

引用格式:马汉勇,邹文凤,靖微.CO₂气体保护焊研究现状[J].热加工工艺,2025,54(1):28-32.
DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.20222401
http://www.rjggy.net rjggy@vip.163.com

CO₂ 气体保护焊研究现状

马汉勇, 邹文凤, 靖 微

(中国兵器工业集团江山重工研究院有限公司, 湖北 襄阳 441005)

摘 要:CO₂ 气体保护焊是发展较早的一种电弧焊接技术,因低成本、高效率、易操作等特点而被广泛应用,但在焊接过程中也存在着缺点,如飞溅大、成形差等,限制了其进一步推广和应用。随着 CO₂ 焊技术的发展,国内外学者针对 CO₂ 焊接存在的问题提供了一系列的解决方案。文中从焊接电源控制技术、改变保护气配比、焊丝成分优化及磁场辅助焊接四个方面对国内外的研究进展进行了综述。

关键词:CO₂ 气体保护焊;焊接电源;保护气;焊丝;磁场辅助

中图分类号:TG434.5;TG444'.73

文献标识码:A

文章编号:1001-3814(2025)01-0028-05

Research Status of CO₂ Gas Shielded Welding

MA Hanyong, ZOU Wenfeng, JING Wei

(China North Industries Group Jiangshan Heavy Industry Research Institute Co., Ltd., Xiangyang 441005, China)

Abstract:CO₂ gas shielded welding is an early developed arc welding technology, which is widely used due to its low cost, high efficiency, easy operation and other characteristics. However, there are also disadvantages in the welding process, such as high spatter and poor forming, which limits its further promotion and application. With the development of CO₂ gas shielded welding technology, the scholars in China and foreign countries provided a series of solutions for the problems of CO₂ welding. The research status in China and foreign countries was summarized from four aspects of welding power control technology, change of protective gas ratio, welding wire composition optimization and magnetic field assisted welding.

Key words:CO₂ gas shielded welding; welding power; protective gas; welding wire; magnetic field assistance

CO₂ 气体保护焊是一种传统的电弧焊接技术,具有成本低廉、高效节能等特点,被广泛用于海洋船舶、工程机械、武器装备、航空航天等领域^[1]。但是 CO₂ 气体保护焊存在两大主要缺点:一是金属飞溅问题,二是焊缝成形差,易出现未焊透、咬边等缺陷。此外,其抗风能力差,只适用于室内作业^[2],限制了进一步推广和应用。

国内外研究学者对 CO₂ 气体保护焊开展了大量的研究,取得了一定成果并获得应用,主要包括焊接电源控制技术、改变保护气配比、焊丝成分优化及磁场辅助焊接等。本文从上述 4 个方面总结了各研究团队在 CO₂ 焊接领域的研究进展,并结合不同技

术手段的特点进行了简要分析。

1 焊接电源控制技术

早期,针对 CO₂ 焊接的飞溅问题,人们在电路中串联一个电感,来减缓焊接电流的上升率和控制瞬时电流幅值,控制电源的输出电感,进而改善焊接电源的动特性,实现低飞溅焊接。采用此方法,飞溅率降低了 40%以上,但仍有较大的提升空间^[3]。

1.1 表面张力过渡技术

表面张力过渡 (surface tension transfer, STT) 焊接技术是美国林肯公司在 20 世纪 90 年代发明的专利技术,是一种以表面张力促进熔滴过渡的熔化极气体保护焊接方法^[4]。林肯公司将高频的逆变技术与波形控制技术相结合,研发出专门用于 CO₂ 气体保护焊的 Inverter STT II 焊机^[5],可将焊接过程的飞溅量降低 80%~85%,其波形图如图 1 所示。图中 I_0 为最低短路电流; I_1 为基值电流; I_2 为短路初值电流; I_3 为短路峰值电流; I_4 为燃弧峰值电流; U_0 为燃弧电压; W 为燃弧脉冲宽度; T_d 为尾拖时间。STT 技术重

收稿日期:2022-08-31

作者简介:马汉勇(1977-),男,湖北天门人,正高级工程师,硕士,主要从事武器装备焊接工艺及自动化、材料成型工艺方面研究;

E-mail:870013897@qq.com

通讯作者:邹文凤(1996-),女,辽宁鞍山人,助理工程师,硕士,主要研究方向:焊接工艺及自动化、电弧增材制造;

