

## 热压罐时效成形过程的有限元分析

## FEA of Autoclave Age Forming

西北工业大学 成武冬 甘 忠 王田修 张志国

[摘要] 基于 ABAQUS 软件对时效成形过程进行有限元分析。在数值模拟分析的过程中,通过改变各个参数的数值来研究成形规律。最后得出了最佳工艺条件,并在最佳工艺条件下研究了成形规律。

关键词: 时效成形 模拟和优化 蠕变方程 有限元分析

[ABSTRACT] The FEA of age forming process is carried out based on ABAQUS software. During the process of numerical simulation analysis, the age forming law is studied by changing each parameter. Finally, the optimal condition of process is obtained and the age forming law is researched under this condition.

Keywords: Age forming Simulation and optimization Equation of creep FEA

热压罐时效成形技术 (Autoclave Forming Aluminum), 是指先对试件施加一定预变形, 加温后使部分弹性应变转化为塑性变形的一种新型的铝合金成形方法<sup>[1]</sup>。

该技术通过将弹性变形转化为永久的塑性变形来达到成形的目的, 具体可以分成 3 个阶段:

(1) 加载阶段: 对工件施加初始应力, 获得初始变形或使工件贴模(见图 1a);

(2) 时效阶段: 保持工件外形不变, 在一定温度、压力下静置一段时间, 使材料发生时效效应(见图 1b);

(3) 卸载阶段: 工件冷却至室温, 去除外加约束, 使其自由回弹(见图 1c)。

在成形的同时, 热压罐时效成形技术改善了合金的微观组织, 提高材料强度, 降低残余内应力水平, 增强耐应力腐蚀能力, 是将零件成形和人工时效处理相结合的新型钣金成形工艺, 是航空先进制造技术的发展重点, 也是长寿命、高可靠制造技术重点发展的方向之一。

由于时效成形不需要大吨位专用设备, 而且具有成形效果好、成形质量稳定、生产效率高、工装简单、人工干预少等优点, 非常适合用于大平面尺寸、小曲率、型面结构复杂、准确度高的框肋腹板和壁板类零件的精密成形。因此, 开展时效成形技术研究, 能提高我国飞机的整体制造水平, 具有重要的现实意义。

但是在国内, 时效成形的理论研究和工程应用都还处于探索阶段。使用数值方法对时效成形过程进行分析, 可以加快该技术的发展, 降低研制成本, 从更深层次上了解时效成形过程。因此, 对时效成形过程的数值分析具有重大意义。

## 1 时效成形过程使用的本构关系

该模拟过程主要针对时效成形试验过程, 时效成形试验主要是在热压罐中进行的, 热压罐的特点是高温高压, 发生的力学现象比较复杂, 主要有弹性应变、塑性应变、蠕变、应力松弛、热应力等<sup>[2]</sup>。其中, 在时效阶段发生的力学现象主要是蠕变与应力松弛, 两者的



图 1 时效成形过程示意图

Fig.1 Process of age forming

本质相同, 应力松弛也可看作是应力不断降低时的多级蠕变, 因此在这个过程中可以使用蠕变方程表征时效阶段的应力应变关系。

在常用的蠕变方程中, 蠕变应变是蠕变时间、初始应力以及蠕变温度的函数, 其单轴应力状态下的函数表达式可以表示为以下形式:

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

对于金属材料而言, 蠕变曲线的第一、第二阶段往往具有几何相似的性质, 故方程的右边可以写成三项乘积的形式, 具体的表达式如下:

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

不考虑温度的情况下, 前两项可以写成如下形式:

$$f_1(\sigma) = A \sigma^n \quad (3)$$

$$f_2(t) = D t^m \quad (4)$$

在式(3)、(4)中, A、n、D 以及 m 都是材料常数, 与蠕变过程无关, 如果蠕变是在不变温度的情况下发生的, 该情况下的蠕变方程可以表示为以下形式:

$$\epsilon_c = B \sigma^n t^m \quad (5)$$

$$\dot{\epsilon}_c = m B \sigma^n t^{m-1} \quad (6)$$

通常情况下, 式(5)、(6)用来描述蠕变速率逐渐减小的蠕变初始阶段, 蠕变初始阶段通常称为硬化阶段。上述方程中共有 3 个参数 B、m、n 需要确定, 经过一系列的蠕变试验, 得到的蠕变本构方程的参数如表 1 所示。

