

焊接工艺对不锈钢焊接变形的影响

陈百强

冰山冷热科技股份有限公司 辽宁 大连 116000

摘要: 本文系统探讨了四大类不锈钢(奥氏体、马氏体、铁素体及双相钢)在焊接工艺中面临的变形挑战。针对每类不锈钢独特的材料特性,深入分析影响焊接变形的核心工艺要素,如线能量调控、层间温度管理、焊接电流与速度的精确匹配、坡口设计的优化及焊缝余高的合理控制。基于详尽的参数分析,提出一系列针对性的优化措施,旨在从工艺层面有效遏制焊接变形,显著提升不锈钢焊接件的综合品质与性能表现。

关键词: 焊接工艺; 不锈钢; 焊接变形

引言: 不锈钢以其卓越的耐腐蚀性能、高强度的机械特性以及优雅的外观,在众多工业领域,如化工、石油开采、食品加工与医疗设备制造中占据了举足轻重的地位。焊接作为不锈钢制品生产的关键环节,其过程中的变形问题一直是制约产品质量的瓶颈。本文聚焦于不同类型不锈钢的焊接特性,深入剖析导致焊接变形的关键因素,旨在通过科学有效的控制策略,降低焊接变形,推动不锈钢焊接技术的持续进步。

1 不锈钢类型及其焊接特性

1.1 奥氏体不锈钢

奥氏体不锈钢,以其卓越的耐腐蚀性、韧性和加工性能,广泛应用于化工、制药、食品加工等领域。然而,其焊接过程中存在几个显著的问题需要注意。首先,奥氏体不锈钢在高温下易形成低熔点的共晶物,这些共晶物在快速冷却时可能无法充分凝固,从而导致热裂纹的产生。奥氏体不锈钢在特定温度区间(即热敏化温度区间)内长时间停留时,可能会发生敏化现象,导致晶间腐蚀的风险增加。尽管奥氏体不锈钢通常不需要进行焊后热处理,但在某些特定应用场合,若需要进行热处理,必须精确控制温度以避免进入热敏化区间,从而防止应力腐蚀开裂的发生。在焊接方法上,奥氏体不锈钢常采用氩弧焊(包括TIG和MIG),这些方法能够提供稳定的电弧和保护气氛,有效防止焊缝区域的氧化和污染。同时,氩弧焊的热输入量相对可控,有助于减少焊接变形。氩弧焊+焊条的方法也常用于需要较高焊接效率或特殊焊缝形状的场所。埋弧焊由于其高效率和良好的焊缝成形,也被应用于奥氏体不锈钢的大型结构件焊接中。而激光焊则以其高精度、低热输入和快速冷却的特点,在薄板和高精度要求的焊接中表现出色。

1.2 马氏体不锈钢

马氏体不锈钢以其高硬度、高强度和良好的耐磨性

著称,在刀具、轴承和机械零件等领域得到广泛应用。然而,其焊接过程中冷裂纹的敏感性较高,需要特别关注预热、后热及热处理范围的控制。预热可以有效降低焊接接头的冷却速度,减少淬硬倾向和残余应力,从而降低冷裂纹的风险。后热则有助于进一步消除焊缝区域的残余应力,提高焊接接头的韧性。通过制定合理的热处理范围,可以调整马氏体不锈钢的组织结构,进一步提高其力学性能和抗腐蚀能力。在焊接方法上,马氏体不锈钢通常选择能量密度较高的焊接方式,如氩弧焊或激光焊,以确保焊缝能够迅速达到所需的熔透深度^[1]。由于马氏体不锈钢的淬硬倾向较强,焊接过程中应严格控制焊接参数,避免产生过高的焊接热输入。

1.3 铁素体不锈钢

铁素体不锈钢以其良好的耐腐蚀性、高温强度和较低的热膨胀系数,在石油、化工和热力设备等领域得到广泛应用。与奥氏体不锈钢相比,铁素体不锈钢的焊接变形相对较小,这主要得益于其较低的热导率和较高的热膨胀系数。然而,尽管铁素体不锈钢的焊接变形较小,但在焊接过程中仍需注意焊缝的韧性和耐腐蚀性。由于铁素体不锈钢的韧性相对较低,特别是在焊接热影响区,可能会出现韧性下降的情况。因此,在选择焊接方法和制定焊接工艺时,需要特别注意保护焊缝区域免受过热和过快的冷却影响,以减少对焊缝韧性的不利影响。铁素体不锈钢对焊接过程中产生的杂质和氧化物较为敏感,这可能会影响其耐腐蚀性。因此,在焊接前应对母材和焊材进行严格的清洁处理,去除表面的油污、氧化物和其他杂质。同时,在焊接过程中应保持适当的保护气氛,如采用惰性气体(如氩气)进行保护焊,以防止焊缝区域暴露在空气中发生氧化。