E-mail:13204029676@163.com

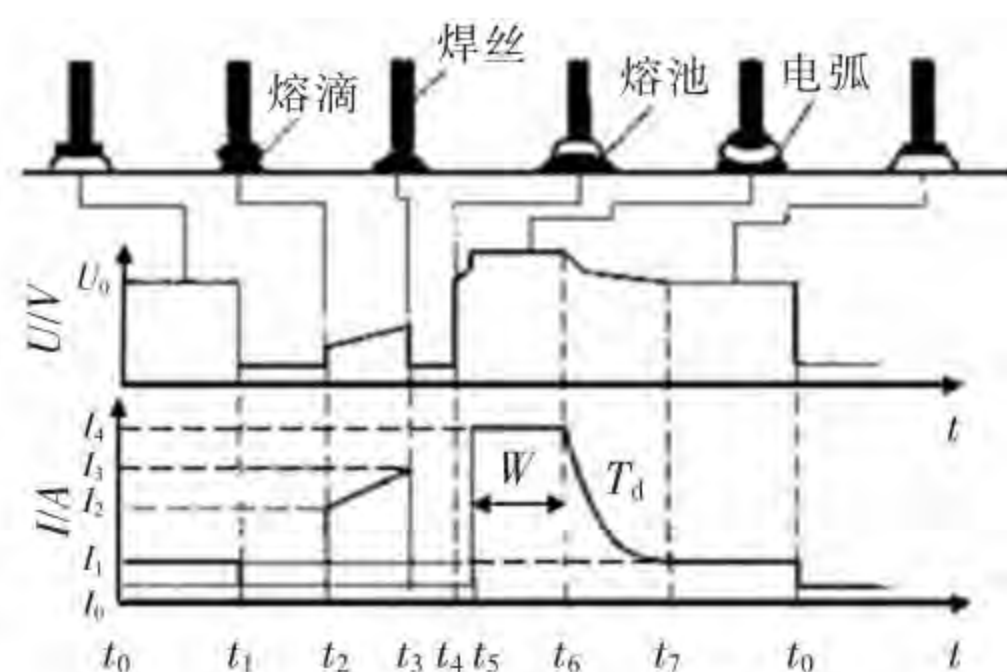


图1 表面张力过渡波形图

Fig.1 Surface tension transfer waveform

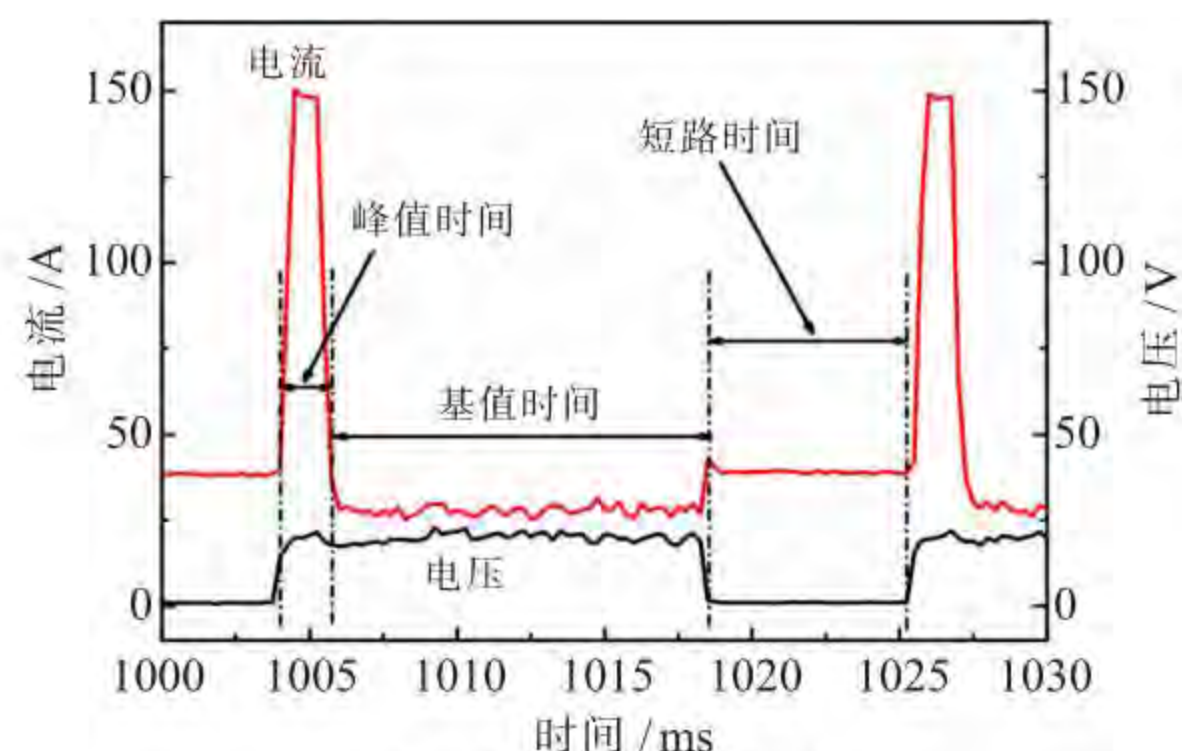


图2 CMT 过渡波形图

Fig.2 CMT transition waveform

点解决 CO₂ 焊接短路过渡后期液态“小桥”汽化爆断问题,核心在于当焊接电源检测到短路液桥形成缩颈时,瞬时降低电流,让熔滴依靠自身重力、表面张力、电磁力的作用发生脱落,形成自由过渡。其实质是通过检测电弧电压的变化来判断熔滴过渡的瞬时状态,控制瞬时电流值,防止电流过大,进而依靠熔滴自身的重力和表面张力实现熔滴稳定过渡的目的^[6-7]。STT 焊接技术具有成本低、效率高、飞溅小等优点,并且焊缝成形美观、焊接质量好等,适用于薄板焊接及打底焊,已被广泛应用于汽车制造和管道工程等领域,但并不适用于中厚板材料焊接方面,存在局限性。

1.2 冷金属过渡技术

冷金属过渡技术(cold metal transfer, CMT)是奥地利的 Fronius 公司在 2004 年提出的一种以熔滴短路过渡为基础的改进型熔化极气体保护焊接工艺方法^[8]。