

## 2124 铝合金热成形本构模型及工艺分析

郭元恒, 谢延敏, 王东涛, 赵江波, 杜凌峰

(西南交通大学 机械工程学院, 四川 成都 610031)

**摘要:** 为了获得 2124 铝合金热变形下的力学行为, 在温度为 350~450 ℃、应变速率为 0.001~0.1 s<sup>-1</sup> 的变形条件下进行热拉伸实验, 获得了材料的应力-应变曲线, 其结果表明: 峰值应力随着温度的升高和应变速率的降低而减小; 温度是影响伸长率的主要因素, 且低应变速率下, 具有较小的均匀伸长率。为精确地描述材料热变形下的变形行为, 建立了粘塑性本构模型, 并采用遗传算法求得该本构模型的材料参数, 结果表明模型的预测值与实验值吻合程度较高。基于已建立的本构模型开发了用户材料子程序 VUMAT, 建立了双 C 件有限元模型, 并利用 ABAQUS 软件对 2124 铝合金热成形过程进行了仿真分析。基于正交实验, 研究了温度、冲压速度、压边力和摩擦因数对双 C 件成形后最大减薄率的影响, 使用极差分析方法获得了较优的成形工艺条件, 并通过实验验证了该工艺条件下的成形结果。

**关键词:** 2124 铝合金; 热拉伸; 本构模型; 应变速率; 伸长率

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.02.034

**中图分类号:** TG146.2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2022) 02-0213-07

## Constitutive model and process analysis on thermoforming of 2124 aluminum alloy

Guo Yuanheng, Xie Yanmin, Wang Dongtao, Zhao Jiangbo, Du Lingfeng

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** In order to obtain the mechanical behavior of 2124 aluminum alloy under thermal deformation, the thermal tensile test was conducted at the temperature of 350–450 ℃ and the strain rate of 0.001–0.1 s<sup>-1</sup>, and the stress-strain curves of material were obtained. The results show that the peak stress decreases with the increasing of temperature and the decreasing of strain rate, the temperature is a main factor affecting elongation rate, and there is a smaller uniform elongation rate at the low strain rate. In order to accurately describe the deformation behavior of the material under thermal deformation, a viscoplastic constitutive model was established, and material parameters of the constitutive model were obtained by genetic algorithm. The results show that the predicted value of the model is in good agreement with the experimental value. Based on the established constitutive model, the user material subroutine VUMAT was developed, the finite element model of double C part was established, and the thermoforming process of 2124 aluminum alloy was simulated and analyzed by software ABAQUS. Based on orthogonal experiment, the influences of temperature, stamping speed, blank holder force and friction coefficient on the maximum thinning rate of double C part after forming were studied, the better forming process condition was obtained by the range analysis method, and the results of forming under the process conditions were verified by experiment.

**Key words:** 2124 aluminum alloy; thermal tension; constitutive model; strain rate; elongation rate

2124 铝合金属于硬铝合金, 是在 2024 铝合金的基础上通过降低 Fe 和 Si 元素的含量开发的高纯、高强度和高断裂韧性合金, 广泛应用于飞机的结构部件<sup>[1]</sup>。2124 铝合金在常温下成形能力差, 难以制

造飞机上形状复杂的结构部件; 在高温下塑性提高, 可以成形一些形状复杂的零件。因此, 研究 2124 铝合金高温下的变形行为具有重要的意义<sup>[2]</sup>。

目前, 对 2124 铝合金的研究主要集中于热处理工艺<sup>[3-5]</sup>、蠕变时效成形<sup>[6-7]</sup>以及高温压缩状态下的力学性能<sup>[8-9]</sup>。齐国栋<sup>[3]</sup>研究了固溶时效处理对 2124 铝合金组织及性能的影响。胥福顺等<sup>[6]</sup>研究了 2124 铝合金蠕变时效成形过程中预拉伸量对成形后强度以及回弹的影响, 并确定了合理的预拉伸量范围以实现成形目标与材料性能的耦合调控。聂辉文等<sup>[8]</sup>通过等温热压缩实验研究了 2124 铝合

收稿日期: 2021-01-10; 修订日期: 2021-04-09

基金项目: 四川省国际创新合作项目 (2020YFH0078); 四川省科技计划资助项目 (2019YFG0313)

作者简介: 郭元恒 (1995-), 男, 硕士研究生

E-mail: gyh@my.swjtu.edu.cn

通信作者: 谢延敏 (1975-), 男, 博士, 副教授

E-mail: xie\_yanmin@home.swjtu.edu.cn

金在高温下的变形行为,采用双曲正弦模型描述了热变形下的力学特性并获得了合适的热变形工艺参数范围。

从研究现状可以看出,目前对于 2124 铝合金高温下拉伸力学行为的研究较少,因此,本文旨在通过实验获取 2124 铝合金在热拉伸变形下的力学特性,分析其在不同温度、不同应变速率变形下的力学行为,并建立一个合适的本构模型来精确地描述其热变形下的应力。此外,基于材料模型的用户自定义子程序 VUMAT,利用有限元软件 ABAQUS 分析了双 C 件不同工艺参数对其成形性能的影响,并获得了较优的工艺参数。

