

# 纤维取向与打团效应对玄武岩纤维增强复合材料拉伸性能的影响

贺晶晶, 师俊平

西安理工大学土木建筑工程学院, 西安 710048

**摘要** 基于Tsai理论, 针对纤维体积掺加率为0.6%、0.9%、1.2%、1.5%, 纤维取向角为0°、15°、30°、45°的玄武岩纤维-环氧树脂复合材料(BFRP)进行了轴向拉伸强度实验研究, 并引入纤维均分系数和打团纤维含量表征玄武岩纤维在环氧树脂中的打团效应, 建立打团纤维的细观力学模型与几何模型, 对BFRP的拉伸强度进行了数值计算对比分析。结果表明, 纤维体积掺加率一定时, BFRP的拉伸强度随纤维取向角的增大而减小, 纤维取向角一定时, BFRP的拉伸强度随纤维体积掺加率的增大而增大; 纤维均分系数随纤维体积掺加率的增大而减小, 打团纤维含量随纤维体积掺加率的增大而增大; 纤维打团效应的存在, 导致了BFRP的纤维临界体积掺加率较纤维均分时有所增大, 降低了玄武岩纤维对环氧树脂基材拉伸强度的增强幅度; 考虑纤维打团效应的BFRP拉伸强度计算值与实验结果接近。

**关键词** 玄武岩纤维; 环氧树脂; 复合材料; 纤维取向; 纤维打团效应

将纤维以一定的工艺加入环氧树脂中形成纤维增强树脂复合材料(FRP)具有抗拉强度高、耐疲劳性能好等优点, 广泛应用于建筑结构加固领域<sup>[1-2]</sup>, FRP的品种主要有: 碳纤维增强复合材料(CFRP)、玻璃纤维增强复合材料(GFRP)、芳纶纤维增强复合材料(AFRP)等<sup>[3]</sup>。相比之下, 玄武岩纤维增强复合材料(BFRP)具有抗拉强度高、耐高温性强、抗化学腐蚀性能好等优点<sup>[4-6]</sup>, 被认为是最适宜应用于建筑结构加固的新型材料之一<sup>[7]</sup>。目前, 关于BFRP的研究主要集中在纤维表面改性对其复合体力学性能影响方面<sup>[8-9]</sup>。有关玄武岩纤维的取向及分布对BFRP的拉伸性能影响研究相对较少。然而, 有研究显示, 纤维的取向及其分布对其复合材料的力学特性具有至为关键的影响<sup>[10]</sup>。Fletche等<sup>[11]</sup>研究发现, 纤维随机分布时, 树脂基材内部的最大拉伸残余应力会有明显增大。Yang等<sup>[12]</sup>研究表明, 较大的纤维体积掺加率情况下, 纤维的随机分布会对树脂基材内热残余应力产生重大影响。Hobbiebrunken等<sup>[13]</sup>建议在复合材料的损伤和失效分析中应尽量采用随机纤维分布模型。Yang等<sup>[14]</sup>对试样断面的纤维走向进行了观察, 发现纤维呈束状分布。本文通过拉伸强度实验和建模计算, 研究纤维取向与打团效应对BFRP拉伸性能的

影响, 以期能为BFRP的设计和强度预测提供理论与实验依据。

## 1 纤维取向对BFRP拉伸特性影响

### 1.1 材料及参数

纤维采用浙江天龙玄武岩连续纤维高新科技有限公司生产的非连续玄武岩纤维, 拉伸强度为3300 MPa, 弹性模量为100 GPa, 直径约0.01 mm, 密度约2.65 g/cm<sup>3</sup>, 长度为12 mm。环氧树脂采用南通星辰合成材料有限公司生产的凤凰牌环氧树脂。固化剂采用天津市宁平化学制品有限公司生产的聚酰胺树脂。稀释剂采用青岛锦鹏化工有限公司生产的丙酮。

按环氧树脂、固化剂、稀释剂的质量比为38:25:1的比例配合制环氧树脂基材, 测得其拉伸强度为16.67 MPa, 极限应变变为0.002, 抗剪强度为21.73 MPa, 固化完成的残余应力为0.31 MPa。

### 1.2 实验设计及材料成型工艺

玄武岩纤维体积掺加率取0.6%、0.9%、1.2%、1.5%, 玄武岩纤维在环氧树脂基体中取向角度取0°、15°、30°、45°, 从而形成4种纤维取向、4种纤维掺加率下的16种BFRP。试样尺

收稿日期: 2017-02-20; 修回日期: 2017-07-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(11302167)

作者简介: 贺晶晶, 博士研究生, 研究方向为岩石与纤维混凝土材料断裂性能, 电子信箱: hejing\_86@126.com; 师俊平(通信作者), 教授, 研究方向为损伤与断裂力学及复合材料夹层结构动态特性, 电子信箱: shijp@xaut.edu.cn

引用格式: 贺晶晶, 师俊平. 纤维取向与打团效应对玄武岩纤维增强复合材料拉伸性能的影响[J]. 科技导报, 2017, 35(19): 67-73; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2017.19.009

