

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2026.02.011

适用于HP-RTM阻燃环氧树脂的开发及在电池上盖的应用

李炜, 许永峰, 曾亮, 姚丁杨, 杨海洋, 黄安民, 彭超义

(株洲时代新材料科技股份有限公司, 湖南株洲 412007)

摘要: 本文开发了一种适用于高压树脂传递模塑(HP-RTM)工艺的无卤膨胀阻燃环氧树脂体系, 系统研究了自配膨胀型阻燃剂(IFR)添加量对树脂工艺性能、力学性能及阻燃性能的影响。研究表明, 当环氧树脂体系(除固化剂和促进剂外)中IFR质量分数为20%时, 树脂在保持良好工艺性能与力学性能的同时, 极限氧指数提高至30.4%, UL 94阻燃等级达到V-0级。通过HP-RTM工艺制备阻燃环氧树脂/双轴向玻璃纤维布复合材料电池上盖产品, 从产品本体取样获得的复合材料展现出优异的综合性能: 拉伸与弯曲强度分别达571 MPa和874 MPa, 显著优于传统片状模塑材料; UL 94阻燃等级达到最高级别5VA; 电绝缘性能稳定, 未受阻燃剂影响。此外, 复合材料在85 °C、85%相对湿度下经历1 000 h老化后, 阻燃等级仍保持5VA级, 关键力学性能保持率超过92%, 且经1 000 °C、30 min火焰灼烧后, 树脂表面形成致密炭层, 显示出卓越的防火能力, 这表明该复合材料具有突出的长期可靠性, 应用前景良好。

关键词: 环氧树脂; 高压树脂传递模塑; 电池上盖; 复合材料; 阻燃改性

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2026)02-0080-06

Development of flame-retardant epoxy resin suitable for HP-RTM and its application in battery covers

LI Wei, XU Yongfeng, ZENG Liang, YAO Dingyang, YANG Haiyang, HUANG Anmin, PENG Chaoyi

(Zhuzhou Times New Material Technology Co., Ltd., Zhuzhou 412007, China)

Abstract: A novel halogen-free intumescent flame-retardant epoxy resin system suitable for high-pressure resin transfer molding (HP-RTM) processes was developed to systematically investigate the effects of self-prepared intumescent flame retardant (IFR) additive amount on resin processability, mechanical properties, and flame retardancy. Results indicate that at 20 wt% IFR in the epoxy resin system excluding curing agent and accelerator, the resin maintains excellent processability and mechanical properties while achieving a limiting oxygen index of 30.4% and a UL 94 flame retardant rating of V-0. The battery cover products made of flame-retardant epoxy resin/biaxial glass fiber cloth composites were prepared by the HP-RTM process. The composite obtained from sampling the product body exhibits outstanding comprehensive properties. The tensile and flexural strengths reach 571 MPa and 874 MPa respectively, significantly outperforming traditional sheet molding compound materials. The composite achieves the highest UL 94 flame retardant rating of 5VA, with stable electrical insulation unaffected by flame retardants. Furthermore, after 1 000 hours of aging at 85 °C and 85% relative humidity, the composite maintains UL 94 flame retardant rating of 5VA and retains over 92% of its key mechanical properties. Moreover, after 30 minutes of flame exposure at 1 000 °C, a dense charring layer is formed on the resin surface, demonstrating outstanding fire resistance of the composites. This indicates that the composite exhibits exceptional long-term reliability and promises application prospects.

Keywords: epoxy resin ; high-pressure resin transfer molding ; battery cover ; composite ; flame-retardant modification

在国家“双碳”战略的牵引下, 新能源产业迎来了爆发式增长。与之配套的电池系统的安全性与可靠性已成为当前研究的热点与关键技术挑战^[1-2]。作为储能及动力电池包中的关键封装与防护构件,

电池上盖不仅承担结构支撑与密封防护的双重功能, 还须在热失控、内部短路或外部撞击等极端工况下, 有效抑制火焰传播与热扩散, 以最大限度保障人身和财产安全^[3]。因此, 开发具备轻量化、高强

通信作者: 杨海洋, 博士, 正高级工程师, 研究方向为高分子化学

收稿日期: 2025-11-18

引用格式: 李炜, 许永峰, 曾亮, 等. 适用于HP-RTM阻燃环氧树脂的开发及在电池上盖的应用[J]. 工程塑料应用, 2026, 54(2): 80-85.

