

双电弧集成冷丝复合焊中冷丝位置对焊接过程的影响

向婷 张明瑞 李桓 高莹 吴世品 娄丽艳

Effect of cold wire position on the welding process in twin-arc integrated cold wire hybrid welding

XIANG Ting, ZHANG Ming-rui, LI Huan, GAO Ying, WU Shi-pin, LOU Li-yan

引用本文:

向婷, 张明瑞, 李桓, 高莹, 吴世品, 娄丽艳. 双电弧集成冷丝复合焊中冷丝位置对焊接过程的影响[J]. 工程科学学报, 2021, 43(11): 1474-1481. doi: 10.13374/j.issn2095-9389.2020.12.10.001

XIANG Ting, ZHANG Ming-rui, LI Huan, GAO Ying, WU Shi-pin, LOU Li-yan. Effect of cold wire position on the welding process in twin-arc integrated cold wire hybrid welding[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2021, 43(11): 1474–1481. doi: 10.13374/j.issn2095–9389.2020.12.10.001

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2020.12.10.001

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

电弧焊接数值模拟中热源模型的研究与发展

Research and development of a heat-source model in numerical simulations for the arc welding process 工程科学学报. 2018, 40(4): 389 https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2018.04.001

变极性电弧焊接的电流换向过程影响因素试验研究

Experimental research on factors influencing the current commutation process of variable-polarity arc welding 工程科学学报. 2019, 41(4): 505 https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2019.04.011

高温应变栅丝蠕变对应变测量精度影响与补偿

Influence of high temperature strain grid wire creep on strain measurement precision and its compensation 工程科学学报. 2017, 39(1): 88 https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2017.01.012

感应加热温度对冷热轧制成形钛/钢复合板界面的影响

Effect of induction heating temperature on the interface of coldhot-rolled titanium/steel composite plates 工程科学学报. 2020, 42(12): 1639 https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2019.12.11.001

焊接速度对机器人搅拌摩擦焊AA7B04铝合金接头组织和力学性能的影响

Effect of the welding speed on the microstructure and the mechanical properties of robotic friction stir welded AA7B04 aluminum alloy

工程科学学报. 2018, 40(12): 1525 https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2018.12.011

不同送进量对皮尔格轧制成形的影响及验证

Influence and verification of different feed ranges on cold pilgering

工程科学学报. 2017, 39(5): 747 https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2017.05.013

工程科学学报,第 43 卷,第 11 期: 1474-1481, 2021 年 11 月 Chinese Journal of Engineering, Vol. 43, No. 11: 1474-1481, November 2021 https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2020.12.10.001; http://cje.ustb.edu.cn

双电弧集成冷丝复合焊中冷丝位置对焊接过程的影响

向 婷1),张明瑞1),李 桓2)◎,高 莹1),吴世品1),娄丽艳1)

1) 天津职业技术师范大学机械工程学院, 天津 300222 2) 天津大学材料科学与工程学院, 天津 300072 ⊠通信作者, E-mail: lihuan@tju.edu.cn

摘 要 搭建了双电弧集成冷丝复合焊接系统,研究了冷丝不同位置对焊接过程的影响机理,其中包括冷丝作用位置对其加 热熔化作用及表面成形的影响.实验结果表明:冷丝从两引导焊丝正前方送入时,熔池前端对冷丝的加热熔化作用不充分, 冷丝末端会顶触熔池底部,随着冷丝的持续送进和母材的向后移动,某一时刻冷丝回弹,焊丝末端的熔滴弹出落在母材表面 形成大颗粒飞溅.当冷丝从侧面送入时,熔池一侧的温度较低,影响熔池金属的流动,导致最终的焊缝成形不对称分布.当冷 丝从两引导焊丝正后方送入熔池时,冷丝始终插入熔池中,焊接过程稳定,是理想的冷丝作用位置.此外,随着冷丝送丝速度 的增加,两种脉冲电流模式(同相和反相)下,熔敷率均随之增加,且相差不大.同相脉冲电流下电弧对冷丝的加热熔化作用 最强烈,反相脉冲电流下次之,直流模式下最弱.

