

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2026.07.07

双电源并联MAG潜弧焊接技术的研究与应用

王兴阳¹, 韩丽营², 顾晓辉²

1. 唐山市安全生产促进中心, 河北 唐山 063015
2. 唐山松下产业机器有限公司, 河北 唐山 060320

摘要: 双电源并联焊接系统的主机采用恒压控制模式, 负责调节弧长和脉冲波形, 从机采用恒流控制模式, 负责输出焊接电流, 通过双电源并联波形控制技术实现了主机与从机电流波形的叠加输出。MAG潜弧焊接技术通过特殊的脉冲波形控制技术, 在熔池中能够形成稳定的空腔, 实现了稳定的潜弧焊接过程, 该方法的熔深形貌呈现出熔深大、余高大和熔宽小的特征。基于双电源并联焊接系统的MAG潜弧焊接控制技术, 实现了大电流条件下稳定、高效的MAG潜弧焊接过程, 可以应用于碳钢中厚板的全熔透焊接, 当采取单道焊接对接接头时, 厚度为14 mm碳钢板可以实现全熔透焊接, 当采取多层多道焊接时, 双电源并联MAG潜弧焊接技术更适合打底层和填充层的焊接, 可以实现焊接接头根部的全熔透焊接, 盖面层可以改用普通脉冲焊接方法以获得更美观的焊缝成形。

关键词: MAG潜弧焊接; 双电源并联; 波形控制; 全熔透焊接

中图分类号: TG444+2 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2026)07-0057-08

Research and Application of Dual-power Parallel MAG Submerged Arc Welding Technology

WANG Xingyang¹, HAN Liying², GU Xiaohui²

1. Tangshan Safety Production Promotion Center, Tangshan 063015, China
2. Panasonic Welding Systems (Tangshan) Co., Ltd., Tangshan 063020, China

Abstract: The master of the dual-power parallel welding system adopts a constant voltage control mode, responsible for regulating the arc length and pulse waveform, while the slave adopts a constant current control mode, responsible for outputting the welding current. Through the dual-power parallel waveform control technology, the superimposed output of the current waveforms of the master and slave is achieved. The MAG submerged arc welding technology, through a special pulse waveform control technique, can form a stable molten pool cavity in the molten pool, achieving a stable submerged arc welding process. The shape of the weld penetration of this method shows the characteristics of large penetration depth, large reinforcement, and narrow bead width. Based on the dual-power parallel welding system, the MAG submerged arc welding control technology realizes stable and efficient MAG submerged arc welding process under high current conditions, making it suitable for full-penetration welding of medium and thick carbon steel plates. When single-pass welding is adopted for butt joints, full-penetration welding can be achieved on 14 mm thick carbon steel plates. When multi-pass welding is adopted, the dual-power parallel MAG submerged arc welding technology is more suitable for the root pass and filler pass welding, achieving full-penetration welding at the root of the weld joint. The capping pass can be performed using conventional pulse welding method to improve the weld appearance.

Keywords: MAG submerged arc welding; dual-power parallel; waveform control; full-penetration welding

引用格式: 王兴阳, 韩丽营, 顾晓辉. 双电源并联MAG潜弧焊接技术的研究与应用[J]. 电焊机, 2026, 56(7): 57-64.

Citation: WANG Xingyang, HAN Liying, GU Xiaohui. Research and Application of Dual-power Parallel MAG Submerged Arc Welding Technology [J]. Electric Welding Machine, 2026, 56(7): 57-64.

收稿日期: 2025-04-22 修回日期: 2025-05-18

作者简介: 王兴阳(1989—), 男, 硕士, 主要从事焊接技术的应用研究。E-mail: wangxingyang02@163.com。

0 引言

潜弧焊接是指焊接电弧在熔池空腔内稳定燃烧的焊接方法,具有熔深大、效率高的显著特点,在厚板焊接领域具有重要的工程应用价值^[1-2]。实现稳定的潜弧焊接需满足三方面条件:一是焊丝直径不低于 1.4 mm,较大的焊丝直径有利于电弧力均匀分布作用于熔池表面;二是焊接电流达到 450 A 以上,足够的电弧力方能排开液态金属形成稳定的熔池空腔;三是焊接电压足够低,使电弧能够成功下潜至熔池内部稳定燃烧^[3]。

