DOI: 10.3901/JME.2018.02.084

纵向稳态磁场对电弧增材成形零件表面质量和性能影响的研究*

周祥曼^{1,2} 田启华^{1,2} 杜义贤^{1,2} 张海鸥³ 王桂兰⁴ 梅飞翔⁴

(1. 水电机械设备设计与维护湖北省重点实验室(三峡大学) 宜昌 443002;

2. 三峡大学机械与动力学院 宜昌 443002;

3. 华中科技大学数字制造装备与技术国家重点实验室 武汉 430074;

4. 华中科技大学模具技术国家重点实验室 武汉 430074)

摘要: 外加磁场作用是影响电弧增材成形过程与成形零件性能的有效方式之一。为了研究外加纵向稳态磁场对低碳钢电弧增材成形零件表面质量和力学性能的影响,搭建基于 GMAW 的纵向稳态磁场辅助电弧增材成形装置,采用形貌分析、金相观测、性能测试的方法对比分析有/无外加磁场作用下成形试样表面质量、微观组织及力学性能差异。结果表明:相比普通熔积,外加磁场作用下,单焊道宽高比增大,形成宽而平的焊道横截面形貌,从而有效地改善搭接精度并提高熔积层表面质量,电磁搅拌作用还能够细化晶粒,减少熔积缺陷以及多道搭接区域的晶粒分布的不均匀性。此外,外加磁场作用还改变了铁素体和珠光体的占比和分布形态。力学性能测试显示,磁场作用使得成形样件在熔积方向和搭接方向的力学性能有一定的提升,力学性能的各向异性减小。

关键词: 纵向稳态磁场; 电弧增材成形; 微观组织; 力学性能

中图分类号: TG47

Study of the Influence of Longitudinal Static Magnetic Field on Surface Quality and Performances of Arc Welding Based Additive Forming Parts

ZHOU Xiangman^{1,2} TIAN Qihua^{1,2} DU Yixian^{1,2} ZHANG Haiou³

WANG Guilan⁴ MEI Feixiang⁴

(1. Hubei Key Laboratory of Hydroelectric Machinery Design & Maintenance,
China Three Gorges University, Yichang 443002;

2. College of Mechanical and Power Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002;

3. State Key Laboratory of Digital Manufacturing Equipment and Technology,
Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074;

4. State Key Laboratory of Materials Processing and Die & Mould Technology,
Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

Abstract: External magnetic field is one of the effective ways to influence arc welding based additive forming(AWAF) process and performances of forming parts. To study the influence of external longitudinal static magnetic on surface quality and mechanical performances of mild steel parts fabricated by AWAF process, an external longitudinal static magnetic assisted AWAF setup is developed, and morphology analysis, metallographic observation and performance testing are employed to compare and analyze the differences of surface quality, microstructure and mechanical performances of specimens fabricated by AWAF process with or without applying external longitudinal static magnetic. The results show that the external magnetic field can enlarge the aspect ratio of single weld bead and result in a wide and flat bead cross-sectional topography, which can effectively improve overlapping accuracy and surface quality of deposited layers. The electromagnetic stirring can refine grains, reduce defects and the inhomogeneity of the grain

* 国家自然科学基金(51705287, 51475265, 51775308)、水电机械设备设计与维护湖北省重点实验室(三峡大学)开放基金(2017KJX05)和湖北省科技支撑计划(对外科技合作类)(2015BHE026)资助项目。20170425 收到初稿, 20170818 收到修改稿

distribution in multi-beads overlapping region. Furthermore, the external magnetic field can change the proportion and distributed pattern of ferrite and pearlite. Mechanical performance tests show that the external magnetic field is capable of improving the mechanical performances in both deposition and overlapping direction, and reducing the anisotropy.

