

引用格式: 韩琦, 江淑园. 外加交变磁场对 MIG 焊电弧及射流过渡的影响[J]. 热加工工艺, 2023, 52(21): 68-72.

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.20212350
http://www.rjggy.net rjggy@vip.163.com

外加交变磁场对 MIG 焊电弧及射流过渡的影响

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: 利用高速摄影系统采集交变间歇磁场下 MIG 焊的电弧和射流过渡图片。通过受力分析, 研究不同磁场方向下电弧和射流过渡的变化。结果表明: 保持励磁频率为 40 Hz, 励磁电流在 0~1.0 A 范围内, 随着磁场方向在纵向由向下到向上的周期变化, 电弧绕焊丝轴线呈周期性顺时针、逆时针旋转, 且出现扩张和收缩现象。焊丝末端导电液体由液锥、液流束和细小球状熔滴组成。当励磁电流为 0 A 时, 液锥和液流束沿焊丝轴向下垂, 未发生偏转, 熔滴沿着液流束末端向熔池内平稳过渡。当励磁电流为 0.2、0.6 A 时, 液流束呈短粗状, 小角度偏离焊丝轴向做顺、逆时针旋转。当励磁电流达到 0.8、1.0 A 时, 液流束呈细长状, 导电液体呈“S”形, 大角度偏离绕焊丝轴向做周期性逆时针和顺时针旋转。

关键词: 交变间歇磁场; 磁场方向; MIG 焊; 电弧; 射流过渡

中图分类号: TG444+.74

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2023)21-0068-05

Influence of External Alternating Magnetic Field on MIG Welding Arc and Jet Transition

HAN Qi¹, JIANG Shuyuan²

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

Abstract: The high-speed photography system was used to collect the images of MIG welding arc and jet transition under alternating intermittent magnetic field. Through force analysis, the changes of arc and jet transition under different magnetic field directions were studied. The result shows that under the excitation frequency of 40 Hz and the excitation current range of 0-1.0 A, as the alternating magnetic field periodically changes from downward to upward in longitudinal direction, the arc rotates clockwise and counterclockwise periodically around the wire axis, and it expands and contracts. The conductive fluid at the end of the wire consists of a liquid cone, a liquid stream and a small spherical droplet. When the excitation current is 0 A, the liquid cone and the liquid stream sag along the axis of the welding wire without being deflected, and the droplet transits smoothly into the molten pool along the end of the liquid stream. When the excitation current is 0.2, 0.6 A, the liquid stream is short and thick, and it deviates from the axis of the welding wire with a small angle and rotates clockwise and counterclockwise. When the excitation current reaches 0.8, 1.0 A, the liquid stream is slender, and the liquid stream shows an "S" shape, deviating from the axis of the welding wire with a large angle and rotating periodically counterclockwise and clockwise.

Key words: alternating intermittent magnetic field; magnetic field direction; MIG welding; arc; jet transition

磁控焊接技术作为一种清洁、绿色的热加工技术, 近年来得到不断的研究与应用。国内外研究表明^[1-4], 在传统焊接过程中引入磁场进行干预, 可实现对焊接电弧、熔滴过渡和焊缝成形的控制, 减少焊缝缺陷, 细化晶粒, 提高焊缝力学性能。因此, 在熔化极惰性气体保护焊(MIG 焊)中引入磁场进行焊接

过程控制已成为一种有效而实用的方法^[5-6]。而对于交变间歇磁场下 MIG 焊中电弧和射流过渡的机理研究鲜有报导, 因此本文借助高速摄影系统, 对外加交变间歇磁场 MIG 焊电弧的形态、运动状态和射流过渡进行研究, 并分析其机理, 为磁控 MIG 焊接技术的后期研究提供理论参考。

1 实验材料与方法

在 MIG 焊接过程中引入磁场强度可调的交变间歇磁场, 其脉冲方波信号如图 1 所示。借助速度为 2000 fps 的高速摄影系统采集磁控 MIG 焊的电弧和

收稿日期: 2021-09-01

基金项目: 江苏航空职业技术学院课题(JATC21010203); 江西省教育厅科技项目(DA201403303)

作者简介: 韩琦(1991-), 男, 江苏连云港人, 助教, 硕士研究生, 主要研究方向: 焊接过程质量控制; E-mail: 1224348783@qq.com

