

微量 In 对 Al-Si-Cu 合金析出行为的影响

朱慧颖 翁文凭 王东涛 长海博文 蔡伟涛 罗广瑞
(苏州大学沙钢钢铁学院)

摘 要 通过扫描电镜(SEM)、透射电镜(TEM)、显微硬度和电导率等方法探讨了 0.4% 的 In 对 Al-7Si-3Cu 合金的沉淀析出行为及组织性能的影响。结果表明,0.4% 的 In 促进了 Al-7Si-3Cu 合金的时效析出过程,并显著细化了 θ' 相。当添加 0.4% 的 In 时,合金达到峰值硬度的时效时间显著缩短,硬度(HV)在 160 ℃时效 16 h 处达到峰值 127,而未添加 In 的合金在同等时效温度下 30 h 仍未达到峰值,硬度(HV)仅为 88。进一步采用 DSC 分析,结果发现,微量 In 显著降低 θ' 相反应激活能,与未添加 In 的合金相比,含 In 合金中 θ' 相的反应激活能从 36.839 kJ/mol 降低至 28.591 kJ/mol,反应难度显著降低,达到促进析出的效果。TEM 结果也表明,含 In 合金中 θ' 相析出物数量密度更高且更加细小。由此可见,微量 In 对 Al-7Si-3Cu 合金的时效析出过程及组织结构的影响,有益于提高合金的力学性能和电导率。

关键词 Al-Si-Cu 微合金化;In;人工时效;组织性能

中图分类号 TG146.21 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.09.020

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Trace In on Precipitation Behavior of Al-Si-Cu Alloys

Zhu Huiying, Weng Wenping, Wang Dongtao, Hiromi Nagaumi, Cai Weitao, Luo Guangrui
(School of Iron and Steel, Soochow University)

Abstract: The influence of 0.4% In on precipitation behavior, microstructure and properties of Al-7Si-3Cu alloy was investigated by scanning electron microscopy(SEM), transmission electron microscopy(TEM), microhardness and electrical conductivity experiments. The results indicate that 0.4% In promotes the aging precipitation process of Al-7Si-3Cu alloy and significantly refines θ' phase. After 0.4% In addition, the aging time to reach peak hardness of the alloy is obviously shortened, which reaches a peak of 127 HV after aging at 160 ℃ for 16 h, while In-free alloy fails to reach peak at the same aging temperature for 30 h, with the hardness of 88 HV. DSC curves reveal that trace In can significantly reduce the reaction activation energy of θ' phase, which is reduced from 36.839 kJ/mol to 28.591 kJ/mol compared with that of In-free alloy, indicating the reduction of reaction difficulty, achieving the effect of promoting precipitation. TEM results also demonstrate that the quantity density of θ' phase precipitates in In-containing alloys is larger and finer. In conclusion, the effects of trace In on aging precipitation process and the microstructure are beneficial to improve the mechanical properties and conductivity of Al-7Si-3Cu alloy.

Key Words: Al-Si-Cu Microalloying, In, Artificial Age, Microstructure and Properties

Al-Si-Cu 系列合金具有密度低、耐磨性好、热膨胀系数低、铸造性能好等特点,广泛应用于气缸套和缸盖、发动机缸体和活塞等汽车零件中^[1-2],如 A319 合金。该种合金主要通过沉淀硬化提高合金力学性能^[3],其时效析出序列为:G.P. I 区→G.P. II 区(θ'')→ θ' → θ 。因此,调节时效沉淀过程对改善合金强度有决定性作用。近年来研究发现,Sn、Cd 及 In 在铝合金中较为独特,其与空位结合能力较强,且在 Al 基体中固溶度低、扩散

率高,能够显著影响析出相的形成过程,改善力学性能^[4-6]。但由于 Cd 带有毒性,应用受限,因此 Sn 与 In 的关注更加广泛。

舒军等^[7]研究了微量 Sn 和 In 对 Al-3.5Cu 合金的时效特性及微观组织演变的影响,发现在 Al-3.5Cu 合金中单独添加微量 Sn 和复合添加 Sn 和 In 均能够抑制 θ' 相的粗化,从而加速合金的时效进程并增强合金的时效强化效果。AKOPYAN T K 等^[8]研究了微量 Sn 的

收稿日期:2022-12-13;修改稿收到日期:2022-12-28

第一作者简介:朱慧颖,女,1998 年出生,硕士研究生,江苏苏州(215000),E-mail: 916605953@qq.com

通信作者:翁文凭,男,1978 年出生,副教授,江苏苏州(215000),E-mail: wenpingweng@suda.edu.cn

引用格式:朱慧颖,翁文凭,王东涛,等. 微量 In 对 Al-Si-Cu 合金析出行为的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(9):1 270-1 275.

