

不锈钢焊接工艺及变形控制分析

谷天帅

中国船舶集团有限公司第七一三研究所 河南 郑州 450000

摘要：本文概述了不锈钢焊接工艺，包括分类、焊接方法及材料选择。分析了焊接变形产生的原因与影响因素，从材料、工艺两方面探讨。提出了控制焊接变形的策略，如优化工艺参数、改进焊接方法与技术、采用合理工装夹具与反变形法。通过实际案例分析其应用，指出存在问题与改进方向，并展望了不锈钢焊接工艺及变形控制未来自动化、智能化、绿色化的发展趋势。

关键词：不锈钢；焊接工艺；焊接变形；变形控制；焊接质量

引言

不锈钢因其优良性能在诸多领域广泛应用，然而焊接过程中易产生变形，影响构件精度与性能。准确把握不锈钢分类特性、焊接方法及材料选择要点，深入剖析焊接变形产生原因与影响因素，进而采取有效控制策略至关重要。本文将系统阐述不锈钢焊接工艺及变形控制相关内容，并结合实际案例分析其应用与发展趋势。

1 不锈钢焊接工艺概述

1.1 不锈钢的分类与特性

不锈钢按组织形态可分为奥氏体不锈钢、铁素体不锈钢、马氏体不锈钢、双相不锈钢等。奥氏体不锈钢具有良好的塑性、韧性和耐腐蚀性，无磁性，是应用最广泛的不锈钢类型；铁素体不锈钢热导率高、线膨胀系数小，耐应力腐蚀性能良好；马氏体不锈钢强度和硬度较高，但耐腐蚀性相对较弱；双相不锈钢结合了奥氏体和铁素体不锈钢的优点，具有高强度、良好的耐腐蚀性和抗疲劳性能。不同类型的不锈钢因化学成分和组织结构的差异，其焊接性能也有所不同。

1.2 常见不锈钢焊接方法

(1) 钨极氩弧焊 (TIG)：该方法以高熔点的钨棒作为电极，利用氩气作为保护气体，电弧稳定，保护效果好，焊缝质量高，能够实现单面焊双面成形，尤其适用于薄板不锈钢的焊接以及对焊接质量要求较高的场合，如食品设备、医疗器械等不锈钢部件的焊接。(2) 熔化极气体保护焊 (MAG/MIG)：采用连续送进的焊丝作为电极，利用气体保护电弧，焊接效率高，熔敷速度快，适用于中厚板不锈钢的焊接。通过选择不同的保护气体和焊丝，可满足不同的焊接需求，在不锈钢结构制造中应用广泛。(3) 激光焊：利用高能量密度的激光束作为热源，焊接速度快、热影响区窄、变形小，能够实现精密焊接，适用于对焊接精度和质量要求极高的不锈钢零

部件焊接，如航空航天领域的不锈钢结构件焊接。(4) 等离子弧焊：利用等离子弧作为热源，能量集中，电弧挺度好，可焊接更薄的不锈钢板材，且焊接质量稳定，在不锈钢管道焊接等方面具有独特优势。

1.3 不锈钢焊接材料的选择

不锈钢焊接材料的选择需综合考虑母材的化学成分、性能要求、焊接方法以及使用环境等因素。一般情况下，焊接材料的化学成分应与母材相近或略高于母材，以保证焊缝金属具有与母材相当的耐腐蚀性和力学性能。例如，焊接奥氏体不锈钢时，常选用含铬、镍量与母材相近或稍高的焊条或焊丝；对于有特殊性能要求的不锈钢，如耐晶间腐蚀性能要求高的场合，则需选用特定成分的焊接材料。同时，焊接材料的工艺性能，如电弧稳定性、脱渣性等也需满足焊接要求^[1]。

2 不锈钢焊接变形产生的原因与影响因素

2.1 焊接变形产生的原因

不锈钢焊接变形是焊接过程中常见且需要重点关注的问题，其产生主要源于焊接过程中不均匀的加热和冷却。在焊接操作时，焊缝及其邻近区域会在短时间内被迅速加热至高温状态。高温使该区域金属发生热膨胀，然而，由于周围低温金属的约束作用，这部分高温金属无法自由膨胀，进而产生压缩塑性变形。当焊接结束进入冷却阶段，先前受热膨胀的金属开始收缩，但此时收缩过程同样受到周围金属的阻碍，从而产生拉伸塑性变形。这种因不均匀加热和冷却导致的膨胀与收缩受限，最终致使焊接构件产生变形。此外，焊接过程中不可避免地会产生焊接应力，当焊接应力超过材料的屈服强度时，材料将发生塑性变形，这也是引发焊接变形的重要因素。因此，在不锈钢焊接过程中，需采取有效措施控制加热和冷却的均匀性，以及降低焊接应力，以减少焊接变形的产生。

