

高强 Al-11Zn-1.84Mg-0.92Cu-0.15Zr-0.15Sc 合金流变挤压铸造组织与性能研究

徐永涛^{1,2,3,4} 赵朴睿^{1,2,3,4} 白月龙^{1,3,4} 张志峰^{1,3,4} 杨子玥^{1,3,4} 刘彦强^{1,3,4} 马恒⁵ 钱苗⁵ 何卫⁶
(1.有研金属复材技术有限公司; 2.北京科技大学材料科学与工程学院; 3.中国有研科技集团国家
有色金属复合材料工程技术研究中心; 4.北京有色金属研究总院;
5.浙江华电器材检测研究院有限公司; 6.国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司)

摘要 采用光学显微镜(OM)、扫描电镜(SEM)、能谱分析仪(EDS)、X射线衍射分析仪(XRD)、热裂试棒试验法研究了 Al-11Zn-1.84Mg-0.92Cu-0.15Zr-0.15Sc 铸造铝合金的热裂敏感性能以及电磁搅拌熔体处理对合金挤压铸造件组织与力学性能的影响。研究表明,试验合金具有良好的抗热裂敏感性能,与未施加电磁搅拌熔体处理相比,电磁搅拌熔体处理的挤压铸造轨道件的晶粒细小均匀,晶界处粗大的初生 Al₃(Sc,Zr)相和低熔点共晶相的数量与尺寸明显减小甚至消失。经 T6 热处理后低熔点共晶相几乎完全回溶到基体内部,铸件的力学性能提升明显,平均抗拉强度为 565 MPa,伸长率达到 7.5%,同时力学性能的一致性和稳定性得到显著改善。
关键词 抗热裂;低熔点共晶相;抗拉强度;伸长率
中图分类号 TG146.21;TG249.2⁺6 **文献标志码** A
DOI:10.15980/j.tzzz.2023.06.008 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



Microstructure and Mechanical Properties of Rheo-squeeze Casting of High Strength Al-11Zn-1.84Mg-0.92Cu-0.15Zr-0.15Sc Alloy

Xu Yongtao^{1,2,3,4}, Zhao Puri^{1,2,3,4}, Bai Yuelong^{1,3,4}, Zhang Zhifeng^{1,3,4}, Yang Ziyue^{1,3,4},
Liu Yanqiang^{1,3,4}, Ma Heng⁵, Qian Miao⁵, He Wei⁶

(1.Grimm Metal Composites Technology Co., Ltd.; 2.Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing;3.National Engineering & Technology Research Center for Nonferrous Metals Composites, China Grimm Group Co., Ltd.; 4.General Research Institute for Nonferrous Metals;
5.Zhejiang Huadian Equipment Testing Institute Co., Ltd.;
6.Wuhan NARI Limited Liability Company, State Grid Electric Power Research Institute)

Abstract: Hot tearing sensitivity, microstructure and mechanical properties of Al-11Zn-1.84Mg-0.92Cu-0.15Zr-0.15Sc alloy by squeeze casting were investigated by OM, SEM, EDS, XRD and hot tearing rod testing method. The results indicate that the test alloy possesses desirable hot tearing resistance. After electromagnetic stirring melt treatment, the grain is refined greatly, and the amounts and size of primary Al₃(Sc, Zr) phases and low-melting eutectic phases in grain boundary are significantly reduced or even disappear, and the latter ones are almost completely dissolved into the matrix after T6 heat treatment. The mechanical properties of the castings are significantly enhanced, where the average tensile strength is 565 MPa, and elongation reaches 7.25%.Meanwhile, the consistency and stability of mechanical properties are apparently improved.
Key Words: Hot Tearing Resistance, Low-melting Eutectic Phase, Tensile Strength, Elongation

随着航空航天、轨道交通、汽车及国防军工等领域结构件制造向一体化和大型化方向发展,对大型轻量化结构件的需求日趋增加,出现大量使用高性能铝合金来替代钢铁材料的趋势^[1-3]。Al-Zn-Mg-Cu 系合金具有高强高韧等特点,是轻量化的首选材料之一,但这类高合金化铝合金通常是变形铝合金,铸造性能差,存在凝固

