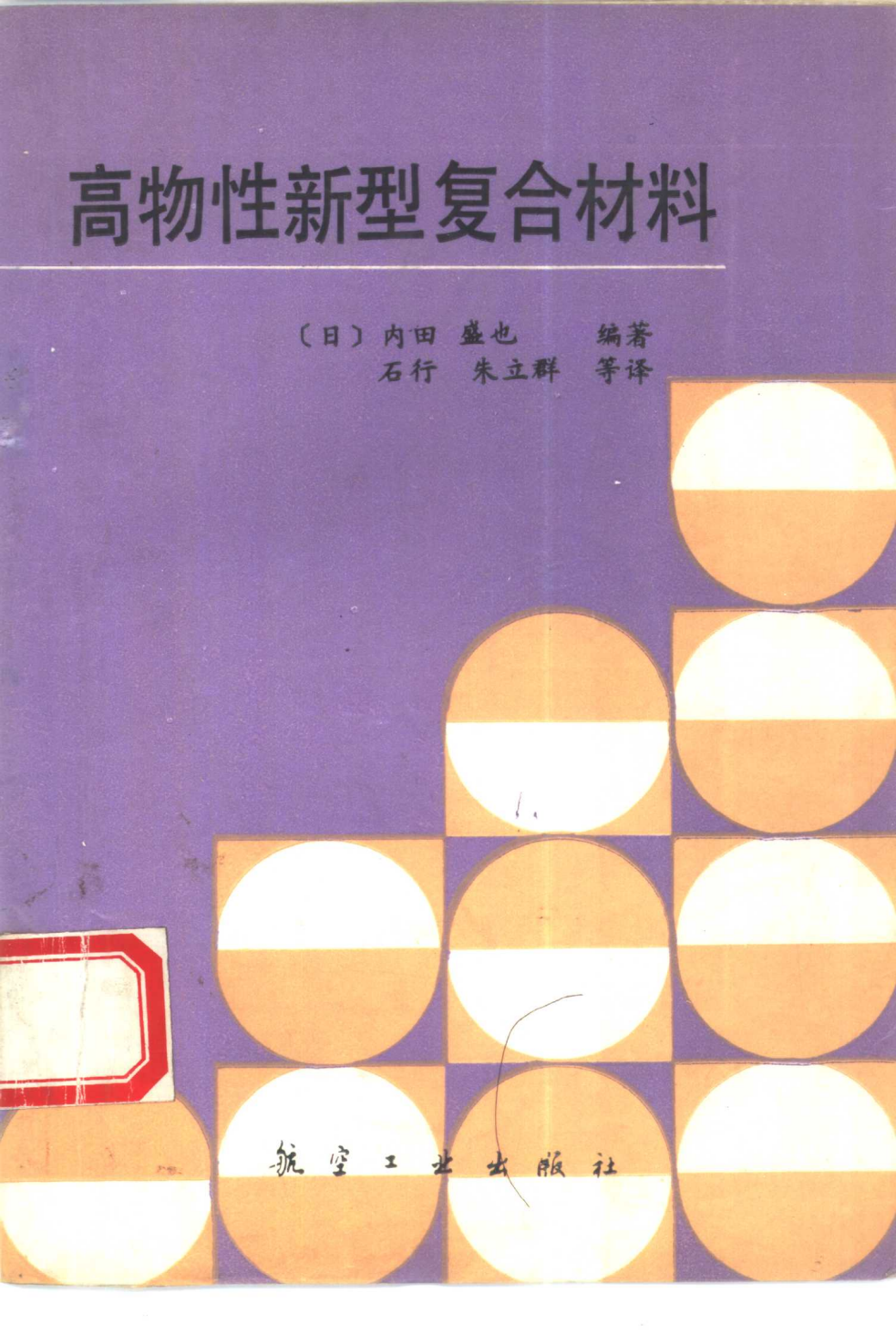


高物性新型复合材料

〔日〕内田 盛也 编著
石行 朱立群 等译



航空工业出版社

高物性新型复合材料

〔日〕 内田 盛也 编著

石 行 朱立群 等译

孙 菊 芳 校 校

航空工业出版社

1992

(京) 新登字161号

内 容 简 介

本书比较全面和系统地介绍了高物性新型(尖端)复合材料的基本理论及其力学和物理性能,并介绍了在实际应用中的设计、制造工艺、性能试验及有关的评价。本书从用户的立场,从实用化的观点阐述了这些高物性新型复合材料在汽车、飞机、导弹、宇航、体育用品等方面的应用技术和存在的问题及对未来的展望。翻译后全书改用国际单位(SI)制和中华人民共和国法定计量单位。

本书可供从事复合材料及材料科学的科研人员和工程技术人员参考,也可作为高等院校有关专业师生的参考书。

高物性新型复合材料

(日) 内田 盛也 编著

石 行 朱立群 等译

孙 菊 芳 审校

航空工业出版社出版发行

(北京市安定门外小关东里14号)

一邮政编码: 100029—

全国各地新华书店经售

航空工业出版社印刷厂印刷

1992年8月第1版

1992年8月第1次印刷

开本: 787×1092毫米 1/32 印张: 8.4375

印数: 1—2200 字数: 191千字

ISBN 7-80046-423-7/G·060

定价: 7.80元

译者的话

人类社会的进步，始终是同当时新材料的发明与应用密切相关的，人类的文明发展史，曾经用新材料的出现来作为划分时代的标志。可以预见，复合材料尤其是新型(尖端)复合材料的开发和利用，必将加速实现我国的“四个现代化”建设，必将推进人类文明的发展。

