



装备科技译著出版基金

先进复合材料工学

Advanced Composite Materials Engineering

[日本] 边 吾一 石川隆司 编著
王荣国 等译



国防工业出版社
National Defense Industry Press



装备科技译著出版基金

先进复合材料工学

[日本]边 吾一 石川隆司 编著
王荣国 等译

国防工业出版社

·北京·

07000010

著作权合同登记 图字:军-2012-070号

图书在版编目(CIP)数据

先进复合材料工学/(日)边 吾一,(日)石川隆司编著;王荣国译.
—北京:国防工业出版社,2014.3
ISBN 978-7-118-09178-6

I. ①先... II. ①边...②石...③王... III. ①复合材料 IV. ①TB33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 037840 号

本书简体中文版由边 吾一授权国防工业出版社独家出版发行。
版权所有,侵权必究。

※

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100048)

北京嘉恒彩色印刷有限公司

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 13 字数 308 千字

2014年3月第1版第1次印刷 印数1—2500册 定价56.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717



《先进复合材料工学》

编 著 者 名 单

- 第 1 章 石川隆司,福田博,荻原慎二
- 第 2 章 小笠原俊夫,石川隆司
- 第 3 章 边 吾一,石川隆司
- 第 4 章 青木隆平
- 第 5 章 青木隆平
- 第 6 章 几田信生
- 第 7 章 青木隆平
- 第 8 章 末益博志,石川隆司
- 第 9 章 末益博志
- 第 10 章 青木隆平,小祝弘道,石川隆司
- 第 11 章 木元顺一
- 第 12 章 石川隆司
- 第 13 章 石川隆司,田中丰巳
- 第 14 章 小笠原俊夫,滨本健司
- 第 15 章 荒木隆人
- 第 16 章 尾崎毅志

编著者所属单位

- | | |
|-------|-------------------|
| 青木隆平 | 东京大学研究生院教授 |
| 荒木隆人 | 石川岛播磨重工业公司 |
| 几田信生 | 湘南工科大学教授 |
| 石川隆司 | 宇宙航空研究开发机构 |
| 小笠原俊夫 | 宇宙航空研究开发机构编辑担当负责人 |
| 荻原慎二 | 东京理科大学副教授 |
| 尾崎毅志 | 三菱电机公司 |
| 木元顺一 | 川崎重工业公司 |
| 小祝弘道 | 中菱工程公司 |
| 末益博志 | 上智大学教授 |
| 田中丰巳 | 三菱电机公司 |
| 滨本健司 | 富士重工业公司 |
| 福田博 | 东京理科大学教授 |
| 边 吾一 | 日本大学教授 |

译者序

本书是由日本大学著名专家边 吾一教授和日本宇宙航空研究开发机构著名专家石川隆司研究员组织编写的有关先进复合材料方面的一本专著,参加本书各章节编写的作者有石川隆司、福田博、荻原慎二、小笠原俊夫、边 吾一、青木隆平、几田信生、末益博志、小祝弘道、木元顺一、田中丰巳、滨本健司、荒木隆人及尾崎毅志均为目前日本复合材料领域内一流的专家学者。本书汇集了先进复合材料领域内的最新研究成果和实例,包括复合材料中断裂力学的研究方法、粘接连接中的化学和力学问题、复合材料结构的损伤容限、设计要点及复合材料在飞机、火箭和人造卫星等结构上的应用实例,并提出了未来复合材料潜在的应用价值,反映了先进复合材料的发展方向,在日本本书被广泛作为研究生教材使用。经作者同意,译者将该著作翻译介绍到中国,期望对我国从事复合材料结构设计、力学性能研究以及复合材料开发应用的工程技术人员和研究生起到一定的参考价值。

本书由王荣国教授主持翻译,并对全书进行了校核。参加本书翻译及校核的人员还有张树萍、李有青、刘再阳、钱民中、刘文博、徐忠海、白淳岳等长年从事复合材料研究及应用的各位专家教授。另外,本书翻译过程中得到了赫晓东教授的全面指导,在此一并表示衷心的感谢!

