

再生铝合金中富Fe相形貌的改善

苗赛男, 郑长清, 周亚伟, 李 泉, 李国瑞, 吕小松

(保定市立中车轮制造有限公司, 河北省高强韧轻量化车轮技术创新中心, 河北保定 071000)

摘要: 为明确Mn、Cr元素对再生铝合金中富Fe相的协同作用及最佳配比, 通过光学显微镜、扫描电子显微镜和拉伸试验机等研究了合金的微观组织及力学性能, 并与未添加微合金化元素的再生铝合金进行对比。结果表明, 在本试验条件下, Fe元素含量为0.3%时, 添加不同Mn和Cr元素会导致富Fe相形貌发生改变, 当Fe:Mn:Cr约为5:3:1时, 合金中富Fe相形貌最佳, 均由针片状转变为汉字状或颗粒状, 进一步增加0.04%的RE元素对合金进行细化, 使再生铝合金性能达到最佳。

关键词: 再生铝合金; 协同作用; 富Fe相; 微观组织优化; 性能提升

据世界铝业协会数据显示, 2019年我国已成为世界第一大原铝生产国。但实际上, 我国的铝土矿资源并不丰富, 大力发展基于循环经济的再生铝产业, 已经成为铝产业结构调整の必然趋势^[1]。此外, 为实现节能减排目标^[2-3], 国家也出台了多项政策支持再生铝产业的发展^[4]。

目前低压铸造车轮的生产大多使用A356铝合金, 经验证, 直接使用废轮或者其他A356铝合金铸件作为再生铝合金原料进行车轮生产, 产品性能能够满足客户要求^[2], 但是随着再生铝应用比例和产品范围的不断增加, 仅凭借A356铝合金的原级再生利用逐渐无法满足需求。为了扩大再生铝回收范围, 计划采用市场上其他牌号再生铝废料进行验证。但是目前市场上能回收到的再生铝材料, 如电机壳和废易拉罐等, 大多为变形铝合金, 其中除含有Cu、Zn等杂质元素外, 最主要的是Fe元素含量远超A356铝合金标准。而其中Fe元素含量的提升, 会在合金中形成粗大的层片状含铁相(β -Fe), 对合金的铸造性能、力学性能及加工性能产生较大影响^[5-8]。

富铁化合物形态大致可以分为两类, 即 α -Fe相和 β -Fe相。其中 β -Fe相主要以针片状形态分布在晶界中, 在受力过程中对基体产生割裂作用, 会影响合金力学性能, 而 α -Fe相呈汉字状和鱼骨状等形态, 基本上不割裂基体, 常作为基体的强化相^[9]。大量研究表明, Mn和Cr等元素可改善富Fe相微观组织形貌, 使针状 β -Fe相断裂分叉或转变为汉字状 α -Fe相, 提升合金性能^[8-11], 但是Mn和Cr元素的添加均无法完全消除 β -Fe相^[9-10]。但对Mn和Cr同时添加下富Fe相形貌变化情况及三者的最佳配比, 之前并无相关报道。本论文的主要目的是明确在再生铝中Fe元素含量提升的情况下, Mn、Cr、Fe元素不同的配比下对富Fe相形貌及合金力学性能的影响。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

本试验的母材采用常用回收料配置再生铝合金锭。满足组织、性能要求及可用回收料资源丰富决定了再生铝合金的实际应用价值, 目前对上述指标影响最大的元素为Fe元素, 为了在保证再生铝合金性能的同时扩大再生料的回收范围, 本次验证将Fe元素控制为0.3%, 根据Fe元素含量计算各回收料的使用量。此外, 为保证铸造性能, 使用Al-Si中间合金将Si元素含量调整为7.0%, 按照此比例配置后, 其他元素

作者简介:

苗赛男(1992-), 女, 工程师, 工学硕士, 主要从事汽车铝合金车轮的研发和制造。E-mail: miaosainan@lzwheel.com

中图分类号: TG146.21

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2024)12-1699-05

基金项目:

河北省创新能力提升计划项目(24431003D)。

收稿日期:

2024-02-01 收到初稿,

2024-05-17 收到修订稿。

的光谱检测结果如表1。试验过程中通过在母材中加入不同比例的Al-Mn、Al-Cr、Al-RE (65Ce35La)等中间合金,配制新合金材料,Mn、Cr、RE元素含量如表2。而不添加Al-Mn、Al-Cr、Al-RE等中间合金的再生

铝合金母材为对比合金(表1)。此外,对比合金及试验合金中分别添加Al-Sr、Al-Ti-B等中间合金作为变质剂和细化剂。

表1 再生铝合金的基础化学成分
Table 1 Basic chemical composition of regenerated aluminum alloy

Si	Fe	Mg	Ti	Cr	Zn	Cu	Mn	Sr	Al	$w_B/\%$
7.0	0.3	0.2	0.08	0.02	0.1	0.17	0.1	0.000 1	余量	

表2 再生铝试验合金中Mn、Cr、RE元素含量
Table 2 Contents of Mn, Cr and RE elements in recycled aluminum experimental alloys

试验合金编号	Mn	Cr	RE	$w_B/\%$
方案一	0.2	0.02	0.01	
方案二	0.3	0.1	0.07	
方案三	0.3	0.02	0.01	
方案四	0.2	0.06	0.04	

1.2 试验过程

准备足量的再生铝铝锭及所需中间合金,通过计算得出各种材料的加入量。将一定量的母材放入坩埚内随炉升温,并通过温度记录仪实时监控坩埚炉内的温度。待铝锭完全熔化且温度稳定在740℃后,将配置好的Al-Mn、Al-Cr、Al-RE中间合金加入,并用石墨棒搅拌均匀,完全熔化并静置30 min后进行除气精炼;利用高纯度流动的氩气精炼熔体10 min,除去表面浮渣后取成分块并使用ARL-3460直读光谱仪进行合金成分检测,后静置10 min,当铝液温度为700℃时,将其倒入提前预热到480℃的铸铁模具中,得到所需的模拟轮辐的铸态试棒;合金棒体按T6热处理工艺热处理(540℃×180 min+155℃×160 min);将热处理完毕后的单铸棒跟随生产线进行涂装。上述过程中,除了加入的中间合金不同外,对比合金及试验合金所使用的试验参数无任何差异。

将热处理后的试棒根据GB/T 228.1标准加工成拉伸试样,常温下对材料的力学性能进行测试,所得的每个数据为5次测试结果的平均值;性能测试完毕后在拉伸断棒的夹持端上切取一块制成金相试样,经过粗磨、细磨和研磨抛光处理后,制成金相样品,观察合金微观组织形貌。

使用蔡司Axio Imager A2m金相显微镜(OM, Optical Microscopy)观察合金 α -Al及共晶硅情况,并使用其自带软件对合金二次枝晶间距(SDAS, Secondary Dendrite Arm Spacing)进行检测;使用蔡司EVO18扫描电子显微镜(SEM, Scanning Electron

Microscopy)进一步观察其相分布及形貌,并使用布鲁克X Flash 6130对合金中的物相进行能谱检测(EDS, Energy Dispersive Spectrometer);使用WDW-50电子万能试验机对材料的力学性能进行测试。

