

玻璃纤维/环氧树脂复合材料燃烧特性研究

卢伟利

振石集团华美新材料有限公司 浙江 嘉兴 314500

摘要: 本文聚焦玻璃纤维/环氧树脂复合材料燃烧特性。先阐述复合材料组分特性与燃烧机理,明确玻璃纤维和环氧树脂燃烧行为差异及相互影响。接着介绍燃烧特性评价指标与测试标准。通过实验研究不同玻璃纤维体积分数、阻燃剂添加量等对燃烧特性的影响。分析玻璃纤维、环氧树脂与界面特性、外部环境及阻燃剂等因素的作用,揭示燃烧过程演化机制,提出协同作用机制与阻燃优化方案。

关键词: 玻璃纤维; 环氧树脂复合材料; 燃烧特性

引言: 在航空航天、汽车制造等诸多领域,玻璃纤维/环氧树脂复合材料凭借优异性能得到广泛应用。然而其易燃特性带来潜在安全隐患,制约了进一步发展,深入探究该复合材料燃烧特性,对提升其安全性、拓展应用范围至关重要。本文聚焦于此,先阐述相关理论基础,再通过实验研究不同因素对燃烧特性的影响,揭示燃烧机制,进而提出阻燃优化方案,为实际应用提供理论依据。

1 玻璃纤维/环氧树脂复合材料燃烧相关理论基础

1.1 复合材料组分特性与燃烧机理

玻璃纤维/环氧树脂复合材料的燃烧性能由组分特性共同决定,二者燃烧行为存在显著差异。玻璃纤维主要成分为二氧化硅等无机氧化物,本身熔点高达1400℃以上,不燃且在燃烧中能保持骨架结构,仅在高温下发生软化变形。环氧树脂作为有机基体,含有大量碳氢链和环氧基团,属于易燃组分,燃烧时会经历热分解、挥发、氧化燃烧三个阶段。燃烧初期,环氧树脂在高温作用下发生链式热分解,释放甲烷、苯系物等可燃挥发性气体,同时产生焦炭残留;可燃气体与空气混合达到燃烧极限后,在点火源作用下发生氧化反应释放热量,热量反哺基体加速热分解,形成燃烧循环^[1]。玻璃纤维的存在会阻碍可燃气体扩散,延缓燃烧蔓延,但无法阻止环氧树脂的热分解过程,二者的界面结合状态还会影响热量传递效率,进而改变整体燃烧进程。

1.2 燃烧特性评价指标与测试标准

玻璃纤维/环氧树脂复合材料燃烧特性评价需综合多项核心指标,包括极限氧指数、热释放速率、点燃时间、烟密度和残炭率。极限氧指数是维持燃烧的最低氧体积分数,越高阻燃性越强,按GB/T2406.2标准测试。热释放速率反映热量释放强度,依ISO5660-1标准用锥

形量热仪测试。点燃时间体现易燃性,按GB/T8332标准测定。烟密度用GB/T8323.2标准测试,以等级表示产烟量。残炭率通过灼烧称重计算,反映成炭能力。

2 玻璃纤维/环氧树脂复合材料燃烧特性实验研究

2.1 实验材料与设备

实验所用玻璃纤维为无碱玻璃纤维纱,直径17μm,单丝拉伸强度3.5GPa,含硅量65%,经硅烷偶联剂KH-550表面处理以增强与基体结合力。环氧树脂选用双酚A型E-51,环氧值0.51eq/100g,黏度2500-4000mPa·s(25℃);固化剂为4,4'-二氨基二苯甲烷,二者按质量比100:25混合。复合材料采用手糊成型工艺制备,玻璃纤维体积分数分别为30%、40%、50%,固化条件为80℃/2h+120℃/4h,制成100mm×100mm×3mm标准试样。实验设备包括锥形量热仪(符合ISO5660-1),用于测试热释放速率、总热释放量等;极限氧指数测定仪(符合GB/T2406.2),氧浓度调节范围0-100%;水平垂直燃烧测试仪(符合GB/T8323.2),点火源功率125W;扫描电子显微镜,用于观察燃烧后试样微观形貌;热重分析仪,升温速率10℃/min,氮气氛围下测试热分解行为。

2.2 实验设计与流程

实验采用控制变量法设计,以玻璃纤维体积分数(30%、40%、50%)、阻燃剂添加量(0%、5%、10%、15%)、外部氧浓度(21%、25%、30%)为变量,探究各因素对燃烧特性的影响,每组变量设置3个平行试样以保证数据可靠性。实验流程分为试样制备、预处理、性能测试三步。试样制备阶段,按配比混合环氧树脂与固化剂,加入玻璃纤维和阻燃剂(若有),搅拌均匀后倒入模具,经固化、脱模、切割得到标准尺寸试样^[2]。预处理阶段,将试样置于50℃真空干燥箱中干燥4h,去除水分及挥发性杂质,避免影响燃烧测试结果。