由于译者水平有限,译文难免存在错误和不妥之处,恳请广大读者批评指正。

王荣国
2014年3月

原著者发刊寄语

——为先进复合材料更广泛的应用

日本复合材料学会成立已经走过 30 年的历程。这期间,经过了各种各样的曲折,不断发展了复合材料理论和技术,最近在各个领域迅速开花。例如:在航空领域,使用先进复合材料减重 50% 的客机已经登场;在通用机械领域,如果没有高模量碳纤维复合材料就不可能有超高速印刷机的辘子;即便在土木建筑领域,从耐震结构改进开始,也孕育着朝阳技术。

2001 年 4 月,随着原航空宇宙技术研究所独立法人化,设置了先进复合材料评价技术开发中心,开始为构建先进复合材料数据库搜集数据。同时,日本复合材料学会组织了“关于构建先进复合材料数据库调查研究委员会”的活动。该委员会(委员长:边 吾一,日本大学教授),汇集了产学研第一线有学识经验者,并由上述中心牵头,在构建先进复合材料数据库中以公平立场出发建言献策,指导并执笔编写了先进复合材料用于航空宇宙结构件的理论和使用指南手册的先导部分。具体说,重新推敲每年度该手册的草稿,并且逐渐补充内容并归拢,面向一般读者,最终出版了与军标 MIL - HDBK - 17 有些差异的《先进复合材料工学》一书。《先进复合材料工学》一书的特点如下所述:

- ① 对 MIL - HDBK - 17 未述及的部分进行补遗;
- ② 对 MIL - HDBK - 17 的部分内容进行释疑;
- ③ 可作为研究生院低年级、企业初级技术工作者的参考书。

本书的内容集 4 年间本委员会编著手册活动的大成,是各位作者全心力作的结晶。这点受到培风馆各位的关注,以前所未有的速度,出版了《先进复合材料工学》这本书。当然本书也是日本复合材料学会 30 周年纪念活动的一个环节,在值得纪念的年份出版,确实是值得庆贺。

上述委员会报告提到,编集本书的工作中除得到委员长日本大学教授边 吾一的帮助外,还得到笔者的同事宇宙航空研究研发机构先进复合材料评价技术开发中心的小笠原俊夫的鼎力支持,在此深表谢意。

本书能对提高年轻学者、技术人员复合材料研究技术水平有所帮助,能对复合材料在所有领域扩展有所贡献的话,作为作者之一、祈愿学会发展的我将无比高兴,这对本学会的纪念活动的确具有深远的意义。

日本复合材料学第 14 届会长
石川隆司
2005 年 4 月

目 录

1 单向增强材料特性的计算方法	1
1.1 引言	1
1.2 单向增强材料弹性模量预测:复合法则/从上下边界到严密解	1
1.3 单向增强材料弹性模量预测:Self - Consistent 模型及材料力学近似解	4
1.4 单向增强材料弹性模量预测:导入几何学经验 系数的对数函数近似解	6
1.5 纤维随机分布对单向增强材料弹性模量的影响	9
1.6 单向增强材料热膨胀系数的预测公式	11
1.7 拉伸强度的概率论	12
1.7.1 拉伸强度	12
1.7.2 Weibull 分布	13
1.7.3 单向增强材料的强度	14
1.7.4 强度概率论的后续发展	15
1.8 压缩强度预测方程	19
1.9 本章小结	20
参考文献	21
2 正交各向异性力学	23
2.1 引言	23
2.2 各向异性材料中独立的弹性常数	23
2.3 正交各向异性材料弹性常数的转换公式	25
2.4 正交各向异性材料弹性模量测定方法示例	29
2.5 单向材料的非线性弹性行为	31
2.6 正交各向异性材料的强度准则	33

