

# 锻造态汽车用 Mg-9Gd-5.5Y-2Zn-0.6Mn 高强镁合金的组织与力学性能

董彦晓<sup>1</sup>, 武一民<sup>2</sup>

(1. 河北交通职业技术学院 汽车工程系, 河北 石家庄 050035; 2. 河北工业大学 机械工程学院, 天津 300401)

**摘要:** 对汽车用 Mg-9Gd-5.5Y-2Zn-0.6Mn 高强镁合金试样的始锻温度、终锻温度、加热温度、保温时间、锻造压力、锻造速度和锻造次数进行了调整和优化, 始锻温度由 430 ℃ 提高至 450 ℃、终锻温度由 360 ℃ 降低至 330 ℃、加热温度由 430 ℃ 提高至 450 ℃、保温时间由 30 min 延长至 40 min、锻造压力由 680 kN 降低至 630 kN、锻造速度由 20 mm · min<sup>-1</sup> 提高至 25 mm · min<sup>-1</sup>、锻造次数由 1 次增加至 2 次; 并对锻造工艺参数优化前后制得的合金试样的显微组织和力学性能进行了测试与对比分析。结果表明, 工艺参数优化后, 合金试样的显微组织得到明显细化; 合金试样的断后伸长率为 7.1%, 较优化前基本保持不变; 抗拉强度为 425 MPa, 屈服强度为 342 MPa, 较优化前分别提高了 37 和 32 MPa。

**关键词:** 高强镁合金; 锻造工艺参数; 参数优化; 显微组织; 力学性能

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2025.05.005

中图分类号: TH164

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2025) 05-0040-07

## Microstructure and mechanical properties of forged high-strength magnesium alloy Mg-9Gd-5.5Y-2Zn-0.6Mn for automobile

Dong Yanxiao<sup>1</sup>, Wu Yimin<sup>2</sup>

(1. Department of Automotive Engineering, Hebei Jiaotong Vocational and Technical College, Shijiazhuang 050035, China;

2. School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

**Abstract:** The initial forging temperature, final forging temperature, heating temperature, holding time, forging force, forging speed and forging times of high-strength magnesium alloy Mg-9Gd-5.5Y-2Zn-0.6Mn specimens for automobile were adjusted and optimized. The initial forging temperature is increased from 430 ℃ to 450 ℃, the final forging temperature is decreased from 360 ℃ to 330 ℃, the heating temperature is increased from 430 ℃ to 450 ℃, the holding time is extended from 30 min to 40 min, the forging force is reduced from 680 kN to 630 kN, the forging speed is increased from 20 mm · min<sup>-1</sup> to 25 mm · min<sup>-1</sup>, and the forging times are increased from 1 to 2 times, and the microstructure and mechanical properties of the alloy specimens before and after the optimization of forging process parameters were tested and compared. The results show that the microstructure of high-strength magnesium alloy Mg-9Gd-5.5Y-2Zn-0.6Mn specimen is significantly refined after optimizing the process parameters, and the elongation after fracture of the alloy specimen is 7.1%, which is basically unchanged compared with that before the optimization. The tensile strength is 425 MPa, and the yield strength is 342 MPa, which are increased by 37 MPa and 32 MPa, respectively, compared to those before the optimization.

**Key words:** high-strength magnesium alloy; forging process parameters; parameter optimization; microstructure; mechanical property

高强镁合金在汽车、航空航天等领域极具应用前景, 其研究也得到了越来越广泛的关注<sup>[1-2]</sup>。李旻昊等<sup>[3]</sup>对镁合金锻压-弯曲反复变形进行了有限元数值模拟分析以及试验研究。王继晨等<sup>[4]</sup>基于无网格法对镁合金等温锻造成形进行了数值模

拟分析。王智勇等<sup>[5]</sup>对航空用 ZK61M 镁合金锻件的成形工艺进行了模拟及试验验证。Zhang K M 等<sup>[6]</sup>采用封闭锻造挤压的方式同步提高了镁合金的强度和塑性。戚勇和姜一达<sup>[7]</sup>探索了锻压温度对挤锻复合成形 AZ80-CeTi 镁合金性能的影响规律。聂志诚等<sup>[8]</sup>研究了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产生的影响。聂焱和王祝堂<sup>[9]</sup>研究了镁合金锻造工艺。宋杰<sup>[10]</sup>基于 Dynaform 软件进行了 AZ91D 镁合金盘体冲锻工艺优化。王海彬等<sup>[11]</sup>研究了锻造温度对 ZK61M

