

学校的理想装备

电子图书·学校专集

校园网上的最佳资源

学友文库

重构世界

 **eBOOK**
网络资源 免费下载

重构世界

一 人类文明发展的里程碑

人类一直努力地创造新产品，并无休止地寻找所需要的材料。若干世纪以来，材料已从石头、骨头、木材扩大到粘土、钢和二十世纪的宠儿——塑料，等等。每一种新材料都使人们的日常生活发生巨大的变化。人类社会发展的历史证明，材料是人类赖以生存和发展、征服自然和改造自然的物质基础，是人类文明发展的里程碑。

材料分子工程学(或称材料分子设计)的倡导人 A. R. 冯·希珀尔(A. R. Von Hippel)教授有一句名言：“人们可以按照材料的变革和用途谱写人类文明史。”美国国家科学院材料科学与工程综合调查研究执行委员会主席莫里斯·科恩(Morris Cohen)教授亦强调指出，人们可以把材料看成为人类赖以跨越时代的一种物质。由此可见材料在人类文明史上的举足轻重的地位。

人类古代史是按生产工具的三个发展阶段划分的：石器时代、青铜器时代、铁器时代。上述三个时代均以其当时的代表性材料而命名。

在遥远的原始人时代，以石器为主要工具，称为石器时代；公元前 5000 年，人类进入了青铜器时代，人类在寻找石器过程中认识了矿石，并在烧陶生产中发展了冶金术，开创了冶金技术；公元前 1200 年左右，人类进入了铁器时代，开始使用的是铸铁，嗣后制钢工业迅速发展，成为 18 世纪产业革命的重要内容和物质基础。随后有色金属开始大量生产，高锰钢(1882 年)、镍钢(1889 年)、钒钢(190 年)等现代合金钢便迎来了新纪元。

20 世纪中叶以来，科学技术突飞猛进、日新月异，作为“发明之母”和“产业的粮食”的新材料研制更是异常活跃，出现了称之为“高分子时代”、“半导体时代”、“先进陶瓷时代”和“复合材料时代”等种种提法。

新材料的发展历程中，有一个耐人寻味的循环。科学家将我们的当代社会称之为“先进陶瓷时代”，它的出现使材料的发展颇具有返老还童的诗意，即它起源于第一个石器时代，而将迎来第二个石器时代。

陶器时代 人类发明摩擦生火后，便开始了陶器时代。如公元前 7000 ~ 5000 年(第一个石器时代)，我国河南渑池县仰韶村居民以及西亚地区的居民都已经掌握了火烧粘土的制陶技术。后来巴比伦、秦代采用大量砖瓦筑城和修建长城、阿房宫，这就标志着制陶业派生了建筑材料行业，特别是埃及进入奴隶制国家后，制陶工艺进一步发展到彩陶，并且掌握了制造玻璃的技术。

瓷器时代 瓷土(高岭土)的发现与利用，高温窑的创造成功，再加上釉的出现以及还原焰的运用，原始青瓷器就应时脱胎而出了。商、周时候的“青釉器”，学术界称为“原始瓷”或“原始青瓷”。瓷器的发明是我们民族对人类文明的又一项重大贡献。

陶瓷时代 “陶瓷”并不完全指的是土砂，而是指除金属、塑料外的几乎任何固体。先进的陶瓷甚至是由氧化金属制成，这种陶瓷是不会生锈的。1885 年，德国陶瓷学家 H. 塞格(H. Seger)发明了窑炉用标准测温堆系列，标志着陶瓷时代的到来。特别是 19 世纪末，以硅酸盐工业为基础的工业之间，普遍建立了十分密切的联系。

先进陶瓷时代 第二次世界大战后，一度掀起了高温高强材料和功能材料的热潮，各国不但开发氧化物特种陶瓷，而且还着手研究非氧化物特种陶瓷。有鉴于此，美国陶瓷工程师国家协会政府术语委员会，曾对陶瓷下定义为：

“陶瓷是由无机非金属矿物质原料组成的和用任意种类方法制造的（通常经过高温处理）那些制品的通用术语。”特别是本世纪70年代以后，更加要求由“可用陶瓷阶段”推进到“可靠陶瓷阶段”，美国便将这些新型陶瓷材料称为“尖端陶瓷（Advanced Ceramic）”，而日本则将高技术陶瓷称为“精细陶瓷（Fine Ceramic）”。总之，我们的祖先从粘土瓦罐发展到青铜时代、铁器时代和钢器时代。现在金属时代正被日益取代，它激起了世界范围的竞争，谁获胜谁就将成为新石器时代的统治者。

所谓新材料，是指当今高技术时代发展起来的，具有传统材料无法比拟的完全新的各种功能，或具有明显优异性能的材料。

新材料发展十分迅速，其品种每年以5%的速度增长，相当于每年有1.25万种新材料推出。化学元素周期表中已有90多个元素在工业上全部被采用，世界上现有800多万个化合物，还在以每年25万个的速度递增，其中相当一部分有发展为新材料的潜力。

新材料品种繁多，习惯上把已有的材料按物质的属性（或化学键的性质）分为金属、有机高分子、无机非金属（包括陶瓷、半导体以及不属于金属和有机高分子的其它材料）等三大门类以及它们的复合材料。如果按使用性能的侧重点分，则分为结构材料和功能材料两类。所谓结构材料，主要用于产品或工程的结构部件，着重于材料强度、韧性等力学性质的材料；所谓功能材料，则是利用材料所具有的电、磁、光、声、热等特性和效应以实现某种功能的材料。

在材料家族中，结构材料占有很重要的地位，它的用途广，用量大，钢铁和其它金属材料在最近几十年或更长一段时间内，仍将是结构材料的主体。但由于有机高分子材料和陶瓷材料的兴起，加之金属矿物资源的日益枯竭，金属材料所占的比重和重要性将逐渐有所下降。有机高分子材料以其原料丰富、成本低、加工方便等优点，发展极为迅速，其年产量按体积计，早已超过了金属材料。陶瓷材料的重要性也将越来越明显。

高性能结构材料对航空航天、海洋开发、交通运输、能源、化工、机械等许多工业部门起着重要作用。

高性能结构材料的研究，为航空航天等相关领域提供了高比强度、高比模量、耐高温、韧性好、抗腐蚀的支撑性关键新材料，并促进现代材料科学与技术的发展。

功能材料是材料家族中的后起之秀。功能材料往往用量少、但附加值高。除少数几种材料外，大多数是近几十年内伴随高技术的产生而发展起来的，今后在新材料中将占有更为重要的地位。

现代新材料的发展潮流以新型功能材料为主导，是由于信息技术、空间技术、能源技术和计算机技术等领域对材料提出的光、电、声、磁等特殊物理性能的要求。

人们普遍认为，21世纪世界将进入信息时代，相应的光电信息材料将在信息的获取、传输、存储、显示和处理与计算等方面发挥重要的作用。因此光电信息材料是高技术功能材料研究的关键材料之一。在我国“863”计划中已重点安排了新型半导体光纤、特种功能薄膜（包括金刚石薄膜、特种陶瓷膜和LB薄膜）。新型非线性光学晶体与激光晶体、新型光存储与显示材料、精细陶瓷、精细复合光电功能材料和新型有机光电材料等专（课）题。

对一个国家而言，能否保持强大的综合国力，能否在现代科学技术上处

于领先地位，掌握一批新材料是十分关键的。因此，各发达国家都把新材料的研究、开发放在突出的地位。

1981年日本科技厅制定的“创造科学技术推进制度”中共七个项目，与新材料有关的就有四个；日本通产省制定的“下世纪产业基础技术研究开发计划”中，共有12个项目，新材料即占了一半。

美国为保持军事上的优势，投入了巨额资金发展高技术，大大刺激了新材料的发展。1983年美国提出的“星球大战”计划中把新材料放在更为突出的地位，所以目前美国材料研究的水平，在大多数领域内仍占有优势。原苏联为了与美国抗衡，十分重视与军事工业有关的高技术，所以对材料研究也相当重视。

以法、德为核心的欧洲各国，为摆脱高技术研究上起步晚、相对落后的局面，广泛开展了多国合作，以便与美、日抗衡。以“尤里卡”计划为代表的五个庞大的欧洲合作计划中，对新材料也给予了足够的重视。

据估计，美国、法国投入材料科学研究有关的人力和经费占整个科研人员 and 经费的一半左右，目前美国每年用于与材料有关的研究费用高达千亿美元。

我国的基础工业水平和经济实力还比较落后，高技术研究水平与先进国家相比还有相当大的差距，作为高技术基础的新材料研究与开发的水平差距则更大，许多关键性的材料还依赖于进口，为了缩小这一差距，加强新材料的研究与开发，除了在全国重大科技攻关计划中作出安排外，1986年起国家又制定了“高技术研究发展计划纲要”（即“863”计划），新材料是纲要中所提七个优先发展领域之一；1988年又制定了为促进高技术成果商品化、推动高技术产业发展的“火炬”计划，1991年起制定了为推动重大基础研究的“攀登计划”。在这些计划中，对新材料的研究在各个层次上都给予了足够重视，为今后新材料的研究、开发和生产，创造了较为良好的条件。

二 老当益壮的金属材料

1. 中华文明史中的一朵奇葩

中华民族历史悠久，除了有丰富的典籍之外，还有大量文物保存至今。其中青铜器数量巨大、制造精密。有的青铜器上铸有文字，成为原始的文字资料。青铜器种类繁多，有祭祀用的礼器，有日常用的器皿，还有乐器、兵器。出土地点遍及黄河流域、长江流域、新疆、东北。仅商代青铜器就达万件，近年还不断有新发现。巨大的数量和广泛的分布，说明古代我国青铜冶炼和铸造技术发达，使用普遍，象征着中国古代高度的文明。

现存青铜器中最大的是商代制造的司母戊方鼎，是一件长方形容器，下面有四足，上有两耳，重 1750 斤，鼎里放得下一头牛，是商王为祭祀他的母亲“戊”而专门铸造的。

关于鼎的记载，在中国古代典籍里非常之多，在现代汉语里也可以找到很多带“鼎”字的词和成语，如“问鼎”、“一言九鼎”、“钟鸣鼎食”，……其实都有它的来历，也包含着中国的冶金史。

《史记》里说，黄帝作宝鼎三，禹铸九鼎。在夏代就铸有九个鼎，以象征九州，这时候鼎是国家最高权力的象征。这说明我国至迟在四千多年前的夏代青铜冶炼和铸造技术就已经很发达，能铸造型复杂的鼎了。

以后商取代夏朝，这些鼎就传到商，周取代商以后，九鼎就传到周的统治者手里。战国时周王朝已经衰落，诸侯争霸，楚庄公建立霸业，就向周定王的大臣王孙满询问鼎的大小轻重，显示了这位称霸者的野心。此后，“问鼎”就成了觊觎最高权力或争夺第一的代名词。

到战国时，鼎已经不光是最高统治者所独有，也不仅用作祭器，它也被诸侯等有地位的人用来煮食物，鼎已逐渐“下放”到较低一些的统治者手里，当然按照级别也有相应的规定。所以“钟鸣鼎食”用来描述富贵、奢侈的生活，与普通人是不相干的。

青铜是铜和锡的合金，比纯铜硬度大。出土的战国铜器已经使用了表面处理技术，由此可以推想，古人为掌握合金配比和处理技术，一定进行了长期摸索和大量实验，冶炼纯铜的历史比青铜还安久远得多。

除了青铜器之外，我国的冶铁史也很久远，早在战国时期便有相当大的规模了。

司马相如和卓文君的故事在我国民间家喻户晓，人们一般只把它看作一段爱情传说，其实这个故事中还可以看到中国的炼铁史。

司马相如大约生于汉初，做过景帝的侍从，是汉初最大的词赋家，但景帝不喜欢词赋，自然不赏识他。司马相如有个朋友在临邛（现在的四川省邛崃县）做县令，后来相如就去了临邛，临邛是当时西南的工业重镇，富人很多。在那儿，司马相如看上了富人卓王孙的女儿卓文君，经过了许多曲折，后来终于成就了美满的婚姻。

据《史记》记载，卓家在战国时是赵国人，因为炼铁致富。秦灭赵以后，为了巩固自己的统治，把赵国的富家豪族迁出赵国。卓氏先人被迁到四川，“夫妻推辇”，就是说，财物所剩无几，也没有僮仆，主人夫妇用车推着他们的行李到了四川。他们自己要求派到边远地方，被安置在临邛，那里有铁矿山，他们非常高兴，就在那里炼铁，很快致富，富至僮千人，“田地射猎

之乐，拟于人君”。僮仆千人，广有田宅，在自己的土地上打猎，过着帝王样的生活。由这个故事可以看出，当时炼铁生产规模很大，铁器应用广泛，铁在当时是先进材料，利润可能很高，卓氏才能迅速致富。这种技术是从赵国带来的，卓家在赵时就是富豪，因此，在战国时炼铁的生产规模也一定是很大的。

2. 小不点取代巨无霸

当文学作品在描述钢铁厂时，总是把它们描绘成庞然大物，人们甚至感到找不到恰当的词汇来形容。确实，现代钢铁企业的发展趋势是日益大型化、自动化、连续化。

但是，这种大型化会不会继续发展下去呢？这些“巨无霸”再发展下去会是什么模样？可能是继续膨胀下去，也可能像哲学上说的“物极必反”，向相反的方向转化，变成小不点，当然不是简单地缩小规模，而是采用更高的形式，更先进的技术，当然还有更高度的自动化。

多年以来，很多科学家已经在这个方向上进行了努力，已进入大规模工业化的阶段，即熔融还原和近形连铸技术。

熔融还原法用铁矿粉与煤直接反应，反应速度可以比现在提高上千倍，因而高炉体积可以大大缩小。要把钢材加工成薄板，各种型材等最终产品的形状，现在要经过连续铸钢、初轧、热轧、冷轧几个工序。新的近形连续工艺就要简单多了，只需把钢水直接浇铸成接近最终产品的形状，再进行冷轧就行了。这样就可以省去大部分庞大的厂房和机器。

这项技术运用了现代信息和自动化技术，随时测定冶炼过程中的化学成份、温度，用电子计算机进行全过程的数据检测、调节、精确控制。产品质量更有保证，性能更高。

3. 地球上储量最多的金属

金属材料中产量居首位的是铁，但若以地壳中的含量来排座次，它就必须让位给铝。铝占地壳重量的 7.5%，比铁多一倍，在金属中居首位。

从开发的时间来看，铝是相当年轻的金属。自然界中的铝以氧化物的形式存在，铝和氧原子间的结合很牢固，用一般的冶炼方法不能把金属铝游离出来。直到 1854 年才由法国化学家用金属钠还原制得金属铝，当时法国金属钠价格是每公斤二千法郎，所以铝的价格比黄金还贵。据说拿破仑三世沉迷于铝制餐具，还给他的幼儿做了一种铝制玩具。1866 年美国 22 岁的青年大学生霍尔在听课时听到他的老师谈到，无论是谁只要能找到一种便宜的制造铝的方法，必能致富，于是大受鼓舞，在自己家里设备简陋的实验室里，用电解法制备铝获得成功。他急忙带着几块铝锭去见他的教授，这几块铝锭至今仍被美国铝业公司收藏。经过不断改进，电解法成为经典的、传统的制铝方法。随着电力工业的发展，炼铝方法的改进，铝的价格不断降低，产量迅速增长。本世纪初，世界铝消费量还不足 20 万吨，70 年代就超过亿吨。铝大器晚成，成为消费量位居第二的金属。

铝是很活泼的金属，由于能在表面形成一层致密的氧化层，氧化层能保护它不受锈蚀，所以有银白色漂亮外表，不像钢铁那样容易生锈，所以铝可以做建筑装饰材料，做成各种用具也不担心锈蚀。铝的导电性稍逊于铜，大

量用作电线电缆。

铝的比重只有铁的三分之一，很适合作航空材料，但铝的硬度太低，受到压力和冲击力都容易变形，只有掺加其它金属形成合金后，硬度提高，才真正成为航空上实用的材料。其中，最老牌的是硬铝，较新的有铝锂合金。

1909年，德国人维尔姆偶然发现在铝中添加3.5%的铜，0.5%的镁以及微量的铁和硅，得到的铝合金在500℃加热后在水中淬火，开始时硬度增加不明显，放置以后硬度逐渐增加，四、五天后达到最高。这种现象叫做“时效硬化”，得到的合金叫硬铝。后来德国杜拉公司取得了这项技术的专利权，所以硬铝也叫杜拉铝。

第一次世界大战时，飞机已被用来侦察敌情和作战。早期的飞机用木材和帆布做成，非常简陋，时速只有一百公里，作战时在飞机上用手枪射击，甚至扔手榴弹。后来，德国人用硬铝制造飞机，飞机外观和性能也大为改进。一战中，已有铝合金单翼飞机出现。20年代，各种新型的铝合金不断开发出来，性能也不断提高。

在众多的铝合金中，铝锂合金因为轻质高强度而受人注目，美国、法国、俄国都有不同型号的铝锂合金作为商品出售。铝锂合金的拉伸强度和模量超过钢材，比重比铝还要轻，只有2.5左右，作为航空材料很有竞争力。

铝锂合金的发展历史颇为曲折。早在20年代，德国人就在铝中添加锂，制成合金，用作铸材和型材，由于硬铝的广泛应用，这种合金没有得到发展。50年代，美国ALCOA公司推出铝锂合金X2020，模量和强度已经接近今天的铝锂合金，六十年代用来制造B52轰炸机和F—111战斗机，后来发现这种材料有缺口敏感性，1969年ALCOA决定停止生产X2020。

所谓缺口敏感性就是当材料存在缺口时强度显著降低的现象。韧性好的材料对缺口不敏感，就是说，它的强度受缺口影响不大，这种材料安全性就很高。一些脆性材料，一旦出现缺口就容易受破坏，裂纹增长很快，断裂是突然发生的。作为飞行器材料是很不安全的。

70年代以后，各国又重新开发铝锂合金，由于基础理论研究的进展和制造工艺的改进，终于解决了铝锂合金的断裂韧性问题，使它成为轻合金的一枝新秀。

有趣的是，锂是非常活泼、不安分的金属，它本身很软，在空气中容易氧化，遇水还会爆炸。但与铝、铜等形成合金后，却能变成高硬度、高强度的金属。

现在商品化的铝锂合金的实际配方中含有3%左右的锂，0.5%—3.0%的铜，0.2%—5.5%的镁，微量的锆等。锂的比重只有0.53，大约是水的一半，是自然界中最轻的金属，铝中添加3%的锂就可以减重10%。在合金中，锂原子分散到铝原子中，表面有氧化铝膜保护，就变得安分了。锂的同族元素钠、钾、氢能引起合金变脆，必须严格控制含量在规定的浓度以下。

4. 未来的钢铁

19世纪钢曾经大出风头，20世纪铝也曾经与金同价，并迅速坐上第二把交椅，而下一个金属“新星”将是钛。

钛的强度超过钢，但重量只有钢的一半，能抵抗酸、碱，甚至王水的腐蚀，熔点1668℃，比黄金还高600℃，性能远远超过铁和铝。钛长期被认为是稀有金属，其实钛在地壳中的含量丰富，比铜、镍、铅、锌的总和还多十

得了更高的超导转变温度，几天后，又用稀土金属镱和钡、铜的氧化物达到转变温度 100K 的记录。稀土是开发超导材料的沃土。

· 稀土发光材料已经研制出近三百种激光晶体和一百多种稀土发光材料，广泛应用在医学、电视光源、信息传输显示上。例如广泛应用的 YAG 激光器上用的就是含稀土镱、钕的激光晶体。用于薄膜显示的发光材料重量轻、体积小，不产生对人体有害的 X 射线。用稀土发光材料制造的三基色节能灯节电显著，如果全国有三分之一的白炽灯采用这种节能灯，每年可以节省 18 亿度照明用电。

此外，稀土金属还是性能优良的储氢金属，这一点，后面还要谈到。

稀土金属既不稀，又非土，所以稀土这个名字实在是名不副实的。那么，这名字是怎样得来的呢？当然跟发现它的过程有关。

早期的化学家把不溶于水、受热不分解的物质称为“土”，按照这个定义，钙、铝、硅、铁、镁的氧化物都是土。其中钙、镁的氧化物被称为“碱土”，因为它们呈碱性的。后来英国科学家戴维从碱土中电解出金属钙、镁，就称它们为“碱土金属”，这个名称沿用至今。

1794 年，芬兰化学家加多林研究了一种奇特的岩石，这种岩石是在瑞典的一个叫于特比的小村庄找到的，加多林认为这种岩石是一种新的“土”，并给这种“稀土”命名为镱。后来德国化学家克拉普罗特发现镱是由两种“土”组成的，他把其中一种仍称为镱，另一种命名为铈。瑞典化学家莫桑德尔又把它们分成一系列不同的“土”。最后证实这些“土”全都是一系列新元素的氧化物，这些新元素被称为“稀土金属”。

现在已经弄清楚，稀土金属原子结构都具有相同的外层电子数，差别只在于内层电子数不同。其中元素周期表中的第 57 至 71 号元素，在周期表中只占一个位置，称“镧系 La-Lu”元素，在周期表下另外列出表来表示它们。镧系的十五个元素加上同族的钷、铽，统称为稀土元素。

我们知道，化学反应中，原子只有最外层电子发生变化，元素的化学性质是由它们的最外层电子决定的，稀土金属最外层电子相同，化学性质也几乎相同，难怪要分离它们是那样困难了。

稀土金属主要存在于一种名叫独居石的矿石中，世界上的独居石主要集中在我国。现已探明的稀土资源中，80% 分布在中国，而且品种齐全。稀土是中国得天独厚的矿物资源。

从 1986 年起，我国的稀土生产跃居世界第一，在世界稀土市场上举足轻重。

稀土的提纯非常困难，而高技术领域对稀土金属的纯度要求非常高，我国的科学技术工作者在这方面做出了出色的工作，促进了我国稀土资源的开发和利用。高纯稀土和超纯稀土本身都是高技术产品，如果再用它们做成高技术高性能产品，还会大大增加它的经济价值。在稀土应用方面，我国有相当多的科技工作者也都在利用本国资源优势，进行高新技术产品的研制。

6. 节省电能的合金

近些年来，美、日、德等国都在推行一项计划，用非晶态软磁合金来取代目前变压器中的硅钢片。这种材料是美国人杜威志 (P·Duwez) 在 60 年代发现的，80 年代初开始推广应用。美国的试验基地已达年产三万吨的规模。通用电气公司已生产一万台 25 千伏安配电变压器投入使用。中国已建成年产

100 吨合金的中试线，已制成五千伏安的变压器，以及 500、1600 千伏安的大功率的变压器。

为了推广使用非晶态软磁合金，中国已制定了国家标准。国外几家公司都推出自己的生产牌号。

对于这种合金材料，为什么这么多国家如此重视呢？关键在于它能节省电能。目前在配电系统和各种机电设备中都普遍使用变压器，变压器进行工作时铁芯会损耗电能。据报导美国仅输电过程中由变压器铁芯所造成的电能损失就占美国发电量的 2.5%。如果用非晶态合金代替大容量输电变压器，每年可降低输电成本 15 亿美元。据资料推算，日本每年可由此节电 60 亿度。中国可由此节电 100 亿度，价值 10 亿元人民币以上。

有一些晶体是人们普通知道的，像白糖粒、冰、食盐颗粒，它们有规则的外形，光亮的表面。另一类物质有结晶态，人们就不大清楚，像普遍的钢铁，它的晶粒太小，肉眼看不见，要是用电子显微镜去看，才看得见。

晶态是因为组成晶体的原子有规则的排列形成的，它们有的排成立方体，有的排成长方体，等等，总之，都是一些有规则的状态。

非晶态里的原子排列在邻近的几个原子间有规则，因为每个原子与其它原子结合的数目是一定的。但在长距离范围完全没有规则，完全杂乱无章。玻璃就是一种典型的非晶态。所以人们也常把非晶态叫玻璃态。许多物质有结晶态，也有玻璃态，例如聚乙烯塑料，里面有结晶部分，也有非结晶部分。有机玻璃里面的分子排列是无序的，是玻璃态。金属材料一般是由无数微小晶粒构成的，是一种多晶。在一定条件下也可以形成单晶。非晶态合金则是近几十年才发现的。

除了原子排列状态不同以外，非晶态软磁合金和硅钢片在化学组成上也是不同的。硅钢片是铁和硅的合金，而非晶态合金化学成分复杂些，一般是由铁族元素和磷、硼、碳、硅等非金属，有时添加锰、钒等金属组成的。典型的变压器芯材料有 $\text{Fe}_{78}\text{B}_{13}\text{Si}_9$ 和 $\text{Fe}_{81}\text{B}_{13.5}\text{Si}_{3.6}\text{C}_2$ 。

作为变压器芯，要求在初级线圈有电流通过时产生尽可能强的磁场，并把磁强传导给变压器另一端，在次级线圈上产生感应电压。当电流流过以后，这种感应磁场应尽快随着消失，不留剩磁，否则与随后到来的反向电流作用，引起电流损耗。非晶态合金正是这种材料，它的磁感应强度高，磁导率高，磁滞损耗小。

非晶态合金的电阻率比硅钢片大十倍，因此由于处在交变磁场中产生的涡流也很小。由涡流引起的发热也很小。发热对变压器十分有害，特别是大功率变压器发热量更大。为了给变压器降温、还得给它加上夹套，里面装上油给它冷却，因此变压器体积大、笨重、维修麻烦。

由于具有以上优点，非晶态合金铁芯制成的变压器体积小、重量轻，不需油冷却。

非晶态合金还是很好的磁头材料。一些大公司都把非晶态合金制造磁头，用在磁记录、音响等设备上。

非晶态合金的制备方法也是很特殊的。60 年代发明了熔融急冷法，70 年代发展成连续急冷法。把合金加热到熔融态，成为液体，喷射到高速旋转的钢质辊筒上，形成薄带或丝。因为冷却速度达到每秒钟一百万度。合金中的原子来不及形成有序排列就被急剧冷凝成固态，形成了非晶态合金。由于连续喷射，形成的薄带也是连续的，再卷成几十至数百公斤重的钢卷，就是

成品了。

7. 能记忆形状合金

形状记忆合金声名远扬，跟它在宇航上的应用是分不开的。要给卫星或飞船安装天线，特别是形状复杂，体积大的碗状天线难度极大。这种天线体积大、形状不规则，放在太空内舱要占很大空间，让宇航员乘航天飞机来一次太空安装，显然代价太高，怎么办？最巧妙的办法就是用形状记忆合金来做成一架能在太空自动架设的天线了。

选用的形状记忆合金在 70℃ 以上是强度很高的金属材料，70℃ 以下就柔软得像纱巾一样，当温度升到 70℃ 以上时，它“记”起了自己在 70℃ 以上时的模样，恢复了原来的形状和强度。于是，就在 70℃ 以上造出这架天线，它是碗状的，有抛物面，有必要的强度，是一架完整、合格的金属设备，冷却 70℃ 以下时，它就变软，像一块纱布，把它折迭、压缩、安装到飞船的适当地方，它就只需很小的空间了。到了太空，阳光照射下温度很高，温度超过 70℃，天线记起了自己原来的形状，就像自动伞一样自动张开，就可以进行讯号传输了。

这是形状记忆合金巧妙应用的一个例子。其实，形状记忆合金最早的应用是在管道套接上。70 年代，美国人用来连接 F14 飞机的油路系统，用的是商品名 Nitinol 的镍钛形状记忆合金。这种合金密度较小，抗拉强度很高，特别是能经受达千万次反复作用，而不受破坏，因此，加工成管套去连接飞机的油管是安全可靠的。这种管套的内径比飞机油管稍小一点，一般情况下很难套上去，只要把它冷冻到一定的温度，管套变得非常柔软，把管套内径扩大一点也很容易，这时管套的口径比飞机油管大，自然很容易套上去，把油管接起来。温度升高到室温后，管套记忆起它的形状。恢复成强硬的钢套，因为内径比油管外径略小，就套得特别紧。这种连接施工时间短，适于航空、核工业、海底油管等危险场合和紧急抢修。

把金属或合金以较快的速度从高温冷却，会出现一种新的结晶相，这种新结晶叫马氏体，这种转变叫马氏体转变。因为冷却速度快，原子的相对位置变化不大，原子间不存在相互扩散现象。只是重新组合成新相。马氏体转变在金属热处理中是一种常见现象，不一定都有形状记忆效应。

