

外加同步磁场对短路过渡 CO₂ 焊接过程的影响

邹文凤¹, 李逸文¹, 梅强¹, Babkin Aleksandr², 常云龙¹

(1. 沈阳工业大学, 沈阳, 110870; 2. 俄罗斯利佩茨克国立技术大学, 利佩茨克, 398024)

摘要: 短路过渡 CO₂ 气体保护焊由于低成本、高效率、便于实现全位置焊接, 广泛应用于工业制造领域, 但是在焊接过程中, 特别是在较高的焊接电流下, 存在许多诸如飞溅, 成形差, 过渡过程不稳定等问题. 文中提出了一种通过施加同步磁场来改善焊接中存在的问题的新方法. 研究了不同类型的燃弧段同步磁场对焊接过程的影响. 用激光作为背光, 采用高速摄像系统拍摄焊接过程, 观察熔滴过渡过程, 计算熔滴的大小和过渡频率等. 结果表明, 在纵向同步磁场的作用下, 可以有效地减少燃弧时间; 施加同步磁场后, 熔滴过渡频率范围都得到不同程度的缩小, 熔滴过渡过程更稳定, 并且在纵向磁场 $I_m(LMF) = 200$ A 时, 熔滴的过渡频率大幅增加; 磁场作用下, 带尖角的熔滴变为圆润无尖角的球形或椭球的熔滴, 熔滴的尺寸减小.

关键词: 短路过渡; 同步磁场; CO₂ 焊接; 熔滴过渡频率; 熔滴形态

中图分类号: TG 444⁺.2

文献标识码: A

doi: 10.12073/j.hjxb.20200313002

0 序言

CO₂ 气体保护焊由于成本低, 效率高, 易实现全位置焊接而被广泛使用, 但是焊缝成形差, 熔深浅, 焊接过程中存在金属飞溅等缺点, 阻碍了其进一步的发展及应用^[1-2]. 现已提出了多种改善 CO₂ 气体保护焊接技术的方法, 首先是波形控制技术, 如美国林肯公司的 STT 技术^[3] 和 Miller 公司的 RMD 技术^[4], 奥地利 Fronius 公司的 CMT 技术^[5], 日本 OTC 公司的 CBT 技术^[6] 等等, 使用以上方法获得的焊缝美观、成形良好, 同时具过渡过程稳定及飞溅低的特点, 非常适用于铝合金及薄板的焊接^[7], 这几种技术在小电流焊接时效果显著, 但是当焊接电流较高时, 使用该技术难以获得理想的效果. 其次, 改变保护气体的成分也可以解决 CO₂ 气体保护焊存在的问题, 例如 CO₂ + Ar^[8], Ar + CO₂ + O₂^[9], Ar + H₂ + CO₂^[10] 等. 再次, 在焊丝中加入稀土元素也是减少飞溅、细化显微组织并改善焊缝成形的有效方法^[11-12]. 此外, 还有学者将磁场引入焊接技术领域以提高 CO₂ 气体保护焊的焊接质量, 包括纵向

磁场, 横向磁场和尖角磁场, 统称为电磁焊接技术——EMW^[13-14]. 磁场的引入对减少 CO₂ 气体保护焊接过程中的飞溅、细化晶粒及改善焊缝成形有一定的作用^[15-17], 但都是基于恒定无序磁场的随机引入, 而没有考虑焊接电流波形与励磁电流波形之间的相位关系. 因此, 外加磁场不能与每次熔滴过渡同步, 并且难以实现精确控制.

现有的技术方法主要针对小电流的短路过渡 CO₂ 焊接, 当采用大电流焊接时, 用这些技术方法不能有效地解决 CO₂ 焊接存在的问题. 磁控焊接技术是近年来研究人员提出的一种新方法, 磁场的引入有望解决大电流 CO₂ 焊接时诸如飞溅和焊缝成形的问题. 文中采用一种新的磁场控制方法——燃弧阶段外加同步磁场, 对较大电流短路过渡 CO₂ 焊接过程展开了研究.

