

[文章编号] 1004- 0609(2001)S1- 0213- 04

纤维硬塑锚杆的试验研究^①

张向东, 张树光, 李永靖

(辽宁工程技术大学 土木建筑系, 阜新 123000)

[摘 要] 通过对纤维硬塑复合材料进行正交实验, 获得了纤维硬塑复合材料锚杆的最佳配比, 进而研究了固化时间与杆体强度的关系、杆体直径对强度的影响。并在试验的基础上, 对杆体的损伤破坏机理进行了分析。

[关键词] 玻璃纤维; 环氧树脂; 复合材料; 锚杆

[中图分类号] TB 332

[文献标识码] A

纤维硬塑材料有很高的比刚度和比强度^[1~4], 在工程中有着越来越多的应用。由于轴向排列的玻璃纤维/环氧树脂复合材料具有较高的单向抗拉强度, 同时与金属相比又具有耐腐蚀的优点^[5], 并且该材料制成的锚杆价格低廉(仅为金属锚杆的一半左右), 因此玻璃纤维/环氧树脂复合材料非常适合于制作锚杆。很多人曾做过纤维束和层压板等方面的研究, 但对于杆体却研究的较少^[6]。本文正是从该点出发, 对纤维硬塑锚杆的力学性能及其损伤破坏机理进行了研究。

1 最佳配比的试验

1.1 试样制作

试验采用国产 E-Glass 玻璃纤维作为增强纤维, 基体材料为国产 618[#] 环氧树脂, 稀释剂为丙酮, 固化剂采用沈阳树脂化工厂生产的具有固化和增塑双重功能的 561 固化剂, 试样的配制(质量比)为试样 1: 环氧树脂: 稀释剂: 固化剂= 10: 2: 1; 试样 2: 环氧树脂: 稀释剂: 固化剂= 10: 3: 1.5; 环氧树脂: 稀释剂: 固化剂= 10: 5: 2。

拉伸试样在制作过程中首先要保证纤维轴向平行排列, 针对上述每一种配比制作小 3 根杆体, 长度 350 mm, 直径 21 mm(经过大量实验取该直径单轴抗拉力即可达到 70~ 80 kN)。具体制作步骤如下: 1) 将纤维束放入烘箱中在 120 ℃下干燥 2h, 用以除去纤维表面的污物和内部的水分; 2) 将装有环氧树脂的烧杯放在恒温水浴箱中加热到 80 ℃左右, 并保持 15 min 以排出树脂中的气泡, 然后加入稀释剂丙酮, 充分搅匀; 3) 将烧杯取出, 在空气中

冷却至 45 ℃, 同时将恒温水浴箱温度调至 45 ℃, 再将烧杯置入其中; 4) 在 45 ℃下, 按比例加入 561 室温固化剂, 将两者充分混合均匀; 5) 将上述混合树脂侵入处理过的纤维束, 外敷薄塑料膜(便于脱模), 置于内径为 21 mm 的模具中, 然后放在烘箱中加热到 60 ℃固化 2h, 再在室温下固化 24h 即可。

1.2 试验步骤

- 1) 将上述制作好的试样放在 10 kN 拉力材料试验机上进行加载, 并自动绘制拉力-变形曲线;
- 2) 根据上述初步试验结果进行正交试验设计, 确定最佳配比;
- 3) 按上述试验结果重复 1.2 制作过程, 重新制作试样;
- 4) 对试样重复试验, 并对结果进行分析。

1.3 试验结果

首先将按照 1.1 初步配比制作的试样进行单轴拉伸试验, 所用的玻璃纤维均为 60 g(烘箱处理后), 对应于 1, 2 和 3 组配比制成的试样分别为试样 1, 2 和 3。将 3 组试样分别进行加载, 获得的拉力-变形(F - ϵ) 曲线见图 1。结果表明, 试样 1 的最大抗拉力 73 kN, 试样 2 的最大抗拉力 74 kN, 试样 3 的最大抗拉力 63 kN。

1.4 正交试验设计

影响试验结果的因素主要有 3 个, 即: 环氧树脂的质量比(l)、稀释剂丙酮的质量比(m)、561 固化剂的重量比(n)。因素水平取 3 水平(正交试验计划见表 1), 共制作 9 个试样, 试验结果见表 2。

