

引用格式: 韩琦, 江淑园. 外加磁场对 MIG 焊电弧及熔滴过渡的影响[J]. 热加工工艺, 2025, 54(8): 147-152+160.

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.25011012
<http://www.rjgy.net> rjgy@vip.163.com

外加磁场对 MIG 焊电弧及熔滴过渡的影响

韩琦¹, 江淑园²

(1. 江苏航空职业技术学院 航空工程学院, 江苏 镇江 212134; 2. 南昌航空大学 航空制造工程学院, 江西 南昌 330063)

摘要:为了有效控制 MIG 焊接电弧和熔滴过渡, 提高焊接质量, 在合理的焊接工艺和励磁参数下进行磁控 MIG 焊滴状过渡试验。在外加磁场的不同方向下, 使用高速摄影仪, 收集 MIG 焊接电弧及熔滴过渡的变化规律。结果表明: 在不同励磁电流下, 随着外加磁场方向的改变, 电弧和熔滴形态和运动都发生了改变。相比于无外加磁场时, 电弧形态均变为“钟罩形”, 熔滴由球形变为椭球形。当磁场向下时, 电弧绕焊丝轴线顺时针旋转, 熔滴绕焊丝轴线逆时针旋转; 磁场向上时, 电弧绕焊丝轴线逆时针旋转, 熔滴则绕焊丝轴线做顺时针旋转。

关键词:外加磁场方向; MIG 焊; 电弧; 熔滴; 顺时针旋转; 逆时针旋转

中图分类号: TG444+.74

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2025)08-0147-06

Influence of External Magnetic Field on MIG Welding Arc and Droplet Transfer

HAN Qi¹, JIANG Shuyuan²

(1. School of Aeronautical Engineering, Jiangsu Aviation Technical College, Zhenjiang 212134, China; 2. School of Aeronautical Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: In order to effectively control MIG welding arc and droplet transfer and improve welding quality, the magnetron MIG welding droplet transition experiments under certain reasonable welding process parameters and excitation parameters were conducted. In the experiment, with the help of high-speed photographers, the variation patterns of MIG welding arc and melting droplets were collected under different directions of external magnetic fields. The results show that under different excitation currents, with the change of the magnetic field direction, the shape and movement of the arc and droplet change. Compared to the absence of an external magnetic field, the arc shape changes into "bell shaped", and the droplet changes from spherical to ellipsoidal. When the magnetic field direction is downward, the arc rotates clockwise around the axis of the welding wire, and the droplet rotates counterclockwise around the axis of the welding wire; when the magnetic field direction is upward, the arc rotates counterclockwise around the axis of the welding wire, while the droplet rotates clockwise around the axis of the welding wire.

Key words: external magnetic field direction; MIG welding; electric arc; molten droplet; clockwise rotation; counterclockwise rotation

MIG 焊作为一种熔化极热加工焊接技术, 其在滴状过渡时, 具有电弧指向性好、焊接飞溅小、焊接效率高等特点。而焊缝成形和焊接质量在很大程度上直接取决于焊接电弧、熔滴过渡的稳定性。近些年, 如何有效控制焊接电弧和熔滴过渡已成为焊接专家讨论的热点。磁控焊接技术是一种容易操作、成本较低的焊接技术, 其主要是将磁场添加到焊接过程

中, 通过外加磁场与熔滴、电弧中带电粒子之间的相互作用, 可达到控制焊接过程的效果, 并且使旋转的电弧搅拌焊缝熔池内的液态金属^[1], 起到细化晶粒, 减少偏析、裂纹和气孔的作用^[2], 从而提高焊接质量^[3-6]。因此, 国内外诸多专家、学者对磁控焊接技术进行了深入研究。例如, 常云龙等^[7]将外加磁场作用于铝合金脉冲 MIG 焊接中, 利用高速摄像机观察熔滴过渡的基本规律和原因。结果表明, 通过调节外加间歇交变磁场的强度和频率, 一方面可获得细小的等轴晶, 改善焊缝质量; 另一方面, 还可以控制熔滴过渡方式。江淑园等^[8]将纵向磁场添加到不锈钢 GTAW 焊接中, 得出外加磁场可以改善焊缝形貌, 细化组织晶粒, 提高接头力学性能。还对 GTAW 焊接接头的

收稿日期: 2025-01-10 修回日期: 2025-03-03

基金项目: 江西省教育厅科技项目(DA201403303); 江苏航空职业技术学院重点课题(JATC24010106)

作者简介: 韩琦(1991-), 男, 江苏连云港人, 讲师, 硕士研究生, 主要研究方向: 焊接过程质量控制及电弧物理特性;

