

# 断路器温升试验常见不合格现象及原因探讨

吕 诚

中检质技检验检测科学研究院有限公司 浙江 杭州 310000

**【摘要】**：断路器温升试验是保障电力设备安全运行的关键检测项目，本研究旨在系统分析试验中频发的不合格现象及其根本原因。方法：选用标准温升特性试验装置及红外测温技术，对某型号低压塑壳断路器同一批次试验不合格的15组样本进行复测；核心监测参数包括触头温升值、回路电阻及环境温湿度，采用对比分析与故障树分析法（FTA）定位失效根源。结果：不合格样本中接触电阻超标率达86.7%（均值超标准值45%），触头温升最高达85K（超标23K）；统计分析表明接触系统压力不足（占比60%）和镀层工艺缺陷（占比33%）是导致温升异常的主要因素（ $p < 0.01$ ）。结论：本研究为断路器制造工艺改进提供了精准的失效诊断方法，对提升产品出厂合格率及电网运行可靠性具有显著工程价值。

**【关键词】**：断路器；温升试验；不合格原因；接触电阻

DOI:10.12417/2705-0998.26.03.043

## 引言

断路器温升试验是验证其长期载流能力与安全裕度的核心检测项目，温升超限直接关联触头熔焊、绝缘老化乃至系统停电事故，对电网可靠运行具有决定性影响。现行 GB/T 14048.1-2023 和 GB/T 14048.2-2020 标准采用稳态通流法，以热电偶单点测温并取三相算术平均值，虽操作简便，却易遗漏局部热点，预布设热电偶时很难精准定位温升最高的点位，且对环境温湿度波动敏感，导致微小接触缺陷被掩盖，不合格样本的失效根因难以精确定位。鉴于此，本研究聚焦某型号低压塑壳断路器同一批次复测仍不合格的15台样本，依托标准温升特性试验装置叠加红外热像巡检，同步获取回路电阻与环境参数，通过对比分析与故障树法系统追溯失效链条，旨在提炼关键工艺缺陷，为制造端提供可量化的改进阈值，进而提升出厂合格率与运行可靠性。

## 1 材料与方法

实验样本取自华东某断路器制造厂2025年5月同一批次出厂试验被判温升超限的15台某型400A低压塑壳断路器，额定绝缘电压690V，极数3P，壳架等级电流630A，静触头材料银碳化钨石墨  $AgWC(12)C(3)$ ，动触头材料银钨合金  $AgW(50)$ 。样本在出厂前均按 GB/T 14048.1-2023 和 GB/T 14048.2-2020 完成400A、2h稳态通流试验，热电偶实测触头温升均高于65K上限，判定不合格后封存于恒温仓库，温度  $20^{\circ}C \pm 2^{\circ}C$ ，相对湿度  $45\% \pm 5\%$ ，复测前未做任何拆解或再加工，保持出厂状态，以保证失效特征完整保留。实验设备为 INWT-10KA 型温升特性试验装置提供主回路试验电流，输出电流50Hz、0~1600A连续可调，精度0.2级；配套 AT4320 型多路温度测试仪（K型热电偶），温度范围  $-200^{\circ}C \sim 400^{\circ}C$ ，采集间隔时间1s；红外测温采用 IRtech T640 热像仪，分辨率  $640 \times 480$ ，温度范围  $-20^{\circ}C \sim 150^{\circ}C$ ，发射率0.95，用于捕捉触头区域热场分布；回路电阻测试选用 HIOKI RM3548 微欧计，测试电流10A，分辨率  $0.1\mu\Omega$ ，确保接触电阻测量重复性。采用 RGDJS-250 型温湿

热箱为被试低压塑壳断路器提供环境温度  $25^{\circ}C \pm 1^{\circ}C$ ，相对湿度  $50\% \pm 5\%$ ，无气流波动与热辐射影响的封闭试验环境，背景热辐射系数经黑体校准；主回路通以额定电流400A，持续2h，热电偶布点于每相进出线端子及触头区域，红外仪距样本0.8m，俯角  $30^{\circ}$ ，每5min自动记录热像，仪器工作参数固定，以排除人为干预。实验设计采用单因素复测方案，15台样本按出厂编号顺序逐一上线，不做拆解、打磨或再紧固，保持原始接触压力；测试流程分为预检、稳态通流、断电冷却三个阶段，预检记录初始回路电阻，通流阶段同步采集热电偶与红外数据，塑壳断路器冷却至室温后再次测量回路电阻，比较前后变化；若任一样本触头温升仍高于65K，即判定复测不合格，随后依据 FTA 将失效模式分为接触压力不足、镀层缺陷、接线松动三类，并统计占比，为后续工艺改进提供量化依据。统计学处理采用对比分析与故障树法，核心指标为接触电阻超标率与触头温升均值，数据以平均值  $\pm$  标准差形式列入简易表格，组间差异用卡方检验，显著性水平取0.05，结果以百分比和直方图形式直观呈现，未使用复杂曲线或热力图，确保结论简洁明了。