Key words: external longitudinal static magnetic field; arc welding based additive forming; microstructure; mechanical performances

0 前言

电弧增材制造技术是一种主要采用熔化极气体保护焊(Gas metal arc welding, GMAW)^[1]或者钨极惰性气体保护焊(Gas tungsten arc welding, GTAW)^[2]为熔积热源的金属增材制造技术,其熔积效率是基于激光和电子束增材制造技术的 5~10 倍,能量利用率可达到后者几倍到几十倍^[3-6]。因此,电弧增材制造技术在航空航天、国防军工、轨道交通等领域高强度、大中型金属零件低成本、高效快速制造方面具有独特的优势,是继激光、电子束增材制造技术后的又一新的金属增材制造研究方向^[7]。

电弧增材制造技术也有一些不足限制其快速发展与应用,如电弧熔积本身的精度限制导致其成形零件具有较低的表面质量,其高的热输入量和温度梯度导致成形零件具有较大的残余应力和变形、较差的组织形态等,此外,电弧熔积常常存在一些气孔、夹杂等冶金缺陷,从而影响成形件的服役性能。电磁处理技术作为一种非接触式的材料处理技术,在材料加工和处理方面有广泛地应用,如在铸造过程中引入外加电磁场可以加速或者抑制熔融金属的流动,形成电磁搅拌,调控晶粒生长^[8];在电弧增材成形中引入高频磁场,利用磁场感应热来减小熔积区域的温度梯度,可以减小成形件残余应力和变形^[9];利用外加磁场控制 GTAW 焊缝微观组织分布、细化晶粒^[10-13]等。目前在电弧熔积过程中主要涉及两种类型电磁场应用,第一种为与熔积方向垂直的横向磁场,其与熔池电流作用产生的电磁力可以抑制高速焊接过程中的驼峰^[14-17],还有学者通过后置焊丝插入熔池增强沿焊道方向的电流与外加横向磁场作用产生向上的电磁力来抵消重力、抑制流淌,实现仰焊^[18]。第二种类型的磁场是纵向磁场,纵向磁场在电弧和熔池中产生绕焊枪轴向的旋转搅拌力,驱动电弧和熔池金属做旋转运动^[19-23]。目前纵向磁场在焊接中的应用主要有两个方面,其一是利用其电磁搅拌作用调控晶粒大小^[10-12, 24-27]、降低焊缝化学元素不均匀性,提高熔覆层的硬度和耐磨性等力学性能^[25-26]以及抑制焊缝咬边和突起等缺陷^[27];其二是利用一定频率和强度的纵向磁场提高 CO₂ 气保 GMAW 金属过渡频率和稳定性^[28-29]。综上可知,电磁场在电弧熔积中的应用主要集中在焊接接头的

成形与性能控制方面,在电弧增材成形零件表面质量和性能控制方面的研究较少。

目前,电弧增材成形熔积层表面质量控制主要采用一些工艺参数控制的策略以及复合受迫成形、减材成形的办法。如通过建立不同的工艺参数下单焊道和搭接焊道的轮廓模型,计算合理的搭接工艺参数来提高熔积层表面质量^[30-32];通过引入随焊轧制控制熔积层外形轮廓的方法^[1]或者采用电弧增材与铣削复合的方法提高熔积层表面质量^[33-34]。上述方法对提高熔积层表面质量具有积极的效果,但是基于工艺参数控制的方法其过程较为复杂且通用性不强,而基于复合制造的方法其设备成本和工艺控制难度显著增加。

本文提出了一种基于 GMAW 的纵向稳态磁场辅助的电弧增材成形方法,拟利用无接触、易调控的外加电磁场对成形过程及微观组织的影响,探索外加磁场对电弧增材成形零件表面质量和力学性能的并行控制方法。

1 试验装置、材料与工艺参数

图 1 为本文搭建的磁场辅助电弧增材成形试验装置示意图。该装置通过机器人运动来实现熔积轨迹控制,采用与焊枪同轴的励磁线圈外接直流励磁电源来施加纵向稳态磁场。图中的箭头表示系统中信号或者物料的流向。

图 1 试验装置示意图

试验所采用的焊丝为直径等于 1.2 mm 的低碳素低合金钢焊丝,基板为 10 mm 厚的 Q235 轧制钢

板。通过对比发现,纵向磁场辅助熔积过程中,焊机的脉冲模式有利于减小飞溅,因此采用脉冲模式进行熔积试验。脉冲模式只是熔积电流为直流脉冲模式,并不影响纵向稳态磁场对电弧和熔池的作用规律。主要的熔积工艺参数如表 1 所示。

表 1 熔积工艺参数

峰值 参数	基值 电压	平均 电流	送丝 速率/ (m/min)	熔积 速率/ (mm/min)	脉冲 频率/Hz	脉冲 时间/ms	
	电流/A	/A					
数值	30	35	230	6	530	230	3.1