CMT 技术采用了一种数字化控制系统,将短路过渡与送丝相结合,形成脉动送丝模式,实现了低热输入焊接^[9]。其工作原理是控制系统捕捉到短路信号后反馈至送丝系统,由送丝系统提供回抽力,将焊丝回抽,迫使熔滴依靠自身惯性脱落^[10]。CMT 技术是以熔滴过渡周期为基础,将一个周期分为峰值电流阶段、基值电流阶段和短路阶段共 3 个阶段(图 2),分析各阶段的电流、电压特点来进行控制。在整个焊接过程中实现了“冷-热”的交替循环模式,回抽次数达到每秒约 70 次,热输入显著降低,焊缝区组织致密、晶粒细小,力学性能表现良好^[11]。

1.3 短路过渡控制技术

短路过渡控制技术 (controlled bridge transfer, CBT)是日本 OTC 公司研发的一种受控搭桥过渡的焊接方法,以电弧自身作为传感器,当短路发生时,迅速减小焊接电流,防止产生飞溅^[12]。再通过检测在短路发生的一小段时间内的标准电压偏差量,可以用来预测电弧复燃所需时间,在电弧复燃前降低电流值,熔

滴依靠自身的表面张力过渡,完成几乎无飞溅的短路过渡过程,详细过程如图 3 所示^[13]。分别采用传统短路过渡方式和 CBT 过渡方式进行焊接时,二者对比可以看出采用 CBT 焊接方法获得的焊缝质量优良,焊缝内的夹杂物数量少,针状铁素体占比小^[14]。

