

全国金属材料学教学
研讨会论文集

现代材料学进展

师昌绪 等编著

国防工业出版社

全国金属材料学教学研讨会论文集

江苏工业学院图书馆材料学进展

藏书章

师昌绪 等编著

国防工业出版社

(京)新登字 106 号

内 容 简 介

《现代材料学进展》是全国第五届金属材料学教学研讨会的特邀报告集, 分别由我国著名材料学家和重点高等院校的知名教授执笔, 内容涉及近代材料的发展动向, 材料强韧化的位错理论, 马氏体、贝氏体相变的进展, 工具钢、高温合金和陶瓷材料等方面最新发展的材料。本书可用于扩大对材料科学领域最新知识的了解和更新材料科学教材。适合于冶金, 机电, 交通, 国防等领域从事材料研究、使用、管理部门的科技人员以及高校材料专业的师生参考。

现代材料学进展

师昌绪 等编著

责任编辑 杜家年

国防工业出版社出版发行
(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)
(邮政编码 100044)
北京航空航天大学印刷厂印装

850 × 1168 毫米 32 开本 $7\frac{1}{4}$ 印张 187 千字

1992 年 5 月第一版 1992 年 5 月第一次印刷 印数:0001—1000 册

ISBN 7-118-01034-0 / TB · 42 定价:10.00 元

序 言

由我国知名金属学家师昌绪教授为主编著的《现代材料学进展》是为全国金属材料学教学研讨会所特邀的论文报告集。近代科学的进展使材料科学的面貌正在发生着日新月异的变化，材料科学本身就是新兴学科的基本组成部分。材料科学的进展也影响到航空、航天、电子、能源等新技术的发展，对国民经济和国防建设的发展和巩固都是举足轻重的。

“教育是根本”，高等工科教育为我国培育了成千上万名工程师、科学研究人员，他们在各条战线上为祖国的现代化建设发挥着骨干和先锋的作用。教育战线上更急需最新的信息和高质量的教材。《现代材料学进展》的出版为更新现有材料学的教材内容，提高教学质量，深入研讨的层次，提供了有力的武器。

“金属材料学”是我国高等理工院校已经普遍开设的专业基础课程，几十年的教学实践不断地完善和丰富着教材和教学内容。国内外正式出版的讲义和教学参考书，至少有上百种。全国金属材料学教学研讨会在近 10 年来，有组织地对有关的教学、科研问题，自始不渝地进行系统深入的研讨，群策群力地为改善教学过程而努力，并且取得了很好的效果。这次《现代材料学进展》的出版，将为金属材料学的研讨活动提供有力的工具。

《现代材料学进展》将不断地记载材料科学专家们研究工作的成果和体会，对材料学课程的教学和发展，将起到深远的影响。希望全国高校今后在材料学研讨活动中取得新的成果。

颜 尚 平

目 录

新型材料发展动向与展望	师昌绪(1)
金属材料强韧化的基本理论及其控制	俞德刚(22)
马氏体相变与马氏体钢的研究进展	王笑天(78)
关于钢中非典型贝氏体的一些问题	康沫狂(104)
高速钢与工具材料	丁培道 石功奇(131)
几种近代高温材料	许昌淦(185)
硅基材料的高温抗腐蚀和蠕变性能	郑治祥(207)
编后记	全国金属材料学教学研讨会领导小组(225)

新型材料发展动向与展望

师昌绪

材料在人类历史进程中的地位已为人所共知，新型材料在现代文明中就更为突出，因为新型材料是发展高技术的先导和基础，没有先进材料，就做不出先进的元器件；没有先进的元器件，就不可能构成先进的系统。因而各工业发达国家莫不将新材料的研制与开发放在十分重要的地位。最近美国商业部公布的一个资料表明，到 2000 年，美国先进材料在 12 项新兴技术中的产值居于首位，即在 3560 亿美元中，先进材料占有 1500 亿美元，为 43%。从全世界范围来看，先进材料为 4000 亿美元，占整个新兴技术产值 10000 亿美元的 40%。这里所说的新兴技术就是指那些目前正在发展，预期在本世纪内会得到发展，其产品在 10 年内占有重要市场的技术，其中包括新兴电子与信息系统，新兴生产系统及与生命科学相关的生物技术与装置；当然也包括新兴材料。所谓新兴材料则包括先进材料和新兴超导材料。先进材料是指目前正在开发中的材料，那就是结构与功能陶瓷、陶瓷基与金属基复合材料、金属间化合物与轻合金，先进塑料、表面改性材料、金刚石薄膜、膜材料及生物材料。这些材料都已有很好的基础，具有广阔的应用前景，在一定程度上代表着当前新材料的发展方向。但是随着科学技术的发展与需求的推动，还会不断地出现更新的材料。例如目前已有 8000 多万个化合物，而每年还以 25 万个的速度在增加。在

