

多点成形冲头动态接触压力仿真分析*

陈雪^{1,2} 李明哲¹ 付文智¹ 龚学鹏¹

(1. 吉林大学无模成形技术开发中心, 长春 130025; 2. 北华大学机械工程学院, 吉林 132021)

【摘要】 采用弹塑性有限元法,建立多点模具复杂多接触面的力学模型,对不同材料、不同厚度和不同曲率半径的球形件多点对压成形过程进行数值模拟,分析了冲头最大接触压力的变化过程及其影响因素。结果表明:材料的弹性模量和屈服强度越大,成形件的板厚和变形量越大,所需的成形力就越大,所以冲头的接触压力就越大。

关键词: 多点成形 冲头 接触压力 数值模拟

中图分类号: TG302 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2010)10-0223-04

Simulation on Dynamic Contact Forces of Punches in Multi-point Forming Process

Chen Xue^{1,2} Li Mingzhe¹ Fu Wenzhi¹ Gong Xuepeng¹

(1. Dieless Forming Technology Center, Jilin University, Changchun 130025, China

2. School of Mechanical Engineering, Beihua University, Jilin 132021, China)

Abstract

A mechanics model of multi-point die that contained complicate multi-contact surfaces was built by elastic-plastic finite element method, different materials with different thickness and deformations of spherical surface parts were simulated during the forming process, the variation histories of maximal contact forces of punches and their correlative factor were analyzed. The results indicated that the contact forces of punches became larger and larger along with the increase forming forces, when the elastic modulus and yield strength of material were bigger, the thickness and deformations of parts were also bigger.

Key words Multi-point forming, Punches, Contact force, Numerical simulation

引言

多点成形是一种柔性的板料数字化加工技术^[1-2]。到目前为止,国内外关于多点成形技术的研究主要围绕着对压痕、起皱、拉裂与回弹变形缺陷的数值模拟^[3-6]以及不同成形工艺方法的数值模拟^[7-9]等,还未见关于多点冲头受力状况的相关研究报道。本文采用弹塑性接触非线性数值算法,研究不同材料参数、不同板厚和不同变形量在成形球形件的多点成形过程中冲头受力变化,为多点模具

结构强度评估和结构设计提供理论依据。

1 弹塑性接触数值算法

多点成形中,基本体冲头与板料的接触表现为多体间非连续性动态接触问题。采用主从面算法先进行全局搜索确定可能接触的节点和曲面片,再进行局部搜索来确定最大的接触点对,然后采用罚函数来处理接触约束条件,并假定接触界面满足修正的 Coulomb 摩擦定律。

在多点成形数值模拟时,将基本体视为刚体,不

收稿日期: 2009-11-18 修回日期: 2010-01-04

* 国家自然科学基金资助项目(50275063)和吉林大学“985 工程”资助项目

作者简介: 陈雪,博士生,北华大学讲师,主要从事板材拉形工艺与数值模拟研究,E-mail:chenxue781213@126.com

通讯作者: 李明哲,教授,博士生导师,主要从事无模成形工艺及设备、塑性加工过程数值模拟研究,E-mail:limz@jlu.edu.cn

考虑其形变。各个冲头与板料在 t 时刻的接触模型如图 1 所示,接触构形分别记为 ${}^i\Omega_{iP}$ 和 ${}^i\Omega_B$, 界面分别为 ${}^iS_{iP}$ 和 iS_B , 接触面记为 ${}^iS_{iC} = {}^iS_{iP} \cap {}^iS_B$, 一般将冲头设为主动接触面, 板料设为从动接触面。冲头与板料接触时的判断条件为: ${}^i\Omega_{iP} \cap {}^i\Omega_B > 0$, 其中 i 为冲头的编号, $i = 1, 2, \dots, n$ 。

