

夹层结构手册

The Handbook of Sandwich Construction

【瑞典】丹·森科特 著

陈秀华 胡 培 王 杰 译



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

总主编 顾诵芬

夹层结构手册

The Handbook of Sandwich Construction

【瑞典】丹·森科特 著
陈秀华 胡 培 王 杰 译



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

内容提要

本书概述夹层结构材料的基本特性,总结现有的理论和设计方法并覆盖新的研究成果,对夹层结构涉及的方方面面给出一个综合的论述。读者可以直接使用书中的内容。书中提供了工程设计的实际结果及其对应的使用方法。本书既可以作为一个简单的工业部门产品设计手册和知识库,也可以作为工科研究生教科书。

Copyright © 1997 Engineering Materials Advisory Services Ltd.
All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in retrieval system or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photo-copying, electrostatic, magnetic tape, recording or otherwise, without the prior written permission of Engineering Materials Advisory Services Ltd., United Kingdom.
上海市版权局著作权合同登记号: 09-2016-794

图书在版编目(CIP)数据

夹层结构手册/(瑞典)丹·森科特(Dan Zenkert)著;陈秀华,胡培,王杰译. —上海:上海交通大学出版社,2016
(大飞机出版工程)
ISBN 978-7-313-16411-7

I. ①夹… II. ①丹…②陈…③胡…④王… III. ①航空器—夹层构件—手册
IV. ①V229-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 319275 号

夹层结构手册

著 者:【瑞典】丹·森科特	译 者:陈秀华 胡 培 王 杰
出版发行:上海交通大学出版社	地 址:上海市番禺路 951 号
邮政编码:200030	电 话:021-64071208
出 版 人:郑益慧	
印 制:上海盛通时代印刷有限公司	经 销:全国新华书店
开 本:787mm×1092mm 1/16	印 张:24.75
字 数:481 千字	
版 次:2016 年 12 月第 1 版	印 次:2016 年 12 月第 1 次印刷
书 号:ISBN 978-7-313-16411-7/V	
定 价:158.00 元	

版权所有 侵权必究
告读者:如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系
联系电话:021-61453770

译者序

10 多年前,中国开展大型飞机研发工作,随着科研工作的展开,我们也开始全面接触夹层结构,当初国内还未有专门论述夹层结构的著作,只能参考复合材料相关著作中关于夹层结构的章节。

KTH(瑞典皇家理工学院)等北欧的大学、研究所和相关企业,对夹层结构开展了全面、深入而持久的研究,并取得了很多实用并令人瞩目的成果,积极地推动了夹层结构的应用,但是文献分布比较分散。

本书对欧洲近期对夹层结构的一系列的研究做了汇总,全面综合地叙述了夹层结构的材料特征、结构分析、无损检测、制造工艺、测试方法和节点设计等,除了声学 and 电性能以外,几乎涵盖了夹层结构应用的相关课题,尤其是泡沫芯材夹层结构。

本书的译者们来自上海交通大学、中国商飞、湖南兆恒公司、东方航空公司等,他们均在理论研究、型号的研发、设计、生产工作中具有充分的实际经验,因此通过对本书的理解,翻译并汇总了本书的内容,期望能够对读者有所帮助。本书结合 HEXCEL 公司 Tom Bitzer 著《Honeycomb Technology》和 Lorna. J. Gibson/Michael F. Ashby 著《多孔固体的结构与性能》,读者会对整个多孔固体和夹层结构有非常深入的了解,译者希望能够通过本书的翻译和出版,推动夹层结构在国内的应用和发展。

全书由陈秀华统稿,各章节的翻译和校对人员如下:

第 1 章介绍由范海涛翻译,陈秀华审校;第 2 章材料和材料性能由范海涛翻译,胡培审校;第 3 章梁的分析和第 4 章平板分析由王杰翻译,余音审校;第 5 章设计过程由刘兴宇翻译,余音审校;第 6 章有限元分析与设计由陈秀华翻译,刘衰财审校;第 7 章曲梁和板的设计由王爱军翻译,王杰审校;第 8 章局部载荷由伍春波翻译,刘衰财审校;第 9 章夹层板的嵌入件由刘衰财翻译,王爱军审校;第 10 章夹层板的连接由王爱军翻译,陈秀华审校;第 11 章材料、构件和结构的试

验由陈秀华翻译,伍春波审校;第12章热绝缘和第13章无损检测由胡培翻译,陈秀华审校;第14章损伤评估由廉伟翻译,陈秀华审校;第15章制造由廉伟翻译,刘沛禹审校。

本书在编写过程中得到了上海交通大学出版社钱方针、陈昕伊、王珍编辑的大力协助,也正是在几位编辑的帮助和督促下,本书得以按照进度完成。本书同时得到了湖南兆恒公司的大力协助,再次一并表示感谢。并且本书的作者也针对本书完成了部分设计软件,软件可以在 <http://www.vbean.com.cn> 网站上下载。

译者

2016年10月

序

多年来,北欧的大学、研究机构和工业部门共同对夹层结构各个方面做了深入研究。然而,人们普遍认为,夹层结构概念想要进一步发展,不仅需要通过深入研究获取专业知识,也许更需要广大的工程师和设计师更多地掌握一些基本知识,并以更广的视角看待夹层概念。大多数工程师对金属和复合材料的设计、选材等已非常熟练且经验丰富,但对夹层结构的设计却缺乏基本理论知识、经验和信心。事实上很多人对夹层结构尤其是芯材既陌生又新鲜,且充满了疑虑。虽然夹层结构的许多问题仍有待深入研究,但大家普遍认为,如果大多数工程师和设计师有机会获得夹层结构的基本知识和概念,那么在未来几年夹层结构的应用有望快速增长。

目前尚没有一个详细的关于夹层结构的分析方法、材料特征、设计准则以及最先进研究结果的公开著作。现有文献都是各种期刊上的十分学术化的论文或者分散的简报。

本书的目的是概述典型材料的基本特性,总结现有的理论和设计方法并覆盖新的研究成果,也即对夹层结构涉及的方方面面给出一个综合的论述。希望读者可以理解并直接使用书中的内容。书中没有冗长的推导过程,只提供实际的结果及其对应的使用方法。本书既可以作为一个简单的设计手册和知识库,也可以作为工科研究生教科书。

本书的初衷是总结现有知识,创建一个合适的论坛,并从工程的角度展示北欧工业基金(NI)框架内的研究结果。书中每一章的内容大多来源于一个或几个NI赞助研究的技术项目,包括:

项目编号	项目名称	本书章节
P89038	夹层结构损伤容限	11, 13, 14
P89185	玻璃纤维夹层结构耐久性	6, 11
P90044	单曲夹层板壳的设计准则	7

(续表)

项目编号	项目名称	本书章节
P90149	夹层结构研究的结果普及	1~5, 12
P92043	夹层结构的破坏和回收	
P93211	动载荷下的夹层结构	11
P93212	复合材料连接和夹层结构	8~10
P93214	高性能热塑性复合材料以及夹层构件的制造	15
P93215	海上复合材料结构	
P93216	热固性复合材料的回收	
P93218	联合工作以及手册编写	所有