收稿日期: 2024-06-13; 修订日期: 2024-09-20

基金项目: 河北省“三三三人才工程”资助项目 (C20221036)

作者简介: 董彦晓 (1990-), 女, 硕士, 讲师

E-mail: dpdongyanxiao@163.com

镁合金显微组织和力学性能的影响。罗航<sup>[12]</sup>对 Mg-9Gd-5.5Y-2Zn-0.6Mn 高强镁合金非对称反挤压进行了数值模拟及试验研究。晏梓翔<sup>[13]</sup>对高强 Mg-Gd 系镁合金的微观结构与力学性能进行了研究。

Mg-9Gd-5.5Y-2Zn-0.6Mn 高强镁合金具有比强度高、室温和高温强度高、抗蠕变性能好、电磁屏蔽性能佳等特点，是一种吸引了众多科研人员研究的稀土镁合金。锻造是高强镁合金常用成形方法之一，但高强镁合金的锻造加工难度较大，在锻造加工过程中容易出现过度变形、裂纹等问题，必须严格控制锻造温度、锻造压力和锻造速度等工艺参数。目前，关于 Mg-9Gd-5.5Y-2Zn-0.6Mn 高强镁合金锻造的相关研究还鲜有报道。本文对汽车用 Mg-9Gd-5.5Y-2Zn-0.6Mn 高强镁合金锻造工艺进行优化，以期获得性能更佳的锻造态汽车用 Mg-9Gd-5.5Y-2Zn-0.6Mn 高强镁合金。

1 试样成分、性能要求及锻件图

锻造态汽车用 Mg-9Gd-5.5Y-2Zn-0.6Mn 高强镁合金试样的化学成分及性能要求分别如表 1 和表 2 所示。Mg-9Gd-5.5Y-2Zn-0.6Mn 高强镁合金采用感应熔炼法进行制备，并进行了 380 ℃×12 h 的均匀化处理，去除表面氧化皮后得到高强镁合金锻前毛坯。毛坯为圆棒状，尺寸为  $\Phi 50\text{ mm}\times 109\text{ mm}$ 。在加热状态下利用 Y13-1000 型自由锻液压机进行高强镁合金试样的锻造试验，所有锻件试样均采用单向拔长方式进行锻造，且锻造时所有试样的锻前毛坯和锻后锻件尺寸均相同，即所有锻件试样的总变形量（变形程度）均相同。图 1a 为汽车用 Mg-9Gd-5.5Y-2Zn-0.6Mn 高强镁合金试样锻件实物图，锻件为圆棒状，其具体尺寸如图 1b 所示。

表 1 锻造态 Mg-9Gd-5.5Y-2Zn-0.6Mn 高强镁合金试样的化学成分（%，质量分数）

Table 1 Chemical compositions of forged high-strength magnesium alloy Mg-9Gd-5.5Y-2Zn-0.6Mn specimen (%, mass fraction)

化学元素	Gd	Y	Zn	Mn	Si	Fe	其他杂质元素	Mg
要求成分	9.0±0.5	5.5±0.5	2±0.5	0.6±0.1	≤0.005	≤0.050	≤0.15	余量
实测成分	9.124	5.834	2.212	0.641	0.002	0.011	0.104	余量

表 2 锻造态 Mg-9Gd-5.5Y-2Zn-0.6Mn 高强镁合金  
试样力学性能要求

Table 2 Mechanical property requirements for forged high-strength magnesium alloy Mg-9Gd-5.5Y-2Zn-0.6Mn specimen

参数	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	断后伸长率/%
数值	≥400	≥320	≥6

2 优化前锻造工艺参数及分析

2.1 优化前锻造工艺参数及存在问题

华北某镁合金企业在生产汽车用 Mg-9Gd-5.5Y-2Zn-0.6Mn 高强镁合金棒状锻件时发现，成品锻件的抗拉强度为 388 MPa、屈服强度为 310 MPa、断后伸长率为 7.2%，其中抗拉强度低于客户要求的

