

纤维缠绕玻璃钢

中国建筑工业出版社

全书分八章，介绍了纤维缠绕玻璃钢制品的应用、原材料、成型工艺、结构性能、产品设计及测试方法。对于金属纤维、硼纤维等的缠绕制品也作了概略的介绍。

本书可供玻璃钢专业技术人员参考。

D.V. Rosato and O.S. Grove, Jr.

FILAMENT WINDING: its development, manufacture, applications, and design

INTERSCIENCE PUBLISHERS-1964

* * *

纤维缠绕玻璃钢

哈 玻 译

*

中国建筑工业出版社出版（北京西外向东路19号）

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

北京印刷六厂印刷

开本：850×1168毫米 1/32 印张：9 13/16 字数：258千字

1973年5月第一版 1973年5月第一次印刷

印数：1-6,400册 定价：1.15元

统一书号：15040·3047

译者说明

纤维缠绕玻璃钢是指用纤维缠绕法制成的玻璃钢制品。纤维缠绕是一种新的成型工艺，易于实现机械化和自动化，从而得到广泛的应用。为了适应我国玻璃钢工业，特别是适应纤维缠绕工业发展的需要，我们翻译了本书。但是我们应当遵照伟大领袖毛主席关于“凡属我们今天用得着的东西，都应该吸收。但是一切外国的东西，如同我们对于食物一样，必须经过自己的口腔咀嚼和胃肠运动，送进唾液胃液肠液，把它分解为精华和糟粕两部分，然后排泄其糟粕，吸收其精华，才能对我们的身体有益，决不能生吞活剥地毫无批判地吸收。”的教导，对于本书批判地阅读。

本书原名是《纤维缠绕的发展、生产、应用和设计》(FILAMENT WINDING; its development, manufacture, applications, and design), 书中极大部分谈的是纤维缠绕玻璃钢，虽也涉及其他纤维(如金属丝和硼纤维)的缠绕制品，但所占篇幅很小，因此书名译成《纤维缠绕玻璃钢》。

原书于1964年初出版，概略地反映了当时国外纤维缠绕玻璃钢制品的应用、原材料、成型工艺、结构性能、产品设计，以及测试方法等方面的情况。内容比较系统，也比较全面，有一定的参考价值。但必须指出，原书内容尚不够深入，写的也比较松散，甚至有重复现象。有关研究合同、供销统计数字、厂商名称和地址、私人致谢词等等，所占篇幅也不少。凡此种种，译文一概从略。原书个别章节编排欠妥或文不对题，译文酌情予以更动。若干技术上不妥或错误之处，凡发现的，译文均作了更正，并且加了注解。

译文沿用了原书的英制单位，为了读者使用方便，书末附有基本单位换算表，以供参考。

玻璃钢是一种新型工程材料，国内尚无统一的译名，不少专业名词不得不由译者自拟。尽管拟定时考虑了国内已沿用的习惯名称，并参考了已出版的中文玻璃钢书籍，但不妥之处一定很多。加之，玻璃钢这类复合材料涉及专业很广，我们技术水平和翻译能力又有限，译文也一定会存在很多缺点和错误，我们诚恳地希望广大读者批评指正。

译 者

1972年9月

目 录

第一章 绪论	1
第一节 历史的回顾	3
第二节 纤维缠绕与纺织技术的关系	6
第三节 纤维缠绕结构的优点	7
第四节 局限性	9
第五节 产品	11
第六节 研究课题	12
参考文献	13
第二章 应用	15
第一节 贮罐和铁路罐车	15
第二节 玻璃钢管	17
第三节 宇宙空间	21
第四节 导弹	22
第五节 液体空间飞行器	28
第六节 武器	30
第七节 电气设备	34
第八节 飞机	35
参考文献	36
第三章 增强材料	39
第一节 玻璃增强材料	39
第二节 金属增强材料	54
第三节 带	70
参考文献	74
第四章 树脂系统	78
第一节 基体材料	79
一、环氧树脂	79
二、聚酯树脂	83

