

电弧增材制造 6061 铝合金的组织调控与力学性能

杨 芙 李 美 范玉磅 鞠洪涛 贾 征

(沈阳大学机械工程学院, 沈阳 110003)

摘要 采用电弧增材工艺研究了 6061 铝合金的组织特征与力学性能。试验比较了未锤击、电动与手动锤击对焊道的影响,并对各组试样进行组织观察、硬度测试和拉伸试验。结果表明,显微组织的比较中,手动锤击试样的晶粒细化程度优于电动锤击,而未锤击试样最差,组织细化程度呈现上部>中部>下部的趋势。硬度分析结果显示,手动锤击试样的硬度最高,其次为电动锤击,未锤击试样最低,硬度呈现上部>中部>下部的规律。在抗拉强度和塑性韧性分析中,手动锤击试样表现最好,电动锤击次之,未锤击试样最差。综上,在组织和力学性能方面,手动锤击优于电动锤击,电动锤击则优于未锤击。

关键词 电弧增材制造;6061 铝合金;微观组织;力学性能

中图分类号 TG146.21;TF132

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.T20240295

Microstructure Regulation and Mechanical Properties of Arc Additive Manufactured 6061 Aluminum Alloy

YANG Fu, LI Mei, FAN Yubang, JU Hongtao, JIA Zheng

(School of Mechanical Engineering, Shenyang University, Shenyang 110003)

Abstract: The microstructure characteristics and mechanical properties of arc additive manufactured 6061 aluminum alloy were systematically investigated. The effect of electric and manual hammering on the weld channel was analyzed comparatively, aiming to obtain optimal hammering method. Three groups of experiments with different hammering methods were set, and microstructural observations, hardness tests, and tensile tests were conducted on each group. The results indicate that the grain refinement of manually hammered specimens is superior to that of electrically hammered ones in terms of microstructural comparison, and the non-hammered specimens are the worst. The degree of grain refinement follows the trend of top > middle > bottom. Hardness analysis reveals that manually hammered specimens exhibit the highest hardness, which is followed by electrically hammered ones, and non-hammered specimens exhibit the lowest hardness. The hardness follows the trend of top > middle > bottom. In aspect of tensile strength and plastic toughness, manually hammered specimen perform desirable, which is followed by electrically hammered ones, and non-hammered specimen performs the worst. In conclusion, in terms of microstructure and mechanical properties, manual hammering is superior to electric hammering, and electric hammering is superior to non-hammering.

Key Words: Arc Additive Manufacturing, 6061 Aluminum Alloy, Microstructure, Mechanical Properties

在传统的制造业中,对于复杂的结构,铸造、锻造等工艺通常成本高、效率低^[1-4]。增材制造技术基于 CAD/CAM 设计,通过离散堆积原理逐层制造实体,能突破传统复杂零件制造的瓶颈^[5-7]。与传统的材料切割和组装方法相比,增材制造具有更明显的优势。冷金属过渡技术(Cold Metal Transfer, CMT)是一种新型的电弧增材制造试验手段。相比传统的 TIG、MIG/MAG 工艺,CMT 具有更好的稳定性,更低的热输入

量,并且对熔滴过渡的可控性更强。因此,CMT 逐渐成为电弧增材制造领域中主要的热源选择^[8-9]。

传统的增材制造材料主要是钢、铝、钛等,其中,铝由于其密度小,焊接性好、成形性能优异等优势而受到了研究者的广泛关注^[10-13]。DEREKAR K 等^[14]采用直流脉冲 GMAW 工艺制备零件,添加的焊丝为 5356 铝合金焊丝并采用 CT 扫描技术,研究了在不同通孔温度条件下的孔隙分布情况。TAKEYUKI A 等^[15]、

收稿日期:2024-07-21;修订日期:2025-01-09

基金项目:辽宁省教育厅重点资助项目(LJKZ1171)

第一作者简介:杨芙,女,1977 年出生,副教授,E-mail:jz140@163.com

通信作者:贾征,男,1982 年出生,教授,E-mail:jz140@163.com

引用格式:杨芙,李美,范玉磅,等. 电弧增材制造 6061 铝合金的组织调控与力学性能[J]. 特种铸造及有色合金, 2025, 45(7): 1 099-1 103.

YANG F, LI M, FAN Y B, et al. Microstructure regulation and mechanical properties of arc additive manufactured 6061 aluminum alloy [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2025, 45(7): 1 099-1 103.

