基于三维CT图像的电弧增材制造高强AlCuMnZr合金的气孔缺陷及其控制研究

康士豪，孟杰，杨代婷，马欣凯，魏浩鹏，解威豪，敖豪杰，周颖惠
西安工业大学材料与化工学院　陕西西安　710021

摘要：研究了电弧增材制造（Wire and Arc Additive Manufacture，WAAM）高强AlCuMnZr合金的气孔缺陷形成机理及其控制方法。基于三维CT图像分析技术，对采用自然空冷（AC）、基板强制水冷（WC）及热等静压（HIP）后处理的薄壁件气孔缺陷分析。结果表明：AC/WC/HIP试样的气孔率分别为1.29%、1.21%、0.45%。HIP处理可有效降低气孔率并提升合金力学性能。基板自然空冷下WAAM成形AlCuMnZr合金经HIP处理后，抗拉强度、屈服强度和伸长率分别为（270±18）MPa、（150±8）MPa和（9±1）%。

关键词：电弧增材制造；AlCuMnZr铝合金；气孔缺陷；热等静压；CT技术

Study of porosity defect and Its controlling in WAAM of high-strength AlCuMnZr alloys based on 3D CT images

KANG Shihao，MENG Jie，YANG Daiting，MA Xinkai，WEI Haopeng，
XIE Weihao，AO Haojie，ZHOU Yinghui
School of Materials and Chemical Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, Shannxi, China

Abstract：Pore defect formation mechanism and its control method of high-strength AlCuMnZr alloy fabricated by Wire and Arc Additive Manufacture (WAAM) were studied in this paper. Based on three-dimensional CT image analysis technology, the results of analyzing the porosity defects of thin-walled parts post-treated by natural air cooling (AC), substrate-forced water cooling (WC) and hot isostatic pressing (HIP) show that the porosity of the WC/AC/HIP specimens are 1.29%, 1.21% and 0.45%, respectively, and that the HIP treatment can effectively reduce the porosity and improve the mechanical properties of the alloys. The tensile strength, yield strength and elongation of AlCuMnZr alloy formed by WAAM under natural air-cooling of the substrate after HIP treatment were （270±18）MPa, （150±8）MPa and （9±1）%, respectively.

Keywords: WAAM; AlCuMnZr aluminum; porosity defect; HIP; CT

1　序言

增材制造作为一项颠覆性技术，是制造业升级的核心助推力，历经40余年的探索与发展，增材制造技术的应用范围由原型制造进入产品快速制造阶

基金项目：陕西省自然科学基础研究计划一般项目（青年）（2023-JC-QN-0551）；中国博士后科学基金第73批面上资助（312804）；陕西省教育厅大学生创新创业训练计划项目（国家级）（202310702054）。
第一作者：康士豪，硕士研究生，主要从事电弧增材制造研究，E-mail：kangshihao@st.xatu.edu.cn。
通信作者：周颖惠，讲师，主要研究方向为高效率电弧增材制造大尺寸高强铝合金的制备工艺、凝固行为、缺陷控制和力学性能方面的研究，E-mail：zhough1014@163.com。

段，并正在向产业化、规模化迈进[1, 2]。随着航空航天、汽车、船舶等高景气行业的快速发展，增材制造有望迎来黄金发展期[3, 4]。增材制造与传统精密加工技术相比，具备诸多优势：①能够快速加工成形复杂零件。增材制造贴合“设计引导制造”的创意驱动，基本不受零件形状的限制，可以加工内部结构复杂、传统加工无法完成一体制造的产品。②缩短产品研发周期，加速产品迭代。无需传统工具、夹具和多重处理，可在单个设备上快速制造所需零件。③材料利用率高。金属增材制造有效避免了传统加工切割过程中产生废料的问题，材料利用率可达95%，远超航空锻造的15%~25%[5-8]。

金属增材制造技术分为粉末床熔融（Powder Bed Fusion，PBF）和直接能量沉积（Directed Energy Deposition，DED）两大类。DED根据原材料不同分为送粉和送丝两种方式，其中电弧增材制造（Wire and Arc Additive Manufacture，WAAM）是典型的同步送丝成形方式[8]。WAAM是以电弧为热源熔化金属丝材，按照路径规划进行层层堆积直至成形，其具有生产效率高、原材成本低、沉积过程安全可靠的特点。WAAM在大尺寸结构件制造中有显著优势，通过一体化成形复杂结构件的加工方式，简化了传统制造的准备过程，缩短了研发周期，并且与激光增材相比，WAAM可更好地成形对激光反射率高的铝合金、镁合金等轻质合金[9-11]。

