

## 基于单向拉伸的7A09铝合金本构方程

马 康<sup>1</sup>, 宋 健<sup>1</sup>, 冯 瑶<sup>2</sup>, 袁斌先<sup>2</sup>

(1. 天津航天长征火箭制造有限公司, 天津 300462; 2. 天津职业技术师范大学 机械工程学院, 天津 300222)

**摘要:** 通过不同温度及应变速率下的单向拉伸试验, 获得了7A09铝合金板材关键力学性能参数的变化规律。结果表明: 在应变速率一定的条件下, 当温度降低时, 7A09铝合金的抗拉强度与流动应力随之升高, 当温度升高时, 断后伸长率有明显提高。基于Fields & Backofen本构方程, 建立7A09铝合金温拉伸时的应力-应变本构模型, 分析和探讨了在不同温度状态下7A09铝合金的强化规律。结果表明: 7A09铝合金的应变强化指数随着温度的升高而减小, 而应变速率敏感性指数则显著提高, 应变速率的强化作用得到了显著增强。以温成形技术生产的桁条加强件为例, 利用本构模型进行有限元模拟, 确定成形速度为5000 mm·s<sup>-1</sup>时, 零件减薄率最小; 温度为175℃时, 零件壁厚分布最为均匀, 最小减薄率仅为3.8%。

**关键词:** 7A09铝合金; 温成形; 单向拉伸; 本构模型; 应变速率

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.04.033

**中图分类号:** TG146.2<sup>+</sup>1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2023) 04-0249-07

## Constitutive equation of 7A09 aluminum alloy based on uniaxial tension

Ma Kang<sup>1</sup>, Song Jian<sup>1</sup>, Feng Yao<sup>2</sup>, Yuan Binxian<sup>2</sup>

(1. Tianjin Long March Launch Vehicle Manufacturing Co., Ltd., Tianjin 300462, China;

2. School of Mechanical Engineering, Tianjin University of Technology and Education, Tianjin 300222, China)

**Abstract:** The variation rules of key mechanical property parameters of 7A09 aluminum alloy sheet were obtained by uniaxial tensile tests at different temperatures and strain rates. The results show that under the condition of constant strain rate, the tensile strength and flow stress of 7A09 aluminum alloy increase with the decreasing of temperature, and the elongation after fracture increases obviously with the increasing of temperature. Based on the Fields & Backofen constitutive equation, the stress-strain constitutive model of 7A09 aluminum alloy during warm tension was established, and the strengthening rules of 7A09 aluminum alloy under different temperature conditions were analyzed and discussed. The results show that the strain hardening index of 7A09 aluminum alloy decreases with the increasing of temperature, while the strain rate sensitivity coefficient increases significantly, and the hardening effect of strain rate is significantly enhanced. For the stringer reinforcement by warm forming technology, the finite element simulation was carried out by using the constitutive model, and it is determined that the thinning rate of parts is the minimum when the forming speed is 5000 mm·s<sup>-1</sup>. When the forming temperature is 175℃, the wall thickness distribution of parts is the most uniform, and the minimum thinning rate is only 3.8%.

**Key words:** 7A09 aluminum alloy; warm forming; uniaxial tension; constitutive model; strain rate

铝合金凭借低密度、高比强度、高热加工性、优异的焊接性、较高的断裂韧性和疲劳强度的特性, 以及优异的成形性能, 在现代工业中被大规模应用于航空航天、汽车制造等领域, 是目前业内轻量化技术使用的主材料之一。7A09铝合金是在Al-Zn-Mg三元系基础上发展起来的, 是汽车制造和航空技术领域的重点发展及应用材料, 是目前世界各国金属材料领域研究的重中之重<sup>[1-3]</sup>。但是, 7A09铝合金

在室温条件下的冲压成形性能不佳, 制件表面容易产生大量的起皱、开裂等缺陷。为了提高铝合金在温冲压加工中的成形性能, 国内外学者通过大量研究发现<sup>[4-6]</sup>, 应用温成形技术, 成形后零件的残余应力及回弹量小, 伸长率有所提升, 材料的塑性得到改善, 此时铝合金板的成形能力得到了极大提高。并且, 铝合金的力学性能参数和温度与应变速率存在很大的相关性, 二者是温成形技术进行有限元模拟的必要条件<sup>[7]</sup>。

本文为了获得材料的关键力学性能参数和应力-应变关系曲线, 探究了成形性能指标受温度和应变速率的影响规律, 对7A09铝合金板在25~225℃范

收稿日期: 2022-11-18; 修订日期: 2023-03-10

基金项目: 天津市教委科研计划项目 (2020KJ106)

