

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.10.05

工艺参数对异种钢激光填丝焊缝质量的影响研究

房顺利, 马 凯*, 庞建新, 韩伟韬, 安 伟, 翟兴刚

包头北方创业有限责任公司, 内蒙古 包头 014030

摘 要: 为解决薄壁特种钢与耐候钢异种材料焊接的质量难题, 以4.5 mm厚特种钢与2.5 mm厚Q345NQR2耐候钢大型结构件为研究对象, 系统开展激光填丝焊接工艺研究。结果表明: 激光填丝焊的低热输入特性, 可有效减小热影响区宽度, 避免Q345NQR2侧晶粒粗化与特种钢侧淬硬组织形成, 通过选用H1Cr21Ni10Mn7Mo奥氏体不锈钢填充焊丝, 能缓解异种钢性能差异, 使接头平均抗拉强度达母材的81%, 且焊缝成形美观、飞溅量少, 后续清理成本降低显著; 而MAG焊虽设备成本低、操作灵活, 但热输入高导致热影响区加宽、变形量增大(纵向收缩量比激光填丝焊高约35%), 接头抗拉强度仅为特种钢母材下限的43%。此外, 研究明确了异种钢焊接中裂纹、气孔的形成机理, 提出“稍快焊接速度+正向大离焦量+负向适当倾斜入射+大功率补偿熔深”的气孔抑制策略, 可将焊接变形控制在1.5 mm/m以内。综上, 激光填丝焊更适用于对焊接质量与结构精度要求高的场景, MAG焊适配成本敏感且质量要求适中的场景, 研究成果为薄壁异种钢大型结构件焊接工艺优化提供了工程参考。

关键词: 激光填丝焊接; 异种钢; 薄壁结构; 焊接工艺参数; 焊接质量

中图分类号: TG457 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2025)10-0035-07

Research on Influence of Laser Wire Feeding Welding Process Parameters on Weld Quality

FANG Shunli, MA Kai*, PANG Jianxin, HAN Weitao, AN Wei, ZHAI Xinggang

Baotou Beifang Chuangye Co., Ltd., Baotou 014030, China

Abstract: To address the quality challenges in welding thin-walled special steels with weather-resistant steels of dissimilar materials, a systematic study of laser filler welding processes was conducted using 4.5 mm thick special steel and 2.5 mm thick Q345NQR2 weather-resistant steel in large structural components. The results show that the low heat input characteristics of laser filler welding can effectively reduce the width of the heat-affected zone, preventing grain coarsening on the Q345NQR2 side and hardened structure formation on the special steel side. By using H1Cr21Ni10Mn7Mo austenitic stainless steel filler wire, the differences in properties between the dissimilar steels can be mitigated, achieving an average tensile strength of 81% of the base material. Moreover, the weld formation is aesthetically pleasing, with minimal spatter, significantly reducing the cost of subsequent cleaning. Although MAG welding has lower equipment costs and greater operational flexibility, its high heat input leads to a wider heat-affected zone and increased deformation (longitudinal shrinkage is about 35% higher than that of laser filler welding), and its joint tensile strength is only 43% of the lower limit of the special steel base material. Furthermore, the study clarified the formation mechanisms of cracks and pores in dissimilar steel welding and proposed a pore suppression strategy of "slightly faster welding speed + positive large defocus + negative appropriate oblique incidence + high power compensation for melt depth", which can control welding deformation within 1.5 mm/m. In conclusion, laser filler welding is more suitable for scenarios requiring high welding quality and structural accuracy, while MAG welding is best suited for cost-sensitive situations with moderate quality requirements. The research provides engineer-

收稿日期: 2025-08-28

基金项目: 中国兵器工业集团科技研究开发计划课题(JM220624)

作者简介: 房顺利(1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事铁路车辆制造技术研究。

通讯作者: 马 凯(1979—), 男, 硕士, 正高级工程师, 主要从事轨道交通车辆设计研究。E-mail: zgcmk@126.com。

ing references for optimizing the welding process of thin-walled dissimilar steel large structural components.

Keywords: laser wire feeding welding; dissimilar steel; thin-walled structure; welding parameters; welding quality

引用格式:房顺利,马凯,庞建新,等. 工艺参数对异种钢激光填丝焊缝质量的影响研究[J]. 电焊机,2025,55(10):35-41.

