

锻造工艺参数对新能源汽车用新型镁合金组织与性能的影响

杨 哲¹, 陈水胜²

(1. 长江工程职业技术学院 机电工程学院, 湖北 武汉 430212;
2. 湖北工业大学 机械工程学院, 湖北 武汉 430068)

摘要: 为了研究新能源汽车用 Mg-8Al-1Zn-0.6Ca 新型镁合金的锻造工艺, 获得优化工艺参数, 采用不同的锻造温度、锻造道次和压下量对 Mg-8Al-1Zn-0.6Ca 新型镁合金试样进行锻造加工, 并分析了各种锻造工艺参数下合金的显微组织以及力学性能。结果表明, 随着锻造温度从 250 ℃ 提高至 450 ℃、压下量从 30% 增加至 50%、锻造道次从 1 次增加至 5 次, 平均晶粒尺寸先减小后增大, 力学性能先提高后降低。在锻造温度为 350 ℃、锻造道次为 4 次、压下量为 45%、压下速率为 10 mm · s⁻¹ 的优化锻造工艺参数下, 试样的组织最细小, 抗拉强度和屈服强度均达到最大, 断后伸长率为 17.5%。

关键词: Mg-8Al-1Zn-0.6Ca 新型镁合金; 锻造工艺; 锻造温度; 锻造道次; 压下量

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2025.01.004

中图分类号: TH164

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2025) 01-0026-07

Influence of forging process parameters on microstructure and properties for new type magnesium alloy used in new energy vehicles

Yang Zhe¹, Chen Shuisheng²

(1. Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Changjiang Institute of Technology, Wuhan 430212, China;
2. School of Mechanical Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

Abstract: In order to study the forging process of new magnesium alloy Mg-8Al-1Zn-0.6Ca used in new energy vehicles and obtain optimized process parameters, new magnesium alloy Mg-8Al-1Zn-0.6Ca samples were forged in different forging temperatures, forging passes and reduction amounts. Then, the microstructures and mechanical properties of the alloy with various forging process parameters were analyzed. The results indicate that when the forging temperature changes from 250 ℃ to 450 ℃, the reduction amount increases from 30% to 50%, and the number of forging passes increases from 1 to 5, the average grain size decreases first and then increases, and the mechanical properties improves first and then decreases. Under the optimized forging process parameters with the forging temperature of 350 ℃, the forging pass of four, the reduction amount of 45%, and the reduction rate of 10 mm · s⁻¹, the structure of sample is the smallest, the tensile strength and the yield strength both reach the maximum values, and the elongation after fracture is 17.5%.

Key words: new type magnesium alloy Mg-8Al-1Zn-0.6Ca; forging process; forging temperature; forging pass; reduction amount

在迫切需要减重的新能源汽车领域, 比重小、比强度高、减震性能佳的镁合金具有巨大的市场潜力。科研人员和工程技术人员均对镁合金产生了极大的研究兴趣, 也取得了较多的研究成果^[1-5]。祁武超等^[6]深入分析了镁合金带式解锁装置在热冲击

作用下的断裂特性, 并在此基础上针对镁合金的冲击断裂特性进行了拓扑结构优化设计。安士忠等^[7]研究了稀土元素镧对 Mg-7Al-2Zn 镁合金耐腐蚀性能和电化学性能的影响。韦永毅等^[8]对铸态和挤压态的 AZ31 镁合金的摩擦学特性进行了详细对比。张天亮等^[9]探讨了 ZA81M 镁合金在多种摩擦状态下的耐磨损性能和磨损机制。尽管如此, 现阶段镁合金的综合性能仍未能完全满足预期, 镁合金在新能源汽车领域的大规模应用仍受到较大的限制。锻造是金属材料成形和改性的有效途径, 研究人员也在该方面进行了较多研究。詹磊等^[10]对轮毂用 6061 铝合金圆铸棒在锻造过程中出现的中心裂纹进行了分

收稿日期: 2024-05-07; 修订日期: 2024-08-17

基金项目: 国家自然科学基金委员会青年科学基金资助项目 (42107214); 湖北省自然科学基金资助项目 (2020CFB122)

