

## 应变对车用挤压态 Mg-4Zn-1.2Y 合金原位拉伸组织演变的影响

杨敬江<sup>1</sup>, 张 明<sup>2</sup>, 李 刚<sup>3</sup>

(1. 杭州职业技术学院 吉利汽车学院, 浙江 杭州 310018; 2. 浙江工业大学 机械学院, 浙江 杭州 310018;

3. 浙江吉利汽车制造有限公司, 浙江 杭州 310018)

**摘要:**综合运用原位电子背散射衍射和微拉伸测试方法,对车轻量化用 Mg-4Zn-1.2Y 合金进行了测试,并分析了应变对合金原位拉伸组织演变的影响。研究表明:原位拉伸测试得到的试样的拉伸强度达到 218 MPa,伸长率为 25.3%,在应变为 26%时,试样断裂。随着拉伸应变程度的增加,合金产生了更多裂纹,裂纹尺寸也增加。拉伸过程中产生的孪晶可以对晶粒变形发挥一定的协调作用,从而消除应力集中的现象,避免晶体组织开裂。初始拉伸试样的晶粒取向角在 0°~50°范围内时,晶粒取向角的数量分布表现为接近正态分布的特征,晶粒取向角主要位于 20°~30°之间;应变达到 20%时,20°~30°之间的取向角占比已经超过 10%。15%原位拉伸应变下,Mg-4Zn-1.2Y 合金产生的孪生对晶粒取向起到良好的调节作用。

**关键词:**镁合金;原位拉伸;组织演变;应变;微裂纹

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.09.036

中图分类号: TG146

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2022) 09-0245-05

## Influence of strain on in-situ tensile microstructure evolution for automotive extruded Mg-4Zn-1.2Y alloy

Yang Jingjiang<sup>1</sup>, Zhang Ming<sup>2</sup>, Li Gang<sup>3</sup>

(1. Geely Automobile College, Hangzhou Vocational and Technical College, Hangzhou 310018, China;

2. School of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310018, China;

3. Zhejiang Geely Automobile Manufacturing Co., Ltd., Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** The test of Mg-4Zn-1.2Y alloy for auto mobile lightweight was conducted by comprehensively using in-situ electron backscatter diffraction (EPD) and micro-tensile test methods, and the influence of strain on the in-site tensile microstructure evolution for alloy was analyzed. The research results show that the tensile strength of specimen is 218 MPa, the elongation is 25.3% obtained by in-situ tensile test, and the specimen breaks at the strain of 26%. With the increasing of tensile strain degree, more cracks occur in the alloy and the crack size increases. The twins produced in the tensile process can coordinate the grain deformation to a certain extent to eliminate the stress concentration phenomenon and avoid the crystal structure cracking. When the grain orientation angle of initial tensile specimen is in the range of 0°~50°, the quantitative distribution of grain orientation angles is close to normal distribution characteristic, and the grain orientation angle is mainly in the range of 20°~30°. When the strain reaches 20%, the proportion of orientation angles in the range of 20°~30° is more than 10%, and the twinning produced in Mg-4Zn-1.2Y alloy under the in-situ tensile strain of 15% plays a good role in regulating grain orientation.

**Key words:** magnesium alloy; in-situ tensile; microstructure evolution; strain; micro-cracks

镁合金是一种具备高比强度、高热导率以及抗振动等多项优异性能的轻型合金,目前已成为航空器材、交通设备、精密测试仪器等行业的重要材料<sup>[1-2]</sup>。从晶体结构类型层面分析,镁合金属于一

种密排六方类型,对其进行室温状态下的变形处理时将会在组织滑移过程中形成很大的切应力,表现为拉伸孪生以及产生大量的基面滑移系。受上述组织转变机制的影响,镁合金无法满足良好室温塑性的加工特性要求,导致变形难度明显增大,限制了该合金的应用推广<sup>[3-5]</sup>。

