

湿热气候变电站防腐工程设计与防腐工程实践

李成鑫¹, 王志高², 安政³, 耿植², 王方强²

(1. 国网四川省电力公司, 四川 成都 610041; 2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041; 3. 国网四川省电力公司巴中供电公司, 四川 巴中 636000)

摘要:针对中国西南地区典型湿热气候电网设备锈蚀严重的实际情况,以四川某110 kV变电站为例,开展了湿热气候变电站防腐工程设计与防腐工程实践,力求达到“电网设备10年不生锈”的目标要求。该工程设计合理,施工严格,监督到位,质量可靠,效果显著,并成为四川电网在湿热气候环境下变电站防腐施工的标准化流程和典型案例,在四川电网全面推广应用。

关键词:湿热气候; 变电站; 防腐工程

中图分类号: TG 174 **文献标志码:** B **文章编号:** 1003-6954(2022)01-0057-05

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20220112

Design and Practice of Anti-corrosion Engineering for Substation in Southwest Area with Damp-heat Climate

LI Chengxin¹, WANG Zhigao², AN Zheng³, GENG Zhi², WANG Fangqiang²

(1. State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, Sichuan, China; 2. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China; 3. State Grid Bazhong Electric Power Supply Company, Bazhong 636000, Sichuan, China)

Abstract: According to the actual situation of severe corrosion of power grid equipments in typical damp-heat climate in southwestern China, taking a 110 kV substation in Sichuan province for example, anti-corrosion engineering of this substation is designed and carried out to achieve the goal of "10-year guarantee against rusting". This project is reasonable in design, strict in operation, efficient in supervision, reliable in quality and remarkable in effect. The standard process and typical experiences of anti-corrosion engineering in damp-heat climate are summarized from this project, which have been applied in whole Sichuan power grids.

Key words: damp-heat climate; substation; anti-corrosion engineering

0 引言

四川省位于中国西南地区,属于典型的亚热带湿润气候,由于青藏高原、秦岭、大巴山、横断山脉的阻隔,四周山区东南部相对较低有利水汽进入,西北部山区相对较高不利于水汽的散失,导致空气湿度大,多阴雨天气,多雾,日照不足,这种湿热气候环境为金属腐蚀提供了有利条件^[1]。在这种恶劣的大腐蚀环境下,四川电网由于设备金属材料腐蚀失效而影响电网安全稳定运行的事故频繁发生^[2-3],福

基金项目:国网四川省电力公司科技项目(521997200030)

建、湖南等其他省份也有类似电网设备腐蚀案例报导^[4-7]。现有的电网防腐工程存在涂料选择不当、除锈不彻底、施工工艺不规范、质量验收手段缺乏等诸多问题,导致防腐效果不理想,防腐寿命过短。

为防止设备锈蚀危及电网的运行安全,选取锈蚀较为严重的某110 kV变电站作为示范工程进行防腐设计与实践,力求达到“电网设备10年不生锈”的目标要求。根据该示范工程总结的国网四川省电力公司变电站防腐施工技术规范 and 标准作业指导卡等典型经验,已在四川省变电站防腐大修技改工程全面推广。在防腐质量检验、防腐施工、防腐维护方面的经验也已写入国家电网有限公司《电网输

变配电设备防腐技术指导意见》^[8],对于四川、重庆、贵州等中国西南湿热环境变电站防腐维护具有重要的指导意义。

1 防腐工程简介及施工方案设计

某 110 kV 变电站位于四川省巴中市,于 2009 年 7 月投入运行。该变电站因气候潮湿多雨,加上周边环境严重,自投运以来户外一次设备出现大面积锈蚀情况,为设备以及电网的安全稳定运行埋下了严重隐患。据四川省统计局数据,四川省巴中市年平均温度 17.6 ℃,年平均湿度 75%,年降雨量 1 260.1 mm^[9]。高温、高湿、高降雨量的特殊环境导致这一地区的电网设备腐蚀较为严重。该变电站防腐示范工程前的腐蚀情况如图 1 所示。

