

酚醛改性氨基模塑料在交流接触器触头支架中的应用研究

肖体锋¹, 覃家波², 郭超雄², 刘建文^{2*}, 刘艳斌²

(1. 浙江正泰电器股份有限公司, 浙江 乐清 325600;

2. 桂林金格电工电子材料科技有限公司, 广西 桂林 541004)

摘 要:针对交流接触器触头支架严苛的服役要求,采用线性酚醛树脂共混改性氨基模塑料,系统研究酚醛树脂含量对试样力学性能、耐热性能、耐磨性能及电气绝缘性能的影响,借助红外光谱与扫描电镜分析试样的微观结构,并考察模具温度与配方的交互作用,同时对成品支架的机械寿命进行测试。结果表明:在酚醛树脂质量分数为0%~25%范围内,酚醛与氨基树脂发生缩合反应并形成半互穿网络聚合物;酚醛树脂质量分数为15%时试样的综合性能最优,无缺口冲击强度、弯曲强度、负荷变形温度、工频电气强度较纯氨基树脂分别提高了47.9%、41.1%、69.1%、32.8%;继续增加酚醛树脂含量,试样的力学性能仅小幅回落;酚醛树脂质量分数为25%时试样的耐磨性能最优,产物磨损量较纯氨基试样降低了87.2%。在160~180℃成型温度区间内,质量分数为15%的酚醛与高温固化对模塑料存在协同增效作用。采用质量分数为15%及以上的酚醛制备的改性材料成型触头支架,接触器的机械寿命可达1 200万次,满足长期服役条件。

关键词:酚醛改性氨基模塑料;交流接触器;触头支架;耐磨性能;力学性能

Application study of phenolic-modified aminoplastic molding compound for contact supports in AC contactors

Xiao Tifeng¹, Qin Jiabo², Guo Chaoxiong², Liu Jianwen^{2*}, Liu Yanbin²

(1. Zhejiang CHINT Electrics Co., Ltd., Yueqing 325600, China;

2. Guilin Coninst Electrical & Electronic Material Co., Ltd., Guilin 541004, China)

Abstract: To address the stringent service requirements of AC contactor contact supports, linear phenolic resin was used for the blending modification of amino molding compounds. The effects of phenolic resin contents on mechanical properties, heat resistance, wear resistance, and electrical insulation properties of samples were investigated systematically. Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) and scanning electron microscopy (SEM) were employed to characterize the microstructure of samples, and the interaction between molding temperature and formulation was further explored. Meanwhile, the mechanical life tests of finished supports were carried out. The results show that within the range of phenolic resin mass fraction from 0% to 25%, condensation reaction occurs between phenolic resin and amino resin to form a semi-interpenetrating polymer network. When the mass fraction of phenolic resin is 15%, the comprehensive performance of the sample is the best. Its unnotched impact strength, flexural strength, deflection temperature under load, and power frequency electric strength increase by 47.9%, 41.1%, 69.1%, and 32.8%, respectively, compared with those of the pristine amino molding compound. Further increasing the content of phenolic resin, the mechanical properties of samples only slightly decrease. When the mass fraction of phenolic resin is 25%, the wear resistance of the sample is the best, and the average wear loss is 87.2% lower than that of the pure amino sample. Within the molding temperature range of 160-180℃, phenolic resin with a mass fraction of 15% and high-temperature curing has a synergistic effect on the molding compound. The modified materials prepared by using phenolic resins with a mass fraction of 15% or above are used to form the contactor's contact switch, and the mechanical life of the contactor can reach 12 million cycles, which can meet the requirements for long-term service.

Key words: phenolic-modified aminoplastic molding compound; AC contactor; contact support; wear resistance; mechanical properties

0 引言

交流接触器是低压配电与控制系统的核心电

器元件,触头支架作为其关键支撑与传动部件,在服役过程中不仅需承受高频开合的交变载荷、触头

通断产生的焦耳热及电弧烧蚀,还会与塑料外壳持续摩擦,产生的粉末易附着于金属触头而引发导电失效,大幅缩短接触器使用寿命,因此对触头支架基材的韧性、耐磨性、电绝缘性等综合性能提出严格要求^[1]。当前交流接触器触头支架的常用热固性基材主要包括氨基模塑料、玻纤增强不饱和聚酯模塑料与酚醛模塑料3类。其中氨基模塑料成型工艺成熟、成本可控,是通用型触头支架的常用选材;玻纤增强不饱和聚酯模塑料综合力学性能突出,多用于重载工况;酚醛模塑料耐热阻燃性能优良,多用于高温绝缘构件^[2-3]。

氨基模塑料是以尿素/三聚氰胺-甲醛缩聚树脂为基体,复配引发剂、增强纤维、无机填料及助剂制成的热固性材料,其具有收缩率低、成型加工性好、原料成本低廉等优势,广泛应用于低压电器绝缘结构件^[4]。但纯氨基模塑料存在脆性大、冲击韧性不足的缺陷,其耐热性能与耐磨性能也难以适配触头支架长期服役工况,亟须通过树脂共混改性实现材料综合性能的协同提升^[5]。