这些化合物中，有的已找到用途，有更多的在等待挖掘。目前只有 8 万个有一定的使用价值，而成为工程材料的就更少，大约只有 5 万个左右。一个有应用前景的材料，从发现到工业化生产一般要 10~15 年。所以现在认为本世纪内能工业化的新型材料，实际上是那些目前已在开发，并显示出工业生产上可行，而在应用方面又有广阔的前景的材料，二者缺一不可。如高温超导，从其应用前景来说，可以认为十分光明，因为仅就输电一项来说，经济效益就很可观，但有些基本问题难以解决，如氧化物超导材料的脆性问题和稳定性问题，要使这种材料工业化生产，在短期内是不可能的了。太阳能的光电转换也是一样，尽管地球表面一年从太阳获得的电量达 60 亿亿度，比全世界一年所用总能量还要大一万倍，但由于转换材料、贮能材料及许多关键技术问题没有得到解决，太阳能的利用一直到本世纪末也难占到很大的比重（只占电量的 5% 以下）。从上述两个例子说明新型材料的发展难度是很大的；没有科学或技术上的重大突破，很难得到预期的效果。只有科学上的重大发现，才能使材料的发展产生事半功倍的效果，超导便是突出的一例，如图 1。仅从金属与金属间化合物的探索，经过几十年的努力也未脱离开液氮温度的范围；而氧化物超导一经发现，便出现了一个飞跃。技术的创新与重大变革也会使材料取得突飞猛进的进展，如薄膜技术、超晶格制造技术与超细颗粒技术等，都可发展出用常规技术难以合成的新材料，或解决材料发展过程中难以克服的困难。所以在谈新材料发展的动向时，也要谈材料合成与制备技术，因为后者对材料的结构与性能有决定性的影响。

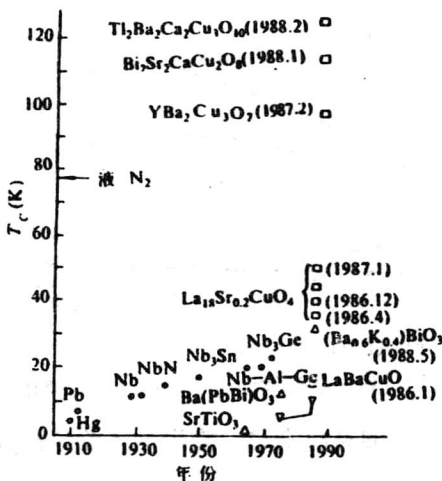


图1 超导体的发展历程

1. 结 构 材 料

结构材料向着更高温度、更高比强度、比刚度和耐更苛刻的工作环境的方向发展。

空间机械与动力机械的发展对材料提出了更高的要求，工作温度愈高，热效率也愈高，如目前的火力发电装置的工作温度只在 400℃ 上下，热效率为 30~40%；正在发展中的磁流体装置，工作温度高达 3000℃，其效率可提高到 50~60%。航空发动机的工作温度在 1000℃ 左右，其效率在 35% 左右；而提高到 1500~1600℃ 后，则效率为 50% 左右，所以高温材料成为提高动力机械热效率的最主要的研究课题。对航空发动机来说，一直到本世纪末，高温合金仍然是最关键的材料，尽管它的地位逐渐下降（图 2）。

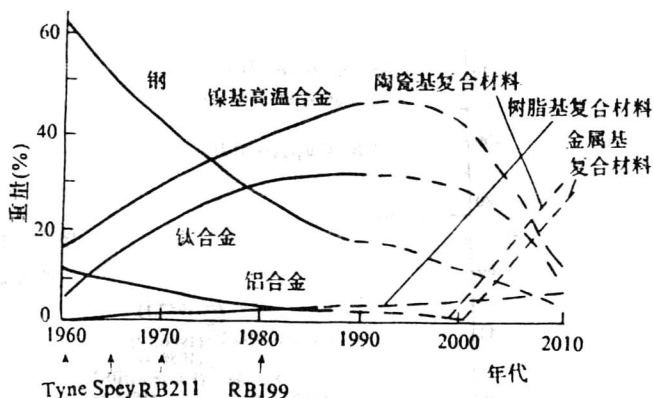


图2 各种材料在航空发动机中所占比例的变化预测

从正在发展中的材料来说，陶瓷是当前的热点，其主要特点：

(1) 低膨胀系数 ($3 \sim 4 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$)，从而抗热震性能好；

