母线主动防护中的集成技术与长效可靠性方案研究

杨忠君[1], 李 静[2], 殷一鸣[1]

(1. 内蒙古包钢鑫能源有限责任公司, 内蒙古 包头 014010;
2. 内蒙古包钢钢联股份有限公司技术中心, 内蒙古 包头 014010)

摘 要: 文章针对 110 kV 变电所鸟类致 10 kV 裸露母线 AB 相短路, 引发主变纵差的保护跳闸事故, 分析指出户外母线异物的短路风险。结合绝缘技术趋势, 探讨采用辐照交联硅橡胶自融带对钢铁企业母线绝缘改造的可行性。文章详细阐述了该材料具备耐高温、自融密封及耐候性的优势, 在包钢 10 kV 母线应用后, 根治了异物搭接的短路问题, 实现免维护安全运行, 为行业提供长效防护方案。

关键词: 裸露母线; 绝缘防护; 硅橡胶自融带; 电力安全
中图分类号: TM215; TM755 **文献标识码**: B **文章编号**: 1009 - 5438(2025)06 - 0080 - 04

Researches on Integrated Technology and Long - term Reliability Scheme in Active Protection of Bus Bar

Yang Zhongjun[1], *Li Jing*[2], *Yin Yiming*[1]

(1. *Inner Mongolia Baotou Steel Xin Energy Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*;
2. *Technical Center of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*)

Abstract: In the paper, the risks of short circuit for outdoor bus bar caused by foreign objects are indicated through analysis aiming at the accident of protective trip for longitudinal differential of main transformer due to short circuit of AB phase for 10 kV exposed bus bar caused by birds in 110 kV substation. The feasibility for retrofitting bus bar insulation of iron and steel enterprise with the self - fusing tape of silicone rubber with radiation crosslinking is discussed combining with the trend of insulation technology. Moreover, it is elaborated that the material is with such advantages as high temperature resistance, self - fusing sealing and weather resistance. The problem of short circuit caused by lapping of foreign object is completely solved by applying the material in 10 kV bus bars of Baotou Steel so that maintenance free and safe operations are achieved, which could provide long - term protective scheme for the industry.

Key words: exposed bus bar; insulation protection; self - fusing tape of silicone rubber; power safe

电力系统是钢铁企业的命脉, 其安全稳定运行 至关重要。10 kV 配电网络广泛用于钢铁企业, 但

收稿日期: 2025 - 07 - 01
作者简介: 杨忠君(1983 -), 男, 内蒙古包头市人, 硕士, 高级工程师, 现从事冶金企业供电系统安全与技术管理工作。

部分变电所变压器与开关柜间的连接母线桥采用裸母线结构,存在显著安全隐患。在户外或半户外环境中,飞鸟、小动物、导电异物或树枝搭接极易引发相间或对地短路,导致跳闸停电,造成巨大经济损失。

传统绝缘防护方式(如护套、绝缘漆、防护网)存在安装复杂、易老化剥落、防护不全面或影响散热等缺点。辐照交联硅橡胶自融带作为一种新型高性能绝缘材料,凭借其优异的电气性能、耐候性、阻燃性及施工便捷性脱颖而出。它通过高能射线辐照形成稳定交联结构,缠绕后可自融成无缝绝缘层。

本文以 110 kV 变电所鸟害致 10 kV 裸母线短路事故为切入点,分析裸母线风险,论证硅橡胶自融带应用的可行性与优势,并详述其在包钢的具体应用过程与效果评估,为同行提供解决类似隐患的技术参考和实践经验,推动该技术在保障电力安全中的应用。

1　户外裸露母线短路引发停电

1.1　事故现象

2024 年,包钢重要生产区域配套的 110 kV 变电所发生一起严重的停电事故。事故发生时,该变电所主变压器速断保护动作。该主变压器是下级 10 kV Ⅰ段母线的主要电源,其跳闸直接导致该段母线完全失压。母线失电造成其所带的所有厂区生产线全部中断运行,造成了显著的经济损失。

