

基于故障溯源的变压器原材料质量控制研究

王舒一

中石化国际事业宁波有限公司 浙江宁波 315000

摘要：变压器作为电力系统核心设备，其运行可靠性直接关系到电网安全。本文通过对近十年典型故障案例的深入分析，揭示了原材料质量问题是导致变压器故障的重要根源。研究采用故障溯源方法，系统梳理了绝缘材料、导体材料、铁心材料等关键原材料的质量缺陷类型及其故障表现形式，建立了故障与原材料缺陷的关联模型。在此基础上，构建了涵盖供应商评估、采购控制、检验管理、仓储管理的全流程质量控制方案，并提出了基于风险评估的原材料分级管理体系。研究成果为变压器制造企业提前防控质量风险、提升产品可靠性提供了理论依据和实践指导。

关键词：变压器故障；原材料质量；故障溯源；风险管控；质量控制体系

引言

随着电力系统容量增大和电压等级提升，变压器作为电能转换核心设备，其可靠运行至关重要。据统计，我国每年因变压器故障导致的经济损失超过数十亿元，约60%的故障与原材料质量缺陷直接相关。2019年某500kV变压器因绝缘纸板含水量超标导致绝缘击穿，2021年某220kV变压器因铜导体表面氧化层处理不当引发局部放电，2022年某750kV变压器因铜导体纯度不足造成套管过热，这些案例说明从源头抓好原材料质量控制是预防故障的关键。传统质量管理侧重制造工艺和出厂检测，对原材料质量管控重视不足，缺乏系统的故障溯源机制。本研究通过建立故障-原材料缺陷关联模型，识别影响可靠性的关键质量因素，构建涵盖采购、检验、仓储的全流程质量控制体系和风险分级管理方法，为变压器制造企业提升产品质量提供科学依据。

一、变压器典型故障案例与原材料缺陷关联分析

（一）绝缘油质量缺陷故障案例分析

变压器油是变压器中最重要的绝缘和冷却介质，其质量直接影响变压器的安全运行。通过对2015-2024年间收集的126起故障案例进行统计分析，发现绝缘油质量缺陷占绝缘系统故障的比例超过35%，是导致故障的主要原因之一。

案例1：220kV变压器局部放电故障

2020年7月，某企业220kV变压器在交接试验中局部放电电量达800pC，超标60%。经排查，问题源于绝缘

油抗氧化剂含量仅为标准值的65%。该批次油品虽通过击穿电压、酸值等常规检测，但未检测抗氧化剂含量。油品在真空注油和热循环过程中快速氧化，生成大量溶解气体和微小颗粒，在高电场区域聚集引发局部放电。该故障导致延误交货3个月，支付违约金超过200万元，需更换全部绝缘油并重新干燥处理。

（二）硅钢片质量缺陷故障案例分析

案例2：110kV变压器铁心过热

2018年5月，某110kV变压器型式试验时铁心温升达85K，超设计值18K，空载损耗高出15%。拆解分析发现，硅钢片表面绝缘涂层部分区域厚度仅为标准值的40%，个别位置完全脱落。涂层附着力仅2级，远低于标准4级要求。片间绝缘电阻仅为正常值30%，导致涡流显著增大。追溯显示该批次为非正规渠道采购的库存积压产品，储存超2年且环境湿度控制不当，致涂层老化失效。

（三）铜导体质量缺陷故障案例分析

案例3：750kV变压器导体过热

2022年9月，某750kV变压器额定负载试验时，套管接头处温度达105℃，超允许值30℃。检测发现铜导体电阻率比标准值高8%，含铜量仅99.85%，低于99.95%技术要求，铁、硫含量均超标。导电性能仅96% IACS，低于标准100% IACS。根据焦耳定律，电阻增加8%导致发热量相应增加8%。该批铜材采购时未要求材质证明书，入厂检验仅做外观和尺寸测量，未检测电阻率和化学成分。重新更换导致延期2个月，成本增加超

