

学校的理想装备

# 电子图书·学校专集

校园网上的最佳资源

在大自然的馈赠之外材料技术



## 序 言

1995年5月6日中共中央、国务院作出《关于加速科学技术进步的决定》，提出“科教兴国”战略。在5月26日召开的全国科技大会上，江泽民同志指出：“实施科教兴国的战略，关键是人才”。而培养人才，关键又在教师。为此，国家教委和中国科协决定在全国师范院校实施“园丁科技教育行动”。“园丁科技教育行动”旨在向师范院校学生传播科技知识、科学思想和科学方法，引导他们树立科技意识，学会科学思维，培养他们的科技制作能力、发明创造能力和进行科技启蒙教育的能力。实施“园丁科技教育行动”，对于培养跨世纪的合格师资，提高未来教师的科技文化素质，教育亿万青少年爱科学、学科学、讲科学、用科学，抵制愚昧迷信，提高全民族的科学文化素质，具有重要的战略意义。

“园丁科技教育行动”的一项配合措施是，组织部分科学家、科技工作者编写有关介绍现代科学技术知识的丛书，供师范院校的学生课外阅读。现在，经过不到一年的努力，这套由中国科学院院士和中国工程院院士担任各册主编、由科技工作者或科普工作者编写的“现代科学技术博览丛书”，终于同大家见面了。

现代科学技术是一个外延很广的概念，要在这几本小册子里把所有的内容全部包括进去是不可能的。这套丛书，由王淦昌同志主编的《永无止境的探索自然科学基本问题》选择了自然科学基础性研究方面的部分内容；按我国1986年制定的《高技术研究发展计划纲要》（即“863”计划）的基本思路，选择了一些得到世界各国公认并将列入21世纪重点研究开发的高新技术领域，即谈家桢同志主编的《向上帝挑战 生物技术》、张效祥同志主编的《大步跨越时空 信息技术》、庄逢甘同志主编的《摆脱地球的羁绊 空间技术》、严东生同志主编的《在大自然的馈赠之外 材料技术》、朱亚杰同志主编的《继承普罗米修斯的伟业 能源技术》、曾呈奎同志主编的《向蔚蓝的世界进军 海洋技术》；此外，还有钱易同志主编的《爱护我们的“地球村”环境保护技术》，介绍了环境保护技术方面的内容，具有一定的基础性和代表性，因此，称这套丛书为“博览”，恐不为过。

这套丛书是面对中等师范学校的学生的。我们知道，他们毕业后将走上小学教师的工作岗位，担负起培养祖国下一代的光荣任务。从这点上看，向他们普及现代科技知识，意义是非常深远的。为了做好这件工作，丛书的编写者们尽了很大的努力，尽量采用了一些深入浅出的叙述方法和一些生动活泼的表现形式，以让读者不但能较容易地接受有关的现代科技知识，而且在将来工作时能把这些知识讲给更多的孩子们听。

自1995年12月《中共中央国务院关于加速科学技术普及工作的若干意见》发表和1996年2月召开全国科普工作会议以来，我国的科普工作掀起了一股热潮。我国的科技工作者有责任把科普搞好。钱学森同志曾经倡导，博士研究生在准备博士论文时，应该准备两篇文章，一篇是专业论文，是供论文答辩用的；另一篇就是对自己工作的通俗介绍，要能让外行看得懂。希望这个倡导今后能逐步实现。怎样把我国的科普工作提高到一个新的水平，是摆在我们面前的一个课题，还望科技界同志们不断努力。

1996年8月9日



在大自然的馈赠之外 材料技术

## 古树新枝话陶瓷

### 从石器到陶瓷

#### 大自然的馈赠

我们人类是从哪儿来的？按照科学的观点，人类是由一种称为古猿的古代动物进化而来的。但人类与动物有着本质的区别，区别之一就是：人能制造工具，具有改造大自然的本领。

要制造工具，首先得有制造工具的材料。人类最早用来制造工具的材料是大自然所馈赠的石头。原始人类把石头打磨成各种形状，用于砍劈、切削、钻凿，来同大自然搏斗，以求生存。在人类发展史上，这段时期称为“石器时代”，大约开始于 250 万年前。

石器时代有新旧之分。在旧石器时代，人类使用的石器工具比较粗糙，也有少量的骨器工具。那时的社会生产方式是采集和渔猎，即采集自然生长的植物，捕捉和猎取自然生长的鱼类和飞禽走兽，作为维持生命的食物。可见那时人类对大自然的慷慨馈赠，只不过是将它们设法获取而已。

#### 陶器：材料技术的发端

旧石器时代的这种生产与生活方式大约持续了 200 多万年。在这一时期中，人类逐渐对大自然的馈赠感到不满足了，他们要“得寸进尺”了。于是大约在 1 万年前，人类发展史上的新石器时代开始了。

由于对采集的现成植物和渔猎的动物不甚满意，在新石器时代初期，人类开始主动种植植物和驯养动物。他们使用的石器工具也打磨得比较精致了，甚至制造了装有木柄的石斧。但是所使用的材料仍然是大自然所馈赠的石头和木头。石头虽硬，但较脆，要打磨成一定形状的工具很费事，而木头的使用范围也有一定限度。于是，以粘土为原料，经过火烧而制成的陶器产生了。

陶器的产生是人类发展史上的一块里程碑。恩格斯把陶器的出现作为新石器时代开始的标志。

陶器是人类最早不用大自然的现成材料而制成的器具，制陶技术可说是最古老的材料技术，是人类材料技术的发端。在制陶技术的基础上，我国古代劳动人民又发明了制瓷技术。因此，我们介绍材料技术，还是先从陶瓷谈起。

## 陶瓷世家

说起陶瓷，在人们的心目中，也许会联想到缸、罐、钵、壶等日用器皿，它们的用途仅是充当厨房用具、餐具、卫生设施或艺术饰品。那么，陶瓷究竟是怎样起源的？严格地说，什么是陶瓷？现代的先进陶瓷与传统陶瓷有哪些区别？陶瓷的未来是怎样的？要回答这些问题，还得先让我们来考察一下陶瓷的世代变迁。

### 万年古树

早在 1 万多年前的旧石器时代末期，人类已会在用树枝条编成的容器上涂抹粘土，晒干后用来盛物，但这种容器既不牢固又怕浸水。在一些偶然的机，例如森林着火，这种容器经受了火烧。人们发现，其内部的树枝条烧成了炭，剩下了坚硬的、耐火的坯料。也许，这就是古代陶器的雏形。后来，人们有意识地把粘土搓捏成形，烧制成器皿，用来盛水，存放、烧煮食物等，或烧制成渔猎工具，如刀、斧、渔网锤等。这就是最古老的制陶技术，所以制陶技术发展到现在，已有 1 万多年的历史，真可谓是一棵“万年古树”。

我国是世界上最早生产陶器的国家。用现代先进技术对在河北徐水及江西万年出土的考古发掘物进行鉴定，证明我国大约在 1 万年前就已有陶器生产。后来，我国的制陶技术不断发展，形成了黑陶、白陶、彩陶等多个品种。陕西临潼出土的秦始皇兵马俑，被人们称作“世界奇观”，它们就是在烧成的陶胎上进行彩绘而制成的，称为彩绘陶，其工艺水平令世人叹为观止。我国现代陶器的产地以江苏宜兴最为著名。

### “两兄弟”

陶瓷实际上是陶和瓷“两兄弟”的总称。瓷是陶的“弟弟”，但年龄要小好几千岁。比起“哥哥”来，“弟弟”身材轻盈，玲珑剔透，肌肤光泽细腻，性格刚强，不渗水，不透气，耐高温，抗腐蚀，人见人爱，可谓“天之骄子”。

制瓷技术是在制陶技术基础上逐渐发展而形成的。从制陶到制瓷，主要是在以下三方面技术上取得了进展。

(1) 精选原材料。瓷器是以含铝成分较多的高岭土为原料烧制而成的。

(2) 改进窑炉，提高烧成温度。

(3) 发明和利用釉。釉是以石英、长石、粘土等为原料，烧结在陶瓷表面的玻璃质薄层。

我国早在 3000 多年前的商代，就已出现了上釉的原始瓷器，烧成温度在 1200 以上。经过 1000 多年的改进和提高，到了东汉（公元 25~220 年），位于今浙江绍兴、余姚一带的越窑首先发明了用 1300 以上高温烧成的上釉青瓷。瓷器是中华文明的象征。在许多拉丁语系国家中，“瓷器”和“中国”都以 CHINA 这同一种字母拼音表示。汉代以后，我国的制瓷技术已发展到非常高的水平，出现了许多名窑和名瓷。古人用这样的诗句来赞扬越窑出产的美丽青瓷：“九秋风露越窑开，夺得千峰翠色来。”素有“瓷都”美称的江西景德镇所烧制的薄胎瓷器，更被誉为：洁如玉，明如镜，薄如纸，声如磬。

以上这些称为传统陶瓷，也就是利用瓷石、粘土、长石、石英等无机非金属天然矿物为原料，经粉碎、混和、磨细、成形、干燥、烧成等传统工艺制成的产品，现在人们主要用作日用器皿和建筑、卫生制品。

## 先进陶瓷

本世纪 20 ~ 30 年代以来，传统陶瓷遇到了严重的挑战。

首先是科学技术的发展，对陶瓷提出了越来越高的要求。例如，电力工业远距离输电线的建立，要求有耐几十万伏高压的绝缘性能良好的陶瓷材料；汽车工业要求有耐高温、高压和高电压的供气缸点火用的火花塞及其他高性能的汽车零件材料；电子工业要求有大功率集成电路用的陶瓷基片以及其他功能元件所需的材料；火箭、导弹、宇宙飞船等空间技术产品要求提供耐极端高温的高强结构材料和各种功能陶瓷。

其次是传统陶瓷在性能上的致命弱点——脆，使得它在工程应用面前望而却步，不得不让位于金属材料。

陶瓷除了脆以外，还有其他一些弱点，人们发现这主要是因为陶瓷结构中存在着较多的玻璃相。玻璃相的组织比晶体疏松，是陶瓷中的薄弱环节，它在一定温度时会软化，降低了陶瓷的耐热性。玻璃相中还含有杂质，这就降低了陶瓷的许多性能。

### 陶瓷的显微结构

在显微镜下观察陶瓷材料，可以发现主要有三种结构，即晶体相、玻璃相和气孔。晶体相是陶瓷的基本结构，它是由陶瓷化合物的原子按一定规则排列而形成的晶体结构。玻璃相是由陶瓷各组成物和杂质的原子无规则排列而形成的非晶态结构，因这种结构同玻璃的显微结构相似，故称为玻璃相。陶瓷的性能同其显微结构密切相关。

挑战是对极限的超越，挑战孕育了新的起点。科学家经过大量的试验研究，特别是对陶瓷结构进行显微分析，认识到如果能降低陶瓷中玻璃相的含量，甚至制造出几乎不含玻璃相、由许多微小晶粒结合而成的结晶态陶瓷，其性能将会大幅度提高。为此，人们不断提高原材料中氧化铝的含量，加入许多高纯度的人工合成化合物去代替天然原料，并对制备工艺作了许多改进。后来发现，完全不用含硅酸盐的天然原料，也可以制成性能很好的陶瓷。于是，在本世纪 40 ~ 50 年代，陶瓷世家中一类新型陶瓷——“先进陶瓷”诞生了。这类先进陶瓷到目前还在不断发展之中，可谓“万年古树”上新长出的茂盛枝叶。

所谓先进陶瓷，是以高纯、超细的人工合成的无机化合物为原料，采用精密控制的制备工艺烧结而成的，比传统陶瓷性能更加优异的新一代陶瓷。先进陶瓷又称为高性能陶瓷、精细陶瓷、新型陶瓷或高科技陶瓷。

### 究竟什么是陶瓷

陶瓷的概念有狭义、广义之分。从狭义上说，陶瓷是用无机非金属化合物粉体，经高温烧结而成的，以多晶聚集体为主的固态物质。狭义的陶瓷概念中不包括玻璃、搪瓷、水泥、耐火材料、金属陶瓷等。从广义上说，陶瓷泛指一切经高温处理而获得的无机非金属材料，包括人工单晶、非晶态、狭义陶瓷及其复合材料、半导体、耐火材料及水泥等，像美国就用 ceramic（陶瓷）一词来泛指无机非金属材料。

先进陶瓷按化学成分可分为氧化物陶瓷、氮化物陶瓷、碳化物陶瓷、硼化物陶瓷、硅化物陶瓷、氟化物陶瓷、硫化物陶瓷等。

按性能和用途，先进陶瓷大体上又可分为先进结构陶瓷和先进功能陶瓷两大类。

先进结构陶瓷是指以其优异的力学性能而用于各种结构部件的先进陶瓷，主要用于要求耐高温、耐腐蚀、耐磨损的结构，如机械密封装置、轴承、缸套、刀具等。日本企业家和陶瓷专家为改变人们对陶瓷易碎的印象，用增韧氧化锆陶瓷制成剪刀和水果刀，作为礼品赠送或廉价出售，称之为永不卷刃、永不生锈、永不磨损的刀具，取得了戏剧性的宣传效果。

先进功能陶瓷则是指利用材料的电、磁、声、光、热等性能或其耦合效应，来实现某种使用功能的先进陶瓷。例如，压电陶瓷可利用机械压力产生电效应，故用于制造内燃机点火系统、电子打火机点火元件和炮弹引爆信管等。先进功能陶瓷具有品种多、价格低、功能全、更新快等特点，在民用、军用和高新技术等领域中都有广泛的应用。

### 第三次飞跃：纳米陶瓷

本世纪 60 年代以来，具有优良性能的先进陶瓷不断涌现，使得陶瓷在生产应用方面发生了质的变化。如果说，以前传统陶瓷尚处于辅助材料地位的话，那么现在先进陶瓷已初露锋芒，正和金属材料、有机高分子材料并驾齐驱，甚至在许多工业领域中逐渐取得了主要材料的地位。这主要是因为先进陶瓷较其他材料表现出更多的具有实用价值的独特性能，如具有高温强度、耐腐蚀、电绝缘及其他功能和性能。在空间技术、原子能技术、激光技术、计算机技术等新兴科技领域，对各种先进陶瓷材料的需求日益增长；而高新技术的发展，特别是现代测试技术和先进仪器的发展，为深入研究先进陶瓷提供了客观条件。例如，以前主要用光学显微镜来研究陶瓷的内部结构，现在则可以采用电子显微镜，尤其是近年来高分辨电镜和分析电镜技术的发展，使人们能进入更深层次的微观世界来研究陶瓷材料，并且取得了令人瞩目的成就。

科学技术的发展永远不会停止，陶瓷技术的发展当然也永无止境。在陶瓷的世代变迁中，如果把从陶器发展到瓷器称为第一次飞跃，从传统陶瓷发展到先进陶瓷称为第二次飞跃，那么目前正面临着从先进陶瓷发展到纳米陶瓷的第三次飞跃。

纳米陶瓷是指显微结构具有纳米量级水平的陶瓷材料。

这里，显微结构是指借助于各种显微分析仪器所观察到的材料的内部组



织。先进陶瓷的显微结构主要是由许多晶粒组成的多晶体结构。目前绝大部分先进陶瓷的显微结构处于微米量级水平，即晶粒尺寸为1~10微米，在1立方厘米体积中约有 $10^{10}$ 个晶粒。纳米陶瓷的显微结构则更加细微，具有纳米量级水平，即晶粒尺寸为1~100纳米，在1立方厘米体积中约有 $10^{19}$ 个晶粒。由此可知，纳米陶瓷较先进陶瓷其晶粒细小得多。

### 纳米

纳米是一种长度单位，符号为nm。在国际单位制中，长度的基本单位是米，符号为m。其他长度单位都与米有一定的换算关系，例如， $1\mu\text{m}$ （微米）= $10^{-6}\text{m}$ （米）， $1\text{nm}$ （纳米）= $10^{-9}\text{m}$ （米）。一根头发丝的直径约为70~80微米，故1纳米还不到头发丝直径的万分之一。

可别以为这仅仅是数量上的变化，这种显微结构的微细化会引起陶瓷在性能上的质变。在纳米陶瓷中，1立方厘米体积中存在 $10^{19}$ 个晶粒边界（称为晶界），晶界上的原子占晶体总原子数的50%，它们受到周围原子的相互作用，其排列组态既不同于晶体（晶体内原子规则排列），也不同于非晶态（非晶态如玻璃，其中原子呈短程有序、远程无序的排列），这种新的原子排列组态给纳米陶瓷带来了许多新性能。纳米陶瓷晶粒细化，有助于晶间的滑移，从而导致了超塑性；也因为晶粒细化，材料中的气孔和其他缺陷尺寸减小，可获得少缺陷甚至无缺陷的陶瓷，其力学性能大幅度地得到提高。总之，纳米陶瓷使陶瓷的原有性能得到很大的改善，以致在性能上发生突变，甚至出现新的性能或功能。

要获得纳米陶瓷，科学家需要制备相应的甚至更细的陶瓷粉末，寻求新的粉料制备方法，探索成型和烧结新工艺等。总之，需要进行大量艰苦、细致的攻关，才能实现陶瓷发展中的这第三次飞跃。

目前在陶瓷显微结构微细化方面，人们已经取得了一些研究成果。例如，晶粒非常细小的氧化锆陶瓷的力学性能得到了改善，亚微米晶粒的钛酸钡陶瓷的电学性能已有大幅度提高。预计在本世纪末和下世纪初，在研制纳米陶瓷方面会取得重大突破。

## 打不破的陶瓷

俗话说：“打破沙锅问（纹）到底。”沙锅及其他传统陶瓷制品脆性大，韧性差，抗拉强度低，这是传统陶瓷不容置疑的缺点。那么，陶瓷为什么会容易破裂呢？

### 陶瓷为什么容易破裂

陶瓷脆性大，经不起外力撞击，也不能急热急冷，例如用沙锅煮食物时，开始切忌猛火烧，烧好后沙锅也不能用水急冷，否则就要炸裂。前者是因为陶瓷的抗机械冲击性差，后者是因为抗热冲击性差。这是两种不同的起因，但有着大致相同的破裂过程，即首先从陶瓷内部已经存在的微裂纹开始，裂纹逐渐扩展，直到全部断裂。而且对陶瓷来说，裂纹扩展的速度非常快，一眨眼就“纹到底”了。

从以上陶瓷破裂的过程可以看出，陶瓷内部存在微裂纹，是引起陶瓷破裂的第一原因。在陶器碎片的断面上，你会看到许多小孔洞，颗粒也比较粗大，这是由于陶器的烧成温度较低（一般为 800~1000℃），气孔率较高。虽然瓷器是在 1200~1400℃ 高温下烧制的，结构细密多了，用肉眼常看不出有什么缺陷，但在显微镜下，仍可以看到在其表面有许多微小的伤痕，瓷器碎片的断口上分布着许多微裂纹、气孔和夹杂物。在放大倍数更大的电子显微镜下，还可以发现有许多晶体结构缺陷，如空位、位错和晶界等。所有这些微裂纹、气孔、夹杂物、晶体缺陷、表面伤痕等，都可能成为裂纹的发源地。

引起陶瓷破裂的第二个原因是在陶瓷中一旦形成裂纹，裂纹就会迅速扩展。陶瓷不像金属那样，金属在外力作用下可以产生塑性变形，塑性变形可以吸收扩展裂纹的能量，起到止裂的作用。陶瓷属于脆性材料，一旦形成裂纹，由于缺乏塑性变形能力，材料内部出现的应力立即集中到裂纹尖端，推动裂纹迅速向前扩展，直至断裂。如果是在热冲击情况下，还由于陶瓷的导热性差，热膨胀系数大，热应力因此增加，促使裂纹迅速扩展。

### 根治“痼疾”

脆性虽是陶瓷的“痼疾”，但绝非“不治之症”。经过科学家的长期努力，陶瓷脆性这一缺点已在很大程度上得到克服。尽管与金属材料相比，还有很大差距，但陶瓷的这一“痼疾”终究是会得到根治的。

归纳起来，目前克服陶瓷脆性的途径有以下几条。

陶瓷的断裂往往从表面或近表面的缺陷开始，故改善陶瓷的表面状态（称为陶瓷的表面改性）至关重要。例如，通过化学或机械抛光技术可消除表面缺陷；对氮化硅、碳化硅等非氧化物陶瓷，通过控制表面氧化技术可消除表面缺陷或使裂纹尖端变钝；经热处理可消除内应力或在表面形成能防止裂纹扩展的压应力。这些陶瓷的表面改性技术，可达到表面强化和增韧的目的。这是一条途径。

### 克服陶瓷脆性的未来途径

使陶瓷显微结构的尺寸从微米量级减小为纳米量级,晶粒的微细化可有效地减小材料中的气孔和其他缺陷的尺寸,制备出少缺陷甚至无缺陷的陶瓷。所以,纳米陶瓷是人们在未来克服陶瓷脆性的根本途径。

抑制陶瓷材料中裂纹的扩展速率则是另一条途径。在这方面被实践证明为成功的实例,是利用氧化锆陶瓷在组织转变时所伴随的体积膨胀,吸收能量,减缓裂纹尖端的应力集中,导致裂纹重新闭合,不再向前扩张,从而达到提高陶瓷韧性的目的。根据这一原理,人们已经研制成功了氧化锆相变增韧陶瓷。

用纤维均匀地分布在陶瓷基体中,来提高陶瓷的强度和韧性,也是一条克服陶瓷脆性的有效途径。其原理同我们在石灰中加入纸筋成为不易产生裂缝的纸筋石灰相类似。首先,由于选择的纤维都具有较高的强度,在工作时可承担大部分外加负荷,从而减轻了陶瓷的负担,使裂纹不易产生;其次,当外加负荷增加,使陶瓷中的裂纹尖端扩展到纤维与陶瓷基体的结合面时,应力集中现象可得到缓解,裂纹尖端可以被钝化;第三,外加负荷进一步增加,使纤维从陶瓷基体中拔出时,由于需要克服摩擦力做功,消耗能量,韧性因此可得到提高,从而使脆性在很大程度上得到克服。

### 氧化锆陶瓷

氧化锆在大自然中存在于锆英砂中,澳大利亚和我国海南岛均有高质量的锆英砂。在不同的温度范围内,氧化锆呈现出不同的晶体结构:从室温到1170 为单斜结构,1170~2370 为四方结构,2370~2706 为立方结构。这三种结构的氧化锆,比重分别为5.68、6.10和6.27。可见温度越高,比重越大。因此,在同样重量下,温度越低,体积越大。

氧化锆从四方结构冷却到单斜结构时会有8%的体积膨胀。为避免氧化锆陶瓷在烧成时因体积变化引起开裂,须加入适量的氧化钙、氧化镁、氧化钇等氧化物作为稳定剂,以形成较稳定的四方或立方结构氧化锆。这种稳定的氧化锆陶瓷具有高耐火性(能耐2000 高温)、良好的化学稳定性(高温时能抗酸性腐蚀)、较小的比热和导热系数,因此是理想的高温绝热材料。它适合于制造冶炼金属与合金用的坩埚、连续铸锭用的耐火材料、耐2000左右高温的电炉发热体和炉膛耐火材料,它还可用来作为氧浓差电池以及磁流体发电机组中的高温电极材料。

在克服陶瓷脆性的进程中,氧化锆相变增韧陶瓷非常令人瞩目,它正在改变着人们对陶瓷力学性能的传统看法,促进了先进陶瓷的进一步发展。

氧化锆相变增韧陶瓷是利用氧化锆由四方结构向单斜结构转变时的效应来克服陶瓷脆性的。

氧化锆相变增韧陶瓷有多种类型。其中有一种称为部分稳定氧化锆陶瓷的,是在氧化锆中加入适当的稳定剂而形成的。它由稳定的立方结构氧化锆和亚稳定的四方结构氧化锆所组成。在外应力作用下,亚稳定的四方结构转变为单斜结构,且伴随有体积膨胀,从而起到增韧作用。

目前又采用有机溶剂蒸馏法获得氧化锆超微颗粒(其直径仅几十纳米),

可在较低温度下烧结成具有微细结构的四方结构氧化锆陶瓷（晶粒尺寸在 1 微米以下）。这种陶瓷具有高强度和高断裂韧性，适用于制造拉丝模、导辊、工夹具、刀具、耐磨部件等。

还有一种氧化锆增韧陶瓷，它是在其他陶瓷中引入氧化锆，从而达到增韧效果的。如氧化锆增韧氮化硅陶瓷，它可用于制造刀具、发动机、热机零部件等；又如氧化锆增韧氧化铝陶瓷，它可用于制造刀具、绝热发动机的某些部件等。

### 纤维补强陶瓷基复合材料

纤维补强陶瓷基复合材料是以纤维作为增强体，把纤维同陶瓷基体通过一定的复合工艺结合在一起而组成的材料的总称。这类复合材料具有高强度、高韧性、优异的热稳定性和化学稳定性，是一类新型结构材料。

作为增强用的纤维有金属纤维（如钨丝、钼丝、钽丝等）、玻璃纤维和陶瓷纤维（如碳、碳化硅、氧化铝、氧化锆等纤维）；而陶瓷基体有氧化物基（如氧化铝、氧化锆等）和非氧化物基（如碳、碳化物、硼化物、氮化物等）。

在选择纤维和陶瓷基体时要注意性能的匹配，如纤维必须和陶瓷一样具有耐高温性能，纤维的热膨胀系数应稍大于陶瓷基体。

纤维补强陶瓷基复合材料的应用领域和即将应用的领域有刀具、滑动构件、航空航天部件、发动机零件、能源构件等。法国已将长纤维增强碳化硅复合材料应用于制造超高速列车的制动件。由于这种材料具有优异的耐摩擦性能和耐磨损性能，使用效果令人满意。

经过纤维补强的陶瓷，无论在抗机械冲击性，还是在抗热冲击性方面，都有了极大的提高，这在很大程度上克服了陶瓷的脆性，同时又保持了陶瓷原有的许多优异性能。这种打不破的陶瓷目前虽只是初露端倪，但肯定有着美好的发展前景。

## 能透光的陶瓷

看了这个标题，也许你会诧异：是否写错了？只有透明的玻璃，陶瓷哪能透光？日常生活中使用的传统陶瓷确实是不透光的。但是，经过科学家的长期研究，已经开发出一批能透光的先进陶瓷，并在生产中获得应用。

### 能使陶瓷透明吗

陶瓷作为理想的绝缘材料，被广泛地应用在电器行业中。与玻璃比较，陶瓷的强度高，耐火性好，能抵抗化学腐蚀，能经受放射性物质的强烈辐照。但陶瓷不透明，以致许多场合，特别是在照明电器上无法应用。因此，在本世纪 50 年代，如何使陶瓷透明成了一项急需解决的重要课题。

美国通用电器公司研究所有一批陶瓷专家，从事陶瓷材料的研制和产品开发。在总结前人研究的基础上，他们认识到陶瓷不透明的主要原因是陶瓷中存在许多微小的气孔。当一束光线照射到陶瓷表面时，微气孔由于具有对光线很强的散射能力，把大部分光线分散到四面八方，最后被陶瓷所吸收。微气孔成了光线前进路上的“拦路虎”，所以，不把这只“拦路虎”赶走，休想让光线从陶瓷中通过。

为此，陶瓷专家们试着采取了几项技术措施。首先，烧制陶瓷所用的原材料要有很高的纯度和细度，而且颗粒要均匀，不能有的粗有的细，故他们用了纯度为 99.99%、平均颗粒尺寸只有 0.3 微米的氧化铝粉末作原料。其次，要减慢陶瓷结晶过程中晶粒长大的速度，这样便可依靠晶粒边界的缓慢移动，把微气孔赶走，所以他们在原料中加入了极少量的氧化镁作为阻碍晶粒长大的添加剂。第三，要减少加热炉中的气体，最好能抽成真空，但由于受到设备的限制，结果他们在炉中通入氢气。这是因为氢气分子的体积比空气中氮气分子的体积来得小，氢气分子容易通过晶格扩散到晶界，最后被排除出去。

### 世界上第一块透明陶瓷

一天，陶瓷专家科布尔和他的助手们正在实验室里研制透明陶瓷，他们从炉内取出一块烧好的陶瓷小圆片试样，不知怎么一来，小圆片落到了实验桌上正翻开的一本书上，奇妙的事情发生了：透过陶瓷片，书上的文字清晰地映入人们的眼帘。年轻的助手们欢乐地跳了起来，把帽子抛向天空，喊着：“成功了！成功了！”奔向科布尔。科布尔抑制住内心的激动，故作镇静地坐到了显微镜前。经过仔细的检查，在这片陶瓷中竟找不到一个微气孔。1957 年一次会议上，科布尔郑重地向大家宣告：世界上第一块透明陶瓷诞生了。

自从透明氧化铝陶瓷诞生以后，透明陶瓷家族真是人丁兴旺，成员已经有几十个，而且还在不断扩大。在氧化物陶瓷方面有氧化镁、氧化钇、氧化铍、氧化钽等透明陶瓷。还有一些由几种氧化物组成的透明陶瓷，如铝镁尖晶石（由氧化铝、氧化镁组成）、锆钛酸铅镧透明铁电陶瓷（由氧化锆、氧化钽、氧化铅、氧化镧组成）。在非氧化物陶瓷方面有氟化镁、氟化钙、氟化镧等透明陶瓷，还有能透过波长较长的红外线的陶瓷，如硫化锌、硒化锌、碲化镉、砷化镓等透红外陶瓷。

## 高压钠灯

早在 30 年代初,人们就已经知道利用钠蒸气放电可获得一种高效率的光源。但是钠蒸气放电会产生超过 1000 的高温,而且钠是一种非常活泼的金属,有很强的腐蚀性,用玻璃制成的灯管无法耐受,而一时又找不到能在高温下抵抗钠蒸气腐蚀的合适灯管材料。经过了二十几个年头,一直到 1957 年,人们盼来了透明陶瓷。透明氧化铝陶瓷的熔点高达 2050 ,能在 1600 的环境里不受钠蒸气的腐蚀,而且可以通过 95% 的光线。有了它,高压钠灯才在 1960 年呱呱坠地,并经过不断改进,得到了实际应用。

高压钠灯是发光效率很高的一种电光源。普通白炽灯的发光效率只有 10 流明/瓦,高压汞灯的发光效率为 50 ~ 60 流明/瓦,而高压钠灯的发光效率高达 110 ~ 120 流明/瓦。在同样功率的情况下,一个高压钠灯能顶两个高压汞灯,而且光色金白,在它的灯光下看物清晰,不刺眼。高压钠灯的光线能透过浓雾而不被散射,用它作为汽车灯特别适合。高压钠灯平均寿命长达 1 ~ 2 万小时,比高压汞灯寿命长 2 倍,高过白炽灯 10 倍,是目前寿命最长的灯。

除了高压钠灯外,透明陶瓷还适用于制造其他新型的灯具,如钾灯、铷灯、铯灯、金属卤化物灯等。

## 响尾蛇的启示

响尾蛇是一种生长在美洲的毒蛇。在漆黑的夜里,响尾蛇会出其不意地发起攻击,像闪电一般将田鼠吞食。响尾蛇为什么有这样灵敏的感觉?科学家发现,奥秘就在于响尾蛇眼与鼻孔之间的一个凹陷的“颊窝”。他们做了一个有趣的实验:把响尾蛇头部包起来,只露出颊窝,前面放一个用黑纸包着的未通电的灯泡,这时响尾蛇无动于衷;但当灯泡通电发热时,响尾蛇立即向它发起猛烈的攻击。这说明响尾蛇的颊窝能接收发热物体产生的红外线。原来,在响尾蛇的颊窝内有一薄膜,上面布满着神经末梢和一种叫线粒体的细胞器,它能随温度的变化而膨胀和收缩,周围温度只要有千分之一度的变化它就能感觉出来。

响尾蛇的奥秘给科学家带来了启示,他们让导弹向响尾蛇“学习”,在导弹头部安装了一个用光敏半导体制成的,能感受红外线的红外探测器。当敌机发动机喷射出的高温燃气或机身上辐射出的红外线被导弹上的红外探测器感受到后,导弹导向系统就会自动地将导弹引向目标,最终击毁目标。导弹头部的红外线探测器上,需要有一个保护罩(称为整流罩),它要有足够的强度和硬度,以抵抗高速气流和雨雪的冲刷,但它又要保证让敌机辐射出来的哪怕是微弱红外线能通过,传到红外探测器中,也就是说它必须具有透过红外线的能力。

能担当此任的材料非透红外陶瓷莫属,它非常适合于制造响尾蛇导弹头部的整流罩。红外线是一种从物体上辐射出来的肉眼看不见的电磁波。物体的温度越高,辐射出来的红外线波长越短;反之,物体的温度越低,红外线波长就越长。每种透红外陶瓷能透过一定波长的红外线。例如,氟化镁陶瓷能透过 0.45 ~ 9 微米波长的红外线,硫化锌陶瓷能透过 0.57 ~ 15 微米波长的红外线,硒化锌陶瓷能透过 0.48 ~ 22 微米波长的红外线,碲化镉陶瓷能透过

2~30 微米波长的红外线。人们可以根据实际的需要来选择不同的透红外陶瓷。

### 能自动调光的护目镜

也许你有这样的感受：当眼睛突然受到强烈光线照射后，会暂时看不清周围的东西，要过一段时间才能恢复正常的视觉。这种现象称为闪光盲，即眼睛因强闪光暂时丧失视觉功能。闪光盲会给正在进行的工作带来影响，经常发生闪光盲会损伤视网膜。但在工作和生活中，人们经常会遇到强光的刺激。

例如，电弧焊时产生的电弧，最高温度达到 6000~8000K（K 是绝对温度的单位，0 相当于 273.15K），发出强烈的弧光，所以电焊工人都要带上面罩，透过近乎黑色的护目镜才能进行操作。但在电弧尚未产生前，带了面罩根本看不清周围情况，工作起来非常不方便。

原子弹爆炸时，情况就更严重了：一颗梯恩梯当量为 20000 吨的原子弹爆炸时，火球辐射的光能约 30 万亿焦耳，几乎全部光能在 3 秒钟内骤然释放。所以核试验工作人员必须带上很深的墨镜。但是原子弹爆炸前带上墨镜，就看不清东西，变得寸步难行。原子弹爆炸了再戴上，就来不及了。如果能有一种自动调光的护目镜，那该多好。

有一种锆钛酸铅镧透明铁电陶瓷，能透光，耐高温，耐腐蚀，强度高，还能把电、光、机械变形等作用结合起来，具有电控光特征，故用它可制作存储、显示或开关用的光电器件。

用这种铁电陶瓷和两块偏振片可组成具有夹层结构的护目镜，这种护目镜带有控制电路、电源和开关，用光敏二极管作为强闪光的接收元件。当接收元件测出周围的光强度超过危险值时，立即发出信号给控制电路，使镜片关闭，护目镜就自动迅速变暗；当危险光消失后，控制电路又自动加压到铁电陶瓷薄片上，使镜片达到最大的开启状态，即又回复到原来的明亮状态。