作者简介: 马 康 (1986-), 男, 硕士, 工程师

E-mail: makang1573@163.com

围内、不同应变速率条件下进行了多次单向拉伸试验,通过材料的真实应力-真实应变曲线以及塑性应变比、抗拉强度、断裂伸长率等相关力学性能指标探究其对材料成形性能的影响。并以 Fields & Backofen 本构方程为基础,计算得到应变强化指数  $n$  与应变速率敏感性指数  $m$  在不同温度条件下的变化趋势,并构建了具体的本构方程,为 7A09 铝合金温成形工艺的模拟与成形分析提供理论与数据支持。

## 1 单向拉伸试验及结果分析

### 1.1 试件和设备

试件采用 7A09 铝合金板材,厚度为 1.9 mm,其化学成分如表 1 所示。

表 1 7A09 铝合金板材的化学成分(%,质量分数)

Table 1 Chemical compositions of 7A09 aluminum alloy sheet(%, mass fraction)

Zn	Mg	Si	Cr	Ti	Fe	Mn	Cu	Al
5.60	2.51	0.05	0.23	0.02	0.45	0.09	1.60	余量

试验设备:MTS E45.305 万能拉伸试验机,封闭加热炉。

温度测量方式:使用直接接触式热电偶测量温度,试验最高温度为 450 ℃,炉内整体温度误差为  $\pm 5$  ℃。

### 1.2 试验方法

在轧板上沿不同方向制备拉伸试样,试验的试样制备与试验方法均按 GB/T 16865—2013<sup>[8]</sup> 及 GB/T 228.2—2015<sup>[9]</sup> 进行。试验所用试件的外观样式及详细规格如图 1 所示。

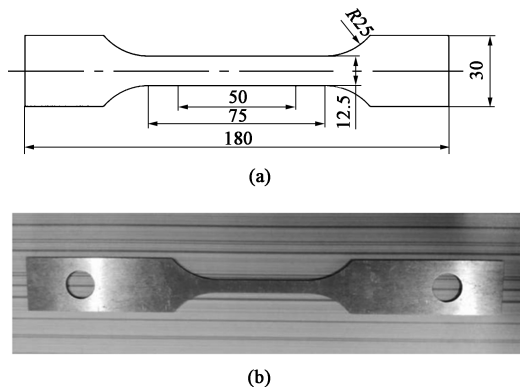


图 1 拉伸试样

(a) 常温拉伸试样 (b) 高温拉伸试样

Fig. 1 Tensile specimens

(a) Tensile specimen at room temperature (b) Tensile specimen at high temperature

经过对目前多个国内外 7000 系铝合金温成形工艺拉伸试验方案的调研<sup>[10-13]</sup>,选取由 5 个从低到高的温度节点作为试验点,以 125 ℃ 为基点,后续点以相邻两点的温差为 25 ℃ 递增。基于试验目标选择应变速率,考虑到试验应获取较大区分度,以  $0.1 \text{ s}^{-1}$  为最大应变速率,其余两点呈指数形式递进,本试验以恒应变速率控制方式进行,且为保证试验的准确性,同一条件下试验重复进行 3 次。

### 1.3 试验结果

图 2 为常温、同一应变速率下,不同拉伸方向上获得的真实应力-真实应变曲线。

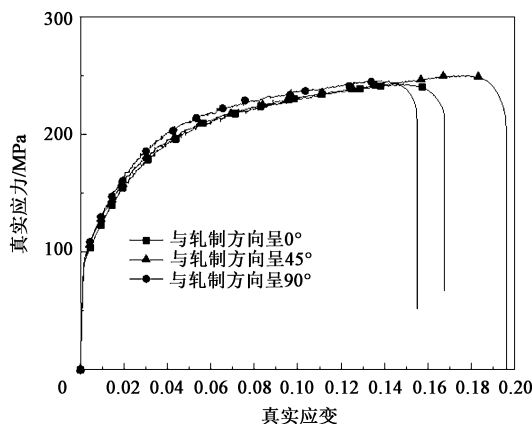


图 2 7A09 铝合金常温、恒应变速率、不同方向下的真实应力-真实应变曲线

Fig. 2 True stress-true strain curves of 7A09 aluminum alloy at room temperature and constant strain rate along different directions

由图 2 可得,变形开始时,由于 7A09 铝合金在加工过程中产生了加工硬化现象,所以出现真实应力随之增大的现象。而 3 个不同拉伸方向的真实应力-真实应变曲线在曲线中段的应力数值相近,变化趋势趋近于一致。基于试验结果及真实应力-真实应变曲线可以得出结论:在室温条件下,7A09 铝合金板材的力学性能稳定,不受拉伸方向影响,明显存在各向同性表现,所以,进一步的高温拉伸试验沿板材轧制方向进行<sup>[14]</sup>,铝合金板材的抗拉强度变化如图 3 所示。

