

# 玄武岩纤维/酚醛树脂复合材料燃烧特性研究

魏俊锋<sup>1</sup>, 郑月<sup>2,3</sup>, 王祥林<sup>4,5\*</sup>

(1. 广东省科学院测试分析研究所(中国广州分析测试中心), 广东 广州 510070; 2. 广东省安全生产和应急管理科学技术研究院, 广东 广州 510053; 3. 广东省化学测量与应急检测技术重点实验室, 广东 广州 510070; 4. 四川玄武岩纤维新材料研究院(创新中心), 四川 广安 638000; 5. 国家市场监督管理总局技术创新中心(玄武岩纤维及先进复合材料), 四川 广安 638000)

**摘要:** 采用锥形量热仪和扫描电镜研究玄武岩纤维/酚醛树脂复合材料在不同火灾环境下的燃烧特性, 评价复合材料的火灾危险性。结果表明: 当热辐射强度为 30 kW/m<sup>2</sup> 时, 复合材料未被点燃。随着热辐射强度的增加, CO、CO<sub>2</sub> 和总烟释放量逐渐上升; 复合材料的点燃时间逐渐提前; 热释放速率和热释放速率峰值均增大, 峰值出现时间提前。此外, 燃烧后质量损失率增大, 总体质量损失幅度均低于 10%。随着热辐射强度的增加, 复合材料的火灾危险性增大。玄武岩纤维/酚醛树脂复合材料燃烧后整体结构保持完好, 玄武岩纤维和阻燃填料的存在能够有效抑制复合材料的热解和燃烧。

**关键词:** 玄武岩纤维; 酚醛树脂; 燃烧特性; 阻燃性能

中图分类号: TB332

文献标志码: A

文章编号: 1005-3360(2026)02-0051-05

DOI: 10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.02.009

## Study on Combustion Characteristics of Basalt Fiber/Phenolic Resin Composites

WEI Junfeng<sup>1</sup>, ZHENG Yue<sup>2,3</sup>, WANG Xianglin<sup>4,5\*</sup>

(1. Institute of Analysis, Guangdong Academy of Sciences (China National Analytical Center, Guangzhou), Guangzhou 510070, China; 2. Guangdong Academy of Safety Production and Emergency Management Science and Technology, Guangzhou 510053, China; 3. Guangdong Provincial Key Laboratory of Chemical Measurement and Emergency Test Technology, Guangzhou 510070, China; 4. Sichuan Basalt Fiber New Material Research Institute (Innovation Center), Guang'an 638000, China; 5. Technology Innovation Center of Basalt Fiber Advanced Composite Materials, State Administration for Market Regulation, Guang'an 638000, China)

**Abstract:** The cone calorimeter and scanning electron microscope were employed to investigate the combustion characteristics of basalt fiber/phenolic resin composites under different fire conditions, and the fire hazard of the composites was evaluated. The results showed that the composites were not ignited when the heat radiation intensity was 30 kW/m<sup>2</sup>. With the increase of heat radiation intensity, the CO, CO<sub>2</sub> and total smoke release amounts gradually increased; the ignition time of the composites progressively advanced. Both the heat release rate and peak heat release rate increased, with the peak occurrence time advancing. In addition, the mass loss rate after combustion increased, while the overall mass loss magnitude remained below 10%. The fire hazard of the composites increased with rising heat radiation intensity. The overall structure of basalt fiber/phenolic resin composites remained intact after combustion, and the presence of basalt fibers and flame retardant fillers effectively inhibited the pyrolysis and combustion of the composites.

**Keywords:** Basalt fiber; Phenolic resin; Combustion characteristics; Flame retardancy

玄武岩纤维作为一种天然无机纤维材料, 其因高强度、高模量及优异的耐高温性能, 在航空航天、轨道交通和

收稿日期 Submitted date 2025-03-12; 修回日期 Revised date 2025-04-20; 录用日期 Accepted date 2025-05-22

基金项目: 广东省社会发展科技协同创新体系建设项目(2023A1111120026)

\*联系人, 821067619@qq.com

引用本文: 魏俊锋, 郑月, 王祥林. 玄武岩纤维/酚醛树脂复合材料燃烧特性研究[J]. 塑料科技, 2026, 54(2): 51-55.

