

电磁搅拌对 Cu-2Ag 合金凝固组织及性能的影响

郭伟^{1,2} 洪志远³ 陈岩^{2,3,4} 宋鸿武² 王克鲁¹ 张士宏^{2,4} 王俊¹

(1.南昌航空大学航空制造工程学院; 2.中国科学院金属研究所, 师昌绪先进材料创新中心;
3.江西铜业技术研究院有限公司; 4.江西铜业集团有限公司)

摘要 采用真空下引连铸加电磁搅拌工艺铸造 $\phi 15$ mm 的 Cu-2Ag 合金杆坯, 分别研究了电磁搅拌参数和拉坯速度对 Cu-2Ag 合金组织和硬度的影响。结果表明, 随着搅拌频率的升高, 合金凝固组织晶粒尺寸逐渐减小; 在电流为 280 A 时合金组织的细化效果较为明显, 且合金硬度随着频率改变有明显变化。相对于拉坯速度为 6 mm/min, 4 mm/min 时合金硬度有所提高, 在不同的拉坯速度和电流强度下, 搅拌频率为 50 Hz 时其硬度均达到最高。

关键词 电磁搅拌; Cu-Ag 合金; 凝固组织; 硬度

中图分类号 TG27; TG146.1⁺1; TG249.7

文献标志码 A

DOI: 10.15980/j.tzzz.2022.01.015

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Electromagnetic Stirring on the Solidification Microstructure and Properties of Cu-2Ag Alloy

Guo Wei^{1,2}, Hong Zhiyuan³, Chen Yan^{2,3,4}, Song Hongwu², Wang Kelu¹, Zhang Shihong^{2,4}, Wang Jun¹

(1.School of Aeronautical Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University; 2.Shichangxu Advanced Materials Innovation Center, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences;

3.Jiangxi Copper Technology Research Institute Co., Ltd.; 4.Jiangxi Copper Group Co., Ltd.)

Abstract: Cu-2Ag alloy rod billet with a diameter of 15 mm was fabricated by vacuum continuous down-drawing casting and electromagnetic stirring process. The influence law of electromagnetic stirring on microstructure and Vickers hardness of Cu-2Ag alloy under different parameters were investigated. The results indicate that the grain size of the solidification microstructure of the alloy is decreased gradually with the increase of stirring frequency. The refinement effect of the alloy structure is desirable under the current of 280 A, and the hardness of alloy is changed obviously with frequency. Compared with that at the drawing speed of 6 mm/min, the Vickers hardness of the alloy specimen is increased at the drawing speed of 4 mm/min. Under different drawing speeds and current intensities, the Vickers hardness reaches the maximum when the stirring frequency is 50 Hz.

Key Words: Electromagnetic Stirring, Cu-Ag Alloy, Solidification Structure, Hardness

Cu-Ag 合金具备优异的强度和导电性, 已成为医疗器材、高速列车用接触线材、强磁场磁体系统、大型高速涡轮发电机转子导线及大规模集成电路引线框架等首选的导体材料^[1~3]。伴随着电子信息工业的快速发展, 特别是笔记本电脑、移动通讯产品及终端信号传输产品等的快速发展, 高强高导超细铜线的需求量日益增加。随着 Cu 基体中 Ag 含量的提高, 其强度增加, 但伸长率降低, 导致拉拔微细线的难度加大^[4], 在拉制过程中极易断线, 其原因包括杆线原始铸坯品质、工艺设计

与控制、工装模具与设备等因素, 其中杆线原始铸坯品质至关重要。通过铸造工艺控制可以有效改善铜杆夹杂、气孔和缩松等铸造缺陷, 一般从组织纯净化、均匀化、细晶化等方面来改善铜杆铸坯品质^[5~10]。

电磁搅拌技术在中国的研究和开发始于 20 世纪 80 年代, 其在改善连铸生产工艺、提高铸坯品质方面发挥着关键作用^[11]。在合金凝固过程中施加电磁搅拌技术可细化晶粒, 基于此原理开发的电磁搅拌技术在工业中已广泛应用^[12~14]。研究电磁搅拌频率和铸造参数等