E-mail: 1224348783@qq.com

残余应力进行了有限元模拟, 并采用小孔法进行测量, 结果表明, 外加磁场可有效降低焊缝的残余应力^[9]。樊丁等^[10]在高效 MAG 焊中引入交变磁场, 试验发现交变磁场可提高焊接电弧的挺度和稳定性, 控制液流束长度和偏斜, 改善焊缝成形, 提高焊接效率。陈树君等^[11]同样是在 MAG 焊中引入磁场, 结果发现, 外加磁场可以控制 MAG 焊射流过渡, 得到稳定的焊接过程, 提高焊接生产效率。杨丰兆^[12]研究磁控高速 GMAW 焊接时发现, 外加磁场可以搅拌熔池, 控制液态金属的流向, 减少焊缝缺陷, 从而实现高速焊接。王龙等^[13]将间歇交变磁场添加到异种金属材质对接 MIG 焊试验中, 发现交变磁场可以有效改善焊缝成形, 提高力学性能。焊接接头的抗拉强度较无外加磁场时提高 35.88%。Marcel 等^[14]以模拟与试验相结合的方式对磁控焊接过程进行研究, 发现外加磁场可以改变熔池的温度分布和传热传质。Avilov 等^[15]在激光焊接过程中引入磁场, 研究发现外加磁场对抑制焊接熔池内金属的对流及熔滴过渡均有一定的作用。值得注意的是, 现有磁控焊接技术的研究主要集中于外加磁场的强度、频率对焊接过程的影响, 而对于外加磁场的不同方向对电弧、熔滴过渡影响的研究却鲜有报道。众所周知, 根据安培定则, 励磁电流方向上的改变, 相应地, 励磁线圈产生的磁场方向会随之改变。因此, 本文选用恒定的励磁电源, 改变线圈中励磁电流的流向, 从而改变励磁线圈产生的磁场方向。研究在匹配的焊接工艺参数和励磁参数下, 外加磁场的方向性对 MIG 焊接过程的影响规律, 并对其机理进行分析, 以丰富磁控焊接技术的理论和提高磁控焊接技术在工程实践中的应用。

1 试验材料与方法

磁控 MIG 焊接系统由焊接试验系统、磁场发生系统、高速摄影系统、背光系统四部分组成, 外加磁场的线圈固定在焊枪喷嘴处, 并且使两者保持同轴。外加磁场的磁感应强度通过励磁电源调节励磁电流而获得, 引入的磁场为轴向性好的直流纵向磁场。其示意图如图 1 所示。焊接设备采用新亚 NB-350 焊机, 焊接方式采用直流反接。选用高速摄影仪实时采集 MIG 焊接过程。磁控 MIG 焊滴状过渡焊接采用的焊接电流为 240 A、焊接电压为 31 V、干伸长为 15 mm、送丝速度为 0.6 m/min, 试验参数见表 1。母材尺寸为 200 mm×60 mm×6 mm 的 Q235 低碳钢板, 焊丝为直

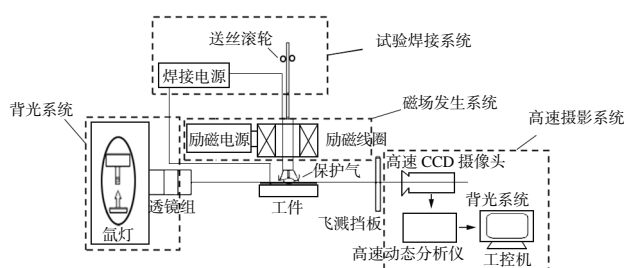


图 1 磁控 MIG 焊接系统

Fig.1 Magnetron MIG welding system

表 1 MIG 焊接试验参数

Tab.1 Experimental parameters of MIG welding

序号	励磁电流 /A	焊接电流 /A	焊接电压 /V	焊接速度 / $(\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$	干伸长 /mm	保护气流量 / $(\text{L} \cdot \text{min}^{-1})$
1	0	240	31	0.6	15	15
2	0.2	240	31	0.6	15	15
3	0.4	240	31	0.6	15	15
4	0.6	240	31	0.6	15	15
5	0.8	240	31	0.6	15	15
6	1.0	240	31	0.6	15	15

径 1.2 mm 的 H08Mn2SiA, 保护气体为纯氩气。

2 试验结果与讨论

2.1 外加磁场下 MIG 焊接电弧

采用表 1 所示的焊接试验参数进行试验。首先, 励磁线圈的两端连接励磁电源的正、负极, 且分别在励磁线圈中通入 0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 A 的励磁电流, 如图 2 所示, 规定此时磁场的方向向下, 即从焊丝熔化极到工件的方向。由安培定则可知, 若改变励磁线圈中电流的流向, 如图 3 所示, 励磁线圈产生的磁场方向也随之改变, 磁场的方向向上, 即从工件到焊丝熔化极的方向。通过改变直流纵向磁场的方向, 研究磁场的方向性对焊接过程的影响规律。