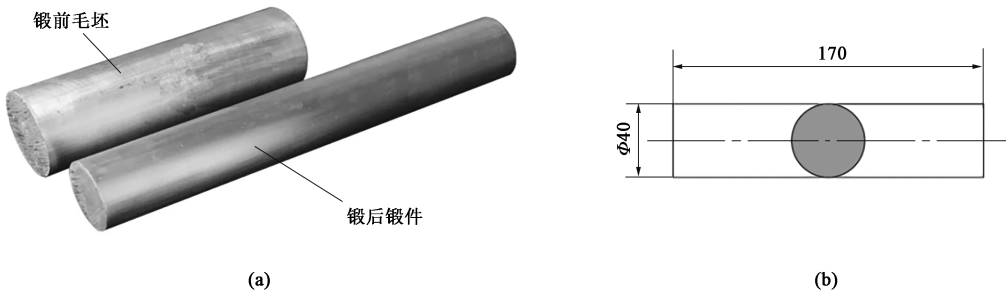


图 1 Mg-9Gd-5.5Y-2Zn-0.6Mn 高强镁合金试样锻件实物图 (a) 及尺寸图 (b)

Fig. 1 Physical map (a) and dimension drawing (b) of forgings for high-strength magnesium alloy Mg-9Gd-5.5Y-2Zn-0.6Mn specimen

≥400 MPa、屈服强度低于客户要求的 ≥320 MPa，无法满足客户需求；此外，锻件内部晶粒组织均匀性较差、晶粒尺寸较粗大、表面光洁度较差，有待改进。该企业汽车用 Mg-9Gd-5.5Y-2Zn-0.6Mn 高强镁合金的锻造方式为单向拔长，具体的锻造工艺参数如表 3 所示。

表 3 Mg-9Gd-5.5Y-2Zn-0.6Mn 高强镁合金试样优化前的锻造工艺参数

Table 3 Forging process parameters for high-strength magnesium alloy Mg-9Gd-5.5Y-2Zn-0.6Mn specimens before optimization									
参数	始锻温度/℃	终锻温度/℃	炉温/℃	保温时间/s	锻造压力/ kN	锻造速度/ (mm·min <sup>-1</sup> )	锻造次数/ 次	模具预热 温度/℃	锻造变形 量/%
数值	430	360	430	30	680	20	1	250	20

2.2 锻造工艺参数影响分析

Mg-9Gd-5.5Y-2Zn-0.6Mn 高强镁合金在锻造高温下的表面摩擦因数较大、粘附力较大、流动性较差，且高温下容易发生氧化，易在锻件中产生孔洞、微裂纹等内部缺陷，表面成形状态差，力学性能不理想。基于 Mg-9Gd-5.5Y-2Zn-0.6Mn 高强镁合金自身物化性能，以及高强镁合金锻造加工难度大、锻造工艺参数控制严格等锻造工艺特点及条件，针对前述 Mg-9Gd-5.5Y-2Zn-0.6Mn 高强镁合金锻造存在的问题，进行了工艺优化探索。前期探索试验结果如表 4 所示，试样的总锻造变形量均为 20%，当锻造次数为 2 次时，第 1 次锻造变形量均为 8%、第 2 次锻造变形量均为 12%。

表 4 Mg-9Gd-5.5Y-2Zn-0.6Mn 高强镁合金试样锻造的前期探索试验结果

Table 4 Pre-exploration test results of forging for high-strength magnesium alloy Mg-9Gd-5.5Y-2Zn-0.6Mn specimens												
试验编号		T1#	T2#	T3#	T4#	T5#	T6#	T7#	T8#	T9#	T10#	T11#
锻造工艺 参数	始锻温度/℃	450	470	430	450	470	430	450	470	430	450	470
	终锻温度/℃	300	330	300	360	330	330	360	300	360	330	300
	加热温度/℃	450	470	430	450	470	430	450	470	430	450	470
	保温时间/s	50	40	50	40	30	30	40	50	30	40	50
	锻造压力/kN	630	580	680	630	580	580	630	680	630	580	680
	锻造速度/(mm·min <sup>-1</sup> )	30	25	30	25	20	20	30	25	25	20	30
	锻造次数/次	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1
	模具预热温度/℃	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250
	总锻造变形量/%	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
锻件力学 性能	抗拉强度/MPa	412	376	382	404	371	387	400	396	414	419	384
	屈服强度/MPa	339	298	301	326	292	309	319	315	336	341	303
	断后伸长率/%	6.9	8.1	7.1	6.9	8.3	6.9	7.2	7.0	6.9	6.9	7.9

