

冲头刃口形状对冲裁的影响研究

杨程¹, 彭迎娇¹, 陈林¹, 刘思琪¹, 谢晓东²

(1. 西安建筑科技大学 冶金工程学院, 西安 710055;

2. 广东合和建筑五金制品有限公司, 广东 佛山 528100)

摘要: **目的** 研究不同冲头刃口形状对冲裁变形过程和冲头磨损情况的影响。**方法** 采用有限元方法和实验分析了相同工况下平冲头、台阶状冲头和屋顶状冲头对坯料冲断行为的影响, 以及不同刃口形状的冲头在冲裁后的磨损情况。**结果** 冲头结构的改变使冲裁过程发生了变化, 影响了冲裁时坯料内部的应力-应变分布、峰值冲裁力、裂纹扩展速度、弹性应变能和冲头单次磨损深度。屋顶状冲头在冲裁时峰值冲裁力最低, 较平冲头与台阶状冲头的峰值冲裁力分别降低了 15%、10%, 坯料最早起裂, 也最快完成断裂, 坯料的高应力区域集中在凹模刃口, 且该冲头冲裁时坯料内储存的弹性应变能最多, 冲头工作区的单次磨损深度最小, 较平冲头与台阶状冲头的单次磨损深度分别降低了 84%、80%。**结论** 屋顶状冲头使坯料在断裂前发生了更大的拉伸变形, 储存了更多的弹性应变能, 坯料在拉伸状态下发生了剪切变形, 冲裁力更小, 高应力分布的改变降低了冲裁时坯料对冲头侧面的压力, 冲断后的坯料发生弹性恢复, 可防止冲头回程时坯料抱紧冲头造成的二次磨损。

关键词: 冲裁; 刃口形状; 数值模拟; 拉伸变形; 模具磨损

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2023.05.008

中图分类号: TG386 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2023)05-0063-08

Effect of Punch Edge Shape on Blanking

YANG Cheng¹, PENG Ying-jiao¹, CHEN Lin¹, LIU Si-qi¹, XIE Xiao-dong²

(1. School of Metallurgical Engineering, Xi'an University of Architectural Science and Technology, Xi'an 710055, China;

2. Guangdong Hehe Construction Hardware Manufacturing Co., Ltd., Guangdong Foshan 528100, China)

ABSTRACT: The work aims to study the effect of different punch edge shapes on blanking deformation and punch wear. The effect of flat punch, step punch and roof punch on the blanking behavior under the same blanking conditions was analyzed based on finite element analysis and experiment. The results showed that the change of punch structure changed the blanking process and affected the stress and strain distribution in the blank, the peak blanking force, the crack generation speed, the elastic strain energy and the single wear depth of the punch during blanking. The roof punch had the lowest peak blanking force, which was 15% and 10% lower than that of the flat punch and the step punch respectively. And also, it was the earliest to have crack initiation and complete the fracture. Meanwhile, the high stress area of the blank concentrated on the edge of the concave die, and the

收稿日期: 2022-11-30

Received: 2022-11-30

基金项目: 国家自然科学基金(51874226); 西安市科技局科技创新引导项目(201805033YD11CG17(10))

Fund: National Natural Science Foundation of China (51874226); Xi'an Science and Technology Bureau Science and Technology Innovation Guidance Project (201805033YD11CG17(10))

作者简介: 杨程(1976—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为先进成形技术与装备。

Biography: YANG Cheng(1976-), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: advanced forming technology and equipment.

引文格式: 杨程, 彭迎娇, 陈林, 等. 冲头刃口形状对冲裁的影响研究[J]. 精密成形工程, 2023, 15(5): 63-70.

YANG Cheng, PENG Ying-jiao, CHEN Lin, et al. Effect of Punch Edge Shape on Blanking[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2023, 15(5): 63-70.

elastic strain energy stored in the blank during punching was the largest, and the single wear depth in the working area of the punch was the smallest, which was 84% and 80% lower than that of the flat and step punches respectively. The roof punch makes the blank undergo greater tensile deformation before fracture and store more elastic strain energy. The blank undergoes shear deformation in the tensile state. The blanking force is smaller. The change of the high stress distribution reduces the pressure of the blank on the punch side during blanking. The broken blank undergoes elastic recovery, which can prevent the secondary wear caused by the blank holding the punch during the punch return.

