

高强玻璃纤维直径及其分布对纤维力学性能的影响

祖 群, 宋 伟, 黄松林, 郭仁贤

(南京玻璃纤维研究设计院有限公司, 南京 210012)

摘 要: 分析了高强(HS2)玻璃纤维原丝和无捻粗纱的直径分布, 评价纤维直径均值与分布参数等对 HS2 玻璃纤维力学性能影响。研究表明: 直径在 11 μm 以上时, 纤维束及浸胶纱拉伸强度随直径增大而降低。单纤维直径为 11~13 μm 的复合材料单向板拉伸强度受直径影响不大, 剪切强度随直径增大而降低。宽分布高离散(C_v)直径分布形态对纤维力学性能产生不利影响, 当纤维直径均值相近时, 直径 C_v 为 0.20 的粗纱比 0.15 粗纱拉伸断裂强度低 8%。直径分布状态能够揭示出其成形工装与工艺水平, 高均匀纤维需更细化的严格控制工艺状态。

关键词: 高强玻璃纤维, 纤维直径、力学性能、正态分布

中图分类号: TQ171.77⁺1.12 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2022)04-0957-09

网络出版时间: 2022-03-22



Influence of Diameter Distribution of High-Strength Glass Fiber on Fiber Mechanical Properties

ZU Qun, SONG Wei, HUANG Songlin, GUO Renxian

(Nanjing Fiberglass Research and Design Institute Co., Ltd., Nanjing 210012, China)

Abstract: The diameter distribution of high-strength glass fiber (HS2) strands and rovings was analyzed, and the influences of the average fiber diameter and the diameter distribution on the mechanical properties of HS2 glass fibers were evaluated. The results show that the tensile strength of fiber bundles and impregnated rovings decreases with the increase of the diameter when the diameter is $>11\mu\text{m}$. The tensile strength of unidirection orientated fiber reinforced plastic plates with the fiber diameters of 11~13 μm is not affected by the diameter, and the shear strength decreases with the increase of the diameter. The wide distribution and high variation coefficient (C_v) have an adverse effect on the mechanical properties of the fiber. When the average fiber diameter is 11 μm , the roving tensile strength of the diameter with C_v 0.20 is 8% lower than that with C_v 0.15. The diameter distribution can reveal the forming tooling and process, and the process needs to be strictly controlled to refine the highly uniform fibers.

Keywords: high-strength glass fiber; fiber diameter; mechanical properties; normal distribution

连续玻璃纤维纺织品是由数十到数千根纤维束构成的纤维集合体, 纤维直径在 3~25 μm 之间, 纤维直径公称值是产品重要特征参数, 标准化直径系列也规定了玻璃纤维直径公称值及其范围^[1-3]。玻璃纤维纺织工艺受直径影响显著, 直径越大, 纤维临界弯曲半径越大, 即纤维柔性下降。直径对纤维及其复合材料的弹性模量没有显著影响, 尽管研究人员很早就发现新生态玻璃纤维拉伸断裂强度与纤维

直径无关, 但在实际生产和使用过程中存在纤维直径与其力学性能的逆向相关性。Stickel 等研究玻璃纤维性能及其复合材料力学性能^[4], 单纤维直径 9 μm 的“S-glass”无捻粗纱浸胶纱强度较 17 μm 的高 15%。CHANG 等研究 E 玻璃纤维增强环氧树脂和高密度聚乙烯^[5], 无论采用何种树脂体系, 单纤维拔出的界面剪切强度都随着纤维直径(9.6~19.5 μm) 的增加而降低。Majbritt 等研究拉丝轴向应力对纤维

收稿日期: 2021-12-01。 修订日期: 2021-12-22。

基金项目: 国家特种纤维复合材料重点实验室资助项目(YJ2018SYS08)。

第一作者: 祖 群(1965—), 女, 教授级高级工程师。

通信作者: 宋 伟(1982—), 男, 高级工程师。

Received date: 2021-12-01. Revised date: 2021-12-22.

First author: ZU Qun (1965—), female, Professor.

E-mail: zuqun@fiberglasschina.com

Correspondent author: SONG Wei (1982—), male, Senior Engineer.

E-mail: wsong_ustc@163.com

性能影响时发现^[6], 在直径 5~17 μm 范围内, 直径降低, 连续玄武岩纤维拉伸轴向应力增大, 威布尔特征强度先随纤维直径的减小而增大, 然后达到一个与纤维直径无关的平台。

当玻璃纤维增强复合材料在应力作用下, 数千根玻璃纤维同时承受载荷。然而, 这些纤维直径不是以单一均值形式存在, 即使束丝有相同的直径均值, 也会存在不同直径区间的纤维含量的不同。已有一些学者关注到纤维直径及其分布对纤维力学性能影响。Gupta 研究玻璃纤维裂纹分布和直径变化对纤维强度统计学的影响^[7], 当纤维直径变化显著高于纤维裂纹分布影响时, 即使纤维强度分布确为威布尔分布, 测量的强度分布呈现非威布尔分布, 在高强度的威布尔分布一侧出现负斜率, 认为纤维直径分布显著影响强度分布, 应对纤维直径分布进行准确测量。Thomason 等研究 E 玻璃纤维直径均值和分布宽度对短切玻璃纤维增强聚酰胺 PA66 力学性能影响^[8], 在平均直径 9~18 μm 范围内, 复合材料缺口冲击强度和模量与纤维直径关系不大, 无缺口冲击强度随纤维直径增大而降低, 当平均直径相同时, 直径分布范围扩大对无缺口冲击强度影响显著, 下降幅度达到 20%(均值 11 μm 纤维)。

上述研究提供了纤维直径对玻璃纤维及其复合材料性能影响的信息。纤维直径都是用均值来表征的, 但纤维直径并不是均匀一致的, 连续玻璃纤维直径呈现正态分布^[9-10], 因生产工艺水平、合股方式等不同, 分布曲线大都偏离标准正态分布, 呈现多个正态分布混合^[11], 而直径分布形态对纤维力学性能影响的研究较少。大量国内外不同公司生产的玻璃纤维直径数据分析表明, 高品质玻璃纤维总是对应高均匀性直径。为进一步分析直径及其分布对纤维力学性能影响, 以连续高强玻璃纤维 HS2 为研究对象, 评价了 8~13 μm 不同平均直径的纤维及其合股无捻粗纱的直径分布, 研究直径统计分布参数与玻璃纤维及其复合材料力学变化相关性, 掌握玻璃纤维直径及其分布对终态产品力学性能影响规律, 为玻璃纤维高均匀成形的提供参考。