有了这种护目镜，电焊工人就不必把面罩举上拿下了，核试验工作人员也可以一直戴着这种护目镜进行核爆炸前的准备工作。

1976 年，美国制成了 PLZT 核闪光护目镜，1977 年正式装备部队，作为飞行员头盔上的护目镜。

## 新奇的能量转换器——压电陶瓷

说起能量转换，我们都知道，水轮机带动发电机发电，是机械能转化为电能；电动机带动水泵把水抽到高处，是电能又转化为机械能；电灯把电能转化为光能和热能；植物进行光合作用，把光能转化为化学能……但你可知道，有一种压电陶瓷，它能把机械能和电能相互转换，为我们做许多有益的事情，称得上是“新奇的能量转换器”。

### 压电效应

压电陶瓷是一种先进功能陶瓷，它具有压电效应。那么，什么是压电效应呢？

某些材料在机械力作用下产生变形，会引起表面带电的现象，而且其表面电荷密度与应力成正比，这称为正压电效应。反之，在某些材料上施加电场，会产生机械变形，而且其应变与电场强度成正比，这称为逆压电效应。如果施加的是交变电场，材料将随着交变电场的频率作伸缩振动。施加的电场强度越强，振动的幅度越大。正压电效应和逆压电效应统称为压电效应。

并非所有的陶瓷都具有压电效应。作为压电陶瓷的原材料，在晶体结构上一定是不具有对称中心的晶体，如氧化铅、氧化锆、氧化钛、碳酸钡、氧化铈、氧化镁、氧化锌等。将这些原材料在高温下致密烧结，制成陶瓷，并将制好的陶瓷在直流高压电场下进行极化处理，才能成为压电陶瓷。常用的压电陶瓷有钛酸钡、钛酸铅、锆钛酸铅以及三元系压电陶瓷等。

压电陶瓷的应用范围非常广泛，而且与人类的生活密切相关。其应用大致可归纳为以下四方面。

(1) 能量转换。压电陶瓷可以将机械能转换为电能，故可用于制造压电打火机、压电点火机、移动 X 光机电源、炮弹引爆装置等。用压电陶瓷也可以把电能转换为超声振动，用于探寻水下鱼群，对金属进行无损探伤，以及超声清洗、超声医疗等。

(2) 传感。用压电陶瓷制成的传感器可用来检测微弱的机械振动并将其转换为电信号，可应用于声纳系统、气象探测、遥感遥测、环境保护、家用电器等。

(3) 驱动。压电驱动器是利用压电陶瓷的逆压电效应产生形变，以精确地控制位移，可用于精密仪器与精密机械、微电子技术、光纤技术及生物工程等领域。

(4) 频率控制。压电陶瓷还可以用来制造各种滤波器和谐振器。

### 压电打火机

近年来，市场上出现的一种新式的压电打火机，就是应用了压电陶瓷的压电效应制成的。只要用大拇指压一下打火机上的按钮，使一根钢柱在压电陶瓷上施加机械力，压电陶瓷即产生高电压，形成火花放电，从而点燃可燃气体。在这种打火机中，采用直径为 2.5 毫米，高度为 4 毫米的压电陶瓷，就可得到 10 ~ 20 千伏的高电压。当压电陶瓷把机械能转换成电能放电时，陶瓷本身不会消耗，也几乎没有磨损，可以长久使用下去，所以，压电打火机



使用方便，安全可靠，寿命长。

### 压电引爆装置

其实，压电打火机的点火原理可应用于各个领域，特别是军事领域。在反坦克炮弹上装上压电陶瓷元件，当炮弹击中坦克时，陶瓷因受压而产生高电压，从而引燃炸药，摧毁坦克。压电陶瓷在非常强的机械冲击波的作用下，储存的能量在以微秒计的瞬间释放出来，产生瞬间电流达 10 万安培以上的高压脉冲，可用于原子武器的引爆。

### 压电探鱼仪

探鱼仪是一种用来探测水下鱼群的声纳设备。它一般由声波发射部分、接收部分、记录装置、显示装置等组成。压电探鱼仪的声波发射部分和接收部分用压电陶瓷制成。压电陶瓷在交变电场作用下，会产生伸缩振动，从而向水中发射声波。当交变电场的频率与压电陶瓷的固有频率相近从而产生共振时，它能发出很强的声波，传至上百千米外。声波在向前传播时遇到鱼群即被反射回来，压电陶瓷接收部分收到回波后，即将它转换成电信号，经过电路处理就会显示出鱼群的规模、种类、密集程度、方位和距离等，便于捕捞作业。

压电陶瓷的硬度很高，它振动起来可以发出很强的功率。压电探鱼仪由于声波发射部分采用了压电陶瓷，其发射功率已达到兆瓦级。用压电陶瓷制成的接收部分有很高的灵敏度，根据回波的强弱可以判断是海底、礁石，还是鱼群，甚至可以判断鱼群的种类、大小和分布情况。

### 压电振荡器与压电滤波器

让我们首先认识一下目前收音机中根据电磁振荡原理制成的振荡器和滤波器。

在超外差式收音机中，有一个双联可变电容器，其中大的电容器和天线磁棒线圈相连，小的电容器和一个电感线圈相连，分别组成两个振荡器。假如我们要收听 790 千赫的节目，把双联电容器调整到相应的适当位置，这时一个振荡器的振荡频率为 790 千赫，另一个振荡器同时产生频率比 790 千赫高 465 千赫的高频信号，这两种信号在晶体管中混在一起，通过差频作用，产生出一个 465 千赫的中频信号，经过中频变压器（它事实上是由电感、电容组成的，只允许频率在 465 千赫附近的信号通过的滤波器）放大，然后经检波，检出声频信号后再进行放大，最后通过扬声器放出，我们就听到了 790 千赫电台的播音。

由此可知，在收音机的电子线路中，振荡器和滤波器是不可缺少的重要部件。那么，压电陶瓷是怎样来完成振荡、滤波功能呢？

作用在压电陶瓷上的交变电压会产生一定频率的机械振动。在一般情况下，这种机械振动的振幅很小。但是当所加电压的频率与压电陶瓷的固有机械振动频率相同时，就会引起共振，使振幅大大增加。这时，外加电场通过逆压电效应产生应变，而应变又通过正压电效应产生电流，电能和机械能最

大限度地互相转换，形成振荡，就像在电容和电感所组成的谐振回路中，电能和磁能相互转换形成振荡一样。这就是压电振荡器的基本工作原理。

在同样的电压作用下，只有在共振频率时通过压电陶瓷的电流最大，因此对于有各种频率的电流来讲，只有频率在共振频率附近的电流可以通过，这就是压电滤波器的基本工作原理。

用压电陶瓷制造的振荡器和滤波器，频率稳定性好，精度高，适用频率范围宽，而且体积小，不吸潮，寿命长，特别是在多路通信设备中能提高抗干扰性，所以目前已取代了相当大一部分电磁振荡器和电磁滤波器，而且这一趋势还在不断发展中。

## 压电地震仪

地震是常见的自然现象。全世界每年要发生几百万次地震，平均每分钟就有十几次。不过绝大多数地震比较微弱，人们感觉不到。强烈的大地震，一般每年不过三五次。然而这种大地震一旦发生，对人类造成的灾难是毁灭性的，因此地震预报十分重要。测量地震的仪器灵敏度越高越精确，地震预报就报得越早越准，就可把地震带来的损失减得越小。

现在让我们来看看，压电陶瓷是怎样在地震仪中起作用的。

地震发生的地方叫震源，震源一般在地壳内比较深的地方。从震源开始，震动不断向四面八方传播。震动是一种机械波，当地震仪中的压电陶瓷受到机械波的作用后，按照正压电效应，就会感应出一定强度的电信号，这些信号可以在屏幕上显示或是以其他形式表现出来。

由于压电陶瓷的压电效应非常灵敏，能精确测出几达因的力的变化，甚至可以检测到十多米外昆虫拍打翅膀引起的空气扰动，所以压电地震仪能精确地测出地震的强度。由于压电陶瓷能测定声波的传播方向，故压电地震仪还能指示出地震的方位和距离。可以毫不夸张地说，压电陶瓷在地震预报方面大显了身手。

## 压电超声医疗仪

生物医学工程是压电陶瓷应用的重要领域。用作生物医学材料的压电陶瓷称为压电生物陶瓷，如铈酸锂、锆钛酸铅和钛酸钡压电陶瓷等。压电生物陶瓷主要用于制作探测人体信息的压电传感器（如用钛酸钡压电陶瓷制作的心内导管压电微压器和心尖搏动心音传感器，用复合压电材料制作的脉压传感器）和压电超声医疗仪。

压电超声医疗仪中应用最广的是B型超声诊断仪。这种诊断仪中有用压电陶瓷制成的超声波发生探头，它发出的超声波在人体内传输，体内各种不同组织对超声波有不同的反射和透射作用。反射回来的超声波经压电陶瓷接收器转换成电信号，并显示在屏幕上，据此可看出各内脏的位置、大小及有无病变等。B型超声诊断仪通常用来检查内脏病变组织（如肿块等）。

压电陶瓷还可应用于超声治疗。进入人体的超声波达到某一强度时，能使人体某一部分组织发热、轻微振动，起到按摩推拿作用，达到治疗的目的，如用于治疗关节、肌肉及其他软组织的创伤和劳损。此外，还可用超声波粉碎体内结石，如胆结石、肾结石、尿路结石等。

## 陶瓷应用的新天地

陶瓷作为一种工程材料，较之金属、塑料等其他材料有许多无可比拟的优异性能，如耐高温、耐磨损、耐腐蚀、不老化，特别是随着脆性等缺点的逐渐克服，陶瓷的应用越来越广泛，陶瓷成了航天、航空、冶金、建筑、机械、化工、电子、生物医学工程等领域的关键材料。未来的科技对材料的要求越来越苛刻，陶瓷有可能成为解决技术难题的最有希望的材料。前面我们已对透明陶瓷、压电陶瓷的应用作了些介绍，下面再介绍一些陶瓷的其他应用实例。

### 宇宙飞行器的“头盔”

在晴朗的夜晚，抬头仰望灿烂的星空，有时会看到一道划破夜空的亮光、似昙花一现，稍纵即逝。这是高速运动的陨星与大气剧烈摩擦的结果，摩擦产生的巨大热量可以把陨星的大部分或全部烧毁。

当宇宙飞行器完成航天任务返回地球时，它面临着与陨星一样的处境。研究表明：当宇宙飞行器的飞行速度等于声速的3倍时，其前端的温度可达3300℃；当飞行速度等于6倍声速时，可达14800℃。宇宙飞行器遨游太空归来，到达离地面高度60~70千米时，其速度仍保持在声速的20多倍，温度在10000℃以上，这样的高温足以把宇宙飞行器化作一团熊熊的烈火。高速带来了高温，这似乎是一道不可逾越的障碍。人们把这种障碍称为“热障”。

怎样使宇宙飞行器克服“热障”，安然地返回地面呢？科学家在分析了“宇宙不速之客”——陨石后发现，陨石表面虽已熔融，但里面的化学成分没有变化。这说明陨星在下落过程中，尽管表面因摩擦生热产生几千度高温而熔融，但由于穿过大气层的时间很短，热量还来不及传到陨石内部。这给科学家以启发：让宇宙飞行器的头部戴一顶用烧蚀材料做成的“头盔”，把重返大气层时摩擦产生的热量消耗在烧蚀材料的熔融、气化等一系列物理和化学变化中，“丢卒保车”，达到保护宇宙飞行器的目的。

一位宇航员曾亲眼目睹了宇宙飞船闯过“热障”的壮观：当飞船降落时，首先从舷窗中看到了烟雾，然后又看到了红色、金黄色、黄色、绿色、蓝色等五彩缤纷的火焰，同时还听到了噼噼啪啪的声音，这是飞船头部的烧蚀材料在燃烧，它们“牺牲”了自己，把飞船内的温度始终维持在正常的范围内，最后使飞船平安地到达地面。

作为烧蚀材料，要求气化热大，热容量大，绝热性好，向外界辐射热量的本领大等。烧蚀材料有很多种，其中陶瓷不失为一“佼佼者”。不过，单纯陶瓷材料的抗热冲击性能还经受不了如此激烈的温差变化，最好采用纤维补强。近年来，人们研制成功了许多具有高强度、高弹性模量的纤维，如碳纤维、硼纤维、碳化硅纤维和氧化铝纤维，用它们可以制成相应的纤维补强陶瓷复合材料。

我国著名科学家严东生院士领导下的中国科学院上海硅酸盐研究所，研制成功了火箭导弹头部用的烧蚀材料——碳纤维—石英复合材料和其他无机烧蚀材料，并将它们应用于我国第一代洲际导弹和远程火箭，成功地解决了端头超高温防热的技术难题，为我国的航天事业作出了贡献。

## 陶瓷发动机

陶瓷具有较好的高温强度、耐蚀性和耐磨性，尤其是氮化硅和碳化硅陶瓷，有可能作为高温结构材料来制造发动机。陶瓷发动机已成为当前世界各国竞相开发的目标之一。用陶瓷材料制造的发动机，具有以下优越性。

(1) 陶瓷的耐热性好，这可以提高发动机的工作温度，从而使发动机效率大大提高。例如，对燃气轮机来说，目前作为其制造材料的镍基耐热合金，工作温度在 1000 左右；若采用陶瓷材料，工作温度可达 1300 ，使发动机效率提高 30% 左右。

(2) 工作温度高，可使燃料充分燃烧，排出废气中的污染成分大大减少。这不仅降低了能源消耗，而且减少了环境污染。

(3) 陶瓷的热传导性比金属低，这使发动机的热量不易散发，可节省能源。

(4) 陶瓷具有较高的高温强度和热稳定性，这可延长发动机的使用寿命。

我们知道，发动机是将其他能量（如热能等）转化为机械能的动力装置。其中燃气轮机是利用燃气推动涡轮（由叶轮和转轴组成）旋转做功，内燃机是用活塞在气缸中往复运动做功。目前汽车发动机一般用内燃机。从 50 年代开始，人们研究将燃气轮机作为汽车动力源。燃气轮机由于采用的是连续燃烧方法，燃料容易充分燃烧，因此可以使用多种燃料，是一种低公害、节省资源的动力装置。而且燃气轮机运行时振动较小，适用于赛车、重型载重汽车等（普通乘用车开车、停车频繁，难以充分发挥燃气轮机的优越性）。

首先让陶瓷获得应用的是高温燃气轮机。用陶瓷制造燃气轮机，不但有利于提高工作温度，降低燃料的消耗，而且陶瓷原料供应丰富，不存在资源紧缺的问题。用陶瓷来代替镍基、钴基等耐热合金，成本可降低到原来的 1/30。当然，陶瓷也可用于制造内燃机。在燃气轮机中可试用陶瓷制造的零部件有：叶片、燃烧筒、套管、主轴轴承等。在内燃机中可用陶瓷制造的零部件有：活塞内衬、气缸、预燃烧室、挺杆、阀门、喷嘴、涡轮增压器转子、轴承等。

据说，汽车发动机的所有零部件若都用陶瓷制造，其重量比现在的发动机轻 2/3，燃料费将下降 20%。看来，陶瓷是汽车产业在激烈竞争中的一张获胜王牌。

1977 年，美国福特汽车公司用氮化硅和碳化硅陶瓷制造了一台全陶瓷车用燃气轮机，并进行了运转试验，燃气温度为 1230 ，转速为 5 万转/分。这台燃气轮机成功地运转了 25 小时。

1982 年，瑞典鲍尔鲍和联合公司通过共同研究，用陶瓷制成了燃气轮机，并且进行了燃气轮机乘用车的实际行驶，首次在世界上取得成功。这台燃气轮机的涡轮工作温度为 1100 （目标为 1350 ），转速为 5 万转/分（目标为 10 万转/分），运行了 10 小时。

我国在“七五”期间（1986~1990 年），有数十个单位在国家科委的组织下，协同攻关，研制成一系列陶瓷发动机的关键零部件，并装配成发动机。不仅顺利通过了台架试验，而且在大型公共汽车上完成了上海与北京间的往返装车路试，使我国成为世界上少数几个有能力进行陶瓷发动机装车路试的

国家之一。这种由陶瓷部件装配的发动机，燃油效率高，无需水冷却系统，特别适用于沙漠地区等恶劣环境。该机已进入西北沙漠地区进行性能考核。我国科学家还将研制工作温度更高的陶瓷燃气轮机，他们正为攻克陶瓷发动机难关而不懈地努力着。

## 陶瓷滚动轴承

滚动轴承是现代机械中的重要部件。它主要用于支承轴及轴上的零件，对整台机器的精度、效率和使用寿命有直接的影响。

滚动轴承从 19 世纪开始使用以来，至今已有 100 多年历史。目前全世界一年要生产 25 亿只滚动轴承，几乎每一台机器设备都要使用滚动轴承。滚动轴承较之滑动轴承具有摩擦系数小、消耗功率少、效率高的优点。它一般由外圈、内圈、滚动体和保持架四部分组成，常用合金钢制造，但同样可用陶瓷制造。

目前，这种陶瓷滚动轴承已经问世。一年一度的名古屋优质陶瓷商品交易会上，日本、英国、德国生产的陶瓷滚动轴承特别引人注目。陶瓷滚动轴承具有下列优点：

(1) 陶瓷的耐蚀性好，所以陶瓷滚动轴承适合于在有腐蚀性介质的恶劣环境中工作；

(2) 陶瓷滚动体的密度比钢低，转动时对外圈的离心作用力可降低 40%，故使用寿命长；

(3) 陶瓷的热膨胀系数比钢小，在轴承的间隙一定时，允许在温差变化较大的环境中工作；(4) 陶瓷的弹性模量比钢高，具有较好的刚度，有利于提高工作速度，达到较高的精度。

陶瓷滚动轴承的制造材料主要采用氮化硅陶瓷，其中含氧化铝和氧化钇添加剂的陶瓷强度要比含氧化镁的高。

日本已开发成功在高温下采用固体润滑剂的陶瓷滚动轴承，以及用液体或油脂润滑的钢—陶瓷组合滚动轴承或全陶瓷滚动轴承。

目前，陶瓷滚动轴承已应用于涡轮增压器、离心分离器、燃气轮机、柴油机和飞机发动机等。

## 陶瓷刀具

刀具也是陶瓷的一个重要应用对象。衡量刀具质量的高低，不在于在室温时硬度的高低，关键是在高速切削产生高温的条件下是否仍能保持高硬度。这种在高温时仍能保持高硬度的能力，称为热硬性或红硬性。陶瓷不仅具有高硬度、高耐磨性，而且高温下的热硬性仍较好，因此是理想的刀具材料。

陶瓷刀具材料主要有氧化铝陶瓷、氧化铝—碳化钛陶瓷（含 30% 碳化钛，目的是提高韧性）、氮化硅陶瓷和复合氮化硅陶瓷等。例如，在加工冷硬铸铁轧辊的时候，复合氮化硅陶瓷刀具可比普通硬质合金刀具切削速度快 5 倍，刀具寿命提高 20~30 倍，还能在间断切削工况下顺利工作，而这是硬质合金刀具无法完成的。

在 70 年代研制成功的立方氮化硼陶瓷刀具，其硬度仅次于金刚石，但耐

热性和化学稳定性均大大高于金刚石，能耐 1300 ~ 1500 的高温，适合于切削难加工的金属材料。

## 陶瓷人工关节

现在，人的关节万一损伤，可以换上人工关节，正像机器损坏了，换个零件那样。以前人工关节一般用不锈钢之类的金属材料制成。在气温变化时，特别是遇到阴雨天，装上这种金属关节的人，往往会感到酸痛。这是因为人体里的液体（称为体液）酸碱度会随气候的变化而变化，并与金属关节相互作用，产生电解现象，使人体的局部生理状态紊乱，引起不适的感觉。

如果采用陶瓷材料来制造人工关节，就没有这种痛苦和烦恼了。陶瓷不怕酸碱腐蚀，也不导电，无论体液酸碱度如何变化，对陶瓷都不会起作用。

但话又要说回来，不是任何陶瓷都可以作为人工关节材料的。凡是生物医学材料，除应满足一定的理化性质要求外，还必须满足生物学性能的要求，即生物相容性要求。通俗地说，这种材料不会引起对人体有害的作用，包括产生局部和全身反应，如发炎、中毒、致癌、有刺激性等，同时人体也不会对材料的结构和性能产生灾难性的破坏。换言之，人体和材料要相互容纳，和平共处。

凡是可作为生物医学材料的陶瓷，称为生物陶瓷，它们可用于制造体内修复器件和人工器官。在化学成分上，生物陶瓷通常由存在于生理环境中的离子（钙、磷、钾、镁、钠等）或对人体组织仅有极小毒性的离子（铝、钛等）所组成，因此具有良好的生物相容性。

生物陶瓷的种类很多。例如，氧化铝生物陶瓷强度大，硬度高，摩擦系数小，耐磨性好，适合于制造人工关节头和臼等对耐磨性要求高的修复体、牙种植体、耳听骨修复体、骨螺丝等。氧化锆生物陶瓷不仅具有良好的耐磨性、抗生理腐蚀性和生物相容性，而且其断裂韧性和强度均优于氧化铝陶瓷，用其制作的髋关节头比氧化铝陶瓷的小 20% 左右，从而具有更好的耐磨性和更长的寿命，主要用于关节、牙等硬组织的修复和替换。中国科学院上海硅酸盐研究所的科学家还研制成功了等离子喷涂氧化铝、氧化锆人工骨与关节陶瓷涂层材料，并获得了国家发明奖。

## 玻璃家族的新成员

### 名副其实的安全玻璃

玻璃可说是我们熟悉的老朋友了，在我们周围到处都有玻璃：房间内的门窗玻璃、电视机的显象管玻璃、汽车驾驶室的挡风玻璃、各种光学仪器玻璃和琳琅满目的器皿玻璃等等。你一定了解玻璃的“性格”：“啪！”一块玻璃落地，跌得粉身碎骨，它那短暂的生命就此结束。

难道玻璃本性难移，脆性果真是它的“不治之症”吗？人类在长期的生产实践中，已经研制出许多新型玻璃，如夹丝玻璃、夹丝防盗玻璃、夹层玻璃、钢化玻璃等。这些玻璃有个共同的特点：经剧烈振动或撞击，仍不易破碎，即使破碎，也不会产生尖锐的碎屑伤人，故统称为“安全玻璃”。

### 遭窃的玻璃厂厂长

在 100 多年前的英国，有一位名叫吉姆斯·牛敦的绅士，开了一家玻璃制造厂。这位牛敦厂长总是不放过任何机会宣传使用玻璃的好处。他别墅中通向阳台的那扇门是用玻璃做的，他逢人就说：“看啊！我的别墅中阳光多么充足！”

可是，不久发生了一件糟糕透顶的事情。小偷似乎并不理会玻璃的优点，专挑玻璃的弱点。在一个漆黑的夜晚，一个小偷悄悄地爬上厂长别墅的阳台，用金刚石划破了那扇玻璃门，伸进手去拉开了插销，潜入屋内，把财物洗劫一空。

牛敦先生在懊恼之余，对玻璃的易碎性和毫无防御能力深为遗憾，冥思苦想怎样才能防止被窃。应该换一扇结实的铁门？不！铁门无法透过阳光。再说他是玻璃厂厂长，玻璃毕竟有许多公认的优点啊！在铁门上挖洞再镶上玻璃？在玻璃门外再加一层保护铁丝网？……方案一个个提出，又一个个被否定。最后，牛敦先生请来了玻璃制造专家，终于找到了为玻璃增添“筋骨”的好主意：在玻璃制造过程中，趁温度较高，玻璃还很软的时候，夹进一层金属网。这层金属网平行于玻璃表面，每个网格的形状可以做成六角形，也可做成方格形等。这样，一种新型的夹丝玻璃便诞生了。

夹丝玻璃中的金属网对玻璃起了加强作用，有效地克服了玻璃的脆性，即使很大的冲击或振动使它破碎，玻璃碎片仍藕断丝连地粘在一起，不会飞出伤人。由于夹丝玻璃可靠、安全，后来一些国家特别规定，在高层建筑中必须使用夹丝玻璃。

### 深夜，展览馆中响起警铃

一次大型的古代名画展览正在某滨海城市举行。这次展出的古代名画具有极高的收藏价值，它们都是几经周折，闯过了战争的烽火，经历了动乱的洗礼，才得以保存下来的，故甚为珍稀。经鉴赏家鉴定，均为前人名迹，绝非贗品。为便于保存，所有名画都经过防霉防蛀处理，并装置在精美的玻璃框中，让每位参观者尽情欣赏。

这次展出吸引了海内外知名画家、鉴赏家、收藏家和广大爱好艺术的平

民百姓，迎来了一批批流连忘返的参观者。第一天展览顺利结束了，工作人员进行了仔细清点和打扫后陆续离去，整个展览馆静悄悄，一片肃穆安谧。

深夜，漆黑的夜空像浸透着墨汁，万籁无声。突然，展览馆值班室亮起红灯，紧接着一阵阵警铃声揪人心肺，警卫人员闻声而起，立即冲向展览厅出事地点，正在作案的窃贼束手就擒。

显然，在这次擒贼行动中立了大功的是展览馆中的防盗报警装置。或许你已经在影视片中见识过类似装置的功效，比方说红外线防盗报警装置等，然而这种装置有两个缺点。一是敌我不分，不管是谁，只要一进入“禁区”，立即警铃大作。这不但限制了警卫人员的行动范围，而且可让盗贼制造假警报，使得警卫人员疲于奔命，松懈警惕，他们便乘机作案。二是目标暴露，易于被盗贼破坏。在著名的河南开封“九·一八”文物盗窃大案中，盗贼就是使报警器失效而得手的。

然而，在我们这次名画展览中，使用的是另一种防盗报警装置，它完全克服了上述两个缺点，因为这种装置使用了一种“夹丝防盗玻璃”。说起它的原理，其实并不复杂。在这种玻璃内夹有一层极细的肉眼无法观察到的金属丝网，它完全不影响玻璃的透明程度。把这种玻璃镶嵌在镜框或展柜上，让金属丝网接通电源，并与自动报警器的开关相连。窃贼在划玻璃时必然会碰到金属丝网，于是报警器自动打开，发出警报，窃贼只有束手就擒。

这种“夹丝防盗玻璃”有着广泛的用途，凡是存放文物、珠宝、钱财、票证、图纸和重要文件的地方都可以采用，而且它还能起到“欲擒故纵”的作用，让窃贼自动上钩。

## 拣回来的发明

20世纪初的一天，法国化学家别涅迪克做完了实验正在打扫工作场所，不知怎的，一不留意，他把一只长颈薄玻璃烧瓶碰落到地上。然而，意外的是，烧瓶没有跌碎，只不过是瓶壁上布满了裂纹。

请你设身处地想一下，要是你遇到了这样的事情，会怎样处理呢？也许，起初你会埋怨自己：“真粗心！”然后看到烧瓶没有跌碎，侥幸地松口气：“还好。”最后拣起烧瓶一看：“啊，那么多裂纹！”于是顺手把它扔进了垃圾箱，虽然带来丝丝的懊恼，事过境迁，也就淡忘了。

别涅迪克可不是这样，长期的科学实践培养了他善于思考的习惯和深邃的洞察力。他从不放过身边的意外事情，处处做个“有心人”。尽管这时他正忙着，来不及仔细研究，但他还是在烧瓶上贴了张小纸条，上面写着：“1903年11月，这烧瓶从3米半高的地方跌下来，拾起来就是这个样子。”

几年后，报纸上披露了一则车祸消息：一辆公共汽车不慎撞在电线杆上，车窗玻璃的碎片击伤了司机和乘客。记者呼吁：应该研制一种碎了也不伤人的车窗玻璃，以免流血事件重演。

别涅迪克看了这则消息，心里不觉一动。他想起了那只布满裂纹的烧瓶，便赶紧从积着厚厚灰尘的角落里把它找了出来。经过仔细研究，他终于弄清了这是一只装过硝化纤维素溶液的烧瓶，瓶壁上结了一层胶膜，所以当烧瓶没有跌得粉碎。

拣回来的烧瓶给别涅迪克带来了启发。对，让胶膜和玻璃紧密合作，取长补短，相得益彰。于是，一种新型的“夹层玻璃”发明了。



夹层玻璃一般都做成三层，即在两层玻璃间夹一层弹性的透明材料，如赛璐珞、聚乙烯醇缩丁醛等塑料，使它们相互粘结起来。也有做成五层的，即在三层玻璃间夹两层弹性的透明材料。还有的在玻璃表面敷设透明的电热材料，这不仅可以使玻璃在破碎时不起碎片，还可以通电发热，用它来作为飞机座舱玻璃和汽车挡风玻璃，可避免发生结霜现象或迅速化解结霜。夹层玻璃装在坦克车的了望孔上，不但不容易被枪弹击穿，即使击穿了，也只是在弹孔的周围出现网状裂纹，不会飞出碎片，所以夹层玻璃又称“防弹玻璃”或“不碎玻璃”。

目前，夹层玻璃已经有了很大发展。夹层中可以使用各种各样的材料。如70年代英国科学家在夹层中夹入一种钛金属薄片，制成的夹层玻璃具有高抗冲击力、抗贯穿、耐高温的特性。

### 像钢一样结实

或许你已听说过大名鼎鼎的“钢化玻璃”。是的，钢化玻璃有钢一样的坚硬倔强的脾气。一个800克的钢球从1米高处落到6毫米厚的钢化玻璃上，钢化玻璃丝毫不受损害。要是普通玻璃，即使10张叠在一起，也会被砸得粉身碎骨。钢化玻璃的抗弯能力比普通玻璃大5~7倍。如果将一块钢化玻璃在两端支撑起来，中间悬空，站上两个彪形大汉，玻璃会被压成弧形，但不会断裂。

那么，玻璃是怎样“钢化”的呢？原来，这是玻璃向钢铁“学习”的结果。

把一块烧红的钢铁迅速投入水中，“哧”的一声，钢铁就变硬了。这种热处理方法称为淬火。人们想，玻璃是否也能淬火呢？不妨试试。先将普通的平板玻璃按照要求的尺寸裁好，将其加热到高温，再立即吹风，让它迅速而均匀地冷却下来。这时，玻璃的表层猛烈地收缩，使玻璃表面均匀地布满压缩应力。当这种玻璃以后受到拉力时，其表面的压缩应力可以抵消一部分拉力，从而提高了玻璃的强度。这就是钢化玻璃能像钢铁一样抗冲击力的原因。

现在也有用化学方法来制造钢化玻璃的。将普通玻璃浸在某些熔融盐里面，在其表面生成一层透明的化合物，同样使玻璃表面受到压缩应力，这样制成的钢化玻璃比淬火法生产的钢化玻璃强度要高得多。

钢化玻璃的厚度一般都在3毫米以上，这样钢化效果比较好。钢化玻璃一旦制成，就不能再裁切，否则会使玻璃破裂。钢化玻璃也是安全玻璃，主要是因为它不碎则已，一碎就粉身碎骨，碎粒没有尖锐的棱角，不会伤人。因此钢化玻璃适合于制成车辆的挡风玻璃、建筑物的门窗、大型吊灯的灯罩和茶杯、台板玻璃等日常用品。钢化玻璃还能代替钢铁作为制造机械零部件的材料，如制造搅拌机的叶片、仪表中的玻璃元件等。

### 绚丽多彩的玻璃幕墙

80年代初，我国第一幢使用玻璃幕墙的高层建筑——长城饭店在高楼林立的北京城中异军突起，为首都的城市建筑增添了风采。自那以来，玻璃幕墙建筑在祖国大地如雨后春笋般地出现，使我国的城市美景显得更加绚丽多

彩。

那么，什么是玻璃幕墙呢？

玻璃幕墙是指作为建筑外墙装潢的镜面玻璃，这种镜面玻璃实质上是在钢化玻璃上涂上一层极薄的金属或金属氧化物薄膜而制成的。它呈现金、银、古铜等颜色，既能像镜子一样反射光线，又能像玻璃一样透过光线。如果你在大楼外面，会看到玻璃幕墙上展现出一幅蓝天、白云和车水马龙的连续变幻的画卷。

现代化高层建筑的玻璃幕墙还采用了由镜面玻璃与普通玻璃组合，隔层充入干燥空气的中空玻璃。中空玻璃有双层和三层两种。前者由两层玻璃加密封框架，形成一个夹层空间；后者由三层玻璃封成二个夹层空间。中空玻璃具有隔音、隔热、防结霜、防潮、抗风压强度大等优点。据测量，当室外温度为-10℃时，单层玻璃窗前的温度为-2℃，而使用三层中空玻璃的室内温度为13℃。在夏天，双层中空玻璃可以挡住90%的太阳辐射热。阳光依然可以透过玻璃幕墙，但晒在身上不会感到炎热。所以，使用中空玻璃幕墙的室内可以做到冬暖夏凉，生活环境非常舒适。

玻璃幕墙诞生至今已有70年的历史，它曾走过一段崎岖曲折的道路。

早期玻璃幕墙建筑中的住户曾遭受过严寒酷暑的折磨，也发生过因玻璃强度不够而引起的破碎、倒塌事故。经过不断的技术改进，特别是采用了颜色玻璃、中空玻璃等新产品，玻璃幕墙的性能不断得到提高，安全性不断加强，使它也跻身于安全玻璃的行列。如新近建成的上海兰生大厦，其玻璃幕墙的抗风压力已达到 $6.27 \times 10^7$ 帕。

高科技的发展已经使幕墙的材质从单一材料发展到复合材料，出现了将玻璃和彩色不锈钢、铝合金、大理石板、搪瓷烧结结构等材料组合而成的幕墙，这不仅减轻了高层建筑的自重，而且使我们的城市变得更加光彩夺目，绚丽多姿！

## 异军突起的微晶玻璃

玻璃家族中有一个与众不同的成员，名叫微晶玻璃。它具有与普通玻璃不同的结构，生就一种特殊的性格。它硬度高，抗弯强度是普通玻璃的 7~12 倍。它耐高温性能好，软化温度高达 1000℃，即使达到 900℃ 高温，突然投入水中也不会炸裂。它的膨胀系数可以调节，甚至可使其膨胀系数为零。它不但电性能优异，还可以用来制作雕刻艺术品，在它身上打出成千上万个微孔也不是一件难事。所以，微晶玻璃在生产中有许多独特的应用。

那么，微晶玻璃是怎样发明的呢？

### “过失”导致的发现

50 年代初，在世界上享有盛誉的美国康宁玻璃公司为了开发新型玻璃，抽调一批精干的科研人员，组成了研究发展中心。化学家斯托凯受命在该中心负责研制含微量银的感光玻璃。所谓感光玻璃，就是一种能感光显色的新型玻璃。这种玻璃经紫外线照射感光后，再经热处理，就能显示出美丽的影象，不但色泽鲜艳，而且永不褪色。