但是形状记忆合金就不同了，它的马氏相由孪晶组成，孪晶也称姊妹晶，两种晶体结构相同，只是晶向不同。两种孪晶间存在界面，界面间作用力较弱，受到外力作用时界面间产生滑移，因而容易变形。虽然产生很大形变，但原子间的结合方式和顺序并没有改变，当温度上升，超过它的转变温度时，它又恢复原状。

形状记忆合金与普通金属材料不同的地方，还在于它从奥氏体向马氏体的转变是完全和可逆的。母相转变为马氏体时，应该是完全的，没有奥氏体残留，这样就容易变形，当马氏体回到母相时，也是完全的，没有马氏体残留。这样就能完全恢复原状。好的形状记忆材料可以经历几十万次的反复转变还保留良好的性能，例如镍钛合金就是这样。有的材料可逆性差些，可逆性不完全，可以用在管接头那样的一次性操作上。

目前正在研究的形状记忆合金主要有三大类型。最成熟的是镍钛合金，1963 年发现镍钛合金具有形状记忆效应，70 年代初用于飞机油路管接头。制

造卫星天线的也是镍钛合金。镍钛合金强度很高，耐腐蚀，反复使用次数高，有的可以达到 20 万次以上。

镍钛合金的品种很多，在镍钛合金中添加铜、钴、铌、铁、钽、铬等，可以制得了一系列新的形状记忆合金。镍钛合金的转变温度范围从零下十度到零下一百度，可以适应不同用途的需要，扩展了形状记忆合金的应用范围。

镍钛合金的价格很贵，限制了它的推广使用。铜系形状记忆合金的价格只有镍钛合金的十分之一，但功能差一些。这个系列的成员主要是铜——锌——铝合金和铜——镍——铝合金。目前正在通过添加其它金属和改进处理方法改善其性能，这类合金是很有发展前途的。

铁系合金的价格是最低的。铁系合金中有记忆功能的有铁——铂、铁——钽、铁——镍——碳、铁——锰——硅等。铁——镍——钴——钛的形状记忆效应性质与镍钛系相同。而铁——锰——硅相变可逆性差，只适于制造管接头等一次性使用。由于价格低廉，铁系合金是很有潜力的。

俗话说，材料是发明之母。新的思维和创造没有适合的材料就不能变成现实，有特殊性能的新材料的出现又给发明家们提供了广阔的思维空间，供他们纵横驰骋，做出各种新奇的玩艺来。

形状记忆合金出现以来，许多新的发明应运而生，除了在航空航天领域应用以外，在医学、自动控制也得到了应用，并出现了许多新的设想。

形状记忆合金被做成牙齿矫形用的唇弓。把这种唇弓按病人牙齿尺寸，选择转变温度在室温以下的形状记忆合金做好，定形后，冷冻，使唇弓变软，套到牙齿上很容易，病人也没有痛苦。套好以后，唇弓慢慢上升到人的口腔温度，“记”起了它在冷冻前的形状，又变成坚强有力的钢箍，迫使牙齿排列整齐，达到矫正齿形的目的。

此外，还用形状记忆合金制成外科用接骨板，用来固定骨折病人的骨骼等。

形状记忆合金用作控温元件是非常简便的。例如，可以把记忆合金做成开关弹簧片，把这种开关安装在房间里，空调器的供电线线路上。欲控制房间温度在 24℃，选取转变温度在 23℃ 的合金。当温度在 24℃ 以下时，簧片变软，收缩，电路断开，空调器停止制冷。当室温上升到 24℃ 以上，弹簧片由于记忆效应，恢复了形状和强度，接通电路，空调器又开始制冷，给房间降温。用一个金属片就可以控温，不需要温度计、传感器、继电器等复杂的元件。

人们还设想用形状记忆合金制造微型机械手、机器人；以及用于核反应堆、加速器的装置。当然，这些设想的实现还需要克服许多技术上的障碍，还需要相当长的一段时间。

8. 吸氢的“海绵”

德国奔驰汽车公司和美国布鲁海文国家实验室合作，首先研制出了以氢气为燃料的汽车。日本也不甘落后，住友集团公司随后也推出日本的燃氢汽车。

因为汽油、柴油等石油燃料是一种很不理想的燃料。石油是一种宝贵的化工原料，从石油裂解可以生产高分子材料、药物，以及许多化工产品，工艺路线简单，成本低。石油又是一种不能再生的资源，不能像淀粉、纤维素

那样，依靠光合作用，每年可以大量产生新的资源来进行补充。地球上石油总是要用完的。现在世界上每年消耗石油约十亿吨，实在是一种浪费。许多有识之士和科学技术工作者致力开发其它能源来代替石油，是一种富有远见的行为。

燃油汽车也是一种不可忽视的污染源。世界上每年由汽车尾气排出的铅估计以万吨计。铅是一种对人体有害的重金属。无铅汽油中有的添加甲苯，甲苯比较难燃烧，排放到大气中，对人体也是有害的。此外，由于汽油不完全燃烧产生一氧化碳会造成对大气的污染，这是一种看不见、闻不着的毒气，能跟血液中的血红蛋白结合，阻止氧气进入人体。地球上的一氧化碳污染主要来自汽车。还有，汽油燃烧的最终产物是二氧化碳，过量的二氧化碳会使气温升高，水灾频繁。

和汽油相比，氢气是一种十分理想的能源。首先，氢是一种十分“清洁”的燃料，燃烧的最终产物是水，燃烧过程中也没有有毒、有害气体排放出来。其次，氢气可以从水中得到，这种资源是取之不尽，用之不竭的。最鼓舞人的是，现代科学可以利用太阳光来分解水，制取氢气。这项技术工业化以后，氢气就成为十分廉价的能源。氢气燃烧放出的热量是汽油燃烧热的五倍，就是说，用氢做动力的汽车发动机比燃油发动机“劲”大。

但是，氢气也像一匹烈马，跑得很快，却很难驯服，派不上用场。氢气是名副其实的轻气，在大气压力下，一克氢气的体积就达到 11 升之多，做一个 224 升的大气囊（大约相当 4 个房间），也才装有 20 克氢气！所以用气袋盛气的办法显然是行不通的。

氢气的另一个特点是难液化。把气体变成液体的过程叫液化。液化以后气体体积大大缩小，便于储存、运输。例如家用液化石油气，每罐装 15 公斤，如果不经过液化，直接装气体的话，只能装六十几克！氢气如果容易液化，装到钢瓶里使用，也是一个办法。然而，氢气必须在低于零下 253 的温度才能液化，高于 -253，无论加多高的压力，它也不会变成液体。-253 被称作氢气的临界温度。任何一种气体都有它的临界温度，高于临界温度时不能液化，只有在临界温度以下才能液化。气体临界温度的概念最初由爱尔兰物理学家安德鲁斯从实验中总结出来，后来荷兰物理学家范德瓦尔斯从理论上加以证明，范德瓦尔斯因此获得 1910 年诺贝尔物理学奖。

由于氢气临界温度低，普通高压氢气钢瓶里氢还是以气体状态存在，一个重达百斤的钢瓶里才装有六百多克氢气，作汽车燃料显然自身重量太重，装的燃料太少。况且，高压氢气的安全性也必须考虑。一旦爆炸，就是一颗大炸弹，恐怕不会有人愿意与炸弹为伴。

在科学上常常是这样：一种方法很难解决的问题。换一种方法，情况就会完全改观了。

1968 年美国布鲁海文国家实验室首先发现镁——镍合金有吸收氢气的特性。第二年菲利普实验室又发现镧——镍合金在常温下能可逆地吸收和放出氢气。从此，储氢合金受到人们的极大关注，八十年代以后，各种储氢合金如同雨后春笋不断涌现，各种应用研究也蓬勃开展起来。

储氢合金能够吸收比它自身体积大一千多倍的氢气。在这些合金里，氢气密度是在高压钢瓶里的七、八倍，是液态氢密度的 1.5 倍，是常温（室温）、常压（大气压力）下氢气密度的一千多倍！而且在储氢合金里氢气还是处在常压之下，自然比高压钢瓶安全多了。

储氢合金具有特殊的晶体结构，氢容易进入晶格间隙，和金属原子形成金属氢化物，这种金属氢化物不稳定，受热就发生分解，把氢气释放出来。由于氢被固定在金属原子周围，氢原子之间的距离很小，氢密度比在液态时还高，大大超过液态。

当前研究开发的储氢合金有镁系、稀土系、钛系、锆系、铁系等。镁系合金有 Mg_2Ni 、 Mg_2Cu 以及镁—铁、镁—钛、镁—钴等。镁系合金价格较低，缺点是要加热到 250 以上时才释放出氢气。

稀土系储氢合金以镧镍合金为代表，容易活化，在 40 以上放氢速度很好，但成本贵。因为稀土提纯困难，单一稀土价格高，混合稀土就低得多，所以国际上都用混合稀土代替金属镧。我国稀土资源丰富，在稀土储氢合金研究和应用方面做出了独创性的工作。

钛系储氢合金成本低，吸氢量大，但需要在较高的温度下进行吸氢前的处理。已研制了钛与锰、铬、镍、铌、锆等二元以及钛—锰—氮、钛—锰—铬等三元和多元合金。钛系合金已经在氢的存储、运输和提纯方面得到广泛的应用。

锆系合金能大量高速地吸收和放出氢气，特别是在 100 以上也能很好地储存氢气，因此适于做热泵、传感器等装置。锆系合金有锆与铬、锆与锰合金，还有锆、铬、铁再加上锰、钴、镍、铜等元素的多元合金，多元合金适于做高温下的储氢材料。

铁系储氢合金中有铁钛合金，吸氢量大、价格低，但缺点是贮氢前需要进行麻烦的处理。铁—钛—锰等合金的性能有了很大改善。铁系合金成本低，反复使用的次数多，如果能克服其弱点就会有很大优势。

有了储氢合金，就可以做成常压钢瓶，就像海绵吸水一样，把氢气储存在这种合金里。它的储量，也比相同重量的高压钢瓶大一个数量级。氢气这匹烈马，就被安安静静地拴住了。剩下的问题，一是希望储氢合金性能更好，价格更低，当然，更期望光解水制氢技术取得进展，实用化，燃氢汽车普遍推广了。地球上的空气就会清洁得多。

储氢合金的应用是多种多样的，提纯氢气就是它的用途之一。用混合稀土合金处理含氧、氮、二氧化碳等杂质的氢气，得到了杂质含量小于百万分之一的超纯氢。道理是很显然的：储氢合金只吸收氢气，其它杂质气体留在外面。可以用真空泵把这些杂质气体抽出，再加热吸收了氢气的储氢合金，把氢气释放出来，氢气的纯度就更高了。用这种方法提纯氢气可以显著降低高纯氢的生产成本。

储氢合金在吸氢时放出热量，放氢时吸收热量，因此可以用来贮存热量或者制冷。美、日等国设计制造了太阳能利用系统为住宅供热。这个系统利用屋面上的集热箱吸收太阳能，热量传到地下的保温层，保温层里有密封的钢罐，里面放有钛铁合金和氢气，受热后钛铁合金放出氢气，使罐内压力升高，达到五个大气压，这个压力把氢气压到和钢罐连通的高压氢室里。到了夜晚，打开高压氢室的阀门，把压力氢气放进钢罐，使钛铁合金吸收氢气。钛铁合金吸氢时放热，四个大气压力的氢气能把冷水加热到 40 ，给房间供热水和取暖。这个系热不需其它能源，可以长期循环使用。

储氢合金在放出氢气时吸收热量，因此可以用来制冷。美、日等国都用储氢合金制造空调器，已有商品在市场上出售。储氢合金制冷设备可以制取 21K 的超低温。利用混合稀土储氢合金还制成了 10K 以下的超低温微型制冷

器。

此外，储氢合金还是化工上的加氢反应的催化剂。利用储氢能大量吸取氢气的性质，制成了镍氢电池。这种电池容量大，使用寿命长，安全无毒。

9. 高温高强的合金

学过化学的人都知道，元素在结合成化合物时都遵循一定的规则，这个规则就是化合价。

但是，有一些化合物并不遵守化合价的规则，像 TiAl 、 Ti_3Al 、 FeAl 、 Fe_3Al 等，两种金属按一定的比例结合，但不符合化合价的价数。这类化合物叫做金属间化合物。

金属间化合物由于组成和结构特殊，也表现出许多特殊的功能和性质。例如，金属间化合物有超导、贮氢、形状记忆、磁特性等。特别是它的高温力学性能，更引人注目。

金属间化合物密度低、强度高。例如 Ti_3Al 密度只有 4.2，只有钢铁的一半多一点，强度接近钛合金。特别可贵的是它在高温下强度好，使用温度超过目前最好的高温钛合金，可以达到 700℃， TiAl 则可以在 900℃ 使用。美国用 Ti_3Al 制成了多种发动机部件，如高压涡轮的支撑环等。

金属间化合物是介于高温合金和陶瓷之间的一类新型高温结构材料，它的密度比高温合金低，韧性比陶瓷要高。金属间化合物在航天航空工业有很好的应用前景，目前主要问题是在室温下塑性不好，加工困难。除钛铝合金外，镍铝化合物 NiAl 熔点高达 1600℃，密度 5.8，高温抗氧化能力强； Fe_3Al 熔点 1540℃，屈服强度可以维持到 600℃ 而不下降，都是很有希望的高温结构材料。

三 人类合成的新石器

1. 诺贝尔奖获得者与新型陶瓷

上世纪末，德国物理学家伦琴发现 X 射线，成为轰动世界的一件大事，伦琴因而成为首届诺贝尔物理奖获得者。X 射线的穿透性很强，伦琴在他关于 X 射线的论文中，附有伦琴夫人手骨的照片。当时人们的兴趣主要在把 X 射线用于诊断和医学，一年之中就有一千多篇论文，数十本小册子问世。据说，当时 X 射线被“炒”得太热，连伦琴本人也感到不愉快。

X 射线是一种电磁波。微波、无线电波、红外线，可见光、紫外线、X 射线都是电磁波，因为它们传播时都伴有电场和磁场，只是它们在传播过程中波长（一个波动跨越的距离）不同。无线电波波长范围从二万米到二百米。人的眼睛能看得见 400 至 800 纳米的波长的光波，这个波段称可见光。波长 800 纳米这一端是红光，按红橙黄绿青蓝紫顺序逐渐缩短，400 纳米这一端是紫光。波长短于 400 纳米叫紫外线，长于 800 纳米的叫红外线，肉眼是看不见红外线和紫外线的。X 射线波长只有 0.1 到 0.01 纳米，接近分子和晶格尺寸，是对物质进行结构测定的常用工具。X 射线并不是波长最短的电磁波，γ 射线的波长比 X 射线还要短得多。

1911 年德国物理学家劳厄从理论上提出，如果晶体内部原子有规则地排列成立体结构，X 射线通过晶体后将在照相底片上产生一定的图案，这种现象就是 X 射线衍射。劳厄的理论，第二年由他的助手从实验上证实，劳厄获得了 1914 年诺贝尔物理学奖。

1915 年的诺贝尔物理学奖由布拉格父子（W.H·Bragg 和 W.L·Bragg）领走。父子俩共同分享诺贝尔奖，堪称世界科学史上的佳话。说起来，现代新兴陶瓷的蓬勃发展，最初的基础还是由他们奠定的呢！

老布拉格是英格兰人，毕业于剑桥大学，在澳大利亚南部的阿德莱德大学作过教授，1908 年回到英国利兹大学任教。晚年担任英国皇家学院院长和皇家学会会长。小布拉格 1890 年出生在澳大利亚的阿德莱德，并在那里接受教育，十八岁随父亲回到英国，在剑桥大学学习。毕业后任剑桥大学讲师，在此期间他和父亲老布拉格共同研究用 X 射线衍射测定晶体结构，提出了有名的布拉格方程。25 岁时和老布拉格共同分享诺贝尔物理学奖。29 岁时担任曼彻斯特大学物理学教授和院长，1972 年去世。父子俩有很多共同的地方，如都毕业于剑桥大学，都担任过皇家学院院长，都活到八十多岁。但最重要的是，他们都是 x 射线衍射测定晶体结构的奠基人。

在劳厄提出 X 射线衍射理论，并观测到衍射图案之后，老布拉格立即着手进行 X 射线衍射的研究。他的处理方法简单明了；推导出衍射角和晶面间距离的公式，这就是有名的布拉格公式。这个公式现在被广泛用来测定晶体、聚合物、蛋白质、纤维……的结构。布拉格还发明了 X 射线分光计，父子俩测定了并弄清了许多物质的结构，例如第一次知道在氯化钠、氯化钾晶体中是以氯离子和钠离子构成空间立方结构，并没有 NaCl 分子存在；知道了金刚石中碳原子的位置和空间距离。1915 年他们合著了《X 射线与晶体结构》一书。此后还测定了有机分子，生物大分子的结构，以及矿物、合金结构，成为晶体结构测定的泰斗和奠基人。

1914 年，老布拉格用 X 射线研究石英结构，随后，小布拉格研究硅酸盐，

此后许多科学家纷纷用晶体化学和固体物理学手段研究陶瓷内部结构。30年代以后其他科学家又大量运用电子显微镜进行观察，在明确了陶瓷的结构和性能关系的基础上对陶瓷进行了有目的改进，促进了新型陶瓷的诞生。今天，在谈论“新石器”的时候，伦琴、劳厄、布拉格父子，这几位诺贝尔奖获得者的贡献当然应该记上一笔。

2. 新石器的诞生

在陕西半坡村出土的彩色陶器已有 6000 年的历史；大约在魏晋时期出现了瓷器；到宋元时期就已经发展到很高的水平，中国瓷器大量运往世界各地。以致在英语及许多拉丁语系的语言中，瓷器与中国是同一词汇，瓷器源于中国，是不争的事实。

但是对瓷器内部结构的深入认识，是在本世纪由布拉格父子开始用现代化科学手段搞清了陶瓷的化学结构之后。

传统的瓷器原料是粘土、长石、石英。它们的化学成份主要是氧化铝、碱金属氧化物、碱土金属氧化物、二氧化硅。把这些原料加水和成泥，制成一定形状，在高温下烧结形成瓷器。由于长石熔点较低在烧结时形成液体，液体的流动填满了各个孔隙，使瓷器质地致密；液体又是一种良好的传热介质，使粘土和石英在高温下形成的微小的晶体，结构更加完善。液体冷凝后成为玻璃态填在多晶的缝隙中，因此瓷器不漏水。陶器是由粘土和成泥制成坯，再经烧结而成，由于缺少长石，在烧结时没有流动相，陶器中有许多孔洞，因此，因为没有长石溶化后形成的流动相作为传热介质，它的多晶相发育不好，强度也低。

人们发现，添加长石可以降低烧结温度，但得到的陶瓷自然不能经受太高温；也发现，当粘土中氧化铝含量增加时，就必须提高烧结温度。烧结温度提高以后，可以得到致密坚实的陶瓷，而且这种陶瓷的耐高温性能也更好。例如，当陶瓷原料中氧化铝含量超过 99.5% 时，烧成的陶瓷的耐热温度可达 1900 以上。这件事启发人们用纯氧化铝做原料来烧制耐高温陶瓷。1924 年，德国科学家用纯氧化铝粉做成试片，在 2000 烧结，得到一块洁白如玉、坚硬无比的氧化铝陶瓷。1933 年德国西门子公司开始生产氧化铝陶瓷，命名为“烧结刚玉”。1948 年前苏联研究出氧化铝陶瓷工具，能切削铸铁和合金钢。二战以后飞机上的火花塞都用氧化铝陶瓷作绝缘体。火花塞一秒引爆 20 至 30 次，瞬时高温达到 2500 ，压力峰值达到 100 大气压，要求材料在高温高压下有高的机械强度，耐热冲击，耐腐蚀，一般材料达不到这种要求。

能不能降低烧结温度得到致密、高强度的氧化铝陶瓷呢？陶瓷学家们为此进行了大量研究。最初，添加氧化铬和氧化钛能把烧结温度降到 1500 以下。后来发现添加氧化镁更好，烧结温度可以降低到 1400 以下，而且可以得到几乎完全致密的透明刚玉瓷。后来又发现，在加压下进行烧结，还可以把烧结温度降到 1300 。

现在，商业上已经有配制好的纯氧化铝粉体出售，烧结温度不高于 1400 ，陶瓷生产者只需买回去加工、烧结就行了。

像这样的新型陶瓷。还有氮化物陶瓷、碳化物陶瓷、莫来石陶瓷、氧化锆陶瓷等。它们也被称为先进陶瓷、精细陶瓷、精密陶瓷、高技术陶瓷等。

从氧化铝陶瓷可以看出新型陶瓷与传统陶瓷的区别。从化学成份看，传统陶瓷是由粘土、长石、石英烧结而成的，而新型陶瓷是由高纯度的化学原料烧结成的。用作新型陶瓷的原料，即使是来自天然矿物，也要精制到很高纯度；有的则完全不含天然矿物。第二，传统陶瓷含有粘土，加水即成泥，容易成型；新型陶瓷不含粘土，用粉体成型，有的加有少量淀粉或人工合成高分子做粘合剂，有的靠加压成型，成型技术要求很高。从结构上看，传统陶瓷是硅酸盐多晶夹有非晶的玻璃态，而新型陶瓷是完全不含玻璃态的多晶相。就性质而言，传统陶瓷只适合做生活用品，易碎，而新型陶瓷有的用锤击也不碎，有的在一千多度以上还能保持高强度，被用作高温结构材料；有的具有特殊的电学、热学、光学性质，被用作功能材料。正是由于这些宝贵性质，才使新型陶瓷受到广泛的重视。

总之，新型陶瓷是从传统陶瓷发展而来，又和传统陶瓷性能迥异的新材料，有的甚至和传统陶瓷没有什么共同之处。

3. 陶瓷汽车发动机

1990年，一辆45座大客车在上海至北京奔驰。这是一辆不寻常的汽车，因为汽车的心脏——发动机是由陶瓷制成的，这是中国制造的第一辆陶瓷发动机汽车首次长途试车，试车结果证明该车性能良好。

世界各国都在加紧进行陶瓷发动机的开发。美国能源部、日本通产省都曾经拨款设立专门研究计划，各大公司都积极推行陶瓷发动机的开发应用。1982年，日本京都陶瓷公司研制的全陶瓷发动机装配的小汽车试车成功。1986年有报导说，美国陆军已制成240马力的陶瓷发动机。

陶瓷发动机成为世界各国、大公司竞相发展的热点，当然是由于它的性能比目前的金属内燃机优越，它的最主要优点在于高效节能。

根据热力学原理，热机工作温度越高，效率也就越高。目前汽车内燃机的热效率只有30%，理论上的热效率可以超过60%。由于汽车多，汽油用量大，因内燃机效率低造成的浪费是惊人的，据估计仅日本每年就达500亿升。如果能把发动机的工作温度从900提高到1370，就能使热效率达到50%，节约燃料40%。金属材料的使用温度极限为1000，有些复合材料工作温度虽可高于1000，但不能承受很强的应力。只有陶瓷能够承受这样的高温和应力。目前的陶瓷发动机运行温度，有的达到1370。今后还可能开发出耐3000高温的陶瓷材料。

陶瓷发动机的另一个优点是不需要冷却系统。目前的金属内燃机都带有水冷却箱，而我国试制的陶瓷发动机没有水冷却装置，这样可以省去给水箱加水的麻烦，特别适用于在沙漠或干旱地区长途行驶。

陶瓷发动机重量比金属发动机轻，因为陶瓷的比重比金属轻，而且没有冷却系统。由于车重的减轻，又可使汽车节省更多的燃料。

用来制作汽车发动机的陶瓷主要有碳化硅、氮化硅陶瓷等。

氮化硅是人工合成的新材料，自然界中不存在天然氮化硅。制造氮化硅陶瓷的方法有反应烧结法和热压法。反应烧结法是把纯硅粉加工制作坯体，放到1200高温的氮气中，氮气钻入坯体与硅反应。第一次反应后将坯体加工成所需要的形状，再在1400高温氮气中进行第二次氮化制成氮化硅陶瓷。这种方法得到的陶瓷气孔比较多，所以人们更重视热压法的开发。热压

法是在高压下加热烧结硅粉坯体制成氮化硅陶瓷，热压法制得的氮化硅陶瓷密度较高，几乎没有气孔。现在工业上已经开发制造了能在 2000 ，2000 个大气压的氮气压力下工作的大型烧结炉，可以满足氮化硅陶瓷的生产要求。氮化硅陶瓷有很高的强度和硬度，又有惊人的耐高温、耐腐蚀能力，能够经受冷热的急剧变化，被认为是目前最重要的新型结构陶瓷。

4 超声波与压电陶瓷

第二次世界大战中，德国军队的潜水艇和德国的军事势力一样，经过了由盛到衰的历史。

战争初期，德军投入了大量的 V—11 型潜水艇，潜水艇经常在水下偷偷接近英国商船或军用船只，在近距离用鱼雷发起突然袭击。英国被击沉的船只达数千艘，遭受了惨重的损失。盟军用雷达和声纳挽救了战局。雷达能侦察到浮到海面上充电的潜水艇，而装在舰艇上的声纳能“听”到水下的潜水艇，所以潜水艇从“无形杀手”变成了被追捕的猎物，大量被击毁。到了战争后期，德军潜水艇已不能构成威胁，盟军取得了制海权。

声纳是一种超声波定位探测系统，它向水下发射方向性很强的超声波束，靠接收反射回来的声波来判断水下物体的位置。人们早就知道蝙蝠是用耳朵“看”东西的。蝙蝠的嘴能发出每秒 13 万周的频率的声波，耳朵能听到它回声，还能够准确地判断造成回声的物体的方向和位置。

人的耳朵能听到每秒 20 到 2000 次的振动。每秒低于 20 次的振动称为次声波，高于 2000 次的称为超声波，人耳都是听不到的。狗的耳朵能听见超声波。有一部电视剧《犬笛》，讲的是一个小孩能吹出只有狗才听得见的声音。这支笛子发出的就是超声波，犬笛是 1883 年发明的，所以这个故事是有科学依据的。

人们不仅能用超声波进行水下探测潜水艇，还用声纳测定海深，研究海底构造，探测鱼群。还用超声波检查人体内的病变和肿瘤，用超声波探测桥梁、大型钢铁制件里的气泡和裂缝。超声波探测不仅像神话中的“顺风耳”，更是一种穿透钢铁的“透视眼”。

法国物理学家皮埃尔·居里是著名女科学家玛丽·居里的丈夫，他们因发现放射性元素共同获得 1903 年的诺贝尔物理学奖。正是这位居里先生发现了压电现象。

1880 年，皮埃尔·居里和他的弟弟雅克·居里发现石英晶体在受到机械压力时会在晶体两端产生电压，这种现象称为压电现象或压电效应。反过来，如果在石英晶体两端加上电压，石英晶体就会产生轻微的收缩，这种现象称为电致伸缩或负压电效应。

显然，如果把一种快速波动的电压加到石英上，石英就会作相应的振动，形成超声波。1917 年法国物理学家朗之万用这种方法产生了超声波，并把超声波用到侦察潜艇上。在二战中，这种技术进一步发展完善，成为声纳技术。

现在，陶瓷已经完全取代天然晶体，成为广泛使用的压电材料，这就是锆钛酸铅陶瓷。

锆钛酸铅压电陶瓷 (PZT) 是六十年代发现的。锆钛酸铅的优异性能促进了超声技术的发展和應用，在压电材料中至今仍占有最显著的地位。三十多年来，寻找新的压电材料的研究很多也是以锆钛酸铅为基础的，元素周期表

中所有可能使用的元素几乎都被用来掺杂到锆钛酸铅中，以便产生能适应不同要求的新型陶瓷，形成了数以千计的专利技术。

压电陶瓷的用处很广，目前已进入实用阶段，例如：

压电点火器点火器的核心是两粒黄豆大的锆钛酸铅压电陶瓷，每粒陶瓷连着一个电极，两个电极相距几个毫米。打火时，手指的力量通过机械传动、挤压两颗压电陶瓷，由于压电效应，陶瓷受到挤压后产生数千伏的电压，电压传到电极上，电极间距离很小，高电压击穿电极间的空气产生电火花，从而点燃煤气、液化气。这种点火方式一发即中，可靠性高，装置简单，使用寿命长。