高温拉伸试验条件:沿板材轧制方向拉伸,变形温度节点以 125 ℃ 为基点,后续点以相邻两点温差为 25 ℃ 递增。以  $0.1 \text{ s}^{-1}$  为最大应变速率,其余两点呈指数形式递进,即  $\dot{\epsilon} = 0.1$ 、 $0.01$  和  $0.001 \text{ s}^{-1}$ 。由图 3 可知,试件在同一应变速率条件下,沿板材轧制方向拉伸,其抗拉强度随着温度的不断提高而逐渐减小。由此可知,温度对材料的抗拉强度存在较大影响;而应变速率对材料的抗拉强度影响较小,

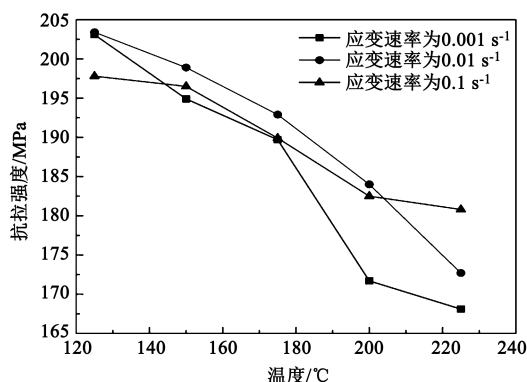


图3 不同应变速率下铝合金板材的抗拉强度

Fig. 3 Tensile strength of aluminum alloy sheet at different strain rates

温度对抗拉强度的影响大于应变速率。

图4为不同应变速率条件下, 7A09 铝合金的断后伸长率与温度的变化趋势。从图4可知: 随着温度的提高, 断后伸长率不断增大, 在  $0.001 \text{ s}^{-1}$  应变速率条件下,  $225^\circ\text{C}$  时材料的断后伸长率比  $125^\circ\text{C}$  时材料的断裂伸长率增加了 7.5%, 从结果来看, 温度的变化对材料的断后伸长率产生了较大影响; 此外, 材料断后伸长率随着应变速率的降低而增大, 且温度越高, 断裂伸长率受应变速率的影响越显著。因此, 7A09 铝合金在较高应变速率和较高温度条件下进行成形可获得较好的成形性能。

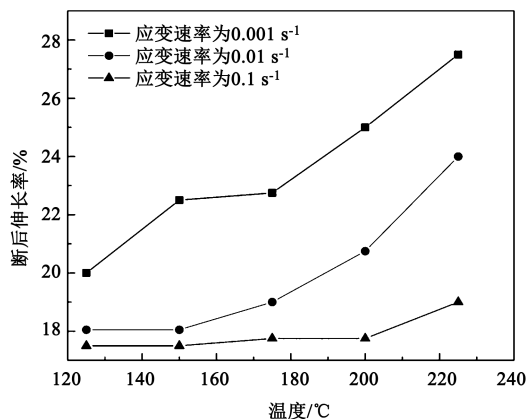


图4 不同应变速率下温度对断后伸长率的影响

Fig. 4 Influences of temperature on elongation after fracture at different strain rates

试验表明: 材料的抗拉强度与温度条件存在一定关联。规律总结为: 抗拉强度随着温度的提高逐渐减小, 而应变速率与抗拉强度的关联性不大。断后伸长率受温度与应变速率的影响较大: 当温度提高, 断后伸长率显著增加; 当应变速率增加, 断后伸长率显著降低。综上所述: 在 7A09 铝合金的成

形工艺中, 提高制件的温度可以有效地提高材料的断后伸长率, 从而减少制件开裂等缺陷的产生, 提高制件成形质量, 以满足制件的力学性能和外观需求。

图5为恒应变速率条件下, 沿轧制方向拉伸时获得的真实应力-真实应变曲线。从图5可知, 随着温度的提高, 抗拉强度降低。究其原因在于: 随着温度的提高, 变形运动中的第二相粒子 P-N 力大于基体 P-N 力、杂质金属化合物的产生增大了位错运动的阻力, 使得维持位错运动需要更大的驱动力, 同时具有一定的强化作用。拉伸试验中, 板材还存在晶体滑移增多、应变软化、粒子扩散等现象, 阻碍了位错运动的产生, 相应地提高了铝合金的塑性, 即降低了铝合金的抗拉强度、增大了铝合金的后断伸长率。

## 2 本构方程

### 2.1 建立本构方程

材料在温成形工艺的真实应力、真实应变受温度与应变速率的显著影响<sup>[15]</sup>。目前, 用于分析金属材料的本构关系较多, 为进一步分析 7A09 铝合金温成形工艺过程中温度和应变速率对材料成形性能的影响, 选取了 Fields & Backofen 本构方程来描述其应力-应变关系:

$$\sigma = C \varepsilon^n \dot{\varepsilon}^m \quad (1)$$

式中:  $\sigma$  为真实应力;  $\varepsilon$  为真实应变;  $\dot{\varepsilon}$  为应变速率;  $C$  为材料强度系数;  $n$  为材料应变强化指数;  $m$  为应变速率敏感性指数。

