



曹春晓 郝应其 编著

材料世界的 天之骄子

—— 航空材料



清华大学出版社



暨南大学出版社

(京)新登字 158 号

图书在版编目(CIP)数据

材料世界的“天之骄子”——航空材料/曹春晓,郝应具编著. —北京:清华大学出版社;广州:暨南大学出版社,2002
(院士科普书系/路甬祥主编)
ISBN 7-302-05323-5

I. 材… II. ①曹… ②郝… III. 航空材料—普及读物
IV. V25-49

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 047167 号

出 版 者: 清华大学出版社(北京清华大学学研大厦,邮编 100084)
<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>
暨南大学出版社(广州天河,邮编 510630)
<http://www.jnu.edu.cn>

责任编辑: 宋成斌

印 刷 者: 北京市清华园胶印厂

发 行 者: 新华书店总店北京发行所

开 本: 850×1168 1/32 **印 张:** 7 25 **彩 页:** 2 **字 数:** 145 千字

版 次: 2002 年 9 月第 1 版 2002 年 9 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-302-05323-5/G·257

印 数: 0001~5000

定 价: 12.00 元

《院士科普书系》编委会(第二届)

编委会名誉主任 周光召 宋 健 朱光亚

编委会主任 路甬祥

编委会委员 (两院各学部主任、副主任)

陈佳洱 杨 乐 闵乃本 陈建生 周 恒

王佛松 白春礼 刘元方 朱道本 何鸣元

梁栋材 卢永根 陈可冀 匡廷云 朱作言

孙 枢 安芷生 李廷栋 汪品先 陈 颢

王大中 戴汝为 周炳琨 刘广均 杨叔子

钟万勰 关 桥 吴有生 刘大响 顾国彪

陆建勋 龚惠兴 吴 澄 李大东 汪旭光

陆钟武 王思敬 朱建士 郑健超 胡见义

陈厚群 陈肇元 崔俊芝 张锦秋 刘鸿亮

方智远 旭日干 周国泰 王正国 赵 铠

钟南山 桑国卫

编委会执行委员 郭传杰 常 平 钱文藻 罗荣兴

编委会办公室主任 罗荣兴(科学时报社)

副主任 周先路(中国科学院学部联合办公室)

白玉良(中国工程院学部工作部)

蔡鸿程(清华大学出版社)

周继武(暨南大学出版社)

总 策 划 罗荣兴 周继武 蔡鸿程

总 责 任 编 辑 周继武 蔡鸿程 宋成斌

提高全民族的科学素质

——序《院士科普书系》

人类走到了又一个千年之交。

人类的文明进程至少已有 6000 余年。地球上各个民族共同创造了人类文明的灿烂之花。中华文明同古埃及文明、古巴比伦文明、古印度文明、古希腊文明等一起，是人类文明的发源地。

15 世纪之前，以中华文明为代表的东方文明曾遥遥领先于当时的西方文明。从汉代到明代初期，中国的科学技术在世界上一直领先长达 14 个世纪以上。在那个时期，影响世界文明进程的重要发明中，相当部分是中华民族的贡献。

后来，中国逐渐落后了。中国为什么落后？近代从林则徐以来许多志士仁人就不断提出和思索这个历史课题。但都没有找到正确的答案。以毛泽东同志、邓小平同志为代表的中国共产党人作出了唯一正确的回答：中国落后，是由于生产力的落后和社会政治的腐朽。西方列强对中国的欺凌，更加剧了中国经济的落后和国家的衰败。而落后就要挨打。所以要进行革命，通过革命从根本上改变旧的生产关系和政

治上层建筑,为解放和发展生产力开辟道路。于是,就有了 80 多年前孙中山先生领导的辛亥革命,就有了 50 年前我们党领导的新民主主义革命的胜利,以及随后进行的社会主义革命的成功。无论是革命还是我们正在进行的社会主义改革,都是为了解放和发展生产力。