2 试验结果与分析

2.1 各元素对合金微观组织形貌的影响

图1为经T6处理后的各合金的SEM图片,其中图1a为对比合金,图1b-e依次为方案一到方案四合金相分布,各图片的右上角为局部放大图。

图1表明,对比合金中富Fe相为典型的针状 β -Fe相,所有的富Fe相均呈长针状(如图1a,能谱检测结果见图2a)。方案一中因添加Mn、Cr元素,Mn、Cr与Fe等元素组合形成新的富Fe相, α -Al(FeMnCr)Si相,因而部分针状富Fe相转变为颗粒状或汉字状,但本方案中Mn、Cr元素添加比例较低,因此部分富Fe相形貌未得到良好的改变,但也因为加入的Mn、Cr元素整体较少,形成的 α -Al(FeMnCr)Si相较少,即枝晶间富Fe相对较少(如图1b,能谱检测结果见图2b)。方案二中同时提升Mn、Cr元素的添加比例,可使合金中的针状 β -Fe相基本消失,但是从图中可明显看出,局部Fe相尺寸过大,可能是因为添加的Mn、Cr元素过量导致能够形成富Fe相的元素含量增加,即使 α -Al(FeMnCr)Si相含量较多;此外,本方案中添加的RE元素含量也最高,部分区域存在较多尺寸较大的白亮相,经检测,为富RE相(如图1c,能谱检测结果见图2c)。与方案一相比,方案三中加入的Mn元素比例增加,图中表明,形貌得到优化的富Fe相比例也增大,但是局部仍有部分针状富Fe相,且与方案一相比,针状相尺寸较大(如图1d)。与方案一相比,方案四中的Cr元素比例增加,从图1e中可以看出,富Fe相全部转变为 α -Al(FeMnCr)Si相,富Fe相得到良好的变质,视野中未出现针状富Fe相,且Fe相尺寸较小, α -Al的尺寸也相对较小(能谱检测结果见图2d)。

