

Mg-Li 系合金超塑性研究进展

曹富荣

(东北大学 材料科学与工程学院, 沈阳 110819)

摘要: 超塑性是材料在一定温度和应变速率下表现出异常高塑性的能力。Mg-Li 合金具有超轻的密度、高比刚度和良好的电磁屏蔽能力, 可望在航天、军事、汽车、3C 电子等领域获得应用。综述了国内外 Mg-Li 合金超塑性研究现状, 介绍了轧制、挤压、等通道转角挤压、搅拌摩擦加工、差速轧制、高压扭转和多向锻造方法获得的超塑性。指出了 Mg-Li 合金超塑性存在的问题和今后进一步研究的方向。

关键词: Mg-Li 合金; 超塑性; 剧烈塑性变形

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2017.03.002

中图分类号: TG135⁺.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2017)03-0008-05

Superplasticity of Mg-Li System Alloys

CAO Fu-rong

(School of Materials Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

ABSTRACT: Superplasticity is exceptionally high plasticity exhibited by materials at certain temperature and strain rate. By taking advantage of ultra-light density, high specific stiffness and good electromagnetic shielding capability, Mg-Li alloys were expected to be applied in aerospace, military affairs, automobile, 3C electronic field, etc. Research status of superplasticity of Mg-Li system alloys at home and abroad was reviewed. The superplasticity induced by rolling, extrusion, equal channel angular pressing, friction stir processing, differential speed rolling, high-pressure torsion and multidirectional forging was introduced. Existing problems and further research direction were pointed out for the superplasticity of Mg-Li system alloys.

KEY WORDS: Mg-Li alloy; superplasticity; severe plastic deformation

1 Mg-Li 系合金简介

金属 Mg 密度为 1.74 g/cm^3 , 金属 Li 密度为 0.534 g/cm^3 , 将 Mg 与 Li 合金化得到密度 $1.3 \sim 1.65 \text{ g/cm}^3$ 的 Mg-Li 合金。由于 Mg-Li 合金具有超轻的密度, 所以有超轻镁合金之称。Li 加入 Mg 中可以降低轴比 (c/a) 值, 改善镁的塑性。根据 Mg-Li 合金相图, Li 的质量分数在 5.7% 以下时, 密排六方结构的 α 相存在; Li 的质量分数在 11% 以上时, 体心立方结构的 β 相存在; Li 的质量分数介于 5.7% ~ 11% 之间时, $\alpha+\beta$ 相存在。现有的 Mg-Li 系合金通常包含 Mg-Li, Mg-Li-Al, Mg-Li-Zn 和 Mg-Li-Al-Zn 等合金或以此为

基体的合金。从研究单位看, 国内哈尔滨工程大学、重庆大学、中科院金属研究所、郑州有色金属研究院、北京航空航天大学、上海交通大学、哈尔滨工业大学、华南理工大学、东北大学、山东大学、西华大学、东北轻合金有限公司等单位在不同的时期开展了 Mg-Li 合金研究。从应用看, 2011 年国内第 1 条 Mg-Li 合金生产线在西安投产, 2015 年 9 月 Mg-Li 合金在“浦江一号”国产卫星中得到了应用。

2 超塑性简介

超塑性是在一定温度和应变速率下, 材料表现出异常高塑性的能力, 延伸率少则几百, 大则几千。

收稿日期: 2017-02-21

基金项目: 国家自然科学基金 (51334006)

作者简介: 曹富荣 (1964—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为金属塑性加工与超塑性。

LANGDON^[1]认为应变速率敏感性指数(m 值)为0.5, 延伸率大于等于400%为真超塑性; 应变速率敏感性指数(m 值)为0.33, 延伸率低于400%为准超塑性或类超塑性。通常细晶材料超塑性的晶粒尺寸要求在10 μm 以下, 温度大于 $0.5T_m$ (T_m 为熔点温度), 应变速率为 $10^{-4}\sim 10^{-2}\text{ s}^{-1}$ 之间^[2], 而对超细晶材料超塑性的晶粒尺寸则在1 μm 以下, 应变速率大于 10^{-2} s^{-1} 。高温变形本构方程见式(1)^[3]:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{AD_0Gb}{kT} \left(\frac{b}{d}\right)^p \left(\frac{\sigma}{G}\right)^n \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (1)$$