航空航天等领域对一些大型化、轻量化和耐疲劳部件的需求，使更多研究者开始关注WAAM成形轻质合金，其中最突出的轻合金是其耐蚀性和比强度高的铝合金[12, 13]，如2系Al-Cu合金，但Al-Cu合金是一种具有高热导率和高热膨胀系数的合金，存在非平衡凝固行为和残余应力导致的变形和不均匀收缩、气孔热裂纹、力学性能低等问题，严重限制了其工程应用[9]，其中气孔缺陷是当前面临的关键问题[14]。如BAI等采用非熔化极保护焊（Tungsten Inert Gas, TIG）成形AlCuMnZr合金，发现气孔以层状带分布在成形件中，从而导致沉积件力学性能各向异性[15]。Cranfield大学利用冷金属过渡技术（Cold Metal Transition, CMT）成形AlCuMnZr合金构件，对构件利用X射线计算机进行断层扫描，获得气孔分布、大小及形状等特征信息[16]。

针对气孔缺陷问题，目前主要有两类解决方案：一类是通过改善工艺抑制气孔形核，促进气孔逸出；二是采用层间轧制和锤击等复合工艺促进前一沉积层成形的气孔闭合。RYAN等采用CMT-WAAM成形AlCuMnZr合金探究保护气流速和压力对于气孔产生的影响[17]。CONG等研究表明，控制沉积过程中的热输入是减小CMT成形AlCuMnZr合金中气孔尺寸和数量的有效方式[18]。ZHOU等在沉积过程采用基板水冷却，发现可有效控制成形过程热积累，从而降低孔隙率[19]。其他研究者使用CMT-WAAM沉积AlCuMnZr合金过程中，添加超声波辅助成形[20]、采用层间轧制工艺[21]和层间气动式原位锤击相结合[22]均可有效地降低气孔数量。上述方法可降低WAAM成形Al-Cu合金的气孔缺陷，但是增加了制造成本与系统复杂度，对于不同设备的适用度不高，且尚未从本质上攻克气孔缺陷难题。热等静压（Hot Isostatic Pressing，HIP）是一种在加热过程中，利用高压气体作为外力均匀作用于构件，消除构件中某种孔洞类缺陷，提高成形件的致密度从而提高其力学性能的一种工艺方法。HIP 后处理在传统铸造及激光增材制造中已有研究，如曲银辉等研究热等静压对铸造铝合金气孔缺陷的影响[23]；吕成林等观察HIP对铸造高温合金涡轮叶片的影响[24]；再如，PLESSIS等研究采用激光粉末床熔合（Laser Powder Bed Fusion，LPBF）成形Ti6Al4V合金后对合金进行HIP后处理[25]，上述研究均发现了HIP后处理可有效地降低构件中孔隙率。

本研究为揭示WAAM成形AlCuMnZr合金中气孔缺陷的形成机理与控制方法，采用基板自然空冷、基板强制水冷，成形后热等静压处理方法，以及采用扫描电子显微镜多种测试手段，精细表征了气孔缺陷的形貌及特征，运用CT技术定量表征了气孔缺陷的基本特性（尺寸、体积分数、球形度）与三维形貌。本研究为WAAM成形铝合金中气孔缺陷的控制机制提供了新的指导方向，为进一步提升合金的综合力学性能奠定了科学和理论基础。

2　试验材料及方法

试验采用自主搭建的TIG-WAAM设备，由交直流氩弧焊机（Tetrix521 Synergic AC/DC）、送丝机（Tetrix Drive 4L）、4轴联动数控机床（LPM-408）等部件组成。该设备中焊机可单独调节预/