当镁合金在受力阶段发生变形时,存在基面滑移与拉伸孪晶之间的明显竞争,对两种组织变化过

收稿日期: 2021-08-10; 修订日期: 2021-11-15

基金项目: 浙江省自然科学基金资助项目 (LQ19E050104)

作者简介: 杨敬江 (1981-), 男, 硕士, 高级实验师

E-mail: yh15036956421@163.com

程进行对比后发现,合金在孪晶变形期间更易形成集中的应力、应变,从而使微裂纹更快形成,同时加快了裂纹的扩展速率<sup>[6-8]</sup>。当在镁合金内加入不同种类或含量的合金元素后,将形成不同的滑移与孪晶转变形式,同时合金的力学特性也存在显著差异<sup>[9]</sup>。为了提高镁合金的力学强度,可以在合金基体内添加一定含量的稀土元素,使镁合金在挤压处理过程中形成更低强度的基面织构,其中,加入较低比例的 Zn 元素时,可以引起基面织构发生变化,由此获得具有更优延展性的合金组织<sup>[10]</sup>。尚未有学者通过在镁基体内加入低含量的 Zn 元素来实现低合金化过程,尤其是缺少关于 Zn 对镁合金的室温拉伸特性及合金孪生、滑移状态的影响的研究。

杨柳等<sup>[11]</sup>主要测试了轧制态 ME20M 镁合金的热拉伸性能,设定热加工的温度区间为 675~775 K,并以  $0.001 \sim 0.010 \text{ s}^{-1}$  的速率完成应变测试。郭丽丽等<sup>[12]</sup>分别以不同的工艺条件对镁合金板材进行轧制处理,再对其实施拉伸测试,重点分析了不同成形加工参数下板材试样各项力学特性的变化情况,可以明显发现,热轧板材达到最小的各向异性,为冲压成形提供了有利条件。顾佳卿等<sup>[13]</sup>主要对 Mg-0.4%Zn 合金在原位拉伸阶段形成的织构特征进行了深入分析,通过观察合金的基体组织发现,随着拉伸应变量由 0% 提高至 20%,材料显微组织中形成了更高比例的孪晶成分,由此引起整体力学性能发生了明显变化。本文综合运用原位电子背散射衍射和微拉伸测试方法,对 Mg-4Zn-1.2Y 合金进行了挤压测试,并对比了不同应变对合金拉伸阶段的组织特征造成的影响。

## 1 实验方法

以质量组成为 Mg-0.4%Zn 的镁合金铸锭作为测试对象,先利用电阻炉将其升温至 345 °C,对其持续保温处理 3 h,再利用 1400 t 挤压机进行挤压处理,得到厚度为 1.5 mm、宽度为 120 mm 的试样。控制挤压筒与模具的温度均达到 345 °C,再以  $0.2 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  的速率对其进行挤压,设定挤压比为 100:1。

用于拉伸测试的样品从挤压板中心部位截取。以电火花切割的方式将试样加工到所需的尺寸,各项尺寸参数见图 1。以 ED 表示与板材试样表面平行的方向,以 ND 表示垂直板材试样表面的方向。通过使用氧化铝与二氧化硅颗粒共同组成的抛光液对试样进行表面抛光,接着利用酒精在施加超声波作

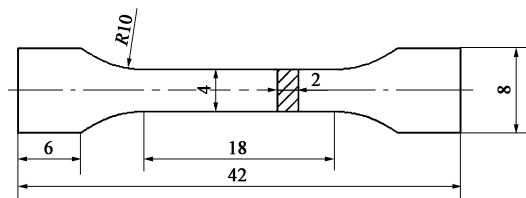


图 1 原位拉伸试样的结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of in-situ tensile specimen structure

