

# 4043铝合金电弧增材冷约束组织特征研究\*

刘一搏<sup>1,2</sup>, 靳鹏<sup>1,2</sup>, 王建峰<sup>1,2</sup>, 李军兆<sup>1,2</sup>, 李长光<sup>3</sup>, 李子岩<sup>2</sup>, 孙清洁<sup>1,2</sup>

(1. 哈尔滨工业大学先进焊接与连接国家重点实验室, 哈尔滨 150001;

2. 哈尔滨工业大学(威海)山东省特种焊接技术重点实验室, 威海 264209;

3. 北京遥感设备研究所, 北京 110000)

**[摘要]** 采用强冷约束辅助电弧增材方法制造 4043 铝合金薄壁墙体, 并对薄壁试样的宏观成型及组织特征进行研究。结果表明, 使用强冷约束装置后试样垂直度提高, 表面成形精度得到明显改善; 平均晶粒尺寸由不加强冷约束时的 25 $\mu\text{m}$  减小为 12 $\mu\text{m}$ , 晶粒得到明显细化; 施加约束后 4043 铝合金侧壁直接与约束装置接触, 使得侧壁散热速度加快, 侧壁产生胞状组织, 中心为柱状组织且与增材方向呈一定角度生长。薄壁墙体底部到顶部硬度呈现递减规律, 硬度平均值由不加约束时的 48HV 提高到 58HV; 横向晶粒分布为两侧呈胞状组织, 中心区域为柱状组织, 中心区域硬度比两侧低。

**关键词:** 强冷约束; 电弧增材; 冷金属过渡; 微观组织; 铝合金

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2019.01/02.058



刘一搏

讲师, 主要研究方向包括金属增材制造方法及设备、异种金属连接界面行为及机理等。主持国家自然科学基金 1 项、国家科技重大专项子课题 1 项及其他横向课题 5 项, 发表学术论文 20 余篇。

铝合金以其轻质、耐腐蚀且具有良好的理化性能等优势被广泛应用于石油化工、船舶制造、汽车及航空航天等工业领域<sup>[1-3]</sup>。随着航空航天产业的迅速发展, 传统的铸造方式由于自身原理性的限制已经不能满足对大型结构件及复杂零件的快速制造要求<sup>[4]</sup>。而增材制造作为一种新型制造方法, 可以实现复杂零件的快速加工制造<sup>[5]</sup>。

电弧填丝增材制造是将电弧作为热源, 焊丝作为填充材料, 将焊丝熔化, 采用连续沉积的方法制造所需部件, 与激光增材制造技术和电子束增材制造技术相比, 具有制造成本低、生产效率高、设备简单等特点, 该

方法已成为实现高质量金属零件经济快速成形的的方法之一<sup>[6]</sup>。Ouyang 等<sup>[7]</sup>采用 VP-TIG 的方式研究了不同增材工艺参数对润湿及宏观成形的影响, 研究表明基板温度对铝合金增材有重要的影响, 采用基板预热的方式可以改变焊缝成形, 当基板预热温度为 118 $^{\circ}\text{C}$  时, 明显改善了增材试样的润湿及成形。Gu 等<sup>[8]</sup>在对 2319 铝合金和 5087 铝合金增材制造过程中认为, 不同位置晶粒尺寸差异及熔合区高的气孔率是造成强度下降的主要原因, 采用层间轧制的方法沉积一层接着对该层施加一定的压力能够减少气孔数量。Wang 等<sup>[9]</sup>搭建了一种基于 GTAW 的新型增材系统, 研究不同工艺参数对 4043 铝合金增材构件组织及性能的影响。研究表明焊接电流、焊接电压、送丝