① [收稿日期] 2001- 02- 06; [修订日期] 2001- 03- 14

[作者简介] 张向东(1961-), 男, 教授, 博士生导师。

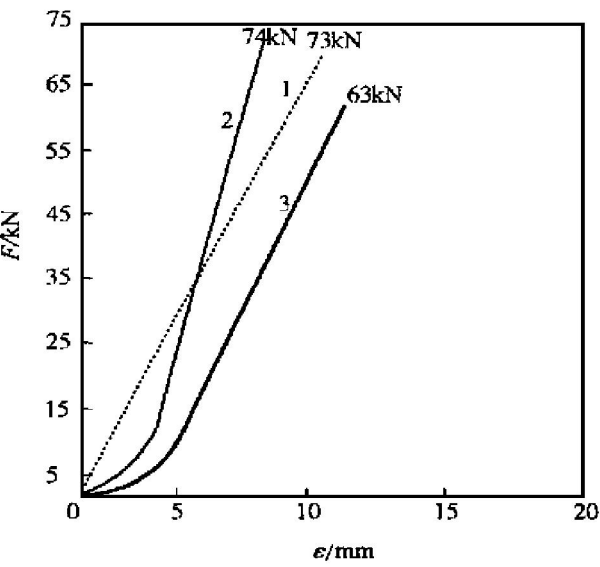


图 1 试样 F - ε 曲线

Fig. 1 F - ε curve of samples

1—Sample 1; 2—Sample 2; 3—Sample 3

表 1 正交试验计划表

Table 1 Arranged schedule of due intersect experiment design

Sample	1	2	3	4	5	6	7	8	9
l	100	100	100	100	100	100	100	100	100
m	20	30	50	20	30	50	20	30	50
n	10	15	20	15	20	10	20	10	15

表 2 正交试验结果

Table 2 Results of due intersect design

Sample	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Tensile resistance/kN	73.0	74.8	77.5	73.6	75.4	72.7	62.9	62.2	62.6

由试验结果可以看出, 稀释剂丙酮对抗拉力的影响最大, 随着含量增大抗拉力减小, 最佳含量 20 份; 固化剂的增加有助于提高抗拉力。综合上述分析, 锚杆杆体的最佳配比(质量比)为: 环氧树脂: 稀释剂: 固化剂= 100: 20: 20。

2 固化时间与杆体强度的关系

在研究该问题时, 以直径为 21 mm 的杆体为样本, 分别测得了在常温条件下, 自然养护 3 d、7 d、15 d、20 d 的拉力-变形曲线, 见图 2。

从上述结果可以看出, 15 d 时杆体的强度已经基本稳定, 以后强度变化不大, 20 d 时, 强度仅增加 2 kN, 因此, 杆体的固化养护时间在常温条件下, 应在 15~ 20 d 为宜。