Mn、Cr元素与Fe元素原子半径相近,在富铁合金中,Mn、Cr元素的加入易置换其中的Fe元素,阻碍富

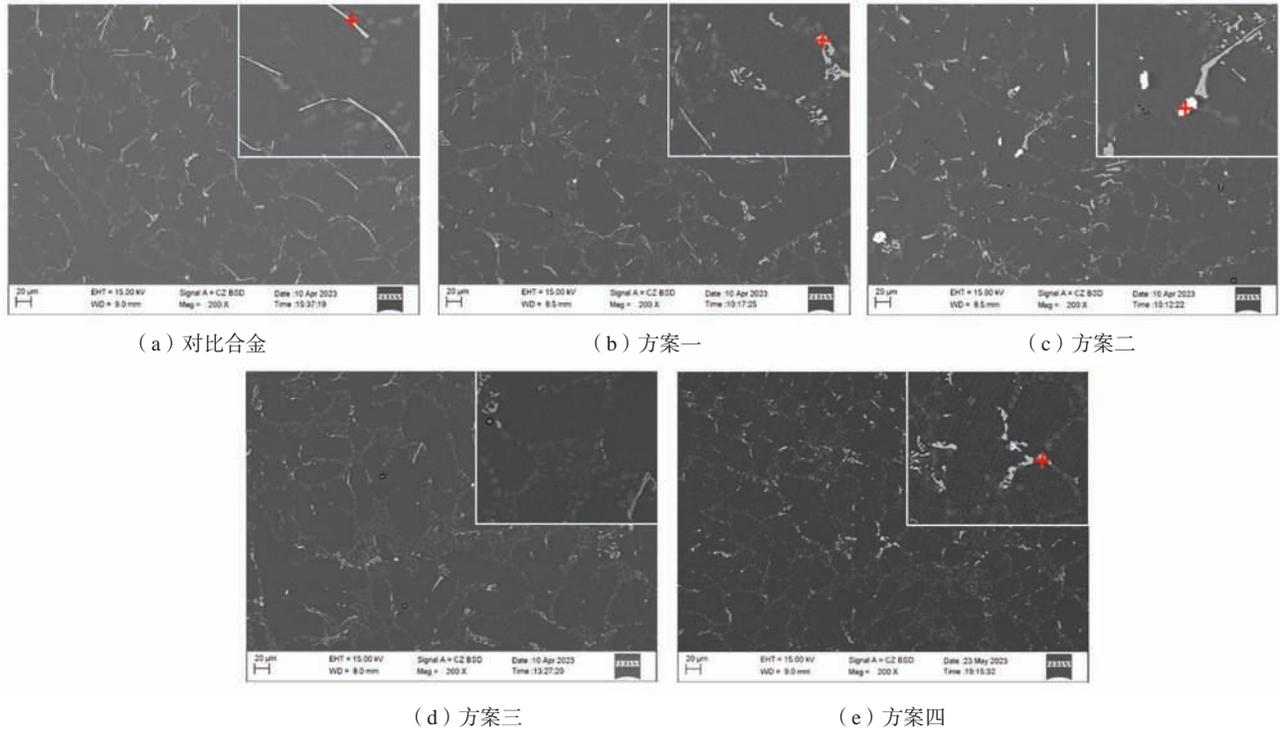


图1 各合金的SEM形貌

Fig. 1 SEM images of each alloy group

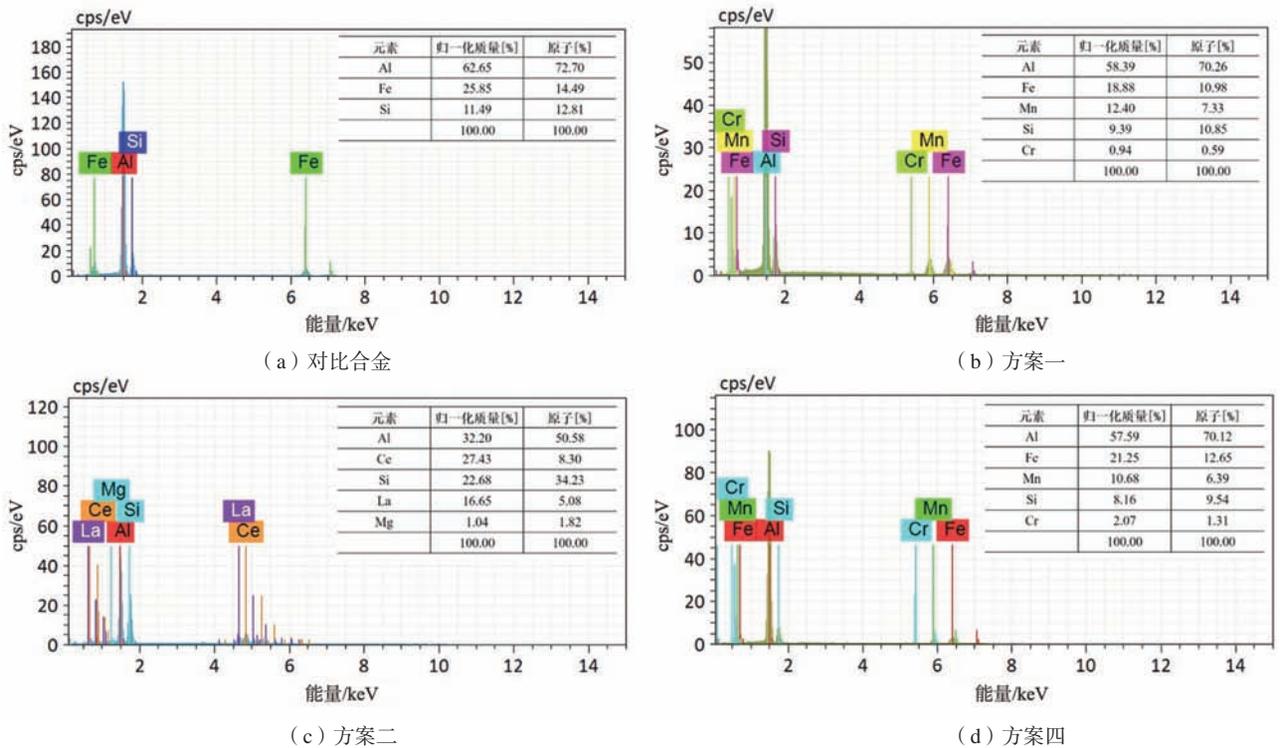


图2 SEM图中标识处能谱检测结果

Fig. 2 Energy spectra detection results at the marked points in the SEM images

Fe相的单向生长取向，改变富铁相的形貌，从而减缓富铁相的危害^[9-11]。但是大量试验表明，单纯添加Mn、Cr无法使β-Fe全部转化为α-Fe^[9-10]。本验证中，同时