1.2　事故原因调查分析

事故发生后,技术人员现场勘查发现,主变压器户外侧 10 kV 母线桥 AB 相间存在电弧烧灼痕迹,附近散落鸟类羽毛,下方变压器储油池内有烧焦鸟类尸体。结合故障录波及保护动作报告,事故原因分析如下:

(1)户外裸露母线设计存在高风险,未采取绝缘包裹、隔板或防护网罩等物理隔离措施。

(2)对鸟类等异物入侵风险认知不足,未纳入重点防范,缺乏风险评估及预案。

(3)未安装有效驱鸟装置,未定期巡检和清理鸟巢,母线本体未实施任何绝缘防护(如喷涂 RTV 涂料、加装绝缘护套等)。

(4)存在侥幸心理,低估突发事故概率及后果,对提升本质安全的绝缘技术投入不足。此次事故暴露了钢铁企业老旧变电所户外裸露母线的重大安全隐患,凸显了绝缘化改造的紧迫性和必要性。

2　母线绝缘防护技术发展与新材料的兴起

电力设备裸露导体的绝缘防护是保障电网安全运行的关键环节之一。随着材料科学和电力技术的进步,母线绝缘防护技术也在不断发展演变。

2.1　传统绝缘方式

传统绝缘方式主要包括绝缘护套/盒、绝缘喷涂(RTV 涂料)、加装防护网/板和热缩套管。绝缘护套/盒由 PVC、PE 或橡胶预制成型,提供物理隔离,但对异型母线适应性差,安装拆卸繁琐,接口处易成为防护弱点,长期使用易老化、变脆开裂。绝缘喷涂采用室温硫化硅橡胶涂料,施工简便,能形成憎水性绝缘层,但涂层厚度薄且不均匀,机械强度低,易被外力划伤或磨损,长期户外耐候性(如紫外线、雨蚀)不足,且对防止鸟类等较大物体搭接效果有限[1]。加装防护网/板通过金属或非金属网格或绝缘隔板实现物理隔离,能阻挡较大异物,但网孔大小难以兼顾防护效果(如防小鸟、老鼠)与散热通风,影响美观。热缩套管需要加热收缩,适用于形状规则的母线或接头,但施工需热源,有火灾风险,对长距离、多弯曲、带 T 接的母线桥极其不便,收缩后可能存在应力,长期热胀冷缩循环下易开裂。

2.2　新型绝缘材料的应用与发展趋势

近年来,以高性能聚合物为基础的新型绝缘材料因其优异的综合性能受到青睐。其中,硅橡胶(Silicone Rubber)因其卓越的耐高低温范围(-60 ℃~250 ℃)、优异的电气绝缘性能、良好的憎水性和耐候性(抗 UV、臭氧)、出色的柔韧性和阻燃性,成为户外绝缘材料的首选基材。为了克服普通硅橡胶机械强度不足或需要高温硫化的缺点,辐照交联技术(Radiation Crosslinking)被引入。该技术利用电子加速器产生的高能电子束轰击硅橡胶分子链,使其产生自由基并相互交联,形成三维网状结构。

2.3　自融带技术的兴起

在上述背景下,自融带(Self - Fusing Tape)技术,特别是基于辐照交联硅橡胶的自融带,应运而生并快速发展。它结合了硅橡胶的优异性能和独特的“自融合”特性:带材本身具有压敏粘性,在缠绕时仅依靠自身压力(无需胶水、加热或明火)即可层间融合成一个无缝、致密、均匀的整体绝缘层。这种技术革命性地解决了传统绝缘方式在施工便捷性、密

封完整性、形状适应性、长期可靠性等方面的诸多痛点。其在电力、通信、轨道交通等领域的成功应用，为其在钢铁企业关键电力设施防护上提供了有力的技术支撑。

3 钢铁企业引进硅橡胶自融带绝缘技术的可行性探讨

基于包钢此次事故教训和行业技术的发展趋势，将辐照交联硅橡胶自融带技术引入钢厂变电所裸露母线绝缘防护，其可行性需从技术特性匹配度、经济性、施工适应性及安全效益等方面进行综合评估。

