

Al-Cu-Mg-Ag 耐热合金的 CMT 电弧熔积特性

何智, 许知非, 盛卫星, 肖珺, 陈树君
(北京工业大学机械与能源工程学院, 北京 100124)

摘要: 【目的】针对 Al-Cu-Mg-Ag 耐热合金电弧增材制造的迫切需求, 采用冷金属过渡 (Cold metal transfer, CMT) 技术为基础的
电弧熔积工艺对 Al-Cu-Mg-Ag 合金进行了多工艺模式下的单层熔积, 并与常用 2319 合金的熔积效果进行全面对比, 反映该种
耐热合金的电弧熔积特性。【方法】通过高速摄像图像与实时电弧信号对熔积过程的电弧气氛、熔滴过渡特征与熔池流动特
性进行深入分析。【结果】研究表明, CMT + P 工艺模式下的沉积层宽度与高度均匀一致, 层间结合性更好, 此模式为最
佳的沉积工艺模式。Ag 元素的加入使 Al-Cu-Mg-Ag 合金在电弧熔积过程中形成的熔池具有更为良好的流动性和铺展性, 熔积
过程熔池的回流更为充分, 这导致了成形沉积层更光滑的表面。而 Ag, Mg 元素使 Al-Cu-Mg-Ag 合金具有的特别物理属性 (更
优异的电导性), 极大地改善了电弧的稳定性, 使熔滴过渡过程更为稳定柔顺。【结论】经验证, Al-Cu-Mg-Ag 合金可在 CMT
技术下实现良好的直壁构件增材制造成形。

关键词: Al-Cu-Mg-Ag 合金; 电弧熔积; 熔滴过渡; 增材制造

中图分类号: TG457 文献标识码: A doi: 10.12073/j.hj.20240826004

CMT arc-depositing characteristics of Al-Cu-Mg-Ag heat-resistant alloys

HE Zhi, XU Zhifei, SHENG Weixing, XIAO Jun, CHEN Shujun
(College of Mechanical & Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: [Objective] In response to the urgent need for wire arc additive manufacturing of Al-Cu-Mg-Ag heat-resistant alloy, arc-depositing
process based on cold metal transfer (CMT) technology is used to deposit Al-Cu-Mg-Ag alloy in a single layer with multiple process modes.
Moreover, its depositing effect is comprehensively compared with that of the commonly used 2319 alloy to reflect arc-depositing characteristics
of the heat-resistant alloy. [Methods] Arc atmosphere, transition characteristics of molten droplets and flow characteristics of molten pool
during the depositing process are thoroughly analyzed by high-speed camera images and real-time arc signals. [Results] The results showed that
under CMT + P process mode, width and height of the deposited layers are uniform, and interlayer bonding is better, the mode is the best
depositing process mode. Addition of Ag element makes molten pool of Al-Cu-Mg-Ag alloy have better fluidity and spreading during the arc-
depositing process, and reflux of molten pool is more adequate during the depositing process, which results in the smooth surface of the formed
deposited layer. Ag and Mg elements make Al-Cu-Mg-Ag alloy have special physical property (better conductivity), which greatly improves
stability of arc, resulting in a more stable and smoother transition of molten droplets. [Conclusion] It has been proven that Al-Cu-Mg-Ag alloy
can achieve good formation of straight-walled component with wire arc additive manufacturing under CMT technology.

Key words: Al-Cu-Mg-Ag alloy, arc-depositing, transition of molten droplets, wire arc additive manufacturing

0 前言

2xxx 系耐热铝合金因其优异的强度和出色的耐

高温性能被广泛应用于航空航天领域。随着航空航
天装备制造领域的飞速发展, 对耐高温材料的需求
日益增长^[1-2]。其中, 航空工业对铝合金材料服役温

收稿日期: 2024-08-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52275304)

度的要求也越来越高^[3]。近年来,学者们发现:向高Cu-Mg含量比的Al-Cu-Mg合金添加少量Ag元素,可通过形成Mg-Ag团簇进而改变合金的时效过程,使最终的合金中析出一种弥散分布的细小针状热稳定相(Ω 相)^[4-5],该相长期在200~250℃高温环境下也不会聚集长大,因此,Al-Cu-Mg-Ag合金被研究人员们广泛关注^[6]。

