

三丝间接电弧焊电弧形态及焊缝成形分析

刘黎明, 于世宝, 胡成辉

(大连理工大学 辽宁省材料连接技术重点实验室, 大连 116024)

摘 要: 气体保护三丝间接电弧焊是一种新型的焊接方法, 电弧建立在主丝与边丝之间, 工件不连接电源. 文中建立了稳定的三丝间接电弧, 针对焊缝侧壁熔合问题, 分析了不同焊丝分布方式产生的电弧形态对侧壁熔合的影响; 针对焊缝层间熔合问题, 采用后置钨极的方法实现了焊缝层间熔合. 结果表明, 主丝与边丝送丝速度与熔化速度相匹配, 可建立稳定的三丝间接电弧; 焊丝分布 IV 沿焊接方向的电弧偏向两侧壁, 垂直于焊接方向的电弧形态集中, 电弧稳定性好, 可实现焊缝侧壁均匀熔合, 熔合深度为 1 ~ 1.2 mm; 施加后置钨极, 可实现焊缝层间熔合, 焊缝抗拉强度为 420 MPa, 断裂位置发生在母材.

关键词: 三丝; 间接电弧; 电弧形态; 侧壁熔合; 层间熔合

中图分类号: TG 444

文献标识码: A

doi: 10.12073/j.hjxb.2019400145

0 序 言

近年来, 随着制造业的快速发展, 对焊接技术的生产效率要求越来越高, 高效化成为当前焊接技术发展的主要方向. 熔化极气体保护焊作为应用最广泛的一种焊接方法主要通过提高焊接速度和焊丝熔敷率实现焊接的高效化^[1]. 传统的熔化极气体保护焊通过增加焊接电流增加焊丝熔敷率, 焊接电流增加导致母材热输入也增加^[2], 焊接接头性能下降. 因此传统电弧焊很难在增加焊丝熔敷率的同时减少母材热输入^[3], 为此学者提出 TIG-MIG 间接电弧焊^[4]、双丝间接电弧焊^[5-6]等焊接方法.

文中提出了一种新型的间接电弧焊方法即三丝间接电弧焊, 电弧在主丝与边丝之间建立, 工件不连接电源, 它改善了间接电弧焊热输入不足的缺点, 同时具有更高的熔敷效率^[7-8]. 三丝间接电弧焊主要通过电弧的热量对工件进行加热, 不同的电弧形态对工件的加热位置不同, 因此对三丝间接电弧焊电弧形态的研究十分必要. 文中通过调控主丝与边丝送丝速度建立了稳定的三丝间接电弧, 通过调整焊丝分布方式改变电弧形态和电弧加热位置, 实现了焊缝侧壁熔合, 通过施加后置钨极, 实现了焊缝层间熔合.

1 试验方法

三丝间接电弧焊示意如图 1 所示. 焊接系统由一根主丝、两根边丝 (左边丝和右边丝) 和两个焊接电源组成, 两电源型号均为 CLOOS-GLC 403 QUINTO, 两边丝连接两电源正极, 主丝连接两电源负极. 试验中, 左边丝电流 I_1 与右边丝电流 I_2 相等, 均固定为 160 A, 主丝电流 I 等于 I_1 与 I_2 的和, 为 320 A. 主丝与边丝间的电压均为 24 V.

试验母材为 300 mm × 150 mm × 20 mm 的 Q235 钢板, 采用 I 型对接坡口, 对接间隙 $d = 10$ mm, 坡口底部使用陶瓷衬垫. 焊丝牌号为 ER50-6, 主丝直径为 $\phi 1.6$ mm, 两边丝的直径均为 $\phi 1.2$ mm, 保护气体为 80%Ar-20%CO₂ 混合气体, 气体流量 15 L/min, 保护气体由置于电弧上方的喷嘴喷出.

