

Ce 对汽车用 Al-Mg-Si-Cu 合金时效析出行为的影响

李美玉¹ 刘学辉¹ 余海东^{2,3} 李 勇^{2,3} 王 娟^{2,3} 刘子梁^{2,3}

[1.广东兴发铝业(江西)有限公司;2.江西理工大学材料冶金化学学部;3.赣州市先进金属及功能材料重点实验室]

摘 要 采用扫描电镜、透射电镜、拉伸试验机、显微硬度测试和能谱分析仪研究了不同 Ce 含量的 Al-Mg-Si-Cu 合金的时效析出行为。结果表明,在 Al-Mg-Si-Cu 合金中加入 Ce,产生了新的析出相(CeAlSi),细化了 Al(Fe,Mn)Si 相。时效析出阶段,Al-Mg-Si 系合金的析出序列为过饱和固溶体-Mg/Si 原子团簇→G.P.区的形成→针状的 β''相→短棒状的 β'相→板条状的 β 相或者 Q'相。添加稀土 Ce 后,Mg/Si 原子团簇和 G.P.区更加细小和均匀,同时针状的 β''相更加细小。Al-Mg-Si-Cu-0.2Ce 合金的抗拉强度达到 412 MPa,Al-Mg-Si-Cu-0.4Ce 合金的抗拉强度达到 400 MPa,分别比 Al-Mg-Si-Cu 合金的抗拉强度提高了 11.4%和 8%。

关键词 Ce;Al-Mg-Si-Cu 合金;时效析出;抗拉强度

中图分类号 TG146.21;TG115.21

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.04.017

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Influence of Ce on Precipitation Behavior of Al-Mg-Si-Cu Alloys for Automotive Application

Li Meiyu¹,Liu Xuehui¹,Yu Haidong^{2,3},Li Yong^{2,3},Wang Juan^{2,3},Liu Ziliang^{2,3}

[1. Guangdong Xingfa Aluminum(Jiangxi) Co., Ltd.; 2. Faculty of Materials Metallurgical Chemistry, Jiangxi University of Science and Technology; 3. Ganzhou Key Laboratory of Advanced Metals and Functional Materials]

Abstract: The aging precipitation behaviors of Al-Mg-Si-Cu alloys with different Ce contents were investigated by SEM, TEM, tensile testing machine, microhardness test and EDS. The results indicate that a new precipitation phase(CeAlSi) is formed after Ce addition, refining the Al(Fe, Mn)Si phase. In the precipitation stage of aging, the precipitation sequence of Al-Mg-Si alloys is supersaturated solid solution-Mg/Si atomic clusters→formation of G.P. region→needle-shaped β'' phase→short rod-shaped β' phase→lath-shaped β phase or Q' phase. After rare earth Ce addition, the Mg/Si atomic clusters and G.P. regions are finer and more uniform, and the needle-like β'' phase is finer. The tensile strength of Al-Mg-Si-Cu-0.2Ce and Al-Mg-Si-Cu-0.4Ce alloy reach 412 MPa and 400 MPa, which are 11.4% and 8% higher than those of Al-Mg-Si-Cu alloy, respectively.

Key Words: Ce, Al-Mg-Si-Cu Alloy, Aging Precipitation, Tensile Strength

收稿日期:2022-07-05;修改稿收到日期:2022-08-06

基金项目:江西省重点研发计划资助项目(20201BBE51009)

第一作者简介:李美玉,男,1979 年出生,高级经济师,江西宜春(336000),E-mail: 11485389785@qq.com

通信作者:李勇,男,1975 年出生,副教授,江西赣州(341000),E-mail: liyong0248@163.com

引用格式:李美玉,刘学辉,余海东,等. Ce 对汽车用 Al-Mg-Si-Cu 合金时效析出行为的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(4):518-523.

LI M Y,LIU X H,YU H D, et al. Influence of Ce on precipitation behavior of Al-Mg-Si-Cu alloys for automotive application[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(4):518-523.

[4] 王文川,杨晓禹,徐宏,等. 高稀土镁合金微弧氧化工艺参数的优化[J].特种铸造及有色合金,2015,35(12):1336-1339.

[5] 张菊梅,王凯,段鑫,等. LA103Z 镁锂合金微弧氧化膜层微观组织及腐蚀行为[J].特种铸造及有色合金,2020,40(5):474-480.

[6] 王兴平,廖斌钊,关浩浩,等. 铝表面微弧氧化膜 1 000~1 200 ℃ 高温蒸气氧化行为研究[J]. 表面技术,2021,50(6):23-31.

[7] LI S J, YAN S F, CHEN W D, et al. Effect of cerium content on hydrogen resistance of ZrH1.8 MAO coatings[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2022, 51(3):793-799.

[8] ZHANG F, GUI M, LI Q. Fretting wear behavior of microarc oxidation coating fabricated on AZ91 magnesium alloy[J]. Journal of Tribology, 2022, 144:1-12.