添加两种元素，并通过控制Mn、Cr、Fe元素的加入比例，利用Mn、Cr元素的协同作用，使其与Al、Si、Fe等元素共同组成稳定的α-Al(FeMnCr)Si相，从而使

所有的 β -Fe全部转化为 α -Fe。

Mn、Cr元素在通过置换 β -Fe相中的Fe原子来改善其形貌时，若Mn、Cr加入的量少，不足以使所有的 β -Fe相转换成 α -Fe相；但是当Mn、Cr元素的含量过高时，因合金中的Al、Si等基础元素是过剩的，且因加入Mn、Cr后，富Fe相中所需Fe元素含量减少，此部分Fe元素可与过剩的Al、Si、Mn、Cr等组合，使富Fe相的数量增多，尺寸增大。综上所述，根据Fe、Mn、Cr添加比例的变化，当三者Fe含量为0.3%的情况下，Fe:Mn:Cr约为5:3:1时，合金中富Fe相形貌最佳。

图3为各合金的OM图片，其中图3a为对比合金，图3b-3e依次为方案一到方案四。

图3表明，各合金微观组织中初生 α -Al均无粗大的树枝状，共晶硅也无明显的偏析。经观察，除图3e的SDAS最小。进一步对其进行定量检测、统计，检测结果如表3所示。其中对比合金数值最大，为34.02 μm ，方案一、二、三差距不大，方案四最小，为27.45 μm ，产生这种效果，主要是因为合金中加入RE后，发生共晶反应时生成的 Al_4RE 和 $\text{Al}_{11}\text{RE}_3$ 能作为 α -Al的形核核心，使晶粒细化^[8, 14]，此外，若加入过量RE，SDAS反而增大，这主要是因为当RE含量提高到一定程度，在合金中就会出现尺寸较大的富RE金属间化合物，消耗了RE元素的含量，减少了有效形核质点的数量，因此合金的晶粒粗化^[14]。

