

Prediction of Tensile Strength for Short Fiber Reinforced Resin Composites

Feng-chun Wei^{1,2}, Yan-rong Wang¹, Lin-qi Zhang¹, Heng Zhang²

1. Materials Science and Engineering school, Henan University of technology, Zhengzhou 450052, China;

2. Materials Science and Engineering school, Zhengzhou University, Zhengzhou 450052, China

Abstract: Factors come from matrix and materials were considered in this paper. In combination with previous studies and our experimental results, a strength predicting formula of short fiber reinforced resin composites has been established. To check the validity of the formula, the stale glass fiber reinforcement 191 resin composites specimens were prepared and tested. The test results agreed well with the modified strength calculation.

Keywords: composite materials; short cut fiber; tensile strength

短纤维增强树脂复合材料强度预测

魏凤春^{1,2}, 王艳荣¹, 张琳琪¹, 张恒²

1. 河南工业大学材料科学与工程学院, 郑州, 中国, 450052

2. 郑州大学材料科学与工程学院, 郑州, 中国, 450052

Email: fchwei@sina.com

摘要: 综合前人的研究成果, 考虑来自基体和纤维材料方面的因素, 结合试验的方法得出了用于工程计算的短切纤维增强复合材料的拉伸强度预测公式。以短切玻璃纤维增强不饱和聚酯树脂为例, 制备了试样进行拉伸试验。结果表明: 使用修正后的公式所得到的强度计算结果与试验结果吻合较好。

关键词: 复合材料; 短切纤维; 拉伸强度

1 引言

复合材料具有高比强度、高比刚度和材料性能可设计性的特点。改善材料的力学性能可以说是材料复合的主要目的之一, 而强度是其重要的衡量指标, 同时也是复合材料结构设计的重要依据。随机走向的短纤维增强复合材料具有比连续纤维增强复合材料更好的模压性能, 成本较低且便于自动化生产等优点, 近年来得到广泛应用。目前短纤维增强复合材料的模量预测已经接近问题的实质水平^[1], 根据组成相材料的强度性能从理论上推导出复合材料的基本强度参数, 是目前细观强度分析的主要问题。文献[2]和[3]考虑短纤维的纤维长度和方向角的影响, 对单向连续纤维复合材料拉伸强度计算公式进行修正, 获得了短纤维增强树脂复合材料的拉伸强度计算公式。本文以短切玻璃纤维增强不饱和聚酯树脂为例, 制备了试样进行

拉伸试验。结合试验结果, 对该公式再次进行了修正, 获得了短纤维增强树脂复合材料的拉伸强度计算公式。

2. 短纤维增强复合材料的拉伸强度

单向连续纤维复合材料拉伸强度计算公式为

$$\sigma_{cu} = \sigma_{fu} V_f + (\sigma_m)_{\varepsilon_{f,\max}} (1 - V_f) \quad (1)$$

文献[2]和[3]考虑短纤维的纤维长度和方向角的影响, 对公式(1)进行修正, 得到了短纤维增强树脂复合材料的拉伸强度计算公式。

2.1 纤维的长度修正

设能够达到纤维的拉伸强度 σ_{fu} 的最小纤维长度为 l_c , 称为短纤维的临界长度。假定复合材料的界面切应力 τ_s 为常量, 考虑拉伸应力与切应力之间的平衡, 有

$$\pi d_f \cdot l_c \cdot \tau_s = 2 \cdot \pi (d_f)^2 \cdot \sigma_{fu} / 4 \quad (2)$$

则纤维的临界长度为:

基金项目: 国家自然科学基金项目(10472106)

作者简介: 魏凤春(1977-), 女, 博士, 讲师, 主要从事复合材料结构与力学性能分析方面的研究。

$$l_c = \sigma_{fu} \cdot d_f \cdot 2\tau_s \quad (3)$$

其中, d_f 为纤维截面直径, τ_s 可取基体或界面的剪切强度中较小者。

设纤维长度大于临界纤维长度 l_c , 根据文献[3], 可用平均纤维应力 $\bar{\sigma}_f$ 来修正纤维长度的影响。设界面剪切强度为常量, 则 $\bar{\sigma}_f = \sigma_{fu}(1-l_c/2l)$, 近似地用基体的拉伸强度 σ'_{mu} 代替式 (1) 中的 $(\sigma_m)_{\epsilon_{f,max}}$, 则对纤维长度修正后复合材料的拉伸强度为

$$\sigma_{cu} = \sigma_{fu} \left(1 - \frac{l_c}{2l}\right) V_f + \sigma'_{mu} (1 - V_f) \quad (4)$$