### 2.2 应变强化指数 $n$

材料应变强化指数  $n$  可以在宏观上度量塑性变形引起的硬度、强度变化和均匀变形的程度。应力一定时, 随着  $n$  的增大, 强度、硬度增大, 应变分布更加均匀, 材料更容易成形, 制件的成形质量越好。对 Fields & Backofen 本构方程式 (1) 进行转换, 可得:

$$n = \left. \frac{\partial \ln \sigma}{\partial \ln \varepsilon} \right|_{\dot{\varepsilon}, T} \quad (2)$$

式 (2) 可计算在不同温度和应变速率条件下的  $n$ , 将其计算结果绘制为图6。由图6可得, 在应变速率一定时,  $n$  随着温度的升高而明显减小, 应变强化效应不断降低。在温度较低时, 应变速率与  $n$  的相关性较小, 与应变速率为  $0.1$  与  $0.001 \text{ s}^{-1}$  时相比, 在  $125^\circ\text{C}$  条件下  $n$  降低了 0.056, 在  $175^\circ\text{C}$  条

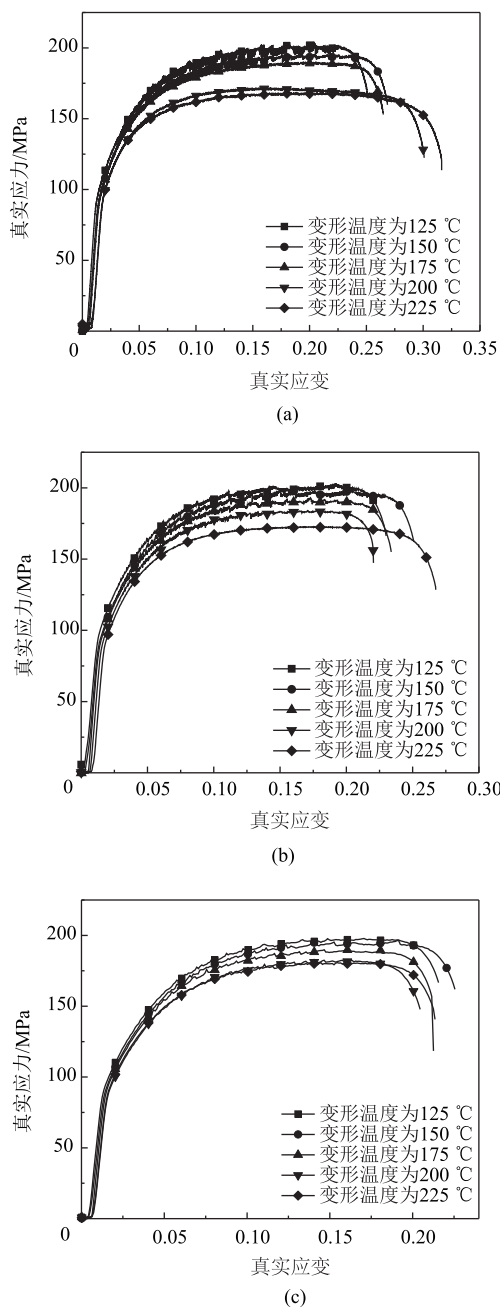


图 5 7A09 铝合金恒应变速率  $\dot{\varepsilon}$  时沿轧制方向拉伸的真实应力-真实应变曲线

(a)  $\dot{\varepsilon}=0.001 \text{ s}^{-1}$  (b)  $\dot{\varepsilon}=0.01 \text{ s}^{-1}$  (c)  $\dot{\varepsilon}=0.1 \text{ s}^{-1}$

Fig. 5 True stress-true strain curves of 7A09 aluminum alloy along rolling direction tension under constant strain rate

件下  $n$  降低了 0.103。结果表明：温度越高，应变速率对  $n$  的影响越大。

考虑计算便捷性，且温度同应变速率相关性较小，所以，仅考虑温度  $T$  与  $n$  的相关性。进行回归分析时，为保证数据的准确性，将应变强化指数  $n$  取均值与温度进行分析，通过计算得知数学表达式为：