收稿日期: 2021-03-03; 修改稿收到日期: 2021-05-18
基金项目: 中国博士后科学基金资助项目(2019M662276); 中国科学院科技服务网络计划区域重点资助项目(KFJ-STQ-QYZD-145); 江西省重大科技研发专项资助项目(20203ABC28W004)
第一作者简介: 郭伟, 男, 1998 年出生, 硕士研究生, 南昌(330063), E-mail: 2509152715@qq.com
通信作者: 陈岩, 男, 1984 年出生, 副研究员, 南昌(330063), E-mail: ychen10b@imr.ac.cn
引用格式: 郭伟, 洪志远, 陈岩, 等. 电磁搅拌对 Cu-2Ag 合金凝固组织及性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2022, 42(1): 73-77.
GUO W, HONG Z Y, CHEN Y, et al. Effects of electromagnetic stirring on the solidification microstructure and properties of Cu-2Ag alloy [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(1): 73-77.

对 Cu-2Ag 合金凝固组织和硬度的影响,对 Cu-Ag 合金铜杆铸造工艺优化具有积极意义。

1 试验材料与方法

对可能影响铜杆品质的拉坯速度、搅拌电流、搅拌频率等 3 个参数进行正交试验。试验工艺参数见表 1。

表 1 Cu-2Ag 合金铜杆的不同工艺参数铸造方案
Tab.1 Casting schemes with different process parameters for Cu-2Ag alloy copper rod

编号	拉坯速度/(mm·min ⁻¹)	频率/Hz	电流/A
1	6	20	280
2	6	50	280
3	6	80	280
4	4	20	280
5	4	50	280
6	4	80	280
7	4	20	400
8	4	50	400
9	4	80	400
10	6	0	0
11	4	0	0

采用 99.9% (质量分数,下同) 的电解 Cu 和 99.999% 的电解 Ag 作为原材料,采用真空感应下引连续铸造炉熔炼 Cu-2Ag 合金,额定容量为 25 kg,设备工作原理示意图见图 1。把 Cu 料放入坩埚后抽真空,升温至 1 160 ℃ 并保温,加入纯 Ag,然后进行电磁搅拌,频率分别为 20、50、80 Hz,电流分别为 280 和 400 A,待 Cu 液升温至牵引温度后,保温静置后,开始牵引,拉坯速度分别为 4 和 6 mm/min,连铸出 φ15 mm 的 Cu-2Ag 合金杆。

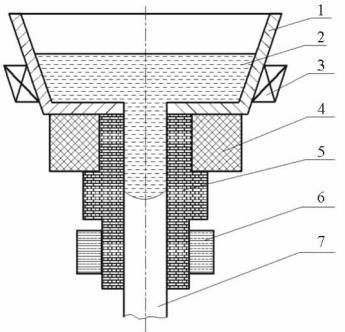


图 1 下引连铸工艺原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of continuous down-drawing casting process

- 1.坩埚 2.合金液 3.电磁搅拌器 4.保温隔热垫
- 5.结晶器 6.冷却水 7.杆坯

对各个参数的 φ15 mm 拉杆坯的宏观组织进行分析。截取试样的横向和纵向剖面进行磨抛,用 3.5 g 的 FeCl₃、25 mL 无水乙醇和 75 mL 水配置溶液腐蚀,采用 OLS-5000 型激光共聚焦显微镜进行宏观组织观察;利用硬度仪测试合金的硬度,载荷为 0.98 N,加载

时间为 15 s,每个试样测试 5 个位置,结果取平均值。

2 试验结果与分析

2.1 搅拌频率对合金组织和硬度的影响

图 2 为无电磁搅拌且拉坯速度为 4 mm/min 的 Cu-2Ag 合金的铸态宏观形貌。可以看出,合金晶粒粗大且形状不规则,呈柱状晶粒,沿纵向生长。晶粒的分布不均匀,大量细小晶粒在边缘,心部多为粗大晶粒。边缘部柱状晶区与下引方向的夹角明显要大于心部连续柱状晶区与下引方向的夹角。经测量,其晶粒平均尺寸为 1 067 μm,硬度(HV)为 69.6。

