

# 等温锻造温度对机械外壳用 Mg-8Al-1Zn-0.5Ca 镁合金组织与性能的影响

郭 伟<sup>1</sup>, 李 桐<sup>2</sup>

(1. 河南工业和信息化职业学院 机械工程系, 河南 焦作 454000; 2. 郑州大学 机械与动力工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:** 为了研究等温锻造温度对机械外壳用 Mg-8Al-1Zn-0.5Ca 镁合金组织与性能的影响, 选择 5 种等温锻造温度对合金试样进行锻造试验, 并进行了显微组织分析、耐腐蚀和耐磨损性能的测试与分析。结果发现: 随着等温锻造温度从 340 °C 增加至 420 °C, Mg-8Al-1Zn-0.5Ca 镁合金的平均晶粒尺寸先减小后增大、腐蚀电位先正移后负移、磨损体积先减小后增大, 合金的耐腐蚀和耐磨损性能先变好后变差。相较于等温锻造温度为 340 °C, 等温锻造温度为 400 °C 时的 Mg-8Al-1Zn-0.5Ca 镁合金的平均晶粒尺寸减小了 76.1%、腐蚀电位正移 141 mV、磨损体积减小了 66.2%。研究结果表明, Mg-8Al-1Zn-0.5Ca 镁合金的等温锻造温度优选为 400 °C。

**关键词:** 等温锻造温度; Mg-8Al-1Zn-0.5Ca 镁合金; 显微组织; 耐磨损性能; 耐腐蚀性能

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.10.003

**中图分类号:** TH164 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2024) 10-0015-06

## Influence of isothermal forging temperature on microstructure and properties of Mg-8Al-1Zn-0.5Ca magnesium alloy for mechanical shells

Guo Wei<sup>1</sup>, Li Tong<sup>2</sup>

(1. Department of Mechanical Engineering, Henan College of Industry & Information Technology, Jiaozuo 454000, China;

2. School of Mechanical and Power Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** In order to investigate the influence of isothermal forging temperature on the microstructure and properties of Mg-8Al-1Zn-0.5Ca magnesium alloy for mechanical shells, five kinds of isothermal forging temperatures were selected for forging tests on the alloy samples, and the microstructure analysis, and the test and analysis of corrosion resistance and wear resistance properties were conducted. The results show that as the isothermal forging temperature increases from 340 °C to 420 °C, the average grain size of Mg-8Al-1Zn-0.5Ca magnesium alloy first decreases and then increases, the corrosion potential shifts positively first and then negatively, the wear volume first decreases and then increases, and both the corrosion resistance and wear resistance properties first improve and then deteriorate. Compared with the isothermal forging temperature of 340 °C, the average grain size of Mg-8Al-1Zn-0.5Ca magnesium alloy decreases by 76.1%, the corrosion potential shifts positively by 141 mV, and the wear volume decreases by 66.2% at the isothermal forging temperature of 400 °C. The research results show that the optimal isothermal forging temperature for Mg-8Al-1Zn-0.5Ca magnesium alloy is 400 °C.

**Key words:** isothermal forging temperature; Mg-8Al-1Zn-0.5Ca magnesium alloy; microstructure; wear resistance property; corrosion resistance property

镁合金由于具有优异的电磁屏蔽性能、较高的比强度、较低的密度, 在机械外壳等领域有着广泛的应用前景。但是, 镁合金在抵抗腐蚀和磨损方面的能力还不是很理想, 这阻碍了镁合金大规模商业

化应用的进程<sup>[1-3]</sup>。许楠等<sup>[4]</sup>采用冷媒辅助搅拌摩擦处理的方法对 AZ31B 镁合金进行处理, 并研究了其显微组织演变及力学性能。熊奇等<sup>[5]</sup>研究和分析了 AZ31 镁合金管件电磁吸引式成形的动态特性。董含武等<sup>[6]</sup>分析和探索了预制锭无熔剂重熔对 ZM6 镁合金的组织与性能的影响。李俊杰等<sup>[7]</sup>研究和总结了不同压铸工艺对 AE44 镁合金的影响规律。安士忠等<sup>[8]</sup>分析了稀土镧对 Mg-7Al-2Zn 镁合金阳极材料腐蚀和电化学性能的影响。付广艳等<sup>[9]</sup>对不同工

收稿日期: 2024-06-22; 修订日期: 2024-09-25

基金项目: 河南省重点研发与推广专项项目 (202102310204)