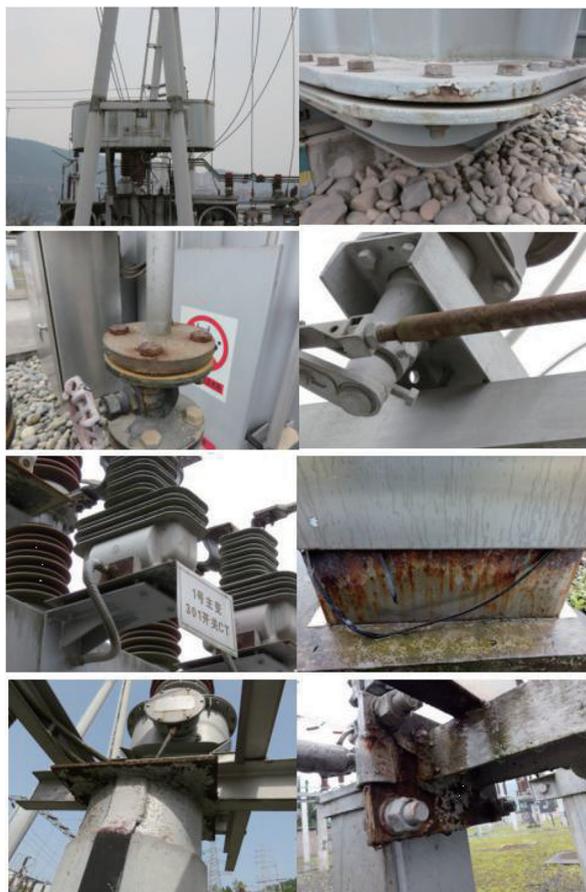


图 1 变电站防腐示范工程前腐蚀情况

在充分开展现场查勘后确定了施工方案设计,明确了巴中市大气腐蚀环境等级、除锈工艺、涂层体系设计以及涂料成分配比等相关技术要求。同时为保证施工质量,工艺流程严格按照电动除锈、底漆、中间漆、面漆 4 道工序进行,并确保每层涂料涂

刷间隔时长满足实干要求。现场每一道施工工序都必须经过技术人员验收合格后方可进入下一道施工。每一桶涂料开盖前都须经确认成分、配比无误后方可进入现场使用。

四川省巴中市经实测,Q235 碳钢材料暴晒第 1 年期大气腐蚀速率为 15.88 $\mu\text{m}/\text{a}$,根据 GB/T 19292.1—2018《金属和合金的腐蚀 大气腐蚀性 第 1 部分:分类测定和评估》^[10]判定其大气腐蚀环境等级为 C2 级。按设计使用年限 10 年,设计涂层干膜厚度须达到 160 μm 以上。同时,每层涂料涂刷间隔时长留够,确保每层涂料有足够时长实干。因此每道涂层实干后,除外观检查外,还须经涂层的厚度、附着力质量检验。涂层厚度要求见表 1,涂层附着力大于等于 5 MPa,检测合格后方可进入下一道工序。

2 防腐施工技术要求

2.1 涂层体系设计及涂料现场检查

对于变电站的防腐工程,选择适合的涂料至关重要。针对中国西南地区湿热气候特点,选用了防腐性能较好的重防腐涂料,要求不仅要具备普通涂料的基础性能,最重要的是要具有良好的抗渗性和耐湿热、耐紫外老化性能^[11]。本次变电站防腐示范工程涂层体系设计为 3 层:分别为环氧富锌底漆大于等于 60 μm ,环氧云铁中间漆大于等于 50 μm ,丙烯酸聚氨酯面漆大于等于 50 μm ,总干膜厚度大于等于 160 μm 。涂层体系设计如表 1 所示。

表 1 变电站防腐示范工程涂层体系设计

涂层	涂料品种	涂层道数	最低干膜厚度/ μm
底漆	环氧富锌底漆	1	60
中间漆	环氧云铁中间漆	1	50
面漆	丙烯酸聚氨酯面漆	1	50
总干膜厚度			160

现场检查防腐涂料、稀释剂和固化剂等产品的质量合格证明文件、检验报告等,其品种、规格和性能等应满足技术合同要求和有关国家、行业标准的规定。涂刷前,检查防腐涂料的型号、名称、颜色及有效期等是否与质量证明文件相符。防腐涂料开启后,不应存在结皮、结块、凝胶等现象,检查数量为每批按总桶数随机抽查 $\sqrt{n/2}$,且不少于 3 桶。涂料充分搅拌均匀后方可施工,采用电动搅拌装置进行机

械搅拌。先将各组分分别搅拌均匀,再严格按涂料产品使用指导说明书规定的比例,添加固化剂和稀释剂进行配制并搅拌均匀无沉淀现象,然后按规定放置 10~15 min 进行熟化,不均匀混合禁止施工。现场施工环境温度宜在 5~38 ℃ 之间,空气湿度不大于 85%。被施工物体表面不得有凝露。在有雨、雾、雪、大风和较大灰尘的条件下应停止户外施工。