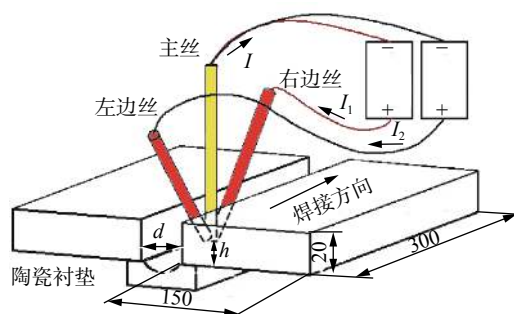


图 1 三丝间接电弧焊示意图

Fig. 1 Schematic diagram of TW-GIA welding

2 试验结果与讨论

2.1 稳定三丝间接电弧的建立

试验中使用最简单的焊丝分布方式 I, 通过分析电弧形态和是否有熔滴飞溅确定建立的三丝间接电弧是否稳定. 焊丝分布方式 I 示意图如图 2 所示, 主丝位于两边丝中间, 垂直向下, 两边丝对称分布在主丝的两侧, 边丝与主丝的丝间夹角为 30° , 沿焊接方向三根焊丝处于一个平面上. 主丝与边丝间电压 24 V, 边丝电流 160 A, 主丝电流 320 A, 右边丝的送丝速度 5.5 m/min, 调整左边丝和主丝送丝速度建立三丝间接电弧. 使用高速摄像机采集垂直于焊接方向的电弧形态, 左边丝和主丝送丝参数如表 1 所示.

图 3 是不同送丝速度下焊丝分布 I 的电弧形态. 图 3a 是左边丝送丝速度 5.0 m/min, 主丝送丝速度 10.0 m/min 的电弧形态, 此时左边丝送丝速度

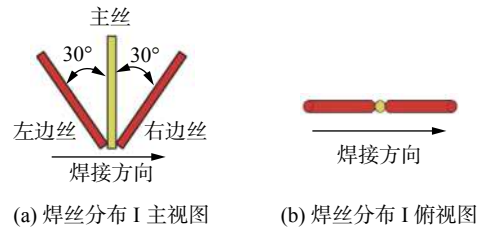


图 2 焊丝分布方式 I 示意图

Fig. 2 Wire configuration type I diagram

表 1 左边丝和主丝送丝参数

Table 1 Left wire and main wire feeding parameters

试验	左边丝送丝速度 $v_1/(\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$	主丝送丝速度 $v_2/(\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$	送丝情况
1	5.0	10.0	左边丝送丝最慢
2	6.0	10.0	左边丝送丝最快
3	5.5	8.0	主丝送丝最慢
4	5.5	12.0	主丝送丝最快
5	5.5	10.0	送丝速度相匹配

