


**21**

世纪复合材料应用技术丛书

丛书主编 刘雄亚



# 夹层结构复合材料 设计原理 及其应用

王兴业 杨孚标 曾竟成 肖加余 编著

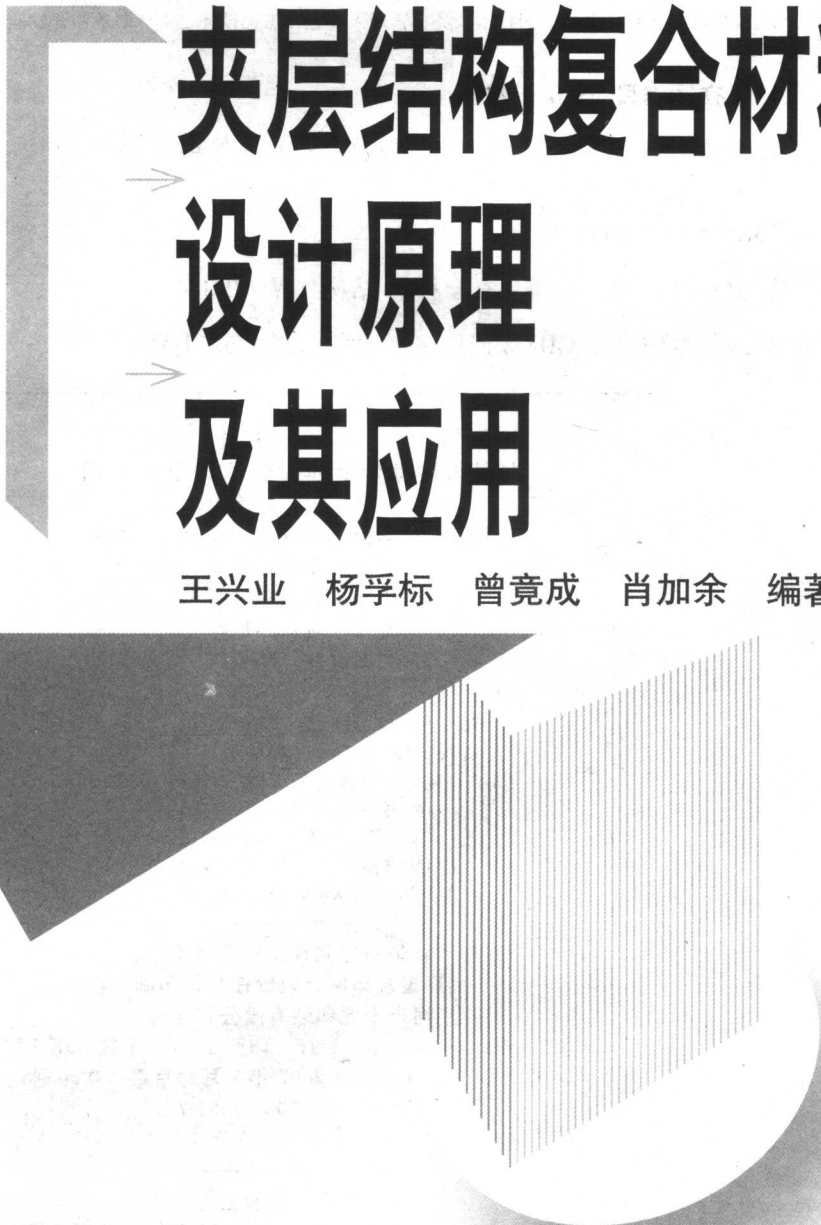


化学工业出版社  
材料科学与工程出版中心

**21**

世纪复合材料应用技术丛书

丛书主编 刘雄亚



# 夹层结构复合材料 设计原理 及其应用

王兴业 杨孚标 曾竟成 肖加余 编著



化学工业出版社

材料科学与工程出版中心

·北京·

本书为《21世纪复合材料应用技术丛书》之一。从复合材料的夹层结构基本原理出发,对夹层结构的力学性能、工程设计方法、制造工艺及工程应用进行了全面的论述,并对不同组合材料的夹层结构的弯曲和稳定问题进行了详细的分析。全书在内容安排及叙述上注重突出系统性、前沿性和实用性,适应了材料科学与工程发展要求。

本书可作为复合材料及工程专业的研究生的基础教材和力学、机械专业相应课程的教学参考书,也可作为复合材料夹层结构技术人员、管理人员进行工程设计、生产制造和开发应用的参考书。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

夹层结构复合材料设计原理及其应用/王兴业等编著.  
北京:化学工业出版社,2006.7  
(21世纪复合材料应用技术丛书)  
ISBN 978-7-5025-9069-7