WANG H J等^[16-17]通过变极性钨极氩弧焊研究了4043铝合金零件的电弧增材成形过程。此外,从保强等^[18-19]通过优化气孔缺陷、成形尺寸和显微组织,显著改善了材料的力学性能。通过对2319、4043两种铝合金采用AC-GMAW方法进行了研究,发现热输入、工作环境和送丝速度都是影响气孔大小的关键因素,其中热输入的影响最大,使用纯氩气作为保护气可以有效降低气孔率。这些研究为铝合金在电弧增材制造中的应用提供了参考。

6061铝合金因含有多种元素,在焊接过程中易形成三元共晶^[20],这种共晶的存在使得合金的凝固温度区间不同于二元合金,可能增加焊接根部开裂的风险,影响材料的力学性能。随焊锤击可明显优化焊缝的受力情况,减少应力集中,并且可以减少气孔等焊接缺陷,也可以改善组织细化晶粒,是一种很好的处理焊道的方法。目前将铝合金增材与随焊锤击结合的研究报道较少,因此本研究采用电弧增材制造方法,研究6061铝合金的组织 and 力学性能,并加入电动锤击和手动锤击技术,以改善组织和力学性能,比较两种锤击方式对焊道的影响,旨在找出最优的锤击方法,为相关研究提供参考。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料及设备

使用6061铝合金板材作为基板,6061铝合金焊丝作为填充材料,其直径为1.2 mm。基板的尺寸为200 mm×100 mm×8 mm。6061铝合金的主要化学成分见表1。本研究为单层多道试验,试验设备包括Fronius CMT Advanced 3200焊机、送丝机、控制箱、试验工作平台、焊枪,并用质量分数为99.99%纯氩气作为保护气体。

表1 焊丝与基板的化学成分

| Tab.1 Chemical composition of welding wire and substrate % | | | | | | | |
|--|-----------|-------|-------|-----------|-------|-------|----|
| w_B | | | | | | | |
| Cu | Mg | Mn | Ti | Cr | Fe | Zn | Al |
| 0.15~0.40 | 0.80~1.20 | ≤0.15 | ≤0.15 | 0.04~0.35 | ≤0.70 | ≤0.25 | 余量 |

1.2 试验方法

在焊接前的预处理阶段,首先需要对材料进行焊前处理,以去除表面油污和杂质。随后,使用GWS670角磨机对基板进行打磨,直至表面光滑,确保焊接时平整无缝隙。焊接完成后,分别对试样进行锤击,确保每次焊枪抬高的高度是一定的,根据焊道的高度差来判断所施加的锤击力的大小。考虑到锤击变形量的误差,通过平均值来减小误差。锤击位置及锤头大小见图1,载

荷为0.245 N。试验中保持焊接速度为600 mm/min、焊接电流为100 A、层间温度为100 °C,改变锤击方式(手动、电动以及未锤击),最终得到3个焊件。

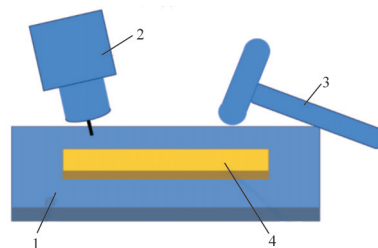


图1 锤击
Fig.1 Hammering

1.基板 2.焊枪 3.锤子 4.焊道

测量焊件尺寸,通过线切割切出用于拉伸试样和金相观察的试样。试样的取样位置见图2。共切割出3组厚度为1.5 mm的水平拉伸试样。每块增材焊件分别切出上、中、下3块试样,共计9块金相观察试样。先使用金相试样镶嵌机进行镶嵌,然后依次进行打磨、抛光,并吹干,选择Kroll试剂(HF、HNO₃、H₂O体积比为1:3:96)对试样进行腐蚀,腐蚀时间为7 s。腐蚀完成后,使用OLYMPUS PX53光学显微镜观察试样,并分别在200倍和500倍下拍摄图像并记录。随后,对观察过的试样进行再次抛磨,并采用高精度的数字式显微硬度计进行维氏硬度测试,加载载荷为0.245 N,每次加载25 s,每块抛磨好的试样在5个不同区域分别进行5组测试。拉伸试样尺寸见图2。最后,对切割好的3组水平拉伸试样进行打磨,并使用WDW-100B型万能拉伸试验机进行拉伸,拉伸速率为1 mm/min,记录拉伸数据。