1 实验

1.1 玻璃纤维及复合材料样品制备

高强玻璃纤维(HS2)均来源于南京玻璃纤维研究设计院有限公司, 浸润剂适用于环氧树脂体系。采用相同规格漏板拉丝, 拉制公称直径为 8 μm 、11 μm 、13 μm 的 HS2 原丝, 代号为 S8、S11 和 S13。

每种规格制备合股所需数量的原丝。每个原丝单独编号, 如 S8-5#表示单丝直径为 8 μm 的 5#原丝筒, S11-3#表示单丝直径为 11 μm 的 3#原丝筒, 其余类推。将原丝合股制成无捻粗纱, 合股方式分别为合 5 股 S8 原丝、合 5 股 S11 原丝、合 2 股 S13 原丝、1 股 S8 与 2 股 S13 股合并、2 股 S8 与 1 股 S13 合并, 代号依次分别为 5-S8、5-S11、2-S13、1S8-2S13、2S8-1S13。

浸胶纱制备采用 GB/T 20310 中规定的简易方法, 树脂使用瀚森公司的 RIM035C, 固化剂使用瀚森公司的 RIMH037, 室温静置 24 h 后放入烘箱, 在 70 $^{\circ}\text{C}$ 保温 10 h 固化。控制浸胶纱纤维质量含量为 70% $\pm$ 5%。

单向板制备按照 ISO 527-5 规定方法制备, 树脂和固化剂同浸胶纱样品, 纤维缠绕层数 32 层, 调整卷绕速率与排线速率匹配, 保证单层纱线基本不重叠或产生大缝隙, 树脂体系采用上述浸胶纱树脂配方, 室温静置 24 h 后放入热压机, 在 80 $^{\circ}\text{C}$ 保温 4 h 并加压, 压力范围为 1~3 MPa。控制层合板纤维质量含量为 80% $\pm$ 5%。

1.2 直径测试与计算

纤维束测试采用 Diamscope 直径分析系统 (Cottonscope PTY LTD), 测试方法由之前的工作给出^[11], 设定检测样本为 2 000 左右。从分析系统导出测试数据, 进行两正态混合分布拟合, 假设纤维直径由 2 个总体 $X_1 \sim N(\mu_1, \sigma_1^2)$ 和 $X_2 \sim N(\mu_2, \sigma_2^2)$ 构成, 其中 $\mu_1 \neq \mu_2$ 为两总体的均值, σ_1^2 、 σ_2^2 为两总体的总体方差, 纤维直径总体概率密度函数如下式:

$$F(X) = \alpha_1 f(X_1) + \alpha_2 f(X_2) \quad (1)$$

$$f(X_1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} \exp\left[-\frac{(x_1 - \mu_1)^2}{2\sigma_1^2}\right] \quad (2)$$

$$f(X_2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_2} \exp\left[-\frac{(x_2 - \mu_2)^2}{2\sigma_2^2}\right] \quad (3)$$

其中: α_1 和 α_2 分别为两总体的占比, $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$, μ_1 、 μ_2 均来自总体 X 的容量为 n 的直径测试样本, n 的数值为 Diamscope 直径分析系统采集的数据量, 样品总体均值为 μ , 标准差 σ 。

两正态分布偏度 S (Skewness)和峰度 K (Kurtosis)均不为零, 正偏度分布图右偏, 即存在高值峰位, 正峰度值越高表示分布图尖峰越陡, 计算公式如下:

$$S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{x_i - \mu}{\sigma} \right)^3 \right] \quad (4)$$

$$K = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{x_i - \mu}{\sigma} \right)^4 \right] \quad (5)$$

采用 SAS 公司 JMP 统计分析软件, 汇总样品测量值, 计算各统计参数。

1.3 玻璃纤维及复合材料力学性能测试

单根玻璃纤维新生态强度测试方法参照《碳纤维单丝拉伸性能的测定》(GB/T 31290—2014), 采用 Instron 5943 单丝强力机(美国英斯特朗公司), 纤维有效长度 10 mm, 试验机十字头位移速率为 2 mm/min。原丝及无捻粗纱拉伸断裂强度测试依据《增强材料 纱线试验方法 第 3 部分: 玻璃纤维断裂强度和断裂伸长》(GB/T 7690.3—2013)。无捻粗纱悬垂度和浸胶纱拉伸强度测试分别依据《玻璃纤维无捻粗纱》(GB/T 18369—2008)附录 B 和《玻璃纤维 无捻粗纱浸胶纱试样的制作和拉伸强度的测定》(GB/T 20310—2006)。复合材料单向板拉伸断裂强度、剪切强度分别依据《定向纤维增强聚合物基复合材料拉伸性能试验方法》(GB/T 3354—2014)、《聚合物基复合材料及其层压材料短梁强度的标准试验方法》(ASTM D2344—2016)。

2 结果与讨论

2.1 纤维直径分布

目前玻璃纤维直径测试方法主要依据《增强材料 纱线试验方法 第 5 部分: 玻璃纤维纤维直径的测定》(GB/T 7690.5—2013), 即在光学显微镜下采用纵向法或横截面法测量 25 个纤维直径算数平均值, 也有采用《化学纤维 微观形貌及直径的测定扫

描电镜法》(GB/T 36422—2018), 测量不少于 200 根纤维。前者测量样本较少, 不利于直径分布的分析, 后者虽能给出较多数据, 但耗时长。近年来国内外开发了较多的纤维直径快速检测方法, 如纤维纱截面激光扫描图像处理法^[10, 12], 纤维分散液的光学系统与图像软件处理^[11, 13–15]等。这些方法可以在较短的时间内采集更多的样本, 进行纤维直径分布统计分析, 如 Diamscope 直径分析系统从制样到完成测试仅需 3 min 时间, 玻璃纤维直径快速分析有助于及时掌握拉丝生产工艺状态。

