

变压器加强筋渗漏焊接修复工艺的研究与应用

李 浩 田景霞

湖南澧水流域水利水电开发有限责任公司江垭水电站 湖南 张家界 427221

【摘 要】：变压器作为电力系统的核心设备，其运行稳定性直接决定电力供应的可靠性。主变本体加强筋焊缝渗漏是变压器常见故障，不仅导致油液损耗，更可能引发设备绝缘失效、内部元件锈蚀等连锁问题。本文以加强筋渗漏修复为研究对象，系统分析渗漏产生的机理，结合焊接工艺理论与工程实践经验，构建涵盖准备、检测、焊前处理、焊接修复、焊后处理及质量检验的全流程焊接修复工艺体系。通过实验验证与工程案例应用，证实该工艺可有效解决加强筋焊缝渗漏问题，修复后焊缝密封性能达标、力学性能稳定，为变压器运维提供技术支撑。

【关键词】：变压器；加强筋；焊缝渗漏；焊接修复

DOI:10.12417/2811-0528.26.16.093

引言

电力工业是国民经济的基础产业，变压器作为输配电系统中的关键枢纽设备，承担着电压变换、电能传输与分配的核心功能。随着电力负荷的持续增长与电网规模的不断扩大，对变压器运行的安全性、稳定性与耐久性提出了更高要求。主变本体作为变压器的核心组成部分，其结构完整性直接影响设备整体性能。加强筋作为主变本体油箱的重要支撑构件，不仅可增强油箱刚度与强度，抵御运行过程中的压力波动与机械振动，还能优化油箱受力分布，延长设备使用寿命。

然而，在变压器制造、运输及长期运行过程中，加强筋焊缝易出现渗漏问题。据电力运维数据统计，约35%的变压器油渗漏故障源于加强筋焊缝缺陷，主要表现为气孔、砂眼、裂纹等焊接缺陷引发的油液渗漏。此类渗漏若未及时处理，一方面会导致变压器油液位下降，影响绝缘与冷却效果，引发绕组过热、绝缘老化加速等问题；另一方面，渗漏的油液会污染环境，增加运维成本，严重时甚至可能引发设备爆炸、火灾等重大安全事故。因此，研发高效、可靠的加强筋渗漏焊接修复工艺，对保障变压器安全运行、降低运维成本具有重要现实意义。

1 研究现状

现有焊接修复研究多聚焦于变压器本体焊缝的通用修复工艺，针对加强筋这一特殊构件的专项研究相对匮乏。加强筋与油箱壁的连接结构复杂，焊缝受力状态特殊，且修复过程中需兼顾油箱内壁漆膜保护、残油清理等特殊要求，常规焊接工艺难以直接套用。部分研究虽提及加强筋修复的基本步骤，但缺乏对工艺参数优化、冷却措施有效性、质量检测标准等关键技术的系统分析，导致实际应用中修复质量参差不齐，存在修复后再次渗漏、漆膜受损等问题。因此，亟需构建一套针对性强、流程规范、参数明确的加强筋渗漏焊接修复工艺体系。

2 变压器加强筋结构与渗漏机理分析

2.1 加强筋的结构与功能

变压器主变本体油箱多采用钢板焊接结构，为提升油箱的抗变形能力与承载能力，通常在油箱壁内侧或外侧设置加强筋。加强筋按结构形式可分为条形加强筋、环形加强筋与网格状加强筋，其中条形加强筋因加工简便、支撑效果好，在中小型变压器中应用最为广泛。

加强筋与油箱壁的连接采用角焊缝焊接方式，焊缝高度通常为6-10mm，焊接接头形式多为T型接头。该类接头在运行过程中需承受多重应力作用：一是变压器油热胀冷缩产生的交变压力；二是设备运输与安装过程中的冲击振动应力；三是加强筋与油箱壁因材质或温度变化产生的附加应力。这些应力长期作用于焊缝，易导致焊缝缺陷扩展，引发渗漏。

2.2 渗漏缺陷类型与成因

(1) 缺陷类型：变压器渗漏缺陷主要分为三类：一是气孔类缺陷，占比42%，表现为焊缝内部或表面存在圆形、椭圆形孔洞，直径多为0.5-3mm；二是砂眼类缺陷，占比35%，呈不规则点状或线状，多分布于焊缝根部或熔合线处；三是微裂纹类缺陷，占比23%，裂纹长度一般为2-8mm，多沿焊缝方向扩展。

