

TC4 钛合金 L 型材高温弯曲蠕变的数值模拟研究

赵 鹏¹, 吴 为², 付雪松¹, 曾元松², 陈国清¹, 周文龙^{1,3}

(1. 大连理工大学 材料科学与工程学院 辽宁省凝固控制与数字化制备技术重点实验室, 辽宁 大连 116023)

(2. 中国航空制造技术研究院, 北京 100024)

(3. 大连理工(营口)新材料工程中心有限公司, 辽宁 营口 115004)

摘 要: 利用 ABAQUS 有限元软件, 针对 TC4 钛合金 L 型材, 分别在蠕变温度为 500、600 和 700 °C 及蠕变时间为 600、1200、1800 s 的条件下, 进行高温压弯蠕变的数值模拟分析, 研究温度和时间对该 L 型材高温压弯蠕变变形后回弹量的影响规律。数值模拟结果表明, TC4 钛合金应力松弛效果受温度影响明显, 当温度为 700 °C 时, 应力松弛后残余应力降低至 50 MPa 以下; 蠕变时间为 600 s 时, 应力松弛后残余应力已经降低到趋于稳定的极限值, 继续增加蠕变时间, 应力松弛效应不发生显著变化。

关键词: 钛合金 L 型材; 数值模拟; 应力松弛; 回弹

中图分类号: TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2022)01-0211-06

随着飞机对装配精度要求不断提高, 所用型材产品对成形精度的要求也越来越高。热拉弯蠕变成形工艺复合了热拉弯成形和热蠕变成形 2 种工艺, 利用热蠕变过程的应力松弛有效减小了变形回弹, 被应用于型材的精密成形。

应力松弛是指金属材料的形变保持不变而应力逐渐降低的现象, 其本质是随时间的增加, 材料内部弹性应变逐步转化为非弹性应变的过程。针对钛合金的应力松弛行为, 学者们进行了大量研究。祝世强等^[1]研究了 TA15 钛合金在 600、650、700、750 °C 4 个典型温度的应力松弛行为。结果表明, 温度越高, 保温时间越长, 试样在卸除外载荷后, 松弛应力和应变越小。王春艳等^[2]对 TA1 钛合金在 480~550 °C 时, 不同初始应力条件下的短时应力松弛行为进行了研究, 发现 TA1 钛合金应力松弛大致分为 2 个阶段, 500 s 前应力松弛迅速, 500 s 后应力松弛缓慢, 最终趋向于某一个极限值。并指出温度越高, 应力松弛量越大, 但超过 530 °C 后, 应力松弛量增幅随温度的升高明显减少。王明伟等^[3]研究了 BT20 钛合金在 700~850 °C 短时的应力松弛行为。结果表明, 随着温度升高, BT20 钛合金应力松弛速率加快, 经过较长时间应力松弛后, 剩余应力趋向于某个极限值。李建伟^[4]基于短时高温蠕变和应力松弛的变形机制, 针对 TC21 细晶钛合金研究了热弯曲实验校形过程,

发现温度对板材回弹的影响有较为明显的规律。即, 回弹量随保压时间的变化与应力松弛随保压时间的变化趋势具有一致性, 随着温度的增高和保压时间的延长, 零件成形精度明显提高。在 TC4 钛合金研究方面, 刘勇等^[5]进行了大量研究, 指出采用二次延迟函数, 足以精确地对应力松弛曲线进行拟合, 并研究了 TC4 钛合金的应力松弛行为的微观机理, 认为在 400 °C 时应力松弛机理为位错蠕变, 600 °C 时为回复蠕变。Xiao 等^[6]研究了 TC4 薄板在 650~750 °C 中等温度范围及不同应变水平下的拉伸应力松弛行为, 发现对于相同温度下的不同初始应力, 应力松弛极限达到相同的值。毕静等^[7]针对 TC4 钛合金薄板基于 Arrhenius 本构模型, 通过对各参数的线性回归, 建立适合 TC4 钛合金薄板的高温短时蠕变型本构方程, 为后续热校形工艺制定和数值模拟奠定了基础。

