

# 压力容器焊接技术分析

韩志扬

内蒙古自治区特种设备检验研究院 内蒙古 呼和浩特 010000

**摘要:** 压力容器是工业生产核心设备,焊接质量直接决定其安全运行。本文围绕压力容器焊接技术展开分析,介绍了压力容器的定义、分类及焊接核心要求,阐述了焊条、焊丝、焊剂等常用焊接材料的类型、特性及匹配原则,详解了手工电弧焊、埋弧焊等常用工艺的技术要点,分析了裂纹、气孔等常见焊接缺陷的形成机理及检测技术。研究表明,合理选择焊接材料、规范执行焊接工艺、强化缺陷检测,能有效提升焊接质量。本文研究可为压力容器焊接施工、质量控制提供理论参考与实践指导。

**关键词:** 压力容器;焊接技术;材料选择;焊接工艺;缺陷检测

**引言:** 压力容器广泛应用于石油化工、能源电力等关键领域,其运行常处于高温、高压、腐蚀性环境,对焊接质量提出极高要求。焊接作为压力容器制造的核心工序,一旦存在缺陷,易引发泄漏、爆炸等重大安全事故,威胁人员生命与财产安全。当前,焊接技术不断发展,但在材料选择、工艺执行、缺陷防控等方面仍存在不足。基于此,本文系统分析压力容器焊接相关技术,梳理材料选择、工艺要点及缺陷检测方法,为提升压力容器焊接质量、保障设备安全稳定运行提供支撑。

## 1 压力容器概述及焊接技术核心要求

### 1.1 压力容器的定义、分类及应用场景

压力容器是指盛装气体或液体、承载一定压力的密闭设备,广泛应用于石油化工、能源电力、航空航天、医药食品等多个关键领域,是工业生产中不可或缺的核心设备。按承压等级可分为低压、中压、高压和超高压压力容器,按用途可分为反应容器、换热容器、分离容器和储存容器。其运行环境常伴随高温、高压、腐蚀性介质等复杂条件,对设备的密封性、强度和稳定性提出极高要求,而焊接作为压力容器制造的核心工序,直接决定设备的安全运行性能,一旦焊接质量不达标,易引发泄漏、爆炸等重大安全事故。

### 1.2 压力容器焊接的核心技术与规范要求

压力容器焊接的核心要求围绕安全性、可靠性和合规性展开,核心技术指标包括焊接接头强度、韧性、密封性及耐腐蚀性,需与母材性能匹配,确保焊接后无明显缺陷。同时,焊接过程需严格遵循国家及行业规范,如《压力容器安全技术监察规程》《钢制压力容器》等,明确焊接工艺参数、焊接材料选择、操作流程等要求。焊接人员需具备相应资质,严格控制焊接电流、电压、焊接速度等参数,避免出现裂纹、气孔等缺陷。此外,焊接

后的接头需满足耐压、耐温及耐腐蚀要求,适配压力容器的工作环境,保障设备长期稳定运行,从根本上杜绝安全隐患<sup>[1]</sup>。

## 2 压力容器焊接材料的选择与性能分析

### 2.1 常用焊接材料(焊条、焊丝、焊剂)的类型及特性

压力容器焊接常用材料主要包括焊条、焊丝、焊剂三类,各类材料的类型及核心技术特性如下:(1)焊条,按用途分为结构钢、不锈钢、耐热钢等类型,分别适配低碳钢、不锈钢、耐热钢压力容器,其携带方便、可手工操作,无需复杂辅助设备,但焊缝成形精度低、飞溅量大,性能受烘干程度影响显著。(2)焊丝,分为实心 and 药芯两类,实心焊丝需配合保护气体使用,焊缝成形均匀、杂质少;药芯焊丝自带焊剂,适配多种焊接方法,二者均焊接效率高、成形性好,便于自动化焊接,但对储存环境要求高,易受潮氧化。(3)焊剂,主要配合埋弧焊使用,分熔炼和烧结两种,熔炼焊剂稳定性好、成本低,烧结焊剂脱渣性强、焊缝质量优,能隔绝空气、保护熔池并脱氧脱硫,但需与焊丝匹配使用。

### 2.2 焊接材料与压力容器母材的匹配原则

焊接材料选择的核心是与母材性能匹配,确保焊接接头满足运行要求,具体原则如下:(1)强度匹配,焊接材料的抗拉、屈服强度需与母材相当或略高,避免接头强度不足断裂,也不可过高以防韧性下降产生裂纹。(2)材质匹配,根据母材材质选择对应焊接材料,如低碳钢用结构钢焊条/焊丝,不锈钢用不锈钢焊接材料,防止焊缝脆化、耐腐蚀性下降。(3)工况适配,结合容器高温、高压、腐蚀性等工况,选择对应特性材料,确保接头长期适应工作环境。(4)工艺适配,焊接材料需适配所用焊接方法,如埋弧焊选用专用焊剂与焊丝组合,手工电弧焊选用对应焊条。