三、酚醛树脂	85
四、有机硅树脂	87
五、聚苯并咪唑树脂	88
六、其它树脂基体	89
七、其它基体材料	89
第二节 增强材料的表面处理	90
第三节 增强材料的浸渍	92
参考文献	99
第五章 成型工艺	102
第一节 缠绕机的类型	102
第二节 缠绕方法	109
第三节 芯模	114
第四节 缠绕张力	122
第五节 封头	126
第六节 内衬	127
第七节 在药柱上直接缠绕的壳体	127
第八节 折叠式容器	128
参考文献	130
第六章 影响玻璃钢性能的诸因素	131
第一节 成型工艺参数的影响	131
第二节 线型参数	132
第三节 尺寸参数	133
第四节 原材料的影响	134
第五节 环境因素	137
第六节 应力参数	147
第七节 小结	150
参考文献	153
第七章 设计准则	157
第一节 概述	157
第二节 应力	165
第三节 设计	173
第四节 理想结构的关系式	201

第五节 大型壳体設計	213
第六节 設計数据	219
第七节 外压容器	228
参考文献	229
第八章 試驗方法	232
第一节 单向环 (NOL 环) 試驗	232
第二节 压縮試驗	238
第三节 水压爆破試驗	241
第四节 循环疲劳試驗 (耐压試驗)	242
第五节 薄壁圆筒的失稳試驗	251
第六节 浸湿循环試驗	258
第七节 树脂的測試方法	261
第八节 非破坏性檢驗	268
第九节 結構檢驗	271
第十节 基本試驗	272
第十一节 质量控制	291
参考文献	303

第一章 绪 论

用环向缠绕增加结构的爆破强度，并不是一种新方法。历史上，曾有人用金属丝缠绕炮筒，以防炮筒爆破；还有人用金属丝把两半的木管缠到一起，既可使木管不漏水，又提高了木管的爆破强度。然而，某些结构性能要求特别高的制品采用纤维缠绕结构，还只是近年的事情。纤维缠绕是增强塑料制品的成型方法的一种。该法能充分发挥树脂基体（有机或无机的）中的连续纤维的高强特性。

纤维缠绕法使用的增强材料是纤维状的非金属材料或金属材料，其中有的是连续纤维，有的是带子。目前最常用的，是玻璃纤维材料：连续纤维、无捻粗纱、加捻纱或带子。无论哪种形式的玻璃纤维材料，都得浸渍树脂基体。浸渍的方法有两种：在缠绕的前一刻浸渍树脂（湿法）和预先浸好树脂（干法）。树脂的基本作用是：包复增强材料；固定增强材料；保护增强材料免遭机械损伤；防止增强材料受环境破坏。浸过树脂的增强材料，连续地绕到芯模上，芯模的外形应和制品的内部结构形式相适应。树脂固化以后，可拆除芯模，也可以留作制品的一个组成部分^[1]。

纤维缠绕需要专门的自动缠绕机。为了提高制品强度，必须严格控制绕型和纤维方向，而要做到这一点，就得精确地控制机器运行。也就是说缠绕机必须按设计参数进行制品的缠绕；浸胶系统必须处于完全稳定的状态。当全部主应力均由受拉纤维承担时，制品强度最高。如合理设计和严格控制成型工艺，纤维缠绕玻璃钢的环向抗拉强度可达500,000磅/吋²以上，通常也可达到210,000磅/吋²。

因为这种成型工艺可以制得轻质高强制品，因而对宇宙空

间、液体空间 (hydrospace) 和军事上的一些部件 (表 1-1) 以及民用和工业用的某些制品等 (表 1-2) 特别适用。如增强材料和树脂选用得当的话, 几乎能缠出符合任何性能要求的制品, 因而纤维缠绕制品可以用于军工或民用等各个领域。这里比强度是制品的重要指标。目前已经可以用纤维缠绕法制造长方形制品^[8]。