ZHU H Y, WENG W P, WANG D T, et al. Effects of trace in on precipitation behavior of Al-Si-Cu alloys[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(9):1 270-1 275.

加入细化了铸态 Al-3.5Cu-0.1Sn 合金中的 Al_2Cu 相。合金的峰值时效时间显著缩短(175 ℃时效 12 h 缩短到 2 h),根据 TEM 和 APT,硬度的增加是由于形成了数量密度高的更为细小的 θ' 相析出物。还研究了微量 In 对 Al-Si-Cu 基铸造合金组织和析出硬化响应的影响,发现微量 In 的添加同样可使合金中析出数量密度更高、更细小的 θ' 相,从而促使合金在更短的时间内达到更高的峰值硬度^[9]。

尽管现有研究证明了微量 In 的有利作用,但迄今为止,大多建立在 Al-Cu 系合金基础之上^[10-13],而关于微量 In 对 Al-Si-Cu 共晶合金的影响研究报道相对较少。由于 Al-Si-Cu 系合金在汽车轻量化等领域有较多的应用需求,本研究将进一步研究微量 In 对 Al-7Si-3Cu 合金的时效析出行为以及组织性能的影响,旨在为其应用提供参考。

1 试验材料与方法

以高纯 Al(99.99%,质量分数,下同)、Al-20Si 合金、纯 Cu(99.9%)、高纯 In(99.99%)为原料,采用电阻炉和中频感应炉进行合金熔炼。首先,将 Al 锭、Al-20Si 中间合金在电阻炉中预热至 200 ℃;随后转移到中频炉中升温至 750 ℃待其完全熔化,加入纯 Cu、纯 In 进行搅拌保温 40~60 min;接着进行精炼、除气;最后加入 Al-10Sr 搅拌,并保温 10 min,将熔体温度稳定在 680 ℃左右浇注到水冷铜模中,制备出 200 mm×100 mm×20 mm 的铸锭。利用 Spectrolab 直读光谱仪测定合金的成分,结果见表 1。铸锭经 500 ℃×10 h 固溶处理后水淬,随后进行人工时效处理,时效温度为 160 ℃,时间时效为 2、4、8、12、16、20、25、30 h。

表 1 Al-Si-Cu-In 合金的化学成分

合金	w_B					
	Si	Cu	Fe	In	Sr	Al
Al-7Si-3Cu	6.67	2.89	0.08	—	0.02	余量
Al-7Si-3Cu-0.4In	6.64	2.94	0.10	0.4	0.02	余量

采用 GX53 光学显微镜和 Phenom XI 扫描电镜观察合金的显微组织;采用 Leiden 自动显微硬度仪测试显微硬度,载荷为 50 N,保压时间为 10 s,每个试样至少保留 6 个有效数据,并取平均值;DSC 分析采用 NETSCH DSC 204 f1 差示扫描量热仪,升温速率为 10 K/min;在 JEM-2100F 透射电镜上进行组织分析,加速电压为 200 kV。TEM 试样经电火花线切割成尺寸为 15 mm×15 mm×1 mm,使用粗砂纸进行预磨,使试样减薄至 100 μm 后,使用细砂纸减薄至 80 μm ;借助冲孔机将试样冲成直径为 3 mm 的圆片;最后用离子减薄仪对圆片进行进一步减薄,获得透射电镜观察的薄区

后即可进行 TEM 观察。

2 试验结果与分析

2.1 非平衡凝固计算分析

试验开始前采用 ThermoCalc 软件对 Al-Si-Cu-(In)合金进行非平衡凝固计算,图 1 为合金的非平衡凝固曲线,表 2 为各相析出温度及凝固完成时的质量分数。Al-7Si-3Cu 合金的凝固过程中主要包括 α -Al、共晶 Si、 Al_2Cu 等 3 相,而 Al-7Si-3Cu-0.4In 合金的凝固过程中多了含 In 相。由表 2 数据可知,Al-7Si-3Cu 合金在 607 ℃时凝固开始,首先形成 Al 固溶体,567 ℃时 Si 相开始析出,最后在 518 ℃以下开始出现 Al_2Cu 相,凝固完成,3 相最终质量分数分别为 90.1%、5.9%、3.9%。而 Al-7Si-3Cu-0.4In 合金中由于 In 的加入,对 Al_2Cu 相的凝固温度产生较明显的影响,518 ℃以下才开始出现 Al_2Cu 相,相比基础合金降低了 4 ℃,最后在 501 ℃时含 In 相析出,凝固完成。微量 In 会显著降低 Al-7Si-3Cu 合金中 Al_2Cu 相的凝固温度,但对凝固完成后的各相占比影响不大,仅使 Al_2Cu 相的质量分数略有提升,从 3.9%增加为 4.0%。另外需注意,与用于计算的模型合金不同,实际合金中还含有 Fe 杂质,因此实际凝固过程中会形成含 Fe 相。