寸为 18 mm×18 mm×300 mm, 每组 3 个试样。采用自主研发的溜槽拉伸装置制作定向玄武岩纤维-环氧树脂复合材料。具体步骤为: 将环氧树脂、固化剂、稀释剂按指定比例混合, 倒入搅拌机(JJ-5 型星式水泥胶砂搅拌机)中搅拌 2 min, 形成环氧树脂基材, 再加入指定掺量的玄武岩纤维搅拌 2 min, 立即倒入溜槽; 玄武岩纤维随基材在重力作用下通过溜槽流入试模, 重力的作用使基材产生一定的拉伸流场, 拉伸流场作用会迫使纤维取向趋于基材的拉伸方向<sup>[15-16]</sup>, 通过控制溜槽与水平面的夹角变化形成不同的重力流场, 在纤维掺加率  $V_f$  为 0.6%、0.9%、1.2%、1.5% 下经反复调试, 分别取溜槽与水平面的夹角为 15°、23°、30°、45° 时可得到纤维取向较为一致的 BFRP; 待基材固化完成后 (约 48 h, (20±2)°C), 沿纤维取向方向分别以 0°、15°、30°、45° 切割成设计尺寸试样。纤维体积掺加率为 1.5% 的 BFRP 成型效果如图 1 所示。

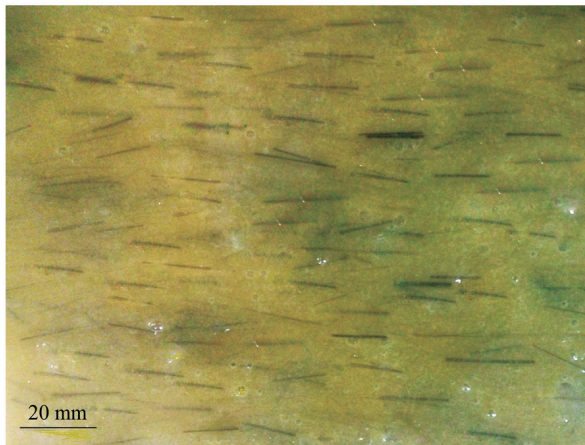


图 1 定向玄武岩纤维/环氧树脂复合材料的成型效果 ( $V_f=1.5\%$ )

Fig. 1 Molding effect of directional basalt fiber/epoxy resin composite material ( $V_f=1.5\%$ )

### 1.3 实验方法及结果分析

采用上海华龙测试仪器股份有限公司生产的 WAW-1000 万能试验机进行单轴拉伸实验。以 5 N/s 的速率加载至试样破坏, 记录其最大荷载并计算其拉伸强度。为保证实验数据的可靠性, 取每组试样峰值应力误差小于 5% 为有效实验数据, 否则重新进行该组实验。

不同纤维体积掺加率的玄武岩纤维-环氧树脂复合材料拉伸强度随纤维取向角的变化趋势如图 2 所示; 玄武岩纤维体积掺加率  $V_f=1.2\%$ 、 $V_f=1.5\%$  时, BFRP 拉伸强度较基材拉伸强度有显著的提高, 提高幅度最高可达 80%;  $V_f=0.9\%$  时, BFRP 拉伸强度较基材拉伸强度有一定的提高, 提高幅度为 10%~20%;  $V_f=0.6\%$  时, BFRP 拉伸强度较基材拉伸强度无明显提高。当纤维取向角一定时, BFRP 拉伸强度随  $V_f$  的增加而增大。当  $V_f$  一定时, BFRP 拉伸强度随纤维取向角的增加而减小。

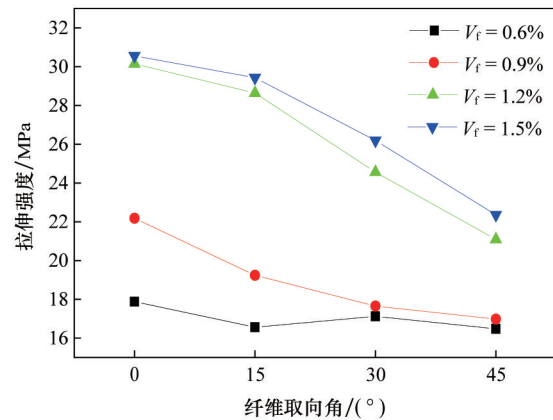


图 2 不同体积掺加率的玄武岩纤维-环氧树脂复合材料拉伸强度随纤维取向的变化

Fig. 2 Change of BFRP tensile strength of different volume mixing ratio with the fiber orientation

## 2 纤维打团效应对 BFRP 拉伸性能的影响

### 2.1 基于 Tsai 理论的 BFRP 拉伸性能分析

基于 Tsai 理论<sup>[17-18]</sup>, 将纤维-环氧树脂复合材料看成是一个纤维强化的多项复合体系, 它的强度和弹性模量等性能是各组分性能的弹性叠加, 则有

$$\sigma_{ic} = \sigma_f V_f + \sigma_m V_m = \sigma_m [1 + (m-1)V_f] \quad (1)$$

