

间接挤压铸造水雷壳体用 ZAlSi7Mg 铝合金隔板件

孙晓平 赵宇宏 陈利文 李志强 景舰辉 李沐奚 田晋忠 侯华

(中北大学材料科学与工程学院)

摘要 采用 SHP34-500A 多功能液态成型机试生产了水雷壳体用 ZAlSi7Mg 铝合金隔板件,研究了不同比压、浇注温度和保压时间下铸件组织和力学性能的变化。结果表明,随着比压和保压时间的增加以及浇注温度下降,铸件的晶粒尺寸呈现减小的趋势。最佳工艺参数是比压为 130 MPa、浇注温度为 720 °C、保压时间为 20 s。从挤压的铸件本体取样,其抗拉强度达 209.9 MPa,屈服强度达 121.8 MPa,伸长率达 10.3%;经过热处理后铸件抗拉强度达 259 MPa,屈服强度达 179.6 MPa,伸长率达 11.8%。

关键词 挤压铸造;工艺参数;ZAlSi7Mg 合金;力学性能

中图分类号 TG146.21;TG249.2

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.04.010

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



ZAlSi7Mg Aluminum Alloy Diaphragm for Mine Shell by Indirect Squeeze Casting

Sun Xiaoping, Zhao Yuhong, Chen Liwen, Li Zhiqiang, Jing Jianhui, Li Muxi, Tian Jinzhong, Hou Hua

(School of Materials Science and Engineering, North University of China)

Abstract: The SHP34-500A multifunctional liquid forming equipment was utilized to trial-produce ZAlSi7Mg aluminum alloy diaphragm for mine shells, and the structure evolution and mechanical properties of the castings at different specific pressures, pouring temperatures and pressure holding times were investigated. The results indicate that with the increase of the specific pressure and holding time, and the decrease of the pouring temperature, the grain size of the casting presents a decreasing trend. After optimization, the optimal squeeze casting process parameters are specific pressure of 130 MPa, pouring temperature of 720 °C, and holding time of 20 s, where the tensile strength, yield strength and elongation reach 209.9 MPa, 121.8 MPa, and 10.3%, respectively, after casting body sampling. After heat treatment, the tensile strength, yield strength and elongation are 259 MPa, 179.6 MPa, and 11.8%, respectively.

Key Words: Squeeze Casting, Process Parameters, ZAlSi7Mg Alloy, Mechanical Properties

ZAlSi7Mg 铝合金具有成分简单、铸造性能优良、流动性好的特点,适用于薄壁、强度适中和形状复杂的铸件。挤压铸造是在压力下充型并在高压下凝固成形的技术,可显著减少缩孔、缩松等缺陷,因此被用于高品质铝合金及其复合材料结构件生产^[1~3]。

国内挤压铸造技术的研究起步较晚,但发展迅速,主要针对汽车领域的铝合金结构件和工艺参数的仿真模拟等^[4~6],集中于轮毂、副车架、控制臂等方面^[7~9]。李宇飞等^[10]采用卧式挤压铸造机,研究了间接挤压铸造工艺对汽车控制臂铸件性能的影响,发现挤压比压较低时,仅有利于铸件宏观缺陷的改善;挤压比较高时,可提高合金液凝固速度,明显细化铸件的微观组织。郭莉

军等^[11]研究间接挤压铸造工艺条件下,浇注温度、挤压压力、挤压速度、冷却速度及参数间的交互作用对 6066 铝合金中 Si 元素的偏析影响,发现浇注温度、挤压压力、挤压速度和冷却速度对 Si 偏析都有影响,其中浇注温度影响最显著。随着浇注温度升高,铝合金中 Si 偏析程度减小。袁方今等^[12]通过模拟分析了 ZL109 铝合金挤压铸造活塞的充型过程、凝固过程,确定了铸件的工艺方法和优化方案。

本课题采用自主研发的 SHP34-500A 多功能液态成型机试生产了水雷壳体用 ZAlSi7Mg 铝合金隔板件,研究了间接挤压铸造工艺对铝合金铸件组织和性能的影响,旨在建立间接挤压铸造工艺-组织-性能关系,对