现有文献报道的应力松弛实验大都采用按照国标设计的拉伸试样, 与实际应用的型材存在一定差异。本研究采用工程应用的 TC4 钛合金 L 型材作为试验件, 在不同温度 (500、600、700 °C) 和不同应力松弛时间 (600、1200、1800 s) 下进行了应力松弛数值模拟分析, 得到温度与时间对应力松弛的影响规律。在此基础上进行热压弯蠕变实验, 与数值模拟结果作对比分析。

收稿日期: 2021-01-12

基金项目: 辽宁省“兴辽英才计划”项目 (XLYC1902084)

作者简介: 赵 鹏, 男, 1995 年生, 硕士生, 大连理工大学材料科学与工程学院, 辽宁省凝固控制与数字化制备技术重点实验室, 辽宁大连 116023, 电话: 0411-84709967, E-mail: zhaopeng950320@163.com

1 有限元模型

1.1 算法选择

ABAQUS 有限元软件具有 Standard 和 Explicit 2 个模块，前者采用隐式算法，适合求解某些光滑非线性问题；后者采用动力显示算法，适合求解瞬时动态事件和包含复杂接触条件的非连续非线性问题。基于型材压弯蠕变成形过程的特点，采用动力显示算法计算压弯成形过程，则需要再通过数据传递的方法进行蠕变成形过程的计算，计算求解缓慢。因此，本研究选择基于 ABAQUS/Standard 分析模块对型材压弯回弹过程进行模拟。其中，成形过程分成压弯和蠕变 2 个分析步，压弯过程采用静力通用分析步，蠕变过程采用粘性分析步。

1.2 几何模型建立

采用工程应用的等截面型材，长度选择为 300 mm。为了保证模拟的便捷性与简洁性，将型材的圆角处简化，简化前后的截面尺寸如图 1 所示。

由于 L 型材截面具有不对称性，在弯曲过程中面板容易产生挠曲^[8]，而且型材厚度较大，为使型材产生良好的变形，设计一种具有“L”形槽的压头，型材与压头装配体如图 2 所示（图中 X^{RP} 表示模型参考点）。

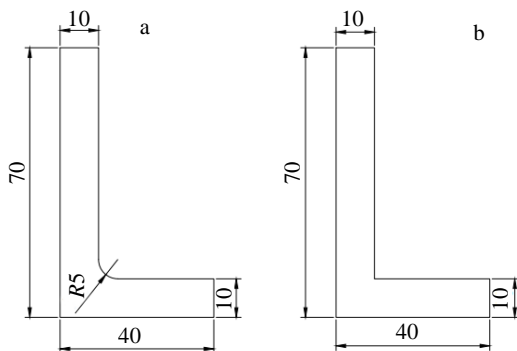


图 1 L 型材简化前后截面尺寸

Fig.1 Section size of L profile before (a) and after (b) simplification

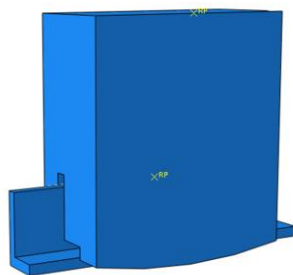


图 2 型材与压头装配体

Fig.2 Profile and indenter assembly

1.3 材料参数及本构模型

采用 Johnson-Cook 本构关系描述钛合金高温变形曲线，如式 (1) 所示；

$$\sigma = (A + B\epsilon^n) \left[1 + C \ln \left(1 + \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right] \quad (1)$$

式中， T 为试样环境温度， T_r 为室温， T_m 为材料熔点， A 、 B 、 C 、 n 、 m 为待定系数。有限元模型中， $T=700\text{ }^\circ\text{C}$ ， $T_r=25\text{ }^\circ\text{C}$ ， $T_m=1660\text{ }^\circ\text{C}$ 。忽略 m 对模型的影响。用由四次延迟函数变换得到的 Arrhenius 蠕变本构方程描述钛合金的应力松弛行为。

选取的 TC4 钛合金弹性参数、塑性变形本构模型及应力松弛本构模型的具体参数分别如表 1~3 所示^[9]。

1.4 接触条件、边界条件及载荷

模具和型材的接触方式为主从面接触，模具外表面为主面，型材外表面为从面。法向接触为硬接触，切向接触采用罚函数摩擦，摩擦系数为 0.1。

成形阶段型材 2 个端面固定，压头设置纵向位移，约束其他自由度。回弹阶段，采用无模法进行回弹模拟。

1.5 模拟参数分组

对 TC4 钛合金 L 型材压弯蠕变进行有限元模拟，目的是研究压弯蠕变过程中关键工艺参数对压弯试件应力松弛及回弹的影响规律，其中主要研究温度、蠕变时间对于型材应力松弛及回弹量的影响。具体模拟参数分组如表 4 所示。