(2) 成因分析：①焊接材料因素：焊条或焊丝受潮，含有的水分在焊接过程中分解为氢气，若氢气未及时逸出，便在焊缝中形成气孔；焊接材料化学成分与母材不匹配，易导致焊缝熔合不良，产生砂眼。②焊接工艺因素：焊接电流过大或过小，均会影响熔池形成与凝固，电流过大易导致烧穿，电流过小则熔合不充分；焊接速度过快，熔池冷却速度快，气体来不及排出，形成气孔；焊道清理不彻底，残留的油污、铁锈等杂质在焊接时燃烧，产生气体，引发缺陷。③结构设计因素：加

强筋与油箱壁连接的 T 型接头存在焊接盲区, 易出现未焊透缺陷; 加强筋开孔位置不合理, 导致焊接时应力集中, 引发裂纹。④运行环境因素: 变压器长期在高温、潮湿环境下运行, 焊缝受到油液腐蚀与氧化, 材质性能下降, 缺陷逐渐扩展; 设备运行过程中的振动与冲击, 加速了缺陷的发展。

3 加强筋渗漏焊接修复工艺体系构建

基于加强筋结构特点与渗漏机理, 结合焊接工艺理论与工程实践, 构建“准备—检测—修复—检验——收尾”全流程焊接修复工艺体系, 明确各环节技术要求、操作规范与质量控制要点。

3.1 前期准备工艺

前期准备是保障修复质量的基础, 主要包括排油操作、残油清理、工具材料准备与安全防护四项内容。

(1) 排油操作: 采用真空排油法, 将主变本体油箱内的变压器油彻底排出, 排油真空度控制在 0.08-0.09MPa, 排油时间根据油箱容积确定, 一般为 4-8 小时。排油结束后, 通过油箱底部取样阀检测油液残留量, 确保残留量不超过 0.5L/m²。

(2) 残油清理: 加强筋内部易积存残油, 若清理不彻底, 焊接时残油受热挥发, 会产生气体, 导致焊缝出现气孔缺陷。

在加强筋底部距油箱壁 100-150mm 处开孔, 孔径为 20-30mm, 确保残油顺利排出; 待残油完全排出后, 用压缩空气 (压力 0.3-0.5MPa) 吹扫加强筋内部, 清除残留油膜, 吹扫时间不少于 5 分钟。

(3) 工具与材料准备: 所有焊接材料需经烘干处理, 焊条烘干温度为 150-200℃, 烘干时间 2 小时, 烘干后置于保温桶中存放; 检测设备需定期校准, 校准周期不超过 1 年。

(4) 安全防护: 作业人员需佩戴安全帽、防护眼镜、焊接手套、绝缘鞋等防护用品; 焊接作业时佩戴焊接面罩, 防止弧光伤害。

作业区域通风良好, 设置排风设备, 防止焊接烟尘积聚; 配备干粉灭火器, 距离焊接作业点不超过 5 米。

油箱内部作业前, 需检测内部氧含量, 确保氧含量在 19.5%-23.5%之间; 作业人员携带便携式气体检测仪, 实时监测有害气体浓度。

3.2 渗漏检测工艺

渗漏检测的核心是精准定位漏点位置与类型, 为后续修复提供依据。本工艺采用氮气加压-肥皂水检测法, 具有操作简便、检测精度高的特点。

(1) 开窗与充气: 在加强筋顶部居中位置开窗, 窗口尺寸为 150mm×100mm, 采用等离子切割方式, 切割速度控制在 50-80mm/min, 避免切割过程中损伤加强筋本体。向变压器内部充入氮气, 充气压力稳定在 0.03MPa, 压力波动范围不超过 ±0.005MPa。

切割前用记号笔标记窗口位置, 确保窗口避开焊缝; 切割后清除切口处的熔渣与毛刺, 用砂纸打磨光滑。连接氮气瓶与油箱充气口, 通过减压阀门缓慢调节压力, 充气时间不少于 10 分钟, 确保油箱内部压力均匀。

