

# 新型复合材料力学 机理及其应用

张 锦 张乃恭 编著

北京航空航天大学出版社

V 258  
216

# 新型复合材料力学机理及其应用

张 锦 张乃恭 编著

北京航空航天大学出版社

(京)新登字166号

## 内 容 简 介

本文是以当代新型复合材料在航空、航天飞行器及其发动机中的应用为主线而编写的。书中陈述了：包括金属微观机理在内的各种材料特性；长短纤维、晶须、粒子等增强复合材料中的各向异性弹性力学、细观力学、湿热效应、宏观力学的基础理论以及在梁板壳等典型结构中的具体应用。以及发展中的MMC；包括结晶可控型合金、形状记忆合金、防振合金、超级耐热合金等的金属间化合物；新型陶瓷复合材料的基本力学性质、断裂强度、统计强度理论、热强度、疲劳强度和蠕变机理等基本力学性质。

本书取材新颖，内容广泛，可供航空、航天、核能、机械、造船、化工以及陶瓷工程等有关专业的大学生、研究生和有关的科研人员和工程师们应用和参考。

### 新型复合材料力学机理及其应用

XINXING FUHECAILIAOLIXUEJILI JIQI YINGYONG

张 锦 张乃恭 编著

责任编辑 陶金福

北京航空航天大学出版社出版

新华书店总店科技发行所发行 各地新华书店经销

北京农业工程大学印刷厂印装

787×1092 1/16 印张：18.25 字数：467千字

1993年3月第一版，1993年3月第一次印刷 印数：2500册

ISBN 7-81012-864-5/TB·051 定价：14.70元

## 序 1

这部著作，对于新型复合材料作了广泛、深入、针对性很强的论述，到目前为止在国内外还没看到哪一本书能与它相比。应该说，它是现今有关复合材料力学和结构这类书籍的佼佼者。它既论述了国内外复合材料的新成就，也反映了当前国际上复合材料发展的前沿课题。同时也说明，如果作者没有扎实深厚的理论基础和宽广渊博的现代材料知识以及远见卓识的眼光和付出辛勤劳动的汗水，写成此书，也是很难作到的。

众所周知，现代经济建设的依托，是迅猛发展的高新科技，而高新科技中有电子技术、空间技术、新型材料、能源开发、海洋开发以及生物工程等。复合材料不但是它们的成员之一，而且是它们赖以发展的物质基础。还要提出的是，陶瓷复合材料又是近年来高性能复合材料结构在许多军用、民用产品方面，特别是航空、航天、航海工程上大量采用而成为新型复合材料的一个重要发展趋势。此书中，用了相当多的章节，论述了陶瓷复合材料在国内外的最新研究成就，它起到了承前启后，总结过去，开辟未来的作用，从而给读者提供了领新悟异、分忧解愁的极大方便。

由于实际的需要和科学技术的突飞猛进，新型复合材料正向高比强度、高比刚度、高比韧性、耐高温、耐腐蚀、耐冲击、抗疲劳、抗断裂等多方面发展。这些独特的性能，已经使它的应用范围，日益开拓和扩大，从而复合材料与其它高新技术的发展和应情况，标志着一个国家的科技水平、经济优势和国防实力。因此我国的复合材料科技工作者，必须从长远的战略高度和近期的建设需要，自力更生地发展我国的新型复合材料。我国虽然已经有了一支可贵的教育与科研队伍，但是还很不能满足建设的要求，所以有能力的科技工作者，应该力所能及和实事求是地著书立说，用以扩大视野、激发思考能力，培养青年一代迅速成长，使他们成为国家栋梁之才。这是时代赋予我们的历史使命，我们不能推卸责任。因此，这部著作的编写，更显出它的重要性。它将为传播复合材料这一门高新科学技术起到它应有的作用，必然也会受到读者的欢迎。

我今天仅向读者推荐这一本有益的著作，希望把它作为手头上的教科书和科研参考资料。我作为一个科技工作者，谢谢作者为我国科技发展和进步所作的努力，也为读者能够得到如此的好书而高兴。