式中: $\dot{\varepsilon}$ 为变形速率; A 为无量纲常数; G 为剪切模量; b 为柏氏矢量的模; p 为晶粒尺寸指数; σ 为外力; n 为应力指数($1/m$); D_0 为频率因子; Q 为变形激活能; k 为玻尔兹曼常数; T 为绝对温度; d 为晶粒尺寸; R 为气体常数。

采用 $n(m)$, p 和 Q 特征值可以表征变形机理。对典型超塑性过程, $n=2(m=0.5)$, $p=2$ 或3, Q 等于晶界扩散激活能或晶格扩散激活能。多数认为晶界滑动是真实超塑性的主要变形机理, 位错粘性滑动是准超塑性的主要变形机理。根据式(1), 在应力和温度恒定情况下, 可以得到下式(2)。

$$\dot{\varepsilon} \propto d^{-p} \quad (2)$$

由式(2)可见, 晶粒尺寸减小, 应变速率提高。由于晶粒细化, 超塑性变形的应变速率提高, 变形的时间减少, 出现高应变速率超塑性(HSRSP)。由于晶粒细化, 超塑性的速率大大提高。例如, 传统超塑性成形晶粒尺寸为2~5 μm 的一块板料成形一个零件, 采用 $10^{-3}\sim 10^{-2}\text{ s}^{-1}$ 速率花费的时间要20~30 min, 而新的超细晶晶粒尺寸1 μm 以下的板料成形, 假设是0.2 μm 晶粒, 由于超细化, 速率提高到 $10^{-1}\sim 1\text{ s}^{-1}$ 花费的时间不到20 s。由于接近应用过程的时间, 所以超细晶 HSRSP 实验研究具有吸引力。

为了实现材料超塑性, 需要对材料进行预处理。由此, 派生出一系列不同成形方法诱发的材料超塑性行为。

3 Mg-Li 系合金超塑性研究进展

从相关文献看, 除了轧制、挤压等常规成形方法以外, 剧烈塑性变形(SPD)也引起了人们浓厚的兴趣。Mg-Li 系合金超塑性采用了如下超塑预处理方法: 轧制、挤压、等通道转角挤压、搅拌摩擦加工、差速辊轧制、高压扭转和多向锻造。

3.1 轧制

KAIBYSHEV^[4]轧制多元 Mg-8.1Li-5.2Al-4.7Cd-0.21Mn-1.38Zn 合金在晶粒尺寸为15 μm 、 m 值为0.55、温度为723 K与应变速率为 10^{-2} s^{-1} 条件下获得

475%的最大超塑性。METENIER 等^[5]采用箔冶金法冷轧层压 Mg-9Li 合金, 在晶粒尺寸6 μm 、温度423~523 K条件下获得460%的最大超塑性。实验发现层压材 n 值为2, Q 值等于 β 相晶格扩散激活能103 kJ/mol。同时, 对铸态 Mg-9Li 合金获得 n 值为5, Q 值等于 β 相晶格扩散激活能。为了使合金氧化和表面反应最小, TALEFF 等^[6]采用箔冶金方法低温轧制(总厚度减薄比例为1200:1)获得细晶(晶粒尺寸2.7 μm) Mg-9Li 合金, 在低温373 K获得450%的延伸率, 发现该合金具有低温超塑性, 应变速率敏感性指数为0.5, 变形激活能 Q 值为65 kJ/mol, 具有晶界扩散控制的晶界滑动特点。KOJIMA 等^[7]对 Mg-8.3Li-0.99Zn-0.011Fe-0.001Na 合金采用473 K温轧和443 K, 1 h热处理获得带状组织, 在573 K, $4.2\times 10^{-4}\text{ s}^{-1}$ 条件下获得840%的最大超塑性。HIGASHI 等^[8]在温轧 Mg-8.5Li 合金中在623 K, $4\times 10^{-4}\text{ s}^{-1}$ 条件下获得630%的最大超塑性, 同时报道了动态再结晶诱发带状组织向等轴晶粒转变的实验现象。FUJITANI 等^[9-10]在轧制 Mg-8Li-(0.5Zr)合金中在573 K, 晶粒尺寸11 μm 条件下获得了大于500%的延伸率。笔者采用图像分析方法获得 α 相和 β 相的尺寸分布图, 首次提出了双相 Mg-Li 合金存在 α 相尺寸增加, β 相尺寸减少这一重要的实验现象, 为认识超塑性 Mg-Li 合金特殊的晶粒长大现象奠定了实验基础。KAWASAKI 等^[11]在轧制 Mg-9.5Li-1Zn 合金中研究了超塑性流动和空洞形成与长大机理, 在523 K, $1.0\times 10^{-4}\text{ s}^{-1}$ 条件下获得290%的准超塑性, 合金 m 值0.33, 过程激活能92 kJ/mol。TANG 等^[12]采用573 K热轧制备了 Mg-3.3Li, Mg-8.5Li-1Al 和 Mg-14.1Li-1Al 合金, 分别在673 K, $5\times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$ 条件下获得139%的延伸率, 在623 K, $5\times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$ 条件下获得357%的延伸率, 在623 K, $5\times 10^{-4}\text{ s}^{-1}$ 条件下获得155.3%的延伸率。CAO 等^[13-14]采用大变形轧制(加工率92%)方法在 Mg-8.42Li 和 Mg-7.83Li 合金中在晶粒尺寸3.48 μm , 温度573 K, 应变速率 $5\times 10^{-4}\text{ s}^{-1}$ 和 $1.67\times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$ 条件下分别获得920%和850%的最大延伸率, 给出了 Mg-Li 合金包含位错数量的变形机理图, 采用杠杆定律和原子扩散分析阐述了双相合金晶粒长大的根本原因, 同时建立了耦合静态与动态长大的晶粒长大模型并在7.83Li 合金中获得有效应用; 在轧制(加工率92%)粗晶 Mg-6Li-3Zn 合金中, 在623 K, $1.67\times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$ 的条件下获得300%的最大延伸率; 在轧制(加工率92%)粗晶 Mg-11Li-3Zn 合金中获得250%的最大延伸率, 同时构建了固溶体基归一化应力-归一化温度的新型变形机理图。最近, CAO 等^[15]在 Mg-9.3Li-1.79Al-1.61Zn 合金中在573 K, $1.67\times 10^{-4}\text{ s}^{-1}$ 条件下获得566.7%的最大延伸率, 获得了考虑位错密度的临界动态再结晶模型以及该合金的本构方程,