KEY WORDS: blanking; blade shape; numerical simulation; stretch deformation; die wear

在冲裁过程中,凸模与凹模刃口作为主要工作部位与坯料直接接触并发生磨损,而冲孔凸模在向下冲切坯料时受到材料变形的侧向压力,在回程时又与冲断面发生二次摩擦,更容易发生磨损失效^[1-3]。磨损不仅会影响零件的加工精度,更换失效的模具还会导致生产中断,降低生产效率。

为了减少模具磨损,一般通过对冲头表面进行涂层处理以提升冲头硬度进而降低磨损程度^[4-6],但在实践中发现涂层在冲裁过程中会因为冲压力过大而发生脱落,尤其是在冲切不锈钢等材料时,涂层脱落后反而使模具磨损加剧^[7-9]。为了改善冲头的磨损情况,有学者发现改变冲头刃口结构可以有效减少模具磨损, Yousefi^[10]发现有圆角的冲头可降低冲头回程时的磨损程度,圆角越大的冲头磨损程度降低越明显,且冲头磨损情况与凸模穿透载荷呈正相关。Shih等^[11]对6种不同结构的冲头进行了AHSS高强度薄板冲孔实验,发现6°斜角冲头可减少50%以上的冲裁力,其磨损程度最小。相关的实验现象均说明凸模结构的改变可降低冲裁力,冲裁力较小时模具磨损情况会得到改善。Karjalainen等^[12]也曾提出用波形冲头来优化冲头,通过引入剪切机制来降低冲裁力,但对改变冲头刃口形状可降低磨损程度的原因并未进一步说明。早期齐延兵等^[13]在研究冲头形状对液压冲孔塌陷的影响时发现,在斜面冲头进给过程中,冲头与坯料由点接触逐渐增大到面接触。Pu等^[14-15]利用屋脊

式冲头进行高强度钢板冲裁实验时发现,屋脊式冲头可以极大减小峰值冲裁力和反向冲击载荷,还会使冲孔处表面形貌变为椭圆形,在屋脊状冲头向下冲切时,由脊线接触扩展为面接触,这意味着冲头结构改变了接触方式,刃口形状制约了冲裁时坯料的变形,进而影响了断裂行为。国内外大量学者的研究均表明,设计合理的冲头刃口形状可以减少冲头磨损,但对于刃口形状减少模具磨损的机制暂未解释清楚。

文中设计了平冲头(FP)、台阶状冲头(SP)、屋顶状冲头(RP)3种不同刃口形状的冲头,在同一工况下进行304不锈钢板的冲孔有限元模拟及实验,分析不同刃口形状的冲头在冲孔时坯料的变形行为,研究冲头刃口形状影响冲头磨损的原因,以为合理设置模具结构、改善模具耐磨性、提升模具寿命提供有益的参考。

1 有限元模型的构建

以304不锈钢板冲孔为研究对象,板厚为2 mm,冲孔直径为6.5 mm,设计了平冲头、台阶状冲头和屋顶状冲头3种不同刃口形状的模具,冲裁模具及不同凸模结构设计如图1所示,其中, D 为冲头端面直径,3种冲头端面直径分别为 $D_1=6.46$ mm, $D_2=6.13$ mm, $D_3=4.22$ mm,分析不同刃口形状对冲裁过程的影响。

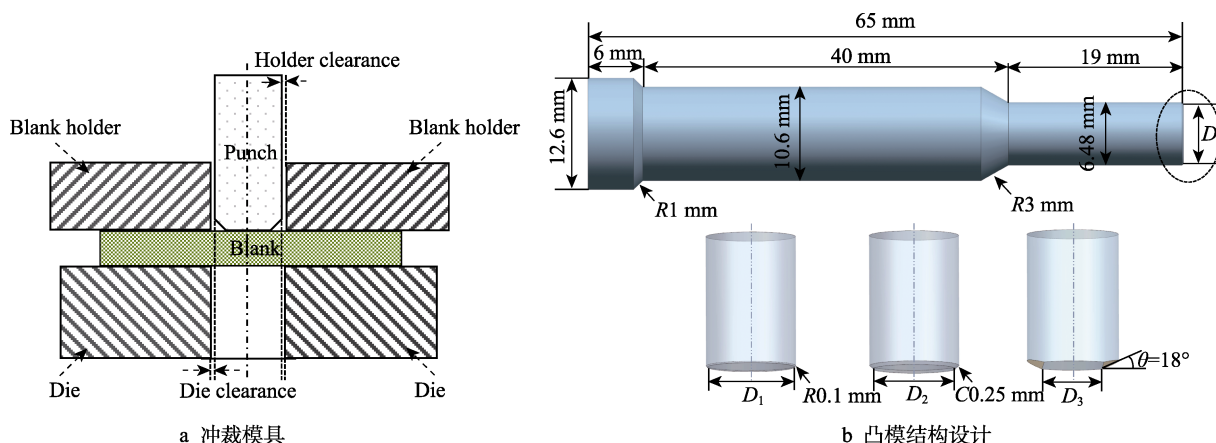


图1 冲裁模具及不同凸模结构设计

Fig.1 Blanking die and structural design of convex dies: a) blanking die; b) structural design of convex dies

借助 ABAQUS 软件的建模功能建立板料和模具的几何模型, 考虑到简化模型可提升计算效率, 采用 1/2 轴对称模型, 将凸模、凹模、压边圈均定义为解析刚体, 坯料采用可变形体, 坯料厚度为 2 mm, 单边压边间隙为 0.36 mm, 单边凹模间隙为 0.1 mm, 冲裁速度为 200 mm/s, 压边力为 1 200 MPa, 定义冲头与坯料间摩擦因数为 0.15, 冲压行程为 3 mm, 模型网格划分及网格细化示意图如图 2 所示, 材料的物理性能如表 1 所示。