作者简介: 杨 哲 (1987-), 女, 硕士, 副教授

E-mail: yipaqie616786@163.com

通信作者: 陈水胜 (1969-), 男, 硕士, 教授

E-mail: 17362905232@163.com

析,并提出了针对性优化方案。李旻昊等^[11]运用有限元技术,对镁合金锻造及弯曲过程中的反复变形进行了模拟计算,并与试验研究对比。肖振宇等^[12]采用分步锻造技术对 AZ91 镁合金进行成形处理,并探索了该工艺对合金组织和力学性能的影响机制。魏振华等^[13]探索和分析了锻造温度对 Inconel 625 镍基高温合金在锻造过程中的形变量以及晶粒尺寸的具体影响。李磊^[14]分析了锻造温度对 20CrMnTiVSr 新型汽车差速器齿轮性能的影响,发现最优始锻温度为 1220 ℃、最优终锻温度为 820 ℃。但截止目前为止,几乎没有文献涉及锻造态新能源汽车用 Mg-8Al-1Zn-0.6Ca 新型镁合金的研究。锻造温度、锻造道次和压下量对锻造态镁合金组织与性能的影响规律研究,是一个重要的研究课题,对于锻造态镁合金的商业化应用具有重要

作用。本文采用不同的锻造工艺参数获得了新能源汽车用锻造态 Mg-8Al-1Zn-0.6Ca 新型镁合金试样,探究锻造温度、锻造道次和压下量对其显微组织和力学性能的影响。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

锻造试验的锻坯为 380 ℃×12 h 均匀化处理后的 Mg-8Al-1Zn-0.6Ca 新型镁合金铸锭。均匀化后去除表面氧化皮,获得所需锻坯。矩形锻坯尺寸为 200 mm (长度)×100 mm (宽度)×150 mm (高度)。Mg-8Al-1Zn-0.6Ca 新型镁合金锻坯采用 EDX1800 型 X 射线荧光光谱仪进行化学成分测试,结果如表 1 所示。

表 1 Mg-8Al-1Zn-0.6Ca 新型镁合金锻坯的化学成分 (%, 质量分数)

Table 1 Chemical composition of Mg-8Al-1Zn-0.6Ca new type magnesium alloy forging blank (%, mass fraction)

化学元素	Al	Zn	Ca	Mn	Si	Fe	其他杂质元素	Mg
要求成分	8.0±0.5	1.0±0.2	0.6±0.2	0.6±0.2	≤0.050	≤0.010	≤0.15	余量
实测成分	7.924	1.086	0.606	0.593	0.012	0.004	0.124	余量

1.2 锻造试验

Mg-8Al-1Zn-0.6Ca 新型镁合金锻坯在 1000 t 液压机上进行锻造试验,锻造过程中改变锻造温度、锻造道次和压下量,保持压下速率为 10 mm·s⁻¹ 不变。所述压下量为 Mg-8Al-1Zn-0.6Ca 新型镁合金锻坯在高度方向上的变形量,具体计算公式见式 (1)。Mg-8Al-1Zn-0.6Ca 新型镁合金试样的具体锻造工艺参数如表 2 所示。

$$\eta = \frac{H_0 - H_1}{H_0} \times 100\%$$

(1)

式中:η 为压下量;H₀ 为试样锻造前的高度;H₁ 为试样锻造后的高度。

1.3 组织与性能

(1) 显微组织

在不同工艺参数下锻造成形的 Mg-8Al-1Zn-0.6Ca 新型镁合金试样中部切取金相试件,砂纸打磨,抛光后进行腐蚀 (15 g 苦味酸、5 mL 冰醋酸、5 mL 去离子水和 90 mL 无水乙醇的混合溶液),吹干后在 Olympus BX53 型金相显微镜下观察显微组织,并通过 Image Pro Plus 软件对试样的平均晶粒尺寸进行统计计算。每种锻造工艺参数下的试样切取 3

表 2 锻造工艺参数

Table 2 Forging process parameters

试样编号	锻造温度/ ℃	锻造道次/ 次	压下量/%	压下速度/ (mm·s ⁻¹)
1#	250	4	45	
2#	300	4	45	
3#	350	4	45	
4#	400	4	45	
5#	450	4	45	
6#	350	1	45	
7#	350	2	45	10
8#	350	3	45	
9#	350	5	45	
10#	350	4	30	
11#	350	4	35	
12#	350	4	40	
13#	350	4	50	

个金相试件,取其晶粒尺寸测试值的算术平均值作为此工艺参数下的合金晶粒尺寸值。

(2) 力学性能

在不同工艺参数下锻造成形的 Mg-8Al-1Zn-0.6Ca 新型镁合金试样的上、中、下位置分别切取

板状拉伸试件, 具体尺寸如图 1 所示。在室温环境下, 以 $1 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 的拉伸速度在新三思 CMT5000 型万能试验机上进行力学性能测试。取 3 个试件力学性能测试值的算术平均值作为此工艺参数下合金的力学性能数值。

