

型材下陷成形回弹补偿算法

Compensation Algorithm for Springback in Joggle Forming for Section Extrusion

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 谭学明 吴建军 张 深
中航工业西安飞机工业(集团)有限责任公司 李善良 王顺红 王 健

[摘要] 下陷成形是一种适用于飞机长桁零件制造的成形工艺,成形后零件发生回弹,并且腹板上缘条回弹量较大。因此,要在准确预测回弹量的基础上对模具型面进行修正,消除回弹对成形精度的影响。本文针对型材下陷成形提出了一种基于有限元计算的平整性修模与下陷深度修模结合的模具型面迭代修正算法,并应用该算法对角型材、角形带弯钩型材及Z字型材三种型材的下陷零件进行了修模计算分析。从对计算结果的分析中,证明了该回弹补偿方法具有计算精度高、收敛速度快的优点。

关键词: 型材 下陷成形 有限元 回弹 模具设计

[ABSTRACT] The joggle forming technique is developed to manufacture aircraft stringer components, after forming the part will generate springback, and the flange's springback is larger than that of other region on the top of webpiston. The die surface should be modified, based on accurate prediction of springback, to eliminate the effect of springback on forming precision. A smoothness repair and depth repair combined iterative die surface modification algorithm drove by finite element method (FEM) is presented for joggle forming of section extrusion. This algorithm is used in die surface modification for the L-section, L-section with flanged edge and Z-section. From the results of the analysis and calculation, this algorithm's advantages of high precision and fast convergence rate are confirmed.

Keywords: Section extrusion Joggle forming Finite element Springback Mold design

下陷成形广泛用于飞机长桁零件制造过程,承担大量的长桁零件的生产制造。下陷成形卸载后长桁零件产生的回弹是造成形状误差的主要因素,直接影响成形零件的品质,使成形后的零件与其设计形状之间产生尺寸及形状偏差,并影响后续装配的难度与效率。型材下陷成形中的回弹是由变形区材料的弹性变形而引起的

一种常见现象。变形区筋板位置的回弹量较大,使成形后两搭接平面不平行,所以,型材下陷成形卸载后的回弹问题成为该成形工艺的一大特点和需要解决的关键技术问题。

传统的控制回弹的方法大多基于回弹机理,通过改变工艺参数减小零件上的回弹量^[1],从而使零件满足设计精度要求。随着有限元模拟技术及其他数值方法的不断发展与进步,它们在板料成形及回弹仿真预测中得到了广泛应用,并发展为基于回弹精确预测的非解析回弹补偿算法。目前,主要的非解析回弹补偿算法为: KARAFILLIS等提出回弹向前法^[2-3], Naceur等提出的响应面法^[4-5]和 Gan W等提出的偏差调节法^[6-7]。其中,回弹向前法是一种开环修正算法,收敛性差且收敛速度慢;响应面法则是根据成形后板料残余应力中的纯弯矩分量对模具型面进行调整,具有收敛速度快的优点,但是,响应面法与具体的有限元单元和求解器相关,通用性较差。因此,本文根据偏差调节法提出一种适用于型材下陷成形的回弹补偿方法,并通过3种不同截面型材下陷零件的算例分析该算法的收敛性和收敛速度。

1 回弹预测

利用 PAMSTAMP2G 板材成形数值模拟软件进行型材下陷成形及回弹有限元数值模拟计算。根据型材下陷成形工艺与有限元分析过程,建立如下分析步骤:

(1) 根据型材下陷成形工装的具体形式,以 CATIA 专业三维建模软件为平台,建立有限元模拟的 CAD 模型,包括成形凸凹模以及辅助成形工装,之后将各个模具导入到 PAMSTAMP2G 软件中建立下陷成形有限元模拟模型。

