

基于机器人焊枪角度变化的熔深分析研究

邓火生, 杨启杰, 龙昌茂, 戴建树

广西机电职业技术学院 广西南宁 530007

摘要: 针对25mm厚碳素钢板角接焊缝难以完全焊透的问题, 通过研究厚板弧焊机器人双丝焊接工艺, 发现影响厚板弧焊机器人焊接质量的关键因素为打底层的焊接方式和焊枪的工作角度。因此, 分别对打底层的焊接方式, 焊枪工作角度进行分析和试验。结果表明: 25mm厚碳素钢板角接头机器人焊打底层需采用拉焊方式进行, 可得到指状熔深, 双面焊接熔深可以达到2~3mm的交汇区宽度, 确保焊透; 对于坡口角度为50°~55°的角接头, 打底层拉焊的焊枪前进角度为90°~95°, 填充和盖面层采用推焊方式保证熔敷效率和焊缝外观质量, 焊枪前进角度为85°~90°, 焊枪与腹板的夹角为25°~35°, 可得到指状熔深交汇区, 同时保证底板和腹板充分熔透, 焊缝区、热影响区和母材区硬度一致性较好, 整体焊接质量高。

关键词: 机器人; 熔深; 焊枪角度

1 序言

随着中国制造技术的快速发展, 国内的制造业将迎来新的发展机遇, 发展智能制造将成为很多企业的必然选择^[1]。由于人工成本的增加, 以及国家对高耗能、高污染产业的限制, 高效焊接成为各焊接企业竞相追逐的目标。钢结构行业的高速发展, 对大熔深全焊透要求越来越高, 此前大多企业都采用埋弧焊焊接, 但埋弧焊的熔池不可见, 对于厚板要求大熔深, 焊接速度最高一般为400mm/min, 效率低下, 一般只适用于长焊缝平焊或弧线位置的焊接, 难以实现空间位置焊接, 因此埋弧焊并不适合与机器人配合使用。近年来, 国内对机器人弧焊工艺展开了诸多方面研究, 高延峰等^[2]研究了焊枪倾角信息融合的弯曲焊缝轨迹跟踪; 郭吉昌等^[3]研究了焊枪空间位姿实时检测, 机器人焊接的焊枪与焊缝相对位置关系以及机器人运动平稳性直接决定焊缝质量^[4]。

目前, 国产奥太焊接电源已可实现单电源双丝单弧焊接, 不仅电弧长度可控, 熔滴过渡可控, 电弧不存在双丝双弧的电磁力干扰, 提高焊接熔敷率, 而且提高焊接生产的效率, 也保证了焊接的质量, 具有高速、高效以及高度自动化等优点。

同时, 由于弧焊机器人焊枪旋转角度与工件坡口的空间限制和熔透性要求, 焊枪前进方式(推焊或拉焊)和焊接角度是影响焊缝熔深的关键, 打底层, 填充、盖面层的前进方式的选择, 合适的焊枪与底板夹角以及焊枪的前进角度, 都是决定25mm以上的厚板是否熔透的关键因素。

因此, 对厚板进行大熔深全焊透工艺进行研究不仅具有学术意义, 对于实际生产更显得尤为必要。本文对厚板角接头进行弧焊机器人双丝单电弧的焊接角度工艺研究, 不仅解决了复杂位置的焊接可达性, 而且通过工艺设计实现焊缝的大熔深和全焊透, 有效提高生产效率(最高速度可达720mm/min), 缩短焊接周期, 降低生产成本。

2 厚板全焊透工艺试验条件

试样如图1所示, 材料为Q355, 采用船形焊接方式, 底板和腹板均为25mm, 坡口角度50°~55°, 钝边6~8mm, 底板与腹板装配无间隙, 焊接材料为 $\phi 1.2$ mm的AWS ER70-6焊丝, 焊接气体为80%Ar+20%CO₂, 焊接设备为CROBOTP弧焊机器人和奥太焊接电源, 焊枪采用水冷方式。为减少母材变形, 使用夹具将母材固定夹紧在工作台, 焊缝质量要求大熔深, 全焊透, 焊缝表面平整光滑无气