一天，斯托凯正在实验室做热处理试验。按工艺规程要求，热处理时加热温度为玻璃软化温度以下 50~100℃，保温时间为 1~2 小时。斯托凯把一块玻璃放入自动控制温度的电炉中，将温度控制仪上的加热温度调整为 600℃。这种温度控制仪的工作原理是：一旦炉温超过设定的温度，比方说 600℃，它会自动切断电源，停止加热；而当温度下降到低于 600℃ 时，又自动接通电源。这样一会儿断电一会儿通电，就把炉温保持在 600℃ 左右。

现在，斯托凯一切准备就绪，他关上炉门，接通电源，电炉开始升温。突然，传来一阵急促的电话铃声，原来是通知他立即去开会。按照实验室规定，电炉在加热时工作人员不能离开岗位，但斯托凯想，反正有温度控制仪，就明知故犯地离开实验室去开会了。当他重返实验室时，不禁大吃一惊，控制仪失灵，炉内温度早已升到 900℃，真是糟糕透顶。不仅实验失败，而且熔融玻璃会粘住炉膛，损坏电阻丝，后果十分严重。

斯托凯非常懊恼，赶紧打开炉门，意外的事情发生了：玻璃没有熔融，还是直挺挺地躺在炉内，但已面目全非，样子有点像不透明的瓷砖，用钳子夹起来不是软绵绵的而是硬邦邦的，敲打起来还会发出像金属那样的声音。

这块玻璃究竟发生了什么变化？经过仔细的研究和反复试验，斯托凯在显微镜下观察到：这块玻璃中析出了大量的微小晶体，这就是后来大名鼎鼎的微晶玻璃。

### 微小的晶体

顾名思义，微晶玻璃是由微小晶体组成的玻璃。由于这种玻璃具有与陶瓷相似的结构，所以又称为“玻璃陶瓷”。

我们知道，玻璃属于非晶态的固态物质。在玻璃制造过程中，由于冷却太快，内部分子来不及排列成整齐的队伍就凝固了，所以基本上还是液态时的结构，显得杂乱无章。只不过玻璃中的分子运动起来不能像在液态中那样自由自在，只能在原地“踏步”，因此形象地说，玻璃是“被冻结的液体”。

但是，玻璃的这种结构是不稳定的，在一定条件下，玻璃还是要让分子按照一定规则排列起来，析出晶体。这正像水总是从高处流向低处，结晶是玻璃的自然趋势。

什么条件下玻璃才能析出晶体呢？空气中的水汽要以尘埃作为凝聚的核心，才能形成水滴。同样，玻璃结晶也要有适当的核心，除了玻璃的自身成分可以作为结晶核心外，金、银、铜等金属元素和氧化钛、氧化锆等氧化物也可作为结晶核心。当然，要使玻璃析出晶体，还要在成分、温度、能量等方面满足一定的条件，一般在 900~1100 温度范围内比较容易析出晶体。

制造微晶玻璃，就是要创造玻璃结晶的条件。首先要确定微晶玻璃的化学成分，并事先加入微量的金属元素或氧化物作为结晶核心。然后在玻璃熔炼、成型后，用紫外线照射，再进行热处理，给予一定的能量条件，使结晶核心像种子发芽一样，生长出许多微小的晶体，其直径通常不超过 2 微米，只有头发丝粗细的几分之一。这种要经过紫外线照射才能制成的微晶玻璃，称为“光敏微晶玻璃”。不用紫外线照射，只通过热处理也可以制成微晶玻璃，这种微晶玻璃称为“热敏微晶玻璃”。目前已有 1000 多种不同成分的微晶玻璃，具有各种不同的性能，但万变不离其宗，微晶玻璃的性能都同微小晶体的存在有关。

### “能工巧匠”

在玻璃中加入微量的感光性贵金属银作为结晶核心，可制成透明的光敏微晶玻璃。在这种玻璃上面覆盖一张照相底片，放到紫外线下照射一定的时间，使玻璃中照到紫外线的地方形成银原子的潜象，成为以后析出微小晶体的核心。再经热处理，玻璃中照到紫外线的地方便析出微小晶体，玻璃上出现乳白色的图象；而未照到紫外线的那部分玻璃没有结晶，仍然是透明的。这种玻璃的结晶部分和未结晶部分在性能上有很大的差别，在氢氟酸中的溶解能力大不一样，前者比后者要大 20 多倍。将这块玻璃浸入氢氟酸，由于结晶部分容易被氢氟酸腐蚀掉，而未结晶部分岿然不动，玻璃上便形成了与底片上同样的精美雕刻图案，其水平绝不亚于专门从事雕刻的能工巧匠。

利用这种化学蚀刻技术，可以对玻璃进行刻花和精密加工。例如，在指甲那么大的玻璃上可打出上万个网眼，网眼的直径小到连头发丝都穿不过。此外，还能打出各种形状的孔眼，如方孔眼、三角孔眼等。

由于光敏微晶玻璃具有良好的电学性能和化学加工性能，故常用来制造印刷线路的基片和镂板，为电子工业的固体电路微型化作出贡献。光敏微晶玻璃还能用来制造射流元件，为实现气动控制自动化立下汗马功劳。用光敏微晶玻璃制成的高级装饰品和艺术珍品，更受到人们的欢迎。

### 观察天体的“眼睛”

天文学家常用反射式望远镜观察天体，这种望远镜中有一面巨大的凹镜，用于聚集来自遥远星体的微弱光线。凹镜愈大，能够集中的光线愈多，看到宇宙的范围愈大，成象愈明亮清晰。自从 1668 年牛顿发明反射式望远镜以来，凹镜的直径做得愈来愈大。在本世纪 40 年代后期，世界上第一台大型反射式望远镜建成，它的凹镜直径为 5 米，净重 13 吨，连同其他部件，望远

镜总重达 530 吨，安装在美国帕洛玛山天文台。这台望远镜能接收到几十亿光年远处发出的极微弱的光线，比人眼灵敏 100 万倍。

但这台反射式望远镜有一个缺点。其凹镜采用的是普通光学玻璃，这种玻璃的膨胀系数较大，因此凹镜的准确形状和尺寸精度会受气温的影响而发生变化，从而会改变光的路线，使成象的清晰度降低。

微晶玻璃的膨胀系数很小，这是因为微晶玻璃在热处理过程中会析出具有“热缩冷胀”性质的微晶颗粒，和一般玻璃材料的“热胀冷缩”的特性正好相反。因此调节得好可以使这两种特性相互抵消，制成膨胀系数为零的微晶玻璃。用这种微晶玻璃制成的凹镜，其精确度不会受到温度影响。于是，微晶玻璃又有了一个用武之地，它是制作大型反射式望远镜凹镜的理想材料。

我国在 1978 年用超低膨胀系数微晶玻璃制成了凹镜直径为 2.2 米的反射式望远镜，安装在北京天文台，使我国进入了为数不多的能制造这类大型微晶玻璃凹镜的国家的行列。

这种超低膨胀系数的微晶玻璃还广泛用于厨房用具、热工仪表、医学和建筑材料等方面，如果制成餐具或烧锅，急冷急热都不用担心炸裂。它强度、硬度高，耐磨性好，常用来做钟表和精密仪器中的轴承，作为贵重的红宝石的代用品。

#### 微晶玻璃的其他用途

微晶玻璃还可以用作火箭、人造卫星和航天飞机的结构材料，在机械工业上可用来制造滚动轴承、汽轮机叶片、高速切削刀具、热交换器、化工用泵和管道以及其他要求耐磨、耐蚀、耐热的机械零件。

此外，还有许多具有特殊性能的微晶玻璃。例如，有生物活性的微晶玻璃可加工成人工骨关节、人工牙等，有磁性的微晶玻璃可以制造计算机记忆元件。用微晶玻璃制成的各种家用器皿，已占有相当大的市场。

#### 导弹头部的“保护神”

我们知道，导弹是一种命中率极高、杀伤力很大的现代化武器。为什么导弹的命中率会那么高呢？原来，导弹的头部装有一个由敏感系统、测量系统、控制系统、执行机构等电子装置组成的制导系统，它可以精确地控制和修正导弹的飞行方向。但导弹在大气中飞行，其头部因与空气摩擦而产生相当高的温度，因此在导弹的头部有一个流线型防护罩，用以保护装在其内的制导系统。防护罩要满足很高的要求，它既要能让微波信号透过，又要抗高温，以保证其内部的电子装置在导弹高速飞行时能正常工作。

微晶玻璃具有良好的成型性，容易加工成尺寸精确、材质均匀的零件。它比重小，抗弯强度高，在短时间内可经受 1200 的高温考验。用它来制作防护罩，在导弹高速飞行时能辐射大量的热，从而降低工作温度。因此，微晶玻璃是一位名副其实的导弹头部的“保护神”。

## 你亮我也亮的交通标志

### “醒目效应”

在茫茫夜色中，如果乘车奔驰在高速公路上，你可能会被这样一种现象所吸引：只见在汽车灯光的直射下，一只一只橙红色的指示灯不断地闪亮在道路两侧，引导着车辆前进；不时还会闪出一块块高架于道路上空的交通标志牌，醒目地显示出前方即将到达的地点及所剩里程。可是，当你回过头往车后望去，却再也看不到这些景象，留在你视野中的只是夜幕下那尾随而来的汽车的灯光。

是不是有什么自动控制装置将那些指示灯和标志牌灯光熄灭了呢？不是。其实这些指示灯和交通标志牌根本没有装上灯泡，它们是一种定向反光膜。这种定向反光膜能将射向它的光线直接反射回光源处，你亮我也亮，使人们看起来好像它自己在发光一样。定向反射膜反射回来的光线十分集中，具有强烈的“醒目效应”，可使驾驶员在夜间或视野不佳的情况下看清周围情况，确保交通安全。

定向反射膜是用什么材料制作的呢？是玻璃家族中的又一成员——玻璃微珠。

### 白色粉末

玻璃微珠从宏观上看是一种白色粉末，但在光学显微镜下观察，你看到的却是一些粒度相当均匀的球形颗粒。这些球形颗粒的直径也就相当于一根头发丝的直径那样大小。

通常，人们以具有较高折射率的氧化物为原料，配以在玻璃中有很高折射率的重金属氧化物，将它们放进电炉或煤气炉中高温熔融，直到原料变得均匀清晰时，取出急冷、粉碎、筛分，制成粒度合宜、但形状不规则的颗粒。然后，采用等离子喷涂技术或火焰喷涂技术将它们制成白色、透明、球形的玻璃微珠。这些玻璃微珠折射率在 2.20 左右，并具有耐水、耐酸、析晶率低等优良性能，是制造定向反光膜的理想材料。

那么，玻璃微珠是怎样反射光线的呢？

### 光线沿原路折返

当光线射入球状玻璃微珠时，玻璃微珠就像一面微型凸透镜，将光线聚焦于微珠的后球面附近。对于暴露在空气中的玻璃微珠，当其折射率为 2 时，入射光线将聚集于微珠的后球面，通过涂在后球面上的反射层或球面本身的反射，光线即可从整体上沿原路折返。而当折射率不到 2 时，光线将聚焦于微珠的外面。显然，在这种情况下，为了得到较好的定向反射，就必须将反射层材料涂得厚一些，使得光线的焦点落在反射层界面上。

此外，当反射层与微珠球面能够构成同心球面时，即使与反光膜成斜角射入的光线，也能较好地反射回来。

通常认为，微珠的折射率越高，焦点离微珠球面的距离越小，就越容易制成与微珠球面成同心球面的反射层。这样，反光膜能反射的光线的入射角

(称为有效入射角)就越大,反光强度就越高。但是在许多反光膜中,玻璃微珠被透明树脂所包裹,树脂折射率一般为 1.4~1.5,那么玻璃微珠的折射率也就要打折扣。因此,为了获得有效入射角大、反光强度高的反光膜,应该尽可能地提高玻璃微珠的折射率,通常应使它大于 2.1。

### 色彩斑斓的反光织物

用玻璃微珠和透明树脂制成的色彩斑斓的反光膜,除了广泛应用于各类交通标志,如道路标识、汽车号牌、桥梁隧道入口标志、海上救生用具反光标记、航标、机场道路信号牌等外,还可用来制成彩色印花反光织物,用于制作矿山、消防、环卫、市政等部门夜间作业者的工作服,例如反光服和反光的帽子、鞋子、包、袖章、伞等等。它们对于减少夜间事故,改善夜间工作管理,提高夜间工作效率都起着极为重要的作用。

你看,细小的玻璃微珠,想不到竟有这么大的本领。

## 神通广大的光导纤维

水可以在管子中流动，电可以用导线来输送，难道光线也能被我们捕捉起来加以传导吗？能！用于传导光线的“管子”就是一种玻璃纤维，人称“光导纤维”。光导纤维在现代科学技术中有重要的应用，它不但是现代通信技术中的重要材料，还是医生的得力助手呢！

### 光线能弯曲吗

在小学的《自然常识》课本中，讲到光是怎样传播的时候，设计了一个小实验：让光通过小孔射进充满浓烟的盒内，人们便可以看到，光是沿着直线传播的。

既然光是沿直线传播的，那么怎样才能使光线弯曲呢？

还是让我们再做一个实验。

在暗室里，放置一个盛水的玻璃容器，在接近其底部的侧壁开一个小孔。让一束平行光线从小孔对面平行入射到小孔处，当水从小孔中流出时，可以清晰地看到光沿着弯曲的水流在闪耀。这说明光线弯曲了。

其实，光沿着直线传播和光线能弯曲，这两个结论都是对的，互相并不矛盾。问题是这两个结论都是在一定条件下才能成立的。光在同一种物质里传播的路线确实是直线。但如果光从一种物质（例如空气）进入另一种物质（例如水或玻璃）时，光的传播方向通常会改变。用一面镜子就可以使光反射，不就是改变了光的前进方向吗？让一束光线斜着射向水中，一部分光被水面反射回到空气中，一部分光穿过水面，偏折了一个角度进入水中。光从水中反射到空气中，光的传播方向也发生了变化。这就是筷子插入水杯里，会看到水中的那部分筷子向上折的道理。

对光的折射、反射进一步研究表明，光由折射率大的水进入折射率小的空气时，能够在这两种物质的交界面上产生所谓“全反射”，即光不进入折射率小的空气、而全部返回到折射率大的水中。上述光线弯曲的实验，正反映了光在水流表面进行全反射的结果。

根据同样道理，用玻璃纤维来模拟这股水流，光也能沿着玻璃纤维传导。不管玻璃纤维做成什么形状，弯曲成什么角度，只要在其一端射入一束光线，并让光线在玻璃纤维界面上进行全反射，就能在另一端接收到这束光线。

### 内外两层

光导纤维，简称“光纤”，就是一种能利用光的全反射作用来传导光线的透明度极高的玻璃细丝。为了防止光线在传导过程中的“泄漏”，必须给玻璃细丝穿上“外套”。所以，光导纤维的构造一般由芯线和外包皮层这两部分玻璃材料组成。外包皮层的折射率通常比芯线折射率小。这样，进入芯线的光线在芯线与外包皮层的界面上作多次全反射而曲折前进，不会透过界面，仿佛光线被外包皮层紧紧地封闭在芯线内。光线只能沿着芯线传送，就好像自来水只能在水管里流动那样。

但是，光在任何物质中传导都会因被吸收或散射而不断减弱。为了减少光在长距离传导过程中的损耗，必须采取相应的技术措施。



首先，要采用超纯石英玻璃来制造光导纤维，以尽量减少光导纤维中的杂质。其次，尽量改善玻璃内部结构上的均匀性。第三，采用波长较长的激光束进行传导，以提高光导纤维的传导效果。

### 光导纤维的制造

制造光导纤维的方法有多种，常用的是管棒法。所谓管棒法，就是将折射率较大的玻璃棒，插入到折射率较小的玻璃管中，一起放进电炉加热。在高温熔融状态下，拉成内外两层的玻璃纤维长丝。

为了保证光导纤维内外两层玻璃间有良好的接触，玻璃管和棒料必须经过严格的质量检验，棒料外表面要进行研磨抛光。

目前生产的光导纤维有单模和多模两种。所谓“模”，是指传导光线的路径。单模光纤十分细，芯径在 10 微米以下，外径为 125 微米，只能有一束光线基本沿芯线的中心传播。多模光纤较粗，芯径为 50 微米，外径为 125 微米，光线能够在光纤中沿着多条路径行进。

1000 米长的单模光纤，重量只有 27 克，传送波长为 1.55 微米的激光时，每传播 1000 米，光能的损耗不到 0.2 分贝。

### 光纤通信

光纤通信是利用激光作载波由光导纤维传送信息的有线通信方式。

光纤通信较之普通电缆通信有许多突出的优点。

首先，光纤通信有巨大的信息容量，一根头发丝那么细的光导纤维可以通几万路电话或 2000 路电视。如果用许多根光导纤维组合成光缆，它的通信容量更大得惊人。

其次，光纤通信不受外界电磁场的干扰，工作稳定可靠，保密程度高。

第三，光纤通信损耗低，目前无中继传送距离一般为 30~70 千米（而同轴电缆每隔 1.5 千米就需设立一个中继站，来补偿电信号在传输中的损耗），很适于远距离信息传输。

目前，人们已建成大西洋海底光缆（全长约 7000 千米）。计划中的南太平洋光缆（全长约 16000 千米）也正在紧锣密鼓的准备之中。进一步降低光纤损耗，减少中继站数目，甚至不用中继站，是人们的进一步目标。

#### 真正的光通信时代

目前的光纤通信，是把声音或图象通过电话机或电视摄象机变成电信号，再通过光调制机对激光光源进行调制，把电信号变成光信号，由光导纤维传送到接收端。接收端的激光接收机通过光电转换器，把光信号还原成电信号，进入电话机或电视机，重现发送的声音或图象。未来的光纤通信，可以不用电信号，而是将声音或图象直接转换成光信号用光纤进行传输，电只是作为能源加以使用。到那时，电话、电报、电视等电通信方式将变成“光话”、“光报”、“光视”等光通信方式，人类将进入一个无限美好的真正的光通信时代。

### 医生的好助手

目前，在医学领域上，普遍使用着一种连接着许多光纤的胃镜。这些光纤并成一束，束中各条光纤的相对位置保持不变。把胃镜插入病人胃内，胃镜接收到的光线沿着这些光纤传到体外。每条光纤中的光仅反映胃中一小点的情况，整束光纤中的光就拼合成胃内某一部分的图象。光纤胃镜的光源是在体外由光纤传进去的，它不产生热辐射，能减轻病人的痛苦。在光导纤维的一头装上精致小巧的微型镜头，将胃内的情况传到体外拍摄下来或显示在屏幕上。还可以在胃镜光纤中留出空的通道，以插入切取生理切片的镊子。

因为光纤又细又软，故可把医生用来观察人体内部病变情况的内窥镜做得小巧玲珑。胃镜是内窥镜中比较粗的一种，也只有 15 毫米左右，其他如食道镜、膀胱镜还要细小得多。可见，光导纤维的应用，使医用内窥镜从构造到功能都发生了重要的变化。

近年来，一种激光光纤药头内窥镜碎石系统已研制成功。这种系统利用胃镜把带有药头的光纤导管送入胃中，然后沿光纤通入激光。激光可以像引爆雷管一样，使药头炸裂并产生冲击波，击碎胃石，再用胃镜把碎石取出。利用该系统已成功地击碎并取出了大小为 8 厘米 × 10 厘米 × 6 厘米的胃石。这种系统还可以用来治疗膀胱结石、输尿管结石和胆结石等疾病。

光导纤维在医学上的另一个重要应用是通过微细的光纤将高强度的激光输入人体的病变部位，用激光来切除病变部位。这种“手术”不用切开皮肤和切割肌肉组织，减少了病人的痛苦，而且切割部位准确，手术效果好。

## 百花争艳的无机非金属涂层

在我们的生活中，常用到碗、茶杯、脸盆等一类的搪瓷制品，它们的特点是在钢料坯表面涂覆了一层玻璃质的保护层（称为瓷釉）。搪瓷制品既有金属的机械强度，又有玻璃的耐蚀、耐热、耐磨和光滑易洁等优点，故深受人们的欢迎。

其实，搪瓷在材料技术中，属于无机非金属涂层。

### 景泰蓝

景泰蓝是中华文化中的一颗璀璨明珠。它是用金、银或铜制成坯胎，覆以彩色瓷釉烧制而成的，常做成花瓶、香炉、碗、盘、杯和珠宝盒等。景泰蓝技术始创于元末，到明朝景泰年间（公元 1450 ~ 1458 年）得到发展。景泰蓝表面的一层彩色（主要是蓝色）瓷釉，就是一种无机非金属涂层，主要起装饰作用。目前，景泰蓝作为我国独特的工艺品，在国际上享有盛誉。

说到涂层，除了装饰作用外，它的作用不外乎两种：一是隔绝作用，即阻止涂层两侧的物质或能量相互交流。如耐腐蚀、耐高温、电绝缘等，可谓“忠实的卫士”；另一是起化解、抵消或抵制作用，即消除外界的不良影响，同外界保持良好接触，如吸收微波、耐磨、保持润滑等，可谓“化干戈为玉帛”。当然，这两种作用不是截然分开的，有许多涂层兼有这两方面的作用，而且现代的无机非金属涂层已是百花争艳，功能齐全。下面大致就这两方面择要介绍一些。

## 忠实的卫士

### 高温隔热涂层

由于火箭、人造卫星、航天飞机等尖端技术产品的飞速发展，材料正面临着高温的严峻考验。火箭喷出的高速烈焰的温度要超过 2000℃，洲际导弹和航天飞机从外层空间返回大气层时，头部与空气剧烈摩擦，可产生 5000~10000℃ 的高温。这是任何金属材料都无法承受的。镍基耐热合金只能在 1000℃ 左右的条件下工作，况且，单靠提高金属材料的耐热性也有一定的限度。

那么，该怎么办呢？你看，炼钢工人穿着石棉工作服，可以挡住灼热钢水的烘烤。能否给在高温下工作的零件也穿上一件“隔热衣服”呢？能！这就是高温隔热涂层。高温隔热涂层是用导热系数很低的耐高温氧化物，如氧化铝、氧化锆、氧化钛及其他的耐火化合物，用喷涂的办法涂覆在金属表面而形成的。

高温隔热涂层广泛应用于航空航天技术领域及其他需隔离高温的场合，如航空发动机、火箭和导弹的喷管、燃烧室、发射台支架及宇宙飞船的许多高温部位。日本发射人造卫星用的大型火箭的发动机燃烧室已成功地应用了氧化铝和氧化锆隔热涂层。美国在一种火箭的大型铝合金喷管上，喷涂五层由氧化锆和钼组成的梯度复合隔热涂料，增加了涂层与喷管之间的结合力和隔热能力，在 2370℃ 高温下仍能正常工作。

### 防火于未然

也许你早已知道，燃烧需要有可燃物、空气和一定温度这三个条件。只要破坏这三个条件中的任一个，就可以达到防火的目的。这三个条件中，可燃物和一定温度很难事先破坏。人们在日常生活和工作中，总有一些以可燃物为材料的器具，也总有一些产生热量、提高温度的热源。但隔绝空气可以事先做到。要是在高温热源周围的工程结构（如火箭、导弹的发射台）上，在生产和储存可燃物的房屋内外壁和有关设施上，在车辆、飞机、化工设备、通信器材、电器、包装物及军工产品上，涂上一层涂层，以隔绝空气，就能做到防火于未然，确保安全。

防火涂层不但本身不是可燃物，而且能延缓、阻止火焰蔓延，在常温下还具有一定的装饰和保护作用。有一种膨胀型防火涂层，当它受热时会膨胀发泡，形成很厚的隔热层，把火焰产生的高温和高热阻挡住，并起到隔离空气的作用，就好比在火焰和被保护物之间筑起了一堵防火墙。任凭烈火熊熊，它仍能使被保护物安然无恙。膨胀型防火涂层是由膨胀催化剂、碳化剂、发泡剂、喷气剂、树脂粘合剂、阻燃添加剂及云母、碳酸钙、石英、长石等硅酸盐矿物粉末，再加水玻璃调制而制成的。

### 高温电绝缘涂层

我们知道，能够导电的物体叫做导体，不能导电的物体则称为绝缘体。石墨、金属和酸、碱、盐的水溶液等都是导体，玻璃、陶瓷、橡胶、塑料等都是绝缘体。要让电流在导体中流动，一定要有绝缘体来限制电流，不让它

流到不该去的地方，以免造成各种事故。导体和绝缘体的导电性能虽然截然相反，但它们又相辅相成，无法分离。

你看，用铜、铝等金属做成的导线外面，或有绝缘漆（涂有绝缘漆的电线称为漆包线），或有塑料、橡胶等绝缘包皮。然而，绝缘漆、塑料、橡胶都怕高温，一般超过 200 就会焦化，失去绝缘性能。而许多电线正需要在高温下工作，那该怎么办呢？对，让高温电绝缘涂层来帮忙。这种涂层实际上是一种陶瓷涂层，它除了能在高温下保持电绝缘性能外，还能与金属导线紧密“团结”在一起，做到“天衣无缝”，任你将导线七绕八弯，它们也不会分离。这种涂层非常致密，涂上它，两根电压差很大的导线碰在一起，也不会发生击穿现象。

高温电绝缘涂层根据其化学成分的不同，可分为许多种类。在石墨导体表面上的氮化硼或氟化铝、氟化铜涂层，到 400 仍有良好的电绝缘性能。金属导线上的搪瓷到 700 ，磷酸盐为基的无机粘结剂涂层到 1000 ，等离子喷涂氧化铝涂层在 1300 ，都仍保持着良好的电绝缘性能。

高温电绝缘涂层已在电力、电机、电器、电子、航空、原子能、空间技术等方面获得了广泛的应用。

## 化干戈为玉帛

### 隐身飞机的奥秘

在现代战争中，有一种隐身飞机，敌方就是使用雷达也不易将它发现。这是什么道理呢？

原来，雷达是利用微波来测定物体位置的电子设备。当雷达向目标发射微波时，在荧光屏上就呈现出一个尖形波；当微波遇到目标反射回来被雷达收到时，荧光屏上就呈现出第二个尖形波。根据两波的距离，可直接从荧光屏上的刻度读出目标的距离。如果飞机的机身用不易反射微波的新型复合材料制成，并在机身表面涂上一层微波吸收涂层，使敌方雷达微波到达飞机时不起作用，或反射很微弱，敌方的雷达就不能觉察到飞机。这就是隐身飞机的奥秘所在。

目前常用的微波吸收涂层有以下两类：一类是将微波能量在涂层中损耗掉，即在涂料中加入易将微波能量转化为机械能、电能或热能的填料，如石墨粉、碳粉、铁氧体等，不同填料吸收不同频率的微波，也可以选用几种填料混合在一起，以吸收较宽频带的微波；另一类是对微波进行干扰，这种涂层的厚度，是根据敌方雷达微波的频率而确定的，它可使微波在涂层表面与底面的两部分反射波相位相反，也就是波峰与波谷相遇，相互抵消，使微波消失。

微波吸收涂层通常由吸收剂、粘结剂和其他添加剂组成。其中吸收剂具有吸收微波的功能，而且吸收率很高。硅酸盐涂层如铁氧体涂层的最大容许吸收微波比有机涂层高出 10~15 倍，故应用最为广泛。据报道，日本科学家已研制成功工作温度高达 2000℃、吸收率为 99.2% 的碳化硅吸波陶瓷和吸波粉末，并将一种含 一氧化铁的“格泰特”吸波粉末用于导弹、飞机等飞行器，能有效地躲避雷达的跟踪。

微波吸收涂层不仅用于军事伪装，使雷达找不到目标，还可用于民用领域，如微波通信、微波炉等。

### 耐磨涂层

摩擦是我们经常遇到的现象。假如没有摩擦，手中的东西会滑掉，人会寸步难行，缝好的衣服会一片片掉下来，开动的车辆停不下来；你也看不到乒乓球比赛中精彩的弧圈球，因为这也是乒乓球运动员巧妙运用摩擦的结果。但可别忘了，摩擦有功也有过。据估计，世界上有 1/3 到 1/2 的能源被摩擦消耗掉。摩擦会带来材料的磨损，这不仅损耗大量材料，而且损坏机器和工程结构，降低工作效率。寻找和研制耐磨材料一直是材料技术专家的一项重要任务。

从耐磨本领来说，无机非金属材料比金属材料不知要高多少倍，但是无机非金属材料一般具有较大脆性，这就影响它作为结构的耐磨材料使用。

能否想个办法，既利用金属材料的韧性和强度，又充分发挥无机非金属材料耐磨性，让它们取长补短，发挥各自的优点。有人想出了办法，就是在金属材料表面覆盖一层由无机非金属材料制成的耐磨涂层。这真是一个好主意。

耐磨涂层的种类很多，使用的材料也各不相同。氧化物中有氧化铬、氧化铝、氧化钛等；碳化物中有碳化铬、碳化钨、碳化钛以及它们和金属的复合物，如含钴量为7%~15%的钴包碳化钨，含铬、镍量为15%~25%的碳化铬等；氮化物中有氮化钛、氮化硅等。它们的抗磨损能力按从强到弱的顺序通常为：氧化铬、碳化钨、氧化铝—氧化钛、氧化铝……

耐磨涂层通常用喷涂的方法制成，即用极高的温度把耐磨涂层的材料熔融，并喷射到金属零件要求耐磨的表面。这些耐磨涂层具有硬度高、耐磨性好、与金属材料结合强度高、耐酸、耐碱、抗腐蚀性强等特点。

耐磨涂层在工业中已经获得了广泛应用。氧化铬涂层主要用于石油化工中泵柱、磨环、轴套的表面防蚀与抗磨损；氧化铝—氧化钛涂层主要用于化学纤维工业中的罗拉、导丝钩等；碳化物涂层主要用于抗气蚀磨损和抗冲击磨损，如航空发动机上许多零件的易磨损部位大量使用了碳化钨或碳化铬涂层；氮化钛涂层主要用于机械工业中的刀具、模具表面，如在硬质合金刀具表面涂覆一层厚度为8~12微米的氮化钛涂层，可提高刀具的耐磨性，使刀具使用寿命延长2~5倍。

## 高温润滑涂层

目前的各种机械，特别是动力和传动机械，正向着高速、高温、高压、高精度的方向发展。但机械的高速转动，会产生大量的摩擦热，工作温度也随之升高。这一方面对制造机械零件的材料的耐热性提出了较高的要求，另一方面给为减少摩擦而使用的润滑油带来了新问题。因为常用的润滑油一般超过200℃就会氧化、挥发，甚至着火燃烧。如果能有一种耐高温的固体润滑剂，固定在机械的运动部位，这不但可以起到减小摩擦的润滑作用，而且可以省掉不时注入润滑剂的操作，那该多好啊！于是，高温润滑涂层应运而生。

所谓高温润滑涂层，是指涂覆在运动物体表面，可在高温（700~1800℃）下减小互相接触的运动物体之间的摩擦力，从而满足某一要求的一类涂层。高温润滑涂层应具备以下三个条件：

- （1）具有高温下的抗氧化能力，具有高熔点和高强度；
- （2）在高温下不易挥发，以保证润滑涂层能长久地附着在运动部件表面；
- （3）摩擦系数小，具有良好的减摩性。

高温润滑涂层通常有玻璃型和陶瓷型两种。玻璃型润滑涂层具有较好的高温润滑性，但抗氧化能力较差；陶瓷型润滑涂层是以氧化物、硫化物、硒化物、氟化物和石墨等具有可滑移晶面的晶体作为润滑介质加粘结剂而组成的，它的高温润滑性相对要差一些，但抗氧化性较好。

高温润滑涂层可用于高温轴承，也可用于金属热加工过程，以降低变形抗力和提高加工质量。

高温润滑涂层又可分为热轧保护涂层、热挤压涂层、高温模锻涂层等。

无机非金属涂层名目繁多，除了上面介绍的外，还有导电涂层、防水涂层、光谱选择涂层、红外辐射涂层、温控涂层、示温涂层、防原子辐射涂层，等等。它们都在各自的岗位上默默无闻地作着贡献。

## 金属园地中的奇葩

### 一发吊千钧的金属晶须

一发怎样吊千钧？原来，它出自成语“千钧一发”。唐朝韩愈《与孟尚书书》说：“其危如一发千钧。”钧是古代重量单位，1钧等于15千克。“千钧一发”比喻把千钧的重量吊在一根头发丝上，你看，情况是多么的危急！然而，在金属世界中，的确有“千钧一发”而又安然无恙的现象。一种胡须那样细的金属晶须，真的能吊起千钧的重量。

### 比钢还强

用于制造桥梁、船舶、飞机、汽车等的金属材料，都要求有较高的强度，即在一定的截面积上能够承受较大的负荷，或者说承受规定的负荷时构件的截面积可以较小，从而使结构轻巧，达到节省材料、提高功效和经济效益的目的。

在冶炼金属时科学家们常设法添加一些合金元素，从而研制出许多新型的合金。他们采用各种热处理方法，改善金属的内部组织，以达到强化材料的目的。此外，还可以使金属冷变形，产生加工硬化现象……这样，就使金属材料的强度水平有了较大的提高。

目前，工业纯铁的抗拉强度为180兆帕。含碳量为0.45%的碳钢，其抗拉强度为600兆帕，经处理后抗拉强度可达850兆帕。如果添加镍、钼、钨等合金元素，高强度钢的抗拉强度可以增加至900~1400兆帕。超高强度钢的抗拉强度为1200~2800兆帕。

在提高金属材料强度的试验过程中，科学家们惊奇地发现，一种胡须状的铁晶须（直径为1.6微米，只有头发丝粗细的1/50~1/40），它的抗拉强度竟能达到13400兆帕，是工业纯铁的70多倍，比超高强度钢高出4~10倍。如果用这样的铁晶须编织成半径为1毫米的线材，能安全地吊起一辆4吨重的载重汽车。这种铁晶须堪称金属世界中的“大力士”。

#### 晶须

晶须也称“须晶”，它是一种直径为几微米到几十微米、长度可达数厘米的单晶体，可以在自然界生成，也可由人工制成。它强度极高，接近晶体的理论强度。因晶须十分细小，故一般不能独立使用，但可编织成线材或与其他聚合物复合成纤维增强复合材料。

### 理想晶体

据说早在200年前，人们在炼铜和炼银的废渣中发现过一种胡须状的金屬晶須。据资料记载，首先发现金属晶须的是1945年在贝尔电话研究所工作的专家们。在20世纪40年代，美国的电话系统经常出现故障，经贝尔电话研究所的专家查明，原来是蓄电池极板表面长出了一些针状晶体，引起了电话线路短路。对这些针状晶体的研究表明，它们和极板属于同样金属，但强度大，弹性好。在显微镜下观察其形状，犹如猫的胡须，故命名为晶须。



经现代的 X 射线衍射技术显示，晶须内部的原子完全按照同样的方向和部位排列。这是一种没有任何缺陷的理想晶体。而在一般金属中，虽说总体上原子是有规则排列的，但局部地方，一些原子的排列并不规则，因而，晶体构造中产生了缺陷。晶体的缺陷有点缺陷、线缺陷和面缺陷三大类。点缺陷是指在晶体空间中，长、宽、高三个方向都存在很小的缺陷，如有的位置上缺少原子（称为空位），另一些位置上有多余原子（称为间隙原子），或有外来原子溶入（称为异类原子）等。线缺陷是指在晶体中某处有一列或几列原子发生了有规律的错排现象（称为位错）。面缺陷主要指在晶粒和晶粒之间的交界面（称为晶界）上，原子呈不规则排列。