由于目前中国航空航天装备制造业正向着轻量化、结构功能一体化的方向快速发展,传统的铸造等材料制备工艺已无法满足当前大型复杂结构件的生产需求。因此,增材制造成为解决这一困境的关键技术。由于增材制造技术采用逐层沉积材料的方式,不受生产零件尺寸限制的同时可大幅缩短生产周期,这为大型航空航天结构件的生产提供了优质的解决方案。而采用电弧熔丝技术的电弧增材制造技术以其低成本、高材料利用率、高沉积效率的特点在生产大型开放结构件领域具有独特的优势^[7-9]。因此,电弧增材技术被广泛应用于多种场景。

目前,多种常用铝合金的电弧增材制造工艺已十分完善,但对于Al-Cu-Mg-Ag合金,却鲜有报导。因此,针对Al-Cu-Mg-Ag合金增材制造的迫切需求,文中突破性的采用CMT电弧熔积工艺对Al-Cu-Mg-Ag合金进行单层沉积与多层增材制造的探索,以探究Al-Cu-Mg-Ag合金的电弧沉积特性与成形规律,为Al-Cu-Mg-Ag合金未来应用于增材制造领域提供理论基础。

1 试验材料与方法

采用以冷金属过渡(CMT)工艺为基础的沉积工艺进行合金的单层电弧沉积与多层电弧增材制造。如图1所示,焊机采用福尼斯焊接电源,由KUKA KR210机器人末端法兰盘搭载CMT焊枪完成2种沉积过程。焊接基板为2319-T6铝合金板,属于铝铜系列可热处理强化锻造合金。为通过与成分相似的常用2319铝合金熔积效果做对比,从而进一步反映Al-Cu-Mg-Ag合金的熔积特性,焊丝材料分别选用直径为1.2 mm的ER 2319焊丝与自研Al-Cu-Mg-Ag合金焊丝。试验采用一元化模型,选用97.5%氩气作为保护气体,并控制保护气体流量为15 L/min。2种焊丝的主要化学成分见表1。试验分为两部分:①单道单层电弧熔积;②单道多层电弧增材制造。为多角度全面分析Al-Cu-Mg-Ag合金本身的熔积特性,单道多层熔积试验采用2种沉积工艺:①正常沉积;②摆动

沉积。单层正常沉积工艺参数见表2;复合摆动模式下的摆动工艺参数见表3,采用圆形与正弦2种摆动模式,控制摆动幅值与左右停留时间相等,以不同摆

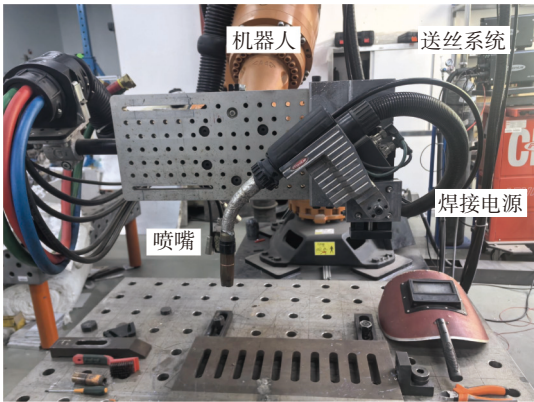


图1 机器人电弧增材制造平台

Fig. 1 Robot wire arc additive manufacturing platform

表1 2319和Al-Cu-Mg-Ag合金焊丝的化学成分(质量分数, %)

Tab. 1 Chemical composition of welding wires for 2319 and Al-Cu-Mg-Ag alloy (wt.%)

材料	Cu	Mg	Ag	Mn	Ti	Zr	Al
2319	6.06	0.02	—	0.31	0.12	0.15	余量
Al-Cu-Mg-Ag	6.22	0.23	1.02	0.54	0.15	0.10	余量

表2 沉积工艺参数

Tab. 2 Depositing process parameters

焊接电流	电弧电压	送丝速度	行走速度
I/A	U/V	$v_1/(m \cdot min^{-1})$	$v_2/(mm \cdot s^{-1})$
85	13	5	6

表3 摆动工艺参数

Tab. 3 Oscillating process parameters

编号	摆动方式	摆动频率 f/Hz	摆动幅值 d/mm	左右停留时间 t/s
1, 5	圆形	4	3.5	0.25
2, 6	正弦	3	3.5	0.25
3, 7	正弦	5	3.5	0.25
4, 8	正弦	6	3.5	0.25

频进行沉积。2种模式所采用的参数均参考实际工业生产所用参数。单道多层沉积时,沉积方向为图中从左至右,沉积层长度为200 mm,采用独立基板以避免沉积带来的热循环对熔滴铺展造成的热环境的影响。单道多层沉积时,沉积层长度为200 mm,层数为45,沉积工艺为正弦摆动沉积,沉积方式为Z字形往复沉积,以获得良好的成形形貌。