Citation:FANG Shunli, MA Kai, PANG Jianxin, et al. Research on Influence of Laser Wire Feeding Welding Process parameters on Weld Quality[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(10): 35-41.

0 引言

薄壁特种钢的应用在航空航天飞行器骨架、船舶耐压壳体等关键领域的现代高端制造业中具有重要地位。这类构件通常由多种高强度钢牌号组焊而成,以实现结构轻量化、高承载能力,并满足复杂服役环境下的综合力学性能需求。激光填丝焊因具有高能量密度、低热输入、大深宽比及窄热影响区等特性,成为异种材料高质量焊接的关键技术。该技术通过精确调控激光束与填充金属的交互作用,可在薄壁构件上形成冶金结合良好、变形量小的优质焊缝,有效克服传统焊接方法在异种钢材连接中存在的诸多技术瓶颈^[1]。随着航空航天领域对减重需求的日益提升,以及船舶结构向大型化、复杂化方向演进,优化薄壁特种钢构件的激光填丝焊接工艺已成为提升产品性能与可靠性的关键途径。

然而,异种钢在热导率、熔点、比热容、热膨胀系数及合金元素分布等方面差异明显,焊接时特别是在熔池凝固阶段,极易产生热裂纹、液化裂纹及界面处碳迁移^[2]。此外,薄壁结构固有的低刚度特性加剧了焊接热应力引发的失稳变形风险,而大型结构件的连续长焊缝进一步放大了工艺参数波动对质量一致性的影响,从而产生气孔、未熔合及夹渣等焊接缺陷。这些缺陷不仅会降低焊接接头的静态强度与疲劳寿命,还可能在复杂交变载荷下引发结构失效。

因此,系统研究激光填丝焊接过程中的热循环行为、熔池流动及界面冶金反应机制,探索激光功率、焊接速度、送丝速度、离焦量、保护气体配比等工艺参数与焊缝成形、微观组织及力学性能的内在联系,对于突破薄壁异种钢大型结构件制造的技术壁垒、保障关键装备的结构完整性与服役安全性具有重大工程意义。

1 材料特性及结构特点

特种钢以高强度、高硬度、良好的抗冲击性能和耐磨性,广泛应用于装甲结构等高承载、高防护要求的工程领域,但其碳当量高,焊接性较差,易在焊接过程中形成冷裂纹和淬硬组织^[4]。Q345NQR2是一种低合金耐候钢,通过添加Cu、Cr、Ni等合金元素提升耐大气腐蚀性能,且具备良好焊接性,主要应用于铁路车辆、桥梁结构等基础设施,不过仍存在热裂纹倾向及合金元素偏析风险。

两类钢材在化学成分、热导率、膨胀系数及屈服强度等方面存在显著差异,成为焊接缺陷的主要诱因:化学成分差异易导致熔合线附近形成脆性带,增加裂纹风险;热导率与热膨胀系数不匹配,会造成焊接热循环中温度分布不均、冷却阶段热收缩量差异,进而引发残余应力集中与焊接变形,加大变形控制难度;屈服强度差异则会使焊接接头受力时出现应力集中,影响接头质量稳定性及综合力学性能^[3-4]。

激光填丝焊接是一种以高能量密度激光束为热源,同时向熔池精确送入填充金属的先进连接技术^[5]。该工艺具有能量密度高、热输入精确可控、热影响区窄及焊接变形小等优势,特别适用于解决薄壁异种钢大型结构件因材料热物理性能差异及冶金相容性问题所引发的焊接应力集中和裂纹敏感性高等问题。目前已在航空航天、船舶等高端制造领域,成功应用于不锈钢与高强钢、马氏体时效钢与奥氏体不锈钢等异种材料的连接,满足了结构件轻量化与高可靠性的双重需求^[6]。

然而,激光焊接过程中熔池窄而深,气孔是最常见的缺陷之一。本研究通过优化离焦量、激光入射角度、送丝速度及焊接参数等关键参数,结合适当的焊接工装夹具设计,提出了一种可工程化应用的焊接工艺方法,有效抑制焊缝气孔的形成,为激

光填丝焊接技术在大型薄板异种钢焊接结构的推广应用奠定了技术基础。

2 试验方案

2.1 试验材料与试样制备

试验材料选用厚 4.5 mm 的特种钢与厚 2.5 mm 的 Q345NQR2 耐大气腐蚀钢作为试验材料。两种钢材在强度(相差近 1 000 MPa)、厚度(相差 2 mm)及结构刚度等方面存在显著差异,焊接过程中易因热载荷作用引发较大变形。采用电弧焊接薄板时,即使将焊接热输入降至最低,仍难以有效控制焊接变形。因此,本研究采用高能密度的激光填丝