2.6.1	最大应力理论	33
2.6.2	最大应变理论	34
2.6.3	相互作用理论	35
	参考文献	39
3	层合板·夹层板及织物结构	41
3.1	单层板的应力—应变关系	41
3.2	层合板	42
3.3	对称铺层	44
3.4	耦合效应	44
3.5	对称铺层参数	45
3.6	铺层参数与铺层结构	46
3.6.1	正交铺层	46
3.6.2	对角铺层	47
3.6.3	准各向同性铺层($0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ$)	47
3.7	夹层梁	48
3.7.1	弯曲刚度	48
3.7.2	芯材剪切刚度的影响	49
3.7.3	整体屈曲载荷	50
3.7.4	局部屈曲载荷	50
3.8	夹层板	51
3.8.1	能量法	51
3.8.2	屈曲载荷	53
3.8.3	挠度	53
3.9	织物增强材料的力学性能预测	54
3.9.1	织物的分类和纱线重复数 n_g	54
3.9.2	嵌合体模型与广义弹性模量的上下边界	55
3.9.3	纱线弯曲模型的一维解	57
3.9.4	缎纹织物增强复合材料特性的架桥模型	61
3.9.5	织物增强复合材料力学模型后续发展简述	63
	参考文献	65
4	断裂力学在复合材料中的应用	67
4.1	引言	67

4.2	利用断裂力学的优点	67
4.2.1	各向同性弹性体中裂纹和应力扩大系数	67
4.2.2	能量释放率	69
4.2.3	裂纹的尺寸效应	72
4.3	各向异性线性弹性体中裂纹尖端附近的应力	72
4.3.1	各向异性弹性体的断裂力学	72
4.3.2	均质各向异性弹性体裂纹尖端的控制方程	72
4.4	层间剥离与断裂力学	74
4.4.1	断裂力学在层间剥离中的应用	74
4.4.2	裂纹扩展的能量守恒	75
4.4.3	数值方法及其相容性	76
4.4.4	裂纹扩展的条件	77
4.5	本章小结	78
	参考文献	79
5	热应力及横向裂纹	79
5.1	引言	79
5.2	层板的热应力	79
5.3	横向裂纹及断裂力学	81
5.3.1	断裂力学的应用	81
5.3.2	横向裂纹扩展时的能量守恒	82
5.4	本章小结	83
	参考文献	83
6	粘接及粘合化学	84
6.1	引言	84
6.2	复合材料界面	84
6.3	界面的评价	85
6.4	工业的表面处理	86
6.4.1	碳纤维的表面处理	86
6.4.2	有机纤维的表面处理	86
6.4.3	玻璃纤维表面处理及硅烷偶联剂	88
6.5	各种界面处理效果	88

6.5.1	提高成型的作用	89
6.5.2	纤维周围的树脂改性	90
6.5.3	浆膜层的添加作用	91
6.6	本章小结	92
	参考文献	92
7	粘接连接的力学	95
7.1	引言	95
7.2	粘接部位力的传递	95
7.2.1	薄板间连接(粘接接头)中的材料力学处理	95
7.2.2	粘接接头上的断裂力学分析	98
7.2.3	层合板与增强材料的结合	99
7.3	纤维与基体树脂的结合	100
7.4	本章小结	101
	参考文献	101
8	复合材料结构的屈曲	103
8.1	引言	103
8.2	杆件的屈曲	104
8.2.1	屈曲载荷与边界条件	105
8.2.2	初始扰动的影响	105
8.2.3	屈曲后的变形与载荷	106
8.2.4	剪切刚度与屈曲载荷	107
8.2.5	受弹性支撑的杆件	107
8.2.6	杆件的各种屈曲现象	108
8.3	平板的屈曲	108
8.3.1	四周简支的矩形板的单向压缩屈曲($N_x = -S, N_{xy} = N_y = 0$)	109
8.3.2	四周简支的正交各向异性板的单向压缩 屈曲($N_x = -S, N_y = N_{xy} = 0$)	109
8.3.3	边界条件与屈曲载荷	111
8.3.4	平板屈曲后的行为	111
8.4	增强平板的屈曲	114
8.5	壳的屈曲	115