式中,  $\sigma_{ic}$  为基体在弹性阶段的应力;  $\sigma_m$ 、 $\sigma_f$  分别为基体和纤维所受的应力;  $V_m$ 、 $V_f$  分别为基体和纤维的体积含量 ( $V_f$  也称作纤维体积掺加率);  $m = E_m/E_f$ ,  $V_m + V_f = 1$ ;  $E_m$ 、 $E_f$  分别为基体和纤维的弹性模量。

假定环氧树脂基体在外力作用下达到拉伸强度开裂后, 荷载全部转移给纤维直至纤维被拉断, 文献<sup>[19-21]</sup>考虑纤维在基体中的取向、纤维的长度及纤维与基体的黏结程度等因素对复合体拉伸性能的影响, 引入纤维有效系数  $\eta_f$ , 给出了复合材料的拉伸强度  $\sigma_{ic}^u$  与纤维临界体积掺加率  $V_{ff}^{crit}$  的计算公式, 即

$$\sigma_{ic}^u = \eta_f \sigma_f^u V_f = \eta_0 \eta_l \eta_i \sigma_f^u V_f \quad (2)$$

$$V_{ff}^{crit} = \frac{\sigma_m^u}{\eta_f (\sigma_f^u - E_f \varepsilon_m^u) + \sigma_m^u} \quad (3)$$

式中,  $\sigma_f^u$  为纤维的拉伸强度;  $\varepsilon_m^u$  为基体的极限应变;  $\eta_l$ 、 $\eta_0$  分别为纤维长度系数、纤维与基体材料的黏结系数;  $\eta_i$  为纤维在基体中的取向系数;  $\varepsilon_m^u$  为环氧树脂基体的极限应变;  $\sigma_m^u$  为基体拉伸强度。

玄武岩纤维在环氧树脂基材中的取向角度为 0°、15°、30°、45° 时, 按式 (3) 计算玄武岩纤维增强环氧树脂基复合材料拉伸性能的纤维临界体积掺加率, 按式 (2) 计算不同纤维取向角下复合体的拉伸强度。表 1 给出了不同纤维取向角下纤维临界体积掺加率和 BFRP 拉伸强度的计算值。

由表 1 可知, BFRP 的临界体积掺加率随纤维取向角的增大而增大; 相同纤维体积掺加率下, BFRP 拉伸强度计算值随

表 1 不同纤维取向角下纤维临界体积掺加率和BFRP拉伸强度的计算值  
Tab. 1 Calculated values of BFRP tensile strength of different fiber volume fraction

纤维取向角/(°)	纤维有效系数	纤维临界体积掺加率/%	BFRP拉伸强度/MPa			
			$V_f=0.6\%$	$V_f=0.9\%$	$V_f=1.2\%$	$V_f=1.5\%$
0	0.9683	0.552	19.17	28.76	38.34	47.93
15	0.9353	0.572	18.52	27.78	37.04	46.29
30	0.8386	0.637	16.60	24.91	33.21	41.51
45	0.6847	0.779	13.55	20.34	27.11	33.89

纤维取向角的增大而减小;纤维体积掺加率小于纤维临界体积掺加率时,纤维对基体的拉伸强度无增强作用,如0.6%–30°组和0.6%–45°组;纤维体积掺加率大于临界体积掺加率时,纤维对基体的拉伸强度有显著的增强作用。然而,相同纤维取向角度、相同纤维体积掺加率下BFRP拉伸强度计算均值高于实验值。文献[22]研究结果同样表明了此现象的存在。这是由于复合材料力学理论是在纤维与基体良好黏结及纤维在基体中均匀分布的前提下提出的。实际中,由于拌合工艺的不同,纤维很难在环氧树脂中达到均匀分布,或多或少会出现纤维打团现象。为研究方便,将纤维打团现象称之为“纤维打团效应”。图3所示为1.2%–15°组BFRP试样的破坏形态。由图3(a)~(c)可知,纤维在环氧树脂中出现了不同程度的打团现象,纤维的破坏形态为被拔出。由图3(d)~(e)可知,由于纤维打团效应的存在,纤维团内部纤维之间的空隙很小,导致环氧树脂很难进入纤维团内部,从而形成了纤维团内部纤维之间的空鼓,纤维团内的纤维与基体失去黏结,减弱了纤维对基体拉伸强度的增强作用。由图3(f)可知,未参与打团的纤维,其破坏形态为纤维被拉断。其他掺量下的试样破坏形态均存在以上现象。

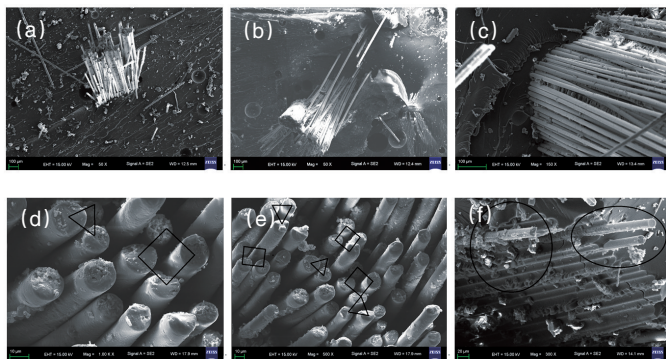


图3 玄武岩纤维在环氧树脂基体中的打团现象及其拉伸破坏形态

Fig. 3 Basalt fiber of cluster phenomenon in polymer and the plastic-cone tension failure of BFRP

