

# Research on Key Processing Technologies and Quality Control of Copper Enameled Wires

Zhixing Ni Dongxing Qiu\* Zhihan Gu Quanxin Long

Jiangxi Jiangtong Taiyi Special Electrical Materials Co., Ltd., Nanchang, Jiangxi, 330000, China

## Abstract

Aiming at the increasingly stringent requirements for electromagnetic performance and reliability of copper enameled wires in high-frequency applications, a key processing technology system based on conductor pretreatment, multi-layer insulation coating, and automatic control is proposed. Research and analysis show that the purity control of oxygen-free copper rods and the collaborative process of multi-pass drawing and annealing can ensure conductor uniformity; gradient viscosity coating and three-temperature-zone curing effectively improve the integrity of the enamel film. The results indicate that through high-precision molds, closed-loop tension control, catalytic combustion VOCs treatment, combined with SPC process monitoring, the enamel film thickness tolerance of  $\pm 2 \mu\text{m}$  and VOCs removal rate of more than 98% can be achieved. The products meet the requirements of 220°C heat resistance and high corona resistance, greatly improving the manufacturing level of high-end electromagnetic wires.

## Keywords

Copper enameled wire; Key processing technology; Quality control

# 铜漆包线加工关键技术与质量控制研究

倪志星 邱东兴\* 顾芝菡 龙全新

江西省江铜台意特种电工材料有限公司, 中国·江西 南昌 330000

## 摘要

针对铜漆包线在高频应用中电磁性能、可靠性要求日益提升的问题, 提出基于导体预处理、多层绝缘涂覆、自动化控制的加工关键技术体系。经过研究分析表明, 无氧铜杆纯度控制、多道次拉丝退火协同工艺可保障导体均匀性; 梯度粘度涂覆和三温区固化有效提升漆膜完整性。研究表明, 通过高精度模具、闭环张力控制、催化燃烧VOCs治理, 结合SPC过程监控, 可实现漆膜厚度公差 $\pm 2 \mu\text{m}$ 、VOCs去除率超过98%, 产品满足220°C耐热、高耐电晕性能要求, 大幅度提高高端电磁线制造水平。

## 关键词

铜漆包线; 加工关键技术; 质量控制

## 1 引言

铜包铝漆包线作为高频电磁应用领域的轻量化导体材料, 通过铜铝复合结构实现性能和成本的协同优化。其内芯为高纯铝, 外层包覆 13%–17% 体积分数的无氧铜, 经过热轧或拉拔形成冶金结合界面, 在保留铜优秀的表面导电性基础上, 还能大幅度降低单位长度质量。在直流工况下, 其电阻率约为纯铜线的 1.45–1.46 倍; 而在 5 MHz 以上高频场景中, 由于趋肤效应使电流集中于铜表层, 导电效能趋近纯铜, 适用于开关电源变压器、射频电感、显示偏转线圈等高频器件。该材料可使线圈重量减轻约 50%, 制造成本下降 30%–50%, 具有较强的经济优势。然而, 铝芯化学活性高, 铜铝界面容易发生电化学腐蚀, 需要在拉丝、退火、涂漆全

工序中实施惰性气氛保护和界面洁净控制, 产品执行 GB/T 29197、SJ/T 11223 标准, 线径覆盖 0.06–4.6 mm, 耐温等级达 130–220 级, 但受限于铝本征电阻率及热稳定性, 不适用于大功率低频电力传输场景。

## 2 铜包铝漆包线的主要特性

### 2.1 分类与规格

铜包铝漆包线 (CCA) 的分类及规格体系体现材料 + 结构 + 性能的多方面融合特征。依据导体构成、几何形态、绝缘类型、铜层比例, 可系统划分为若干技术类别。按照 GB/T 29197–2012 标准, 铜层体积分数是分级指标, 直接影响导电性、焊接性、成本; 线径覆盖微细 ( $< 0.6 \text{ mm}$ ) 至常规范围, 适配不同电磁器件需求; 绝缘涂层则决定耐温等级。例如: CCAQZ(G)-1(2)/155 采用聚酯亚胺复合涂层, 适合应用在 155°C 长期工作环境。下表综合关键参数, 为工程选型提供量化依据。