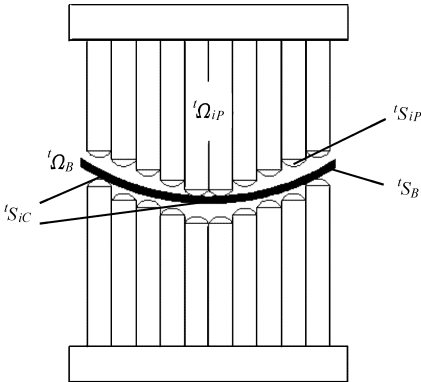


图 1 多点模具二维接触模型
Fig. 1 2-D contact of multi-point die

1.1 接触有限元方程

利用虚功原理可得接触有限元方程

$$\int_{\Omega+\Omega'} \delta \boldsymbol{\varepsilon}^T \mathbf{S} d\Omega = \int_{\Omega+\Omega'} \delta \mathbf{u}^T \mathbf{f} d\Omega + \int_{\Gamma_{\sigma}+\Gamma_{\sigma'}} \delta \mathbf{u}^T \bar{\mathbf{p}} d\Gamma + \int_{\Gamma_{c_1}} (\delta \mathbf{u}_n^T (\mathbf{f}_n + \mathbf{f}'_n) + \delta \mathbf{u}_t^T (\mathbf{f}_t + \mathbf{f}'_t)) d\Gamma + \int_{\Gamma_{c_2}} (\delta \mathbf{u}_n^T \mathbf{f}_n + \delta \mathbf{u}_t^T \mathbf{f}'_t + \delta \mathbf{u}_t^T \mu |\mathbf{f}_n| |\mathbf{t}| + \delta \mathbf{u}_t'^T \mu |\mathbf{f}'_n| |\mathbf{t}'|) d\Gamma \quad (1)$$

式中 $\mathbf{f}$ ——体积力 $\bar{\mathbf{p}}$ ——表面力
 $\mathbf{f}_n, \mathbf{f}'_n$ ——接触面法向力
 $\mathbf{f}_t, \mathbf{f}'_t$ ——接触面切向力
 $\delta \mathbf{u}, \delta \boldsymbol{\varepsilon}$ ——虚位移和虚应变
 $\mathbf{t}, \mathbf{t}'$ ——切向单位矢量
 Ω, Ω' ——接触体体积
 $\Gamma_{\sigma}, \Gamma_{\sigma'}$ ——接触体面力的边界
 Γ_{c_1} ——相对滑动的接触区域
 Γ_{c_2} ——未滑动的接触区域
 μ ——摩擦因数

1.2 罚函数算法

在罚函数算法中, t 时刻接触点的法向穿透量为^[10]

$${}^i d = ({}^i x_1 - {}^i x_2) {}^i \mathbf{e}_1 \quad (2)$$

式中 ${}^i x_1, {}^i x_2$ ——主动接触点和被动接触点在 t 时刻的坐标

${}^i \mathbf{e}_1$ ——接触点处的法向单位矢量

根据罚函数算法可得接触面法向力为

$${}^i \mathbf{f}_n = -\alpha {}^i d \quad (3)$$

式中 α ——惩罚因子

负号表示接触力与穿透方向相反。

1.3 修正 Coulomb 摩擦定律

在处理接触边界约束中需要引入库仑 (Coulomb) 摩擦模型。为了提高有限元计算的稳定性, 使接触面切向力随着相对位移增量 $\Delta \mathbf{u}_t$ 连续变化, 采用修正的库仑摩擦定律。

此时修正的接触面切向力为

$$\mathbf{f}_t = \mu \|\mathbf{f}_n\| \varphi(\Delta \mathbf{u}_t) \frac{\Delta \mathbf{u}_t}{\|\Delta \mathbf{u}_t\|} \quad (4)$$

式中 $\varphi(\Delta \mathbf{u}_t)$ ——位移连续函数

2 有限元模型建立

采用非线性有限元法, 建立多点模具复杂多接触面的三维弹塑性接触力学模型。板料尺寸为 $140 \text{ mm} \times 140 \text{ mm}$, 上下基本体冲头有效排列方式为 20×20 , 基本体冲头间距为 7 mm , 材料为 45 号钢。板料和基本体冲头都采用四边形 shell 单元, 成形速度设为 1 m/s , 板料与冲头之间的接触为“刚体-变形体”接触, 接触算法采用罚函数法, 摩擦算法采用修正的库仑摩擦定律, 摩擦因数为 0.1。由于本模型中存在着诸多接触面, 定义了许多接触单元对而使计算时间开销大。考虑到模型的对称性, 为了节省 CPU 计算时间, 采用 1/4 有限元模型, 如图 2 所示。

