

Zr 对 Al-Si-Mg-Mn 合金凝固过程、时效组织和性能的影响^①

陈安柱, 周鹏飞

(盐城工业职业技术学院 汽车与交通学院, 江苏 盐城 224005)

摘要: 通过模拟计算、组织观察以及力学性能测试, 研究了不同 Zr 含量对铸造 Al-Si-Mg-Mn 合金凝固过程、时效组织及力学性能的影响。结果表明, 随着 Zr 含量增加, 合金凝固路径存在显著差异, 晶粒由初期树枝晶逐步演变为等轴晶; 175 °C 时效 7 h 条件下, Zr 的加入显著提高合金硬度。Zr 的加入促使析出相在更低时效温度析出, 这可能是 Zr 细化了晶粒从而提高了扩散效率。峰值时效时合金主要析出相为 β'' 相和 Q' 相。

关键词: 铝合金; 轻量化; 析出强化; 晶粒细化; Zr; Al-Si-Mg-Mn; 时效; 析出相; 组织形貌

中图分类号: TB302

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2024.03.033

文章编号: 0253-6099(2024)03-0156-05

Effect of Zr on Al-Si-Mg-Mn Alloy Solidification Process and Its Microstructure and Properties After Aging Treatment

CHEN Anzhu, ZHOU Pengfei

(School of Automotive and Transportation, Yancheng Polytechnic College, Yancheng 224005, Jiangsu, China)

Abstract: The effects of Zr content on solidification process of Al-Si-Mg-Mn alloy, and its microstructure and mechanical properties after aging treatment were investigated by means of numerical simulation, microstructure observation and mechanical property testing. The research results reveal that with increasing Zr content, the solidification path of the alloy become significantly different, and grains evolve from initial dendrites to equiaxed grains. After aging treatment at 175 °C for 7 h, an addition of Zr can significantly improve the hardness of the alloy. The addition of Zr promotes the precipitation of precipitates at lower aging temperature, which may be attributed to grain refinement of Zr, thus leading to improved diffusion efficiency. The main precipitates of the alloy are β'' phase and Q' phase during peak aging.

Key words: aluminum alloy; lightweight; precipitation strengthening; grain refinement; Zr; Al-Si-Mg-Mn; aging; precipitates; microstructure and morphology

近年来,我国汽车工业、航空航天、国防军工等产业飞速发展,但随之而来的能源紧缺和环境问题日渐凸显^[1-3]。研发低密度、低成本、高强度的高性能铸造铝合金成为一项紧迫任务,旨在实现产品轻量化,减少能源消耗,降低环境污染,为相关产业的可持续发展提供有力支持。

Al-Si 系铸造铝合金因其轻质、高比强度、优异的延展性和铸造性能等,在汽车工业、船舶制造和航空航天等领域具有广泛应用前景^[4,6],如采用 Al-10Si-0.5Mg-0.5Mn(牌号 Silafont36)合金制造重型卡车保险

杠用脚踏板,相较于传统钢制件,质量减轻了 33%^[1]。

提高铸造 Al-Si 合金性能,主要有以下途径:① 改善共晶 Si 形貌,通过添加 Sr、Na 或稀土元素 Er、Ce 等,使共晶 Si 从粗大的板片状或长针状变为细小状,改善合金性能^[4,9];② 引入细化剂如 Al-Ti-B、Al-C-B 或 Al-Zr 细化晶粒,实现细晶强化^[6-11];③ 加入 Mg、Cu、Zn 等强化元素,并通过热处理实现固溶和析出强化^[10-12]。

前人针对铸造 Al-Si 合金共晶 Si 变质、晶粒细化、析出相演变等问题进行了大量研究,其中添加过渡族元素(V、Zr、Ti 等)的方法备受关注^[13-18],这些元素既

① 收稿日期: 2023-11-26

基金项目: 2022 年度国家外国专家项目(G2022014146L); 2022 年度江苏省高校基础科学自然科学基金面上项目(22KJD430011); 江苏省产学研合作项目(BY2022482, BY2022472, 2021HX-67); 2022 江苏高校“青蓝工程”; 2019、2020 校级自然科学基金(ygy2019-04, ygy2004); 2019 校级创新团队项目(YGYKT-04)

作者简介: 陈安柱(1984—),男,江苏连云港人,硕士,副教授,主要研究方向为高强高韧铸造铝合金开发。E-mail: 775132386@qq.com

通信作者: 周鹏飞(1988—),男,江苏盐城人,博士,讲师,主要研究方向为高强高韧铸造铝合金开发。E-mail: zpfjyc@126.com

能细化晶粒、改善共晶 Si, 又能促进强化相的析出^[16-22], 例如, 在 A319 合金中加入微量 Zr 不仅能细化晶粒, 而且在固溶处理时形成 Al₃Zr 第二相, 提高了合金的强度^[18-25]。

