

等温锻造 ZK60 镁合金电气设备壳体的组织与性能

郭慧静¹, 胡大力²

(1. 濮阳职业技术学院 机电与汽车工程学院, 河南 濮阳 457000; 2. 河南理工大学 材料科学与工程学院, 河南 焦作 454000)

摘要: 采用等温锻造方法制备了 ZK60 镁合金电子设备壳体试样, 对试样的显微组织、力学性能和耐腐蚀性能进行了测试与分析, 并与商用常规锻造 ZK60 镁合金进行了对比。结果表明: 等温锻造高性能 ZK60 镁合金电子设备壳体具有细小等轴晶形态的内部显微组织, 合金平均晶粒尺寸为 $6.7\ \mu\text{m}$, 较商用常规锻造合金减小 $11.8\ \mu\text{m}$; 合金的屈服强度和抗拉强度分别达到 396 和 322 MPa, 较商用常规锻造合金分别提高了 121 和 108 MPa, 合金的断后伸长率为 21.1%, 与商用常规锻造合金无明显差异; 腐蚀 100 h 后单位面积质量减重较商用常规合金减小了 $20.9\ \text{mg} \cdot \text{mm}^{-2}$ 。等温锻造 ZK60 镁合金电子设备壳体具有较佳的力学性能和耐腐蚀性能。

关键词: 等温锻造; ZK60 镁合金; 电子设备壳体; 力学性能; 耐腐蚀性能

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2025.07.006

中图分类号: TH164

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2025) 07-0044-07

Microstructure and properties on ZK60 magnesium alloy electronic equipment shell by isothermal forging

Guo Huijing¹, Hu Dali²

(1. Mechanical and Automotive Engineering College, Puyang Vocational and Technical College, Puyang 457000, China;
2. School of Materials and Science Engineering, Henan University of Technology, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: ZK60 magnesium alloy electrical equipment shell specimens were prepared by isothermal forging method, and the microstructure, mechanical properties and corrosion resistance of specimens were tested and analyzed, which was compared with commercial conventional forged ZK60 magnesium alloy. The results show that the isothermally forged high-performance ZK60 magnesium alloy electronic equipment shell has an internal microstructure with fine equiaxed crystal morphology. The average grain size of the alloy is $6.7\ \mu\text{m}$, which is $11.8\ \mu\text{m}$ smaller than that of commercial conventional forged alloy, and the yield strength and tensile strength of the alloy are 396 and 322 MPa, respectively, which are 121 and 108 MPa higher than those of to commercial conventional forged alloy, respectively. The elongation after fracture of the alloy is 21.1%, showing no significant difference from commercial conventional forged alloy. After corrosion for 100 h, the weight loss per unit area is $20.9\ \text{mg} \cdot \text{mm}^{-2}$ less than that of commercial conventional forged alloy. The isothermally forged ZK60 magnesium alloy of electronic equipment shell has good mechanical properties and corrosion resistance.

Key words: isothermal forging; ZK60 magnesium alloy; electronic equipment shell; mechanical properties; corrosion resistance

密度轻、比强度高、电磁屏蔽性佳的镁合金, 在电气设备壳体方面具有广阔应用前景^[1-7]。陈飞腾等^[8]分析了热处理对大规格等温模锻 AZ80-Ag 镁合金机匣显微组织和拉伸力学性能的影响规律, 发现室温下强化作用更强的不连续析出相在 T5 ($175\ ^\circ\text{C} \times 36\ \text{h}$ 时效后空冷) 样品中的面积分数高于

T6 ($410\ ^\circ\text{C} \times 3.5\ \text{h}$ 固溶后水淬+ $175\ ^\circ\text{C} \times 36\ \text{h}$ 时效后空冷) 样品中的面积分数。杨柳等^[9]进行了 ZK61M 高强镁合金板热变形过程中的韧性断裂预测, 结果表明, 预测的拉伸件断裂位移和断裂载荷的平均误差均小于 15%, 预测的圆筒形件的成形深度的平均误差为 13.88%。王继晨等^[10]基于无网格法进行了镁合金等温锻造成形模拟分析, 发现使用无网格法来分析金属成形中的大变形问题, 可以较好地解决有限元法分析过程中产生的网格畸变问题。张坤敏等^[11]研究了封闭锻造挤压镁合金以同步提高强度和塑性, 结果表明, 经过 60 s 封闭锻造和连续挤压

