

装备科技出版基金

Structural and Failure Mechanics of Sandwich Composites

夹层复合材料结构 与失效机制

[美]雷夫·卡尔松 (L.A. Carlsson)

著

[美]乔治·卡尔德曼特斯 (G.A. Kardomateas)

范金娟 程小全 王占彬 译



国防工业出版社
National Defense Industry Press



Springer



装备科技译著出版基金

夹层复合材料结构 与失效机制

Structural and Failure Mechanics of Sandwich Composites

[美] 雷夫·卡尔松 (L.A. Carlsson) 著
[美] 乔治·卡尔德曼特斯 (G.A. Kardomateas)
范金娟 程小全 王占彬



国防工业出版社

· 北京 ·

著作权合同登记 图字:军—2018—027 号

图书在版编目(CIP)数据

夹层复合材料结构与失效机制/(美)雷夫·卡尔松(L. A. Carlsson),
(美)乔治·卡尔德曼特斯(G. A. Kardomateas)著;范金娟,程小全,王
占彬译.—北京:国防工业出版社,2019.1

书名原文:Structural and Failure Mechanics of Sandwich Composites
ISBN 978-7-118-11645-8

I. ①夹… II. ①雷… ②乔… ③范… ④程… ⑤王…
III. ①复合材料结构—研究 IV. ①TB33

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第239465号

Translation from the English language edition:
Structural and Failure Mechanics of Sandwich Composites
by L.A. Carlsson and G.A. Kardomateas

Copyright© Springer Science+Business Media B.V. 2011

This Springer imprint is published by Springer Nature

The registered company is Springer Science+Business Media B.V.

All Rights Reserved

※

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)

三河市腾飞印务有限公司印刷

新华书店经售

※

开本 710×1000 1/16 印张 18¼ 字数 347 千字

2019年1月第1版第1次印刷 印数 1—2000册 定价 88.00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

译者序

夹层结构复合材料由于其重量轻,刚度大,可设计性强等优点,以及隔热、隔音、耐疲劳的特性,已成功应用于航空航天器的承力结构件。但是夹层结构的使用也给设计带来了许多问题,因为夹层结构,尤其是对于复合材料圆柱夹层结构来说,其损伤破坏形式比层合结构更复杂,结构尺寸和工艺参数也更多,因此影响圆柱夹层结构破坏的因素也更多,对于夹层结构的力学性能表征方法、性能影响因素、失效机制分析就显得更为重要。

在过去的10年,国内有10余种有关先进结构复合材料的专著或译著出版,但这些著作主要集中论述复合材料基体,或工艺,或基础理论,或结构设计,重点集中在复合材料层合结构。而本书主要针对夹层复合材料结构,从面板和芯子的力学性能表征,夹层板、夹层梁、夹层柱的剪切分析,皱曲、局部失稳、脱黏的断裂力学分析及试验等方面系统论述了夹层复合材料的结构与失效机制,采用理论与实践相结合的方法对夹层复合材料结构的失效机理(面/芯脱黏,芯子开裂)及相关断裂机制的分析方法、经典力学问题(夹层板的横向加载,夹芯壳体的内压力)的弹性解进行了系统介绍。迄今为止尚未有这两个方面公开发表的系统研究成果。本书对从事夹层复合材料研究、成型工艺研究、力学性能表征、飞机结构设计、失效分析等方面的人员具有重要的指导作用。

本书的第1章、第3章由程小全、王占彬翻译,第2章、第4章由范金娟、刘杰翻译,第5章、第12章由陶旋姿翻译,第6章、第7章由范金娟、肖淑华翻译,第8章、第9章由刘小辰、程小全翻译,第10章由冯闻、范金娟翻译,第11章及附录由范金娟翻译。全书由范金娟、程小全统稿,由陶春虎审核。

由于译者工作和认识的局限,本书翻译难免有不妥之处,希望读者提出宝贵意见。

译者

2017年10月

前 言

近年来,由于结构减重的迫切需求,夹层材料在结构件上的应用越来越广泛,对夹层材料与结构的力学行为和失效表征方面教材的需求也与日剧增。目前,有关夹层复合材料结构研究出现了大量的新成果,也成功创建了这方面的一些专业杂志。本书除涵盖了传统的研究成果以外,还系统介绍了夹层复合材料结构的失效机理(面/芯脱黏,芯子开裂)及相关断裂机制的分析方法、经典力学问题(夹层板的横向加载,夹芯壳体的内压力)的弹性解。迄今为止尚未有这两个方面公开发表的系统研究成果。