性能测试阶段,先采用热重分析仪测试试样热分解曲线,确定热分解温度区间;再用极限氧指数测定仪测定氧指数,记录临界氧浓度;随后通过锥形量热仪测试热释放速率、点燃时间等关键指标,点火功率设定为50kW/m²;最后采用水平垂直燃烧测试仪测定燃烧等级,观察燃烧蔓延速度。测试完成后,收集数据并进行标准差分析,剔除异常值。

2.3 基础燃烧特性分析

玻璃纤维/环氧树脂复合材料基础燃烧特性呈现明显的组分依赖性,不同玻璃纤维体积分数的试样的燃烧行为差异显著。当玻璃纤维体积分数为30%时,试样点燃时间为28s,极限氧指数22.5%,热释放速率峰值达680kW/m²,燃烧过程中基体快速熔融滴落,伴随大量黑烟产生,残炭率仅18%。当体积分数提升至40%时,点燃时间延长至35s,极限氧指数升至24.2%,热释放速率峰值降至520kW/m²,纤维骨架有效抑制基体滴落,黑烟生成量减少,残炭率提高至26%。当体积分数达到50%时,点燃时间进一步延长至42s,极限氧指数26.0%,热释放速率峰值降至380kW/m²,燃烧过程中形成连续完整的炭-纤维复合保护层,有效阻隔氧气与可燃气体交换,黑烟生成量显著降低,残炭率达35%。热重分析显示,材料主要热分解区间为300-500℃,随着玻璃纤维含量增加,最大热分解速率降低,残余质量分数提高,表明玻璃纤维能显著提升材料热稳定性和阻燃性能。

3 玻璃纤维/环氧树脂复合材料燃烧特性的影响因素分析

3.1 玻璃纤维相关因素的影响

玻璃纤维对复合材料燃烧特性的影响体现在体积分数、直径及表面处理方式三个核心维度。体积分数是关键影响因素,随着体积分数从30%增至50%,材料热释放速率峰值从680kW/m²降至380kW/m²,这是因为更高含量的纤维能形成更密集的骨架结构,阻碍可燃气体扩散并提升热阻隔能力。玻璃纤维直径对燃烧性能也有显著影响,当直径从17μm减小至10μm时,相同体积分数下试样点燃时间缩短5-8s,热释放速率峰值提高约10%,原因是细纤维比表面积更大,与基体界面结合面积增加,热量传递效率提高,加速基体热分解;而直径增至25μm时,纤维骨架间隙增大,阻隔效果减弱,热释放速率峰值上升约8%。表面处理方式影响界面结合强度,经KH-550处理的纤维与基体结合紧密,燃烧时不易发生界面剥离,残炭率比未处理试样提高7%-10%;而未处理纤维在高温下与基体剥离,形成缝隙,导致氧气渗入,燃烧强度增加^[1]。

3.2 环氧树脂与界面特性的影响

环氧树脂的分子结构、固化程度及界面结合特性直接决定复合材料燃烧行为。环氧树脂分子链中芳香环含量越高,燃烧时成炭能力越强,采用高芳香环含量的E-54环氧树脂替代E-51时,试样残炭率从26%提高至32%,热释放速率峰值降低15%。固化程度不足会导致材料中残留未反应的环氧基团和固化剂,这些挥发性成分会降低点燃时间,当固化度从85%提升至98%时,点燃时间从25s延长至38s,极限氧指数从23%升至25%。界面结合特性的影响尤为关键,界面结合紧密时,热量能快速从基体传递至纤维,纤维及时软化形成热阻隔层,同时抑制基体熔融滴落;当界面存在缺陷时,燃烧过程中易出现界面开裂,氧气通过裂缝渗入材料内部,加速基体热分解,使热释放速率峰值提高20%以上。另外,界面处硅烷偶联剂的分解产物含硅氧化物,能与焦炭协同形成保护层,进一步提升阻燃效果。

3.3 外部环境及阻燃剂的影响

外部环境及阻燃剂是调节复合材料燃烧特性的重要外部因素。外部氧浓度直接影响燃烧强度,当氧浓度从21%(空气)提升至30%时,玻璃纤维体积分数40%的试样点燃时间从35s缩短至18s,热释放速率峰值从520kW/m²增至750kW/m²,燃烧蔓延速度提高1.8倍,表明高氧环境会加速燃烧进程。环境温度和湿度也有一定影响,环境温度从25℃升至50℃时,试样初始热分解温度降低15-20℃,点燃时间缩短10%;相对湿度从30%增至80%时,材料吸潮导致界面结合力下降,燃烧时残炭率降低5%-7%。阻燃剂的添加能显著改善阻燃性能,添加10%的氢氧化铝阻燃剂后,试样极限氧指数从24.2%升至29.5%,热释放速率峰值降至360kW/m²,原因是氢氧化铝受热分解吸热降温,同时释放水蒸气稀释可燃气体,生成的氧化铝覆盖在表面形成阻隔层;添加10%的十溴二苯醚时,阻燃效果更优,极限氧指数达32%,但会产生较多有毒气体,环保性较差。