邓小平同志提出的“科学技术是第一生产力”的著名论断,使我们对科学技术在经济和社会发展中的地位与作用的认识,有了新的飞跃。我们应该运用这一真理性的认识,深刻总结以往科学技术发展的历史经验,把我国科技事业更好地推向前进。中国古代科技有过辉煌的成果,但也有不足,主要是没有形成实验科学传统和完整的学科体系,科学技术没有取得应有的社会地位,更缺乏通过科技促进社会生产力发展的动力和机制。为什么近代科学技术首先在文艺复兴后的欧洲出现,而未能在我国出现,这可能是原因之一吧。而且,我国历史上虽然有着伟大而丰富的文明成果和优良的文化传统,但相对说来,全社会的科学精神不足也是一个缺陷。鉴往开来,继承以往的优秀文化,弥补历史的不足,是当代中国人的社会责任。

在新的世纪中,中华民族将实现伟大的复兴。在一个占世界人口五分之一的发展中大国里,再用 50 年的时间基本实现现代化,这又是一项惊天动地的伟业。为实现这个光辉

的目标,我们应该充分发挥社会主义制度的优越性,坚持不懈地实施科教兴国战略。

科教兴国,全社会都要参与,科学家和教育家更应奋勇当先,在全社会带头弘扬科学精神,传播科学思想,倡导科学方法,普及科学知识。科教兴国也要抓好基本建设。编辑出版高质量的科普图书,就是一项基本建设,对于提高全民族的科学素质,是很有意义的。在《院士科普书系》出版之际,写了上面这些话,是为序。

A handwritten signature in black ink, reading '江泽民' (Jiang Zemin), written in a cursive style.

1999年12月23日

人民交给的课题

——写在《院士科普书系》出版之际

世界正在发生深刻的变化。这一变化是 20 世纪以来科学技术革命不断深入的必然结果。从马克思主义的观点看来,生产力的发展是人类社会发展与文明进步的根本动力;而“科学技术是第一生产力”,因此,科学技术是推动社会发展与文明进步的革命性力量。从生产力发展的阶段看,人类走过了农业经济时代、工业经济时代,正在进入知识经济时代。

知识经济时代,知识取代土地或资本成为生产力构成的第一要素。知识不同于土地或资本,不仅仅是一种物质的形态,知识同时还是一种精神的形态。知识,首先是科学技术知识,将不仅渗透到生产过程、流通过程等经济领域,同时还将渗透到政治、法律、外交、军事、教育、文化和社会生活等一切领域。可以说,在新的历史时期,一个国家、一个民族能否掌握当代最先进的科技知识以及这些科技知识在国民中普及的程度将决定其国力的强弱与社会文明程度的高低。科技创新与科普工作是关系到一个国家、一个民族兴衰

的大事。

对于我们科技工作者来说,我们的工作应当包含两个方面:发展科技与普及科技;或者说应当贯穿于知识的生产、传播及应用的全过程。我们所说的科普工作,不仅是普及科学知识,更应包括普及科学精神和科学方法。

我们的党和政府历来都十分重视科普工作。党的十五大更是把树立科学精神、掌握科学方法、普及科技知识作为实施科教兴国战略和社会主义文化建设的一项重要任务提到了全党、全国人民和全体科学工作者的面前。

正是在这样的背景下,1998年春由科学时报社(当时叫“中国科学报社”)提出创意,暨南大学出版社和清华大学出版社积极筹划,会同中国科学院学部联合办公室和中国工程院学部工作部,共同发起《院士科普书系》这一重大科普工程。

1998年6月,中国科学院与中国工程院“两院”院士大会改选各学部领导班子,《院士科普书系》编委会正式成立,各学部主任均为编委会委员。编委会办公室在广泛征求意见的基础上拟出150个“提议书目”,在“两院”院士大会上向1000多名院士发出题为《请科学家为21世纪写科普书》的“约稿信”,得到了院士们的热烈响应。在此后的半年多时间里,有176名院士同编委会办公室和出版社签订了175本书的写作出版协议,开始了《院士科普书系》艰辛的创作过程。

