● 今日铸造 Today Foundry ●

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2021.06.020

电弧增材及镁合金 WAAM 成形技术发展及应用

徐春杰[1,2], 张凯军[1],马 东[1],路瑶涵[1],杨 怡[1],王银玉[1],屠 涛[2,3],田 军[2,3],张忠明[1,2]

(1. 西安理工大学 材料科学与工程学院, 陕西 西安 710048; 2. 西安谢赫特曼诺奖新材料研究院, 陕西 西安 710048;3. 镁高镁诺奖(铜川)新材料有限公司,陕西 铜川 727031)

摘 要:进入 21 世纪,金属材料成形技术正在发生巨大变革。电弧增材制造技术,因具有加工速度快、材料利用率高、成本低等优点,被尝试用于加工各种重要零部件。目前,以熔化极气体保护焊(GMAW)、钨极惰性气体保护焊(GTAW)、等离子电弧焊(PAW)为主,同时结合机器人、计算机仿真模拟、剖分算法、路径规划、工艺参数优化、后处理及组织与性能之间的内在联系等,以减少缺陷,适应不同性能指标需要。综述了电弧增材制造的工艺过程及其在镁合金中的研究现状,展望了镁合金电弧增材先进制造技术及智能化制造的未来发展方向。

关键词:丝材电弧增材;镁合金;3D 打印;智能化制造

中图分类号: TG142.2 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-8365(2021)06-0521-06

Development and Application of Arc Additive Manufacturing and Magnesium Alloy WAAM Forming Technology

XU Chunjie[1,2], ZHANG Kaijun[1], MA Dong[1], LU Yaohan[1], YANG Yi[1], WANG Yinyu[1], TU Tao[2,3], TIAN Jun[2,3], ZHANG Zhongming[1,2]

(1. School of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Xi'an Shechtman Nobel Prize New Materials Institute, Xi'an 710048, China; 3. Meigaomei Nobel Prize (Tongchuan) New Materials Co., Ltd., Tongchuan 727031, China)

Abstract: Entering 21st century, metal materials forming technology is revolutionizing greatly. Arc additive manufacturing technology, due to its advantages of fast processing speed, high material utilization rate and low cost, has been tried to be used to process various important parts. At present, gas metal arc welding (GMAW), gas tungsten arc welding (GTAW), plasma arc welding (PAW) are mainly used in additive manufacturing (AM). At the same time, the robot, computer simulation, subdivision algorithm and path planning optimization, process parameters, post-processing, and the internal relationship between microstructure and performance, etc., to reduce defects, to meet the needs of different performance indicators. In this paper, the process of arc additive manufacturing and the research status of arc additive manufacturing in magnesium alloys are reviewed, and the future development direction of advanced arc additive manufacturing technology and intelligence for magnesium alloys is prospected.

Key words: wire arc additive manufacture; magnesium alloy; 3D Printing; intelligence manufacturing

镁合金具有密度小质量轻、比强度高、导电导热性好、减震性好、冲击韧性高等优良性能,被誉为“21 世纪最具发展前景的绿色工程材料”,在航空航天、汽车制造等领域已经被广泛应用[1]。由于镁为 HCP 结构,难以进行室温塑性变形加工,目前仍以压铸成形为主。然而,气孔、缩松、夹杂、冷隔和充型不良等铸造缺陷严重影响铸件性能[2]。增材制造是近年来发展起来的新型复杂结构定制化产品成形新方法, 按照材料的进给方式主要有铺粉、送粉和送丝等,由于镁蒸汽压低,易挥发、易氧化、易燃、易爆,铺粉和送粉工艺难度大,效率低,实际应用较少。因此,基于丝材的电弧增材制造 (Wire arc additive manufacturing, WAAM) 是目前镁合金增材制造最高效、可靠和安全的选择。利用 WAAM 方法制造的镁合金件比压铸件缺陷更少,更节约原材料[3],镁合金 WAAM 前景十分广阔。