I. 夹… II. 王… III. 复合材料-结构 IV. TB330.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 075911 号

---

### 21 世纪复合材料应用技术丛书 夹层结构复合材料设计原理及其应用

丛书主编 刘雄亚  
王兴业 杨孚标 曾竟成 肖加余 编著  
责任编辑:张玉崑  
文字编辑:麻雪丽  
责任校对:洪雅妹  
封面设计:郑小红

\*

化学工业出版社 出版发行  
材料科学与工程出版中心  
(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

购书咨询:(010)64982530

(010)64918013

购书传真:(010)64982630

<http://www.cip.com.cn>

\*

新华书店北京发行所经销  
大厂聚鑫印刷有限责任公司印刷  
三河市万龙印装有限公司装订  
开本 720mm×1000mm 1/16 印张 14¼ 字数 261 千字  
2007 年 1 月第 1 版 2007 年 1 月北京第 1 次印刷  
ISBN 978-7-5025-9069-7  
定 价:36.00 元

---

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责退换

## 丛书前言

材料是人类赖以生产、生活所必需的物质基础，也是社会文明进步的标志。在人类历史发展过程中，每一种新材料的出现和制造技术的进步，都不同程度地促进了社会生产力的发展。

复合材料是指由两种以上的异质、异形、异性的材料，经过复合而形成的新材料，它除保留原组分材料的主要特点外，还能通过复合效应获得原有组分材料所不具备的新的优异性能。按其基体材料的不同，复合材料可分为聚合物（树脂）基复合材料、金属基复合材料和无机非金属材料基复合材料三大类。

在 2200 年前，我们的祖先就已开始利用复合材料。如在西安半坡村原始人遗址中发现，用草（天然纤维）拌泥作墙和地面，防止黏土干裂和剥落，提高墙体与地面的强度和耐风雨侵蚀能力，这可以看作是纤维增强无机复合材料的始祖。1972~1974 年在我国湖南马王堆古墓中出土的漆器是西汉时代的文物，它是用丝和麻作增强材料，用大漆作胶黏剂制成的鼎、酒壶、盆具、茶几等物品，在地下埋藏了两千多年，仍然熠熠生辉。湖北隋县出土的曾侯乙墓中，有许多用于战车的戈戟和殳，它们的柄是用 3~4m 长的木杆芯，外面包以纵向竹丝，再用大漆和蚕丝进行环向缠绕，然后再浸渍大漆经干燥后形成复合材料，产品坚硬光滑，耐水耐热，耐化学腐蚀。这和现今的树脂基纤维缠绕增强复合材料的成型是相似的。魏晋南北朝时期，在改革底胎和面漆的基础上，先塑造出泥胎，再在泥胎上粘贴麻布、涂漆和彩绘，当油漆干固后挖出并用水冲去泥胎，形成中空漆麻复合材料佛像。这种佛像轻巧美观、坚固耐久，几米高的佛像，一个人就可以举着行走（称为“行像”）。这种技术流传到日本后，至今还保留着当年唐代高僧鉴真和尚东渡日本，在该国圆寂时塑制的漆麻复合材料座像，作为日本的国宝文物，每年只对外开放几天，供人瞻仰。这种制造佛像技术与当今的手糊玻璃钢成型工艺几乎没有多大区别。

现代复合材料的历史只有 60 多年，它始于 20 世纪 40 年代，是由美国人发明的，用玻璃纤维增强不饱和聚酯树脂复合材料，并在第二次世界大战中用于制造军用飞机雷达罩和远航副油箱。1942 年用手糊工艺制成第一艘复合材料（玻璃钢）渔船。到了 20 世纪 60~70 年代，树脂基复合材料制品已广泛应用于航空、机械、建筑、化工及体育用品等领域。现代复合材料的发展一直是围绕着解决传统材料不能适应的工程技术难题和尖端科学技术提出的新材料需求而发展的。由于复合材料的最大特点是性能的可设计性，因而使它能广泛地应用于国民经济各个领域，顺利

解决了尖端科学技术中宇航材料、隐形技术、复合装甲、信息技术材料、新能源材料、生物医用材料及智能材料等一系列高精尖技术难题。在一般民用经济建设中，复合材料又能起到改善性能、降低成本的作用。复合材料在国民经济各个领域的开发和应用，可以说是无所不能、无所不在。因此，学术界和工程界的专家都一致认为21世纪将是复合材料时代。

我国现代复合材料的发展始于20世纪50年代，是由当时的建材部赖际发部长首先倡导的，他根据1956年访问苏联时对“Стеклопластика”的认识，认为这种新材料内含有玻璃，强度又比钢高，遂起名玻璃钢，这种叫法虽然不尽科学，但国内已然约定俗成，在国际交往中也被认可。自此以后，我国复合材料得以持续不断发展、壮大，研究、生产、教育以及行业建设、媒体传播、标准化工作等相继提到日程并付诸实施。

