

# 风电扭转电缆生产过程中质量控制与分析

李焱霖

湖南华菱线缆股份有限公司 特种线缆制备湖南省重点实验室 湖南 湘潭 411104

**【摘要】：**风电扭转电缆是风电机组中的关键部件，其质量直接影响运行安全与可靠性。生产中若材料选型不当、工艺控制不严或检测不足，易导致扭转性能下降、绝缘老化甚至断裂。为提升品质，需系统分析各工序质量影响因素，建立覆盖原材料检验、绞合、成缆、护套挤出及成品测试的全过程控制体系。通过强化工艺参数监控、优化设备配置、完善在线与出厂检测，可有效降低缺陷率，提升电缆耐扭转性与环境适应性。科学的质量控制能显著增强产品稳定性，满足风电领域严苛工况要求。

**【关键词】：**风电扭转电缆；生产质量控制；工艺参数；缺陷检测；可靠性

DOI:10.12417/2811-0722.25.12.003

## 引言

风力发电机组在复杂多变的环境中持续运行，对内部连接电缆的动态性能提出了极高要求。风电扭转电缆长期承受反复扭转、振动及恶劣气候影响，一旦发生故障将导致高昂的维修成本和发电损失。近年来，因电缆质量问题引发的停机事件频发，凸显出生产过程中质量控制的重要性。如何在制造环节精准识别风险点，实施有效管控，已成为行业关注的焦点。本文从实际生产出发，系统探讨关键工序的质量影响因素及控制策略，旨在为提升产品可靠性提供实践参考。

## 1 风电扭转电缆的关键性能要求与应用环境

风电扭转电缆是风力发电机组中实现电能传输的核心部件，其主要功能是在机舱与轮毂之间随风向变化持续进行相对旋转运动时，稳定传输电力与信号。由于风电机组常运行于高海拔、低温、盐雾腐蚀及强风沙等恶劣环境，电缆需具备优异的耐候性、抗紫外线能力以及良好的阻燃性能。更为关键的是，电缆在运行中需承受高频次、大角度的周期性扭转，因此必须具有出色的柔韧性和抗疲劳性能。若电缆在设计或制造过程中未能充分考虑这些工况需求，极易在长期使用中出现导体断裂、绝缘层开裂或护套磨损等问题，进而引发短路、断电甚至火灾等严重事故，影响整机运行安全与发电效率。

从结构上看，风电扭转电缆通常采用多股细铜丝绞合导体，以增强弯曲和扭转适应能力；绝缘层多选用交联聚乙烯或乙丙橡胶材料，确保在宽温范围内保持电气性能稳定；护套则常采用高弹性、耐磨损的聚氨酯或氯丁橡胶，以抵御外部机械应力与环境侵蚀。为防止扭转过程中内部结构发生位移或变形，电缆内部常设置填充绳与包带层，提升整体结构稳定性。在实际应用中，电缆还需通过严格的扭转试验，如低温扭转测试、动态弯曲扭转循环测试等，以验证其在模拟工况下的使用寿命与可靠性。这些性能指标直接决定了电缆能否在20年以上的服役周期中保持稳定运行。

在生产过程中，必须依据风电应用的实际工况设定明确的技术规范，确保每一环节都服务于最终产品的可靠性目标。导

体绞合节距、绝缘挤出厚度、护套材料硬度等参数均需精确控制，任何偏差都可能在长期扭转应力下被放大，导致早期失效。对电缆性能要求的深入理解，是制定有效质量控制策略的核心前提。因此，只有将应用环境的严苛性转化为生产过程中的具体技术指标，才能从根本上保障风电扭转电缆的质量稳定性与长期运行可靠性。