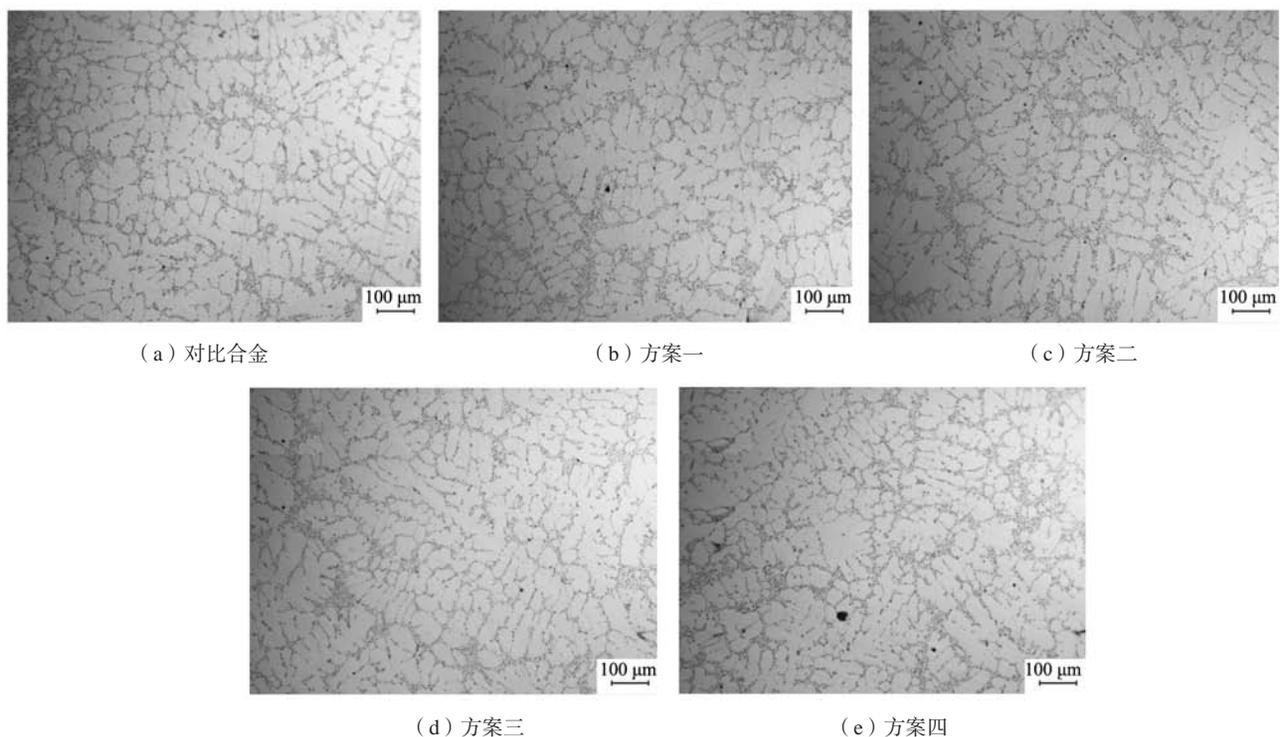


图3 各合金的OM形貌

Fig. 3 OM images of each alloy group

表3 各合金二次枝晶间距值

Table 3 Secondary dendrite spacing values of different alloys

验证方案	对比合金	方案一	方案二	方案三	方案四
SDAS/ μm	34.02	32.33	30.26	32.89	27.45

2.2 各元素对合金力学性能的影响

表4为各合金热处理后的力学性能。数据表明，对比合金与添加合金元素的试验合金屈服强度差别不大，主要是因为Al-Si-Mg合金的屈服强度主要受Mg、Si、Cu等强化元素及晶粒尺寸的影响，本次验证中，各合金中Mg、Si、Cu等元素含量一致，SDAS相差也

表4 各合金力学性能值

Table 4 Mechanical properties of different alloys

编组	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%
对比合金	191.83	251.65	4.54
方案一	193.76	270.55	7.56
方案二	196.72	271.38	6.55
方案三	191.87	260.47	6.15
方案四	193.64	275.38	8.41

不大，因此合金的屈服强度整体相差不大；但是各合金抗拉强度及伸长率相差较大，主要是因为抗拉强度和伸长率受缺陷及第二相影响较大，对比合金中富

Fe相呈针片状, 受力过程中容易产生应力集中, 从而发生断裂, 因此合金抗拉强度及伸长率均较低, 方案一中富Fe相变质不完全, 但整体富Fe相尺寸及含量较低, 因此合金的抗拉强度、伸长率均较高; 方案四中富Fe相变质效果最好, 且颗粒尺寸较小, 分布均匀, 因此合金的抗拉强度及伸长率最优; 方案二、三中含富Fe相变质效果较差, 且加入微合金化元素过量后, 富Fe相含量增加, 即枝晶间的硬质颗粒增加, 因此合金的抗拉强度、伸长率均受到影响, 特别是方案三, 从图1d中可明显看出, 局部存在粗针状富Fe相, 此形貌富Fe相对合金性能会产生极大危害。此外, 加入不同量的RE元素也会使合金晶粒尺寸存在差别, 合金尺寸越

小, 强度及伸长率越高, 反之, 合金的力学性能越差。

3 结论

(1) Mn、Cr元素能够改善富Fe相形貌, 且两者存在协同作用, 当合金中Fe、Mn、Cr元素比例发生变化, 合金中富Fe相形貌也发生改变。

(2) 在本试验条件下, 当Fe含量为0.3%时, Fe:Mn:Cr约为5:3:1, 合金中富Fe相形貌最佳, 均由针状转变为尺寸较小、分布均匀的汉字状或颗粒状, 同时增加0.04%的RE元素对合金进行细化, 使合金性能达到最佳, 可满足再生铝合金的使用要求。