## 1 热拉伸力学行为

实验材料为厚度为 1 mm 的 2124-T4 铝合金轧制板材。通过线切割方式将板材加工成图 1 所示的尺

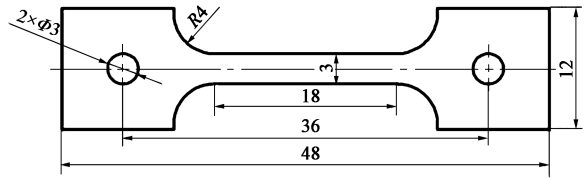


图 1 热拉伸试样尺寸

Fig. 1 Dimensions of hot tensile specimen

寸,其中拉伸方向为材料的轧制方向。

在热拉伸之前,将试样加热至指定的温度并保持 3 min,使试样温度均匀。使用 CMT5150 电子万能实验机分别在 3 组温度 (350、400 和 450 °C)、3 组应变速率  $\dot{\epsilon}$  (0.001、0.01 和 0.1 s<sup>-1</sup>) 条件下进行热拉伸实验,获得了 9 组载荷-位移曲线数据并转换为应力-应变曲线,结果如图 2 所示。

2124 铝合金热拉伸变形过程主要经历了 3 个阶段:峰值应力前的硬化阶段、稳态应力阶段以及应

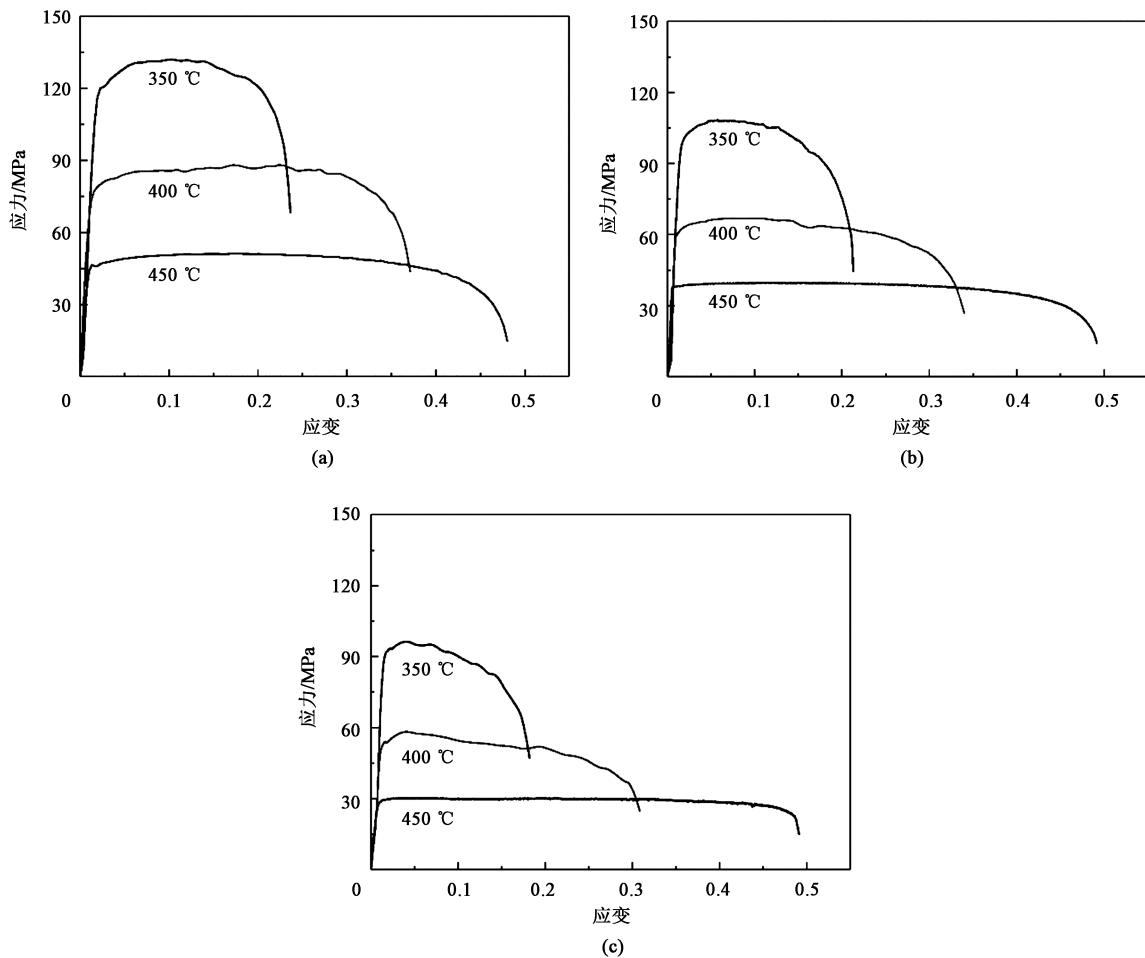


图 2 2124-T4 铝合金在不同变形条件下的应力-应变曲线

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

Fig. 2 Curves of stress-strain for 2124-T4 aluminum alloy under different deformation conditions