基金项目: 2021广西高校中青年教师科研基础能力提升项目(2021KY1068)。

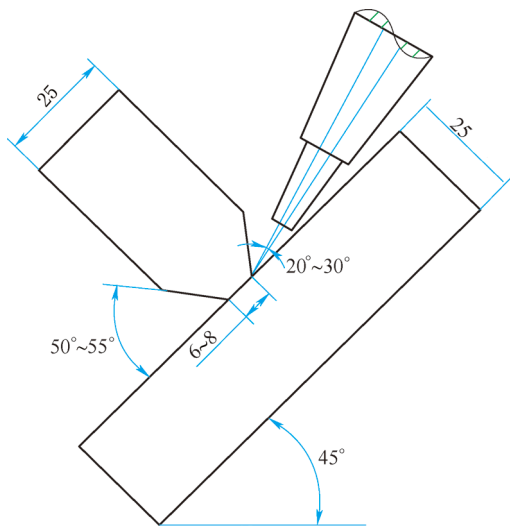


图1 25mm厚Q355板角接头焊双丝单弧焊接角度

孔、咬边、裂纹。

焊前用千叶轮打磨清理试件表面及边缘每侧 $\geq 20\text{mm}$ 处直至露出金属光泽，去除表面的氧化膜、铁锈等杂质，用丙酮擦拭去除表面油污。

3 焊枪前进方式（推焊或拉焊）对焊缝熔深的影响

对于25mm以上的厚板角焊缝而言，焊缝熔深是决定其性能的关键（见图2），熔深越大，焊缝初强度就越大，同时金属在高温情况下，晶格会改变。在冷却过程中，最先冷却的地方是颗粒最粗的地方，也就是强度最小的地方，越向表面晶格越小，密度更大，所以强度就更大，因此熔深与焊缝强度是成正比关系的。

分别用相同厚度尺寸和结构的角接头进行试验（见表1），试验后用硝酸酒精溶液进行断面腐蚀观

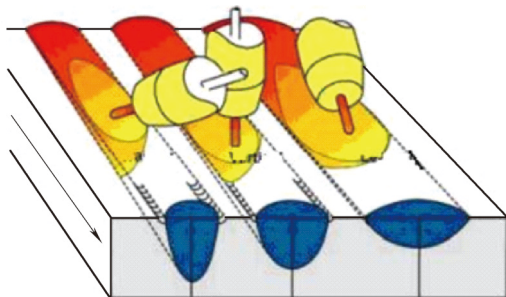


图2 不同前进方式焊缝熔深对比

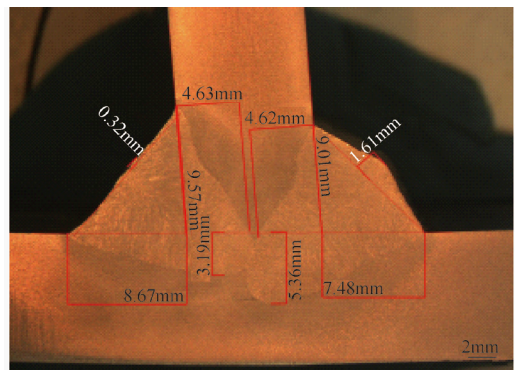
表1 焊缝打底焊接参数

电弧电压 /V	焊接电流 /A	焊接速度 /mm·s ⁻¹	干伸长 /mm	焊枪前进角 / (°)
38.4	530	10~12	22~25	90~95

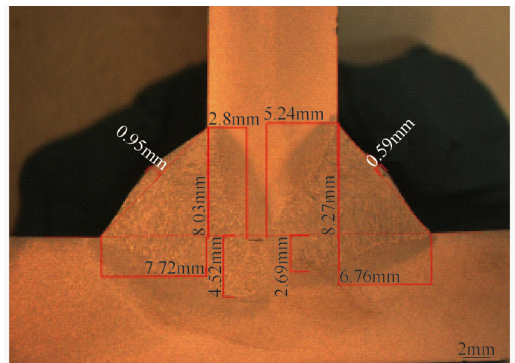
察熔深，测试方法为ISO 17639: 2003，测试设备为体式显微镜，试验数据和结果见表2和如图3所示。

