

基于宏模板技术的橡皮囊成形仿真研究

Rubber Diaphragm Forming Simulation Based on Macro Template Technology

南京航空航天大学机电学院 胡丹 鲍益东
上海飞机制造有限公司 尹铂淞 刘垒 王厚闽

[摘要] 橡皮囊成形是飞机钣金件的一种重要成形工艺方法。有限元数值模拟技术越来越多地被用于分析板料成形过程中可能存在的问题。本文针对目前大多数有限元软件没有针对橡皮囊成形模块的现状,基于橡皮囊成形工艺,应用 PAM-STAMP 2G 软件提供的开发宏模板的功能,以一个典型的钛合金钣金零件为例,研究钛合金钣金零件橡皮囊成形仿真技术,为飞机钛合金钣金零件的橡皮囊成形设计和生产提供依据。

关键词: 橡皮囊成形 飞机钣金件 数值模拟 宏模板

[ABSTRACT] Rubber diaphragm forming is a very important manufacture method in aircraft fabrication. Finite element numerical simulation technology has been increasingly used in the analysis of possible problems in the process of sheet metal forming, for most of the finite element software doesn't have modules for the rubber diaphragm forming, based on the rubber diaphragm forming process, using PAM-STAMP 2G the function of development of macro template, the rubber diaphragm forming simulation technology of the titanium sheet metal parts is researched with a typical titanium alloy sheet metal parts. The simulation results are analyzed, which provides the basis for the design and production of rubber diaphragm forming of aircraft titanium sheet diaphragm metal parts.

Keywords: Rubber diaphragm forming Aircraft sheet metal parts Numerical simulation Macro template

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.09.097

橡皮囊成形是飞机钣金零件的一种重要成形工艺方法。其原理是利用橡皮囊作为弹性凹模(或凸模),用液体作为传压介质,使金属板料随刚性凸模(或凹模)成形的一种软模凸模(或凹模)的成形方法^[1]。与常规的冲压生产相比,橡皮囊成形主要优点是:可成形复杂形状零件,如非轴对称件、斜底件等,并可同时完成下陷和切边的工作;可部分取代刚性模落料、弯曲和拉深等工艺方法,显著缩短生产准备周期,成形过程中模具的应

力集中和冲击现象少,模具材料要求不高,比钢模拉深的模具成本降低约 70%~80%;在高压和摩擦力的作用下,材料的塑性可得到充分发挥,零件的回弹小,贴模精度和形状冻结度显著提高,手工校形量小;厚度变化均匀,材料内部的损伤率显著降低,大大提高了零件的成形质量和结构的可靠性,零件表面由于橡皮的紧贴,无擦伤痕迹,零件抗疲劳强度提高;能耗低、噪音低、污染小等。橡皮囊成形为品种多、产量少的飞机钣金零件生产提供一种极为适宜的成形工艺方法^[2],使其在飞机制造领域得到广泛的应用。

橡皮囊成形的有限元数值模拟技术,随着计算机技术、有限元技术和塑性加工理论的发展日趋成熟^[3-4],将数值模拟的分析方法应用于橡皮囊成形,是一种新的研究途径^[5-10]。目前,应用比较广泛的板成形 CAE 软件有 Autoform^[11-12]、Dynaform^[13-14]和 PAM-STAMP^[15-17]。这 3 种软件都是商品化软件,其中前两者被广泛应用于汽车行业,用其指导和优化板料设计,模拟板料成形过程,明显减少了模具的试模次数,缩短模具制造周期,降低了成本;而 PAM-STAMP 2G 软件被广泛应用于航空工业中,是 ESI 公司于 2002 年推出的第二代模拟仿真系统,实现了各功能模块之间的无缝连接,所有的冲压模拟数据均能在各功能模块间共享。目前,这些软件都没有针对橡皮囊成形开发具体对应的模块, PAM-STAMP 2G 软件没有自带的针对于橡皮囊成形的宏模板,但是它提供了宏模板开发工具,基于橡皮囊成形的基本工艺要求,开发出了橡皮囊成形宏模板。在进行橡皮囊成形模拟时,可以方便地进行一系列连续模拟操作,使原本复杂的参数设置得到简化。

