

# 热处理对铸态 Mg-Sn-Al-Zn-Si 合金组织和性能的影响<sup>①</sup>

马冬, 张建新

(河南理工大学 材料科学与工程学院, 河南 焦作 454000)

**摘要:** 研究了不同热处理制度对铸态 Mg-5Sn-1.5Al-1Zn-1Si 合金组织性能的影响。结果表明, 固溶处理时, 随着固溶时间延长, 合金枝晶逐渐溶解、晶粒逐步球化, 适宜的固溶处理制度为 510 °C × 8 h, 此时合金组织分布均匀, 析出少量细小的二次颗粒相, 延伸率较高; 合金适宜的时效处理制度为 200 °C × 16 h, 此时偏聚在晶界处的合金相析出迁移, 晶界清晰, 组织均匀度高, 合金屈服强度达到 136.3 MPa, 较铸态提升 16.5%。510 °C 固溶 8 h+200 °C 时效 16 h 处理后, 组织均匀度和弥散程度进一步提升, 抗拉强度和硬度分别达到 178.2 MPa 和 59.6HB, 相对铸态合金分别提升了 21.6% 和 23.4%。

**关键词:** 镁合金; 固溶处理; 时效处理; Mg-Sn-Al-Zn-Si 合金; 热处理

中图分类号: TG156

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2023.05.032

文章编号: 0253-6099(2023)05-0140-04

## Effect of Heat Treatment on Structure and Properties of Cast Mg-Sn-Al-Zn-Si Alloys

MA Dong, ZHANG Jianxin

(Institute of Materials Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, Henan, China)

**Abstract:** The effects of different heat treatment regimes on the microstructure and properties of as-cast Mg-5Sn-1.5Al-1Zn-1Si alloy were investigated. The results indicate that during the dissolution of solid, as the dissolution time is prolonged, the alloy dendrites gradually dissolve and the grains gradually spheroidize. It is shown that the appropriate dissolution parameter is 510 °C × 8 h, and the alloy after such treatment has an evenly distributed microstructure, with a trace of precipitation of fine second-phase particles from the matrix, and thus possesses a high elongation rate. The appropriate aging parameter for the alloy is 200 °C × 16 h, and due to precipitation and migration of the phases segregating at the grain boundary, the alloy after aging treatment possesses clear grain boundaries and a microstructure with high uniformity, and also has the yield strength up to 136.3 MPa, which is higher than that of the as-cast alloy by 16.5%. After a treatment including 8 hours of solid dissolution at 510 °C and 16 hours of aging at 200 °C, the alloy has its uniformity and dispersion of the microstructure further improved, and its tensile strength and hardness reach to 178.2 MPa and 59.6HB, respectively, up by 21.6% and 23.4% compared to the as-cast alloy.

**Key words:** magnesium alloy; solid dissolution; aging treatment; Mg-Sn-Al-Zn-Si alloy; heat treatment

镁合金是工程应用中最轻的金属结构材料,且可以回收利用,被誉为 21 世纪的“绿色工程材料”。镁合金因其优良的阻尼能力、高比强度和良好的浇铸性能等,在汽车制造、电子通信、航空航天等行业得到广泛应用<sup>[1-5]</sup>。实际生产中,铸态镁合金、变形镁合金等均需通过热处理工艺来满足特定应用要求,热处理能

细化合金组织,调整和改善第二相的结构、分布等,显著提升镁合金的强度、韧性和其他性能<sup>[6-9]</sup>。Mg-Sn-Al-Zn-Si 合金中主加元素 Sn 在 Mg 中的固溶度随温度变化较大,采用固溶、时效处理能显著提升该合金的性能。本文以 Mg-5Sn-1.5Al-1Zn-1Si 合金为研究对象,探讨了固溶、时效和固溶+时效态合金的组织 and 力学

① 收稿日期: 2023-04-29

基金项目: 国家自然科学基金(52103290)