2.2 涂装工艺

防腐施工涂装工艺流程如下:表面除锈→除锈验收合格后→涂刷第一道底漆→干燥验收合格后→涂刷第二道中间漆→干燥验收合格后→涂刷第三道面漆→干燥验收合格后→工程质量、安全验收。涂装施工方案流程如图 2 所示。

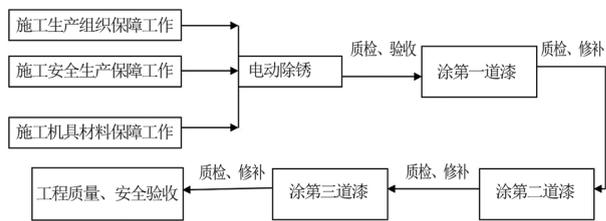


图 2 涂装施工方案流程

2.3 表面处理

涂装前首先要对设备原有的表面锈层进行除锈处理,以保证涂层与金属基体具有良好的结合力,基体的清洁程度直接影响设备的最终防腐效果。该变电站防腐示范工程表面除锈处理采用电动与手动工具相结合的形式进行。在除锈处理前,金属表面的厚锈层、焊渣、毛刺和飞溅物等附着物全部铲除,对于表面涂层已劣化部位(起泡、锈蚀、开裂、剥落)处的原涂层也全部铲除。表面处理使用电动砂轮机或电动钢丝刷除锈,电动工具无法到达的部位采用钢丝刷、铲刀、砂纸等手动工具除锈,除锈完成后用干净棉纱清除金属表面的浮灰和碎屑。

除锈后金属表面清洁度要求达到 GB/T 8923.1—2011 规定的 St3 级,即表面应无可见的油、脂和污物,并且没有附着不牢的氧化皮、铁锈、涂层和外来杂质,表面应具有金属底材的光泽^[11]。对于不易清理部位,处理后表面应达到 GB/T 8923.1—2011 规定的 St2 标准,即在不放大的情况下观察时,表面应无可见的油、脂和污物,并且没有附着不牢的氧化皮、铁锈、涂层和外来杂质^[12]。紧固件用砂纸包裹反复打磨,除锈等级达到 GB/T 8923.1—2011 规定的 St2 级以上。

2.4 底漆涂刷

除了表面处理,涂装的施工工艺也同样重要。在表面除锈处理完毕后,确保 4 h 内完成环氧富锌底漆涂装。环氧富锌底漆是以环氧树脂、锌粉、聚酰胺固化剂等为主要成分的特种涂料,含有大量金属锌粉,具有阴极保护作用,该漆自然干燥快、附着力强、耐水性好,在各种环境下的防腐蚀性能优良,是重防腐领域选用最多的产品之一。基于底漆工艺质量的重要性,在环氧富锌底漆涂装后,现场技术人员应及时进行回检,对漏涂和缺陷立即进行处理,确保涂装后涂层均匀平整、色泽正常,无明显的疏松、皱皮、流坠、针孔和气泡等缺陷以及无漏涂、误涂和涂层脱皮现象,对于非导电部件紧固件均用涂料予以全包覆。待底漆施工完成实干后,对底漆进行附着力和涂层厚度检测,确保满足厚度不低于 60 μm 以及附着力大于等于 5 MPa 的试验要求。

2.5 中间漆涂刷

待环氧富锌底漆实干且满足相关试验检测后,进行环氧云铁中间漆涂装。环氧云铁中间漆含有鳞片状防锈保护等成分,能更好地封闭屏蔽及延缓各种环境条件下腐蚀介质的侵蚀。环氧云铁中间漆涂装后,及时对涂装质量进行检查,漆膜应无针孔、气泡、裂纹、起皮脱落、流挂、漏涂等缺陷。实干后,随机取点对中间漆进行涂层厚度检测,确保中间漆+底漆满足厚度不低于 110 μm 要求。