复合材料是现代科学技术发展的产物，它既是多种学科成果的综合，又与其他学科相互渗透，相辅相成，相互促进。近二十年来，复合材料在航空、航天、交通、电子、机械、建筑、化工、能源等部门得到日益广泛的应用，现在已推广应用于生产和生活的各个领域，已成为现代社会不可缺少的重要物质基础。而新材料的研制和开发，已成为新技术革命的前沿和支柱。

复合材料之所以受到人们普遍的重视，是由于它与普通材料相比，具有明显的优点，其最突出的优点是比强度、比刚度高。作为结构件的最大优点是它具有可设计性，即可以根据设计对象及使用环境的特殊需要，通过适当地选择增强纤维、基体材料和加工方法，恰当地安排增强纤维的位置和取向等，使结构能很好地满足设计要求。因此，复合材料尤其是高性能复合材料在现代科学技术中得到了广泛应用。

国内外已出版的复合材料科学方面的书籍不少，但比较系统地介绍高物性尖端复合材料的应用及其力学和物理性能的书籍却少见。而内田盛也编著的《先端複合材料高度物性をめざして》一书的特点之一正好弥补了这一不足。本书既

适合于从事这方面工作的科技人员作为工程手册查阅，也可以作为高等院校有关专业的教材或教学参考书。为此我们翻译了这本书。原书中的单位很不统一，且多数采用了非国际单位制。为了便于读者阅读和使用，审校者将全书单位都换算成国际单位制或我国的法定计量单位。

本书由石行、朱立群、范相生、李晓波翻译，全书由石行统稿，最后由孙菊芳同志审校并进行了单位换算。

张西忠、辛美丽、李驰同志为本书的翻译也作了有益的贡献。

由于时间仓促，水平有限，翻译不当或错误之处，殷切期望读者指正。

译者

1990年8月

序 言

集中了材料生产者和学术研究者的材料联合会与日本经济新闻社，在日光市池袋中央会堂共同主办一年一度的“新材料展览”。1984年11月为第一次，为期四天共有57 728人参加。1985年10月为第二次，到会81 837人。展览对促进尖端材料科技情报的交流产生了很大的作用。事实证明，新材料是步入21世纪新产业的技术革新的关键，这是日本需要解决的一个紧迫问题。