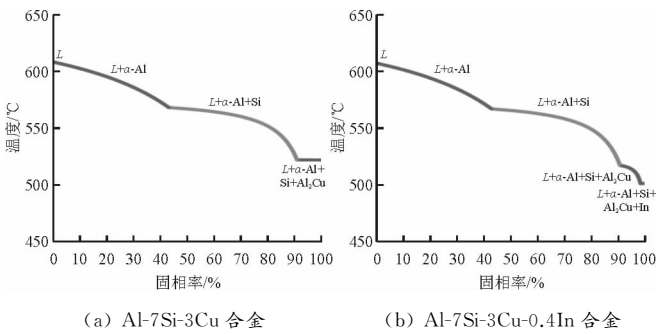


图 1 合金非平衡凝固曲线

Fig.1 Non-equilibrium solidification curves of alloys

表 2 两种合金中各相凝固温度及质量分数

each phase in the alloys			
相	$w(\text{In})/\%$	$T/^\circ\text{C}$	相含量/ $\%$
α -Al	0	608	90.1
	0.4	607	89.7
Si	0	568	5.9
	0.4	567	5.9
Al_2Cu	0	522	3.9
	0.4	518	4.0
含 In 相	0	—	—
	0.4	501	0.4

2.2 显微组织表征

图 2 为合金的铸态微观组织 SEM 结果。可以看

出,两种合金的铸态微观结构基本相同,主要由 Al 基体、共晶 Si 和金属间化合物组成。Al-7Si-3Cu 中金属间化合物主要包括 Al_2Cu 和 $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}_2$ 相;而在 Al-

7Si-3Cu-0.4In 中,Cu 主要以 Al_2Cu 相存在, $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}_2$ 相含量极低,In 以圆整明亮的夹杂物形式存在,大多依附在 Al_2Cu 相边缘(见图 2d)。