本文综述了 WAAM 工艺过程、研究现状及应用领域, 展望了 WAAM 镁合金的研究方向和发展趋势,以期扩大该技术在镁合金领域的应用。

收稿日期: 2021-05-14

基金项目: 西安市高校重大科技创新平台及科技成果就地转化项目(20GXSF0003),陕西省技术创新引导专项(基金)科技成果转移与推广计划–百项科技成果转化行动项目(2021CGBX-32),2020 国家级大学生创新创业训练计划(G202010700029)

作者简介: 徐春杰(1971—),河南淅川人,博士,教授. 研究方向:镁合金强韧化及增材制造.电话:13119153059, Email: xuchunjie@gmail.com

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1 电弧增材制造

WAAM 技术是一种以电弧为热源,以金属丝材为原材料，以大型数控机床（Computer numerical control,CNC）或六自由度机械臂（Six-DOF robot arm,Six-DOF RA)为移动机构,结合计算机辅助设计,进行逐层加工,从而可以利用相对较低的成本快速成形制造出形状复杂金属构件[4-6],图 1 为熔化极气体保护焊(gas metal arc welding GMAW),或等离子电弧焊 (plasma arc welding, PAW）智能化 WAAW 示意图。由于 WAAM 具有沉积效率高、成形速度快、能量利用率高、成本低等诸多优点,近年来得到了越来越多的关注。其工艺过程包括:模型修复与优化、路径规划、选择工艺参数、电弧增材、后处理。目前 WAAM 技术已经被广泛的应用于铝合金、钛合金、不锈钢、镍基合金等材料,在航空航天、汽车制造、生物医疗、模具工业等领域得到了广泛的应用,如制造发动机外壳、起落架组件、船用螺旋桨等。而对于镁合金,由于丝材制备存在一定难度,目前关于 WAAM 的研究报道仍较少。

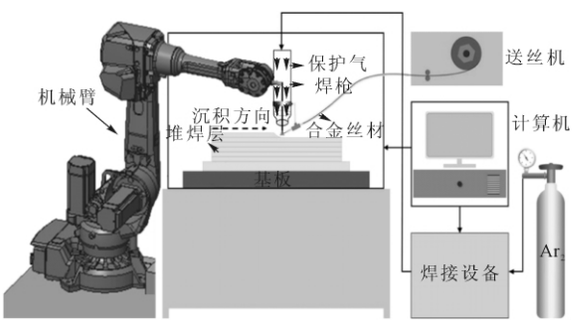


图 1 GTAW 或 PAW 智能化 WAAM 示意图
Fig.1 Schematic diagram of GTAW or PAW intelligent WAAM

1.1 模型修复与优化

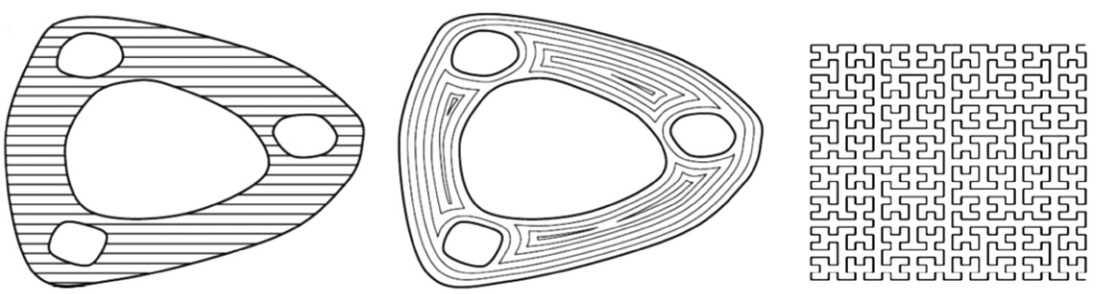
增材制造所使用的模型文件为水密性的 STL 文件，而由于 CAD 模型是以参数化表示模型,STL 文件是以许多的三角面片表示的模型,在转换的过程中有可能出现错误。同时,由于模型设计本身问题,在转换成 STL 文件时也可能产生错误,如反向三角面片,坏边、壳体、重叠三角面片和交叉三角面片等。因此,为确保打印成功和质量,转换后需要对模型进行 STL 错误修复。此外，在参数化模型向 STL 文件转化过程中,必然伴随尺寸精度的降低,尤其是对小尺寸零件而言,精度下降尤为明显。而采用基于曲面的修正算法[7],可以减小 CAD 模型向 STL 文件转化过程中的弦误差、轮廓误差以及圆柱度误差,可以保证模型的精度。可见,可以通过零件轮廓适当优化来避免 STL 文件出现错误,以提高打印尺寸精度,改善质量。