力软化阶段。第1个阶段主要为弹性变形以及塑性变形的初始阶段,此阶段加工硬化占主导,应力快速上升。同时,高温变形中存在动态回复的软化效应,当加工硬化与动态回复平衡后,材料的应力将不再变化<sup>[10]</sup>,此为稳态的应力阶段。随着塑性变形进行,第二相颗粒会引起微孔形核及生长,从而应力出现下降,当微孔聚合时,材料承载能力急剧降低,随后很快断裂失效<sup>[11]</sup>,此为应力软化阶段。

此外,通过图2的热拉伸应力-应变曲线可以得出:

(1) 由于高温下的热激活效应,峰值应力随着温度的升高而减小,应变速率为  $0.1 \text{ s}^{-1}$  时,当温度从  $350 \text{ }^{\circ}\text{C}$  增加至  $450 \text{ }^{\circ}\text{C}$  时,峰值应力从  $132.02 \text{ MPa}$  降低至  $50.27 \text{ MPa}$ ,降低幅度为  $61.92\%$ 。峰值应力随着应变速率的降低而减小,温度为  $400 \text{ }^{\circ}\text{C}$  时,当应变速率从  $0.1 \text{ s}^{-1}$  降低至  $0.001 \text{ s}^{-1}$  时,峰值应力从  $86.84 \text{ MPa}$  降低至  $57.88 \text{ MPa}$ ,降低幅度为  $33.34\%$ ,这是因为:在低变形速率下,有更多的时间发生动态回复的软化效应,因此,峰值应力较小<sup>[12]</sup>。此外,应变硬化指数反映了材料抗颈缩的能力,图2表明材料应变硬化指数随着温度的升高和应变速率的降低而减小,这也表明该变形条件下动态回复的软化效应较强。

(2) 2124 铝合金的伸长率随温度的增加而增加,应变速率为  $0.1 \text{ s}^{-1}$  时,当温度从  $350 \text{ }^{\circ}\text{C}$  增加至  $450 \text{ }^{\circ}\text{C}$  时,伸长率从  $27.63\%$  增加至  $61.61\%$ 。图2表明伸长率及均匀伸长率总体上随着温度和应变速率的升高而增大,且温度对他们的影响强于应变速率的影响,因此,提高温度及适当增加应变速率可以提高材料的成形能力。

## 2 本构模型

### 2.1 粘塑性本构模型

实验结果表明,2124 铝合金热拉伸变形下的应力与温度、应变速率和应变相关,因此,采用粘塑性模型来描述他们之间的相关性。Lin J 等<sup>[13]</sup>开发了基于位错密度的统一粘塑性模型:

$$\begin{cases} \dot{\varepsilon}_p = \left( \frac{\sigma - H - k_0}{K} \right)^n \\ H = B\sqrt{\rho} \\ \dot{\rho} = A(1 - \bar{\rho})\dot{\varepsilon}_p^{r_1} - C\rho^{r_2} \\ \sigma = E(\varepsilon - \varepsilon_p) \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\dot{\varepsilon}_p$  为塑性应变速率;  $\sigma$  为应力;  $\varepsilon$  为总应变;  $\varepsilon_p$  为塑性应变;  $k_0$  为初始屈服应力;  $H$  为各向

同性硬化变量;  $\bar{\rho}$  为归一化位错密度,  $\bar{\rho} = 1 - \rho_0/\rho$ ;  $\rho_0$  为初始状态下的位错密度;  $\rho$  为位错密度;  $\dot{\bar{\rho}}$  为相对位错密度的演化速率;  $E$  为弹性模量;  $K$ 、 $n$ 、 $B$ 、 $A$ 、 $C$ 、 $r_1$ 、 $r_2$  为材料常数,其中  $r_1$  用于捕捉位错密度增殖速率对应变速率的敏感性。

