



复合材料设计

〔美〕 蔡为仑 著

科学出版社

复合材料设计

〔美〕蔡为仑 著

刘方龙 王弘生 徐厚华 译

冯广吉 校

科学出版社

内 容 简 介

本书主要介绍复合材料结构的设计与分析。本书共分三部分。第一部分包括第一章至第十一章，阐述复合材料刚度及强度的基本原理、计算公式和数据。第二部分包括第十二章至第十四章，详细介绍微观-宏观力学一体化的设计方法。第三部分包括第十五章至第二十九章，重点论述复合材料的特殊设计问题，如残余应力、环境效应、螺钉连接、疲劳特性、切口强度、试验方法、层间应力、压力容器和屈曲分析等。

本书可供航空、航天、化工、材料等方面的科技人员及高等院校有关专业师生参考。

Stephen W. Tsai
COMPOSITES DESIGN
Think Composites, 1987

复 合 材 料 设 计

[美] 蔡为仑 著

刘方龙 王弘生 徐厚华 译

冯广占 校

责任编辑 董安齐

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

中 国 科 学 院 印 刷 厂 印 刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1989年11月第一版 开本：787×1092 1/32

1989年11月第一次印刷 印张：17 1/4

印数：0001—1 560 字数：387,000

ISBN 7-03-000403-5/TB·16

定价：14.90 元

译 者 的 话

本书著者蔡为仑博士是复合材料领域的世界知名学者。他对复合材料所作的开创性贡献，是举世公认的。他是美国“Journal of Composite Materials”(复合材料学报)和“Journal of Reinforced Plastics and Composites”(增强塑料与复合塑料学报)两个著名学术刊物的主编，并主持加利福尼亚大学(柏克利)每年一度的复合材料专题讲习班。蔡为仑博士从1979年起，曾先后六次回国访问和讲学，对我国复合材料科技工作给予了热情的支持与帮助，并担任北京航空航天大学的名誉教授。

原书第一版(英文)发行于1985年，本书译自该书第三版，比第一版的内容增加了近两倍。在原书中，作者简单、明确地提出了基于层板理论的复合材料设计方法，即宏观与微观力学一体化的设计方法，从而使得复合材料的设计方法更加科学化、合理化，同时也指出了美国工业界过去所用的网络理论、地毯曲线和极限应变控制等设计方法的不合理性。

蔡为仑博士的设计方法提出后，在美国、西欧和日本等产生了较大影响。欧美工业界经多次试验证明，蔡博士的方法是正确的。因此，原书从第一版开始，就同时在美国、法国和日本分别用英文、法文和日文出版。根据各方面反映的意见和要求，第三版较初版增加了许多新内容，其中包括最后一层破坏估算、湿热效应、螺钉连接、疲劳特性、切口强度、层间应力、试验方法、压力容器、屈曲计算和大量数值算例，并对前两版的内容作了修订。这个中译本中少量地保存了第二版第

十章与第十五章的内容,以便利读者参考。我们在翻译时,对原书中的一些印刷错误和笔误做了更正,但未一一注出。我们希望,本书的出版,能对我国复合材料产品设计的科学化和合理化起到一定的促进作用。

同本书配套的个人计算机设计软件,将对分析与设计复合材料提供很大方便。

本书的大部分基本原理与公式,缺少说明和推导,这给读者掌握和运用造成了一定的困难。如需要了解这些基本原理与推导,可参考《复合材料特性与分析》一书(刘方龙编著,科学出版社,待出版)。

第三版前言

自从《复合材料设计》的1985年版和1986年版出版后，我们就已决定出版本书第三版，而不称其为1987年版。本书在1986年已比1985年拥有更多的大学生和从事实际工作的工程师读者。美国现在大约有30所大学采用本书及其软件作教材。我们在伯克利加利福尼亚大学举办的1986年复合材料讲习班，是10年来参加人数最多的一次。有近300人参加了“材料和加工工程促进协会”(SAMPE)年会举办的会前讲习班。我们在欧洲SAMPE和“底特律ASM国际工程协会”讨论会上举办的讲习班，也受到了同样热情的欢迎。

本版最引人注目的改进是本书用了Apple微机的激光打印机打印。Microsoft的Excel工作片的集成图象，给我们提供了一种新的图象尺度。其它硬件和软件方面的改进，使书写和编辑加快，且更为灵活。

在技术内容上，第二十二章压力容器和第二十三章屈曲完全是新的，并涉及到设计方面的一些专题。第十章微观力学有所精简。第十二章限制和极限强度基本上是新的，并为设计提供了理论基础。现在的层板排序法，包括了子层板可变厚度与铺向角的选择。新的第十四章包括了排序法的所有方面，还包含了一个新的化整程序。

在第十五章残余应力中，添加了一些新的插图。在第十九章疲劳中，增加了寿命估算的数据分析。在第二十章切口强度中，增加了作为修理技术基础的粘接包含物形式孔的强度。

增加了第二十五章到第二十七章，以提供许多必需的软

件包文件,如 GENLAM、LAMRANK、Mic-Mac 和易学指导.关于术语汇编、符号和索引,已作了扩充和修改.本书1985年版有 220 页;1986年版为 380 页;而1987年版则约为 530 页.激光打印机的字符密度,超过光电图象打印机 15%,因此本版的实际内容增加了 50%.