本书主要内容如下。第1章主要定义了夹层复合材料结构的概念,介绍了夹层复合材料在重要结构上的应用以及常见芯子的概念;通过夹层梁的简单分析,提出了面板和芯子刚度与强度的重要性,并列举了典型面板和芯子材料的力学性能。第2章系统介绍了面板与芯子的力学性能试验方法。第3章给出了分析平面夹层板和夹层梁的应力与位移的一阶剪切形变理论。此理论可用于确定夹层板和夹层梁的弯曲挠度、屈曲载荷和扭曲响应。第4章分析和描述了夹层梁三点弯曲的试验方法,并举例说明。第5章简述了夹层板和壳的弹性理论,列举了弹性理论在圆柱壳体结构受压缩和扭转载荷下的应用。第6章给出了芯子的高阶剪切理论。第7章和第8章主要讲述了夹层板一些重要失效模式的分析与试验方法,如整体屈曲和面板皱曲。最后4章给出了另一种非常重要的失效模式——面板/芯子分离以及针对这种失效模式的分析与试验方法。在书的结尾还列举了目前发表的一些有关夹层结构方面的文献。

本书并非包罗万象,没有涉及夹层结构所有方面,如没有包含夹层部件的动态力学分析,也没有包含塑性和大形变问题以及高温行为。此外,夹层结构在循环载荷(疲劳)失效、应力集中或动态载荷导致的局部失效、芯子连接部位失效等方面的重要论题也未做阐述。我们也非常乐意指出,对本书中没有涉及的这些方面应给予关注。

本书的完成离不开朋友与同事的支持和帮助,其中海军研究办公室的 Yapa D. S. Rajapakse 博士作为我们重要的长期支持与合作伙伴,他的视野与观点不仅对我们的研究,而且对促进复合材料结构有效替代金属结构应用于海军装备都具有非常重要的作用。本书第一作者也谨向已故 Alf de Ruvo 博士表达谢意,感谢在

我研究生期间领我进入夹层结构领域以及随后多年来与我在 SCA Research 有关夹层结构富有成效的合作。感谢 DIAB 的 Kilbourn 和 Baltek 的 Kurt Feichtinger 为试验与测试提供了非常有价值的芯子材料。同时,也感谢同事们给与的支持与建议,感谢 George Simites, Victor Birman, Charles W. Bert, Shuki Frostig, Dan Zenkert, Karl-Axel Olsson, Hassan Mahfuz 和 Christian Berggreen 教授,尤其感谢 Frostig 教授对第 6 章(高阶理论)的贡献。此外还要感谢我们的研究生, Francis Aviles, Catherine Ferrie, Huang Haiying, Valeria LaSaponara, Andrew Layne, Li Renfu, Li Xiaoming, Tomas Nordstrand, Poorvi Patel, Srinivas Prasad, Mina Pelegri, Catherine Phan, Felipe Ramirez, Magnus Renman, Scott Sendlein, Vinod Vadakke 和 Gilmer Viana, 对本书作出的突出贡献。另外,2004 年夏天第一作者在卡德洛克美国海军海上系统司令部 (NAVSEA) 的参观,使得作者能够有幸与 Douglas Loup, Diane Hoyns 和 Robert Matteo 在夹层试样与面板研究方面展开合作。感谢 Alejandra Quesada, Riti Waghay, Trudy Jeffries, Nicole Carr, Laura Thornton, Anu Maharaj 和 Megan Crosara 在文字录入方面; Shawn Pennell, Laurie Don-ahue 和 Joshua Kahn 在图片处理方面给予的大力帮助。最后,我们还要感谢施普林格(荷兰)的 Nathalie Jacobs 女士和 Krarada 出版社(斯洛文尼亚)的 Jolanda Karada 女士耐心、灵活地促成了本书的出版。