1.6 模拟结果提取路径的创建

在压弯成形过程中，零件会因为外载荷卸载以后产生回弹变形，影响成形制件的精度。表征回弹大小的参数并没有统一的标准，弯曲变形处的位移量^[10]、回弹角^[11,12]和曲率半径^[13]都是研究者们常用的表征参数。本研究采用弯曲变形处的位移量作为回弹大小的表征参数。

表 1 弹性参数

Table 1 Elastic parameters

Temperature/ $^\circ\text{C}$	Elastic modulus/GPa	Poisson's ratio
700	84.36	0.33

表 2 塑性变形 Johnson-Cook 本构模型参数

Table 2 Parameters of Johnson-Cook constitutive model of plastic deformation

Temperature/ $^\circ\text{C}$	A	B	n	C
700	270	7.16	0.2	0.15

表 3 应力松弛 Arrhenius 本构模型参数

Table 3 Parameters of stress-relaxed Arrhenius constitutive model

Temperature/ $^\circ\text{C}$	A_3	n_2	α	$Q/\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$
500	1.52e^{-5}	5.94	0.002 41	14 638.72
600	1.52e^{-5}	3.11	0.005 16	11 017.26
700	1.52e^{-5}	2.12	0.015 80	15 234.62

表 4 模拟参数分组
Table 4 Simulation parameters grouping

Group	Temperature/°C	Creep time/s
1	500	600
2	500	1200
3	500	1800
4	600	600
5	600	1200
6	600	1800
7	700	600
8	700	1200
9	700	1800

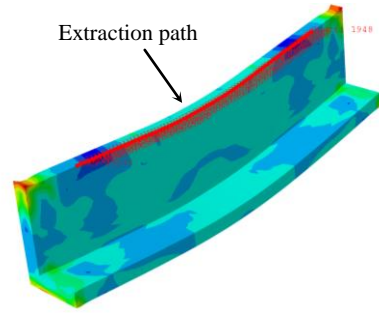


图 3 数据提取路径

Fig.3 Data extraction path

在 ABAQUS 软件中, 模拟计算完成后, 创建数据提取路径, 得到应力及弯曲变形处位移量。创建的数据提取路径如图 3 所示。

2 结果及讨论

2.1 蠕变温度对应力松弛的影响

图 4 显示了蠕变时间为 1800 s 时, 型材在蠕变温度分别为 500、600 及 700 °C 条件下成形后的应力分布。可以看出, 当蠕变温度为 500 °C 时, 型材内部还保留较大的残余应力, 最高达到 258.5 MPa; 当蠕变温度为 600 °C 时, 残余应力明显降低, 最大应力减至 112.3 MPa;

当蠕变温度升至 700 °C 时, 最大残余应力仅为 42.7 MPa。由此可见, 随着蠕变温度的升高, 应力松弛效应更加明显, 型材内部的残余应力显著降低, 表明 TC4 钛合金应力松弛行为对温度变化较为敏感。按照创建的提取路径获得相应的应力值与回弹量, 并使用 Origin 软件绘制成曲线, 如图 5 示。

从图 5 可以发现, 型材内部应力与回弹量大小变化趋势有较好的一致性, 即残余应力越大的位置, 回弹量越大。蠕变温度对回弹量的大小具有显著的影响, 当蠕变温度为 500 °C 时, 最大回弹量在 1.3 mm 左右; 当蠕变温度上升至 700 °C 时, 最大回弹量减小至仅 0.07 mm 左右。

