

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.07.010

纤维同质化结构/防热一体化复合材料的制备与性能

朱培源, 高守臻, 孔国强, 李大勇, 王磊, 黄振强, 徐国芬, 安振河

(山东非金属材料研究所, 济南 250031)

摘要: 高超声速飞行器对材料的结构承载和防热功能提出更高的要求, 故而需要一种兼具承载和防热功能的材料。为此, 采用模压成型工艺制备了碳纤维(CF)增强苯并噁嗪(BZ)-聚酰亚胺(PI)(CF/BZ-PI)纤维同质化结构/防热一体化层合复合材料, 其中CF/BZ作为防热层, CF/PI作为结构层。研究了成型方式和固化工艺对CF/BZ-PI复合材料力学性能的影响, 并对其微观结构、断裂形貌、热稳定性和烧蚀性能进行测试与表征。结果表明, 对CF/PI预浸料进行预热处理, 可以实现BZ树脂与PI树脂共固化成型, 所制备的CF/BZ-PI复合材料综合力学性能最优, 其拉伸强度、弯曲强度、层间剪切强度分别达到628.7, 618.5, 35.24 MPa, 显著优于CF/BZ复合材料, 其断裂形貌也证实了CF/PI层的承载作用。此外, CF/BZ-PI复合材料的起始热分解温度为389 °C, 800 °C下失重仅11.8%, 展现出良好的热稳定性。同时, CF/BZ-PI复合材料的质量烧蚀率为0.121 g/s, 线烧蚀率为0.109 mm/s, 具有较好的抗烧蚀能力。所制备的CF/BZ-PI复合材料在力学性能、热稳定性和烧蚀性能方面表现优异, 可作为结构/防热一体化复合材料使用。

关键词: 结构/防热一体化; 聚酰亚胺; 苯并噁嗪; 碳纤维; 共固化成型

中图分类号: TQ322.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)07-0063-06

Preparation and properties of fiber homogenization structure/thermal protection integrated composite

ZHU Peiyuan, GAO Shouzheng, KONG Guoqiang, LI Dayong, WANG Lei, HUANG Zhenqiang, XU Guofen, AN Zhenhe

(Shandong Institute of Non-Metallic Materials, Jinan 250031, China)

Abstract : The development of hypersonic aircraft required higher requirements for the structural load-bearing and thermal protection functions of materials, and the materials with load-bearing and thermal protection functions are needed. For this purpose, a carbon fiber (CF) reinforced benzoxazine (BZ)-polyimide (PI)(CF/BZ-PI) fiber homogeneous structure/thermal protection integrated laminated composite was prepared using compression molding technology, with CF/BZ as the thermal protection layer and CF/PI as the structural layer. The influences of molding methods and curing processes on the mechanical properties of CF/BZ-PI composites were studied, and their microstructure, fracture morphology, thermal stability, and ablation performance were tested and characterized. The results show that pre-heating treatment of CF/PI prepreg can achieve co-curing of BZ resin and PI resin. The CF/BZ-PI composite material prepared has the best comprehensive mechanical properties, with tensile strength, bending strength, and interlaminar shear strength reaching 628.7, 618.5 MPa and 35.24 MPa, respectively, significantly better than CF/BZ composite material. Its fracture morphology also confirms the bearing capacity of the CF/PI layer. In addition, the thermal decomposition starting temperature of CF/BZ-PI composite is 389 °C, and the weight loss at 800 °C is only 11.8%, demonstrating good thermal stability. Meanwhile, the mass ablation rate of CF/BZ-PI composite is 0.121 g/s, and the linear ablation rate is 0.109 mm/s, indicating good resistance to ablation. In summary, the prepared CF/BZ-PI composite exhibits excellent mechanical properties, thermal stability, and ablation performance, and can be used as a structural/thermal protection integrated composite material.

Keywords : structural and thermal protection integration ; polyimide ; benzoxazine ; carbon fiber ; co-curing molding

近年来, 航空航天技术的发展以及日益复杂的军事环境对材料的热防护提出了更高的要求, 飞行

器在高超声速飞行时的热防护问题, 已经成为航空航天结构设计中的关键技术难题^[1-3], 这往往需要依

通信作者: 高守臻, 研究员, 研究方向为热防护材料和聚酰亚胺复合材料

收稿日期: 2025-04-23

引用格式: 朱培源, 高守臻, 孔国强, 等. 纤维同质化结构/防热一体化复合材料的制备与性能[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(7): 63-68.