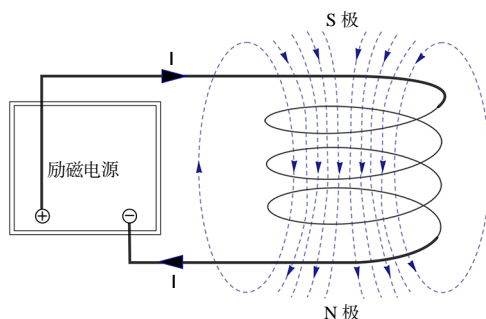


图 2 外加磁场的方向向下示意图

Fig.2 Schematic diagram of downward direction of external magnetic field

本试验中, 借助于高速摄影仪采集到的磁控 MIG 焊接电弧的形态和运动方式, 如图 4、5 所示。

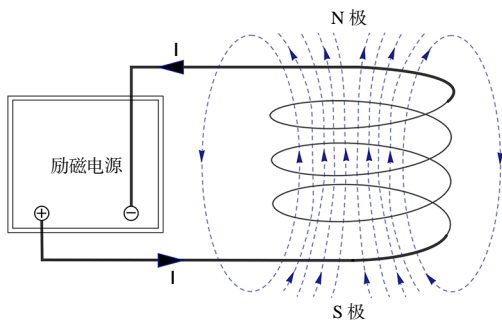


图3 外加磁场的方向向上示意图
Fig.3 Schematic diagram of upward direction of external magnetic field

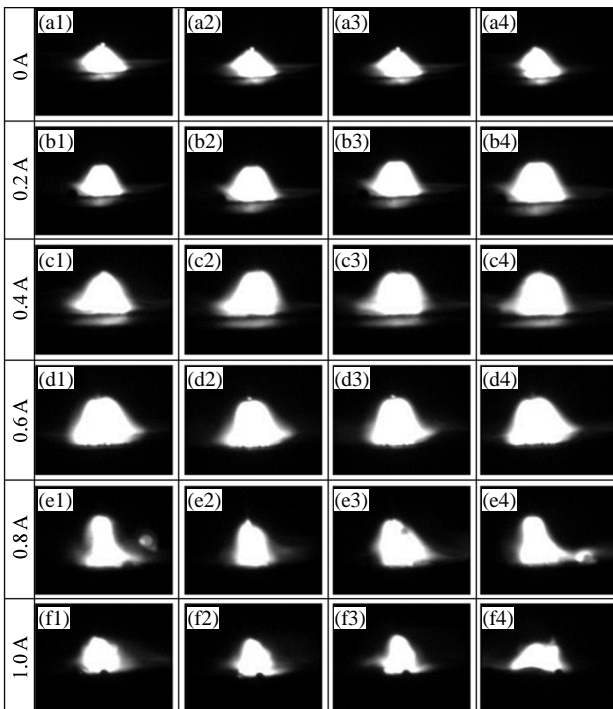


图4 外加磁场的方向向下时不同励磁电流下
MIG 焊电弧的形态
Fig.4 Morphologies of MIG welding arc
under different excitation currents when the direction
of external magnetic field is downward

当无外加磁场作用于 MIG 焊时, MIG 焊电弧的形态呈稳定的“锥形”,且电弧平稳燃烧,未发生旋转运动。当引入外加磁场,励磁电流分别为 0.2、0.4、0.6 时,由图 4、5 可知,显然此时电弧均似“钟罩形”,励磁电流越大,电弧扩张程度越大,且发生一定的摆动,偏离焊丝,伴有旋转运动;当励磁电流继续增大时,电弧形态反而受压缩变小,形状上仍呈“钟罩形”,且偏离焊丝轴线的幅度变大,发生摆动,电弧旋转剧烈,不能稳定燃烧,伴有少量飞溅,电弧亮度变小。但是总体来讲,在不同磁场方向下,图 4、5 中电弧形态上的变化是相同的,电弧均由无外加磁场的

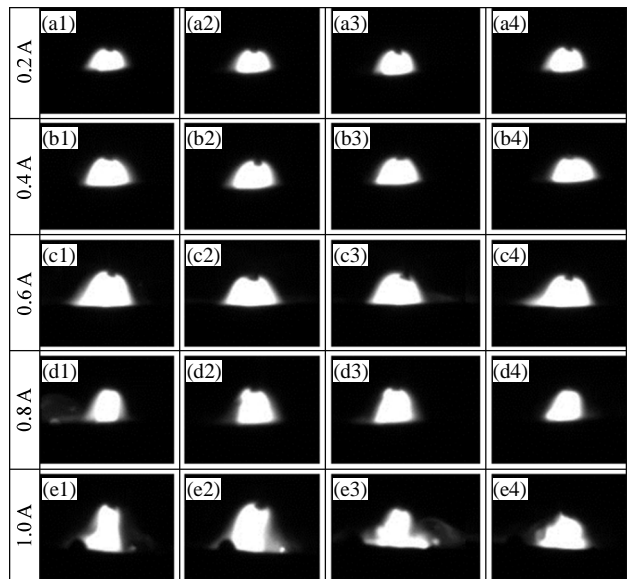


图5 外加磁场方向向上时不同励磁电流下
MIG 焊电弧的形态

Fig.5 Morphologies of MIG welding arc
under different excitation currents when the direction
of external magnetic field is upward