2.2 影响焊接变形的材料因素

不锈钢的诸多材料特性对焊接变形有着不可忽视的影响。(1) 热物理性能是关键因素之一。不锈钢热导率相对较低,在焊接过程中,热量难以迅速向周围扩散,使得焊接区域温度持续升高,热影响区范围随之扩大。高温区域长时间存在,材料受热不均匀程度加剧,极大地增加了焊接变形的可能性。(2) 不锈钢具有较大的线膨胀系数。在焊接热循环的反复作用下,材料在加热时膨胀幅度大,冷却时收缩幅度也大。这种较大的膨胀和收缩量,使得材料内部产生较大的内应力,进而容易引发较大的焊接变形。(3) 不锈钢的化学成分同样对焊接变形有着重要影响。例如,碳含量过高时,不仅会降低不锈钢的耐腐蚀性能,还会增加焊接裂纹产生的倾向。而且,碳含量的变化可能会改变材料的微观组织结构,影响材料的力学性能和热膨胀特性,从而间接影响焊接变形的程度^[2]。

2.3 影响焊接变形的工艺因素

焊接工艺因素在焊接变形产生过程中起着关键作用。焊接工艺参数是影响焊接变形的重要因素之一。焊接电流、电弧电压和焊接速度等参数的合理设置至关重要。若增大焊接电流,热输入量会显著增加,焊缝及其附近区域受热更为剧烈,材料热膨胀和收缩程度加剧,进而导致焊接变形增大。电弧电压过高时,会使焊缝熔宽增大,热影响区范围变宽,同样会引起变形增加。而焊接速度过慢,意味着单位长度焊缝上热输入量增多,材料受热时间延长,变形也会加剧。焊接方法的选择同样不容忽视。不同焊接方法具有不同的热输入和能量密度特性。例如,激光焊能量集中、热输入小,焊接变形相对较小;而气焊热输入大且分散,焊接过程中材料受热不均匀程度高,焊接变形较大。此外,焊接顺序和焊接方向若不合理,会使焊接应力分布不均匀,局部应力集中,从而增大焊接变形,因此需根据实际情况进行科学规划。

3 不锈钢焊接变形控制策略

3.1 优化焊接工艺参数

合理优化焊接工艺参数对于有效控制不锈钢焊接变形起着至关重要的作用。在确保焊接质量满足相关标准和工程要求的基础上,应尽可能采用较小的焊接电流、较低的电弧电压以及较快的焊接速度。这是因为较小的焊接电流能降低焊接过程中的热输入量,避免焊缝及其附近区域温度过高;较低的电弧电压可减少电弧的能量输出,使焊接热影响区范围缩小;较快的焊接速度则能缩短材料受热时间,进一步控制热输入。例如,在焊接

薄板不锈钢时,采用小电流、快速焊的方式,可显著降低焊缝及其周边区域的温度,有效减小热影响区,从而实现对接头变形的良好控制。此外,还需依据不同的焊接方法(如手工电弧焊、气体保护焊等)和焊接位置(如平焊、立焊、仰焊等),精心选择合适的工艺参数组合。比如在进行立焊和仰焊时,由于操作难度较大,需适当降低焊接电流和焊接速度,以保证焊缝成形良好,同时有效控制焊接变形。

3.2 改进焊接方法与技术

改进焊接方法与技术是控制不锈钢焊接变形的有效途径。选择恰当的焊接方法对减少焊接变形意义重大。

(1) 对于薄板不锈钢焊接,应优先选取热输入较小的焊接方法,像钨极氩弧焊,其电弧稳定、热影响区窄;激光焊能量高度集中,热输入极低,这两种方法都能有效降低焊接过程中的热量输入,减少材料受热不均匀程度,从而控制焊接变形。(2) 对于中厚板不锈钢焊接,可采用多层多道焊、对称焊等技术。多层多道焊能使焊接热量分散,避免局部过热;对称焊则通过合理安排焊接顺序,使焊件两侧受热均匀,减小焊接应力集中,进而减小焊接变形。(3) 应用先进的焊接技术也能取得良好效果。脉冲焊接技术通过精确控制脉冲电流的大小和频率,实现对热输入的精准调节,减少焊接变形。振动焊接技术则是在焊接过程中对焊件施加振动,促使焊接应力得以释放,改善焊件内部的应力分布状态,有效降低焊接变形,提高焊接质量^[3]。

3.3 采用合理的工装夹具与反变形法

在不锈钢焊接过程中,采用合理的工装夹具与反变形法是控制焊接变形的有效手段。(1) 工装夹具能对焊件实施刚性固定,有效限制其在焊接过程中的自由变形。在焊接前,需充分考虑焊件的结构特点、尺寸规格以及可能出现的变形趋势,精心设计并安装合适的工装夹具。通过将焊件牢固固定,使其在焊接过程中难以发生自由变形,待焊接完成且焊件充分冷却后再拆除夹具。这种方法能显著减小焊接变形,保证焊件的尺寸精度和形状精度。(2) 反变形法则是基于对焊接变形的预测,提前对焊件进行反向变形处理。根据经验或模拟计算预测出焊接变形的方向和大小,在焊接前对焊件施加一个与焊接变形方向相反的预变形量。例如,在焊接不锈钢平板对接焊缝时,可预先将焊件两端向上翘起一定角度,焊接后焊件在自身应力作用下产生的变形与预先施加的变形相互抵消,最终使焊件恢复平整,有效控制了焊接变形。