目前,氨基模塑料的改性方法主要包括无机填料改性、树脂共混改性和化学交联改性等,其中无机填料改性因工艺简单、成本低廉得到了广泛应用^[6]。

针对三聚氰胺-甲醛树脂的增韧改性,国内外学者开展了大量研究,主要包括弹性体增韧、热塑性树脂增韧和纳米材料增韧等技术路线^[7]。

三聚氰胺-甲醛氨基树脂在耐电弧性、电寿命及相比漏电起痕指数(CTI)等核心电气指标上显著优于酚醛树脂,这是其长期作为触头支架核心基材的关键原因。酚醛树脂是1907年由L H Baekeland发明的世界上第一种完全人工合成热固性树脂,以其为基体制备的酚醛模塑料机械强度高、耐高温、耐磨性能突出;且酚醛树脂与氨基树脂的固化反应体系相互兼容,无机理冲突,可通过共缩聚强化两相界面结合,是对氨基模塑料进行增韧耐磨改性的理想材料^[8]。但纯酚醛模塑料的固化速率慢、成型周期长、制品尺寸稳定性弱于氨基模塑料,且原料成本相对高,单独作为触头支架基材时,在高频交变载荷下存在脆性开裂风险,因此工业应用中多将其作为改性组分与氨基树脂共混,协同并平衡材料的综合性能与加工经济性。目前酚醛改性氨基树脂体系的研究多集中于胶黏剂^[9]、涂料^[10]等领域,针

对模塑料配方体系优化及其在交流接触器触头支架中的工程化应用研究鲜有报道。

为延长交流接触器使用寿命,满足器件制造商对触头支架用热固性材料的高性能要求,本文采用酚醛树脂共混改性氨基树脂,制备高耐磨、常规性能优良的酚醛改性氨基模塑料,系统表征材料的理化与电气性能,筛选最优配方制备成品支架并开展接触器机械寿命测试,验证其应用可行性,为交流接触器触头支架的材料选型与配方优化提供参考和依据。

1 实验

1.1 主要原材料

线性酚醛树脂,工业级,济南圣泉集团股份有限公司;三聚氰胺甲醛(MF)氨基树脂,工业级,江苏丹化集团有限责任公司;六亚甲基四胺(乌洛托品),分析纯,天津科密欧化学试剂有限公司;增强纤维,重庆国际复合材料股份有限公司;脱模剂,工业级,广州化学试剂厂;无机填料,河北久鹏化工股份有限公司;硅烷偶联剂,分析纯,南京曙光化工集团有限公司;着色剂,工业级,上海颜钛实业有限公司。

1.2 主要仪器设备

LN-160型开炼机,利拿机械实业有限公司;3HP型破碎机,汕头市群达塑胶机械有限公司;VFS-90U型热固性注射机,上海川口机械有限公司;XJJ-5型冲击试验机,承德市试验机厂;MH-20型塑料摩擦磨损试验机,长春市智能仪器设备有限公司;21H-006型三思试验机、EVT-1600型维卡热变形试验机,深圳三思纵横科技股份有限公司;HG-10/50型电气击穿测试仪,桂林赛盟检测技术有限公司;Nicolet iS50 FTIR型傅里叶变换红外光谱仪,美国Thermo Scientific公司;JSM-IT300型扫描电子显微镜,日本电子株式会社。

1.3 试样制备

固定基体树脂总质量为100份,以酚醛树脂占基体树脂总质量的质量分数为变量,分别设置5%、10%、15%、20%、25%共5个梯度,对应试样编号为PF-5、PF-10、PF-15、PF-20、PF-25,同时设置纯氨基树脂对照组(PF-0)。

试样制备工艺:按照配方比例,先将酚醛树脂与氨基树脂在高速混合机中预混5 min,再加入乌洛托品、无机填料、硅烷偶联剂、脱模剂及着色剂混合

10 min, 然后加入增强纤维继续混合 3 min, 得到均匀的混合料。将混合料加入开炼机并辊炼成片。混合料经冷却、粉碎后, 制得酚醛改性氨基模塑料。将制备好的酚醛改性氨基模塑料采用热固性注塑机注射成型为标准测试试样, 注射成型工艺参数为: 模具温度为 160~180℃, 料筒前段温度为 90~105℃、后段温度为 70~90℃, 注射压力为 60~100 MPa, 固化速率为 10~20 s/mm; 同时采用交流接触器触头支架模具模压制备成品件, 用于装机验证。

1.4 性能测试

力学性能与耐热性能: 参照 GB/T 1043.2—2018 相关要求测试试样的冲击强度; 参照 GB/T 9341—2008 相关要求测试试样的弯曲强度; 参照 GB/T 1634.1—2025 相关要求测试试样的负荷变形温度。

电性能与耐磨性能: 参照 GB/T 1408.1—2016 相关要求测试试样的工频电气强度; 参照 GB/T 3960—2016 相关要求测试试样的耐磨性能。

微观结构表征: 采用扫描电子显微镜观察试样的冲击断面形貌, 测试前对试样断面进行喷金处理, 选取放大倍数为 100 倍和 500 倍; 采用傅里叶变换红外光谱仪 (FTIR) 对试样进行表征, 分析试样的官能团组成与分子结构特征, 测试波数为 4 000~400 cm⁻¹, 扫描次数为 32 次, 分辨率为 4 cm⁻¹。

成品性能验证: 参照 GB/T 14048.4—2020 规定的试验方法, 开展交流接触器机械寿命测试。

2 结果与分析

2.1 耐磨性能测试

对不同酚醛含量的改性氨基模塑料进行耐磨性能测试, 得到磨损量随酚醛树脂含量的变化趋势如图 1 所示。从图 1 可以看出, 当酚醛树脂质量分数为 0%~25% 时, 试样平均磨损量随酚醛树脂含量的增加持续降低, 试样耐磨性能呈逐步升高的变化趋势。纯氨基模塑料 (PF-0) 的平均磨损量最高, 为 0.008 6 g; 当酚醛树脂质量分数提升至 25% 时, 试样的平均磨损量降至 0.001 1 g, 较纯氨基模塑料降幅达到了 87.2%, 在本次实验考察的酚醛含量区间内耐磨性能最优。

纯氨基模塑料固化后形成以三嗪环为核心的高刚性三维交联网络, 分子链柔顺性差、脆性大, 摩擦过程中易发生脆性剥落, 磨损量较高。线性酚醛树脂自身具备优异的耐磨、减磨特性, 引入氨基树脂后, 可与氨基树脂形成半互穿聚合物网络, 提升