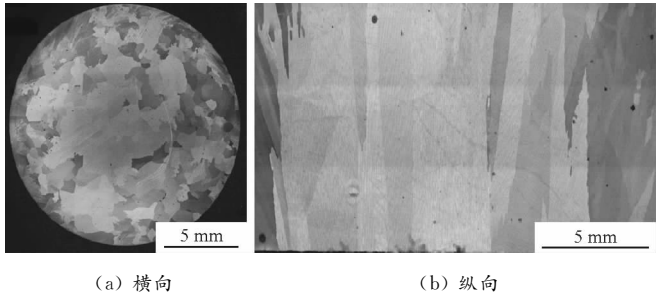


图 2 无电磁搅拌条件下铸态 Cu-2Ag 合金的宏观形貌

Fig.2 Macromorphology of as-cast Cu-2Ag alloy without electromagnetic stirring

图 3 是电流均为 280 A,拉坯速度为 4 mm/min 下不同电磁搅拌频率的 Cu-2Ag 合金横截面铸态宏观形貌。可以看出,随着频率增加,晶粒逐渐细化,分布也逐渐均匀;心部晶粒在 20 Hz 和 50 Hz 下与无电磁搅拌相比变得粗大,边缘部位晶粒细化,在 80 Hz 频率下,心部晶粒开始细化,边缘部位晶粒尺寸要大于心部晶粒。随着电磁搅拌频率提高,晶粒平均等积圆直径持续减小,由 20 Hz 时的 1 403 μm 持续减小到 80 Hz 时的 608 μm。

图 4 是电流为 280 A,拉坯速度为 4 mm/min 时不同电磁搅拌频率下 Cu-2Ag 合金纵截面铸态宏观形貌。可以看出,试样纵截面芯部为连续柱状晶区,与下引方向夹角为 θ,两端为柱状晶区,与下引方向夹角为 α。当电磁频率增加时,θ 角从 4.2° 增加到 9.5°,α 角先减小再增大。对比图 3c 和图 4c 可看出,在 80 Hz 下,试样芯部的连续柱状晶消失,形成等轴晶。等轴晶与下引方向夹角太大,不利于线材拉拔。柱状晶与下引方向夹角越小,越利于线材的拉拔。故电磁搅拌频率不宜过大,电磁搅拌频率为 50 Hz 的铸态组织综合夹角利于拉拔,柱状晶生长方向与拉拔方夹角最小。

由图 3、图 4a 和图 4b 可看到,合金纵截面心部只有一个较大的连续柱状晶,外圆有多个小柱状晶组成。测量了试样 4~6 的柱状晶区和连续柱状晶区的硬度,

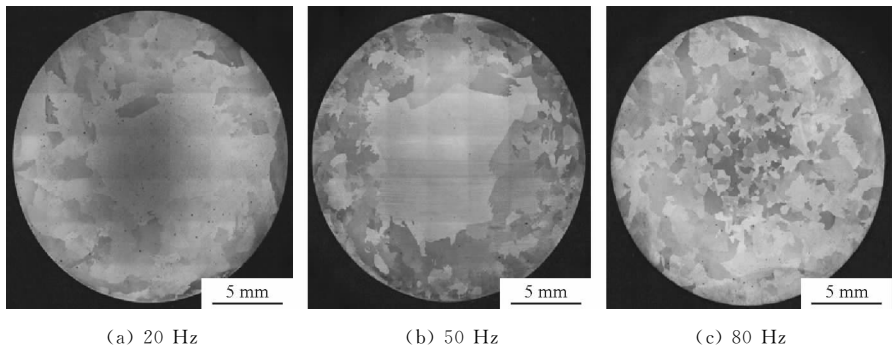


图 3 在电流为 280 A,拉坯速度为 4 mm/min 时,不同电磁搅拌频率下 Cu-2Ag 合金的横截面宏观形貌
Fig.3 The cross-section macrostructure of Cu-2Ag alloy under electromagnetic stirring at different frequencies with current of 280 A and drawing speed of 4 mm/min

