



DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2026.02.01

高强钢熔化极活性气体保护电弧焊 免预热焊接技术综述

郑启文¹, 马晨阳², 杨天恩^{2,3*}, 洪华平³, 王友国⁴

1. 成都名钨科技有限责任公司, 四川 成都 610105
2. 四川大学 机械工程学院, 四川 成都 610065
3. 宁波三韩合金材料有限公司, 浙江 宁波 315311
4. 四川邦立重机有限责任公司, 四川 泸州 646003

摘要: 为了降低焊接过程中的能耗, 免预热焊接值得研究和应用, 这符合碳中和目标与绿色制造的发展趋势。免预热焊接最主要的难点是防止焊接裂纹。焊接裂纹的形成主要与母材热胀系数失配、焊接母材残余应力过大、焊接区域的脆性包括脆硬组织、魏氏组织和氢脆等因素有关。免预热导致焊前预热的缩小焊接温差、降低焊接冷却速度、清除焊件表面水分等作用取消, 因此需要在焊接材料以及焊接工序中提升抵抗裂纹的能力, 补偿预热的作用, 要从焊接母材、焊丝以及焊丝与工序匹配、焊接工艺优化等方面综合协同, 同时通过有限元模拟预测焊接变形和残余应力帮助改进免预热焊接技术。本文重点阐述了免预热MAG焊接的关键技术路径, 包括低淬硬倾向母材的选择、适配性焊丝研发及焊丝与焊接工序的强度匹配、焊接热输入与层间温度控制等工艺优化措施, 为高强钢免预热MAG焊接技术的工程应用提供参考。

关键词: MAG焊接; 免预热; 高强钢; 焊接裂纹; 残余应力

中图分类号: TG441.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2303(2026)02-0001-18

Study of Preheating-Free Welding Technology for High-Strength Steel Using Melting Electrode Active Gas Shielded Arc Welding

ZHENG Qiwen¹, DENG Chengjun², YANG Tianen^{2,3*}, HONG Huaping³, WANG Youguo⁴

1. Chengdu Mingwu Sci. and Tech. Co., Ltd., Chengdu 610105, China
2. College of Mechanical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China
3. Ningbo Sanhan Alloy Materials Co., Ltd., Ningbo 315311, China
4. Sichuan Bonny Heavy Machinery Co., Ltd., Luzhou 646003, China

Abstract: As the demand for sustainable manufacturing practices increases, preheat-free welding emerges as a promising solution to reduce energy consumption in welding processes. However, the primary challenge lies in preventing welding cracks, which can result from several factors: mismatched thermal expansion coefficients of base materials, excessive residual stresses, brittleness in the welding zone—such as hard brittle structures, Widmanstätten structures, and hydrogen embrittlement. The lack of preheating leads to a smaller temperature differential before welding, slower cooling rates, and diminished moisture on the surface of welded components. To effectively mitigate cracking, enhancing the resistance of both

收稿日期: 2024-12-17 修回日期: 2025-06-09

基金项目: 四川大学-泸州市人民政府战略合作项目(2022CDLZ-7); 云南省重大科技专项计划(202302AA310038)

通讯作者: 杨天恩(1986—), 男, 博士, 副教授, 主要从事先进焊接成形研究。E-mail: yangtze86@163.com。

the welding materials and the overall process is essential, compensating for the typically beneficial effects of preheating. This necessitates a comprehensive approach that considers the base material, welding wire compatibility, and the optimization of welding techniques. Moreover, employing finite element modeling to predict deformation and residual stresses can significantly improve preheat-free welding methods. This paper focuses on elaborating the key technical pathways for preheating-free MAG welding, including the selection of base materials with low hardenability, the development of adaptable welding wires, the strength matching between welding wires and welding processes, and process optimization measures such as the control of welding heat input and interpass temperature. It provides a reference for the engineering application of preheating-free MAG welding technology for high-strength steels.

Keywords: MAG welding; preheating-free; high-strength steel; welding cracks; residual stress

引用格式:郑启文, 马晨阳, 杨天恩, 等. 高强钢熔化极活性气体保护电弧焊免预热焊接技术综述[J]. 电焊机, 2026, 56(2): 1-18.

Citation: ZHENG Qiwen, DENG Chengjun, YANG Tianen, et al. Study of Preheating-Free Welding Technology for High-Strength Steel Using Melting Electrode Active Gas Shielded Arc Welding[J]. Electric Welding Machine, 2026, 56(2): 1-18.

0 引言

高强钢广泛应用于重型工程机械如抓料抓钢机、报废汽车拆解机、矿用挖掘机、装载机、煤矿液压支架等的焊接结构件。熔化极活性气体保护电弧焊(MAG)因具备焊接效率高、接头成形质量稳定等显著优势,成为高强钢结构件关键焊接成形环节的核心工艺。然而,高强钢合金体系复杂、淬硬性大,焊接中容易出现冷裂纹和热影响区脆化^[1-2],这严重影响焊接接头的抗拉强度与冲击韧度,对结构件的服役安全性构成潜在威胁。

为保证高强钢焊接接头的抗拉强度和冲击韧度,工业生产中普遍采用焊前预热工艺。常用的预热方法有火焰加热、红外线加热、工频感应加热等^[3]。通常焊前预热能缩小区域与母材的温差、降低焊接冷却速度,进而减少热影响区淬硬组织的生成;而且焊前预热还能清除焊件表面水分,降低焊缝扩散氢的含量,减少气孔等缺陷的产生。但对于重型机械中的高强钢大型焊接结构件而言,焊前预热工序不仅会加剧热影响区的软化程度,还相当于多增加了一道焊接工序,导致能耗和焊接成本增加、延长了焊接周期,成为制约生产效率提升的瓶颈。因此,在保证焊接质量、满足焊接结构件应用需求的前提下,研发并推广焊前免预热(亦称不预热)工艺,已成为高强钢焊接技术发展的重要方向。

免预热MAG焊接技术能够提高焊接效率、缩短交货周期、降低能耗和焊接成本,契合碳中和背景下绿色制造的发展趋势。随着智能制造的进步,该技

术正朝着自动化和智能化方向快速演进。自动化焊接系统的应用不仅提升了焊接过程的一致性和生产效率,还有效降低了人工成本。在技术创新层面, Tessema等^[4]将小波变换、傅里叶变换和时频分析等先进信号处理技术应用于等离子体-MAG焊接过程,借助麦克风构建监测与数据采集系统,实现了焊接缺陷的早期识别、焊缝质量的一致性控制及焊接参数的优化,提升了工艺可靠性与焊缝完整性; Han等^[5]基于响应面法(RSM)建立数学模型,系统分析了电流、激光功率、焊接速度、激光-电弧距离及焊接位置等参数对全位置低功率脉冲激光-MAG混合焊接焊缝几何形状的影响,模型预测误差控制在8.1%以内,为焊缝成形精准调控提供了有效手段。

本文总结了MAG焊接技术,分析了高强钢焊接应力和焊接裂纹形成因素,全面概括了各级别高强钢的免预热焊接工艺要点,重点阐述了高强钢MAG免预热焊接的关键技术因素和辅助分析方法,以期为该技术的工程化应用提供参考。

1 熔化极活性气体保护电弧焊(MAG)技术概述

气体保护焊因焊接效率高、焊缝质量好等优势,获得了广泛的应用。目前主流的气体保护焊方法包括熔化极活性气体保护焊(MAG)、CO₂气体保护焊、熔化极惰性气体保护焊(MIG)。其中,MAG焊接是在氩气中加入少量的氧化性气体(O₂, CO₂或其混合气体)作为保护气体,通过连续送进的焊丝

与熔池之间建立电弧作为热源实现熔化焊接,其焊接系统构成如图1所示。

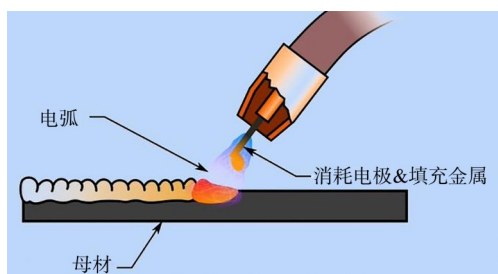


图1 MAG焊接示意

Fig.1 Schematic diagram of MAG welding

相较于其他气体保护焊方法,MAG焊接的技术优势为:(1)保护气体的活性组分可优化熔滴过渡稳定性,抑制阴极斑点漂移,提升电弧燃烧连续性;(2)调控焊缝熔深形态与表面成形质量,增大电弧热功率密度,改善焊缝冶金反应效率;(3)工艺参数可调范围宽,与CO₂气体保护焊相比,飞溅量更

低、焊丝熔敷率更高,焊缝气孔缺陷发生率显著降低,力学性能更优^[6];(4)电弧特性与MIG焊相近,可灵活采用短路过渡、喷射过渡及脉冲喷射过渡等多种熔滴过渡模式^[7],适配不同厚度、材质的焊接需求;(5)焊接速度快、生产效率高^[8],且抗锈能力强、焊前清理要求宽松、操作便捷,可实现全方位焊接,尤其适用于碳钢、合金钢及不锈钢等黑色金属材料的焊接加工^[9]。

熔滴过渡是决定MAG焊接质量的关键环节,主要形式包括自由过渡、接触过渡(短路过渡)和渣壁过渡,这些过渡方式对焊接过程的稳定性、焊缝成形、飞溅以及焊接接头的质量有着显著的影响。Zhang等^[10]研究了高强度钢激光-MAG混合焊接工艺的稳定性,通过高速摄像机和电信号分析仪探究了激光功率与电弧功率比对焊缝形态、熔滴传输特性和焊接稳定性的影响(见图2a)。结果表明,激光

