

分步锻压对汽车用 AZ80 镁合金耐蚀及耐磨性能的影响

孙忠玉¹, 赵越顺²

(1. 辽源职业技术学院 招生办, 吉林 辽源 136201; 2. 大连理工大学 材料科学与工程学院, 辽宁 大连 116081)

摘要: 为了探究分步锻压对汽车用 AZ80 镁合金耐蚀及耐磨性能的影响, 对均匀化处理后的 AZ80 镁合金分别进行了高应变速率 ($4 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$) 下的一次锻压处理、先低应变速率 ($4 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$) 后高应变速率 ($4 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$) 的分步锻压处理, 并与锻压前试样进行了显微组织、耐蚀性能和耐磨性能的对比分析。结果表明: 在组织细化、耐蚀及耐磨性能的改善方面, 分步锻压的效果优于一次锻压。与锻压前试样相比, 一次锻压可使腐蚀电位减小 1.58%、腐蚀电流密度减小 2.77%、500 N 外加载荷条件下的磨损体积减小 25.00%, 分步锻压则可使腐蚀电位减小 5.83%、腐蚀电流密度减小 7.03%、500 N 外加载荷下的磨损体积减小 54.64%。分步锻压处理是改善汽车用 AZ80 镁合金耐蚀及耐磨性能的有效途径。

关键词: 分步锻压; AZ80 镁合金; 耐磨性能; 耐蚀性能; 组织细化

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.01.003

中图分类号: TH164

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2023) 01-0023-06

Effect of step forging on corrosion resistance and wear resistance properties of AZ80 magnesium alloy for automobile

Sun Zhongyu¹, Zhao Yueshun²

(1. Admission Office, Liao Yuan Vocational Technical College, Liaoyuan 136201, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116081, China)

Abstract: In order to explore the influences of step forging on the corrosion resistance and wear resistance properties of AZ80 magnesium alloy for automobile, the homogenized AZ80 magnesium alloys were processed by the one time forging treatment at a high strain rate of $4 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ and the step forging treatment first at a low strain rate of $4 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ and then at a high strain rate of $4 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$. Then, compared with the samples before forging, the microstructure, corrosion resistance property and wear resistance property of samples were compared and analyzed. The results show that the effect of step forging is better than that of one-time forging in terms of microstructure refinement, corrosion resistance and wear resistance improvement. Compared with the sample before forging, the one-time forging can reduce the corrosion potential by 1.58%, the corrosion current density by 2.77%, and the wear volume under the applied load condition of 500 N by 25.00%. The step forging can reduce the corrosion potential by 5.83%, the corrosion current density by 7.03%, and the wear volume under the applied load condition of 500 N by 54.64%. Thus, the step forging treatment is an effective way to improve the corrosion resistance and wear resistance properties of AZ80 magnesium alloy for automobile.

Key words: step forging; AZ80 magnesium alloy; wear resistance property; corrosion resistance property; microstructure refinement

AZ80 镁合金由于力学性能较佳、成本较低, 有望成为一种得以规模化应用的镁合金, 同时也引起了较多科研工作者的研究兴趣。贾雪娇等^[1]探讨了划痕对 AZ80 镁合金上磷酸钙转化涂层耐腐蚀性能的影响。范玲玲等^[2]分析了等径角挤压对 AZ80M 合金在半固态等温加热过程中液相分布的影响规律。

张冬冬等^[3]研究了 AZ80-Ag 镁合金环轧件的组织及力学性能各向异性。李忠盛等^[4]研究和分析了 AZ80 镁合金表面冷喷涂铝/微弧氧化复合涂层的耐蚀性能。李全和金朝阳^[5]针对物理基本构模型和 BP 人工神经网络模型对 AZ80 镁合金高温流动应力预测能力进行了比较研究。何舒阳和杨素媛^[6]研究和探讨了 Mg-Y-Zn 合金高应变率下 LPSO 结构的变形机制。高植等^[7]分析了固溶参数对 Mg-13Gd-4Y-2Zn-0.6Zr 合金组织及性能的影响。但是, 随着市场对镁合金性能要求的不断提高, 迫切需要进一步改善镁合金的综合性能。锻压是合金材料性能改善的有