关键词 双电弧集成冷丝复合焊;冷丝作用位置;冷丝送丝速度;熔敷率;电流模式

分类号 TG442

Effect of cold wire position on the welding process in twin-arc integrated cold wire hybrid welding

XIANG Ting¹, ZHANG Ming-rui¹, LI Huan²¹, GAO Ying¹, WU Shi-pin¹, LOU Li-yan¹

School of Mechanical Engineering, Tianjin University of Technology and Education, Tianjin 300222, China
 School of Materials Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Corresponding author, E-mail: lihuan@tju.edu.cn

ABSTRACT With rapid social and economic development, high-efficiency welding technology has become an important development direction in the field of welding. In recent years, scholars and professionals in many countries have devoted themselves to further increasing the welding efficiency by improving welding materials, welding process, and arc-welding equipment. The welding efficiency can be increased using two approaches: one is increasing the welding speed, the other is increasing the welding deposition rate. Considering these two methods, typical technologies such as multiwire submerged arc welding (SAW) and multiwire gas metal arc welding (GMAW) were proposed. A twin-arc integrated cold wire hybrid welding system was established. The mechanical effect of the cold wire position on the welding process was studied, including its effects on heating, melting, and weld surface formation. Results show that the melting of cold wire depends on the front end of the weld pool, and the melting effect of the weld pool on the cold wire is not sufficient when the cold wire is fed in front of two leading wires. The end of the cold wire makes contact with the bottom surface of the weld pool with the continuous feeding of the cold wire. Droplets melted at the wire ends are ejected and fall on the base metal surface to generate a globular spatter with the backward motion of the base metal. The thermal distribution on the side of the weld pool decreases as the cold wire is fed inside of the two leading wires. Hence, the flow of molten metal is affected, ultimately leading to an uneven weld

收稿日期:2020-12-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52105394);天津职业技术师范大学科研发展基金资助项目(KYQD202101, KJ1704);天津市教委 科研计划资助项目(2020KJ104)

formation. The cold wire is stably inserted into the weld pool when fed behind the two leading wires, representing the optimum cold wire position. Moreover, the deposition rates increase with an increase in the cold wire feed speed and show little change under two-pulse phase differences (in-phase and reverse-phase pulse differences). The effect of arc heating and melting on the cold wire was most intense at the in-phase pulse current, followed by the reverse-phase pulse current and subsequently direct current.

KEY WORDS twin-arc integrated cold wire hybrid welding; cold wire position; cold wire feed speed; deposition rate; current mode

焊接作为制造业中一项重要工艺在各个领域 广泛应用,发挥着不容小觑的作用.焊接技术的发 展水平已经成为多个国家评价其制造业水平的重 要评价标准之一^[1-3].提高焊接生产效率和焊接质 量、实现焊接自动化生产、减少焊接缺陷成为实 际生产的迫切要求^[4-6].鉴于 GMAW(Gas metal arc welding,熔化极气体保护焊)具有工艺适应性强、 操作简便、易于实现机械化和自动化等一系列优 点^[7-9],20世纪 80年代以来,发达国家以气体保护 焊为基础,大力发展以数字化焊接为代表的高效 GMAW 工艺^[10-12].

