文章编号:1005-0523(2022)05-0097-08

等温处理对 $AlMgLi_{0.5}Zn_{0.5}Cu_{0.2}$ 轻质高熵合金半固态组织影响

饶 丽,金一豪,刘 飞,赵龙志,胡 勇

(华东交通大学载运工具先进材料与激光增材制造南昌市重点实验室,江西 南昌 330013)

摘要:采用等温热处理法制备 $AlMgLi_{0.5}Zn_{0.5}Cu_{0.2}$ 轻质高熵合金半固态坯料,研究保温温度和保温时间对 $AlMgLi_{0.5}Zn_{0.5}Cu_{0.2}$ 轻质高熵合金半固态组织演变影响。结果表明:随着保温温度增加,$AlMgLi_{0.5}Zn_{0.5}Cu_{0.2}$ 轻质高熵合金的晶粒平均尺寸先减小后增大,而圆整度先增大后减小。随着保温时间的延长,$AlMgLi_{0.5}Zn_{0.5}Cu_{0.2}$ 轻质高熵合金的晶粒平均尺寸和圆整度均增加。在460 ℃保温60 min时,$AlMgLi_{0.5}Zn_{0.5}Cu_{0.2}$ 轻质高熵合金的的半固态组织最佳,晶粒平均尺寸为41 μm,圆整度为0.82,粗化系数 K=20.95 $\mu m^3/s$。

关键词:等温热处理;$AlMgLi_{0.5}Zn_{0.5}Cu_{0.2}$;轻质高熵合金;半固态

中图分类号:TG166.4 **文献标志码**:A

本文引用格式:饶丽,金一豪,刘飞,等. 等温处理对 $AlMgLi_{0.5}Zn_{0.5}Cu_{0.2}$ 轻质高熵合金半固态组织影响[J]. 华东交通大学学报,2022,39(5):97-104.

Effect of Isothermal Heat Treatment on the Semi-solid Microstructure of Light-Weight High Entropy Alloy $AlMgLi_{0.5}Zn_{0.5}Cu_{0.2}$

Rao Li, Jin Yihao, Liu Fei, Zhao Longzhi, Hu Yong

(Key Laboratory of Advanced Materials for Vehicles & Laser Additive Manufacturing of Nanchang City, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: The semi-solid billet of light-high entropy alloy $AlMgLi_{0.5}Zn_{0.5}Cu_{0.2}$ was prepared by isothermal heat treatment and the effects of holding temperature and holding time on the microstructure evolution of the light-high entropy alloy $AlMgLi_{0.5}Zn_{0.5}Cu_{0.2}$ were investigated. The results show that with the increase of holding temperature, the average grain size of semi-solid light-weight high entropy alloy $AlMgLi_{0.5}Zn_{0.5}Cu_{0.2}$ decreases first and then increases, while the roundness of the grains increases first and then decreases. With the prolongation of holding time, the average grain size and roundness of the light-weight high entropy alloy $AlMgLi_{0.5}Zn_{0.5}Cu_{0.2}$ increase. The best semi-solid microstructure of the light-weight high entropy alloy $AlMgLi_{0.5}Zn_{0.5}Cu_{0.2}$ was obtained at 460 ℃ for 60 min, whose average grain size is about 41 μm, roundness is 0.82, and coarsest coefficient K=20.95 $\mu m^3/s$.

Key words: isothermal heat treatment; $AlMgLi_{0.5}Zn_{0.5}Cu_{0.2}$; light-weight high entropy alloy; semi-solid

Citation format: RAO L, JIN Y H, LIU F, et al. Effect of isothermal heat treatment on the semi-solid microstructure of light-high entropy alloy$AlMgLi_{05}Zn_{05}Cu_{02}$[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2022, 39(5): 97-104.

收稿日期:2022-03-04

基金项目:国家自然科学基金项目(51865011);江西省自然科学基金项目(20212BAB204008)

目前,高熵合金一般选用过渡金属元素,合金密度大,无法满足航空航天、交通等领域的轻量化要求[1-2]。为进一步拓宽高熵合金的应用范围,已开始探索开发轻质高熵合金。但铸造轻质高熵合金的塑性较差,造成其塑性变形困难而成形难[3]。Li等[4]对$Mg_x(MnAlZnCu)_{100-x}$轻质高熵合金进行室温压缩,发现塑性仅为3.29%~4.83%。半固态金属成形时液-固两相共存,融合了液态成形和塑性成形的特点,具有流动性好和变形阻力低的优点,可实现低塑性高熵合金的成形。

半固态成形具有凝固收缩少、使用寿命长、材料损耗少等优点,是21世纪特种制造关键技术之一[5-6]。半固态成形的关键是获得非枝晶球状组织。当前,对传统合金(如铝合金、镁合金等)半固态成形的研究较为成熟[7],而半固态高熵合金研究较少。主要利用再结晶与局部重熔法(RAP)制备半固态高熵合金组织。Wang等[8]发现,在1 150 ℃和1 300 ℃保温30 min时,半固态CoCrCuFeNi高熵合金塑性分别为13.7%和7.9%。Zhang等[9]通过RAP法制备了半固态CoCrCuFeNi高熵合金,发现在1 160 ℃时粗化系数K=5.87 μm³/s,比传统铝合金、镁合金低。Rogal[10]发现,半固态CoCrCuFeNi高熵合金压缩强度较铸态时提升了30%。

RAP法需要在重熔处理前对合金进行较大的塑性变形,工艺较为复杂,周期长,成本高。等温热处理法在半固态触变成形前的加热过程中直接获得半固态球状组织,工艺简单,成本低,被广泛采用[11]。利用等温热处理法制备$AlMgLi_{0.5}Zn_{0.5}Cu_{0.2}$轻质高熵合半固态坯料,探讨半固态组织演变机理。