临界纤维体积比为

$$V_{fc} = (\sigma_{mu} - \sigma'_{mu}) / (\sigma_{fu}(1-l_c/2l) - \sigma'_{mu}) \quad (5)$$

2.2 纤维的方向角的修正

Zhu^[2]等根据大量纤维的几何排布规律分析了三维空间随机分布纤维和单向纤维增强复合材料的拉伸强度, 提出利用纤维的“长度效应”来修正单向纤维增强复合材料拉伸强度的计算公式。假设全部纤维拉伸强度相等、每根纤维长度相等, 且纤维在基体中随机分布, 界面为理想状态, 根据文献[2], 可将式 (4) 修正为:

$$\sigma_{cu} = \frac{\sigma_{fu}}{8} \left(\frac{1+\nu^2}{1+\nu}\right) \left(1 - \frac{l_c}{2l}\right) V_f + \sigma'_{mu} (1 - V_f)$$

式 (6) 即为短切纤维增强复合材料的拉伸强度的计算公式。

3. 短切纤维增强树脂复合材料拉伸强度计算

选用南京玻璃纤维研究设计院六所生产的纤维玻璃, 玻璃纤维直径 $12\mu\text{m}$, 长度裁为 7mm ; 相对密度 $\rho_f = 2.4 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$; 拉伸强度 3400MPa 。采用常州 253

厂生产的 191 不饱和聚酯树脂, 经测试, 树脂基体的拉伸强度为 33.6 MPa , 剪切强度为 26 MPa , 泊桑比为 0.34 。

Table 1 Calculation of tensile strength with different fiber volume percentage

表 1 不同纤维体积比的复合材料的拉伸强度计算值

V_f	10	12.5	15	20	35	50
$\sigma_{cu}(\text{MPa})$	63.78	71.32	78.87	93.96	139.22	184.49

根据以上参数, 代入式 (3) 可计算出临界纤维长度 $l_c = \sigma_{fu} / 2\tau_s \cdot d_f = 0.73 \text{ mm}$ 。

根据式 (5) 可计算出临界体积比, 由式 (6) 可计算出不同纤维体积比短切玻璃纤维增强不饱和聚酯树脂复合材料的拉伸强度, 如表 1 所示。

选用同样直径为 $12\mu\text{m}$ 的玻璃纤维, 分别切成 2mm 、 7mm 、 9mm 、 13 mm 、 20 mm 和 28 mm 不同的长度, 按 20% 的纤维体积比分别与 191 树脂混合制成不同纤维长度的短切玻纤增强树脂复合材料。把相关参数代入式 (6) 进行计算。表 2 给出不同纤维长度的短切玻纤增强树脂复合材料的拉伸强度计算值。

Table 2 Calculation of tensile strength with different fiber length

表 2 不同纤维长度的短切玻纤增强复合材料的拉伸强度计算值

l/mm	2	7	9	13	20	28
σ/MPa	84.73	93.96	94.78	95.66	96.35	96.72

按照表 1 和表 2 给出的纤维体积比和纤维长度值, 制备拉伸试验试件并进行拉伸强度试验, 每组试样制备 5 个, 每组试验结果只取 1 个, 列于表 3 和表 4。

表 3 不同纤维体积比试件的拉伸强度试验结果

Table 3 Test results of tensile strength with different fiber volume percentage

试件组	纤维体积比 (%)	试件编号	试件厚度 (mm)	试件宽度 (mm)	拉断时拉力 (kN)	拉伸强度 (MPa)	平均拉伸强度 (MPa)
1	10	1-1	4.2	20	4.37	52.04	52.50
2	12.5	2-1	4.0	21	4.79	56.98	57.44
3	15	3-1	4.1	21	5.18	63.18	63.16
4	20	4-1	4.2	20	6.32	75.26	74.94
5	35	5-1	4.2	20	9.26	110.65	111.52
6	50	6-1	4.1	20	11.95	145.76	145.58

表 4 不同纤维长度试件的拉伸强度试验结果

Table 4 Test results of tensile strength with different fiber length

试件组	纤维长度/mm	试件编号	试件厚度/mm	试件宽度/mm	拉断时拉力 kN	拉伸强度 /MPa	平均拉强度 /MPa
1	2	1-1	4.1	20	5.53	67.42	67.45
2	7	2-1	4.0	21	6.32	75.26	75.68
3	9	3-1	4.0	20	6.02	75.31	76.13
4	13	4-1	4.0	20	6.20	77.56	76.52
5	20	5-1	4.1	20	6.34	77.36	77.27
6	28	6-1	4.1	20	6.39	77.91	77.40