符 号

下面是本书中使用的一些标记和符号。有些符号在不同的章节意义不同,在文章中给出了具体的定义,其余的符号在文章中没有给出定义。

拉丁字母	意义	单位
C	柔度系数	mm/N
C_E, C_G, C_τ	定义夹芯材料性能的常数	
D	弯曲刚度	N · mm
D_0, D_f, D_c	夹层结构中各组分的弯曲刚度	N · mm
E	杨氏弹性模量	N/mm ² (MPa)
G	剪切模量	N/mm ²
G	能量释放率	N/mm
K	屈曲系数	—
K_I, K_{II}	模型 I 和模型 II 的应力强度因子	MPa $\sqrt{m}$
$K_x K_z$	模数	N/mm ³
L	梁的长度	mm
M	弯曲力矩	N · mm
N	法向力	N/mm
P	载荷(线载荷)	N/mm
Q	集中载荷	N
Q	14 章中的广义应力强度因子	N · mm ^{$\lambda-2$}
R	壳体的反作用力或者初始半径	N/mm 或者 mm
$\mathcal{R}$	转动惯量	kg · m ²
S	抗剪刚度	N/mm
T	横向力	N/mm
T_1, T_2, T_m	温度	K
U	应力能;势能	N · mm
W	质量	kg

Z	曲率参数	—
A, B, D	延伸矩阵,耦合矩阵,弯曲刚度矩阵	
a, b	矩形板的边长(梁的宽度)	mm
a	热传递系数	$W/m^2 \cdot K$
d	夹层板形心之间的距离	mm
e	中性轴的位置	mm
k	热传导系数	$W/m^2 \cdot K$
k_b, k_s	梁和板的变形系数	—
k_T, k_M	负载常数,外形常数	—
m, n	模式,指数	—
p_x, p_z	表面载荷	N/mm^2
q_x, q_z	第 8 章的界面应力分量	N/mm^2
q	分布载荷(力/表面积)或热流密度	N/mm^2 或 W/m^2
r, φ, z	圆柱坐标	mm, rad, mm
t	部件厚度	mm
u, v, w	x, y, z 方向的变形量	mm
w_b, w_s	由于弯曲和剪切各自引起的变形	mm
x, y, z	笛卡尔直角坐标系	mm
x^*	衰减长度	mm
z_i	单面的局部坐标 z 轴	mm
希腊字母	意义	单位
α	热膨胀系数	K^{-1}
ε	应变	—
κ	曲率	mm^{-1}
γ, γ_0	横向剪切应变和面内剪切应变	—
η	弯曲效率因子	—
λ	波长或热传导率	mm 或 W/mk
θ	泊松比	—
ρ	FEM 中的剪力系数或节点旋转量	kg/m^3
ρ^*	单位表面积上的质量	kg/m^2
σ	正应力	N/mm^2 (MPa)
τ	剪应力	N/mm^2 (MPa)
下标	意义	
x, y, z	笛卡尔坐标下各方向的性能	
r, φ, z	圆柱坐标下各方向的性能	

c	夹芯的性能
f	面板的性能
1, 2 或 f1, f2	不同层上的性能
L, R	左, 右
I, II, I c, II c	模式 I 和模式 II, c 表示临界值
elastic, plastic	弹性的, 塑性的
max, min	最大值, 最小值
tan	正切缩写
tot	总量
b	纯弯曲
r	减缩模量
s	纯剪切
y	屈服点
上标	意义
$\wedge$	极限值
—	最大值
运算符	意义
d/dx_i	微分
$\partial/\partial x$	偏微分
Δ	拉普拉斯算子

目 录

1	介绍	1
1.1	历史背景	1
1.2	夹层板的定义	2
1.3	优点和缺点	3
1.4	应用	4
	参考文献	7
2	材料和材料性能	9
2.1	面板材料	9
2.1.1	金属面板材料	10
2.1.2	非金属面板材料	11
2.1.3	纤维复合材料性能的估算	15
2.2	夹芯材料	20
2.2.1	Balsa 木	21
2.2.2	蜂窝夹芯	22
2.2.3	多孔泡沫	30
2.2.4	性能估算	33
2.2.5	疲劳特性	34
2.2.6	断裂韧性	39
2.2.7	夹芯材料的制备和定制	39
2.3	胶黏剂	41
2.3.1	对胶黏剂的要求	41
2.3.2	胶黏剂及其性能	43
	参考文献	45