目前关于 Zr 对铸造铝合金时效过程的研究仍然较为有限。本文以常用的铸造 Silafont36 合金为基础, 研究了 Zr 对 Al-10Si-0.5Mg-0.5Mn 合金组织、性能以及时效析出过程的影响, 旨在为优化热处理制度和提升合金力学性能提供理论依据。

1 实验材料与方法

实验主要原料: 纯 Al (99.9%, 质量分数, 下同)、Mg 锭、Cu 丝、Al-20Si、Al-10Sr、Al-5Zr 中间合金等, 配制 3 种 Al-10Si-0.5Mg-0.5Mn-Zr ($w(\text{Zr}) = 0, 0.05\%$ 和 0.25%) 合金。先将配制好的 Al 锭、Al-20Si 放入挤压机 (自行研制的 400T 挤压机) 侧边的熔炼炉中, 调整炉温至 780 °C, 待合金全部熔化后充分搅拌并保温 1 h 以保证成分均匀, 然后将 Cu 丝、纯 Mg 加入熔液中并搅拌 (Mg 按 5% 烧损配制); 氩气通过石墨转子进入熔液中进行除气除渣 (转子速度 350 r/min, 除气 10 min); 待炉温降至 730 °C, 加入 Al-10Sr, 确保熔体中 Sr 含量 160~200 g/t, 取适量熔液浇注至蘑菇锭模具中并采用光谱仪 (SPECTROLAB M12) 分析合金成分, 结果如表 1 所示。由表 1 可知, 合金实测成分与名义成分基本一致。成分合格后, 进行挤压铸造, 挤压圆棒尺寸为 $\Phi 30 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$, 挤压成形工艺参数为: 比压 160 MPa, 挤压速度 40 mm/s, 保压时间 6 s, 模具预热温度 200 °C。

表 1 合金化学成分 (质量分数) %

合金名称	Si	Fe	Cu	Mg	Fe	Mn	Sr	Zr	Al
A	9.50	0.106	0.21	0.42	0.126	0.523	0.0172	0.005	余量
B	9.50	0.102	0.26	0.43	0.135	0.538	0.0165	0.047	余量
C	9.67	0.093	0.23	0.42	0.117	0.526	0.0150	0.243	余量

从挤压圆棒中心截取高 20 mm 的圆柱形试样分析铸态及热处理组织。热处理工艺为: 采用两步固溶工艺, 首先在 480 °C 下保温 6 h, 再升温至 530 °C 保温 4 h, 然后水淬 (水温 20 °C), 固溶试样在室温下放置 24 h 后, 进行 175 °C 不同时间的时效处理, 最后空冷。

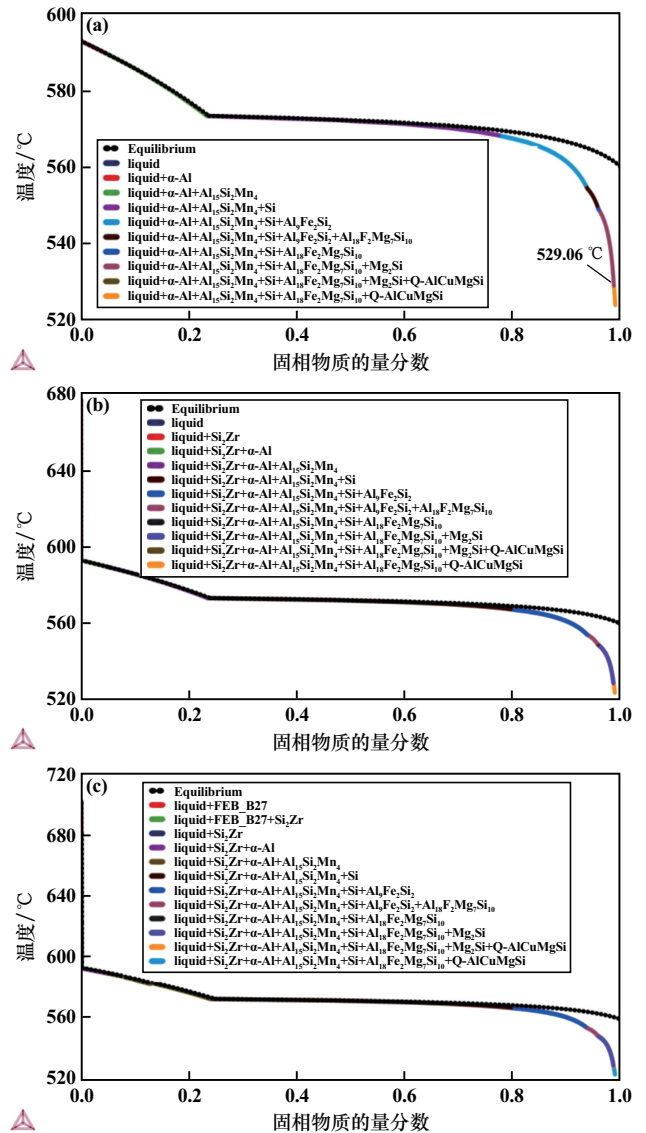
使用 OLYMPUS SZX10 型体视显微镜观察合金晶粒尺寸; 经过阳极覆膜 (3% HBF₄ 溶液, 电流 200 mA, 80 s) 后, 使用 OLYMPUS GX53 型倒置金相显微镜观察覆膜组织。在 Wilson[®] VH1102 型显微硬度仪上测试不同时效时间合金的硬度, 加载载荷为 200g, 保压时间 10 s, 每个试样测试 5 个点取其平均值。采用