作者简介: 郭 伟 (1982-), 男, 硕士, 副教授

E-mail: 61140911@qq.com

艺处理的 AZ91D 镁合金进行了耐腐蚀性能的测试与研究。柯静和郭林通<sup>[10]</sup>分析和探索了析出相对稀土镁合金腐蚀行为的影响。杨湘杰等<sup>[11]</sup>研究和分析了 Ti-Al 中间合金对 AZ91D 镁合金组织及腐蚀性能的影响规律。韦永毅等<sup>[12]</sup>对比研究了铸态和挤压态 AZ31 镁合金的摩擦学特性。上述研究从多种途径对镁合金的组织与性能进行了研究。

锻造是一种常见的变形和改性方法。张凯等<sup>[13]</sup>探索和分析了径锻 AZ61 镁合金退火后晶粒长大及组织演变的规律。孙忠玉和赵越顺<sup>[14]</sup>研究和分析了分步锻压对汽车用 AZ80 镁合金耐腐蚀及耐磨性能的影响规律。李旻昊等<sup>[15]</sup>采用有限元数值模拟对镁合金锻压-弯曲反复变形进行了研究,同时还进行了试验验证分析。王海彬等<sup>[16]</sup>研究了锻造温度对 ZK61M 镁合金显微组织和力学性能的影响。但是,目前关于等温锻造温度对镁合金组织、耐腐蚀和耐磨损性能影响的研究报道还很少。为此,本文以机械外壳用 Mg-8Al-1Zn-0.5Ca 镁合金为研究对象,探究和分析了等温锻造温度对 Mg-8Al-1Zn-0.5Ca 镁合金的显微组织、耐腐蚀和耐磨损性能的影响规律。

## 1 试验材料及方法

### 1.1 试验材料

试验材料为机械外壳用 Mg-8Al-1Zn-0.5Ca 镁合金,具体成分见表 1。试验材料的熔炼采用 HX-GP35 型高频感应熔炼炉,浇注前静置 25 min,冷却后去除表面氧化皮再在 MFLXD321-12 型马弗炉中进行均匀化处理,处理温度为 380 ℃、保温时间为 10 h,最后去除表面氧化物,得到直径为  $\Phi 200$  mm、高度为 150 mm 的圆柱型 Mg-8Al-1Zn-0.5Ca 镁合金坯料。将 Mg-8Al-1Zn-0.5Ca 镁合金坯料在 HLDS-1200 t 液压机上进行等温锻造试验。等温锻造成形的 Mg-8Al-1Zn-0.5Ca 镁合金机械壳体主要用于航空航天和国防军工领域起屏蔽作用,该镁合金机械壳体零件为圆角矩形壳体,长度为  $(420 \pm 1)$  mm、宽度为  $(180 \pm 1)$  mm、高度为  $(52 \pm 1)$  mm、壁厚为  $(10.5 \pm 0.2)$  mm、圆角半径为  $(2 \pm 0.2)$  mm。等温锻造的条件主要包括:模具与成形件处理为基本相同的温度,锻造时应变速率低。等温锻造的成功实施主要依赖于精确控制模具和坯料的温度,以及采用低应变速率进行锻造,这些条件共同确保了等温锻造能够加工出高质量、高精度的金属零件,同时

表 1 Mg-8Al-1Zn-0.5Ca 镁合金的化学成分(%,质量分数)

Al	Zn	Ca	Si	Fe	其他杂质元素	Mg
7.983	0.957	0.514	0.009	0.011	0.131	余量

减少材料浪费、降低生产成本<sup>[17]</sup>。图 1 为本试验等温锻造成形的 Mg-8Al-1Zn-0.5Ca 镁合金机械壳体的实物照片。其技术要求主要有:外观无裂纹、气泡、夹杂等缺陷,尺寸和形状满足产品要求,腐蚀电位不低于 -1.6 V、在要求试验条件下的磨损体积小于  $20 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$ 。其等温锻造的难点在于壳体尺寸(尤其是圆角半径)的精确成形以及微观组织的均匀细化,这主要取决于锻造工艺参数的优化及控制,尤其是等温锻造温度的优化及精确控制。