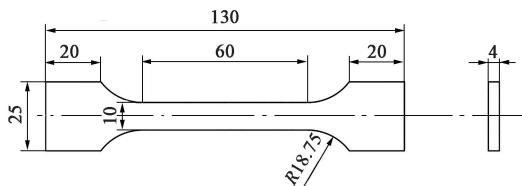


图 1 拉伸试样尺寸

Fig. 1 Tensile specimen sizes

2 试验结果及讨论分析

2.1 锻造温度对合金组织和力学性能的影响

锻造道次为 4 次、压下量为 45%、压下速率为 $10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 合金的显微组织和平均晶粒尺寸随锻造温度的变化分别如图 2 和图 3 所示, 力学性能测试结果如图 4 所示。

由图 2~图 3 可知, 随着锻造温度从 $250 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 升高至 $450 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 显微组织先细化后粗化, 平均晶粒尺寸先

减小后变大。 $350 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 平均晶粒尺寸为 $9.4 \text{ }\mu\text{m}$ 、显微组织最细小; $250 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 平均晶粒尺寸为 $16.1 \text{ }\mu\text{m}$ 、显微组织最粗大。所以, 选择恰当的锻造温度有助于 Mg-8Al-1Zn-0.6Ca 新型镁合金获得更细小的显微组织。

根据图 4 的结果可知, 随着锻造温度从 $250 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 升高至 $450 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 抗拉强度和屈服强度先提高后下降, 断后伸长率先基本不变后提高。其中, $350 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 合金的抗拉强度和屈服强度均最大, 分别为 296 和 227 MPa, 断后伸长率为 17.5%。

2.2 锻造道次对合金组织和力学性能的影响

锻造温度为 $350 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、压下量为 45%、压下速率为 $10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 合金的显微组织和平均晶粒尺寸随锻造道次的变化分别如图 5 和图 6 所示, 力学性能测试结果如图 7 所示。

根据图 5 和图 6 的结果可知, 随着锻造道次从 1 次增加至 5 次, 显微组织先细化后粗化, 平均晶粒尺寸先减小后稍有增大。当锻造道次为 4 次时, 平均晶粒尺寸为 $9.4 \text{ }\mu\text{m}$ 、显微组织最细小; 当锻造道次为 1 次时, 平均晶粒尺寸为 $18.3 \text{ }\mu\text{m}$ 、显微组织最粗大。所以, 选择恰当的锻造道次有助于 Mg-8Al-1Zn-0.6Ca 新型镁合金获得更细化的显微组织。

