37

材料与成形性能

# 2024 铝合金板材高温拉伸流变行为和微观组织演化研究

#### 赵婷, 邓磊, 王新云

(华中科技大学,武汉 430074)

摘要:目的 研究高温拉伸应力状态下,2024 铝合金板材的流变行为和微观组织演化行为。方法 对退火后的 2024 铝合金板进行等温拉伸试验,得到其应力应变曲线,并通过金相实验测定平均晶 粒尺寸。建立了 2024 铝合金板材高温拉伸条件下的流变应力本构关系和晶粒尺寸模型。结果 流 变应力随温度的升高而减小。流变应力对应变速率有正的敏感性,随着温度的升高,应变速率敏 感系数变大。变形后的平均晶粒尺寸随 Zener-Hollomon 参数升高而减小,随应变量的增加先减小 后增大。结论 所建立的流变应力本构关系和晶粒尺寸模型,有助于在实际生产过程中优化工艺 参数,获得细小晶粒,提高零件性能。该研究为 2024 铝合金板材热成形工艺的开发和组织控制奠 定了理论基础。

关键词: 2024 铝合金; 热拉伸; 流变行为; 微观组织演化; 平均晶粒尺寸模型 DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2015.03.007 中图分类号: TG113.26 文献标识码: A 文章编号: 1674-6457(2015)03-0037-06

## Flow Behavior and Microstructure Evolution of 2024 Aluminum Alloy Sheet during Hot Tension Deformation

ZHAO Ting, DENG Lei, WANG Xin-yun

(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**ABSTRACT**: The aim of this work was to study the flow behavior and microstructure evolution of 2024 aluminum alloy sheet during hot tension deformation. The 2024 aluminum alloy sheet was stretched to get the true stress-strain curves when the range of deformation temperature was 300 °C ~ 450 °C and the range of strain rate was 0.001 s<sup>-1</sup> ~ 0.1 s<sup>-1</sup>, after the deformation, metallographic tests were carried out on the deformed samples to determine the average grain size. The flow stress constitutive relationship and grain size model for 2024 aluminum alloy sheet under hot tension condition were established using the experiment results. The flow behavior decreased with the increase of temperature. The flow behavior had a positive sensitivity to the strain rate. With the increase of temperature, the sensitivity coefficient of strain rate became larger. After deformation, the average grain size decreased with the increase of Zener-Hollomon parameter. With the increase of strain, the average grain size first decreased and then increased. The flow stress constitutive relationship and grain size model established were conductive to optimize the process parameters, obtain fine grains and improve the performance of parts in the process of actual production. This study provided a theoretical basis for the development of hot forming process

收稿日期: 2015-03-20

基金项目: 国家自然科学基金(51205143)

作者简介:赵婷(1991-),女,湖北荆州人,硕士研究生,主要研究方向为铝合金冲压成形。

通讯作者:王新云(1973—),男,湖北洪湖人,教授,博士生导师,主要从事板材冲压成形及精密锻造技术、现代模具技术、金属塑性加工过 程有限元分析等方面的研究。

and control of microstructure of 2024 aluminum alloy sheet.

KEY WORDS: 2024 aluminum alloy; hot tension; flow behavior; microstructure evolution; average grain size model

2024 铝合金是典型的 Al-Cu-Mg 系高强度硬铝合 金,由于其具有比强度高、焊接性能良好的特点,广泛 应用于航天、航空和汽车制造领域<sup>[1]</sup>。该合金在室温 下塑性低,成形零件时一般采用热成形。热成形过程 中,材料除了发生软化行为,还伴随着微观组织的变 化<sup>[2-3]</sup>。微观组织的变化将对零件力学性能产生决 定性的影响<sup>[4-5]</sup>,因此,研究材料在高温条件下的流 变行为和微观组织演化对指导工业生产具有重要的 意义。

板材成形时,材料的变形状态以拉伸变形为主。 而目前关于材料微观组织演化的研究一般通过压缩 实验所得到的数据<sup>[6-8]</sup>,这与板材的变形状态不一 致,无法准确体现材料的变形特征。文中通过高温拉 伸实验和金相实验来研究 2024 铝合金板材的高温拉 伸流变行为和微观组织演化规律,并运用实验数据来 建立描述其流变行为的本构关系和描述其微观组织 演化规律的晶粒尺寸模型,为 2024 铝合金板材热成 形工艺的开发和组织控制奠定理论基础。