表 1 不同温度下蠕变本构方程的参数值

温度/	B	m	n
190	$5.31 \times 10^{-13}$	-0.303 5	2.513 2
180	$3.01 \times 10^{-13}$	-0.278 9	2.381 5
170	$1.93 \times 10^{-13}$	-0.269 2	2.253 5

## 2 有限元模型的分析过程

试验件的有限元模型是通过 CATIA 软件导入的 (存为后缀名为 .catipart 的格式), 使用的试验件和模具的装配形式如图 2 所示。

试验中使用的材料是铝合金 2124, 其屈服强度为 393MPa, 抗拉强度为 485MPa, 杨氏模量约为 67GPa, 泊松比约为 0.35。塑性参数也是通过试验测得的, 通过在拉伸曲线上选取有限个点进行参数拟合, 将表格 1 中的蠕变参数直接输入到 ANBAQUS 中。

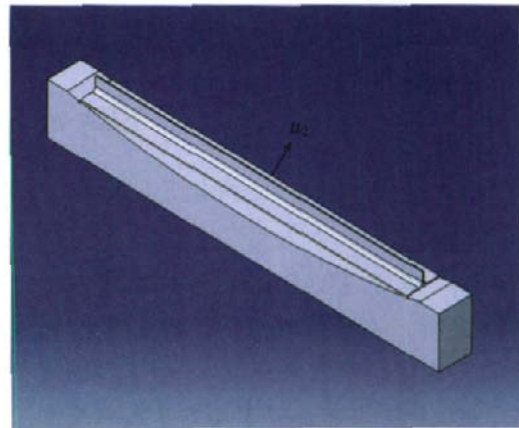


图 2 试验件和模具装配图

Fig.2 Assembly diagram of die and sample

接触性质的定义在该分析中起到了比较重要的作用, 将试验件的下表面设定为主接触面 (Master Surface), 支撑件的上部平板部分设定为次接触面 (Slave Surface), 且两个面之间的摩擦性质假设为理想状态, 摩擦系数为 0。

加载是通过热压罐来施加的, 所施加的压力均匀地分布在试验件的上表面。边界条件的定义需要尽量与实际情况相符合, 经过实际调研, 将模具的下端固定, 约束所有方向的位移; 此外为了消除试验件的横向位移需要约束试验件在  $u_2$  方向的自由度。

网格的划分对于最后的结果有着重要的影响, 网格划分不恰当可能会导致计算结果不收敛。对于特别复杂的系统, 需要特别的网格划分办法, 但是由于该系统不是十分复杂, 使用系统自带的网格划分办法可以满足要求。结合实际情况, 网格划分中使用了扫掠网格划分办法, 最后生成了 C3D20R 单元。

## 3 误差分析

有限元模拟完成以后提交模拟分析, 得到的模拟分析数据如表 2 所示:

经过与实际试验数据比较可以看出, 试验数据与模拟数据有一定的误差, 如图 3 所示, 其中虚线部分

表 2 模具曲率半径对回弹的影响

模具曲率半径/mm	2 400	2 200	2 000	1 800	1 600
试件最大挠度/mm	1.114	1.944	3.167	4.856	7.139
试件曲率半径/mm	2 8052	16 075	9 867	6 435	4 377

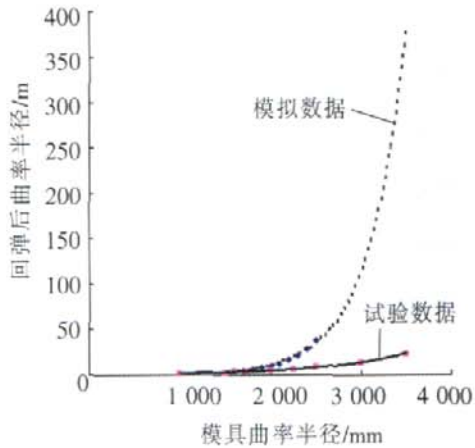


图3 试验数据与模拟数据的比较  
Fig.3 Comparison between test data and simulation data

的曲线是数值模拟数据,实线部分的曲线是试验数据拟合的曲线。

通过图3中试验数据与数值模拟数据的比较可以看出,在弯曲回弹曲率半径比较小的情况下,数值模拟仿真的数据与试验数据的误差比较小,但是在回弹曲率半径比较大的情况下误差就变得特别大,以至于不可以接受,误差分析如表3所示。