1 试验方法

试验采用 400 mm × 50 mm × 5 mm 的低碳钢板 (Q235) 作为母材, 焊丝为 $\phi 1.2$ mm 的 H08Mn2Si, 保护气体为纯 CO₂ 气体. 文中采用奥太公司型号为 MAG-350RL 的焊机, 根据自主改装的 MCWE-315 III 型号焊机作为励磁电源. 试验前, 必须清洁钢板表面.

文中采用了四种不同的焊接电流分别对应不

收稿日期: 2020-03-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51575362、51275314); 沈阳市“双百”资助项目 (Z17-5-70); 俄罗斯联邦教育和科学部高级领导人才引进 GDAS 计划资助项目 (2016GDASRC-0106).

同的磁场参数,包括纵向磁场(longitudinal magnetic field, LMF)和横向磁场(transverse magnetic field, TMF),试验参数如表1所示. 试验使用自行研发的磁控制装置来完成磁场的引入,试验设备及系统结构如图1所示. 通过数据采集卡和霍尔传感器耦合并跟踪CO₂焊接过程,从而将磁脉冲信号准确地添加到每个熔滴过渡周期的燃弧阶段以实现如图2所示的同步控制. 采用激光作为背光,FASTCAN Mini UX50AX高速摄像系统拍摄熔滴过渡过程,同时采集焊接电流和磁脉冲的波形,通过计算机来观察分析熔滴过渡过程和波形图像.

表1 试验参数
Table 1 Experimental parameters

磁场类型	励磁电流 I_m /A	焊接电流 I /A	焊接电压 U /V
纵向/横向	100/200	140/160/180/200	21~26

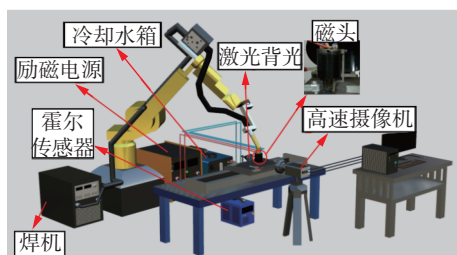


图1 试验设备结构图

Fig. 1 Structure of the experimental equipment system

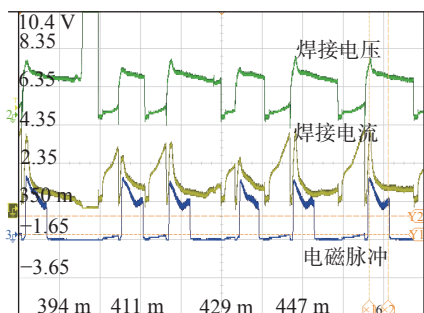


图2 同步磁场波形图

Fig. 2 Waveform of synchronous magnetic field

2 结果与分析

2.1 同步磁场对燃弧时间的影响

图3为焊接电流与燃弧时间之间的关系,在无磁场的情况下,随着焊接电流的增加,燃弧时间也增加. 引入磁场后,曲线有明显变化. 在励磁电流100 A和200 A的纵向磁场下,燃弧时间呈波动性减小. 当焊接电流从140 A增加至160 A,纵向磁场励磁电流200 A下,燃弧时间从10.4 ms减少到

7.9 ms,但是焊接电流为180 A时,燃弧时间又增加到10.0 ms,接近于无磁场的10.3 ms,在焊接电流为200 A时,横、纵磁场作用下,燃弧时间均减少,平均燃弧时间从14.2 ms缩短为7.1 ms,仅为原来燃弧时间的一半. 在磁场作用下,燃弧时间随焊接电流的增加而减少,即磁场可以减少焊丝的熔化时间,同一时间内会产生更多的熔滴,从而提高焊接效率. 同时,燃弧时间的缩短熔滴尺寸也随之减小.

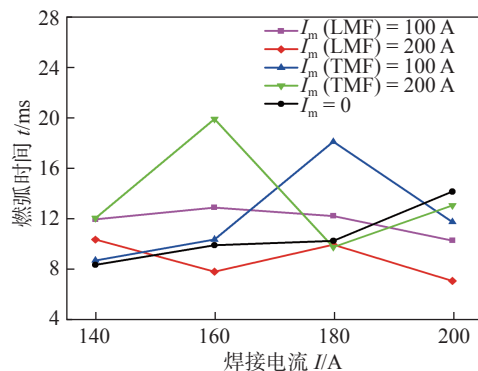
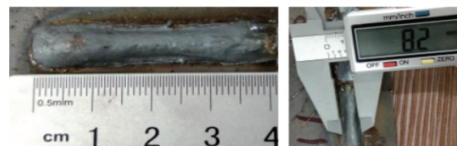


