

高强钢焊接工艺及焊接接头性能研究

李铭 杨喜顺 王翔

安阳钢铁建设有限责任公司, 河南 安阳 455000

[摘要]高强度钢应用于桥梁、建筑物以及机械设备当中,但是其在进行焊接的过程中易产生热影响区脆化、变形大等问题并且伴随有裂纹和焊接缺陷的存在,使得焊接接头的质量受到影响。目前高强度钢的焊接技术虽然进展迅速,但是在焊接方法的改进、焊接接头可靠性的提高方面还存在着问题。开展对高强度钢焊接工艺与焊接接头性能的研究,能够有效地提高焊条质量、增强力学性能,确保焊接结构的安全性和使用寿命,具有一定的实际意义。

[关键词]高强钢; 焊接工艺; 焊接接头; 力学性能

DOI: 10.33142/ect.v4i1.18826

中图分类号: TG457.11

文献标识码: A

Research on Welding Process and Welding Joint Performance of High Strength Steel

LI Ming, YANG Xishun, WANG Xiang

Anyang Iron & Steel Construction Co., Ltd., Anyang, He'nan, 455000, China

Abstract: High strength steel is used in bridges, buildings, and mechanical equipment, but it is prone to problems such as embrittlement and large deformation in the heat affected zone during welding, accompanied by cracks and welding defects, which affect the quality of the welded joints. At present, although the welding technology of high-strength steel has made rapid progress, there are still problems in improving welding methods and enhancing the reliability of welded joints. Conducting research on the welding process and welding joint performance of high-strength steel can effectively improve the quality of welding rods, enhance mechanical properties, ensure the safety and service life of welded structures, and has certain practical significance.

Keywords: high strength steel; welding process; welding joints; mechanical properties

引言

高强度钢材作为一种广泛应用于现代工程技术的重要材料,其高性能、高负荷和低自重的特点使其成为建造桥梁、建筑物、压力容器、大型机械设备等工程的重要选材。但是由于高强度钢材高强度的性能也使得焊接加工对其要求更加严格。焊接时的热输入量、施焊顺序、预热和后热等因素都影响着焊缝及热影响区的金相组织,决定了焊接接头的力学性能和使用可靠性。在工程焊接过程中,高强钢焊接接头存在着易产生残余应力集中,焊接变形以及裂纹、气孔、夹渣等焊接缺陷的问题,这不仅会造成焊缝强度和韧性的下降而且容易导致结构工程在运行的过程中发生脆断或者疲劳破坏。所以研究高强钢焊接工艺优化及焊接接头性能,不仅在理论上意义重大而且对于提高工程安全性及寿命、节约成本有重要指导作用,本文的研究目的在于全面分析高强钢焊接接头类型及结构特征,探究焊接工艺参数对焊缝微观组织、力学性能的影响,将实验研究同焊接质量检测方法相结合,找到合理改进焊接工艺的方法和改善高强钢焊接接头可靠性的方法,以期能够为在工程应用中使用高强度焊接结构的安全提供技术支持和理论参考。

1 高强钢焊接接头类型及结构特点

高强度钢焊接接头的种类及构造特点主要反映在焊

接接头形式、材质特性以及焊接工艺对接头性能的影响方面。焊接接头形式主要有对接接头、T型接头、角接头、搭接接头,其中对接接头因应力分布均匀,应力集中区域小,应用最为广泛,T型接头适合多向力和扭矩的作用场合,角接和搭接接头常应用于次要受力部位或者薄壁构件中。高强度钢焊接接头高强度轻质化的优点,其焊缝强度可达甚至高于母材自身,节约了连接用材料,减轻了结构自重;结构的整体性好硬度高,焊缝致密保证了气密性和水密性要求;但焊接热影响区晶粒易于长大,塑性降低,焊接残余内应力和变形又使结构尺寸不准确,降低了结构的稳定性和使用寿命,而焊缝缺陷使得焊接接头在低温和动态载荷作用下会发生脆性破坏。所以高强度钢结构焊接往往需要使用专用焊接材料、严格控制预热温度以及高温回火,并结合超声波、X射线等无损检测方法来提高焊接接头质量和延长使用寿命。