### 2.3 焊接材料的质量控制要点

焊接材料质量直接决定接头性能,需从多环节严格控制:(1)储存控制,存放于干燥通风库房,分类标识、避免混放,焊条、焊剂远离腐蚀物质,焊丝密封保存防锈。(2)烘干控制,焊条、焊剂使用前按规范烘干去水分杂质,如结构钢焊条300-400℃烘干1-2小时,烘干后保温存放防受潮。(3)使用控制,选用符合标准的材料,核对型号规格与母材、工艺的适配性,严禁使用过期、受潮材料,焊丝使用前去除表面油污铁锈。(4)追溯控制,建立台账,记录采购、储存、烘干、使用等信息,实现全程追溯,便于质量排查<sup>[2]</sup>。

## 3 压力容器常用焊接工艺及技术要点

### 3.1 手工电弧焊工艺及操作要点

手工电弧焊是压力容器焊接中最基础的工艺,核心在于操作规范性,具体工艺及技术要点如下:(1)工艺参数控制,根据母材厚度、焊条型号确定焊接电流,一般厚度越大、焊条直径越粗,电流越大,通常控制在80-200A;焊接电压控制在20-30V,电压过高易产生飞溅,过低则熔深不足;焊接速度保持均匀,一般为10-20cm/min,避免过快导致未焊透,过慢造成烧穿。(2)操作核心要点,引弧时采用划擦法或直击法,划擦法需快速划擦母材后提起焊条形成电弧,直击法需将焊条直接接触母材后迅速提起;运条时控制焊条角度,平焊时焊条与母材夹角为45°-60°,立焊、横焊时适当调整角度以保证熔池稳定;收尾时需缓慢断弧,反复断弧几次,避免产生弧坑裂纹。(3)工艺细节要求,焊接前需清理坡口及两侧20mm范围内的油污、铁锈,确保无杂质;多层多道焊时,每层焊缝需清理焊渣后再进行下一道焊接,层间温度控制在150-300℃,防止冷裂纹产生。

### 3.2 埋弧焊工艺在压力容器焊接中的应用

埋弧焊主要用于压力容器厚壁焊缝的自动化焊接,其工艺及技术要点重点关注参数匹配和操作规范:(1)工艺参数设定,焊接电流根据母材厚度和焊缝要求控制在500-1000A,熔深随电流增大而增加;焊接电压控制在28-40V,影响焊缝宽度和成形;焊接速度为30-60cm/min,需与电流、电压匹配,避免出现未熔合、焊瘤等缺陷;焊丝伸出长度控制在20-30mm,过长易导致电弧不稳定。(2)应用操作要点,焊接前需精准调整坡口尺寸,间隙控制在2-4mm,坡口角度为60°-70°,确保熔透;焊剂铺设厚度为20-40mm,均匀覆盖焊接区域,防止电弧外露;焊接时需保证焊丝与坡口中心线对齐,避免焊缝偏移;环焊缝焊接时,需调整工件转速,确保焊接速度均匀。(3)工艺注意事项,焊接过程中需及时补充焊剂,避

免出现漏焊;焊后需清理焊渣和飞溅物,检查焊缝成形,若出现缺陷需及时返修<sup>[3]</sup>。

### 3.3 气体保护焊(MAG/MIG/TIG)的技术优势与应用场景

气体保护焊分为MAG、MIG、TIG三种,核心技术要点围绕参数控制和保护效果,具体如下:(1)MAG焊技术要点,采用二氧化碳或混合气体作为保护气,焊接电流控制在100-300A,电压20-35V,焊接速度15-30cm/min;焊丝伸出长度10-20mm,保护气流量为15-25L/min,流量不足易产生气孔;操作时需保持焊条与母材夹角为30°-50°,避免保护气遮挡不足。(2)MIG焊技术要点,采用惰性气体保护,适用于不锈钢、铝合金容器焊接,焊接电流80-250A,电压18-30V,保护气流量10-20L/min;需严格控制焊丝纯度,避免杂质影响焊缝质量。(3)TIG焊技术要点,采用钨极作为电极,惰性气体保护,焊接电流50-150A,电压10-20V,焊接速度5-15cm/min;打底焊时需控制熔池大小,实现单面焊双面成形,钨极伸出长度5-10mm,避免钨极烧损。(4)应用场景要点,MAG焊适用于中薄壁碳钢、低合金钢容器焊接,MIG焊适用于不锈钢、铝合金容器,TIG焊适用于容器接管、法兰等关键部位打底焊。

### 3.4 其他特殊焊接工艺(等离子弧焊、窄间隙焊)的应用

等离子弧焊、窄间隙焊适用于压力容器特殊部位或厚壁容器焊接,工艺及技术要点如下:(1)等离子弧焊技术要点,采用等离子弧作为热源,焊接电流50-300A,等离子气流量2-5L/min,保护气流量8-15L/min;焊接时需控制喷嘴与母材距离为5-10mm,避免电弧发散;适用于薄壁容器、不锈钢容器及难熔金属焊接,可实现大熔深、高精度焊接。(2)等离子弧焊操作注意,需严格控制等离子弧的稳定性,避免出现断弧、弧偏吹等问题,焊前需清理坡口,确保无油污、铁锈。(3)窄间隙焊技术要点,坡口宽度控制在8-12mm,采用多层单道焊方式,焊接电流200-400A,电压25-35V,焊接速度10-20cm/min;需采用专用导向装置,保证焊丝对准坡口中心,避免未焊透;适用于厚壁压力容器焊接,可减少焊接层数,提高效率。(4)窄间隙焊注意事项,焊接过程中需控制层间温度,及时清理焊渣,确保焊缝成形均匀,避免出现夹渣、裂纹等缺陷<sup>[4]</sup>。