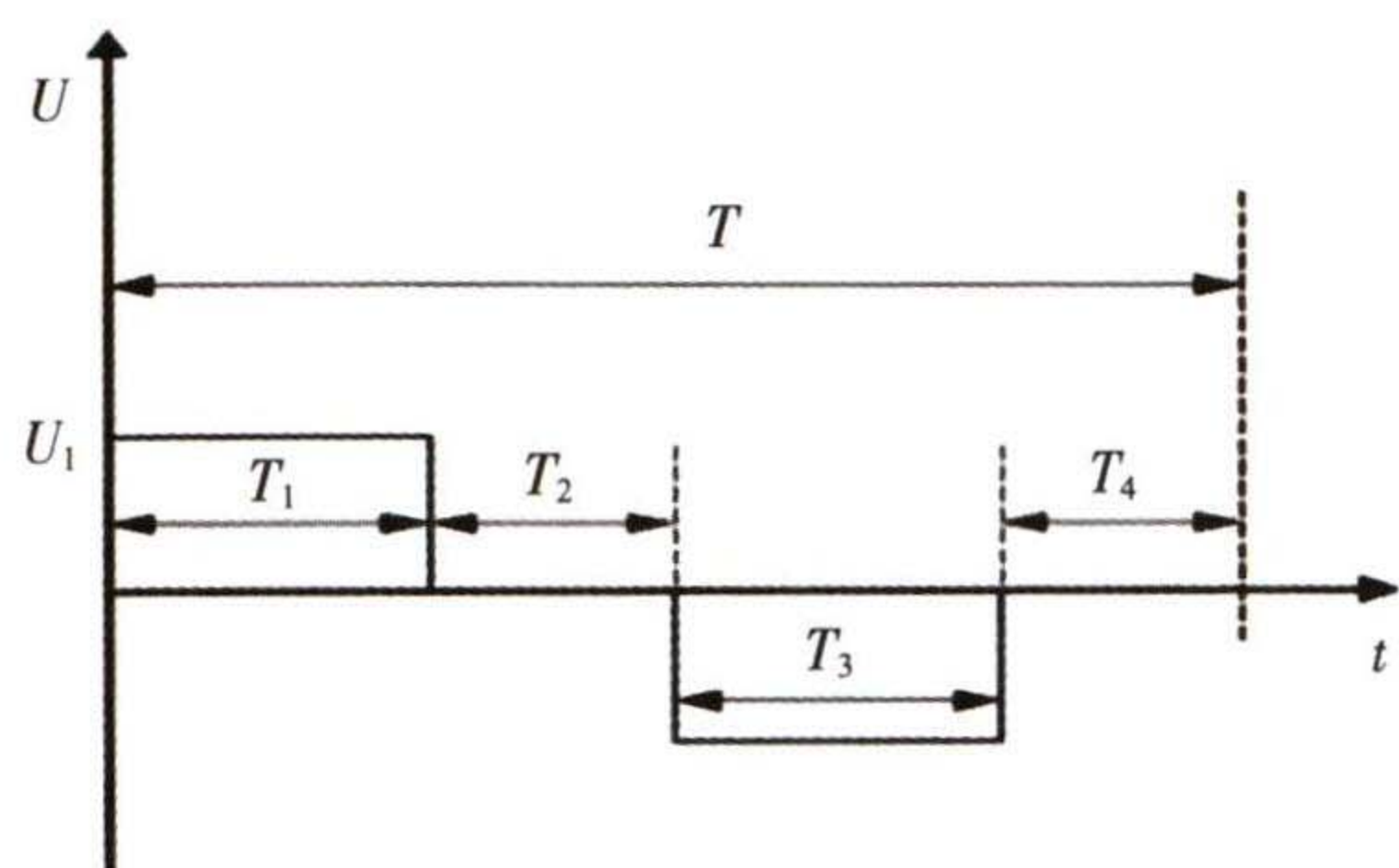


图1 交流脉冲方波信号示意图
Fig.1 Schematic of AC pulse square wave signal

射流过渡图片，焊接方式采用直流反接。焊材为Q235普通低碳钢，尺寸200 mm×60 mm×6 mm，焊丝为直径1.2 mm的H08Mn2SiA焊丝，干伸长为15 mm，保护气体为纯氩气，保护气流量为18 L/min，送丝速度为40 m/min。磁控MIG焊的射流过渡实验参数见表1，实验系统示意图如图2所示。

表1 磁控MIG焊射流过渡实验参数
Tab.1 Experimental parameters of jet transition of magnetron MIG welding

励磁电流 /A	励磁频率 /Hz	焊接电流 /A	焊接电压 /V	焊接速度 /(m·min ⁻¹)
0	0	320	35	0.7
0.2、0.4、0.6、0.8、1.0	40	320	35	0.7

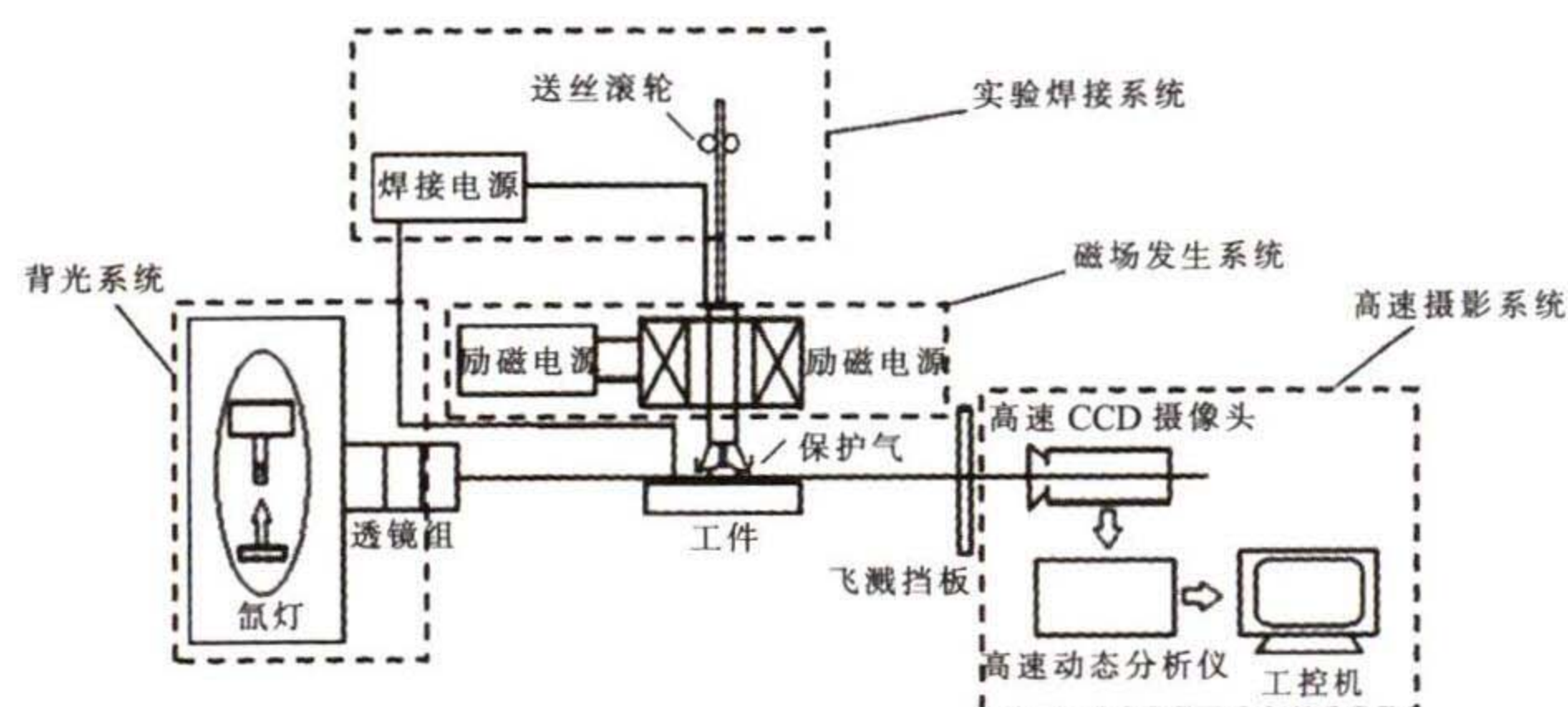


图2 磁控MIG焊接系统示意图
Fig.2 Schematic of magnetron MIG welding system

2 实验结果及分析

2.1 交变磁场下MIG焊接电弧

在表1的实验参数下进行磁控MIG焊接实验。结果显示，焊接电弧的形态和运动方式均发生了明显的变化，如图3所示。当励磁电流为0 A时，即无外加磁场作用下，MIG焊接过程的电弧呈“锥形”，未做旋转、收缩扩张运动；当励磁电流为0.2、0.4 A时，电弧小角度偏离焊丝轴线方向做周期性的顺时针、逆时针旋转，相比于无外加磁场时稳定的“锥形”电弧^[7]，此时电弧伴有周期性的扩张和收缩；当励磁

电流增加到0.6、0.8 A时，电弧偏离焊丝轴线方向的角度变大，同样，电弧周期性做顺时针、逆时针旋转，且扩张、收缩现象愈加明显；当励磁电流增大到1.0 A时，电弧旋转剧烈，摆动幅度大，焊接过程处于不稳定状态。