收稿日期:2021-09-11;**修改稿收到日期:**2021-10-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52074246,22008224);国防基础科研资助项目(JCKY2020408B002);山西省科技重大专项资助项目(20191102008,20191102007);山西省研究生教育创新资助项目(2020BY093,2020SY356);山西省高等学校科技创新计划资助项目(2020L0280);中北大学科学研究基金资助项目(XJJ201909);中北大学研究生科技立项资助项目(20201708)

第一作者简介:孙晓平,男,1994 年出生,硕士研究生,太原(030051),E-mail:sunxiaoping360@163.com

通信作者:赵宇宏,女,1974 年出生,教授,太原(030051),E-mail:zhaoyuhong@nuc.edu.cn

引用格式:孙晓平,赵宇宏,陈利文,等.间接挤压铸造水雷壳体用 ZAlSi7Mg 铝合金隔板件[J].特种铸造及有色合金,2022,42(4):446-450.

SUN X P, ZHAO Y H, CHEN L W, et al. ZAlSi7Mg aluminum alloy diaphragm for mine shell by indirect squeeze casting[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(4):446-450.

间接挤压铸造制备工艺、铸件组织及性能进行研究,实现高性能挤压铝合金铸件的可控制备。

1 间接挤压铸造

1.1 试验材料

试验材料选用 ZAlSi7Mg 铝合金,采用 Foundry-Master Xpert 型火花直读光谱仪测试成分见表 1。

表 1 ZAlSi7Mg 铝合金的化学成分

Tab.1 Chemical composition of ZAlSi7Mg aluminum alloy %

ω_B							
Si	Mg	Fe	Cu	Mn	Zn	Ti	Al
7.5	0.28	0.16	0.2	0.04	0.01	0.03	余量

1.2 间接挤压铸造

采用 SHP34-500A 多功能液态成型机试生产铝合金隔板铸件,模具材质为 H13 钢。经过备料、熔炼、模具预热、浇注、间接挤压等工艺,最终制得铝合金隔板铸件,工艺路线见图 1。

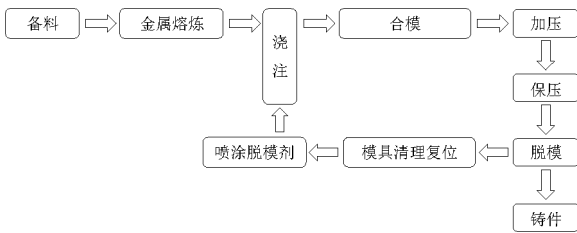


图 1 工艺路线图

Fig.1 Schematic diagram of process route

挤压模具结构见图 2,主要包括凹模、凸模、铸件顶出装置、合模装置、间接挤压装置。首先用锯床对铝锭切块,打磨表面,去除杂质;预热中频炉;用模温机预热模具,设定温度为 260 °C;把 ZAlSi7Mg 铝锭放进预热的坩埚中;待 ZAlSi7Mg 铝合金熔化后,采用 C₂Cl₆ 精炼、除气、静置、扒渣。使用热电偶测量熔体温度,准备

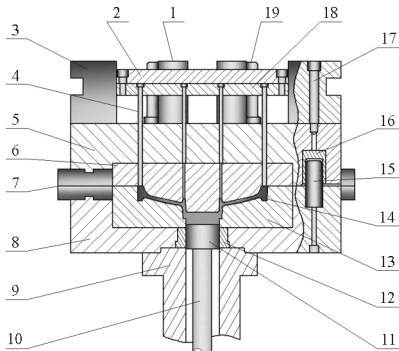


图 2 模具图

Fig.2 Assembly diagram

- 1.支撑柱 2.顶针背板 3.模架 4.顶针 5.凸模模套 6.凸模
- 7.承力块 8.凹模模套 9.料缸 10.推杆 11.压头 12.浇口套
- 13.凹模 14.铸件 15.导柱 16.导套 17.固定螺栓 18.顶针固定板 19.回程导柱