收稿日期: 2022-04-11; 修订日期: 2022-07-29

基金项目: 吉林省教育厅“十三五”科学技术研究项目 (JJKH20181388KJ)

作者简介: 孙忠玉 (1975-), 女, 学士, 副教授

E-mail: na5341@163.com

效途径。邓彬等^[8]分析和探讨了高应变速率多向锻造对 AZ31 镁合金组织及耐腐蚀性能的影响。蒋莉萍等^[9]研究了室温多向锻压 AZ31 镁合金的静态再结晶行为。邹景锋等^[10]分析了径锻压下率对镁棒热力参数及组织演变的影响规律。张宗良等^[11]研究了 Mg-9Gd-3Y-0. 6Zr-0. 05Ag 镁合金模锻件微观组织及力学性能的不均匀性。余富忠和赵强李^[12]分析了多向锻造对汽车用 AZ80 镁合金组织及性能的影响。郭俊成等^[13]研究了两步锻压对铸态 AZ80 镁合金伸长率的提升作用。肖振宇等^[14]分析了分步锻压工艺对 AZ91 镁合金组织演化及力学性能的影响。但是, 目前关于分步锻压对 AZ80 镁合金耐蚀和耐磨性能影响的研究还鲜有报道。为此, 本文对汽车用 AZ80 镁合金进行了分步锻压处理, 并研究了分步锻压对汽车 AZ80 镁合金耐蚀和耐磨性能的影响, 为汽车用 AZ80 镁合金综合性能的改善提供了新的途径和相关研究数据。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

以汽车用 AZ80 镁合金试样为研究对象, 将 AZ80 合金试样在中频感应熔炼炉中熔炼, 采用自制 H13 钢金属模具浇注, 冷却后车除表面氧化皮并进行 380 ℃ × 10 h 均匀化处理后, 切成 Φ20 mm × 50 mm 试样, 试样的化学成分如表 1 所示。

表 1 试样化学成分 (%, 质量分数)
Table 1 Chemical compositions of specimens
(%, mass fraction)

Al	Zn	Mn	Fe	Si	其他杂质 元素	Mg
8. 582	0. 574	0. 314	0. 012	0. 016	<0. 150	余量

1.2 试验方法

在 KX-63T 型四柱液压机上进行分步锻压试验, 该压机具有保温的功能, 锻压以墩粗方式进行。分步锻压的工作流程为: 第 1 步, 低应变速率为 $4 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 、始锻温度为 420 ℃、终锻温度为 320 ℃、模具预热温度为 250 ℃, 锻压后试样高度为 40 mm; 第 2 步, 250 ℃ 保温 15 min; 第 3 步, 高应变速率为 $4 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ 、始锻温度为 420 ℃、终锻温度为 320 ℃、模具预热温度为 250 ℃, 锻压后试样高度为 25 mm, 获得分步锻压汽车用 AZ80 镁合金试样, 记为“分步锻压试样”, 分步锻压的合计变形量为

200%。为了对比, 将均匀化处理后的 Φ20 mm × 50 mm 试样在 KX-63T 型四柱液压机上进行一次锻压试验, 锻压仍以墩粗方式进行。一次锻压工艺参数为: 高应变速率为 $4 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ 、始锻温度为 420 ℃、终锻温度为 320 ℃、模具预热温度为 250 ℃, 锻压后试样高度为 25 mm, 从而获得一次锻压汽车用 AZ80 镁合金试样, 记为“一次锻压试样”, 一次锻压的变形量为 200%。将均匀化处理后、未经锻压的汽车用 AZ80 镁合金试样, 记为“锻压前试样”。