采用霍尔传感器对熔积过程的实时电流和实时电压信号进行采集,以分析合金熔积过程电弧信号的变化特性。采用英国 iXCameras 公司生产的 I-speed720 型高速摄像机对熔积过程的熔滴过渡现象进行拍摄记录,通过分析熔滴过渡特征来全面表征该合金的熔积特性,拍摄帧率为1 000 幅/s。

2 试验结果及讨论

2.1 单层熔积成形

采用了4种CMT工艺模式:标准CMT模式,脉冲CMT(CMT+P)模式,变极性CMT(CMT+A)模式,变极性脉冲CMT(CMT+P+A)模式,以期对2种合金熔积特性进行全面的对比与表征。图2为2319与Al-Cu-Mg-Ag合金正常单道单层不同沉积模式下沉积层的表面形貌。通过图2(a)与图2(b)的对比可以发现:

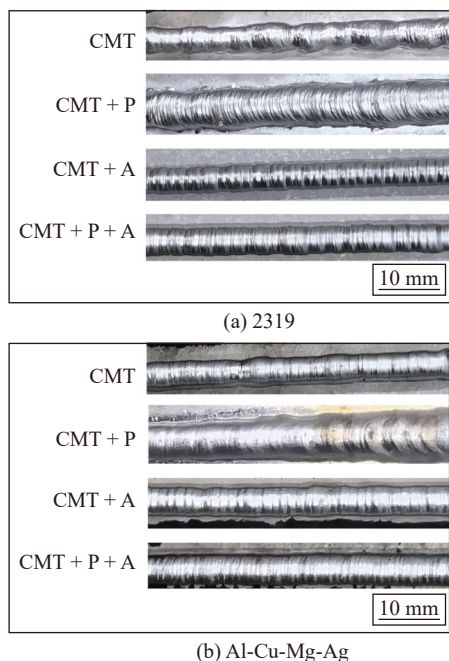


图2 2种合金不同沉积工艺模式下的沉积层表面形貌

Fig. 2 Surface morphology of deposited layers of two alloys under different depositing modes. (a) 2319; (b) Al-Cu-Mg-Ag

4种沉积模式下,Al-Cu-Mg-Ag沉积层的宽度和高度均比2319沉积层更为均匀稳定。这说明:Al-Cu-Mg-Ag熔积过程熔滴过渡尺寸一致性更好。CMT模式下Al-Cu-Mg-Ag沉积层的鱼鳞纹比2319沉积层更薄。CMT+A模式下沉积层表面有较为明显的由极性切换导致的表面纹路。经比较,4种模式中,CMT+P模式下的沉积层表面更为光滑平整,层间结合更充分,宽度适宜,为4种沉积模式中最优的沉积模式。后续沉积试验均采用该种工艺模式。

对CMT+P工艺模式下的沉积层进行横截面的获取,如图3所示。对比发现:Al-Cu-Mg-Ag合金由于加入了Ag元素,熔体流动性更好,沉积层有更易铺展的趋势。且在熔点液态状态下,Cu,Mg和Ag的表面张力系数分别为1 303 mN/m,559 mN/m和498 mN/m。可以发现:液态Mg和Ag具有更低的表面张力,这也印证了电弧沉积过程Al-Cu-Mg-Ag合金具有更佳的铺展性。

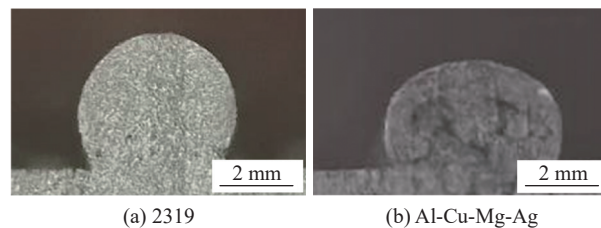


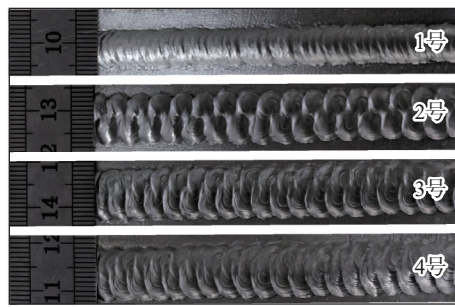
图3 2种合金在CMT+P工艺模式下沉积层的横截面形貌

Fig. 3 Cross-sectional morphology of deposited layers of two alloys in CMT+P mode. (a) 2319; (b) Al-Cu-Mg-Ag