中国复合材料学会理事长 王俊奎

91.11.26

## 序 2

70年代初期，我在美国麻省理工学院航空航天学系开过在本系首创的复合材料力学的课。当时连讨论一些最基本的课题，如估计纤维增强材料的强度，和计算复合材料层合板刚性的方法等，都要从一些航空航天方面的研究所的报告中去取材。可以说，在当时根本没有复合材料力学的教科书供我们采用。这二十年以来，确实已经出版了几本关于复合材料力学的教科书。但是我觉得由张锦和张乃恭两位作者编著的这本《新型复合材料力学机理和应用》，才既是给学习复合材料力学的人们的一本非常完备的教科书，又是给在这一方面搞科研的人们的一本重要参考。

从本书的大纲来看，作者们不但在纤维材料和一般的层合结构的强度和特性等问题上都给了非常完整的论述，对于现今非常热门的陶瓷材料的性能也有非常详细而且时新的叙述。这本书的书名用了“新型”两个字，确实是非常恰当的。

美国麻省理工学院宇航系教授

卞学镛

北京航空航天大学名誉教授

1992年2月

# 前 言

复合材料是一种新型材料，它具有强度高、刚度大、重量轻等优点。它可根据使用条件的要求进行设计，以满足各种特殊用途，从而极大地提高工程结构的效能。近20多年来，复合材料已经得到飞速发展。它最初在航空、航天等尖端技术领域显示其优越性，继而在建筑、机械、汽车、能源、化工、造船、生物工程、医疗器械和体育器材等部门得到日益广泛的应用。国内、外许多高等院校已将复合材料力学列为本科生及研究生的课程。在复合材料蓬勃发展和广泛使用的今天，迫切需要一本能反映该领域国内、外最新成就和动向的书籍。为此，作者张锦教授基于在美国麻省理工学院宇航系从事复合材料桨扇叶片力学分析的经验 and 在美国工作数年所收集的有关资料，为北京航空航天大学动力系博士与硕士研究生开设了《新型复合材料力学机理》的课程与中国科学院空间科学与应用研究中心研究员张乃恭合编了教材。本书是在授课讲稿及所编教材基础上加以修改、扩展而成的。

本书是以新型复合材料如纤维（包括短纤维、晶须）增强复合材料、粒子增强复合材料、高温结构陶瓷复合材料等为主，且对金属基体的复合材料（MMC）、金属间化合物（包括结晶可控材料、形状记忆和防振型功能材料）及陶瓷复合材料均给予较详细的介绍与分析。书中陈述了各种材料特性、各向异性弹性力学、宏观力学、细观力学、结构陶瓷力学的基本原理及它们在航空、航天飞行器及其发动机中的应用概况。

本书共分十四章。

第一章，概论。以新型航空航天飞行器及其发动机为背景，综述了新型复合材料及其力学研究的发展概况与动向。

第二章，介绍了金属与复合材料的材料特性。以复合材料的技术体系与分类来展示材料特性。

第三、四、五章，除对各向异性弹性体的弹性力学基本方程，连续体的应力应变场及其本构关系，作了较详尽的分析外，并分析了单层板的弹性力学特性，侧重于各向异性体弹性力学的特点。从层合板的弹性特性出发，对各种形式各向异性单层板及层合板的刚性作了仔细的分析，并以实例展示层合板强度分析的特点。

第六章，从细观力学出发，叙述复合材料的各种特性，并突出长纤维、短纤维、粒子弥散型等的弹性特性分析。

第七章，讨论了复合材料的湿热效应。从宏观力学和细观力学介绍了各种模化和分析的方法并对残余应力进行了分析。

第八、九、十章，以各向异性梁、板、壳为分析对象，在不同载荷作用下展示了力学性质，介绍了各种分析方法、近似理论及修正公式。对于振动、稳定性及屈曲问题也作了分析及计算方法的介绍。各章均附有实例，以便于学习。

第十一章，介绍了金属间化合物、金属基复合材料、形状记忆合金、伪弹性合金、防振合金等功能性复合材料，同时介绍了涂层材料、定向凝固型合金、耐热超级合金、石墨纤维

增强金属基体材料等的发展现状与力学机理。对金属基复合材料作了专门的力学分析。

第十二、十三、十四章，专门对陶瓷复合材料作了较详细的分析。从它的发展现状、基本特性、热特性到其断裂与增韧均作了介绍，并对陶瓷材料的机械疲劳、热疲劳及其与断裂的相互作用、蠕变现象、过程及分析方法均作了分析。