收稿日期: 2024-11-05; 修订日期: 2025-02-10

基金项目: 河南省科技攻关计划项目 (172102210433)

作者简介: 郭慧静 (1981-), 女, 硕士, 讲师

E-mail: xiaolong52123@126.com

后,合金表现出较好的力学性能,其拉伸屈服强度、抗拉强度、抗压强度、伸长率和屈服不对称性分别为 305 MPa、337 MPa、295 MPa、27%和 0.97。刘俊杰等^[12]基于 DEFORM-3D 进行了镁合金齿轮热锻成形工艺优化研究,结果发现,最优的工艺参数组合为:模具温度为 623 K、坯料温度为 693 K、摩擦因数为 0.2、模具速度为 $0.5\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 。李柱锦^[13]研究了 AZ80-Ce 镁合金的热锻可行性及其组织演化机理,研究了不同保温时间对坯料温度场的影响规律,构建了“锻前保温时间”数学模型。王智勇等^[14]进行了航空用 ZK61M 镁合金锻件成形工艺模拟,并进行了试验验证,依据模拟工艺确定了预锻毛坯形状,并成功实现了航空用 ZK61M 镁合金锻件的模锻生产。董含武等^[15]探讨与分析了预制锭无熔剂重熔对 ZM6 镁合金组织与性能的影响,发现熔炼工艺参数对合金强度的影响程度由大到小依次为:过热保温温度>气体精炼>保温时间。但是,目前关于 ZK60 镁合金等温锻造的研究还鲜有报道,本文采用等温锻造方法进行了 ZK60 镁合金电气设备壳体试样的制备,并进行了显微组织、力学性能和耐腐蚀性能的测试与分析,为 ZK60 镁合金电子设备壳体的等温锻造积累试验数据。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

锻造坯料为经高频感应熔炼并均匀化处理 ($380\text{ }^{\circ}\text{C}\times 12\text{ h}$) 的 ZK60 镁合金棒料,尺寸为 $\Phi 50\text{ mm}\times 150\text{ mm}$ 。ZK60 镁合金的化学成分如表 1 所示。

表 1 ZK60 镁合金试样化学成分 (%, 质量分数)
Table 1 Chemical compositions of ZK60 magnesium alloy specimen (%, mass fraction)

元素	Zn	Zr	Mn	Si	Fe	其他杂质元素	Mg
要求成分	4.80~6.20	≥ 0.45	≤ 0.15	≤ 0.05	≤ 0.05	≤ 0.30	余量
实测成分	5.654	0.386	0.011	0.019	0.014	0.206	余量

在 1500 t 油压机上进行等温锻造,并采用 4Cr5MoSiV1 合金工具钢自制模具,在凸模和凹模中均放置测温用的热电偶,配备比例-积分-微分 (Proportional-Integral-Derivative, PID) 温控加热器,确保在整个锻造过程中锻造温度恒定在设定值,以

实现 ZK60 镁合金电子设备壳体的等温锻造。等温锻造工艺参数如表 2 所示。等温锻造 ZK60 镁合金电子设备壳体实物照片及测试取样位置如图 1 所示,壳体的壁厚为 10 mm、长度为 150 mm、宽度为 60 mm、高度为 40 mm。为了进行对比,采用商用常规锻造方法进行了上述 ZK60 镁合金电子设备壳体的锻造试验,锻造工艺参数为:始锻温度为 $440\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、终锻温度为 $360\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、变形速度为 $3\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 、锻造压力为 17.64 kN、坯料及模具加热保温时间为 30 min。

表 2 ZK60 镁合金电子设备壳体试样等温锻造工艺参数
Table 2 Isothermal forging process parameters of ZK60 magnesium alloy electronic equipment shell specimen

锻造温度/ $^{\circ}\text{C}$	变形速度/ $(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	锻造压力/ kN	坯料及模具加热 保温时间/min
400	1	6.37	30