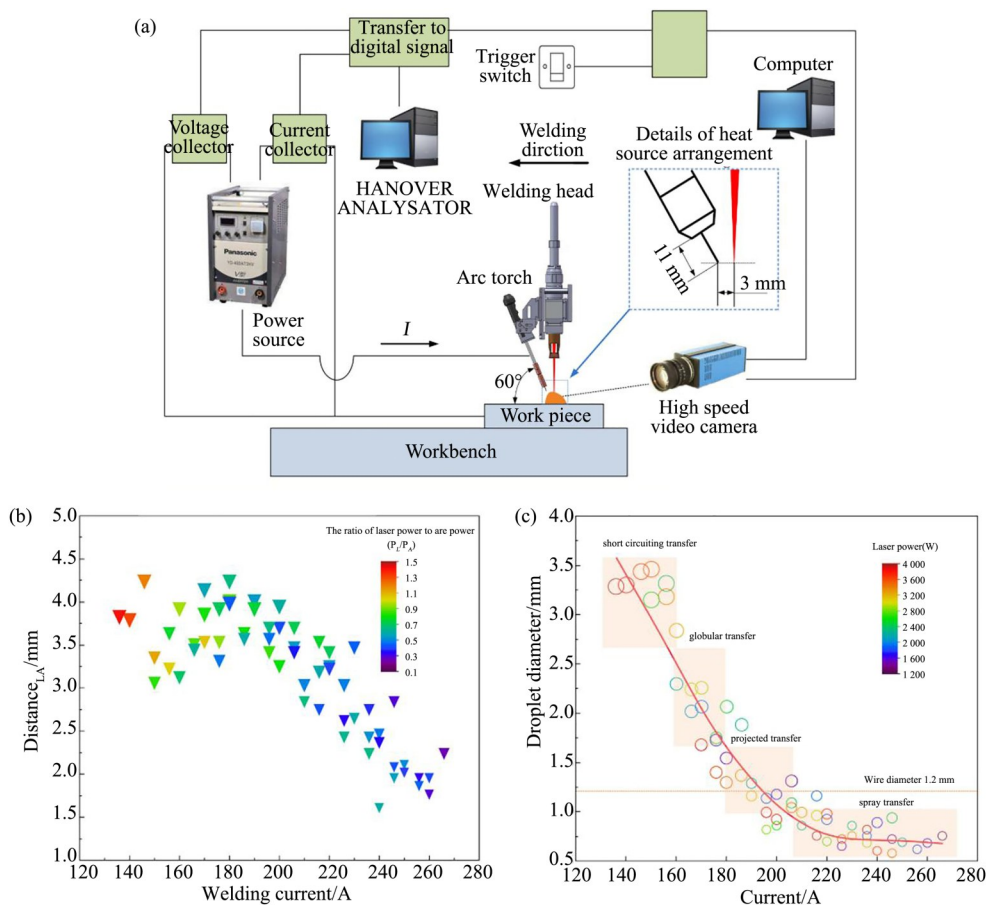


图2 (a)实验系统示意;(b)电流与激光和电弧之间的实际距离的关系;(c)电流与液滴直径的关系

Fig.2 (a)Schematic diagram of experimental system;(b)The relationship between current and actual distance between laser and arc;(c)Relationship of the current and the diameter of droplet

功率主导焊缝熔深,电弧功率主要影响焊缝宽度,激光与电弧的间距显著改变熔滴传输模式和激光能量与电弧能量的比例(见图2b,2c);焊接电流是熔滴过渡模式的关键因素,不同过渡模式有不同的转换电流,当熔滴传输模式为投射传输时,焊接稳定性最佳。

Mukherjee等^[14]研究了在气保金属极电弧焊技术下,不同金属转移模式对低镍奥氏体不锈钢焊缝金属的晶粒结构和晶粒生长方向的影响,如图3所示。研究发现,熔滴过渡模式通过改变浮力、电磁力和马兰戈尼力等驱动力,直接影响熔池热流与流体流动特性:在短路过渡模式下,高马兰戈尼力和低电磁力导致熔池较浅且宽;在喷射过渡模式下,高电磁力和低马兰戈尼力使得熔池较深且窄;脉冲喷射过渡模式则因高马兰戈尼力和高峰值电流的共同作用,增加了熔池的宽度和穿透深度。此外,焊缝金属的凝固过程、晶粒结构和晶粒生长方向完全受金属转移模式的支配,并且对于特定的金属转移模式,无论使用哪种填充线,晶粒结构和生长方

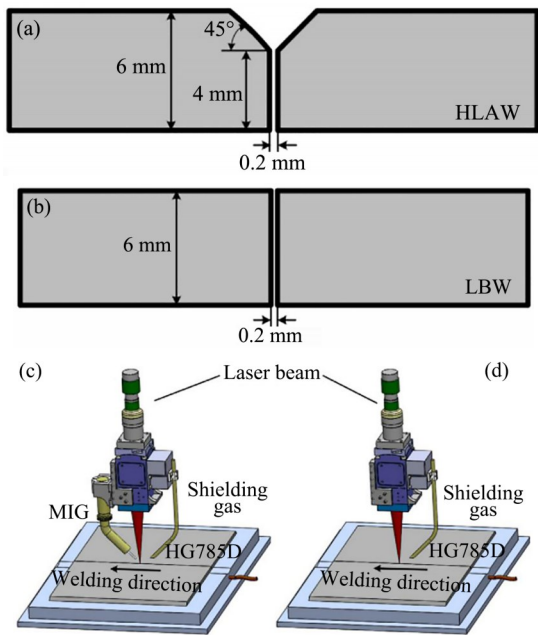


图3 两种焊接方法的坡口配置:(a)混合激光-MAG焊接;(b)激光焊接;在两种焊接方法中使用的实验装置:(c)HLAW方法;(d)LBW方法

Fig. 3 Schematic of the groove configuration for two welding methods: (a) hybrid laser-MAG welding; (b) laser welding; Schematic of the experimental setup used in two welding methods: (c) HLAW method; (d) LBW method

向都能保持一致。这项研究提供了对焊接参数如何影响焊缝金属微观结构的深刻见解,对于优化焊接工艺和提升焊接质量具有重要的指导意义。

针对脉冲MAG焊接的电弧稳定性控制难题,Sun等^[13]提出了一种创新的基于峰值电压反馈的模糊控制策略。该策略通过脉冲频率调制(PFM)原理(见图4a)实现脉冲波形精确调制,以基值时间 T_b 为控制变量、峰值电弧电压 U_f 为被控制变量,采用查表法简化模糊控制的实时计算流程,显著提升系统响应速度。上坡焊实验结果表明(见图4b、4c),该控制器可有效补偿焊炬高度变化带来的电弧长度波

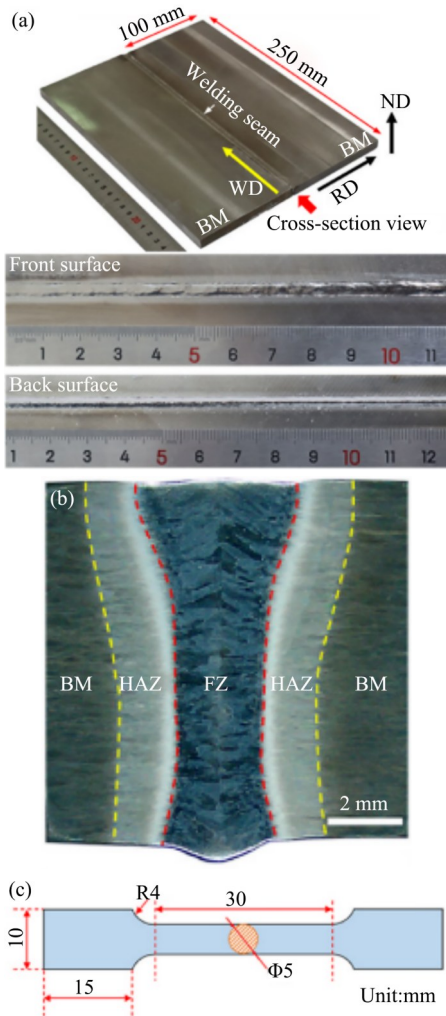


图4 电子束焊接接头和拉伸样品尺寸:(a)10 mm厚亚稳 β 钛电子束焊接接头图片;(b)电子束焊接接头的代表性横截面视图;(c)拉伸样品

Fig. 4 EBW joint and tensile sample dimensions: (a) Picture of the 10 mm-thick metastable β titanium EBW joint; (b) Representative cross-sectional view of the EBW joint; (c) Illustration of tensile sample

动,维持焊接过程连续性与稳定性;同时,平均焊接电流的轻微提升使焊缝宽度呈现均匀增宽趋势,为脉冲MAG焊接的质量控制提供高效技术方案。

Liu等^[11]通过对比激光-MAG焊接(HLAW)和激光束焊接(LBW)的工艺特性与接头性能(见图5)发现,两种方法均在熔融区形成类似的板条马氏体微观结构,但HLAW焊缝因热输入更高、冷却速率更小,晶粒尺寸较粗,晶体学取向也更加随机;HLAW焊缝热影响区还出现M-A组分和等轴铁素体等不同的微观组织,而LBW焊缝以细晶马氏体为主。性能测试结果显示,HLAW焊缝熔融区显微硬度低于LBW,但冲击韧性更优,且热源熔化效率较LBW提升26%,为兼顾焊接效率与接头韧性提供有效技术路径。

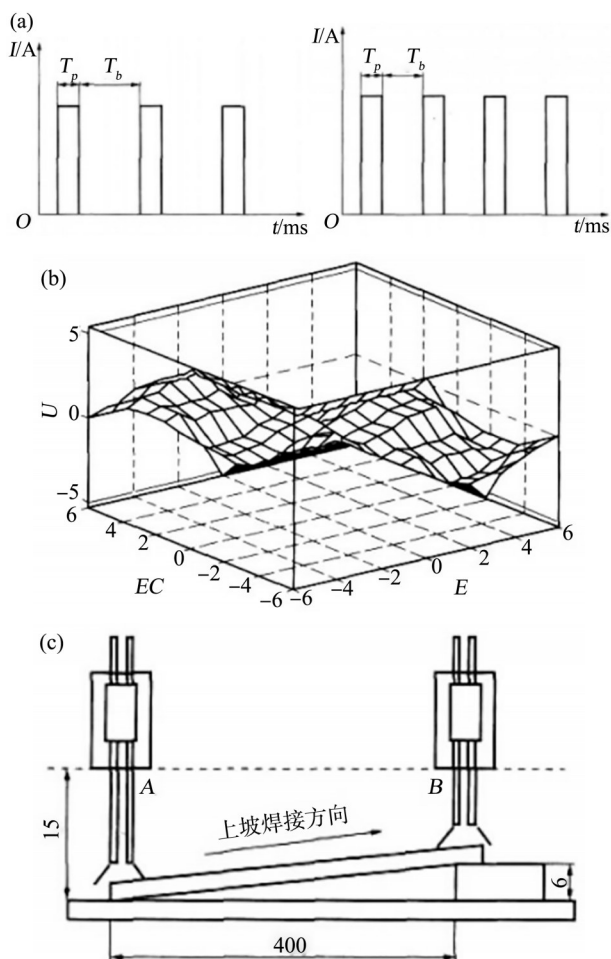


图5 (a) PFM调节机理示意; (b) 模糊输入E、EC与输出U的关系; (c) 上坡焊试验

Fig. 5 (a) Working principle of PFM; (b) Sketch of E, EC and U relationship; (c) Sketch of upgr ade welding experiment

作为高强钢连接的重要工艺,电子束焊接(EBW)凭借高能量密度与强穿透力,可实现金属部件高精度焊接,且能有效降低焊接变形与残余应力。该工艺适用于真空或保护气氛环境,可确保焊接过程中材料的纯净度和焊缝的性能。Zeng等^[12]针对电子束焊接(EBW)技术在制造高强度准稳定 β 钛合金接头时的微观结构演变及其力学性能高强度准稳定 β 钛合金的EBW接头开展研究(见图6),结果表明,EBW接头的熔融区(FZ)中形成了粗大的柱状 β 晶粒,未发现 α 相,且析出纳米尺度的 ω 粒子;在热影响区(HAZ)中,经历了二次 α 相的大量溶解和显著的晶粒粗化现象,在FZ和HAZ的交界处存在少量等轴 β 晶粒构成的部分熔融区。与母材相比,EBW接头焊缝区域出现明显软化,其抗拉强度下降17%,伸长率降幅达73%。这一现象归因于拉伸应变主要集中在狭窄的FZ内,导致过接头过早断裂和整体延展性的恶化。