4 玻璃纤维/环氧树脂复合材料燃烧机制与阻燃优化

4.1 复合材料的燃烧过程演化机制

玻璃纤维/环氧树脂复合材料燃烧过程可分为四个演化阶段,各阶段相互关联形成完整燃烧循环。第一阶段为热解诱导期(温度 ≤ 300℃),外部热量使材料温度升高,环氧树脂开始发生轻度热分解,释放少量低分子挥发物,玻璃纤维无明显变化,界面结合状态保持稳定,材料未出现燃烧现象。第二阶段为点燃燃烧期(300-500℃),随着温度升高,环氧树脂热分解速率加快,释放大量可燃气体,当气体与空气混合达到燃烧极限并

接触点火源时发生点燃,形成火焰并释放大量热量,热量通过传导和辐射使周围基体持续热分解,玻璃纤维开始软化但仍维持骨架结构,界面处开始出现轻微剥离。第三阶段为稳定燃烧期(500-700℃),火焰维持稳定燃烧,环氧树脂大量消耗,燃烧产生的焦炭附着在玻璃纤维表面,形成初步炭层;玻璃纤维进一步软化,骨架结构出现局部坍塌,炭层与纤维协同发挥阻隔作用,燃烧强度逐渐降低。第四阶段为燃烧衰减期(温度 \geq 700℃),环氧树脂基本燃尽,仅残留玻璃纤维和炭层,炭层开始氧化分解,火焰逐渐熄灭,最终残留多孔玻璃纤维骨架。

4.2 玻璃纤维与阻燃剂的协同作用机制

玻璃纤维与阻燃剂在复合材料中通过物理阻隔、化学抑制、热量调控三重作用协同阻燃,提升整体效果。物理阻隔上,玻璃纤维形成刚性骨架,为阻燃剂提供结构支撑,防止其随基体熔融滴落流失,确保持续发挥作用;阻燃剂受热分解生成的无机氧化物填充骨架间隙,形成复合阻隔层,玻璃纤维表面焦炭与之结合,增强阻隔层完整性,阻止氧气和可燃气体传递。化学抑制方面,含磷阻燃剂分解的磷酸类物质催化环氧树脂脱水成炭,玻璃纤维表面硅烷偶联剂分解的含硅化合物与之反应生成稳定硅磷酸酯,提升炭层抗氧化能力;卤素阻燃剂释放的卤化氢气体捕捉活性自由基,玻璃纤维减缓其扩散,延长作用时间。热量调控上,阻燃剂分解吸热与玻璃纤维低导热性协同,降低材料表面温度,延缓环氧树脂热分解,打破燃烧热量循环。

4.3 基于燃烧特性的阻燃优化方案

基于复合材料燃烧特性及影响因素分析,从材料设计、工艺优化及阻燃剂选择三方面制定阻燃优化方案。材料设计方面,确定玻璃纤维最佳体积分数为45%,该含量下纤维能形成致密骨架且不影响材料成型性,搭配高芳香环含量的E-54环氧树脂,提升成炭能力;选用直径

17 μ m的无碱玻璃纤维,经KH-560硅烷偶联剂处理,增强界面结合强度,减少燃烧时界面剥离^[4]。工艺优化方面,采用真空辅助成型工艺替代手糊成型,使材料致密性提高15%,减少内部孔隙和缺陷,避免燃烧时氧气通过孔隙扩散;固化工艺调整为90℃/3h+130℃/5h,确保固化度达到98%以上,降低残留挥发性成分。阻燃剂选择方面,采用氢氧化铝与蒙脱土复配阻燃体系,复配比例为8:2,总添加量12%,既能发挥氢氧化铝的吸热降温及稀释作用,又能利用蒙脱土的层状结构增强阻隔效果,使试样极限氧指数提升至31%,热释放速率峰值降至320kW/m²,且无明显有毒气体产生;同时在材料表面涂覆一层50 μ m厚的硅烷改性丙烯酸酯涂层,进一步提升表面阻燃性能。

结束语

玻璃纤维/环氧树脂复合材料燃烧特性研究意义重大。通过对其组分特性、燃烧机理、评价指标及实验研究的深入分析,明确了多种因素对燃烧特性的影响。揭示的燃烧过程演化机制和协同作用机制,为理解燃烧行为提供理论支撑。提出的阻燃优化方案,从材料设计、工艺优化和阻燃剂选择三方面入手,有效提升了材料阻燃性能,为该复合材料在安全领域的应用提供了可靠依据。

参考文献

- [1]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.
- [2]马俊豪,贾旭宏,汤婧,等.碳纤维、玻璃纤维/环氧树脂热解及燃烧特性对比[J].复合材料学报,2023,40(2):794-803.
- [3]张扬,王峰,张一川,赵子豪,魏刚.中温透波环氧树脂/高强玻璃纤维复合材料的性能研究[J].玻璃纤维,2022(01):11-15.
- [4]杨小军,刘文凤.玻璃纤维增强复合材料用环氧树脂基体性能研究[J].热固性树脂,2021,36(01):27-30.