由于晶须中的原子排列极为规则，不允许有任何缺陷存在，所以目前仅能制成截面直径为数微米大小的晶须（还不到头发粗细的 1/10），如果再粗些，就会出现原子的不规则排列，使其强度迅速降低。

应该说明的是，金属和非金属单质，以及氧化物、碳化物、氮化物等化合物都能用来制造晶须。目前人们已利用 30 多种单质材料（如铁、铜、镍等金属和石墨），以及数十种化合物（如碳化硅、氮化硅、三氧化二铝等）制出了晶须。

晶须可以通过金属晶体长时间放置而自然得到，也可以通过人工方法制造。常用的制造晶须的方法有两种：一是蒸发—凝固法，它是在真空或惰性气体环境中，使晶须原料升华或蒸发成气体，再使气体在低温下凝固成晶须；二是化学反应法，是将晶须原料与炉内气体起还原反应，从而长出晶须。如铁晶须是在含结晶水的三氯化铁中加入三氧化二铁，再通过氢的还原而制得的。

## 高强度的奥秘

晶须之所以受到科学家的高度重视，原因是它具有一般金属无可比拟的高强度。

那么，晶须高强度的奥秘又在哪里呢？

让我们来到金属的微观世界，考察一下金属晶须高强度的奥秘吧。

### 长达数十年的“冤案”

早在 1920 年，一位叫弗兰克的金属学家就根据金属的塑性变形（一种不能恢复原状的变形）必须使外力大于晶体原子间的结合力的原理，提出了金属理论强度的概念及其计算公式，事实上他计算的就是晶须的强度。但是弗兰克算出的理论值比一般金属的实际强度高出数千倍，以致有人怀疑他计算的正确性，因而招来了许多非议和攻击。弗兰克就此经受了长达数十年的冤屈。直到 20 世纪 40 年代，人们发现了晶须，而到 20 世纪 50 年代，又研制成功了电子显微镜，并拍摄到第一张显示晶体缺陷（位错）的电子显微照片，弗兰克的理论才得以正式确认，他的计算值与实测值之间的差别才得到了合理的解释。这说明科学的道路并不总是平坦而又阳光普照的，只有那些不畏险阻、敢于坚持真理的人，才能最终赢得胜利。

金属原子的最外层电子数很少，一般只有 1~2 个，最多不超过 4 个，而且这些最外层电子和原子核的结合力较弱，很容易脱离原子核的束缚，组成

所有原子共有的“电子云”。金属原子因为失去最外层电子而成为正离子。正是依靠正离子和电子云之间的强大吸力，才把金属原子紧密地结合在一起。对金属晶须而言，由于它是一种理想的晶体，全部原子各就各位，阵容排列整齐，组成了一道坚不可摧的防线，故只有当外力增加到使一部分原子相对于另一部分原子作整体移动时，才能产生塑性变形或断裂。而在一般金属中，存在着这样或那样的晶体缺陷，在不大的外力作用下，只要使少数原子发生短距离的移动，就可以像“千里之堤，溃于蚁穴”那样导致塑性变形或断裂，因而表现出较低的强度。

### 深刻启示

目前人们已能制造出一些极细的金属晶须，可用它们编织成较大的线材，或让晶须作为增强材料与其他材料组合成复合材料，这些新材料已在生产中获得了可喜的应用。

但这仅仅是开始，科学家们正面临一条更为艰辛的晶须实用化的道路。寻求具有较大生产规模的制造晶须方法，优化晶须制造的工艺过程，生产更粗更强的晶须，扩大晶须的应用范围，深入开展晶须的基础理论研究……这些都是摆在人们面前的新课题。

纤细的金属晶须，却给我们以十分深刻的启示。它的出现犹如远航在茫茫的科学海洋上的人们透过浓雾而看到的一丝曙光。晶须给我们带来了信心和希望，它的存在，显示了大幅度提高金属强度的可能性。目前，金属材料的强度潜力远远没有充分发挥。如果我们能有效地减少金属的晶体缺陷，制造出可供直接应用的理想晶体，那就无异于增加了数十倍、数百倍的金属材料产量，甚至从根本上改变人类的生活环境和条件。到那时，地球上将会出现许多轻巧的薄壳建筑结构，机器不再是那样笨重和庞大，摩托车和轿车可以折叠起来随身携带，航天飞机和宇宙飞船神速地来往于星际之间，人类的活动场所向着无限宽阔的宇宙空间延伸，出现许许多多目前人们意想不到的事情。

### 彩色不锈钢

钢铁又称“黑色金属”。实际上，钢铁的断口一般不是黑色的，而是亮白色的，只有灰口铸铁的断口才是暗灰色的。那么，为什么把钢铁称为“黑色金属”呢？这是因为铁的表面常常生锈，形成一层由黑色的四氧化三铁与棕褐色的三氧化二铁组成的混合物，看上去是黑乎乎的，所以称作黑色金属。如何才能得到亮白色的钢铁呢？首要的任务是防锈。科学家设法在炼钢时添加铬、镍等元素，制造出了不怕酸、碱腐蚀，永远亮晶晶的不锈钢。然而，随着科技的发展和物质生活的提高，生活用品、建筑装潢用品都要求“多样化、高级化、个性化”，色彩鲜艳，具有艺术魅力。所以各国科学家正在打破传统观念，寻找研制彩色钢铁的方法。下面介绍的是一种已经获得实际应用的彩色不锈钢。

### 为什么呈彩色

说起彩色不锈钢，你可别以为只是在不锈钢表面涂上一层五彩缤纷的油漆，其实这样做不但会失去不锈钢固有的金属光泽，而且油漆不耐磨，天长日久还会一块块剥落下来。

也许你有这样的经验：当水面上浮着一层薄薄的油膜时，虽然油膜本身是无色透明的，但在阳光照射下，会看到彩虹似的颜色。其实这是一种光的干涉现象。

原来，白光是由红、橙、黄、绿、蓝、靛、紫七种颜色组成的复色光。当一束平行光线照射到薄膜表面时，一部分光线  $I_1$  从上表面反射回来，另一部分光线  $I_2$  进入薄膜，再从下表面反射回来，共同形成干涉光  $I$ 。如果干涉光中两列光波正好是波峰与波峰或波谷与波谷相遇，光波的振动便得到加强；相反，如果波峰与波谷相遇，光波的振动便会减弱。白光产生上述干涉现象后，究竟何种颜色的光波被加强，这主要取决于薄膜的厚度。因为白光中每种色光的波长不同，白光通过某一厚度的薄膜反射，使某一波长的色光振动加强，就出现了这种颜色的光；白光通过另一厚度的薄膜反射，另一波长的色光振动得到加强，就呈现出另一种色光。水面上油膜一般是厚薄不匀的，于是我们就看到了油膜反射出来的“七色彩虹”。能不能利用这个原理，在不锈钢表面也形成一层薄膜，使它呈现彩色呢？

## 工艺方法

科学家正是根据上述光的干涉原理，设法在不锈钢表面形成一层无色透明的致密薄膜，研制成功了彩色不锈钢。他们所用的方法是酸性浴氧化着色法。这种方法主要包括着色处理和硬膜处理两个步骤。

着色处理是在热铬硫酸溶液槽中进行的。常用的着色液是由一定浓度的硫酸和三氧化铬配制而成的，着色液的温度应保持在  $70 \sim 90$ （一般为  $80$  左右）。对着色的不锈钢的合金含量也有一定的要求（含铬量应大于  $13\%$ ，含铁量应大于  $50\%$ ）。为了获得理想的着色效果，不锈钢表面应光洁，无油垢，一般要预先进行抛光加工。

将不锈钢浸渍在热铬硫酸溶液中，就在不锈钢表面生成一层薄薄的无色透明氧化膜。可别小看这层厚度只有头发丝直径几百分之一的氧化膜，随着浸渍时间的延长，氧化膜厚度增加，不锈钢表面就呈现出了不同的颜色。例如，氧化膜厚度从  $0.2$  微米增加到  $0.4$  微米时，将产生以下的色序：蓝色 金色 红色 绿色。按照所要求的表面色彩，可通过试验来确定浸渍时间，不必具体测定氧化膜的厚度。

经着色处理后的不锈钢应立即在水槽中将着色液清洗干净，否则又将引起颜色的变化。经着色处理的氧化膜比较柔软，存在微小的孔隙，不够致密，所以必须接着进行下一步的硬膜处理。

硬膜处理的目的是提高氧化膜的耐磨性、耐蚀性和耐热性。在含磷酸和三氧化铬的水溶液中，将已经着色处理过的不锈钢作为阴极，铅板作为阳极，通以一定的电流，经过  $10$  分钟左右，就可以在阴极上生成三氧化二铬、氢氧化铬等稳定化合物，它们填塞了氧化膜中的微小孔隙。应该指出的是，经硬膜处理后，不锈钢的颜色有所变化，故在着色处理时必须预先考虑到这一情况，才能获得理想的效果。经硬膜处理后的不锈钢，要立即清洗和干燥，以免影响彩色不锈钢的色调和光泽。

## 质量优异

彩色不锈钢的最大优点是在保持固有金属光泽的前提下，显得色调艳丽、柔和高雅，令人获得美的艺术享受，这种颜色经长时间紫外线照射也不会褪去。

彩色不锈钢的耐蚀性比未经着色的原材料强。它对光照、气候变化和时间效应不敏感，长期暴露在恶劣环境中，色膜也不会破裂。有人将彩色不锈钢在污染严重的环境中和海水里进行长达 6 年的“暴露试验”，结果仍然安然无恙。

彩色不锈钢还具有良好的耐热性。在 100℃ 沸水中浸泡 28 天，或在 150℃ 干燥条件下暴露 35 天，或在 200℃ 干燥条件下暴露 21 天，或经 200~300℃ 高温的短时间处理，都能保持原有的色调和光泽。

彩色不锈钢还经受了不同的磨损试验，证明它确实具有较好的耐磨性。例如，用负荷 5 牛顿力的橡皮摩擦着色氧化膜，擦了 200 多次仍未擦穿；用钢针刻划着色氧化膜（这枚钢针上施加了 0.5~1.2 牛顿的力），着色氧化膜安然无事；用彩色不锈钢制成的烟灰缸经两年以上的使用试验，也没有发现明显的磨损现象。

彩色不锈钢的着色氧化膜致密度高，吸附力强。它能经受 180℃ 下的疲劳弯曲试验，直至不锈钢产生断裂，而着色氧化膜仍未剥落。在采用适当的表面保护措施的情况下，可对彩色不锈钢进行冲压、弯曲、拉伸、冷作、轧制等变形加工，制成螺钉、螺母、铆钉等彩色不锈钢机械紧固件。

### 五彩缤纷的装饰品

彩色不锈钢不仅可用于高层建筑、桥梁结构、室内外装潢、商品广告、橱窗陈列、体育用品、工艺美术品，还可以制成机械零部件，适合于机器造型设计和包装，小轿车、摩托车、自行车、照相机、钟表和各种家用电器都可以用彩色不锈钢来装饰。

## 前程似锦

酸性浴氧化着色法是 1927 年由英国国际镍公司首先提出并获得专利的，其工业产品于 1972 年投放市场。近年来，美国、日本、印度等国家积极研制和推广彩色不锈钢，使其从实用化走向商业化，市场前景一片看好。

在我国宝岛台湾的台北市，耸立着金碧辉煌、气派豪华的亚洲信托大楼，其外壁和窗框都是采用金色不锈钢制成的。在美国华盛顿的国立宇航博物馆，矗立着一座 30 米高的金属结构塔，它也是采用彩色不锈钢建造的。更值得一提的是，美国得克萨斯州休斯敦市的一幢用彩色不锈钢装潢的 21 层大楼，由于阳光照射角度不同，从旭日东升到日落黄昏，大楼的色调显示出红、橙、黄、绿、蓝、靛、紫七种颜色的连续变化，交相辉映，十分壮观，它展示了建筑装饰从单色到彩色，从静态到动态的变革，给城市“穿戴上新装”，进一步美化了生活环境，深受人们的喜爱。

彩色不锈钢对阳光具有高度的选择性，它能吸收可见太阳光光谱中 90% 的入射光线，使光能高效率地转换成热能，因而又是一种优秀的太阳能吸收

材料，可用于制造太阳能吸收装置，或用以制造以太阳能为能源的农业饲料和谷物的干燥设备。由此可见，在缓解日益紧缺的能源危机和改善地球的环境污染方面，彩色不锈钢也能作出它特殊的贡献。

我国对彩色不锈钢有着广泛的需求市场。专家们决心生产出更多更好的彩色不锈钢，为祖国的四化建设添砖加瓦，让我们的日常生活变得更加绚丽多姿，日益美好。

## 像玻璃那样的金属

看了这个题目，你一定会奇怪：玻璃和金属是两种截然不同的材料，风马牛不相及，为什么要硬把它们扯在一起呢？但看了下面的介绍，你便会明白。

### 什么是金属玻璃

玻璃是大家熟悉的材料，在房屋建筑、室内装潢、日常生活等方面人们都要用到玻璃制品。玻璃的主要成分是硅酸钠和硅酸钙，故属于硅酸盐材料。

你知道玻璃瓶是怎样制造的吗？工人们首先将玻璃加热，随着温度的升高，玻璃逐渐软化、熔融，成为一种糊状体；他们再将压缩空气经过管道通入糊状体，像吹肥皂泡一样，把小泡泡变成大泡泡；最后依靠模具的帮助获得具有一定形状的玻璃瓶。从上述过程中我们可以看出，玻璃从液态到固态是连续变化的，没有明确的分界线，即没有固定的凝固点（或熔点），这是因为固态玻璃与液态玻璃相似，原子都呈无序的紊乱排列。

在通常的情况下，液态金属冷却凝固时，原子按一定的规则排列，成为晶体，所以金属凝固又称金属结晶。金属的许多特性都是由其内部的晶体构造决定的。

1960年，美国科学家皮·杜威等首先发现某些液态贵金属合金（如金硅合金）在冷却速度非常快的情况下，当金属内部的原子来不及“理顺”位置，仍处于无序的紊乱状态时，便马上凝固了，成为非晶态金属。这些非晶态金属材料具有类似玻璃的某些结构特征，故又称为“金属玻璃”。金属玻璃具有许多独特而宝贵的性能，是一种极有发展前途的新型金属材料，并已在生产中初露锋芒，得到一定的应用。它的出现具有深刻的理论意义，它为金属学增添了新鲜内容，可说引起了金属材料发展史上的一场革命。

### 金属玻璃的制备方法

目前生产中制备金属玻璃主要采用“液体急冷法”。这是一种将金属液体以  $1 \times 10^5 \sim 1 \times 10^6$  /秒的速度快速冷却、凝固，以获得金属玻璃的方法，用它可以生产带状和丝状金属玻璃制品。具体有三种常用的方法。一是单辊法，即将液体金属从喷嘴中喷射到高速旋转的圆辊面上，因为辊面的温度很低，液体金属一接触到辊面就快速冷凝，在离心力的作用下被抛离辊面，形成厚度为 15~40 微米，宽度为 5~100 毫米，尺寸可以调整控制的金属玻璃薄带。

二是双辊法，此法也生产带状制品。与单辊法不同的是，液体状金属喷射到两辊间隙处，进行双面冷却和压延。

三是水中拉丝法。金属玻璃丝有独特的用途，但难以用上述的辊面冷却方法制作，故常用水中拉丝法制作，即把液体金属连续注入冷却水中，直接获得金属玻璃丝。

用这些方法制备金属玻璃，与传统的冶金方法比较，省去了浇注、开坯、轧制、拉拔等多道工序，生产过程简化，效率高，耗能少，成本低。

我国已于 1988 年研究成功自动卷取金属玻璃带的技术及其装备，并建成

年产 100 吨金属玻璃带的生产线，可喷制宽度为 100 毫米的金属玻璃薄带，自动卷取单卷 91 千克的带材。近年来，在研制块状金属玻璃材料方面也获得了可喜的进展。人们用爆炸烧结法、超声波及激光焊接技术制备大块金属玻璃，也用高能电子束和激光束照射大块金属晶体，以获得表层为金属玻璃的复合材料。

制备金属玻璃必须重视材料成分的选择。并不是所有的金属材料都能制备成金属玻璃，如用纯金属就要求冷却速度大于  $1 \times 10^{10}$  /秒，而且即使制备成金属玻璃，由于非晶态结构不稳定，在室温时又会回复到晶体状态，所以目前在制备金属玻璃的生产中应用较多的材料是以铁、钴、镍为主要元素，加入少量硼、硅、磷、碳等组成的合金。

### 优异的磁性材料

金属玻璃具有优良的磁学性能，如磁感应强度和磁导率高，热稳定性好，同时还具有较高的耐磨性和耐腐蚀性，再加上目前主要生产的是带状和丝状金属玻璃制品，故适宜用作磁性材料，如铁芯、磁头、电极、磁盘等。如果用金属玻璃制成收录机的磁头，可以避免磁头尖部的脱落现象，能降低磁头与磁带摩擦发出的噪声，虽然称不上是永不磨损的磁头，但肯定能延长使用寿命，并带来优美、清晰的音质和理想的音响效果。用金属玻璃制作的电磁传感器，已成功地应用在城市交通信号自动控制装置的探头上，同用其他材料制作的探头相比，电路电压降低一半，输出信号强度增加 2 倍，作用距离延长 1 倍，成本仅为后者的 1/10 左右。此外，金属玻璃还可以代替石英制作雷达、计算机的导声材料、敏感元件等。

如果你仔细观察电动机、变压器的结构，会发现它们的铁芯都不是整块金属，而是用许多薄硅钢片叠合而成的。这是因为交流电通过导线时，电磁感应会在铁芯中产生涡电流，块状铁芯中电阻很小，涡电流很强，使铁芯发热，消耗大量电能；而采用由涂有绝缘漆的薄硅钢片叠压制成的铁芯，由于硅钢的电阻率比普通钢大，再加上涡电流被限制在狭窄的薄片之间，回路中电阻进一步增大，消耗的电能只有普通钢的 1/5 ~ 1/4。要是用金属玻璃来代替硅钢片，变压器的空载损耗可减小 2/3。照此推算，如果全国都采用金属玻璃铁芯，每年可节电 100 亿千瓦时，以每千瓦时电 0.5 元计，仅价值而言就节约了 50 亿元人民币，更重要的是缓解了能源紧张的矛盾。金属玻璃具有高饱和磁感、低铁损、低密度和成本低等优点，是制作航空变压器铁芯的理想材料，采用它可以使变压器做得轻巧、紧凑，适合于航空事业发展的需要。

### 胜过不锈钢

金属也会生病，这是一种腐蚀病。钢铁和空气中的氧、水分、二氧化碳等相互作用以后，会变得锈迹斑斑，甚至一块块剥落下来。由于许多酸、碱、盐介质都会严重腐蚀金属，所以据估计，英国每 3 分钟就要腐蚀掉 2 吨钢材，英美两国在本世纪 70 年代共腐蚀掉 4000 万吨钢材，全世界每年因腐蚀而损失的钢铁，约占全年钢铁产量的 1/3。可见，腐蚀对于金属来说是一种多么可怕的“疾病”，它使我们遭受多么巨大的损失！

人们设想了许多防止金属腐蚀的方法，其中一个行之有效的措施是在钢

中添加铬、镍、硅、铝等元素，改善钢的耐腐蚀性能，做成鼎鼎有名的不锈钢。有过这样的试验，把两块质量都是 20 克的不锈钢和普通碳素钢，在煮沸的稀硝酸中放置 24 小时，结果普通碳素钢腐蚀掉 6.4 克，而不锈钢也腐蚀掉 0.2 克。可见，天下没有绝对不锈的金属，不锈钢只不过在通常情况下不易生锈罢了。

实验证明，金属玻璃的耐腐蚀性能远远胜过不锈钢。例如，不锈钢在温度为 40℃、浓度为 10% 的三氯化铁溶液中，每年表层被腐蚀掉 18 毫米，而含铬的金属玻璃在同样情况下竟“固若金汤”，腐蚀速率接近于零。其原因是金属玻璃内部原子呈无序排列，不存在晶体的交界面，也不存在晶体缺陷，腐蚀液体无法“入侵”。再加上含铬氧化物在金属玻璃表面形成了一层致密而均匀的保护膜，所以金属玻璃的耐腐蚀性特别强，是一种有发展前途的高耐蚀材料。

此外，金属玻璃还具有极高的强度，目前铁系金属玻璃的屈服强度约为 4000 兆帕，镍系和钴系金属玻璃的屈服强度约为 3000 兆帕，远远超过了同类的晶态合金的强度。金属玻璃兼有良好的塑性，可经受 180° 弯曲而不断裂。它的抗裂纹扩展能力强，断裂韧性值约为钢的 5 倍，铝合金的 10 倍，硅酸盐玻璃的 1 万倍。金属玻璃作为结构材料和复合材料的日期已经为期不远了。

目前，影响金属玻璃大面积推广应用的因素有以下两个方面，一是缺乏金属玻璃大型块状材料，二是因为金属玻璃的热稳定性差（如铁系金属玻璃的最高使用温度不得超过 650℃），所以，金属玻璃作为一种新兴的、未来的材料，还有许多难题需要我们去研究解决，去作出更大的努力。



## 有“记性”的金属

你一定非常羡慕记性好的同学，因为他能记住大量的外语单词，背诵许多古代诗词，而且从不丢三拉四做“马大哈”……的确，记性对我们的学习和生活实在是太重要了。可能有人要问，难道金属也有“记性”？金属也能靠“记性”为人类作贡献？

请看图中那个烟灰缸。我们知道，吸烟不仅有害健康，而且常因忘了熄灭烟头，酿成火灾。为了防止这种不幸事故的发生，有人用有“记性”的金属制成了这个烟灰缸。你看，当烟头燃至靠近缸边，使它温度升高时，它就会“记起”自己以前的形状，向内弯折，将烟头滑入缸内。这种有“记性”的金属，就是“形状记忆合金”。下面就给你说说神秘的形状记忆合金。

### 意外的发现

60年代初的一天，美国海军军械实验室的研究人员领来一批镍钛合金丝，也许是在制造过程中处理不当，合金丝被弄弯了，他们只能一根一根地将合金丝校直。有人顺手把校直的合金丝堆放在炉子的旁边。这时，意外的事情发生了，一些校直的合金丝在炉温的烘烤下，不一会儿都恢复到原来弯曲的形状。前功尽弃，令人懊丧，于是不得不重新校直合金丝。起初，他们没有领悟到其中的原因，还是把校直的合金丝堆放在炉旁，结果合金丝又变弯了，这种现象重复出现了多次：校直，弯曲，再校直，再弯曲……直到人们把校直的合金丝换了一个地方堆放，不再受到炉温的烘烤以后，合金丝才继续保持挺直的形状。

要是你碰到这种意外的事情，会怎么办？也许，开始时感到奇怪，后来，校直的合金丝不再弯曲了，你便以为问题解决了，也就不再思索了。其实，早在1951年的金镉合金试验和1953年的铌钽合金试验中都出现过类似的现象，却都没有引起人们应有的重视。科学的发现需要我们做有心人，处处留意这些貌似偶然的意外事情，勤于思索，善于思索，透过现象看本质，进行深入细致的研究。

美国海军军械实验室的研究人员正是紧紧地抓住了上述的意外事情，开展反复的试验研究，终于发现了50%镍和50%钛的合金在温度升高到40以上时，能“记住”自己原来的形状。科学家把这种现象叫做“形状记忆效应”。1963年，在一次美国海军科学会议上，他们宣布了自己的研究成果，并向会议代表演示了“形状记忆效应”实验。后来，经过许多科学家的辛勤劳动，人们又发现铜锌铝合金、铜镍铝合金、铁铂合金等也具有“形状记忆效应”。科学家把这类合金叫做“形状记忆合金”。

### 奥秘浅释

形状记忆合金的发现，是对人们长期来形成的弹性和塑性变形的传统观念的一次挑战。就拿我们熟悉的弹簧来说吧，当我们用不大的力去拉弹簧时，弹簧的伸长和受到的拉力成正比，手一放，“啪”的一声，弹簧又恢复到原来的长度。人们把这种外力去除后能恢复的变形叫做弹性变形。如果我们的拉力过大，超过了材料的弹性范围，放手后弹簧不能恢复到原来的长度，弹

簧就损坏了。这种外力去除后不能恢复的变形叫做塑性变形。通常，用钢丝做的弹簧，一旦产生了塑性变形，即使加热也不会恢复到原来的样子。

然而，形状记忆合金具有与一般金属不同的新特性：它们虽然产生了塑性变形，但只要稍微加热（通常只要加热到 20~30℃），便仿佛有记忆似地恢复到原来的形状。这种特性对于传统的塑性变形概念来说，简直是不可思议的。

那么，究竟为什么这类合金能“记住”自己以前的形状呢？要阐明它的机理需要冶金学、金属物理学等多种学科的知识，会涉及到许多专业术语和名词，这些都是科学家们锲而不舍、孜孜不倦研究的课题，至今还有不少问题未能完全搞清楚。

从根本上来说，形状记忆合金的特性是由它的内部晶体结构所决定的。这类合金在一定的温度范围内具有一定的外形，而且，合金内部的原子排列具有同外形相适应的可逆转变结构。形状记忆合金都有一定的转变温度，在转变温度以上，加工成欲记忆的形状，合金内部原子则排列成一种稳定的结晶构造。把它冷却到转变温度以下，施加外力改变它的外形，此时，它的原子结合方式并未发生变化，只是原子离开自己原来的位置，在邻近的位置上暂时地停留着。如果把这种变形后的记忆合金加热到转变温度以上，由于原子获得了向稳定结晶构造转变所需的能量，就又重新回复到原来的位置，从而又恢复了以前的形状。

## 飞向月球

我们的时代正向着浩瀚广袤的宇宙空间进军。1969年7月21日，人类首次摆脱地球引力的羁绊，乘坐“阿波罗”11号宇宙飞船登上月球，在月球上度过了难忘的21小时。此后，人类又先后数次成功地实现了载人的登月飞行，给地球传送了许多珍贵的天体资料和科技信息。在这过程中，鼎鼎大名的镍钛合金充分发挥了“形状记忆效应”的“聪明才智”，为宇航事业立下了汗马功劳。

为了将在月球上收集到的各种信息发回地球，必须在月球上架设直径为好几米的半球形月面天线。然而，要把这种庞然大物直接放进宇宙飞船的船舱中，几乎是不可能的。美国航宇局先用镍钛合金在40℃以上制成半球形的月面天线（这种合金非常强硬，刚度很好），再让天线冷却到28℃以下。这时，合金内部发生了结晶构造转变，变得非常柔软，所以很容易把天线折叠成小球似的一团，放进宇宙飞船的船舱里。到达月球后，宇航员把变软的天线放在月面上，借助于阳光照射或其他热源的烘烤使环境温度超过40℃，这时天线犹如一把折叠伞那样自动张开，迅速投入正常的工作。

## 大显身手

形状记忆合金还是连接零件和管道的能手。用它做铆钉，只要先加热到转变温度以上，把铆钉的两脚分开并弯曲，再冷却到转变温度以下把它拉直，插入被连接零件的孔中，最后再将其加热到转变温度以上，让它记起自己以前的形状，它就会自动地把两个零件紧紧地铆住，免去了锤击的麻烦。这种铆钉尤其适合在具有化学介质、放射性物质或其他恶劣的工作环境中应用。

美国制造的 F—14 飞机上的液压系统管道，由于结构紧凑而无法焊接，用形状记忆合金制造连接套管，解决了这个困难。只要先在室温下将套管内径加工成比管道外径稍小一些的尺寸，再将套管在低温下扩大内径，套在欲连接的管道外面，当温度升高到室温时，套管就像孙悟空头上的那道箍遇到唐僧念紧箍咒那样，紧紧收起，将管道封接得非常严密。迄今为止，人们已使用了 10 多万个形状记忆合金接头，无一损坏，十分安全。

形状记忆合金在医疗器械方面也有着广泛的应用。例如，在治疗骨折的外科手术中，用形状记忆合金制造人工骨骼拉杆，依靠人的体温即可将骨缝接合固定，大大加快了骨折愈合的速度。同样，将形状记忆合金事先连接在弯曲的脊椎骨上，依靠人的体温使合金伸直，就可以达到矫正脊椎骨的目的。而用形状记忆合金来补牙，任蛀洞七弯八绕，也能镶嵌得十分紧密。此外，它还可用于人造心脏瓣膜、人造关节、人工肾微型泵、脑动脉瘤手术钳等。

### 有“记忆”的警报器

人们发现形状记忆合金还能在各种自动调节和控制装置中大显神通，是制造机械手和机器人的理想材料。用它来制造火灾自动报警器，只要周围出现火灾的苗子，它就毫不犹豫地恢复到原来的形状，发出报警的信号。眼下世界各国正在积极发展“生物记忆”、“材料记忆”和“计算机记忆”三大记忆技术，如将形状记忆合金和其他高技术相结合，它必将发挥更大的作用。

形状记忆合金更可以用于能源的开发和利用。美国、英国、比利时等国正在研究固体热能发动机，使形状记忆合金往返于温差为 20 ~ 30 的两个水槽之间，利用它的变形、恢复产生的力量，推动主轴旋转，将机器发动起来。它不需要消耗煤、油等燃料，也不消耗电能，无废渣、废气，不污染大环境，还可利用太阳能、海洋能、地热能等自然资源或工厂的余热。所以形状记忆合金在发生能源危机、公害横行的今天，确实值得开发和利用。

## 金属中的“哑巴”

悠扬悦耳的钢琴声，低沉纤柔的二胡声，清脆婉转的笛子声，激昂嘹亮的军号声……使我们的生活变得丰富多彩。“姑苏城外寒山寺，夜半钟声到客船”，钟声也许真的会给漂泊异乡的游子带来无限的感慨。

声音与我们生活的关系实在是太密切了。可以毫不夸张地说，我们的生活一步也离不开声音，否则人类就会进入因寂静而无法生存的世界。

然而，声音也有对人类不利的一面。随着城市的扩大、工农业和交通的发展，人们时时受到噪声的骚扰。噪声和污水、废气一起被公认为污染环境的当代世界三大公害。人们用金属材料制造各种机器和设备，不幸的是，它们使得噪声污染更为严重。噪声来源于振动，它们是一对“孪生姐妹”。所以，要减少噪声的污染，首先得尽量防止振动和减少振动。为此，目前材料科学家们正在致力于寻找一种“哑巴”金属——防振和减振合金。

### 噪声的危害

钢琴、二胡、笛子、大钟等乐器能发出准确、优美的音响，令人愉悦。然而，绝大部分用金属制造的机器和设备，在加工和使用过程中却产生出对人类有害的噪声。

噪声，从物理性质上看，是由声源作无规则的非周期性振动而产生的，听起来有嘈杂、刺耳的感觉。从环境保护的角度看，人们把一切对生活和工作有妨碍的声音都算作噪声。其实，在我国约 2000 年前的文献中已有关于噪声的记载。例如《说文》中把“噪声”的含义明确解释为“扰也”，《玉篇》中解释为“群呼烦扰也”。

噪声的危害性是多方面的。首先，噪声会影响身体健康，产生头痛、脑胀、耳鸣、眼花等症状，引起心律不齐、高血压、冠心病、消化不良、胃溃疡等疾病，严重时还会导致鼓膜破裂、双耳变聋、脑震荡、休克和死亡。其次，噪声对正常生活和工作产生干扰，噪声使人心烦意乱、注意力不集中，妨碍休息和睡眠。第三，特强噪声会损坏仪器设备和建筑结构，带来灾难性的破坏。例如，火箭和宇宙飞船的机械结构，在特强噪声作用下，会产生“声疲劳”，使材料或结构产生疲劳断裂；当超音速飞机在低空掠过时，引起的“隆隆声”相当于炸弹爆炸，会使门窗损坏、墙面开裂、屋顶掀翻、烟囱倒塌。据统计，在机械制造业中，近 80% 的事故和设备损伤与噪声、共振有关。

噪声可通过空气振动和固体振动两种途径传播，而对付噪声，则有吸收和反射两种方法。对于空气中传播的噪声，可采用隔声和吸声材料加以隔离；对于固体振动引起的噪声，则采用防振和减振材料加以消除。

### 此物无声胜有声

首先，我们将金属材料和高分子材料（如塑料、橡胶等）进行比较。金属材料的强度高，适合于作为工程结构和机械零件的材料，但它的振动衰减性差，容易产生振动和噪声。若要振动衰减性好，可以采用塑料，但塑料无法用在强度要求高的场合。所以，人们为了兼顾高强度和振动衰减性好这两方面的要求，开始研制防振合金。这种防振合金可利用金属本身所具有的高

减振性能，来达到减振、消声的目的。防振合金又称“减振合金”、“阻尼合金”、“无声合金”、“消声合金”、“安静合金”等。目前生产中应用的防振合金有数十种，例如有减振和强度兼优的锰铜合金、镍钛合金，有常作为机床床身、机器底座的灰口铸铁，有用于制造立体声放大器底板的铝锌合金，也有作为蒸汽轮机叶片材料的铬钢，更有用作火箭、卫星上精密仪器防振台架的镁锆系合金等。

锰铜合金是一种目前被认为性能较好的防振合金。据说，当初有一块含锰量为 80% 的合金掉在地上，并未发出多大的声音，因而引起了人们的兴趣。从此，美国矿山局开始研究它，英国有关方面也研究它。结果，英国研制成功了含 54.25% 锰、37% 铜、3% 铁、1.5% 镍的合金，这种合金被称为“索诺斯同”（Sonoston）；美国研制成功了含 40% 锰、58% 铜、2% 铝的合金，该合金被称为“因克拉谬特”（Incramate）；而上海交通大学则研制成功了我国自己的锰铜合金。

锰铜合金之所以具有优异的减振性，是因为它的结晶构造进行了重新排列，依靠容易移动的晶体界面及在运动过程中产生的能量损耗，对振动起到阻尼作用，从而能有效地吸收噪声。生产中常用振动波传递过程中振幅的衰减程度来计算材料的减振系数。减振系数愈大，则材料的减振性愈好。据测定，锰铜合金的减振系数为 40%，低碳钢的减振系数仅为 4%，锰铜合金的减振性竟是低碳钢的 10 倍。

锰铜合金是名副其实的金属中的“哑巴”。用锤敲打锰铜合金，如同敲打橡胶那样沉闷，即使使劲把它摔在水泥地上，也只发出轻微的“噗噗”声。用锰铜合金制造潜水艇的螺旋桨，无论转速多高，都不会发出声响，从而不易暴露目标，增加了潜水艇活动的隐蔽性。用锰铜合金镶嵌在燃气轮机或凿岩机钻杆的轴承套上，机器开动时，它“不动声色”，可降低噪声几十分贝，为延长机器寿命和改善劳动条件“默默无闻”地作出了贡献。圆盘锯、链式输送机、高速纸带穿孔机等许多机器，都是锰铜合金大显身手的用武之地。它还可以制成防音车轮，悄悄来，悄悄去，整日“哑口无言”，为降低城市噪声，维护宁静的生活环境立下了汗马功劳。