2 免预热焊接应力和焊接裂纹的形成因素

免预热焊接取消了传统预热工序缩小焊接温差、降低冷却速度及清除焊件表面水分的核心作用,若仍采用常规预热焊接的材料和工序参数,极易引发焊接裂纹。研究表明,焊接裂纹的形成主要与母材热胀系数失配、焊接母材残余应力过大、焊接区域的脆性包括脆硬组织、魏氏组织和氢脆等以及焊接接头的气孔缺陷等因素有关。

2.1 母材热胀系数失配

母材的热膨胀系数失配是焊接残余应力的一个重要原因,尤其是异质高强钢焊接,而残余应力是导致焊接件裂纹的直接原因。即使不立即产生焊接裂纹,在焊接件使用过程中,焊接残余应力的存在也会降低焊件的疲劳强度,缩短其使用寿命。在焊接加热阶段,母材近焊缝区域随温度升高自由膨胀,不同母材的热膨胀系数导致膨胀量不一样,而在焊接冷却阶段,由于焊丝金属凝固后将各母材连接成整体,使得各母材的收缩运动受到相互约束,其中热胀系数小的母材会承受持续的拉应力。

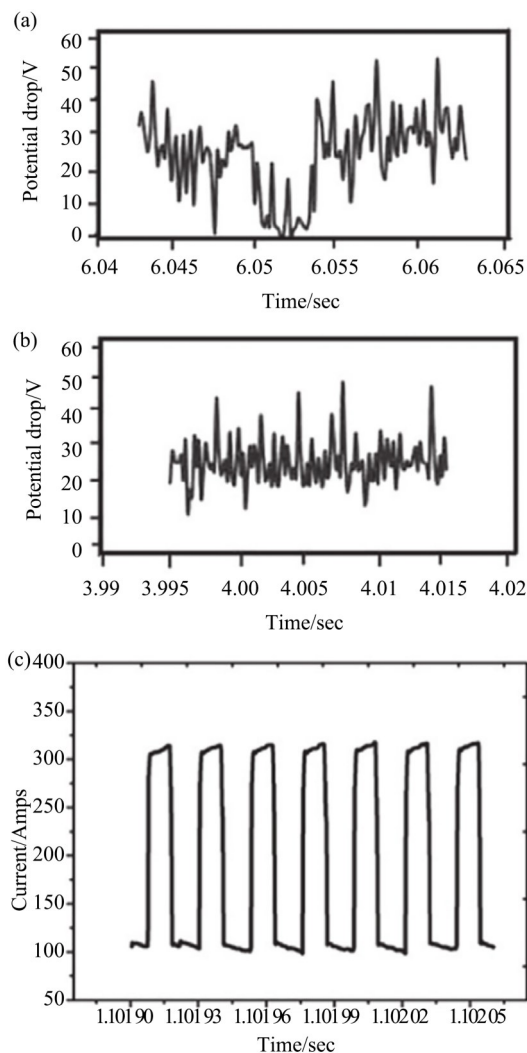


图6 (a)短路过渡和(b)喷射过渡的电位降-时间曲线以及(c)脉冲喷射过渡的电流-时间曲线

Fig. 6 Potential drop vs time curves for (a) short-circuit and (b) spray modes of metal transfer and current vs. time curve for (c) pulse spray mode of metal transfer

研究证实,离焊缝越近,应力值越大^[15-16],如图7所示,当拉应力超过母材或者焊接接头的抗拉强度极限时则会引发焊接裂纹。

2.2 焊接母材残余应力过大

焊接过程中,当焊接温度高于焊接母材高强钢的奥氏体转变温度时,若焊接件与周围环境的温差较大,快速降温过程会导致母材内部残余应力累积。一方面,焊接冷却速度较快,导致母材截面的内外温差较大,外围区域冷却速度快,内部区域冷却速度慢,导致内外收缩不均匀,这会引起残余热应力。另外一方面,母材中不同组织的比热不同,

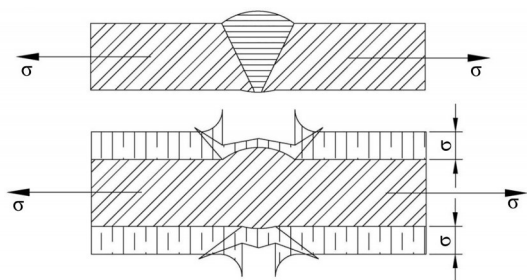


图7 对焊焊接接头应力示意

Fig. 7 Schematic diagram of stress in butt welded joints

其中马氏体的比热大,而奥氏体的比热小,因此焊接过程中较快的冷却速度条件下发生的马氏体转变导致钢的体积膨胀。在较大的冷却速度条件下,由于母材截面上的内外温差增大,使得马氏体转变不能同时进行,外围先冷却则先发生马氏体转变,从而变成比热大的马氏体,内部的依然是比热小的奥氏体,因此这种相的差异造成母材组织应力。当热应力和组织应力叠加后的残余应力超过焊接接头母材区域的强度时,即会引发焊接裂纹。

焊接过程的快速加热和冷却会导致材料微观结构发生显著变化,这些变化包括相变、晶粒的长大以及第二相的析出。这些微观结构的演变对材料的硬度、韧性和应力分布产生重要影响,从而直接关系到焊接接头的整体性能。焊接热循环引起的热应力和组织应力在焊接区域积累,特别是在焊缝及其邻近的热影响区(HAZ)中。这些应力的累积可能导致焊接接头中产生残余应力,进而影响其疲劳寿命和抗裂性能。微观结构的变化,例如晶粒的细化或第二相的分布,对应力的分布和传播路径有着显著的影响。具体来说,晶粒细化可以增强材料的强度和韧性,这对于提升焊接接头的性能至关重要。细化的晶粒能够提供更多的晶界,这些晶界作为位错运动的障碍,增加了材料的屈服强度。同时,晶粒细化还能提高材料的韧性,因为更多的晶界可以阻碍裂纹的扩展,从而提高材料对裂纹扩展的抵抗能力。此外,第二相的析出可以影响材料的硬度和应力分布。第二相颗粒可以作为应力集中的中心,影响位错的运动,从而改变材料的塑性变形行为。在某些情况下,第二相可以作为裂纹扩展的障碍,提高材料的断裂韧性。

Keränen 等^[17]深入探讨了 MAG 焊接工艺对超

高强度钢矩形空心截面残余应力的影响。研究发现,焊接过程中的热输入导致了矩形空心截面的冷成形区域,特别是在角部与平坦侧面之间,出现了微观结构的显著变化。这些变化对于准确评估残余应力至关重要。在微观层面,残余应力的存在使得晶格间距发生改变,拉应力导致晶格间距增大,而压应力则使其减小。焊接产生的热量对材料的性能产生了影响,这些性能通常通过热机械加工过程获得,如先前对S960钢的研究结果所证实(见图8)。焊接不仅引起了微观结构和机械性能的变化,还产生了高残余应力,这些应力对焊接接头的疲劳性能有着显著影响。此外,研究还考察了残余应力与钢材料等级之间的关系,发现高强度钢在角部区

域倾向于产生压缩应力,而低强度材料则倾向于产生拉应力。这些重要的发现突显了焊接残余应力研究的重要性及其预测的可能性,为各类工程应用中的焊接结构提供了宝贵的设计参考和依据。

2.3 焊接区域脆性高

高强度钢焊前免预热的焊接裂纹通常是冷裂纹。冷裂纹的产生原因除了焊接应力过大外,主要是焊接母材脆化的原因。脆化可能是焊接热影响区产生了淬硬组织,或者是低韧性魏氏组织,或者是氢脆。随着焊接接头强度级别的增高,热影响区淬硬倾向增大,当焊接能量较低时就会产生淬硬组织。焊后保温工艺将降低焊接接头的冷却速度,减少脆硬组织的形成。魏氏组织是奥氏体在分解时形成

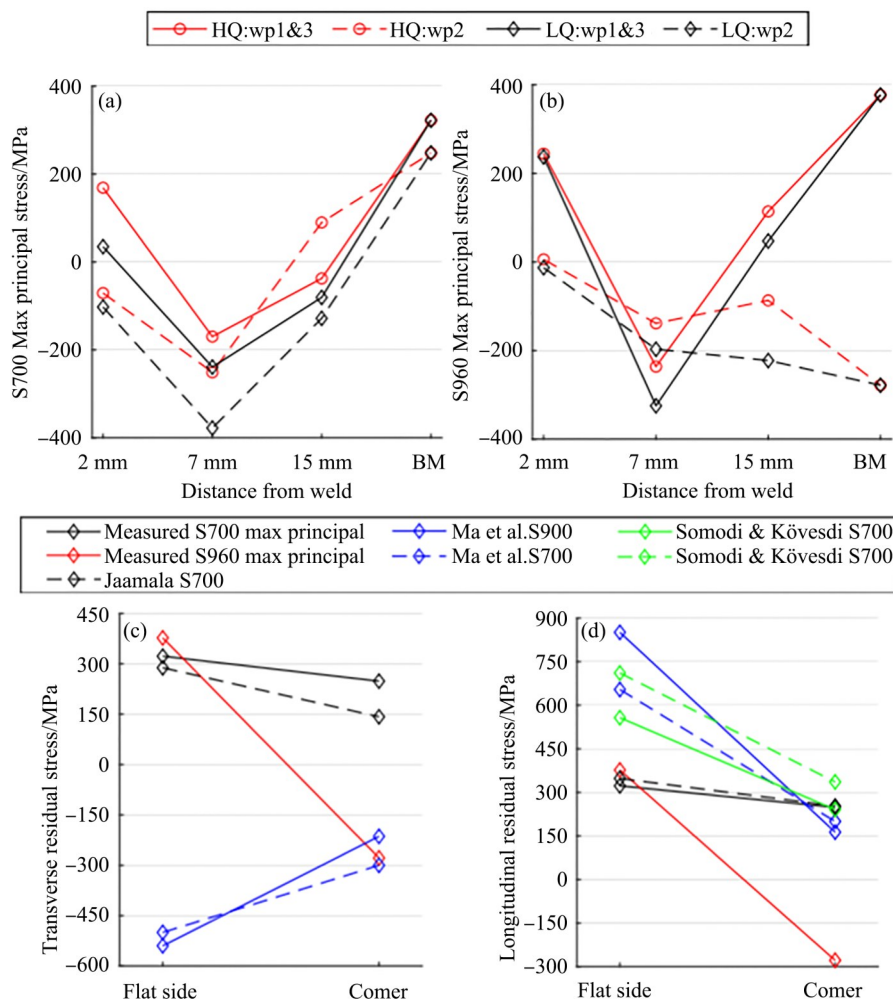


图8 S700(a)和S960(b)空心截面的实测最大主残余应力的平均值,以及未焊接(BM)空心截面的比较:横向(c)和纵向(d)残余应力与实测主应力

Fig. 8 Mean of the measured maximum principal residual stresses for S700 (a) and S960 (b) hollow sections, and comparison of unwelded (BM) hollow sections: transverse (c) and longitudinal (d) residual stresses with measured principal stresses

