

基于响应曲面的时效成形材料参数修正

Material Parameter Modification for Age Forming Simulation Based on Response Surface Model

西北工业大学现代设计与集成制造技术教育部重点实验室 熊威 甘忠
中航工业成都飞机工业(集团)有限责任公司制造工程部 许旭东

[摘要] 为了提高时效成形中回弹现象的有限元仿真精度,使用均匀试验设计结合响应曲面设计的方法,建立了仿真误差对于材料参数的响应函数,求解出材料参数的修正解。以此法得到的仿真结果与试验结果相吻合。

关键词: 时效成形 材料参数修正 响应曲面 有限元分析

[ABSTRACT] A modified solution of material parameters is obtained by solving simulation error response function for material parameters, which is established by response surface methods combined with uniform design, in order to improve finite element analysis precise for springback in creep age forming. The simulation results with the modified solution are in accord with experimental results.

Keywords: Age forming Material parameter modification Response surface model Finite element analysis

时效成形技术是一种利用材料的蠕变特性,同时进行零件成形和时效处理的成形方法,主要适用于成形带有整体加强筋、变厚度的大型飞机整体壁板或者大型运载火箭壁板。由于受到材料时效处理制度的限制,时效成形的回弹量远大于通常钣金成形的回弹量。因而,回弹计算是时效成形的关键技术之一^[1]。目前,确定零件时效成形后回弹量的主要方法是有限元仿真,但是由于受到各种误差因素的影响,不易得到良好的效果,通常解决的方法是修改材料参数,从而使仿真结果和试验结果吻合,例如成武冬等^[2]通过修正蠕变方程的参数得到了较为精确的仿真结果,但是并没有说明具体的修正过程。

本课题使用均匀设计方法设计计算机仿真试验,使用ABAQUS作为仿真工具,通过有限次有限元仿真获得数据;使用二次回归的方法建立材料参数以及仿真精度的响应曲面,最终通过求解响应曲面得到材料参数的

满意修正解。

1 材料参数修正原理

假设有有限元模型中除了材料参数以外,其他因素引起的分析误差都是微小的,设有限元模型中待定的材料参数为 $[B]$,使用该有限元模型对一个实际的成形过程进行仿真,得到成形后的零件外形。如果仿真结果和实际试验结果足够接近,就说明材料参数可以较为准确地描述材料的变形行为^[3]。由此构造一个误差函数,希望能够求得函数的零点或者极小值点,最终以该点函数自变量的值作为 $[B]$ 的修正值。时效成形的有限元仿真模型可以看作是一个以材料参数为输入,仿真误差为输出的系统。由于系统比较复杂,不易推导材料参数和仿真误差的解析表达式,因此修正材料参数需要研究偏差 Q 和 $[B]$ 之间的定量关系,其中,一个合适的做法是通过适当的计算机仿真试验,结合响应曲面设计,近似构造一个具有简单表达形式的近似模型,并且对受多个变量影响的响应进行分析,最终达到优化响应值的目的。在常用的响应面方法中,以二阶响应面模型应用最为广泛^[4]。

2 有限元模型的建立

2.1 时效成形工艺过程

典型的时效成形工艺过程分为3个阶段^[5]:

(1)加载。通过热压罐加载使金属零件产生弹性变形,以便和具有一定型面的工装贴合。

(2)时效。保持零件和工装型面的贴合状态不变,在零件材料的人工时效温度内保温一段时间,在时效过程中施加到零件上的部分弹性变形在蠕变的作用下转变为永久塑性变形。

(3)卸载。保温结束后,去除零件的外加约束,零件发生自由回弹(回弹量可以达到70%)。

本课题考虑的时效成形试件为T型梁试件,试件长500mm,时效成形的工艺参数如图1所示,升温加压同时进行,经过5h的时效后,试件跟随热压罐降温降压。

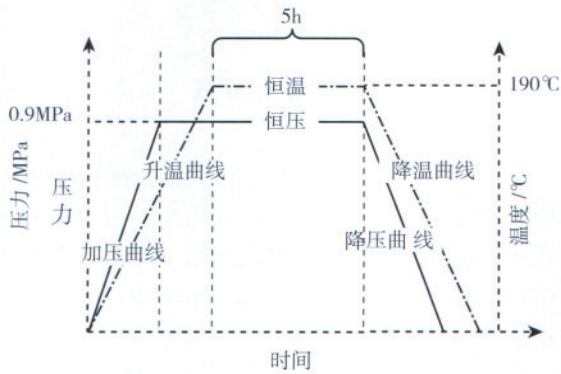


图1 (1bar=0.1MPa) 时效成形工艺参数
Fig.1 Process parameters in age forming (1bar=0.1MPa)

