

蠕变时效成形回弹预测及工装型面优化

马振武¹, 童国权¹, 徐宝林²

(1. 南京航空航天大学机电学院, 南京 210016;

2. 南京晨光集团有限责任公司, 南京 210006)

[摘要] 蠕变时效成形是一种将蠕变成形与时效强化同步进行的成形工艺。由于卸载后工件的回弹量较大, 因此回弹的预测和成形工装型面的优化很重要。以 LY12 的蠕变时效成形为研究对象, 对经典蠕变本构方程进行了修正并将其开发为 ABAQUS/CREEP 子程序。对板材的蠕变时效成形特点进行了模拟研究, 建立了 LY12 的回弹预测函数。试验结果表明: 其预测准确性较高。将变偏差调节算法与 ABAQUS/CREEP 相结合用于某蒙皮的成形工装型面的优化, 通过 7 次迭代, 型面精度达到 97.9%, 结果表明该组合算法优化速度快、精度高。

关键词: 蠕变时效; 子程序; 回弹函数; 型面优化

Springback Prediction and Tooling Profile Optimization of Creep Age-Forming

MA Zhenwu¹, TONG Guoquan¹, XU Baolin²

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,

Nanjing 210016, China;

2. Nanjing Chengguang Group Co., Ltd., Nanjing 210006, China)

[ABSTRACT] Creep age-forming is a metal forming process that combines creep forming with age strengthening. In consideration of the big unloading springback value for the forming parts, it's very important to predict the springback and optimize the tooling profile. For the creep age-forming of LY12, we fix the classical creep constitutive equation and develop it as a ABAQUS/CREEP subroutine. we simulate the creep and springback process and establish the springback function of LY12, and the accuracy of the predicted value is verified by experiments. Using the variable deviation adjusting algorithm, combines with ABAQUS/CREEP for the optimization of tooling profile, through 7 iterations, we get the profile accuracy of 97.9%. Results show this combinatorial optimization method is fast and owns high accuracy.

Keywords: Creep age; Subroutine; Springback; Profile optimization

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2017.1/2.066

蠕变时效成形 (Creep age-forming) 是一种将蠕变成形和时效强化同步进行的成形工艺。该工艺不仅具有成形件强度高、刚度大和抗疲劳裂纹等性能好的特点, 还具有成形过程简单, 成形速率快, 工装造价低的优点, 因此该工艺在航空工业中具有良好的发展和应用前景。目前, 蠕变时效成形技术在国外已得到深入研究并应用于工程生产, 如: 湾流 GIV 商务机的上机翼板, B-1B 远程战略轰炸机的机翼上下壁板和空客 A380 上机翼壁板等均采用该制造工艺。在国内, 也有不少学者致力于蠕变时效成形技术的研究, 但仍处于基础研究阶段。随着我国“大飞机”项目的启动, 该技术迫切需要深入研究和发

展^[1-4]。蠕变时效成形技术的关键问题是回弹的预测和成形工装型面的补偿优化。20 世纪 90 年代以来, 有关学

者就该问题做了大量研究, 如 Ho 等^[3]提出了统一本构理论, 在数学建模方面取得了一定进展。甘忠等^[5]通过进行单向应力松弛试验, 推导出了零件半径的计算公式, 并提出材料的应力极限是时效成形回弹的原因之一。然而, Ho 等提出的本构方程参数多, 需要进行大量试验进行参数拟合, 同时采用试验法建立零件回弹函数的方法易受环境影响且适应性较弱。基于上述问题, 本文采用有限元分析技术研究蠕变时效成形的回弹预测问题, 目的在于提出一种快速高效的预测方法。首先, 对经典蠕变本构方程进行修正并将其开发为 ABAQUS/CREEP 子程序。其次, 对蠕变时效成形的卸载回弹特点进行模拟研究, 建立回弹预测函数。最后, 通过某蒙皮的蠕变时效成形工装型面的优化, 验证方法的实用性。

表1 材料常数

| 常数 | A | m | n | σ_0 | B | C |
|----|-----------------------|------|-------|------------|--------|--------|
| 数值 | 7.47×10^{-5} | 3.49 | 0.354 | 169.3 | 2257.5 | -221.1 |