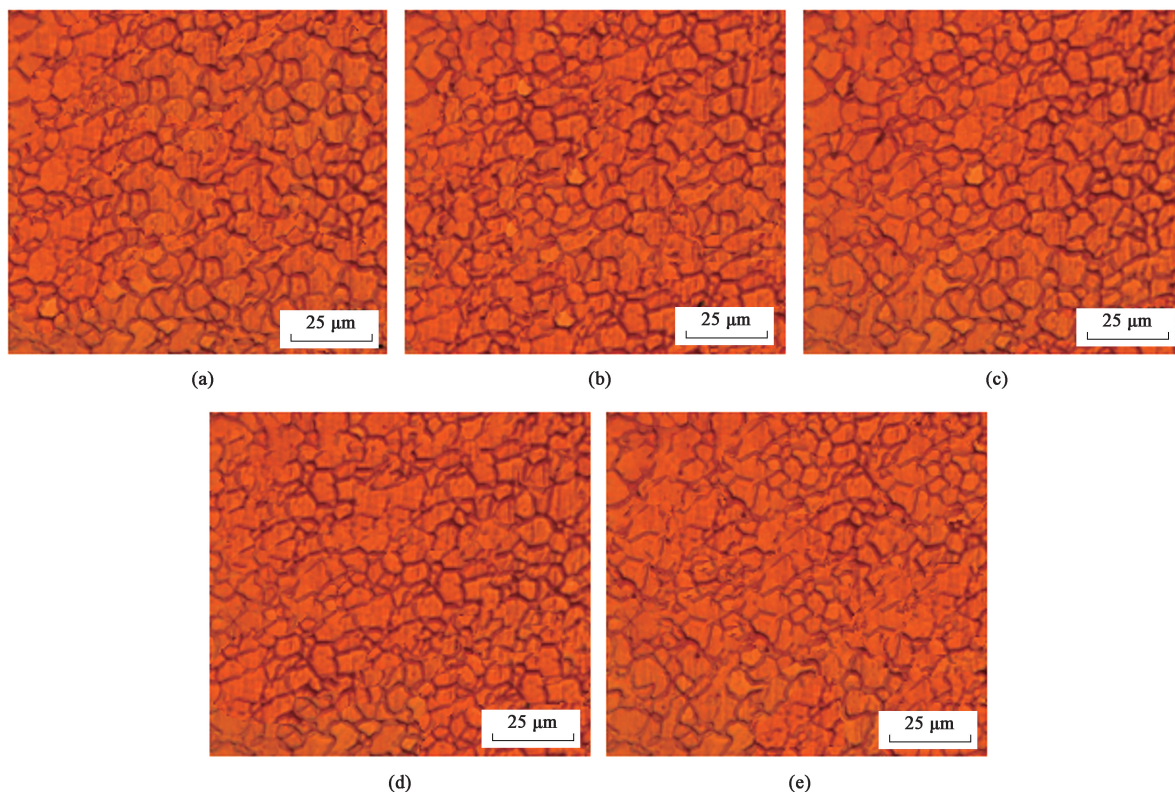


图 2 不同锻造温度下合金的显微组织

(a) $250 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (b) $300 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (c) $350 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (d) $400 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (e) $450 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Fig. 2 Microstructures of alloy with different forging temperatures

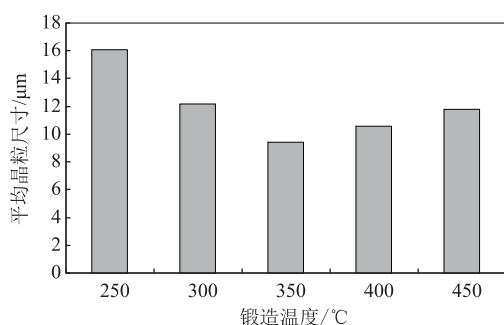


图3 锻造温度对合金平均晶粒尺寸的影响

Fig. 3 Effect of forging temperature on average grain size of alloy

根据图7的结果可知,随着锻造温度从250℃升高至450℃,合金试样的抗拉强度和屈服强度先提高后降低,断后伸长率先下降后基本不变。其中,当锻造道次为4次时,抗拉强度和屈服强度均最大,分别为296和227 MPa,断后伸长率为17.5%;锻造道次为1次时,试样的抗拉强度和屈服强度均最小,分别为252、195 MPa,断后伸长率最大(18.3%)。

2.3 压下量对合金组织和力学性能的影响

在锻造温度为350℃、锻造道次为4次、压下

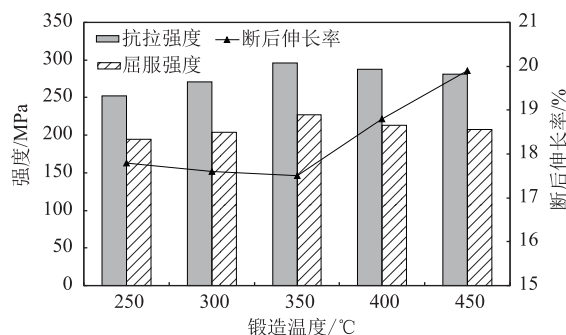


图4 锻造温度对合金力学性能的影响

Fig. 4 Effects of forging temperature on mechanical properties of alloy

速率为 $10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 下,合金的显微组织和平均晶粒尺寸随压下量的变化分别如图8和图9所示,力学性能测试结果如图10所示。

根据图8和图9的结果可知,随着压下量从30%增大至50%,显微组织先细化后粗化、平均晶粒尺寸先减小后变大,压下量为45%时,显微组织最细小、平均晶粒尺寸为 $9.4 \mu\text{m}$;压下量为30%时,平均晶粒尺寸为 $15.4 \mu\text{m}$ 、显微组织最粗大。由此可以看出,在锻造温度为350℃、锻造道次为