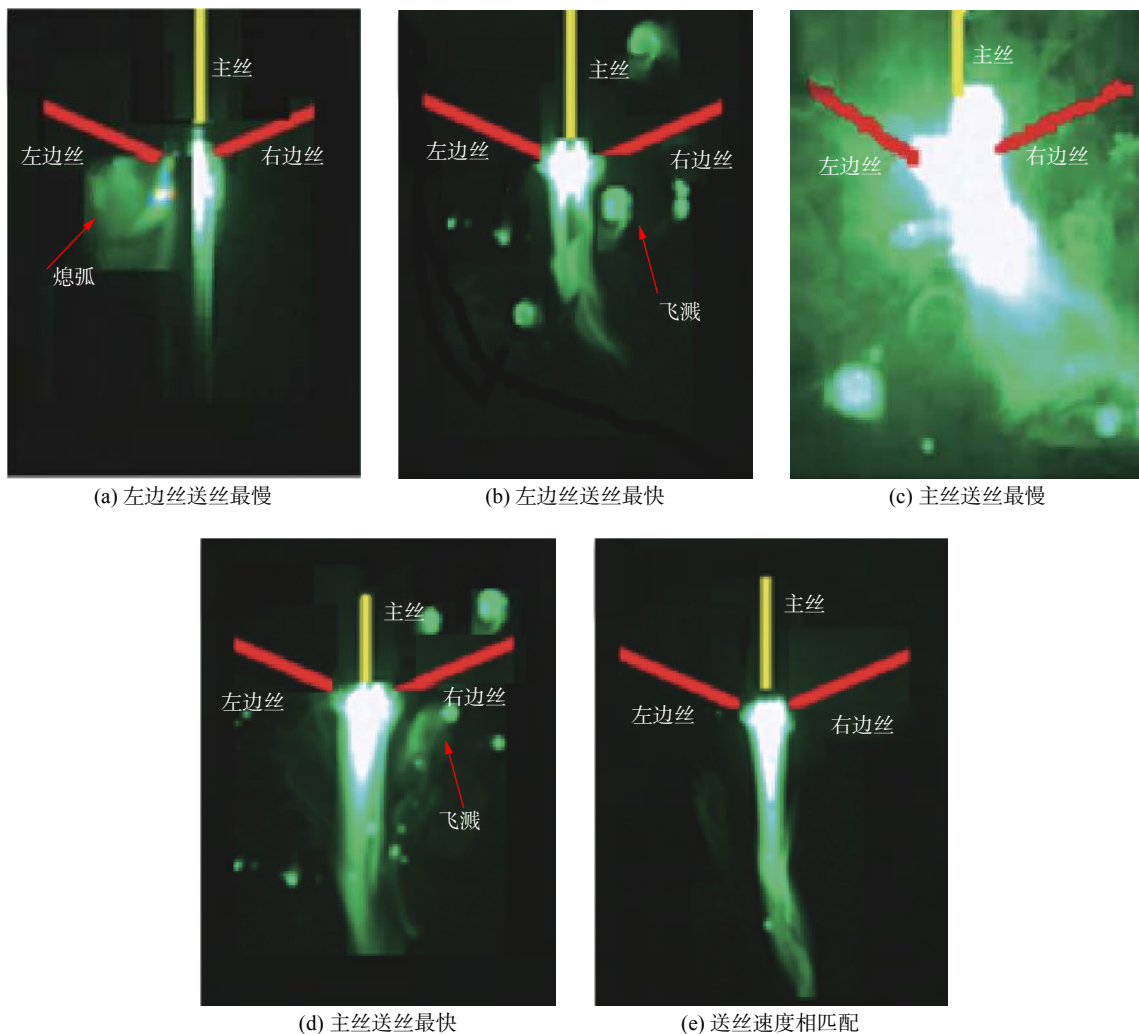


图 3 不同送丝速度下焊丝分布 I 的电弧形态

Fig. 3 Arc morphology of wire distribution I under different wire feeding speeds

最慢,左侧边丝与主丝熄弧,右侧边丝与主丝建立一个间接电弧;图3b是左边丝送丝速度 6.0 m/min,主丝送丝速度 10.0 m/min 的电弧形态,此时左边丝送丝速度最快,主丝与两边丝均建立竖直向下的间接电弧,产生大量的熔滴飞溅.图3c是左边丝送丝速度 5.5 m/min,主丝送丝速度 8.0 m/min 的电弧形态,此时主丝送丝速度最慢,电弧向右边丝侧偏转,并且沿主丝向上攀升;图3d是左边丝送丝速度 5.5 m/min,主丝送丝速度 12.0 m/min 的电弧形态,此时主丝送丝速度最快,电弧沿主丝方向竖直向下,产生大量熔滴飞溅;图3e是左边丝送丝速度 5.5 m/min,主丝送丝速度 10.0 m/min 的电弧形态,此时主丝与边丝送丝速度相匹配,电弧沿主丝延长线方向竖直向下,电弧稳定的在三根焊丝之间燃烧.

综上可知,左边丝送丝速度过慢时,主丝与左边丝端点之间的距离是不断变化的,当左边丝与主丝在引燃电弧的有效距离之间时,电弧引燃,超出有效引弧距离电弧熄灭,因此当左边丝送丝速度过慢时出现熄弧;左边丝送丝速度过快时,左边丝产生的熔滴与主丝产生的熔滴相互接触,形成短路,

产生大量熔滴飞溅;主丝送丝速度过慢时,为了维持电弧的燃烧,电弧向焊丝上方攀升;主丝送丝速度过快时,主丝产生的熔滴易与两边丝产生的熔滴相互接触,形成短路,产生大量熔滴飞溅.为保证电弧在三根焊丝之间持续稳定的燃烧,主丝和边丝的送丝速度与熔化速度必须相互匹配.