浇注;启动多功能液态成型机,测试滑块和顶缸运行是否正常,开模准备浇注;熔体到预定温度后将坩埚取出开始浇注;经合模保压后,开模取件,并开始下一次浇注。

1.3 试验设计

挤压铸造工艺参数见表 2。通过控制变量法,分 3 次进行,变量依次为浇注温度、比压和保压时间,模具温度设为 260 °C。在第 1 组挤压铸造试验中,浇注温度分别为 700、720、740 °C,比压和保压时间分别为 110 MPa 和 15 s。在第 2 组试验中,采用获得最佳力学性能的浇注温度,保压时间不变,比压在 110、120、130 MPa。在第 3 组试验中,基于前两次获得最佳力学性能的工艺参数,保压时间分别为 15、20、25 s。

表 2 挤压铸造参数

Tab.2 Squeeze casting parameters

比压/MPa	浇注温度/°C	保压时间/s
110、120、130	700、720、740	15、20、25

1.4 热处理方案

将不同工艺下制备的试样经线切割处理成规则形状,观察铸态的微观组织,选择最佳组织形态对应下的试样进行 535 °C × 6 h (T6) 固溶处理,在 70 °C 的水中淬火,淬火时间不超过 10 s,然后进行 185 °C × 6 h 时效处理,空冷。

1.5 试样制备及检测

在铸件本体取样,分别将铸态和 T6 态试样车削加工成标准拉伸试样,每种工艺参数下的试样取 3 个试样的平均值,拉伸试样尺寸见图 3。采用 CMT5105 型微机控制电子万能试验机进行室温拉伸试验,加载速率为 1.0 mm/min。采用 TMHVS-1000 自动数字显微硬度计进行维氏硬度测试,在 500 N 载荷下持续加载 15 s。采用扫描电镜进行不同状态试样的断口形貌扫描,对不同处理状态下的试样进行、微观形貌及力学性能分析。

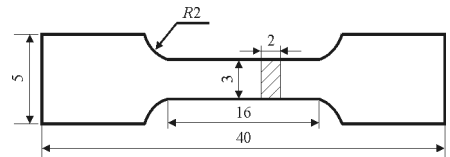


图 3 拉伸试样

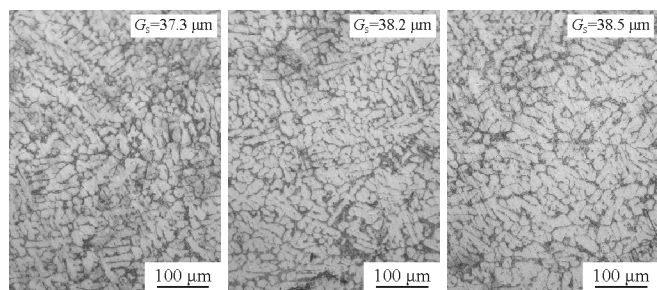
Fig.3 Tensile specimens

2 试验结果与分析

2.1 不同工艺参数下铸件的微观组织

图 4 为浇注温度分别为 700、720 和 740 °C 时的挤压 ZAlSi7Mg 铝合金铸件的显微组织。可以看出,灰色相为 α-Al 初生相,呈树枝状分布,共晶 Si 分布于树枝

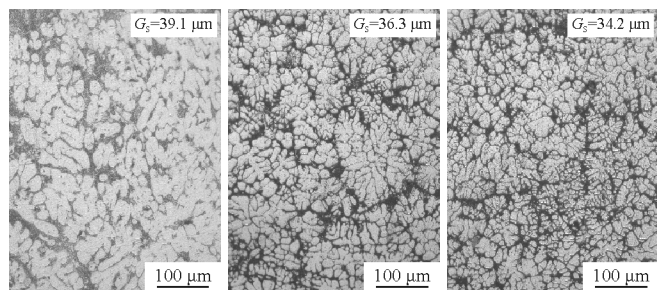
晶的晶界处呈黑色。随着浇注温度提高,平均晶粒尺寸(G_s)逐渐提高。平均晶粒尺寸依次为 $37.3 \mu\text{m}$ 、 $38.2 \mu\text{m}$ 、 $38.5 \mu\text{m}$ 。



(a) 700 °C (b) 720 °C (c) 740 °C

图4 ZA1Si7Mg 铝合金不同浇注温度时的显微组织
Fig.4 Microstructures of ZA1Si7Mg alloy at different casting temperatures

