

玻璃钢结构设计

上海玻璃钢结构研究所

中国建筑工业出版社

玻 璃 钢 结 构 设 计

上海玻璃钢结构研究所

中国建筑工业出版社

本书内容分为四个部分。第一部分概述了玻璃纤维和树脂以及成型工艺的常识。第二部分介绍了玻璃钢的基本力学性能的估算和温度、大气曝晒、水、腐蚀介质及核辐射对玻璃钢性能的影响。此外，还用一章的篇幅介绍了强度校核及一些准则。第三部分叙述了简单构件的结构设计和强度计算，包括拉伸杆件、压缩杆件、弯曲杆件、连接和夹层结构。第四部分是具体产品的结构设计，主要介绍叶片和雷达天线反射面及雷达罩两类产品，重点是介绍结构设计的基本思想，也适当介绍了一些结构试验。

本书由朱颐龄、陈名甫、张崇杰、徐祖根等同志执笔编写，杨胜绘图。

本书可供玻璃钢结构设计有关人员参考，亦可供高等院校有关专业师生阅读。

玻璃钢结构设计

上海玻璃钢结构研究所

中国建筑工业出版社出版 (北京西郊百万庄)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

中国建筑工业出版社印刷厂印刷

开本：850×1168毫米1/32 印张：20 字数：535千字

1980年2月第一版 1980年2月第一次印刷

印数：1—5,650册 定价：3.15元

统一书号：15040·3540

前 言

玻璃钢作为结构材料使用已近二十年了，但是在结构设计方面还没有一本专著。原因是多方面的，其中较主要的一点是理论研究工作做得少。这是不利于玻璃钢工业进一步发展的。我们研究所做了一些玻璃钢结构设计方面的工作，积累了一些经验和教训，为了总结经验，以利于发展玻璃钢结构设计工作，尽管水平有限，还是编写了这本书。

限于条件，本书主要是总结本所的结构设计工作，许多兄弟单位的宝贵经验，没有能够编入本书中。

玻璃钢毕竟还是年轻的材料，研究工作的重点大都放在提高性能上，对玻璃钢的合理结构设计方面，做得还不深入，因此目前的一些产品结构设计还处在“等代设计”阶段，即在结构物形状、荷载、使用环境都不变的条件下，用玻璃钢代替其他材料制作零部件，所用的设计计算方法是沿用原用材料的设计方法，仅考虑玻璃钢的特点作些修改。所以，本书内容的重点放在力学性能和强度校核上。为便于读者阅读，在编写时力求简单明了，尽量用材料力学的分析方法叙述。

本书的内容分为四个部分。第一部分介绍了玻璃纤维和树脂以及成型工艺的常识。第二部分是力学性能，它分三章，一章叙述基本力学性能的估算，并辅以少量的试验资料，其中对第一主向弹性模量 E_L 和第一主向强度 σ_L 的估算比较准确，其他向的试验资料还不多，还不能评论估算的可靠程度，但从几种抽象的模型来看，其计算结果是比较接近的。另一章罗列了一些试验结果，例如温度影响，老化影响，高速荷载，交变荷载等等，这一方面还缺乏足够的研究，罗列这些现象和实测数据的目的是给具体工作者有个量级上的概念便于在结构设计中考虑。还有一章是强度

校核，把玻璃钢抽象为一个单向纤维层板，以这样一个基本单元作为强度校核的基础，对各种层板并包括短纤维毡层板和模塑料进行了一些校核，其中虽介绍了一些强度准则，还需要在这方面进行试验工作。第三部分内容是简单构件的结构设计和强度计算，这方面的内容包括了拉伸杆件，压缩杆件，弯曲杆件，连接和夹层结构。基本上以常用材料的结构设计方法为蓝本，尽可能的考虑到玻璃钢的特点，特别是单向拉伸强度较高、弹性模量较低、剪切强度和剪弹性模量过低这些特点，有些金属结构中较少出现的扭转失稳、侧向失稳等问题，在玻璃钢结构件中却是必须考虑的。第四部分内容是具体产品的结构设计，重点是结构设计的基本思想并附了结构试验，这方面尚需进行更多的试验研究工作，才能逐步上升为玻璃钢设计理论。