希望本书能够成为遇到夹层复合材料结构与失效机理方面问题的专业人员参考手册,并帮助他们将其应用于研究或工程实践。

Leif A. Carlsson, 伯克莱屯, 佛罗里达州

G George A. Kardomateas, 亚特兰大, 佐治亚州

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 夹层梁的弯曲刚度	4
1.2 面板与芯子的应力	6
1.3 局部失效	8
1.4 面板和芯子材料	10
第 2 章 面板和芯子的力学性能表征	13
2.1 面板的力学性能	13
2.1.1 各向同性面板	13
2.1.2 复合材料面板	14
2.2 芯子的力学性能	20
2.2.1 拉伸试验	21
2.2.2 压缩试验	22
2.2.3 剪切试验	23
第 3 章 夹层板经典与一阶剪切变形分析	26
3.1 经典层合板理论分析	26
3.1.1 层合板命名法	26
3.1.2 形变运动学	27
3.1.3 层合板内的应力	30
3.1.4 内力与力矩	31
3.1.5 层合板的有效工程弹性常数	33
3.2 夹层板的一阶剪切变形分析	35
3.2.1 夹层板单元本构方程的另一种形式	42
3.2.2 平衡方程	42
3.2.3 矩形板的边界条件	43
3.3 横向载荷作用下的夹层板分析	44
3.4 夹层板扭转试验分析	49
3.4.1 经典层合板理论分析	50

3.4.2	有限元分析	51
3.5	夹层板测试	52
3.5.1	夹层板的压缩	52
3.5.2	板扭转试验	55
第4章	夹层梁的一阶剪切分析	58
4.1	夹层梁分析	58
4.2	夹层梁的三点弯曲	60
4.3	夹层梁弯曲刚度简化分析	62
4.3.1	无轴向力作用的弯曲	63
4.4	夹层梁三点弯曲试验	65
4.4.1	夹层梁的弯曲与芯子的剪切刚度测量	65
4.4.2	芯子剪切强度与面板压缩强度测量	68
第5章	夹层结构的弹性解	71
5.1	具有正交各向异性面板和芯子的矩形夹层板	71
5.1.1	负判别式 D	73
5.1.2	正判别式 D	77
5.1.3	各向同性层	82
5.1.4	举例	86
5.2	含正交各向异性层的夹层柱壳	90
5.2.1	正交各向异性夹层管在内压和(或)外压作用下的广义平面 应变	93
5.2.2	轴向载荷作用下的正交各向异性夹层柱壳	95
5.2.3	夹层壳理论表达式	96
5.2.4	夹层轴的扭转	99
第6章	高阶夹层板理论	101
6.1	基本假设	101
6.2	高阶夹层板理论(HSAPT)	102
6.3	扩展高阶夹层板理论(EHSAPT)	103
6.4	简支夹层梁中的应用	111
6.5	其他高阶夹层板理论	117
第7章	夹层柱和夹层宽板的整体屈曲	118
7.1	Engesser 法	118
7.2	Haringx 法	120
7.3	Allen 公式	121

7.3.1	薄面板	121
7.3.2	厚面板	122
7.4	Bazant 和 Cedolin 公式	125
7.5	Huang 和 Kardomateas 剪切修正公式	127
7.6	整体屈曲公式的比较	128
7.7	简单支撑夹层板的一阶剪切变形屈曲分析	130
7.8	夹层板压缩试验	133
7.8.1	夹层板屈曲载荷的试验测量	138
7.8.2	破坏荷载分析	141
第 8 章	皱曲与局部失稳	146
8.1	皱曲	146
8.1.1	Hoff 和 Mautners 方程	147
8.1.2	Plantema 方程	154
8.1.3	Allen 方程	156
8.1.4	Winkler 弹性基础法	158
8.1.5	举例与皱曲方程比较	160
8.2	蜂窝夹层结构芯格内屈曲	161
8.2.1	Norris 方程	161
8.2.2	Fokker 凹陷方程	163
第 9 章	面/芯脱黏的断裂力学分析	166
9.1	线弹性断裂力学概念	167
9.1.1	有限元裂纹闭合方法	171
9.2	裂纹弯折分析	173
9.2.1	泡沫夹层双悬臂梁 (DCB) 试样的裂纹扩展路径	176
9.3	面/芯界面失效的内聚区模型	180
9.4	夹层梁中面/芯脱黏的能量释放率表达式	184
第 10 章	脱黏断裂试样分析	190
10.1	引言	190
10.2	脱黏试样	191
10.3	双悬臂梁试样	192
10.3.1	裂纹偏转分析	196
10.4	倾斜夹层脱黏 (TSD) 试样	198
10.4.1	混合断裂模式分析	200
10.5	含裂纹的夹层梁试样	201