\* 基金项目: 国家重点研究开发项目 (2016YFB0300602); 国家自然科学基金 (51705103)。

速度、增材速度等工艺参数对增材构件的宏观成形、显微组织、力学性能有重要的影响。对显微组织进行研究,发现顶层为细小的枝晶组织,中间层和底层为粗大的柱状晶组织,柱体表面为细小的等轴晶组织。铝硅共晶主要分布在晶界及层间结合处。底层由于散热的原因主要为柱状晶。增材构件的硬度从顶层到中间层到底层逐渐减小,这是由于上层沉积金属对下层的热影响使得下层组织粗化,从而造成硬度下降。Zhang 等<sup>[10]</sup>采用变极性(Cold Melt Transfer, CMT)进行 Al-6Mg 合金增材制造,研究表明顶部为细小的胞状晶,中间为柱状晶,不同晶粒导致各部位抗拉强度差异较大,采用变极性 CMT 方法能够显著细化晶粒,提高材料屈服强度及极限抗拉强度。综上,目前国内外对于铝合金电弧增材制造技术的研究已有许多,且主要集中在通过调节焊接参数、轨迹优化等调控增材件的成型精度及组织性能。在铸造、锻压及焊接领域施加水冷能够有效细化晶粒,Laitila 等<sup>[11]</sup>在研究马氏体钢焊后强制冷却对粗晶热影响区机械特性的影响中得出,施加强冷约束能够快速降低冷却时间,提高生产效率,此外焊缝力学性能得到提高。陈明华等<sup>[12]</sup>在高纯铝组织细化工艺研究中认为,在多向锻造过程中,道次间施加水冷使得锻造后的组织更加细小均匀,其性能优于道次间不加水冷试样。而在电弧增材制造领域,增材构件的组织为铸态组织,存在组织粗化的问题,这会造成增材件力学性能的下降,这一问题尚未得到较好的解决。将水冷约束引用到电弧增材领域无疑能够解决组织粗化问题,而针对这一研究国内外所做的工作尚少,Wu 等<sup>[13]</sup>采用丝材电弧增材制造 Ti-6Al-4V 合金墙体,结果表明引入 CO<sub>2</sub> 气体强制层间冷却装置后增材墙体成形变好,可重复性提高,沉积层间停留时间大幅度

减小,生产效率提高。此外施加冷却装置后使得晶粒内部柱状  $\alpha$  相增多,从而产生高密度位错,使得增材墙体极限抗拉强度提高。综上,在增材制造过程中施加冷约束能够解决晶粒粗大的问题,而这一方法在电弧增材领域应用极少,有必要进行系统研究。为改善持续热循环对增材部件中下部组织粗大的影响,本文在增材过程中施加强冷约束,以期降低持续热循环对组织的影响,并对薄壁试样的宏观成形及组织特征进行研究。

## 试验及方法

试验采用福尼斯公司生产的 CMT4000 Advance 型弧焊电源,并配备 ABB 焊接机器人及自行设计制作的强制冷却约束装置,如图 1 所示。采用 5mm 厚纯铝板作为母材基板,选用直径 1.2mm 的 ER4043 铝合金焊丝作为熔敷填充材料,焊丝成分见表 1。

强制冷却约束装置使用两个水冷铜块作为冷却板,间距可调节,铜块中间中空并通过水管与水箱及循环装置连接,并且将约束装置与焊枪固定连接,增材过程中水冷装置随焊枪移动而移动,实现动态水冷,该装置可实现增材墙体强制冷却及

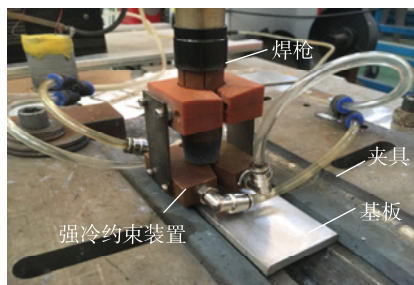


图1 焊接及强制冷却装置示意图  
Fig.1 Schematic of welding and forced water cooling equipment

表1 ER4043铝合金焊丝成分百分含量

Table 1 Composition percentage of ER4043 aluminum alloy welding wire %

材料	Al	Ti	Mg	Si	Cu	Mn	Fe	Zn
4043	余量	0.2	0.05	5.0	0.305	0.05	0.8	0.1

约束成形。4043 铝合金增材制造过程中,通过编程语言来实现机器人与焊接电源的通讯,并对机器人的行走路径进行规划控制。试验所用焊接速度为 7mm/s,第一层焊道焊接电流为 96A,以后每层焊接电流为 69A,分别在不施加约束(1#)、约束间距 4mm(2#)、5mm(3#)、6mm(4#)条件下进行增材制造。

切取 4043 铝合金增材薄壁试样顶部、中部和底部,用金相砂纸打磨至 3000#,经抛光机抛光至镜面。将抛光后的金相试样用 20% 氢氟酸溶液腐蚀 10s,腐蚀后用水冲洗,然后置于盛酒精的烧杯中超声清洗 3min。采用 DSX510 光学显微镜对金相试样进行显微组织分析。采用 HMAS-D100Z 显微维氏硬度仪对试样微观硬度进行检测,加载力为 0.245kg,试验力保荷时间 10s,沿纵向测试线从试样底部向顶端每隔 1mm 取一点,同样也沿横向测试线从左往右每隔 0.5mm 取一点测试。采用 D8 Advance X 射线衍射仪对物相进行了分析。