$$\dot{\epsilon}_c = B\sigma^n t^m \quad (4)$$

2.3 试件网格化及边界条件的建立

仿真中采用的单元模型为 C3D8R (六面体线性缩减几单元), 优点是对位移求解的结果精度较高; 网格存在扭曲变形时分析精度不会受到较大的影响; 在弯曲载荷作用下不易发生剪切自锁。有限元剖分的数学意义在于将一个连续域分割为有限个子域, 场函数在每个子域上是只包含有限个参数的简单场函数, 用这些子域的场函数的集合就可以近似的代表整个连续域的场函数。在实际建模过程中可以逐渐增加网格密度, 形成一个密度序列 (图 2), 综合考虑序列中相邻两项的仿真结果的差

2.2 材料模型的选取

时效成形过程包含了弹性变形、塑性变形和由蠕变导致的应力松弛现象, 因而针对三者分别定义了响应的材料属性。时效成形的加载一般是在弹性范围内, 但是对具有较高加强筋的壁板进行加载, 局部材料会发生塑性变形, 因此可以认为时效成形的加载变形是弹塑性的, 采用线性强化模型可以表示为:

$$\sigma = \begin{cases} E\varepsilon & \varepsilon \leq \varepsilon_y \\ \sigma_y + H(\varepsilon - \varepsilon_y) & \varepsilon > \varepsilon_y \end{cases}, \quad (1)$$

式中, E 是杨氏模量, H 是硬化系数, σ_y 、 ε_y 分别是屈服应力和屈服应变。

ABAQUS 中定义塑性材料数据的方法是给出一系列由真实应力和塑性应变构成的数据点。分析时, ABAQUS 自动在各数据点之间进行线性插值, 所以可以改写为:

$$\sigma = \begin{cases} E\varepsilon & \varepsilon \leq \varepsilon_y \\ \sigma_y + \frac{\sigma_{0.04} - \sigma_y}{0.04} \left(\varepsilon - \frac{\sigma_y}{E} \right) & \varepsilon > \varepsilon_y \end{cases}, \quad (2)$$

式中, $\sigma_{0.04}$ 是等效塑性应变为 0.04 时的等效应力。

蠕变现象机理复杂, 影响因素较多, 研究中希望以最少的变量反映蠕变的主要因素。建立蠕变理论时, 其中应用较多的是时间硬化理论和应变硬化理论。时间硬化理论认为产生蠕变速率 $\dot{\epsilon}_c$ 降低的主要原因是时间, 通常可以表述为:

$$\dot{\epsilon}_c = mA\sigma^n t^{m-1}, \quad (3)$$

式中, A 、 n 、 m 是与温度有关的材料常数。

为了和 ABAQUS 中的蠕变材料模型 “time hardening version of power-law model” 保持符号一致, 本文将上述表达式改写为:

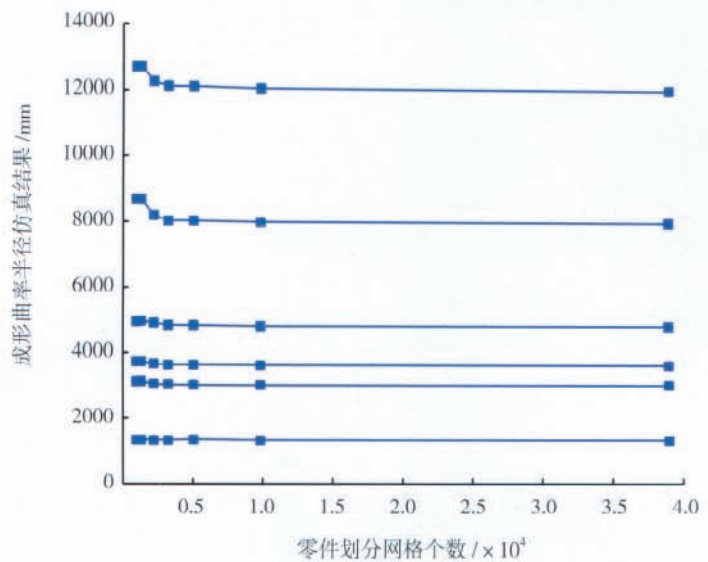


图2 网格疏密对仿真结果的影响
Fig.2 Variations of springback with mech size

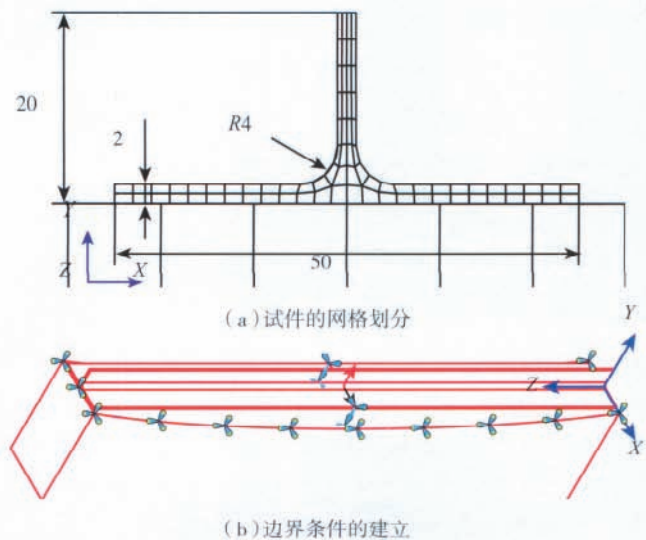


图3 试件的网格划分和边界条件的建立
Fig.3 Meshes and boundary conditions in the specimens

表1 均匀试验方案

$B \times 10^{-13}$	n	m	E	σ_y	$\sigma_{0.04}$
4.00	2.43	-0.336	69800	450	498
4.10	2.47	-0.298	68225	426	486
4.20	2.56	-0.300	71550	458	505
4.30	2.59	-0.310	67700	472	489
4.40	2.38	-0.282	70500	440	496
4.50	2.50	-0.318	70325	466	481
4.60	2.53	-0.326	67175	432	503
4.70	2.62	-0.292	71025	430	493
4.80	2.39	-0.330	68750	460	487
4.90	2.64	-0.314	69100	442	509
5.00	2.49	-0.288	69275	478	491
5.10	2.57	-0.322	71725	438	485
5.20	2.41	-0.294	67875	454	508
5.30	2.45	-0.308	71900	420	499
5.40	2.63	-0.328	70675	476	501
5.50	2.54	-0.280	68925	448	480
5.60	2.37	-0.316	67525	428	494
5.70	2.36	-0.304	69625	468	502
5.80	2.60	-0.332	69450	422	483
5.90	2.61	-0.284	67350	464	497
6.00	2.48	-0.334	71200	446	507
6.10	2.42	-0.290	71375	470	484
6.20	2.55	-0.338	68050	456	492
6.30	2.51	-0.286	69975	424	506
6.40	2.44	-0.306	67000	444	482
6.50	2.65	-0.302	70150	452	488
6.60	2.46	-0.320	68400	474	504
6.70	2.40	-0.324	70850	434	490
6.80	2.58	-0.296	68575	436	500
6.90	2.52	-0.312	72075	462	495

异和网格的规模,确定网格密度的适当值。这样确定的T型梁试件在筋条上的网格划分如图3(a)所示。T型梁试件在进行时效成形仿真时,在加载和回弹阶段都是使用静力分析,需要保证各个实体都不会出现不确定的刚体位移(rigid body motion),为此在加载前增设一个分析步骤,使试件具有微小的初始位移,如图3(b)所示,从而和模具建立可靠的接触关系,确保分析过程的稳

定。

3 有限元仿真与数据回归

3.1 试验方案设计

时效成形涉及的材料参数较多,希望通过最少的试验来获得最多的信息,所以选用均匀设计方法设计仿真试验;因为修正材料参数的数学处理过程是对误差函数求零点或者极小值点,因而希望误差函数在材料参数的输入空间上存在零点或极小值点。定性的分析时效成形过程,随着温度的升高蠕变速率加快,时效成形中的变形量增加使成形的回弹量减少,因而可以选择时效温度的上下界处的材料参数作为输入空间的上下界。2124 铝合金的人工时效温度为 185~195℃,根据王田修^[6]通过试验得出 2124T851 在 170℃、180℃、190℃时的蠕变参数,插值得到材料输入空间的上下界。选择 U_{30} (30^6) 建立均匀试验,如表 1 所示。