4 不锈钢焊接工艺及变形控制的实践与展望

4.1 实际案例分析

以某不锈钢压力容器的焊接项目为例,该项目对焊接质量和尺寸精度要求极高。在焊接过程中,采用了钨极氩弧焊打底、熔化极气体保护焊填充和盖面的组合焊接工艺。钨极氩弧焊打底能够保证焊缝根部的良好成形,减少未焊透等缺陷;熔化极气体保护焊填充和盖面则具有较高的焊接效率,能确保焊缝填充饱满。为有效控制焊接变形,技术人员对焊接参数进行了细致优化。采用小电流进行焊接,降低了热输入量,减少了焊缝及其附近区域的温度升高幅度;运用多层多道焊技术,使焊接热量分散,避免局部过热。同时,合理安排焊接顺序,遵循对称焊、分段焊等原则,使焊件各部分受热均匀,减小了焊接应力集中。此外,还利用了专业的工装夹具对焊件进行固定。工装夹具根据压力容器的结构特点设计,能够牢固地限制焊件在焊接过程中的自由变形。通过这些综合措施的实施,成功控制了焊接变形,使压力容器的尺寸精度和焊接质量均达到了设计要求。该案例充分表明,在实际生产中,综合运用多种焊接工艺及变形控制策略,能够显著提高焊接质量,满足工程对构件精度和性能的严格要求。

4.2 存在问题与改进方向

当前,不锈钢焊接工艺及变形控制领域虽已取得一定成果,但仍面临诸多问题。(1)在复杂结构的不锈钢焊接中,变形控制难度显著增大。由于复杂结构焊件形状不规则、拘束度差异大,焊接过程中热传导和应力分布复杂,现有的变形控制方法往往难以精准应对,控制效果有限,导致焊件尺寸精度和形状精度难以保证。(2)部分先进的焊接技术和变形控制方法成本高昂,限制了其在中小企业的推广应用。中小企业受资金、技术等因素制约,难以承担高昂的设备购置、技术引进和维护成本。(3)针对这些问题,未来需进一步加强对复杂结构不锈钢焊接变形机理的深入研究,通过数值模拟、实验分析等手段,揭示变形产生的内在规律,开发更加精准、有效的变形控制技术。同时,致力于降低先进焊接技术和控制方法的成本,提高其适用性和经济性,推动这些技术在更广泛范围内的应用,提升不锈钢焊接行

业的整体水平^[4]。

4.3 未来发展趋势展望

在科技飞速发展的时代背景下,不锈钢焊接工艺及变形控制技术正迎来全新的发展机遇,未来将朝着自动化、智能化、绿色化方向大步迈进。(1)自动化焊接设备和机器人的广泛应用将成为趋势。自动化设备能够按照预设程序稳定运行,极大提高焊接效率,且焊接质量的一致性和稳定性更高,有效减少因人为操作差异导致的焊接变形问题。机器人焊接则凭借其高精度、高灵活性的优势,可完成复杂焊缝的焊接,进一步提升焊接质量。(2)智能化技术也将深度融入焊接领域。焊接过程实时监测与控制技术能实时获取焊接参数,如电流、电压、焊接速度等,并依据参数变化自动调整焊接工艺,实现对焊接变形的精准控制。(3)绿色焊接技术将受到更多关注。研发和应用低能耗、低污染的焊接材料和工艺,减少焊接过程中的能源消耗和有害气体排放,降低对环境的影响,实现不锈钢焊接行业的可持续发展。

结束语

综上所述,不锈钢焊接工艺及变形控制是一个复杂且关键的领域。当前在焊接方法、材料选择及变形控制策略上已取得一定成果,但复杂结构变形控制难、先进技术成本高等问题仍待解决。未来,随着自动化、智能化、绿色化技术的不断推进,将为不锈钢焊接带来新的突破。通过持续创新与研究,开发更精准的变形控制技术,降低成本,提升行业整体水平,实现不锈钢焊接的高质量、可持续发展。

参考文献

- [1]高艳华.不锈钢焊接工艺及变形控制[J].中国金属通报,2022,No.1064(03):148-150.
- [2]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,No.490(02):113-114.
- [3]王德军.不锈钢焊接操作方法及变形控制要点[J].南方农机,2020,51(12):177-182.
- [4]石伟伟,杨碧涛,胡珊珊,等.不同接头工艺激光焊接双相不锈钢的焊缝性能[J].广西大学学报(自然科学版),2020,45(02):359-368.