在锻压前试样、一次锻压试样和分步锻压试样中部, 分别切取金相试样 (圆片状, 尺寸为 Φ10 mm × 10 mm)、腐蚀试样 (圆片状, 尺寸为 Φ10 mm × 15 mm)、磨损试样 (圆柱状, 尺寸为 Φ25 mm × 30 mm)。金相试样经过磨制、浸蚀 (腐蚀液为 5 mL 冰醋酸+5 g 苦味酸+5 mL 去离子水+100 mL 无水乙醇)、吹干后在 PG18 型金相显微镜上观察试样的显微组织。室温腐蚀试验在 RST5201F 电化学工作站上进行, 采用三电极体系 (工作电极为腐蚀试样、辅助电极为铂黑电极、参比电极为甘汞电极), 腐蚀液为 5% 氯化钠水溶液, 扫描速度为 $0. 001 \text{ V} \cdot \text{s}^{-1}$ 。试验前先在 -1. 0 V 恒电位下极化 3 min, 以去除试样表面氧化物, 避免氧化物对试验结果产生影响。电化学腐蚀后用 EVO18 型扫描电镜观察腐蚀试样的表面腐蚀情况。室温磨损试验在 M-2000 型摩擦磨损试验机上进行, 采用磨损试样本体作为对磨材料, 磨轮转速为 $350 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 、行进速度为 $100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 、试验时间为 15 min、外加载荷分别为 100 和 500 N, 记录磨损体积, 并用 EVO18 型扫描电镜观察试样的表面磨损情况。

2 试验结果与分析

2.1 显微组织

锻压前试样、一次锻压试样和分步锻压试样的显微组织照片如图 1 所示。一次锻压试样的变形量为 200%, 分步锻压试样的两步锻压合计变形量为 200%。从图 1 可以看出, 与锻压前试样 (图 1a) 相比, 一次锻压试样 (图 1b) 的显微组织得到了改善, 晶粒变细, 但是晶粒细化程度不够大, 晶粒分布均匀性较差; 分步锻压试样 (图 1c) 的显微组织得到了进一步改善, 晶粒较一次锻压试样的得到了进一步细化, 晶粒分布均匀性也得到了进一步改善, 经分步锻压处理后, 试样的晶粒非常细小、晶粒分布均匀性佳, 试样获得较为理想

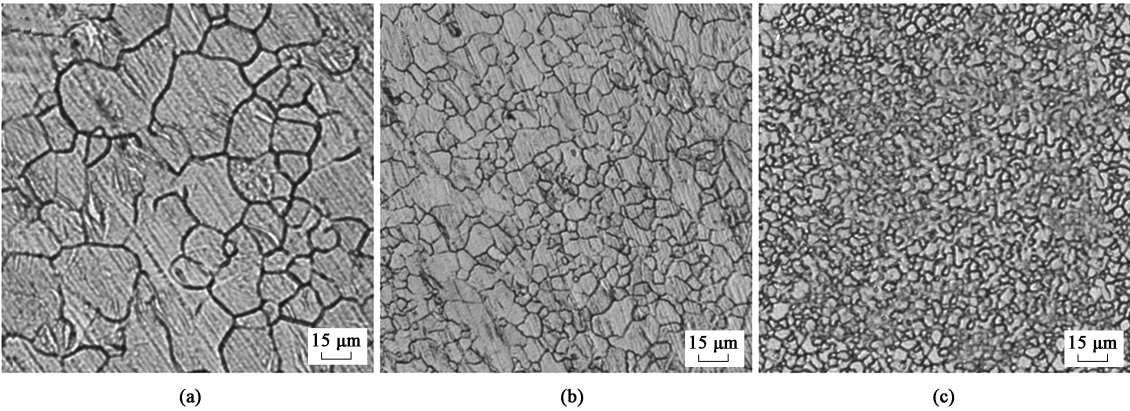


图 1 试样显微组织照片
(a) 锻压前试样 (b) 一次锻压试样 (c) 分步锻压试样
Fig. 1 Microstructure photographs of specimens
(a) Specimen before forging (b) One-time forging specimen (c) Step forging specimen

