

蜂窝夹芯材料的
设计和工艺

蜂窝夹芯材料的 設計和工艺

尹祥社 編

中国人民解放军国防科学技术大学

1982.7

摘 要

本书为复合材料专业编写。

全书包括绪言、夹芯结构设计的基本理论、蜂窝芯的基本性能及强度计算、蜂窝夹芯结构的基本性能、蜂窝夹芯结构的成型、原材料的选择和有关工艺问题、蜂窝夹芯结构的修理和开孔补强等。

本书可供专业技术人员参考。

前 言

本教材为我校五〇二专业本科生学习蜂窝夹芯材料而编写。

蜂窝夹芯材料由于它具有轻质、高刚度、高强度、隔音、隔热等优异性能，越来越多地被应用在军用和民用中。但是，因为它本身就是一种复合结构，加上复合材料的结构理论还不很完整，因此，蜂窝夹芯材料不论是设计方法还是成型工艺均远没有达到系统化、规范化的程度。特别是工艺还没有达到规范化，使得蜂窝夹芯材料不能充分发挥应有的性能。为此，本教材的第一、二、三章在阐述材料性能和设计方法时，着眼于通过工艺保证材料的性能提供理论依据，以便改进和提高工艺。

编写专业教材尚属首次。加上编写时没有完整的教材可为借鉴，又缺乏系统的资料和数据。编者虽做过一定的调研，并阅读一些国内外资料，但受水平所限，不当之处和错误在所难免，衷心希望读者随时提出宝贵意见。

本教材是在刘念超同志给七六届学员讲课的讲稿基础上编写的。编前，蒙上海玻璃钢结构研究所朱颐龄教授对编写思想给予热情的指导，完稿后五〇二教研室主任唐羽章同志对全书做审阅。谨致谢意。

编 者

1982年3月

目 录

绪 言

- 一、引言..... (1)
- 二、蜂窝夹芯材料的发展及应用概况..... (5)

第一章 夹芯结构设计的基本理论

- §1-1 夹芯结构的基本理论..... (9)
- §1-2 夹芯结构的破坏形式..... (16)
- §1-3 夹芯结构的设计准则..... (20)
- §1-4 蜂窝夹芯的承剪能力..... (24)

第二章 蜂窝芯的基本性能及强度计算

- §2-1 蜂窝芯的容重(密度)..... (29)
- §2-2 蜂窝芯的弹性模量(相当)..... (32)
- §2-3 蜂窝芯的剪切模量..... (34)
- §2-4 蜂窝芯的强度..... (42)

第三章 蜂窝夹芯结构的基本性能

- §3-1 蜂窝夹芯结构的容重..... (54)
- §3-2 蜂窝夹芯结构弹性模量的计算..... (57)
- §3-3 蜂窝夹芯结构的刚度..... (62)
- §3-4 蜂窝夹芯结构的强度计算..... (69)
- §3-5 蜂窝夹芯结构的稳定性..... (83)
- §3-6 最轻蜂窝夹芯结构..... (93)

第四章 蜂窝夹芯结构的成型

- §4-1 概述..... (99)

§4-2	蜂窝夹芯结构成型工艺简介·····	(100)
§4-3	涂胶工艺·····	(102)
§4-4	蜂窝夹芯结构的装配·····	(107)
§4-5	蜂窝夹芯结构成型工艺的流程及 主要工艺参数·····	(112)
第五章 原材料选用和有关工艺问题		
§5-1	原材料选择·····	(115)
§5-2	工艺中的几个问题·····	(119)
§5-3	成型工艺对蜂窝夹芯结构件性能的影响··	(130)
§5-4	蜂窝夹芯结构的边缘收边及连接·····	(135)
第六章 蜂窝夹芯结构的修理和开孔补强		
§6-1	蜂窝夹芯结构的修理原则·····	(140)
§6-2	修复工艺·····	(141)
§6-3	蜂窝夹芯结构的开孔和补强·····	(146)
参考书及参考资料·····		(151)