Citation: WEI J F, ZHENG Y, WANG X L. Study on combustion characteristics of basalt fiber/phenolic resin composites[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(2): 51-55.

建筑防火领域展现出巨大的应用潜力<sup>[1-4]</sup>；酚醛树脂凭借其优异的热稳定性、低烟毒性和自熄特性，成为高温阻燃复合材料的的首选基体<sup>[5-7]</sup>。两者的复合可协同提升材料的热防护性能，但复合体系在真实火灾场景中的燃烧行为仍存在机理不明确、定量表征不足等问题，这对材料的安全应用构成潜在风险。

近年来，针对玄武岩纤维/酚醛树脂复合材料的研究多集中于力学增强与耐高温性能优化。李卫东等<sup>[8]</sup>调控纤维体积分数，将复合材料的层间剪切强度提升至65 MPa。魏化震等<sup>[9]</sup>发现，玄武岩纤维中的氧化铁成分可催化碳硅反应，降低反应温度并增强吸热效应，从而提升材料的耐高温性能。NAJAFI等<sup>[10]</sup>研究不同玄武岩/碳纤维混杂比例下，编织玄武岩纤维与编织碳纤维的混杂效应对冲击能量吸收的影响。研究发现，随着玄武岩纤维含量的增加，复合材料的冲击性能显著提高。此外，研究人员还对纤维/酚醛树脂复合材料燃烧特性有一定研究。例如，CHEN等<sup>[11]</sup>采用锥形量热仪研究纤维/酚醛复合材料的点火时间、质量损失和质量损失率、热释放速率以及CO<sub>2</sub>和CO的浓度。张开拓等<sup>[12]</sup>采用锥形量热仪测试碳纤维/酚醛树脂复合材料的燃烧特性，评价碳纤维/酚醛树脂复合材料的火灾危险性。结果表明：复合材料的质量损失速率随着热辐射强度的增加而增大，随着热辐射强度的增加，复合材料的火灾危险性增大。张晓宇等<sup>[13]</sup>采用锥形量热仪研究玻璃纤维/酚醛树脂复合材料的燃烧特性，分析环境压力对面板的隔热性能、着火时间、质量损失和烟雾特性的影响。ZHANG等<sup>[14]</sup>采用锥形量热仪探究不同热辐射强度下玻璃纤维/酚醛树脂复合材料的燃烧特性，通过评价指标评估材料的火灾危险性，并结合高温氧指数仪，探索不同温度下的极限氧指数。

目前，有许多研究人员研究不同类别的复合材料的火灾危险性<sup>[15-17]</sup>、燃烧特性<sup>[18-20]</sup>和热解特性及其规律<sup>[21-25]</sup>，但对玄武岩纤维/酚醛树脂复合材料燃烧性能方面的研究很少，玄武岩纤维/酚醛树脂复合材料燃烧特性参数的变化规律及燃烧机理尚不明确。本实验采用锥形量热仪测试不同热辐射强度下玄武岩纤维/酚醛树脂复合材料燃烧特性参数，探索玄武岩纤维/酚醛树脂复合材料的燃烧机理，为开发低成本、低毒、高性能阻燃材料提供了技术路线，推动其在航空航天、轨道交通和建筑防火领域等关键领域的应用，促进绿色材料产业的升级，同时降低火灾引发的社会与环境风险。

## 1 实验部分

### 1.1 主要原料

酚醛树脂，PF9301B-1，固含量55%，山东圣泉新材料股份有限公司；玄武岩纤维平纹布，300 g/m<sup>2</sup>，四川谦宜复合材料有限公司；阻燃填料，软化点530 °C，平均粒径为5 μm，自制，表1为阻燃填料化学组成。