本书三、四、五、八、九、十各章由张锦编著；第一、二、六、七、十一、十二、十三、十四各章由张乃恭编著。

由于作者水平有限，谬误之处敬请读者指正。本书承蒙聂景旭教授、赵敬世教授及周施真博士等人作了大量校审工作，作者谨向他们表示由衷的谢意。

张 锦 张乃恭

1992.4

# 目 录

序 1  
序 2  
前 言

## 第一章 概 论

§ 1-1 引 言 .....	(1)
§ 1-2 航空、航天技术与新型复合材料 .....	(2)
一、轻 .....	(5)
二、热 .....	(6)
§ 1-3 新型材料的力学发展动向 .....	(8)
一、复合性 .....	(9)
二、多学科交叉性 .....	(10)
三、界面性 .....	(11)
四、断裂与非线性 .....	(11)
五、热特性 .....	(12)
六、环境特性 .....	(12)

## 第二章 金属与复合材料的材料特性

§ 2-1 金属材料的微观特性 .....	(14)
一、晶格的周期性 .....	(14)
二、几何性 .....	(15)
三、对称性和方向性 .....	(15)
四、晶体的结合力 .....	(16)
五、晶面角守恒特性 .....	(17)
六、各向异性 .....	(17)
七、解理面 .....	(17)
八、有一定的熔点 .....	(17)
§ 2-2 复合材料 (CM) 的分类及其材料特性 .....	(18)
一、CM的技术体系 .....	(18)
二、CM的分类 .....	(18)
三、CM特性 .....	(18)
§ 2-3 复合理论 (CT) .....	(25)
一、混合定律 .....	(25)



二、增强系数 $F$ .....	(27)
三、复合理论中的平均应力与平均应变 .....	(27)
§ 2-4 CM的界面与浸润性 .....	(28)
§ 2-5 CM的疲劳和蠕变 .....	(30)

### 第三章 各向异性体弹性力学基本方程

§ 3-1 连续体的应力状态 .....	(32)
一、应力分量和应力张量 .....	(32)
二、平衡微分方程 .....	(33)
三、斜面应力 .....	(34)
四、应力转轴公式 .....	(34)
§ 3-2 连续体的应变 .....	(36)
一、位移和位移分量 .....	(36)
二、应变分量和应变张量 .....	(37)
三、斜向应变 .....	(38)
四、应变转轴公式 .....	(39)
§ 3-3 应力和应变的关系 .....	(40)
一、广义虎克定律 .....	(40)
二、应变位能 .....	(41)
三、均质弹性体的弹性特性 .....	(43)
四、弹性对称 .....	(44)
五、弹性系数的转轴公式 .....	(50)
六、正交异性体的弹性系数 .....	(51)

### 第四章 单层板的弹性特性及强度理论

§ 4-1 单层板的弹性特性 .....	(54)
一、单层板弹性主方向的弹性特性 .....	(54)
二、单层板非弹性主方向的弹性特性 .....	(56)
三、单层板弹性系数的方向性 .....	(60)
四、交叉效应与交叉系数 .....	(61)
§ 4-2 单层板的强度理论 .....	(63)
一、宏观强度理论的概念 .....	(63)
二、最大应力理论和最大应变理论 .....	(65)
三、蔡-希尔(Tsai-Hill)理论 .....	(66)
四、霍夫曼(Hoffma)准则 .....	(67)
五、蔡-吴(Tsai-Wu)张量理论 .....	(68)
§ 4-3 单层板强度方向性与各种强度理论的比较 .....	(73)