10.6	单悬臂梁(SCB)试样	204
10.7	夹层梁三点弯曲试样	205
10.8	混合模式弯曲试样	206
10.8.1	解析解与有限元分析	209
10.9	双悬臂梁-非均匀弯矩(DCB-UBM)试样	211
第11章	含脱黏夹层板断裂试验	214
11.1	双悬臂梁(DCB)试验	214
11.2	斜脱黏(TSD)试验	220
11.3	含裂纹的夹层梁(CSB)试验	224
11.4	单悬臂梁(SCB)试验	227
11.5	夹层梁三点弯曲(TPSB)试验	231
11.6	混合模态弯曲(MMB)试验	233
11.7	双悬臂梁-不均匀弯矩(DCB-UBM)试验	234
11.7.1	双悬臂梁-不均匀弯矩(DCB-UBM)试验结果	236
第12章	面/芯脱黏屈曲和扩展	239
12.1	引言	239
12.2	宽板/梁中的面/芯脱黏屈曲	239
12.2.1	渐进展开式	243
12.2.2	前屈曲状态 $O(\xi^0)$	243
12.2.3	(一阶)屈曲方程	244
12.3	宽板/梁中面/芯脱黏的初始后屈曲	246
12.3.1	二阶方程, $O(\xi^2)$	246
12.3.2	三阶方程, $O(\xi^3)$	248
12.3.3	变形分析	251
12.4	面/芯脱黏屈曲及其扩展试验研究	253
12.4.1	夹层柱试验	253
12.4.2	夹层板试验	259
附录A	正轴与偏轴复合材料单元应力-应变关系	265
A.1	正轴系统	265
A.2	偏轴系统	267
附录B	夹层板柔度矩阵计算	268
附录C	索思韦尔法(Southwell Method)	270
参考文献		272

第 1 章 绪 论

夹层结构通常由两块“面板”和它们中间的“芯子”粘接而成,面板材料致密、刚度与强度高,芯子一般为厚的轻质材料。夹层结构酷似工字梁,但却是二维的,受载时面板承受弯曲载荷,芯子承受剪切载荷。平面夹层结构与曲面夹层结构如图 1.1 所示。

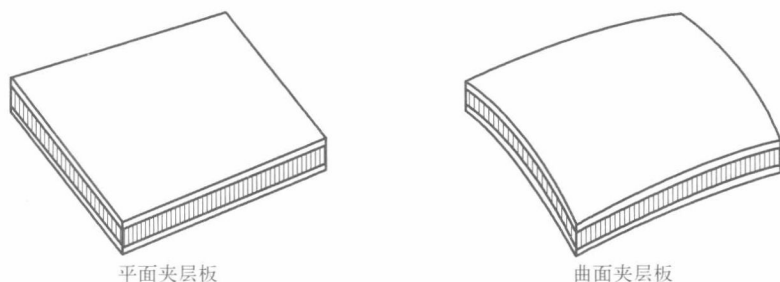
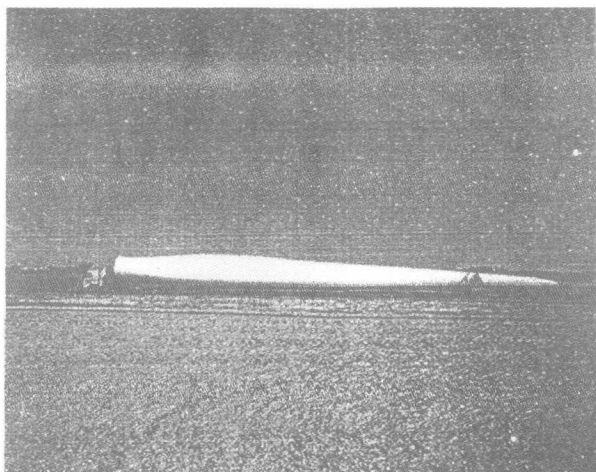


