

引文格式: 鲍益东, 席洁, 秦雪娇, 等. 基于解耦计算的多步快速成形有限元法[J]. 航空制造技术, 2023, 66(9): 14-22.

BAO Yidong, XI Jie, QIN Xuejiao, et al. Multi-step quick forming finite element method based on decoupling calculation[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(9): 14-22.

基于解耦计算的多步快速成形有限元法*

鲍益东¹, 席洁¹, 秦雪娇¹, 刘永财²

(1. 南京航空航天大学, 南京 210016;

2. 常州工学院, 常州 213032)

[摘要] 钣金零件是构成飞机机体和汽车车身的重要零部件。为缩短钣金件的生产周期, 将有限元法用于零件设计初期评估零件的可制造性。为提高现有板料成形有限元法的计算效率, 同时保证模拟精度, 在一步快速成形有限元法的理论上, 研究多步快速成形有限元法, 通过引入中间构形的方式来考虑板料成形过程中加载路径与变形历史的影响。中间构形的构造是多步快速成形有限元法的关键, 采用解耦思想将中间构形分解为弯曲变形和拉伸变形两个独立的过程进行计算。在弯曲变形阶段, 不考虑材料的流动, 根据板料与模具之间的位置关系计算获得滑移约束面; 在拉伸变形阶段, 材料的流动限制在滑移约束面上, 通过应力平衡迭代以及节点修正后获得中间构形。以典型的钣金零件为例进行成形模拟, 与现有商业有限元软件在计算精度和效率上进行对比, 验证了该算法的可行性和有效性。结果表明, 所提出的算法能够快速构造出合理的中间构形, 且能够准确地预测零件的成形性和厚度分布。

关键词: 多步快速成形有限元法; 中间构形; 解耦计算; 滑移约束面; 钣金成形

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2023.09.014



鲍益东

副教授, 博士, 研究方向为板材/管材快速仿真技术、复合材料成型工艺仿真。

钣金件有着强度高、重量轻、性能好、可大规模量产的优点, 并且成形钣金件比常见的机械减材加工工艺具有更高的加工效率和材料使用率, 因此被广泛应用于航空、航天、汽车、船舶、电子器件等工业产业。随着现代飞机产量需求的加大和制造要求的提高, 飞机零部件的生产愈发精密复杂, 并且生产周期短、质量要求高。钣金零件是飞机机体构成的重要零件, 在飞机零件总量中可占 30%~50%, 冲压成形是飞机钣金件制造的关键技术之一, 飞机钣金件的生产效率和成形精度直接影响着飞机的生产周期和整机质量, 因此钣金零件的生产也需要保证高质量、高精度、短周期和低成本。为了缩短钣金件的设计制造周期, 节约研发成本, 计算机技术和数值模拟技术逐渐

应用于生产当中^[1-2]。

有限元法是板材成形数值模拟的主要分析方法, 主要分为基于流动理论的增量法和基于形变理论的全量法。增量法的主要优点在于模拟过程中考虑了加载历史的影响, 模拟结果精度相对较高, 但计算时间较长, 难以满足设计阶段快速评价产品可制造性的需求^[3]。法国的 Batoz^[4]和 Naceur^[5]等首先提出了基于全量理论的一步逆成形有限元法, 基本原理是简化设置整个成形过程, 将零件的最终形态和初始板料形态进行对比, 简单且快速地求出零件最终形态的应力应变分布以及初始板料形状。Li 等^[6]提出在一步逆成形有限元法中用小应变方程解决大变形问题。我国对一步逆成形有限元法的研究从 20 世纪 90 年代开始, 上海交

* 基金项目: 国家自然科学基金(51975280)。

通大学的沈启彧^[7]和Wang^[8]对方盒件的成形使用一步逆成形有限元算法进行了预示。周平等^[9]对一步逆成形法的求解方法进行了改进,提出一种基于切平面的解耦列式法,使一步逆成形法的计算精度得到提高。在一步逆成形有限元法的基础上,具有一定工程实用性的一步正成形有限元法发展起来,与一步逆成形有限元法相比,一步正成形有限元法的求解过程更加符合零件的实际成形过程,根据规则的初始坯料计算得到成形后零件的形状。一步成形有限元法(包括一步逆成形和一步正成形)计算效率虽然很高,但是由于计算过程中采用了过多的简化处理与条件假设,忽略了变形历史,使得应力计算的精度无法达到预期。为了改善这一现状,研究人员多采用引入中间构形的方式来模拟成形过程中的变形历史。Lee等^[3]在单步逆成形法基础上提出了多步逆成形法,通过线弹性映射法计算成形过程中的中间构形,并根据数值结果验证了可行性,但对于复杂零件难以找到对应的映射函数进行计算,具有一定的局限性。Guo等^[10]提出伪逆成形法,采用最小面积法构造成形加载过程中的中间构形,但只考虑轴对称问题,对于非对称问题并不适用。唐炳涛等^[11]采用双截面法和单元面积最小的方法求解中间构形初始解,可以求解非对称问题,但是容易出现局部网格严重畸变的问题。陈伟等^[12]对多步正成形算法中的中间构形初始解预示算法进行研究,将初始平板料投影到最终构形上后,采用比例插值的方法计算出中间构形,并对中间构形进行接触修正。

目前,国内外对中间构形基本理论的研究尚未成熟,在构造复杂形面的中间构形时仍然存在一些问题,对于构形间应力更新算法方面的研究相对更少,因此要做到高效准确地预示中间构形,从而提高零

件成形模拟的精度仍然需要更加深入透彻的研究。

本文在一步快速成形有限元法(一步正成形有限元法)的理论基础上,研究多步快速成形有限元法,提出了一种基于解耦格式的中间构形预示算法,将中间构形的求解过程解耦为弯曲变形和拉伸变形两个阶段,解决了迭代求解复杂非线性方程组容易出现病态矩阵的问题,提高了求解效率,并且可以适应复杂零件形状的求解。最后,通过实际数值算例验证了该算法的有效性和准确性,可以用于指导钣金件的实际生产。

