

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)

“碳达峰、碳中和”目标的提出促使国内外汽车制造企业大力降低产品的碳足迹值,也要求上游供应商加快实现资源的高效利用。研究指出,我国再生铝回收加工利用能耗仅为原铝生产总能耗的4.86%,温室效应仅为原铝生产的 1/24,使用再生铝替代电解铝作为主要原材料可以大幅降低能源消耗^[1~3]。

再生铝合金所利用的废杂铝往往存在很多附着物,如泥土、油漆、铁铸件等。经常规分拣和洗净处理后仍有一部分无法完全除净的附着物进入熔炼阶段,致使再生铝液中含有较多的非金属夹杂物和溶解性杂质元素,而这些杂质在熔炼阶段能否得到有效的清除和控制决定着再生铝合金的力学性能以及最终产品的品质。净化不充分的合金中会有大量气孔和氧化物夹渣,受力时易产生应力集中,导致合金性能下降^[4,5]。此外,废杂铝存在成分差异,重熔阶段又会发生烧损,因此,控制再生铝成分也是生产中的重要环节。

本课题采用 100%再生铝生产 A356 铸造铝合金,对成分调整、微合金化、精炼除渣等关键工艺进行优化。精炼除渣除气的工艺参数包括精炼剂组分、添加量和精炼温度等。随后对最优工艺条件下净化处理和微合金化的再生 A356 铝合金进行了详细的微观组织表征和力学性能分析,为其应用提供参考。

1 试验条件及方法

试验用再生铝来自回收的主体为 A356 合金的废旧车轮(原级利用)和 Al 含量为 99.8%的剥皮废铝线。废旧车轮经拆解、分拣、脱漆处理后,在 GR2-60 型电阻炉中进行熔炼。熔炼过程中撒入精炼剂搅拌后扒出浮渣,再采用石墨转子旋转喷吹法导入 99.999%的氮气精炼除气,转速为 400 r/min,气体流量为 2 L/min。取样后分析其化学成分,合格后将铝液静置 15 min 后浇注。

为探究精炼剂成分对铝液净化效果的影响,使用机械混合法研制了两款成分不同的精炼剂,主要成分为 NaCl、KCl、K₃AlF₆等盐类。万兵兵^[6]通过熔剂凝聚试验发现 K₃AlF₆具有较强的去除氧化膜的能力,适合作为铝合金精炼剂的成分组元。

使用 ARL-3460 直读光谱仪对试样进行成分检测,并使用 Zeiss SteREO Discovery 体式显微镜和 Zeiss EVO18 扫描电镜进行微观组织表征。氢含量和减压密度测试设备分别为 CHAPEL 型铝熔体快速测氢仪和 CQY-01 型铝液测氢仪,检测温度为 700 ℃。铝液过滤速度由 PREFIL-Footprinter 直显式金属液品质检测设备测定,铝液中的夹杂物由 PoDFA 多微孔圆板过滤分析技术进行定性、定量表征。采用 N-tec 金属品质检测系统进行试样流动性、热裂倾向、体收缩率检测,浇注温

度为 700~705 ℃,模具温度为 150 ℃。

力学性能测试包括拉伸试验和旋转弯曲疲劳试验,试样均取自 T6 热处理[(535±5 ℃)×8 h 固溶处理;(180±5 ℃)×3 h 时效处理]后的合金锭。拉伸试验依照 GB/T 228.1 进行,测试设备为 WDW3100 万能试验机。使用 SHIMADZU H7 疲劳试验机进行旋转弯曲疲劳试验,转速为 2 700 r/min。

2 试验结果与讨论

2.1 成分调整

再生铝熔炼过程中出现损耗的元素通常为化学性质活泼、易氧化的元素。表 1 为再生 A356 铝合金成分调整前后的各元素占比变化,可见在成分调整前熔体中的 Mg 和 Sr 含量均低于标准值。通过直接添加纯 Mg 块和 Al-10Sr 中间合金可将 Mg 与 Sr 含量调整至标准范围。