1.2 路径规划

路径规划是 WAAM 的重要环节之一，合理的路径规划对打印过程的顺利进行，获取高精度工件以及提高成形效率具有十分重要的意义。目前,WAAM 常见的填充路径有:往复直线、轮廓偏置和分形线填充路径,见图 1。往复直线路径具有适应性强、成形效率高、算法简单,如图 2(a)。当加工件内孔较多时,成型效率低,质量差;当零件为曲面轮廓时,表面易出现阶梯现象，这些小台阶易影响成形尺寸精度和表面精度质量;当加工尺寸较大的零件时,由于扫描线较长,热输入能量过度集中,加工过程中易造成零件翘曲变形、温度场分布不均匀等问题;

轮廓偏置填充加工路径是连续的,无空行程,加工效率高,如图 2(b)。由于加工方向不断变化,有效避免了已熔堆材料冷却过程中的内应力集中，有利于残余应力降低,可以对工件的变形实现有效控制。然而,在进行偏置的过程中,需要不断确认环与环之间是否有相交或自交,且其算法复杂,成形效率低。

分形线填充能有效避免轮廓偏置过程中的相交和自交问题,并可有效降低残余应力,减少变形,最常用的是 Hilbert 曲线,如图 2(c)所示。然而,由于路径中存在着大量的 90 直角，当焊枪经过这些直角时,角速度与线速度均发生变化,从而会导致焊瘤或者焊不足缺陷,成形质量差,对设备的损耗较大[8-11]。



(a)往复直线路径　(b)轮廓偏置填充　(c)分形线填充

图 2 常用填充路径
Fig.2 Common filling paths

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

上述 3 中种路径规划各有优缺点,分别适合用于不同类型截面的零件。但是,随着 WAAM 技术的广泛应用,零件几何形状的复杂度以及性能要求的不断提高,尤其是在航空航天领域,诸如螺旋桨叶片、发动机叶轮等,单一的路径规划往往不能满足要求。比如针对薄壁零件采用基于中轴变换路径规划算法[10],可以实现无间隙路径,打印质量稳定。针对复杂的几何形状采用模块化路径填充方案 [12],可以保证打印过程中沉积层的均匀性, 改善成形质量, 满足复杂零件加工需要。因此, 为有效解决 WAAM 中的路径填充问题,目前广泛采用的方法是根据所加工零件的具体情况,改进路径填充算法并结合多种填充方法,从而优化填充路径。