表1 阻燃填料化学组成

Tab.1 Chemical composition of flame-retardant filler 单位:%

成分	质量分数
玄武岩	20
五氧化二磷	10
三氧化二锑	35
氧化硼	35

### 1.2 仪器与设备

锥形量热仪，NLFRM-05，英国FTT公司；扫描电镜能谱分析仪，EM-30AX+，韩国库赛姆公司。

### 1.3 样品制备

玄武岩纤维/酚醛树脂复合材料中玄武岩纤维、酚醛树脂和阻燃填料质量分数分别为75%、14%和11%，采用预浸料模压工艺制备<sup>[26]</sup>，材料尺寸为450 mm×250 mm，厚度为4 mm。

### 1.4 性能测试与表征

燃烧性能和烟释放量测试：采用锥形量热仪，按ISO 5660—1:2015进行测试，电火花点火，测试玄武岩纤维/酚醛树脂复合材料的点燃时间、热释放速率、质量损失、质量损失率以及CO和CO<sub>2</sub>的体积分数，评估材料的火灾危险性。实验中设定热辐射强度分别为30、40、50 kW/m<sup>2</sup>，模拟不同火灾环境，评价玄武岩纤维/酚醛树脂复合材料燃烧特性。表2为不同热辐射强度对应的环境温度。

表2 不同热辐射强度对应的环境温度

Tab.2 Ambient temperatures corresponding to different thermal radiation intensities

热辐射强度/(kW·m <sup>2</sup> )	环境温度/°C
30	653
40	742
50	789

SEM测试：利用扫描电镜能谱分析仪测试复合材料燃烧前、后的表面微观形貌。

## 2 结果与讨论

### 2.1 烟气分析

材料在燃烧的过程中，会产生大量的烟气、CO和CO<sub>2</sub>，这些烟气不但威胁生命安全，还会阻碍相应的救援工作。图1为热辐射强度对CO和CO<sub>2</sub>体积分数的影响。从图1可以看出，热辐射强度为30 kW/m<sup>2</sup>时，复合材料未燃烧，出现微弱热解；热辐射强度为40 kW/m<sup>2</sup>和50 kW/m<sup>2</sup>时，CO和CO<sub>2</sub>体积分数变化规律是相似的。随着辐射强度增大，CO和CO<sub>2</sub>体积分数增大，其中CO的体积分数峰值分别为0.002 2%、0.004 2%和0.004 8%，CO<sub>2</sub>的体积分数峰值分别为0.047%、0.130%和0.170%。美国职业安全与健康管理局(OSHA)规定，工作场所中CO体积分数上限为0.005%，CO<sub>2</sub>体积分数上限为1.00%，CO和CO<sub>2</sub>体积分数

均未超过限定值,说明该复合材料燃烧产生的CO和CO<sub>2</sub>较少且毒性较小。

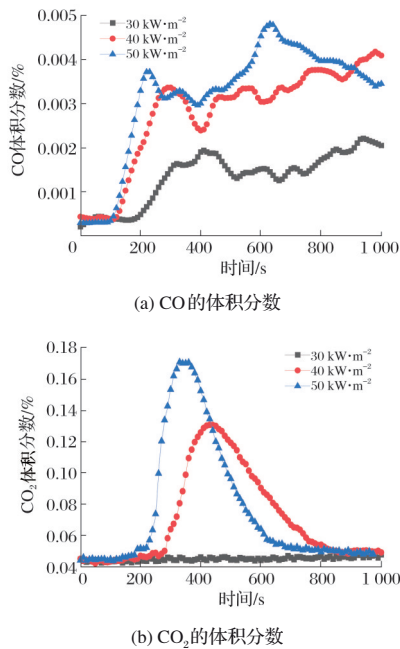


图1 热辐射强度对CO和CO<sub>2</sub>的体积分数的影响

Fig.1 Effect of thermal radiation intensity on volume fraction of CO and CO<sub>2</sub>