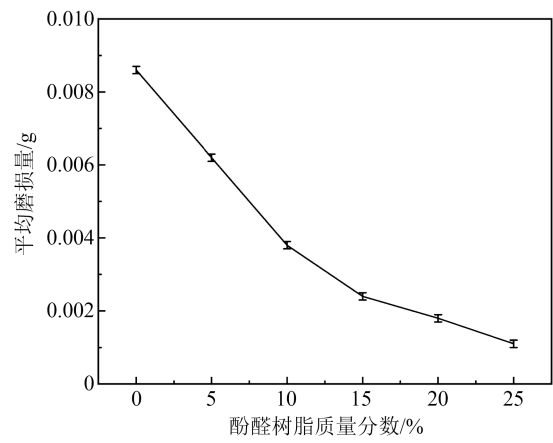


图1 不同酚醛树脂含量下改性氨基模塑料的平均磨损量
Fig.1 Average wear loss of modified aminoplastic molding compounds with different phenolic resin contents

基体韧性与两相界面结合力, 减少摩擦过程中的材料脱落。当酚醛树脂质量分数在 0%~25% 范围内时, 酚醛树脂占比提升带来的本征耐磨增益始终占据主导作用, 因此试样材料耐磨性能随酚醛含量增加持续优化。这与酚醛树脂基摩擦材料的相关研究结论一致, 酚醛树脂的刚性芳香环结构和良好的界面结合力是其耐磨性能优异的主要原因^[11-13]。

上述结果表明, 添加质量分数为 25% 的酚醛树脂时可大幅提升氨基模塑料的耐磨性能, 有效减少触头支架与外壳摩擦产生的粉尘, 降低金属触头污染引发导通失效的风险, 对延长交流接触器服役寿命具有积极意义。

2.2 冲击强度

对不同酚醛树脂含量下改性氨基模塑料进行冲击强度测试, 结果如图 2 所示。

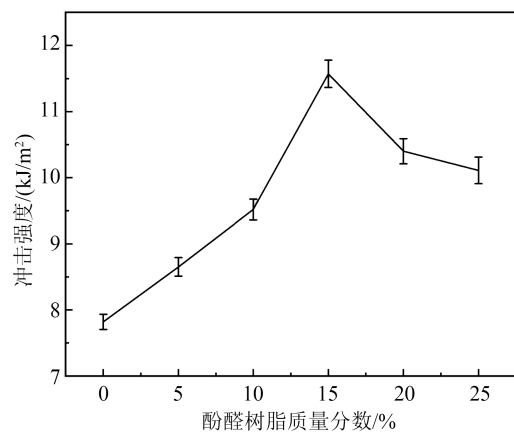


图2 不同酚醛树脂含量下改性氨基模塑料的无缺口冲击强度

Fig.2 Unnotched impact strength of modified aminoplastic molding compounds with different phenolic resin contents

从图2可以看出,随酚醛树脂质量分数从0%增加至25%时,改性氨基模塑料的无缺口冲击强度呈先显著提升达到峰值后再小幅平缓回落的单峰变化规律。纯氨基模塑料(PF-0)的无缺口冲击强度仅为 7.82 kJ/m^2 ;当酚醛树脂质量分数为15%时,试样的冲击强度达到峰值,为 11.57 kJ/m^2 ,较PF-0提升了47.9%;当酚醛树脂质量分数超过15%后,试样的冲击强度呈平缓小幅下降趋势;当酚醛树脂质量分数为20%和25%时,试样的冲击强度分别为 10.4 kJ/m^2 和 10.0 kJ/m^2 ,仍维持较高水平,且优于酚醛树脂质量分数为10%及以下试样的冲击强度。

引入酚醛树脂后,可与氨基树脂形成半互穿聚合物网络:一方面,酚醛树脂分子中的柔性链段可有效分散试样受载时的冲击应力,阻碍裂纹扩展;另一方面,酚羟基与氨基树脂羟甲基的缩合反应可强化两相界面结合。在酚醛树脂质量分数为0%~15%的区间内,体系固化充分、交联密度持续优化,冲击韧性稳步提升。当酚醛树脂质量分数超过15%后,过量线性酚醛会竞争消耗固化活性基团,导致体系交联密度略有下降,两相界面结合力轻微减弱,冲击韧性出现小幅回落;但酚醛树脂本身的增韧作用仍可使试样维持较高的韧性水平,未出现大幅下降,且始终保持优于纯氨基模塑料的冲击性能。

2.3 弯曲强度

对不同酚醛树脂含量下改性氨基模塑料试样进行弯曲强度测试,结果如图3所示。

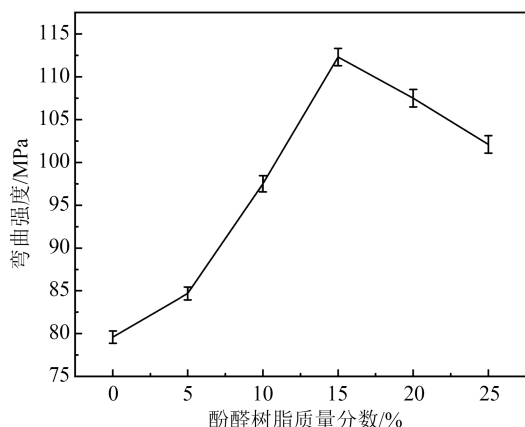


图3 不同酚醛树脂含量下改性氨基模塑料的弯曲强度
Fig.3 Flexural strength of modified aminoplastic molding compounds with different phenolic resin contents

