

材料科学技术 百科全书



中国大百科全书出版社



材料科学技术 百科全书

上卷

中国大百科全书出版社



材料科学技术 百科全书

下卷

中国大百科全书出版社



材料科学技术百科全书(上、下)

材料科学技术百科全书编辑委员会编

中国大百科全书出版社出版发行

(北京阜成门北大街17号)

新华书店总店北京发行所经销

国防大学第一印刷厂印刷

开本: 787×1092 1/16 印张: 90.5 插页: 64 字数: 3500千字

1995年11月第1版 1995年11月第1次印刷 印数3500

ISBN 7-5000-5365-7/Z·66 定价: 320.00元





材料科学技术百科全书

中国大百科全书出版社



材料科学技术百科全书编辑委员会

主任 师昌绪

副主任 朱丽兰 冯 端 林兰英 郭景坤

委员 (按姓氏笔画顺序排列)

干福熹 万 群 叶恒强 冯 端 冯之榴

师昌绪 朱丽兰 朱道本 刘其贤 孙志敏

李成功 吴人洁 闵乃本 汪宗荣 张兴栋

张沛霖 陈难先 林兰英 金宗哲 周 廉

周本廉 胡壮麒 赵先存 姚 熹 袁新泉

徐 僖 郭景坤 蒋民华 熊家炯 颜鸣皋



ISBN 7-5000-5365-7



9 787500 053651 >

图书在版编目(CIP)数据

材料科学技术百科全书/《材料科学技术百科全书》编辑委员会编.
—北京: 中国大百科全书出版社, 1995. 8
ISBN 7-5000-5365-7

I. 材… II. 材… III. 材料科学-百科全书 IV. TB3-61

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 07677 号



分支编写组

论	主编	李成功				
	副主编	袁新泉	李学勇			
	成 员	黄聪明				
基 础	理 论					
	主 编	冯 端				
	副主编	熊家炯	闵乃本	叶恒强		
	成 员	陈难先	刘治国	丘第荣	曹必松	杨顺华
金 属	材 料					
	主 编	颜鸣皋	胡壮麒			
	副主编	赵先存	石力开			
无机非金属材料	主 编	郭景坤				
	副主编	姚 熹	汪宗荣	金宗哲	钟香崇	
	成 员	诸培南	潘振魁	袁启明	张绪礼	
高 分 子	材 料					
	主 编	徐 僖				
	副主编	朱道本	冯之榴			
	成 员	苏家齐	毕先同	张隐西	徐 懋	
复 合	材 料					
	主 编	吴人洁				
	副主编	刘其贤	周本灏			
	成 员	宋焕成	黄 勇	沈曾民		
半 导 体	材 料					
	主 编	林兰英				
	副主编	万 群	闵端麟			
	成 员	孔梅影	彭瑞伍	王永鸿	尤重远	江德生
光 学、光 电 子 材 料	主 编	干福熹				
	副主编	蒋民华				
	成 员	肖定全	李爱珍	吴世康	蒋亚丝	



磁性和超导材料

主 编 周 廉

副主编 王新林

成 员 林 毅 戴道生 汪京荣 胡素辉

核 材 料

主 编 张沛霖

副主编 石永康

成 员 林少非 郝嘉琨

生物医学材料

主 编 张兴栋

副主编 徐恒昌

成 员 孙福玉 俞耀庭 田杰谟



前 言

当今世界正日益强烈地感受到新的科学技术浪潮的涌动和冲击。信息技术、生物技术、新材料技术和新能源技术等构成了一个前所未有的新科技群，标志着生产力质变的狂飙时期已经到来。

材料是人类一切生产和生活活动的物质基础，对社会生产力的提高起着不可估量的推动作用。每一项技术的发展，首先要有相应的优良材料作基础，新材料和器件的突破往往导致新的技术及其产业的诞生，对工业乃至人类生活产生重大的影响。因此，当今材料科学技术领域十分活跃，理论上的新概念，技术上的新构思，工艺上的新方法不断出现。材料科学理论和技术近年来都取得了重大进展，新材料的发展十分迅速，其品种每年都以5%的速度增长，相当于每年有1.25万种新材料推出。新材料产业的种类和规模也随之不断扩大。