ZHU Peiyuan, GAO Shouzheng, KONG Guoqiang, et al. Preparation and properties of fiber homogenization structure/thermal protection integrated composite[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(7): 63-68.

托热防护系统与烧蚀材料来实现。结构/隔热一体化材料创新性地将隔热功能与承载结构融为一体,且其黏结性能和力学性能良好,在起到结构承载作用的同时拥有良好的烧蚀性能^[4],与传统热防护系统相比可以起到减重的作用,还能够改善传统热防护系统的固有弊端。目前针对结构/隔热一体化材料的研究多数为金属材料 and 陶瓷基复合材料,很少有使用两种树脂基复合材料制备结构/隔热一体化复合材料的研究。树脂基复合材料相比金属材料密度更低,具有高比强度,可以起到更好的减重效果,且与陶瓷基复合材料相比具有更好的韧性,在航空航天领域有不可取代的优势。

酚醛树脂具有残炭率高、成本低、密度低的优势,常被用于飞行器的烧蚀材料^[4-5],但酚醛树脂内部结构不够致密,在固化的过程中会有小分子物质释放,导致孔隙率升高,影响制品的力学性能^[5]。苯并噁嗪(BZ)树脂是一种新型的酚醛树脂,固化时没有小分子释放,微观结构更加致密,综合力学性能更加优秀,并且BZ树脂具有耐热性好、玻璃化转变温度高、残炭率高和阻燃性能良好等优势,在电子电气以及航空航天等领域已有大量应用^[6-11]。BZ树脂是一种能够替代传统酚醛树脂的优秀烧蚀材料。然而,BZ树脂自身的结构承载能力较为有限,目前只能作为传统热防护系统的烧蚀材料使用。若将其作为附加的烧蚀隔热层,不仅会导致黏结连接性能降低、构件总重量增加,还会导致材料综合力学性能下降,给飞行器的运行增加了额外的安全隐患^[12-13]。聚酰亚胺(PI)树脂具有优异的高温力学性能和高温热稳定性能,可在400℃下长期使用,550℃下短期使用,并且PI树脂还具有良好的耐老化性能和耐腐蚀性^[14-15],作为结构材料在航空航天领域有广泛的应用^[16]。

笔者选用BZ和PI两种树脂,使用碳纤维(CF)作为增强纤维,制备CF增强BZ-PI层合复合材料(CF/BZ-PI),可作为纤维同质化结构/隔热一体化材料使用,材料中的CF/BZ层和CF/PI层分别作为一体化复合材料的隔热部分和承载部分,两层的增强纤维种类相同,在承受外力时变形程度接近,与异种增强纤维相比,纤维同质化结构/隔热一体化材料具有更好的综合力学性能。探究了不同成型方式和固化工艺对一体化复合材料力学性能的影响,并对其耐高温性能和热防护能力进行研究。

1 实验部分

1.1 主要原材料

CF平纹正交布:SYT55S-12K,连云港中复神鹰碳纤维有限公司;

BZ树脂:SL-68,自制;

PI树脂:SL-32,自制;

无水乙醇:分析纯,上海国药集团化学试剂有限公司;

丙酮:分析纯,天津富宇精细化工有限公司。

1.2 主要仪器及设备

液压机:P-V-50-3RT-PCD,磐石油压工业(安徽)有限公司;

鼓风干燥箱:FXB-101-2,上海树立仪器仪表有限公司;

热重(TG)分析仪:STA449,德国耐驰集团;

傅里叶变换红外光谱(FTIR)仪:Magna750型,美国Nicolet公司;

电子万能试验机:RGR-10A,深圳市瑞格尔仪器有限公司;

扫描电子显微镜(SEM):GeminiSEM300,德国蔡司集团;