2 高强钢焊接工艺参数优化研究

2.1 焊接热输入与焊接变形关系

在高强钢的焊接中,焊接热输入是影响焊缝性能、焊接变形、焊接残余应力的关键因素之一。高强钢的强度高、硬而淬性大并且热影响区较为敏感,如果焊接热量输入过大,容易引起焊缝及其热影响区晶粒粗大,出现明显的针状马氏体裂纹或热裂纹,并使焊接接头残余应力增大,造

成焊接变形、接头脆断或使用性能变差;热量输入量过小,又会使焊缝熔合不良、焊接缺陷增多,焊缝结合不牢。所以在焊接高强度时要严格控制好焊接电流、电压、焊接速度以及焊丝直径等参数,通过精确的算法并通过试验加以论证来确定合理的焊接输入热量范围,以达到焊缝良好的熔合状态及细密的金属微观组织结构^[1]。此外焊接工艺顺序和焊接过程中的层间控制温度也对焊接变形有着较大的影响。采取对称焊接、间隔焊接或者多层分段焊接等方式可以有效的减少焊接残余应力集中现象的发生与热变形。

2.2 预热与后热处理工艺研究

在高强度焊接时,对焊接接头组织性能控制、减少裂纹倾向和提高机械强度的有效措施就是采取预热和焊后热处理等技术措施。由于高强度具有较高的碳当量和较高的强度,在焊接时在热影响区易产生硬脆马氏体组织,造成冷裂纹和应力集中的情况出现,通过对焊件采取恰当的焊前预热能够降低接头部位的温差以及冷却速率,使焊接熔池周边金属缓慢冷却,可减少接头部位硬脆相的生成并减轻焊接内应力;预热还可以增强焊丝与母材的润湿作用,提高其结合程度,使焊接熔合不良,未完全熔透等缺陷的概率降低,同时也能减少焊接过程中气泡的产生。焊后的热处理主要包括缓冷或者低温退火的方法,用于消减焊接残余应力,并优化焊缝及其热影响区组织结构,使之具有良好的韧性及塑形性能,达到接头组织性能优良的目的。实际生产中需要合理制定预热温度、恒温时间和加热方法等参数,并依据不同级别的材质、板厚大小、焊接方式及焊接结构等进行相应的调整,使得焊缝组织致密均匀,性能稳定可靠、减少焊接缺陷,确保了高强度焊接头高质量制备和长期服役的安全。

2.3 焊接工艺参数对焊缝金相组织的影响

对于高强度焊接来说,焊接工艺参数直接影响着焊缝与热影响区的金相组织,焊接时的焊接电流、电压,焊接速度,焊丝直径都会造成焊缝的热量输入与冷却速度的变化,进而造成焊缝与热影响区的显微组织变化,高热量输入会造成焊缝晶粒长大,热影响区粗大的马氏体或者贝氏体组织,降低了接头的韧性与塑形,增大了裂纹倾向与残余应力集中的程度;低热量输入会造成焊缝未完全熔合,出现气孔、夹渣等问题并且使热影响区快速冷却,形成了硬脆组织,产生冷裂纹的风险加大。除此之外,焊接层间的温度和焊接次序也影响着焊缝金相组织的一致性以及应力分布情况,选择正确的焊接路径、控制层间温度、分段施焊均能优化焊缝组织致密度,减少金相组织落差、增强整个焊接接头的机械性能。

2.4 多通道焊接及双面焊技术优化

在高强度焊接工程中,多道焊、双面焊工艺的应用对控制焊接应力,减小变形,提升焊缝的质量有着重要的意义作用。高强厚板厚、热影响区域敏感,一道通焊容易导

致焊缝穿透差、热量输入不平衡、残余应力集中等现象,引起焊接变形和裂纹风险。采用多道逐层、逐段的焊接方法来分散热量输入量,防止焊件局部高温,合理的焊接顺序编排以及层间温度管理也可以在一定程度上减弱焊接过程中焊接应力的叠加效应,降低焊接变形。而双面焊则是利用两面交错或者是同步焊接的方式让焊缝均匀受热,进而达到平衡热应力的目的,加强焊缝穿透效果,优化焊缝金属结构,减少焊接缺陷的发生概率^[2],并结合恰当的焊接参数以及预热、焊后缓慢冷却或者施加振动消除应力等处理措施以优化焊缝金相组织结构、增强焊接接头的机械强度和稳定性能。