“锥形”变为“钟罩形”,且励磁电流增大,电弧扩张程度变大,偏转越剧烈。但励磁电流达到一定程度,电弧反而受到压缩变小;而电弧的旋转方向则会有所改变,电弧做顺时针旋转或逆时针旋转。说明励磁电流的大小对电弧的形态和运动的剧烈程度影响较大;而磁场的方向性对电弧形态的变化和运动的剧烈程度影响较小,对电弧的旋转运动方向影响较大。

2.2 外加磁场下 MIG 焊接电弧机理分析

实际上,电弧是由大量的正离子、负离子和电子所组成,其中的电子质量远远小于正离子^[13],且电弧中电子流甚多。若在外加磁场的作用下,电子的旋转速度将会比正离子的旋转速度要大得多。因此,本节以带电粒子为研究对象,电弧中的带电粒子均指电子。以下将在无外加磁场和外加磁场的不同方向情况下,分析带电粒子的受力情况。

首先,普通 MIG 焊即无外加磁场时的电弧始形态终呈稳定的“锥形”,如图 4(a1)~(a4)所示。电弧受到的径向压力为

$$F_r = K(I^2 / \pi R^4)(R^2 - r^2) \quad (1)$$

式中: I 为焊接电流; r 为电弧内径; R 为电弧外径; K 为系数, $K = \mu / 4\pi$, μ 为介质磁导率^[16]。

当普通 MIG 焊电弧的内径 r 自下而上逐渐减小,由式(1)可知,电弧径向压力 F_r 则逐渐增大。因此,无外加磁场时,普通 MIG 焊电弧未发生偏转,呈

稳定的“锥形”。

其次,当有方向向下的磁场作用于 MIG 焊时,绕焊丝轴线旋转的电弧中某一带电粒子的速度为 V ,如图 6(a)所示。将 V 分解为沿电弧径向分量 V_r 和沿电弧轴向分量 V_z ;将磁感应强度 B 分解为径向分量 B_r 和轴向分量 B_z 。磁感应强度与带电粒子相互作用,产生的作用力 F_{rz} 、 F_{rz} 分别如式(2)、(3)所示。

$$F_{rz}=V_r \times B_z \quad (2)$$

$$F_{rz}=V_z \times B_r \quad (3)$$

由左手定则可知, F_{rz} 、 F_{rz} 指向电弧中心轴线。此时,绕电弧中心旋转的带电粒子的离心力变大。在电弧径向方向,又因为电弧中心与电弧边缘存在带电粒子浓度差,致使带电粒子沿电弧径向向着外缘扩散运动;在电弧纵向方向,在电场强度 E 的作用下,带电粒子自工件往焊丝方向运动。因此,在上述两种运动下,带电粒子做自下而上的顺时针螺旋运动。电弧形态上整体呈“钟罩形”,如图 6(b)所示。

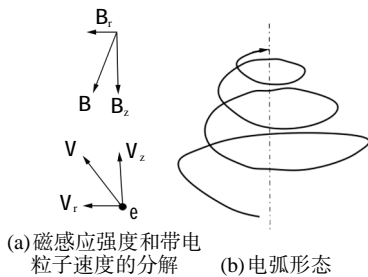


图 6 磁场方向向下时电弧顺时针旋转的示意图
Fig.6 Schematic diagram of the arc rotating clockwise when the magnetic field direction is downward

由图 5 可知,此时,带电粒子受到的洛伦兹力仍指向电弧中心,与向心力同向,电弧仍呈“钟罩形”。若改变外加磁场 \vec{B} 的方向,即外加磁场的方向向上,如图 7(a)所示。由左手定则可知,带电粒子则绕电弧中心轴线做逆时针旋转运动。同样地,又在纵向电场强度的 E 作用下,带电粒子沿着电弧轴线由下往上运动。此时,电弧中的粒子整体上绕焊丝轴线做逆时针螺旋运动,形态上仍呈“钟罩形”,如图 7(b)所示。

因此,综上所述,无外加磁场时, MIG 焊电弧呈稳定的“锥形”,在有外加磁场作用时,电弧则变成“钟罩形”。外加磁场方向的改变,电弧的形态基本不变,仍然保持“钟罩形”,说明磁场的方向性对电弧形态的变化影响较小,而电弧的运动方式会随着外加磁场方向的改变而改变,做顺时针旋转或者逆时针旋转,即磁场的方向性对电弧的运动方式影响较大。

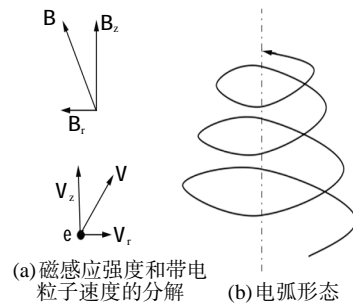


图 7 磁场方向向上时电弧逆时针旋转的示意图
Fig.7 Schematic diagrams of the arc rotating counterclockwise when the magnetic field direction is upward