压电传感器传感器是自动检测，自动控制系统的眼睛和耳朵。它把要检测的对象的性质转变成电讯号传送给检测和控制系統。这些待测对象有各种化学性质，也有温度、压力等物理性质。作为传感器的材料必须对测量的对象敏感。一种材料往往只能感觉一、两种性质，只用于相应性质的测量。压电材料能把压力或振动变成电讯号，因而被用来制造检测机械振动的传感器。

声纳系统需要接受水下的振动，这个装置叫水听器，是用压电陶瓷做传感器的。水听器的灵敏度非常高，甚至可以检测到十多米远处的昆虫拍打翅膀所引起的空气波动，用来探测水下物体，自然就可以做到“明察秋毫”了。

频率控制器无线电通讯需要对频率实行控制。利用压电效应可以制成性能优良的频率控制器。向压电体施加高频电压、压电体就产生频率相同的机械波振动。当机械振动频率和压电体的固有频率相同时，就产生共振（谐振），使机械振动的幅度大大增加。由于压电效应，这种大幅度的机械振动又产生交变电流。电场能和机械能互相转换，形成振荡。在谐振频率下，流过压电体的电流最大，阻抗最小，因此，可以用压电体制造从音频到超高频的各种滤波器、谐振器，而且体积小，频率稳定性好。

精密位移控制在压电陶瓷两端加上电压，陶瓷就产生微小的形变，这种性质可以用来进行精密位移控制，制成压电控制器。在精密仪器、精密机械、光学仪器等领域中经常要用到精密位移控制。传统的方法用机械传装置来实现。比较起来，压电控制反应速度快，装置体积小。

在精密位移控制方面，铌镁酸铅陶瓷性能更为优越。它的电极伸缩效应大，可以达到千分之几；经历多次反复伸缩仍能保持原有尺寸不变形。因为在电压下产生伸缩的效应称电致伸缩效应，所以铌镁酸铅被称为电致伸缩陶瓷。

多层结构的电致伸缩位移器可以在低电压下工作，使得位移器工作电压降低，安全性增加了。

电致伸缩位移器的伸缩效应大，因而位移器体积更小。例如弯月型位移器只有3毫米厚可以产生百微米级的位移。

5. 有“智能”的陶瓷

很多读者都有使用电饭锅的经验，它可以算得上一台“自动”电器。把米洗净加水放进锅里，按下开关，它就自动加热；饭煮熟了，它就自动停止加热。不用人去关开关或者拔插头，也不会把饭煮糊。

其实电饭锅结构简单，除了电加热装置外，它只用一块陶瓷来控制加热，

并没有复杂的测温控温系统，更没有电脑，所以这块陶瓷也可称为“智能”陶瓷。

那么，这块陶瓷是怎样看管电饭锅的呢？其实，它只是一块掺了杂质的钛酸钡陶瓷。这种陶瓷的导电性随温度而改变，在 120（称为钛酸钡的居里点）以下时，电阻较小，能传导电流，当温度上升到 120 左右时，电阻率猛然上升几千倍甚至千万倍，基本上不导电了。所以也称热敏电阻。把热敏电阻串联到电热器电路中，放到饭锅下面，当米饭未熟、锅里有水时，饭锅温度一定不会超过水的沸点（100），热敏电阻值不大，有足够的电流供加热用。当水干以后，饭锅温度就会超过 100。当温度继续上升，到 120 时，热敏电阻变成绝缘体，电流就被自动切断，实现了自动控制。

如果你用电饭锅煮粥，那么它的自动控制就不灵了——即使饭熟了。它会继续加热下去，就需要你自己亲自照管它了。所以，所谓“智能”，不过是智能的人巧妙利用了它的导电特性罢了。

有的陶瓷的电阻可以随温度变化，也有的陶瓷的电阻随湿度、氧气、一氧化碳、二氧化碳等气体浓度变化，因而可以用来制造传感器，用来测量温度、湿度和各种气体浓度。陶瓷传感器不怕高温、不怕腐蚀性，性能稳定，可靠性高，价格便宜，因而受到重视。前面讲到的水听器就是超声传感器的一种。超声传感器还被用来测量行驶的汽车与障碍物间的距离。重要的应用还有：

由氧化镍、氧化钴、氧化亚铁配制烧结而成的热敏陶瓷的电阻对温度非常敏感。当温度升高时，陶瓷的电阻值大幅度下降，测量陶瓷的电阻或者电路的电流就可以知道温度的变化，陶瓷传感器测量范围很宽，从液氦到钢水都可以准确测定，是应用最广的传感器之一。

在工农业生产、医疗、科学研究中经常要求对空气湿度进行测量和控制，陶瓷传感器是最好的湿度测量工具。因为陶瓷在潮湿条件下化学性质高度稳定，其它物质往往在潮湿空气中容易氧化或发生腐蚀等化学变化。这些陶瓷的电阻随湿度变化而发生显著的改变，能够把湿度变成电讯号显示出来，所以也称为湿敏陶瓷或者湿敏电阻器。它们是元素周期表中称为过渡金属的氧化物，具有尖晶石的结构，例如钴锌尖晶石、五氧化二钒陶瓷等。

氧化锆、氧化钒、氧化钛等氧化物陶瓷的电阻值随氧气浓度变化，被用来制造氧敏器件，测量钢铁冶炼过程中氧的含量，内燃机排放废气中氧含量等。

6. 电路的保护神

集成电路是现在高技术领域广泛应用的基础元件，在飞机、火箭、军事装备、家用电器中都离不开它。集成电路是把许多元件做在一块硅片上，再固定在基片上。大功率集成电路在工作时要放出大量的热，如果不及时排除就会烧毁电路。所以，需要一种传热性好而且绝缘性能也好的材料来做集成电路的基片来托起大功率集成块的硅片，保护硅片能长时间安全地工作。

常用的绝缘材料、普通陶瓷、聚合物都是良好的绝缘体，但也是好的隔热材料。如果把硅片固定在这些材料上，热量难以散发。金属材料散热能力强，但是导电能力也强，用来做基片会引起短路，当然不会用金属做基片。

氧化铝陶瓷有很强的导热能力，接近钢铁，又是良好的绝缘材料，因此

保护集成电路的重任就落在氧化铝陶瓷身上了。像这类用在电子技术中的陶瓷叫作装置陶瓷。

科学家们还在寻找比氧化铝陶瓷更好的基片材料，这些新材料也属于新型陶瓷。氮化铝陶瓷和氧化铍陶瓷的导热能力比氧化铝陶瓷要强十倍；而氮化硼陶瓷和金刚石比氮化铝和氧化铍还要好。人工合成金刚石的技术已经有几十年的历史，但至今还不能长出大颗的金刚石来。但是，制造金刚石薄膜比生长金刚石单晶在技术上要容易得多；而且，作为导热材料，薄膜也就够了。研究人员在硅基片上生长金刚石薄膜，这种基片的导热能力是最强的，而且金刚石的绝缘性能也是无与伦比的。这项技术不久就会进入实际应用。

现代社会离开电是不可想象的。除了穷乡僻壤，普通人的生活没有电就无法正常进行。可以说，人们生活在“电网”之中，这里指的“网”是供电系统。为了提高电的使用效率，输电线路把每一个用户、每一个发电厂联系在一起，组成网络，而且网络往往覆盖广大地区，甚至不同的国家的电网有的也互相联结。

巨大的电网也给管理和安全带来新的问题，因为互相影响的机会多了。例如某处遭受雷击，会形成瞬间的巨大的电流冲击电网，称为过电流；而相应的高电压称过电压。因为它们作用的时间极短，又是一次性的，也称为过电流脉冲和过电压脉冲。如果不加防护，遭雷击的部分会被这种过电流击毁，在电网中还会出现过电压的脉冲。此外，大型电器在开、关时也会产生过电压，称为操作过电压。

雷电的破坏性是巨大的，必须加以防护；即使是操作过电压，也有很大的破坏性。因为过电压容易造成电子计算机出错或者信息丢失。现在微型计算机制造技术日新月异，新型号层出不穷，功能越来越强，价格越来越低，因而越来越普及。普通办公室，甚至一些家庭都拥有微型电子计算机，因此，供电系统的脉冲污染的危害也会更加明显。

显然，消除供电系统的脉冲污染成为刻不容缓、急待解决的问题。幸好，陶瓷的奇妙导电特性能为我们提供保护。

前面谈到热敏电阻的导电特性，当温度改变时，它的电阻也会随着改变，但不和温度变化成正比，而在某一温度时突然成千、万倍地增大，这种变化称为非线性。（正比例的函数图像是一条直线，称为线性。）

类似地，氧化锌陶瓷的电阻在低电压下很高，当电压超过某一数值时，电阻率急剧下降，这也是一种非线性关系，这种特性称为电压非线性。将这种电压敏感陶瓷一端接在供电线路上，另一端接地。在通常情况下，陶瓷电阻很高，供电线路与地绝缘。当遭受雷击时，陶瓷的电阻突然下降，巨大的电流通过陶瓷流入地下。就像洪水到来一样，最好的办法是有大江大河及时排走洪水。相传古代中国洪水泛滥，江河横溢，大禹带领人民对洪水进行“疏导”，降伏了洪水，大禹成了中华民族千古传颂的人物。所谓疏导，就是指开出河渠，引走洪水。在雷电突然向电网大量倾注高压、巨大电流时，电压敏感陶瓷也能迅速开出一条“河渠”，把电流放走。目前陶瓷的瞬间通电能力为十万安培，抗脉冲电流能力很强。

这种电压敏感陶瓷是由氧化锌掺杂氧化铋以及氧化钴、氧化钡、氧化锰等添加物烧结而成的。实用的氧化锌变阻材料常常掺有六、七种添加剂，其中氧化铋是最重要的。

7. 成员众多 各有神通

近些年来，先进陶瓷研究迅速发展，陶瓷家族不断涌现出新的成员，有的还引起世人瞩目。例如，80年代出现的高温超导体，把超导转变温度提高到液氮以上，引起世界科学技术界甚至政界的高度重视，因为它有着巨大的科技经济发展前景，这些高温超导体是由一些金属氧化物烧结成的具有晶态结构的材料，属于陶瓷的范畴。

有种新型陶瓷像玻璃一样透明，而且它的折射率在电场作用下能发生改变，这种特性称为电光特性，可以用来制造光开关、光调制器、光存储器，在光通信、光计算机等高科技领域有重要应用前景。

在耐高温材料方面，陶瓷有不可替代的作用，一般认为，金属材料使用的极限温度是摄氏一千度。能够在上千度以上保持高强度的材料目前还只有陶瓷。陶瓷除了用来制造汽车引擎外，还用来制造刀具，用来切削金属；制造高温燃气涡轮的叶片，还有可能在热核聚变装置中起主要作用。

现代陶瓷是在近代物理和化学对陶瓷的结构作出了深刻了解的基础上发展起来的，在今后的发展中，现代科学仍将是继续深入认识陶瓷的工具和手段，弄清楚陶瓷的结构和性能的关系，控制陶瓷结构和质量是陶瓷制备研究中不可忽视的问题。

目前有些新型陶瓷制品还不能像金属零件那样大批量稳定、精确的生产，特别是作为机器零部件的，精确、稳定是大规模应用的前提。随着研究的深入和应用的广泛，这些问题会逐一解决。

新型陶瓷，人类合成的“新石器”，在未来的人类社会中将发挥重要的作用，在第三次技术革命和21世纪的文明中留下它的印记。

四 无所不在的高分子材料

1. 改变人们观念的斯陶丁格

20 世纪初，美国化学家贝克兰用苯酚和甲醛反应，再添加木粉或者云母粉，得到坚硬耐温的绝缘材料，用作电器插头、插座，人们称这种材料为电木，这个名称一直沿用至今。

第一次世界大战中，德国政府为了适应战争需要，生产了 2000 多吨甲基橡胶。到 20 年代，法国公司又合成了丁苯橡胶，这种橡胶至今还在生产，是橡胶的主要品种之一。

这些已经形成工业生产规模的新材料，都是有机化合物，从分子结构上讲，并没有什么特别的地方。可是，把这些材料溶解到溶剂中，得到的溶液粘度特别大，粘粘糊糊的，即使溶液中橡胶的含量只有百分之几，也特别粘。而且，早就有人测出橡胶分子量在一万以上，这些性质是不同寻常的。对此，当化学家、物理化学家们用了“胶体”这个概念去解释这种现象。胶体理论是英国化学家格拉汉在 1861 年提出的，认为晶体在溶液中分散成小颗粒，因此容易溶解，胶体形成大颗粒，这种大颗粒由小分子聚集而成，因此溶液粘度大。用现成的理论去解释碰到的问题，这是人们思维上的一种惯性，苛刻一点说是惰性，它阻碍人们去发现新事物。这时候，有一位化学家，德国人施陶丁格，看到了用胶体理论去解释这种溶液所包含的矛盾，经过长期的研究和思考之后，大胆地提出，这些物质是由重复单元通过化学键互相联结形成的线性的长分子。这是第一次提出高分子概念，在当时并不受到科学界的欢迎。施陶丁格从 20 年代初就开始说服同行接受大分子的概念，1928 年，在德国物理和胶体化学年会上正式宣读了他关于大分子概念的论文，他得到的回答是同行们的反对和质问。问他为什么要他们“放弃低分子化学的美好思想”。直到 1929 年，还有人劝告他，“亲爱的同行，让我们奉劝你放弃大分子的概念，没有一个有机分子的分子量能超过五千。纯化你的产品，它们就会结晶，揭示它们本是低分子物质。”

施陶丁格对高分子的概念有深刻的理解，因此他没有气馁，而是继续进行深入的研究。在 1930 年的年会上，再次阐述了高分子概念，终于得到承认。施陶丁格不仅在思想观念上超过同时代的人，而且改变了人们的错误观念。

施陶丁格同时也建立了通过测量高分子溶液粘度来测定分子量的方法，研究的进展也推动了在分子科学基础上建立起来的橡胶、塑料、化学纤维的生产、加工，高分子成为 20 世纪的新兴的材料。

20 多年之后，施陶丁格被授予 1953 年诺贝尔化学奖。

2. 分子量以万计的大分子

高分子的概念在二三十年代很难被人接受，因为当时有错误的“胶体”概念先入为主，进行了错误的导向。在今天，凡是了解化学的人都会认为高分子的观念是顺理成章、理所当然的。下面，让我再对朋友们作一些简单介绍。

为了度量原子和分子的质量，人们规定用一个碳 12 原子质量的十二分之一作原子质量的单位，把一个分子里各个原子质量加起来，就是分子量。比

如，氢的原子量是 1，一个氢分子由两个氢组成，氢分子的分子量就是 2。氧原子的质量是 16，一个氧分子的分子量是 32。一般的有机物分子量在从几十到几百的范围内。但淀粉、蛋白质这类天然有机物的分子量都很大，都要以万计，有的甚至高达数百万。我们经常见到的尼龙、聚乙烯塑料这样一些物质，它们的分子量也在几万到几十万。

当物质分子量增大到一定数量时，物质性质就发生质的变化。石蜡就是一个例子，石蜡和聚乙烯在化学结构上是相向的，差别在于石蜡的分子量很小，只有几百，而聚乙烯分子量在几万甚至几十万。石蜡的强度低，经不起拉力和冲击，而聚乙烯强度高，可以做成各种器具，吹制成塑料袋；石蜡如果浇成薄片，一掰就会碎。石蜡的分子也会排列成结晶甚至排列的方式都和聚乙烯差不多。石蜡的结晶在五六十度就熔化了，而聚乙烯的结晶熔点在 130

左右。当聚乙烯分子量达到一千多的时候，也是一种蜡状物。只有当分子量增加到一万多的时候，在性质上才会产生突变，成为高强度、高熔点，能作材料使用的物质。

高分子分子量达到几万以上时，它的长度是粗细的几万倍，正像一根头发那样粗的钢丝，如果长度达几十米，即使钢丝再硬，也会卷曲起来，很难保持挺直的状态。要把一堆卷成团，缠在一起的钢丝无论是拉断还是折断，或者撕扯开都是很困难的。而且，在分子间存在相互吸引的力，对小分子而言，这种力是很微弱的；一个高分子是由上千个小分子组成的，高分子间的作用力也就增加了上千倍。因此，每种高分子都得达到一定的分子量才会表现出高分子性质，与小分子、低分子产生根本的区别，这个分子量叫做临界分子量。

小分子如果在两端有活性基团，彼此拉起手来；或者有双键、三键，打开一个双键，跟别的分子联结起来，就能形成较大的分子。小分子被彼此连结起来形成大的分子的过程叫聚合。

3. 击败纳粹的功臣

1941 年 12 月 7 日，日本飞机突然袭击珍珠港，把美国海军太平洋舰队停泊在珍珠港的大部分舰艇击沉或击伤。日本军队相继占领新加坡、马来西亚以及东印度群岛。这些天然橡胶生产地原属英国管辖，占有世界天然橡胶产量的百分之九十。而欧洲和北美是不生产天然橡胶的，橡胶资源曾控制在盟军手里，并对德国和日本实行禁运。橡胶是重要的战略物资，是生产汽车、大炮和飞机轮胎的原料。一旦断绝橡胶供应，数以万计的汽车、飞机和大炮就会因为没有轮胎更换而无法使用。显然，盟军面临的危机是非常紧迫的。

在这紧急关头，美国的有识之士建议政府加紧人工合成橡胶的生产，美国总统采纳了这一建议，下令专门成立了橡胶局，以协调人工合成橡胶的生产和研制。

1940 年，杜邦公司的化学家合成了用氯丁二烯聚合的氯丁橡胶。氯丁橡胶具有天然橡胶不具备的优点，例如不燃烧、耐腐蚀、不易老化，特别是耐油性好。普通橡胶经不起汽油浸泡，汽油分子很容易钻到橡胶分子间去，橡胶变得肿胀起来（这种现象叫溶胀），失去弹性和强度，不能使用。氯丁橡胶这些可贵的性能使它在军事上特别有用。

此外，美国还掌握有丁苯橡胶的生产技术，一流的研究水平和雄厚的工

业基础。经过战时体制的动员和组织，开始了从原料到产品，从研究到生产的全国性协作。陆续建立起五十多家工厂，当年生产合成橡胶 1.8 万吨，第二年达到十几万吨，1944 年产量达到 63 万吨。这是一个很大的数目，相当于 15 年后的 1959 年世界合成橡胶总产量。

这场技术革命耗资十亿美元，为盟军在太平洋、在意大利、在诺曼底大反攻的数以万计的车辆、大炮、飞机装备了轮胎和其它零件，也创造了大规模人工合成橡胶的纪录。

橡胶性能最主要特点是具有高弹性。你可以把一根橡皮筋拉长几倍甚至十几倍，当你把手松开后它还能恢复到原来的长度，这使它能经受巨大的冲击，吸收外来的能量使自己产生形变，然后慢慢释放出来。我们中国有句成语，叫“以柔克刚”，橡胶正是以柔克刚的能手。当飞机在机场着地时，巨大的冲击足可使任何刚性材料做成的轮子撞扁或撞成碎片甚至损坏飞机，而橡胶这个蔫头蔫脑的角色却能轻易地将冲击化解，使乘客和飞机安然无恙。

那么，橡胶高弹性的奥秘在哪里呢？说来十分简单，就是橡胶分子量大，且具有网状结构。这些卷曲的长链使橡胶能拉长到原来的许多倍，也吸收了外来的能量。而且每隔一定长度，都像鱼网一样有一个结，这种网是立体的、三维的、上下左右都有。有了这些结，无论在受到拉伸或压缩，它都能恢复原来的形状。如果没有这些结。就像一团线，你一扯，它就变形了，再也回不到原来的形状。

当然，说它打结只是个比方，实际上是分子链之间是形成共价键联结，经典的方法是把硫磺和生橡胶反应，让硫原子在生橡胶分子链间架起桥来，或者说结成网。化学上叫交联。因为用硫来交联，所以叫“硫化”。现在，很多合成橡胶用过氧化物或其它方式交联，但硫化这个词还经常被使用。

此外，橡胶的弹性还跟一个重要的性质有关，那就是大分子本身的柔顺性。每一种高分子的柔顺还和温度有关系，温度越低分子越僵硬，过了某一点，就成了刚性物质，适于做塑料，这个转变温度叫玻璃化转变温度，是高分子材料的一个重要指标。对橡胶来说，玻璃化必须低于使用温度，比方说，北方冬天气温冷到零下 30 度，如果用玻璃化温度 -20 度的橡胶，就会变成硬梆梆的塑料了。天然橡胶，玻璃化温度可达零下 20 度到 40 多度，这还跟它的含硫量有关，不同的规格和牌号可能有不同的玻璃化温度。

天然橡胶来自橡胶树的分泌液，这种树只能在赤道附近的热带、亚热带生长，产品性能、生产规模、成本都受到限制。合成橡胶在工厂大规模生产，不受气候、自然条件限制，石油化工原料充足，成本低。而且，合成橡胶品种多，性能变化大，可以根据需要研制许多特殊性能的产品，如能耐 300 度的硅、氟橡胶。能在极低温度（-100℃）下工作的硅橡胶，能耐油、耐腐蚀的丁腈橡胶、氯丁橡胶，特别耐磨、耐油的聚氨酯橡胶，等等。

橡胶还可能被赋予各种特殊功能，如导电橡胶、微波吸收材料、有机半导体等。还有人设想用合成橡胶研制高温超导材料。毫无疑问，合成橡胶在高精尖技术中将起积极作用。

合成橡胶的年产量在 60 年代初就赶上了天然橡胶，70 年代初就达到了天然橡胶的两倍，到 80 年代初，合成橡胶产量又翻了一番，而天然橡胶产量无显著增长。天然橡胶年产量徘徊不前，而合成橡胶产量猛增。这是因为随着经济的发展，世界对橡胶的需求迅速增长，天然橡胶只能在热带生长，而且需要大量土地和人力，大规模增长很困难。有人作出这样的对比：生产一

万吨天然橡胶，要在 10 万亩土地上栽三千万棵橡胶树，六至八年后才能割胶，每年需 500 人工作。而建成年产一万吨的合成橡胶工厂，只要 150 人工作，占地仅数亩，一两年即可投产，随着自动化程度提高，定员还可减少，而且不受气候限制，温带、寒带均可生产。因此，合成橡胶在数量和品种中占主导地位是必然趋势。

4. 无穷无尽的丝

本世纪七八十年代以后，合成纤维做成的人造丝花色品种繁多，色彩鲜艳，无论从外观、手感上都可以乱真，穿在身上和真丝一样滑爽透气，而且比真丝挺括，耐洗、耐穿。由于生产规模大、成本低、价格也比真丝便宜。这些丝都来自能源源不断吐出丝的巨“蚕”——喷丝头。喷丝头一般由不锈钢制成，下部钻有很多细孔，高分子被加热熔融到流动态或者溶解到溶剂中形成溶液，再流进喷丝头，从那些细孔里源源不断地流出来形成细丝。根据需要，纺成的丝可以直接送去纺织，也可以切成与羊毛、棉纤维相近的长度，和天然纤维混合纺纱。

只要原材料供应不中断，喷丝头吐出的丝也不会中断，可以说，这种丝是无穷无尽的。根据原料和工艺的不同，纤维的品种变化无穷。作为丝使用的还是少数，更大量还是作为棉纤维以及羊毛代用品。把天然纤维经过化学或者物理方法溶解到溶剂中，再纺丝形成的纤维叫人造纤维。人造纤维在结构上还是纤维素，是经过化学修饰的纤维素。而合成纤维是由石油化工原料甚至无机物经过化学反应合成的。合成纤维的化学结构多种多样，可以说，凡是结晶、半结晶的高分子化合物都可作纺织的原料。用聚酯纺成的丝叫涤纶，用尼龙纺的丝叫锦纶，用丙烯腈纺的丝叫腈纶，用聚丙烯纺的丝叫丙纶，用聚乙烯醇缩醛纺成的丝叫维纶，聚氯乙烯纺成的丝叫氯纶，等等。合成纤维的产量在六十年代后期赶上人造纤维，七十年代超过人造纤维，占全部纺织纤维的 23%，80 年代达到 1200 万吨，占全部纺织纤维的 40%。如今世界纺织品中，半数以上是化纤。其中 97% 是涤纶、锦纶和腈纶，特别是涤纶占 45%。因此，长期以来困扰人类社会的吃饭穿衣问题，在近些年由于高分子材料的迅速发展，有了根本的改善。

一座年产 10 万吨化纤的工厂能够代替 30 万亩棉田或者 50 万亩桑田，这相当一个小县的耕地面积。把这些耕地改种粮食，每年可以生产二十万到三十万吨粮食，供 60 万至 70 万人食用，在人口膨胀，粮食需求猛增的当今世界，社会效益是不可估量的。自 1956 年以来，美国由于合成纤维的发展，已将百分之六十的棉田改种粮食作物。这种情况，在其它国家和地区也会出现。

棉花生产也有受气候影响问题。前几年因为棉铃虫为害，由于长期使用农药，使害虫产生抗药性，造成世界上很多地区棉花大幅度、大面积减产。合成纤维的生产却是旱涝保收，不受自然条件的影响。

合成纤维是新型复合材料的基本组成部分。碳纤维是由腈纶经高温炭化制成的。另一种重要的纤维开伏勒是由芳香族尼龙经液晶纺丝得到的，强度已超过钢铁，它们都是航空航天技术中制造飞机和飞船的重要材料。

5. 与钢铁竞争

人类告别青铜器以后，就进入了铁器时代，在结构材料领域，钢铁是人们首选的材料。可是，到了近代，钢铁的霸主地位受到动摇，挑战者就是塑料。

就说汽车吧，显然一副钢筋铁骨，但实际情况正在变化，钢铁逐步被取代。美国轿车现在每辆车上塑料构件已达到 230 公斤，还不算车内装饰、轮胎、油漆等近百公斤的其它聚合物。现在，人们正在用刚性纤维增强塑料，做汽车驱动轴、弹簧片这样一些关键的结构部件。要知道，驱动轴把发动机的动力转给车轮，而弹簧装在车身底下，要承受车身的全部重量和给车身减小震动，这意味着塑料要传递汽车的全部动力和承担车身的全部重量。甚至连发动机这样的需要承受高温的设备也有人考虑用塑料制造呢！

塑料比重只有钢铁的七分之一，用塑料代替钢铁，可以明显减轻自重。作为交通工具，减轻自身重量能降低油耗，减少二氧化碳的排放。据统计，美国小汽车以往自身重量 2 吨，采用塑料后，1980 年减到 1.4 吨，到 1990 年进一步减轻到 1.1 吨。日本汽车轻便，油耗低，是由于大量采用塑料的结果。日本每年用于汽车工业的塑料近百万吨。

要把塑料作为结构材料使用，首先是要提高塑料的性能，除了制定各种标准，建立科学的、统一的，可以比较的评价方法，还要对高分子材料的结构作深入了解，找到提高性能的内在因素，用各种化学和物理的方法去提高它们。

作为结构材料使用的塑料称工程塑料，尼龙、聚矾、聚碳酸酯、聚酯等都是常见的工程塑料，其中能在 150 以上长期使用并且具有更高的强度的称特种工程塑料。

为了改进工程塑料的性能，各种各样的方法被使用，例如取向，用其它材料增强、复合，或者不同的聚合物的“合金”等等。

除了作结构材料外，塑料还有钢铁材料所不能具有用途。例如，塑料很容易吹制或压延、拉伸成膜。塑料薄膜价格低，作包装材料、手提袋非常方便。塑料膜在农业上的用途很广泛，能透过阳光而不传热，覆盖温室，造价比玻璃低得多而效果相同，适于大面积推广。在温室里种植蔬菜、瓜果，使人们在寒冷的冬季也可以吃到西红柿、青椒等果菜。

塑料不像钢铁那样生锈、腐蚀，塑料被广泛应用在需要防腐的场合，例如耐酸的容器、管道、阀门、泵等。把塑料加热喷涂到金属表面，既可以防止金属锈蚀，还可起装饰作用。

世界塑料产量按体积计算已经超过钢铁。过去人们常用钢铁产量来衡量一个国家的工业发展水平。现在，塑料的生产量也成为重要的经济指标。

6. 集成电路的助产士

第一台电子计算机 ENIAC 是美国在第二次世界大战中制造的，运算速度每秒钟五千次，重 30 吨，占地 170 平方米，耗电 140 千瓦，是一个庞然大物、电老虎。今天，一台摆在书桌上的微机运算能力每秒钟达上亿次。要达到 E - NIAC 那样运算能力，只需 60 克重，耗电 0.7 瓦的微机就够了。ENIAC 由于耗电量大，发热厉害，工作一会就得停下来散热，今天的计算机则可以长期连续工作。