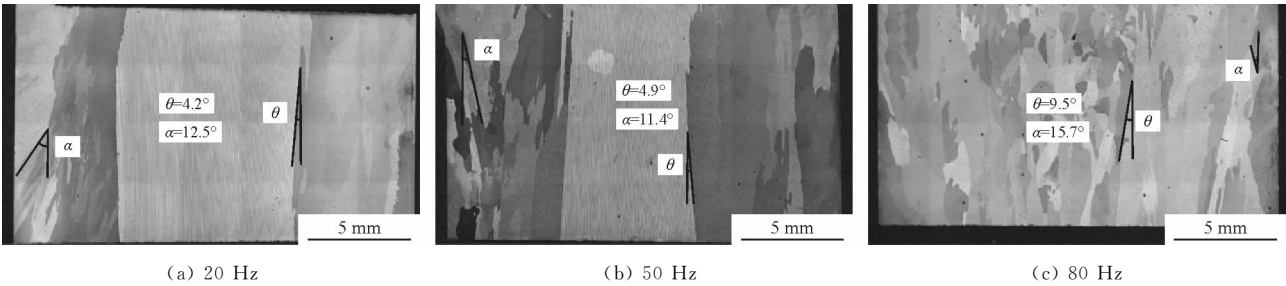


图 4 拉坯速度为 4 mm/min、电流为 280 A 时,不同电磁搅拌频率下 Cu-2Ag 合金纵截面铸态宏观形貌
Fig.4 The as-cast macromorphology in longitudinal section of Cu-2Ag alloy under different electromagnetic stirring frequencies with the current of 280 A and drawing speed of 4 mm/min

见图 5。发现在电磁搅拌频率相同时,试样横截面外圆的柱状晶区硬度要明显高于心部的连续柱状晶区。这是因为外圆的晶粒尺寸明显小于心部,晶粒数目多,抵抗变形能力强。

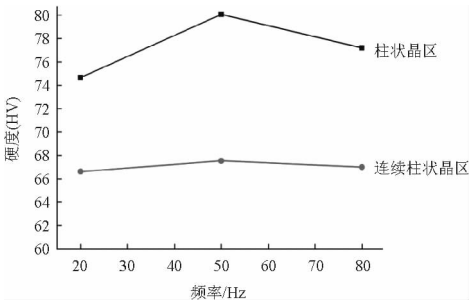


图 5 试样 4~6 柱状晶区和连续柱状晶区硬度
Fig.5 Hardness of columnar crystal area and continuous columnar crystal area of specimen 4~6

Cu-2Ag 合金熔体浇入铸型后,保温一段时间达到热稳定,在铸型中建立轴向的温度梯度,使熔融合金沿着热流相反方向生长,凝固后以一定速度从加热区牵引出来,从而定向结晶,使 Cu-2Ag 合金获得柱状晶组织。电磁搅拌技术是利用电磁感应产生的电磁力来推动熔体运动,电磁搅拌频率越大,电磁搅拌力越大^[15]。当搅拌频率为 20 Hz 时,熔体受到的电磁力较小,熔体运动有限;搅拌频率提高到 50 Hz 时,熔体中的磁感应强度有所增大,柱状晶受到的电磁搅拌力增大,倾斜角增大,组织形貌也有所改变;搅拌频率为 80 Hz 时,熔体所受

到的电磁力较大,柱状晶被破碎成等轴状晶粒。

2.2 搅拌电流对合金组织和硬度的影响

图 6 是搅拌频率为 80 Hz,拉坯速度为 4 mm/min 时不同搅拌电流下 Cu-2Ag 合金的铸态宏观形貌。可以看出,在 400 A 电流下,合金的晶粒平均尺寸为 696 μm ,在 280 A 电流下的晶粒平均尺寸为 584 μm ,电流强度对凝固组织有一定的影响,电流为 280 A 时,铸坯的等轴晶率相比 400 A 更高,晶粒得到细化。