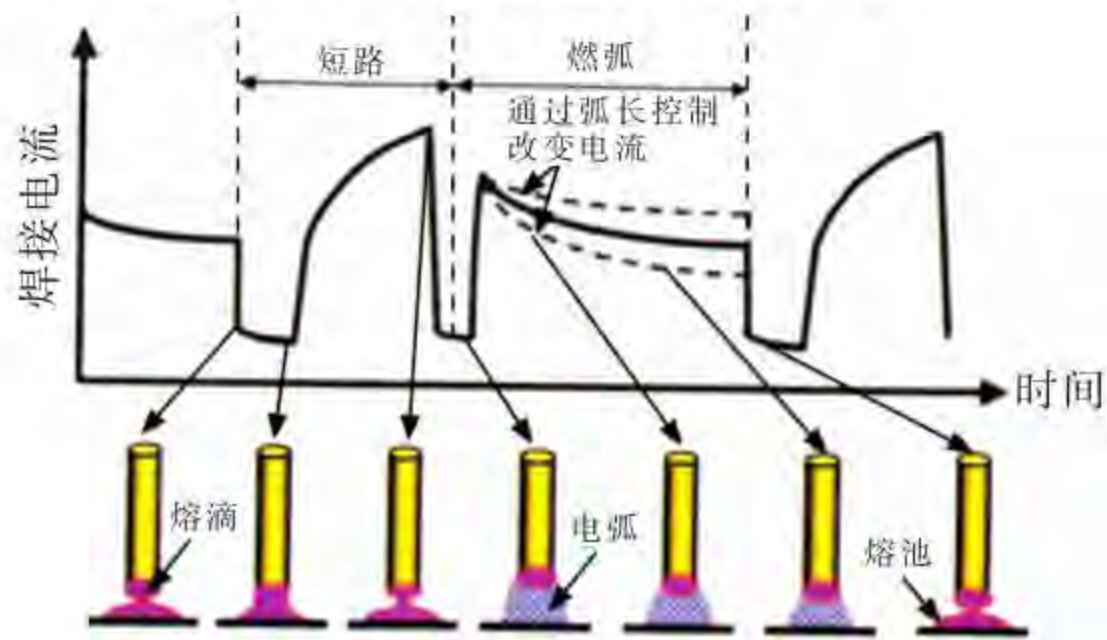


图3 CBT 过渡波形图^[13]

Fig.3 CBT transition waveform^[13]

美国 Miller 公司在 2004 年提出的一种控制液态金属过渡方式的专利技术 (regulated metal deposition, RMD),使短路过渡过程可以得到更加精确的控制,是基于短路过渡 GMAW 焊接工艺软件研发的熔敷金属过渡技术。通过监测焊接过程,对电流大小和电流上升速度进行调控,控制熔滴过渡过程,熔滴呈规律性脱落^[15-16]。将熔滴过渡过程细分为 7 个阶段,GMAW 焊接工艺软件的每个程序各个阶段的电流波形根据电流大小自动优化到最佳的电弧特性,如图 4 所示。

1.4 闭环波形控制技术

张鹏贤等^[17]针对短路过渡的 CO₂ 焊接过程设计了一套电流波形在线自适应控制系统,焊接过程的稳定性和飞溅量等由熔滴过渡频率和电弧声能量来表征和传感,建立了焊接规范和波形控制参数的神经网络优化模型,运用 PID 参数的双闭环波形控制实现对 CO₂ 焊接的在线自适应控制,从而实现了焊接规范和波形控制参数的自调节,提高了焊接质量。沙德尚等^[18]在原有的 CO₂ 逆变弧焊电源的基础上设计了新的准