轧制 Mg-9.3Li-1.79Al-1.61Zn 合金超塑性实物照片见图 1。

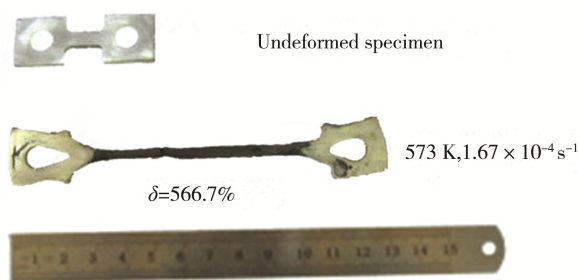


图1 Mg-9.3Li-1.79Al-1.61Zn 合金超塑性实物
Fig.1 Appearance of superplastic sample of
Mg-9.3Li-1.79Al-1.61Zn alloy processed by rolling.

3.2 挤压

DONG 等^[16]采用搅拌铸造和大挤压比(100:1)挤压方法研究了 Mg-8.5Li-1Zn 和 Mg-8.5Li-3Zn 合金的超塑性行为,发现挤压板材发生动态再结晶。Mg-8.5Li-1Zn 合金在 623 K, $1.1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 条件下获得约 400% 的延伸率,表现出高应变速率超塑性。Mg-8.5Li-3Zn 合金获得大于 540% 的延伸率。Mg-8.5Li-1Zn 和 Mg-8.5Li-3Zn 合金在 573 和 673 K 下的变形激活能分别为 86 和 79 kJ/mol, Mg-Li-Zn 合金的变形机理为晶界扩散控制的晶界滑动。QU 等^[17]采用挤压方法制备了 Mg-8Li 合金,晶粒尺寸小于 10 μm ,在 $5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 条件下获得 164.5% 的延伸率,同时实验研究了合金空洞行为。实验发现随初始应变速率降低,空洞含量和尺寸增加。越接近裂尖的位置,空洞变得越大。笔者采用 $5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 应变速率的超塑性变形是该工作的特色。LIU 等^[18-19]采用双道次挤压方法在 Mg-8Li-2Zn 合金中在 $1.0 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 条件下获得 279% 的高应变速率超塑性,在 563 K, $1.5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 条件下获得 758% 超塑性,后者 m 值为 0.55, Q 值为 90 kJ/mol。

