

基于可变波形 SAW 焊缝成形质量研究

高险峰

(福建福船一帆新能源装备制造有限公司,福建 漳州 363211)

摘要: 通过对比试验研究了直流、交流方波波形参数(频率、平衡和电压偏移)对埋弧焊焊接效率的影响。结果表明,熔深随着频率的增大而减小,随着平衡和电压偏移的增大而增大;熔敷效率随着平衡和电压偏移的增大而减小。进一步试验证明:直流、交流并用有利于提高焊接生产效率。该研究成果为实际工业应用中埋弧焊成形质量提供了理论依据。

关键词: Q345 钢;SAW;波形参数;焊缝成形;熔敷效率

中图分类号: TG445

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2021)04-0342-07

Research on weld forming quality based on variable waveform SAW

GAO Xianfeng

(Fujian Fuchuan Yifan New Energy Equipment Manufacturing Co., Ltd., Zhangzhou 363211, China)

Abstract: The effects of DC and AC square wave waveform parameters (frequency, balance and offset) on the efficiency of submerged arc welding are studied through comparative experiments. Results show that the penetration depth decreases with the increase of frequency, and increases with the increase of balance and offset; the deposition efficiency decreases with the increase of balance and offset. Further tests have proved that the combined use of DC and AC is beneficial to improve welding production efficiency. The research results provide a theoretical basis for the forming quality of submerged arc welding in practical industrial applications.

Keywords: Q345 steel; SAW; waveform parameters; weld forming; deposition efficiency

埋弧焊(SAW)^[1]是 Q345 钢焊接方法之一,具有熔深大、熔敷率高、机械化程度高等优点,广泛地应用于船舶、压力容器、大型导管、桥梁梁柱等结构中^[2]。近年来,国内外学者对焊接工艺方面做了大量的研究^[3-5]。胡效东等^[6]用埋弧自动焊对 Q345R 钢板进行对接焊试验;张新明等^[7]开展了填丝埋弧焊相关工艺试验;杨伟锋等^[8]进行焊接试验及参数优化;Ravinder 等^[9]开发了数学模型评估极性对埋弧焊焊缝几何形状的影响。

本文采用对比试验方法研究直流、交流波形等参数对埋弧焊焊缝成形的影响。分别针对极性、频率、平衡和电压偏移设计了对比试验,观察了方波波形参数对熔深的影响,计算了熔敷效率,

总结了极性、频率、平衡和电压偏移在埋弧焊领域的作用和特点,为埋弧焊方波波形参数优化提供了理论依据。

1 材料和方法

1.1 材料与设备

试验材料为 20 mm 厚的 Q345D 钢板,试样尺寸为 20 mm×700 mm×150 mm。焊材为 H10Mn2 4.0 mm + SJ101。Q345D 钢板与焊剂的化学成分如表 1 和表 2 所示。试验使用 Powerwave AC/DC 1000SD 在试样板上进行平板单道堆焊,焊接参数:焊接电流 650~800 A,焊接电压 32~36 V,焊接速度 38~40 cm/min,埋弧焊示意图如图 1。

收稿日期: 2021-06-07

基金项目: 福建省科技重大专项(2020HZ03018)

作者简介: 高险峰(1983—),男,湖北黄冈人,工程师,研究方向:风电钢构的焊接及检测技术。

表 1 Q345D 钢板的化学成分

Tab.1 Chemical composition of Q345D steel plate

化学成分	C	Si	Mn	P	S	Ni	V	Ti	Cr	Ni	Cu	N	Mo	P	Als
质量分数/%	≤0.18	≤0.5	≤1.7	0.03	0.025	0.07	0.15	0.2	0.3	0.5	0.3	0.012	0.1	-	0.015

表 2 S101J 焊剂化学成分

Tab.2 Chemical composition of S101J flux

化学成分	SiO ₂ +TiO ₂	MnO+Al ₂ O ₃	Ca+MgO	CaF ₂	P	S	H ₂ O	杂质
质量分数/%	21.4	23.4	30.2	22.4	0.017	0.013	0.02	0.01