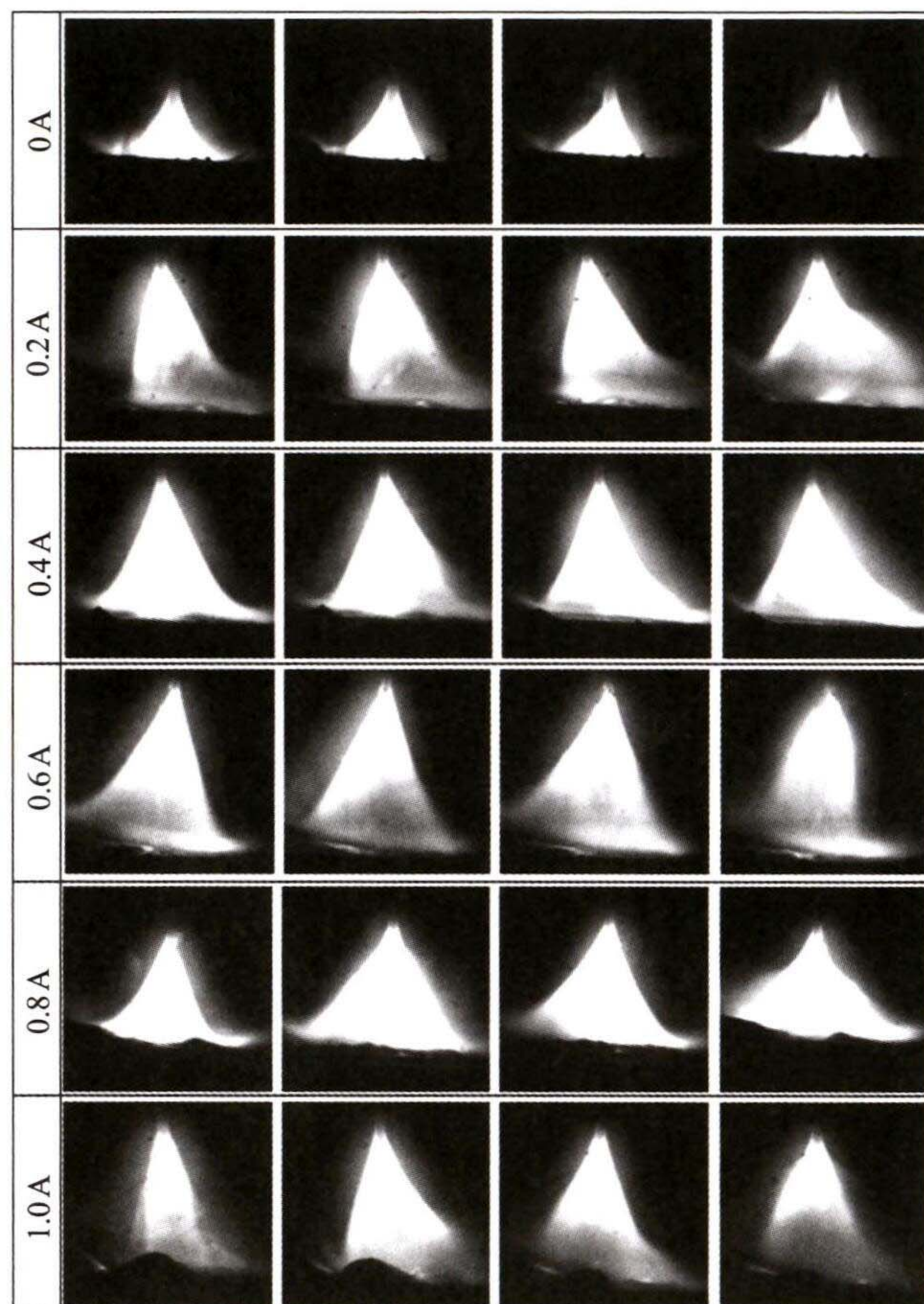


图3 不同励磁电流下焊接电弧的形态
Fig.3 The shape of the welding arc under different excitation currents

2.2 交变磁场下MIG焊接电弧机理分析

由2.1节可知，磁控MIG焊射流过渡中电弧的形态、运动方式均发生变化。以下通过励磁电源产生的脉冲方波信号周期 T 内的四个阶段来分析电弧中带电粒子的受力情况。

如图4所示，当交变脉冲方波信号处于正脉冲 T_1 时，磁场方向为纵向向下。电弧中带电粒子某一瞬间运动状态为绕电弧中心轴线做顺时针旋转运动，速度记为 V ，将其分解成 V_r 、 V_z 和 V_a ；外加纵向磁场强度 B 分解成沿电弧径向方向的分量 B_r 和沿电弧轴向方向的分量 B_z 。带电粒子与外加磁场的作用力如式(1)~(4)所示：