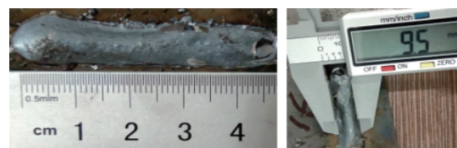
图3 不同磁场参数下平均燃弧时间

Fig. 3 Average arcing time in different parameters

随着焊接电流的增加,磁场的作用越来越显著,在磁场作用下燃弧时间保持在一个稳定的范围内,燃弧更加稳定. 纵向磁场在平行于焊枪的方向上产生磁感线,电弧和熔滴在磁场的作用下被迫发生旋转^[18]. 在相同的焊接电流下,单位面积的热输入低于无磁场时的焊接过程,因此在小焊接电流下燃弧时间略有增加. 由于电弧高速旋转而扩张,电弧面积增加,并且电流密度在电弧的整个径向上呈双峰分布,因此熔宽增加,如图4所示;而电弧中心的能量密度减小,也使得熔深减小^[19]. 但是由于强大的电磁力迫使熔滴脱落至熔池后燃弧停止,因此在焊接电流200 A时燃弧时间缩短了.



(a) $I = 200$ A 无磁场

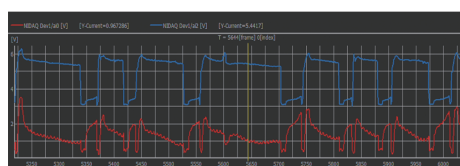


(b) $I = 200$ A 有磁场

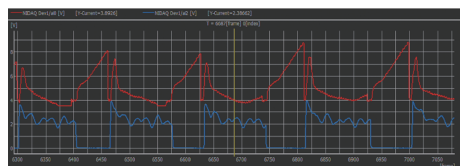
图4 不同参数下焊缝成形

Fig. 4 Weld formation in different parameters. (a) $I = 200$ A without magnetic field; (b) $I = 200$ A with magnetic field

图 5 为不同参数条件下焊接电流和电压的波形。可以看出,无磁场时,每个燃弧阶段,短路阶段和整个周期都是不同的,并且波动很大。而引入磁场后每个熔滴的过渡周期时间从不同变为近似相同,表明同步磁场在保持焊接稳定性方面起着至关重要的作用。将同步磁场精确地添加到每个燃弧阶段,从而影响焊丝的熔化,确保每个熔滴的过渡周期大致相等,并使每个熔滴的尺寸大致相等,从而使焊接过程更加稳定。



(a) 无磁场, 焊接电流 $I = 140$ A



(b) 纵向磁场, 励磁电流 $I_m = 200$ A, 焊接电流 $I = 140$ A

图 5 不同参数下的电流波形图

Fig. 5 Waveform of current in different parameters. (a) without magnetic field, welding current $I = 140$ A; (b) longitudinal magnetic field exciting current $I_m = 200$ A, welding current $I = 140$ A

2.2 同步磁场对熔滴过渡频率的影响

无磁场时, 140 A 至 200 A 不同焊接电流下的熔滴过渡频率范围如图 6a 所示, 引入磁场后, 4 个不同磁场参数下焊接电流与熔滴过渡频率范围之间的关系如图 6b ~ 图 6e 所示。在无磁场的情况下, 熔滴过渡频率的最大值和最小值曲线所围成的区域面积非常大, 最低点为 38.0 Hz, 最高点为 156.3 Hz。可以看出, 频率波动范围非常大。在各种磁场的作用下, 熔滴过渡频率曲线所围成的面积减小, 尤其是横向磁场的 d 和 e 组最为显著。