图 1.1 平面与曲面夹层结构

夹层结构可以使质量要求苛刻的构件如飞机部件、空间结构、体育器材、舰船结构、风力发电机叶片等实现最优设计,如图 1.2 所示。



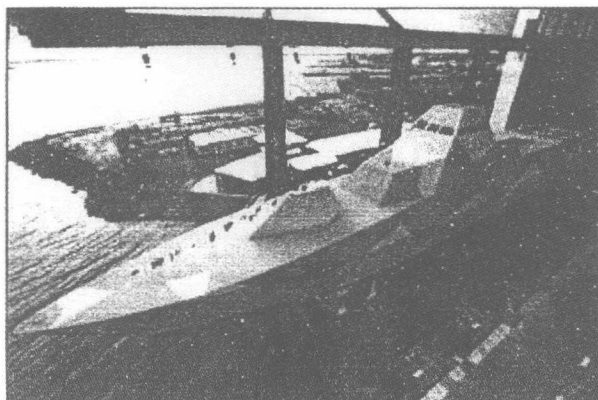


图 1.2 夹层结构应用举例

夹层结构除承载效率高外,其理念还用于多功能结构的设计。图 1.3 所示为美国海军雷德福(Radford)导弹驱逐舰封闭式桅杆,其表面蒙皮即夹层结构,通过在芯子中埋置吸波材料,使该桅杆具有雷达隐身功能。

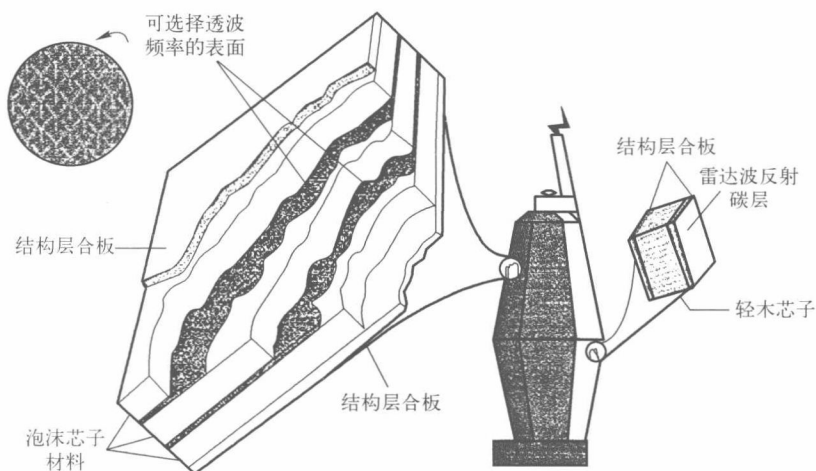


图 1.3 Radford 导弹驱逐舰桅杆蒙皮夹层结构截面图

除先进结构方面的应用外,夹层结构的理念还应用于包装材料,例如,瓦楞纸板(图 1.4)。一些天然材料和结构,如人类和动物的骨骼与头骨以及鸟类的翅膀也是夹层结构(Gibson and Ashby, 1997)。

芯子材料可分为两大类,即多孔式和架构式。多孔式指的是材料由“孔”组成,即由周期重复的壁包围形成一个个“孔”(图 1.5)。多孔泡沫,如聚合物或金属泡沫、蜂窝芯子、轻木芯子均在结构上得到了广泛应用。腹板芯子(Web core)则