2.2 不同焊丝分布的电弧形态及侧壁熔合分析

针对焊缝侧壁熔合问题,分析了不同焊丝分布方式产生的电弧形态对焊缝侧壁熔合的影响.试验中使用高速摄像机采集沿焊接方向的电弧形态,主丝与边丝间电压 24 V,边丝电流 160 A,主丝电流 320 A,两边丝送丝速度 5.5 m/min,主丝送丝速度 10.0 m/min,工件对接间隙为 10 mm.

图4为焊丝分布方式I的电弧形态和焊缝成形.由图4a可见,电弧沿主丝延长线方向,垂直向下,呈倒锥型;由图4b可见,焊缝两侧壁均出现未熔合缺陷.因为当采用焊丝分布I时,电弧方向与工件侧壁平行,电弧热量主要集中在焊缝中心,弧柱区的热量不能充分的传递到工件两侧壁,造成焊缝两侧壁未熔合.

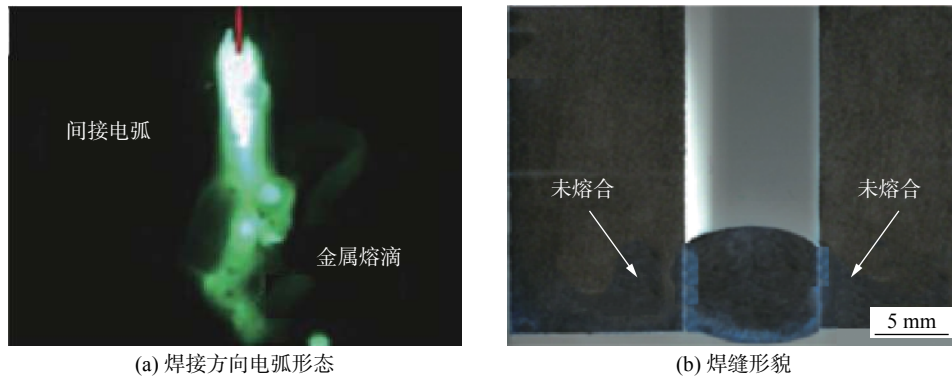


图4 焊丝分布I 电弧形态及焊缝成形

Fig. 4 Arc morphology and formation of weld with wire configuration type I

为保证电弧对工件两侧壁加热,需要使电弧向侧壁偏转,因此提出了焊丝分布方式II和III.图5为焊丝分布方式II和III的示意图,焊丝分布方式II主丝与边丝夹角为 30°,主丝垂直向下,两边丝同时偏移到主丝的一侧,沿焊接方向主丝与边丝在两个相互平行的平面上.焊丝分布方式III主丝与边丝夹角为 30°,主丝与焊接方向成 45°夹角,两边丝偏移到主丝两侧,沿焊接方向三根焊丝位于三个互相平行的平面上.

图6为焊丝分布方式II对应的电弧形态和焊缝成形,由图6a可见,电弧整体上沿着主丝的延长

线同时向边丝侧偏移.由图6b可见,焊缝左侧壁未熔合,右侧壁熔合良好.因为当采用焊丝分布方式II时,沿焊接方向两边丝偏向主丝的右侧,电弧向工件右侧壁偏转,电弧热量作用于右侧壁,所以右侧壁熔深较大,左侧壁电弧热量作用较少而基本没有熔化.