采用 ABAQUS/Explicit 处理器进行分析求解, 断裂模型采用 Johnson–Cook 失效模型, 模型表达式如式 (1) 所示。

$$\varepsilon_f = \left\{ \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \exp \left[\varepsilon_3 \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}} \right) \right] \right\} \left[1 + \varepsilon_4 \ln \left(\varepsilon_p^* \right) \right] \left[1 + \varepsilon_5 T^* \right] \quad (1)$$

式中: ε_f 为材料破坏应变; ε_1 、 ε_2 、 ε_3 为不同应力三轴度因素下的破坏应变; ε_4 为不同应变率因素下的破坏应变; ε_5 不同温度因素下的破坏应变; ε_p^* 为失效应变; σ_m 为平均应力; σ_{eq} 为等效应力; T^* 为同系温

度。304 不锈钢的 Johnson–Cook 材料失效模型参数 ε_1 — ε_5 分别为 0.070 5、1.732、−0.54、−0.012 3、0^[16-18]。

2 冲裁行为分析

2.1 接触与冲裁力

3 种不同刃口形状冲头的冲裁力–位移曲线与最大冲裁力对比如图 3 所示, 冲头的总下行位移为 3 mm, 3 种冲头结构的冲裁力均表现为接触坯料后急剧升高到最大值, 当冲裁完成后降低到 0 N。平冲头的峰值冲裁力最高, 为 16 428 N, 台阶状冲头的峰值冲裁力次之, 为 15 437 N, 屋顶状冲头的峰值冲裁力最小, 为 13 962 N, 相较于平冲头, 台阶状冲头和屋顶状冲头的峰值冲裁力分别降低了 6% 和 15%。

在材料强度和冲头结构确定的情况下, P_u 等^[19] 引入了冲孔力系数 K 来表示接触单位长度上冲裁力的大小, 以及材料极限抗拉强度 (σ) 用来评估材料断裂时抵抗拉伸力的程度, 如式 (2) 所示。

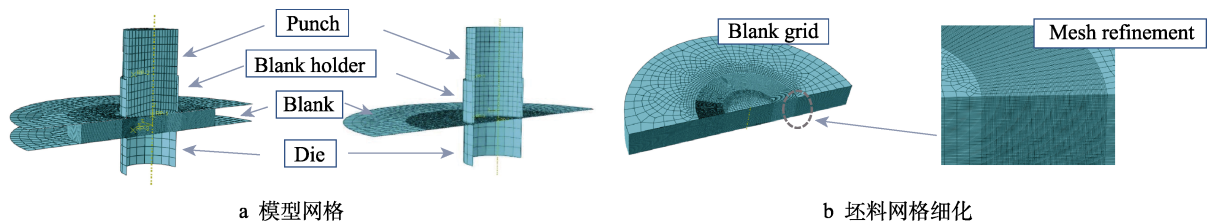


图 2 模型网格划分及网格细化示意图
Fig.2 Schematic diagram of model meshing and mesh refinement: a) model mesh; b) blank mesh refinement

表 1 材料物理性能
Tab.1 Physical properties of materials

Materials	Density/(g·cm ^{−3})	Young's modulus/GPa	Elastic modulus/GPa	Poisson's ratio
Cr12Mo1V1	7.85	218	207	0.28
304 stainless steel	7.93	194	200	0.30

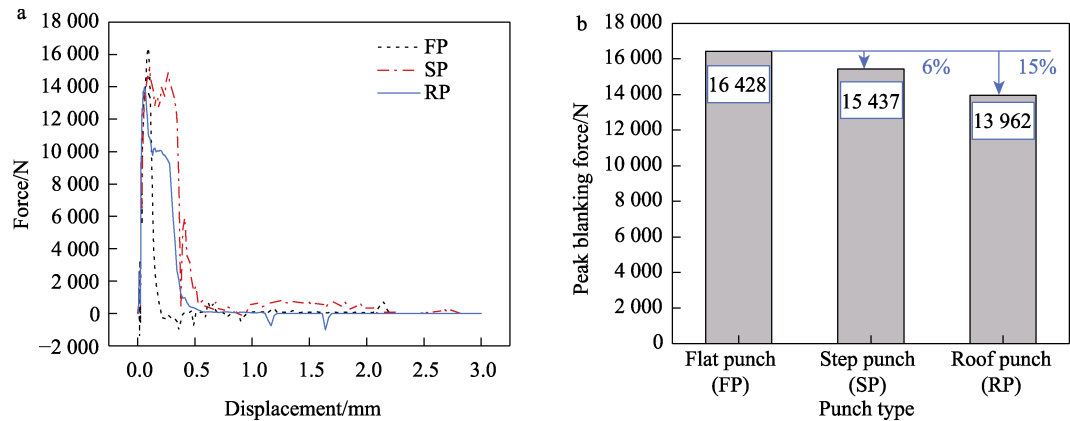


图 3 3 种不同刃口形状冲头的冲裁力–位移曲线 (a) 与最大冲裁力 (b) 对比

Fig.3 Comparison of blanking force-displacement curve (a) and maximum blanking force (b) of 3 different blade shape punches