收稿日期:2023-03-22
基金项目:国家电网公司科技指南项目(SGZJ0000KXJS2100125)
第一作者简介:徐永涛,男,1993 年出生,博士研究生,北京(100088),E-mail:xyt93upc@hotmail.com
通信作者:张志峰,男,1970 年出生,教授,北京(100088),E-mail:zhangzf@grinn.com
引用格式:徐永涛,赵朴睿,白月龙,等. 高强 Al-11Zn-1.84Mg-0.92Cu-0.15Zr-0.15Sc 合金流变挤压铸造组织与性能研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2023, 43(6): 763-767.
XU Y T, ZHAO P R, BAI Y L, et al. Microstructure and mechanical properties of rheo-squeeze casting of high strength Al-11Zn-1.84Mg-0.92Cu-0.15Zr-0.15Sc alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(6): 763-767.

温度区间大、收缩严重、易偏析和热裂等问题,无法直接铸造成形,必须通过铸坯、塑性变形、机加工等多道工序改善性能才能使用,加工成本高,极大地限制了合金的广泛应用^[4-5]。

半固态流变铸造技术将半固态制浆工艺和传统铸造工艺相结合,具有诸多技术优点,如半固态浆料的充型能力提高^[6]、成形后的铸件组织细小均匀^[7]、偏析程度明显改善^[8]、铸件凝固收缩程度小、热裂倾向小^[9]、力学性能得到明显提升等^[10-11]。但是目前流变成形研究的 Al-Zn-Mg-Cu 合金为 7xxx 系变形铝合金,半固态流变铸造工艺虽在一定程度上可以改善合金的抗热裂敏感性能,但很难满足对大型复杂铸件的成形要求。XU Y T 等^[12-13]设计开发了 Al-Zn-Mg-Cu 超高强挤压铸造铝合金,研究了 Zn 含量、 $w(\text{Zn})/w(\text{Mg})$ 与 $w(\text{Cu})/w(\text{Mg})$ 对合金力学性能与热裂敏感性的影响,发现在确保高强度的同时适当增加高固溶度的 Zn 有利于降低合金的热裂敏感性。

在前期研究基础上,选用 Al-11Zn-1.84Mg-0.92Cu-0.15Zr-0.15Sc 合金为研究对象,采用流变挤压铸造,研究该合金的热裂敏感性能及其流变挤压铸造件的组织和力学性能,制备出力学性能接近或超过同类变形合金指标要求的高性能轨道铸件,以期对超高强铝合金流变挤压铸造工程化应用提供技术参考。

1 试验材料与方法

1.1 合金熔炼

采用自主配置铝合金,原料为高纯铝锭(99.99%,质量分数,下同)、高纯镁锭(99.95%)、高纯锌锭(99.92%),Al-50Cu、Al-10Zr 以及 Al-2Sc 中间合金锭,利用 FOUNDRY-MASTER Pro 电火花直读光谱仪进行成分检测,并通过 GB/T17432-1998 中的变形铝及铝合金化学成分分析方法测量合金中的 Sc 含量,合金的实际化学成分见表 1。合金熔炼采用电阻加热炉加热,熔化坩埚材质为高纯石墨,熔炼温度控制在 760 ℃,合金熔体采用旋转喷吹氩气进行除气除渣处理,将熔体温度控制在 720 ℃ 左右静置。

表 1 试验合金的实际化学成分

Tab.1 Actual chemical composition of test alloys							%
w_B							
Zn	Mg	Cu	Zr	Sc	Fe	Si	Al
11.000	1.830	0.895	0.150	0.140	0.001	0.001	余量

1.2 挤压铸造

本试验在自主研发的流变挤压铸造工程化研制线上进行,装置见图 1,尺寸为 177 mm×150 mm×50 mm。铸造流程为:将静置处理后的合金熔体(浇注量约为 2.5 kg)置于交变磁场下,搅拌电流为 10 A,搅