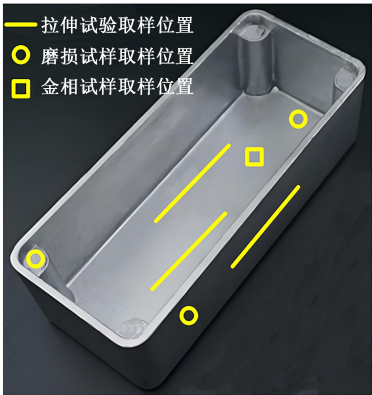


图 1 等温锻造 ZK60 镁合金电子设备壳体实物照片及测试取样位置
Fig. 1 Physical photo and sampling locations for test of ZK60 magnesium alloy electronic equipment shell by isothermal forging

1.2 试验方法

为了更好地研究等温锻造 ZK60 镁合金电子设备壳体的组织与性能,选用商用常规锻造 ZK60 镁合金进行对比试验。常规锻造 ZK60 镁合金选用山西银光华盛镁业股份有限公司产品,在合金中部位置切取金相试样、拉伸试样和腐蚀试样,并采用与等温锻造 ZK60 镁合金电子设备壳体试样完全相同的测试方法进行显微组织与性能测试。

1.2.1 显微组织分析

按图 1 所示取样位置切取方形金相试样,尺寸为 $10\text{ mm}\times 10\text{ mm}\times 5\text{ mm}$ 。经过金相砂纸磨制、抛光后在混合液体 (配比为: 5 g 苦味酸、10 ml 氢氟酸、5 ml 去离子水、80 ml 无水乙醇) 中浸蚀 15 s

后立即冲洗并吹干,然后置于 PG18 型金相显微镜和 JSM6510 扫描电子显微镜 (Scanning Electron Microscope, SEM) 下观察,并结合 Image Pro Plus 软件计算平均晶粒尺寸。

1.2.2 力学性能测试

按图 1 所示取样位置切取矩形拉伸试样,平行段的长度为 65 mm、宽度为 10 mm、厚度为 8 mm,过渡段的圆弧半径为 $R15\text{ mm}$,总长度为 125 mm。在 TY-8000B 型拉伸试验机上进行力学性能测试,拉伸速度为 $1\text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$,测试温度为室温,并采用 JSM6510 扫描电子显微镜观察试样的拉伸断口形貌。

1.2.3 耐腐蚀性能测试

按图 1 所示取样位置切取圆形腐蚀试样,尺寸为 $\Phi 20\text{ mm} \times 8\text{ mm}$,在质量分数为 5% 的氯化钠溶液中进行全浸腐蚀试验,试验温度为室温,腐蚀时间为 100 h,每 10 h 取出腐蚀试样,烘干并准确记录试样

的质量,并采用 JSM6510 的扫描电子显微镜观察试样腐蚀试验后的表面形貌。

2 试验结果与讨论

2.1 显微组织

商用常规锻造 ZK60 镁合金和等温锻造 ZK60 镁合金电子设备壳体试样的金相组织照片如图 2 所示。从图 2a 和图 2b 的对比可以看出:商用常规锻造 ZK60 镁合金的内部晶粒较为粗大、组织分布均匀性较差,平均晶粒尺寸约为 $18.5\text{ }\mu\text{m}$;等温锻造 ZK60 镁合金电子设备壳体的内部晶粒较为细小、组织分布均匀性较好,平均晶粒尺寸约为 $6.7\text{ }\mu\text{m}$,较商用常规锻造 ZK60 镁合金减小了 $11.8\text{ }\mu\text{m}$ 。等温锻造显著细化了 ZK60 镁合金的内部晶粒,合金锻件中的组织呈均匀的等轴细晶形态,获得了更好的内部显微组织。