从图3可以看出,当酚醛树脂质量分数为0%~25%时,改性氨基模塑料的弯曲强度呈现先快速升

高达到峰值后再小幅回落的单峰变化规律。纯氨基模塑料(PF-0)的弯曲强度为 79.6 MPa ;当酚醛树脂质量分数为15%时,试样的弯曲强度达到峰值,为 112.3 MPa ,较PF-0提高了41.1%;当酚醛树脂质量分数超过15%后,试样的弯曲强度呈平缓小幅下降趋势;当酚醛树脂质量分数为20%和25%时,试样的弯曲强度分别为 107.5 MPa 和 102.1 MPa ,仍维持较高水平,且优于质量分数为10%及以下试样的弯曲强度。

纯氨基树脂固化后形成的三维交联网络刚性虽强但分子链协同承载能力不足,在弯曲载荷作用下应力易在结构缺陷处集中,限制了弯曲强度的进一步提升。引入酚醛树脂后,可与氨基树脂形成半互穿聚合物网络:酚醛分子链上的芳香环结构可嵌入氨基树脂的交联骨架中,提升体系整体的刚性与载荷传递效率;同时酚羟基与氨基树脂羟甲基的缩合反应可强化两相界面结合,使弯曲载荷更均匀地分散至整个基体。在酚醛树脂质量分数为0%~15%区间内,体系的交联密度随酚醛树脂含量提升持续优化,刚性网络结构趋于完整,弯曲强度稳步上升;当酚醛树脂质量分数超过15%后,过量线性酚醛会竞争消耗固化活性基团,导致交联点分布不均,局部承载骨架完整性轻微受损,弯曲强度出现小幅回落;但酚醛自身的芳香族刚性结构仍可维持基体的整体承载能力,弯曲强度未出现大幅下降,始终保持优于纯氨基模塑料的弯曲性能。

2.4 负荷变形温度

对不同酚醛树脂含量下改性氨基模塑料试样进行负荷变形温度测试,结果如图4所示。

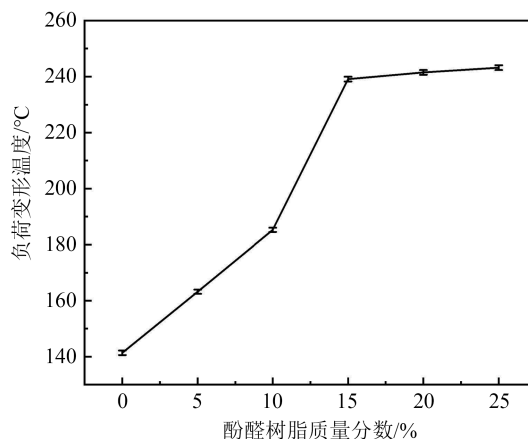


图4 不同酚醛树脂含量下改性氨基模塑料的负荷变形温度

Fig.4 Deflection temperature under load of modified molding compounds with different phenolic resin contents

从图4可以看出,当酚醛树脂质量分数为0%~25%时,改性氨基模塑料的负荷变形温度整体呈上升趋势,呈现前期快速升高后期增速放缓的变化规律。纯氨基模塑料(PF-0)的负荷变形温度为141.4℃;当酚醛树脂质量分数为15%时,试样的负荷变形温度提升至239.1℃,较PF-0提高了69.1%;继续增加酚醛树脂质量分数至25%,试样的负荷变形温度仍保持小幅增长,达到了243.2℃。

试样的负荷变形温度主要由体系交联密度与分子链刚性共同决定。纯氨基树脂固化后形成的三嗪环交联网络,在高温载荷下分子链段易发生松弛,抗热变形能力不足。引入酚醛树脂后,其刚性芳香环结构可大幅提升分子链整体刚性,同时与氨基树脂形成半互穿网络,提升体系的交联密度,因此酚醛树脂质量分数为5%~15%内试样的耐热性明显提升;随着酚醛树脂占比进一步提升,体系中耐热刚性基团占比持续增加,抵消了交联密度小幅下降带来的影响,因此材料负荷变形温度仍维持微幅上涨。这与酚醛树脂耐热改性的研究结果一致,通过引入刚性基团和提高交联密度是提升氨基树脂耐热性的有效途径^[14]。

2.5 工频电气强度

将试样裁剪成直径为100 mm、厚度为(2±0.1) mm的圆形试样,对不同酚醛树脂含量下改性氨基模塑料进行工频电气强度测试,结果如图5所示。

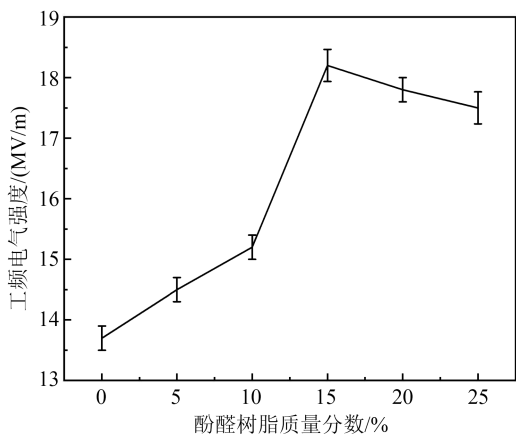


图5 不同酚醛树脂含量下改性氨基模塑料的工频电气强度

Fig.5 Power frequency electric strength of modified aminoplastic molding compound with different phenolic resin contents

从图5可以看出,当酚醛树脂的质量分数为0%~25%时,改性氨基模塑料的工频电气强度呈现先显著提升达到峰值后小幅回落的变化规律。纯氨基

模塑料(PF-0)的工频电气强度为13.7 MV/m;当酚醛树脂质量分数增至15%时,试样的电气强度达到峰值,为18.2 MV/m,较PF-0提升了32.8%;继续增加酚醛树脂质量分数至25%,试样的电气强度出现小幅下降。当酚醛树脂质量分数为20%和25%时,试样的电气强度分别为17.8 MV/m和17.5 MV/m,仍保持在较高水平。