2.3 外加磁场下 MIG 焊熔滴过渡

图 8、9 分别是通过高速摄影仪采集到的在外加磁场的不同方向情况下,不同励磁电流时 MIG 焊滴状过渡的图片。

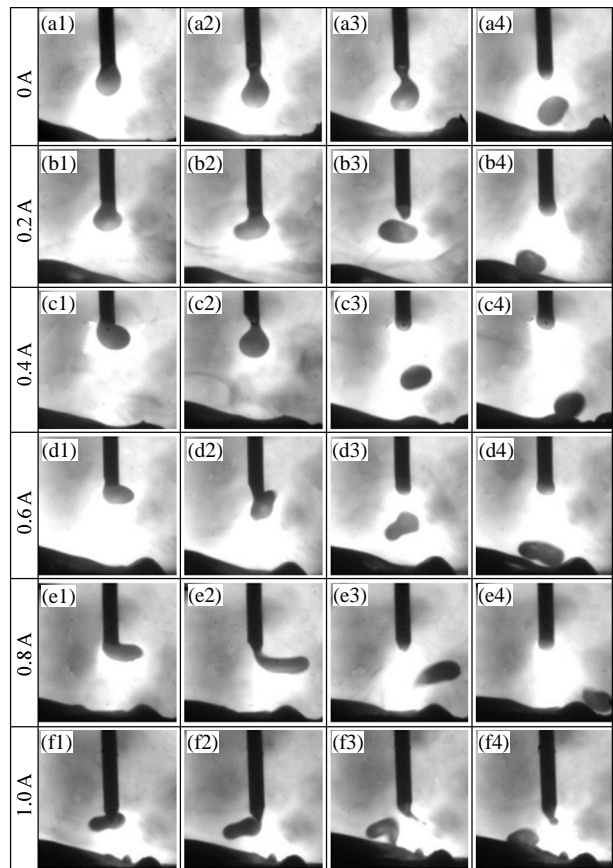


图 8 外加磁场的方向向下时不同励磁电流下熔滴过渡
Fig.8 Droplet transition under different excitation currents with a downward direction of the external magnetic field

图 8(a1)~(a4)显示,当无外加磁场时,传统 MIG 焊熔滴从长大、缩颈到脱落始终呈较为规则的球形,沿着焊丝轴线的方向平稳过渡,落入熔池,且未发生偏转和旋转运动。当励磁电流为 0.2、0.4、0.6 A 时,磁控 MIG 焊熔滴由球形变为长而扁的椭球形,

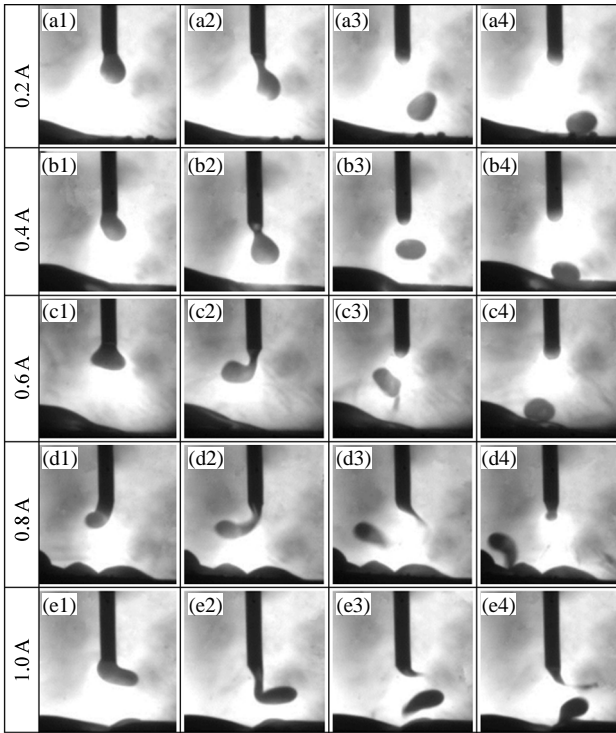


图9 外加磁场的方向向上时不同励磁电流下的熔滴过渡
Fig.9 Droplet transition under different excitation currents with a upward direction of the external magnetic field

熔滴偏离焊丝中心轴线而脱落,并发生旋转。溶滴被电弧笼罩,电弧的形状也会随着熔滴形状的变化而改变。当励磁电流增大到0.8、1.0A时,即磁感应强度更大,椭球形的熔滴旋转更加剧烈,偏离焊丝中心轴线的距离也更大,溶滴过渡的频率变低,直至滴落至熔池;且焊丝末端出现了笔尖状液锥,液锥与溶滴均发生旋转,但旋转的速度有所不同。期间,熔滴的偏转导致电弧偏转,电弧形成不对称现象。由图8、9可知,在相同励磁电流下,外加磁场方向的改变,熔滴形态上的变化基本相同,均由无外加磁场时的球形变成椭球形,但其运动方式不同。当外加磁场的方向向下,熔滴绕焊丝中心轴线做逆时针旋转运动;当外加磁场的方向改为向上,熔滴的运动方式随着磁场方向的改变发生变化,绕焊丝中心轴线做顺时针旋转运动。这说明励磁电流的大小对熔滴形态和运动的剧烈程度影响较大。磁场的方向性对溶滴形态的影响较小,对溶滴的运动方向影响较大。

