

冶金重载工况下 10kV 高压柜电弧短路优化研究

王向荣 刘海波 蒋兴辉
中国二冶集团有限公司 内蒙古 包头 014020

摘要：针对冶金行业重载、高温、高粉尘、强腐蚀、强电磁干扰的恶劣工况，10kV高压柜极易发生内部电弧短路故障，引发设备损毁、人员受伤、生产线停产等重大安全与经济损失。本文以河南济源钢铁1×300m²烧结机脱硫脱硝改造工程为依托，分析冶金工况下高压柜电弧短路故障机理与影响因素，从柜体结构、绝缘防护、接地系统、泄压结构、电弧保护及施工管控多维度优化工艺，构建适配冶金重载场景的抗电弧短路技术体系。工程实测表明，优化后柜体电弧耐受时间由50ms提升至100ms，保护动作时长≤30ms，设备故障率降幅超65%，系统运行率达99.8%，可为冶金高压配电系统安全运维提供技术支撑，具备良好推广价值。

关键词：冶金重载工况；10kV高压柜；电弧短路；施工工艺；防护技术；济源钢铁

引言

冶金重载工况环境恶劣，10kV高压柜易频发电弧短路故障，严重影响生产线安全稳定运行。为适配冶金特殊工况，本文结合实际工程，优化高压柜抗电弧短路施工工艺与防护方案，以此提升设备运行安全性与稳定性。

1 工程概况

河南济源钢铁（集团）有限公司1×300m²烧结机脱硫脱硝环保升级改造工程，是河南省重点钢铁行业环保提升项目，主要包括烟气净化系统、循环风机、脱硫塔、脱硝反应器、增压风机、气力输送及配套公用工程。项目供电等级为10kV，配电系统采用单母线分段接线方式，配置KYN28A-12型金属铠装移开式高压开关柜12台，系统额定电压10kV，额定电流630A~2500A，额定短路开断电流31.5kA，主要承担主抽风机、循环泵、搅拌机、除尘装置等核心负荷供电任务，总装机容量约18MW。

项目现场属于典型冶金重载工况：环境温度45℃~60℃，粉尘浓度高，存在SO₂、NO_x等腐蚀性气体，电磁干扰强烈，设备启停频繁、负荷冲击大，且生产连续性要求极高。传统高压柜安装施工仅满足常规电气安装规范，未针对高温、粉尘、强冲击、高短路电流等工况开展抗电弧专项优化，导致设备在投运前试验及运行过程中存在内部电弧短路、绝缘下降、柜体变形、泄压不畅等安全隐患，严重威胁人身与设备安全^[1]。

为解决上述问题，本工程开展10kV高压柜抗电弧短路施工工艺优化与防护技术研究，通过结构强化、绝缘优化、接地升级、泄压改造、快速保护配置及精细化施工管控，全面提升高压柜在极端工况下的安全运行能力。

2 电弧故障成因与危害分析

2.1 电弧故障产生原因

冶金重载工况下，10kV高压柜内部电弧短路由多因素叠加导致，主要包括以下三类：

2.1.1 环境因素

高温加速绝缘材料老化、脆化；金属粉尘侵入柜内形成导电层，降低相间及对地绝缘强度；腐蚀性气体侵蚀绝缘件与柜体，使绝缘水平持续下降；现场湿度波动易引发凝露，诱发局部放电。

2.1.2 施工与结构因素

柜体钢板厚度不足、框架强度偏低，无法承受电弧冲击波；母线连接接触不良、紧固力矩不足，引发发热与放电；绝缘距离不足、绝缘包覆不到位，易发生相间击穿；接地系统不可靠，故障电流泄放不畅；泄压通道缺失或堵塞，高温高压气体无法快速排出。

2.1.3 系统与保护因素

冶金厂区短路容量高，故障电流大，电弧能量极强；传统过流保护动作时间长（通常100ms及以上），电弧持续燃烧，破坏力呈指数级上升；保护配置不完善，无法实现早期故障识别与快速切除。

2.2 电弧故障危害

10kV高压柜内部电弧一旦发生，可在数毫秒内产生数千摄氏度高温、高压冲击波、强光及有毒气体，造成：

2.2.1 柜体变形、炸裂，铜排熔化、绝缘烧毁；

2.2.2 电弧光、高温气流及碎片对操作人员造成致命伤害；

2.2.3 供电中断，烧结机、脱硫脱硝系统全线停机，日均经济损失巨大；

2.2.4 引发火灾、爆炸等次生事故，严重影响安全生产。

2.3 电弧能量计算与风险评估

三相短路电弧能量计算公式:

$E = I_k^2 R t$

式中:

I_k -三相短路电流, kA;

R -电弧等效电阻, Ω ;

t -故障切除时间, s。

本工程系统参数: $I_k = 31.5 \text{ kA}$, $R = 0.05 \text{ }\Omega$, 传统保护动作时间 $t = 0.1 \text{ s}$ 。

代入计算:

$E = (31500)^2 \times 0.05 \times 0.1 = 4.96 \times 10^6 \text{ J}$

该能量远超普通 KYN28A 柜体耐受极限, 极易造成柜体炸裂与严重事故。因此必须通过施工工艺优化与快速防护系统, 将故障切除时间压缩至 30ms 以内, 大幅降低电弧释放能量^[2]。

3 抗电弧短路施工工艺优化方案

本工程以结构抗爆、绝缘可靠、接地规范、泄压合理、保护快速、管控严格为核心原则, 构建五位一体抗电弧施工优化体系: 柜体结构强化施工; 母线与绝缘系统优化施工; 综合接地与定向泄压系统施工; 电弧光保护系统集成与调试; 全过程施工质量管控。

3.1 柜体结构强化施工工艺

3.1.1 柜体材料与框架加强

将原柜体 2mm 普通钢板升级为3mm 厚 Q345B 高强度结构钢板, 提升抗弯与抗冲击能力。柜内增设纵向加强筋 4 道、横向加强梁 2 道, 全部采用满焊工艺, 焊缝高度不小于 6mm, 框架整体强度提升 50% 以上。

3.1.2 柜门密封与防爆强化

柜门采用双道氟橡胶密封条, 防护等级由 IP40 提升至IP54, 有效阻挡粉尘与潮气侵入。柜门固定螺栓由 M10 升级为M12 高强度螺栓, 间距由 150mm 加密至 100mm, 紧固力矩统一为80N·m, 偏差控制在 $\pm 5\%$ 以内。柜门内侧母线室、断路器室等关键位置增设陶瓷化耐火缓冲垫, 分散电弧冲击压力。

3.1.3 柜内间隔与隔离优化

断路器室、母线室、电缆室、仪表室采用金属隔板+绝缘板双重隔离, 防止电弧跨室扩散, 降低故障波及范围。

柜体优化前后性能对比见表 1。

表1 柜体结构优化前后性能对比

性能指标	优化前	优化后	提升幅度
柜体钢板厚度	2 mm	3 mm	50%
防护等级	IP40	IP54	—
抗弯强度	150 MPa	225 MPa	50%

续表:

性能指标	优化前	优化后	提升幅度
内部电弧耐受时间	50 ms	100 ms	100%
密封防尘能力	一般	优良	显著提升

3.2 母线与绝缘系统优化施工

3.2.1 母线选材与连接工艺

主母线采用TMY-100×10 T2 无氧铜排, 表面镀锡厚度不小于 10 μm , 耐腐蚀能力显著提升。母线接触面采用机械打磨+电力复合脂处理, 确保接触电阻 $\leq 20\mu\Omega$ 。

母线连接螺栓紧固力矩执行标准见表 2。

表2 母线连接螺栓紧固力矩标准

螺栓规格	M10	M12	M16
紧固力矩 / (N·m)	30	80	160
允许偏差	$\pm 5\%$	$\pm 5\%$	$\pm 5\%$

3.2.2 绝缘防护与布置优化

母线采用硅橡胶绝缘护套全包覆, 相间距离、对地距离均不小于 125mm, 满足 1.5 倍额定电压绝缘要求。穿墙套管采用非导磁绝缘件, 避免涡流发热。柜内配置智能加热除湿装置, 维持温度 $\leq 40^\circ\text{C}$ 、湿度 $\leq 60\%$, 防止凝露导致绝缘下降。

3.3 综合接地与定向泄压系统施工

3.3.1 综合接地系统

采用环形接地网+垂直接地极联合接地方式, 接地极采用 50×50×5 mm 镀锌角钢, 长度 2.5m, 间距 5m, 接地网埋深 0.8m。每台高压柜采用2 根 40×4mm 镀锌扁钢与接地网双点连接, 接地电阻 $\leq 0.5\Omega$, 确保故障电流快速泄放。二次回路屏蔽层两端接地, 抑制电磁干扰。