OA烧蚀试验机:YS型,中国航天四十四所。

1.3 试样制备

1.3.1 预浸料的制备

将BZ树脂溶于丙酮中,得到BZ树脂质量占总溶液质量50%的溶液。采用溶液法制备CF/BZ预浸料,用刮板将BZ丙酮溶液在CF平纹正交布上均匀刮涂,BZ丙酮溶液与CF布的质量比为4:3,于室温下放置24 h使丙酮挥发,得到CF/BZ预浸料,面密度为330 g/m²,BZ树脂和CF的质量比为2:3。采用同样方法制备CF/PI预浸料,使用乙醇作为溶剂,PI树脂质量占PI乙醇溶液质量的50%,PI乙醇溶液与CF布的质量比为4:3,于室温下放置48 h使乙醇挥发,得到CF/PI预浸料,面密度为330 g/m²,PI树脂和CF的质量比为2:3。

1.3.2 CF/BZ复合材料和CF/PI复合材料的制备

采用模压成型工艺,压力3 MPa,将10层CF/BZ预浸料在模具中铺层,然后按照BZ树脂的固化方式(在160℃下保持1 h,再升至200℃保持1 h,最后升至260℃保持2 h)固化,得到CF/BZ复合材料(CF/BZ-1);将10层CF/PI预浸料在模具中铺层,然后按照PI树脂的固化方式(升至320℃保持4 h)固化,得

到CF/PI复合材料(CF/PI-1)。

1.3.3 CF/BZ-PI一体化层合复合材料的制备

如图1所示,CF/BZ-PI一体化层合复合材料由4层CF/PI预浸料和6层CF/BZ预浸料依次铺层组成,同样采用模压成型工艺制备。图2、图3为CF/BZ-PI复合材料制备的工艺流程。其中,CF/BZ-PI-1的制备流程为先按照PI树脂的固化方式固化4层CF/PI预浸料,然后铺层6层CF/BZ预浸料,按照BZ树脂的固化方式进行二次固化;CF/BZ-PI-2的制备流程为将10层预浸料按序铺层,按照PI树脂的固化工艺固化;CF/BZ-PI-3的制备流程为先将CF/PI预浸料在鼓风干燥箱中进行预处理(200℃,60 min),然后将10层预浸料按序铺层,最后按照PI树脂的固化工艺进行固化。

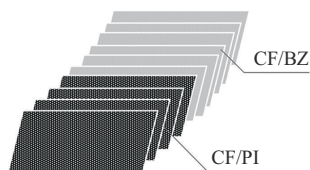


图1 一体化复合材料铺层示意图

Fig. 1 Schematic diagram of integrated composite material layering

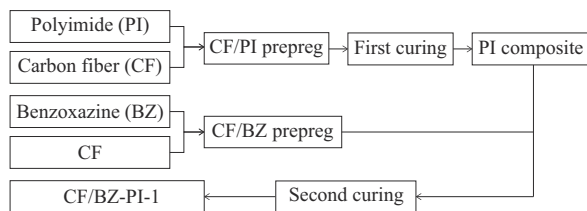


图2 二次固化成型工艺流程

Fig. 2 Secondary curing process

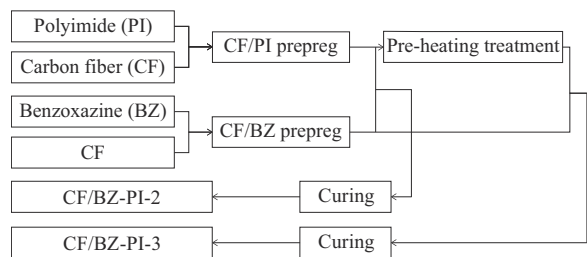


图3 一体化成型工艺流程

Fig. 3 Integrated molding process

1.4 测试与表征

(1) FTIR 表征: FTIR 仪测试波数为 500~4 000 cm^{-1} , 扫描次数为 8 次, 分辨率为 4 cm^{-1} 。

(2) 力学性能测试: 拉伸性能按照 GB/T 1447-2005 进行测试, 加载速度为 2 mm/min, 测试试样采用 I 型试样, 形状为哑铃型, 总长 180 mm, 标距 50 mm, 平行段宽度 10 mm, 端头宽度 20 mm, 厚度 2

mm; 弯曲性能按照 GB/T 1449-2005 进行测试, 加载速度为 2 mm/min, 跨距 32 mm, 试样尺寸为 45 mm×15 mm×2 mm; 层间剪切性能按照 JC/T 773-2010 进行测试, 加载速度为 1 mm/min, 跨距 10 mm, 压头半径 5 mm, 试样尺寸为 20 mm×10 mm×2 mm。