(2) 使凸模以一定的下压速度沿冲压方向进行模拟压制下陷,通过设定凸凹模间距来控制整个模拟压制下陷计算过程的终止。

(3) 卸载,型材回弹计算,测量回弹量。

2 补偿修模算法及实现方法

2.1 型面误差定义

考虑到型材下陷多为直下陷,并根据零件设计要求与实际装配需求,将成形零件原始面与设计零件原始面置于空间模型中,使两原始面保持重合位置,并使两平面的法向均与Z轴重合。定义两型材下陷面间Z轴方向的距离为型面误差。

模拟试验中型材采用体单元进行离散,通过对模拟试验的结果与原始设计型面网格进行对比,同时,测量3个关键区域节点之间沿Z轴方向上的距离差值。关键区域1为零件下陷区上端原始装配面,关键区域2为零件下陷面远离腹板侧位置,关键区域3为零件下陷面靠近腹板侧位置。Z字型型材关键区域定义如图1所示,其他型材关键区域定义方式类似,既可得到整个零件下陷型面的误差分布。

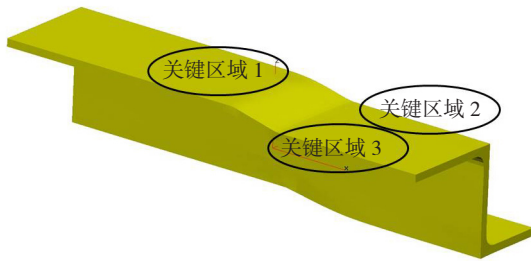


图1 关键区域定义
Fig.1 Definition of key region

2.2 模具型面补偿算法

针对型材腹板位置处回弹量大的特点,将模具型面修模分为两个部分:第一部分为模具型面平整性修模,另一部分为下陷深度修模。并根据整个零件下陷型面的误差分布与关键区域节点之间沿Z轴方向的距离差值对模具型面进行调整,消除回弹对零件形状精度的影响。

模具型面补偿过程分为两个部分:型面平整性修模与下陷深度修模。通过第*i*次迭代得到模具型面 F_i ,进行型材压下陷成形及回弹模拟试验,预测零件的回弹量。

2.2.1 平整性修模

型材压制下陷经卸载后回弹引起零件扭曲使下陷面与原始面不平行,如图2所示。针对此种情况,将H与L的差值 P_i 作为平整性修模的修模量,对模具单侧型面下陷深度 h_i 进行补偿,得到补偿后的下陷深度 $h_{i+1}=h_i+p_i$ 。通过CATIA建模软件扫描生成新的模具型面 F_i ,使整个模具下陷成形面与型材原始面存在一定的夹角。经过*i*次补偿后使下陷面与原始面基本平行,使误差在允许范围之内。

2.2.2 下陷深度修模

在平整性修模之后,成形零件二维侧视图,如图3

所示。将零件回弹后下陷深度H值与设计要求下陷深度的差值 Q_i 作为修模量对模具进行补偿,生成新的模具型面 $F_{i+1}=F_i+kQ_i$,进行修模迭代。其k为修模系数,取值一般介于0.1至0.5,根据回弹量来确定,回弹量大则取较大值,反之取较小值。对关键区域节点进行测量得出的 $Q_i \leq Q$ 时,即停止迭代,Q为型面所能接受的最大误差。