几年前，笔者曾参与化学工业出版社出版的《复合材料大全》主编工作，该书受到各界读者的好评和鼓励，出版社和笔者都收到了大量读者来信、来电咨询，反响较为强烈。由于该书篇幅所限，很多内容不能深入阐述，为了满足广大读者的要求，化学工业出版社经过广泛调查研究并征求专家意见后，特邀请本人组织编写这套《21世纪复合材料应用技术丛书》，本丛书共分八册：

《无机非金属材料及其应用》(刘雄亚 郝元恺 刘宁 编著)

《透光复合材料、碳纤维复合材料及其应用》(刘雄亚 欧阳国恩 张华新 刘宁 编著)

《夹层结构复合材料设计原理及其应用》(王兴业 杨孚标 曾竟成 肖加余 编著)

《复合材料建筑结构及其应用》(晏石林 杨学忠 刘雄亚 庄英 编著)

《热固性树脂复合材料及其应用》(黄志雄 彭永利 秦岩 梅启林 编著)

《防腐蚀复合材料及其应用》(张大厚 编著)

《功能复合材料及其应用》(曾黎明 编著)

《纤维增强热塑性复合材料及其应用》(张晓明 刘雄亚 编著)

参加编著的作者都是复合材料界的专家，具有丰富的科研、生产和教学实践经验，在编写过程中，作者们除收集最新资料外，还写入了自己多年的研究成果和实践经验，相信会对读者有所裨益。希望这套丛书能为我国复合材料工业的发展起到积极的推动作用。书中倘有不足，敬请赐教。

《21世纪复合材料应用技术丛书》主编

刘雄亚 于武汉理工大学

2006年5月

# 前 言

八年前参与主编《复合材料大全》时，发现有关“夹层结构”的内容分散在该书的基础篇、设计篇和应用篇等几个部分，这对于对“夹层结构”有需要的工程技术人员来说查找起来很不方便，而且在各篇章中确实也没有把“夹层结构”的内容写全，如基础篇中那一点点有关蜂窝夹层板的内容，连夹层结构入门的 ABC 都够不上，因此就酝酿着编写一本能全面介绍夹层结构的原理与工程应用的书，以供对夹层结构有兴趣的读者参考。自 20 世纪 90 年代末，原来这种只供航空、航天应用价格高贵的结构形式，已经扩大到国民经济的各个领域，正所谓“旧时王谢堂前燕，飞入寻常百姓家”。如建筑领域已采用铝蜂窝芯加上铝面板作为高档建筑的幕墙，用纸蜂窝芯加上各种面板作为内墙隔断；至于蜂窝纸板在包装行业上用来制作联运托盘和大承重包装箱更是风靡一时，因此更促使我们起意编写这本书的想法。

本书的前半部分（即原理部分）是根据给研究生讲学和外出讲学的部分讲稿整理写成的，主要介绍了 Reissner 和 Hoff 理论对夹层板的弯曲和稳定分析，后半部分是给对夹层结构有兴趣的技术人员、企业领导提供一些工程设计、生产制造和开发应用的资料。夹层结构涉及的力学分析问题比较广泛，除弯曲和稳定静力学问题外，还有振动、冲击响应等动力学问题。更由于夹层结构过去主要用在飞机结构上，尤其是军机上应用较多，对于飞机上夹层结构构件的战伤修补现已形成了专门课题，其中就有夹层结构的冲击损伤、损伤诊断、修补设计等力学问题，由于本书的初衷是工程应用，在基本原理部分仅就静力学问题也是最基础的问题进行了阐述，如果有了这些基础再去研究其他问题也就不难了。这部分也考虑了读者的数学力学基础，只要有高等数学和材料力学的知识，就可以顺利地读下去。至于有关夹层结构动力学问题和夹层结构构件损伤修补问题准备另外撰写专题，再与读者见面。

本书共分 7 章，第 1 章是绪论性质的内容，简要地介绍了夹层结构的原理，由于夹层结构的弯曲和稳定问题是建立在弹性力学的基础上，因此为了读者的方便，列出了弹性理论的基本方程；第 2 章、第 3 章是夹层结构的弯曲和稳定，也是关于夹层结构力学分析的基础；第 4 章专门讲了蜂窝夹层板的力学性能；第 5 章是工程设计方法，介绍了夹层结构工程设计中一些图表、曲线的使用方法；第 6 章是夹层结构的制造与质量检测，其中蜂窝纸板的制造是近几年才兴起的一个新技术，这一部分是搜集了国内外的一些资料整理的，不一定很成熟；第 7 章介绍了夹层结构在