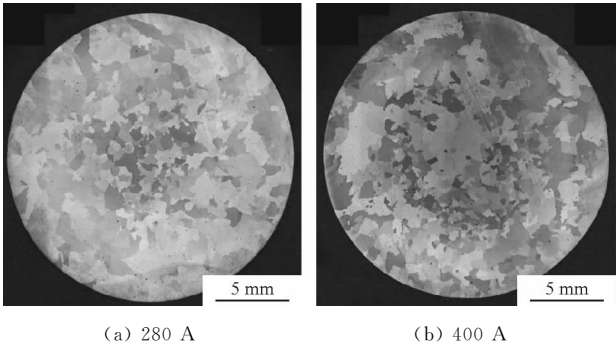


图 6 搅拌频率为 80 Hz,拉坯速度为 4 mm/min 时不同搅拌电流下 Cu-2Ag 合金的宏观形貌

Fig.6 Macromorphology of Cu-2Ag alloy with stirring frequency of 80 Hz and drawing velocity of 4 mm/min under different currents

图 7 是拉坯速度为 4 mm/min,搅拌电流为 280 A 和 400 A 时不同频率下 Cu-2Ag 合金的布氏硬度。可以看出,在 280 A 的电流下,频率在 20~50 Hz 变化时,

合金的硬度随频率的增加而增大,当频率达到 50 Hz 时,合金硬度最高,而频率继续增加到 80 Hz 时硬度则明显下降。在 400 A 的电流下,合金硬度变化不明显。这是因为电流为 280 A 时,铸坯形成的等轴晶率相比 400 A 更高,晶粒细化作用明显,而细化晶粒因素在合金强度的提高方面起主导作用。

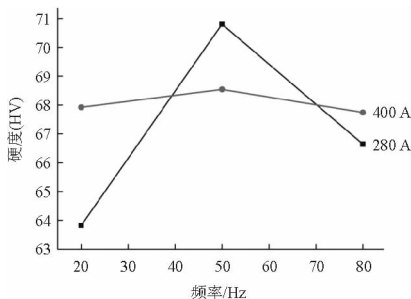


图 7 不同电磁搅拌电流对 Cu-2Ag 合金硬度的影响

Fig.7 Effects of electromagnetic stirring current on the hardness of Cu-2Ag alloy

2.3 拉坯速度对合金硬度的影响

图 8 是电流为 280 A,拉坯速度为 4 和 6 mm/min 时不同频率下 Cu-2Ag 合金试样的硬度。可以看出,拉坯速度为 6 mm/min 时,Cu-2Ag 合金硬度偏低,拉坯速度为 4 mm/min 时合金的硬度均有所提高,且在电磁搅拌频率为 50 Hz 时其硬度(HV)最高,为 70.8。

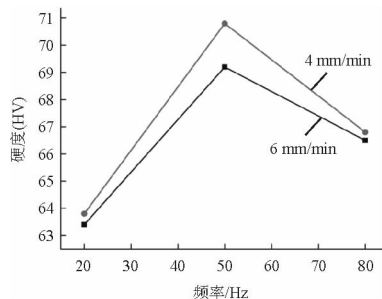


图 8 拉坯速度为 4、6 mm/min 时,不同频率下 Cu-2Ag 合金的硬度

Fig.8 The effect of stirring frequency on the hardness of Cu-2Ag alloy with current of 280 A and drawing velocity of 4 mm/min and 6 mm/min

2.4 结果分析

通过对比电磁搅拌频率对组织形貌的影响可发现,频率增大,平均晶粒尺寸减小。但频率为 80 Hz 时,柱状晶已被电磁力搅拌成等轴晶,不利于后续拉拔加工;在 50 Hz 时晶粒得到细化,柱状晶生长方向与拉拔方向夹角最小, $\theta=4.9^\circ$, $\alpha=11.4^\circ$,且硬度(HV)达到最高值 70.8。电流为 280 A 相比 400 A 时,晶粒平均尺寸较小。合金硬度在拉坯速度为 4 mm/min 时要比拉坯速度为 6 mm/min 更高。对比发现,电磁搅拌频率在 50 Hz 时,在不同的拉坯速度和电流强度下合金的硬度均