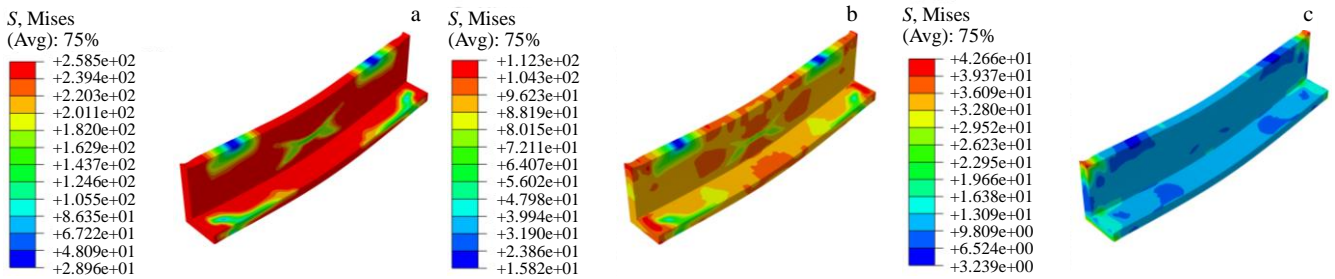


图 4 不同蠕变温度下成型型材的应力分布图

Fig.4 Stress distributions of the profiles after forming at different creep temperatures: (a) 500 °C, (b) 600 °C, and (c) 700 °C

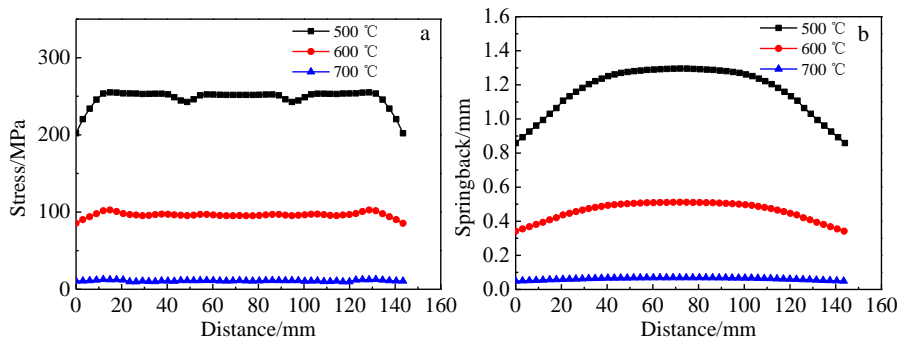


图 5 不同蠕变温度下成型型材内部应力及回弹量曲线

Fig.5 Curves of internal stress (a) and springback (b) of the profiles after forming at different creep temperatures

2.2 蠕变时间对成形的影响

由 2.1 节可知，蠕变温度为 700 °C 时，降低型材回弹效果最显著。因此本研究选取蠕变温度为 700 °C，探究不同蠕变时间对压弯蠕变成形回弹的影响规律。图 6 为当蠕变温度为 700 °C 时，型材在蠕变时间分别为 600、1200 及 1800 s 条件下成形后的应力分布。可以看出，随着蠕变时间的增加，型材内部应力逐渐减小，但是并不十分明显。

按照创建的提取路径，获得相应的应力值与回弹量，并使用 Origin 软件绘制成曲线，如图 7 所示。型材内部应力分布与回弹量大小变化趋势具有较好的一致性，即残余应力越大的位置回弹量也越大。在靠近型材端部的

位置，残余应力呈先增大后减小趋势，但回弹量呈单调减小趋势。这是由于在模拟过程中对型材两端设置了保持全约束，两端的限制作用使得靠近端部的位置残余应力较大，但回弹量依然很小。

随着蠕变时间的增加，型材内部残余应力逐渐得到释放，回弹量也降低，图 8 给出了蠕变温度为 700 °C 时、型材上某一点的应力随时间变化曲线。可以看出，前 200 s 该点处残余应力迅速降低，在 200~600 s 应力变化较平缓，随着时间的继续增加，应力逐渐趋于稳定值。应力松弛过程中，由型材内部的等效蠕变应变分布（见图 9）可见，当蠕变时间为 1800 s 时，最大等效蠕变应变变为 0.648%；当蠕变时间为 600 s 时，最大等效蠕变应变变为