用的条件下对试样进行充分清洗,保证达到理想的光洁程度。利用 ZeissSigma300 场发射扫描电镜观察试样的表面结构,将样品头部固定后,再设定  $0.2 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  的速率沿 ED 方向对其进行拉伸测试至断裂为止。依次设定 0%~20% 的不同应变程度,再对各状态下试样的截面微观形貌进行 SEM 表征并分析其组织形貌变化特征,同时观察试样基体中裂纹形成与扩展的状态;再以 EBSD 系统依次测试本实验设定的各应变程度对应的试样的表面组织形貌、晶界结构与晶粒取向的特征。

## 2 结果和讨论

### 2.1 应力-应变分析

原位拉伸 Mg-4Zn-1.2Y 合金的应力-应变曲线如图 2 所示。观察图 2 的曲线变化特征可以发现,在逐渐提高测试阶段的拉伸作用载荷时,试样的受力也持续增加,并在应变为 26% 时,试样断裂。经测试,得到该合金的伸长率为 25.3%,拉伸强度为 218 MPa。

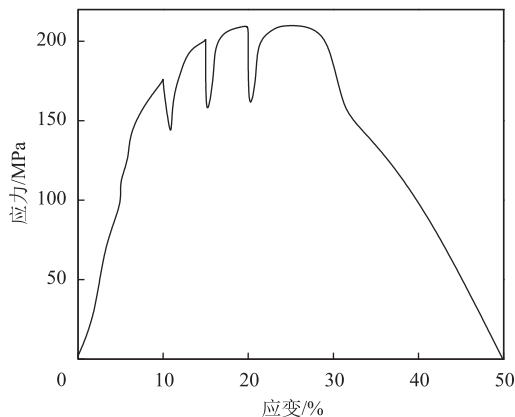


图 2 原位拉伸 Mg-4Zn-1.2Y 合金的应力-应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curve of Mg-4Zn-1.2Y alloy by in-situ tensile

