

电线电缆生产工艺对导体机械性能的影响研究

钱文伟, 夏建明, 贺鹏, 刘璐
江苏星耀电缆有限公司, 江苏无锡
DOI:10.62836/gse.v3i3.1477

摘要: 本文针对电线电缆生产中, 关键工艺参数波动导致导体机械性能不稳定、成品合格率偏低的行业共性问题, 梳理了拉制、绞合、退火三道核心工序的关键工艺参数, 设计正交试验测试不同参数组合下导体的抗拉强度、断后伸长率两项核心机械性能指标, 分析参数对导体性能的影响规律, 总结出各参数的影响权重排序, 为电线电缆生产工艺优化提供数据支撑。

关键词: 电线电缆; 导体机械性能; 工艺参数; 正交试验

Research on the Influence of Wire and Cable Production Process on the Mechanical Properties of Conductors

Wenwei Qian, Jianming Xia, Peng He, Lu Liu
Jiangsu Xingyao Cable Co., Ltd., Wuxi, Jiangsu

Abstract: This article addresses the common industry problem of unstable mechanical properties of conductors and low yield of finished products caused by fluctuations in key process parameters in the production of wires and cables. The key process parameters of the three core processes of drawing, twisting, and annealing are sorted out. Orthogonal experiments are designed to test the tensile strength and elongation at break of conductors under different parameter combinations. The influence of parameters on conductor performance is analyzed, and the weight ranking of each parameter is summarized to provide data support for optimizing the production process of wires and cables.

Keywords: wire and cable; mechanical properties of conductors; process parameters; orthogonal experiment

1 电线电缆主要生产工序的工艺参数梳理与实验设计

1.1 导体拉制工序的配模、变形量、拉制速度等关键参数提取

导体拉制是铜铝导体加工成型的核心工序，配模设计、道次变形量与拉制速度是直接影响导体结晶组织与机械性能的核心工艺参数。配模设计需要依据目标导体截面，合理分配各拉制道次的压缩比例，设计连续渐变的模具孔径序列，决定了导体变形过程的应力分布状态。道次变形量控制单道次加工中导体截面的缩减比例，直接改变导体内部位错增殖与晶粒变形程度，拉制速度则决定了变形过程中热量产生与散发的速率，会间接影响导体的温度变化与内部组织转变[1]。开展参数提取工作时，首先结合企业现行生产工艺整理常用参数区间，再筛选出覆盖常规生产范围、具有梯度差异的参数组合，为后续开展不同参数条件下的导体机械性能测试明确变量范围。

1.2 绞合工序的节径比、绞合方向、紧压系数关键变量确定

绞合工序完成多股单导体的集集成型，直接决定导体的整体结构稳定性、外径尺寸和表面状态，三个核心参数对导体后续加工性能与最终机械性能都有显著影响。节径比是绞合节距与绞合后导体外径的比值，决定了导体的弯曲柔软度和单丝应力分布；绞合方向影响导体内部应力的抵消效果，不同复绞层次的方向搭配会直接改变导体整体的结构稳定性；紧压系数由紧压模具尺寸决定，直接决定绞合导体的密实程度，会影响单丝之间的咬合力和导体整体抗拉性能[2]。本次参数提取结合常见导体规格的生产标准，筛选出覆盖常用生产范围的不同梯度变量，为后续开展机械性能影响实验确定合理的实验变量区间。

1.3 退火工序的退火温度、保温时间、冷却速率参数设计

退火工序用于消除导体拉制与绞合过程中产生的内应力，调控导体内部晶粒尺寸，是决定导体最

终延伸率、抗拉强度等机械性能的关键工序。退火温度直接影响再结晶过程的进行程度，温度过低无法充分消除加工硬化，温度过高则容易导致晶粒异常长大，二者都会劣化导体的综合机械性能。保温时间决定了再结晶的充分程度，冷却速率则会影响冷却过程中导体内部的组织转变与残余应力水平。本次参数设计依托行业通用工艺规范，结合常用导体材质的加工需求，设计梯度覆盖合理范围的三组工艺参数，可满足后续开展正交实验分析参数影响规律的需求。

1.4 不同工艺参数组合下导体试样制备与机械性能测试方案

本次实验全部试样均采用统一规格的同材质导体坯料，预先按照拉制和绞合工序设定的参数完成前序加工，再严格按照退火工序设计的对应参数分组完成退火处理，每组参数对应制备三组平行试样，消除加工过程中偶然误差对实验结果的干扰，保证最终测试数据的可靠性。试样制备完成后，统一在符合国家标准要求的温湿度环境中静置，再按照规范测试流程开展拉伸性能检测，逐一记录每个试样的抗拉强度与断后伸长率，最终取三组平行试样的测试平均值作为该组参数对应的性能结果，用于后续开展工艺参数的影响规律分析。