的内部显微组织。

2.2 耐蚀性能

锻压前试样、一次锻压试样和分步锻压试样的室温电化学腐蚀试验结果如表 2 所示。从表 2 可以看出，与锻压前试样相比，一次锻压试样的腐蚀电位由-1578 mV 降低至-1553 mV，减小了 25 mV，减小了 1.58%；腐蚀电流密度从 2.9972 mA·cm⁻² 减小至 2.9143 mA·cm⁻²，减小了 0.0829 mA·cm⁻²，减小了 2.77%。由此可以看出，一次锻压可以改善试样的耐蚀性能，但是改善效果不够显著。此外，从表 2 还可以看出，与锻压前试样相比，分步锻压试样的腐蚀电位由-1578 mV 降低至-1486 mV，减小了 92 mV，减小了 5.83%；腐蚀电流密度从 2.9972 mA·cm⁻² 减小至 2.7864 mA·cm⁻²，减小了 0.2108 mA·cm⁻²，减小了 7.03%。由此可以看出，分步锻压较一次锻压更能显著改善试样的耐蚀性能，使汽车用 AZ80 镁合金获得更为优秀的耐蚀性能。分步锻压是改善汽车用 AZ80 镁合金耐蚀性能的有效途径。

表 2 试样电化学腐蚀试验结果

Table 2 Electrochemical corrosion test results of specimens		
试样	腐蚀电位/mV	腐蚀电流密度/(mA·cm ⁻²)
锻压前试样	-1578	2.9972
一次锻压试样	-1553	2.9143
分步锻压试样	-1486	2.7864

锻压前试样、一次锻压试样和分步锻压试样的室温电化学腐蚀后的表面形貌扫描电镜照片如图 2 所示。从图 2 可以看出，锻压前试样（图 2a）在室

温电化学腐蚀后，表面出现较多较大的团状腐蚀坑，腐蚀现象较为严重；与锻压前试样相比，一次锻压试样（图 2b）在室温电化学腐蚀后表面的团状腐蚀坑更小、更少，腐蚀现象得到了一定程度的减轻，一次锻压处理改善了试样的耐蚀性能，但是从图 2b 可以看出，试样在电化学腐蚀后，虽然腐蚀现象较锻压前试样得到了缓解，但是试样表面仍有较多腐蚀坑，试样表面存在较为明显的腐蚀；而分步锻压试样（图 2c）在室温电化学腐蚀后，表面未见明显的团状腐蚀坑，仅有部分细小的腐蚀孔，试样的腐蚀现象得到了明显减轻，分步锻压处理显著提高了试样的耐蚀性能。

均匀化处理的汽车用 AZ80 镁合金内部的晶粒较为粗大，组织分布均匀性较差，在氯化钠腐蚀液中，合金试样抵抗侵蚀的能力较差，表面出现较多尺寸较大的团状腐蚀坑，腐蚀较为严重。一次锻压后，由于锻压作用使得合金试样内部晶粒得到了一定程度的细化，组织分布均匀性得到一定程度的改善，从而使得一次锻压试样在腐蚀液中能更好地抵抗侵蚀，获得更好的耐蚀性能。但是，由于 AZ80 镁合金本身的第二相析出强化和固溶强化等作用，合金的变形抗力较大，高应变速率下的一次锻压过程中合金来不及协调变形，内部动态再结晶过程不充分，从而也难以充分发挥锻压的作用和优势，难以获得理想的内部组织，从而难以获得理想的耐蚀性能^[14]。然而，采用先低应变速率、后高应变速率的分步锻压方法，由于锻压过程中的变形速率先低后高、锻压过程中的温度也与一次锻压有所降低，使得锻压过程中的变形抗力减小，可以促使合金试

