

废料回炉比对 AlSi10MgFe 合金组织及性能的影响

袁际滨¹ 姜 博^{1,2} 杨婉婷¹ 吉泽升^{1,3} 胡茂良¹ 王 晔¹ 王云龙³ 张永冰³

(1.哈尔滨理工大学材料科学与化学工程学院; 2.哈尔滨理工大学先进制造智能化技术教育部重点实验室;
3.哈尔滨吉星机械工程有限公司)

摘 要 利用 AlSi10MgFe 合金废料与新料制备出不同废料回炉比的 AlSi10MgFe 合金,通过成分分析、物相分析、显微组织、力学性能以及断口形貌分析等,探究了铝料回炉比对 AlSi10MgFe 合金组织及力学性能的影响。结果表明,随着废料占比的增加,合金中条片状共晶 Si 的粗化程度和针状 β -Fe 相的面积分数增加。合金的抗拉强度呈现先上升后下降的趋势,伸长率整体呈下降趋势,硬度逐渐增加,合金逐渐趋向脆性断裂。另外,气孔在 β -Fe 相富集区形成。

关键词 AlSi10MgFe 合金;废料占比;微观组织;力学性能

中图分类号 TG146.21;TG249.2;TP311

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.011.013

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Scrap Recycling Ratio on Microstructure and Properties of AlSi10MgFe Alloy

Yuan Jibin¹, Jiang Bo^{1,2}, Yang Wanting¹, Ji Zesheng^{1,3}, Hu Maoliang¹,
Wang Ye¹, Wang Yunlong³, Zhang Yongbing³

(1.School of Material Science and Chemical Engineering, Harbin University of Science and Technology;
2.Key Laboratory of Advanced Manufacturing and Intelligent Technology, Ministry of Education,
Harbin University of Science and Technology; 3.Jixing Mechanical Engineering Co., Ltd.)

Abstract: AlSi10MgFe alloys with different scrap recycle ratios were prepared using AlSi10MgFe alloy scrap and new alloy material. The influence of different scrap recycle ratios on microstructure and mechanical properties of AlSi10MgFe alloy was investigated through composition analysis, phase analysis, microstructure, mechanical properties and fracture morphology analysis. The results indicate that as the proportion of scrap increases, the coarsening degree of the lamellar eutectic Si and area fraction of needle-like β -Fe phase in the alloy are increased. The tensile strength of the alloy presents a tendency to rise firstly and then down, elongation tends to fall, and hardness is gradually increased, while the alloy gradually tends to brittle fracture. In addition, gas holes are generated at β -Fe-rich zone.

Key Words: AlSi10MgFe Alloy, Scrap Recycle Ratio, Microstructure, Mechanical Properties

铝合金作为一种可循环利用的再生资源,拥有极大的可回收性及再生效率^[1]。与初生铝坯料相比,完全由废料制成的再生铝可以将能耗和温室气体排放量减少 90% 以上^[2],再生铝的回收与利用具有重要意义^[3-8]。

国内外研究者对于铝合金的高效回收与利用进行了大量研究。LIN R 等^[9]使用飞机废铝直接重熔生产 7075 合金,并通过低 Cu 含量的 5xxx 系列铝合金进行成分调整。ZHOU B 等^[10]使用 7xxx 系列废铝为原料,

收稿日期:2022-12-11;**修改稿收到日期:**2023-01-09
基金项目:黑龙江省百千万工程科技重大专项资助项目(2021ZX05A02);国家重点研发计划资助项目(2019YFB2006500)
第一作者简介:袁际滨,男,1998 年出生,硕士研究生,哈尔滨(150080),E-mail:2367443615@qq.com
通信作者:姜博,男,1990 年出生,讲师,哈尔滨(150080),E-mail:jiangbo@hrbust.edu.cn
引用格式:袁际滨,姜博,杨婉婷,等. 废料回炉比对 AlSi10MgFe 合金组织及性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(11):1 512-1 517.
YUAN J B, JIANG B, YANG W T, et al. Effects of scrap recycling ratio on microstructure and properties of AlSi10MgFe alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(11):1 512-1 517.

[15] JUNG S H, LEE J S, KAWASAKI M. Effects of pre-strain on the aging behavior of Al 7075 alloy for hot-stamping capability[J]. Metals, 2018, 8: 137.

[16] ZHAO Y H, LIAO X Z, JIN Z, et al. Microstructures and mechanical properties of ultrafine grained 7075 Al alloy processed by ECAP and their evolutions during annealing[J]. Acta Materialia, 2004, 52: 4 589-4 599.

[17] DIXIT M, MISHRA R S, SANKARAN K K. Structure-property correlations in Al 7050 and Al 7055 high-strength aluminum alloys [J]. Materials Science and Engineering, 2008, A478: 163-172.