焊接技术,并与传统 MAG 焊进行对比分析。

试样制备采用数控激光切割机将板材加工成 350 mm×150 mm 标准试板,随后利用打磨机清除毛刺及热影响层,确保表面粗糙度 $Ra \leq 3.2 \mu m$ 。MAG 焊试板设计成单边 V 形坡口,坡口角度为 $30^\circ \pm 2^\circ$,钝边高度 1.0 mm,装配间隙控制在 0.2~1.2 mm。

2.2 试验设备与工艺参数

设备包括 2 kW 手持式激光焊接机和数字化熔化极混合气体保护焊机。保护气体分别选用 99.99%Ar 和 95%Ar+5%CO₂,气体流量 16~20 L/min。为保证焊接接头韧性并避免焊接裂纹,选用 H1Cr21Ni10Mn7Mo 奥氏体不锈钢焊丝作为填充材料。具体焊接工艺试验方案见表 1。

表 1 焊接工艺试验方案
Table 1 Welding process plan

试件编号	母材	焊接方法	焊材	直径/mm	保护气体	接头形式
a	特种钢+特种钢	激光焊	H1Cr21Ni10Mn7Mo	1.6	99.99%Ar	对接,无坡口
b	特种钢+耐候钢	激光焊	H1Cr21Ni10Mn7Mo	1.6	99.99%Ar	对接,无坡口
c	特种钢+特种钢	气保焊	H1Cr21Ni10Mn7Mo	1.2	95%Ar+5%CO ₂	对接,60°坡口

2.3 激光焊接参数设计与变形测量

为系统探讨激光功率对特种钢与耐候钢对接接头焊接变形的影响,本研究设计了三种不同激光功率(900 W、1 200 W、1 500 W)的对比试验,共设置 9 组焊接参数组合,具体试验参数与变形量如表 2 所示。

表 2 激光焊参数对特种钢与耐候钢对接接头(试样 b)焊接变形的影响

Table 2 Laser welding parameters on welding deformation welding process parameters

试件编号	激光功率 /W	送丝速度 /(cm·min ⁻¹)	离焦量 /mm	角变形 /(°)	弯曲变形 /mm
1	900	30	0	3.93	0.35
2	900	45	2	1.40	0.50
3	900	60	4	0.43	0.37
4	1 200	30	0	2.87	0.70
5	1 200	45	2	1.30	0.72
6	1 200	60	4	1.06	0.40
7	1 500	30	0	1.17	0.75
8	1 500	45	2	4.53	1.11
9	1 500	60	4	1.04	0.45

2.4 焊缝成形质量分析

试样 a 和试样 b 采用激光填丝焊,接头表面成形良好,未发现未熔合、未焊透等明显缺陷,经磁粉探

伤和射线探伤后,焊缝质量合格;试样 c 采用熔化极气体保护焊,接头表面质量成形不均匀,余高较大,如图 1 所示。

由表 2 数据可知,激光功率的调控对焊缝成形质量具有明显影响。在送丝速度固定为 30 cm/min

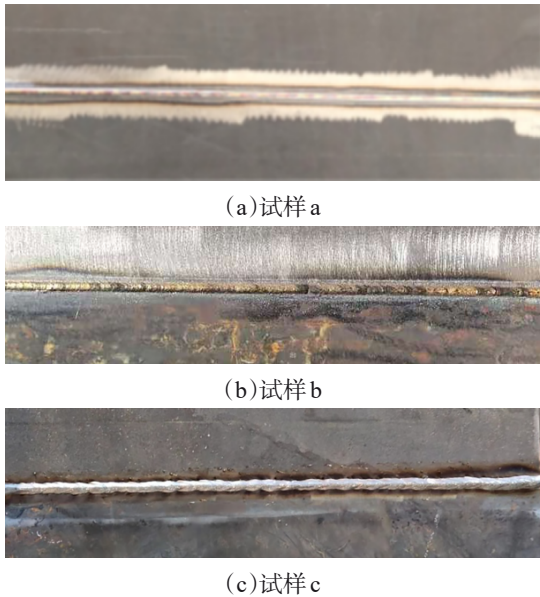


图 1 激光填丝焊焊接接头宏观形貌
Fig. 1 Macroscopic morphology of the weld seam in laser wire-filling welding joints