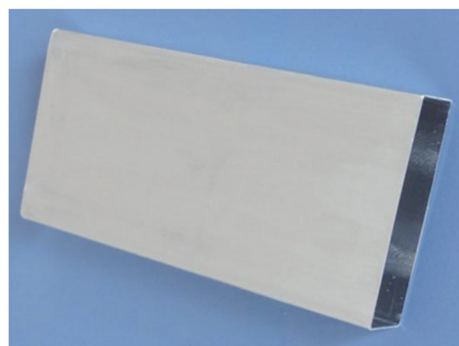


图 1 等温锻造成形的 Mg-8Al-1Zn-0.5Ca 镁合金机械壳体实物照片

Fig. 1 Physical picture of Mg-8Al-1Zn-0.5Ca magnesium alloy mechanical shell formed by isothermal forging

为了研究等温锻造温度对机械壳体用 Mg-8Al-1Zn-0.5Ca 镁合金显微组织、耐腐蚀和耐磨损性能的影响,在等温锻造温度试验过程中,保持锻造变形量为 40%、锻造速度为  $350 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 、模具预热温度为 280 ℃、保温时间为 20 min、保压时间为 2 min 等工艺参数不变,仅改变等温锻造温度,具体的锻造工艺参数见表 2。等温锻造的温度控制及选择结合了 Mg-8Al-1Zn-0.5Ca 镁合金物化性能的有关研究<sup>[18-19]</sup>以及类似合金锻造温度的选择经验。图 2 为本试验等温锻造成形的 Mg-8Al-1Zn-0.5Ca 镁合金机械壳体的模具总装及温度控制示意图。在等温锻造过程中,凹模、凸模中分别安置了测温的热电偶,并配置了 PID (Proportional-Integral-Derivative, 比例-积分-微分) 温控加热器。Mg-8Al-1Zn-0.5Ca 镁合金机械壳体等温锻造时模具通过加热器进行加热,模具温度的检测是通过安装在模具内部的热电偶来完成,然后将检测信号反馈给 PID 温控加热

表 2 Mg-8Al-1Zn-0.5Ca 镁合金等温锻造工艺参数

Table 2 Isothermal forging process parameters of Mg-8Al-1Zn-0.5Ca magnesium alloy

试样	等温锻造温度/℃	模具预热温度/℃	锻造变形量/%	锻造速度/(mm·min <sup>-1</sup> )	保温时间/min	保压时间/min
1#	340					
2#	360					
3#	380	280	40	350	20	2
4#	400					
5#	420					

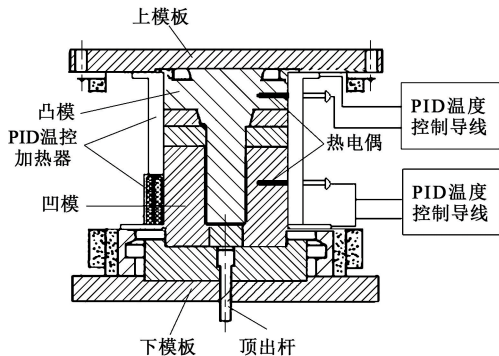


图 2 等温锻造试验的模具总装及温度控制示意图

Fig. 2 Schematic diagram of mold assembly and temperature control for isothermal forging test

器，整个等温锻造过程中进行 PID 温度控制，从而实现整个等温锻造过程中温度的自动测量和精确控制，使等温锻造温度始终保持在预设的范围内。本试验设置的 Mg-8Al-1Zn-0.5Ca 镁合金机械壳体等温锻造温度控制范围为（预设温度±2）℃。

1.2 试验方法

Mg-8Al-1Zn-0.5Ca 镁合金的显微组织分析采用金相分析方法，金相试样为圆片形，取样位置为合金壳体锻件的中部及边沿位置，尺寸为Φ15 mm×10 mm，经过由粗至细的金相砂纸磨制并抛光后，经过腐蚀剂（5 mL 苦味酸+5 mL 氢氟酸）浸蚀 15 s，在 BX53M 金相显微镜上观察和拍照，然后使用专用软件 Image Pro Plus 统计平均晶粒尺寸。Mg-8Al-1Zn-0.5Ca 镁合金的耐腐蚀性能通过三电极体系的电化学腐蚀试验来测试，腐蚀试样也取自合金壳体锻件的中部位置及边沿位置，尺寸为Φ10 mm×10 mm，工作电极为本文研究的 Mg-8Al-1Zn-0.5Ca 镁合金，参比电极为甘汞电极，辅助电极为铂黑电极。电化学腐蚀试验是在室温、质量分数为 3.5% 的 NaCl 水溶液中进行，试验仪器为 INTERFACE 1010E 型电化学工作站，试验过程中的扫描速度为 1 mV·s<sup>-1</sup>。Mg-8Al-1Zn-0.5Ca 镁合金的耐磨损性能

