

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2021.07.011

工艺方法和试验环境对 EP/GF 层合板力学性能影响

高琦, 赵文忠, 张晨晖, 李建伟

(中国电子科技集团公司第二十研究所, 西安 710068)

摘要: 采用热压罐成型工艺, 分别制备环氧树脂 (EP) 含量为 38%、铺层参数为 $[0^\circ/+45^\circ/-45^\circ/90^\circ]_s$ 的 EP/GF 层合板 1, EP 含量为 33%、铺层参数为 $[0^\circ/+45^\circ/-45^\circ/90^\circ]_s$ 的 EP/GF 层合板 2 和 EP 含量为 33%、铺层参数为 $[0^\circ/90^\circ/0^\circ/+45^\circ/-45^\circ/90^\circ/0^\circ/+45^\circ/-45^\circ/90^\circ]_{1s}$ 的层合板 3。研究了 EP 含量、铺层参数对 EP/GF 层合板力学性能的影响, 并在室温干态、-50℃低温干态、80℃高温干态和高温湿态四种环境试验条件下对层合板的力学性能进行了测试。结果表明, 在相同铺层参数条件下, 相比层合板 1, 低 EP 含量的层合板 2 的拉伸强度、面内压缩强度和层间剪切强度分别提高 7.9%, 11.2% 和 12.6%; 增加 $0^\circ, 90^\circ$ 方向 GF 铺层, 有利于提升层合板的拉伸强度和面内压缩强度; 复合材料层合板的力学性能受温度、湿度影响较大, 在高温湿态条件下, 层合板 3 的拉伸强度和面内压缩强度和层间剪切强度分别下降 46%, 33.8% 和 36.1%。

关键词: 环氧树脂含量; 铺层参数; 玻璃纤维; 湿热条件; 力学性能

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2021)07-0065-06

Effects of Process Method and Test Environment on Mechanical Properties of EP/GF Laminates

Gao Qi, Zhao Wenzhong, Zhang Chenhui, Li Jianwei

(No.20 Research Institute of CETC, Xi'an 710068, China)

Abstract: Using the autoclave molding process, the epoxy resin (EP)/glass fibre (GF) laminates 1 with EP content of 38% and ply parameters of $[0^\circ/+45^\circ/-45^\circ/90^\circ]_s$, EP/GF laminates 2 with EP content of 33% and ply parameters of $[0^\circ/+45^\circ/-45^\circ/90^\circ]_s$, EP/GF laminates 3 with EP content of 33% and lay parameters of $[0^\circ/90^\circ/0^\circ/+45^\circ/-45^\circ/90^\circ/0^\circ/+45^\circ/-45^\circ/90^\circ]_{1s}$ were prepared. The effects of EP content and ply parameters on the mechanical properties of EP/GF laminates were studied. Besides, the mechanical properties of laminates were tested under four experimental environmental conditions: room temperature dry state, -50℃ cold temperature dry state, 80℃ elevated temperature dry state, elevated temperature wet state. The results show that under the same ply parameter conditions, compared with laminate 1, the tensile strength, in-plane compressive strength and interlaminar shear strength of laminate 2 with low EP content increases by 7.9%, 11.2% and 12.6% respectively. Increasing the GF layer in the direction of 0° and 90° is conducive to improving the tensile strength and in-plane compressive strength of the laminate. The mechanical properties of the composite laminate are greatly affected by temperature and humidity. Under elevated temperature wet state conditions, the tensile strength, in-plane compressive strength and interlaminar shear strength of the laminate 3 decrease by 46%, 33.8% and 36.1% respectively.