最高。

根据 Hall-Petch 关系,合金晶粒尺寸的平均值越小,材料的屈服强度就越高。晶粒越细,在一定体积内的晶粒数目越多,则在同样变形量下,变形分散在更多的晶粒内进行,变形较均匀,表现出较好的塑性和强度。硬度随着合金晶粒尺寸的减小而升高。晶粒越细,增大合金表面张力,进而阻碍合金变形,提高了合金的硬度^[16]。

3 结 论

(1)Cu-2Ag 合金铜杆晶粒尺寸随着搅拌频率的升高而减小,在搅拌频率为 80 Hz 时达到最小,升高搅拌频率,合金晶粒转变或成等轴晶,不利于拉拔。电磁搅拌频率为 50 Hz 的铸态组织柱状晶生长方向与拉拔方向夹角最小,且硬度(HV)最高,为 70.8。

(2)电磁搅拌电流为 280 A 时对 Cu-2Ag 合金熔体细化的作用效果要比电流为 400 A 更好,晶粒平均尺寸由 696 μm 减小到 584 μm 。且电磁搅拌为 280 A 电流下合金硬度随着频率改变有明显变化。

(3)Cu-2Ag 合金铜杆拉坯速度为 4 mm/min 比 6 mm/min 的硬度有所提高,采用搅拌频率为 50 Hz,电流为 280 A,拉坯速度为 4 mm/min 的电磁搅拌工艺时,合金的综合性能最优。

参 考 文 献

- [1] 沈月,杨有才,张国全,等.大变形对连铸 Cu-(2%~8%)Ag 合金力学性能及导电率的影响[J].稀有金属材料与工程,2014,43(7): 1 748-1 753.
- [2] 陈世康,陈小红,刘平,等.高速铁路接触线用高强高导 Cu-Cr-Co/Ti 合金的组织性能研究[J].有色金属材料与工程,2020,41(5): 1-8.
- [3] SAKAI Y, SCHNEIDER-MUNTAU H J. Ultra-high strength, high conductivity Cu-Ag alloy wires[J]. Acta Materialia, 1997, 45 (3): 1 017-1 023.
- [4] 封存利,秦芳莉,介明山,等.拉拔工艺对定向凝固 Cu-Ag 合金导线性能的影响[J].特种铸造及有色合金,2015,35(8): 893-896.
- [5] TIAN Y, ZHANG Z, LANGDON T. Achieving homogeneity in a two-phase Cu-Ag composite during high-pressure torsion[J]. Journal of Materials Science, 2013, 48(13): 4 606-4 612.
- [6] GUBICZA J, RAJU K S, SARMA V S, et al. The effect of thermomechanical treatment on the microstructure and the mechanical behavior of a supersaturated Cu-Ag alloy[J]. Materials Science Forum, 2015, 812: 53-58.
- [7] 谢建新,王宇,黄海友.连续柱状晶组织铜及铜合金的超延展变形行为与塑性提高机制[J].中国有色金属学报,2011,21(10): 2 324-2 336.
- [8] 李贵茂,王恩刚,张林,等.强磁场对 Cu-25Ag 合金凝固、拉拔组织及导电性能的影响[J].稀有金属材料与工程,2012,41(4): 701-706.
- [9] 柳艳,李贵茂,吉宁,等.电磁搅拌对 Cu-6Ag 合金凝固组织及硬度的影响[J].机械工程材料,2014,38(2): 32-35.
- [10] 王冰洁,田保红,张毅,等.稀土元素 Y 对 Cu-0.4Mg 合金热变形行为的影响[J].材料热处理学报,2018,39(7): 126-134.
- [11] 任忠鸣,雷作胜,李传军,等.电磁冶金技术研究新进展[J].金属学报,2020,56(4): 583-600.