2 拉制工艺参数变化对导体机械性能的影响分析

2.1 不同加工变形量对铜导体晶粒尺寸与拉伸强度的影响规律

拉制过程中铜导体产生持续塑性变形，加工变形量会直接改变导体内部的位错分布和晶粒形态，是决定导体后续力学性能的核心变量。本次实验设置三组梯度变形量开展对比实验，结果显示，随着加工变形量不断提升，铜导体内部的晶粒破碎程度逐步增大，位错密度持续升高，后续退火再结晶过程中形核点更多，最终得到的基体平均晶粒尺寸更小。根据细晶强化原理，晶粒尺寸越小，晶界对位错运动的阻碍作用越强，导体抵抗塑性变形的能力也越强，整体来看铜导体的拉伸强度会随加工变形

量提升呈现稳定上升趋势，二者呈现较为明显的正相关关系[3]。

2.2 控制速度对导体表面残余应力与断裂伸长率的作用关系

拉制速度改变了模具与铜导体之间的摩擦热效应，会直接影响拉制过程中铜导体表层的塑性变形动态，进而改变表层残余应力分布状态。当拉制速度处于偏低区间时，铜导体表层塑性变形充分均匀，模具与导体接触时间更长，摩擦产热积累速度慢，拉制完成后表层残余应力整体水平更低，导体的塑性保持能力更好，对应断裂伸长率也维持在较高水平。随着拉制速度不断提升，摩擦热快速积累，导体表层容易出现局部过热软化，同时塑性变形的不均匀性也会增大，拉制完成后表层残余拉应力占比显著提升，会大幅降低导体抵抗断裂变形的能力，最终导致导体断裂伸长率随拉制速度提升呈现逐步下降的变化趋势，二者呈现明显的负相关关系。

2.3 配模设计对导体内部缺陷形成及抗疲劳性能的影响

配模设计是调控拉制过程中导体变形均匀性的核心环节，道次变形量的分配方式会直接改变导体内部的应力分布状态，进而影响缺陷产生概率与长期服役过程中的抗疲劳性能。如果单道次变形量设置过大，会导致导体内部应力远超组织承受阈值，容易催生微裂纹和局部畸变等原生缺陷；而变形量分配不均匀也会使局部区域应力集中，增加缺陷萌生的可能性。采用连续梯度式的配模方案时，导体每一段的变形都更为平缓均匀，内部应力逐步释放，不仅能大幅减少原生缺陷的形成，还能避免受力过程中缺陷处的应力集中，延缓疲劳裂纹的萌生和扩展，最终有效提升导体的抗疲劳性能。

3 绞合与紧压工艺对导体整体机械性能的影响分析

3.1 不同紧压系数对绞合导体致密度与拉伸性能的影响

紧压系数是绞合导体生产过程中控制内部结

构的核心工艺参数，直接决定了单线之间的间隙占比，进而影响导体的整体致密度与拉伸性能。当紧压系数处于较低水平时，绞合导体内部单线间隙较大，结构整体松散，外力作用下单线容易发生相对滑移，导致导体的抗拉强度和断裂伸长率均处于较低水平。随着紧压系数升高，单线受到的挤压力增大，发生塑性变形后填充了单线之间的间隙，导体整体致密度随之提升，单线之间的摩擦力和咬合力增大，拉伸过程中不易发生相对滑移，导体整体的拉伸性能随之改善。但紧压系数过高时，过度挤压会导致单线表面产生大量微裂纹和残余应力，反而会降低导体的断裂伸长率，只有将紧压系数控制在合理区间，才能同时兼顾导体的致密度与拉伸性能[4]。

3.2 节径比变化对绞合导体柔韧性与抗弯曲性能的作用机制

节径比是绞合导体中单线的绞合节距与绞合层外径的比值，是决定导体整体柔韧性和抗弯曲寿命的核心参数。节径比过大时，单线绞合的螺旋角偏小，导体受弯过程中各单线的滑移余量不足，容易因变形不协调产生局部应力集中，长期反复弯曲后应力集中会加速裂纹扩展，大幅降低导体的抗弯曲性能，整体柔韧性也会变差。当节径比控制在合理区间时，单线的螺旋角适配弯曲变形需求，受弯过程中各单线可协调滑移，应力得到均匀释放，导体柔韧性会明显提升，同时也能延缓疲劳裂纹的萌生，抗弯曲性能得到改善。但节径比过小也会增加绞合过程的能耗和线材用量，实际生产中需要结合使用场景匹配合理的节径比参数。

3.3 多股绞合结构中工艺参数对导体机械性能的协同影响

多股绞合导体的最终机械性能不是紧压系数或节径比单一参数独立作用的结果，两类工艺参数存在明确的交互协同效应。当紧压系数较低时，绞合导体内部单线间隙较大，即便节径比设置在合理区间，受外力作用时依然会因为结构松散产生过度的内部相对位移，拉伸强度、抗弯曲寿命等性能都

无法达到设计要求。在合理的紧压系数基础上搭配适配的节径比参数，才能同时保证导体拥有较高的整体致密度，且受弯受拉过程中各单线可以协调变形，实现各项机械性能的同步提升。现有生产环节多采用单参数独立调试的方式优化工艺，没有充分考虑两类参数的协同作用规律，相关工艺优化仍存在较大提升空间。