Keywords: epoxy resin content; ply parameter; glass fiber; hygrothermal condition; mechanical property

环氧树脂 (EP) 是一种性能优异的热固性树脂, 具有较好的力学性能、工艺灵活性、可加工性、耐腐蚀性等, 已广泛应用于制作复合材料、结构材料等^[1-2]。但其固化过程中易产生裂纹, 且耐冲击性能较低, 韧性不足等缺点使其应用受到极大的限制。通过填

加不同的增强材料对 EP 进行增韧改性, 制成复合材料, 可有效提升其力学性能。玻璃纤维 (GF) 具有拉伸强度高、耐腐蚀性好等特点, GF 增强 EP (EP/GF) 复合材料是以 EP 为基体和 GF 为增强体组成的一类树脂基复合材料, 因具有低密度、高强度、良

通信作者: 高琦, 硕士, 工程师, 主要从事功能复合材料的研究

收稿日期: 2021-04-21

引用格式: 高琦, 赵文忠, 张晨晖, 等. 工艺方法和试验环境对 EP/GF 层合板力学性能影响 [J]. 工程塑料应用, 2021, 49(7): 65-70.

Gao Qi, Zhao Wenzhong, Zhang Chenhui, et al. Effects of process method and test environment on mechanical properties of EP/GF laminates[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(7): 65-70.

好的电绝缘性和耐腐蚀性能而广泛应用于航空航天、雷达天线罩、飞机制造等领域^[3-5]。

为了进一步提高树脂基复合材料的力学性能,诸多学者开展了相关研究,如张硕等^[6-8]对EP/GF复合材料的力学性能进行了详细研究;吴海亮^[9]则对EP含量对EP/GF复合材料力学性能的影响开展了论证分析;左祺等^[10-12]针对复合材料制件的结构特殊性,从多角度讨论分析了纤维铺层方式对树脂基复合材料力学性能的影响;N. B. V. L. Kumari等^[13-14]对树脂基复合材料的环境适应性开展了相关研究,冯振宇等^[15-17]在研究温度、湿度对复合材料力学性能影响的背景下,重点分析了湿热环境下树脂基复合材料力学性能降低的原因。

复合材料层合板是由多层预浸料铺贴压制而成,是复合材料制件的主要形式之一,其力学性能受预浸料铺覆层数、铺层角度、成型工艺等因素的影响,通过调整预浸料树脂含量、铺层参数及热压罐固化工艺等可实现复合材料层合板的可设计性。面对新一代雷达天线对树脂基复合材料高强度、耐冲击、高承载性及环境适应性强的迫切需求,笔者对新研制的国产高精度、高强EP/GF层合板的拉伸、压缩、层间剪切等力学性能进行了研究,分析了预浸料的铺层方式及树脂含量对EP/GF层合板力学性能的影响,讨论了温、湿度等环境条件对复合材料力学性能的影响,特别是湿热状态下复合材料力学性能下降明显的原因,为其应用于新一代雷达天线提供数据支撑。

1 实验部分

1.1 主要原料

GF薄层中温固化预浸料:EP含量分别为33%,38%,中国航空制造技术研究院。

1.2 主要仪器与设备

热压罐:J10-019型,西安江河机器制造有限公司;

电子拉力试验机:EMT305D型,深圳万测仪器设备有限公司;

引伸计:ZYS-2型,西安世纪测控技术研究所;

高低温试验箱:SANS GDX300型,深圳新三思计量技术有限公司;

恒温恒湿试验箱:HY-TH-225BH型,东莞市泓进检测仪器有限公司;

电阻应变计:TST120型,江苏泰斯特电子设备制造有限公司。

1.3 EP/GF层合板的制备

使用下料工装分别裁剪 0° 、 $+45^\circ$ 、 -45° 、 90° 的EP薄层中温固化预浸料,按设计要求将裁剪好的预浸料按照相应的顺序铺贴。用酒精清理平板模具,然后用棉纱沾700NC脱模剂在平板模具表面均匀涂抹2遍,每遍之间间隔15 min,晾干后在金属平板模具上进行预浸料的固化,工艺组合为模具/预浸料毛坯/隔离膜/透气毡/真空袋,真空袋四周用耐高温胶条进行密封,室温下抽真空至 -95 kPa 以下,随后在热压罐中进行加压升温固化。热压罐固化工艺的升温速率、固化温度、固化压力、加压时间等因素决定了层合板的固化质量,根据EP/GF复合材料的特点,试验的固化工艺为:室温下抽真空至 -0.095 MPa 以下,模具温度升至 30°C ,罐内压力加压至 $(0.40 \pm 0.02)\text{ MPa}$,以 $2.5^\circ\text{C}/\text{min}$ 的升温速度加热升温,当模具温度升至 130°C 后,保温保压 $(180 \pm 10)\text{ min}$,带压冷却至模具温度为 60°C 以下,卸压出罐。根据试验要求,共制作3块EP/GF层合板:

(1) 层合板1。

使用EP含量为38%的GF薄层中温固化预浸料,共铺20层,铺层顺序及角度为 $[0^\circ/+45^\circ/-45^\circ/90^\circ]_5$ 。

(2) 层合板2。

使用EP含量为33%的GF薄层中温固化预浸料,共铺20层,铺层顺序及角度为 $[0^\circ/+45^\circ/-45^\circ/90^\circ]_5$ 。

(3) 层合板3。

使用EP含量为33%的GF薄层中温固化预浸料,共铺20层,铺层顺序及角度为 $[0^\circ/90^\circ/0^\circ/+45^\circ/-45^\circ/90^\circ/0^\circ/+45^\circ/-45^\circ/90^\circ]_{18}$ 。

1.4 试样处理

根据相应测试标准规定,采用数控铣的方法将层合板加工成标准测试尺寸,并按照下列要求将测试试样做相应的前处理:

高温湿态(ETW)试样均按照HB 7401-1996的规定,在恒温恒湿试验箱中于温度 $(70 \pm 3)^\circ\text{C}$ 、相对湿度 $(95 \pm 5)\%$ 条件下湿热处理至吸湿饱和(质量至恒定值);

-50°C 低温干态(CTD)试样的处理在高低温试验箱 $(-70 \sim 350^\circ\text{C})$ 中保温5~8 min进行,采用液氮进行降温,并采用高精度控温器进行控温;

80°C 高温干态(ETD)试样的处理在高低温试

试验箱 ($-70 \sim 350^{\circ}\text{C}$) 中保温 $5 \sim 8 \text{ min}$ 进行,采用电阻丝加热,并采用高精度控温器进行控温;

室温干态 (RTD) 试样的处理在空气中进行,采用空调对室内温度进行控制。

1.5 性能测试

拉伸强度按照 GB/T 1447-2005 测试,试验加载速率为 2.0 mm/min ,有效测试试样不少于 5 个,测试结果取平均值;

面内压缩性能按照 GB/T 5258-2008 测试,试验加载速率为 1.3 mm/min ,有效测试试样不少于 5 个,测试结果取平均值;

层间剪切性能按照 JC/T 773-2010 测试,试验加载速率为 1.0 mm/min ,有效测试试样不少于 5 个,测试结果取平均值。

2 结果与讨论

2.1 EP 含量对 EP/GF 层合板力学性能的影响

固定热压罐固化温度、固化压力和固化时间,采用不同 EP 含量的复合材料预浸料制得的 EP/GF 层合板力学性能见表 1。

表 1 不同 EP 含量的 EP/GF 层合板的力学性能 MPa

试样 编号	拉伸强度		面内压缩强度		层间剪切强度	
	层合板 1	层合板 2	层合板 1	层合板 2	层合板 1	层合板 2
1 [#]	488.03	528.16	288.18	347.28	62.86	70.24
2 [#]	478.99	519.42	290.16	326.11	61.93	69.36
3 [#]	491.95	524.17	299.55	319.56	61.74	70.18
4 [#]	490.76	521.01	314.84	336.84	62.51	69.84
5 [#]	477.39	526.58	299.55	328.93	61.93	70.51
平均值	485.42	523.87	298.46	331.74	62.19	70.03