$$\vec{F}_{az} = \vec{V}_a \times \vec{B}_z \quad (1)$$

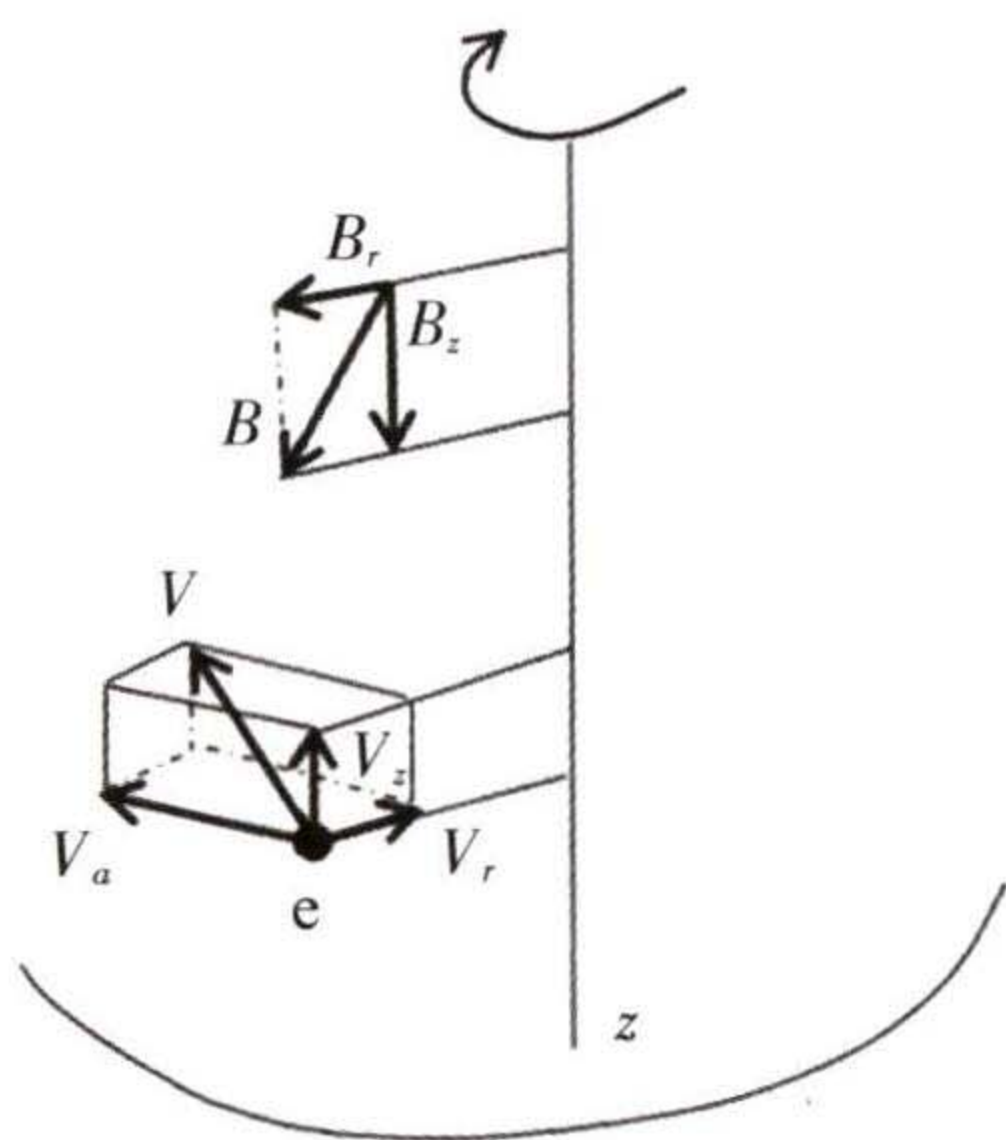


图4 带电粒子顺时针旋转运动示意图

Fig.4 Schematic of clockwise rotation of charged particles

$$\vec{F}_{zr} = \vec{V}_z \times \vec{B}_r \quad (2)$$

$$\vec{F}_{rz} = \vec{V}_r \times \vec{B}_z \quad (3)$$

$$\vec{F}_{ar} = \vec{V}_a \times \vec{B}_r \quad (4)$$

由左手定则可知,带电粒子所受的洛伦兹力 $\vec{F}_{az}$ 和向心力方向相同,因此旋转的带电粒子受到的离心力变大,偏离焊丝轴线方向角度变大。带电粒子向电弧外缘做螺旋运动,在粒子间粘滞力的影响下,必将引起周围中性粒子运动。电弧从整体上呈现向外扩张的“钟罩形”。由于惯性,带电粒子保持顺时针螺旋运动趋势,受到的洛伦兹力仍指向电弧径向方向。

当交变脉冲方波信号处于负脉冲 T_3 时,磁场方向为纵向向上,如图5所示。由左手定则可知,此时带电粒子开始做逆时针螺旋运动。洛伦兹力与向心力同向,相互叠加,促使向心力增大,同样带电粒子所受的离心力增加,电弧向外扩张,整体呈“钟罩形”。

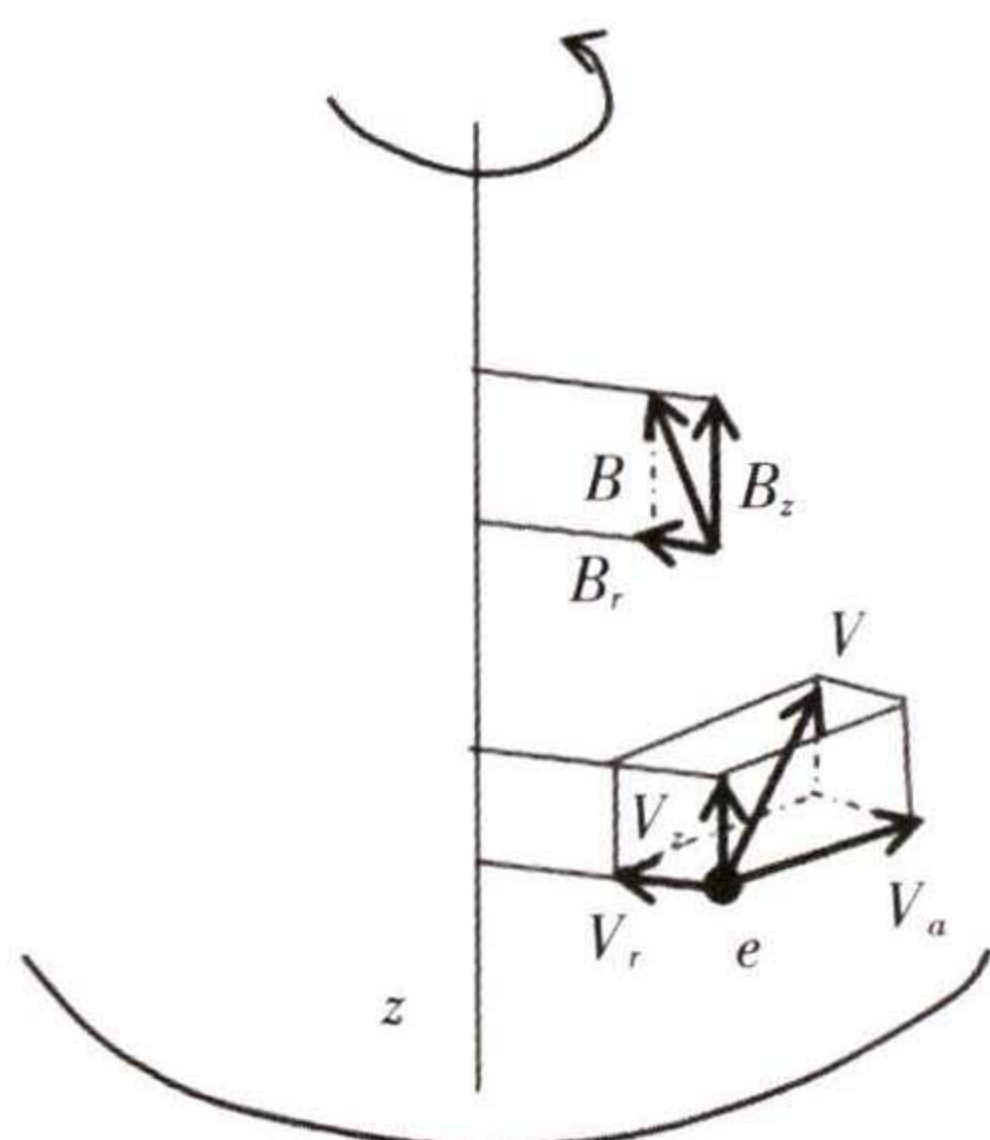


图5 带电粒子逆时针旋转运动示意图

Fig.5 Schematic diagram of counterclockwise rotation of charged particles

当交变脉冲方波信号处于间歇 T_2 、 T_4 时,即无外加磁场作用于MIG焊。普通MIG焊的焊接电弧

内部任意半径处的径向压力为^[8]:

$$F_r = K(I^2/\pi R^4)(R^2 - r^2) \quad (5)$$

式中: R 是电弧外径; r 是电弧内径; I 是焊接电流; K 是系数, $K=\mu/4\pi$, μ 是介质磁导率。一方面,电弧中带电粒子受到电弧轴向的等离子流力和电场力的作用向下运动,另一方面,带电粒子在电弧径向方向受到热扩张力、电场力、离心力等合力的作用,沿电弧径向方向向电弧外边缘运动。因此,在径向运动与轴向运动的合运动下,电弧中带电粒子做的是一种高速螺旋运动。由式(5)可知,随着电弧内径 r 不断增大, F_r 逐渐减小,相应地电弧径向方向上指向外的综合作用力增大,故电弧从上往下整体呈现出“圆锥状”。