综上所述,纤维打团效应的存在,引起了其内部不同程度的空鼓,导致纤维不能与基体材料完全黏结,使复合体在受拉作用破坏时的形态表现为大部分纤维被拔出而少部分纤维被拉断。被拉断的纤维是在达到其屈服极限时随复合

体发生破坏,多为纤维团外围的纤维。被拔出的纤维是在尚未达到其屈服极限时复合体已经破坏,且多为纤维团内部的纤维。由此可知,纤维打团效应的存在,使复合体在拉伸破坏时部分纤维未达到屈服极限,一定程度上削弱了玄武岩纤维对环氧树脂的增强作用。

### 2.2 打团纤维的受力特性及纤维均分系数

取一团定向纤维及其邻域的基体为一个特征单元,如图4所示。

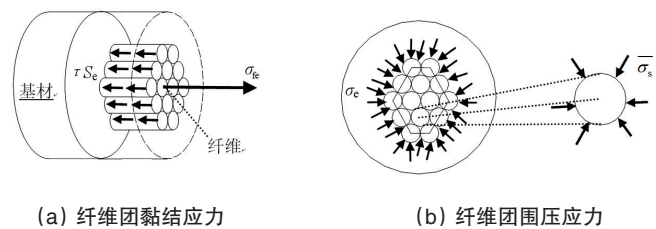


图4 打团纤维-环氧树脂复合材料的细观力学模型

Fig. 4 Cluster fiber reinforced resin matrix composites of micro-mechanics model

图4(a)为打团纤维与环氧树脂基体黏结产生的应力,图4(b)为基体固化收缩作用对纤维团产生的围压应力。由图4可知,打团纤维在基体中所受的拉伸应力为

$$\sigma_{ic} = \tau S_c + \int_0^N \mu \bar{\sigma}_s dN = \tau \left[ Cl_f + N\pi \left( \frac{d_f}{2} \right)^2 \right] + \mu \sigma_c Cl_f \quad (4)$$

式中, $\tau$ 为纤维与基体的黏结强度; $S_c$ 为N根纤维打团时最外围纤维与环氧树脂黏结表面积; $\mu$ 为纤维之间的摩擦系数; $C$ 为纤维团截面周长; $d_f$ 、 $l_f$ 分别为纤维的直径和长度; $\bar{\sigma}_s$ 为纤维团内部单根纤维的平均围压应力; $\sigma_c$ 为纤维团围压应力(数值上等于环氧树脂基体固化收缩产生的残余应力)。

因此,打团纤维在基体中所受应力可分为纤维与基体的黏结应力和纤维之间的摩擦力,而均分纤维在基体中所受应力为纤维与基体的黏结应力。基于此,不计纤维尖端的面积,引入纤维均分系数 $\eta_c$ 表征纤维的打团效应对基体材料拉伸性能的影响,即

$$\eta_c = \frac{\sigma_{ic}}{\sigma_i} = \frac{\tau S_c + \int_0^N \mu \bar{\sigma}_s dN}{\tau S_i} = \frac{\tau Cl_f + \mu \sigma_c Cl_f}{2\pi d_f \tau N l_f} \quad (5)$$

式中, $\sigma_i$ 为均分纤维在基体中所受应力; $S_i$ 为N根纤维均匀分

布时纤维与环氧树脂黏结表面积。

由式(5)可知,纤维均分系数随打团纤维根数的增加而减小,随打团纤维外围纤维中心点形成多边形的周长增加而增大。

假设基体中有  $N$  根纤维打团,纤维团内部纤维的排列包含三角形排列和正方形排列,如图5所示,由纤维团外围纤维中心形成任意  $k$  边形(图中实线围成的多边形),称其为  $k$  边形纤维打团模型。

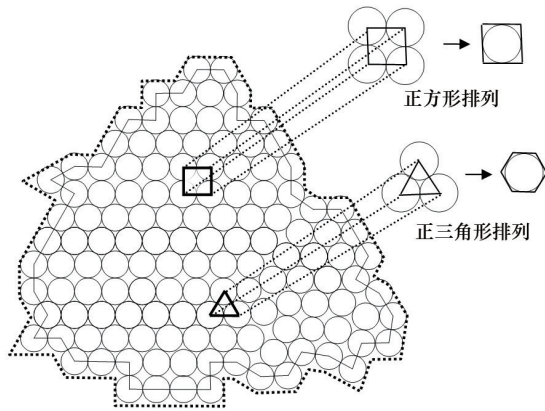


图5  $k$  边形纤维打团模型

Fig. 5 Fiber cluster model of  $k$  polygon

对  $k$  边形纤维打团模型的几何特性分析可知

$$M = \frac{c}{d_f} \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^k \alpha_i = (k-2)\pi \quad (7)$$

$$C = \pi d_f (M-k) + 2\pi d_f \sum_{i=1}^k \frac{2\pi - \alpha_i}{2\pi} \quad (8)$$