绪 言

一、引 言

材料科学和材料工程，是当代科学技术的一个重要方向，而复合材料又是材料科学的一个重要方向。大力研究复合材料，并将其应用于生产实践，这对加快我国四个现代化建设有着重要的意义。

复合材料是两种或两种以上材料的结合。在现代技术中，复合材料含有更为广泛的意义：无论是以微观或宏观的形式而构成的不同化学性质或不同结构的材料组合起来，成为具有统一性能的材料，都可称为复合材料。复合材料具有它自己独特的性能。就其强度、耐热性或其他一些性能来说，复合材料可望优于它的任一个单个组分，并与它们有显著的差别。

常见的复合材料主要是以一种材料（如水泥、陶瓷、合成树脂、橡胶、金属等）为基体，加入另一种称之为增强材料（如钢筋、各种纤维、粒料等），组合成一个整体。其中以纤维增强合成树脂复合材料的研究最为活跃，它的使用和发展最为突出和广泛，是近代复合材料发展的重要方向。

以谓增强的含义是，如果一块基体材料的破坏应力为 σ_{mu} ，则加入纤维（或颗粒）后，其破坏应力可达 σ_{cu} ，通常 $\sigma_{cu} \gg \sigma_{mu}$ ，即强度增加了。把 σ_{cu} 与 σ_{mu} 的比值定义为增强率，即

$$F = \frac{\sigma_{ca}}{\sigma_{mu}}$$

对于纤维增强树脂复合材料， $F=30\sim 50$ 。

显然，纤维增强树脂其主要目的或效果是增加强度。所以把这种复合材料称之为纤维增强塑料，或叫纤维增强复合材料 (Fibre Reinforced Composite Materials)。这种材料的主要优点是轻质、高强，即高的比强度。现将玻璃纤维增强复合材料（俗称玻璃钢）与 40Mn2 结构钢比较如表 I。

玻璃钢与 40Mn2 钢性能比较 表 I

品 名	比 重 克/厘米 ³	拉伸强度 (公斤/毫米 ²)	比强度 (10 ⁷ 毫米)	杨氏模量 (公斤/毫米 ²)
40Mn2 钢	7.8	103	1.3	2.1×10^4
玻璃钢	2.0	106	5.3	2×10^3

从表 I 中看出，玻璃钢的比强度为钢的 4~5 倍。但是，同样可以看到，玻璃钢的杨氏模量约比钢低 10 倍。所谓弹性模量低，就是指抗变形能力低。

例如，有一跨度 $l=1$ 米的矩形截面梁，其厚度 $t=10$ mm，宽度 $b=5$ mm，两端简支。梁中央作用有集中力 $P=2.3$ 公斤（见图 1）。如果选用材料为 10 号钢（10 号钢强度 $\sigma_{s,0}=35$ 公斤/毫米²，杨氏模量 $E_s=2.1 \times 10^4$ 公斤/毫米²），则经强度和刚度校核都满足设计要求。假如用玻璃钢梁来代替 10 号钢，则从强度和刚度校核中看出：

< i > 由于玻璃钢的强度极限 σ_{cu} 一般都大于 35 公斤/毫

原
书
缺
页

占跨度的6%。因此，用玻璃钢代替10号钢是不可行的。

由举例中看到，纤维增强塑料由于弹性模量较低，用它制成的构件刚度比较差。这一方面是因为纤维增强复合材料是以塑料为基体，而塑料的弹性模量都比金属的弹性模量为低。

例如：酚醛树脂 (Phenolic resin), $E_{ph}=18\sim 21$ 公斤/毫米²

环氧树脂 (Epoxy resin), $E_{ep}=7\sim 18$ 公斤/毫米²

聚酯树脂 (polyester resin), $E_{p0}=7\sim 17$ 公斤/毫米²

还有一个原因，某些纤维的杨氏模量也不高。仍以玻璃钢为例，虽然玻璃纤维的杨氏模量比塑料高， $E_f=0.8\times 10^4$ 公斤/毫米²，但它也只相当于铝合金的杨氏模量。按混合律算出来的复合材料的杨氏模量仍然偏低。例如单向增强的纤维复合材料，沿纤维方向的杨氏模量为：