其中最具代表性的高效焊接工艺有日本神户 制钢开发的双明弧加热填丝的三丝焊接工艺,在 引导弧和跟随弧中间加入填充丝,引导弧与跟随 弧设计成一直线,绕各自的转动轴作相对的偏移 微调. 填充焊丝由直流负极性电流加热熔化,填充 焊丝上的电流所产生的磁场会降低引导焊丝和跟 随焊丝(两焊丝均为直流正极性)之间的电弧干 扰,这样有助于稳定焊接熔池[13-14].针对造船企业 平面分段生产流水线纵骨双丝角焊接最大焊接速 度小于 1.0 m·min⁻¹ 的问题, 上海交通大学激光制 造实验室华学明等开发了高速三丝 GMAW 新工 艺[15-17]. 三根焊丝分别为引导焊丝、中间焊丝和跟 随焊丝,并呈纵向排列.每根焊丝各接一套送丝系 统、焊接电源和保护气,构成独立的电弧—电源系 统,其焊接参数分别可调,以满足各种焊接要求. 大连理工大学提出了一种新型三丝间接电弧焊接 技术[18-20]. 该焊接系统主要包括两台焊接电源及 三根焊丝,其中三根焊丝分别为中间的主焊丝以 及两侧的旁焊丝, 主焊丝连接电源的负极, 旁焊丝 连接电源的正极,间接电弧在主焊丝与两个旁焊 丝之间产生,用来加热熔化母材,而母材不连接电 源. 在 2012 年第十七届北京埃森焊接与切割展览 会上,伊萨公司提出了全新的辅助冷丝埋弧焊工 艺. 该项技术是一个焊枪引出三根焊丝,其中间焊 丝不导电(冷丝),利用另两根焊丝熔化时过剩的 热量来熔化冷丝[21-22].

基于上述研究成果,提出一种新型三丝高效

焊接工艺—双电弧集成冷丝复合焊工艺,实际焊 接时,两引导焊丝在前加热熔化母材形成熔池,而 冷丝直接由送丝机送入熔池,主要依靠熔池的热 量进行熔化.冷丝的增加不仅可以增加熔敷率,同 时又保持焊接热输入基本不变.此外,冷丝加入还 有助于改善焊接过程稳定性^[23].针对冷丝作用位 置对焊接过程的影响机理进行研究分析,明确冷 丝的合理作用位置,为焊接工艺的制定提供指导.

1 实验材料、设备及方法

1.1 实验材料

实验所选材料为 310 mm×150 mm×10 mm 的 Q235A 低碳钢板.焊接填充材料为直径 1.2 mm 的 H08Mn2SiA 镀铜焊丝.实验中选用的保护气体为 85% Ar+15% CO₂ 的混合气体,气体流量均为25L·min⁻¹.焊接速度为 0.18 m·min⁻¹,两根引导焊丝均为直流 反接,实验采用堆焊的形式.

1.2 焊接设备

图 1 为双电弧集成冷丝复合焊的焊接示意图, 三根焊丝集成于同一焊枪中,呈等边三角形排布. 为了保证在较小焊接参数下,形成单一焊道,三根 焊丝向焊枪中心聚拢,并与焊枪轴线形成 7°夹角. 根据三根焊丝实际焊接时所处的位置,将在前引 导的两根焊丝分别定义为引导焊丝 1 和引导焊丝 2,其后跟随的焊丝定义为冷丝,冷丝直接由送丝 机送入熔池中,主要依靠熔池的热量加热熔化.两 根引导焊丝分别由两台焊接电源通过通讯控制线 实现任意相位差的脉冲电流输出.两焊丝上的焊 接电参数设置均相同,如表 1 所示.此外,利用电 压和电流传感器分别监测焊接过程中电信号的变 化情况,高速摄像系统监测电弧行为和熔滴过渡 过程.

由于焊枪中焊丝的特殊排列,实际焊接时,冷 丝的作用位置可以分为三种,如图2所示.其中黑 色箭头的方向表示实际的焊接方向.三根焊丝以 焊枪轴线为中心呈等边三角形排列,且彼此间距 (即等边三角形边长)为10mm.第一种是常规形



图1 双电弧集成冷丝复合焊焊接系统示意图

Fig.1 Schematic of twin-arc integrated cold wire hybrid welding system

表1 两引导焊丝上的基本脉冲电参数

Preset	Preset	Pulse peak	Pulse peak	Pulse base	Pulse base	Pulse peak	Pulse basic time/ms	Frequency/
current/A	voltage/V	current/A	voltage/V	current/A	voltage/V	time/ms		Hz
140	24	600	40	100	20	3.2	8	89

式,冷丝的送入位置位于两引导焊丝正后方,如 图 2(a)所示.第二种是冷丝的送入位置位于两引 导焊丝正前方,如图 2(b)所示.第三种是冷丝的送 入位置位于两引导焊丝的侧面(左侧或者右侧), 如图 2(c)所示.为了研究冷丝不同作用位置对焊 接过程的影响,我们保持两根引导焊丝的焊接参 数不变,将三种冷丝作用位置下的焊接过程进行 对比,冷丝的送丝速度均保持在 0.8 m·min⁻¹.