表 1 再生 A356 铝合金成分调整前后的元素含量

Tab.1 The weight percentage variation of each element in recycled A356 Al alloy before and after compositional adjustment %			
元素	w_B		
	标准值	调整前	调整后
Si	6.5~7.5	7.26	7.24
Fe	≤0.20	0.14	0.13
Mg	0.25~0.45	0.24	0.31
Ti	≤0.20	0.12	0.12
Sr	0.004~0.025	0.003	0.023
Cu	≤0.20	0.01	0.009 2
Mn	≤0.10	0.005 5	0.13 *
Zn	≤0.05	0.018	0.02
杂质总量	≤0.15	0.018	0.02
Al	余量	余量	余量

注: * 微合金化后

重熔回收的 A356 废旧车轮常出现 Fe 含量超标,主要是由于未拆净的铁铸件、Fe 含量高的废旧车轮和其他含 Fe 部件。综合运用多种除铁技术降低再生铝熔体中的 Fe 含量,包括使用具有一定坡度的熔炼炉将大尺寸铁块沉降^[7],以及在 Fe、Si 等元素含量超标时采用剥皮废铝线进行稀释。

2.2 微合金化

含 Fe 相的形貌对 A356 合金性能影响较大,针状含 Fe 相(β -Fe)会割裂 α -Al 基体,降低合金的力学性能和抗腐蚀性^[8~10]。基于之前的研究,在成分调整阶段通过添加 Al-Mn 中间合金提高 Mn 含量,促使 β -Fe 转变为 α -Fe,从而改变含 Fe 相形貌^[11]。

2.3 精炼除渣除气

表 2 为分别使用普通精炼剂(外购)与自制精炼剂所得试样的气、渣定量表征。当不使用精炼剂时,试样

中分布着很多大尺寸孔洞,气渣体积分数高;使用普通精炼剂后,气渣体积分数降至 1.35%,而使用含 K_3AlF_6 的自制精炼剂可以将气渣体积分数进一步降低。由表 2 可见,使用 K_3AlF_6 含量较高的 2 号精炼剂可将气渣体积分数降至 1.21%。

表 2 不同熔剂成分条件下试样的气、渣定量表征

Tab.2 Quantitative characterization of the gas and slag for the specimens using different refining agents

精炼剂	$w_B/\%$	减压密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	100 g Al 中 氢含量/mL	气渣体积 分数/%
普通精炼剂(外购)	$NaCl+KCl+(4.5\sim5.5)KAlF_4$	2.635	0.12	1.35
1 号精炼剂(自制)	$NaCl+KCl+(5\sim10)K_3AlF_6$	2.651	0.11	1.29
2 号精炼剂(自制)	$NaCl+KCl+(10\sim15)K_3AlF_6$	2.662	0.11	1.21

图 1 为各试样的 PREFIL-Footerprinter 铝液过滤曲线。PREFIL-Footerprinter 检测技术根据单位时间内铝液滤过质量曲线获取其过滤速度。当铝液中夹杂物含量较低时,同一时间内滤过的铝液量更多,过滤速度更快。从图 1 可以看出,使用自制精炼剂后铝液过滤速度快,夹杂物含量低^[12,13]。 K_3AlF_6 的优良除渣效果主要归因于其较强的覆盖性和润湿性。相关热力学及润湿性分析表明, K_3AlF_6 可以降低熔剂与铝液间界面张力,提高熔剂的覆盖及润湿能力。同时,它也能够降低熔剂与固态夹杂间的界面张力,有利于熔剂润湿夹杂物^[6]。

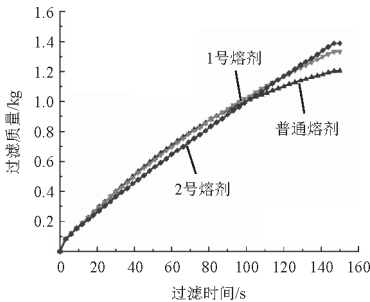


图 1 使用不同精炼剂时的铝合金液过滤曲线
Fig.1 The filtration curves of the A356 alloy using different refining agents