$$K = \frac{P}{\sigma \cdot \pi D \cdot \delta} \quad (2)$$

式中： P 为最大冲击载荷； D 为冲头端面直径； δ 为材料厚度。由式(2)可知， K 值与最大冲裁力呈正相关，与材料极限抗拉强度呈负相关， K 值越小说明接触单位冲裁长度上的冲裁力越小，材料断裂时冲头需要抵抗的拉伸力越大。但在实际冲裁时，冲头刃口形状的不同导致冲头刃口与坯料的接触周长不同，如图4所示，在平冲头的冲裁过程中，由于冲头小倒角的存在，冲头刃口与坯料的接触周长为20.29 mm，台阶状冲头在凸台形貌的影响下接触周长为19.24 mm，屋顶状冲头因为其特殊的斜切面，接触周长最小，只有18.96 mm。

由于不同刃口形状的冲头与坯料接触周长不能用冲裁孔径周长直接表示，为此文中引入了新的初始冲孔力系数 K_0 ，将冲头刃口与坯料接触的变化纳入考虑因素，定义 K_0 为冲击载荷与初始接触周长 L 、材料极限抗拉强度 σ 、材料厚度 δ 的比值，如式(3)所示。

$$K_0 = \frac{P}{\sigma \cdot L \cdot \delta} \quad (3)$$

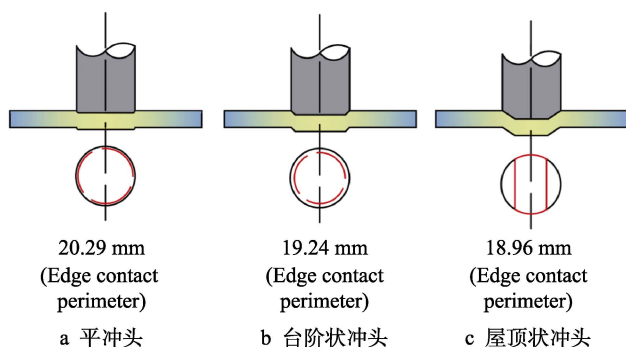


图4 不同冲头刃口冲裁示意图及刃口接触周长

Fig.4 Schematic diagram of blanking and edge contact perimeter of different punch edges: a) flat punch; b) step punch; c) roof punch

分别计算3种不同刃口形状冲头的 K 与 K_0 ，如图5所示。可以发现，相较于冲孔力系数 K ，3种不同冲头的初始冲孔力系数 K_0 均出现小幅增加，其中屋顶状冲头、台阶状冲头、平冲头的 K_0 分别增加了0.052、0.046、0.005，说明在考虑冲头接触周长的变化后，冲头与坯料实际接触单位冲裁长度上的冲裁力表现出不同程度的增加，其中屋顶状冲头的初始冲孔力系数增长值最大，即该冲头冲裁时坯料表面单位长度上的冲裁力增长幅度最为突出。随着冲头结构从平刃口向带有斜面的屋顶状刃口过渡，接触周长逐渐减小， K 与 K_0 均逐渐降低，其中屋顶状冲头的冲孔力系数最小，这说明使用屋顶状冲头冲裁时，坯料受到冲头的拉伸效应最大，坯料内部储存了更高的拉应力，冲头需要抵抗更大的拉伸力来冲断坯料。

