

玻璃纤维 增强复合材料的设计

[英] F·A·魁恩 M·I·泼劳特 编著

支振德 译 徐鹤梅 校



福建科学技术出版社

玻璃纤维

增强复合材料的设计

[英] F. A. 魁恩 M. I. 泼劳特

支振德 译 徐鹤梅 校

福建科学技术出版社

责任编辑：黄宗黎

玻璃纤维增强复合材料的设计
(英) F·A·魁恩 M·I·泼劳特 编著
支振德 译 徐鹤梅 校

*
福建科学技术出版社出版

(福州得贵巷27号)

福建省新华书店发行

福建新华印刷厂印刷

开本787×1092毫米 1/32 2 875印张 53千字

1987年6月第1版

1987年6月第1次印刷

印数：1—1,300

ISBN 7-5335-0015-6/TB·1

书号：15211·98

定价：0.65元

前 言

复合材料的概念是简单的。当单一材料不能满足使用要求时，就要把两种或两种以上的材料复合起来以满足需要。广义地说，所有的材料都是复合材料，从古代的草筋泥墙，到近代的钢筋混凝土都是如此。但目前复合材料的定义却是狭义的，主要是指两种或两种以上材料在宏观尺度上的复合，有时更局限于以玻璃钢为始的玻璃纤维增强复合材料。

必须注意的是，这里的复合不是合成。复合材料中的组分材料不允许有化学腐蚀，而只能是物理组合，当然也希望它们的界面上有些化学反应以增强粘结力。就本质来讲，复合材料不仅作为材料，更应作为结构物来处理，这样就使得材料的应用有更大的自由度。例如，所有的玻璃纤维、树脂已确定，但不同的玻纤含量和不同的铺放方向，却可组成品种繁多、性能各异的复合材料。

按照使用要求选择合适的材料组成复合材料，以充分发挥组分材料的优点，人们称之为材料设计。但各组分材料的弱点也不可避免地带进来，应扬长避短。选择合适的玻璃纤维含量和铺放方向以满足强度、刚度要求，选择合适的树脂以满足耐温、耐腐蚀要求。

支振德、徐鹤梅两同志译、校的这本小册子，简明扼要地说明了上述这些基本概念，使不熟悉复合材料的人花不多的时间就能了解复合材料的概貌。

作为一种材料，总有它的使用场合。国际上玻璃钢产品已超过4万种，自宇航到家具，遍布各工业部门，产量达200万吨，主要用于车辆、船舶、建筑和化工设备。国内近年来玻璃钢生产发展较快，产品超过千种，产量达5万多吨。本小册子结合船舶和化工设备举了不少例子，这些例子可以推广到其他应用上。本小册子还提供了许多数据和图表，这些都是英国资料，有些并不适合我国国情，只能作参考或借鉴。例如，国外的玻璃纤维价格比通用聚酯树脂高得多，当然少用些玻璃纤维是合理的；而我国的通用聚酯树脂价格高于玻璃纤维，则不宜套用英国资料。又如，国外的主要玻璃纤维产品是无捻粗纱和短切纤维毡，而国内却以织物为主，短切纤维毡尚在创始阶段。要结合我国具体情况提供自己的数据和图表，首先要有可靠的性能数据，这些数据只能在大量测试数据基础上用统计分析获得，忽视这些平凡的重复测试是错误的；其次要有合理的设计方法。现在一般采用“等代设计”法，即在不改变结构形式下作简单的等强度或等刚度换算。过去的经验是宝贵的，也是应该借鉴的；再次要有可信的质量控制和检测手段。由于这类材料的历史还不到50年，需要在实践中累积更丰富的经验，所以不宜要求过分严密的理论分析和过分精密的检测手段；以免花费过大，但解决问题时要求概念上清楚、分析上正确、处理上简单。本小册子中所贯穿的理论分析和处理方法是合理的，值得我们学习。

顺便提一下，关于玻璃钢横向弹性模量的估算，国内学者做了较多工作，提出了实用简便的估算公式： $E_T = E_m / \bar{W}_m$ 。本小册子中提出的 E_T 估算值偏低一些，但还可应用。另

外，小册子中的一些数据是精确过分的，如玻璃纤维的 $E_f = 68948 \text{MN/m}^2$ ，聚酯树脂的 $E_m = 3447 \text{MN/m}^2$ ，计及材料本身的变异性，取二位有效数字是足够精确的。这只能说是美玉微瑕，不掩其辉。