纤维直径测试采用 Diamscope 直径分析系统, 原丝及无捻粗纱纤维直径统计参数汇总见表 1, 部分样品两正态混合分布见图 1 所示。样品纤维直径分布峰度为负值, 表明分布相对正态分布较平坦, 偏度则有正有负, 与直径偏粗或细相关。直径分布的宽度系数(Span)采用 $(D_{90}-D_{10})/\bar{\mu}$ 计算结果, D_{90} 和 D_{10} 分别是累计分布概率为 90%和 10%的纤维直径, $\bar{\mu}$ 为纤维直径均值。S8-5#、S11-3#和 S13-2#原丝直径主峰分别位于 8.2、11.1 μm 和 13.6 μm , 离散系数 C_v 差异不大, 但分布的宽度系数存在一定差异, 较粗的纤维直径分布相对较窄。单一品种原丝合股后峰位变化表明原丝间直径分布存在差异, 合股纱的纤维直径将是这些差异的累计, 差异较低时, 合股纱纤维直径与原丝直径分布形态及统计参数相近, 两者峰位相近, 如图 1 中 5-S11 与 S11、2-S13 与 S13。

表 1 纤维直径分布
Table 1 Fiber diameter distribution

Fiber	Group 1			Group 2			$\bar{\mu}/\mu\text{m}$	C_v	S	K	Span
	$\mu_1/\mu\text{m}$	σ_1	α_1	$\mu_2/\mu\text{m}$	σ_2	α_2					
S8-5#	8.2	0.86	0.62	9.8	0.76	0.38	8.8	0.13	0.03	-0.29	0.89
S11-3#	7.7	0.53	0.1	11.1	1.18	0.9	10.8	0.14	-0.59	-0.04	0.79
S13-2#	11	0.84	0.43	13.6	1.08	0.57	12.5	0.13	0.06	-0.91	0.67
5-S8	7.8	0.58	0.3	9.7	0.93	0.7	9.1	0.13	0.04	-0.46	0.8
5-S11	8.2	0.63	0.14	11.6	1.16	0.86	11.1	0.15	-0.6	-0.25	0.81
2-S13	11.5	1.07	0.64	14	0.87	0.36	12.4	0.13	0.09	-0.68	0.73
2S8-1S13	9.7	1.68	0.87	13.8	0.87	0.13	10.2	0.2	0.34	-0.14	1.2
1S8-2S13	11	1.76	0.86	14.2	0.75	0.14	11.5	0.17	-0.01	-0.49	0.91

纤维直径及分布与拉丝作业条件密切相关。熔窑熔制的玻璃熔体流入拉丝通路, 经过通路底部漏板及漏嘴, 在拉丝机的高速牵伸下形成玻璃纤维原丝。生产过程中大量的原丝纤维直径分布均呈现出图 1 原丝的状态, 但随着生产工艺水平的不同, 相同规格原丝的直径宽度系数和离散性

不同, 为验证这些不同对纤维应用性能影响, 本文设计将不同规格原丝进行混纱以获得较大分布宽度和离散性的纤维样品。图 1 中 2S8-1S13 和 1S18-2S13 纤维直径 C_v 分别高达 0.20 和 0.17, 宽度系数在 0.9 以上, 主要离散性来自于低直径总体。