图2为热辐射强度对总烟排放量(TSR)的影响。从图2可以看出,不同热辐射强度下TSR变化规律相似。开始阶段复合材料TSR很小,一段时间后迅速增加,之后趋于平稳。辐射强度越大,复合材料越早产生烟气,TSR越早出现平稳阶段,TSR越大。

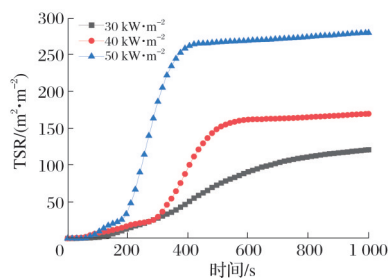


图2 热辐射强度对复合材料TSR的影响

Fig.2 Effect of thermal radiation intensity on TSR

## 2.2 热释放速率分析

热释放速率(HRR)是火灾危险评估中最重要的参数之一,利用它可对火灾发生和蔓延进行预测。图3为热辐射强度对复合材料HRR的影响。从图3可以看出,随着辐射强度的增加,材料的热释放速率峰值(pHRR)逐步变大,到达峰值时间逐渐降低。表3为热辐射强度对复合材料的燃烧特性参数的影响。从表3可以看出,热辐射强度为30 kW/m<sup>2</sup>时,复合材料未发生燃烧,热辐射强度对HRR影响不明显;热辐射强度为40 kW/m<sup>2</sup>和50 kW/m<sup>2</sup>时,复合材料点燃时间分别为190 s和129 s, HRR分别在335 s和255 s达到峰值,56.0 kW/m<sup>2</sup>和79.9 kW/m<sup>2</sup>,两者HRR相差

42.7%。发生这种现象的原因是随着辐射强度越大,酚醛树脂基体碳化和阻燃填料熔融形成的覆盖层无法继续起到隔绝热源的作用,酚醛树脂分解得越完全,材料越能充分燃烧。

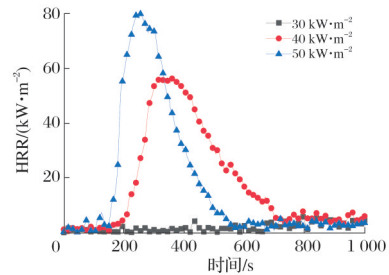


图3 热辐射强度对复合材料HRR的影响

Fig.3 Effect of thermal radiation intensity on HRR of composites

表3 热辐射强度对复合材料的燃烧特性参数的影响

Tab.3 Effect of thermal radiation intensity on combustion characteristic parameters of composites

热辐射强度/ (kW·m <sup>-2</sup> )	点燃时间/ s	pHRR/ (kW·m <sup>-2</sup> )	达到峰值时间/ s
30	未点燃	5.73	895
40	190	56.0	335
50	129	79.9	255

## 2.3 质量损失和质量损失率分析

材料的质量损失是衡量其燃烧危险性的一个重要指标<sup>[27]</sup>。图4为复合材料的质量损失速率(MLR)曲线。表4为热辐射强度对复合材料质量损失率的影响。从图4和表4可以看出,MLR曲线出现第一个峰值主要是由复合材料中水分的蒸发以及小分子烃的脱除引起。在热辐射强度为30 kW/m<sup>2</sup>时,复合材料未发生燃烧,MLR变化不大,质量损失率为5.4%。在热辐射强度为40 kW/m<sup>2</sup>和50 kW/m<sup>2</sup>时,复合材料发生燃烧,MLR分别在345 s和230 s达到峰值,在1000 s质量损失率均未超过10%。这是因为酚醛树脂基体分解速率随环境温度的升高而变大,使MLR更快达到峰值,产生的覆盖层对树脂基体分解的抑制作用,MLR和质量损失率随时间的延长不断减小至平稳。