【作者简介】倪志星 (1988—), 男, 中国江西南昌人, 本科, 助理工程师, 从事铜金属材料加工研究。

表 1 铜包铝漆包线的分类与规格

分类维度	类型 / 等级	技术特征与应用指向
铜层体积比	10A/H (8%–12%)	成本敏感型, 低频轻载场景
	15A/H (13%–17%)	主流型号, 具有良好的导电性、可焊性、经济性
	20A/H (18%–22%)	高可靠性需求, 接近纯铜焊接性能
线径规格	圆线: 0.10–5.00 mm	微细线用于高频电感, 粗线被应用在功率绕组
	扁线: 截面积 $\leq 20 \text{ mm}^2$	提升槽满率, 适合高效电机
绝缘体系	QA (聚氨酯, 155 级)	易焊接, 适用于消费电子
	QZY (聚酯亚胺, 220 级)	耐高温、耐溶剂, 用于新能源汽车电驱
	自粘 / 变频专用型	简化绕制工艺
典型含铜量	0.1–0.63 wt%	和铜层体积比正相关, 影响其应用成本

## 2.2 特性与性能

铜包铝漆包线在电磁性能和经济性之间实现高效平衡。其直流电阻率约为纯铜线的 1.45–1.46 倍, 但高频 (>5 MHz) 下受到趋肤效应影响, 致使电流集中在高导电铜表层, 等效交流电阻趋近纯铜水平; 密度仅为铜的 40%, 相同电阻条件下线材重量降低 37%–50%, 显著减轻线圈质量; 抗拉强度 96–135 MPa, 虽然是纯铜线的 44%–51%, 但满足多数绕组机械要求; 连续铜层赋予其良好的抗氧化性及直接钎焊能力, 有效规避铝线需表面活化处理的工艺限制; 材料成本约为纯铜线的 2/3, 结合轻量化优势, 终端产品综合成本可下降 30%–60%, 在高频变压器、消费电子、新能源电驱等领域具备良好的应用价值。

## 3 铜漆包线加工关键技术

### 3.1 导体预处理技术

微细漆包线对于杂质较为敏感, 工作人员必须采用纯度 $\geq 99.95\%$ 的无氧铜 (OFC), 其氧含量低于 10 ppm, 可有效抑制  $\text{Cu}_2\text{O}$  夹杂形成, 有助于保障晶界完整性。拉丝过程采用多道次连续减径工艺, 单道压缩率严格限定在 15%–20% 区间, 避免局部剪切带集中引发断线; 模具材质优选硬质合金, 将尺寸公差控制在  $\pm 1 \mu\text{m}$  以内; 拉丝后立即进入在线连续退火系统, 炉温精准调控为 400–500 °C, 依据线速动态匹配保温时间, 让冷加工位错充分回复再结晶, 恢复延伸率至 30% 以上, 同时彻底裂解, 充分挥发残留润滑剂作用, 防止碳化物在漆膜界面富集。同时, 退火全程通入高纯氮氢混合保护气氛, 氧分压控制在  $10^{-6} \text{ Pa}$  量级, 杜绝  $\text{CuO}/\text{Cu}_2\text{O}$  氧化膜生成 (如图 1 所示)。

### 3.2 绝缘涂覆与固化技术

现代高性能产品普遍采用多层复合结构, 典型配置为聚酰胺酰亚胺 (PAI) 底漆层和聚氨酯 (PU) 外层协同体系, 前者提供 220°C 以上耐热等级, 后者赋予产品高耐磨性, 涂覆层数则依据耐压需求设定为 4–30 道。针对不同线径, 涂覆方式严格采用差异化实施, 微细线 ( $\leq 0.2 \text{ mm}$ ) 采用毛毡浸渍法, 利用毛细作用实现均匀包覆; 粗线则选用精密模具涂漆, 通过间隙控制保障同心度。漆液粘度按照涂 -4 杯标准动态调控, 初道维持 25–30 秒以利渗透, 后续提高至 40–45 秒, 进一步增强膜厚累积, 最终漆膜厚度公差压缩至  $\pm 2 \mu\text{m}$ 。

在固化过程中, 工作人员根据双热风对流烘炉分三温区精准执行: 预热区驱除溶剂, 防止气泡; 主固化区促使树脂交联成网状结构; 冷却区缓冷抑制内应力开裂。全程温度波动须控制在  $\pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$  以内, 超差将导致交联度不足, 大幅度劣化耐溶剂性、长期热老化性能, 支撑高端电磁器件对于绝缘可靠性的严格要求。