试样的工频电气强度由体系的交联密度、内部缺陷与界面结合状态共同决定。纯氨基树脂固化后存在微孔隙与界面缺陷,易引发电树枝发展,导致本征电气强度偏低。引入酚醛树脂后,与氨基树脂形成半互穿聚合物网络,酚醛树脂质量分数为15%时体系固化最为充分、交联密度持续提升,结构致密性显著优化,可有效阻碍电树枝的引发与扩展,电气强度稳步提升;酚醛树脂质量分数超过15%后,虽体系的交联密度略有下降,但酚醛树脂本身具备优异的电绝缘性能,仍可有效维持试样的绝缘水平,因此电气强度仅微幅波动,整体保持平稳。同时,引入酚醛树脂带来的韧性提升可抑制材料内部微裂纹的萌生与扩展,减少电树枝的诱发路径;耐热性能提升可削弱高温下的分子链松弛,二者共同保障了电绝缘性能的长期稳定性^[15]。

2.6 模具温度与酚醛含量的交互作用

为明确酚醛改性氨基模塑料的工艺适用边界,验证配方改性效果的普适性,探究配方组成与工艺参数的交互作用规律,本节选取0%、15%、25%共3个酚醛特征质量分数,以对试样交联固化起关键作用的模具温度为变量,选取实际生产常用工艺温度区间的下限160℃、上限180℃两个水平,采用2×3两因素实验设计,以弯曲强度和冲击强度为评价指标,分析二者对试样力学性能的协同与拮抗效应。

2.6.1 弯曲强度的交互效应分析

在不同模具温度下,酚醛树脂含量对改性氨基模塑料弯曲强度的影响如图6所示。从图6可以看出,在160~180℃的工艺区间内,试样的弯曲强度均随酚醛树脂含量的增加先上升后下降,在酚醛树脂质量分数为15%时达到峰值,说明该变化趋势在所考察的模具温度范围内具有良好的一致性;在相同酚醛树脂含量下,180℃下制备的试样性能均优于160℃下制备的试样,表明模具温度升高可提升体系交联程度,整体改善弯曲力学性能。

模具温度与酚醛树脂含量对弯曲强度的影响

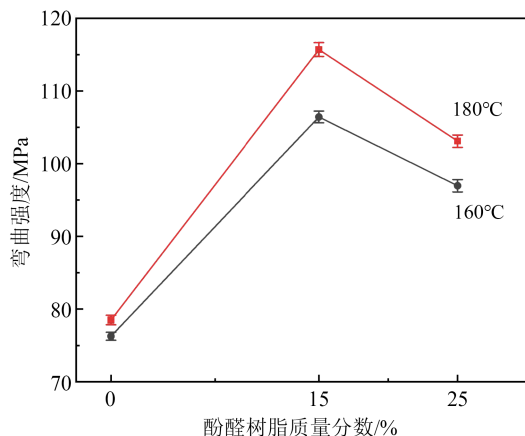


图6 不同成型温度下酚醛树脂含量对改性氨基模塑料弯曲强度的影响

Fig.6 Effect of phenolic resin contents on the flexural strength of modified aminoplastic molding compounds at different mold temperatures

存在明显的交互作用：纯氨基模塑料在两个温度下的弯曲强度差异仅约3%，因纯氨基树脂固化活性高，160℃已可达到较高交联密度，模具温度进一步提升对其性能增益有限；当酚醛树脂质量分数为15%时，180℃下制备的试样弯曲强度较160℃提升了8.8%，呈现明显的协同增效效应，较高模具温度促进了酚醛与氨基树脂的共缩聚反应，形成更均匀的半互穿交联网络，强化界面结合；当酚醛树脂质量分数提升至25%时，模具温度升高带来的性能增益显著弱化，表现出拮抗特征，过高酚醛含量搭配快速高温固化，易引发相分离与固化不均，导致体系内应力增大，抵消了部分温度提升带来的性能优势。

2.6.2 冲击强度的交互效应分析

图7为不同成型温度下酚醛树脂含量对改性氨基模塑料冲击强度的影响。从图7可以看出，试样冲击强度的变化规律与弯曲强度高度一致，进一步验证了二者交互作用规律的可靠性。在160~180℃的模具温度区间内，试样的冲击强度均随酚醛树脂含量的增加先上升后下降，15%为最优质量分数，且180℃下制备的试样整体韧性更优。不同酚醛树脂含量下，模具温度的提升效果存在明显差异：纯氨基模塑料体系中温度对其冲击性能的提升幅度较小；当酚醛树脂质量分数为15%时，模具温度与酚醛树脂含量的协同效应最显著，180℃下制备的试样冲击强度较160℃提升了约8.7%，均匀的共交联网络可有效分散冲击载荷，抑制裂纹扩展；

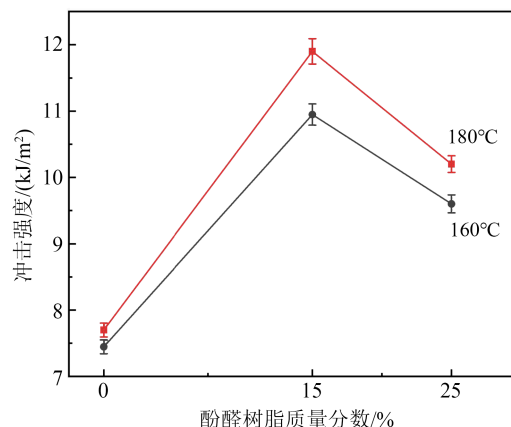


图7 不同成型温度下酚醛树脂含量对改性氨基模塑料冲击强度的影响

Fig.7 Effect of phenolic resin contents on impact strength of modified aminoplastic molding compounds at different mold temperatures