各个领域的应用情况，可供有志于新产品开发的人们参考。

本书在编写过程中得到了国防科学技术大学航天与材料工程学院领导的鼓励和支持。第1章~第3章由王兴业编写，第4章、第5章由杨孚标编写，第6章由曾竟成编写，第7章由肖加余编写，全书由王兴业统编定稿。

在本书编写过程中还得到了航天科技集团508所沃西源研究员提供的大量资料，也得到了北京环森蜂窝纸板设备有限公司总经理孙培举高级工程师的协助，在此一并致谢。

本书不足之处在所难免，敬请读者不吝指教。

**编著者**

2006年4月于国防科学技术大学

# 目 录

<b>1 夹层结构的基本原理</b> .....	1
1.1 夹层结构的基本力学原理 .....	1
1.2 夹层结构的发展 .....	4
1.3 夹层结构分析力学基础 .....	8
1.3.1 弹性力学基本方程组 .....	8
1.3.2 正交异性材料的工程常数与刚度系数的关系 .....	12
<b>2 夹层板弯曲</b> .....	16
2.1 薄板的弯曲 .....	16
2.1.1 薄板弯曲基本方程 .....	16
2.1.2 薄板弯曲问题的一般解法 .....	21
2.2 薄面板各向同性夹芯夹层板的弯曲 .....	24
2.2.1 基本假设与基本方程 .....	24
2.2.2 基本方程的简化 .....	29
2.2.3 简支矩形夹层板的弯曲 .....	30
2.2.4 周边简支圆形夹层板的弯曲 .....	34
2.2.5 其他支承边界的矩形夹层板 .....	36
2.3 厚面板各向同性夹层板的弯曲 .....	40
2.3.1 厚面板夹层板弯曲的基本方程 .....	40
2.3.2 简支矩形厚面板夹层板在均布载作用下的弯曲 .....	47
2.4 正交异性夹层板的弯曲 .....	49
2.4.1 薄面板正交异性夹层板基本方程 .....	50
2.4.2 复合材料面板夹层板弯曲问题的解 .....	59
2.5 考虑面板耦合刚度和弯曲刚度的夹层板弯曲 .....	64
2.5.1 基本方程 .....	64
2.5.2 基本方程的解法 .....	72
<b>3 夹层板的稳定性</b> .....	74
3.1 薄板受侧压失稳的基本方程和一般解法 .....	74
3.1.1 考虑面内力作用时板弯曲基本方程 .....	74
3.1.2 薄板受压稳定问题的一般解法 .....	76
3.2 夹层板考虑面内载荷作用的平衡方程和能量方程 .....	82
3.2.1 平衡方程 .....	82



3.2.2	能量方程 .....	83
3.3	纯剪变形失稳 .....	85
3.3.1	狭长板受压失稳 .....	85
3.3.2	矩形夹层板受压失稳 .....	85
3.3.3	矩形夹层板受剪失稳 .....	86
3.4	剪切和弯曲联合失稳的各向同性夹层板 .....	87
3.4.1	狭长夹层板单向压缩时的稳定性 .....	88
3.4.2	简支矩形夹层板在侧压下的稳定性 .....	89
3.4.3	其他边界情况的矩形夹层板的失稳 .....	90
3.5	正交异性夹层板的稳定性 .....	95
3.6	夹层板的局部失稳 .....	96
3.6.1	局部对称失稳 .....	97
3.6.2	局部反对称失稳 .....	99
3.6.3	蜂窝夹芯层板的格区凹陷 .....	100
<b>4</b>	<b>蜂窝夹层结构基本力学性能 .....</b>	<b>102</b>
4.1	蜂窝夹层板的相当密度 .....	102
4.1.1	蜂窝夹芯的相当密度 .....	102
4.1.2	蜂窝夹层板的相当密度 .....	103
4.2	蜂窝夹层板的弹性 .....	104
4.2.1	拉压弹性模量 .....	104
4.2.2	平拉(压)模量 .....	105
4.2.3	剪切模量 .....	106
4.2.4	蜂窝芯弹性模量计算 .....	107
4.3	蜂窝夹层板的强度 .....	111
4.3.1	侧面拉伸强度 .....	111
4.3.2	平拉平压强度 .....	112
4.3.3	夹层板的剪切强度 .....	114
4.3.4	蜂窝夹层板的弯曲强度 .....	116
<b>5</b>	<b>夹层结构的工程设计 .....</b>	<b>118</b>
5.1	夹层结构的结构特性和设计原则 .....	118
5.1.1	夹层结构的基本特性 .....	118
5.1.2	夹层结构设计总体原则 .....	118
5.2	夹层结构材料选择 .....	119
5.2.1	面板材料的选择 .....	119
5.2.2	芯材的选择 .....	119
5.2.3	胶黏剂的选择 .....	120