本文采用 PAM-STAMP 2G 2011 软件开发宏模板的功能,基于橡皮囊成形工艺,开发橡皮囊成形宏模板,将基于宏模板的橡皮囊成形模拟与传统手动参数设置的成形模拟进行比较,并通过实际零件进行验证宏模板的高效与便捷。

1 橡皮囊成形模拟算法的选择

(1) 动态显示算法。

动态显示算法最大优点是较好的稳定性。另外,

动态显式算法采用动力学方程的一些差分方法(如广泛使用的中心差分法、线性加速度法、New mark 法和 Wilson 法等),不需要进行平衡迭代,计算速度快,也不存在收敛控制问题,最小时间步取决于最小单元的尺寸。该算法需要的内存也比隐式算法要少。因此,动态显示算法主要应用于板成形中的精密冲裁、冲压拉深、橡皮囊成形、液压胀形等高精度成形过程求解。

进行有限元模拟时,计算程序会根据单元节点信息形成一个基本的运动方程:

$$M\ddot{u}+C\dot{u}+Ku=Q, \quad (1)$$

式中,这里 M 为质量矩阵; C 为阻尼矩阵; K 为刚度矩阵; u 为位移矩阵。对于复杂问题(材料非线性等), K 里面也含有未知数 u ,即 $K(u)$ 。 u, \dot{u}, \ddot{u} 分别为位移、速度和加速度矢量, Q 为外力和接触力矢量。

在显示算法中,对加速度和速度一般做如下假设:

$$\ddot{u}_t = \frac{1}{\Delta t^2} (u_{t-\Delta t} - 2u_t + u_{t+\Delta t}), \quad (2)$$

$$\dot{u}_t = \frac{1}{2\Delta t} (u_{t-\Delta t} - u_{t+\Delta t})。 \quad (3)$$

从上式中可知:对时间的微分关系。被简化成了简单的线性关系。将式(2)和(3)代入到式(1)中,进而得到中心差分法的递推公式:

$$\begin{aligned} & \left(\frac{1}{\Delta t^2} M + \frac{1}{\Delta t} C \right) u_{t+\Delta t} = Q_t - \left(K_t - \frac{2}{\Delta t^2} M \right) u_t \\ & - \left(\frac{1}{\Delta t^2} M - \frac{1}{2\Delta t} C \right) u_{t-\Delta t}。 \end{aligned} \quad (4)$$

这个方程左式系数为常数矩阵,右边最后的计算结果是一个常数向量,最后要求出 $u_{t+\Delta t}$ 很容易。

(2) 静态隐式算法。

静态隐式算法也是解决金属成形问题的一种方法。静态隐式算法基于虚功原理,一般需要对静态平衡方程迭代计算。理论上在这个算法中的增量步可以很大,但是,实际运算中要受到接触以及摩擦等条件的限制。随着单元数目的增加,计算时间呈平方次增加。因此,隐式算法用来求解与时间无关的静力学问题,如重力加载、回弹计算等一般的非线性问题。

在隐式算法 (Implicit) 中 u, \dot{u}, \ddot{u} 的表达式就相对复杂。在 Δt 时间域里,加速度、速度和位移的关系:

$$\dot{u}_{t+\Delta t} = \dot{u}_t + [(1-\delta)\dot{u}_t + \delta\ddot{u}_{t+\Delta t}]\Delta t, \quad (5)$$

$$u_{t+\Delta t} = u_t + \dot{u}_t\Delta t + \left[\frac{1}{2} - \alpha \right] \ddot{u}_t\Delta t^2 + \alpha\ddot{u}_{t+\Delta t}\Delta t^2, \quad (6)$$