通过 M-200 型摩擦磨损试验机来测试，磨损试样也取自合金壳体锻件的中部位置及边沿位置，尺寸为Φ20 mm×10 mm，磨损试验也是在室温条件下完成。根据机械壳体产品要求，磨损试验时的主要参数设置如下：试样滑动速度为 90 mm·min<sup>-1</sup>、磨轮转速为 400 r·min<sup>-1</sup>、磨损试验时间为 30 min，对磨材料选择商用的退火态 45 钢。

2 试验结果与讨论

2.1 显微组织

不同等温锻造温度下，Mg-8Al-1Zn-0.5Ca 镁合金试样的显微组织及平均晶粒尺寸分别如图 3 和图 4 所示。根据图 3 和图 4 可以看出，随着等温锻造温度从 340 ℃逐步增加至 420 ℃，合金试样的平均晶粒尺寸先减小后增大、合金试样内部的晶粒先变细后长大、合金试样内部的组织分布先更加均匀后恶化。当等温锻造温度为 340 ℃时，Mg-8Al-1Zn-0.5Ca 镁合金试样的平均晶粒尺寸最大，为 41.6 μm；当等温锻造温度为 400 ℃时，Mg-8Al-1Zn-0.5Ca 镁合金试样的平均晶粒尺寸最小，为 10.1 μm，组织分布最均匀。等温锻造温度为 400 ℃时的合金平均晶粒尺寸比 340 ℃时减小了 76.1%，平均晶粒尺寸显著减小。

2.2 耐腐蚀性能

不同等温锻造温度下，Mg-8Al-1Zn-0.5Ca 镁合金试样的耐腐蚀性能测试结果如图 5 所示。根据图 5 发现，在 340~420 ℃范围内，随着等温锻造温度的升高，Mg-8Al-1Zn-0.5Ca 镁合金试样的腐蚀电位先正移后负移，换言之，合金试样的耐腐蚀性能随着等温锻造温度的升高先变好后变差。当等温锻造温度为 340 ℃时，Mg-8Al-1Zn-0.5Ca 镁合金试样的腐蚀电位最低，为-1.683 V；当等温锻造温度为 400 ℃时，Mg-8Al-1Zn-0.5Ca 镁合金试样的腐蚀电位最高，为-1.542 V，耐腐蚀性能最佳。