1.3　工艺参数与电弧增材

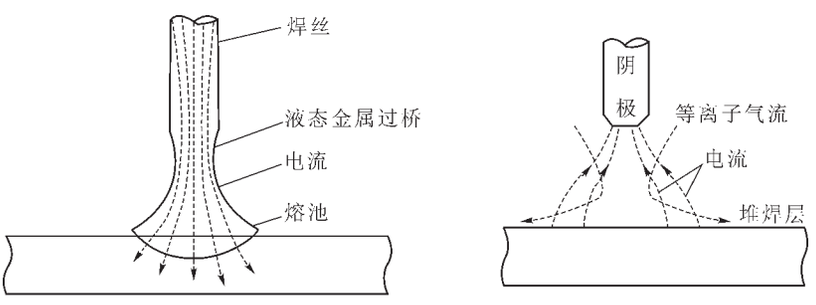
根据热源的不同, 镁合金 WAAM 工艺以熔化极气体保护焊 (Gas metal arc welding, GMAW)、钨极惰性气体保护焊 (Gas tungsten arc welding, GTAW)、等离子弧焊(Plasma arc welding, PAW)为主。GMAW 直接以丝材和基板为电极产生电弧,在惰性气体保护条件下,丝材由电弧作用下形成熔滴并沉积到基板上实现增材制造, 该工艺生产效率高、成本低、零件组织致密、性能优异。由于同轴送丝,自由度高,有利于机械臂的任意角度变位操做。GMAW 沉积效率更高, 大约是 GTAW 和 PAW 工艺的 2~3 倍。然而,由于 GMAW 电弧稳定性较差,加工过程中易产生烟尘和飞溅,因此加工精度相对较低, 成型件的表面粗糙度相对较低;GTAW 以钨极作为电极,电弧与熔池的可见性好、熔道清洁、无需焊后清理;PAW 利用电弧热将气体电离, 并在高速通过喷嘴时受到机械压缩、热压缩、电磁压缩的共同作用下产生高能量密度的等离子弧。PAW 能量密度比 GTAW 高、电弧稳定性好、飞溅小、成型精度高,在一定程度上会减小加工过程工件的变形[13-15]。然而, 由于 GTAW 和 PAW 均存在侧位送丝问题,不利于机械臂的任意角度变位操做,在某些位置难于实现正向送丝,影响智能操作。

WAAM 主要工艺参数包括:电流、波形、送丝速度、焊接速度、保护气的选择、压力和送气流量等。通过对这些工艺参数的调控, 可以改变加工过程中的热输入、温度梯度、冷却速率、层宽、层高等,从而可以实现对组织、性能和缺陷的控制。

(1)电流　在 WAAM 过程中,电流大小直接影响零件的宏观形貌和尺寸,尤其影响组织与性能。电流增大,直接影响零件的宏观形貌与尺寸,一方面丝材熔化所形成熔滴尺寸变大, 堆焊层表面所形成鱼鳞纹变大,零件表面粗糙;另一方面,热输入增多使熔池内金属液的流动性增大, 在电弧力的搅拌作用下,层宽增大,层厚降低[16]。电流显著影响熔宽和焊接速度,送丝速度对焊道余高影响最大[17]。同时,熔池温度将随热输入的增大而升高,冷却速率将降低,晶粒尺寸将显著增大[18]。

当使用脉冲波形电流时,改变脉冲频率,可以细化晶粒。当增大脉冲电流与脉冲频率,AZ61 镁合金接头晶粒尺寸随电流与频率的增加呈先减后增趋势[19]。一方面,脉冲电流可以搅拌熔池,随着脉冲电流的增加,等离子体动量和电磁力将增加。等离子体动量能够产生电弧压力,在熔池表面形成剪切力;电磁力可以使熔池金属液先径向后轴向运动, 如图 3 所示。在等离子体动量和电磁力的共同作用下,熔池内将产生足够的振荡,从而有利于枝晶破碎,提供更多的异质形核点,促使晶粒细化。另一方面,脉冲电流可以提高熔池的冷却速率,峰值电流提供热输入,熔化丝材,基极电流稳定电弧。在基极电流时,热输入突降,有利于熔池冷却速率的提高,更有利于提供更多的异质形核核心, 从而细化晶粒。脉冲频率增加,电弧压力增大,使电弧收缩、变长,同时,基极电流持续时间将减少, 散热时间缩短, 有效热输入增加,晶粒尺寸先减后增[6,18]。

(2)送丝速度　送丝速度变化与热输入变化效果接近,送丝速度增大,相当于单位长度丝材所获



(a)电磁力　　(b)等离子体动量

图 3 熔池受力示意图

Fig.3 Stress diagram of molten pool

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

得的热输入降低，熔池温度降低，冷却速率加快，从而抑制了熔池金属的流动，电弧对熔池的搅拌作用将减小。因此，零件的表面将变得逐渐光滑，且堆焊层层宽将减小，层厚将增大，晶粒尺寸减小[16]。

(3)焊接速度　随着焊接速度的增大，堆焊层每层的加工时间缩短，在其它工艺参数保持不变的情况下，每一层所沉积的合金总量将减少，电弧对熔池的搅拌作用也将减少。因此，零件表面更粗糙，沉积层每层的宽度和厚度也将减少。焊接速度增大，热输入降低，晶粒尺寸减小[20]，焊接速度过快，可能导致打印失败。