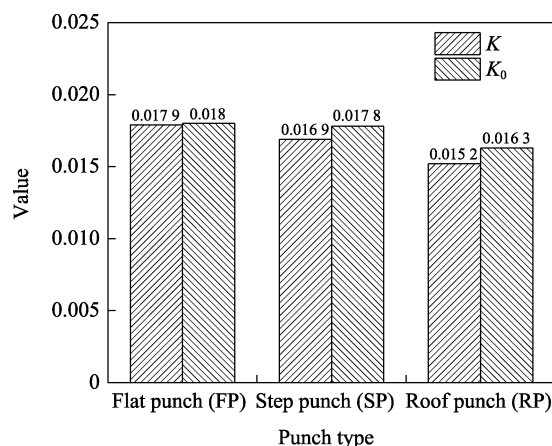


图5 3种不同刃口形状冲头的 K 与 K_0

Fig.5 K and K_0 of punches with three different blade shapes

2.2 应力-应变

对不同刃口形状冲头冲裁后坯料的Mises应力云图进行分析，观察冲头刚接触坯料、坯料开始断裂以及断裂后的应力状态，如图6所示。可以发现，3种冲头冲裁时坯料的应力峰值均为206.8 MPa，但坯料内部的应力分布和裂纹扩展速度不同。在平冲头的冲裁过程中，冲头刚接触坯料时高应力区域的范围最大，对称分布在刃口两侧，随着平冲头的继续下行，高应力区域向坯料凸凹模刃口处集中，第40步时坯料出现裂纹，在第68步坯料完全断裂后，被冲断的孔周围存在较小的残余应力。在台阶状冲头的冲裁过程中，应力分布情况与平冲头冲裁时类似，在冲头接触坯料时，高应力区域也大范围分布在刃口两侧，裂纹出现后（第33步）高应力区域范围变小并向废料中心偏移，第60步时坯料完全断裂，与平冲头相比，断裂时间提前了8步，被冲断的孔周围存在的残余应力较大。在屋顶状冲头的冲裁过程中，坯料在刚与冲头接触时内部的高应力区域更为集中，且凸模刃口高应力区域明显减少，在3种冲头中其分布范围最小，在开始产生裂纹（第29步）时，高应力区域向废料中心移动，随着裂纹的扩展，坯料的完全断裂发生在第54步（最早完成断裂），被冲断的孔周围残余应力较小。随着冲头刃口形状由简单平刃口向带有斜切面的屋顶状刃口过渡，坯料起裂与完全断裂的时间提前，屋顶状冲头冲裁时坯料起裂更早，裂纹扩展更快，最早完成断裂。分析表明，台阶状冲头与屋顶状冲头和坯料的接触周长更小，冲头施加的力集中在坯料较小的变形区内，随着冲头的下行，接触区域逐步扩大，高应力区域逐渐向刃口处集中，坯料在冲头的拉伸作用下在达到材料的极限强度时发生断裂。

观察图6b中屋顶状冲头冲裁时坯料的应力分布可以发现，在裂纹产生并开始扩展时，坯料的高应力区域集中在凹模刃口附近，而平冲头与台阶状冲头的则集中在凸模刃口附近，并且屋顶状冲头冲断坯料

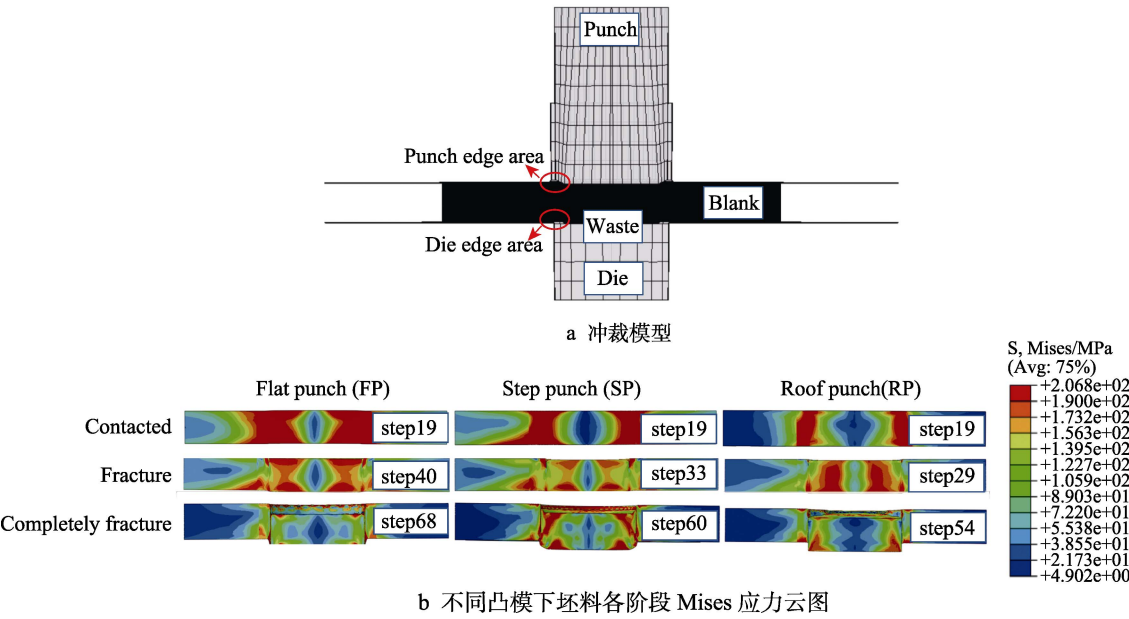


图 6 坯料 Mises 应力云图

Fig.6 Mises stress pattern: a) blanking model; b) Mises stress pattern of blank at different stages under different convex dies