1 材料与方法

选取纯度为99.9%的Al,Mg,Li,Zn,Cu为原材料,其中Al,Mg,Li,Zn,Cu的原子比为1:1:0.5:0.5:0.2。通过XFC-0.25磁悬浮炉制备$AlMgLi_{0.5}Zn_{0.5}Cu_{0.2}$高熵合金。将高熵合金铸锭切取成10 mm×10 mm×10 mm的试样,在箱式电阻炉中进行半固态等温热处理,控温精度为±1 ℃。半固态等温处理温度分别为435,460,485,510 ℃,保温时间为10~80 min,达到预定时间后将试样迅速取出并水淬。

将半固态试样表面抛光并用超声波清洗,用凯勒试剂(95 mL H_2O,2.5 mL HNO_3,1.5 mL HCl,1.0 mL HF)腐蚀金相试样,用蔡司Axio vert.Al金相显微镜观察显微组织,用Hitachi SU-8020型扫描电镜进行能谱分析,用岛津XRD-6100衍射仪进行物相分析(Cu靶Kα线,电压40.0 kV,电流30.0 mA,扫描角度为10~80°,扫描速度为2 °/min)。采用CPH60-STA-01型综合热分析仪对$AlMgLi_{0.5}Zn_{0.5}Cu_{0.2}$高熵合金进行差热分析。

根据阿基米德排水法,利用德安特ES-D电子密度天平,以去离子水为介质,测得$AlMgLi_{0.5}Zn_{0.5}Cu_{0.2}$高熵合金实际密度$\rho$=2.851 g/cm³,低于3 g/cm³,可认定为轻质高熵合金。

利用Image-Pro Plus软件计算晶粒尺寸d和形状因子f,计算公为[12]

$$d=\frac{\sum\sqrt{4A_n/\pi}}{n} \tag{1}$$

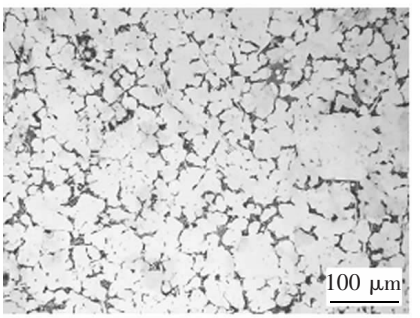
$$f=\frac{\sum\sqrt{4\pi A_n/p^2}}{n} \tag{2}$$

式中:A_n为颗粒面积,μm²;P为颗粒周长,μm;f为形状因子,f越接近1,表明得到的固相颗粒越圆整。

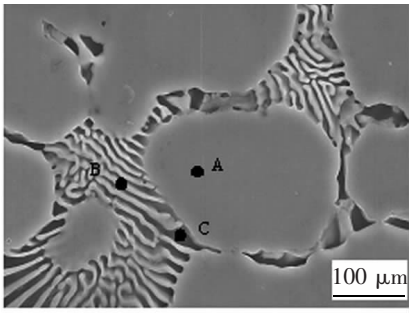
2 结果与分析

2.1 铸态组织

图1为$AlMgLi_{0.5}Zn_{0.5}Cu_{0.2}$轻质高熵合金的微观组织。由图1(a)可见,该合金主要由白色块状组织和晶界不连续组织组成。由图1(b)看出晶界中的共晶组织由不连续条状组织B及黑色组织C组成。结合表1能谱分析,发现A处含Al,Mg,Zn,Cu四种元素,且分布比较均匀,再结合图2的XRD结果,可以判定为FCC相。B主要为Al,Mg,Zn三种元素,结合XRD分析,可以推断B为含$Mg_{32}(AlZn)_{49}$的共晶组织。通过表1发现C主要为Mg元素,再结合XRD,可以判断C为α-Mg相。由图2 XRD分析还



(a) OM



(b) SEM

图 1　$AlMgLi_{0.5}Zn_{0.5}Cu_{0.2}$ 轻质高熵合金的微观组织

Fig.1　Microstructure of the light-weight high entropy alloy $AlMgLi_{0.5}Zn_{0.5}Cu_{0.2}$

发现，$AlMgLi_{0.5}Zn_{0.5}Cu_{0.2}$ 轻质高熵合金中出现了未知相，这应与 Li 有关。由于 EDS 无法检测原子序数小于 7 的元素，但根据 Al-Li-Mg 三元合金相图分析[13]，可推断 Li 主要位于组织 C 中。故铸态 $AlMgLi_{0.5}Zn_{0.5}Cu_{0.2}$ 轻质高熵合金主要由 FCC 相、$Mg_{32}(AlZn)_{49}$ 和 α-Mg 相组成。

表 1　铸态 $AlMgLi_{0.5}Zn_{0.5}Cu_{0.2}$ 轻质高熵合金的元素分布(原子分数)

Tab.1　Elements distribution of as-cast $AlMgli_{0.5}Zn_{0.5}Cu_{0.2}$ light-weight high entropy alloy (atomic fraction)

%

Elements	Al	Mg	Zn	Cu
A	36.47	26.40	22.29	14.84
B	21.42	44.92	32.98	0.68
C	10.11	78.89	10.94	1.51

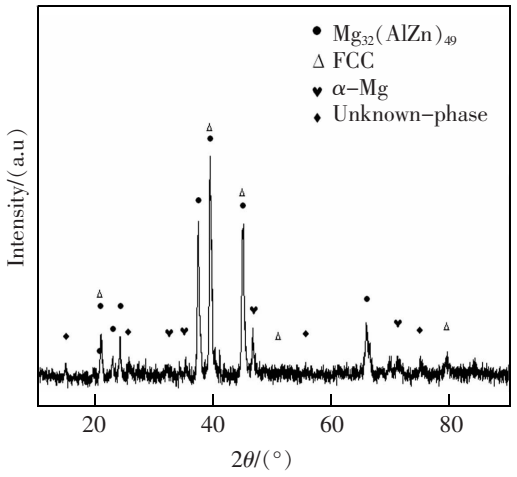


图 2　$AlMgLi_{0.5}Zn_{0.5}Cu_{0.2}$ 轻质高熵合金的 XRD 图谱

Fig.2　XRD patterns of the $AlMgLi_{0.5}Zn_{0.5}Cu_{0.2}$ light-weight high entropy alloy