(2) 良好的高温强度，当前可达 1400°C ，前景可望达 1600°C ；

(3) 优良的环境稳定性，耐腐蚀、抗氧化；

(4) 低密度 ($2.7 \sim 3.2$, Si_3N_4 、 SiC)，从而具有高比强度和高比刚度。

(5) 高硬度，耐磨性好；

(6) 有丰富的资源，如 Si_3N_4 、 SiC 、 Al_2O_3 等都几乎是取之不尽、用之不竭的。

表1列出了一些现代陶瓷的性能特点，可以看出，这类材料有很多优点，但是也存在不易克服的弱点，那就是断裂韧性太低 ($< 5\text{MPa} / \text{m}^{1/2}$)，即使是经过增韧，也只有 $10\text{MPa} / \text{m}^{1/2}$ 左右，还不到超高强度钢的 $1/5$ 。

在这样低的断裂韧性下，其临界裂纹（ a_c ）也就很小了，大致在 $25\sim 75\mu\text{m}$ 之间，而探伤的最高水平只在 $20\mu\text{m}$

表 1 几种陶瓷材料的性能

材料	密度	弯曲强度 (MPa)	断裂韧性 (MPa / $\text{m}^{1/2}$)	杨氏模量 (GPa)	热膨胀 ($\times 10^{-6}$ / C)	热传导 (W / m°C)
Al_2O_3	3.97	276~1034	2.7~4.2	380	7.2~8.6	27.2
莫来石 ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$)	2.8	185	2.2	145	5.7	5.2
部分稳定化的 ZrO_2	5.7~5.75	600~700	8~9	205	8.9~10.6	1.8~2.2
TiB_2	4.5~4.54	700~1000	6~8	514~574	8.1	65~120
SiC	3.21	230~825	4.6~6.1	207~483	4.2~5.6	63~455
Si_3N_3	3.19	700~1000	4.1~6.0	304	3.0	9.30

量级。其次是质量的分散性很大，如图 3，金属材料可以保证平均强度的 90%（即最低强度 $\sigma_1 > 0.9\sigma_{\text{平均}}$ ），而陶瓷材料在平均强度的 10% 就可能发生断裂。这些都是急待克服的缺点。尽管如此，其发展前景还是十分光明的，不谈用于非常高的温度所取得的实效，就以一般热工机械而论，其耗油率（SFC, g/Wh）及功率的提高就很显著，见表 2。

除了用于常用热机以外，由于膨胀系数小，耐高温与高硬度，用于刀具和模具，也是很有前途的。图 4 为采用陶瓷刀具和硬质合金切削性能的对比。切削对象为一种难加工的 Inconel718 镍基高温合金。

表 2 几种曲型热机采用陶瓷后的效果

机械类型	功率(kW)	机构配置 及燃气轮 进口温度(℃)	油耗率(%) (g / Wh)	功率增量 (%)
汽车(燃气轮机)	149	单轴、回热 1350°	~27	0
卡车	261	双轴、回热 1250°	~27	+30
小型燃气轮机 船	745	3 程单循环 1350°	~10	+40
柴油机	373	绝热燃气轮 机组 1050°	~22	+37