后送气时间、电流上升/衰减时间、基值和峰值电流等参数，实现实时电压和电流控制，如图1a、b所示。采用商用ER2319铝合金丝材（ϕ1.2mm）和尺寸为300mm×200mm×10mm的铝合金基板（Substrate），其化学成分见表1。沉积开始前，首先用砂纸打磨基板表面后再用丙酮脱脂和酒精进行清洗。沉积过程中采用基板强制水冷（WC）和自然空冷法（AC）两种方式；基板强制水冷成形时水的流速、流量、温度分别为2.09m/s、$2.17\times10^{-4}m^3/s$及20℃，二者其他沉积工艺参数见表2。沉积完成后对自然空冷基板与基板强制水冷成形后的试样进一步进行了热等静压（HIP）后处理，热等静压处理的制度为300℃、压强100MPa、保温10h后气冷，设备如图1c所示。

本试验中成形后的试样，采用线切割方法切取相应尺寸后采用热镶样机（Struers-Citopress-20）镶嵌试样。使用200#、400#、600#、800#、1000#、1500#、2000#砂纸进行磨制之后用抛光机进行机械抛光，采用Keller试剂（HF 2mL+HCl 3mL+HNO_3 5mL+H_2O 190mL）进行化学腐蚀20s，最后用无水乙醇清洗并吹干。采用光学显微镜（OM）进行宏微观组织观察，再利用扫描电子显微镜（SEM）对微观组织进行观察。采用微米CT设备（见图1d）检测试样中的气孔缺陷，并用Dragonfly Pro软件定量统计气孔信息，使用Image-Pro Plus软件测量气孔尺寸。拉伸试样利用线切割机切取后，用砂纸进行粗磨和细磨除去线切割层，使用Instron 3382万能力学试验机（见图1e）进行室温拉伸测试，拉伸速度为1mm/min，获得试样工程应力-应变曲线、抗拉强度、屈服强度和伸长率。室温拉伸试样尺寸和组织观察试样取样位置，如图1f、g所示。

表1　基板和ER2319丝材实测化学成分（质量分数）（%）

元素	Cu	Mn	Mg	Zr	Ti	Al
ER2319	6.750	0.314	0.016	0.215	0.136	Bal.
基板	4.550	0.596	1.460	0.010	0.040	Bal.

表2　TIG-WAAM成形2219铝合金不同试验组的工艺参数

试验组	电流/A	送丝速度/(m/min)	扫描速度/(mm/min)	氩气流量/(L/min)	基板冷却模式
WC	250→150	2	350	18	水冷
AC	250→150	2	350	18	空冷