由表 1 可以看出,EP 含量为 38% 的层合板 1 的拉伸强度平均值、面内压缩强度平均值、层间剪切强度平均值分别为 485.42,298.46,62.19 MPa;EP 含量为 33% 的层合板 2 的拉伸强度平均值、面内压缩强度平均值、层间剪切强度平均值分别为 523.87,331.74,70.03 MPa,层合板 2 的三项力学性能均高于层合板 1,后者较前者分别提升 7.9%,11.2% 和 12.6%。表明 EP 含量对 EP/GF 层合板的力学性能有明显影响。EP/GF 层合板的界面层主要有 GF 层和 EP 层,EP 和 GF 的界面通过化学基团的相互作用及凹凸部位的机械结合作用来提高粘接强度。在预浸料面重确定的情况下,当 EP 含量过高时,导致 GF 含量低,界面面积减少,增强效果减弱,材料力学性能降低。理论上 GF 含量越高,复合材料的强度越大,但 EP 含量过低时,EP 无法完全浸润 GF,导致 GF 贫胶且粘接不牢,致使复合材料的力学性能降低。对于平纹织物复合材料,层与层间无

GF 连接,当 EP 含量过低时,容易发生层间破坏;当 EP 含量过高时,导致 GF 体积含量低,界面面积减小,复合材料在受到外部载荷作用时发生 EP 基体的破坏^[9],GF 的增强效果无法体现,致使复合材料层合板的力学性能降低。因此,通过控制预浸料的 EP 含量,可有效地提升复合材料层合板的综合力学性能。

2.2 铺层参数对 EP/GF 层合板力学性能的影响

使用 EP 含量为 33% 的 GF 薄层中温固化预浸料,固定热压罐的固化温度、固化压力和固化时间,采用不同铺层参数制备的 EP/GF 层合板的力学性能见表 2。

表 2 不同铺层参数的 EP/GF 层合板的力学性能 MPa

试样 编号	拉伸强度		面内压缩强度		层间剪切强度	
	层合板 2	层合板 3	层合板 2	层合板 3	层合板 2	层合板 3
1 [#]	528.16	598.91	347.28	433.78	70.24	63.63
2 [#]	519.42	640.98	326.11	392.9	69.36	64.19
3 [#]	524.17	616.79	319.56	411.92	70.18	64.50
4 [#]	521.01	611.06	336.84	417.47	69.84	63.86
5 [#]	526.58	603.34	328.93	410.11	70.51	64.02
平均值	523.87	614.22	331.74	413.24	70.03	64.04

由表 2 可以看出,采用 $[0^{\circ}/+45^{\circ}/-45^{\circ}/90^{\circ}]_s$ 铺层参数的层合板 2 的拉伸强度平均值、面内压缩强度平均值、层间剪切强度平均值分别为 523.87,331.74,70.03 MPa,采用 $[0^{\circ}/90^{\circ}/0^{\circ}/+45^{\circ}/-45^{\circ}/90^{\circ}/0^{\circ}/+45^{\circ}/-45^{\circ}/90^{\circ}]_s$ 铺层参数的层合板 3 的拉伸强度平均值、面内压缩强度平均值、层间剪切强度平均值分别为 614.22,413.24,64.04 MPa。相比采用 $[0^{\circ}/+45^{\circ}/-45^{\circ}/90^{\circ}]_s$ 铺层参数的层合板 2,采用对称铺层的 $[0^{\circ}/90^{\circ}/0^{\circ}/+45^{\circ}/-45^{\circ}/90^{\circ}/0^{\circ}/+45^{\circ}/-45^{\circ}/90^{\circ}]_s$ 铺层参数的层合板 3 的拉伸强度、面内压缩强度均显著提升,分别提升 17.2% 和 24.6%,而层间剪切强度则降低 8.6%。层合板在受到外力作用时,拉伸和面内压缩的载荷主要由 $0^{\circ}, 90^{\circ}$ 方向的纤维承担,因此层合板 3 通过增加 $0^{\circ}, 90^{\circ}$ 的纤维铺层,实现了拉伸强度及面内压缩强度的提升;复合材料层合板抵抗层间应力的能力较差,在外部集中载荷作用下,易发生层间分层;在层合板 $0^{\circ}, +45^{\circ}, -45^{\circ}, 90^{\circ}$ 的 GF 各向分布均匀的情况下,EP 基体可以把外部集中载荷作用传递给各向 GF,GF 把集中载荷传递到层合板各个部位,分散外部集中载荷,能够有效阻止分层扩展,使层合板具有更优异的稳定性及更高的层间剪切强度。层合板 2 的 GF 各向分布均匀,使之具有更高的层间剪切强度。