本文所采用的电磁线圈的铜线直径为 0.35 mm,匝数为 3 520 匝,线圈与焊枪保护气套同轴,并与保护气喷嘴下端相平。经过测试发现,当线圈施加 0.9 A 的励磁电流时,外加磁场对熔积稳定性影响较小且对焊道形貌控制最好,在非熔积状态下,通过高斯计测得熔池中心位置的磁感应强度为 140 Gs。

2 试验结果与分析

2.1 单层多道和多层多道搭接试验

根据文献[30],送丝速率与熔积速率比值(The ratio of the wire feed rate to the welding speed, RWFRTWS)小于 12.5 时,焊道横断面轮廓用抛物线模型拟合具有更高的精度,本文 RWFRTWS 等于 11.32,当施加纵向稳态磁场后,熔池层形貌以及高度和宽度都有所变化,但通过比较后发现,采用抛物线拟合单焊道横断面轮廓仍具有最高的精度,因此本文普通熔积和磁场辅助熔积均采用抛物线模型来拟合单焊道横断面轮廓,并采用文献[30]的方法来计算最优的搭接中心距为 $2w/3$, w 为单焊道横断面轮廓宽度。

图 2a 左边和右边分别是普通熔积和纵向稳态磁场辅助熔积的单焊道横断面形貌,图 2b 和图 2c 分别是所对应的单层四道搭接熔积层横断面形貌。单道和多道搭接熔积层的横截面轮廓平均尺寸见表 2。由图 2 和表 2 可知,磁场辅助熔积的单焊道高度减小,宽度明显增大,焊道轮廓更加平缓,这是由于纵向磁场的周向搅拌作用推动熔池金属向熔池边缘流动^[23],提高了焊道的宽高比。对比图 2b 和图 2c 可以看到,随着搭接道次增多(均为向右搭接),普通熔积的熔积层形貌变化较大,而磁场辅助熔积搭接的熔积层整体更加平整,这是由于在电弧增材成形过程中,由于工艺特性限制,很难通过调整工艺参数得到理想的、完全平整的搭接形貌^[35-36],而宽高比大的焊道更有利于提高搭接精度^[35]。

图 2 单道和多道搭接熔积层的横截面形貌对比

表 2 熔积层截面平均尺寸

熔积方式	单道截面尺寸		四道搭接截面宽度/mm
	高度/mm	宽度/mm	
普通熔积	2.5	8	22
电磁辅助熔积	2	10	27

为了对比普通熔积和外加纵向磁场辅助熔积多层多道熔积层表面质量,分别堆积了外形尺寸为 120 mm×60 mm×15 mm 的多层多道试样块。图 3 为堆积过程中第 3 层熔积层形貌,可以看到在外加纵向磁场作用下,熔积层表面更平整,表面质量提高。这是由于除了上述宽高比大的焊道可以提高搭接精度外,周向的电磁搅拌还能驱动熔池金属填充焊道

图 3 多层多道熔积层表面形貌对比

之间的“低谷”区域。此外, 多层堆积成形过程中每层表面质量的提高有利于减小层之间的误差累积, 使得后续熔积层能够持续获得高的表面质量。

2.2 微观组织与力学性能

为了对比普通熔积和外加纵向磁场辅助熔积成形样件的微观组织和力学性能, 对上述单道试样取金相试样, 对多层多道试样块取金相和拉伸试样。图 4 为本文所约定的坐标方向和试样截取的方向, 其中约定 X 方向为熔积方向, Y 方向为搭接方向, Z 方向为堆叠方向。