作者简介: 马冬(1996—),男,河南信阳人,硕士研究生,主要从事耐热镁合金研究。

通信作者: 张建新(1972—),男,河南商丘人,博士,副教授,主要从事高性能有色金属材料的开发与应用研究。

性能,以期得到 Mg-Sn-M 系高性能镁合金,并为该系合金的研发提供理论依据和技术支持。

## 1 实验材料与方法

在井式电阻炉中熔炼所需合金试样,主要原材料为纯 Mg 锭(99.9%)、纯 Sn 锭(99.9%)、纯 Al 锭(99.9%)、纯 Zn 锭(99.9%),Si 以 Mg-10Si 中间合金的形式加入。在依次加入原材料后开始熔炼,熔炼过程中使用碳棒持续均匀搅拌熔体,并通入  $\text{CO}_2 + 0.1\% \text{SF}_6$  的混合气体加以保护。熔炼完成后将熔体倒入  $\Phi 20 \text{ mm}$  的铁制模具中获得铸锭试样。用电火花线切割机将铸锭切割成大小合适的方形金相试样,然后对试样进行热处理,热处理后的试样经打磨抛光后,用 4% 的硝酸酒精溶液腐蚀。固溶处理将试样加热到  $510 \text{ }^\circ\text{C}$ ,分别保温 4 h、8 h、12 h,然后在水中淬火冷却;时效处理将试样重新加热到  $200 \text{ }^\circ\text{C}$ ,再分别保温 8 h、16 h、24 h,随后在空气中冷却至室温;固溶+时效处理选择  $510 \text{ }^\circ\text{C} \times$  最佳处理时间+ $200 \text{ }^\circ\text{C} \times$  最佳处理时间。

对铸态、固溶态、时效态及固溶+时效态合金试样进行显微组织观察与分析、拉伸性能和硬度等测试。用 MA500GBD 金相显微镜和 JSM-6700F 型扫描电镜观察合金的显微组织。按照 GB/T 228.1—2021,采用 CMT5105-100KN 电子万能试验机对试样进行拉伸测试。采用 HBRVD-187.5 数显布洛维硬度计检测合金硬度。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 组织观察与分析

图 1 为铸态 Mg-5Sn-1.5Al-1Zn-1Si 合金的显微组织。由图 1 可知,合金组织由白色  $\alpha\text{-Mg}$ 、粗大的枝晶和其他化合物组成。根据 Mg-Si 二元合金相图<sup>[10]</sup>,合金中 Si 含量小于 1.34% 时,会产生细小的共晶组织,显微组织中汉字状组织为共晶  $\text{Mg}_2\text{Si}$  相,在合金组织中存在量较多且多偏聚在晶界处。合金晶粒分布不均匀,大小不一,平均尺寸约  $30 \mu\text{m}$ 。枝晶组织不连续,呈弥散分布,间距较大,一些枝晶中还有黑色析出相。铸态 Mg-5Sn-1.5Al-1Zn-1Si 合金中的  $\text{Mg}_2\text{Si}$  枝晶形貌如图 2 所示。

图 3 为固溶态合金显微组织。由图 3 可知,随着保温时间增加,合金组织晶粒球形化趋势逐步明显,达到过饱和和固溶时,合金组织析出少量细小的第二相颗粒。固溶 4 h 时,枝晶组织开始溶解,少量晶粒呈现出不规则球形,晶界不清晰,偏聚在晶界处的合金相开始减少,多往晶内聚集靠拢;固溶 8 h 时,枝晶组织完全

溶解于镁基体,形成过饱和固溶体,晶粒得到进一步球化,并析出少量细小的二次颗粒相,与铸态相比,粗大形状的合金相已彻底改变,组织呈现均匀分布,晶界较清晰;固溶 12 h 时,组织均匀度下降,析出的颗粒相虽然较弥散,但尺寸大小不一,大量颗粒相粒径在  $8 \mu\text{m}$