(3) SEM 表征: 取拉伸和弯曲断裂后的试样, 对断面的表面进行喷金处理, 通过 SEM 观察断面的微观形貌。

(4) TG 分析: 在 N_2 气氛下使用 TG 分析仪测试样品的热稳定性, 升温速率为 10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$, 测试温度范围为 25~800 $^{\circ}\text{C}$ 。

(5) 烧蚀性能测试: 按照 GJB 323A-1996 测试线烧蚀率和质量烧蚀率, 试样标准尺寸为 $\Phi 30 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$, 烧蚀时间为 20 s。

2 结果与讨论

2.1 力学性能分析

图4为CF/BZ-PI复合材料以及CF/BZ, CF/PI复合材料力学性能的测试结果。综合来看, CF/BZ-PI复合材料的拉伸性能和弯曲性能介于CF/BZ复合材料和CF/PI复合材料之间, 层间剪切强度与CF/BZ复合材料接近。增强体同为CF, CF/PI复合材料的力学性能优于CF/BZ复合材料。可见, 在CF/BZ-PI复合材料中CF/PI层起到更多承载的作用, 当CF/BZ-PI复合材料受到外界载荷时, PI部分使材料整体的强度更高, 需要更高的力才能使试样破坏。CF/BZ-PI-2和CF/BZ-PI-3复合材料的综合力学性能相比CF/BZ复合材料有明显的提高。一体化复合材料中CF/BZ-PI-3具有最好的综合力学性能, 拉伸强度为 628.7 MPa, 弯曲强度为 618.5 MPa, 层间剪切强度为 35.24 MPa。

成型方式和固化工艺会影响CF/BZ-PI复合材料的力学性能。比较CF/BZ-PI-1和CF/BZ-PI-2可知, 一体化成型得到的复合材料具有更好的力学性能, 与二次固化成型相比, 其弯曲强度和层间剪切强度得到显著提升, 拉伸强度也有少量提升。二次固化成型中, BZ树脂固化时PI树脂已经完成固化, 两种树脂之间的结合较弱, 导致复合材料在界面处力学性能较差, 在承受外界载荷时更容易破坏; 而一体化成型过程中, 两种树脂同时固化, 具有更强的结合力, 在承受外界载荷时具有更高的强度, 所以弯曲强度和层间剪切强度显著提高。