3 焊接接头性能分析

3.1 焊缝力学性能测试方法

高强度焊接接头性能的研究,焊缝力学性能测试,是对焊接质量好和焊接接头可靠性的考察的一项重要内容。其主要采用的试验方法包括有拉伸实验,弯曲试验,冲击试验,硬度检查,疲劳性能试验等。其中拉伸试验主要是测出焊缝及热影响区的抗拉强度、屈服强度及延伸率用来评价焊缝金属整体的承载能力和塑性变性能;弯曲试验主要是用来衡量焊缝的韧性,对焊缝缺陷的敏感程度,通过正面弯和根部弯的试验来观察有没有出现裂纹的现象以此来检验出焊缝的质量好坏以及它的延展性能如何;冲击试验主要是指焊缝的低温或者常温的冲击吸收功,用于研究该处的焊接接头受到冲击力之后的韧性和发生破坏的情况,特别是对于高强度焊接接头来说,在低温的时候容易发生突然的断裂的现象,因此冲击试验可以考察出它的抗断裂的能力;硬度检查是用来检测焊缝和热影响区域的硬化情况和是否均匀,从而可以确定出合适的焊接参数;疲劳性能试验主要是用来反复应力加载来考察焊接接头长时间工作之后的耐用性以及使用寿命长短的问题。

3.2 焊接接头的力学性能实验研究

高强度焊接接头机械性能试验研究一般是根据系统的设计方案对焊接接头的实用情况下承受能力与服役能力进行评价。主要包括拉伸、弯曲、冲击、疲劳试验等方式,对焊缝以及热影响区域的强度、韧性与持久性进行全面测试分析。拉伸试验是通过焊接接头的抗拉强度、屈服强度与伸长率进行测试来判断焊缝能否承受轴向拉力、是否具备一定的变形能力;弯曲试验则是验证焊缝及其根部韧性和是否有易于造成裂纹的因素存在,根据出现的裂纹及扩展情况进行焊接质量的评估以及是否具备较好的均匀承受力等;而冲击试验主要检测焊缝在较低温度或者受到冲击时的韧性情况,通过吸收功和断面形态的分析来确定焊接接头对于脆性破坏的抵御程度^[3]。疲劳试验是对焊接结构由于长时间的工作处于反复疲劳应变状态下,对其进行疲劳寿命与损伤累积特性的评估,从而确定高强度焊接结构的实际工作性能。

3.3 焊接接头的断裂机理及金相分析

对于高强钢焊接接头的研究来说,断裂机制及金相分析是最能探究到焊接接头内部本质的一环,在焊接时焊缝与热影响区因为局部加热、急速冷却、金属相变而存在复杂的金相组织,例如粗大马氏体、贝氏体、回火脆化组织等,这种组织的不均匀分布就是造成焊接接头断裂的主要因素之一,通过对焊接接头进行金相显微镜的观察,了解了焊缝的熔合线、热影响区、母材的晶粒大小、相结构及界面结合状态并且发现了焊接缺陷如气孔、夹渣、未熔合、微裂纹等问题的存在,提供了最直观的断裂依据,再配合着断口形貌观察、力学试验的结果就可以得出焊接接头在拉伸、弯曲或者冲击力的作用下发生的是哪种类型的断裂了,比如脆性断裂、多晶体的穿晶断裂又或者是微裂纹扩展产生的延展性断裂。研究发现焊接电流、焊接速度、线能量、预热和消氢处理都对焊缝的金相组织有着重要的影响,它们直接影响着断裂机制的发展方向。

4 高强钢焊接质量控制与工艺改进

4.1 焊接缺陷及检测方法

对于高强钢焊接而言,在焊接时出现的缺陷会影响到焊缝的力学性能及整个结构的安全性,所以对于缺陷的研究与检测就十分必要了。常见的焊接缺陷有气孔、夹杂、未熔合、裂纹、咬边、焊道表面高低不平等情况,这些缺陷容易造成焊接接头处应力集中的现象发生,从而降低了焊接接头的抗拉强度、冲击韧性、疲劳寿命等性能指标。为了保证焊接的质量,要使用多种无损检测的方法进行检验。其中超声波探伤(UT)常用来检测焊缝内部的夹杂物和裂纹,其灵敏度较高、穿透力较强;而射线探伤(RT)利用X射线或者 γ 射线可以检测出内部存在的气孔及未熔合状况,尤其适用于较厚钢板的焊缝检查;磁粉检测(MT)和渗透检测(PT)用来检测表面或近表面层的裂纹以及咬边缺陷的情况。除此之外,还有焊缝尺寸量测、外观观察以及焊接接头力学性能测试等方式来检查焊接状况。