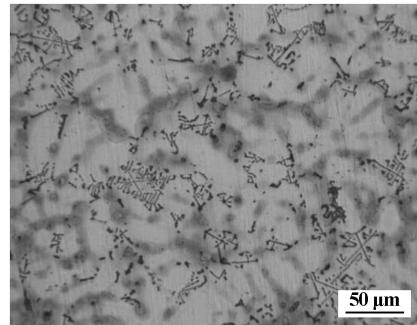


图 1 铸态 Mg-5Sn-1.5Al-1Zn-1Si 合金显微组织

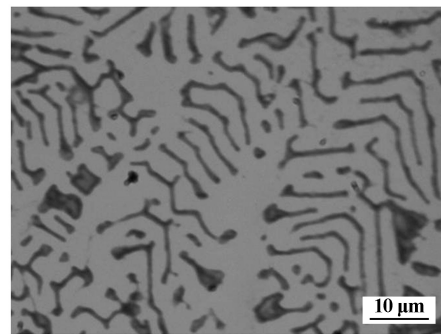
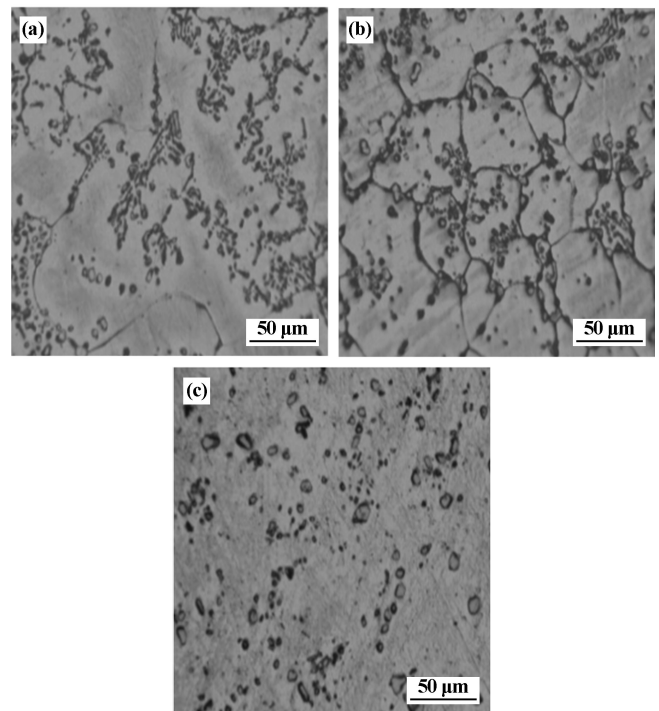