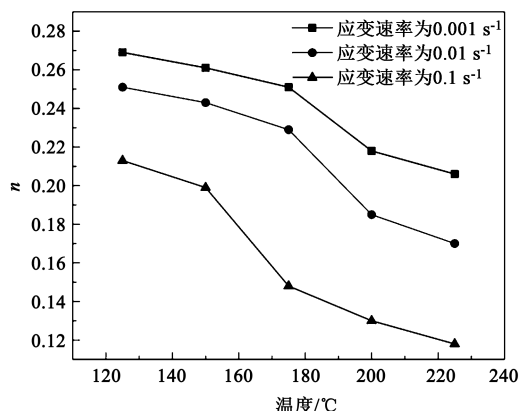


图 6 不同应变速率下温度与  $n$  的相关变化趋势

Fig. 6 Correlation change trend between temperature and  $n$  under different strain rates

$$n = 0.3558 - 8.56 \times 10^{-4} T \quad (3)$$

### 2.3 应变速率敏感性指数 $m$

应变速率敏感性指数  $m$  是用于判断材料在塑性加工中成形性能高低的力学参数，一般而言， $m$  值越大，拉伸时的缩颈现象出现越少，材料的成形性和可加工性越好。对式 (1) 进行转换，可得：

$$m = \left. \frac{\partial \ln \sigma}{\partial \ln \dot{\varepsilon}} \right|_{\varepsilon, T} \quad (4)$$

式 (4) 可计算在不同温度和不同应变条件下的  $m$ ，将其计算结果绘制为图 7。由图 7 可得，在温成形工艺中， $m$  受温度的影响较大，两者密切相关。温度较低时， $m$  较小，趋近于零，材料的成形性较低。随着温度的提高，当超过 175 °C 后， $m$  随之迅速增大，当温度提高至 225 °C 时  $m=0.169$ ，材料的应变速率敏感程度显著加强。由此可见， $m$  与应变相关性不大，可以仅考虑温度与  $m$  的相关性，得到：

$$m = 1.79 \times 10^{-3} T - 0.2492 \quad (5)$$

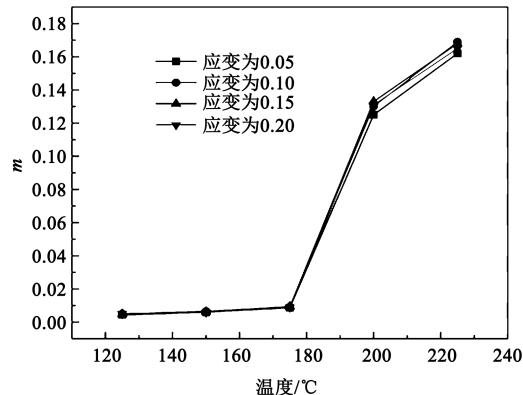


图 7 不同应变下温度与  $m$  的相关变化趋势

Fig. 7 Correlation change trend between temperature and  $m$  under different strains

通过上述计算的  $n$ 、 $m$ , 获取  $C$ , 不考虑应变影响, 经拟合计算得:

$$C = 5.4192T - 391.779 \quad (6)$$

将得到的  $n$ 、 $m$  和  $C$  代入式 (1) 中, 得到 Fields & Backofen 本构方程的拉伸方程为:

$$\sigma = (5.4192T - 391.779) \cdot \varepsilon^{0.3558 - 8.56 \times 10^{-4}T} \cdot \dot{\varepsilon}^{1.79 \times 10^{-3}T - 0.2492} \quad (7)$$

### 3 Fields & Backofen 本构模型的应用

有限元模拟作为提供金属零件最优加工工艺参

数的最有效手段之一, 其模拟结果的可靠性主要取决于材料本构方程的可靠性<sup>[16]</sup>。7A09 铝合金温成形的有限元模拟需要同时考虑温度、应变速率和力学性能之间的相互关系。以温成形技术生产的桁条加强件为例, 将本构模型导入有限元模拟软件中, 确定材料相关系数, 完成工艺参数的优化。

#### 3.1 确定成形速度

成形速度与应变速率关系密切, 影响零件塑性成形效果。设置不同成形速度进行模拟计算, 结果如图 8 所示。可知, 成形速度为  $5000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  时, 零件最大减薄率较小, 各处壁厚均匀, 表面质量理想。