表2 不同焊接前进方式焊缝尺寸 (mm)

试样	焊脚长度		熔深		余高
	底部	侧边	底部	侧边	
1 [#] (左, 推焊)	8.67	9.57	3.19	4.63	0.32
1 [#] (右, 拉焊)	7.48	8.01	5.36	4.62	1.64
2 [#] (左, 拉焊)	6.65	8.60	3.60	6.77	2.12
2 [#] (右, 推焊)	7.65	8.42	3.52	4.16	0.79



a) 左推右拉焊



a) 左推右拉焊

图3 打底层不同焊接前进方式焊缝断面形貌

如图3所示，焊枪倾角 $90^\circ \sim 95^\circ$ 实施拉焊，此时焊接电流达530A，电弧呈倒锥形状，熔滴过渡约束电弧的扩展，熔滴呈射流过渡，电弧挺直，能量集中，在推动电极附近的高温气流等离子体的作用下，熔滴以极大的加速度连续沿轴向射向熔池，细化晶粒，促进排除杂质气体及夹杂，易形成指状熔深，增大熔深。

4 焊枪角度对熔深的影响

如图4所示，厚板焊接角度包括焊枪与腹板夹角 θ_1 ，焊枪前进角度 θ 和焊枪与底板夹角 θ_2 ，由于坡口空间位置限制，当 $\theta_1 = \theta_2 = 45^\circ$ 时，焊枪端部无法伸

入坡口根部,无法进行焊缝打底,因此,当 $\theta_1 > \theta_2$ 时方可施焊。根据推焊和拉焊的焊接方式分析可知,厚板角焊缝打底层应采用拉焊可得较大熔深结论,焊枪前进角应 $\theta > 90^\circ$ 。根据试验可知,焊枪不同角度是获得大熔深良好焊缝成形的关键。因此,当焊枪前进角度为 $90^\circ < \theta < 95^\circ$ 时,分别改变焊枪与底板

的夹角 θ_2 ,观察两侧熔深交汇区宽度来分析焊枪与底板夹角 θ_2 对熔深的影响,规定两侧熔深交汇区为负数则证明未熔合,焊接参数见表3。试验后,用角磨机沿着焊缝横向截面切开,获取焊缝断面试样,进行打磨抛光,用硝酸金属腐蚀液腐蚀,酒精冲洗并吹干,利用工业相机观测金相试样的左右熔深。

表3 焊接倾角参数

电弧电压 /V	焊接电流 /A	焊接速度 /mm·s ⁻¹	干伸长 /mm	起弧时间 /s	收弧时间 /s	焊枪与底板夹角 θ_2 / (°)	两侧熔深交汇区 宽度/mm
38.4	530	10~2	22~25	0.05	1.0	45	-2.6
						40	-2.4
						35	-0.5
						30	1.6
						25	2.3

