



全国“星火计划”丛书

刘德安 郁轶澄 编

玻璃钢实用技术(三)

玻璃钢结构设计基础

中国建筑工业出版社

9024317



TG327.1
032

全国“星火计划”丛书

玻璃钢实用技术

- (一) 玻璃钢应用
- (二) 玻璃钢原材料
- (三) 玻璃钢结构设计基础
- (四) 玻璃钢成型工艺
- (五) 玻璃钢成型机械
- (六) 玻璃钢机械加工
- (七) 玻璃钢性能测试及产品检验

ISBN 7-112-00671-6/TU · 468

(5791) 定价: 6.65 元

《全国“星火计划”丛书》

玻璃钢实用技术(三)

玻璃钢结构设计基础

刘德安 郁轶澄 编

中国建筑工业出版社

本书是“玻璃钢实用技术”第三分册，其他几个分册为《玻璃钢应用》、《玻璃钢原材料》、《玻璃钢成型工艺》、《玻璃钢成型机械》、《玻璃钢机械加工》和《玻璃钢性能测试及产品检验》。

本书内容包括玻璃钢的基本力学性能、玻璃钢构件设计、夹层结构设计、纤维缠绕压力容器设计、贮罐设计、层合板及连接设计。书中以介绍浅显的材料力学设计方法为主，适当介绍复合材料力学的基本概念。全书通过一些设计实例和常见玻璃钢产品设计分析，使读者在理解玻璃钢基本力学性能和基础理论知识的基础上，初步掌握设计方法，能进行简单的构件设计。

本书可作中小玻璃钢厂培训工人教材，也可供玻璃钢专业人员参考。

刘德安编写第一、二、五、六、七章和全书整理，郁铁澄编写第四、八章。

全国“星火计划”丛书
玻璃钢实用技术(三)
玻璃钢结构设计基础
刘德安·郁铁澄 编

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

新华书店经销

中国建筑工业出版社印刷厂印刷(北京阜外南礼士路)

开本: 787×1092毫米 1/32 印张: 9 1/4 字数: 206 千字

1990年3月第一版, 1990年3月第一次印刷

印数: 1—3,370册 定价: 6.65 元

ISBN7-112-00671-6/TU·468

(5791)

《全国“星火计划”丛书》编委会

主任委员

杨 浚

副主任委员（以姓氏笔划为序）

卢鸣谷 罗见龙 徐 简

委 员（以姓氏笔划为序）

王晓方 向华明 米景九 应日珪

张志强 张崇高 金耀明 赵汝霖

俞福良 柴淑敏 徐 骏 高承增

序

经党中央、国务院批准实施的“星火计划”，其目的是把科学技术引向农村，以振兴农村经济，促进农村经济结构的改革，意义深远。

实施“星火计划”的目标之一是，在农村知识青年中培训一批技术骨干和乡镇企业骨干，使之掌握一、二门先进的适用技术或基本的乡镇企业管理知识。为此，亟需出版《“星火计划”丛书》，以保证教学质量。

中国出版工作者协会科技出版工作委员会主动提出愿意组织全国各科技出版社共同协作出版《“星火计划”丛书》，为“星火计划”服务。据此，国家科委决定委托中国出版工作者协会科技出版工作委员会组织出版《全国“星火计划”丛书》，并要求出版物科学性、针对性强，覆盖面广，理论联系实际，文字通俗易懂。

愿《全国“星火计划”丛书》的出版能促进科技的“星火”在广大农村逐渐形成“燎原”之势。同时，我们也希望广大读者对于《全国“星火计划”丛书》的不足之处乃至缺点、错误提出批评和建议，以便不断改进提高。

《全国“星火计划”丛书编委会》

1987年4月28日

前 言

玻璃纤维增强塑料俗称玻璃钢，它是以玻璃纤维为增强材料，合成树脂为基体的塑料基复合材料。除玻璃纤维外，用作塑料基复合材料的增强材料还有碳纤维、硼纤维、芳纶纤维、碳化硅纤维及其他有机和无机纤维。用碳纤维、硼纤维、芳纶纤维、碳化硅纤维制成的复合材料，具有比玻璃钢更高的技术性能，故称为先进复合材料。本丛书虽然介绍了先进复合材料的一些情况，但主要是介绍玻璃钢（玻璃钢占复合材料总产量的99%以上），故书名仍统称为“玻璃钢”。