Phenom XL 型台式扫描电镜 (SEM) 观察合金 T6 态的组织形貌, 并用自带的能谱仪 (EDS) 对第二相进行成分分析。利用 NETZSCH DSC204 f1 型差示热量扫描仪测试固溶态试样升温过程中析出相的演变, 升温速率均为 5 K/min, 氩气流量为 60 mL/min。利用 JEOL-2000F 型透射电镜 (TEM) 观察纳米态析出相, 工作电压为 200 kV。

2 实验结果与分析

2.1 凝固过程模拟

图 1 为 Scheil 模型模拟的合金凝固路径。合金 A 中先析出 α -Al 相, 随后析出富 Fe、Mn 相; 加入 Zr 后, 合金 B 和合金 C 凝固时会先析出 Si₂Zr 相, 随后 α -Al 和 (α -Al+Al₁₅Si₂Mn₄) 相析出, 紧接着共晶 Si 才析出。随着温度继续降低, Al₉Fe₂Si (β -Al₃FeSi) 和 Mg₂Si 相才



(a) 合金 A; (b) 合金 B; (c) 合金 C
图 1 Scheil 模型模拟的合金凝固路径

相继析出。合金中含有少量的 Cu,从模拟组织中可知,最终的组织中不含 Mg_2Si 相。

2.2 组织演变

图2为合金铸态宏观组织和微观组织。由图2可知,随着 Zr 含量增加,组织由粗大的树枝晶逐步变为等轴晶。相对应的微观组织显示,合金 A 和 B 中树枝晶比较粗大,其当量直径约为 $350\ \mu m$;合金 C 中则呈现大量的花瓣状等轴晶,其当量直径约为 $100\ \mu m$ 。这说明,Zr 含量 0.05% (合金 B) 时,Zr 并没有起到显著晶粒细化效果,Zr 含量达到 0.25% 时,晶粒细化效果明显。有研究表明,Zr 的添加可以使合金晶粒细化^[25-26],这是由于添加 Zr 后形成 $(Al, Si)_3Zr$ 相,随着温度下降,发生包晶反应(包晶成分 0.09%) ($L + Al_3Zr \rightarrow \alpha-Al$, $660.5\ ^\circ C$), $\alpha-Al$ 在 Al_3M 颗粒周围形核并生长而使晶粒细化^[22-26]。合金 B 虽然添加了 Zr,但含量只有 0.05%,低于发生包晶反应的成分,因此晶粒细化效果不明显。

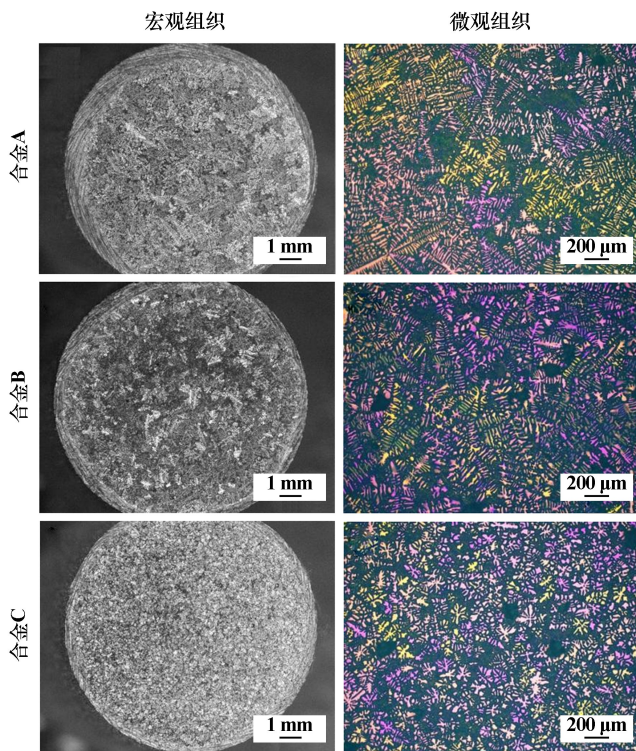


图2 铸态合金的宏观组织和微观组织

2.3 时效硬度变化

图3为合金在 $175\ ^\circ C$ 时效条件下硬度随时效时间的变化曲线。为了方便对比,图3中也标注了铸态硬度。在铸态下,3种合金的硬度非常接近,说明 Zr 的加入对铸态合金的硬度影响甚微。固溶处理后,合金硬度均上升,并且随着 Zr 含量增加,硬度逐步提高。合金 A 在时效时间 0~3 h 内硬度迅速上升,3~5 h 时

