

多腔变断面薄壁件冷挤压过程的有限元分析

Finite Element Analysis of Multicavity Thin Wall Part With Changing Section During Cold Extrusion Process

北京科技大学机械学院 李会民 胡福泰
中国重型机械进出口总公司 宋志明

[摘要] 根据刚塑性有限元理论,用非线性有限元分析软件 Deform3D 对多腔变断面薄壁件冷挤压成形过程进行了有限元分析。模拟多腔变断面薄壁件的冷挤压变形过程,获得了挤压变形时金属流动、应力和应变分布情况,分析了产生缺陷的原因,并提出了相应的解决办法。

关键词: 塑性成形 数值模拟 多腔变断面薄壁件 冷挤压

[ABSTRACT] According to the plastic-rigid finite element theory, the cold extrusion forming process of multicavity thin wall part with changing section is analyzed by using non-linear finite element analysis software Deform3D. The flow, stress and strain distributions of metal during extrusion deformation are obtained through simulation of cold extrusion process of multicavity thin wall part with changing section. The reasons of defects are analyzed and the solutions are suggested.

Keywords: Plastic forming Numerical simulation Multicavity thin wall part with changing section Cold extrusion

多腔变断面薄壁件是一种复杂结构零件,用传统的机加方法不但浪费材料、耗能高而且效率低、成本较高。采用冷挤压加工的方法可以提高产品精度,缩短产品交货期,减少或免除切削加工,降低成本,节省原材料,降低能耗,提高产品性能。然而,传统的冷挤压工艺分析和模具设计主要依靠工程类比和设计经验,要经过反复试模和修模来调整工艺,以消除挤压成形过程中的产品缺陷,这种方法显然无法满足高速发展的加工业的要求,因此建立适当的过程模拟非常重要^[1]。

本课题所研究的多腔变断面薄壁件属非直壁类零件,是矩形和锥形等形状的组合,由拐角、棱角和锥度不同的倾斜侧壁等部分组成(见图1),因形状复杂,在成形过程中会产生各种问题。本课题从数值模

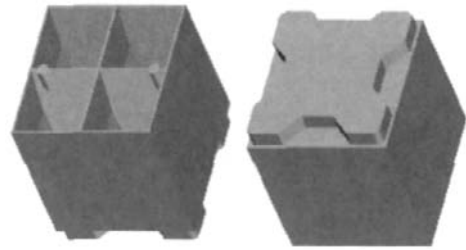


图1 零件示意图

Fig.1 Sketch of part

拟的角度出发,借助有限元分析软件 Deform3D,对多腔变断面薄壁件的挤压成形过程进行了数值模拟,初步探讨了该零件的成形特点,并分析了产生缺陷的原因及消除办法。

1 刚塑性有限元的基本理论

1.1 虚功率方程(平衡方程)

由于大变形会引起构型的变化,对平衡方程也会产生影响。按 Lagrange 描述的虚功率方程为^[1]

$$\int_{V_0} S_{ij} E_{ij} dV_0 = \int_{S_0} P_i^0 V_i dS_0 + \int_{V_0} b_i^0 V_i dV_0, \quad (1)$$

式中, S_{ij} 为第二 Piola-Kirchhoff 应力张量的分量; E_{ij} 为 Green 应变张量变化率的分量; P_i^0 为在初始构形中受载表面上的表面 S_0 力分量; b_i^0 为在初始构形中单位体积的体力分量; V_0 为初始构形时的体积; V_i 为虚位移。

1.2 本构方程

本构方程是表达变形体的应力或应力变化率与应变或应变速率之间关系的物理方程^[2]。本构方程为

$$\dot{\sigma}_{ij} = \sigma_{ij}, \quad (2)$$

式中, $\dot{\sigma}_{ij}$ 为单元应变速率张量, σ_{ij} 为单元应力偏张量, σ 为材料模量,其计算公式为

$$\bar{\epsilon} = \frac{3}{2} \bar{\epsilon}^e$$

其中 $\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{3}{2} (\dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij})^{1/2}}$ 为有效应力, $\bar{\epsilon} = \sqrt{\frac{2}{3} (\dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij})^{1/2}}$ 为有效应变。

1.3 有限元列式

由于几何非线性和材料非线性的原因,需将平衡方程离散化为一个关于节点位移增量的非线性方程组,通过 Newton-Raphson 算法迭代求解。刚塑性有限元方程的矩阵形式可描述为^[3]

$$[S_{n-1}] \{u\}_n = \{R_{n-1}\}, \quad (3)$$

式中, $[S_{n-1}]$ 为第 $n-1$ 步当量刚度, $\{u\}_n$ 为第 n 步节点位移增量阵列, $\{R_{n-1}\}$ 为单元的应力张量。