LI Wei, XU Yongfeng, ZENG Liang, et al. Development of flame-retardant epoxy resin suitable for HP-RTM and its application in battery covers[J]. Engineering Plastics Application, 2026, 54(2): 80-85.

度及优异阻燃性能的电池上盖材料,对于提升电池包的整体安全水平具有至关重要的意义。

目前,电池上盖的制造材料主要包括金属(如铝合金)、工程塑料(如聚酰胺、聚丙烯)及纤维增强复合材料[如片状模塑料(SMC)、环氧基复合材料]等^[4-5]。其中,纤维增强复合材料因其出色的比强度、比模量与耐候性好等特点,受到广泛关注。在众多复合材料成型工艺中,高压树脂传递模塑(HP-RTM)工艺因适用于高性能复杂构件而备受重视。HP-RTM是一种在封闭模具内高压注入树脂以浸润纤维增强材料的成型方法^[6-7]。其主要优势在于:(1)注射压力大(通常大于5 MPa)可以实现树脂快速充模与纤维高效浸润,显著降低孔隙率,从而提升复合材料力学性能;(2)常配合快速固化树脂体系,成型周期短,可控制树脂在数分钟内固化,满足汽车行业大批量、快节奏生产要求,此外,HP-RTM工艺同样要求树脂体系具有低黏度的特性,以保证树脂优异的流动性;(3)适用于大型复杂构件的整体成型,所得制品表面质量良好,后续加工需求少,易于实现自动化与半自动化生产。基于上述特点,HP-RTM被视作制备大型、复杂结构高性能复合材料构件最具潜力的成型工艺之一^[8-9]。

环氧树脂因其优异的力学性能、电绝缘性和化学稳定性,成为HP-RTM工艺中应用最广泛的基体树脂之一^[10-12]。然而,常规环氧树脂极限氧指数(LOI)较低(约19.8%),阻燃性能不足,难以满足电池上盖对防火安全的要求。为改善环氧树脂阻燃性,传统方法常使用溴系阻燃剂,虽然其可明显提高阻燃效果^[13],但在燃烧过程中会产生大量有毒有害气体,因此逐渐被禁止使用^[14]。近年来,无卤磷氮膨胀型阻燃剂因其具有低毒、低烟等特性,被广泛应用于环氧树脂阻燃改性^[15-16]。但该类阻燃剂与环氧树脂的相容性较差,在实际使用过程中易出现沉降、析出和迁移等问题,影响材料的长期稳定性和阻燃持久性^[17]。

基于上述背景,本研究旨在开发一种适用于HP-RTM成型工艺的阻燃环氧树脂体系,以满足新能源电池上盖在工程应用中的性能要求。通过引入膨胀型阻燃剂(IFR),系统研究其添加量对树脂工艺性能、固化产物力学性能及阻燃行为的影响规律。在此基础上,选取综合性能最优的树脂配方,通过HP-RTM工艺制备电池上盖产品,对上盖本体

进行取样测试,系统评估了其力学性能、电绝缘性、阻燃等级及耐湿热老化性能。最后,通过连续火烧试验验证该材料体系在模拟热失控场景下的防火有效性。结果表明,所开发的阻燃环氧树脂体系能够满足复合材料电池上盖的各项关键技术指标,展现出良好的工程应用潜力。

1 实验部分

1.1 主要原材料

双酚A型环氧树脂:E-51,工业级,中国蓝星化工新材料股份有限公司;