图7为焊丝分布III对应的电弧形态和焊缝成形,由图7a可见,主丝与边丝建立两个相互独立的间接电弧,电弧向两边丝侧发生偏移;由图7b可见,焊缝两侧壁熔合不均匀,熔合深度为 0.3 ~ 1.2 mm.采用焊丝分布方式III时,边丝偏移到主丝

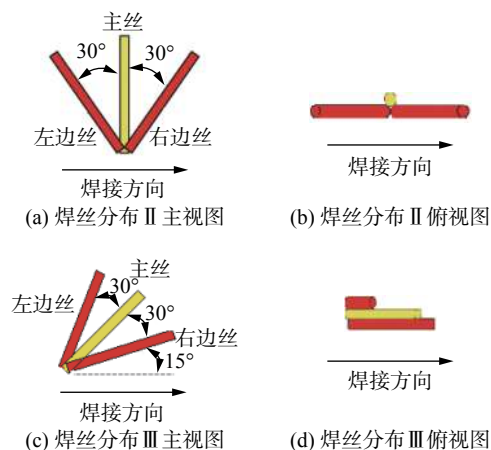
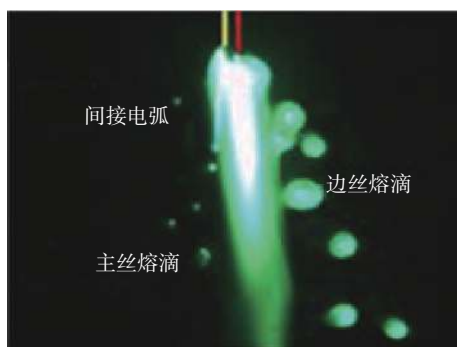
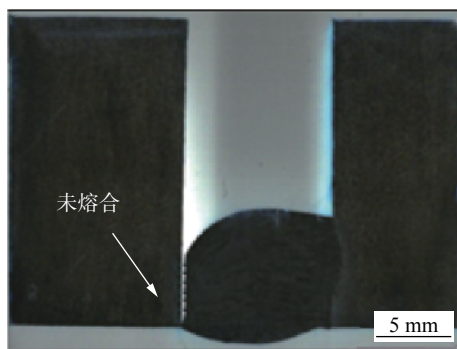


图 5 焊丝分布方式 II 和 III 示意图

Fig. 5 Wire configuration type II and III diagram



(a) 焊接方向电弧形态



(b) 焊缝形貌

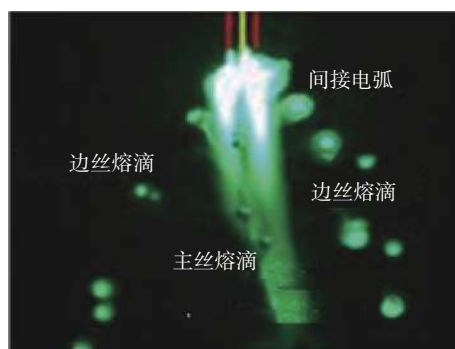
图 6 焊丝分布 II 电弧形态及焊缝成形

Fig. 6 Arc morphology and formation of weld with wire configuration type II

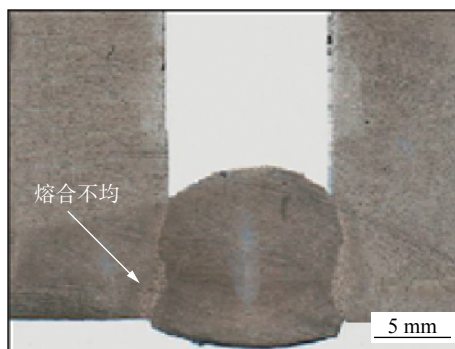
两侧, 电弧向两边丝侧偏移, 电弧热量分散到焊缝的两侧壁, 所以焊缝两侧壁能够实现熔合。

为实现侧壁的均匀熔合, 提出焊丝分布 IV。图 8 为焊丝分布方式 IV 的示意图, 焊丝分布 IV 主丝与两边丝夹角为 30° , 主丝与焊接方向成 45° 夹角, 边丝偏移在主丝两侧, 垂直于纸面方向观察, 两边丝重合, 两边丝关于主丝成镜面对称分布, 沿焊接方向三根焊丝在三个互相平行的平面上。