玻璃钢在我国已有近30年的发展历史，从原材料的生产和选用、制品成型工艺、产品性能检测及设计、机械装备的设计和制造，直到产品的开发应用等，都取得了很大成绩。特别是党的十一届三中全会以后，中小玻璃钢厂像雨后春笋，发展十分迅速，据1986年统计，全国从事玻璃钢/复合材料的研究和生产单位已有二千余家，年产量达到6万吨，各种玻璃钢产品已广泛用于国民经济的各个领域，成为发展现代工业不可缺少的新材料。当然，我国与经济发达的国家相比，仍有相当的差距，如产量低、品种少、工艺落后、产品质量不够稳定等。为了振兴我国的玻璃钢工业，满足中小玻璃钢企业广大职工的学习要求，我们编写了这套玻璃钢实用技术，并列入全国“星火计划”丛书。

玻璃钢实用技术包括《玻璃钢应用》、《玻璃钢原材料》、《玻璃钢结构设计基础》、《玻璃钢成型工艺》、

《玻璃钢成型机械》、《玻璃钢机械加工》和《玻璃钢性能测试及产品检验》共七个分册，由武汉工业大学刘雄亚教授主编。在编写过程中，我们尽量总结国内外的最新实践经验和研究成果。期望本套玻璃钢实用技术能对我国中小玻璃钢企业的发展有所贡献，但限于作者水平，书中难免有不妥之处，希望广大读者批评指正。

编者 1987年8月

目 录

序

前言

第一章 绪论 1

第二章 玻璃钢的基本力学性能 7

第一节 玻璃纤维的基本力学性能 7

第二节 树脂基体的基本力学性能 10

第三节 玻璃钢的拉伸与压缩性能 14

第四节 玻璃钢的密度和各组分材料含量的关系 21

第五节 玻璃钢拉伸强度的理论估算 23

第六节 玻璃钢的剪切性能 29

第七节 玻璃钢的弯曲性能 31

第三章 玻璃钢构件设计 35

第一节 层合梁的设计 35

第二节 玻璃钢薄壁梁的设计 44

第三节 玻璃钢脱板设计实例 51

第四节 玻璃钢受弯圆管的设计 57

第五节 玻璃钢承压杆件的设计 60

第六节 玻璃钢冷却塔塔体强度计算实例 72

第四章 玻璃钢夹层结构 83

第一节 蜂窝夹层结构的坐标及分析单元体 84

第二节 蜂窝夹层结构容重的估算 85

第三节 蜂窝夹层结构的力学原理及计算方法 88

第四节 蜂窝夹层结构在拉伸(压缩)时的力学性能 89

第五节 蜂窝夹层结构受剪切时的力学性能 97

第六节 蜂窝夹层结构的弯曲性能 106

第七节 最轻蜂窝夹层结构 112

第八节	计算实例	116
第五章	纤维缠绕压力容器	119
第一节	网格分析的基本假设与压力容器的内力计算	119
第二节	网格分析的基本方程式	121
第三节	纤维缠绕压力容器的组合缠绕	123
第四节	纤维缠绕压力容器的筒体结构设计	126
第五节	平衡型张力封头曲线	131
第六节	金属接管及封头壁厚的计算	139
第七节	纤维缠绕容器计算实例	143
第六章	玻璃钢贮罐的设计	150
第一节	玻璃钢贮罐的构造	151
第二节	具有两个鞍形支座的玻璃钢卧式贮罐	153
第三节	多个鞍座的卧式贮罐	167
第四节	卧式贮罐设计实例	174
第五节	玻璃钢立式贮罐的设计	182
第七章	层合板的设计	190
第一节	广义胡克定律	192
第二节	工程常数与刚度矩阵元及柔度矩阵元的关系	195
第三节	任意坐标系中简单层板的应力-应变关系	197
第四节	用工程常数表示的任意坐标系中简单层板的应力-应变关系	210
第五节	正交异性简单层板在平面应力作用下的强度准则	218
第六节	层合板外载与各层应力-应变的关系	228
第七节	层合板的铺层序列	236
第八节	层合板的强度计算	240
第九节	层合板的设计	251
第八章	玻璃钢的连接	258
第一节	玻璃钢的连接方式	258
第二节	玻璃钢管的连接	271