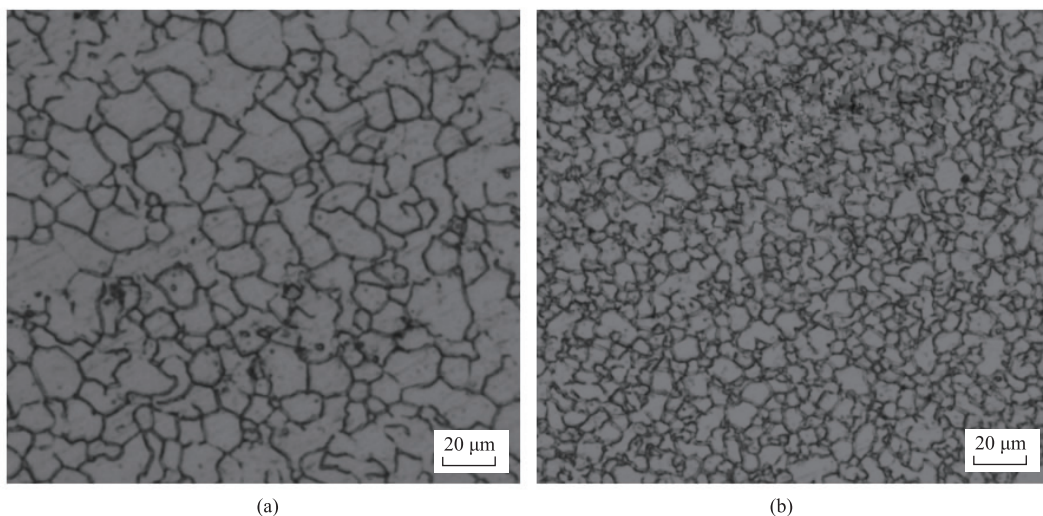


图 2 ZK60 镁合金试样的金相组织照片

(a) 商用常规锻造 (b) 等温锻造

Fig. 2 Metallographic structure photographs of ZK60 magnesium alloy specimens

(a) Commercial conventional forging (b) Isothermal forging

商用常规锻造 ZK60 镁合金和等温锻造 ZK60 镁合金电子设备壳体试样的显微组织 SEM 照片如图 3 所示。从图 3a 和图 3b 的对比可以看出:商用常规锻造 ZK60 镁合金的第二相 (MgZn 相) 以粗大不规则颗粒 (平均尺寸约为 $4\text{ }\mu\text{m}$) 的形式分布在晶界上和以细小颗粒状 (平均尺寸约为 $0.5\text{ }\mu\text{m}$) 分布在晶粒内部;而等温锻造 ZK60 镁合金电子设备壳体的第二相 (MgZn 相) 大部分以细小颗粒状 (平均尺寸约为 $1\text{ }\mu\text{m}$) 分布在晶界上、小部分以细小颗粒状 (平均尺寸约为 $0.5\text{ }\mu\text{m}$) 分布在晶粒内

部。等温锻造促使 ZK60 镁合金的第二相 (MgZn 相) 尺寸大幅减小,使得第二相以细小颗粒状分布在晶界和晶粒内部。

2.2 力学性能

商用常规锻造 ZK60 镁合金和等温锻造 ZK60 镁合金电子设备壳体试样的室温力学性能测试结果如图 4 所示。从图 4 可以看出:与商用常规锻造相比,等温锻造 ZK60 镁合金试样的屈服强度、抗拉强度均得到显著提升;屈服强度从 201 MPa 提高至 322 MPa,提高了 121 MPa,抗拉强度从 288 MPa 提