1 ABAQUS/CREEP 开发

1.1 本构模型的修正

经典蠕变理论认为,蠕变应变 ε 与温度 T 、时间 t 、应力 σ 及组织状态 s 有关^[6],可表示为:

$$\varepsilon_c = f(\sigma, T, t, s) \quad (1)$$

试验研究表明,在一定的温度、应力范围内,在固定的材料结构因子条件下,上式可分解为:

$$\varepsilon_c = f_1(\sigma), f_2(T), f_3(t) \quad (2)$$

据此建立的经典时间强化本构模型为:

$$\dot{\varepsilon}_c = A \sigma^n t^m \quad (3)$$

经典本构模型形式较简单、材料常数偏少,为更好地描述蠕变时效成形过程,对经典模型进行修正,修正后的本构模型为:

$$\varepsilon = A (\sigma - \sigma_0)^n (t^m + Bt + C) \quad (4)$$

式(3)、(4)中: A, B, C, m, n, σ_0 为材料常数。

1.2 材料常数的确定

试验材料为 LY12, 状态为 CZ。沿轧制方向,线切割加工标准蠕变试样。根据热处理规范^[7],取时效温度为 190℃,保温时间为 24h,应力分别为 175MPa、200MPa,在蠕变拉伸试验机上进行试验。用最小二乘法对蠕变拉伸试验曲线和本构方程进行拟合,优化算法选择麦夸特(Levenberg-Marquardt)结合全局优化算法,得到 LY12 在 190℃时蠕变本构方程中的材料常数,如表 1 所示。

1.3 CREEP子程序

ABAQUS 提供了一个蠕变模型来定义材料的蠕变行为,其塑性变形服从扩展的 D-P 模型^[8]。将修正的蠕变本构方程(4)采用 FORTRAN95 语言按照 ABAQUS 的二次开发规范编写 CREEP 子程序,与 ABAQUS 结合计算。CREEP 参与计算的流程如图 1 所示。

2 回弹预测函数

典型的蠕变时效成形工艺分为 3 个步骤^[4]:(1)加载。室温下,板料加载弯曲;(2)蠕变时效。在恒定载荷下,在时效温度下保持一定时间,部分弹性变形转变为蠕变变形,并产生应力松弛;(3)卸载。冷却,卸载回弹。根据蠕变时效成形工艺过程,以回弹率为目标,采用 ABAQUS/CREEP 模拟研究 190℃下各因素的影响规律。图 2 所示为所建立的有限元模型,模具型面为单曲率圆柱面,采用解析刚体单元,板料为 LY12,采用 S4R 壳单元,加载方式为气压均布载荷^[5]。

板料卸载回弹后,对板料拱高进行测量。定义公式:

$$\Delta H_n = H_0 - H_n \quad (5)$$

$$\alpha = \left(\frac{\Delta H}{H_0} \right) 100\% = \left(\frac{H_0 - H_n}{H_0} \right) 100\% = \left(1 - \frac{H_n}{H_0} \right) 100\% \quad (6)$$