针对 2 号精炼剂进一步开展添加量和精炼温度研究。表 3 是不同添加量的 2 号精炼剂处理后熔体的气、渣定量表征。可见当精炼剂的添加量为熔体总质量的 0.15% 时,合金中的气渣量最低(1.23%),对应的 100 g Al 中氢含量为 0.10 mL。当精炼剂添加量较低时,其净化效果未能完全显现;当精炼剂添加量较高时,未能参与反应的精炼剂将形成夹渣残留在熔体内。

表 4 为在不同温度下进行精炼时熔体的气、渣定量表征。可以看出,当精炼温度为 740 ℃ 时,合金中的气渣量最低。当精炼温度较低时(如 700 ℃),精炼剂未能

表 3 精炼剂不同添加量条件下试样的气、渣定量表征

Tab.3 Quantitative characterization of the gas and slag for the specimens using various amounts of refining agent

$w_B/\%$	减压密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	100 g Al 中 氢含量/mL	气渣体积 分数/%
0	2.576	0.22	5.01
0.10	2.651	0.12	1.30
0.15	2.663	0.10	1.23
0.20	2.661	0.11	1.27
0.25	2.659	0.12	1.28
0.30	2.660	0.12	1.25

达到熔点,无法与非金属夹杂物充分反应;当精炼温度较高时(如 760 ℃),精炼剂挥发,亦不能起到良好的除气除渣效果。

表 4 不同精炼温度条件下试样的气、渣定量表征

Tab.4 Quantitative characterization of the gas and slag for the specimens at various refining temperatures

精炼温度/ ℃	减压密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	100 g Al 中 氢含量/mL	气渣体积 分数/%
700	2.579	0.22	1.32
720	2.654	0.13	1.27
740	2.660	0.12	1.18
760	2.649	0.14	1.26

表 5 为采用 PoDFA 测得的使用不同精炼剂处理后的试样夹杂物含量,其为金相图片中夹杂物面积与过滤的铝液总量之间的比值。可以看出,采用自制 2 号精炼剂进行精炼除渣处理大幅降低了再生 A356 铝合金熔体中尖晶石、氧化铝以及氧化膜含量。典型的 PoDFA 夹杂物金相照片见图 2。

表 5 精炼除渣处理夹杂物含量对比

Tab.5 Comparison of impurity content under different refining conditions

试样条件	refining conditions				mm ² /kg
	尖晶石	氧化铝	氧化镁	氧化膜	合计
普通精炼剂	0.032 3	0.006 7	0.001 5	0.010 5	0.051 0
2 号精炼剂	0.010 9	0.002 0	0.006 3	0.001 8	0.021 0