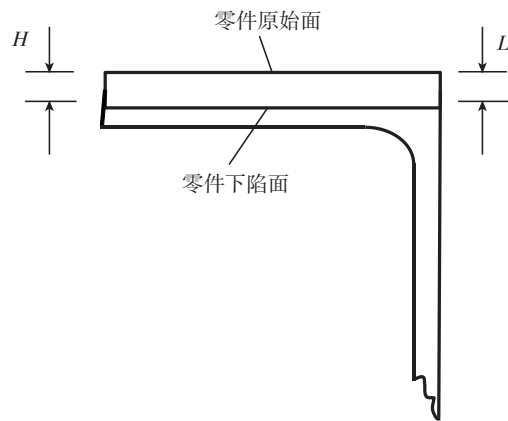


图2 平整性修模示意图
Fig.2 Delineation of smoothness repair

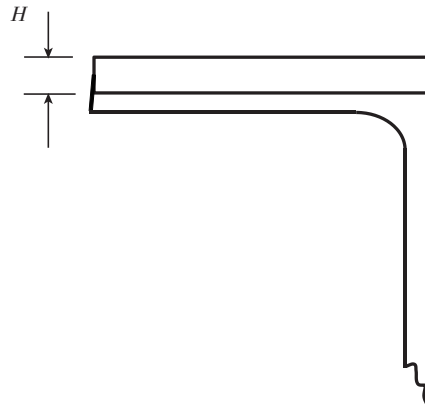
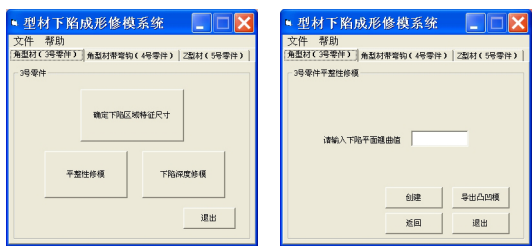


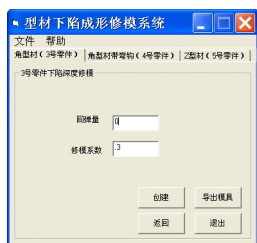
图3 下陷深度修模示意图
Fig.3 Delineation of depth repair

2.3 基于CATIA二次开发型材下陷修模系统

以CATIA二次开发为平台,基于参数化设计,利用面向对象的程序设计语言VB,开发了一个型材下陷成形回弹修模系统。以模拟试验得到的修模量为依据对模具型面进行修正。通过建立尺寸约束及几何约束,并利用自动化应用接口的宏作为VB与CATIA之间的接口,实现修模过程的参数化控制,使设计的图形在CATIA软件中显示。通过应用型材下陷成形回弹修模系统,使整个修模过程简单化,易于操作。修模系统界面如图4所示。



(a) 修模系统主体界面 (b) 角型材平整性修模界面



(c) 角型材下陷深度修模界面

图4 修模系统界面

Fig.4 Interface of die modification system

3 计算实例

通过3个典型零件:角型材、角型材带弯钩和Z字型材。材料为Al2008,弹性模量 $E=70\text{GPa}$,泊松比 $\nu=0.3$,进行下陷成形及回弹模拟试验,验证回弹补偿算法的收敛性并对收敛速度加以考察。

3.1 角型材

角型材腹板与缘条厚度为2.2mm,内侧倒角 R 为2.0mm。腹板末端有端头。下陷深度为3.0mm。在迭代计算中,修模系数取0.5。型材截面如图5所示。

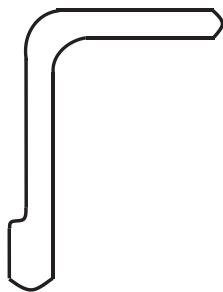
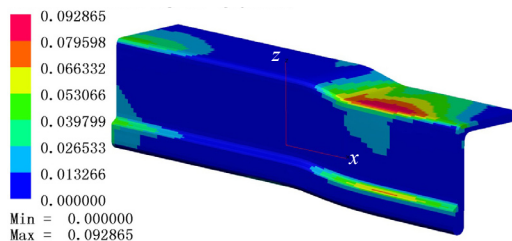
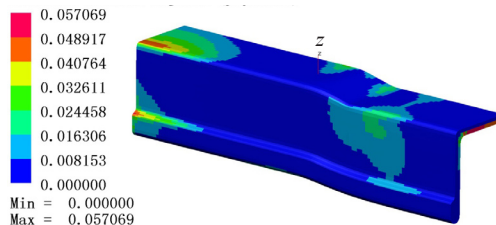