在 Mg-9Gd-5.5Y-2Zn-0.6Mn 高强镁合金试样锻造工艺中，工艺参数的设定直接影响了试样的质量和成形效果，工艺参数除了锻造方式和模具预热温度外，还主要包括始锻温度、终锻温度、加热温度、保温时间、锻造压力、锻造速度以及锻造次数等，他们之间相互影响，需要综合考虑和调整。

始锻温度和终锻温度是影响 Mg-9Gd-5.5Y-2Zn-0.6Mn 高强镁合金试样锻造工艺的重要因素之一，温度过高或过低均会影响材料的塑性变形和流动性，从而影响产品的成形质量。

Mg-9Gd-5.5Y-2Zn-0.6Mn 高强镁合金试样锻造时的加热温度和保温时间，不仅影响合金的加工塑性，而且还影响锻件锻后的组织和力学性能。若加热温度过低，变形不够充分，甚至会形成裂纹，严重影响合金试样的性能。如果加热温度过高、保温时间过长或加热次数过多，则再结晶愈充分且晶粒尺寸增大，使镁合金的抗拉强度和屈服强度降低，即产生软化现象。这种晶粒长大及软化现象，不能靠随后的热处理来补救，所以，必须严格控制锻造工艺，最终锻造工序的加热温度应取下限，才能保证锻件性能。

Mg-9Gd-5.5Y-2Zn-0.6Mn 高强镁合金试样锻造

时的锻造压力也是至关重要的工艺参数。合理的锻造压力可以保证材料的充分填充和成形，过高或过低的压力均会导致产品出现缺陷。

Mg-9Gd-5. 5Y-2Zn-0. 6Mn 高强镁合金试样锻造时的锻造速度也会对试样的成形质量产生影响。合适的锻造速度可以保证试样表面的光洁度和尺寸精度，而过快或过慢的速度均会导致产品表面粗糙或尺寸不准确。

Mg-9Gd-5. 5Y-2Zn-0. 6Mn 高强镁合金试样锻造时的锻造次数也是锻造加工中一个非常重要的考虑因素。较高的锻造次数可以使合金的晶粒变细，提高其拉伸性能和塑性。但是过多的锻造次数也会增加生产成本和降低生产效率。因此，在确保锻造质量的前提下，选择适当的锻造次数才能更加有效地降低生产成本。

综上所述，Mg-9Gd-5. 5Y-2Zn-0. 6Mn 高强镁合金试样锻造工艺的优化需要充分考虑工艺参数的影响因素，始锻温度、终锻温度、加热温度、保温时

间、锻造压力、锻造速度和锻造次数都是需要综合考虑和调整的因素，只有合理调整这些工艺参数，才能够保证试样的锻造质量和成形效果。因此，在实际的锻造过程中，需要对这些工艺参数进行科学合理的设定，不断优化工艺流程，提高产品的质量和生产效率。

### 3 优化后锻造工艺参数及分析

#### 3.1 优化后锻造工艺参数

对汽车用 Mg-9Gd-5. 5Y-2Zn-0. 6Mn 高强镁合金试样的锻造工艺进行优化，锻造方式仍为单向拔长，模具预热温度仍设置为 250 ℃、总锻造变形量仍为 20%（第 1 次锻造变形量为 8%、第 2 次锻造变形量为 12%），但是对始锻温度、终锻温度、加热温度、保温时间、锻造压力、锻造速度和锻造次数等工艺参数进行调整，优化后的具体锻造工艺参数如表 5 所示。

表 5 Mg-9Gd-5. 5Y-2Zn-0. 6Mn 高强镁合金试样优化后锻造工艺参数

参数	始锻温度/ ℃	终锻温度/ ℃	炉温/℃	保温时间/ s	锻造压力/ kN	锻造速度/ (mm · min <sup>-1</sup> )	锻造次数/ 次	模具预热温度/ ℃	总锻造变形 量/%
数值	450	330	450	40	630	25	2	250	20

#### 3.2 组织与性能测试分析

在锻造工艺优化前后的 Mg-9Gd-5. 5Y-2Zn-0. 6Mn 高强镁合金试样中部切取直径为  $\Phi 20$  mm、高度为 8 mm 的金相试片，经金相制样、腐蚀后，采用 Olympus BX53M 金相显微镜和 EVO18 型扫描电子显微镜进行锻造态合金试样显微组织的分析。