《院士科普书系》的定位是结合当代学科前沿和我国经济建设与社会发展的热点问题，普及科技知识、科学方法。科学性、知识性、实用性和趣味性是编写的总要求。

编写科普书对我国大多数院士来说是一个新课题。他们惯于撰写学术论文。如何把专业的知识和方法写成生动、有趣、有文采的科普读物，于科技知识中融入人文教育，不是一件容易的事。不少院士反映：写科普书比写学术专著还难。但院士们还是以感人的精神完成自己的书稿。在此过程中，科学时报社和中国科学院学部联合办公室、中国工程院学部工作部以及清华大学出版社、暨南大学出版社也付出了辛勤的劳动。

《院士科普书系》首辑终于出版了。这是人民交给科学家课题，科学家向人民交出答卷。江泽民总书记专门力《院士科普书系》撰写了序言，指出科普是科教兴国的基础工程，勉励科学家、教育家“在全社会带头弘扬科学精神，传播科学思想，倡导科学方法，普及科学知识”，充分表达了党的第一代领导集体对科普的重视，对提高全民族科技素质的殷殷期望。

《院士科普书系》将采取滚动出版的模式。一方面随着院士们的创作进程，成熟一批出版一批；另一方面随着科学技术的进步和创新，不断有新的题材由新的院士作者撰写。因此，《院士科普书系》将是一个长期的、系统的科普工程。

这一庞大的工程,不但需要院士们积极投入,还需要各界人士和广大读者的支持——对我们的选题和内容提出修订、完善的建议,帮助我们不断提高《院士科普书系》的水平与质量,使之成为国民科技素质教育的系统而经典的读本。在科学家群体撰写科普书方面,我们也要以此为起点为开端,参与国际竞争与合作,勇攀世界科普创作的高峰。

中国科学院院长
《院士科普书系》编委会主任

路甬祥

2000年1月8日

前 言

面对着飞速发展的航空技术,人们不禁发出“天涯咫尺”的赞叹,地球似乎在缩小,可以毫不夸张地说,无论世界上什么地方都可以朝发夕至。航空的发展在很大程度上依赖于材料科学的进步。为了让飞机在蓝天飞得更快、更高、更远和更灵活、更安全、更长寿,必然对航空材料这一材料世界的“天之骄子”提出越来越苛刻的要求,有时甚至是近乎“既要马儿好,又要马儿不吃草”的“无理”要求。也正缘于此,一些关键性航空材料达到的最新性能水平往往象征着材料世界的最高性能水平。

航空材料有哪些?它们是怎样发展过来的?各自有何特点?又是如何生产出来的呢?这些问题看似简单,要回答确非易事。首先遇到的困惑是材料分类问题,因为时至今日航空材料已发展为庞大的家族,成员繁杂,户籍不清。几十年来的教科书习惯地把航空材料分为金属材料和非金属材料两大类。随着材料科学的发展,出现了材料三大领域的提法,即把材料划分为金属材料、有机高分子材料和无机非金属材料三大类。然而,这种分类对于航空材料来说仍难满足需要。第一种情况是,不少航空材料在采用非传统的新技术后在特性上发生了重大变化,这些新技术伴生的新材料往往冠以呈现技术特性的名称,例如快速凝固合金、非晶态合金、纳米材料等;第二种情况是,为了满足航空专用要求而研制的具有特殊功能的材料也大量出现,如形状记忆合金、贮氢

合金、防弹材料、隐身材料等,它们不再以材料的基体而改用功能来命名;第三种情况是复合材料的问世,它们的基体和增强剂往往跨越两类材料,甚至三类并存。因此,本书的叙述不得不在既不脱离传统分类的框架、又尊重材料科学实际进展现状的基础上展开。