式(5)中, H_0 为完全贴模时的拱高, H_n 为蠕变时效 n 小

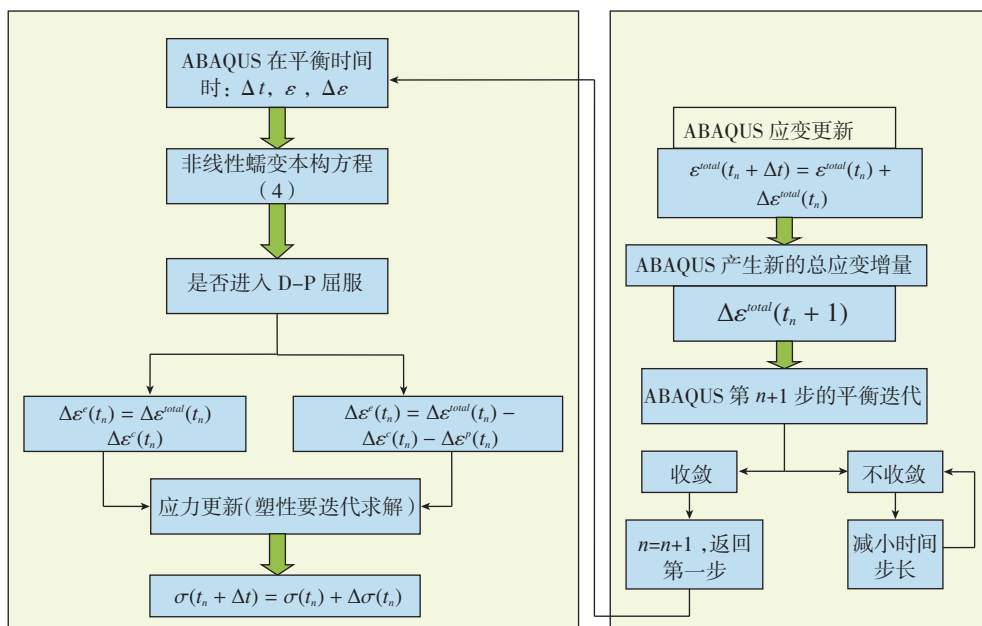


图1 计算流程图

Fig.1 Flow chart of calculating

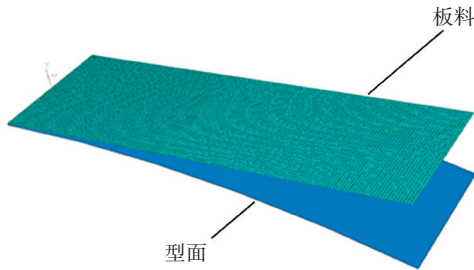


图2 有限元模型
Fig.2 Finite element model

时后卸载回弹的拱高, ΔH_n 为拱高差。式(6)中 α 为回弹率。

图3为 $T=190^\circ\text{C}$, $R=1000\text{mm}$, $H=2\text{mm}$ 时的回弹率随时间的变化曲线。由图可知,回弹率随着时间的增长逐渐减小,且变化率也逐渐减小。对上述曲线回归拟合得到函数关系, $\alpha=90.4-6.21\ln t$ 。函数关系式表明,回弹率与时间的对数存在较强的线性关系。

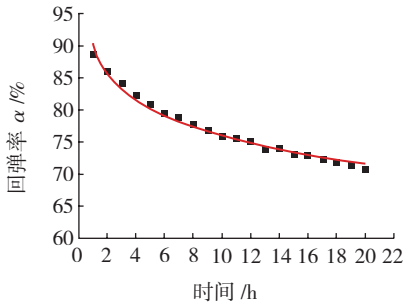


图3 回弹率与时间关系
Fig.3 Relationship between disability and time

图4为 $T=190^\circ\text{C}$, $R=1000\text{mm}$, $t=12\text{h}$ 时的回弹率随厚度的变化曲线,可知,回弹率随着厚度 H 的增加逐渐降低。对上述曲线回归拟合得函数关系, $\alpha=73.3+3.7e^{-H/2.7}$ 。函数关系式表明,在一定范围内,回弹率与厚度的指数存在较强的线性关系。

图5为 $T=190^\circ\text{C}$, $H=2\text{mm}$, $t=12\text{h}$ 时的回弹率随型面半径 R 的变化曲线,由图可知,回弹率随型面半径 R 的增大逐渐增大。模拟数据点分布近似于直线,对上述曲线进行回归拟合,得到型面半径 R 与回弹率的函数关系式 $\alpha=0.0027R+72.4$ 。