复合材料的国际概述,用“梗概目录”形式提供在第二十八章中.该章用多种语言说明,包括英文、法文、德文和日文.“梗概目录”由Microsoft的Excel操作,并包含很鲜明的视图以便于训练和自学.当这些软件包由休斯飞机公司先进的Graphics Projector 700提供,并用于训练工程师们使用复合材料设计时,获得了惊人的速度和效率.我们对休斯飞机公司在1986年期间提供的慷慨支持致以谢忱.

我们还愿对美国空军材料实验室、美国空军萨克利门托航空计算中心、美军弹道研究实验室和美国国家研究委员会博士后计划给予的支持表示感谢.非常感激我们编写组为按时完成本版的献身精神和相互鼓励.尤其要感谢罗伊博士、金博士和帕特森.

对在多次报告会期间会面以及用过本书和软件的成百上千的大学生和工程师,我们要感谢他们热情的响应和建设性的反馈.对复合材料,我们感到乐观并充满信心.诚然,复合材料中仍然存在一些问题有待我们去克服.但是,这些问题是可以解决的.我们已看到了在未来岁月中复合材料令人振奋的前景.

蔡为仑

1987年2月

1986 年 版 前 言

《复合材料设计》(1985年版)一书的初稿于1985年2月在加利福尼亚大学(伯克利)复合材料专题讲习班年会上首次分发。但是不到一年的工夫,就有成千上万册简装本到了大学生和工程技术人员手中。美国材料与工艺工程促进学会对本书的出版起了重要的促进作用。在撰写和出版本书的过程中,许多组织给予了大力协助,这些组织是:日本复合材料学会、美国冶金工程师学会、欧洲复合材料协会、底特律工程师协会、欧洲航天局和法国原子能委员会。

在同工业界设计师们的大量直接接触中,我们获得了重要的信息反馈,这将对本书未来的修订产生影响。一些建议已经编进了本版。复合材料的合理设计在不断地发展,我们高兴地看到少数积极研究者所作出的贡献,他们把复合材料的高深技术简化成容易使用的形式。一些重要的课题如湿度影响、连接、疲劳、切口强度、试验方法、层间应力,以及许多精心的修改,都已包括在本版中。

我们对“想着复合材料[†]软件用户俱乐部”的普及,感到既高兴而又惊奇。许多工程师已经有了使用本书设计程序的机会。任何人都可以编写和调试程序,不必再花费宝贵的时间去重复做那些容易得到的现成计算。对于大学生而言,他们把时间用于学习复合材料设计的精髓,胜似去计算有残余应力层板的强度。

[†] “想着复合材料”(Think Composites)是蔡为仑博士早些年提出的一句颇有影响的口号,现已成为他及其国内外合作者建立公司的名称。本书及其配套设计软件,皆以它的名义在美国、日本和法国发行。——译者注

我们还对有幸同斯坦福大学、伦塞利尔理工学院、德雷克塞尔大学，以及其他一些开设有复合材料课程的高等院校进行相互交流感到满意。迄今，本书在工业界所取得的成功，远较在政府和科学院所取得的为好。此外，本书对于个人比对图书馆所起的作用更大。我们希望，本版将受到更加广泛的注意。

当把本书向苹果计算机公司展示时，我们惊奇地发现，本书代表了计算机排版的一个重要里程碑。预计随着个人计算机硬件和软件的进展，这种出版物将迅速增长。在本版中，只有一小部分是用激光打印机打印的。我们希望，下一版将全部用激光打印机来完成。