8.6	复合材料层合板的屈曲	116
8.6.1	层合板的屈曲与铺层数	118
8.7	层间剥离与屈曲载荷	119
8.8	T型增强材料的屈曲与屈曲后的行为	125
8.9	本章小结	130
	参考文献	131
9	复合材料的有限元分析	132
9.1	有限元法的基础知识	132
9.2	基于位移法的有限元分析	133
9.2.1	虚功原理	133
9.2.2	有限单元内部位移内插	134
9.2.3	控制方程的导出	134
9.2.4	解的收敛和误差	135
9.3	几种不同类型的有限单元	136
9.3.1	常应变三角形单元	136
9.3.2	四边形单元	137
9.3.3	8节点等参数单元	138
9.3.4	4节点非协调四边形单元	139
9.3.5	薄壳单元	140
9.3.6	高阶剪切单元与剪切闭锁	141
9.4	非线性问题和有限元法	142
9.5	有限元法和断裂力学	142
9.6	用于复合材料分析有限元法的开发	145
9.6.1	均质化法	145
9.6.2	扩展有限元法(X-FEM)	146
	参考文献	146
10	损伤容限	147
10.1	引言	147
10.2	损伤种类和损伤容限的适用范围	147
10.3	冲击损伤	149
10.4	层间剥离	153

10.5 本章小结	153
参考文献	154
11 复合材料结构设计要点	155
11.1 强度与刚度	155
11.2 热膨胀	156
11.3 失稳	156
11.4 铺层结构	156
11.5 接头	157
11.5.1 机械接头	158
11.5.2 胶接接头	160
11.6 疲劳及冲击损伤	161
11.6.1 疲劳	161
11.6.2 冲击损伤	162
参考文献	162
12 飞机、火箭结构方面的应用实例	163
12.1 引言	163
12.2 先进复合材料在飞机中的应用	163
12.3 CFRP 在运载火箭上的应用	167
12.4 本章小结	167
参考文献	168
13 复合材料的无损检测	169
13.1 引言	169
13.2 检测方法种类和应用	169
13.3 采用超声检测技术的无损检测	170
13.4 采用 X 射线透过法检测技术和 X 射线 CT 检测技术的无损 检测	173
13.5 本章小结	174
参考文献	175
14 飞机用复合材料试验指南和试验方法	176
14.1 引言	176

14.2	用积木构建法对复合材料结构进行验证	176
14.3	试验水平与数据的使用	177
14.3.1	按结构复杂性分类	177
14.3.2	按数据适用性分类	178
14.4	试验计划	179
14.5	试验模型	179
14.6	本章小结	180
	参考文献	180
15	发动机用复合材料结构的特征	181
15.1	引言	181
15.2	喷气发动机用结构材料与复合材料的位置	181
15.3	树脂基复合材料(PMC)	182
15.4	金属基复合材料(MMC)	183
15.5	陶瓷基复合材料(CMC)	184
15.5.1	陶瓷纤维的特征	184
15.5.2	CMC 的特征	185
15.6	本章小结	186
	参考文献	186
16	人造卫星的复合材料结构	188
16.1	引言	188
16.2	人造卫星结构的重要部件	188
16.3	人造卫星用复合材料结构实例	189
16.3.1	作为基本结构的蜂窝夹层板	189
16.3.2	卫星运载舱	190
16.3.3	天线反射面	192
16.3.4	宇宙望远镜结构	193
16.4	本章小结	193
	参考文献	193

1 单向增强材料特性的计算方法

1.1 引言

在航空航天等尖端领域中作为结构件使用的复合材料几乎均为长纤维增强复合材料。仔细观察实际长纤维增强复合材料结构可见,有单向带铺层、纤维缠绕(FW)、三维织物及其他织物增强的结构。但基本上都是纤维单向排列的单向增强复合材料(简写成单向增强材料或单向材料)。因此,论及纤维和树脂构成的复合材料力学性能时基本指单向增强材料性能。这种特征可用图 1.1 表示。图中“阶段 1”带下划线的单向材料性能预测将在本章简述,这一阶段称为微观力学。织物的特性也可以基于单向材料性能叙述,见第 3 章的内容^[1.1]。作为对象的素材尺寸稍稍变大的“阶段 2”有代表性的考虑方法是层合板理论,也将在第 3 章中介绍。