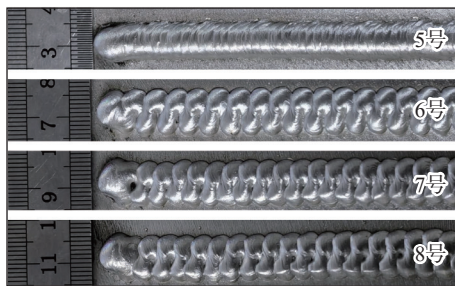
图4为2种合金不同摆动沉积工艺下的沉积层表面形貌,通过对比发现:随着摆动频率的增加,Al-Cu-Mg-Ag合金沉积层的表面始终比2319合金沉积层表面更为光滑,后者表面具有较为明显的规律性不均匀纹路。

2.2 熔积过程熔滴过渡特征

为进一步对比分析Al-Cu-Mg-Ag合金的熔积特性,通过高速摄像对2种合金在CMT+P模式下的单个熔滴过渡周期图像进行记录,结果如图5所示。从图中可以看出:2319合金沉积时的电弧有跳动的现象,形成的熔池由于铺展和回流不是特别的充分使熔池后方的糊状区和凝固区有较为明显的分层边界,俯视观察即鱼鳞纹形貌。而从Al-Cu-Mg-Ag合金CMT+P模式沉积时的单个熔滴过渡图像中可以看出:Al-Cu-Mg-Ag合金熔体的流动铺展效果更好,使得熔滴接



(a) 2319



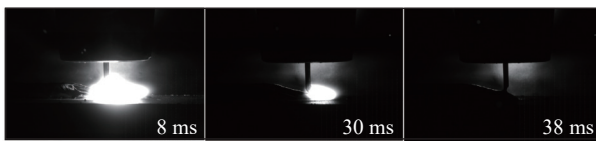
(b) Al-Cu-Mg-Ag

图4 2种合金 CMT+P 摆动沉积工艺模式下的沉积层表面形貌

Fig. 4 Surface morphology of deposited layers for two alloys in CMT+P oscillating depositing mode. (a) 2319; (b) Al-Cu-Mg-Ag



(a) 2319

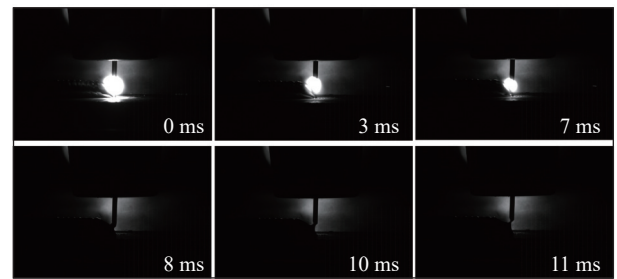


(b) Al-Cu-Mg-Ag

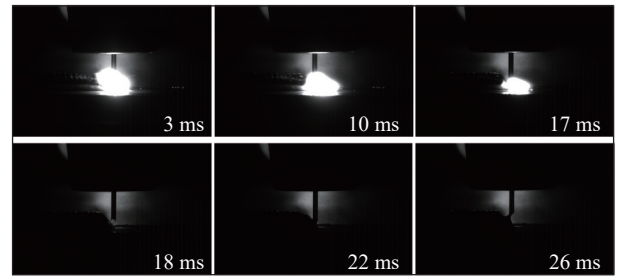
图5 2种合金在 CMT+P 模式下单个熔滴过渡周期的图像

Fig. 5 Images of single droplet transition for two alloys in CMT+P mode. (a) 2319; (b) Al-Cu-Mg-Ag

触基板铺展形成熔池后的回流过程更充分,这促使凝固后的沉积层高度更为均匀,凝固后的沉积层表面没有较为明显的鱼鳞纹形貌。从2种合金熔滴过渡周期中息弧时刻的熔池形貌对比可以发现:Al-Cu-Mg-Ag合金明显具有更好的流动性,熔池表面更为平整,且由于熔滴过渡更为稳定,熔滴脱落对熔池的冲击更小,这使得熔池振荡幅度较小,改善了成形的稳定性。图6与图7分别为CMT+A模式下2319合金