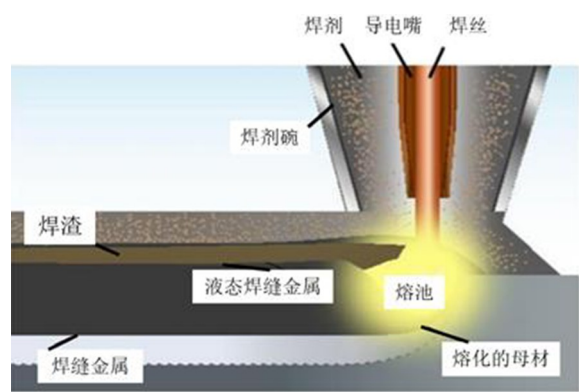


图 1 埋弧焊示意图

Fig.1 Schematic diagram of submerged arc welding

1.2 方案及结果

试验用电流 700 A, 电压 34 V, 焊接速度 40 cm/min, 具体方案及结果如表 3 所示。表 3 中

序号 1~3 为方案一:不同极性情况下的对比方案;序号 4~8 为方案二:不同频率情况下的对比方案;序号 9~13 为方案三:不同平衡情况下的对比方案;序号 14~18 为方案四:不同电压偏移情况下的对比方案。同一工艺参数下的试验,应尽量保证在同一工况,时间内完成,以此降低随机误差。

焊前需对钢板表面除锈和去油污处理,分别采用砂纸和丙酮进行打磨和清洗,焊剂在 350 ℃ 下烘干 2 h 铺进焊道,然后进行焊接试验。焊后,电火花线切割取试样,经过打磨、抛光、腐蚀(使用 4%硝酸酒精溶液腐蚀),观察焊缝的宏观金相,测得熔深,如图 2~图 5 为不同参数下焊缝宏观截面图,测量消耗的焊丝长度及其所用的时间用于计算熔敷效率,将测得的熔深及熔敷效率填入表 3。