2.3 环境试验条件对EP/GF层合板拉伸性能的影响

层合板3在室温干态、-50℃低温干态、80℃高温干态、高温湿态四种不同环境条件下的拉伸强度和拉伸弹性模量如图1所示。

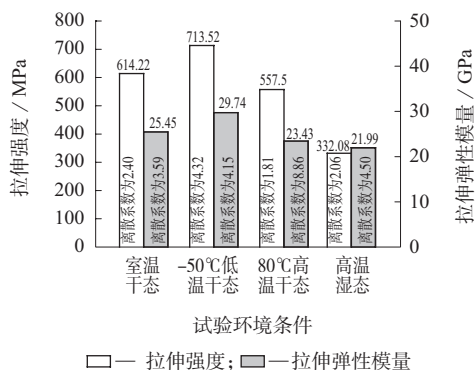


图1 不同环境试验条件下层合板3的拉伸性能

由图1可知,在-50℃低温干态下,层合板3的拉伸强度高于室温干态下的拉伸强度;在80℃高温干态下,层合板3的拉伸强度较室温干态的拉伸强度下降9.2%;经高温湿态处理后,层合板3的拉伸强度相比较室温干态条件下下降46%。这是由于在-50℃低温干态下EP和GF的结合度提升,GF间载荷传递能力增强,导致层合板3的拉伸强度升高;80℃高温干态降低了EP基体的强度,使EP基体传递应力的能力下降,导致复合材料层合板3的拉伸强度下降;高温湿态处理使部分水分子在EP基体内渗透和扩散,水分子容易与GF表面的大量的硅羟基等结合,一定程度破坏了GF与EP基体的界面,同时水分的塑化作用也可能降低了EP的强度,从而使EP基体传递应力的能力降低,导致层合板3的承载能力显著下降,说明复合材料拉伸强度对湿热环境更加敏感^[18]。拉伸弹性模量反映了复合材料在初始载荷作用下的抗变形能力,其对温度的依赖性与拉伸强度类似。这反映出随着EP及GF在低温条件下分子链无序运动能力降低到高温条件下热运动速率提升,材料的拉伸弹性模量由高到低的下降过程,特别是EP基体热性能和力学性能等对环境温、湿度的依赖性,导致复合材料层合板的拉伸性能对环境温度、湿度的敏感性。此外,拉伸强度和拉伸弹性模量的离散系数均小于10%,说明复合材料层合板的拉伸性能具有良好的稳定性。

