

焊接缺陷成因诊断与质量改进的PDCA循环应用研究

曹建虎

石油化工工程质量监督总站 天津 300271

摘要：焊接作为制造业核心连接技术，其质量直接决定装备可靠性与使用寿命。焊接缺陷的频繁出现不仅增加生产成本，还可能引发安全事故。PDCA循环作为系统性质量改进工具，具备闭环管理特性，适配焊接质量的全流程管控。本文基于PDCA循环理论，构建“计划-执行-检查-处理”全流程焊接质量改进体系，重点分析气孔、裂纹、未焊透等典型缺陷的成因诊断方法，结合实例验证该体系的应用效果。因此，PDCA循环可有效提升焊接缺陷诊断精度与质量改进效率，为制造业焊接质量管控提供科学可行的解决方案。

关键词：焊接缺陷；成因诊断；PDCA循环；质量改进；闭环管理

引言：在石油化工、机械制造、压力管道、压力容器等制造领域，焊接质量是保障装备安全运行的关键。当前焊接生产中，受材料特性、工艺参数、操作技能等多因素影响，气孔、裂纹、夹渣等缺陷时有发生，严重制约产品质量升级。传统焊接质量管控多采用事后补救模式，缺乏系统性与前瞻性，难以从根源上解决缺陷问题。PDCA循环作为国际通用的质量改进方法，通过持续迭代的闭环管理，实现问题的精准定位与长效改进。

1 焊接质量改进的核心理论基石探究

1.1 焊接典型缺陷分类及危害

焊接缺陷指焊接过程中形成的不符合设计与标准要求的缺陷，按形成位置可分为外部缺陷与内部缺陷。外部缺陷包括焊缝成形不良、咬边、未焊满、飞溅过多等，直观可见且易引发应力集中；内部缺陷涵盖气孔、裂纹、未焊透、夹渣等，隐蔽性强，是导致结构失效的主要诱因。不同缺陷危害存在差异：裂纹作为最危险的缺陷，在受力状态下易快速扩展，引发焊接结构断裂，如压力容器焊接裂纹可能导致介质泄漏甚至爆炸；气孔会降低焊缝致密性与力学性能，削弱接头强度与耐腐蚀性。在航空航天领域，焊接缺陷可能导致零部件失效，引发严重安全事故；在民用建筑领域，钢结构焊接缺陷会影响建筑稳定性，缩短使用寿命^[1]。

1.2 PDCA循环理论核心内涵

PDCA循环由美国质量管理专家戴明提出，又称戴明环，核心内涵是通过“计划（Plan）-执行（Do）-检查（Check）-处理（Act）”四个阶段的持续循环，实现质量的渐进式提升。计划阶段需明确质量目标、分析现状、识别问题、制定解决方案与实施计划；执行阶段按照计划落实具体措施，同步开展人员培训与过程管控；检查阶段对比实际结果与计划目标，评估措施实施

效果，识别存在的偏差；处理阶段总结成功经验并标准化，将未解决问题转入下一轮循环。PDCA循环具有闭环性、持续性、系统性特点，打破传统质量管控的碎片化模式，通过多轮迭代实现问题的逐步解决与质量的持续优化，已广泛应用于制造业、服务业等多个领域的质量改进工作。

1.3 PDCA循环与焊接质量改进的适配性

焊接质量形成过程具有多环节、多因素交互的特点，从材料采购、坡口加工、装配定位到焊接操作、焊后处理，每个环节均可能引发缺陷，需系统性管控。PDCA循环的系统性与闭环性的特点与焊接质量改进需求高度适配：计划阶段可针对焊接生产全流程进行风险分析，精准定位缺陷高发环节与关键影响因素，制定针对性管控措施；执行阶段可规范焊接操作流程，落实工艺参数管控，确保措施有效落地；检查阶段通过多元化检测手段验证质量改进效果，及时发现实施过程中的问题；处理阶段将成熟经验转化为标准流程，实现质量管控的常态化与标准化。此外，焊接质量改进并非一蹴而就，需通过多轮优化逐步提升，PDCA循环的持续性可满足这一需求，通过每轮循环的复盘与改进，不断提升焊接质量稳定性。

2 基于PDCA循环的焊接缺陷成因诊断体系构建

2.1 计划阶段（Plan）：目标设定与问题分析

计划阶段是PDCA循环基础，核心是明确焊接质量改进目标、分析缺陷现状与成因并制定实施计划。首先，结合企业实际与行业标准设定量化目标，如将焊缝合格率从92%提至97%，关键缺陷发生率降至3%以下。其次，开展缺陷现状调研，统计近6个月焊接数据，明确缺陷类型分布、高发工序与部位，如压力管道焊接中气孔缺陷占比24%，集中在打底焊工序。最后，用鱼骨图从