图 1 流变挤压铸造装置及轨道件实物图

Fig.1 Schematic diagram of rheo-squeeze casting device and product of rail component

1.温度采集器 2.K 型热电偶 3.熔体 4.坩埚 5.搅拌线圈

拌频率为 15 Hz,由洛伦兹力驱动自发进行圆周运动,产生强剪切作用,使熔体的温度场与成分场混合均匀;当经电磁搅拌处理的合金熔体温度达到 650~660 ℃ 时,将熔体定量浇注到挤压铸造模具型腔中,然后操作挤压铸造机完成流变成形,挤压比压为 50 MPa,保压时间为 15 s,空冷,流变挤压铸造前需要预热模具并均匀喷涂脱模剂,模具温度控制在 200 ℃ 左右。

1.3 分析检测

采用热裂棒试验方法对比测试试验合金与 7075 铝合金的热裂敏感性能。合金的组织与力学性能检测试

样在轨道铸件本体上切取,取样位置见图 2。试样首先进行 T6 热处理,工艺制度为 450 ℃×3 h+460 ℃×

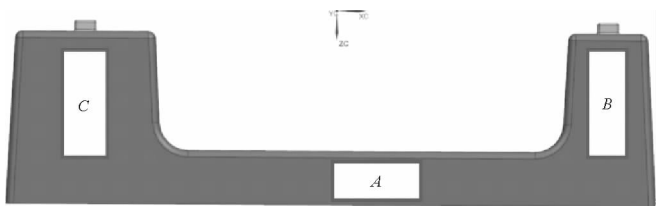


图 2 轨道件组织观察及力学性能测试取样位置图

Fig.2 Observation of rail component and sampling position for property testing

3 h+470 ℃×3 h 固溶,水淬,120 ℃×24 h 时效,试样经打磨抛光和阳极覆膜处理,采用 Zeiss Axiovert 200 光学显微镜观察合金的金相组织,采用 JSM-7900F 扫描电镜观察未经浸蚀试样的微观组织。经 100、400、600、1000 和 2000 号砂纸打磨并抛光处理,覆膜液为体积分数为 2.5% 的 HFB₄ 溶液,力学拉伸性能测试按照 GB/T228-2002 中标准圆形试样规定进行,拉伸试验在 CSS-4100 电子万能材料试验机上进行,拉伸速率为 2 mm/min。

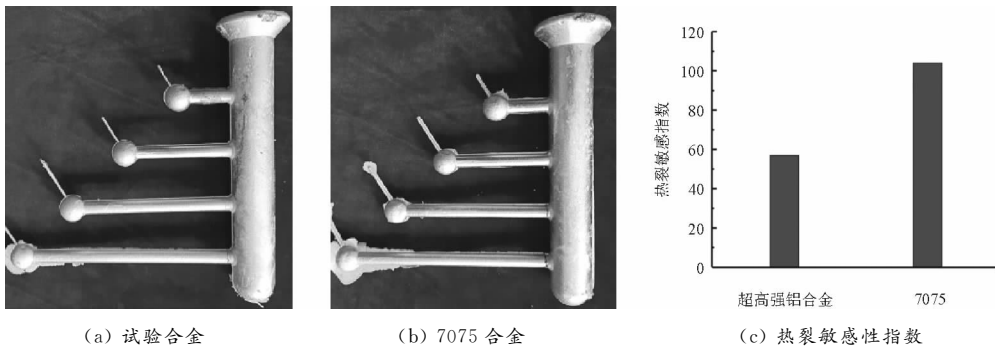


图 3 试验合金与 7075 合金的热裂试验棒实物及其对应的热裂敏感指数计算结果
Fig.3 Hot cracking bars of test alloy and 7075 alloy as well as corresponding hot tearing sensitivity index