### 铸铁的减振性优于钢

铸铁和钢都是黑色金属的家族成员。从化学成分讲，它们都是铁碳合金，含碳量大于 2% 的铁碳合金称为铸铁，含碳量小于 2% 的铁碳合金则是钢。铸铁的种类很多，常用的是灰口铸铁，其中的碳主要以石墨形式存在，因其断口呈暗灰色而得名。比较灰口铸铁和钢的内部结构，可以得出结论：灰口铸铁组织相当于在钢的基体上分布着石墨。从分析石墨的作用着手，我们可以比较容易地了解铸铁有别于钢的许多特点。铸铁的减振性能优于钢，主要也是因为铸铁中的石墨具有吸收振动能量的本领。

也许你有这样的经验，把耳朵贴在钢轨上，能听到远方火车的滚滚车轮声，这是因为钢的内部结构比较紧密，是一种“连续”的物质，能把火车开动的声音（实际上是声波引起钢轨的振动）以 5000 米/秒的高速度传到你的耳中，它比声波在 20 空气中的传播速度（344 米/秒）快得多，说明钢传递振动的能力强，也就是减振性差。而铸铁中存在石墨，情况就不同了。石墨作为一种非金属夹杂物，破坏了合金组织的连续性，石墨的强度比起金属来

差得多，可以近似地把它看成为“微小的裂缝或空洞”，所以振动在传递时碰到石墨只能“绕道而行”，再加上石墨本身非常松软，在振动时会反复变形，从而把振动能变成热能而散发掉。石墨的数量愈多，吸收的振动能愈多，这样就起到了减振的作用。据测定，铸铁的减振系数为 19%，低碳钢的减振系数为 4%，也就是说铸铁的减振性接近于低碳钢的 5 倍。

铸铁内分布有较软的石墨，属于复合型防振合金。铸铁常用来制造要求减振性好的机床床身、机架、箱座、壳体等。例如，在精密磨床上用砂轮可以磨削出平滑如镜的工件（称为镜面磨削），它的尺寸误差只有头发丝粗细的几百分之一，在磨削时要求磨床非常平稳，不允许较大的振动。这时就请铸铁来“帮忙”，它能非常称职地充当精密磨床床身材料的“角色”，任你砂轮飞速转动，火花四溅，铸铁床身巍然屹立，稳稳地托住工件，即使有什么“风吹草动”，也能吸振、消振，起到缓冲作用。铸铁成了减振能手，到处受到机床工人的欢迎。

### “ 三明治 ”

上面介绍的防振合金是把原来“发声”的金属变成“哑巴”金属，令噪声无法产生或使其减弱，但这有时不一定能完全达到降低噪声的指标。那该怎么办呢？可以用吸声材料和隔声材料把噪声源封闭起来，不让噪声传出去，这种做法同样可达到降低噪声的目的。“三明治”式的减振钢板就起到这样的作用。

说起“三明治”，你也许知道，这是一种大众化的西式点心，一般用两片面包，中间夹上荷包蛋、火腿片、番茄片或蔬菜、果酱等配制而成。传说，在 18 世纪时，英国贵族三明治伯爵四世，因终日玩牌顾不上吃正餐，只好用这种快餐点心充饥。想不到这消息不胫而走，人们感到吃这种点心既经济又节省时间，就以三明治的名字命名。因此，“三明治”点心很快地在世界各地流行起来。

我们所说的减振钢板，与“三明治”有某些相似之处。它是在两块钢板间夹有或涂有一层薄薄的树脂而组成的复合钢板。树脂能吸收振动能并将其转化为热能，同时多层界面本身也具有减振吸能的作用。这种减振钢板把树脂优异的减振性能和钢板的高强度巧妙地结合在一起，取长补短，相得益彰。为了减少汽车振动和降低噪声，这种减振钢板在汽车工业中获得了广泛的应用。它的厚度为 0.2~1.2 毫米，中间的树脂层厚度为 0.04 毫米。用这种减振钢板制成的零件和用普通钢板制成的零件相比，振动噪声一般可降低 3~5 分贝。1989 年，日本在某些高级轿车上采用这种减振钢板，使噪声降低 10~15 分贝。

还有一种简易的减振钢板，只是在钢板的一面涂上或贴上树脂等减振材料。

也有人把这种“三明治”式或简易的减振钢板，再与吸声效果好的纤维材料、泡沫材料等组合，制成隔声镶板。

这些减振钢板或隔声镶板广泛应用于需要消声、隔声、减振的场合，如用于制造机器板材或构件、发动机转动部件或家用电器等，也可用于建造电子计算机机房、打字机室、电话交换台室、体育馆、宾馆卧室、会议厅，以及居住区附近的高架公路或高速公路的防噪装置等。

## 金属中的“变形能手”

金属给人的一般印象总是硬邦邦的样子，连形容“坚硬”都说“像钢铁那样”。下面要介绍一种“超塑性合金”，它能像面粉团、麦芽糖那样柔软，称得上是金属中的“变形能手”。

### 双重性要求

金属常常用作工程结构和机械零件的材料。你看，东方明珠电视塔巍然屹立在黄浦江边，大吊车把成吨的钢铁轻轻抓起来，万吨远洋巨轮经受了台风的考验胜利归航……这些都是因为金属具有较高的强度和刚度，能在外力的作用下不变形、不断裂，因而经久耐用。所以，从使用角度来说，人们要求金属强而硬，这样可以减轻构件的自重，节省材料，延长寿命。

可是，你别忘了这些工程结构和机器零件都是制造出来的，有一种制造方法被称作“压力加工”，即在外力作用下使金属产生塑性变形，以获得具有一定形状和尺寸的毛坯或零件。像起重机的吊钩、机器的主轴、轿车的外壳等都是用这种方法生产的。所以，从制造角度来说，为了适合于压力加工，就要求金属塑性好，容易变形，这样可以做成复杂的形状，变形时较省力，消耗的能量也较少。

由此可知，对金属材料的要求是双重性的：在制造过程中要能像面粉团、麦芽糖一样柔软，制成后使用时又要求坚固耐用。如果说，前者要求软，那么后者就要求硬。对金属的这种时软时硬的双重性要求能否予以满足呢？人们能否找到这种软硬兼顾的金属材料呢？能。这就是超塑性合金。

### 什么是超塑性合金

要想知道什么是超塑性合金，须先介绍一下“塑性”的含义。所谓塑性是指材料在外力作用下产生永久变形而不致引起破坏的性能。塑性常用伸长率（单位长度的伸长量）来衡量。例如，原来长度为 100 毫米的金属材料，拉断后再接起来的长度为 120 毫米，则该材料的伸长率为 20%。对普通的金属材料来说，黑色金属的伸长率不超过 40%，有色金属不超过 60%，即使在高温时也达不到 100%。而超塑性合金的伸长率可达 1000%~2000%，个别的高达 6000%。迄今为止，对超塑性合金尚没有严格确切的定义，目前一般是指在一定温度和变形速度的条件下，在断裂前具有异常大伸长率（对黑色金属来说大于 100%，对有色金属来说大于 200%）的合金。1920 年，德国科学家罗森汉在研究锌铝铜合金时，在温度为 250 的条件下，以非常缓慢的变形速度对其进行拉伸，发现了这种材料具有超塑性的奇异现象，伸长率竟可达 1000%。1945 年苏联科学家包奇瓦尔等提出了“超塑性”的概念。到目前为止，人们至少已发现了 170 多种超塑性合金，如锌合金、铝合金、钛合金、镍基耐热合金、铁基合金等。

### 超塑性合金的分类

在通常情况下，金属是不具备超塑性的。所以，金属的超塑性是在特定

的条件下发生的。根据金属材料的结构和变形条件（温度、应力），可将超塑性合金大致划分为两大类。第一类是微晶超塑性合金。这种合金产生超塑性的条件是：变形温度要高（这个温度大约是熔点绝对温度的0.4~0.7倍）；变形速度要低；材料的晶体结构应为微细晶粒。第二类是相变超塑性合金。这种超塑性合金虽不具有微细晶粒，但它在加热到一定的温度时，其内部结构会发生变化。

纯铁、碳钢、铸铁及合金钢等都属于相变超塑性合金。例如，含碳量1.3%的碳钢，在650~900℃变形，便获得了500%的伸长率。铸铁一向被认为属于脆性材料，是无法锻造的，但当它变成超塑性铸铁后，在600~800℃变形后，也可获得很大的伸长率。

### 超塑性合金的应用

超塑性合金适合于各种形状复杂的零件及薄壁零件的成形。例如钛合金，它具有强度高、密度小、耐蚀性好等优点，是目前航天器、飞机、导弹等设备的重要结构材料，但它属于难加工的材料，用普通的压力加工方法难以生产出形状复杂的零件。人造卫星的球形燃料箱，厚度只有0.7~1.5毫米，只有采用超塑性加工法才能成形。又如，用钛合金制造飞机隔架，若采用普通锻造法，对每个隔架来说，需要先锻成158.8千克的毛坯，再进行机械加工，而用超塑性模锻，只需227千克材料即可锻出，每个隔架能节省材料136.1千克材料。B—1喷气式飞机的舱门、尾舱、骨架，原用100个零件组装而成，现用超塑性加工，可一次成形，这使尾舱架的重量减轻了33%，成本降低了55%。

由于超塑性合金表现出优异的塑性，故一次变形就可达到极大的变形量。以前要用几次“深冲”工序加工才能形成的中空杯状零件，现在只要一次就能完成。以前进行拉拔加工时都要将坯料通过拉拔模孔成形，现在可采用无模拉拔方法。将受拉的线材一部分置于加热用的感应线圈中，在超塑性温度下，一边移动感应线圈加热，一边拉拔，被拉长的部分随即喷气冷却，这样将感应线圈从线材的一端移动到另一端，就完成了全部的拉拔过程。依靠调节拉拔速度和线圈移动速度，就可以获得各种截面尺寸。

超塑性合金的变形抗力非常小，通常只有一般金属的几分之一，甚至几十分之一，因此大大减小了成形压力。同时，它还减少了工序，精简了设备，节约了能源。例如，锌铝合金（含铝22%）采用通常的冲压成形方法需要40~50兆帕的压力，而利用超塑性加工只需要0.1~0.2兆帕的压力，它可以用1~2个大气压（1个大气压合101.325千帕）的压缩气体进行吹塑成形。



## 未来的能源“仓库”

目前，能源问题已受到世界各国的高度重视。因为半个世纪以来，能源的消耗量急剧增加，石油、天然气和煤等在地球上的储量正面临耗尽的危险。据估计，石油和天然气尚够使用 50~100 年，煤的储量较丰富，也只能再用几百年。因此，开发和利用新能源已提到了人类的议事日程上。人们自然想到了取之不尽、用之不竭的氢能，为了解决氢能的储存问题，储氢合金应运而生。

### 第一号元素的功勋

你一定知道元素周期表中的第一号元素——氢。氢原子的构造最简单，由原子核和一个电子构成，原子量为 1.0079。氢是所有元素中最轻的，通常以气态存在。

说到氢的发现还有一段历史呢！约在 400 多年前，瑞士科学家巴拉塞尔斯在试验中发现铁片和硫酸作用以后会产生大量气泡，但当时并不知道这是什么气体。1766 年，英国科学家卡文迪许开始对这种气体进行研究，了解到这种气体能在空气中燃烧，并生成水，故称它为“燃素化水”。1780 年，法国化学家布拉克把这种气体灌入猪膀胱中，制成气球，飞向天空。1783 年法国化学家拉瓦锡进行深入研究，把这种比空气还轻的气体定名为氢。同年，世界上第一个载人的氢气球飞上蓝天，成为对大气层进行研究的有力工具。1935 年，英国探险家斯蒂文和安特逊乘坐氢气球到离地 2.2 万米以上的高空进行探险。在第二次世界大战期间，氢气球还作为防空武器，为取得反法西斯战争的胜利立下了汗马功劳。

值得一提的是，氢作为一种崭新的干净的燃料，不仅能够燃烧，而且在燃烧中只产生水，没有烟尘和废气，不会污染环境。氢是一种发热值很高的燃料，燃烧每千克氢可产生 14 万千焦的热量，这一发热值是煤发热值的 4 倍，汽油发热值的 3 倍。氢在大自然中分布很广，泥土、石油、煤炭、天然气、动物和植物里都有氢，水中含有 11% 的氢，地球表面的 70% 以上被水覆盖着，全世界的海水就有 137 亿吨。氢燃烧生成的水又可循环使用，任何时候都不会有氢能枯竭的危险。

目前，人们在开发氢能方面主要碰到两个问题。一个是氢的制取，另一个便是氢的储存。

现在世界上氢的年产量约有 3600 多万吨，其中绝大部分取自石油、煤炭和天然气，要消耗地球上储量本已不多的能源，实在不够经济。所以各国科学家正在寻找新的制氢方法。其中，利用太阳能直接分解水的制氢方法最有发展前途。日本科学家用凹镜把太阳光聚集起来，产生 3000 以上的高温，使水分解，产生大量氢气。还有人提出，先用太阳能发电，再用发出的电能来电解水制氢，这种方法也引起了科学界的重视。生物学家还利用某些藻类植物的光合作用从水中制氢，某些微生物在阳光照射下，也会将水分解出氢。总之，科学家想尽了一切办法，设法寻求最经济、最实用的制氢方法，人们相信，只要继续探索，成功的日子一定会到来。

### 把氢储存起来

通常情况下，氢是气体，重量非常轻，只有同体积空气重量的  $1/14.5$ ，如果把它加压到 150 个大气压，储存在高压钢瓶中，所装氢气的重量还不到钢瓶重量的  $1/100$ 。这种钢瓶携带和使用起来很不方便，储存的氢气又不多，很快就用完了。氢气如同一匹性情暴躁的烈马，遇到火花或与氧气、氯气等混合，就会引起爆炸，使用起来不够安全。所以，直接把氢气储存在高压钢瓶中，不是一个好办法。

既然氢气不便储存，能否把它液化后储存起来呢？早先，人们在常温下加压，使氢气液化，但无论加上多大的压力，还是无法将其液化，以致有人误认为氢只能以气态存在。但科学是从来不会捉弄敢于进取的人们的，经过不断试验，到 1900 年，英国化学家杜瓦确定氢气液化的临界温度为  $-239.9$

。在该温度以下对氢气加压，才能把它变成液氢。如果在常压下，氢气要到  $-252.64$  下才会变成液氢。这样制备液氢不仅需要制造极低温的冷却设备，还要将液氢储存在隔热的储存箱中，以防止液氢沸腾气化。例如，宇宙火箭用液氢作燃料，用液氧作助燃剂，液氢和液氧的储存箱，就要占火箭全部空间的一半以上。航天飞机起飞重量约为 2000 吨，而液氢和液氧储存箱重约 700 吨，占起飞重量的  $1/3$  以上。虽然说储存液氢有很多困难，但人们已经将其广泛应用于实践中。美国肯尼迪航天中心的巨型球罐储存液氢可达 90 万加仑（约合 340 万升），相当于一艘巨型油轮的载油量。而美国研制用液氢作燃料的超音速客机，时速已达 7400 千米。

也许你从未听说过氢气还会变成固态的、能导电的金属氢吧。早在 1926 年，英国物理学家贝尔纳曾经预言在足够高的压力下，非金属也能转变成金属。由元素周期表的规律可知，同一族元素的物理、化学性质相似，而与氢同一族的锂、钠、钾、铷、铯、钫都是金属，唯独氢是非金属，是否在一定条件下氢会转变成金属呢？我们知道，一个氢分子由两个氢原子组成，每个氢原子由原子核和一个绕核旋转的电子构成。当两个氢原子相遇时，双方的原子核都要争夺对方的电子，结果两个氢原子核共用一对电子，形成了所谓共价键。要制得金属氢就要设法把电子从原子核的束缚下解放出来，成为能自由运动的电子。这样，在电位差作用下就会形成电流，氢就具有了能导电的金属特性。有的科学家打算首先在  $-268$  的极低温度下，使氢气变成固态氢，再在  $80 \sim 260$  万个大气压下使固态氢变成金属氢。从 1972 年以来，美国、前苏联、日本等国的科学家都制得了金属氢。金属氢的密度很高，是固态氢的 6.3 倍，液氢的 7.9 倍。用金属氢作燃料，不但体积小，效率高，储存也方便。目前，人们正着手解决常压下金属氢的稳定性问题，估计离实用阶段还有相当的距离。

所有储存氢的方法中，最令人感兴趣的是，利用金属吸氢的本领来储氢。这种能用于储氢的金属，称为“储氢合金”。金属为什么能储氢呢？这是因为氢是一种很活泼的元素，能与许多金属起化学反应。一个金属原子能与两个、三个或更多的氢原子结合，生成稳定的金属氢化物，同时放出热量。稍稍加热，金属氢化物吸收热量后，就会分解出高纯度的氢气。金属氢化物中氢的密度大约是同样温度、压力条件下氢气的 1000 倍，也就是说储氢合金中储存着 1000 个大气压的高压氢气。与储存相同容量氢气的钢瓶比较，储氢合金的重量只有钢瓶的  $1/3$ ，而其体积还不到钢瓶的  $1/10$ 。所以，用储氢合金储氢，不需要体积庞大的高压钢瓶，使用起来非常安全、方便，只要将储氢

合金加热，就会分解出一定压力的氢气。加热温度愈高，分解出的氢气压力愈高。例如，有一种镧镍储氢合金，把它加热到 100℃，就能分解出 10 个大气压的氢气，这样不用压缩机就能得到所需要的高压氢气。由此可见，用储氢合金储氢是一种储存氢的理想方法。

### 哪些金属适合储氢

许多金属能与氢作用生成金属氢化物，但并非这些金属都适合储氢。只有具备以下条件的金属，才能考虑作为储氢材料：这些材料储氢量大，所用设备简单，操作方便，使用安全可靠；作为金属氢化物，生成或分解时，放出或吸收的热量要适当；这些材料吸氢和放氢速度快；反复吸氢和放氢时，材料性能稳定；材料来源丰富，成本低。回顾储氢材料的发展史，最早发现的是铀和钛，它们都有吸氢的本领。但铀是放射性元素，使用不安全，本身又是贵重的核材料；钛要在极低的温度下，接近—200℃时才吸氢，所以都没有实用价值。

纯金属一般都不能满足作为储氢材料的基本条件，为了改善其储氢性能，必须添加一些合金元素形成储氢合金。1968 年美国布鲁海文国家实验室的专家首先发现镁镍合金具有吸氢特性。1969 年荷兰飞利浦实验室发现钐钴合金能大量吸氢，后又发现镧镍合金在常温下能吸氢和放氢，这才引起各国科学家的注意。

研究表明：能够满足储氢材料基本条件的合金，其成分中的主要元素有镁、钛、铌、钒、锆和稀土类金属，添加元素有铬、铁、锰、钴、镍、铜等。目前研究发展中的储氢合金主要有镧镍类储氢合金、钛铁类储氢合金、镁镍（铜）类储氢合金、混合稀土类储氢合金和非晶态类储氢合金。其中各种性能都优异的代表性储氢合金是镧镍合金和铁钛合金。

储氢合金正在向合金系的多元化发展。我国具有丰富的稀土资源，有关研究部门正在成功地研究和发新型混合稀土类储氢合金。毫无疑问，储氢合金无论在品种和质量方面都将取得大幅度的进展。

### 储氢合金的广泛应用

储氢合金可作储氢“罐”，精炼和回收氢气。储氢合金主要用于储氢，与储存氢气的钢瓶和储存液氢的储箱比较，重量和体积都比较小。而且，储氢合金放出来的氢气纯度高，可用于工业氢气的提纯。如用混合稀土类储氢合金处理含氧气、氮气、二氧化碳等杂质的工业氢气，可获得纯度高于 99.9999% 的超纯氢，作为电子工业的重要原料，可显著降低成本。

储氢合金还可用于汽车和高速飞机。德国试验的燃氢汽车，采用 200 千克的铁钛合金储氢，可行驶 130 千米。1980 年，我国也研制出一辆燃氢汽车，储氢燃料箱重 90 千克，乘坐 12 人，以每小时 50 千米的速度行驶了 40 千米。使用钛系和稀土系储氢合金的燃氢汽车，每立方米氢可行驶 5~6 千米。燃氢汽车排出的气体中氮氧化物浓度约为使用汽油的 1/4，即使采用氢油混燃也能大大减少对环境的污染，节省汽油。目前，燃氢汽车存在的问题是储氢合金比汽油箱重，影响车速的提高。国外正在研究设计超音速的燃氢飞机，以大大提高飞机的载重量、航速和航程。

储氢合金可用于暖气机和冷冻机。储氢合金除了具有吸氢和放氢的功能外，还会在生成金属氢化物时放出热量，故可作为暖气机的热源。储氢合金吸氢时，需要吸收热量，使温度降低，故还可用于冷冻机。根据同样原理，储氢合金还可用于热能的回收、储存和运输等。

#### 镍氢电池

以储氢电极材料为负极的镍氢电池，与镍镉电池比较具有容量大、无毒、安全和使用寿命长等优点。我国利用丰富的稀土资源研究发展出的新型混合稀土类储氢合金，已成功地用来制造镍氢电池。

储氢合金可用来均衡电厂的负荷。各用电单位的用电时间往往相同，这会造成电厂负荷的不平衡。利用储氢合金，就可以调节电厂负荷的均衡，保证电力的正常供应，提高电厂的经济效益。例如，在晚间，许多工厂的工人下班了，机器也停止了运转，发电厂的电力就有了剩余，这时可用多余的电力来分解水，并用储氢合金将电解水产生的氢储存起来，到了白天，大部分机器开动起来，发电厂的电力供不应求，这时可让储氢合金放出氢，用氢燃料发电。

此外，氢可作为理想的家用燃料，因此储氢合金还可用于厨房供氢系统。储氢合金化学性能很活泼，可作为化学工业中的催化剂。储氢合金放氢时会产生压力，故还可用于制造压缩机等。

## 形形色色的多孔金属

大千世界，无奇不有。任何事物都一分为二，优点、缺点无不在一定条件下转化。就拿金属中存在的孔洞来说，你能说清楚它是好还是坏？

曾听说有这么一个铸造工厂，其生产过程是将金属先熔化成液态，再将液态金属浇注到预先做好的铸型空腔中，冷却凝固后便获得具有一定形状和尺寸的铸件。这些铸件是准备经切削加工制成机器零件的。但该厂生产的铸件中，常常出现气孔、渣眼等缺陷，用这样的铸件加工成零件是不行的，于是只能报废。铸件质量不合格，全厂上下都心急火燎，工人到食堂吃饭时，连炊事员也要讽刺上几句：“要是把你们调来食堂做馒头准行，馒头可是孔洞愈多愈好。可惜你们生产的是铸件，尽出废品！”

作为受力的机器零件，自然要求结实，不允许出现孔洞。对于承受较高压力的容器、管道和储罐，更不允许有微小孔洞或裂缝。然而，炊事员的讽刺却无意中道出了金属孔洞的两重性，因为确实有一类金属，它像馒头那样，孔洞愈多愈好，这种金属被称为“多孔金属”、“海绵金属”或“泡沫金属”等。

你见过马蜂窝吗？窝上排列整齐而别致的孔洞是马蜂们的住处。你见过海绵吗？海绵中相互贯通的小孔能饱饱地吸足水分。多孔金属中的孔洞，比马蜂窝和海绵有过之而无不及，不仅孔洞密密麻麻而且相互贯通，组成了网络结构，孔洞之间还有无数的毛细管，组成了毛细管系统。这些金属的孔洞有着许多奇妙的功能，形成了各种各样别出心裁、独特的多孔金属。

## 香气扑鼻的金属

金属是一种无臭无味的物质。如果设法使它变得香气扑鼻，再制成装饰品或工艺品，那该多好啊！

要香气扑鼻，可在金属中添加香料。香料从哪里来？香料有两种，一是天然香料，二是合成香料。天然香料又分为植物香料和动物香料。植物香料，如薄荷油、豆蔻油、玫瑰香油等。动物香料，如麝香，被称为“香料之王”，在国际市场上每千克要卖到5万美元，比黄金还贵。因为天然香料产量有限，所以，目前所用的大都是合成香料。许多合成香料是从煤焦油中提炼出来的。比如，有一种茉莉香精是将一种极臭的“吡啶”稀释1万倍，再与乙酸节酯调合而成的。

在金属中添加香料，要做到经久不散，必须采用多孔金属，使香料分子无孔不入地渗透到金属的内部结构中，达到长期保存香气的目的。

要再制成装饰品或工艺品，还必须使多孔金属带有美丽的光泽，而且要求耐腐蚀性好，永不变色。

目前日本科学家制成了这种有香料的多孔金属。金属中除了加入香料外，还含有7%~10%的锌，在炼制过程中锌粉受热后形成许多孔隙，再加入2%~3%的氧化铬粉末，使多孔金属带有淡绿色的美丽光泽，若改变添加物的成分还可以得到其他的金属光泽。

我国四川省冶金研究所的科学家经过反复试验，研制成功了一种“香合金”。只要身边带上一小块“香合金”，就能时时闻到扑鼻的阵阵清香。

## 会“出汗”的金属

人体通过皮肤上的汗孔，用出汗来降低体温，这是因为汗水蒸发时会带走一部分热量。

有许多机械是在高温环境下工作的。特别是在航天、航空的尖端技术中，火箭作为人造卫星、宇宙飞船、航天飞机、弹道导弹等的运载工具，依靠高能化学燃料燃烧时产生的高温高压气体，经过喷嘴高速向后喷射时产生巨大反作用力，推动箭体向前飞行，它的飞行速度达到 4000 米/秒以上。制造火箭喷嘴的材料必须能经受高温、高压气体的冲击，以保证喷嘴在使用时安全可靠。科学家从人体出汗能降温的生理现象中得到启发，根据仿生学原理，让金属向人体“学习”，终于研制成功了会“出汗”的多孔金属。

科学家从众多的金属中，挑选了号称“高熔点金属之王”的钨作为多孔金属的骨架。俗话说：“真金不怕火炼”，金的熔点为 1063℃，而钨的熔点为 3380℃，比金的熔点还高出 2000 多摄氏度，所以钨是最难熔化的金属。但是只依靠钨的耐高温性能还不够，还要设法让它“出汗”降温。为此，人们在钨骨架的孔洞中注满容易熔化的低熔点的铜或银（铜的熔点为 1083℃，银的熔点为 961℃）。用这种多孔金属制成的喷嘴，随着温度不断上升，铜或银就逐渐熔化成液体，并迅速沸腾、蒸发，吸收并及时散发出大量的热量，从而降低喷嘴的温度，保证火箭的正常运行。

## 陶瓷多孔隙金属

陶瓷多孔隙金属是一种由铸铁和陶瓷组成的多孔隙复合材料。该材料的制造过程为：先将泡沫状合成树脂浸入陶瓷浆料（陶瓷浆料的成分主要有三氧化二铝、碳化硅或氧化锆，再加适量的粘结剂）中，使浆料均匀涂布到合成树脂的泡沫孔隙中，取出后在 80℃ 左右的环境中干燥 24 小时，再放在 1600℃ 的高温下烧结，使泡沫合成树脂气化，形成多孔隙的陶瓷骨架。然后，将熔化了了的铸铁浇注到陶瓷骨架的孔隙中，冷却凝固后便制成了多孔隙复合材料。

这种陶瓷多孔隙金属，由于内部的孔隙互相贯通，对流体有渗透性，故可制成自动加油的含油轴承。

高速转动的轴在轴承中会产生滚动摩擦，为了减少摩擦引起的功率消耗和零件磨损，一般要定期向轴承中加油，有的机器加油困难，加油时还会引起油的飞溅和滴漏。因此有人想用含油轴承进行自动加油，其原理是：当轴在轴承中旋转时，在轴和轴承接触的间隙中会产生半真空状态，这就使含油轴承中的油被吸至轴承表面，形成油膜。这样，轴和轴承之间避免了直接接触，摩擦就大大减少了。应用同样原理，陶瓷多孔隙金属还可制成机床静压导轨，使导轨面和在它上面运动的零件之间形成油膜，不直接接触，这样有利于提高机床的精度和延长使用寿命。

此外，陶瓷多孔隙金属还可用来制造机床气动悬浮平台、气浮搬运装置和真空卡盘等。

陶瓷多孔隙金属经退火处理后能进行钻孔、车削等机械加工，具有较好的切削加工性。由于铸铁的表面分布有陶瓷，还有利于提高耐磨性，再加上内部存在的孔隙能吸收冲击能量，有良好的减振性，故它适合于制造机床床

身、机架和底座等。

### 能浮在水面上的泡沫铝

泡沫铝是一种充满气泡的多孔金属。它兼有金属特性和气泡特性：既有一定的坚韧性、耐热性、耐蚀性和良好的切削加工性，又有质轻、绝热、吸音、减振等特点。纯铝的密度是 2.7 克/厘米<sup>3</sup>，在水中会下沉，而泡沫铝中存在着大大小小的气泡，密度只有 0.2~0.6 克/厘米<sup>3</sup>，与一般木材相当，所以能漂浮在水面上。

泡沫铝的制造方法很多，大致可归纳为以下几种：直接发泡法、精密铸造法、气泡法、烧结法和电镀法。实际上，每种泡沫铝的制取方法都有一定的工序和技术奥秘，如直接发泡法的关键是选择发泡剂，形成的气泡要均匀分布在铝基体中。以日本某公司的泡沫铝制造方法为例，其主要工序有：添加 0.5%~5% 钛（目的是增加熔融铝的粘性）；添加并熔解 2%~25% 镁，以形成大小适宜、均匀的网状孔隙；添加并熔解 2%~18% 硅，在凝固时可产生膨胀；让其自然冷却，降到适当温度时充分搅拌；将泡沫铝浇注到经 450~600 预热的铸型空腔中，以获得所需的铸件。

本世纪 50 年代，美国首先在世界上研制成功泡沫铝样品，日本在 60~70 年代也已取得 10 项泡沫铝专利。其中美国罗尔公司和乙烷基公司已将试制品投入市场，并进行工业化试验；日本通产省工美技术院九州试验室、藤野金属公司等生产了不同牌号的泡沫铝型材和铸件，并进入试生产应用阶段。我国于 80 年代开始泡沫铝的试验研究。目前东南大学、贵州科学院分别用精密铸造法和直接发泡法制取了泡沫铝试样，尤其是贵州科学院用廉价发泡剂制取了较大规格的泡沫铝型材，性能指标达到国外同类产品的水平。此外，同济大学也研制成功了泡沫铝试样。

泡沫铝质轻，耐热性强，吸收冲击性能好，能吸声、减振，绝热性好，具有良好的电磁干扰屏蔽效应，易于车削加工，可以粘接和涂漆。在建筑工业中，泡沫铝可做内外装饰、隔音壁、天花板、地板、门窗、间壁、屏蔽墙等。在交通运输业中，它可以做汽车的车门、内壁、耐热耐摩擦零部件、减震器、观光列车空调发电室的隔音墙和航空运输的包装箱等。在机械工业中，它可以做精密仪器的防振装置、热交换器、消声器、过滤器、缓冲部件等。总之，泡沫铝是一种新型的多孔金属材料，有着广泛的应用前景。

## 奇妙的超导现象

电，在现代工农业生产、国防建设、科学研究和日常生活中，是须臾不可离开的。它是人类征服自然、改造自然的重要工具。发电厂把发出的电能通过导线输送到各个地方。电在导线中流动会受到阻碍作用，人们把导体阻碍电流的性质叫做电阻。电流克服电阻需要消耗能量，这部分能量以发热的形式，白白地损失掉了，有时热还会影响到电气设备中的元件以及周围的精密器械。如果没有电阻，那该多好啊！

### 低温下的奇迹

1911年的一天，荷兰莱顿大学的物理实验室里，昂尼斯教授正在专心致志地研究水银的低温性能。他先将水银冷却到 $-40^{\circ}\text{C}$ ，液体水银便凝固成一条水银线；然后，再在水银线中通以电流，并一步一步地降低水银的温度，当温度降低到 $-269.03^{\circ}\text{C}$ ，也就是绝对温度 $4.12\text{K}$ 时，奇迹出现了：水银的电阻突然消失了。这意味着，电流在零电阻的导线中可以畅通无阻，不再消耗能量，如果电路是闭合的，电流就可以永无休止地流动下去。有人做过这样的实验：将一个铅环冷却到绝对温度 $7.25\text{K}$ 以下，用磁铁在铅环中感应生成几百安培的电流。从1954年3月16日开始，在和外界隔绝的情况下，一直到1956年9月5日，铅环中的电流数值没有变化，仍在不停地循环流动。

人们把这种零电阻现象称为超导现象。凡具有超导性的物质称为超导体或超导材料。无论哪一种超导体，只有当温度降到一定数值时，才会发生超导现象。这个从正常电阻转变为零电阻的温度称为超导临界温度。由于昂尼斯在超导方面的卓越贡献，他获得了1913年的诺贝尔物理学奖。

此后，人们陆续发现近30种单质和几千种合金及化合物都具有超导现象，而且超导临界温度的纪录不断地被打破。例如，1975年，有人发现铌三锆的超导临界温度为 $23.2\text{K}$ 。1986年，又有人发现钡镧铜氧化物的超导临界温度为 $30\text{K}$ ，这个现象引起了科学家对氧化物高温超导陶瓷的高度重视。1986年12月，中国科学院的赵忠贤研究组获得了起始转变温度为 $48.6\text{K}$ 的镧镧铜氧化物。1987年2月，美籍华裔科学家、美国休斯敦大学的朱经武教授获得了起始转变温度为 $90\text{K}$ 的高温超导陶瓷。1987年3月，中国科学院公布了起始转变温度为 $93\text{K}$ 的8种钡钇铜氧化物。1988年，中国科学院发现了超导临界温度为 $120\text{K}$ 的钛钡钙铜氧化物。这些成就显示了我国高温超导材料的研究已经名列世界前茅。

为什么超导体在临界温度以下会具有零电阻特性呢？我们知道，在常温下金属导体的原子因失去外层电子成为正离子。正离子按规则排列在晶格的结点上，作微小的振动。摆脱了束缚的自由电子无序地充满在正离子周围，形成所谓“电子云”。导体在一定电压作用下，自由电子作定向运动就成为电流。自由电子在运动中受到的阻碍称为电阻。随着温度不断地下降，降至超导临界温度以下时，自由电子将不再完全无序地“单独行动”。由于晶格的振动作用，每两个电子必须“手挽手”地结合成“电子对”，温度愈低，结成的电子对愈多，电子对的结合愈牢固，不同电子对之间相互的作用力愈弱。在电压的作用下，这种有秩序的电子对按一定方向畅通无阻地流动起来。当温度升高后，电子对因受热运动的影响而遭到破坏，重新失去了超导性。