的条件下:当功率为900 W时,试样1的角变形达到 3.93° ,表明热输入不足易导致残余应力集中;将功率提升至1 200 W后,试样4弯曲变形增至0.70 mm,说明功率增加加剧了热影响区的塑性变形;继续将功率提升至1 500 W时,试样7的角变形降至 1.17° ,弯曲变形为0.75 mm,表明热输入达到一定程度后,熔深增加使热膨胀和冷却收缩过程保持基本平衡,从而有效降低角变形量。在此基础上,保持激光功率1 500 W不变,将送丝速度提升至60 cm/min,试样9的角变形进一步降至 1.04° ,弯曲变形减小至0.45 mm,表明优化热输入可有效改善应力分布。

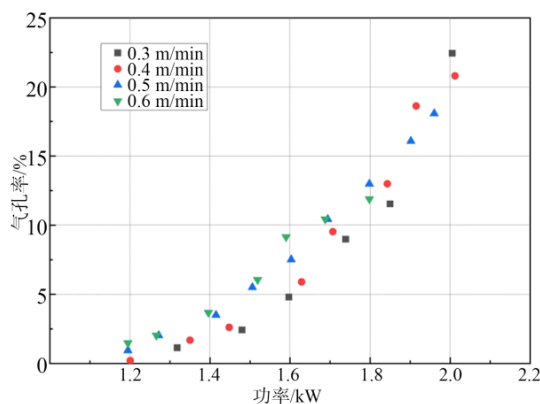
此外,送丝速度的变化对熔深与冶金结合质量的影响呈现非线性特征。在激光功率为900 W时,将送丝速度由30 cm/min增至60 cm/min(对应表2中试样1~3),金相分析显示熔合线处出现连续脆性相。离焦量作为关键辅助参数,在1 500 W高功率条件下(表2中试样7~9)表现出显著作用:当送丝速度固定为60 cm/min时,将离焦量从2 mm增至4 mm,焊缝熔合缺陷率下降了42%。

3 激光焊气孔抑制方法

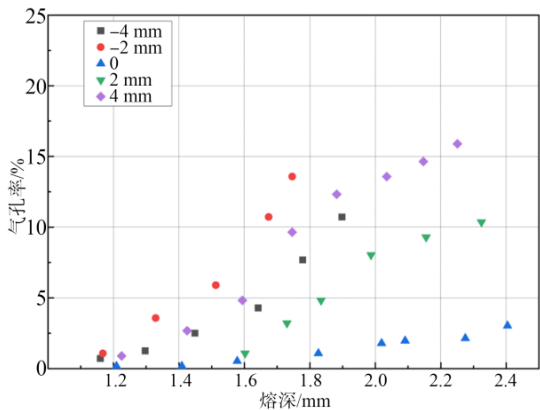
激光焊气孔按形成原因可分三类:母材受污染而产生的成分性气孔;匙孔不稳定引发的工艺性气孔;保护气或空气卷入匙孔形成的混入性气孔。对于成分性气孔,通过焊前严格清理可以减少或避免;对于工艺性和混入性气孔,需通过优化焊接过程参数加以控制。在相对稳定的激光深熔焊过程中,光束经匙孔壁多次反射至底部,金属蒸汽周期性的强烈喷发会引发匙孔和熔池的高频振荡。当匙孔底部波动幅度超过一定限值后,熔池内会产生若干个孤立的气泡,若气孔距熔池表面过远、液态金属凝固速度过快或气泡上浮动力不足,则最终将残留于固态焊缝内形成气孔。因此,合适的工艺参数能减小匙孔的波动频率或幅度,或形成较好的熔池环境以利于气泡的逸出,从而抑制气孔超标现象的产生。

为系统研究激光功率、焊接速度、离焦量、入射角等因素对气孔行为的影响规律,本研究在固定其他参数的基础上,对四个参数进行正交试验。试验规定焦点位于工件上方时离焦量为正、光束向后仰