3 梁的分析 47

- 3.1 定义和符号 47
- 3.2 弯曲刚度 48
- 3.3 应力和应变 49
- 3.4 横向剪切变形和剪切刚度 51
- 3.5 变形分量 52
- 3.6 惯性载荷 53
- 3.7 平衡方程 54
- 3.8 梁的控制方程 54
- 3.9 刚性夹芯 56
- 3.10 一般屈曲 56
- 3.11 夹层梁的局部屈曲 57
- 3.12 扭转 60
- 3.13 案例 60
 - 3.13.1 悬臂梁 60
 - 3.13.2 在点载荷作用下的双支承梁 61
 - 3.13.3 在单位分布载荷作用下的双支承梁 64
 - 3.13.4 在静水压作用下的双支承梁 66
 - 3.13.5 超静定梁计算范例 67
 - 3.13.6 梁的自由振动 68

参考文献 70

4 平板分析 71

- 4.1 定义及符号约定 71
- 4.2 截面特性 72
- 4.3 应力和应变 73
- 4.4 热应力和应变 75
- 4.5 平衡方程 77
- 4.6 变形分量 78
- 4.7 夹层板的控制方程 78
- 4.8 边界条件 81
- 4.9 旋转对称板 83
- 4.10 矩形板的弯曲 85
 - 4.10.1 各向同性、薄面板简支板——均布载荷 85
 - 4.10.2 各向同性、厚面板简支板——均布载荷 87

- 4.10.3 各向同性、简支厚面板——集中载荷 88
- 4.10.4 正交各向异性的简支、薄面板——均布载荷 89
- 4.10.5 均匀载荷分布下薄面板夹层板的近似解 95
- 4.11 矩形板的屈曲 99
 - 4.11.1 简支、各向同性、薄面板夹层板的屈曲 99
 - 4.11.2 简支、各向同性厚面板夹层板的屈曲 101
 - 4.11.3 简支、正交各向异性、薄面板夹层板的屈曲 101
 - 4.11.4 各向异性薄面板夹层板在各种边界条件下的近似屈曲方程 104
 - 4.11.5 剪切屈曲 109
- 4.12 复合屈曲及横向载荷 110
- 4.13 矩形板的自由振动 111
 - 4.13.1 简支各向同性薄面板夹层板 111
 - 4.13.2 简支、各向同性厚面板夹层板 111
- 参考文献 112

5 设计过程 114

- 5.1 梁和板的失效 115
- 5.2 失效模型图 119
- 5.3 其他设计约束 121
- 5.4 设计过程 121
 - 5.4.1 厚度的选择 122
 - 5.4.2 确定尺寸的过程 123
 - 5.4.3 单一参数优化 125
 - 5.4.4 给定的刚度下最小的重量 125
 - 5.4.5 在给定强度下的最小重量 127
 - 5.4.6 通常的优化设计方法 128

参考文献 128

6 有限元分析与设计 130

- 6.1 一般说明 130
- 6.2 对夹层结构的特殊考虑 131
- 6.3 线性分析 131
- 6.4 局部影响：连接和载荷引入 136
- 6.5 动力学问题和稳定性 137
- 6.6 优化设计 137