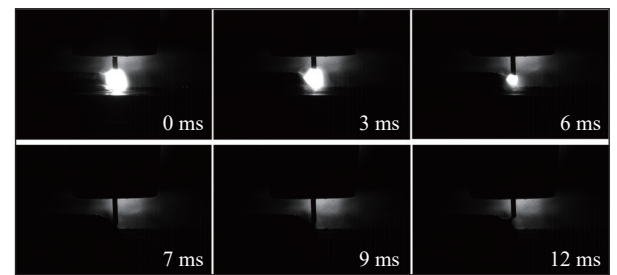
(a) 焊丝作负极



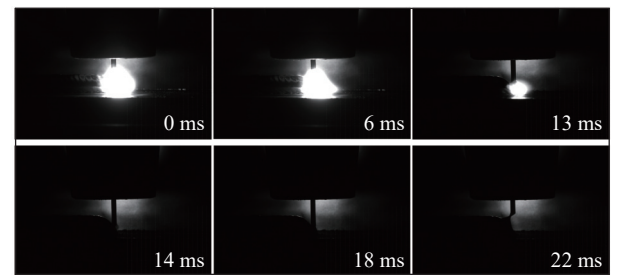
(b) 焊丝作正极

图6 CMT+A 模式下 2319 合金在焊丝作正/负极时单个熔滴过渡周期的图像

Fig. 6 Images of single droplet transition for 2319 alloy in CMT+A mode. (a) welding wire as negative electrode; (b) welding wire as positive electrode



(a) 焊丝作负极



(b) 焊丝作正极

图7 CMT+A 模式下 Al-Cu-Mg-Ag 合金在焊丝作正/负极时单个熔滴过渡周期的图像

Fig. 7 Images of single droplet transition for Al-Cu-Mg-Ag alloy in CMT+A mode. (a) welding wire as negative electrode; (b) welding wire as positive electrode

与 Al-Cu-Mg-Ag 合金分别在焊丝作正/负极时单个熔滴过渡周期的图像,通过对比可以发现: Al-Cu-Mg-Ag 合金在焊丝作正极时的电弧长度明显增加,二者的沉积层表面均呈现极性切换导致的明显的分层波纹。

2.3 熔积过程电弧信号

为进一步揭示 Al-Cu-Mg-Ag 合金具有更佳熔滴过渡特征的内在影响机制,对 2 种合金在 CMT+P 和 CMT+A 沉积工艺模式下沉积过程的电流和电压信号进行实时采集,结果如图 8 与图 9 所示。

图 8 为 2 种合金沉积过程的电流波形,所有数据均为原始数据,未经过降噪处理。从图中可以看出: 2319 合金在 2 种模式下的沉积过程的电流信号均噪音较大,峰值电流波形已比较模糊,这反映了熔滴过渡过程电弧的不稳定性。

相较于 2319 合金, Al-Cu-Mg-Ag 合金在 2 种模式沉积过程的电流波形的波动明显降低,噪音变小,毛刺变少,基值电流信号十分稳定,这反映出焊丝熔化-熔滴过渡过程形成的电弧具有更好的稳定性,也解释了 2.2 节展示的熔滴过渡图像的相关现象。图 9 展示的 2 种合金沉积过程的电压波形亦表现出相似的规律,即 Al-Cu-Mg-Ag 沉积过程的电压信号也更为稳定清晰。值得注意的是, Al-Cu-Mg-Ag 沉积过程的电压基值与峰值均略低于 2319 合金沉积过程的电压基值与峰值。这与 2.2 节所述观察到的 Al-Cu-Mg-Ag 合

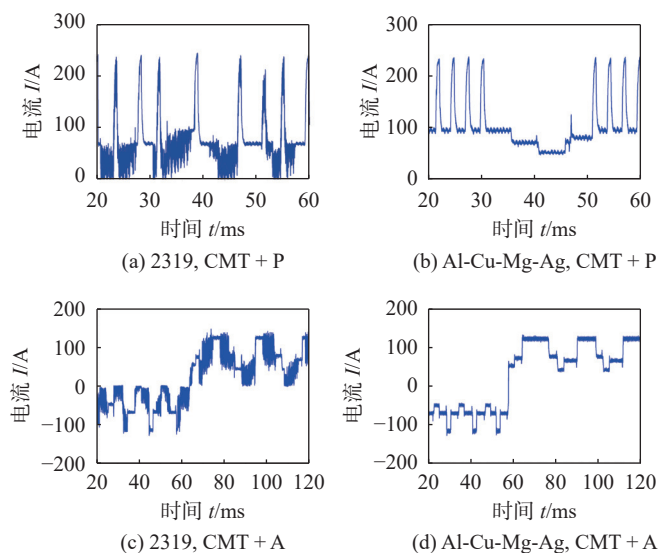


图 8 2 种合金在 2 种沉积工艺模式下的电流波形

Fig. 8 Current waveforms of two alloys in two depositing modes. (a) 2319, CMT+P; (b) Al-Cu-Mg-Ag, CMT+P; (c) 2319, CMT+A; (d) Al-Cu-Mg-Ag, CMT+A