图5 角型材截面
Fig.5 L-section

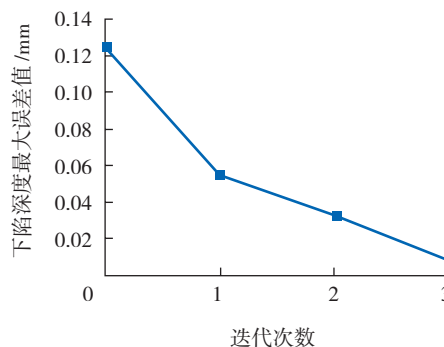
型面误差分布如图6所示。可见,对于角型材零件,第一修模就表现出了显著的效果,并随着修模次数的增加,零件下陷深度最大误差逐步减少。通过对关键区域进行测量,经过1次平整性修模与两次下陷深度修模共3次迭代。初始型材下陷面关键区域2与关键区域3沿 Z 轴差值均值由0.116mm减小到0.007mm,关键区域1与关键区域2、3中间位置沿 Z 轴的下陷深度最大差



(a) 修正前误差分布



(b) 修正后误差分布



(c) 下陷深度最大误差收敛情况

图6 角型材零件计算结果

Fig.6 L-section calculation results

值由0.126mm减小到0.006mm。

3.2 角形带弯钩型材

型材腹板与缘条厚度均为2.4mm,内侧倒角 R 为2.4mm。腹板末端呈圆弧弯钩形式。下陷深度为3.0mm。型材截面如图7所示。

型面误差分布如图8所示。角形带弯钩型材零件,第一次修模就表现出显著的效果,零件与下陷深度误差

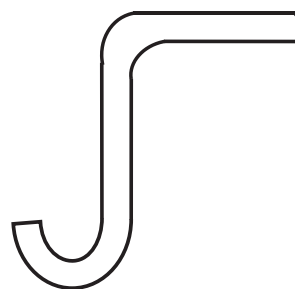
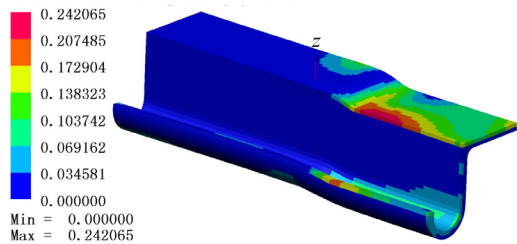
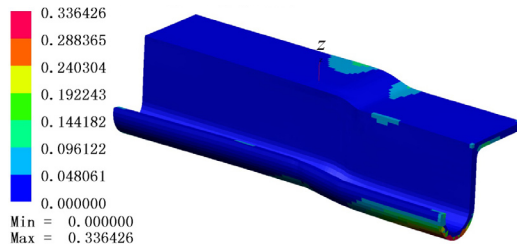


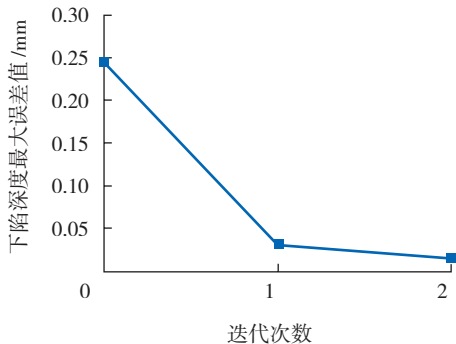
图7 角型材带弯钩截面
Fig.7 L-section with flanged edge



(a)修正前误差分布



(b)修正后误差分布



(c)下陷深度最大误差收敛情况

图8 角型材带弯钩零件计算结果

Fig.8 L-section with flanged edge calculation results

显著减少。通过对关键区域进行测量,经过1次平整性修模与1次下陷深度修模共2次迭代。初始型材下陷面关键区域2与关键区域3沿Z轴差值由0.442mm减小到0.012mm,关键区域1与关键区域2、3中间位置沿Z轴下陷深度最大差值由0.246mm减小到0.018mm。