这是目前许多科学家对超导现象作出的解释，他们把这种有秩序的电子对在超导体中特殊的运动状态，作为引起超导性的根本原因。但是，科学永无止境，高温超导体的发现又进一步引起人们不断去深入探索超导的奥秘。

## 电流畅通无阻

超导现象的最直接、最诱人的应用是用超导体制造输电电缆。因为超导体的主要特性是零电阻，因而允许在较小截面的电缆上输送较大的电流，而且基本上不发热和不损耗能量。据估计，我国目前约有 15% 的电能损耗在输电线路路上，每年损失的电能达到 900 多亿千瓦时。如果改用超导体输电，就能大大节约电能，缓解日益严重的能源紧张。

要进行超导输电，首先必须选择好制造电缆的超导体，其次要保证电缆处于超导临界温度以下的低温。为此，每条超导电缆必须放在对热量和电都能绝缘的冷却管里，管里盛放冷却介质，如液态氦等。冷却介质经过冷却泵站进行循环使用，这样便使整条输电线路都在超导状态下运行。这样的超导输电电缆比普通的地下电缆容量大 25 倍，可以传输几万安培的电流，电能消耗仅为所输送电能的万分之几。

自从发现高温超导陶瓷后，特别是 1987 年全世界掀起了“超导热”以后，人们把注意力转向高温超导陶瓷的研究和应用。研究实践表明，陶瓷超导体同样具有实用意义，预计在 50 年左右的时间内，有可能制备出工作在 77K（—196.15）的温度下、临界电流密度超过每平方厘米 10 万安的实用化线材、缆材或带材。

### 超导临界温度的突破

自从超导临界温度突破 77K（-196.15）以来，科学家的下一个目标是使超导临界温度达到 240K（-33.15），甚至 300K（26.85）。

有些科学家提出用氟、氮、碳部分取代氧，用镉、铊、铊取代镧，或在钡钪铜氧化物中加铕、铈和其他金属元素，将有可能进一步提高超导临界温度。

超导体还可用于制造超导通信电缆。人们对通信电缆的主要要求是信号传递准确、迅速，容量大，重量轻，超导通信电缆正好能满足上述要求。因为超导通信电缆的电阻接近于零，允许用较小截面的电缆进行话路更多的通信，这样就可以降低超导通信电缆的自重，节约超导体材料，更主要的是超导通信电缆基本上没有信号的衰减，不论距离远近，接收方都能准确无误地收到发出方发出的信号，所以在线路上不必增设中间放大器，就能进行远距离通信。

用超导体制造雷达天线、导航天线、通信天线和电视天线，可使天线的损耗电阻减小几个数量级，而天线辐射效率可增加几百倍或更多；还可减少各种干扰信号，使天线发射和接收信号的能力大大提高。尤其重要的是，这将改变传统天线庞大、笨重的外观，做到小型化、轻型化，以满足军事上或其他的特殊需要。

## 超导发电机

将超导体做成线圈，由于它的零电阻特性，故可在截面较小的线圈导线

中，通以大电流，形成很强的磁场，这就是超导磁体。超导磁体的磁场强度可达 15~20 万高斯，重量却不超过数十千克，而用普通导线绕制成的电磁体要产生 10 万高斯的磁场已经非常困难。磁场强度为 5 万高斯的常规电磁体重达 20 吨，而达到同样的磁场强度，超导磁体的重量还不到 1 千克。超导磁体的另一个优点就是不产生热量，不消耗电能，只要通入一次电流就可以经久不息地流动下去，不需要再补充电能。超导磁体唯一需要的能量就是把环境温度维持在超导临界温度以下的能量。例如，美国造出一台 10 万高斯的常规电磁体，耗电达 1600 千瓦，每分钟还要用 4500 升水冷却，而日本制造的一台 17.5 万高斯的超导磁体，总共耗电才 15 千瓦，其中包括 13 千瓦的冷却消耗。

超导磁体正成功地应用在制造超导发电机上。超导发电机的构造与常规的同步发电机大致相同，一般都由定子和转子两部分组成。所不同的是，超导发电机的定子线圈和转子线圈都是用超导体制成的。转子一般由水轮机、汽轮机、内燃机等发动机带动。当直流电通入超导转子线圈后，由于转子线圈处于零电阻状态，故电流很大，从而形成一个很强的旋转磁场。超导定子线圈在这个转动的磁场中不断切割磁力线，产生电压，输出功率极大的电能。常规的发电机最大输出功率很少超过 150 万千瓦，原因是转子线圈产生的磁场强度有限，而定子线圈中电流过大会导致严重发热，影响发电机正常工作。超导发电机比常规发电机提高输出功率 20 倍以上，可超过 2000 万千瓦。

此外，超导发电机还能减少能量消耗，节约原材料和降低成本。例如，一台 6000 千瓦的常规发电机重 370 吨，同样功率的超导发电机仅重 40 吨，可以降低成本 50% 左右。

超导磁体还能制造磁流体发电机。所谓磁流体发电，是将火力发电产生的高温气体变成等离子气体，再高速喷入发电通道，使发电通道中的磁力线受到切割，在等离子气体中产生感应电动势，把气体离子推向发电通道两侧的电极，在外回路中产生电流，热能就这样直接转化为电能。磁流体发电机如用超导磁体来产生发电通道中的强磁场，与常规发电机联合使用，可把热效率从 20%~40% 提高到 50%~60%，节省 1/4~1/3 的燃料。此外，它还具有重量轻、体积小、启动快、不污染空气等优点。

## 空中列车

我们先来做一个有趣的实验：在一个铅环上放一个铅球，把它们的温度降低到超导临界温度（7.2K）以下，变成超导体。通过磁感应，使铅环中产生电流，这时铅球像着了魔似地飘然升起，当到达一定高度后便悬浮在铅环上方不动了。这是怎么回事呢？原来，铅环里通了电流，就在周围产生了磁场，磁场在铅球表面感应出一股电流，这股电流产生的磁场与铅环本身产生的磁场方向相反，使铅球受到向上的斥力，这斥力与铅球的重力平衡，铅球便悬浮在铅环的上方。超导体的这种排斥外界磁力线，使自身变成磁力线无法通过的物体的性质，称为完全抗磁性。人们正是利用超导体的完全抗磁性，研制成功了高速超导磁悬浮列车。

1966 年，美国首先提出制造超导磁悬浮列车的设想。此后，美国自己，以及英国、日本、德国、瑞典等国家都进行了开发和研制。目前日本、德国的超导磁悬浮列车已投入运行，车速高达 500 千米/小时。乘坐这种超导磁悬

浮列车，从上海到北京，只需要 2 小时 48 分钟。

那么，这种列车是怎样悬浮起来的呢？原来，在每节车厢的底部都安装了超导磁体，在列车行进的路面上埋有许多由闭合的矩形铝环组成的铝轨，在超导磁体的线圈中通入电流就会产生很强的磁场。列车开动后，超导磁体相对于铝环运动，在铝环里感应出一股很大的电流，并相应形成极强的磁场。铝环产生的磁场与车上超导磁体的磁场方向相反，相互排斥。也就是说，超导体的完全抗磁性，使车上的超导磁体受到地面铝环的向上托力。当车速大于每小时 150 千米时，托力大于列车自重，就使列车浮起，车速愈高，托力愈大。当列车停下时，由于铝环中没有感应电流，也就不能产生磁场，所以在开车启动和减速停车时有一段时间仍需用车轮在轨道上运行。

列车悬浮在空中飞奔，还存在空气的阻力。所以有人设想：让列车在抽成真空的隧道里行进，这样将能大幅度地提高车速。到那时，人类的高速飞行将由高空转入地下。

超导材料还可以用于制造威力无比的快速激光炮、具有人工智能的电子计算机、能明察秋毫的电子显微镜、先进医疗器械核磁共振诊断摄象机等等。也许，上述应用还远非超导材料的最重要应用。人们正开拓思路，扩大视野，不断学习和研究，促使超导技术向前发展。

## 有机高分子材料集萃

### 向海洋要淡水

#### 现代社会的水危机

水是人类赖以生存的基本物质。人可以 7~10 天不进食，却不能不饮水。要知道，人体总重量的 70% 是水，血液中的含水量更高，达 83%。

世界各国的工业化给人类带来了物质文明，但也产生了负面影响。人是人类社会最宝贵的财富，但人口的猛增也给地球带来了沉重的负担。就拿水来说，由于工业的发展和人口的猛增，地球已发生了水危机。早在 1972 年，联合国在瑞典斯德哥尔摩召开人类环境会议，许多国家的代表在会上都提到城市缺水和水严重污染的问题。会议纪要中也写道：“遍及世界的许多地区，由于工业膨胀和每人消费量的提高，需水量已增加到超过天然来源的境地……”

如果我们乘坐在宇宙飞船上，居高临下看地球，就可以看到：西欧最大的河流——全长 1320 千米的莱茵河，由于沿岸各国污染物的排入，已成了“欧洲最大的下水道”，河水变成红褐色，鱼类大量死亡；美国号称“百川之父”的密西西比河，其流域面积达美国大陆的 1/4，也处于危机之中；被俄罗斯人称为“母亲河”的伏尔加河，几乎接受了该国一半的污水。

再看看发展中国家，我们也无法乐观：南美洲拥有的世界第一长度和第一大水量的亚马孙河被污染着；被印度人敬为“圣河”的恒河，曾因受污染而导致几万人患黄疸病，许多人因此死亡。

人口的急增是水危机的又一重大原因。据科学家测算，每人每天约需饮用清洁水 5 升，加上其他生活用水，共需几百升。1830 年世界人口是 10 亿，1930 年增加到 20 亿，1960 年达到 30 亿，1975 年已有 40 亿，1990 年高达 53 亿，预计到 2000 年世界人口至少达 63 亿。而据世界卫生组织的调查，早在 70 年代中期，世界上就已有 70% 的人得不到安全、卫生的水了。如此算来，很快就会有 90% 以上的人饮用不到安全、卫生的水。到那时，说“水贵如油”毫不过分。

#### 根本的出路：海水淡化

让我们还是在宇宙飞船上往下看，你会看到：地球表面的 70.8% 被水覆盖着，总水量达 13.56 亿立方千米。但是被水覆盖的地球表面中 97.2% 是浩瀚的海洋，而陆地水面只占 2.8%，其中淡水更是少得可怜，只占 0.64%。我们遇到的是一个非常矛盾的现象：一方面，地球上的水并不少，但绝大多数是又苦又咸的海水；另一方面，人类生存所必需的淡水却越来越少。怎么办？人类早已有了改造大自然的能力，我们不能看着水而大喊没有水。向海水要淡水，这是从根本上解决水危机的唯一出路。

其实，海水淡化早就是人们重视的一项技术，如今已有多种海水淡化的方法，如多级闪蒸法、电渗析法、溶剂萃取法、冷冻法、反渗透法等。其中，反渗透法是耗能最少的一种方法，而且用它可直接得到清洁的淡水。

反渗透海水淡化装置包括去除混浊物质的前处理设备、高压泵、反渗透

装置、后处理设备、浓缩水能量回收器等。其中最核心的装置就是反渗透装置，而这个装置中最核心的部件就是反渗透膜。那么，什么叫反渗透？反渗透膜是一种什么材料？这个装置为什么能把海水中的盐和水分开呢？让我们来做一个实验。

## 渗透与反渗透

在一个水池中，用一张有机材料薄膜从中间隔开，把水池分为两部分。在其中一部分注入盐水，在另一部分注入淡水。这张薄膜是特制的，它可以让水透过，但绝不让盐透过。这种膜称为半透膜。如果淡水和盐水的水面本来一样平，过一段时间，你就会发现：一部分淡水自动地透过了半透膜，跑到了盐水那一边，使得盐水的水面有所升高，但升高到一定程度，便不再升高。这时，淡水水面和盐水水面之间就形成了一个高度差。这种现象称为渗透。那个高度差所造成的压强称为渗透压。就好像淡水那边有一种“压力”，把淡水从膜那边“压”到膜这边，使得膜两边的水形成高度差，从而产生渗透压来抵消这种“压力”。

其实，渗透现象在我们平时的日常生活中也可观察到。比方说，我们在腌菜时总要撒上许多的盐，菜腌了一段时间便会产生出不少腌菜卤，这就是因为菜细胞中的水分透过细胞膜跑了出来。

渗透现象的产生是因为大自然有一种平衡的趋势，它似乎总是希望保持某种一致性。当膜两边的溶液浓度不一致时，低浓度溶液中的水分子就无孔不入地透过膜来到高浓度溶液中。同样，高浓度溶液中的溶质分子，也有透过膜进入低浓度溶液的趋势。只是在我们的实验中，使用的是半透膜，它忠于职守地只让水分子通过，而不让盐分子通过。于是，只有用水面高度差来维持平衡了。

既然半透膜只让水分子通过而不让盐分子通过，那么我们是否可以利用这个特性，让水分子从盐水中跑出来而不带出任何盐分子呢？可以，只要在盐水那边施加压强，这个压强要大于渗透压，首先把渗透压抵消掉，再继续压盐水。我们可以看到：盐水中的水分子可受不了了，从盐水中透过半透膜跑到淡水这边来了。施加的压强越大，透过来的水就越多。这就是反渗透现象。在这里，那张半透膜就称为反渗透膜。

说到这里，你已经可以明白，淡化海水的反渗透法就是利用反渗透膜的这个特性，让它看起来好像过滤器那样，把海水中的盐分及其他杂质“过滤”掉。就这么简单，而关键就在于那张神奇的反渗透膜。

## 神奇的反渗透膜

粗浅地说，反渗透膜的表面有这样一种特性：它能有选择地在它上面吸附一层水分子，而把盐远远地排斥开。反渗透膜上还有许多很细小的孔，在反渗透压强的作用下，那层水分子就通过这些小孔流向淡水一边。盐水中的水分子会不断地补充到膜表面上，并不断地通过小孔流向淡水，而盐则被拒之“门”外。

当然，小孔的大小很重要，孔太大了，盐也会蒙混过“关”。但更重要的是制造这种膜的材料。这种材料要能吸附水分子而排斥盐及其他杂质；这

种材料要能让人们在反渗透膜上制出足够小的孔，小到把最小的细菌之一——绿脓杆菌，以及病毒，都排斥在膜的一边而不让通过，从而得到最纯净的水。这种材料就是一种有机高分子材料。

1960年，美国加利福尼亚大学洛杉矶分校的索里拉金和劳勃制得了世界上第一张透水量大、除盐率高的醋酸纤维素反渗透膜。1969年，美国杜邦公司制成了以尼龙66为主的中空纤维膜组件。1971年，丹麦DDS公司制成了平板式组件并获得专利。但是这些膜都需要较大的反渗透压强，因此不够理想。

到80年代，人们发明了一种复合膜。这种复合膜由三层组成。上面一层是超薄反渗透膜，中间一层是多孔支撑层，最底下为织物增强层。它透水量极大，除盐率达99%，是一种理想的反渗透膜。

如今，反渗透海水淡化装置已在为人类服务了。据不完全统计，世界上已有反渗透海水淡化厂1000多家，其中最大的建在位于地中海中部的马耳他。它为这个小岛国的3.5万居民以及来观光的旅游者源源不断地提供着清洁的淡水。

## 膜分离技术

生物体上的膜是隔开不同组织的屏障，它能有选择地让膜两边的物质进行交流，有的让过，有的不让过，这就是膜的分离功能。人们很早就发现了膜具有分离功能。据记载，1748年，一个叫奈尔克脱的研究者发现水能自动地扩散到装有酒精的猪膀胱中去。人们就是受到生物膜这些功能的启发而进行人工分离膜的研究的。

反渗透膜是膜分离技术所研究的各种分离膜中的一种。除了反渗透膜外，还有可分离氧气的高透量富氧膜，以及氢分离膜、氮气分离膜、乙醇和水的分离膜、细菌分离膜、干扰素分离膜等等。研制各种分离膜的关键是材料，例如，模仿人体功能的人工膜的研究就是当今高分子材料研究的前沿课题之一。

## 树木的眼泪

### 英国女王的御车

南美洲的亚马孙河是世界第一大河。它西起秘鲁的安第斯山脉东麓，向东横穿巴西北部，流入大西洋。整个流域位于赤道附近，千万年来一直是郁郁葱葱的原始大森林。森林中有一种高大的乔木，叫作“三叶树”。如果用小刀在它的树皮上割开一个小口子，便会有牛奶似的树汁流淌出来。这种树汁，就是今天人们所熟悉的橡胶的最初来源。在印第安人的土语中，“橡胶”就是“树木的眼泪”的意思。其实，除了亚马孙河流域之外，其他许多热带林区也生长着会流“眼泪”的树木，比如我国的海南、广西、云南西双版纳等地。

目前人们发现，至少有 200 多种植物的树汁能够作为橡胶的原料，人们把这种树汁称为胶乳。胶乳经凝聚、脱水等加工步骤，便成为有弹性的固体，称为生胶。生胶强度大小，表面又发粘，无法作为材料使用。1832 年，德国的鲁斯特道尔夫发明了硫化技术，他用松节油、硫磺与胶乳共煮，得到了一种既有弹性又不发粘的固体，即硫化橡胶，并把它作为贡品敬献给英国女王，用于包覆女王御用马车的车轮，使这辆马车显得更加豪华，坐起来又十分舒适。然而，同今天的橡胶轮胎相比，硫化橡胶的耐磨性和强度还差得太远。

### 硫磺、炭黑与纤维

鲁斯特道尔夫发明的硫化技术，实质上相当于在一定条件下，在胶乳的一个又一个分子之间架起“桥梁”，使它们互相牵制，无法自由移动。这“桥梁”就是硫原子。这种“架桥”工艺是大有讲究的，因为“桥”的多少决定了硫化橡胶的软硬程度。“桥”越多，橡胶越硬。于是，同一种天然胶乳，可以硫化成强度和弹性完全不同的多种橡胶。

硫化技术使胶乳变成了有用的硫化橡胶，但硫化橡胶在强度和耐磨性上还不尽人意。小学生用的五颜六色的橡皮擦就是一种硫化橡胶，一般用不了多久就磨完了。这样的材料怎么能用来制造汽车轮胎呢？

不久，人们发现一种黑不溜秋、毫不起眼的材料——炭黑，居然可以用来弥补这一缺陷。在生炼橡胶的同时，加入一定量的炭黑，充分混合炼制成橡胶，再经硫化，其强度和耐磨性便大大提高。炭黑的这种作用是独一无二的，因为有人试图用其他物质来代替炭黑，结果都失败了。这就是为什么至今大多数橡胶制品——汽车轮胎、耐高压橡皮管、传送带、橡胶鞋鞋底等等，都无一例外是黑色的缘故。

然而，光加炭黑达到的效果仍不能满足载重车、飞机等轮胎的强度要求。于是，科学家们又想到了纤维，他们在橡胶中加入纤维，制成了“子午线轮胎”。开始时只是在黑色橡胶混合时加入由棉线、麻线等织成的子午线布的碎片，强度已有明显提高。后来发展到用高强度的合成纤维甚至钢纤维来制造子午线轮胎，强度又得到了惊人的提高。

现在使用的橡胶轮胎，包括大多数自行车轮胎，都是经过加硫磺、炭黑、纤维等一系列加工步骤后制成的，它们当然比当年英国女王座车的车轮强多了。

## 诞生于炮火中的合成橡胶

用天然胶乳加工制成的橡胶至今仍是橡胶工业中的主角。然而，纯粹由人工用化学方法合成的橡胶也早已登上了橡胶材料的舞台，发挥着它们独特的作用。说起合成橡胶的诞生，还要追溯到第二次世界大战。

二战爆发前夕，许多北方国家，如苏联、德国等，纷纷意识到自己国家并没有天然橡胶资源，一旦战争发生，这一资源的进口渠道被切断，就意味着坦克、大炮、军车、飞机等军备无法大量制造，战争必败无疑。于是，这些国家都组织了力量，加紧研制天然橡胶的代用品，结果得到了不同程度的成功，合成橡胶由此诞生。战争是罪恶的，但合成橡胶却的确是因为战争而迅猛发展起来的。

合成橡胶是以石油和煤为原料，采用高分子合成技术制造出来的，现在已发展了 20 多个大品种，一般分成两类：通用型合成橡胶和特种合成橡胶。

通用型合成橡胶主要有丁苯橡胶、顺丁橡胶、氯丁橡胶等。有趣的是，至今尚无一种合成橡胶在弹性和抗撕裂性方面优于天然橡胶。即使是完全模仿天然橡胶结构合成出来的顺式聚异戊二烯橡胶，综合性能也还是略逊一筹。看来人类对那神秘的“树木的眼泪”还未能完全了解。

然而，合成橡胶也有其独特长处，它们总能在某些性能上超过天然橡胶。丁基橡胶是二战期间美国的垄断产品，其最大优点是气密性极好，对氢气、氧气、氮气、二氧化碳等多种气体的透过值仅是天然橡胶的  $1/25 \sim 1/7$ ，所以用它做内胎最为合适。又如顺丁橡胶，特别耐寒，可在  $-85$  使用，而天然橡胶只能在  $-50$  以上使用。将顺丁橡胶与天然橡胶混合制成轮胎，尤其适用于严寒地区。还有乙丙橡胶，原料是价廉易得的乙烯和丙烯，它特别耐腐蚀，耐老化，而且其颜色可以呈浅色，但是因为不能与天然橡胶很好混合，无法制得轮胎。其他如丁苯橡胶、氯丁橡胶、聚异丁烯橡胶等，也各具特色，都用来在某一方面代替天然橡胶。

特种橡胶是为了适应某些特殊需要而制出的。在航空、航天、造船、化工、机械等部门，对橡胶有着诸如耐高温低温、耐油、耐真空、耐辐射等要求，天然橡胶和通用型橡胶都无法满足这些要求。于是，各种特种橡胶应运而生。飞机和宇宙飞船上用的特种橡胶是氟橡胶和硅橡胶，它们耐高温低温，耐辐射，一般用来制作各种密封件。造船业、机械工业中又特别需要耐油型橡胶，丁腈橡胶和氟橡胶都是合格的候选者。制造快艇则要用到聚硫橡胶，因为它的耐高真空性能最佳。

## 第三代橡胶

1956 年，高分子化学家许瓦尔克发现了活性阴离子聚合现象，即某些高分子在聚合过程中，始终保持着继续聚合的“生命力”，只要加入单体，它便继续聚合，单体耗尽，则停止聚合；再加入单体，又可以聚合……他的学生密尔苛维希利用这项成果开发了嵌段共聚技术。用嵌段共聚技术可生成一种三嵌段的共聚物，它的分子结构呈三个嵌段的形式，头尾两段称为硬段，中间一段称为软段。顾名思义，硬段使材料具有刚性，软段使材料具有柔性。于是这种材料刚柔相济，后来人们把它叫作热塑性弹性体。



热塑性弹性体兼有塑料和橡胶的性能。在常温下，它很像橡胶，可以拉长到原长的3~10倍而不断；在高温下，它又像塑料那样便于塑化成型。这种热塑性弹性体，不需要硫化和加炭黑就具有橡胶的弹性和强度，又能像塑料一样加工和反复使用，省时省钱。人们已把它誉为第三代橡胶。

在热塑性弹性体的分子结构中，由于软段提供弹性，硬段提供强度，因此我们可以通过改变软段和硬段的长度或连接方式来改变材料的性能。

#### 单体

许多分子量很高的化合物（即高分子化合物，或称聚合物）是由一些分子量较低简单化合物通过聚合反应而生成的。例如，常用来制成塑料台布或塑料雨衣的一种高分子材料——聚氯乙烯，就是由氯乙烯这种简单化合物聚合而成的。在分子化学中，这种简单化合物就称为单体。

有一种热塑性弹性体，它的分子结构是多个嵌段在一端相连，呈放射状的星型，就像神话中的千手观音那样，从身体上伸出许多条手臂。这种星型多臂的热塑性弹性体，臂数可有5~29个，它的一个好处是加工方便。我们知道，要提高材料的弹性和强度，就要求分子量增大，但一般高分子材料分子量一大，就导致粘度增大，难于加工。而这种星型材料却能够做到分子量很大而粘度并不太大，十分著名的K-树脂就是其一，用它做的包装材料，透明性和韧性都无与伦比。

从“树木的眼泪”到子午线轮胎，再到特种橡胶和热塑性弹性体，橡胶工业的发展正是人类文明进步的一个缩影，它清晰地反映出人类从利用大自然馈赠的现成材料，走向揭开材料结构的奥秘，创造自己所需要的材料，让大自然更好地为人类服务的过程。

## 使沙漠变良田的吸水树脂

### 沙漠的肆虐

人类祖祖辈辈居住的地球，陆地面积约有 120 亿公顷。当原始人刚刚出现的时候，地球上 2/3 的陆地覆盖着森林。我们的祖先便是在森林中与狼虫虎豹搏斗，艰难地存活下来的。经过漫长的进化，人类学会了取火、畜牧、伐木、种植、狩猎等等生存本能，逐渐从依赖大自然、听命大自然转向利用大自然、改造大自然。然而，正是从这时起，森林的原始状态开始被破坏。好在最初的破坏并不严重，砍伐与生长基本上保持着平衡，气候也一直风调雨顺。

随着工业革命的开始和发展，在最近的几百年里，森林面积急剧下降，大量的滥砍滥伐、烧林垦荒、过度放牧，使今天的森林只剩下当初的 1/6，而且仍在不断地被破坏！取而代之的，是沙漠的蔓延。现在，沙漠正以每年增加 500~700 万公顷的速度，无情地吞噬着良田和牧场，肆虐的风沙一夜间就可以淹没几千公顷土地。比如著名的撒哈拉大沙漠，在近半个世纪中已向南扩大了 65 万平方千米；而我国辽宁省西北部的章古台沙漠，在 100 多年前还是水草丰美、树木成林的绿地，盛产杏树，如今却是一片不毛之地。

现状已十分危急，我们不能再如此愚昧了，必须尽快行动，想方设法，保护森林，向沙漠讨回良田！

### 无形的水库

人类已经意识到自己过去的无知已造成了怎样的危害，严禁滥伐森林，大力植树造林已是世界上所有国家的一致行动。与此同时，人类也在利用自己的智慧，改造沙漠，改造大自然。亡羊补牢，犹未晚也。

沙漠之所以不能生长植物，主要原因之一就是缺水。70 年代美国农业部北方研究中心，出于改沙漠为农田的设想，制定了研究计划，首先开发了高吸水性的树脂。这种树脂一改普通树脂憎水的特点，可以把周围的水分吸附住，受热以后又能缓慢释放出这些水分。更可贵的是，吸水树脂的吸水能力很强，最初研制出来的吸水树脂能够吸附自身重量 200 倍的水，而今最多的可以吸附 5000 倍以上。

美国高分子化学家、诺贝尔奖获得者弗洛里教授，对吸水树脂进行了深入的研究后发现，这种材料的结构正像一张大网，它是由许多长链高分子连接起来的。这张网上含有许多亲水基团，它们一遇到水就会十分迅速地把它吸附住。大家知道，高分子的链很长，通常情况下它们都是蜷曲起来的，因此由这样的长链结成的网一旦伸展开来，可以扩大许多倍，也就是说，水可以源源不断地被吸附到网中，直到分子链被近乎拉直为止。这就是为什么吸水树脂能够吸附这么多的水的缘故。而当树脂被加热时，水分子运动剧烈起来，最后冲破网的束缚而蒸发出去，树脂的分子结构渐渐恢复到原状。所以，吸水树脂可以重复使用。

利用这一特性，人们在干旱的沙漠和荒地上用吸水树脂建起了无形的水库，树木于是得以不断吸取到水分，沙漠终将重新变为绿洲。

## 吸油树脂

90 年代，许多科学家仿效吸水树脂的原理和结构，还研制出了吸油树脂。尽管目前吸油树脂的吸油率最大仅为自身重量的 25 倍，但仍然被广泛应用在油处理及除臭剂、杀虫剂、缓释药物载体的制造上。

## 吸水树脂的其他应用

1983 ~ 1986 年，吸水树脂尚在崭露头角阶段，产量就骤增了 10 倍。当时日本的三洋化学公司投入巨资，引进生产线，使日本生产的吸水树脂达到世界产量的一半。日本没有沙漠，但日本人早已发现了吸水树脂的其他新用途。

首先是婴儿、妇女、病人使用的卫生用品。吸水树脂不但可以吸水，还可以吸收尿和血。这给整个卫生用品市场带来了一股新的浪潮：含有“新奇高分子”的婴儿一次性尿布、妇女卫生巾、病人用的床垫尿垫等，又轻又软又有很好的吸收效果，立刻成为受欢迎的产品，并且日益取代老式卫生用品，给人们带来的是清洁、方便和卫生。

其次，吸水树脂已广泛应用于工业领域。它除了做干燥剂和脱水剂外，还有许多奇妙的用处。比如“膨胀橡胶”，是最新研制成功的地下防水材料。这种橡胶中含有高吸水性的树脂，遇水后体积膨胀，用它来堵塞漏水的缝隙，效果奇佳，因为哪里漏水厉害哪里橡胶就膨胀得厉害，密封性能也就越好，真可谓是“以水治水”。又如海底电缆尽管有很厚的保护层，但难免有被鱼类咬破之处。那么在保护层下面置一层吸水树脂，一旦漏水，吸水树脂就能立刻吸附水分并堵塞漏洞。

## 从不粘锅说起

### 家庭主妇的福音

80年代中期，在美国和西欧市场上出现了一种特别的菜锅——不粘锅。而今这种锅已经在全世界的市场上深受欢迎。从此，家庭主妇们不必再担心煎鱼时鱼皮粘在锅壁上，也不必再担心煮肉时一不小心就会烧焦。她们甚至只用很少的油或干脆不用油，照样烧出一桌色香味俱佳的菜肴。继不粘锅后，很快又出现了易清洁的脱排油烟机，油腻的机身只需用棉纸轻轻一擦，立刻恢复原貌，大大减轻了主妇们的劳动。

这种不粘功能与不粘锅和脱排油烟机的外型并没有什么关系，人们仅仅是在锅的内表面和脱排油烟机的外表面多涂了一层氟树脂，利用氟树脂优异的热性能、化学性能、易清洁性能和无毒性能，制成了这些大受欢迎的厨房用具。

### “塑料王”

氟树脂家族中的老大哥是聚四氟乙烯，它被誉为“塑料王”。聚四氟乙烯具有最好的耐化学腐蚀和耐老化的性能。这一特点的应用，使基础化学工业——三酸两碱工业，跃上了一个新的台阶。原来装浓酸浓碱只能用笨重易碎的陶瓷容器。塑料容器出现后，虽然适于装置大多数的酸、碱，可是对浓氢氧化钠和腐蚀性极强的“王水”却只能“俯首称臣”。而采用由聚四氟乙烯制成的容器后，非但浓氢氧化钠和“王水”能安全地放置其中，连用于原子能工业的强腐蚀剂五氟化铀，也能乖乖地安居其中，难怪人们要给聚四氟乙烯冠以“塑料王”的美称了。

普通塑料制品容易发生老化现象，原来看上去挺好的东西，过了三五年或者十来年就会产生裂纹，甚至破碎。可“塑料王”就是不一样。把聚四氟乙烯制品在室外放置，任凭日晒雨淋，二三十年都毫无损伤，真是“王者风范”。

#### 王水

王水是一种具有极强腐蚀作用的液体，它是用浓硝酸和浓盐酸以1：3的体积比混合而配成的。如此混合后，其腐蚀作用比浓硝酸和浓盐酸更为强烈，甚至金、铂也能溶于其中，真是“溶剂之王”。但是“溶剂之王”遇到“塑料王”，也只能“甘拜下风”。

### 不用润滑油的轴承

我们知道，轴承必须要经常加油润滑。这一方面是为了减小摩擦，另一方面还为了散去摩擦热，否则轴承就会发热变形，导致转动不灵，甚至损坏。对高级复杂的机器必须设计出整套润滑油油路，以定时地加入润滑油，并让润滑油顺着油路流动，润滑每一个轴承。当然，这很麻烦。

当人们对聚四氟乙烯作了进一步研究之后，发现它竟又是一种摩擦系数非常小的物质。用它来代替钢制造的轴承，转动起来又灵活又轻巧，发热量很小，根本不必再添加润滑油。而且，用聚四氟乙烯制造的零部件，在-200~

350 的温度范围内都能很好使用，这无疑给机械行业带来了巨大的效益。不仅如此，聚四氟乙烯轴承在转动时不发出噪音，杜绝了噪音污染这一公害，难怪越来越多的高级设备都离不开它了。

在有些场合，聚四氟乙烯还是不可替代的材料。现代化工业生产中，许多化学反应不仅需要搅拌，还需要防腐与密封。虽然反应釜和管道可以用不锈钢或特种搪瓷材料制成，但搅拌棒的轴承和所有的密封圈，就非用这“百毒不侵”的聚四氟乙烯不可了。

## 人体器官的替代品

人是世界上最宝贵的财富。但人不可能不生病，人体的器官有时会因多种原因被损坏。要修补、代替这些器官该用什么材料呢？我们又该推荐：用“塑料王”！

在选择制造人体器官替代品的材料时，除了要求这种材料具备一定的物理、化学性能之外，关键还要考虑它们的生物性能。也就是说，只有那些能与人体“和平共处”的材料，我们称为“生物相容性材料”的，才可以用在人体上。否则，人体的“排异性”将对那些植入体内的材料发生“排异反应”，甚至导致生命危险。

经过大量的实验和研究，人们对聚四氟乙烯材料进行了改造，不但使这种材料具有“生物相容性”，而且加工方便，容易制成所需的形状，以满足医学上的要求。现在，人们已用这种改性聚四氟乙烯制成了各种人体医疗器具（如胃镜钳导管）和人体器官替代品（如心脏补片、人造动脉血管、人工气管等）。用改性聚四氟乙烯制造的人工器官，都经过非常严格的试验，各国也制定了非常严格的标准，帮助人们安全地使用它。尽管这些材料价格昂贵，但是，还有什么能比人的生命更昂贵的呢？

## 英雄辈出的氟家族

科学家经过对聚四氟乙烯的大量研究，确定了它具有如此特异性能的微观原因，也找到了改进它缺点的方法。在研究的过程中，又发现了一大批其他的氟树脂，我们就把它们称为氟家族吧。

氟家族中英雄辈出，它们不仅继承了聚四氟乙烯“塑料王”的许多优良性能，还发展了各自独特的优点。就拿 1990 年才“出生”的新成员“特弗龙-AF”来说吧，它是由著名的杜邦公司郑重推出的产品，目前在电子工程、光学工程、医学上都有惊人的表现。

特弗龙-AF 具有优异的介电性能、良好的尺寸稳定性、高温下的刚性、光滑的表面和不被腐蚀的化学惰性。用它可制成新一代高速电子计算机的线路介质层和集成电路芯片。用它制成的薄膜经均匀掺杂后，可成为微米级、亚微米级的高绝缘薄膜驻极体理想材料。完全非晶态的特弗龙-AF 有优异的光学清晰度，它透过可见光的能力大于 95%，可算是最好的透光材料之一了。更重要的是它还有很低的折射系数和较高的抗辐照能力，这使它成为制造光纤的最好材料，尤其是用于航天技术等新技术领域。它还可以用来作为微波、雷达系统中透镜的表面涂层和光学涂层。特弗龙-AF 优异的生物相容性，使它在医学领域也能大显身手。