1 一步快速成形有限元法基本理论

一步快速成形有限元法基于全量理论,将零件成形过程简化为近似比例加载的过程,只考虑初始板料构形及最终零件构形两种状态,其基本思想为:从板料的初始构形 C^0 出发, C^0 上各节点 P^0 的坐标已知,在满足一定边界条件的情况下,通过有限元

方法可以确定与初始板料上各节点 P^0 对应的最终构形 C 上的节点 P 的坐标,对比两者坐标的变化可以获得成形后零件的应力应变状态以及厚度分布情况,如图1所示。

1.1 几何关系

一步快速成形有限元法假设板料的变形满足Kirchhoff假设,则初始板料和最终零件构形上的任意质点的几何关系如图2所示(其中, U_p 为质点 p 的位移函数,即质点 p 和 p^0 之间的位移向量; n 为质点 p 的单位法向量; n^0 为质点 p^0 的单位法向量; z 为 q 点的厚向坐标; z^0 为 q^0 点的厚向坐标; h 为最终构形的板料厚度; h^0 为初始板料厚度)。将初始状态板料作为参考构形,比较当前构形与初始构形上对应的质点(如质点 q 和质点 q^0)的位置坐标,即可得到相应质点的位移函数 U_q ,即

$$U_q = X_q - X_{q^0} \quad (1)$$

式中, $U_q = [U_1 \ U_2 \ U_3]^T$; $X_q = [X_q \ Y_q \ Z_q]^T$; $X_{q^0} = [X_{q^0} \ Y_{q^0} \ Z_{q^0}]^T$ 。 X_q 和 X_{q^0} 分别为 q 点和 q^0 点的坐标向量。

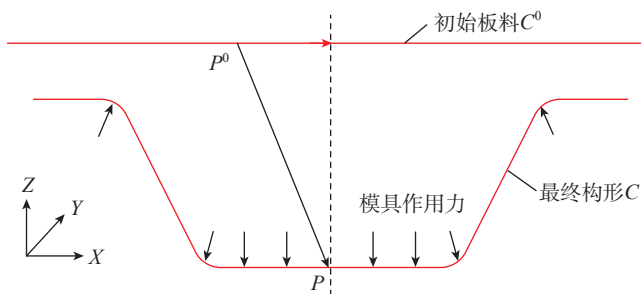


图1 一步快速成形有限元法示意图

Fig.1 Diagram of one-step quick forming finite element method

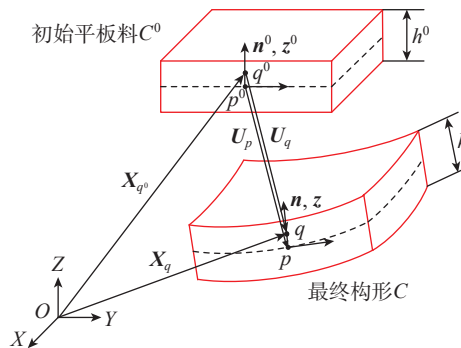


图2 一步快速成形有限元法的几何关系

Fig.2 Geometric relations of one-step quick forming finite element method

采用 Lagrange 描述质点的运动, 则有

$$dX_q = [F] \cdot dX_{q^0} \quad (2)$$

式中, $[F]$ 为变形梯度张量, 由此可得左柯西-格林 (Cauchy-Green) 矩阵 $[B]$ 的逆矩阵为

$$[B]^{-1} = [F]^{-T} [F]^{-1} \quad (3)$$

对于当前构形材料内部任一点来说, 可以用 3 个主方向上的主伸长量来描述这一点的变形。通过计算 $[B]^{-1}$ 的特征值可以得到板上各点的面内主拉伸 λ_1 、 λ_2 , 然后通过体积不变的原理可以得到单元厚度方向的主拉伸 λ_3 为

$$\lambda_3 = (\lambda_1 \lambda_2)^{-1} \quad (4)$$

单元应变的主方向是由 $[B]^{-1}$ 的特征向量决定的, 即

$$[M] = [n_1 \ n_2 \ n_3] \quad (5)$$

式中, $[M]$ 为单元应变方向向量矩阵; n_1 、 n_2 、 n_3 分别为单元应变 3 个主方向的单位向量。

最终可以得到单元沿厚度方向任意一点变形的对数应变为

$$[\varepsilon] = [M] \begin{bmatrix} \ln \lambda_1 & & \\ & \ln \lambda_2 & \\ & & \ln \lambda_3 \end{bmatrix} [M]^T \quad (6)$$

1.2 本构关系

一步快速成形有限元法的本构方程是采用比例加载条件下的全量形变理论描述的, 并将材料的各向异性特性考虑在内, 本构方程为

$$\{\sigma\} = E_s [P]^{-1} \{\varepsilon\} = \frac{\bar{\sigma}}{\varepsilon} [P]^{-1} \{\varepsilon\} \quad (7)$$

式中, $\{\sigma\}$ 为应力矩阵, $\{\varepsilon\}$ 为应变矩阵; E_s 为材料应力-应变曲线的割线模量, 即等效应力与等效应变的比值 $\bar{\sigma}/\varepsilon$; 矩阵 $[P]$ 由面内各向异性系数 R_0 、 R_{45} 、 R_{90} 求得, 即

$$[P] = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{R_0}{1+R_0} & 0 \\ -\frac{R_0}{1+R_0} & \frac{R_0(1+R_{90})}{R_{90}(1+R_0)} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{(1+2R_{45})(R_0+R_{90})}{R_{90}(1+R_0)} \end{bmatrix} \quad (8)$$

1.3 有限元方程的建立与求解

根据虚功原理在最终构形上建立平衡方程, 即

$$W = \sum_e \{U^*\}^T (\{F_{int}^e\} - \{F_{ext}^e\}) = 0 \quad (9)$$

式中, W 为单元虚功; e 为单元编号; $\{U^*\}$ 为全局坐标系下的虚位移; $\{F_{int}^e\}$ 为节点内力向量; $\{F_{ext}^e\}$ 为节点外力向量。