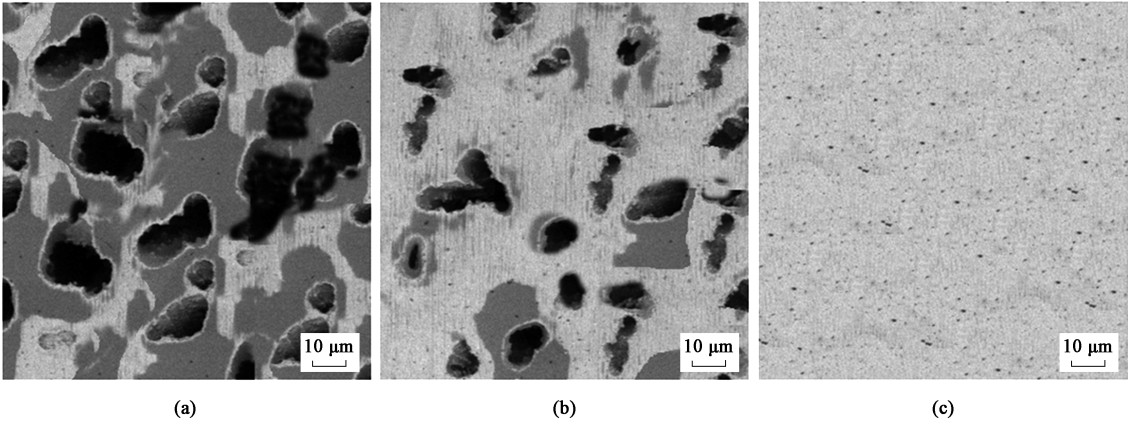


图 2 试样电化学腐蚀后的表面形貌照片
(a) 锻压前试样 (b) 一次锻压试样 (c) 分步锻压试样
Fig. 2 Photos of surface morphology for specimens after electrochemical corrosion
(a) Specimen before forging (b) One-time forging specimen (c) Step forging specimen

样在锻压过程中充分的协调变形，合金内部发生充分的动态再结晶，从而获得细小的等轴晶组织，组织分布也更加均匀，进一步提高了合金试样在腐蚀液中抵抗侵蚀的能力，显著提升合金试样的耐蚀性能^[15]。

2.3 耐磨性能

锻压前试样、一次锻压试样和分步锻压试样的室温磨损试验结果如表 3 所示。从表 3 可以看出，不管是在 100 N 外加载荷还是在 500 N 外加载荷条件下，与锻压前试样相比，一次锻压试样和分步锻压试样的磨损体积均减小，试样的耐磨性能提高。此外，从表 3 还可以看出：在 100 N 外加载荷下，3 种试样的磨损体积差异较小，但当外加载荷增大至 500 N 后，3 种试样的磨损体积差异较大；与锻压前试样相比，500 N 外加载荷下，一次锻压试样的磨损体积从 $38.8\times10^{-3}\text{ mm}^3$ 减小至 $29.1\times10^{-3}\text{ mm}^3$ ，减小了 $9.7\times10^{-3}\text{ mm}^3$ ，减小了 25.00%；而 500 N 外加载荷下，分步锻压试样的磨损体积从 $38.8\times10^{-3}\text{ mm}^3$ 减小至 $17.6\times10^{-3}\text{ mm}^3$ ，减小了 $21.2\times10^{-3}\text{ mm}^3$ ，减小了 54.64%。由此可以看出，一次锻压可以改善试样的耐磨性能，但是改善效果不如分步锻压。分步锻压较一次锻压更能显著改善试样的耐磨性能，使汽车用 AZ80 镁合金获得更佳的耐磨性能。分步锻压是改善汽车用 AZ80 镁合金耐磨性能的有效途径。

锻压前试样、一次锻压试样和分步锻压试样磨损试验后的表面形貌扫描电镜照片如图 3 所示。从图 3 可以看出：锻压前试样（图 3a）在磨损试验后

表 3 试样磨损试验结果
Table 3 Wear test results of specimens

试样	外加载荷/N	磨损体积/ $(\times10^{-3}\text{ mm}^3)$
锻压前试样	100	19.4
一次锻压试样		17.1
分步锻压试样		14.8
锻压前试样	500	38.8
一次锻压试样		29.1
分步锻压试样		17.6