图 9 为焊丝分布方式 IV 对应的电弧形态和焊缝



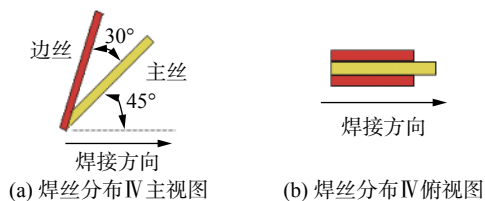
(a) 焊接方向电弧形态



(b) 焊缝形貌

图 7 焊丝分布 III 电弧形态及焊缝成形

Fig. 7 Arc morphology and formation of weld with wire configuration type III



(a) 焊丝分布 IV 主视图

(b) 焊丝分布 IV 俯视图

图 8 焊丝分布方式 IV 示意图

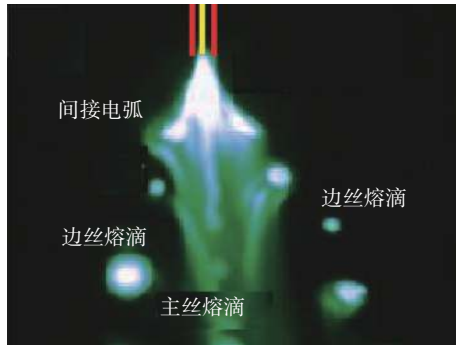
Fig. 8 Wire configuration type IV diagram

成形, 由图 9a 可见, 主丝与两边丝建立两个间接电弧, 两间接电弧偏向边丝两侧; 由图 9b 可见, 焊缝侧壁熔合良好, 熔合深度均匀, 熔合深度为 $1 \sim 1.2$ mm。

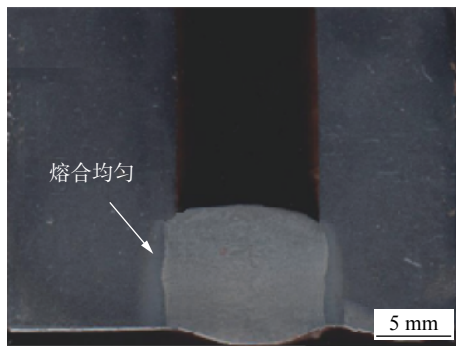
焊丝分布 III 和 IV 的焊缝侧壁熔合均匀程度主要受垂直于焊接方向的电弧形态的影响。图 10 为焊丝分布 III 和 IV 垂直于焊接方向的电弧形态, 由图 10a 可见, 焊丝分布 III 在垂直于焊接方向主丝与边丝建立的两个间接电弧没有重合, 电弧形态发散, 对工件加热不均匀, 导致焊缝侧壁熔合不均; 由图 10b 可见, 焊丝分布 IV 在垂直于焊接方向主丝与边丝建立的两个间接电弧相重合, 电弧形态集中, 电弧稳定性好, 对工件加热均匀, 可实现焊缝侧壁均匀熔合。

2.3 三丝间接电弧多层焊焊缝成形

由图 9 的焊缝成形可知, 三丝间接电弧焊焊缝



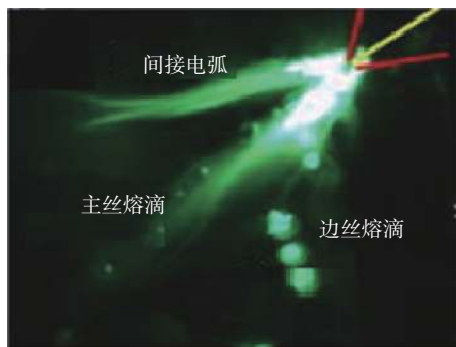
(a) 焊接方向电弧形态



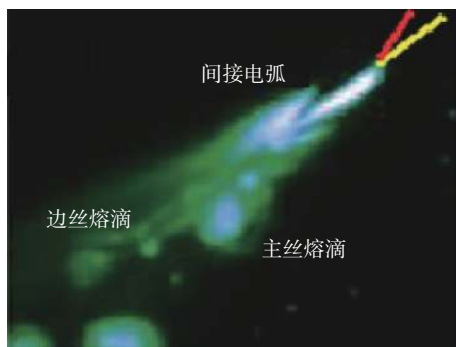
(b) 焊缝形貌

图 9 焊丝分布Ⅳ电弧形态及焊缝成形

Fig. 9 Arc morphology and formation of weld with wire configuration type IV



(a) 焊丝分布Ⅲ电弧



(b) 焊丝分布Ⅳ电弧

图 10 焊丝分布Ⅲ和Ⅳ垂直于焊接方向的电弧形态

Fig. 10 Arc morphology perpendicular to the welding direction of wire distribution III and IV

中间为凸起状,不利于后续焊缝的层间熔合.为解

决焊缝层间熔合问题,在三丝间接电弧焊的后面添加了传统的钨极电弧焊,钨极焊枪和工件形成回路.