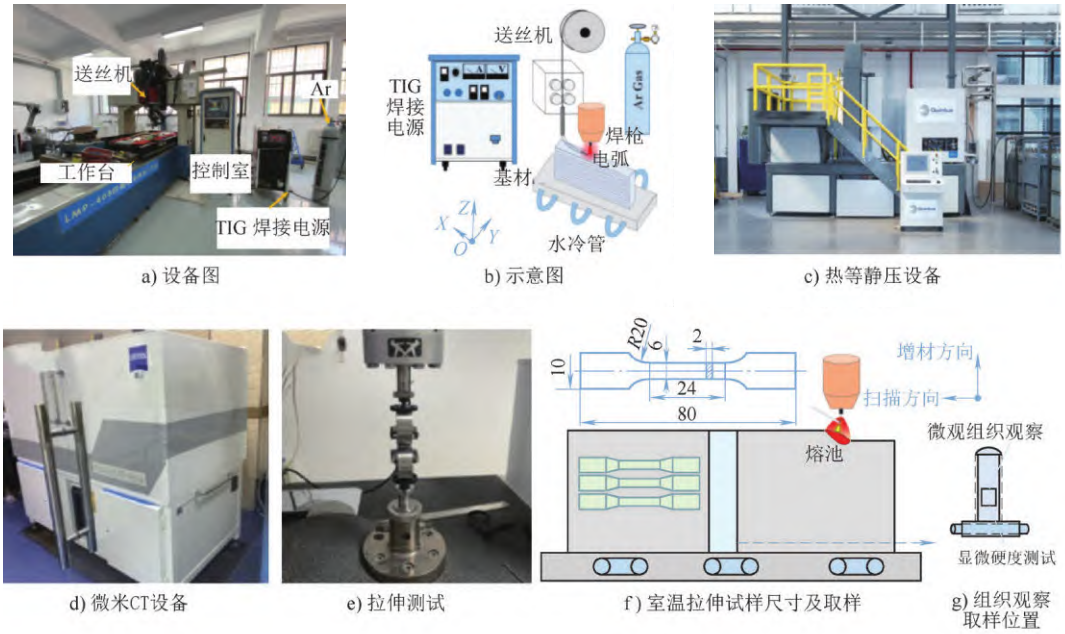


图1　电弧增材制造设备及试验测试装置

3　试验结果及讨论

3.1　成形件的气孔缺陷

对AC试样进行形貌观察、定性分析与定量统计。AC试样中气孔形状为球形且呈层状分布，如图2所示，经计算，AC试样气孔平均直径为20.38μm、气孔率为1.29%、平均气孔体积为13911.0μm^3。气孔缺陷产生原因为氢在液态铝合金（0.69mL/100g）和固态铝合金（0.036mL/100g）中的溶解度不同，而氢的主要来源是丝材表面带有水分、油脂和碳氢化合物污染物[9]。由图2可知，气孔通常分布在等

轴晶区呈层状分布，且气孔聚集带的带间距平均为1561μm。此现象为气孔在液态铝合金中上浮速度远小于在TIG-WAAM成形过程中熔池内近似的凝固速度，气孔在液态铝合金中产生后难以逃逸，且位于熔池底部的气孔逸出需要更长的时间，增大了逸出难度[14]。基于以上分析，目前自然沉积降低气孔率的方法主要有以下2个方面：①改善丝材表面清洁质量，可有效减少丝材中氢含量，以降低气孔中氢的来源。②调控工艺参数，以降低沉积层厚度，减小气孔上浮距离，促进气孔逸出。