的具有一定取向的片条状(或针状)的铁素体(或渗碳体)组织。魏氏组织的形成必须具备使晶粒长大的过热温度和随后碳原子仅能扩散到一定程度的冷却速度^[18]。另外,MAG焊接气体保护效果不佳会导致空气中水分进入焊接区域,水分则是氢(H₂)的来源,可能造成氢脆,氢在不同金属组织中的溶解度和扩散系数不同,焊接过程中氢的行为可能导致氢致延迟裂纹的形成。氢在奥氏体中的溶解度大,而在铁素体中的溶解度小,焊接冷却时氢的溶解度下降,在铁素体和珠光体中快速扩散,可能导致富氢区域的形成,从而增加裂纹风险。对于MAG焊接工艺而言,焊丝伸出长度、气体流量、极性选择等都会影响焊接区气体保护效果、焊缝氢含量以及产生氢气孔的倾向。

2.3.1 脆硬组织的影响

脆硬组织降低焊接接头的塑性和韧性。刘东明^[19]研究认为,对于多层多道焊接而言,填充盖面层与过渡层熔合区出现脆硬组织是焊材合金元素含量差异大、元素发生扩散而形成的。当过渡层中合金元素含量高于填充盖面层,形成较大的元素分布差异,在焊接时熔合区马氏体成分不均匀,促使过冷度变大,由于含碳量较低,因此形成了板条马氏体,即脆硬组织。该马氏体层的厚度与熔合区厚度成正比,而熔合区的厚度是由合金元素扩散控制。脆硬组织厚度由热输入量决定,因此,可以通过控制热输入量来控制脆硬组织厚度。

Skowrońska等^[20]采用混合等离子体转移电弧-金属活性气体(PTA-MAG)技术焊接的RAMOR 500防弹高强度钢(初始马氏体结构,强度达1 450 MPa)的研究表明,如图9所示,该混合热源焊接马氏体结构钢时,即便使用屈服强度为890 MPa的高强度钢填充材料,冷裂缝风险仍处于较低水平。这

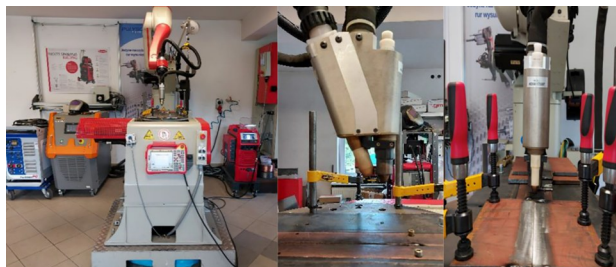


图9 研究中使用的混合PTA-MAG机器人焊接站

Fig. 9 Hybrid PTA-MAG robotic welding station used in research

种基于等离子体的混合焊接技术因其高效率、焊缝金属含量的减少以及对边缘准备的低要求,有望成为防弹钢焊接的优选替代方案。焊接接头中最脆弱的区域是靠近基材的热影响区(HAZ),该区域因焊接热循环经历了二次回火,导致软化。为实现无缺陷的全熔透对接焊接接头并在焊接过程中有效覆盖焊缝间隙,所需的热输入量约为0.57 kJ/mm。

2.3.2 魏氏组织的影响

钢的过热和随后一定的冷却速度是魏氏组织形成的两个条件,因此,调控焊接后冷却速度可有效抑制魏氏组织的形成。李命兰^[18]认为,焊接后快冷或缓冷均能防止魏氏组织的形成。快冷会使碳原子的扩散受到抑制,铁素体来不及析出,无法形成魏氏组织;缓冷能使碳原子充分完成扩散过程,魏氏组织也难以形成。对于免预热焊接,为了抑制魏氏组织同时减少焊接应力,应优先采用焊后缓冷。

2.3.3 氢脆的影响

氢脆会降低高强度钢焊接件的塑性。高心心等人^[21]认为,相比于焊缝区和母材区,高强度钢焊接件中热影响区的氢扩散系数和溶解度更大,氢原子在热影响区更容易通过,说明热影响区的氢渗透能力更强,因此热影响区具有较强的吸氢倾向。李天雷等人^[22]研究发现,在相同条件下,相比母材和热影响区,焊缝位置的断面收缩率明显下降,表现出较高的氢脆敏感性。与在空气环境中相比,焊缝在0.36 MPa氢分压环境中的疲劳裂纹扩展速率增大了1个数量级,说明氢能够增大材料的疲劳裂纹扩展速率。

3 免预热MAG焊接材料

3.1 焊接母材高强钢的选型原则

根据上文所知,在热影响区产生淬硬组织,导致焊接钢母材强度降低,当焊接应力超过母材的强度时则产生焊接裂纹。焊前采用预热工艺的其中一个目的是减小焊缝与母材之间的焊接温度差并且降低焊接冷却速度,降低马氏体等淬硬组织的生成和含量^[23]。焊接区域的脆硬倾向与母材的化学成分有关。钢材碳当量越大,脆硬冷裂倾向越大。根据碳当量计算方法^[24-25],如式(1)所示,在各种元

素中,碳对钢组织的脆硬及冷裂影响最显著。

$$C_{eq}=w_C+\frac{1}{6}w_{Mn}+\frac{1}{15}w_{Ni+Cu}+\frac{1}{5}w_{Cr+Mo+V}\quad (1)$$

因此对于焊接母材高强钢,当含碳量较高时,具有明显的脆硬倾向,因而冷裂纹敏感性较大。高碳含量时马氏体转变温度较低,难以产生“自回火”效应,且马氏体中碳过饱和程度大、点阵畸变严重,硬度和脆性大,形成脆硬组织,免预热焊接时容易产生冷裂纹。低碳含量时,淬火后得到低碳马氏体,并且会发生自回火现象^[26],脆性小,焊缝产生裂纹的倾向小。因此,在满足强度等性能要求的条件下,尽量降低碳含量以达到抗裂纹、提高塑韧性的目的。如果采用超低碳钢,即使不焊前预热,也不产生脆硬组织,比如,超低碳贝氏体钢(ULCB)的热影响区硬度与冷却速率无关^[27],在较快的冷却速率下不产生淬硬组织。

冲击断裂试验^[28]表明,裂纹在扩展过程中,在母材区的裂纹扩展速率比焊缝区的裂纹扩展速率高几个数量级。而当钢的焊接热影响区(HAZ)最高硬度<350 HV 时,母材钢具备良好的抗冷裂纹性能,可以免预热焊接^[29]。由于碳钢的硬度随着碳含量的降低而下降,韧性随着碳含量的降低而增加,因此从控制热影响区硬度与阻碍裂纹扩展的角度,均证实免预热焊接预防裂纹需母材降低碳含量。

3.2 焊丝成分及焊接工序匹配

3.2.1 焊丝(条)成分

焊丝成分的选择是一个复杂的过程,需要综合

考虑焊接材料的类型、焊接方法、服役条件以及成本效益等因素,这直接影响焊缝的机械性能、耐腐蚀性、热影响区(HAZ)的特性以及焊接过程中的熔池行为。正确的选择可以确保焊接结构的可靠性和经济性,否则可能导致焊接缺陷、性能下降甚至结构失效。其他类型的焊丝对比如表 1 所示。

Kang 等^[30]深入探讨了碳含量(0.061~0.080wt.%)对 1 000 MPa 级海洋用钢焊丝沉积金属的微观结构和力学性能的影响。研究发现,随着碳含量的升高,马氏体相的比例显著增加,与此同时,贝氏体和残余奥氏体的含量相应减少。此外,微观结构中的片状形态也从“交织”转变为“平行”结构(见图 10)。屈服强度随之从 915 MPa 提升至 1 007 MPa,然而,在-50 ℃时的冲击能量却从 120 J 降至 59 J。马氏体比例的增加虽然提高了材料的强度,但贝氏体与马氏体的“交织”结构以及高角度晶界的存在有效阻碍了裂纹的扩展,从而增强了材料在低温条件下的冲击韧性。这些发现对于优化海洋用钢焊丝的性能具有重要意义。

焊缝中的结晶裂纹是在焊接凝固后期,由于低熔点共晶在晶界形成液态薄膜,在拉应力作用下沿着晶界形成的^[29,31],其产生与焊缝中的杂质(如 S、P)等有关。Mn 具有脱硫的作用,可以提高焊缝的抗结晶裂纹能力^[30]。Mo 可以提高钢的塑性和韧性,减少裂纹倾向^[32]。Ni 元素能细化晶粒,有利于提升抗断裂能力^[33]。此外,焊接金属处于液态阶段所形成的氧化产物 FeO 熔池结晶后,残留在焊缝金

表 1 各类型焊丝对比
Table 1 Comparison of Various Types of Welding Wires

种类	型号	成分	硬度	优/缺点
钴基堆焊焊丝	HS112	1.2%~1.7% 碳, 26%~32% 铬, 7%~9.5% 钴	45~50 HRC	具有较好的耐磨性和耐热性,适用于 650 ℃以下环境
	HS113	2.5%~3.0% 碳, 27%~33% 铬, 15%~19% 钴	55~60 HRC	耐磨性好,但抗冲击性较差,适用于 650 ℃以下环境
	HS114	2.4%~3.0% 碳, 27%~33% 铬, 11%~14% 钴	HRC≥52	耐磨性和耐蚀性良好,但抗冲击韧性差
	HS115	0.15%~0.35% 碳, 25.5%~29% 铬, 5%~6% 钴	—	—
药芯焊丝	低碳钢及高强钢用药芯焊丝	0.3%~0.8% 钼	52~57 HRC	品种多、用量大,多数为钛型渣系,焊接工艺性好,焊接生产率高,主要用于造船、桥梁、建筑、车辆制造等部门
	不锈钢用药芯焊丝	12%~32% 铬, 6%~22% 镍, 0.2%~6% 钼	HRC≥30 至 HRC≥60 不等	具有工艺性能好、力学性能稳定、生产效率高等特点,应用于石化、压力容器、造船和工程机械等行业
铝合金/不锈钢接头药芯焊丝	ZnAl15 药芯焊丝	CsAlF4、KAIF4	—	所得接头抗拉强度可达 121 MPa,经 280 ℃保温 30 min 焊后热处理后,抗拉强度可达 180 MPa
	AlSi12 药芯焊丝	12.15% 硅	—	所得接头抗拉强度最高可达 162 MPa,经 280 ℃保温 30 min 焊后热处理后,抗拉强度可达 166 MPa