然而,在大电流、低电压工况下实现稳定潜弧焊接仍面临较大困难。以传统 CO₂ 气体保护焊为例,虽然在大电流、低电压条件下能够形成潜弧,但由于 CO₂ 气氛下电弧斑点压力大、熔滴过渡剧烈,导致飞溅严重且熔池振荡剧烈,难以维持稳定的熔池空腔,焊缝边缘成形差且附着大量的大颗粒飞溅^[4-6]。采用 80%Ar+20%CO₂ 混合气体的熔化极气体保护焊接(MAG)具有飞溅少、焊缝成形好的特点^[7-10],但关于大电流 MAG 潜弧焊接脉冲波形控制方法及其工程应用的研究尚不充分。此外,市场上的焊接电源以最大额定电流为 500 A 的机型为主,由于受到焊接电源最大输出能力的限制,难以实现焊接电流在 500 A 以上的潜弧焊接,所以大电流潜弧焊接方法在市场上应用并不广泛。

基于上述背景,本文搭建了一套基于两台 500 A 脉冲焊接电源并联的双电源焊接系统,通过主从控制策略和波形协同控制技术,实现了最高 740 A 的稳定电流输出。在此基础上,研究了大电流 MAG 潜弧焊接的脉冲波形控制方法,分析了潜弧焊接的熔深形貌特征,并将其应用于 14 mm 碳钢板单道全熔透焊接和 40 mm 碳钢板多层多道全熔透焊接,验证了该技术在碳钢中厚板高效焊接中的工程适用性。

1 双电源并联焊接控制技术

1.1 双电源并联焊接系统的构成

搭建的双电源并联焊接系统如图 1 所示,主要由焊接机器人系统、2 台额定电流 500 A 的脉冲焊接

电源和 1 台水箱组成。2 台焊接电源以并联方式连接:正极输出端互联后与焊接机器人相连,2 台焊接电源的负极输出端相连,负极输出端互联后均与工作台(工件)相连,2 台焊接电源之间通过通讯线实现数据传输与协同控制。水箱是为水冷焊枪提供水冷循环,避免大电流工况下焊枪烧损,延长焊枪使用寿命。

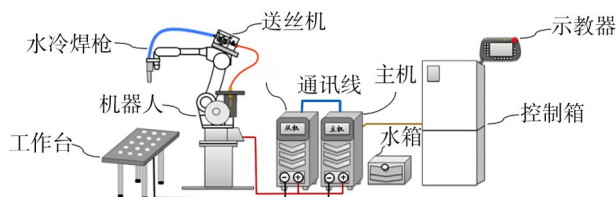


图1 双电源并联焊接系统

Fig. 1 Dual-power parallel welding system

1.2 双电源并联焊接系统的控制策略

双电源并联系统的控制策略如图 2 所示。两台焊接电源分别设为主机和从机:主机电源采用恒压控制方式,负责对焊接过程中的弧长进行调节和脉冲波形输出;从机电源采用恒流控制方式,负责输出恒定的焊接电流。从机的输出电流受主机焊接指令的实时控制。

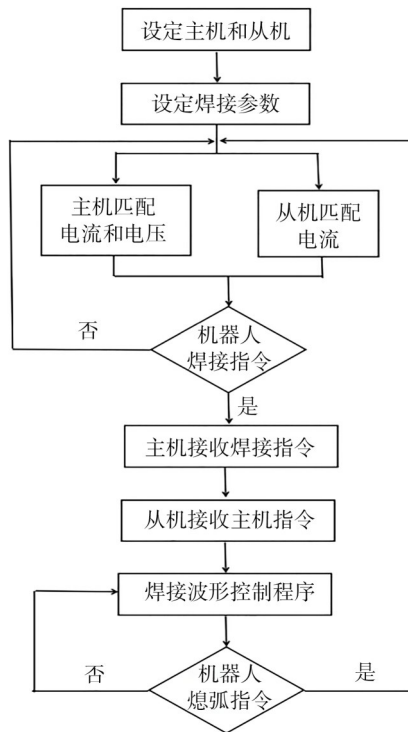


图2 双电源并联焊接系统的控制策略

Fig. 2 Dual-power parallel welding control strategy

主机与从机之间通过通讯线连接。2 台电源的设定电流和波形参数以“焊接数据表”的方式存储于焊接电源中,根据双电源并联系统的设定电流,主机与从机通过查表自动匹配各自的输出电流,电流分配方案如表 1 所示。分配好电流后,系统通过自动均流控制算法,实时采样主机和从机的输出电流并反馈至控制系统,控制系统根据各自设定的均流目标实时调整电源的输出参数,从而抑制 2 台电源之间的环流。