(编辑:栗万仲)

通过控制熔炼温度除渣,降低高熔点杂质元素的危害,利用中间合金和纯金属补充低于标准的元素,得到可挤压和热处理的优质铝合金。

在铝合金废料的回收研究中,主要合金元素的损失与杂质元素的累积限制了材料的回收与利用^[11]。Fe 作为铸造铝合金中主要的杂质元素,当含量过高时易形成长条或针状 β -AlFeSi 相,严重割裂 α -Al 基体,显著降低合金的力学性能^[12-14]。过量的 Si 元素同样会呈棒状、块状或细针状,杂乱无序地处于 α -Al 基体中,对基体造成割裂^[15]。目前有害相的控制成为提升合金力学性能的主要研究方向^[16]。这些杂质相很难在二次加工中去除,通常采用废料与新料相结合的方法^[17]。MANSUROV Y N 等^[18]研究了不同废料占比的 A356 合金显微组织与力学性能的变化,以经济且合理的方式得到了再生 A356 合金。

新铝料在生产中起到合金的成分调控与稀释的作用,需要根据合金性能要求对用于再生铝铸造的废料回炉比设置上限^[19]。超过这一上限时,合金的成分会发生急剧变化,力学性能会显著下降。本研究制备了不同废料占比的再生 AlSi10MgFe 合金,重点研究了废料占比对再生料成分、显微组织以及力学性能的影响,为生产中铝合金废料的回收利用提供参考。

1 试验方法

以某工厂回收的 AlSi10MgFe 合金废料与新料为原材料,分别以 0%、25%、50%、75%、100% 等 5 种不同废料占比与新料进行熔炼。将配制好的不同回炉比的 AlSi10MgFe 合金原料放入熔炼炉中加热升温至 750℃,保温 30 min。将 0.15% 的精炼剂用钟罩压入铝合金熔体液面以下,并搅拌 5 min,使精炼剂与熔体充分接触反应,静置 5 min 后除渣。待熔体降温至 720℃ 时,将铝液浇注到预热至 300℃ 的模具中,待其凝固后取样冷却。

铸件的组织观察、成分分析以及力学性能测试试样的取样位置及试样尺寸见图1。组织观察以及力学性

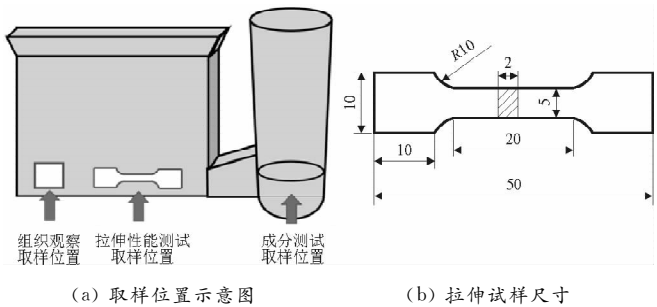


图1 试样取样位置及尺寸

Fig.1 Sampling position and dimension of specimen

能测试试样的取样位置均为铸锭底部 10 mm 处,成分测试试样的取样位置为浇口部分。

在试样的同一位置截取尺寸为 10 mm×10 mm×20 mm 的试样,依次用 600、1000 和 1500 目的砂纸进行打磨,最后在抛光机上进行抛光,使用体积分数为 0.5% 的 HF 溶液腐蚀 15~18 s 后,利用 OLYMPUS-GX71-6230A 型金相显微镜、FEI Sirion 200 型扫描电镜对试样进行微观组织观察,并用附带的 EDX 能谱分析仪对微区进行元素分析。采用 X'Pert PRO 型 X 射线衍射仪对试样进行物相成分测试。硬度测试在 HVS-50 型数显维氏硬度计上进行,试验载荷为 9.8 N,保压时间为 15 s,每组试样测试 10 个点取平均值。室温拉伸性能在美特斯 E44.304-B 型电子万能试验机上进行,拉伸速率为 2 mm/min。

2 试验结果与讨论

2.1 成分分析

图 2 为不同回炉比 AlSi10MgFe 合金的化学成分。由于 Fe、Si 的饱和蒸气压相对较低,废料在重熔过程中烧损较少,Fe、Si 累积含量与新铝料相比增加。在 Al-Si10MgFe 合金再生过程中,Fe、Si 含量随着回炉比的增加而不断增加。当废料达到 50% 后,Fe 含量由 0.91% 增至 1.06%。与 Si、Fe 不同,Mg 化学性质活泼,易与 O₂ 发生反应形成氧化渣,从而产生烧损,因此含量呈递减趋势,未添加废料时 Mg 含量为 0.33%,全部采用废料时 Mg 含量降至 0.14%。