$$E_c = E_f V_f + E_m V_m$$

从上式中看出，提高 V_f 可以提高 E_c 。但提高 V_f 是有限度的，

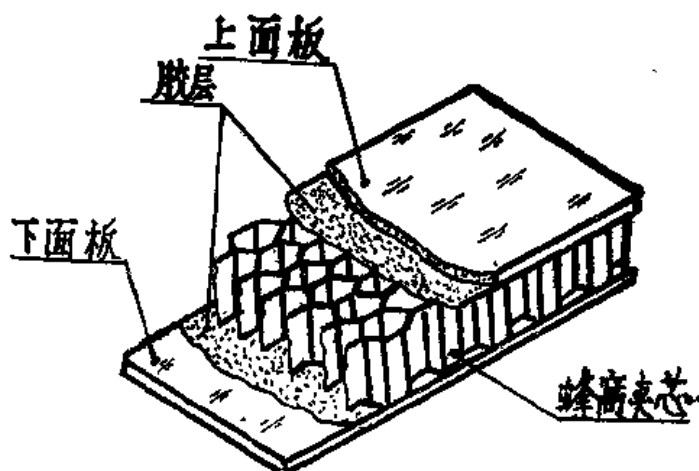


图 2 蜂窝夹芯结构

通常 $V_f < 0.91$ 。因此仅靠调节纤维体积分数的办法来提高复合材料的弹性模量是非常有限的。近年，为了提高纤维增强复合材料结构物的刚度，主要从以下三个方面进行努力：

1. 发展高模量的纤维，如碳纤维、硼纤维、碳化硅纤维、各种无机材料的晶须等；

2. 采用高模量的基体，主要是发展金属基复合材料；

3. 研究新的复合方式，即在复合的结构方式上作改进。

本课程所要介绍的“蜂窝夹芯结构复合材料” (Structural Sandwich Composite)，简称“夹芯结构”或“夹层结构” (S.S.C.) (见图 2 所示)，就是利用已有的原材料在相同结构质量下提高结构物刚度的有效方法。

二、蜂窝夹芯材料的发展及应用概况

由于航空、航天工业的发展，特别是本身结构重量对性能影响极为敏感的导弹，卫星，航天飞机的出现，对制造这些飞行器的结构材料提出越来越高的要求。这就使材料重量与性能之间的矛盾变得越来越突出。为了解决这个矛盾，通常采用二种途径，一是采用轻质、高强的材料；二是选择材料的应用方式，即采用合理的结构形式并充分地利用材料。而具有轻质、高强度、高刚度及优良稳定性的夹芯结构就应运而生。

蜂窝夹芯结构产生于四十年代初期，至今已有四十年历史了。当时英国的希耳(Hill)教授所设计的“飞翼”飞机中，第一次应用以桃花心木为面板，以巴萨木为芯子的夹芯结构。后来德国哈威兰飞机公司生产的“蚊式”飞机也应用了这种夹芯结构。为了进一步改进结构性能，把木质芯胶接在铝质薄蒙皮上。美国千斯渥特飞机公司生产的“短剑式”飞机的机翼就采用这种结构。由于巴萨木夹芯耐潮、抗蚀及耐火性较差，接着

研制出金属蜂窝夹芯结构。金属蜂窝于1945年分别在杜法公司和马丁公司试验成功，并在飞机结构中显示出优异的性能。随后因玻璃纤维增强塑料的出现，又研制出耐热性和电性能均十分良好的玻璃钢蜂窝夹芯结构。

蜂窝夹芯结构生产比较发达的国家有美国、英国、法国、瑞典和德国。如美国除各飞机制造公司生产蜂窝夹芯结构外，还有专门研制蜂窝夹芯结构的制造公司。1958年以后，西欧各国也大力发展蜂窝夹芯结构。