(2) 渗漏检查: 用毛刷将肥皂水均匀涂抹在加强筋焊缝表面, 涂抹厚度为 1-2mm, 覆盖所有可疑区域; 观察焊缝表面是否有气泡产生, 根据气泡大小与产生频率判断漏点大小, 气泡直径 ≥1mm 为大型漏点, 0.5-1mm 为中型漏点, <0.5mm 为小型漏点。

检查顺序从加强筋一端向另一端推进, 每段检查长度为 500mm, 确保无遗漏区域; 发现漏点后, 用记号笔标记漏点位置、大小与类型, 并绘制漏点分布图。

3.3 焊前处理工艺

焊前处理旨在清除焊缝表面的杂质与缺陷, 改善焊接性, 为高质量焊接奠定基础, 主要包括表面打磨、清洁处理与漏点定位三项工序。

(1) 表面打磨: 采用角磨机打磨焊缝外部表面, 内磨机打磨焊缝内部表面, 打磨范围为漏点周边 50mm 区域, 去除焊缝表面的氧化层、铁锈、油污及旧漆层, 直至露出金属光泽; 打磨后焊缝表面粗糙度 $Ra \leq 6.3 \mu m$ 。

(2) 清洁处理: 用白布蘸无水酒精擦拭打磨后的焊缝表面, 擦拭次数不少于 3 次, 确保表面无粉尘、油污残留; 清洁后静置 5-10 分钟, 待无水酒精完全挥发。

(3) 漏点定位: 将超声波探伤仪探头置于漏点位置, 调节探测频率为 2-5MHz, 获取缺陷反射波形, 根据波形特征判断缺陷类型与深度; 在漏点周边用记号笔标记探测范围, 确保覆盖缺陷全部区域。

3.4 焊接修复工艺

焊接修复是整个工艺体系的核心环节, 需根据漏点类型与大小, 合理选择焊接材料与工艺参数, 控制焊接热输入, 避免损伤油箱内壁漆膜。

(1) 漏点填充: 漏点填充采用小电流点焊方式, 可有效控制焊接热输入, 减少对油箱内壁漆膜的影响。

焊接材料选择: 根据母材材质 (Q235 钢), 选用 E4303

焊条（直径 2.5mm）或 ER50-6 焊丝（直径 1.2mm），焊条熔敷金属抗拉强度 $\geq 420\text{MPa}$ ，延伸率 $\geq 22\%$ 。

焊接电流控制在 80-100A，电弧电压 18-22V，焊接速度 100-150mm/min，点焊时间 2-3 秒/点，点间距 3-5mm。通过正交实验验证，该参数组合下焊缝熔深为 2-3mm，热影响区宽度 $\leq 5\text{mm}$ ，可有效避免漆膜受损。

起弧前清理焊条端部药皮，采用直击法起弧；焊接时焊条与焊缝表面呈 45-60° 角，沿漏点长度方向依次点焊，确保熔滴均匀填充；每点焊 5-6 点后，暂停焊接，待焊缝温度降至 60℃ 以下再继续作业。

油箱内侧安排专人观察漆膜情况，当漆膜温度超过 80℃ 时，采用面团（含水量 20%-30%）覆盖外部点焊部位，面团厚度为 10-15mm，可使焊缝冷却速度提升 30%-40%。

（2）周边加强：周边加强旨在增强修复区域的力学性能与密封性，防止再次渗漏。

采用直径 3.2mm 的 E4303 焊条，焊接电流 100-120A，电弧电压 22-25V；补焊范围为漏点周边 20-30mm，焊道宽度 5-8mm，焊缝高度与原焊缝平齐。

采用分段焊接方式，每段焊接长度 10-15mm，焊接时间不超过 10 秒；每段焊接结束后，用湿布擦拭焊缝表面加速冷却，待焊缝温度降至室温后再进行下一段焊接。

补焊过程中实时监测焊缝温度，采用红外测温仪检测，确保温度不超过 150℃；补焊后检查焊缝表面，不得出现咬边、未熔合等缺陷。

3.5 焊后处理工艺

焊后处理可改善焊缝表面质量，增强焊缝耐腐蚀性，包括表面清理与补漆作业两项内容。

（1）表面清理：用 240 目砂纸打磨修复后的焊缝表面，去除焊渣、飞溅物及氧化皮，使焊缝表面平整光滑，与母材过渡平缓；打磨后用白布蘸无水酒精擦拭焊缝表面，确保无粉尘残留。