表 1 主机与从机电流分配(焊丝 $\varnothing 1.6\text{ mm}$)

Table 1 Master-secondary current matching table (wire $\varnothing 1.6\text{ mm}$)				
序号	送丝速度/($\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$)	设定电流/A	主机电流/A	从机电流/A
1	1.8	100	70	30
2	3.6	200	170	30
3	6.8	300	270	30
4	10.8	400	320	80
5	13.6	500	370	130
6	17.2	600	420	180
7	20.4	700	480	220
8	21	740	500	240

主机与焊接机器人控制箱通过通讯线连接,焊接电流、焊接电压和焊接速度等工艺参数均通过机器人示教器设定。在示教器上设定好焊接电流和焊接电压后,主机与从机按照已制定的“焊接数据表”自动匹配各自的焊接电流。双电源并联焊接系统输出的焊接电流为主机与从机输出的焊接电流之和,设定的焊接电压为主机的焊接电压。当焊接机器人发出焊接指令后,主机按照焊接控制程序开始输出焊接电流,同时向从机发送焊接指令,从机按照匹配的电流恒定输出焊接电流;焊接过程中主机通过弧压反馈调节方式不断调整弧长;当焊接机器人发出熄弧指令后,主机向从机发送进入回烧处理的指令,主机与从机同时进行回烧处理,直至焊接停止。

由表 1 可知,当设定电流小于等于 300 A 时,从机电流恒定输出 30 A,主机电流随示教器的设定电流同步调节,该设计有利于主机对弧长的精确控制;当设定电流大于 300 A 时,主机与从机电流均随示教器的设定电流同步调节。受限于送丝机的最高送丝速度, $\varnothing 1.6\text{ mm}$ 焊丝的设定电流最高可达 740 A,此时双电源并联系统的送丝速度为 21 m/

min,对应的主机电流为 500 A,从机电流为 240 A。要想实现 740 A 以上的焊接电流,就需要提高送丝机的最大送丝速度,当送丝机的最高送丝速度达到 50 m/min 时,双电源并联焊接系统的最大焊接电流可以达到 1 000 A;目前该双电源并联焊接系统最小设定电流为 100 A。

1.3 双电源并联焊接系统的波形控制技术

双电源并联焊接系统的波形控制如图 3 所示,主机采用恒压控制方式,从机采用恒流控制方式,焊接过程分为引弧阶段、主焊接阶段和回烧阶段。

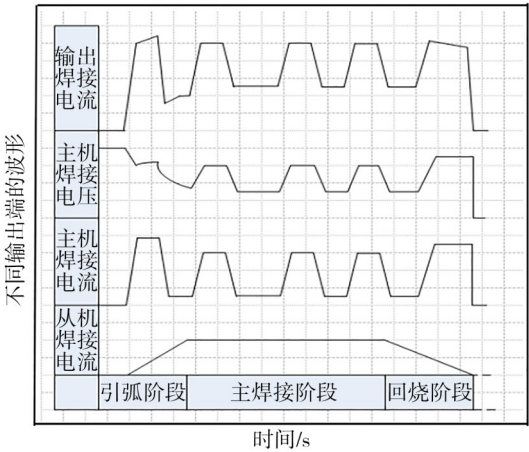


图 3 双电源并联焊接系统的波形控制技术

Fig. 3 Dual-power parallel welding waveform control technology

在引弧阶段,从机焊接电流以一定的爬坡斜率和时间上升到设定电流,主机按照引弧程序进行焊接引弧。主机与从机在引弧阶段的爬坡时间一致,最终引弧过程的输出电流为主机与从机在引弧爬坡阶段焊接电流的叠加,这种协同引弧控制方式解决了大电流条件下引弧上燃的难题。

在主焊接阶段,主机按照分配电流的脉冲波形控制程序输出脉冲电流波形,从机按照分配的焊接电流输出恒定电流,输出端的焊接电流波形为主机与从机焊接电流波形的叠加。主机通过弧压反馈的调节方式,通过调整脉冲电流波形的基值时间来调节焊接弧长,确保焊接过程中弧长的一致性。

在回烧阶段,从机的焊接电流以一定的下降斜率和时间逐渐降至零,主机按照回烧控制程序进行回烧处理。主机与从机在回烧阶段的下降时间一致,最终焊接回烧过程的输出电流为主机与从机在回烧阶段焊接电流的叠加,这种协同回烧控制方式