因此,在外加交变间歇磁场的作用下,MIG焊接电弧做周期性地逆时针、顺时针旋转运动,且伴有扩张与收缩现象。

2.3 交变磁场下MIG焊射流过渡

图6为不同励磁电流下MIG焊的射流过渡过程。图中焊丝末端的液态金属呈铅笔尖状,称为液锥;液锥的末端悬挂一条流束状的黑线,称为液流

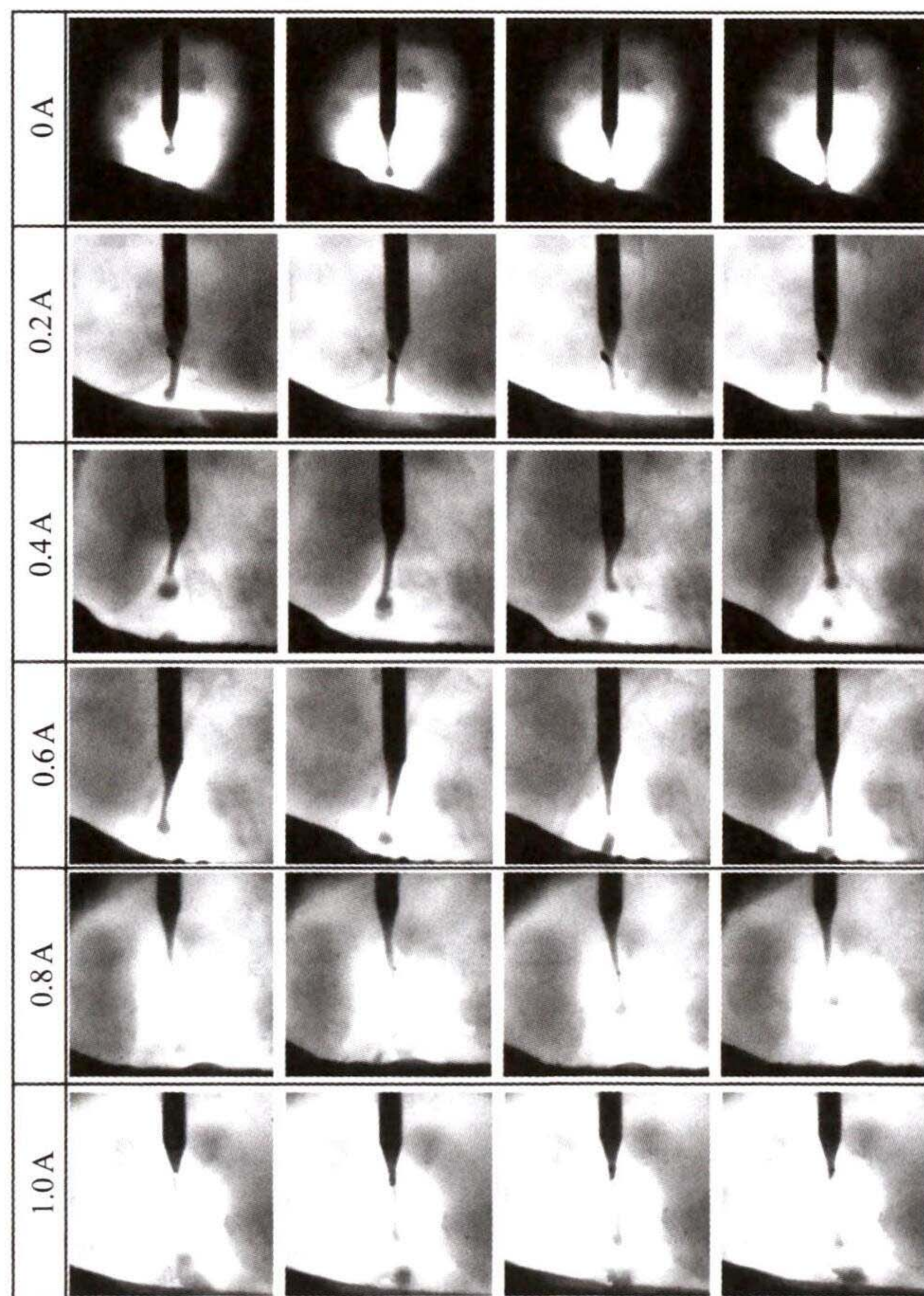


图6 不同励磁电流下MIG焊的射流过渡过程

Fig.6 Jet transition process of MIG welding under different excitation currents

束,细小的熔滴从液流束末端快速向熔池过渡。在励磁电流为 0 A,液锥和液流束未发生偏转,沿着焊丝轴向下垂,细小圆球状熔滴向熔池平稳过渡,金属飞溅小;当交变磁场的励磁电流为 0.2、0.4、0.6 A 时,液流束呈粗短线状并和液锥一起呈小角度偏离焊丝轴向做周期性顺时针、逆时针旋转,熔滴成椭球形向熔池过渡;当励磁电流达到 0.8、1.0 A 时,液流束呈细长的“S”形,大角度偏离焊丝轴向做顺时针、逆时针旋转,而液流束末端熔滴向焊丝轴向靠近,发生射流过渡。

2.4 交变磁场下 MIG 焊射流过渡机理分析

由 2.3 节可知,在外加交变间歇纵向磁场 MIG 焊中,液锥、液流束和液流束末端细小熔滴都会偏离焊丝中心线并绕其发生旋转。为了方便分析,统一将液锥、液流束和液流束末端的细小熔滴统称为导电流体。

图 7、8 分别是外加交变间歇磁场方向向下和向上时的分布图。首先,分析在脉冲信号为正,交变磁场方向向下的情况,见图 7。通过导电流体的焊接电流 I 可分解成沿着焊丝径向方向的 I_r 和轴向方向的 I_z 。外加磁场 B 可分解成沿着焊丝径向方向的 B_r 和轴向方向的 B_z 。其中, ϕ 为导电流体的偏转角度,为外加磁场的发散角。焊接电流的径向分量 I_r 和外加磁场的轴向分量 B_z 相互作用产生作用力 F_1 ,焊接电流的轴向分量 I_z 和外加磁场的径向分量 B_r 相互作用产生作用力 F_2 。