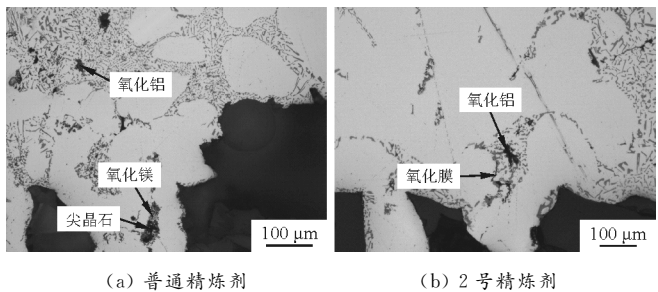


图 2 不同试样的 PoDFA 夹杂物分析示例图

Fig.2 Typical diagram of PoDFA impurity analysis for different specimens

2.4 铸造性能

经成分调整、微合金化和精炼除渣除气处理后的再生 A356 铝合金具有良好的铸造性能,其流动性、热裂

倾向和体收缩率与电解 Al 配制的 A356 铝合金接近, 见表 6。

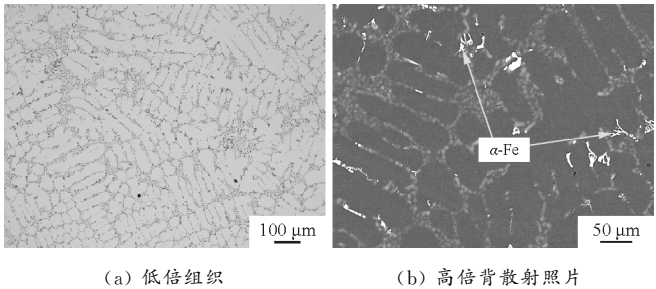
表 6 再生铝与电解铝配制的 A356 铝合金的铸造性能

Tab.6 Comparison of casting properties between recycled and electrolytic A356 aluminum alloy

试样	流动长度/mm	热裂倾向	体收缩率/%
再生铝	865.0	90.1	4.72
电解铝	857.9	89.3	4.72

2.5 显微组织

图 3 为再生 A356 铝合金试样的微观组织。从图 3a 可以看出,合金中的 α -Al 枝晶组织均匀,平均晶粒尺寸为 $47.6\ \mu\text{m}$ 。从图 3b 可以看出,共晶 Si 变质正常,呈点状或蠕虫状。由于 Mn 含量增加,试样中含 Fe 相多为短棒状的 α -Fe 相 ($\text{Al}_5\text{Fe}_2\text{Si}$),几乎看不到针状的 β - Al_5FeSi 相。Mn 在含 Fe 相中优先占据 Fe 原子的位置,促使 α -Al(Fe,Mn)Si 相(立方结构)替代 β - Al_5FeSi (单斜结构)在凝固过程中形成^[14]。



(a) 低倍组织 (b) 高倍背散射照片

图 3 再生 A356 铝合金试样微观组织

Fig.3 Microstructure of recycled A356 Al alloy specimens

2.6 力学性能

2.6.1 拉伸力学性能

表 7 为模拟铸造铝合金车轮性能最低轮辐部位冷却条件浇注的再生 A356 铝合金试样与电解 A356 铝合金试样的力学性能,为 15 根拉伸试样的平均值。经处理后的再生 A356 铝合金抗拉强度为 254 MPa,伸长率为 4.2%,与电解 A356 铝合金试样的性能相当。

表 7 再生铝与电解铝配制的 A356 铝合金的力学性能

Tab.7 Comparison of mechanical properties between recycled and electrolytic A356 aluminum alloy

试样	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%
再生铝	254	202	4.2
电解铝	256	204	4.3

2.6.2 旋转弯曲疲劳性能

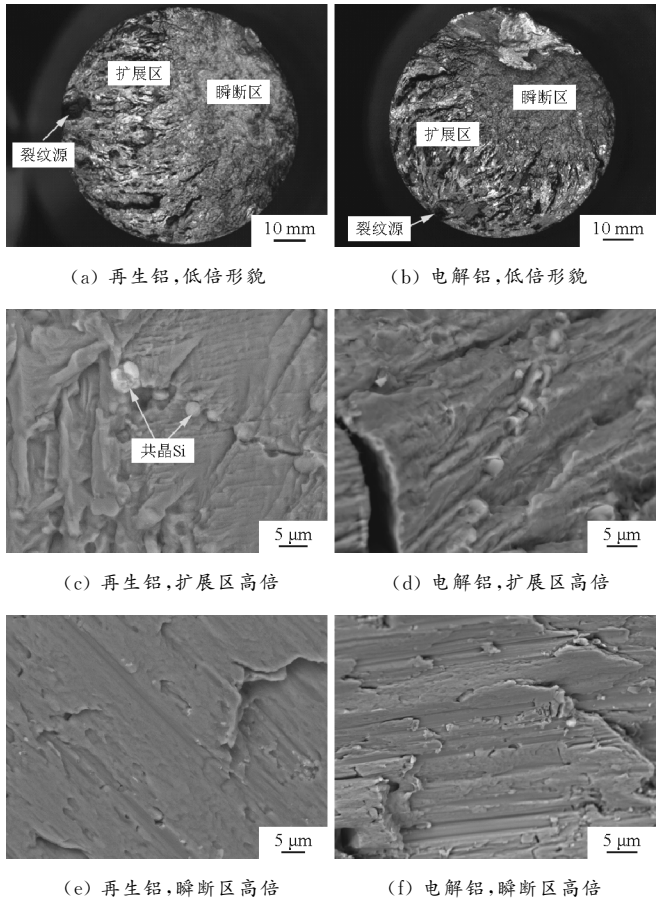
经熔体强化工艺处理后的再生 A356 铝合金试样在 80 MPa 和 95 MPa 加载应力下,循环次数达 10^7 均未发生断裂。当加载应力为 110 MPa 时,试样的疲劳寿命均值为 3.89×10^6 ,同样条件下电解 A356 铝合金试样疲劳寿命均值为 4.21×10^6 ,相差不大(见表 8)。