通常材料参数与温度之间关系的构建直接影响建模精度,原始模型中材料参数  $K$ 、 $k_0$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $E$ 、 $A$ 、 $n$  与温度之间的关系均为 Arrhenius 关系表达。为了提高该模型描述 2124 铝合金热变形下变形行为的能力,在参数求解过程中构建了一组合适的参数方程来描述材料常数与温度之间的关系。在本文中,材料常数  $K$ 、 $k_0$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $E$ 、 $A$ 、 $n$  与温度之间的关系表示为:

$$\begin{cases} K = K_0 T + K_1 \\ k_0 = k_{01} \exp \left[ - \left( \frac{T - k_{02}}{k_{03}} \right)^2 \right] \\ B = B_0 \exp(B_1 T) \\ C = C_0 \exp \left( \frac{-Q_C}{RT} \right) \\ E = E_0 \exp \left( \frac{Q_E}{RT} \right) \\ A = A_0 \exp \left( \frac{Q_A}{RT} \right) \\ n = n_0 T + n_1 \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $K_0$ 、 $K_1$ 、 $k_{01}$ 、 $k_{02}$ 、 $k_{03}$ 、 $B_0$ 、 $B_1$ 、 $C_0$ 、 $E_0$ 、 $A_0$ 、 $n_0$ 、 $n_1$  为材料常数;  $R$  为通用气体常数;  $T$  为绝对温度;  $Q_C$ 、 $Q_E$ 、 $Q_A$  为激活能。

### 2.2 参数求解

由于粘塑性模型中材料参数较多,通过实验难以求解。利用智能算法来逼近模型曲线与实验曲线可以有效地获取本构模型材料参数。由于目标函数具有强烈的非线性(多峰),需要全局优化算法来寻得可靠的最优解<sup>[14]</sup>,本文采用遗传算法(Genetic Algorithm, GA)来确定粘塑性模型的材料参数,优化模型可以表达为:

$$\min f(x) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \left\{ \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left[ \ln \left( \frac{\sigma_{ij}^e}{\sigma_{ij}^c} \right) \right] \right\} \quad (3)$$

式中:  $f(x)$  为流动应力残差;  $x$  为所求的材料常数数组;  $i$  为曲线编号,  $i=1, \dots, M$ ;  $M$  为曲线数;  $j$  为每条曲线上所取数据点的编号,  $j=1, \dots, N$ ;  $N$  为每条曲线上所取的实验特征点的数量;  $\sigma_{ij}^e$  为采集数据点的实验应力值;  $\sigma_{ij}^c$  为对应于实验特征点的计算应力值。本文中,  $M=9$ ,  $N=7$ 。

材料参数的具体确定过程如下:

(1) 利用遗传算法分别获取 350、400 和 450 °C 变形条件下的材料常数  $K$ 、 $k_0$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $E$ 、 $A$ 、 $n$ 、 $r_1$ 、 $r_2$ 。其中, 每个温度下参数优化流程如图 3 所示, 参数的初始边界参考文献 [15] 中的范围。

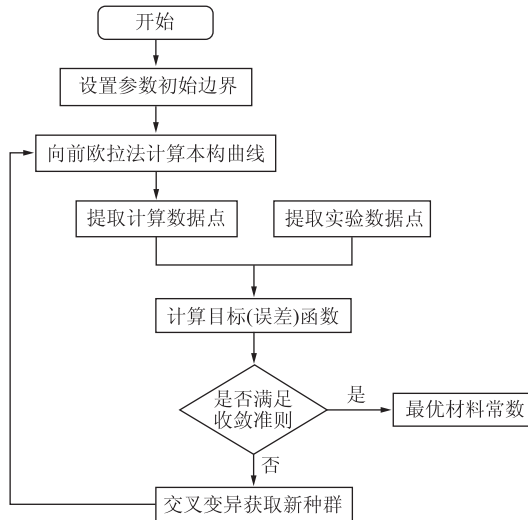


图 3 参数优化流程图

Fig. 3 Flow chart of parameters optimization

(2) 评估每个温度下的材料常数  $K$ 、 $k_0$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $E$ 、 $A$ 、 $n$  与温度之间的相关性, 并构建合适的参数方程来描述材料常数与温度之间的关系。

(3) 将求得的常数  $K_0$ 、 $K_1$ 、 $k_{01}$ 、 $k_{02}$ 、 $k_{03}$ 、 $B_0$ 、 $B_1$ 、 $C_0$ 、 $Q_C$ 、 $E_0$ 、 $Q_E$ 、 $A_0$ 、 $Q_A$ 、 $n_0$ 、 $n_1$  作为初始值按照图 3 所示流程进行优化, 并获得最终的材料常数, 如表 1 所示。