在纵向磁场中, 当焊接电流在 140 A 至 180 A 变化时, 熔滴过渡频率在一个稳定范围内波动, 该频率略低于原无磁场时的频率。但是在 $I = 200$ A 时, 熔滴的过渡频率瞬时增加, 两种励磁电流下的最大值分别达到 161.3 Hz 和 238.0 Hz, 平均值分别达到 91.9 Hz 和 160.0 Hz, 远远高于无磁场的最大值 (98 Hz) 和平均值 (68 Hz)。可以预见, 焊接电流越大, 磁场对熔滴过渡频率的影响越大。频率的增加意味着单位时间内脱落至熔池内的熔滴数量增加, 即焊丝的熔化量增加, 填充焊缝的金属质量提高, 焊接效率提高, 这对 CO_2 焊接是非常有利的。横向磁场时, 在各个电流参数下熔滴过渡频率曲线围成的面积都很小, 两种磁场参数下的最低点分

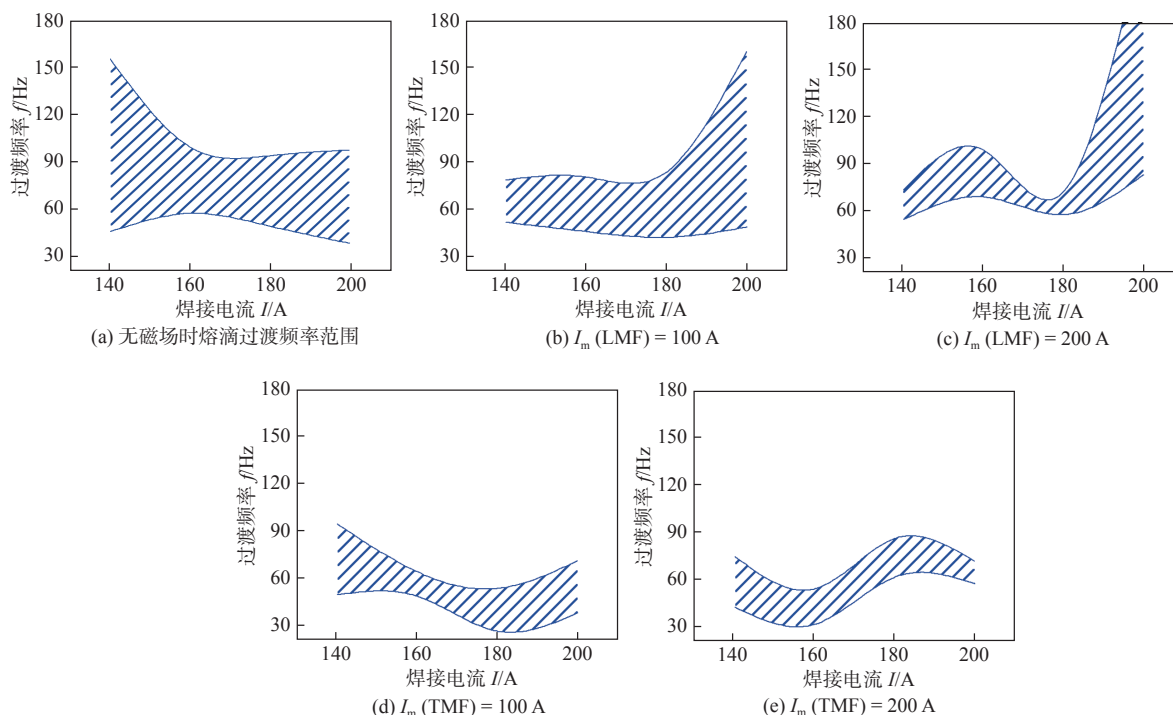


图 6 不同参数下熔滴过渡频率范围

Fig. 6 Droplet transfer frequency in different parameters. (a) the range of droplet transfer frequency without magnetic field; (b) $I_m(\text{LMF}) = 100$ A; (c) $I_m(\text{LMF}) = 200$ A; (d) $I_m(\text{TMF}) = 100$ A; (e) $I_m(\text{TMF}) = 200$ A

别是 35.2, 30.7 Hz, 最高点分别是 100, 86.2 Hz. 与无磁场时相比分别减少了 47.3, 52.8 Hz, 说明熔滴过渡频率波动范围缩小, 基本稳定在相应范围内, 侧面反映出引入磁场后过渡过程具有很好的稳定性, 焊接质量提高. 两种磁场相比, 纵向磁场可以提高熔滴过渡频率, 横向磁场可以提高熔滴过渡稳定性. 磁场引入后, 短路液桥内电流的径向分量会受到外加磁场的纵向分量产生的洛伦兹力作用, 对短路液桥产生径向向内的磁致压力作用. 这样, CO_2 焊短路液桥缩颈处, 除了受到重力、表面张力、爆破力、焊接电流产生的电磁力作用外, 还受到外加纵向磁场对它的径向向内的磁致压力作用, 从而促进熔滴脱落, 保证熔滴过渡频率的一致性.