体重减轻 50 万倍，耗电减少 20 万倍，这样惊人的技术进步是怎样得来

的呢？归根到底，应该归功于集成电路的诞生。ENIAC 使用电子管作主要元件，用电子管的亮和不亮来表示二进制的 0 和 1 两种状态，每个电子管有一个小电灯泡那样大，再组成电路，体积当然就大了。后来在硅片上掺杂其它金属制作晶体管，用晶体管代替电子管，体积就小多了。而集成电路是把二极管、三极管、电阻、电容等元件都做到一块指甲大小的硅片上，体积更大大减小了。集成电路的诞生，带来了计算机的革命。集成电路的集成量越来越大，从小规模集成电路每块包含几十个元件，到大规模集成电路几百个元件，70 年代的大规模集成电路每块集成上千个到 20 万个元件，80 年代以后的超大规模集成电路达到 200 万个元件或更多。集成电路制造技术的每一次突破，都给计算机带来更新换代，微机的体积没有变化，但运算速度已达到每秒上亿次，相当于几年前大型计算机的水平。计算机价格也随着戏剧性地下降，很多家庭拥有了计算机，这里面就有高分子材料的功劳。

要明白高分子材料在集成电路制作过程中的作用，先得大体了解光刻工艺。要在一小块单晶硅片上加工出几万个元件并把它们连接成电路，用一般的方法是不行的，比较好的方法是把线路图遮盖在硅片上，要保留的部分不让光通过，要去掉的地方让光通过，用光线刻蚀出凹坑来，这种工艺叫光刻。因为光并不能直接在硅片上进行刻蚀，就需要高聚物来完成这个任务了。

实际工艺是很复杂的。先要用专用的仪器把线路图缩小、聚焦到硅片上。硅片表面经过氧化或沉积了一层二氧化硅，二氧化硅上面涂有一层光敏聚合物。这种聚合物必须是对所用的光敏感，就是说经光照能发生交联或者降解反应。所谓降解就是大分子发生断链或分解使分子量下降。因此经过照射后，线路图就留在这层高分子膜上了：被点和线遮住光的部分没有变化，没有遮住光的地方的聚合物被降解或破坏。到这个时候，线路图还只是潜在的，没有显现出来的图形。再用溶剂去清洗，降解部分的聚合物膜被溶掉了，没有降解的部分还在，线路图就洗出来了，这个步骤叫显影。也可把要保留的部分让光线照射，而把要去掉的部分遮盖住。这时要使用在光照射下进行固化反应的光刻胶。反应后掩膜不溶于溶剂，而未经光照的部分被溶剂洗去。再用氢氟酸去腐蚀，聚合物不怕氢氟酸，复盖住的部分受聚合物保护原封不动，暴露出来的二氧化硅被氢氟酸溶解掉，硅就裸露出来。再对露出的硅片进入离子注入，扩散掺杂，在上面制造晶体管。再造出电阻、电容，用金属把它们连接起来，就成为集成电路。

在集成电路从大规模到超大规模的演变过程中，高分子科学的任务就是为它提供高性能的掩膜。由于集成块上的元件越来越多，线路越来越复杂，线条越来越细，可见光发生衍射现象，已经不能刻出清晰准确的线条，必须使用波长更短的紫外线、X—射线等，就必须寻找新的对紫外线、X—射线敏感的聚合物。

光在传播时，只有当光波的波长比它通过的狭缝或小孔的尺寸小很多时才能沿直线传播，当二者尺寸相近时，光就会绕过狭缝，照射到周围去，就是说，光会把应该保留的部分也刻掉了，线路图就不准确。可见光波长在 400~800 纳米（1 纳米为百万分之一毫米）。目前工业上使用曝光机用 356 纳米波长的光，可以达到线宽 200~300 纳米水平，使用的聚合物是酚醛环氧作掩膜材料。随着集成度的提高，线宽缩小到 250 纳米以下时，就要发展 X 射线和电子束曝光，也必须发展和它相适应的聚合物材料来满足新技术的要求。

7. 绝缘导电 左右逢源

高分子材料良好的绝缘性能是众所周知的，它的电阻率很高，可达到每平方厘米 10^{20} 欧姆，电子不能突破它的屏障；聚合物很容易进行加工，也很容易和其它绝缘材料如云母、二氧化硅复合，复合以后性能更佳。因此，高分子材料被广泛用于各种电器和线路绝缘：从漆包线到高压电缆，从插头插座到高压线路绝缘子，从微型电机到百万千瓦大电机主绝缘，从印刷线路板到各种仪器表盘，都是高分子材料在保护着电器的正常运行和用户的安全。

然而，高分子材料在与绝缘相反的方向——导电与超导方面也崭露头角、跃跃欲试，也可能在未来的高技术领域中一展身手呢！

乙炔是一种气体，乙炔分子由两个碳原子和两个氢原子构成，是最简单的有机化合物之一。乙炔可以由电石和水反应制得，所以也叫电石气。工业上用来与氧气共燃切割金属。

乙炔可以直接通过聚合反应得到聚乙炔，因为聚合产物后处理困难，现在大多用间接的方法来制备。聚乙炔本身是一种半导体，用溴、碘、五氟化砷等化学试剂处理，让这些分子掺到聚合物中，这种方法叫“参杂”。掺杂后的聚乙炔的导电性变化很大，达到金属的水平，稍微比铜差一点，而且还具有金属光泽。

晶体管是在半导体上掺杂其它金属，形成的电子导体或空穴导体组成 PN 结，PN 结能管制电流有方向地通过。聚乙炔本是半导体，掺杂后可形成导体，如果在聚乙炔薄膜上用控制掺杂的方法制造 PN 结，就形成了有机晶体管，这种晶体管已经在世界上的不少实验室被制备出来。

苯胺是一种普通的化工原料，苯胺的聚合物早在上世纪就被发现，但聚苯胺的结构很复杂，直到 70 年代以后才逐步弄清楚。聚苯胺的导电性因制造和处理方法不同，从绝缘体到导体都有。

聚吡咯的导电性和聚苯胺差不多。它的优点是热稳定性好，甚至在接近 300 时导电性也没有显著的变化。此外，它的机械强度也很高。

导电聚合物适于做可充电电池的电极。因为可充电电池要经历反复充电和放电的循环。金属电极在失去电子后形成的离子会溶解到电解液中，电极因此被消耗掉了。聚电物电极不存在消耗问题，因为聚合物导电是靠掺杂的离子来传递，无论在充电、放电过程中离入或者移出，聚合物本身的结构并不发生变化。用聚苯胺做电极的锂电池，充电放电次数在千次以上。

塑料比重只有金属的七到十分之一，用塑料做的电池重量很轻，如果应用到电动汽车上，可以大幅度减轻汽车自重。

聚硫氮是一种无机聚合物，也是第一个不含金属而显示超导性的共价聚合物。它的临界温度在 0.3K，虽然转变温度很低，但毕竟显示了聚合物超导的可能性。

早在 60 年代，里特尔 (Little) 提出，有机聚合物有可能存在超导性，并且转变温度可能比室温高得多，他还提出了具体的模型，计算了超导转变温度。但由于合成上的困难以及对超导机制还没有真正认识清楚，聚合物室温超导至今还是一个美好的梦想。

聚硫氮的超导性和金属氧化物、陶瓷在超导转变温度上的突破会激起高分子化学家甚至物理学家对高分子超导新的研究热情。聚合物结构变化多，

可以进行分子设计，再通过化学反应来实现，尝试各种新的理论、新的设想、新的模型。大分子既提供了广阔的活动空间，又提高分子链作为电荷转移和传递的最好通道。高分子材料可能是高温超导的下一个突破点。

8. 救死扶伤治病救人

一位苏格兰医生在治疗病人时发现：有个病人眼球中有一颗有机玻璃碎片，原来他在交通事故中受伤，有机玻璃车窗撞碎后飞入他的眼球。医生还观察到：七年之后的病人的眼球功能正常，并没有因为异物侵入而引起溃疡、坏死。这件事使他深受启发，认识到有机玻璃和人体有很好的相容性，是一种优良的人体器官材料。于是他用有机玻璃修复病人角膜。这可能是用高分子材料修补人体器官的开始。

现在，除大脑神经外，几乎所有的人体器官的“零件”都被制造出来，救助那些因外伤、病变而急需修补“零件”的病人。医用高分子材料有硅橡胶、有机玻璃、聚氨酯、聚乙烯、尼龙、聚碳酸酯等硬质塑料经填充或改性后做人工骨骼；尼龙、聚酯、聚乙烯等合成纤维可以制造人造血管；聚乙烯醇、聚丙烯酰胺等经过改性，接上亲水基团做成水凝胶，做成人工玻璃体；硅橡胶做成人工食道、气管、鼓膜等。

人的心脏、肾脏一刻也不能停止工作，否则就会危及生命。对许多病人而言，只要给他一个健康的器官就可以正常地生活许多年。如果能够挽救这些人的生命，无疑是一件功德无量、造福社会的事情。

一种办法是器官移植。器官移植有许多的限制，主要是人体的免疫系统能够“认识”并排斥外来的器官。第一个肾移植成功的病例，是1954年在法国一对孪生兄弟间进行的。在当时，不是孪生关系，移植后器官都不能成活。60年代用药物压制病人的免疫作用，把移植对象扩大到有血缘关系的人或者经过鉴定认为有相容性的人之间进行，成活率有所提高。那些移植了近亲器官的人可以活七年甚至十年以上，无血缘关系的有的活到四年以上。由于异体排斥作用，难以找到合适的捐献者，是器官移植的一大障碍。心脏移植是在70年代以后才在人体上进行，虽然有个别病人活到13年以上，但总的成活率还不高。

人工肾是荷兰医生科尔夫(W·Koff)在1943年发明的。它靠半透膜把入血液中的尿酸、尿素等小分子过滤出去，让红血球、白血球等大分子继续留在血液中。当时是一个很大的装置，称为透析机器更合适。病人必须躺在旁边的病床上，让血液流过透析机，除去有毒的废物，再从机器上流回人体。据说做透析是很痛苦的，但对那些肾功能衰竭的病人，不去掉血液中的废物，就会发生尿中毒，甚至死亡。50年代以来，由于各种新的高分子材料出现，以及制半透膜技术的改进，透析机变得小而轻，可以称得上人工肾了。病人从病床上解放出来，目前世界上至少有上万病人使用这种人工肾，有的已靠它生活了十几年。

用来制造人工的肾的材料有醋酸纤维素、有机玻璃、聚丙烯腈、聚砜、尼龙等，分别加工成空心纤维、膜等。再组装成透析器。纤维的管壁有极细的微孔，过滤就靠管壁上的小孔进行。

人工心脏机在病人进行心脏手术时代替心脏，维持人体血液的正常循环，手术完成后就不再使用人工心脏机。完全的人工心脏机还在研制之中。

人体免疫系统是人体的自身保护系统，它能够识别外来的“入侵者”，或将它们消灭，例如病毒，或进行排斥，使它坏死。这种异物排斥造成了器官移植的困难，对那些糖尿病人，肝病人，不能像模拟肾脏那样造出人工肾，怎样去救治他们呢？人体免疫系统不能识别一些高分子，也就不排斥它们。聪明的科学家想出了“人造细胞”的方法，把肝细胞、胰岛细胞用一层高分子半透膜包起来，放入人体内。由于这些高分子半透膜能透过小分子，这个假细胞也可以执行它的功能，维持人体正常的新陈代谢。在动物身上进行的试验表明用这种膜包埋的胰岛细胞可以存活一年，并且维持动物的血糖含量正常。同样方法包埋的肝细胞可以活一个月。目前这些试验都还在动物身上进行。

用高分子半透膜包埋活性炭做成的“人工细胞”可以抢救中毒病人。当这种假细胞在血液中流动时，血液中的毒素，例如尿中毒病人血中的尿酸、尿素；药物中毒病人血中的药物，因为是小分子，可以通过膜上的小孔钻进这些假细胞，被里面的活性炭吸附，蛋白质这些大分子继续留在血液中，毒物被活性炭固定在人工细胞内，就不会去危害人体的真细胞了。

9. 跨世纪的新材料

合成高分子材料是 20 世纪出现的新材料，在短短的几十年中，它已经赶上和超过了金属材料，而且还继续保持高速增长，在 21 世纪，按重量计算也会超过金属材料。高分子材料将得到更广泛的应用，为人们的衣、食、住、行提供高质量的服务。

今后，对高分子材料的结构和性能的研究将更加深入，控制结构，提高性能的手段更加多样化，除了设计和合成的新的品种，也可以通过对现有品种的进一步改进来实现。

各种有特殊性能、特殊用途的高分子材料，如具有光学活性、电学活性、生物活性的高分子材料，被用来制造光通信器件、电子计算机、记录材料、人造器官、高分子药物等高技术产品。

此外，高分子材料将向环境保护方向发展。目前，高分子垃圾在很多地方已经显现出它与环境不适应的地方。比如聚乙烯被广泛用作包装材料、手提袋，用后被随手丢弃；农用膜、地膜用过后留在土地中。由于微生物不“吃”聚乙烯，太阳光也不能很快分解它，聚乙烯可能在地里要埋几十年。

因此，研究开发天然高分子材料，已成为当务之急，世界各国的科学家们正为此作不懈的努力。

五 轻质高强的复合材料

1. 漆器、兵器与复合材料

1973年，在河北省藁城县台西发现了一个商代遗址。其中有一批漆器。这批漆器色彩绚丽，漆面光洁发亮，花纹纤细精巧。有的花纹红漆为底，上面描绘着黑漆花纹；有的花纹上还嵌着圆形、三角形的绿松石；有的花纹还像浮雕一样凸现出来。说明早在三千年前，我国古代在漆器制造工艺上已达到很高水平。

我国古书中有许多关于漆器的记载。战国时韩非子说，舜禹最先发明漆器；有的说“舜作食器，黑漆之，禹作祭器，黑漆其外，未画其内”。商代出土漆器的精美说明在舜、禹的时代出现漆器是可信的。

这些漆器所用的漆就是生漆，也叫大漆，是一种多年生乔木漆树分泌的树汁。生漆中含有水、漆酚和漆酶等。漆酶是一种天然蛋白质，也是天然的催化剂。漆酚含有羟基和不饱和基因，在漆酶的促进作用下，这些基团发生化学反应使漆酚分子彼此联接起来，形成巨大的立体网状分子。漆树只生长在我国和亚洲东部的一些国家，所以生漆也叫“中国漆”。生漆干燥固化后形成的膜坚硬、牢固、耐温、防腐，至今仍是一种高性能的涂料。

古籍中记载，庄子曾作过漆园吏。庄子是战国时期人，古代著名哲学家、思想家。庄子的时代虽然比舜、禹晚了许多年，但“漆园吏”至少说明了：当时漆树的种植和管理已形成规模，不仅是靠采集野生漆树，因为天然野生漆不可能称为漆园；漆树种植规模很大，而且在经济生活中很重要，否则不可能专门设置官吏进行管理。

据有关专家考证，古代漆器制作时，有的是直接在木器上涂漆，有的是用丝或麻的纤维丝筋，涂上生漆，干燥后形成坚固的整体。70年代在湖北随县出土了战国时期曾侯乙墓。墓中有兵器戟和殳。这是些类似矛的长杆兵器，杆芯是用三四米长的木棒制成，木棒外面纵向包着竹丝，再用丝线缠绕，再涂上生漆，干燥后成为坚固的整体。这种兵器长而质轻、坚韧，使用起来得心应手，在当时无疑是一种先进武器。

魏晋南北朝时期佛教在中国盛行，工匠们用漆器制作方法塑佛像。他们先用泥塑好佛像，塑好以后，把麻纤维包在泥像上，再往纤维上涂生漆，干燥后表面形成坚硬的固化漆层，然后再往已经固化的漆膜上涂生漆，往漆上贴麻纤维，再往纤维上涂漆，反复几次之后，在泥像外面形成了一座生漆与纤维复合的佛像，再用水把里面的泥冲去，就得到夹紵脱胎佛像。夹紵指生漆里夹有紵麻纤维；脱胎指脱去了里面的泥胎。胎指制造漆器的衬底。这种佛像轻巧、坚固、耐久。

像漆器这样，把两种或两种以上的材料按一定的方式复合起来的就是复合材料。漆器这样的复合材料被称为传统的复合材料。传统复合材料的特点是以天然材料为原料。纤维叫作增强材料，生漆称作基体。用纤维做增强材料的复合材料也叫维纤复合材料。

在西安半坡村挖掘的古代遗址属新石器时代前期原始社会，距今已有七千多年。半坡遗址中的墙壁和坯砖是用草掺合泥巴制成的，这是迄今发现最古老的复合材料了。四千多年前古埃及人也是用稻草切碎掺入粘土和混制成坯砖，晒干后砌墙，这种方法至今在一些农村还在使用。

2. 体育竞赛与复合材料

撑杆跳高的历史记载着一部材料史，当然也包含复合材料。二战前夕，日本运动员在撑杆跳高中曾有过优秀成绩。虽然不曾问鼎冠军宝座，但获得过 1932 年洛杉矶奥运会亚军，1936 年柏林奥运会的银牌和铜牌。日本的撑杆跳高成绩与当时所用的材料有关。因为当时撑杆跳高用的是竹竿，而且全世界的优秀撑杆选手全都用日本竹竿。

到了第二次世界大战中的 1942 年，美国运动员瓦马塔姆用一种新型的金属材料撑杆创造了 4.7 米的撑杆跳世界纪录，从此，竹竿便退出了田径场，开始了金属撑杆的时代。

在 50 年代出现了玻璃纤维增强撑杆。1956 年墨尔本奥运会上，希腊选手拿出了玻璃纤维撑杆，取得了第三名，但并未引起人们高度重视，金属杆还占统治地位。到了 60 年代，美国运动员尤尔塞斯用玻璃纤维撑杆跃过了 4.89 米，玻璃纤维杆这才引起广泛的重视和采用，跳高纪录不断被刷新。当时，因为撑杆跳高成绩长期徘徊，人们认为 4.87 米是人的体力所能达到的极限，尤尔塞斯打破了极限，自然引起人们的注意，玻纤增强撑杆也迅速普及开来。

这种玻纤撑杆，准确地说，应该是玻璃纤维增强不饱和聚脂，就是人们常说的“玻璃钢”。它是用玻璃纤维做增强材料，或用玻璃布浸渍不饱和聚酯，加压固化成型以后成为一体而得到的。玻璃纤维在今天已经是很普通的材料了，是把玻璃熔化后拉成极细的丝，或纺织成织物，除了制造玻璃钢以外，还广泛用作隔热、保暖材料。

玻璃钢和钢并没有什么联系，这个名称只是用来形容它们强度高而已。玻璃钢的强度能与钢材媲美，而比重比钢材小很多。不怕酸碱腐蚀，可以用来做化工原料和产品的贮槽、贮罐、管道等。玻璃钢有很好的绝缘性能，也用于电器、仪表等电器绝缘。1948 年美国海军曾经生产过一艘玻璃钢扫雷艇，因为船体不含钢铁，可以免受磁性水雷的威胁。另外，玻璃钢还用来制造游艇、船只等。

玻璃钢是以人工合成的材料制成的复合材料，已不同于以天然产物为原料的传统复合材料，所以它被称为现代复合材料。

玻璃纤维与环氧树脂也可以形成复合材料，这些复合材料被用作电工绝缘材料等一些工业用途上。

今天，玻璃撑杆已不大被人采用，玻璃纤维被碳纤维代替；不饱和聚脂被环氧树脂取代。这种碳纤维复合材料的性能比玻璃钢有了大幅度的提高，因而现在的撑杆更轻、强度更好。现在世界男子撑杆跳高纪录早已突破 6 米，能跃过 6 米也不止一二个运动员。布勃卡自 1985 年以来保持着撑杆跳高的世界纪录，我们没有见到有关布勃卡手中长杆材质的报道，但相信一定是先进复合材料制成的。

这种用碳纤维作为增强材料的复合材料被称为先进复合材料，或新型复合材料。

制造碳纤维复合材料制品的方法和玻璃钢相似，把碳纤维织成布或毯，浸上环氧树脂，再一层层迭成所需要的形状，在模具里加温加压，环氧树脂聚合成为一个整体，以碳纤维为“骨”，塑料为“肉”，形成复合材料，也

可以在室温加压固化，但固化后耐热性差一些。

现在自行车赛场上，已很少见到传统的由碳钢和普通合金钢制成车轮的自行车了，现在赛车的后轮是一个像铁饼样的圆盘。理论计算结果表明这种碟式车轮阻力最小，如果用一般材料制造碟式车轮就会加重车轮重量，用新型复合材料制造碟式车轮，重量轻、强度高。这种新式赛车重量只有九公斤，比一般赛车轻得多。现在，新型赛车日新月异、层出不穷，但都离不开复合材料。

网球高手的球拍是用新型复合材料做成的，这种球拍重量轻、强度高、弹性好，击出的球速度快。

据说，当年成吉思汗的军队所用的弓是用动物胶粘合木片制成的，这种弓尺寸小、弹性大，而且没有扭曲变形，因而射击准确。今天，体育比赛所用的弓和箭都用先进复合材料制成，准确性和射击距离都大大超过前人。

还有，像赛艇、桨、钓竿、滑雪板、滑雪杆等。日本是碳纤维和新型复合材料生产大国，产品的80%都用于高级体育用品。美国的新型复合材料则大规模应用到航空航天工业中。

3. 航天领域的尖兵

现代科学技术引人注目的成就莫过于航天工业了。在六、七十年代，超级大国在航天领域的竞争还主要是显示军事实力。今天，航天技术已经进入民用，和亿万普通人的生活密切相关。例如，体育比赛现场转播通过卫星传送，电视台每天发布的天气预报和星云图，也是由气象卫星收集的。自1957年第一颗人造卫星升空以来，已有数千颗卫星被送上太空。在这些卫星发射过程中，离不了复合材料的贡献。

卫星是靠火箭送上太空的，要把卫星送到绕地球飞行的轨道，必须达到7.9公里/秒，称为第一宇宙速度，小于这个速度就会被拉回地球。在火箭高速上升时，火箭头部会与空气产生剧烈摩擦，产生二三千度的高温。火箭是靠向尾部喷射高温高压气体产生的推力前进的，火箭尾部喷管壁要经受3000的高温。

火箭是一次性使用的，发射完毕就被丢弃，这样很不经济，因此美国人发明了航天飞机(space shuttle)，也译为太空梭、穿梭机。它可以多次往返于地球和太空之间，多次重复使用。航天飞机已经经历了多年载人飞行，在太空中进行科学观察和研究，施放、回收和修复卫星等。航天飞机除了要经受发射时的高温外，回到地球时再入大气层，受地球引力作用，速度越来越快，达到每秒七千米，要和空气产生剧烈摩擦，飞机头部的温度高达五千多度。

因此，火箭和航天飞机的头部必须用耐高温材料来制造，否则在发射时就会被烧毁，或在再入大气层时像陨石一样烧掉。尾部喷管也必须选用耐高温材料，否则火箭会被自己喷出的火焰烧毁。

为了减小空气阻力，火箭和航天飞机头部做成锥状，称鼻锥。鼻锥和尾喷管是用碳——碳复合材料制造的。

碳——碳纤维是把碳纤维织成布、毯或者更复杂的三维或多维织物，浸渍树脂或沥青，再放到高温炉中在惰性气体保护下把碳以外的氢原子、氧原子等原子赶掉，使树脂或沥青炭化，还要在2500℃处理，形成石墨结构。一

次浸渍和炭化还不能填满碳纤维织物的缝隙，还要反复多次浸渍和炭化，直到织物内部缝隙被填满，达到所需要的密度。

要制造鼻锥和喷管，当然最好是把碳纤维织成鼻锥状和管状，再反复浸渍树脂沥青，并进行炭化，形成一个整体的碳——碳复合材料部件。

为了进一步提高碳——碳复合材料的耐热性，还要在其表面进行碳化硅或氮化硅涂层。

碳——碳复合材料比强度高、耐高温、抗腐蚀、抗热震，特别是耐高温性能无与伦比，它是在 2500 以上高温烧结而成，所以能耐受二三千度高温，当温度再升高时，在表面起火燃烧，表面的碳纤维分解、氧化或气化带走热量，由于碳——碳复合材料隔热性好，里面丝毫不受影响。这种材料也叫“烧蚀”材料，只要材料有足够厚度，在进入大气层的短暂时间内不完全烧毁，足可以保证飞行的安全。

卫星是乘坐火箭或航天飞机进入太空的，而且卫星都是负有使命才去太空的，执行任务的仪器就装在卫星里，减少卫星自身重量，就能多搭载工作仪器，因此减轻自重就显得非常重要。此外，卫星的制造和发射费用非常昂贵，仅发射费用就以亿元计，从经济效益考虑，也必须减轻自重、加强功能。

例如用于传播电视节目和电话的卫星（称通信卫星），必须像一盏灯固定在某个高处，和地面保持相对静止的状态，用三颗这样的卫星就可以覆盖整个地球。俗话说“高灯远照”，通信卫星挂在距地面 36000 公里的高空，它发射的无线电波可以“照亮”地球三分之一的面积。要使卫星“悬”在高空不动，卫星绕地球飞行的速度必须和地球自转速度相等，这样才能保持和地面相对静止的状态。就是说，卫星飞行和地球自转“同步”，所以也叫同步通信卫星。为了避免卫星互相干扰，两颗卫星之间必须保持 3~5 度，卫星轨道圆周 360 度，因此只能安放 120 颗卫星。现代科学技术的发展，全球性的信息交流越来越多，卫星通信容量也越来越大。例如 60 年代只有 200 多个通路，到 80 年代有 6000 多个通路。之所以能够做到这一点，是由于通信设备的改进，火箭推进力的增强；另一方面就是采用复合材料，减轻自重，例如第五颗国际通信卫星，80%用复合材料制成，有 12000 个通信通道。

同步通信卫星在人造卫星中只占很小的比例，仅军用侦察卫星就有一千多颗绕地球飞行，它们都带有遥感技术中最好的仪器。此外，还有地球资源卫星，利用遥感，遥测技术找出地球上的矿藏分布、水源，观察森林、作物生长等。这些卫星都是靠卫星上的仪器工作的，都需要减轻自重，尽可能多搭载工作仪器。

卫星都必须装有天线，以便和地面进行无线联络。卫星上有两个很大的太阳能电池板，上面嵌着非晶硅片，把照射到硅片上的太阳能转变成电能供卫星使用。卫星主体则是一个圆筒，里面装着仪器设备。卫星上的主要结构，就是天线支架、天线反射镜反射面、太阳能电池板、中央圆筒都是由碳纤维增强塑料制造的。

碳纤维是新型复合材料的中坚，是纯粹由碳组成的纤维，由沥青或聚丙烯腈纤维制取。世界上每年由丙烯腈纤维制取的碳纤维超过万吨，由沥青制取的碳纤维达数千吨。

聚丙烯腈是由丙烯腈聚合得到的高分子化合物，纺成丝就是人造羊毛，商品名“腈纶”。聚丙烯纤维产量很大，它的主要用途还是作羊毛代用品。

现在工业上已经能够成吨地生产碳纤维，商品碳纤维有多种不同牌号和

规格。有的碳纤维的拉伸强度达到 7GPa，拉断碳纤维比拉断同样粗细的钢丝要多花两三倍的力量。碳纤维的比重早有 1.7 克/立方厘米，不到钢铁（比重 7.8）的四分之一，比铝和钴合金也要轻得多。碳纤维和很多高分子材料容易复合，复合后强度像钢材一样高，比铝合金还要轻 30%。像这样轻质、高强的材料，航天航空工业当然格外青睐。

4. 铝合金的竞争者

自二三十年代金属材料全面取代天然材料作为飞机结构材料以后，铝合金逐渐占据统治地位，成为飞机最主要的结构材料，到 70 年代以后，新型复合材料逐渐取代铝合金，成为铝合金的强有力竞争者。

复合材料在飞机上的应用首先是军用飞机，尤其以战斗机首当其冲。

美国空军战斗机上使用的复合材料占结构材料的比例逐步增加，70 年代进入服役期的 F—15 机上使用复合材料 218 磅，占结构重量的 7% 左右；到 80 年代进入服役的 F18 战斗机上，使用的复合材料增加到 1169 磅，占结构重量的 13%；而后来的垂直起降战斗机 V—88 上，机翼和前机身的主要受力构件都由复合材料制成，占结构总重量的 26%，而 F—117 战斗机的机体结构几乎全部由复合材料制成。