（2）补漆作业：补漆前确保焊缝表面干燥，无水珠、油污等杂质；采用环氧改性醇酸漆，涂刷厚度为 80-120 μm ，分两次涂刷，第一次涂刷后静置 2 小时，待漆层干燥后再进行第二次涂刷。

3.6 质量检验工艺

质量检验是验证修复效果的关键环节，采用无损检测方式，包括着色探伤与超声波探伤两项检测内容。

（1）着色探伤：着色探伤适用于检测焊缝表面开口缺陷，检测灵敏度可达 0.5mm。按照 JB/T6062-2007《焊缝渗透检测》标准执行，检测步骤包括预处理、渗透、清洗、显像与观察。

预处理时用无水酒精擦拭焊缝表面；渗透剂涂抹厚度为 0.5-1mm，渗透时间 15-20 分钟；清洗时用清水冲洗，避免冲刷过度；显像剂采用喷洒方式，厚度为 0.05-0.1mm，显像时间 10-15 分钟；在自然光下观察，缺陷处呈红色显示。

焊缝表面无红色显示即为合格，若发现缺陷，需重新进行焊接修复与检测。

（2）超声波探伤：超声波探伤适用于检测焊缝内部缺陷，按照 JB/T6061-2007《焊缝超声波检测》标准执行，检测频率为 2-5MHz，探头采用直探头与斜探头组合使用，直探头检测焊缝内部气孔、砂眼，斜探头检测裂纹等线性缺陷。

焊缝内部无超过 $\Phi 2\text{mm}$ 的气孔、砂眼及长度 $> 3\text{mm}$ 的裂纹即为合格，检测结果需形成超声波探伤报告。

3.7 收尾工作工艺

收尾工作主要包括加强筋上盖恢复与最终补漆，旨在恢复加强筋的结构完整性与外观质量。

（1）加强筋上盖恢复：采用手工电弧焊焊接恢复加强筋上盖，焊条选用 E4303（直径 3.2mm），焊接电流 100-120A，电弧电压 22-25V；焊接接头采用角焊缝，焊缝高度为 6-8mm，与原焊缝高度一致。

将切割下的上盖复位，采用点焊固定，点间距为 50-100mm；焊接时采用分段退焊法，每段焊接长度 50-100mm，焊接时间不超过 15 秒，每段焊接后暂停冷却，待温度降至 60℃ 以下再继续作业。

焊接后检查上盖与加强筋的贴合度，间隙不超过 1mm；采用肥皂水检测焊接接头密封性，无气泡产生即为合格。

（2）最终补漆：补漆材料与焊后处理补漆一致，涂刷厚度为 80-120 μm ，分两次涂刷；补漆范围覆盖上盖焊接接头及周边 10-15mm 区域，确保与原漆层颜色、光泽一致。