2.4 外加磁场下MIG焊熔滴过渡分析

在有、无外加磁场的情况下,熔滴的形状和运动有所不同,如图8、9所示。磁控MIG焊溶滴呈扁而长的椭球形,且绕焊丝中心轴线做逆时针或顺时针旋转运动。其原因主要是外加磁场与经过溶滴的焊

接电流I相互作用,产生的电磁力作用于熔滴上。

由图8(a1)~(a4)可知,传统MIG焊溶滴呈球形,未发生偏转,沿着焊丝中心轴线方向滴落到熔池。此时,熔滴受到的作用力^[6]有以下几种,如式(4)~(8)所示:

重力 F_g :

$$F_g = \frac{1}{2} \pi \rho g R^3 \quad (4)$$

式中: g 为重力加速度; R 为熔滴半径; ρ 为熔滴密度。

表面张力 F_σ :

$$F_\sigma = 2\pi R \sigma \quad (5)$$

式中: σ 为表面张力系数; R 为焊丝半径。

电磁收缩力 F_m :

$$F_m = J \times B \quad (6)$$

式中: B 为磁场强度; J 为电流密度。

等离子流力 F_p ^[17]:

$$F_p = C_d A_p \left(\frac{\rho_f v_f^2}{2} \right) \quad (7)$$

$$A_p = \pi R_d^2 \left(1 - \frac{R_w^2}{2R_d^2} \right) \quad (8)$$

式中: v_f 为等离子气体的流速; ρ_f 为等离子气流的密度; C_d 为等离子流力系数; A_p 为等离子流力作用面积。

斑点压力 F_s 。

由静力平衡理论的基本假设^[18]可得:

$$F_g + F_m + F_p = F_\sigma + F_s \quad (9)$$

式中:重力 F_g 、电磁收缩力 F_m 和等离子流力 F_p 主要起到促进溶滴过渡的作用;表面张力 F_σ 和斑点压力 F_s 则阻碍溶滴过渡。传统MIG焊液态溶滴在上述5种力的共同作用下处于动态平衡状态。因此,溶滴形态上呈球形,未发生偏转,沿着焊丝轴线平稳过渡到熔池。

而磁控MIG焊溶滴除受上述5种作用力以外,还受到外加磁场产生的电磁力。由2.3节可知,磁控MIG焊溶滴呈椭球形,并会发生偏转。下面以导电流体溶滴做为研究对象,将从在不同外加磁场的方向时溶滴受到的电磁力角度来分析溶滴形状和运动方式的变化。

图10是磁场向下时MIG焊溶滴受到的电磁力。将磁感应强度 B 分解为沿焊丝径向 B_r 和沿焊丝轴向 B_z ;将流过溶滴的焊接电流 I 分解为沿焊丝径向 I_r 和沿焊丝轴向 I_z ^[9]。其中, ϕ 为溶滴的偏转角度,即 I_z 与 I 的夹角; φ 为外加磁场的发散角,即 B_z 与 B 的夹角。则 B_z 与 I_r 相互作用产生电磁力 F_1 、 B_r 与 I_z 相互作用产生电磁力 F_2 ,分别如式(10)、(11)所示。

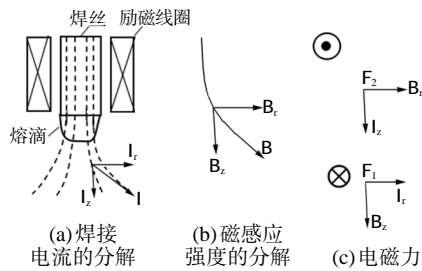


图 10 外加磁场向下时熔滴受到的电磁力
Fig.10 The electromagnetic force exerted on the welding droplet when an external magnetic field is downward

$$F_1 = I_r \times B_z \quad (10)$$

$$F_2 = I_z \times B_r \quad (11)$$

根据左手定则,电磁力 F_1 与 F_2 共线但反向,其合力为

$$\begin{aligned} F &= F_1 - F_2 = I \sin\phi \cdot B \cos\phi - I \cos\phi \cdot B \sin\phi \\ &= IB(\sin\phi \cos\phi - \cos\phi \sin\phi) \\ &= IB \sin(\phi - \varphi) \end{aligned} \quad (12)$$

因为试验中外加磁场的轴向性很好,所以 $\phi > \varphi$, $F_1 > 0$, 即 $F_1 > F_2$ 。因此,当磁场方向向下时,熔滴呈椭球形,绕焊丝中心轴线做逆时针旋转运动。