图 4 取样约定方向

图 5 为普通熔积和磁场辅助熔积单焊道 X 截面的晶粒形貌对比(放大 50 倍)。由图 5a 和图 5c 对比

可以看到, 磁场辅助熔积熔池底部熔合线曲率相比普通熔积小, 这是由于周向的电磁搅拌作用扩张了熔池。普通熔积熔池底部主要为细小的等轴晶, 而电磁辅助熔积熔池底部多为细小、密集的胞状枝晶, 这是由于普通熔积熔池底部基板激冷, 容易形成细小、密集的等轴晶, 而电磁搅拌的作用下, 熔池对流加速, 传热加快, 温度分布更加均匀, 熔池底部和基板的温度梯度减小, 因此底部区域等轴晶区域面积减小。同时强制对流降低了熔池固液共存区的温度梯度以及溶质浓度梯度, 枝晶生长前端靠近熔池侧的成分过冷增加, 使晶粒生长平衡环境改变, 晶粒前沿的生长速度增大, 容易形成细密的枝晶。此外, 由图 5a 可以看到, 普通熔积时, 熔池底部出现多个气孔(方框内), 而磁场辅助熔积没有出现气孔, 这是由于电磁搅拌有利于熔池中气体排出。由图 5b 和图 5d 熔池中中部晶粒形貌对比可以看到, 普通熔积熔池中晶粒向中间交汇生长, 而电磁辅助熔积情况下, 晶粒生长方向一致性较好, 这是由于电磁搅拌使得整个熔池的温度分布更加均匀, 降低了熔池中心高温区域的集中趋势, 减弱了晶粒的交汇、竞争生长的趋势, 使得晶粒尺度更加均匀, 晶粒的方向与尺度一致性较好。

图 5 单道熔积 X 截面晶粒形貌对比

图 6 为单道焊道 Z 截面(焊道高度一半的位置)晶粒形貌对比(放大 50 倍)。可以看到, 磁场辅助熔积下晶粒更加细密, 结合图 5 可以看到,

在本文的工艺条件下, 电磁搅拌对晶粒有一定的均匀化和细化作用。图 6a 普通熔积情况下靠近底部还有部分柱状晶出现, 这是由于普通熔积晶

粒为典型树枝状分支的柱状晶, 晶粒生长方向多变, 而电磁辅助熔积的晶粒主要为方向一致性较

高、分支少的胞状枝晶, 因此 Z 截面晶粒形貌出现上述的差别。

图 6 单道熔积 Z 截面晶粒形貌对比

图 7 为多层多道堆叠熔积的试样块 X 截面晶粒形貌对比, 其中图 7a 和图 7c 为两道堆叠熔合的位置对比, 图 7b 和图 7d 为三道堆叠熔合的位置对比。可以看到, 由于外加磁场作用下, 单焊道整个横截

面晶粒尺度和方向更加均匀, 因此, 无论是两道堆叠的位置还是三道堆叠和搭接的位置, 磁场辅助熔积情况下焊道之间的晶粒尺度与晶粒取向更加均匀一致。

图 7 多层多道试样堆叠处 X 截面晶粒形貌对比

图 8 为普通熔积和磁场辅助熔积 X 截面和 Z 截面的组织形貌对比(放大 500 倍)。可以看到高倍组织主要由铁素体和珠光体组成, 普通熔积时 X 截面的铁素体呈细密的针状分布, 而磁场辅助熔积情况铁素体更粗大; 由 Z 截面的组织分布可以看到, 普通熔积时 Z 截面的铁素体由较粗大和

细密的针状混合而成, 磁场辅助熔积情况铁素体呈粗大的树枝状分布, 这是由于电磁搅拌不仅改变了熔池的传热和传质, 同时外加磁场还能影响凝固区域的磁场能量大小和分布。相关研究表明^[37-40]: 在奥氏体向铁素体转变的过程中, 外加磁场增大了奥氏体向铁素体转变的自由能, 即相

当于降低了相变时候的冷却速度, 提高了奥氏体向铁素体的转变温度, 同时外加磁场还可以增加

铁素体形核的数量, 提高铁素体的长大速度, 使得铁素体占比增大。

图 8 X 和 Z 截面组织对比

图 9 为力学性能对比。对比图 9a 和图 9b 可以看到磁场辅助熔积下, X 向屈服强度平均值稍有降

低, Y 向增大, 而 X 和 Y 方向抗拉强度均有一定的增加。这是由于外加磁场作用细化了晶粒并减少了

(a) 屈服强度

(b) 抗拉强度

(c) 伸长率

(d) 硬度

图 9 力学性能对比

冶金缺陷,使相变后的组织比一般淬火得到的组织更加均匀^[37, 41-42],同时提高了合金元素分布的均匀性^[25-26],这些因素的共同作用使得其强度整体略有提升。由图 9c 可以看到磁场辅助熔积试样 X 和 Y 方向延伸率均有一定的提高,这是由于晶粒细化、铁素体占比提高以及更少的冶金缺陷均有利于提高塑性。图 9d 所示的是 X 截面和 Y 截面的平均硬度对比:磁场作用下熔积层硬度也略有提高。而硬度主要是由组织成分、晶粒大小等因素所决定,虽然外加磁场作用下低硬度的铁素体占比增加,但晶粒细化、合金元素分布均匀使平均硬度也略有提升^[26]。