式中,  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k$  为实线  $k$  边形的内角;  $M$  为打团纤维外围纤维的根数;  $c$  为实线  $k$  边形的周长。

将式(8)化简为

$$C = \pi d_f (M-k) + d_f \left( 2k\pi - \sum_{i=1}^k \alpha_i \right) \quad (9)$$

将式(6)、式(7)代入式(9)得

$$C = c\pi + 2\pi d_f \quad (10)$$

将实线  $k$  边形各边向外偏移  $d_f/2$  形成一个虚线  $k$  边形(图5中虚线围成的多边形)。设  $S$  为虚线  $k$  边形的面积,将虚线  $k$  边形的面积近似为纤维团的截面积,则有

$$S \approx n_1 d_f^2 \quad (\text{纤维全部正方形排列}) \quad (11)$$

$$S \approx n_2 \times \frac{3\sqrt{3}d_f^2}{4} \quad (\text{纤维全部三角形排列}) \quad (12)$$

式中,  $n_1, n_2$  分别为纤维团内部纤维全部呈正方形排列和三角形排列时的根数。

考虑纤维团内部纤维既有正方形排列,又有三角形排列,因此,可以确定打团纤维根数  $N$  的范围为  $n_1 \sim n_2$ 。取  $N = 0.5(n_1 + n_2)$ ,则任意  $k$  边形纤维打团模型的纤维均分系数为

$$\eta_c = 1.13 \frac{d_f^2}{S} \left( \frac{c}{2d_f} + \frac{\mu \sigma_c c}{2\tau d_f} + \frac{\mu \sigma_c}{\tau} + 1 \right) \quad (13)$$

实际中,纤维复合材料中既含有打团纤维,有含有均分纤维。因此,定义打团纤维体积掺加率( $V_c$ )占纤维体积掺加率( $V_f$ )的百分比为打团纤维含量  $w$ ,即

$$w = \frac{V_c}{V_f} \times 100\% \quad (14)$$

由式(2)得到纤维-环氧树脂复合材料的拉伸极限强度与  $w, \eta_c$  的关系为

$$\sigma_{fc}^u = \eta_f \sigma_f^u V_f (1-w) + \eta_c \eta_f \sigma_f^u V_f w \quad (15)$$

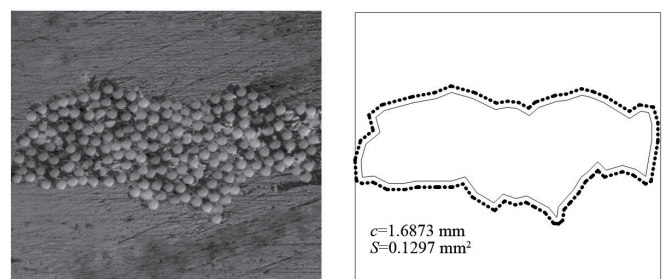
由式(3)、式(5)得到考虑纤维打团效应的纤维临界体积掺加率( $V_{fc}^{crit}$ )为

$$V_{fc}^{crit} = \frac{\sigma_m^u}{\eta_f (1-w + \eta_c w) (\sigma_f^u - E_f \varepsilon_m^u) + \sigma_m^u} \quad (16)$$

由此可知,纤维打团效应的存在,使纤维-环氧树脂复合材料初裂时的纤维临界体积掺加率较纤维均分时有不同程度的增加( $V_{fc}^{crit} < V_{fc}^{crit}$ ),减少了纤维的利用率。

### 2.3 纤维打团效应对BFRP拉伸性能影响

取掺加率为0.6%、0.9%、1.2%、1.5%的定向玄武岩纤维-环氧树脂复合材料试样的代表性截面,经切割打磨处理后,放大500倍观察,得到不同纤维掺加率下打团纤维的团数及打团纤维内部的排列情况。掺加率为1.2%时试样代表性截面内的1个纤维团如图6(a)所示,对其进行图形分割,其中虚线多边形为纤维团与基体的分割线,将虚线多边形向内偏移  $d_f/2$  得到纤维团外围纤维中心点形成的实线多边形,如图6(b)所示,通过计算可以求得虚线多边形的面积  $S$  和实线多边形的周长  $c$ 。按照此方法,可以得到体积掺加率为0.6%、0.9%、1.2%、1.5%的定向玄武岩纤维-环氧树脂复合材料试样代表性截面内的第  $j$  个纤维团的  $c_j, S_j$  值。



(a) 打团纤维

(b) 分割结果

图6 打团纤维的图形分割与  $c, S$  计算

Fig. 6 Cluster fibre of graph division and the calculation of  $c$  and  $S$

取代表性截面垂直方向的一个纤维长度(12 mm)所含的BFRP体积作为体积单元,纤维有效系数( $\eta$ )按照文献[19-21]中的方法计算,  $\mu$  取0.33<sup>[23]</sup>。采用式(13)对代表性体积单元内的每一团纤维的均分系数进行计算,取体积单元内所含纤维团的均分系数的平均值作为代表性体积单元的纤维均分系

数。采用式(14)对代表性体积单元的打团纤维含量进行计算,结果如图7所示。由此表明,随纤维体积掺加率的增大纤维均分系数呈下降趋势,纤维打团含量随纤维体积掺加率的增大而增大。

