

金属薄板滚压冲裁过程数值模拟及模具参数

臧勇[✉], 穆磊, 吴迪平, 秦勤, 郜志英

北京科技大学机械工程学院, 北京 100083

[✉] 通信作者, E-mail: yzang@ustb.edu.cn

摘要 研究了在没有压下辊的情况下滚压冲裁过程的运动学特性, 据此提出了通孔滚压冲裁模具的设计方案. 在此基础上, 利用 ABAQUS 有限元软件进行了基于 Shear Failure 韧性断裂准则和任意拉格朗日-欧拉自适应网格技术的 45 号钢薄板滚压冲裁过程有限元仿真, 分析了主要参数对断面质量的影响. 仿真结果表明: 方形孔滚压冲裁时, 前后刃口依次经历板带弯曲、凸模压入、裂纹产生和发展、断裂和凸模拔出五个阶段; 滚压冲裁断面的主要质量缺陷包括断面垂直度、毛刺、塌角、压痕等; 影响滚压冲裁断面质量的主要因素包括侧隙、凸模高度、辊子半径等. 减小标称侧隙和凸模高度、增大辊子半径均会使断面质量提高, 其中又以对断面垂直度和毛刺高度的影响更为明显. 对于 45 号钢一类的碳钢, 后刃口标称侧隙以板厚的 5%~10% 为宜, 前刃口标称侧隙可以更小; 辊子半径应以大于板厚的 100~150 倍为宜; 在保证板材完全断裂的前提下, 应使凸模高度尽量减小.

关键词 钢板; 金属冲裁; 模具; 数值模拟; 运动学

分类号 TG385.2

Numerical simulation of metal sheet rotary blanking and die parameters

ZANG Yong[✉], MU Lei, WU Di-ping, QIN Qin, GAO Zhi-ying

School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

[✉] Corresponding author, E-mail: yzang@ustb.edu.cn

ABSTRACT The kinematic characteristics of rotary blanking without press rollers was researched, and then a design scheme of dies was put forward for sheet metal rotary blanking. Finite element simulation of 45# steel sheet rotary blanking processes was performed by ABAQUS software based on shear failure criterion and arbitrary Lagrangian Eulerian adaptive meshing method, and the influence of technical parameters on machining quality was analyzed according to this simulation result. It is found that the front and rear cutting edges of square holes undergo five stages during rotary blanking: metal sheet bending, punch indentation, crack initiation and propagation, material fracture and separation, and punch pullout. Quality defects in rotary blanking processes appear as perpendicularity, burr, corner collapse, indentation, etc. The main factors which influence cutting quality perspicuously include nominal clearance, punch height, roller radius, and so on. Decreasing the nominal clearance, lessening the punch height and enlarging the roller can improve cutting quality, especially are good to cutting perpendicularity and burr height. For carbon steel such as 45# steel, the nominal clearance of the rear cutting edge should be 5% to 10% of metal sheet thickness and this value of the front cutting edge can be smaller. The roller radius should be 100 to 150 times greater than metal sheet thickness. On the condition that the metal sheet could be fully separated, the punch height should be as small as possible.

KEY WORDS steel sheet; sheet metal blanking; dies; numerical simulation; kinematics

冲裁是利用模具使板料分离的冲压工序, 目前被广泛应用于汽车工业和电信工业^[1], 主要用于生

产诸如汽车部件, 机器零件以及电气设备结构件的加工制造过程, 同时还能满足大批量和高质量的生产要求^[2]. 随着时代的发展, 传统冲裁越来越不能满足制造业对低成本、低能耗、低噪音和高效率的要求^[2-3]. 滚压冲裁工艺较传统冲裁优势明显, 具有生产率高、冲裁力小、噪音低, 设备灵活、紧凑等优点^[3-5].

目前滚压冲裁工艺的理论 and 实验研究以德国慕尼黑工业大学的工作最为全面和先进^[5-6], 大部分工作集中于运动学特性、材料变形过程和滚压冲裁力等几个方面, 并且都是在前后存在压下辊的条件下完成的. 德国的 Baust Automation 公司已将该技术用于了工业生产^[3]. 在国内, 北方工业大学最先进行了滚压冲裁工艺的研究, 大部分工作集中于滚压冲裁设备的结构设计, 并实现了滚压冲裁设备与辊弯成型生产线的结合. 目前有关滚压冲裁模具参数对加工质量的影响机理研究还相对较少, 需要完善这方面的工作. 在研究传统冲裁工艺时, 很多学者使用了有限元仿真法^[1-2,7-9], 这不仅能够节约成本^[10], 还可以很好地描述加工过程中的材料行为^[1], 给研究工作带来了巨大的帮助. 鉴于此, 本文亦使用有限元仿真法对滚压冲裁工艺进行研究. 研究主要针对无压下辊的滚压冲裁工艺展开.