在锻造工艺优化前后 Mg-9Gd-5. 5Y-2Zn-0. 6Mn 高强镁合金试样中部切取圆棒状拉伸试件，拉伸试件具体尺寸如图 2 所示。在 WAW-300B 万能试验机上进行室温拉伸性能测试，拉伸时速度设置为  $1\text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ，采用 EVO18 型扫描电子显微镜对拉伸断口形貌进行观察。

#### 3.3 工艺优化效果

汽车用 Mg-9Gd-5. 5Y-2Zn-0. 6Mn 高强镁合金试样锻造工艺参数优化前后的显微组织金相照片如图 3 所示，其内部组织扫描电镜（Scanning Electron Microscope, SEM）照片如图 4 所示。从图 3 和图 4 可以看出，与锻造工艺参数优化前的合金试样相比，采用优化后的锻造工艺参数制备得到的 Mg-

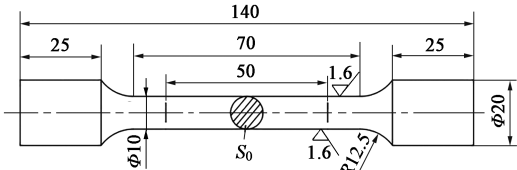


图 2 Mg-9Gd-5. 5Y-2Zn-0. 6Mn 高强镁合金拉伸试件尺寸  
Fig. 2 Dimensions of tensile specimen for high-strength magnesium alloy Mg-9Gd-5. 5Y-2Zn-0. 6Mn

9Gd-5. 5Y-2Zn-0. 6Mn 高强镁合金试样具有更加细小的显微组织，且组织分布更加均匀。

汽车用 Mg-9Gd-5. 5Y-2Zn-0. 6Mn 高强镁合金试样锻造工艺参数优化前后的室温力学性能测试结果如表 6 所示。从表 6 可以看出，Mg-9Gd-5. 5Y-2Zn-0. 6Mn 高强镁合金试样的锻造工艺参数优化效果显著，在断后伸长率基本保持不变的前提下，试样的抗拉强度提高了 37 MPa，屈服强度提高了 32 MPa。图 5 为汽车用 Mg-9Gd-5. 5Y-2Zn-0. 6Mn 高强镁合金试样拉伸断口扫描电镜照片。从图 5a 可知，优化前试样的拉伸断口中除了一部分韧窝和撕裂棱外，还



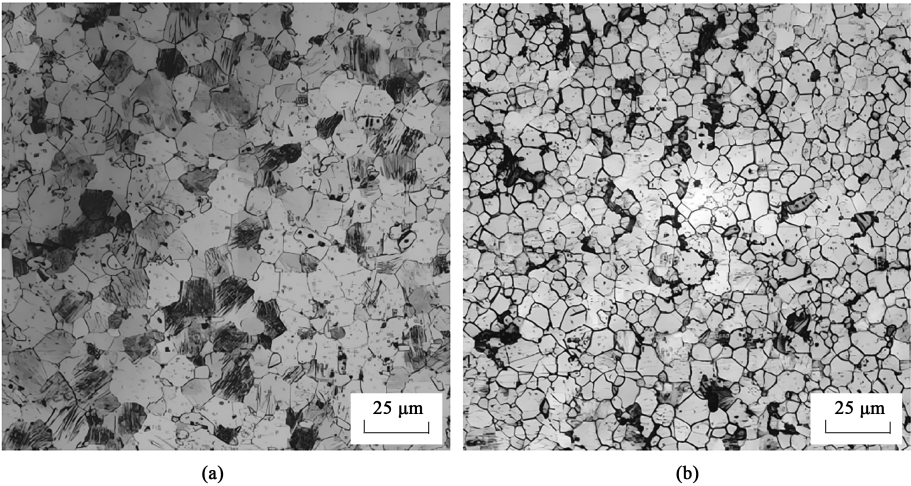


图 3 锻造工艺参数优化前后的 Mg-9Gd-5.5Y-2Zn-0.6Mn 高强镁合金试样的金相组织  
(a) 优化前 (b) 优化后

Fig. 3 Metallographic structures of high-strength magnesium alloy Mg-9Gd-5.5Y-2Zn-0.6Mn specimens before and after optimization of forging process parameters  
(a) Before optimization (b) After optimization