(4)保护气氛　WAAM 常用气氛有：CO_2、He、Ar、N_2、H_2。其中，Ar 具有比其它气体更大的电离势能，有利于提高电弧温度，增加冷却速率，应用最广。同时，气体压力和流速也是重要参数，合适的气体压力和流速不但可以有效防止镁合金的氧化，并可以对电弧施加一定机械力。当低热输入时，使电弧更分散；当高热输入时，有利于气体电离，提高电弧的稳定性。然而，如果气体流速过大，则可能在堆焊层中形成气孔[21-22]。

1.4　后处理

WAAM 所加工零件的尺寸精度较低，难以达到直接使用要求，通常仍需要进行减材加工[23]。此外，由于 WAAM 是一个局部快速加热、快速冷却的过程，基板与沉积层、层与层之间存在着较大的温度梯度和残余应力，变形和开裂有时不可避免[24]。因此，必须进行适当的后处理，以消除残余应力，确保零件的成形精度和质量。目前，消除或降低残余应力的常用方法包括：①对于小型零件，可通过基板预热来减小层与层之间的温度梯度，降低冷却速率；②对于尺寸较大和形状复杂的零件，由于对基板加热难度较大，在加工的过程中可以引入超声振动，使树枝晶破碎，并对熔池起到搅拌作用，促使相分布更加均匀，从而减小枝晶间产生的拉应力及不同相因凝固收缩不同而产生的凝固应力；③采用适当的热处理工艺，以有效降低残余应力，可以使组织中的第二相分布的更加均匀，残余应力降低，并使性能得到一定程度的提升[25-26]。

2　WAAM 镁合金

由于镁及镁合金易氧化，因此在进行 WAAM 时大多采用交流电源，焊枪和工件反接，工件为阴极而焊枪为阳极，此时易在工件表面氧化膜处形成阴极斑点，有利于清除金属表面的氧化膜；当焊枪和工件正接，即工件为阳极而焊枪为阴极，此时能够冷却枪头并确保电极发射足够的电子以稳定电弧，从而减少镁合金的氧化，减少加工缺陷。目前，对于镁合金的 WAAM 主要有以下几个问题。

(1)热输入的控制　热输入控制是保障 WAAM 加工零件质量的重要因素，尤其大型零件。如果零件内部积累了过多的热量，将可能出现大量加工缺陷[27]。在 WAAM 初始时，由于直接在基板上熔敷和堆积，因此大部分热量通过基板热传导散失，冷速比较快。随着打印层数的不断增加，基板对熔池的冷却效果将减弱，冷却速率大幅度降低，工件内部积累热量较多，如图 4 所示。一方面，由于热量的不断积累，沉积层会受到反复的热过程，直接影响零件的微观组织和几何尺寸。另一方面，当积累过多的热量时，熔池内液态金属的流动性增加，加工过程可能出现塌陷[28-29]，因此，必须严格控制热输入。热输入的公式为：

$$Q=\eta\frac{IU}{V}$$

其中，Q 为热输入；I 为焊接电流；U 为焊接电压；V 为焊接速度；η 为功率系数。

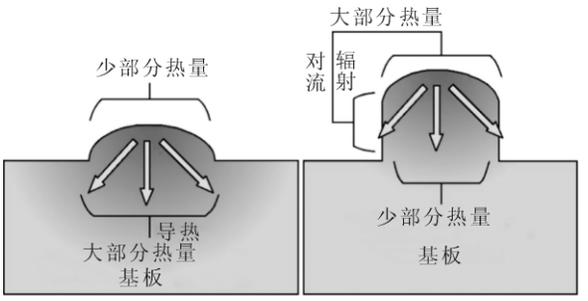


图 4 打印件散热示意图[28]