2.2　DTA 分析

图 3 为 $AlMgLi_{0.5}Zn_{0.5}Cu_{0.2}$ 轻质高熵合金的 DTA 曲线。从图 3 可看出，该合金存在两个吸热峰，第 1 个峰在 380~400 ℃，该峰为晶界处 $Mg_{32}(AlZn)_{49}$ 相与 α-Mg 相的共晶组织熔化所致，第 2 个峰在 558~601 ℃，该峰为 FCC 相熔化所致。由图 3 可见，$AlMgLi_{0.5}Zn_{0.5}Cu_{0.2}$ 轻质高熵合金的固液温度区间较大，为 221 ℃。

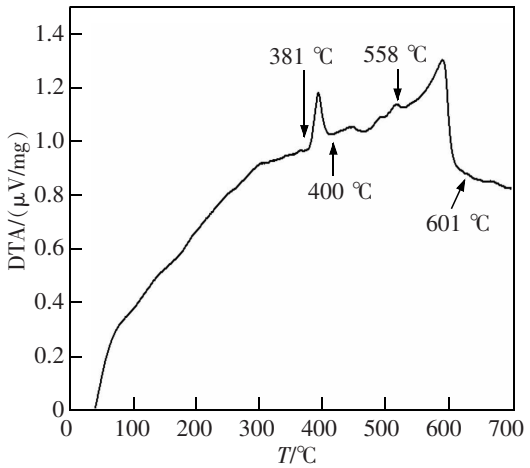


图 3　$AlMgLi_{0.5}Zn_{0.5}Cu_{0.2}$ 轻质高熵合金 DTA 曲线

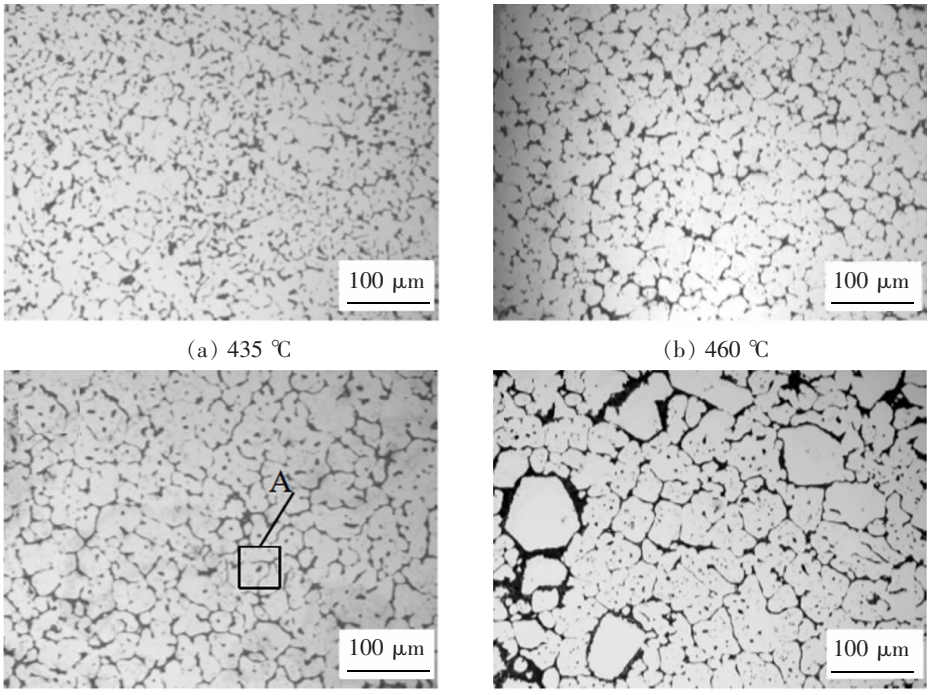
Fig.3　DTA analysis of the $AlMgLi_{0.5}Zn_{0.5}Cu_{0.2}$ light-weight high entropy alloy

2.3　半固态组织

2.3.1　保温温度对半固态组织的影响

图 4 为不同温度下保温 40 min 时半固态 $AlMgLi_{0.5}Zn_{0.5}Cu_{0.2}$ 轻质高熵合金组织。从图 4(a)可以看出，在 435 ℃时，大块状的 FCC 相晶粒发生熔解，变为小块状及不均匀分布的枝状。当保温温度为 460 ℃时，如图 4(b)，块状及枝状形貌的 FCC 相基本消失，变成大小均匀分布的近球状组织。当温度升高至 485 ℃时，如图 4(c)，合金中液相量增加，FCC 固体颗粒晶内出现了许多小液池 (如 A 点)，初生球状组织转变为不规则形状，且较大的颗粒出现合并长大现象。当温度为 510 ℃时，如图 4(d)，初生相颗粒已经合并长大，尺寸大小不均匀，个别晶粒异常长大，FCC 晶粒开始出现弧状，晶界更加“平直化”[14]。

图 5 为 $AlMgLi_{0.5}Zn_{0.5}Cu_{0.2}$ 轻质高熵合金不同温度下保温 40 min 时，FCC 相的晶粒尺寸分布图。由图 5 可以发现，FCC 相晶粒尺寸主要集中在 25~55 μm。随着温度的升高，大尺寸晶粒分布逐渐增