朱颐龄

1986年3月

序 言

十年前，英国玻璃纤维（下面简称玻纤）有限公司出版了第一本有关玻纤增强复合材料的书。五年后，经修改和再版，该书成了与玻纤增强复合材料有关的工业标准参考书。

现在这本书，是在前两本书的基础上增编的最新版本。虽然书中有些数据还是原来的，但新增了许多内容，使之更能适应十多年来工业迅速发展的需要。

〔英〕 F·A·魁恩 M·I·泼劳特

·目次·

序言

- 一、玻纤复合材料简介..... 1
 - (一) 玻璃 (二) 玻纤的分类 (三) 树脂
- 二、玻纤复合材料基本知识..... 6
 - (一) 复合材料的厚度 (二) 质量含量与体积含量的换算 (三) 复合材料的密度 (四) 复合材料的孔隙含量
- 三、玻纤复合材料的力学性质..... 14
 - (一) 复合材料强度增强的力学原理 (二) 复合材料弹性模量 (三) 复合材料的强度
- 四、玻纤复合材料性能预测..... 23
 - (一) 用经验资料预测 (二) 用数学模型预测
- 五、玻纤复合材料的设计..... 35
 - (一) 梁的弯曲应力与弯曲力矩 (二) 帽型截面的几何特性 (三) 圆柱形容器 (四) 矩形容器 (五) 变形标准 (六) 安全系数 (七) 由不同材料层组成的层合板弯曲 (八) 夹层结构
- 六、玻纤复合材料的性能..... 58
 - (一) 复合材料的物理性能 (二) 等效截面积、

质量、厚度 (三) 吸音 (四) 硬度和耐磨性

(五) 透光和传热 (六) 温度的影响 (七) 电

性能 (八) 耐腐蚀性能 (九) 其他性能

七、玻纤复合材料性能优选..... 74

(一) 材料性能优选 (二) 性能优选设计

译后记..... 82

一、玻纤复合材料简介

(一) 玻璃

当玻璃被拉成细纤维时，其强度大大地超过了块状玻璃。在英国的玻纤制造业中，原先用两种玻璃，现只用其中的一种——E玻璃生产玻纤，其是一种低碱硼硅酸盐玻璃。拉成纤维的玻璃类型有：

1. E玻璃。其由钠和钾的氧化物组成，碱含量少于1%。E玻璃拉成的纤维是一种高级绝缘纤维，也是世界上的树脂标准增强纤维。

2. C玻璃。其拉成的纤维可抗酸性腐蚀，常以表面毡的形式作为化工设备的耐腐蚀层。

3. S、R玻璃。这两种玻璃拉成的纤维有很高的弹性模量，特别适于制造与空间工业有关的对性能要求很高的层合板。

4. Cem-FIL AR 玻璃。其拉成的玻纤具抗碱性，适用于增强水泥。

表1

各种玻璃拉成的纤维性能

性能 \ 玻璃类型	E	C	S	R
比重	2.56	2.45	2.49	2.58
单纤维抗拉强度 GN/m ²	3.6		4.5	4.4
弹性模量 GN/m ²	75.9		86.2	84.8
软化点 ℃	850	690		990
热膨胀系数 1/℃	4.9×10^{-6}			
热传导系数 W/m·℃	0.04			