图 10 为 X 和 Y 方向(或截面)之间的力学性能各向异性对比,可以看到,由于外加磁场辅助熔积下力学性能的各向异性均有一定的降低。

图 10 力学性能各向异性对比

3 结论

本文搭建了外加纵向稳态磁场辅助电弧增材成形装置,采用试验方法对比分析了外加磁场对低碳钢电弧增材成形样件的表面质量、微观组织和力学性能的影响,得到了以下结论。

(1) 纵向稳态磁场作用下,单焊道的宽高比增大,形成宽而平的焊道横截面形貌,同时电磁搅拌有利于熔池金属填充焊道之间的“低谷”区域,从而有助于提高搭接精度以及熔积层表面质量。

(2) 纵向稳态磁场辅助熔积能够细化晶粒,提高搭接区域晶粒均匀性并减少了冶金缺陷。此外,外加磁场能量作用使得铁素体形态及分布改变,铁素体占比增大,上述因素共同作用使得磁场辅助电弧增材成形样件整体力学性能及各向同性均有一定的提升。

(3) 合理利用外加纵向稳态磁场对电弧增材成形零件表面质量、微观组织和力学性能的影响,可以为“形”、“性”并行控制的电弧增材制造技术提

供一种研究思路。

参 考 文 献

- [1] ZHANG H, WANG X, WANG G, et al. Hybrid direct manufacturing method of metallic parts using deposition and micro continuous rolling[J]. Rapid Prototyping Journal, 2013, 19(6): 387-394.
- [2] MA Y, CUIURI D, HOYE N, et al. Effects of wire feed conditions on in situ alloying and additive layer manufacturing of titanium aluminides using gas tungsten arc welding[J]. Journal of Materials Research, 2014, 29(17): 2066-2071.
- [3] MAZUMDER J, DUTTA D, KIKUCHI N, et al. Closed loop direct metal deposition: Art to part[J]. Optics & Lasers in Engineering, 2000, 34(4-6): 397-414.
- [4] WANJARA P, BROCHU M, JAHAZI M. Electron beam free forming of stainless steel using solid wire feed[J]. Materials & Design, 2007, 28(8): 2278-2286.
- [5] AMARNATH C, SREENATHBABU A, KARUNAKARAN K P. Statistical process design for hybrid adaptive layer manufacturing[J]. Rapid Prototyping Journal, 1995, 11(4): 235-248.
- [6] DING D, PAN Z, CUIURI D, et al. A multi-bead overlapping model for robotic wire and arc additive manufacturing (WAAM)[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2015, 31: 101-110.
- [7] 耿海滨,熊江涛,黄丹,等. 丝材电弧增材制造技术研究现状与趋势[J]. 焊接, 2015(11): 17-21.
GENG Haibin, XIONG Jiangtao, HUANG Dan, et al. Research status and trends of wire and arc additive manufacturing technology[J]. Welding & Joining, 2015(11): 17-21.
- [8] LI X, GAGNOUD A, FAUTRELLE Y, et al. Dendrite fragmentation and columnar-to-equiaxed transition during directional solidification at lower growth speed under a strong magnetic field[J]. Acta Materialia, 2012, 60(8): 3321-3332.
- [9] BAI X, ZHANG H, WANG G. Modeling of the moving induction heating used as secondary heat source in weld-based additive manufacturing[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 77(1-4): 717-727.
- [10] MALINOWSKI-BRODNICKA M, DEN O G, VINK W J P. Effect of electromagnetic stirring on GTA welds in austenitic stainless steel[J]. Welding J., 1990, 69(2): 52-59.
- [11] LIM Y C, YU X, CHO J H, et al. Effect of magnetic stirring on grain structure refinement: Part 1-Autogenous nickel alloy welds[J]. Science and Technology of Welding