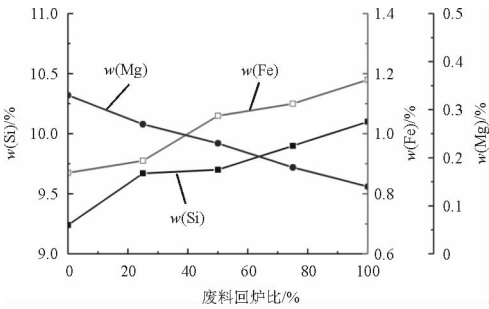


图2 不同废料占比再生 AlSi10MgFe 合金的含量变化
Fig.2 Content variation of recycled AlSi10MgFe alloys with different scrap proportions

2.2 物相分析

不同废料占比的 AlSi10MgFe 合金的 X 射线衍射图谱见图 3。可以看出,不同废料占比下再生合金的衍射峰种类相同,但强度不同。表明不同废料占比合金的物相组成相同,但含量有较大变化。随着废料占比的提高,再生 AlSi10MgFe 合金中 Si 相以及 Al₅FeSi 相的含量随之升高,与成分测试结果一致。在不同废料占比再生

料的衍射图谱中均没有出现含 Mg 化合物的衍射峰,这是因为 5 种再生料中 Mg 含量均较低,衍射峰强度较弱。

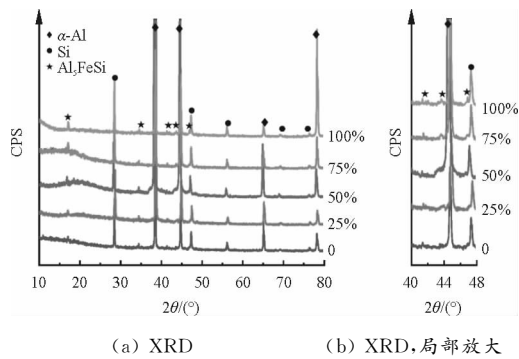


图 3 不同废料占比再生 AlSi10MgFe 合金的 XRD 图谱
Fig.3 XRD patterns of recycled AlSi10MgFe alloys with different scrap proportions

2.3 微观组织及力学性能分析

不同废料占比的再生 AlSi10MgFe 合金的力学显微组织见图 4。可以看出,合金中含有大量 α -Al 枝晶以及共晶 Si。0 和 25% 废料占比的再生合金组织均匀,无明显缺陷。当废料占比达到 50% 时,组织中出现较多的微小气孔,随着废料占比的继续增加,气孔尺寸显著增大。为了探究废料占比对再生料气孔数量及尺寸的影响,在每个试样中随机选取了 30 个不同区域,使用 Image-Pro-Plus 软件对单位面积内气孔的面积分数进行统计,结果见图 4f。可以看出,当废料占比增至 75% 和 100% 时,气孔的面积分数激增,分别达到 0.628% 和 0.821%。由成分测试结果可知,当废料占比超过 25% 时,再生料中的 Fe 含量增加,组织中的 β -Fe 相数量逐