(二) 玻纤的分类

1. 粗纱。有各种号数，适于作包装物或结构物。

(1) 大型喷射：用手工或机械连续短切的喷射粗纱。

(2) 小型喷射：用手工或机械连续短切的，并经铬盐处理的喷射粗纱。

(3) 大型预浸胶：用于聚酯稀浆以生产团状和片状模塑料的短切粗纱。

(4) 大型缠绕：用于高强度元件或杆材的缠绕。

(5) 大型编织：用于大量生产质地一致的织物。

(6) 等张力粗纱：用于缠绕或编织的粗纱。

2. 短切纤维毡。有密度和宽度各不相同的多种品种。

(1) 大型纤维毡：用于手工湿法敷层，有良好的模制性。

(2) 多层纤维毡：易于湿透、疏松的多层而高度呈整体的手糊毡。

(3) 等纤维毡：由不同树脂、玻纤比例组成的多种长度的纤维毡。

(4) S·M·C大型纤维毡：用于生产高质量的片状模塑材料。

(5) F·W大型纤维毡：用于缠绕高强度快速湿润纤维毡。

(6) P·B大型纤维毡：其为粉粘纤维毡，可用手工敷成半透明模塑料或供化工厂使用。

(7) T·S大型纤维毡：其为细纱、高强度粉毡，用于机械制造半透明片状模塑料。

3. FGCS系列短切纤维。用于增强聚酯、醇酸模塑材料以生产预成型制品，也可用于非塑性材料，如沥青、硅酸钙、石膏、灰泥等。其经设计还可用于增强热塑性聚合物，如尼龙、苯乙烯、聚丙烯等。

4. 粗纱布。其有各种密度和各种织法，其中也包括了单向布。

5. 纤维带。其有各种宽度和厚度，用于电器或用作增强物。

6. 连续纤维毡。其有各种密度和宽度，用于增强经热、冷加工处理的对模模制品。

7. 组合产品。把两种增强材料复合成为应用广泛的结构材料，即称为组合产品。

(1) 纤维织物毡：粗纱织物与短切纤维毡复合，用作触模模制品。

(2) 单向粗纱毡：单向粗纱和短切纤维毡复合，用于

拉挤法或触模法模塑。

8. 表层毡。其为薄纤维纱毡，在对模模塑中易于铺放。

9. 表面毡。其为薄纤维纱毡，在触模模塑时，易于形成富含树脂的表面层。

(三) 树脂

聚酯树脂是玻璃纤维复合材料使用最广泛的树脂。制造可完全固化的聚酯树脂有3个明显阶段：第一阶段由有机酸（通常是饱和或不饱和二元酸的混合物）和二元醇反应生成不饱和聚酯；第二阶段用单体溶剂（通常是苯乙烯）溶解不饱和聚酯，使之成为流体；第三阶段是层合阶段，即在树脂流体中加催化剂（有时称加速剂），在单体溶剂分子和不饱和酸的双键之间形成完全可固化的聚酯树脂。若改变组分比例和使用不同的酸、醇，则制得的聚酯树脂性质也不同。

其他常用的树脂有：

1. 环氧树脂。其是直链聚合物，由环氧氯丙烷与多元酚类缩聚而成。

2. 硅树脂。其是半有机化合物，具有交替的硅和氧原子链。

3. 呋喃树脂。其由糠醇和糠醛自缩聚而成。

4. 酚醛树脂。其由酚与醛缩聚而成。大部分酚醛树脂是粉状的，其制品由模压而成。近年来已有适合于手工糊层工艺的酚醛树脂问世。

表2给出了模塑复合材料中最为通用的已固化了的聚酯、环氧树脂的典型性能数据，可供设计时参考。

表2

聚酯、环氧树脂典型性能

性 能	已固化聚酯树脂	已固化环氧树脂
比重	1.10~1.46	1.11~1.40
硬度 (洛氏) M	70~115	80~110
抗拉强度 MN/m ²	42~91	28~91
弹性模量 MN/m ²	2~4.5	2.4
抗压强度 MN/m ²	90~250	100~175
比 热 cal/g·°C	0.3	0.25
导热性 W/m·°C	0.21	0.21
线膨胀系数 1/°C	9.9~18×10 ⁻⁵	8.1~11.7×10 ⁻⁵
收 缩 率	0.004~0.008	0.001~0.004
吸水性 %	0.15~0.60	0.08~0.15

二、玻纤复合材料基本知识

(一) 复合材料的厚度

选用材料质量与成品厚度之间关系，是设计复合材料的关键问题之一。这个关系可由每种所选用材料在复合材料中所占的厚度得到。图1、图2为层合板厚度曲线。已知层合板的

表3 材料密度与厚度常数对照表

材 料	密度 Mg/m^3	厚度常数 $\frac{\text{mm}}{\text{kg}/\text{m}^2}$
E 玻 纤	2.56	0.391
S 玻 纤	2.49	0.402
C 玻 纤	2.49	0.402
聚酯树脂	1.10	0.909
聚酯树脂	1.20	0.833
聚酯树脂	1.30	0.769
聚酯树脂	1.40	0.714
环氧树脂	1.1	0.909
环氧树脂	1.3	0.769
填充物碳酸钙	2.3	0.435
填充物碳酸钙	2.5	0.400
填充物碳酸钙	2.9	0.345

玻纤质量含量及玻纤单位面积质量，即可从中查出其厚度。

表3中的厚度常数按下式计算：

$$\frac{1}{\text{密度}(\text{Mg}/\text{m}^3)} = \text{厚度常数} \left(\frac{\text{mm}}{\text{kg}/\text{m}^2} \right) \quad 2-1$$