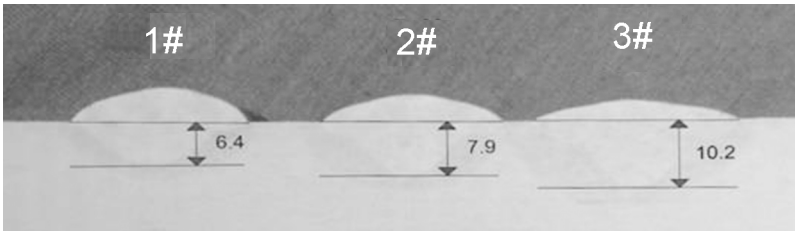


图 2 不同极性下焊缝宏观截面图

Fig.2 Macro cross-sectional view of welds under different polarities

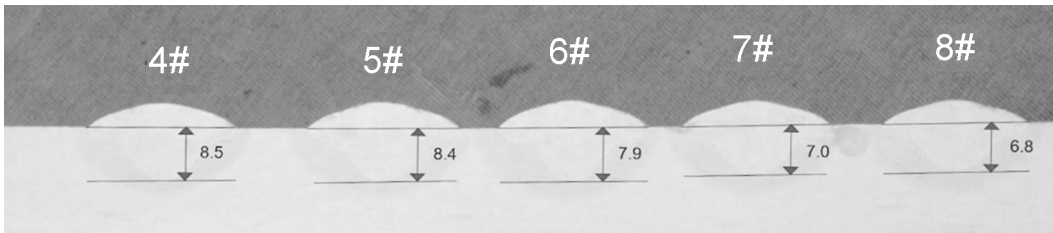


图 3 不同频率下焊缝宏观截面图

Fig.3 Macro cross-sectional view of welds at different frequencies

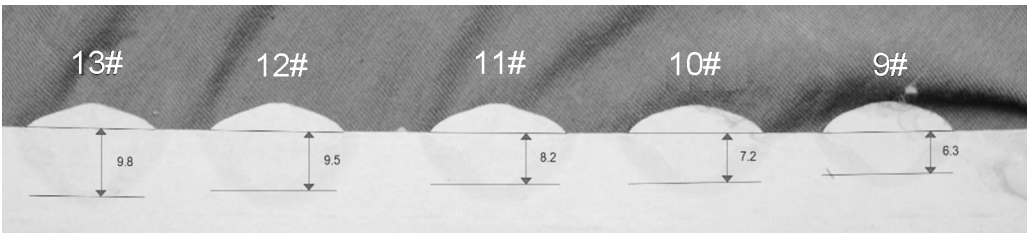


图 4 不同平衡下焊缝宏观截面图

Fig.4 Macro cross-sectional view of welds under different balances

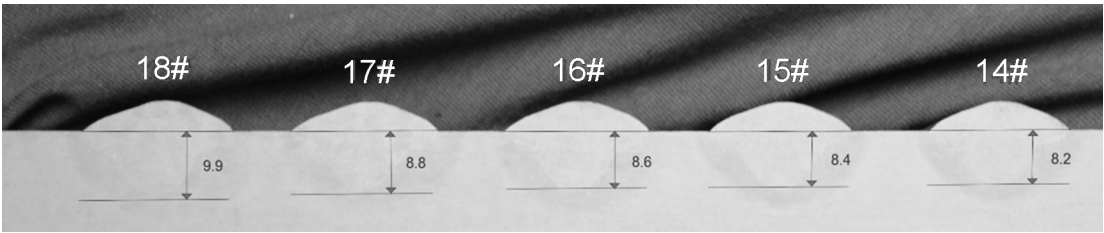


图 5 不同电压偏移下焊缝宏观截面图

Fig.5 Macro cross-sectional view of welds under different offsets

表 3 试验方案及结果

Tab.3 Test plan and results

项目	试样序号	极性	频率/Hz	平衡/%	电压偏移/V	熔深/mm	熔敷效率/($\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$)
方案一	1	DC-	-	-	-	6.4	13.1
	2	AC	50	50	0	7.9	10.9
	3	DC+	-	-	-	10.2	8.2
方案二	4	AC	10	50	0	8.5	-
	5	AC	25	50	0	8.4	-
	6	AC	50	50	0	7.9	-
	7	AC	75	50	0	7.0	-
	8	AC	100	50	0	6.8	-
方案三	9	AC	50	25	0	6.3	12
	10	AC	50	35	0	7.2	11.3
	11	AC	50	50	0	8.2	10.9
	12	AC	50	65	0	9.5	9.8
	13	AC	50	75	0	9.8	8.9
方案四	14	AC	50	50	-10	8.2	12.5
	15	AC	50	50	-5	8.4	11.4
	16	AC	50	50	0	8.6	10.9
	17	AC	50	50	5	8.8	10.2
	18	AC	50	50	10	9.9	9.5

2 试验结果分析

2.1 电弧热及电弧力

在埋弧焊过程中,焊接电弧产生高温熔化母材、焊丝和焊剂,形成熔池,熔池在电弧力、磁力、表面张力及重力等作用下,保持一种稳定的形状尺寸,伴随着电弧远离,温度降低,冷却凝固形成焊缝。焊接电弧主要由阳极区、弧柱区以及阴极区组成,每一部分有不同的电压降,如图 6 所示^[10]。 U_1 为阳极电压降, U_2 为弧柱电压降, U_3 为阴极电压降, U 为整体电压降, $U=U_1+U_2+U_3$ 。