比较CF/BZ-PI-2和CF/BZ-PI-3可知, 将CF/PI

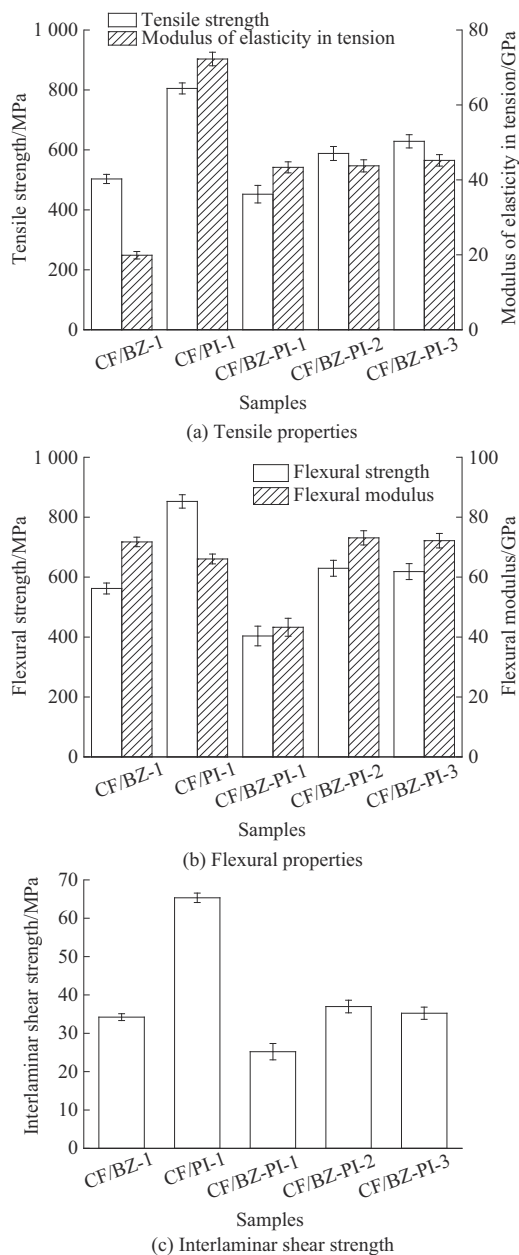


图4 复合材料的力学性能

Fig. 4 Mechanical properties of composites

预浸料进行预热处理会使成型复合材料的拉伸性能提高,在固化过程中BZ树脂的凝胶时间短于PI树脂,加压时BZ树脂已经基本凝胶,流动性差,而PI树脂在此温度下仍有一定的流动性,可在成型压力的作用下流入CF/BZ预浸料中,导致界面处的成分不均匀,拉伸性能降低。CF/PI预浸料的预热处理使PI树脂预凝胶,减少了在加压时的树脂流动,使拉伸性能得到提升,但流动性降低导致两部分树脂结合强度减弱,使复合材料的弯曲性能和层间剪切强度降低,但降低幅度很小。

2.2 FTIR 分析

为了研究CF/BZ-PI-3复合材料中两种树脂是否都发生了固化反应,测试并比较了CF/BZ-PI-3复合材料两部分界面处的树脂固化物和PI固化物、BZ固化物的FTIR谱图,如图5所示。在PI的FTIR谱图中,1782 cm^{-1} 处为酰亚胺环的不对称伸缩振动峰,1711 cm^{-1} 处为酰亚胺环的对称伸缩振动峰,1360 cm^{-1} 处为酰亚胺环中C—N的伸缩振动峰,1086 cm^{-1} 和721 cm^{-1} 处为C=O的弯曲振动峰^[17],说明PI固化物中含有酰亚胺结构,完成了PI树脂的固化。在BZ红外光谱的FTIR谱图中,931 cm^{-1} 处为噁嗪环的特征振动吸收峰,1256 cm^{-1} 处为C—O—C的不对称伸缩振动峰,1009 cm^{-1} 处为C—O—C的对称伸缩振动峰,1152 cm^{-1} 处为C—N—C的对称伸缩振动峰^[18],说明BZ固化物中含有噁嗪环结构,完成了BZ树脂的固化。对照3种材料的FTIR谱图,可以发现CF/BZ-PI-3的谱图中包含了PI和BZ对应的特征峰,说明CF/BZ-PI-3中的PI树脂和BZ树脂都完成了相应的固化,且在界面处两种树脂的混合区域中PI和BZ也都完成固化,实现了PI和BZ的共固化。

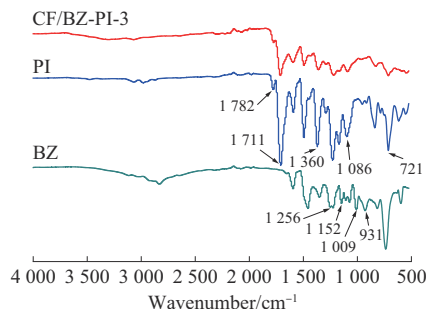


图5 复合材料的FTIR谱图

Fig. 5 FTIR spectra of composites

2.3 CF/BZ-PI复合材料的断裂形貌分析

图6为CF/BZ-PI-3侧面及拉伸后断面的微观形貌,试样上方为CF/BZ层,下方为CF/PI层。试样的CF/BZ层断裂程度更大,发生了纤维的断裂、树脂的破裂以及纤维和树脂之间的断裂,断裂类型为脆性断裂;试样的CF/PI层断裂程度较小,树脂的破裂程度较轻,同时也发生了纤维的断裂以及树脂和纤维间的断裂;两种材料的界面处出现了分层现象,并有少量的纤维发生断裂。在拉伸时,试样的两部分同时承受拉伸作用力,在断裂前两部分一起变形,变形量相同,CF/BZ层由于拉伸弹性模量较低,产生同样变形量时能承受的应力较低,同时其拉伸强度