## 第五章 层合板的弹性特性及强度

§ 5-1 概述.....	(77)
一、层合板的特点.....	(77)
二、层合板的标记.....	(77)
§ 5-2 一般层合板的弹性特性 .....	(78)
一、变形分析.....	(79)
二、层合板的内力表达式.....	(80)
三、一般层合板的弹性特性.....	(81)
§ 5-3 单层板的刚度 .....	(86)
一、各向同性单层板.....	(86)
二、横观各向同性单层板.....	(86)
三、参考轴与主轴一致的正交异性单层板.....	(87)
四、参考轴与主轴不一致的正交异性单层板.....	(87)
§ 5-4 对称层合板的刚度 .....	(88)
一、各向同性组成的对称层合板.....	(89)
二、对称正交铺设层合板.....	(89)
三、规则对称角铺设层合板.....	(90)
§ 5-5 某些非对称层合板的刚度 .....	(91)
一、规则非对称正交铺设层合板.....	(91)
二、反对称层合板.....	(93)
三、无矩层合板.....	(95)
§ 5-6 层合板的强度分析 .....	(97)
一、概述.....	(97)
二、层合板各层应力、应变分析.....	(98)
三、强度分析.....	(98)
§ 5-7 层间应力与层间剥离 .....	(104)
一、层间应力.....	(104)
二、层间剥离.....	(106)

## 第六章 复合材料的细观力学

§ 6-1 力学分析方法 .....	(109)
§ 6-2 复合材料的弹性性质 .....	(110)
一、假设、模型与方法.....	(110)
二、CM的密度、应变、应力与应变能密度 .....	(112)
三、弹性系数.....	(113)
§ 6-3 复合材料强度的细观力学 .....	(123)
一、连续纤维单向CM的强度 .....	(123)

二、不连续纤维单向CM的强度 .....	(127)
----------------------	-------

## 第七章 复合材料(CM)的湿热效应

§ 7-1 CM湿热效应的细观力学 .....	(130)
一、引言 .....	(130)
二、材料的湿热效应 .....	(130)
三、考虑湿热效应时的本构关系 .....	(132)
四、CM湿热效应的分析方法 .....	(133)
五、界面中的热膨胀系数 $\alpha$ .....	(137)
§ 7-2 CM湿热效应的宏观力学 .....	(139)
一、单向材料的湿热膨胀系数 .....	(139)
二、层合材料的湿热膨胀系数 .....	(142)
§ 7-3 中面和厚度方向的湿热膨胀系数 .....	(145)
一、中面内的湿热膨胀系数 .....	(145)
二、厚度方向的热膨胀系数 .....	(146)
§ 7-4 残余应力 .....	(147)

## 第八章 各向异性梁

§ 8-1 各向异性体的弹性平面问题 .....	(149)
一、平面应变问题 .....	(149)
二、广义平面应力问题 .....	(151)
三、圆柱弹性体的平面问题 .....	(155)
§ 8-2 各向异性梁的弯曲 .....	(156)
一、自由端承受横向力的悬臂梁的弯曲 .....	(156)
二、受均布载荷简支梁的弯曲 .....	(157)
三、任意横向载荷作用下梁的弯曲 .....	(158)
§ 8-3 各向异性梁的弯曲-扭转耦合 .....	(163)

## 第九章 各向异性板的弯曲、振动与稳定性

§ 9-1 引言 .....	(167)
§ 9-2 各向异性板的经典理论 .....	(168)
§ 9-3 圆柱极坐标下各向异性圆板的弯曲 .....	(175)
§ 9-4 层合板的弯曲 .....	(180)
§ 9-5 层合板的屈曲、稳定和振动 .....	(183)
§ 9-6 层合板的振动 .....	(186)

## 第十章 各向异性壳的弯曲、振动与稳定性

§ 10-1 引言 .....	(190)
-----------------	-------

§ 10-2 各向异性壳的近似理论	(193)
§ 10-3 各向异性壳的修正理论	(198)
§ 10-4 各向异性圆柱壳的修正理论	(199)
§ 10-5 圆柱壳的弯曲、稳定和振动	(206)
一、承受横向载荷 $p(x, \theta)$ 时圆柱壳的平衡方程	(207)
二、圆柱壳中面内只承受轴向压力 $N_x$ 及 $N_\theta$ 时的屈服方程	(210)
三、圆柱壳在横向振动作用下的自振频率	(210)

## 第十一章 金属间化合物与 MMC

§ 11-1 金属间化合物	(212)
一、什么是金属间化合物	(212)
二、功能材料	(214)
三、涂层	(217)
§ 11-2 金属基体复合材料 MMC	(219)
一、MMC 概况	(219)
二、MMC 的一些特性	(220)
三、界面相容性	(221)
四、定向凝固共晶合金	(222)
五、耐热超合金	(223)
六、石墨纤维增强的 MMC	(224)
七、MMC 中的力学分析	(225)