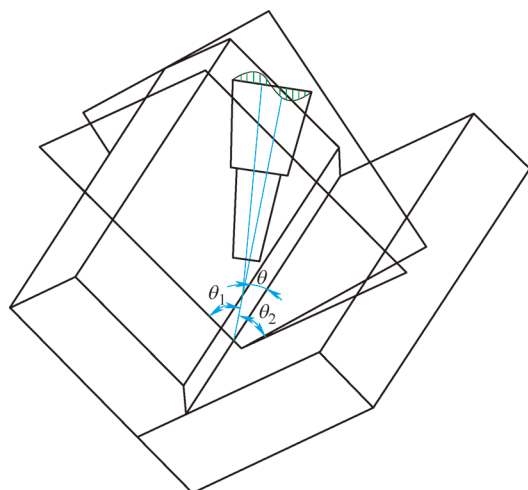


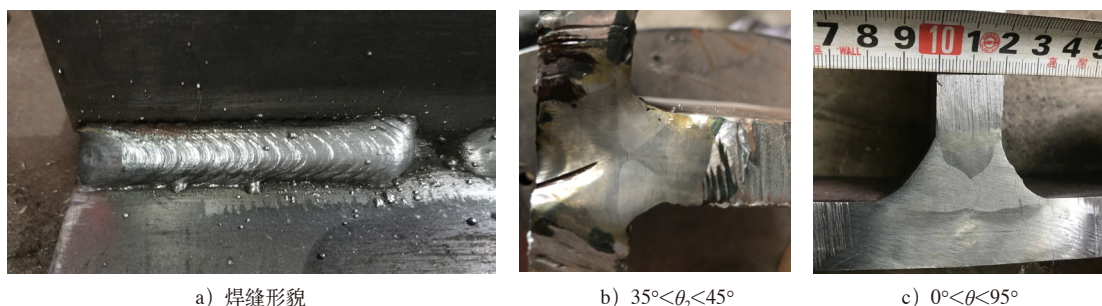
图4 焊枪角度

1) 当 $35^\circ < \theta_2 < 45^\circ$ 、 $90^\circ < \theta < 95^\circ$ 时,试验结果如图5所示,角焊缝根部未焊透,焊缝出现咬边,飞溅大。根据焊接过程中的熔滴过渡和电弧作用形态可知,双丝焊丝电流密度大,焊丝熔化速度快,焊接电弧推力较弱,大部分推力指向底板,指向腹板钝边(6~7mm)处热量不足,对母材金属的挖掘

力小,无法熔透。同时, $50^\circ \sim 55^\circ$ 的坡口对于双丝焊枪的空间位置限制较大,因此,根据空间位置对电弧的限制以及电压最小原理的作用,焊接电弧最强推力无法集中于焊缝根部,而是在两侧母材以及焊缝中心随熔滴过渡发生不规则的偏移,造成未焊透。

此外,双丝 CO_2 焊接为短路过渡, CO_2 气体在高温下发生 $\text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{CO} + \text{O}$ 分解^[5],造成体积增大,引起局部压力上升,产生向上的推力,使焊丝端部大块熔滴出现偏斜^[6],熔池内的金属蒸汽超过临界值时,液态金属在气孔爆破力的冲击下形成大量飞溅。同时,双丝焊接熔滴较大,先与坡口两侧母材发生接触短路,无法直接过渡到焊缝根部^[7],已过渡的熔融金属由于失去电弧的继续加热和保护作用而结晶凝固,较大的表面张力阻碍了金属向根部的继续流动,造成焊缝根部未熔合。

2) 根据前面的分析结果,改变焊枪与腹板的倾斜角度,即当 $25^\circ < \theta_2 < 35^\circ$ 、 $90^\circ < \theta < 95^\circ$ 时,试验结果如图6所示。焊缝整体外观效果成形良好,焊缝笔