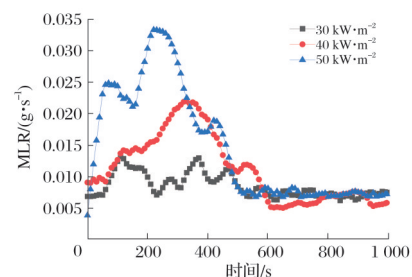


图4 复合材料的MLR曲线

Fig.4 MLR curves of composites

## 2.4 火灾危险性评价

火焰增长指数(FGI)是pHRR与到达pHRR所用时

间的比值,火灾性能指数(FPI)是材料点燃时间与pHRR的比值<sup>[14,28]</sup>。FPI越低,火焰的增长趋势越迅速;FGI越高,材料在受到热辐射时越易燃,火灾危险性指数越大,安全性能越低。

表4 热辐射强度对复合材料质量损失率的影响

Tab.4 Effect of thermal radiation intensity on mass loss rate of composites

热辐射强度/(kW·m <sup>-2</sup> )	质量损失率/%
30	5.4
40	8.9
50	9.5

表5为热辐射强度对复合材料的FPI和FGI的影响。在热辐射强度为30 kW/m<sup>2</sup>时,复合材料未点燃,故点燃时间取试验时长1 000 s。从表5可以看出,热辐射强度由30 kW/m<sup>2</sup>增加至50 kW/m<sup>2</sup>时,复合材料的FPI从175.00 kW/(m<sup>2</sup>·s)大幅下降至1.61 kW/(m<sup>2</sup>·s),FGI从0.006 (m<sup>2</sup>·s)/kW跃升至0.313 (m<sup>2</sup>·s)/kW。热辐射强度增强后,火焰增长更快,火灾危险性更大。由此可见,热辐射强度的变化对玄武岩纤维/酚醛树脂复合材料的火灾危险指标影响很大。

表5 热辐射强度对复合材料的FPI和FGI的影响

Tab.5 Effect of thermal radiation intensity on FPI and FGI of composites

热辐射强度/(kW·m <sup>-2</sup> )	FPI/[kW·(m <sup>2</sup> ·s) <sup>-1</sup> ]	FGI/[(m <sup>2</sup> ·s)·kW <sup>-1</sup> ]
30	175.00	0.006
40	3.39	0.167
50	1.61	0.313

## 2.5 复合材料垂直燃烧后微观形貌

图5为复合材料试验前后的形貌照片和微观形貌照片。从图5b可以看出,当辐射强度较低时,复合材料未点燃只是发生热解反应有少量残炭出现。从图5c和图5d可看出,增加辐射强度后,复合材料燃烧并生成大量残炭,辐射强度增加至50 kW/m<sup>2</sup>时,复合材料燃烧更加充分,残炭减少,这与质量损失率得出结果一致。从图5a~图5d可以看出,试验前酚醛树脂将陶瓷化填料均匀地固定在材料表面,当辐射强度较低时,酚醛树脂降解,填料熔融,材料变得圆润,表面有裂纹和少量空穴出现。辐射强度增加,空穴数量增多,熔融填料合并成大液滴包裹着树脂,覆盖在材料表面。当辐射强度增加至50 kW/m<sup>2</sup>时,材料表面无裸露纤维并有大量凹坑出现。原因是熔融填料包裹未完全分解的树脂受热分解,产生的气体逃逸,熔滴破碎留下的痕迹。玄武岩纤维/酚醛树脂复合材料受热辐射作用,使复合材料中酚醛主链上侧基弱键开始断裂,部分酚醛主链上侧基弱键的断裂速度超过主链的裂解反应速度,使少量酚醛主链以碳的形式保留<sup>[12,18]</sup>;阻燃填料在受热后能够形

成一层熔融的覆盖层,覆盖在树脂材料的表面,可促进成炭,同时填充纤维间空穴,紧密黏接裂解残炭和玄武岩纤维,形成液相桥接的较致密陶瓷体可有效防止火焰继续蔓延和燃烧。复合材料燃烧后整体结构保持完好,玄武岩纤维和阻燃填料的存在能够有效抑制复合材料的热解及燃烧,说明玄武岩纤维/酚醛树脂复合材料具有较好的阻燃耐烧蚀性能。