蔡为仑

1986年2月

目 录

第一章 绪言	1
§ 1.1 背景	1
§ 1.2 用复合材料进行设计	3
§ 1.3 我们的方法	5
§ 1.4 计算机	7
第二章 表示法和符号	9
§ 2.1 我们的系统	9
§ 2.2 缩写表示法	10
§ 2.3 缩写应力	11
§ 2.4 缩写应变	11
§ 2.5 缩写刚度	12
§ 2.6 缩写柔度	13
§ 2.7 结论	15
§ 2.8 主要符号表	15
第三章 广义胡克定律	16
§ 3.1 矩阵乘法表	16
§ 3.2 单斜轴材料的对称性	17
§ 3.3 正交异性材料的对称性	17
§ 3.4 横向同性材料的对称性	18
§ 3.5 各向同性材料的对称性	19
§ 3.6 材料对称性摘要	21
§ 3.7 工程常数	22
§ 3.8 用工程常数表示刚度	24
§ 3.9 结论	25
第四章 平面应力和平面应变	26

§ 4.1	平面应力	26
§ 4.2	平面应力的材料对称性	28
§ 4.3	平面应力工程常数	29
§ 4.4	平面应变	30
§ 4.5	平面应变工程常数	32
§ 4.6	平面应力的算例	33
§ 4.7	平面应变的算例	33
§ 4.8	结论	35
第五章 应力和应变转换		36
§ 5.1	转换方程	36
§ 5.2	倍角转换式	38
§ 5.3	主应力和主应变	39
§ 5.4	应力和应变不变量	41
§ 5.5	算例	42
§ 5.6	结论	44
第六章 单层的刚度		45
§ 6.1	刚度转换	45
§ 6.2	倍角转换式	47
§ 6.3	准各向同性材料的常数	48
§ 6.4	矩阵求逆	49
§ 6.5	工程常数和耦合常数	49
§ 6.6	算例	50
§ 6.7	典型单层复合材料的弹性常数	56
§ 6.8	典型复合材料的转换刚度	56
§ 6.9	CFRP T300/5208的转换刚度	58
§ 6.10	结论	60
第七章 对称层板的面内刚度		61
§ 7.1	层板标记	61
§ 7.2	层板理论	62
§ 7.3	矩阵求逆运算	63

§ 7.4	面内工程常数	63
§ 7.5	单层的应力和应变	64
§ 7.6	刚度矩阵计算	65
§ 7.7	$\pi/4$ 层板的倍角法	67
§ 7.8	收银机法算例	69
§ 7.9	复合律法算例	71
§ 7.10	面内刚度算例	73
§ 7.11	平面刚度排序法	76
§ 7.12	单层应力和应变的算例	79
§ 7.13	压力容器	82
§ 7.14	结论	84
第八章 对称层板的挠曲刚度		85
§ 8.1	层板理论	85
§ 8.2	挠曲工程常数	86
§ 8.3	单层的应力和应变	86
§ 8.4	挠曲刚度计算	88
§ 8.5	夹芯板	89
§ 8.6	梁	91
§ 8.7	管道	94
§ 8.8	结论	97
第九章 非对称层板的刚度		98
§ 9.1	层板理论	98
§ 9.2	部分求逆	99
§ 9.3	柔度	99
§ 9.4	正则化的应力-应变关系	100
§ 9.5	工程常数	101
§ 9.6	刚度计算	102
§ 9.7	平行轴原理	103
§ 9.8	重复使用的子层板	104
§ 9.9	薄壁结构	106

§ 9.10	具有子层板的薄壁结构	108
§ 9.11	薄壁理论的精度	108
§ 9.12	加劲壁板	110
§ 9.13	结论	114
第十章	微观力学	115
§ 10.1	背景	115
§ 10.2	密度	117
§ 10.3	纵向杨氏模量和泊松比	118
§ 10.4	纵向剪切模量	119
§ 10.5	具有各向异性纤维的单层剪切模量	123
§ 10.6	横向模量	125
§ 10.7	膨胀系数	126
§ 10.8	强度的微观力学	126
§ 10.9	编织复合材料的微观力学	128
§ 10.10	无规复合材料的微观力学	129
§ 10.11	结论	130
第十一章	破坏准则	132
§ 11.1	引言	132
§ 11.2	基本强度数据	132
§ 11.3	强度/应力比	134
§ 11.4	最大应力准则	135
§ 11.5	最大应变准则	136
§ 11.6	应力空间中的二次准则	137
§ 11.7	应变空间中的二次准则	139
§ 11.8	典型单层强度数据	143
§ 11.9	偏轴层的破坏表面	144
§ 11.10	逐层破坏	145
§ 11.11	单层破坏包络举例	147
§ 11.12	多向层板破坏包络举例	150
§ 11.13	结论	152