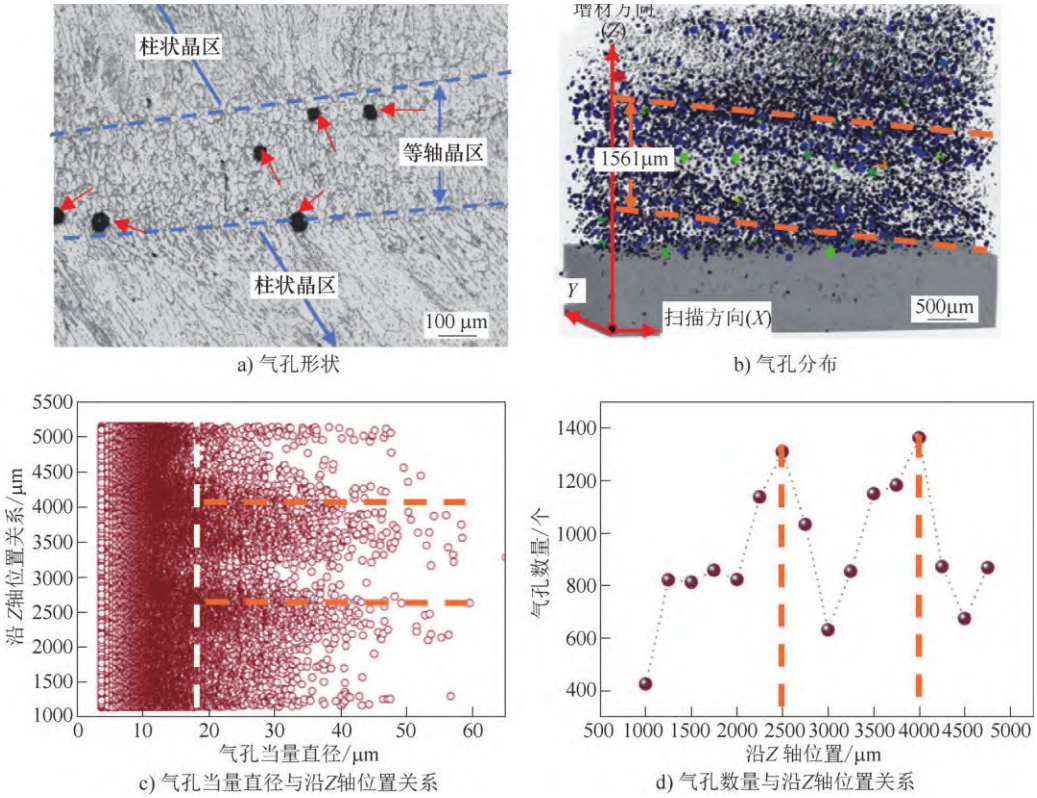


图2　AC下TIG-WAAM成形AlCuMnZr合金中及微米CT检测的气孔特征

3.2　基板强水冷法

对WC试样进行定性分析与定量统计。经计算，WC成形件中气孔率和气孔平均体积分别约为1.21%和12760.0μm^3，与前述AC试样相比，气孔数量和尺寸均减小。图3a为WC试样不同当量直径气孔沿沉积方向分布情况，对于De>35μm的气孔，层带分布特征依然明显。图3b为气孔沿沉积方向数量统计图，可以看到气孔分布仍然呈层状带（见图3c）分布特征，WC试样中气孔聚集带的带间距平均为1175μm，比AC试样明显减小。

气孔球形度可用来表征气孔形状特点，气孔球形度的计算公式为

$$S_{球}=\frac{4\pi\left(\frac{3V_p}{4\pi}\right)^{\frac{2}{3}}}{S_p} \tag{1}$$

式中　V_p——气孔体积（m^3）；

S_p——气孔表面积（m^2）。

根据式（1）计算WC和AC下AlCuMnZr合金TIG-WAAM试样中气孔球形度分别为0.91±0.08和0.90±0.10。图3d为气孔当量直径与球形度的关系，蓝色斑点和红色斑点分别代表WC和AC试样中的气孔。从图3d可以看到，尽管沉积条件不同，但气孔球形度普遍较高。WC试样中气孔球形度仅稍高，其气孔平均当量直径为15.34μm，而AC试样中气孔平均当量直径为20.38μm，对比WC和AC试样中气孔特征的统计数据，WC试样中的气孔率比AC试样中的气孔率降低6.20%，且气孔平均尺寸降低24.73%。上述研究结果表明，WC可使气孔直径降低24.7%，虽然气孔有所降低，仍很难彻底消除TIG-WAAM成形AlCuMnZr合金气孔缺陷。