表3 模拟数据与试验数据的比较

曲率半径/mm	1 600	1 800	2 000	2 200	2 400
模拟回弹后半径/mm	4 377	6 435	9 867	16 075	28 052
试验回弹后半径/mm	3 048	4 192	4 780	6 180	6 574
误差/%	43.6	53.5	106.4	160.1	326.7

经过上述分析可以知道,模拟分析的结论和实际数据还有一定的差距,因此需要对原程序进行修正。经过对原有程序的分析可以知道,决定回弹的主要因素是蠕变方程中的参数,因此只要修正蠕变方程的参数,就可以得到较为精确的结果。

经过处理,试验数据与模拟数据如图4所示,其中虚线的部分是数值模拟仿真的数据曲线,实线部分是试验数据拟合的曲线。

可以看出,经过修正以后误差降低了很多,但是仍然存在着模具曲率半径越大,误差越大的情况,但是总体上讲误差的范围在1.5%~5%之间,通过误差分析可以发现,修正后的误差基本上在程序允许的范围内,可以使用该子程序对时效成形过程进行分析。

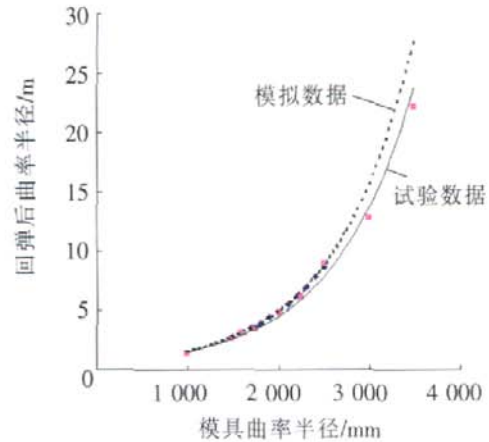


图4 修正后试验数据与模拟数据比较  
Fig.4 Comparison between test data and revised simulation data

#### 4 成形规律分析

时效成形的各个影响因素之间既有相互之间的联系又各自对回弹有一定的影响。为了简化分析过程,先确定其他的参数,只考虑某一个参数的影响,最后再综合考虑各个因素的影响。

##### (1) 时效温度的影响。

由于蠕变试验只研究了170、180以及190时的情况,因此数值模拟仿真也仅仅研究上述温度下的回弹影响,表4所示为这些温度下的回弹情况。

表4 某条件下时效温度不同时的回弹情况

时效温度/	170	180	190
曲率半径/mm	5 101.6	4 857.1	3 489.9

在上述的数值模拟数据中,选取一些数据点与试验数据相比较,发现误差范围在7%以内,因此可以认为模拟数据是可信的。通过前面的数据我们知道,在数值模拟的几个时效温度中,时效温度越高,时效成形的效果就越明显。

但是,结合现有的时效理论可以知道,在一般情况下温度越高,时效成形的效果就会越明显,但是时效温度有上限(2124铝合金的温度上限温度约为200),超过这个上限就会发生其他的现象。

##### (2) 时效时间的影响。

为了研究时效时间对时效成形质量的影响,在其他条件相同的情况下,改变时效的时间,得到的回弹的情况如图5所示。

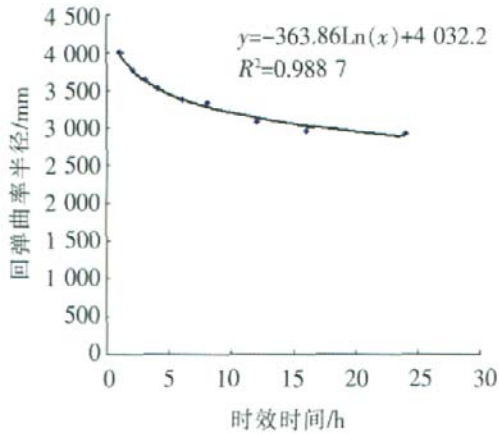


图5 时效时间与回弹曲率半径的关系

Fig.5 Relation between age time and springback curvature radius

在上述的数值模拟数据中,选取一些数据点与试验数据相比较,发现误差范围在5%以内,因此可以认为模拟数据是可信的。

可以看出:时效时间越长,时效效果越明显;但是时效时间达到一定的数值以后,时效效果的变化就不明显了。具体对于铝合金2124来说,时效时间大于12h以后,时效效果的变化就不明显了。因此,通过数值模拟分析可以知道最佳的时效时间是12h。