6.7 非线性分析 138

6.7.1 非线性夹芯材料 139

6.7.2 非线性面板材料 141

6.7.3 大位移平板分析 142

6.7.4 杂项 144

参考文献 145

7 曲梁和曲板的设计 147

7.1 曲夹层板承受压缩载荷作用 147

7.1.1 各向同性夹芯 147

7.1.2 不同厚度面板的影响 150

7.1.3 曲板的褶皱 153

7.2 曲夹层梁受弯曲 154

7.2.1 应力和变形 154

7.2.2 曲夹层梁的手工计算 154

7.2.3 曲夹层梁弯曲时的强度 155

参考文献 156

8 局部载荷 157

8.1 理论背景——基本弹性分析 157

8.2 考虑局部载荷的设计 160

8.2.1 工程设计问题的解决方法 160

8.2.2 实例 161

8.2.3 参数影响 163

8.3 设计图解法 164

8.3.1 单位集中载荷 P_0 165

8.3.2 均布载荷 p_0 167

8.3.3 单位弯矩载荷 M_0 169

8.4 案例 171

8.4.1 案例 1 171

8.4.2 案例 2 173

8.5 总结 175

致谢 176

参考文献 176

9 夹层板的嵌入件 178

9.1 嵌入的目的 178

9.1.1 影响区域 179

9.2 包含的元件 180

9.2.1 不同嵌入形式 180

9.2.2 夹层板 181

9.2.3 固定组分 182

9.3 元件间的载荷传递 182

9.3.1 面板/嵌入界面 183

9.3.2 夹层/嵌入的交界 184

9.4 被动嵌入 184

9.4.1 面板开孔 184

9.4.2 嵌入件壁板受剪 185

9.5 总结 185

9.6 算例 186

9.6.1 自行嵌入的螺钉或铆钉 188

9.6.2 部分嵌入 189

9.6.3 贯穿板厚的嵌入 192

9.6.4 带有法兰翻边端部的贯穿板厚的嵌入 192

参考文献 193

10 夹层板的连接 194

10.1 基本类型 194

10.2 载荷传递 194

10.3 T型连接 195

10.4 L型连接 196

10.5 V型连接 198

10.6 局部变形 199

10.6.1 挠度 199

10.6.2 面板的弯曲应力 201

10.7 算例(T型连接) 202

10.8 算例(L型连接) 203

10.9 T型连接的试验和观察 204

参考文献 207

- 11 材料、构件和结构的试验 208
 - 11.1 材料试验的基本知识 208
 - 参考文献 210
 - 11.2 面板材料 210
 - 11.2.1 拉伸试验 210
 - 11.2.2 压缩试验 213
 - 参考文献 215
 - 11.2.3 面内剪切试验 216
 - 11.2.4 层间剪切试验 222
 - 参考文献 223
 - 11.2.5 弯曲试验 223
 - 参考文献 225
 - 11.2.6 冲击试验 225
 - 参考文献 229
 - 11.2.7 冲击后的压缩 230
 - 参考文献 231
 - 11.2.8 疲劳试验 231
 - 参考文献 232
 - 11.2.9 动态性能测试 232
 - 参考文献 234
 - 11.2.10 断裂韧性试验 235
 - 参考文献 243
 - 11.2.11 高应变率 243
 - 参考文献 245
 - 11.2.12 蠕变试验 245
 - 参考文献 248
 - 11.2.13 纤维体积分数试验 251
 - 参考文献 252
 - 11.2.14 孔隙率试验 252
 - 参考文献 253
 - 11.2.15 固化度 253
 - 参考文献 254
 - 11.2.16 其他试验 254
 - 参考文献 255
 - 11.3 夹芯材料 256

11.3.1 拉伸试验	257
参考文献	257
11.3.2 压缩试验	259
参考文献	259
11.3.3 剪切试验	261
参考文献	261
11.3.4 弯曲试验	262
参考文献	262
11.3.5 疲劳试验(剪切块试验)	262
参考文献	263
11.3.6 断裂韧性试验	263
参考文献	264
11.3.7 高应变率	267
参考文献	267
11.3.8 蠕变试验	269
参考文献	269
11.3.9 密度试验	269
参考文献	269
11.3.10 热传导特性试验	270
参考文献	270
11.3.11 热膨胀系数	271
参考文献	272
11.3.12 吸湿试验	272
参考文献	272
11.3.13 透湿性	273
参考文献	273
11.3.14 其他试验	274
参考文献	274
11.4 夹层结构(包括芯材/面板的粘接)	275
11.4.1 拉伸试验	278
参考文献	278
11.4.2 面外剪切试验	279
参考文献	280
11.4.3 面内剪切试验	281
参考文献	281