第十二章	层板设计的限制强度和极限强度	155
§ 12.1	引言	155
§ 12.2	退化层的模型化	155
§ 12.3	最后一层破坏(LPF)的估算	158
§ 12.4	破坏模型	160
§ 12.5	最后一层破坏的包络	162
§ 12.6	极限强度的包络	164
§ 12.7	限制强度的包络	165
§ 12.8	$[0/45/-45]_s$ 层板的强度包络	169
§ 12.9	参数灵敏度研究	170
§ 12.10	在 $p = 0$ 平面中的破坏包络	173
§ 12.11	E-玻璃/环氧复合材料的强度包络	178
§ 12.12	单层模量的退化因子	180
§ 12.13	结论	182
第十三章	主应力设计	184
§ 13.1	单一载荷	184
§ 13.2	各向同性设计	184
§ 13.3	主应力设计	186
§ 13.4	用方向性材料作设计	188
§ 13.5	算例	189
§ 13.6	魔杆	195
§ 13.7	结论	196
第十四章	用排序法设计层板	197
§ 14.1	层板排序法	197
§ 14.2	层板数据库	198
§ 14.3	主应力法与排序法	199
§ 14.4	排序法的化整处理	202
§ 14.5	结果显示	203
§ 14.6	单一载荷	206
§ 14.7	多载荷	209

§ 14.8	厚梁	211
§ 14.9	薄壁结构的弯曲	213
§ 14.10	排序法参数的灵敏度	217
§ 14.11	结论	224
第十五章	残余应力和应变	226
§ 15.1	残余应力	226
§ 15.2	自由湿热膨胀	226
§ 15.3	膨胀后的单层强度	228
§ 15.4	固化后的残余应变	228
§ 15.5	膨胀系数	230
§ 15.6	单层破坏和强度比	231
§ 15.7	带残余应变的最大机械应力的二次准则	234
§ 15.8	最大残余应力的二次准则	234
§ 15.9	带残余应力的机械应力最大应变准则	235
§ 15.10	残余应力的重要性	235
§ 15.11	带残余应力的单层应力	240
§ 15.12	温度梯度的重要性	241
§ 15.13	算例	243
§ 15.14	结论	247
第十六章	环境效应	248
§ 16.1	引言	248
§ 16.2	温度与水分分布	249
§ 16.3	确定 D 和 M_m 的实验方法	254
§ 16.4	最大水分含量	255
§ 16.5	水分扩散系数	257
§ 16.6	加速吸湿条件	259
§ 16.7	玻璃化转变温度	266
§ 16.8	环境循环变化的影响	267
	参考文献	267
第十七章	湿热效应	268

§ 17.1	微观力学方法	268
§ 17.2	无量纲温度	271
§ 17.3	基体和纤维的特性	273
§ 17.4	湿热对单向复合材料的影响	274
§ 17.5	湿热对层板的影响	276
§ 17.6	结论	279
第十八章	螺钉连接	280
§ 18.1	螺钉连接的一般特性	280
§ 18.2	各种参数的影响	281
§ 18.3	多钉连接	290
§ 18.4	单钉双剪连接的设计方法	292
	参考文献	295
第十九章	疲劳特性	297
§ 19.1	破坏机理	297
§ 19.2	基体破裂	297
§ 19.3	分层	302
§ 19.4	纤维断裂和界面剥离	305
§ 19.5	强度和模量的变化	307
§ 19.6	疲劳特性	311
§ 19.7	平均应力	315
§ 19.8	切口	317
§ 19.9	频率	318
§ 19.10	环境	320
§ 19.11	韦布尔分布和参数估算	324
§ 19.12	疲劳数据库	326
§ 19.13	S-N 曲线的特征	327
§ 19.14	疲劳寿命估算	328
§ 19.15	结论	332
第二十章	切口强度	333
§ 20.1	引言	333

§ 20.2	控制方程	333
§ 20.3	切口强度的估算	335
§ 20.4	切口强度数据	336
§ 20.5	切口强度的排序法	339
§ 20.6	带内含物的层板	343
§ 20.7	结论	349
	参考文献	349
第二十一章	试验方法	351
§ 21.1	拉伸试验	351
§ 21.2	压缩试验	354
§ 21.3	面内剪切试验	355
§ 21.4	弯曲试验	357
§ 21.5	层间剪切试验	359
§ 21.6	I 型断裂韧性试验	360
§ 21.7	II 型断裂韧性试验	362
§ 21.8	结论	362
第二十二章	层间应力	364
§ 22.1	层梁的弹性理论解	364
§ 22.2	数学公式	365
§ 22.3	应力分布	368
§ 22.4	应变分布	370
§ 22.5	位移分布	371
§ 22.6	讨论	373
§ 22.7	结论	375
	参考文献	375
第二十三章	压力容器	376
§ 23.1	引言	376
§ 23.2	问题的数学描述	377
§ 23.3	爆破压力的估算	380
§ 23.4	应力分布	382