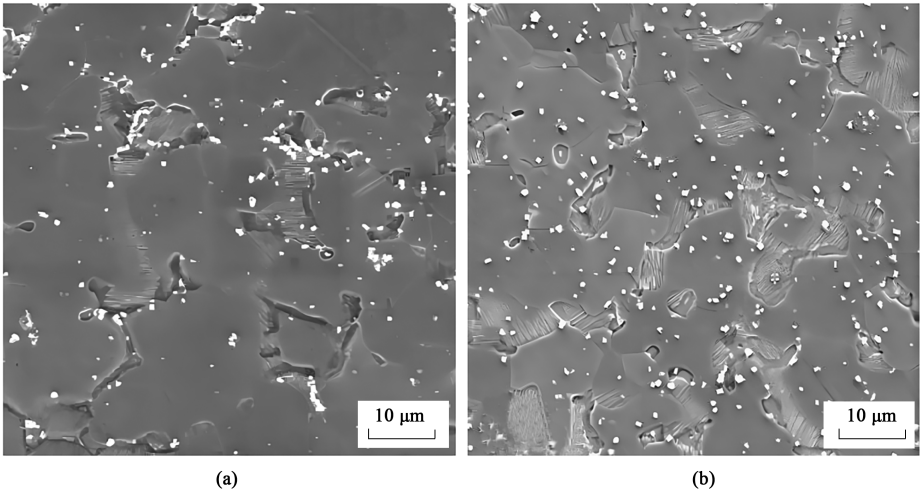


图 4 锻造工艺参数优化前后的 Mg-9Gd-5.5Y-2Zn-0.6Mn 高强镁合金试样的 SEM 显微组织  
(a) 优化前 (b) 优化后

Fig. 4 SEM microstructures of high-strength magnesium alloy Mg-9Gd-5.5Y-2Zn-0.6Mn specimens before and after optimization of forging process parameters  
(a) Before optimization (b) After optimization

表 6 Mg-9Gd-5.5Y-2Zn-0.6Mn 高强镁合金试样锻造  
工艺参数优化前后的力学性能

Table 6 Mechanical properties of high-strength magnesium  
alloy Mg-9Gd-5.5Y-2Zn-0.6Mn specimens before and  
after optimization of forging process parameters

参数	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	断后伸长率/%
优化前	388	310	7.2
优化后	425	342	7.1

有较明显的解理台阶，除了韧性断裂特点外，还有较明显的脆性断裂特点。从图 5b 可知，优化后试样的拉伸断口中的解理台阶明显减少，韧窝和撕裂棱明显变细，表现出更好的拉伸性能。

通过对汽车用 Mg-9Gd-5.5Y-2Zn-0.6Mn 高强镁合金试样锻造工艺参数的优化，可以有效改善合金试样的内部组织，提高合金试样的力学性能。在优化时，针对 Mg-9Gd-5.5Y-2Zn-0.6Mn 高强镁合金试样锻造过程中的始锻温度、终锻温度、加热温度、