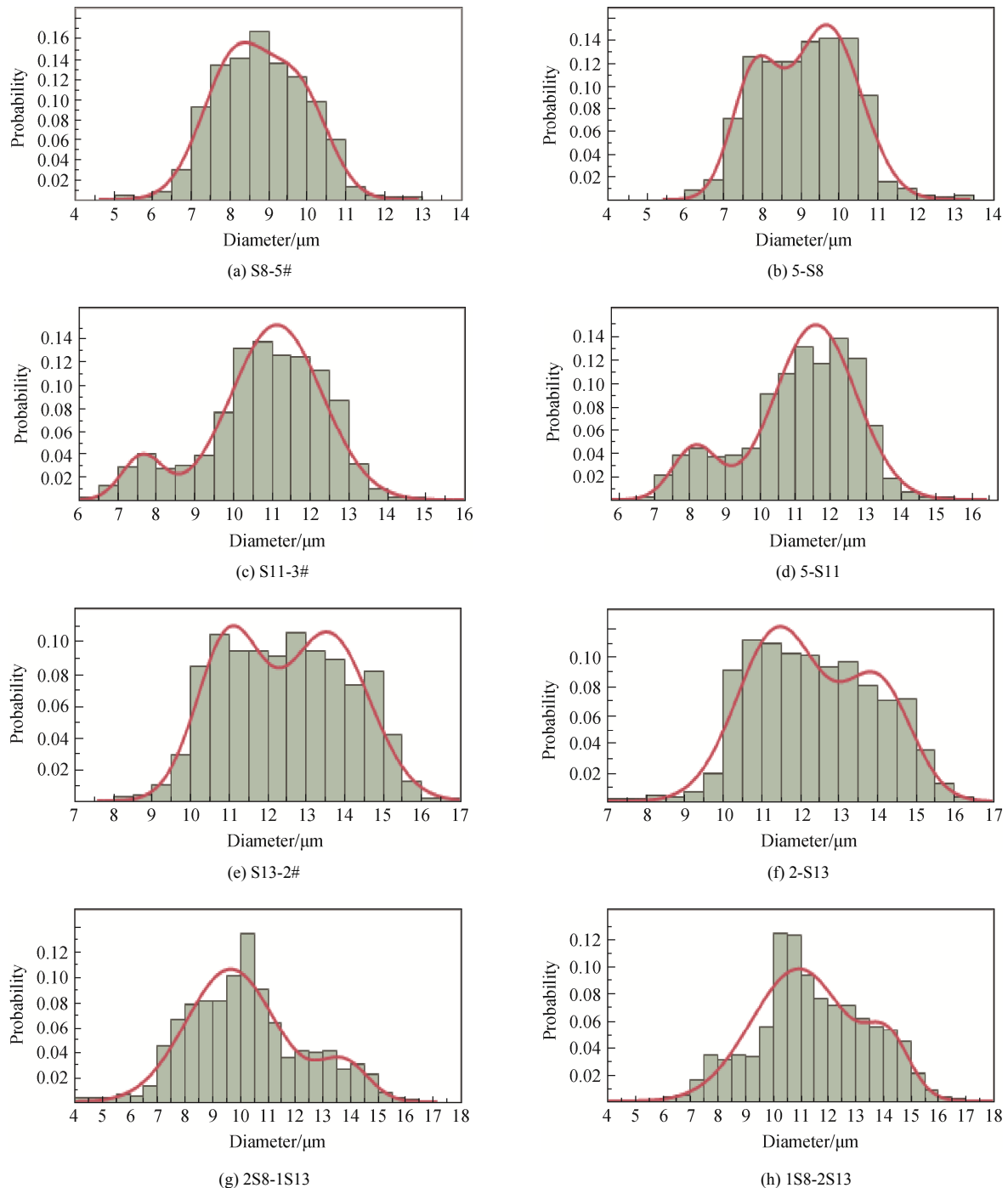


图1 纤维直径分布概率

Fig. 1 Probability of fiber diameter distribution

依据泊肃叶方程,漏嘴出口的玻璃液流量 Q 如下式表示^[16]:

$$Q = \pi r^2 V \rho = C \frac{\pi R^4 \rho^2 g H}{8 \eta l} \quad (6)$$

式中: r 为纤维半径; V 为拉丝机卷绕线密度; ρ 为玻璃密度; R 为漏嘴直径; H 为玻璃液位高度; η 为玻璃液黏度; l 为漏嘴长度; g 为重力加速度; C 为常数,上式可转换为:

$$r = R^2 \sqrt{\frac{C' \rho g H}{8 \eta l V}} \quad (7)$$

玻璃液的黏度与温度关系可用 VFT 方程表示:

$$\lg \eta = a + b / (T - c) \quad (8)$$

由式(7)和式(8)可知,如漏嘴出口处温度、液面高度、拉丝线速度,以及漏嘴内径、漏嘴长度等拉丝工艺与漏嘴工装参数的变化都将造成纤维直径的波动。高温下玻璃熔体密度随温度的提高而降低,

且呈现较好的线性关系^[17], 但温度变化引起的密度变化相对较小, 可近似为常数。当漏板参数和拉丝线速度 V 相同时, 玻璃纤维直径与漏嘴出口处玻璃液温度的强相关性, 同时受到丝根冷却条件、环境温湿度等影响。实际生产对加热漏板温度进行控制, 通常设定的温度范围为 $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$, 但不同漏嘴出口处丝根温度存在较高的差异, OZDEN 等对 6 000 孔拉丝漏板作业条件进行数值模拟, 计算各漏嘴出口处的温度^[18], 结果表明漏嘴出口玻璃液温度呈现梯度形式, 梯度向边缘增大, 向中心减小, 对应的温差值为 $50.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。Quentin Chouffart 分析 AdvantexTM 玻璃的拉丝漏嘴出口处的温度分布与直径分布的相关性^[19-20], 结果表明漏嘴出口处温度在 $1\ 268\sim 1\ 328\text{ }^{\circ}\text{C}$ 区间波动, 纤维直径变化范围是 $(10\pm 2)\text{ }\mu\text{m}$, 他们进一步分析漏嘴温度分布与直径分布形态, 发现二者统计分布形态是一致的, 说明降低纤维直径离散性的重要措施仍是控制漏嘴出口处温度均匀性。

高强玻璃纤维漏板和丝根冷却的数值模拟研究表明, 漏板温度呈现二正态分布, 丝根冷却强度由内侧向外呈现梯度降低趋势, 后续将进一步研究丝根冷却条件对漏嘴出口处玻璃温度场的影响, 以及该影响与纤维直径分布的相关性。

2.2 单根和丝束玻璃纤维强度

脆性材料的断裂强度概率呈现 Weibull 二参数

分布^[21-24], 强度 σ 的总体分布函数或概率如下式:

$$f(\sigma) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^m\right] \quad (9)$$

式中: m 为 Weibull 模数(或形状参数); σ_0 为对应测试跨距(有效长度)下的尺度参数。为获得 Weibull 分布形状参数和尺度参数, 式(9)可以转换如下:

$$\ln\ln[1/(1-f(\sigma))] = m \ln \sigma - m \ln \sigma_0 \quad (10)$$

绘制 $\ln \sigma$ 与 $\ln\ln[1/(1-f(\sigma))]$ 的散点图, 并作一元线性回归方程, 直线方程的斜率为 Weibull 方程的形状参数, 利用截距求出 Weibull 方程的尺度参数。

新生态单根纤维和原丝束强度均值及 Weibull 参数见表 2, 单根纤维和 S8 原丝束强度 Weibull 分布见图 2 和图 3。新生态单根纤维强度较原丝束强度高近 1 倍以上, 但形状参数低于束丝。新生态纤维夹具间有效长度仅为 10 mm , 原丝束纤维有效长度为 350 mm , 依据 Weibull 模型理论, 脆性纤维束长度增加时, 其中处于临界强度的缺陷出现的概率更高, 大尺寸的脆性材料强度更低^[25-27]。新生态纤维表面是成形初始状态裂纹, 较低的形状参数说明表面裂纹分布的离散性。而原丝束经过浸润剂涂覆、烘干等工序, 浸润剂和空气水分及机械磨损等造成纤维表面新裂纹产生并进一步扩展, 引起力学性能的衰减^[28-31], 但丝束在相同测试条件下, 测试结果

表 2 单根纤维新生态强度和原丝束强度
Table 2 Strength of virgin fiber and strands

Fiber	Average fiber diameter $D/\mu\text{m}$	Average strength σ/MPa	Shape parameter m	Scale parameter σ_0/MPa
Virgin fiber	8.6	4 267	13.9	4 411
S8 strand	8.9	2 071	24.3	2 097
S11strand	10.8	2 052	24.3	2 097
S13strand	12.5	1 779	24.5	1 818