5.3	夹层板设计 .....	121
5.3.1	受横向均布载荷夹层板的工程设计 .....	121
5.3.2	受轴压载荷夹层板的设计 .....	127
5.3.3	受剪夹层板设计 .....	130
5.4	夹层梁的设计 .....	134
5.4.1	夹层梁的设计步骤 .....	135
5.4.2	夹层梁设计实例——蜂窝纸板联运托盘的设计 .....	138
5.5	夹层结构的连接设计 .....	141
5.5.1	夹层板的边缘处理与局部增强 .....	142
5.5.2	夹层结构的连接 .....	142
<b>6</b>	<b>夹层结构的制造与质量检测 .....</b>	<b>144</b>
6.1	泡沫塑料夹层结构的制造工艺 .....	144
6.1.1	泡沫塑料夹芯制造方法和性能 .....	144
6.1.2	泡沫塑料夹层结构的制造 .....	145
6.2	蜂窝夹层结构的制造 .....	148
6.2.1	蜂窝夹层结构的原材料 .....	148
6.2.2	蜂窝芯的制造 .....	150
6.2.3	蜂窝夹芯结构成型工艺 .....	154
6.2.4	蜂窝夹芯结构质量检验 .....	156
6.3	蜂窝纸板的制造 .....	161
6.3.1	蜂窝纸板的原材料 .....	162
6.3.2	蜂窝纸板的生产工艺和设备 .....	166
6.3.3	蜂窝纸板的质量控制 .....	171
6.4	瓦楞纸板的制造工艺与设备 .....	175
6.4.1	瓦楞纸板的类型 .....	175
6.4.2	瓦楞纸板的生产工艺和设备 .....	177
6.4.3	瓦楞纸板的质量检测 .....	179
<b>7</b>	<b>夹层结构的工程应用 .....</b>	<b>182</b>
7.1	夹层结构在航天航空领域中的应用 .....	182
7.1.1	夹层结构在航天工程中的应用 .....	183
7.1.2	夹层结构在飞机上的应用 .....	191
7.2	夹层结构在交通运输上的应用 .....	196
7.2.1	火车 .....	196
7.2.2	船舶 .....	197
7.3	夹层结构在建筑物上的应用 .....	198
7.3.1	夹层结构墙体 .....	198

7.3.2 夹层结构屋盖 .....	202
7.3.3 地面大型雷达天线罩 .....	204
7.4 纸质夹层结构在包装工程中的应用 .....	207
7.4.1 瓦楞纸板包装箱 .....	207
7.4.2 蜂窝纸板在包装产品中的应用 .....	209
<b>参考文献</b> .....	<b>216</b>

# 1 夹层结构的基本原理

## 1.1 夹层结构的基本力学原理

在具有同等结构功能的条件下，怎样能使结构的质量最轻最省材料，这是结构设计师在进行构件设计时所追求的目标之一，这个目标不仅是对于航空、航天飞行器的设计十分重要，而对于通常的民用工程结构也是必要的。任何结构在载荷作用下，都要产生应力和发生变形，最简单的几种受力状态如下。

(1) 直杆的简单拉伸或压缩

$$\text{应力} \quad \sigma = \frac{P}{F} \quad (1.1a)$$

$$\text{应变} \quad \epsilon = \frac{P}{EF} \quad (1.1b)$$

式中  $P$ ——拉伸载荷；

$F$ ——杆的横截面积；

$E$ ——杆材料的弹性模量；

$EF$ ——拉伸刚度。

(2) 构件纯剪切

$$\text{应力} \quad \tau = \frac{Q}{F} \quad (1.2a)$$

$$\text{应变} \quad \gamma = \frac{Q}{GF} \quad (1.2b)$$

式中  $Q$ ——剪力；

$G$ ——受剪构件材料的剪切模量；

$GF$ ——剪切刚度。

(3) 直圆杆的扭转

$$\text{应力} \quad \tau = \frac{Tr}{J} \quad (1.3a)$$

$$\text{应变} \quad \gamma = \frac{T}{GJ}r \quad (1.3b)$$

式中  $T$ ——扭矩；

$r$ ——圆杆半径；

$J$ ——圆杆极惯矩；

$GJ$ ——扭杆的抗扭刚度。

(4) 梁的弯曲

$$\text{应力} \quad \sigma = \frac{M}{I} h \quad (1.4a)$$

$$\text{曲率} \quad \kappa = \frac{M}{EI} \quad (1.4b)$$

式中  $M$ ——弯矩；

$I$ ——截面的轴惯矩，对矩形截面梁  $I = \frac{bh^3}{12}$ ；

$b$ ——梁的宽度；

$h$ ——梁的高度；

$EI$ ——梁的抗弯刚度。

(5) 平板弯曲 计算平板弯曲变形的微分方程

$$-\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}\right) = \frac{M_x}{D} \quad (1.5a)$$

$$-\left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \mu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\right) = \frac{M_y}{D} \quad (1.5b)$$