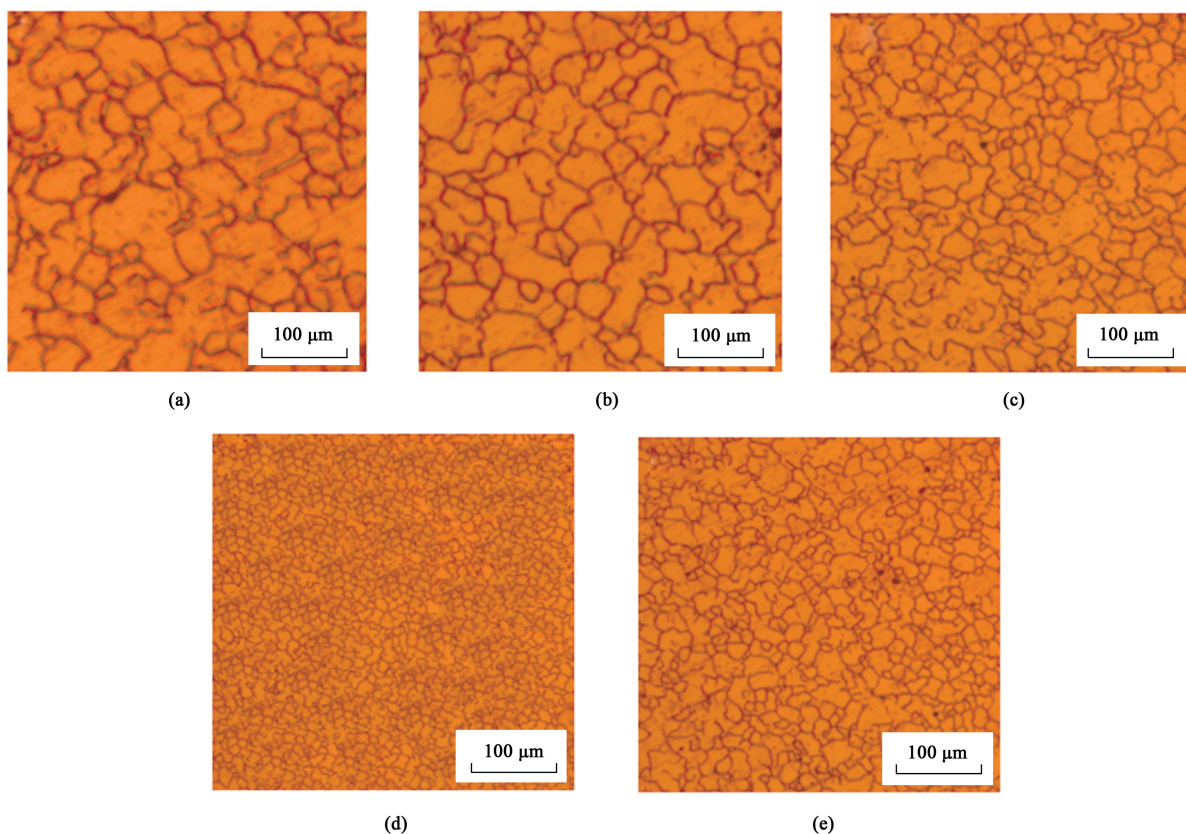


图 3 不同等温锻造温度下 Mg-8Al-1Zn-0.5Ca 镁合金试样的显微组织  
(a) 340 °C (b) 360 °C (c) 380 °C (d) 400 °C (e) 420 °C

Fig. 3 Microstructures of Mg-8Al-1Zn-0.5Ca magnesium alloy samples under different isothermal forging temperatures

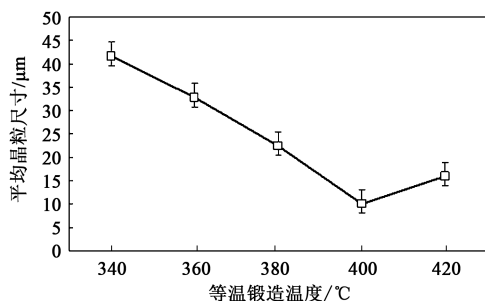


图 4 不同等温锻造温度下 Mg-8Al-1Zn-0.5Ca 镁合金的平均晶粒尺寸

Fig. 4 Average grain sizes of Mg-8Al-1Zn-0.5Ca magnesium alloy under different isothermal forging temperatures

等温锻造温度为 400 °C 时合金试样的腐蚀电位比 340 °C 时正移了 141 mV，合金试样的耐腐蚀性能显著提高。

### 2.3 耐磨损性能

图 6 为不同等温锻造温度下 Mg-8Al-1Zn-0.5Ca 镁合金试样的耐磨损性能测试结果。根据图 6 可知，在 340~420 °C 范围内，随着等温锻造温度的升高，Mg-8Al-1Zn-0.5Ca 镁合金试样的磨损体积

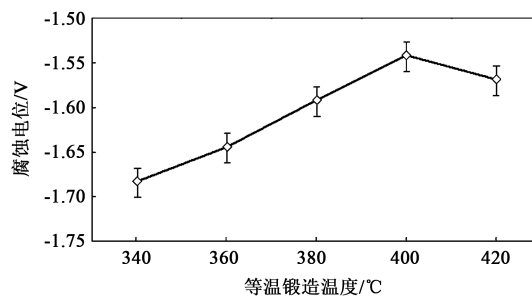


图 5 不同等温锻造温度下 Mg-8Al-1Zn-0.5Ca 镁合金耐腐蚀性能

Fig. 5 Corrosion resistant properties of Mg-8Al-1Zn-0.5Ca magnesium alloy under different isothermal forging temperatures

先减小后增大，换言之，合金试样的耐磨损性能随着等温锻造温度的升高先变好后变差。当等温锻造温度为 340 °C 时，Mg-8Al-1Zn-0.5Ca 镁合金试样的磨损体积最大，为  $38.8 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$ ；当等温锻造温度为 400 °C 时，Mg-8Al-1Zn-0.5Ca 镁合金试样的磨损体积最小，为  $13.1 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$ ，耐磨损性能最佳。等温锻造温度为 400 °C 时合金的磨损体积比 340 °C 时的减小 66.2%，合金试样的耐磨损性能得到显著提高。