本文首先以量纲为一化方式研究了无压下辊时滚压冲裁的运动学特性, 在此基础上提出了模具设计方案, 并对滚压冲裁过程进行了模拟仿真. 为了保证仿真的准确性, 有限元模型采用了基于 Shear Failure 韧性断裂准则的单元删除技术和自适应网格技术, 并且采用了国内外学者使用的仿真参数数据. 最后分析了模具设计参数对加工质量的影响, 得到了具有规律性的结论.

1 运动学及模具设计参数

1.1 轨迹

半径一定的滚圆在一定直线上做无滑动滚动, 滚圆上一定点所描绘的曲线为摆线, 而滚圆半径或其延长线上的定点所描绘的曲线, 称为长短幅摆线^[11]. 滚压冲裁过程中, 将板带视为静止, 模具辊在板带上做纯滚动, 那么凸模上一点相对于板带的轨迹就是长短幅摆线. 令 r 表示滚圆半径, b 表示滚圆上一定点到圆心的距离, 根据几何关系确定这一定点的轨迹方程, 即

$$\begin{cases} x = r\theta - b\sin\theta, \\ y = r - b\cos\theta. \end{cases} \quad (1)$$

式中: θ 为滚圆滚动角度, 对象点处于垂直位置时

$\theta=0$; x 、 y 为对象点水平和垂直方向的坐标, 以 $\theta=0$ 时滚圆和板带表面的接触处为坐标原点, 滚动方向和向上为正向.

1.2 轨迹的特性

凸模高度用 h 表示, 则 $b = r + h$, 凸模刃尖的轨迹曲线如图 1 所示. 在轨迹最低处存在一个水滴形的闭合区域. 轨迹与板带上表面相交于两点, 即凸模同一刃尖在板带表面的垂直压入点和垂直拔出点, 两点之间的距离就是水滴形的宽度. 只有当凹模刃尖位于滚圆表面上时, 水滴形的宽度为零. 所以一般情况下, 在凸模压入金属板带的过程中, 前后刃口的侧隙是变化的. 因此, 模具侧面将受到来自材料的反力, 这将增加模具的磨损, 降低剪切断面的质量^[3].

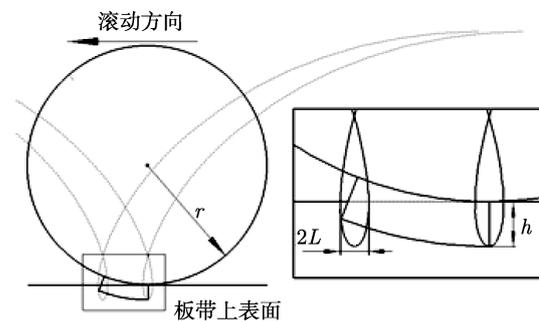


图 1 凸模刃尖轨迹

Fig.1 Edge track of the punch

利用式 (1), 可以得到用辊半径 r 和凸模高度 h 表示的水滴形半宽 L 的关系式, 即

$$L = \sqrt{2rh + h^2} - r \cos^{-1} \frac{r}{r+h}. \quad (2)$$

根据式 (2) 绘制出曲线图可以更加形象的表达水滴形半宽 L 随辊半径 r 和凸模高度 h 的变化规律, 图 2 所示为相应的量纲为一的关系. 从图中可以看出: 水滴形宽度随辊子半径的增大而减小; 当辊半径较小时, 水滴形半宽变化较快, 而当辊径和凸模高度比大于 100 之后, 水滴形半宽变化很小. 另外, 凸模高度愈大, 水滴形愈宽.

1.3 模具设计

滚压冲裁模具主要参数包括凸模高度 h 、辊子半径 r 及凸模前后标称侧隙 C_1 和 C_2 , 如图 3. 其设计步骤如下.

(1) 确定凸模高度 h . 凸模高度愈大, 加工的切断性愈好, 但水滴形宽度将增大, 这会影影响加工质量. 应根据材料特性选择合适的凸模高度 h 以保证完全切断并兼顾加工质量.

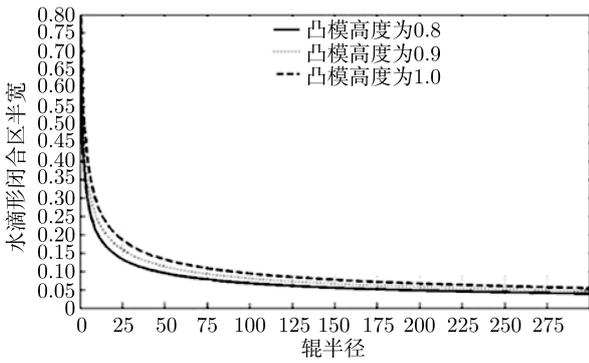


图 2 不同凸模高度下辊半径对水滴形闭合区半宽的影响
 Fig.2 Effect of roller radius on drop-shaped area half-width under different punch heights

(2) 确定辊子半径 r . 为控制加工质量, 应当增大辊子半径, 一般取 $r \geq 100h$; 凸模辊和凹模辊的半径相同.