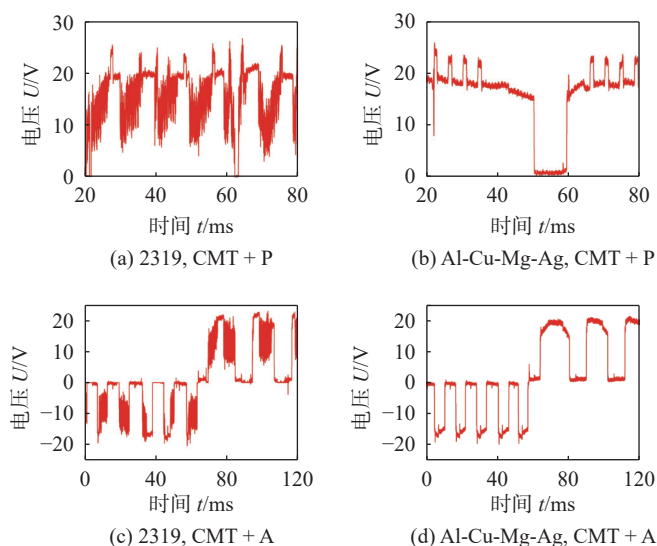


图 9 2 种合金在 2 种沉积工艺模式下的电压波形

Fig. 9 Voltage waveforms of two alloys in two depositing modes. (a) 2319, CMT+P; (b) Al-Cu-Mg-Ag, CMT+P; (c) 2319, CMT+A; (d) Al-Cu-Mg-Ag, CMT+A

金沉积过程弧长增加的现象所矛盾,即在电流、电极材料、保护介质等导电机构提供的导电环境相同的情况下,弧长的增加意味着电压的增加。在该试验中,2 种合金熔积时的上述条件均相同,因此,导致这一现象的原因与 Al-Cu-Mg-Ag 合金相对特殊的物理属性有关。该文对由于 Al-Cu-Mg-Ag 合金的特殊材料属性引起的电弧反常行为进行了潜在影响机制的分析:①电弧电导性的增加。银元素的适量加入在一定程度上增加了电弧区域的电导性。且银的一级电离能(727.3 kJ/mol)与镁的前两级电离能(2 189 kJ/mol)均较低,这有助于电弧中更多的电子和离子生成,从而降低了电弧的电阻。而银具有优良的导电性,因此,银的加入或进一步提高了焊丝的整体导电性。这意味着即使在电弧长度增加的情况下,通过焊丝的电流能以较低的电阻和因而较低的电压传递,从而导致整体电压降低。②沉积过程中的化学反应。焊丝中的铜、镁、银元素可能在焊接过程中与基板发生特定的化学反应,这些反应如果产生较低熔点的相,则有助于焊接熔池的形成和稳定,同时也影响了电弧的特性。这种化学相互作用也潜在地促进了在更低电压下的电弧维持。

在该试验中,根据以往学者们的研究,加入的镁和银元素并没有在沉积过程中与其他元素结合形成化合物,二者是在时效过程中以镁-银原子团簇的方

式影响热稳定相的析出。综上所述, Al-Cu-Mg-Ag 合金由于其自身物理属性(优良电导性)导致沉积过程电弧稳定性更高, 熔滴过渡周期更加清晰, 熔滴脱离焊丝端部至基板形成熔池的过程也更柔顺, 而合金本身含有的 Ag 元素使得熔体的流动性更强, 熔池铺展效果更好。以上多方面因素综合改善了合金的电弧熔积过程, 使最终成形更优异。

2.4 多层电弧增材制造成形

通过对比单沉积层的宏观成形确定了 CMT+P 模式为最佳沉积工艺模式, 考虑到增材效率问题, 该文最后采用摆动沉积工艺进行了 Al-Cu-Mg-Ag 合金直壁构件的电弧增材制造成形验证。增材制造试验参数如下: 沉积电流为 85 A, 送丝速度为 5 m/min, 沉积速度为 6 mm/s, 摆动方式为正弦摆动, 摆频为 4 Hz, 摆幅为 3.5 mm, 左右停留时间为 0.25 s, 共沉积 45 层, 结果如图 10 所示。Al-Cu-Mg-Ag 合金电弧增材制造直壁构件获得良好稳定的表面成形。构件具有 15 mm 的均匀宽度, 侧壁平整, 成形良好。

