

# 树脂基复合材料粘接的优化设计

吴妙生<sup>1</sup> 周祝林<sup>2</sup>

(周承侗推荐, 1996年6月9日收到, 1997年6月30日收到修改稿)

## 摘 要

本文在试验数据和理论分析的基础上, 提出树脂基复合材料单搭接的优化设计的原则, 胶粘剂的选择、被粘物的设计, 粘接长度的选择、胶层厚度的选择等。认为通过优化设计可以提高粘接强度, 减轻产品的重量, 提高其质量。

**关键词** 粘接 复合材料 优化设计 纤维 剪切

## 一、引 言

树脂基复合材料产品, 多数是薄壁结构, 采用粘接可以充分发挥复合材料优点。粘接比其他连接有下列优点: 粘接可以实现同种和异种材料的连接, 特别是夹层结构最好的连接方式; 粘接能减轻产品重量的20~30%; 粘接产品表面光滑、平整、美观, 保持复合材料中纤维的连续性, 改善表面气动力性能, 提高疲劳强度; 粘接的胶层具有良好的电缘性、隔热、隔声、透无线电波、耐腐蚀和密封防松性能; 粘接工艺简便, 便于实现机械化和自动化。

## 二、粘接的优化设计

### 2.1 粘接优化设计原则

树脂基复合材料粘接优化设计的目的是使产品满足强度和刚度的条件下使其重量最轻。粘接优化设计原则为: (a) 选择高强度、高延伸率、中弹性模量、低收缩率的胶粘剂, 线热膨胀系数尽量与被粘物相近; (b) 合理设计接头形式及搭接长度, 一方面使胶层应力尽量均匀, 另一方面尽量避免或减小对胶层产生剥离力和劈裂力; (c) 被粘物的粘接表面要进行合理处理, 使胶层与被粘物有较强的粘附强度; (d) 对接头处的复合材料中的增强纤维要进行合理的铺设及表面处理; (e) 进行科学的涂胶工艺, 使胶层厚度达到设计要求。

### 2.2 单搭接应力分析

对如图1所示的单搭接接头。不计及附加弯矩产生正应力时的剪应力分布为:

1 上海材料所, 上海 2000437.

2 上海玻璃钢所, 上海 200000.

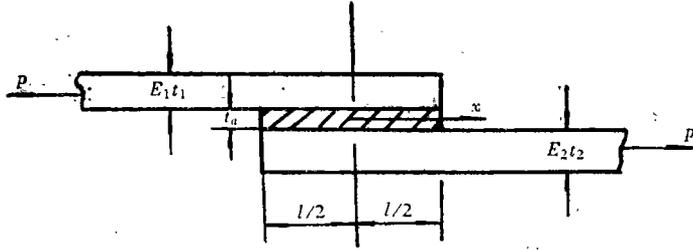


图1 单搭接受力示意图

$$\tau = \frac{pc}{2b} \left[ \frac{\text{ch}cx}{\text{sh}(cl/2)} - \frac{E_2t_2 - E_1t_1}{E_1t_1 + E_2t_2} \frac{\text{sh}cx}{\text{ch}(cl/2)} \right] \quad (2.1)$$

式中  $t_1, t_2, E_1, E_2$  为被粘物的厚度和弹性模量,  $b$  为试样宽度,  $c$  为:

$$c = \left[ \frac{2G_a}{t_a} \left( \frac{1}{E_1t_1} + \frac{1}{E_2t_2} \right) \right]^{1/2}$$

式中  $G_a$  为胶粘剂剪切模量,  $t_a$  为胶层厚度。

计及被粘物的弯曲产生的正应力时, 胶层中剪应力分布 (假设二被粘物同材料、同厚度) 为:

$$\tau = \frac{P}{bl} \left[ \frac{\beta l}{8t} (1 + 3\kappa) \text{cth} \frac{\beta x}{t} + \frac{3}{4} (1 - \kappa) \right] \quad (2.2)$$

$$\text{式中 } \beta = \left[ \frac{8G_a t}{Et_a} \right]^{1/2}$$

$\kappa$  为力矩系数, 与拉伸载荷, 被粘物和胶粘物的弹性性能、厚度、搭接长度等因素有关。当被粘物在破坏前始终不变形的话, 此时  $\kappa=1$ , 代入式(2.2), 化简后, 对同材料、同厚度的被粘物, 可得出与式(2.1)同样的结果。