## 聚丙烯传奇

### 实验室中的险情

1949年的一天，联邦德国马克斯—普朗克研究院，著名化学家齐格勒带着他的助手，像往常那样走进他们专用的实验室，开始进行催化剂三乙基铝的研究工作。这项研究当时已进入成熟阶段，其主要化学反应是用三氯化铝和乙烯气体在60~80℃温度范围内和一定的压力下生成三乙基铝。

实验开始后，不知什么原因，齐格勒的助手没有注意控制温度。只见温度计上的指标已升到100℃，慌了手脚的助手不知所措，温度继续上升……其实，这时只要将通入乙烯的开关关掉就可以了。这是因为反应器中的三氯化铝和乙烯气体是按一定比例进行反应的，三氯化铝消耗完后，反应便会停止。如果继续通入乙烯，一般来说，反应器内的压力就会增加，就有可能引起爆炸。在这万分紧急的时刻，镇静的齐格勒发现，尽管乙烯仍在不断地通入，但反应器内的压力并没有升高，不存在爆炸的危险。

这个偶然发生的意外现象引起了齐格勒的深思。他又经过无数次的实验，追根寻源，终于在1953年发表了一篇具有重大意义的论文。这篇论文论述了这样一个科研成果：用三乙基铝—四氯化钛催化剂，可使乙烯在低温低压下聚合，获得短支链的聚乙烯。

### 高压聚乙烯与低压聚乙烯

在这之前，聚乙烯是采用1937年帝国化学公司的专利，用高温高压法生产的，这样生产出来的聚乙烯称为高压聚乙烯，例如如上海金山石油化工总厂的一期工程，就是采用这种高温高压法生产聚乙烯的。

高温高压法的生产过程是：将纯净的乙烯气体放在很厚的无缝不锈钢管道中，让乙烯气体经受2500~2800个大气压的高压和300~330℃的高温，再用少量的氧气引发，使乙烯分子打开其双键，然后“手”拉“手”地连成长链分子，即形成聚乙烯高分子。

高压聚乙烯的生产需要昂贵的设备，还要消耗大量的能量，而且这样生产出来的聚乙烯其长链分子的排列是很不整齐的。据测定，在一个聚乙烯长链分子的主骨架上，大约平均每100个碳原子就会伸出两个支链，就像在树的主干上伸出分枝那样。这些支链较长，一般有4个碳原子。这样的结构影响了聚乙烯的性能。

采用齐格勒的催化剂法生产聚乙烯，只需低温低压设备，消耗能量也少。这样生产出来的聚乙烯称为低压聚乙烯。低压聚乙烯的长链分子排列较整齐。据测定，平均每1000个碳原子只伸出5个仅有1~2个碳原子的支链。

比起高压聚乙烯来，低压聚乙烯的性能有了较大的提高。高压聚乙烯的密度在0.91~0.95克/厘米<sup>3</sup>，结晶度仅50%左右，熔点在110℃左右。低压聚乙烯密度较大，为0.94~0.96克/厘米<sup>3</sup>，结晶度高达70%以上，熔点在130~136℃，而且其抗拉强度是高压聚乙烯的3~4倍。

### 从聚乙烯到聚丙烯

事情并不到此为止，当这一成果由齐格勒转让给意大利的蒙蒂卡提尼公司后，引起了该公司高级技术顾问、米兰聚合物工艺学院的纳塔教授的重视。他分析了齐格勒的催化剂，并进行了理论上的研究，终于在 1954 年发表了用改进的催化剂引发丙烯聚合的论文，成为世界上第一个获得有实用价值的聚丙烯材料的人。

大家知道，在天然气和石油气中，含有大量的乙烯和丙烯气体。乙烯气体较早地就被用来聚合成有实用价值的聚乙烯，但丙烯的聚合一直未能很好地解决。在纳塔之前，有许多研究者进行了大量工作，希望制成聚丙烯。然而，按常规的聚合方法获得的只是像浆糊那样的粘稠物，成不了固体材料。纳塔认为，这是因为这种粘稠物的分子没有整齐排列之故。只有提高其分子结构的规整性，才能得到固体状态的聚丙烯。

原来，丙烯经聚合后，其聚合物的分子排列可能有三种方式。将其分子的主骨架放在一张平面上，所有甲基（ $-\text{CH}_3$ ）都在平面一侧的，称为全同立构；甲基一个在一侧一个在另一侧交替排列的，称为间同立构；甲基完全无规则地排列的，称为无规立构。分子排列呈全同立构或间同立构的聚丙烯，在常温下是固体，可以纺丝，制成纤维，也可加工成塑料制品。而呈无规立构的，就是像浆糊那样的粘稠物。分子结构上的微小差别，导致了宏观性能上的巨大不同。这启发材料科学工作者必须去找出物质微观结构与宏观性能之间的关系，这样便可以通过设计分子结构来制造出具有所希望性能的材料。

那么，纳塔教授是怎样实现聚丙烯的全同立构或间同立构的呢？

## 配位络合聚合

纳塔发表了一系列论文，提出了配位络合聚合的理论，阐明了齐格勒—纳塔催化剂使聚丙烯分子整齐排列的机理。这是一种特殊的聚合机理，称为配位络合聚合。粗浅地说，这种催化剂可使一个丙烯分子按一定的方向配位在另一个丙烯分子下，并先同催化剂形成络合物，再断键并整齐地同前一个丙烯分子连接，从而可形成分子排列呈全同立构或间同立构的聚丙烯。

配位络合聚合的方法是使分子整齐排列的有效方法。如今人们已把这种方法用于许多高分子材料的合成，如顺式聚异戊二烯橡胶、乙丙橡胶等。而聚丙烯已成为我们生产生活中不可缺少的材料之一。它具有塑料中最小的密度，可在 120 的温度下长期使用，无毒，无臭，耐折叠疲劳，成纤性好，因此广泛用于包装、食品容器、绞链、绳索、纤维等方面。据统计，我国在 1983 年聚丙烯产量为 12.08 万吨，到 1992 年已达 72.22 万吨，而且在继续发展。

## 获奖风波

齐格勒和纳塔由于这项成果，荣获了 1963 年的诺贝尔化学奖。遗憾的是他们两人都没有出席颁奖仪式。齐格勒认为纳塔窃取了他的成果而拒绝出席，纳塔则因已瘫痪在床而无法前往。这两位科学家直至去世再未见面。无论怎么说，他们留下的科学财富是十分宝贵的。配位络合聚合理论告诉人们：物质的微观结构和材料的宏观性能是密切相关的，人们可以按照一定的规律

来设计分子结构，以制备出具有预想性能的材料。



## 能导电的塑料

提到塑料和橡胶，人们当然地认为它们是很不错的电绝缘体。是的，绝大多数高分子材料都具有优异的电绝缘性能，可以用来做电线的包覆、插座、插头、电器外壳等。但是，你可知道，在这一般认为不能导电的塑料家族中，却出现了一支“叛军”，这就是导电聚合物材料。说起它的发现和发展，几十年来，不知凝聚着多少高分子材料专家的心血。

### 纳塔教授的失败

意大利的纳塔教授是配位络合聚合理论的创立者，前面说过，是他首先在上世界上把丙烯合成为聚丙烯。由于这些成就，他后来荣获了1963年的诺贝尔化学奖。从1958年起，他就对把乙炔合成为聚乙炔产生了浓厚的兴趣，开始了孜孜不倦的研究。

自配位络合聚合理论建立以后，单烯类单体的聚合研究工作已日臻完善。所谓单烯类单体，指的是那些含有两根共价键、并且能够发生聚合反应的有机小分子化合物。科学家们发现，这些小分子的那两根共价键中有一根比较牢固，称为  $\sigma$  键，而另一根却相对比较弱，称作  $\pi$  键。可采用一定的方法把较弱的  $\pi$  键“切断”。这样，一根  $\pi$  键就断成了两根“空着头”的“ $\pi$  键”，就好像每个小分子空出了两只“手”。于是，我们就可以让小分子们“手”拉“手”地连接起来，形成分子量很大的高分子了。这就是对单烯类单体为什么能聚合成高分子聚合物的一种粗浅解释。

与单烯类单体不同，乙炔是一种很特别的小分子化合物。它的分子有3根共价键，两根是  $\sigma$  键，一根是  $\pi$  键。如果能够像对单烯类单体那样，把乙炔的  $\pi$  键“切断”，再让乙炔小分子“手”拉“手”地连接起来，也可以聚合成大分子。纳塔教授就是这样想的。

如果这种大分子能聚合出来，那么其中碳原子之间既有用两根键（双键）连接的，也有用一根键（单键）连接的，而且在这个分子长链中，双键和单键交替排列。这种结构形式叫作共轭结构。按照有机化学的知识，有这种共轭结构的大分子肯定会表现出许多特殊的性质。这个激动人心的想法激励着纳塔教授为此工作了许多年，甚至在他得病瘫痪在床上时，依然在妻子的帮助下顽强地进行着研究。可是，经过无数次实验，他始终只得到一些黑色的粉末，不能制成像样的材料。直至1979年他去世时，这项工作仍然没有很大的进展。尽管纳塔一生取得了许多科学成就，但在乙炔聚合的研究上，他终于抱憾而逝。

### 错误导致了奇迹

纳塔教授失败了，乙炔聚合的想法却吸引了许多科学家。日本的白川英树教授从1960年开始，也投入了这个课题的研究。经过整整10年的坚持不懈的努力，收获却很小。1970年的一天，白川教授的一位朝鲜籍研究生，按照导师的指示进行着这个聚合实验。这位研究生的日语不太好，他把导师要求的催化剂浓度听错了，试验用的催化剂浓度比以前大了近100倍。然而这一错误竟然导致了奇迹——一张聚乙炔薄膜合成出来了！白川英树教授欣喜

若狂，多年的愿望竟这样意外地成了现实。

科学家对聚乙炔的性能展开了全面的测定，结果表明，它的性能中最突出的是导电性能。材料的导电性能常用它的电阻率的倒数——电导率来表示，单位是西门子/厘米。电导率越大，电阻率越小，导电性能就越强。高分子材料通常都是很好的绝缘材料，因此电导率很小，在  $10^{-18} \sim 10^{-12}$  西门子/厘米。白川教授他们制成的聚乙炔，电导率为  $10^{-10}$  西门子/厘米，比一般高分子材料高了 2~8 个数量级。导电性的提高加上材料易成型，使得聚乙炔一下子成了材料科学家的“宠儿”。

### 麦克第阿密特教授的参与

白川英树教授成功了。但他深深知道，他个人的力量是很有限的，而且仅仅靠化学家的力量也不足以解决许多边缘问题。白川教授胸襟开阔，对自己的工作毫不保密，他公开声明欢迎各行各业的科学家与自己合作。

美国宾夕法尼亚大学的物理教授麦克第阿密特在仔细参观了白川的实验室后，决定与他携手共同开展对聚乙炔的进一步研究。

麦克第阿密特教授擅长于单晶硅的掺杂工作。我们知道，单晶硅本身并没有半导体性质，只有掺入某种元素以后才能制成半导体晶体管。这叫作掺杂。麦克第阿密特教授带领他的工作小组，展开了对聚乙炔的掺杂研究。他们进行了选择合适的掺杂剂，寻找掺杂的最佳条件，确定掺杂工艺等一系列艰难的工作，终于在 1977 年得到了研究成果：用白川方法制成的聚乙炔薄膜，经碘掺杂后，电导率达到了  $10^2$  西门子/厘米。这就是说，将原先聚乙炔的电导率提高了 12 个数量级。多么了不起的进展！

### 纳尔曼更上一层楼

宾夕法尼亚大学聚乙炔研究小组的工作已尽善尽美，用掺杂法提高聚乙炔的电导率也几乎走到了尽头。然而  $10^2$  西门子/厘米仅仅使聚乙炔属于半导体范围，人们还期望着更大的发展。

“山穷水尽疑无路，柳暗花明又一村。”纳塔、白川这些高分子化学家无法解决的问题，由麦克第阿密特等物理学家接过来解决；现在他们又面临新的挑战，于是又有高分子物理学家和高分子材料专家来接手。前联邦德国的纳尔曼教授正是其中之一。

纳尔曼教授用白川催化体系获得聚乙烯后，马上对其进行特殊的熟化和拉伸取向处理，将处理好的聚乙炔薄膜再用宾夕法尼亚大学研究小组的办法掺杂，结果使这种材料的电导率提高到了  $1.2 \times 10^5 \sim 1.7 \times 10^5$  西门子/厘米，也就是说，又提高了 3 个数量级，从而达到了导体的指标。这项工作成就是 1987 年报道的，可见，为了这 3 个数量级，科学家们又花了 10 年时间。

在金属中，金和银是最佳导体，而广泛应用的是居第三位的铜，它在室温时的电导率为  $5.5 \times 10^5$  西门子/厘米。纳尔曼的聚乙炔其导电能力已与铜相近了，而且它在空气中能很稳定地存在。

后来，又有其他科学家如黑格等人，认为纳尔曼的方法还有可改进之处。用他们改进了的方法研制成的聚乙炔，经测量，电导率竟高达  $2 \times 10^6$  西门子/厘米，也就是说，超过了铜，是真正的导电塑料了。

## 风起云涌的导电聚合物

从 1958 年纳塔教授的研究开始，到 1987 年纳尔曼教授的成功，经过 30 年的努力，导电聚乙炔终于诞生了。事实上，聚乙炔只是导电塑料的一种。这些年来，对其他导电塑料的研究也有许多成就，每年发表的有关论文达数百篇。单是美国，在这几年的美国物理学会和美国化学学会的年会论文中，有近一半是关于导电高分子材料的。研制成功的导电塑料有：聚苯胺、聚噻吩及其衍生物、聚吡咯及其衍生物、聚对苯乙炔、聚对亚苯基等。

导电聚合物的研究除了在开发品种上，还在导电机理上、导电聚合物的应用、超导聚合物等方面取得了进展。在应用方面已有许多成功的尝试，我们举几个例子。

导电聚乙炔的吸收光谱与照到地面上的太阳光十分相似，也就是说，导电聚乙炔能把太阳光中几乎所有的能量都吸收下来，因此是做太阳能电池的理想材料。

导电聚合物由于掺杂、脱杂，会发生从绝缘体到导体之间的不同相变化，这种变化同时带来吸收光谱的变化，聚合物的颜色也就发生变化，所以用来做电致变色显示元件是很理想的。

透明的导电聚合物已成为透明导电膜的首选材料。我国访问学者曹镛参与的希格尔小组，已用某种导电聚合物制成了发光二极管。美国军界已把导电聚合物用于隐身飞机。

此外，导电聚合物还在传感器、电磁屏蔽、催化等方面作出了贡献。

### 光谱

光事实上是一种电磁波，因此也有波长（或频率）。只有单一波长的光是所谓“单色光”，一般是由激光器产生的激光。我们通常所见到的光都不是单色光，而是复色光。复色光有多种甚至无数种波长。把这些波长按大小排列起来，就成了相应复色光的光谱。

一般物质都能吸收和反射光，有的物质能透射光，也有的物质能发射光。它们吸收、反射、透射或发射的光都具有一定的光谱。因此，通过对某种物质的有关光谱的研究，可以反推出这种物质的成分和性质。光谱已成为科学家们的有力工具。

目前，从事导电聚合物研究的科学工作者正充满信心，大家一致认为，21 世纪导电聚合物研究将有突破性的进展，超导型导电聚合物也有成功的希望。导电聚合物全面造福于人类的日子已为期不远了。

## 会爬杆的液体

### 千奇百怪的流动现象

我们知道，气体或液体可统称为流体。这是因为它们没有固定的形状，在外力作用下会发生流动。流动是我们日常生活中司空见惯的现象，但不知你是否知道，有些液体的流动现象十分奇怪。下面就让我们来介绍一些。

当我们用棒快速搅动杯中的水时，会发现水将沿杯壁上升，而棒周围的水面则下降。但如果同样搅动某些高分子溶液或熔体，奇怪的现象发生了：这些溶液或熔体会沿着棒往上爬，棒转得越快，爬得越高。这就是 1948 年由韦森堡发现的高分子的“爬杆效应”，又称“韦森堡效应”。

在地质钻探中，需要用泥浆冷却钻头。如果输出泥浆用的泵力量较小，尽管泥浆是液体，却不会从泵口流出，就好像泵被堵塞住了一样。当泵达到一定力量时，泥浆便会突然地倾泻出来。除了泥浆之外，还有一些流体也具有这种性质。由于美国物理化学家宾汉姆研究了这种现象，所以这类流体被称为“宾汉姆流体”。

在塑料和橡胶的挤出加工或纤维的拉丝生产中，人们发现，无论流出口设计成什么形状，流出产品的出口尺寸均会比这流出口的尺寸大，但长度却缩短了，仿佛它们能记住出口前在容器中的形状，并在离开出口后要努力予以恢复似的。人们把这种现象称为“弹性记忆效应”。

一位叫汤姆斯的科学家发现，若在水中加入极少量的某些高分子物质，加入量少到仅为水量的百万分之几，则水的流动阻力会下降 75%，输送水管的出水率会因此一下子提高好几倍。若把这种含高分子的水注入油层的岩隙，可使石油的产量提高 20%~50%。这种现象称为“汤姆斯效应”。

#### 我国的“陶钟”和埃及的“水钟”

其实古代人们对液体的流动早有观察和利用。据我国 2000 年前的《墨经》记载，我们的祖先把陶瓷制成漏斗，灌入沙或水，用流出的沙或水的量来计时，这种“陶钟”的精度竟可同现代的钟表媲美。

无独有偶，埃及人在公元 1500 年前制造的“水钟”，不仅可以测量容器中水层高度与时间的关系，还可测定温度对水流粘度的影响，堪称一绝。

各种液体在流动时还有许多其他奇怪的现象，如无管虹吸、挤出畸变等等。于是，一门专门研究材料流动与变形的学科——流变学产生了。流体，特别是高分子流体是很重要的一类材料，因此，在高分子材料技术研究中，流变学研究也十分活跃。

## 牛顿流体定律

17 世纪英国伟大的科学家牛顿，是最早深入研究物质流动和变形之间规律的人。对于水流的研究，他发表了著名的牛顿流体定律。该定律用数学公式表达了流体的流动阻力和切变速率之间的关系。式中的比例系数称为流体的粘度，其单位被定名为“泊”，以纪念对流变学有重大贡献的法国科学家泊肃叶。

## 非牛顿流体

牛顿的研究对象是水或气体等小分子流体，牛顿流体定律中的比例系数即粘度是一个不变的常数。这类流体称为“牛顿流体”。随着现代科学技术的发展，出现了大量新型的流体，若套用牛顿流体公式，将发现它们的粘度不再是一个不变的常数，人们将这类流体称为“非牛顿流体”。

对非牛顿流体的深入研究大大推动了流变学的发展，也提高了物质生产的水平。例如，我们在油漆家具或粉刷墙面时，当然希望涂层越均匀越平整越好。但在垂直面上要做到这一点却并不容易。其实，油漆和涂料就是非牛顿流体，它们的粘度是可变的。我们选定油漆、涂料的配方时，可要求配成的油漆或涂料在涂刷时粘度（阻力）很小，而一旦刷子停刷，粘度又变得很大，不会自行下流。这样，就可做到既涂刷省力又质量上乘。油漆与涂料的这种特性，用术语就称为“触变性”。也就是说，这种非牛顿流体当有外力的作用时粘度很小，没有外力时又变得很大，具有这种流变性能的流体称为“剪切变稀流体”。

相反，在塑料、橡胶、皮革、纤维及食品等工业中，不少流体在流动中随外力的增大，粘度随之增大。这类流体称为“剪切增稠流体”。

宾汉姆流体也属于非牛顿流体的一种，但又与牛顿流体有相似之处：当施加的外力超过一定值后，宾汉姆流体从不流动变成像牛顿流体一样流动，粘度不再变化。究其微观原因，宾汉姆流体（如泥浆）具有一种胶状结构，颗粒间相互连结。若外力不能破坏这种连结，它就不流动；而一旦破坏了，颗粒就像小分子一样欢畅地流动起来。

## 韦森堡效应

让我们再回到韦森堡发现的爬竿现象上来。高分子液体或熔体在旋转时会沿中心杆向上爬。如果将高分子流体置于两个转动的平板中间，它又会把两块平板分别向上、向下推挤。

如果把高分子流体放在一个圆锥板粘度计中，会发现在粘度计的不同位置，流体向上爬的高度不同，越近中心爬得越高。

原来，这些高分子流体不仅具有粘性，而且具有弹性。它们在流动时不仅有切向应力（沿流动方向），还会产生法向应力（垂直于流动方向）。流体的弹性成分越大，其法向应力就越大，也就能往竿上爬得越高。不同的高分子流体，由于它们的分子量、分子量分布，以及流动速度不一样，弹性就不一样，爬竿的能力也就不一样。

人们已经利用韦森堡效应，让赤裸的电线直接包裹上塑料，完全淘汰了过程复杂、成本高昂的沙包线工艺。

## 高分子流体的“缩骨功”

前面说过，在进行塑料挤出成型、橡胶拉片、纤维拉丝时，会出现产品厚度（或尺寸）增大，而长度缩小的现象，这就是弹性记忆效应。那么，这种弹性记忆效应的原理是什么呢？

原来，高分子溶液或熔体的分子一般都是长链分子，由于它们的长度比

它们的直径大得多，通常就像线团那样一团一团地蜷曲着。然而当这些完全不规则的胖胖的线团不得不通过模具的小孔时，由于体积不能变化，故只得把自己拉长（分子链被迫拉伸）；而一旦冲过模孔，它们便努力恢复自己原来自由松散的状态。这就像武侠小说中的高手，有一种“缩骨功”，得以穿过本来无法与人身体相适应的孔洞，过后又重新恢复正常一样。

高分子流体的这种弹性恢复一般在 0.02 秒里就能完成。现代的科学手段进一步证实，它与法向应力之间也存在一定的关系。有了这些科学理论根据，人们就能更准确地制造高分子产品，把它们的尺寸控制在我们所要求的范围之内。

今天，流变学已在现代机械制造、冶金、地质勘探、化工生产、新材料设计等多个领域中起着指导作用。同时，新问题新现象也不断涌现，比如有的高分子溶液会自动地爬上容器壁而流淌出去（这称为无管虹吸现象），气泡通过高分子溶液或熔体时会变成扁形、椭圆形等无法理解的形状。

由此可见，在流变学研究领域中，还有许许多多的谜等待着人们去揭开。可以相信，流变学将不断地发展，也将不断地指导有关的工业部门生产出最优质的产品。有志献身于流变学研究的人，一定会大有作为。

## “足球分子”

### 克罗托的大胆假设

1984年，美国的罗弗林在实验室里用激光轰击石墨时，在石墨的蒸气中发现了一些很奇怪的碳原子簇。这些碳原子堆积在一起，却又并不像石墨那样呈层状排列结构，也不像金刚石那样呈四面体结构。罗弗林的英国导师克罗托教授对这个发现十分重视。后来，他在美国的赖斯大学实验室中改变了部分实验条件，再次获得了这些碳原子簇，并且发现大多数的碳原子簇不多不少正好是由60个碳原子组成的。

60个碳原子组成了这么一个大大的“碳分子”，那么它的结构该是怎么样的呢？它又为什么这么稳定地存在着呢？这一系列的问题让克罗托教授终日冥思苦想，食不知味，睡不入眠。

一天，在一个偶然的时机里，他被一只亮闪闪的球形模型吸引住了——只见这个由著名建筑学家布克曼斯特·富勒设计出来的模型，十分像一只拼皮足球，只不过它是中空结构，由一大堆骨架构成了20个正六边形和12个正五边形，呈一定弧度一个接一个地排列，最终成为一个球体。克罗托教授呆呆地望着这只笼子似的模型，仿佛看见那60个碳原子乖乖地一一跳到那些五边形的顶点上，12个正五边形正好有60个顶点！一个大胆的设想在他的脑子里形成了。

为了感谢建筑学家富勒给他的灵感，克罗托教授把自己假设的这种新的碳分子结构称为“富勒笼球”，也有人把它称作“足球分子”，而现在大家还习惯地把它写作 $C_{60}$ 。

### 克雷希梅尔的贡献

然而，克罗托教授的假设只是引起了科学界的注意，由于没有足够多的 $C_{60}$ ，就没有办法进一步通过实验来证明这个假设。直到5年后，一位德国科学家克雷希梅尔，在从氮气氛中石墨放电时产生的松烟中，首次获得了较多的碳原子簇，为人们全面深入研究 $C_{60}$ 提供了保证。

经过许多科学家大量的研究和论证，终于证明克罗托教授的“富勒笼球”假设是正确的！也就是说，碳元素除了四面体结构的金刚石和层状的石墨之外，还存在着第三种球状形态！

### 庞大的碳簇家庭

进一步的研究发现，这种形态并不要求非60个碳原子不可。 $C_{20}$ 、 $C_{24}$ 、 $C_{28}$ 、 $C_{32}$ 、 $C_{36}$ 、 $C_{50}$ 、 $C_{60}$ 、 $C_{70}$ 、 $C_{84}$ ……都是存在的。只不过当中最稳定的是 $C_{60}$ ，能长期存在。其次是 $C_{70}$ ，再次是 $C_{50}$ 。其他的碳簇稳定性较差。当然，它们的形态也略有区别，不同的碳簇含有不同个数的正六边形和正五边形。例如，拿 $C_{70}$ 来说，它是由25个正六边形和12个正五边形构成的中空椭球笼。几何学家证实： $C_{60}$ 的碳球结构是所有碳球中可以避免两个五边形（五元环）相连的最小分子； $C_{70}$ 是比 $C_{60}$ 在轴向上更长一些的橄榄球； $C_{50}$ 是可以避

免 3 个五元环相连的最小分子； $C_{28}$  是可以避免 4 个五元环相连的最小分子； $C_{20}$  则是可能存在的最小的中空笼状碳分子。

### 从“双胞胎”到“多胞胎”

在克罗托以前，人们知道碳有两种“同素异构体”（即组成元素相同而分子结构不同的物质）——金刚石和石墨。尽管在大多数人心目中，一个代表高贵，一个代表普通平常，其实它们都是由纯粹的碳元素组成的，可谓是一对“双胞胎”。所不同的是，金刚石由许许多多正四面体分子结构组成，每个四面体由 4 个正三角形围成，这四面体 4 个顶点的位置，又分别与周围 4 个正四面体的中心相重合。这样整齐致密的排列，使得金刚石本身棱角分明，切面光滑平整，光照时光芒四射，而且有非常高的硬度，除了用来制作高贵的装饰品外，还可以用来制造刀具和钻头等。再看石墨，它由许多正六边形排成的平面层状分子结构组成，层与层之间的连接很弱，没有棱角，没有折光，硬度很小，但润滑性很好，可以导电。它们二者虽然如此不像，但毕竟有着相同的“血缘”，所以，在高温高压下煅烧石墨，部分地改变它的结构，就成了以假乱真的“人造金刚钻”。

十余年前才发现的富勒笼球是碳原子自身结合的第三种形态。原来，由碳元素自身组成的物质至少是“三胞胎”。加上其他碳簇分子，碳单质成了一个庞大的“多胞胎”家族。

通过先进的仪器，科学家们已像取指纹似地把  $C_{60}$  和  $C_{70}$  的光谱性质测定出来。通过扫描电镜还给它们拍了“身份证”照片。从照片上来看， $C_{60}$  是一个直径为  $7.1 \times 10^{-8}$  厘米的圆球，最邻近的两个球的球心距离大约为  $1.02 \times 10^{-9}$  厘米。球是中空的，表面的碳原子构成紧密结合在一起的六边形和五边形。而且这些碳原子十分活泼，可以和各种无机基团或有机基团结合生成许多衍生物。

### 大器晚成

尽管富勒笼球对于人们来说，还是个“婴儿”，我们尚不能清楚地知道它究竟是怎么回事，会有多大应用。但是就手头已有的资料分析，它日后定能成“大器”。

前面说过，从  $C_{60}$  的“身份证”照片上得知，两个球之间的球心距是  $1.02 \times 10^{-9}$  厘米，而每个球的直径是  $7.1 \times 10^{-8}$  厘米，也就是说球面间隙为  $3.1 \times 10^{-8}$  厘米左右。根据间隙算出它们的结合能，发现这个数值与目前的半导体材料的能隙十分接近。因此  $C_{60}$  很可能在电子材料、通信工程、计算机元件材料上大显身手。

$C_{60}$  分子又是一个中空的笼子般的球状体，这个空腔大得可以容纳下任何金属离子，我们称这种容纳了金属离子的化合物为包合物。已有人把很小的钾离子和很大的镧离子分别“放”入  $C_{60}$  分子的笼球中。不过，包合物的性质与  $C_{60}$  和金属离子都有关系，具体能有何种应用尚不清楚。据报道，1992 年，北京大学已成功地将锡离子放入球中，并且发现这种锡包合物具有超导性能，超导临界温度为  $-236$ 。这是一项十分有意义的研究成果。



再看  $C_{60}$  的表面，由于这里的碳原子十分活泼，很容易发生各种各样的化学反应，获得的产物也有各种各样的性质。有人认为，干脆拿碳球表面作为某些化学反应的场地，或许能获得一些过去从未制得的化合物。

还有人发现， $C_{60}$  可以被氢化成  $C_{60}H_{18}$ ，而这种氢化物又可以返回到  $C_{60}$  的状态，进一步又形成带负电的  $C_{60}^-$  离子。利用这种性质，可制造充电电池。这种干净、大容量的充电电池正是无污染汽车的理想动力。

天文物理学家们在研究星际物质的光谱图时，曾对许多陌生的光谱图感到困惑。对照  $C_{60}$  的“指纹”后发现，其中有些正是  $C_{60}$  及其碳簇“兄弟”！说明在浩渺的宇宙里同样存在着  $C_{60}$ ，这的确令天文物理学家们振奋，人类对那个宏观大世界的认识又进了一步。

#### 苯结构的发现与 $C_{60}$ 的发现

1825 年，德国有机化学家凯库勒曾大胆假设由 6 个碳原子构成的苯是一种六边形的环状物。这个假设被证实后，开始了苯以及芳香族化合物的研究，含苯环的化合物成为有机化学中一类极重要的研究对象。而克罗托教授的“富勒笼球”假设，简直就像是历史的重演。 $C_{60}$  的发现，不仅为碳家族增添了一名新成员，更重要的是它将繁衍出一个新的家族。可以预见，这个家族将创造出许多新的奇迹，产生许多新的材料。让我们拭目以待吧！

$C_{60}$  及一系列碳簇分子的发现，是化学发展史上一件具有划时代意义的大事。为了表彰这一重大科学成就，1996 年的诺贝尔化学奖授给了克罗托和另两位对  $C_{60}$  的发现作出贡献的科学家，他们是美国赖斯大学的化学教授柯尔和斯莫利。

## 合成纤维的新篇章

### 从无花果叶子说起

在圣经故事中，亚当和夏娃因在伊甸园偷吃了善恶果，羞耻之心油然而生，但他们只能用无花果叶子编成裙子，遮盖赤裸的身体。这个神话故事说明了这样一个道理：衣服不仅是人类抵御寒冷、保护身体的工具，更是人类文明进步的标志。

自古以来，人类用棉花、羊毛、麻、丝这些天然纤维来纺纱织布，缝制衣服，这同亚当和夏娃用无花果叶子来遮体在本质上是一回事，用的都是大自然的现成材料。

合成纤维诞生后，一度风靡世界，人们曾以穿一身尼龙衣服来显示身价。但是直到 1960 年，世界总人口达到 30 亿时，合成纤维还只占有生产生活用纤维的 4%，人们依然主要靠天然纤维来织布制衣。

时至 1990 年，世界人口猛增至 53 亿，而棉田和牧场的面积无法再增加，纤维作物的产量也尽可能地达到了最大值，人们的衣着再也无法仅仅依靠天然纤维了。事实上，这一年全世界合成纤维所占的百分比已达到了 45%。

据世界粮食组织估计，到 2000 年，世界人口将达到 63 亿，人均纤维的消费量若是按年递增 0.5% 计算，天然纤维是远远不能满足人类的需求的，唯一的出路是合成纤维。

据美国有关部门估计，到 2000 年，其国内市场的纤维中，将有 70% 属于合成纤维。其实，整个世界的发展趋势又何尝不是如此。

### 四大“纶”

走进布店，今天的人们已对“涤纶”、“腈纶”、“锦纶”、“丙纶”等名词十分熟悉了。高分子行业中有专门的名词命名这些合成纤维，但到了纺织行业，为通俗易懂起见，一律把各种合成纤维称为“纶”。至今，以上述四大“纶”为主，加上许多新型的“纶”，占据着衣料市场。它们可以满足人们对衣着的质量、数量、品种等各方面的要求。

涤纶是被公认为最主要品种的合成纤维，它是用聚对苯二甲酸乙二醇酯纺丝织成的。自诞生以来，涤纶在质量、使用性能、使用范围等方面都大有发展，使其产品更加高档化。就拿涤纶真丝来说，第一代产品仅仅在外观上同真丝质地十分相似；第二代产品则进一步在染色性、覆盖性、悬垂性等方面有了很大的提高；第三代，在颜色和手感上几可乱真；到了第四代产品，直接从结构和性能上着手改进，吸湿性和穿着舒适性已同真丝一样，而强度却远远高于真丝。

腈纶是第二大合成纤维，它是由聚丙烯腈纺丝得到的，主要用来代替毛、呢织品。其实它色彩艳丽丰富，抗虫蛀，重量轻，保暖性佳，洗后不缩水，在这些方面，它更胜毛呢一筹。目前人们正致力于使它的质地全面地达到甚至超过毛呢。

由聚酰胺（俗称尼龙）纺出的丝，纺织业中称为锦纶。纺织业中用的主要是尼龙 6 和尼龙 66。锦纶的用途广泛，因为它的强度高，宜于织成袜子，不仅在 70 年代流行的“锦纶袜”，当今女性们爱穿的丝袜也全是它制得的。

还有家家户户少不了的尼龙绳，细细一根，却能挂很重的东西而不怕断。

还有一类叫丙纶，是由聚丙烯纺丝而得到的，虽发展较晚，却异军突起。它原料易得，性能优异，有着很广阔的前景。

除了这四大类“纶”之外，还有维尼纶（聚乙烯醇纤维）、氯纶（聚氯乙烯纤维）、乙纶（聚乙烯纤维）等。所有这些合成纤维布的生产都需要纺织机，所以人们也称它们为“化纤布”。

## 非织造物的兴起

从棉花、羊毛或合成纤维到衣服是一个复杂的过程。对于棉花和羊毛，先要经过采集和加工；对于合成纤维，则先要由石油化工厂制备。然后经过纺丝、加捻、整理，机织或针织成衣料。最后设计、裁剪，缝制成服装。