将所有的节点内力向量和节点外力向量组装在一起即可获得整体残余力向量, 即

$$\{R(U)\} = \sum_e (\{F_{ext}^e\} - \{F_{int}^e\}) \quad (10)$$

一步快速成形有限元法具有强烈的非线性特征, 一般采用牛顿-拉普森 (Newton-Raphson) 方法进行迭代求解, 即

$$\begin{cases} \left[-\frac{\partial \{R(U)\}}{\partial (U)} \right]_{U=U^i}, & \{\Delta U^i\} = \{R(U^i)\} \\ \{U^{i+1}\} = \{U^i\} + \omega^i \{\Delta U^i\}, & (0 < \omega^i \leq 1) \end{cases} \quad (11)$$

式中, $\{U^i\}$ 为第 i 个迭代步的近似初始解; ω^i 为引入的迭代松弛系数, 以保证求解能够顺利收敛。

根据一步快速成形有限元法的实际计算情况, 选择位移准则和残余力准则进行收敛性的综合判断, 若迭代步小于设定阈值且迭代计算过程满足任何一个收敛准则, 则认为迭代收敛结束计算。

2 基于解耦计算的多步快速成形有限元法

一步快速成形有限元法只考虑

初始板料构形和最终零件构形, 忽略了变形的中间状态, 计算效率得以大幅提高, 可以快速获得成形后零件的应力应变状态和厚度分布情况, 但是对中间加载历史的忽略也会导致最终零件分析精度不足。为解决这一问题, 提出了多步快速成形有限元法, 通过引入中间构形的方式考虑加载路径和变形历史从而提高计算精度, 每一个中间构形都作为当前时间步的最终构形通过一步快速成形有限元法进行迭代计算。因此, 多步快速成形有限元法的关键在于准确地构造每个时间步的中间构形, 以及各中间构形之间的应力迭代更新。

对金属薄板成形来说, 变形主要由弯曲变形和拉伸变形构成, 由于剪切变形对整个板料成形结果影响比较小, 可以忽略其影响效应。在多步快速成形有限元法中, 中间构形的计算被分解为弯曲变形和拉伸变形的解耦形式, 其中对弯曲变形起主要作用的是弯曲刚度, 对拉伸变形起主要作用的是膜刚度。通过解耦技术, 首先进行弯曲变形过程的求解, 获得板料在当前模具作用下的构形, 如图 3 (a) 所示; 其次是进行拉伸变形过程的求解, 在上一步求解出的板料构形的基础上, 限定材料的非线性流动在该构形上, 通过弹塑性流体力学进行迭代求解来获得当前时间步的中间构形, 如图 3 (b) 所示。

2.1 中间构形滑移约束面的构造

板料弯曲变形的求解过程就是

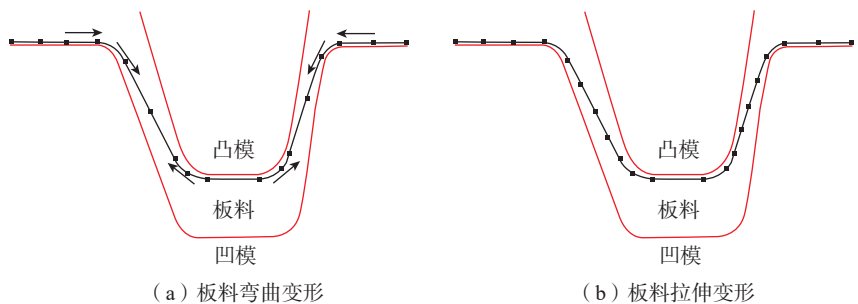


图 3 解耦计算原理示意图

Fig.3 Diagram of principle of decoupling calculation

板料中间构形滑移约束面构造过程,假设已计算出上一个时间步的板料构形,则在该构形的基础上计算当前时间步的中间构形。其首要问题是准确地得到板料和模具的接触状态,其中包括确定凸模、凹模、压边圈等工具与板料的接触状况,只有正确地判断出与模具相接触的板料节点,才能为中间构形的预示算法提供计算依据。由于板料和模具的接触状态仅被用来计算板料的形状,所以只需判断哪些板料节点与工具发生接触,而不用进一步判断板料节点在工具表面是发生滑动还是固定不动。在判断板料节点与模具接触状态时,首先要通过搜索算法确定板料节点沿法线方向在模具表面上的投影单元,然后进一步确定具体的投影点。在接触搜索阶段,为了缩小搜索范围,加快接触搜索的速度,采用划分空间格的方法搜索距离板料节点最近的模具节点,根据节点与单元之间的拓扑关系确定模具表面的投影单元范围。

确定了板料节点在模具表面的投影点后,根据几何关系判断节点是否穿透模具表面,如图4所示。节点穿透量计算方程式为

$$g(x_s) = (x_s - x_m) \cdot n(x_m) \quad (12)$$

式中, $g(x_s)$ 为节点 x_s 的穿透量; x_s 为板料上某一节点; x_m 为节点 x_s 在模具表面的投影点; $n(x_m)$ 为节点 x_m 所在投影单元的外法线方向。

当 $g(x_s) > 0$ 时,表明板料节点 x_s 并未穿透模具表面;当 $g(x_s) < 0$ 时,

表明板料节点 x_s 穿透模具表面。判断出所有发生穿透的板料节点后,将其沿节点法线方向直接投影到工具表面,假定这些发生穿透的板料节点就是可能与工具发生接触的节点,根据发生接触的板料节点会与工具表面产生作用力的特点排除其中一些误判的板料节点,剩下的发生穿透的板料节点则是真正与工具发生接触的板料节点。最后根据接触算法,搜索出与工具发生接触的板料节点信息,并确定出接触区域的板料构形。

在弯曲变形过程中,板料与凸凹模具接触的区域受到模具面的约束作用,未接触区域面内会存在膜面的初始应力而不承受其他力的作用,因此非接触区域的构形采用基于预应力膜单元建立平衡方程的方法进行计算。预应力膜单元顶点的位移向量为 $a = [u \ v \ w]^T$ (其中 u 、 v 和 w 分别为 x 、 y 和 z 方向的位移分量)。预应力膜单元在变形过程中的几何关系为

$$\varepsilon = \varepsilon_L + \varepsilon_{NL} = Ba = (B_L + B_{NL})a \quad (13)$$