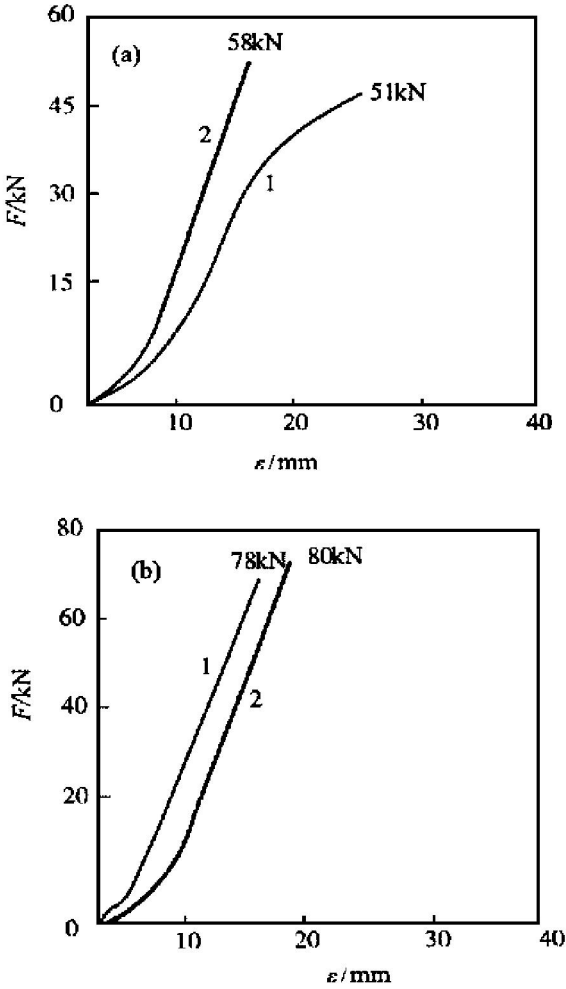


图 2 固化时间与杆体强度的关系

Fig. 2 Relation between solidification time and bolt capacity

3 杆体直径对强度的影响

3.1 直径与强度的关系

在试验过程中, 按照最佳配比, 分别制做了直径为 21 mm, 23 mm 和 24 mm 的锚杆进行抗拉试验, 试验结果见图 3 和表 3。

表 3 不同直径锚杆的性能参数

Table 3 Property parameters of different bolt diameters

Diameter	Tenacity	Failure loading/kN	Failure stress/MPa	Plastic modulus/MPa
21	0.112	80	231.5	2 067
23	0.107	98	232.3	2 171
24	0.110	106	234.5	2 132
Average	0.110	—	232.8	2 123

3.2 纤维硬塑锚杆与螺纹钢锚杆的结果对比

通过对直径为 18 mm 的螺纹钢锚杆进行检测

(检测结果见表 4), 现将直径为 24 mm 的纤维硬塑锚杆与其进行对比。

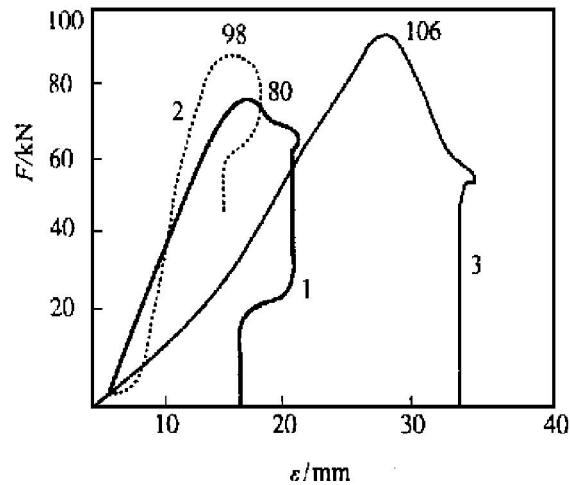


图 3 不同直径锚杆的拉力-变形曲线

Fig. 3 *F-ε* curves of different bolt diameters

- 1—Testing curve for *d* 21 mm;
- 2—Testing curve for *d* 23 mm;
- 3—Testing curve for *d* 24 mm

表 4 螺纹钢锚杆的检测结果

Table 4 Detecting result of screw steel bolts

Number	Yield loading, <i>P</i> _s /kN	Yield strength, <i>σ</i> _s /MPa	Ultimate strength, <i>σ</i> _b /MPa
1	98	465.9	580.0
2	96	465.4	556.2
3	100	475.4	580.0
Average	98	468.9	572.1

从对比结果来看, 直径为 24 mm 的纤维硬塑锚杆与直径为 18 mm 的螺纹钢锚杆的破断荷载基本相同, 但螺纹钢锚杆的韧性要好于纤维硬塑锚杆。通过对比还获得了纤维硬塑锚杆的直径与螺纹钢锚杆直径的对应关系, 参见表 5。

表 5 两种锚杆直径的对应关系

Table 5 Corresponding relation between two bolts

Bolt material	Corresponding diameter				
Fibre rigid plastic/mm	16	18	21	24	28
Screw steel/mm	12	14	16	18	20

4 破坏机理分析

在单轴拉伸条件下, 杆体的破坏主要表现为两种。1) 断口处玻璃丝全部被拉断的“剪断型”断口。2) 断口处玻璃丝大部分被拉断, 虽仍有部分未断纤维, 但强度已经较低, 并且杆体伴随劈裂现象。

通过分析杆体破坏前后的软 X 光照片, 可以得出, 以上两种破坏形式主要是由配比和加工工艺引起的。对于配比适当且树脂均匀的杆体所发生的破坏方式为“剪断型”; 对于配比不当(特别是丙酮含量过多时)或树脂发生积聚时, 多发生“劈裂型”破坏。但无论何种破坏, 都是由于杆体内部出现损伤裂纹, 然后裂纹进一步扩展, 最终导致杆体的破坏断裂。