在美国，生产和科研单位与政府一起，集中优势力量向新材料挑战，他们一方面与开拓者的工作结合起来，一方面把这种新产业和国家安全保障结合起来共同培育和发展。而在电子领域里的新材料方面，由于日本具有较强的生产能力，正以比较顺利的方式进行研究开发。但对尖端复合材料，则应给予足够的重视，还要下大力气进行研究开发。1985年3月，材料联合会组织了美国尖端材料产业情况调查团，对各种情况进行调查。调查团的主要命题是：（1）在参加日本宇宙基地建设中，尖端复合材料所处的位置；（2）作为将来的飞机结构材料，预测铝锂合金与复合材料竞争的情况；（3）作为汽车结构材料，采用碳纤维增强复合材料的可能性及其条件等。

调查团团长在访美时邀请了不同行业、不同专业的各方面人士，并肯请用户对调查给予协作。通过调查搜集了大量有益情报，经过整理汇总，编制成本书。本书第二、五、六章由中村務君编写；第三、四章由铃木正彦君编写；第一、

七、八章由笔者编写。

全部汇总资料的整理工作，得到了工业调查会出版部的依田登先生的大力协作，在此表示感谢。对其他文献、资料的引用以及各方面的配合也表示感谢。

目 录

译者的话

序言

第一章 工业革新与尖端复合材料	(1)
1.1 尖端材料是工业革新的关键.....	(1)
1.2 材料工业的结构变化.....	(3)
1.3 纤维业与尖端复合材料.....	(6)
第二章 有机类尖端复合材料	(10)
2.1 增强用高性能纤维.....	(10)
2.2 有机类尖端复合材料的基体树脂.....	(16)
2.3 有机类尖端复合材料的成形技术.....	(18)
2.4 碳纤维增强环氧树脂预浸渍材料质量的 评估.....	(22)
2.5 碳纤维增强塑料 (CFRP).....	(23)
2.6 芳纶纤维增强塑料 (KFRP).....	(46)
第三章 无机类尖端复合材料 (I)	
—无机类纤维及其特性—	(52)
3.1 前言.....	(52)
3.2 玻璃纤维.....	(53)
3.3 硼纤维.....	(56)
3.4 碳纤维.....	(60)
3.5 碳化硅纤维.....	(67)
3.6 硅—钛—碳—氧纤维.....	(69)
3.7 氧化铝纤维.....	(71)

3.8	无机类晶须	(74)
第四章 无机类尖端复合材料 (I)		
	—无机纤维增强复合材料—	(80)
4.1	前言	(80)
4.2	碳纤维增强复合材料	(81)
4.3	碳/碳 (C/C) 复合材料	(85)
4.4	碳纤维/铝复合材料	(93)
4.5	硼纤维增强复合材料	(95)
4.6	碳化硅纤维增强复合材料	(102)
4.7	氧化铝纤维增强复合材料	(107)
4.8	晶须增强复合材料	(112)
第五章 汽车与尖端复合材料		
5.1	分离大梁结构与整体结构	(117)
5.2	汽车结构材料的变迁	(118)
5.3	汽车中使用的塑料	(120)
5.4	塑料材料高性能化的方向	(124)
5.5	汽车用结构材料的成形技术	(132)
5.6	尖端有机复合材料在汽车上的应用	(150)
第六章 飞机与尖端复合材料		
6.1	材料的重要性与飞机工业的现状	(156)
6.2	适用于飞机的复合材料	(165)
6.3	用于军机的尖端有机复合材料	(168)
6.4	适用于民用飞机的尖端有机复合材料	(180)
6.5	尖端有机复合材料成形技术的进展	(198)
6.6	尖端复合材料今后在航空领域里的发展	(202)
第七章 宇宙开发与尖端复合材料		
7.1	耐热瓦的开发	(205)