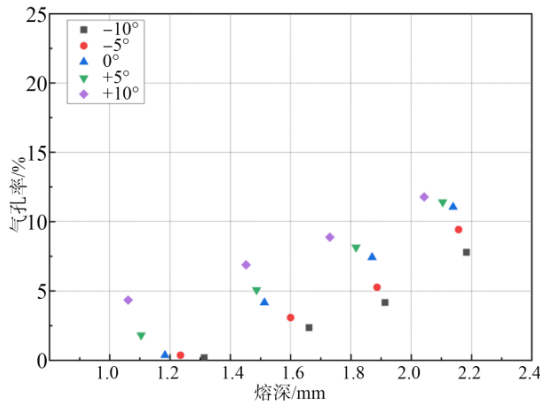
时入射角为负。通过焊后剖切断面检测熔深,并逐一进行射线探伤,分析气孔率,结果如图2所示。研究表明,气孔率与焊接参数密切相关:当熔深 <2 mm时,慢速低功率条件下的焊缝气孔率较低;当熔深 ≥ 2 mm时,快速高功率条件下的焊缝气孔率相对更低。正向离焦和负角入射均能有效抑制气孔,其中正向离焦的作用更明显。当离焦量增至6 mm及以



(a) 激光功率、焊接速度与气孔率关系



(b) 离焦量、熔深与气孔率关系



(c) 入射角、熔深与气孔率关系

图2 焊接参数与气孔率关系

Fig. 2 Relationship between welding parameters and porosity

上时, 过大的熔宽和热输入会对接头成形和结构精度产生不利影响; 负角过大则会导致光束深熔转变区间大幅延后, 因此这两项参数的设置不宜过大。

进一步分析表明, 激光功率线性减小或焊接速度线性增大时, 匙孔振幅会显著减小。在低功率低熔深条件下, 匙孔振荡相对稳定, 此时提高焊接速度对稳定振荡的作用有限, 反而会缩减光束在当前位置的加热时长, 减少匙孔的存续时间, 降低金属蒸汽完全喷出的概率, 从而加剧气孔生成。相反, 在高功率高熔深条件下, 匙孔振荡极为不稳定, 提高焊接速度有助于稳定振荡, 从而减少气孔。正离焦时, 熔池表面的光斑比实焦时更大, 并且光束呈圆锥形发散, 功率密度更低, 需提高功率以形成相同的熔深。此外, 光束在孔内进行多次吸收和反射时, 主要能量在 1~3 次的反射位置被吸收, 而正离焦相较于实焦和负离焦, 相同反射次数的位置更靠上, 使匙孔上沿受热比例更高。加上更高功率带来更多的金属气化量, 正离焦时匙孔的开口程度更大, 熔池横截面形状趋于三角形而非丁字形, 匙孔闭合时间延长, 金属蒸汽更易完全喷出, 因此正离焦时焊缝气孔数量更少。

理想的匙孔形态一般为倒直立的圆锥, 但在实际焊接过程中, 由于光束的连续移动和熔池的黏滞作用, 匙孔常发生向后的弯曲变形。当光束入射角为负时, 光束相对于前进方向轻微后仰, 使匙孔下部的后弯程度减小, 整体形状更趋于竖直。在激光功率和焊接速度不变的情况下, 匙孔的总长度保持不变, 即金属蒸汽喷出的路径长度不变。由于越竖直的匙孔越利于蒸气顺畅喷出, 减少蒸气在焊缝内的残留, 从而有效降低焊缝内部气孔的产生。

试验样件验证表明, 采用常规激光焊接头、稍快的焊接速度、正向大幅提高离焦量、负方向适当倾斜入射, 并辅以大功率补偿熔深可以有效抑制气孔产生, 保证焊接接头质量, 同时将焊接变形控制在 1.5 mm/m 以内, 无需后续打磨、校正和返修。

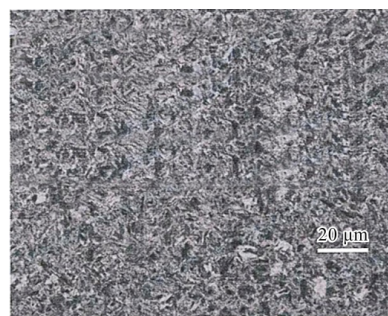
4 焊接接头性能评价

4.1 显微组织

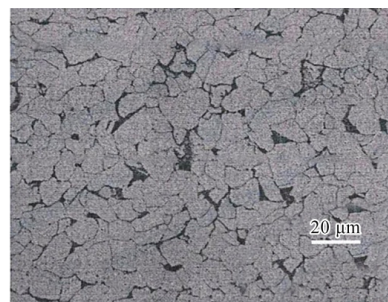
对特种钢与耐候钢激光填丝焊对接接头、特种

钢激光填丝焊对接接头的显微组织进行评价。特种钢+耐候钢对接焊缝(试样 b)显微组织形貌如图 3 所示, 特种钢+特种钢对接焊缝(试样 a)显微组织形貌如图 4 所示。