图 2 冷丝不同作用位置的示意图.(a)位于两引导焊丝正后方; (b)位于两引导焊丝正前方;(c)位于两引导焊丝侧面

Fig.2 Schematic of cold wire different locations: (a) right behind the two leading wires; (b) in front of the two leading wires; (c) in side of the two leading wires

2 实验结果与分析

2.1 冷丝不同作用位置对焊接过程的影响

图 3 所示的是冷丝送入位置在两引导焊丝后 方时的高速摄像图片.由于两引导焊丝上脉冲电 流相位差为 0°,两根焊丝保持同步燃弧,即同时点 燃和熄灭电弧.从图中可以看出,冷丝在焊接过程 中始终插入熔池中并未脱离,且位于熔池上层,主 要依靠熔池的热量加热熔化.整个焊接过程为稳 定的一脉一滴过渡[24].

图 4 所示的是冷丝位于两根引导焊丝正前方 时的高速摄像图片,此时焊接方向与图3所示情 况正好相反. 由于冷丝始终处于熔池最前端, 熔池 对其的加热熔化作用微乎其微,冷丝主要依靠两 个引导电弧进行加热熔化,因而加热熔化作用并 不显著. 这会造成冷丝的熔化速度小于冷丝的送 进速度,冷丝的末端划擦熔池底部. 冷丝末端熔化 后在右侧位置形成一个熔滴,如图中箭头所示,随 着冷丝的送进,由于熔池的热量来不及加热熔化 冷丝,致使冷丝末端始终顶触母材。当母材随焊接 工作台向后移动时,在高速摄像图片上为向左侧 移动, 冷丝的轴线与焊枪轴线间的夹角 α 越来越 大,随着夹角α的继续增加,在某一刻时,冷丝突 然向右回弹,将右侧的熔滴弹出.此外,从冷丝的 熔化状态上可以看出,冷丝的末端仅是插入熔池 最前端进行加热熔化形成熔滴,如图中椭圆部分 所示. 这也充分说明了当冷丝插入位置在两引导 焊丝前方时,熔池对冷丝的加热熔化作用很小,冷 丝末端会顶触划擦熔池底部并形成大颗粒飞溅, 影响焊接过程的稳定性. 综上所述, 冷丝在前的作 用位置并不理想,应该避免.

图 5 所示的是冷丝位于两引导焊丝右侧时的 高速摄像图片,从高速摄像的拍摄方向看,冷丝正 好处于两引导焊丝中间.此时,冷丝的末端刚刚接 触熔池表面,且很容易与熔池分离,这说明当冷丝 作用位置处于侧面时,其熔化速度大于送进速度,

530 ms	531 ms	532 ms	533 ms	534 ms
535 ms	536 ms	537 ms	538 ms	539 ms
		12		
540 ms	541 ms	542 ms	543 ms	544 ms
		6		
545 ms	546 ms	547 ms	548 ms	549 ms

图 3 冷丝在后方时的高速摄像图片

Fig.3 High-speed photographs of the cold wire in the rear

1579 ms /	1580 ms	1581 ms	1582 ms	1583 ms
1584 ms	1585 ms	1587 ms	1588 ms	1589 ms
1560 ms	1561 ms	1562 ms	1563 ms	1564 ms
1565 ms	1566 ms	1567 ms	1568 ms	1569 ms