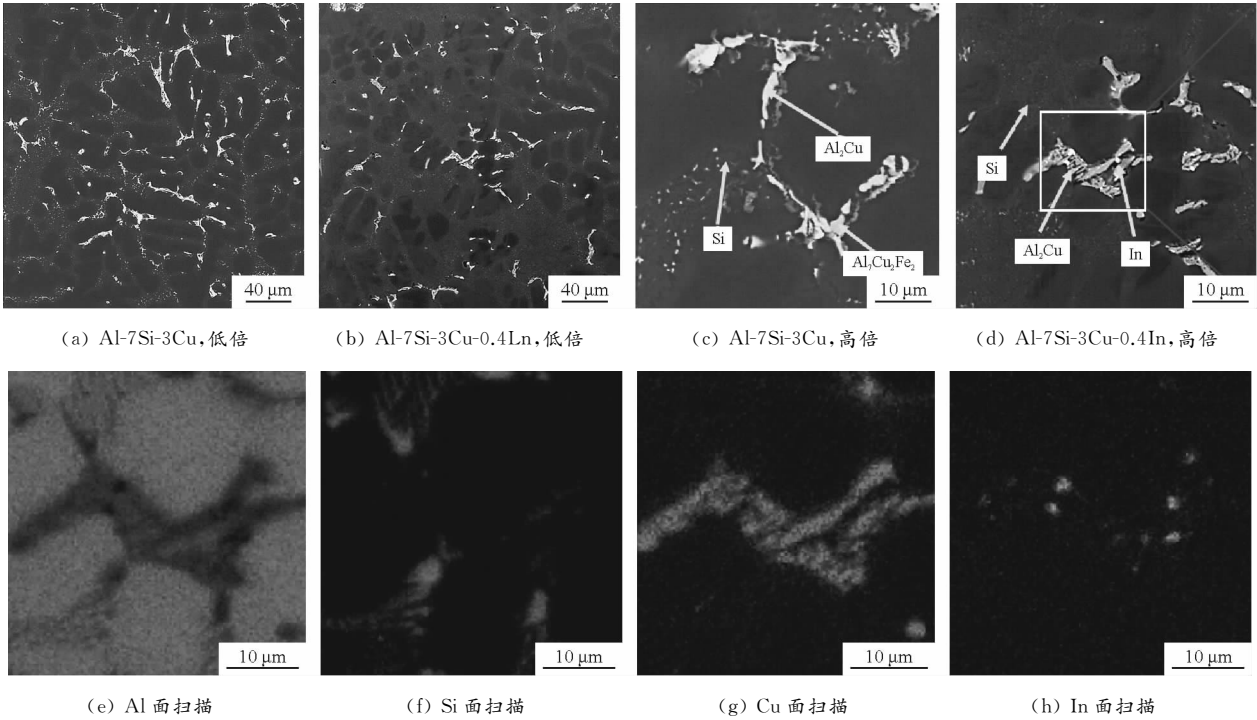


图 2 铸态合金的 SEM 显微组织及元素面扫描

Fig.2 SEM microstructure and elemental face scanning of as-cast alloys

图 3 为两种合金固溶状态下的 SEM 微观组织。可以看到,固溶处理后,合金中 Cu 在 Al 中几乎完全溶解(见图 3d),残留部分主要以 $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}_2$ 相存在,少数以细小 Al_2Cu 形式存在,而 Si 的共晶夹杂物和含 Fe 相

显示出部分碎裂和球化的趋势。与 Al-7Si-3Cu 合金相比,Al-7Si-3Cu-0.4In 中 In 大部分溶解于基体中,残留少量的含 In 相附着在 $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}_2$ 相边缘或独立存在, Al_2Cu 相几乎全部溶解。

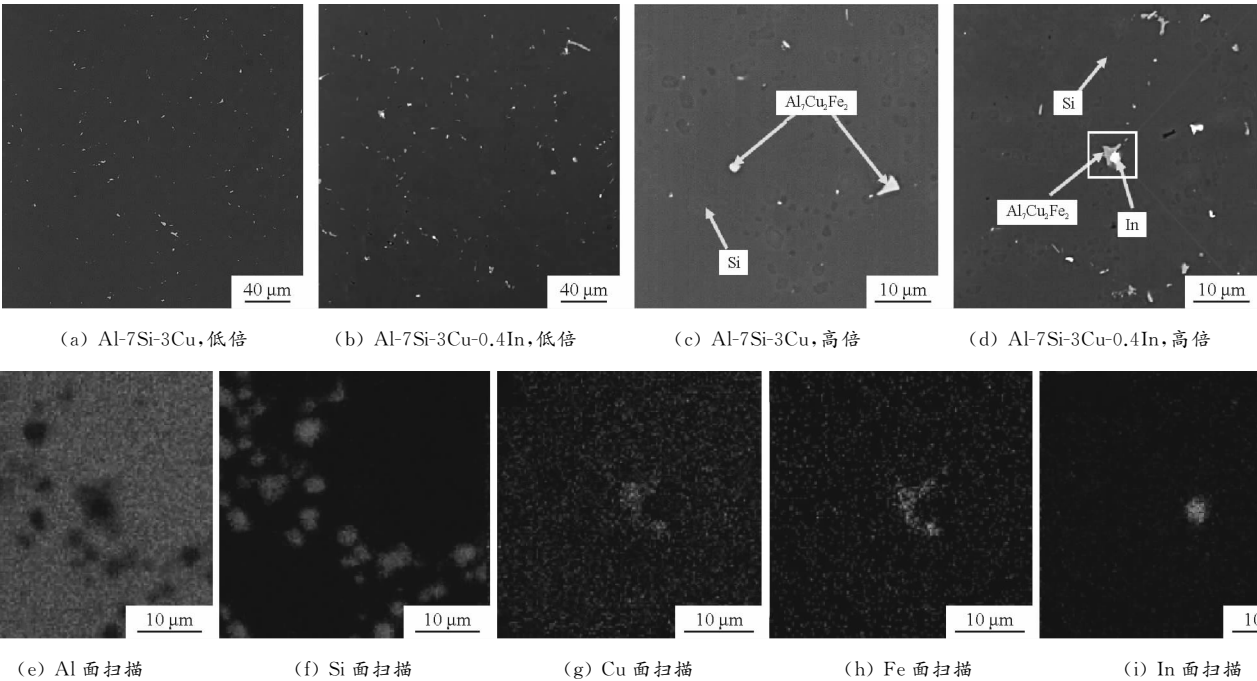


图 3 固溶态合金的 SEM 显微组织及元素面扫描

Fig.3 SEM microstructure and elemental face scanning of solid solution alloys

2.3 显微硬度及电导率分析

图 4 为合金在 160 ℃时效条件下的显微硬度和电导率。可以看出,随时效时间延长,两种合金的显微硬度与电导率都有较为明显的提升。淬火态时两种合金硬度(HV)均在 69 左右,Al-7Si-3Cu 的硬度(HV)提升幅度很小,直到 30 h 仅提升至 88,增幅为 28%,且未达到峰值;而含 In 合金在时效开始后硬度(HV)迅速增加,在 16 h 处达到峰值 127,增幅达 84%。说明添加微量 In 能显著加快 Al-7Si-3Cu 合金的时效硬化响应速率,并大大加时效峰值硬度,峰值硬度相较于未添加 In 的提高了 44%。