### 2.2 组织演变分析

不同应变下 Mg-4Zn-1.2Y 合金原位拉伸的反极图如图 3 所示。其中,在初始合金试样中形成了沿

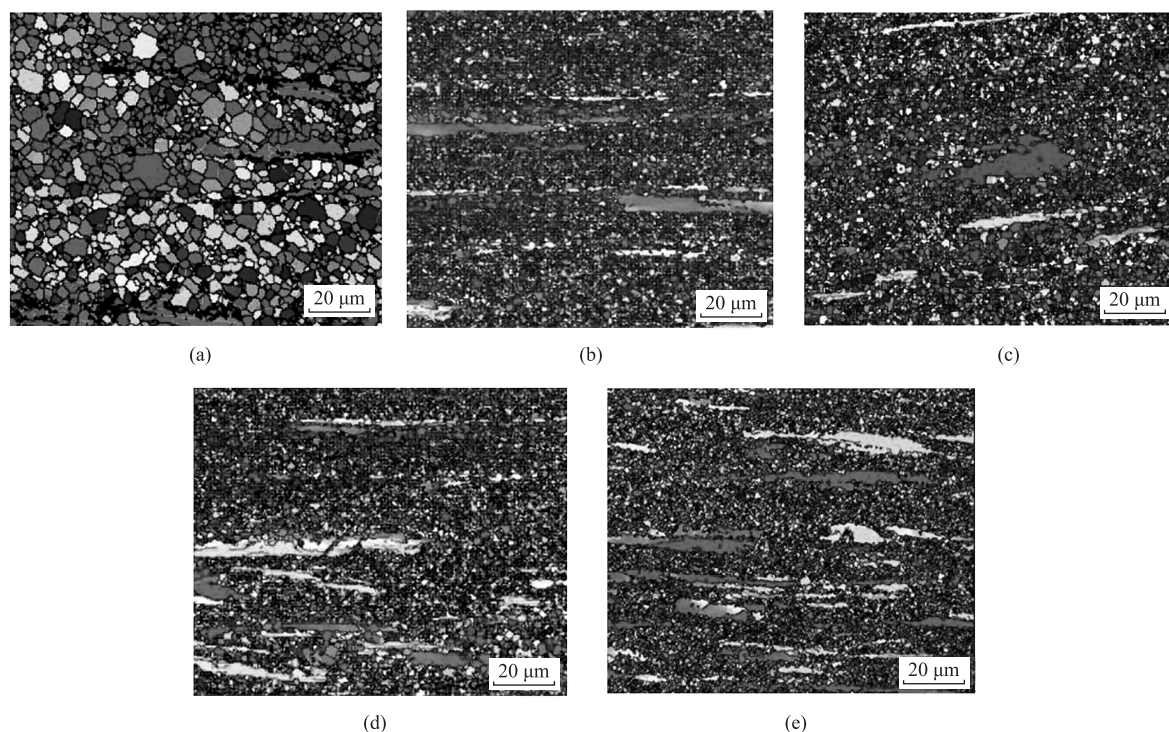


图3 不同应变下 Mg-4Zn-1.2Y 合金原位拉伸的反极图

(a) 0% (b) 5% (c) 10% (d) 15% (e) 20%

Fig. 3 Inverse pole diagrams of in-situ tensile for Mg-4Zn-1.2Y alloy under different strains

拉伸方向晶粒具有伸长特征的织构。应变为 5% 时,材料中产生了部分孪晶,此时晶粒中形成了孪晶组织。应变为 10% 时,孪晶组织增多,形成了相互错位的晶界并进一步转变为了微裂纹。这是因为错位晶界会对临近晶粒区造成了一定的穿透效果,由此产生更多的孪晶。应变为 15% 时,裂纹尺寸也进一步增加;当应变增加至 20% 时,裂纹尺寸快速增加。

图 4 为在应变在 0%~20% 范围内对试样进行二次电子测试得到的微观组织结构。由图 4 可知,当应变为 5% 时,形成了部分晶粒转动的现象,受晶粒位置变化的影响,在合金基体中形成了许多微观凹凸结构,还有一些区域产生了微裂纹。这些孪晶可以对晶粒变形发挥一定的协调作用,从而消除应力集中的现象,避免晶体组织开裂的情况。应变达到 10% 时,初始合金晶界与孪晶中形成了微裂纹,这是由于这些部位形成了比临界值更高的应力。进一步增加拉伸应变变量,产生了更多裂纹,并且裂纹尺寸也明显增加。

### 2.3 晶体取向角分析

不同应变下 Mg-4Zn-1.2Y 合金原位拉伸的晶粒取向角分布结果见图 5。由图 5 可知,初始拉伸试

样的晶粒取向角在  $0^{\circ} \sim 50^{\circ}$  范围内时,晶粒取向角表现为接近正态分布的特征,取向角主要位于  $20^{\circ} \sim 30^{\circ}$  之间;提高应变后,  $20^{\circ} \sim 30^{\circ}$  之间取向角的占比也随之下降,但占比均已超过 40%。

原位拉伸应变量为 15% 时, Mg-4Zn-1.2Y 合金的 EBSD 结果见图 6。在图 6 中采用黑线表示  $86^{\circ}$  取向角附近的晶界,可以看到试样基体内的孪晶和界面基本均为交互类型,这是因为  $(0001) // TD$  织构是由初始晶粒通过  $\{10-12\}$  拉伸孪生而形成的晶粒取向。拉伸变形期间形成了晶粒取向角为  $86^{\circ}$  的孪晶界,属于一种镁基体中最易形成的  $\{10-12\}$  孪晶界<sup>[14]</sup>。 $\{10-12\}$  拉伸孪晶形成了最低切变量与临界分切应力,因此,其在各类组织变形中最易形成<sup>[15]</sup>。当在原位拉伸阶段仅分析宏观主应力与晶体面平行时的受力状态时,初始位向无法对孪生起到明显的激活作用。对于实际拉伸变形,在  $ND$  方向上未受到约束,沿  $TD$  方向会对附近晶粒造成挤压,产生与  $ND$  方向垂直分布的压应力;同时因为  $\{10-12\}$  拉伸过程中形成了很低的孪生临界分切应力,从而造成这类孪生更快地进入激活状态。孪生可以对晶粒取向起到良好的调节作用,促使更多的滑移与孪生形成,使合金更易释放应变载荷,因此,促进伸长率的提高。