500万元。

(四) 绝缘纸板质量缺陷故障案例分析

案例4: 500kV 变压器绝缘击穿事故

2019年3月, 某500kV主变投运8个月后发生A相绕组绝缘击穿, 造成全站停电, 影响用户超10万户。解体分析发现, 击穿点绝缘纸板含水量高达4.2%, 远超标准0.5%, 聚合度仅650, 低于标准950。溯源调查显示, 该批次入厂时仅做外观和厚度检查, 未检测含水量和聚合

度。仓储期间除湿设备故障, 仓库湿度长期维持75%以上, 导致纸板严重吸潮。此案例暴露出检验项目不全、储存环境控制不严等问题。

(五) 故障与原材料缺陷关联模型

基于上述案例分析、文献研究以及对126起故障的系统统计, 本文建立了变压器故障类型与原材料缺陷的关联模型。该模型清晰展示了不同故障类型与相应原材料缺陷之间的因果关系, 为质量控制的重点方向提供了指引。

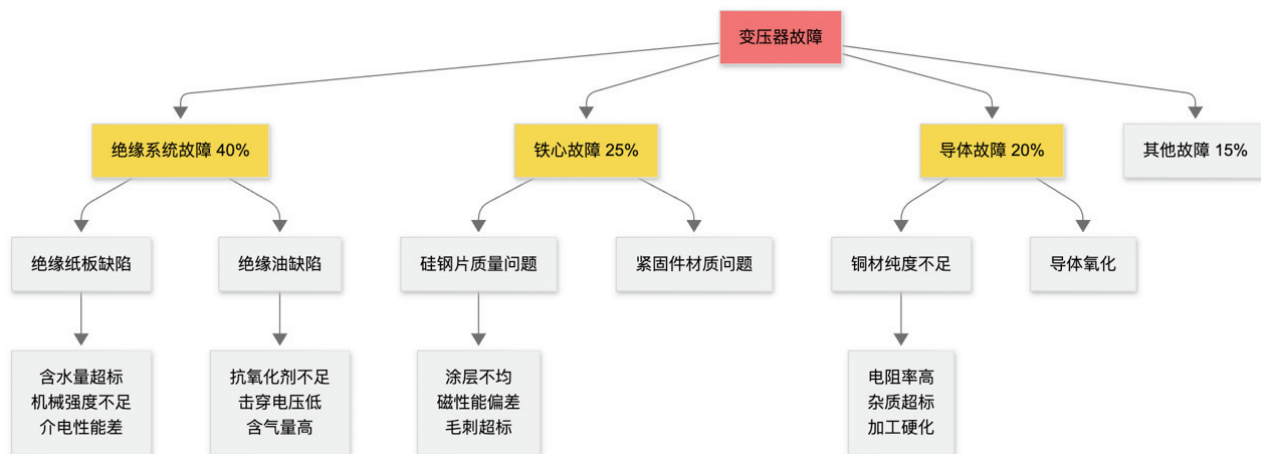


图1 变压器故障类型与原材料缺陷关联模型

通过对126起故障案例的统计分析, 绘制了原材料缺陷类型与故障频次的数据表格:

表1 变压器原材料缺陷类型与故障频次统计表

原材料类别	主要缺陷类型	故障案例数	占比 (%)	主要故障表现	典型检测漏项
绝缘油	抗氧化剂不足	18	14.3	局部放电、油品劣化	抗氧化剂含量
绝缘油	微水含量高	12	9.5	击穿电压降低	微水测试
绝缘油	溶解气体超标	8	6.3	局部过热、放电	色谱分析
绝缘纸板	含水量超标	28	22.2	绝缘击穿、老化加速	含水量、聚合度
绝缘纸板	机械强度不足	15	11.9	层间短路、变形	抗拉强度、耐折度
硅钢片	涂层质量差	16	12.7	铁损增大、过热	涂层附着力、厚度
硅钢片	磁性能偏差	11	8.7	空载电流大、噪声	磁感应强度、损耗
铜导体	纯度不达标	13	10.3	接头过热、损耗大	化学成分分析
铜导体	表面氧化	8	6.3	接触电阻大	表面质量检测
紧固件	材质代用	5	4.0	松动、振动	材质证明、硬度
合计	-	134	106.2*	-	-