3.1 技术特性匹配度

该绝缘材料通过高绝缘性能确保无缝隔绝导体，消除短路风险；耐候稳定性提供15～20年寿命，适应钢厂恶劣环境；阻燃性符合标准，阻止火焰扩散；高机械强度贴合复杂结构，抗热胀冷缩；自融密封性完全阻断侵入物，防止绝缘下降。这些特性高度匹配高电压系统需求，实现免维护、安全可靠的长期运行。

3.2 经济性与成本效益

自融带技术对现有裸露母线进行绝缘化改造具有显著经济优势。初期投入远低于新建绝缘封闭母线桥或大规模更换，材料与施工成本大幅降低，且无需定制模具或大型设备。施工过程简便快捷，无需热源、明火、特殊工具或拆卸母线，单次停电时间可压缩至数小时，最大限度减少生产损失，尤其适合连续生产的钢铁企业。该技术具备长效免维护特性，大幅降低后期检查、维修和更换成本。更重要的是，它能有效预防鸟类短路等非计划停机事故，避免直接损失（如设备损坏和抢修费用）及间接损失（如停产、合同赔偿和安全处罚），其投资回报率（ROI）极高，一次事故的经济损失远超改造项目总投入。

综合以上分析，辐照交联硅橡胶自融带技术在技术性能、经济效益、施工便利性和安全效益等方面，均能满足钢铁企业对变电所裸露母线进行可靠、长效、经济绝缘防护的需求，引进该技术具有高度的可行性（改造前后效果对比见图1、图2）。

4 硅橡胶自融带绝缘防护方案设计与应用过程

基于可行性分析结论，包钢在事故变电所及同类隐患站点实施辐照交联硅橡胶自融带绝缘改造。对材料选型及施工遇到的问题和解决措施进行了充分的论证。



图1 变压器一次母线AB相间短路故障灼伤痕迹（改造前）



图2 变压器一次母线灼伤点包覆自融带后效果（改造后）

4.1 材料选型与技术验证

选用甲基乙烯基硅橡胶（VMQ）基材的电子束辐照交联带材，关键参数要求为体积电阻率≥1.0×10^{15} Ω·cm，介电强度≥20 kV/mm，通过加压42 kV的持续1分钟工频耐压测试；机械性能满足拉伸强度≥3.0 MPa、断裂伸长率≥400%（见图3）；耐温范围－60 ℃～250 ℃（瞬时可承受300 ℃）；阻燃等级UL 94－V0；耐候性通过1 000 h加速老化试验。按母线尺寸选用宽50 mm、厚度为0.5～0.8 mm的带材，缠绕2～3层达成绝缘目标[2]。

4.2 应用过程遇到的问题及解决措施

4.2.1 应用过程的问题归类

在辐照交联硅橡胶自融带的应用过程中，施工人员遇到四类典型问题：一是黏结不良，表现为缠绕

后的自融带不能充分黏合，出现脱层、翘边，尤其在低温或潮湿环境下更为明显；二是结构缺陷，表现为缠绕层间产生气泡或褶皱，严重影响整体的密封性能和机械强度；三是长期老化问题，表现为运行一段时间后，材料表面出现龟裂或整体发生收缩、松动；四是材料兼容性问题，表现为与特定电缆护套材料（如某些 PVC、XLPE）粘接不牢，甚至发生界面溶胀或腐蚀现象。