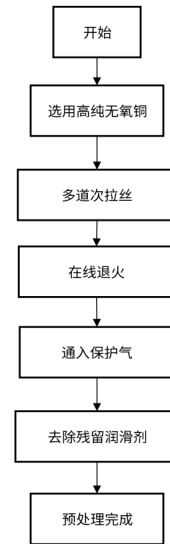


图 1 导体预处理

### 3.3 高性能绝缘材料应用

高性能绝缘材料选型及应用是铜漆包线适配多样化工况的技术支撑, 其本质在于树脂分子结构和使用环境热-电-机械应力的精准匹配。通用工业电机通常采用聚酯漆 (QZ), 其主链含苯二甲酸、乙二醇单元, 玻璃化转变温度约为 130°C, 具有成本低、柔韧性好等特征, 但长期热老化容易发生酯键水解, 限制其在高温场景的应用。面向航空航天、新能源汽车驱动电机、高频开关电源等领域, 则普遍采用聚酰胺酰亚胺 (PAI)、聚酯亚胺 (QZY) 体系。QZY 通过引入亚胺环刚性结构, 在保持良好的可绕性的同时, 将耐热等级提高至 200°C; PAI 则凭借全芳香杂环骨架、高交联密度, 实现 220°C 下长期稳定运行, 并具备良好的耐电晕性、耐溶剂性, 适用于变频电机中高频脉冲电压环境。近年来, QZY/XY 复合涂层进一步优化性能梯度, 内层 PAI 强化附

着力,外层 QZY 可有效提升自粘特性,形成功能梯度绝缘体系。另外,材料选择要综合考量热指数(TI)、相对温度指数(RTI)、介电强度、漆膜柔韧性的平衡,确保在热氧化、局部放电、机械振动融合作用下维持绝缘完整性<sup>[1]</sup>。

### 3.4 环保与自动化技术

在环保层面,涂覆及高温固化阶段释放的苯系物、醇醚类挥发性有机物(VOCs)经过集成式废气治理系统高效处置。主流工艺采用不燃性水基分散剂乳液吸收结合催化燃烧(CO)技术,VOCs去除率稳定超过98%,排放浓度低于20 mg/m<sup>3</sup>,远优于GB 16297大气污染物综合排放标准。部分先进产线引入在线GC-MS监测技术,加强智能反馈控制,实现废气成分动态识别。在自动化方面,国产高速漆包生产线已经实现放线+退火+多道涂漆+梯度烘焙+激光测径+收线全流程闭环控制,线速度达到30 m/min以上。关键工序配备伺服张力控制系统,波动控制在±0.5 N以内;漆膜厚度由涡流传感器实时反馈,联动调节涂漆泵频率;烘炉温区采用PID+模糊算法复合调控,温度均匀性偏差≤±2℃,有效降低人工干预导致的质量离散性,为电磁线产业向智能化转型升级提供坚实技术底座<sup>[2]</sup>。

## 4 铜漆包线加工质量控制分析

### 4.1 原材料质量控制

在导体材料质量控制过程中,工作人员须采用符合GB/T 3952标准的无氧铜杆(OFC),其纯度不低于99.95%,氧含量严格控制在5-10 ppm区间。过高氧含量会形成Cu<sub>2</sub>O脆性相,降低延展性,诱发拉丝断裂;Bi、Pb、S等杂质元素要通过ICP-MS检测,总量不超过5 ppm,有效避免晶界偏析削弱高频导电性能。针对微细线(<0.1 mm)生产,则应对铜杆进行超声波探伤和晶粒度评级,确保内部无缩孔、夹杂、粗大柱状晶,且每批次铜杆入厂必须完成电导率、抗拉强度、延伸率三项指标验证<sup>[3]</sup>。

绝缘漆作为功能层载体,其质量直接影响漆膜附着力、耐热性、介电强度。供应商须提供完整技术数据包,包括树脂固含量、粘度、酸值、凝胶时间、热重分析(TGA)曲线。漆液入厂后进行小样试涂及烘焙,量化评估流平性、针孔率、和铜基体的界面结合力;溶剂体系中苯类物质含量须符合GB 38507限制,优先选用低毒环保型稀释剂;所有原材料实施批次追溯编码管理,建立“一物一码”数据库,确保质量问题可快速回溯至源头,从供应链端筑牢质量防线。