使用复合材料来制造飞机对减轻飞机重量的效果是明显的，F—15 减重仅 2%；F—18 减重 8%；Ar—88 减重达到 15%。由于飞机自身重量减轻，耗油量减少，飞行距离更远，作战范围更大，机动性更强。所以，由于使用了碳纤维，战斗机轻装上阵，威力更大了。

一名 F117 飞机驾驶员撰文描述了他驾驶飞机的体会。他写道，他驾驶 F117 飞机在天空游弋，简直是神不知鬼不觉，他甚至可以看见地面的雷达站，而雷达站却对他毫无觉察。

F117 是专门设计制造的“隐形”战斗机，而 B—2 则是能够隐形的大型轰炸机。这种飞机的外型非常奇特，像一只巨大的蝙蝠，而且呈流线性。这种外型是经过计算特地制造成这种模样以逃避雷达“千里眼”的侦察。我们知道，雷达向天空发射电磁波，这种电磁波波长为 1~100 毫米，属微波波段。当电磁波碰到飞机时，就被反射回去，雷达的天线接收到这些反射回去的电波，就会在荧光屏上描出亮点，雷达对这个亮点定位计算，就知道飞机出现的方向和距离。隐形飞机的奇特外形使它反射回去的电波极少，少到雷达不能觉察。同时，经过处理的碳纤维能够吸收电磁波。B—2 和 F117 是用碳纤维增强复合材料做成骨架和外面的蒙皮的，没有金属表面，也没有金属铆钉反射雷达波。当雷达发射的微波照射到隐身飞机时，通过碳纤维的电磁波被吸收，而通过碳纤维间的热塑性树脂的电磁波也被树脂吸收，没有电磁波回去“报信”，自然雷达站的荧光屏上见不到飞机的身影了。

用作军用飞机复合材料的增强纤维主要是碳纤维，此外还有少量芳纶（开伏勒）纤维，用作基体的塑料有环氧树脂和热塑性树脂，也有少量聚酰亚胺树脂等。

飞机发动机主要由金属制成，而且在飞行时喷出大量灼热气体，也发射出大量红外线，如果红外线被敌方探测到，飞机也会现出原形，因此，在飞机发动机喷口外面设置了许多栅条来屏蔽雷达波，还要采取措施屏蔽红外线，把飞机的红外线发射减到最小，这也是飞机能隐身的重要因素。

飞机隐形是一项综合性技术，复合材料的应用，既减轻了飞机自身重量，又帮助了飞机隐身，真是一举两得。

军用飞机重视飞机的先进性、战斗力、威慑力等军事方面的因素，有时能承受很高的成本和造价。民用飞机一般用于商业性飞行，更重视成本和效益。先进材料如果不能带来经济利益就不会有人采用。安全性更是航空公司首先要考虑的问题，一旦出现事故就会给公司造成巨大经济损失，大型民航客机上往往乘坐二三百甚至三四百人，更不能存在丝毫隐患。铝合金经过多年使用，加工技术已经成熟，加工所需要的工艺设备、生产线已经专门化，如果采用新材料，就不能利用现有生产线，必须重新建立生产线，增加设备投资。在这样严格的条件限制之下，复合材料还是部分取代了铝合金，在民航机上占有一席之地，成为铝合金的有力竞争者。

美国和日本联合研制了全复合材料飞机 Artek—400，是一种 6~9 座客货两用飞机。构成复合材料的纤维有玻璃纤维、碳纤维和芳族尼龙纤维，玻璃纤维和碳纤维占 21%，79% 是杜邦公司生产的芳族尼龙开伏勒，作为基体的树脂是道化学公司生产的环氧树脂。由于全部使用复合材料代替铝合金，机身重量只有 2.5 吨，比铝合金飞机轻一半。飞机在 1984 年 9 月试飞，起飞时飞机在跑道上滑行 380 米就升空了，比通常的金属飞机缩短了一半。飞机时速达到 780 公里，最大航程 4200 公里，耗油量是同类飞机的一半。

美国研制了一架全复合材料的小型飞机旅游者号 (Voyager)，组成复合材料的增强纤维 90% 以上是碳纤维。飞机的结构重量只有 453 公斤。由于飞机重量轻，节省油料，同时自重轻也能装载更多的油料 (达三吨多)，这架飞机不加油、不着陆连续飞行 9 天，飞行距离 40252 公里，创下了飞机在大气层连续飞行时间最长、飞行距离最远的纪录。

航天线上服务的大型客机的安全至关重要，而且要通过严格的鉴定和审核。复合材料是以前未曾使用过的新材料，缺少作鉴定和审核的标准和依据，欧美一些国家已经开始制定关于复合材料结构的适航鉴定条例。

尽管如此，大型客机上使用的复合材料日益增多。波音公司设计生产的大型客机 B757、B767、B737、B747 都采用了复合材料代替金属制件，如方向舵、升降舵、主起落架舱门等。在比较新的机型上，如 757、767，连一些作机身骨架的肋条以及机翼都用复合材料制成。另一家大公司麦道公司正在进行大型客机的复合材料机翼和机身的预研，目标是把机身减重一半，成本要下降四分之一。

与波音公司旗鼓相当的竞争对手是欧洲空中客车公司，他们在复合材料的使用上也积极行动，大型民航客机 A320 上的垂直尾翼就是用复合材料制成的。

用作波音 757 机翼、机身的复合材料的增强纤维是芳族尼龙纤维，也叫芳纶、开伏勒、开伏那。这是一种高分子化合物，它是由苯环和酰胺键组成的大分子，因为一些带有苯环的化合物具有芳香气味，所以称芳香族、芳族。而主链有酰胺键的聚合物都称为尼龙，所以称为芳族尼龙、芳纶，杜邦公司出售的商品名 Kevlar，所以按读音翻译又有开伏勒、卡伏勒之类许多读音相近的名称。

芳纶的力学性能很好，它的拉伸强度高于不锈钢丝与石墨纤维相同，就是说要拉断同样粗细的丝，不锈钢丝比芳纶容易断。芳纶的抗冲击强度比碳纤维高几倍。芳纶比重只有 1.44，比碳纤维低，只有铝的一半，钢铁的 5.4

分之一，比玻璃纤维差不多轻一半。芳纶还有很高的耐热性，不熔、耐火。用芳纶制成的复合材料强度也很高，因此被用作大型客机的结构材料。

芳纶是尼龙的一种。尼龙是最早的合成纤维，但至今仍是纤维中的佼佼者。三十年代卡洛瑟斯研制成尼龙 66，1940 年出售第一批尼龙袜，弹性高、耐磨、售价很高，只有电影明星才穿得起。锦纶的化学结构是尼龙 6，是尼龙家族的另一成员。以后又陆续出现了尼龙 4、9、12、6、10 等许多品种，大多作工程塑料用，它们结构上相差不大，是同系物。芳香尼龙在结构上以苯环作主链，所以带来了一系列不同性质。

芳纶的分子非常刚硬，在溶液中能形成棒状排列，成为液晶结构。这一点是很不寻常的，因为一般的高分子在溶液中会形成线团状结构。把这种液晶从喷丝头喷出，拉伸形成纤维，称为液晶纺丝。液晶纺丝后成为芳纶。芳纶中尼龙大分子基本上还保持着伸直状态，平行排列，因此芳纶的力学性能好，强度非常高。在锦纶及一般纤维中，高分子链来回折迭形成结晶态，在结晶态之间还夹着非晶态。因此，芳纶纤维的结构也不同于普通纤维结构。

环氧树脂是常用的复合材料基体，这是两端带有环氧基的化合物，根据分子量不同和分子中所含环氧基团数目，以及分子结构的差异而有许多牌号的商出售。环氧基团在酸、酸酐、氨类以及一些化学试剂作用下容易打开，发生化学反应形成交联的固体大分子，这个过程叫固化。

固化后的环氧树脂的力学性质、耐热性随着所用的固化剂不同而有很大差异，一般地说，在高温下固化的树脂耐热性好。但无论使用什么固化剂，环氧树脂的长期使用温度难以超过 200 。

更高性能的材料能耐 250 ~ 350 高温，在这些情况下，要使用聚酰亚胺树脂作基体。

热固性树脂的缺点是性脆，冲击韧性低，此外，要连接各个部件必须用铆接或粘接，不如焊接方便。此外，由于不溶解和不熔融，大型制品一旦出现不合格，很难修补，也不能回收，就造成浪费，提高了成本。

因此，在一些情况下，可以使用像尼龙、聚酯这类塑料。这类塑料加热到一定温度能够成为粘稠液体，可以流到模子里，冷却后就按模子形状形成制品，所以称为热塑性（这也是塑料这个名称的由来）。实际上，考虑到树脂强度，与纤维复合的能力等因素，对所用的树脂是有严格选择的。例如波音公司把石墨纤维和聚矾复合，代替铝合金做飞机蒙皮。在隐身飞机的复合材料中，是以热塑性树脂作为基体，比热固性树脂有更好的吸收雷达波的能力。

5. 给金属和陶瓷补强

以树脂为基体的复合材料只能在 350 以下的温度使用，如果能以金属为基体，用耐高温的纤维补强，就可以得到强度高于金属、耐更高温度的新型材料。

用碳纤维、碳化硼、碳化硅纤维与金属镁、铝、钛、铜等复合，复合材料强度高、刚性强，耐磨损。因为造价贵，工艺复杂，目前还未进入实用阶段，一些发达国家仍在进行研究。

把碳化硅颗粒掺到铝合金中，得到的复合材料比重只有钢的三分之一，钛合金的三分之二；强度高于中碳钢、接近钛合金。与铝合金比较，比重没

有增加，强度、耐磨性都提高了。显然，碳化硅起到了增强效果，这种不是用纤维而是用颗粒作增强材料的复合物叫颗粒增强材料。碳化硅是一种新型陶瓷，我们在前面已经谈到。

铝的来源丰富，价格不高，比重小，通过增强以后能达到钛合金的强度，很有意义，因此铝基增强材料在目前占主导地位。以铜和镁为基体的复合材料也在快速增长。在美国的一项国家航空航天计划中，以金属间化合物为基质进行增强，预计到下世纪初将达到仅次于铝基复合材料的地位。

陶瓷能在一千度以上保持高强度、高硬度，高的耐腐蚀性，是作燃气轮机叶片、刀具、汽车引擎等初温下工作机械的最佳材料，但是陶瓷脆性大，吸收冲击的能量的能力差，裂纹扩展快。克服陶瓷脆性的一个有效办法就是用纤维或颗粒补强，制成陶瓷基复合材料。

用作补强体的有陶瓷纤维、晶须、颗粒。将碳化硅颗粒或须晶，掺混到其它陶瓷的粉体中，成型、烧结后得到的陶瓷就是一种复合材料。因为碳化硅也是一种陶瓷，所以也称为复相陶瓷。在这种陶瓷中，碳化硅起到了很好的增强效果，使复合后的陶瓷韧性大大增强了。

陶瓷复合材料能够克服陶瓷的裂纹敏感性和易于断裂的弱点，使陶瓷在刀具、航空航天部件，发动机等领域正在或即将得到应用。

六 前途无量的超导材料

1. 卡麦林·昂纳斯的故事

荷兰物理学家卡麦林·昂纳斯(H.Kamerling Onnes)是1913年诺贝尔物理奖的获得者,这是为了表彰他制取液氮的低温技术,但他更大的贡献却是发现了超导现象。这一发现直至现在,甚至下个世纪都将对民界产生重大影响。昂纳斯无愧于诺贝尔科学奖的殊荣。

本世纪初,物理学家进行了一场获取低温的竞赛。

从分子运动的角度看,气体压力是分子碰撞容器壁的结果,而温度是气体分子动能的量度,所以,温度是没有上限的,却有下限,那就是当气体分子都停止运动时的温度。那么,这个温度是多少呢?

实验测出,如果保持气体体积不变,把气体从摄氏零度冷却,温度每下降一度,压强降低273分之一。由此推算,当气体压力为零时分子也就停止了运动,这时的温度就是低温的极限。英国物理学家开尔文勋爵建议用这个温度作为温度的起点,仍然用摄氏温度的温度间隔,也就是把水从冰点到沸点间的温差分为100等分每个等分为一度。这个温标称开氏温度,也称绝对温标,用这个温标表示的温度称绝对温度,用大写字母K表示。

把气体变成液体就能得到低温,比如,你可以把物体浸在液氮里,它就被冷却到液氮的沸点-195 以下。而且每种气体都必须冷却到一定的温度以下才能被液化,所以,气体液化和低温技术自始至终是密切相关的。

19世纪下半叶,当时已知的气体除氢以外几乎都被液化了。是苏格兰科学家杜瓦完成了氢气液化这一工作。杜瓦把装着压缩氢气的容器浸在液氮里,将压缩氢气冷到零下200 ,再让这瓶极冷的氢气减压,通到一个大的容器里,气体体积迅速增大时就吸收热量,进一步冷却。然后再将氢气用管子引回来,压缩到容器里,冷却,再膨胀,进一步降温。反复循环这种压缩——膨胀的过程,终于在大约-240 时,氢气变成了液体。次年,杜瓦使液氢减压蒸发,进一步降温,液氢凝固变成了固态氢。

杜瓦是第一个得到液氢和固态氢的人,也是第一个获得-253 和-259 的人。杜瓦还发明了特殊的镀银玻璃瓶来保存他的超冷液体。这种玻璃瓶有两层,中间抽真空,细长的瓶颈上端有一个小口,叫做杜瓦瓶,至今还在物理、化学等许多实验室使用。杜瓦瓶还是现在家用热水瓶的前身。

1908年7月,在荷兰莱顿大学,昂纳斯教授开始了他准备十年之久的试验,这就是把当时称为“永久气体”的氢气液化。

昂纳斯具有卓越的组织能力和指挥才能,他的实验准备完善而且周密。他和他的同事们安装制造了大型气体液化装置,能够大量制取液态空气直到液态氢,提供一系列的低温环境;液态乙烯能达到-145 ,液态氧能达到-183 ,液态氢能达到-253 。

实验从上午十点开始,他们先用前天准备好的液态空气冷却高压氢气,利用高压氢气在体积膨胀时的吸热效应来使氢气液化。这个步骤花了半天时间。

得到了足够的液态氢以后,再把装有高压氢气的容器放到液体氢中冷却到零下250 ,开启高压容器的阀门,使高压氢气喷射到另一个低压容器中,显然,这是一个典型的绝热膨胀过程。由于这个喷射,氢气的分子运动能进

一步减小，温度进一步降低。开始，这个试验并不太顺利，并没有得到所期望的液态氢，直到液氢全部用完，准备结束实验时，才在低温恒温器中发现了液氢的液面。

这是人类第一次将氢气液化，也是人类第一次把最低温度降到接近绝对零度，开辟了低温研究的新纪元。

昂纳斯没有满足于他的成功，立即着手进行物质在超低温下的性质的研究。在此之前，杜瓦教授获得液氢温度后，也研究过金属在低温时的导电性。据说杜瓦教授在被竞争对手超过以后，感到心灰意冷，不久就放弃了他的低温物理研究，无法与昂纳斯教授分享低温物理研究中的成功与荣誉。鲁迅先生主张“不耻最后”，赞扬那些落在最后仍然能够坚持跑到终点的选手，含意十分深远。我们做每一件事，都应该“不耻最后”，坚持到底。

昂纳斯和他的学生们首先测定白金丝在低温下的电阻，发现随着温度的降低，铂丝的电阻不断减小，当接近绝对零度时，电阻减小到某一定值就不再减小。这个电阻值就叫残余电阻。昂纳斯认为残余电阻是金属中的杂质引起的，就改用黄金丝做实验，因为黄金容易达到更高的纯度。实验测得黄金的残余电阻果然比白金小得多。后来，昂纳斯又选用水银做实验，因为水银在常温下是液体，可以通过蒸馏来提纯，蒸馏在实验室是很容易实现的操作，经过多次蒸馏后，可以达到很高的纯度。当测量水银的电阻时，随着温度下降，水银的电阻也变小，当温度降到 4.2K 附近时，电阻突然消失。这是一个前所未有的发现，昂纳斯本人也大为吃惊，他并没有将实验结果立即发表，而是提高精度，反复试验，证明结果准确无误。1911 年，他把结果报告给荷兰皇家科学院，1913 年，把这个结果公开发表。在这篇论文里，昂纳斯首次使用 Super conductivity 一词来描述他所发现的现象。Super 意为“超” Conductivity 意为“传导”，这就是“超导”一词的由来。用来描述物质导电能力的物理量是电导，电导是电阻的倒数，电阻趋近零，意味着电导无穷大。所以，“超导”一词也并没有夸张的意味。

也有人提出，“超导”也可能理解为光、热的传导，建议使用“超电导”来代替它。但实际上，由于约定俗成，大家都知道“超导”指的是超电导，所以仍然使用超导一词。

昂纳斯还设计了十分巧妙的实验来证明超导现象的存在，他把铅制圆圈放进杜瓦瓶里，瓶外放一块磁块，把液氢倒入杜瓦瓶，使铅冷却成超导体（这时他已经知道铅在液氢中是超导体），这时，把瓶外的磁块铁突然拿掉，由于导体切割磁力线在铅圈中产生了感生电流，这个电流应该持久不息，这就是有名的持久电流实验。

以后，很多人用更精确的方法重复了这个实验，1954 年 3 月 5 日，斯坦福大学做的一次实验，在长达两年半的时间，持续电流未见减弱，直到 1956 年 9 月 6 日，由于液氢供应中断，实验才告中止。费勒等用更精确的核磁共振方法测量超导电流产生的磁场，推算出超导电流衰变时间在十万年以上，就是说，只要保持导体的超导状态，其中的电流至少可以流动十万年！

临界温度和临界磁场

水银在温度下降至 4.2K 附近变成超导体，当温度超过 4.2K 时，水银的超导性消失，又转变为普通导体，这个超导转变温度叫临界温度。昂纳斯发现，铅在 7.2K 以下转变为超导体，7.2K 以上是普通导体。

显然，每一种超导体都有它自己特定的临界温度，而且超导临界温度越

高越好，使用起来越方便，因为维持的温度越低，花费的钱就越多。

由持久电流实验，昂纳斯立即意识到制造超导线圈是一件很有意义的工作。因为往线圈中注入电流以后，电流流动就产生磁场，成为超导磁体，而且在超导线圈中一次注入电流就可以永久流下去，而普通线圈因为存在电阻要消耗电流，很多电能作为热量被损耗了，超导电磁铁可能会比普通电磁铁消耗少得多的电而获得更高的磁场。昂纳斯用铅制成导线，绕成线圈，在液氮冷却下，加上电流，得到了磁场。研究结果发现，磁场会破坏线圈的超导态。当磁场强度超过某一数值时，线圈就从超导体变成普通导体。由此发现了超导体的另一个重要性质：存在临界磁场。

事实上，每一种超导体都有自己的临界磁场，不管这个磁场是外加的，还是由于本身通过电流时所产生的感应磁场，当磁场强度超过超导体的临界磁场时，超导体的超导状态就被破坏，成为普通导体。

临界磁场下流过超导体的电流密度称为临界电流密度，是表征超导体性质的另一个重要参数。

例如铅的临界温度 7.2K，铅在 4.2K 时，临界磁场 550 高斯，临界电流密度 150 安。这就是说，当铅制线圈的导线中电流密度达到 150 安培时，或者线圈产生的磁场强度达到 550 高斯时，铅导线的超导性就会消失，转变为普通导体。这就是昂纳斯的超导电磁铁得不到强磁场的原因。

临界磁场是温度的函数，在临界温度以下时，随着温度降低而增大。在临界温度时，不需加磁场，超导体的超导性就消失，换言之，在磁场为零时实现由超导体向普通导体的转变，此时的临界磁场为零。

临界电流密度与临界磁场互相依存，它与温度的关系也是一样的。也就是在临界温度时，临界电流密度为零，随温度降低而增大。当然每一种超导体的增大趋势是各不相同的。

2. 迈斯纳的发现

关于超导的研究在两次世界大战的间隙中有过一段繁荣时期，在 30 年代曾达到高峰，这一时期的代表人物是柏林的迈斯纳 (K.W.Meissner)

1933 年，迈斯纳通过实验发现纯净的、无应力的超导体内部的磁场为零。这是由于超导体产生了与外磁场相反的磁场，从而抵消了外磁场的作用，使内部的磁场为零，这种性质被称为完全抗磁性，按照科学界以发现者的名字命名的习惯，也称为迈斯纳效应。

所以，当把超导体放在磁场上部时，由于超导体反向磁化，产生方向相反的磁场，在超导体和外磁场间产生排斥力，甚至可以把超导体托起来浮在上面，磁悬浮列车就是依据超导体的抗磁性制成的。

当外磁场足够大，能够穿透超导体内部，超导体的抗磁性丧失了，超导体也就消失了。

所以，超导体的基本性质是超导性和完全抗磁性，表征这两个基本性质的参数是临界温度、临界磁场和临界电流密度。

在有表面电流流动的这一薄层里，磁场并不为零，而是有一定的穿透，穿透深度叫伦敦穿透深度，对决定超导体的性质有十分重要的意义。

3. 阿布里科索夫的贡献

昂纳斯研制的铅制线圈超导磁场强度只有几百高斯时就受到破坏，这是由于铅临界磁场和临界电流密度太低造成的。在他之后几十年，人们也未能做成一个有实用价值的高磁场超导磁体。

事情的转机是在发现了另一类超导体以及阿布里科索夫作了科学阐述之后。这类超导体有两个临界温度，在第一个临界温度以下，它表现为超导体，当温度超过第一临界温度，尚未达到第二临界温度时，它表现为超导体与普通导体的混合态，超导部分是抗磁性的，而非超导部分则有磁场通过；当温度超过上临界磁场时，磁场完全穿透，超导体完全转变为普通导体。这种结构就好像一块藕片，中间圆孔是磁力线穿过的非超导部分，而藕块就是超导体，没有磁力线通过。

上临界磁场比下临界磁场大一个数量级，第二类超导体的发现，意味着超导体的临界温度和临界磁场增大了十倍，可能成为有实用价值的材料。

第一类超导体是由纯物质组成的，像汞、铅；第二类超导体含有杂质或合金。看来，作超导材料并不是越纯越好，不纯的才有用。不仅如此，在结构上还要有晶体缺陷，晶体错位，杂质析出物才能形成稳定的超导体。

这里的道理也不难明白。在混合态时，超导部分有电流流动，产生感应磁场，因而推动穿过非超导部分的磁力线产生移动，通过磁通涡线运动。移动的磁力线产生相反的电场，形成电阻，就会破坏超导态。幸好有前面谈到的缺陷、析出物等，这些杂质和缺陷阻止了磁通的运动，就像在磁力线上钉上钉子一样，所以称为钉扎点。钉扎点阻止磁力线运动的力称钉扎力，钉扎力越大，超导体的临界磁场就越高，临界电流越大。在制造超导线材、带材时要设法增加钉扎点，提高钉扎力。

4. 磁悬浮列车

在日本的宫崎县日向市，有一条新奇的铁道线，铁道上运行的列车也是前所未有的，这种车厢安装的是橡胶轮，但不靠车轮驱动，运行时车厢浮在铁轨上方 10 厘米高处，因而没有车轮和铁轨撞击的轰隆声，它的速度极快，在 1979 年试运行，时速超过 500 公里，据推算，理论上的速度可以达到 1000 公里。

除日本国铁进行的试验外，德国也进行了磁悬浮高速列车试验，时速 500 公里，悬浮 10 毫米。很多国家都看好磁悬浮列车，认为它可能是未来的交通工具。

实验磁悬浮列车是为了对现在的火车进行改革。由于现在运行的火车是靠车轮和铁轨间的摩擦力前进的，现在已经有了时速 300 公里的高速列车，但速度不容易再提高，否则列车车轮打滑空转，高速列车已临近极限。要突破极限就必须寻求新的运行方式。磁悬浮因为列车和轨道没有接触，就没有以上的问题，而且运行时稳定、安全、不受台风等任何风力的影响。

其实磁悬浮的设想早在 1911 年就由俄国人提出来了，但真正实施是在六、七十年代，主要是由于超导材料的实用化研究取得了进展。

磁悬浮列车的关键设备是安装在车上的超导磁体，超导磁体的主体是两个装在不锈钢罐（低温恒温器）的超导线圈。列车下面的轨道呈 U 字形，轨道下面装有电磁线圈，这些线圈都是独立、闭合的，不用通电，由于受到列

车下面的超导磁体感应而产生电流，电流使线圈产生与超导磁体相反的磁场而使列车浮起。U 字形轨道两侧装有线圈，由普通导线绕成，通交流电。由交流电引起的磁力和超导磁体相互作用产生推力驱动列车前进，前进速度与交流电频率成正比。侧壁线圈还对车厢起稳定作用：当列车车厢靠近时它产生斥力，在车厢离得太远时又产生吸引力，它把车厢拉在 U 型轨道内，非常安全。

这个超导磁体的磁场强度约一万高斯，就是一特斯拉，超导线圈所用线材是铌钛合金线。

铌钛合金并不算好的超导材料，它的临界温度仅 9K 左右，上临界磁场约 11 特斯拉，这些指标在超导材料中实在排不上名次，但却是应用较广的超导线材。

这是因为超导线材至少会碰到三个问题。一个是前面谈到的磁通涡线运动，会破坏超导态；第二个就是所谓的磁不稳定性，一般情况下，钉扎能钉住磁通线，当外界磁场变化时，磁通线与钉扎力间的平衡被打破，为了建立新的平衡，磁通线要发生一次运动，运动产生的热又会减弱钉扎力，结果又导致磁通进一步运动，形成恶性循环，直到超导态被完全破坏。这种连锁反应又叫磁通跳跃。

所以实际使用的超导线材结构非常复杂。是由铜镍合金包埋着上万根铌钛合金细丝，细丝粗细只有头发的十分之一，用肉眼根本就看不见，细丝内部还造成许多钉扎点。造成钉扎是为了制止磁通涡线运动，做成极细超导线芯是为了防止磁通跳跃，实践证明芯越细越稳定；使用铜合金包覆是为了保护超导线芯，因为铜镍合金导电性好而且导热性较差，这样可以防止热量入侵超导线而且一旦超导态破坏可以顺利地传导电流。

铌钛合金线材的制作过程也是为着上述目的而进行的。先要把铌钛合金铸成锭，再加工成棒，把许多根合金棒埋到铜镍合金里，再压延，冷拉，长度拉伸到原先的上百万倍，才能把里面的铌钛合金拉成比头发还细的丝。用冷拔工艺是为了在铌钛合金丝的晶格里产生位错和缺陷，增加钉扎点。

冷拔成线材后，还要在 300 ~ 500 摄氏度进行时效热处理。所谓时效，就是要经历一定时间才能显出效果。目的是使以钛为主的细小的粒子沿着位错脱落出来，这种现象称为析出。析出的粒子就成为钉扎点。

此外，还要用钨或铜增强，再把这种增强的超细多芯线制成扁带、电缆或编织带。

铌钛合金延展性好，适于冷拔加工；和铜或铜合金容易复合，制成的线材稳定性好，加之工艺成熟，原料也不算昂贵稀缺，因此使用较多。这就是为什么在磁悬浮列车上使用铌钛线圈的原因。

现在，许多高温超导体问世，使用温度已进入液氮范围，液氮的价格只有液氦的十分之一，经济效益十分可观，关键的问题是要解决线材和带材生产中的问题，生产出稳定化的线材、带材来。

5. 关住一亿度高温的“魔室”

1952 年，美国在马绍尔群岛的一个小岛上进行了名为“迈克”的试验，爆炸了一颗相当于 1300 万吨黄色炸药的氢弹，使这个小岛从此从地球上消失。

这就是氢弹的威力。一颗原子弹足以毁灭一个城市，然而在氢弹面前，原子弹不过是小巫见大巫：氢弹是用原子弹引爆的，原子弹不过是氢弹的“雷管”！一颗氢弹可以相当于5000万吨黄色炸药，比前面所说的氢弹威力还大四倍！