图 11 是磁场向上时 MIG 焊熔滴受到的电磁力。同样,将磁感应强度 B' 分解成沿焊丝径向 B'_r 和沿焊丝轴向 B'_z ; 将流过熔滴的焊接电流 I 分解为沿焊丝径向 I_r 和沿焊丝轴向 I_z 。其中, ϕ' 为熔滴的偏转角度, 即 I_z 与 I 的夹角, φ' 为外加磁场的发散角, 即 B'_z 与 B' 的夹角。 B'_z 与 I_r 相互作用产生电磁力 F'_1 ; B'_r 与 I_z 相互作用产生电磁力 F'_2 。

$$F'_1 = I_r \times B'_z \quad (13)$$

$$F'_2 = I_z \times B'_r \quad (14)$$

同理,由左手定则,电磁力 F'_1 与 F'_2 共线但反向,其合力为 F' 。

$$\begin{aligned} F' &= F'_1 - F'_2 = I \sin\phi' \cdot B' \cos\varphi' - I \cos\phi' \cdot B' \sin\varphi' \\ &= IB'(\sin\phi' \cos\varphi' - \cos\phi' \sin\varphi') \\ &= IB' \sin(\phi' - \varphi') \end{aligned} \quad (15)$$

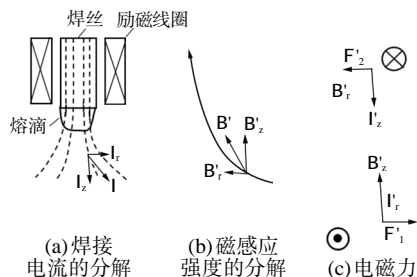


图 11 外加磁场向上时熔滴受到的电磁力
Fig.11 The electromagnetic force exerted on the welding droplet when an external magnetic field is upward

同样地,因采用的外加磁场轴向性好,所以, $\phi' > \varphi'$, $F'_1 > 0$, 即 $F'_1 > F'_2$ 。因此,在外加磁场作用下,当磁场的方向向上时,熔滴呈椭球形,绕焊丝中心轴线做顺时针旋转运动。

3 结论

为了有效控制 MIG 焊接电弧和熔滴过渡,减少焊缝缺陷,提高焊接质量,通过在 MIG 焊滴状过渡的试验中引入直流纵向磁场,在多组不同大小的励磁电流下,改变外加磁场的方向。通过高速摄影仪,观察并分析外加磁场的方向性对磁控 MIG 焊接过程的影响规律,并得出以下结论:

(1) 磁场方向改变,电弧的形态相比无外加磁场均为“钟罩形”,而电弧的运动方向会受到磁场方向的影响。磁场向下时,电弧绕焊丝轴线做顺时针旋转;磁场向上时,电弧则绕焊丝轴线做逆时针旋转。

(2) 磁场方向改变,熔滴的形态相比无外加磁场均为椭球形,但熔滴的运动方式会发生改变。当外加磁场方向向下时,MIG 焊熔滴绕焊丝轴线做逆时针旋转运动;当外加磁场方向向上时,熔滴则绕焊丝轴线做顺时针旋转运动。

(3) 励磁电流的大小对电弧和熔滴形态的变化影响较大;而外加磁场的方向性对电弧和熔滴的旋转运动的方向影响较大。

参考文献:



- [1] (苏)阿勃拉洛夫 M A,(苏)阿勃杜拉赫曼诺夫 P Y. 电磁作用焊接技术[M]. 韦福水,路登平,译. 北京:机械工业出版社,1988.
- [2] 贾昌申,罗键,贾涛,等. 外加间歇交变纵向磁场对 GTAW 焊缝中气体的抑制[J]. 航空工艺技术,1999(3):26-28.
- [3] Brown D. The effect of electromagnetic stirring and mechanical vibration on arc welding[J]. Welding journal,1962,41(2):41-50.
- [4] Tseng C F, Savage W F. The effect of arc oscillation in either the transverse or longitudinal direction has a beneficial effect on the fusion zone microstructure and tends to reduce sensitivity to hot cracking[J]. Welding Journal, 1971, 50(12):777-785.
- [5] 刘民军. 磁控焊接电弧行为及焊缝成形机理的研究 [D]. 沈阳:沈阳工业大学,2016.
- [6] 檀财旺,徐炳孝,刘福运,等. 外加磁场辅助激光焊接的研究现状及展望[J]. 热加工工艺,2023,52(19):1-6.
- [7] 常云龙,车小平,李敬雅,等. 外加磁场对 MIG 焊熔滴过渡形式和焊缝组织性能的影响[J]. 焊接,2008(10):25-28.