2.3 同步磁场对熔滴形态的影响

在图 7 中可以看出在无磁场情况下, 燃弧开始时, 焊丝端部形成一个半球形略有尖角的熔滴并逐渐长大, 长大后熔滴中心不再位于焊丝正下方, 而是形成中心偏离焊丝轴线且带有尖角的熔滴, 然后与母材上的液态熔池接触后完成短路过渡过程. 引入同步磁场后, 熔滴的形态受到不同程度的影响, 主要是熔滴的形状和尺寸发生变化. 熔滴变为球形或椭球形, 形状圆润无尖角, 燃弧阶段熔滴始终保持这一形态长大, 直至与熔池接触完成脱落, 这与无磁场相比是一个明显的不同特征.

采用不同试验参数焊接时, 熔滴的尺寸不同. 图 8 是不同试验参数下随机选取的 10 个过渡过程

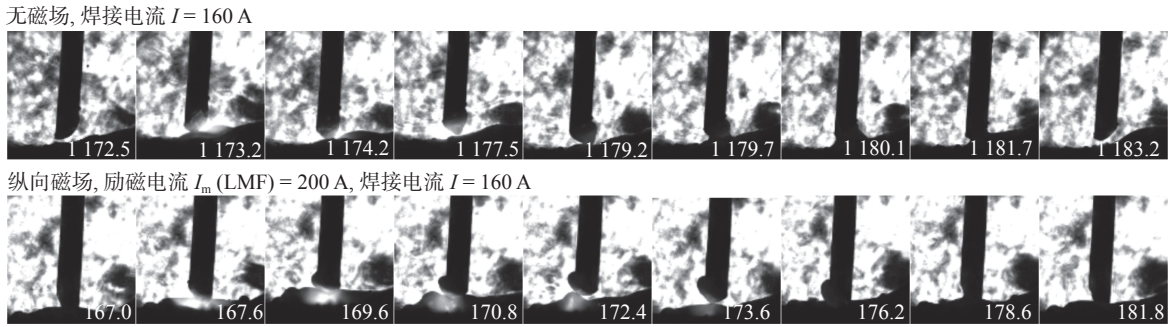


图 7 不同参数下熔滴过渡过程 (ms)

Fig. 7 Droplet transfer process in different parameters (ms)