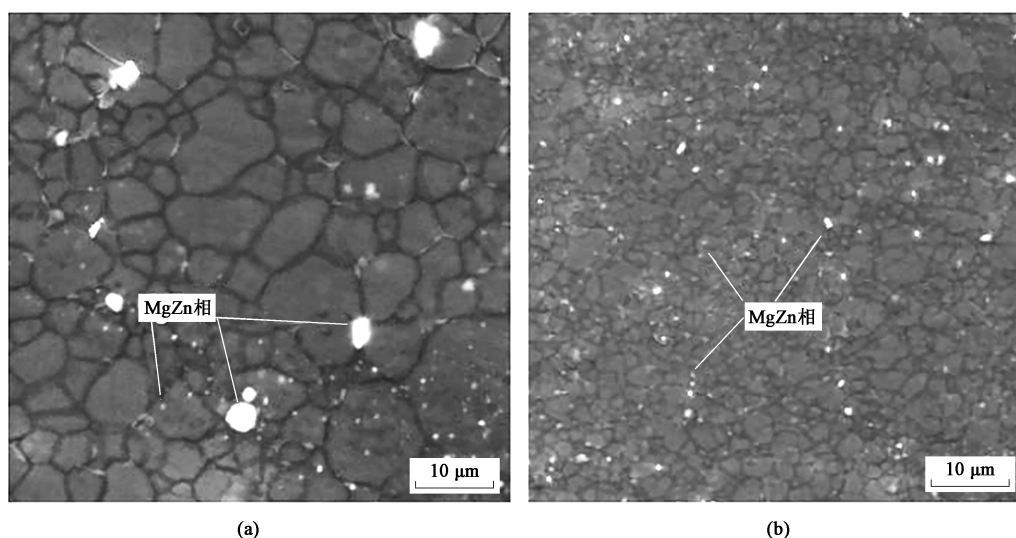


图 3 ZK60 镁合金试样显微组织 SEM 照片

(a) 商用常规锻造 (b) 等温锻造

Fig. 3 SEM photographs of microstructures for ZK60 magnesium alloy specimens

(a) Commercial conventional forging (b) Isothermal forging

高至 396 MPa, 提高了 108 MPa; 断后伸长率从 21.5% 小幅度降低至 21.1%。由此可以看出, 等温锻造显著改善了 ZK60 镁合金的强度, 且使其断后伸长率也保持了较高水平。因此, 等温锻造显著提升了 ZK60 镁合金的力学性能。

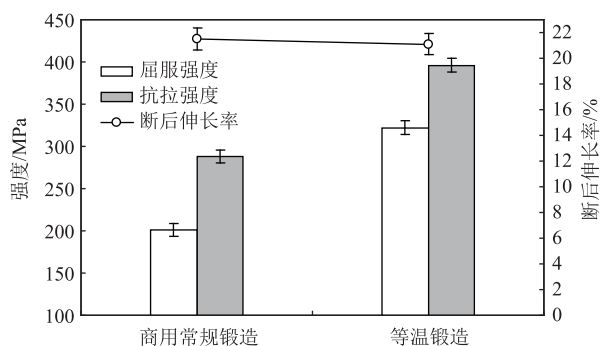


图 4 ZK60 镁合金室温力学性能测试结果

Fig. 4 Mechanical property test results of ZK60 magnesium alloy at room temperature

商用常规锻造 ZK60 镁合金和等温锻造 ZK60 镁合金电子设备壳体试样的室温拉伸断口形貌 SEM 照片如图 5 所示。从图 5a 和图 5b 的对比可以看出, 不管是商用常规锻造 ZK60 镁合金, 还是等温锻造 ZK60 镁合金电子设备壳体, 在室温拉伸试验后的拉伸断口均由韧窝和撕裂棱组成, 韧窝均比较细小、深邃, 二者的拉伸断口没有显著区别。

2.3 耐腐蚀性能

商用常规锻造 ZK60 镁合金和等温锻造 ZK60 镁

合金电子设备壳体试样的室温耐腐蚀性能测试结果如图 6 所示。从图 6 可以看出, 与商用常规锻造相比, 等温锻造 ZK60 镁合金试样的单位面积质量减重显著减小。其中, 腐蚀 50 h 后单位面积质量减重从 $27.4 \text{ mg} \cdot \text{mm}^{-2}$ 减小至 $10.1 \text{ mg} \cdot \text{mm}^{-2}$, 减小了 $17.3 \text{ mg} \cdot \text{mm}^{-2}$; 腐蚀 100 h 后, 单位面积质量减重从 $35.1 \text{ mg} \cdot \text{mm}^{-2}$ 减小至 $14.2 \text{ mg} \cdot \text{mm}^{-2}$, 减小了 $20.9 \text{ mg} \cdot \text{mm}^{-2}$ 。由此可以看出, 等温锻造显著提升了 ZK60 镁合金的耐腐蚀性能。

商用常规锻造 ZK60 镁合金和等温锻造 ZK60 镁合金电子设备壳体试样在室温腐蚀 100 h 后的表面形貌 SEM 照片如图 7 所示。从图 7a 和图 7b 的对比可以看出: 商用常规锻造 ZK60 镁合金腐蚀 100 h 后表面布满大小不一的腐蚀坑, 腐蚀坑尺寸约在 $\Phi 1 \sim \Phi 8 \mu\text{m}$ 之间, 腐蚀现象较为严重; 但等温锻造 ZK60 镁合金腐蚀 100 h 后仅有少量细小的腐蚀坑, 腐蚀坑尺寸约在 $\Phi 0.5 \sim \Phi 2 \mu\text{m}$ 之间, 腐蚀现象较商用常规锻造合金明显减轻。由此可以看出, 等温锻造明显改善了 ZK60 镁合金的耐腐蚀性能。