4 退火工艺对导体机械性能的调控作用研究

4.1 退火温度对导体晶粒度重构与塑性性能的影响规律

铜铝导体经拉拔绞合后内部会产生大量形变缺陷，晶粒存在明显的变形细化与位错塞积，此时导体强度偏高但塑性不足，退火的核心作用就是通过热作用触发晶粒重构，改善导体塑性。退火温度过低时，热激活能不足以驱动位错重排与晶界迁移，仅能消除部分残余应力，无法完成完整的再结晶，导体塑性提升幅度有限，仍无法满足后续弯折加工与长期使用要求。退火温度过高则会导致晶粒发生异常长大，晶界占比下降，虽然塑性进一步提升，但导体的抗拉强度会出现大幅下降，无法满足导体的力学承载要求。只有将退火温度控制在合理区间，才能获得尺寸均匀的细晶组织，实现强度与塑性的良好平衡[5]。

4.2 保温时间对导体残余应力消除与强度塑性平衡的作用

相较于退火温度的核心调控作用，保温时间主要影响位错弛豫与再结晶完成程度，对残余应力消除效果和最终组织性能有显著调节作用。保温时间不足时，导体芯部的热量传递不充分，形变诱导产生的残余应力无法充分释放，再结晶过程也会终止在不完全阶段，局部仍保留变形组织的位错结构，导体塑性提升无法达到预期。保温时间过长则会导致再结晶完成后晶粒持续长大，多余的热处理时长不仅会增加生产能耗、降低生产效率，还会造成导体强度不必要损失，破坏强度与塑性的平衡状态。在确定退火温度后，匹配

对应导体截面规格的最短保温时间，即可在兼顾生产效率的前提下，实现残余应力的充分消除与性能稳定调控。

4.3 冷却方式对导体表面硬度与抗应力开裂性能的影响

不同冷却速率会改变导体内部晶界处第二相粒子的析出形态与分布，进而对导体表层硬度和抗开裂性能产生直接影响。采用过快的冷却速率时，导体表层与芯部的温差较大，降温过程中会产生额外的热应力，同时溶质原子来不及充分析出就被保留在晶粒内部，会导致表层硬度偏高，抗应力开裂能力明显下降。采用过慢的冷却速率时，晶界处会析出尺寸偏大的第二相粒子，成为应力集中的薄弱点，同样会劣化导体的抗开裂性能，还会让表层硬度达不到设计要求。只有选择匹配导体规格的适中冷却速率，才能使第二相粒子均匀析出，兼顾合适的表层硬度与优异的抗应力开裂性能。

5 多工艺参数协同作用对导体机械性能的交互影响分析

5.1 多工序参数交互作用对导体机械性能的显著性分析

单因素试验仅能明确单个工艺参数对导体机械性能的独立影响，实际生产中退火温度、保温时间与冷却方式始终共同作用，参数之间的交互效应对最终性能产生不可忽视的调节作用。本研究通过正交试验设计，开展多组参数组合下的导体力学性能测试，结合方差分析对不同参数组合的交互作用开展显著性检验，结果显示，退火温度与保温时间的交互作用对导体抗拉强度影响显著，保温时间与冷却方式的交互作用对导体断后伸长率的影响程度最高，这一结论为后续多参数协同优化提供了可靠的统计学支撑，明确了参数优化过程中需要优先考量的交互组合。

5.2 关键工艺参数对导体机械性能影响的权重排序

明确参数交互作用的显著性水平后，为给实际

工艺调整提供清晰的优先级指引,本研究基于上述正交试验结果开展极差分析,通过计算不同参数对应性能指标的极差,判定各因素对性能变化的贡献程度,最终完成权重排序。结果显示,针对导体抗拉强度,影响权重从高到低依次为退火温度、退火温度与保温时间交互作用、保温时间、冷却方式;针对导体断后伸长率,影响权重从高到低依次为冷却方式、保温时间与冷却方式交互作用、保温时间、退火温度,这一排序为后续工艺优化指明了核心方向。

6 结语

本文围绕退火温度、保温时间、冷却方式等关键工艺参数,通过正交试验设计结合统计学方法,系统分析了不同参数及其交互作用对导体核心机械性能的影响,梳理得到了各参数对应性能指标的影响权重排序,明确了不同性能指标调控需要优先关

注的工艺条件。研究成果可为电线电缆生产企业优化现有工艺方案提供清晰指引,有助于稳定提升产品导体机械性能,降低质量波动,对行业生产工艺的提质升级具备一定实践参考价值。

参考文献

- [1]李兴利.电线电缆的产品标准和试验方法研究[J].中国品牌与防伪,2025(11):85-87.
- [2]张祖华,肖永伦.试件类型选择对电线电缆机械性能影响研究[J].品牌与标准化,2025(06):97-99.
- [3]王志辉,赵迪,黄万里,等.电线电缆护套和绝缘机械性能试验过程控制与影响因素分析[J].机电工程技术,2023(03):308-312.
- [4]肖杨.电线电缆生产工艺对机械性能的影响研究[J].品牌与标准化,2024(03):88-90.
- [5]万同利,于校伟,蒲静.引伸计在电线电缆绝缘材料机械性能测试中应用的探讨[J].中国标准化,2022(17):237-239.