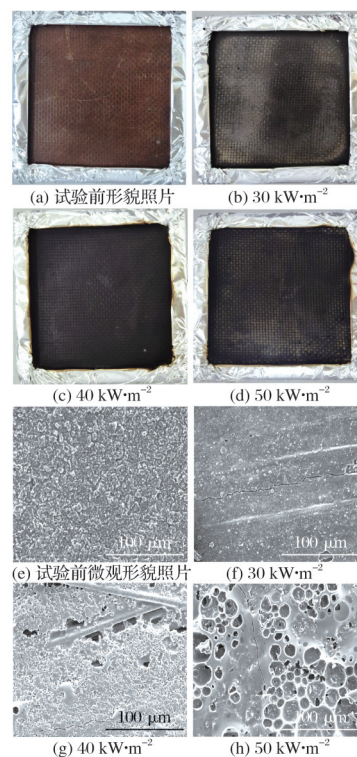


图5 复合材料试验前后的形貌照片和微观形貌照片

Fig.5 Morphology images and microstructure images before and after testing of composites

## 3 结论

当热辐射强度为30 kW/m<sup>2</sup>时,复合材料未被点燃。随着热辐射强度的增加,CO、CO<sub>2</sub>和TSR逐渐上升,点燃时间逐渐提前,HRR和pHRR均增大,峰值出现时间提前,燃烧后质量损失率增大。随着热辐射强度的增加,复合材料的火灾危险性增大。热辐射强度由30 kW/m<sup>2</sup>增加至50 kW/m<sup>2</sup>时,复合材料的FPI从17 500 kW/(m<sup>2</sup>·s)大幅下降至1.61 kW/(m<sup>2</sup>·s),FGI从0.006 (m<sup>2</sup>·s)/kW跃升至0.313 (m<sup>2</sup>·s)/kW。复合材料燃烧后整体结构保持完好,玄武岩纤维和阻燃填料的存在能够有效抑制复合材料的热解及燃烧。

## 参考文献

- [1] DHAND V, MITTAL G, RHEE K Y, et al. A short review on basalt fiber reinforced polymer composites[J]. Composites Part B Engineering, 2015, 73: 166-180.
- [2] 罗益锋, 罗晰旻. 玄武岩纤维及其混杂纤维等复合材料的新进展和新应用[J]. 高科技纤维与应用, 2018, 43(5): 17-23.