对于任一材料，只要给出其密度，则厚度常数就能算出。故有：

$$\text{材料所占厚度}(\text{mm}) = \text{材料质量}(\text{kg}/\text{m}^2) \times \text{厚度常数} \left(\frac{\text{mm}}{\text{kg}/\text{m}^2} \right) \quad 2-2$$

例1 某种层合板含有600g/m²E玻纤的短切纤维毡和密度为1.2Mg/m³的聚酯树脂，树脂与玻纤的质量比为2.25:1，求此层合板的厚度。

$$\text{解 玻纤厚度} = 0.6 \times 0.391 = 0.235 \text{ mm}$$

$$\text{树脂厚度} = 2.25 \times 0.6 \times 0.833 = 1.125 \text{ mm}$$

$$\text{层合板厚度} = 0.235 + 1.125 = 1.360 \text{ mm}$$

例2 某种层合板由5层800g/m²E玻纤无捻粗纱和密度为1.3Mg/m³的树脂组成，玻纤质量含量为55%，求此层合板的厚度。

$$\text{解 } \frac{\text{树脂质量}}{\text{玻纤质量}} = \frac{100 - 55}{55} = 0.818$$

$$\text{树脂质量} = 0.818 \times 5 \times 0.8 = 3.272 \text{ kg}/\text{m}^2$$

$$\text{玻纤厚度} = 5 \times 0.8 \times 0.391 = 1.564 \text{ mm}$$

$$\text{树脂厚度} = 3.272 \times 0.769 = 2.516 \text{ mm}$$

$$\text{层合板厚度} = 1.564 + 2.516 = 4.080 \text{ mm}$$

例3 某种层合板由一层300g/m²E玻纤C·S·M（片状模塑复合材料）、4层600g/m²E玻纤C·S·M组成。树脂混

合物中有40%密度为 2.5Mg/m^3 的填充物和60%密度为 1.2Mg/m^3 的聚酯树脂。树脂与玻纤的质量比为 2.5:1，求此层合板的厚度。

解 玻纤总质量 = $1 \times 0.3 + 4 \times 0.6 = 2.7 \text{ kg/m}^2$

树脂质量 = $2.7 \times 2.5 = 6.75 \text{ kg/m}^2$

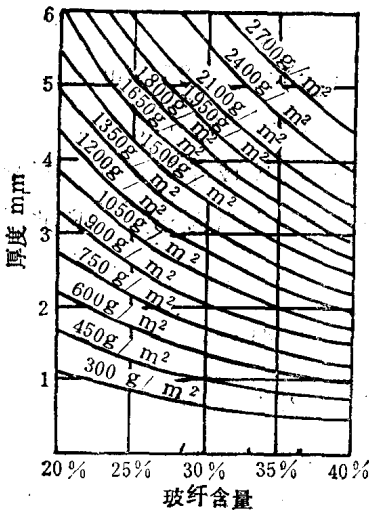
填充物质量 = $6.75 \times \frac{40}{60} = 4.50 \text{ kg/m}^2$

玻纤厚度 = $2.7 \times 0.391 = 1.056 \text{ mm}$

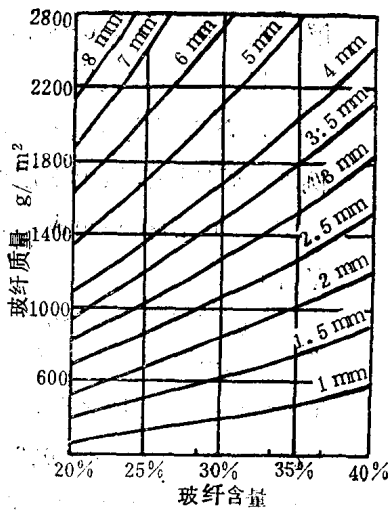
树脂厚度 = $6.75 \times 0.833 = 5.623 \text{ mm}$

填充物厚度 = $4.50 \times 0.4 = 1.800 \text{ mm}$

层合板厚度 = $1.056 + 5.623 + 1.800 = 8.479 \text{ mm}$



4/1 3/1 2.5/1 2/1 1.75/1 1.5/1
树脂/玻纤



4/1 3/1 2.5/1 2/1 1.75/1 1.5/1
树脂/玻纤

图1

图2