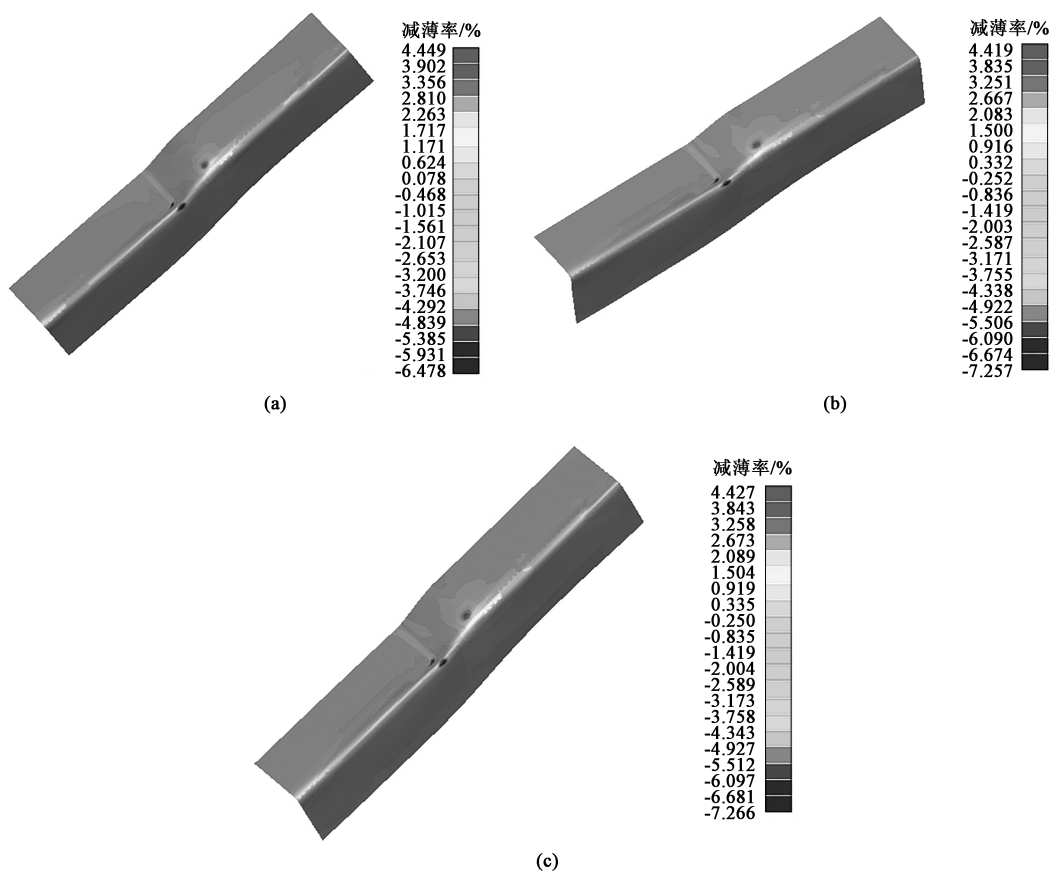


图 8 不同成形速度  $V$  下的减薄云图

(a)  $V = 4000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  (b)  $V = 5000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  (c)  $V = 6000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$

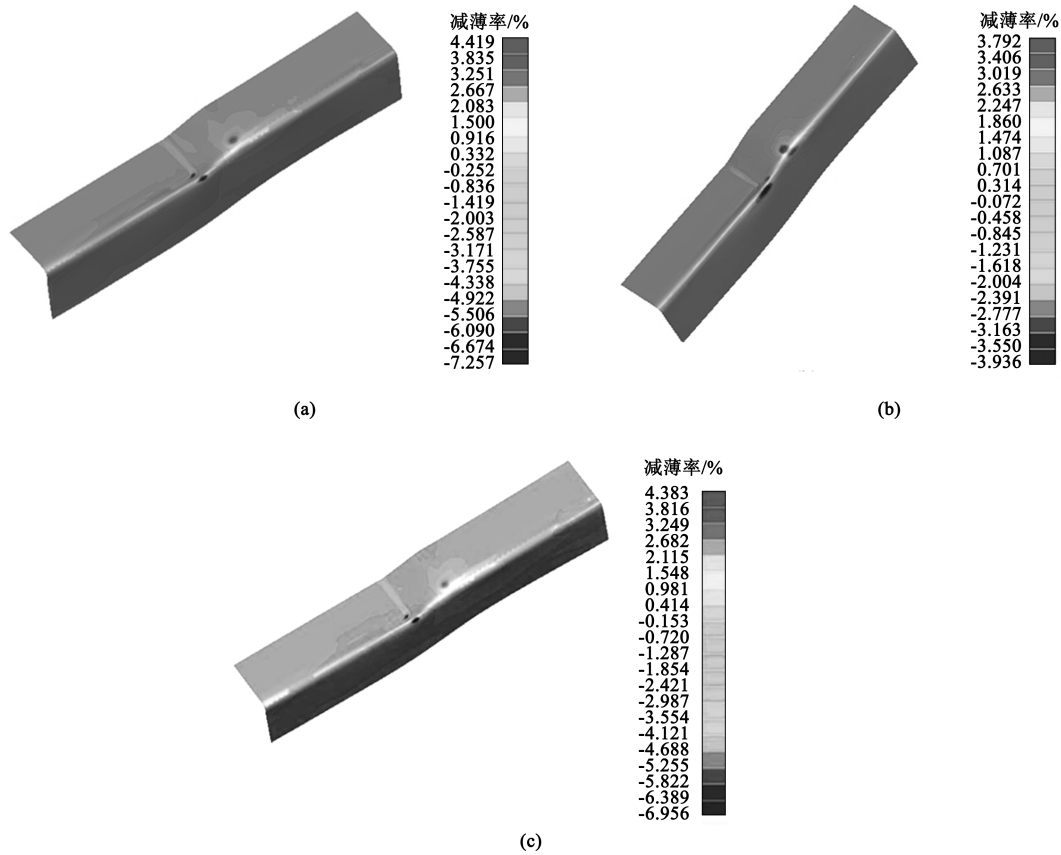
Fig. 8 Thinning cloud images under different forming speeds  $V$