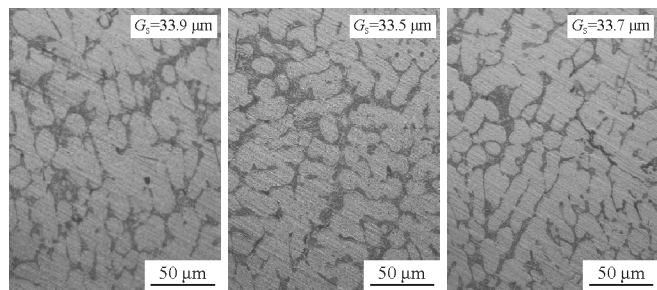
图5是比压为110、120、130 MPa时的ZA1Si7Mg铝合金铸件的微观组织。可以看出,在110 MPa时平均晶粒尺寸为 $39.1 \mu\text{m}$, α -Al相主要以等轴晶形式存在。随着压力增大,在130 MPa时蔷薇状晶粒明显增多,见图5b,晶粒平均尺寸减小到 $34.2 \mu\text{m}$,这是因为压力的增大提高了合金液的流动性和凝固时的过冷度,所以合金液与模具内壁的热导率和凝固结晶速率增大,加快了凝固速度,阻止晶粒长大,导致晶粒细化。



(a) 110 MPa (b) 120 MPa (c) 130 MPa

图5 不同挤压压力时 ZA1Si7Mg 铝合金的显微组织
Fig.5 Microstructures of ZA1Si7Mg alloy at different extrusion pressures

图6是保压时间为15、20、25 s时的ZA1Si7Mg铝合金挤压铸造的显微组织。从图6a中看出,组织中有



(a) 15 s (b) 20 s (c) 25 s

图6 挤压 ZA1Si7Mg 铝合金保压不同时间的显微组织
Fig.6 Microstructures of ZA1Si7Mg alloy for different holding time

一处缺陷,这是由于保压时间过短导致补缩不完全所致;从图6b中看出,共晶Si相分布均匀,晶粒尺寸进一步减小达到 $33.5 \mu\text{m}$,且没有缺陷;从图6c中看出,共晶Si形貌以片状和长杆状为主,对 α -Al相割裂作用较小,晶粒尺寸与图6b相差不大。

2.2 不同工艺参数下铸件的力学性能

在第一组试验中,浇注温度为700、720、740 °C,比压和保压时间分别为110 MPa和15 s。试验结果见表3。可以看出,浇注温度为720 °C时,铸件力学性能最佳,而浇注温度过高会导致晶粒粗大,所以选择720 °C作为后两次试验的浇注温度。

表3 不同浇注温度的铸件的力学性能

Tab.3 The mechanical properties of castings at different pouring temperatures

编号	浇注温度/ °C	抗拉强度/ MPa	屈服强度/ MPa	伸长率/ %	硬度 (HV)
1	700	165.3	99.6	6.7	88.4
2	700	168.3	127.6	3.8	87.1
3	700	161.1	114.8	4.4	90.2
4	720	185.3	124.9	5.9	90.1
5	720	180.8	117.1	6.5	89.3
6	720	182.9	118.4	6.1	90.7
7	740	180.4	122.7	5.4	88.0
8	740	146.3	115.5	2.7	91.9
9	740	176.4	107.5	11.2	87.6

在第二组试验中,浇注温度为720 °C,保压时间为15 s,比压为110、120、130 MPa,结果见表4。可以看出,比压为130 MPa时,铸件力学性能最佳。从图5可知,130 MPa的平均晶粒尺寸最小,这符合细晶强化的机理。所以选择130 MPa作为第3次试验的比压。

表4 不同比压时铸件的力学性能

Tab.4 The mechanical properties of castings at different specific pressures

编号	比压/ MPa	抗拉强度/ MPa	屈服强度/ MPa	伸长率/ %	硬度 (HV)
1	110	180.5	102.3	8.8	94.3
2	110	179.7	126.2	4.1	98.7
3	110	179.8	123.9	10.1	93.9
4	120	183.9	111.8	8.8	99.2
5	120	186.5	121.6	5.6	95.7
6	120	191.5	127.5	7.9	97.6
7	130	201.4	116.2	12.4	98.4
8	130	192.5	113.6	12.3	100.6
9	130	194.3	111.7	10.9	107.5