2 多腔变断面薄壁件冷挤压过程的有限元仿真

2.1 有限元分析初始条件

材料为 Al6063, 用棒料制作成外形尺寸为 $\phi 60\text{mm} \times 70\text{mm}$ 的坯料, 单元类型为四节点四面体单元, 环境温度为 25, 冷挤压变形流动应力 $\bar{\sigma}$ 由如下公式计算:

$$\bar{\sigma} = 209 (\bar{\epsilon})^{0.122}$$

式中, $\bar{\sigma}$ 为有效应力, $\bar{\epsilon}$ 为有效应变。不考虑挤压过程中, 模具对坯料做功而导致的坯料温度升高, 接触面摩擦系数为 0.08。

2.2 有限元模型的建立

由于 Deform3D 系统没有直接实体建模的功能, 必须通过中间格式如 *.STL、*.UNV、*.IGS 等格式导入实体模型。首先在 Pro/Engineer 的实体设计模块中创建三维实体模型, 然后保存为 *.STL 格式, 最后由 Deform3D 前处理器读取。整个模型由凸、凹模的 2 个刚体和 1 个圆柱坯料构成(图 2), 凸模和凹模被定义

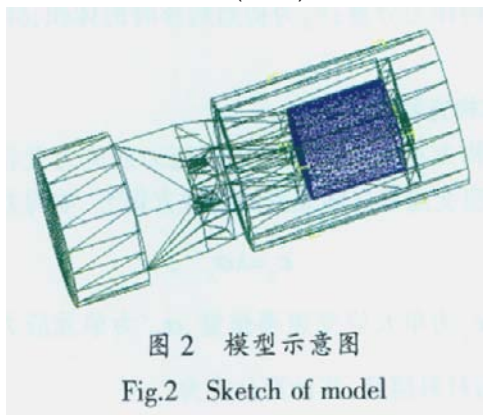


图 2 模型示意图
Fig.2 Sketch of model

为刚体(Rigid), 圆柱坯料定义为塑性体。圆柱坯料用四面体四节点单元划分网格, 整个坯料初始共划分四面体单元 18 503 个, 节点 4 259 个。

2.3 模拟结果分析

图 3 给出了不同阶段金属在挤压过程中的流动情况。在初始阶段, 金属主要向凹模流动, 充满底部后向上流动(见图 3 的增量步 100)。在这一阶段, 金属的流动相对较均匀。紧接着往下挤压时, 金属的流动出现严重的不均匀性, 中间的金属流动较快, 四周较慢。在最后阶段, 由于金属流动的不均匀性, 会在薄壁件上部的十字处产生开裂现象。这主要是由于凸模的 4 个爪间的间隙不同, 造成金属流通的不均匀性, 使局部产生应力集中、应变过大, 从而导致开裂。图 4 给出了最后成形的等效应力和等效应变分布情况, 表明在底部等效应力和等效应变都为最大, 凸模与凹模的这一部分都先磨损。因此, 通过模拟挤压过程, 可发现挤压过程的缺陷, 便于及时修改模具结构来提高产品质量。

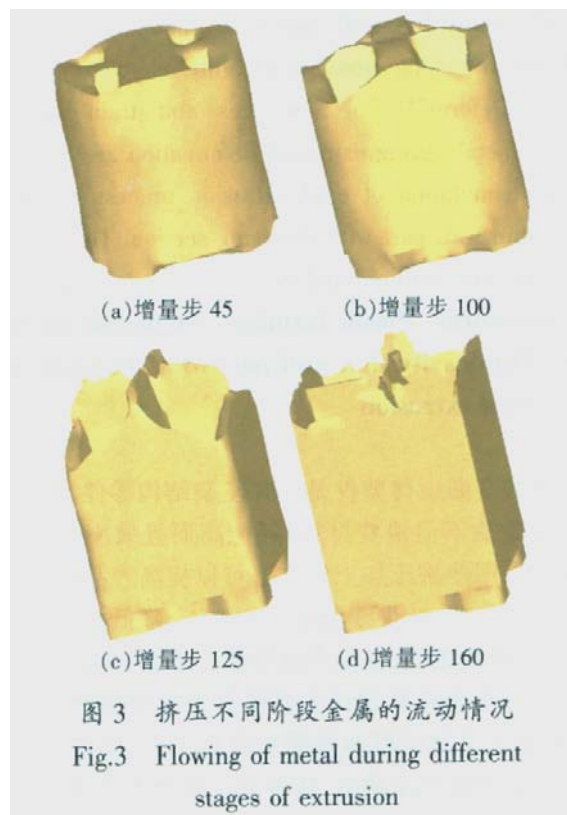
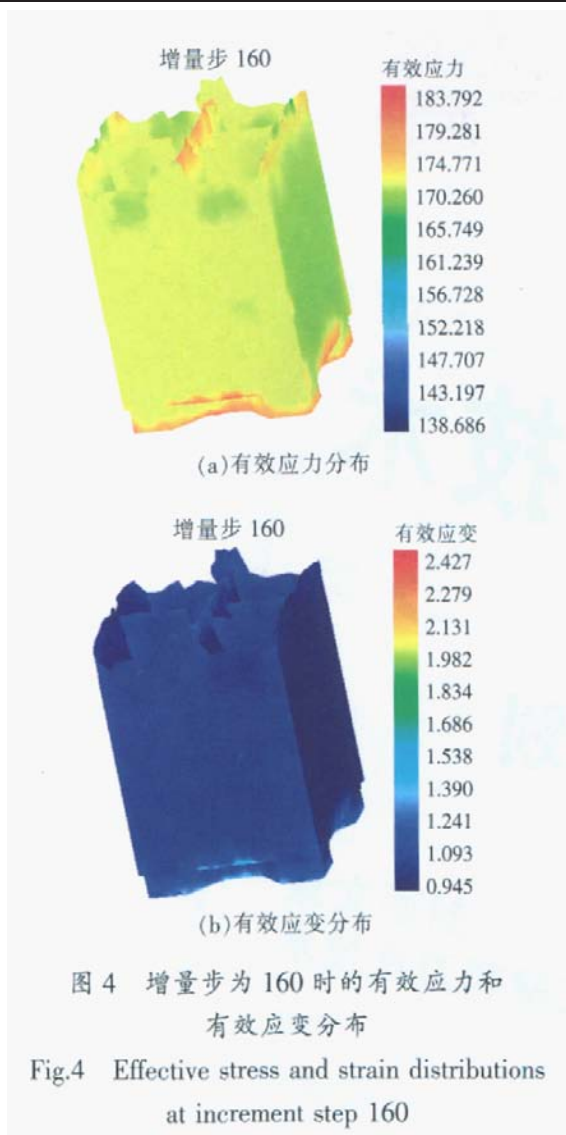