表 8 110 MPa 应力水平条件下各试样的旋转疲劳性能

Tab.8 Rotary fatigue properties of each sample under 110 MPa stress level

试样	疲劳寿命/ $\times 10^6$
未处理再生铝	1.92
处理后再生铝	3.89
电解铝	4.21

对 110 MPa 应力条件下断裂的再生 A356 铝合金和电解 A356 铝合金试样进行断口分析,典型的断口组织见图 4。可以看出,经处理的再生 A356 铝合金和电解 A356 铝合金疲劳裂纹萌生、扩展和最后断裂方式相同,均可分为 3 个不同的区域,即裂纹源区、扩展区和瞬断区。其中,扩展区存在明显的疲劳断口特征——疲劳辉纹,同时也可观察到被拔起或撕裂的共晶 Si 颗粒(见图 4c 和图 4d)。由图 4e 和图 4f 可以看出,瞬断区由于断裂速度快,共晶 Si 颗粒不易辨识。



(c) 再生铝,扩展区高倍 (d) 电解铝,扩展区高倍

(e) 再生铝,瞬断区高倍 (f) 电解铝,瞬断区高倍

图 4 再生铝和电解铝在 110 MPa 应力条件下旋转疲劳失效试样的断口组织

Fig.4 Fracture morphologies of rotary fatigue specimen of recycled and electrolytic Al under 110 MPa stress level

为研究熔体强化处理效果,对未进行熔体强化工艺处理的再生 A356 铝合金疲劳性能也进行了测试,其在 110 MPa 应力条件下的平均疲劳寿命仅为 1.92×10^6 。断口分析表明,试样内存在大量缩松。此外,在缩松底

部发现长针状 β -Fe相,其会在凝固过程中阻塞枝晶间铝熔体的流动和补缩,增加铸件中出现缩松、气孔等缺陷的几率,导致疲劳寿命降低。

上述结果表明,本课题提出的再生铝处理工艺可以有效降低再生 A356 铝合金中的非金属夹杂物,改变含 Fe 相形貌,使其抗疲劳性接近常规 A356 合金水准^[15,16]。

3 结 论

综合运用重力沉降法和废铝线稀释法形成一套高效的再生铝降铁工艺,并针对易损耗元素进行成分调整,使再生 A356 铝合金化学成分达到标准要求。优选出针对再生 A356 铝合金的精炼除渣除气工艺,即使用含 K_3AlF_6 的混合盐类精炼剂,添加量为 0.15%,精炼温度为 740℃,处理后的熔体夹杂物和气渣含量明显降低。适当添加 Mn 可改变含 Fe 相形貌,改善合金的力学性能。经熔体强化工艺处理的再生 A356 铝合金铸造性能及力学性能基本达到了电解 A356 铝合金产品性能水平。