解决了因回烧量过大而烧损导电嘴或者因回烧量不足而导致焊丝粘连母材的难题。采用上述双电源并联波形控制方式,能够实现稳定的焊接过程。

2 MAG 潜弧焊接技术

2.1 MAG 潜弧焊接的波形控制方式

潜弧焊接示意如图4所示。MAG 潜弧焊接要求电弧持续稳定地排开熔池,在熔池中形成稳定的熔池空腔,这是实现MAG 潜弧焊接过程的关键。因此,MAG 潜弧焊接电弧需要同时具备较强的电弧力和良好的抗干扰能力。根据对MAG 潜弧焊接电弧的特性分析,研究并设计了MAG 潜弧焊接脉冲波形控制方式。

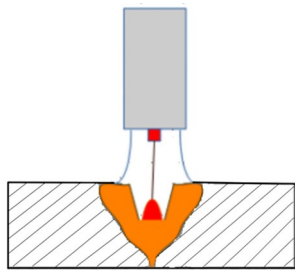


图4 潜弧焊接示意

Fig. 4 Schematic diagram of submerged arc welding

图5为 $\varnothing 1.6$ mm碳钢焊丝在焊接电流为520 A的MAG 潜弧焊接脉冲波形。由图5可以看出,MAG 潜弧焊接脉冲波形具有峰值电流大、基值电流小、脉冲频率高的特点。与相同焊接电流下普通MAG 脉冲波形参数相比(见表2),MAG 潜弧焊接脉冲波形的峰值(460 A)与基值(210 A)电流差值更大,脉冲频率更高(346 Hz对比202 Hz)。这种高脉冲频率、峰值与基值电流差更大的脉冲波形设计具有很强的抗熔池干扰能力,可实现稳定的MAG 潜弧焊接过程。

通过电弧摄像机对 $\varnothing 1.6$ mm碳钢焊丝在焊接电流520 A、焊接电压30.8 V条件下的MAG 潜弧焊接过程进行拍摄,焊接过程的电弧和熔池形态如图6所示。由图6可以看出,熔池中形成了稳定的空腔,熔池未发生剧烈振荡,电弧在熔池中稳定燃烧。焊接后的焊缝表面平整,无明显焊接缺陷,焊缝边缘无大颗粒飞溅附着,焊缝成形如图7所示。

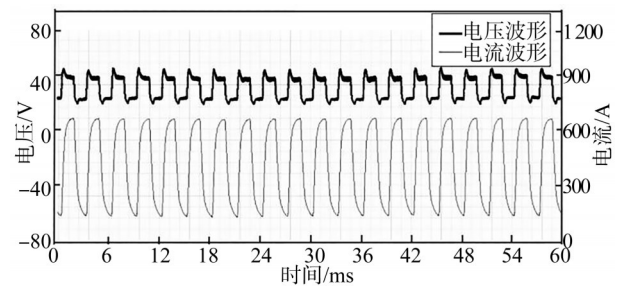


图5 MAG 潜弧焊接波形

Fig. 5 Waveform of MAG submerged arc welding

表2 脉冲波形参数

Table 2 Pulse waveform parameters

类别	焊接电流 /A	脉冲峰值 /A	脉冲基值 /A	峰值与基值 电流差/A	脉冲频率 /Hz
普通脉冲 焊接	520	620	410	210	202
MAG 潜弧 焊接	520	640	180	460	346



(a) 电弧形态

(b) 熔池形态

图6 潜弧焊接过程电弧和熔池形态

Fig. 6 Arc and molten pool morphology in submerged arc welding process



图7 潜弧焊接焊缝照片

Fig. 7 Weld bead photograph of submerged arc welding

采用上述脉冲波形设计方式,当焊接电流大于450 A时,双电源并联MAG 潜弧焊接的脉冲峰值与基值电流差为400~600 A,脉冲频率为300~400 Hz, $\varnothing 1.6$ mm碳钢焊丝能够实现稳定的MAG 潜弧焊接过程。

2.2 MAG 潜弧焊接的熔深形貌特点

与普通MAG 脉冲焊接电弧相比,MAG 潜弧焊接电弧能够潜入熔池内部,其焊缝熔深形貌与普通MAG 脉冲焊接相比将发生明显变化。为对比分析

两种焊接方法的熔深形貌差异,在相同焊接电流下分别采用MAG潜弧焊和普通脉冲焊接方法对碳钢试件进行焊接,焊接试件为16 mm厚的Q355低合金高强钢,采用无坡口、无预留间隙的对接接头,焊接工艺参数如表3所示。