图 2 铸态 Mg-5Sn-1.5Al-1Zn-1Si 合金中的  $\text{Mg}_2\text{Si}$  枝晶形貌

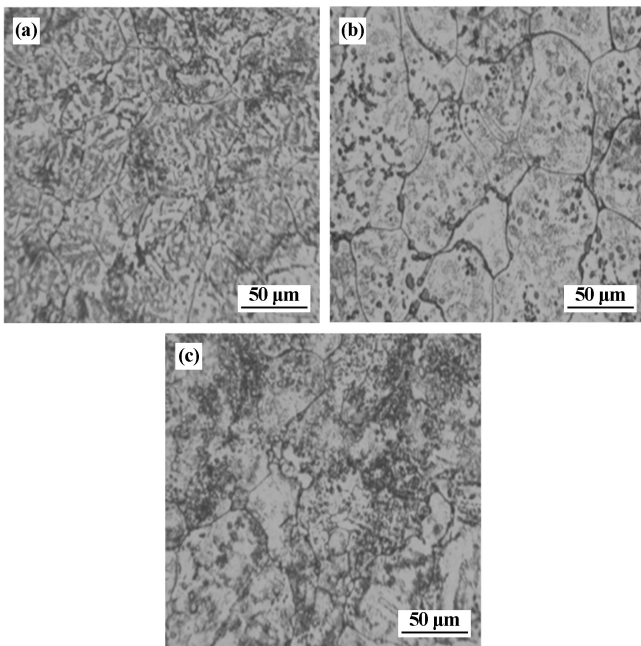


(a) 4 h; (b) 8 h; (c) 12 h

图 3 不同保温时间下固溶态合金显微组织

上下,这是固溶时间过长,颗粒相重新聚集长大,进而导致合金组织均匀度降低。由此可知,随着固溶时间增加,合金经历完全固溶、过饱和固溶和晶粒析出、析出相重新聚集长大3个阶段。综合分析,铸态 Mg-5Sn-1.5Al-1Zn-1Si 合金适宜的固溶处理制度为  $510\text{ }^{\circ}\text{C} \times 8\text{ h}$ 。

图4为时效态合金的显微组织。由图4可知,时效8 h时,粗大的枝晶变为细小的树枝晶,只有少量晶粒发生球化,晶粒尺寸变化不大,不连续的颗粒相开始从组织中析出,偏聚在晶界处的合金相开始迁移,晶界模糊;时效16 h时,组织形貌已完全改变,晶界处的偏聚合金相往晶内迁移,组织内部有大量第二颗粒相析出,粒径尺寸较均匀,晶界较清晰,组织均匀度得到有效提高;时效24 h时,组织内部析出的第二颗粒相进一步增加,其分布方式变为网状结构,大量二次相颗粒靠拢聚集,晶界也重新出现偏聚合金相,组织均匀度显著降低。由此可知,随着时效时间延长,合金组织析出方式经历了非连续性的不完全析出、连续性的完全析出、过时效的网状析出。综上所述,铸态 Mg-5Sn-1.5Al-1Zn-1Si 合金适宜的时效处理制度为  $200\text{ }^{\circ}\text{C} \times 16\text{ h}$ 。



(a) 8 h; (b) 16 h; (c) 24 h

图4 不同保温时间下时效态合金显微组织

图5为固溶+时效( $510\text{ }^{\circ}\text{C} \times 8\text{ h} + 200\text{ }^{\circ}\text{C} \times 16\text{ h}$ )态合金的显微组织。晶粒在固溶过程中先发生球化,随后在时效过程中组织内部析出连续分布的密集二次相颗粒,尺寸较细小,弥散分布。与仅固溶处理或仅时效处理的合金组织相比,固溶+时效后合金晶界更平整清晰,均匀度更高。热稳定性高的硬脆  $\text{Mg}_2\text{Sn}$  等析出

相能阻止基面滑移,显著提升合金强度。

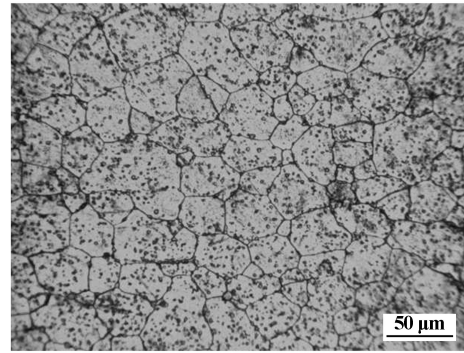


图5 固溶+时效态合金显微组织

## 2.2 硬度测试及分析

图6为保温时间对不同状态合金硬度的影响。由图6可知,合金经固溶处理后,其硬度值要比相应的铸态合金低,且随着保温时间延长,合金硬度逐渐降低。原因是随固溶时间增加,偏聚在晶界处的粗大硬脆合金相( $\text{Mg}_2\text{Si}$ 、 $\text{Mg}_2\text{Sn}$ 等)固溶到 $\alpha\text{-Mg}$ 基体中,在形成过饱和固溶体后,析出的细小且弥散分布的二次颗粒相无法有效地阻碍晶粒长大,导致合金硬度下降。固溶处理前期,硬度下降速率较大,之后下降速率减小,这是因为前期阶段偏聚在晶界处的粗大硬脆合金相溶解较快,快速固溶到镁基体中。