1,4-丁二醇二缩水甘油醚(622 稀释剂):工业级,湖北绿色家园材料技术股份有限公司;

炭黑(着色剂):EA-B03,工业级,湖北溢彩新材料科技有限公司;

三乙烯四胺(TETA)和N-氨基乙基哌嗪(AEP)(固化剂):工业级,亨斯迈国际有限责任公司;

2,4,6-三(二甲氨基甲基)苯酚(DMP-30)(促进剂):工业级,岳阳中展科技有限公司;

溴化环氧树脂:KJB-400,工业级,山东开济化学科技有限公司;

次磷酸铝型阻燃剂:WSFR-3151,工业级,浙江万盛股份有限公司;

六苯氧基环三磷腈(HPCTP):工业级,浙江万盛股份有限公司;

双轴向(0°/90°)无碱玻璃纤维织物:面密度700 g/m²,常州普泰玻纤制品有限公司;

SMC:英力士复合材料有限公司。

1.2 主要仪器及设备

电子天平:JA21002,精度0.01 g,上海精密仪器仪表有限公司;

高速机械搅拌器:JB90-S,上海梅颖浦仪器仪表制造有限公司;

真空干燥箱:PH-250,上海苏盈试验仪器有限公司;

旋转黏度计:LVDV-II Pro,美国博勒飞Brookfield(中国)有限公司;

万能材料试验机:Z100,Zwick(中国)有限公司;

简支梁冲击试验机:KRT-2022C,昆山科瑞特试验仪器有限公司;

LOI测定仪:JF-5,北京中航时代仪器设备有限公司;

水平垂直燃烧测定仪:CZF-5,北京智德创新仪器设备有限公司;

高低温湿热交变试验箱:JYW-183,重庆奥普提科技有限公司;

耐压测试仪:RK2683AN,深圳美瑞克电子科技有限公司;

差示扫描量热(DSC)仪:DSC 3,梅特勒托利多国际有限公司;

电位滴定仪:JH-T8,上海佳航仪器仪表有限公司;

扫描电子显微镜(SEM):JSM-6610LV,日本电子株式会社;

反应釜:S212-100L,上海聚昆仪器设备有限公司;

HP-RTM设备:RS8/4RTM,德国克劳斯玛菲股份有限公司。

1.3 适用于HP-RTM阻燃电池上盖用环氧树脂的制备

1.3.1 阻燃环氧树脂A组分制备

根据表1配方将环氧树脂、稀释剂、溴化环氧树脂、自配IFR(由次磷酸铝型阻燃剂和HPCTP组成)、着色剂加入反应釜中,控温100~110℃,待树脂黏度下降后高速分散3h,最后真空脱泡10min后得到HP-RTM阻燃树脂A组分,外观为黑色液体。

表1 阻燃环氧树脂配方(质量分数)

Tab.1 Formula of flame retardant epoxy resin (mass fraction) %

Component	Type or brand of raw material	EP-0	EP-1	EP-2	EP-3	EP-4	
A	Epoxy resin	E-51	60	75	70	60	50
	Diluent	622	15	15	15	15	15
	Brominated epoxy resin	KJB-400	20				
	IFR	WSFR-3151		3	7	13	20
		HPCTP		2	3	7	10
	Colorant	EA-B03	5	5	5	5	5
B	Curing agent	TETA	70	70	70	70	70
		AEP	20	20	20	20	20
	Accelerator	DMP-30	10	10	10	10	10