中华人民共和国成立以来，在旧中国极端落后的经济基础上已经建立起比较完整的工业体系，取得了举世瞩目的成就。各门类材料工业已初具规模，多数基本材料已能立足于国内，全国拥有一支不小的、有相当水平的研究开发队伍。新材料科研工作对促进国民经济建设和国防建设，在突破一批关键性技术方面都取得了不少成绩。但从总体上来说，与发达国家相比还有相当大的差距。在进一步改革开放的格局下，新材料产业将置身于国际大市场的竞争之中。我国新材料研究开发如何积极跟踪，突出创新，形成特色以提高国防竞争力乃当务之急。为了缩小差距，加强新材料的研究和开发，除了在全国各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7个优先发展领域之一；1988年起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。在这些计划中均对新材料的研究、开发和生产创造了较为良好的条件。

《材料科学技术百科全书》顺应人们对材料科学技术知识的需求应运而生。她是我国近900位专家经历4年辛勤劳动和卓有成效的合作的成果。全书共2073个条目，近350万字，含227幅彩色图片，较好地反映了材料科学技术的全貌，具有很高的学术水平和应用价值。她的出版是适时的，一定会在推动我国材料产业加速发展，促进材料科学技术的进步，加强科技界和产业界结合，促进社会各界的关注等方面发挥积极作用，并产生深远影响。

朱丽宁

凡 例

一、编 排

1. 本书条目按条目标题的汉语拼音字母顺序并辅以汉字笔画、起笔笔形顺序排列。同音时按汉字笔画由少到多的顺序排列，笔画数相同的按起笔笔形一(横)、丨(竖)、丿(撇)、丶(点)、㇇(折，包括丿、乚、乚(等)的顺序排列。第一字相同时，按第二字，余类推。条目标题以拉丁字母、希腊字母和阿拉伯数字开头的，依次排在汉字条目的后面。

2. 在条目分类目录之前有一篇介绍材料科学技术的概观性文章。

3. 列有全部条目的分类目录，以便读者了解本学科的全貌。分类目录还反映出条目的层次关系，例如：

无机非金属材料

陶瓷

传统陶瓷

陶器

炆器

瓷器

日用瓷器

4. 在全部条目释文之后，列有材料科学技术大事年表，以便读者查阅。

二、条 目 标 题

5. 条目标题多数是一个词，例如“塑料”、“合金”；一部分是词组，例如“复合材料”、“高分子光电导材料”。

6. 大部分条目标题附有对应外文，例如橡胶 rubber。中国人物条目不附外文。

三、释 文

7. 本书条目的释文力求使用规范化的现代汉语，条目释文开始一般不重复条目标题。

8. 较长条目设置释文内标题。

9. 一个条目的内容涉及其他条目并需由其他条目的释文给以补充的，采用“参见”的方式。所参见的条目标题在本条释文中出现的，用楷体字排印，例如“由丁二烯聚合制得的结构规整的合成橡胶”；所参见的条目标题未在本条释文中出现的，另用括号加“见”字标出，例如“热塑性树脂添加剂或增强材料可制得热塑性塑料(见塑料)”。

10. 条目释文中出现的外国人名，一般在姓的前面加上外文名字的缩写，并附有原文，例如J. W. 克里斯琴(Christian)；在释文中出现的学术名词、地名和组织机构名称，一般不附原文。

四、插 图

11. 本书在条目释文中配有必要的插图。

12. 彩色图汇编成插页。

五、参 考 书 目

13. 在重要条目的释文后附有参考书目，供读者选读。

六、索 引

14. 本书附有全部条目的汉字笔画索引、外文索引和内容索引。

七、其 他

15. 本书所用科学技术名词以各学科有关部门审定的为准，未经审定和尚未统一的，从习惯。地名以中国地名委员会审定的为准，常见的别译名必要时加括号注出。

16. 本书字体除必须用繁体字的以外，一律用《简化字总表》所列的简化字。

17. 本书所用数字，除习惯用汉字表示的以外，一般用阿拉伯数字。



材料科学技术

师 昌 绪

材料是人类用以制成用于生活和生产的物品、器件、构件、机器和其他产品的那些物质。材料是物质，但不是所有的物质都可以称为材料，如燃料和化学原料、工业化学品、食物和药物，一般都不算是材料。但是这个定义也并不那么严格，如炸药、固体火箭推进剂，有人便称之为“含能材料”。