[9] 余国庆,景然,王国迪,等.MAO 电压对 TC4 合金氧化膜层摩擦磨损性能的影响[J].金属热处理,2021,46(1):126-130.

[10] 呼丹,陶路路,高广睿,等.电压对 Zr-4 合金 Na₂SiO₃-(NaPO₃)₆-K₂ZrF₆体系微弧氧化膜性能的影响[J]. 电镀与涂饰,2021,40(17):1352-1358.

[11] 赵华星,孙晓峰,宋巍,等.添加剂在铝合金微弧氧化中的应用综述[J]. 材料保护,2022,55(1):187-192.

[12] LÜ K, GUO B Q, ZHANG Y P, et al. Study on micro arc oxidation coating based on Ti-5Al-1V-1Sn-1Zr-0.8Mo alloy with applied voltage in stages[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2019, 48(8):2474-2479.

[13] 杨少辉,闫淑芳,李世江,等.阶段占空比对 ZrH1.8 表面微弧氧化陶瓷层性能的影响[J].无机材料学报,2020,35(10):1112-1116.

(编辑:张正贺)

铝合金具有强度高、耐腐蚀、成形性好、较易再生利用等特点,在汽车工业得到广泛应用。能源、环境、安全等方面对汽车轻量化的要求越来越迫切,使用轻量化材料是实现汽车轻量化的重要途径,如以铝代钢^[1-3]。Al-Mg-Si 系合金具有中高强度、良好的成形性和耐蚀性,优良的焊接性能,易着色,烘烤后表面品质好,并且可进行热处理强化等特点,是目前汽车轻量化的关键材料^[4-5]。

作为可热处理强化的 Al-Mg-Si-Cu 系高强铝合金,微合金化是其重要的强化手段,其中最常见的是 Ag、Zn 和 Sn 等元素。少量 Ag 的加入可以促进 Al-Mg-Si 合金中 G.P.区的形成,改善合金的析出动力学,从而导致后续时效过程中析出更细小且密度更大的团簇和析出相,改善合金的时效析出硬化效果^[6-7]。WENG Y Y 等^[8]研究发现,Ag 可以进入 β' 相中取代 Si 原子的位置,形成 β' -Ag 相。添加微量的 Zn 后,Al-Mg-Si 合金不仅具有良好的强度及塑性,其烤漆响应和时效硬化效果也有明显的改善^[9-12]。稀土 La、Ce、Sc 和 Yb 对铝合金的组织及性能也会产生重要的影响。在铝中添加 Sc 会形成大量的 Al_3Sc 相,而 Al_3Sc 相和 Al 具有高匹配性,符合晶粒细化剂的要求,即 Al_3Sc 相起到了晶种的作用,细化铝合金晶粒^[13]。在铝合金中加入 Yb 元素后生成含 Yb 的弥散相粒子,其与基体呈共格形式,具有同样的强化机制,可以提高合金的强度及韧性^[14]。陈康华等^[15]在铝合金中添加 Zr、Cr 和 La 元素,形成了 $\text{Al}_{20}\text{Cr}_2\text{La}$ 相,可阻碍晶界、位错移动,抑制再结晶,但其耐腐蚀性能与基体合金相比有所降低。郭江等^[16]探讨了 Ce 对 6063 铝合金组织和综合性能的影响,证明 Ce 的添加可以与 Al 作用生成一种相粒子,形核率增加,形核数量增多,达到细化晶粒和第二相弥散强化的效果。罗伟等^[17]、李勇等^[18]研究了微量 RE 和 Al-Ti-B 添加剂对 6063 铝合金的晶粒尺寸和力学性能的影响,微量 RE 和 Al-Ti-B 复合作用后,晶粒得到显著细化,抗拉强度和伸长率得到很大的提高。

随着 6xxx 系铝合金在汽车轻量化产业中的推广应用,关于其相关研究已然成为热点^[19-20],但是对于该合金中析出相演变规律认识不够深入,尤其是添加微量 RE 元素后含 Cu 的 6xxx 系铝合金中无序结构析出相的形成、结构及演变规律还不清楚。对析出相演变规律认识不清会导致新型合金和热处理工艺的设计难以推进。为此,本研究以汽车车身用 Al-Si-Mg-Cu 铝合金作为研究对象,添加微量 Ce,分析合金在时效热处中的析出行为,以为汽车车身用 Al-Si-Mg-Cu 合金热处理工艺提供参考。

1 试验材料及方法

试验材料由质量分数为 99.5% 的工业纯铝锭、纯镁锭、Al-20Si、Al-10Mn、Al-20Fe、Al-20Cu 和 Al-10Ce 等中间合金配制而成。在石墨坩埚电阻炉内进行熔炼,熔炼温度为 750~780 °C,精炼温度为 730~750 °C,浇注温度为 710~720 °C,除气剂采用 C_2Cl_6 ,晶粒细化剂为 Al-5Ti-1B,浇注于金属型中获得 3 种不同成分的铝合金方锭,其实际成分见表 1。将冷轧后铝锭进行切割处理,加热到 550 °C,保温 30 min 后迅速水冷。取样进行时效处理。时效工艺:时效温度分别为 150、180 和 210 °C,保温时间分别为 0.5、1.5、3、5、7、11、13、15 和 17 h。