1.3.2 阻燃环氧树脂B组分制备

根据表1配方将固化剂及促进剂加入反应釜中,在室温状态下持续搅拌1h,最后真空脱泡10min后得到HP-RTM阻燃树脂B组分,外观为淡黄色透明液体。

1.3.3 环氧树脂固化物的制备

通过不同树脂的环氧值计算出两组分最佳混合比,将A组分和B组分在室温下,按照最佳混合比

混合搅拌并进行真空脱泡。按照50℃/2h、120℃/0.5h的条件将上述制得的环氧树脂组合物固化,制得所需环氧树脂固化物。

1.4 复合材料电池上盖的制备

采用HP-RTM工艺制备复合材料电池箱上盖:首先将双轴向玻纤布按照模具尺寸裁成标准大小,并在模具型腔中涂抹两遍脱模剂,测量模具温度,达到110℃后,将玻纤布铺叠至模具中,按照250g/s注胶流量、10s注胶时间及树脂A/B组分最佳混合比设置注胶参数。合模压力设定为1800t,待压机合模注胶完毕后,保压270s至树脂固化完全,脱模后得到复合材料上盖,玻纤质量分数为68%±3%。根据树脂基体的不同,将复合材料命名为EP-X/GF(X为不同环氧树脂基体编号)。

1.5 测试与表征

密度测试:使用密度瓶法,按GB/T 4472-2011测试。

环氧值测试:使用电位滴定仪,按GB/T 4612-2008测试。

黏度测试:使用旋转黏度计,并在自制的油浴循环温度控制系统中,按GB/T 10247-2008测试。

玻璃化转变温度(T_g)测试:采用DSC仪,按ISO 11357-2:2020测试。

力学性能测试:采用万能材料试验机,环氧树脂固化物和复合材料的拉伸性能分别按GB/T 2567-2021和GB/T 1447-2005进行测试,拉伸速度为2mm/min,弯曲性能分别按GB/T 2567-2021和GB/T 1449-2005进行测试,加载速率为2mm/min。

冲击韧性测试:采用简支梁冲击试验机,环氧树脂固化物冲击韧性按GB/T 2567-2021测试,复合材料冲击韧性按照GB/T 1451-2005测试。

LOI测试:按GB/T 2406.2-2009测试,使用LOI仪测试,试样尺寸为100mm×6.5mm×3mm。

垂直燃烧测试:按UL 94测试,环氧树脂固化物试样尺寸为130mm×13mm×4mm,复合材料试样尺寸为130mm×13mm×1.1mm。

火焰燃烧试验测试:使用丙烷火焰,1000℃下持续燃烧30min,复合材料试样尺寸为150mm×150mm×1.1mm。

漏电电流与绝缘电阻测试:分别按GB/T 1408.1-2016和GB/T 31838.4-2019标准,使用耐压测试仪在1000V直流电压下测定。

2 结果与讨论

2.1 阻燃环氧树脂的基本性能

为评估不同质量分数的IFR对环氧树脂基本性能的影响,参照1.3制备了不同IFR含量的环氧树脂,其中以EP-0传统卤系阻燃体系作为空白对照组,测试结果见表2。不同IFR含量的环氧树脂各项基本性能均有一定差异,其中黏度和凝胶时间是HP-RTM工艺控制的重要指标,因此在配方设计时,需要重点考虑树脂的工艺性能,从而设计适当的IFR添加量。从表2看出,IFR质量分数在30%以下时,均可满足HP-RTM的工艺要求。

表2 IFR不同质量分数下环氧树脂的基本性能

Tab. 2 Basic properties of epoxy resin under different mass fractions of IFR

Samples	IFR mass fraction/%	Density/ (g·cm ⁻³)	Epoxy value/ [mol·(100 g) ⁻¹]	Viscosity/ (mPa·s)	100 °C gel time/ s
EP-0	0	1.35	0.46	12 300	76
EP-1	5	1.35	0.45	13 900	81
EP-2	10	1.34	0.43	19 100	84
EP-3	20	1.32	0.40	24 500	73
EP-4	30	1.31	0.36	32 700	71

2.2 阻燃环氧树脂固化物的性能

为对比不同IFR含量对环氧树脂固化物各项性能的影响,根据1.3制备了对应的环氧树脂固化物,并测试其各项关键性能,结果见表3。随着IFR添加量的增加,固化物的 T_g 、拉伸强度和弯曲强度总体呈现缓慢下降的趋势,除IFR添加量较大的EP-4外,模量则相对较为稳定;而冲击韧性下降较为明显,可能是IFR的加入使得其在树脂中形成了应力集中点,导致树脂材料更易脆断;阻燃性能是本研究的重点,当IFR的质量分数达到20%时,EP-3的LOI达到30.4%,可以通过UL 94 V-0测试。作为空白对照组的EP-0虽然也可以通过V-0测试,但是溴化环