在本书审稿过程中，得到北京251厂、哈尔滨玻璃钢研究所、哈尔滨建工学院、湖北建工学院、上海化工学院等单位的支持，提出了许多宝贵的意见，在此表示衷心的感谢。

限于我们的工作经验和水平，错误之处定然不少，恳请读者批评指正。

上海玻璃钢结构研究所

目 录

第一章 绪论

§1.1 概况	1
§1.2 玻璃钢结构设计的一些考虑	4

第二章 玻璃钢的原材料

§2.1 玻璃纤维及其织物	15
§2.2 玻璃纤维纱和玻璃纤维布及其标准	19
§2.3 玻璃纤维的性能	28
§2.4 玻璃纤维表面处理	41
§2.5 合成树脂	47
§2.6 不饱和聚酯树脂	48
§2.7 环氧树脂	51
§2.8 酚醛及其它树脂	56
§2.9 玻璃钢成型工艺简介	57
§2.10 手糊成型工艺	58
§2.11 模压成型工艺	62
§2.12 缠绕成型工艺	64
§2.13 连续成型工艺	65

第三章 玻璃钢的基本力学性能估算

§3.1 玻璃钢的密度及其玻璃纤维的体积含量	67
§3.2 单向玻璃钢的拉伸性能	69
§3.3 双向玻璃钢的拉伸性能	79
§3.4 玻璃钢的压缩性能	83
§3.5 玻璃钢的剪切性能	91
§3.6 玻璃钢的弯曲性能	97
§3.7 设计用强度值的确定	97

第四章 玻璃钢的其它力学、物理性能

§4.1 玻璃钢的冲击性能	103
§4.2 玻璃钢的疲劳性能	106
§4.3 玻璃钢的徐变性能	112
§4.4 玻璃钢在高速荷载下的性能	117
§4.5 温度对玻璃钢力学性能的影响	124
§4.6 大气曝晒对玻璃钢性能的影响	129
§4.7 吸水性及水对玻璃钢性能的影响	133
§4.8 腐蚀性介质对玻璃钢性能的影响	141
§4.9 核辐射对玻璃钢力学性能的影响	146
§4.10 玻璃钢的线膨胀系数	147
§4.11 玻璃钢的导热系数	150
§4.12 玻璃钢的电性能	151

第五章 强度准则及多层板的计算

§5.1 正交各向异性材料的虎克定律	153
§5.2 单层板在任意方向的应力应变关系	157
§5.3 强度准则简介	164
§5.4 多层板的应力应变关系	176
§5.5 多层板的应力计算及铺层序列	179
§5.6 多层板的强度计算	185
§5.7 短切纤维毡玻璃钢的弹性常数和强度估算	191
§5.8 各向同性玻璃钢的弹性常数和强度估算	197
§5.9 多层板的设计	202

第六章 玻璃钢承拉构件——缠绕结构物

§6.1 缠绕方法	208
§6.2 缠绕结构的力学计算——网格理论	210
§6.3 压力容器	215
§6.4 球形容器	215
§6.5 扁球形容器	224
§6.6 等张力回转壳体	229

§6.7 筒形容器	232
§6.8 强度校核和检验压力	236
§6.9 内衬	239
§6.10 体积变形	245
§6.11 接头处的应力	247
§6.12 高速转筒	251

第七章 玻璃钢承压杆件

§7.1 压杆稳定计算——轴向受压时的欧拉公式	258
§7.2 承受偏心荷载的压杆	263
§7.3 计算压杆临界应力的 φ 系数法	265
§7.4 玻璃钢开口型材承压时的一些考虑	267
§7.5 轴向力和横向力联合作用下的压杆	274
§7.6 玻璃钢天线杆	276
§7.7 撑杆	281
§7.8 玻璃钢矩形薄板的稳定计算	291
§7.9 玻璃钢矩形薄板的极限承载能力	297

第八章 玻璃钢弯曲杆件

§8.1 受弯杆件的设计思想	300
§8.2 玻璃钢梁材的强度刚度分析	303
§8.3 玻璃钢梁材的挠度计算	311
§8.4 玻璃钢梁材带板宽度的选取及其它	314
§8.5 玻璃钢跳水板的设计计算	316
§8.6 受弯圆管的强度刚度分析	321
§8.7 工字梁翼缘和箱形梁面板的经纬向纤维量比	326
§8.8 玻璃钢梁材的侧向稳定性以及截面尺寸的考虑	327
§8.9 玻璃钢多层薄板的弯曲	335
§8.10 玻璃钢层板的弯曲基本方程	353