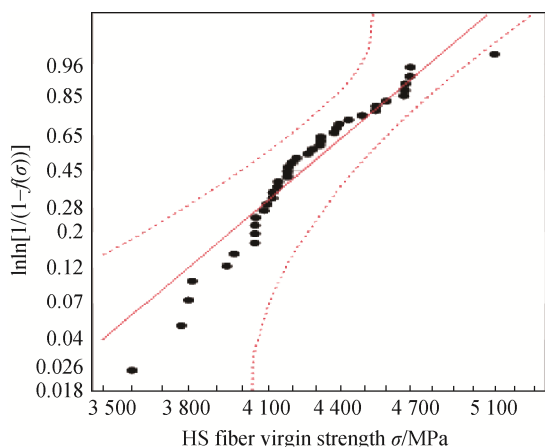


图 2 HS 新生态纤维强度 Weibull 分布
Fig. 2 Weibull distribution of HS virgin fiber strength

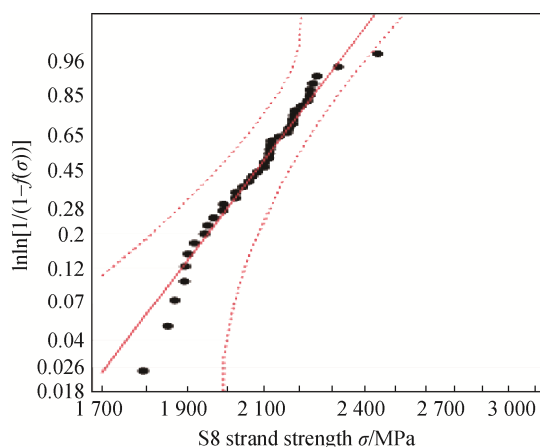


图 3 S8 原丝强度 Weibull 分布
Fig. 3 Weibull distribution of S8 strand strength

的一致性较好。如果在纤维拉伸试验过程中监测声发射(AE),使每根纤维断裂事件被探测到,声发射振幅随伸长量增大而增加,振幅总体分布符合Weibull分布,即与纤维断裂相关,声发射信号参数也呈现双峰缺陷群^[32–33],表明缺陷的存在造成纤维在低应力水平下断裂。另外,纤维间摩擦力也将造成拉伸强度的降低^[34–36],涂覆润滑剂的丝束拉伸强度高于未涂覆的干丝束,摩擦使载荷从断裂纤维转移到未断裂的相邻纤维,引起干束中一定程度的纤维协同破坏或多纤维断裂,导致丝束快速断裂和快速载荷下降,降低了束丝的强度。

2.3 纤维直径对丝束强度的影响

从表2可以看到,当纤维直径在11 μm以上时原丝拉伸断裂强度均值及Weibull尺度参数均出现随直径增大而下降趋势,直径离散性的降低无法改变这种下降趋势。原丝合股的粗纱拉伸断裂强度与直径均值如图4所示,相同规格原丝合股后仍表现出在11 μm以上时强度随直径增大而下降趋势,尽管S13和2-S13具有较低的宽度系数。

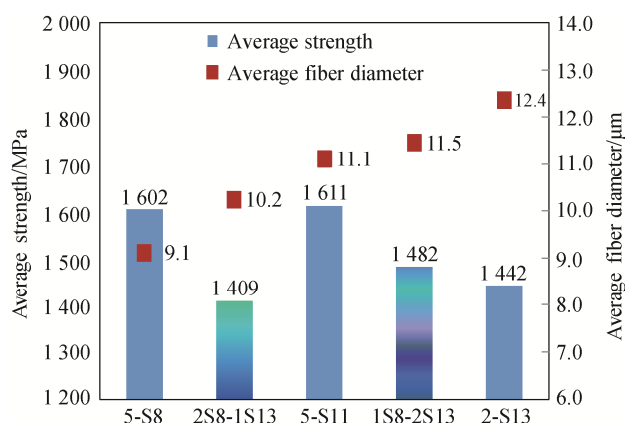


图4 无捻粗纱拉伸断裂强度与纤维直径的均值

Fig. 4 Average tensile strength and fiber diameter of rovings

纤维强度微裂纹假说目前仍被广泛接受,直径增大,纤维表面微裂纹增加,引起表观强度的下降。细直径纤维与其高轴向应力相关^[37],Majbritt D等将轴向应力简化为与纤维直径平方根成反比^[6],阐明轴向应力增加导致玻璃结构各向异性和缺陷(裂纹、气泡、条纹等)的取向的增加,与低轴向应力的玻璃棉纤维,以及浇注的块状玻璃相比,轴向应力与拉伸强度呈现正向相关性。

纤维直径与其轴向应力相关,纤维直径及其分布差异也会造成纤维力学性能变化。当不同直径原丝合股后,纤维直径宽分布和高离散将造成强度下降幅度加大,如2S8-1S13强度较5-S8下降12%,而1S8-2S13与5-S11直径均值相近,但前者强度比

后者低8%。这种差异在较低的应变速率下更加显著,当拉伸速率由(200±20) mm/min降至(10±0.5) mm/min时,2S8-1S13粗纱强度较5-S8下降22%,1S8-2S13较5-S11下降29.6%。由于纤维直径宽分布和高离散也造成轴向应力波动增大,当降低应变速率时放大这些差异。

有学者研究了拉伸速率对碳纤维单丝与复丝强度的影响^[38–39],当拉伸速率在一定范围内升高时,碳纤维浸胶纱(复丝)强度降低,而碳纤维干丝束强度随之升高。造成二者差异的原因是浸胶纱存在着纤维与树脂的界面结合,在较大拉伸速率时,产生应力集中且没有足够的时间进行界面传递载荷分散应力,导致复丝出现大量新的弱节,在载荷较低时即发生断裂。而干丝束没有界面的应力传递,影响强度的是纤维的缺陷、直径的分布,包括纱线间摩擦力,以及纱线间的张力均匀性。在较大拉伸速率时,张力均匀性与直径分布差异影响因子被缩小,大部分纤维被迅速拉伸至断裂临界状态从而在很短的时间内几乎同步发生断裂。在低速拉伸下,纤维出现不同步断裂的几率增大,从而强度降低。低速拉伸纱线,纱线失效存在明显的分级断裂现象,高速拉伸纱线呈现爆炸式的一次断裂现象。

2.4 纤维直径对复合材料力学性能影响

图5为5种浸胶纱拉伸强度,随直径增大浸胶纱强度也呈现降低的趋势,同样需要关注的是直径宽分布高离散对浸胶纱拉伸强度造成不利影响,2S8-1S13浸胶纱拉伸强度均值较5-S8下降4.5%,1S8-2S13较2-S13下降2.7%,均值相近的5-S11和2S8-1S13,混纱的强度降低了10%。