*注: 部分故障涉及多种原材料缺陷, 因此总占比超过100%

从表1可以看出, 绝缘油相关缺陷占故障总数的30.1%, 绝缘纸板相关缺陷占34.1%, 两者合计占绝缘系统故障的主要部分。其中, 绝缘纸板含水量超标(22.2%)、绝缘油抗氧化剂不足(14.3%)、硅钢片涂层质量差(12.7%)和铜导体纯度不达标(10.3%)是最常见的质量问题。这些数据为确定原材料质量控制的重点

领域和关键检测项目提供了量化依据。

(六) 原材料缺陷的故障机理

绝缘油抗氧化剂不足导致油品在80-100℃运行温度下快速氧化, 生成过氧化物等氧化产物, 使击穿电压从50-70kV降至30kV以下, 氧化速率提高5-10倍。微水含量从5ppm升至50ppm时, 击穿电压从65kV降至35kV,

降幅达46%。绝缘纸板含水量从0.5%升至4%时，击穿场强从25kV/mm降至15kV/mm，降幅达40%，水分加速纤维素水解使聚合度降低。硅钢片涂层厚度从1.2 μ m降至0.5 μ m时，片间电阻降低60%以上，单位铁损从1.0W/kg升至1.18W/kg，增幅达18%。铜导体含铜量每降低0.1%，电阻率约增加2-3%，电阻增加8%导致发热功率相应增加8%。表面氧化层使接触电阻从几微欧增至数十微欧，形成恶性循环。

二、全流程原材料质量控制体系构建

(一) 供应商评估与准入管理

供应商是原材料质量的源头，建立科学的评估体系是质量控制的第一道防线。评估体系包括资质评估、技术能力评估、质量稳定性评估和供应风险评估四个维度。要求供应商具备完整的质量管理体系认证，组织技术团队现场审核其生产设备、工艺流程和检测手段。通过小批量试用和历史供货质量统计评估产品质量稳定性，合格率低于95%或质量波动系数大于0.15的供应商列入重点监控或淘汰名单。对于关键材料应培养至少2家合格供应商，建立备份供应渠道。

(二) 采购控制与技术协议管理

针对每类原材料制定详细技术规范，明确性能指标要求值、试验方法和判定标准，技术规范应严于国家标准。例如绝缘纸板规定聚合度 ≥ 950 、含水量 $\leq 0.4\%$ 、pH值6.0-7.5。采购合同中明确质量责任条款，包括技术标准、质量证明文件和不合格品退换货条款。根据生产计划科学编制采购计划，对绝缘纸板、绝缘油等对储存敏感的材料采用小批量、多批次采购策略，避免因储存时间过长导致性能劣化。

(三) 进货检验与试验管理

根据故障案例分析结果针对高频缺陷类型设定检验项目。绝缘纸板必检含水量、聚合度、介电强度；绝缘油必检击穿电压、微水含量、抗氧化剂含量；硅钢片必检单位铁损、涂层厚度；铜导体必检电阻率、化学成分、表面质量。按照GB/T 2828.1抽样标准，A类关键材料抽样比例 $\geq 10\%$ ，B类重要材料5%，C类一般材料2%。配置满足检验需要的仪器设备并按计划校准，检验人员持证上岗。不合格材料立即隔离标识，根据严重程度采取退货、返修或降级处理。