涂刷前清理上盖表面，去除焊渣、飞溅物及油污；采用羊毛刷均匀涂刷，避免出现流挂、漏涂现象；涂刷后静置 24 小时，待漆层完全干燥。

4 工艺验证与工程应用

以江垭电站 220kV 变压器为工程实例分析，采用本文工艺进行修复，修复后对变压器进行了无损检查（见图 1、2），检测数据合格。

湖南省特种设备检验检测研究院 超声检测报告				
报告编号: MH-0205-0003				
1	设备名称	2号主变油桶	2号主变油桶	4203
2	设备型号	4-150mm	检测部位名称	焊缝
3	检测日期	2025-03-08	检测人员	王强
4	检测地点	湖南湘潭市湘乡市	检测时间	2025-03-08
5	检测对象	300 焊条电弧焊焊缝	检测方式	2.5MHz 纵波
6	检测目的	化学腐蚀	检测标准	GB
7	检测标准	GB/T 19151.2-2023	检测范围	工作一次范围 100-150mm
8	检测时间	2025-03-08	检测地点	1楼
9	检测人员	王强	检测单位	湖南省特种设备检验检测研究院
10	检测地点	湖南湘潭市湘乡市	检测时间	2025-03-08
11	检测对象	300 焊条电弧焊焊缝	检测方式	2.5MHz 纵波
12	检测目的	化学腐蚀	检测标准	GB
13	检测标准	GB/T 19151.2-2023	检测范围	工作一次范围 100-150mm
14	检测时间	2025-03-08	检测地点	1楼
15	检测人员	王强	检测单位	湖南省特种设备检验检测研究院
16	检测地点	湖南湘潭市湘乡市	检测时间	2025-03-08
17	检测对象	300 焊条电弧焊焊缝	检测方式	2.5MHz 纵波
18	检测目的	化学腐蚀	检测标准	GB
19	检测标准	GB/T 19151.2-2023	检测范围	工作一次范围 100-150mm
20	检测时间	2025-03-08	检测地点	1楼
21	检测人员	王强	检测单位	湖南省特种设备检验检测研究院
22	检测地点	湖南湘潭市湘乡市	检测时间	2025-03-08
23	检测对象	300 焊条电弧焊焊缝	检测方式	2.5MHz 纵波
24	检测目的	化学腐蚀	检测标准	GB
25	检测标准	GB/T 19151.2-2023	检测范围	工作一次范围 100-150mm
26	检测时间	2025-03-08	检测地点	1楼
27	检测人员	王强	检测单位	湖南省特种设备检验检测研究院
28	检测地点	湖南湘潭市湘乡市	检测时间	2025-03-08
29	检测对象	300 焊条电弧焊焊缝	检测方式	2.5MHz 纵波
30	检测目的	化学腐蚀	检测标准	GB
31	检测标准	GB/T 19151.2-2023	检测范围	工作一次范围 100-150mm
32	检测时间	2025-03-08	检测地点	1楼
33	检测人员	王强	检测单位	湖南省特种设备检验检测研究院
34	检测地点	湖南湘潭市湘乡市	检测时间	2025-03-08
35	检测对象	300 焊条电弧焊焊缝	检测方式	2.5MHz 纵波
36	检测目的	化学腐蚀	检测标准	GB
37	检测标准	GB/T 19151.2-2023	检测范围	工作一次范围 100-150mm
38	检测时间	2025-03-08	检测地点	1楼
39	检测人员	王强	检测单位	湖南省特种设备检验检测研究院
40	检测地点	湖南湘潭市湘乡市	检测时间	2025-03-08
41	检测对象	300 焊条电弧焊焊缝	检测方式	2.5MHz 纵波
42	检测目的	化学腐蚀	检测标准	GB
43	检测标准	GB/T 19151.2-2023	检测范围	工作一次范围 100-150mm
44	检测时间	2025-03-08	检测地点	1楼
45	检测人员	王强	检测单位	湖南省特种设备检验检测研究院
46	检测地点	湖南湘潭市湘乡市	检测时间	2025-03-08
47	检测对象	300 焊条电弧焊焊缝	检测方式	2.5MHz 纵波
48	检测目的	化学腐蚀	检测标准	GB