表 1 优化后的材料常数

Table 1 Material constants after optimization

参数	最优值	参数	最优值
$K_0/(\text{MPa} \cdot \text{K}^{-1})$	-0.3991	$E_0/\text{MPa}$	145.7
$K_1/\text{MPa}$	343.5	$Q_E/(\text{J} \cdot \text{mol}^{-1})$	22684.25
$k_{01}/\text{MPa}$	41.12	$A_0$	0.267942
$k_{02}/\text{K}$	604.8	$Q_A/(\text{J} \cdot \text{mol}^{-1})$	19006.42
$k_{03}/\text{K}$	83.44	$n_0/\text{K}^{-1}$	0.01575
$B_0/\text{MPa}$	3102002	$n_1$	-4.252
$B_1/\text{K}^{-1}$	-0.01796	$r_1$	0.7343
$C_0$	2792.702	$r_2$	9.1015
$Q_C/(\text{J} \cdot \text{mol}^{-1})$	11225.419		

### 2.3 模型验证

将求得的本构模型参数带入本构方程中, 基于向前欧拉法获得模型的计算曲线, 实验值与模型计算曲线对比如图 4 所示。从图 4 中可以看出, 模型的预测值与实验点吻合良好, 该模型能够较为准确

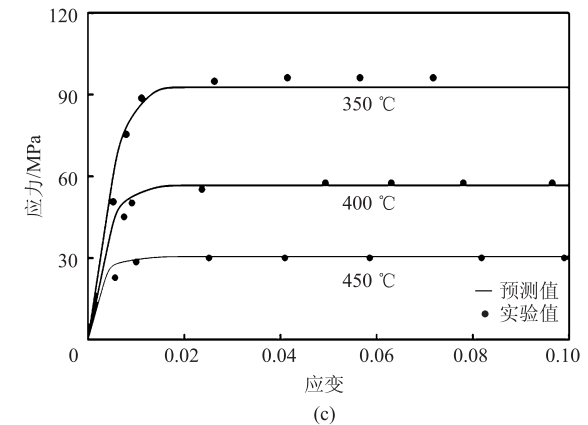
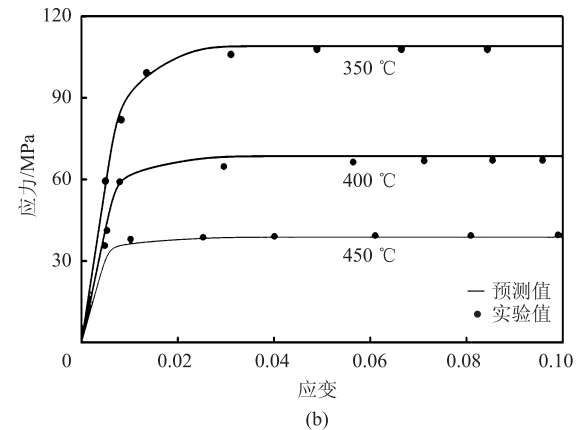
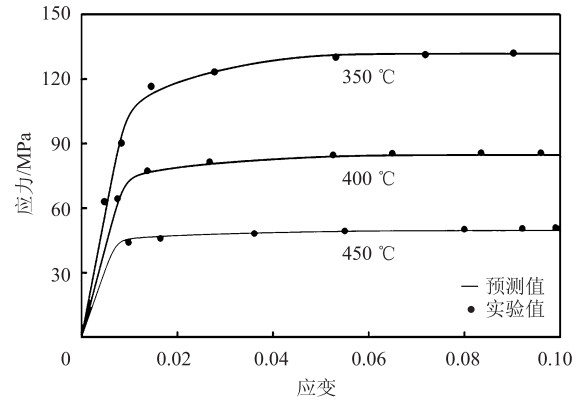


图 4 预测值与实验值对比

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

Fig. 4 Comparison between predicted and experimental values

地描述不同温度和应变速率下峰值应力前的应变硬化行为, 并且能够较好地表达应变硬化能力随着温度降低和应变速率升高而增强的趋势。此外, 不同变形条件下的峰值应力也基本一致, 因此, 利用该模型对 2124 铝合金热成形件进行成形分析是可靠的。

为了定量评估已建立的粘塑性模型的精度, 采用统计学的指标计算实验应力值与本构模型计算应力值的相关系数  $R_0$  以及均方根误差  $RMSE$ , 其值分

别为 0.9892 和 2.73 MPa，表明该粘塑性模型能够有效地反映 2124 铝合金热变形下的变形行为。

3 双 C 件热成形分析与实验验证

基于 Fortran 语言将粘塑性模型编译为用户自定义子程序 VUMAT，利用 ABAQUS 对双 C 件进行热成形仿真分析。建立双 C 件有限元模型，如图 5 所示。