2.4 环境试验条件对EP/GF层合板面内压缩性能的影响

面内压缩性能试验主要考察复合材料层合板

在压缩载荷作用下的承载能力。层合板3在室温干态、-50℃低温干态、80℃高温干态、高温湿态四种不同环境条件下的面内压缩强度和面内压缩弹性模量如图2所示。

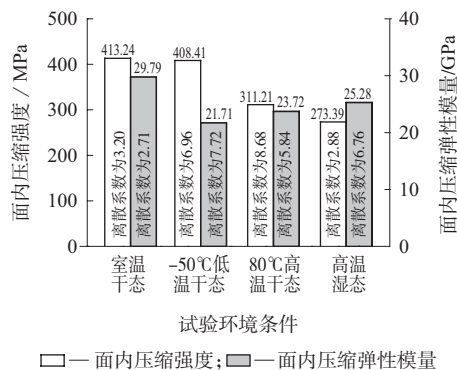


图2 不同环境试验条件下层合板3的面内压缩性能

由图2可看出,相较于室温干态,-50℃低温干态条件下的面内压缩强度无明显变化,80℃高温干态条件下的面内压缩强度下降24.7%,高温湿态条件下的面内压缩强度下降33.8%。有研究表明^[14]基体对纤维的束缚作用赋予复合材料较高的压缩性能,树脂基体的强度及基体与纤维间界面粘接强度对整体压缩性能的影响显著。80℃高温干态条件下层合板的面内压缩强度下降显著是因为高温环境降低了EP基体的强度,使EP基体对GF的束缚能力和传递应力的能力下降,导致EP/GF层合板的压缩强度下降;此外,湿热处理一定程度上破坏了EP与GF之间的界面,同时水分子对EP基体的塑化作用降低了EP的强度,从而降低了EP基体对GF的束缚和传递应力的作用,导致层合板的承压能力下降^[9]。面内压缩弹性模量主要考察复合材料在初始压缩载荷作用下的抗压缩变形的能力,试验数据表明压缩弹性模量受温度和湿度影响不明显。此外,面内压缩强度和面内压缩弹性模量的离散系数均小于10%,说明复合材料层合板的面内压缩性能具有良好的稳定性。

2.5 环境试验条件对EP/GF层合板层间剪切性能的影响

层间剪切性能试验主要评估复合材料层合板在弯曲载荷作用下面间的剪切性能。层合板在室温干态、-50℃低温干态、80℃高温干态、高温湿态四种不同环境条件下的层间剪切强度如图3所示。

由图3可看出,相较于室温干态,-50℃低温干态条件下的层间剪切强度提高23.1%,原因是高分子聚合物在低温环境作用下,EP基体收缩,分子

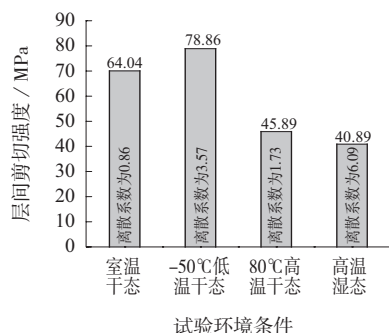


图3 不同环境试验条件下的层间剪切性能

间距变小^[20],表现为EP基体强度增加,致使EP/GF层合板3的层间剪切强度提升;80℃高温干态条件下的层间剪切强度下降28.3%;高温湿态条件下的层间剪切强度下降36.1%,因为材料表面的吸湿水量在很大程度上决定了复合材料的层间剪切性能,复合材料界面受吸湿水影响较大,水分子进入EP基体后通过溶胀作用使基体发生增塑,为链段运动提供了所需的自由体积,使EP性能降低。EP吸湿后会发生膨胀,使得EP/GF界面上产生剪切湿应力,使得界面性能下降,最终导致层合板的层间剪切强度下降明显。

3 结论

针对新研制的国产GF增强EP复合材料进行了力学性能试验,深入研究了EP含量、铺层参数以及试验环境对复合材料层合板力学性能的影响,得到如下结论:

(1) 在铺层参数相同的情况下,相较于层合板1,层合板2通过降低EP含量使其拉伸强度、面内压缩强度和层间剪切强度分别提升7.9%,11.2%和12.6%,表明EP含量对复合材料层合板力学性能的影响明显,控制预浸料的EP含量是提升复合材料层合板力学性能的重要手段。

(2) 在预浸料EP含量相同的情况下,层合板3通过增加0°,90°的GF铺层使拉伸强度及面内压缩强度分别提升17.2%和24.6%,层间剪切强度下降8.6%;层合板2各向GF分布均匀,EP基体可以把外部集中载荷作用传递给各向GF,分散外部集中载荷,能够有效阻止分层扩展,使层合板具有更优异的稳定性及更高的层间剪切强度。

(3) 在室温干态、-50℃低温干态、80℃高温干态和高温湿态四种环境测试条件下,对复合材料层合板的力学性能进行测试,结果表明,层合板3的力学性能受温度、湿度影响较大,在高温湿态条件下,层合板的拉伸强度、面内压缩强度、层间剪切强度分