## 2 生产过程中主要质量影响因素分析

风电扭转电缆的生产过程涉及多道工序，每一道环节的工艺执行情况都直接关系到最终产品的质量稳定性。在实际生产中，原材料的质量波动是影响电缆性能的首要因素。导体所用铜丝的纯度、拉丝均匀性以及表面氧化程度，若控制不当，将导致导体电阻增大或局部过热，降低电缆载流能力。绝缘材料和护套材料的批次差异，如交联度不足、杂质含量过高或配方比例偏差，会显著削弱其机械强度与耐老化性能。特别是在低温环境下，劣质材料易发生脆化，一旦受到扭转应力，极易产生微裂纹并逐步扩展，最终造成绝缘失效。原材料进厂时必须进行严格检验，确保其物理、化学及电气性能符合风电电缆专用标准。

在电缆的绞合与成缆工序中，工艺参数的设定与设备状态对产品质量具有决定性作用。导体绞合过程中，若节距控制不精准或张力不均，会导致铜丝间受力不一致，在反复扭转中产生应力集中，加速导体疲劳断裂。成缆时，若填充不饱满或包带绕包过松，电缆在动态弯曲过程中内部结构易发生位移，造成绝缘层受压变形或护套内壁磨损。屏蔽层的编织密度和均匀性也至关重要，编织过稀或跳丝会降低电磁屏蔽效果，影响信号传输质量。在实际生产中，设备老化、模具磨损或操作人员经验不足，均可能导致工艺偏离标准，形成潜在缺陷。必须建立完善的工艺规程，并对关键设备进行定期校准与维护。

护套挤出是电缆成型的最后一道关键工序，其质量直接影响电缆的外部防护能力与扭转性能。挤出过程中，温度控制不稳定会导致材料塑化不良或焦烧，影响护套的柔韧性与附着力。护套厚度不均或偏心，会在扭转时产生局部应力集中，加速外护层开裂。护套与内层结构的粘结强度若不足，在长期动态运

行中可能出现分层现象，降低整体结构稳定性。生产环境中的粉尘、湿气等污染物若混入挤出过程，也会在护套中形成气泡、杂质点等缺陷，成为应力破坏的起始源头。必须加强过程监控，采用在线测厚、火花检测等手段及时发现并纠正偏差，确保每一米电缆都符合质量要求。

### 3 原材料选择与预处理环节的质量控制

风电扭转电缆的性能基础始于原材料的科学选型与严格把关，材料的物理化学特性直接决定了电缆在复杂工况下的使用寿命与安全水平。导体作为电能传输的核心，通常采用无氧铜杆拉丝制成多股细铜丝绞合结构，其纯度需达到99.99%以上，以确保良好的导电性和抗疲劳性能。铜丝表面应光滑无氧化、无划伤，否则在绞合过程中易产生断丝或毛刺，影响整体柔韧性。绝缘材料多选用交联聚乙烯(XLPE)或乙丙橡胶(EPR)，要求具备优异的介电强度、耐热等级和抗辐照能力，尤其在低温环境下仍能保持良好的弹性，避免因脆化导致开裂。护套材料则常采用聚氨酯(TPU)或氯丁橡胶(CR)，需具备高耐磨性、耐油性及抗紫外线性能，以应对风机舱内复杂的机械摩擦与环境侵蚀。

在材料投入使用前，必须经过系统的预处理与检验流程，确保其符合风电电缆专用技术标准。铜杆在拉丝前需进行表面清洁与干燥处理，防止水分和杂质影响拉丝质量；拉丝过程中要严格控制模具磨损程度和冷却液浓度，确保铜丝直径均匀、表面光洁。绝缘和护套材料在挤出前需进行充分干燥，尤其是吸湿性较强的材料如聚氨酯，若含水率超标，会在高温挤出时产生气泡或针孔，严重影响绝缘完整性。材料在配料时应严格按照配方比例进行称量和混合，避免因添加剂比例失调导致交联度不足或材料老化加速。每批次原材料均需进行抽样检测，包括拉伸强度、断裂伸长率、热延伸率、密度及电性能测试，确保其批次稳定性，杜绝不合格材料流入生产线。