当酚醛树脂质量分数升至25%时，高温带来的性能提升效果明显回落，过量酚醛引发的相分离与内应力会形成薄弱区域，加速冲击裂纹扩展，削弱改性效果。

2.7 微观结构表征与改性机理分析

2.7.1 扫描电镜分析

冲击断面的微观形貌是解析试样断裂行为与增韧机制的直接依据。对酚醛树脂质量分数分别为0%、15%、25%的改性氨基模塑料冲击断面进行扫描电子显微镜表征，结果如图8所示。从图8可以看出，PF-0试样在低倍镜(100倍)下断面平整光滑，裂纹扩展路径平直，呈典型脆性解理断裂特征；高倍镜(500倍)下玻纤表面洁净、基体附着量极少，纤维与基体界面结合薄弱，冲击载荷下裂纹易沿界面快速萌生扩展，对应试样宏观力学性能偏低的特征。PF-15试样断面粗糙度明显提升，裂纹发生大量偏转与钝化，断裂模式由脆性向韧性转变；高倍镜下基体可见明显塑性撕裂褶皱，玻纤表面包覆大量基体树脂，界面结合紧密，冲击能量可通过基体塑性变形、纤维断裂与拔出等多重机制协同耗散，因此力学性能达到峰值。PF-25试样的韧性特征有所弱化，断面平整度回升，部分区域恢复解理断裂特征；高倍镜下部分玻纤出现界面脱粘，基体塑性变形程度减弱。从断面形貌变化可推断，过量酚醛干扰了树脂体系的固化交联过程，导致基体交联程度下降、界面结合力劣化，因此力学性能较PF-15试样小幅回落，但仍优于纯氨基体系。

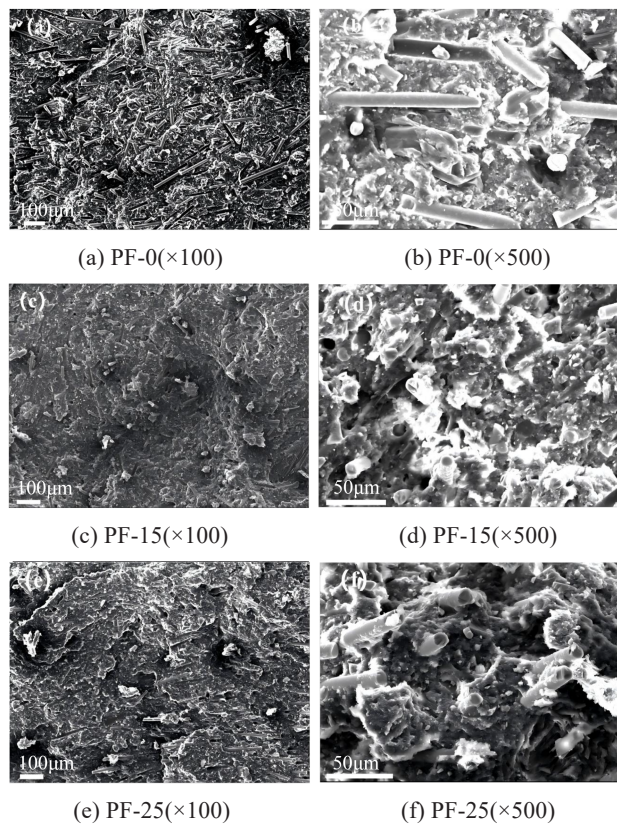


图8 不同酚醛树脂含量改性氨基模塑料冲击断面的SEM
Fig.8 SEM images of impact fracture surfaces of modified aminoplastic molding compounds with different phenolic resin contents

2.7.2 红外光谱分析

傅里叶变换红外光谱可从分子层面表征树脂体系的官能团结构与固化交联程度,不同酚醛树脂含量改性氨基模塑料的测试结果如图9所示。从图9可以看出,所有试样均完整保留氨基树脂的特征峰结构。波数为3 320 cm⁻¹附近属于羟甲基中O-H与仲氨基N-H的叠加伸缩振动峰,波数为2 917 cm⁻¹、2 849 cm⁻¹处属于亚甲基伸缩振动峰,波数为1 543 cm⁻¹、872 cm⁻¹处属于三聚氰胺三嗪环的特征振动峰。随酚醛树脂含量的提升,波数为1 500 cm⁻¹附近的苯环骨架振动吸收峰逐渐增强、峰形宽化,与三嗪环特征峰发生叠加,表明酚醛树脂成功复合于体系中,苯环骨架特征峰强度与酚醛树脂含量呈正相关。

从固化反应的官能团演变规律来看,波数为3 320 cm⁻¹处的活性羟基吸收峰与波数为1 150 cm⁻¹处的亚甲基醚键伸缩振动峰呈现出此消彼长的反向变化趋势:PF-0试样的羟基吸收峰强度最高,体系残留较多未反应的羟甲基与氨基活性基团,固化

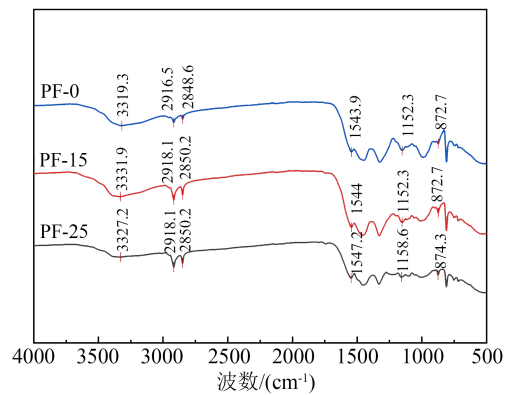


图9 不同酚醛树脂质量分数下改性氨基模塑料的FTIR谱图

Fig.9 FTIR spectra of modified aminoplastic molding compounds with different mass fractions of phenolic resin