(3) 确定冲模前后标称侧隙 C_1 和 C_2 . 为保证

滚压冲裁的顺利进行, 应使凹模孔型弧长稍大于凸模端面的弧长. 设凸模端面的弧长 B 等于孔长, 则凹模孔型的弧长 $B_1 = B + C_1 + C_2$.

这里的 C_1 和 C_2 是以凸模刃尖与凸模辊圆心连线呈竖直状态时的标称侧隙, 如图 3(a) 所示. 实际上在滚压冲裁过程中刃口侧隙是变化的, 某一时刻的侧隙称为瞬时侧隙. 滚压冲裁过程中, 前刃口瞬时侧隙由最大侧隙 $C_1 + L$ 减小到最小侧隙 $C_1 - L$, 后刃口瞬时侧隙由最小侧隙 $C_2 - L$ 增大到最大侧隙 $C_2 + L$. 在图 3(a) 中, 凹模辊以展平状态示出, 以便于说明标称侧隙和瞬时侧隙的变化情况, 而图 3(b) 所示为实际状态.

一般情况下, 应根据工件厚度、凸模高度、材料特性等确定标称侧隙, 以避免出现凸凹模干涉并保证加工质量. 当凸模高度小于工件厚度时没有凸凹模干涉的问题.

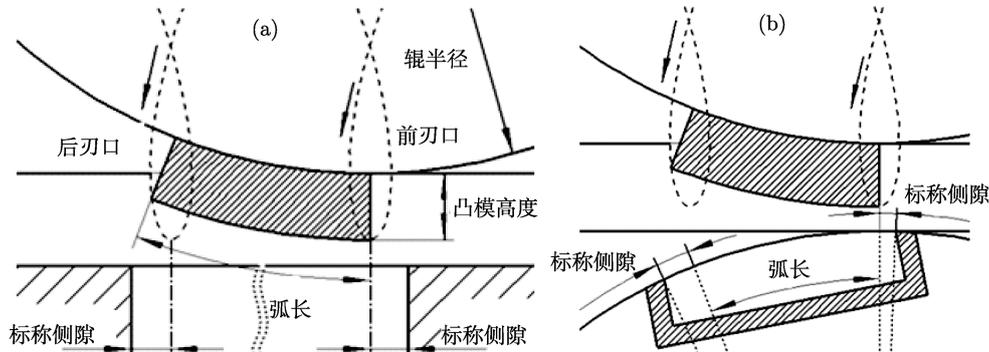


图 3 滚压冲裁过程的模具设计. (a) 标称侧隙; (b) 真实凹模
 Fig.3 Die design of rotary blanking: (a) nominal clearance; (b) cavity die

2 滚压冲裁过程二维数值模拟

2.1 几何模型

方形孔的几何参数如图 4 所示, 长度为 5 mm, 宽度为 10 mm, 板带厚度为 1 mm. 视方形孔的宽度无限大, 将问题简化为平面应变问题, 利用二维有限元模型进行仿真可以方便地研究前后刃口的应力应变分布, 这有助于研究参数对滚压冲裁过程和质量的影 响. 有限元几何模型如图 5 所示.

2.2 材料模型

模具设定为刚体, 板带采用 45 号钢, 其应力应变关系采用幂指强化模型, 即

$$\sigma = A\varepsilon^n \tag{3}$$

式中, σ 表示真实应力, A 表示强化系数, ε 表示真实应变, n 表示形变硬化指数. 材料符合 von Mises 屈服准则, 强化方式采用等向强化, 材料参数如表 1 所示 [12].