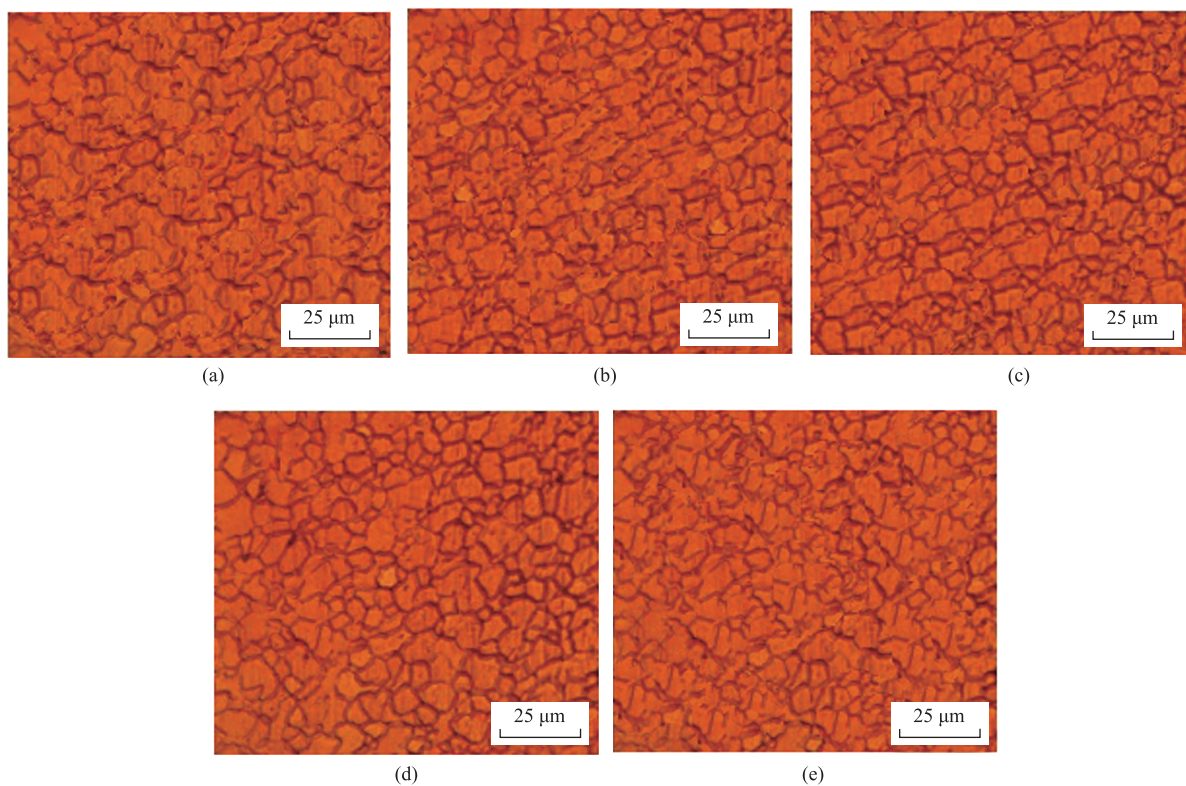


图5 不同锻造道次下合金的显微组织

(a) 1道次 (b) 2道次 (c) 3道次 (d) 4道次 (e) 5道次

Fig. 5 Microstructures of alloy with different forging passes

(a) One pass (b) Two passes (c) Three passes (d) Four passes (e) Five passes

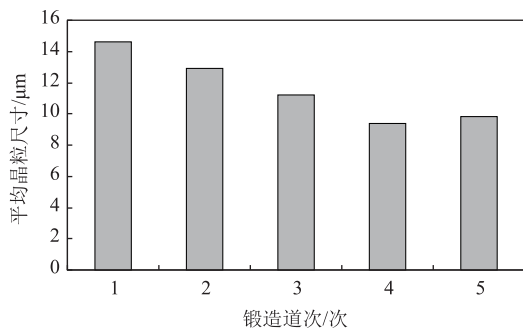


图 6 锻造道次对合金平均晶粒尺寸的影响

Fig. 6 Effect of forging pass on average grain size of alloy

4 次、压下量为 45%、压下速率为 $10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 下, 锻造态 Mg-8Al-1Zn-0.6Ca 新型镁合金内部晶粒基本均为动态再结晶后的细小颗粒, 在平面下, 颗粒表现为圆形或近圆形, 合金内部晶粒尺寸大小较为一致、晶粒分布也较为均匀。

根据图 10 的结果可知, 随着压下量从 30% 增大至 50%, 合金的抗拉强度和屈服强度先提高后下降, 断后伸长率则先降低后提高。压下量为 45% 时, 合金的抗拉强度 (296 MPa) 和屈服强度 (227 MPa) 均最大, 断后伸长率为 17.5%。压下

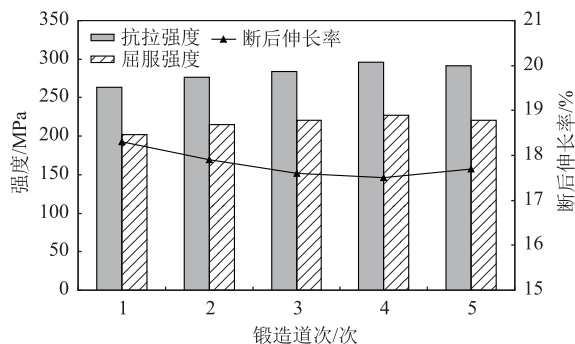


图 7 锻造道次对合金力学性能的影响

Fig. 7 Effects of forging pass on mechanical properties of alloy

量为 30% 时, 试样的抗拉强度 (263 MPa) 和屈服强度 (198 MPa) 为本组试验数据中的最小数值, 断后伸长率是本组试验数据中的最大数值 (19.4%)。