## 结果与讨论

### 1 宏观成形控制

1#、3# 增材件侧壁成形形貌对比和金相件外观形貌对比如图 2 所示。由图 2 可知,不施加冷却约束时,由于持续热循环导致热量积累较为严重,随着堆积层数的增加,熔宽有增大的趋势,成形精度较差,此外持续热循环导致热量积累很容易造成增材过程中墙体坍塌。施加冷却约束后,在相同的焊接参数下,由于铜块的约束间距恒定,即增材件的熔宽始终保持不变,在机械约束作用下增材件的高度得到明显提高,两侧侧壁

垂直,在一定程度上控制并改善了成形形貌。

铝合金增材制造过程中存在堆积层形状及边缘形态难以控制,成形精度及垂直度低等问题。由于堆积层热积累较为严重,熔池过热难于凝固,很容易出现熔敷金属大面积坍塌现象。使用冷却约束时,水冷铜块可以提高熔敷金属的散热速度使铝合金迅速凝固成形,提高效率。同时在约束装置的挤压下,焊道厚度在一定范围内可控,侧壁垂直度提高,成形精度得到明显提高。

## 2 微观组织特征

采用X射线衍射对4043铝合金增材试样进行物相分析,如图3所示。分析X射线图谱可知,在衍射角为 $20^{\circ}\sim 80^{\circ}$ 范围内,出现Al的三强峰及Al-Si共晶三强峰,即 $Al_{3,21}Si_{0,47}$ 。因此,增材试样组织由Al及Al-Si共晶组成。

无约束及加水冷约束装置进行4043铝合金增材后,第3层中间位置组织微观形貌如图3所示。不加强冷约束时晶粒粗大,平均晶粒尺寸为 $25\mu m$ ,约束间距为4mm、5mm、6mm时,平均晶粒尺寸分别为 $12\mu m$ 、 $15\mu m$ 、 $19\mu m$ 。与不加强冷约束相比,晶粒得到明显细化,如图4所示。晶粒均为胞状晶且晶界处有大量灰色相析出,结合XRD分析可知,该灰色相为Al-Si共晶组织。4043铝合金中Si含量约为5%,而Al-Si共晶中Si含量为12.6%,表明Si在晶界处富集。这是由于结晶过程中界面能的存在,且晶粒生长向着降低界面能的趋势发展(晶粒长大、晶界平直化,降低界面能的活性元素在晶界富集等),而Si能降低Al的界面能<sup>[14]</sup>,因此结晶过程中Si在晶界处富集,并能够起到细化晶粒的作用。水冷约束对焊缝会起到加速冷却的作用,使得铝合金快速形核结晶,并且降低持续热循环对晶粒的重熔作用,从而细化晶粒。随着约束间

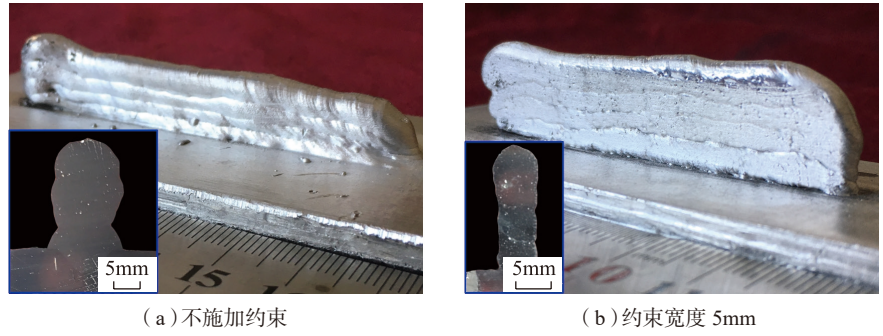


图2 4043铝合金增材薄壁试样侧壁及截面宏观形貌图

Fig.2 Macroscopical morphology of lateral wall and section of 4043 aluminum alloy specimen