常用的焊接方法对于铁素体不锈钢来说,主要包括氩弧焊(TIG/MIG)和焊条电弧焊。氩弧焊由于能够提供

稳定的电弧和良好的保护气氛，因此常用于对焊缝质量要求较高的场合。而焊条电弧焊则因其操作简便、适应性强，在野外作业或复杂结构的焊接中较为常见。在选择焊接方法时，应根据具体的工程要求和材料特性进行综合考虑。

1.4 双相钢

双相不锈钢，顾名思义，其显微组织由奥氏体和铁素体两种相组成，因此兼具了奥氏体不锈钢的耐蚀性和铁素体不锈钢的强度。这种独特的组织结构使得双相钢在海洋工程、石油化工和化工设备等领域具有广泛的应用前景。在焊接双相钢时，维持相平衡是至关重要的。焊接过程中，高温会使部分奥氏体相转变为铁素体相，导致相比例失衡，进而影响双相钢的力学性能。必须严格控制焊接热输入和冷却速度，以避免过度的相变发生^[2]。为了保持相平衡，通常会采用较低的热输入量进行焊接，如氩弧焊或激光焊等。选择合适的焊接顺序和层间温度控制策略也是非常重要的。焊后热处理也可用于调整焊接接头的相比例和组织结构，但必须谨慎进行，以避免进入对双相钢不利的热敏化区间。

2 控制焊接变形的关键工艺因素

2.1 线能量（热输入量）

线能量，作为焊接过程中的一个重要参数，直接关联着焊接区域的温度梯度、熔化区的尺寸以及随后的冷却速率，这些因素共同决定了焊接变形的程度和形式。在焊接奥氏体不锈钢时，线能量的控制尤为关键。过高的线能量不仅会引起焊接区域的急剧升温，增加熔池的停留时间，还可能导致焊缝区及近缝区的晶粒过分长大，进而降低材料的韧性和耐腐蚀性，甚至诱发热裂纹和晶间腐蚀。这是因为过高的温度会加速敏感元素（如碳、铬）的扩散，促进有害相（如碳化铬）的析出。相反，在焊接马氏体不锈钢时，线能量若不足，则焊接区域可能无法获得足够的热量以支持马氏体转变的完成，从而增加了冷裂纹形成的风险。足够的线能量能够保证焊缝金属在冷却过程中发生充分的组织转变，形成稳定的相结构，减少裂纹倾向。

2.2 层间温度

层间温度作为焊接过程中的一个关键工艺参数，对焊接变形和残余应力的影响不容忽视。它反映了焊接过程中焊缝金属从熔化状态冷却至下一道焊缝焊接开始前的温度状态，直接决定了焊缝金属在连续焊接过程中的热应力演变路径。对于奥氏体不锈钢而言，过高的层间温度可能导致焊缝区域在多次加热过程中发生热敏化现象，即析出碳化铬等有害相，降低材料的耐蚀性。过高

的温度还会加剧焊接区域的热膨胀和随后的冷却收缩，增加焊接变形的风险；因此，在焊接奥氏体不锈钢时，应严格控制层间温度，避免其超过推荐的最高值。而对于马氏体不锈钢，适当的层间温度对于防止冷裂纹具有重要意义^[3]。马氏体不锈钢在焊接过程中容易发生淬硬和冷裂倾向，适当的层间温度可以通过预热和保持焊缝区域的温度来减缓冷却速率，减少焊接应力的积累，从而提高焊缝的韧性和抗裂性。

2.3 焊接电流与焊接速度的精确匹配

在焊接工艺中，焊接电流与焊接速度的匹配是实现高效且高质量焊接的核心环节。焊接电流的大小直接决定了焊接热源的能量输出，影响着焊接熔池的深度和宽度，以及焊接速度的快慢。提高焊接电流可以增加单位时间内的热输入量，从而提高焊接效率，尤其是在厚板焊接中效果显著。过大的焊接电流也会带来一系列问题，如焊接变形加剧、熔池稳定性下降以及焊接缺陷（如烧穿、咬边）的增加。相反，提高焊接速度能够在一定程度上减小焊接热影响区的范围，降低焊接变形和残余应力的水平。这是因为较快的焊接速度减少焊接区域在高温下的停留时间，使得材料能够更快地冷却，从而减少因热胀冷缩不均而产生的变形。但值得注意的是，过高的焊接速度可能会导致焊缝熔合不良、未熔合或未焊透等质量问题，特别是当焊接电流未相应调整时。因此在不锈钢焊接过程中，可以通过采用小电流，多层多道焊的工艺方法的工艺，来控制变形量。

2.4 坡口尺寸的精心设计

坡口设计是焊接准备工作中不可或缺的一环，它直接关系到焊缝的填充量、焊接效率以及焊接变形的控制。合理的坡口尺寸应根据母材厚度、焊接位置、焊接方法以及焊接质量要求等因素综合考虑确定。较小的坡口尺寸可以减少焊接材料的消耗和焊接热输入量，从而降低焊接变形的风险。特别是在焊接奥氏体不锈钢时，由于其对热裂纹的敏感性较高，采用较窄的坡口有助于减少焊接热影响区的宽度，降低热裂纹的发生概率。坡口设计的细致考量在焊接前期准备中占据核心地位，它精确平衡了焊缝的饱满度、作业效率与变形控制的微妙关系。

