

DOI: 10.16410/j.issn1000-8365.2024.2196

高应变速率下铸态 ZM6 镁合金的力学行为研究

郑兆博¹, 高景龙¹, 孙庆冀¹, 董旭光¹, 闫友军²

(1. 沈阳理工大学 材料科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110159; 2. 潍坊科技学院 化工与环境学院, 山东 寿光 262700)

摘要: 利用分离式霍普金森压杆对铸态 ZM6 镁合金进行高应变速率的动态力学压缩实验, 并对 ZM6 镁合金的力学性能和微观组织进行了研究分析。结果表明, 在试样解体之前, 随着冲击载荷的提高, 试样的应变速率及最大应变不断提高。从真应力-真应变曲线中发现, 铸态 ZM6 镁合金表现出明显的正应变率强化现象, 并且随着应变速率的提升, 加工硬化效果显著, 最高抗冲击强度达到 328.1 MPa。通过微观组织分析, 铸态 ZM6 镁合金在高应变速率下的断裂方式为脆性断裂。

关键词: ZM6 镁合金; 高应变速率; 霍普金森杆; 力学性能; 断裂方式

中图分类号: TG146.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2024)02-0187-04

Research on the Mechanical Behavior of ZM6 Magnesium Alloy at High Strain Rates

ZHENG Zhaobo¹, GAO Jinglong¹, SUN Qingji¹, DONG Xuguang¹, YAN Youjun²

(1. School of Materials Science and Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China; 2. School of Chemical Engineering and Environment, Weifang University of Science and Technology, Shouguang 262700, China)

Abstract: A high strain rate dynamic mechanical compression test was carried out on an as-cast ZM6 magnesium alloy by using a split Hopkinson pole, and the mechanical properties and microstructure of the resulting ZM6 magnesium alloy were studied and analysed. The results show that the strain rate and the maximum strain of the specimen increase with increasing impact load before disintegration. According to the true stress-strain curve, the as-cast ZM6 magnesium alloy exhibits obvious positive strain rate strengthening. With increasing strain rate, the work hardening effect is significant, and the maximum impact strength reaches 328.1 MPa. According to the microstructural analysis, the fracture mode of the as-cast ZM6 magnesium alloy at a high strain rate is brittle fracture.

Key words: ZM6 magnesium alloy; high strain rate; Hopkinson pole; mechanical property; fracture mode

随着军工^[1]、航空航天^[2]、电子信息科技^[3]、医学^[4]等领域的发展, 各行业对质量更轻^[5]、体积更小的材料需求逐渐升高, 其中镁合金作为少有的具备轻质减重特征的材料被誉为“21世纪的绿色材料”, 受到广泛关注^[6]。在我国镁合金产业蓬勃发展的同时^[7-8], 镁合金在高温条件下的应用案例不断增多, 使得耐热镁合金在近年来受到关注^[9]。铸态 ZM6 镁合金成分为(质量分数, %): 2.0~2.8 Ru, 0.2~0.7 Zn 和 0.4~1.0 Zr, 由于其在高温下的抗蠕变性能、耐热耐腐蚀性能被广泛应用在室温和 250 °C 以上的高温工作环境。现有的研究也多注重 ZM6 高温压缩或室温拉伸力学性能方面^[10-16]。

1 实验材料与方法

实验在室温下进行, 所用材料为铸态 ZM6 试件, 使用霍普金森杆对试件进行高应变速率下的高速冲击实验, 研究铸态 ZM6 在高速应变速率下的动态力学行为及微观表征。

实验用 ZM6 镁合金成分如表 1 所示, 图 1 为霍普金森杆实验装置示意图, 图 2 为铸态 ZM6 镁合金原始组织, 具体组成为 α -Mg 基体和晶界附近线状第二相 $Mg_{12}Nd$ ^[19-20]。

将镁合金取尺寸均匀部位用线切割机切割成 $\phi 9$ mm $\times$ 5 mm 试样, 使用 LWY20-A 型霍普金森压杆

收稿日期: 2022-06-22

作者简介: 郑兆博, 1997 年生, 硕士生。研究方向为材料表面科学。Email: swxzheng@163.com

通讯作者: 高景龙, 1975 年生, 硕士, 教授级高级实验师。研究方向为材料表面设计及性能。Email: jlgao@sylu.edu.cn

引用格式: 郑兆博, 高景龙, 孙庆冀, 等. 高应变速率下铸态 ZM6 镁合金的力学行为研究[J]. 铸造技术, 2024, 45(2): 187-190.