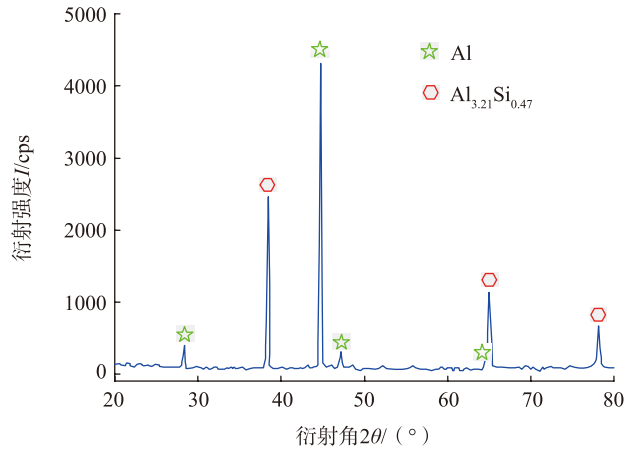


图3 4043铝合金增材薄壁试样X射线衍射图谱

Fig.3 X-ray diffraction pattern of 4043 aluminum alloy specimen

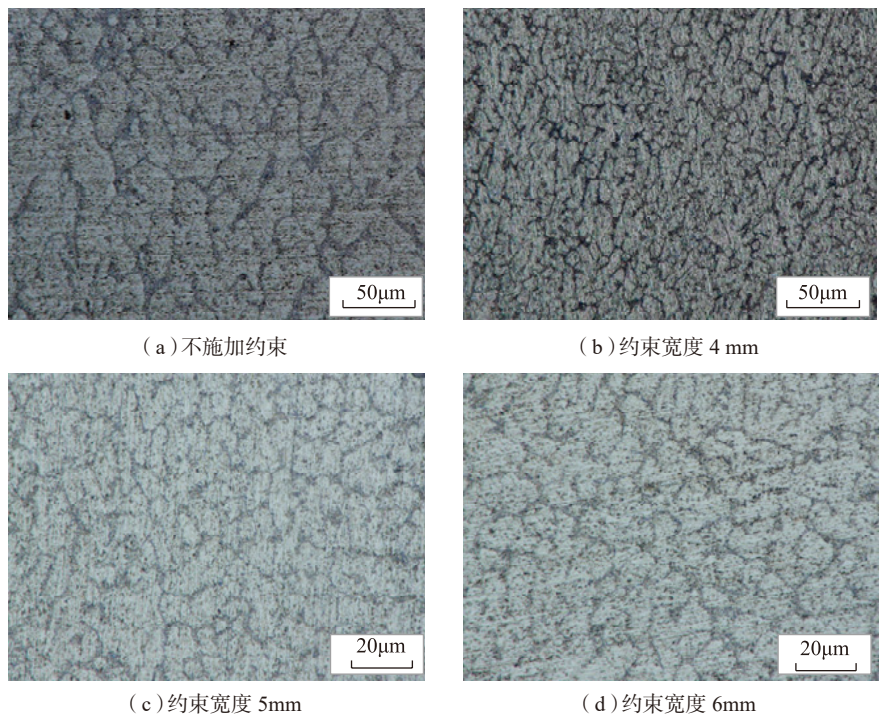


图4 4043铝合金施加约束前后金相组织

Fig.4 Metallographic structure of 4043 aluminum alloy specimen before and after constraint is applied

距增加,晶粒尺寸逐渐增加,表明加速热量散失、降低热循环能够有效细化晶粒尺寸。

2# 增材件侧壁第 4 层中心位置及第 2 层中心及边缘组织形貌如图 5 所示。根据图 5 (a) 中的金相图片可以看到,顶部晶粒为胞状晶。成形件底部侧壁和中间位置的晶粒生长方向不同,中间晶粒生长方向与增材方向呈现一定角度,从中心向两侧由柱状组织向胞状组织过渡,侧壁为胞状组织,如图 5 (b) 所示。分析认为,不施加冷却装置时,由于熔池底部与已沉积焊道相接触,使得热流沿沉积方向向基板散失,该方向为最大温度梯度方向,晶粒生长方向与热流方向相反,沿增材方向生长。在增材过程中,已沉积墙体与熔池接触使得墙体表层重熔,在层间结合处产生粗大晶粒。同时在已沉积焊道产生持续热循环,使得处于固-液相线间的晶粒熔化并且互相吞噬,沿热流反方向生长产生柱状组织,晶粒生长具有一定的方向性。增材墙体顶部组织相对较细,是因为熔池顶部持续热循环作用微弱,热量又可以通过空气散失,使得结晶速率增大,从而形成细小的胞状组织。施加强冷约束后,在水冷作用范围内,使得增材墙体最大温度梯度由不加约束的竖直向下分布转变为从熔池中心向水冷侧壁分布,新的焊道在成形时与侧壁水冷铜块之间的散热速度比基体铝合金熔覆层之间的散热速度要快,侧壁结晶速度加快,随着 Si 的偏析,高浓度 Al 首先形核,形核质点增多且结晶速度加快,因此在侧壁外层产生胞状组织;墙体中心区域散热慢,成为温度最高区域,热量从中心处沿斜下方散失,使得该区域处于固-液相线间的晶粒熔化并且互相吞噬,产生柱状组织且生长方向与热量散失方向吻合。因此,水冷约束增材墙体中下部产生从中心向两