在第3组试验中,在浇注温度为720 °C和比压为130 MPa下,保压时间分别为15、20、25 s,结果见表5。可以看出,保压时间为20 s时,铸件力学性能最佳;保压时间15 s时熔体补缩不完全,保压时间为25 s时,会对铸件形成固态挤压,所以保压时间为25 s时铸件伸长率明显下降。综合3次试验,浇注温度为720 °C、比

表 5 不同保压时间下铸件力学性能

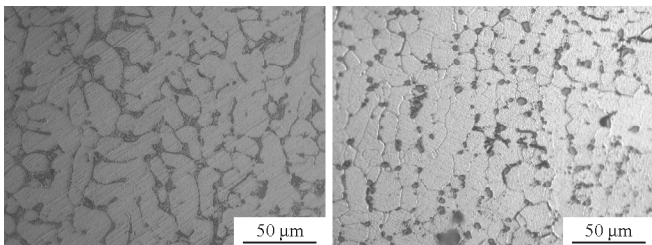
Tab.5 Mechanical properties of castings under different

编号	holding time				
	保压时间/ s	抗拉强度/ MPa	屈服强度/ MPa	伸长率/ %	硬度 (HV)
1	15	202.4	126.8	12.1	101.8
2	15	194.3	123.3	10.8	103.7
3	15	186.5	130.5	3.1	97.8
4	20	209.9	121.8	10.3	105.8
5	20	201.4	116.3	12.4	97.2
6	20	197.8	131.0	7.5	99.4
7	25	200.7	120.9	9.2	95.3
8	25	200.0	134.8	3.6	101.2
9	25	186.5	130.5	3.1	99.8

压为 130 MPa、保压时间为 20 s 较为理想。

2.3 热处理后铸件微观组织和力学性能的变化

图 7 为经最优工艺挤压的 ZAlSi7Mg 铝合金在 T6 热处理前后的微观组织。可以看出,热处理前共晶 Si 相呈较大的针状,热处理后共晶 Si 细化,呈短杆状和球状。经过热处理后其抗拉强度达 259 MPa、屈服强度达 179.6 MPa、伸长率达 11.8%。这是因为共晶 Si 的形状和尺寸会显著影响 Al-Si 系合金的力学性能,复合材料受力时共晶 Si 附近容易形成应力集中,细化的共晶 Si 相降低了材料内部应力集中,形成细晶强化^[13]。



(a) 热处理前

(b) 热处理后

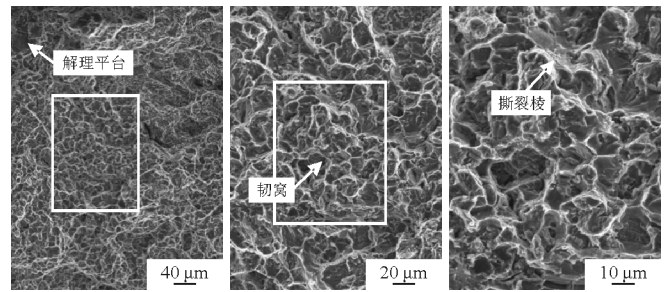
图 7 T6 热处理前后 ZAlSi7Mg 合金的微观组织

Fig.7 Microstructure of ZAlSi7Mg alloy before and after T6 heat treatment

2.4 断口形貌

图 8 为经最优工艺挤压的 ZAlSi7Mg 铝合金试样 3 处不同位置的拉伸断口形貌。可以看出,断口形貌主要由韧窝、解理平台和撕裂棱组成。韧窝小而多,分布密集,ZAlSi7Mg 合金断口形貌中韧窝的比例较大,解理平台面积较少,无明显缺陷,属于韧性断裂。