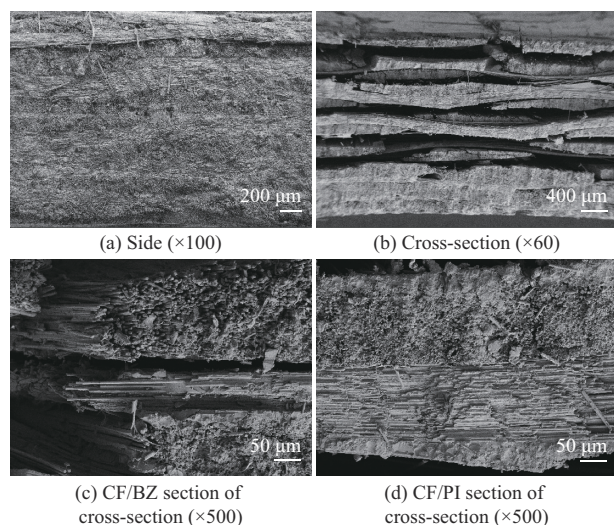


图6 CF/BZ-PI-3 侧面及拉伸断裂后断面的SEM图

Fig. 6 SEM images of side and cross-section after tensile fracture of CF/BZ-PI-3

也更低,所以CF/BZ层断裂处的破坏程度较大,并且在内部出现了分层的现象;而CF/PI层的拉伸强度和拉伸弹性模量更大,抗拉伸的能力更强,并且在断裂前承受的拉力更小,所以断裂处的破坏程度也更小。两部分的界面是材料的薄弱处,在拉伸过程中界面处发生了分层现象。

图7为CF/BZ-PI-3弯曲断裂后断面的微观形貌,试样上方为CF/PI层,下方为CF/BZ层。弯曲时CF/BZ层的纤维层间发生了断裂,出现一定的分层现象;CF/PI层基本没有发生断裂,只有靠近界面的部分出现了少量的裂纹。这由于CF/PI层的弯曲强度更高,而且弯曲模量较高,弯曲时变形量小,在弯

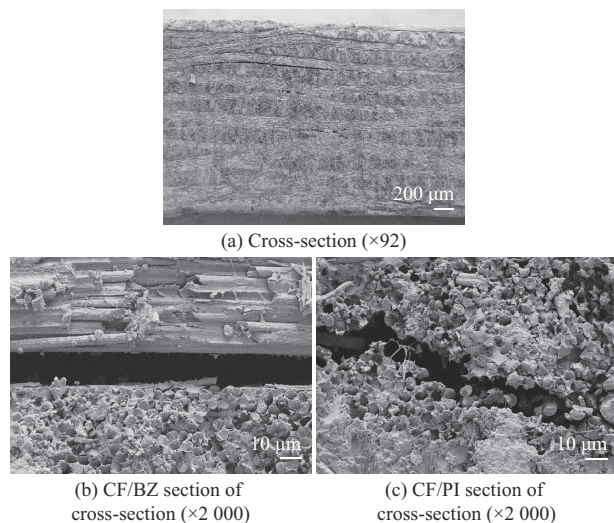


图7 CF/BZ-PI-3 弯曲断裂后的断面SEM图

Fig. 7 Cross-sectional SEM images after bending fracture of CF/BZ-PI-3

曲变形时外界载荷没有达到断裂的临界值,几乎没有发生断裂;而CF/BZ层的变形量大,且弯曲强度更低,所以CF/BZ层会先断裂。由于CF/BZ层和CF/PI层分界面间的层间结合力低于各自内部的层间结合力,弯曲断裂时试样在两部分的界面处出现了分层的现象。

2.4 CF/BZ-PI复合材料的热稳定性分析

图8为CF/BZ-PI-3的TG曲线。CF/PI复合材料的起始热分解温度(失重5%时)为436℃,800℃失重率为18.5%;CF/BZ复合材料的起始热分解温度为371℃,800℃失重率为9.3%;CF/BZ-PI-3复合材料的起始热分解温度为389℃,800℃失重率为11.8%。CF/BZ复合材料的起始热分解温度低于CF/PI复合材料,但800℃的热失重更少,在高温环境中更高的残炭率。CF/BZ-PI-3复合材料综合了CF/PI和CF/BZ两种材料的热性能,起始热分解温度高于CF/BZ复合材料,并且残炭率没有明显降低,具有较好的热稳定性。