图 3b 中 7075 合金试样最长的热裂棒浇道口位置出现了严重的裂纹,约束球与次长的热裂棒浇道口与约束球位置出现轻微的裂纹,因此,试验合金的抗热裂敏感性优于 7075 合金。

2.2 铸件组织

图 4 为试验合金电磁搅拌熔体处理前后轨道件不同

同位置的金相组织,轨道件不同位置处经截线法统计的平均晶粒尺寸见图 5。可以看出,不同处理条件下轨道件不同位置的晶粒尺寸与形貌差别明显。熔体未经过电磁搅拌处理时,晶粒均为不规则形貌,铸件壁厚最薄位置的 A 处的晶粒尺寸最小,平均晶粒尺寸为 78 μm;壁厚次之的 B 处大晶粒数量开始增多,平均晶粒尺寸

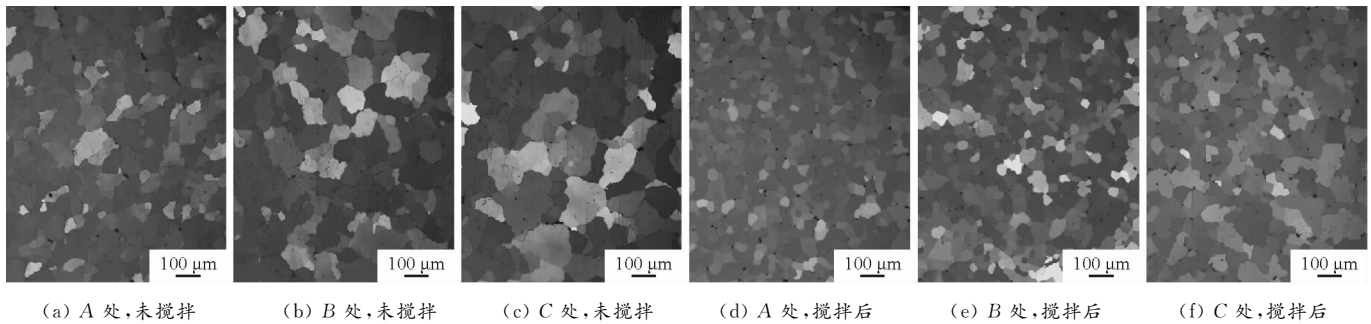


图 4 电磁搅拌前后挤压铸造轨道件不同位置试样的 OM 组织

Fig.4 OM structures of squeeze casting rail parts at different positions before and after electromagnetic stirring

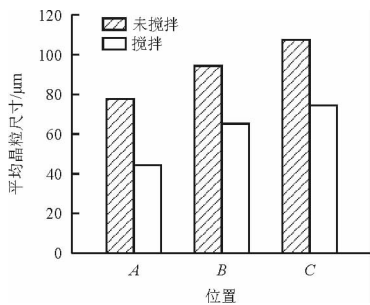


图 5 电磁搅拌处理前后挤压铸造轨道件晶粒尺寸

Fig.5 Grain size of rail parts before and after electromagnetic stirring treatment

为 95 μm;壁厚最大位置的 C 处,晶粒尺寸粗大,其平均晶粒尺寸为 105 μm。熔体经过电磁搅拌处理后,A 处为细小的等轴晶,其平均晶粒尺寸为 45 μm,B 处的晶粒尺寸为 63 μm,较 A 处略有变大但均匀分布,C 处的平均晶粒尺寸为 75 μm,晶粒大小相间分布。

图 6 为电磁搅拌熔体处理前后挤压铸造轨道件不同部位的 SEM 组织。对比发现,未经电磁搅拌处理的轨道件组织中仍会剩余少量的晶界残留相和粗大块状初生相,而熔体经电磁搅拌处理后,铸件不同位置处的组织中未观察到粗大块状 Al₃(Sc,Zr)相,且晶界处非