(a) 435 ℃ (b) 460 ℃

(c) 485 ℃ (d) 510 ℃

图 4 不同温度下保温 40 min 时的 $AlMgLi_{0.5}Zn_{0.5}Cu_{0.2}$ 轻质高熵合金半固态组织

Fig.4 Semi-solid microstructures of the $AlMgLi_{0.5}Zn_{0.5}Cu_{0.2}$ light-weight high entropy alloy at different holding temperatures for 40 min

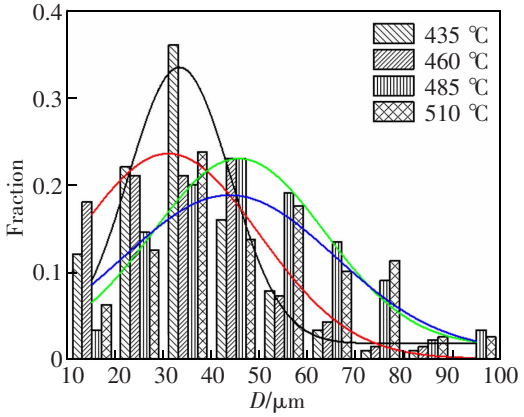


图 5 $AlMgLi_{0.5}Zn_{0.5}Cu_{0.2}$ 轻质高熵合金合金在不同温度下保温 40 min 晶粒尺寸分布图

Fig.5 Grain size distribution of the $AlMgLi_{0.5}Zn_{0.5}Cu_{0.2}$ light-weight high entropy alloy held at different temperatures for 40 min

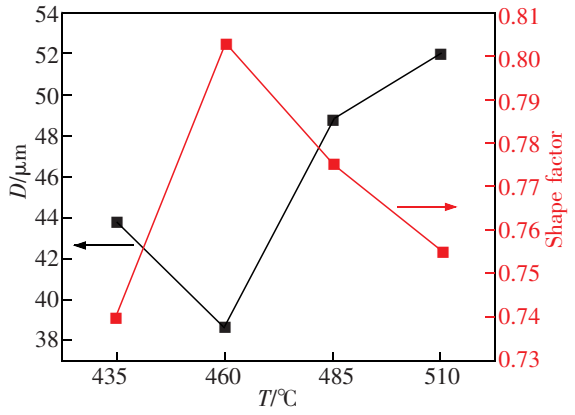


图 6 $AlMgLi_{0.5}Zn_{0.5}Cu_{0.2}$ 轻质高熵合金在不同温度下保温 40 min 的平均晶粒尺寸及形状因子

Fig.6 Average grain size and shape factor of the $AlMgLi_{0.5}Zn_{0.5}Cu_{0.2}$ light-weight high entropy alloy held at different temperatures for 40 min

多,在 435 ℃时保温 40 min,晶粒尺寸的主要分布在 15~45 μm,当温度为 510 ℃时,晶粒尺寸主要分布在 35~75 μm。

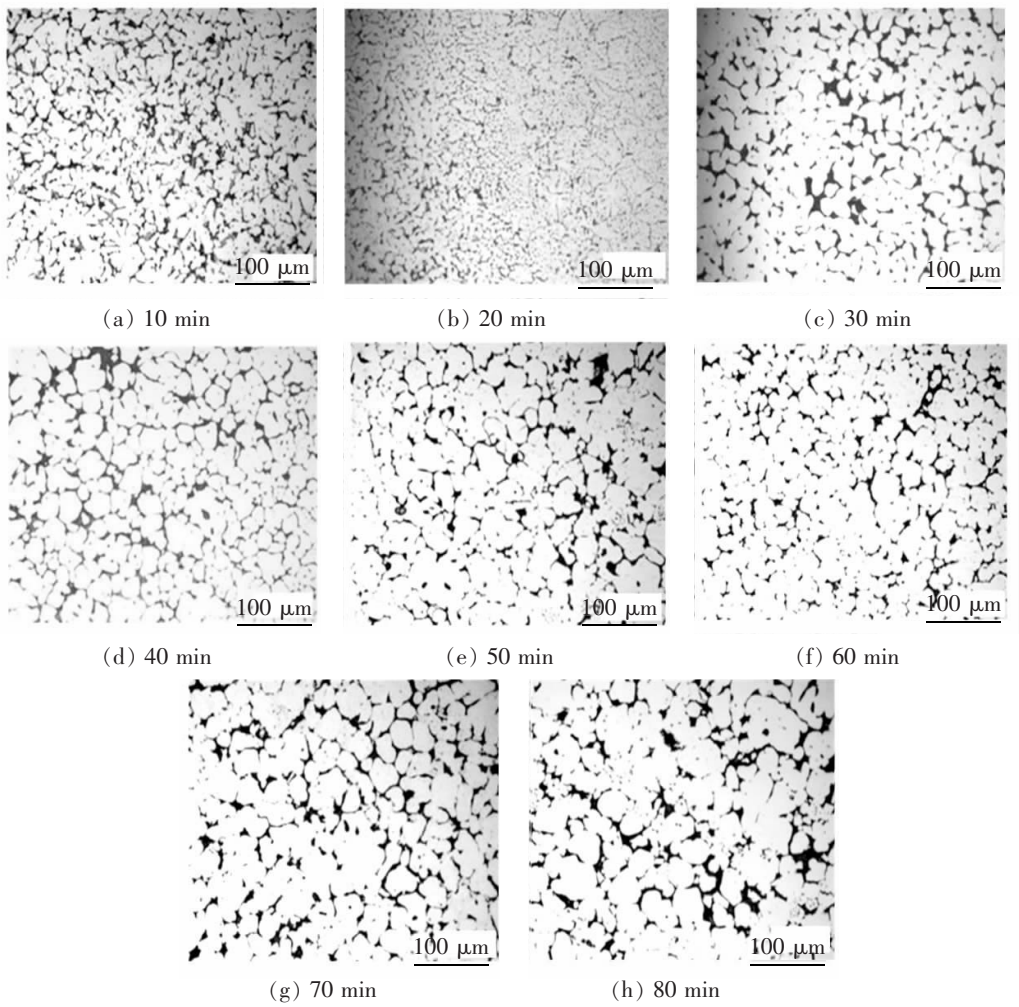
图 6 为 $AlMgLi_{0.5}Zn_{0.5}Cu_{0.2}$ 轻质高熵合金不同温度下保温 40 min 的平均晶粒尺寸及形状因子。由图 6 可以发现,FCC 相平均晶粒尺寸随温度的升高先减小后增大, 在 460 ℃时其尺寸最小约为 38 μm;随着温度升高,在 Ostwald 熟化作用下[15],颗粒发生合并与长大,其颗粒的平均尺寸增加,当温度升高到 510 ℃时,晶粒尺寸达 50 μm。形状因子随温度的升高先增大后减小,当温度从 435 ℃升高到 460 ℃时,形状因子增加到最大值 0.803,接近于理想值 1。这是因为晶界中液相流动促进晶粒球化,圆整度提高,但当温度继续升高时,小尺寸晶粒发生熔化,大