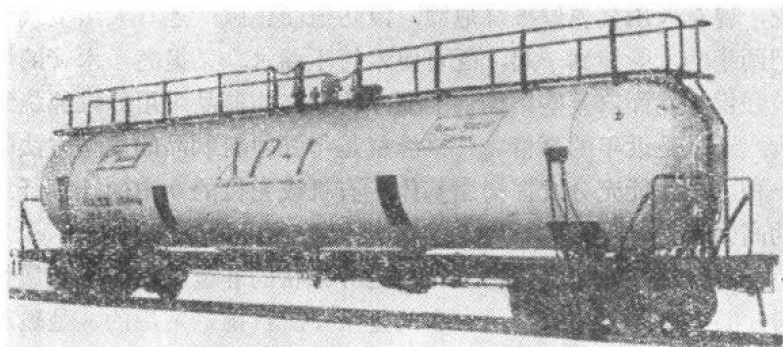


图 1-1 铁路用的环氧纤维缠绕玻璃钢油罐
(直径 9 呎, 长 55 呎)

宇宙空间、液体空间和军事上应用的纤维缠绕制品 表 1-1

火箭发动机壳体	雷 达 罩	炮弹带护环
火箭发动机绝热层	点火装置容器	炮弹防护锥体
固体火箭发动机内衬	机翼液体贮箱	潜水艇流体管路
整流罩鼻锥	直升飞机旋转叶片	潜水艇的贮箱和容器
火箭鼻锥 ^[2]	热 控 管	潜水艇通风管道
火箭喷管内衬	导弹运载筒	潜水艇外壳 (submarine hulls)
助推火箭发动机	船用通风机罩	水下浮标
辅助动力装置的涡轮壳	液体火箭推力室	低温容器
高压容器(气体或液体)	火箭出口锥管	电子仪器外壳
真 空 筒	化学火箭	潜水艇流线型桥和指挥塔
鱼雷发射管	化学容器	声波定位器罩(声纳罩)
火箭发射筒	探空火箭发射管	发动机叶片
火焰喷射管	战术轰炸火箭	引信外壳
导弹着陆减震针	帐篷杆(Tent poles)	鱼雷壳和鱼雷发射器
人造卫星结构	热保护层	

铁路罐車油罐 ⁽⁸⁾	计算机罩	热水箱
儲箱(貯酸、硷、水、油、盐等)	指示浮标	管道配件和弯头
高压开关装置	洗衣筒	工程安装車(工程救險車)上的安装构架
电气装置外壳	通风机壳	公路标桩
推进器	来复枪管 ⁽¹⁾	电容器外壳和垫圈
高压气瓶 ⁽⁴⁾	奶場用的容器 ⁽⁶⁾	线圈架
建筑裝飾支架	汽車和卡車彈簧	电子波导管
发动机罩、電池壳等	电路断路器切断瓶 (circuit breaker rupture pots)	印刷电路板
浮 标	摩托艇(cartop boat)	电动机轉子
閥 門	电镀用夹具	电路切断器外壳
飞机貯油箱	灌溉管道	高压絕緣体
飞机起落架	盐水处理管	整 流 器
飞机结构	地下水管路	天线反射器
圓头小艇	油 井 管	直流电机轉子
船 桅	梯 子	直流电机整流子
灯 杆	电訊工程車伸出臂	風扇外壳
运动場跑道栏杆	紡織用繞线筒	高压熔断器
汽車車身 ⁽⁷⁾	气象火箭	浮动导管
传 动 軸	气 瓶	自动机零件
空气制动器圓筒	承力結構管	槽 車
供热管路	絕 緣 管	輕型圓杆
酸滤淨器	电路导管	織 布 机
无座力来复枪管	化工管道	
浮 筒	紙浆和紙厂管道	
发动机壳		

第一节 历史的回顾

1920年, 格里菲思^[9]曾报导, 新拉出来的、未受损伤的玻璃纤维的强度高达 900,000 磅/吋²。普通连续玻璃纤维的强度也达 250,000~300,000 磅/吋²。然而, 玻璃纤维的抗拉强度与纤维的裂纹状况和周围环境密切相关^[10]。纤维表面的微小裂痕和吸附水分, 都严重地降低玻璃纤维的破坏应力。