图 3 挤压不同阶段金属的流动情况
Fig.3 Flowing of metal during different stages of extrusion

3 结束语

本课题采用刚塑性有限元理论, 利用三维塑性有限元分析软件 Deform3D 成功地仿真了多腔变断面薄壁件挤压变形过程, 深入探讨了挤压过程中金属流动



的规律,揭示了复杂多腔变断面薄壁件挤压成形过程中造成的开裂、表面划伤等缺陷及产生的原因,并提出了相应的解决方法。复杂零件成形问题主要是控制金属的流动,模具的结构是影响金属流动成形的主要因素。应用有限元模拟技术全面、动态分析金属塑性变形过程流动规律,可及时发现塑性变形过程可能出现的缺陷,从而为缺陷的预防和工艺方案的修改提供科学依据。

参 考 文 献

- [1] 闫洪,夏巨谌,胡国安. 双孔模型材挤压过程的有限元分析. 塑性工程学报, 2003(2): 28~32.
- [2] 余斌. 薄壁方锥形件冷挤压变形过程的分析及数值模拟[D]. 北京: 北京科技大学, 2005.
- [3] 李旻明, 彭颖红. 刚塑性含空穴材料的有限元方程的研究. 锻压技术, 2002(3): 43~46.

(责编 咏智 晓霏)

(上接第 84 页)

高了2%左右,相应的耗油率降低了约2%^[4]。上述应用说明刷式封严已能在较高的工作温度与高的切线速度下长期工作,这也是刷封技术在高温、高切向速度下的第一次应用,扩大了刷封的使用范围。由于刷式封严有较好的封严效果,能较显著地提高发动机性能,普惠公司在1996年,对用于波音747、波音767等客机上的PW4000系列发动机进行了同样的改装,作为PW4000系列发动机提高性能计划的主要措施之一。同时,GE公司也在其用于B777客机的GE90发动机低压涡轮中,采用了4套刷式封严装置。GE90发动机采用刷封后,封严效果好,在高压压气机后采用可使推力增加2%。IHPTET计划,已将刷封作为在第二阶段(到2000年)中达到实用的项目。由于材料等的改进,目前刷封也用于油腔的封严处^[4]。

5 结束语

传统的篦齿封严装置虽然存在着效率低、容易碰磨等很多缺点,但经过不断采用新工艺、新技术、新结构,仍具有广阔的应用空间,如蜂窝技术在一些新研制的航空燃气涡轮发动机上还在应用;刷式封严技术由于其具有结构简单、安装方便、重量轻、稳定性和密封性好等优点,在一些新研制的发动机上得到了广泛应用;在某些发动机上同时采用篦齿封严装置、浮动环式封严装置、石墨封严装置和刷式封严装置。

欧洲的EJ200发动机和美国F119发动机都将采用刷式封严装置;目前,还在发展一种用于高压压气机后的气-气非接触式气膜封严装置,它也将获得较高的封严效果,能使发动机推力提高约2%~2.5%^[4]。随着人们不断追求高性能、高可靠性和高经济性的航空发动机,更新更好的封严技术如指状封严技术、环形浮动薄膜封严技术也纳入人们的研究范围,预计将在未来高性能航空燃气涡轮发动机上得到应用。

参 考 文 献

- [1] 费多洛夫, 聂加耶夫. 航空燃气涡轮发动机原理. 北京: 国防工业出版社, 1984.
- [2] 曹玉璋. 航空发动机传热学. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005.
- [3] 王如根, 高坤华. 航空发动机新技术. 北京: 航空工业出版社, 2003.
- [4] 陈光. 航空发动机结构设计分析. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2006.

(责编 钟元)