58

# 基于尺寸效应的镁合金箔材本构关系的研究

### 赵宾<sup>1</sup>.王刚<sup>2</sup>.李萍<sup>1</sup>

(1. 合肥工业大学 材料科学与工程学院, 合肥 230009;2. 哈尔滨工业大学(威海) 材料科学与工程学院, 山东 威海 264209)

摘要:目的 探究 AZ31 镁合金微拉伸过程中存在的尺寸效应,提出适用于镁合金微拉伸的本构模型。方法 以 AZ31 镁合金箔材为试验材料,分别针对不同厚度和不同晶粒大小的试样进行微拉伸试验。结果 试样在单向拉伸时存在明显的尺寸效应,在实验数据的基础上对 Swift 模型进行修 正,得到了适用于镁合金微拉伸过程的本构方程。结论 用表面层模型解释了不同厚度的试样, 在微拉伸试验时出现的尺寸效应现象,用细晶强化理论解释了不同晶粒尺寸的试样,在微拉伸试 验时出现的尺寸效应现象;修正后的本构模型与试验数据吻合较好。

关键词: AZ31 镁合金; 微拉伸; 尺寸效应; 本构方程

**DOI**: 10.3969/j.issn.1674-6457.2014.04.011

中图分类号: TG146.2 文献标识码: A 文章编号: 1674-6457(2014)04-0058-05

### Constitutive Relationship of Magnesium Alloy Foil Based on the Size Effect

ZHAO Bin<sup>1</sup>, WANG Gang<sup>2</sup>, LI Ping<sup>1</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;2. School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai 264209, China)

**ABSTRACT**: **Objective** To explore the size effect of AZ31 magnesium alloy in the micro-tensile process, and to propose a constitutive model applicable to this process. **Methods** AZ31 magnesium alloy foil was used as the test material, and micro-tensile tests were carried out for samples with different thicknesses and grain sizes. **Results** There was obvious size effect in uniaxial tension, and the Swift model was modified based on the experimental data, resulting in a constitutive model that was suitable for magnesium alloy micro-tensile test. **Conclusion** The surface layer model was used to explain the phenomenon of size effect during the micro-tensile test of samples with different thicknesses, and the fine grain strengthening theory explained the phenomenon of size effect occurred during the micro-tensile test of samples with different grain sizes. The modified constitutive model agreed well with the experimental data.

KEY WORDS: AZ31 magnesium alloy; micro-tensile; size effect; constitutive equation

随着微机电系统(MEMS)从基础研究阶段快速 跨入实用阶段,越来越多的用户更加青睐于得到体 积小、功能集成的电子产品,而在医疗器械、航空电子等领域也迫切需要更微小、功能要求更高的零

收稿日期: 2014-04-26

作者简介:赵宾(1991—),男,四川南充人,硕士研究生,主要研究方向为精密塑性成形及控制。

件<sup>[1]</sup>。由于该类零件体积小、精度要求高、成形难 度大,关于该类零件经济高效的成形技术的开发一 直是研究热点。微成形技术正是近年发展起来的实 现微小零件成形的一种新型技术,该技术能够利用 塑性变形的方法生产至少在二维方向上尺寸处于毫 米量级的零件,具有成本低、工艺过程简单、精度高 以及生产效率高等特点,表现出了显著的优越性,发 展前景广阔<sup>[2-4]</sup>。

简单合理的材料本构关系的建立是准确地描述 材料力学性质的关键。然而随着零件尺寸的微小 化,材料的尺寸效应越加明显,传统的宏观力学模型 和成形理论不再直接适用于微塑性成形技术<sup>[5]</sup>。 为建立适用于微成形过程的材料本构关系模型,众 多学者在对传统的宏观本构模型进行修正的基础上 展开了大量研究。