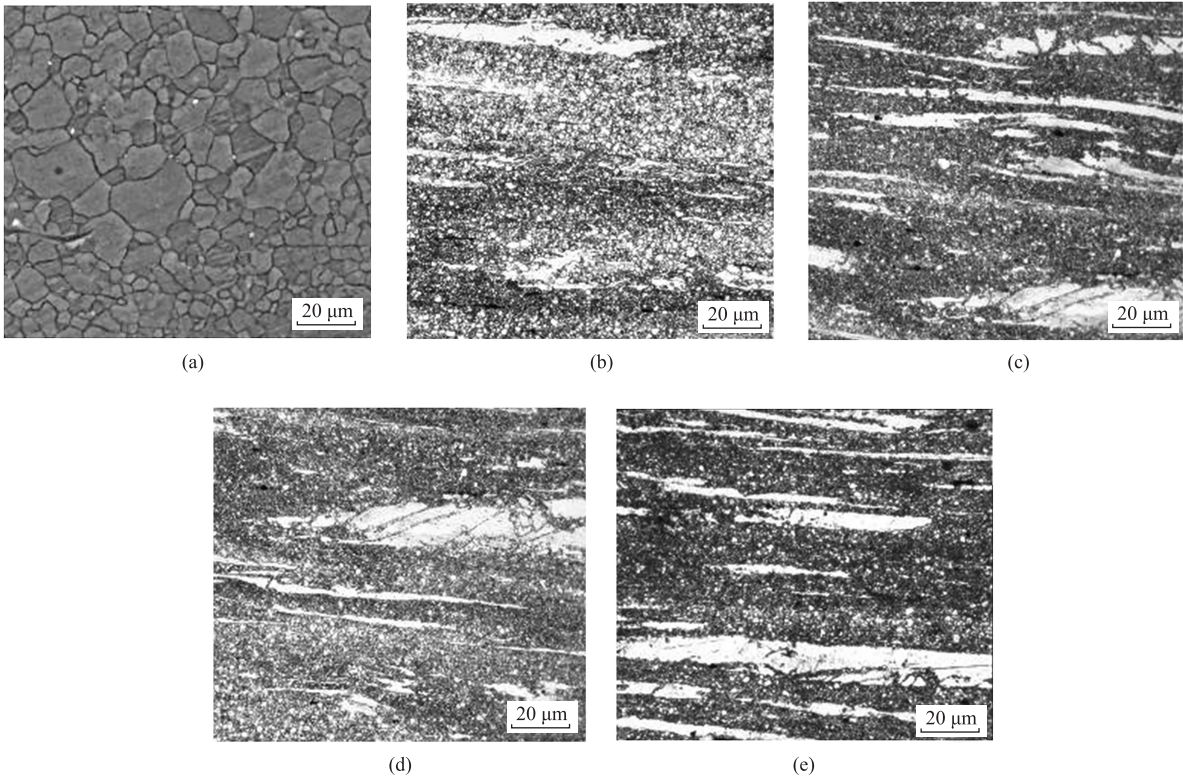


图 4 不同应变下 Mg-4Zn-1.2Y 合金原位拉伸的 SEM 图像

(a) 0% (b) 5% (c) 10% (d) 15% (e) 20%

Fig. 4 SEM images of in-situ tensile for Mg-4Zn-1.2Y alloy under different strains