材料是人类赖以生存和发展的物质基础。20世纪70年代人们把信息、材料、能源作为社会文明的支柱；80年代以高技术群为代表的新技术革命，又把新材料与信息技术和生物技术并列为新技术革命的重要标志。这主要是因为材料是国民经济建设、国防建设与人民生活所不可须臾缺少的重要组成部分。

材料多种多样，分类方法也没有一个统一的标准。从物理化学属性来分，可分为金属材料、无机非金属材料、高分子材料和复合材料。此外，木材、纸张等也都属于材料的范畴。从用途来分，可分为电子材料、航空航天材料、核材料、建筑材料、能源材料、生物材料等。更常见的分类方法有两种。一种是分为结构材料和功能材料。前者是以力学性能为基础，用以制造以受力为主的构件。当然，结构材料对物理性能或化学性能也有要求，如光泽、热导率、抗辐照、抗腐蚀、抗氧化能力等。对性能的具体要求因材料用途而异。功能材料则主要是利用物质独特的物理性质、化学性质或生物功能等而形成的一类材料。另一种是分为传统材料和新型材料(又称新材料、先进材料)。前者是指在工业中已批量生产并已得到广泛应用的材料，后者则是指刚刚投产或正在发展而且有优异性能和应用前景的一类材料。新型材料与传统材料之间并没有决然的界限，传统材料可以发展成为新型材料，新型材料在经过长期生产与应用之后也就成为传统材料。传统材料是发展新材料的基础，而新型材料又往往能推动传统材料的进一步发展。

材料是人类进步的里程碑

人类发展的历史证明，材料是社会进步的物质基础和先导，是人类进步的里程碑。纵观人类利用材料的历史，可以清楚地看到，每一种重要材料的发现和利用，都会把人类支配和改造自然的能力提高到一个新的水平，给社会生产力和人类生活带来巨大的变化，把人类物质文明和精神文明向前推进一步。

早在100万年以前，人类开始以石头做工具，称之为旧石器时代。1万年以前，人类知道对石头进行加工，使之成为更精致的器皿和工具，从而进入新石器时代。在新石器时代，人类还发明了用粘土成型，再火烧固化而制成的陶器。同时，人类开始用皮毛遮身；中国在8000年前就开始用蚕丝做衣服；印度人在4500年前开始培植棉花。人类使用的这些材料都是促进人类文明的重要物质基础。

在新石器时代，人类已经知道使用天然金和铜，但因其尺寸较小，数量也少，不能成为大量使用的材料。后来，人类在寻找石料过程中认识了矿石，在烧制陶器过程中又还原出金

属铜和锡，创造了炼铜技术，生产出各种青铜器物，从而进入青铜时代。这是人类大量利用金属的开始，是人类文明发展的重要里程碑。世界各地开始青铜时代的时期前后不一，希腊是公元前3000年以前，埃及是公元前2500年左右，中国是夏代(约公元前22~约前17世纪)，欧洲在公元前1800年。中国在商周(约公元前17世纪初~前256年)即进入青铜器的鼎盛时期，在技术上达到了当时世界的顶峰。如河南安阳殷墟出土的商代晚期的司母戊方鼎(重875公斤)，就反映出当时中国青铜铸造的高超技术和宏大规模。又如在湖北随县曾侯乙墓出土的战国(公元前475~前221)初期制造的编钟，亦充分反映出当时中国在冶金方面已达到相当高的工艺和技术水平。冶金术的迅速发展，提高了社会生产力，推动了社会进步，并导致城市的诞生。城市最早出现于公元前3000年前的美索不达米亚，随后出现在埃及、印度河流域及中国华北地区。这标志着人类文明又向前跨进了一大步。

5000年前，人类已开始用铁。公元前12世纪，在地中海东岸已有很多铁器。由于铁比铜更容易得到，更好利用，在公元前10世纪铁工具已比青铜工具更为普遍，人类从此由青铜时代进入铁器时代。公元前8世纪，已出现用铁制造的犁、锄等农具，使生产力提高到一个新的水平。中国在春秋(公元前770~前476)末期，冶铁技术有很大突破，遥遥领先于世界其他地区。如利用生铁经退火制造韧性铸铁及以生铁制钢技术的发明，标志着中国生产力的重大进步。这些发明对战国和秦汉农业、水利与军事的发展起了重大作用，成为促进中华民族统一和发展的重要因素之一。这些技术从战国至汉代相继传到朝鲜、日本和西亚、欧洲地区，推动了整个世界文明的发展。