3.2 二阶响应曲面的建立

使用表 1 中的每组参数,对模具半径分别为 1000mm、1600mm、1750mm、2000mm、2250mm、2500mm 和 3000mm 的 T 型梁试件时效成形进行仿真,得到回弹后零件的半径,所得结果和试验值对比如图 4 所示。图中粗线是通过连接表示试验结果的点得到的,可以发现仿真结果包络了试验结果。如果假设仿真结果会随着参数连续变化,则可以认为误差函数在参数输入空间上存在零点。

二阶响应曲面的近似模型可以表示为^[4]:

$$\hat{y} = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{p < i} \sum \beta_{pi} x_p x_i, \quad (5)$$

式中, x_i 为输入参数, β_0 、 β_i 、 β_{ii} 、 β_{pi} 均为待定系数。

因为参数的绝对值相差很大,所以对参数进行编码变换,将各个参数的输入空间投影到 $[-1, 1]$ 区间上:

$$B' = (B - 5.45 \times 10^{-13}) / 1.45 \times 10^{-13}; \quad (6)$$

$$n' = (n - 2.505) / 0.145; \quad (7)$$

$$m' = (m + 0.309) / 0.029; \quad (8)$$

$$E' = (E - 69537.5) / 2537.5; \quad (9)$$

$$\sigma'_y = (\sigma_y - 449) / 29; \quad (10)$$

$$\sigma'_{0.04} = (\sigma_{0.04} - 494.5) / 14.5. \quad (11)$$

通过比较使用 $Q = \sum (R_i - R_{i0})$ 描述仿真结果和试验结果的偏差,进行二次回归,结果为:

$$\begin{aligned} Q = & 8134.4929 - 7323.4955B' - 21009.3103n' \\ & - 6561.9316m' - 3272.8098E' + 3414.8717\sigma'_y \\ & + 177.3382\sigma'_{0.04} + 287.3597B'^2 + 4148.3661B'n' \\ & + 3195.1285B'm' + 1866.8117B'E' - 1518.7564B'\sigma'_y \\ & + 721.1178B'\sigma'_{0.04} + 5823.7550n'^2 + 4012.1955n'm' \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &+2279.6713n'E' - 3\ 624.0449n'\sigma_y' + 1177.9223n'\sigma_{0.04}' \\
 &+1393.8792m'^2 + 1734.9311m'E' - 123.8003m'\sigma_y' \\
 &+ 673.0266m'\sigma_{0.04}' + 443.3543E'^2 - 600.9885E'\sigma_y' \\
 &+ 716.3276E'\sigma_{0.04}' - 1521.9160\sigma_y'^2 + 2345.5607\sigma_y'\sigma_{0.04}' \\
 &- 226.1273\sigma_{0.04}'^2 \quad \circ \quad (12)
 \end{aligned}$$