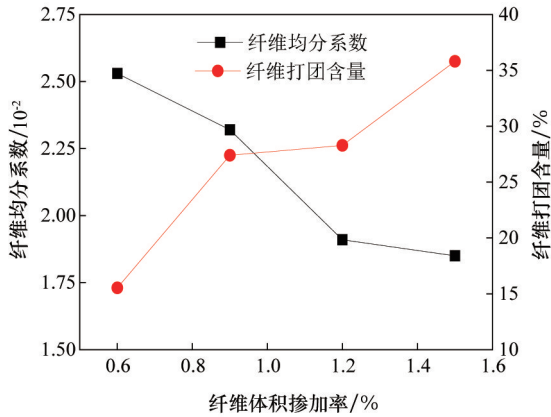


图7 纤维均分系数( $\eta_s$ )与打团纤维含量( $w$ )随纤维体积掺加率的变化趋势

Fig. 7 Change trend of fiber sharing coefficient ( $\eta_s$ ) and content of fiber clustering ( $w$ ) with the fiber volume mixing rate

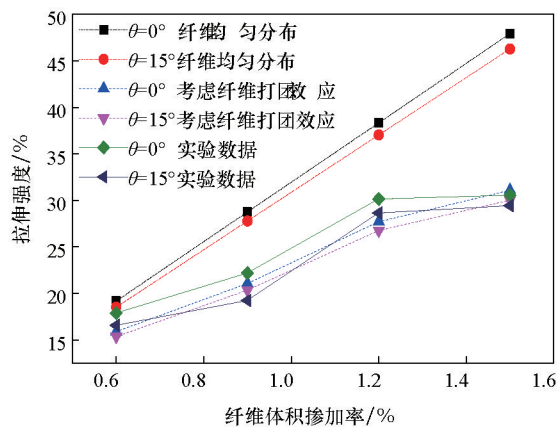
将计算所得的不同掺加率下的纤维均分系数、打团纤维含量代入式(15),可以得到考虑纤维打团效应的不同纤维取向角下的BFRP拉伸强度计算值。不同纤维取向角时,在不同纤维体积掺加率下,考虑纤维打团效应的BFRP拉伸强度计算值,不考虑纤维打团效应(纤维均匀分布)的BFRP拉伸

强度计算值,以及BFRP拉伸强度实验值,如图8所示。

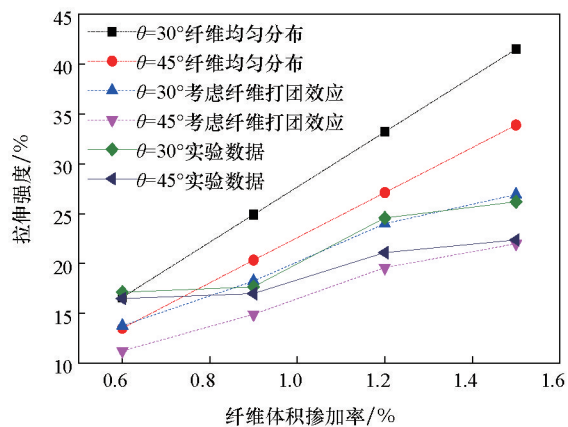
由图8知,纤维取向角一定时,纤维打团的BFRP拉伸强度计算值、纤维均匀分布的BFRP拉伸强度计算值均随纤维体积掺加率的增加而增大;纤维体积掺加率一定时,纤维打团的BFRP拉伸强度计算值、纤维均匀分布的BFRP拉伸强度计算值均随纤维取向角的增加而减小。不同的是,纤维取向角 $\theta=0^\circ$ 、 $\theta=15^\circ$ 且 $V_f$ 在0.6%~1.5%范围变化时, $\theta=30^\circ$ 、 $\theta=45^\circ$ 且 $V_f$ 在0.9%~1.5%范围变化时,与纤维均分时相比,考虑纤维打团效应的BFRP拉伸强度计算值更接近实验值;而 $\theta=30^\circ$ 、 $\theta=45^\circ$ 且 $V_f=0.6\%$ 时,考虑纤维打团效应的BFRP拉伸强度计算值与实验值相差较大。

将计算所得的不同掺加率下的纤维均分系数、打团纤维含量代入式(16),可以得到考虑纤维打团效应的临界纤维体积掺加率。利用插值法绘制的纤维临界体积掺加率随打团纤维含量和纤维取向角的变化曲面如图9所示。可以看出,纤维临界体积掺加率随打团纤维含量与纤维取向角的增大而增大,且较纤维均分时均有所增大;纤维取向角为 $0^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 条件下,纤维临界体积掺加率最小值均大于0.6%,因此,当 $V_f=0.6\%$ 时,玄武岩纤维对BFRP拉伸强度无明显提高作用,BFRP拉伸强度的实验值在理论上等于基材的拉伸强度实验值。换言之,当玄武岩纤维体积掺加率大于纤维临界体积掺加率时,考虑纤维打团效应的BFRP拉伸强度计算值更接近实验值。