简单来说, 玻璃纤维的生产过程是: 先把玻璃球放进坩埚内

加热熔化，其后进行拉制。玻璃球的成分是由用途决定的，使用前要经过仔细挑选。每个坩埚的底部都有一定数量的拉丝孔。从坩埚里拉出来的许多根单纤维集束成一股后绕到绕丝筒上。绕丝筒的表面速度约为12,000呎/每分钟。在原丝绕到绕丝筒之前，把润滑剂涂到集束的纤维上。润滑剂由两大部分组成，一部分起润滑单纤维作用，以减少机械磨损。另一部分起粘合作用，把每根纤维都粘合到一起。最普通的润滑剂是淀粉与油的混合物^[11]，既起润滑作用，又起粘合作用。

在选择增强材料时，单纤维的抗拉强度是一个很重要的指标。如表 1-3 所示，玻璃纤维的抗拉强度比其它纤维高得多。表中的抗拉强度是用每但尼尔的克数来表示的（但尼尔是纺织上的通用术语）。对玻璃纤维来说，1 克/但尼尔相当于 31,000 磅/吋²。但玻璃纤维对机械损伤比其它纤维敏感，而且高温度的环境也会使其性能削弱。一般说来，玻璃纤维比其它纤维坚固，耐热性也好。

各种纤维的抗拉强度^[12]

表 1-3

纤维名称	抗拉强度 (克/但尼尔)	纤维名称	抗拉强度 (克/但尼尔)
玻璃(纤维)	6.3~6.9	尼 綸	4.7~5.6
棉 纤维	3.0~4.9	腈 綸	4.4~5.2
羊 毛	1.0~1.7	滌 綸	4.0~5.0
粘胶纤维	1.5~2.4	維 綸	0.7~1.0
醋酸纤维	1.3~1.5	黄 麻	1.6~1.9

增强塑料是树脂基体和纤维增强材料的复合体。树脂的类型不同以及增强材料与树脂间的比例不同，所得制品的性能也不同。增强材料的特点是：比强度高，耐化学腐蚀性和电绝缘性优良，能够用多种方法成型^[13]。

火箭助推器和宇宙飞船结构所用的材料，包括吸热用的高密

度材料和承受结构应力用的高强材料，都要求重量尽可能小。在不少民用结构中，如铁路罐车，同样也要求减轻重量。很多沿用材料，大都只具有某一方面的优异特性。而理想的新材料应当由两种以上的基本材料按适当比例组成，每种组份都发挥出各自的特长。

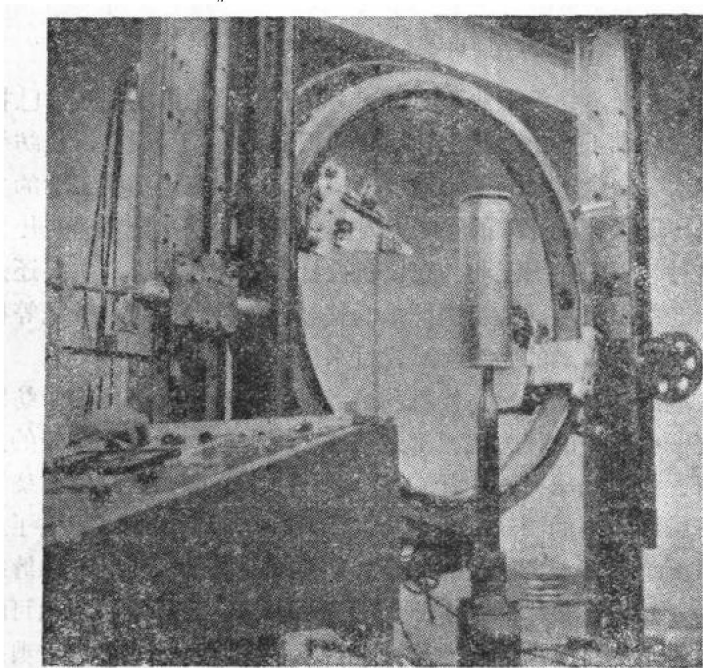


图 1-2 玻璃钢蓄电池外壳的成型工艺

所谓压力容器，就是指能够贮存有压流体或能承受外部流体压力的结构物。在大气层或宇宙空间中使用的内压容器，要求抗拉强度高。内压容器多半是球形或圆筒形的。如果不考虑容器结构效率问题，任何形状的容器都可以制成。在液体空间或水下使用的外压容器，要承受压应力，在这里显然是球形容器的设计指标最好，因为在各种形状的容器中，如果表面积相同，球形容器的容积最大^[15]。