表3 IFR不同质量分数下阻燃环氧树脂固化物性能对比

Tab. 3 Comparison of properties of flame retardant cured epoxy resin under different mass fractions of IFR

Items	EP-0	EP-1	EP-2	EP-3	EP-4
$T_g/^\circ\text{C}$	115.1	113.9	112.7	110.2	109.4
Tensile strength/MPa	68.7	69.3	67.2	65.3	61.7
Tensile modulus/GPa	2.97	2.97	2.95	2.95	2.77
Elongation at break/%	3.8	4.0	3.8	3.8	3.6
Bending strength/MPa	131	130	127	125	118
Bending modulus/GPa	2.91	2.88	2.85	2.88	2.81
Impact toughness/(kJ·m ⁻²)	25	24	22	21	18
UL 94 flame retardant rating	V-0	V-2	V-1	V-0	V-0
LOI/%	28.8	25.3	27.9	30.4	32.4

氧树脂的加入导致该固化物在燃烧时产生大量有毒气体。EP-0及EP-3燃烧残炭的微观形貌如图1所示,溴化环氧树脂主要在气相中发挥阻燃效果,因此EP-0的残炭有较多的裂纹和空洞。而EP-3表面残炭完整且光滑致密,机理可能是次磷酸铝型阻燃剂发生热氧分解生成磷酸盐并和环氧树脂燃烧产生的芳香族物质产生致密的炭层,从而起到凝聚相阻燃作用。HPCTP燃烧过程产生的苯氧基及其歧化物可以淬灭自由基,终止燃烧链式反应,起到气相阻燃作用。因此复配阻燃剂可以兼顾凝聚相和气相阻燃效能,提高阻燃效果。经过综合对比,选用EP-3作为基体树脂进行后续的测试和试验。

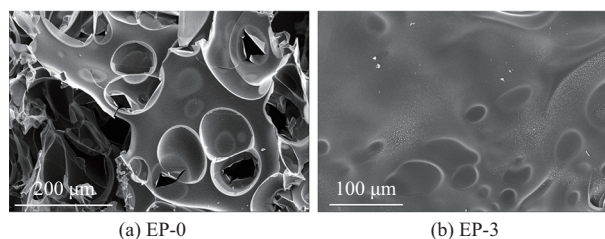


图1 环氧树脂固化物燃烧残炭SEM照片

Fig. 1 SEM images of carbon residue from combustion of cured epoxy resin

2.3 阻燃环氧树脂/双轴向玻纤布复合材料的性能

将筛选出的EP-3树脂与空白对照组EP-0参考1.4通过HP-RTM工艺制成电池上盖,并将本体取样的复合材料与市售SMC材料进行对比,测试结果见表4。由表4可知,无论是EP-0/GF还是EP-3/GF,其各项性能均明显优于传统的SMC材料,拉伸、弯曲强度和模量均提升2~4倍,这充分体现了连续纤维和高性能环氧树脂带来的优势。比较EP-0/GF和EP-3/GF可以发现,加入一定量的IFR后,复合材料力学性能无明显下降,说明阻燃剂并未明显破坏环氧树脂与纤维的界面性能。值得一提的是,传统的IFR会导致材料的绝缘性能显著下降,而EP-3/GF