## 4 压力容器焊接缺陷的形成机理与检测技术

### 4.1 裂纹(热裂纹/冷裂纹)的生成条件与预防措施

裂纹是压力容器焊接中最危险的缺陷,主要分为热裂纹和冷裂纹,其生成条件与预防措施如下:(1)热

裂纹生成条件,焊接过程中熔池冷却速度过快,焊缝中硫、磷等杂质含量过高,形成低熔点共晶体,在焊接应力作用下沿晶界开裂;多产生于焊缝中心或熔合线附近,焊接电流过大、电压过高、焊接速度过快易诱发热裂纹。(2)冷裂纹生成条件,焊后冷却过程中,焊缝及热影响区组织硬化,焊接应力超过材料韧性极限,且母材含氢量过高,氢原子扩散聚集形成裂纹;多在焊后数小时至数天内产生,低温环境、厚壁焊接更易出现。(3)预防措施,严格控制焊接材料纯度,降低杂质含量;合理调整焊接参数,控制熔池冷却速度,避免组织硬化;焊前对母材和焊接材料进行烘干脱氢处理;焊后进行消应力热处理,释放焊接应力。

#### 4.2 气孔与夹渣的超声波检测信号特征分析

气孔与夹渣是压力容器焊接中常见的体积型缺陷,其超声波检测信号特征具有明显区别,具体分析如下:(1)气孔的超声波检测信号特征,单个气孔表现为脉冲幅度较高、波形尖锐的反射信号,信号宽度较窄,多次反射信号衰减较快;密集气孔表现为连续的、幅度不均匀的反射信号,无明显单一尖锐波形,底波会出现不同程度的衰减;气孔信号位置不稳定,探头移动时信号易消失或偏移。(2)夹渣的超声波检测信号特征,反射信号幅度中等,波形较平缓、宽度较宽,多次反射信号衰减较慢,有明显的连续性;夹渣信号位置相对固定,探头移动时信号强度逐渐变化,无突然消失现象;大尺寸夹渣会导致底波明显衰减,甚至消失,信号形态不规则。(3)检测注意要点,检测时需调整探头角度和灵敏度,区分气孔与夹渣信号,避免误判;结合缺陷位置、信号形态,初步判断缺陷类型和大致尺寸。

#### 4.3 未熔合缺陷的TOFD检测技术应用

未熔合是焊接接头未完全熔合的面状缺陷,TOFD检测技术是其核心检测方法,应用要点如下:(1)检测前

准备,清理焊接接头表面,去除油污、焊渣,确保表面平整;根据母材厚度调整TOFD探头角度和间距,选择合适的检测频率,一般为2-5MHz,确保检测覆盖整个焊缝区域。(2)检测操作要点,将探头对称布置在焊缝两侧,沿焊缝长度方向匀速移动,保持探头与焊缝中心线平行;同步记录检测信号,通过TOFD成像技术,清晰显示未熔合缺陷的位置、长度和高度,面状缺陷会呈现连续的反射波形。(3)应用注意事项,检测时需控制探头移动速度,避免漏检;对于厚壁容器,需采用多组探头组合检测,确保缺陷无检测盲区;结合超声波常规检测方法,验证缺陷检测结果,提高检测准确性,避免误判或漏判<sup>[5]</sup>。

结束语:本文对压力容器焊接技术进行了全面系统的分析,从焊接材料选择、焊接工艺执行到焊接缺陷检测,明确了各环节的核心要点与技术规范。焊接材料的合理匹配、工艺参数的精准控制、缺陷的有效检测,是保障压力容器焊接质量的关键。随着焊接技术的不断革新,智能化、高精度焊接工艺将广泛应用。未来需进一步优化焊接技术,完善质量控制体系,解决实际施工中的技术难题,持续提升压力容器焊接质量,推动压力容器行业安全、健康、有序发展。

#### 参考文献:

- [1]王伟.压力容器焊接技术分析[J].产业创新研究,2021(16):113-115.
- [2]林厚起.耐热钢压力容器焊接技术分析[J].冶金与材料,2023,43(1):86-88.
- [3]张维东,徐大为.压力容器焊接技术分析[J].模具制造,2023,23(5):109-111.
- [4]王荣军.基于无损检测的钢制压力容器焊接工艺控制技术[J].产品可靠性报告,2025(6):103-105.
- [5]傅春浩,田志勇,张锋.基于先进焊接技术的压力容器焊接接头优化方法[J].今日制造与升级,2025(6):47-49.