后,被冲断的孔周围残余应力最小。说明坯料受到的拉伸效应使坯料刃口区的高应力集中转移到凹模刃口附近,凸模刃口附近高应力区域减少,降低了坯料对冲头的侧面压力。

对 3 种冲头冲裁时坯料的应变能曲线进行分析,如图 7a 所示。应变能是指在坯料受力发生弹塑性变形后,材料内部因弹性变形而产生和积蓄的能量,可以反映金属坯料在冲裁弹性变形阶段材料内部累计的弹性应变能^[20-22]。可以看出,坯料被 3 种不同冲头接触后,内部的应变能均明显上升,即在冲头接触金属坯料时开始发生弹性形变,其中,屋顶状冲头冲裁时坯料内部产生的峰值应变能最高,为 8.48 mJ,平冲头冲裁时坯料的峰值应变能最低,为 6.94 mJ,台阶状冲头冲裁时坯料内部的峰值应变能为 7.69 mJ,在 3 种冲头结构中居中。对坯料产生的瞬时应变能进

行积分,计算不同冲头冲裁时坯料内部储存的总应变能,如式 (4) 所示。

$$E = \int_0^t e dt \tag{4}$$

式中： e 为坯料单位时间内产生的瞬时应变能； E 为坯料内部储存的总应变能； t 为冲裁时间。计算得出,平冲头、台阶状冲头、屋顶状冲头冲裁时坯料内部储存的总应变能分别为 370、435、440 mJ,屋顶状冲头冲裁时坯料储存的总弹性应变能最高。

断裂前坯料被各冲头下行纵向拉伸的伸长量如图 7b 所示。平冲头、台阶状冲头、屋顶状冲头冲裁时坯料纵向的伸长量分别为 0.539 6、0.547 1、0.581 9 mm,断裂前坯料的伸长量反映了坯料被冲头拉伸的程度。分析可知,屋顶状冲头冲裁时坯料断裂前的伸长量最大,说明在下行过程中具有斜度的冲头使坯料受拉伸

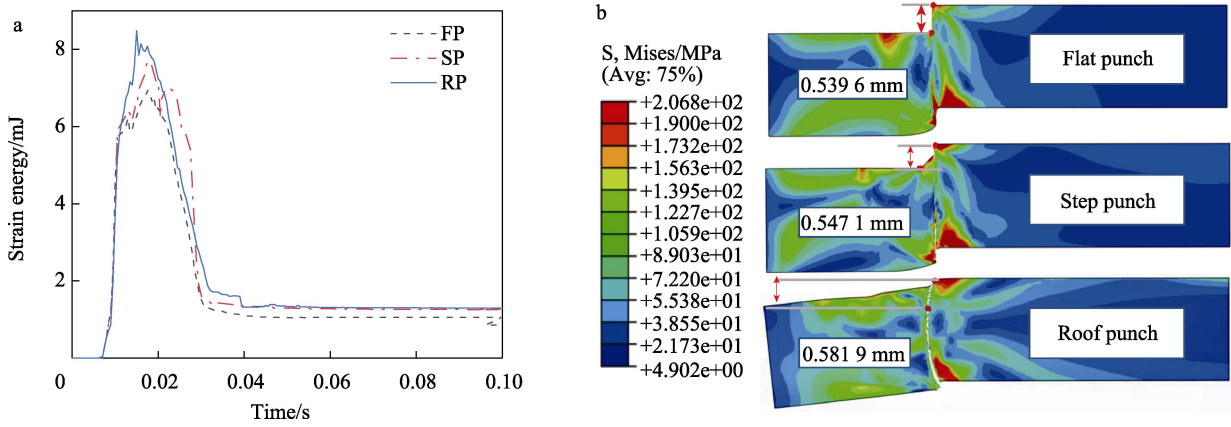


图 7 应变能曲线 (a) 及坯料纵向伸长量 (b)

Fig.7 Strain energy curve (a) and longitudinal elongation (b) of blank

的程度更大,同时坯料在断裂前储存的弹性应变能更多,而坯料断裂后弹性应变能的释放会导致冲孔尺寸增大,坯料冲孔尺寸的增大可降低冲头回程时坯料抱紧冲头造成的二次磨损。

3 冲头磨损分析

DEFORM-3D 可以通过云图直观地表示模具磨损的程度^[23-26]。将3种不同刃口形状的冲头模型导入 DEFORM-3D 中,设置与 ABAQUS 相同的材料属性与冲裁参数,通过 DEFORM-3D 有限元模拟软件,基于 Achard 磨损模型对不同刃口形状的冲头进行磨损分析。

观察平冲头、台阶状冲头和屋顶状冲头3种冲头工作区的磨损情况(见图8a—c,其中 b_1 和 b_2 分别是3种冲头侧壁和端面的最大磨损宽度值)。可以发现,冲头磨损均发生在冲头刃口位置,等量磨损值连成的曲线为不规则闭合线,闭合线形状由冲头形状、划分网格数、硬度等多种因素共同决定,磨损量由磨损最大的中心部位向外侧依次不规则递减,随着冲头下行时间的延长,刃口侧壁及端面磨损值不断增大,冲程结束后,平冲头、台阶状结构冲头的磨损大量集中在刃口侧壁,而屋顶状冲头的磨损则主要集中在斜切面区域,这是由于冲头下行斜面逐渐与坯料贴合。