图 4 冷丝在正前方时的高速摄像图片 Fig.4 High-speed photographs of the cold wire in the front

冷丝受到两方面热源的加热,一个是两个引导电弧,另一个是熔池,其中对冷丝作用的主要热源是

两个引导电弧.与上述两种冷丝作用位置相比,冷丝从侧面插入时所受的电弧热最多,因而在实际





图 5 冷丝在侧面时的高速摄像图片 Fig.5 High-speed photographs of the cold wire in the side

焊接过程中,冷丝末端处于刚刚接触熔池表面或 者与熔池分离的状态.该冷丝作用位置下,由于冷 丝并未深入插进熔池中,不时地会与熔池分离,因 而并未充分发挥冷丝稳定液态熔池这一优势.

2.2 冷丝不同作用位置对其焊缝表面质量的影响

图 6 所示的是相同送丝速度下冷丝作用位置 不同时的焊缝宏观形貌,其中图 6(a)所示的是两 引导焊丝在前冷丝在后时的焊缝形貌,此时焊道 表面光滑,成形较好. 图 6(b)所示的是冷丝从两引 导焊丝侧面插入时的焊缝成形,相同的冷丝送丝 速度下,一方面由于电弧对冷丝的加热熔化作用 强烈,冷丝熔化速度很快而不时地脱离熔池;另一 方面由于冷丝从侧面送入,冷丝一侧的熔池温度 较低,影响熔池金属的流动,最终导致焊缝成形不 对称分布. 图 6(c) 所示的是冷丝在前两引导焊丝 在后时的焊缝形貌,焊道边缘处产生大颗粒飞溅, 这是由于冷丝位于熔池前端时,其末端来不及被 加热熔化而顶触熔池底部,随着母材向后移动,冷 丝轴线与焊枪轴线间夹角随之增加,某一时刻冷 丝回弹,会将焊丝末端处形成的熔滴弹出落在母 材表面形成大颗粒飞溅.对比上述三种情况下的 焊缝表面成形可以看出,冷丝作用位置在前时焊



图 6 冷丝不同作用位置时的焊缝宏观形貌.(a)冷丝在后;(b)冷丝 在侧面;(c)冷丝在前

Fig.6 Welding appearances at different cold wire positions: (a) cold wire in the rear; (b) cold wire in the side; (c) cold wire in the front

缝成形最差,应该避免.最佳的冷丝作用位置是冷 丝从两引导焊丝后方插入.

2.3 两种脉冲相位差下冷丝对焊接熔敷率的影响

为了研究冷丝送丝速度对焊接熔敷率的影响,保持其余焊接参数不变,仅改变冷丝的送丝速度,并且分别称量焊接前后试件的重量,焊接前后试件的重量差与焊接时间的比值即为焊接熔敷率.选取预设电流和电压分别为180 A 和 24 V.

图 7 为冷丝从两引导焊丝后方送入时, 熔敷率 随冷丝送丝速度的变化情况, 随着冷丝的送丝速 度增加, 两种脉冲相位差下焊接熔敷率也呈现随 之增加的趋势, 当冷丝送丝速度小于 1.4 m·min⁻¹ 时, 两者的熔敷率增幅相对较小, 曲线呈缓增的趋势. 当冷丝送丝速度在 1.4 m·min⁻¹ 到 2.0 m·min⁻¹ 之 间, 两者的熔敷率增幅较大, 曲线呈陡增的趋势. 这 是由于当冷丝送丝速度小于 1.4 m·min⁻¹时, 冷丝 处于不时脱离熔池表面的状态, 因此, 冷丝送丝速 度的变化对熔敷率的影响相对较小. 反相脉冲电 流下冷丝送丝速度在 1.4 m·min⁻¹ 至 2.0 m·min⁻¹ 时, 冷丝始终插入熔池中, 因此熔敷率的变化非常显著.