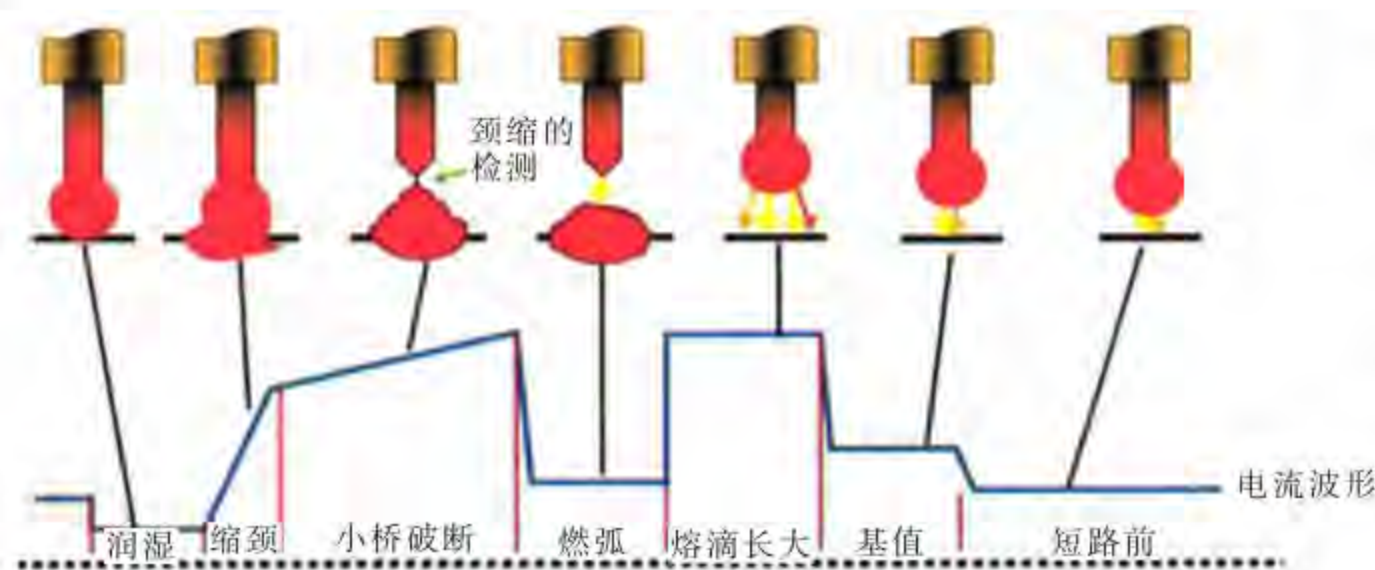


图4 RMD 过渡波形图
Fig.4 RMD transition waveform

恒压波形控制技术,使短路和燃弧过程自然过渡,而不根据电弧电压划分焊接过程,提高了系统的自适应性,构建的全数字闭环控制模型,可在短路初期采用瞬态电流控制达到降低飞溅的目的。结果表明,该方法使焊接过程更加稳定,焊缝成形质量良好。

2 改变保护气配比

电源控制技术只是解决 CO_2 焊接问题的一种途径,通过改变保护气配比,向 CO_2 保护气中加入其他气体成分,形成混合保护气,对降低焊接飞溅、提高焊缝成形质量也有较好的改善效果。

2.1 $\text{Ar}+\text{CO}_2$ 保护气

混合气体保护焊以 $\text{Ar}+\text{CO}_2$ 居多。李慧敏等^[19]通过汉诺威焊接质量分析仪对电压和电流信号进行采集,分析不同保护气体作用下的电弧特性,发现电弧的稳定性会受到电弧电压和电流的影响,同时熔滴过渡频率、飞溅大小、焊缝成形质量等也受其影响。研究发现选择 $80\%\text{Ar}+20\%\text{CO}_2$ 保护气进行保护,当电压为 18V 、电流为 220A 时,电弧的稳定性最好,获得的焊缝质量最佳。Wilhelm 等^[20]采用 $\text{Ar}+8\%\text{CO}_2$ 、 $\text{Ar}+18\%\text{CO}_2$ 和 $100\%\text{CO}_2$ 三种保护气对钢材进行焊接,发现在保护气中加入 Ar 气后,电弧中心径向温度分布存在一个最小值,而纯 CO_2 气体保护时不存在这一现象,同时采用 CO_2+Ar 混合保护气进行焊接时,可以提高电弧的温度,导电率、导热率也得到提升。Liskevych 等^[21]对 CO_2 和 Ar 混合气体保护焊展开了多种成分配比的焊接试验。结果表明,焊接飞溅随着 CO_2 占比的增加而增大,焊缝成形变差,同时熔深增大,进一步增加 CO_2 占比,熔宽变大,余高降低,如图 5 所示。当 CO_2 占比在 $10\%\sim 30\%$ 时,焊缝成形质量最好,飞溅量最小。

2.2 CO_2+O_2 保护气

Pozdeev^[22]对 $12\text{Kh}18\text{N}10\text{T}$ 钢进行了 $70\%\text{CO}_2+30\%\text{O}_2$ 混合气体保护焊试验,结果表明,焊缝的耐蚀性较好,焊接过程稳定。许江晓等^[23]采用 CO_2+O_2



图5 不同保护气体成分下的焊缝截面形貌
Fig.5 Cross-sectional morphologies of the weld beads under different contents of shielding gas

混合气体保护焊工艺对灰铸铁构件进行补焊,发现白口层的厚度明显减少,裂纹倾向小,补焊后的法兰无裂纹,使用质量稳定。裘荣鹏^[24]对奥氏体不锈钢进行了 Ar 、 CO_2 、 O_2 不同比例混合气体的保护焊接,研究不同气体成分分配比对焊接接头力学性能的影响,得出增加 CO_2 气体占比后,焊缝的硬度、冲击韧性下降;但是加入一定比例的 O_2 ,可抑制 CO_2 的分解,焊缝的力学性能得到控制。

2.3 其他类型混合保护气

Schafrański 等^[25]针对 $\text{Ar}+\text{CO}_2$ 、 $\text{Ar}+\text{H}_2$ 、 $\text{Ar}+\text{CO}_2+\text{H}_2$ 几种保护气,按照不同配比进行试验,结果表明:采用 $\text{Ar}+8\%\text{CO}_2$ 混合气保护时,熔敷效率高、焊缝的润湿效果最好;采用 $\text{Ar}+5\%\text{H}_2$ 混合气保护时,焊丝熔化率更高;采用 $\text{Ar}+5\%\text{H}_2+7\%\text{CO}_2$ 混合气保护时,熔敷效率和焊丝熔化率最高,且焊缝的润湿效果较好。曾锋^[26]通过调整保护气体的成分及焊枪的倾角研究其对脉冲熔化极气体保护焊铸造铝合金和锻造铝合金的搭接焊缝中气孔数量和分布的影响规律,当保护气体中加入 He ,可以提高电弧温度,有利于气体的逸出;加入 CO_2 后可以与 H 反应,减少氢气孔的数量,最终确定最佳的保护气体成分配比为 $39\%\text{Ar}+1\%\text{CO}_2+60\%\text{He}$,焊枪倾角为 40° 。在此参数下搭接接头内的气孔数量最少。