侧由柱状组织向胞状组织过渡的特殊组织特征。与未施加水冷约束相

比,施加水冷约束后散热更快,持续热循环对组织影响更小,因此晶粒

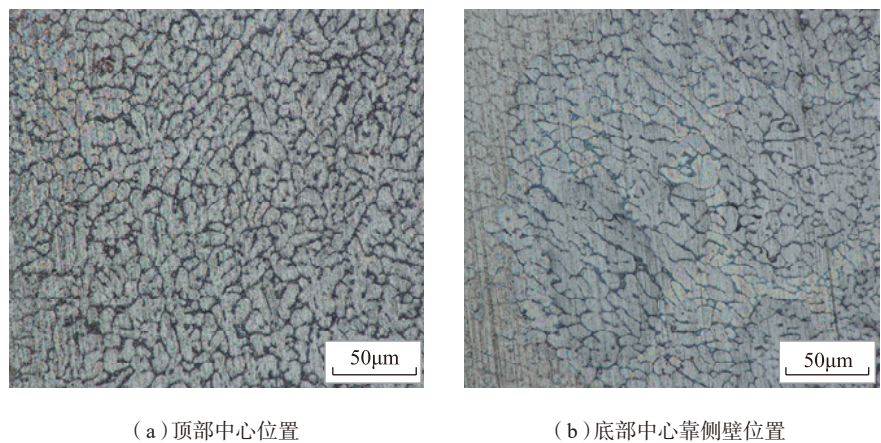


图5 施加4mm约束时4043铝合金试样金相组织  
Fig.5 Metallographic structure of 4043 aluminum alloy specimen with forced cooling equipment

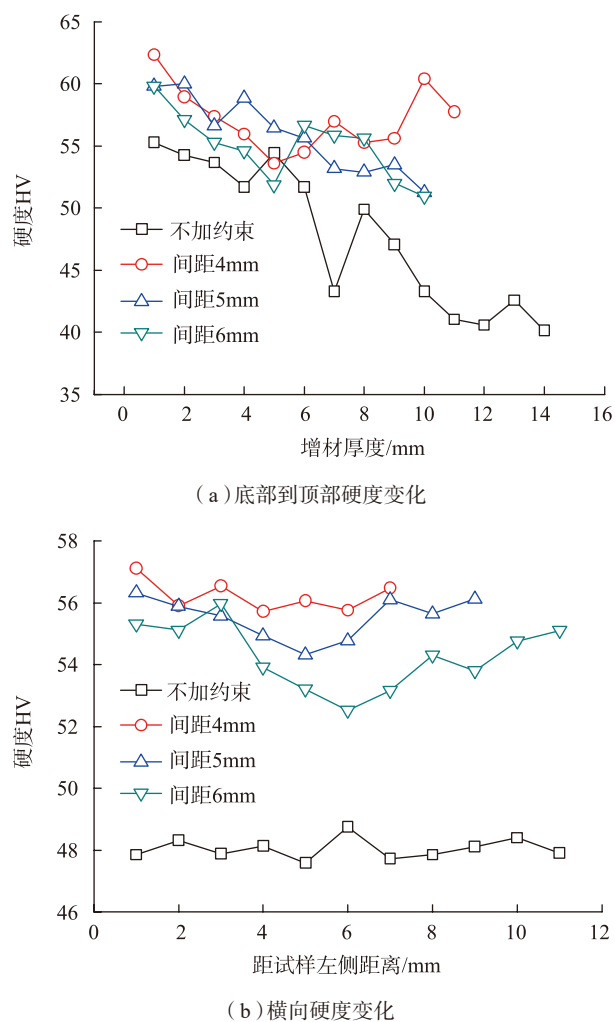


图6 施加约束前后4043铝合金试样显微硬度  
Fig.6 Microhardness of 4043 aluminum alloy specimen before and after constraint is applied