硬度又有所下降,5 h 后硬度又继续上升并在 7 h 时硬度达到最高值,然后随着时效时间延长,硬度不断下降。合金 B 硬度随时间的变化规律与合金 A 基本相似。合金 C 在时效时间 0~7 h 内硬度逐步上升,虽然并没有出现合金 A、B 中硬度下降的现象,但峰值时效硬度依然出现在 7 h 处,而且在整个时效时间内合金 C 的硬度比其他两种合金高。峰值时效时,3种合金的硬度分别为 $140.24HV_{0.2}$ 、 $143.81HV_{0.2}$ 和 $153.37HV_{0.2}$,相比合金 A,合金 B 和 C 硬度分别提高了 2.5% 和 9.4%。

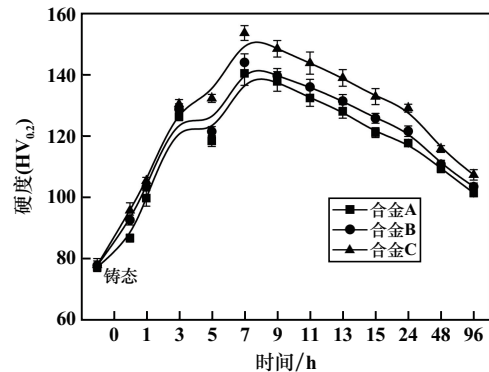


图3 合金在 $175\ ^\circ C$ 时效条件下硬度随时间变化曲线

汽车用铝合金零部件不但要有一定硬度,而且注重屈服强度和断后延伸率。表2给出了合金在峰值时效($175\ ^\circ C \times 7\ h$)状态下合金的力学性能。随着 Zr 含量增加,合金强度不断提高,断后延伸率则先提高后有所下降。Zr 的增加一方面有晶粒细化的作用,另一方面可能促进了析出相的析出,这两方面都会提高合金的强度。晶粒细化一方面会提高合金的韧性,但另一方面加入 Zr 后也会形成富 Zr 相,这样会割裂基体,不利于提高合金韧性。

表2 3种合金在峰值时效($175\ ^\circ C \times 7\ h$)状态下的力学性能

合金名称	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	断后延伸率/%
A	279.3	204.1	7.8
B	292.0	210.0	9.1
C	330.7	242.2	8.8

2.4 固溶态 DSC 分析

图4为固溶态合金 DSC 曲线(升温速度 $5\ K/min$)。峰 I 和峰 II 分别对应 $\beta-Mg_2Si$ 和 $Q-Al_5Cu_2Mg_8Si_6$ 相的析出,峰 III 对应 $\pi-Al_8FeMg_3Si_6$ 相的析出^[24]。相比整个析出过程,合金 C 析出温度比合金 A 下降了近 $50\ ^\circ C$;从析出温度分析,合金 C 比合金 A 更低。DSC 曲线中每个峰的面积区域代表析出相的析出总量^[22],由图可知,随着 Zr 含量增加,虽然析出相的析出总量

变化不大,但析出相的析出速率明显增加。

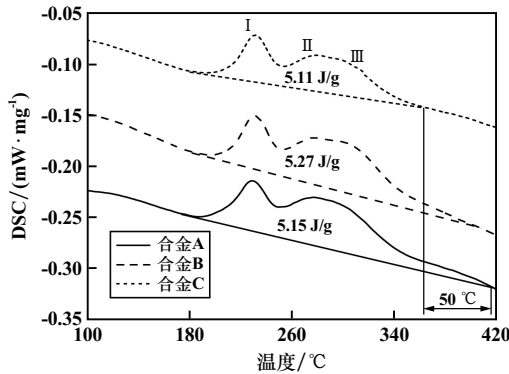
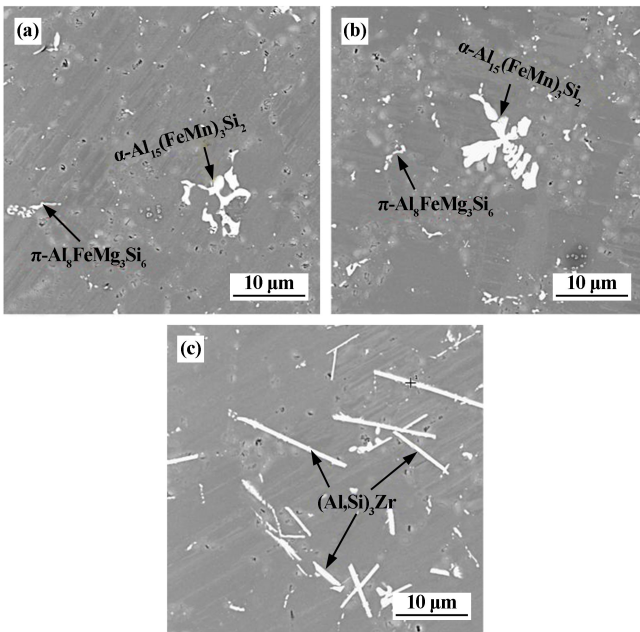