3.3 等通道转角挤压

YOSHIDA 等^[20]采用感应炉熔炼制备双相 Mg-10Li-1Zn 合金铸锭,323 K 等通道转角挤压(模角 180°)随后 623 K $\times 1 \text{ h}$ 退火,在 423 K, $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 条件下获得 391% 延伸率。组织观察发现试样包含细晶,细晶因动态再结晶产生,已经再结晶的 α 相中沿晶界和三叉晶界析出 β 相。MA 等^[21]采用旋转模等通道转角挤压制备了 Mg-8.5Li 合金,笔者沿板材厚度方向实验研究 β 相的含量变化,用光学显微镜和电子探针分析研究脱锂现象。发现在超塑性变形期间,平均 β 相含量减少,表面看不到 β 相层。试验温度越高,平均 β 相含量越低。在太高的温度 673 K,氧化锂产

生,在最佳超塑性条件下,试样没有氧化。该报告进一步发展了前述 FUJITANI 等人的工作,为 Mg-Li 合金 α 相晶粒长大问题奠定实验基础。这一工作和 FUJITANI 的工作^[9-10]为后来 CAO^[13-14]采用杠杆定律和原子扩散理论分析阐述了双相合金晶粒长大的原因创造了前提条件。FURI 等^[22]采用铸造、挤压和 423 K 等通道转角挤压(模角 110°)制备了 Mg-8Li 合金,晶粒尺寸为 1~3 μm ,在 473 K, $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 条件下获得 970% 的延伸率, m 值为 0.4~0.6。Furi 等人^[23]采用铸造、铸造+挤压以及铸造+挤压+室温等通道转角挤压(模角 135°)3 种方法制备了 Mg-8Li 合金,发现挤压造成显著晶粒细化,随后的等通道转角挤压进一步细化晶粒。对铸造+挤压+室温等通道转角挤压试样在 473 K 下获得 1780% 的最大延伸率,这是迄今为止在 Mg-Li 合金中获得的最大超塑性。Lin 等人^[24]采用等通道转角挤压制备了粗晶(154.6 μm)Mg-10.73Li-4.49Al-0.52Y 合金,在 523 K, $5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 条件下获得 512% 的超塑性。实验还发现,最佳超塑性条件下, m 值为 0.53,变形激活能为 89.7 kJ/mol,甚至在 10^{-2} s^{-1} 各种温度条件下,延伸率大于 150%,表现出高应变速率准超塑性。YANG 等^[25]在等通道转角挤压制备的带状晶粒的 Mg-9Li-1Zn 合金中,采用最大 m 值超塑性方法研究该合金的超塑性,在 573 K 获得 563.7% 的延伸率。实验还发现,最大 m 值超塑性方法优于恒应变速率超塑性方法。过去最大 m 值超塑性方法在钛合金中获得成功应用,文中在 Mg-Li 合金中首次应用。KARAMI 和 MAHMUDI^[26-27]采用等通道转角挤压制备了细晶 Mg-11.8Li-0.8Zn 合金,采用剪切冲头实验研究了合金的超塑性,获得的应变速率敏感性指数为 0.45,变形激活能为 71 kJ/mol。

3.4 其他 SPD 方法

LIU 等^[28]采用挤压板材进行水下搅拌摩擦加工和低温热处理制备了(超)细晶 Mg-9.93Li-3.06Al-1.49Zn 合金小试样(试样长为 2.5 mm,宽为 1.4 mm,厚为 1.0 mm), α 相晶粒尺寸为 1.6 μm , β 相晶粒尺寸为 6.8 μm ,在 200 $^\circ\text{C}$, $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 条件下获得 630% 的最大超塑性,在 100 $^\circ\text{C}$ 获得延伸率为 330% 的低温超塑性,在 225~300 $^\circ\text{C}$ 获得大于 400% 的高应变速率超塑性。KIM 等^[29]采用特制的大速比设备进行单道次 398 K 差速冷轧制,在超细晶 Mg-9Li-1Zn 合金中在 473 和 523 K, 2.4×10^{-4} 和 $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 条件下获得 470%~550% 的最大延伸率。MATSUNOSHITA 等^[30]采用高压扭转方法制备试样,在沸水中完成超塑性成形,在 Mg-8Li 合金中在 473 K, $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 条件下获得 1330% 的优异超塑性。最近,CAO 等^[31]采用多向锻造与轧制方法制备了 Mg-10.2Li-2.1Al-

2.3Zn-0.2Sr 板材, 在 623 K, $1.67 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 条件下获得 712.1% 的最大延伸率。多向锻造轧制 Mg-10.2Li-2.1Al-2.3Zn-0.2Sr 合金超塑性实物照片见图 2。

