

承压设备焊缝常见缺陷检验及防范对策探讨

王建军

内蒙古自治区特种设备检验研究院 内蒙古 呼和浩特 010020

摘 要：承压设备焊缝质量直接关系到设备运行安全，是特种设备质量管控的核心环节。本文以压力容器、压力管道等常用承压设备焊缝为研究对象，结合现场施工与检验经验，梳理焊缝结构工况特点与成型原理，系统归类气孔、裂纹、未熔合、外观不良等常见缺陷，分析各类缺陷的实际产生诱因。同时对比外观检验、各类无损检测及破坏性检验的适用场景与操作要点，从焊前、焊中、焊后全施工环节提出针对性防控及缺陷闭环处置对策，可为承压设备焊接质量控制与安全检验提供实际参考。

关键词：承压设备；焊缝缺陷；无损检测；质量检验；防控对策

引言：承压设备广泛应用于化工、能源、供热等关键领域，长期承受压力、温差及腐蚀介质作用，运行风险较高。焊缝作为设备主要连接部位，极易因施工工艺、操作规范、环境条件等因素产生各类缺陷，多数缺陷会在服役过程中持续扩展，引发泄漏、开裂等安全事故。当前现场焊接施工仍存在工艺管控不严、缺陷检出不准、整改不规范等问题。为有效降低焊缝缺陷发生率、提升设备安全稳定性，本文结合工程实际，系统分析焊缝缺陷成因、检验方法及防控措施，为现场质量管控提供技术支撑。

1 承压设备焊缝基础理论

1.1 承压设备焊缝结构特点与服役工况

承压设备主要包含压力容器、压力管道、锅炉等特种设备，其焊缝是设备本体的关键连接结构，也是整体强度最薄弱的部位。相较于普通钢结构焊缝，承压设备焊缝多为全熔透对接、角接组合结构，要求焊缝与母材等强，成型均匀连续，无结构性缺口缺陷。设备实际服役过程中，焊缝长期承受内介质压力、交变载荷、温度波动等多重作用，部分工况还会接触腐蚀介质、低温或高温环境。复杂的服役条件易让焊缝产生应力集中，在疲劳荷载和介质腐蚀叠加作用下，微小缺陷会持续扩展，极易引发泄漏、开裂甚至爆炸事故，因此焊缝结构稳定性直接决定承压设备的运行安全。

1.2 焊缝成型核心工艺原理

承压设备焊缝成型以熔化焊工艺为主，核心原理是通过电弧、热能等热源使母材坡口与填充金属快速熔化，形成熔池，经冷却凝固后形成一体的焊接接头。焊接过程中，熔池的温度、冷却速度、保护氛围直接影响焊缝成型质量。正常成型的焊缝，金属晶粒组织均匀，熔合线过渡平滑，内

部结构致密。若焊接热输入不稳定、坡口处理不到位、保护气体失效，会导致熔池成型不良，出现熔合不充分、冷却收缩不均等问题，进而产生各类原生缺陷。焊接过程中的热应力和残余应力，会残留在焊缝及热影响区，为后续缺陷萌生和扩展埋下隐患^[1]。

2 承压设备焊缝常见缺陷类型及成因

承压设备焊缝受工艺、操作、环境条件影响容易产生各类缺陷。缺陷会破坏焊缝结构完整性，削弱接头力学性能，在压力、温度交变与腐蚀介质共同作用下持续扩展，带来设备泄漏、开裂等安全风险。结合工程实践，焊缝常见缺陷可分为三类：（1）体积类缺陷。以气孔、夹渣最为多见。气孔产生原因包括坡口与焊材受潮，坡口表面油污、锈蚀清理不到位，保护气体纯度偏低、供气不稳，熔池内气体凝固前难以逸出。夹渣多发于多层多道焊缝，层间焊渣清除不彻底、焊接电流偏小、焊接速度过快，熔池搅拌不充分，杂质无法上浮滞留于焊缝内部，缩减有效承载面积，破坏焊缝致密性。（2）面状缺陷。包含裂纹、未焊透、未熔合，危险程度最高。坡口角度不足、组对间隙偏小、焊枪角度偏差、热输入不足，容易引发未焊透与未熔合。裂纹分为热裂纹和冷裂纹：焊材硫、磷杂质偏高、冷却速度过快易产生热裂纹；母材淬硬性较大、残余应力集中，缺少焊后消氢处理，则易诱发冷裂纹。（3）外观成型缺陷。主要有咬边、焊瘤、塌陷。电流偏大、电弧拉长、运条不稳造成母材边缘烧蚀形成咬边；熔池温度过高、冷却缓慢，液态金属堆积形成焊瘤；仰焊、横焊工况下参数控制不当，受熔池重力作用，易出现焊缝塌陷，外观成型不符合验收要求^[2]。