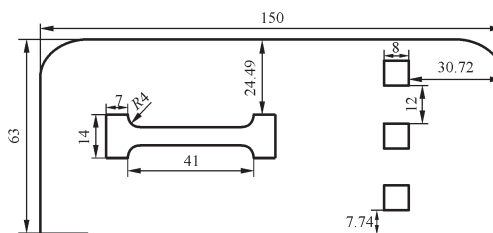


图2 取样位置

Fig.2 Sampling positions

2 数据分析

2.1 金相组织图分析

未锤击和2种锤击方式焊件上部、中部和下部组织分别见图3~图5。

不同锤击方式各部分不同放大倍数下的晶粒尺寸均值见表2。

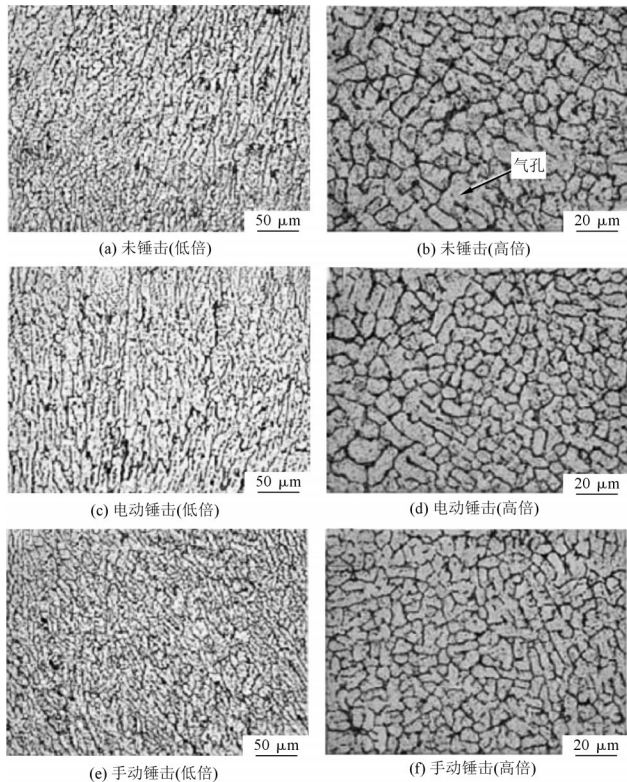


图3 未锤击和不同锤击方式焊件上部组织图

Fig.3 Microstructure of welded component at upper region

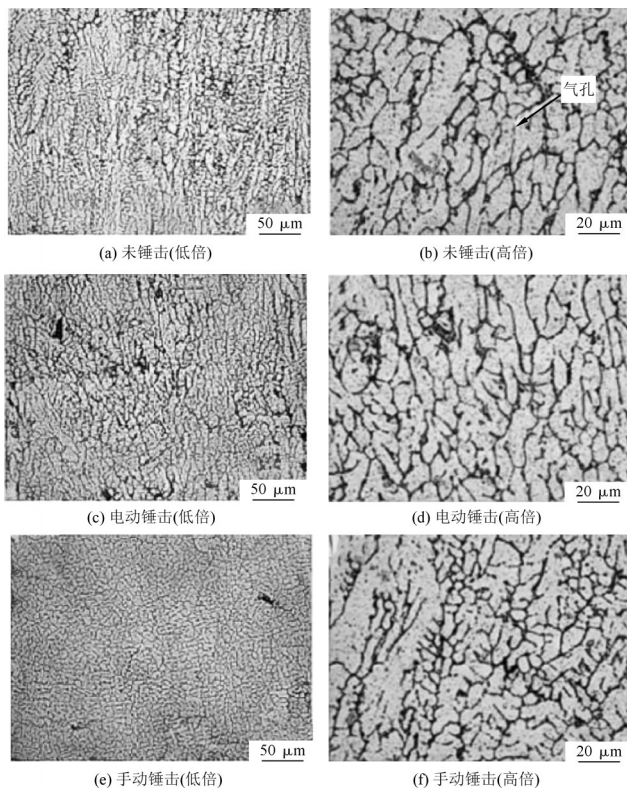


图4 未锤击和不同锤击方式焊件中部组织图

Fig.4 Microstructure of welded component at middle region

通过显微组织观察和尺寸数据分析可以得出,未锤击、电动锤击和手动锤击的增材焊件在金相组织存在显著区别。其中,未经锤击的焊件晶粒组织较为粗

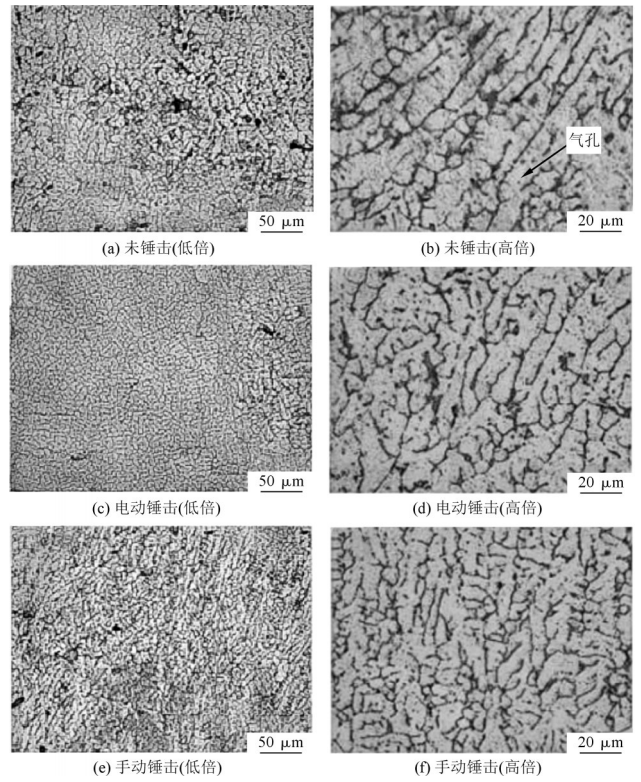


图5 未锤击和不同锤击方式焊件下部组织图

Fig.5 Microstructure of welded component at bottom region

大,内部结构不够细化,易出现较多缺陷,如气孔或裂纹,影响材料的力学性能。电动锤击的焊件晶粒组织相比未锤击更加细小,结构趋于均匀,因锤击带来的振动有效地细化了晶粒,但效果不如手动锤击显著。手动锤击的焊件组织最为细小,晶粒细化效果最佳,焊件的金相组织最为均匀。手动锤击提供了更加精确的控制,促使更均匀的塑性变形和晶粒细化。