2.4 讨论与分析

在 Mg-8Al-1Zn-0.6Ca 新型镁合金试样锻造过程中, 锻造温度是一个非常重要的工艺参数。若锻造过程中的温度太低, 则难以进行充分的动态再结晶, 从而使得合金试样内部的晶粒较为粗大、平均晶粒尺寸较大, 合金试样难以获得较高的抗

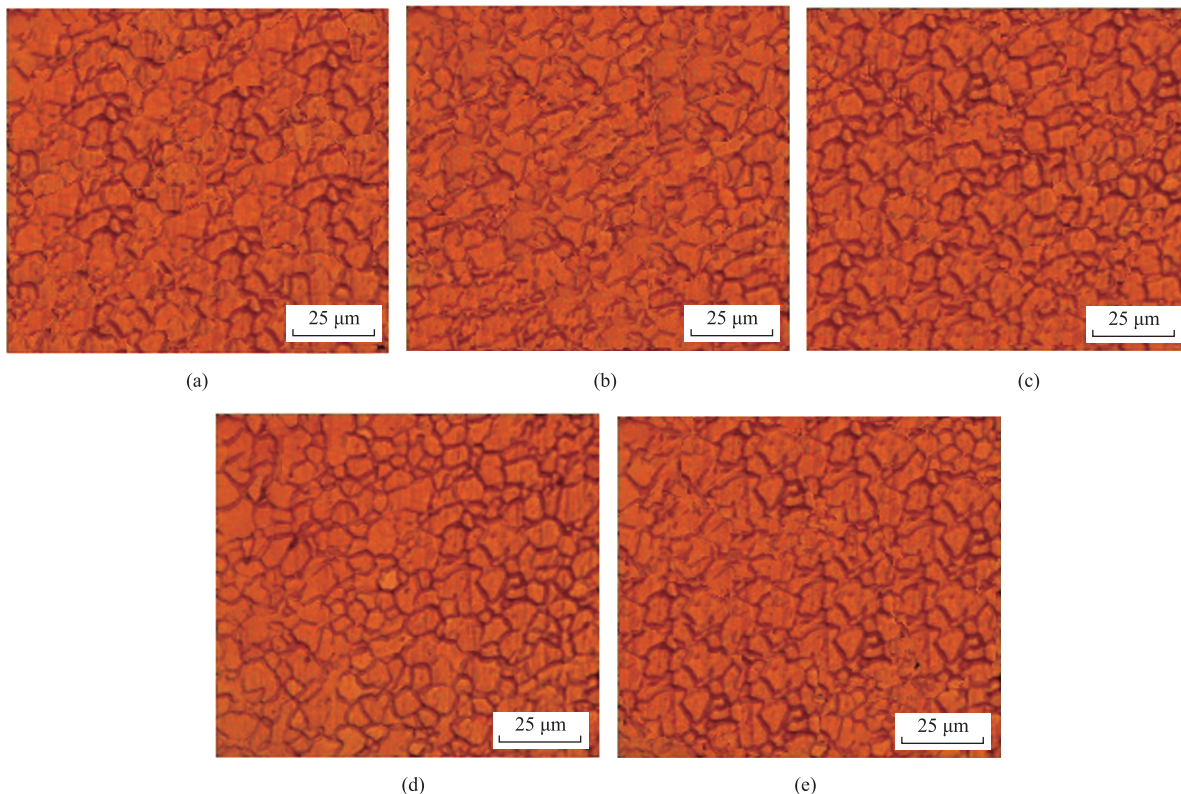


图 8 不同压下量下合金的显微组织

(a) 30% (b) 35% (c) 40% (d) 45% (e) 50%

Fig. 8 Microstructures of alloy with different reduction amounts

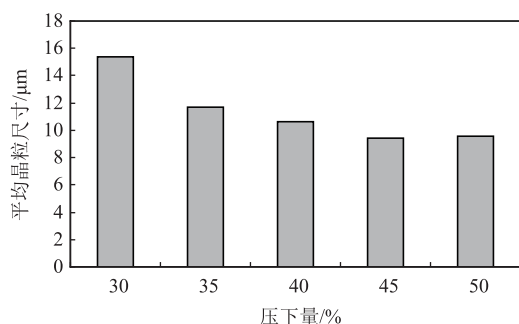


图 9 压下量对合金平均晶粒尺寸的影响

Fig. 9 Effects of reduction amount on average grain size of alloy

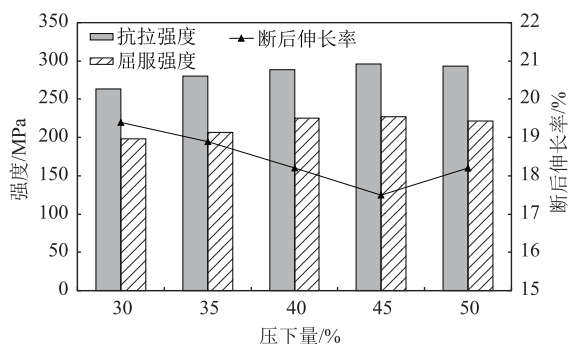


图 10 压下量对合金力学性能的影响

Fig. 10 Effects of reduction amount on mechanical properties of alloy

拉强度和屈服强度;此外,过低的锻造温度也导致合金的变形抗力较大,容易在锻造过程中产生内部微裂纹甚至发生开裂,进一步导致合金的抗拉强度和屈服强度降低。适当增加锻造温度,有助于促进合金在锻造过程中的动态再结晶,并能有效减小锻造过程中的变形抗力,细化晶粒,促使合金在具备较好断后伸长率的前提下提高其抗拉强度和屈服强度,使得锻造态 Mg-8Al-1Zn-0.6Ca 新型镁合金具有理想的组织和力学性能。但是,锻造温度并不是越高越好,过高的锻造温度容易使得 Mg-8Al-1Zn-0.6Ca 新型镁合金在锻造过程中发生过烧或者过热,引起内部晶粒粗化,导致合金的力学性能下降。所以,在 Mg-8Al-1Zn-0.6Ca 新型镁合金锻造过程中,锻造温度从 250 ℃ 提高至 450 ℃ 时,合金的平均晶粒尺寸先减小后增大、力学性能先提高后下降,合金的锻造温度不宜过高也不宜过低。