表4 阻燃环氧树脂复合材料性能对比

Tab. 4 Comparison of properties of flame-retardant epoxy composite materials

Items	EP-0/GF	EP-3/GF	SMC
Tensile strength/MPa	596	571	113
Tensile modulus/GPa	27.8	28.6	9.9
Elongation at break/%	3.1	2.9	1.8
Bending strength/MPa	892	874	273
Bending modulus/GPa	34.2	35.4	8.6
Impact toughness/(kJ·m ⁻²)	137	121	103
Leakage current/mA	0.18	0.17	0.38
Insulation resistance/MΩ	3.6×10 ⁸	3.2×10 ⁸	1.4×10 ⁸
UL 94 flame retardant rating	V-0	5VA	V-0

电绝缘性与EP-0/GF空白对照组相当,可能是由于该IFR和基体树脂极性相差较小,改善了其和树脂的相容性;在UL 94测试中,EP-0/GF的阻燃等级仅达到V-0级,而EP-3/GF可以达到5VA级,这可能是树脂燃烧时产生的炭层较为致密且坚固,能够有效抵挡更高强度的火焰冲击的缘故,这也为电池系统提供了更高的防火保护,远超普通阻燃环氧树脂EP-0及常用的SMC材料。

传统的IFR,如聚磷酸铵/季戊四醇/三聚氰胺氰尿酸盐体系,由于其结构中富含羟基,因此易吸湿,耐水性较差,材料在长时间湿热老化后,其中的小分子阻燃剂极易迁移至表面,从而导致材料的外观

发生改变且性能显著下降。为验证自配IFR是否会以上现象,将材料置于湿热老化箱中进行湿热老化测试,测试条件为85℃/85%相对湿度,测试时间为1 000 h。结果见表5。空白对照组EP-0老化后力学性能略有下降,但强度保留率达96%以上,模量及冲击韧性基本保持不变,且阻燃等级同样为V-0级,表现出较为良好的耐湿热性能。加入一定量IFR的EP-3/GF,其性能变化趋势与空白对照组类似,各项力学性能无明显下降,保留率超过92%,阻燃等级也同为5VA级,且材料外观无明显阻燃剂析出,证明该IFR体系与环氧树脂基体结合相对稳定,保证了材料长期使用的可靠性。

表5 阻燃环氧树脂复合材料湿热老化性能对比

Tab. 5 Comparison of hot-humid aging performances of flame retardant epoxy resin composites

Items	EP-0/GF			EP-3/GF		
	Before aging	After aging	Change rate	Before aging	After aging	Change rate
Tensile strength/MPa	596	577	-3.2%	571	556	-2.6%
Tensile modulus/GPa	27.8	27.6	-0.7%	28.6	27.1	-5.2%
Elongation at break/%	3.1	3.0	-3.2%	2.9	2.8	-3.4%
Bending strength/MPa	892	849	-4.8%	874	811	-7.2%
Bending modulus/GPa	34.2	34.2	0.0%	35.4	35.1	-0.8%
Impact toughness/(kJ·m ⁻²)	137	138	0.7%	121	117	-3.3%
UL 94 flame retardant rating	V-0	V-0	-	5VA	5VA	-

2.4 阻燃环氧树脂/双轴向玻纤布复合材料的防火能力

为更直观地评价EP-3/GF复合材料的极端火场防护能力,在电池上盖本体取样,规格均为150 mm×150 mm×1.1 mm片状复合材料。根据1.5进行了1 000℃/30 min连续火焰燃烧试验,结果如图2所示。图2a为SMC材料对照组,可以看出材料在长时间燃烧后,受火面的树脂分解,纤维裸露。图2b为由EP-0树脂基体制得的上盖产品,受火面的树脂同样完全分解,纤维完全裸露,这是因为溴系阻燃剂主要在气相中阻燃,在长时间燃烧中对树脂基体和纤维的保护有限。图2c为由膨胀型阻燃树脂EP-3制备的上盖产品,由于树脂基体良好的成炭能力,受火面有大量坚固致密残炭覆盖,未有裸露纤