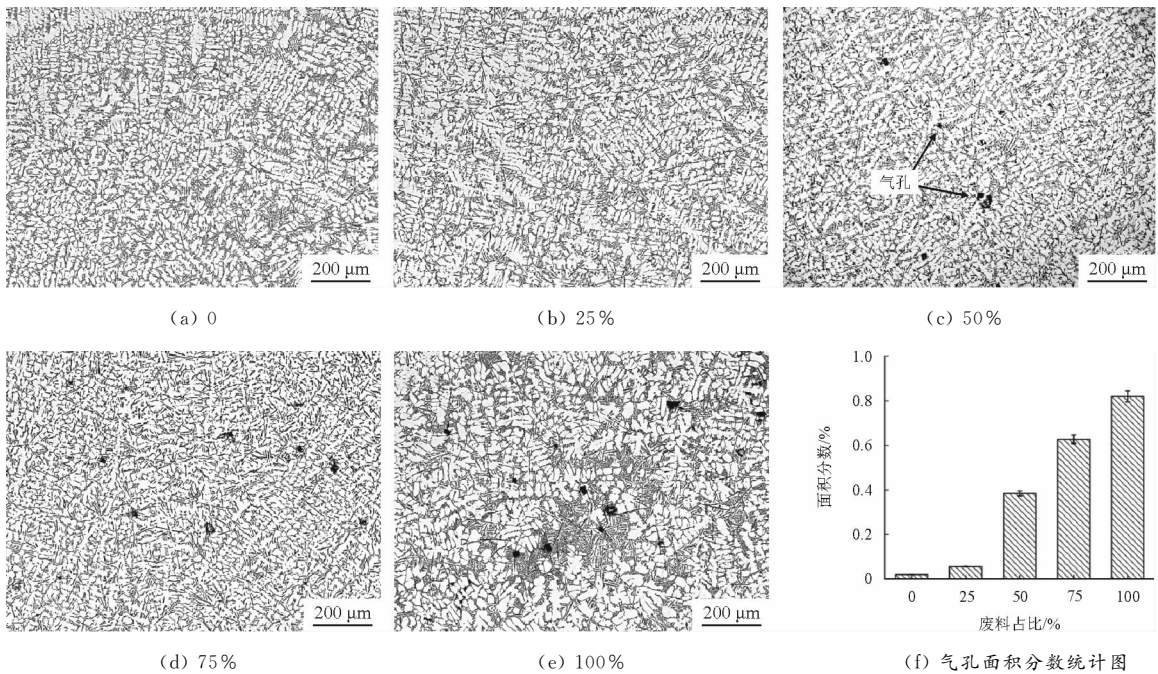


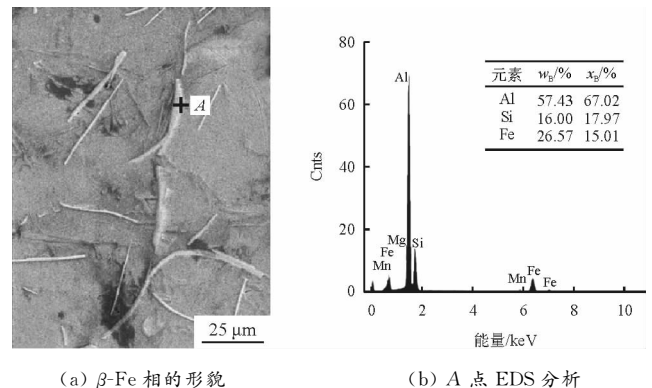
图 4 不同废料占比再生 AlSi10MgFe 合金的显微组织以及气孔面积分数统计图

Fig.4 Microstructure and porous area fraction of recycled AlSi10MgFe alloys with different scrap proportions

渐增多,成为气孔形成的基底,对气孔形成起到促进作用。

为了验证富 Fe 相的成分组成,对组织中的针状富 Fe 相进行 EDS 能谱分析。图 5 为废料占比为 100% 的再生 AlSi10MgFe 合金中 β -Fe 相的形貌及能谱分析。可以看出,A 点针状相包含 Al、Si、Fe 元素,其摩尔比约为 67 : 18 : 15,接近 β -Al₅FeSi 相的摩尔比 5 : 1 : 1,可以推断组织中的针状富 Fe 相为 β -Al₅FeSi 相。

图 6 为不同废料占比 AlSi10MgFe 合金的 SEM 显微组织以及 β -Fe 相的长径比统计图。可以看出,合金中共晶 Si 组织呈黑色条片状, β -Fe 相呈针状,主要分布于枝晶内以及枝晶间区域,部分 β -Fe 相贯穿 α -Al 基体,对基体造成严重割裂。在废料占比为 0 和 25% 的



(a) β -Fe 相的形貌 (b) A 点 EDS 分析
图 5 废料占比为 100% 的再生 AlSi10MgFe 合金中 β -Fe 相的形貌及能谱分析

Fig.5 Morphology and EDS results of β -Fe phase in recycled AlSi10MgFe alloy with 100% scrap

再生 AlSi10MgFe 合金的铸态组织中,共晶 Si 形貌相对细小,呈短针状分布于晶界处, β -Fe 相数量较少,分布较为分散。随着废料占比增长,组织中的共晶 Si 粗化

程度加剧, β -Fe 相数量出现大幅增长,形成 β -Fe 相的富集区。对单位面积内 β -Fe 相的长径比进行了统计,见图 6f。可见单位面积内 β -Fe 相的长径比随着废料占