人类自有史以来，材料在促进人类物质与精神文明方面的事例不胜枚举。18世纪蒸汽机的发明和19世纪电动机的发明，使材料在新品种开发和规模生产等方面发生了飞跃。如1856年和1864年先后发明了转炉和平炉炼钢，使世界钢的产量从1850年的6万吨突增到1900年的2800万吨，大大促进了机械制造、铁路交通的发展。随之不同类型的特殊钢种也相继出现，如1887年高锰钢，1900年18-4-1高速钢，1903年硅钢及1910年铬镍不锈钢等的问世。这些都是现代文明的标志，使人类进入了钢铁时代。在此前后，铜、铅、锌也得到大量应用，而后铝、镁、钛和稀有金属相继问世，从而金属材料在20世纪中占据了材料的主导地位。20世纪初，人工合成高分子材料问世，如1909年的酚醛树脂(胶木)，1925年的聚苯乙烯，1931年的聚氯乙烯以及1941年的尼龙等，并发展十分迅速，如今世界年产量在1亿吨以上，论体积已超过了钢。有些工业发达国家如美国，高分子材料的体积已是钢的两倍。所以有人说现在是高分子材料时代。应该指出，有些材料如木材、砖瓦、石料、水泥及玻璃等一直占有十分重要的地位，因为这些材料资源丰富，性能价格比在所有材料中最有竞争能力。20世纪50年代，通过合成化工原料或特殊制备方法，制造出一系列先进陶瓷。由于其资源丰富、比重小、耐高温、耐磨等特点，很有发展前途，成为近三四十年来研究工作的重点，且用途在不断扩大，有人甚至认为“新陶瓷时代”即将到来。因为高分子材料及先进陶瓷材料的迅猛发展，使得金属材料相形见绌，甚至有人把钢铁工业称之为“夕阳工业”。其实，高分子材料、现代陶瓷与金属材料，各有其互不可代替的性能和功能。从资源情况来看，陶瓷原料(硅、氮、碳等)可以说取之不尽、用之不竭，高分子原料有再生的优势，金属矿产资源虽只有几百年的寿命，但如果考虑海洋及地壳深处的资源，也可以说是无限的。所以当前乃至下一世纪，将是多种材料并存的时代。随着科学技术的发展，它们之间互有消长。但是更有发展前途的是复合材料，因为这类材料具有每种单质材料所不具备的性

能，而且可以节约资源，是今后材料发展的主要方向。事实上，人类很早就利用复合材料。如泥巴中混入碎麻或麦秆用以建造房屋，钢筋水泥是脆性材料与韧性材料、抗张材料与抗压材料的结合，玻璃钢是玻璃纤维与树脂的复合，还有碳纤维增强的树脂基复合材料，都是为了提高材料的强度和模量而采取的措施。此外，人们还在发展更高级的复合材料，如金属基、陶瓷基复合材料等。经过仔细分析可以发现，几乎所有生物体，如内脏、牙齿、皮肤以及木材、竹子等都是复合材料的方式构成的，说明这是一种最合理的结构，大有发展前途。

英国学者 M. 阿石贝(Ashby)对机械制造和土木工程材料在演化过程中各类材料的相对重要性进行了估计，认为自 1860 年前后现代炼钢技术出现以后，金属的重要性急剧增加，一直到 20 世纪中叶人工有机合成材料、工程陶瓷及现代复合材料迅速发展，金属材料的重要性逐步下降了。到 21 世纪初，4 类材料的重要性可能是平分秋色。

前面所述，主要指的是结构材料。随着科学技术的发展，功能材料愈来愈重要，特别是半导体材料出现以后，促进了现代文明的加速发展。1948 年发明了第一支具有放大作用的晶体管，10 年后又研制成功集成电路，使计算机的功能不断提高，体积不断缩小，价格不断下降；加之高性能的磁性材料不断涌现，激光材料与光导纤维(见光学纤维)的问世，使人类社会进入了“信息时代”。因此，功能材料占据了更重要的地位。特别是功能材料品种多，包括了金属、陶瓷、高分子和复合材料所构成的各种功能材料，而且应用范围广泛，发展非常迅速，成为研究与开发的重点。