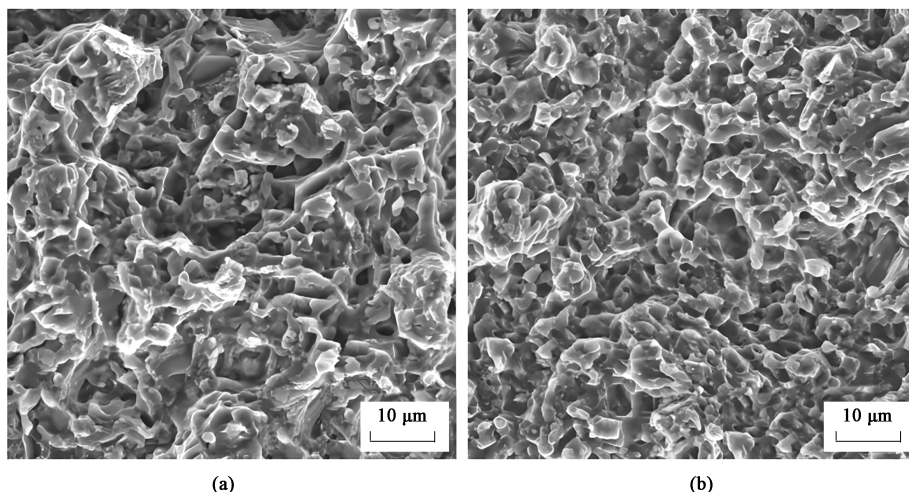


图5 锻造工艺参数优化前后的 Mg-9Gd-5.5Y-2Zn-0.6Mn 高强镁合金试样的拉伸断口形貌  
(a) 优化前 (b) 优化后

Fig. 5 Tensile fracture morphologies of high-strength magnesium alloy Mg-9Gd-5.5Y-2Zn-0.6Mn specimens before and after optimization of forging process parameters  
(a) Before optimization (b) After optimization

保温时间、锻造压力、锻造速度和锻造次数等关键参数进行了调整和改进,以期达到更理想的锻造效果。将 Mg-9Gd-5.5Y-2Zn-0.6Mn 高强镁合金试样的始锻温度由优化前的 430 ℃ 适当提高至优化后的 450 ℃,将终锻温度由优化前的 360 ℃ 适当降低至优化后的 330 ℃。调整温度可以有效控制金属的流动性和塑性,从而使得 Mg-9Gd-5.5Y-2Zn-0.6Mn 高强镁合金试样在锻造过程中更加均匀和稳定,获得更加细化的内部显微组织以及更加优异的力学性能。其次,针对锻造时 Mg-9Gd-5.5Y-2Zn-0.6Mn 高强镁合金试样的加热温度和时间进行了调整,将加热温度由优化前 430 ℃ 适当提高至优化后的 450 ℃,将保温时间由优化前的 30 min 适当延长至优化后的 40 min,避免了锻造过程中加热温度过低和变形不充分的问题,从而有效改善了锻造态 Mg-9Gd-5.5Y-2Zn-0.6Mn 高强镁合金试样的内部显微组织。再次,对 Mg-9Gd-5.5Y-2Zn-0.6Mn 高强镁合金试样锻造时的锻造压力进行了调整,将锻造压力由优化前的 680 kN 适当降低至优化后的 630 kN,获得了表面光洁度更佳的锻造态合金试样,同时减小了锻造时的能耗和设备磨损。然后,针对 Mg-9Gd-5.5Y-2Zn-0.6Mn 高强镁合金试样锻造时的锻造速度进行了调整,将锻造速度由优化前的  $20 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  适当提高至优化后的  $25 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,从而有效地控制了合金试样的形变和变形速率,使合金试样在锻造成形过

程中的形貌更加精细、表面更加光滑。最后,针对锻造时 Mg-9Gd-5.5Y-2Zn-0.6Mn 高强镁合金试样的锻造次数进行了调整,将锻造次数由优化前的 1 次适当提高至优化后的 2 次,使得合金的晶粒变细,提高了 Mg-9Gd-5.5Y-2Zn-0.6Mn 高强镁合金试样的力学性能。综上所述,通过优化 Mg-9Gd-5.5Y-2Zn-0.6Mn 高强镁合金试样的锻造工艺参数,可以有效改善合金试样的内部显微组织,显著提高合金试样的力学性能,实现更加理想的成形效果。

## 4 结论

(1) 通过对锻造过程中的始锻温度、终锻温度、加热温度、保温时间、锻造压力、锻造速度和锻造次数等锻造工艺参数的优化, Mg-9Gd-5.5Y-2Zn-0.6Mn 高强镁合金试样的显微组织明显细化、力学性能得到明显提高。

(2) 与优化前相比,锻造工艺参数优化后的 Mg-9Gd-5.5Y-2Zn-0.6Mn 高强镁合金试样的断后伸长率基本保持不变,抗拉强度提高了 37 MPa、屈服强度提高了 32 MPa。

(3) 始锻温度由 430 ℃ 提高至 450 ℃、终锻温度由 360 ℃ 降低至 330 ℃、加热温度由 430 ℃ 提高至 450 ℃、保温时间由 30 min 延长至 40 min、

锻造压力由 680 kN 减小至 630 kN、锻造速度由  $20 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  加快至  $25 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 、锻造次数由 1 次增加至 2 次,可以有效细化锻造态 Mg-9Gd-5.5Y-2Zn-0.6Mn 高强镁合金试样的显微组织,提高合金试样的力学性能。