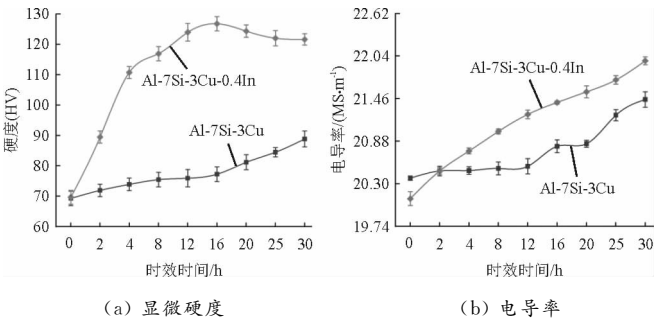


图 4 合金 160 ℃时效条件下的显微硬度与电导率
Fig.4 Microhardness and conductivity of the alloys at 160 ℃

电导率对相变特别是与铝基体成分变化相关的相变极为敏感,淬火状态两种合金电导率相近,说明此时固溶体成分相差不大。但时效开始后,两者差别开始变大,Al-7Si-3Cu 合金的电导率增长相对缓慢,而添加 In 后的合金电导率随时间延长显著增加,从20.07 MS/m

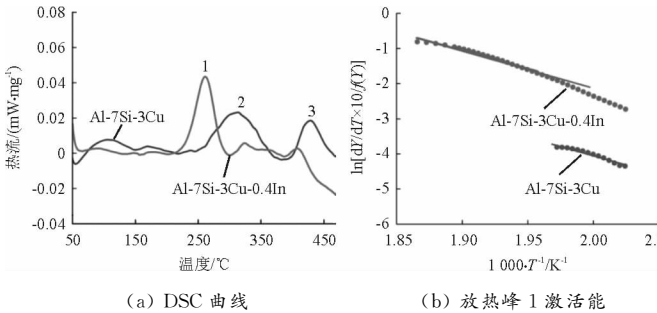


图 5 固溶态合金 DSC 曲线及各放热峰对应的相的激活能拟合曲线

提高至 21.98 MS/m。由于电导率受固溶体中畸变程度的影响,因此时效期间电导率的增加主要是由于 Al 固溶体中元素的分解。说明微量 In 的加入促进了 Al-Si-Cu 合金在时效过程中的沉淀过程,使其析出更加迅速,效果更好,产生时效硬化的同时提高了电导率。

2.4 DSC 分析

为了研究 In 对 Al-Si-Cu 合金时效过程中析出行为的影响,对固溶态合金进行了 DSC 热分析试验,并对各相反应所需的激活能进行计算^[14-15]。激活能计算公式如下:

$$\ln\left[\frac{dY}{dT} \frac{\varphi}{f(Y)}\right] = \ln k_1 - \frac{Q}{R} \frac{1000}{T}$$

式中,Y 为 t 时刻析出的溶质的摩尔分数;k₁ 为速率常数,s⁻¹;Q 为反应激活能,kJ/mol;R 为摩尔气体常数,J/(kg·K);T 为热力学温度,K;φ 为 DSC 测试时的加热速率,K/min。

根据式(1)可以得到 ln(dY/dT * φ/f(Y)) 关于 1 000/T 的曲线,拟合得到一个直线函数,通过直线函数的斜率 -Q/R 可以得到反应激活能 Q。

图 5 为合金固溶态 DSC 曲线及各放热峰对应的相的激活能拟合曲线,激活能数据见表 3。根据相关文献资料显示^[16-18],图 5a 中放热峰 1、2、3 分别对应 G.P. II 区(θ'')、θ'、θ 的相变反应。可以看出,两种合金的 DSC 曲线存在显著差异,Al-7Si-3Cu 合金只能看到比较明显的 θ'、θ 相放热峰,而 Al-7Si-3Cu-0.4In 中 θ'、θ'、θ 相的放热峰均比较明显,说明 In 对 Al-7Si-3Cu 合金的析出