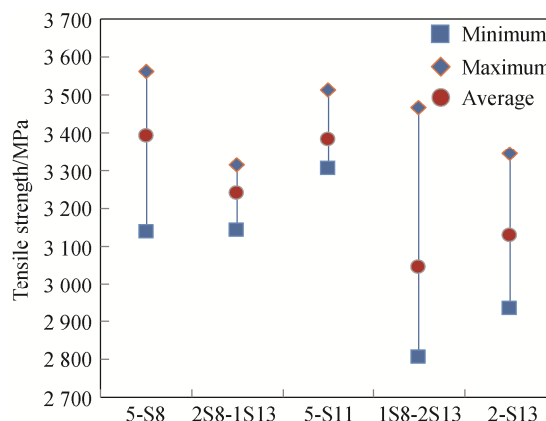


图5 浸胶纱拉伸强度

Fig. 5 Tensile strength of impregnated roving

复合材料力学设计需要对样本检测结果进行统计分析,材料许用值包括A基准值、B基准值和平

均值^[40], 如 B 基准值是指力学性能的一个限定值, 在 95% 的置信度下, 90% 的性能数值群的最小值。本文值复合材料样品仅有 1 批, 可按照下式计算单批样本 B 基值^[41]:

$$B = X \cdot \frac{1 - 1.6C_v}{1 + 2.326C_v / N} \quad (11)$$

式中: X 为均值; N 为样本数, N 值均为 5。图 6 给出了复合材料单向板试样的拉伸强度测试结果的最小值、最大值、均值和 B 基值。直径均值在 8~14 μm 之间的纤维单向板拉伸强度未呈现随直径增大而下降的趋势, 但直径离散度增大也带来了单向板拉伸强度的降低, 1S8-2S13 单向板拉伸强度均值最低。

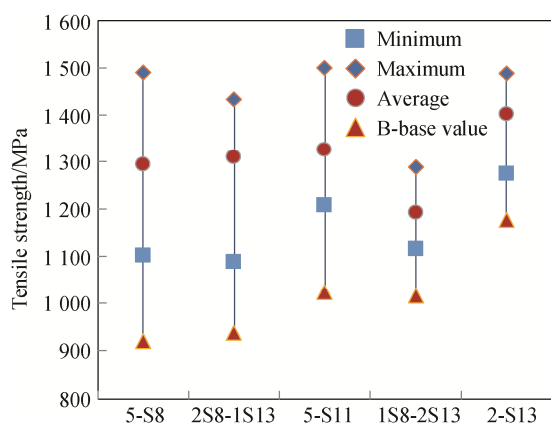


图 6 单向板拉伸强度

Fig. 6 Tensile strength of uni-direction fiber reinforced plate

复合材料力学性能除了与纤维本体与表界面物理和化学性能相关外, 纤维束张力的一致性同样影响测试结果。对于 2-S13 粗纱, 仅有 2 股原丝合并, 原丝间张力差异相对 3 股不同线密度原丝或 5 股相同规格原丝小, 合股张力一致性好。各合股纱悬垂度测试结果如图 7 所示, 悬垂度测试对象为 10 m 间

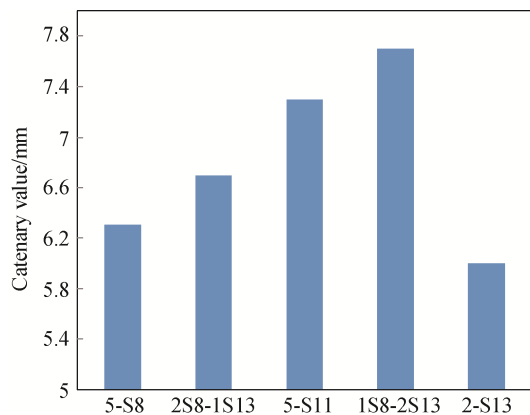


图 7 粗纱悬垂度

Fig. 7 Catenary value of roving

距内的丝束, 悬垂度越小, 丝束间张力一致性越好, 在 10 m 间距内丝束越趋于平行排列在一个平面上, 在载荷作用下受力均匀的 2-S13 纤维单向板具有较高的拉伸强度。高悬垂度也将造成拉伸测试结果离散性增大, 相应造成 B 基值的降低, 如 5-S11 的均值虽高于 1S8-2S13, 但 B 基值相近, 张力的影响并未呈现一一对应关系, 与复合材料样品测试间距 (15 mm) 小有关。

图 8 为单向板剪切强度测试结果, 剪切强度呈现出随直径增大而降低的趋势, 混纱(2S8-1S13、1S8-2S13)的剪切强度也低于其中主要一种纤维直径纱线(5-S8、2S13)的剪切强度, 悬垂度最低的 2-S13 同样表现出较好的层间力学性能。已有研究表明纤维/树脂复合材料的剪切强度随纤维直径增大而降低, 这种影响并不是来自于纤维与树脂结合强度, 而是归因于摩擦力^[5, 42]。纤维束张力离散性、纤维直径离散性等增大进一步降低了复合材料层间剪切强度, 其中直径离散系数高达 0.20 的 2S8-1S13 的 B 基值利用率(B/X)也相对较低。作者承认复合材料样品制备也会影响测试结果的一致性, 但直径离散仍将会通过影响纤维制品均匀性及复合材料工艺性而降低纤维排列在破坏时载荷重新分配的能力, 成为复合材料力学性能离散性主要来源之一。

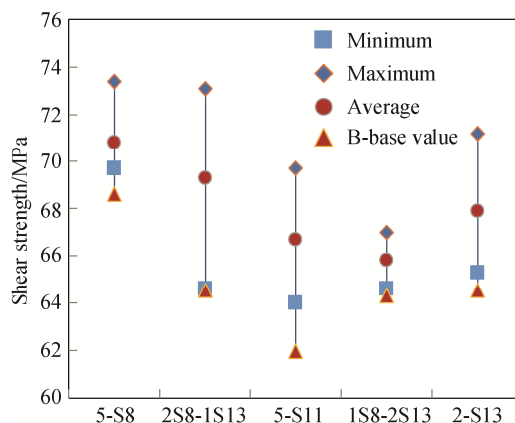


图 8 单向板剪切强度

Fig. 8 Shear strength of uni-direction fiber reinforced plate

3 结论

研究直径均值在 8~13 μm 之间的 HS2 玻璃纤维直径分布, 单根纤维新生态强度、束丝强度, 以及纤维/环氧树脂复合材料力学性能等, 对纤维直径分布和纤维及其复合材料力学性能进行统计分析, 得出以下结论:

1) 合股无捻粗纱中纤维直径离散性是其中原丝离散性的叠加, 通过对原丝或粗纱纤维直径正态

分布参数分析, 能够反馈纤维成形控制水平。

2) 直径相近的纤维新生态强度高于大生产获得的束丝拉伸强度, 但结果一致性较低, 丝束和浸胶纱的拉伸断裂强度随纤维直径增大而降低。

3) 不同直径纤维原丝合股后, 直径呈现宽分布高离散的正态分布, 造成纤维束和浸胶纱拉伸强度的降低。

4) 纤维单向板拉伸强度与直径均值相关性不强, 剪切强度随直径增大而降低, 直径离散性和丝束间张力一致性是纤维复合材料力学性能重要因素。

参考文献:

- [1] ASTM D578/D578M-18, Standard Specification for Glass Fiber Strands.
- [2] JIS R3413-2012 纺织玻璃纤维纱.
- [3] GB/T 18371-2008 连续玻璃纤维纱.
- [4] STICKEL J M, NAGARAJAN M. Glass fiber-reinforced composites: from formulation to application[J]. *Int J Appl Glass Sci*, 2012, 3(2): 122–136.
- [5] MOON C K, LEE J O, CHO H H, et al. Effect of diameter and surface treatment of fiber on interfacial shear strength in glass fiber/epoxy and HDPE[J]. *J Appl Polym Sci*, 1992, 45(3): 443–450.
- [6] LUND M D, YUE Y. Impact of drawing stress on the tensile strength of oxide glass fibers[J]. *J Am Ceram Soc*, 2010, 93(10): 3236–3243.
- [7] GUPTA P K. Combined effect of flaw distribution and diameter variation on the statistics of glass fiber strength[J]. *J Am Ceram Soc*, 2010, 70(7): 486–492.
- [8] THOMASON J L. Structure–property relationships in glass reinforced polyamide, part 2: The effects of average fiber diameter and diameter distribution[J]. *Polym Compos*, 2010, 28(3): 331–343.
- [9] BAUER J F, MANVILLE J. Properties of glass fiber for filtration: influence of forming process[J]. *Int Nonwovens J*, 2004, os-13(4): 1558925004os-13.
- [10] 付志刚, 王曦, 郑天勇, 等. 长丝纤维直径及其分布的快速测量方法研究[J]. *产业用纺织品*, 2018, 36(8): 37–41.
FU Zhigang, WANG Xi, ZHENG Tianyong, et al. Technical Textiles (in Chinese), 2018, 36(8): 37–41.
- [11] 黄三喜, 郭仁贤, 黄松林, 等. 激光扫描法玻璃纤维直径及其分布测试方法研究[J]. *玻璃纤维*, 2020(6): 9–13.
HUANG Sanxi, GUO Renxian, HUANG Songlin, et al. *Fiber Glass* (in Chinese), 2020(6): 9–13.
- [12] 王曦, 郑天勇, 宁祥春. 电子纱纤维直径及其均匀性的高效测定方法研究[J]. *玻璃纤维*, 2019(3): 8–13.
WANG Xi, ZHENG Tianyong, NING Xiangchun. *Fiber Glass* (in Chinese), 2019(3): 8–13.
- [13] BRIMS M, LTD H, COM W C. Introducing CottonscopeHD: an Instrument for the Rapid and Accurate Measurement of Fibre Diameter Distribution. www.cottonscope.com.
- [14] 刘叶凤, 刘琛琛, 李安红, 等. Diamscope 在玻璃纤维直径测试中的应用[J]. *玻璃纤维*, 2021(1): 1–5.
LIU Yefeng, LIU Chenchen, LI Anhong, et al. *Fiber Glass* (in Chinese), 2021(1): 1–5.
- [15] BUNSELL A R. Handbook of Tensile Properties of Textile and Technical Fibres[M]. Second Edition, United Kingdom: Elsevier, 2009. 24–25.
- [16] CHOUFFART Q, SIMON P, TERRAPON V E. Numerical investigation of continuous fiber glass drawing[A]. In: COUPLED V: proceedings of the V International Conference on Computational Methods for Coupled Problems in Science and Engineering[C]. CIMNE, 2013. p. 171–182.
- [17] FLUEGEL A, EARL D A, VARSHNEYA A K, et al. Density and thermal expansion calculation of silicate glass melts from 1 000 °C to 1 400 °C[J]. *Phys Chem Glass*, 2008, 49(5): 245–257.
- [18] ÖZDEN U A, BEZOLD A, BROECKMANN C, et al. Numerical simulation of the tip plate temperature gradient in a glassfiber bushing during production//1st International Glass Fiber Symposia[C]. Aachen, Germany 2012.
- [19] CHOUFFART Q. A NUMERICAL STUDY OF FIBER GLASS DRAWING PROCESS[A]. In: 1st International Glass Fiber Symposia [C]. Aachen, Germany 2012.
- [20] CHOU F A Q, SIMON P, TERRAPON V E. Numerical and experimental study of the glass flow and heat transfer in the continuous glass fiber drawing process[J]. *J Mater Proc Tech*, 2016, 231: 75–88.
- [21] ASTM C1239-07(2007) Standard practice for reporting uniaxial strength data and estimating Weibull distribution parameters for advanced ceramics.
- [22] ANDERSONS J, JOFFE R, HOJO M, et al. Glass fibre strength distribution determined by common experimental methods[J]. *Compos Sci Technol*, 2002, 62: 131–145.
- [23] THOMASON J L. On the application of Weibull analysis to experimentally determined single fibre strength distributions[J]. *Compos Sci Technol*, 2013, 77: 74–80.
- [24] 周娜娜, 李炜. 碳纤维单丝强度 WEIBULL 分析与研究[J]. *高科技纤维与应用*, 2015, 40(6): 35–40.
ZHOU Yuanna, LI Wei. *WEIBULL. Hi-Tech Fiber Applic* (in Chinese), 2015, 40(6): 35–40.
- [25] 王明超, 张佐光, 孙志杰, 等. 玄武岩纤维束强度的 Weibull 和 Gauss 分布统计分析[J]. *复合材料学报*, 2008, 25(3): 105–109.
WANG Mingchao, ZHANG Zuoguang, SUN Zhijie, et al. *Acta Mater Compos Sin* (in Chinese), 2008, 25(3): 105–109.
- [26] 赵栩欣, 欧忠文, 莫金川. 玄武岩纤维与其他纤维的单丝强度及强度分布对比分析[J]. *建筑技术开发*, 2013(1): 17–19.
ZHAO Xuxin, OU Zhongwen, MO Jinchuan. *Build Technol Develop* (in Chinese), 2013(1): 17–19.
- [27] 许敏. 纤维长度对玻璃纤维单丝强度测定的影响[J]. *玻璃纤维*, 2012(6): 6–9.
XU Ming. *Fiber Glass* (in Chinese), 2012(6): 6–9.
- [28] LI Hong. Strength of glass and glass fibers[A]. In: Proc. in 76th Conference on Glass Problems[C]. Am Ceram Soc New Jersey: Wiley & Sons. 2016: 3–15.
- [29] WANG Qingwei, BROW Richard K, LI Hong, et al. Effect of aging on the failure characteristics of E-glass fibers[J]. *J Mater Sci*, 2016, 51(5): 2404–2410.
- [30] BROWN E N, DAVIS A K, JONNALAGADDA K D, et al. Effect of surface treatment on the hydrolytic stability of E-glass fiber bundle tensile strength[J]. *Compos Sci Technol*, 2005, 65(1): 129–136.