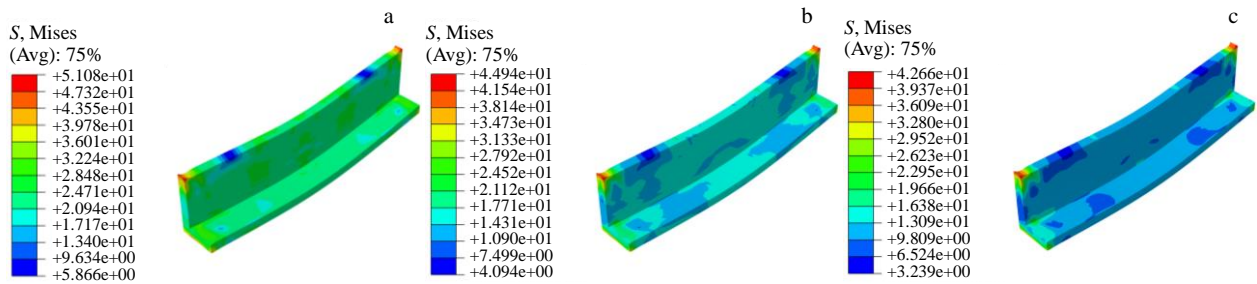


图 6 不同蠕变时间成形型材的应力分布

Fig.6 Stress distributions of the profiles after forming with different creep time: (a) 600 s, (b) 1200 s, and (c) 1800 s

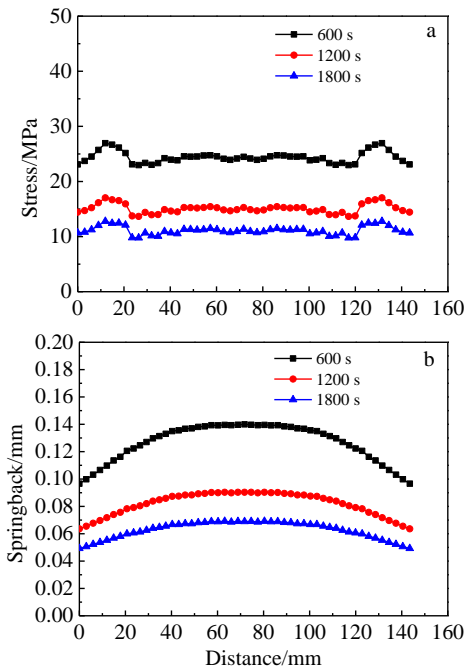


图 7 不同蠕变时间成形型材内部应力及回弹量曲线

Fig.7 Curves of internal stress (a) and springback (b) of the profiles after forming with different creep time

0.485%，占整个过程应变总量的 74.8%。由此可见，在蠕变时间达到 600 s 时，已经基本完成了大部分的变形。

3 热压弯曲蠕变实验验证

为验证有限元模拟的准确性，设计了与模拟等尺寸的成形模具进行工艺实验验证。模拟结果和工艺实验结果对比如图 10~图 13 所示。模拟与实验结果均显示，压弯过程中“L”型材有横向挠曲的趋势，横边向交角方

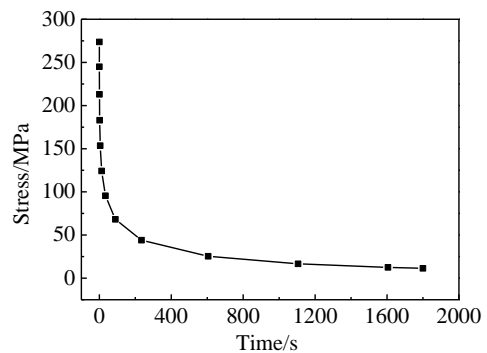


图 8 节点应力随蠕变时间变化曲线

Fig.8 Change curve of node stress with creep time

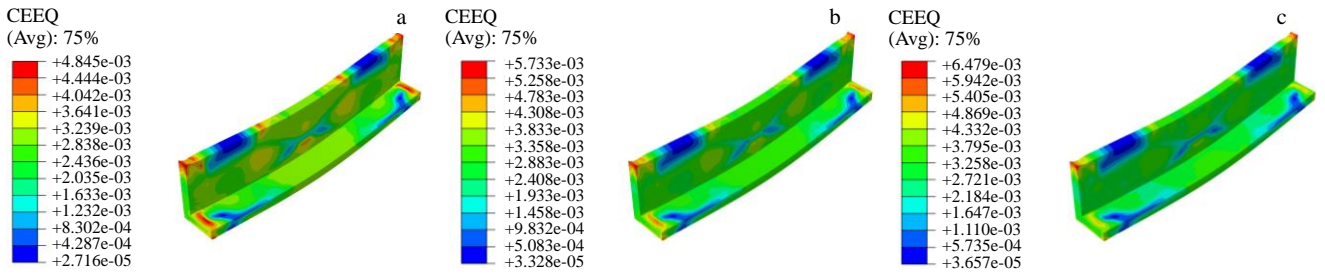


图 9 不同蠕变时间成形型材的等效蠕变应变

Fig.9 Equivalent creep strains of the profiles with different creep time: (a) 600 s, (b) 1200 s, and (c) 1800 s