表 1 试验合金的化学成分

Tab.1 Chemical composition of tested alloys %							
合金	w_B						
	Si	Mg	Cu	Mn	Fe	Ce	Al
1	0.682	1.150	0.456	0.082	0.012	—	余量
2	0.664	1.156	0.463	0.078	0.014	0.2	余量
3	0.670	1.148	0.448	0.075	0.015	0.4	余量

利用 FM-700 型显微硬度计对合金进行显微硬度测试。采用标准金相试样制备方法制样,试样用 1 mL HF+1.5 mL 的 HNO_3 +2.5 mL 的 HCl+95 mL 的 H_2O 腐蚀,并使用 CMM-77Z 型金相显微镜观察。采用 MLA650F 型扫描电镜观察微观组织和形貌,并使用 EDS 能谱分析进行微区成分分析。采用 TecnaiG2-20 透射电镜进行微观组织及结构表征。

2 试验结果与讨论

2.1 不同 Ce 含量时 Al-Mg-Si-Cu 系合金的时效析出序列

图 1 为不同 Ce 含量时 Al-Mg-Si-Cu 合金在 180 °C 下时效处理不同时间的微观组织。可以发现,随着时间的延长,合金中的析出相明显增多,形态也变得较为粗大。相比于基体合金,含有稀土合金的白色析出相明显增多,但是相较于不同含量 RE 的微观组织,Ce 含量为 0.2% 的合金中析出相明显较为细小,在合金中弥散分布;Ce 含量为 0.4% 的合金中析出相明显增多,形态也更加粗大。另外,当加入 0.4% 的 Ce 时,合金的析出相呈链状分布,部分发生聚集现象,反而不利于合金性能的提高。

图 2 为 Al-Mg-Si-Cu 合金在初时效状态下的 TEM 组织。可以看出,G.P.区和基体完全共格,在傅里叶变化花样中也仅仅看到 α -Al 基的衍射花样。Mg、Si 原子团簇和 G.P.区在时效初期就已形成,原子团簇的尺寸为 1~2 nm,G.P.区的尺寸为 3~4 nm,甚至更大,在早期时效阶段共同对合金起强化作用。原子团簇和 G.P.