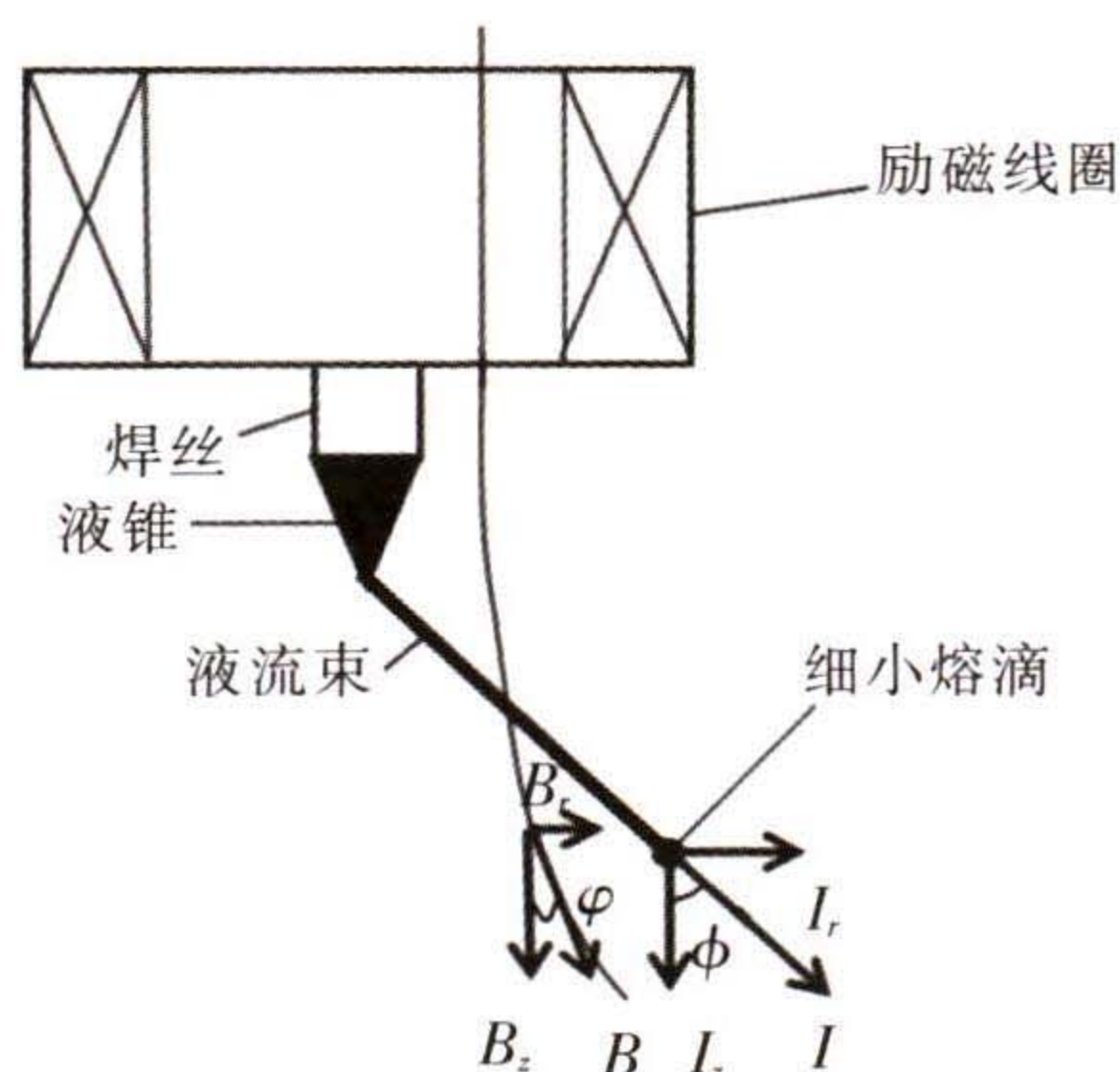


图 7 外加磁场方向向下时的分布图
Fig.7 Distribution of the applied magnetic field in downward direction

$$F_1 = I_r \times B_z \quad (6)$$

$$F_2 = I_z \times B_r \quad (7)$$

以导电流体为分析对象,根据左手定则可以判断出 F_1 与 F_2 方向相反且共线,其合力 F 为:

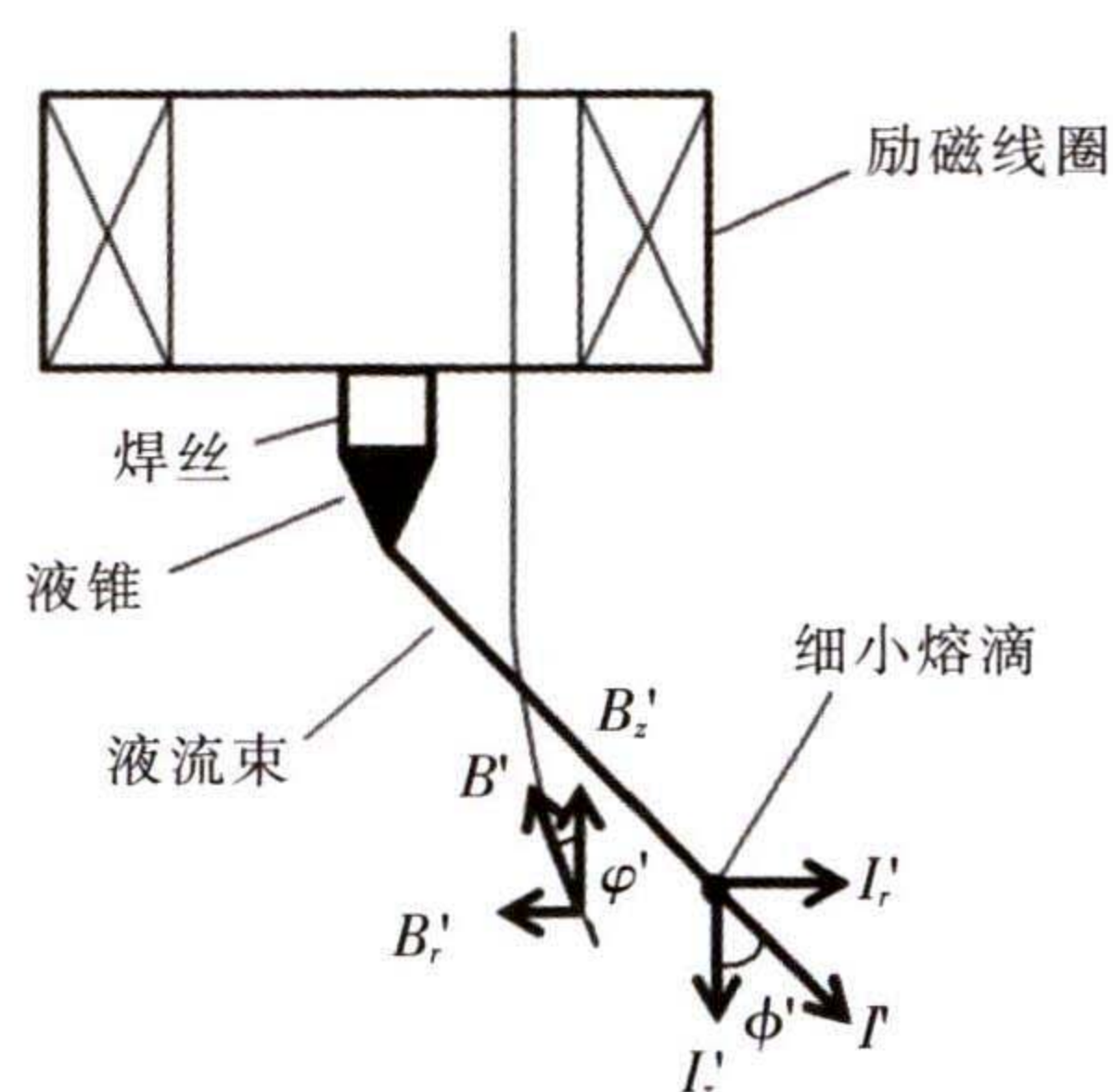


图 8 外加磁场方向向上时的分布图
Fig.8 Distribution of the applied magnetic field in upward direction