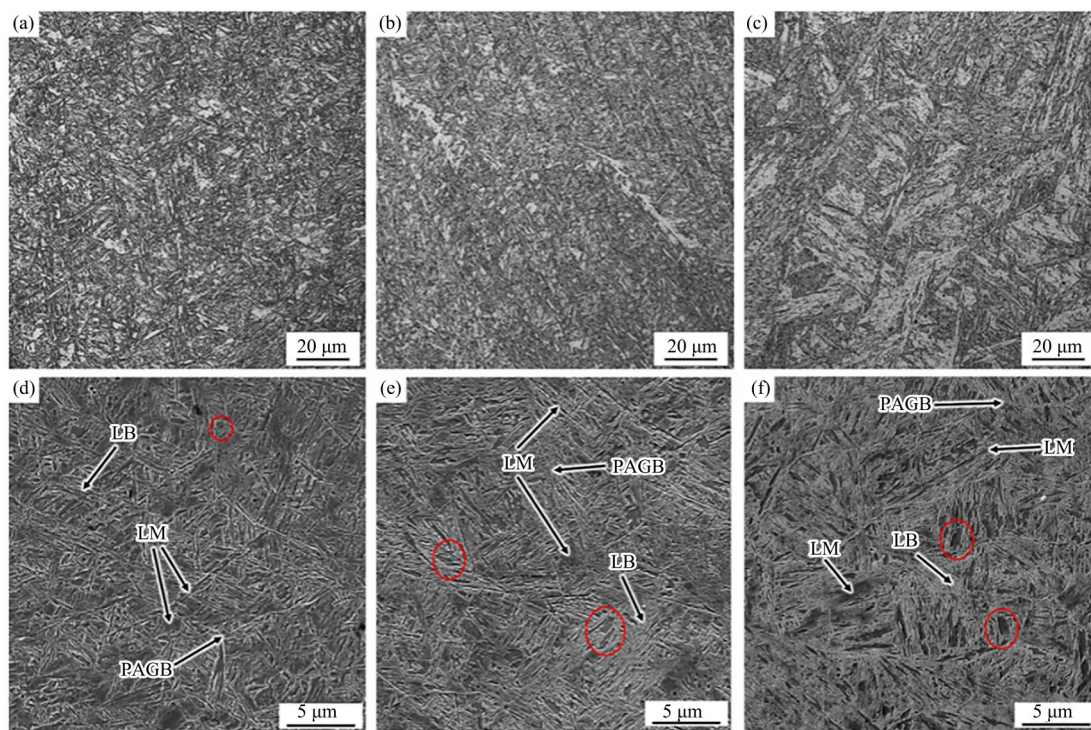


图 10 不同碳含量熔敷金属的 OM 和 SEM 显微组织: (a,d)0.061 wt.%; (b,e)0.070 wt.%; (c,f)0.080 wt.%

Fig. 10 Microstructure of deposited metal OM and SEM with different carbon contents: (a,d)0.061 wt.%; (b,e)0.070 wt.%; (c,f)0.080 wt.%

属中的 FeO 将使焊缝中的含氧量增加而降低力学性能,焊丝中的脱氧剂 Si、Mn 能够阻碍力学性能的降低,进而减少焊接裂纹的倾向。

焊丝中 Ni 元素能够提高焊接接头的冲击韧性。刘政军等^[34]采用药芯焊丝焊接 WQ960 高强钢,研究发现,在常温冲击试验或者 -20 °C 低温冲击试验中,无合金元素 Ni 的冲击试样断口均呈现脆性断裂特性,属于解理断口,尤其是低温冲击断口形貌呈河流状,撕裂棱很少。加入 1.22%Ni 的冲击断口呈现出韧性断裂特征,有大量的韧窝和撕裂棱,常温下韧窝较深,低温下在局部韧窝内发现有拉断的质点,可能是针状铁素体组织,该组织提高了接头的低温冲击韧性。

由于合金元素在焊缝金属结晶过程中可形成质点,这些形核质点促进了液态金属的结晶;合金元素含量越多,焊缝金属结晶过程中形核质点的数量就越多,结晶就越快,组织就越细小。张敏等^[35]在焊条药皮中加入合金元素 Ni 和 Mn,添加合金元素 Ni 后,焊缝组织细小致密,马氏体片层更加细小。随添加合金元素 Mn 含量增多,焊缝中的马氏体片层更加均匀,马氏体位向更加明显。同时添加合金

元素 Ni 和 Mn 的焊缝组织明显细化。由于晶粒细化,马氏体板条束的尺寸也细化,对焊缝金属产生良好的韧化效果。

对于 MAG 焊接,由于在惰性气体中加入了一定比例的氧化性气体,焊接区高温阶段少量金属发生氧化是不可避免的,碳与氧的亲合力比 Fe 大,为了防止气孔以及降低焊缝产生裂纹的倾向,需限制焊丝中的碳含量。董贵斌等人^[28]研究表明,在层间温度 160~210 °C,热输入 12~28 kJ/cm 的焊接条件下,在脱氧剂含量接近的条件下 (0.711%~0.749% Si, 1.840%~1.892% Mn),碳含量 (0.082%) 较低的焊丝其焊接接头抗拉强度为 778~784 MPa, 180° 弯曲时无裂纹,而碳含量 (0.112%) 较高的焊丝其焊接接头抗拉强度为 739~742 MPa, 120° 和 180° 弯曲时裂纹均为 1 mm。

3.2.2 焊接工序与焊丝强度匹配

通常, MAG 焊接采用多层多道焊工艺,考虑到免预热、防裂纹的要求,焊丝应分焊接工序作强度匹配。手工打底焊点固焊接宜采用韧性优异的焊丝,可有效降低焊缝的开裂倾向,并通过点固焊缝对焊道加固,增加整体焊件的刚度,减少后续整体

打底焊时引起的焊道变形,一定程度上减小打底焊时的焊缝冷裂倾向。手工整体打底焊宜采用强度稍高、韧性同样较好的焊丝,有利于减少焊接裂纹。工业机器人整体打底焊、填充焊和盖面焊时,由于焊接机器人的工作电流较大,对焊接裂纹敏感性较强,所用的焊丝强度更高。

孟贺超等^[36]基于焊丝与焊接工序强度匹配原则研究了免预热焊接(焊前环境温度为 5℃以上)20~50 mm 的低碳、热机械轧制的低合金高强钢板。焊接采用流量 20~30 L/min 的 80%Ar+20%CO₂混合气体,包括点固焊-手工打底焊-机器人打底焊-机器人填充焊-机器人盖面焊的流程:(1)人工点固焊接,∅1.2 mm 的 ER50-6 实心焊丝;(2)手工打底焊,∅1.2 mm 的 ER62-G 实心焊丝;(3)机器人打底焊,∅1.4 mm 或 ∅1.6 mm 规格的 ER76-G 实心焊丝;(4)机器人填充焊和盖面焊,∅1.4 mm 或 1.6 mm 的 ER76-G 实心焊丝。其中,ER62-G ∅1.2 mm 规格的实心焊丝抗拉强度>620 MPa,屈服强度>520 MPa,伸长率>19%, -20℃的 V 型缺口冲击功>68 J; ER76-G ∅1.4 mm 或 1.6 mm 规格的实心焊丝抗拉强度>760 MPa,屈服强度>660 MPa,伸长率>16%, -20℃的 V 型缺口冲击功>47 J。采用该工艺焊接

的高强钢中厚板,焊缝致密性好、没有裂纹,与常规的焊前预热 100℃相比,该免预热方法可提高整体焊接效率 20% 以上,焊接成本可降低 10% 以上。

4 免预热 MAG 焊接工艺优化

当 MAG 焊接线能量输入增大时,焊接时温度场变大,温度梯度加大,导致焊后变形量增大,也会增大焊后残余应力。适当降低热输入量、控制层间温度,在不预热的条件下可减少焊接裂纹,并获得较好的焊接接头力学性能。由于电流和电压的乘积与焊接速度的比值为线能量,免预热焊接与焊前预热焊接相比,需适当降低焊接电流和电弧电压。另外,焊后保温工艺将降低焊接接头的冷却速度,减少焊接裂纹的形成。因此,对于免预热高强钢 MAG 焊接,在焊接工艺方面需适当降低热输入量、控制层间温度、焊后保温。表 2 为各级别高强钢免预热 MAG 焊接热量控制及焊接质量。

热输入控制在焊接技术中扮演着关键角色,它不仅影响焊缝的质量和性能,还关系到生产效率和成本控制,是实现高质量焊接和可持续发展的重要手段。Tang 等^[37]研究了焊接热输入对 690 MPa

表 2 各级别高强钢免预热 MAG 焊接热量控制与性能

Table 2 Heat control and performance of non-preheating MAG welding for high strength steel of various grades					
高强钢	厚度/mm	热输入	层间温度	焊后保温	是否裂纹/性能
Q345 级高强钢 ^[32]	≤80	打底焊热输入阈值为 20 kJ/cm,填充焊热输入阈值为 30 kJ/cm	填充焊时,坡口温度 40~80℃;盖面焊时,坡口温度 60~100℃	—	无裂纹
Q550 钢板 ^[33]	—	—	最高道间温度不能超过 200℃	焊后回火热处理时升温速度 200℃/h,控制温度 350℃,保温 1.5 h,室内空冷	无裂纹。抗拉强度 730~765 MPa,伸长率 16%~19%, -20℃冲击吸收功 121~187 J
Q690 级高强钢 ^[34]	—	—	中道间温度 100~110℃	—	无裂纹。屈服强度 755 MPa,抗拉强度 840 MPa,延伸率 19%,焊缝中心 -20℃冲击功≥110 J
HG785 高强度钢 ^[35]	30	焊接热输入 10~20 kJ/cm	—	焊后以硅酸铝板覆盖焊接接头区的措施缓冷	无裂纹。抗拉强度 760 MPa,屈服强度 680 MPa,伸长率 21%,冲击吸收功大于 89 J
890D 高强钢 ^[36]	15 和 10	热输入 10.1 kJ/cm	—	—	10 mm 厚钢板无裂纹,15 mm 厚钢板在拘束度较小的非关键焊缝无裂纹
1 100 MPa 级热轧高强钢 ^[37]	15	—	—	在 200±5℃条件下保温 50 min	无裂纹。抗拉强度 1 080 MPa,屈服强度 945 MPa,延伸率 14.6%,焊缝 0℃冲击功≥90 J, -20℃冲击功≥60 J