尺寸晶粒合并长大，圆整度变差。说明 460 ℃保温 40 min，获得的半固态组织较理想[16]。

2.3.2　保温时间对半固态组织的影响

图 7 为保温温度为 460 ℃时不同保温时间下的 $AlMgLi_{05}Zn_{05}Cu_{02}$ 轻质高熵半固态组织。由图 7 可以看出，在半固态等温热处理过程中，存在固相颗粒的分离与合并两个过程。这是由局部能量起伏造成的。在 40 min 以前，晶粒分离占主导，40~60 min 半固态组织基本保持不变，到 60 min 之后晶粒合并开始占主导。当保温 10 min 时，晶界及枝晶臂的间隙处有大量共晶组织，此时低熔点共晶组织几乎未发生熔化(图 7(a))。保温 20 min 时，由于保温时间延长，晶界处共晶组织开始熔化，促进 FCC 相分离，形成不规则的块状晶粒[17](图 7(b))。保温 30 min 时，共晶组织熔化完毕，共晶体消失，晶粒之间液相增多，此时有球化组织出现，但球化效果不明显(图 7(c))。当保温时间继续延长到 40~60 min 时，晶粒与晶粒之间逐渐分离，固相颗粒趋于圆整，大小趋于均匀，同时在颗粒内部开始出现小液池(图 7(d)~图 7(f))。当保温 70 min 时，晶粒开始长大，尺寸相近且距离较近的颗粒之间发生合并，出现大晶粒吞并小晶粒的现象，晶粒圆整度变差(图 7(g))。保温时间为 80 min 时(图 7(h))，组织中小晶粒数目减少，颗粒的平均尺寸继续增大，这是由于保温时间长，小尺寸晶粒被熔解，大尺寸晶粒在 Ostwald 熟化机制作用下长大造成的。

图8 为 $AlMgLi_{05}Zn_{05}Cu_{02}$ 轻质高熵合金在 460 ℃下保温不同时间时，FCC 相的晶粒尺寸分布图。从图 8 可以看出，固相颗粒尺寸随着保温时间的延长不断增大，保温时间为 10 min 时，晶粒尺寸为 15~50 μm，当保温时间延长到 80 min 后，晶粒尺寸增长到 35~95 μm。



(a) 10 min　(b) 20 min　(c) 30 min

(d) 40 min　(e) 50 min　(f) 60 min

(g) 70 min　(h) 80 min

图 7　$AlMgLi_{0.5}Zn_{0.5}Cu_{0.2}$ 轻质高熵合金在 460 ℃保温不同时间的组织

Fig.7　Microstructures of the $AlMgLi_{0.5}Zn_{0.5}Cu_{0.2}$ light-weight high entropy alloy held at 460 ℃ for different time

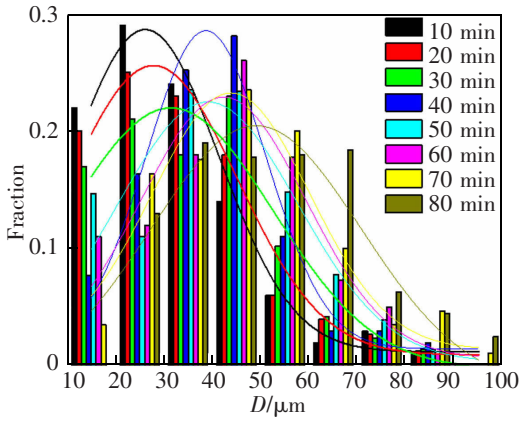


图 8 $AlMgLi_{0.5}Zn_{0.5}Cu_{0.2}$ 轻质高熵合金合金在 460 ℃保温不同时间晶粒尺寸分布

Fig.8 Grain size distribution of the $AlMgLi_{0.5}Zn_{0.5}Cu_{0.2}$ light-weight high entropy alloy held at 460 ℃ for different time

图 9 为 $AlMgLi_{05}Zn_{05}Cu_{02}$ 轻质高熵合金在 460 ℃下保温不同时间的平均晶粒尺寸及形状因子。由图 9 可以看出，随着温度的升高，晶粒尺寸逐渐增大。在 40~60 min 时，晶粒尺寸增长幅度较 30 min 前小，此时晶粒平均尺寸约为 40 μm。在 60 min 时，形状因子达到最大值为 0.82，说明晶粒的圆整度最好，获得的半固态组织较为理想。当保温时间超过 60 min 后，晶粒尺寸明显增大，形状因子出现上下波动，这是因为此时晶粒进入合并与长大过程，晶粒形状在不断的发生改变[18]。