$$\begin{aligned} F &= F_1 - F_2 = I \sin \phi \cdot B \cos \phi - I \cos \phi \cdot B \sin \phi \\ &= IB (\sin \phi \cos \phi - \cos \phi \sin \phi) \\ &= IB \sin(\phi - \phi) \end{aligned} \quad (8)$$

因为采用的外加磁场轴向性很好,所以 $\phi > \phi'$, $F > 0$,即 $F_1 > F_2$ 。因此在外加磁场的作用下,导电流体将受到逆时针方向合力的作用做逆时针旋转运动。

当在脉冲信号为负时,外加磁场方向向上。同样地,导电流体受到的洛伦兹力分别是 F'_1 和 F'_2 ,共线反向,其大小为:

$$F'_1 = I'_r \times B'_z \quad (9)$$

$$F'_2 = I'_z \times B'_r \quad (10)$$

则 F'_1 和 F'_2 的合力 F' 为:

$$\begin{aligned} F' &= F'_1 - F'_2 = I' \sin \phi' \cdot B' \cos \phi' - I' \cos \phi' \cdot B' \sin \phi' \\ &= I' B' (\sin \phi' \cos \phi' - \cos \phi' \sin \phi') \\ &= I' B' \sin(\phi' - \phi') \end{aligned} \quad (11)$$

由于 $\phi' > \phi'$,所以 $F' > 0$,即 $F'_1 > F'_2$,导电流体将受到顺时针方向合力的作用,做顺时针旋转运动。

从上述对处于不同磁场方向的导电流体进行受力分析可知,在合力 F 和 F' 的周期性交替作用下,导电流体绕焊丝轴线周期性地做逆时针和顺时针旋转运动。这样,导电流体横截面微元体上的带电粒子做圆周方向的定向移动,形成周向电流^[9]。在此,以导电流体逆时针旋转产生的周向电流 I_w 进行分析,如图 9 所示。外加磁场方向向下, I_w 同时垂直于外加磁感应强度的径向分量 B_r 和轴向分量 B_z ,它们之间相互作用使导电流体受到新的轴向力 F_z 和径向力 F_r ,如图 10 所示。

F_z 沿焊丝轴向方向向下,使做旋转运动的导电流体受到向下的加速作用,促进熔滴过渡,其大小为:

$$F_z = I_w \times B_r \quad (12)$$

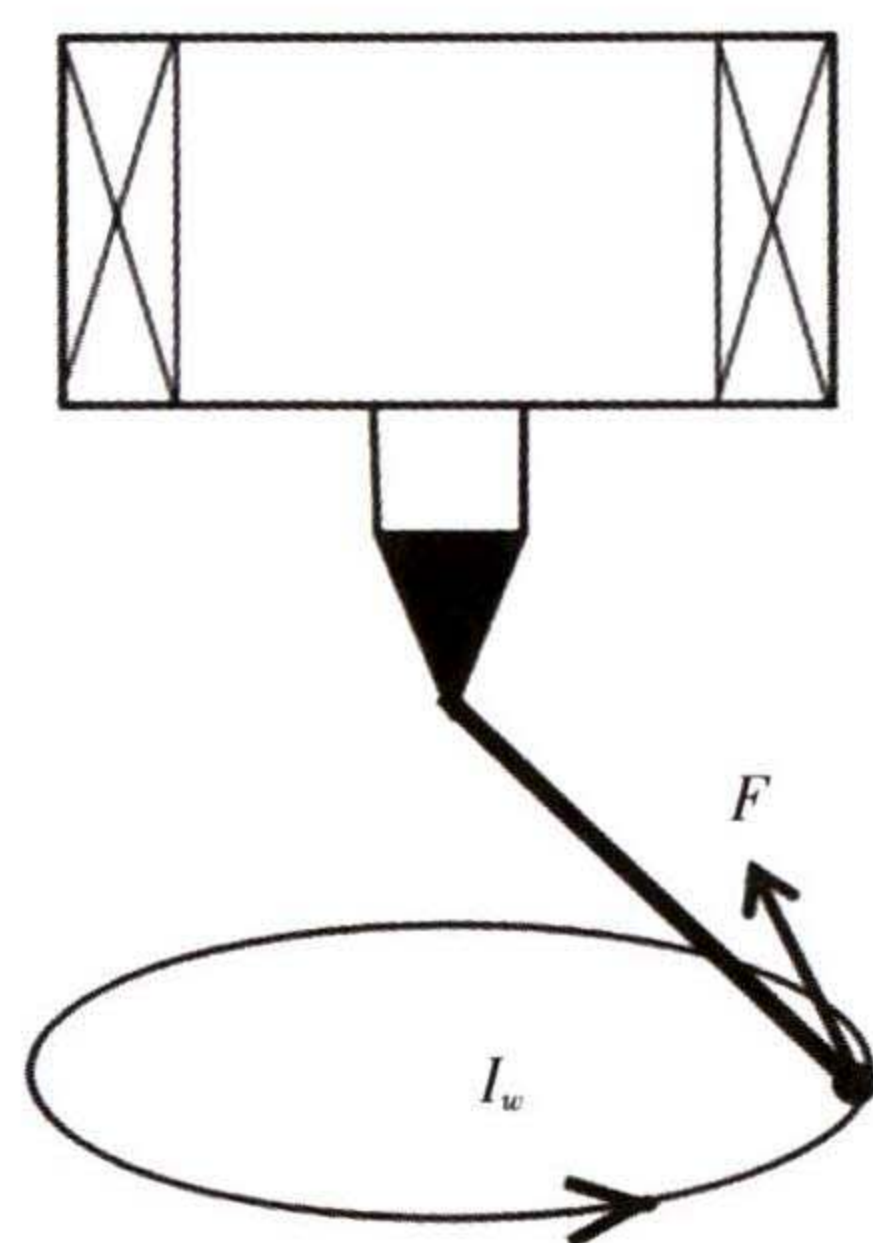


图9 导电流体旋转产生周向电流
Fig.9 A circumferential current generated by the rotation of conductive fluid