### 1 实验

实验所采用的材料为 5 mm 厚的 T4 态 2024 铝合 金轧制板材。对板材先进行完全退火处理,板材加热 到 410 ℃,保温 2 h,再以每小时 30 ℃的速度随炉冷 却至 270 ℃,最后空冷,组织为长轴状晶粒,如图 1 所 示,平均晶粒尺寸为 25 μm。根据《GB/T 4338—006 金属材料高温拉伸试验方法》,在 5 mm 厚的 2024 铝 合金板材上利用电火花线切割沿着轧制方向切出标 准片状拉伸试样,试样标距为 45 mm。为避免表层粗 大晶粒的影响<sup>[9]</sup>,在试样厚度两侧各去掉 1 mm,试样 厚度最终为 3 mm。

在 Zwick/Roell Z020 电子万能材料试验机上对 所加工拉伸试样进行等温拉伸试验。试样保温 3 min 之后开始拉伸变形,试验温度分别为 300,350,400, 450 ℃,应变速率分别为 0.001,0.01,0.1 s<sup>-1</sup>,拉伸试 验的停止条件分别设定为 4.73 mm(对应真实应变量 为 0.1)、9.96 mm(对应真实应变量为 0.2)和拉断。 变形完成立即水冷保留高温变形组织,大应变量条件 下的金相观察位置按照等效应变的方法取在对应变 形条件下拉断试样的颈缩区域。等效应变的方法是





基于颈缩区域某位置的横截面是由均匀变形而来的 假设,该位置所对应的均匀拉伸长度等于原始变形体 积除以该位置的横截面积。通过等效应变的方法可 以在拉断试样颈缩区域取到真实应变量为0.3,0.4, 0.5和0.7的金相组织。各变形条件对应的试样被处 理成金相观察试样,进行机械磨抛和电解抛光之后, 在 DMM-480 金相显微镜下观察,平均晶粒尺寸通过 ASTM E112-96 标准测量。

### 2 结果及讨论

#### 2.1 流变行为

实验条件为 300 ~ 450 ℃ 和应变速率为 0.001 ~ 0.1 s<sup>-1</sup>条件下的 2024 铝合金板材的热拉伸真应力-真 应变曲线,如图 2 所示。2024 铝合金在拉伸变形初 期,材料发生加工硬化,流变应力急剧增加,随着变形 的继续进行,发生动态回复或者动态再结晶,使得真 应力在达到峰值应力之后有所降低。其流变应力随 温度升高而降低,随应变速率的升高而增加。这是因 为升高温度有助于铝合金动态回复或动态再结晶的 软化效应,位错密度下降,第二相的溶解度增大,滑移 阻力减小,塑性变形容易进行,使合金材料变形阻力 降低,而增加应变速率,提高了金属的形变存储能,使 材料的加工硬化作用增强,动态回复或再结晶引起的 软化速度不足以抵消因应变速率增大而产生的加工 硬化速率,导致应力增大。根据应变速率敏感指数 m

公式  $m = \frac{\mathrm{dln} \sigma}{\mathrm{dln} \epsilon}$ 来求取各个温度条件下的 m 值,可以

38



Fig. 2 The true stress-strain curves under different deformation conditions

得到应变速率敏感指数随温度的变化规律。如图 3 所示,随着温度的升高,应变速率敏感指数有一个增 加的趋势,这说明,随着温度的升高,应变速率对流变 应力的影响越来越大。







在材料成分确定的条件下,材料塑性变形过程中的流变应力 $\sigma$ 一般采用 Sellars 和 Tegart<sup>[10]</sup>提出的包含变形温度T、应变速率 $\epsilon$ 和变形激活能Q的双曲正弦函数来表示:

 $\dot{\varepsilon} = A [\sinh(\alpha \sigma)]^n \exp(-Q/RT)$ (1)

式中:*R* 为气体常数,*A*,α 和 *n* 均为与温度无关的常数。在不同的应力水平,即 ασ 的不同取值范围 有不同的表达式<sup>[11–12]</sup>,式(1)可以简化为:

$$\dot{\varepsilon} = A_1 \sigma^{n_1} \exp(-Q/RT) \qquad \stackrel{\text{\tiny def}}{=} \alpha \sigma \leq 0.8 \qquad (2)$$

$$\dot{\varepsilon} = A_2 \exp(\beta \sigma) \exp(-Q/RT) \quad \stackrel{\text{def}}{=} \alpha \sigma \ge 1.2 \quad (3)$$