事实上，用热核反应作为新的能源，正是许多科学家们梦寐以求的目标。氢弹爆炸的原理是热核反应，是两个重氢（氘）或超重氢（氚）的原子在数百万度高温下生成一个氦原子的反应，所以称热核反应，也叫核聚变，反应放出的能量比核裂变放出的能量高六倍。核聚变还是一种清洁的能源，它不像核裂变那样污染环境。在这里需要补充说明一下：核裂变是铀 235（或是钚 239 等）受到中子轰击分裂成一个钡原子和一个氪原子，并释放出三个中子的反应。反应放出巨大能量，几乎为普通炸药的一亿倍。这正是原子弹爆炸所发生的反应，也是目前地球上几百座核电站里的反应。核电站的废气中有放射性气体氙 85，这是一种不起化学反应的惰性气体，在空气中能存在很久而保持着放射性。核裂变的放射性固体废渣也令人头痛，目前的处理方法是深埋到废弃矿井里。核电站还有爆炸泄漏的危险，前苏联的一次泄漏曾经造成长时间的放射性污染。热核反应作为能源就没有这些问题，它没有放射性副产物；其次，核聚变需要在数百万度的高温下反应，装的原料少，一旦发生泄漏，反应也自然停止了。

核聚变反应的原料氘（也叫重氢）在地球上的储量非常丰富，普通水中都含有五十分之一的重水，重水是氘（重氢）和水的化合物，电解重水就可以得到重氢。一桶平常的水中所含重氢的能量相当于400桶优质石油，地球的水资源中重氢的能量，可供人类使用几百亿年！

核裂变已经成功地用来发电，成为一种廉价的能源，而对核聚变反应进行控制以利用反应释放的能量还处在研究和实验阶段。

要利用核聚变反应的能量，就必须对反应进行控制，必须建造反应堆，这当然比爆炸氢弹难得多。爆炸氢弹的目的是利用它的巨大能量进行破坏，温度越高越好，压力越大越好，冲击越强越好，不需要控制。而现在的任务是不让它有一点破坏性，安安静静、服服帖帖地交出它的能量。首先想到的问题就是：热核反应产生上亿度的高温，用什么材料建造反应堆，才能关得住这个小太阳呢？况且，一旦反应物接触到反应堆内壁，也会冷却下来。幸而，物理学家想出了非常巧妙的办法，其中之一就是磁约束。

已经知道，在高温下，所有的电子都会脱离原子核的束缚，形成等离子体，它是由自由电子和失去电子的原子核组成的。等离子体在强磁场面前会受到排斥力而被推开。因此，用磁体围成一个房间，等离子体就会受到周围墙壁的推拒而集中在房间的中央。在热核反应近亿度的高温下，重氢和氚都会成为等离子体，当然可以用磁场来建造反应装置，把上亿度的火球关在磁场里，再让它把能量慢慢释放出来。

实际研究中已经建立了几种不同的装置来进行受控热核反应，如托卡马克装置、仿星器等。托卡马克是由磁体围成的环形真空容器，仿星器是用磁体围成“8”字形，里面的空腔也呈“8”字形，等离子体在腔内循环流动，再用各种方式加热等离子体，使它们达到热核反应所必需的温度。

建造托卡马克和仿星器以及磁镜式装置都需要强磁体。这些磁体的磁场比磁悬浮列车所用的超导磁体强十到二十倍，如果用普通电磁铁，耗电量将是惊人的。

因此，又得借助超导技术来解决问题。一些致力开发受控热核反应的工业化国家，也都开始了大型超导磁体的制造。这些超导磁体除了需要高的磁场强度以外，还要承受大的电流密度，更高的稳定性和安全性，极大的应力，以及制冷和冷却技术等。

大型超导磁体所用的超导线材，除铌钛合金外，还有铌三锡。铌钛合金在前面已有介绍，下面谈谈铌三锡。

研制超导线材的历史和超导现象的研究一样悠久，昂纳斯就曾经制作过铅制线圈，在他以后，经历了很长的时间，才做出符合条件的线材，超导磁体才被制造出来。

首先是各种单质超导材料，主要是金属，都用来制作过超导线材，特别是铌，因为在单质中临界温度最高，被寄予很大的希望，但由于临界磁场过低，都失败了。

以后在铌中添加其它金属，得到了合金超导材料，通过一系列稳定化措施，得到了有实用价值的合金线材，如铌钛合金，能制造产生 10 特斯拉磁场强度的超导磁体，用在磁悬浮列车上。要制造磁场强度为 20 特斯拉的超导磁体，就必须使用更优良的化合物超导材料，因为它已经超过了合金的临界磁场，在这个强度下，合金会失去超导性。

1930 年就发现了化合物超导材料碳化铌，这是人类第一次发现临界温度超过 10K 的超导材料，到 50 年代，又发现了临界温度为 17K 的钒三硅、18K 的铌三锡，以后共发现了这类由两种元素组成的化合物 40 多种，其中有些有很高的临界温度，但实际使用的只有铌三锡和钒三镱，因为它们能制作线材，其它的则无法制备。

这类化合物具有类似食盐那样的晶体结构，容易碎裂，不能像合金那样直接拉制成线材，为此，研究人员设计了许多巧妙的方法，终于制成了多芯超导线材和带材。

一种方法叫表面扩散法。在制铌三锡带材时，把铌制成薄带，让铌带通过熔化的锡池，在铌带表面镀上锡。加热到 950℃，在铌带表面由于铌、锡的原子互相扩散，发生反应，生成了铌锡超导体。再在两边焊上铜带，就制成了铌三锡超导线带材。制造铌三锡线材的方法很巧妙。先制成铜锡合金锭，在合金锭中开许多孔，插入铌棒，再进行压延、拉伸成细线，就形成了包含有上万根铌丝的铜锡合金线。这与制造铌钛合金线的情形相同，只是到这一步还没有得到超导组分，还需要在六百至八百度进行热处理，由于原子在高温下的热运动，包围着铌丝的锡原子与铌丝表面的铌原子结合形成铌三锡化合物，这样超导层就形成了。铜锡合金就是青铜，这种方法叫青铜法。

类似地，把钒棒插入铜镱合金，拉制成多芯线以后，再进行热处理。在钒丝表面形成钒三镱超导层。这种方法用发明者的名字命名为太刀川法。

还有一种方法叫析出法，思路更为奇特一些。这种方法利用物质在快速冷却时形成非晶和非晶态易于加工的性质，先把铌三锗或钒三硅等超导化合物溶化，使溶体快速冷却，成为非晶态。把非晶态超导化合物分散到铜材中，拉制成线材，把线材加热再缓慢冷却，非晶态转变成结晶态。控制适当的结晶条件，超导化合物在铜线内形成极细的树枝状结晶，这些结晶交错重叠，形成超导通路。电子在导体内移动时有走捷径的习惯，总是从阻力小的路走，当超导线材在临界温度、临界磁场以下时，电子沿着这些树枝状结晶移动，当处在临界条件以上时，这些结晶失去超导性，电阻很大，电子就从晶体周

围的铜质部分通过，毫不损坏这些结晶超导体。析出法制成的线材性能很好，临界电流相当高。

用化合物超导材料制成的线材、带材可以产生 20 特斯拉的磁场，而且必须在液氮温度下工作，这是它的局限性。现在，陶瓷超导材料的临界温度达到 100K 以上。但同样面临易脆、难加工的问题，现在世界上许多实验室都在致力于超导材料的实用化工作，一旦取得突破，必将加速受控热核反应的实用化，为人类提供丰富的廉价能源。

6. 初生之犊约瑟夫逊

一般地说，理论研究可以指导实际的、应用的研究和开发，但也常常落后于实际研究。在发现超导现象以后，很多科学家都力图对超导作出理论解释，但都不能圆满解释所有实验现象，直到 1957 年，BCS 理论问世，才使理论界交出了一份令人满意的答案。

BCS 理论是由巴丁 (Bardeen)、库柏 (Cooper)、席瑞弗 (Schrieffer) 三人合作发表的，取他们姓氏的第一个字母，称为 BCS 理论。

这个理论涉及到高深的数学，在这里只作最粗浅、形象的介绍。

电流流动的本质是电子的运动。在通常情况下，晶格中离子的热运动和晶格缺陷使电子运动受到阻碍，形成电阻。在超导状态。超导体的晶格振动（也叫声子）和电子相互作用，使其形成电子对，当电子对通过晶格时能克服阻力，顺利通过。就像在足球场上，一个运动员带球前进就容易被拦截，而两个运动员互相传球前进则容易绕过对方，全体队员互相配合，阻力就更小。当大量电子整体流动时，由于电子的相互作用，电子两两成对，或者互相交换搭档，形成超电流。

随着超导研究的迅速发展，许多新的实验结果用 BCS 已不能解释，为此，一些物理学家又对超导 BCS 理论作了许多修正和发展。

1962 年，剑桥大学年仅 22 岁的研究生约瑟夫逊 (B.D. Josephson) 在超导研究中作出了独到的科学预见，因而一举成名。

约瑟夫逊经过慎密的思考，并依据 BCS 理论作出推导和计算，指出，当两个超导体之间存在着薄的绝缘层时，如果超导体内有电流流动，那么这个超导体的电流可以在没有电压的情况下通过绝缘层。我们知道，所谓绝缘层就是能阻挡电流，不让电流通过的不导电的物质，只有当电压很高使绝缘层受到破坏时才能使电流通过。显然，约瑟夫逊的推断是很大胆的。

约瑟夫逊还指出，当给这一绝缘体层两边施加电压时，除了有直流超导电流通过绝缘层之外，还有交流电通过绝缘层，交流电频率与施加的电压成正比。显然，这一推论比前一个理论更复杂。

约瑟夫逊在进行这一研究时曾经接受过著名美国物理学家安德森的指导，而且他本人并没有直接测量到通过绝缘层的超导电流，在安德森的鼓励下，他发表了论文。

几年后，约瑟夫逊的推断全部在贝尔实验室得到证实，初生之犊约瑟夫逊一举成名。这种超导电流从中间绝缘层穿过的现象被称为约瑟夫逊效应。

约瑟夫逊效应的发现对人们理解超导的本质有帮助。约瑟夫逊效应还被利用来制造精密仪器，例如超导量子干涉仪，这是一种非常敏感的磁场探测装置，用来进行医学诊断和地质调查。

在约瑟夫逊作出他的预言之前，美籍挪威物理学家贾埃瓦就制作了一个由两块铝片中间有氧化铝夹层的仪器，用来研究超导能隙，为超导的基础研究作出了贡献。在实验中，他多次观察到在没有电压的情况下电流通过氧化铝薄层，在液氮温度，金属铝是超导体，氧化铝是绝缘体，这就是约瑟夫逊效应。但他认为是氧化铝层没有做好，电流短路造成的，放弃了实验样品，也错过了做出重大发现的机会。后来有人问他是否为此感到遗憾，他诚恳地说：“不，因为要做出一个实验上的发现，光观察到某些情况是不够的，还必须了解观察的意义，就此而言，我甚至还没有入门。”

这件事说明，要作出重大的科学发现，必须大胆的思考，不受前人束缚的创新精神，以及坚实的科学基础。否则，即使新现象摆在面前，也会熟视无睹。

7.80 年代的淘金热

1983 年，在 IBM 公司设在瑞士苏黎世的研究室，贝特诺兹和缪勒开始了研制他们称之为“高温超导体”的工作。他们没有用当时热门的化合物超导材料作为研究对象，而是从金属氧化物入手。这是因为他曾经长期研究过锶、钛等金属氧化物，对它们的制备、性质、晶体结构，以及结构的转变有很深的了解。更重要的是，早在 1973 年，美国人约翰斯顿制备的锂钛氧化物具有超导性，临界温度 13K，说明氧化物超导体这个领域是块值得耕耘的沃土，但还极少有人涉足。

他们决定通过使氧化物晶格畸变，或“价带混合”的方法来加强晶格振动，提高临界温度。晶格振动也称“声子”，根据 BCS 理论，是形成超导的原因。可是，开始阶段用含镍氧化物试验，结果得到了绝缘体。这时，有人气馁了，甚至想放弃研究。贝特诺兹后来回忆道，由于苏黎世研究所良好的研究气氛和工作环境，使他们坚持下来了。

后来他们改用镧铜氧化物，用钡离子掺杂时，获得转变温度为 35K 的超导体；当用锶离子进行掺杂时，临界温度达到 40K，这时已是 1986 年了。

这是超导领域的惊人突破。因为自发现超导以后 70 多年中，临界温度最高纪录才达到 23K，这项纪录是 1973 年得到的，从那以后没有任何进展，很多人认为超导临界温度有一个极限，对这种大幅度提高半信半疑。况且，金属氧化物烧结成的晶体属陶瓷范围，在通常状态下是绝缘体，这也是前所未有的。

但感觉敏锐的科学家立即看到了这项研究的意义，争相挖掘氧化物超导体的潜力。

同年 12 月，中国科学院赵忠贤领导的研究组获得了转变温度为 48.6K 的镧镧铜氧化物。次年二月，美籍华人科学家朱经武和吴茂昆两位教授同时宣布获得转变温度为 98K 的超导体，三天后，赵忠贤等又把超导转变温度提高到 100K。

1987 年，贝特诺兹和缪勒获得诺贝尔物理学奖。

液氮沸点 77K，金属氧化物超导材料超过 100K，意味着可以把超导体工作温度提高到液氮中。大气中氮气含量 79%，氮气资源丰富，取之不尽，用之不竭，液氮价格只有液氦的十分之一。超导材料突破液氮禁区，这一进展立即受到各国政府的重视，全世界有数以万计的科技工作者参加超导研究。

80年代兴起的超导“淘金热”方兴未艾。

8. 前途无量的超导材料

尽管经历了几代人的努力，花费了巨额研究经费，还没有取得多少实际效益，超导材料仍然是最富有吸引力的新材料，这主要是因为它独特的性质和诱人的应用前景。除了前面提到的在磁悬浮列车、受控核聚变上的应用之外，还有许多其它应用，例如：

超导输电。目前输电线路因电阻引起的电能损耗十分惊人，超导输电具有零电阻，是最理想的输送电方式。

超导计算机。高速电子计算机需要超大规模集成电路，高密度排列的电路在工作时产生大量的热，如采用零电阻连接，就不会产生热量，可以大大提高运算速度。

利用约瑟夫逊效应还可以制成精密仪器，如量子干涉仪。

超导磁体用来制造发电机，可以降低发电成本，提高发电效率。

超导温度进入液氮温度，说明“禁区”、“屏障”是可以突破的。在数以万计的物理学家、化学家、材料学家千方百计使高温超导材料实用化的同时，人们还期待着更新的突破。下一个目标将是使临界温度进入二氧化碳干冰温度，直至室温。一旦实现室温超导，超导材料就可用来制造普通导线、普通电器，不需制冷和冷却，每一个与电、磁有关的机器、元件都要重新考虑如何适应和应用超导材料，甚至重新设计和制造。

七 信息社会的基础

1. 构筑信息高速公路的材料

有人把工业化以后的社会叫做信息社会。在信息社会里，获取和拥有信息就和拥有科学技术和资本一样重要，或者说，信息就是资产。因而，信息的迅速传播就成为十分重要的事情，因为信息如同新闻，过时了就失去价值；信息也包含商业情报、科技资料，迟到了就会造成重大的经济损失。

各国政府都十分重视信息现代化。美国最先提出了“信息高速公路”的构想，日本、欧洲也都作了规划和对策。所谓信息高速公路就是光通讯网络，它以激光作为信息载体，光导纤维作光的传输通道；计算机作为信息处理和显示的工具。网络以巨型电子计算机为中心，用光纤把众多的办公室和千家万户联系在一起，每个用户都有一台电脑，称为终端，用户可以从终端输入和得到各种信息。现在需要花许多时间奔走的事情，在电子计算机前很快就可以解决。信息在光导纤维里以光速奔驰，这种信息高速公路，实际上就是光导纤维。

光导纤维也称光纤，纤芯是石英玻璃细丝，纤芯外面是玻璃包层，外面再包以聚合物包皮，形成单根光纤。也有由多根光纤胶合在一起，再套上塑料套管制成的光缆。使用时可以像电缆一样埋在地下或架设在电杆上。激光在光纤芯中传导，碰到包层时会折射回到纤芯里去，曲折前进。评价光纤性能的最重要指标是传输损耗。顾名思义，传输损耗是激光在光纤里传输的过程中由于透射、散射，被吸收而造成的光损失。传输损耗越小，光纤中的光就传播得越远。传输损耗的大小主要取决于纤芯的特性，也跟包层性质，纤芯与包层间的结合方式有关。

最先提出将光纤作为光通讯传输介质的是美籍华裔科学家高焜，他在1966年从理论上证明，如果排除光导纤维中的有害杂质、光的传输能力就会大大提高，可能用于激光通讯。此后，各国研究者都力求提高纤芯纯度，降低传输损耗。到1970年，美国康宁公司用高纯度石英制取光纤取得突破，首次制得传输损耗20分贝/千米的套层光纤。这意味着信号在光纤中传输时的损失与电信号在同轴电缆中传输时损失相当，可以进入实用阶段。一根光纤可以同时传输150万路电话和2万套电视节目，远远超过同轴电缆，光纤的实用化意味着通讯技术的革命。因此这项突破引起世界的极大重视和关注，鼓舞人们进一步努力降低光纤的传输损耗，结果每过二三年，光纤的传输损耗就下降一个数量级，到70年代末，石英光纤最低传输损耗记录达到0.047分贝/千米。激光通讯技术也随之迅速推广应用，光纤取代电缆，石英玻璃丝代替了铜线，光纤成为高技术产业而迅速发展起来。

由于光信号在传输过程中因损耗而减弱，在光纤通讯线路中每隔一定距离，就必须建立中继站把光纤中的信号放大，使激光有能力继续前进。设立中继站又增加了设备和费用，使通讯成本增加，因此，最好的办法还是降低光纤的传输损耗，可以增加中继站间的距离，减少中继站的个数，降低传输费用。对于跨越大洋的光纤通讯来说，最理想的是用无损耗光纤，不设中继站，一步跨过大洋，无论如何，在大洋中设立中继站，建设和管理都是很麻烦的事。

目前中继站间的距离（称无中继距离）为数十公里，日本曾经宣布他们

的无中继传输距离达到 300 公里。

光纤的特性与光纤的化学成份、纯度、结构有关。光纤的原料是无水石英玻璃，它是从石英（砂子）制得的，光纤的化学成份是二氧化硅，铁、钴、铬、镍等金属杂质的含量小于十亿分之一。在拉制纤维的过程中，要尽量减少纤维表面的氢、氧离子残留。

化学成份对光纤性能影响很大，微量过渡金属离子就会改变光纤传输性能。如稀土金属镧添加氟化镧能把光纤的传输损耗降到 0.001 分贝/千米。因此，控制原料的化学成份，在光导材料的制备中非常重要。

造成光纤传输损耗的原因有光吸收和光散射等。因为光吸收造成的损失，目前这方面的工作已经接近极限。要进一步降低损耗，例如铺设跨洋光缆要用超低损耗光纤，就必需增加激光的工作波长。因为瑞利散射的强度和光波长的四次方成反比，增加激光波长可以大幅度降低瑞利散射。现在正在开发红外光纤，用红外激光做传输介质，红外光纤的原料主要是重金属氟化物玻璃。

塑料光纤有质轻、柔韧耐折、容易连接、价格便宜等优点，缺点是传输损耗大。用重氢化的有机玻璃可以把损耗降低到 20 分贝/千米。重氢化就是用氢的同位素重氢（氘）来取代氢，这样一来价格就上去了。另外有报导说，日本已有技术生产出传输损耗接近石英光纤的塑料光纤。由于塑料光纤有价格低廉的优势，在短距离传输、广告、装饰和仪器等场合还可以派上用场。

2. 计算机的核心材料

在电脑中，关键的部件是中央处理器、控制器、存贮器，这些元件都是由集成电路组成的。在现代社会的各种技术进步中，计算机制造技术的进步是最令人鼓舞的。每隔几年，计算机的运算速度就加快一倍，而价格同时却要下降一半，几年前买下的电脑，现在就已经显得落后、过时了。这些令人眼花缭乱的进步，归根到底来源于计算机的核心——构成中央处理器的集成电路的生产技术的进步。集成电路到今天已经走过了小规模集成、中规模集成、大规模、超大规模集成的道路，每块硅片上的电路数目从几百发展到几百万之多。组成芯片的材料没有改变，还是一片单晶硅片。

和光导纤维一样，单晶硅也“出身贫寒”，它们来自地球上随处可见，其貌不扬的砂子。硅是地球上最丰富的元素之一，占地壳的四分之一，仅次于氧。硅以硅酸盐和氧化物的形式存在，我们平常见到的砂和砂石都是二氧化硅，只是纯度不同，以石英纯度最高。光纤是超高纯度的二氧化硅。而制造硅片首先要经过还原制成高纯度的单质硅。

作为集成电路材料，除了纯度高以外，还需要长成均匀、完整、无缺陷的晶体。目前普遍采用提拉法。在坩埚中装满硅并加热使坩埚里的温度保持在 1685℃，这个温度高出单质硅的熔点 100℃ 左右，所以坩埚里的单质硅是处在熔融状态。在坩埚上部有一个提拉杆，有机械装置使提拉杆自由升降和旋转。把一小颗单晶硅固定在提拉杆顶端浸入坩埚。这一颗硅晶体就像一颗“种子”引得周围的硅原子在它周围按顺序排列，形成晶体。缓缓提拉并旋转，晶体便逐步长大，拔出来的部分都属于同一块单晶。大的单晶直径达 200 毫米，比胳膊还粗。这样一根晶体内部没有界面、没有缺陷，可以说是人类所能制造最完美的单晶。

晶体生长出来以后，把它切割成片状并抛光，制成晶片。晶片非常均匀、平整、光滑，表面上各处的厚度相差不超过 10 埃，即 1 纳米，等于十亿分之一米。

然后在晶片上加工集成电路，要在绝对无尘的环境中，通过几十道工序，在晶片上做出许许多多的晶体管及其它元件，再将晶片切割成芯片，每个芯片可以多达百万个晶体管，还要把芯片装在陶瓷封装壳中，便做成了集成块。

在今后相当长的时间内，单晶硅还将继续作为半导体材料的主体，但是，科技工作者已经在探索性能更优越的材料，砷化镓就是目前大力研究的半导体电子材料。

理论工作者推测，用砷化镓制造晶体管的开关速度比硅晶体管的开关速度快一到四倍，用砷化镓晶体管可以制造出速度更快的电子计算机。

在元素周期表中镓同族的元素还有铟和铊；与砷同族还有磷、锑。把这两族元素可以组成不同的化合物，以得到不同的电子和光学性质的材料来适应不同用途的需要。和单质不一样，这类半导体都是由化合物组成的，所以叫化合物半导体。

化合物半导体还有许多问题需要解决，例如砷原子最外层有五个电子、镓原子最外层有三个电子，有着根本不同的化学性质和电气性质，要确定这种化合物半导体的表面特性比较困难，另外，要制造像单晶硅那样没有缺陷的晶格也是困难的。

集成电路芯片的集成度越来越高，线度越来越细。电子束、X 射线束都被用来“雕刻”线路图，X 射线的波长可以短到 1 埃，跟晶格上原子间的距离差不多，用这样精细的“刻刀”来雕刻线路，可以刻出几个原子大小的晶体管来。但在实际上，人们估计还没有达到这个尺寸，晶体管就不能以通常的方式工作了。对如此之小的晶体管来说，它的表面太大广。由于表面效应，连量子力学理论中的测不准原理都可能发生。通俗地讲，到那个时候，电子的运动方向和位置都变得不确定了，当然就无法进行运算和信息存贮。

因此，科学家都未雨绸缪，提出种种设想，设计分子尺寸的晶体管。生物学家提出了“生物芯片”，化学家提出了“分子器件”，但都还没有明确的定义，例如，用分子结构的顺式结构和反式结构来表示二进制中的“1”和“0”两种状态，进行记录和运算；或者用其它互变异构来表示；或像脱氧核氧核酸记录遗传密码那样用碱基对记录信息。这些新奇的想法，都还处在构想和实验中。

3. 信息的仓库

当代社会科学技术、经济高速发展，各种知识、信息以几何级数增长，有人比喻为“信息爆炸”。电子计算机发展迅猛，摆在桌面上的微机的运算次数就达到每秒亿次，可以用来进行信息处理；光纤为信息提供了高速公路，使信息能够以光速飞驰；然而，遗憾的是，集成电路记录的信息是用“有电”“无电”表示的，停电以后，记录的信息也消失了，因此，只能用于开机时处理信息，不能用来存贮信息。天文数字的信息，贮存到哪里？因此，现代信息社会需要像《西游记》里能装得下四海之水，又能托在手心的宝瓶，把尽量多的信息，装进尽可能小的体积，实行高密度信息存储。

磁记录材料

磁记录方式是迄今为止最普遍的记录方式，录音带、录像带，都是磁记录的例子，它们的记录方式被称为模拟式记录。计算机的磁盘也是采用磁记录，在进行这种记录时要把信息用二进制的“0”和“1”两种形式表示出来，因此称为数字式记录方式。

磁记录的最主要组成部分是磁头和存贮信息的磁介质，如磁带、磁盘、磁卡等。就说磁盘吧，是表面复盖铁氧体的铝盘，铁氧体有磁化、不磁化两种状态，分别对应二进制的“1”和“0”。磁头的作用是在记录时在磁盘上“写”出“1”和“0”；在读出时认出“1”和“0”。

磁头主要由线圈和磁芯组成。为了叙述方便，我们假定用“磁化”状态表示“1”。因此要在磁盘上写出“1”来，只需向线圈中通入电流，线圈产生的磁场使磁芯磁化，靠近磁芯的铁氧体小区域被磁化，就记下了“1”。读取信息的过程与此相反，此时磁头当传感器使用，当磁头靠近磁化区域时，线圈产生感应电流，电流被传送给电子计算机，计算机从“有电”就读出了“1”。同样地，在磁盘上写“0”时，计算机不给电，磁盘的那一点就不被磁化，读出时，因为未磁化，送给计算机的信息是“无电”，计算机也读出了“0”。

制造磁头的材料有金属材料 and 铁氧体材料。金属材料常用镍铁合金，也称坡莫合金。坡莫合金原是美国一家公司生产的一种镍铁合金的商品名称，现在用来专指含镍量30—90%的镍铁软磁合金。所谓软磁材料，是指磁化后保持磁场能力差，或者说剩磁很少的磁材料。因为磁头必须在有磁性和无磁性两种状态之间迅速变换，要去掉磁头的剩余磁性，必须在线圈中通反向电流，以便产生相反的磁场来消除磁头剩磁，这种消除剩磁的反向磁场称矫顽力，矫顽力小的材料就是软磁材料。

矫顽力大的磁材料叫硬磁材料，也叫永磁材料。永磁材料一经磁化以后就有很强的保持磁场强度的能力，在磁电式仪表、永磁电机、电度表、扬声器等场合都需要永久磁体，这已是题外的话了。

铁氧体是50年代以后发展起来的一种新型磁体，化学成份以四氧化三铁为主，用二价锰离子取代其中部分二价铁离子的称为锰铁氧体；用二价锰、二价锌离子同时代换其中的二价铁离子的称为锰锌铁氧体；类似地，还可以得到镍锌铁氧体等等。

用作磁头材料的铁氧体主要是锰锌铁氧体和镍锌铁氧体。铁氧体的制造工艺与新型陶瓷十分相近，先把化学原料按一定配方配制，球磨制成粉料，把粉料压制成型，再经高温烧结成型。在高温烧结时施加一定压力，称为热压法，这样可以使铁氧体更加致密、耐磨。用作磁头材料的铁氧体大都是经热压烧结成型的。这种铁氧体在结构上也与陶瓷相似，是由一个个微小晶粒组成的，也就是所谓的多晶结构。多晶的缺点是晶粒间结合力较小，晶粒容易剥落。经热压法烧结的铁氧体比普通在常压下烧结的铁氧体在耐磨和抗破碎性要高得多，是比较理想的磁头材料。

在特制的炉子中将铁氧体粉料加热熔化，控制冷却速度，可以生产铁氧体单晶。用单晶做记录磁头不存在破碎和剥落问题，性能要优于多晶铁氧体，但生产成本和价格都比多晶磁头贵。

还有一种记录方式叫磁泡记录。磁泡是一种形象的说法，是指磁性薄膜或膜片在垂直于膜面的小面积磁场作用时产生圆柱状的局部磁化区，从垂直于膜面的方向看去一个圆柱就像是一个泡。实际上，这些圆柱用肉眼是看不