7.2	宇宙飞船的结构材料.....	(209)
7.3	失重状态下的材料研究.....	(212)
7.4	宇宙空间中的材料实验.....	(218)
7.5	宇宙基地的建设.....	(222)
7.6	供宇宙基地使用的复合材料.....	(233)
第八章	未来尖端复合材料的展望	(243)
8.1	美国政府的研究与开发.....	(243)
8.2	对尖端复合材料产业的扶植.....	(249)
8.3	结束语.....	(252)
参考文献		(256)

第一章 工业革新与尖端复合材料

1.1 尖端材料是工业革新的关键

自有人类以来，新材料的发现和发展，都对人类社会产生划时代的影响。我们认为，人类生产的发展无疑是从石器时代开始的，随着人类文明的发展，又产生了青铜器时代，铁器时代。可以说早在公元前1000多年前，新材料就反映了人类社会的进步。在人类社会向前发展的同时，迎来了18世纪的产业革命。1769年瓦特应用金属材料能够耐热的特点，改良了蒸汽机，使炼铁工业蓬蓬勃勃地发展起来。这样，蒸汽机的时代来到了。

当时，英国人垄断了世界经济市场，铁路建设成了引导经济发展的原动力，蒸汽船的发展又促进了殖民地贸易。由于炼铁工业过多地使用木材为燃料，后来发展到利用煤炼铁的技术，煤还作为有机化学的资源。为了抗衡染料贸易的经济魅力而发明了合成染料，并形成了有机化学的工业时代。有机化学的发展，为煤炭化学、电化学工业的发展提供了牢固的基础。1927年赫尔曼·施陶丁格博士的巨型分子学说的诞生，给今天的高分子化学工业提供了科学依据。

随着化学工业的进步以及石油工业的发展，出现了石油化学时代，与高分子科学相结合，形成了巨大的高分子合成材料工业。

20世纪初叶，铁的生产量能够满足国家的需要，因而使

金属工业得到了进一步发展，产生了内燃机。1910年福特发明了批量生产汽车的流水线，进一步为商业提供了消费市场。

汽车工业的进步，为人类提供了内燃机，在运输方面给材料的可靠性、设计体系以及部件的组合加工等打下了技术基础。而莱特兄弟的飞机和铝合金的发明，在建立汽车工业体制中产生了巨大影响，并使运输机商业化的时代到来。汽车大王福特也在飞机工业初期的技术开发中做出了贡献，但由于不幸的坠落事故放弃了工业化生产。现在美国底特律博物馆的所在地，就是那时候的机场遗址。飞机工业的进步，成为火箭问世的技术基础，而各种耐热材料的发明，为宇宙的开发提供了可能。

在电磁领域，由镍、钨制做的真空管，促进了电子工业的进步。在此基础上，由于锗和硅材料的利用产生了晶体管时代，由于感光性树脂等精细加工技术的进步，发明了集成电路、大规模集成电路、超大规模集成电路，并且实现了今天的电子文明时代。

在能源领域里，原子能发电中的铀浓缩、放射能控制等方面的技术与材料特性的研究和技术产业的成功两者是相辅相成的。可见，各个时期尖端材料的发明是与当时社会的需要相适应的。回顾过去，可以预见新的尖端材料是产业革新的关键，见图1.1所示。

1980年，全世界的钢铁产量与塑料产量都满足了需求，超过了合成橡胶与天然橡胶的消费量，天然纤维和化学纤维在全世界的生产量大体相等，所以可以说是进入了材料发展的新时期。

在石油文明发展的同时，能源消耗量大幅度增长，在能

源消费繁荣的情况下，形成了合成材料与天然材料共存的局面。可以预见，人类正在进入以经济繁荣为目的的新材料时代。

材料科学的进步，使新材料的发展成为可能。根据原子、分子的功能及其反映出的材料特性，开发出高性能材料是可能的。而且，这些新材料的功能和性能，将会在许多领域里得到有效的应用。可参看图1.1所示的那些情况。