式中, α 和 δ 取不同的值代表不同的数值方案。将式(5)和(6)代入式(1)中得到式(7)。

为了得到计算结果,在每一个时间步长的计算中,求解器都必须进行一定量的迭代计算,当计算满足收敛条件时,迭代结束,才能获得当前时间步长下的位移增

量 $u_{t+\Delta t}$ 。

$$\begin{aligned} & \left(K_{t+\Delta t} + \frac{1}{\alpha\Delta t^2} M + \frac{\delta}{\alpha\Delta t} C \right) u_{t+\Delta t} \\ & = Q_{t+\Delta t} + M \left[\frac{1}{\alpha\Delta t^2} u_t + \frac{1}{\alpha\Delta t} \dot{u}_t + \left(\frac{1}{2\alpha} - 1 \right) \ddot{u}_t \right] + \\ & C \left[\frac{\delta}{\alpha\Delta t} u_t + \left(\frac{\delta}{\alpha} - 1 \right) \dot{u}_t + \Delta t \left(\frac{\delta}{2\alpha} - 1 \right) \ddot{u}_t \right] \end{aligned} \quad (7)$$

因此,基于橡皮囊成形工艺的特点,成形过程是与时间有关的动力学问题,成形模拟过程采用动态显示算法,回弹属于非线性静力问题,回弹模拟过程采用静态隐式算法。

2 橡皮囊成形宏模板开发

PAM-STAMP 2G2011 软件为高级用户提供了 1 个宏构建环境——冲压工具箱 (Stamp tool kit),使用户可以根据板料成形过程的特点,构建自己特有的宏模板快速设定来完成所需要的模拟任务。

在定义橡皮囊成形的宏模板前,首先要激活主菜单单中环境变量中的高级模型 (Advanced mode)。设定创建宏的工具箱主要由菜单栏、板料区、对象工具条、宏命令设置区(包括宏信息栏、工具栏、参数栏、预览栏)、对象操作区、属性树显示区、操作信息区 7 部分组成。

图 1 为橡皮囊成形机的结构示意图。主要的工作单元有:橡皮囊 (Rubber membrane)、内压单元 (fluid cell)、板料 (sheet) 和压力内腔模具 (Press housing)。

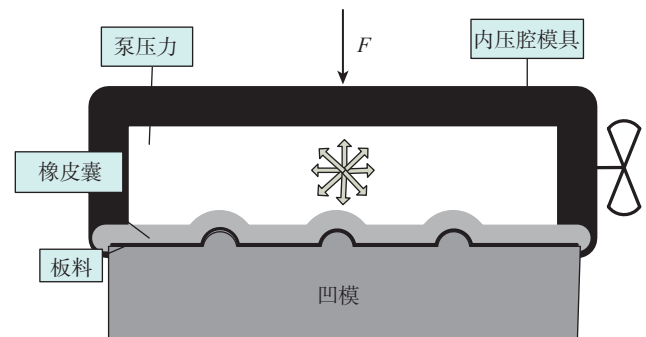


图1 橡皮囊液压机示意图

Fig.1 Rubber diahragm forming process

根据上述橡皮囊成形机的结构示意图可以简化出如图 2 所示的橡皮囊成形示意简图,实际的橡皮囊成形工艺比较复杂,而仿真过程中对橡皮囊成形进行简化处理,便于后续成形分析。

由橡皮囊成形机的结构和工作过程可以简化出有限元仿真过程中涉及的对象:刚性模具、板料、橡皮垫、边界以及工作台。创建橡皮囊成形的宏模板主要包括两个部分:一个是成形过程中涉及的刚性模具、板料、橡皮、工作台以及边界这些对象的定义;另一个是橡皮囊的成形进程和回弹进程的创建,涉及对象的添加以及对