别下降46%,33.8%和36.1%。

参考文献

- [1] 秦小山,冯静,王仁舒,等.纤维增强环氧树脂复合材料性能研究进展[J].山东化工,2019(5):44-45.
Qin Xiaoshan, Feng Jing, Wang Renshu, et al. Research progress on properties of fiber reinforced epoxy resin composites[J]. Shandong Chemical Industry, 2019(5):44-45.
- [2] 魏文康,虞鑫海,李远波.高性能环氧树脂胶粘剂的研制[J].中国胶粘剂,2019,28(5):18-20,30.
Wei Wenkang, Yu Xinhai, Li Yuanbo. Preparation of high performance epoxy resin adhesives[J]. China Adhesives, 2019,28(5):18-20,30.
- [3] Cheng Zheng, Zhang Lingjie, Jiang Chan, et al. Aramid fiber with excellent interfacial properties suitable for resin composite in a wide polarity range[J]. Chemical Engineering Journal, 2018,347:483-492.
- [4] Sathishkumar T P, Satheeskumar S, Naveen J. Glass fiber-reinforced polymer composites—A review[J]. Journal of Reinforced Plastics & Composites, 2014,33(13):1258-1275.
- [5] 宋来福,杨彩云.树脂基复合材料在雷达天线罩上的应用[J].上海纺织科技,2018,46(1):1-3,7.
Song Laifu, Yang Caiyun. Application of resin based composites in radar radome[J]. Shanghai Textile Science & Technology, 2018,46(1):1-3,7.
- [6] 张硕,姚宁,吴继平,等.E玻璃纤维增强环氧树脂复合材料的力学性能[J].电工材料,2010(1):11-14,19.
Zhang Shuo, Yao Ning, Wu Jiping, et al. Mechanical properties of glass fiber reinforced epoxy resin composite material[J]. Electrical Engineering Materials, 2016(1):11-14,19.
- [7] 王启强,彭龙贵.玻璃纤维增强环氧树脂复合材料的力学性能研究[J].化工时刊,2016,30(7):4-7.
Wang Qiqiang, Peng Longgui. Mechanical Properties of Glass Fiber Reinforced Epoxy Resin Composites[J]. Chemical Industry Time, 2016,30(7):4-7.
- [8] 刘家余,王双双,于晓燕.玻璃纤维增强环氧树脂基复合材料的性能研究[J].胶体与聚合物,2017(1):20-21,31.
Liu Jiayu, Wang Shuangshuang, Yu Xiaoyan. Properties of epoxy resin toughened by adding fiberglass[J]. Chinese Journal of Colloid & Polymer, 2017(1):20-21,31.
- [9] 吴海亮.树脂含量对玻璃纤维增强环氧树脂复合材料力学性能的影响[J].天津科技,2017,44(7):21-22,26.
Wu Hailiang. Effect of resin content on mechanical properties of glass fiber reinforced epoxy resin composites[J]. Tianjin Science and Technology, 2017,44(7):21-22,26.
- [10] 左祺,费建武,王春红,等.铺层角度对苧麻纤维复合材料性能的影响[J].上海纺织科技,2019,47(10):71-74,81.
Zuo Qi, Fei Jianwu, Wang Chunhong, et al. Effect of layup angle on ramie fiber reinforced composites[J]. Shanghai Textile Science