式中:
$$A_1 = A\alpha^{n_1}, A_2 = \frac{A}{2^n}, \beta = \alpha n_1$$

分别对式(1)、(2)和(3)中的3个等式取自然对数,可以得到当温度一定时, ln  $\dot{\epsilon}$ 与 $\sigma$ , ln  $\dot{\epsilon}$ 与 ln  $\sigma$ , ln  $\dot{\epsilon}$ 与 ln(sinh( $\alpha\sigma$ ))都呈线性关系。取 $\sigma$  为各变形条件下峰值应力 $\sigma_{p}$ ,线性拟合得到如图4所示的各参量之间的关系。得到等式中各常数的取值, 从而得到拉伸状态下2024板材的流变应力本构方程为:

 $\dot{\varepsilon} = 4.889 \times 10^{11} [\sinh(0.013\ 29\sigma)]^{5.546\ 158} \times \exp(-1.737\ 435 \times 10^{5}/RT)$  (4)

所求得的 2024 铝合金板材热拉伸应力状态下的 热激活能为 173.74 kJ/mol,其他学者对各种铝合金 热变形条件下的变形激活能也有研究,如 6061 铝合 金<sup>[13]</sup>、7050<sup>[14]</sup>和 2618<sup>[15]</sup>铝合金热压缩变形条件下的 激活能分别为 242.2,264.06,181 kJ/mol。对比可以 发现文中所求得的拉伸条件下的激活能明显小于压 缩状态下其他铝合金,这与高温变形时的微观组织演 化机制有关。对于铝合金材料高温压缩变形,微观组 织演化的机制一般为晶界迁移和小角度晶界的演 化<sup>[16]</sup>,而高温拉伸条件下,微观组织演化机制为晶界 滑移<sup>[17]</sup>和小角度晶界的演化。



Fig. 4 The relationship between the various parameters

0

#### 2.2 微观组织演化行为

所得高温拉伸变形后的金相组织如图 5 所示,可 以看到,温度、应变速率和应变量对晶粒的形态和尺 寸都有一定的影响。总体而言,各变形条件下拉伸变 形后未发生大量的动态再结晶。针对这种微观组织 演化特点,提出了一种新的唯象型模型来描述变形过 程中的平均晶粒尺寸。



Fig. 5 Metallographic structure of samples after tension deformation under different conditions 模型中将平均晶粒尺寸的改变归因于温度、应变 速率、应变量和初始晶粒尺寸的影响,不考虑再结晶 晶粒的形成过程。模型可以表述为方程(5)。式中:  $f_1(\varepsilon)$ 为关于应变量  $\varepsilon$ 的方程, $f_2(Z)$ 为关于 Zener-Hollomon 参数( $Z = \varepsilon \exp(Q/RT)$ )的方程, $d_0$  为初始 晶粒尺寸。

$$d_0 - d_{\text{avg}} = f_1(\varepsilon) \cdot f_2(Z) \tag{5}$$

统计得到  $\ln(d_0 - d_{avg}) \le \varepsilon$ 和  $\ln Z$  之间的关系, 如图 6 所示。所得曲线满足二次多项式分布规律,这 与金泉林的研究成果一致<sup>[18]</sup>。采用顶点式二次函数 形式描述图 5 所示的变量关系。最终式(5)可以变形 为式(6)的形式。

$$d_{\text{avg}} = d_0 - \exp(M + N) \cdot \exp\left[-0.5 \frac{(\varepsilon - B)^2}{-0.5A^{-1}} - 0.5 \frac{(\ln Z - D)^2}{-0.5C^{-1}}\right]$$
(6)

式中,*A*,*B*,*C*,*D*,*M* 和 *N* 为材料常数。采用式 (6) 拟合的 2024 铝合金高温拉伸变形平均晶粒尺寸 模型如式(7) 所示, 拟合度达到 0.86, 模型结果与所 得实验结果较吻合。

$$d_{\text{avg}} = 25.2615 - 5.8651 \exp\left[-0.5\left(\frac{\varepsilon - 0.5440}{0.1460}\right) - .5\left(\frac{\ln Z - 28.7534}{4.4121}\right)^2\right]$$
(7)  
从模型中可以看出,当  $\varepsilon = 0.544$ , ln  $Z = 28.7534$ 





时,平均晶粒尺寸最小。结合图 4 中的金相结果可以 看出,随着温度的升高或应变速率的降低(Z 参数减 小),晶粒尺寸变大,这是因为温度升高导致原子的扩 散系数变大,高温下位错的运动更容易发生,从而使 得晶粒边界的迁移能力增加,晶粒长大。而应变速率 的提高会增加晶界的储能,促进再结晶形核,形成更 多的细小再结晶晶粒,造成平均晶粒尺寸减小。随着 应变量的增加,晶粒边界被拉得更为平直,晶粒尺寸 随应变量的增加先减小后增大。这主要是因为在高 温拉伸过程中发生了少量的动态再结晶,产生了细小 晶粒,造成平均晶粒尺寸减小;随后由于再结晶晶粒 长大,使得平均晶粒尺寸增大。