第一章 绪 论

在我国玻璃钢已经有二十多年的发展历史了，但是和金属、木材这类材料相比，应该说还是比较年轻的材料学科，很多研究工作还在进行之中，产品的结构设计还无规范可循，即使在先进工业国家中，结构设计也还处于等代设计阶段，就是说在载荷、形状、环境不变的条件下用强度和刚度等量的办法，将原用材料置换成玻璃钢，但是不应该认为等代设计就是合理的设计方法，因为它不一定能够发挥玻璃钢的两大优点，材料的可设计性和结构形状选择的无限制性。在采用等代设计方法时，还必须考虑这种材料本身的特性，否则也有可能导致设计的失败，比如金属结构中不会出现的稳定问题，用玻璃钢去代替金属材料就可能出现稳定失效，

因为玻璃钢的弹性模量只是钢材的 $\frac{1}{10} \sim \frac{1}{14}$ ，剪切强度和垂直纤维方向的拉伸强度低也是玻璃钢特点之一，玻璃钢性能的可设计性，使我们在产品设计中有较大的自由，但是三个低的性能指标又给结构设计增加了难度。

玻璃钢产品设计，应包括材料设计（根据产品使用的环境介质要求，如耐化学腐蚀、透光或绝缘等）、工艺设计和结构设计三部分内容。材料设计和工艺设计主要通过原材料和成型工艺的选择来实现，请参见〈玻璃钢原材料〉及〈玻璃钢成型工艺〉。本书主要介绍玻璃钢结构设计的内容，在介绍详细的设计方法之前，先讲一下结构设计中的几个问题。

一、材料的可设计性

玻璃钢是由玻璃纤维、树脂和填料所组成，它兼有结构材料和功能材料的特性，其组分中的纤维、树脂和填料的性能、用量对玻璃钢的性能影响很大，因此，我们可以根据玻璃钢使用条件对材料性能的要求，通过合理选材进行设计。

玻璃钢性能设计分力学性能和物理化学性能两部分内容。前者是根据产品所承受荷载的大小和方向，去选择原材料的含量比例和纤维的铺层形式。不同的原材料及其含量比例和铺层形式，构成了具有不同力学性能的玻璃钢；后者则主要取决于原材料本身的物理化学性能。

在力学性能方面，玻璃钢可以设计成如下三种典型形式。

（一）准各向同性玻璃钢

它可以由短切纤维的预混料和短纤维毡制成，也可以用玻璃布作 0° ， $\pm 45^\circ$ ， 90° 或 0° ， $\pm 60^\circ$ ， 90° 铺设而成，这类玻璃钢在铺层平面内的各个方向有大致相同的性能，但其数值较低，对于一些强度和刚度要求不高或载荷不准确的产品可以使用这类玻璃钢，如透明波形瓦，酸泵叶轮、汽车外壳等。

（二）正交平衡型玻璃钢

这种类型玻璃钢是由1:1玻璃布或单向布作 0° ， 90° 铺设而成，在 0° 和 90° 两个垂直方向上有相同的强度和刚度，数值较高，但在 $\pm 45^\circ$ 方向上较弱，对于方形或近似于方形的平板、薄壳构件，可以采用这类玻璃钢，但对于长宽比较大的板壳构件，还应该设置 $\pm 45^\circ$ 铺层，这样可以充分发挥纤