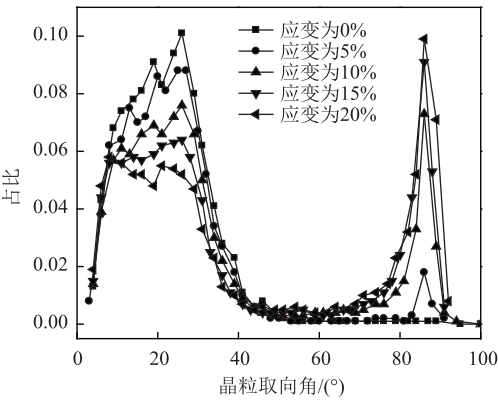


图 5 不同应变下 Mg-4Zn-1.2Y 合金原位拉伸晶粒取向角分布

Fig. 5 Grain orientation angle distributions of in-situ tensile for Mg-4Zn-1.2Y alloy under different strains

3 结论

- (1) 试样在应变为 26% 时断裂，伸长率为 25.3%，拉伸强度为 218 MPa。
- (2) 随着拉伸应变程度的增加，合金产生了更多的裂纹，并且尺寸也明显增加。形成了更大尺寸

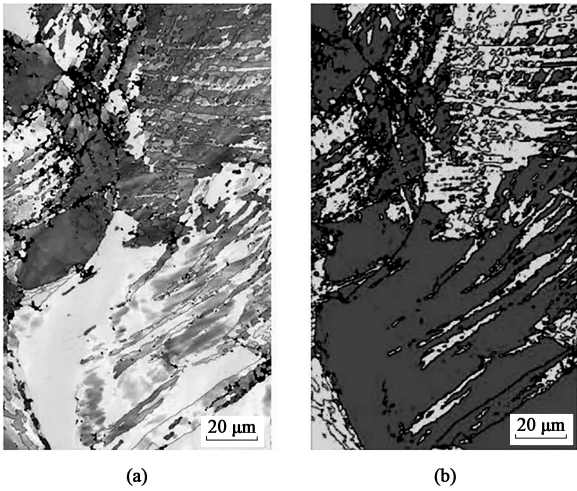


图 6 15%原位拉伸应变量下 Mg-4Zn-1.2Y 合金的 EBSD 结果

(a) IPF (b) PF

Fig. 6 EBSD results of Mg-4Zn-1.2Y alloy under in-situ tensile strain amount of 15%

的孪晶，这些孪晶可以对晶粒变形发挥一定的协调作用，从而消除应力集中。当应变增加至 20% 时，裂纹尺寸快速增加。

- (3) 初始拉伸试样晶粒取向角的占比分布接近

正态分布的特征, 主要位于  $20^{\circ} \sim 30^{\circ}$  之间; 应变达到 20% 时,  $20^{\circ} \sim 30^{\circ}$  之间的取向角的占比已经超过 10%。15% 原位拉伸应变量下, Mg-4Zn-1.2Y 合金产生的孪生晶粒对晶粒取向起到良好的调节作用, 促进伸长率提高。