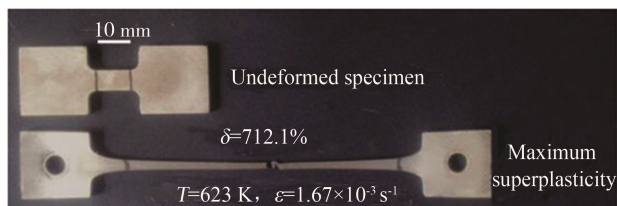


图 2 多向锻造轧制 Mg-10.2Li-2.1Al-2.3Zn-0.2Sr 合金超塑性实物

Fig.2 Appearance of superplastic sample of Mg-10.2Li-2.1Al-2.3Zn-0.2Sr alloy processed by multiple forging and rolling

4 存在的问题与今后研究的方向

目前简单体系的 Mg-Li 合金超塑性研究居多, 复杂体系或接近工业过程的多元 Mg-Li 合金超塑性研究尚少, 因此复杂体系的 Mg-Li 合金有待研究。SPD 其他的成形方式, 如往复挤压、累积叠轧、连续等通道转角挤压、连续限制带材角轧挤、限制斜槽压缩、反复褶皱压直法、反复模压变形法、T 型通道法、挤扭等均有待研究。复杂体系 Mg-Li 合金的超塑性机理也有待研究, 为了使复杂形状的零件制备获得应用, 有必要开展气压胀形和超塑性成形/扩散焊接 (SPF/DB) 的研究。

5 结语

综述了 Mg-Li 合金超塑性国内外研究现状, 介绍了轧制、挤压、等通道转角挤压、搅拌摩擦加工、差速辊轧制、高压扭转和多向锻造方法获得的超塑性。指出了 Mg-Li 合金超塑性存在的问题和今后进一步研究的方向: 复杂体系的 Mg-Li 合金有待研究; SPD 其他成形方式, 如往复挤压、累积叠轧、连续等通道转角挤压等有待研究; 复杂体系 Mg-Li 合金的超塑性机理有待研究; 有必要开展气压胀形和超塑性成形/扩散焊接 (SPF/DB) 的应用研究。

参考文献:

- LANGDON T G. Seventy-five Years of Superplasticity: Historic Developments and New Opportunities[J]. Journal of Materials Science, 2009, 44(22): 5998—6010.
- MOHAMED F A. Micrograin Superplasticity: Characteristics and Utilization[J]. Materials, 2011, 4(7): 1194—1223.
- LANGDON T G. A Unified Approach to Grain Boundary Sliding in Creep and Superplasticity[J]. Acta Metallurgica et Materialia, 1994, 42(7): 2437—2443.
- KAIBYSHEV O A. Superplasticity in Commercial Alloys [M]. Moscow: Metallurgiya, 1984.
- METENIER P, GONZALEZ-DONCEL G, RUANO O A, et al. Superplastic Behavior of a Fine-grained Two-phase Mg-9wt.%Li Alloy[J]. Materials Science and Engineering A, 1990, 125(1/2): 195—202.
- TALEFF E M, RUANO O A, WOLFENSTINE J, et al. Superplastic Behavior of a Fine-grained Mg-9Li Material at Low Homologous Temperature[J]. Journal of Materials Research, 1992, 7(8): 2131—2135.
- KOJIMA Y, INOUE M, TANNO O. Superplasticity in Mg-Li Alloy[J]. Journal of Japan Institute of Metals, 1990, 54(3): 354—355.
- HIGASHI K, WOLFENSTINE J. Microstructural Evolution during Superplastic Flow of a Binary Mg-8.5wt%Li Alloy[J]. Materials Letters, 1991, 10(7/8): 329—332.
- FUJITANI W, HIGASHI K, FURUSHIRO N, et al. Effect of Zr Addition on Superplastic Deformation of the Mg-8%Li Eutectic Alloy[J]. Journal of Japan Institute of Light Metals, 1995, 45(6): 333—338.
- FUJITANI W, FURUSHIRO N, HORI S, et al. Microstructural Change during Superplastic Deformation of the Mg-8mass%Li Alloy[J]. Journal of Japan Institute of Light Metals, 1992, 42(3): 125—131.
- KAWASAKI M, KUBOTA K, HIGASHI K, et al. Flow and Cavitation in a Quasi-superplastic Two-phase Magnesium-lithium Alloy[J]. Materials Science and Engineering A, 2006, 429(1/2): 334—340.
- TANG W, XU Y B, HAN E H. Plastic Deformation Behavior of Mg-Li Alloys at Ambient and Elevated Temperatures[J]. Materials Science Forum, 2005, 488/489: 531—534.
- CAO Fu-rong, DING H, LI Y L, et al. Superplasticity, Dynamic Grain Growth and Deformation Mechanism in Ultra-light Two-phase Magnesium-lithium Alloys[J]. Materials Science and Engineering A, 2010, 527(9): 2335—2341.
- 曹富荣. 金属超塑性[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2014.
- CAO Fu-rong. Metallic Superplasticity[M]. Beijing: Metallurgical Industrial Press, 2014.
- CAO Fu-rong, XIA F, XUE G Q. Hot Tensile Deformation Behavior and Microstructural Evolution of a Mg-9.3Li-1.79Al-1.61Zn Alloy[J]. Materials and Design, 2016, 92: 44—57.
- DONG S L, IMAI T, LIM S W, et al. Superplasticity in Mg-Li-Zn Alloys Processed by High Ratio Extrusion[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2008, 23(4): 336—341.
- QU Z K, LIU X H, WU R Z, et al. The Superplastic Property of the As-extruded Mg-8Li Alloy[J]. Materials Science and Engineering A, 2010, 527(13/14): 3284—3287.
- LIU X H, DU G J, WU R Z, et al. Deformation and Microstructure Evolution of a High Strain Rate Superplastic