2.4 讨论与分析

在 ZK60 镁合金电子设备壳体等温锻造过程中, 在 PID 温控加热器及其他辅助部件的共同作用下, 模具与 ZK60 镁合金电子设备壳体成形件处于基本相同的温度, ZK60 镁合金发生了明显的动态再结晶, 从而使得等温锻造 ZK60 镁合金电子设备壳体中的组织呈均匀分布的等轴细晶形态。在细晶强化

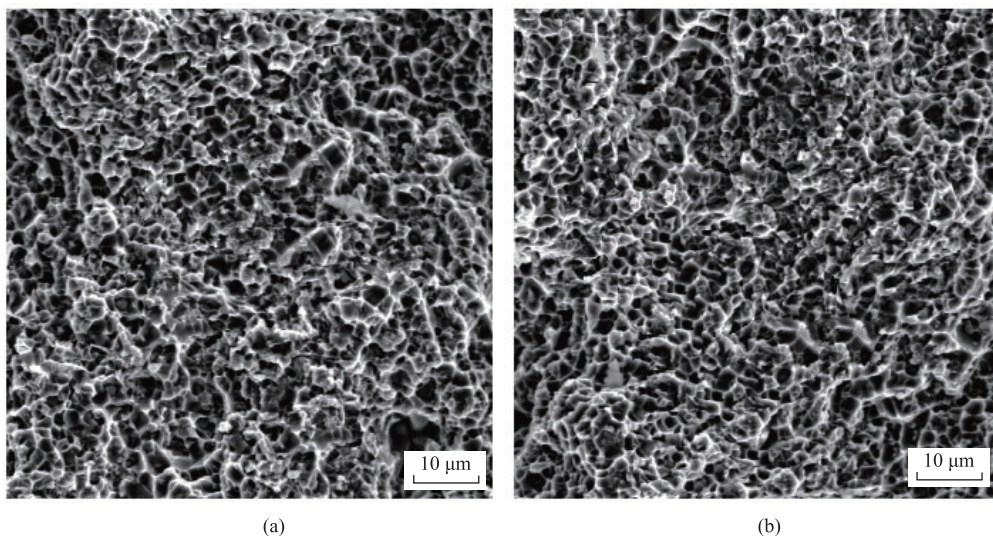


图 5 ZK60 镁合金试样拉伸断口 SEM 照片

(a) 商用常规锻造 (b) 等温锻造

Fig. 5 SEM photographs of tensile fractures for ZK60 magnesium alloy specimens

(a) Commercial conventional forging (b) Isothermal forging

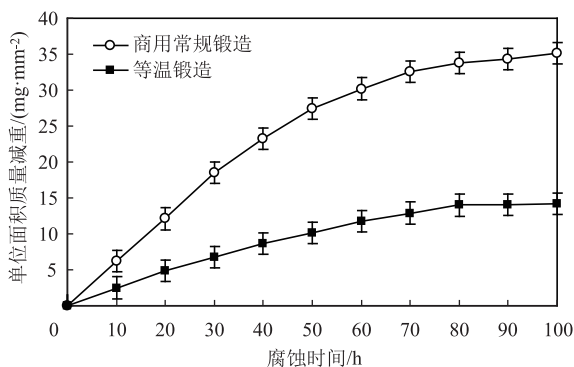


图 6 ZK60 镁合金室温耐腐蚀性能测试结果

Fig. 6 Corrosion resistance test results of ZK60 magnesium alloy at room temperature

机制下显著提升了等温锻造 ZK60 镁合金电子设备壳体的力学性能和耐腐蚀性能。

此外,在 ZK60 镁合金电子设备壳体等温锻造过程中,第二相 (MgZn 相) 的尺寸大幅减小,除小部分存在于晶粒内部以外,大部分第二相 (MgZn 相) 在晶界处形成了细小的颗粒相。这些细小且弥散分布在晶界处的第二相明显改善了合金在拉伸过程中抵抗破坏的能力,明显提高 ZK60 镁合金的屈服强度和抗拉强度;同时,这些细小且弥散分布在晶界处的第二相增强了合金在腐蚀液体中抵抗外界腐蚀的能力,从而明显改善 ZK60 镁合金的耐腐蚀性能。