对比磨损情况发现,不同刃口形状冲头单次最大磨损深度有明显不同,平冲头、台阶状冲头和屋顶状冲头单次最大磨损深度分别为 1.66×10^{-4} 、 1.39×10^{-4} 、 2.68×10^{-5} mm。相较于平冲头,台阶状冲头与屋顶状冲头的磨损程度均有不同程度的减小,其中屋顶状冲头单次磨损深度最小,较平冲头和台阶状冲头的单次磨损深度分别降低了84%和80%。分析冲头磨损区域的侧壁及端面磨损宽度值,发现在3种冲头中,屋顶状冲头侧壁磨损高度最小,端面磨损宽度最大。冲裁时凸模侧刃磨损深度的连续累加是使模具尺寸精度超出公差范围而失效的主要因素,所以屋顶状冲头(侧面磨损高度与磨损深度较小)将有效提升模具的使用寿命。同时,在不同刃口冲头侧面磨损区定义7个点,进行磨损程度的点追踪,发现平冲头与台阶状冲头磨损深度的最大值出现在侧壁,而屋顶状冲头的最大磨损深度则集中在刃尖。

对完成2万个冲次的冲头侧面磨损形貌进行分析,如图9所示。可见台阶状冲头侧面有磨粒磨损的沟槽,也有黏着磨损的痕迹,而屋顶状冲头仅有磨粒磨损的痕迹,验证了前述分析,即屋顶状冲头产生了拉伸剪切的效果,冲切时坯料对模具的侧向压力降低,且可防止回程时坯料抱紧冲头造成的二次磨损。但由于屋顶状冲头接触面积小,抵抗的拉伸力大,刃尖有崩刃的问题。

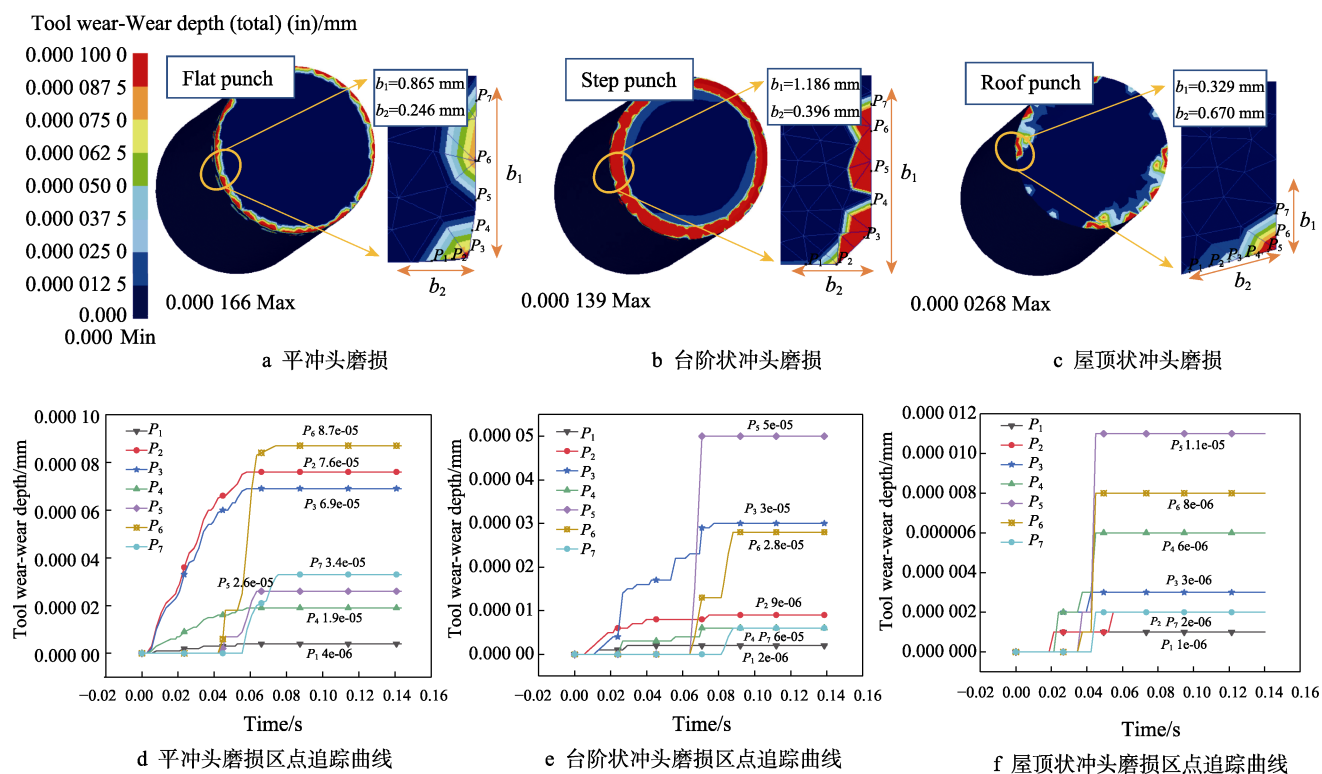
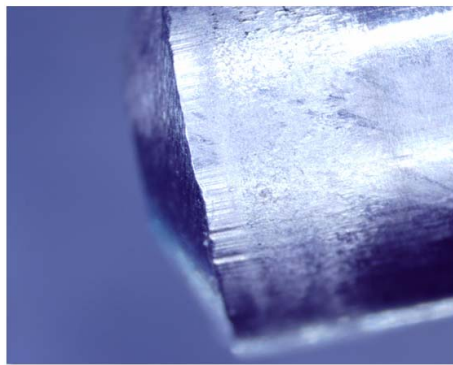
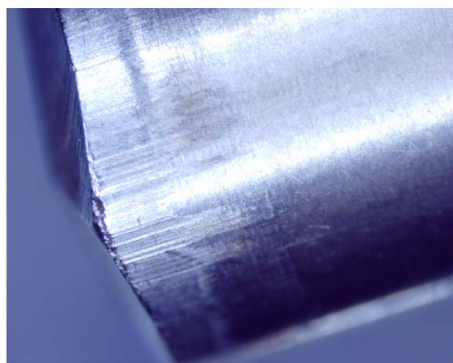