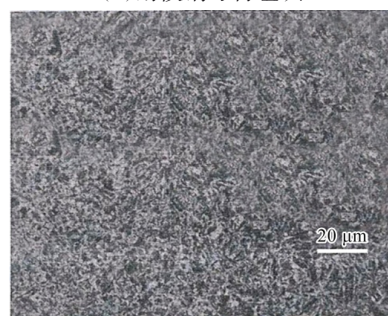
显微组织分析显示, 激光填丝焊的焊缝区域均呈现典型的回火马氏体组织特征。相较于激光焊,



(a) 特种钢母材组织



(b) 耐候钢母材组织



(c) 热影响区



(d) 焊缝显微组织

图 3 特种钢+耐候钢对接焊接试样的显微组织

Fig. 3 Metallographic diagram of a butt welding specimen

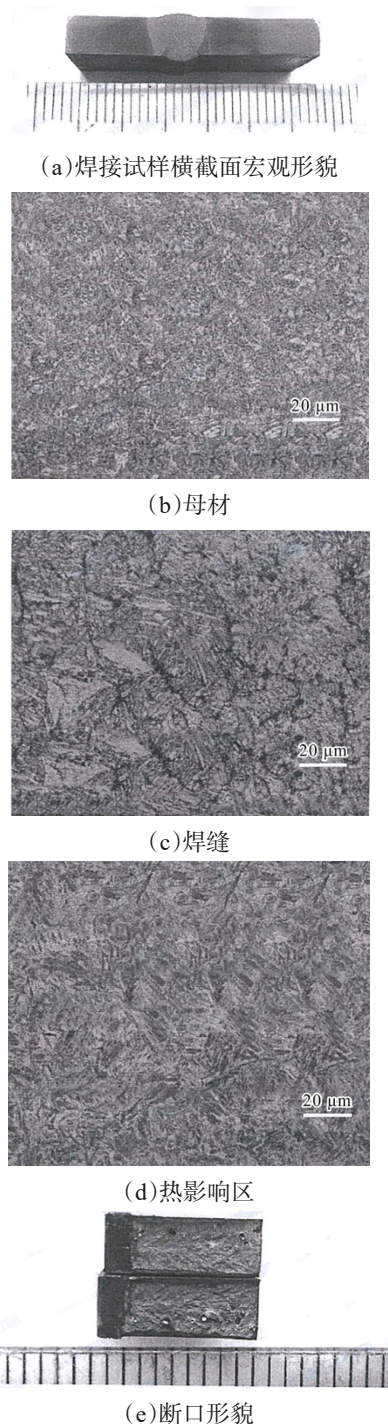


图4 特种钢激光焊对接焊接试样的显微组织

Fig. 4 Metallographic diagram of a butt welding specimen

MAG焊因热输入较高,导致热影响区宽度增大,组织粗化现象突出,尤其在2.5 mm厚的Q345NQR2薄板一侧表现更为明显。而激光填丝焊可以结合扫描振动技术(扫描频率100~200 Hz,扫描振幅0.6~1.0 mm),有效实现晶粒细化,同时抑制粗大先共析

铁素体的形成。

如图3所示,特种钢与耐候钢异种钢对接焊接试样的激光焊显微组织显示,横截面宏观形貌无缺陷。特种钢侧母材组织由回火马氏体和少量残余奥氏体组成,耐候钢侧母材以铁素体为主,掺杂少量的珠光体。热影响区与焊缝区均以回火马氏体为主,伴随少量残余奥氏体。

如图4所示,特种钢与特种钢对接焊接试样的激光焊显微组织同样无缺陷。母材组织主要为回火索氏体,伴随少量贝氏体;热影响区以回火马氏体为主,含有少量残余奥氏体;焊缝区显微组织主要为回火马氏体,伴随少量托氏体和残余奥氏体,断口形貌为韧性断口。