焊件在锤击作用下,晶粒细化的原因主要有两方面:一是塑性变形,锤击促使固相区金属产生纵向和横向的延展,导致晶粒在受压的过程中被压缩、细化;二是振动影响结晶,当焊件未完全固化时,锤击产生的振动扰乱了熔池的结晶取向,树枝状晶因振动而破碎,形成了更多的晶核,这使晶界面积增大,增强了细晶强化效果。通过细化晶粒,提高了焊件的强度和韧性,最终达到了增强焊接质量的目的。

从显微组织中可以观察到,未锤击的焊件存在更多的焊接缺陷,如气孔等,而经过电动锤击的焊件缺陷明显较少,手动锤击的焊件缺陷最少。原因是锤击作用在焊接过程中通过压实气孔和减少缺陷,提高了焊道的致密性,改善了结构性能,使得材料的组织更加致密,表面缺陷明显减少。这种改善对焊件的整体性能提升有着重要作用。

在形态上,各层焊道的晶粒大小存在显著差异,其中下部的晶粒最为粗大;中部的晶粒相较于下部略为

表2 各部分晶粒尺寸均值

| 未锤击上部尺寸 | 未锤击中部尺寸 | 未锤击下部尺寸 | 电动锤击上部尺寸 | 电动锤击中部尺寸 | 电动锤击下部尺寸 | 手动锤击上部尺寸 | 手动锤击中部尺寸 | 手动锤击下部尺寸 |
|---------|---------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 30.604 | 40.704 | 30.450 | 23.482 | 28.600 | 23.312 | 17.276 | 23.976 | 22.134 |

细小;而上部的晶粒最为细小。这种差异的原因在于,每增材一层,下面的焊道会受到上一层焊道的加热,导致热输入量增加,促使晶粒变得粗大。此外,由于下层焊道散热较为困难,这也进一步导致了晶粒的粗大。