人、机、料、法、环五个维度分析成因，如人员操作技能不足、设备参数不稳定、材料质量不达标、防风措施不到位等。基于分析制定针对性计划，包括开展技能培训、检修设备、优化工艺参数等，并明确各措施的责任部门、实施时间与考核标准。

2.2 执行阶段 (Do)：措施落地与过程管控

执行阶段需严格按照计划落实各项措施，同时强化过程管控，确保改进方向不偏离目标。针对人员技能不足问题，组织开展专项培训，内容涵盖焊接工艺规范、缺陷预防技巧、设备操作要点等，培训后进行理论与实操考核，考核合格后方可上岗；通过案例分享、质量奖惩机制提升员工质量意识。安排专业人员对焊机、焊枪等设备进行全面检修与校准，更换老化零部件，建立设备定期维护台账，确保设备参数稳定；引入智能焊机实现焊接参数的自动化调控，减少人为操作误差。材料管控上，严格执行原材料入库检验制度，杜绝不合格焊丝、焊条投入使用；规范母材预处理流程，明确表面清理标准与验收要求。通过试验确定最优焊接参数，如针对TP304/304L双牌号不锈钢管道焊接，管材规格 $\phi 168 \times 11\text{mm}$ 。选用钨极气体保护焊+焊条电弧焊(GTAW+SMAW)的焊接方法，焊丝型号ER308L，焊条型号E308L-16。确定GTAW焊接电流115-130A、电压14-16V、焊接速度5-6cm/min；确定SMAW焊接电流105-145A、电压22-26V、焊接速度7-12cm/min；优化坡口设计与装配间隙，减少未焊透缺陷。环境管控上，确保焊接环境湿度低于60%，施焊风速小于2m/s，设置防风罩避免风速对焊接过程的影响。执行过程中，安排质量专员实时巡查，记录关键数据，及时纠正不规范操作^[2]。

2.3 检查阶段 (Check)：效果评估与偏差识别

检查阶段的核心是对比实际结果与计划目标，全面评估措施实施效果，精准识别存在的偏差。采用多元化检测手段对焊接质量进行全面检验，包括外观检查、无损检测(UT超声检测、RT射线检测、MT磁粉检测)及力学性能试验。外观检查重点排查焊缝成形、咬边、未焊满等缺陷；无损检测精准识别内部气孔、裂纹、夹渣等缺陷；力学性能试验检测焊缝的抗拉强度、冲击韧性等指标，验证焊接接头性能。统计分析检测数据，对比改进前后缺陷发生率、焊缝合格率等关键指标，例如改进后焊缝合格率从92%提升至97%，气孔缺陷发生率从24%降至2%，基本达成计划目标。同时，识别实施过程中的偏差，如部分老员工仍存在习惯性不规范操作，智能焊机参数适配性需进一步优化，这些问题将作为下一轮循环的重点改进方向。

2.4 处理阶段 (Act)：经验固化与持续改进

处理阶段是实现质量持续提升的关键，需总结成功经验并标准化，同时梳理未解决问题转入下一轮循环。针对改进过程中验证有效的措施，如优化后的焊接工艺参数、设备维护流程、材料预处理标准等，纳入企业《焊接质量管控规范》，形成标准化作业指导书，确保全员严格执行。开展复盘会议，总结本次循环的经验与不足，分析偏差产生的原因。将未解决的问题明确为下一轮PDCA循环的目标，制定针对性改进计划，如开展老员工专项技能提升培训，联合设备厂家优化焊机参数设置，通过多轮循环持续提升焊接质量。

3 实例应用分析

3.1 案例背景

某大型项目不锈钢压力管道安装，焊接作为核心工序，焊缝合格率持续维持在92%-94%，气孔、未焊透等缺陷频发，不仅增加返工成本，还因焊接质量问题影响现场进度。为解决这一问题，企业引入PDCA循环理论，构建焊接质量改进体系，选取一个单元压力管道对接焊缝为试点，该工序主要采用氩电联焊，母材材质为TP304/304L双牌号不锈钢，管材规格为 $\phi 168 \times 11\text{mm}$ 。分析近2周焊接缺陷以气孔(占比45%)和未焊透(占比18%)为主。

3.2 PDCA循环实施过程

(1) 计划阶段：明确试点工序质量目标，将焊缝合格率从92%提升至98%，气孔与未焊透缺陷发生率均降至3%以下。通过鱼骨图分析确定缺陷主要成因：操作工技能参差不齐、焊接电流与电压匹配不合理、母材表面油污清理不彻底、坡口间隙不均匀。制定改进计划，包括开展技能培训、优化焊接参数、规范母材预处理与装配流程，明确各措施实施周期与责任人员。