式中, ε 为应变; ε_L 、 ε_{NL} 分别为线性应变和非线性应变; B 为应变与位移的转换矩阵, B_L 、 B_{NL} 分别为线性应变和非线性应变分析的矩阵项,前者与位移向量 a 无关,后者则是 a 的函数。

预应力膜单元具有大位移、小应变的特点,因此假设材料的应力-应变关系满足如下线弹性关系,即

$$\sigma = D\varepsilon + \sigma_0 \quad (14)$$

式中, D 为弹性矩阵; σ_0 为膜单元的预应力。

在单元所在的局部坐标系下,根

据几何关系和本构关系,基于虚功原理建立平衡方程为

$$\int \tilde{B}^T (DBa - \sigma_0) dV = 0 \quad (15)$$

式中, V 表示体积,对体积进行积分; B 和 \tilde{B} 均为位移向量的函数, $\tilde{B} = B_L + 2B_{NL}$ 。

采用 Newton-Raphson 方法进行迭代求解,并根据位移准则和残余力准则进行收敛性的综合判断,若迭代步小于设定阈值且迭代计算过程满足任何一个收敛准则,则认为迭代收敛结束计算。否则,需要采用缩小步长的方法重新计算板料非接触区域中间构形。

重复上述过程,直至中间构形的所有单元都满足预应力膜单元的平衡条件,从而完成当前时间步的中间构形滑移约束面的构造。

2.2 基于滑移约束面的中间构形计算

在拉伸变形求解过程中,为了确保板料节点在平衡迭代过程中的移动始终被限定在板料中间构形上,将2.1节计算出的中间构形作为板料拉伸变形计算过程的滑移约束面,约束板料的运动和变形。滑移约束面即节点的切平面区域,滑移约束面如图5所示。可以看出,节点坐标系 $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$ 定义在节点切平面上, \bar{z} 轴为节点法线方向,单元坐标系 (s, t) 则定义在单元所在平面上。单元上的刚度矩阵 K^e 和残余应力 f_{int}^e 都将转换到节点坐标系下,转换公式如下:

$$\begin{cases} \bar{K}^e = T^T k^e T \\ \bar{F}_{int}^e = T^T f_{int}^e \end{cases} \quad (16)$$

$$T = \begin{bmatrix} T_1 & 0 & 0 \\ 0 & T_2 & 0 \\ 0 & 0 & T_3 \end{bmatrix}_{6 \times 6} \quad (17)$$

$$T_i = \begin{bmatrix} \cos(\bar{x}_i, s) & \cos(\bar{y}_i, s) \\ \cos(\bar{x}_i, t) & \cos(\bar{y}_i, t) \end{bmatrix} \quad (18)$$

式中, \bar{K}^e 为节点坐标系下的刚度矩阵; \bar{F}_{int}^e 是节点坐标系下的节点内力向量; T 为坐标转换矩阵; i 为单元的节点号。多步快速成形有限元法的每个中间构形都会基于全量理论进行塑性迭代求解,为了保证中间构

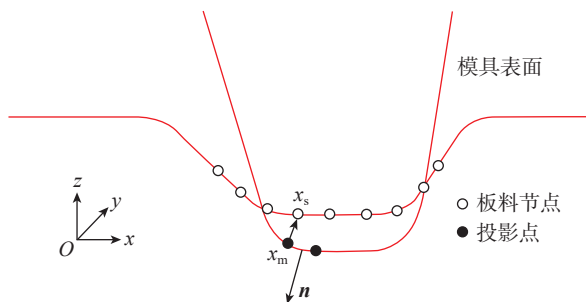


图4 节点穿透判断示意图
Fig.4 Diagram of node penetration judgment

形塑性迭代求解的收敛性,需要在平衡迭代前计算得到一个中间构形的近似初始解。本文基于线弹性有限元法在滑移约束面上对板料中间构形建立平衡方程,迭代求解滑移约束面上中间构形的节点残余力直至收敛,最终即可获得滑移约束面上中间构形的初始解。

经过 2.1 节中的几何迭代判断,滑移约束面上各节点与模具表面之间不会发生穿透,但在模具表面上圆角较小的地方,滑移约束面的网格单元会出现穿透模具表面的情况,如图 6 (a) 所示,因此,中间构形上的节点虽然被约束在滑移约束面上,但在基于滑移约束面进行迭代计算时,节点在滑移约束面上的移动会导致中间构形上部分节点与模具表面发生穿透,需要对迭代求解的中间构形进行修正。首先按照 2.1 节中的方法将约束在滑移约束面上的中间构形节点与模具进行几何接触判断,搜索到入侵至模具内部的节点,判断出中间

构形上所有发生穿透的节点后,将这些节点拉回到模具表面,使其成为附着在模具表面的固定点。通过直接投影的方法将这些节点沿法线方向直接投影到工具表面,从而可以获得修正后的中间构形,如图 6 (b) 所示。

3 算例验证

本文所提出的基于解耦计算的多步快速成形有限元法算法已集成于自主开发的 QuickForm 板料成形模拟软件中。为验证该算法的有效性,将计算结果与现有的基于隐式算法求解的板料成形商业有限元软件 AutoForm 软件以及动力显式求解的 Dynaform 软件的模拟结果进行对比分析。翼子板具有造型复杂多变、曲率变化大,表面质量和尺寸精度要求高等特点,因此成形难度大,容易出现开裂、起皱以及棱线滑移等缺陷,并且回弹量大难以准确预测^[13]。以翼子板的冲压成形为例进行分析,可以充分地验证本文所提出算法的可

行性。

零件所用材料为热镀锌合金钢板,材料牌号为 GD53D-ZF-V22,材料参数为:抗拉强度 370.4 MPa、屈服强度 165.5 MPa、各向异性系数 1.61、硬化指数 0.22,应力-应变关系式为: $\bar{\sigma}=502.3(0.00644+\bar{\epsilon})^{0.22}$ MPa,曲线如图 7 所示。初始板料厚度为 0.65 mm,初始板料划分三角形网格后如图 8 所示,初始单元数量为 21105 个,初始节点数量为 10756 个,板料成形过程中可根据板料接触区域的工具表面曲率变化情况自适应加密板料网格尺寸,加密级数为 3 级,板料与工具之间的摩擦系数为 0.15。板料与模具的装配如图 9 所示,从下到上依次是凸模、压边圈、板料以及凹模,凹模向下运动,当凹模与压边圈接触后开始拉延过程,总行程为 424.23 mm,压边圈行程为 85 mm。采用的计算机配置为英特尔 Core i5-10400@2.90 GHz 六核/12 线程的 CPU,32 GB 内存。