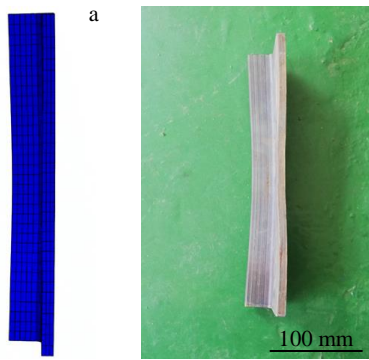


图 10 模拟和实验的型材的挠曲形貌

Fig.10 Flexure topographies of profiles of simulation (a) and experiment (b)



图 12 模拟和实验回弹后的型材

Fig.12 Springback profile of simulation (a) and experiment (b)

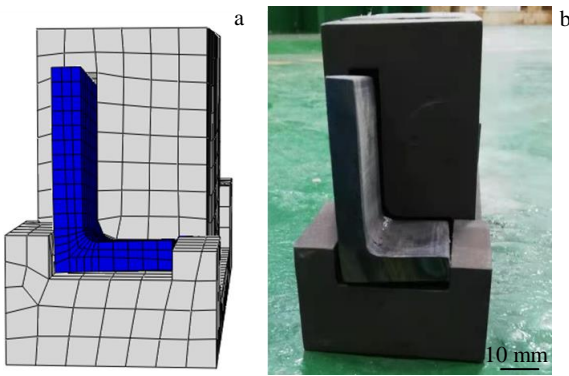


图 11 模拟和实验的型材成形后截面

Fig.11 Cross-section of formed profiles of simulation (a) and experiment (b)

向弯曲, 回弹后的型材状态一致。由图 13a 可以看出, 蠕变温度为 600 °C, 蠕变时间从 600 s 增加至 1800 s, 实验回弹量从 2.5 mm 降至 1.2 mm, 模拟的回弹量从 1.48 mm 降至 1.22 mm; 由图 13b 可以看出, 蠕变时间为 600 s, 蠕变温度从 500 °C 升至 700 °C, 实验回弹量从 3.2 mm 降至 1.7 mm, 模拟回弹量从 1.70 mm 降至 0.87 mm。蠕变温度

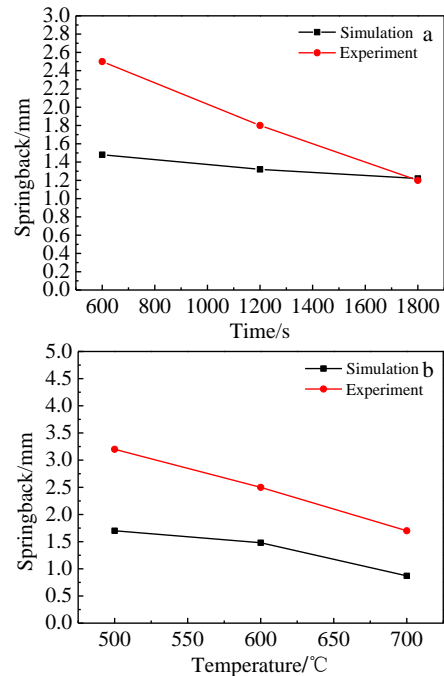


图 13 蠕变时间和温度对回弹影响的模拟与实验结果对比曲线

Fig.13 Comparison curves of simulation and experiment results: (a) influences of creep time on springback (at 600 °C) and (b) influences of creep temperature on springback (for 600 s)

600 °C、蠕变时间 1800 s 模拟与工艺实验结果具有一致性,回弹量随着时间和温度的变化规律基本吻合。由此说明本研究有限元模型可以模拟型材压弯蠕变成形过程。