ZHENG Z B, GAO J L, SUN Q J, et al. Research on the mechanical behavior of ZM6 magnesium alloy at high strain rates[J]. Foundry Technology, 2024, 45(2): 187-190.

表1 实验用ZM6镁合金成分

Tab.1 Composition of the ZM6 magnesium alloy used in the experiment

(mass fraction/%)				
成分	Nd	Zr	Zn	Mg
含量	2.5	0.5	0.4	余量

(洛阳利维集团)对试件进行高速冲击实验,表2为实验中铸态ZM6镁合金试件不同实验参数及实验后试件的状态。冲击实验后采用OLYMPUS GX53型金相显微镜和日立S-3400扫描电镜对ZM6镁合金进行显微组织表征。

2 实验结果及讨论

图3为铸态ZM6铸造镁合金受到不同应变速率载荷后的宏观图。随着气压增加,子弹初始速度不

断增加,由最初的10.033 m/s逐渐增加至18.536 m/s,此时铸态ZM6镁合金应变速率为1 060 s⁻¹,当应变速率继续增大到1 165 s⁻¹时,试样发生解体。在不同应变速率的高速冲击载荷下,试样表面无明显变化,没有裂纹、褶皱及表面变形,仅当应变达到1 165 s⁻¹时出现解体,且试样沿45°断裂。

2.1 冲击压缩作用下的ZM6镁合金应力-应变行为

经高速冲击载荷作用下的铸态ZM6镁合金的真实应力-应变曲线如图4所示。由图4可知,随着应变速率的不断增加,试样解体前铸态ZM6镁合金的真实应力-应变曲线不断升高。当应变速率由439 s⁻¹增加到1 060 s⁻¹时,真实应力、应变从275 MPa、0.135增加到318 MPa、0.32。由此可见,在解体前铸态ZM6镁合金表现为正应变速率强化。在霍普金森压杆冲击

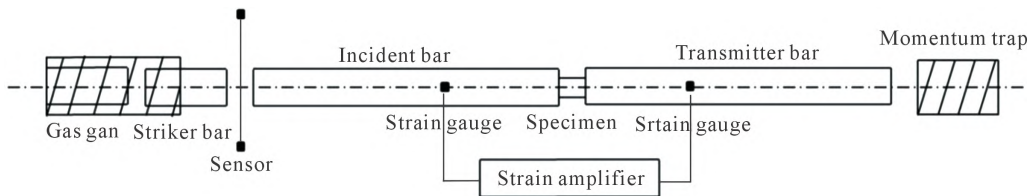


图1 霍普金森杆示意图

Fig.1 Schematic of the Hopkinson pole

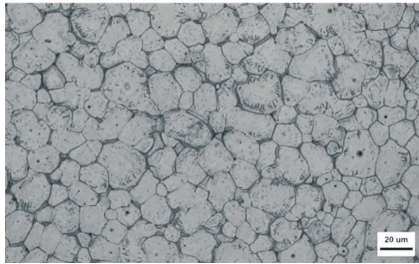


图2 铸态 ZM6 镁合金原始金相组织

Fig.2 Original metallographic structure of the as-cast ZM6 magnesium alloy

表2 铸态ZM6镁合金所用载荷条件及试样状态

Tab.2 Load conditions used for the impact test and test sample state of the as-cast ZM6 magnesium alloy

编号	气压/MPa	应变速率/s ⁻¹	子弹速度/(m·s ⁻¹)	试样状态
1	0.20	439	10.033	完整
2	0.30	679	14.159	完整
3	0.40	1 060	18.536	完整
4	0.45	1 165	18.958	断裂