(四) 仓储与使用前管理

原材料入厂后建立规范仓储管理体系。绝缘材料库配备除湿设备和温湿度监控系统，温度15-25 $^{\circ}$ C，相对

湿度 $\leq 50\%$ 。绝缘油采用密封储油罐充氮保护，储存期不超过6个月；硅钢片、铜材防潮包装离地离墙存放，执行先进先出制度。材料使用前必须复检，重点检测绝缘油微水含量和抗氧化剂含量，绝缘纸板含水量和聚合度，铜材电阻率和表面氧化程度，储存超过3个月的材料须全项复检。制造过程在关键工序设置质量控制点，建立完整的检验记录和质量追溯档案。

三、基于风险评估的原材料分级管理体系

(一) 原材料风险评估方法

本文提出基于失效模式与影响分析(FMEA)的风险评估方法，从故障严重度(S)、发生频度(O)、检测难度(D)三个维度对每类原材料进行评估，计算风险优先数 $RPN=S \times O \times D$ ，RPN值越高风险越大。故障严重度根据材料缺陷可能导致的故障后果评分，分值1-10分；发生频度根据历史统计数据 and 供应商质量水平评估缺陷发生概率，分值1-10分；检测难度根据现有检测手段对缺陷的识别能力评分，分值1-10分。通过量化评估为原材料分级管理提供科学依据。

(二) 原材料分级管理策略

根据RPN值将原材料分为三个风险等级，实施差异化质量控制。A类高风险材料($RPN \geq 120$)包括绝缘纸板、绝缘油等，仅从合格供应商名录采购，每年审核一次，进货检验抽样比例 $\geq 10\%$ ，储存期超过1个月使用前必须复检。B类中风险材料($60 \leq RPN < 120$)包括硅钢片、铜导体等，每两年审核一次，进货检验抽样比例5%，储存期超过3个月使用前抽检。C类低风险材料($RPN < 60$)包括紧固件、密封件等，可从多家供应商采购，进货检验抽样比例2%。

(三) 动态风险监控与调整机制

建立动态风险监控机制，每年更新风险评估，根据故障统计、供应商质量表现、检测技术进步等因素重新计算RPN值，调整材料分级。发生重大质量事故时立即启动应急响应，成立事故调查组进行故障溯源分析，如确认与某批次原材料相关，立即封存该批次剩余材料，必要时实施召回。建立质量改进小组，定期召开质量分析会，统计分析原材料不合格情况和故障案例，识别质量短板，制定改进计划。构建原材料质量管理信息系统，实现全流程数据电子化管理和智能分析。

结论

本文通过对近十年变压器典型故障案例的深入分析，

揭示了原材料质量缺陷是导致变压器故障的重要根源。研究表明,绝缘材料相关缺陷占故障总数的58%,其中含水量超标和抗氧化剂不足是最常见问题。在此基础上,构建了涵盖供应商评估、采购控制、进货检验、仓储管理的全流程质量控制体系,并提出了基于FMEA的风险评估和分级管理策略。研究的主要贡献包括:建立了故障-原材料缺陷关联模型,为精准识别质量风险提供工具;提出了全流程质量控制体系;设计了差异化风险控制策略。研究成果为变压器制造企业从源头防控质量风险、提升产品可靠性提供了系统方法。未来可进一步探索人工智能技术在质量预测和缺陷识别方面的应用,建议建立行业质量数据共享平台,促进最佳实践交流,共同提升行业质量水平。

参考文献

- [1]李聪,王德才.电力变压器常见故障及诊断技术研究[J].灯与照明,2025,49(3):189-191.
- [2]章政,杨荆林,肖登明,等.基于油中溶解气体分析的变压器绝缘故障诊断方法的研究和发展[J].电力设备,2004,5(1):20-24.
- [3]孟丽坤.变压器绝缘材料老化判断的方法探讨[J].科技资讯,2014(30):107-107,134.
- [4]孟宪乡.变压器绝缘材料老化问题阐述[J].中国科技博览,2015,0(30):319.
- [4]赵小军,张凌云,刘洋,等.机械应力对取向硅钢片综合磁性能影响的实验研究[J].电工技术学报,2022,37(22):5776-5787.