图4 合金固溶态 DSC 曲线

2.5 时效析出组织演变

图5为合金峰值时效态(175 °C×7 h)的SEM显微组织。从图5可以观察到Si相、 $\alpha\text{-Al}_{15}(\text{FeMn})_3\text{Si}_2$ 、 $\pi\text{-Al}_8\text{FeMg}_3\text{Si}_6$ 以及 $(\text{Al},\text{Si})_3\text{Zr}$ 相,但并未观察到 Mg_2Si 或 $\text{Q-Al}_5\text{Cu}_2\text{Mg}_8\text{Si}_6$ 相,这是固溶处理时可溶第二相(Mg_2Si 、 $\text{Q-Al}_5\text{Cu}_2\text{Mg}_8\text{Si}_6$ 、 $\theta\text{-Al}_2\text{Cu}$)全部回溶至基体的缘故。由于时效析出相都在纳米尺寸范围内,以至在SEM图中观察不到。但从SEM图可知,合金A、B、C的峰值时效态微观组织中的未溶解相主要是富Fe相和 $(\text{Al},\text{Si})_3\text{Zr}$ 相。

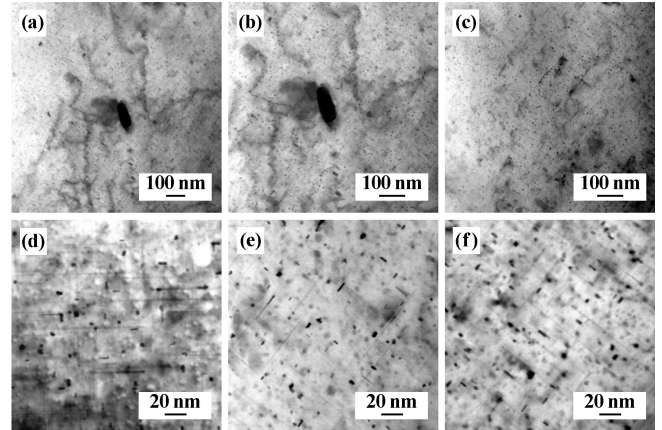


(a) 合金 A; (b) 合金 B; (c) 合金 C

图5 合金峰值时效态(175 °C×7 h) 显微组织

图6为3种合金峰值时效状态下的TEM形貌图,对比3种合金的析出相形貌及分布可知,无论Zr含量多少,析出相都呈点状或短杆状形貌;但随着Zr含量

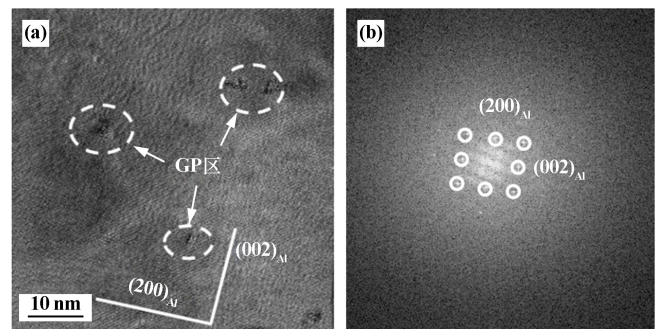
增加,析出相数量呈增多趋势,特别是C合金,其析出相数量明显比合金A和B多,从析出强化理论可知,其析出强化效果更好,所以该合金硬度更高。由于Zr的加入并未改变合金时效析出相的种类,并且合金C的析出相数量更多,后续选取合金C分析时效过程中析出相的变化情况。



(a) 合金 A; (b) 合金 B; (c) 合金 C; (d)~(f) 相应的放大图

图6 合金峰值时效态 TEM 明场像

图7为合金C在175 °C下时效10 min的TEM明场像及相应的衍射花样。此时合金处于欠时效状态,析出相呈椭圆状(白色虚线椭圆区),析出相与基体之间有明显扭曲,同时根据相应的选区衍射花样可知,该析出相并没有明显的晶体点阵结构,因此,该析出相为GP区。