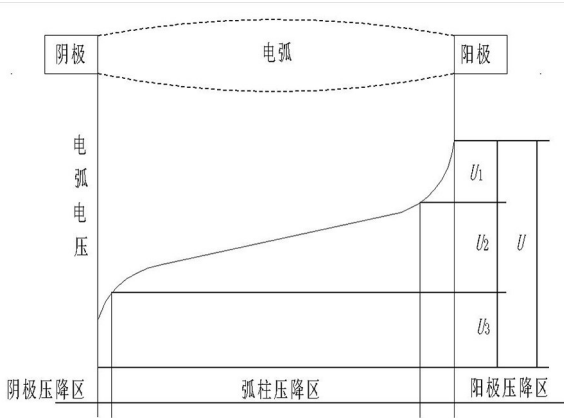


图 6 电弧各区域的电压分布

Fig.6 Voltage distribution in each area of the arc

在单位时间内电弧提供的总能量由阳极区、弧柱区和阴极区 3 部分组成,其总能量 P 如式 (1),由于产热机制复杂,因此需要简化处理,忽略一些次要因素,目前公认的产热公式如式 (2)^[11]:

$$P = P_1 + P_2 + P_3 = IU_1 + IU_2 + IU_3 \quad (1)$$

$$\begin{cases} Q_1 = I \times (U_1 + U_w + U_T) \\ Q_2 = I \times U_2 \\ Q_3 = I \times (U_3 - U_w - U_T) \end{cases} \quad (2)$$

式中, Q_1 为阳极区获得的热能(J); Q_2 为弧柱区获得的热能(J); Q_3 为阴极区获得的热能(J); U_w 为电子溢出电压(V); U_T 为弧柱区温度等效电压(V)。

在变极性的一个周期内,总时间为 t , T_1 为电流正极所占的时间, T_2 为电流负极所占的时间, F 为电弧力,电弧力如公式(3):

$$F \times t = \Delta P = M \times (V_1 - V_0) \quad (3)$$

其中, M 为粒子质量(g); V_0 与 V_1 分别为电弧中正粒子的初始速度(m/s)和涌入熔池速度(m/s)。

2.2 波形参数分析

由试验可得出极性与熔深、熔敷效率的关系,如图 7 所示,在其它参数相同条件下,熔深 $DC+ > AC(50/50/0) > DC-$,熔敷效率 $DC- > AC(50/50/0) > DC+$ 。当 $DC+$ 焊接时,焊丝接正极,焊件接负极,在负极区域因材料沸点影响表面温度不能升得很高,阴极只有局部区域有导电性,因此阴极的导电性将减弱;而在阳极区域电流较大,温度高,有较多的金属蒸汽,产生更多热电离,提供足够的正粒子,阳极的电压降相对较小^[12]。由于 $U_3 \gg U_w$, $U_T < 1V$, U_1 较小,由公式 2 可知 $Q_1 < Q_3$ 。 $DC+$ 焊接时,焊丝接阳极,用于熔化焊丝的热量减少,焊件接阴极产热多,易产生较大熔深,熔敷效率较小。反之,当 $DC-$ 焊接时,焊件接阳极产生热少,熔深较浅,而阴极接焊丝热量多,熔化焊丝多,熔敷效率大。交流焊接时, AC 相当于在一个周期内经历 $DC+$ 与 $DC-$ 的变极性焊接,熔深与熔敷效率也介于二者之间,同时图 7 的试验也验证此规律的正确性,在同一工艺参数下因试验和人为误差的原因,会导致测试结果有波动,根据实践经验与理论推导可确定图 8 符合实际规律。