到的，称“磁泡”是一种比喻。

早在 1966 年就已发现了磁泡。磁泡的直径在 1 到 1000 微米的范围里变化，在膜的平面内加一个小的磁场，就可以把磁泡从一个位置移到另一个位置，因此，人们想到用磁泡的“存在”与“不存在”来代表两种不同的稳定状态，如二进制的“1”或“0”，来进行存贮、运算。铁氧体单晶中的正铁氧体单晶、钡铁氧体单晶按一定的方向切割成薄片可以作磁泡材料。但生长尺寸大、无缺陷的单晶很困难，实际上是把非磁性单晶片浸到熔化的铁氧体中去，再迅速降温使铁氧体在单晶片表面上再长出一层磁性薄膜来，这层薄膜也是单晶状态的，这种方法称为液相外延法。

光记录材料

现在市面上光盘很流行，光盘容量大，音像质量好。这种光盘的原理是用盘面上的一系列凹坑来记录信息，读出信息时用激光束照射盘面，突出部分和凹坑反射激光的情况不同，接收反射光把光信号转变成电信号，就可以记录下“有电”和“无电”两种状态，从而读出信息。

实际上光盘的结构并非只是在光盘表面上烧出凹坑来进行记录就行了，光盘往往具有多层结构。下面介绍一种多层结构光盘，光盘的基底是由透明的高分子材料如有机玻璃。聚碳酸酯，聚氧乙烯制成，表面经过涂层后复合一层金属铝，金属铝层的作用是反射激光，使照射到凹坑的激光能反射出去。铝层表面复合一层透明的聚甲基苯乙烯透明薄膜，再上面是吸收层。用来进行记录的凹坑就造在吸收层里。吸收层可以是银粒分散到聚合物中制成金属/聚合物复合材料；也可以把方酸染料分散到聚合物中来制成吸收层，方酸染料能够吸收半导体激光器发出的红外激光，在这里作吸收剂使用。在进行记录时，激光束在吸收层烧出凹坑，这些凹坑穿透吸收层，对吸收层而言实际上是洞而不是坑。在读信息时，半导体二极管发出的激光照射光盘，照到凹坑时，会被铝层反射；没有凹坑的地方由吸收层吸收入射的激光，没有激光反射回去，这时就有“有反射光”和“无反射光”两种状态。用光电管来接收反射光，把光信号复成电信号输出，就有了“有电”“无电”两种状态，信息就读出了。

也有的光盘用玻璃或塑料做基板，上面涂复碲基膜。碲是一种非金属元素，熔点低、导热能力差，用激光束烧蚀时容易形成微孔、气泡或其它记号；碲的吸收光能力很强，在读出时未烧蚀部分容易吸收激光。碲基膜的缺点是化学稳定性差，容易氧化和腐蚀。

凹坑一经烧出，不能重新填平，因此这种光盘只能读出信息，不能擦除和重写，也就是只能放，不能录，所以叫只读光盘，这是从英义 Read Only Memory 翻译过来的，缩写为 ROM。

只读光盘的缺点是不能擦除和重写，为了实现光记录重写，发展了相变记录的方法。

用聚丙烯制成 1.1 毫米厚的光盘基片，表面涂覆碲低氧化物晶体形成光盘。因为氧化碲分子式为 TeO_2 ，这里使用碲氧化物分子式为 $\text{FeO}_{1.2}$ ，含氧量减少了，所以称低氧化物，碲低氧化物容易形成非晶态，在进行记录时，用功率 8 毫瓦、直径 0.8 微米的激光束照射 50 纳秒，被照射的点加热到几百摄氏度而熔化，因为照射时间短，熔化部分急剧冷却形成非晶态，依次按照信

息记录的需要在光盘上烧出一个个非晶态点。读出时，用激光束照射盘面，非晶态吸光多、反射少；晶态部分反射光强，接收反射光就可以识别这些点，读出信息。

要擦除光盘上的讯号，用功率 10 毫瓦的激光束照射盘面，但在每个部位照射时间要长些，长到 1 微秒，加热时间长了 20 倍，周围环境被加热了，冷却速度慢，冷后形成结晶，整个盘面回到原来状态，记录的信息就被“擦除”了。

氧化碲在擦除后再记录时不容易形成非晶态，添加锗、铟、锡以后，就能在激光照射下进行反复的晶态和非晶态相互转变，反复擦除和重写。因为晶态和非晶态的转变是一种相变，这种记录方式称为相变记录方式。

这种相变光盘的缺点是制造困难，长期保存不够稳定。

光致变色材料受光照产生颜色，置于暗处又褪色；而且这种变化是可逆的，能够反复使用。

光致变色材料的用途之一就是作调色材料，例如制作变色眼镜，在强光下镜片颜色变深，遮住阳光通过，在暗处镜片褪色，让光线通过，是一种有自动调色功能的眼镜。

但是要用作光记录材料就不能用调色材料，因为调色材料在暗处自动褪色，信息就丢失了。作为光记录材料应该在某个波长激光照射下产生颜色变化，用另一波长的激光照射下回到原来颜色，在通常条件下长期放置也不变色。例如带有噻吩和呋喃环的二烯丙基化合物能在激光照射下开环和闭环，可以用“开环”和“闭环”两种状态进行记录。开环体加热到 300℃ 也不着色；闭环体在 80℃ 保存五个月也不褪色，记录的信息就可以长期保存了。

前面几种记录方式都是在盘的表面进行记录，从盘的横切面来考察，盘只使用了一次，这种记录方式可以认为是平面式的。光致变色材料做成光盘时可以用多种对不同激光波长敏感的材料做成多层结构。用相关的激光去照射时，只在相关的那一层实施记录和重写，其它的记录层则不受影响；然后再用另二种激光去对另一层进行记录和擦除……这样就可以实现多重、立体记录，一张光盘能够具有几张光盘的容量。

光致变色材料一般是有机材料，这是一种正在开发中的材料。

1978 年 IBM 公司提出了光化学烧孔进行高密度信息存储的设想，这是目前在信息存储方面最富有革命性的想法，从理论上可以实现一千层的记录，就是把记录密度提高三个数量级，比现在的光盘容量大一千倍，是真正的高密度信息存储。

光化学烧孔的原理可以这样来解释。把光化学活性分子分散在高分子或者无机材料中，光化学活性分子称客体分子，高分子或无机材料称主体或基质。由于主体分子存在微观上的不均匀性和局部变形，对客体分子造成影响，使得客体分子，即那些掺杂的光化学活性分子对光的吸收波长也发生了不同的改变。换言之，处在不同环境中的光化学分子对激光的感受不同，对各种不同的波长的激光都能有分子作出反应，吸收激光能量，从基态跳到激发态。这时，用一个可以调节波长的激光器，先用某一波长激光照射光盘，光盘上就有些分子吸收激光能量，发生光化学反应，在客体分子的吸收光谱上产生空穴，进行了光记录。换一个波长又可以进行一次记录，从理论上讲可以进行多达千次的记录。

目前光化学烧还处在研究阶段，所用的化学物质有卟啉、酞青、醌茜等，

在液氮的温度下进行记录和读出。如果能找到室温下能实施记录的材料，将是非常有意义的。

磁光记录材料

磁记录可以擦除、重写，价格便宜，给用户带来很大的方便，缺点是容量较小。光记录容量大，目前已商品化的只读式光盘不能擦除和重写，这是它的不足之处。把两种记录方式结合起来，兼有二者优点的记录方式是磁性光记录方式。产品叫磁光盘。

磁光盘是在铝盘表面上镀一层 0.1 微米厚的铽铁钴非晶态合金制成的。在进行记录前，把磁盘表面全部磁化成一种状态，比如说使合金膜磁化成所有磁体 N 极朝向盘外的排列。在进行记录时，在要记录的点上用激光束照射，在数十毫秒的瞬间，被照射的点升温到 200℃，这个温度是铽铁钴非晶态合金的居里温度，或居里点。在居里点磁性材料保持磁性的能力很弱，只需用很弱的外部磁场就可以使这点的磁性翻转。撤去激光，使这点的温度冷到室温，这一点的磁性就固定下来，再撤去外磁场，就完成了对这一点的记录。用 N 极朝里或朝外来表示二进制的 0 和 1，在盘面上逐点进行记录，就把信息记录在盘上了。擦除时，仍用外加磁场改变各点磁矩取向，就擦去了记录的信息，并可用于重新记录。

要读出这些点时，需要用偏振激光束照射。偏振光是光束经过偏振片以后得到的，它的电场矢量在传播时只在一个平面上振动，这个面叫偏振面。因为光是一种电磁波，在传播时伴有电场，而且电场矢量在垂直于传播方向的平面内所有方向上都振动。克尔发现，当偏振光照射到磁体表面反射后，偏振面会发生偏转，而且 S 极和 N 极的偏转角不同，这个效应叫克尔效应。利用克尔效应可以检测各点的磁化方向，也就可以读出盘上的信息。

用作磁光盘的磁性材料除铽铁钴非晶态合金外，还有铽铁非晶合金、钆铽铁、铁铽非晶态合金等等。这是一类由稀土金属和过渡金属组成的合金，再经蒸发或溅射法制成非晶态薄膜。这类合金的结晶态的居里温度都比非晶态高，因为磁光盘是在居里温度进行记录的，居里温度高就需要更强的激光或更长的照射时间，需要更高的功率。高功率除了消耗更多的电能以外，还要增加设备的体积和投资。一般认为居里温度应在 100—200℃ 为好。前面提到的几种非晶态合金的居里温度是：铽铁钴 180—200℃；钆铽铁 150—165℃；铽铁 135℃；钆铁铽 160℃。稀土—过渡金属非晶态薄膜的另一个优良特性是能产生垂直于膜面的微小磁化区域（称磁畴），这时膜内的磁矩的方向垂直膜面，要么向上，要么向下，只有两个稳定状态，称双稳态，这是二进制存贮的基本条件。要实现高密度记录，磁化点要小，激光光斑可以控制在 1 μm 左右，因此磁性膜的磁畴也应在 1 μm 左右，磁畴尺寸小，这是非晶态膜的另一个优点。此外，作为磁光记录材料，还必须考虑到克尔偏转角，偏转角大，容易检测，信噪比增大。

克尔效应磁光盘已经商品化，8.8 厘米的光磁盘记录容量 128 兆，大约是现在致密磁盘的一百倍。

八 光学领域中的功能晶体

1. “光学魔术”

你想知道信息光学或者光信息处理是怎么回事吗？那么让我们先来看一个有趣的实验，是一个羽毛球拍和它的影子，球拍本身是网络结构，可它的影子却不是网络形的，图中只有经线没有纬线。这可能吗？可能，只要把球拍放在一盏日光灯下就行了。长条形的日光灯，几乎消去了与本身方向垂直的纬线的影子，而只让它同方向的经线成份投射在影子中。

距今 100 多年前，光学家阿贝曾做过一系列寓意深远的实验，为现代信息光学的发展提供了基础。

首先他把一张类似羽毛球拍的网格—二维光栅放在一块凸透镜前面，用相干光照亮，在透镜后的像平面上出现了网格的像（图 2）。然后，阿贝先生在透镜后焦面放上一块毛玻璃屏，屏上立即出现一系列排列整齐的二维点阵，中间一个点最亮，周围的点越来越暗。接着，阿贝先生又别出心裁，在焦平面上放置了一个能够开合的狭缝光阑，于是，这位光学“魔术师”开始表演魔术了。他把狭缝拉开一点点，只让水平的一排光斑通过，像面上就会出现与羽毛球拍影子一样的现象，原先的二维网格光栅只剩下一个沿水平方向排列的一维光栅了；随后，把狭缝转过 90° ，此时水平方向的一维光栅又变成了垂直方向的一维光栅（这种现象实际上就可说成是光的偏振了。即一束多维的光束通过一种偏振片，就像那条狭缝光阑作用一样，得到了一束只有一维方向的光束），接下去，阿贝先生又找到了一个照相机光圈代替狭缝，起初稍稍打开光圈，只让中心亮点通过，这时屏上的光栅像消失了，只剩下一片均匀的照明然后将光圈加大，使靠近中心的几个光斑通过，而拦去外周的其它光斑，立刻二维光栅又奇迹般地出现了，只有这个网格光栅不像实物那样棱角分明。其线条过渡十分圆滑，光强度变化好像正弦曲线一样，最后把光圈开到最大，毫无疑问，在屏上出现网格的清晰像。如果移去光圈，而用一根大头针挡掉焦面的中心光斑，会出现一个奇特的现象—衬度对比反转：网格之间透光部分变暗了，丝网却变成一道道明晰的亮线。

在我们平时不十分注意的焦平面上，竟然可以做这么多文章，可见这其实是个不寻常的平面。按照现代信息光学的观点，透镜的后焦面就是光学信号的频谱面成滤波面。前面提到的光斑列阵，代表了物体（网格）的空间频谱，中心点为零频，越向外的点代表的空间频率越高。我们把图像中的均匀背景称为零频，图像中缓慢变化的成份称为低频，而图像的细节及急剧变化的成份称为高频。

这样，在焦面放置不同的光阑，实际上起到了空间频率滤波的作用。水平的狭缝，只让焦面上水平方向的一排亮斑即沿水平方向的一维光栅的谱通过，因此像面上只剩下一维水平光栅；同样垂直的狭缝只让沿垂直方向的一维光栅的谱通过，像面上只呈现一维垂直光栅。这种过滤可称为“方向滤波”，也叫“光的偏振。”

当光圈口很小，只能通过中心亮斑，这是信号中的零频即有直流分量，因此呈现一片均匀照明；再加大光圈，出现一个边缘不明晰的网格像，这是因为滤去了高频信息，从而失去了网格的细节与急剧变化的成份之故，这些可称为“低通滤波”，而当用一枚大头针挡掉中心亮斑时，滤去了零频即均

匀照明的成份，图像的亮暗将发生变化，这就是实验中对比度反转的原因，也就是高频滤波。显然，如果光阑是一个环形光圈，即将起到“带通滤波”的作用。

在后焦点即频谱片上设置各种滤波器，就可以对信号频谱进行改造，滤掉不需要的信息或噪声，提取或增强有用的信息，最后得到理想的图像或信号。这就是光学信息处理的基本概念。

围绕光学信息处理，便产生了各种作用机理不同的但却都可用来进行光学信息处理的材料。下面，我们就分别介绍这些不同的光功能材料。

2. 光功能晶体

在研究光功能材料的发展中，科学家们最早接触到的是各种无机晶体，而且到目前为止，对光功能材料工作机理了解最透彻的仍然是无机晶体。进入 90 年代以来，用有机高分子薄膜来代替无机晶体做为光功能材料已成为一种发展趋势，但目前进入实用阶段的还只是无机晶体，高分子膜光功能材料的研究、开发、利用还有许多问题没有解决，仍处于研究阶段。下面我们就着重介绍这种具有光学信息处理功能的无机晶体，它们是普通光学晶体、电光晶体、声光晶体、磁光晶体、激光晶体、非线性晶体、光折变晶体和闪烁晶体。

普通光学晶体

普通光学晶体主要有金属卤化物晶体和高温氧化物晶体。主要用作光学仪器的透过窗口、棱镜透镜、滤光、偏光元件及相位补偿镜等，配置在光的发射、处理和接收部分。近年来，还研制出光纤晶体和光波导用晶体，主要用于光的传输，变换和分支等。当然光学晶体只用在光学玻璃力不能及的特殊场合，因为它比玻璃贵得多。

在金属卤化物晶体中氟化物晶体以具有较宽的透射光谱区而成为佼佼者，它们是优良的紫外和红外透过材料。还有些金属卤化物晶体，可塑性好，可用于传输 CO_2 激光。

在高温氧化物晶体中，最主要的是 Al_2O_3 晶体，由于它的熔点高，机械强度高、导热性好，物理化学性质稳定等特点，在空间技术中得到广泛的应用。它还可制作永不磨损型各种钟表表面，因而具有很大的潜在市场。水晶是另一种重要的氧化物光学晶体，它不但广泛用于棱镜、透镜和补偿镜，而且在计时、计频、通信导航设备中广泛应用，它的年产量达 3000 吨，总产值在 25 亿美元以上。

电光晶体

在外加电场作用下，晶体的折射率发生变化的现象称为电光效应，具有电光效应的晶体称为电光晶体。这种电光晶体首先是各向异性的，各向异性是许多晶体共有的一种特性，它是指晶体的物理性质在不同方向上是不同的，比如电导率，在一块晶体上横向测量值与纵向测量值就不相等，具有各向异性的电光晶体中，其光折射率在不同方向上是不相等的，光折射率表示

的是光在物体中的传播速度与光的真空中传播速度的比值的倒数。我们都知道，光在真空中传播速度是每秒 30 万公里，但光在水中，在玻璃中的传播速度也是 30 万公里/秒吗？答案是否定的，光在不同物质中的传播速度是不同的，为了表示物质对光传播速度影响的特性，科学家们把光在物质中传播速度与光在真空中传播速度之比定义为该物质的折射率。通常物质的折射率是不会变化的，可是在电光晶体中，如果施加强电场，就会导致晶体的折射率值的变化，从而使光调制成载有信息的调制光，也就是说，外加强电场电压的不同，透射出光的光强变化不同。这种光强度的变化便是某种信息的载体。电光晶体的这种性质，可以用来制激光扫描器，光开关以及产生巨脉冲激光，另外它在大屏幕激光显示汉字处理以及光通讯方面具有广泛的应用前途。

声光晶体

当物质受到弹性应力或应变作用时，介质的折射率发生变化，这种由于应力使折射率发生变化的现象称为光弹效应。声音是一种机械波，当超声波在晶体中传播时，晶体内产生弹性应力，使晶体折射率发生周期性变化形成超声光栅，光通过形成超声光栅的晶体时，将产生声光的相互作用，因此声光效应也是一种光弹效应，具有声光效应的晶体就是声光晶体。

声光器件对声光材料的要求是多方面的，但最重要的是具有高的声性能指数和低的声损耗，大多数的声光晶体为可见光波段晶体，这类晶体主要是氧化物，其中最重要的是 TeO_2 和 $\text{P}_6\text{M}_0\text{O}_4$ 。 TeO_2 ，晶体的声光性能指数远高于其它实用声光材料，但氧化物一般有吸收带，因而对许多红外声光扫描和调制来讲，它是一种比较好的材料。声光器件基本由三部分组成：将高频电功率转换成超声波的换能器，引入声波并与光产生作用的声光材料，吸收声波变成热的吸声材料。最早的声光效应仅用于物理性质的测量，随着激光和超声波技术的发展，声光效应又在光电子学方面得到广泛应用。

由于改变声波的驱动频率便可以改变光从晶体中透射出来的方向，因而可把它制成高速声光偏振器，它主要用于高速印刷系统，由于此系统没有机械运动部分，每秒可印 40 万个字。此外，它还常用作光调制器。

磁光晶体

当组成晶体的原子内有未被填满的电子时，那么晶体的原子就可能有磁性，这是因为一个电子轨道上可容纳两个自旋方向相反的电子。当原子内部有未被填满的电子时，则电子轨道上就只有一个自旋电子。电子自旋产生一个磁场，由于没有另外一个自旋相反的电子产生磁场去抵消，所以原子就表现出磁性，具有磁性原子的晶体叫磁光晶体。当偏振光被磁性晶体反射或透射后，其偏振状态发生改变，偏振而发生旋转，这叫磁光效应。其中由反射引起的偏振面旋转称克尔效应，而由透射引起的偏振面旋转称法拉第效应。

利用磁光效应可制成具有很高存储密度的计算机存储器和高密度光存储器，磁光晶体在激光系统中可作为快速光开关，调制器以及隔离器，其中应用最广泛的是作为光隔离器。

在磁光晶体中，最有实用价值的是钇铁石榴石（简称 YIG），这是由于它的法拉第转角大，在近红外波段透明，晶体的物理化学性能优良，因而在

大容量光纤通信和激光隔离器方面起重要作用。

激光晶体

能够辐射出激光的晶体就是激光晶体。激光是指利用工作物质中多数粒子处于激发态，用外界光感应，使所有处于激发态的粒子同时完成受激辐射，发出一束强大的光束。

激光具有良好的方向性，单色性和相干性，由于这些特性，使它在社会各个方面都得到广泛应用。

晶体激光由两部分组成，一部分是作为“发光中心”的激活离子，另一部分是作为激活离子“载体”的基质晶体。基质晶体中最重要的是氧化物晶体，这些晶体具有熔点高，硬度大，导热性能好等独特优点。在它们中间，红宝石和钕铝石榴石（YAG）应用最广泛，还有一种叫“色心”的基质晶体，由于它们的晶格缺陷能吸收某一光谱范围的可见光而呈现某种颜色，从而实现可调谐的激光振荡。

除了传统的晶体激光器外，晶体激光器还向超大型和超小型两个极端方向发展。超大型晶体激光器主要用于激光核聚变、激光同位素分离、激光加工等领域，超小型的晶体激光器主要是指半导体激光器，由于它的泵浦效率高，晶体的热负荷小，激光输出稳定，寿命长，激光器体积小等优点，因此在实际运用上有着巨大的发展前途。

闪烁晶体

当射线或放射性粒子通过某些晶体时，晶体会发出荧光。波段在紫外或可见，这类晶体被称为闪烁晶体，闪烁晶体是单晶，对自己发出的荧光是透明的，它可与光电倍增管耦合，制成晶体闪烁计数器，实现光—光转换功能。

闪烁晶体在核医学、高能物理、核技术、空间物理及石油勘探等领域获得广泛应用，著名的美籍华人科学家诺贝尔物理学奖的获得者丁肇中教授领导建造的 LEP—3 正负电子对撞机中的电磁能器就是闪烁晶体。在 LEP—3 中，有 12000 多根 BGO 晶体（一种闪烁晶体），总重达 12 吨。

目前重要的闪烁晶体有 NaI (Tl)，CsI (Na)、BGO，BaF₂、ZnWO₄ 等。其中 BGO 晶体的应用发展十分迅速，是当前应用最多的一种闪烁晶体。

非线性光学晶体

非线性这个词语人们一般不很熟悉，开始时常有奇异之感。但是，该词语最近的使用率很高，甚至已成为各学科研究领域的流行话。所谓非线性是指相对于某种物质其输入量、输出量不按比例进行变化。按日常经验，如转动无线电收音机的音量旋钮，开始时对照刻度而使扬声器声音变大（线性领域）。但是，如果过度旋转按钮，声音则不像刻度那样变大，声音就失真了（非线性领域）。光也有这种非线性变化，当对某种材料过度照射强烈的单色光时，在透射光就会出现光强、波长、折射率等方面产生这种非线性现象。

在介绍非线性光学材料之前，我们先了解一下历史上的牛顿光学实验。很久以前，人们认为太阳光只有一种颜色——白光。英国大科学家牛顿

在 17 世纪做了一个令人惊奇的实验：他手拿一块用玻璃做的棱镜，在一个黑暗的屋子里，当把棱镜插入由缝隙射进屋子的太阳光束时，在墙壁上便可以看到一条五彩的光带，如天空中出现的彩虹一样：赤、橙、黄、绿、青、蓝、紫；如果放下棱镜，墙上那条彩虹便消失，恢复原先白色的光斑；再次把棱镜插入光束中去，墙上便又重新出现彩色的光带。牛顿重复了多次实验，每次都得到相同的结果。后来，他把由棱镜“分离”出来的彩色光中的一种色光再通过第二个棱镜，看看这种色光还能不能再分解出彩色光来，他看到的是：彩色光束只是传播方向受到一次折射，而光的颜色不再发生变化，红色光通过之后依然是红色光，绿色光依然还是绿色光，牛顿把每种这样颜色的光叫做“单色光”。牛顿接着又将实验程序倒过来，他发现彩色光通过棱镜会合后又变成了白色。原来，看上去像是白光的太阳光，其实是由许多种单色光组合成的，人们之所以看不到有彩色光，是因为各种单色光在大气中以相同的速度传播，彼此混合，使得我们凭肉眼没有能力把它们分辨出来。当太阳光通过玻璃三棱镜的时候，因为不同颜色的光波在玻璃内的速度不同，例如红色光传播的速度比黄色光快，黄色光又比绿色光快……按照物质的折射率和光波传播速度之间的关系，太阳光在通过棱镜之后出现了分离。此后，许多科学家又做过大量相类似的实验，结果也都和牛顿当年所做的实验结果相同。但是，从来也没有人看到过，单色光还会发生色散现象，除非他在实验时所用的不是真的单色光。

然而，到了本世纪 60 年代，科学家在用激光束来做物质的色散实验时，牛顿当年企图要想看到的现象终于出现了：颜色很纯的单色光在透过透明物质后，出现彩色，即使通过的不是棱镜，而是平面玻璃板，也会出现不同的色光来，这个奇怪的光学现象就是所谓光倍频现象。

1961 年，科学家做了这样一个实验：将红宝石激光器输出出来的激光，经透镜聚焦后，进入一块透明的石英晶体片。按照通常的情况，这束红色光通过石英片后，我们见到的只能是红色光。可是，科学家在红斑的外围，意外地看到蓝色光。把光束送入棱镜光谱仪进行光波波长标定，测量的结果是，从这石英片出来的光束中含有两个波长： 69.43×10^{-8} 米和 34.77×10^{-8} 米，后者的波长刚好等于红宝石激光波长—— 69.43×10^{-8} 米的一半。这部分频率加倍的蓝色光又是从何而来的？科学家把石英晶体片换下来，放上去一片普通的玻璃片，刚才见到的那部分蓝色光便消失掉，当再换上那块石英晶体片时，蓝色光又重新出现。显然，频率加倍的那部分色光是靠着石英晶体片而产生出来的。这种石英晶体对色散是否有特殊的作用呢？科学家改用其它一些晶体材料来做实验，结果又发现不少晶体材料，如磷酸二氢氨（APP）、磷酸二氢钾（KDP）、砷酸二氢铷（RDA）、铌酸锂（ LiNbO_3 ）、碘酸锂（ LiIO_3 ）、铌酸钡钠（BNN）等等，它们也都出现了用石英晶体做实验时相同的现象。无疑，这是一种新的光学现象。科学家采用分辨本领很高的光栅光谱仪，对基波的波长和新出现的光波波长做了精确测量，对不同的晶体材料，不同的入射光功率进行了实验，结果都表明：基波的波长和新出现的这束光波波长之比都是 2。所以，科学家把这种光学现象叫做光波倍频现象。现在，人们不仅发现有频率加倍的光波，而且还发现，在高强度的光波作用下，物质产生出为原入射光波频率 3 倍、4 倍、5 倍甚至高达 25 倍的光波。

光倍频现象是非线性光学中的一个典型现象。

除了出现由每束光波各自产生的倍频光波之外，由两束光波或者几束光

波“合作”也将产生另外一些颜色的光束来，这就是光的混频。

在普通光学中，有一条很著名的原理，叫做光的迭加原理。还是在近代光学发展的初期，笛卡尔、牛顿、惠更斯、罗蒙诺索夫等科学家就提出了光的迭加原理。惠更斯在他的“光论”中写道：“光的最不可思议的性质是，从不同的甚至相反方向到来的诸光束互相穿过，一点也不妨碍彼此的行动。”事实上，我们在通常作光学实验的时候，无论是研究它的传播方向，颜色或者它的能量变化，都是不计较在其中传播的是一束还是两束、三束光的，因为反正各束光都是独立行动，互不影响。从来没有人会怀疑，一束单色光在它通过透镜或者棱镜的时候，会因为同时有另外一束单色光通过，而使它的传播方向或者它的颜色发生变化。

然而，现在我们就不能再用老眼光看问题了，科学家发现，一束单色光的颜色，会因为同时存在另外一束单色光而有所变动。

红宝石激光器输出的是红色光束。YAG 激光器输出的是波长为 1.06 微米的红外光束，当红宝石激光器输出的激光通过倍频晶体时，在观察屏幕上我们看到红光以及由它所产生的、呈蓝色的倍频光；当我们同时将红宝石激光器和 YAG 激光器输出的两束激光一道通过倍频晶体时，按常识，这时在观察屏上充其量也就只增加波长 1.06 微米和它的倍频光波——绿色的光斑，不会再有别的颜色出现的。可是，奇怪的是，我们还看到了淡蓝色的光斑，经过光谱仪作的波长测定，这淡蓝色光对应的光波波长是 41.89×10^{-8} 米，换成光频率的话，它刚好等于红宝石激光器输出的激光频率与 YAG 激光器输出的激光频率相加的数值。假如两束光虽然传播方向一致，在空间是重迭在一起的，但是，如果入射的时间不相同，彼此一前一后相隔一段时间，那么，这束频率相加的光束就不出现；当把两束光脉冲进入晶体的时间有一部分时间是重迭的，就开始看到这束频率相加的光束，当两束光脉冲在时间上重迭时，那么，得到的光束强度最高。