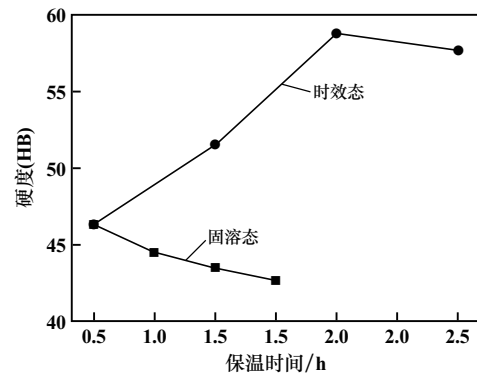


图6 保温时间对不同状态合金硬度的影响

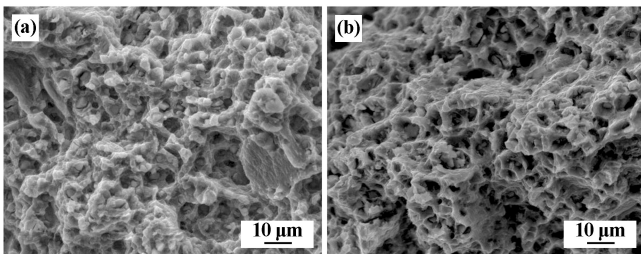
经时效处理后,合金硬度比未经处理的铸态合金高,合金硬度随着保温时间延长先增大到峰值,后随之减小。因为随着保温时间增加,析出的强化相逐渐细化,这些析出相与镁基体的点阵数目和排列方式相差很大,它们四周发生畸变形成应力场,而且析出相多分布于位错线的滑移面上。位错前移时,位错线要克服应力场并强行切过析出相,致使位错移动困难,从而使硬度提升。继续延长保温时间,析出相靠拢聚集,长大粗化,位错运动变为位错线绕过析出相,位错开动容易,强化效果变弱,合金硬度下降。

### 2.3 力学性能分析

表1列出了 Mg-5Sn-1.5Al-1Zn-1Si 合金在不同状态下的力学性能。由表1可知,固溶处理(510 °C × 8 h)后,合金大部分力学性能得到明显提高,其中抗拉强度显著提升,延伸率达到峰值,为9.9%,屈服强度小幅度提升;硬度较铸态下降了9.5%,一些硬质强化相溶解到基体组织中,对硬度有一定影响。时效处理(200 °C × 16 h)后,合金力学性能呈上升状态,屈服强度达到136.3 MPa,相较于铸态合金,抗拉强度、硬度分别提升了11.6%、22.1%,延伸率提升了20.3%。固溶+时效处理(510 °C × 8 h+200 °C × 16 h)后,相对于铸态合金,抗拉强度、屈服强度、延伸率和硬度分别提升了21.6%、12.3%、27.0%和23.4%,此时合金具有更好的综合力学性能,断裂形貌已由铸态的准解理脆性断裂过渡到准解理韧性断裂,如图7所示。

表1 Mg-5Sn-1.5Al-1Zn-1Si 合金不同状态下的力学性能

状态	$\sigma_b$ /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	$\delta$ /%	HB
铸态	146.5	117.0	7.4	48.3
固溶态	167.8	124.2	9.9	43.7
时效态	163.5	136.3	8.9	59.0
固溶+时效态	178.2	131.4	9.4	59.6



(a) 脆性断裂; (b) 韧性断裂

图7 Mg-5Sn-1.5Al-1Zn-1Si 合金拉伸断口形貌

分析热处理后的合金组织可知,对合金固溶处理时,粗大的枝晶溶解,晶粒球化,大量的合金相溶解到基体中,形成过饱和固溶体,达到固溶强化,相较于铸态,合金抗拉强度、屈服强度和伸长率都有提升。

对合金时效处理时,是没有经过固溶阶段直接进行的,只有少量晶粒球化和低熔点相溶解,大部分合金相得到有效迁移,且组织中析出连续分布的二次颗粒相,相较于铸态合金,其力学性能全方位提升,抗拉强度达到峰值,原因是:一方面晶粒得到细化,平均尺寸细小,数量多,呈弥散分布,晶界清晰,总长度变大,位错运动需要更大的力才能从一个晶粒跨到另一个晶粒,产生细晶强化;另一方面,析出相为硬脆相,提升了