级高强度低合金钢(HSLA)焊缝金属的组织结构和力学性能的影响。当焊接热输入从 13 kJ/cm 增加至 19 kJ/cm 时,对接接头的抗拉强度和硬度均呈现下降趋势,而焊缝金属在 -50°C 时的冲击吸收能量则表现为先增加后减少的规律。特别地,在 16 kJ/cm 的热输入条件下,焊缝金属展现出了卓越的强韧性,具体表现为对接接头抗拉强度达到 828 MPa,焊缝中心 -50°C 的冲击吸收能量介于 71~90 J 之间,平均值为 80 J。焊缝金属的组织主要由贝氏体、针状铁素体、侧板条铁素体、晶界铁素体和 M-A 组元构成。随着焊接热输入的增加,焊缝金属中 M-A 组元的数量先增后减,针状铁素体的组织则经历了从不

足到充分形成再到结构的长大,如图 11 所示。同时,贝氏体结构也经历了从明显的板条结构到结构逐渐弱化的过程。在 13 kJ/cm 的热输入条件下,焊缝金属中的板条贝氏体和侧板条铁素体等脆性组织导致了冲击韧性的降低;而在 19 kJ/cm 的热输入条件下,粗大的 M-A 组元为裂纹的扩展提供了通道,进一步降低了冲击韧性;相比之下,在 16 kJ/cm 的热输入条件下,焊缝金属中充分形成了塑性优良的针状铁素体组织,这些组织与贝氏体交织分布,有效提高了焊缝金属的韧性。此外,细小且弥散分布的 M-A 组元并未对焊缝金属的韧性产生明显的负面效应。

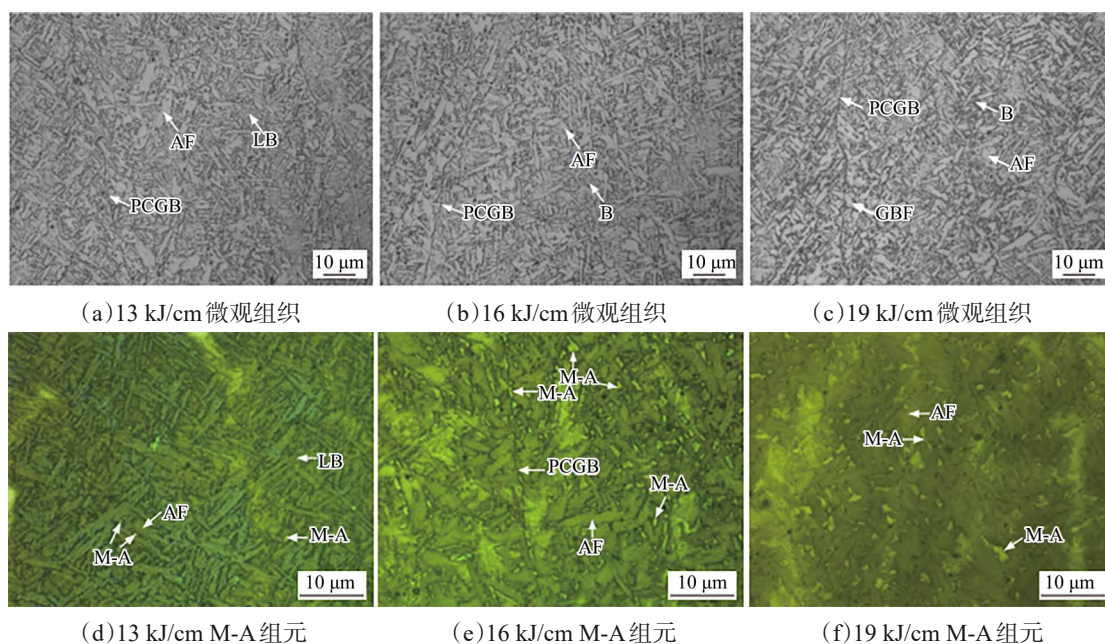


图 11 焊缝金属微观组织和 M-A 组元

Fig. 11 Weld metals and M-A in weld metals

Xiao 等^[38]针对 316LN 奥氏体不锈钢窄间隙 MAG (NG-MAG) 焊接研究表明,低热输入是提升低温韧性的关键。NG-MAG 焊接接头的低温韧性可超过 100 J,与 TIG 焊接接头相当,且焊接效率更高。这种改善的低温韧性归功于 NG-MAG 工艺的低热输入特性,低热输入能减轻成分偏析、细化枝晶尺寸(见图 12),从而增强低温韧性;而热输入的增加会导致成分偏析加剧、枝晶粗化,低温冲击韧性逐渐下降。因此,合理控制热输入是优化 NG-MAG 焊接工艺、获得优异低温韧性并避免焊接缺陷的关键,也为高强钢免预热焊接的工艺优化提供了参考。

5 免预热 MAG 焊接残余应力仿真模拟预测

当残余应力超过焊缝或者母材的强度极限时即会产生焊接裂纹。除了提高母材强度、减少脆硬组织等,降低焊接应力是提升焊接抗裂性能的有效手段,但残余应力的直接检测难度较大。计算机有限元模拟是一种有效的焊接应力预测手段,通过有限元模拟可以预测焊接零部件温度场、应变和焊接残余应力分布,进而为优化焊接参数和焊接顺序提供参考。常用于焊接应力模拟的有限元软件包括

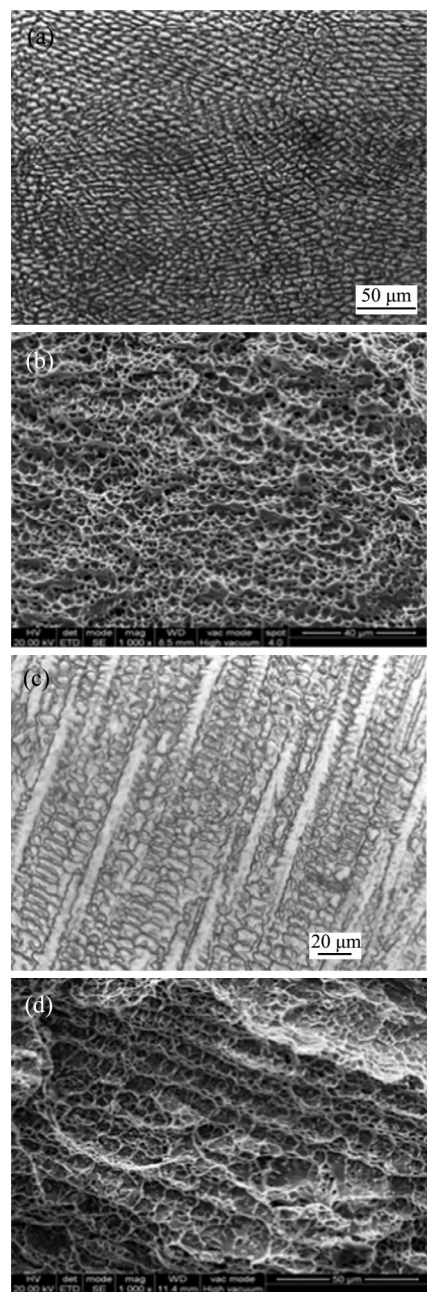


图 12 (a)TIG 焊接接头典型金相;(b)与(a)相同试样的断口图像;(c)N100 -3 横截面上的枝晶组织;(d)与(c)相同试样的断口图像

Fig. 12 (a)Typical metallography of TIG weld joint;(b) Fracture surface image taken from the same sample with (a);(c)Dendritic micro-structure on cross section of N100-3;(d)Fracture surface image taken from the same sample with (c)

ANSYS、ABAQUS、ADINA、NASTRAN、MARC、SYSWELD 等。有限元模拟的准确性依赖于材料属性定义、网格划分、热源模型选择及边界条件设置等关键环节。

王刚^[39]基于中厚板焊接过程多道填充焊接数值分析方法,对 20 mm、25 mm、30 mm 三种板厚的 Q345 钢 T 型接头进行仿真,分析不同焊脚尺寸、焊缝坡口形式及角度对焊接热弹塑性变形、焊接变形与残余焊接应力分布的影响。模拟前输入 Q345 钢 (MS) 的温度依赖性材料属性(见表 3)、温度相关屈服应力(见表 4),并采用与企业实际生产中相同的多层多道填充焊接工艺参数(见表 5),以确保数值模拟的现实性和精确度。后续通过相应实验进行了预估结果的验证。通过对比发现,仿真预估的焊接变形值最大误差为 17.7%(见表 6),焊接残余应力值最大误差为 16.67%(见表 7),误差均控制在 20% 以内,证实了该模拟方法的可靠性。

表 3 Q345 温度依赖性钢材的材料性能

Table 3 Material properties of Q345 temperature-dependent steels

温度 /°C	导热系数 /(W·m·K ⁻¹)	比热 /J·(kg·K) ⁻¹	热膨胀系数 (10 ⁻⁶ /°C)	杨氏模量 /GPa	泊松比
0	51.9	450	10	200	0.278 6
100	51.1	499.2	11	200	0.309 5
300	46.1	565.5	12	200	0.331
450	41.05	630.5	13	150	0.338
550	37.5	705.5	14	110	0.357 5
600	35.6	773.3	14	88	0.373 8
720	30.64	1 080.4	14	20	0.373 8
800	26	931	14	20	0.423 8
1 450	29.45	437.93	15	2	0.473 8
1 510	29.7	400	15	0.2	0.499
1 580	29.7	735.25	15	0.000 02	0.499
3 500	42.1	400	15.5	0.000 02	0.499

表 4 Q345 钢的温度相关屈服应力

Table 4 Temperature dependent yield stress of Q345 steel

温度/K	屈服应力 σ_y /MPa	温度/K	屈服应力 σ_y /MPa
293	398	1 073	36
373	379	1 273	28
573	305	1 473	20
773	192	1 673	12
973	41		

表 5 焊接参数选取值

Table 5 Selected value of welding parameters

焊接道数	焊接电流 /A	焊接电压 /V	焊接速度 /(mm·s ⁻¹)	线能量 /(J·mm ⁻¹)
第一道	300~350	29~34	9.1~9.6	717~930
第二道	300~350	29~34	7.5~7.9	870~1130
第三道	300~350	29~34	4.5~5.1	1 450~1 750

表6 动臂焊接变形仿真实验对比

Table 6 Comparison of simulation and experiment on boom welding deformation

	变形预估/mm	变形测量/mm	预估误差/%
铲斗孔1	14.25	12.35	15.38
铲斗孔2	2.93	3.56	17.70
车架孔1	10.15	12.14	16.39
车架孔2	5.01	5.70	12.11

表7 动臂焊接残余应力仿真实验对比

Table 7 Comparison of simulation and experiment on boom welding residual stress

应力类型	预估/mm	测量/mm	预估误差/%
纵向残余应力	200~320	240.0~318.9	0.34~16.67
纵向残余应力	152~292	180.5~312.0	6.41~15.79

岳国柱^[40]采用SYSWELD软件对装载机动臂焊接过程进行仿真,分析了固定点、焊接顺序、焊接方向、焊后夹紧保持时间、焊接速度、焊接电压电流等因素对动臂焊接变形和应力的影响。动臂三维结构模型如图13a所示,动臂主要由20 mm厚的腹板(空心板)和50 mm厚的上下翼板构成。由于焊接变形和焊后残余应力的影响较小,仿真时不考虑总拼搭工序的影响。动臂变形云图见图13b,其中红色表示高变形量区域,蓝色表示低变形量区域。