以后又发现，两束光会合后，除了有它们的频率相加的光波成份出现外，也还有频率相减的光波成份出现。前者人们通常称之为和频光波，后者称之为差频光波，两束光波在物质内会合后产生频率相加减的光波，这种现象叫做光的混频。进一步的实验又发现，两束会合的光束中，有一束是功率很高的激光，另外一束是普通光源来的光束，它们在物质内会合，也能够产生混频现象。例如，科学家将从红宝石激光器来的激光和由汞弧灯来的绿光或者黄光，在 KDP 晶体内会合，结果能够观察到由它们的频率相加的光波，这光波的强度正比于汞弧灯的强度和激光的强度。这个现象似乎还有更为重要的一层意义。因为这么一来，我们便有可能设想利用普通光源输出的光波频率，调谐激光器输出出来的光频率，让我们更为方便地获得各种波长的相干单色光了。因为受天然材料的限制，现有的激光器输出的激光频率只有几种，而非覆盖整个频率范围。

或许有人会问，彩色电影和彩色电视，它们不也利用几种色光混合在一块产生另外一种颜色吗？比如，红色光和蓝色光合在一起就成了紫色光，红色光和绿色光合在一起成了黄色光。但是，我们所见到的这种颜色交换现象和这里讲的光波混频现象在本质上是完全不同的两回事情。平时，我们见到的几种色光混合后得到别种色光，那仅仅是因为颜色的“互补”关系所造成的，混合后得到的光波波长成份是没有任何变化的。比如说，红色光和绿色光合起来虽然看上去是黄色光，但把混合后的光束送入光谱仪进行波长分

析，仍旧只有原来对应于红光和绿光的波长。光混频现象就完全不一样了，比如以红色激光和绿色激光在物质内发生混频，把混频后得到的光束送入光谱仪进行波长分析，我们就会发现，除了有原来的那两种色光的波长之外，还出现几条新的光波波长，对应于它们两者频率相加和相减的光波波长。

前面我们谈的是两束光沿相同的方向传播在非线性介质中会合后产生混频。3束、4束，许多束光波会合在一起，它们也会产生频率相加减的光波吗？回答同样是肯定的。科学家发现，如果将三束光波在非线性物质混合后将产生出第四列光波，它的频率、强度、以及传播方向，与三束基波会合之前的传播方向光波频率有密切的联系。此时，连同新出现的光束在内，一共有四束光波一起在物质内传播。所以，通常又将这种形式的混频现象叫做四波混频。

四波混频还有一些有趣的现象，比如说，基波光束 1, 2, 3，三者同时会合在样品中便出现第四束光波，当同时将这三束基波光束撤掉，第四束光几乎同时消失，这是我们可以想象得到的。但是，如果只撤掉其中两束光波，例如，撤去光束 1 和 3，而让光束 2 保留下来，或者撤掉光束 2 和 3，保留下来光束 1，我们就会看到一个奇怪现象，单独留下那支“独苗”，竟然也有能力挽留光束 4 存在一段时间才消失！第二个有趣的现象是，一般来说，混频后得到的新光波——光束 4，通常它的光强度只会比基波的强度低，然而，如果实验操作适当，三束基波配合完美，情况就会逆转，新生出来的第四束光波，它的强度就可以比基波强得多，得到了光放大的作用。

科学家从事各种科学实验，常常需要用不同波长的光束。例如，天体物理研究需要波长很长的远红外光，化学研究却常需要波长很短的紫外光。激光器能够发出很纯颜色的光，强度又很高的单色光，是科学家们现在非常喜爱使用的重要光源，但是输出功率较高的几种激光器的波长大多数在近红外范围。比如，红宝石激光器、钕玻璃激光器、YAG 激光器、二氧化碳分子激光器等。波长更长的激光器当然也有，比如甲基氟气体激光器，但是，它的激光功率都很低，平均功率还不到一瓦。至于输出波长短一些的也是有的，比如氨分子激光器和准分子激光器，它们输出的波长就在紫外和远紫外。它们的平均功率水平也不高，离实用还有一段距离。

利用光波倍频和混频现象，我们就可以用现在技术上已经比较成熟、输出功率又很高的一些激光器，创造出我们所需要的各种波长的相干光。例如，利用倍频晶体将 YAG 激光器输出的激光做二次倍频，获得高功率的绿色光；作三次倍频，获得波长为 35×10^{-8} 米左右的紫色光；作四次倍频，获得波长为 26.5×10^{-8} 米的紫外光。同样，光波混频现象也是我们获得远红外波段相干辐射的好方法。将二氧化碳分子激光器输出束波长为 9.6 微米和 10.6 微米的激光，在 n 型碲化镉晶体中进行光混频，便可以得到波长在 100 微米左右的远红外相干光波，而由二氧化碳分子激光器在 10.6 微米附近的几个激光波长的基波在砷化镓半导体材料中进行光波混频，便可以得到波长与微波波段相接的光波了。当用波长可调谐的染料激光器来作倍频和混频的光源时，还有可能让我们获得波长从真空紫外一直到远红外，甚至功率很高的相干光束。

非线性光学材料应用的主要领域除了上述用倍频、混频技术进行频率转换外，还有光旋转、光束畸变消除、图像放大与变换、光信息处理与光信号控制、光受限与阈值检测，全光学连接、光计算机、光贮存以及光纤通讯

与器件等。再举一个简单例子来说，非线性光学晶体材料应用于蓝绿光激光器中，可被用来进行铀同位素（ ^{238}U 和 ^{235}U ）的分离（铀同位素是制造原子弹的主要原料），可以用以引发核聚变。在美国的“星球大战”计划中，蓝绿激光器是基本武器之一。正由于其具有如此重要的战略意义，某些高敏非线性光学材料如 KTP（磷酸氧钛钾）等已被列为美国国务院控制下的军事物资，它的出口或转出口都必须经过美国政府的批准。目前世界各国纷纷把非线性光学材料的研究列为高科技和优先发展项目，给予高度重视。

非线性光学晶体 BBO

世界上第一个“中国牌”的非线性光学晶体新材料——偏硼酸钡晶体已于 1984 年问世，这是我们中国人的骄傲。

一块指甲大小的光学晶体，它晶莹透明，以其优良的非线性光学性能，正在国际晶体材料高技术产品市场上称雄，这就是在国际材料科学界公认的由中国科学院福建物质结构研究所首创的非线性光学晶体新材料——BBO。

BBO 是在对晶体非线性光学效应的结构与性能相互关系研究的基础上通过大量实验而取得的。该晶体在近红外，可见，紫外波段具有比目前通用的 ADP、KDP 晶体大 3~6 倍的有效倍频系数，相匹配波段可达到 212nm 左右。

还具有比 KDP 型晶体高二倍的光损伤阈值，较高的光学均匀性，不易潮解，热稳定性好等优点。由于该晶体极化稳定，并能承受高的辐射功率，因此在高功率的激光热释电探测器件中也将有实际应用。同时，医学研究也已证明，通过非线性晶体变频获得的紫外激光，是用于医治心血管病、切除脑瘤的理想“光刀”。而用不同波长激光束确定早期癌细胞的部位将成为医治癌症的重要手段。

国际上，对于非线性光学晶体的研究已有 20 多年历史，虽发现了一批有实用价值的晶体，但只能解决可见光区的倍频转换问题，而在紫外区和红外区还缺乏有效的晶体。我国人工培养晶体始于 60 年代，过去由于重点放在晶体培养工艺上，长期以来一直是步人后尘，盲目摸索，耗时费力。近来，由多学科科技人员组成的群体，开拓了一条探索晶体材料的新路子，指出了非线性光学效应是由阴离子基团结构及其空间排列所决定的。在此基础上研制出了新型晶体 BBO，先后荣获第三世界科学院化学奖，陈嘉庚物质科学奖和美国《世界激光集锦》杂志评选的光频电子学工业成就奖等。

目前，BBO 做成的器件，已打入美、日、俄、德、英、法等 20 多个国家和地区的近 200 个研究机构、大专院校和高技术公司，震动了国际学术界，也冲击了高技术产业部门。这种由我国独创的国际第一流水平的晶体已形成产品，并为我国在国际高科技领域赢得了荣誉。

光折变晶体

1966 年，当贝尔实验室的科学家们第一次注意到光致折射效应时，他们认为这种现象大不了是一种奇异的特性，而且还是一个十分有害的现象。而今天，光致折射材料正在被制成利用光而不是利用电的新一代计算机的元件，也就是被制成为光学计算机的元件。当时，科学家们正在对一种无机晶体进行实验，希望能出现倍频现象，也就是从红宝石激光器中输出的红色光

通过无机晶体后产生蓝色光波。实验开始时相当成功，光通过晶体而不受干扰。但是，几分钟后，晶体开始使光束变形并向实验室四周散射。激光已经莫名其妙地改变了晶体本身的光学性质。这种光致折射效应能在晶体中保持几天。然而，如果研究人员用均匀的激光束照射这个晶体，晶体会再次使光束通过而不变形，即光致折射现象消失。在过去二、三十年里科学家们已经发现大量各种各样的光致折射材料。其中包括绝缘体、半导体和有机化合物。与我们平常照相用的胶片感光剂一样，能记录错综复杂的光的图案，可这种材料比胶片还要优越，它记录的光图像是可以消除的，而胶片曝光后只能记录一次图像，也无法抹除图像。

由于光致折射材料的灵敏性、耐久性和独特的光学性质，它们有可能用于制造光学计算机的数据处理元件。理论上讲，这些设备将使光学计算机和电子计算机的信息处理速度要高得多。

由于光致折射材料的光学性质可以被穿过这种材料的光所改变，因此这种材料属于非线性光学材料。在线性光学材料中，（如透镜、棱镜等）光束只是相互透过，而不改变材料本身的某种性质。

多数透明材料在受到有足够强度的光的照射时其折射率都将改变。然而“光致折变”一词通常用于在低强度光的照射下折射率发生变化的材料。在光致折射材料中，强度弱至 0.001 瓦/厘米²的光束都能够改变晶体中原子的排列，进而使折射率发生不同改变。而且，与大多数透明材料不同的是，光致折射材料中的变化是半永久性的，如果使一个折射率已经改变的晶体不受任何光源照射，那么根据材料的不同，折射率的变化可以保持几毫秒至若干年，这样就能够以图像的形式存贮信息。

那么，一束弱光怎样能够引起晶体的折射率发生如此强烈的变化呢？科学家们通过细致地观察，认为光致折射效应的基本模型正如“蚂蚁搬家”一样，即一只蚂蚁一次搬走一粒沙子，最终可以移走一大堆沙子。一束弱光也可以使电荷一个个地移动，从而逐步建立起强电场。在光致折射材料中，有多余的电荷，它们是电子（带负电的粒子）空穴（带正电的区域），当激光照射材料之前，这些电荷被束缚着，在材料中不能自由移动，它们遇到光照射时，便从光中吸收一部分能量，变得活跃起来，就可在材料内部自由地漫游。当移到没有光照的区域时，这些电荷便被再次束缚住。这样，如果光照射在材料中的一个区域内的电荷上，那么这些电荷就将离开这个区域而在没有光照的区域累积起来，光照前均匀分布在材料中的电荷便分离、移动至两个不同的区域，正、负电荷之间便形成了强大的电场，促使这种材料的结构发生变化，从而改变了该材料的折射率即改变了光在材料中的传播速度。

光致折射效应的一个最直接、最有用的应用便是两束激光间的能量交换，它也被称为双光束耦合。这种现象与前面我们所讲的光波混频现象不一样，光波混频是当两束激光同时射出倍频晶体时，透过的光除了各自的倍频光外，还有这两束不同波长激光的和频、差频光，也就是产生了新的频率的光。而这里所讲的双光束耦合是指当两束频率相同的激光同时射入光致折变材料时，出来的光其中一束光强增大，而另一束光强减弱，就好像一束光中的能量跑到另一束光中去了一样。这种能量交换现象是光致折射材料独有的一种特性。这种特性的应用前景非常之好，其原因就在于这种材料对光高度敏感，再加上它们能够将来自不同激光器的光束联接起来并能将一种信息图案转变成另一种信息图案。

光折变晶体主要有三类，第一类是某些属于铁电体的电光晶体；第二类是非铁电氧化物；第三类是半导体化合物，人们最感兴趣的是 BaTiO_3 ， $\text{Fe}:\text{KNbO}_3$ ， $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_2$ 等晶体。

应用光折变晶体，只需低功率激光，就可在室温下进行各种不同信号处理和运算。光折变晶体还具有非常高的光学非线性，实验中可以产生许多新过程、新现象，因此它的研究发展前景是十分吸引人的。

3. 光计算机与光功能晶体

在现代信息处理中，光信息处理占有举足轻重的作用。不仅是光学图像，而且电信号、机械信号、语音信号、热信号等，都可转换成光学信号作快速、并行处理。光信息处理的容量大，速度快，设备简单，可以并行处理二维图像信息等优点，是任何计算机系统无法比拟的。随着信息光学技术的发展，可以预料，在未来的计算机家族中，将出现第六代崭新的机型——光计算机。

多少年来，科学家一直在考虑用光子代替电子设备中的电子工作，对于电子计算机来讲，电子是信息的载体，它只能通过一些相互绝缘的导线来传输、处理信息。虽然现在电子计算机的运算速度在不断增加，体积也在不断减小，但它运算能却存在着一个极限。最佳情况下，电子在固体中的运行速度也达不到光速的 $1/10$ ，再者，通信通道也严重制约了快速性。当工作频率超过 100MH_2 时，通道中就会形成驻波、反射信号等障碍。此外，无论微电路中的电流是多么微弱，随着装配密度和集成电路“管脚”的增大、增多，散热也在增加，从而使导线间产生寄生的电磁相互作用，……所有这些都必将限制电子计算机的能力，运算速度也无法突破一个极限。

和电子比较，光子速度恒等于光速，无质量与电荷，不像电子那样互相影响，它们能互相穿过而互不干扰，它还具有电子所不具备的频率与偏振，还可在空间中传播等特点，从而使光子的载息能力得以扩大。利用光存贮处理指令和信息的光计算机的运算机速度也将因此而大大提高。

光计算机主要由激光器，光纤和光开关组成，采用串行信息处理方式，指令与数据都是以光脉冲的方式在光纤中传输，而所有这些信息发送、传输，处理过程都离不开与之密切的各种光学材料。前面所介绍的各种光功能晶体，有许多都可以用于光计算机的使用元件，特别是像激光晶体、光折变晶体等，这些晶体材料的优越与否直接影响到光计算机开发的前景，而且各种不同功能的光晶体日益在许多科学研究和实际应用领域发挥出越来越大的作用。

九 明天的材料

科学正在开创一个新材料的时代，科学家为我们描绘了许多种理想中的材料：如 99.9% 硬质泡沫；坚硬透明的钻石防护表层；以及具有“智能”的材料，即把人造触觉和人造肌肉联接起来，使物体能改变自身的形状和硬度来适应环境的变化，等等。

到现在为止，这些新材料还不能够在工业上投入生产，但随着工艺的提高和制造费用的降低，这些新材料毫无疑问将进入人们的日常生活中。比如，表面具有钻石防护层的手表；可以纠正牙齿位置的“智能”牙支架。将来还有许多事物中都会用到它们，从几乎无摩擦的球珠轴承到与外界超隔音的房屋，到可以随空气压力和飞行速度来改变形状以达到更高速度的飞机机翼等。

美国电气公司已制造出非常纯净的金刚石，这种金刚石的导热的效率是自然出产的金刚石的 50 倍——这是迄今最好的导热体，把它用在集成电路板上可以吸收大量的热，使一个硅晶片可容纳更多的电路而不会因过热遭到破坏。

更先进和便宜的方法是几乎用稀薄的气体来生产金刚石，这就使科学家们在将来能用金刚石制造整个计算机，新的生产钻石的方法是，利用甲烷气体中的碳原子重新组合制得可用于许多物质如纸、金属及塑料上的钻石薄层。世界上还有许多实验机构在寻找生产低制造费用的钻石的方法，以后，我们可以使用无划痕的眼镜和镜子，最锋利的剃刀和具有低摩擦表面的煎锅或滚珠轴承。美国国家研究署在一份报告中称钻石薄膜的功用“可以与高温超导体相媲美”。

美国加利福尼亚劳伦斯·利弗莫实验室已制造出一种玻璃，称为“气胶”，它只有空气密度的四倍，却可以支持等于自身重量几百倍的物体。这些利弗莫实验室所制造迄今最轻的气胶使人们对其在地球和太空的应用产生了极大的兴趣。它的隔热能力是纤维玻璃的三倍，所以可以将这种半透明的物质用做冬天保暖的双层玻璃间的填充剂。美国航空航天局想利用这种气胶在航天飞机上捕捉微陨星并安全地送回地面以供研究。另外，研究人员还试图调节类似气胶的孔隙的大小，可以像用“筛子”似的从多种化学成份的混合物中过滤出有用的成份。

研究人员找到了合成肌肉和灵敏动作的方法，同时还找到了合成智能的方法。美国的许多实验室都在从事一项研究，使具有“智能”的材料可以适应于不同的使用条件或外部环境，并作出相应的反应。比如宾州大学材料研究实验室正在试验能对外部压力产生反应并发生弯曲的陶瓷。他们在陶瓷中加入一些称作压电材料的物质，压电材料当被弯曲时能产生电，而当通入一定电流时，它会弯曲，宾州大学的研究人员用这种材料做为“感觉器官”和“肌肉”。已经产生出一种陶瓷硅，尽管它是硬质的固体，但当对其施加压力时，它的性质却像橡胶一样。这种根据外界压力而相应调节材料弹性的能力在潜艇的设计中将大有用处。如果将各种智能材料适当地联接，潜艇的船体就可以随发动机的振动强度的不同而具有不同的弹性，从而可以使潜艇在深水下的高压中即可保持坚固又可以减小噪音，更加安静地运行。还有一些研究人员在试验通入电流会变得凝滞的液体和“记忆”金属，这种金属受热时从一种形状变化为另一种形状。

自人类有史以来，新材料的发现和发展对人类社会产生了划时代的影响。人类已经经历了两次工业革命的发展过程，这两次工业革命都与人为控制的新材料的研制及其应用密切相关。

第一次工业革命从 18 世纪中期至后半期产生，以当时世界贸易中占垄断地位、资本形成最快的英国为舞台。1785 年詹姆斯·瓦特蒸汽机的诞生，标志着第一次工业革命的到来。以金属作为耐热材料和钢铁冶炼行业的兴起，使蒸汽机进入了发展的时代。交通运输业的发达激发了贸易交流，其中对染料贸易需求的矛盾促使合成染料的发明，并在煤炭化学和电化学这样的工业基础上形成了有机化学工业时代。1927 年由斯陶丁格博士创立的高分子学说直到今天仍然是构成高分子化学和石油化学的理论基础。

第二次工业革命是以美国为舞台。金属的发展产生了内燃机。1910 年，随着福特汽车大规模的生产方式出现，向汽车进入家庭的大规模消费迈出了第一步。汽车产业的发展和铝合金的发明，为飞机的生产提供了基础。各种耐热材料的发明，使宇宙的开发成为可能。

在电和电磁的领域中，由于采用了镍和钨的电子管材料，促进了电子学的发展，在这个基础上发展到应用锗和硅的三极管时代。随着感光性树脂等微细加工技术的发展，导致集成电路、大规模集成电路和超大规模集成电路等技术的发明和发展，并出现了今天的电子文明时代。

在能源领域中，原子能发电为人类提供了廉价、丰富的能源，而铀的浓缩和核能的控制中，材料科学和技术对核技术产生的成功起着重要的作用。因此，面临着产业时代，这些新材料的发明及其应用，对经济发展起着重要的作用。可以说，新材料是产业革命的关键。

当今世界正处于第三次工业革命的发展过程中。第三次工业革命领域有三个显著的特征。一是高度信息化社会及其基础设施；二是新能源或资源，尤其热核聚变新能源的开发；三是宇宙利用和空间基地等；此外，以利用海底资源、海底油田等的开发为主，也将带来很大希望。在这场广泛而深刻的新技术革命中，新材料起着举足轻重的作用。

人们普遍认为，今后 20 年左右将是世界高新技术发展的重大转折时期。21 世纪，人类将从工业时代进入信息时代。在信息传递、存贮和处理上，和现在的电子技术相比，利用光学技术无论从速度和容量上都优越得多。当前，光纤通信、光存贮、音响和视像光盘的迅速崛起，这标志着纯电子技术向光电混合技术的过渡已经开始。日、美等国已宣称在 3—5 年内要实现“光纤到户”。因而与光学技术相联系的材料，如低损耗的石英光纤和新一代氟化物光纤，小型固态激光器的关键材料，非线性光学晶体，各种半导体和有机光电电子材料，光盘材料，光学薄膜和器件，光波导和光集成技术等必将更加受到重视。

宇宙空间运输技术的进步，把人类的活动环境扩大到地面 500 公里的低轨道，今后还要把距地面 3.6 万公里的静止轨道甚至要把月球、行星收进活动领域。宇宙开发的成功是由于耐热材料作出的重大贡献。宇宙飞船从地面发射，再从宇宙空间通过大气层返回地面，其外壁受到宇宙空间-170 °F 的低温，再猛升到 2300 °F 高温的热变化。其内壁的铝合金设计必须要耐宇宙空间-170 °F 的低温，并要经受得住返回大气层时在 2000 秒内的热脉冲，同时瓷砖的表面温度不得超过 350 °F。

宇宙开发中的这种材料科学的课题是如何利用金属系高比刚性（比强

度) 结构材料, 大型一体化复合材料, 超耐热结构材料, 超低温结构材料、轻质而耐久性优良的隔热材料、耐宇宙环境材料的开发与评价以及利用宇宙环境(微重力、真空)来创造新型材料。此外, 值得一提的是碳纤维增强碳基复合材料, 它是由碳纤维浸渍沥青后再经碳化而成, 是航天技术中高温部位的关键材料, 又是优良的低密度烧蚀或隔热材料。

莱特兄弟时代飞机的机体是木材、金属丝和布。20世纪30年代~40年代出现了全金属制的近代飞机, 主要依靠半硬壳式结构结合的高强度铝合金。铝合金至今已做了各种改进, 正式成为机体的主流材料。

由于喷气式发动机正式转向实用, 飞机的性能得到飞速的提高。为了适应随之而来的机体表面空气动力加热和发动机室等的高温化而采用了钛合金。在60年代由于出现了比强度和比钢性优良的碳纤维复合材料, 机体材料也发生了很大的变化。

目前带翼的航天器和飞机, 机体表面温度高达一千几百度, 因此仅靠历来使用的金属材料并不能承受如此高温, 而所需要的各种各样高性能的结构材料, 其中影响最大、最重要的涉及两类: 第一类是广泛用于结构件、隔热件和内装修的高比强结构材料, 如工程塑料及其合金, 高比强金属合金(铝、镁、钛等)以及各种高性能复合材料(树脂基、金属基、陶瓷基等); 第二类是高温结构材料, 主要包括用陶瓷纤维、晶体或颗粒增强的高温金属合金、高温工程结构陶瓷。用陶瓷做发动机, 工作温度高, 重量轻, 可大大提高效率, 节约能源, 是各国竞相研究的热点。这些带头领域中高性能结构材料的突破, 将使其它领域产生重大影响。是期望于碳——碳复合材料、陶瓷复合材料、金属间化合物等等高耐热、高比强度材料。

海洋占地球表面的70%, 同海面上的陆地相比是10倍的容积, 同大气层相比拥有1100倍的热容量, 还储存着很多的资源。这不仅起到保护地球环境的巨大作用, 而且也是留给人类的宝贵的新开拓地。

海洋开发, 就是充分留心、保护环境并利用和开发海洋所具有的优势, 开发储存着的各种海底矿物资源、海水溶存资源、未利用的能源、生物和空间。对海底石油、天然气的开发在不久的将来要达到水深800米的海域, 锰结核、富钴渣壳和热水矿物资源一般存在于1000米深处。为了进行温度差发电和养殖生物则需要来自800米以下深水层的低温而富于营养的深层水。

海洋开发目前所使用的材料主要是钢铁材料和混凝土。科学家正在研究如何利用结构材料和功能材料, 前者是高强度、高比强度和提高了耐蚀性、焊接(接合)性、可加工性等特性的材料; 后者是具备了有关控制压力、温度、湿度、气体等环境和水供给——处理等特性材料。

世界范围内的能源危机, 迫使人们对与能源和节能技术有关的新材料的开发更加重视。在太阳能利用方面, 要发展可与常规能源竞争的太阳能电池(如非晶硅薄膜太阳能电池)。大容量、高比能的可充电电池, 在储能、蓄电技术中占有十分重要的地位。目前研究开发比较活跃的有氢镍电池、锂电池、钠硫电池等。在节能方面, 有可减少涡流损耗70%的非晶态软磁材料。各种贮氢材料在干净能源——氢的利用方面有很大的作用。

核聚变能为我们提供清洁、廉价、丰富的能源, 将成为21世纪电力的主要供应者。有关核聚变反应堆的材料将是今后研究的重要课题。

开发超导材料和磁性材料也是必不可少的。超导磁性材料, 除核聚变外,

还考虑应用于 MHD 发电和磁轨列车等。目前，超导技术中只有低温（液氦温区）超导材料已进入实用阶段，高温（液氮温区）超导材料离实用尚有距离。但是超导技术的突破将对节能产生重大影响，而且将会引起工业生产各领域的革命性变化。

上面，我们向读者朋友讲述了许多关于材料的故事，介绍了材料的过去、现在，以及将来可能的发展趋势。其实，我们每天都在和材料打交道，我们身上穿的衣服、手上拿的文具和用具，住的房屋，都是由材料制造成的。随着时代的发展，科学技术的进步，材料科学和工程也在发展和进步，也影响到我们周围的一切，现代化的进程需要每一个社会成员都具有科学素质，而且，如果我们对科学技术知之甚少，在日新月异的技术进步面前就会显得茫然，给生活和工作带来不便。

材料是构成各种设备和设施的物质。因此，任何一种创造发明都离不开材料，任何一项制造也离不开材料。爱迪生发明电灯时，为了制造灯丝，竟使用了一千六百多种材料做试验！贝尔在上世纪就发明了光通信，但光通信真正推广应用，是在本世纪 70 年代制造出传输损耗在 20 分贝/公里的光导纤维之后。可见，即使有了创造性的思想，如果没有适合的材料就不能付诸实施，或者造不出有实用价值的新发明。同样地，一种新材料的出现也会给人们的创造性思维提供广阔的空间，从而造出许多精巧绝伦的新仪器、新设备。例如压电材料的发现，给人们带来了声纳、超声波探伤仪、超声诊断仪（B 超）等许多仪器，带来了巨大的社会效益和经济效益。新型复合材料的诞生，给航天航空工业带来了巨大的技术进步。同样，我们也可以想象，一旦实现室温超导，世界将出现多少新奇的东西，当前，新的材料层出不穷，为新的发明创造提供了广阔的余地和机会，世界性的竞争也向我们提出了更为严峻的挑战。

现代科学和技术的发展，使学科分得越来越细、越来越窄。早期的科学家大都是通才，牛顿精通哲学、数学、物理、化学；法拉第是物理、化学界的泰斗。今天的许多专家，甚至很难通晓他那个学科的所有领域。这种过细的分工，是科学技术高速发展、知识大量积累造成的。它没有反映事物的内在联系，因而也会限制人们的思维。就材料而言，多年来已经分化成许多专业，如冶金学、陶瓷学、高分子化学、复合材料等。其实，就成份研究和制备方法而言，它们的本质都是化学。此外，用 X 射线，电子显微镜等物理手段来研究材料的结构，也分成了金属物理，陶瓷结构，高分子物理等专业，其实这些学科的方法和工具都基本相同，只是研究对象不同。布拉格父子用 X 射线衍射方法研究物质结构时，并没有去区分专业。古人云，天下事久分必合，久合必分，事物发展规律是螺旋型上升的，如果用统一的观点去看材料，分析各种材料的性能和结构的关系，可能会创造出更优异的材料来。这是作者的一孔之见，也是寄托予未来者的期望。