#### 参考文献:

- [1] 武昌, 赵天亮, 许晋, 等. Al-Nb-B 细化纯镁原位拉伸变形机制及其断裂机理 [J]. 中国有色金属学报, 2021, 31 (8): 2081-2090.
- Wu C, Zhao T L, Xu J, et al. In situ tensile deformation and fracture mechanism of Al-Nb-refined pure magnesium [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31 (8): 2081-2090.
- [2] 罗锡才, 刘灏霖, 康利梅, 等. 搅拌摩擦加工方向对 AZ61 镁合金组织和力学性能的影响 [J]. 材料研究与应用, 2021, 15 (3): 203-209.
- Luo X C, Liu H L, Kang L M, et al. Effect of friction stir processing direction on microstructure and mechanical properties of AZ61 magnesium alloy [J]. Journal of Materials Research and Application, 2021, 15 (3): 203-209.
- [3] 郭丽丽, 郭浩然, 汪建强, 等. 轧制工艺对连续挤压 AZ31 镁合金板材成形性的影响 [J]. 塑性工程学报, 2021, 28 (7): 56-63.
- Guo L L, Guo H R, Wang J Q, et al. Influence of rolling process on formability of continuously extruded AZ31 magnesium alloy sheets [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28 (7): 56-63.
- [4] 李磊, 郎利辉, 轩永波, 等. 基于单向拉伸的半固化 GLARE 层板成形性能分析 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (2): 200-205.
- Li L, Lang L H, Xuan Y B, et al. Analysis on forming performance of semi-cured GLARE laminate based on uniaxial tensile [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (2): 200-205.
- [5] 张丽英, 张晨, 郭翰韬, 等. 晶间变形行为对 AZ31 镁合金延展性的影响 [J]. 塑性工程学报, 2021, 28 (4): 136-145.
- Zhang L Y, Zhang C, Guo H T, et al. Effect of intergranular deformation behavior on ductility of AZ31 magnesium alloy [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28 (4): 136-145.
- [6] Ventura N M D, Kalácska S, Casari D, et al. {10-12} twinning mechanism during in situ micro-tensile loading of pure Mg: Role of basal slip and twin-twin interactions [J]. Materials & Design, 2021, 197: 109206.
- [7] 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.
- [8] 郑庭坚, 张丽霞, 廖娟. 超声振动辅助镁合金板拉伸力学行为及本构建模 [J]. 塑性工程学报, 2020, 27 (12): 170-176.
- Zheng T J, Zhang L X, Liao J. Mechanical behavior and constitutive modeling of magnesium alloy sheet in ultrasonic vibration assisted tensile test [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2020, 27 (12): 170-176.
- [9] 付三玲, 李全安, 张清. Mg-12Gd-2Y-1Sm-0.5Zr 镁合金高温拉伸过程中的显微组织演变 [J]. 材料热处理学报, 2019, 40 (12): 32-38.
- Fu S L, Li Q A, Zhang Q. Microstructure evolution of Mg-12Gd-2Y-1Sm-0.5Zr magnesium alloy during high temperature tensile process [J]. Journal of Materials and Heat Treatment, 2019, 40 (12): 32-38.
- [10] 肖震东, 刘宇坤, 国宏伟, 等. 不同形变温度下 Mg-Al-Ca-Mn 合金的变形机制 [J]. 塑性工程学报, 2019, 26 (5): 174-179.
- Xiao Z D, Liu Y K, Guo H W, et al. Deformation mechanism of Mg-Al-Ca-Mn alloy at different deformation temperatures [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2019, 26 (5): 174-179.
- [11] 杨柳, 官英平, 段永川, 等. 轧制态 ME20M 镁合金热拉伸变形行为及加工图 [J]. 稀有金属材料与工程, 2020, 49 (5): 1715-1721.
- Yang L, Guan Y P, Duan Y C, et al. Hot tensile deformation behavior and processing of rolled ME20M magnesium alloy [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2020, 49 (5): 1715-1721.
- [12] 郭丽丽, 郭浩然, 汪建强, 等. 轧制工艺对连续挤压 AZ31 镁合金板材成形性的影响 [J]. 塑性工程学报, 2021, 28 (7): 56-63.
- Guo L L, Guo H R, Wang J Q, et al. Influence of rolling process on formability of continuously extruded AZ31 magnesium alloy sheets [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28 (7): 56-63.
- [13] 顾佳卿, 唐伟能, 徐世伟. Mg-0.4Zn 镁合金挤压板拉伸变形组织的演变 [J]. 材料研究学报, 2021, 35 (7): 553-560.
- Gu J Q, Tang W N, Xu S W. Microstructure evolution during tensile deformation of an extruded Mg-0.4Zn alloy plate [J]. Journal of Materials Research, 2021, 35 (7): 553-560.
- [14] Jain A, Duygulu O, Brown D W, et al. Grain size effects on the tensile properties and deformation mechanisms of a magnesium alloy AZ31B sheet [J]. Materials Science & Engineering, 2008, (1/2): 545-555.
- [15] Reed-Hill R E, Robertson W D. Additional modes of deformation twinning in magnesium [J]. Acta Metallurgica, 1957, 5 (12): 689-768.