表3 16 mm厚Q355低合金高强钢对接接头焊接工艺参数
Table 3 Welding process parameters for butt joints of 16 mm thick Q355 low alloy high strength steel

类别	送丝速度 $/(m \cdot min^{-1})$	焊接 电流 /A	焊接 电压 /V	焊接速度 $/(m \cdot min^{-1})$	焊丝 直径 /mm	气体流量 $/(L \cdot min^{-1})$
普通脉冲焊	11	480	35	0.6	1.6	20
MAG潜弧焊	11	480	30	0.6	1.6	20

针对2组焊接后的试件,选取相同焊缝位置,垂直于焊道方向截取焊缝,制作熔深形貌试样,利用体式显微镜对两种焊接方法的焊缝熔深形貌进行分析。熔深形貌如图8所示。由图8可以看出,与普通脉冲焊接相比,MAG潜弧焊接的焊缝熔深呈现出熔深大、余高大、熔宽小的特征,其熔深是普通脉冲焊接熔深的1.2倍。这表明MAG潜弧焊接方

法更适合有大熔深需求的应用场合,尤其对工程机械行业中的全熔透焊接需求具有较大的应用价值。

3 双电源并联MAG潜弧焊接技术的应用

将双电源并联焊接控制技术与MAG潜弧焊接技术相结合,实现了大电流条件下稳定、高效的潜弧焊接过程。该技术不仅具有大电流高效焊接的特点,还具备了熔深大、余高大、熔宽小的焊缝熔深形貌特征,可实现碳钢中厚板的全熔透焊接,能够提升碳钢中厚板的焊接效率。因此对双电源并联MAG潜弧焊接技术在碳钢中厚板中的全熔透焊接应用进行研究。

3.1 碳钢中厚板单道全熔透焊接的应用

采用双电源并联MAG潜弧焊接技术焊接厚度为14 mm的Q355低合金高强钢,分别采用单边V型坡口对接接头和预留4 mm间隙的对接接头,2种接头形式如图9所示。焊接目标为:单道满焊、接头根部全熔透、焊缝与母材熔合良好、焊缝内部无明显焊接缺陷。

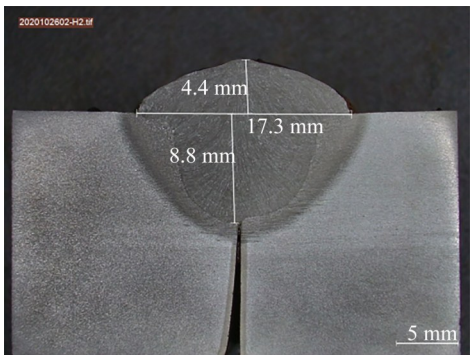


(a)单边V型坡口对接接头 (b)预留4 mm间隙的对接接头
图9 对接接头示意

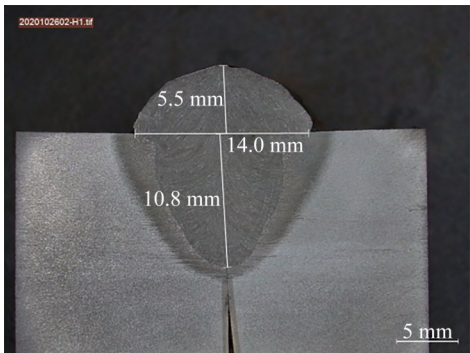
Fig. 9 Schematic diagram of butt joint

为实现接头根部全熔透焊接,在对接接头背面增加6 mm厚的碳钢板作为永久性衬垫,以防止焊接电流过大而烧穿焊缝根部。永久性衬垫采用相同材质的Q355低合金高强钢。双电源并联MAG潜弧焊接的具体工艺参数如表4所示,示教器设定焊接电流为580 A,主机和从机分别自动匹配主机电流410 A和从机电流170 A。

针对焊接后的焊缝,随机选取焊缝位置,垂直于焊道方向截取焊缝,制作熔深形貌试样,利用体式显微镜进行熔深形貌分析。熔深形貌如图10所示。由图10可以看出,采用双电源并联MAG潜弧



(a)普通脉冲焊接焊缝熔深形貌



(b)MAG潜弧焊接焊缝熔深形貌

图8 普通脉冲焊接和MAG潜弧焊接的焊缝熔深形貌

Fig. 8 Weld penetration profiles of conventional pulsed welding and submerged arc welding

表4 14 mm厚Q355低合金高强钢对接接头焊接工艺参数
Table 4 Welding process parameters for butt joints of 14 mm thick Q355 low alloy high strength steel