因为玻璃钢的比强度高，所以在设计时，要把承载用的增强材料按照一定的方向排列，以便在给定几何形状的壳体中，充分利用其抗拉强度。用这种纤维缠绕复合材料缠成一种平衡结构，例如火箭发动机壳体的扁椭球形封头（oblated spheroid），就是这种几何形状。

第二节 纤维缠绕与纺织技术的关系

几十年来，纺织工业不断发展，棉花和羊毛的纺织技术已推广到其它纤维工业上。能用短切纤维织成布、带等织品，使纺织工业进入了一个重要的生产新阶段。从前，棉花是纺织工业的主要原料，近代合成纤维的发展，却使棉花退居到次要位置上去了。这种较新的纺织工业，在设备设计和操作技术上，主要还是借鉴于老纺织工业。如新型纤维的整经、络纱、机织和针织等机械，多半都是由老的纺织机械改过来的。

玻璃纤维并捻机、络纱机和整经机的改进也大都依赖于纺织工业。一些重要的张力装置都是从纺织工业的同类装置改装的。调整杆、弹簧加压夹、驼背（camel backs）以及在纤维缠绕时控制纤维张力用的制动装置很早就都用在老的针织和机织上了。往复式缠绕设备，最初是为了络纱而发展起来的。甚至纤维缠绕使用的某些旋转机构的基本概念，也来源于纺织工业。因此可以说，这种新的纤维缠绕工业充分地继承了纺织工业的一些古典技术。

除了增强材料和树脂基体的基本性能外，纤维缠绕结构的性能还和很多因素有关，其中最重要的是线型设计和成型工艺。尽管这两个因素的影响远比原材料本身的性能的影响小得多，但是，合理的线型设计和成型工艺却能保证这些原材料得到最有效的利用。在如何处理增强材料，以取得满意的结构性能方面，纺织技术起重要作用。