得到明显细化。

### 3 显微硬度

显微硬度值是金属材料重要力学性能之一,它从侧面也可以反映出材料内部组织,成分均一性,与微观组织紧密相连。1#、2#、3#、4# 增材试样底部至顶部及横向硬度变化如图 6 所示。由图 6 (a)可知,对于单一的增材件,其靠近基板熔合线的底部硬度要高于堆积层顶部的硬度,这是因为随着热量的累积,顶部熔敷金属的晶粒组织较为粗大,硬度较低。在不施加约束的增材件上体现得更为明显。施加冷却约束装置后,试样整体的峰值硬度和平均硬度得到明显提高,其峰值硬度与最小硬度的差值变小,整体硬度分布更加均匀。此外,沿纵向测试线硬度值高低交替变化,原因是增材过程中,层与层之间结合部位重熔,晶粒长大,硬度降低,而熔合线附近因过冷度大,形核率的增加比晶核长大的速度更快,晶粒较为细小,硬度较高。由图 6 (b)可知,施加冷却约束装置后,试样两侧的硬度值比中心线附近的略大,这个差值随着约束间距的增大变得更为明显。分析认为随着约束间距的增大,水冷铜块对试样中心线附近的冷却效果减弱,导致侧壁和中心线附近存在温度差值,侧壁晶粒组织的尺寸较细,使得试样侧壁硬度值比中心线附近略大。而对于不加约束的试样,由于其主要散热途径为和下层熔敷金属之间的热传递以及和空气之间的交换散热,横向测试线上各点散热速率均匀,所以未出现上述现象。

### 结论

(1) 使用冷却约束装置后,堆积层厚度在一定范围内可控,试样垂直度提高,表面成形精度得到明显改善;不加强冷约束时晶粒粗大,平均晶粒尺寸为  $25\mu\text{m}$ ,约束间距为

4mm、5mm、6mm 时,平均晶粒尺寸分别为  $12\mu\text{m}$ 、 $15\mu\text{m}$ 、 $19\mu\text{m}$ ,与不加强冷约束相比,晶粒得到明显细化;施加约束后 4043 铝合金侧壁直接与约束装置接触,散热快且有较强指向性,使得侧壁产生胞状组织,中心产生柱状组织且与增材方向呈一定角度生长。

(2) 使用冷却约束装置后,增材试样纵向及横向硬度明显提高,纵向硬度平均值由不加约束时的 48HV 提高到 58HV;横向硬度平均值由不加约束时的 48HV 提高到 56HV。

### 参考文献

[1] 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: 3315-3322.

[2] WANG F D, WILLIAMS S, RUSH M. Morphology investigation on direct current pulsed gas tungsten arc welded additive layer manufactured Ti6Al4V alloy[J]. *International Journal of Manufacture Technology*, 2011, 57: 597-603.

[3] 陈家河. 高强铝合金机器人双面双弧自动焊接工艺研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2015.

CHEN Jiahe. Research on double-arc automatic welding technology of high-strength aluminum alloy robot[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2015.

[4] LINK A N. Basic research and productivity increase in manufacturing: additional evidence[J]. *American Economic Review*, 1981, 71(5): 1111-1112.

[5] 张禹, 王世龙, 罗震, 等. 基于机器人堆增材制造工艺与方法研究[J]. *制造业自动化*, 2013(11): 145-147.

ZHANG Yu, WANG Shilong, LUO Zhen, et al. Research on the technology and method of robot reactor augmentation[J]. *Manufacturing Automation*, 2013(11): 145-147.

[6] KAZANAS P, DEHERKAR P, ALMEIDA P, et al. Fabrication of geometrical

features using wire and arc additive manufacture[J]. *Journal of Engineering Manufacture*, 2012, 226(6): 1042-1050.

[7] OUYANG J H. Rapid prototyping of 5356-aluminum alloy based on variable polarity gas tungsten arc welding: Process control and microstructure[J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2002, 17(1): 103-124.

[8] GU J, DING J, WILLIAMS S W, et al. The effect of inter-layer cold working and post-deposition heat treatment on porosity in additively manufactured aluminum alloys[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, 230(4): 26-34.