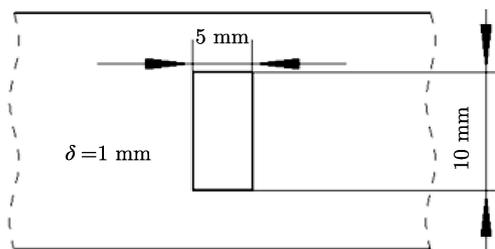


图 4 孔型尺寸

Fig.4 Dimension of the hole

表 1 45 号钢性能

Table 1 Properties of 45# steel

弹性模量/GPa	泊松比	密度/(kg·m ⁻³)	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	延伸率/%	A/MPa	n
210	0.3	7800	585	505	12	1019.7	0.11

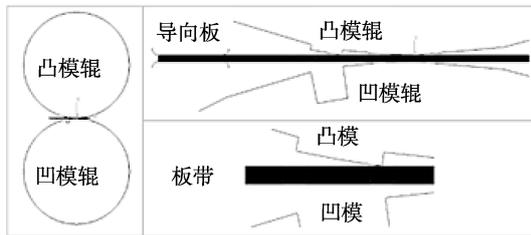


图 5 有限元几何模型

Fig.5 Geometric model of finite element analysis

2.3 裂纹模拟

材料的力学性能和材料在剪切区的韧性断裂情况决定了金属板带的冲裁质量^[10]。冲裁过程中材料的韧性断裂现象包括裂纹产生、裂纹成长和材料彻底断裂。很多学者采用了基于韧性断裂准则的单元删除技术来准确地模拟裂纹产生和裂纹成长过程^[12-16]，由断裂准则确定单元的损伤参数，当损伤参数超过了临界值时，将该单元删除并生成新的内部边界。在众多韧性断裂准则中，Shear Failure 准则已被应用于剪切仿真中，并被证明其结果是与剪切实验一致的，尤其在预测断面质量方面^[13]。本文亦选择 Shear Failure 准则。Shear Failure 准则是基于单元积分点处等效塑性应变来判断失效的，当等效塑性应变达到阈值 $\bar{\epsilon}_f^{pl}$ 时认为该处单元失效，并将该单元删除。不同材料的 $\bar{\epsilon}_f^{pl}$ 不同，本文取 $\bar{\epsilon}_f^{pl}$ 为 1.94^[12]。此外，在对材料塑性加工过程进行有限元仿真时，局部大变形会导致单元网格畸变，使仿真过程难以实现^[17]，鉴于此，自适应网格技术得到了广泛的应用^[14,17-19]。本文采用任意拉格朗日-欧拉自适应网格技术解决因大变形引起的网格扭曲问题。

2.4 滚压冲裁变形过程

图 6 为滚压冲裁的变形过程仿真模拟图。从仿真结果可以看到在前刃口处，板带依次经过了板带弯曲、凸模压入、裂纹产生和发展、断裂和凸模拔出五个阶段。

(1) 板带弯曲。随着模具辊的旋转，凸模压下，使板带向下弯曲，直到板带下表面与凹模接触，此过程的弯曲变形属于弹性变形。

(2) 凸模压入。凸模端面继续压下，凹模逐渐上升，对板带的压力增加，刃口附近发生显著的塑性

变形。

(3) 裂纹产生和发展。塑性变形继续增加，满足 Shear Failure 准则后，上下刃口附近出现裂纹并发展。

(4) 断裂。上下裂纹重合，板带断裂。

(5) 凸模拔出。由于水滴形轨迹的特点，凸模在上升的过程中其侧面还会对板带断面产生压力，将断面略微带动翘起，发生干涉，此过程会对模具带来磨损。

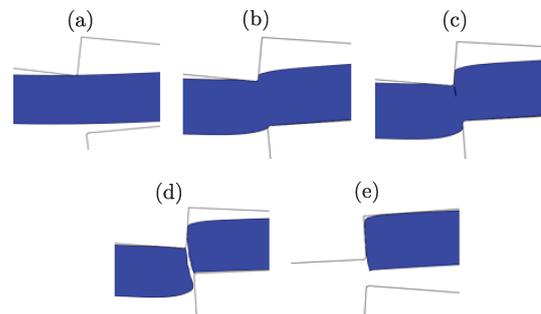


图 6 滚压冲裁的变形过程仿真模拟图。(a) 板带弯曲; (b) 凸模压入; (c) 裂纹产生和发展; (d) 断裂; (e) 凸模拔出

Fig.6 Deformation of a workpiece during rotary blanking by simulation: (a) sheet bending; (b) punch indentation; (c) crack initiation and propagation; (d) material fracture and separation; (e) punch pullout

前后刃口的约束条件示意图如图 7 所示，后刃口的变形过程在两个方面与前刃口不同。

(1) 凸模拔出。在后刃口处，凸模上升的过程中其侧面逐渐远离板带断面，故后刃口在凸模拔出时不存在干涉现象。

(2) 压痕。前刃口处存在辊子的约束作用，使板带下表面与凹模辊端面完全接触，如图 7(a) 所示。后刃口处不存在辊子的约束作用，使板带下表面与凹模辊端面局部接触，如图 7(b) 所示。约束条件的不同使得前刃口断面压痕不明显，而后刃口断面存在明显压痕。