(下转第 160 页)

硬化使得流变应力维持相对稳定。815℃、1s⁻¹ 高应变速率下流变应力的大幅降低归因于剧烈温升导致的α粒子回溶对第二相强化效应的减弱。而910℃、1s⁻¹ 下流变应力的急剧降低则归结为β晶界的动态再结晶导致的组织软化作用。

(4) 热压组织中β晶粒形成<111>和<001>两种织构。当变形温度越高、变形量越大、或者变形速率越慢,变形组织中<111>织构减弱而<001>织构增强,出现了<001>织构对<111>织构的“吞噬”。这种“吞噬”现象归因于β晶粒间动态回复程度不同导致的晶界迁移。

参考文献:

- [1] Luo J, Wang L F, Liu S F, et al. The correlation between the flow behavior and the microstructure evolution during hot working of TC18 alloy [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2016, 654(27):213-220.
- [2] 王晋忠,王惠梅,王永飞,等. 变形态TC4钛合金热压缩本构方程及热加工图研究[J]. *热加工工艺*, 2023, 52(23): 100-104.
- [3] Weiss I, Semtin. Thermomechanical processing of beta titanium alloys-An overview [J]. *Materials Science and Engineering A*, 1998, 243(1/5):46-65.
- [4] Qu F S, Zhou Y H, Zhang L Y, et al. Research on hot deformation behavior of Ti-5Al-5Mo-5V-1Cr-1Fe alloy[J]. *Materials and Design*, 2015, 69(15): 153-162.
- [5] Zherebtsov S V, Murzinova M A, Klimova M V, et al. Microstructure evolution during warm working of Ti-5Al-5Mo-5V-1Cr-1Fe at 600 and 800 °C [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2013, 563(15):168-176.
- [6] Semiatin S L, Bieler T R. The effect of alpha platelet thickness on plastic flow during hot working of Ti-6Al-4V with a transformed microstructure [J]. *Acta Materialia*, 2001, 49(17): 3565-3573.
- [7] Nan Y, Ning Y Q, Liang H Q, et al. Work-hardening effect and strain-rate sensitivity behavior during hot deformation of Ti-5Al-5Mo-5V-1Cr-1Fe alloy [J]. *Materials and Design*, 2015, 82(5):84-90.
- [8] Ning Y Q, Luo X, Liang H Q, et al. Competition between dynamic recovery and recrystallization during hot deformation for TC18 titanium alloy [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2015, 635(21):77-85.
- [9] Chen Y, Li J S, Tang B, et al. Texture evolution and dynamic recrystallization in a beta titanium alloy during hot-rolling process [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, 618(5): 146-152.
- [10] Sander B, Raabe D. Texture inhomogeneity in a Ti-Nb-based β-titanium alloy after warm rolling and recrystallization [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2008, 479(1/2):236-247.
- [11] Li K, Yang P, Sha A X, et al. Investigation of microstructure and texture of β phase in a forged TC18 titanium alloy bar[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2014, 50(6):707-714.
- [12] Estrin Y, Mecking H, A unified phenomenological description of work hardening and creep based on one-parameter models [J]. *Acta Metallurgica*, 1984, 32(1):57-70.
- [13] Zhao G H, Liang X Z, Kim B, et al. Modelling strengthening mechanisms in beta-type Ti alloys [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2019, 756(22):156-160.
- [14] 李凯. 钛合金加热过程变形与相变之间相互影响与织构控制[D]. 北京:北京科技大学, 2018.
- [15] Humphreys J, Hatherly M. Recrystallization and related annealing phenomena [M]. Second Edition. Oxford: Elsevier, 2014:251. 
- [16] penetration high power laser beam welding of thick aluminium parts [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, 60:309-321.
- [15] Avilov V, Gumenyuk A, Lammers M, et al. PA position full penetration high power laser beam welding of up to 30 mm thick AlMg₃ plates using electromagnetic weld pool support [J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2012, 17(2):128-133.
- [16] 王宗杰. 熔焊方法及设备[M]. 北京:机械工业出版社, 2006: 28-29.
- [17] Fan H G, Kovacevic R. Droplet formation, detachment, and impingement on the molten pool in gas metal arc welding [J]. *Metal Mater Trans B*, 1999, 30:791-801.
- [18] Amson J C. An analysis of the gas shielded consumable metal arc welding system[J]. *Welding Journal*, 1962, 41(4):232-249.
- [19] 杨超. 磁控MIG/MAG焊熔滴过渡行为研究[D]. 南昌:南昌航空大学, 2014. 

(上接第 152 页)

- [8] 江淑园,张学武,陈焕明. 外加纵向磁场对GTAW焊接不锈钢接头宏观形貌及组织的影响[J]. *上海交通大学学报*, 2010, 44(S): 89-91.
- [9] 钟其林,江淑园,陈焕明,等. 基于磁控技术GTAW焊接残余应力的有限元模拟[J]. *热加工工艺*, 2012, 41(7):112-114.
- [10] 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.
- [11] 陈树君,王军,王会霞,等. 纵向磁场作用下的旋转射流过渡的机理[J]. *焊接学报*, 2005(3):45-49.
- [12] 杨丰兆. 外加磁场对高速GMAW驼峰焊道的抑制作用[D]. 济南:山东大学, 2014.
- [13] 王龙,胡德安,陈益平,等. 交变磁场对MIG熔钎焊铝铜接头组织性能的影响[J]. *稀有金属*, 2022, 46(12):1657-1662.
- [14] Marcel B, Vjaceslav A, Andrey G, et al. About the influence of a steady magnetic field on weld pool dynamics in partial