纤维的作用，也可以提供较大的抗剪能力。

用无捻粗纱布成型正交平衡型玻璃钢极为方便，目前中小型玻璃钢厂所生产的产品几乎都采用这类玻璃钢制成，但是应该指出，这是一种不正常的现象，因为对有些产品采用正交平衡型铺层不能很好地发挥纤维的作用，比如承受横向荷载的梁，主要应力发生在梁的轴向，那么大部分的纤维也应该放置在轴向，如果用1:1无捻粗纱布正交铺设成型，势必造成横向纤维的浪费，增加了梁的壁厚，这个问题呼吁过多年，应该引起人们的重视了。

（三）单向玻璃钢

单向玻璃钢是用单向布或股纱沿一个方向铺设而成，在纤维方向有很高的强度和刚度，但在垂直纤维的方向却是很弱的，如单向挤拉棒，只有在载荷非常清楚的情况下才能使用这类材料，在设计这类构件时应特别谨慎小心，比如一根受弯的薄壁圆管，由于弯矩的作用，主要应力发生在管轴方向，但是由于作用在轴向平面上的弯曲应力有压扁薄壁管的趋势，产生了环向拉应力，如果圆管的横向强度不够时，就会使圆管沿轴向产生破裂，所以，在玻璃钢结构设计中，次应力的影响是不能忽略的，在纤维铺设不当时，次应力就有可能上升为主要矛盾。

二、结构形状的选择

如前所述，等代设计方法有时是可行的，有时不一定可行，例如用玻璃钢去取代一个金属的实心叶片，如果不改变原型就不可能得到和金属叶片同等的刚度，因为玻璃钢的弹性模量比金属小得多。因此在设计玻璃钢叶片时，希望能选用较厚的叶型或空腹薄壁结构。在设计承压构件时，金属结构

通常采用型钢或型钢的组合形式，如果用玻璃钢去取代金属承压构件，有时也可以用金属型材形式的玻璃钢型材，但它的断面要比金属型材大，因为它的抗扭转失稳能力差，因此用闭合截面的玻璃钢型材要比开口截面型材好得多。

金属构件的连接是很方便的，可以用焊接、铆接和螺栓连接，玻璃钢也可以采用铆接和螺栓连接方式，但比金属困难，因为它的剪切强度低，而且表现为脆性，打孔和敲击易引起局部分层和破损。但玻璃钢有成型材料的同时也成型了自身结构的特点，只要在设计时考虑周密一些，尽可能设计成整体结构，就可以减少连接上的困难，并同时减轻了结构的重量。再以轮渡码头用的跳板为例，木质跳板是实心板材，铝合金跳板是梳子形的，如果这种跳板用玻璃钢制成，它的断面形式就要变动，采用木质跳板形式，成本太昂贵，采用铝合金跳板的截面形式会产生很大的扭转摆动，采用多格箱形截面就合适得多。总之，在满足使用条件和用户的认可下，设计玻璃钢产品时，不要受原来形状的约束，要尽可能使产品的形状有利于发挥这种玻璃钢材料的长处，避免其短处。与此同时，还应注意到玻璃钢的性能有强烈的方向性，即使结构形状选择是合理的，如果在产品成型时不注意控制纤维的方向，也可能导致产品的破坏。

三、材料的线弹性与强度的分散性

试验表明，玻璃钢的拉伸应力-应变关系曲线直到断裂几乎是线性的，不象钢材那样有明显的塑性，因而它没有缓和缺陷处高应力的能力，所以它的冲击性能是较差的，给连接也带来了困难。

由于纤维强度的分散性和成型工艺所致，玻璃钢的性能

表现了较大的分散性，应该从两方面来对待这个问题，第一要承认分散性较大是客观事实，要尽量排除人为的因素，如改善原材料的生产工艺和严格控制成型工艺，第二不要因此而非难玻璃钢这种复合材料，材料性能的稳定与否与所选的指标有关，以3号钢为例，它的拉伸强度在167兆帕（1700公斤力/厘米²）到412兆帕（4200公斤力/厘米²）之间变化，最大值与最小值相差约2.5倍，取235兆帕（2400公斤力/厘米²）为3号钢的屈服指标，保证了99%以上的屈服极限是超过这个指标的，所以人们认为这个数值是可信的，如果把它的极限值定为294兆帕（3000公斤力/厘米²），恐怕很多人也会认为3号钢的性能不稳定了，因此对玻璃钢这种材料，也需要根据不同的原材料及其含量和铺层方式订出一个性能指标来。但是玻璃钢的性能是上述三个因素的复杂函数，要想制定一个无所不包的性能表格来，是非常困难的，只能对少数常用的类型订出指标来，大多数的性能指标要根据特定材料的性能试验来评价，如何可靠地确定这个指标在第二章再述。