Geiger M 等人<sup>[6]</sup>提出了表面层理论模型,公式 可表示为:

$$\sigma = \eta \sigma_0 + (1 - \eta) \sigma_1 \tag{1}$$

其中: $\eta$  为表面层所占的体积分数; $\sigma_0$  和 $\sigma_1$  分 别表示材料表面层晶粒和内部晶粒的流动应力。这 种模型分析了表面为自由表面的试样所呈现出的 "越小越弱"的尺寸效应。Armstrong 等人<sup>[7]</sup>在解释 传统多晶体金属塑性流动应力时,首次考虑了晶粒 尺度对材料性能的影响。Feaugas,Haddou<sup>[8]</sup>把应变 硬化的影响引入 Hall-Patch 关系式,将其修正为:

$$\sigma(\varepsilon, d) = \sigma_{hn}(\varepsilon) + k(\varepsilon) d^{-1}$$

这样使之能够估算流动应力。Fleck N A<sup>[9]</sup>和 Nix W D, Gao H<sup>[10]</sup>将描述微观尺寸的内禀尺寸, 耦 合到经典塑性力学本构关系中, 提出了不同的应变 梯度塑性理论。孟庆当等人<sup>[11]</sup>将相对厚度 t/d(板 厚与晶粒尺寸比值)引入了 Hall-Patch 关系式中, 使之与实验结果更接近。Wang<sup>[12]</sup>等人提出了一个 同时考虑薄板厚度、晶粒尺寸以及 t/d 比值影响的 应力应变模型。王勾<sup>[13]</sup>分阶段分析了 t/d 对屈服 强度和切变模量的影响, 修正了双线性弹塑性本构 关系。

文中通过对不同厚度和晶粒尺寸的 AZ31 镁合 金箔材进行微拉伸试验,探究了试样在微拉伸过程 中出现尺寸效应的原因;并在试验数据的基础上,在 经典 Swift 本构模型中引入 t/d,建立了考虑尺寸效 应的适用于镁合金微拉伸的本构模型。

## 1 微拉伸试验中的尺寸效应

实验材料为 AZ31 镁合金箔材,其化学成分如 表1 所示。微拉伸试样截面形状尺寸如图1 所示, 采用电火花线切割加工,其原始晶粒平均尺寸为1.2 μm,厚度有0.05,0.1 和0.15 mm 3 种。另外,对厚 度为0.1 mm 的箔材进行热处理实验,通过改变保 温温度得到的试样平均晶粒尺寸分别为4.0,5.5, 10.0 μm。微拉伸试验在 Instron3343 型电子材料试 验机上进行,加载速度均为1.5 mm/min。

表	1	AZ31 镁合金的化学成分(质量分数,%)

(2)

Fable 1    Chemica	l composition	of magnesium	alloy AZ31
--------------------	---------------	--------------	------------

合金牌号	Al	Zn	Mn	Fe	Si	Be	Cu	Mg
AZ31B	3.19	0.81	0.334	≤0.005	≤0.02	≤0.01	≤0.005	余量



图1 微拉伸试样的尺寸与形状

Fig. 1 Specimen dimensions and geometry

## 1.1 不同箔材厚度引起的尺寸效应

对箔材厚度为 0.05, 0.10, 0.15 mm 的试样进

行微拉伸试验。得到的箔厚与抗拉强度、延伸率的 关系如图 2 所示,可以看出箔材的抗拉强度和延伸 率均有随箔厚的增加而增大的趋势,表现出了明显 的尺寸效应现象;而且从图 2 中还可看出,在箔厚从 0.1 mm 到 0.15 mm 时,材料延伸率增加明显,不再 是如抗拉强度那样的线性增加,体现出了材料延伸 率对箔厚具有敏感区间,相应的材料尺寸效应更加 显著。

材料抗拉强度随箔厚增加而增大的现象可通过 表面层模型<sup>[14]</sup>加以解释:在微尺寸下,表面层晶粒 运动时所受到周围晶粒和位错的阻碍作用要比内部

59



60

图 2 抗拉强度、延伸率与箔厚的关系



晶粒小,当试样厚度小到一定程度时,表面层晶粒在 箔厚中占的比例相应增大,在变形过程中,内层位错 运动剧烈而表层晶粒所受约束限制较小,因此,表面 层变形的趋势较小,试样的整体流动应力降低,这种 趋势随着试样厚度的减小而更加显著。延伸率随箔 厚增加而增加的现象,需要考虑晶粒之间的变形,晶 体塑性理论认为,多晶体金属塑性变形是由于各向 异性的晶粒塑性变形的结果,当外力条件相同时,厚 度较大的试样在变形时可以看成多晶体变形,变形 程度相对均匀,产生应力集中从而开裂的机会比较 小,延伸率比较大;厚度较小的试样在变形时可以看 成单晶体变形,单个晶粒的变形对材料整体的变形 影响较大,因此产生的应力集中更大,产生开裂的机 会变大,延伸率比较小。