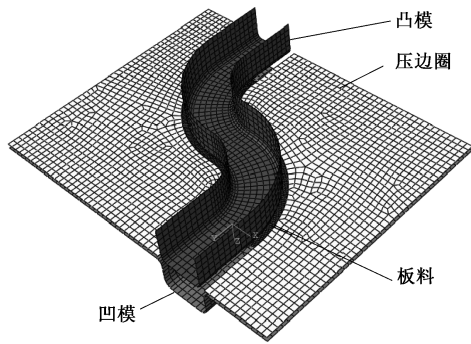


图 5 双 C 件有限元模型  
Fig. 5 Finite element model of double C part

仿真分析需要设置板料和模具的一些性能参数，如表 2 所示<sup>[11]</sup>。板料采用温度位移耦合的缩减积分壳单元（S4RT），模具设置为刚性体以减小计算成本。模具与板料之间使用运动接触算法以及罚函数摩擦模型。采用 ABAQUS/explicit 求解器完成双 C 件热成形分析。

表 2 材料性能参数设置  
Table 2 Settings of material performance parameters

参数	数值	
	板料	模具
密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	2780	7850
泊松比	0.3	0.3
比热/( $\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$ )	1050	460
热膨胀系数/( $\times 10^{-5} \text{K}^{-1}$ )	6.6	1.2
热导率/( $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ )	190	44
模具与坯料之间的换热系数/( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ )	2000	—
坯料与环境之间的换热系数/( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ )	40	—

为了研究温度、冲压速度、压边力及摩擦因数对双 C 件成形后最大减薄率的影响，设计 4 因素 5 水平正交表，共 25 组实验。具体实验方案及结果如表 3 所示，各因素水平与成形指标的趋势图如图 6 所示。

从图 6 可以得出，在给定的因素水平范围内，各因素对最大减薄率的影响从大到小分别为：摩擦因数>压边力>温度>冲压速度。最大减薄率随着摩擦因数的增加呈指数增加，因此，应尽可能在板料

表 3 正交实验方案及结果

Table 3 Schemes and results of orthogonal experiment

编号	温度/K	冲压速度/ ( $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	压边力/ kN	摩擦因数	最大减薄率/ %
1	623	20	2	0.100	10.13
2	623	65	6	0.175	12.38
3	623	110	10	0.125	10.72
4	623	155	4	0.200	12.27
5	623	200	8	0.150	11.22
6	648	20	10	0.175	13.81
7	648	65	4	0.125	10.59
8	648	110	8	0.200	14.22
9	648	155	2	0.150	10.67
10	648	200	6	0.100	10.08
11	673	20	8	0.125	11.35
12	673	65	2	0.200	12.99
13	673	110	6	0.150	11.52
14	673	155	10	0.100	10.76
15	673	200	4	0.175	11.90
16	698	20	6	0.200	15.61
17	698	65	10	0.150	14.42
18	698	110	4	0.100	10.22
19	698	155	8	0.175	13.72
20	698	200	2	0.125	10.25
21	723	20	4	0.150	15.61
22	723	65	8	0.100	14.42
23	723	110	2	0.175	10.22
24	723	155	6	0.125	13.72
25	723	200	10	0.200	10.25

与模具之间使用摩擦因数较低的润滑剂以提高成形质量。当压边力为 2 和 6 kN 时，成形效果较好，最大减薄率较小；但当压边力为 2 kN 时存在起皱风险，因此，当压边力为 6 kN 时，成形效果较好。最大减薄率总体上随温度的升高而增加，从热拉伸曲线可知，材料应变硬化能力随温度的升高而降低，从而抗颈缩的能力降低，阻碍了材料的流动；另外，较低温度下材料塑性较差，有破裂风险，因此，温度的合理值应在 673 K 左右。冲压速度对最大减薄

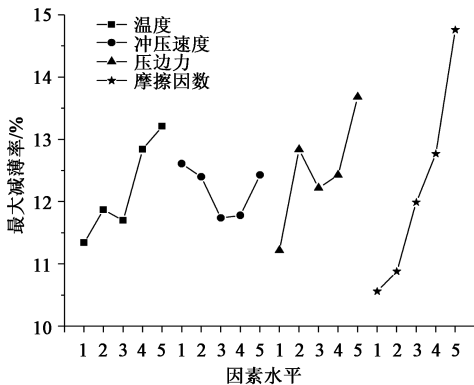


图 6 各因素水平与最大减薄率趋势图  
Fig. 6 Trend chart of each factor level and maximum thinning rate

率的影响较低,最大减薄率随冲压速度的增加先减小后增加,因此,最佳速度为  $110 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  左右。综上可得,较优的成形条件为:在使用摩擦因数较低的润滑剂条件下,压边力、温度及冲压速度分别为  $6 \text{ kN}$ 、 $673 \text{ K}$  及  $110 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  左右。

为验证以上分析结果,进行双 C 件的热成形实

验。实验中使用干性石墨润滑剂,其摩擦因数约为  $0.1$ <sup>[16]</sup>。仿真结果与实验结果对比如图 7 所示,成形件左端面实验与仿真的厚度分布对比如图 8 所示。从图 7 中可以看出,该工艺条件下双 C 件的成形效果良好,从图 8 中可以看出,实验与仿真的厚度分布较为接近,证明了该工艺条件的合理性。