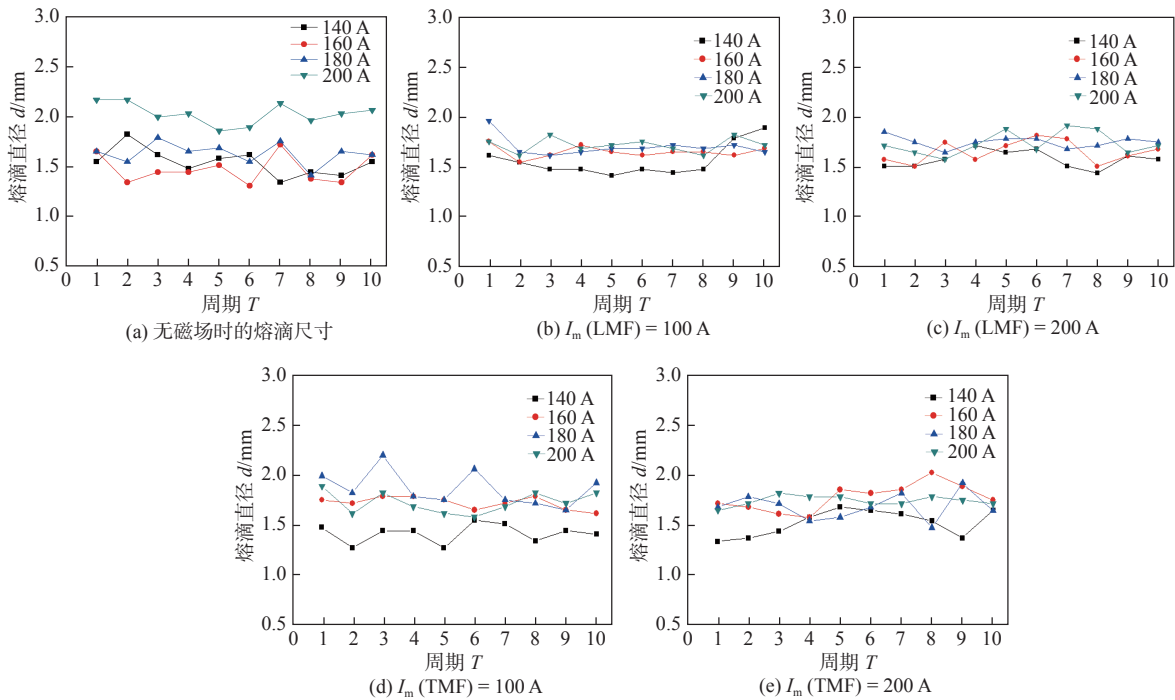


图 8 不同参数下的熔滴尺寸

Fig. 8 The dimension of droplet in different parameters. (a) dimension of droplet without magnetic field; (b) I_m (LMF) = 100 A; (c) I_m (LMF) = 200 A; (d) I_m (TMF) = 100 A; (e) I_m (TMF) = 200 A

的熔滴尺寸情况,以熔滴直径作为 Y 轴的变化量。

图 9 为不同参数下熔滴尺寸的平均值。无磁场情况下,焊接电流在 140 ~ 180 A 范围变化时,熔滴尺寸基本在 1.6 mm 上下波动,每个焊接参数下熔滴尺寸的最大值与最小值之间有比较大的差距,波动变化比较明显;而焊接电流 200 A 时,熔滴尺寸整体增加了约 0.4 mm,在 2.0 mm 上下波动,随着电流的增加,熔滴尺寸也有一定幅值的增加。引入磁场后,这个现象消失了,4 种磁场参数下都可以看到不同焊接电流时,熔滴尺寸波动不明显,熔滴尺寸并没有随着焊接电流的增加出现大幅的增加,可以维持在一个相对稳定的尺寸范围内。其中纵向磁场、励磁电流 100 A 时,对熔滴尺寸的控制效果最为显著,可以看到 4 条曲线都在比较小的范围内波动,曲线的重合度非常高,即磁场的引入可以将熔滴尺寸控制在一定的范围内,改善了无磁场时熔滴尺寸不一的情况。结合误差曲线可以更直观的观察这一变化。

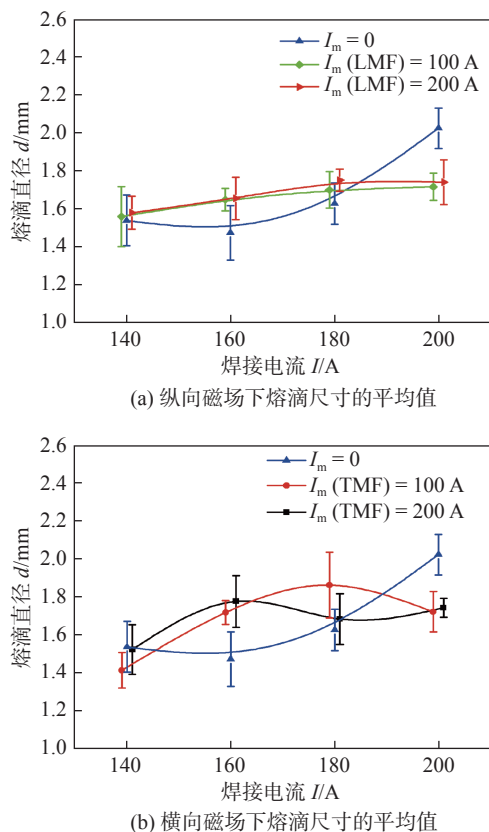


图 9 不同参数下熔滴尺寸的平均值

Fig. 9 Average dimension of droplet in different parameters. (a) the average dimension of droplet in longitudinal magnetic field; (b) the average dimension of droplet in transverse magnetic field