2.6 面漆喷涂

最后一道工序进行丙烯酸聚氨酯面漆涂装。丙烯酸聚氨酯面漆是由羟基丙烯酸树脂、脂肪族聚氨酯、耐候性颜料、助剂等组成的混合物,防腐性能好,耐候性能优异。此外,漆膜还具有较好的耐酸、耐碱、耐水、耐油、耐热、耐化学腐蚀性,其漆膜光亮、饱满,具有良好的表面装饰性。变压器、箱体等大面积部件采用喷涂方式;紧固件、边角缝隙等其他小面积部件采用手工刷涂。丙烯酸聚氨酯面漆喷涂后,及时对涂装质量进行检查,面漆应均匀平整、色泽正常,无针孔、气泡、裂纹、起皮脱落、流挂、漏涂等缺陷。涂装完毕后,测量漆膜总厚度,确保面漆+中间漆+底漆满足总厚度不低于 160 μm 以及附着力大于等于 5 MPa 的要求。

3 防腐工程质量验收及防腐效果跟踪

为检验防腐施工质量及效果,对变电站防腐示

范工程质量进行了验收,开展了工程前、中、后期外观和涂层厚度、附着力指标前后检测对比工作以及长期防腐效果跟踪。该变电站典型部位防腐处理前后对比照片如图 3—图 5 所示。



图 3 1 号主变压器本体防腐处理前后对比



图 4 2 号主变压器 102 断路器支架防腐前后对比



图 5 35 kV 301 断路器间隔防腐处理前后对比

3.1 外观检查

从图 3—图 5 可以看出,该变电站典型部位防腐处理前后对比效果明显。原有的锈蚀、涂层起皮脱落处已被处理干净,经过底漆、中间漆刷涂后表面

整体喷涂一层海灰面漆。涂层外观均匀平整、色泽正常,无明显的疏松、皱皮、流坠、针孔和气泡等缺陷,无漏涂、误涂和涂层脱皮现象。紧固件、边缘棱角、缝隙等薄弱部位均采用涂料全包覆处理。

3.2 涂层厚度检测

采用德国 Qnix4500 磁性法涂层测厚仪对该变电站典型部位开展了防腐工程前、中、后期涂层厚度检测工作。检测结果见表 2、表 3。从结果可以看出,抽检的 2 号主变压器 102 断路器间隔支架和 35 kV 301 断路器间隔,防腐处理前原涂层厚度平均值分别为 $63.4 \mu\text{m}$ 和 $87.7 \mu\text{m}$,远低于 DL/T 1425—2015《变电站金属材料腐蚀防护技术导则》规定的户外最低 $120 \mu\text{m}$ 的标准^[12]。经过三层涂层涂覆,抽检的 2 号主变压器 102 断路器间隔支架和 35 kV 301 断路器间隔的防腐涂层总厚度平均值分别达到 $330 \mu\text{m}$ 和 $212 \mu\text{m}$,均高于设计值 $160 \mu\text{m}$ 。

表 2 2 号主变压器 102 断路器间隔支架涂层厚度

单位: μm

检测阶段	测点 1	测点 2	测点 3	测点 4	测点 5	测点 6	平均值
防腐前	52.2	48.4	67.1	73.0	68.1	71.6	63.4
底漆后	156	175	166	183	172	160	169
中间漆后	253	262	249	269	272	275	263
面漆后	316	322	305	339	342	353	330

表 3 35 kV 301 断路器间隔涂层厚度

单位: μm

检测阶段	测点 1	测点 2	测点 3	测点 4	测点 5	测点 6	平均值
防腐前	89.0	79.0	82.0	89.1	91.8	95.5	87.7
防腐后	222	219	223	190	201	218	212

3.3 涂层附着力检测

采用美国 Defelsko PosiTest AT-A 拉拔法附着力测试仪对防腐工程前、后涂层附着力进行了抽检,现场测试照片见图 6。以 1 号主变压器本体为例,防腐处理前,对于原涂层附着力抽检结果为 $3.68 \sim 4.39 \text{ MPa}$,均低于 DL/T 1425—2015《变电站金属材料腐蚀防护技术导则》规定的 5 MPa 标准^[13]。防腐处理后,对于涂层附着力抽检结果为 $9.89 \sim 14.51 \text{ MPa}$,均高于标准值 5 MPa 。由于附着力试验属于破坏性试验,因此抽检的位置和数量应严格控制。检测完后,应对破坏试验造成的涂层损伤部位采用同种涂层体系进行修复。