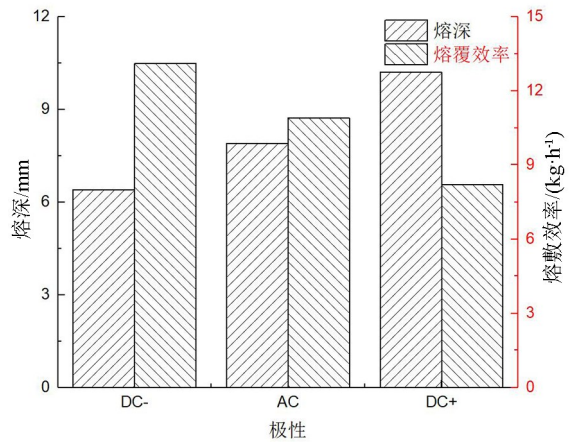


图 7 极性与熔深、熔敷效率关系图

Fig.7 Relationship between polarity and penetration and deposition efficiency

根据表 2 中的数据对熔深与熔敷效率进行函数拟合,由图 8 ~ 图 10 可知,频率与熔深成线性关系, R^2 为 0.957, R_{Adj}^2 为 0.943,均较接近 1 (R^2 为回归平方和与总离差平方和的比值,比值越大模型越精确,回归效果越显著。从数值上看, R^2 介于 0 ~ 1 之间,越接近 1,回归拟合效果越好;随着解释变量的增加,无论解释变量是否真的与被解

释变量相关, R^2 都会提高, 引入 R^2_{Adj} , 则可以度量“真正的相关性”, 它不会随着无关解释变量的引入而显著提高), 说明曲线拟合精度高, 拟合公式如式(4); 同理可得, 平衡与熔深、熔敷效率成线性关系, R^2 为 0.988, R^2_{Adj} 为 0.984, 公式如式(5), R^2 为 0.969, R^2_{Adj} 为 0.959, 公式如式(6); 电压偏移与熔深、熔敷效率成二次函数关系, R^2 为 0.948, R^2_{Adj} 为 0.895, 公式如式(7), R^2 为 0.990, R^2_{Adj} 为 0.981, 公式如式(8)。从表 4 可以看出, P 值小于 0.05 认为模型是显著的, 所以可得出频率与熔深、平衡与熔深、平衡与熔敷效率、电压偏移与熔敷效率的回归模型是显著的, 而电压偏移与熔深回归模型的 P 值为 0.052 与 0.05 较接近, 并且其 $R^2 =$

0.948 接近 1, 可接受此模型, 此模型有一定的指导作用。

频率与熔深

$$y = 8.815 - 0.021x \tag{4}$$

平衡与熔深

$$y = 4.612 + 0.072x \tag{5}$$

平衡与熔敷效率

$$y = 13.521 - 0.059x \tag{6}$$

电压偏移与熔深

$$y = 8.523 + 0.076x + 0.005x^2 \tag{7}$$

电压偏移与熔敷效率

$$y = 10.814 - 0.144x + 0.002x^2 \tag{8}$$

表 4 回归方程显著性分析表
Tab.4 Significance analysis table of regression equation

项目	来源	自由度	平方和	均方	F 值	P 值
频率与熔深	模型	1	2.362	2.362	66.772	0.004
	误差	3	0.106	0.035		
	总计	4	2.468			
平衡与熔深	模型	1	8.755	8.755	250.854	0.001
	误差	3	0.105	0.035		
	总计	4	8.86			
平衡与熔敷效率	模型	1	5.882	5.882	95.057	0.002
	误差	3	0.186	0.062		
	总计	4	6.068			
电压偏移与熔深	模型	2	1.675	0.838	18.099	0.052
	误差	2	0.093	0.046		
	总计	4	1.768			
电压偏移与熔敷效率	模型	2	5.210	2.605	103.602	0.010
	误差	2	0.050	0.025		
	总计	4	5.260			

在其他工艺参数保持不变时, 频率与熔深关系如图 8 所示, 随着频率的增大, 熔深减小。交流方波埋弧焊频率可在 0~100 Hz 调节, 在变极性埋弧焊工作下, 正粒子引起的电弧力是影响熔深的主要因素。在一个正半波周期内, 正粒子加速从正向电极涌向熔池, 由公式(3)可知, 随着频率的增加, 正半波长时间减少, 正粒子涌向熔池的加速时间减少, 正粒子的速度减小, 进而削弱了电弧