两图中的蓝色曲线是无磁场时熔滴尺寸的平均值曲线,比较可知,在熔滴尺寸控制方面纵向磁

场的作用效果较好,获得的曲线较为平滑,误差也较小,励磁电流 100, 200 A 的最小误差在焊接电流 160, 180 A 处取得,均为 0.058,表明熔滴尺寸的变化很小,保证了每个周期内的熔滴尺寸基本一致的条件。而在大焊接电流 200 A 时,横向磁场的作用突出的体现出来,将熔滴尺寸的平均值控制在 1.74 mm,误差也只有 0.051,比同等条件下的其它磁场参数取得的效果都要显著,但是 4 种磁场参数下,都把原来的熔滴尺寸缩小了,防止了大电流大熔滴现象的发生。

熔滴尺寸发生变化是由于电流的轴向和径向分量分别与磁场的横向和纵向分量的相互作用,产生的洛伦兹力对熔滴施加额外的控制作用,使熔滴的尺寸缩小;而电流方向与磁场方向一致时,没有洛伦兹力产生,对熔滴无影响。电流的轴向分量与磁场的横向分量产生洛伦兹力方向垂直于焊丝轴线向外,而电流的径向分量与磁场的纵向分量在焊丝轴线的两侧产生的洛伦兹力方向相反,垂直于焊丝轴线向内或向外。在同一侧时(焊丝轴线右侧),电流的轴向分量与径向分量产生的洛伦兹力会相互抵消一部分,磁场的横向分量越强,磁场对熔滴的控制作用越弱^[20],因而当施加纵向磁场和横向磁场时,前者的熔滴尺寸要小于后者。随着焊接电流的增加,与磁场作用的电流也增大,产生的洛伦兹力也相应增大,因此熔滴尺寸也减小更多。

3 结论

(1) 纵向磁场时,燃弧时间随着焊接电流的增加而减少,并且焊接电流越大,减少越多,在 $I = 200$ A, I_m (LMF) = 200 A 时,由平均燃弧时间由 14.2 ms 减小到 7.1 ms。

(2) 小焊接电流时 (140 ~ 180 A), 在两种磁场作用下熔滴过渡频率范围都得到了不同程度的缩小,熔滴过渡的稳定性得到提高,且横向磁场比纵向磁场的作用效果更加显著。但 $I = 200$ A 时,熔滴过渡频率显著提高,并在 I_m (LMF) = 200 A 时,平均过渡频率由原来的 68 Hz 提高到 160 Hz,焊接电流越大,频率提升越大。

(3) 同步磁场作用下,熔滴变成圆润的球形或椭圆形,同一焊接参数下,熔滴尺寸趋于一致。纵向磁场时,随着焊接电流的增加熔滴尺寸缓慢增加,并且在大电流 $I = 200$ A 时熔滴的平均直径由原来