区本质是一样的,唯一的区别在于溶质原子的数量和密度的不同,G.P.区的尺寸更大,溶质原子浓度更高,因此团簇在 TEM 和 HRTEM 无法看到相应的应变衬度,

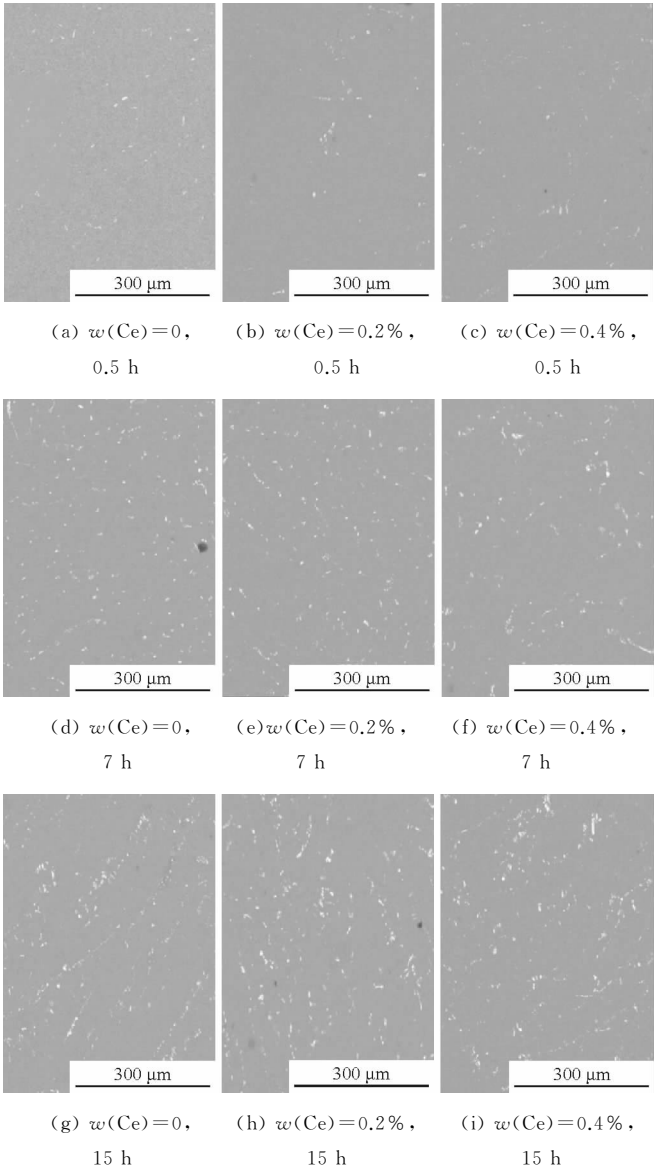


图 1 在 180 °C 下不同时间时效处理后 Al-Mg-Si-Cu-xCe 合金的微观组织

Fig.1 SEM images of Al-Mg-Si-Cu-xCe alloy aged at 180 °C for different time

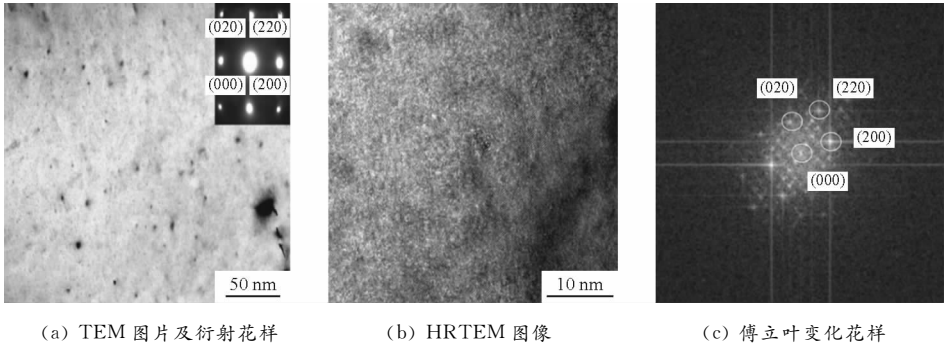


图 2 Al-Mg-Si-Cu 球状 G.P.区 TEM 图像和 HRTEM

Fig.2 TEM and HRTEM images of spherical G.P. region in Al-Mg-Si-Cu alloy

而 G.P.区可以,形貌呈球状并且 Al 基体完全共格。目前,主要通过 3DAP 和 APIM 技术对团簇组织展开研究^[20],原子团簇的形成、生长和粗化尚未得到系统的解释。

图 3 是在晶带轴为 $[001]_{\text{Al}}$ 下选取的 TEM 图像和 HRTEM 图像。图 3a 为 Al-Mg-Si-Cu 合金在峰时效阶段析出的 β'' 析出相, β'' 相在 Al-Mg-Si-Cu 中起主要强化作用,呈针状,部分黑色球状析出相为插入型的 β'' 相。 β'' 相在 3 个 $\{100\}_{\text{Al}}$ 面上沿 3 个 $\langle 100 \rangle_{\text{Al}}$ 方向生长,沿 b 轴方向同 α -Al 基体完全共格。图 3c 是 HRTEM 选取部分的傅立叶变化花样,在傅立叶变化图中包括 α -Al 基体和 β'' 的衍射花样。 β'' 相属于底心单斜的晶体结构,其晶格参数为 $a=1.516, c=0.674, \beta=105.26^\circ$,上述试验结果和文献结果一致^[21]。同时, β'' 相与 α -Al 基体的晶体学关系为: $(010)\beta''//\{100\}_\alpha; (001)\beta''//\{310\}_\alpha; (100)\beta''//\{230\}_\alpha$ 。

图 4 为 Al-Mg-Si-Cu 合金在 180 °C 时效不同时间的 TEM 形貌,晶带轴为 $[001]_{\text{Al}}$ 。从图 4a 中并不能清楚看到第二相的衬度,这表明在合金中并不存在明显的析出沉淀相,即 G.P.区还没出现。同时也可以观察到中有一些纳米级的点状物质,这可能是溶质原子的团簇现象,如 Mg 原子团簇和 Si 原子团簇。但是由于这些团簇的尺寸较小,Mg、Al 的原子半径相差不大,所以引起的晶格畸变也较小,这些团簇也不能明显的显示应变场衬度。当合金时效 3 h 后,大量的 G.P.区从基体中均匀的析出,尺寸比原子团簇大,为 3~4 nm,原子团簇和 G.P.区在时效初期共同起强化作用。同时在对合金进一步时效后,合金中明显出现不同衬度的析出相,一种是沿着铝基体 $(100)_{\text{Al}}$ 和 $(010)_{\text{Al}}$ 方向排列,长度为 15~20 nm 的针状析出相,另一种是直径为 2~3 nm 的粒状析出相。一部分应该是针状析出相的横截面,其中一部分可能是未知结构的析出相或者是 G.P.区。根据图 4 可以看出,合金中的针状析出相占主要地位,在这些析出相周围,也可以明显地发现共格应变场,这表明,此时合金基本上以共格的针状 β'' 相为主,同时这些针状的