2.2 硬度数据分析

未锤击焊件硬度数据,电动锤击焊件硬度数据及手动锤击硬度数据见表3。

表3 不同处理方式试样的硬度

| 位置 | 未锤击上部 | 未锤击中部 | 未锤击下部 | 电动锤击上部 | 电动锤击中部 | 电动锤击下部 | 手动锤击上部 | 手动锤击中部 | 手动锤击下部 |
|----|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | 52.3 | 40.0 | 33.2 | 49.3 | 44.1 | 47.7 | 51.9 | 50.7 | 51.4 |
| 2 | 49.3 | 39.9 | 35.2 | 44.1 | 48.6 | 46.3 | 61.2 | 50.1 | 47.7 |
| 3 | 41.5 | 37.5 | 26.7 | 48.6 | 38.3 | 41.2 | 54.4 | 54.9 | 50.4 |
| 4 | 42.2 | 37.7 | 39.1 | 38.3 | 45.1 | 44.9 | 51.5 | 51.5 | 53.9 |
| 5 | 45.3 | 33.2 | 38.4 | 45.1 | 48.1 | 43.4 | 58.4 | 55.6 | 50.6 |

对5组数据求平均值,见图6。可以看出,手动锤击的焊件硬度最大,其次是电动锤击,未锤击的焊件硬度最小。这主要是锤击作用使焊缝金属发生塑性变形,导致位错不断运动并累积。随着位错密度增加,位错在运动过程中相互交割、缠结,从而提高了材料的硬度。手动锤击产生的塑性变形更大,因此焊件的硬度也更高。另一个原因是晶粒细化作用。锤击引发的细晶强化效果进一步提高了焊件的硬度。

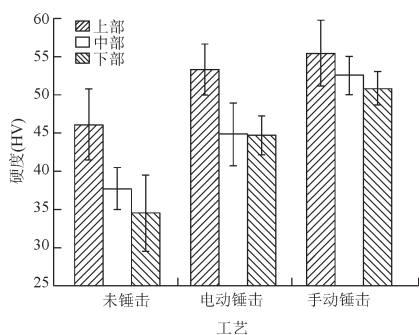


图6 硬度工艺数据图

Fig.6 Diagram of hardness

焊件上部的硬度大于中部,中部的硬度又大于下部。这是因为上部区域的晶粒更为细小,随着深度增加,晶粒逐渐粗化。细小的晶粒由于具有更强的细晶强化作用,因此上部区域的强度和硬度更高,而下部区域由于晶粒较粗,细晶强化效果较弱,导致强度和硬度相对较低。

2.3 拉伸数据分析

3组应力-应变曲线见图7。可以看到,未锤击、电

动锤击和手动锤击焊件抗拉强度分别为170、182和190 MPa。

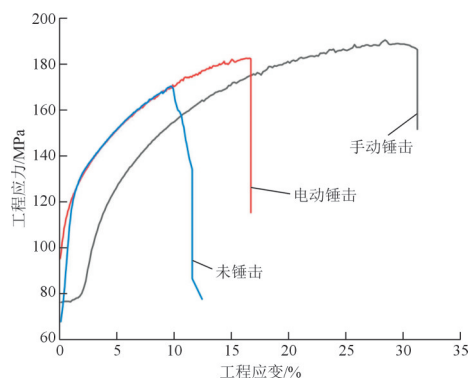


图7 工程应力-工程应变曲线图

Fig.7 Engineering stress-engineering strain curves

手动锤击的焊件试样具有最高的抗拉强度、最佳的塑性和韧性,其次是电动锤击的焊件,而未锤击的焊件表现最差。这是因为手动锤击能使晶粒变得最细,而晶粒越细,更能有效地阻碍位错的移动,材料中的裂纹在每一个晶体中的扩展越困难,进而避免了应力集中。因此,通过锤击可以细化材料的晶粒,从而改善焊件的塑性和韧性。

3 结论

(1)6061焊件经不同方式锤击后,焊件的晶粒尺寸依次为手动锤击>电动锤击>未锤击,而在同一焊件中,晶粒尺寸依次为上部>中部>下部。

(2)焊件的硬度同样遵循手动锤击>电动锤击>

未锤击的规律,并且焊件的硬度随着位置的变化呈现出上部>中部>下部的分布。焊件的抗拉强度和伸长率也表示出相同的趋势。

参 考 文 献

[1] 韩嘉伟. 2319 铝合金电弧增材制造构件的组织与力学性能研究 [D]. 沈阳: 沈阳大学, 2020.

[2] 郝轩. CMT 电弧增材制造 2319 铝合金组织及力学性能调控 [D]. 南昌: 南昌航空大学, 2020.

[3] 程俊廷, 常天瑞. 金属增材制造技术研究与应用现状及趋势 [J]. 中国设备工程, 2018(20): 181-183.