从图中还可以看出,两种脉冲电流模式(同相和反相)下,随着冷丝送丝速度的增加,熔敷率均呈现增加的趋势,且两者的熔敷率并无较大差别,这是由于当保持焊接电参数(预设电流和电压)不变时,两种脉冲模式下的峰值电流、峰值电流持续时间、基值电流、基值电流持续时间以及脉冲频率均相同,因而单位时间内的焊接热输入量也相同,因此在相同的冷丝送丝速度下,两者的焊接熔敷率几乎相等.值得注意的是冷丝送丝速度小于1.6 m·min⁻¹时,反相脉冲电流下的熔敷率略微高于同相脉冲电流下的熔敷率.这是由于冷丝送丝速度小于1.6 m·min⁻¹时,同相脉冲电流下冷丝末端会时不时脱离熔池表面,因此焊接熔敷率会相对减小.此外,冷丝送丝速度为0.8 m·min⁻¹时,两种



Fig.7 Relationship between the cold wire feed speed and deposition rate

脉冲相位差下熔敷率相差最大,这是因为此时冷 丝均处于时不时脱离熔池的状态,而对冷丝的加 热熔化主要依靠电弧热。0°相位差时,两引导电弧 同时燃烧,对冷丝的加热熔化作用最强烈,冷丝脱 离熔池的频率较大. 而180°相位差时, 两引导电弧 交替燃烧,对冷丝的加热熔化作用次之,冷丝脱离熔 池的频率减小. 综上, 当冷丝送丝速度为 0.8 m·min⁻¹ 时,两者的熔敷率相差最大.此外,上述两种脉冲 相位差下,加热熔化冷丝的热量主要来源于熔池 以及电弧热,0°相位差时两电弧同时燃烧,而 180°相位差时两电弧仅交替燃烧,因此,与0°相位 差相比,180°相位差时交替燃烧的单个电弧对冷丝 的加热熔化作用较弱,当预设电流和电压分别为 180 A 和 24 V 时, 冷丝最大送丝速度可达 2.0 m·min⁻¹, 当冷丝送丝速度继续增加时,熔池和电弧热不足 以及时熔化冷丝而导致"顶丝".

2.4 不同电流模式下冷丝对焊接熔敷率的影响

图 8 为三种电流模式下,冷丝在熔池中的状态 与送丝速度之间的对应关系,选取预设电流为



图8 三种电流模式下冷丝在熔池中的状态与送丝速度间的对应关系.(a)同相脉冲电流;(b)反相脉冲电流;(c)直流

Fig.8 Corresponding relationships between the states of cold wire in the weld pool and feed wire speeds under three current modes: (a) in-phase pulse current; (b) reverse-phase pulse current; (c) direct current

180 A, 预设电压为 24 V, 冷丝送丝速度的变化间 隔为 0.2 m·min⁻¹.

图 8(a)为两引导焊丝通以同相脉冲电流时的 对应关系,从图中可以看出当冷丝送丝速度小于 1.6 m·min⁻¹, 冷丝会时而不时脱离熔池, 且随着冷 丝送丝速度的增加,冷丝末端从脱离熔池到重新 进入熔池的时间间隔会越来越短;冷丝送丝速度 在 1.6 m·min⁻¹ 至 2.8 m·min⁻¹ 之间时, 冷丝插入熔 池且末端不会脱离熔池表面;当冷丝送丝速度大 于 2.8 m·min⁻¹, 冷丝末端会顶触熔池底部, 出现 "顶丝"现象. 图 8(b)为两引导焊丝通以反相脉冲电 流时的对应关系,其中冷丝送丝速度小于1.0 m·min⁻¹ 时,冷丝末端会时不时脱离熔池表面;当冷丝送丝 速度在 1.0 m·min⁻¹ 至 2.0 m·min⁻¹ 之间时, 冷丝末 端插入熔池,不会脱离熔池表面;当冷丝送丝速度 大于 2.0 m·min⁻¹ 时,会出现顶丝现象。当两引导焊 丝上通以直流电时的对应关系如图 8(c)所示. 冷 丝不会出现脱离熔池表面的现象,当冷丝送丝速 度大于 1.8 m·min⁻¹ 时,会出现顶丝现象.