原材料的储存与管理同样是质量控制的重要环节。电缆生产企业应建立恒温恒湿的原材料库房，避免材料因环境温湿度变化而发生性能劣化。铜丝应密封包装，防止氧化；橡胶和塑料粒子应远离热源和阳光直射，防止提前老化。不同批次、不同厂家的材料应分区存放，并建立可追溯的台账系统，一旦成品出现质量问题，可迅速追溯至源头。在投料过程中，操作人员需核对材料型号与批次信息，防止混料或错用。通过建立从选型、检验、预处理到仓储的全流程管控体系，能够有效保障原材料质量的稳定性，为后续工序打下坚实基础，从根本上提升风电扭转电缆的整体可靠性与一致性。

表1 风电扭转电缆主要原材料性能检测结果

材料类别	检测项目	单位	国家标准值(GB/T)	实测值	合格判定
无氧	电阻率(20℃)	$\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$	$\leq 0.01724$	0.01711	合格

材料类别	检测项目	单位	国家标准值(GB/T)	实测值	合格判定
铜导体	拉伸强度	MPa	$\geq 200$	213	合格
	介电强度	kV/mm	$\geq 25$	28.2	合格
XLPE绝缘料	热延伸率( $200^{\circ}\text{C} \times 15\text{min}$ )	%	$\leq 175$	140	合格
	撕裂强度	kN/m	$\geq 25$	28.6	合格
TPU护套料	耐低温弯曲( $-40^{\circ}\text{C}$ )	—	不开裂	不开裂	合格

数据来源：国家电线电缆质量监督检验中心，2024

### 4 核心制造工序的工艺优化与过程监控

风电扭转电缆的制造质量在很大程度上取决于核心工序的工艺稳定性与过程控制精度。导体绞合是电缆成型的首要环节，其工艺参数直接影响电缆的柔韧性和抗扭转疲劳能力。绞合过程中，需严格控制单丝直径、绞合节距、绞合方向及张力均衡性，确保铜丝排列紧密、结构对称。若张力不均或节距过长，会导致导体在反复弯扭中出现局部松股或变形，加速金属疲劳。生产中应采用恒张力放线装置，并定期校准模具与牵引系统，保证绞合密度和圆整度符合设计要求。对绞合后的导体进行在线外观检查和导体电阻测试，及时发现断丝、划伤或电阻超标等缺陷，防止不良品流入下道工序。

在多芯电缆的成缆过程中，需合理配置填充绳，保证缆芯圆整，避免因空隙过大导致在扭转时内部元件相互挤压或滑移。包带材料通常采用无纺布或聚酯带，绕包需紧密且重叠率符合工艺要求，既能稳固固定缆芯结构，又不影响电缆的弯曲与扭转性能。若包带过松，电缆在后续护套挤出或使用过程中易发生结构松散；若过紧，则会限制内部元件的相对运动，增加扭转应力。实际生产中，应通过调节绕包角度和张力控制装置，确保包带均匀贴合。屏蔽层的编织工艺也需重点监控，编织密度应达到85%以上，避免出现漏编、跳丝或断丝现象，以保障电缆的电磁兼容性和信号传输稳定性。

护套挤出作为电缆生产的最后一道成型工序，其质量直接影响产品的外部防护性能和动态耐久性。挤出过程中，需精确控制挤出机各段温度、螺杆转速和冷却水温，确保材料塑化均匀、流动稳定。护套厚度必须符合标准要求，且圆整度良好，避免偏心或薄点，否则在长期扭转中易出现局部破裂。生产中应配备在线测厚系统，实时监测护套外径变化，并与控制系统联动进行自动调节。采用火花试验机对护套进行连续性高压检测，及时发现针孔、气泡或杂质等绝缘缺陷。在整个生产流程中，还应建立关键工艺参数的记录与追溯机制，对每盘电缆的工艺参数、操作人员、设备状态等信息进行存档，实现全过程可追溯。通过优化工艺参数、强化设备维护和实施在线监控，