- and Joining, 2010, 15(7): 583-589.
- [12] LIM Y C, YU X, CHO J H, et al. Effect of magnetic stirring on grain structure refinement Part 2-Nickel alloy weld overlays[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2010, 15(5): 400-406.
- [13] 柏兴旺, 张海鸥, 周祥曼, 等. 外加高频磁场下电弧快速成形过程的电磁-流体耦合数值模拟[J]. 机械工程学报, 2016, 52(4): 60-66.
- BAI Xingwang, ZHANG Haiou, ZHOU Xiangman, et al. Electromagneto-fluid coupling simulation of arc rapid prototyping process with external high-frequency magnetic field[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(4): 60-66.
- [14] LI Y, WU C S, WANG L, et al. Analysis of additional electromagnetic force for mitigating the humping bead in high-speed gas metal arc welding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 229: 207-215.
- [15] 陈姬. 高速 GMAW 驼峰焊道形成机理的研究[D]. 济南: 山东大学, 2009.
- CHEN Ji. The study of haumping formation mechanism in high-speed GMAW[D]. Jinan: Shandong University, 2009.
- [16] 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.
- YANG Fengzhao. The suppression of haumping bead by an external magnetic field in high-speed GMAW[D]. Jinan: Shandong University, 2014.
- [17] WU C, YANG F, GAO J. Effect of external magnetic field on weld pool flow conditions in high-speed gas metal arc welding[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2016, 230(1): 188-193.
- [18] SHOICHI M, YUKIO M, KOKI T, et al. Study on the application for electromagnetic controlled molten pool welding process in overhead and flat position welding[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2013, 18(1): 38-44.
- [19] LIN Z Q, LI Y B, WANG Y S, et al. Numerical analysis of a moving gas tungsten arc weld pool with an external longitudinal magnetic field applied[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2005, 27(3-4): 288-295.
- [20] LI L C, XIA W D. Effect of an axial magnetic field on a DC argon arc[J]. Chinese Physics B, 2008, 17(2): 649-654.
- [21] CHEN T, ZHANG X, BAI B, et al. Numerical study of DC argon arc with axial magnetic fields[J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2015, 35(1): 61-74.
- [22] YIN X, GOU J, ZHANG J, et al. Numerical study of arc plasmas and weld pools for GTAW with applied axial magnetic fields[J]. Journal of Physics D Applied Physics, 2012, 45(45): 285203-285215.
- [23] 周祥曼, 张海鸥, 王桂兰, 等. 纵向稳态磁场辅助电弧增材制造的熔池数值模拟及搭接实验研究[C/CD]//第 16 届全国特种加工学术会议, 2015.
- ZHOU Xiangman, ZHANG Haiou, WANG Guilan, et al. Numerical simulation of molten pool and overlapping experimental investigation for arc based additive manufacturing assisted with external longitudinal static magnetic field[C/CD]//The 16th National Conference on Special Processing, 2015.
- [24] 车小平. 纵向磁场作用下铝合金 MIG 焊接实验研究及数值模拟[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2007.
- CHE Xiaoping. Study on the welding test of Al alloy and simulation in mig arc welding with longitudinal magnetic field[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2007.
- [25] 孙景刚. 间歇交变磁场对等离子堆焊金属组织及性能影响机理的研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2009.
- SUN Jinggang. Research on principles of influence of intermittent alternative magnetic field on microstructure and properties of plasma arc surfacing layer[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2009.
- [26] 慈鸿钢. 外加直流磁场对等离子弧堆焊层组织及性能的影响研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2011.
- CI Honggang. The effect of external dc magnetic field on the microstructure and properties of plasma arc surfacing layer[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2011.
- [27] 高亚楠. 纵向磁场作用下高速 TIG 焊接电弧行为及焊缝成形机理研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2012.
- GAO Yanan. Research on high-speed tig welding arc behavior and weld formation mechanism under longitudinal magnetic fields[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2012.
- [28] LUO J, LUO Q, WANG X, et al. EMS-CO₂ welding: A new approach to improve droplet transfer characteristics and welding formation[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2010, 25(11): 1233-1241.
- [29] CHANG Y L, LIU X L, LU L, et al. Impacts of external longitudinal magnetic field on arc plasma and droplet during short-circuit GMAW[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 70(9-12): 1543-1553.
- [30] XIONG J, ZHANG G, GAO H, et al. Modeling of bead section profile and overlapping beads with experimental validation for robotic GMAW-based rapid manufacturing[J]. Robotics and Computer-Integrated