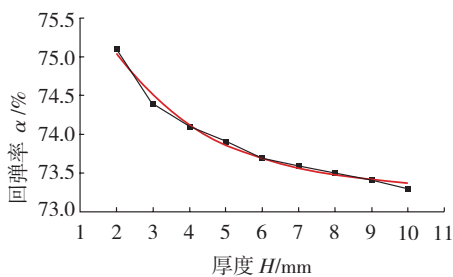


图4 回弹率与厚度关系
Fig.4 Relationship between disability and thickness

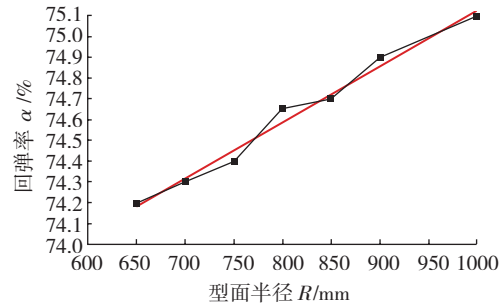


图5 回弹率与型面半径关系
Fig.5 Relationship between disability and radius

对蠕变时效成形温度为 190°C 时,回弹率 α 关于保温时间 t 、工件厚度 H 和型面半径 R 3个工艺参数的函数关系式进行统一回归,得到 LY12 的回弹预测函数:

$$\alpha=0.0019R + e^{-H/2.7} - 4.31\ln t + 118.7 \quad (7)$$

为验证公式(7)的预测准确性,设计如图6所示试验模具,进行试验验证。对比结果如表2所示,由表可知,试验值和计算值的误差率在5%以内,符合要求。由此证明,可以采用式(8)预测 LY12 蠕变时效成形的回弹率,同时也证明所开发的 CREEP 子程序模拟蠕变时效的准确性。

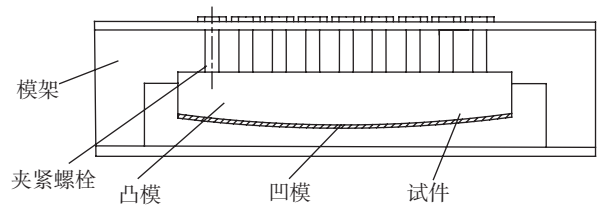


图6 试验模具
Fig.6 Experimental die

表2 对比分析

| 计算类型 | 试验值 /% | 计算值 /% | 误差值 /% |
|---|--------|--------|--------|
| $R=800\text{mm}, H=2^\circ\text{C}, t=24\text{h}$ | 77.68 | 74.69 | 2.99 |

3 成形工装型面优化

型面回弹补偿算法主要有误差逆推算法和定偏差调节算法。误差逆推方法,优化精度较高但是收敛速度较慢。定偏差调节方法,收敛速度较快,但是在偏差调节末期,优化精度不易保证。基于上述问题提出变偏差调节算法用于蠕变时效工装的型面优化,如图7所示。

板料加载后贴模于初始型面位置 S_0 。时效成形卸载后,板料回弹至位置 S_1 。在工装型面上选取一系列逆推点 A, B, \dots ,以 A 点为例加以说明。板料上与 A 点相吻合的点在卸载后的回弹值为 E_A ,将 E_A 乘以变调节系数 K 反加至 A 点,使工装型面“过弯”至 $S_1(A)$ 。以此方法逆推 B, C, \dots, N 点,由逆推后得到的一系列新

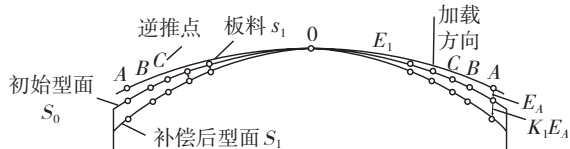


图7 变偏差调节示意图
Fig.7 Variable deviation

点构成型面为新的贴模位置。重新进行加载、回弹、变偏差计算、逆推,直到误差率符合要求。综上可得:

$$\begin{cases} E_n(N) = S_0(N) - S_{n-1}^*(N) \\ S_{n+1}(N) = S_n(N) + KE_n(N) \end{cases} \quad (8)$$

式中: $E_n(N)$ 为 $S_0(N)$ 与 $S_{n-1}^*(N)$ 的偏差; $S_0(N)$ 为初始型面 N 点处位置坐标; $S_{n-1}^*(N)$ 为 $n-1$ 次变偏差调节回弹后板料上对应 N 点处的位置坐标; $S_n(N)$ 为 n 次变偏差调节后型面上对应 N 点处的位置坐标; K 为偏差调节系数; K 值根据误差率 β 选取为:

$$K(\beta) = \begin{cases} 2 & 50 \leq \beta \\ 1.5 & 15 \leq \beta < 50 \\ 1 & \beta < 15 \end{cases} \quad (9)$$