3 模具参数对质量的影响

3.1 质量评价

根据断口形貌，选择断面垂直度、毛刺高度、塌角、压痕深度等来评价断面质量，具体如图 8 所

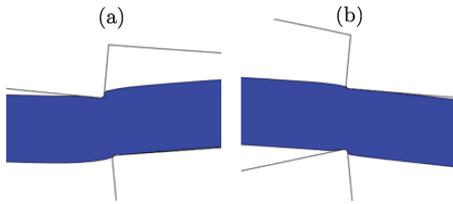


图 7 前刃口 (a) 和后刃口 (b) 的约束条件

Fig.7 Constraint conditions of the front (a) and rear (b) cutting edges



图 8 断面质量评价指标

Fig.8 Quality evaluation indexes of sheared edges

示. 影响断面质量的主要因素包括侧隙、辊子半径、凸模高度等.

3.2 标称侧隙对断面质量的影响

以辊子半径为 80 mm、凸模高度为 0.8 mm 的工况为例. 在前刃口处, 随着标称侧隙 C_1 增加, 断面形貌的变化如图 9 所示. 从图中可以看出标称侧隙对切口的断面垂直度、断面的平面度、毛刺高度和端部的平直度均有较大影响. 单从前刃口情况看, 标称侧隙增大, 断面的大多数质量指标是下降的.

标称侧隙值对前后刃口加工质量的具体影响如图 10 所示. 图 10(a) 为标称侧隙对断面垂直率的影响. 从图 10(a) 可以看出, 随着标称侧隙的增加, 前断面的垂直度越来越大, 后断面则先减小后增大. 这一现象的出现是由瞬时侧隙变化情况造成的: 前刃口处板带断裂前的瞬时侧隙一直大于标称侧隙 C_1 , 当取 C_1 大于零时, 断裂前的瞬时侧隙始终为正, 这时断面垂直度随标称侧隙的增大而增大. 后刃口处板带断裂前的瞬时侧隙一直为小于标称侧隙 C_2 , C_2 较大时的情况与 C_1 较大时一样不利于断面的平直, 而当 C_2 较小时断裂前的瞬时侧隙可能小于零, 即存在负侧隙, 这同样不利于断面的平直. 只有当 C_2 适中时, 后断面才比较平直. 仿真结果表明, C_1 愈小愈好, C_2 的选取与水滴形半宽 L 有密切关系, 当辊半径大于 100 mm, 且凸模高度可取范围有限时, 二者共同作用使 L 的变化范围很小, 因此影响后刃口断面垂直度的关键因素主要是 C_2 , 此时 C_2 以板厚的 5%~10% 为宜.

图 10(b) 为断面毛刺高度随标称侧隙变化规律. 由图可以发现: 一方面, 毛刺高度随标称侧隙的增大均是增大的, 这是因为标称侧隙较小时, 前后刃

口在断裂前的瞬时侧隙较为合适, 使上下裂纹会合, 毛刺较小; 而标称侧隙较大时, 前后刃口在断裂前的瞬时侧隙偏大, 使得上方裂纹从刃口尖端萌生扩展后不能与从下方刃口发展过来的裂纹重合, 从而使材料断裂后在断口上留下粗大的毛刺, 如图 11 所示. 这种情况类似于文献 [20] 中有关冲裁间隙对裂纹成长影响的描述. 另一方面, 同样由于瞬时侧隙的变化, 标称侧隙相同时前刃口处毛刺高度较后刃口处大. 因此, 按上面原则确定的前后刃口处标称侧隙同样可以获得较好的毛刺控制效果.

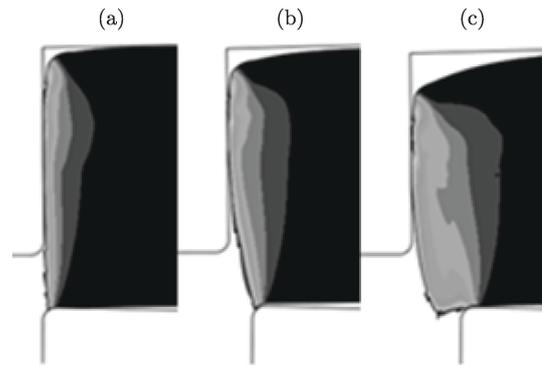


图 9 标称侧隙 C_1 对前刃口断面形貌的影响. (a) $C_1=0$ mm; (b) $C_1=0.1$ mm; (c) $C_1=0.2$ mm

Fig.9 Effects of the nominal clearance C_1 on the front sheared edge appearance: (a) $C_1=0$ mm; (b) $C_1=0.1$ mm; (c) $C_1=0.2$ mm

此外, 前后断面的塌角随标称侧隙的增加直线上升, 变化范围分别为 0.1 mm 和 0.043 mm, 因此按断面垂直度和毛刺高度确定的标称侧隙也可以获得较好的塌角控制效果. 另外, 后刃口压痕深度很小, 一般不超过 0.005 mm, 标称侧隙对其几乎没有影响.