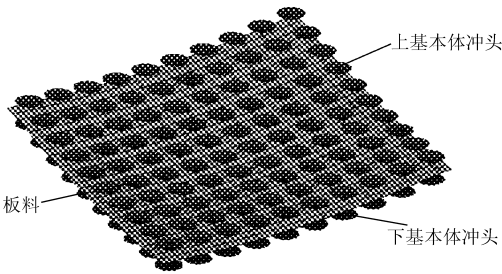


图 2 球形件 1/4 有限元模型

Fig. 2 Finite element model of 1/4 spherical surface part

3 数值模拟

多点成形中, 影响板料与冲头接触情况的因素很多, 其中材质、板厚和变形量为主要因素, 以双向曲率的球形件为例, 分析上述 3 种因素对冲头接触压力变化的影响。

3.1 材料参数的影响

对目标曲率半径 $R = 400 \text{ mm}$ 、厚度 $T = 1.5 \text{ mm}$ 的球形件多点对压成形过程进行数值模拟。板料分别为工业纯铝 (L2Y2)、铜 (Cu) 和汽车用钢 (08Al), 采用双线性等向强化材料模型, 材料参数见表 1。

图 3 为 3 种不同材料成形球形件时上、下基本体冲头最大接触压力 $f_{\max}$ 随基本体行程 h 的变化情

表 1 材料参数

Tab.1 Mechanical parameters of materials

材料	密度 $\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	弹性模量 E/GPa	屈服强度 σ_s/MPa	抗拉强度 σ_b/MPa	泊松比 μ
L2Y2	2 750	71	113	148	0.3
Cu	8 900	125	234	245	0.3
O8Al	7 850	207	276	260	0.3

况。可以看出,冲头所受的接触压力随着基本体行程的增加而逐渐增大,成形初期,冲头受力比较平缓,当行程大于 5 mm 时,冲头的接触压力急剧增大,这是由于随着基本体行程的增加,工件的变形量会增大,当行程超过一定值后,材料发生强化,导致接触压力明显增大。由图 3a 可知,成形 O8Al 板时冲头的最大接触压力为 776 N;成形 Cu 板时冲头的最大接触压力为 626 N;成形 L2Y2 板时冲头的最大接触压力为 490 N。由图 3b 可知,成形 O8Al 板时冲头的最大接触压力为 890 N;成形 Cu 板时冲头的最大接触压力为 798 N;成形 L2Y2 板时冲头的最大接触压力为 512 N。由此可见,上基本体冲头比下基本体冲头接触压力偏小些,这是由于球形件弯曲变形时内压应力所致。成形 L2Y2 材料时,冲头的受力载荷最小;成形 O8Al 材料时,冲头的受力载荷最大。说明材料的弹性模量越大,板料抵抗弹性弯曲变形的能力越强,冲头与板料的接触压力就越大;材料的屈服强度越高,板料的塑性变形抗力越大,冲头与板料的接触压力就越大。