合金强度,且这些析出相也能阻碍位错运动。相对于固溶态,时效态合金延伸率有所下降,这是因为过时效时大量二次相偏聚,在晶界处呈网状分布,这些网状相与 $\alpha$ -Mg基体的结合力度下降,弱化效果明显,合金易断裂。

对合金固溶+时效处理时,第一阶段合金相溶解到基体中,形成过饱和固溶体;第二阶段合金组织析出大量二次颗粒相,析出相粒径细小、弥散分布,晶界平整清晰,组织均匀度高,此时合金具有更好的综合力学性能。

### 3 结 论

1) 铸态 Mg-5Sn-1.5Al-1Zn-1Si 合金固溶处理时,随着保温时间延长,合金组织中枝晶溶解,晶粒逐步球化,当固溶处理制度为510 °C × 8 h时,形成的过饱和固溶体经历脱溶过程,析出少量细小的二次颗粒相,组织分布均匀,合金固溶效果较佳。

2) 铸态 Mg-5Sn-1.5Al-1Zn-1Si 合金时效处理时,随着时效时间延长,合金中组织形貌发生改变,当时效处理制度为200 °C × 16 h时,偏聚在晶界处的合金相析出迁移,晶界清晰,组织均匀度有效提高,合金屈服强度达到最大值136.3 MPa,较铸态提升16.5%。

3) 铸态 Mg-5Sn-1.5Al-1Zn-1Si 合金在固溶+时效处理时,组织中分布有连续弥散分布的细小二次相颗粒,晶界更平整清晰,均匀度更高,合金抗拉强度和硬度达到峰值178.2 MPa和59.6 HB,分别较铸态合金提升了21.6%和23.4%。本合金适宜的热处理工艺为510 °C × 8 h+200 °C × 16 h。

### 参考文献:

- [1] 聂志诚,张欣,刘筱. 多向锻造变形和退火处理对AZ31镁合金微观组织和力学性能的影响[J]. 矿冶工程, 2021, 41(6): 194-197.
- [2] CHAI Y, SHAN L, JIANG B, et al. Ameliorating mechanical properties and reducing anisotropy of as-extruded Mg-1.0Sn-0.5Ca alloy via Al addition[J]. Progress in Natural Science: Materials International, 2021, 31(5): 722-730.
- [3] JIN S, MA X, WU R, et al. Effect of carbonate additive on the microstructure and corrosion resistance of plasma electrolytic oxidation coating on Mg-9Li-3Al alloy[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2022, 29(7): 1453-1463.
- [4] 李庆芬,吴远志,邓彬,等. 单道次大应变轧制对AZ31镁合金组织与耐腐蚀性能的影响[J]. 矿冶工程, 2019, 39(2): 125-127.
- [5] MA S, XING F, TAN, et al. Kinetic modeling of high-temperature oxidation of pure Mg[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2020, 8(3): 819-831.

(下转第148页)