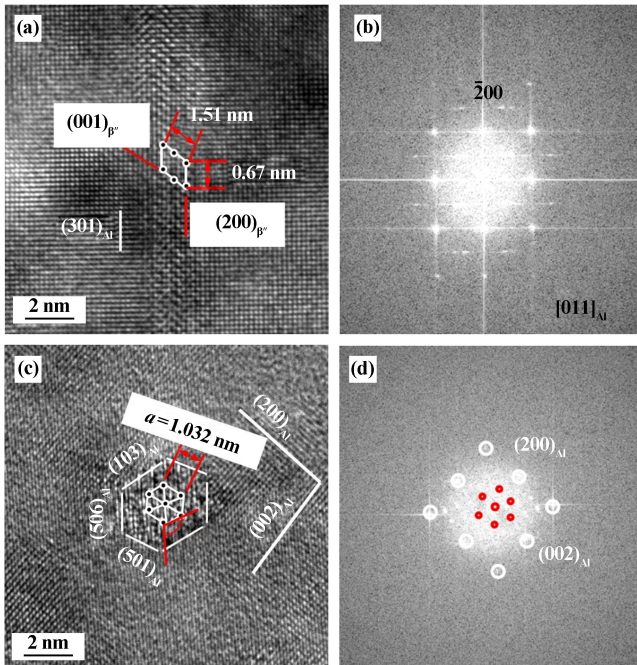


(a) TEM 明场像; (b) 选区衍射花样

图7 合金 C 在 175 °C 下时效 10 min 的 TEM 图

图8为合金C在175 °C下时效10 min的峰值时效条件下观察到的析出相及相应的衍射花样。由图8(a)~(b)可知,析出相 $\beta''\text{-Mg}_2\text{Si}$ 属于单斜结构体系,点阵常数 $a = 1.51\text{ nm}$, $c = 0.67\text{ nm}$,位向关系为 $(200)_{\text{析出相}} // (301)_{\text{Al}}$, $[010]_{\text{析出相}} // [010]_{\text{Al}}$,这与文献中观察到的 β'' 相完全一致^[23-24]。在合金C中除了观察到上述单斜结构的 $\beta''\text{-Mg}_2\text{Si}$ 相外,还观察到了另一

种不同的相,如图8(c)~(d)所示。这种析出相呈多边形(六边形)结构,点阵常数 $a=1.032\text{ nm}$,其 a 轴和 b 轴的夹角为 120° ,是典型的密排六方结构。另外此析出相有3个晶面与Al基体平行,即 $(103)_{\text{Al}}$ 、 $(501)_{\text{Al}}$ 和 $(506)_{\text{Al}}$ 。结合文献[15]可知,此析出相是 Q' - $\text{Al}_5\text{Cu}_2\text{Mg}_8\text{Si}_6$ 相。



(a) β'' - Mg_2Si 相TEM明场像;(b)相应的选区衍射花样
(c) Q' - $\text{Al}_5\text{Cu}_2\text{Mg}_8\text{Si}_6$ 相TEM明场像;(d)相应的选区衍射花样
图8 合金C峰值时效态TEM图

3 结 论

1) 随着Zr含量增加,Al-10Si-0.5Mg-0.5Mn-Zr合金组织从粗大的树枝晶逐渐演变为等轴晶。Zr含量0.05%时,晶粒细化效果不显著;Zr含量达到0.25%时,晶粒细化效果显著,呈现花瓣状等轴晶结构。

2) 175℃时效条件下,随着Zr含量增加,合金硬度逐步提高。在峰值时效状态下,随着Zr含量增加,合金强度逐步提高,断后延伸率先增加后下降,这与Zr的晶粒细化作用和富Zr相的形成有关。

3) Zr含量0.25%时,合金晶粒细化效果显著,可能是通过包晶反应形成了 $(\text{Al},\text{Si})_3\text{Zr}$ 相,使得晶粒细化;Zr的加入缩短了合金的析出温度范围,提高了析出相的析出速率。在时效过程中,Zr的加入导致 β'' - Mg_2Si 相和 Q' - $\text{Al}_5\text{Cu}_2\text{Mg}_8\text{Si}_6$ 相的形成,这对硬度的提高起到了关键作用。

参考文献:

[1] 熊俊杰,李尹,冯志军. Al-Si系铸造合金热处理工艺研究进展[J].

铸造, 2022, 71(5):544-550.