## 第十二章 陶瓷复合材料的物性

§ 12-1 陶瓷复合材料的发展与现状	(228)
一、陶瓷复合材料的来历	(228)
二、陶瓷材料的理论研究	(230)
三、陶瓷材料与陶瓷发动机	(230)
§ 12-2 陶瓷材料的基本特性	(231)
一、陶瓷的弹性模量	(231)
二、陶瓷的硬度	(233)
三、陶瓷的塑性变形与粘性流动	(234)
四、陶瓷的气孔率	(236)
§ 12-3 陶瓷的热特性	(237)
一、陶瓷的热现象	(237)
二、陶瓷的热响应	(238)
三、比热	(238)
四、陶瓷的 Debye 特征温度	(239)
五、陶瓷的热膨胀系数	(240)

六、陶瓷的导热系数.....(241)

**第十三章 陶瓷材料的强度**

§ 13-1 陶瓷的强度与脆性断裂.....(244)

- 一、陶瓷强度的基本概况.....(244)
- 二、陶瓷的脆性断裂.....(244)
- 三、由裂纹引起的应力集中.....(245)
- 四、Griffith-Orowan-Irwin 理论.....(246)
- 五、位错与陶瓷.....(247)

§ 13-2 陶瓷的断裂能、非线性断裂与增韧.....(249)

- 一、陶瓷的断裂能.....(249)
- 二、陶瓷的非线性断裂.....(251)
- 三、增韧.....(253)

§ 13-3 陶瓷强度的统计方法.....(254)

- 一、强度统计方法的由来.....(254)
- 二、Batdorf 断裂强度统计理论.....(254)
- 三、Weibull 断裂强度统计理论.....(254)
- 四、Weibull 统计方法在发动机中的应用.....(258)

**第十四章 陶瓷材料的热强度**

§ 14-1 热应力与热冲击.....(261)

- 一、热应力与温度梯度.....(261)
- 二、热冲击.....(262)
- 三、热应力断裂.....(263)
- 四、热冲击断裂.....(265)

§ 14-2 机械疲劳与热疲劳.....(267)

- 一、机械疲劳.....(267)
- 二、热疲劳.....(270)

§ 14-3 陶瓷材料的蠕变.....(272)

- 一、蠕变现象及其基本问题.....(272)
- 二、陶瓷的蠕变研究概况.....(275)
- 三、扩散蠕变与位错蠕变.....(276)

**参考文献**.....(277)

# 第一章 概 论

## § 1-1 引 言

在当今电子、新材料、空间技术、能源、生物工程等举世公认的高技术中，新材料是其它高技术赖以发展的物质基础。从当初日本经济经营战略计划时期对企业的调查中可知电子、新原材料开发分别占据了冠亚之席（图1-1）。今天他们的电子产品已充斥世界市场各个角落，超导材料、新陶瓷材料的成就使美国受到了惊震。原来未能列入计划的空间技术在新材料的支持下很快就赶了上来。例如1992年他们将用自己的H2大型运载火箭把JEM送入轨道和美国发射的永久空间站主体对接组装。航天飞机（希望号）、空天飞机（HIMES号）也紧追美国研制的NASP和ESA集团的HOTOL（英）、HERMES（法）和SÄNGER（德）开始研制。这些空间大型结构的发展如没有新材料的支持几乎是寸步难行的。反过来空间技术的发展不仅向材料科学不断提出了新的需求，同时可为具有特殊要求的新材料的制备提供地球上无法实现的场所——长时间的微重力或失重空间和很高的纯真空环境。

新型材料中复合材料是最为突出的，它综合了固体材料中晶体材料（如水晶、云母、各种金属、合金等）和非晶体材料（如玻璃、塑料、橡胶、人造丝等）的各种优点，按需求复合而成。复合材料实际上由来已久。我国远在西汉前期就有“孝武帝时，鲁共王坏孔子教堂以为殿，得百篇尚书于墙壁中”的记载。这里所指的壁就是以竹木粘土砖石麻缕组成的空心复合材料墙的建筑结构。三国时吕布用过的画戟，它的杆就是以木为芯，纵向由竹丝铺层用丝质纤维缠绕胶接而成，还有用漆和藤条编织胶粘而成的盾牌等，都是复合材料制品。现代的复合材料要从1942年美国诞生了玻璃纤维增强的FRP算起，到了1955年GFRP已工业化；1960—1965年英国研制出了碳纤维材料；1971年美国TYCO公司