式中  $M_x, M_y$ ——作用在板两个方向的弯矩；

$D$ ——板的抗弯刚度， $D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}$ 。

从式(1.1a)~式(1.5b)可以看到，构件的应力和变形与材料的性能和构件的截面尺寸有关。从变形的角度考察，构件的变形与刚度成反比；刚度大变形小，刚度小变形大，而不论哪一种刚度，都是由两个参数构成的，一个是反映构件几何参数的截面尺寸，一个是反映材料性的弹性模量。因此要提高构件抵抗变形的能力可以从两个方面入手，一方面提高材料的性能，一方面改变构件的截面尺寸和形状。如一个三点弯曲的简支梁，截面形状为矩形，尺寸如图 1-1 所示。当梁按图 1-1(b) 情况承载时，相对于  $y$  轴的轴惯矩  $I_b = \frac{10 \times 1^3}{12} = \frac{10}{12} \text{cm}^4$ 。如果按图 1-1(c) 情况承载，其相对于  $y$  轴的轴惯矩  $I_c = \frac{1000}{12} \text{cm}^4$ 。两种承载状态的轴惯矩相比  $\frac{I_c}{I_b} = 100$  倍，由式(1.4b) 可见其曲率之比也将是 100 倍。所以在结构应用中矩形截面的梁都是将长的一边作为梁高处理。如果将构件的截面形状进行变化，也还会有不同的效果。例如将上例的矩形截面梁的中间挖空构成一个工字梁，把取下的部分放在

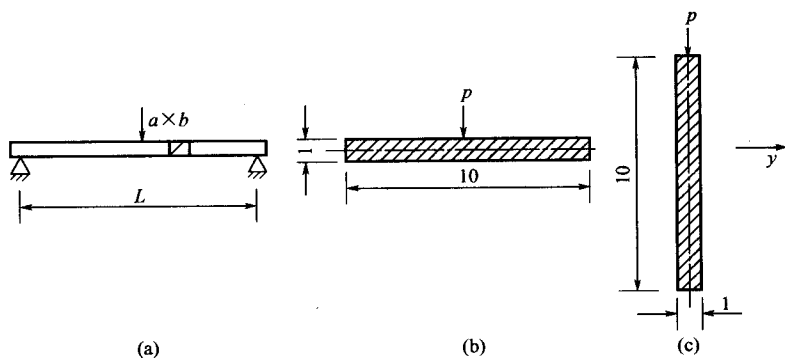


图 1-1 三点弯曲的简支梁截面形状示意图

工字梁翼缘上,如图 1-2(c) 所示。根据图 1-2 所示的尺寸,图 1-2(a) 相对于  $y$  轴的轴惯矩

$$I_a = \frac{bh^3}{12} = 45000\text{cm}^4$$

而图 1-2(c) 截面,相对于  $y$  轴的轴惯矩

$$I_c = \frac{1}{12}(BH^3 - bh^3) = 70000\text{cm}^4$$

两者相比

$$\frac{I_c}{I_a} = \frac{7}{4.5} = 1.55$$

如果把挖下来的部分放在工字梁的腹板处,如图 1-2(d) 所示,则此时

$$I_d = 155000\text{cm}^4$$

与如图 1-2(a) 所示情况相比

$$\frac{I_d}{I_a} = 3.44$$

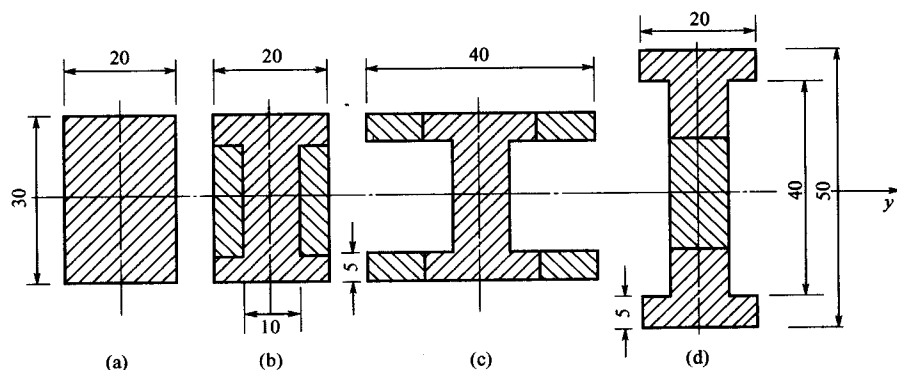


图 1-2 工字梁示意图

可见，尽管构成构件的材料用量没变，仅改变了截面的形状，使得其抗弯刚度发生了显著的变化。

从受力方面分析结论也是这样。一个三点弯曲的简支梁，其应力分布如图 1-3 所示，最大正应力在梁的上、下表面上。

$$\sigma_m = \frac{M}{I} \times \frac{h}{2} = \frac{3}{2} \frac{pl}{bh^2} \quad (1.6)$$