设定	主机	从机	主机	送丝速度	焊接速度	焊丝	气体流量
电流	电流	电流	电压	$/(m \cdot min^{-1})$	$/(m \cdot min^{-1})$	直径	$/(L \cdot min^{-1})$
/A	/A	/A	/V			/mm	
580	410	170	32	14.6	0.4	1.6	22

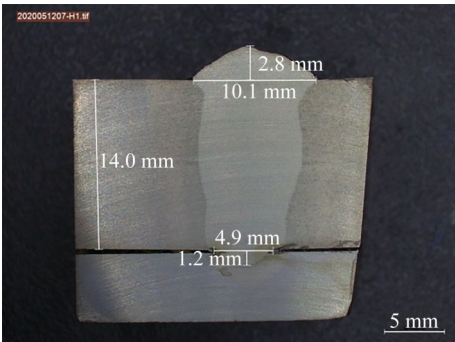
焊接工艺能够实现 14 mm 厚碳钢板对接接头的单道满焊,且 2 种对接接头根部均达到全熔透焊接;在永久性碳钢衬垫上均有大于 1 mm 的熔深余量,焊缝两侧与母材之间熔合良好,两侧均有 1~3 mm 的熔深余量,焊缝内部无明显缺陷,满足接头全熔透要求。

3.2 碳钢厚板多层多道全熔透焊接的应用

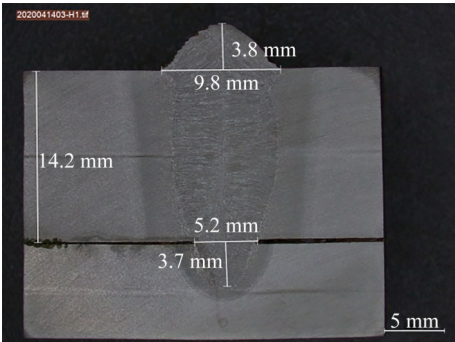
采用双电源并联 MAG 潜弧焊接技术焊接厚度为 40 mm 的 Q355 低合金高强钢,焊接接头形式为 K 形坡口 T 型接头,接头示意图如图 11 所示。K 形坡口角度为 45°,预留 4 mm 钝边。焊接要求为:接头根部全熔透,焊缝与母材熔合良好,焊缝内部无裂纹、气孔等缺陷。由于试板厚度较大,单道焊接无法填满单侧坡口,需采用多层多道焊接工艺。K 形坡口两侧分别标记为左侧和右侧,如图 11 所示。

坡口左侧采取二层三道焊接工艺,打底层单道和盖面层二道均采用双电源并联 MAG 潜弧焊接工艺,具体焊接工艺参数如表 5 所示。坡口右侧采用三层四道焊接工艺,打底层单道和填充层二道采用双电源并联 MAG 潜弧焊接工艺,盖面层单道采用普通 MAG 脉冲焊接工艺,具体工艺参数如表 6 所示。