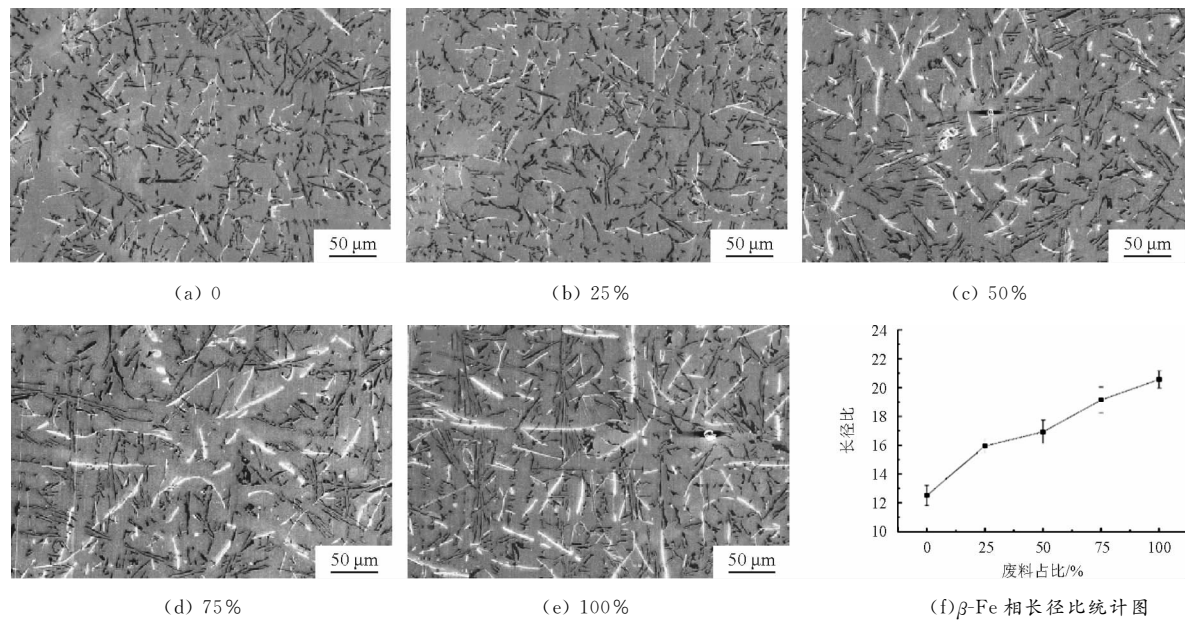


图 6 不同废料占比再生 AlSi10MgFe 合金的显微组织以及 β -Fe 相长径比统计图

Fig.6 Microstructure of recycled AlSi10MgFe alloys with different scrap proportions and L/D ratio of β -Fe phase

比的增加而增加,呈尖锐粗大形貌。

图 7 和图 8 是废料占比分别为 0 和 100% 的 Al-Si10MgFe 合金的元素分布。可以发现,与 Al-

Si10MgFe 合金新料相比,废料中 Fe 分布面积明显增加,这表明随着废料占比的增加, β -Fe 相的面积分数显著增加。从 Si 分布情况可以看出,随着废料占比的增