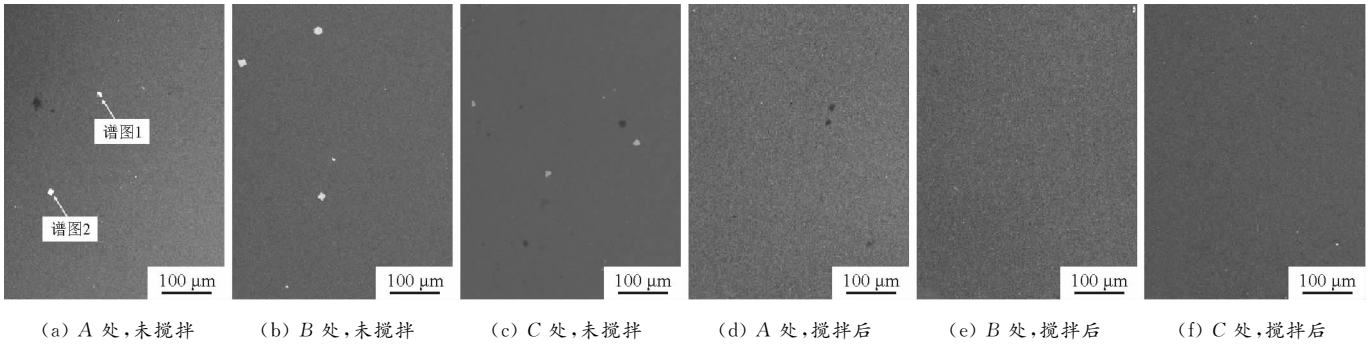
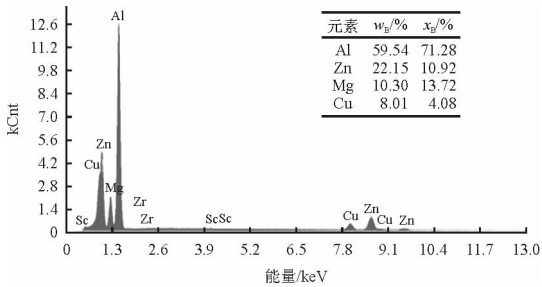


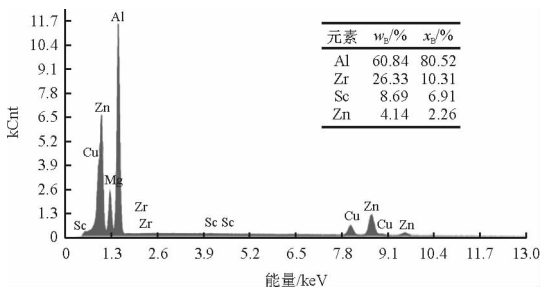
图 6 电磁搅拌处理前后挤压铸造轨道件不同位置组织 SEM 图

Fig.6 SEM images of squeeze casting rail parts at different positions before and after electromagnetic stirring treatment

平衡共晶相几乎完全回溶到基体内部。图 7 为图 6a 中合金 T6 处理后未回溶相的 EDS 分析。可以看出,谱图 1 晶界残留相主要为 τ -AlZnMgCu 相,粗大块状初生相主要为 $\text{Al}_3(\text{Sc,Zr})$ 相,尺寸大约为 $10\ \mu\text{m}$ 。



(a) 谱图 1 EDS 分析



(b) 谱图 2 EDS 分析

图 7 图 6a 中合金 T6 热处理后未回溶相 EDS 分析

Fig.7 EDS analysis of undissolved phase in test alloy in

Fig.6a after T6 heat treatment

2.3 力学性能

图 8 为电磁搅拌熔体处理前后试验合金挤压铸造轨道件不同部位的力学性能。可以看出,未经电磁搅拌熔体处理时,挤压铸造轨道件的力学性能较差,平均抗拉强度为 540 MPa,伸长率为 5%,且不同位置处的性能差异比较大。经电磁搅拌熔体处理后,挤压铸造轨道件不同位置处的力学性能均优于未处理的成形件,其平均抗拉强度为 565 MPa,较未处理件提高了 4.63%;平均伸长率为 7.5%,较未处理件提高了 50%,力学性能稳定性明显改善。