根据模拟和实验结果,温度对热蠕变成形过程中应力松弛和回弹的影响更加显著,蠕变变形主要产生在前 600 s,考虑成形效率,蠕变成形温度在 700 °C、时间为 600 s 为宜。

4 结 论

1) 对于 TC4 钛合金 L 型材,在蠕变时间相同的条件下,随着蠕变温度升高,残余应力减小;在蠕变温度相同的条件下,随着蠕变时间增加,残余应力减小。温度对于蠕变过程中的应力松弛影响更加显著。

2) 蠕变温度和蠕变时间对回弹量和内部应力的影响规律具有很好的一致性,随着蠕变温度升高以及蠕变时间增加,回弹量减小。

3) 本研究建立的有限元模型可以用于模拟 TC4 钛合金 L 型材高温弯曲蠕变成形过程。

参考文献 References

- [1] Zhu Shiqiang(祝世强), Yang Wei(杨 微), Jia Chunli(贾春莉) *et al.* *Journal of Plasticity Engineering*(塑性工程学报)[J], 2017, 24(4): 178
- [2] Wang Chunyan(王春艳), Chen Guoliang(陈国亮). *Hot Working Technology*(热加工工艺)[J], 2015, 44(18): 78
- [3] Wang Mingwei(王明伟), Wang Chunyan(王春艳), Yang Jixin(杨继新) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2012, 41(3): 502
- [4] Li Jianwei(李建伟). *Dissertation for Master*(硕士论文)[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013
- [5] Liu Yong(刘 勇), Zhu Jingchuan(朱景川), Yin Zhongda(尹钟大). *Chinese Journal of Rare Metals*(稀有金属)[J], 2002(6): 509
- [6] Xiao Junjie, Li Dongsheng, Li Xiaoqiang. *Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2015, 44(5): 1046
- [7] Bi Jing(毕 静), Cui Xuexi(崔学习), Zhang Yanling(张艳苓) *et al.* *Journal of Mechanical Engineering*(机械工程学报)[J], 2019, 55(18): 43
- [8] Li Sujie(李苏杰). *Dissertation for Master*(硕士论文)[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2016
- [9] Ding Pan(丁 盼). *Dissertation for Master*(硕士论文)[D]. Beijing: Beihang University, 2015
- [10] Wu Jie(武 洁). *Dissertation for Master*(硕士论文)[D]. Changchun: Jilin University, 2015
- [11] Groche P, Hoppe F, Hesse D *et al.* *Journal of Manufacturing Processes*[J], 2016, 24: 62
- [12] Yu C L, Li X Q. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2011, 21(12): 2705
- [13] Miller J E, Kyriakides S, Bastard A H. *International Journal of Mechanical Sciences*[J], 2001, 43(5): 1283

Numerical Simulation of High Temperature Bending Creep of TC4 Titanium Alloy L Profile

Zhao Peng¹, Wu Wei², Fu Xuesong¹, Zeng Yuansong², Chen Guoqing¹, Zhou Wenlong^{1,3}

(1. Key Laboratory of Solidification Control and Digital Preparation Technology (Liaoning Province), School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

(2. AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China)

(3. Dalian Technology (Yingkou) Advanced Material Engineering Center Company Limited, Yingkou 115004, China)

Abstract: Based on ABAQUS finite element software, in view of TC4 titanium alloy L profile, under the conditions of creep temperatures of 500, 600 and 700 °C, and creep time of 600, 1200, 1800 s, the numerical simulation analysis of high temperature bending creep was carried out to study the influences of temperature and time on the springback after high temperature bending creep deformation of the L profile. The numerical simulation results show that the stress relaxation effect of TC4 titanium alloy is significantly affected by temperature. When the temperature is 700 °C, the residual stress after stress relaxation reduces to below 50 MPa; when the creep time is 600 s, the residual stress after stress relaxation has reduced to a stable limit value. With increasing the creep time continuously, the stress relaxation effect does not change significantly.

Key words: titanium alloy L-profile; numerical simulation; stress relaxation; springback

Corresponding author: Zhou Wenlong, Ph. D., Professor, Key Laboratory of Solidification Control and Digital Preparation Technology (Liaoning Province), School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, P. R. China, Tel: 0086-411-84709967, E-mail: wlzhou@dlut.edu.cn