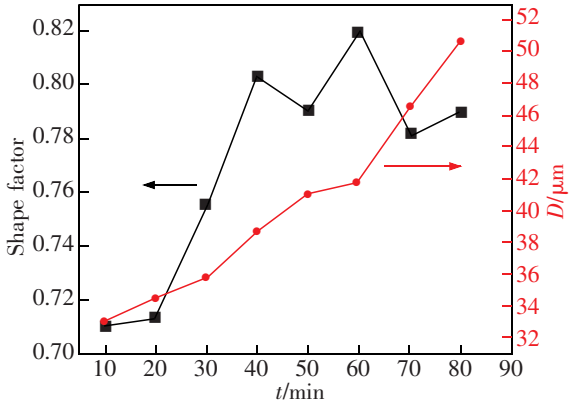


图 9 $AlMgLi_{0.5}Zn_{0.5}Cu_{0.2}$ 轻质高熵合金 460 ℃保温不同时间的平均晶粒尺寸及形状因子

Fig.9 Average grain size and shape factor of the $AlMgLi_{0.5}Zn_{0.5}Cu_{0.2}$ light-weight high entropy alloy held at 460 ℃ for different time

在半固态等温处理过程中，根据 LSW 理论，晶粒生长动力学可用下式描述[19]

$$d_t^3 - d_0^3 = kt \tag{3}$$

式中：t 为保温时间，s；d_t 为在 t 时刻的平均颗粒尺寸，μm；d_0 为颗粒的原始尺寸，μm；k 为粗化系数，$\mu m^3/s$。

根据式(3)，得出不同合金 d_t^3 与保温时间 t 的关系如图 10 所示。由图 10 发现，$AlMgLi_{0.5}Zn_{0.5}Cu_{0.2}$ 轻质高熵合金在 460 ℃下保温 10~80 min 的固相颗粒合并长大过程较好地符合 Ostwald 熟化机制[22]，其粗化系数 k 值为 20.68 $\mu m^3/s$，与常见的 FeCoCrNiMn 高熵合金接近。通过与图 10(a)对比发现，$AlMgLi_{0.5}Zn_{0.5}Cu_{0.2}$ 轻质高熵合金的粗化系数远低于传统的铝合金、镁合金。这与高熵合金的迟滞扩散效应有关，高熵合金由于缺乏主扩散元素以及各组元之间的协同扩散，而导致了晶粒的缓慢生长。

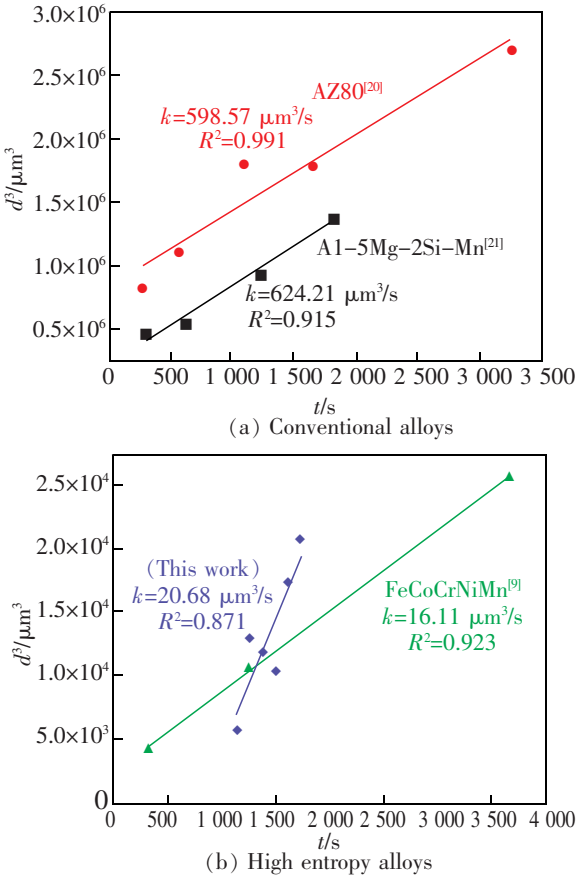


图 10 不同合金与保温时间 t 关系图

Fig.10 Relationship of different alloys between and holding time t

2.4 半固态组织 SEM 分析

为了进一步确定 $AlMgLi_{0.5}Zn_{0.5}Cu_{0.2}$ 轻质高熵合金半固态组织的元素分布，取 460 ℃保温 60 min 的试样进行 SEM 分析，如图 11 所示。从图 11 中可以看出，FCC 相组织呈近球状。合金中 Mg 元素同铸态一样主要分布在晶界中，而 Al，Cu 元素主要分布在

晶内，Zn 元素分布比较均匀。与图 1 的铸态组织相比，晶界的形貌发生了明显变化，条状组织消失，说明在等温热处理过程中，共晶组织发生熔化，这将促进 FCC 相球化[23]。