## 1.2 不同晶粒尺寸引起的尺寸效应

对晶粒尺寸为 4.0,5.5,10.0 μm 的材料进行 微拉伸试验,得到的材料屈服强度、延伸率与晶粒大 小的关系分别如图 3 所示,可知箔材的屈服强度与 延伸率均随着晶粒尺寸的增大而降低,表现出明显 的尺寸效应。

细晶强化理论可解释屈服强度与延伸率随着晶 粒尺寸的增大而降低的现象<sup>[5]</sup>。在多晶体材料中, 晶界比晶粒内部的自由能高得多,晶粒越小,晶界滑 动对塑性变形的贡献越大;同时,在已发生滑移的晶 粒晶界附近,只有当位错塞积产生足够的应力集中, 才能激发相邻晶粒滑移系中的位错源,随着晶粒细 化,晶界的数量随之增加,产生足够位错塞积所需的



图 3 屈服强度、延伸率与晶粒大小的关系



外力值也更大,材料屈服所需的应力越大。晶粒细 小的材料晶粒内部应变与晶界附近应变的差值比较 小,变形均匀,产生应力集中进而引起开裂的机会也 少;细小晶粒材料内部晶界的面积增大,不利于裂纹 的扩展;同时细小晶粒材料内部缺陷较少,不易引起 开裂。

图4为在不同晶粒尺寸下的应力-应变关系 图,从图4可以观察到,随着晶粒尺寸的减小,试样 能够承受的流动应力增大。这种晶粒尺寸越小流动 应力越大的现象是细晶强化机理和尺寸效应现象共 同作用的结果。



图4 不同晶粒尺寸对应的流动应力-应变曲线

Fig. 4 Flow stress – strain curves corresponding to different grain sizes

# 2 基于尺寸效应的微拉伸本构关系

在不考虑材料尺寸效应的情况下,图4流动应 力-应变曲线可以用 Swift 模型来描述:

$$\sigma_k = K(\varepsilon_0 + \overline{\varepsilon})^n \tag{3}$$

根据不同晶粒大小的箔材微拉伸试验数据,采 用最小二乘法得到参数  $K, \varepsilon_0, n$  的值,具体数值见 表 2。

表 2 不同晶粒尺寸的 Swift 模型材料参数

 
 Table 2 Material parameters for the Swift model of different grain sizes

晶粒大小 /µm	K∕ MPa	$\boldsymbol{arepsilon}_{0}$	n
4.0	443	0.007	0.169
5.5	303	0.005	0.165
10.0	305	0.006	0.185

Michel J F 等人<sup>[15]</sup>修正了 Swift 模型,提出了一 种考虑尺寸效应的应力应变模型  $\sigma = \sigma_k F(\lambda, \overline{\epsilon})$ ,式 中: $\lambda$  为材料的尺寸系数,在文献[15]中 $\lambda$  是与厚 度 t 有关的系数,从修正后的模型可以看出,在微成 形中材料的流动应力不仅和等效应变 $\overline{\epsilon}$  有关,还与 试样的尺寸有密切的关系。因此,通过设  $\lambda = t/d$ 考虑尺寸效应对本构关系的影响,表 3 为不同晶 粒尺寸下的 $\lambda$  值。此时,材料的考虑尺寸效应的 应力应变关系可以表示为 $\sigma = \sigma_k F(t/d, \overline{\epsilon})$ ,在修正 后的模型中,设  $\lambda = 10$  时, $F(t/d, \overline{\epsilon}) = 1$ ,则有 $\sigma_k =$ 305(0.006+ $\overline{\epsilon}$ )<sup>0.185</sup>。