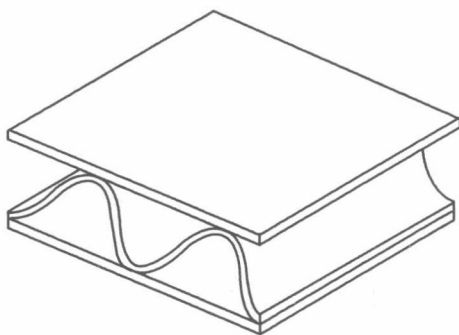


图 1.4 包装箱用的瓦楞夹层纸板

是一种架构芯子,它是由连续的固体材料腹板组成,这种方式将面板隔离,可有效传递剪切力。

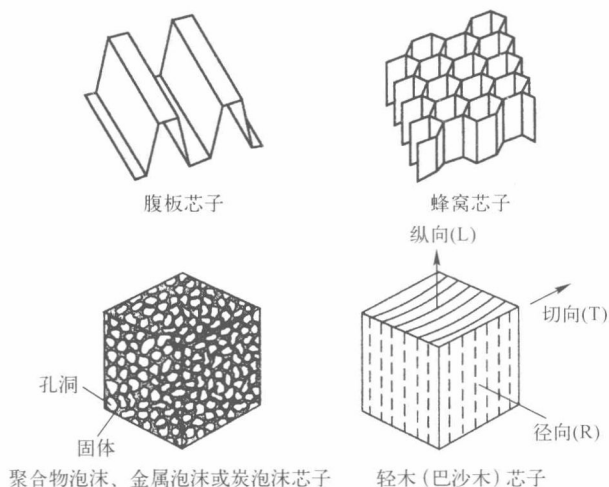


图 1.5 用于夹层结构的芯子形式

由于夹芯质量轻,其刚度与强度按密度分级(Gibson and Ashby, 1997),所以它通常是夹层结构中的薄弱部位。在有些情况下,面板与芯子的粘接质量是决定夹层结构完整性的关键。

想要合理地选择面板与芯子材料,需要了解夹层结构的力学性能。本章将介绍夹层结构的一些基本的承载方式和失效模式。了解面板与芯子对夹层结构刚度和强度的贡献,能够指导设计者选择合适的材料设计出轻质可靠的结构。夹层结构几乎全部是平面或曲面板(图 1.1),很多情况下可以简化为夹层梁来处理。本章将重点介绍夹层梁结构,层合面板将在后面的章节详细以介绍。

1.1 夹层梁的弯曲刚度

夹层梁的弯曲刚度 $E_x I$ 可以从平行移轴定理 (PAT) (Gere, 2004) 获得, 以组份模量与厚度方式给出刚度 $E_x I$ 对于如图 1.6 所示的对称截面, PAT 定理为

$$E_x I = E_x^c I_c + 2E_x^f I_f \quad (1.1)$$

式中: I_c, I_f 为芯子与面板相对于中性轴 (y 轴) 的惯性矩。

$$I_c = \frac{bh_c^3}{12} \quad (1.2a)$$

$$I_f = \frac{bh_f^3}{12} + bh_f d^2 \quad (1.2b)$$

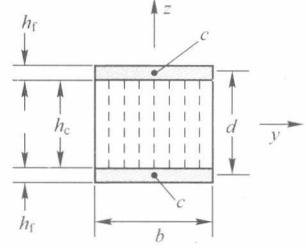


图 1.6 对称夹层梁剖视图
(c 代表每个面板的质心位置,
 y 代表梁的中心轴)

因此, 夹层梁单位宽度的弯曲刚度变为

$$\frac{E_x I}{b} = \frac{E_x^c h_c^3}{12} + E_x^f \left(\frac{h_f^3}{6} + \frac{h_f d^2}{2} \right) \quad (1.3)$$

$E_x I/b$ 通常被称为“弯曲刚度” D_x 。式 (1.3) 则简化为

$$D_x = E_x^f h_f d^2 \left[\frac{h_c^3}{12h_f d^2} \left(\frac{E_x^c}{E_x^f} \right) + \frac{1}{6} \left(\frac{h_f}{d} \right)^2 + \frac{1}{2} \right] \quad (1.4)$$