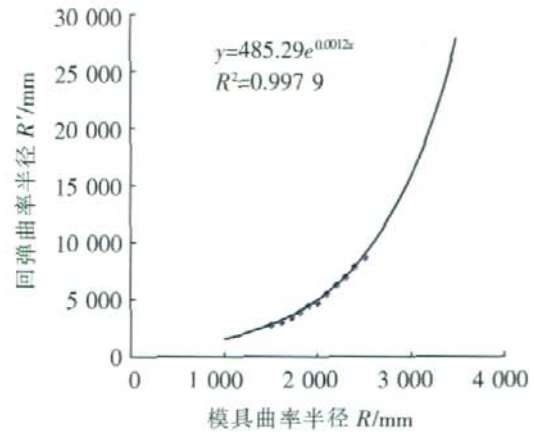
(3) 模具曲率半径的影响。

为了研究模具曲率半径对时效成形质量的影响,在其他条件相同的情况下,改变模具的曲率半径,得到的回弹的情况如图6所示,其中(a)图表示模具曲率半径和回弹曲率半径之间的关系,(b)表示模具曲率半径的对数与回弹曲率半径的对数之间的关系。在图6中取某些数据与试验数据比较,发现两者之间的误差范围在3%~6%之间,可以认为这些模拟仿真数据是可信的。

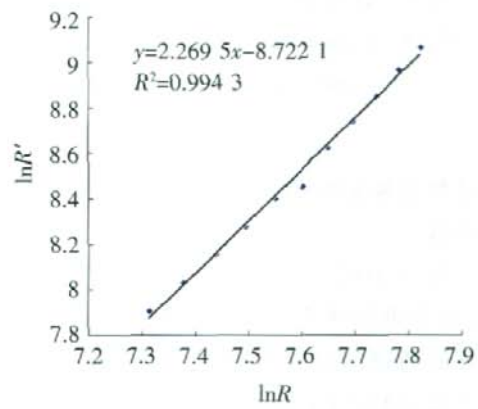
通过图6可以看出,模具曲率半径的自然对数与回弹曲率半径的对数存在明显的线性关系。通过对不同几何形状的试验件进行分析发现这些试验件都存在相似的规律。因此,在试验件的外形确定的情况下,模具的曲率半径是可以设计出来的,这对于实际生产有重大意义。

(4) 筋条高度的影响。

为了研究筋条高度对成形的影响,在其他情况相同的条件下,改变试验件的筋条高度,得到的回弹的情况如图7所示。在图中取某些数据与试验数据比较,发现两者之间的误差范围在5%~8%之间,可以认为



(a)



(b)

图6 模具曲率半径与回弹曲率半径之间的关系

Fig.6 Relation between die curvature radius and springback curvature radius

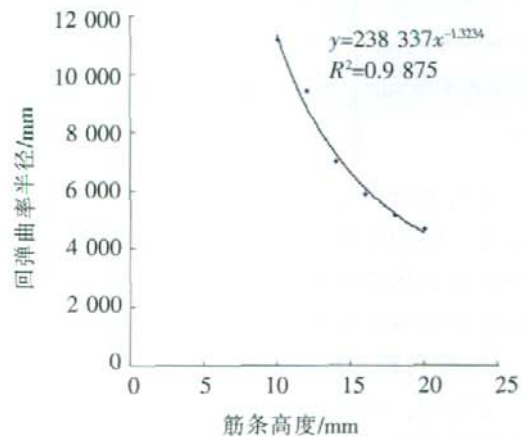


图7 筋条高度与回弹曲率半径的关系

Fig.7 Relation between rib height and springback curvature radius

为这些模拟仿真数据是可信的。

通过图7可以看出,筋条的高度与回弹曲率半径