目前，制造纤维缠绕结构的许多特殊设备，主要是参考纺织技术而设计和发展的。

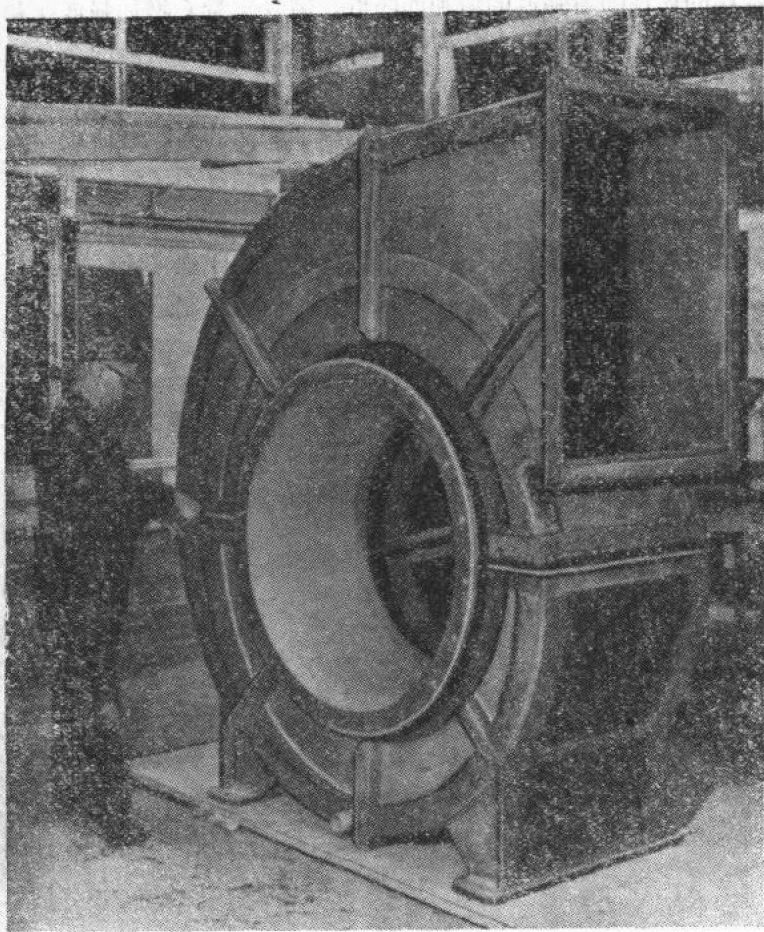


图 1-3 紙浆厂通风設備上的聚酯树脂玻璃纖維帶纏繞管

第三节 纤维缠绕结构的优点

由于固体火箭发动机壳体及其他许多军用和工业产品都对减轻材料重量提出了特别高的要求，对于高强材料，例如，铝合金、不锈钢以及其它合金钢也就进行了新的研究。近年来的研究工作表明，材料固有的韧性或缺口敏感性限制了材料的可靠性。

金属的韧性随着强度的增加而降低。减轻重量（增加强度）和改善可靠性（增加韧性）是两个相互矛盾的要求。目前的合金钢，凡是抗拉屈服强度高于 2.0×10^5 磅/吋²的，对缺口都很敏感。采用合理的制造工艺，可使因缺口敏感而引起的问题有所减少。然而，制造方法再好，效果也不甚显著，仍满足不了对轻质容器所提出的极高要求。采用纤维缠绕结构有助于解决这个根本问题。例如，在固体火箭武器中，纤维缠绕结构的比强度比现有的其它任何结构材料的比强度都优越，而且，前者在制造、安装及成本方面也有不少优点。

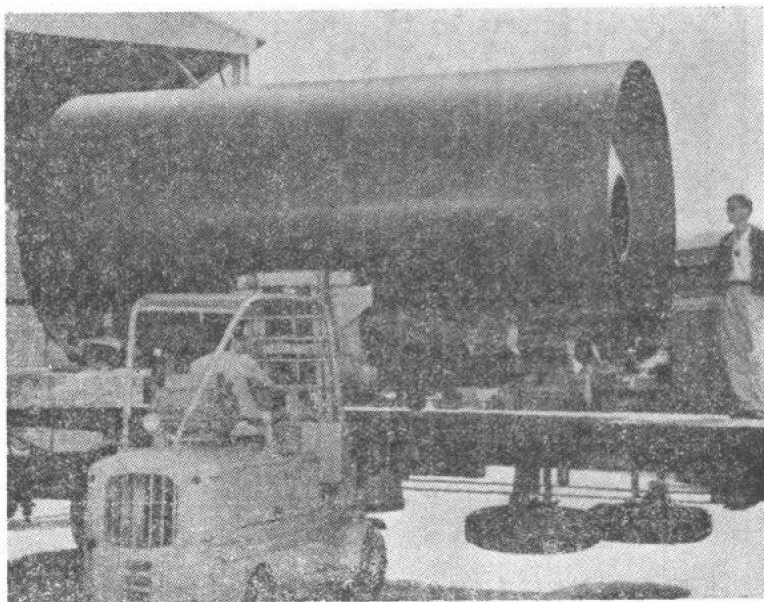


图 1-4 纤维缠绕玻璃钢火箭发动机壳体
（直径8呎，长17呎，重950磅）

用金属制造宇宙空间、液体空间和工业设备，还有另外一些缺点，这就是热绝缘性差、热容量小（吸收或烧蚀）和成本高。由于纤维缠绕技术日趋完善，纤维缠绕玻璃钢就更有利于推广和使用^[17]。当前，由于增强塑料进展很快，它可能扩大到很多技

术领域内，而金属曾经是这些技术领域的主要结构材料。金属材料在宇宙飞船上的用量，正在迅速地减少，甚至可能完全被排出。

纤维缠绕结构的方向强度比可根据结构要求决定，从而有可能设计一种能充分发挥材料效率的结构^[18]，在这种结构的任何方向上，荷载要求的强度都能与材料提供的实际强度相适应。而金属就做不到这一点。内压圆筒是一个典型的例子，其主应力是环向爆破应力。诸如此类，纤维缠绕玻璃钢可获得很高的爆破强度。