模型可以描述变形过程中晶粒尺寸的变化量,还 可以获得平均晶粒尺寸最小时的变形条件,有利于实 际生产过程中优化工艺参数,获得细小晶粒,提高零 件性能。

### 3 结论

 2024 铝合金的流变应力随温度的升高而 降低,流变应力对应变速率有正的敏感性,随着温 度的升高,应变速率敏感系数变大。其高温拉伸 条件下的应力应变本构方程为: ε=4.889×10<sup>11</sup>  $[\sinh(0.013\ 29\sigma)]^{5.546\ 158} \cdot \exp(-1.737\ 435 \times 10^5 / RT)_{\circ}$ 

 2) 2024 铝合金高温拉伸变形后的平均晶粒尺寸 随温度的升高而变大,随应变速率的升高而减小;平 均晶粒尺寸随应变量的增加先减小后增大。

3)提出了一种新的模型来描述拉伸过程中的平均晶粒尺寸,与实验结果吻合度较高。2024 铝合金 拉伸变形平均晶粒尺寸可以表征为:*d*<sub>ave</sub> = 25.2615-

5.8651 exp
$$\left[-0.5\left(\frac{\varepsilon-0.5440}{0.1460}\right)^2 - 0.5\left(\frac{\ln Z - 28.7534}{4.4121}\right)^2\right]_{\circ}$$

#### 参考文献:

- [1] HUDA Z, TAIB N I, ZAHARINIE T. Characterization of 2024-T3: An Aerospace Aluminum Alloy [J]. Materials Chemistry and Physics, 2009, 113 (2/3):515-517.
- [2] SAKAI T, BELYAKOV A, KAIBYSHEV R, et al. Dynamic and Post-dynamic Recrystallization under Hot, Cold and Severe Plastic Deformation Conditions[J]. Progress in Materials Science, 2014, 60:130-207.
- [3] 朱雄,夏华,胡冬,等. 镁合金 AZ40M 再结晶晶粒尺寸与 硬度模型研究[J]. 精密成形工程,2014,6(5):76—79.
  ZHU Xiong,XIA Hua,HU Dong, et al. Recrystallized Grain Size and Hardness Model of AZ40M Alloy[J]. Journal of Netshape Forming Engineering,2014,6(5):76—79.
- [4] YANG Y,ZHANG Z,LI X, et al. The Effects of Grain Size on the Hot Deformation and Processing Map for 7075 Aluminum Alloy[J]. Materials & Design,2013,51:592-597.
- [5] 王艳彬,陈嫚丽,赵志翔. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 微粒的尺度律对镁微观 组织和拉伸性能的影响[J]. 精密成形工程,2011,3(2): 15—19.

WANG Yan-bin, CHEN Man-li, ZHAO Zhi-xiang. Effects on Magnesium Microstructure and Mechanical Properties of the Scaling Laws of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Micro-particles [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2011, 3(2):15–19.

- [6] CHAMANFAR A, JAHAZI M, GHOLIPOUR J, et al. Evolution of Flow Stress and Microstructure during Isothermal Compression of Waspaloy [J]. Materials Science and Engineering: A, 2014, 615:497-510.
- [7] 舒大禹,肖远伦,胡传凯,等. Mg-10Gd-2Y-0.6Zr 合金热 压缩变形及其微观组织研究[J].精密成形工程,2010,2
   (4):1—6.

SHU Da-yu, XIAO Yuan-lun, HU Chuan-kai, et al. Study on Hot Compression Deformation of Mg-10Gd-2Y-0. 6Zr Alloy and its Microstructure [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2010, 2(4):1-6.

[8] 曾莉,任学平,王小俐,等. 高体分 SiCp/Al 复合材料热 变形行为及组织的研究[J]. 精密成形工程,2009,1

(1):57-61.

ZENG Li, REN Xue-ping, WANG Xiao-li, et al. The Research of Hot-deformation Behavior and Microstructure of SiCp/Al Composite with High Volume Fraction[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2009, 1(1):57-61.