### 2.3 胶粘剂的优化选择

同式(2.1)、(2.2)除以胶层的平均剪应力, 可得出接头端点的应力集中系数, 以被粘物同材料同厚度为例, 可得出:

$$n = \frac{1}{2} cl \text{cth} \frac{cl}{2} \quad (2.3)$$

$$\text{式中 } c = [2G_a / Et_a]^{1/2}$$

由此可见与胶粘剂有关的是  $c$  系数。从式(2.3)可知, 为使胶层中剪应力集中系数降低, 必须选择剪切模量  $G_a$  较低的胶粘剂。一般情况下, 材料的强度性能与弹性性能成正比, 选择弹性模量太低, 其剪切强度也要下降, 所以要选二高 (高强度、高延伸率)、一中 (中等弹性性能)、一低 (低收缩率) 的胶粘剂。一些胶粘剂粘接玻璃钢单搭接的拉剪强度列于表 1。

表 1

一些胶粘的拉剪强度

材 料	环 氧	环氧-尼龙	环氧-丁腈	环氧-酚醛	聚氨酯	氯丁橡胶
$\tau(\text{MPa})$	20.6	44.6	27.5	20.6	10.0	2.8

最好加之适量的膨胀性单体, 使胶粘剂固化的体积变化略有膨胀, 可以填充被粘物表面及胶粘剂本体内部可能的空洞和缺陷, 改善界面的粘接性能, 提高粘接强度,

## 2.4 被粘物的设计

被粘物的设计包括三个方面：(i)被粘物的弹性模量及厚度的选择。从式(2.3)可知，用同样的胶粘剂，被粘物不同，胶层剪应力集中系数不一样。被粘物的弹性模量越高、厚度越厚，应力集中系数越小，平均剪切强度就越高。按式(2.3)计算，若弹性模量提高一倍，应力集中系数降低30%，也即粘接剪切强度提高43%。复合材料产品成型的可塑性，可根据产品设计在粘接的内表面增厚被粘物，如图2(c)所示。(ii)被粘物表面处理。纤维增强复合材料粘接，必须经过表面处理，如用砂布打磨或喷砂处理被粘物表面，尽量打磨到使纤维露出。表面深度对粘接强度的影响如表2所示，被粘物是CFRP，胶粘剂为环氧618—3700#，热固化。(iii)接头形式设计。就单搭接而言，接头形式也是很重要的，当被粘物较厚时，可采

表2 被粘物表面深度对粘接强度的影响

表面深度(mm)	0.03	0.3
剪切强度 $\tau$ (MPa)	11.0	16.1

用图2中的(a)、(d)接头形式。当被粘物较薄时，可采用(c)形式，在被粘物中的局部铺设高模量纤维，或局部增加厚度、减小应力集中。

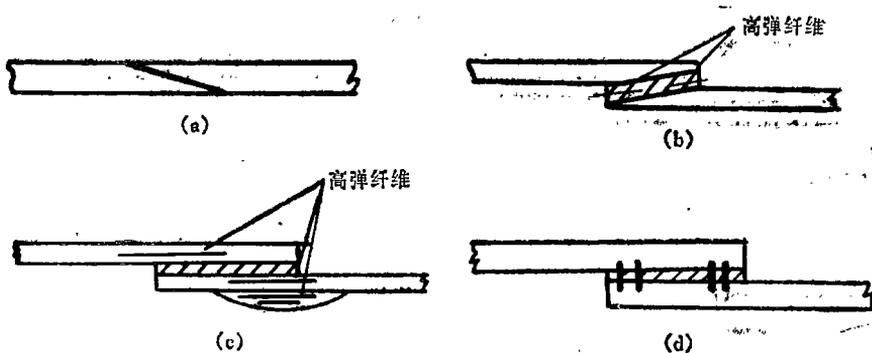


图2 改进的单搭接接头

## 2.5 粘接长度的选择

从式(2.3)很明显地看出，随接头长度 $l$ 的增长，应力集中系数成比例地上升，粘接剪切强度下降。几组玻璃钢粘接剪切强度随接头长度的关系如图3所示(被粘物厚度为2.5mm)。