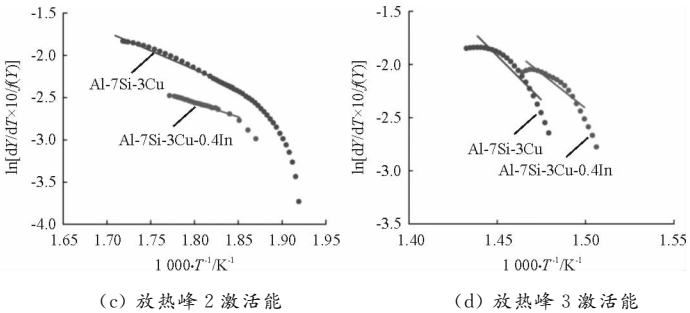


Fig.5 DSC curves of solid solution alloys and fitted activation energy curves of phases corresponding to each exothermic peak

表 3 固溶态合金 DSC 曲线中各相的反应激活能

Tab.3 Reaction activation energy of each phase in DSC curves of solid solution alloys

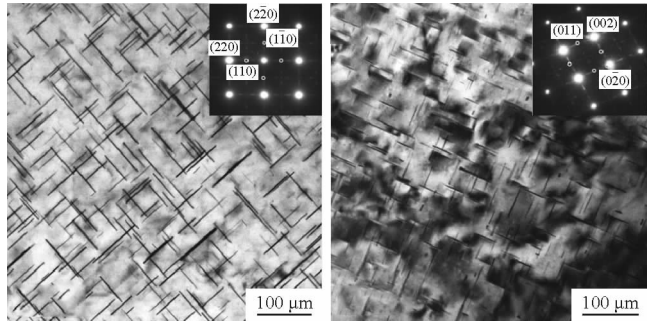
合金	放热峰	-Q/R	Q/(kJ·mol ⁻¹)
Al-7Si-3Cu	峰 1(θ'')	-10.517	87.438
	峰 2(θ')	-4.431	36.839
	峰 3(θ)	-16.592	137.946
Al-7Si-3Cu-0.4In	峰 1(θ'')	-10.347	86.025
	峰 2(θ')	-3.439	28.591
	峰 3(θ)	-13.128	109.146

有一定影响。由表 3 可知,In 的加入对 θ'、θ'、θ 相的反应激活能也有较为明显的影响。其中对 θ''相的影响较小,从 87.438 kJ/mol 降为 86.025 kJ/mol,仅有小幅降低。而对 θ'和 θ 两相的影响较显著,θ 相的激活能从 137.946 kJ/mol 降低为 109.146 kJ/mol,下降了约 21%;θ'相的激活能从 36.839 kJ/mol 降低为 28.591 kJ/mol,降幅为 22%,影响最大。因此,可以说明,微量 In 的加入对 Al-7Si-3Cu 合金时效过程中 θ'相的激活能

有显著降低作用,使得 θ' 相的形成反应更容易,因而达到促进析出的效果。

2.5 TEM 表征

为了进一步分析 In 的加入对 Al-7Si-3Cu 合金时效过程中 θ' 相析出的影响,对合金 160℃峰值时效态的试样进行了 TEM 观察分析,见图 6。可以看出,合金经时效处理后,析出了大量针状 θ' 沉淀(分别沿 $\langle 00\bar{1} \rangle_{\text{Al}}$ 和 $\langle 100 \rangle_{\text{Al}}$ 轴获得的衍射图判断)。为了更清楚地对比两种合金中的沉淀相的区别,利用 GMS 3 以及 ImagePro Plus 6.0 对沉淀相的尺寸及密度进行量化统计,结果见表 4。可见 Al-7Si-3Cu 基础合金中 θ' 相的平均长度和厚度分别为 65 nm 和 3 nm 左右,且尺寸差别很大,数量密度为 $0.79 \times 10^{15} \text{ m}^{-2}$;但 Al-7Si-3Cu-0.4In 中 θ' 相的尺寸更细小,其平均长度和厚度分别为 42 nm 和 2.6 nm,且尺寸分布更均匀,数量密度也显著增大为 $1.03 \times 10^{15} \text{ m}^{-2}$ 。因此,微量添加 In 可导致沉淀结构的细化及其数量密度和纵横比的增加,从而大大提高了沉淀硬化效果,同时沉淀相析出越多,铝固溶体中畸变程度越低,对合金导电性也有一定程度的改善,该现象与图 4 结果一致。



(a) Al-7Si-3Cu (b) Al-7Si-3Cu-0.4In

图 6 合金在 160℃峰时效态的 TEM 结果

Fig.6 TEM results of the alloys in the peak aging state at 160℃

表 4 合金 160℃峰时效态 θ' 沉淀相尺寸及数量密度

Tab.4 Size and quantity density of θ' precipitated phase in the peak aging state at 160℃