蜂窝夹芯结构的研制和发展，与胶接技术的发展有密切联系。虽然蜂窝夹芯结构在四十年代初已开始研制和生产，但由于在五十年代初期的胶粘剂质量不能满足要求，以致工艺质量不稳定，同时也因缺乏可靠的检验方法，使得蜂窝夹芯结构的应用受到限制。六十年代由于胶粘剂和胶接技术的发展，使蜂窝夹芯结构获得迅速的发展。目前国外已大量和普遍地应用于飞机、导弹、飞船和航天飞机等飞行器的设计和制造中。

在飞机上，蜂窝夹芯结构主要应用在机翼（包括襟翼、付翼）、水平安定面、舵面（包括方向舵和升降舵）、进气道、喷气发动机整流罩、雷达罩以及直升飞机的旋翼等部位。

在火箭、导弹上的应用部位主要有：火箭的安定面、弹头外壳、导弹的安定面、发动机尾喷管、推进剂和氧化剂储箱共底、核装置座等。

在卫星、飞船、航天飞机的应用部位主要有：舱盖、太阳能电池阵壳体、整流罩、天线罩、防热底、贮箱共底、宇宙飞船的再入舱等。

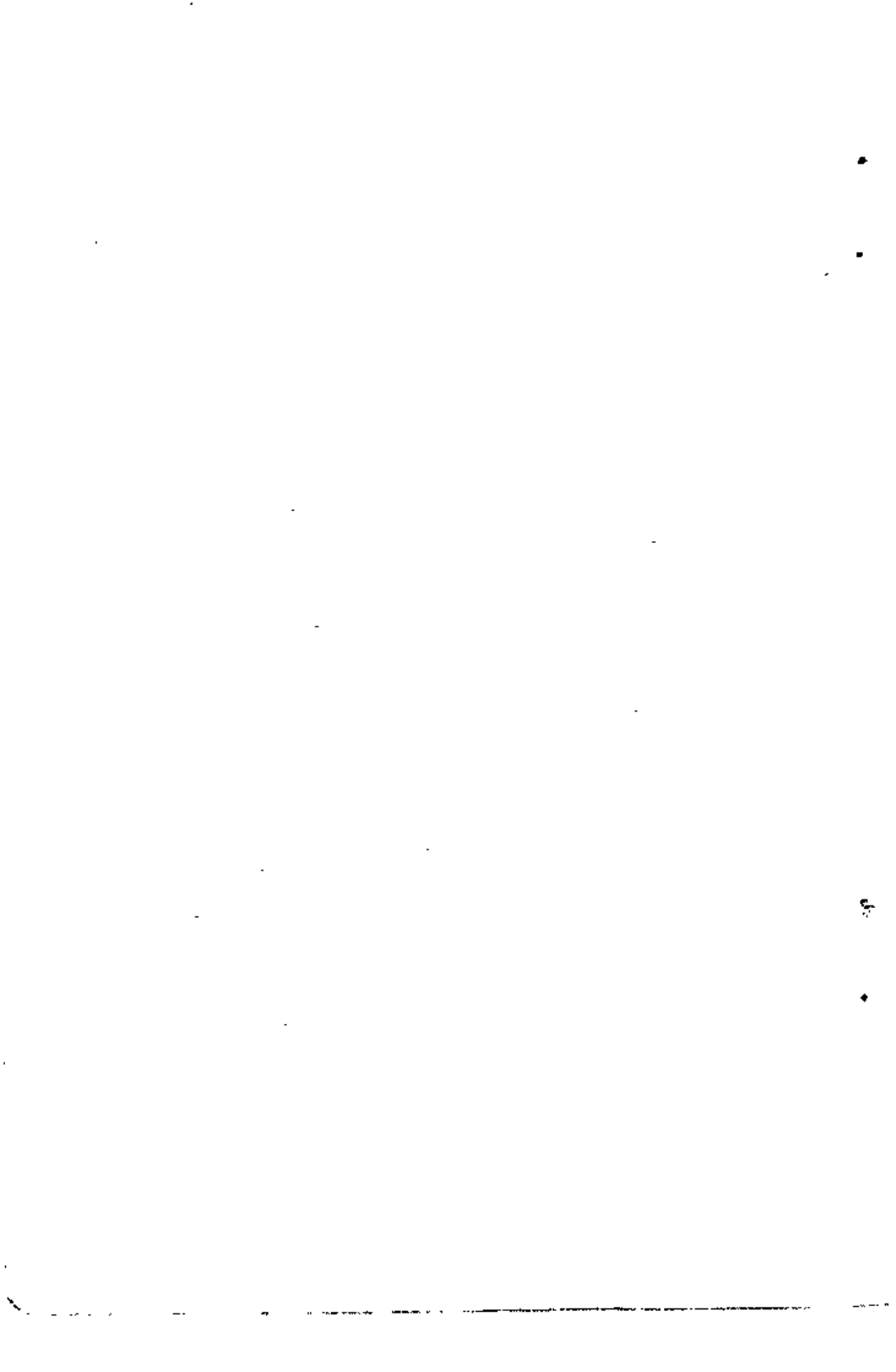
当前蜂窝夹芯结构生产最发达的国家是美国。例如美国康维尔公司生产的超音速轰炸机 B-58，应用蜂窝夹芯结构的面积占整个飞机外形面积85%以上，其结构重量只占总起飞重量的16.5%，而同类飞机一般为25%。如果按16.5%与25%相比，减