交联程度有限,对应波数为1 150 cm⁻¹处的亚甲基醚键伸缩振动峰强度也处于最低水平;当酚醛树脂质量分数提升至15%时(PF-15),羟基吸收峰强度显著降低,活性基团被大量消耗,固化反应充分进行,与之相反,波数为1 150 cm⁻¹处的醚键峰强度达到峰值,说明体系生成了大量亚甲基醚键交联结构,交联密度升至最高;当酚醛树脂质量分数进一步提升至25%时(PF-25),羟基吸收峰强度出现回升,未反应的游离羟基占比增加,同时醚键峰强度下降,表明过量线性酚醛竞争消耗了体系中的固化剂与反应位点,阻碍了交联反应的充分进行,最终导致体系交联密度下降。

2.8 应用性能研究

为验证不同酚醛树脂含量改性氨基模塑料在交流接触器中的工程适用性,分别采用PF-0、PF-5、PF-10、PF-15、PF-20、PF-25配方制备交流接触器触头支架零件各3只,每台成品装配1只对应配方的触头支架,共装配18台交流接触器成品,试样编号依次对应为:PF-0(A-1~A-3)、PF-5(A-4~A-6)、PF-10(A-7~A-9)、PF-15(A-10~A-12)、PF-20(A-13~A-15)、PF-25(A-16~A-18)。对所有成品开展机械寿命试验,每组取3个平行样的平均值作为该配方的最终机械寿命结果,测试数据见表2。从表2可以看出,交流接触器机械寿命随酚醛树脂含量的提升呈持续上升趋势:纯氨基模塑料(PF-0)制备的触头支架,接触器平均机械寿命仅为895万次,未达到1 200万次的行业合格标准;当酚醛树脂质量分数提升至15%时,平均机械寿命达到1 202万次,满足合格要求;继续提升酚醛树脂质量分数至20%和

25%，机械寿命分别稳定在1 205万次和1 208万次，均显著高于合格阈值。上述结果表明，酚醛树脂改性可显著提升交流接触器的长效服役性能，酚醛树脂质量分数为15%及以上的改性试样均可满足低压交流接触器的工程应用要求。这与碳纤维增强酚醛树脂复合材料的研究结果类似，通过优化材料的力学性能和耐久性能，可以显著提升其在实际服役条件下的使用寿命^[16]。

表2 交流接触器机械寿命测试结果					
Table 2 Mechanical life test results of AC contactors					
试样	酚醛树脂质量分数/%	机械寿命次数/万次			平均值/万次
PF-0	0	892	895	898	895
		(A-1)	(A-2)	(A-3)	
PF-5	5	988	992	996	992
		(A-4)	(A-5)	(A-6)	
PF-10	10	1 093	1 097	1 101	1 097
		(A-7)	(A-8)	(A-9)	
PF-15	15	1 198	1 202	1 206	1 202
		(A-10)	(A-11)	(A-12)	
PF-20	20	1 201	1 205	1 209	1 205
		(A-13)	(A-14)	(A-15)	
PF-25	25	1 204	1 208	1 212	1 208
		(A-16)	(A-17)	(A-18)	

3 结论

(1)酚醛树脂共混改性可提升氨基模塑料的综合性能。随着酚醛树脂质量分数从0%提升至25%，试样无缺口冲击强度、弯曲强度在质量分数为15%时达到峰值，较纯氨基模塑料分别提升了47.9%、41.1%，之后呈小幅平缓回落；负荷变形温度随酚醛树脂含量的提升，整体呈前期快速升高，后期增速放缓的上升趋势，工频电气强度在酚醛树脂质量分数为15%后保持平稳，耐磨性能与成品服役寿命随含量提升持续优化。酚醛树脂与氨基树脂形成半互穿聚合物网络，酚醛树脂质量分数为15%内可显著提升体系交联密度与两相界面结合力，实现多性能协同优化；过量酚醛仅会造成力学性能小幅回落，其本身的刚性芳香环结构及优异的绝缘、耐磨特性仍可保证材料综合性能保持高位，无明显劣化。

(2)红外光谱分析证实，酚羟基可与氨基树脂分子上的羟甲基发生缩合反应，两相形成共价键结合；扫描电镜形貌观测表明，当酚醛质量分数为

15%时，两相界面结合紧密，试样冲击断面呈现韧性断裂形貌，能够有效阻滞裂纹扩展。酚醛与氨基树脂构建的半互穿聚合物网络，是材料韧性与界面强度同步提升的核心原因。酚醛过量时仅会造成力学性能小幅下降，依靠自身刚性芳香环结构，材料整体性能仍维持在较高水平，未出现明显下降。

(3)模具温度与酚醛添加量的双因素试验结果表明，在160~180℃成型温度区间内，不同配方材料的力学性能变化趋势保持一致。当酚醛树脂质量分数为15%时，高温固化可进一步促进两相共缩聚反应，交联网络更均匀，工艺与配方表现出明显的协同增效作用；当酚醛质量分数升至25%时，高温条件易诱发两相分离，温度带来的性能提升效果有所弱化。

(4)采用质量分数为15%及以上酚醛树脂的改性材料制备交流接触器触头支架，机械寿命可稳定达到1 200万次，能够满足低压电器长期服役要求。综合性能、服役效果与应用成本考量，确定15%为工程化应用的最优酚醛树脂含量。

参考文献 References

[1] 肖体锋,胡钰佳,章星栋,等.尼龙材料采用不同包覆工艺红磷阻燃剂对交流接触器通电性能的影响及分析[J].绝缘材料,2021,54(9):65-68.

Xiao Tifeng, Hu Yujia, Zhang Xingdong, et al. Influence and analysis of nylon materials modified by red phosphorus flame retardants with different coating processes on energization performance of AC contactors [J]. Insulating Materials, 2021, 54(9): 65-68.