3 承压设备焊缝缺陷常用检验技术及应用

3.1 外观目视检验技术及适用范围

外观目视检验是承压设备焊缝检验的第一道工序，主要依托人工辅助简单工具完成焊缝表面质量筛查，为后续精准检测提供基础判定依据。该技术贯穿焊后初检、设备定期巡检、返修复检全流程。（1）检验操作方式。现场检验以裸眼目视观测为主，搭配焊缝尺、钢直尺、手电筒等简易工具，对焊缝整体成型状态、表面形貌进行全面检查。针对设备死角、管道内侧、高空焊缝等可视性较差的位置，借助内窥镜、反光镜辅助观测，避免检测盲区。检验前需清理焊缝表面的焊渣、飞溅、锈蚀及油污，保证焊缝区域干净整洁，确保检测结果真实准确。（2）核心检验内容与适用范围。该技术主要排查焊缝表面可见缺陷，包括咬边、焊瘤、表面气孔、表面裂纹、焊缝未填满、错边、余高超标、焊接变形等外观问题。依据现行承压设备检验标准，所有承压设备焊缝均需100%开展外观目视检验，无特殊豁免工况。该技术适用于压力容器、压力管道、锅炉等各类承压设备的出厂检验、安装验收及在用定期检验，可快速筛选不合格焊缝，筛选出需进一步无损检测的重点检测部位。

3.2 无损检测技术应用要点

无损检测技术广泛应用于设备出厂验收、现场安装及在用设备定期检测中。四类常用无损检测技术实操要点各有侧重，适配不同焊缝结构与缺陷类型。（1）射线检测（RT）。该技术依托射线穿透焊缝金属，通过底片成像呈现内部缺陷形态，直观性强、可留存永久记录，主要用于检测焊缝内部气孔、夹渣、未焊透、未熔合等体积型、平面型缺陷。现场应用中，薄板对接焊缝、管道环向对接焊缝优先采用射线检测，不适用于厚壁焊缝、角焊缝及厚度不均的异形焊缝，检测效率偏低，且射线存在辐射风险，作业时需划定安全警戒区域，做好防护措施。（2）超声检测（UT）。该技术利用超声波反射原理识别焊缝内部缺陷位置、大小及埋藏深度，检测灵敏度高、无辐射、作业便捷，成本较低。主要适配中厚壁压力容器对接焊缝、厚壁管道焊缝检测，对裂纹、未熔合等危害性平面缺陷检出率极高。实操中需根据母材厚度、材质调校检测参数，做好探头校准工作，避免因参数偏差导致缺陷误判、漏判，缺点是缺陷成像不直观，依赖检测人员实操经验。（3）磁粉检测（MT）。该技术仅适用于铁磁性材料焊缝，通过磁化焊缝表面，利用磁粉聚集痕迹判定表面及近表面裂纹、发纹等细微缺陷。操作简单、检测速度快，多

用于碳钢、低合金钢承压设备焊缝的表面缺陷筛查，尤其适配焊缝热影响区细微裂纹检测。检测后需对焊缝进行退磁处理，避免残留磁性吸附杂质，影响设备后续运行。（4）渗透检测（PT）。该技术适用于不锈钢、铝合金等非铁磁性材料焊缝，以及所有材质焊缝的开口性表面缺陷检测。通过渗透、清洗、显像三道工序，清晰呈现焊缝表面开口裂纹、细微气孔等缺陷。该技术不受材料磁性、结构形状限制，适合异形焊缝、狭小位置焊缝检测，仅能检测表面开口缺陷，无法排查内部埋藏缺陷^[3]。

3.3 破坏性检验技术的操作规范与应用场景

破坏性检验属于抽样检测技术，通过截取焊接试板、试样进行力学性能及金相试验，直观判定焊缝焊接工艺合规性与接头综合性能，检测结果精准可靠，可作为验证焊接工艺、评定焊缝质量的最终依据。（1）核心操作规范。承压设备破坏性检验严格遵循现行焊接工艺评定标准，试样需取自同批次、同工艺、同操作人员焊接的试板，保证试样代表性。常用检测项目包含拉伸试验、弯曲试验、冲击试验、金相组织分析，分别检测焊缝接头抗拉强度、塑性、韧性及内部金相结构。试验过程需标准化操作，全程记录试验数据，试样截取、加工、试验流程均需符合国标要求，杜绝操作偏差影响检测结果。（2）实际应用场景。该技术主要用于新焊接工艺评定、焊工技能考核、批量设备焊接质量抽检、重大设备出厂质量验证。针对首次采用的焊接工艺、新材料焊接作业，必须通过破坏性检验验证工艺可行性；特种设备批量生产过程中，定期抽样开展破坏性检测，把控整体焊接质量；工程验收出现质量争议时，可通过破坏性试验出具权威检测结论，作为质量判定依据^[4]。