3.3　热等静压法

试验进一步研究了HIP后处理方法对消除气孔缺陷的作用效果。分别对WC和AC获得的沉积态试

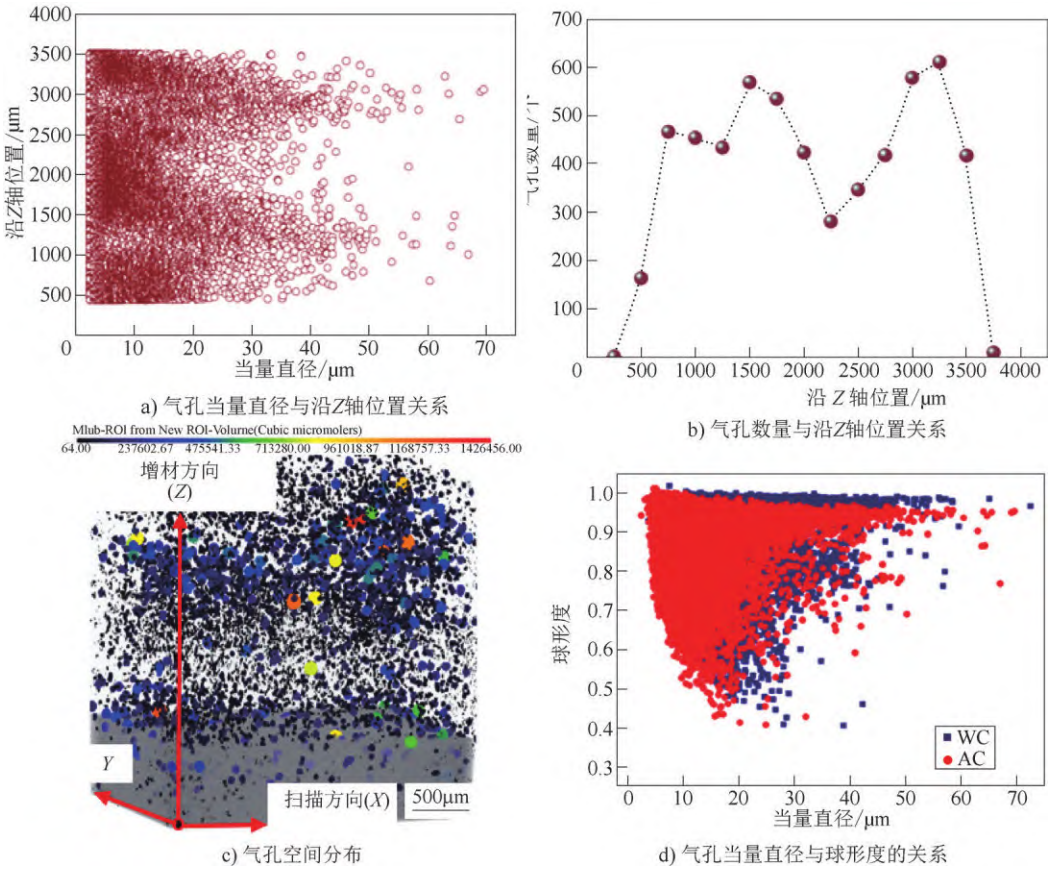


图3 WC条件下TIG-WAAM成形AlCuMnZr合金中微米CT检测的气孔特征

样进行处理，从气孔的平均尺寸和气孔率两方面分析HIP处理对气孔缺陷的影响规律。经计算，AC试样经HIP处理后试样中气孔率、气孔平均直径、气孔平均体积和平均表面积分别为0.45%、10.38μm、3308.88μm^{3}和705.3245μm^2，对比相同沉积条件下未HIP处理试样，可得HIP处理可使气孔率显著降低，气孔尺寸进一步减小。图4所示为HIP处理后采用微米CT技术获得的气孔沿沉积方向三维分布图，由此可知，虽然气孔缺陷得到有效改善，但是气孔仍呈层带状分布。

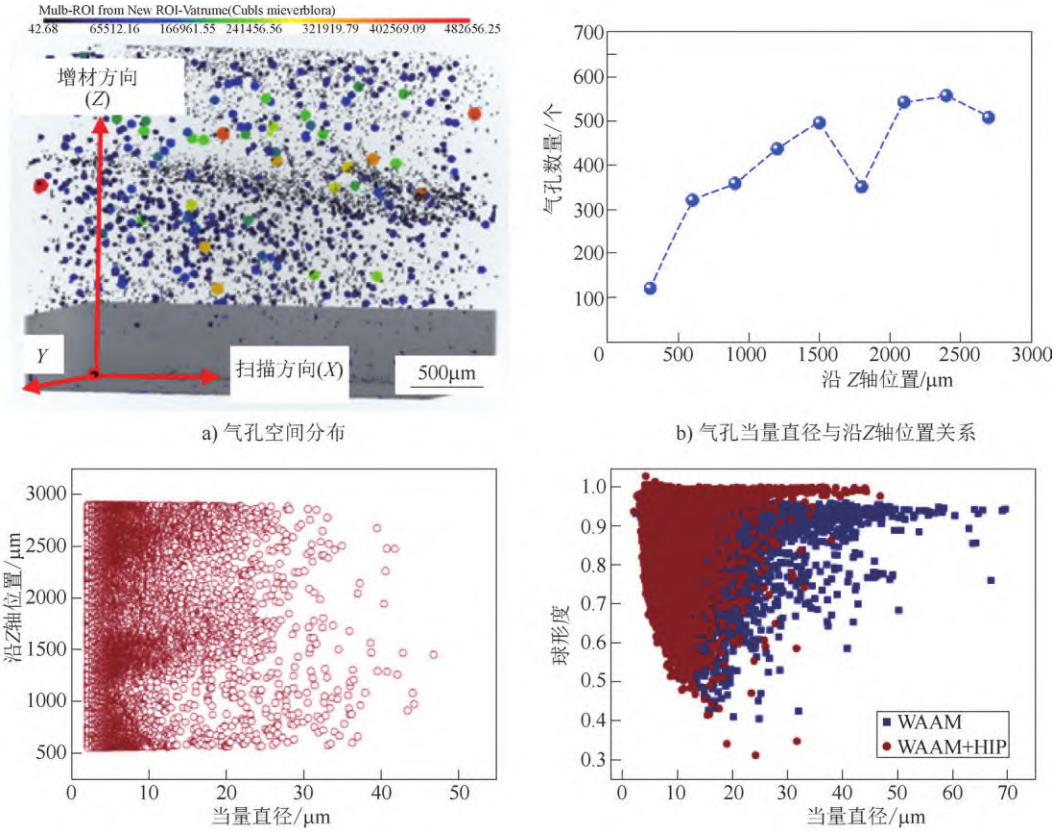
进一步对经以上两种消除气孔缺陷方案处理后的试样进行性能测试，结果如图5所示。不同处理方案对沉积态试样硬度影响不大，但对拉伸性能存在一定影响。从AC到AC-HIP的抗拉强度和屈服强度分别由（223±8）MPa和（95±9）MPa提升至（270±18）MPa和（150±8）MPa，但伸长率稍有降低。从WC到WC-HIP的抗拉强度和屈服强度分别由（248±18）MPa和（110±6）MPa提升为（255±26）MPa和（145±11）MPa，*EL*从（12%±1）%降至（8%±1）%。HIP处理可显著提升沉积态试样屈服强度，而伸长率稍有降低。