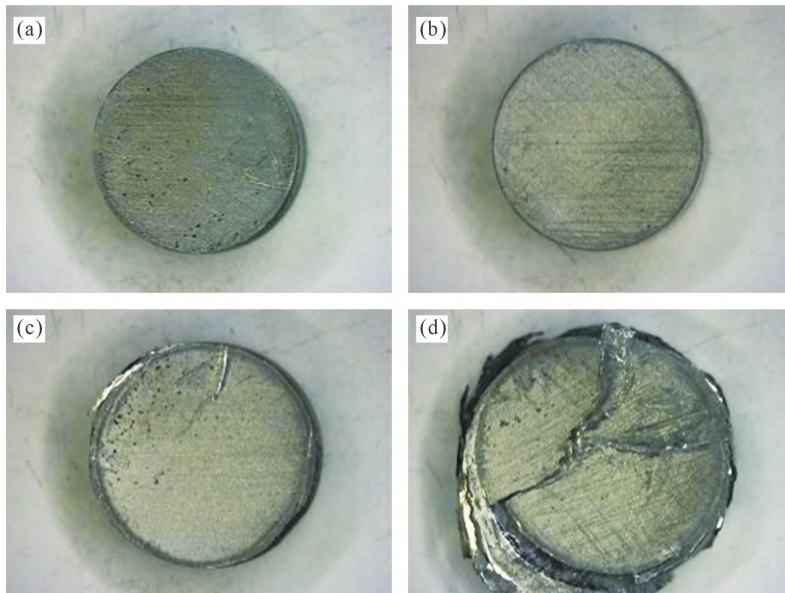


图3 铸态 ZM6 镁合金不同应变速率下被冲击表面宏观形貌: (a) 439 s⁻¹, (b) 679 s⁻¹, (c) 1 060 s⁻¹, (d) 1 165 s⁻¹

Fig.3 Macrostructure of the as-cast ZM6 magnesium alloy impacted at different strain rates: (a) 439 s⁻¹, (b) 679 s⁻¹, (c) 1 060 s⁻¹, (d) 1 165 s⁻¹

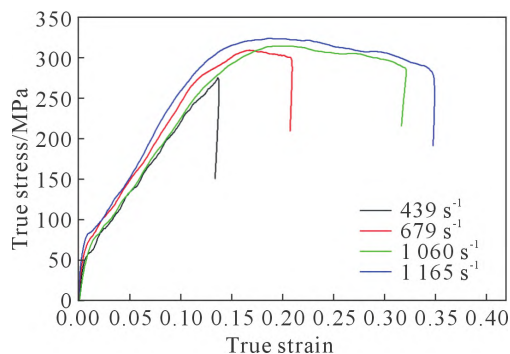


图4 铸态 ZM6 不同应变速率下的应力-应变曲线
Fig.4 Stress-strain curves of the as-cast ZM6 magnesium alloy at different strain rates

作用下,铸态ZM6镁合金在屈服点后的应力-应变曲线均呈较大斜率,这表明在冲击过程中加工硬化现象显著。当施加的应变速率在 $439\sim 679\text{ s}^{-1}$ 时,铸态ZM6镁合金屈服点的提高较为明显;当应变速率在 $679\sim 1\,165\text{ s}^{-1}$ 时,这种提高不再那么明显,表明铸态ZM6镁合金在低形变量的情况下应力对应变速率更为敏感。

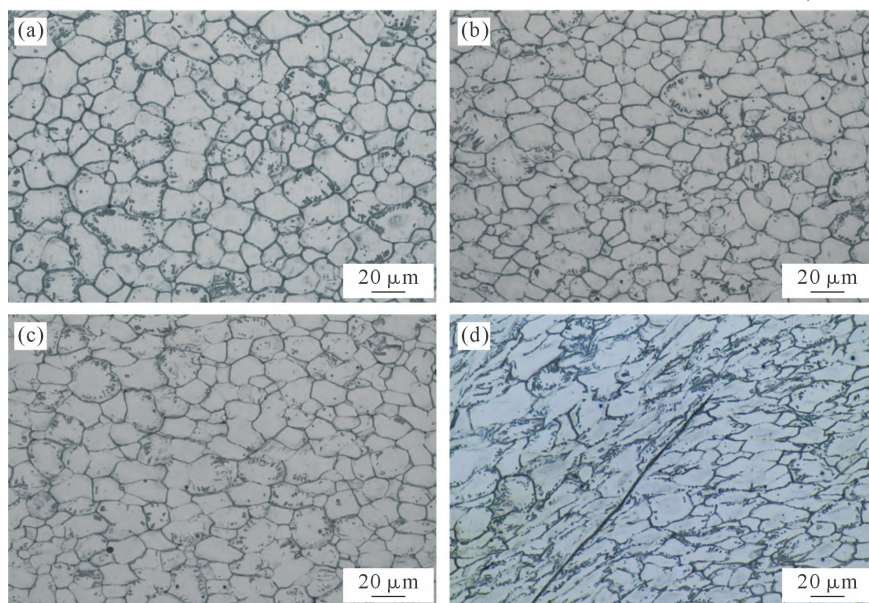


图5 不同应变速率下铸态 ZM6 镁合金金相组织:(a) 439 s^{-1} , (b) 679 s^{-1} , (c) $1\,060\text{ s}^{-1}$, (d) $1\,165\text{ s}^{-1}$
Fig.5 OM images of as-cast ZM6 magnesium alloy at different strain rates: (a) 439 s^{-1} , (b) 679 s^{-1} , (c) $1\,060\text{ s}^{-1}$, (d) $1\,165\text{ s}^{-1}$