#### 3.2 确定成形的温度

7A09 铝合金的材料应变速率对温度敏感程度较高, 选择合适的温度可以提高零件成形质量。设置不同的温度, 分析不同温度下的壁厚分布规律, 结果如图 9 所示。由图 9 可知, 当温度为  $175 \text{ }^{\circ}\text{C}$  时, 壁厚分布最为均匀, 最小减薄率仅为 3.8%。

### 4 结论

(1) 应变速率一定时, 不同轧制方向下的真实应力-真实应变曲线在中段的应力数值相近, 变化趋势趋近于一致, 明显存在各向同性表现, 因此, 7A09 铝合金的力学性能表现与轧制方向的相

图 9 不同温度  $T$  下的减薄云图(a)  $T = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$  (b)  $T = 175\text{ }^{\circ}\text{C}$  (c)  $T = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ Fig. 9 Thinning cloud images under different temperatures  $T$ 

关性较小。

(2) 在 7A09 铝合金的加工过程中, 提高温度会导致材料抗拉强度的降低和断后伸长率的显著增加; 提高应变速率会导致断后伸长率减小, 而应变速率与抗拉强度的相关性较小。同时, 提高温度和应变速率会导致应变强化指数减小, 且提高温度会增大应变速率敏感性指数。

(3) 回归分析得到了 7A09 铝合金关于温度、真实应力和真实应变之间的 Fields & Backofen 本构方程:

$$\sigma = (5.4192T - 391.779) \cdot \varepsilon^{0.3558 - 8.56 \times 10^{-4}T} \cdot \dot{\varepsilon}^{1.79 \times 10^{-3}T - 0.2492}$$

(4) 利用 Fields & Backofen 本构模型对温成形生产的桁条加强件进行有限元模拟, 确定成形速度为  $5000\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  时零件减薄率最小, 成形效果最佳, 温度为  $175\text{ }^{\circ}\text{C}$  时的壁厚分布最为均匀, 最小减薄率仅为 3.8%。

#### 参考文献:

- [1] Dursun T, Soutis C. Recent developments in advanced aircraft aluminium alloys [J]. Materials & Design, 2014, 56: 862-871.
- [2] 王建国, 王祝堂. 航空航天变形铝合金的进展 (1) [J]. 轻合

金加工技术, 2013, 41 (8): 1-6, 32.

Wang J G, Wang Z T. Advance on wrought aluminium alloys used for aeronautic and astronautic industry [J]. Light alloy Fabrication Technology, 2013, 41 (8): 1-6, 32.

- [3] 吴栋, 王志祥, 刘观日, 等. 基于 Kriging 代理模型的大直径运载火箭蒙皮桁条结构分步优化方法研究 [J]. 载人航天, 2020, 26 (2): 166-171.

Wu D, Wang Z X, Liu G R, et al. Substep optimization method of skinned truss structure for large diameter launch vehicle based on Kriging surrogate model [J]. Manned Spaceflight, 2020, 26 (2): 166-171.

- [4] Zhou J, Wang B, Lin J, et al. Optimization of an aluminum alloy anti-collision side beam hot stamping process using a multi-objective genetic algorithm [J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2013, 13 (3): 401-411.

- [5] 孙德勤, 陈慧君, 文青草, 等. 耐热铝合金的发展与应用 [J]. 有色金属科学与工程, 2018, 9 (3): 65-69.

Sun D Q, Chen H J, Wen Q C, et al. Development and application of heat-resistant Al alloy [J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2018, 9 (3): 65-69.

- [6] 管仁国, 娄花芬, 黄晖, 等. 铝合金材料发展现状、趋势及展望 [J]. 中国工程科学, 2020, 22 (5): 68-75.

Guan R G, Lou H F, Huang H, et al. Development of aluminum alloy materials; Current status, trend, and prospects [J]. Strate-