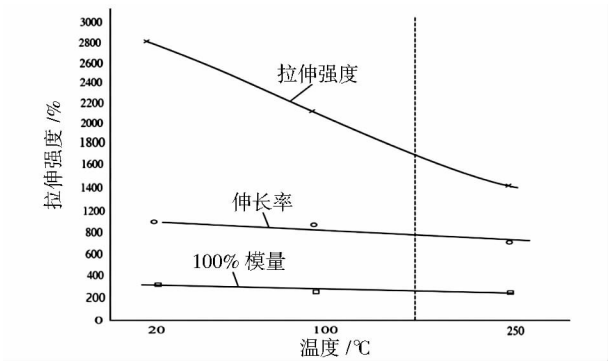


图 3　拉伸强度随温度变化曲线

4.2.2　应用过程产生问题的原因分析

经分析造成上述问题的根源是多方面的。其中环境与操作因素起着关键作用，如环境温度过低（小于 5 ℃）导致材料硬化、施工时基材表面未彻底清洁（存在油污、灰尘或水分）、缠绕操作不规范（拉伸力度不均或过小、逐层未压实）以及基材表面本身不平整（如有损伤）都易引发黏结不良和结构缺陷。材料本身的特性与工艺控制也至关重要，自融带辐照交联度不足会降低其耐热性，存储不当（如长期高温或紫外线暴露）会引起胶层老化，而施工中过度拉伸（超过最大允许拉伸率，通常大于 200%）则会导致内应力积累并在后期释放，这些是造成长期龟裂或收缩的主要原因。

4.2.3　实践研讨综合解决策略

针对性地采取综合措施是解决问题的关键。优化施工条件与规范操作是基础，需确保施工在适宜环境（温度 10 ~ 35 ℃，湿度小于 70%）下进行，低温时应预热自融带（40 ~ 60 ℃，10 ~ 15 分钟）并辅以热风枪加热（不大于 80 ℃）；缠绕过程中要严格按产品说明保持均匀拉伸（通常 50% ~ 100%）[3]。严控材料质量与合理使用同样重要，应选用高交联度产品（如符合 UL 510 耐温等级不小于 125 ℃ 标准），在避光阴凉干燥处（5 ~ 30 ℃）密封保存并遵循先进先出原则，同时严格避免过度拉伸（通常不大于 200%），并在外层加绕 PVC 胶带或热缩管以隔离紫外线防护老化。最后，预防兼容性问题不可或缺，对已知或疑似不兼容的护套材料，应先缠绕一层聚酯薄膜或丁基胶带作为隔离过渡层[4]。

5　应用效果评估与长期效益

自 2024 年 12 月在包钢 110 kV 变电所首次应用硅橡胶自融带对裸露母线桥进行绝缘防护改造以来，该技术已在包钢多个变电所推广实施。

（1）杜绝同类短路事故，所有经过绝缘处理的母线桥，再未发生因鸟类、小动物或其他异物搭接导致的相间或相对地短路故障。绝缘层形成的可靠物理隔离屏障，从根本上消除了此类事故隐患，验证了其防护的有效性[5]。

（2）显著提升供电可靠性，消除了因母线异物短路引发的非计划停机，保障了相关生产线的连续稳定供电。减少了保护装置误动/拒动风险，提高了整个变电所运行的安全裕度。为钢铁企业连续生产提供了坚实的电力保障。

（3）优异的长期绝缘性和稳定性，定期对运行多年的自融带绝缘层进行跟踪检测（包括体积电阻率、憎水性测试、介电强度）[6]。

测试结果见表 1。

表 1　自融带绝缘层衰减特性

参数	初始值	3 年后	衰减率/%
体积电阻率/（Ω · cm）	2.1×10^{15}	1.8×10^{15}	14.3
介电强度/（kV · mm^{-1}）	31	26	16.1
憎水性（接触角）/（°）	105	98	6.7

6　结论

本文通过对包钢一起典型裸露母线短路事故的深入分析，结合新型绝缘材料技术的发展，系统探讨并实践了辐照交联硅橡胶自融带在钢厂变电所 10 kV裸露母线绝缘防护中的应用。研究与应用结果表明，事故根源在于户外母线设计缺乏有效绝缘防护与物理隔离，对鸟类等异物搭接风险防范不足。研究引入辐照交联硅橡胶自融带技术进行改造，该技术融合硅橡胶的优异耐候性、电气绝缘性、阻燃性及辐照交联带来的高机械强度和长期稳定性，其独特的自融合特性可形成无缝密封整体绝缘层，完美