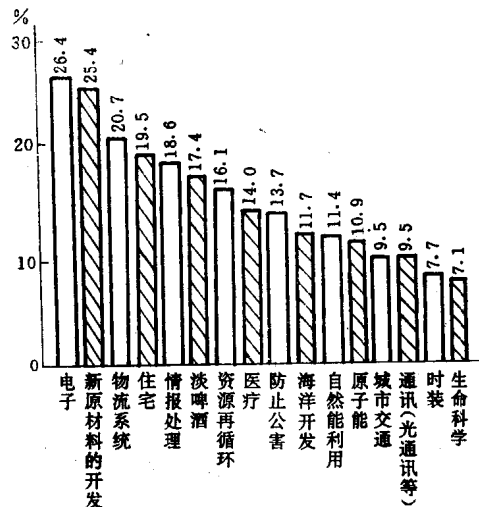


图 1-1

制成了 $Al_2O_3$ 耐热材料，Du Pont公司开发出了Kevlar-49；1975年CF/epoxy、GF/epoxy已用于飞机、火箭的主承力件上；到了80年代复合材料已大量生产。目前复合材料已大大超过纤维增强有机化合物基体的概念。一些新型复合材料有如表1-1所示。它们已有不少应用于航空、航天、汽车、造船、核能、建筑、电子、桥梁、机械、医疗以及体育等部门，但是其中有些材料尚处于研制之中。由表1-1也可以看出，当代复合材料的广泛性，如DSES、SC、ODS本属于结晶可控合金，但是由于它们的各向异性特性、界面特性、不均质特性等方面都呈现出

表 1-1

名 称	缩 写	名 称	缩 写
炭/炭	C/C	金属间化合物	IMC
金属基体纤维增强材料	FRM	快速固化处理材料	RSR
纤维增强超合金	FRS	陶瓷	Ceram
定向凝固共晶合金	DSES	晶须增强陶瓷材料	WRC
单晶合金	SC	高级陶瓷(细陶瓷)复合材料	AC(FC)
氧化弥散增强合金	ODS		
纤维增强材料	FRP	陶瓷基体复合材料	CWC

材料复合的性质,因此,常常把它们也作为复合材料;IMC也是如此;还有MMC的各组分相也都是金属材料,同一理由也都是复合材料。

此外,还有一些是具有声、热、光、电、磁等功能效应的新型复合材料,如形状记忆合金材料、形状记忆非金属材料、优质透波性材料、导电塑料、隔热材料、吸振材料、光导纤维材料、高分子材料等等,也都有了很大的发展。在80年代末期掀起的“超导热”中,各种新的超导材料也应运而生。由表1-2中可以看出,它们的临界温度 $T_c$ 在逐年提高,其中Bi系的BiPbSbSrCaCuO就是由我国提出的。虽然它们目前尚仅仅在磁推进器、磁悬浮高速列车、高能加速器中获得一些应用,但是随着 $T_c$ 的不断提高,人们已预测到它对未来的信息、计算机工程技术等将会引起革命性的变革。一旦成为现实时,对飞行器的导航、操作、控制等也将产生不可估量的影响。

表 1-2

时间/年	超 导 材 料	临 界 温 度, $T_c$ /K
1986	LaBaCuO	30
1987	YBaCuO	90
1988	BiSrCaCuO	110
	TiBaCaCuO	120
1989	BiPbSbSrCaCuO	130

80年代除了出现的超导热外,另一个就是“陶瓷热”,高温结构陶瓷材料将对航空、航天用飞行器及其发动机、核能技术等部门引起巨大的影响。有关高温结构陶瓷的情况,将在本书有关章节中讨论。