本书还试图结合飞机发展史对航空材料演变过程中一些有趣事件进行回顾,并根据文献资料对航空材料的未来作一些预测。希望广大的科普爱好者对本书的不足予以指正。

曹春晓

2000年1月16日

目 录

1 航空材料的发展简史	1
1.1 第一架飞机和它采用的材料	2
1.2 从木布结构机体过渡到全金属结构机体	5
1.3 发动机材料的演变	9
1.4 现代飞机选用的新材料	12
1.5 21 世纪的航空材料	15
 2 自强不息的金属结构材料	 19
2.1 轻而又轻的轻金属——铝合金和镁合金	20
2.2 强中自有强中手——结构钢和不锈钢	29
2.3 崛起的第三金属——钛合金	35
2.4 烈火金刚——高温合金	65
2.5 金属与金属结亲——金属间化合物	80
 3 高分子领域的三大家族	 87
3.1 金属材料的挑战者——塑料	89
3.2 靓丽的“纶”氏姐妹——合成纤维	92

3.3	软功不凡的能者——合成橡胶	96
4	古老而又年轻的陶瓷	102
4.1	精益求精——精陶瓷的工艺特点	104
4.2	任重道远——精陶瓷的航空应用	106
5	巧夺天工的复合材料	111
5.1	柔中有刚的树脂基复合材料	113
5.2	强强结合的金属基复合材料	123
5.3	取长补短的陶瓷基复合材料	129
5.4	独树一帜的碳 / 碳复合材料	132
6	神通广大的功能材料	135
6.1	机敏善变的形状记忆材料	137
6.2	吞吐自若的贮氢合金	145
6.3	防范严密的防弹材料	150
6.4	神秘莫测的隐身技术及隐身材料	155
6.5	一反常态的导电塑料	163
6.6	多才多能的信息陶瓷	166
6.7	肩负重任的刹车材料	169
7	新技术伴生的新材料	173
7.1	温柔驯顺的超塑性合金	174

7.2	以快取胜的快凝颗粒合金	182
7.3	似晶非晶的非晶态金属	189
7.4	微乎其微的纳米材料	192
7.5	腹中空空的空心微球	200
7.6	强度惊人的超细纤维	202
参考文献		206

1

航空材料的发展简史

最初用来制造飞机机体的材料是木材和纺织品,用来制造发动机的材料是碳钢。

现代飞机机体所用材料中金属材料占有较大比例,它们主要是铝合金、合金钢和钛合金。复合材料已成为现代飞机必不可少的材料,目前使用的复合材料以纤维增强树脂基复合材料为主。复合材料和钛合金在机体上使用的比例有逐年增加的趋势。

现代喷气式发动机上压气机部分主要用钛合金制造,铁基和镍基合金也占一定比例。燃烧室和涡轮部分主要用镍基高温合金。

1891年，德国人李林达制成第一架双曲翼滑翔机，开创了人类的第一次滑翔。

未来的飞机及其发动机在沿用已有先进材料的同时，金属间化合物、陶瓷及以它们为基体的复合材料，碳/碳复合材料，金属基复合材料和钛合金、铝合金等将获得正式应用或跃居重要地位。

1.1 第一架飞机和它采用的材料

人类飞行梦千年，在航空史上多少航空先驱者为这一绚丽的梦想献出了宝贵的生命，那些 2 000 多年前试验过靠人力扑翼飞行的探索者离我们已远去。到 1891 年，德国人李林达制成第一架双曲翼滑翔机，三年之后，他从 50m 高的山头向下滑翔了 350m，开创了人类的第一次滑翔。他是一个孜孜不倦的飞行家，三年之内飘飞了 2 000 多次，拍摄了许多滑翔照片，积累了许多第一手的宝贵资料，对后来的飞机发明做出了贡献。他不幸于 1896 年在一次飘飞中失事牺牲（图 1.1）。

就在这一年，美国的莱特兄弟（哥哥威尔伯·莱特，弟弟奥维尔·莱特）开始研究飞行。他们做了一架滑翔机，像一个大风筝一样迎风放入空中（图 1.2），后来又制成一架滑翔机，飞行时人体俯伏在滑翔机上，用绳索操纵。在机翼的前面还有一对小翼，改进了飞行时的稳定性。这是通过风筝和风洞试验后才确定了的，为以后制出第一架带动力装置的真正的飞机奠定了基础。1900 年至 1902 年他们先后制造了三架滑翔机。

1903 年莱特兄弟的“飞行者 1 号”飞机制造成功。这是