第九章 玻璃钢连接

§9.1 玻璃钢的机械连接	369
§9.2 机械连接接头设计	371

§9.3 多列连接钉的计算	376
§9.4 玻璃钢的胶接	379
§9.5 玻璃钢结构中常用的几种胶粘剂	384
§9.6 玻璃钢搭接接点的试验研究	388
§9.7 玻璃钢搭接接点的极限承载力分析	395
§9.8 玻璃钢管道连接	405

第十章 玻璃钢蜂窝夹层结构

§10.1 玻璃钢夹层结构件成型工艺简介	414
§10.2 玻璃钢夹层结构件的尺寸符号和坐标以及分析单元体	416
§10.3 夹层结构的容重计算	418
§10.4 夹层结构的力学基础和最简单的设计方法	422
§10.5 等代截面——机头雷达罩的稳定校核	426
§10.6 最轻夹层结构	430
§10.7 蜂窝夹层结构的平压（拉）弹性模量和强度的估算	433
§10.8 波纹夹层结构的平压强度和弹性模量	436
§10.9 蜂窝夹层结构侧压时的弹性模量估算	438
§10.10 波纹夹层结构的X向和Y向弹性模量	449
§10.11 蜂窝夹层结构的剪切弹性模量	451
§10.12 波纹夹层结构的剪切弹性模量	456
§10.13 芯子对弯曲刚度的影响	462
§10.14 夹层结构的强度估算	466
§10.15 面板的皱褶	468
§10.16 面板在蜂格区域的凹陷	475
§10.17 芯子剪切弹性模量对面板正应力的影响	476
§10.18 集中荷载处的附加应力	486
§10.19 夹层柱的屈曲	490

第十一章 玻璃钢叶片和风机

§11.1 玻璃钢叶片的应用和特点	493
§11.2 玻璃钢叶片的结构设计	495
§11.3 叶片的强度和变形计算	509
§11.4 682-D8000型风机叶片	523

§11·5 26号轴流风机	531
---------------------	-----

第十二章 玻璃钢天线反射体与天线罩的结构设计

§12·1 天线结构的外荷载计算	541
§12·2 玻璃钢中型天线的总体方案考虑	543
§12·3 六米口径全玻璃钢天线反射体实例	545
§12·4 大型天线罩的设计与计算	577

第十三章 玻璃钢其它结构产品

§13·1 玻璃钢船舶设计	601
§13·2 解放-7型玻璃钢滑翔机设计简介	617
§13·3 玻璃钢水上飞机浮筒设计简介	624

第一章 绪 论

现在，在材料使用方面，对材料的要求是非常广泛的，因而不大可能用一种材料来满足结构物所需要的使用要求。过去，常常是为特定的结构物选择适当的材料。目前，有可能成型适当的复合材料来满足结构物所希望的性能要求。所谓复合材料是由几种性能不同的材料组合起来的材料，例如大家熟知的钢筋混凝土，塑料覆面金属，以及纤维增强塑料等等。本书将讨论玻璃纤维增强塑料（又名玻璃钢）的结构物设计。

§ 1.1 概 况

追溯复合材料的历史是很古老的，早就有用草筋增强泥坯作为墙体材料，现在在防腐蚀方面还在使用的生漆衬布，在我国已有了二千年的历史。元朝的弓是一个具有相当水平的夹层结构物，它用木材做芯子，在受拉面胶有平行纤维而在受压面胶着牛角。近代的钢筋混凝土更是广泛使用的复合材料。近四十年来，由于航空工业和其他工业的要求，在设计和制造高效能复合材料上有相当的进展。

现代复合材料之一的玻璃钢是由于航空通讯的要求在本世纪四十年代初产生的。像飞机雷达罩一类结构物，既要承受气动荷载，又要求能透过雷达波。铝材可以满足强度要求，但不能满足电讯要求，陶瓷等可以满足电讯要求但不能满足强度要求。在塑

料工业和玻陶工业的基础上应运而产生了玻璃钢这种二方面都能得到满足的材料，并在1942年起就在飞机上得到应用。由于这种材料还有许多特点，也在其他方面得到了应用，在六十年代以前，曾经把它不恰当的誉为万能材料。其实，万能材料是不存在的，事物总是一分为二的，以玻璃钢而言，人们可以选择适当的塑料基体和增强纤维组成特定的玻璃钢以满足特定的结构物的要求。故复合材料的出现，使人们对选择材料、设计材料有了更多的自由度。