维。该试验直观证明了EP-3树脂具有优异的阻燃防火能力。

3 结论

(1)本研究成功开发出一种适用于HP-RTM工艺的高性能阻燃环氧树脂体系,发现自配的IFR对环氧树脂表现出优异的阻燃改性效果。当IFR质量分数为20%时,对应EP-3树脂体系在保持良好工艺适应性的前提下(黏度24 500 mPa·s,凝胶时间73 s),其固化物的LOI提升至30.4%,阻燃等级达到V-0级,同时力学性能下降幅度较小,显示出理想的综合性能。

(2)采用HP-RTM工艺成型的EP-3/GF复合材料展现出卓越的综合性能。其力学性能显著优于传统SMC材料,阻燃等级达到最高的5VA级。此外,该复合材料表现出优异的环境耐久性:经1 000 h、85℃/85%相对湿度的加速湿热老化后,其核心力学性能保持率仍超过92%,且阻燃等级未发生变化,证明了该复合材料在严苛工况下具备长期使用的可靠性。

(3)在1 000℃的连续火焰灼烧下,EP-3/GF复合材料通过高效地膨胀成炭反应,迅速形成了一层坚固致密的保护炭层。该炭层显著阻隔了热量与

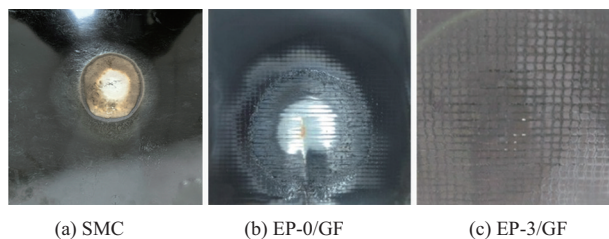


图2 1 000℃火焰燃烧试验及结果

Fig. 2 1 000℃ flame combustion test and results

可燃物的传递,直观验证了该复合材料基于膨胀成炭的有效阻燃机制。

综上所述,本研究开发的EP-3阻燃环氧树脂体系满足HP-RTM的要求,对应复合材料的综合性能优异,在动力/储能电池上盖产品中具有良好的应用前景。

参考文献

- [1] 刘岩,尹艳萍,黄倩,等.我国新能源汽车动力电池安全现状分析与探讨[J].电池工业,2022,26(6):309-312,320.
LIU Yan, YIN Yanping, HUANG Qian, et al. Safety status and suggestions of country's new energy vehicle power battery industry [J]. Chinese Battery Industry, 2022, 26(6):309-312, 320.
- [2] 顾泽波,唐昕雅,黄鲲,等.新型电化学储能安全技术及标准研究[J].电源技术,2025,49(6):1 148-1 158.
GU Zebo, TANG Xinya, HUANG Kun, et al. Research on safety technology and standard of new electrochemical energy storage[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2025, 49(6):1 148-1 158.
- [3] 冯毅,张德良,高翔.基于安全、轻量化、可靠性多目标的新能源汽车电池包壳体开发[J].汽车工程学报,2024,14(2):155-167.
FENG Yi, ZHANG Deliang, GAO Xiang. Development of new energy vehicle battery cases based on safety, lightweighting and reliability[J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2024, 14(2):155-167.
- [4] 叶淑英.新能源汽车电池包上盖专用阻燃聚丙烯的研制[J].工程塑料应用,2019,47(5):21-26.
YE Shuying. Development of flame retardant polypropylene for battery pack top cover of new energy vehicle[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(5):21-26.
- [5] 林新耀,乔兵,高梦鸾,等.连续玻璃纤维增强聚丙烯热塑性复合材料电池包上盖[J].汽车与配件,2024(13):60-62.
LIN Xinyao, QIAO Bing, GAO Mengluan, et al. Continuous glass fiber reinforced polypropylene thermoplastic composite battery pack top cover[J]. Automobile & Parts, 2024(13):60-62.
- [6] 蒋诗才,包建文,张连旺,等.液体成型树脂基复合材料及其工艺研究进展[J].航空制造技术,2021,64(5):70-81, 102.
JANG Shicai, BAO Jianwen, ZHANG Lianwang, et al. Research progress of liquid molding resin matrix composites and its technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(5): 70-81, 102.
- [7] 武健,米新征.碳纤维复合材料HP-RTM模压成形装备[J].锻造与冲压,2023(10):28-33.
WU Jian, MI Xinzheng. Compression molding machine of HP-RTM carbon fiber composite materials[J]. Forging & Stamping, 2023(10):28-33.
- [8] 武健,王世明,米新征.碳纤维复合材料高压树脂传递模塑(HP-RTM)成型工艺[J].机械设计,2023,40(S1):173-177.