Fig.4 Schematic diagram of heat dissipation of printed parts

由于采用交流反接或正接，电压恒定不变，因此可改变的参数只有电流和焊接速度。随着打印高度的增加，可以通过不断改变焊接时的电流、焊接速度来对热输入进行调控。此外，还可以通过控制层间温度对热输入进行控制，良好的层间温度不但可以使零件得到合适的热积累，还可以降低气孔率、减少材料脆性[30]。目前，典型的做法是通过控制已沉积层和后续沉积层之间的时间间隔，当工件冷却到合适的温度时，再开始下一层的打印[31-33]。然而，对于大型零件，随着加工高度的增加，层与层之间的停留时间延长，将严重影响生产效率。因此，通过外加水冷却和空气喷射冷却，以增加加工环境中的对流通量，可以实现对层间温度进行控制[34-36]。

(2)合金成分　目前，WAAM 镁合金材质多样，以 AZ31B、AZ91D、AZ80M 等镁合金为主[3, 15, 37-38]，无 WAAM 专用合金，WAAM 工件性能具有一定的局

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

限性。因此,在上述合金基础上,加入微量稀土元素,可以达到提高力学性能的目的,如以 AZ91、AZ61A 合金为基础,加入 RE 和 Ca 元素开发的 AEX11 镁合金及丝材,并用于 WAAM,获得了良好的力学性能[39]。由此可见,开发 WAAM 镁合金专用丝材及产品尤为重要。

3　结语与展望

WAAM 具有成型速度快、灵活度大、成本低等特点,必然会成为结构复杂零件的一种新兴加工工艺。然而,对于镁合金 WAAM 研究相对较少,存在的许多工艺问题仍需深入,并需时间和经费投入。但是,随着研究的不断深入、技术的不断进步,规律的不断总结和探索,镁合金 WAAM 技术必将得到广泛应用。

基于此,后续研究仍需在以下几方面进行深入探索:

(1)开发新型镁合金丝材,以适应不同性能指标的需要。

(2)将计算机仿真模拟与 WAAM 相结合,优化剖分算法,探究路径规划、工艺参数、热处理与组织和性能之间的内在关系,优化工艺、节约成本。

(3)根据加工材料的特性,探寻并优化工艺,减少加工缺陷,从而获得优良性能。

参考文献:

[1] 丁文江,吴玉娟,彭立明,等. 高性能镁合金研究及应用的新进展[J]. 中国材料进展,2010,29(8):37-45.

[2] LORENZO M, ALEGRE J M, CUESTA I I. Magnesium alloy defectology AZ91D high-pressure die cast and influence on the fatigue behaviour [J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2013, 36(10):1017-1026.

[3] TAKAGI H, SASAHARA H, ABE T, et al. Material-property evaluation of magnesium alloys fabricated using wire-and-arc-based additive manufacturing [J]. Additive Manufacturing, 2018, 24: 498-507.

[4] 卢秉恒,李涤尘. 增材制造(3D 打印)技术发展[J]. 机械制造与自动化,2013,42(4):1-4.

[5] MARINELLI G, MARTINA F, GANGULY S, et al. Development of Wire+Arc additive manufacture for the production of large-scale unalloyed tungsten components [J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2019, 82:329-335.

[6] GUO J, ZHOU Y, LIU C, et al. Wire Arc Additive Manufacturing of AZ31 Magnesium Alloy: Grain Refinement by Adjusting Pulse Frequency[J]. Materials, 2016, 9(10):823-836.

[7] ZHA W, ANAND S. Geometric approaches to input file modification for part quality improvement in additive manufacturing[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2015, 20:465-477.

[8] 方力,侯智文,黄俊润,等. 电弧熔丝增材制造复合填充路径规划算法[J]. 南京航空航天大学学报,2019,51(1):98-104.

[9] DING D, PAN Z, CUIURI D, et al. Adaptive path planning for wire-feed additive manufacturing using medial axis transformation [J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 133:942-952.

[10] DING D, PAN Z, CUIURI D, et al. A practical path planning methodology for wire and arc additive manufacturing of thin-walled structures [J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 2015, 34:8-19.

[11] YANG Y, LOH H T, FUH J, et al. Equidistant path generation for improving scanning efficiency in layered manufacturing [J]. Rapid Prototyping Journal, 2002, 8(1):30-37.