2.5 焊缝余高的合理控制

焊缝余高是焊接完成后焊缝表面相对于母材表面凸起的部分，其高度和形状不仅影响焊接构件的美观性，还直接关系到焊接应力的分布和焊接变形的控制。过高的焊缝余高容易成为应力集中的来源，加剧焊接变形和疲劳破坏的风险；同时，过大的焊缝余高还可能影响焊

接构件的装配和后续加工^[4]。

3 焊接变形控制策略

3.1 焊接工艺优化的深度实施

焊接工艺的优化是控制焊接变形的根本所在，它要求从多个维度对焊接过程进行精细化调整。首先，根据不锈钢的类型和具体应用需求，量身定制焊接工艺方案。这包括选择合适的焊接方法，如TIG焊、MIG焊、激光焊等，每种方法都有其独特的热输入特性和焊缝成形能力，对变形的控制效果也各异。其次，优化焊接顺序是减少焊接变形的关键环节。通过合理安排焊接顺序，可以平衡焊接过程中的温度场和应力场，减少因焊接顺序不当引起的变形累积。最后，精确控制焊接参数是实现焊接工艺优化的重要手段^[5]。这包括对焊接电流、电压、焊接速度、层间温度等参数的精准设定和调整，以确保焊接过程稳定、焊缝质量优良，同时最大限度地减少焊接变形。

3.2 焊后处理的多样化与精细化

焊后处理是控制焊接变形的关键环节，它通过对焊接完成后的构件进行一系列处理，以消除焊接残余应力和变形。退火处理是一种常用的焊后处理方法，它通过加热和保温使焊接构件内的残余应力得到释放和平衡，从而减小变形。但需要注意的是，对于奥氏体不锈钢等容易发生热敏化的材料，退火处理时应避免进入热敏化温度区间，以防止有害相的析出。局部加热校正则是一种针对局部变形的有效处理方法，它通过对变形区域进行精确加热和冷却，使变形得到矫正。此外，对于马氏体不锈钢等需要特定组织性能的材料，焊后还需进行必要的热处理，如回火处理，以改善焊缝的组织结构和性能。

3.3 监测与检测技术的融合应用

在日益精密化的不锈钢焊接领域中，监测与检测技术的融合应用已成为了质量控制不可或缺的一环。随着科学技术的飞速进步，先进测量工具和设备的不断涌现，如高精度激光测距仪、三维激光扫描仪、热成像相机等，极大地丰富了我们对接过程的全面掌握能力。这些工具能够在焊接作业期间持续收集并分析焊接区域的温度梯度、应力分布以及微小变形的即时数据，帮助操作人员及时发现并预测潜在问题，从而实现早期干预

和调整，有效抑制焊接变形的产生。值得注意的是，现代监测技术还结合了智能化分析软件，能够将海量数据进行实时处理，快速生成焊接质量报告和可视化图表，让决策更加直观和准确。这些报告不仅详尽描述了焊接变形量的大小和方向，还能提供焊接缺陷的具体位置和类型，为后续工艺改进或返修提供精准的靶向信息。在无损伤检测领域，X射线检测、超声波检测以及磁粉检测等技术已成为行业标准配置。这些技术各自擅长于不同的检测任务，能够非破坏性地透视焊缝内部，精准捕捉并识别出夹渣、裂纹、未熔合等隐藏缺陷，确保焊缝的机械性能和耐腐蚀性能符合设计标准和行业规范^[6]。尤为重要的是，这些检测过程的自动化和数字化，显著提高了检测效率和精度，减少了人为错误和主观判断的影响，使焊缝质量的评估更加客观和科学。

结束语

综上所述，焊接工艺对不锈钢焊接变形的控制至关重要，涉及多个关键参数的精确调整与优化。通过深入理解不同类型不锈钢的焊接特性，结合焊接工艺参数的细化调控、焊后处理的多样化策略及监测检测技术的有效应用，可显著提升不锈钢焊接件的质量与性能。未来，随着焊接技术的不断发展和创新，焊接变形的控制将更加精准高效，为不锈钢在更多领域的应用提供坚实的技术支撑。

参考文献

- [1]刘冬梅.焊接工艺对不锈钢焊接变形的影响研究[J].内燃机与配件,2019(02):83-84
- [2]周燕阳.周丕勇.焊接工艺对不锈钢焊接变形的影响及对策分析[J].科技创新与应用,2020(23):115-116.
- [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.
- [4]侯志伟.李倩云.焊接工艺对不锈钢焊接变形的影响分析[J].内燃机与配件,2018(22):86-87.
- [5]王斌.王雨轩.焊接工艺对不锈钢焊接变形的影响[J].科技创新导报,2020,14(24):28-29.
- [6]邵元金.閆君.杨玉超.焊接工艺对不锈钢焊接变形的影响[J].焊接技术,2019,44(04):80-81.