由此也可看到最大应力和梁的高度平方成反比，而且在梁的中性轴处应力为零。

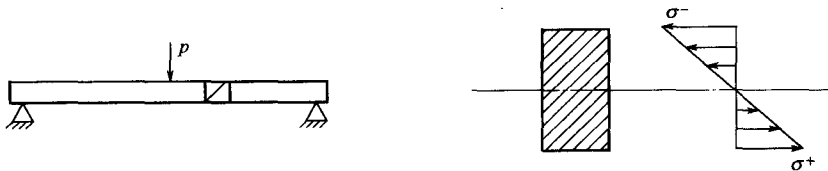


图 1-3 三点弯曲简支梁的应力分布

综上所述对受弯构件的分析，可见在设计这类构件时，应尽可能地增加梁的高度，使构件的截面惯性矩提高，于是就产生了工字梁、槽形梁等一类构件。对于受弯矩作用的板材，人们也想到把中间镂空，把承载的关键材料放到远离中间的部位，于是就出现了各种形式的夹层结构。工字梁和夹层结构是在相同载荷条件下，变形和应力最小的构件，是最省材料结构质量最轻的构件，工字梁已在工程上广泛应用，夹层结构已被大量地用在航空、航天这一类对质量最为敏感的结构上。

## 1.2 夹层结构的发展

航天、航空工程的飞行器对结构质量是非常敏感的，它需要由轻质高强的材料制造，根据当代推进技术计算，若能使飞机的结构质量减轻 1kg 可提高飞机的升限近 40m，把卫星和洲际导弹的弹头质量减轻 1kg，可使运载火箭的质量减轻 1t。因此，飞机、导弹和卫星的设计师们是以克来计算结构质量的。在飞机发展的近 100 年时间里、空间工程发展的 50 多年间，人们一直在寻找轻质高强材料。但是传统材料的“轻质”和“高强”互不相容，解决这个矛盾的途径一是寻找新型材料使其满足既轻质又高强的要求，二是合理的使用材料，制成轻质高强的结构。对于前者在 20 世纪 40 年代人们发现了玻璃纤维增强塑料，后来发展成先进复合材料，解决了材料的轻质、高强问题。几乎在同一时代，人们发现了夹层结构，创造出合理使用材料的结构达到轻质高强的要求。

历史上第一个夹层结构应是英国人希利和艾伦在 1856 年发明的瓦楞纸板，它是在两层面纸之间加入波纹形的纸芯，使得柔软的纸张成为较为刚挺的纸板。自 1870

年工业化以来，这种夹层结构广泛用作包装材料制成包装箱，经过了 100 多年的发展，瓦楞纸板从原纸到制造包装箱已形成了完善的技术体系，成为一个规模巨大的产业，但这种纸质的夹层结构满足不了后来迅猛发展的航天、航空工程的需要。

用于航空构件上的第一件夹层结构是 1940 年英国人希尔在他所设计的飞翼式飞机上，以桃花芯木为面板、以巴萨木为芯子构成的夹芯材料作为机翼。后来，德国哈威兰飞机公司生产的“蚊式”飞机也使用了这种夹芯结构。而后，为了提高构件的结构性能，把面板换成了铝质材料。由于巴萨木夹芯不防潮，抗蚀及耐火性较差，继而又研制出以铝箔制成的蜂窝形芯材。1945 年，美国的杜法公司和马丁公司把金属蜂窝夹芯结构成功的用在飞机结构上，显示出优异的性能。

当前工程上应用的夹层结构，其基本构造形式是由上下两块薄而强的面板和填在其中并与面板牢固连接起来的轻质芯材所组成。用做面板的材料很多，如铝、不锈钢、复合材料层合板、胶合板、纸板等，按所使用芯材形式的不同有泡沫夹芯结构、蜂窝夹芯结构和波纹夹芯结构，见图 1-4。巴萨木是一种天然的泡沫材料，因其产量有限满足不了日益扩大的工程需要。随着高分子合成材料的迅速发展，用做泡沫夹芯结构的芯材主要是聚苯乙烯泡沫塑料、聚氨酯泡沫塑料、聚氯乙烯泡沫塑料，近年来又出现了聚丙烯、氯化或磺化聚乙烯、聚碳酸酯、聚四氟乙烯等泡沫塑料。