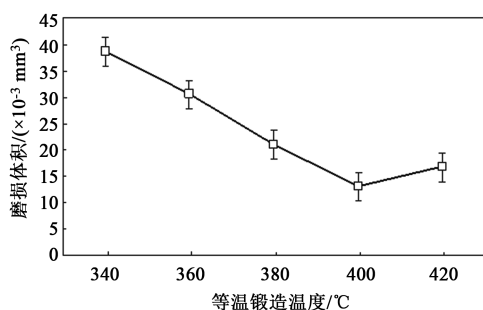


图 6 不同等温锻造温度下 Mg-8Al-1Zn-0.5Ca 镁合金的耐磨损性能

Fig. 6 Wear resistant properties of Mg-8Al-1Zn-0.5Ca magnesium alloy under different isothermal forging temperatures

## 2.4 讨论与分析

等温锻造温度是影响等温锻造合金材料组织与性能的重要因素之一。等温锻造温度是指在等温锻造工艺过程中, 模具和坯料保持的恒定温度。在 Mg-8Al-1Zn-0.5Ca 镁合金等温锻造过程中, 等温锻造温度直接影响镁合金的晶粒尺寸和晶粒形貌, 进而影响镁合金的耐腐蚀性能和耐磨损性能。通过调控等温锻造温度, 可以改变 Mg-8Al-1Zn-0.5Ca 镁合金的晶粒尺寸和晶粒形貌, 进而影响材料的耐腐蚀性能和耐磨损性能。

晶粒尺寸是影响 Mg-8Al-1Zn-0.5Ca 镁合金性能的重要因素之一。在 340~420 °C 范围内, 随着等温锻造温度的升高, Mg-8Al-1Zn-0.5Ca 镁合金的平均晶粒尺寸先减小后增大。这是因为: 适当增大等温锻造温度, 可以促使合金内部晶粒的生长速度加快, 晶粒边界的迁移和晶粒的再结晶过程更加显著, 从而使得合金试样的晶粒组织更加细小且均匀, 可以有效地改善和提升合金试样的耐腐蚀性能和耐磨损性能。但是过低的等温锻造温度会导致 Mg-8Al-1Zn-0.5Ca 镁合金在等温锻造过程中的变形与应力分布不均, 难以获得细小且均匀的内部晶粒组织, 从而使得合金的耐腐蚀性能和耐磨损性能不理想。然而, 过高的等温锻造温度易导致晶粒长大或过度生长, 从而引起晶粒粗大, 也难以获得细小且均匀的内部晶粒组织, 进而难以获得理想的耐腐蚀性能和耐磨损性能。

此外, 等温锻造温度还会对 Mg-8Al-1Zn-0.5Ca 镁合金的微观缺陷和宏观形貌产生影响。在等温锻造过程中, 由于 Mg-8Al-1Zn-0.5Ca 镁合金的变形与应力分布不均, 易产生各种缺陷, 如晶界滑移带、孪晶区、裂纹等。等温锻造温度的变化可以改变 Mg-8Al-1Zn-0.5Ca 镁合金的流动性和变形机制, 进

而影响缺陷的形成与分布。等温锻造温度还会对 Mg-8Al-1Zn-0.5Ca 镁合金的表面光洁度和形貌产生影响, 直接影响合金材料的表面质量和加工工艺。所以, 在过低温度下进行等温锻造, 由于上述缺陷的存在, 使得 Mg-8Al-1Zn-0.5Ca 镁合金的耐腐蚀性能和耐磨损性能难以达到理想状态。

总体来说, 锻造过程中选择的等温锻造温度会明显影响 Mg-8Al-1Zn-0.5Ca 镁合金的内部显微组织, 进而影响合金试样的耐腐蚀性能和耐磨损性能。等温锻造温度不应过低也不应过高, Mg-8Al-1Zn-0.5Ca 镁合金的等温锻造温度优选为 400 °C。机械壳体用 Mg-8Al-1Zn-0.5Ca 镁合金的等温锻造工艺参数众多且彼此相关, 在以后的研究中, 将进一步深入探讨 Mg-8Al-1Zn-0.5Ca 镁合金等温锻造工艺参数彼此的相关性, 以促进锻造态 Mg-8Al-1Zn-0.5Ca 镁合金机械壳体的商业化应用。