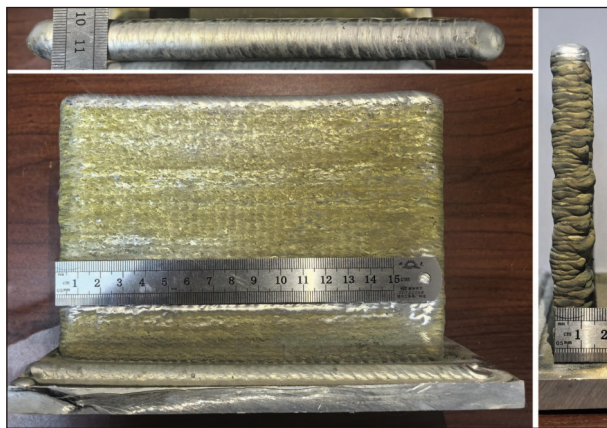


图 10 电弧增材制造 Al-Cu-Mg-Ag 合金直壁构件形貌

Fig. 10 Morphology of Al-Cu-Mg-Ag alloy wall-like component fabricated by wire arc additive manufacturing

3 结论

(1) 在以 CMT 为基础的 4 种工艺模式中, CMT+P 模式下 2319 合金与 Al-Cu-Mg-Ag 合金沉积层的宽度与高度更稳定、层间结合更充分, 为最佳沉积工艺。

(2) 相较于 2319 合金, Al-Cu-Mg-Ag 合金在电弧熔积过程中形成的熔池具有更为良好的流动性, 熔滴过渡过程熔池回流更充分, 这使得 Al-Cu-Mg-Ag 合金沉积层高度与宽度更为均匀, 表面更光滑。

(3) Ag 元素的加入使 Al-Cu-Mg-Ag 合金在一定

程度上具有的更优异的电导性等特别物理属性极大地改善了电弧的稳定性, 使熔滴尺寸一致性更好, 熔滴过渡过程更为稳定柔顺。

(4) Al-Cu-Mg-Ag 合金可实现良好的电弧增材制造直壁构件成形, 构件尺寸均匀, 侧壁平整, 良好的增材制造特性使其具有大型复杂结构件增材制造的应用潜力。

参考文献

- [1] FU Yongzhong, ZHUANG Yuan, XU Xiaojing, et al. Effect of Ti content and hot/cold extrusion on microstructure and properties of 2219 heat-resistant aluminum alloy[J]. *Materials Research Express*, 2019, 6(10): 1065f2.
- [2] ZHANG Liang, BIAN Wenzhuo, FU Kai, et al. Improvement of mechanical properties and microstructure of wire arc additive manufactured 2319 aluminum alloy by mechanical vibration acceleration[J]. *Materials Characterization*, 2024, 208(2): 113672.
- [3] 付俊伟, 崔凯, 王江春. Al-Cu 系耐热铝合金的研究进展[J]. *中国有色金属学报*, 2021, 31(7): 1827 – 1841.
FU Junwei, CUI Kai, WANG Jiangchun. Recent development in Al-Cu series heat-resistant aluminum alloys[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2021, 31(7): 1827 – 1841.
- [4] 徐浩楠, 杜翥, 何雨, 等. Al-Cu-Mg-Ag 耐热铝合金研究进展[J]. *信息记录材料*, 2022, 23(10): 8 – 10.
XU Haonan, DU Zhu, HE Yu, et al. Research progress of Al-Cu-Mg-Ag heat resistant aluminum alloy[J]. *Information Recording Materials*, 2022, 23(10): 8 – 10.
- [5] YU Zhe, QIU Junqi, LI He, et al. Microstructure, mechanical properties and thermal stability of friction-stir-processed Al-Cu-Mg-Ag alloy [J]. *Materials Science & Engineering: A*, 2023, 863: 144525.
- [6] 刘晓艳, 潘清林, 陆智伦, 等. Al-Cu-Mg-Ag 耐热铝合金的热稳定性 [J]. *中国有色金属学报*, 2011, 21(6): 1244 – 1251.
LIU Xiaoyan, PAN Qinglin, LU Zhilun, et al. Thermal stability of Al-Cu-Mg-Ag heat-resistant alloy[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2011, 21(6): 1244 – 1251.
- [7] 倪允强, 杨健楠, 方学伟, 等. 2219 铝合金 CMT 电弧增材熔滴过渡行为 [J]. *焊接学报*, 2024, 45(2): 19 – 32.
NI Yunqiang, YANG Jiannan, FANG Xuewei, et al. The metal transfer behavior in CMT-based wire arc direct energy deposition of 2219 aluminum alloy[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2024, 45(2): 19 – 32.