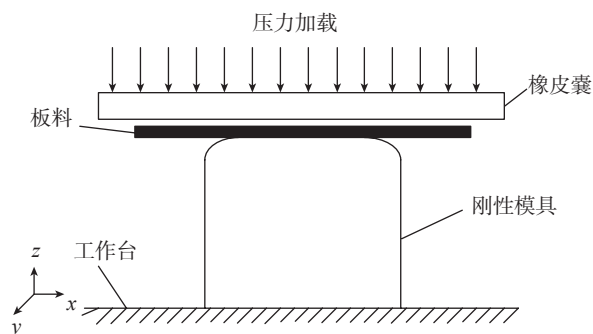


图2 橡皮囊成形示意简图

Fig.2 Rubber diaphragm forming schematic diagram

象行为(属性)的定义。

首先是选择整个仿真分析过程中的单位制(Unit system),为 $\text{mm} \cdot \text{kg} \cdot \text{ms} \cdot \text{C}$ 。

橡皮囊成形工艺分为成形(Stamping)和回弹(Spring back)两个阶段,主要的成形工艺参数为板料与模具的接触参数和橡皮成形压力。考虑到接触计算的需要,板料和模具、板料和橡皮、橡皮和模具、橡皮和工作台的接触参数设置如表 1 所示。

表1 接触设置参数

主接触面	从接触面	摩擦系数	罚函数因子	接触算法
凹膜	板料	0.15	0.03	非线性 罚函数 接触算法
凹膜	橡皮囊	0.3	0.03	
工作台	橡皮囊	0.3	0.03	
板料	橡皮囊	0.3	0.03	

板料材料为工业纯钛 CP3,密度为 $4430\text{kg}/\text{m}^3$,板料厚度为 0.6mm ,板料厚度设置为可更改项目,此处是针对本文例子所设,弹性模量为 $1.10\text{E}5\text{MPa}$,泊松比为 0.34 ,其通过实验测得在 0° 方向的真实应力应变曲线如图 3 所示,材料属性可建立 *.psm 文件存放在材料库中。橡皮厚度为 6mm ,密度为 $1200\text{kg}/\text{m}^3$,橡皮参数一般为固定参数,不需要修改。

橡皮囊成形是通过液体单元在橡皮垫上施加均布力实现压力加载,体积模量为 $2.1\text{E}3\text{MPa}$,仿真过程中设置初始体积为 $3.6\text{E}8\text{mm}^3$,橡皮囊的充液速率曲线如图 4 所示,这些参数在宏模板中设置之后一般不需要修改。橡皮囊成形的最大压力曲线如图 5 所示,最大压力为 25MPa ,此参数设置为可更改项目,根据不同的实际情况进行修改。

时间进程设置为 25s ,此处是为了简化计算过程,没有考虑橡皮囊成形过程中的保压阶段,橡皮囊成形的最大节点速度如图 6 所示,为 $3\text{mm}/\text{ms}$ 。

基于宏模板的模拟要求坐标系 Z 轴正方向与成形方向严格一致,所以需要创建一个 Z 轴与成形方向一

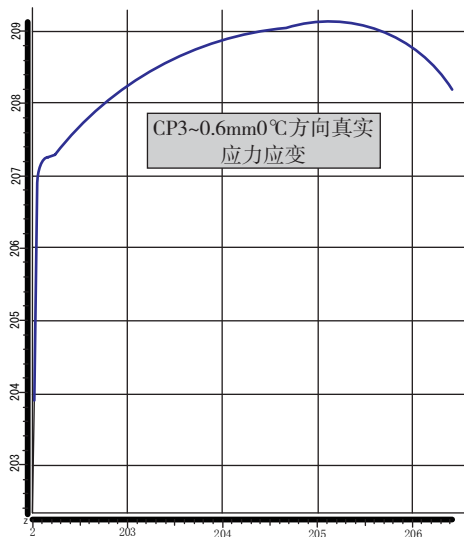
图3 CP3-0.6mm 0° 方向真实应力应变图Fig.3 CP3-0.6mm true stress strain diagram in 0° direction