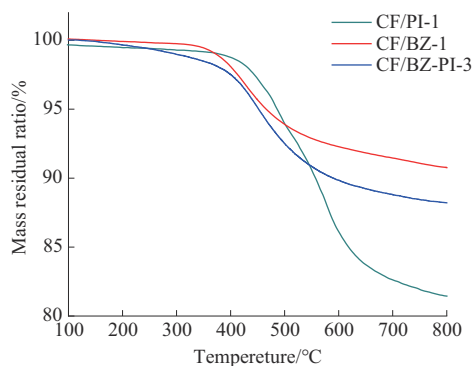


图8 复合材料的TG曲线

Fig. 8 TG curves of composites

2.5 CF/BZ-PI复合材料的烧蚀性能分析

表1为CF/BZ复合材料和CF/BZ-PI-3复合材料的烧蚀性能。PI树脂的热烧蚀性能低于BZ树脂,在烧蚀过程中,CF/PI层在高温下分解更快,所以CF/BZ-PI-3复合材料有更高的质量烧蚀率和线烧蚀率。从表1可以看出,CF/PI作为CF/BZ-PI-3复合材料的结构部分,会使CF/BZ-PI-3复合材料的线烧蚀率和质量烧蚀率增大,导致烧蚀性能降低,但降低程度不大,CF/BZ-PI-3的质量烧蚀率为0.121 g/s,

表1 复合材料的烧蚀性能

Tab. 1 Ablation performance of composites

Samples	Mass ablative rate/(g·s ⁻¹)	Linear ablative rate/(mm·s ⁻¹)
CF/BZ-1	0.093	0.076
CF/BZ-PI-3	0.121	0.109

线烧蚀率为0.109 mm/s,复合材料整体仍能保持较好的烧蚀性能。

3 结论

(1)研究了结构/隔热一体化复合材料的成型方式和固化工艺,通过共固化成型的方式制备出纤维同质化复合材料CF/BZ-PI,其具有良好的力学性能,综合力学性能介于CF/PI复合材料和CF/BZ复合材料之间。

(2)成型工艺会对一体化复合材料的力学性能产生影响。将CF/PI预浸料进行预热处理,通过共固化一次成型制备出的复合材料(CF/BZ-PI-3)具有最好的综合力学性能。