虽然合成纤维是人工制造的，但从其制备到织成衣料，却完全模仿了天然纤维的加工过程。能否把这个过程也“人工”地改造一下呢？于是，被称为“无纺布”的非织造物应运而生。

在非织造物的生产工艺中，取消了纺织机和针织机，“无纺布”因此得名。这种工艺的特点是，借助合成纤维不同层间的连接方法，或者用短纤、长纤，直接铺成网形。最先进的非织造物制造方法是将聚合物膜拉伸，成为纤维网，或用化学法、喷气法等直接形成纤维网。

非织造物的用途远不止在制衣业。早在它诞生初期，就用于包装、过滤、吸附、增强等场合。随着技术的进步、性能的提高和成本的下降，它的应用已扩展到工业、农业的各行各业。在有些场合，非织造物已成为不可替代的产品。例如，园艺业中的“植生带”，就是利用非织造物的光学性质及降解性而发挥其独特作用的。在极薄的、可以被生物降解的非织造物上，用激光均匀打洞，洞边再粘上优质草籽，就制得了植生带。把它铺在土地上，只有那些优质草籽可以接受阳光而生根、发芽、成长；而地面上的其他杂草则被植生带覆盖住而死亡。当优质草已长成绝对优势后，非织造物也就开始被泥土中的微生物分解，消失，不留下一点污染。

## 高科技合成纤维

人们常用“纤度”来表征纤维的细度与密度，其单位是“旦”，被定义为9000米纤维长度的克重数。比方说，某种纤维的纤度为10旦，就是指这种纤维长为9000米时，重量为10克。普通纤维的纤度一般为1~10旦。高支数的纤维，纤度在0.4~1旦。而利用当今高科技对纤维进行超微细化，可使其纤度低于0.3旦。纤度的大幅度降低，使纤维发生了质的变化。用低纤度纤维制成的仿麂皮织物、仿真丝织物、人造革，达到了以假乱真的地步。用它们制成的各种高密度织物，如高性能清洁布等，深受市场欢迎。

日本自知国土小，人口密集，多地震，在多年之前就开展了特种纤维用于建筑的研究。他们以高强碳纤维、芳香族聚酰胺纤维和普通的沥青纤维为原料，用特定方法制成了强度非常高的建筑材料，并用这种材料成功地建造了两幢高达42层的建筑物。日本大成建设公司更是设计了面向21世纪的超高层建筑，称之为“X—SEED400”，其建筑高度达4000米，甚至超过了富士山。这样高的建筑物，其稳固性就是由特种纤维来保证的。

不仅建筑行业要用到新型纤维，军事、航空、航天这些尖端科技领域，都需要新型纤维材料。拿海湾战争来说，多国部队使用的高性能歼击机、主战坦克、军用直升飞机、导弹、弹道导弹发射装置、防弹背心、头盔、降落伞等，无一不是用特种纤维加工制成的。据报道，用芳纶织物制成的复合钢板，抗穿甲弹的能力比相同厚度的普通钢板强 10~20 倍。最新的波音 777 客机，大量采用了高强中空的聚丙烯腈碳纤维。而“哥伦比亚”号航天飞机共采用了 10 多种特种合成纤维，总重量达 1 吨多。这些特种纤维质轻而强度高，在-70~120 温度范围内，尺寸的稳定性很好，热胀冷缩效应微乎其微。

除了以上强度特别大的合成纤维外，高科技合成纤维研究的另一重点是功能型合成纤维。在各种纤维的分子上连接上特殊的基团，这些基团都带有一定功能，再把纤维制成中空形式，就制成了功能纤维。它在能源、环境保护、医学等领域已初露锋芒。例如在“海水提铀”方面，用某种球形离子交换纤维提取铀元素已获成功。日本建成的世界上第一座海水提铀工厂，用的便是这种纤维。又如，人们发现活性碳纤维可以处理含酚废水，还能吸附、浓缩、回收废水中有害的有机溶剂。在医学上，人们已开始试验用中空纤维分离膜来制造人工肾、人工肺、人工肝等人造器官。相信在不久的将来，肾功能衰竭、肝癌、肝硬化等疾病不会再像如今这样可怕。

## 从玻璃钢谈起

### 不是钢，胜似钢

#### 刚柔相济的跳高撑杆

你看过撑杆跳高比赛吗？那真是一种力量与艺术的完美结合。只见运动员双手紧握撑杆，先是疾速飞跑，当跑到横杆前时，撑杆触地，借着助跑的一股冲力，身体腾空而起，如矫健的雄鹰，掠过横杆，轻轻落在泡沫软垫上。显然，在这一过程中，撑杆起到了决定性的作用。你看那撑杆先是弯曲，而且弯的弧度非常大，然后挺直，将运动员弹向空中。这细长、神奇的撑杆，它柔中带刚，又富有弹性，比竹杆强韧，较钢棒轻巧，真可谓“刚柔相济”。它是用什么材料做的呢？

现在世界上绝大多数撑杆跳高运动员所用的撑杆，都是用玻璃钢做的。但玻璃钢是怎样一种材料？它是怎样诞生的？玻璃钢是钢吗？玻璃钢里有玻璃成分吗？

#### 玻璃钢是怎样诞生的

玻璃钢诞生于本世纪 40 年代。那时，正值第二次世界大战。战争需要大量的武器装备，迅速发展的军事工业对材料提出了越来越高的要求。例如，制造飞机的材料要求密度小而强度高；制造潜艇的材料，既要耐海水腐蚀，又要能防磁，以避开鱼雷的袭击。同一种零件要求同时具有好几种优异的性能，有时这些性能看起来是相互矛盾而不能兼有的。显然，这样的要求是任何一种单一材料所无法满足的。于是，人们设法把两种或两种以上的材料结合起来，让它们取长补短，相得益彰，制成兼有几种优良性能的新材料，这就是复合材料。

虽然“复合”的思想可以追溯到久远的古代，但用到人工材料的复合材料则直到本世纪上半叶才出现。先是 1907 年世界上第一家人工合成酚醛树脂厂建立，接着一大批人工合成树脂，如脲醛树脂、环氧树脂、不饱和聚酯树脂等热固性树脂相继出现。树脂材料容易成形，比重小，耐磨，耐腐蚀，但它们脆性较大。于是人们用天然纤维与之复合，产生了最初的含有人工材料的复合材料。其中天然纤维称为增强材料，人工合成树脂称为基体材料。如在无线电通信设备和军事器械中常用的“电木”，就是用木粉、布、纸或其他纤维作为增强材料，经浸渍酚醛树脂层压而成的复合材料。

1938 年，人们制成了玻璃纤维。到二次大战，出于军事的需要，在“比铝轻，比钢强”的要求下，人们把玻璃纤维作为增强材料，以一类热固性树脂作为基体材料，复合成了现在所称的“玻璃钢”，用于制造飞机零件。从此以后，人工复合材料便一发而不可收，成了当前材料技术的一个主要发展方向。

### 不是钢的“钢”

你别望文生义，以为“玻璃钢”是钢的一种。钢是金属材料，是由铁和

碳这两种基本元素组成的合金。玻璃钢中没有金属元素，更不是铁碳合金，它是一种复合材料。之所以称它为“玻璃钢”，是因为它具有钢一般的刚强性格，真可谓“不是钢，胜似钢”。

玻璃钢同一切复合材料一样，由两部分材料组成。一部分称为增强材料，在复合材料中起骨架作用；另一部分称为基体材料，在复合材料中起粘结作用。

玻璃钢中的增强材料就是玻璃纤维。玻璃纤维是由熔融的玻璃拉成或吹成的无机纤维材料，其主要化学成分为二氧化硅、氧化铝、氧化硼、氧化镁、氧化钠等。制成的纤维有长丝、短丝及絮状物，直径一般为3~80微米，最粗也只有头发丝那样粗细。直径为10微米的玻璃纤维，抗拉强度为3600兆帕，相当于在每平方毫米的截面积上能承受360千克的拉力而不断。这种强度比高强度钢还高出2倍。

我们知道，玻璃是很脆的，不小心掉到地上，“啪”的一声便粉身碎骨。为什么拉成玻璃纤维后会有如此高的强度呢？大块玻璃强度不高，是因为其内部存在许多微裂缝、气孔和夹杂物等。如果把大块玻璃比作一块布满小洞的破布，把玻璃制成玻璃纤维就相当于把这块破布撕成许多细小的布条。我们知道，把破布随意撕成布条时总是在有洞的地方撕开，这样，撕下来的布条上小洞就减少了，就变得比破布还结实。玻璃纤维比一般玻璃强度高，甚至比钢还高，道理就在于此。

玻璃钢中的基体材料是热固性树脂。它的作用是把玻璃纤维按一定位置固定下来，使玻璃纤维受力均匀。玻璃钢中常用到的热固性树脂有酚醛树脂、环氧树脂、聚酯树脂三种。基体材料对玻璃钢的性能也有举足轻重的影响。它们的共同特点是密度小、强度高，而且耐蚀性和电绝缘性能好。不同的是：酚醛树脂玻璃钢耐热性较高，可在150~200℃下长期工作，具有良好的综合性能，价廉，但需在高温下成形，即成形性较差；环氧树脂玻璃钢强度高，收缩性小；聚酯树脂玻璃钢可在常温常压下成形固化，便于制成大型构件。

玻璃钢的生产，一般是将几层浸浇了合成树脂的玻璃纤维布层叠到一定的厚度，再经过热压固化，制成各种形状的材料，如板料、管料、棒料等。

## 博采众长

用合成树脂和玻璃纤维复合而成的玻璃钢，既提高了树脂的强度，又克服了玻璃纤维的脆性，有的性能指标超过了其组成材料性能的总和，如玻璃钢比玻璃纤维和树脂都不容易断裂。玻璃钢的密度为2克/厘米<sup>3</sup>，抗拉强度为1170兆帕，比强度（即抗拉强度同其密度之比）为 $6.0 \times 10^4$ 米；而铝合金的密度为2.6克/厘米<sup>3</sup>，抗拉强度为470兆帕，比强度为 $1.7 \times 10^4$ 米，即玻璃钢的比强度是铝合金的3~4倍。玻璃钢具有质轻、高强、耐蚀、电绝缘性能好、能透过电磁波、隔音、减震、传热慢、耐瞬时高温等一系列优点。它的缺点是刚性较差、易变形、长时间工作的温度不能超过250℃、易老化等。

## 用途广泛

目前，玻璃钢产品已有数万个品种，它们在军事、航天、航空、机械、

汽车、舰船、建筑、化工、体育以及人们日常生活中，都有着广泛的应用。

玻璃钢与常用的飞机材料相比，质轻而强度高，玻璃钢比同样重量的铝合金可多承受载荷 2~3 倍。对飞机来说，减轻自重会带来巨大的效益，除了能节省材料、降低成本外，还能提高飞行速度，增加运输量。如果你知道了“超重一克与黄金价值等量”的说法，就能体会到玻璃钢减轻飞机自重的重大意义了。早在 40 年代玻璃钢诞生之初，它就用来制造战斗机、轰炸机上的雷达罩，因为玻璃钢不但不反射无线电波，而且能让电波通过。1944 年 3 月，美国的 BT—15 飞机试飞成功，这种飞机的机身采用了玻璃钢制造的塑料夹心结构，这为进一步在飞机上应用玻璃钢奠定了基础。在现代的大型民航客机上，多处使用了用玻璃钢制造的零部件，我国在 1983 年也试制成功了壳体全部用玻璃钢制成的飞机。

由于玻璃钢具有瞬时耐高温性能，而且传热慢，它被用作导弹、火箭、人造卫星等的外壳和烧蚀防热材料。50 年代后期，美国中程导弹“北极星 A—2”的第二级固体火箭发动机壳体采用了玻璃纤维增强环氧树脂玻璃钢的缠绕制件，它比钢质壳体轻 27%。后来美国人又在“北极星 A-3”第一级火箭壳体所用的玻璃钢中，用高性能的玻璃纤维代替了普通的玻璃纤维，使这个壳体比钢质壳体减轻 50%，从而使这种导弹的射程从 2700 千米增加到 4500 千米。

航天事业的发展，开拓了玻璃钢应用的新领域。对航天器由太空重入大气层的烧蚀性研究，显示了玻璃纤维增强酚醛树脂的卓越性能。第一代头部烧蚀防热材料就是高硅氧玻璃纤维增强酚醛树脂，头部后面的大面积防热层则采用了高硅氧玻璃纤维织物缠绕增强酚醛树脂。

玻璃钢耐海水腐蚀，能吸收撞击能量而达到减震的目的，故适合于制造船舶，包括潜艇、扫雷艇等。1946 年，美国海军第一艘玻璃纤维聚酯小艇诞生。1948 年，美国海军开始生产玻璃纤维聚酯增强塑料的扫雷艇，这种扫雷艇可不受磁性水雷的威胁。目前，水上运动中的赛艇、旅游用的快艇也广泛采用玻璃钢制造。

## 层出不穷的先进复合材料

### 鉴真和尚的塑像

我们已经看到，以玻璃钢为代表的复合材料，开拓了材料技术的一个全新领域。其实，“复合”的思想，可以追溯到距今7000多年的新石器时代前期。那时，人们已会在粘土泥浆中掺入稻草作为墙壁和砖坯的材料，因为他们知道这样可以把粘土的强度和稻草的韧性结合起来，形成比单一的粘土或单一的稻草性能要好的材料。

你听说过1200年前我国唐代高僧鉴真和尚东渡日本弘扬佛法的故事吗？日本至今还保存着鉴真和尚的塑像。其实，这尊塑像是用复合材料制成的。它的制作过程是这样的：先做出一个泥胎，在其外面裹上一层麻布，这麻布就是现在所称的增强材料；再涂上油漆将麻布粘结起来，这油漆就是现在所称的基体材料，它是用大漆和桐油混拌而成的（大漆是由漆树分泌出来的一种天然树脂）。然后再裹上一层麻布，再涂上油漆，如此反复多次，直至达到一定的厚度。最后对塑像表面进行修饰，勾出线条，涂上颜色。等油漆干燥后，用水冲去里面的泥胎，一个中空的、由麻布和油漆复合而成的塑像就全部完成了。这一丈（约相当于3.3米）多高的塑像既轻巧又牢固，一个人就可以轻易举起，倒地也不会损坏。这可说是古代复合材料的成功范例了。

现代生活中的简单复合材料比比皆是，如建筑用的钢筋混凝土也是一种复合材料，它是以钢筋为增强材料，以混凝土为基体材料，制成后比钢筋或混凝土都来得坚固，不容易断裂损坏。

### “三高一低”

到目前为止，可把复合材料的发展史划分为三个阶段。第一阶段是古代，就像制作鉴真和尚塑像的复合材料那样，用的是天然材料，制作工艺比较简单，强度和韧性只能说满足当时生产力发展水平的需要。第二阶段是近代，其典型代表就是玻璃钢。第三阶段是从60年代至今，其特点就是“三高一低”的先进复合材料。

所谓“三高一低”，是指高强度、高模量、耐高温和低密度。60年代以来，航空航天事业的飞速发展对复合材料提出了“三高一低”的要求。而玻璃钢缺乏这样的高性能，特别是它刚性差，易变形，比模量只有 $2.1 \times 10^6$ 米，所以它逐渐被先进复合材料所代替。

所谓先进复合材料，通常是指比强度大于 $4 \times 10^4$ 米、比模量大于 $4 \times 10^6$ 米的复合材料。

#### 模量与比模量

模量，这里是指弹性模量。这是一个表征材料刚度的物理量，一般用材料所受的外力同在这个外力下材料所发生的形变之比来计算。弹性模量越大，说明这种材料越不容易发生形变，也就是说，其刚度越高。

比模量是材料的弹性模量同其密度之比。比模量大的材料，质轻而刚强，显然是优秀的材料。



我们知道，复合材料是由增强材料和基体材料这两部分组成的。要提高复合材料的性能，还得从这两部分入手。

在增强材料方面，人们使用了多种纤维材料，主要有碳纤维、硼纤维、芳纶纤维、碳化硅纤维、氧化铝纤维等。这些都是比玻璃纤维更优越的纤维材料。就拿碳纤维来说吧，它的强度比玻璃纤维高6倍，比钢高4倍，而密度只有钢的1/4。碳纤维的最大特点是刚性好，抵抗变形的能力要比钢大两倍多。80年代以来，人们通过合理选择原材料和工艺条件，不断改善碳纤维的结构，使碳纤维向着高强度化、高模量化的方向发展。

在基体材料方面，用于先进复合材料的有树脂、金属和陶瓷等，因此先进复合材料可分为树脂基复合材料、金属基复合材料和陶瓷基复合材料。

人们可以根据不同的使用要求，选择不同的纤维增强材料和不同的基体材料进行复合，可以制成结构复合材料，也可以制成功能复合材料，或制成结构和功能一体化的复合材料。当前研究较多的是：以高分子纤维、碳纤维或碳化硅纤维增强的树脂基复合材料（最高使用温度可达400℃），以碳纤维、硼纤维、碳化硅纤维或氧化铝纤维增强的金属基复合材料（最高使用温度可达800℃），以及以陶瓷纤维或陶瓷颗粒增强的陶瓷基复合材料（最高使用温度可达1000~1400℃）。此外，还有碳/碳基复合材料。

碳/碳基复合材料是先用碳（石墨）纤维毯、布或三维及多维编织物浸渍可碳化物质（树脂、沥青等），再使其碳化和石墨化，如此反复进行多次，直至达到所需的密度为止而制得的。碳（石墨）的各向异性使其在高温工作时容易炸裂。但制成碳/碳基复合材料后，却具有比强度高、耐高温、抗烧蚀、抗磨损、抗热震性好等优点，可在航天航空领域中用作导弹的头锥、火箭的喷管、航天飞机的机翼前缘等，还可用作大型飞机及军用飞机的刹车片等。

## 应用领域一瞥

先进复合材料的应用几乎涉及各个领域。在航天领域中，除了上面提到的碳/碳基复合材料可作为优良的热防护材料外，先进复合材料还广泛用作结构材料，如卫星天线及其支撑结构、太阳能电池翼和外壳、各种受力骨架、运载火箭壳体、航天飞机舱门等。

在航空领域中，目前先进复合材料在军用飞机上的重量已占到结构重量的20%~30%。格鲁门飞机公司正在执行一项“先进设计的复合材料飞机”计划，按该计划，先进复合材料将占飞机结构总重量的68.5%，使飞机结构重量减轻35%。在民用飞机上，美国研制的“旅游者号”全复合材料飞机，其结构材料的90%以上采用碳纤维复合材料，结构重量仅为435千克，载油量达3200千克。该飞机在1986年创造了不着陆加油连续环球飞行，历时9天，行程40252千米的世界纪录。

在汽车工业中，先进复合材料可用来制造车身、底盘、悬挂结构、传动轴、发动机架等。用先进复合材料制造的轿车车身，比钢制的身轻60%。有人预言，若在欧洲的的每辆轿车上使用1千克碳纤维，其总用量将在12000吨以上，大大超过在航天产品上的用量。

先进复合材料也给传统的自行车带来了巨大的变革。一辆碳纤维复合材料的自行车仅重9千克，骑起来轻快省力。在我国，90年代初，北京环航复合材料有限公司与天津飞鸽自行车厂联合研制了碳纤维复合材料自行车，北

京航天工艺研究所与广州自行车公司合作研制了全碳纤维复合材料自行车。可以相信，不久的将来，先进复合材料的自行车将出现在大街小巷，跑遍祖国各地。

先进复合材料的出现还使材料设计从常规设计转向仿生设计。例如，风力发电机的风翼和直升飞机的机翼所用的材料就是仿造了动物的骨骼结构：其内层结构是硬泡沫塑料，相当于骨骼中心的疏松泡沫组织；中层结构是玻璃纤维增强的复合材料，相当于骨骼中间质地较柔韧的骨纤维与骨质素的复合体；外层结构是刚度、强度都很高的碳纤维复合材料，相当于骨骼表面质地坚硬的骨纤维含量高的组织。仿生设计不仅提供了生动活泼、丰富多彩的设计思路，而且还可以启发人们参照生物体的功能机制设计出新型的功能复合材料。

## 研制材料的新方法

在我们这个丰富多彩、千姿百态的物质世界中，琳琅满目的材料何止万千！除了少数材料，如石头、木材等，是大自然馈赠的天然材料外，绝大部分是经过人们加工或由人们合成出来的人工材料。这些材料是怎样研制出来的？目前研制材料有什么新方法？

### 永不满足于大自然的馈赠

人类从距今二三百万年开始，先后经历了石器时代、铜器时代和铁器时代。在现代生产中，已由钢铁等金属材料为主的局面，逐步向着金属材料和非金属材料并驾齐驱的局面过渡，出现了越来越多的人工合成材料，形成了一个规模宏大的、相互渗透的材料体系。材料和能源、信息共同组成了现代科学技术的三大支柱。

然而，截止于 1983 年联邦德国科学家发现第 109 号化学元素，地球上已经发现的化学元素总共才 109 种。凭借着化合、混合、溶解、复合等一切可以使元素之间相互作用的方法，对分子结构进行各种排列组合，形成了各种各样的材料。到 1976 年底，全世界已经注册的正式材料达到了 25 万种，并估计每年以 5% 的速度递增。如果这种估计符合实际情况的话，那么可推算出目前全世界材料的种数已经超过了 60 万。

人类的物质文明发展史告诉我们：人们永不满足于大自然的馈赠，总是在馈赠之外，用自己的聪明才智和勤劳的双手，不断地研制、创造着各种新材料，共同来营造我们赖以生存的物质世界。然而，由于各个时期的历史局限，特别是受到科学发展水平的限制，人们早先只能凭借着长期积累的经验 and 直观的感性认识，主要依靠大量的实验来摸索、筛选和研制新材料，走着一条坎坷不平的、漫长曲折的道路。让我们用爱迪生发明电灯的故事来说明这一点吧！

## 电灯发明的启迪

### “低能儿”的发明

大家知道，爱迪生（1847~1931年）是一位世界著名的大发明家，他一生完成了2000多项发明，1910年他正式登记的发明项目就有1328项。其中白炽灯是他在1879年获得的一项专利发明。

爱迪生出生在美国俄亥俄州的穷苦农民家庭。他在学校读过三个月的书，后来被老师、同学欺凌，嘲笑他是“低能儿”，被迫退学。少年爱迪生只好一边做工，一边在母亲的教导下读书。他非常勤奋好学，11岁就读完了《大英百科全书》，12岁在火车上卖报，同时坚持自学并亲手做实验。15岁那年，他在火车上做黄磷实验时，不慎着火，结果挨了列车长一记重重的耳光，右耳被打聋。爱迪生不得不离开火车，但他创造发明的雄心壮志并不减弱，继续在艰苦的生活环境中煎熬，实验、失败、再实验、再失败，甚至在实验中受伤，也在所不惜。

晚上，爱迪生在昏暗的油灯下看书，做实验。有一次，当他看到两根通电流的电线偶尔碰在一起，发出了耀眼的火花，给黑暗带来了一线光明，他就琢磨着如何利用电流发光，萌发了创造电灯的念头。他仔细观察了产生火花的两根电线，发现接触处被电流通过时的高温熔化了。他认识到制造电灯的关键是必须寻找经久耐用的灯丝。怎么寻找呢？他只能从现有的材料中一个一个地试验。他先后找了棉花、稻草、鱼骨等，把它们在高温下隔绝空气碳化，制成碳化纤维，又找了一种称为赛璐珞的高分子化物，还找了1000多种毛竹进行试验，总共试验了6000多种灯丝材料，最后终于确定日本产的毛竹比较符合要求，因为它的纤维紧密，碳化后电阻值高，能经受较高的电压，制成的灯泡较亮，使用寿命也比其他材料的灯丝来得长。爱迪生不惜重金，向远隔重洋的日本农民购买毛竹，生产了世界上第一批白炽灯。

### “配方式”或“炒菜式”

爱迪生的这一发明经历，自然说明他孜孜不倦、百折不挠的研究精神。我们在钦佩之余也不免为他惋惜。爱迪生为寻求灯丝材料付出了多大的牺牲和代价，花费了多少宝贵的时间啊！无怪乎有人说，要是爱迪生在这方面少费些时间和精力，他的一生中一定会有更多的创造发明。但话又说回来，在当时的科学水平下，人们对各种材料的内部结构和性能还不甚了了，不采用这种逐个筛选的试验方法，还能采用什么方法呢？爱迪生从6000多种材料中确定日本毛竹为灯丝材料，这在当时称得上是杰出的成就，但它同样带有历史的局限性。爱迪生终究只试验了6000多种材料，他没有试验到8000种、10000种，甚至更多些，他仍然没有找到理想的灯丝材料——钨。

上述研究方法，就是先凭经验选择某种材料，做成试样，加以使用；若使用不满意，再调换材料，重做试验，直到挑选到合适的材料为止。其实，在我国明代名医李时珍编著《本草纲目》时，就运用了这种方法。我国古代还有“神农氏尝百草”的传说，就是由神农来亲口尝一尝草药的味道，以确定哪些草药可以治病，哪些草药不能治病。就好比家中炒菜，要做出美味佳肴，选用何种主料、何种副料，以及油、盐、酱、醋等，大多是靠经验搭配，

经不起人们“打破沙锅问到底”。所以这种比较古老、原始的研制材料的方法，又称为“配方式”或“炒菜式”的经验方法。但是，随着科技和生产的发展，人们已无法安于这种现状，他们从低效率的经验方法中醒悟过来，开始从宏观转向微观，向着物质微观世界的深度和广度进军，以寻求材料特性的客观内在规律，总结出一套崭新的研制材料的方法。

## 向物质的微观世界进军

### 宏观性能与微观结构

不同的材料具有不同的性能，例如，金属材料具有光泽，有较高的强度和塑性，有良好的导电性和导热性；陶瓷材料硬而脆，但耐高温，耐腐蚀；塑料等有机高分子材料密度小，耐腐蚀，电绝缘，但易老化，不耐高温。上述性能，以及材料的外形、色调和聚集状态等，都能直接地表现出来，为我们的感官所感受到，属于材料的宏观性能。然而，材料的宏观性能是物质内部结构的反映。换言之，材料的宏观性能取决于物质的微观世界。所谓物质的微观世界，是指材料内部结构的微观差别，包括原子核的外层电子排列方式、原子间的结合力、晶体结构、分子组成、分子结构等。只有认识了材料的微观结构，才能找到材料具有某种性能的根本原因，从而设计出我们所需要的材料。

惰性气体的原子最外层有 8 个电子，是稳定的结构，不易起化学变化。其他元素的原子最外层电子数都小于 8，因此它们都有得失电子的可能，趋于形成稳定的结构。由重新分配最外层电子而产生的原子间的化学结合力，称为化学键。我们可以用材料的化学键来解释它们为什么表现出不同的特性。

金属材料都具有金属键。金属原子失去最外层的电子成为正离子，脱离原子的自由电子形成所有原子共有的“电子云”，固态金属正是依靠各正离子和自由电子的相互作用，即金属键，使金属原子紧密地结合在一起。金属之所以有光泽，是由于自由电子容易被可见光激发，跳到离原子核较远的高能级，当它重新跳回原来的低能级时，就把所吸收的可见光的能量，以电磁波的形式辐射出来，从而表现出金属的光泽。在正离子的周围充满了自由电子，故各个方向上的结合力相同。固态金属各层原子发生相对位移时，金属键的结合力仍可保持，故金属可发生较大的永久变形而不断裂，即具有良好的塑性。金属中热能传递不仅依靠正离子的振动，而且依靠自由电子的运动，故金属有良好的导热性。当金属中有电位差时，自由电子就要向着高电位方向移动，形成电流，自由电子定向移动受到正离子的阻碍较小，就表现出良好的导电性。

塑料、橡胶等高分子材料，其相邻原子间通常以因共有电子而产生的结合力即共价键结合，原子核外的电子只能在相邻的两个原子核之间移动，缺乏可以自由运动的电子，即使在电位差的作用下，也无法形成电流，故表现出电绝缘性。

掌握了上述微观结构同导电性的关系，我们就可以人为地使高分子材料导电，如设法在分子材料中掺入铜粉、银粉、碳料等导电微粒，也可以把乙炔聚合成聚乙炔，它具有共轭双键，电子可以在其长分子链中运动，因而具有导电性。这样就可以按照我们的意图对材料进行改造。

进一步研究金属原子的排列情况，发现它们都是按照一定规则排列的晶体结构。约有 90% 以上的金属其原子排列呈下列三种常见的晶胞结构。

(1) 体心立方晶胞：原子排列在立方体的各顶点和中心处，如铬、钼、钨、钒等，它们具有较高的强度和熔点，是研制高强度、高温合金的基础材料。

(2) 面心立方晶胞：原子排列在立方体的各顶点和各面的中心处，如铜、镍、金、银等，它们具有良好的塑性和韧性，没有冷脆性，是研制低温合金的基础材料。

(3) 密排六方晶胞：原子排列在正六面柱体的各顶点和上下面的中心，在正六面柱体的中间还有 3 个原子，如镁、锌、铍、镉等，因塑性、韧性差，很少用作结构材料。

晶体结构同金属宏观性能的这种关系，为我们研制新型合金材料指明了方向。

## 显微镜的功绩

应该指出，对材料的认识能够如此洞幽入微，是同生产力的发展、先进实验手段和仪器的产生分不开的。对微观结构的分辨能力用尺寸分辨率来表示。所谓尺寸分辨率，是指能予以分辨而不致混淆在一起的两点之间的距离。人眼的尺寸分辨率取决于视神经末梢间的距离，大约为 0.3 毫米。

自从 1676 年世界上第一台显微镜问世以来，经过不断的改进，现在的显微镜放大倍数已达到 2000 ~ 2500 倍。光学显微镜的尺寸分辨率主要取决于照明光的波长，其分辨率一般为 0.4 ~ 0.6 微米。1950 年出现了用波长更短的电子束来“照明”的电子显微镜，它的放大倍数通常为 5000 ~ 20000 倍，尺寸分辨率在理论上可达  $5 \times 10^{-12}$  米，目前为  $1 \times 10^{-10} \sim 5 \times 10^{-10}$  米，相当于原子间的距离。用微探针和扫描电子显微镜等现代先进仪器还可对材料的微观结构进行化学分析，以确定组成物的化学成分。

## 分子设计

研究材料的终极目的，不仅是认识材料，更重要的是根据指定的性能，对已有的材料进行改造或重新设计出新材料。

正如裁缝师设计和裁剪衣服，工程师设计和制造机器那样，材料技术工作者也可以根据指定的性能，设计出材料的晶体结构和分子组成，从而制造出所需的材料。这种按指定性能设计材料的新方法，称为分子设计。下面以高分子合成材料为例，简单介绍一下分子设计的方法。

高分子合成材料，如合成树脂、合成橡胶、合成纤维等，是由低分子量的化合物经过各种化学反应聚合而成的，其分子量一般在 1000 ~ 1000000 的范围内。从化学成分看，它们都是以碳氢为主的化合物，聚合物的链节是以碳原子为骨架，碳原子之间以共价键结合起来。按照链节在空间的排列形状，可分为线型结构和体型结构两种。

线型结构中，大分子链的链节排列成线型主链，也可能在主链的两侧带有许多不交联的短分支链。线型结构由于链条蜷曲，在外力作用下可以拉直伸长，因此具有这种结构的材料有着良好的弹性。它们在加热时软化，冷却后硬化，而且这一过程可以反复进行，故易于加工成形。这类材料称为热塑性高聚物，如聚乙烯、聚氯乙烯、聚丙烯、合成纤维等，都属于这类材料。

体型结构中，线型主链间的支链相互交联成网状，并向三维空间伸展。体型结构的材料比线型结构的刚性大，但因链段活动困难，故弹性、塑性较低，甚至有硬脆性。只有在加热时，才发生塑性变形，一次成形后就不可逆

转。这就是说，在固化后不能用加热方法使它们再具有可塑性，故称之为热固性高聚物，如酚醛树脂、环氧树脂、硫化橡胶等，都属于此类。

人们对高分子材料进行系统研究的历史并不长，但已取得了许多卓有成效的进展。例如，对高分子材料的链节结构进行处理，促使它们结晶，使分子排列得比较整齐，就可以提高材料的强度和刚度。聚丙烯树脂的高分子链排列得非常规则，其性能就比较理想。如果高分子链排列不规则，性能就会降低。对合成纤维进行多次熔融延伸，促使它在结晶过程中排列成整齐的线型结构，就可以获得高强度的合成纤维。在合成高分子材料时，用定向聚合的方法，使高分子链节按一定方向排列，或在支链上引入稳定的、较大的基团，都能提高材料的强度、刚度和热塑性。在塑料的分子侧链上引入氟、氯等卤族元素，可提高其强度和耐热性。这些研究成果充分体现出，分子设计对改进现有产品的质量和寻找新的聚合物都有实际的指导意义。

## 电子计算机的介入

目前，应用先进的电子计算机进行材料设计，已成为材料科学研究的重要方法之一。因为材料的品种数以万计，材料的性能同其组成的关系错综复杂，影响合金性能的因素非常多，仅成分之间的排列组合就不胜枚举，依靠经验的筛选和试验，无论在人力物力上，还是在时间周期上，都是无法令人承受的。

电子计算机的特点是信息容量大，具有记忆、逻辑推理和判断的能力，运算迅速而准确。所以，在材料设计中，用电子计算机可以建立材料的情报、信息网络和数据库；可以进行大量数据的处理，如精确计算出破坏某一个分子化学键需要多少能量，计算出合金的电子空位数，以估计高温合金中的有害相组分等；可以按照预定的程序进行运算和逻辑比较，确定材料的结构、成分和工艺的最佳方案。

用电子计算机进行材料设计，首先要对材料的性能同其微观结构的关系建立起一定的数学模型和一些定量表达式，并编制成计算机软件，然后根据指定的性能，用人机对话的方式输入计算机，计算机便开始一系列的运算，提出各种材料设计方案，供你选择。如果运用多媒体技术，还可以在屏幕上显示出材料的立体分子结构，让你对这个结构进行“裁剪”，把不需要的分子“剪”掉，“接上”需要的分子。在这一过程中，计算机不断征求着你的意见，对分子结构进行修改，最后它还会告诉你这种材料的制造方法，预测它的各项性能指标，直到让你满意为止。

这种按指定性能设计材料的方法，包括电子计算机在其中的应用，目前尚处于摸索的起步阶段，但已有一些成果。例如，人们用分子设计的方法合成了以磷氮为主链的高分子材料，达到了预定的性能指标。

分子设计不但可用于高分子材料的设计，现在人们正在研究将它用于功能材料设计和合金设计。当然，要取得突破性的进展，还要解决许多技术难题，这就需要材料科学家、工程师与计算机专家、数学家、化学家密切合作，攻克一个个难关。

正如人们常说的：“道路是曲折的，前途是光明的。”分子设计必将使人类最终摆脱对天然材料的依赖，用自己的双手创造出一个神奇壮观的材料世界！