## 3 结论

(1) 等温锻造温度对 Mg-8Al-1Zn-0.5Ca 镁合金的显微组织、耐腐蚀性能和耐磨损性能具有显著影响, 其等温锻造温度优选为 400 °C。

(2) 等温锻造温度从 340 °C 增加至 420 °C, Mg-8Al-1Zn-0.5Ca 镁合金的平均晶粒尺寸先减小后增大、晶粒先细化后粗化、组织分布均匀性先变好后变差, 腐蚀电位先正移后负移、磨损体积先减小后增大, 说明 Mg-8Al-1Zn-0.5Ca 镁合金的耐腐蚀和耐磨损性能先变好后变差。

(3) 与 340 °C 时的等温锻造相比, 等温锻造温度为 400 °C 时, Mg-8Al-1Zn-0.5Ca 镁合金的平均晶粒尺寸减小了 76.1%、腐蚀电位正移 141 mV、磨损体积减小了 66.2%。

## 参考文献:

- [1] 张书弟, 许宇恒, 何欢欢, 等. 耐高温防腐涂料及其在镁合金上应用的研究进展 [J]. 材料保护, 2023, 56 (2): 100-110.  
Zhang S D, Xu Y H, He H H, et al. Research progresses of high temperature resistant anti-corrosive coatings and their application on magnesium alloys [J]. Materials Protection, 2023, 56 (2): 100-110.
- [2] 邓迎诚, 秦卫华, 王飞, 等. 镁合金在大气环境中腐蚀行为及表面处理技术的研究进展 [J]. 机械工程材料, 2023, 47 (3): 1-6, 54.  
Deng Y C, Qin W H, Wang F, et al. Research progress on corrosion behavior in atmospheric environment and surface treatment