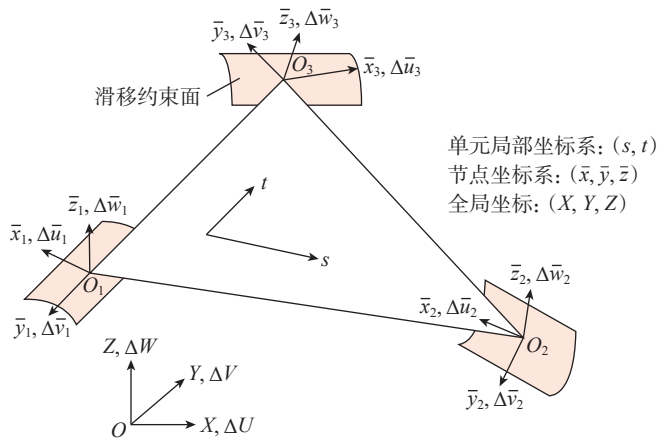


图 5 滑移约束面示意图
Fig.5 Diagram of slip constraint surface

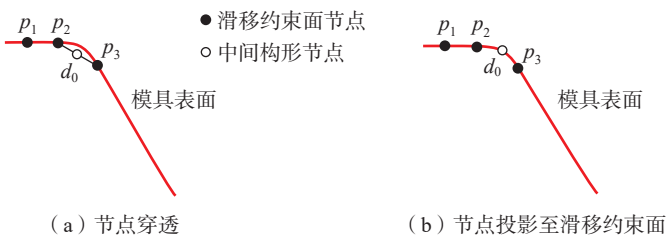


图 6 中间构形修正过程示意图
Fig.6 Diagram of intermediate configuration modification process

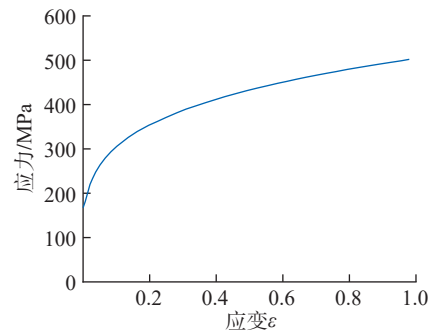


图 7 材料应力-应变曲线
Fig.7 Material stress-strain curve

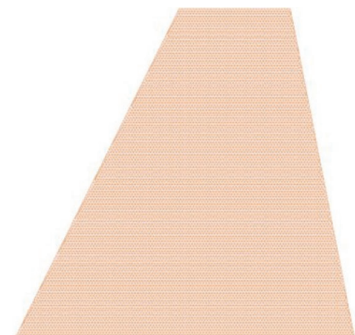


图 8 初始板料网格示意图
Fig.8 Diagram of initial sheet grid

拉伸过程中,工具向下运动接触板料后,板料受到力的作用开始发生变形,该过程采用自适应时间步长控制,时间步长即工具向下移动的距离。有效的自动时间步长控制可以确保接触约束只在从一个增量到下一个增量之间适度改变。因此要合适的时间步长,既可以提高

计算效率也可以减少对计算精度的影响,不会出现难以收敛的问题。本算法设置的拉伸过程最大时间步长为 5 mm,初始时刻步长为 2 mm,发生的变形较小,时间步长自动增加为 5 mm,当即将合模时,为避免迭代发散,时间步长减少至 0.5 mm。每一个时间步长都对应一个经过弯曲和

拉伸变形求解之后的中间构形,中间构形的变化反映了成形过程中的材料的流动情况,板料初始状态至合模状态之间若干时间步长的中间构形如图 10 所示。

上下模距离为 12 mm 时的中间构形网格如图 11 (a) 所示,构形上特征明显的区域网格经过多次加密,节点数目较多,特征不明显的区域网格没有被加密,节点数目较少。为验证中间构形预示算法的有效性,在图 11 (a) 所示中间构形上做纵向及横向的截面线,与 AutoForm 对应位置的构形截面线进行对比。图 11 (b) 为沿截面线 AA' 上分布的曲线形状,可以发现 QuickForm 和 AutoForm 软件计算的曲线形状及拉伸深度整体比较接近,但是局部区域存在一些