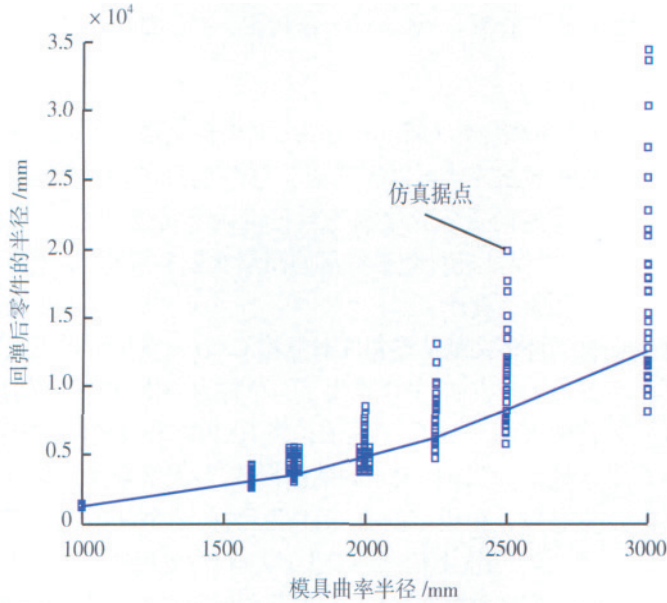


图4 零件回弹半径的仿真值和试验值对比

Fig.4 Comparisons of springback radiuses between simulation data and test data

表2 修正后的材料参数

B	n	m	E	σ_y	$\sigma_{0.04}$
5.628×10^{-13}	2.556	-0.306	69677	421.0	494.5

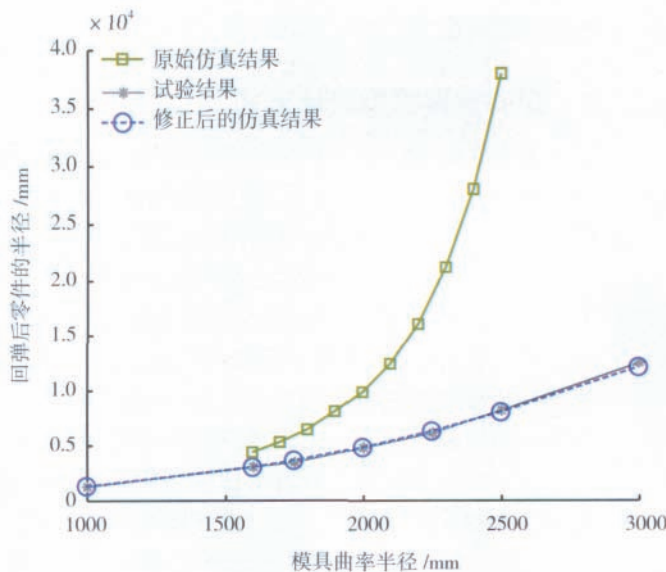


图5 参数修正结果验证

Fig.5 Verification of modified parameters

4 参数修正结果及讨论

4.1 修正结果与验证

求式(12)在 {0,0,0,0,0,0} 附近的零点,经过编码逆变换得到修正后的参数如表2所示。

根据上述偏差描述方式, $Q=0$ 只是偏差为零的一个必要条件而不是充分条件,而且式(12)在参数输入空间上有无穷多个零点。因此必须对修正后的材料参数进行验证。使用表2中的材料参数,对上述T型梁的时效成形过程进行仿真,得到回弹后的零件弯曲半径和试验结果对比如图5。

图中的原始仿真结果是王田修^[6]使用未经修正的材料参数得到的仿真结果。对比试验结果和使用修正后材料参数得到的仿真结果,可以发现仿真结果很接近于试验结果。

4.2 修正结果与标准结果的对比

根据《中国航空材料手册·第3卷·铝合金·镁合金》2124T851的拉伸弹性模量在常温下是72GPa,而修正得出的弹性模量是69577MPa。材料参数的差异来自以下2个方面:

(1)时效成形的过程需要对试件加热,弹性模量会随着温度的升高而降低,而这种材料性能的改变并不能够在本课题所使用的方程中得到反映。

(2)有限元建模误差或者试验误差。

5 结论

使用ABAQUS建立了T型梁试件的时效成形有限元仿真模型,综合运用响应曲面设计和均匀试验方法建立了时效成形的参数修正模型,对时效成形材料参数进行了修正从而提高了有限元仿真的精度。

参考文献

[1] 曾元松,黄遐,黄硕.蠕变时效成形技术研究现状与发展趋势.塑性工程学报,2008,15(3):1-8.
 [2] 成武冬,甘忠,王田修,等.热压罐时效成形过程的有限元分析.航空制造技术,2008(17):85-89.
 [3] 吴建军,周维贤.板料成形性基础.(1版).西安:西北工业大学出版社,2004.
 [4] 胡龙飞,刘全坤,王成勇,等.基于响应面模型的铝合金壁板挤压成形优化设计.中国机械工程,2008,19(13):1630-1633.
 [5] Jeunechamps P P, Ho K C, Lin J, et al. A closed form technique to predict springback in creep age-forming. International Journal of Mechanical Sciences, 2006, 48: 621-629.
 [6] 王田修.时效成形的有限元模拟.西安:西北工业大学,2008.

(责编 岭雾)