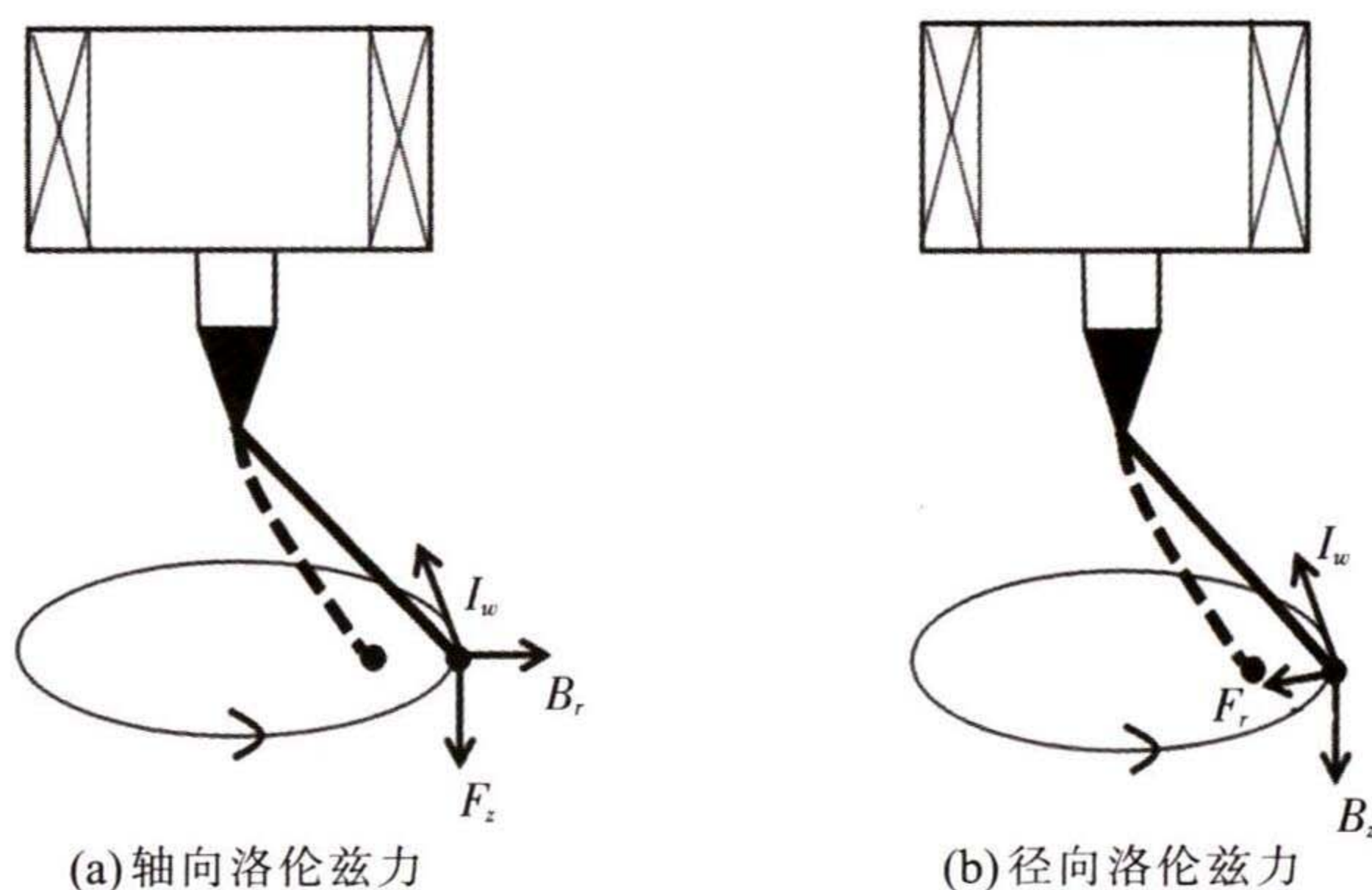


图10 周向电流与外加磁场作用产生的洛伦兹力
Fig.10 The Lorentz force generated by the action of circumferential current and applied magnetic field

F_r 指向焊丝的径向方向,使导电流体向焊丝靠近,减小导电流体的旋转半径,其大小为:

$$F_r = I_w \times B_z \quad (13)$$

同样地,当导电流体做顺时针旋转运动产生顺时针周向电流时,外加磁场方向向上,由左手定则可以得出,周向电流 I_w' 与磁场的径向分量 B_r' 相互作用,产生作用于导电流体的作用力 F_z' ,其沿焊丝的轴向方向向下,其大小为:

$$F_z' = I_w' \times B_r' \quad (14)$$

该作用力使做旋转的导电流体受到向下的加速作用,同样促进熔滴过渡。

周向电流 I_w' 与磁场的轴向分量 B_z' 相互作用, F_r' 产生作用力指向焊丝的径向方向,其大小为:

$$F_r' = I_w' \times B_z' \quad (15)$$

该作用力导电流体向焊丝靠近,减小导电流体的旋转半径。

由以上分析可知,不论导电流体做顺时针运动还是逆时针运动,在轴向力和径向力的共同作用下,导电流体先偏离焊丝轴向再靠近焊丝轴向运动,呈“S”形。

3 结论

(1) 当无外加磁场时,MIG 焊接电弧呈“圆锥形”,当交变间歇磁场作用于 MIG 焊,电弧一方面做周期性的逆时针、顺时针旋转运动,另一方面做周期性的扩张与收缩。

(2) 在无外加磁场时,MIG 焊丝末端液锥和液流束未发生偏转,沿着焊丝轴向下垂,细小圆球状熔滴向熔池平稳过渡。当有外加交变磁场作用 MIG 焊时,液锥、液流束和熔滴组成的导电流体呈“S”形绕焊丝轴向做周期性逆时针和顺时针旋转运动。

参考文献:

- [1] 孙雅杰,常云龙. 磁控电弧焊接过程及新技术研究进展[J]. 材料导报,2020,34(21):21155-21165.
- [2] 张玉红,李明,刘华. 汽车车架用 AZ61A 镁合金的外加磁场 MIG 焊研究[J]. 热加工工艺,2015,44(5):47-49.
- [3] 许凯,侯击波,刘雅鑫,等. 旋转磁场对 ZL205A 堆焊层组织与性能的影响[J]. 热加工工艺,2019,48(7):69-72.
- [4] Marcel B,Vjaceslav A,Andrey G,et al. About the influence of a steady magnetic field on weld pool dynamics in partial penetration high power laser beam welding of thick aluminium parts [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013,60:309-321.
- [5] 白金. 铝合金磁控 MIG 焊接电弧特性及焊缝组织性能的研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2017.
- [6] 刘玉项,王启伟,朱胜. 励磁电流对 6061 铝合金 MIG 焊熔敷层组织及性能的影响[J]. 焊接技术,2021,50(5):12-16.
- [7] 常云龙,邵礼光,李多,等. 外加纵向磁场作用下的 MIG 焊电弧形态[J]. 焊接技术,2009,38(5):14-16.
- [8] 王宗杰. 熔焊方法及设备 [M]. 北京:机械工业出版社,2006:28-29.
- [9] 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. 