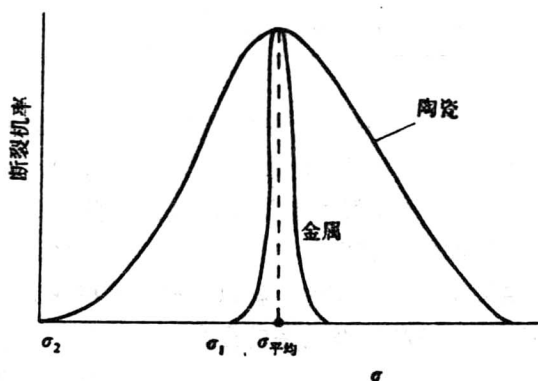


图 3 陶瓷与金属断裂几率和应力关系的示意图

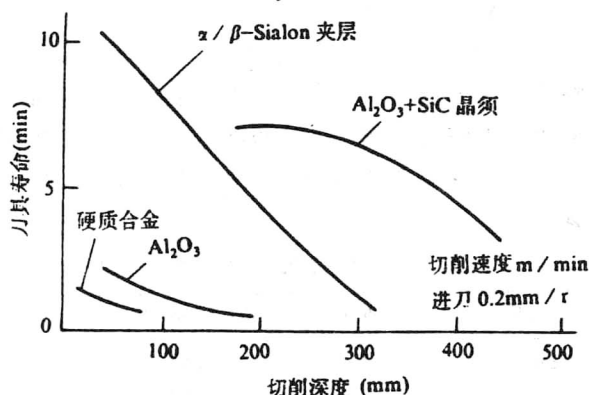


图 4 陶瓷刀具与硬质合金刀具的对比

作为模具，陶瓷也是理想的材料，但是无论刀具还是模具，都存在两个问题，一个是成型困难，其次是价格缺乏竞争能力。目前我国在这两方面都有较高水平，但一直没有在工业上得到广泛的应用，价格可能是重要原因之一。

作为高温材料，高温合金尽管有较好的稳定性和可靠性，但是其使用温度受到其熔点的限制，很难再有较大幅度的提高，中间化合物便成为当前令人瞩目的一类材料了。其实早在本世纪 50 年代就对金属中间化合物给予了高度重视，只是由于脆性问题难以得到解决而又冷下来，到了 70 年代末，在高温合金的主要强化相 Ni_3Al 中加硼，可以解决它的脆性问题，从而才引起人们又一次研究金属间化合物的热潮。除了在 Ni_3Al 加硼可使其高温拉伸塑性达 40% 以上以外；在 Co_3V 中加合金元素 Ni、Fe，使六角超结构转变为面心立方超结构，也明显地提高其塑性；粉末冶金工艺及合金化手段，也可使 Ti_3Al 及 TiAl 塑性大幅度提高。因

此，这类材料有可能继高温合金之后成为实用材料。表 3 列出了当前比较有希望的几种金属中间化合物，其中钛铝合金最有特点，密度低、熔点高，最有发展前景，可能是解决钛合金使用温度偏低问题的一个重要方向。当然，除了表中所列以外，最近又有不少发展，如 Fe-Si、NbAl₃ 等，都在加强探索。

表 3 几种金属间化合物的性质

合金系	熔点(℃)	弹性模量(GPa)	密 度
TiAl	1460	1.70	3.91
Ti ₃ Al	1600	1.45	4.20
NiAl	1640	2.95	5.86
Ni ₃ Al	1390	1.79	7.50
FeAl	1250~1400	2.61	5.56
Fe ₃ Al	1540	1.41	6.72

第三种类型的高温材料当属于复合材料。应该指出，复合材料并不全是用于高温，甚至复合的目的不主要为了提高使用温度，而是改善材料的其他性能。如陶瓷基复合材料主要是用来解决脆性或提高断裂韧性等问题，金属基复合材料及树脂基复合材料可以大幅度提高刚度（弹性模量）和抗疲劳性能等，碳碳复合材料为了提高热震性能等。图 5 说明不同高温材料的工作温度区域及其同比强度的关系。其中以碳碳复合材料最占优势，其次是陶瓷及其复合材料，金属基和金属间化合物及其复合材料的特点在于具有高韧性、高可靠度。

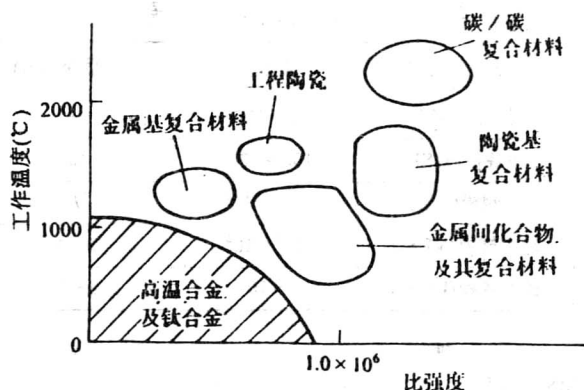


图5 几种高温材料的工作温度范围及与比强度的关系

2. 信息材料

信息材料向着多功能、集成化与高灵敏度的方向发展。

信息材料是当前最活跃的领域之一，因为信息技术的发展十分迅速，是工业现代化的最重要的标志。多年来，一直以电子作为传递信息的媒介，故称之为电子材料，近年来光子的作用愈来愈重要，因为电子有一定的质量，传输速度比光子慢，而且在传输过程中还会发热和产生磁场，对制造高密度与高速器件都是不利的，因而用光来作为信息传递的媒介便应运而生了。与光电子技术配套的就是光电子材料。