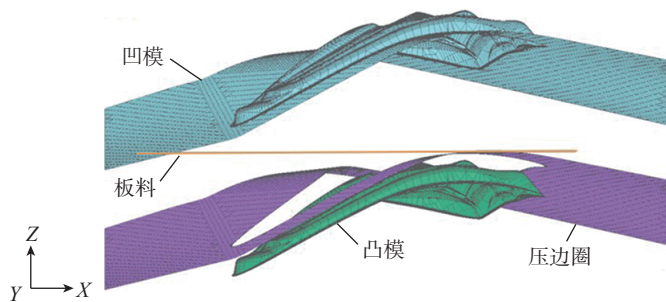


图 9 板料与模具装配图
Fig.9 Assembly drawing of sheet and die

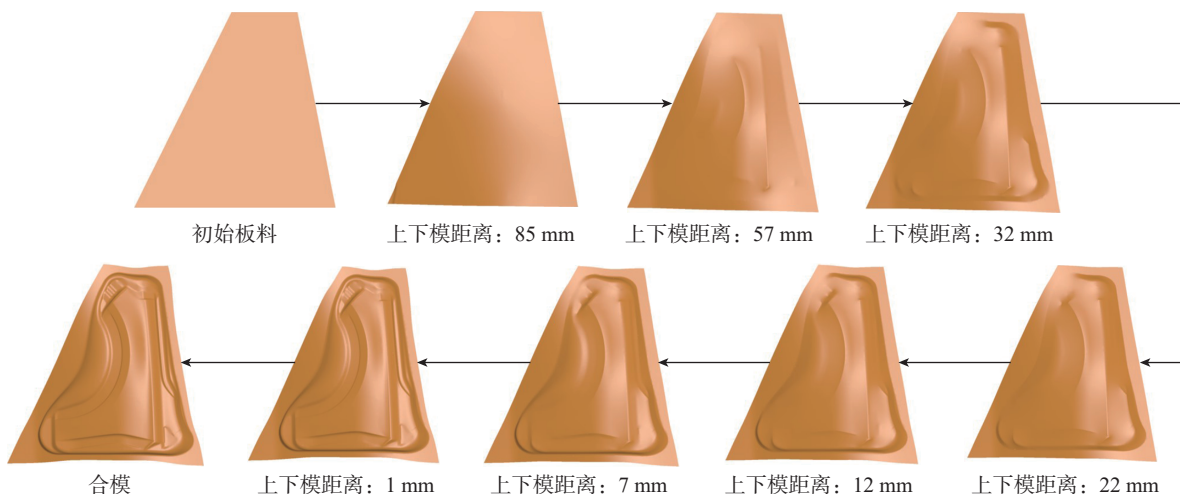


图 10 板料变形过程示意图
Fig.10 Diagram of sheet deformation process

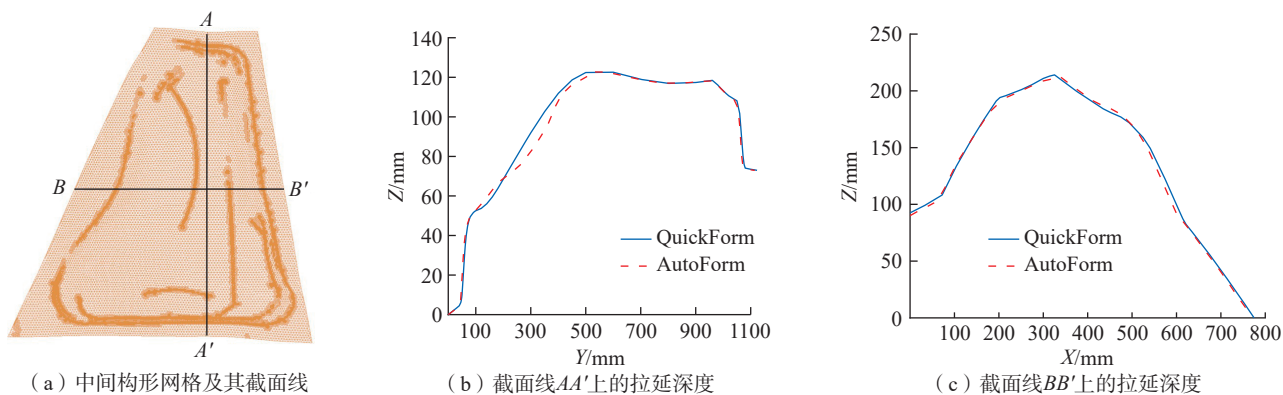


图 11 上下模距离为 12 mm 时的中间构形形状结果
Fig.11 Intermediate configuration shape results when the upper and lower die distance is 12 mm

差别。图 11 (c) 为沿截面线 BB' 上分布的曲线形状, 两个软件计算的曲线形状及拉延深度十分接近, 说明了本文提出的中间构形预示算法是有效且可行的, 能够较好地反映材料的流动情况。

合模状态下成形性和厚度分布对比见图 12 和 13, 其中一步快速成形有限元法与多步快速成形有限元法的最终模拟结果如图 12 (a) 和 (b)、图 13 (a) 和 (b) 所示。一步快速成形有限元法没有中间构形的预示过程, 因此模拟所得的零件成形性稍差, 零件上特征复杂的区域成形不充分, 最大厚度与最小厚度也偏大, 精度稍差。一步快速成形有限元法的计算时间为 29 s, 多步快速成形有限元法 (QuickForm) 的计算时间为 216 s, QuickForm 在保证模拟精度的情况下仍可在几分钟内完成计算, 保证了求解效率。

从图 12 可以看出, QuickForm、AutoForm 二者成形性的整体分布情况接近, 安全、变形不足, 起皱趋势和

趋势区的位置基本一致。从图 13 可以看出, QuickForm、AutoForm 模拟的板料厚度整体分布趋势一致, 且最大增厚和最大减薄的位置一致。最大厚度 QuickForm 的计算结果为 0.691 mm, AutoForm 为 0.673 mm, 相对误差为 2.7%; 最小厚度 QuickForm 的计算结果为 0.526 mm, AutoForm 为 0.499 mm, 相对误差为 5.4%。相较于 QuickForm 和 AutoForm 两种软件, Dynaform 模拟的零件整体成形性较差, 变形不足的区域较大, 且最大增厚和最大减薄的位置与另外两种软件相比有所差别, 出现差距的主要原因是 Dynaform 软件求解采用的是动力显式算法, 该算法会引起惯性效应, 从而使拉延结果受到影响。以上模拟结果说明了本文所提出的算法计算结果是合理可行的。在求解时间上, QuickForm 的计算总时间为 216 s, AutoForm 计算总时间为 165 s, Dynaform 计算总时间为 39 min+48 s, QuickForm 计算效率要远高于 Dynaform 但是略低于 AutoForm 软

件。QuickForm 的算法目前是单核计算, 尚未实现并行求解, 因此计算效率低于 AutoForm, 但是考虑到未来实现本文提出算法的并行计算版本后, 计算效率有很大的提升空间。

基于上述仿真模拟的工艺参数, 进行零件的拉深成形试验, 获得成形后的产品如图 14 所示, 翼子板外观无开裂、起皱等缺陷, 成形质量较好。将试验制备的最终成形零件的截面厚度分布、外轮廓线等结果与 QuickForm 自研算法的计算结果进行对比, 如图 15 所示, 可以发现试验结果与 QuickForm 的模拟结果基本一致, 模拟精度可以满足实际生产需求。

4 结论

(1) 在一步快速成形有限元法的基础上, 引入了中间构形的多步快速成形有限元法, 并提出了一种基于解耦计算的中间构形构造方法, 将板料成形过程中的变形解耦为弯曲变形和拉伸变形两个过程, 提高了求解