夹层结构要求质量轻, 因此在确定最佳刚度时须考虑结构的密度, 密度即夹层梁质量 W 除以梁的宽度和长度, 为

$$\frac{W}{bl} = 2h_f \rho_f + h_c \rho_c \quad (1.5)$$

式中: ρ_f, ρ_c 分别为面板和芯子的密度 (单位体积的质量)。

那么夹层梁的平均密度 (有效密度) ρ^* 则为

$$\rho^* = 2 \frac{h_f}{h} \rho_f + \frac{h_c}{h} \rho_c \quad (1.6)$$

式中: h 为夹层结构的总厚度 ($h = 2h_f + h_c$)。

图 1.7 所示为由铝面板与 H100 PVC 泡沫组成的典型夹层结构的 D_x 与 $E_x^f h_f d^2$ 的比值 ρ^* 与 ρ_f 比值随芯子/面板厚度比 (h_c/h_f) 的变化规律。 $E_x^f = 70\text{GPa}$, $E_x^c = 0.1\text{GPa}$, $\rho_f = 2.7\text{g/cm}^3$, $\rho_c = 0.1\text{g/cm}^3$ 。典型芯子与面板材料的性能见表 1.1 ~ 表 1.4。从图 1.7 可以看出, 夹层梁弯曲刚度与密度均随芯子/面板厚度比的增加而降低。归一化的弯曲刚度在厚度比值较小时下降较快, 接近于 1/2, 而归一化密度则随 h_f/h_c 比值的下降持续降低。

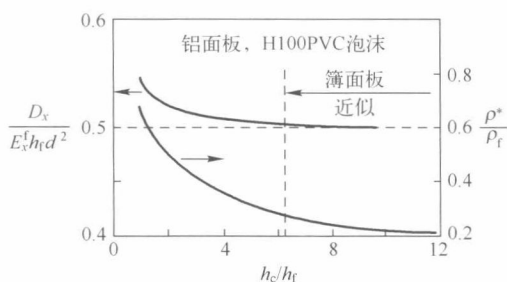


图 1.7 夹层梁的弯曲刚度和密度随芯子/面板厚度比的变化曲线
(面板为铝, 芯子为 H100PVC 泡沫)

式(1.4)中括号内的第一项代表芯子对弯曲刚度的贡献。由于上述夹层结构芯子与面板模量比值小(0.00143), 所以这一项的贡献较小, 另外, 对于大多数面板与芯子材料来说, 第1项的贡献均较小, 具体如表 1.1~表 1.4 所列。式(1.4)中括号内的第二项在面板非常厚时对弯曲刚度贡献作用才明显, 如图 1.7 所示。实际应用的大多数夹层结构采用的是薄面板, 所以只与尺寸相关的第二项较于第三项(1/2)可以忽略, 根据这一点, 可以设定芯子/面板厚度比的下限值, 使得第二项对弯曲刚度的影响小于 1%。根据式(1.4), 有

$$h_c/h_f \geq 5.35 \quad (1.7)$$

如果满足上面的不等式, 则可将之看成“薄面板夹层板”, 其弯曲刚度变为

$$D_x = \frac{E_x^f h_f d^2}{2} \quad (1.8)$$

从式(1.8)可以看出, 要得到高的弯曲刚度需注意两个重要因素, 即高的面板模量 E_x^f 和大的面板间距离 d 。增大面板厚度 h_f 对增大刚度似乎有利, 但从重量的角度考虑是不合适的, 如图 1.7 所示。所以, 从弯曲刚度和重量这两方面考虑, 大多夹层结构设计倾向于采用薄的高模量面板和低密度的芯子材料。

表 1.1 面板材料的力学性能

材 料	ρ /(g/cm ³)	E /GPa	G /GPa	ν	X_T / MPa	X_C / MPa
铝(2024-T3)	2.80	73	27.4	0.33	414	414
钢(AISI 1025)	7.80	207	80.0	0.30	394	394
钛	4.40	108	42.4	0.30	550	475
S-玻璃/环氧 ^①	1.73	20.6	3.10	0.12	261	177

(续)

材 料	ρ /(g/cm ³)	E /GPa	G /GPa	ν	X_T / MPa	X_C / MPa
E-玻璃/环氧 ^①	2.00	26.6	4.63	0.144	422	410
AS4-碳/环氧 ^①	1.63	59.5	4.96	0.047	584	491

① 复合材料由0°和90°纤维织物和环氧树脂基体构成
 ρ —密度; E —弹性模量; G —剪切模量; ν —泊松比; X —强度; T—拉伸; C—压缩

1.2 面板与芯子的应力

如图 1.8 所示,夹层单元体承受纯弯曲载荷时,由于大多数芯子都是柔性材料,其弯曲刚度没有明显贡献,若面板相对芯子较薄,则弯矩 M 与作用在面板形心上的等值拉伸、压缩内力(“一对”)平衡,如图 1.9 所示。