4. 短纤维增强树脂复合材料拉伸强度计算公式试验修正

对比表 1 和 3、表 2 和 4 中的数据，绘出计算结果和试验结果的对比图，如图 1 和 2 所示。

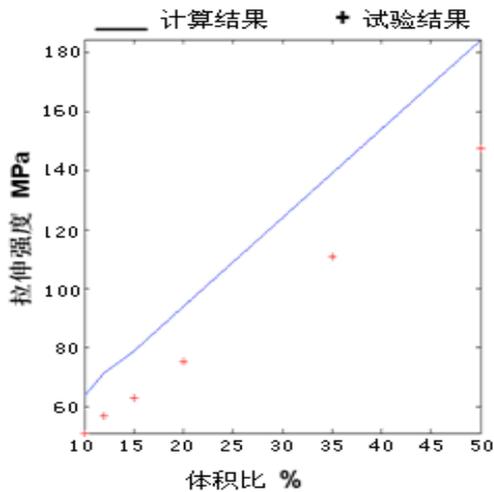


图 1 不同纤维体积比短纤维复合材料的拉伸强度

Fig 1 Tensile strength of composites with different fiber volume percentage

由图 1 和 2 可以看出，计算结果和试验结果相比变化规律吻合，但都偏高。分析产生偏差的原因，有两个方面：其一是基体材料方面的问题。文献[2]是针对金属基复合材料的，此处是树脂基复合材料；另外，在文献[2]的修正公式的计算方法中，为了便于工程应用，用树脂的拉伸强度 σ'_{mu} 代替了纤维断裂时基体内的应力 $(\sigma_m)_{\epsilon_{f,max}}$ 。随着所采用的树脂种类的不同，这种修正方法所引起的模型误差大小也不同。其二是纤维材料方面的问题。随着所采用的纤维以及偶联剂的不同，纤维的增强效果也会有所差异，因而也会引

起不同的误差。考虑上述两个来自材料本身方面的因素，本文把公式 (6) 修改为

$$\sigma_{cu} = a \cdot \frac{\sigma_{fu}}{8} \left(\frac{1+v^2}{1+v} \right) \left(1 - \frac{l_c}{2l} \right) V_f + b \cdot \sigma'_{mu} (1 - V_f) \quad (7)$$

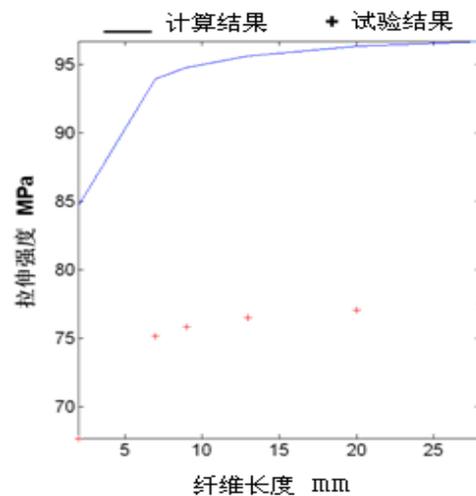


图 2 不同纤维长度短纤维复合材料的拉伸强度

Fig 2 Tensile strength of composites with different fiber length

式中系数 a 和 b 称为材料影响系数，它们的值针对所采用的不同材料，用试验方法确定。

用于短纤维增强树脂易碎复合材料的体积比可在 10% 和 50% 的范围内变化，其纤维长度可在 l_c （临界纤维长度）和 28mm 范围内变化。由此，可在 $10\% \leq V_f \leq 50\%$ ， $l_c \leq l \leq 8\text{mm}$ （此处 $l_c = 0.73\text{mm}$ ）范围内利用试验结果和计算结果的综合误差取最小来确定材料影响系数 a 和 b。

首先由式(6)计算出对应 V_f 分别为 10%，12.5%，15%，20%，35% 和 50% 以及 l 分别为 2mm，7mm，9mm，13mm，20mm 和 28mm 时的 σ_{cu} 值（表 5）。然后分别按上述纤维体积比和纤维长度制备试件，并按照标准进行拉伸试验，得到对应的试验结果（表 6）。

Table 5 Calculation of tensile strength of short fiber/191 resin composites(MPa)

表 5 短切玻纤/191 树脂复合材料拉伸强度计算值 (MPa)

V_f (%) l (mm)	10	12.5	15	20	35	50
2	59.17	65.56	71.95	84.73	123.06	161.43
7	63.78	71.32	78.87	93.96	139.22	184.49
9	64.19	71.84	79.48	94.78	140.66	186.54
13	65.63	72.39	80.14	95.66	142.20	188.75
20	64.98	72.82	80.67	96.35	143.42	190.49
28	65.16	73.05	80.94	96.72	144.07	191.41