铸件力学性能的差异与组织变化密不可分。未经

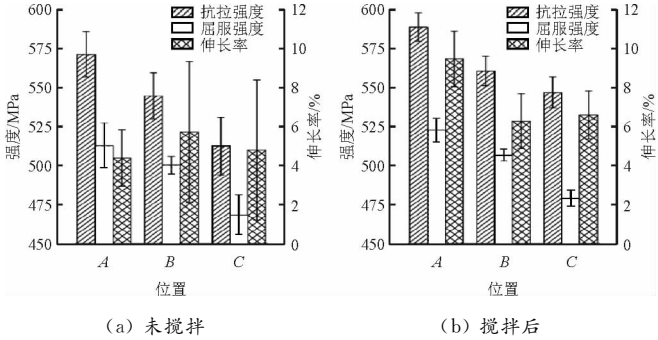


图 8 电磁搅拌处理前后挤压铸造轨道件力学性能

Fig.8 Mechanical properties of squeeze casting rail parts

before and after electromagnetic stirring treatment

电磁搅拌熔体处理的铸件,铸件中不同位置的晶粒整体粗大不均匀。这主要是由于在熔体温度降低的过程中,Sc,Zr 与 Al 原子会生成尺寸不同的原子团簇,随着原子团簇不断聚集长大到临界形核半径, $\text{Al}_3(\text{Sc,Zr})$ 的晶核就会开始形成,但是熔体内的 $\text{Al}_3(\text{Sc,Zr})$ 晶核核心数量很少,在铸造快速凝固过程中合金多以模具表面作为形核基底形核长大,导致合金晶粒组织比较粗大,达不到细化晶粒的效果,并且熔体中 $\text{Al}_3(\text{Sc,Zr})$ 相还会不断聚集长大形成粗大块状 $\text{Al}_3(\text{Sc,Zr})$ 相。这些粗大块状 $\text{Al}_3(\text{Sc,Zr})$ 相和未回溶晶界共晶相经 T6 热处理后难以完全回溶,对力学性能的影响较大,尤其是伸长率。电磁搅拌熔体处理之后,熔体在电磁场强剪切搅拌的作用下,一方面促进了温度场与成分场的均匀分布,使 Sc,Zr 在熔体中分布更加均匀,减轻了 Sc,Zr 元素的偏析,另一方面促进了 Al、Sc 和 Zr 原子集团结合形成大量小尺寸稳定晶胚并均匀分布在熔体中,抑制了大尺寸 Al-Sc-(Zr) 原子团簇的聚集。随着温度降低,很少或不会出现 $\text{Al}_3(\text{Sc,Zr})$ 形核的优先顺序,有利于大量细小弥散的 $\text{Al}_3(\text{Sc,Zr})$ 晶核形成。当熔体浇注到模具中快速凝固成形时,由于熔体中形核核心数量较多,会显著细化合金的微观组织结构,从而达到细化晶粒的效果。因此电磁搅拌熔体处理能显著细化晶粒尺寸,而且可以减少合金中粗大块状 $\text{Al}_3(\text{Sc,Zr})$ 相的数量,这些

都有利于晶界处共晶相的溶解,使得铸件的力学性能得到提升。此外,未经电磁搅拌熔体处理的铸件不同位置的力学性能差异大,主要原因是铸件不同壁厚位置的冷却速率不同,进而导致其组织形貌与尺寸差异。经过电磁搅拌熔体处理后,成形的合金浆料温度场和成分场相对均匀,低温半固态浆料流变挤压铸造造成形使得铸件不同壁厚位置因冷却速率不同带来的组织差异也变小,因此铸件不同位置的力学性能均匀性也得到明显改善。

3 结 论

(1)Al-11Zn-1.84Mg-0.92Cu-0.15Zr-0.15Sc 合金具有良好的抗热裂敏感性能,经电磁搅拌熔体处理后,挤压铸造轨道件的晶粒细小均匀,晶界处粗大的初生 $Al_3(Sc,Zr)$ 相和低熔点共晶相的数量减少,尺寸明显减小。