缠绕工艺的原理简单，容易实现高度机械化和自动化，从而使产品经济。对纤维缠绕制品来说，无论是增强材料还是树脂基体，都不受尺寸限制，而这种尺寸限制常使大型结构的设计和制造复杂化，有时甚至不可能。制造缠绕制品的设备要比制造同类型金属制品的设备轻巧、简单而且经济。

无论是军用或民用纤维缠绕容器，除承受内压荷载外，一般还要求能承受装卸荷载和安装荷载以及轴向应力和弯曲应力。对薄壁圆筒进行的理论分析表明，对远程导弹或宇宙空间研究用的火箭的头一、二级来说，轴向压缩荷载往往是主要的。为了满足临界压缩荷载要求，可采用纤维缠绕夹层结构和附加纵向加强肋。纤维缠绕夹层玻璃钢结构的蜂窝芯子可看作加强肋，它比纵向加强肋和环向加强肋有更大的安全度^[19]。蜂窝结构还可使重量大大减轻。缠绕蜂窝夹层结构的抗振性、抗热冲击性好，能吸收声能和抵抗高速撞击。此外，这种结构的散热或热绝缘性及防射线能力也都较好。如纤维缠绕夹层结构的蜂窝芯子设计得当，可抵抗子弹或炮弹的贯穿。

第四节 局 限 性

由于玻璃增强材料缺乏延性，纤维缠绕玻璃钢目前还存在一些问题。其中有些问题可以通过合理的设计和正确的成型工艺加以解决。为了获得良好的延性，可以采用其它增强材料而不用玻

玻璃纤维，但是，这些材料多半不耐高温。玻璃纤维由于强度高、价格低，至今仍是主要的增强材料。然而，为了提高使用温度和提高刚度，仍然需要继续对新型纤维进行研究。正在研究的单独使用或组合使用的其它纤维材料，有石英、石棉、陶瓷和金属^[19]。

纤维缠绕用的树脂组分与一般层压增强塑料板用的基本相同。其中环氧树脂用得最多。酚醛树脂和有机硅树脂会使制品具有耐高温性能。聚酯树脂一般用来制造成本低、耐温性要求不高的制品。

对某些纤维缠绕容器来说，玻璃钢的弹性模量较低是个严重缺点。调整玻璃成分或变更工艺制度可少许提高弹性模量，但要大幅度提高，就得改变玻璃的组份了。这会使玻璃纤维的拉制以及玻璃同树脂的粘结出现一些新的问题。氧化铍是一种有效的添加剂，用它能提高玻璃的弹性模量而增加其密度。目前含氧化铍的纤维已投入生产。但这种纤维价格昂贵，熔制相当困难，制造经验也还不足。

层间剪切强度低也使纤维缠绕制品的应用受到限制。虽然纤维缠绕用的纱未经过纺织，避免了编织过程中纤维间的相互磨损，抗拉强度有所提高，但增强材料与树脂间的粘结力不高却限制了纤维缠绕制品的剪切强度。在一般层压玻璃钢中，相邻两层玻璃布凸凹处能相互啮合，剪切破坏强度因而有所增加。采用环氧树脂能使制品具有较高的层间剪切强度，因这种树脂的粘结能力比其它树脂强。另外，设计时应使材料受到的层间剪切荷载最低。

纤维缠绕结构的刚性大、延性小，它的极限挤压强度比一般层压板低，因此，消除开孔或开口周围应力集中的能力较小^[21]。即使如此，由于它的原始抗拉强度高，仍能满足上述条件下的许用设计应力要求。为了连接配件或开口而进行的切割、钻孔或开槽都会使纤维缠绕结构的机械强度受到损失，因此结构设计要合理，在制品固化后，不再进行切割和钻孔等破坏性机械操作。在切口或连接孔处，必须用模压塑料或金属等嵌入物进行局部加