### 4.2 工艺质量控制

工艺过程是连接材料和成品性能的重要环节,须通过参数闭环、在线监测等手段,实现动态稳态控制。例如:在拉丝工序中,单道压缩率、模具角度、润滑剂浓度构成重要控制要素,压缩率偏离15%-20%区间容易引发加工硬化<sup>[4]</sup>;退火温度和线速匹配决定再结晶程度,400-500℃保护气氛退火后,铜线延伸率应稳定在30%-35%,电阻率波动≤±0.5%。涂覆阶段采用多级粘度梯度设计,初道低粘度保障浸润,后续高粘度累积膜厚,漆膜总厚度依IEC 60317标准按线径分级控制,公差±2 μm。固化炉三温区(预热—主烘—冷却)温度曲线经热电偶实测校准,PAI体系主烘区

必须维持380±3℃,偏差超限将导致交联不足。此外,全流程嵌入SPC统计过程控制,外径、漆膜同心度、击穿电压等特性实施X-R图监控,异常趋势自动触发工艺纠偏,确保产品一致性达到六西格玛水平<sup>[5]</sup>。

### 4.3 设备质量控制

拉丝机主轴径向跳动需要≤2 μm,模具座定位重复精度达到±1 μm,防止线径椭圆度超标;退火炉采用双通道氮氢混合气控制系统,实时监测露点并联动流量调节阀,保证炉内氧分压<10<sup>-6</sup> Pa,避免铜线表面氧化影响漆膜附着力<sup>[6]</sup>。涂漆系统配备高精度齿轮计量泵,流量波动<±1%,配合激光测径仪反馈实现漆膜厚度自适应调节。烘炉热风循环系统经过CFD仿真优化,截面温差≤±2℃,热电偶校准周期不超过30天<sup>[7]</sup>。

在设备维护过程中,严格推行TPM(全员生产保全)模式,建立预防性维护台账,收线张力传感器、β射线测厚仪、VOCs在线监测仪等关键部件实行强制周期检定,误差超限立即停用。高速生产线集成MES系统,实时采集放线张力、线速度、各区温度等200+参数,异常数据自动标记,生成详细的维修工单。此外,设备清洁度纳入日常点检,涂漆槽每周超声清洗,烘炉内壁每月除积碳,杜绝杂质污染漆膜<sup>[8]</sup>。

## 5 结语

本研究系统梳理铜漆包线加工中的关键技术和质量控制路径。导体预处理环节通过高纯无氧铜、精确退火工艺,有助于保障晶界完整性,控制氧化物生成。绝缘涂覆采用PAI/QZY复合体系,结合粘度梯度调控、三温区固化等手段,实现热稳定性和机械强度协同优化。在环保和自动化方面,集成催化燃烧系统,实现VOCs高效治理。质量控制依托原材料入厂检测、工艺SPC监控、设备TPM管理,确保产品一致性达到六西格玛水平。研究成果为高性能漆包线量产提供从材料到工艺再到管控的完整技术模式,推动电磁线制造向高精度、智能化、绿色化方向发展。

### 参考文献:

- [1] 宋启龙,陈智勋,穆锡龙,等. 耐高温漆包线用高效复配氢氧化钠脱漆剂的研究[J]. 电镀与涂饰,2025,44(4):141-145.
- [2] 刘志军,陈亮,袁敏,等. 扁铜漆包线免剥漆皮电阻焊接头性能分析[J]. 微特电机,2025,53(1):78-82.
- [3] 高晨光,汪旭东,刘旭辉,等. 镍合金漆包线电阻脱漆微点焊工艺[J]. 焊接,2025(4):78-83.
- [4] 夏扬,于正林. 基于单相机全视角的漆包线缺陷检测方法[J]. 机电工程技术,2025,54(15):115-122.
- [5] 徐飞. 电机用漆包线表面针孔检测工装的设计与应用[J]. 电机技术,2025(4):53-54.
- [6] 蔡凯,龙香林,王阳. 高频方波脉冲频率对漆包线耐电晕性能的影响研究[J]. 上海塑料,2025,53(6):58-62.
- [7] 曾跃云,郭伟,刘红芳,等. 铜材质量和退火工艺与漆包线柔软性的关系[J]. 电线电缆,2025,68(12):55-60.
- [8] 陈金刚. 电机绕组用电磁漆包线性能检测及绕组浸漆工艺控制[J]. 电气防爆,2025(1):24-26.