(2)经 T6 热处理后低熔点共晶相几乎完全溶解到基体内部,铸件的力学性能明显提升,平均抗拉强度达到565 MPa,伸长率为 7.5%,同时力学性能的一致性和稳定性得到显著改善。

参 考 文 献

[1] 李军,夏明许,胡侨丹,等. 大型铸锭均质化问题及其新解[J]. 金属学报, 2018, 54(5): 164-179.
[2] 张新明,邓运来,张勇. 高强铝合金的发展及其材料的制备加工技术[J]. 金属学报, 2015, 51(3): 257-271.

[3] 范子杰,桂良进,苏瑞意. 汽车轻量化技术的研究与进展[J]. 汽车安全与节能学报, 2014(1): 1-16.
[4] 齐丕疆. 面向 21 世纪的挤压铸造技术[J]. 特种铸造及有色合金, 1998(4): 34-38.
[5] 邢书明,李楠,郭文龙. 近净形高品质铸件流变成形技术进展[J]. 特种铸造及有色合金, 2008(S1): 22-25.
[6] ZHAO J, XU C, DAI G, et al. Microstructure and properties of rheo-diecasting wrought aluminum alloy with Sc additions[J]. Materials Letters, 2016, 173(15): 22-25.
[7] 郭洪民. 半固态铝合金流变成形工艺与理论研究 [D].南昌:南昌大学, 2007.
[8] 赵海越. 7050 铝合金半固态压铸缺陷控制及组织性能研究 [D]. 北京:北京有色金属研究总院, 2019.
[9] FLEMINGS M C. Solidification processing [J]. Metallurgical Transactions, 1974, 5(10): 2 121-2 134.
[10] CYRLE U A, GOVENDER G. Semi-solid rheocasting of grain refined aluminum alloy 7075[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, S20(3): 832-836.
[11] 吕书林. 半固态铝合金的超声振动制浆及其流变成形技术研究 [D].武汉:华中科技大学, 2012.
[12] XU Y T, ZHANG Z F, GAO Z H, et al. Effect of main elements (Zn, Mg and Cu) on the microstructure, castability and mechanical properties of 7xxx series aluminum alloys with Zr and Sc[J]. Materials Characterization, 2021, 182:111 559.
[13] XU Y T, ZHANG Z F, GAO Z H, et al. Effect of Sc on the hot cracking properties of 7xxx aluminum alloy and the microstructure of squeeze castings[J]. Materials, 2021, 14(22): 6 881.

(编辑:彭瑾)

《特种铸造及有色合金》征订启事

《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,SA、CA、MA、AJ、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学术期刊等。

本刊主要报道各种(黑色和有色合金)特种铸造方法、各种有色合金及复合材料成形的理论、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,并报道各相关学科和交叉学科,如挤压铸造(液态模锻)、半固态加工、电子封装、高熵合金、非晶合金(金属玻璃)、焊接、粉末冶金、合金化、热处理、表面处理等方面的学术研究和技术信息以及上述内容的国内外发展动向、行业活动、学术会议、消息动态等。

本刊诚征国内外广告,业务范围:铸造及有色合金材料、辅助材料、铸造及相关设备、铸造生产线、测控与控制设备、仪器仪表、计算机应用软件、铸造展会等。

本刊为月刊,标准(大)16 开,邮发代号 38-109。邮发订价每期 20 元,全年 240 元,如须快递,费用另计。全国各地邮局均可订阅,也可直接向本刊编辑部邮购,本刊还提供过刊、压铸宝典和年会专刊邮购服务。

特种铸造及有色合金杂志社(武汉)有限公司



地址:武汉市江岸区九万方路 26 号

邮编:430019

电话:027-85358206,85486024

传真:027-85358127

投稿网址:www.special-cast.com

邮箱:tzzz@special-cast.com