a) 焊缝形貌

b) $35^\circ < \theta_2 < 45^\circ$

c) $0^\circ < \theta < 95^\circ$

图5 不同角度焊缝断面形貌

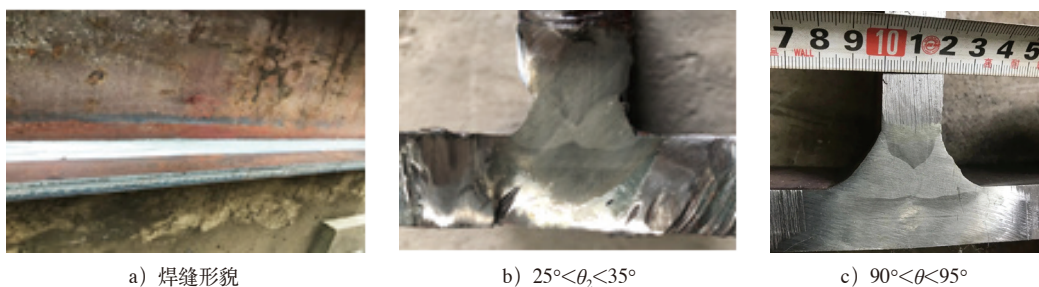


图6 不同角度焊缝断面形貌

直、规则连续，宽度和高度也分布均匀合理，无明显飞溅。

根据试验结果分析可知，双丝焊接大电流产生的电弧轴向力直接指向焊缝根部，有效挖掘试件，角接头两侧熔深出现交汇区。电弧能量集中，不仅有高效的熔敷效率，较大的挖掘力，也保证电弧轴向力能够较均匀地施加到熔池底部，搅拌能力较强，排开液态金属，去除气体和杂质。同时，CO₂气氛由于高温分解而产生的氧化性气氛和对电弧产生的冷却压缩作用^[8]，熔池表面不断产生电弧斑点，电弧产生压缩效应，电弧强度增大，弧长变短，轴向力集中，出现弧坑后，焊丝端面而呈潜弧状态。在强电弧轴向力作用下，角接头两侧熔深均可达到腹板中心线，并产生2~3mm宽的交汇区，咬合与互溶效应明显，焊缝完全焊透（见图6）。

3) 根据图7可知，角接头两侧熔深交汇区随焊枪与底板的夹角的变化趋势：焊枪前进为拉焊（90° < θ < 95°），随着焊枪与底板的夹角θ₂在45°~35°时，两侧熔深交汇区宽度为负值，焊缝未焊透；θ₂在25°~35°时，两侧熔深交汇区宽度为正值，焊缝焊透。

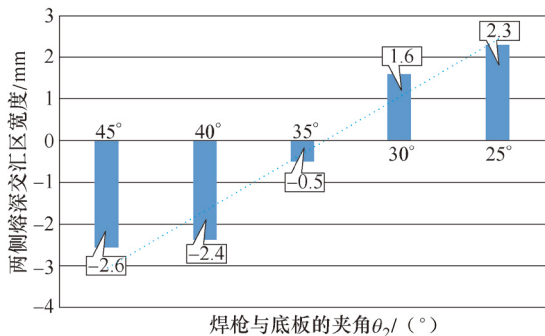


图7 两侧熔深交汇区随焊枪与底板的夹角的变化趋势

5 焊缝熔透性检测分析

按图8所示标定位置进行超声波检测取样，以

焊缝横向中心为X轴，纵向为Y轴，对焊缝断面进行打磨，按照GB 11345—2013规定进行100%超声波检测。超声波检测探头型号为N5P12L，探头K值为2，前沿距离为12.5mm，扫查速度≤150mm/s，检测灵敏度为SL-8DB，灵敏度补偿为3dB，对比试块为CS-3-1。检测结果表明，焊缝熔透率达100%，焊缝质量完全符合工艺标准和GB 50205—2020质量验收标准。

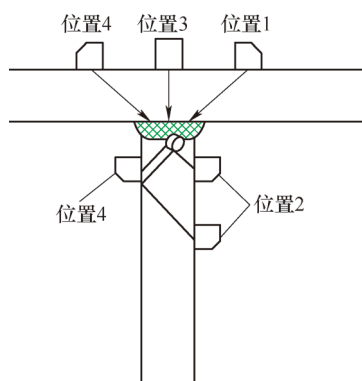


图8 焊缝超声波检测取样

6 结束语

本文针对厚度超过25mm的碳素钢角接头不易焊透、熔敷效率低、力学性能不理想等问题进行分析，确定了影响厚板角接头焊接质量的关键因素为打底层焊接方式，打底与填充盖面层的焊枪角度不合理。对于与坡口角度为50°~55°的角接头，根据熔深要求和坡口角度空间位置限制等条件，确定了如下结论：

1) 焊缝打底层应采用拉焊方式进行，焊接前进角度θ应保持在90°~95°，可获得较理想熔深，θ角度过大，电弧轴向力会部分分散，气体保护效果差。填充和盖面层应采用推焊的方式进行，可有效提高熔敷效率，获得符合规定的熔宽和余高，外观成形好。