3 焊丝成分优化

3.1 加入稀土金属

焊丝成分是获得良好焊接质量的重要因素。近年来,国内外研究学者通过向焊丝中添加稀土金属来改善焊接质量。Tokihiko 等^[27]开展了焊接极性和含稀土金属焊丝对 CO_2 气体保护焊影响的研究。结果发现,当使用添加稀土成分的焊丝以直流负极性进

行焊接时,电弧形态呈锥形,熔滴以细小、连续形式稳定过渡,飞溅减少。陈锐等^[28]向药芯焊丝中加入稀土元素,自制高强钢焊丝进行焊接试验。结果表明,当稀土元素的含量在一定范围内时,焊缝组织均匀,低温冲击韧性和综合力学性能有一定程度提升,但当稀土元素的含量超过该范围后,焊缝力学性能降低。

3.2 加入活化剂

李培祖^[29]在现有 H08Mn2Si 焊丝两侧增加存放活化剂的横向沟槽,将活化剂粉末联合钾钠水玻璃混合后装入槽中,烘干后进行 CO₂ 气体保护焊接试验,确定了最优的活化剂成分配比,采用直流正接,当电流为 300~320 A、电压为 24 V 时,飞溅率为 2%。李存剑等^[30]将活化剂加入焊丝制成活化焊丝,当采用该焊丝进行 CO₂ 气体保护焊时,电弧的稳定性较好,熔滴呈细小颗粒过渡,飞溅率降低至 2%左右,焊接质量良好,力学性能较佳,其中冲击韧性可提高 2~3 倍。

4 磁场辅助焊接

磁场辅助焊接是在传统焊接方法的基础上外加磁场干预,利用外加磁场对通电介质产生的电磁压缩作用促进熔滴过渡、改变电弧形态的一种新型焊接技术。外加磁场包括横向磁场、纵向磁场以及尖角磁场三种类型,作用效果有一定差异,目前的研究成果以外加纵向磁场居多。江淑园等^[31-32]通过在焊枪上加装励磁线圈来实现纵向磁场辅助焊接,线圈通电后在其周围产生磁场,磁场强度大小可通过调节电流幅值来实现。大量试验表明:在磁场参数与焊接参数匹配的情况下,存在一个最佳参数范围,能够有效降低焊接过程中的飞溅,提升熔滴过渡频率,焊接过程更稳定。在外加纵向磁场作用下焊缝的熔深减小,熔宽增加,焊缝截面呈宽而浅的形状。华爱兵等^[33-35]采用磁场控制技术辅助 MAG 焊接,采用高速摄像拍摄电弧形态。结果表明,在外加纵向磁场作用下,电弧形态由原来相对“静态”的锥形变成高速旋转的螺旋状,增大线圈的励磁电流,电弧旋转角速度增加、弧长缩短、电弧电场强度提升,同时熔滴过渡频率和焊丝熔化系数增加。外加磁场产生的电磁搅拌作用对焊缝组织的细化有一定的促进作用。

常云龙等^[36-38]针对低频磁场和高频磁场均开展了 CO₂ 焊接试验研究,发现在中等焊接电流时,励磁电流和励磁频率参数在一定范围变化时,焊接飞溅明显减少,且焊缝成形较好,熔滴过渡频率也得到


提高。通过高速摄像对焊接电弧进行拍摄,得出在低频磁场下,当励磁电流为 1 A、励磁频率为 50 Hz 时,电弧形态发生显著变化,由锥形变为旋转的钟罩形。邹文凤等^[39]在 CO₂ 焊接过程的燃弧阶段施加同步纵向磁场和横向磁场,发现在纵向同步磁场作用下,可以有效减少燃弧时间,而且在两种同步磁场作用下,熔滴过渡频率范围均减小,过渡过程更加稳定。