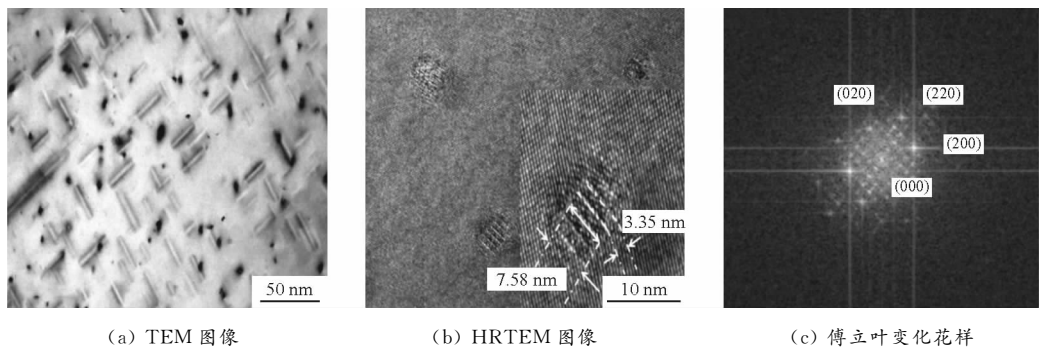


图 3 Al-Mg-Si-Cu 合金峰时效 β'' 相的 TEM 图和 HRTEM 图片

Fig.3 TEM and HRTEM images of peak aging β'' phase of Al-Mg-Si-Cu alloy

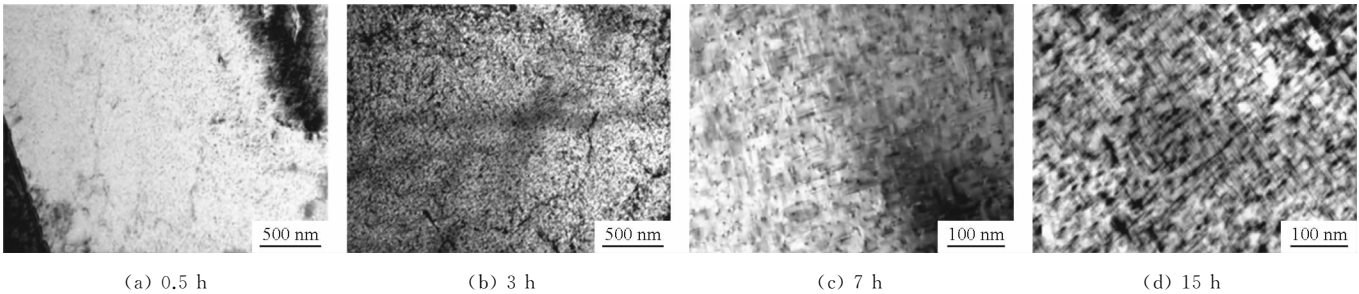


图 4 Al-Mg-Si-Cu 合金在 180 °C 时效 0.5、3、7 和 15 h 的 TEM 照片

Fig.4 TEM images of Al-Mg-Si-Cu alloy aged at 180 °C for 0.5, 3, 7 and 15 h

β'' 相也是 Al-Mg-Si-Cu 合金的主要强化相^[22]。同时，在基体中也可以观察到少量 G.P.区组织，随着峰值时效的到来，合金中 G.P.区组织回溶到基体中。随着时效时间延长，峰值时效过后，达到过时效阶段，此时合金中的针状 β'' 相仍占据主要地位，尺寸没有发生明显的变化。然而，除了这些针状的析出相外，合金中还析出了 90 nm 左右的相，具有棒状和板条状的形貌，称为 β' 相或 Q' 相。当进一步延长时效时间后，合金中的针状 β'' 相近乎完全消失，合金的力学性能也显著降低， β' 相或者 Q' 相的尺寸能达到 250 nm 左右。

2.2 Ce 对 Al-Mg-Si-Cu 系合金时效组织的影响

图 5 为 Al-Mg-Si-Cu-Ce 合金时效析出过程的微观组织的 TEM 图。初时效阶段(0.5 h)，未加入 Ce 的合金中可以发现粗大的、不均匀的原子团簇，这对于合金在后续时效过程产生不利的影响；Ce 含量为 0.2% 的合金原子团簇析出明显变得均匀，细小；Ce 含量为 0.4% 时效析出相数量减少，且相对粗大。

在峰时效过程中，添加 Ce 的合金中 β'' 相明显变多和细小，其中一些细小的点状析出相可能是一些插入型的 β'' 相的截面和 G.P.区。另外，Ce 含量为 0.4% 的合金中的析出相也会明显变得粗大，但明显小于不含稀土的合金。随着稀土含量增加，合金中的 G.P.区明显增大。BEVILAQUA W L 等^[23]认为，Ce 属于活性非常高的元素，具有非常大的原子半径和高的空位结合能，可以促进其他原子的扩散，从而促进时效过程中原子的