- Mg-Li-Zn Alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2011, 509: 9558—9561.
- [19] LIU X H, ZHAN H B, GU S H, et al. Superplasticity in a Two-phase Mg-8Li-2Zn Alloy Processed by Two-pass Extrusion[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2011, 528: 6157—6162.
- [20] YOSHIDA Y, CISAR L, KAMADO S, et al. Low Temperature Superplasticity of ECAP Processed Mg-10%Li-1%Zn Alloy[J]. *Materials Transactions*, 2002, 43(10): 2419—2423.
- [21] MA A B, NISHIDA Y, SAITO N, et al. Movement of Alloying Elements in Mg-8.5 wt% Li and AZ91 Alloys during Tensile Tests for Superplasticity[J]. *Materials Science and Technology*, 2003, 19(12): 1642—1647.
- [22] FURI M, XU C, AIDA T, et al. Improving the Superplastic Properties of a Two-phase Mg-8%Li Alloy Through Processing by ECAP[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2005, 410/411: 439—442.
- [23] FURI M, KITAMURA H, ANADA H, et al. Influence of Preliminary Extrusion Conditions on the Superplastic Properties of a Magnesium Alloy Processed by ECAP[J]. *Acta Materialia*, 2007, 55(3): 1083—1091.
- [24] LIN K, KANG Z X, FANG Q, et al. Superplasticity at Elevated Temperature of a Coarse-grained Mg-Li Alloy [J]. *Advanced Engineering Materials*, 2014, 16(4): 381—388.
- [25] YANG H P, FU M W, TO S, et al. Investigation on the Maximum Strain Rate Sensitivity(m) Superplastic Deformation of Mg-Li Based Alloy, *Materials and Design*, 2016, 112: 151—159.
- [26] KARAMI M, MAHMUDI R. Shear Punch Superplasticity in Equal-channel Angularly Pressed Mg-12Li-1Zn Alloy [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2013, 576: 156—159.
- [27] MAHMUDI R, ALIZADEH R, AZHARI SH. Strain Rate Sensitivity of Equal-channel Angularly Pressed Sn-5Sb Alloy Determined by Shear Punch Test[J]. *Materials Letters*, 2013, 97: 44—46.
- [28] LIU F C, TAN M J, LIAO J, et al. Microstructural Evolution and Superplastic Behavior in Friction Stir Processed Mg-Li-Al-Zn Alloy[J]. *Journal of Materials Science*, 2013, 48: 8539—8546.
- [29] KIM W J, KIM M J, WANG J Y. Ultrafine-grained Mg-9Li-1Zn Alloy Sheets Exhibiting Low Temperature Superplasticity[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2009, 516(1/2): 17—22.
- [30] MATSUNOSHITA H, EDALATI K, FURI M, et al. Ultrafine-grained Magnesium-lithium Alloy Processed by High-pressure Torsion: Low-temperature Superplasticity and Potential for Hydroforming[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2015, 640: 443—448.
- [31] CAO F R, XUE G Q, XU G M. Superplasticity of a Dual-phase Mg-Li-Al-Zn-Sr Alloy Processed by Multidirectional Forging and Rolling[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2016, submitted.