参考文献:

- [1] 张卓群. 我国再生铝产业政策分析及前景展望 [J]. 再生资源与循环经济, 2020, 13 (5): 20-23.
- [2] 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 (1): 42.
- [3] 秦琦, 卢晴晴, 滕雪纯, 等. 我国再生铝产业现状 [J]. 轻合金加工技术, 2019, 47 (3): 12-15.
- [4] 杨富强, 熊慧, 宋仁伯. 我国再生铝产业现状及发展方向 [J]. 新材料产业, 2019 (8): 5.
- [5] MOUSTAFA M A. Effect of iron content on the formation of α -Al₅FeSi and porosity in Al-Si eutectic alloys [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209 (1): 605-610.
- [6] LU L, DAHLE A K. Iron-rich intermetallic phases and their role in casting defect formation in hypoeutectic Al-Si alloys [J]. Metallurgical & Materials Transactions A, 2005, 36 (13): 819-835.
- [7] BACAICOA I, WICKE M, LUETJE M, et al. Characterization of casting defects in a Fe-rich Al-Si-Cu alloy by microtomography and finite element analysis [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2017, 183: 159-169.
- [8] 叶珍, 苗赛男, 郑长清, 等. 稀土复合微合金化对A356.2铝合金组织与性能的影响 [J]. 铸造, 2021, 70 (3): 356-360.
- [9] 宋东福, 王顺成, 周楠, 等. Al-Si合金中富铁相形态及其影响因素研究进展 [J]. 材料工程, 2016 (5): 120-128.
- [10] 范晓明, 谭聪, 马斌, 等. Cr对高铁量的A356合金铸态显微组织的影响 [J]. 热加工工艺, 2014, 43 (11): 4.
- [11] 刘涛, 苏光. Mn对A356铝合金铁相形貌组织和力学性能的影响 [J]. 铸造, 2014, 63 (7): 647-650.
- [12] 何芳, 庄林忠, 何国元, 等. 汽车轮毂用A356铝合金合金化的研究进展 [J]. 铸造, 2021, 70 (4): 431-437.
- [13] 姚丽娟, 坚增运, 朱满, 等. 富铈混合稀土对A356铝合金凝固组织和力学性能的影响 [J]. 铸造, 2016, 65 (2): 166-171.
- [14] 李新荣. A356.2铝合金用Ar-Sr-La变质剂的开发及其细化、变质效果的研究 [D]. 天津: 河北工业大学, 2016.

Improvement of Fe Rich Phase Morphology in Recycled Aluminum Alloys

MIAO Sai-nan, ZHENG Chang-qing, ZHOU Ya-wei, LI Quan, LI Guo-ru, LÜ Xiao-song

(Baoding Lizhong Wheel Manufacturing Co., Ltd., High Strength and Lightweight Wheel Technology Innovation Center of Hebei Province, Baoding 071000, Hebei, China)

Abstract:

The purpose of this study was to clarify the synergistic effect and optimal ratio of Mn and Cr elements on the Fe rich phase in recycled aluminum alloys. The microstructure and mechanical properties of the alloy were studied using optical microscopy, scanning electron microscopy, and tensile testing machines. The recycled aluminum alloy without micro alloying elements was used as a comparison. The research results showed that under the experimental conditions, adding different Mn and Cr elements caused changes in the morphology of the Fe containing phase when the Fe element content was 0.3%. When the Fe:Mn:Cr ratio was about 5:3:1 under the conditions of this experiment, the Fe containing phase in the alloy had the best morphology, transforming from needle like to Chinese character like or granular. Further refining the alloy with 0.04% RE element achieved the best performance.

Key words:

recycled aluminum alloy; synergetic effect; Fe rich phase; microscopic microstructure optimization; performance improvement