[2] 马林泉.低压电器用电工模塑料的现状与发展趋势[J].中国电器工业,2015(11):12-14.

Ma Linquan. Current situation and development trend of electrical molding compounds for low-voltage electrical appliances[J]. China Electrical Equipment Industry,2015(11):12-14.

[3] 马林泉.电工塑料在我国工业用低压电器中的应用现状[J].电气制造,2006(8):5-9.

Ma Linquan. Application status of electrical plastics in industrial low-voltage electrical appliances in China[J]. Electrical Manufacturing,2006(8):5-9.

[4] 苏湘,杨小燕,苏建华,等.氨基模塑料/有机改性凹凸棒土的制备及其性能研究[J].能源化工,2016,37(6):62-64.

Su Xiang, Yang Xiaoyan, Su Jianhua, et al. Study on preparation and properties of amino molding plastics/organic attapulgite[J]. Energy Chemical Industry,2016,37(6):62-64.

[5] 王宁,李春风,刘明利.改性三聚氰胺甲醛树脂研究进展及应用[J].热固性树脂,2020,35(6):62-65.

Wang Ning, Li Chunfeng, Liu Mingli. Research progress and

- application of modified melamine formaldehyde resins[J]. Thermosetting Resin, 2020, 35(6): 62-65.
- [6] 杨福兴, 杨小燕, 曲广淼, 等. 改性凹凸棒土及其在氨基模塑料中的应用[J]. 塑料, 2023, 52(1): 15-18, 23.
- Yang Fuxing, Yang Xiaoyan, Qu Guangmiao, et al. Modified attapulgite and its application in amino molding compounds[J]. Plastics, 2023, 52(1): 15-18, 23.
- [7] 冯云, 屈伟, 刘美宏, 等. 三聚氰胺甲醛树脂增韧改性研究进展[J]. 木材工业, 2022, 36(1): 1-7.
- Feng Yun, Qu Wei, Liu Meihong, et al. Research progress in toughening modification of melamine formaldehyde resins[J]. China Wood Industry, 2022, 36(1): 1-7.
- [8] 魏卫. 酚醛树脂改性氨基模塑料[J]. 热固性树脂, 2005, 20(4): 21-22.
- Wei Wei. Amino molding materials modified by phenolic resin[J]. Thermosetting Resin, 2005, 20(4): 21-22.
- [9] 冯炎, Abdurakhman M, 林芷芊, 等. 三聚氰胺-甲醛树脂胶粘剂增韧阻燃改性研究[J]. 中国胶粘剂, 2025, 34(11): 41-48, 61.
- Feng Yan, Abdurakhman M, Lin Zhiqian, et al. Research on toughening and flame retardant modification of melamine-formaldehyde resin adhesives[J]. China Adhesives, 2025, 34(11): 41-48, 61.
- [10] 董玉灿, 王才朋, 孟祥克, 等. 甲醚化三聚氰胺甲醛树脂醚化程度对卷材面漆涂料性能影响[J]. 山东化工, 2022, 51(17): 35-37.
- Dong Yucan, Wang Caipeng, Meng Xiangke, et al. Effect of etherification degree of methylated melamine formaldehyde resin on properties of coil topcoat[J]. Shandong Chemical Industry, 2022, 51(17): 35-37.
- [11] 徐传伟, 江立鼎, 邢介名, 等. 酚醛树脂的改性技术进展[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2025, 23(5): 38-43.
- Xu Chuanwei, Jiang Liding, Xing Jieming, et al. Progress in modification techniques of phenolic resin[J]. Chemical Propellants & Polymeric Materials, 2025, 23(5): 38-43.
- [12] 郝力博, 冉启蒙, 刘毅, 等. 酚醛树脂功能复合材料研究进展[J]. 塑料工业, 2024, 52(7): 9-15.
- Hao Libo, Ran Qimeng, Liu Yi, et al. Research progress of functional composites based on phenolic resin[J]. China Plastics Industry, 2024, 52(7): 9-15.
- [13] 黄林恒, 陈韦涛, 马海霞, 等. 不同酚醛树脂基复合摩擦材料的制备和性能研究[J]. 轻工科技, 2025, 41(2): 117-120.
- Huang Linheng, Chen Weitao, Ma Haixia, et al. Preparation and properties of different phenolic resin-based composite friction materials [J]. Light Industry Science and Technology, 2025, 41(2): 117-120.
- [14] 孔国强, 冯建顺, 邵蒙, 等. 酚醛树脂耐热改性研究进展[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(10): 223-228.
- Kong Guoqiang, Feng Jianshun, Shao Meng, et al. Research progress on heat resistance modification of phenolic resin[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(10): 223-228.
- [15] 朱小兰, 唐建君. 酚醛树脂增韧及耐热改性研究进展[J]. 合成材料老化与应用, 2019, 48(6): 119-122, 127.
- Zhu Xiaolan, Tang Jianjun. Research progress in toughening and heat resistance modification of phenolic resins[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2019, 48(6): 119-122, 127.
- [16] 卫娇, 罗冯敏, 穆占春, 等. 碳纤维对酚醛树脂复合材料力学性能和耐久性能的影响[J]. 塑料工业, 2026, 54(3): 111-115.
- Wei Jiao, Luo Fengmin, Mu Zhanchun, et al. Effect of carbon fibers on mechanical properties and durability of phenolic resin composites[J]. China Plastics Industry, 2026, 54(3): 111-115.

收稿日期: 2026-05-07; 修回日期: 2026-06-25。

作者简介:

肖体锋(1976—), 男(汉族), 湖南邵阳人, 高级工程师, 主要从事低压电器工控产品的研究和开发设计;

通信作者: 刘建文(1976—), 男(汉族), 山西原平人, 高级工程师, 主要从事热固性模塑料研发与生产制造。