49	检测标准	GB/T 19151.2-2023	检测范围	工作一次范围 100-150mm
50	检测时间	2025-03-08	检测地点	1楼
51	检测人员	王强	检测单位	湖南省特种设备检验检测研究院
52	检测地点	湖南湘潭市湘乡市	检测时间	2025-03-08
53	检测对象	300 焊条电弧焊焊缝	检测方式	2.5MHz 纵波
54	检测目的	化学腐蚀	检测标准	GB
55	检测标准	GB/T 19151.2-2023	检测范围	工作一次范围 100-150mm
56	检测时间	2025-03-08	检测地点	1楼
57	检测人员	王强	检测单位	湖南省特种设备检验检测研究院
58	检测地点	湖南湘潭市湘乡市	检测时间	2025-03-08
59	检测对象	300 焊条电弧焊焊缝	检测方式	2.5MHz 纵波
60	检测目的	化学腐蚀	检测标准	GB
61	检测标准	GB/T 19151.2-2023	检测范围	工作一次范围 100-150mm
62	检测时间	2025-03-08	检测地点	1楼
63	检测人员	王强	检测单位	湖南省特种设备检验检测研究院
64	检测地点	湖南湘潭市湘乡市	检测时间	2025-03-08
65	检测对象	300 焊条电弧焊焊缝	检测方式	2.5MHz 纵波
66	检测目的	化学腐蚀	检测标准	GB
67	检测标准	GB/T 19151.2-2023	检测范围	工作一次范围 100-150mm
68	检测时间	2025-03-08	检测地点	1楼
69	检测人员	王强	检测单位	湖南省特种设备检验检测研究院
70	检测地点	湖南湘潭市湘乡市	检测时间	2025-03-08
71	检测对象	300 焊条电弧焊焊缝	检测方式	2.5MHz 纵波
72	检测目的	化学腐蚀	检测标准	GB
73	检测标准	GB/T 19151.2-2023	检测范围	工作一次范围 100-150mm
74	检测时间	2025-03-08	检测地点	1楼
75	检测人员	王强	检测单位	湖南省特种设备检验检测研究院
76	检测地点	湖南湘潭市湘乡市	检测时间	2025-03-08
77	检测对象	300 焊条电弧焊焊缝	检测方式	2.5MHz 纵波
78	检测目的	化学腐蚀	检测标准	GB
79	检测标准	GB/T 19151.2-2023	检测范围	工作一次范围 100-150mm
80	检测时间	2025-03-08	检测地点	1楼
81	检测人员	王强	检测单位	湖南省特种设备检验检测研究院
82	检测地点	湖南湘潭市湘乡市	检测时间	2025-03-08
83	检测对象	300 焊条电弧焊焊缝	检测方式	2.5MHz 纵波
84	检测目的	化学腐蚀	检测标准	GB
85	检测标准	GB/T 19151.2-2023	检测范围	工作一次范围 100-150mm
86	检测时间	2025-03-08	检测地点	1楼
87	检测人员	王强	检测单位	湖南省特种设备检验检测研究院
88	检测地点	湖南湘潭市湘乡市	检测时间	2025-03-08
89	检测对象	300 焊条电弧焊焊缝	检测方式	2.5MHz 纵波
90	检测目的	化学腐蚀	检测标准	GB
91	检测标准	GB/T 19151.2-2023	检测范围	工作一次范围 100-150mm
92	检测时间	2025-03-08	检测地点	1楼
93	检测人员	王强	检测单位	湖南省特种设备检验检测研究院
94	检测地点	湖南湘潭市湘乡市	检测时间	2025-03-08
95	检测对象	300 焊条电弧焊焊缝	检测方式	2.5MHz 纵波
96	检测目的	化学腐蚀	检测标准	GB
97	检测标准	GB/T 19151.2-2023	检测范围	工作一次范围 100-150mm
98	检测时间	2025-03-08	检测地点	1楼
99	检测人员	王强	检测单位	湖南省特种设备检验检测研究院
100	检测地点	湖南湘潭市湘乡市	检测时间	2025-03-08