锻造道次也是 Mg-8Al-1Zn-0.6Ca 新型镁合金锻造过程中的一个重要工艺参数。如果合金在锻造过程中的锻造道次太少,合金无法进行充分的动态再结晶,合金内部的晶粒就会较为粗大、平均晶粒尺寸较大,合金无法获得较高的抗拉强度和屈服强度,

难以得到理想的力学性能。适当增加锻造道次,有助于促进合金在锻造过程中的动态再结晶,从而细化晶粒,促使合金具备较高的抗拉强度和屈服强度的同时还具有较好的断后伸长率,使得锻造态 Mg-8Al-1Zn-0.6Ca 新型镁合金具有理想的组织和力学性能。但是,合金的晶粒尺寸并不会随着锻造道次的增加持续减小,这主要是因为合金在一定的锻造温度和压下量下,其晶粒无法一直细化下去,当达到一定锻造道次后再进一步增加锻造道次, Mg-8Al-1Zn-0.6Ca 新型镁合金的平均晶粒尺寸及力学性能基本保持不变。所以,在 Mg-8Al-1Zn-0.6Ca 新型镁合金锻造过程中,随着锻造道次从 1 次增加至 5 次,合金的平均晶粒尺寸先减小后增大、力学性能先提高后降低,合金的锻造道次不宜过少也不宜过多。

除了锻造温度和锻造道次以外,压下量也是 Mg-8Al-1Zn-0.6Ca 新型镁合金锻造过程中的一个重要工艺参数。如果合金在锻造过程中的压下量太小,合金很难在锻造过程中进行充分的动态再结晶,获得的锻造态合金的内部晶粒较粗大、平均晶粒尺寸较大,合金无法获得较高的抗拉强度和屈服强度,难以得到理想的力学性能。适当增加压下量,有助于促进合金在锻造过程中的动态再结晶,从而细化晶粒,促使合金具备较高的抗拉强度和屈服强度的同时还具有较好的断后伸长率,使得锻造态 Mg-8Al-1Zn-0.6Ca 新型镁合金具有理想的组织和力学性能。但是,合金在锻造过程中的压下量并非越大越好。过大的压下量容易导致合金在锻造过程中发生失稳而产生内部微裂纹,并有可能引起过热造成内部晶粒粗化,进而导致合金的力学性能下降。所以,在 Mg-8Al-1Zn-0.6Ca 新型镁合金锻造过程中,随着压下量从 30% 增加至 50%,合金的平均晶粒尺寸先减小后增大、力学性能先提高后下降,合金的压下量不宜过小也不宜过大。