WU Jian, WANG Shiming, MI xinzheng. High-pressure resin transfer molding (HP-RTM) process for carbon fiber composites[J]. Journal of Machine Design, 2023, 40(S1):173-177.
- [9] 姜淑巍,董晓传,杜丽峰.复合材料树脂传递模塑成型工艺研究进展[J].机电工程技术,2024,53(1):24-29.
JIANG Shuwei, DONG Xiaochuan, DU Lifeng. Research progress of resin transfer molding technology for composite materials[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2024, 53(1): 24-29.
- [10] 张欢,陈杰,王美发,等. HP-RTM高活性树脂体系制备及性能[J].工程塑料应用,2022,50(8):42-47.
ZHANG Huan, CHEN Jie, WANG Meifa, et al. Preparation and properties of HP-RTM resin system with high reactivity[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(8):42-47.
- [11] 郭帅,杨旭静,方文俊,等.快速固化环氧树脂/碳纤维复合材料的性能[J].工程塑料应用,2017,45(4):12-16.
GUO Shuai, YANG Xujing, FANG Wenjun, et al. Properties of rapid curing epoxy resin/carbon fiber composites[J]. Engineering Plastics Application, 2017, 45(4):12-16.
- [12] 沈蒙莎,彭超义,李建林,等.适用于HP-RTM板簧用环氧树脂固化工艺及验证[J].塑料工业,2025,53(1):134-138.
SHEN Mengsha, PENG Chaoyi, LI Jianlin, et al. Curing process and verification of epoxy resin for HP-RTM plate spring[J]. China Plastics Industry, 2025, 53(1):134-138.
- [13] 陈明奇,李仙会.溴锑协同阻燃剂提高环氧树脂泡沫的阻燃性能[J].工程塑料应用,2025,53(5):155-162, 168.
CHEN Mingqi, LI Xianhui. Flame retardancy of epoxy resin foams improved by bromine-antimony synergistic flame retardants [J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(5):155-162, 168.
- [14] 童艺,程伊雪,吴冠履,等.新型溴系阻燃剂环境污染现状研究进展[J].环境化学,2021,40(1):83-101.
TONG Yi, CHENG Yixue, WU Guanlv, et al. Current research progress on environmental pollution of novel brominated flame retardant[J]. Environmental Chemistry, 2021, 40(1):83-101.
- [15] 胡志.单分子膨胀型无卤阻燃环氧树脂的制备[J].工程塑料应用,2022,50(10):21-24, 35.
HU Zhi. Preparation of single molecular intumescent halogen-free flame retardant epoxy resin[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(10):21-24, 35.
- [16] 封春甫,王立合,岳福升,等.磷系复配阻燃剂协同体系在环氧树脂中的研究进展[J].化工科技,2025,33(3):72-80.
FENG Chunfu, WANG Lihe, YUE Fusheng, et al. Research progress on synergistic system of phosphorus based compound flame retardants in epoxy resins[J]. Science & Technology in Chemical Industry, 2025, 33(3):72-80.
- [17] 袁博,贾蕊汀,杨旭,等.功能化聚磷酸铵在环氧树脂阻燃中的应用研究进展[J].塑料科技,2025,53(9):209-214.
YUAN Bo, JIA Ruiting, YANG Xu, et al. Research progress of application of functionalized ammonium polyphosphate in flame retardancy of epoxy resin[J]. Plastics Science and Technology, 2025, 53(9):209-214.