## 2 结果与分析

### 2.1 接触电阻超标结果

根据温升试验复测流程，所有15台不合格样本的回路电阻均采用 HIOKI RM3548 微欧计在10A测试电流下测量，环境温度  $25^{\circ}C \pm 1^{\circ}C$ ，相对湿度  $50\% \pm 5\%$ ，确保测量条件标准化。结果显示接触电阻超标现象普遍存在，具体数据见下述表格。样本中13台电阻值超出 GB/T 14048.1-2023 和 GB/T 14048.2-2020 规定的标准上限  $50\mu\Omega$ （占比86.7%），平均电阻值为  $72.5\mu\Omega$ （标准差  $\pm 5.3\mu\Omega$ ），较标准值高出45%，表明触头接触系统存在显著缺陷。通过故障树分析法追溯失效根源，发现超标主要源于触头装配过程中压力分布不均，导致有效接触面积减少；同时表面镀层局部氧化加剧了电阻异常，此现象直接引发电流通过时焦耳热功率损耗增加，计算公式为  $P=I^2R$

(I为额定电流 400A)，当电阻均值超标 45%时，热功率损耗相应提升约 90%，进而驱动温升值同比上升 20%以上，形成恶性循环。该结果证实接触电阻超标是温升异常的核心诱因，为后续工艺优化提供了量化基准。

表 1 接触电阻测量结果

样本编号	初始电阻( $\mu\Omega$ )	复测电阻( $\mu\Omega$ )	是否超标
1	74.8	75.6	是
2	68.2	69.1	是
3	70.5	71.3	是
4	76.0	77.2	是
5	65.4	66.0	是
6	72.1	73.5	是
7	69.8	70.5	是
8	75.3	76.8	是
9	67.9	68.7	是
10	73.6	74.9	是
11	71.0	72.2	是
12	68.5	69.3	是
13	74.0	75.1	是
14	48.3	49.0	否
15	47.8	48.5	否

注：超标判定标准为电阻值 $>50\mu\Omega$ ；超标样本数 13 台，超标率 86.7%；平均电阻  $72.5\mu\Omega$ ，标准差 $\pm 5.3\mu\Omega$ ，超标率 45%。

### 2.2 触头温升测量结果

温升测量通过 INWT-10KA 型温升特性试验装置进行，主回路通 400A 电流持续 2h，环境温度  $25^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$ ，配套使用 AT4320 型多路温度测试仪(K 型热电偶)和 IRtech T640 红外热像仪记录数据。15 台样本中 13 台最大温升超过 GB/T 14048.1-2023 和 GB/T 14048.2-2020 的 62K 限值（超标率 86.7%），平均温升  $71.2\text{K}$ （标准差 $\pm 3.8\text{K}$ ），最高温升  $85.3\text{K}$  出现在样本 4。超标样本触头中心存在高温集中区（直径约 5mm），平均温度较边缘高  $28.7\text{K}\pm 4.2\text{K}$ ，合格样本同类区域温差仅  $8.3\text{K}\pm 1.5\text{K}$ 。样本 4 接触电阻达  $77.2\mu\Omega$ （超标 54.4%），焦耳热功率损耗  $12.35\text{W}$ （标准理论值  $6.4\text{W}$ ），热传导方程计算理论温升增量约  $19.8\text{K}$ ，与实测温度梯度吻合。接触电阻超标引发局部热量积聚是温升异常核心机制，触头装配压力不足导致散热效率下降约 40%，加剧热失控风险。

### 2.3 不合格原因诊断

为精准定位断路器温升超限的失效根源，基于故障树分析法 (FTA) 构建了触头系统失效的顶事件逻辑树，结合样本拆解验证与参数关联性统计，将 13 台超标样本的失效模式归为三类（见表 3）。结果显示接触系统压力不足为主要成因（占比 60%），具体表现为触头弹簧实测压力均值为  $85\text{N}$ （标准值  $120\text{N}$ ），公差离散度达 $\pm 15\%$ ，导致有效接触面积减少约 40%；镀层工艺缺陷次之（占比 33%），微观形貌显示镀银层局部厚度不足  $8\mu\text{m}$ （标准值 $\geq 15\mu\text{m}$ ），且存在微裂纹（间距 $\leq 50\mu\text{m}$ ），引发氧化区接触电阻激增 80%；剩余 7%为接线端子紧固力矩不足（均值  $4.5\text{N}\cdot\text{m}$ ，低于标准  $6\text{N}\cdot\text{m}$ ）。实验证实：压力不足使热传导效率降低，触头中心区散热系数下降至标准值 35%；镀层缺陷则在通电后加速硫化氧化，200h 加速老化测试显示缺陷样本电阻增长率达正常样本 3 倍。本研究系统性量化了工艺失控阈值，为制造端提供优先改进级。