如果忽略芯子中的弯曲应力,则在图 1.9 所示的平衡单元体面板内将产生平均弯曲应力。

$$\sigma = \frac{M}{bdh_f} \quad (1.9)$$

式中: d 为面板形心间距, $d = h_c + h_f$, h_c 和 h_f 分别为芯子与面板的厚度; b 为单元体的宽度(图 1.6)。

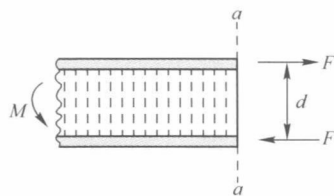
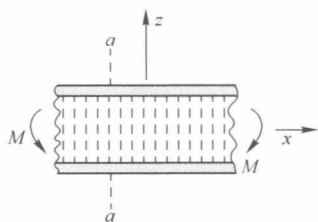


图 1.8 纯弯曲下的夹层结构单元体

图 1.9 弯曲载荷作用下面板内力的示意图

注意,对于图中所示加载方式,上表面的 σ 为拉应力(正值),下表面的为压应力(负值)。因此,面板需要足够的拉伸与压缩强度,以承受弯曲载荷的作用。

如果作用在夹层梁上的弯矩沿长度方向发生变化,通过平衡分析(Gere, 2004)将发现在垂直梁轴线的横截面上会有一个剪切力 V (图 1.10)。

$$V = \frac{dM}{dx} \quad (1.10)$$

通过图 1.11(b)所示 mm_1ba 单元体的平衡分析,可以得到作用在芯子上的剪应力 τ_{xz} 。由单元体左侧应力 σ 合成的水平(x 轴)载荷为

$$F_1 = \sigma b h_f = \frac{M}{d} \quad (1.11)$$

相应的作用在单元体右侧的水平载荷为

$$F_2 = \frac{M+dM}{d} \quad (1.12)$$

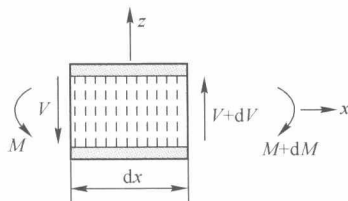


图 1.10 变化弯矩作用下的夹层梁单元

由作用在 ab 间芯子表面的剪应力所形成的水平载荷为

$$F_3 = \tau_{xz} b dx \quad (1.13)$$

上表面(mm_1)不受剪切力作用,由平衡方程得到:

$$\tau_{xz} = \frac{dM}{dx} \frac{1}{bd} = \frac{V}{bd} \quad (1.14)$$

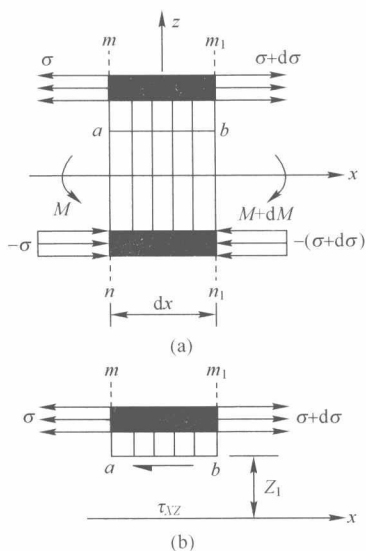


图 1.11 用于计算芯子剪切应力的夹层板单元体

以上方程是基于薄面板/柔性芯子的假设进行的推导,所得到的芯子剪应力是均匀的(与 z 向位置无关)。精确分析(Zenkert, 1997)表明该剪应力从面/芯界面到面板外表面几乎呈线性下降,其值从 $V/(bd)$ 降至 0。式(1.14)表明,芯子需要选择具有高剪切强度的材料。然而,对于后面要讨论的低模量的芯子(表 1.2~表 1.4),芯子可能发生大的剪切变形,并可能影响夹层结构的整体变形。因此,为避免夹层结构发生大的剪切变形,所采用的芯子必须具有足够高的剪切模量。