综上所述,等温锻造是制备高性能 ZK60 镁合金电子设备壳体的有效方法。等温锻造高性能 ZK60 镁合金电子设备壳体可以获得呈细小等轴晶形态的

内部显微组织,优异的力学性能和耐腐蚀性能。在后续的研究中,将进一步探讨等温锻造各工艺参数对 ZK60 镁合金电子设备壳体组织与性能的影响规律,以优化 ZK60 镁合金电子设备壳体的等温锻造工艺参数,为等温锻造 ZK60 镁合金电子设备壳体的商业化应用积累试验数据。

3 结论

(1) 等温锻造 ZK60 镁合金电子设备壳体具有呈细小等轴晶形态的内部显微组织,合金平均晶粒尺寸较商用常规锻造减小 11.8 μm ,具有优异的力学性能和耐腐蚀性能。

(2) 与商用常规锻造相比,等温锻造 ZK60 镁合金试样的屈服强度提高 121 MPa、抗拉强度提高 108 MPa、断后伸长率下降 0.4%,但两种锻造方式得到的合金拉伸断口均为韧性断裂,等温锻造明显提升了 ZK60 镁合金的力学性能。

(3) 与商用常规锻造相比,等温锻造 ZK60 镁合金试样在质量分数为 5% 的氯化钠溶液中腐蚀 50 h 后,单位面积质量减重减小 17.3 $\text{mg} \cdot \text{mm}^{-2}$,腐蚀 100 h 后,单位面积质量减重减小 20.9 $\text{mg} \cdot \text{mm}^{-2}$,等温锻造显著改善了 ZK60 镁合金的耐腐蚀性能。

参考文献:

- [1] 张娜娜,李全安,陈晓亚,等. 变形镁合金组织调控的研究进展 [J]. 材料热处理学报, 2024, 45 (8): 13-26.

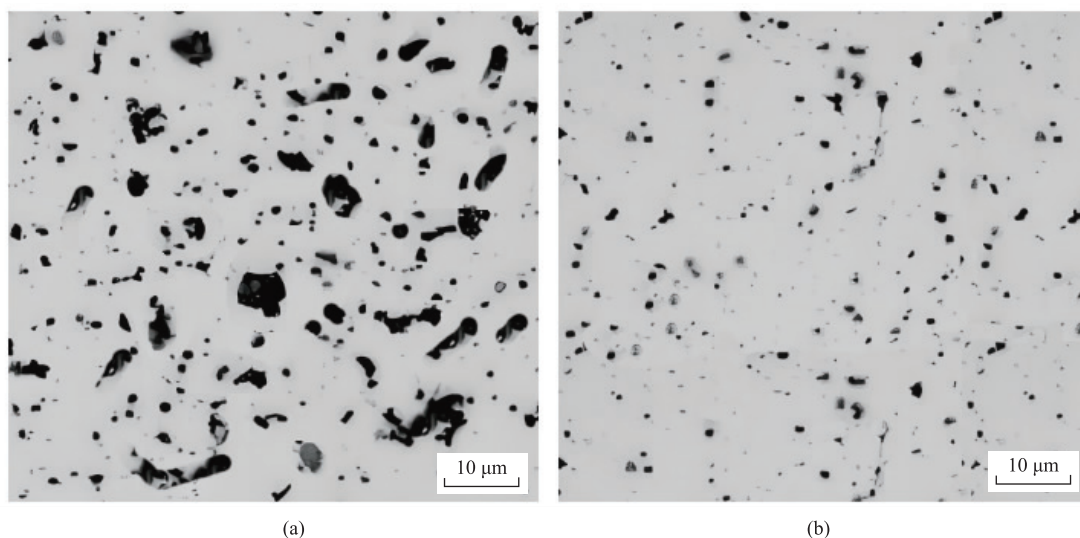


图7 ZK60 镁合金试样室温腐蚀 100 h 后表面形貌 SEM 照片

(a) 商用常规锻造 (b) 等温锻造

Fig. 7 SEM photographs of surface morphologies for ZK60 magnesium alloy specimens after corrosion for 100 h at room temperature

(a) Commercial conventional forging (b) Isothermal forging

Zhang N N, Li Q A, Chen X Y, et al. Research progress on texture control of deformed magnesium alloys [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2024, 45 (8): 13-26.