（下转第 88 页）

4 管理体系效能提升的优化路径

4.1 准入深度强化

探索在证件核查基础上,增加由业主企业组织的入厂(或项目专项)安全教育培训及考核,并将考核合格作为人员进场的强制性条件。

4.2 过程智能监管升级

在关键区域(如轧机主控室)部署“双屏监控系统”,实时显示相关方操作界面与核心设备运行参数,并预设安全阈值实现异常状态自动报警,提升干预时效性。

4.3 技能与安全协同发展

强调深化相关方人员技能培训,促使其不仅能掌握安全规程,还能更深入理解设备原理与标准作业流程,以实现维检修作业安全性与效率的同步提升。

5 结论

本研究深入剖析了大型轨梁厂相关方维检修作业的安全管理痛点,系统性地提出并构建了以“合规性为底线、技术性为支撑、协同性为保障”的优化理念及覆盖作业全生命周期的安全管理体系。通过实施“三维一体”准入审核模型、数字化作业许可平台、“双交底+双监护”协同监管机制、基于绩效的黑名单联动制度以及闭环的验收评估改进流程,有效缓解了生产连续性与维检修安全性之间的固有矛盾。实践应用初步表明,该体系有助于显著提升作业现场的本质安全水平。未来研究工作将聚焦于以下方向:

(1)深化智慧化融合应用

推动相关方全面接入企业“智慧安全管理平台”,实现人员定位、设备状态、作业许可、风险预警等多源数据的实时互联互通与智能分析预警,提升风险预控能力。

(2)强化标准化体系落地与迭代

系统编制并持续完善《轨梁厂维检修作业标准化手册》,确保在每次设备维检修前精准下发,并对相关方人员实施强制性、针对性的培训与严格考核,保障标准要求的有效执行与持续改进。同时,需关注该体系在更广泛冶金场景及不同规模企业中的适用性与推广路径。

参 考 文 献

[1] 王建军. 冶金企业外包安全管理痛点分析[J]. 中国安全生产科学技术,2024,20(1):112-117.

[2] 中华人民共和国特种设备安全法[S]. 北京:中国标准出版社,2014.

[3] 冶金企业安全生产规定[S]. 北京:应急管理出版社,2018.

[4] 张建国. 冶金企业检修作业风险防控[M]. 北京:冶金工业出版社,2020.

(上接第83页)

匹配钢厂防护需求。实际应用效果卓越:彻底根除了鸟类搭接所引发的短路事故,形成的绝缘层在多年运行后仍保持优异的耐候、电气、机械、密封和阻燃性能,实现长效免维护运行,显著提升供电安全可靠性,保障连续生产。

综上所述,采用辐照交联硅橡胶自融带对钢铁企业变电所户外裸露母线进行绝缘防护改造,是一项投入合理、效果显著、效益持久的安全技术措施,对保障企业电力安全、稳定生产具有重要的现实意义和推广价值。

参 考 文 献

[1] 李志刚,王建华. 高压电气设备外绝缘技术[M]. 北京:中国电力出版社,2010.

[2] 张军,钱政,严璋. 电力设备防护用硅橡胶材料的老化研究进展[J]. 绝缘材料,2018,51(5):1-7.

[3] Q/GDW 1799.2—2013,防止电力生产事故的二十五项重点要求[S].

[4] 刘振亚. 智能电网技术[M]. 北京:中国电力出版社,2010.

[5] 胡文斌,司马坚,雷清泉. 辐照交联聚乙烯电缆绝缘研究进展[J]. 电工技术学报,2015,30(18):366-375.

[6] GB/T 20633.1—2006,承载印制电路板用涂料(敷形涂料)[S].