- [31] MINOSHIMA K, TANAKA K, ISHIDA S. Influence of Artificial Micro Defect and Wet Environment on the Property of Static and Dynamic Environmental Strength of Silica Glass Optical Fiber[A]. A Collection of Lectures at the Kansai Conference[C]. 2004(79).
- [32] SHA J, SIDDIQUI A M, SWEET M. Fracture strength of E-glass fibre strands using acoustic emission[J]. Ndt E Int, 1997, 30(6): 383–388.
- [33] OSKOEI A R, AHMADI M. Fracture strength distribution in E-glass fiber using acoustic emission[J]. J Compos Mater, 2010, 44(6): 693–705.
- [34] 朱德举, 黄蒙影. 不同标距及应变率下纤维丝间摩擦对 Kevlar49 纤维束力学性能的影响[J]. 实验力学, 2018, 33(3): 366–376.
ZHU Deju, HUANG Mengying. Experimental Mech (in Chinese), 2018, 33(3): 366–376.
- [35] HILL R, OKOROAFOR E U. Weibull statistics of fiber bundle failure using mechanical and acoustic-emission testing—The influence of interfiber friction[J]. Composites, 1995, 26(10): 699–705.
- [36] M R'Mili, MOEVUS M, GODIN N. Statistical fracture of E-glass fibres using a bundle tensile test and acoustic emission monitoring[J]. Compos Sci Technol, 2009, 68(7-8): 1800–1808.
- [37] REKHSON S, LEONARD J, SANGER P. Attenuation and breakage in the continuous glass fiber drawing process[J]. Ceram Eng Sci Proc, 2004, 25(1): 179–190.
- [38] 苏玉芹, 陈俊林, 熊舒, 等. 碳纤维复丝拉伸性能测试影响因素研究[J]. 合成纤维工业, 2019, 42(3): 34–37.
SU Yuqin, CHEN Junlin, XIONG Shu, et al. Synth Fiber Ind (in Chinese), 2019, 42(3): 34–37.
- [39] 季根顺, 张梅英, 贾建刚, 等. 拉伸速率对碳纤维单丝拉伸性能的影响[J]. 兰州理工大学学报, 2018, 44(2): 28–31.
JI Genshun, ZHANG Meiyong, JIA Jiangang, et al. Lanzhou Univ Technol(in Chinese), 2018, 44(2): 28–31.
- [40] 王翔, 陈新文, 王海鹏, 等. 基于统计的复合材料 B 基准值计算方法研究[J]. 失效分析与预防, 2010(4): 210–215.
WANG Xiang, CHEN Xinwen, WANG Haipeng, et al. Failure Anal Prevent(in Chinese), 2010(4): 210–215.
- [41] 王翔, 陈新文, 王海鹏, 等. 复合材料 B 基值计算方法及影响因素研究[J]. 直升机技术, 2011(2): 39–44.
WANG Xiang, CHEN Xinwen, WANG Haipeng, et al. Helicopter Technol(in Chinese), 2011(2): 39–44.
- [42] YIN B B, LIEW K M. Machine learning and materials informatics approaches for evaluating the interfacial properties of fiber-reinforced composites[J]. Compos Struct, 273(2021)114328: 1–12.

※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※



祖群, 教授级高级工程师。1990年毕业于华东理工大学无机非金属材料。先后主持国家科技部 863、重点专项、院所专项, 以及国防科技攻关和重点专项等数十项国家及省部级科技计划。成功开发了高强度、高模量、低介电、高硅氧、耐辐照等高性能特种玻璃纤维, 产品已广泛应用于国防、航天航空、新能源、电子通讯等高端装备制造中。获英国诺丁汉大学荣誉教授, 华东理工大学兼职教授, 国际玻璃委员会纤维玻璃分会秘书长、中国复合材料学会常务理事、中国硅酸盐学会理事。作为第一完成人获 2017 年度建材行业技术发明一等奖 1 项, 2018 年中国专利银奖 1 项, 2019 年度国家科技进步二等奖 1 项。



宋伟, 高级工程师, 从事特种玻璃纤维增强复合材料的应用评价研究, 参与了多项国家和省部级重点专项研究工作, 主持 1 项国防专项工程研究项目。作为参与人员获得中国建材联合会技术发明一等奖 1 项, 中国建材工程建筑协会工程设计一等奖 1 项, 江苏省复合材料学会一等奖 1 项。