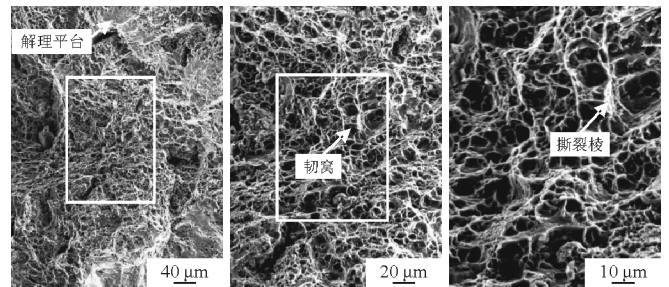
图 9 为 ZAlSi7Mg 铝合金在最优工艺下挤压后经 535 °C×6 h 固溶处理、在 185 °C×6 h 人工时效后拉伸试样的断口形貌。可以看出,断口表面由韧窝、解理平台和撕裂棱组成。从图 9a 中可以看出,韧窝变的更小更密集,图 9b 中可以看出撕裂棱增多,图 9c 中可以看出韧窝变深,结合力学性能检测,经热处理后,试样抗拉强度、屈服强度和伸长率均有较大提升。



(a) SEM 形貌 (b) 图 8a 方框放大 (c) 图 8b 方框放大

图 8 最优工艺挤压的 ZAlSi7Mg 铝合金的拉伸断口形貌

Fig.8 Tensile fracture morphology of ZAlSi7Mg alloy extruded by optimum process



(a) 断口形貌 (b) 图 9a 方框放大 (c) 图 9b 方框放大

图 9 最优工艺挤压的 ZAlSi7Mg 铝合金热处理后拉伸断口形貌

Fig.9 Tensile fracture morphology of ZAlSi7Mg alloy extruded by optimum process after heat treatment

3 结 论

(1) 挤压工艺对 ZAlSi7Mg 铝合金组织和性能影响较大,能细化铸件晶粒,使组织分布均匀和共晶 Si 尺寸减小,对基体相的割裂作用减小。

(2) ZAlSi7Mg 铝合金最佳挤压工艺参数是比压为 130 MPa、浇注温度为 720 °C、保压时间为 20 s,该工艺条件下铸件力学性能最佳,抗拉强度为 209.9 MPa、屈服强度为 121.8 MPa、伸长率为 10.3%。

(3) ZAlSi7Mg 铝合金在最佳挤压工艺下经 535 °C×6 h 固溶处理,在 70 °C 进行淬火,淬火转移时间少于 10 s,在 185 °C×6 h 时效后,空冷。试样抗拉强度达 259 MPa、屈服强度达 179.6 MPa、伸长率达 11.8%。

参 考 文 献

- [1] 尚群超.大型耐磨板型件液态模锻及其组织性能研究[D].北京:北京交通大学, 2019.
- [2] YANG L, HOU H, ZHAO Y H, et al. Effect of applied pressure on microstructure and mechanical properties of Mg-Zn-Y quasicrystal-reinforced AZ91D magnesium matrix composites prepared by squeeze casting[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25(12): 3 936-3 943.
- [3] YANG L, HOU H, ZHAO Y H, et al. Microstructure and mechanical properties of squeeze casting quasicrystal reinforced AZ91D magnesium matrix composites[J]. Rare Metal Materials & Engineering, 2016, 45(8): 1 978-1 982.

再生 A356 铝合金生产工艺及性能研究

葛素静^{1,2} 刘永昌^{1,2} 叶珍^{3,4} 鲁园园⁵ 毛贻国^{1,2} 孙芳芳^{1,2} 苑高利^{1,2} 霍臣明^{1,2} 马朝利⁵

(1.河北新立中有色金属集团有限公司; 2.河北省轻金属合金材料技术创新中心; 3.保定市立中车轮制造有限公司; 4.河北省高强韧轻量化车轮技术创新中心; 5.北京航空航天大学材料科学与工程学院)

摘要 以再生铝生产 A356 合金全工艺流程为研究对象,对合金成分调整、微合金化、精炼除渣等关键工艺进行优化,并对处理后的合金铸造性能、微观组织及力学性能进行评估。结果发现,经优化工艺处理后,再生 A356 铝合金中夹杂物含量较低、含 Fe 相形貌主要为短棒状,使用再生铝生产的 A356 合金铸造性能、拉伸性能和旋转弯曲疲劳性能与电解铝生产的 A356 合金性能相差不大,再生铝可以替代电解铝原材料生产 A356 合金,降低能源消耗。

关键词 再生铝; 精炼除渣; 微观组织; 旋转弯曲疲劳

中图分类号 TG223; TG292 **文献标志码** A

DOI: 10.15980/j.tzzz.2022.04.011

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Production Process and Performance of Recycled A356 Aluminum Alloy