对比三种电流模式下冷丝脱离熔池及顶丝时 对应的送丝速度可以看出,同相脉冲电流下电弧 对冷丝的加热熔化作用最强烈,反相脉冲电流下 次之,直流模式下最弱.这是由于同相脉冲电流 下,两个引导电弧同时燃烧,峰值阶段电弧能量最 高且两电弧由于彼此吸引会发生偏移,有利于对 后侧冷丝的加热^[25-26].而反相脉冲电流下,两个电 弧交替燃烧且几乎不发生偏移,对冷丝的加热熔 化作用次之.直流模式下,两个引导电弧对冷丝的 加热熔化作用最小,冷丝不会脱离熔池表面.

3 结论

(1)通过对比三种冷丝作用位置下冷丝的加 热熔化及焊缝成形的情况,可以看出冷丝最佳的 作用位置是从两引导焊丝后方插入.当冷丝从两 引导焊丝正前方插入时,容易形成大颗粒飞溅.当 冷丝从两引导焊丝侧面插入时,冷丝一侧的熔池 温度较低,影响熔池金属的流动,导致最终的焊缝 成形不对称分布.

(2)随着冷丝送丝速度的增加,两种脉冲电流 模式(同相和反相)下,熔敷率均呈现增加的趋势, 且两者的熔敷率并无较大差别,当冷丝送丝速度 小于 1.6 m·min⁻¹时,反相脉冲电流下的熔敷率略 微高于同相脉冲电流下的熔敷率.

(3)通过对比三种电流模式下冷丝脱离熔池 及顶触熔池底部时对应的送丝速度可以看出,同 相脉冲电流下电弧对冷丝的加热熔化作用最强 烈,反相脉冲电流下次之,直流时电弧对冷丝的加 热熔化作用最弱.

参考文献

- [1] Chen L S. Discussion on the production status and development of welding technology. *Nonferrous Met Abstr*, 2015, 30(2): 46
 (陈连生. 焊接生产现状与焊接技术的发展研究. 有色金属文摘, 2015, 30(2): 46)
- [2] Tusek J. Raising arc welding productivity. *Weld Rev Int*, 1996, 15(3): 102
- [3] Öberg A E, Åstrand E. Improved productivity by reduced variation in gas metal arc welding (GMAW). *Int J Adv Manuf Technol*, 2017, 92(1-4): 1027
- [4] Zhang J G, Wang H Y, Wang X, et al. Research status and prospect of high efficient welding technology for pipeline steel. *Hot Work Technol*, 2018, 47(3): 18
 (张锦刚, 王海燕, 王茜, 等. 管线钢高效焊接技术的研究现状及前景分析. 热加工工艺, 2018, 47(3): 18)
- [5] Liu L M, Hu C H, Yu S B, et al. A triple-wire indirect arc welding method with high melting efficiency of base metal. J Manuf Process, 2019, 44: 252
- [6] Zhang K, Jiang H T, Meng Q, et al. Effect of the welding speed on the microstructure and the mechanical properties of robotic friction stir welded AA7B04 aluminum alloy. *Chin J Eng*, 2018, 40(12): 1525

(张坤,江海涛,孟强,等.焊接速度对机器人搅拌摩擦焊 AA7B04铝合金接头组织和力学性能的影响.工程科学学报, 2018,40(12):1525)