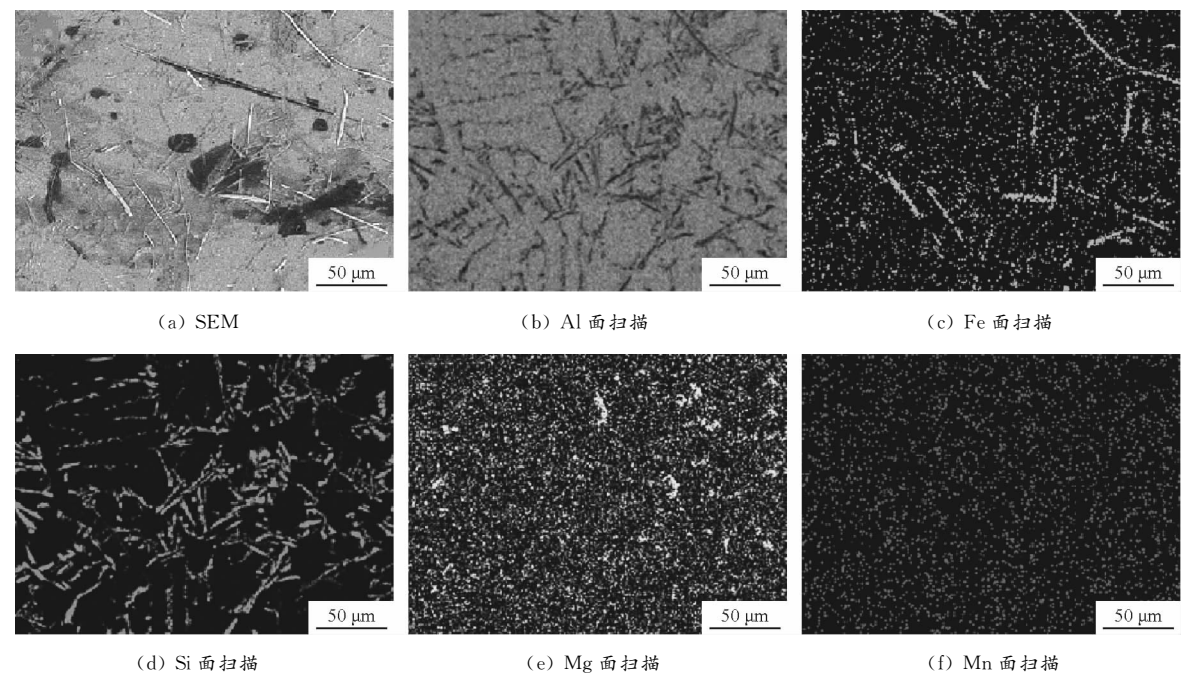


图 7 AlSi10MgFe 合金新料 SEM 形貌及元素分布

Fig.7 SEM morphology and element distribution of AlSi10MgFe alloy without scrap

加,共晶 Si 明显粗化。

不同废料回炉比 AlSi10MgFe 合金的力学性能见图 9。可以看出,随着废料占比的增加,再生 Al-Si10MgFe 合金的抗拉强度呈现先升高后下降的趋势。

在废料占比为 25% 时,合金的抗拉强度达到峰值为 188.07 MPa。抗拉强度提升可能是因为 Si 较 Fe 含量升高较多, β -Fe 相面积分数相对减少。随着废料占比的继续提高,组织中 β -Fe 相面积分布更加密集,且气孔

缺陷的数量及尺寸也随之增大,β-Fe 相尖端易产生应力集中,因此抗拉强度下降,全废料合金的抗拉强度降至 171.45 MPa。

再生 AlSi10MgFe 合金的伸长率随着废料占比的增加整体呈下降趋势,当废料占比为 100% 时降至

2.03%,较不含废料的再生 AlSi10MgFe 合金下降了 25.6%。这是由于随着废料占比提高,共晶 Si 和 β-Fe 相增加,共晶 Si 和 β-Fe 相呈针状和针片状的硬脆相,严重割裂基体,降低合金的伸长率。

随着废料占比增加,再生 AlSi10MgFe 合金的硬度

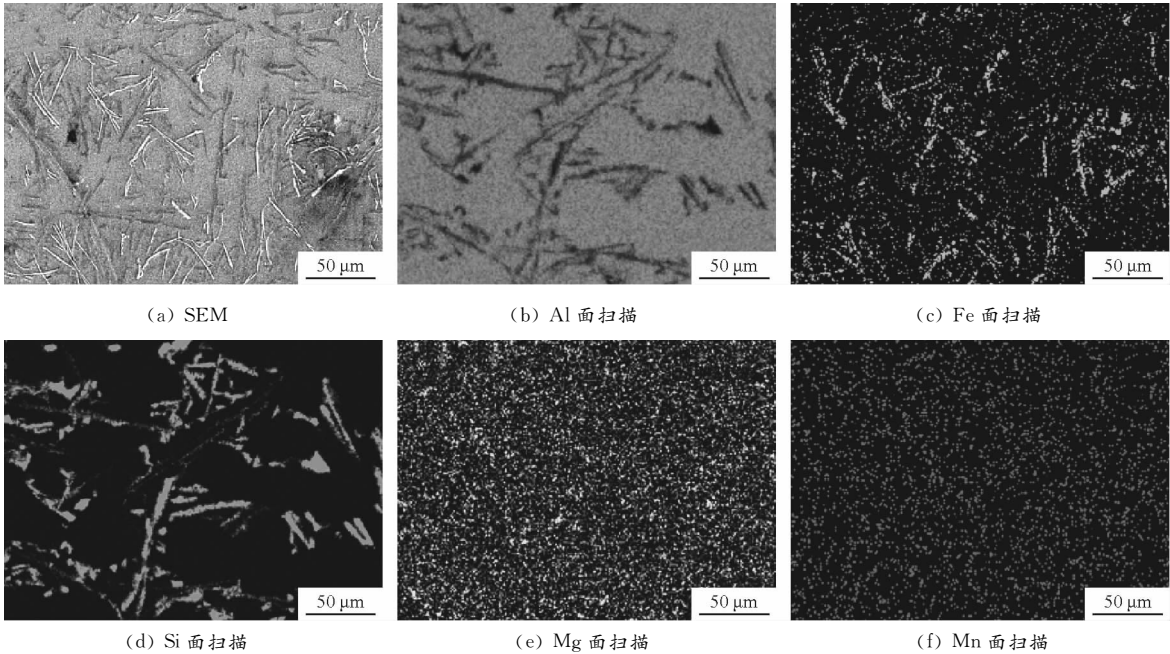


图 8 废料占比为 100% 的 AlSi10MgFe 合金 SEM 形貌及元素分布

Fig.8 SEM morphology and element distribution of AlSi10MgFe alloy with 100% scrap