- [2] 范卫忠,黄建良,闫俊,等. 挤压铸造高强韧Al-Si-Cu-Mg合金组织性能研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2022, 42(4):513-516.
- [3] 薛利文,周文强,朴一男,等. 挤压铸造Al-Si系合金成分优化、孕育变质及其复合材料的研究进展[J]. 特种铸造及有色合金, 2022, 42(1):22-31.
- [4] 张云翔,赵海东,等. Zr含量对铸造AlSi7Mg0.4合金力学性能的影响[J]. 材料研究学报, 2021, 35(3):209-220.
- [5] 陈安柱,周鹏飞,陆从相. 高Mg含量对Al-Si-Cu-Mg合金凝固过程和组织演变的影响[J]. 铸造, 2022, 71(3):315-322.
- [6] 李云翔,夏凯,方诗杰. 新型压铸用高强Al-Si-Mg-Cu合金的组织及力学性能[J]. 特种铸造及有色合金, 2023, 43(2):267-271.
- [7] 崔晓明,孟闯,石博,等. Al-Si-Mg-Sc铸造合金微观组织演变及其细化变质机制[J]. 稀有金属材料与工程, 2022, 51(7):2529-2535.
- [8] 刘超,文锋,陈继强,等. 添加Sc,Zr和退火对Al-Si合金铸态力学性能的影响[J]. 材料研究学报, 2021, 35(2):93-100.
- [9] 谢浩宇,刘志义,赵娟刚,等. 稀土Er对Al-Cu-Mg-Ag合金微观组织和力学性能的影响[J]. 矿冶工程, 2022, 42(1):140-143.
- [10] LI H, YAN Z H, CAO L Y. Bake hardening behavior and precipitation kinetic of a novel Al-Mg-Si-Cu aluminum alloy for lightweight automotive body[J]. Materials Science and Engineering: A, 2018, 728:88-94.
- [11] Sankaran K K, Mishra R S. Metallurgy and Design of Alloys with Hierarchical Microstructures[M]. Elsevier, 2017:57-176.
- [12] 魏辽,刘志义,于迪尔,等. 预变形对Al-4.28Cu-1.33Li-0.40Mg-0.30Ag-0.14Zr合金时效组织与性能的影响[J]. 矿冶工程, 2021, 41(1):106-109.
- [13] LIU T, PEI Z R. Characterization of nanostructures in a high pressure die cast Al-Si-Cu alloy[J]. Acta Materialia, 2022, 224:117500.
- [14] ZHANG G W, WANG Z J. Age hardening of Al-7Si-0.5Mg alloy: Role of Si size and distribution[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2023, 933:167797.
- [15] ZHU X Z, JI S. Improvement in as-cast strength of high pressure die-cast Al-Si-Cu-Mg alloys by synergistic effect of Q - $\text{Al}_5\text{Cu}_2\text{Mg}_8\text{Si}_6$ and θ - Al_2Cu phases[J]. Materials Science and Engineering: A, 2021, 802:140612.
- [16] LIU W Y, XIAO W L, XU C. Synergistic effects of Gd and Zr on grain refinement and eutectic Si modification of Al-Si cast alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2017, 693:93-100.
- [17] Jonas K S, Calin D M, Randi H. The effect of low Cu additions on precipitate crystal structures in overaged Al-Mg-Si(-Cu) alloys[J]. Materials Characterization, 2020, 160:110087.
- [18] YAN P, MAO W. Microstructural evolution, segregation and fracture behavior of A390 alloy prepared by combined Rheo-HPDC processing and Sr-modifier[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 835:155297.
- [19] Shishido H, Aruga Y, Murata Y. Evaluation of precipitates and clusters during artificial aging of two model Al-Mg-Si alloys with different Mg/Si ratios[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2022, 927:166978.

(下转第165页)

3 结 论

1) 通过高温固相法制备了 Nb-NCM、Nb@ Sr-NCM、Nb@ Y-NCM、Nb@ W-NCM、Nb@ Zr-NCM 样品, 相比 Nb-NCM、Nb@ Y-NCM 不仅可以降低产品表面残锂量, 同时减少一次颗粒尺寸, 缩短锂离子的扩散路径。

2) 铌与钇双掺杂可以使阳离子混排程度降低, 晶面间距增大, 有利于锂离子在层间的脱嵌, 从而提高电化学性能。

3) 45 °C 下循环 50 圈后, 铌与钇双掺杂样品的容量保持率较单掺铌样品高 2.58 个百分点; 2C 倍率充放电条件下, 其放电容量比单掺铌样品高 6.2 mAh/g, 该材料具有优异的高温循环稳定性和倍率性能, 这与 Nb-Y 协同作用减小极化及可逆性有关。

4) 与 Nb-NCM 的起始放热峰 252 °C 相比, 样品 Nb@ Y-NCM 的起始放热峰在 272.5 °C 左右, 说明铌与钇双掺杂后样品热稳定性明显增强, 对样品高温性能具有一定的贡献。

参考文献:

- [1] 张建茹, 蓝兹炜, 席儒恒, 等. 锂离子电池高镍三元材料不足与改性研究综述[J]. 稀有金属, 2022, 46(3): 367-376.
- [2] 魏媛, 李世友, 李春雷, 等. 高能量密度型锂离子电池正极材料 $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$ 改性的研究进展[J]. 人工晶体学报, 2018, 47(9): 1861-1867.
- [3] 牛晟, 孙旭, 李海强, 等. 基于二次烧结及水洗工艺的高镍正极材料改性研究[J]. 铜业工程, 2022(2): 8-12.
- [4] 郭方亚. 层状高镍 $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$ 正极材料改性及电化学性能研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2021.
- [5] 何晶晶, 李勇, 段建国, 等. 单晶高镍三元正极材料研究进展[J]. 有色设备, 2023, 37(1): 124-131.