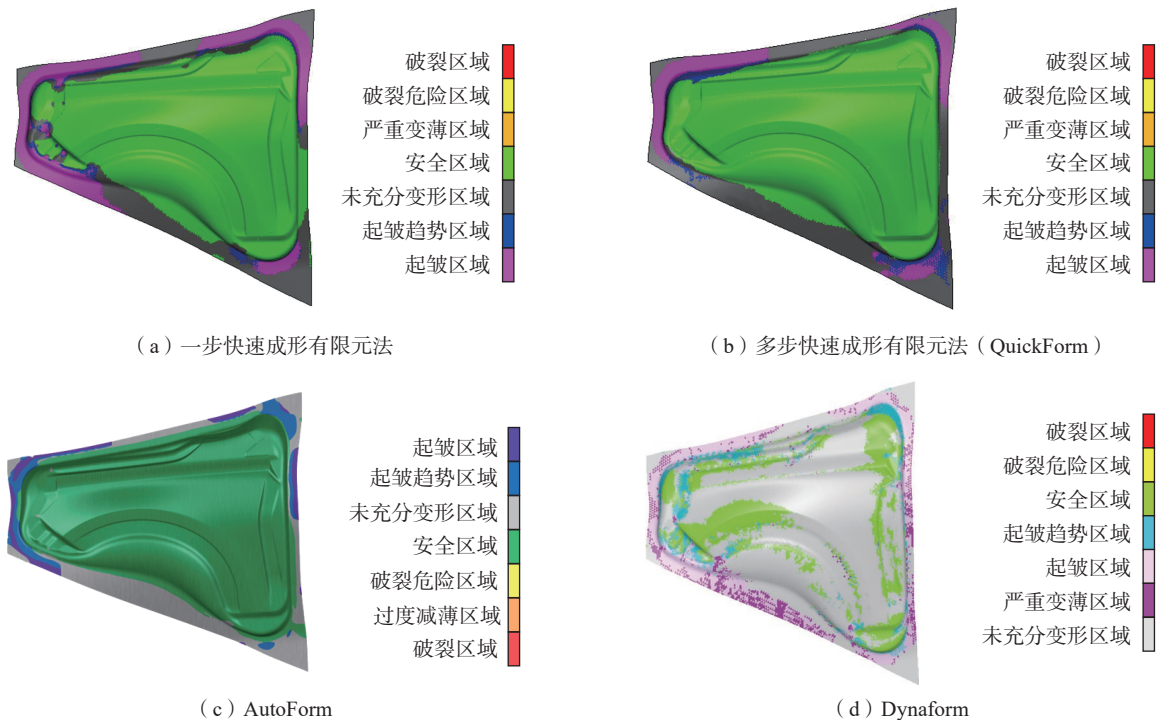
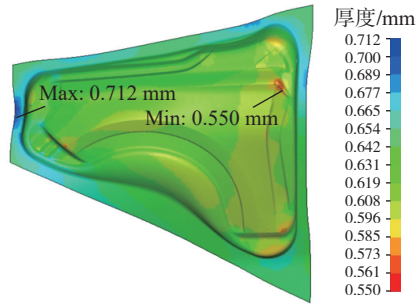
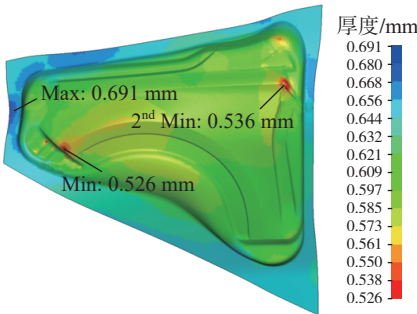


图 12 合模状态下成形性分布对比

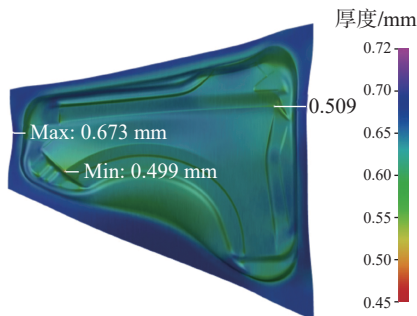
Fig.12 Comparison of formability distribution under clamping state



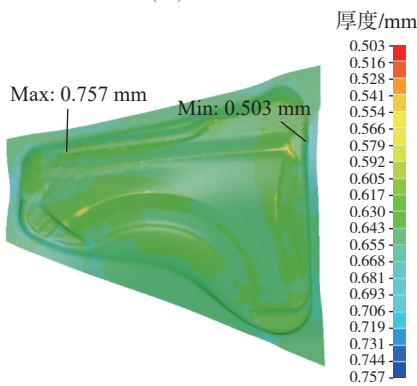
(a) 一步快速成形有限元法



(b) 多步快速成形有限元法 (QuickForm)



(c) AutoForm



(d) Dynaform

图 13 合模状态下厚度分布对比

Fig.13 Comparison of thickness distribution under clamping state

效率,并通过算例的模拟结果对比验证了本文提出的中间构形构造方法的有效性。

(2) 以典型钣金件翼子板为案

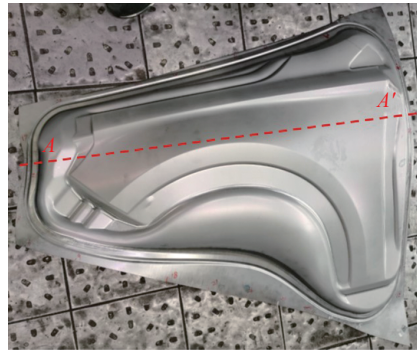
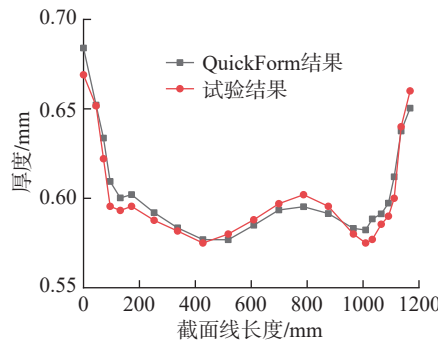
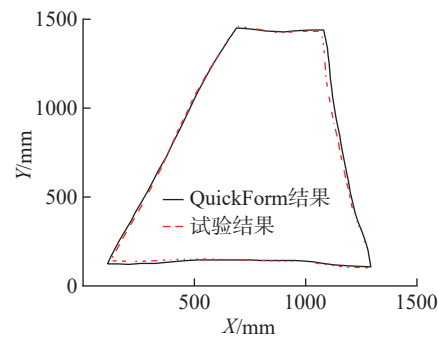