15CrMnMoVA钢与30CrMnSiA钢氩弧焊 及焊后热处理工艺研究

戴浩, 王宝龙, 李智勇, 王燕

江西昌河航空工业有限公司 江西景德镇 333002

摘要: 针对15CrMnMoVA与30CrMnSiA合金结构钢异种材料焊接时焊丝及热处理工艺制度选用问题, 通过开展工艺试验与测试, 研究结果表明: 15CrMnMoVA与30CrMnSiA异种材料焊接时, H18CrMoA或15CrMnMoVA焊丝均可选用, 焊后调质采用30CrMnSiA的热处理工艺更为合适, 即淬火温度为880~900℃, 油作为淬火冷却介质, 回火温度为500~570℃。

关键词: 异种合金结构钢; 氩弧焊; 焊后热处理

1 序言

15CrMnMoVA是一种具有较低合金含量和良好焊接性能的低碳贝氏体高强钢, 经调质处理后可以获得高强度、良好的韧性和塑性以及良好的焊接性能, 主要用在直升机主减撑杆、发动机支架等重要部件^[1]。30CrMnSiA属中碳调质钢, 强度高, 焊接性能较差, 30CrMnSiA钢调质后有很高的强度和足够的韧性以及淬透性, 常用于汽车、飞机各种特殊耐磨零配件等。部分航空焊接零件由于特殊的使用要求, 结构设计时选用15CrMnMoVA与

30CrMnSiA两种材料, 并且需要通过焊接方法制造成形。但是这两种材料焊接主要存在以下两点问题: ①焊接工艺规范中两种材料焊接使用的焊丝不同, 15CrMnMoVA钢焊接应选择15CrMnMoVA焊丝, 30CrMnSiA钢焊接应选择H18CrMoA焊丝。②热处理工艺规范中, 为使两种材料满足 $R_m=(1180\pm100)$ MPa强度要求所采用的热处理工艺制度不同。通过开展钨极氩弧焊工艺试验, 分析添加15CrMnMoVA钢和30CrMnSiA钢焊接时所用焊丝对焊接接头强度的影响, 以及不同热处理温度对焊接

2) 焊接角度, 即焊枪前进角度 θ 和焊枪与腹板的夹角 θ_2 要在 $25^\circ<\theta_2<35^\circ$, $90^\circ<\theta<95^\circ$, 角接头两侧熔深出现交汇区, 熔深根部咬合和互熔良好, 焊缝熔宽、熔深和余高较为理想, 外观成形良好。

3) 本文所研究的角接头的焊接方式和焊枪角度的合理范围结论, 经试验证明效果良好, 已进行大批量实际生产, 为进一步的焊缝形成机理提高有益的实践参考价值。

参考文献:

- [1] 周军, 黄建鹏, 贾小磊. T型钢机器人焊接立向焊接工艺研究[J]. 金属加工(热加工), 2019(4): 14-16.
- [2] 高延峰, 肖建华. 基于焊枪倾角信息融合的弯曲焊缝

轨迹跟踪[J]. 焊接学报, 2014, 35(12): 15-18.

- [3] 郭吉昌, 朱志明, 孙博文. 基于视觉的焊枪空间位姿实时检测技术[J]. 电焊机, 2018, 48(9): 1-7.
- [4] 杨启杰, 龚胜峰. 车桥壳体机器人焊接工艺优化的研究[J]. 金属加工(热加工), 2020(8): 40-43.
- [5] 常云龙, 刘晓龙, 路林, 等. 短路过渡CO₂焊研究现状及展望[J]. 焊接技术, 2013(3): 1-5, 5.
- [6] 杨立军, 李俊岳, 李桓, 等. 波控CO₂短路过渡焊的电弧行为[J]. 焊接学报, 2003(5): 73-76, 7-8.
- [7] 王宝, 杨林, 王勇. 药芯焊丝CO₂焊熔滴过渡现象的观察与分析[J]. 焊接学报, 2006(7): 77-80, 117.
- [8] 安藤弘平, 长谷川光雄. 焊接电弧现象[M]. 施雨湘译. 北京: 机械工业出版社, 1985.

MW 20210613