针对焊接后的焊缝,随机选取焊缝位置,垂直于焊道方向截取焊缝,制作熔深形貌试样,利用体



(a)单边V型坡口对接接头焊缝照片



(b)预留4 mm间隙的对接接头焊缝熔深形貌

图10 对接焊缝熔深形貌图片

Fig. 10 Cross-sectional macrograph of butt weld penetration

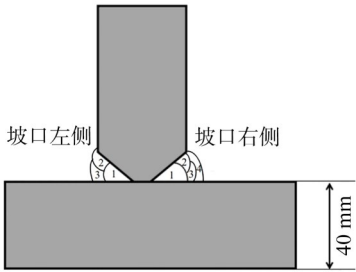


图11 K形坡口T型接头示意

Fig. 11 Schematic diagram of K-groove T-joint

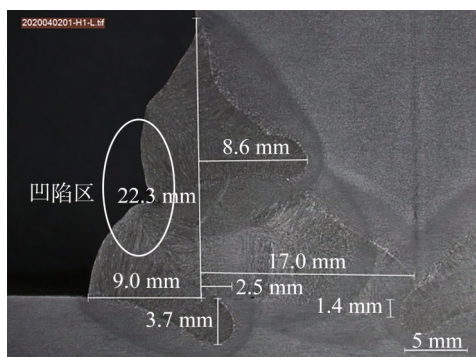
式显微镜对 T 型接头焊缝进行熔深形貌分析,熔深形貌如图 12 所示。

表5 40 mm厚Q355低合金高强钢T型接头K形坡口左侧焊接工艺参数

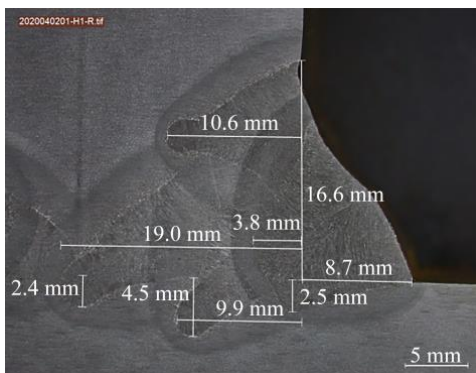
类别	设定电流/A	主机电流/A	从机电流/A	主机电压/V	送丝速度 $/(m \cdot min^{-1})$	焊接速度 $/(m \cdot min^{-1})$	焊丝直径/mm	气体流量 $/(L \cdot min^{-1})$
打底层	480	360	120	29.6	11	0.35	$\varnothing 1.6$	22
盖面层	560	400	160	31.6	13.8	0.35	$\varnothing 1.6$	22

表6 40 mm厚Q355低合金高强钢T型接头K形坡口右侧焊接工艺参数

类别	设定电流/A	主机电流/A	从机电流/A	主机电压/V	送丝速度 $/(m \cdot min^{-1})$	焊接速度 $/(m \cdot min^{-1})$	焊丝直径/mm	气体流量 $/(L \cdot min^{-1})$
打底层	480	360	120	29.6	11	0.35	$\varnothing 1.6$	22
填充层	520	380	140	30.6	11.8	0.45	$\varnothing 1.6$	22
盖面层	240	210	30	25.1	4.7	0.30	$\varnothing 1.6$	22



(a) K形坡口左侧焊缝熔深形貌



(b) K形坡口右侧焊缝熔深形貌

图12 K形坡口T型接头焊缝熔深形貌图片

Fig. 12 Cross-sectional macrograph of K-groove T-joint weld penetration

由图12可知,T型接头根部已实现全熔透焊接,且焊缝根部两侧熔合良好。如图12a所示,从坡口左侧焊缝熔深形貌可以看出,二层三道焊接工艺能够填满单侧坡口,焊缝熔深形貌呈现深且窄的“指状”特征。但由于MAG潜弧焊接焊缝具有熔宽小而余高大的特点,盖面层的2道焊缝之间未实现平滑过渡,存在明显的凹陷区域,该区域需进行打磨处理。这表明MAG潜弧焊接工艺不适合作为多层多道焊接的盖面层。从坡口右侧焊缝熔深形貌可以看出,如图12b所示,盖面层采用普通MAG脉冲焊接工艺能够实现焊缝平滑过渡,而打底层和填充层采用双电源并联MAG潜弧焊接工艺获得了大熔深焊缝,最大熔深超过10 mm。

综上,碳钢厚板采取多层多道焊接工艺时,可采用双电源并联MAG潜弧焊接方法进行打底层和填充层焊接,以获得足够大的熔深;盖面层采用普通脉冲焊接方法以保证焊缝成形美观。两种方法配合使用,既可满足全熔透焊接要求,又能保障焊缝外观质量。

4 结论

(1)搭建了基于2台额定电流500 A脉冲焊接电源并联的双电源焊接系统,主机采用恒压控制模式,从机采用恒流控制模式,通过双电源并联波形控制技术实现了主机与从机电流波形的叠加输出。该系统输出电流可达740 A以上,突破了单台电源最大输出能力的限制。

(2)MAG潜弧焊接技术采用大峰基值电流差(400~600 A)和高脉冲频率(300~400 Hz)的脉冲波形控制方式,在熔池中形成稳定的空腔,实现了稳定的潜弧焊接过程。与普通脉冲焊接相比,MAG潜弧焊接的焊缝熔深为普通脉冲焊接的1.2倍,熔深形貌呈现熔深大、余高大和熔宽小的特征,适合有大熔深需求的应用场合。

(3)将双电源并联焊接控制技术与MAG潜弧焊接技术相结合,实现了大电流条件下稳定、高效的潜弧焊接,并将其应用于碳钢中厚板的全熔透焊接。单道焊接对接接头时,14 mm厚碳钢板可实现全熔透焊接;多层多道焊接时,该方法适用于打底层和填充层的焊接,可获得更大熔深,实现接头根部全熔透,盖面层采用普通脉冲焊接即可保证焊缝成形美观。