总之，人类社会的进步，几乎无不与材料密切相关。相反，有些技术，因为没有合适的材料而进展迟缓。如太阳能是一种永恒能源，量大面广，又无污染，但是由于没有发展出效率高、寿命长、价格低廉的光电转换材料而使太阳能在能源中的地位一直很低；磁流体发电装置的效率可达 50~60%，远远高于现有热机，而且可以燃烧劣质燃料，污染也小，但是由于有些关键材料没有得到解决，至今未能实现工业化。如此种种，都说明新材料的研究与开发，材料科学与技术的基础和应用研究至关重要。

材料科学的形成与内涵

“材料”是早已存在的名词，但“材料科学”的提出只是 20 世纪 60 年代初的事。1957 年苏联人造卫星首先上天，美国朝野上下为之震惊，认为自己落后的主要原因之一是先进材料落后，于是在一些大学相继成立了十余个材料科学研究中心。从此，“材料科学”这个名词便广泛地被引用了。

事实上，“材料科学”的形成是科学技术发展的结果。

首先，固体物理、无机化学、有机化学、物理化学等学科的发展，对物质结构和物性的深入研究，推动了对材料本质的了解；同时，冶金学、金属学、陶瓷学、高分子科学等的发展也使对材料本身的研究大大加强，从而对材料的制备、结构与性能，以及它们之间的相互关系的研究也愈来愈深入，为材料科学的形成打下了比较坚实的基础。

其次，在材料科学这个名词出现以前，金属材料、高分子材料与陶瓷材料都已自成体系，目前复合材料也正在形成学科体系。但它们之间存在着颇多相似之处，不同类型的材料可以相互借鉴，从而促进本学科的发展。如马氏体相变本来是金属学家提出来的，而且广泛地被用来作为钢热处理的理论基础；但在氧化锆陶瓷中也发现了马氏体相变现象，并用来作为陶瓷增韧的一种有效手段。又如材料制备方法中的溶胶-凝胶法，是利用金属有机化合物

的分解而得到纳米级高纯氧化物粒子，成为改进陶瓷性能的有效途径。复合材料更需要借鉴利用其他材料的基础知识和制备方法。

第三，各类材料的研究设备与生产手段颇多共同之处。虽然不同类型的材料各有其专用测试设备与生产装置，但许多方面是相同或相近的，如显微镜、电子显微镜、表面测试及物性与力学性能测试设备等。在材料生产中，许多加工装置也是通用的。如挤压机，对金属材料可以用来成型及冷加工以提高强度；而某些高分子材料，在采用挤压成丝工艺以后，可使有机纤维的比强度和比刚度大幅度提高。研究设备与生产装备的通用不但节约资金，更重要的是相互得到启发和借鉴，加速材料的发展。

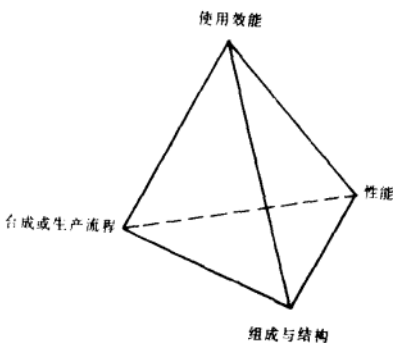
第四，许多不同类型的材料可以相互代替和补充，能更充分发挥各种材料的优越性，达到物尽其用的目的。但长期以来，金属、高分子及无机非金属材料相互分割，自成体系。由于互不了解，习惯于使用金属材料的，便想不到采用高分子材料，即使是想用，又因对其不太了解，而不敢用；相反，习惯于用高分子材料的，也想不到用金属材料或陶瓷材料来代替。设计人员的“因循守旧”，对采用异种类型的新材料持怀疑态度，这既不利于材料的推广，又有碍于使用材料的行业的发展。

第五，复合材料在多数情况下是不同类型材料的组合，特别是出现超混杂复合材料以来更为如此。如果对不同类型材料没有一个全面的了解，复合材料的发展必然受到影响。而复合材料又是今后新材料发展重点之一。因此，发展材料科学，对各种类型材料有一个更深入的了解，是复合材料发展的必要的基础。