[9] WANG H, JIANG W, OUYANG J, et al. Rapid prototyping of 4043 Al-alloy parts by VP-GTAW[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 148(1): 93-102.

[10] ZHANG C, LI Y, GAO M, et al. Wire arc additive manufacturing of Al-6Mg alloy using variable polarity cold metal transfer arc as power source[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2017, 711: 415-423.

[11] LAITILA J, LARKIOLA J, PORTER D. Effect of forced cooling after welding on CGHAZ mechanical properties of a martensitic steel[J]. *Welding in the World*, 2018, 62(6): 1247-1254.

[12] 陈明华. 高纯铝组织细化工艺研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2010.

CHEN Minghua. Study on the technology of high purity aluminum structure refining[D]. Shenyang: Northeastern University, 2010.

[13] WU B, PAN Z, DING D, et al. The effects of forced interpass cooling on the material properties of wire arc additively manufactured Ti6Al4V alloy[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, 258: 97-105.

[14] SHEN P, FUJII H, NOGI K. Wettability of R(0112) single crystalline and polycrystalline  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  substrates by Al-Si alloys over wide composition and temperature ranges[J]. *Journal of Materials Science*, 2006, 41(21): 7159-7164.

通讯作者: 孙清洁, 教授, 研究方向为窄间隙、增材、水下焊接等, E-mail: qjsun@hit.edu.cn.

## Microstructure Characteristic of 4043 Aluminum Alloy Produced by Arc Additive Manufacturing Process With Forced Water Cooling Constraint

LIU Yibo<sup>1,2</sup>, JIN Peng<sup>1,2</sup>, WANG Jianfeng<sup>1,2</sup>, LI Junzhao<sup>1,2</sup>, LI Changguang<sup>3</sup>,  
LI Ziyang<sup>2</sup>, SUN Qingjie<sup>1,2</sup>

( 1. State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. Shandong Provincial Key Laboratory of Special Welding Technology, Harbin Institute of Technology at Weihai,  
Weihai 264209, China;

3. Beijing Remote Sensing Equipment Research Institute, Beijing 110000, China )

**[ABSTRACT]** The 4043 aluminum alloy thin-wall was manufactured by arc additive manufacturing (AM) process with forced water cooling constraint, and the macro-appearance and microstructure of AM specimens were studied. The results revealed that the verticality of the sample and the surface forming precision were improved. The average grain size decreased from 25 $\mu\text{m}$  to 12 $\mu\text{m}$  when the water cooling constraint was used, and the grain size was obviously refined. When the water cooling constraint device was applied, the 4043 aluminum alloy lateral wall was directly in contact with the restraint device, and the heat quickly dissipated. Therefore, the columnar grain grew in a certain angle. The hardness decreased from the bottom to the top of the AM specimen, and the average value of hardness increased from 48HV without restriction to 58HV. The horizontal grain distribution was cellular grain on both sides, central region was columnar grain, and the hardness of central region was lower than that of both sides.

**Keywords:** Forced water cooling constraint; Arc additive manufacturing; Cold metal transfer; Microstructure;  
Aluminum alloy

(责编 铃兰)

(上接第37页)

## Research Progress of Additive Manufacturing Technology and Its Applications for Metamaterial Structure

LIANG Qingxuan, YANG Zhen, HE Jin, JIANG Zijie, CHEN Tianning, LI Dichen  
( School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China )

**[ABSTRACT]** Metamaterial structure has important scientific research value and extensive application prospect in military stealth and camouflage, communication, security and medical imaging owing to the ability of manipulating the phase and propagation mode of electromagnetic wave and acoustic wave precisely. The research is one of the hotspots in the field of international academic and engineering. Generally speaking, the research on metamaterial structure in the world has greatly promoted its development of lightness, broadband, high performance and practicality. However, the interdisciplinary research of manufacturing technology and electromagnetics, acoustics, physics, materials and other disciplines should be further focused. It is necessary to accelerate the exploration of the way of manufacturing metamaterial structure in a large scale, and promote its rapid development towards application. In this paper, the application status of additive manufacturing technology in manufacturing metamaterial structure is summarized, and the research progress of metamaterial structure functional devices is discussed. We also discuss and prospect the future development trend about metamaterial structure.

**Keywords:** Metamaterial structure; Sub wavelength; Additive manufacturing; Functional device; 3D Printeing;  
Sterelithography

(责编 铃兰)