合金	长度/nm	厚度/nm	数量密度/($\times 10^{15} \cdot \text{m}^{-2}$)
Al-7Si-3Cu	65.1	2.9	0.79
Al-7Si-3Cu-0.4In	42.4	2.6	1.03

3 结 论

(1)0.4%的 In 使 Al-7Si-3Cu 合金达到峰值硬度的时效时间显著缩短,当添加 In 后,合金硬度(HV)在 160℃时效 16 h 后达到峰值 127,但无 In 合金在 30 h 仍未达到峰值,此时硬度(HV)仅为 88。

(2)由 DSC 所得的各相反应激活能结果表明,微量

Ln 对 θ' 相的反应激活能影响最大。相比 Al-7Si-3Cu 合金,Al-7Si-3Cu-0.4In 合金中 θ' 相的反应激活能从 36.839 kJ/mol 降低至 28.591 kJ/mol,从而使其反应难度显著降低,迅速析出,达到促进时效析出的效果。

(3)TEM 结果表明,添加 0.4%的 In 显著促进了 Al-7Si-3Cu 合金时效析出,细化了 θ' 相,使时效过程中 θ' 相析出物的数量密度更高且尺寸更细小,从而增强了沉淀硬化的效果。

参 考 文 献

[1] LI Z, SAMUEL A M, SAMUEL F H, et al. Effect of alloying elements on the segregation and dissolution of CuAl₂ phase in Al-Si-Cu 319 alloys[J]. Journal of Materials Science, 2003, 38(6): 1 203-1 218.

[2] 鲍庆煌,叶兵,王其贵,等. Cu 对铸造 Al-Si-Cu 合金组织和力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2016, 36(5): 536-539.

[3] ELSEBAIE O, MOHAMED A M A, SAMUEL A M, et al. The role of alloying additives and aging treatment on the impact behavior of 319 cast alloy[J]. Materials & Design, 2011, 32(6): 3 205-3 220.

[4] 贾志宏,翁瑶瑶,丁立鹏,等. 铝合金中的 Sn 微合金化:强化作用及机制[J]. 材料导报, 2017, 31(5): 123-127.

[5] SILCOCK J M, FLOWER H M. Comments on a comparison of early and recent work on the effect of trace additions of Cd, In, or Sn on nucleation and growth of θ' in Al-Cu alloys[J]. Scripta Materialia, 2002, 46(5): 389-394.

[6] 陈保安,祝志祥,张强,等. Sn 对 Al-Cu 合金微观组织与力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2016, 36(5): 540-543.

[7] 舒军,陈志国,李世晨,等. 微量 Sn 和 In 对 Al-3.5Cu 合金时效行为及微观组织演变的影响[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(9): 2 486-2 491.

[8] AKOPYAN T K, BELOV N A, LETYAGIN N V. Effect of trace addition of Sn on the precipitation hardening in Al-Si-Cu eutectic alloy[J]. JOM, 2019, 71(5): 1 768-1 775.

[9] AKOPYAN T K, BELOVA N A, LETYAGIN N V, et al. Influence of indium trace addition on the microstructure and precipitation hardening response in Al-Si-Cu casting aluminum alloy[J]. Materials Science and Engineering, 2021, A831(13): 142 329.

[10] 潘峥嵘,郑子樵,李世晨,等. In 对 Al-3.5Cu 合金析出过程的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2011, 40(6): 1 079-1 083.

[11] GABLE B M, MUDDLE B C. Factors influencing the heterogeneous nucleation of θ' in Al-Cu-In alloys[J]. Materials Science Forum, 2006, 519: 495-500.

[12] PAN Z R, ZHENG Z Q, LIAO Z Q, et al. Effects of indium on precipitation in Al-3.3Cu-0.8Li alloy[J]. Acta Metall Sinica: English Letters, 2010, 23(4): 285-292.

[13] LOTTER F, PETSCHKE D, STAAB T E M, et al. The influence of trace elements (In, Sn) on the hardening process of Al-Cu alloys[J]. Physica Status Solidi., 2018, A215(11): 1 800 038.

[14] LIU M P, WU Z J, YANG R, et al. DSC analyses of static and dynamic precipitation of an Al-Mg-Si-Cu aluminum alloy[J]. Progress in Natural Science Materials International, 2015, 25(2): 153-158.