的2.02 mm减小至1.71 mm,避免了大电流大熔滴现象。

参考文献

- [1] Jiang S Y, Wang X W, Chen H M, *et al.* The impact of adscitious longitudinal magnetic field on CO₂ gas shielded welding process[J]. *Advanced Materials Research*, 2012(538-541): 1447 - 1450.
- [2] 常云龙, 刘晓龙, 路林, 等. 短路过渡 CO₂ 焊研究现状及展望 [J]. *焊接技术*, 2013, 42(3): 1 - 5.
Chang Yunlong, Liu Xiaolong, Lu Lin, *et al.* Current status and prospects of short-circuit transition CO₂ gas shielded welding[J]. *Welding Technology*, 2013, 42(3): 1 - 5.
- [3] 李兴霞, 赵干. STT 焊接技术的研究与应用现状 [J]. *焊管*, 2013, 36(4): 23 - 26.
Li Xingxia, Zhao Gan. Research and application status of STT welding technology[J]. *Welding Pipe and Tube*, 2013, 36(4): 23 - 26.
- [4] Furukawa K. New CMT arc welding process - welding of steel to aluminium dissimilar metals and welding of super-thin aluminium sheets[J]. *Welding International*, 2006, 20(6): 440 - 445.
- [5] Prajapati V, Vora J J, Das S, *et al.* Experimental studies of regulated metal deposition (RMDTM) on ASTM A387 (11) steel: study of parametric influence and welding performance optimization[J]. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2020, 42(78): 1 - 21.
- [6] Ueyama T. Development of low heat input and spatter reduction CO₂/MAG alternating current welding system by controlled bridge transfer process[J]. *Electric Welding Machine*, 2009, 39(9): 10 - 13.
- [7] Pickin C G, Young K. Evaluation of cold metal transfer (CMT) for welding aluminium alloy[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2006, 11(5): 583 - 585.
- [8] Teixeira G S, Mazzaferro J A E. GMA welding metal transfer mode study by high-speed imaging and electrical signal acquisition[J]. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2019, 41(8): 315 - 327.
- [9] 刘静, 隋国欣, 王明山, 等. 机车车体 Q345E 钢 Ar + CO₂ + O₂ 三元混合保护气体 MAG 焊接头的组织和性能 [J]. *电焊机*, 2017, 47(5): 104 - 108.
Liu Jing, Sui Guoxin, Wang Mingshan, *et al.* Microstructure and mechanical properties of welded joints of MAG welding with Ar + CO₂ + O₂ ternary mixed shielding gas of steel Q345E for locomotive and rolling stock body[J]. *Electric Welding Machine*, 2017, 47(5): 104 - 108.
- [10] Lincon L S, Tiago V C, Carlos E N B. Benefits from H₂ and CO₂ additions in argon gas mixtures in GMAW[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 249: 158 - 166.
- [11] Vimalraj C, Kah P, Layus P, *et al.* High-strength steel S960QC welded with rare earth nanoparticle coated filler wire[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 102: 105 - 119.
- [12] Methong T, Yamaguchi T, Shigeta M, *et al.* Effect of rare earth metal on plasma properties in GMAW using CO₂ shielding gas[J]. *Welding in the World*, 2017, 61: 1039 - 1047.
- [13] Wu H, Chang Y L, Lu L, *et al.* Review on magnetically controlled arc welding process[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 91: 4263 - 4273.
- [14] Luo Q, Lu D M, Luo J. Droplet transfer and microstructure of Q235 steel thick plate using CO₂ welding with additional longitudinal magnetic field controlling[J]. *Advanced Materials Research*, 2010(102-104): 451 - 454.
- [15] Nosov D G, Peremitko V V. Influence of frequency and induction of longitudinal magnetic field on the electrode metal loss and its spattering during MAG-welding[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2015, 91: 12 - 18.
- [16] 常云龙, 杨殿臣, 魏来, 等. 外加横向磁场对高速 TIG 焊缝形成的影响 [J]. *焊接学报*, 2011, 32(3): 53 - 56.
Chang Yunlong, Yang Dianchen, Wei Lai, *et al.* Influence of magnetic controlled technology on formation of high-speed TIG welding[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2011, 32(3): 53 - 56.
- [17] Chang Yunlong, Yang Xu, Che Xiaoping, *et al.* Grain refinement and improved properties through electromagnetic stirring in Al alloy MIG welds[J]. *China Welding*, 2008, 17(3): 77 - 80.
- [18] Liu Y B, Sun Q J, Wang H, *et al.* Effect of the axial external magnetic field on copper/aluminium arc weld joining[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2016, 21(6): 460 - 465.
- [19] 江淑园, 陈焕明, 熊震宇. 外加磁场对 CO₂ 焊接焊缝形成的影响 [J]. *焊接技术*, 2006(2): 5 - 30.
Jiang Shuyuan, Chen Huanming, Xiong Zhenyu. Effect of external magnetic field on the weld formation of CO₂ welding[J]. *Welding Technology*, 2006(2): 5 - 30.
- [20] 罗键, 贾昌申, 王雅生, 等. 外加纵向磁场 GTAW 焊缝成形机理 [J]. *焊接学报*, 2001, 22(3): 19 - 22.
Luo Jian, Jia Changshen, Wang Yasheng, *et al.* Mechanism of GTAW weld formation with external longitudinal magnetic field[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2001, 22(3): 19 - 22.

第一作者简介: 邹文凤, 1996 年出生, 硕士研究生, 主要从事先进焊接工艺的研究; Email: 13204029676@163.com.

通信作者简介: 常云龙, 博士, 教授; Email: sychyl@163.com.