3.3 辊子半径对加工质量的影响

取凸模高度为 0.8 mm, 前后刃口标称侧隙均为 0.1 mm, 辊半径由 80 mm 增加到 320 mm. 仿真结果显示: 毛刺高度和断面垂直度随着辊半径增加而减小, 但变化范围很小, 且毛刺高度变化率随着辊半径增加而减小; 前断面毛刺高度变化仅有 0.008 mm, 后断面毛刺高度变化仅有 0.018 mm; 前断面垂直度变化仅有 0.012 mm, 后断面垂直度变化仅有 0.045 mm; 辊半径在上述范围内变化时对前后断面的塌角的影响很小, 仅为 0.02 mm~0.006 mm; 而压痕深度随辊半径的改变几乎没有变化. 所以, 当标称侧隙适当、辊子半径相对板厚较大时, 虽然辊半径增大可以使加工质量有所提高, 但影响有限, 故辊子半径不用再特别设计, 但应以大于板厚的 100~150 倍为宜.

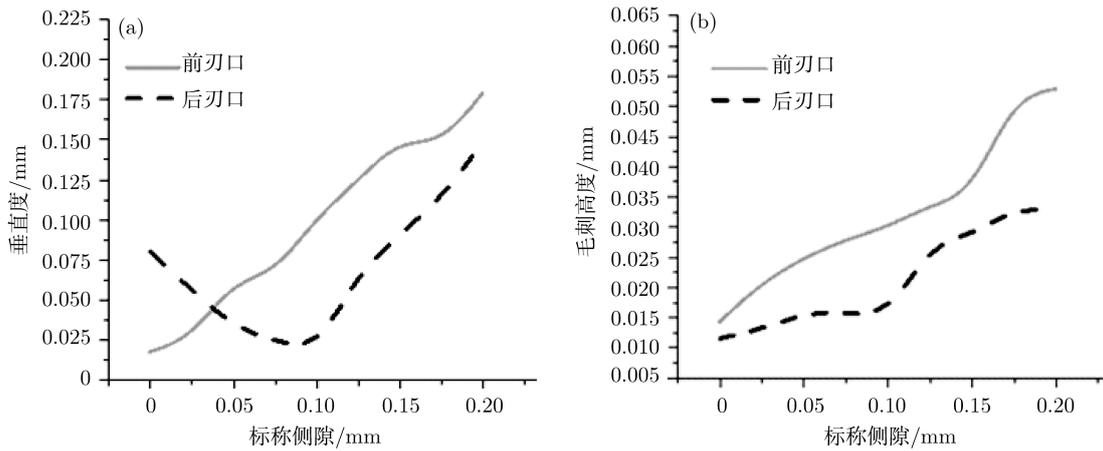


图 10 标称侧隙对断面垂直度 (a) 及断面毛刺高度 (b) 的影响

Fig.10 Effect of nominal clearance on the perpendicularity (a) and burr height (b) of cutting edges

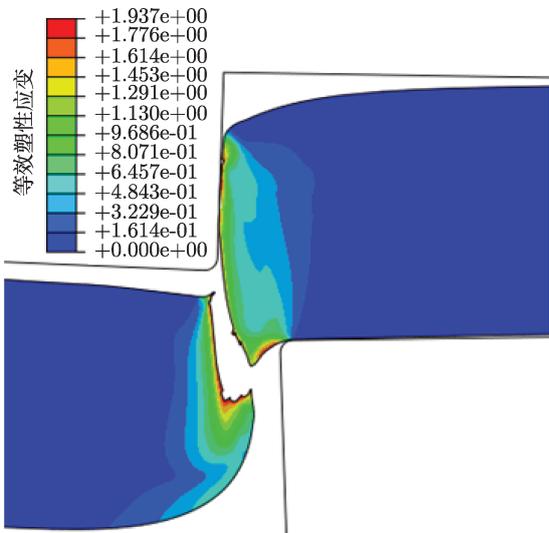


图 11 刃口中粗大的毛刺

Fig.11 Large burr in cutting edges

3.4 凸模高度对加工质量的影响

以辊子半径为 120 mm, 前后刃口标称侧隙均为 0.1 mm 的工况为例. 凸模高度 h 对后刃口断面形貌的影响如图 12 所示. 由图可以看出, 凸模高度变化对断面的整体形貌 (断面垂直度和头部弯曲等) 影响不大, 但随凸模高度的增大, 断面下方的毛刺有所增大. 凸模高度对加工质量的具体影响如图 13 所示. 图 13(a) 为凸模高度对前刃口断面毛刺高度影响. 由图可以看出: 一方面再次证实标称侧隙相同时, 由于瞬时侧隙的变化前刃口处毛刺高度较后刃口处大; 另一方面, 同样由于瞬时侧隙的变化, 在冲裁过程中前刃口处的瞬时侧隙一直较大, 凸模高度对前刃口断面毛刺高度影响反而不大, 而在后刃口处, 凸模高度的增加增大了水滴形半宽,