4 结束语

针对TIG-WAAM沉积AlCuMnZr合金成形气孔缺陷及其控制问题展开研究，揭示了沉积工艺参数对2219铝合金试样成形工艺特性的影响规律，明晰了成形件中气孔缺陷形成机理，通过对基板强制水冷沉积及热等静压后，降低了气孔率，减小了气孔尺寸。

1）TIG-WAAM沉积AlCuMnZr合金中气孔缺陷主要是球状氢气孔，气孔集中分布在等轴晶区并具有明显层带状分布特征。气孔缺陷的形成原因与氢在固-液态铝中的溶解度差异有关，基板强制水冷法可促进气孔逸出，采用热等静压后处理方法也可降低气孔率。

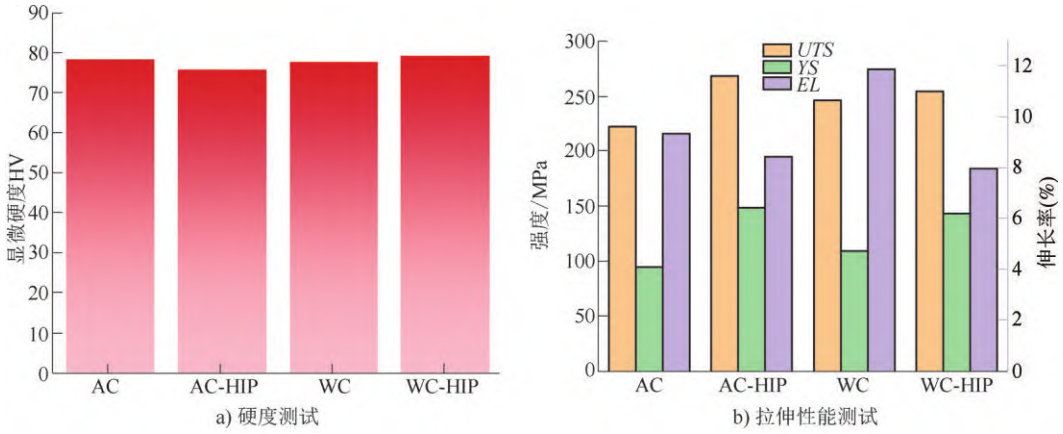
2）采用基板强制水冷及HIP处理均对气孔缺陷产生一定的消除效果。基板自然冷却和强制水冷下的成形件及HIP处理后成形件的气孔率分别为1.29%、1.21%、0.45%。HIP处理可有效降低气孔率并提升合金力学性能。基板自然冷却下TIG-WAAM



a) 气孔空间分布　b) 气孔当量直径与沿Z轴位置关系

c）气孔数量与沿Z轴位置关系图　d）HIP处理前后成形件中气孔缺陷的当量直径与球形度的关系

图4　TIG-WAAM+HIP成形2219铝合金中微米CT检测的气孔特征



a) 硬度测试　b) 拉伸性能测试

图5　不同沉积方案沉积态成形件性能测试结果

沉积AlCuMnZr合金成形件经HIP处理后，*UTS*、*YS*和*EL*分别为（270±18）MPa、（150±8）MPa和（9%±1）%。

参考文献：

[1] 黄卫东. 材料3D打印技术的研究进展[J]. 新型工业化，2016（6）：53-70.

[2] 卢秉恒. 增材制造产业链创新发展[J]. 企业管理，2023（5）：13-14.