图 11 为施加后置钨极电弧的多层焊焊缝成形,焊缝层间形状为下凹状.在焊缝层间位置加工拉伸试样,图 12 为焊缝拉伸断裂试样,屈服强度 258 MPa,抗拉强度 420 MPa,断后伸长率 29.8%,断裂位置发生在母材,说明焊缝侧壁和层间熔合良好.在三丝间接电弧作用之后施加后置钨极,钨极电弧压力可将熔池中部液态金属推向焊缝两侧,使焊缝中部形状由凸起变为凹陷,有利于后续焊缝填充,同时钨极电弧提供了更多的热量弥补了间接电弧层间热输入不足的缺点,因此后置钨极可实现焊缝层间熔合.

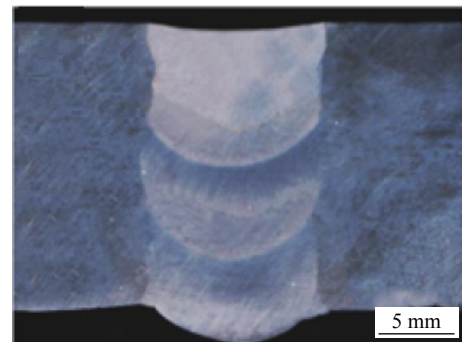


图 11 后置钨极多层焊焊缝成形

Fig. 11 Weld formation of post tungsten multilayer welding



图 12 拉伸断裂试样

Fig. 12 Tensile fracture specimen

2.4 不同焊丝分布方式电弧形态机理分析

三丝间接电弧形态主要受磁场分布的影响,焊丝分布 I 的磁场分布状态如图 13 所示.图中 H_+ 和 H_- 分别为主丝两侧区域内的磁场强度, H_1 和 H_2 分别为边丝外侧区域磁场强度,大小和方向由毕奥-萨伐尔定律确定^[9]. H_+ 和 H_- 以及 H_1 和 H_2 均是由主丝与边丝产生的磁场求矢量和的结果. H_+ 和 H_- 是主丝和边丝磁场叠加增强的结果, H_1 和 H_2 是主丝和边丝磁场相减削弱的结果,导致 H_+ 和 H_- 的值要远大于 H_1 和 H_2 ,所以忽略 H_1 和 H_2 对三丝间接电弧的作用,只考虑 H_+ 和 H_- 对电弧形态的作用.这种磁场分布状态与传统单丝电弧焊磁场分布相似,由电弧挺度作用可知^[10],电

弧会沿着主丝的延长线方向。

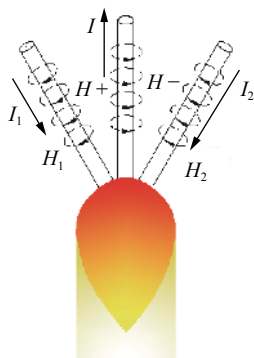


图 13 三丝间接电弧磁场分布状态

Fig. 13 Distribution of magnetic field in triple-wire indirect arc welding

当边丝相对于主丝偏移后,如焊丝分布方式Ⅱ,Ⅲ,Ⅳ的情况,可将边丝和主丝看作为相互平行的带电导线,主丝和边丝导电方向相反,其磁场分布及对电弧形态的影响如图 14 所示.根据安培定则,边丝和主丝产生排斥力,假设 I_{dl} 为边丝电弧的一段电流元,电流元受到主丝排斥力 F 的方向由主丝指向边丝.因此电弧受到主丝的作用力,向边丝一侧偏移.三丝间接电弧焊主要依靠电弧的热量对工件加热,电弧偏移有利于焊缝的侧壁熔合。