3.3 Z字型材

Z字型材腹板与缘条厚度均为2.0mm。内侧倒角R为3.0mm,下陷深度为3.0mm,型材截面如图9所示。

型面误差分布如图10所示。由于Z字型材下陷零件的复杂性,使收敛速度减慢,但仍能达到成形的

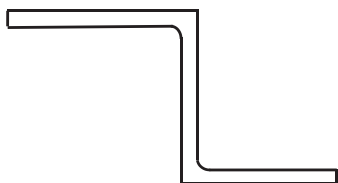
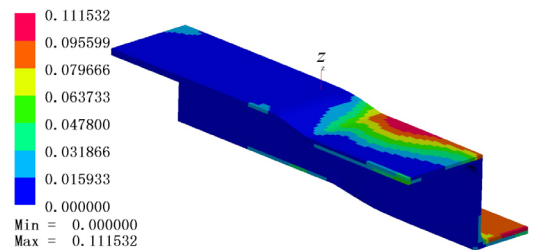
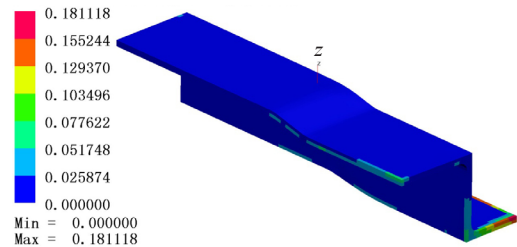


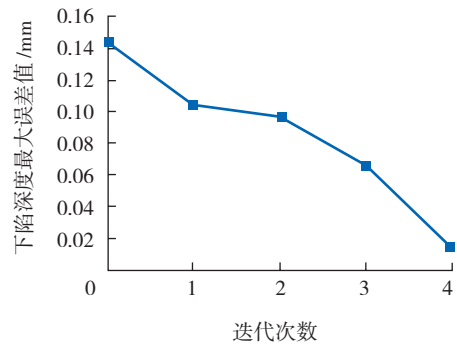
图9 Z字型材截面图
Fig.9 Z-section



(a)初始型面误差分布



(b)4次迭代后型面误差分布



(c)下陷深度最大误差收敛情况

图10 Z字型材零件计算结果

Fig.10 Z-section calculation results

精度。通过对关键区域进行测量,经1次迭代后,初始型材下陷面关键区域2与关键区域3沿Z轴差值由0.265mm减小到0.004mm,关键区域1与关键区域2、3中间位置沿Z轴的下陷深度最大差值由0.145mm减小到0.014mm。

4 结论

(1) 基于有限元模型对型材下陷成形后回弹量的准确预测,提出了有限元计算驱动的适用于型材下陷成形的平整性修模与下陷深度修模结合的模具型面修正算法。

(2) 以CATIA二次开发为平台,基于参数化建模设计,利用面向对象的程序设计语言VB,开发了一个型材下陷成形修模系统,实现了参数化修模过程。

(3) 通过3次迭代计算,使角型材下陷深度误差减小到0.006mm以内;通过2次迭代,使角型带弯钩型材

(下转第114页)

O::={C,R,F,A,I},图4为钣金工艺本体的一般表示图式。

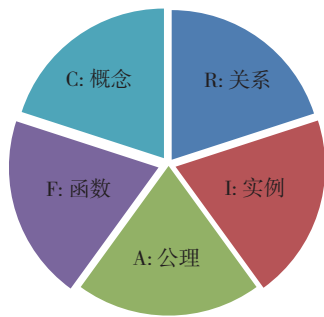


图4 钣金工艺本体的一般表示图式

Fig.4 Chart of process ontology on sheet metal

其中:

C: 概念,通常指按照一定的关系形成的分类层次结构,除此之外,还可包括任务、功能、行为、策略、推理过程等。

R: 关系,表示概念之间的一类关系,如概念之间的 subclass-of (子类)关系、part-of (部分)关系等。

F: 函数,是一种特殊的关系,如函数“零件的重量”由零件的密度和零件的体积唯一确定。

A: 公理,概念或者概念之间的关系所满足的公式,是恒真的,如钣金冲压工艺属于钣金成形工艺的范畴。

I: 实例,某概念类所指的具体实体。

航空产品钣金零件不同于机械加工零件,其特点是品种多、批量小以及零件加工成形方法的多样性,这就决定了钣金工艺知识的复杂性。通过采用本体技术,我们给出了基于知识的钣金工艺本体实例的一个示例,如图5所示。