表面布满孔洞和起皮，磨损现象较为严重；与锻压前试样相比，一次锻压试样（图 3b）在磨损试验后表面的孔洞尺寸更小、数量更少，起皮也更少，磨损现象得到了一定程度的减轻，一次锻压处理改善了试样的耐磨性能，但是从图 3b 可以看出，虽然试样在磨损试验后的磨损现象较锻压前试样得到了缓解，但是试样表面仍有较多孔洞和起皮，试样表面存在较为明显的磨损；而分步锻压试样（图 3c）在磨损试验后的表面未见明显的孔洞，仅有细小的磨痕，试样的磨损现象得到了明显减轻，分步锻压处理显著提高了试样的耐磨性能。

由此可以看出，锻压前试样的耐磨性能最差，分步锻压试样的耐磨性能最佳，一次锻压试样的耐磨性能介于锻压前试样和分步锻压试样之间。这主要是因为：锻压前试样的内部晶粒较为粗大，组织分布均匀性也较差，在磨损试验中抵抗外界摩擦磨损的能力较弱，从而在磨损试验后表面布满孔洞和起皮，磨损现象很严重，锻压前试样的耐磨性能差。

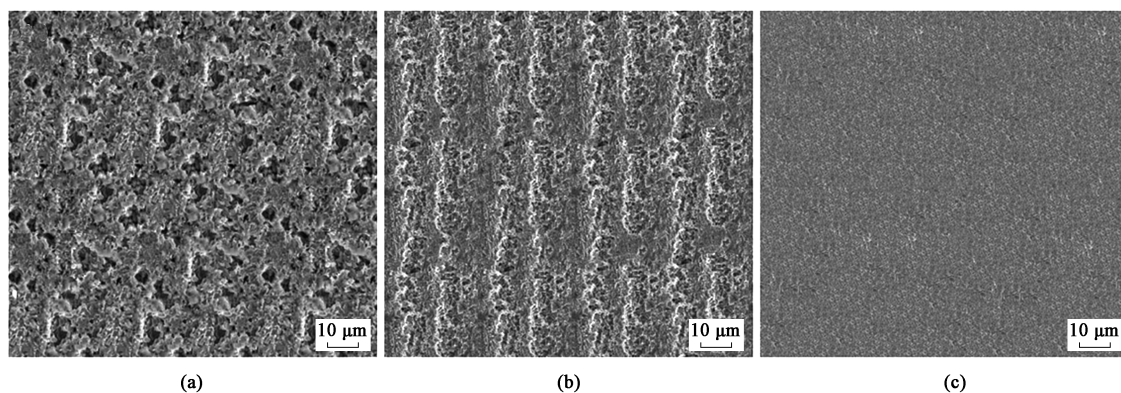


图3 试样磨损试验后的表面形貌照片

(a) 锻压前试样 (b) 一次锻压试样 (c) 分步锻压试样

Fig. 3 Photos of surface morphology for specimens after wear test

(a) Specimen before forging (b) One-time forging specimen (c) Step forging specimen

当对均匀化处理的汽车用 AZ80 镁合金进行高应变速率 ($4 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$) 下的一次锻压处理后, 由于锻压引起的动态再结晶和内部塑性变形, 合金试样内部晶粒得到了一定程度的细化, 组织分布均匀性得到了一定程度的改善, 故一次锻压试样具有了更好的抵抗磨损能力, 可以获得更好的耐磨性能。但是, 因为 AZ80 镁合金的第二相析出强化和固溶强化等作用, 合金的变形抗力较大, 高应变速率 ($4 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$) 下的一次锻压过程中的合金来不及协调变形, 内部动态再结晶过程不充分, 从而难以充分发挥锻压的作用和优势, 很难获得理想的内部组织^[14], 一次锻压试样的耐磨性能虽较锻压前试样有所改善, 但改善效果还不够理想。当采用先低应变速率 ($4 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$)、后高应变速率 ($4 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$) 的分步锻压方法时, AZ80 镁合金试样在锻压过程中可以进行充分的协调变形, 内部动态再结晶过程也得以充分进行, 从而获得细小的等轴晶组织, 组织分布均匀性也进一步提高, 从而使合金试样可以更好地抵抗外界的摩擦磨损, 获得更好的耐磨性能。