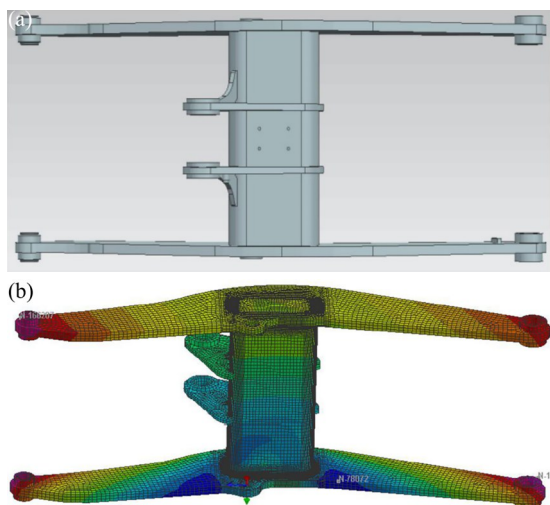


图13 (a)动臂三维结构模型;(b)动臂焊后变形量云图

Fig. 13 (a) Three-dimensional structure model of boom; (b) Post-welding deformation cloud map of boom

为确保计算的简便性和准确性,焊缝区域网格尺寸为 $1.5\text{ mm}\times 1.5\text{ mm}\times 8\text{ mm}$,远离焊缝的动臂两端区域为 $20\text{ mm}\times 20\text{ mm}\times 20\text{ mm}$ 。采用双椭圆模型将焊接热源作为单元内生热处理,实现瞬态焊接过

程模拟。仿真结果显示(见图13b),动臂焊后变形呈现明显区域不同;实验验证表明,在17%误差范围内仿真变形量准确,在19%误差范围内残余应力值是准确的,如图14所示,且不同焊接参数下仿真与实验的焊后变形量及焊后残余应力的变化趋势一致,证实了该模拟方法在工艺优化中的有效性。

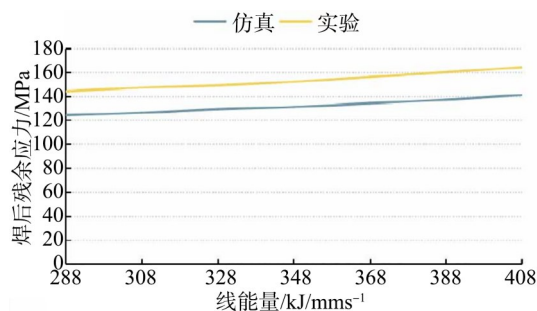


图14 线能量大小与焊后残余应力之间的关系

Fig. 14 Relationship between line energy and post-welding residual stress

Keränen等^[17]采用有限元方法(FEM)预测了超高强度钢矩形空心截面的焊接残余应力,如图15a、15b所示,模拟中同时考虑了先前制造过程中产生的残余应力,输入S700和S960钢的具体材料特性,包括随温度变化的热导率、比热容、热膨胀系数、屈服应力、延伸率、杨氏模量以及泊松比等。采用简化热源模型和元素生死技术,以体积热体流形式加载焊接热输入,如图15c、15d所示,采用四分之一对称模型简化计算(半模型和四分之一模型结果相近),应用对称边界条件,采用线性8节点实体砖元素进行三维耦合的温度-位移分析,并根据应力水平的变化来选择适当的网格密度。FEM模拟结果与实验测量结果高度一致,验证了模型的精确性。模拟结果也揭示了焊接热输入对残余应力的显著影响,如表8所示,热输入越高,残余应力越大。基于模拟结果提出的残余应力预测模型,可预测不同热输入下的残余应力最大变化,为焊接结构设计 with 工艺优化提供坚实依据。

6 结论

MAG焊接免预热技术能够提高焊接效率、降低能耗和焊接成本,是重型机械高强度大型结构件焊接发展需要突破的技术瓶颈,尤其是面向焊接机

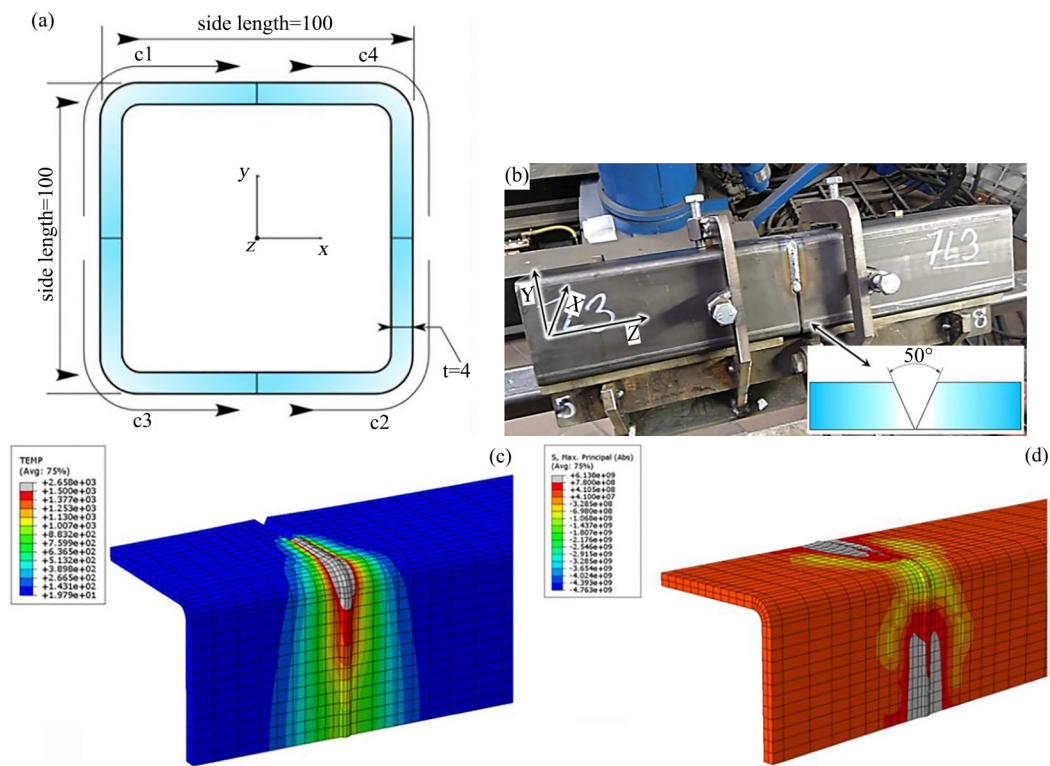


图 15 (a)焊接顺序和方向;(b)焊接搭设与对接焊缝坡口几何形状;(c)S700 HQ模拟过程中的温度分布(灰色区域温度>1 500 ℃);(d)S700 HQ冷却后模拟的最大主残余应力(灰色区域的表面应力超过标称屈服强度)

Fig. 15 (a) Welding sequence and directions; (b) Welding set-up with butt weld groove geometry; (c) Temperature distribution during simulation for S700 HQ (temperatures on grey areas are over 1 500 ℃); (d) Simulated maximum principal residual stresses after cooling down for S700 HQ (surface stresses on grey areas exceeding the nominal yield strength)

表 8 有限元模型模拟参数

Table 8 Predictive parameters of the finite element model

钢	区域	最大拉伸残余应力			最大压缩残余应力		
		a	b	R-square	a	b	R-square
S700	侧边(wp1%3)	2.71E+08	8.60E+08	0.51	-5.49E+07	-5.02E+08	0.73
	角(wp2)	1.97E+08	8.60E+08	0.99	-1.52E+07	-3.03E+08	0.20
S960	侧边(wp1%3)	-5.98E+07	6.07E+08	0.42	6.53E+07	-4.51E+08	0.45
	角(wp2)	1.83E+08	2.31E+08	0.66	2.92E+08	-4.26E+08	0.86

器人自动焊接,焊前免预热有很强的必要性。免预热焊接最主要的难点是防止焊接裂纹。由于免预热取消了传统预热工序缩小焊接温差、降低冷却速度及清除焊件表面水分等关键作用,因此需要从焊接母材、焊丝以及焊丝与工序匹配、焊接工艺优化等方面综合协同,补偿预热的作用。焊接母材方面,应优先选择低碳、低淬硬倾向的钢种(如超低碳贝氏体钢),控制热影响区最高硬度<350 HV,从源头降低冷裂纹敏感性;焊丝设计需调控碳含量与合金元素配比(如适量添加 Mn、Mo、Ni 等),同时实现与手工点固焊、手工打底焊、机器人焊接等不同工

序的强度匹配;焊接工艺层面,通过合理控制热输入量、层间温度及焊后保温措施,改善焊缝组织与应力状态;焊接残余应力仿真模拟则为工艺参数优化提供了理论支撑,可有效预测温度场、应变及应力分布,指导实际生产。在推动环境可持续性方面,免预热焊接技术展现了其环保优势,通过减少焊接过程中的能源消耗,有效降低了与焊接活动相关的环境污染。此外,该技术在焊接过程中还能显著减少有害气体排放,包括二氧化碳和其他氧化物,从而减轻对空气质量的负面影响。

当前,对于较小厚度的高强钢,免预热 MAG 焊

接可行性高,但是对 20 mm 及以上厚板焊件,裂纹控制难度显著增加,免预热的可行性降低;此外,对于冬季低温天气以及气候潮湿的地区,免预热焊接的难度急剧增加。为了抑制免预热焊接裂纹,必须要降低焊接脆硬组织出现的倾向和焊缝氢扩散含量。

未来,免预热焊接技术的发展需重点突破三大挑战:(1)焊接质量控制。免预热焊接技术要求对焊接参数进行更为严格的控制,以确保焊接质量达到高标准。这包括精确调控焊接电流、电压以及预热温度,从而降低焊接过程中的变形和裂纹风险。(2)材料选择与预热策略。在寒冷地区,免预热焊接技术需要精心选择焊接材料,例如采用低氢型焊丝,并实施适当的预热措施,以增强焊接接头的冲击韧性和抗裂性。(3)环境适应性。在极端气候条件下,尤其是寒冷地区,应用免预热焊接技术需要采取特殊的环境控制措施。这可能包括构建密闭式操作平台和实施加热措施,以维持焊接环境在一个适宜的温度范围内,确保焊接过程的稳定性和焊接质量。

参考文献:

- [1] 黄治军,缪凯,胡伦骥.低合金高强度钢焊缝强韧性研究[J].电焊机,2004,34(9):31-34.
HUANG Z J, MAO K, HU L J. Study on strength and toughness of seam of HSLA steel[J]. Electric Welding Machine, 2004, 34(9): 31-34.
- [2] 吴冰,陈辉.X80 管线钢的焊接冷裂纹试验[J].电焊机,2008,38(10):66-69.
WU B, CHEN H. Research on cold cracks of welding X80 pipeline alloy steel[J]. Electric Welding Machine, 2008, 38(10): 66-69.
- [3] 周云芳,戴为志.预热在焊接应用技术中的作用[J].焊接技术,2018,47(10):48-51.
ZHOU Y F, DAI W Z. The role of preheating in welding application technology [J]. Welding Technology, 2018, 47(10): 48-51.
- [4] Tessema S H, Bismor D, Wyżgolik R. Advanced Signal Processing Techniques for Plasma-MAG Welding Process[C]//2024 Signal Processing: Algorithms, Architectures, Arrangements, and Applications (SPA), Poznan, Poland: IEEE, 2024.
- [5] Ronghao H, Gang S, Xin L, et al. The mathematical model for the prediction and optimization of weld bead geometry in all-position low-power pulsed laser-MAG hybrid welding[J]. Int. J. Adv. Manuf. Technol., 2023, 126: 5245-5258.
- [6] 李亚江,刘鹏,刘强,等.气体保护焊工艺及应用[M].北京:化学工业出版社,2015.
- [7] 华爱兵,陈树君,白韶军,等.磁旋弧 MAG 焊接工艺的熔滴过渡机制[J].北京工业大学学报,2009,35(7):882-885.
HUA A B, CHEN S J, BAI S J, et al. The Mechanism of Drop Transfer During Rotating Spray Transfer Controlled by Longitudinal Magnetic Field [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2009, 35(7): 882-885.
- [8] 殷树言,李西恭,王军,等.熔化极气体保护焊发展中的问题及对策[J].电焊机,1997,27(6):1-4.
YIN S Y, LI X G, WANG J, et al. Problems and Solutions During Developments of Gas Metal Arc Welding [J]. Electric Welding Machine, 1997, 27(6): 1-4.
- [9] 李闯,李锐,史元成,等.MAG 焊原理及应用浅析[J].应用技术,2013,231(4):92-94.
LI C, LI R, SHI Y C, et al. Brief Discussion on Principles and Applications of MAG Welding [J]. Applied Technology, 2013, 231(4): 92-94.
- [10] Fulong Z, Shuangyu L, Fenge L, et al. Stability evaluation of laser-MAG hybrid welding process [J]. Optics & Laser Technology, 2019, 116: 284-292.
- [11] Fuyun L, Caiwang T, Xiangtao G, et al. A comparative study on microstructure and mechanical properties of HG785D steel joint produced by hybrid laser-MAG welding and laser welding [J]. Optics & Laser Technology, 2020, 128: 106247.
- [12] Caiyou Z, Yuan Z, Haiyan W, et al. Microstructural evolution and mechanical property of high-strength metastable β titanium alloy joint via electron beam welding [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 33: 9166-9179.
- [13] Deyi S, Shisheng H, Kuanfang H, et al. Research on the stability of arc-length in pulse MAG welding by fuzzy logic control [J]. Electric Welding Machine, 2008, 38(08): 51-54.
- [14] Mukherjee M, Saha S, Pal T K, et al. Influence of modes of metal transfer on grain structure and direction of grain growth in low nickel austenitic stainless steel weld metals [J]. Materials Characterization, 2015, 102: 9-18.

- [15] Chen Q, Fan F, Shidi Y, et al. Numerical Simulation of Temperature Field and Residual Stresses in Stainless Steel T-Joint[J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2020, 73(3): 751–761.
- [16] 杨天冰, 郭瑞杰. X70管道环焊缝接头残余应力数值模拟[J]. 电焊机, 2008, 38(11): 9–14.
YANG T B, GUO R J. Residual stress simulation of X70 pipeline girth welding joint[J]. Electric Welding Machine, 2008, 38(11): 9–14.
- [17] Keränen L, Kaijalainen A, Jokiahho T, et al. Residual stresses of MAG-welded ultrahigh-strength steel rectangular hollow sections[J]. Engineering Structures, 2024, 305: 117719.
- [18] 李命兰. 30CrMnSiA钢焊接件中魏氏组织的研究[J]. 洪都科技, 1977(3): 1–12.
LI M L. Study on the Weibull Structure of 30CrMnSiA Steel Welded Parts[J]. Hongdu Technology, 1977(3): 1–12.
- [19] 刘东明. 双金属复合管焊接接头熔合区脆硬组织及裂纹分析[D]. 山东: 中国石油大学(华东), 2016.
LIU D M. Brittle Structure of Fusion Zone and Crack Analysis of Welded Joints of Bimetal Lined Pipe[D]. Shandong: China University of Petroleum(East China), 2016.
- [20] Skowrońska B, Szulc J, Bober M, et al. Selected properties of RAMOR 500 steel welded joints by hybrid PTA-MAG[J]. Journal of Advanced Joining Processes, 2022, 5: 100111.
- [21] 高心心, 郭建章, 张海兵. 1000 MPa级高强钢焊接件的氢脆敏感性研究[J]. 材料导报, 2017, 31(6): 93–97+104.
Gao X X, GUO J Z, ZHANG H B. Hydrogen Embrittlement Susceptibility of 1000 MPa Grade High Strength Steel Weldment[J]. Materials Reports, 2017, 31(6): 93–97+104.
- [22] 李天雷, 李科, 施岱艳, 等. 含氢环境中X80管线钢焊接接头氢脆敏感性研究[J]. 材料保护, 2024, 57(4): 80–89.
LI T L, LI K, SHI D Y, et al. Hydrogen Embrittlement Sensitivity of X80 Pipeline Steel Welded Joints in Hydrogen Environment[J]. Materials Protection, 2024, 57(4): 80–89.
- [23] Sun J M, Dilger K. Influence of preheating on residual stresses in ultra-high strength steel welded components[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 25: 3120–3136.
- [24] 熊腊森. 焊接工程基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [25] 曹良裕, 魏战江. 钢的碳当量公式及其在焊接中的应用[J]. 材料开发与应用, 1999, 14(1): 39–43.
CAO L Y, WEI Z J. The carbon equivalent formula of steel and its application in welding[J]. Material Development and Application, 1999, 14(1): 39–43.
- [26] 段国炎. Ms温度及淬火速度对低碳马氏体自回火组织形貌的影响[J]. 江西冶金, 1988, 8(1): 24–26.
DUAN G Y. The influence of Ms temperature and quenching speed on the self tempering microstructure of low-carbon martensite[J]. Jiangxi Metallurgy, 1988, 8(1): 24–26.
- [27] Moon D W, Fonda R W, Spanos G. Microhardness variations in HSLA-100 welds fabricated with new ultra-low-carbon weld consumables[J]. Welding Journal, 2000, 79(10): 278–285.
- [28] 杨世柏, 杨红霞. 母材碳含量对A/F钢焊接熔合区断口形态的影响[J]. 武汉交通科技大学学报, 1995, 19(3): 223–227.
YANG S B, YANG H X. Influence of Carbon Content of Base Metal on Fractography of Welding Transition Zone of Dissimilar A/F Steel[J]. Journal of Wuhan Transportation University, 1995, 19(3): 223–227.
- [29] 董贵斌, 潘高祥, 顾晔, 等. 煤矿机械用690 MPa级高强钢不预热焊接技术[J]. 宝钢技术, 2024(2): 30–36.
DONG G B, PAN G X, GU Y, et al. Non-preheat welding technology of 690 MPa high strength steel for coal mine machinery[J]. Baosteel Technology, 2024(2): 30–36.
- [30] Ju K, Linlin Z, Tongbang A, et al. Effect of carbon content on strength and toughness of deposited metal for 1000 MPa-grade high-strength welding wire[J]. Materials Today Communications, 2024, 39: 108930.
- [31] 薄春雨, 杨玉亭, 丑树国, 等. 690镍基合金焊接结晶裂纹形成机理分析[J]. 焊接学报, 2007, 28(10): 69–72+116–117.
BO C Y, YANG Y T, CHOU S G, et al. Analysis of the Formation Mechanism of Welding Crystallization Cracks in 690 Nickel based Alloy[J]. Transactions of The China Welding Institution, 2007, 28(10): 69–72.
- [32] 汤付江, 安同邦, 彭云, 等. Mo对690MPa低合金高强钢熔敷金属力学性能的影响[J]. 焊接, 2022(2): 18–25+38.
TANG C J, AN T B, PENG Y, et al. Effect of Mo on mechanical properties of deposited metal for 690 MPa

- high strength low alloy steel [J]. *Welding & Joining*, 2022(2):18-25+38.
- [33] 张明华. 低合金高强耐候钢用药芯焊丝及接头组织和性能研究[D]. 湖南:湘潭大学, 2017.
- ZHANG M H. Research on the flux-cored wire for low-alloy high-strength weathering steel and microstructure and properties of the welded joint[D]. Hunan: Xiangtan University, 2017.
- [34] 刘政军, 裘荣鹏, 武丹, 等. 合金元素 Ni 和 Mo 对高强钢金属粉芯型药芯焊丝焊接接头力学性能的影响[J]. *热加工工艺*, 2017, 46(19):59-62.
- LIU Z J, QIU R P, WU D, et al. Effect of Alloying Elements Ni and Mo on Mechanical Properties of Metal Powder Flux Cored Wire Welding Joint of High Strength Steel [J]. *Hot Working Technology*, 2017, 46(19):59-62.
- [35] 张敏, 唐江, 李继红, 等. 合金元素锰和镍对 FV520 (B) 钢焊接接头组织与力学性能的影响[J]. *机械工程材料*, 2015, 39(5):58-62.
- ZHANG M, TANG J, LI J H, et al. Effects of Mn and Ni on Microstructure and Mechanical Properties of Welded Joint of FV520 (B) Steel [J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2015, 39(5):58-62.
- [36] 孟贺超, 李福永, 兰志宇, 等. 液压支架用 750 MPa 级高强钢中厚板不预热焊接方法: CN202110600837.X [P]. 2022-12-02.
- [37] Cunjiang T, Tongbang A, Yun P, et al. Effect of heat input on microstructure and mechanical properties of weld metal of 690 MPa grade HSLA steel [J]. *Transactions of The China Welding Institution*, 2024, 45 (9): 110-119.
- [38] Wenkai X, Li Z, Fujun Z, et al. Effect of heat input on cryogenic toughness of 316LN austenitic stainless steel NG-MAG welding joints with large thickness [J]. *Materials & Design*, 2015, 86:160-167.
- [39] 王刚. 面向大型结构件的焊接残余应力及变形预估 [D]. 广西:广西科技大学, 2022.
- WANG G. Prediction of Welding Residual Stress and Variant for Large Structural Parts [D]. Guangxi: Guangxi University of Science and Technology, 2022.
- [40] 岳国柱. 动臂焊接仿真模拟及残余应力控制研究 [D]. 广西:广西科技大学, 2020.
- YUE GZ. Research on Welding Arm Simulation and Residual Stress Control [D]. Guangxi: Guangxi University of Science and Technology, 2020.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>