4.2 焊接接头力学性能

对接接头的拉伸和冷弯性能结果见表3。试验结果表明,采用激光填丝焊工艺的对接接头抗拉强度可达到母材强度的81%,采用熔化极气体保护焊的对接接头抗拉强度只能达到母材的43%;180°弯曲试验均合格。

表3 对接焊缝接头拉伸、冷弯性能

Table 3 Butt weld joint tensile and cold bending performance

试件 编号	母材类别	焊接方式	焊接接头 /MPa	180°冷弯 D=4a	
a	特种钢+特种钢	激光填丝焊	1263	面弯	合格
			1259	背弯	合格
d	特种钢+耐候钢	激光填丝焊	567	面弯	合格
			562	背弯	合格
c	特种钢+特种钢	熔化极气体 保护焊	675	面弯	合格
			674	背弯	合格

5 结论

本研究针对4.5 mm厚的特种钢与2.5 mm厚的Q345NQR2异种钢大型结构件的激光填丝焊接工艺进行了研究,结合与传统MAG焊的对比分析,主要结论如下:

(1)激光填丝焊在薄壁异种钢焊接中展现出显著优势。其低热输入特性有效减小了热影响区宽度,避免了Q345NQR2侧晶粒粗化,降低了特种钢淬硬组织出现的风险。该工艺能精确控制焊接接头熔深,焊缝成形美观,飞溅极小,显著降低了后续

清理成本。通过合理选择填充焊丝,有效减轻了异种钢间的物理性能和化学成分差异,使得接头的抗拉强度达到母材的80%以上。因此,激光填丝焊特别适用于对外观质量、承载强度、防护性能要求较高的领域。

(2)MAG焊在本次异种钢焊接实验中表现出较高的经济性和操作灵活性。该设备成本低,工艺适应性强,对工件装配间隙要求相对宽松。但较高的热输入导致焊接热循环剧烈,热影响区加宽,组织性能劣化风险增大,且焊接变形量显著高于激光填丝焊,实测纵向收缩量平均高出约35%。焊缝表面成形相对粗糙,飞溅较多。焊接接头的平均抗拉强度通常只能达特种钢母材下限的40%。因此,气保焊更适用于对成本敏感、焊接质量要求适中且结构允许一定变形量的应用场景。

参考文献:

- [1] Yang Q Q, Wang Y, Li D X, et al. Research on charpy impact test and simulation of laser welded joints in 6252 armor steel[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2025, 138: 104920.
- [2] Xu X Y, Wang G, Zhang R B, et al. Microstructure and mechanical properties of MIG welds between 6252 armor steel and Q550D HSLA steel[J]. Materials, 2022, 15(24): 9043.
- [3] Sun H T, Ma Y Z, Cai Q S, et al. Study on the Effect of Impact on the Macro-and Micro-structure of Q345 Steel Plate [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2024, 33(18): 9321–9335.
- [4] 张琳, 杜利清, 吴刚, 等. 高强度合金钢焊接件的工艺研究[J]. 机车车辆工艺, 2019(03): 19–21.
ZHANG L, DU L Q, WU G, et al. Process Research on High-Strength Alloy Steel Welded Components[J]. Locomotive & Rolling Stock Technology, 2019(03): 19–21.
- [5] 胡士廉, 马良超, 马冰, 等. 低密度钢与异种钢的焊接工艺研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2019, 42(01): 69–73.
HU S L, MA L C, MA B, et al. Study on Welding Process Between Low-Density Steel and Parazacco spilurus subsp. spilurus Species Steel[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2019, 42(01): 69–73.
- [6] 韩丽梅, 蔡得涛, 张宇鹏, 等. 304不锈钢MIG、激光和激光-MIG复合焊接工艺对比研究[J]. 热加工工艺, 2019, 48(01): 72–77.
HAN L M, CAI D T, ZHANG Y P, et al. Comparative Study on MIG, Laser and Laser-MIG Hybrid Welding Process of 304 Stainless Steel [J]. Hot Working Technology, 2019, 48(01): 72–77.
- [7] 杨钊, 但龙, 马君. 不锈钢与碳钢的异种钢焊接技术研究[J]. 中国金属通报, 2019(02): 116–117.
YANG Z, DAN L, MA J. Research on Welding Technology of Stainless Steel and Carbon Steel for Parazacco spilurus subsp. spilurus Species [J]. China Metal Bulletin, 2019(02): 116–117.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>