3 结论

(1) 与锻压前的 AZ80 镁合金比较, 一次锻压处理可以细化合金内部晶粒, 但细化效果不够明显; 分步锻压处理可以显著细化合金内部晶粒, 并使组织均匀性得到进一步提高。

(2) 与锻压前的 AZ80 镁合金比较, 一次锻压处理可使腐蚀电位减小 25 mV、减小了 1.58%, 腐蚀电流密度减小 $0.0829 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ 、减小了 2.77%; 分步锻压处理则可使腐蚀电位减小 92 mV、减小了

5.83%, 腐蚀电流密度减小 $0.2108 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ 、减小了 7.03%。分步锻压对 AZ80 镁合金耐蚀性能的改善效果优于一次锻压。

(3) 与锻压前的 AZ80 镁合金比较, 一次锻压处理可使 500 N 外加载荷条件下的磨损体积减小 $9.7 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$ 、减小了 25.00%, 而分步锻压可使 500 N 外加载荷下的磨损体积减小 $21.2 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$ 、减小了 54.64%。分步锻压对 AZ80 镁合金耐磨性能的改善效果优于一次锻压。

参考文献:

- [1] Jia X J, Song J F, Qu X Q, et al. Effect of scratch on corrosion resistance of calcium phosphate conversion coated AZ80 magnesium alloy [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2022, 32 (1): 147-161.
- [2] Fan L L, Zhou M Y, Guo Y Y, et al. Effect of ECAP process on liquid distribution of AZ80M alloy during semi-solid isothermal heat treatment [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2021, 31 (6): 1599-1611.
- [3] Zhang D D, Liu C M, Wan Y C, et al. Microstructure and anisotropy of mechanical properties in ring rolled AZ80-Ag alloy [J]. Journal of Central South University, 2021, 28 (5): 1316-1323.
- [4] 李忠盛, 吴护林, 丁星星, 等. AZ80 镁合金表面冷喷涂铝/微弧氧化复合涂层耐蚀性能 [J]. 材料工程, 2021, 49 (12): 57-64.
- [5] Li Z S, Wu H L, Ding X X, et al. Corrosion resistance of cold sprayed aluminum/micro-arc oxidation composite coating on AZ80 magnesium alloy [J]. Journal of Materials Engineering, 2021, 49 (12): 57-64.
- [5] 李全, 金朝阳. 物理基本构模型和 BP 神经网络模型预测 AZ80 镁合金高温流动应力的比较研究 [J]. 稀有金属材料与工程, 2021, 50 (11): 3924-3933.

