

不锈钢压力管道接管座焊接变形机理与控制措施研究

段 岩

吉林化纤集团有限责任公司 吉林 吉林 132012

摘 要：不锈钢压力管道接管座焊接变形直接影响管道系统安全与性能。研究表明，热输入产生的不均匀温度场、材料热物理性能差异、焊接接头拘束条件及工艺参数等是引发变形的关键因素。通过系统分析变形机理，提出优化焊接工艺参数、调整焊接顺序与方向、运用反变形法及实施焊前预热与焊后热处理等控制措施，可有效抑制焊接变形，为保障不锈钢压力管道工程质量、提升焊接工艺可靠性提供理论与实践依据。

关键词：不锈钢压力管道；接管座焊接；变形机理；控制措施

引言

随着工业领域对不锈钢压力管道需求的增长，其接管座焊接质量成为保障系统安全运行的核心环节。焊接过程中，不均匀温度场、材料特性差异及工艺参数不合理等因素，易导致接管座产生变形，影响管道密封性与承载能力。目前，针对不锈钢压力管道接管座焊接变形的系统性研究仍存在不足。本文通过深入剖析焊接变形机理，结合工程实践，提出有效控制措施，旨在为提升不锈钢压力管道焊接工艺水平、降低安全隐患提供技术支撑。

1 不锈钢压力管道接管座焊接工艺概述

不锈钢压力管道接管座焊接作为工业管道系统构建中的关键环节，直接影响管道承压能力与整体运行安全。其焊接工艺涉及多维度技术要点，需综合考虑材料特性、结构形式、服役环境等因素，以确保焊接接头具备良好的力学性能与耐腐蚀性能。不锈钢材料因铬、镍等合金元素的存在，具有独特的物理化学特性，在焊接过程中易出现热裂纹、晶间腐蚀、应力腐蚀开裂等问题。接管座与主管道的连接区域，由于结构形式复杂，应力分布不均，进一步增加了焊接难度。焊接工艺需精确控制焊接参数，包括焊接电流、电弧电压、焊接速度、层间温度等，以优化焊缝成形与内部质量。在焊接方法选择上，常用的钨极氩弧焊（TIG）、熔化极气体保护焊（MAG）及焊条电弧焊各有优势与适用场景。TIG焊电弧稳定、熔深浅、热影响区窄，适用于根部焊道焊接，能有效保证焊透性与背面成形质量；MAG焊熔敷效率高，可用于填充和盖面焊道，提升焊接效率；焊条电弧焊则灵活性强，适用于现场复杂环境下的修补焊接。多种焊接方法的组合应用，能够充分发挥各自特点，实现高质量焊接。焊前准备环节，需对母材与焊接材料进行严格清理，去除油污、铁锈等杂质，避免因杂质混入

导致气孔、夹渣等缺陷。合理的坡口设计与装配间隙控制，对保证焊接质量至关重要。焊后处理同样不容忽视，通过焊后热处理可消除焊接残余应力，改善接头组织性能；对焊缝进行无损检测（如射线检测、超声检测、渗透检测等），能够全面评估焊接接头质量，确保不锈钢压力管道接管座焊接满足工程实际需求，保障工业系统安全稳定运行。

2 不锈钢压力管道接管座焊接变形机理分析

2.1 热输入引起的不均匀温度场

在不锈钢压力管道接管座焊接过程中，电弧热源以极高的能量密度瞬间作用于焊接区域，导致局部温度急剧升高。焊接热源的集中性使得焊缝及其附近区域迅速升温至材料熔点以上，形成高温熔池，而远离焊缝的区域仍处于环境温度或较低的预热温度状态，由此在焊件内部产生显著的温度梯度。在熔池边缘，温度梯度可达每毫米数十摄氏度甚至更高。这种不均匀的温度场会引发材料的不均匀热膨胀，高温区域的材料因热膨胀产生较大的变形趋势，但受到周围低温区域材料的约束，无法自由膨胀，从而在焊接接头中产生热应力。随着焊接过程的推进，熔池逐渐冷却凝固，高温区域材料收缩，而此时周围材料已基本冷却定型，对收缩形成阻碍，导致焊接接头内部产生拉应力。不均匀温度场形成的热应力与收缩应力相互叠加，最终导致焊接接头产生宏观变形，如角变形、弯曲变形等。温度场的不均匀性还会影响焊接接头的微观组织分布，不同区域的组织转变不一致，进一步加剧了焊接变形的复杂性^[1]。

2.2 材料的热物理性能差异

不锈钢材料自身具有独特的热物理性能，其热膨胀系数较高，约为碳钢的1.5倍，这使得在焊接热循环作用下，不锈钢材料的热胀冷缩效应更为显著。在焊接过程中，焊缝金属与母材的化学成分存在差异，导致两者的