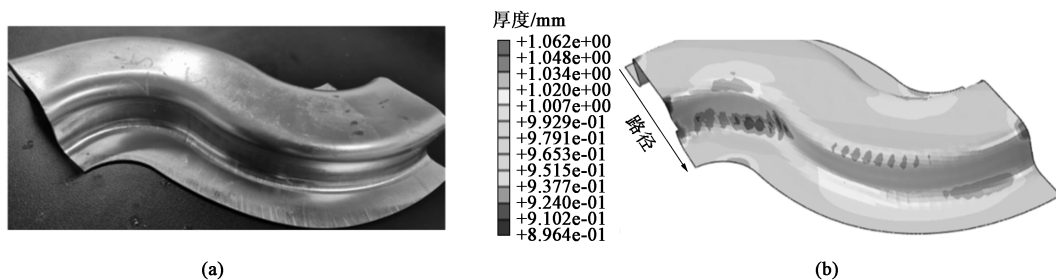


图 7 实验结果 (a) 与仿真结果 (b) 对比

Fig. 7 Comparison of results between experiment (a) and simulation (b)

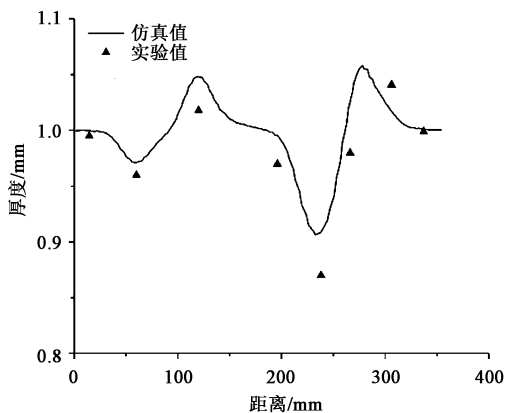


图 8 沿路径的实验与仿真厚度对比

Fig. 8 Comparison of thickness between experiment and simulation along path

## 4 结论

(1) 2124 铝合金热拉伸实验表明:峰值应力随温度的降低和应变速率的升高而增加;温度是影响伸长率的主要因素,低变形速率下非均匀伸长率较低。

(2) 建立了描述 2124 铝合金热拉伸变形下力学行为的粘塑性模型,模型的预测值与实验值吻合良好,其相关系数与均方根误差分别为  $0.9892$  和  $2.73 \text{ MPa}$ 。

(3) 分析了双 C 件成形工艺参数对成形结果的影响,获得了较优的工艺参数条件:在使用摩擦因数较低的润滑剂条件下,压边力、温度及冲压速度分别为  $6 \text{ kN}$ 、 $673 \text{ K}$  及  $110 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  左右,并通过实验验证了其工艺条件的合理性。

## 参考文献:

- [1] 刘兵,彭超群,王日初,等. 大飞机用铝合金的研究现状及展望 [J]. 中国有色金属学报, 2010, 20 (9): 1705-1715.  
Liu B, Peng C Q, Wang R C, et al. Recent development and prospects for giant plane aluminum alloys [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20 (9): 1705-1715.
- [2] Zheng K L, Politis D J, Wang L, et al. A review on forming techniques for manufacturing lightweight complex-shaped aluminium panel components [J]. International Journal of Lightweight Materials and Manufacture, 2018, 1 (2): 55-80.
- [3] 齐国栋. 2124 铝合金固溶时效对组织和性能的影响 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.  
Qi G D. Effects of Solution and Aging on Structure and Properties of 2124 Aluminum Alloy [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.
- [4] 王昌臻,潘清林,何运斌,等. 2124 铝合金热轧厚板的热处理制度 [J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2007, 38 (3): 386-373.  
Wang C Z, Pan Q L, He Y B, et al. Heat treatment of thick hot-rolled plate of 2124 alloy [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2007, 38 (3): 386-373.
- [5] 臧金鑫,陈军洲,伊琳娜,等. 时效工艺对 2124 铝合金厚板组织与性能的影响 [J]. 材料工程, 2019, 47 (12): 98-103.  
Zang J X, Chen J Z, Yi L N, et al. Effect of ageing process on microstructure and properties of 2124 aluminum alloy thick plate [J]. Journal of Materials Engineering, 2019, 47 (12): 98-103.
- [6] 胥福顺,张劲,邓运来,等. 预拉伸对 2124 铝合金蠕变时效形性同步的影响 [J]. 中国有色金属学报, 2017, 27 (1): 1-7.  
Xu F S, Zhang J, Deng Y L, et al. Effect of pre-stretching on synchronization of shape and property in creep age forming of 2124 aluminum alloy [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2017, 27 (1): 1-7.