- & Technology, 2019, 47(10): 71–74, 81.
- [11] 李涛, 陈光耀, 闫李昕, 等. 不同铺层角度编织复合材料力学性能的试验研究[J]. 数字制造科学, 2018(4): 258–262, 274.
Li Tao, Chen Guangyao, Yan Li Xin, et al. Influence of ply angle on mechanical properties of woven composites[J]. Digital Manufacturing Science, 2018(4): 258–262, 274.
- [12] 赖家美, 鄢冬冬, 刘榆华, 等. VARTM 工艺铺层取向对复合材料力学性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2015, 43(1): 43–47.
Lai Jiamei, Yan Dongdong, Liu Yuhua, et al. Influence of different ply orientations on mechanical properties of composite with VARTM technique[J]. Engineering Plastics Application, 2015, 43(1): 43–47.
- [13] Kumari N B V L, Mehar A, Abdulrahman M, et al. Performance analysis of ply orientation in composite laminates[J]. Materials Today: Proceedings, 2018, 5(2): 5984–5992.
- [14] 宋健, 温卫东. 不同温度下树脂基复合材料层板力学性能试验[J]. 航空动力学报, 2016, 31(4): 1006–1018.
Song Jian, Wen Weidong. Experiment on mechanical properties of resin matrix composites laminates under various temperatures[J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(4): 1006–1018.
- [15] 冯振宇, 解江, 迟琪琳, 等. 湿热环境对复合材料单向板拉伸性能的影响[J]. 高分子材料科学与工程, 2018, 34(11): 37–43.
Feng Zhenyu, Xie Jiang, Chi Qilin, et al. Influence of hygrothermal environment on tensile property of unidirectional composite laminates[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2018, 34(11): 37–43.
- [16] 冯青, 李敏, 顾轶卓, 等. 不同湿热条件下碳纤维/环氧复合材料湿热性能实验研究[J]. 复合材料学报, 2010, 27(6): 16–20.
Feng Qing, Li Min, Gu Yizhuo, et al. Experimental research on hygrothermal properties of carbon fiber / epoxy resin composite under different hygrothermal conditions[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2010, 27(6): 16–20.
- [17] 王迎芬, 彭公秋, 李国丽, 等. T800H 碳纤维表面特性及 T800H / BA9918 复合材料湿热性能研究[J]. 材料科学与工艺, 2015, 23(4): 115–120.
Wang Yingfen, Peng Gongqiu, Li Guoli, et al. Study on surface characteristic of T800H carbon fiber and hygrothermal performance of T800H / BA9918 composite[J]. Materials Science and Technology, 2015, 23(4): 115–120.
- [18] 张建鹏. 玻纤对湿热环境下的环氧复合材料拉伸性能的影响[J]. 玻璃纤维, 2019(2): 14–17, 21.
Zhang Jianpeng. Effect of glass fibers on tensile properties of epoxy composites in hygrothermal environment[J]. Fiber Glass, 2019(2): 14–17, 21.
- [19] 王翔, 贾普荣, 陶春虎, 等. 湿热环境对 AC318 / S₆C₁₀-800 玻璃纤维复合材料压缩力学性能影响分析[J]. 塑料工业, 2020, 48(S1): 136–140, 161.
Wang Xiang, Jia Purong, Tao Chunhu, et al. Effect of hygrothermal environment on compressive properties of AC318 / S₆C₁₀-800 composites[J]. China Plastics Industry, 2020, 48(S1): 136–140, 161.
- [20] 罗健, 石建军, 贾彬, 等. 低温暴露对碳纤维 / 环氧树脂复合材料拉伸力学性能的影响[J]. 复合材料学报, 2020, 37(12): 3091–3101.
Luo Jian, Shi Jianjun, Jia Bin, et al. Effect of low temperature exposure on tensile mechanical properties of carbon fiber / epoxy composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2020, 37(12): 3091–3101.

优惠销售中国工程塑料复合材料技术研讨会《论文集》及论文集光盘

中国合成树脂供销协会加工与应用分会为了配合 2000 ~ 2019 年先后召开的中国工程塑料复合材料技术研讨会, 共编辑、出版了 20 本《论文集》。其内容涉及工程塑料及通用塑料的合成与改性、加工、应用、测试、模具、设备新技术, 以及文献综述、评论等, 突出了我国工程塑料行业发展规划、热点分析。现尚有部分《论文集》, 以及应广大读者要求加工制作的论文集光盘, 现以优惠价格 (含邮费) 销售, 欢迎订阅。

1. 2004 ~ 2019 年中国工程塑料复合材料技术研讨会《论文集》, 优惠价 400 元 / 套。

2. 2000 ~ 2019 年中国工程塑料复合材料技术研讨会论文集光盘, 优惠价 300 元 / 盘。本光盘除收录 2000 ~ 2019 年 20 本《论文集》的全部内容外, 还包括约 3 300 人次的会议代表通讯录。

邮局汇款

收款地址: 山东济南市天桥区田庄东路 3 号

收款单位: 《工程塑料应用》编辑部

邮 编: 250031

电 话: (0531)85878223 85878057 85878278

传 真: (0531)85947355

银行汇款

户 名: 山东非金属材料研究所

开户银行: 济南市工商银行经十一路支行

帐 号: 1602001229014425546

网上订购: <http://www.epa1973.com>