玻璃钢作为一个工业，在我国是比较晚的。1958年，才诞生了玻璃钢工业。但二十年来，玻璃钢工业得到迅猛的发展。现在，生产和研制单位几乎已遍及全国各省市。就承力结构而言：1965年试飞了玻璃钢飞机螺旋桨；1966年首飞了全玻璃钢水上飞机浮筒和解放7型滑翔机；1970年安装了直径44米的全玻璃钢蜂窝夹层结构地面雷达罩，同年还运转了 $\phi 4.7$ 米的玻璃钢风洞螺旋桨；1974年颁布了40升铝内衬玻璃钢气瓶规范；1976年定型了8米直径风机的玻璃钢叶片；还试航了长39米的玻璃钢船。

玻璃钢的应用是多方面的，下面就其主要方面作一简单介绍：

玻璃钢具有优良的电绝缘性能和抗磁性以及微波透过性好等特点，在电讯、电机、电器方面得到了广泛的应用，而且品种繁多，例如各种雷达罩、各种绝缘板材、管材以及换向器、集电环、整流子V形环、绝缘梯、印刷线路板、电机护环等等，面广量大，提高了产品性能、延长了使用寿命，还节约了大量棉纱、云母、黄铜等材料。

玻璃钢的成型工艺简单，维修方便，而且耐腐蚀和不易长海蛎子。目前已用它制造多种船艇和船上用品，最大的船体已长达39米，宽达6米。最近还有采用钢筋混凝土骨架玻璃钢船壳的组合结构形式，提高了刚度，降低了成本。1964年首航的玻璃钢艇，仍在继续使用着。其他还有驾驶舱、甲板、推进器、风斗、风帽、油箱、舵叶、导流帽、声纳罩、救生圈、杆篙、橹等数十种上部

建筑、配件和栖装件。

陆运中的各种轿车、客车、载重汽车、拖拉机也都普遍采用了玻璃钢制作的零部件，如车身、发动机罩、门窗、地板等，使原来要由许多钣金工才能完成的任务，只需少数普通工，既省工时又经济耐用。

玻璃钢的耐化学腐蚀性良好，近几年已在石油、化工等工业上得到应用，从而可以节约不少不锈钢和铜铝等有色金属。特别是在中小型石油、化工、染化、制药、化纤、化肥、有色冶炼等工厂中，采用玻璃钢制造各种管道、阀门、泵、贮罐、贮槽、塔器、压力容器衬里等制品，其中以管道的用量为最大。在防腐使用中，较多的是用作衬里或用作增强材料，当原来结构材料的耐腐蚀性较差而强度是足够时，用玻璃钢衬里覆面较为经济，当原结构材料的耐腐蚀性较好而强度不够时，用玻璃钢增强较为合理。

建筑部门的广大职工，也用玻璃钢来制成各种彩色的透明或半透明波纹瓦、卫生设备以及窗框、门扇、隔墙、活动房屋、高层建筑围护墙、装饰贴面板等，还有落水斗、落水管、空调设备、灯具和路标等。

在采煤工业中，也用玻璃钢制造矿井支柱和设备。它比木支柱重复使用的次数多，比钢支柱的重量轻。

在火箭和宇航器等产品上，玻璃钢也是一种重要的烧蚀材料。

其他如农业用的农药喷雾器、体育器械用的撑杆、弓、跳水板等，都有应用玻璃钢制品。

总的说来，玻璃钢的使用领域是广泛的，但是目前的使用量是不多的。主要的原因是玻璃纤维和树脂等原材料的产量较少和品种不多，另外价格也较昂贵。这就不可避免地缺乏确切的性能指标，合理的设计方法以及产品检验。随着我国国民经济的发展，原材料来源的扩大，价格的下降，制造工艺水平的提高，研究工作的深入，可以预计玻璃钢将成为一种常规的工程材料。

§ 1.2 玻璃钢结构设计的一些考虑

与其他如金属、木材、钢筋混凝土等惯用材料相比较，玻璃钢毕竟还是相当年轻的材料。尽管在航空、船舶、化工、建筑、车辆、机电等方面都有应用，它的结构设计方法还不成熟，有待于进一步有意识的积累经验和资料。