- technique of magnesium alloy [J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2023, 47 (3): 1-6, 54.
- [3] 谭军, 王芳磊, 蒋斌, 等. 镁合金结构材料应用现状与展望 [J]. *自然杂志*, 2023, 45 (2): 93-105.
- Tan J, Wang F L, Jiang B, et al. Application status and prospects of magnesium alloy structural materials [J]. *Chinese Journal of Nature*, 2023, 45 (2): 93-105.
- [4] 许楠, 任紫科, 范越, 等. 冷媒辅助搅拌摩擦处理 AZ31B 镁合金的显微组织演变及力学性能 [J]. *中国有色金属学报 (英文版)*, 2023, 33 (6): 1729-1741.
- Xu N, Ren Z K, Fan Y, et al. Microstructural evolution and mechanical properties of cooling medium assisted friction stir processed AZ31B Mg alloy [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2023, 33 (6): 1729-1741.
- [5] 熊奇, 朱鑫辉, 赵翔, 等. AZ31 镁合金管件电磁吸引式成形动态特性研究 [J]. *电工技术学报*, 2023, 38 (10): 2577-2588, 2636.
- Xiong Q, Zhu X H, Zhao X, et al. Research of dynamic characteristics in electromagnetic attraction forming of AZ31 magnesium alloy tube [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2023, 38 (10): 2577-2588, 2636.
- [6] 董含武, 叶小舟, 罗素琴, 等. 预制锭无熔剂重熔对 ZM6 镁合金组织与性能的影响 [J]. *特种铸造及有色合金*, 2024, 44 (5): 641-646.
- Dong H W, Ye X Z, Luo S Q, et al. Effects of remelting without fusion agent on microstructure and properties of prefabricated ingots of ZM6 magnesium alloy [J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2024, 44 (5): 641-646.
- [7] 李俊杰, 马超胜, 张通通, 等. 不同压铸工艺对 AE44 镁合金的影响 [J]. *特种铸造及有色合金*, 2024, 44 (5): 647-655.
- Li J J, Ma C S, Zhang T T, et al. Effects of different die casting processes on AE44 magnesium alloy [J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2024, 44 (5): 647-655.
- [8] 安士忠, 刘夏琳, 王志华, 等. 稀土镧对 Mg-7Al-2Zn 镁合金阳极材料腐蚀和电化学性能的影响 [J]. *河南科技大学学报 (自然科学版)*, 2023, 44 (2): 17-24.
- An S Z, Liu X L, Wang Z H, et al. Effect of rare earth lanthanum on corrosion and electrochemical properties of Mg-7Al-2Zn magnesium alloy anode [J]. *Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science)*, 2023, 44 (2): 17-24.
- [9] 付广艳, 杨龙飞, 薛丰. 不同工艺处理下 AZ91D 镁合金耐腐蚀性能研究 [J]. *特种铸造及有色合金*, 2024, 44 (5): 633-637.
- Fu G Y, Yang L F, Xue F. Corrosion resistance of AZ91D magnesium alloy under different treatment processes [J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2024, 44 (5): 633-637.
- [10] 柯静, 郭林通. 析出相对稀土镁合金腐蚀行为的影响 [J]. *中国材料进展*, 2024, 43 (4): 336-343.
- Ke J, Guo L T. Effect of precipitates on corrosion behavior of rare earth magnesium alloys [J]. *Materials China*, 2024, 43 (4): 336-343.
- [11] 杨湘杰, 邓博焰, 邹伟峰, 等. Ti-Al 中间合金对 AZ91D 镁合金组织及腐蚀性能的影响 [J]. *特种铸造及有色合金*, 2024, 44 (5): 577-582.
- Yang X J, Deng B Y, Zou W F, et al. Effects of Ti-Al intermediate alloy on microstructure and corrosion performance of AZ91D alloy [J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2024, 44 (5): 577-582.
- [12] 韦永毅, 谢红梅, 苟庆霜, 等. 铸态和挤压态 AZ31 镁合金摩擦学特性对比研究 [J]. *轻金属*, 2023 (7): 45-49.
- Wei Y Y, Xie H M, Gou Q S, et al. Comparison of the tribological properties of the as-cast and as-extruded AZ31 magnesium alloy [J]. *Light Metals*, 2023 (7): 45-49.
- [13] 张凯, 马立峰, 邹景锋. 径锻 AZ61 镁合金退火后晶粒长大及组织演变规律 [J]. *精密成形工程*, 2023, 15 (4): 40-48.
- Zhang K, Ma L F, Zou J F. Grain growth and microstructure evolution law of radial forged AZ61 magnesium alloy after annealing [J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2023, 15 (4): 40-48.
- [14] 孙忠玉, 赵越顺. 分步锻压对汽车用 AZ80 镁合金耐蚀及耐磨性能的影响 [J]. *锻压技术*, 2023, 48 (1): 23-28.
- Sun Z Y, Zhao Y S. Effect of step forging on corrosion resistance and wear resistance properties of AZ80 magnesium alloy for automobile [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2023, 48 (1): 23-28.
- [15] 李昊旻, 卢立伟, 张家龙, 等. 镁合金锻压-弯曲反复变形的有限元数值模拟分析与实验研究 [J]. *锻压技术*, 2023, 48 (2): 52-61.
- Li M H, Lu L W, Zhang J L, et al. Finite element numerical simulation analysis and experimental research on forging-bending repeated deformation for magnesium alloys [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2023, 48 (2): 52-61.
- [16] 王海彬, 王智勇, 赵盛荣. 锻造温度对 ZK61M 镁合金显微组织和力学性能的影响 [J]. *锻压装备与制造技术*, 2023, 58 (2): 112-115, 127.
- Wang H B, Wang Z Y, Zhao S R. Effect of forging temperature on the micro-structure and mechanical properties of ZK61M magnesium alloy [J]. *China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology*, 2023, 58 (2): 112-115, 127.
- [17] 龚旻宇. 挤压态 FGH4096 高温合金真空等温锻造工艺及组织性能研究 [D]. 黑龙江: 哈尔滨工业大学, 2023.
- Gong M Y. Study on Vacuum Isothermal Forging Process and Microstructure Properties of Extruded FGH4096 Superalloy [D]. Heilongjiang: Harbin Institute of Technology, 2023.
- [18] 王旭, 黄元春, 王强, 等. 异步轧制对 Mg-Gd-Y-Zn-Zr 板材组织、织构和性能的影响 [J]. *稀有金属*, 2023, 47 (7): 934-941.
- Wang X, Huang Y C, Wang Q, et al. Microstructure, texture and mechanical properties of Mg-Gd-Y-Zn-Zr sheet with different rolling speed [J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2023, 47 (7): 934-941.
- [19] 付博文, 李冰, 陈星合, 等. 连续流变挤压与热处理对 6061 合金线材组织性能的影响 [J]. *稀有金属*, 2023, 47 (8): 1070-1078.
- Fu B W, Li B, Chen X H, et al. Mechanical properties and microstructure evolution in 6061 alloy wire with continuous rheo-extrusion and heat treatment [J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2023, 47 (8): 1070-1078.