#### 参考文献:

- [1] 王兵, 刘飞, 胡婉婷, 等. 超高强韧稀土镁合金直筒段锻造成形工艺 [J]. 宇航材料工艺, 2023, 53 (3): 82-86.  
Wang B, Liu F, Hu W T, et al. Forging process of ultra-high strength and toughness rare earth magnesium alloy in straight tube section [J]. Aerospace Materials & Technology, 2023, 53 (3): 82-86.
- [2] 王俊升, 薛程鹏, 王硕, 等. 轻质金属的发展和应用: 高强铝合金和镁合金 [J]. 特种铸造及有色合金, 2023, 43 (2): 145-152.  
Wang J S, Xue C P, Wang S, et al. The development and application of lightweight metals: High-strength aluminum alloys and magnesium alloys [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43 (2): 145-152.
- [3] 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 of magnesium alloys [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (2): 52-61.
- [4] 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 on isothermal forging for magnesium alloy based on meshless method [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (2): 10-15.
- [5] 王智勇, 王小刚, 刘涛, 等. 航空用 ZK61M 镁合金锻件成形工艺模拟及试验验证 [J]. 锻压装备与制造技术, 2022, 57 (5): 85-89.  
Wang Z Y, Wang X G, Liu T, et al. Forming process simulation and experimental verification of ZK61M magnesium alloy forgings for aviation [J]. China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology, 2022, 57 (5): 85-89.
- [6] Zhang K M, Qin C, She J, et al. Simultaneous improvement in strength and ductility of extruded Mg alloy via novel closed forging extrusion [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2022, 32 (9): 2866-2876.
- [7] 戚勇, 姜一达. 锻压温度对挤锻复合成形 AZ80-CeTi 镁合金性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2022, 51 (3): 112-114, 121.  
Qi Y, Jiang Y D. Effect of forging temperature on properties of AZ80-CeTi magnesium alloy by extrusion-forging composite forming [J]. Hot Working Technology, 2022, 51 (3): 112-114, 121.
- [8] 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.  
Nie Z C, Zhang X, Liu X. Effect of multiple-forging and annealing on microstructure and mechanical properties of AZ31 magnesium alloy [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2021, 41 (6): 194-197.
- [9] 聂焱, 王祝堂. 镁合金的锻造工艺 [J]. 轻合金加工技术, 2021, 49 (11): 1-8.  
Nie Y, Wang Z T. The forging process of Mg alloy [J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2021, 49 (11): 1-8.
- [10] 宋杰. 基于 Dynaform 的 AZ91D 镁合金盘体冲锻工艺优化 [J]. 热加工工艺, 2021, 50 (7): 89-91, 96.  
Song J. Optimization of stamping and forging process for AZ91D Mg alloy disc based on Dynaform [J]. Hot Working Technology, 2021, 50 (7): 89-91, 96.
- [11] 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]. Forging Equipment and Manufacturing Technology, 2023, 58 (2): 112-115, 127.
- [12] 罗航. Mg-9Gd-5.5Y-2Zn-0.6Mn 高强镁合金非对称反挤压数值模拟及实验研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2022.  
Luo H. Numerical Simulation and Experimental Study on Asymmetric Reverse Extrusion of Mg-9Gd-5.5Y-2Zn-0.6Mn High-strength Magnesium Alloy [D]. Chongqing: Chongqing University, 2022.
- [13] 晏梓翔. 高强 Mg-Gd 系镁合金微观结构与力学性能研究 [D]. 安徽: 中国科学技术大学, 2022.  
Yan Z X. Study on the Microstructure and Mechanical Properties of High-strength Mg-Gd Magnesium Alloys [D]. Anhui: University of Science and Technology of China, 2022.

### 《锻压技术》郑重声明

为充分尊重作者权益,坚决抵制学术不端行为,积极倡导优良学风,努力为学术创新营造良好氛围,本刊郑重声明:对一稿多投,重复发表,存在署名有争议,引用他人著述未注明出处,抄袭、剽窃、弄虚作假,或以上情况的变相形式等学术不端行为的文章,坚决拒绝刊登。一经发现,立即撤稿,并由本刊视情节轻重给予书面警告、拒绝刊登有其署名的稿件、通知其所在单位等处理。轻者给予 3~5 年不允许刊发其论文的处罚,情节严重者,将以适当方式予以公布,该作者的论文永久不得刊用。

《锻压技术》编辑部