[12] MICHEL F, LOCKETT H, DING J, et al. A modular path planning solution for Wire+Arc Additive Manufacturing [J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 2019, 60:1-11.

[13] JAFARI D, VANEKER T, GIBSON I. Wire and arc additive manufacturing: Opportunities and challenges to control the quality and accuracy of manufactured parts [J]. Materials & Design, 2021, 202:109471-109521.

[14] SINGH S R, KHANNA P. Wire arc additive manufacturing (WAAM): A new process to shape engineering materials [J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 44:118-128.

[15] KARUNAKARAN R, ORTGIES S, TAMAYOL A, et al. Additive manufacturing of magnesium alloys[J]. Bioactive Materials, 2020, 5(1):44-54.

[16] BENAKIS M, COSTANZO D, PATRAN A. Current mode effects on weld bead geometry and heat affected zone in pulsed wire arc additive manufacturing of Ti-6-4 and Inconel 718 [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 60:61-74.

[17] 刘东帅,吕彦明,杨华,等. 电弧增材工艺参数对成形质量的影响[J]. 机械科学与技术,2020,39(9):1412-1418.

[18] 施瀚超,胡立杰,郑涛. 电流对电弧增材制造 AZ31 镁合金成型与组织性能的影响[J]. 铸造技术,2018,39(10):2285-2288.

[19] ROSE A R, MANISEKAR K, BALASUBRAMANIAN V, et al. Prediction and optimization of pulsed current tungsten inert gas welding parameters to attain maximum tensile strength in AZ61A magnesium alloy[J]. Materials and Design, 2012, 37:334-348.

[20] SUBRAVEL V, PADMANABAN V, BALASUBRAMANIAN V. Effect of welding speed on microstructural characteristics and tensile properties of GTA welded AZ31B magnesium alloy [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24(9): 2776-2784.

[21] RODRIGUES T A, DUARTE V, MIRANDA R M, et al. Current Status and Perspectives on Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM)[J]. Materials, 2019, 12(7):1121-1135.

[22] MURPHY A B, TANAKA M, TASHIRO S, et al. A computational investigation of the effectiveness of different shielding gas mixtures for arc welding[J]. Journal of Physics D Applied Physics, 2009, 42(11):14-29.

[23] BUCHANAN C, GARDNER L. Metal 3D printing in construction: A review of methods, research, applications, opportunities and challenges[J]. Engineering Structures, 2019, 180:332-348.

[24] SAMES W J, LIAR F A, PANNALA S, et al. The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing [J]. International Materials Reviews, 2016, 61(5):315-360.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

[25] 耿汝伟,杜军,魏正英.电弧增材制造成形规律、组织演变及残余应力的研究现状[J].机械工程材料,2020,44(12):11-17.
[26] 杜畅,张津,连勇,等.激光增材制造残余应力研究现状[J].表面技术,2019,48(1):200-207.
[27] LU X, ZHOU Y F, XING X L, et al. Open-source wire and arc additive manufacturing system: formability, microstructures, and mechanical properties [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 93(5-8):2145-2154.
[28] CUNNINGHAM C R, FLYNN J M, SHOKRANI A, et al. Invited review article: Strategies and processes for high quality wire arc additive manufacturing [J]. Additive Manufacturing, 2018, 22: 672-686.
[29] YANG D, WANG G, ZHANG G. Thermal analysis for single-pass multi-layer GMAW based additive manufacturing using infrared thermography [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 244:215-224.
[30] XIONG J, LEI Y, LI R. Finite element analysis and experimental validation of thermal behavior for thin-walled parts in GMAW-based additive manufacturing with various substrate preheating temperatures [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 126:43-52.
[31] LEI Y, XIONG J, LI R. Effect of inter layer idle time on thermal behavior for multi-layer single-pass thin-walled parts in GMAW-based additive manufacturing [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 96 (1): 1355-1365.
[32] MONTEVECCHI F, VENTURINI G, GROSSI N, et al. Idle time selection for wire-arc additive manufacturing: A finite element-based technique [J]. Additive Manufacturing, 2018, 21: 479-486.
[33] DING J, COLEGROVE P, MEHNEN J, et al. Thermo-mechanical analysis of Wire and Arc Additive Layer Manufacturing process on large multi-layer parts[J]. Computational Materials Science, 2011, 50 (12). Computational Materials Science, 2011, 50 (12): 3315-3322.
[34] DING J, COLEGROVE P, MEHNEN J, et al. A computationally efficient finite element model of wire and arc additive manufacture [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 70(1-4):227-236.
[35] 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.
[36] FILIPPO M, GIUSEPPE V, NICCOLÒ G, et al. Heat accumulation prevention in Wire-Arc-Additive-Manufacturing using air jet impingement[J]. Manufacturing Letters, 2018, 17:14-18.
[37] GUO Y, PAN H, REN L, et al. Microstructure and mechanical properties of wire arc additively manufactured AZ80M magnesium alloy[J]. Materials Letters, 2019, 247:4-6.
[38] HAN S, ZIELEWSKI M, HOLGUIN D M, et al. Optimization of AZ91D Process and Corrosion Resistance Using Wire Arc Additive Manufacturing[J]. Applied Sciences, 2018, 8(8):847-859.
[39] GNEIGER S, Ö STERREICHER J A, ARNOLDT A R, et al. Development of a High Strength Magnesium Alloy for Wire Arc Additive Manufacturing[J]. Metals, 2020, 10(6):778-792.