## § 1-2 航空、航天技术与新型复合材料

1903年自莱特兄弟乘自由飞轮一号活塞式发动机的飞机升空之后,揭开了人类航空史的第一页。二次世界大战末,德国的Von Braun设计出了V-2导弹。1957年原苏联发射了第一颗人造地球卫星。1975年美国开始了航天飞机的研制并于80年代初发射成功。为了实现由地面直接起飞的航天器,1983年NASA-LaRc提出了空天飞机NASP计划。继而ESA以及日本也提出了它们的空天飞机计划。由此可见飞行器是朝着高速度、高 $Ma$ 数、远航程、大型化方向发展。从地球大气层内航行到近地轨道空间,直至星际航行,飞行速度从每小时数百公里(F16A为1480km/h),直到每秒几十公里(如金星飞行器脱离地球的最小速度

11.64km/s,到达金星轨道速度37.73km/s),飞行 $Ma$ 数由亚声速到高超声速。图1-2给出的是一般飞机、航天飞机、空天飞机的高度-速度特性与飞行路径的情形。1992年即将发射的永久空间站其横梁尺寸为175/m长的大型结构了。而其它各种人造卫星、飞船、空间站、空间平台是另一类大型空间结构。它们都是要靠大型运载工具送入轨道。所有这些飞行器也都有各自的动力装置。前一类飞机型飞行器,目前以空天飞机最为先进复杂。它们的动力装置是由吸气式发动机与火箭发动机组合而成的。吸气式发动机也叫空气呼吸式发动机(ABE),是涡轮喷气发动机(TJ)、冲压发动机(RJ)、涡轮冲压组合发动机(TRJ)、空气涡轮冲压

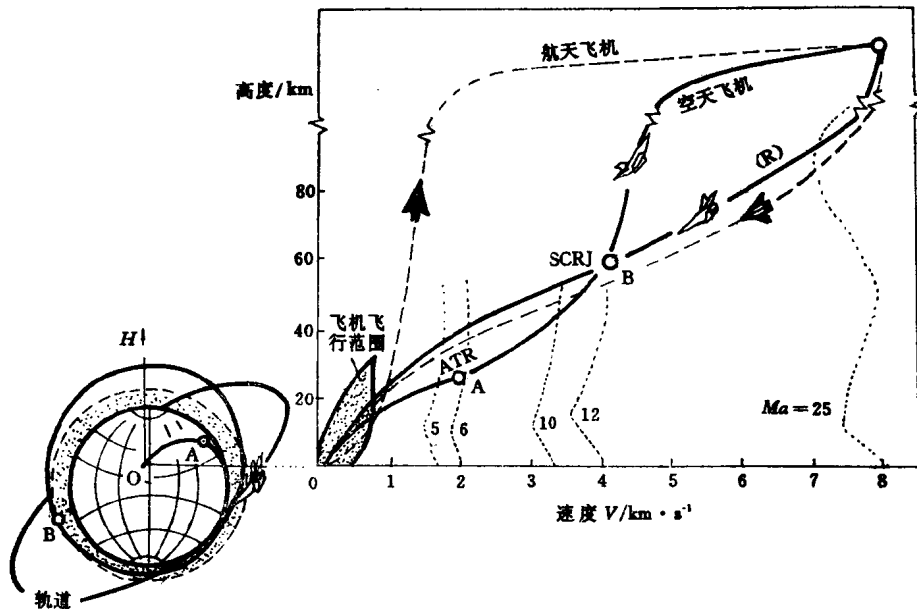


图 1-2

发动机(ATR)、超声速燃烧冲压发动机(SCRJ)、液化空气循环发动机(LACE)、超声速变循环涡轮风扇发动机(SCTF)等的统称,其简图如图1-3所示。后一类轨道型飞行器多用液氢火箭发动机(R)。它们多用于大角度机动、变轨、轨道转移中。所有这些飞行器及发动机的结构材料,由于受到复杂的外部与内部环境的作用,要求日益苛刻化。

### (1) 外部环境

如空天飞机从地面起飞到进入轨道,要通过稠密大气层、稀薄大气层,受到强大的高速气流形成的气动力、阵风等的作用,然后进入真空轨道空间。同时它要经过由1g重力场到达微重力或失重空间场,还要经历空间冷、热环境、日、月引力、光压、太阳风、各种宇宙射线、地磁场、宇宙尘埃、流星以及在低空时的飞鸟撞击和再入的热冲击等。