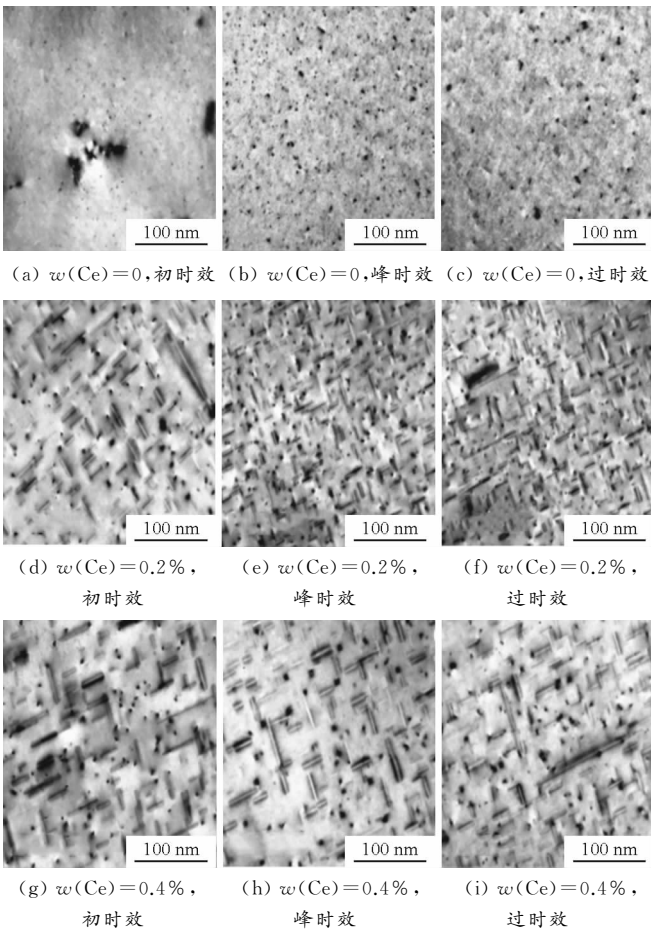


图 5 Al-Mg-Si-Cu-Ce 合金 180 °C 时效过程中初时效、峰时效、过时效的 TEM 图像

Fig.5 TEM images of initial aging, peak aging and over aging of Al-Mg-Si-Cu-Ce alloy during aging at 180 °C

团簇和 β'' 相的形成,加速合金的时效进程。

在过时效阶段,合金中的析出相明显长大,但是在不含稀土的合金中,部分呈针状的析出相进一步生长,出现了板条状的析出相,即 β' 相。在含有稀土的合金中, β'' 相进一步长大,但是 Ce 含量为 0.2% 的合金中还未出现 β' 相,Ce 含量为 0.4% 的合金中部分 β'' 相明显粗大,析出相平均尺寸明显大于 0.2% 的 Ce。但同时也可以证明合金在 180 ℃ 峰时效后有一个稳定的下降平台,而不含稀土的合金在峰时效过后稳定阶段较短,且硬度明显下降。

2.3 Ce 对 Al-Mg-Si-Cu 合金时效力学性能的影响

图 6 为 Al-Mg-Si-Cu 合金在不同温度下单级时效硬度曲线。可以看出,150 ℃ 时随着时效时间延长,合金的硬度逐渐提高,Ce 含量为 0.2% 时,合金的硬度(HV)达最大值 93。这是由于在较低的温度下,合金时效时,溶质原子在迁移和扩散过程中得不到充足的能量,尤其是 Si 原子。所以合金中的 Mg 原子和 Si 原子的团簇在形成过程中受到抑制和延缓,不利于合金力学

性能的提高。

180 ℃ 下时效时,同样是 Ce 含量为 0.2% 的合金的硬度最高,随着合金时效时间延长,合金的硬度也不断的提高,在 10 h 左右时达到最高并开始下降,这可能是由于合金中在第 3 阶段部分 G.P.区回溶造成硬度的下降,但是随着时效进行,合金的硬度并没有明显的增加,形成一个较为稳定的硬化平台,这时候由于合金中仍以 β'' 相为主, β'' 没有明显的长大变粗^[24]。当时效 15 h 后,合金的硬度开始明显下降,这是由于合金中的 β'' 相变粗变大,生成棒状和板状 β' 相和 Q' 相,造成合金的硬度迅速下降。

210 ℃ 下时效 30 min 后,合金的硬度明显小于固溶时,这是由于时效温度过高,促使合金中部分溶质原子溶于基体中,造成硬度下降。同时也可以看到,合金在 210 ℃ 时效硬度峰值明显快于 150、180 ℃,造成这种现象的原因是由于合金在较高的温度下,原子扩散和迁移的能力提高,促使时效进程加快。