热物理性能也不尽相同。焊缝金属在焊接过程中经历了快速的熔化和凝固过程,其化学成分和组织形态与母材存在明显区别,热导率、比热容等热物理性能参数也随之改变。这种热物理性能的差异使得焊缝与母材在受热和冷却过程中的膨胀与收缩速率不一致。例如,焊缝金属的热导率相对较低,热量散失较慢,冷却速度比母材更缓,导致焊缝区域在冷却过程中的收缩滞后于母材,产生不均匀的收缩变形。不锈钢在高温下的力学性能下降明显,屈服强度和弹性模量随温度升高而降低,使得高温区域的材料更容易发生塑性变形。在焊接热循环作用下,不同区域材料热物理性能的变化以及由此产生的力学性能差异,使得焊接接头内部的应力分布更加复杂,从而加剧了焊接变形的程度。

2.3 焊接接头的拘束条件

焊接接头的拘束条件对不锈钢压力管道接管座的焊接变形有着重要影响。在实际焊接过程中,接管座与管道的连接结构以及装配方式会对焊接接头产生不同程度的拘束。刚性拘束是常见的一种形式,当接管座与管道采用刚性固定方式装配时,焊接接头的自由变形受到极大限制。在焊接热应力作用下,接头无法通过自由变形来释放应力,导致应力在接头内部不断积累。随着焊接过程的进行,当应力超过材料的屈服强度时,就会产生塑性变形,而在冷却过程中,由于拘束的存在,塑性变形无法完全恢复,从而形成残余变形。弹性拘束同样会影响焊接变形,虽然其限制程度相对刚性拘束较小,但在焊接热循环过程中,弹性拘束结构会因自身弹性变形而产生反作用力,与焊接热应力相互作用,改变焊接接头的应力分布状态。焊接接头的拘束还会影响焊接应力的分布形式,不同的拘束条件会导致应力集中区域的变化,进而影响焊接变形的方向和大小。例如,角焊缝在单面拘束和双面拘束条件下,产生的角变形量和变形方向可能截然不同^[2]。

2.4 焊接工艺参数的影响

焊接工艺参数直接决定了焊接过程中的热输入量和能量分布,进而对不锈钢压力管道接管座的焊接变形产生显著影响。焊接电流是影响热输入的关键参数之一,增大焊接电流会使电弧产热增加,焊接热输入量显著提高,焊缝及其附近区域的温度升高幅度增大,高温区域范围扩大。这不仅会导致材料的热膨胀和收缩变形加剧,还会延长材料处于高温状态的时间,增加焊接接头的塑性变形量。焊接速度同样对热输入和温度场分布有着重要影响,降低焊接速度会使单位长度焊缝的热输入量增加,焊缝的冷却速度减慢,导致焊接接头的变形增

大。电弧电压的变化也会影响焊接过程的稳定性和能量分布,过高的电弧电压会使电弧发散,热量分布不均匀,可能导致焊接接头产生不规则变形。焊接层数和层间温度也是不可忽视的工艺参数,多层焊接时,后续焊层的热输入会对前一层焊缝及其热影响区产生二次加热作用,改变其组织和性能,同时影响焊接应力的分布和累积,进而影响最终的焊接变形。层间温度过高会使焊接接头在较长时间内处于高温状态,增加塑性变形的可能性,导致焊接变形增大;而层间温度过低,则可能因焊缝冷却过快产生较大的收缩应力,同样不利于控制焊接变形。

3 不锈钢压力管道接管座焊接变形的控制措施

3.1 优化焊接工艺参数

(1) 在焊接电流的选择上,需依据管道壁厚、管径以及焊接位置精准确定。较小的焊接电流可降低焊接热输入量,减少焊缝及热影响区的温度梯度,从而有效抑制因局部过热导致的塑性变形。例如,对于薄壁不锈钢压力管道接管座焊接,适当减小焊接电流能避免焊缝金属过度熔化与流动,降低变形风险。(2) 焊接速度直接影响焊接热输入,保持合理且稳定的焊接速度,可使焊接过程中热量均匀分布,防止局部热量堆积造成的不均匀收缩变形。通过试验和经验总结,根据不同的焊接工艺评定确定合适的焊接速度,使熔池能充分结晶且避免出现未熔合等缺陷,维持焊缝成形良好的同时减少变形。(3) 电弧电压的调控对焊缝熔宽和熔深起着关键作用。稳定且适宜的电弧电压能保证焊缝熔合质量,避免因电压过高导致焊缝熔宽过大、热影响区变宽进而产生变形,也防止因电压过低出现熔合不良等问题。通过优化焊接电流、速度和电弧电压的匹配关系,形成最佳的焊接工艺参数组合,可有效控制焊接变形。