图4 充液速率曲线

Fig.4 Volume flow rate curve

致的成形坐标系(Forming axis system)。板料和橡皮垫的网格自适应加密(Refinement)属性,将其最大加密级数引用为(Max refinement)。板料设置为弹塑性变形体,单元模型为壳单元,模具为刚性模具,橡皮材料采用的弹性本构模型为 Mooney-Rivlin,单元模型为壳单元。采用的屈服准则为 Orthotropic Hill 48。为模拟中的橡皮建立边界,约束边界的 6 个自由度中的 5 个自由度,只保留上下运动自由度。工作台用于在模拟过程中限定橡皮的成形位置,防止其由于过度变形导致计算失败。

至此就完成橡皮囊成形的宏模板的创建,将其保存为 rubber diaphragm forming .ksa 宏模板文件。

宏模板内定义的是一些通用参数,在相同的情况下,这些参数就不需要重复设置,但是针对一些特殊情

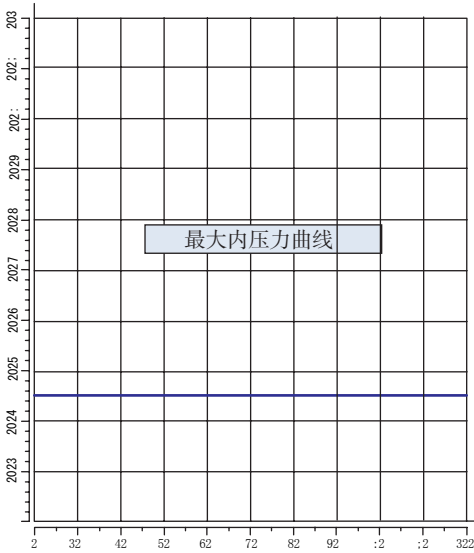


图5 最大内压力曲线
Fig.5 Maximum fluid pressure curve

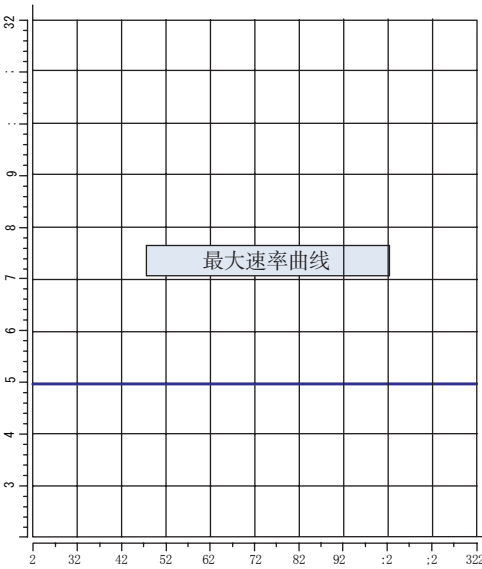


图6 最大节点速度曲线
Fig.6 Maximum velocity curve

况,可在对象属性进程中进行操作修改。

3 基于宏模板设定的橡皮囊成形模拟

板制下陷零件是橡皮囊成形工艺中常见的一种零件形式,以一个典型的板制下陷零件的成形模拟过程为例,说明宏模板的应用。零件的几何模型如图7所示,该零件为弧形板安装角片,下陷处的弯曲半径为3mm, A处的下陷深度为6mm, B处的下陷深度为1.7mm,零件毛坯最大长度为85mm,最大宽度59mm,该零件的主要特点是下陷处易产生回弹。

经过前面分析建立的橡皮囊成形各部分的模型,在PAM-STAMP 2G软件中建立钛合金钣金零件橡皮囊成

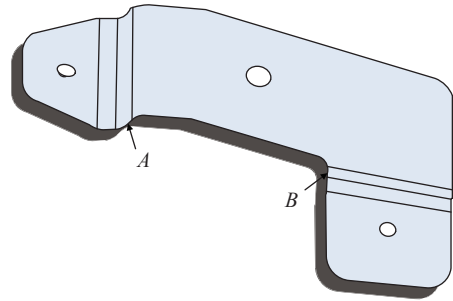


图7 零件几何模型
Fig.7 Part geometric model

形的有限元仿真模型,零件成形的橡皮囊成形有限元模型如图8所示。在完成橡皮囊成形模拟过程的创建项目、几何模型导入、模型定位和相关对象的构建之后,导入宏模板进行快速设定。激活宏模板设置对话框。首先,导入宏模板 rubber diaphragm forming .ksa,包括对象的选择添加,设置板料和橡皮的参数。宏模板设置完之后,对于一些特殊的参数,可以激活“对象属性进程”列表修改必要的对象属性。完成之后,设定求解器提交计算即可。