对考虑纤维打团效应的BFRP拉伸强度计算值与实验值进行线性回归分析,结果如图10所示。可以看出,考虑纤维打团效应的BFRP拉伸强度理论计算值与实验值有较强的线性相关性,相关系数高达0.941。这一结论可为BFRP的设计及强度预测提供理论与实验依据。



(a)  $\theta=0^\circ, \theta=15^\circ$



(b)  $\theta=30^\circ, \theta=45^\circ$

图8 玄武岩-环氧树脂复合材料拉伸强度计算值与实验值

Fig. 8 Calculated and experimental values of tensile strength of BFRP

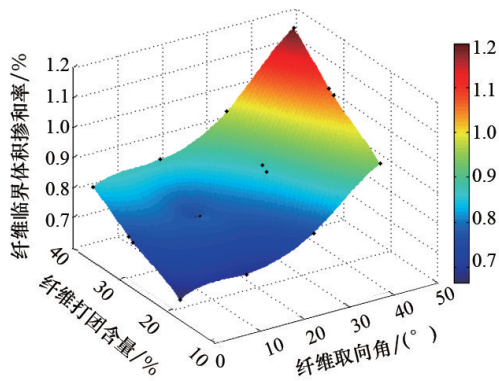


图9 纤维临界体积掺加率随打团纤维含量及纤维取向角的变化曲面

Fig. 9 Change surface of critical fiber volume mixing rate with the content of clustering fiber and the orientation angle

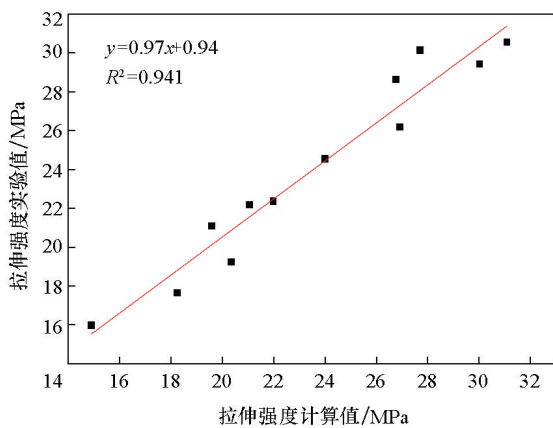


图10 考虑纤维打团效应的BFRP拉伸强度计算值与实验值的相关关系

Fig. 10 Correlation between the calculated values with considering the fiber clustering effect of tensile strength of BFRP and the experimental values of tensile strength of BFRP

### 3 结论

针对玄武岩纤维-环氧树脂复合材料(BFRP),通过实验和建模计算,研究了纤维取向、纤维体积掺加率和纤维打团效应对其性能的影响,结论如下。

1) 当纤维临界体积掺加率  $V_c=0.6\%$  时,玄武岩纤维对环氧树脂基材的拉伸强度无明显提高,当  $V_c=1.2\%$ 、 $1.5\%$  时,与环氧树脂基材相比,BFRP的拉伸强度提高的幅度最高可达80%,而  $V_c=0.9\%$  时,BFRP的拉伸强度提高的幅度为10%~20%。纤维体积掺加率一定时,BFRP的拉伸强度随纤维取向角的增大而减小,纤维取向角一定时,BFRP的拉伸强度随纤维体积掺加率的增大而增大。

2) 纤维均分系数随纤维体积掺加率的增大而减小,打团纤维含量随纤维体积掺加率的增大而增大;BFRP的纤维临界体积掺加率随纤维取向角的增大而增大。

3) 纤维打团效应的存在,导致了BFRP的纤维临界体积掺加率较纤维均分时有所增大,使玄武岩纤维对环氧树脂基材拉伸强度的增强幅度有所减小,降低了纤维的利用率。考虑纤维打团效应的BFRP拉伸强度理论计算值与实验值较为接近,且二者有较强的线性相关性,其相关系数高达0.941。

### 参考文献(References)

- [1] Elgabbas F, El-ghandour A A, Abdelrahman A A, et al. Different CFRP strengthening techniques for pre-stressed hollow core concrete slabs: Experimental study and analytical investigation[J]. Composite Structures, 2010, 92(2): 401-411.
- [2] Pilakoutas K, Neocleous K, Guadagnini M. Design philosophy issues of fiber reinforced polymer reinforced concrete structures[J]. Journal of Composites for Construction, 2002, 6(6): 154-161.
- [3] 朱德举, 欧云福. 应变速率和温度对单束BFRP力学性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2016, 19(3): 491-495.
- [4] Lopresto V, Leone C, Iorio I D. Mechanical characterisation of basalt fibre reinforced plastic[J]. Composites Part B, 2011, 42(4): 717-723.
- [5] Lee J H, Rhee K Y, Park S J. The tensile and thermal properties of modified CNT-reinforced basalt/epoxy composites[J]. Materials Science & Engineering A, 2010, 527(26): 6838-6843.
- [6] Todic A, Nedeljkovic B, Cikara D, et al. Particulate basalt-polymer composites characteristics investigation[J]. Materials & Design, 2011, 32(3): 1677-1683.
- [7] Colombo C, Vergani L, Burman M. Static and fatigue characterisation of new basalt fiber reinforced composites[J]. Composite Structures, 2012, 94(3): 1165-1174.
- [8] Huonnic N, Abdelghani M, Mertiny P, et al. Deposition and characterization of flame-sprayed aluminum on cured glass and basalt fiber-reinforced epoxy tubes[J]. Surface & Coatings Technology, 2010, 205(3): 867-873.
- [9] 叶国锐, 晏义伍, 曹海琳. 氧化石墨烯改性玄武岩纤维及其增强环氧树脂复合材料性能[J]. 复合材料学报, 2014, 31(06): 1402-1408.
- [10] 秦计生, 彭雄奇, 申杰, 等. 考虑纤维方向分布的玻纤增强PP复合材料拉伸性能[J]. 复合材料学报, 2013, 30(4): 53-58.
- [11] Fletcher A J, Oakeshott J L. Thermal residual microstress generation during the processing of unidirectional carbon fibre/epoxy resin composites: random fibre arrays[J]. Composites, 1994, 25(8): 806-813.
- [12] 杨雷, 刘新, 高东岳, 等. 考虑纤维随机分布的复合材料热残余应力分析及其对横向力学性能的影响[J]. 复合材料学报, 2016, 33(3): 525-534.
- [13] Hobbiebrunken T, Hojo M, Jin K K, et al. Influence of non-uniform fi-