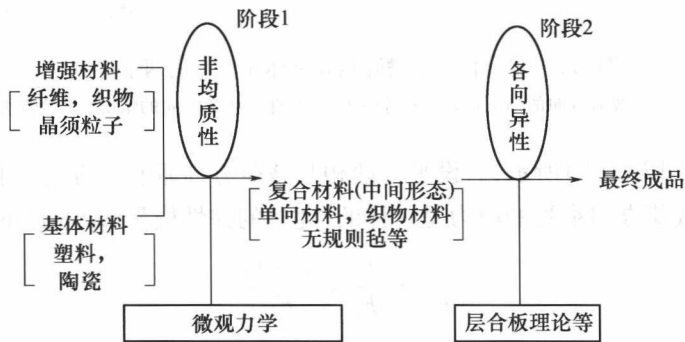


图 1.1 复合材料力学体系

1.2 单向增强材料弹性模量预测:复合法则/ 从上下边界到严密解

在由增强纤维和基体构成的复合材料力学性能预测中,关于弹性模量的预测,在研究阶段论文几乎已经全部完成^[1.2]。留下的唯一课题就是增强纤维空间随机分布的影响,这方面也已做出了粗略推论并掌握了其趋势。

忽略这个理论体系,只取简单而有用的就是所谓的复合法则(Rule of Mixture,

ROM)和罗伊斯(Reuss)法则。这两个法则公式的模型如图 1.2 所示。(a)是增强相和基体相与载荷方向平行排列的情况,此时如忽略泊松比的影响,那么增强相和基体相沿载荷方向应变一样的假设是成立的,因此,复合材料沿载荷方向的弹性模量记作 E_L 时,有

$$E_L = E_{fL}V_f + E_m(1 - V_f) \quad (1.1)$$

这是复合材料等效弹性模量的复合法则。式中的 E_{fL} 是图 1.2 中增强相(阴影部分)的弹性模量, E_m 是基体的弹性模量, V_f 是增强相的体积含量。因此,如果已知组成材料的弹性模量和体积含量,则容易预测出复合材料沿纤维方向的弹性模量。(1.1)式也是由两相构成的复合材料体系弹性模量的上限。

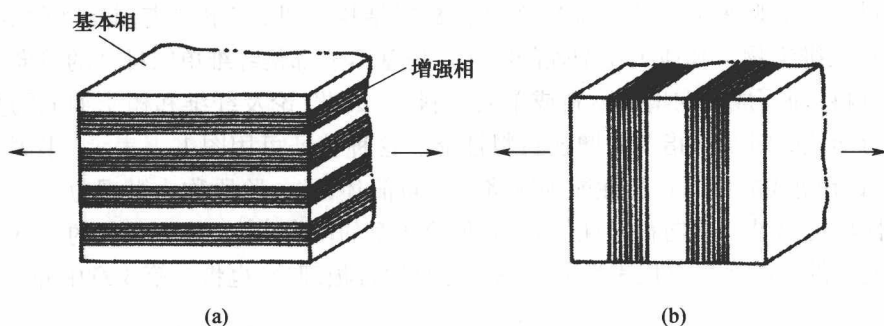


图 1.2 复合材料中增强相和基体相分布的两个特例

(a) 平行于载荷方向的情况(复合法则); (b) 垂直于载荷方向的情况(罗伊斯法则)。

另外,如图 1.2(b)所示,假设平行两相与载荷方向垂直。在这种情况下,可以认为各相沿载荷方向承受的应力是一样的,此时的弹性模量 E_R 通过下式计算。

$$\frac{1}{E_R} = \frac{V_f}{E_f} + \frac{1 - V_f}{E_m} \quad (1.2)$$

式中: E_f 为图 1.2(b)中增强材料沿载荷方向的弹性模量,含 $E_{fL} \neq E_f$ 的情况。

(1.2)式算得的是罗伊斯法则两相复合材料体系弹性模量的下限。

单向增强材料沿纤维方向的弹性模量 E_L 的预测如前所述可用复合法则(1.1)式,但横向(与纤维垂直方向)弹性模量的预测用罗伊斯法则时,应力完全不一样,预测值过小,所以不适用。于是,考虑引进一个经验系数 C ,结合参考文献[1.3]实验结果得出下式:

$$E_T = CE_L + (1 - C)E_R \quad (1.3)$$

式中: C 为 0.2 左右比较合适。与实验吻合较好的 C 与 V_f 的关系^[1.4]如下:

$$C = 0.4V_f - 0.025 \quad (1.4)$$

单向增强材料中面内剪切弹性模量 G_{LT} 也具有与 E_T 非常相似的性能。将