Table 3 Material parameters of micro-tensile specimen

表3 微拉伸试样参数

箔材厚度	晶粒大小	箔材厚度/晶粒	
$t \neq mm$	$d  eq \mu \mathrm{m}$	大小λ	
0.1	4.0	25	
0.1	5.5	18	
0.1	10.0	10	

函数  $F(t/d, \bar{e})$  是与材料尺寸有关的部分,采用 非线性最小二乘法拟合可得:

$$\sigma = a K \exp(b\lambda) \left( \bar{\varepsilon} + \varepsilon_0 \right)^{n[c \exp(d\lambda - 1)]}$$
(4)

式(4)可以很好地拟合实验数据,将K=305, $\varepsilon_0$ = 0.006,n=0.185 代入式(4)中,再采用最小二乘法 计算出系数a,b,c,d的值,具体数值分别为0.008, 0.93,0.004,0.42。

将各系数的数值代入修正后的本构关系中,则 可以得到 AZ31 镁合金微成形中考虑尺寸效应的应 变应力关系式:

 $\sigma$ =2.44exp(0.93 $\lambda$ )( $\varepsilon$ + $\varepsilon_0$ )<sup>*n*[0.004exp(0.42 $\lambda$ -1)]</sup>(5) 采用修正后的本构关系得到了不同 *t*/*d* 值所对 应的流动应力应变曲线,如图5所示。



图 5 修正后本构模型计算得到的流动应力-应变曲线 Fig. 5 Flow stress-strain curve for AZ31 calculated with the new model

对比可以看出,图 5 与图 4 塑性阶段吻合度较 好,表明修正后的本构关系能够较好地反映 AZ31 镁合金箔材微拉伸过程中的流动特性。这样根据该 本构模型,计算不同  $\lambda$  值对应的试样的屈服强度, $\lambda$ 为 25,18,10 时对应的屈服强度分别为213.3, 154.1,132.7 MPa。

# 3 结论

 1)不同厚度的镁合金箔材微拉伸试验表明,试 样的抗拉强度和延伸率均随箔厚的增加而增大,表 现出明显的尺寸效应,表面模型可以很好地解释这 种"越小越弱"的变化趋势。

2)不同晶粒尺寸的镁合金箔材微拉伸试验表明,试样的屈服强度与延伸率均随着晶粒尺寸的增大而降低,表现出明显的尺寸效应,可以用细晶强化理论对这种变化趋势进行解释。

3)根据不同晶粒大小的箔材微拉伸试验数据,并通过引入 $\lambda = t/d($ 板厚与晶粒大小比值)考虑尺寸效应对本构关系的影响,修正了Swift模型, 建立了考虑尺寸效应的镁合金的本构方程: $\sigma = 2.44 \exp(0.93\lambda)(\overline{\epsilon}+\epsilon_0)^{n[0.004\exp(0.42\lambda-1)]}$ ,该方程计算的结果能够较好地吻合试验数据,较好地反映AZ31 镁合金箔材微拉伸过程中的流动特性。

#### 参考文献:

[1] GEIGER M, MEBNER A, ENGEL U. Metal Forming of

Microparts for Electronics [J]. Production Engineering, 1994,2(1):15–18.