力; 同时电源极性改变会对熔池产生磁力搅拌作用, 随着频率变大, 电极方向改变加快, 磁力搅拌作用增强, 使熔池热流分散, 降低熔池周围的电弧力与温度, 电弧对焊件的熔透能力降低, 熔深变浅。当频率较高时, 正粒子涌入熔池的速度降低, 同时因为频率的极性变换较快, 电弧将变得不稳定, 熔深变得不均匀, 出现一些反常现象^[13]。在变极性埋弧焊中, 频率对焊丝的熔化速率可忽略

不计,因此忽略频率对熔敷效率的影响。综上所述,熔深随着频率的增大而减小。

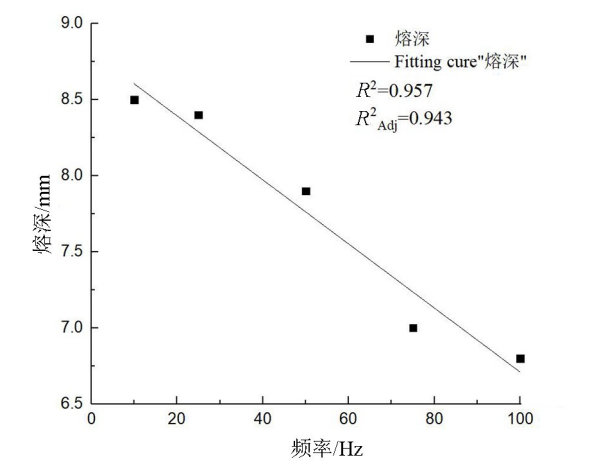


图 8 频率与熔深关系

Fig.8 Relationship between frequency and penetration

在其他工艺参数保持不变时,平衡与熔深关系如图 9 所示。当平衡在 0.25~0.75 之间可调时,起初正半波时间较短,正粒子从正电极加速时间短、速度小,由公式(3)可知,电弧力较弱,磁力搅拌占主导作用,热流分散熔深较浅;随着平衡的增加,正半波时间长,正粒子加速时间长,速度大,电弧力增大,电弧力占主导作用,对焊件熔透能力增强,熔深加大。随着平衡的增大,正半波时间增长,由公式及 2 极性分析可知,阳极热量 $Q_1 < Q_3$, 分配到焊丝端热量减少,焊丝熔化速率降低,熔敷效率随之降低。综上所述,熔深随着平衡的增大而增大,熔敷效率随着平衡增大而减小。

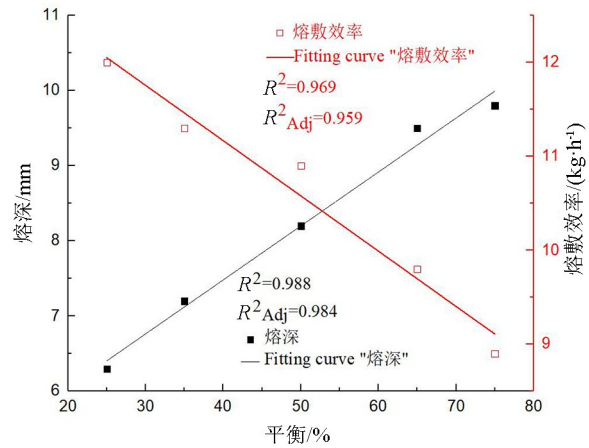


图 9 平衡与熔深、熔敷效率关系图

Fig.9 Relationship between balance and penetration and deposition efficiency

在其他工艺参数保持不变时,电压偏移与熔深关系如图 10。随着电压偏移的增大,阳极的电流幅值增大,正粒子的电压降增大,由公式(3)可知,电弧力也加大,电弧对焊件的熔透能力加强,熔深增大。当电压偏移值增大时,增大阳极的电流值,由公式(2)及电弧产热机制可知,阳极产热少,阴极产热多,降低分配到焊材的热量,焊丝熔化速率降低,熔敷效率降低。综上所述,熔深随电压偏移量的增大而增大(电压偏移为-10~-5 V),熔敷效率随着电压偏移量的增大而减小。