- Manufacturing, 2013, 29(2): 417-423.
- [31] DING D, PAN Z, CUIURI D, et al. A multi-bead overlapping model for robotic wire and arc additive manufacturing (WAAM)[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2015, 31: 101-110.
- [32] 柏久阳, 王计辉, 林三宝, 等. 电弧增材制造厚壁结构焊道间距计算策略[J]. 机械工程学报, 2016, 52(10): 97-102.
- BAI Jiuyang, WANG Jihui, LIN Sanbao, et al. Model for multi-beads overlapping calculation in gta-additive manufacturing[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(10): 97-102.
- [33] SONG Y, PARK S, CHOI D, et al. 3D welding and milling: Part I-a direct approach for freeform fabrication of metallic prototypes[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2005, 45(9): 1057-1062.
- [34] XIONG X H, QUAN D M, CHEN J L. Directly manufacturing table tennis mould by hybrid plasma deposition & milling[J]. Advanced Materials Research, 2014, 887-888: 1219-1222.
- [35] AIYITI W, ZHAO W, LU B, et al. Investigation of the overlapping parameters of MPAW-based rapid prototyping [J]. Rapid Prototyping Journal, 1995, 12(3): 165-172.
- [36] SURYAKUMAR S, KARUNAKARAN K P, BERNARD A, et al. Weld bead modeling and process optimization in hybrid layered manufacturing[J]. Computer-Aided Design, 2011, 43(4): 331-344.
- [37] 王亚男, 廖代强, 武战军. 稳恒磁场对铁素体转变的影响[J]. 材料热处理学报, 2005(5): 105-108.
- WANG Yanan, LIAO Daiqiang, WU Zhanjun. Effect of stable magnetic field on the phase transformation of steels[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2005(5): 105-108.
- [38] 吴开明, 周珍妮, 张国宏, 等. 强磁场对铁基合金中奥氏体分解的影响[J]. 材料工程, 2010(6): 84-89.
- WU Kaiming, ZHOU Zhenni, ZHANG Guohong, et al. Effect of high magnetic field on the decomposition of austenite in fe-based alloys[J]. Journal of Materials Engineering, 2010(6): 84-89.
- [39] 张快, 李运刚, 刘丽敏, 等. 磁场在金属固态相变中的应用[J]. 钢铁研究, 2010, 38(2): 57-59, 62.
- ZHANG Kuai, LI Yungang, LIU Limin, et al. Application of magnetic field in solid phase transformation[J]. Research on Iron and Steel, 2010, 38(2): 57-59, 62.
- [40] 宫明龙, 赵骧, 王守晶, 等. 磁场强度对 Fe-0.76% C 合金先共析铁素体显微组织的影响[J]. 金属学报, 2008, 44(5): 615-618.
- GONG Minglong, ZHAO Xiang, WANG Shoujing, et al. Effect of magnetic field intensity on microstructure of proeutectoid ferrite in Fe-0.76% C alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2008, 44(5): 615-618.
- [41] 梁龙飞, 王绪, 章守华. 临界区磁场热处理双相钢组织及性能的研究[J]. 热加工工艺, 2001(5): 15-17.
- LIANG LongFei, WANG Xu, ZHANG Shouhua. A study the structure and properties of dual-phase steels produced by intercritical heat-treatment under a magnetic field[J]. Hot Working Technology, 2001(5): 15-17.
- [42] 冯光宏, 谢建新. 磁场处理对微合金钢抗腐蚀性能的影响[J]. 钢铁研究学报, 2001, 13(5): 39-42.
- FENG Guanghong, XIE Jianxin. Effect of magnetic treatment on corrosion resistance of microalloyed steel[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2001, 13(5): 39-42.
-
- 作者简介: 周祥曼, 男, 1983 年出生, 博士, 讲师。主要从事电弧增材制造工艺与多尺度数值模拟的研究。
E-mail: zhouxman@ctgu.edu.cn
- 田启华(通信作者), 男, 1962 年出生, 博士, 教授。主要从事机械设计及理论、CAD/CAE/CAM 技术、制造业信息化方面的研究。
E-mail: tqh@ctgu.edu.cn