- [7] 张劲, 邓运来, 杨金龙, 等. 2124 铝合金蠕变时效实验及本构模型研究 [J]. 金属学报, 2013, 49 (3): 379-384.  
Zhang J, Deng Y L, Yang J L, et al. Experimental studies and constitutive modeling for creep aging of 2124 Al alloy [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2013, 49 (3): 379-384.
- [8] 聂辉文, 尹付成, 聂俊红. 2124 铝合金热变形的流变行为研究 [J]. 特种铸造及有色合金, 2013, 33 (10): 887-890.  
Nie H W, Yin F C, Nie J H. Rheological behavior of 2124 aluminum alloy during thermal deformation process [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2013, 33 (10): 887-890.
- [9] 李齐飞. 2124 铝合流变规律及成形工艺优化 [D]. 长沙: 中南大学, 2012.  
Li Q F. Flow Behavior and Process Optimization of 2124 Aluminum Alloy [D]. Changsha: Central South University, 2012.
- [10] Lin Y C, Chen X M. A critical review of experimental results and constitutive descriptions for metals and alloys in hot working [J]. Materials & Design, 2011, 32 (4): 1733-1759.
- [11] 王新云, 石婵, 邓磊, 等. 2024 铝合金高温损伤模型的建立及其应用 [J]. 塑性工程学报, 2019, 26 (6): 120-127.  
Wang X Y, Shi C, Deng L, et al. Establishment and application of high temperature damage model for 2024 Aluminum alloy [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2019, 26 (6): 120-127.
- [12] 张学忠, 刘建生, 何文武, 等. 12%Cr 超超临界转子钢热变形行为及高温塑性本构方程 [J]. 锻压技术, 2020, 45 (8): 184-189.  
Zhang X Z, Liu J S, He W W, et al. Hot deformation behavior and high temperature plastic constitutive equation for 12% Cr ultra-supercritical rotor steel [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (8): 184-189.
- [13] Lin J G, Mohamed M, Balint D, et al. The development of continuum damage mechanics-based theories for predicting forming limit diagrams for hot stamping applications [J]. International Journal of Damage Mechanics, 2014, 23 (5): 684-701.
- [14] Piccininni A, Sorgente D, Palumbo G. Genetic algorithm based inverse analysis for the superplastic characterization of a Ti-6Al-4V biomedical grade [J]. Finite Elements In Analysis & Design, 2018, 148: 27-37.
- [15] 傅垒, 王宝雨, 林建国, 等. 耦合位错密度的 6111 铝合金热变形本构模型 [J]. 北京科技大学学报, 2013, 35 (10): 1333-1339.  
Fu L, Wang B Y, Lin J G, et al. Constitutive model coupled with dislocation density for hot deformation of 6111 aluminum alloy [J], Journal of University of Science and Technology Beijing, 2013, 35 (10): 1333-1339.
- [16] 校文超. 7075 铝合金板材热塑性本构建模与热冲压关键技术研究 [D]. 北京: 北京科技大学, 2018.  
Xiao W C. Study of Unified Viscoplastic Constitutive Modeling and Key Technologies of Hot Stamping of 7075 Aluminum Sheet [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2018.

## 关于开展第十二期“锻压企业质量工程师”培训班（有色金属及高温合金锻造工艺与标准）的通知（第二轮）

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经研究决定, 自 2013 年起, 在全国范围内开展“锻压企业质量工程师”的培训与认证工作, 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十一期, 取得了很好的效果, 得到广大锻压企业认可和支持。

第十二期“‘锻压企业质量工程师’培训班——有色金属及高温合金锻造工艺与标准”将于 2022 年举办。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) 有色金属及高温合金锻造技术、工艺、装备发展现状与发展趋势; (2) 锻造车间安全生产与环境保护; (3) 有色金属及高温合金锻造模拟技术及优化设计; (4) 高温合金锻件质量控制、工艺设计与实例分析; (5) 铝合金锻件质量

控制、工艺设计与实例分析; (6) 镁合金、锆合金和铜合金锻件质量控制、工艺设计与实例分析; (7) 钛合金锻件质量控制、工艺设计与实例分析; (8) 有色金属及高温合金锻件的缺陷分析与控制; (9) 企业参观与讨论; (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、培训时间及地点

培训时间: 2022 年 4 月 22-25 日。

培训地点: 安徽省芜湖市。

### 五、报名方式

欲参加培训的学员, 请您填好回执表 (登陆网站 <http://www.fstjournal.net> 下载), 通过 E-mail 发至全国锻压标准化技术委员会秘书处。

### 六、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: 010-62920652; 18811346037; 13439515704

E-mail: fst\_linyutong@163.com; dyjsjournal@163.com;  
duanya2005@126.com

全国锻压标准化技术委员会