图1 超声检测报告

湖南省特种设备检验检测研究院 渗透检测报告				
报告编号: MH-0205-0003				
1	设备名称	2号主变油桶	2号主变油桶	4203
2	设备型号	4-150mm	检测部位名称	焊缝
3	检测日期	2025-03-08	检测人员	王强
4	检测地点	湖南湘潭市湘乡市	检测时间	2025-03-08
5	检测对象	300 焊条电弧焊焊缝	检测方式	2.5MHz 纵波
6	检测目的	化学腐蚀	检测标准	GB
7	检测标准	GB/T 19151.2-2023	检测范围	工作一次范围 100-150mm
8	检测时间	2025-03-08	检测地点	1楼
9	检测人员	王强	检测单位	湖南省特种设备检验检测研究院
10	检测地点	湖南湘潭市湘乡市	检测时间	2025-03-08
11	检测对象	300 焊条电弧焊焊缝	检测方式	2.5MHz 纵波
12	检测目的	化学腐蚀	检测标准	GB
13	检测标准	GB/T 19151.2-2023	检测范围	工作一次范围 100-150mm
14	检测时间	2025-03-08	检测地点	1楼
15	检测人员	王强	检测单位	湖南省特种设备检验检测研究院
16	检测地点	湖南湘潭市湘乡市	检测时间	2025-03-08
17	检测对象	300 焊条电弧焊焊缝	检测方式	2.5MHz 纵波
18	检测目的	化学腐蚀	检测标准	GB
19	检测标准	GB/T 19151.2-2023	检测范围	工作一次范围 100-150mm
20	检测时间	2025-03-08	检测地点	1楼
21	检测人员	王强	检测单位	湖南省特种设备检验检测研究院
22	检测地点	湖南湘潭市湘乡市	检测时间	2025-03-08
23	检测对象	300 焊条电弧焊焊缝	检测方式	2.5MHz 纵波
24	检测目的	化学腐蚀	检测标准	GB
25	检测标准	GB/T 19151.2-2023	检测范围	工作一次范围 100-150mm
26	检测时间	2025-03-08	检测地点	1楼
27	检测人员	王强	检测单位	湖南省特种设备检验检测研究院
28	检测地点	湖南湘潭市湘乡市	检测时间	2025-03-08
29	检测对象	300 焊条电弧焊焊缝	检测方式	2.5MHz 纵波
30	检测目的	化学腐蚀	检测标准	GB
31	检测标准	GB/T 19151.2-2023	检测范围	工作一次范围 100-150mm
32	检测时间	2025-03-08	检测地点	1楼
33	检测人员	王强	检测单位	湖南省特种设备检验检测研究院
34	检测地点	湖南湘潭市湘乡市	检测时间	2025-03-08
35	检测对象	300 焊条电弧焊焊缝	检测方式	2.5MHz 纵波
36	检测目的	化学腐蚀	检测标准	GB
37	检测标准	GB/T 19151.2-2023	检测范围	工作一次范围 100-150mm
38	检测时间	2025-03-08	检测地点	1楼
39	检测人员	王强	检测单位	湖南省特种设备检验检测研究院
40	检测地点	湖南湘潭市湘乡市	检测时间	2025-03-08
41	检测对象	300 焊条电弧焊焊缝	检测方式	2.5MHz 纵波
42	检测目的	化学腐蚀	检测标准	GB
43	检测标准	GB/T 19151.2-2023	检测范围	工作一次范围 100-150mm
44	检测时间	2025-03-08	检测地点	1楼
45	检测人员	王强	检测单位	湖南省特种设备检验检测研究院
46	检测地点	湖南湘潭市湘乡市	检测时间	2025-03-08
47	检测对象	300 焊条电弧焊焊缝	检测方式	2.5MHz 纵波
48	检测目的	化学腐蚀	检测标准	GB
49	检测标准	GB/T 19151.2-2023	检测范围	工作一次范围 100-150mm
50	检测时间	2025-03-08	检测地点	1楼
51	检测人员	王强	检测单位	湖南省特种设备检验检测研究院
52	检测地点	湖南湘潭市湘乡市	检测时间	2025-03-08
53	检测对象	300 焊条电弧焊焊缝	检测方式	2.5MHz 纵波
54	检测目的	化学腐蚀	检测标准	GB
55	检测标准	GB/T 19151.2-2023	检测范围	工作一次范围 100-150mm
56	检测时间	2025-03-08	检测地点	1楼
57	检测人员	王强	检测单位	湖南省特种设备检验检测研究院
58	检测地点	湖南湘潭市湘乡市	检测时间	2025-03-08
59	检测对象	300 焊条电弧焊焊缝	检测方式	2.5MHz 纵波
60	检测目的	化学腐蚀	检测标准	GB
61	检测标准	GB/T 19151.2-2023	检测范围	工作一次范围 100-150mm
62	检测时间	2025-03-08	检测地点	1楼
63	检测人员	王强	检测单位	湖南省特种设备检验检测研究院
64	检测地点	湖南湘潭市湘乡市	检测时间	2025-03-08
65	检测对象	300 焊条电弧焊焊缝	检测方式	2.5MHz 纵波
66	检测目的	化学腐蚀	检测标准	GB
67	检测标准	GB/T 19151.2-2023	检测范围	工作一次范围 100-150mm
68	检测时间	2025-03-08	检测地点	1楼
69	检测人员	王强	检测单位	湖南省特种设备检验检测研究院
70	检测地点	湖南湘潭市湘乡市	检测时间	2025-03-08
71	检测对象	300 焊条电弧焊焊缝	检测方式	2.5MHz 纵波
72	检测目的	化学腐蚀	检测标准	GB
73	检测标准	GB/T 19151.2-2023	检测范围	工作一次范围 100-150mm
74	检测时间	2025-03-08	检测地点	1楼
75	检测人员	王强	检测单位	湖南省特种设备检验检测研究院
76	检测地点	湖南湘潭市湘乡市	检测时间	2025-03-08
77	检测对象	300 焊条电弧焊焊缝	检测方式	2.5MHz 纵波
78	检测目的	化学腐蚀	检测标准	GB
79	检测标准	GB/T 19151.2-2023	检测范围	工作一次范围 100-150mm
80	检测时间	2025-03-08	检测地点	1楼
81	检测人员	王强	检测单位	湖南省特种设备检验检测研究院
82	检测地点	湖南湘潭市湘乡市	检测时间	2025-03-08
83	检测对象	300 焊条电弧焊焊缝	检测方式	2.5MHz 纵波
84	检测目的	化学腐蚀	检测标准	GB
85	检测标准	GB/T 19151.2-2023	检测范围	工作一次范围 100-150mm
86	检测时间	2025-03-08	检测地点	1楼
87	检测人员	王强	检测单位	湖南省特种设备检验检测研究院
88	检测地点	湖南湘潭市湘乡市	检测时间	2025-03-08
89	检测对象	300 焊条电弧焊焊缝	检测方式	2.5MHz 纵波
90	检测目的	化学腐蚀	检测标准	GB
91	检测标准	GB/T 19151.2-2023	检测范围	工作一次范围 100-150mm
92	检测时间	2025-03-08	检测地点	1楼
93	检测人员	王强	检测单位	湖南省特种设备检验检测研究院
94	检测地点	湖南湘潭市湘乡市	检测时间	2025-03-08
95	检测对象	300 焊条电弧焊焊缝	检测方式	2.5MHz 纵波
96	检测目的	化学腐蚀	检测标准	GB
97	检测标准	GB/T 19151.2-2023	检测范围	工作一次范围 100-150mm
98	检测时间	2025-03-08	检测地点	1楼
99	检测人员	王强	检测单位	湖南省特种设备检验检测研究院
100	检测地点	湖南湘潭市湘乡市	检测时间	2025-03-08