- [3] WOLTER N, CARRILLO BEBER V, HAUBOLD T, et al. Effects of flame-retardant additives on the manufacturing, mechanical, and fire properties of basalt fiber-reinforced polybenzoxazine[J]. *Polymer Engineering and Science*, 2021, 61(2): 551-561.
- [4] 宋渝天, 王犁, 颜贵龙, 等. 玄武岩纤维粉末/氟橡胶复合材料的制备及性能研究[J]. *橡胶工业*, 2024, 71(9): 676-682.
- [5] YANG S, WU Y, JI N, et al. Thermal degradation and combustion performance comparison of plywood based on inorganic adhesive and phenol-formaldehyde resin[J]. *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, 2017, 14(1): 775-779.
- [6] 张一夏. 基于酚醛树脂热熔胶膜的碳纤维纸制备及性能研究[D]. 无锡: 江南大学, 2025.
- [7] YANG W, JIAO L, WANG X, et al. Formaldehyde-free self-polymerization of lignin-derived monomers for synthesis of renewable phenolic resin[J]. *International Journal of Biological Macromolecules: Structure, Function and Interactions*, 2021, 166: 1312-1319.
- [8] 李卫东, 曹海琳, 陈国荣, 等. 玄武岩纤维/酚醛树脂基复合材料性能研究[J]. *化学与黏合*, 2009, 31(6): 1-4.
- [9] 魏化震, 张清辉, 李锦文. 玄武岩纤维增强酚醛树脂复合材料高温热分析研究[J]. *材料工程*, 2013(1): 64-67.
- [10] NAJAFI M, KHALILI S M R, ESLAMI-FARSANI R. Hybridization effect of basalt and carbon fibers on impact and flexural properties of phenolic composites[J]. *Iranian Polymer Journal*, 2014, 23(10): 767-773.
- [11] CHEN R Y, LU S X, LI C H, et al. Experimental study on ignition and combustion characteristics of fibre-reinforced phenolic composite[J]. *Key Engineering Materials*, 2016, 707: 13-22.
- [12] 张开拓, 王志, 徐松, 等. 碳纤维/酚醛树脂复合材料燃烧特性研究[J]. *塑料科技*, 2023, 51(4): 46-49.
- [13] 张晓宇, 贾旭宏, 代尚沛, 等. 低压环境下玻璃纤维/酚醛树脂燃烧特性[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2023, 63(10): 1520-1528.
- [14] ZHANG K, WANG Z, NIE J, et al. Study on combustion characteristics of glass fiber/phenolic resin composites[J]. *Heliyon*, 2024, 10(13): e32939.
- [15] MOURITZ A P, FEIH S, KANDARE E, et al. Review of fire structural modelling of polymer composites[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2009, 40(12): 1800-1814.
- [16] TOLDY A, SZOLNOKI B, MAROSI G. Flame retardancy of fibre-reinforced epoxy resin composites for aerospace applications[J]. *Polymer Degradation & Stability*, 2011, 96(3): 371-376.
- [17] 杨晓光, 贾旭宏, 徐松涛, 等. 酚醛树脂/玻璃纤维型飞机货舱衬板复合材料火灾危险性评价[J]. *消防科学与技术*, 2022, 41(3): 367-370.
- [18] 徐艳英, 张雷, 王志, 等. 基于锥形量热法的典型碳纤维/环氧复合材料燃烧特性[J]. *复合材料学报*, 2017, 34(8): 1674-1682.
- [19] 尹含煜, 王志, 徐松, 等. 玻璃纤维/环氧树脂复合材料燃烧特性研究[J]. *化工新型材料*, 2024, 52(3): 146-150.
- [20] 王志超, 曲芳, 王志, 等. T800碳纤维/环氧复合材料燃烧行为的实验研究[J]. *塑料科技*, 2021, 49(9): 1-5.
- [21] 徐松涛, 贾旭宏, 杨晓光, 等. 酚醛树脂/玻璃纤维夹层结构材料热解机理与燃烧特性研究[J]. *塑料科技*, 2022, 50(5): 29-33.
- [22] MA C, SÁNCHEZ-RODRÍGUEZ D, KAMO T. A comprehensive study on the oxidative pyrolysis of epoxy resin from fiber/epoxy composites: Product characteristics and kinetics[J]. *Journal of hazardous materials*, 2021, 412: 125329.
- [23] LAN X K, BIAN C X, YANG Y X, et al. Modified epoxy resin on the burning behavior and mechanical properties of aramid fiber composite [J]. *Materials*, 2024, 17(16): 4028.
- [24] 罗翔祥, 李峰, 乔成芳. 改性碳纤维含量对聚丙烯的阻燃性能影响研究[J]. *塑料科技*, 2023, 51(3): 33-37.
- [25] 韩琳, 赵凌锋, 李龙, 等. 玻纤表面处理对环氧树脂复合材料性能的影响及阻燃剂的应用研究[J]. *塑料科技*, 2024, 52(3): 18-22.
- [26] 王祥林, 肖文强, 彭旭. 基于可瓷化填料的玄武岩纤维增强硼酚醛树脂复合材料高温性能研究[J/OL]. *西华大学学报(自然科学版)*, 1-8 [2025-03-12]. <https://link.cnki.net/urlid/51.1686.n.20240911.1008.002>.
- [27] 张学林. 高速列车典型内饰材料热解、燃烧及火蔓延特性研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019.
- [28] 刘天明, 赵东, 沈育才, 等. 热塑性聚酯弹性体复合材料的制备与阻燃性能[J]. *复合材料学报*, 2024, 41(3): 1249-1258.