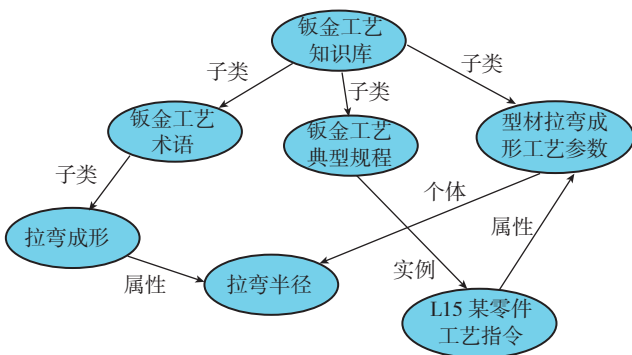


图5 基于知识的钣金工艺本体实例示例

Fig.5 Ontological instance of knowledge based sheet metal process

6 结束语

通过对钣金工艺本体技术的研究,为钣金工艺知识的获取、表示,钣金工艺概念体系及其相互关系模型的建立,为钣金工艺本体模型和钣金工艺知识库模型方案

的设计做好了前期技术储备,为企业工艺知识的共享与重用提供了理论依据,对实现工艺知识的信息化工程应用可起到示范的作用,对企业信息系统平台的建设有一定的借鉴意义。

参考文献

- [1] Schreiber. 知识工程和知识管理. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [2] 施荣明. 知识工程与创新. 北京: 航空工业出版社, 2009.
- [3] 韩家炜. 数据挖掘: 概念与技术. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [4] 周士林. 航空制造工程手册 - 飞机钣金工艺. 北京: 航空工业出版社, 1992.
- [5] 邵新宇. 现代 CAPP 技术与应用. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [6] Pang N T. 数据挖掘导论. 北京: 人民邮电出版社, 2006.
- [7] 高复先. 信息资源规划: 信息化建设基础. 北京: 清华大学出版社, 2002.

(责编 小城)

(上接第 110 页)

下陷深度误差小于 0.018mm; 通过 4 次迭代,使 Z 字型材下陷深度误差小于 0.014mm。

(4)通过 3 个计算实例,即角型材带端头直下陷零件、角型材带弯钩直下陷零件和 Z 字型材直下陷零件,验证了该补偿算法的实用性,并证明了该回弹补偿算法收敛性好、计算精度高及具有较快的收敛速度。

参考文献

- [1] Chu C C. Elastic-plastic springback of sheet metals subjected to complex plane strain bending histories. International Journal of Solids and Structures, 1986,22(10): 1071-1081.
- [2] Karafillis A P, Boyce M C. Tooling design in sheet metal forming using springback calculations. International Journal of Mechanical Sciences.1992,34(2):113-131.
- [3] Karafillis A P, Boyce M C. Tooling design accommodating springback errors. Journal of Materials Processing Technology, 1992, 32(1/2):499-508.
- [4] Guo Y Q, Gati W, Naceur H, et al. An efficient DKT rotation free shell element for springback simulation in sheet metal forming. Computers and Structures, 2002, 80(27/30):2299-2312.
- [5] Naceur H, Guo Y, Benelechi S. Response surface methodology for design of sheet forming parameters to control springback effects. Computers and Structures, 2006, 84(26/27):1651-1663.
- [6] Gan W, Wagoner R H. Die design method for sheet springback. International Journal of Mechanical Sciences, 2004, 46(7):1097-1113.
- [7] Gan W, Wagoner R H, Mao K, et al. Practical methods for the design of sheet formed components. Journal of Engineering Materials and Technology, 2004, 126(4):360-367.

(责编 日午)