本书不仅侧重于阐述尖端材料中的高性能材料，并且以汽车、航空航天技术发展过程中所用的复合结构材料为重点进行叙述。

1.2 材料工业的结构变化

图 1.2 所示是从资源到产品市场的生产体系与技术结构及其围绕着社会环境的变化而变化的关系。日本从世界各地进口质量最好，价钱最低的原料，然后，选定消费基地和加工出口基地并不断地开发沿海工业地区。扩大作为原料工业的石油精加工工业，首先需要重质油，在电力、钢铁、水泥产业中也是需要的；其次在造船、家用电器、汽车等工业及港湾、道路、建筑等产业也需要；另外，作为轻质油，首先需要汽油、煤油等燃料；石油化学工业更需要。扩大各种化学产品、纤维、塑料橡胶及其加工业，使日本已发展成为占世界国民生产总值百分之十的国家。这主要是依靠中东价格便宜的石油资源发展起来的。对于美国和欧洲的产业，原材料成本的优越性与所处地理位置有很大关系。然而，由于石油危机而引起的石油价格的上涨，已失去了地理位置的优

越性。以往的原材料工业产品，由于利用了元素或化合物的机械性质，使物质形态的变化转变为产品，而且相同的化学成分，不论在世界的哪个地方制作，都能成为相同的产品。为此，怎样使自己制造出来的产品物美价廉，在国际市场上有竞争力，就成了经营上的最大课题。

石油危机以前，是资源丰富、物价稳定，并在大的消费基地附近建成了大的工厂，用世界上最低廉的资源，采用为降低运费而制造的大型油船和专用运输船，既可降低工业产品的成本，又是非常有利的事情。这样的环境对于日本最为有利，所以，在日本的沿海工业地区，生产原材料的大工厂林立。将来，在世界的任何地方都能仿照制做相同性质的材料，为此也得把工厂建立在资源丰富、价格低廉的地方，只需把产品运到消费地就行了。需要指出的是使用高价的资源和能源太浪费，将会发生社会结构的逆转从而使产业倒闭。

日本的社会结构，从战后开始，在寻求富裕的衣、食、住基本原料的供给方面已取得成功，现已是达到人均超过一万美元的国家。在生活方面与价值观的变化相适应的是与生活有关的产业的多样化；而与生活领域的扩大相适应的是向着航天、航空、航海方面发展。为进一步寻求人类的身体健康、知识领域的扩大，日本正致力于生命科学、信息交流、电子工业方面的发展。

在适应这种产业变化的技术革新中，与其说要了解物理学、化学、生物学的边缘领域，不如说要了解整个领域的物理特性，这正是进入新时代的关键。在加工产业技术体系方面，操作和机械设备是基本技术和基本设备，过去依赖人工的方面很多，而现在由于采用机电设备一体化，使工厂生产进入了自动化、机械化以及全自动化的时期。对于这样的技