参 考 文 献

- [1] 丁宁,高峰,王志宏,等.原铝与再生铝生产的能耗和温室气体排放对比[J].中国有色金属学报,2012,22(10):2 908-2 915.
- [2] 胡斌.汽车行业发展对轻质结构部件的需求与展望[J].精密成形工程,2020(3):120-124.
- [3] 孙德勤,江宽,崔凯,等.再生铝制备汽车零部件技术的应用与发展[J].铸造技术,2018,39(6):1 387-1 391.
- [4] 肖亚庆.铝加工技术实用手册[M].北京:冶金工业出版社,2004.
- [5] 徐建国,LIU H W.铝合金疲劳裂纹扩展过程中夹杂物影响的量化分析[J].浙江大学学报(自然科学版),1993(4):521-530.
- [6] 万兵兵.再生铝硅合金熔体净化及变质处理技术研究[D].广州:华南理工大学,2018.
- [7] 臧立中.再生铝自动熔化铝铁分离工艺.中国专利:ZL201210590847.0[P].2016-08-24.
- [8] 杨怀德.再生铝硅合金中富铁相变质降除方法研究[D].重庆:重庆大学,2014.
- [9] 孙德勤,徐正亚,戴军.废铝熔体中去除夹杂铁元素的工艺试验[J].铸造技术,2016,37(1):95-98.
- [10] 贾建磊.再生铝富铁相调控及熔体净化研究[D].河北秦皇岛:燕山大学,2020.
- [11] 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.
- [12] ENRIGHT P G, HUGHES I R, PICKERING J, et al. Characterisation of molten metal quality using the pressure filtration technique[C]. American Foundry Society, 2003.
- [13] INSTONE S, KRINGS D, GRUEN G U, et al. Relationship between the Permeability of the Porous Disk Filter and the Filtrate Weight-Time Curves Generated with the PoDFA/Prefil Footprinter Method[M]. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons Ltd., 2012.
- [14] KIM H Y, PARK T Y, HAN S W, et al. Effects of Mn on the crystal structure of α -Al(Mn,Fe)Si particles in A356 alloys [J]. Journal of Crystal Growth, 2006, 291: 207-211.
- [15] HASKEI T, VERRAN G O. Rotating and bending fatigue behavior of A356 aluminum alloy: Effects of strontium addition and T6 heat treatment[J]. International Journal of Fatigue, 2018, 114: 1-10.
- [16] ÖZDES H, TIRYAKIOGLU M, EASON P D. On estimating axial high cycle fatigue behavior by rotating beam fatigue testing: Application to A356 aluminum alloy castings[J]. Materials Science & Engineering, 2017, A697: 95-100.

(编辑:栗万仲)

高强韧钼合金研制成功

近日,中国科学院合肥物质科学研究院与中国核动力研究设计院合作,研制出一种高性能钼合金,或可在先进核能系统和航空航天等领域应用。

空间核反应堆具有环境适应性好、功率覆盖范围广、结构紧凑以及大功率条件下质量功率比小等突出特点,在大功率地球轨道卫星、深空探测以及月球行星基地供电等方面具有广阔的应用前景。空间堆中的包壳及堆芯结构材料面临高温、中子辐照及液态碱金属腐蚀等苛刻服役环境,是制约空间堆技术发展的瓶颈之一。钼及其合金由于高熔点、高热导率、与碱金属相容性好等特点,是空间堆关键候选材料,但纯钼存在室温塑性低、高温强度不足、再结晶脆性和辐照脆化等问题。

该研究团队提出通过纳米碳化物弥散、细晶强化和晶界净化来协同提升钼合金综合性能的研究思路。通过粉末冶金法和高温旋锻制备了室温及高温下均具有优异力学性能的纳米结构钼—碳化钨合金。该纳米结构合金的室温抗拉强度达 928 MPa、伸长率为 34.4%,比工业中广泛应用的钼钛钨合金(TZM 合金)分别提高 26% 和 100% 以上;在 1 000℃ 时,钼—碳化钨合金的抗拉强度达到 562 MPa,比纯钼和其他纳米结构合金提高 50% 以上。在 1 200℃ 高温下,钼—碳化钨合金的强度优势更为显著,其抗拉强度比氧化物弥散强化钼提高 1 倍以上,并保持优良塑性。此外,该合金的再结晶温度比纯钼提高约 400℃,具有优异的高温稳定性。

(摘自中国有色网)