- [6] 张建茹, 蓝兹炜, 席儒恒, 等. 锂离子电池高镍三元材料不足与改性研究综述[J]. 稀有金属, 2022, 46(3): 367-376.
- [7] 魏诗诗, 侯顺利, 周庚, 等. 高镍三元材料的掺杂改性研究及展望[J]. 化工新型材料, 2023, 51(3): 58-62.
- [8] 方苏捷, 陈安勇, 高洪涛, 等. Al、Mn 共掺杂高镍正极材料电化学性能研究[J]. 电源技术, 2022, 46(1): 11-14.
- [9] 王楚, 李灵均, 曾爱香, 等. 铝掺杂对高镍无钴 $\text{LiNi}_{0.95}\text{Mn}_{0.05}\text{O}_2$ 正极材料结构与性能的影响[J]. 矿冶工程, 2022, 42(4): 150-154.
- [10] Kaneda H. Improving the cycling performance and thermal stability of $\text{LiNi}_{0.6}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.2}\text{O}_2$ cathode materials by Nb-doping and surface modification[J]. International Journal of Electrochemical Science, 2017, 12(6): 4640-4653.
- [11] 吕卓贻, 向伟. 钛铝共掺杂改性高镍正极晶格及电化学性能研究[J]. 广东化工, 2022, 49(13): 62-65.
- [12] 邵奕嘉, 黄斌, 刘全兵, 等. 三元镍钴锰正极材料的制备及改性[J]. 化学进展, 2018, 30(4): 410-419.
- [13] 饶先发, 李宝宝, 楼铁韬, 等. 单晶型 $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$ 正极材料的制备及性能对比[J]. 有色金属科学与工程, 2021, 12(4): 42-50.
- [14] 王泽晶, 吴建栋, 沙思淼, 等. 高镍三元正极材料 $\text{LiNi}_{0.82}\text{Co}_{0.15}\text{Mn}_{0.03}\text{O}_2$ 的制备及电化学性能研究[J]. 电源技术, 2022, 46(8): 854-858.
- [15] 侯敏, 胡亦杨, 聂荣荣, 等. 锆硼共改性提高 $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$ 正极材料循环性能研究[J]. 电源技术, 2022, 46(7): 723-728.
- [16] 褚曼曼, 于建, 张兴旺. 氟化铝/硼酸复合包覆 $\text{LiNi}_{0.83}\text{Co}_{0.12}\text{Mn}_{0.05}\text{O}_2$ 的制备及性能[J]. 电池, 2022, 52(3): 258-262.
- [17] 陈浩舟, 邹大中, 李勋, 等. 锂离子电池正极材料热稳定性研究[J]. 稀有金属与硬质合金, 2021, 49(5): 47-52.
- [18] 孙桂岩. 锂离子电池三元正极材料的热稳定性研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2019.

引用本文: 李崇, 马娜妮, 王子钰, 等. 铌复合钇共掺杂改善高镍单晶三元正极材料的高温电化学性能研究[J]. 矿冶工程, 2024, 44(3): 161-165.

(上接第 160 页)

- [20] ZUO L J, YE B, FENG J, et al. Microstructure, tensile properties and creep behavior of Al-12Si-3.5Cu-2Ni-0.8Mg alloy produced by different casting technologies[J]. Journal of Materials Science and Technology, 2018, 34: 1222-1228.
- [21] PAN S, CHEN X, ZHOU X. Micro-alloying effect of Er and Zr on microstructural evolution and yield strength of Al-3Cu (wt%) binary alloys[J]. Materials Science and Engineering: A, 2022, 790: 139391.
- [22] CAO Y, CHEN X, WANG Z. Effect of Cd micro-addition on microstructure and mechanical properties in ternary Al-Si-Cu alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 851: 156739.
- [23] KANG J, SU R, WU D Y. Synergistic effects of Ce and Mg on the microstructure and tensile properties of Al-7Si-0.3Mg-0.2Fe alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 796: 267-278.

- [24] Vončina M. Precipitation microstructure in Al-Si-Mg-Mn alloy with Zr additions[J]. Materials Characterization, 2019, 155: 109820.
- [25] LI L, LI D, MAO F. Effect of cooling rate on eutectic Si in Al-7.0Si-0.3Mg alloys modified by La additions[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 826: 154206.
- [26] ZHENG Q, ZHANG L, JIANG H, et al. Effect mechanisms of micro-alloying element La on microstructure and mechanical properties of hypoeutectic Al-Si alloys[J]. Journal of Materials Science and Technology, 2020, 47: 142-151.

引用本文: 陈安柱, 周鹏飞. Zr 对 Al-Si-Mg-Mn 合金凝固过程、时效组织和性能的影响[J]. 矿冶工程, 2024, 44(3): 156-160.