4.2 焊接质量控制措施

为获得优质的焊接接头,保证强度、塑性、韧性等力学性能指标,在高强度钢的焊接过程中,焊接质量控制方法是对焊缝的质量以及焊接接口的可靠性至关重要的一环。首先,应该严格遵循其焊接工艺规范,合理编制焊接工艺规程,如焊接电流大小、焊接电压、焊接速度、焊丝直径、预热温度及焊后热处理温度等参数指标来保障焊缝能够达到完全熔透的效果并且金相组织能够均匀分布。其次,重视焊接材料以及设备的管理问题,做到焊接材料的质量达标、焊接设备稳定,还需要对其进行经常性的检验、维护。^[4]施工时,加强对焊工技术水平的训练及相关焊接工作的监督管理力度,严格把控焊接程序以及次序,运用

适当的焊接顺序、双面焊、多通道式焊接等方式降低残留应力和焊接变形量。最后,构建完善焊接检测监控管理体系,实施焊缝表面的观察和检测、无损测试、力学性能等方面的检测,针对出现的问题进行及时的研究并予以补救措施,避免产生积累效应。

4.3 焊接工艺改进与可靠性提升

针对高强钢的焊接工艺改进对提高焊接接头可靠性与结构整体性能有着至关重要的影响。通过对焊接热输入的合理化调控、调整焊接顺序、应用多道焊或多层焊以及双面焊接等措施来有效地减少焊接残余应力和焊接变形,改善焊接金属微观组织,使高强钢焊接接头的强度及韧性得到加强,并通过合理的预热和焊后热处理来降低冷裂倾向,以释放内部应力,提高焊接接头长寿命工作条件下的抗疲劳性能。选择合适的焊接材料和精密化的焊接设备也是工艺改进不可缺少的一部分,在使用时应根据钢材的不同种类选择相应的焊丝和保护性气体以及先进的焊接设备和自动化焊接技术来保证焊缝的充分融合,减少焊接缺陷,另外,运用实时焊接监测技术和在线的质量检测方法来进行整个焊接过程的质量管理,实时监控焊接过程中的变化,一旦出现偏差,则及时进行调整,从而达到全程质量管理的效果。

5 结语

高强钢焊接工艺及焊接接头性能的研究发现,焊接参数的选择,焊接方法的应用以及焊接材料的选择决定了焊缝组织和焊接接头的机械性能。通过控制焊接热输入量、科学地应用预热和后续加热处理、优化焊接工艺技术,配合以严格的质保措施和无损检测方法可以减少焊接缺陷率、减少焊接应力残留,增强焊缝接头的机械强度以及韧性,提升其可靠性,本文的研究不仅是对高强钢焊接工艺优化的重要参考,同时对于整个高强钢结构的安全和耐久性的保障都提供了一定程度的帮助和支持,有着较高的工程实际价值。

[参考文献]

- [1]刘立龙,王绍习.高强钢焊接工艺及焊接接头性能研究[J].装备维修技术,2025(5):33-36.
- [2]邓蕾,向高.不同焊接工艺下建筑高强钢接头性能对比试验[J].焊接技术,2025,54(9):86-89.
- [3]曹积轩,向婷,张熹,等.高强钢不同焊接工艺下焊接接头性能优化研究进展[J].天津职业技术师范大学学报,2025,35(2):14-20.
- [4]曹睿,刘梓申.高强钢焊缝金属强韧性研究进展[J].金属学报,2026,62(1):64-80.

作者简介:李铭(1998.4—),男,毕业院校:洛阳理工学院,所学专业:材料成型及控制工程,当前工作单位:安阳钢铁建设有限责任公司,职称级别:助理工程师。