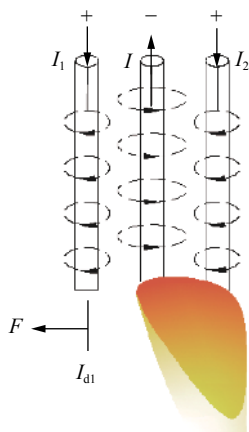


图 14 焊丝偏移对电弧形态的影响

Fig. 14 Effect of the side wire offset on the arc behaviour

3 结 论

(1) 三丝间接电弧建立在主丝与边丝之间,主丝与边丝的送丝速度与熔化速度相匹配可建立稳定的三丝间接电弧。

(2) 焊丝分布Ⅳ沿焊接方向电弧偏向两侧壁,可实现侧壁的充分加热,垂直于焊接方向电弧形态集中,电弧稳定性好,可实现焊缝侧壁的均匀熔透。

(3) 施加后置钨极,可保证焊缝层间良好熔合,实现三丝间接电弧多层焊。

参考文献:

- [1] 韩国明. 双丝熔化极气体保护焊[J]. 现代焊接, 2006(4): 45-47.
Han Guoming. Double wire gas shielded welding[J]. Modern Welding, 2006(4): 45-47.
- [2] Richardson I M, Bucknall P W, Stares I. The influence of power source dynamics on wire melting rate in pulsed GMA welding[J]. Welding Journal, 1994, 73: 2(2): 32-37.
- [3] Fan D, Sheng W, Huang J, *et al.* High effective double-electrode GMAW procedure[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(2): 13-16.
- [4] Wang Jun, Cao Jian, Feng Jicai. Microstructure and mechanical performance of depositing CuSi3 Cu alloy onto 30CrMnSi steel plate by the novel consumable and non-consumable electrodes indirect arc welding[J]. Materials and Design, 2010, 31: 2253-2258.
- [5] 曹梅青, 邹增大, 杜宝帅, 等. 双丝间接电弧氩弧焊的熔滴过渡[J]. 焊接学报, 2006, 27(1): 45-48, 115.
Cao Meiqing, Zou Zengda, Du Baoshuai, *et al.* Droplet transfer in double wire indirect arc argon arc welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2006, 27(1): 45-48, 115.
- [6] 曹梅青, 邹增大, 王春茂, 等. 焊接电流对双丝间接电弧焊电弧特性的影响[J]. 焊接学报, 2005, 26(12): 47-20.
Cao Meiqing, Zou Zengda, Wang Chunmao, *et al.* Influence of welding current on arc characteristic of twin-wire indirect arc welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2005, 26(12): 47-20.
- [7] Liu L M, Fang D S, Song G. Experimental investigation of wire arrangements for narrow-gap triple-wire gas indirect arc welding[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2016(31): 2136-2142.
- [8] 刘黎明, 胡成辉, 方迪生. 窄间隙气体保护三丝间接电弧焊缝成形特征[J]. 焊接学报, 2018, 39(2): 66-70.
Liu Liming, Hu Chenghui, Fang Disheng. Weld bead formation in narrow-gap triple-wire gas indirect arc welding process[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2018, 39(2): 66-70.
- [9] 张顺善, 吴东亭, 邹增大, 等. 磁场对双丝间接电弧形态的影响[J]. 焊接学报, 2010, 31(7): 87-90.
Zhang Shunshan, Wu Dongting, Zou Zengda, *et al.* Effect of magnetic field on twin-wire indirect arc shape[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(7): 87-90.
- [10] 张九海, 王其隆, 韦伟平. 小电流 TIG 焊电弧磁控特性的研究[J]. 焊接学报, 1990, 11(1): 43-49.
Zhang Jiuhai, Wang Qilong, Wei Weiping. A study of the characteristics magnetic control for low current TIG welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 1990, 11(1): 43-49.

第一作者简介: 刘黎明, 男, 1967 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师. 主要研究方向为绿色焊接技术与装备. 2010 年度“杰出青年基金”获得者. Email: liulm@dlut.edu.cn