从被粘物的承载力和胶层承载力的平衡可以求出产品设计中的接头长度为：

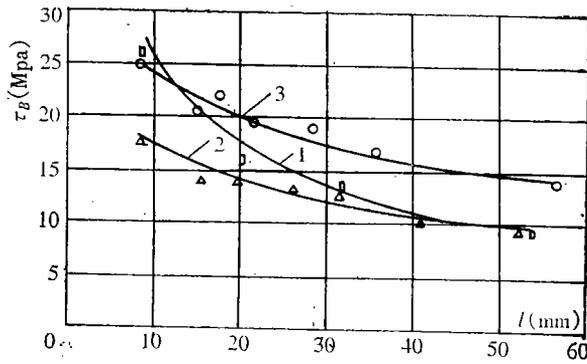
$$l = \frac{\sigma_B \cdot t}{2.5[\tau]} \quad (2.4)$$

式中  $\sigma_B$  为被粘物材料的拉伸强度， $[\tau]$  是计及接头长度的粘接拉剪强度的设计值，为：

$$[\tau] = \tau_B / n \quad (2.5)$$

式中  $\tau_B$  为标准拉剪试样的剪切强度， $n$  是计及实际接头长度因子系数，一般有下列表达式：

$$n = \frac{0.5k_1(l+a)}{a+0.1k_2l} \quad (2.6)$$



1: 环氧玻璃钢    2: 聚酯玻璃钢    3: 聚酯玻璃钢(斜搭接拉剪, 厚度为5mm)

图3 粘接剪切强度与接头长度关系

式中  $a$  是标准拉剪试样的搭接长度, 各国标准不同;  $l$  是实际接头长度;  $k_1, k_2$  是从试验数据统计得出的系数, 对不同的复合材料是不同的, 对玻璃钢可取  $k_1 = k_2 = 1$ 。

### 2.6 胶层厚度的选择

从式(2.3)可知, 胶层越厚, 应力集中系数越小, 而实际上从树脂浇铸体拉伸试验可知, 随试样厚度减薄, 强度增高, 对胶层也同样, 胶层本身强度随胶层减薄而提高, 结合两个方面因素, 对不同的被粘物, 存在着最佳胶层厚度, 一般在  $0.1 \sim 0.2 \text{ mm}$  之间。胶层厚度对粘接强度的影响如表 3 所示。

表 3 胶层厚度对粘接强度的影响

胶层厚度 $t_a$ (mm)	0.07	0.15	0.22
粘接剪切强度 $\tau$ (MPa)	11.9	21.1	20.7

对不同接头形式及受力状态, 可以在胶层中设计缓冲层, 以减小应力集中。

## 三、结 论

综合上述研究, 树脂基复合材料粘接的优化设计是重要的。优化设计不单是搞产品结构, 搞力学性能工作者的任务, 是一门多科学综合课题, 只有力学和化学, 结构和工艺等配合才能达到粘接的最优设计, 对不同被粘物, 选择出最优的二高一中一低的胶粘剂, 最优接头形式, 最优胶层厚度等, 以达得到重量最轻质量最好的产品的目的。

## 参 考 文 献

- [1] J. Shields, *Adhesive Handbook*, London, Butterworths (1976), 7—20.  
[2] 上海玻璃钢研究所, 《玻璃钢结构设计》, 中国建筑工业出版社 (1980), 379—398.  
[3] 张志冬, 复合材料粘接设计的几个问题, 粘接, 5(3) (1984), 18—22.

**Optimum Design of Adhesive Bonding of Resin-Base Composites**

Wu Miaosheng

(*Shanghai Research Institute of Materials, Shanghai 200437, P. R. China*)

Zhou Zhulin

(*Shanghai FRP Research Institute Shanghai Received,  
Shanghai 200000, P. R. China*)

**Abstract**

In this paper, based on the experimental and theoretical analysis, the principle of optimum design for single lap joint of resin matrix, together with composites, is presented, the adhesive selection, the bonding length and the thickness of the adhesive layer and the adherent design. It is shown that by the optimum design the strength of adhesive bonding is increased while the weight of the composites products is decreased so that the quality of the products is improved.

**Key words** adhesive, composites, optimum design, fiber, shear