再生铝超净化处理与微合金化技术在低压铸造铝车轮中的应用

叶 珍^{1,2} 郑长清^{1,2} 葛素静^{3,4} 鲁园园⁵ 张少文^{1,2} 苗赛男^{1,2} 刘永昌^{3,4} 周亚伟^{1,2} 马朝利⁵
(1.保定市立中车轮制造有限公司; 2.河北省高强韧轻量化车轮技术创新中心; 3.河北新立中有色金属集团有限公司; 4.河北省轻金属合金材料技术创新中心; 5.北京航空航天大学材料科学与工程学院)

摘 要 基于铝液夹杂物分析方法而建立的超净化处理技术可有效去除再生铝液中的夹杂物,提高铝液品质。通过添加少量 RE、Zr、Cr、Mn、Sr 等元素可改善再生铝合金的微观组织,提高其力学性能。比较不同再生铝添加量的车轮铸件在超净化处理和微合金化前后的性能变化。结果表明,经过超净化处理和微合金化处理后的再生铝制车轮性能与电解铝制车轮性能差异较小,能满足乘用车轮产品要求。

关键词 再生铝;夹杂物分析;超净化处理;微合金化

中图分类号 TG223;TG292 文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.01.016 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Application of Ultra-purification Treatment and Microalloying Technology of Recycled Aluminum in Aluminum Wheels by Low Pressure Casting
Ye Zhen^{1,2}, Zheng Changqing^{1,2}, Ge Sujing^{3,4}, Lu Yuanyuan⁵, Zhang Shaowen^{1,2},
Miao Sainan^{1,2}, Liu Yongchang^{3,4}, Zhou Yawei^{1,2}, Ma Chaoli⁵
(1.Baoding Lizhong Wheel Manufacturing Co., Ltd.; 2.Hebei High Strength and Toughness Lightweight Wheel Technology Innovation Center; 3.Hebei New Lizhong Non-ferrous Alloy Group Co., Ltd.;
4.Hebei Light Metal and Alloy Material Technology Innovation Center;
5.School of Materials Science and Engineering, Beihang University)

Abstract: The ultra-purification treatment technology developed on the basis of advanced inclusion identification and analysis methods for aluminum(Al) melt can effectively remove the inclusions in the recycled Al melt and improve the melt quality. The microalloying technology by doping small amounts of rare earth(RE), Zr, Cr, Mn and Sr elements can modify the microstructure and improve the mechanical properties of the recycled Al alloys. The performance of cast wheels containing various contents of recycled Al before and after ultra-purification treatment and microalloying was systematically compared. The results reveal that the performance of wheels made by recycled Al have little difference from those made by regular electrolytic Al, satisfying the product requirement of commercial wheels.

Key Words: Recycled Aluminum, Inclusion Analysis, Ultra-purification Treatment, Microalloying

收稿日期:2021-09-09;修改稿收到日期:2021-10-12
基金项目:北航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:叶珍,男,1974 年出生,高级工程师,河北保定(071000),E-mail:yezhen@lzwheel.com
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:叶珍,郑长清,葛素静,等.再生铝超净化处理与微合金化技术在低压铸造铝车轮中的应用[J].特种铸造及有色合金,2022,42(1):77-82.
YE Z, ZHENG C Q, GE S J, et al. Application of ultra-purification treatment and microalloying technology of recycled aluminum in aluminum wheels by low pressure casting[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(1):77-82.

[12] LI M, OMURA N, MURAKAMI Y, et al. A comparative study of the primary phase formation in Al-7Si and Al-17Si alloys solidified by electromagnetic stirring processing[J]. Materials Today Communications, 2020, 24(18): 101-146.

[13] ZOU A Q, HAN B N, SHEN B Z, et al. Effects of AlB₂/AlP phase and electromagnetic stirring on impurity B/P removal in the solidification process of Al-30Si alloy[J]. Separation and Purification Technology, 2018, 52(6): 207-211.

[14] 李贵茂,柳艳,石为喜,等.强磁场对 Cu-Ag 合金凝固组织及性能的影响[J].铸造,2017, 66(6): 626-628.

[15] 于洋,李宝宽.钢连铸电磁搅拌工艺中电磁力的计算[J].金属学报,2006(5): 540-544.

[16] PESTEANU O, SCHWERDTFEGGER K. Contribution to the large eddy simulation of flows in electromagnetic stirrers for continuous casting[J]. ISIJ International, 2003, 43(10): 1 556-1 561.

(编辑:刘晨辉)