### (2) 内部环境

内部环境主要来自发动机自身产生的动力和热环境,如高温燃气与空气等内流形成的气动力。结构的机械振动、高速旋转件的离心力、液体的晃动、振荡燃烧、气流脉动、热冲击、POGO振动、约束引起的各种内力、热应力等以及氧化、腐蚀、氢脆效应等作用。

随着飞行器的航程与飞行速度的增大,对发动机的推力、推重比、比推力的要求也越来越高,因而导致发动机的压力比、涵道比、进口温度、燃烧室温度、TIT、转子转速也都大大



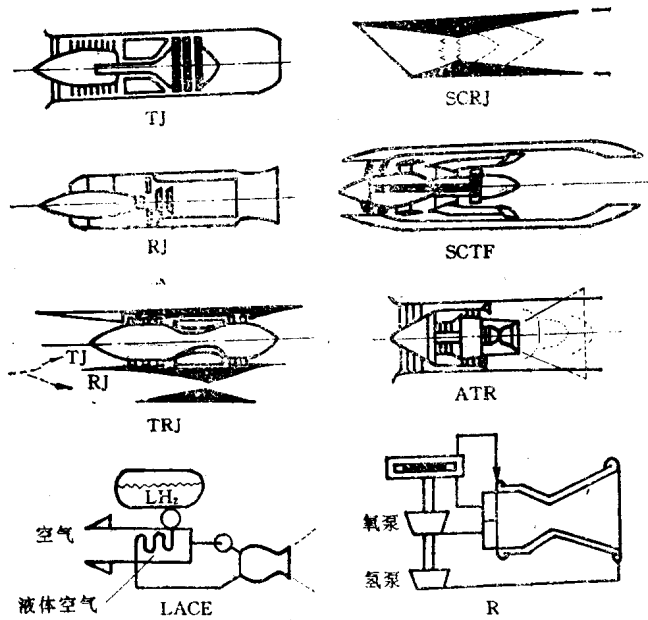


图 1-3

提高。与此同时，燃烧产物对材料的腐蚀、氧化、脆化作用增强，外流、内流对材料的冲击、摩擦以及开车、停车时热交变载荷强度也增大。所有这些力、热、化学和物理的作用，最终都要集中到构成飞行器及其发动机的材料上去。因此，更新材料已成为飞行器及其发动机经常不断的要求了。图1-4就是人们预测未来TJ发动机中新型复合材料的应用情况。但总起来看，航空航天技术中的材料在保证其刚度与强度下，问题主要集中在“轻”和“热”两点上面。

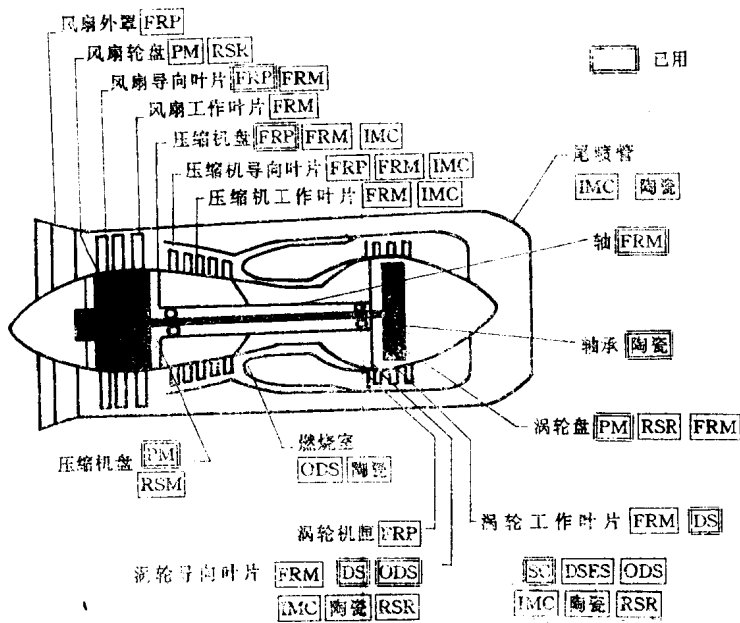


图 1-4