[3] 韦超，杨潇，鲁淑芬，等. 激光多材料增材制造技术研究进展和展望[J]. 航空制造技术，2023，66（8）：26-34.

[4] 李翔，吴文恒，王涛. 激光快速增材制造技术在国

防科技中的应用现状与展望[J]. 表面工程与再制造，2023，23（4）：20-26.

[5] WILLIAMS S W，MARTINA F，ADDISON A C，et al. Wire arc additive manufacturing[J]. Materials Science and Technology，2016（32）：641-647.

[6] 杨扬，张澳，李瑶，等. 金属增材制造工艺、材料及成形机理的研究与应用[J]. 金属加工（热加工），2024（3）：33-45.

[7] 刘博宇，王向明，杨光，等. 面向金属增材制造的拓扑优化设计研究进展[J]. 中国激光，2023，50（12）：196-211.

[8] 贾传宝，宋亚东，王卫，等. 金属材料电弧增材制造技术研究现状[J]. 稀有金属，2023，47（5）：633-646.

[9] 方学伟，杨健楠，陈瑞凯，等. 铝合金电弧增材制造技术研究进展[J]. 电焊机，2023，53（2）：52-67.

[10] 崔强，邱松，SUHAS S，等. 基于电弧增材制造技术的电动车底盘设计方法研究[J]. 工业设计，2020（6）：26-28，11.

[11] LI S S，YUE X，PENG H L，et al. Development and applications of aluminum alloys for aerospace industry[J]. Journal of Materials Research and Technology，2023（27）：944-983.

[12] 臧金鑫，陈军洲，韩凯，等. 航空铝合金研究进展与发展趋势[J]. 中国材料进展，2022，41（10）：769-777.

[13] 邓运来，张新明. 铝及铝合金材料进展[J]. 中国有色金属学报，2019，29（9）：2115-2141.

[14] HAUSER T，REISCH RT，BREESE PP，et al. Porosity in wire arc additive manufacturing of aluminum alloys[J]. Additive Manufacturing，2021（41）：101993.

[15] BAI J Y，FAN C L，LIN S B，et al. Mechanical properties and fracture behaviors and GTA-Additive manufactured 2219-Al after an especial heat treatment[J]. Journal of Materials Engineering and Performance，2017，26（4）：1808-1816.

[16] GU J，GAO M，YANG S，et al. Pore formation and evolution in wire + arc additively manufactured 2319 Al alloy[J]. Additive Manufacturing，2019（30）：100900.

[17] RYAN E M，SABIN T J，WATTS J F，et al. The influence of build parameters and wire batch on porosity of wire and arc additive manufactured aluminum alloy 2319[J]. Journal of Materials Processing Technology，2018，262：577-584.

[18] CONG B，DING J，WILLIAMS S. Effect of arc mode in cold metal transfer process on porosity of additively manufactured Al-6.3%Cu alloy[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology，2014，76：1593-1606.

[19] ZHOU Y H，LIN X，KANG N，et al. The heterogeneous band microstructure and mechanical performance in a wire + arc additively manufactured 2219 Al alloy[J]. Additive Manufacturing，2022，49：102486.

[20] JI F L，HU Z Q，QIN X P，et al. Improving microstructure and mechanical properties of thin-wall part fabricated by wire arc additive manufacturing assisted with high-intensity ultrasound[J]. Journal of Materials Science，2023，58（6）：2381-2395.

[21] 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，2016，230：26-34.

[22] FANG X，ZHANG L，CHEN G，et al. Microstructure evolution of wire-arc additively manufactured 2319 aluminum alloy with interlayer hammering[J]. Materials Science and Engineering：A，2021，800：140168.

[23] 曲银辉，韩鹏江，纪校君，等. 热等静压对铸造铝合金气孔缺陷的影响[J]. 铸造，2021，70（10）：1228-1232.

[24] 吕成林，桑梓晗，曲劲宇，等. 热等静压处理对铸造高温合金涡轮叶片的影响[J]. 热能动力工程，2023，38（8）：53-57.

[25] PLESSIS A du，MACDONALD E. Hot isostatic pressing in metal additive manufacturing: X-ray tomography reveals details of pore closure[J]. Additive Manufacturing，2020，34：101191.

MW 20240505