- ber arrangement on microscopic stress and failure initiation in thermally and transversely loaded CF/epoxy laminated composites[J]. Composites Science & Technology, 2008, 68(15-16): 3107-3113.
- [14] Yang C, Huang H X, Li K. Investigation of fiber orientation states in injection-compression molded short-fiber-reinforced thermoplastics [J]. Polymer Composites, 2010, 31(11): 1899-1908.
- [15] Ye Z, Lee D, Campbell S A, et al. Thermally enhanced single-walled carbon nanotube microfluidic alignment[J]. Microelectronic Engineering, 2011, 88(9): 2919-2923.
- [16] Liu Y, Yang J P, Xiao H M, et al. Role of matrix modification on interlaminar shear strength of glass fibre/epoxy composites[J]. Composites Part B Engineering, 2012, 43(1): 95-98.
- [17] Tsai S W, Wu E M. A general theory of strength for anisotropic materials[J]. Journal of Composite Materials, 1971, 5(1): 58-80.
- [18] Liu K S, Tsai S W. A Progressive quadratic failure criterion for a laminate 1[J]. Composites Science & Technology, 1998, 58(7): 1023-1032.
- [19] 杜国平. 纤维混凝土单层衬砌隧道稳定性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2013.
- Du Guoping. Research on stability of fiber reinforced concrete among single layer tunneling lining[D]. Chongqing: Chongqing University, 2013.
- [20] 陈伟力. 聚丙烯、玻璃纤维混凝土物理力学性能试验研究[D]. 福州: 福州大学, 2004.
- Chen Weili. The performance experimental study of concrete with polypropylene fiber and glass fiber[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2004.
- [21] 王世君. 纤维混凝土在拉压下应力传递机理的分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2006.
- Wang Shijun. The analysis of stress transfer mechanism in fiber concrete under pull and pressure[D]. Harbin: Harbin Engineering University. 2006.
- [22] Fukuda H, Kawata K. On the strength distribution of unidirectional fibre composites[J]. Fibre Science & Technology, 1977, 10(1): 53-63.
- [23] 邹龙, 李新娥, 孙卫国, 等. 玄武岩丝性能测试[J]. 西安工程大学学报, 2013, 27(3): 314-318.
- Zou Long, Li Xine, Sun Weiguo, et al. Performance evaluation of basalt filament[J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2013, 27(3): 314-318.

## Effect of fiber clustering effect and orientation on the tensile properties of BFRP

HE Jingjing, SHI Junping

Civil Engineering & Architecture College, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China

**Abstract** According to Tsai theory, axial tensile experiments are carried out for basalt fiber-epoxy resin composite material (BFRP), with fiber volume fractions of 0.6%, 0.9%, 1.2% and 1.5%, and fiber orientation angle of 0°, 15°, 30° and 45°. The fiber sharing coefficient and the clustering fiber content are adopted to characterize the clustering effect of the basalt fiber in the epoxy resin, and to establish the micromechanics model and the geometry model of the clustering fiber. Meanwhile, the tensile strength of the BFRP is numerically calculated and compared. The results show that, when the fiber volume fraction is fixed, the BFRP tensile strength is decreased with the increase of the fiber orientation angle, and when the fiber orientation angle is fixed, the BFRP tensile strength is increased with the increase of the fiber volume fraction. The fiber sharing coefficient is decreased with the increase of the fiber volume fraction, and the clustering fiber content is increased with the increase of the fiber volume fraction. The fiber clustering effect increases the BFRP critical fiber volume fraction as compared with the sharing one, and decreases the enhancement amplitude of the tensile strength of the basalt fiber in the epoxy resin substrate. The calculated values of the BFRP tensile strength with consideration of the fiber clustering effect are close to the experimental results.

**Keywords** basalt fiber; epoxy resin; composite; fiber orientation; fiber clustering effect

(责任编辑 韩星明)