[4] DING D, PAN Z, DOMINIC C, et al. Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 81(1): 465-481.

[5] 张艳. 金属高性能增材制造技术在航空领域中的研究 [J]. 工业加热, 2019, 48(3): 78-80, 84.

[6] GAO W, ZHANG Y B, RAMANUJAN D, et al. The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering [J]. Comput.-Aided. Des., 2015, 69: 65-69.

[7] 刘勇, 任香会, 常云龙, 等. 金属增材制造技术的研究现状 [J]. 热加工工艺, 2018, 47(19): 15-19, 24.

[8] CONG B Q, DING J L, 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, 2015, 76:1 593-1 606.

[9] 李伟, 陆玉娇, 周杨智. 冷金属过渡焊接技术在汽车行业的应用 [J]. 低碳技术, 2018(1): 55-56.

[10] SKIBA T, PROPERTIESBAUFELD B, BIEST O. Microstructure and mechanical of stainless steelshaped metal deposition [J]. Component Manufactured by ISIJ International, 2009, 49 (10): 1 588-1 591.

[11] 张德伟, 祝喙, 刘瑞萍, 等. 铝合金在挂车后下防护轻量化中的应用 [J]. 汽车实用技术, 2019(7): 80-81.

[12] GU J L, BAI J, ZHU Y, et al. First-principles study of the influence of doping elements on phase stability, crystal and electronic structure of Al₂Cu (B) phase [J]. Comput. Mater. Sci., 2016, 111: 328-333.

[13] MUGHALI M, FAWAD H, MUFTI R. Three-dimensional finite-element mode lling of deformation in weld-based rapid prototyping [J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 2006, 220: 875-885.

[14] DEREKAR K, LAWRENCE J, MELTON G, et al. Influence of interpass temperature on wire arc additive manufacturing (WAAM) of aluminium alloy components [A]// MATEC Web of Conferences [C]. Osaka, Japan, 2019.

[15] TAKEYUKI A, HIROYUKI S. Dissimilar metal deposition with a

stainless steel and nickel-based alloy using wire and arc-based additive manufacturing [J]. Precision Engineering, 2016, 45: 387-395.

[16] WANG H J, JIANG W H, 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.

[17] WANG H J, KOVACEVIC R. Variable polarity GTAW in rapid prototyping of a luminum parts [A]//Proceedings of the 11th Annual Solid Freeform Fabri cation Symposium [C], Austin, TX, 2000.

[18] 从保强, 丁佳洛. CMT 工艺对 Al-Cu 合金电弧增材制造气孔的影响 [J]. 稀有金属材料与工程, 2014, 43(12): 3 149-3 153.

[19] 从保强, 苏勇, 齐铂金, 等. 铝合金电弧填丝增材制造技术研究 [J]. 航空制造技术, 2016, 6(3): 29-37.

[20] 顾江龙. CMT 工艺增材制造 Al-Cu-Mg 合金的组织与性能的研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2016.

(编辑: 栗万仲)

《特种铸造及有色合金》征稿启事

《特种铸造及有色合金》杂志是中国科学技术协会主管、中国机械工程学会铸造分会和武汉机械工艺研究所共同主办的全国性科技期刊,是对国内外公开发行的中文核心期刊,中国科技论文统计与分析用刊,INSPEC、CA、MA、AJ、JST、Scopus 等国内外权威数据库及检索系统收录期刊,并获得全国优秀科技期刊一等奖、国家期刊奖、新中国 60 年有影响力的期刊、湖北省十大有影响力的自然科学期刊等。

本刊面向国内外广大科技工作者征稿,征稿内容包括:各种(黑色和有色合金)特种铸造方法、各种有色合金及复合材料的成形理论、工艺、设备、材料、测试与控制、计算机应用等方面的科技成果、生产技术和现场经验,此外还包括各相关学科和交叉学科,如挤压铸造(液态模锻)、半固态加工、新能源材料、电子封装、高熵合金、非晶合金(金属玻璃)、焊合、粉末冶金、合金化、热处理、表面处理等方面的学术和技术研究成果等。

特种铸造及有色合金杂志社(武汉)有限公司

地址:武汉市江岸区建设大道融玺 1001 大厦 10 楼

邮编:430015

电话:027-85358206,85486024,

85358127

投稿网址:www.special-cast.com

邮箱:tzzz@special-cast.com