- [2] 钟志坚, 刘超, 李畅. 汽车用镁合金的表面改性及耐蚀性能研究 [J]. 电镀与精饰, 2024, 46 (7): 15-21.

Zhong Z J, Liu C, Li C. Research on surface modification and corrosion resistance of magnesium alloys for automotive use [J]. Plating and Finishing, 2024, 46 (7): 15-21.

- [3] 靳康帅, 张航, 张旭翌, 等. 定向凝固镁合金组织形貌及力学性能研究进展 [J]. 铸造, 2024, 73 (4): 453-462.

Jin K S, Zhang H, Zhang X Z, et al. Research progress on microstructure and mechanical properties of directionally solidified magnesium alloys [J]. Casting, 2024, 73 (4): 453-462.

- [4] 周慧敏, 黄须强, 孔令菲, 等. 海洋大气环境下镁合金腐蚀行为研究进展 [J]. 稀有金属材料与工程, 2024, 53 (4): 1170-1180.

Zhou H M, Huang X Q, Kong L F, et al. Research progress on corrosion behavior of magnesium alloys in marine atmospheric environment [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2024, 53 (4): 1170-1180.

- [5] 陈雅薇, 周济, 刘勇, 等. 镁合金腐蚀机制与调控研究进展 [J]. 中国有色金属学报, 2023, 33 (10): 3152-3170.

Chen Y W, Zhou J, Liu Y, et al. Research progress on corrosion mechanism and regulation of magnesium alloys [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2023, 33 (10): 3152-3170.

- [6] 裴三略, 王海涛, 韩越兴, 等. 基于机器学习的含 LPSO 相镁合金腐蚀 [J]. 中国有色金属学报, 2024, 34 (6): 1964-1981.

Pei S L, Wang H T, Han Y X, et al. Corrosion of magnesium alloys containing LPSO phase based on machine learning [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2024, 34 (6): 1964-

1981.

- [7] 杨青山, 颜宏伟, 彭鹏, 等. 高成形镁合金板材最新研究进展 [J]. 稀有金属, 2024, 48 (3): 398-410.

Yang Q S, Yan H W, Peng P, et al. Latest progress of high formability in Mg alloy sheets: A review [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2024, 48 (3): 398-410.

- [8] 陈飞腾, 蒋树农, 陈志永, 等. 热处理对大规格等温模锻 AZ80-Mg 镁合金机匣显微组织和拉伸力学性能的影响 [J]. 中国有色金属学报 (英文版), 2023, 33 (8): 2340-2350.

Chen F T, Jiang S N, Chen Z Y, et al. Effects of heat treatment on the microstructure and tensile mechanical properties of AZ80 Mg magnesium alloy casing in large scale isothermal forging [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2023, 33 (8): 2340-2350.

- [9] 杨柳, 段永川, 官英平. ZK61M 高强镁合金板热变形过程中的韧性断裂预测 [J]. 中国有色金属学报 (英文版), 2023, 33 (1): 95-106.

Yang L, Duan Y C, Guan Y P. Prediction of ductile fracture during hot deformation of ZK61M high-strength magnesium alloy sheet [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2023, 33 (1): 95-106.

- [10] 王继晨, 刘飞, 鲍益东, 等. 基于无网格法的镁合金等温锻造成形模拟分析 [J]. 锻压技术, 2023, 48 (2): 10-15.

Wang J C, Liu F, Bao Y D, et al. Simulation analysis of isothermal forging forming of magnesium alloy based on meshless method [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (2): 10-15.

- [11] 张坤敏, 秦晨, 余加, 等. 封闭锻造挤压镁合金同步提高强度和塑性 [J]. 中国有色金属学报 (英文版), 2022, 32 (9): 2866-2876.

(下转第 73 页)