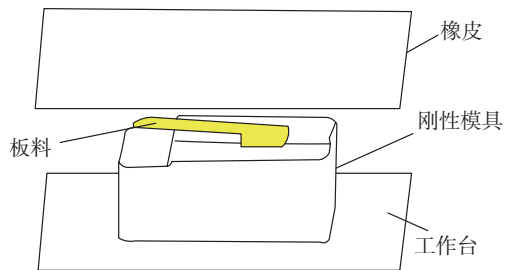


图8 橡皮囊成形有限元模型示意图
Fig.8 Rubber diaphragm forming finite element model

完成橡皮囊成形的前处理过程大概需要10分钟左右。然而,如果没有宏模板,基于对象属性手动设置,需要至少半个多小时才能完成橡皮囊成形的前处理过程,且容易出错。由此可知,宏模板的使用,提高了仿真的效率,也降低了在繁杂设置过程中出现错误的几率。

4 结果与讨论

按照上述设置对橡皮囊成形过程进行仿真,经过多次的仿真实验,由于橡皮囊成形过程中局部加载压力不够,都没有得到合理的结果,在结果云图中得出板料的贴膜度最小为-0.02684mm,最大贴膜度在板料弯曲比较大处其间距为3.1478mm,有板料与模具之间最大间距,可看出板料的贴膜度不够。

然而不能单纯地靠提高橡皮囊成形机的加载压力来达到成形的目的,否则会影响橡皮囊成形机的使用寿命。考虑到零件的圆角半径,改变成形方案,需要增加

盖板加强局部压力,进而提高板料的贴模度。

按照改变后的成形方案,首先修改原来宏模板,增加盖板刚性模具,然后再建立带盖板刚性模具的有限元模型,如图9所示。经过多次的仿真分析,从贴膜云图看出得到合理的结果,其贴膜度最小为 -0.05mm ,最大为 1.27mm ,最大贴膜处也相应也在弯曲最大处,橡皮囊的成形进程完成后板料的贴模状态,可以得到板料在成形阶段贴膜状态良好,可以进行后续的回弹分析。

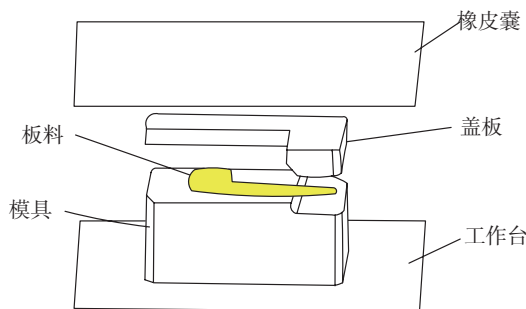


图9 带盖板的橡皮囊成形有限元示意模型图

Fig.9 Rubber diaphragm forming finite element model with cover

经过上述基于 PAM-STAMP 2G 软件的钛合金钣金零件橡皮囊成形的多次有限元模拟仿真,完成回弹补偿后,修改模具,得到了一组合理的成形工艺参数,板料与刚性模具的摩擦系数为 0.15,其他对象之间的摩擦系数为 0.3,橡皮囊成形的压力为 25MPa。