这将产生较小的瞬时侧隙, 使断面金属被挤出而增大毛刺. 但是, 总体来讲, 在其他参数适当时, 毛刺高度很小. 图 13(b) 为凸模高度对最大上翘量的影响. 由图可以看出滚压冲裁过程中在凸模拔出时会出现凸模和板带的干涉现象, 前刃口处板带会被翘起, 翘起量与凸模的高度关系类似于抛物线的关系. 此外, 凸模高度对断面垂直度、塌角和压痕深度的影响类似于辊半径. 因此, 综合考虑, 在保证板材完全断裂的前提下, 应使凸模高度尽量减小.

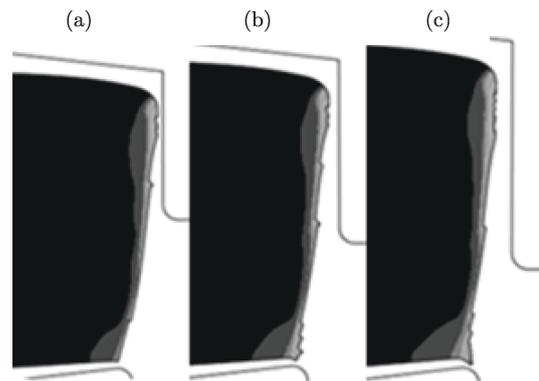


图 12 凸模高度 h 对后刃口断面形貌的影响. (a) $h=0.5$ mm; (b) $h=0.6$ mm; (c) $h=0.7$ mm

Fig.12 Effects of punch height on the rear sheared edge appearance: (a) $h=0.5$ mm; (b) $h=0.6$ mm; (c) $h=0.7$ mm

4 结论

- (1) 确定了水滴形闭合区半宽 L 与辊半径 r 和凸模高度 h 的关系.
- (2) 设计滚压冲裁模具时, 应先确定凸模高度 h 和辊子半径 r , 以控制水滴形半宽 L , 最后选择合适的标称侧隙 C_1 和 C_2 .

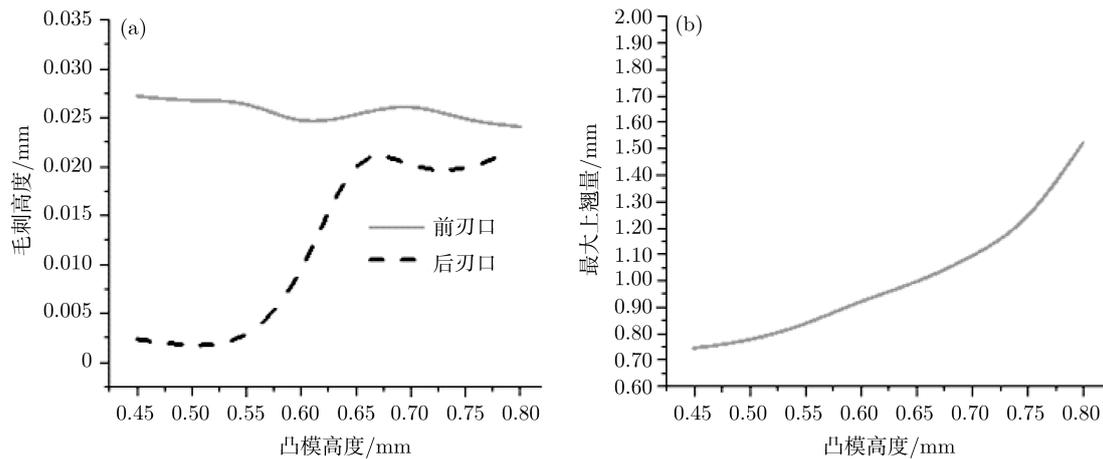


图 13 凸模高度对断面毛刺高度 (a) 和最大上翘量 (b) 的影响

Fig.13 Effect of punch height on burr height (a) and maximum up-warp (b)

(3) 数值模拟分析表明: 方形孔滚压冲裁时, 前后刃口依次经历板带弯曲、凸模压入、裂纹产生、断裂和凸模拔出五个阶段; 在凸模拔出阶段, 前刃口处存在凸模和板带的干涉现象, 后刃口处则没有; 前后刃口处板带断裂前的约束条件不同, 使后刃口压痕更为明显。