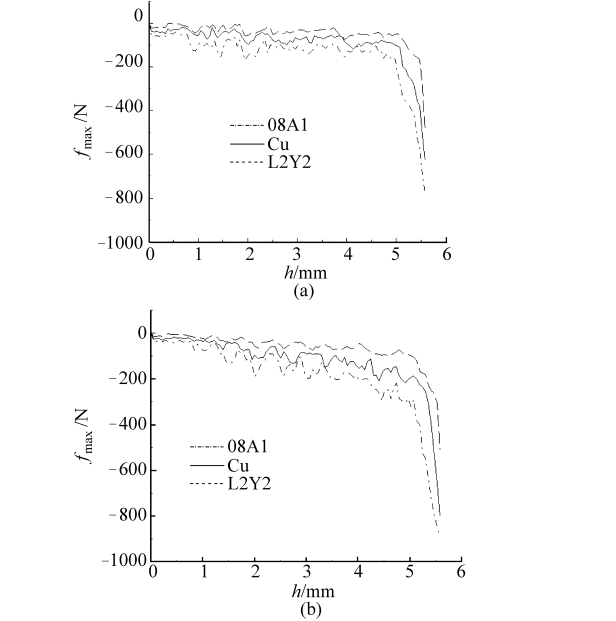


图 3 不同材料时冲头最大接触压力随行程的变化曲线

Fig.3 Maximal contact forces of punches vs distance using different materials

(a) 上基本体冲头 (b) 下基本体冲头

3.2 板料厚度的影响

对目标曲率半径 $R = 350\text{ mm}$ 的 O8Al 材料球形件多点对压成形过程进行数值模拟。图 4 为 O8Al 在厚度分别为 1 mm、2 mm 和 3 mm 时上、下基本体冲头最大接触压力 f_{max} 随基本体行程 h 的变化。由图 4a 可知,成形 1 mm 厚的板料冲头所受的最大接触压力为 887 N;成形 2 mm 厚的板料冲头所受的最大接触压力为 1 360 N;成形 3 mm 厚的板料冲头所受的最大接触压力为 2 050 N。由图 4b 可知,成形 1 mm 厚的板料冲头所受的最大接触压力为 926 N;成形 2 mm 厚的板料冲头所受的最大接触压力为 1 520 N;成形 3 mm 厚的板料冲头所受的最大接触压力为 2 360 N。可见,板料越厚,变形越不容易,冲头与板料之间的作用力就越大。这是由于板料越厚,刚度越大,变形抗力越大,需要的成形力也就越大。

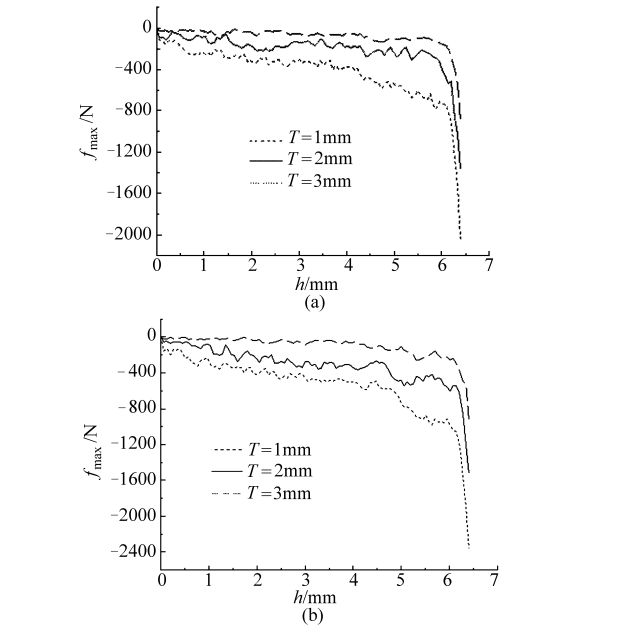


图 4 不同板厚时冲头最大接触压力随行程的变化曲线

Fig.4 Maximal contact forces of punches vs distance using different thicknesses

(a) 上基本体冲头 (b) 下基本体冲头

3.3 曲率半径的影响

对厚度 $T = 1\text{ mm}$ 的 Cu 板采用多点对压成形,对目标曲率半径 R 分别为 300 mm、400 mm 和 500 mm 的球形件进行数值模拟。图 5 为 3 种不同曲率半径的球形件成形时上、下基本体冲头最大接触压力 f_{max} 随时间步 n 的变化情况。可以看出,成形曲率半径 $R = 300\text{ mm}$ 的球形件时上、下基本体冲头所受的最大接触压力分别为 894 N 和 996 N;成形曲率半径 $R = 400\text{ mm}$ 的球形件时上、下基本体冲头最大接触压力分别为 563 N 和 576 N;成形曲率半径 $R = 500\text{ mm}$ 的球形件时上、下基本体冲头最大接触压力分别为 259 N 和 299 N。说明成形件的曲率半