- gic Study of CAE, 2020, 22 (5): 68-75.
- [7] Toros S, Ozturk F, Kacar I. Review of warm forming of aluminum-magnesium alloys [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 207 (1-3): 1-12.
- [8] GB/T 16856—2013, 变形铝、镁及其合金加工制品拉伸试验用试样及方法 [S].  
GB/T 16856—2013, Test pieces and method for tensile test for wrought aluminium and magnesium alloys products [S].
- [9] GB/T 228.2—2015, 金属材料 拉伸试验 第2部分: 高温试验方法 [S].  
GB/T 228.2—2015, Metallic materials—Tensile testing—Part 2: Method of test at elevated temperature [S].
- [10] 冀亚森, 赵劲舟, 雍艺龙, 等. 7A09 铝合金半固态材料力学行为研究 [J]. 热加工工艺, 2009, 38 (10): 71-73.  
Ji Y S, Zhao M Z, Yong Y L, et al. Study on mechanical behavior of 7A09 alloy on semi-solid state [J]. Material & Heat Treatment, 2009, 38 (10): 71-73.
- [11] 马冬威, 李森泉, 罗皎, 等. 基于应变影响的 7A09 铝合金等温压缩流动应力模型 [J]. 中国有色金属学报, 2011, 21 (5): 954-960.  
Ma D W, Li M Q, Luo J, et al. Flow stress model considering contribution of strain in isothermal compression of 7A09 aluminum alloy [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21 (5): 954-960.
- [12] Kim Hyunok, Hahnlen Ryan, Feister Tom, et al. Comparison of drawability between warm forming and cold forming of aluminum 6xxx alloys [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 418 (1): 012029.
- [13] Laurent H, Simões V M, Oliveira M C, et al. The influence of warm forming conditions on the natural aging and springback of a 6016-T4 aluminum alloy [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 418 (1): 012020.
- [14] Sheng Z Q, Mallick P K. Predicting sheet forming limit of aluminum alloys for cold and warm forming by developing a ductile failure criterion [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2017, 139 (11): 111018.
- [15] Sun H T, Wang J, Shen G Z, et al. Application of warm forming aluminum alloy parts for automotive body based on impact [J]. International Journal of Automotive Technology, 2013, 14 (4): 605-610.
- [16] 冯瑶. 7A09 铝合金桁条加强件压弯温成形性能及工艺参数研究 [D]. 天津: 天津职业技术师范大学, 2021.  
Feng Y. Warm Bending Formability and Process Parameters Research of 7A09 Aluminum Alloy Stringer Reinforcement [D]. Tianjin: Tianjin University of Technology and Education, 2021.

## 关于开展“锻压企业质量工程师”培训暨锻压标准宣贯工作的通知

各有关单位、各有关人员:

为促进我国锻压企业实行规范化生产, 提高企业生产技术水平、管理水平和市场竞争能力, 满足各企业对质量管理体系和安全生产管理体系的需求, 同时, 提高锻压企业技术人员和质量管理人员对相关国家与行业标准的理解和使用能力, 全国锻压标准化技术委员会自 2013 年起, 在全国范围内开展“锻压企业质量工程师”的培训工作, 以及锻压标准宣贯工作。为配合此项工作, 本标委会将按“模锻”、“自由锻”、“特种成形”、“冲压”等专题陆续举办相关培训班, 截止目前已成功举办十二期, 取得了很好的效果, 得到广大锻压企业认可和支持。

第十三期“‘锻压企业质量工程师’培训班——模锻工艺与标准”将于 2023 年 5 月 19-22 日在江苏盐城举办。请各单位尽快报名, 有关事宜通知如下:

### 一、报名条件

具备中专及以上学历的企业负责人、质量主管、安全卫生主管、标准化工作人员和锻压专业技术人员。

符合报名条件的上述人员, 须由本人填写报名表, 并经单位审核同意后方可报名。

### 二、培训内容

- (1) 智能制造发展及热点技术概论
- (2) 数值模拟技术在精密模锻工艺的应用现状及发展趋势
- (3) 模锻工艺过程控制及模锻件质量控制与评定
- (4) 锻造车间安全生产与环境保护要求
- (5) 摩擦与润滑条件对模锻成形的影响
- (6) 锻后热处理产品质量影响因素及控制要点

(7) 影响锻模寿命的因素及如何提高锻模寿命

(8) 锻造生产缺陷及控制措施

(9) 企业参观与讨论 (江苏森威精锻有限公司)

(10) 考试与测评

### 三、主讲教师

我国锻压领域知名专家、企业负责人、高级工程师、现场管理人员、知名院校教授等。

### 四、培训证书

每人准备 2 寸照片 2 张, 培训考试合格者, 由全国锻压标准化技术委员会颁发资格证书, 有效期 5 年。

### 五、培训时间及地点

1. 培训时间: 2023 年 5 月 19-22 日。

2. 培训地点: 江苏省盐城市。

### 六、报名方式

欲参加培训的学员, 请登录网址 <http://www.fstjournal.net/>, 在下载中心下载回执表, 通过 E-mail 发至全国锻压标准化技术委员会秘书处。

### 七、联络方式

全国锻压标准化技术委员会

联系人: 林玉彤、魏 巍、金 红

地 址: 北京市海淀区学清路 18 号 709 室 (100083)

电话及传真: 010-62920652; 18811346037;

13439515704

E-mail: [fst\\_linyutong@163.com](mailto:fst_linyutong@163.com); [dyjsjournal@163.com](mailto:dyjsjournal@163.com);  
[duanya2005@126.com](mailto:duanya2005@126.com)

全国锻压标准化技术委员会