5 结语

目前,电源波形控制技术已大量应用到机械制造行业,但是只限于小电流 CO₂ 焊接,大电流 CO₂ 焊接仍存在较大的提升空间。改用混合保护气焊接(多为 CO₂+Ar 混合保护气)方法也已应用到诸多领域,但是 Ar 气价格昂贵,生产成本相对较高。优化焊丝材料对改善焊接质量有显著效果,值得深入研究和探索。磁场辅助技术近年来得到了研究学者的广泛认可,取得了一定的成果,但因设备复杂、技术还未成熟等因素,距工程应用仍有一定差距,需不断研究和优化,向集成化、一体化方向发展。

参考文献:

- [1] 黄鹏飞,张华栋,马超,等. 逆变 CO₂ 焊接电源动特性对焊缝成形影响分析[J]. 热加工工艺,2019,48(9):227-229.
- [2] 代扬,杜孟启,郭飞阳. CO₂ 气体保护焊技术的现状及发展[J]. 建材与装饰,2017(42):176-177.
- [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.
- [4] Stava E K. Waveform control speeds root pass[J]. Welding Design & Fabrication,2001(2):552-559.
- [5] 范晓明. STT+CO₂ 自动焊接技术[J]. 焊管,2005,28(5):43-44.
- [6] 詹斌. STT 焊接技术[J]. 焊接技术,2010(s1):73-75.
- [7] 王广权,许艳霞. 管道焊接中的 STT 根焊技术应用[J]. 建材与装饰,2016(42):182-183.
- [8] 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.
- [9] Ahsan M R U, Kim T, Kim D B, et al. A study on the effect of wire composition on welding with gap and offset in cold metal transfer (CMT) GMAW [J]. Journal of Welding and Joining,2018,36(5):12-18.
- [10] Pickin C G, Williams S W, Lunt M. Characterisation of the cold metal transfer (CMT) process and its application for low dilution cladding [J]. Journal of Materials Processing Technology,2011,211:496-502.
- [11] 周士朝,朱浩,赵熠朋,等. 5086 铝合金 CMT 焊接接头微观组织及力学性能研究[J]. 热加工工艺,2017,46(21):35-42.
- [12] 武传松,王林,陈姬,等. 电弧焊接工艺高效化改型的研发进展[J]. 焊接,2013(8):1-10.