能够有效提升产品一致性，确保风电扭转电缆在复杂工况下的长期可靠运行。

## 5 成品检测与质量反馈机制的建立

风电扭转电缆在完成全部生产工序后，必须经过系统、全面的成品检测，以验证其是否满足设计要求和实际运行条件。出厂前的常规电性能测试包括导体电阻测量、绝缘电阻测试和工频耐压试验，用以确认电缆的导电能力与绝缘完整性。导体直流电阻需符合 GB/T3956 等标准规定，确保载流量达标；绝缘电阻测试可发现材料受潮或杂质污染等问题；工频耐压试验则在规定电压下持续施加一定时间，检验绝缘层能否承受正常工作电压及瞬时过电压而不发生击穿。还需进行结构尺寸检查，利用外径千分尺和投影仪测量导体直径、绝缘厚度、护套厚度及椭圆度，确保各层结构符合图纸要求，避免因尺寸偏差导致机械强度不足或安装困难。

动态扭转试验是评估电缆抗疲劳能力的核心手段，可模拟风电机组运行中电缆频繁摆动和扭转的工况，在特定温度、弯曲半径和扭转角度下进行数万次甚至数十万次的循环测试，观察电缆是否出现导体断裂、绝缘开裂或护套磨损等失效现象。低温弯曲试验用于检验电缆在极寒环境下的柔韧性，将样品置于规定低温环境中恒温放置一段时间后，绕过指定直径的圆棒进行弯曲，检查外护层是否产生裂纹。热延伸试验则用于判断交联聚乙烯绝缘的交联度是否充分，若热延伸率超标，说明交

联反应不完全，材料在高温下易变形，影响长期使用可靠性。所有试验项目均需依据 IEC60092、GB/T18380 等相关标准执行，并形成完整的检测报告，作为产品合格放行的重要依据。

为实现质量持续改进，企业应建立闭环的质量反馈机制。每批产品的检测数据需归档保存，形成可追溯的质量档案，一旦客户端出现故障，可通过序列号快速调取原始工艺参数和检验记录，分析问题根源。收集现场运行反馈信息，尤其是因电缆问题导致的停机、维修案例，通过失效模式与影响分析（FMEA），精准识别设计或工艺中的薄弱环节。对于重复出现的质量问题，应组织技术攻关，优化材料配方或调整工艺参数。内部还应定期开展质量评审会议，将检测结果与客户反馈纳入质量考核体系，推动从原材料到成品的全流程改进。通过检测把关与反馈优化相结合，不断提升风电扭转电缆的可靠性和市场竞争力。

## 6 结语

风电扭转电缆的质量控制是一个涵盖原材料、生产工艺到成品检测的系统工程。通过强化原材料管理、优化核心工艺、实施全过程检测与闭环反馈，可显著提升电缆的可靠性、耐久性与运行稳定性。唯有建立科学严谨的质量控制体系，才能保障风电扭转电缆在复杂工况下的长期稳定运行，为风力发电系统的安全高效运行提供有力支撑。

## 参考文献：

- [1] 刘志远,陈晓峰.风电用扭转电缆结构设计与性能测试研究[J].电线电缆,2022,45(3):12-16.
- [2] 孙文博,黄海涛.风力发电机组用动态电缆材料选型与工艺控制[J].橡胶工业,2021,68(7):534-538.
- [3] 周立新,吴建国.风电电缆生产过程中的质量缺陷分析与改进[J].电气技术,2023,24(5):88-92.
- [4] 朱建民,冯玉蓉.动态扭转环境下电缆疲劳寿命评估方法探讨[J].高电压技术,2020,46(9):3125-3130.
- [5] 胡庆生,马振宇.风电电缆护套挤出工艺参数优化与质量控制[J].塑料工业,2022,50(4):103-107.