材料科学所包括的内容往往容易理解为研究材料的组织、结构与性质的关系，探索自然规律。这属于基础研究。实际上，材料是面向实际、为经济建设服务的，是一门应用科学，研究与发展材料的目的在于应用，而材料又必须通过合理的工艺流程才能制备出具有实用价值的材料来，通过批量生产才能成为工程材料。所以，在“材料科学”这个名词出现后不久，就提出了“材料科学与工程”。工程是指研究材料在制备过程中的工艺和工程问题。许多大学的冶金系、材料系也就此改变了名称，多数改为“材料科学与工程系”，偏重基础方面的也就称“材料科学系”，偏重工艺方面的称“材料工程系”。也有不肯放弃“冶金”而称为“冶金与材料科学系”的，如英国的剑桥大学。同时，有关材料科学或材料科学与工程方面的杂志和书籍也应运而生。第一部《材料科学与工程百科全书》自1986年陆续由英国

Pergamon 出版。它对材料科学与工程下的定义为：材料科学与工程就是研究有关材料组成、结构、制备工艺流程与材料性能和用途的关系的知识的产生及其运用。换言之，材料科学与工程是研究材料组成、结构、性能、生产流程和使用效能以及它们之间的关系（见图）。

这里应该强调指出的是使用效能（或称为使用性能或效果）。它是指材料在使用条件下的表现，如使用环境、受力状态对材料特性曲线以及寿命等的影响。效能往往决定着材料能否得到发展或大量使用。有些材料的实验室测定值是有吸引力的，而在实际使用过程中却表现很差，从而也就难以得到推广。只有



材料科学与工程的四要素及其间的关系

不断调整组成、改变工艺条件或采用其他有效措施来改进材料的使用性能，材料才能真正得到发展。

材料科学与工程具有物理学、化学、冶金学、陶瓷学、计算数学等多学科交叉与结合的特点；实验室的研究成果必须通过工程研究与开发以确定合理的工艺流程，经过中间试验后才能生产出符合要求的工程材料。各种工程材料用于信息、交通运输、能源及制造工业等方面，而后根据使用情况，把需要改进的地方反馈于研究与开发，进行改善，再回到各应用领域。如此通过应用与改进多次反复，才能成为成熟的材料。即使是成熟材料，随着科学技术的发展与需求的推动，还需不断加以改进。

近年来，又出现了“材料科学与技术”的提法。实际上它与“材料科学与工程”没有本质区别。“工程”与“技术”都是指材料制备过程中的技术、流程和方法。而目前“材料科学技术”更为通用，本书也就以此命名了。

材料是社会现代化的物质基础与先导

材料既是人类社会进步的里程碑，又是社会现代化的物质基础与先导。因此，材料，尤其是新材料的研究、开发与应用反映着一个国家的科学技术与工业水平。20世纪40年代，英、美对核材料的研究与开发给予高度重视，在美国的曼哈顿计划中专门设立了有关材料的研究与开发机构，从而取得很大的突破，研制成功核武器，也促进了核能利用的发展。下面就现代科学技术的发展与新材料的关系举几个典型事例予以说明。

电子技术的发展 追溯电子技术的发展，可见新材料研制与开发所起的举足轻重的作用。1906年发明了电子管，从而出现了无线电技术、电视机、电子计算机；1948年发明了半导体晶体管，导致电子设备的小型化、轻量化、省能化及成本的降低，可靠性的提高与寿命的延长；1958年出现了集成电路，使计算机及各种电子设备发生一次飞跃。此后，集成电路的发展十分迅速，这是以硅为主的半导体材料相应发展的结果。

进入90年代，集成电路的集成度进一步提高，加工技术达到0.3微米(研究水平已达0.1微米)，每位存储器的价格就更低了。这些都与硅单晶的生长和晶片的加工技术密切相关，即对单晶纯度与缺陷的要求不断提高，单晶直径不断增加，晶片的加工精度和表面质量不断提高，从而芯片成品率大为提高，每位存储器的价格急剧下降。这就是为什么计算机的功能愈来愈好，而其价格却不断下降的重要原因。集成电路的发明与发展，使人类文明发生了一个飞跃，成为人类进入“信息时代”的里程碑。这是因为微型计算机可以普及到世界的每一个角落，如果仍采用电子管计算机的话，这就不可能了。表1中所列数据便说明了这个问题。

表1 1946年电子管计算机与1976年微机一些指标的对比

指 标	电子管计算机	微型计算机	对比
体积(立方英尺)	30000	0.011	$\sim 10^6$
功耗(千瓦)	140	0.0025	5.6×10^4
重量(吨)	30	0.005	6.0×10^3
平均故障时间	几个小时	几年	$\sim 10^4$