信息材料主要是指用作通信、计算机及控制技术所需的材料，其主要发展趋势是多功能、集成化、微型化与高灵敏度。最突出的是集成电路的发展，它是高技术中的基础，表4及图6反映了集成电路的发展历程，说明集成电路的集成程度以指数的速度逐年增长。

表 4 集成电路集成度的发展

年度	集成电路分类	集成度	加工线宽(μm)
1958	小规模(SSI)	1~100	—
1965	中规模(MSI)	100~1000	10
1973	大规模(LSI)	100~ 10^5	7
1978	超大规模(VLSI)	$10^5\sim 10^6$	2~3
1987	极大规模(ULSI)	$> 10^6$	0.8~1.0

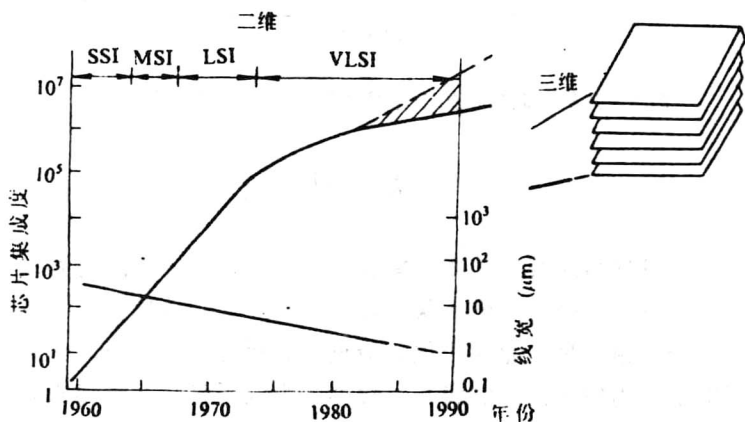


图 6 集成电路集成度的增长与线宽的减少

1991 年, 4×10^6 (4Mb) 芯片 ($0.5\mu\text{m}$ 工艺) 已批量生产, 4 年后可出 64Mb ($0.3\mu\text{m}$ 工艺) 芯片, 90 年代末可达 1024Mb, 那就接近硅片工艺的极限了。

制造集成电路所需材料种类很多, 要求也很高, 特别是纯度有所谓电子级的纯度, 那比分析纯还要高。表现于集成电路上的主要是半导体材料与封装材料。从半导体材料来看, 硅占 95%, 其余为 III-V 族化合物, 如 GaAs, 图 7 为

它们的发展历程，同时还显示出硅单晶的直径也以指数速度增加，这意味着对材料的要求更高（偏析度要低）。由于硅单晶直径的增加，集成电路的成品率大幅度增加，相应地成本急剧下降，如果说在 1990 年每位 (bit) 2 美分的话，到 1984 年只有 0.005 美分了。难怪计算机的性能逐年提高，而价格却不断下降。

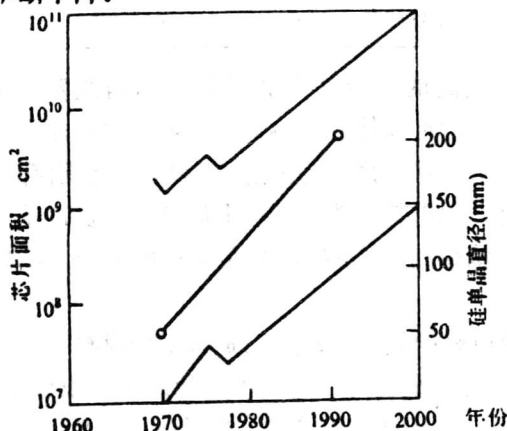


图 7 全世界单晶硅与Ⅲ-V族化合物半导体的增长趋势

集成电路材料的特点示于表 5，可以看出，GaAs 有极大的优越性，即开关速度比 Si 大千倍，工作温度有所提高，耗电量减少。更为突出地是在 GaAs 中激化的电子可以发光而成为激光源，成为激光探测器、光纤通讯、全息图象转换与光存储不可缺少的材料，也就是重要的光电子材料。