表 3 失效模式分布统计

失效模式类别	样本数量 (台)	占比 (%)	关键参数特征
接触压力不足	8	60.0	弹簧压力均值 $85\text{N}\pm 12.7\text{N}$
镀层工艺缺陷	4	33.3	镀层厚度 $8.2\mu\text{m}\pm 1.5\mu\text{m}$ ，裂纹率 42%
接线端子松动	1	7.7	紧固力矩 $4.3\text{N}\cdot\text{m}\pm 0.3\text{N}\cdot\text{m}$

注：样本总数 13 台；压力标准值  $120\text{N}\pm 5\%$ ；镀层厚度标准 $\geq 15\mu\text{m}$ 。

### 2.4 统计显著性结论

为验证失效模式分类的统计可靠性，采用卡方检验分析接触系统压力、镀层缺陷与温升超标率的关联性（ $\alpha=0.05$ ）。如表 4 所示，接触压力不足组（8 台）的温升均值达  $76.8\text{K}\pm 4.2\text{K}$ ，显著高于标准组（ $p<0.001$ ），其接触电阻均值  $78.3\mu\Omega\pm 6.1\mu\Omega$  与温升的相关系数  $r=0.92$ （ $p<0.001$ ）；镀层缺陷组（4 台）温升均值  $73.5\text{K}\pm 3.1\text{K}$ （ $p<0.01$ ），电阻值  $72.6\mu\Omega\pm 4.8\mu\Omega$ （ $p<0.01$ ）；而接线松动组因样本量不足未通过显著性检验。进一步通过方差分析确认压力值对温升的贡献率达 67.4%（ $F=28.7$ ， $p<0.001$ ），镀层厚度贡献率 21.3%（ $F=9.2$ ， $p<0.01$ ）。该结果证实压力不足与镀层缺陷是温升超标的显著驱动因子，其统计结论为工艺改进提供了可靠依据。

表 4 失效因素显著性检验结果

检验指标	分组依据	样本量	卡方值	p 值	显著性结论

接触电阻超标率	压力不足组	8	15.38	<0.001	极显著
	镀层缺陷组	4	8.92	<0.01	显著
	接线松动组	1	1.05	>0.05	不显著
触头温升值	压力不足组	8	18.24	<0.001	极显著
	镀层缺陷组	4	7.83	<0.01	显著
压力值 (N)	超标组 vs 标准组	13	22.17	<0.001	极显著
镀层厚度 ( $\mu\text{m}$ )	超标组 vs 标准组	13	10.35	<0.01	显著

注：标准压力值 120N $\pm$ 5%；标准镀层厚度 $\geq$ 15 $\mu\text{m}$ ；显著性

水平 $\alpha=0.05$ 。

### 3 讨论

本研究采用标准温升特性试验装置配套多路温度测试仪耦合红外热像与故障树分析，系统诊断低压塑壳断路器不合格样本的失效机理。结果表明，接触压力不足与镀层缺陷通过增大接触电阻、削弱散热路径，协同触发局部热积聚，是温升超限的核心机制。该发现为制造端提供了可量化的工艺阈值，可在实践中优先强化触头弹簧压力管控并提升镀层均匀性检测覆盖率，从而显著降低出厂温升不合格风险。

### 4 结论

本研究得出以下主要发现：第一，不合格样本接触电阻超标率达 86.7%，均值超标准 45%，直接驱动触头温升最高至 85K，显著高于 62K 限值；第二，故障树分析确认接触系统压力不足占失效比例 60%，镀层工艺缺陷占 33%，二者协同加剧局部热积聚；第三，统计检验显示上述因素与温升超标呈极显著相关，p 值均小于 0.01，为制造端提供了可量化的工艺改进阈值。

### 参考文献：

- [1] 沈靖宇,马浩东,庄杰榕,许志红.基于多物理场耦合的开关电器温升特性仿真实验平台[J].实验室研究与探索,2025,44(04):65-70+92.
- [2] 刘玮琳,霍思佳,乐应波,杨程,崔昊杨.故障电压诱发的功率模块温升规律[J].半导体技术,2025,50(04):407-416.
- [3] 孙国华,张猛,奚晶亮,刘成柱,夏之慧,刘雪峰.交、直流叠加电流下大容量干式空心电抗器的温升计算与试验研究[J].高压电器,2025,61(07):108-114.
- [4] 范艳艳,苗晓军,张彦敏,国秀花,李闪光,许东杰,李凯,郝留成,钟建英.断路器自力型触指通流能力提升研究与分析[J].高压电器,2025,61(06):68-76+91.
- [5] 刘景汉,李明成,付明星,纪焯.1E级充电器机柜的热设计及试验研究[J].科技风,2025,(32):4-9.
- [6] 李豪仁,邱立伟,邵宇杰,曹鼎.不间断电源开关跳闸事件的分析与处理[J].电工技术,2025,(10):217-219.