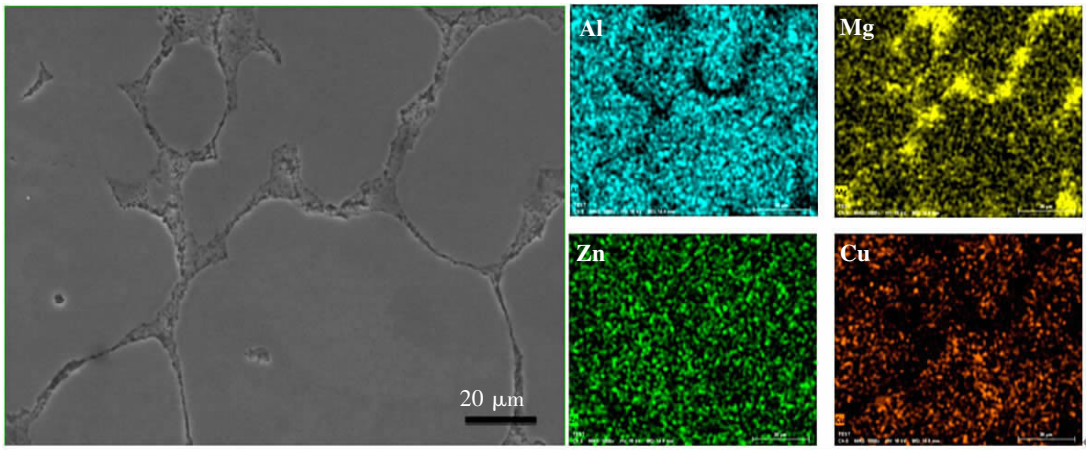


图 11　$AlMgLi_{0.5}Zn_{0.5}Cu_{0.2}$ 轻质高熵合金在 460 ℃保温 60 min 元素分布

Fig.11　Element distribution of the $AlMgLi_{0.5}Zn_{0.5}Cu_{0.2}$ light-weight high entropy alloy held at 460 ℃ for 60 min

2.5　半固态组织演变机理

由图 4 和图 7 发现，在等温热处理过程中，$AlMgLi_{0.5}Zn_{0.5}Cu_{0.2}$ 轻质高熵合金半固态非枝晶组织的演变主要经过了以下几个过程：① 组织分离过程。在保温初期，溶质浓度梯度及能量起伏不断变化，共晶组织不断发生熔解，但由于此时温度较低或时间较短，导致液相率低，枝晶熔解不充分，形成了块状的颗粒；② 球化过程。随着保温温度或时间的不断增加，固液界面张力的存在以及液相诱导 FCC 相球化，使得分离后的块状颗粒逐渐趋于球状，并且圆整度逐渐变好，此时液相和固相达到一个平衡。球化过程由不同曲率导致的平衡熔点差异驱动，固相颗粒的曲率与合金平衡熔点之间的关系为[24]

$$\Delta T_r = \frac{2\sigma T_m V_s \gamma}{\Delta H_m} \tag{4}$$

式中：ΔT_r 为固相曲率变化引起的合金平衡熔点的变化，K；σ 为固液界面张力，N/m；T_m 为固液界面为平界面时的熔点，K；V_s 为固相的摩尔体积，L/mol；γ 为固液界面的曲率；ΔH_m 为液固转变时的摩尔焓值，kJ/mol。

根据式(4)可知，曲率越大，则 ΔT_r 越大，平衡熔点的温度越低。这导致固相颗粒弯曲处或边角处曲率大熔点低，将熔化而变成球状。③ 颗粒合并与长大过程。当温度升高或时间延长时，FCC 相颗粒会自发长大大。这主要是在 Ostwald 熟化作用下，不同曲率半径的颗粒之间会形成扩散偶，大的晶粒为了降低表面能向小晶粒扩散，此时小的晶粒逐渐熔化或被吞并，大晶粒聚集长大。

4　结论

1）在460℃保温 60 min 时，半固态 $AlMgLi_{0.5}Zn_{0.5}Cu_{0.2}$ 轻质高熵合金的组织最佳，其平均晶粒尺寸约为 41 μm，圆整度为 0.82。

2）在等温热处理过程中，由于高熵合金的迟滞扩散效应，$AlMgLi_{0.5}Zn_{0.5}Cu_{0.2}$ 轻质高熵合金的粗化率 K=20.68 $\mu m^3/s$，远低于传统合金的粗化速率。

3）$AlMgLi_{0.5}Zn_{0.5}Cu_{0.2}$ 轻质高熵合金半固态非枝晶组织的演变经过了 3 个过程：组织分离、球化、合并长大。

参考文献：

[1] CHEN Q S，LU Y P，DONG Y，et al. Effect of minor baddition on microstructure and properties of AlCoCrFeNi multi-component alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China，2015，25(9)：2958-2964.

[2] 赵明娟，薛林威，赵火平，等. FeCoCrNiAl/Al_2O_3 金属陶瓷坯体凝胶注模研究[J]. 华东交通大学学报，2021，38(3)：82-88.
ZHAO M J，XUE L W，ZHAO H P，et al. Gel injection，olding of FeCoCrNiAl/Al_2O_3 cermet body[J]. Journal of East China Jiaotong University，2021，38(3)：82-88.

[3] 黄晓锋，郭峰，张玉，等. 等温热处理对 Mg-7Zn-0.3V 合金半固态组织演变的影响[J]. 中国有色金属学报，2018，28(8)：1516-1522.
HUANG X F，GUO F，ZHANG Y，et al. Effects of isothermal heat treatment on semi-solid microstructural evolution of Mg-7Zn-0.3V alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals，2018，28(8)：1516-1522.