- [2] 谢延敏,于沪平,阮雪榆. 微成形技术的研究现状[J]. 中国机械工程,2005,16(10):935—939.
  XIE Yan-min, YU Hu-ping, RUAN Xue-yu. Development and Future of Metal Micro-forming Technology[J]. China Mechanical Engineering,2005,16(10):935—939.
- [3] ENGEL U, ECKSTEIN R. Microforming from Basic Research to Its Realization [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 125:35-44.
- [4] 董湘怀,王倩,章海明,等. 微成形中尺寸效应研究的进展[J]. 中国科学,2013,43(2):115—130.
  DONG Xiang-huai, WANG Qian, ZHANG Hai-ming, et al. Progress in the Study of the Size Effect in Micro Forming[J]. Science China,2013,43(2):115—130.
- [5] 郭斌,周健,单德斌,等. 黄铜箔拉伸屈服强度的尺寸 效应[J].金属学报,2008,44(4):419—422.
  GUO Bin,ZHOU Jian,SHAN De-bin, et al. Size Effects of Yield Strength of Brass Foil in Tensile Test[J]. Acta Metallurgica Sinica,2008,44(4):419—422.
- [6] GEIGER M, VOLLERTSEN F. Fundamentals on Manufacturing of Sheet Metal Microparts [J]. CIRP Ann-Manuf Tech, 1996, 45:277-282.
- [7] ARMSTRONG R W. On Size Effects in Polycrystal Plasticity[J]. Mech Phys Solids, 1961, 9:196–199.
- [8] FEAUGAS X, HADDOU H. Grain-size Effects on Tensile Behavior of Nickel and AISI 316L Stainless Steel [J]. Metal Mater Trans A, 2003, 34:2329-2340.
- (上接第5页)
- [8] MAO X C, YAO J H, CHEN L, et al. Current Production Situation and Development Counter Measures of Connecting Rod Forging[J]. J Zhejiang Univ Technol, 2001 (2): 156—160.
- [9] JOHNSON W. Plane Strain Slip Fields[M]. Arnold, 1970.
- [10] BRAMLEY A, OSMAN F. The Upper Bound Method[M]. Numerical Modelling of Materials and Deformation Processes. Springer Verlag, 1992.
- [11] WANHEIM T. Physical Modelling of Metal Forming Processes[M]. Process Modelling. Proceedings of ASM Process Modelling Sessions, Materials and Processing Congresses, 1979.
- [12] HATZENBICHLER T, BUCHMAYR B. Vorformoptimierung Für Das Gesenkschmieden Mittels Numerischer Simulation
   [J]. Buchmayr, 2008(11):413-417.

- [9] FLECK N A, HUTCHINSON J W. A Reformulation of Strain Gradient Plasticity[J]. J Mech Phys Solids, 2001, 49:2245-2271.
- [10] NIX W D, GAO H. Indentation Size Effects in Crystalline Materials: A Law for Strain Gradient Plasticity[J]. J Mech Phys Solids, 1998, 46:411-425.
- [11] 孟庆当,李河宗,董湘怀,等. 304 不锈钢薄板微塑性成 形尺寸效应的研究[J].中国机械工程,2013,24(2): 280—283.
  MENG Qing-dang, LI He-zong, DONG Xiang-huai, et al. Investigation of Size Effects of 304 Stainless Stell Foils in Microforming Processes [J]. China Mechanical Engineering,2013,24(2):280—283.
- [12] WANG Q, DONG Xiang-huai. Constitutive Model for Thin Sheet Metal with One or Several Grains Across Thickness in Micro-forming [J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2013,23,1428—1434.
- [13] 王匀,董培龙,许桢英,等. 微薄板塑性成形本构关系研究[J]. 功能材料,2008,39(10):1641—1645.
  WANG Yun,DONG Pei-long,XU Zhen-ying, et al. Constitutive Relation of Thin Sheet of Plastic Forming[J]. Journal of Functional Materials,2008,39(10):1641—1645.
- [14] GEIGER M, MEBNER A, ENGEL U. Production of Microparts-size Effects in Bulk Metal Forming [J]. Production Engineering, 1997, 4(1):55-58.
- [15] MICHEL J F, PICART P. Size Effects on the Constitutive Behaviour for Brass in Sheet Metal Forming[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 141:439-446.
- [13] KIMA H S, KIMB T G, CHUNGC T J, et al. Fatigue Characteristics of High Strength C70S6 and SMA40 Steels[J].
   Materials Science and Engineering: A, 2010, 527 (12): 2813–2818.
- [14] BARIANI P F, BRUSCHI S. Modelling the Forging and Postforging Cooling of C70S6 Conrods [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 167(2-3):529-535.
- [15] FUKUDA S,ETO H. Development of Fracture Splitting Connecting Rod[J]. JSAE Review,2002,23(1):101-104.
- [16] 刘雅辉,刘淑梅,于秋华. 轿车连杆热锻模具结构设计 改进[J]. 锻压技术,2014,39(3):108—112.
  LIU Ya-hui, LIU Shu-mei, YU Qiu-hua. Structure Design Improvements of Hot Forging Die for Automobile Connecting Rod[J]. Forging and Stamping Technology, 2014,39(3):108—112.