- [13] Era T, Ide A, Uezono T, et al. Controlled bridge transfer (CBT) gas metal arc process for steel sheets joining[J]. *Science & Technology of Welding & Joining*, 2013, 14(6):493-499.
- [14] Maja J, Zoran K, Branko B, et al. Effect of the GMAW metal-transfer mode on the weld-metal structure of HSLA X80 [J]. *Materiali in Tehnologije/Materials and Technology*, 2017, 51(3):449-453.
- [15] Woloszyn A C, Melton G, Sende M. Comparison of advanced MIG, MAG and TIG welding processes [C]// 65th Annual Assembly & International Conference of the International Institute of Welding. Denver, USA, 2012:9-11.
- [16] Prajapati V, Vora J J, Das S, et al. Experimental studies of regulated metal deposition (RMD™) 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.
- [17] 张鹏贤, 马跃洲, 陈剑虹, 等. CO₂ 焊电流波形在线自适应控制系统[J]. *焊接学报*, 2003, 24(5):17-20.
- [18] 沙德尚, 廖晓钟, 单立军, 等. CO₂ 气体保护焊的新型全数字化波形控制技术[J]. *焊接学报*, 2009, 30(12):33-36.
- [19] 李慧敏, 凌泽民, 何建. 混合气体保护焊焊接过程电弧特性分析[J]. *热加工工艺*, 2016, 45(11):232-235.
- [20] Wilhelm G, Kozakov R, Gött G, et al. Behaviour of the iron vapour core in the arc of a controlled short-arc GMAW process with different shielding gases[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2012, 45(8):1-11.
- [21] Liskevych O, Scotti A. Influence of the CO₂ content on operational performance of short-circuit GMAW[J]. *Welding in the World*, 2015, 59(2):217-224.
- [22] Pozdeev V N. Properties of welded seams in 12Kh18N10T steel which have been made in an atmosphere of CO₂ or a mixture of CO₂ and O₂[J]. *Chemical & Petroleum Engineering*, 1976, 12(11):1013-1014.
- [23] 许江晓, 李世涛, 赵永峰. CO₂+O₂ 混合气体保护焊补焊灰铸铁[J]. *热加工工艺*, 2009, 38(11):136-137.
- [24] 裘荣鹏. 保护气对奥氏体不锈钢药芯焊丝弧焊接头性能的影响[J]. *兵器材料科学与工程*, 2016, 39(4):53-57.
- [25] Schafranski L L, Cunha T V D, 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.
- [26] 曾锋. 铸造铝合金 GMWA 搭接焊缝气孔成因及消除措施的技术研究[J]. *机械设计与制造*, 2017(9):152-154.
- [27] Tokihiko K, Rinsei I, Moriaki O, et al. Effect of REM addition of wire on CO₂ gas shielded arc phenomenon [J]. *Welding International*, 2009, 23(7):517-522.
- [28] 陈锐, 王凯, 易耀勇, 等. 药芯焊丝的稀土元素对 921A 钢焊缝金属组织与力学性能的影响 [J]. *热加工工艺*, 2017, 46(5):9-13.
- [29] 李培祖. 活化焊丝对 CO₂ 焊工艺性能的影响[J]. *山东工业大学学报*, 1991, 21(1):93-96.
- [30] 李存剑, 王禄田, 张有为. 活化剂及其活化焊丝的工艺特性 [J]. *钢铁研究学报*, 1991, 3(S1):71-78.
- [31] 江淑园, 郑晓芳, 陈焕明, 等. 外加磁场对 CO₂ 焊飞溅的控制机理[J]. *焊接学报*, 2004, 25(3):65-67.
- [32] 江淑园, 陈焕明, 熊震宇. 外加磁场对 CO₂ 焊接焊缝成形的影响[J]. *焊接技术*, 2006, 35(2):5-6.
- [33] 华爱兵, 陈树君, 殷树言, 等. 外加纵向磁场对 MAG 焊焊缝成形的影响机理[J]. *北京工业大学学报*, 2010, 36(7):18-23.
- [34] 华爱兵, 殷树言, 陈树君, 等. 纵向磁场对 MAG 焊电弧及熔滴过渡的控制作用[J]. *机械工程学报*, 2010, 46(14):99-104.
- [35] 华爱兵, 陈树君, 张晓亮, 等. 纵向磁场作用下 MAG 焊电弧的动力学分析[J]. *焊接学报*, 2008, 29(6):56-59.
- [36] 常云龙, 刘明旭, 路林, 等. 外加纵向磁场对短路电弧与熔滴过渡的作用[J]. *焊接技术*, 2015, 44(5):23-27.
- [37] 常云龙, 白金, 刘丹, 等. 纵向磁场对 CO₂ 焊接电弧及焊缝成形的影响[J]. *沈阳工业大学学报*, 2016, 38(6):612-617.
- [38] Chang Y L, Liu M X, Lu L, et al. The influence of longitudinal magnetic field on the CO₂ arc shape [J]. *Plasma Science and Technology*, 2015(4):321-326.
- [39] 邹文凤, 李逸文, 梅强, 等. 外加同步磁场对短路过渡 CO₂ 焊接过程的影响[J]. *焊接学报*, 2020, 41(9):16-21. 

(上接第 27 页)

- [20] Li F, Li J, Rehman S U, et al. Pr₈₀Al₂₀ surface-coated DyF₃ modified sintered Nd-Fe-B magnets for large coercivity increment via grain boundary diffusion [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, 899:163270.
- [21] Yu H, Bao X, Li J, et al. Microstructure optimization and coercivity enhancement of Nd-Fe-B magnet by double-step diffusion with Pr₆₀Cu₂₀Al₂₀ alloy and Tb metal [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2022, 562:169743.
- [22] Zhong S, Munan Y, Rehman S U, et al. Microstructure, magnetic properties and diffusion mechanism of DyMg co-deposited sintered Nd-Fe-B magnets [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 819:153002.
- [23] Cao Y, Zhang P, Xu G, et al. Study on the corrosion resistance of (Nd, Dy)-Fe-B magnets obtained by grain boundary diffusion method [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2020, 57(1):1-6.
- [24] 赵苗苗, 张敏刚, 陈峰华, 等. 超高性能钕铁硼表面镀渗处理研究[J]. *中国稀土学报*, 2024, 42(1):53-61.
- [25] Bae K H, Lee S R, Kim H J, et al. Effect of oxygen content of Nd-Fe-B sintered magnet on grain boundary diffusion process of DyH₂ dip-coating [J]. *Journal of Applied Physics*, 2015, 118(20):203902.
- [26] Cheng X, Li J, Zhou L, et al. Influence of Al/Cu content on grain boundary diffusion in Nd-Fe-B magnet via in-situ observation [J]. *Journal of Rare Earths*, 2019, 37(4):398-403.
- [27] 李成灿, 许亿, 李国栋, 等. 高矫顽力烧结钕铁硼磁体重稀土减量研究进展[J/OL]. *中国稀土学报*:1-27[2023-03-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2365.TG.20230311.1533.004.html>. 