轻重量5.7吨。美国F-111型战斗机采用蜂窝夹芯结构竟占外形面积90%以上。全机壁板几乎全由蜂窝夹芯结构组成。美国客机波音747也大量使用蜂窝夹芯结构。

美国研制的两艘宇宙飞船“双子座”(Gemini)和“阿波罗”(Apollo)号都大量采用蜂窝夹芯结构。“双子座”密封舱的底部采用二层玻璃钢夹芯结构，满足了烧蚀和绝热的要求。“阿波罗”飞船上应用蜂窝夹芯结构更为广泛。它整个壳体分成四个舱：控制舱、供给舱、登月舱、仪器舱，全部采用多层蜂窝夹芯结构。

近几年，国外又出现一种夹芯缠绕玻璃钢。由于它的高强度、高刚度及其他优异的特性，已用于内压和外压容器、宇宙飞船外壳、固体火箭发动机外壳、液体燃料贮箱、大型火箭前锥体等。例如美国的“人马星座”宇宙飞船的助推火箭用的液体燃料贮箱、“雷神”导弹的液体燃料贮箱，据说都是采用夹芯缠绕玻璃制成的。

我国于六十年代初开始蜂窝夹芯结构的研制。目前已取得很大进展，并已经应用到飞机、导弹、卫星上。如飞机的舵面、直升飞机的旋翼、雷达罩、整流罩、机头罩等，很多都已应用蜂窝夹芯结构。在导弹、卫星方面，舱口盖、爆炸螺栓支座、太阳能电池阵壳体、液体贮箱共底等部位，有很多也已经采用蜂窝夹芯结构。由于这方面的研制工作迅速发展，科技队伍正在不断扩大和提高。预计蜂窝夹芯结构不论在研制和应用方面，将会在不长时间内达到世界先进水平。



第一章 夹芯结构设计的基本理论

§1-1 夹芯结构的基本理论

(Basic Principle of Sandwich Structure)

从上章图 2 中已知, 所谓“夹芯结构”, 是由两块薄而强的面板和充填在其中用以保证两块面板共同工作的软而轻的芯子 (图 2 是蜂窝夹芯) 所组成的复合结构。夹芯结构是一种特殊的复合材料, 与其说它是一种材料, 毋宁说它是一种结构。它可以采用复合材料, 也可以采用单一材料。它与一般形式使用的纤维增强复合材料相比有两个主要特点:

(1) 它既可以由两种以上的材料组成, 也可以只有一种材料组成。但是, 不论是几种材料组成, 它们都必须做成两种不同的结构形状, 然后将它们复合起来。从这个意义上看, 它是一种广义的复合材料, 所指的“复合”, 主要是指结构形状的复合。

(2) 夹芯结构的主要功能和效果是增加刚度和增加稳定性。但也可以在隔热、耐烧蚀……等方面提供其特殊用途。

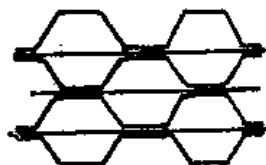
据国外资料报道, 夹芯结构现已大量地在飞机、导弹、卫星、飞船和航天飞机上应用。但是, 根据使用的部位不同, 对结构性能提出了不同要求。所以应选择相应的材料来制造夹芯结构。当前国外应用较多的有 (按上面板/夹芯/下面板方式表达):

不锈钢板/不锈钢箔/不锈钢板；不锈钢板/铝箔/铝板；
 玻璃钢板/铝箔/玻璃钢板；铝板/铝箔/铝板；
 铝板/玻璃布/铝板；玻璃钢板/泡沫塑料/玻璃钢板；
 玻璃钢板/玻璃布/玻璃钢板；碳纤维板/铝箔/碳纤维板；
 碳纤维板/玻璃布/碳纤维板等等。

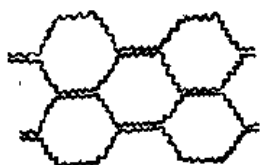
夹芯除泡沫塑料外，也可以做成各种形状的蜂窝。主要有：
 正六角形蜂窝[图1.1(a)]；加强正六角形蜂窝[图1.1(b)]；
 波纹加强正六角形蜂窝[图1.1(c)]；菱形蜂窝[图1.1(d)]；长
 方形蜂窝(图1.1(e))；扁六角形蜂窝[图1.1(f)]等。但使用



(a) 正六角形蜂窝



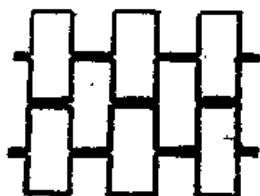
(b) 加强正六角形蜂窝



(c) 波纹加强正六角形蜂窝



(d) 菱形蜂窝



(e) 长方形蜂窝(过拉伸形)



(f) 扁六角形蜂窝(欠拉伸形)

图 1.1 几种主要的蜂窝形状

最多的是正六角形蜂窝。

蜂窝芯之所以要做成各种不同的形状，主要是为了适应不同的设计和工艺要求。

正六角形蜂窝 (Honeycomb core of hexagon cells)，也就是自然蜂窝。对于自然蜂窝，除许多生物学家如“进化论”的创始人达尔文研究过它以外，著名的数学家，如苏格兰的大数学家马克劳林，我国数学家华罗庚，以及物理学家法国的列奥缪拉和许多建筑师都研究过它。他们指出：自然蜂窝的形状最节省材料，即同样多的材料做成自然蜂窝形状，其容积最大，而且刚度方面的性能特别好。称赞蜜蜂是“奇妙的建筑师”。

前面提到，夹芯结构的主要功能和效果是增加刚度和增加稳定性。所谓刚度，就是指结构本身所具有的抵抗变形的能力。对于不同的变形形式，各有不同的计算公式，现列表如下：

表 I

基本变形	变 形 计 算 式	刚 度 计 算 公 式
拉 伸 (压缩)	$\epsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{N}{EF}$	EF (拉伸或压缩)
剪 切	$\gamma = \frac{Q}{GF}$	GF (剪切刚度)
扭 转	$\theta = \frac{M_n}{GJ_p}$	GJ_p (扭转刚度)
弯曲(梁)	$K = \frac{1}{\rho} = \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = \frac{M}{EI}$	EI (梁的弯曲刚度)
弯曲(板)	$\begin{cases} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = \frac{M_x}{D} \\ \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = \frac{M_y}{D} \end{cases}$	$D = \frac{Ek^3}{12(1-\nu^2)}$ (板的弯曲刚度)