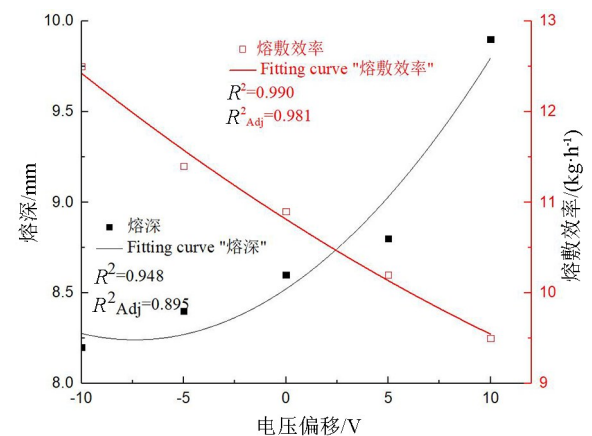


图 10 电压偏移与熔深、熔敷效率关系图

Fig.10 Relationship between offset, penetration and deposition efficiency

3 对比优化试验

(1) 试验采用 $\delta 20$ 平板对接,无坡口,无间隙,电流 750 A,电压 34 V,焊接速度 40 cm/min。在 A、B 面各一道 AC(频率/平衡/电压偏移:50/50/0),以及用 DC+焊接如图 11 所示。两种焊接方式都能完全熔透,但 DC+的熔透效果更好,进一步证明 DC+焊接时,电弧力强,熔透效果好,熔深大。

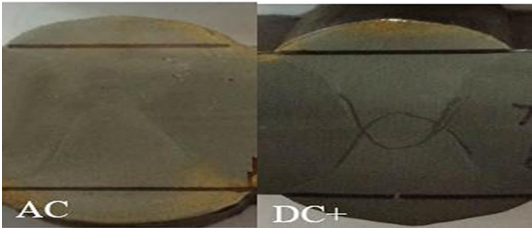


图 11 AC 与 DC+熔深

Fig.11 Penetrations of AC and DC+

(2) 试验采用 $\delta 50$ 坡口对接,60°坡口,钝边 6~8 mm,间隙 0~1 mm,背面焊条打底 3 mm,电

流 650~800 A, 电压 33~35 V, 焊接速度 40~50 cm/min, 对比 AC+DC 焊接与 DC+焊接的成形质量。由图 12 可知, 两焊接方式都能保证完全熔透, 但交、直流混并用方式可使熔池轮廓更加均匀, 相比较 DC+焊缝更为平整美观。

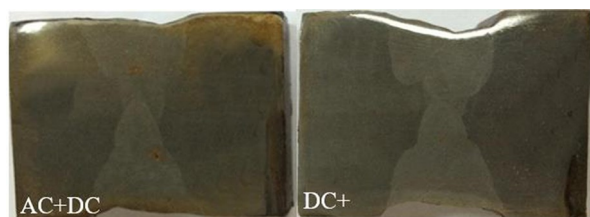


图 12 AC+DC 与 DC+对照图

Fig.12 Comparison of AC+DC and DC+

(3) 试验采用 $\delta 30$ 坡口对接, 60° 坡口, 钝边 6~8 mm, 间隙 0~1 mm, 背面焊条打底 3 mm。电流 685~750 A, 电压 33~37 V, 焊接速度 40 cm/min。在 A 面两道 AC/DC+, B 面两道 AC/AC (A 面 60/75/-4、B 面 60/75/-5)。从图 13 可看出, 两种焊接方式都能完全熔透, 但 A 面 AC/DC+ 的熔透效果更好, 熔池形态较为稳定, 进一步证明了交、直流混并用方式可使熔池轮廓更加均匀, 相比较 AC 焊缝更优。