3.2 采用合理的焊接顺序和方向

(1) 对称焊接是控制接管座焊接变形的有效方式。对于对称结构的不锈钢压力管道接管座,采用对称焊接顺序,能使焊接过程中产生的焊接应力相互抵消,减少因应力分布不均引发的变形。例如,从管道中心向两侧对称施焊,可平衡焊接热量输入和收缩力,防止管道产生扭曲或弯曲变形。(2) 分段跳焊法能有效分散焊接热量,避免局部热量集中。将焊缝划分成若干小段,间隔进行焊接,每段焊接完成后待焊缝冷却至一定温度再焊接下一段,使焊缝在焊接过程中有足够的时间释放应力,降低整体变形量。在实际操作中,合理确定分段长度和焊接间隔时间是关键,需根据管道规格和焊接工艺进行调整。(3) 多层多道焊时,合理安排各层各道的焊

接方向和顺序至关重要。若不同层道的焊接方向相互交错,便能巧妙打乱应力分布规律,有效减小应力积累。这使得焊缝在逐层堆积过程中得以均匀收缩,进而从根源上对焊接过程进行把控,最终有效控制接管座的焊接变形,确保焊接接头的尺寸精度和结构稳定性^[3]。

3.3 采用反变形法

(1) 反变形法是在焊接前根据经验或通过有限元模拟分析,预估焊接变形的方向和大小,然后在焊接部件上施加与预估变形方向相反、大小相近的预变形。对于不锈钢压力管道接管座,可通过机械加工、模具压制等方式使接管座产生预变形,当焊接过程中产生焊接变形时,预变形与焊接变形相互抵消,达到控制最终变形的目的。(2) 在确定反变形量时,需综合考虑管道材质、焊接工艺、结构形式等因素。通过试验和模拟计算,建立反变形量与各影响因素之间的关系模型,为实际生产提供准确的参考依据。例如,对于较厚壁的接管座焊接,反变形量需适当增大,以补偿较大的焊接收缩变形。(3) 在实施反变形法过程中,要确保预变形的精度和稳定性。采用专用的工装夹具对部件进行固定和定位,保证预变形量在焊接过程中不发生变化,同时要注意工装夹具的拆除时机,避免因拆除过早或过晚影响反变形效果,从而实现对焊接变形的有效控制。

3.4 焊前预热与焊后热处理

(1) 焊前预热能够降低焊接接头的冷却速度,减小焊接过程中的温度梯度,避免产生过大的焊接应力和变形。对于不锈钢压力管道接管座,将焊接部位预热至适当温度,可使焊缝金属在较宽的温度范围内完成结晶过程,改善焊缝组织性能,减少因快速冷却产生的淬硬组织和焊接裂纹倾向,同时降低因温差引起的不均匀收缩变形。(2) 合理的预热温度和预热范围是关键。预热温

度需根据不锈钢的材质、厚度、焊接方法等因素确定,一般通过焊接工艺评定试验来获取准确数据。预热范围应覆盖焊缝及其周围一定区域,保证焊接过程中热量分布均匀,使焊接接头处于较为缓和的热循环状态,从而有效控制焊接变形。(3) 焊后热处理主要是通过消除焊接残余应力来控制变形。常见的焊后热处理方法如退火处理,在一定温度下对焊接接头进行保温和缓冷,使焊接过程中产生的残余应力得到释放和重新分布。通过消除残余应力,可避免焊接接头因应力集中导致的长期变形和性能劣化,提高管道接管座的结构稳定性和使用寿命,同时进一步减小焊接变形对管道整体尺寸和安装精度的影响^[4]。

结语

综上所述,不锈钢压力管道接管座焊接变形受多因素耦合作用,热输入、材料性能、拘束条件及工艺参数均对变形产生显著影响。通过优化焊接工艺参数、采用合理工艺方法、实施预热与热处理等控制措施,能够有效改善焊接变形问题。本研究成果为工程实践中不锈钢压力管道接管座焊接质量控制提供了科学指导,未来可进一步结合先进焊接技术与仿真模拟,深化对焊接变形的研究,推动焊接工艺的创新发展。

参考文献

- [1]毛晓军.浅析不锈钢管道施工的焊接变形控制[J].中国设备工程,2022(2):113-114.
- [2]郑学庆.厚壁不锈钢管道焊接变形分析及控制方法[J].设备管理与维修,2020(7):106-107.
- [3]贺海波.高温奥氏体不锈钢压力管道焊缝开裂原因分析及改造[J].建筑工程技术与设计,2020(14):4175.
- [4]傅琴.不锈钢洁净压力管道施工技术[J].建筑工程技术与设计,2020(29):323.