图 14 成形后的产品

Fig.14 Finished product



(a) 截面线AA'上的厚度分布



(b) 板料外轮廓线

图 15 最终成形零件与 QuickForm 的计算结果对比

Fig.15 Comparison of final formed parts and calculation results of QuickForm

例进行模拟分析,并将计算结果与 AutoForm、Dynaform 软件的计算结果进行对比,验证了本文所提出算法对钣金零件成形预测的准确性以及高效率;在相同工艺参数下进行成形试验,试验结果进一步表明本文所提出算法的可行性,模拟精度符合实际生产要求,可以在钣金件生产设计初期进行参数优化,从而降低模具制造成本,缩短产品试制周期。

参考文献

[1] 朱永胜,刘洋.先进钣金成形技术在航空制造领域应用分析[J].科技创新与应用,2019(34):110-111.

ZHU Yongsheng, LIU Yang. Application analysis of advanced sheet metal forming technology in aviation manufacturing field[J]. Technology Innovation and Application, 2019(34): 110-111.

[2] 陆璐,王辅忠,王照旭.板料成形数值模拟有限元求解算法[J].材料导报,2011,25(3):111-115.

LU Lu, WANG Fuzhong, WANG Zhaoxu. The algorithm of finite element method with numerical simulation of sheet metal forming[J]. Materials Review, 2011, 25(3): 111-115.

[3] LEE C H, HUH H. Blank design and strain estimates for sheet metal forming processes by a finite element inverse approach with initial guess of linear deformation[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1998, 82(1-3): 145-155.

[4] BATOZ J L, DUROUX P, GUO Y Q, et al. An efficient algorithm to estimate the large strains in deep drawing[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1996, 143(8): 383-388.

[5] NACEUR H, DELAMÉZIERE A, BATOZ J L, et al. Some improvements on the optimum process design in deep drawing using the inverse approach[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 146(2): 250-262.

[6] LI Y M, ABBÈS B, GUO Y Q. Two efficient algorithms of plastic integration for sheet forming modeling[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2007, 129(4): 698-704.

[7] 沈启彧,卫原平,王玉国,等.金属板料成形的快速有限元分析[J].计算力学学报,2000,17(2):242-245.

SHEN Qiyu, WEI Yuanping, WANG Yuguo, et al. Fast finite element analysis for sheet metal forming[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2000, 17(2): 242-245.

[8] WANG Y, SHEN Q Y, WANG Y G, et al. Research on applying one-step simulation to blank design in sheet metal forming[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 120(1-3): 111-114.

[9] 周平,胡平,张健伟,等.基于节点切平面解耦列式的一步逆成形法[J].机械工程学报,2010,46(22):24-30.

ZHOU Ping, HU Ping, ZHANG Jianwei, et al. One-step inverse approach based on decoupled formulation in nodal tangent plane[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(22): 24-30.

[10] GUO Y Q, LI Y M, BOGARD F, et al. An efficient pseudo-inverse approach for damage modeling in the sheet forming process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 151(1-3): 88-97.

[11] 唐炳涛, 赵震, 陈军, 等. 多工步板料成形问题的多步反向模拟法[J]. 机械工程学报, 2006, 42(12): 211-217.

TANG Bingtao, ZHAO Zhen, CHEN Jun, et

al. Development of multistage sheet metal forming simulation based on multi-step inverse analysis approach[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(12): 211-217.

[12] 陈伟, 那景新. 基于拟全量理论的多步正向成形模拟方法[J]. 工程力学, 2016, 33(10): 236-242.

CHEN Wei, NA Jingxin. The multi-step positive approach for sheet metal forming

simulation based on the quasi-deformation theory[J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(10): 236-242.

[13] 蒋磊, 马培兵, 王龙, 等. 翼子板成形数值模拟与工艺优化[J]. 锻压技术, 2021, 46(11): 113-123.

JIANG Lei, MA Peibing, WANG Long, et al. Numerical simulation and process optimization on fender forming[J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46(11): 113-123.

Multi-Step Quick Forming Finite Element Method Based on Decoupling Calculation

BAO Yidong¹, XI Jie¹, QIN Xuejiao¹, LIU Yongcai²

(1. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Changzhou Institute of Technology, Changzhou 213032, China)

[ABSTRACT] Sheet metal parts are important parts of aircraft body and automobile body, in order to shorten the production cycle of sheet metal parts, finite element method is used to evaluate the manufacturability of parts in the initial stage of part design. In order to improve the calculation efficiency of the existing finite element method of sheet metal forming and ensure the simulation accuracy, based on the theory of one-step quick forming finite element method, multi-step quick forming finite element method was studied. The influence of loading path and deformation history in sheet metal forming process is considered by introducing intermediate configuration. The structure of intermediate configuration is the key of multi-step quick forming finite element method, the intermediate configuration is decoupled into two independent processes of bending deformation and tensile deformation, which were calculated. In the bending deformation stage, the slip constraint surface is calculated according to the position relationship between the sheet and the die without considering the material flow. At the stage of tensile deformation, the material flow is restricted to the slip constraint plane, and the intermediate configuration is obtained through stress balance iteration and node modification. Taking a typical sheet metal part as an example to simulate the forming, and comparing with the existing commercial finite element software in calculation accuracy and efficiency, the feasibility and effectiveness of the algorithm are verified. The results show that the proposed algorithm can quickly construct reasonable intermediate configuration and accurately predict the formability and thickness distribution of parts.

Keywords: Multi-step quick forming finite element method; Intermediate configuration; Decoupling calculation; Slip constraint surface; Sheet metal forming

(责编 七七)