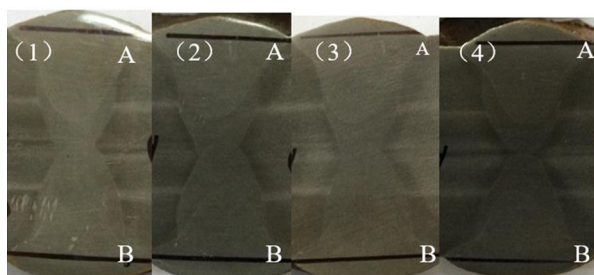


图 13 AC/DC+与 AC/AC 对照图

Fig.13 Comparison of AC/DC+ and AC/AC

4 结论

1) 其它参数相同条件下, 熔深规律是: $DC+ > AC(50/50/0) > DC-$, 熔敷效率 $DC- > AC(50/50/0) > DC+$ 。

2) AC 焊接时, 在其他参数相同下, 熔深随着频率的增大而减小, 随着平衡的增大而增大, 随着电压偏移的增大呈增大趋势。

3) AC 焊接时, 在其他参数相同下, 熔敷效率随着平衡的增大而减小, 随电压偏移的增大呈减小趋势。

4) 在埋弧焊接过程中, 交、直流并用焊接工艺能更有效地调整焊缝成形质量, 以达到实际的生产需求。

参考文献:

- [1] 康凌风. 基于波形控制的 9Ni 钢交流方波埋弧焊接头组织和性能研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2016.
- [2] 田玉吉, 程尚华. 一种厚壁直缝钢管的双丝交流埋弧焊接工艺[J]. 焊管, 2021, 44(1): 59-62.
- [3] SINGH A, SINGH R P. A review of effect of welding parameters on the mechanical properties of weld in submerged arc welding process[J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 26: 1714-1717.
- [4] CHOUDHARY A, KUMAR M, UNUNE D R. Experimental investigation and optimization of weld bead characteristics during submerged arc welding of AISI 1023 steel[J]. Defence Technology, 2019, 15(1): 72-82.
- [5] SHARMA H, RAJPUT B, SINGH R P. A review paper on effect of input welding process parameters on structure and properties of weld in submerged arc welding process[J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 26: 1931-1935.
- [6] 胡效东, 孙启童, 张勇, 等. 热输入对 Q345R 钢埋弧焊接头组织性能的影响[J/OL]. 热加工工艺, [2021-06-11]. <https://doi.org/10.14158/j.cnki.1001-3814.20202359>.
- [7] 张新明, 丁卫, 刘云芳, 等. Q345R 钢填丝埋弧焊工艺研究[J]. 焊接技术, 2021, 50(5): 65-66.
- [8] 杨伟锋, 黄楚畅, 许斌, 等. T 形全焊透接头双丝埋弧焊工艺试验[J]. 广东造船, 2021, 40(1): 89-91.
- [9] SINGHRP, GARG R K, SHUKLADK. Mathematical modeling of effect of polarity on weld bead geometry in submerged arc welding[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2016, 21: 14-22.
- [10] 张建优. 变极性埋弧焊焊缝成形和熔化速度及工艺参数优化研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [11] 李清明, 位旭, 杜宝帅, 等. 电焊焊极性选择与电弧阴阳极产热关系[J]. 电焊机, 2011, 41(6): 29-31, 72.
- [12] LU Y, CHEN S J, SHI Y, et al. Double-electrode arc welding process: Principle, variants, control and developments[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2014, 16(1): 93-108.
- [13] 樊丁, 郑发磊, 肖磊, 等. 高效 MAG 焊接熔滴过渡行为及交变磁场控制试验分析[J]. 焊接学报, 2019, 40(5): 1-5, 161.

(责任编辑: 陈雯)