4 承压设备焊缝缺陷针对性防范对策

4.1 焊前：原材料管控与工艺方案优化

焊前准备是预防焊缝原生缺陷的基础环节，材料质量不合格、工艺方案不合理是前期缺陷滋生的主要诱因，需从材料核验和工艺策划两方面严格把控。（1）严格原材料与焊材质量管控。承压设备母材、焊条、焊丝、焊剂等核心材料进场后，必须核对材质证明、出厂检验报告，严禁使用无资质、参数不符的材料。针对碳钢、低合金钢、不锈钢等常用母材，重点核查硫、磷等有害杂质含量，杜绝杂质超标引发焊接裂纹。焊材需按规范分类存放，库房保持干燥通风，严格控制温湿度；受潮、锈蚀、药皮脱落的焊条必须报废处理，使用前按对应材质要求进行烘干、保温，避免焊材含水导致焊缝产生气孔、夹渣缺陷。（2）优化焊接工艺方案与技术交底。施工前需根据设备材质、壁厚、服役工况编制专项

焊接工艺文件,严格按照焊接工艺评定结果确定焊接电流、电压、焊接速度、层间温度等核心参数,杜绝凭经验随意调整工艺。针对厚壁焊缝、低温工况、腐蚀环境下的承压设备,提前制定预热、层间控温、焊后缓冷等专项措施,规避冷裂纹、热应力缺陷。

4.2 焊中:焊接过程动态质量管控

焊接施工过程是缺陷产生的核心阶段,现场操作不规范、过程管控不到位极易引发未焊透、未熔合、咬边、裂纹等危害性缺陷,需实施全过程动态监督管控。(1)规范现场焊接操作流程。施焊前核对坡口尺寸、组对间隙、错边量,杜绝组对超标强行施焊。焊接过程中严格执行既定工艺参数,保持稳定的运条速度和电弧长度,避免电流过大造成咬边、烧穿,或电流过小引发熔合不良、夹渣问题。多层多道焊施工时,每完成一道焊缝需彻底清理层间焊渣,检查无缺陷后再进行下一道焊接,防止层间杂质残留。针对仰焊、横焊等难度较大的焊接位置,调整操作手法,控制熔池大小,防止熔池金属下坠形成焊瘤、塌陷缺陷。(2)强化过程质量监督与环境管控。现场安排专职质检人员全程旁站监督,及时纠正焊工违规操作、参数随意改动等问题,对关键焊缝、承压主焊缝实行全程质量跟踪。同时严控焊接作业环境,雨雪、大风、低温等恶劣天气下,未采取防护措施禁止露天施焊,避免环境因素干扰熔池成型,引发气孔、裂纹等缺陷。焊接过程中严格把控层间温度,避免温差过大产生焊接残余应力,减少应力型缺陷萌生。

4.3 焊后:精准检验与缺陷及时处置机制

焊后检验与缺陷处置是把控成品质量、杜绝不合格设备投用的关键,需依托标准开展精准检测,建立闭环整改机制,消除设备安全隐患。(1)落实标准化焊后检验工作。焊缝冷却至规定温度后,先完成100%外观目视检验,排查咬边、焊瘤、表面裂纹等可见缺陷,对外观合格的焊缝,按照NB/T47013及设备监察规程要求,开

展射线、超声、磁粉等无损检测。根据设备压力等级、介质特性确定检测比例与合格等级,重点对管道环焊缝、容器对接焊缝等关键部位加强检测,杜绝漏检、抽检不到位的问题。检测过程规范操作,精准判定缺陷位置、大小与性质,为缺陷整改提供准确依据。(2)建立缺陷闭环处置与复盘机制。针对检验发现的超标缺陷,严禁私自补焊,需根据缺陷类型、尺寸制定专项返修方案,明确返修工艺、返修次数。气孔、夹渣等体积缺陷彻底打磨清除杂质后补焊;裂纹、未熔合等危害性缺陷需完全剔除缺陷区域,预热后规范补焊,返修完成后重新复检,直至达标。定期统计焊缝缺陷类型、产生位置及成因,复盘施工全过程,针对性优化工艺与管控流程^[5]。

结束语: 本文通过梳理承压设备焊缝基础特性、常见缺陷成因、主流检验技术及全流程防控措施,明确了不同缺陷的危害特点与适配检测方式。研究表明,焊缝质量隐患多源于施工全过程管控疏漏,只有落实焊前材料与工艺审核、焊中动态监督、焊后精准检测及闭环返修,才能从源头控制缺陷产生。

参考文献

- [1] 李永凯,包冲剑.无损检测技术在承压类特种设备检验检测中的应用研究[J].中国标准化,2026,(12):215-219.
- [2] 韩培,孔繁坤.承压特种设备检验检测中的裂纹问题探究[J].中国科技期刊数据库工业A,2024,(4):137-140.
- [3] 刘伟.无损检测技术在承压类特种设备检验中的应用研究[J].中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术,2025,(11):082-086.
- [4] 高扶田,胡雪宁.基于磁化阵列涡流检测的压力容器焊缝缺陷检测方法分析[J].冶金与材料,2025,45(6):166-168.
- [5] 庄宜德.浅述压力容器定期检验常见缺陷及处理对策[J].中国设备工程,2026,(12):166-168.