Ge Sujing^{1,2}, Liu Yongchang^{1,2}, Ye Zhen^{3,4}, Lu Yuanyuan⁵, Mao Yiguo^{1,2},
Sun Fangfang^{1,2}, Yuan Gaoli^{1,2}, Huo Chenming^{1,2}, Ma Chaoli⁵

(1.Hebei New Lizhong Non-ferrous Alloy Group Co., Ltd.; 2.Hebei Light Metal and Alloy Material Technology Innovation Center; 3.Baoding Lizhong Wheel Manufacturing Co., Ltd.; 4.Hebei High Strength and Toughness Lightweight Wheel Technology Innovation Center; 5.School of Material Science and Engineering, Beihang University)

Abstract: Taking recycled aluminum A356 alloy ingots as object, main processes such as compositional adjustment, micro-alloying as well as refining and deslagging were optimized, and the casting performance, microstructure and mechanical properties of treated alloy were evaluated. The results indicate that impurity content in recycled A356 aluminum alloy is relatively low and the morphology of the iron-containing phase presents mainly rod-like structure after the optimization treatment. The casting, tensile and rotary-bending fatigue properties of A356 alloy produced by recycled Al show little difference from those produced by electrolytic aluminum. The results reveal that the recycled Al is able to replace the electrolytic Al in producing A356 alloy, thus reducing energy consumption.

Key Words: Recycled Al, Refining and Deslagging, Microstructure, Rotary-bending Fatigue

收稿日期: 2021-12-31; 修改稿收到日期: 2022-02-12

基金项目: 北京航空航天大学青年拔尖人才支持计划资助项目(YWF-21-BJ-J-1102)

第一作者简介: 葛素静, 女, 1974 年出生, 高级工程师, 河北保定(071000), E-mail: gesujing@lizhong.com.cn

通信作者: 鲁园园, 女, 1987 年出生, 副教授, 北京(100191), E-mail: luyy87@buaa.edu.cn

引用格式: 葛素静, 刘永昌, 叶珍, 等. 再生 A356 铝合金生产工艺及性能研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2022, 42(4): 450-454.

GE S J, LIU Y C, YE Z, et al. Production process and performance of recycled A356 aluminum alloy [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(4): 450-454.

- [4] CHEN L W, ZHAO Y H, WEN Z Q, et al. Modelling and optimization for heat treatment of Al-Si-Mg alloy prepared by indirect squeeze casting based on response surface methodology[J]. Materials Research-Ibero-American Journal of Materials, 2017, 20(5): 1 274-1 281.
- [5] 陈利文, 侯华, 靳玉春, 等. 基于响应面法的铝合金间接挤压铸造工艺研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2018, 47(4): 1 174-1 179.
- [6] 李静怡, 赵宇宏, 陈利文, 等. 镁合金隔板铸件低压铸造工艺数值模拟[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(5): 588-592.
- [7] 马春江, 陈玖新, 葛素静, 等. 挤压铸造重载汽车用铝合金车轮的组织及性能[J]. 特种铸造及有色合金, 2014, 34(10): 1 063-1 065.
- [8] 姜峰, 何波, 刘文琪. 铝铜合金汽车轮毂的液态模锻成形与组织性能研究[J]. 铸造技术, 2018, 39(12): 2 798-2 801.
- [9] 孙珏, 许善新, 汤杰, 等. 汽车铝合金副车架挤压铸造工艺设计和产品开发[J]. 铸造, 2015, 64(1): 17-21.
- [10] 李宇飞, 余振龙, 石飞, 等. 挤压铸造工艺对汽车控制臂铸件组织及性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2018, 38(8): 864-866.
- [11] 郭莉军, 邢书明, 鲍培玮. 间接挤压铸造工艺参数对铝合金中 Si 偏析的影响[J]. 工程科学学报, 2016, 38(2): 257-262.
- [12] 袁方今, 陈刚, 张再磊, 等. 间接挤压铸造活塞模具设计与工艺优化[J]. 铸造技术, 2017, 38(7): 1 646-1 649.
- [13] 景舰辉, 陈利文, 孙晓平, 等. 热处理对半固态注射成形石墨烯/镁基复合材料组织及性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(1): 47-50.

(编辑: 刘卫)