- [7] Kah P, Suoranta R, Martikainen J. Advanced gas metal arc welding processes. *Int J Adv Manuf Technol*, 2013, 67: 655
- [8] Zhao Y Y, Lee P S, Chung H. Effect of pulsing parameters on drop transfer dynamics and heat transfer behavior in pulsed gas metal arc welding. *Int J Heat Mass Transf*, 2019, 129: 1110
- [9] Xu Y L, Lv N, Fang G, et al. Welding seam tracking in robotic gas metal arc welding. *J Mater Process Technol*, 2017, 248: 18
- [10] Sproesser G, Chang Y J, Pittner A, et al. Energy efficiency and environmental impacts of high power gas metal arc welding. *Int J Adv Manuf Technol*, 2017, 91(9-12): 3503
- [11] Mohammadijoo M, Collins L, Henein H, et al. Evaluation of cold wire addition effect on heat input and productivity of tandem submerged arc welding for low-carbon microalloyed steels. *Int J Adv Manuf Technol*, 2017, 92(1-4): 817
- [12] Zhu Z M, Fu P P, Yang Z Y, et al. Experimental research on factors influencing the current commutation process of variable-polarity arc welding. *Chin J Eng*, 2019, 41(4): 505
 (朱志明, 符平坡, 杨中宇, 等. 变极性电弧焊接的电流换向过程影响因素试验研究. 工程科学学报, 2019, 41(4): 505)
- [13] Arita H, Morimoto T, Nagaoka S, et al. Development of advanced3-electrode MAG high-speed horizontal fillet welding process.

 \cdot 1481 \cdot

Weld World, 2009, 53(5-6): 35

- [14] Yokota Y, Shimizu H, Nagaoka S, et al. Development and application of the 3-electrode MAG high-speed horizontal fillet welding process. *Weld World*, 2012, 56(1-2): 43
- [15] Xu C, Hua X M, Ye D J, et al. An improved simulation model for three-wire gas metal arc welding. *Int J Adv Manuf Technol*, 2017, 90(5-8): 1447
- [16] Gu Y, Hua X M, Ye D J, et al. Numerical simulation of hump suppression in high-speed triple-wire GMAW. Int J Adv Manuf Technol, 2017, 89: 727
- [17] Ma X L, Xu C, Wang W C, et al. Impact of welding parameters on arc characteristics in triple-wire welding. J Shanghai Jiao Tong Univ, 2020, 54(7): 682
 (马晓丽, 徐琛, 王伟成, 等. 三丝焊接参数对电弧形态特征的影响. 上海交通大学学报, 2020, 54(7): 682)
- [18] Fang D S, Liu L M. Analysis of process parameter effects during narrow-gap triple-wire gas indirect arc welding. *Int J Adv Manuf Technol*, 2017, 88(9-12): 2717
- [19] Fang D S, Song G, Liu L M. A novel method of triple-wire gas indirect arc welding. *Mater Manuf Process*, 2016, 31(3): 352
- [20] Liu L M, Fang D S, Song G. Experimental investigation of wire arrangements for narrow-gap triple-wire gas indirect arc welding.

Mater Manuf Process, 2016, 31(16): 2136

- [21] Wang F Z. Esab ice saw. *Electr Weld Mach*, 2016, 46(3): 11
 (王富州. 伊萨ICETM集成冷丝埋弧焊. 电焊机, 2016, 46(3): 11)
- [22] Raudsepp H. Integrated cold electrode —latest advancement in Submerged Arc Welding. *Electr Weld Mach*, 2015, 45(5): 23 (Hannes Raudsepp. 集成冷丝—埋弧焊新技术. 电焊机, 2015, 45(5): 23)
- [23] Xiang T, Li H, Wei H L, et al. Effects of filling status of cold wire on the welding process stability in twin-arc integrated cold wire hybrid welding. *Int J Adv Manuf Technol*, 2016, 83(9-12): 1583
- [24] Wu K Y, Cao X W, Yin T, et al. Metal transfer process and properties of double-wire double pulsed gas metal arc welding. J Manuf Process, 2019, 44: 367
- [25] Xiang T, Li H, Huang C Q, et al. The metal transfer behavior and the effect of arcing mode on metal transfer process in twin-arc integrated cold wire hybrid welding. *Int J Adv Manuf Technol*, 2017, 90(1-4): 1043
- [26] Xiang T, Li H, Wei H L, et al. Arc characteristics and metal transfer behavior of twin-arc integrated cold wire hybrid welding. *Int J Adv Manuf Technol*, 2016, 87(9-12): 2653