3.4 防腐效果跟踪

本次变电站防腐示范工程完工后,经过 4 年的实际运行,未见涂层发生明显失色、粉化,未观察到



图 6 涂层附着力检测

涂层有起泡、起皱、开裂、脱落、锈蚀等现象,全站设备运行情况良好。

4 结 论

针对四川湿热气候电网设备腐蚀严重的实际情况,以某 110 kV 变电站作为试点,开展了变电站防腐工程设计及防腐工程实践,探索出湿热气候变电站防腐涂层体系设计、施工技术要求、操作规范及质量验收方法,为其他类似环境条件下变电站的防腐工程提供了参考,工程中的创新做法如下:

1) 电动除锈工艺应用

充分发挥电动工具除锈效率更高、除锈力度更强等优点,彻底将锈蚀设备表面锈渣清除干净并打磨至可见金属光泽,杜绝因除锈不彻底,从防腐涂层底层最先起壳的现象,有效地保证了防腐涂层底漆附着力效果。

2) 三层涂层体系设计

较以往变电站防腐施工采用的“一底两面”涂料搭配相比,防腐示范工程采用“一底漆—中间漆—面漆”的三层涂层配套体系。充分发挥环氧富锌底漆附着力强、阴极保护,环氧云铁中间漆封闭屏蔽效果好,丙烯酸聚氨酯面漆耐候性能优良等特点,确保充分发挥涂层整体效果。

3) 涂层附着力质量验收

很多情况下,涂层厚度虽然达标,但由于除锈不彻底、涂料调配不当、涂刷工艺不过关等施工工艺原因,导致底漆与基体之间、涂层整体附着力不足,运行后涂层容易起皮、开裂,而这些内部缺陷通过目视和涂层测厚无法发现。防腐示范工程采用拉拔法附着力测试仪,在现场对防腐工程前、后涂层附着力进行检测,检出附着力不合格的涂层均铲除重做,从根本上确保涂层施工工艺质量过关。

参考文献

- [1] 潘玉霞,王玫,王志高,等.大气腐蚀环境对四川电网输变电设备腐蚀的影响研究[J].材料保护,2018,51(4):110-129.
- [2] 朱军,赵兴虹,吴驰,等.四川地区变电站高压电气设备锈蚀情况及防腐技术研究[J].四川电力技术,2016,39(5):49-89.
- [3] 王志高,田倩倩,耿植,等.四川电网输变电设备的腐蚀情况调查及防护措施[J].腐蚀与防护,2021,42(3):34-37.
- [4] 陈军君,李明,王军,等.变电站金属构件的常见腐蚀形式及解决措施[J].内蒙古电力技术,2013,31(1):7-11.
- [5] 顾君梦,杨凡,邓亚文.变电所接地装置钢质腐蚀及电化学保护的探讨[J].云南电力技术,2004(2):17-18.
- [6] 方乙君,柳松,王雄文,等.沿海地区变电站腐蚀现状及防腐措施研究[J].电气技术,2018(12):97-102.
- [7] 夏晓健,金焱,乔汉文,等.输变电设备腐蚀状况调查与分析[J].腐蚀科学与防护技术,2019,31(2):121-127.
- [8] 国家电网有限公司.电网输变电设备防腐技术指导意见[Z].北京:国家电网有限公司,2019.
- [9] 四川省统计局,国家统计局四川调查总队.四川统计年鉴—2018[M].北京:中国统计出版社,2018.
- [10] 金属和合金的腐蚀 大气腐蚀性 第 1 部分:分类测定和评估:GB/T 19292.1—2018[S].北京:中国标准出版社,2018.
- [11] 王剑英,邓杰,董男,等.热带沿海输变电设备防腐技术研究及应用[J].涂料工业,2016,46(12):63-67.
- [12] 涂覆涂料前钢材表面处理 表面清洁度的目视评定 第 1 部分:未涂覆过的钢材表面和全面清除原有涂层后的钢材表面的锈蚀等级和处理等级:GB/T 8923.1—2011[S].北京:中国标准出版社,2011.
- [13] 变电站金属材料腐蚀防护技术导则:DL/T 1425—2015[S].北京:中国电力出版社,2015.

作者简介:

李成鑫(1977),男,工学硕士,高级工程师,从事电网技术监督工作;

王志高(1985),男,工学博士,高级工程师,从事电网设备腐蚀与防护工作;

安政(1987),男,工学硕士,工程师,从事电网技术监督与变电检修工作;

耿植(1990),男,工学硕士,工程师,从事电网设备腐蚀与防护工作;

王方强(1970),男,工学硕士,高级工程师,从事电网环境监测工作。

(收稿日期:2021-06-17)