目前的玻璃钢结构设计方法，基本上是所谓等代设计：即在结构物形状、荷载、使用环境都不变的条件下，用玻璃钢材料代替其他材料制作零件。所用的设计计算方法是沿用原用材料的设计方法，稍为考虑一些玻璃钢的特点，有时甚至只作等强度或等刚度的替换。原惯用材料的设计计算方法是人类在生产斗争中积累起来的经验，是应该而且是必须借鉴的。在今后一段时间内，等代设计可能仍是常用的设计方法。这种设计方法，有时是可行的，有时不一定是可行的。在结构设计中，希望能最有效的使用玻璃钢。

从结构上来说，玻璃钢的主要优点是易成型性和轻质高强以及强度和弹性性能的可设计性，这些优点使人们在结构形状的设计和材料性能的设计上有较大的自由；玻璃钢的主要缺点是低的弹性模量和低的层间强度，这些使零件的连接和某些有刚性要求的结构设计增加了难度。下面将讨论一些结构设计中应注意的问题。

1. 强度和弹性性能的可设计性

玻璃钢是由树脂和玻璃纤维或其织物组成的，它的比重较小，大约为1.5~2.0，视玻璃纤维的含量多少而定。它的强度是较高的，有时采用“比强度”这一指标作为选用材料的依据，所谓比强度就是强度与密度之比。比较各种材料的比强度，玻璃钢的品位是较高的，这对于承受惯性力的产品（例如叶片）来说是有利的。

玻璃纤维的强度或弹性模量比树脂的强度或弹性模量大几十倍，而玻璃纤维在宏观范围内是单向强度的材料，所以玻璃钢的

强度或弹性模量在相当大的程度上取决于所含的玻璃纤维量及其分布的方向，这二点使人们能够在一定程度上设计出各种强度和弹性性能的玻璃钢。一般说来，可以设计成三种类型，即准各向同性材料、二个垂直方向上有较高强度或弹性模量的正交各向异性材料、以及只在一个方向上有特高强度的单向性材料。

准各向同性玻璃钢可以用短切纤维预混料压成，也可以用短切纤维毡制成，其纤维含量约为15~45%；也可以用玻璃布作 0° 、 $\pm 45^\circ$ 、 90° 铺陈，其纤维含量在50%左右；还有用单向丝片作 0° 、 $\pm 60^\circ$ 铺陈，其纤维含量可高达80%。这类材料在铺陈平面内各个方向上有基本上相同的强度和弹性模量，但其绝对数值是低的。对于强度或刚度要求不高的产品，或者对于荷载情况不甚清楚而只能要求具有准各向同性性能时，例如一些机电零件或头盔等产品，可以选用这类组成。

双向铺陈可以用玻璃布或单向丝片作 0° 、 90° 铺陈，在 0° 及 90° 方向上可以有相同的强度或弹性模量，或者有一定比例的强度或弹性模量，其数值是较高的，但在 45° 方向上则较低，对于一般矩形或近似矩形的平板或薄壳形构件，可以采用这种铺陈。

单向铺陈可以用单丝片或股纱在一个方向上铺陈，在这个方

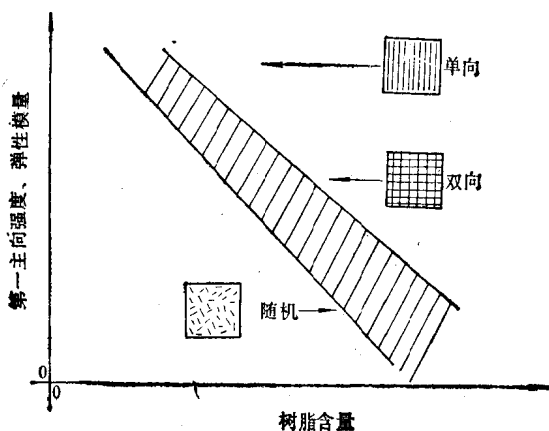


图 1-1 树脂含量、铺陈方式与第一主向强度或弹性模量的关系

向上有特高的强度或弹性模量，其拉伸强度可达 10000 公斤/厘米²，但是在垂直于这一方向的第二方向上，强度是很低的，最多也只是树脂的拉伸强度 500 公斤/厘米² 左右。对于荷载情况清楚而产品的重量要求又很严格的产品，可以考虑这种铺陈形式。一般比较保险的是选用 4 : 1 或 7 : 1 的铺陈形式。