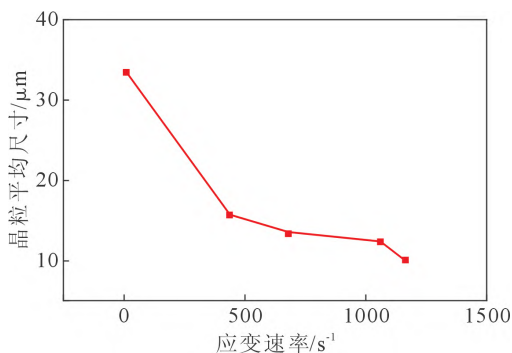


图6 不同应变速率下试件内部晶粒平均尺寸变化图
Fig.6 Changes in the average grain size of the specimens at different strain rates

2.2 高速应变下ZM6合金的显微组织及力学性能

图5为受到不同应变速率冲击后的铸态ZM6镁合金金相组织。可以看到,相较于图2的原始组织,受到冲击后的铸态ZM6镁合金晶粒均发生不同程度变形,但直到试件解体前,在试件金相组织中均未发现裂纹,这反应了铸态ZM6镁合金具有良好的强韧性。图6为截点法测得的不同应变速率下铸态ZM6镁合金晶粒平均尺寸变化。可以看到,随着应变速率的增加,晶粒的平均尺寸越小,这说明在载荷下试件内部晶粒出现细化现象,也解释了图4中试件真实应力随应变速率增加而增加的现象。图5d中试样所受的应变速率为 $1\,165\text{ s}^{-1}$,由图可见,当受到高速冲击时,铸态ZM6镁合金晶粒沿加载方向发生明显形变,晶粒内部萌生裂纹并沿裂纹方向发生穿晶断裂,使试样失效。

图7为铸态ZM6镁合金解体后断口形貌的扫描电镜。可以看到,断口呈河流状,结合试件解体时沿 45° 断裂,由此说明常温下铸态ZM6镁合金动态压缩下的断裂方式为脆性断裂,这与文献[19]研究结果

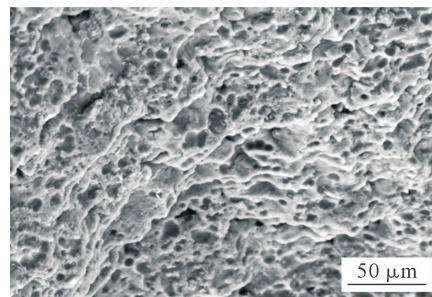


图7 铸态 ZM6 镁合金解体后断口形貌
Fig.7 Fracture morphology of the as-cast ZM6 magnesium alloy after disintegration

一致。

3 结论

(1)试件解体前,铸态ZM6合金在高应变速率的压缩试验中,呈现出正应变率强化效应,其中当形变量较小时,ZM6合金材料应力表现出对应变速率较高的敏感性。

(2)在高应变速率的压缩试验中,各试样真应力-应变曲线的上升斜率在屈服点后升高明显,表明该过程中加工硬化现象明显。

(3)铸态ZM6镁合金试样解体后,经金相观察,其断裂方式为穿晶断裂,由断口特征判断其为脆性断裂。

参考文献:

- [1] 马康. 镁合金板材循环弯曲成形组织演变及力学性能研究[D]. 沈阳:沈阳理工大学,2011.
MA K. Study on the microstructure evolution and mechanical properties of AZ31 magnesium alloy by isothermal cyclic bending[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2011.
- [2] 吴国华,陈玉狮,丁文江. 镁合金在航空航天领域研究应用现状与展望[J]. 载人航天,2016,22(3): 281-292.
WU G H, CHEN Y S, DING W J. Current research, application and future prospect of magnesium alloys in aerospace industry[J]. Manned Spaceflight, 2016, 22(3): 281-292
- [3] 潘复生,蒋斌. 镁合金塑性加工技术发展及应用[J]. 金属学报, 2021, 57(11): 1362-1379.
PAN F S, JIANG B. Development and application of plastic processing technologies of magnesium alloys[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2021, 57(11): 1362-1379.
- [4] 康明阳. 骨科用生物可降解镁合金材料研制及骨科相关生物学功能研究[D]. 吉林:吉林大学,2018.
KANG M Y. Development of biodegradable magnesium alloy materials for orthopedics and study on related biological functions of orthopedics[D]. Jilin: Jilin University, 2018.
- [5] 杨嘉傲,房宇轩,杨景超,等. 导热镁合金的发展和研究现状[J]. 铸造设备与工艺,2019(6): 55-58, 64.
YANG J A, FANG Y X, YANG J C, et al. Development and research status of thermal conductive Mg alloys[J]. Foundry Equipment and Process, 2019(6): 55-58, 64.
- [6] MORDIKE B L, EBERT T. Magnesium: Properties-applications-potential [J]. Materials Science and Engineering: A, 2001, 302(1): 37-45.
- [7] 王慧远,夏楠,布如宇,等. 低合金化高性能变形镁合金研究现状及展望[J]. 金属学报,2021,57(11): 1429-1437.
WANG H Y, XIA N, BU R Y, et al. Current research and future prospect on low-alloyed high-performance wrought magnesium alloys [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2021, 57(11): 1429-1437.
- [8] 丁文江,袁广银,王渠东. 镁合金科学与技术[M]. 北京:科学出版社,2007.
DING W J, YUANG G Y, WANG Q D. Magnesium alloy science and technology[M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [9] 宋佩维. 耐热镁合金的研究现状与发展趋势[J]. 陕西理工大学学报(自然科学版),2017,33(4): 5-11.
SONG P W. Research status and development trend of heat-resistant magnesium alloys[J]. Journal of Shaanxi University of Technology (Natural Science Edition), 2017, 33(4): 5-11.
- [10] 焦广发. ZM6材料铸件性能评估及改进措施[J]. 山东工业技术, 2015(2): 27.
JIAO G F. Performance evaluation and improvement measures for ZM6 material castings [J]. Journal of Shandong Industrial Technology, 2015(2): 27.
- [11] 余国康. Mg-2.5Nd-0.5Zn-1Zr合金的力学性能研究[J]. 热加工工艺,2018,47(14): 91-96.
YU G K. Study on mechanical properties of Mg-2.5Nd-0.5Zn-1Zr alloy[J]. Hot working Technology, 2018, 47(14): 91-96.
- [12] WEN L H, JI Z S, LI X L, et al. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of ZM6 Alloy prepared by solid recycling process[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2010, 19: 107-111.
- [13] 郁红敏. ZM6镁合金热变形微观组织及力学性能的研究[D]. 贵阳:贵州大学,2021.
YU H M. Study on the microstructure and mechanical properties of ZM6 magnesium alloy during hot deformation[D]. Guiyang: Guizhou University, 2021.
- [14] 杨光昱,卢鑫,刘少军,等. 新型铸造镁合金Mg-3.0Nd-1.5Gd-0.25Zn-0.5Zr的组织及力学性能[J]. 特种铸造及有色合金,2012,32(4): 298-301.
YANG G Y, LU X, LIU S J, et al. Microstructures and mechanical properties of Mg-3.0Nd-1.5Gd-0.25Zn-0.5Zr new casting magnesium alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2012, 32(4): 298-301.
- [15] FU J, CHEN S. Microstructure evolution and mechanical properties of as-cast and as-compressed ZM6 magnesium alloys during the two-stage aging treatment process[J]. Materials, 2021, 14(24): 7760.
- [16] 李小亮. 热处理对固相合成ZM6镁合金组织与性能的影响研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2008.
LI X L. Effect of heat treatment on structure and property of ZM6 magnesium alloy by solid-state recycling[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008.
- [17] 唐林. 高应变率下纯铜强迫剪切变形行为研究[D]. 长沙:中南大学,2012.
TANG L. Research on forced shear deformation behavior of pure copper under high strain rates[D]. Changsha: Central South University, 2012.
- [18] LI Q Z. Mechanical properties and microscopic deformation mechanism of polycrystalline magnesium under high strain rate compressive loadings[J]. Materials Science and Engineering: A, 2012, 540: 130-134.
- [19] LI F, SHI W, HU Z L, et al. Microstructure and mechanical properties of ZM6 magnesium alloy after continuous variable cross-section direct extrusion[J]. Metallic Materials, 2015, 53(1): 1-7.
- [20] 杜建峰. ZM6合金组织及高温性能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2006.
DU J F. The microstructure and the study of elevated temperature property of ZM6 alloy[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006.