- Li Q, Jin C Y. Comparative study of physical-based constitutive model and BP artificial neural network model in predicting high temperature flow stress of az80 magnesium alloy [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2021, 50 (11): 3924–3933.
- [6] 何舒阳, 杨素媛. Mg-Y-Zn 合金高应变率下 LPSO 结构的变形机制 [J]. *稀有金属*, 2021, 45 (3): 257–263.
- He S Y, Yang S Y. LPSO in Mg-Y-Zn alloy deformation mechanism under high strain rate [J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2021, 45 (3): 257–263.
- [7] 高植, 孟模, 张治民, 等. 固溶参数对 Mg-13Gd-4Y-2Zn-0.6Zr 合金组织及性能的影响 [J]. *稀有金属*, 2021, 45 (6): 657–663.
- Gao Z, Meng M, Zhang Z M, et al. Microstructure and properties of Mg-13Gd-4Y-2Zn-0.6Zr alloy with different solid solution parameters [J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2021, 45 (6): 657–663.
- [8] 邓彬, 李庆芬, 吴远志, 等. 高应变速率多向锻造对 AZ31 镁合金组织及耐腐蚀性能的影响 [J]. *锻压技术*, 2021, 46 (8): 7–11, 25.
- Deng B, Li Q F, Wu Y Z, et al. Influence of high strain rate multi-directional forging on microstructure and corrosion resistance property for AZ31 magnesium alloy [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2021, 46 (8): 7–11, 25.
- [9] 蒋莉萍, 王军, 肖振宇, 等. 室温多向锻压 AZ31 镁合金的静态再结晶行为 [J]. *中国有色金属学报*, 2015, (11): 3051–3059.
- Jiang L P, Wang J, Xiao Z Y, et al. Static recrystallization behavior of multi-directionally forged AZ31 magnesium alloy at room temperature [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2015, (11): 3051–3059.
- [10] 邹景峰, 马立峰, 朱艳春. 径锻压下率对镁棒热力参数及组织演变的影响 [J]. *精密成形工程*, 2021, 13 (6): 84–90.
- Zou J F, Ma L F, Zhu Y C. Effect of radial forging reduction rate on thermodynamic parameters and microstructure evolution of magnesium alloy bar [J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2021, 13 (6): 84–90.
- [11] 张宗良, 刘楚明, 高永浩, 等. Mg-9Gd-3Y-0.6Zr-0.05Ag 镁合金模锻件微观组织及力学性能不均匀性研究 [J]. *锻压技术*, 2021, 46 (2): 206–212.
- Zhang Z L, Liu C M, Gao Y H, et al. Study on inhomogeneity of microstructure and mechanical property for Mg-9Gd-3Y-0.6Zr-0.05Ag magnesium alloy die forgings [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2021, 46 (2): 206–212.
- [12] 余富忠, 赵强李. 多向锻造对汽车用 AZ80 镁合金组织及性能的影响 [J]. *锻压技术*, 2021, 46 (3): 32–36.
- Yu F Z, Zhao Q L. Influence of multi-directional forging on microstructure and properties for AZ80 magnesium alloy used for automobile [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2021, 46 (3): 32–36.
- [13] 郭俊成, 肖振宇, 杨续跃. 两步锻压提升铸态 AZ80 镁合金延伸率的研究 [J]. *矿冶工程*, 2018, 38 (4): 144–148.
- Guo J C, Xiao Z Y, Yang X Y. Enhancement of ductility for cast AZ80 Mg alloy by a two-step forging process [J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2018, 38 (4): 144–148.
- [14] 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.
- [15] 王以华. 锻模设计技术及实例 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- Wang Y H. *Forging Die Design Technology and Examples* [M]. Beijing: China Machine Press, 2009.

(上接第 22 页)

- [11] 赵辉, 李旭. 有限元分析在紧固件塑性成形领域中的应用 [J]. *新技术新工艺*, 2015, (10): 58–61.
- Zhao H, Li X. Application of finite element analysis in the field of fastener plastic forming [J]. *New Technology and New Process*, 2015, (10): 58–61.
- [12] 武欢. 基于 Deform 二次开发的连杆折叠缺陷预测及优化 [J]. *锻压技术*, 2022, 47 (2): 12–18.
- Wu H. Prediction and optimization of connecting rod folding defects based on secondary development of Deform [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2022, 47 (2): 12–18.
- [13] Yoon J, Jeon H, Lee J. Process design of cold forging with thick plate for seat recliner parts [J]. *Materials & Design*, 2013, 49: 449–455.
- [14] 潘鹏. 高速列车大规格高强度高耐疲劳紧固件精密成型研究 [D]. 贵州: 贵阳大学, 2020.
- Pan P. *Research on Precision Forming of Large Size, High Strength and High Fatigue Resistant Fasteners for High-speed Train* [D]. Guiyang: Guizhou University, 2020.
- [15] 崔令江, 韩飞. 塑性加工工艺学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- Cui L J, Han F. *Plastic Processing Technology* [M]. Beijing: China Machine Press, 2007.
- [16] 方秀梅, 荆志杰, 龚毅. 基于 DEFORM-3D 的 2024 铝合金锻造变形过程晶粒度分析 [J]. *世界有色金属*, 2021, (15): 120–121.
- Fang X M, Jing Z J, Gong Y. Grain size analysis of 2024 aluminum alloy forging deformation process based on DEFORM-3D [J]. *World Nonferrous Metals*, 2021, (15): 120–121.