(上接第 520 页)

的力学性能除断后伸长率和断面收缩率合格，其余力学性能均不合格,不满足使用条件。

(3)服役后 P91 钢显微组织观察显示,硬区域主要由马氏体+少量的铁素体+析出物组成,软区域主要由大块状铁素体+少量的马氏体+析出物组成。软区域中 $M_{23}C_6$ 碳化物的析出及在晶界处的大量聚集、大块状铁素体的形成是导致其强度和硬度降低的主要原因。

参考文献:

[1] 郑准备,张兵,王小迎. P91 钢的性能与组织结构研究[J]. 热加工工艺, 2008, 37(24): 57-58.
[2] 张冰,王国亮,肖功业,等. 长期时效 P91 钢的组织与性能[J]. 材料热处理学报, 2013, 34(4): 123-127.
[3] 翁立奎,陈飞,张悦,等. T/P91 高温炉管服役后的组织与力学性能分析[J]. 热加工工艺, 2020, 49(16): 133-135,139.
[4] 严泽生, 刘永长. 高 Cr 铁素体耐热钢相变过程及强化[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
[5] 陈军. P91 钢管道硬度低的分析及处理 [J]. 价值工程, 2015, 34 (14): 134-135.
[6] 赵永峰,蔡红生,耿进锋,等. P91 导汽管焊后热处理对母材组织与性能影响[J]. 热加工工艺, 2014, 43(7): 54-56,60.
[7] 范德良,王志武,句光宇. P91 钢管道异常低硬度部位的组织和性能[J]. 金属热处理, 2020, 45(3): 1-6.
[8] 高立新,李炜丽,侯小龙,等. P91 钢高温蒸汽管道低硬度对其理化性能的影响[J]. 华北电力技术,2015(7):37-43,66.
[9] 王宝臣,田旭海,梁军,等. P91 钢管硬度低的原因分析及对性能的影响[J]. 神华科技,2012,10(3): 48-52.
[10] 钟万里,李文胜,王伟,等. P91 钢管长时间服役后的组织与力学性能[J]. 金属热处理, 2015, 40(6):54-60.
[11] GRYBENAS A, MAKAREVICIU V, BALTUSNIKAS A, et al. Correlation between structural changes of $M_{23}C_6$ carbide and mechanical behaviour of P91 steel after thermal aging [J]. Materials Science and Engineering A, 2017(696): 453-460.
[12] PAUL V T, SAROJA S, VIJAYALAKSHMI M. Microstructural stability of modified 9Cr1Mo steel during long term exposures at elevated temperatures [J]. Journal of Nuclear Materials, 2008, 378 (3): 273-281.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net