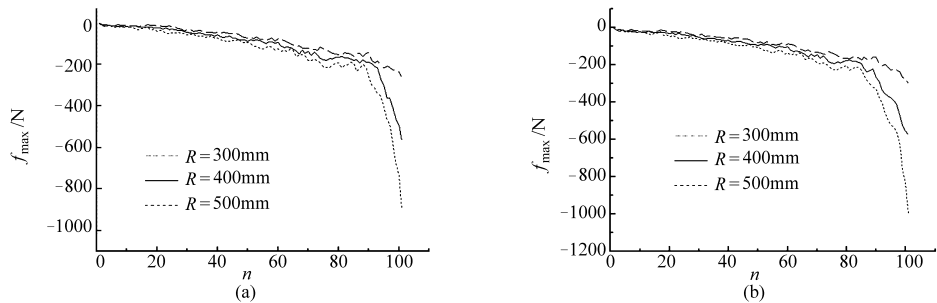


图 5 不同曲率半径时冲头最大接触压力随时间步的变化曲线
Fig. 5 Maximal contact forces of punches vs time step using different deformations
(a) 上基本体冲头 (b) 下基本体冲头

径越大,板料弯曲变形量越小,所需要的成形力越小,冲头所受的作用力越小。

模具结构设计和强度评估提供了一种切实可行的方法。

4 结论

(1)采用数值模拟方法来处理多点模具与板料之间的复杂接触耦合作用,真实地反映了冲头的受力情况,简化了实际问题的复杂程度,为多点

(2)在多点成形中,冲头受力载荷与板料材质、厚度及工件变形量有关。冲头受力随着板料的弹性模量和屈服强度的增大而增大。对于相同尺寸、相同材质的板料,板料越厚,冲头受力越大;目标曲率半径越大,工件变形量越小,冲头受力越小。

参 考 文 献

1 Li Mingzhe, Cai Zhongyi, Sui Zhen, et al. Multi-point forming technology for sheet metal parts [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 129 (1 ~ 3) : 333 ~ 338.

2 Li Mingzhe, Cai Zhongyi, Liu Chunguo, et al. Recent developments in multi-point forming technology [C] // Proceedings of the 8th International Conference on Technology of Plasticity, Verona, Italy, 2005: 707 ~ 708.

3 蔡中义, 李明哲, 付文智. 板料多点成形中压痕缺陷的分析与控制 [J]. 锻压技术, 2003, 28 (1) : 16 ~ 19.

Cai Zhongyi, Li Mingzhe, Fu Wenzhi. Analysis and control of dimpling in multi-point forming for sheet metal [J]. Forging & Stamping Technology, 2003, 28 (1) : 16 ~ 19. (in Chinese)

4 陈喜娣, 蔡中义, 李明哲, 等. 板料无压边多点成形中起皱的数值模拟 [J]. 农业机械学报, 2005, 36 (4) : 132 ~ 135.

Chen Xidi, Cai Zhongyi, Li Mingzhe, et al. Numerical simulation of wrinkling in multi-point forming for sheet metal without blank holder [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36 (4) : 132 ~ 135. (in Chinese)

5 孙刚, 李明哲, 刘纯国, 等. 薄板多点成形中的拉裂现象研究 [J]. 塑性工程学报, 2007, 14 (3) : 24 ~ 27.

Sun Gang, Li Mingzhe, Liu Chunguo, et al. Study on crack of sheet metal in the multi-point forming [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2007, 14 (3) : 24 ~ 27. (in Chinese)

6 Cai Zhongyi, Li Mingzhe, Chen Xidi. Digitized die forming system for sheet metal and springback minimizing technique [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2006, 28 (11 ~ 12) : 1 089 ~ 1 096.

7 李明哲, 李淑慧, 陈建军, 等. 板料多点成形不同工艺方法的数值模拟研究 [J]. 中国机械工程, 2000, 11 (9) : 1 042 ~ 1 046.

Li Mingzhe, Li Shuhui, Chen Jianjun, et al. Numerical simulation on different multi-point forming techniques for sheet metal parts [J]. China Mechanical Engineering, 2000, 11 (9) : 1 042 ~ 1 046. (in Chinese)

8 Tan Fuxing, Li Mingzhe, Cai Zhongyi. Research on the process of multi-point forming for the customized titanium alloy cranial prosthesis [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 187 ~ 188 : 453 ~ 457.

9 Cai Zhongyi, Wang Shaohui, Xu Xudong, et al. Numerical simulation for the multi-point stretch forming process of sheet metal parts [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 209 (1) : 396 ~ 407.

10 Hunek I. On a penalty formulation for contact impact problems [J]. Computers & Structures, 1993, 48 (2) : 193 ~ 203.