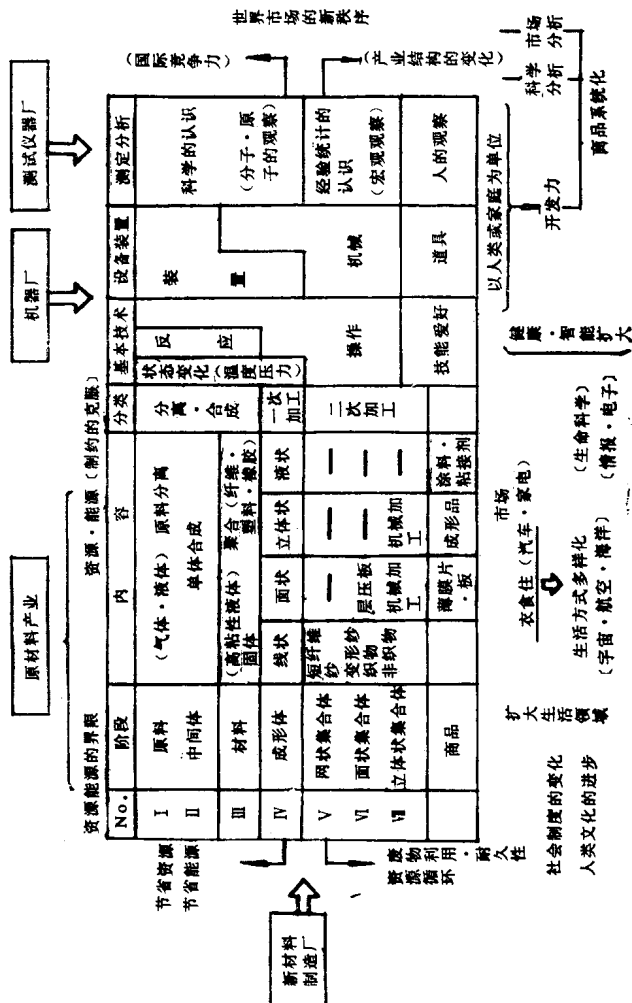


图 1.2 材料产业系统

术革新，决策中关键的一条是材料科学的进步。在现代技术革新中，由于物理学与化学的融合，通过电子、原子、分子的特性来获取化学产品是完全可能的。当今技术革新的关键可以说是电子，即研究新材料中电子的功能。所以，为了能够应用新技术，需要高速地发展电子工业。

新材料的发展，一方面取决于电子、原子、分子微观结构的设计，而另一方面则是人类应利用已经获得的材料的加工形态。这方面的工作正向着实用化与商品开发的方向发展。当前，由于掌握了元素及化合物所具有的化学和物理性能的评估方法，并随着数学分析仪器和分析方法的迅速进步，使得新材料产业向着技术革新的方面发展。

材料的电、磁、光学性能，促进了电子通信产业的革命，机械及热性能工程又促进了航天、航空、汽车、船舶、运输机械等产业的革命。

新材料有无机材料（金属、非金属）、有机材料和复合材料（高分子、金属陶瓷）。复合材料包括作为基体材料的无机和有机材料，以及作为增强材料的纤维。尖端复合材料之所以发展很快，首先应归功于增强材料开发的成功，进而将增强材料的特性有效地分布于基体树脂中。从而生产出三维空间结构材料。

尖端复合材料的核心要涉及到作为增强材料纤维的技术进步问题。

1.3 纤维业与尖端复合材料

各国都非常重视尖端技术产业的发展壮大，而在尖端技

术产业中新材料产业的发展普遍受到关注，其中纤维业的发展对新材料产业的发展起着重要作用。在新材料产业中，尖端复合材料是最有发展前途的材料。

新材料研究会把新材料定义为：金属、无机、有机原料以及它们的组合，使用新的制造技术或商业化技术，得到它们各自本身所没有的新的绝对价值（性能、功能、特性），并产生一定的社会价值或用途。新材料的开发，就是要将原材料、零件、商品设计一体化，由图1.2可见，所有这一切，必须积极动员所有科学技术力量和产业的生产手段，才有可能使开发工作取得成功。在开发周期短的情况下，尽管是品种多小批量生产，也必须继续向高功能和高性能进军。

纤维工业应该把吸水性要求作为商品开发的最根本的任务。但是，新材料在实用化上有不少困难，其中包括材料制造厂与材料组成的商品体系之间以及材料制造厂与用户之间的技术术语的差异；用户方面的机械设备及生产组织者对引入新材料的保守意识；另外，在改造现有材料和引入新材料时也有阻力等。

利用机械设备和组织管理系统，企业本来可以利用工程物理学基础，制定开发产品的要素和组织生产的进度表。但是，对新材料的开发成本、可靠性的确定等需要很长的时间，而且难以预测的事情很多，因而制定进度表是很困难的。为了解决这种问题，企业间的合作是非常必要的。图1.3所示为合成纤维中新纤维开发的动向。

衣料行业中发展起来的纤维技术，也可以推广到工业纤维，并促进各种新纤维的开发。

在三大合成纤维中，由于聚酯是属于芳香族直链结构，可以制成幅面宽度满足杨氏模量的纤维。短纤维有可能与高