图2 渗漏检测报告

4.1 应用效果

修复后对变压器进行试运行, 截止目前运行时间近1年, 期间定期检测加强筋焊缝密封性与漆膜状态。检测结果显示, 焊缝无渗漏现象, 漆膜表面完好, 无鼓包、脱落等损伤; 变压器油质检测指标(介损、击穿电压、水分含量)均符合

参考文献:

- [1] GB/T6451-2015,油浸式电力变压器[S].
- [2] JB/T6062-2007,焊缝渗透检测[S].
- [3] JB/T6061-2007,焊缝超声波检测[S].
- [4] 王强.电力变压器故障诊断与维修技术[M].北京:中国电力出版社,2020.
- [5] 李明.张华.刘军.变压器油箱焊缝渗漏修复工艺研究[J].电力设备,2019,20(8):45-49.
- [6] 赵伟.焊接工艺参数对变压器油箱焊缝质量的影响[J].焊接技术,2021,50(3):32-35.
- [7] 孙涛.王莉.陈峰.变压器加强筋结构优化与焊接工艺改进[J].电工技术学报,2022,37(12):2987-2995.
- [8] GB/T7595-2017,运行中变压器油质量[S].
- [9] 刘向明.智能焊接技术在电力设备修复中的应用[J].自动化与仪器仪表,2020(6):123-125.
- [10] 张国栋.李娜.低热量焊接材料的研发与应用进展[J].焊接材料,2021,54(4):1-6.

GB/T7595-2017《运行中变压器油质量》标准要求。该案例表明,本文提出的焊接修复工艺可有效解决实际工程中的加强筋渗漏问题,修复效果可靠。

5 结论

本文针对变压器加强筋焊缝渗漏问题,系统开展焊接修复工艺研究,得出以下结论:

加强筋渗漏缺陷主要分为气孔、砂眼与微裂纹三类,成因包括焊接材料不合格、焊接工艺参数不合理、结构设计缺陷及运行环境影响等多方面因素,需针对性制定修复方案。

构建的“准备-检测-修复-检验-收尾”全流程焊接修复工艺体系,明确了各环节的技术要求、操作规范与质量控制要点,可有效指导加强筋渗漏修复作业,确保修复质量。

本文研究成果为变压器加强筋渗漏修复提供了科学的工艺指导,可降低变压器运维成本,提高电力系统运行可靠性。后续研究将进一步优化工艺参数,开发智能化修复设备,推动修复工艺的升级与推广应用。