确定了极限值后，还需要选定一个安全系数，安全系数就是保险系数，用这个系数来保证结构正常工作，通常它有两种表达形式，一是用材料的极限值与工作应力的比值来表示：

$$K = \sigma_{\text{极限}} / \sigma_{\text{工作}}$$

也可以用结构的实际工作荷载和结构所能承受的极限荷载来表示：

$$K = P_{\text{极限}} / P_{\text{工作}}$$

从上述两个公式可以看出 K 总是一个大于1的数。

对于纤维增强塑料的安全系数，英国标准包括有6项，

$K = 3K_1K_2K_3K_4K_5$, 3是基本安全因素; $K_1 = 1.4 \sim 3$ 与生产方法有关; $K_2 = 1.2 \sim 2$ 与时间有关; $K_3 = 1 \sim 1.25$ 与工作温度有关; $K_4 = 1.1 \sim 2$ 与交变荷载有关; $K_5 = 1. \sim 1.5$ 与固化制度有关; 连乘的结果是从 6 到 40, 这样大的安全系数, 使纤维增强塑料轻质高强的优越性能接近消失, 这说明研究工作还很不成熟, 目前我国对玻璃钢结构设计如何选用安全系数, 尚无统一规范, 一般可按下列情况参照选取。

正常环境条件	$K = 2$
短期静载	$K = 3$
长期静载	$K = 4$
交变荷载	$K = 4 \sim 6$
重复冲击荷载	$K = 10$

根据具体的成型工艺和工作条件的严峻程度, 可以在上述参考值的基础上稍许增大一点。如何正确地确定各种工作条件下玻璃钢结构物的安全系数, 值得进一步探讨, 需要所有从事玻璃钢研究、设计和生产的工作者认真总结经验, 制定出我国的玻璃钢结构设计规范。

玻璃钢结构设计除前述的等代设计方法外, 还有网格理论设计方法和复合材料力学设计方法, 复合材料力学方法要求有较深的数学和力学基础, 这方面的内容将在第七章略作介绍。

第二章 玻璃钢的基本力学性能

玻璃钢的基本力学性能是设计玻璃钢产品所必须掌握的基本资料，在玻璃钢材料中，玻璃纤维是承受荷载的主要成分，树脂的作用是传递应力和支撑、固定纤维，因此它的力学性能取决于纤维和树脂的力学性能，取决于它们的含量比、增强方式及这两种材料之间的界面状态。界面状态是一个比较复杂的影响因素，它对玻璃钢性能的影响程度，目前还无法作出定量评价。

第一节 玻璃纤维的基本力学性能

如果不加特别说明，我们一般都是讨论常温和静荷载条件下纤维和树脂的力学性能，如弹性模量、强度极限等。

大家知道，平板玻璃的强度是比较低的，拉伸强度约为69兆帕（700公斤/厘米²），而玻璃纤维的实验室强度最高可达7250兆帕（74000公斤/厘米²），这是由于玻璃纤维只有很小横截面积，它存在缺陷（如微裂纹）的可能性要比块体材料小得多，所以纤维在其长度方向的强度比块体材料高得多，表2-1列举了各种玻璃纤维与A₃钢性能的比较，E玻璃纤维是无碱纤维，耐热性与电绝缘性好，S玻璃纤维是高强高弹纤维，C玻璃纤维是中碱纤维，A玻璃纤维是有碱纤维。

纤维的测试强度以拉断力计量，根据拉断力的大小计算拉伸强度，按照支数定义可以计算出纤维的横截面积来，