通过制定成形实验方案,确定成形在橡皮囊成形机床 QCF450-70 上完成,最大加载压力为 25MPa,试压成形后的零件如图 10 所示,对橡皮囊成形后的零件进行检测,根据 HB5800-1999 中国航空工业标准与工厂内部工艺规范,该零件的下陷区域的深度公差为 $0\sim+0.8$,下陷段长度公差为 $0\sim+0.2$ 。对零件的上述关键部位进行检测,将试压零件检测结果与计算结果进行对比,实际检测结果与计算结果相符合。因此,验证了所建立的数值模型以及橡皮囊成形仿真技术的有效性。



图10 实际成形零件

Fig.10 Actual forming parts

5 结束论

本文基于 PAM-STAMP 2G 2011 软件的宏模板开发

功能,开发出橡皮囊成形宏模板,并应用于材料为 CP3 (工业纯钛)的典型的板制下陷零件,进行了多次的数值分析,得到了一组合理的橡皮囊成形工艺参数。

宏模板的开发与应用简化了橡皮囊成形的前处理过程,结果表明:基于宏模板的成形模拟效率较高、出错率较低、仿真过程简化,宏模板的应用为橡皮囊成形提供了一种便捷的仿真方法。通过宏模板的应用,工艺人员容易掌握仿真的流程,使橡皮囊成形仿真技术更加方便地应用到实际生产中,对今后的实际生产工作提供可靠的依据。

参考文献

- [1] 付云芳,高霖,王辉. 橡皮囊成形的研究进展. 中国制造业信息化,2009,38(7): 59-66.
- [2] 航空制造工程编写组. 航空制造工程手册. 飞机钣金工艺. 北京:航空工业出版社,1992.
- [3] Browne D J, Battikha E. Optimization of aluminum sheet forming using a flexible die. Journal of Material Processing Technology, 1995, (55): 218-223.
- [4] Nader A. On stretch and shrink flanging of sheet aluminum by fluid forming. Journal of Materials Processing Technology, 1999(96): 198-214.
- [5] 刘峰. 凸翻边零件的液压橡皮囊成形有限元模拟与分析. 机械制造与研究,2007,36(2):21-22,25.
- [6] 王福东,陈明和,熊杰. 大曲率凸弯边零件橡皮囊液压成形工艺的数值模拟. 机械工程材料,2011,35(12):107-111.
- [7] 李靖宜,周贤宾. 弯曲半管橡皮囊液压成形工艺数值模拟研究. 计算力学学报,2003,20(1):43-48.
- [8] 王森,李东升,李小强. 橡皮液压成形工艺的可靠性稳健优化设计方法. 北京航空航天大学学报,2012,38(8):1064-1069.
- [9] 杨伟俊,李东升,李小强. 基于快速回弹补偿的橡皮囊液压成形模面设计方法. 机械工程学报,2011,47(12):67-73.
- [10] 宫东林. 机翼前缘蒙皮橡皮成形及回弹研究 [D]. 沈阳:沈阳航空航天大学,2012.
- [11] 李飞舟. 基于 Autoform 的汽车覆盖件成形有限元分析,热加工工艺,2010,39(15):111-113.
- [12] 张静,陈靖芯. 基于 Autoform 的汽车覆盖件冲压成形关键技术研究,拖拉机与农用运输,2011,38(6):83-85.
- [13] 刘世豪,王东方,苏小平,等. 基于 Dynaform 的汽车覆盖件冲压成形仿真研究. 新技术新工艺,2008,2:16-19.
- [14] 郭敏杰,曾珊珊. 基于 Dynaform 的汽车纵梁工艺分析及冲压数值模拟,金属铸锻焊技术,2011,40(5):112-114.
- [15] 李泷泉. 金属板料成形有限元模拟基础. 北京:北京航空航天大学出版社,2008.
- [16] 贾春莉,张杰刚,张玉强,等. 基于 PAM-STAMP 三通半管拉深成形工艺的模拟,金属铸锻焊技术,2012,41(3): 95-99.
- [17] Choudhury I A, Lai O H, Wong L T. PAM-STAMP in the simulation of stamping process of an automotive component. Journal of Simulation Modeling Practice and Theory, 2006 (14):71-81.

(责编 叶枫)