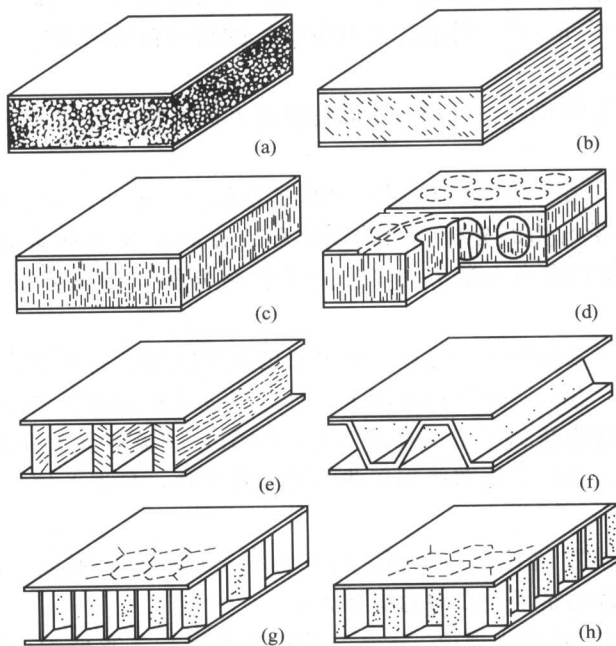


图 1-4 不同芯材结构



以蜂窝结构作为夹层结构的芯材，是人类仿生学应用的一大成果，正六角形的天然蜂窝是蜂族的杰作。对于天然蜂窝，历史上有许多杰出的科学家都对它进行过深入的研究。如生物学家“进化论”的创始人达尔文，著名数学家马克劳林和华尔庚，物理学家列奥缪拉及许多知名建筑师，他们指出天然蜂窝的形状最省材料，即用同样多的材料制成各种形状，惟蜂窝状其容积最大而且刚度最好，所以科学家一致称赞蜜蜂是“奇妙的建筑师”。一个很有趣的实验证明了夹层结构的质量最小。有人用玻璃钢层合板、铝合金板、钢板和铝蜂窝夹层板，做成跨度为0.61m，宽为0.3m的抗弯试件，在16300kN压力下做三点弯曲试验，使各试件都产生0.147mm的挠度，结果发现蜂窝夹层板质量只有3.53kg，而玻璃钢层合板、铝合金板、钢板质量分别为37.83kg、15.51kg和31.12kg。最初被用于航空结构上的蜂窝芯是由铝箔条压制成半边蜂窝状，然后用钎焊连接起来，它与面板的连接也用钎焊，工艺复杂，制造成本高，随着高分子粘接剂的发展和性能不断提高，目前用于航空、航天工程上的蜂窝夹层结构制造已全采用胶接技术，不仅改进了工艺，降低成品，而且质量也大幅度提高了。工程上应用的蜂窝芯材除铝蜂窝外，还有不锈钢蜂窝，以及用各种复合材料制成的蜂窝芯，如玻璃钢蜂窝、Nomax蜂窝等。近十几年来，从20世纪的90年代初出现了一种用纸质材料制造的蜂窝芯，这种纸蜂窝芯同样具有质量轻，刚度好的特点，同时还有较好的隔声、隔热的性能，而且不污染环境、价格便宜，是一种有广阔开发前景的新型轻质结构材料，可广泛应用在建筑、包装领域。

工程上应用的蜂窝芯材，根据不同需要有不同的构造形式，图1-5是几种不同形状的蜂窝芯。

随着夹层结构在工程上的应用，尤其是在航空、航天结构上的应用范围不断扩大，对它的力学行为的分析、结构设计和计算的研究也不断深入。早在20世纪的40年代，就有许多力学工作者提出了各种分析与计算模型，其中主要有如下几个。

① Reissner (莱斯纳尔) 理论，其分析的出发点是把夹层结构的面板看作只承受面内力的薄膜，忽略本身的抗弯刚度，夹芯只承受横向的剪切力，在夹芯中面内应力为零。这一理论是基于Reissner (莱斯纳尔) 层板剪切修正理论基础上提出的，用它求解夹层板的总体弯曲和压曲问题比较简便，且误差较小，较受工程设计者们的欢迎。

② Hoff (霍夫) 理论，这个理论与Reissner理论的区别是考虑了面板的抗弯性能，夹心的承载仍是承受横向的剪切力。

③ 普鲁卡克夫-杜庆华理论，这一理论的提出稍后于莱斯纳尔和霍夫理论，认为夹芯除了承受剪切力以外，还进一步考虑了夹芯横向弹性变形的作用。