[4] LI R，GAO J，FAN K. Study to microstructure and mechani-

cal properties of Mg containing high entropy alloys[J]. Materials Science Forum,2010,650:265-271.
[5] HEO M,JIN C K,ROH J S,et al. Investigating the microstructures of A356 semi-solids based on electromagnetic stirring currents and crucible materials[J]. Journal of Mechanical Science and Technology,2020,34:3807-3813.
[6] JIANG J F ,ZHANG Y H,LIU Y Z,et al. Research on Al-Si7Mg alloy semi-solid billet fabricated by RAP[J]. Acta Metallurgica Sinica,2021,57(4):703-716.
[7] 潘帅,李强,于宝义,等. 镁合金半固态研究进展[J]. 稀有金属材料与工程,2019,48(7):2379-2385.
PAN S,LI Q,YU B Y,et al. Research progress of Mg alloy semisolid forming[J]. Rare Metal Materials and Engineering,2019,48(7):2379-2385.
[8] WANG L,XIONG J,LIU J,et al. Effect of microstructures and mechanical properties of large deformation high entropy alloy CoCrCuFeNi in semi-solid isothermal heat treatment [J]. Mechanical Engineering Science,2019,1(2):33-39.
[9] ZHANG L J,FAN J T,LIU D J,et al. The microstructural evolution and hardness of the equiatomic CoCrCuFeNi high-entropy alloy in the semi-solid state[J]. Journal of Alloys & Compounds,2018,745:75-83.
[10] ROGAL L. Semi-solid processing of the CoCrCuFeNi high entropy alloy[J]. Materials & Design,2017,119:406-416.
[11] 刘晓波,杨淼,赵宇光,等. 等温时间对半固态挤压 Mg_2Si/Al复合材料组织和力学性能的影响[J]. 金属热处理,2019,44(8):158-165.
LIU X B,YANG M,ZHAO Y G,et al. Effect of isothermal time on microstructure and mechanical properties of semi-solid extruded Mg_2Si/Al composites[J]. Heat Treatment of Metals,2019,44(8):158-165.
[12] 段兴旺,李鹏,李凯. 等温处理对挤压态 AZ80A 镁合金半固态组织的影响[J]. 金属热处理,2021,46(10):39-44.
DUAN X W,LI P,LI K. Effect of isothermal treatment on semi-solid microstructure of extruded AZ80A magnesium alloy[J]. Heat Treatment of Metals,2021,46(10):39-44.
[13] 赵中魁,周铁涛,刘培英,等. 高锌 Al-Zn-Mg-Cu-Li 合金晶界相的研究[J]. 特种铸造及有色合金,2003(5):12-14.
ZHAO Z K,ZHOU T T,LIU P Y,et al. Phase in grain boundary of Al-Zn-Mg-Cu-Li alloy containing high Zn[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys,2003(5):12-14.
[14] CHU C L,WU X Q,QIU S C,et al. Microstructure and Gd-rich phase evolution of as-cast AZ31-xGd magnesium alloys during semi-solid isothermal heat treatment[J]. Journal of Central South University,2021,28(1):1-15.
[15] KANG M K,KIM D Y,NONG M H. Ostwald ripening kinetics of angular grains dispersed in a liquid phase by 2-D nucleation and abnormal grain growth[J]. Journal of the European Ceramic Society,2002,22(5):603-612.
[16] 黄晓锋,马亚杰,张玉等. 等温热处理对 ZC61-0.3Cr 镁合金半固态组织演变的影响[J]. 中国有色金属学报,2018,28(10):1962-1971.
HUANG X F,MA Y J,ZHANG Y,et al. Effects of isothermal heat treatment on microstructural evolution ZC61-0.3Cr magnesium alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals,2018,28(10):1962-1971.
[17] LI X L,CHEN S X,KANG M,et al. Effect of Holding time on the microstructure of Mg-3Si-1.7Sn alloy during semisolid isothermal heat treatment[J]. Advanced Materials Research,2013,787:231-235.
[18] 胡勇,王达豪. 斜板法制备半固态 Mg_2Si/A356 复合材料的技术研究[J]. 热加工工艺,2021,50(12):80-83.
HU Y,WANG D H. Study on preparation technique of semi-solid Mg_2Si/A356 composites by sloping-plate method [J]. Hot Working Technology,2021,50(12):80-83.
[19] ATKINSON H V,LIU D. Microstructural coarsening of semi-solid aluminum alloys[J]. Materials Science & Engineering A,2008,496(1/2):439-446.
[20] 孙兵,张英波,权高峰,等. AZ80 镁合金半固态等温处理过程中的组织演变[J]. 稀有金属材料与工程,2016,45(2):404-408.
SUN B,ZHANG Y B,QUAN G F,et al. Microstructures evolution of AZ80 magnesium alloy in semi-solid isothermal treatment process[J]. Rare Metal Materials and Engineering,2016,45(2):404-408.
[21] 刘洋,杨光昱,张晓丹,等. Al-5Mg-2Si-Mn 铝合金压铸坯锭半固态等温组织演变[J]. 稀有金属材料与工程,2019(9):2972-2980.
LIU Y,YANG G Y,ZHANG X D,et al. Semi-solid isothermal heat treatment microstructure evolution of sie-casting Al-5Mg-2Si-Mn alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering,2019(9):2972-2980.
[22] 尹健,卢春辉,谢世坤等. 等温热处理对 Mg-Gd-Zn-Zr 合金半固态组织的影响[J]. 金属热处理,2020,45(2):175-181.
YIN J,LU C H,XIE S K,et al. Effect of isothermal heat treatment on semi-solid microstructure of Mg-Gd-Zn-Zr alloy[J]. Heat Treatment of Metals,2020,45(2):175-181.
[23] 黄晓锋,魏浪浪,杨剑桥等. 半固态等温热处理对 Mg-7Zn-1Cu-0.3V 镁合金非枝晶组织的影响[J]. 材料导报,2020,34(14):14116-14121.
HUANG X F,WEI L L,YANG J Q,et al. Effect of semi-solid isothermal heat treatment on non-dendritic structure of Mg-7Zn-1Cu-0.3V magnesium alloy[J]. Materials Reports,2020,34(14):14116-14121.
[24] HU Y,RAO L,NI X W. Effect of isothermal heat treatment on semi-solid microstructure of AZ91D magnesium alloy containing rare earth Gd[J]. China Foundry,2015,12(1):20-25.



第一作者:饶丽(1982—),女,讲师,硕士,研究方向为轻合金及其复合材料。E-mail:286401853@qq.com。



通信作者:胡勇(1982—),男,教授,博士,硕士研究生导师,研究方向为轻合金及其复合材料。E-mail:huyong@ecjtu.edu.cn。

(责任编辑:刘棉玲)