- [9] DUAN X, SHEPPARD T. Simulation and Control of Microstructure Evolution during Hot Extrusion of Hard Aluminium Alloys[J]. Materials Science & Engineering A, 2003, 351 (1):282-292.
- [10] SELLARS C M, TEGART W J. On the Mechanism of Hot Deformation [J]. Acta Metallurgica, 1966, 14 (9): 1136-1138.
- [11] 贾耀军.7050 铝合金热变形和动态再结晶行为的实验研 究和数值模拟[D].重庆:重庆大学,2013.
   JIA Yao-jun. Experimental Research and Numerical Simula-

tion of Hot Deformation and Dynamic Recrystallization Behavior of 7050 Aluminum Alloy[D]. Chongqing: Chongqing University, 2013.

- [12] 戴俊,李鑫,鲁世强,等.TC21 钛合金高温变形本构方程 研究[J]. 精密成形工程,2014,6(6):116—121.
  - DAI Jun, LI Xin, LU Shi-qiang, et al. Constitutive Equation of Titanium Alloy TC21 Deformation at High Temperature [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2014, 6 (6): 116-121.
- [13] 李展志. 6061 和 6069 铝合金的热变形行为研究[D]. 长 沙:中南大学, 2012.

LI Zhan-zhi. Research on the Hot Deformation Behaviors of

6061 and 6069 Aluminum Alloy [ D ]. Changsha: Central South University, 2012.

- [14] 易幼平,杨积慧,蔺永诚. 7050 铝合金热压缩变形的流变 应力本构方程[J]. 材料工程,2007(4):20—22.
  YI You-ping, YANG Ji-hui, LIN Yong-cheng. Flow Stress Constitutive Equation of 7050 Aluminum Alloy During Hot Compression [J]. Journal of Material Engineering, 2007 (4):20—22.
- [15] 黄光胜,汪凌云,陈华,等. 2618 铝合金的热变形和加工 图[J].中国有色金属学报,2005(5):763—767.
  HUANG Guang-sheng, WANG Ling-yun, CHEN Hua, et al. Hot Deformation and Processing Maps of 2618 Aluminum Alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals,2005 (5):763—767.
- [16] SHEN B, DENG L, WANG X. A New Dynamic Recrystallisation Model of An Extruded Al-Cu-Li Alloy During Hightemperature Deformation [J]. Materials Science and Engineering: A, 2015, 625:288—295.
- [17] XUN Y, TAN M J. EBSD Characterization of 8090 Al-Li Alloy during Dynamic and Static Recrystallization [J]. Materials Characterization, 2004, 52(3):187–193.
- [18] 金泉林. 铝合金 6061 的热变形力学行为与微观组织演 化规律[J]. 材料热处理学报,2011(6):51—57.
  JIN Quan-lin. Experimental Study on Hot Deformation Behavior and Microstructure Evolution of Aluminum Alloy 6061[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2011(6):51—57.

(上接第32页)

NING Hong-long, MA Ju-sheng, HUANG Fu-xiang, et al. Rolling of Aluminum/Steel Bimetal Plate with Multi-Lager Spray Deposition[J]. Powder Metallurgy Technology, 2003 (4):228-231.

- [37] 宁洪龙,王一平,黄福祥,等. 多层喷射沉积铝/钢双金属 板材的研究[J]. 功能材料,2002,23(2):166—168.
  NING Hong-long, WANG Yi-ping, HUANG Fu-xiang, et al. The Research of Aluminum/Steel Bimetal Plate with Multi-Lager Spray Deposition[J]. Journal of Functional Materials, 2002,23(2):166—168.
- [38] 汤琼,宁洪峰,傅定发,等. 多层喷射沉积制备双金属板材的机理初探[J]. 粉末冶金技术,2004(1):12—15.
   TANG Qiong, NING Hong-feng, FU Ding-fa, et al. Mechanism of Multi-Layer Spray Deposition of Bimetal[J]. Powder Metallurgy Technology,2004(1):12—15.
- [39] 孙德生,徐寒冰,章靖国,等.喷射成形复合轧辊的显微 组织[J].中国有色金属学报,1999(S1):19—23.
  SUN De-sheng, XU Han-bing, ZHANG Jing-guo, et al. Microstructure of Spray Forming Composite Roll[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals,1999(S1):19—23.
- [40] 汪煜,崔成松,李庆春. 喷射铸造复合轧辊温度场的数值 模拟[J]. 航空材料学报,2006(3):98—102.
  WANG Yu, CUI Cheng-song, LI Qing-chun. Numerical Simulation of Spray Casting Composite Roll Temperature Field
  [J]. Journal of Aeronautical Materials,2006(3):98—102.
- [41] CUI C, SCGULZ A. Modeling and Simulation of Spray Forming of Clad Deposits with Graded Interface Using Two Scanning Gas Atomizers [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2013, 44(4):1030—1040.

42