(4)双电源并联MAG潜弧焊接技术可实现大电流输出与中厚板大深熔焊接,但仍存在技术局限性:两台焊接电源为独立控制单元,彼此通过通讯线连接,输出的电流波形的调控精度与电弧控制精度不足,在复杂的焊接场合下,电弧容易受到外部环境干扰而不稳定,应用场合受限;目前,该技术主要应用在全熔透或对熔深有更高要求的中厚板焊接,未系统开展焊接接头力学性能检测与组织分析。下一步将优化双电源自适应协同控制策略,提高电弧控制精度,使得焊接电弧能够适用更多的应用场合,同时开展焊接接头力学性能试验与微观组织分析研究,揭示工艺参数对焊接接头性能的影响规律,优化焊接工艺以改善接头组织、均衡力学性能,进一步提升该技术的稳定性与可靠性。

参考文献:

- [1] 白俊朋. 厚板窄间隙细丝GMAW潜弧焊工艺优化及

- 组织性能研究[D]. 兰州:兰州理工大学, 2024.
- BAI J P. Study on process optimization and microstructure and properties of fine-wire GMAW submerged arc welding for thick plate narrow gap[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2024.
- [2] 刘忠杰, 马场勇人, 惠良哲生, 等. 厚板单道全焊透的大电流潜弧焊接方法[J]. 金属加工(热加工), 2017(12): 14-19.
- LIU Z J, BABA Yoshito, EMURA Tetsuo, et al. High-current submerged arc welding method for single-pass full penetration welding of thick plate[J]. MW Metal Forming, 2017(12): 14-19.
- [3] 侯英杰, 樊丁, 黄健康. 高效 GMAW 潜弧焊电弧特性数值分析[J]. 电焊机, 2022, 52(03): 11-19.
- HOU Y J, FAN D, HUANG J K. Numerical analysis of arc characteristics in high-efficiency GMAW submerged arc welding[J]. Electric Welding Machine, 2022, 52(3): 11-19.
- [4] 王亚洲. 磁控大电流细丝 CO₂ 潜弧焊电弧-熔滴-熔池耦合行为数值模拟研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2024.
- WANG Y Z. Numerical simulation study on arc-droplet-molten pool coupling behavior in magnetically controlled high-current fine-wire CO₂ submerged arc welding[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2024.
- [5] 凡乃峰, 李福永, 杨国梁. CO₂ 潜弧焊在液压支架行业的可行性研究[J]. 金属加工(热加工), 2022(2): 23-27.
- FAN N F, LI F Y, YANG G L. Feasibility study of CO₂ submerged arc welding in hydraulic support industry[J]. MW Metal Forming, 2022(2): 23-27.
- [6] 马汉勇, 邹文凤, 靖微. CO₂ 气体保护焊研究现状[J]. 热加工工艺, 2025, 54(1): 28-32.
- MA H Y, ZOU W F, JING W. Research status of CO₂ gas shielded welding[J]. Hot Working Technology, 2025, 54(1): 28-32.
- [7] 房务农, 何前进, 董加利, 等. 大型球罐高效脉冲 MAG 全位置自动焊接系统[J]. 电焊机, 2016, 46(3): 19-26.
- FANG W N, HE Q J, DONG J L, et al. High-efficiency pulse MAG all-position automatic welding system for large spherical tank[J]. Electric Welding Machine, 2016, 46(3): 19-26.
- [8] 赵小康, 张海燕, 屈海东, 等. Q355B 钢与 Q345B 钢 MAG 焊接接头力学性能对比研究[J]. 金属加工(热加工), 2024(12): 30-33.
- ZHAO X K, ZHANG H Y, QU H D, et al. Comparative study on mechanical properties of MAG welded joints between Q355B steel and Q345B steel[J]. MW Metal Forming, 2024(12): 30-33.
- [9] 张猛, 陈庆城, 徐晓萍, 等. 高频脉冲大电流深熔 MAG 焊接工艺研究[J]. 金属加工(热加工), 2024(8): 66-72.
- ZHANG M, CHEN Q C, XU X P, et al. Study on high-frequency pulsed high-current deep penetration MAG welding process[J]. MW Metal Forming, 2024(8): 66-72.
- [10] 郭飞. Q690 高强度钢板 MAG 焊焊接工艺研究[J]. 装备制造技术, 2023(7): 282-284.
- GUO F. Study on MAG welding process for Q690 high-strength steel thick plate[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2023(7): 282-284.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>