图 7 和表 2 为 Ce 含量对 Al-Mg-Si-Cu 合金时效处

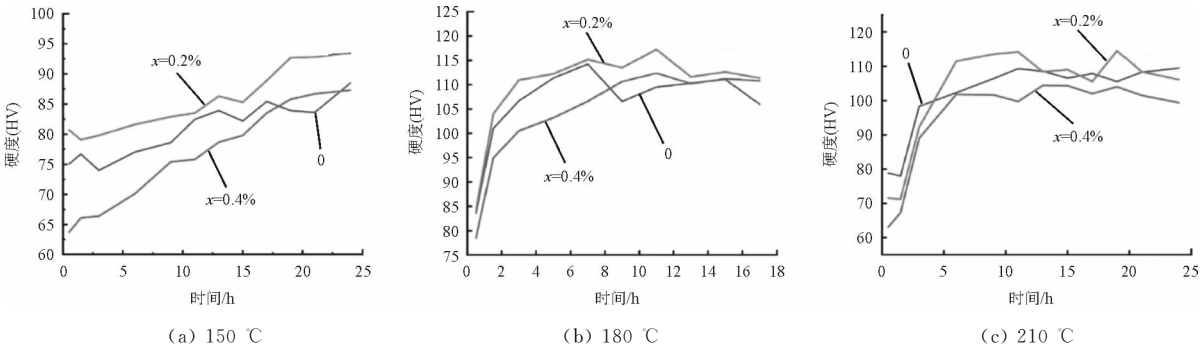


图 6 Al-Mg-Si-Cu-xCe 合金在不同温度下时效不同时间的硬度

Fig.6 Hardness curves of Al-Mg-Si-Cu-xCe alloy aged at 150 ℃, 180 ℃ and 210 ℃ for different times

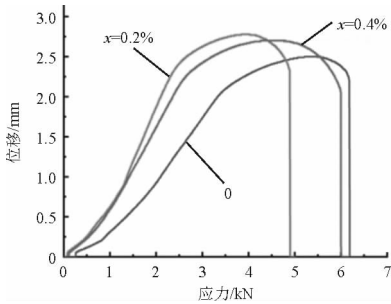


图 7 时效处理后的 Al-Mg-Si-Cu-xCe 合金的拉伸曲线
Fig.7 Tensile curves of Al-Mg-Si-Cu-xCe alloy after aging treatment

理后力学性能的影响。可以看出,添加 Ce 后合金的抗拉强度都有明显的提高,Ce 含量为 0.2% 和 0.4% 的合金的抗拉强度分别为 412 和 400 MPa,较未添加 Ce 的分别提高了 11.4% 和 8%。并且发现,加入 Ce 后,合金的屈服强度、弹性模量也有较大的提高。一般情况下,在外力相同时,合金弹性模量越大,其刚度也越大,即塑

表 2 Al-Mg-Si-Ce 合金的室温拉伸力学性能

Tab.2 Tensile mechanical properties of Al-Mg-Si-Cu-Ce alloy at room temperature

$w(\text{Ce})/\%$	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	弹性模量/GPa
0	370	313	3.097
0.2	412	356	4.975
0.4	400	347	3.818

性越低。这也是由于添加少量的 Ce,能够明显细化 Al (Mn,Fe) Si,但同时也形成了含 Ce 的金属间化合物 CeAlSi 相,CeAlSi 属于硬脆相,合金在发生塑性变形时,金属间化合物和沉淀析出相阻碍位错和缺陷的运动,从而降低合金塑性,但同时合金的强度明显提高。

3 结 论

(1)在时效析出阶段,Al-Mg-Si-Cu 系合金的析出序列为过饱和固溶体-Mg/Si 原子团簇→G.P.区的形成→针状的 β'' 相→短棒状的 β' 相→板条状的 β 相或者

Q' 相。在添加 Ce 后, Mg/Si 原子团簇和 G.P.区更加细小和均匀,同时针状的 β'' 相更加细小,相比于 0.2% 的 Ce,添加 0.4% 的 Ce 后析出相明显粗大。因此,Ce 不能改变合金的析出序列,但是能够加速合金的时效析出进程。

(2)在 Al-Mg-Si-Cu 合金中加入 Ce,产生了新的析出相 CeAlSi,细化了 Al(Fe,Mn)Si 相,改善了合金中杂质 Fe 相的存在形式,有利于合金性能的提高。

(3)Ce 含量为 0.2% 和 0.4% 的 Al-Mg-Si-Cu-Ce 合金的抗拉强度为 412 和 400 MPa,比未添加 Ce 的分别提高了 11.4% 和 8%。同时,添加 Ce 后合金硬度在时效进程中有一个稳定平台,且比基体合金维持时间更长,说明合金 Ce 能够抑制合金的老化。