以初始工件型面为迭代起点,当 $E_n(N) \leq \varepsilon_0$ 时停止迭代, ε_0 为可接受误差值。

某 LY12-CZ 蒙皮,厚度为 2mm,截面线处存在曲率变化。采用蠕变时效成形工艺,将上述变偏差调节算法结合 ABAQUS/CREEP,对工装型面进行补偿优化。步骤如下:(1)将成形零件表面区域化,提取边线、截面线和脊线的数学信息;(2)将提取的线条离散化,以关键点形式表达,直线段采用两点确定,线条曲率突变处加大点密度;(3)以关键点信息为基本元重构数模,使用 ABAQUS/CREEP 进行计算;(4)卸载,按式(8)进行迭代补偿,直到误差率 ε_0 符合要求;(5)提取符合要求的关键点信息,以逆向形成线条和区域表面的方法重构零件表面。

优化工装后的型面如图 8 所示,蠕变时效成形的零件如图 9 所示。蒙皮蠕变时效成形后经柔性多点托架检测,最大不贴模度为 0.4mm,尺寸精度符合要求。

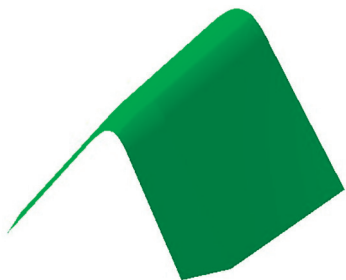


图8 优化后型面
Fig.8 Optimized profile

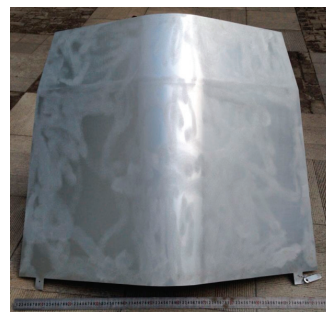


图9 蠕变时效成形的LY12-CZ蒙皮照片
Fig.9 Photo of a LY12-CZ skin by creep age-forming

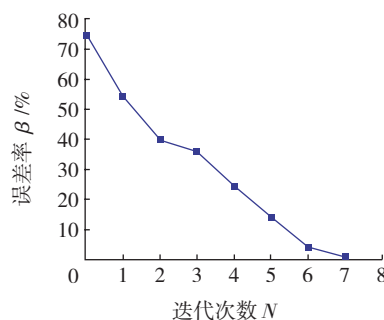


图10 迭代次数与误差率关系
Fig.10 Relationship between iterations and the error rate

图 10 所示为误差率与迭代次数的关系图,可知误差率 β 随迭代次数 N 的增加单调减小,初始误差率 β 为 74.7%,型面经过 7 次迭代,型面精度为 99.9%。结果表明:该组合优化方法优化速度快、精度高。

4 结论

本文主要对 LY12 的蠕变时效成形回弹预测和成形工装型面的补偿优化问题进行了研究,总结如下:

(1)对经典蠕变本构模型进行了修正,并将其开发为 CREEP 子程序。

(2)采用 CREEP 子程序建立了 LY12 的蠕变时效成形回弹预测函数。试验结果表明其预测准确性较高。

(3)以某型蒙皮件为例进行了蠕变时效成形工装型面的补偿优化,成形件检测结果显示成形件质量满足要求。研究表明:采用变偏差调节算法,结合 ABAQUS/CREEP,可以进行蠕变时效成形工装型面的补偿优化。

参考文献

- [1] LI C, WAN M, WU XD, et al. Constitutive equations in creep of 7B04 aluminum alloys[J]. Materials Science & Engineering A, 2010, 527(16):3623-3629.
- [2] HUANG L, WAN M, CHI CL, et al. FEM analysis of spring-backs

(下转第78页)