3 结论

(1) 锻造过程中的锻造温度、锻造道次和压下量都是影响 Mg-8Al-1Zn-0.6Ca 新型镁合金组织和力学性能的重要工艺参数。在锻造温度为 350 ℃、锻造道次为 4 次、压下量为 45%、压下速率为 $10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 的优化参数下,锻造态 Mg-8Al-1Zn-

0.6Ca 新型镁合金的内部组织最细小、平均晶粒尺寸最小,为 9.4 μm ,抗拉强度和屈服强度均达到最大值,分别为 296 和 227 MPa,断后伸长率为 17.5%。

(2) 随着锻造温度从 250 $^{\circ}\text{C}$ 提高至 450 $^{\circ}\text{C}$,合金的平均晶粒尺寸先减小后增大,力学性能先提高后下降。

(3) 随着锻造道次从 1 次增加至 5 次,合金的平均晶粒尺寸先减小后增大,力学性能先提高后降低。

(4) 随着压下量从 30% 增加至 50%,合金的平均晶粒尺寸先减小后增大,力学性能先提高后下降。

参考文献:

- [1] Easton M, Beer A, Barnett M, et al. Magnesium alloy applications in automotive structures [J]. The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society, 2008, 60 (1): 57-62.
- [2] Saeed G S, Ehsan G. The effect of calcium addition and rotational speed on the microstructure and solidification parameters of AZ91 magnesium alloy in semi-solid casting of rotating vessels [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2023, 33 (2): 396-408.
- [3] 张弛, 王俊升, 李鑫, 等. 耐腐蚀镁合金的成分设计方法研究进展 [J]. 航空制造技术, 2023, 66 (6): 85-98, 118.
Zhang C, Wang J S, Li X, et al. Research progress on composition design methods of corrosion-resistant magnesium alloys [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66 (6): 85-98, 118.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 祁武超, 刘炳宏, 田素梅. 镁合金带解锁装置热冲击断裂特性及拓扑优化 [J]. 兵器装备工程学报, 2023, 44 (11): 47-56.
Qi W C, Liu B H, Tian S M. Fracture characteristics and topology optimization of unlocking devices with magnesium alloy strip under thermal shock environment [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2023, 44 (11): 47-56.
- [7] 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 the corrosion and electrochemical properties of Mg-7Al-2Zn magnesium alloy anode materials [J]. Journal of Henan University of Science & Technology (Natural Science), 2023, 44 (2): 17-24.
- [8] 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.
- [9] 张天亮, 王婷婷, 隋雨婷, 等. 不同摩擦状态下 ZA81M 镁合金磨损行为研究 [J]. 液气气动与密封, 2023, 43 (4): 49-55.
Zhang T L, Wang T T, Sui Y T, et al. Wear behaviors of ZA81M magnesium alloy in different friction conditions [J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2023, 43 (4): 49-55.
- [10] 詹磊, 何生平, 郝海. 锻压轮毂用 6061 铝合金圆铸棒中心裂纹分析及改进 [J]. 轻金属, 2023 (11): 44-48.
Zhan L, He S P, Hao H. Analysis and improvement of center crack of 6061 aluminum alloy billet for forged hubs [J]. Light Metals, 2023 (11): 44-48.
- [11] 李旻昊, 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.
- [12] 肖振宇, 杨溢, 袁星宇, 等. 分步锻压工艺对 AZ91 镁合金组织演化及力学性能的影响 [J]. 中国有色金属学报, 2018, 28 (11): 2173-2181.
Xiao Z Y, Yang Y, Yuan X Y, et al. Effects of interrupted forging on microstructural development and mechanical properties of cast AZ91 Mg alloy [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2018, 28 (11): 2173-2181.
- [13] 魏振华, 李铸国, Durand Camille. 不同温度锻压时 Inconel 625 镍基高温合金的形变量和晶粒尺寸 [J]. 机械工程材料, 2019, 43 (3): 67-71.
Wei Z H, Li Z G, Durand Camille. Deformation amount and grain size of Inconel 625 Ni-based superalloy during forging at different heating temperatures [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2019, 43 (3): 67-71.
- [14] 李磊. 锻压温度对新型汽车差速器齿轮性能的影响 [J]. 制造技术与机床, 2020 (5): 28-31.
Li L. Influence of forging temperature on the performance of new automotive differential gears [J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2020 (5): 28-31.