(4) 滚压冲裁断面质量可以用断面垂直度、毛刺高度、塌角、压痕深度等来评价。影响滚压冲裁断面质量的主要因素包括侧隙、凸模高度和辊子半径等。减小标称侧隙和凸模高度、增大辊子半径均会使断面质量的各项指标提高, 其中又以对断面垂直度和毛刺高度的影响更为明显。

(5) 45 号钢的滚压冲裁数值模拟表明: 后刃口标称侧隙以板厚的 5%~10% 为宜, 前刃口标称侧隙可以更小; 辊子半径应以大于板厚的 100~150 倍为宜; 在保证板材完全断裂的前提下, 应使凸模高度尽量减小。

参考文献

- [1] Husson C, Correia J P M, Daridon L, et al. Finite elements simulations of thin copper sheets blanking: Study of blanking parameters on sheared edge quality. *J Mater Process Technol*, 2008, 199(1-3): 74
- [2] Hein C, Hong S, Suh J, et al. Finite element analysis of rotary blanking: Effects of punch geometries on cutting area and stress distribution. *Int J Automot Technol*, 2008, 9(2): 211
- [3] Hoffmann H, Schweitzer M, Milberg J. Rotary blanking. *CIRP Ann Manuf Technol*, 1999, 48(1): 213
- [4] Hoffmann H, Hein C, Hong S. Rotary blanking: tool materials. *Prod Eng*, 2007, 1(3): 259
- [5] Schweitzer M. *Prozessspezifische Merkmale des Rotationsschneidens* [Dissertation]. München: Technische Universität München, 2001
- [6] Schmidt T. *Verbesserung der Schnittfläche Durch Anpassung der Stempelgeometrie an die Kinematik des Rotationsschneidens* [Dissertation]. München: Technische Universität München, 2004
- [7] Chenot J L, Fourment L, Ducloux R, et al. Finite element modelling of forging and other metal forming processes. *Int J Mater Forming*, 2010, 3(1): 359
- [8] Thipprakmas S, Jin M, Tomokazu K, et al. Prediction of fineblanked surface characteristics using the finite element method. *J Mater Process Technol*, 2008, 198(1-3): 391
- [9] Thipprakmas S. Finite-element analysis of V-ring indenter mechanism in fine-blanking process. *Mater Des*, 2009, 30(3): 526
- [10] Yu S, Xie X L, Zhang J, et al. Ductile fracture modeling of initiation and propagation in sheet-metal blanking processes. *J Mater Process Technol*, 2007, 187/188: 169
- [11] Litvin F L. *Gear Geometry and Applied Theory*. Guo K, Ye L Y, Translated. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 2008
(Litvin F L. 齿轮几何学与应用理论. 国楷, 叶凌云, 译. 上海: 上海科学技术出版社, 2008)
- [12] Ding M, Wu D P, Qin Q. Finite element modeling of shear-slitting process. *Adv Mater Res*, 2012, 459: 3
- [13] Hubert C, Dubar L, Dubar M, et al. Finite element simulation of the edge-trimming/cold rolling sequence: analysis of edge cracking. *J Mater Process Technol*, 2012, 212(5): 1049
- [14] Zhang J, Cherouat A, Borouchaki H. FE simulation of metal orthogonal cutting processes based on 3D adaptive remeshing procedure. *Adv Mater Res*, 2011, 409: 461

- [15] Soyarslan C, Tekkaya A E, Akyuz U. Application of continuum damage mechanics in discontinuous crack formation: Forward extrusion chevron predictions. *ZAMM J Appl Math Mech*, 2008, 88(6): 436
- [16] Takata Y, Hirota K. Numerical simulation of blanking process over a wide range of clearances. *J Solid Mech Mater Eng*, 2009, 3(12): 1249
- [17] Labergère C, Rassineux A, Saanouni K. 2D adaptive mesh methodology for the simulation of metal forming processes with damage. *Int J Mater Form*, 2011, 4(3): 317
- [18] Badreddine H, Labergère C, Saanouni K, et al. F.E. elastoplastic damage model with 2D adaptive remeshing procedure for fracture prediction in metal forming simulation. *Int J Mater Form*, 2008, 1(Suppl 1): 109
- [19] Giraud-Moreau L, Cherouat A, Borouchaki H. Influence of the adaptive remeshing during simulations of sheet metal forming processes. *Key Eng Mater*, 2011, 473: 691
- [20] Chuan T K D. *Sheet Metal Punching Process*. Guo Q S, Translated. Tianjin: Tianjin Science and Technology Press, 1982
(中川威雄. 板料冲压加工. 郭青山, 译. 天津: 天津科学技术出版社, 1982)