(2) 执行阶段：组织8名焊接员工开展为期1天的专项培训，重点讲解TP304/304L双牌号不锈钢焊接工艺、气孔与未焊透缺陷预防技巧，培训后考核通过率达100%。编制管道焊接工艺卡发放至每位员工。规范管道焊接的各项工艺参数，要求采用机械打磨结合化学清洗的方式去除表面油污与氧化皮，清理范围不小于坡口两侧20mm；优化装配工序，使用专用工装保证坡口间隙均匀(2-3mm)，减少装配误差；严格控制焊材烘烤、发放和使用流程；保证环境因素如湿度、风速等满足施焊要求。焊前由专人检查验收。

(3) 检查阶段：试点实施1个月，共抽取600道对接焊缝进行检测，结果显示焊缝合格率提升至97.2%，气孔缺陷发生率降至2%，未焊透缺陷发生率降至0.5%，接近

计划目标。同时发现部分员工在焊接过程中存在电流微调不及时的问题,导致少数焊缝成形稍差。

(4) 处理阶段:将优化后的焊接参数、母材预处理标准、装配流程纳入企业标准,在全公司焊接工序推广^[3]。针对员工电流微调不及时的问题,制定专项培训计划,重点强化动态参数调控技能,转入下一轮PDCA循环持续改进。

3.3 应用效果总结

通过PDCA循环的应用,试点工序焊缝合格率从92%提升至97.2%,缺陷发生率大幅降低,返工成本减少26%,工期周期缩短7%。后续通过多轮PDCA循环优化,企业整体焊接焊缝合格率稳定在98%以上,核心产品焊接质量达到行业先进水平,市场竞争力显著增强。

4 焊接质量改进的关键保障措施

4.1 人员保障

人员是焊接质量控制的核心要素,需建立完善的人员管理体系。构建分层级培训机制,针对新员工开展岗前系统培训,针对在岗员工开展定期技能提升培训与新技术、新工艺培训,确保员工技能与生产需求匹配。建立焊接人员资质认证体系,实行持证上岗,明确不同等级焊工的作业范围。完善激励机制,将焊接质量与绩效工资、评优评先直接挂钩,对质量优秀的员工给予奖励,对因操作不当引发缺陷的员工进行处罚,激发员工质量管控积极性。加强质量文化建设,通过质量讲座、案例分析、宣传栏等形式,强化全员质量意识,形成“人人重视质量、人人管控质量”的良好氛围。

4.2 技术保障

技术创新是提升焊接质量的重要支撑。加大技术研发投入,引入先进焊接技术,如机器人焊接、激光焊接等,减少人为操作对焊接质量的影响;建立焊接工艺数据库,整合不同材质、不同结构的最优焊接参数、工艺方案等数据,为生产提供技术支撑。加强与科研院校、

行业协会的合作,开展焊接质量改进专项研究,攻克复杂结构焊接、特殊材质焊接等技术难题^[4]。

4.3 管理保障

完善的管理体系是焊接质量改进的重要保障。建立全流程质量管控体系,覆盖材料采购、坡口加工、装配、焊接、焊后处理等各个环节,明确各环节质量标准、责任主体与验收要求。加强质量管理信息化建设,引入质量管控系统,实现焊接生产数据、检测数据的实时采集、分析与共享,提升质量管控的精准度与效率。建立定期质量审核机制,组织专业人员对焊接质量管控流程、标准执行情况进行审核,及时发现管理漏洞并整改。

结束语

本文围绕焊接缺陷成因诊断与质量改进,深入探讨PDCA循环在焊接领域的应用。通过构建全流程改进体系,结合实例验证其有效性,显著提升焊接质量与缺陷诊断精准度。同时,提出人员、技术、管理等多方面保障措施。实践表明,科学运用PDCA循环并配套相应保障,能有效解决焊接缺陷问题,推动制造业焊接质量持续优化,增强企业市场竞争力,为行业质量管控提供有益借鉴。

参考文献

- [1]冯志强,曾宪平,方乃文,等.结合邻域粗糙集与优化SVM的多信息融合焊接缺陷识别[J].焊接学报,2025,46(5):50-60.
- [2]徐东辉,孟范鹏,孙鹏,等.基于深度学习的GMAW焊接缺陷在线监测[J].焊接学报,2024,45(3):114-119.
- [3]张树坤,王志坤,吕加华,等.输氢管道焊接接头及缺陷处氢扩散机制的仿真模拟研究[J].有色金属(中英文),2025,15(2):225-230.
- [4]刘剑,段瑞彬,崔琬婷,等.基于改进MaskR-CNN的焊接成形缺陷检测与区域分割研究[J].电焊机,2025,55(9):98-101,144.