Table 6 Test results of tensile strength of short fiber/191 resin composites(MPa)

表 6 短切玻纤/191 树脂复合材料拉伸强度试验结果 (MPa)

V_f (%) l (mm)	10	12.5	15	20	35	50
2	47.33	52.43	57.50	67.70	98.45	111.10
7	51.03	57.00	63.00	75.20	110.90	145.60
9	51.30	57.45	63.60	75.82	112.50	149.21
13	51.77	57.91	64.12	76.53	114.00	150.99
20	51.90	58.30	64.60	77.09	114.90	152.39
28	52.13	58.45	64.75	77.50	115.30	149.87

式 (8) 即为本文得到的短切玻纤增强 191 树脂易碎复合材料的强度公式。由它可以很方便的设计这种复合材料的拉伸强度性能。图 3 和图 4 是由 Matlab 画出的试验修正前后强度计算公式的计算结果与试验结果的差异情况。

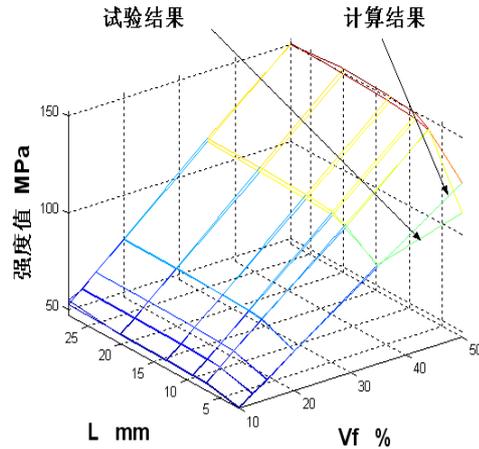


Fig 4 different of calculation and test results after the formula was modified

图 4 修正后强度计算结果与试验结果差异

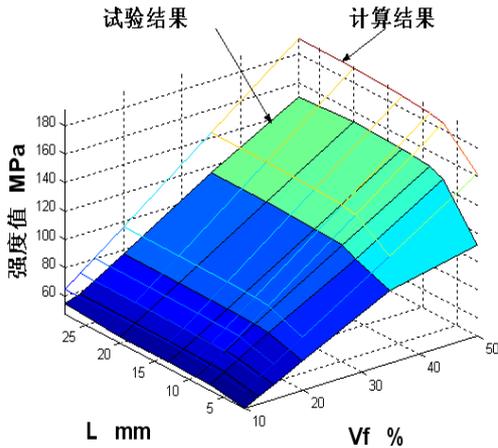


Fig 3 different of calculation and test results before the formula was modified

图 3 修正前强度计算结果与试验结果差异

根据表 5 和 6 中给出的计算值和试验值, 采用最小二乘法, 由 Matlab 软件进行曲面拟合, 求出式 (7) 中的特定系数 $a=0.7794, b=0.8388$, 则式 (6) 变成

$$\sigma_{cu} = 0.7794 \frac{\sigma_{fu}}{8} \left(\frac{1+v^2}{1+v} \right) \left(1 - \frac{l_c}{2l} \right) V_f + 0.8388 \sigma'_{mu} (1 - V_f) \quad (8)$$

由图可知, 按照修正后的公式所得到的强度计算结果与试验结果吻合较好。

5. 结论

(1) 综合前人的研究成果, 结合试验的方法得出了用于工程计算的短切纤维增强复合材料的拉伸强度预测公式。

(2) 以短切玻璃纤维增强不饱和聚酯树脂为例, 其试验结果和计算结果吻合较好。

(3) 是一个建立在试验结果上的计算公式, 针对不同的材料, 需要首先获得试验资料数据才能确定材料影响系数 a 和 b 。

References (参考文献)

- [1] J.S.Bergstrom.H.B.Lilbert J r.,A constitutive model for predicting the large eformation thermomechanical behavior of fluoropolymers, mechanics of materials 37,899(2005).
- [2] Y. T. ZHU, G. Zong, A. Manthiram, Z. Eliezer. Strength analysis of random short-fiber-reinforced metal matrix composite materials [J]. Journal of materials science. 1994(29):6281-6286.
- [3] Aifang Sun,Qiwu Dong. Prediction of Tensile Strength for short-fiber-reinforced Composites[J].Chinese Journal of Materials Research. 2008,22(3):333-336
刘敏珊, 董其伍.短切纤维增强复合材料拉伸强度的预测[J].材料研究学报.2008,22(3):333-336.