参 考 文 献

- [1] 侯世忠.汽车用铝合金的研究与应用[J]. 铝加工, 2019(6): 8-13.
- [2] HIRSCH J. Recent development in aluminium for automotive applications[J]. Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 2014, 24(7): 1 995-2 002.
- [3] 温璐,徐仕豪,刘文才,等. 汽车用铝合金应力腐蚀开裂敏感性研究现状与展望[J]. 特种铸造及有色合金, 2020, 40(12): 1 339-1 348.
- [4] JAVIDANI M, LAROCHE D. Application of cast Al-Si alloys in internal combustion engine components[J]. International Materials Reviews, 2014, 59(3): 132-158.
- [5] MA W Y, WANG B Y, FU L, et al. Effect of friction coefficient in deep drawing of AA6111 sheet at elevated temperatures[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25(7): 2 342-2 351.
- [6] WENG Y Y, JIA Z H, DING L P, et al. Combined effect of pre-aging and Ag/Cu addition on the natural aging and bake hardening in Al-Mg-Si alloys[J]. Progress in Natural Science: Materials International, 2018, 28(3): 109-116.
- [7] WENG Y Y, JIA Z H, DING L P, et al. Effect of Ag and Cu additions on natural aging and precipitation hardening behavior in Al-Mg-Si alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 695: 2 444-2 452.
- [8] WENG Y Y, DING L P, ZHANG Z, et al. Effect of Ag addition on the precipitation evolution and interfacial segregation for Al-Mg-Si alloy[J]. Acta Materialia, 2019, 180: 301-316.
- [9] GUO M X, ZHANG X K, ZHANG J S, et al. Effect of Zn addition on the precipitation behaviors of Al-Mg-Si-Cu alloys for automotive applications[J]. Journal of Materials Science, 2017, 52: 1 390-1 404.
- [10] GUO M X, SHA G, CAO L Y, et al. Enhanced bake-hardening response of an Al-Mg-Si-Cu alloy with Zn addition[J]. Materials Chemistry and Physics, 2015, 162: 15-19.
- [11] GUO M X, ZHANG Y D, LI G J, et al. Solute clustering in Al-Mg-Si-Cu-(Zn) alloys during aging[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 774: 347-363.
- [12] DRITS M A. Metastable phase diagram of the Al-Sc system in the

range rich in aluminum[J]. Russ. Metall., 1983(1): 150-153.

- [13] ZAKHAROV V. Effect of scandium on the structure and properties of aluminum alloys[J]. Metal Science and Heat Treatment, 2003, 45(7-8): 246-253.
- [14] RØYSET J, RYUM N. Scandium in aluminium alloys[J]. International Materials Reviews, 2005, 50(1): 19-44.
- [15] 陈康华, 方华婵, 陈祥, 等. 复合添加 Zr、Cr 和 Pr 对 Al-Zn-Mg-Cu 合金组织和性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(2): 20-35.
- [16] 郭江, 李荣, 牛海云. 铈对 6063 铝合金组织和综合性能的影响[J]. 中国稀土学报, 2021, 39(2): 275-281.
- [17] 罗伟, 熊计, 王均, 等. 稀土对 6063 铝合金挤压性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2012, 32(5): 476-478.
- [18] 李勇, 朱志云, 张建新. 微量添加剂对 6063 铝合金晶粒细化及力学性能的影响[J]. 铝加工, 2004(5): 1-3.
- [19] 葛丽丽, 李永兵, 陆兴, 等. 6016 铝合金汽车板材预时效处理工艺研究[J]. 锻压技术, 2014, 39(1): 113-117.
- [20] CHEN B, ZHANG C, JIN Y. First-principles calculation of interface binding strength and fracture performance of β'/Al interface in Al-Mg-Si-Cu alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 830: 154 515.
- [21] 董朋轩, 陈康华, 方华婵, 等. Al-Zn-Mg-Cu-Zr-Yb 铝合金中弥散相的形成和作用[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(4): 912-918.
- [22] ZHAO J R, DU Y, ZHANG L J, et al. Thermodynamic calculation of the liquidus projections of the Al-Cu-Fe-Si and Al-Cu-Fe-Mg-Si multicomponent systems on Al-rich side[J]. Materials Science Forum, 2020, 993: 984-995.
- [23] BEVILAQUA W L, STADTLANDER A R, FROELICH A R, et al. High-temperature mechanical properties of cast Al-Si-Cu-Mg alloy by combined additions of cerium and zirconium[J]. Materials Research Express, 2020, 26 532.
- [24] YUAN B, LI G, GUO M, et al. Synergy of Ni micro-alloying and thermomechanical processing in Al-Mg-Si-Cu-Zn-Fe-Mn alloys with enhanced bendability[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 15: 5 059-5 077.

(编辑:栗万仲)

布勒第一台 9200T 压铸机下线

近年来,随着大型一体化压铸的发展趋势,整个压铸产业链上下游纷纷开始布局。2022 年,布勒压铸工厂为了实现更大吨位压铸机的生产,完成了产线升级改造。如今,布勒第一台 Carat 920 压铸机成功下线。

近日,布勒压铸工厂举办了 Carat 920 开放日活动,这场被誉为“总身价超过 2 000 亿的开放日”引来国内外多家头部汽车整车厂、压铸厂及产业链上下游合作企业参加此次活动。活动现场,布勒领导、客户代表及行业协会的领导对未来一体化压铸的发展趋势及布局发表了各自的见解。

(摘自压铸周刊)