图1-1表示玻璃钢的纤维含量、铺陈方向对主要方向的强度或弹性模量的影响。单向铺陈的树脂含量最低而第一主向强度（弹性模量）最高；随机短切纤维毡的树脂含量最高而强度（弹性模量）最低。

2. 各向异性性能

当使用准各向同性铺陈时，除了用玻璃布或单丝片时要考虑铺层顺序和层数以避免零件在脱模后发生不必要的翘曲外，在强度和刚度计算上可以使用原各向同性材料的计算方法。为了更好地利用玻璃纤维的强度和弹性模量，更常用的是双向铺陈或单向铺陈玻璃钢。最简单的设计方法是：假定玻璃纤维是主要承力基材而忽略树脂的强度，同时假定树脂具有无限剪切刚度并将纤维维持在固定的空间内。将零件简化为一个网格结构，利用简单的力学计算就可以确定零件的截面尺寸。这种计算方法有点像钢筋混凝土的计算，只是钢筋混凝土中的钢筋量很少而玻璃钢中的玻璃纤维量却很多。用各向异性体弹性力学来进行强度和刚度设计，是太费时的，有时甚至是相当难的。尽管我们用材料力学的方法初选了零件的尺寸，还是建议在设计以后作一些各向异性计算的校核，特别是某些连接点附近的强度问题。

金属材料在各个方向上的强度或弹性模量基本上是相同的，因而在设计一个金属零件时，往往只满足主要荷载的要求，不一定去考虑另一方向的次要荷载，或去考虑第二向的强度或刚度，但是对玻璃钢来说，特别是使用单向铺陈时，这些次要因素也是必须注意的，如前所述，单向玻璃钢的第二主向强度有时还不到第一主向强度的 5 %，尽管第二方向的荷载或应力不大，但是由于其强度小的缘故，在满足第一向荷载的同时，还必须考虑次要

的第二向载荷和校核第二向强度。所以，在设计玻璃钢结构物时，一方面要求对结构物承受的外荷载知道得更清楚，如果只知道主要荷载，很可能在主要荷载下没有破坏，却在次要的第二向荷载下发生破坏；另一方面要求将强度计算做得更仔细些，例如一根受横力弯曲的圆管，可以用单向玻璃钢制成，由平行于管轴的纵向纤维承受弯矩，但是不能忽略由弯曲变形引起的管壁附加弯矩，它将使圆管沿轴向开裂。在设计圆管时，除了计算纵向纤维量而外，还得计算周向纤维量。再举一个例子，一块受简单拉伸的玻璃钢薄板有时会出现翘曲现象，而对各向同性材料的薄板则没有这一现象。对于由各向异性性能引起的一些现象，至少要能够定性的了解它，以便在设计 and 成型工艺上利用它。

3. 低弹性模量

玻璃钢的弹性模量是比较低的。以玻璃纤维含量为80%的单向玻璃钢而言，其第一主向的弹性模量约为 5×10^5 公斤/厘米²，为钢的弹性模量的25%，或为铝的70%，其比重约为2.1。如果单纯的使用等代设计，则将稍超过原结构物的重量。至于一般常用的双向玻璃钢，其主向弹性模量约为钢材的1/14或铝材的1/5；而准各向同性铺陈玻璃钢的弹性模量，仅与一般木材相近。这样的数量级，在设计结构物时是必须重视的。当然，我们可以要求使用更高弹性模量的纤维如碳纤维、硼纤维、晶须等以提高弹性模量，但这已不在本书讨论范围之列，不予赘述。

当设计一个有刚度要求的构件时，一般都需要改变截面尺寸以弥补低弹性模量这一弱点。例如用双向玻璃钢代替普通钢壁板，在等刚度要求下，不改变原来的结构布置而单纯将厚度增加到原厚度的 $(14)^{1/4} = 2.4$ 倍，还是可以减轻重量的。如果用同样的方法代替铝材，则厚度将为原厚度的1.7倍，非但不能减轻重量而且将超重。如用同法替代木材，则超重更多。在替代后二种材料时，则要在结构布置上作适当考虑，或者减小梁、肋间距，或者增加次梁、次肋以减薄壁板，或者采用夹层结构，以便使整个结构重量下降。再如用单向玻璃钢来代替某些杆件，要求维持弯