- 力学性能的影响[J]. 热加工工艺, 2021, 50(22):149-152.
- [2] JIN Z Z, ZHA M, WANG S Q, et al. Alloying design and microstructural control strategies towards developing Mg alloys with enhanced ductility[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2022, 10(5):1191-1206.
- [3] 张二雨, 常峰. ZK60 镁合金时效热处理工艺研究[J]. 热加工工艺, 2018, 47(24):208-210.
- [4] Nataraj M V, Swaroop S. Deformation-induced phase transition and nanotwins in SS 304 steel during cryogenic laser shock peening without coating[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 19:2611-2622.
- [5] LUO A A, Sachdev A K, Apelian D. Alloy development and process innovations for light metals casting[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2022, 306:117606.
- [6] WANG J, ZHANG L, JIN P, et al. Microstructure evolution and constitutive relation establishment of extruded Mg-1Al-6Y alloy under high speed impact[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2022, 908:164540.
- [7] YE T, WU Y, LIU A, et al. Mechanical property and microstructure evolution of aged 6063 aluminum alloy under high strain rate deformation[J]. Vacuum, 2019, 159:37-44.
- [8] ZHANG F, LIU Z, YANG M, et al. Microscopic mechanism exploration and constitutive equation construction for compression characteristics of AZ31-TD magnesium alloy at high strain rate[J]. Materials Science and Engineering: A, 2020, 771:138571.
- [9] LI P, YUAN K, GUO W, et al. Dynamic compressive behavior of a single crystal nickel-base superalloy at ultra-high temperature: mechanism investigation with a modified electric synchronous SHPB technique[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 18:637-657.
- [10] Meyers M. Dynamic behavior of materials[M]. New York: Wiley, 1994.
- [11] Cho J H, Han S H, Jeong H T, et al. The effect of aging on mechanical properties and texture evolution of ZK60 alloys during warm compression[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 743:553-563.
- [12] LI Z, PENG Z, QIU Y, et al. Study on heat treatment to improve the microstructure and corrosion behavior of ZK60 magnesium alloy[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9(5):11201-11219.
- [13] TIAN L N, LIU L, HOU N, et al. Quantitative assessment of multi-scale second phase particles and their roles in the deformation response of ZK60 alloy[J]. Materials Today Communications, 2021, 26:101708.
- [14] LI C, YU Y D. The effect of solution heat treatments on the microstructure and hardness of ZK60 magnesium alloys prepared under low-frequency alternating magnetic fields[J]. Materials Science and Engineering: A, 2013, 559:22-28.
- [15] Malik A, Chaudry U M, Yan T, et al. Achieving higher dynamic mechanical response by adjusting texture through twinning in a ZK61 Mg alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2022, 902:163755.
- [16] ZHANG L. Thermo-mechanical characterization and dynamic failure of a CoCrFeNi high-entropy alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2022, 844:143166.
- [17] NIE J F. Precipitation and Hardening in Magnesium Alloys[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2012, 43(11):3891-3939.
- [18] YANG Y, WANG Z, JIANG L H. Evolution of precipitates in ZK60 magnesium alloy during high strain rate deformation[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 705:566-571.
- [19] HUA L, ZHOU P, SONG Y, et al. Characterization of strain rate sensitivity of 7075 aluminum alloy at different solution temperatures by novel kinetic models[J]. Materials Science and Engineering: B, 2022, 282:115751.
- 引用本文: 胡丽香, 杨扬. 高应变变速率载荷下 ZK60 镁合金的动态析出研究[J]. 矿冶工程, 2023, 43(5):144-148.

(上接第 143 页)

- [6] 刘明明, 李全安, 陈晓亚, 等. 热处理对 Mg-10Y-1Zn-0.5Zr 镁合金显微组织和力学性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2022, 43(6):34-41.
- [7] 张举, 胡小东, 赵红阳, 等. 热处理对镁合金第二相析出及性能的影响[J]. 辽宁科技大学学报, 2020, 43(5):332-337.
- [8] 张海艳, 龚志华, 李振亮, 等. 热处理对 Mg-Y-Gd-Nd-Zr 显微组织及力学性能的影响[J]. 内蒙古科技大学学报, 2021, 40(2):152-156.
- [9] 张玉, 李明, 杨文龙, 等. 热处理工艺对 Mg-6Zn-2.5Cu 镁合金显微组织和力学性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2020, 41(4):40-46.
- [10] 石章智, 张敏, 黄雪飞, 等. 可时效强化 Mg-Sn 基合金的研究进展[J]. 金属学报, 2019, 55(10):1231-1242.
- 引用本文: 马冬, 张建新. 热处理对铸态 Mg-Sn-Al-Zn-Si 合金组织和性能的影响[J]. 矿冶工程, 2023, 43(5):140-143.