基于复合铸型的钛合金双流道闭式叶轮铸造工艺研究

肖强伟^{1,2,3} 贾志伟¹ 范世玺¹ 纪志军² 王德季¹

(1.北京航空材料研究院股份有限公司; 2.中国航发北京航空材料研究院;
3.北京市先进钛合金精密成型工程技术研究中心)

摘 要 针对具有狭小间隙特点的钛合金双流道闭式叶轮铸造过程中存在的技术难点,提出了一种复合铸型铸造工艺。复合铸型的外模采用石墨铸型,型芯为特种砂芯,该砂芯成本低、生产周期短和溃散性好。复合铸型预热后在真空自耗凝壳炉中熔炼浇注,对铸件浇注结果进行了分析。结果表明,闭式叶轮清芯便捷,铸件成形完整,表面粗糙度在 6.3 μm 以下,铸件尺寸轮廓误差在±0.5 mm。采用石墨-砂芯复合铸型铸造工艺可实现对具有狭小间隙特点的钛合金铸件的研制。

关键词 钛合金铸件;双流道闭式叶轮;狭小间隙;复合铸型

中图分类号 TG249.5;TG146.23

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.09.021

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Product of Titanium Alloy Double-channel Enclosed Impeller Based on Compound Mold

Xiao Qiangwei^{1,2,3}, Jia Zhiwei¹, Fan Shixi¹, Ji Zhijun², Wang Deji¹

(1.Beijing Institute of Aeronautical Materials Co., Ltd.; 2.AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials;
3.Beijing Engineering Research Center of Advanced Titanium Alloy Precision Forming Technology)

Abstract: In view of technical difficulties existing in the development of titanium alloy double-channel enclosed impeller casting with narrow clearance, a casting process of compound mold was proposed with graphite shell and special casting sand core, which has advantages of low cost, short production cycle and high collapsibility. After preheating, melting and pouring were conducted in vacuum consumable shell furnace. The results indicate that closed impeller core cleaning is convenient and the casting shape is complete, where the surface roughness is controlled below 6.3 μm and profile size error within ±0.5 mm. Therefore, development of titanium alloy castings with narrow clearance can be realized by graphite-sand core compound casting process.

Key Words: Titanium Alloy Casting, Double-channel Enclosed Impeller, Narrow Clearance, Compound Mold

钛合金具有密度小、比强度高、抗耐腐蚀强等特点,在航空、航天、化工、石油等领域得到了广泛应用^[1-5]。常规的钛合金铸造工艺有精密铸造、机加石墨型铸造、特种砂型铸造等。传统的单一铸型很难同时满足不同铸型特性要求。将多种铸型或型芯有机结合起来,可以实现铸件不同部位所需的性能要求^[6-10]。对于具有复杂狭小型腔结构的钛合金铸件,通常采用精密铸造或石墨型-型芯的成形方法。但目前常用的型芯存在脱除困难、成本高、周期长等问题,尤其是对于具有大面积的狭

长内腔的铸件^[11-13]。基于钛合金石墨铸型和特种砂型的优点,提出了一种石墨型复合砂芯的铸件成形工艺。

石墨铸型具有短流程、高精度的特点,而砂芯相对传统的型芯制备不但具有低成本、短周期的特点,同时具有更好的溃散性和低热导率。该技术结合石墨铸型与特种砂型砂芯的优势,可实现薄壁狭小间隙结构特点的铸件完整成形,同时型芯易于脱除。采用石墨型-砂芯的复合铸型工艺对某狭小间隙双流道闭式钛合金叶轮铸件进行研制,旨在为相关产品的生产提供参考。

收稿日期:2022-08-31;修改稿收到日期:2022-10-20

第一作者简介:肖强伟,男,1979 年出生,高级工程师,北京(100094),E-mail: x_qiangwei@163.com

引用格式:肖强伟,贾志伟,范世玺,等. 基于复合铸型的钛合金双流道闭式叶轮铸造工艺研究[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(9):1 275-1 278.

XIAO Q W, JIA Z W, FAN S X, et al. Product of titanium alloy double-channel enclosed impeller based on compound mold[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(9):1 275-1 278.

[15] WU Y P, YE L Y, JIA Y Z, et al. Precipitation kinetics of 2519A aluminum alloy based on aging curves and DSC analysis[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24(10): 3 076-3 083.
[16] 李润霞,李荣德,何立子,等. 可热处理铸造 Al-Si 系合金时效行为研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2004, 33(2): 171-175.
[17] CHOI S W, CHO H S, KANG C S, et al. Precipitation dependence

of thermal properties for Al-Si-Mg-Cu-(Ti) alloy with various heat treatment[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 647: 1 091-1 097.
[18] WANG G, BIAN X, LIU X, et al. Effect of Mg on age hardening and precipitation behavior of an AlSiCuMg cast alloy[J]. Journal of Materials Science, 2004, 39(7): 2 535-2 537.

(编辑:栗万仲)