(下转第 29 页)

GAO S S, DI X J, LI C N, et al. Effect of strain aging on fracture toughness of welded joints of high-strain pipeline steel[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2021, 42(10): 22 – 28.

- [15] 王汉奎, 商学欣, 柳旺, 等. 高钢级油气管线环焊缝应变时效脆化研究 [J]. 压力容器, 2021, 38(5): 8 – 13.

WANG H K, SHANG X X, LIU W, et al. Study on strain aging embrittlement of the girth weld of the high strength oil and gas pipeline[J]. Pressure Vessel Technology, 2021,

38(5): 8 – 13.

第一作者: 贾海东, 硕士, 工程师; 主要从事管道检测及完整性评价的研究; jiahd@pipechina.com.cn。

通信作者: 李学达, 博士, 副教授; 主要从事先进金属材料及其焊接物理冶金、油气装备的焊接及性能评价、金属材料的腐蚀与防护等方向的研究; 已发表论文 20 余篇; xli@upc.edu.cn。

(编辑: 王龙权)

本文引用格式:

贾海东, 徐乐乐, 刘剑, 等. 强度匹配状态对高钢级管道环焊接头根部应变集中及应变时效脆化的影响[J]. 焊接, 2025(3): 20 – 29.
JIA Haidong, XU Lele, LIU Jian, et al. Influence of strength matching state on local strain concentration and strain aging embrittlement of girth welded joints of high-strength steel pipelines[J]. Welding & Joining, 2025(3): 20 – 29.

(上接第 13 页)

- [8] DONG Bolun, CAI Xiaoyu, XIA Yunhao, et al. Wire arc additive manufacturing of a heat-resistant Al-Cu-Ag-Sc alloy: microstructures and high-temperature mechanical properties [J]. China Welding, 2023, 32(4): 1 – 10.

- [9] 王震林, 戴为, 齐雨航, 等. 铝合金电弧增材与激光冲击强化复合制造组织与性能 [J]. 焊接, 2024(2): 18 – 25.

WANG Zhenlin, DAI Wei, QI Yuhang, et al. Microstructure and properties of aluminum alloy by wire and arc additive and laser shock peening hybrid manufacturing[J]. Welding &

Joining, 2024(2): 18 – 25.

第一作者: 何智, 博士研究生; 主要从事铝合金电弧增材制造及其他金属材料增材工艺与应用的研究; 18801157056@163.com。

通信作者: 陈树君, 博士, 教授, 博士研究生导师; 主要从事焊接电弧物理及新型弧焊工艺、智能焊接控制与装备、特种能场焊接机理等方面的研究; 已发表论文 200 余篇; sjchen@bjut.edu.cn。

(编辑: 王龙权)

本文引用格式:

何智, 许知非, 盛卫星, 等. Al-Cu-Mg-Ag 耐热合金的 CMT 电弧熔积特性[J]. 焊接, 2025(3): 8 – 13, 29.
HE Zhi, XU Zhifei, SHENG Weixing, et al. CMT arc-depositing characteristics of Al-Cu-Mg-Ag heat-resistant alloys[J]. Welding & Joining, 2025(3): 8 – 13, 29.

(上接第 19 页)

- [8] LI Yanjie, WEI Wu, GAO Yong, et al. PQ-RRT*: An improved path planning algorithm for mobile robots[J]. Expert Systems with Applications, 2020, 152: 113425.

- [9] YI Junhui, YUAN Qingni, SUN Ruitong, et al. Path planning of a manipulator based on an improved P_RRT* algorithm[J]. Complex & Intelligent Systems, 2022, 8: 2227 –

2245.

第一作者: 吕学勤, 博士, 教授; 主要从事基于视觉和激光传感的机器人智能控制、新能源混合动力系统能量分配与优化控制方向的研究; 已发表论文 60 余篇; lvxueqin@shiep.edu.cn。

(编辑: 王龙权)

本文引用格式:

吕学勤, 王佩吟泉, 徐雨哲, 等. 基于改进扩展随机树算法的焊缝巡检机器人路径规划[J]. 焊接, 2025(3): 14 – 19, 29.
LYU Xueqin, WANG Peiyinquan, XU Yuzhe, et al. Path planning of welding seam inspection robot based on improved extended random tree algorithm[J]. Welding & Joining, 2025(3): 14 – 19, 29.