(3)一体化复合材料CF/BZ-PI-3具有较好的热稳定性,其起始热分解温度为389℃,在800℃时失重率为11.8%。

(4)一体化复合材料CF/BZ-PI-3的质量烧蚀率为0.121 g/s,线烧蚀率为0.109 mm/s,具有良好的烧蚀性能。

参考文献

- [1] 刘永胜,曹立阳,张运海,等.高超声速飞行器热防护用超高温复合材料的研究进展[J].复合材料科学与工程,2022(10):107-118.
LIU Yongsheng, CAO Liyang, ZHANG Yunhai, et al. Research progress on ultra-high temperature composites for thermal protection of hypersonic vehicles[J]. Composites Science and Engineering, 2022(10):107-118.
- [2] UYANNA O, NAJAFI H. Thermal protection systems for space vehicles: A review on technology development, current challenges and future prospects[J]. Acta Astronautica, 2020, 176:341-356.
- [3] 王佳为,郑振荣,毕月姣.飞行器热防护材料的研究现状与发展趋势[J].化工新型材料,2020,48(11):15-19.
WANG Jiawei, ZHENG Zhenrong, BI Yuejiao. Research status and development trend of aircraft thermal protection material[J]. New Chemical Materials, 2020, 48(11):15-19.
- [4] LEI Y F, HU Z J, CAO B, et al. Enhancements of thermal insulation and mechanical property of silica aerogel monoliths by mixing graphene oxide[J]. Materials Chemistry and Physics, 2017, 187: 183-190.
- [5] 白炳越,刘丹,杨进军,等.酚醛树脂浸渍石英纤维复合材料的热解行为[J].消防科学与技术,2023,42(9):1 275-1 279.
BAI Bingyue, LIU Dan, YANG Jinjun, et al. Thermal decomposition behavior of phenolic resin impregnated quartz fiber composites [J]. Fire Science and Technology, 2023, 42(9):1 275-1 279.
- [6] OZAKI J I, OHIZUMI W, OYA A. A TG-MS study of poly(vinyl butyral)/phenol-formaldehyde resin blend fiber[J]. Carbon, 2000, 38 (10):1 515-1 519.
- [7] 张建,刘向阳,顾宜.高性能苯并噁嗪模压复合材料的研究[J].塑料工业,2009,37(3):78-81.
ZHANG Jian, LIU Xiangyang, GU Yi. Preparation and properties of high-performance benzoxazine molding composites[J]. China
- Plastics Industry, 2009, 37(3):78-81.
- [8] PAN Z, HU L H, ZHANG M, et al. Synthesis of benzoxazine resin and its application in shape memory polymers[J]. Biomass Chemical Engineering, 2020, 54(6):91-102.
- [9] 王国荣,李瑜,梅志远,等.苯并噁嗪树脂在阻燃领域研究进展[J].工程塑料应用,2021,49(10):161-165.
WANG Guorong, LI Yu, MEI Zhiyuan, et al. Research progress of benzoxazine resin in flame retardant field[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(10):161-165.
- [10] 步同安,刘占鑫,杨家乐,等.苯并噁嗪树脂的研究进展[J].宇航材料工艺,2023,53(4):1-9.
BU Tongan, LIU Zhanxin, YANG Jiale, et al. Research progress on benzoxazine resin[J]. Aerospace Materials & Technology, 2023, 53(4):1-9.
- [11] 代洁,李鹏程,朱蓉琪,等.一种高残炭新型苯并噁嗪树脂的固化及热解动力学[J].功能高分子学报,2018,31(2):114-120.
DAI Jie, LI Pengcheng, ZHU Rongqi, et al. Curing and pyrolysis kinetics of a new benzoxazine resin with high char yield[J]. Journal of Functional Polymers, 2018, 31(2):114-120.
- [12] 周世豪,倪楠楠,刘彬,等.结构热防护一体化复合材料研究进展[J].航空材料学报,2022,42(4):1-15.
ZHOU Shihao, NI Nannan, LIU Bin, et al. Research progress on structural thermal protection integration composite[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2022, 42(4):1-15.
- [13] 赵振宁,王辉,虎琳.航空航天先进复合材料研究现状及发展趋势[J].炭素,2021(2):24-29.
ZHAO Zhenning, WANG Hui, HU Lin. The research status and development trend of aerospace advanced composites[J]. Carbon, 2021(2):24-29.
- [14] YI C H, LI W M, SHI S, et al. High-temperature-resistant and colorless polyimide: Preparations, properties, and applications[J]. Solar Energy, 2020, 195:340-354.
- [15] GOUZMAN I, GROSSMAN E, VERKER R, et al. Advances in polyimide-based materials for space applications[J]. Advanced Materials, 2019, 31(18). DOI: 10.1002/adma.201807738.
- [16] 孟祥胜,柯红军,阎敬灵,等.热固性聚酰亚胺树脂研究进展[J].高分子通报,2023(8):1 027-1 041.
MENG Xiangsheng, KE Hongjun, YAN Jingling, et al. Recent progress in thermosetting polyimides resins[J]. Polymer Bulletin, 2023(8):1 027-1 041.
- [17] 陈辰,陆馨,赵玉棣,等.3-甲基邻苯二酚/糠胺型聚苯并噁嗪的制备与性能[J].高等学校化学学报,2021,42(12):3 757-3 764.
CHEN Chen, LU Xin, ZHAO Yudi, et al. Preparation and properties of 3-methylcatechol/furfurylamine based polybenzoxazine[J]. Chemical Journal of Chinese Universities, 2021, 42(12): 3 757-3 764.
- [18] 钟敏,刘杰,江乾,等. PMR型耐高温聚酰亚胺基体树脂及复合材料的制备与性能研究[J].化工新型材料,2023,51(11): 111-117.
ZHONG Min, LIU Jie, JIANG Qian, et al. Preparation and properties of PMR-type high-temperature resistant polyimide matrix resins and composites[J]. New Chemical Materials, 2023, 51(11): 111-117.