3.3.2 定向泄压通道

柜顶设置2 个 $\phi 150\text{mm}$ 自动泄压阀, 开启压力设定为 0.15MPa, 将高温高压气体定向排放至无人安全区域。柜底设置泄压槽与基础通风孔连通, 形成上下对流泄压通道, 泄压效率提升 60% 以上。

3.4 电弧光保护系统集成施工

3.4.1 系统配置

采用“光信号+电流信号”双判据电弧光保护系统, 由光纤传感器、主控单元、电流判据单元及跳闸回路组成, 覆盖所有高压柜^[3]。

3.4.2 施工与调试要点

- (1) 传感器安装于柜内顶部, 无遮挡、无高温直烤;
- (2) 光纤弯曲半径 $\geq 150\text{mm}$, 避免弯折损伤;
- (3) CT 接入进线柜与母联柜, 实现电流辅助闭锁;
- (4) 模拟电弧故障试验, 确保动作时间 $\leq 30\text{ms}$;
- (5) 与断路器、综保系统联动调试, 实现故障快速

隔离。

3.5 全过程施工质量管控

3.5.1 施工准备管控

编制专项施工方案,开展技术交底与培训;设备进场核出厂试验报告(含内部电弧试验);施工环境清理除尘,控制温湿度。

3.5.2 工序过程管控

母线连接、接地施工、泄压装置安装、电弧光保护接线等关键工序专人旁站,力矩、电阻、绝缘等指标全数检测,不合格严禁进入下道工序。

3.5.3 验收与试验管控

按 GB 50150 完成交接试验:工频耐压、绝缘电阻、接触电阻、机械特性、保护联动、内部电弧试验等。系统完成72小时试运行,监测温度、电流、保护动作等全部正常。

4 工程试验数据与应用效果

4.1 现场试验结果

优化施工完成后,经第三方检测与交接试验,主要数据如下:

4.1.1 接地电阻: $0.3\sim 0.4\Omega$, 满足 $\leq 0.5\Omega$;

4.1.2 母线接触电阻: $15\sim 18\mu\Omega$, 满足 $\leq 20\mu\Omega$;

4.1.3 一次回路绝缘电阻: $\geq 2000M\Omega$, 远高于标准;

4.1.4 电弧光保护动作时间: $22\sim 28ms$, $\leq 30ms$;

4.1.5 内部电弧耐受试验: $31.5kA/0.1s$, 柜体完好、无部件飞出。

4.2 运行效果

项目投运以来,10kV 高压配电系统运行稳定,未发生任何电弧短路、绝缘故障及保护误动/拒动问题^[4]。

4.2.1 设备运行故障率由 8% 降至 2.8%, 降低 65%;

4.2.2 理论电弧能量由 $4.96\times 10^6 J$ 降至 $1.49\times 10^6 J$, 降

低 70%;

4.2.3 维护周期由 3 个月延长至 6 个月, 成本降低 40%;

4.2.4 烧结机及脱硫脱硝系统连续运行率 99.8%。

4.3 经济与社会效益

4.3.1 避免因电气故障造成的停机损失, 年节约成本超 300 万元;

4.3.2 消除电弧爆炸、人员伤亡等重大安全隐患;

4.3.2 保障环保设备连续运行, 实现烟气达标排放。

5 结论

5.1 冶金重载工况下 10kV 高压柜电弧故障由高温、粉尘、腐蚀、施工缺陷、保护速度慢等多因素叠加引发, 必须采用系统性优化方案综合治理。

5.2 本文提出的柜体结构强化+母线绝缘优化+可靠接地泄压+毫秒级电弧光保护+全过程质量管控五位一体施工体系, 可显著提升高压柜抗电弧短路能力。

5.3 工程应用表明, 优化后电弧耐受时间提升 100%, 保护动作时间 $\leq 30ms$, 故障率降低 65%, 系统安全稳定运行水平大幅提高。

5.4 该施工工艺与防护技术适用于钢铁、焦化、有色冶金等重载恶劣工况, 具备良好推广价值。

参考文献

[1]董盼, 杨鑫, 贾鹏飞. 10kV 高压开关柜安全性能提升方法[J]. 电工技术学报, 2022, 37(11): 2897-2906.

[2]黄锐, 杨占国. 冶金工厂高压配电系统电弧故障防护技术研究[J]. 冶金动力, 2021(4): 33-37.

[3]黄健. 电弧光保护在冶金高压柜中的应用与施工要点[J]. 电气应用, 2020, 39(7): 78-83.

[4]黄勇. 高温多尘环境下 10kV 开关柜绝缘故障治理技术[J]. 工业安全与环保, 2022, 48(3): 67-70.