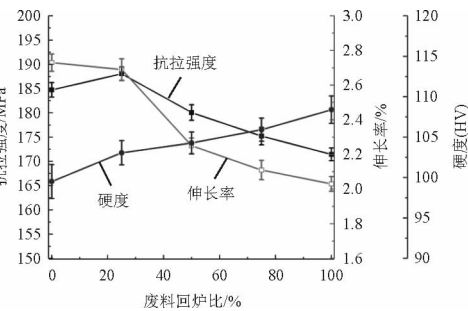


图 9 不同废料占比再生 AlSi10MgFe 合金的力学性能
Fig.9 Mechanical properties of recycled AlSi10MgFe alloy with different scrap proportions

逐渐增加。当废料占比为 100% 时,再生 AlSi10MgFe 合金的硬度(HV)达到最高值 108.4,较合金新料增长了 8.94%。这是由于随着废料占比提高,再生铝合金中的 Si、Fe 含量增加,以硬质相的共晶 Si 和 β-Fe 相的形式存在,提升了合金的硬度。

2.4 废料回炉对 AlSi10MgFe 合金断口影响

不同废料占比再生 AlSi10MgFe 合金的拉伸断口形貌见图 10。可以看出,不含废料的再生 AlSi10MgFe 合金断口较为细小,存在较多解理面以及一定数量的撕裂棱和细小韧窝,断裂方式为脆性断裂。废料占比为

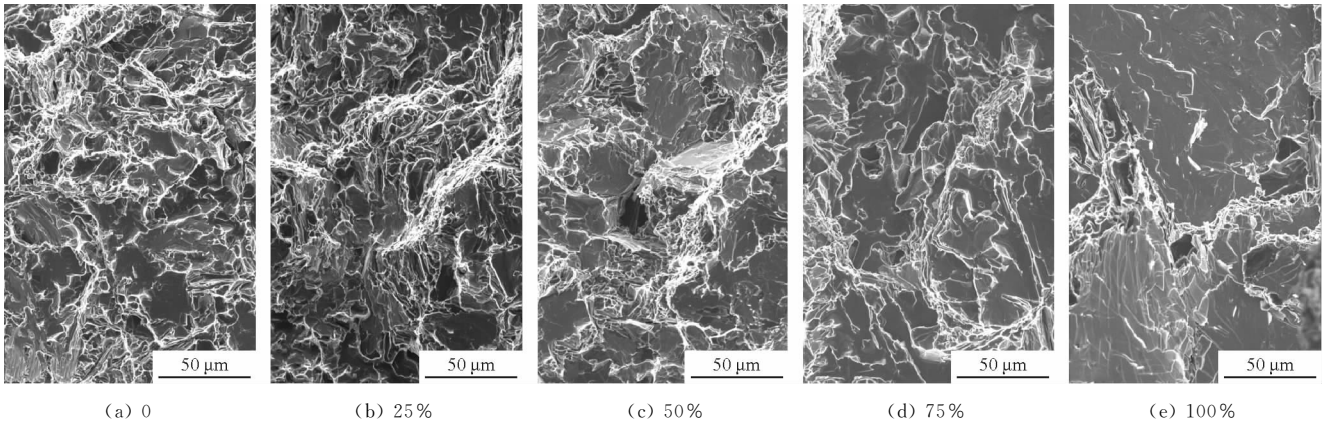


图 10 不同废料占比再生 AlSi10MgFe 合金的拉伸断口形貌

Fig.10 Tensile fracture morphologies of recycled AlSi10MgFe alloys with different scrap proportions

25% 的合金断口形貌与不含废料的断口形貌相似,同样表现为脆性断裂,由于共晶组织增多,与不含废料的再生 AlSi10MgFe 合金相比解理面变得更加细小,出现解理台阶。当废料占比为 50% 时,断口中出现了气孔缺陷,且解理面开始呈现面积增大趋势,韧窝数量减少。随着废料占比继续增加,断口形貌越接近河流花样,解理平面十分光滑,面积显著增大,解理台阶平直,韧窝几乎消失,表现为解理断裂。这是由于随着废料占比的增加,组织中初生 Si 含量增加,而初生 Si 易对基体造成严重割裂,从而导致力学性能下降,且再生 Al-Si10MgFe 合金的断裂模式趋向脆性断裂,与合金力学性能的变化趋势相吻合。

3 结 论

(1) 随着废料占比从 0 增长到 100%, 再生 AlSi10MgFe 合金中 Si 含量由 9.24% 增长到 10.1%, Fe 含量由 0.87% 增长到 1.18%, Mg 含量由 0.33% 减少到 0.14%。