对于其损伤演化规律, 确定为如下形式:

$$\omega = B \left| \frac{(0.031 \sigma_x)^3}{\sigma_0^2} \right| \tag{1}$$

式中 σ_x 为纤维方向的拉应力, MPa; σ_0 为未损伤时的拉应力, MPa; B 为常数。

实验测得杆体的 $B = 3.4974 \times 10^{-3}$; $\sigma_0 = 1.76$ MPa; 拉伸损伤破坏的临界值 $\omega_c = 0.05427$ 。当 $\omega = \omega_c$ 时, 得锚杆轴向拉伸破坏应力为 $\sigma_{xc} = 230.58$ MPa。则抗拉力为 $F = 79.8$ kN, 与实验值 77.5 比较, 误差为 3.64%, 精度较高, 说明上述演化规律是正确的。

5 结论

- 1) 正交试验的结果表明: 稀释剂丙酮对杆体抗拉强度的影响最大, 强度随其含量的增加而减小, 同时, 若加入过多还会发生杆体劈裂现象; 固化剂对强度的影响并不明显, 但可以调节杆体固化时间。
- 2) 锚杆的破坏应力为 230~ 235 MPa, 弹性模量为 2 000~ 2 150 MPa, 韧性为 0.1 左右。
- 3) 杆体的强度随固化时间的增长而成呈上升趋势, 在常温条件下, 一般 15~ 20 d 稳定。
- 4) 杆体出现劈裂现象, 主要是杆体内部存在界面造成的; 而断口型主要是损伤裂纹逐步扩展贯通造成。
- 5) 强度相同时, 纤维硬塑锚杆的直径等于 1.42 倍的螺纹钢锚杆直径, 但其价格仅为螺纹钢锚杆价格的 50%, 具有推广应用价值。

[REFERENCES]

[1] MAO Ren-jie(茅人杰). 玻纤/环氧复合材料力学性能和界面参数的实验研究[J]. Glass-Steel/ Complex Material (玻璃钢/ 复合材料), 1996, 68(3): 3- 7.
[2] DENG Chuan-bin(邓传斌). 纤维树脂界面剪切强度及

- 纤维强度分布参数的实验测定[J]. *Experimental Mechanics* (实验力学), 1997, 12(2): 204–208.
- [3] YANG Yin-ping(杨荫萍). 单向混杂纤维复合材料弹性常数的实验研究[J]. *Fiber Complex Material* (纤维复合材料), 1989, 19(2): 32–42.
- [4] WEN Huo-jiang(闻获江). 环氧树脂/胺固化体系及固化动力学分析[J]. *Aquarium/Complex Material* (玻璃钢/复合材料), 1986, 28(3): 1–6.
- [5] BAI Xiao-guang(柏晓光). 玻璃纤维成份对复合材料耐腐蚀性能的影响[J]. *Fiber Complex Material* (纤维复合材料), 1998, 80(3): 21–28.
- [6] XU Cheng-dong(许承东). 材料非线性对复合材料层板损伤的影响[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics* (北京航空航天大学学报), 1998, 59(5): 416–418.
- [7] ZHANG Shu-guang(张树光). 纤维硬塑锚杆及其支护参数的研究[D]. Fuxin: Liaoning Technical University (辽宁工程技术大学), 2001.
- [8] XIAO Ying-chun(肖迎春). 基于脆性损伤机制的高周疲劳模型[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics* (北京航空航天大学学报), 1998, 56(2): 204–206.
- [9] CHANG K Y, LIU S and CHANG F K. Damage tolerance of laminated composites containing an open hole and subjected to tensile loadings [J]. *J Composite Material*, 1991, 25(3): 274–301.
- [10] Chaboche J L. Continuum damage mechanics [J]. *J Applied Mechanics*, 1988, 55(3): 59–72.

Experimental study of fiber rigid-plastic bolt

ZHANG Xiang-dong, ZHANG Shu-guang, LI Yong-jing

(Department of Civil and Architecture, Liaoning Technical University,
Fuxin 123000, P. R. China)

[Abstract] Through the due intersect experiment of complex material bolt with the fiberglass and epoxy resin, the optimal ratio is found. The relation of solidification time and bolt capacity and the influence of bolt diameter on bolt capacity were studied. Based on the experiment, the bolt's damage and breakage mechanism were analyzed.

[Key words] fiberglass; epoxy resin; complex material; bolt

(编辑 朱忠国)