(2) 5 种废料占比再生 AlSi10MgFe 合金均包含 α -Al 相、共晶 Si 以及 β -Fe 相,组织中针片状共晶 Si 的粗化程度和针状 β -Fe 相的面积分数随着废料占比的增加而增加。气孔在 β -Fe 相富集区处形成,且面积分数随着 β -Fe 相富集程度的增加而增加。

(3) AlSi10MgFe 合金的抗拉强度在废料回炉比为 25% 时,达到峰值,为 188.07 MPa。废料回炉比达到 100% 时,再生合金的抗拉强度降低至 171.45 MPa,伸长率低至 2.03%。合金的硬度随着废料占比增加,废料回炉比为 100% 时,硬度(HV)达到最高值 108.4。随着废料占比的增加,合金趋向脆性断裂。

参 考 文 献

[1] TAN J, WEHDE M V, BRØND F, et al. Traded metal scrap, traded alloying elements: A case study of Denmark and implications for circular economy[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2021, 168(3): 102 242.

[2] JABER A M, KRISHNAN P K. Development of a sustainable novel aluminum alloy from scrap car wheels through a stir-squeeze casting process[J]. Kovove Materialy-Metallic Materials, 2022, 60 (3): 151-161.

[3] KIM D H, KIM J H, KIM Y G, et al. Evaluation of microstructure and mechanical properties on solution heat treatment of recycled A319 cutting chip[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 2018, 5(3): 427-433.

[4] WEI X, WANG H, LIU C, et al. A review on recycling of waste aluminum alloy[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2019, 19: 45-54.

[5] RAABE D, TASAN C C, OLIVETTI EA. Strategies for improving the sustainability of structural metals[J]. Nature, 2019, 575 (7 781): 64-74.

[6] PANDEY A, PRAJAPATI N, NAYAK K, et al. Sustainable manufacturing process for recycling of aluminum alloy waste into direct product by high-pressure torsion process[J]. Materials Today: Proceedings, 2019, 18: 3 099-3 108.

[7] RAABE D, PONGE D, UGGOWITZER P J, et al. Making sustainable aluminum by recycling scrap: The science of “dirty” alloys [J]. Progress in Materials Science, 2022, 128: 100 947.

[8] CANN J L, DE LUCA A, DUNAND D C, et al. Sustainability through alloy design: Challenges and opportunities[J]. Progress in Materials Science, 2021, 117(4): 100 722.

[9] LIN R, LIU B, ZHANG J, et al. Microstructure evolution and properties of 7075 aluminum alloy recycled from scrap aircraft aluminum alloys[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 19: 354-367.

[10] ZHOU B, LIU B, ZHANG S, et al. Microstructure evolution of recycled 7075 aluminum alloy and its mechanical and corrosion properties[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 879: 160 407.

[11] 丁宏波. 高强变形铝合金型材废料的回炉处理[J]. 世界有色金属, 2020(10): 167-168.

[12] YUAN L L, GUO M X, YU K C, et al. Multi-scale iron-rich phases induce fine microstructures in Al-Zn-Mg-Cu-Fe alloys[J]. Philosophical Magazine, 2021, 101(12): 1 417-1 442.

[13] JIAO X Y, LIU C F, GUO Z P, et al. On the characterization of primary iron-rich phase in a high-pressure die-cast hypoeutectic Al-Si alloy [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 862: 158 580.

[14] 吴桃泉, 杜军, 黄正阳, 等. Mn/Cr 复合变质对 15% Mg₂Si/再生 A356-1.5% Fe 基复合材料中富 Fe 相形态的影响[J]. 中国有色金属学报, 2018, 28(4): 654-661.

[15] LI R, LIU L, ZHANG L, et al. Effect of squeeze casting on microstructure and mechanical properties of hypereutectic Al-xSi alloys [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2017, 33(4): 404-410.

[16] 吴津生, 周雄多, 梁敬军. 铝合金废料熔炼过程中烧损控制实践 [J]. 轻合金加工技术, 2014, 42(7): 19-20, 29.

[17] 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.

[18] MANSUROV Y N, RIKHSIBOEVA R, MANSUROV S Y. Features of multicomponent secondary aluminium alloy structure formation[J]. Metallurgist, 2020, 63(11-12): 1 303-1 312.

[19] 程颖, 洪涛, 魏怀远, 等. 返回料及精炼工艺对 A356 铝合金净化效果的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2022, 42(11): 1 325-1 330.

(编辑:栗万仲)

勘 误

2023 年第十期论文《Cu 含量对 WE43 镁合金凝固组织及力学性能的影响》,作者潘俊霖 陈乐平 周全 袁源平。资助基金名称和编号[江西省研究生创新专项基金资助项目(YC2023-5700)],由于排版和校对原因,发生错误。更正如下:江西省研究生创新专项资金资助项目(YC2023-S720)。