图8 冲头磨损示意图及点追踪曲线

Fig.8 Punch wear diagram and point tracking curve: a) flat punch wear; b) step punch wear; c) roof punch wear; d) point tracking curve of flat punch wear area; e) point tracking curve of step punch wear area; f) point tracking curve of roof punch wear area



a 台阶状冲头



b 屋顶状冲头

图9 冲头侧面磨损形貌

Fig.9 Punch side wear morphology: a) step punch;
b) roof punch

4 结论

1) 冲头结构改变了刃口与坯料的接触周长,随着刃口形状从平面向斜切面结构的转变,刃口与坯料的接触周长逐渐减小,冲孔力系数降低,材料断裂前需要抵抗的拉伸力增大,即材料需要在更大的拉伸变形下完成剪切分离。

2) 冲头刃口由平面向屋顶状过渡,坯料起裂与断裂的时间提前,屋顶状冲头冲裁时坯料最早起裂并发生断裂,坯料在断裂前被拉伸的伸长量最大,储存的弹性应变能最多,同时坯料的高应力区域集中在凹模刃口,降低了冲裁时坯料对冲头侧面的压力,冲断后弹性应变能的释放也可防止回程时坯料抱紧冲头造成的二次磨损。

3) 屋顶状冲头的单次磨损深度最小,2万次冲裁后主要表现为磨粒磨损,台阶状冲头磨损深度次之,2万次冲裁后表现为侧壁大量的黏着磨损与刃尖小部分的磨粒磨损,但由于屋顶状冲头的接触周长小,抵抗的拉伸力更大,刃尖发生了崩刃现象。

参考文献:

[1] HAMBLI R, GUERIN F, DUMON B. Numerical Evaluation of the Tool Wear Influence on Metal-Punchi-

ng Processes[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2003, 21(7): 483-493.

- [2] SOLDATENKOV I A. The Wear of a Punch When it Slides Randomly on a Thin Elastic Layer[J]. Journal of Applied Mathematics and Mechanics, 2013, 77(5): 559-565.
- [3] 陈明和, 胡道春. 高速冲裁过程中的韧性断裂和断面质量研究进展[J]. 中国机械工程, 2016, 27(9): 1263-1271.
CHEN Ming-he, HU Dao-chun. Research Progress on Ductile Fracture and Fracture Quality during High-Speed Blanking[J]. China Mechanical Engineering, 2016, 27(9): 1263-1271.
- [4] BALCI M N, DAG S. Moving Contact Problems Involving a Rigid Punch and a Functionally Graded Coating[J]. Applied Mathematical Modelling, 2020, 81: 855-886.
- [5] SERGEJEV F, PEETSALU P, SIVITSKI A, et al. Surface Fatigue and Wear of PVD Coated Punches during Fine Blanking Operation[J]. Engineering Failure Analysis, 2011, 18(7): 1689-1697.
- [6] WANG L, NIE X, HOUSDEN J, et al. Material Transfer Phenomena and Failure Mechanisms of a Nanostructured Cr-Al-N Coating in Laboratory Wear Tests and an Industrial Punch Tool Application[J]. Surface and Coatings Technology, 2008, 203(5/6/7): 816-821.
- [7] MACKENSEN A, GOLLE M, GOLLE R, et al. Experimental Investigation of the Cutting Force Reduction during the Blanking Operation of AHSS Sheet Materials[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2010, 59(1): 283-286.
- [8] ORAON M. Tool Wear in the Single Point Incremental Forming[J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 56: 1738-1742.
- [9] ZEIDI A, BEN S F, ELLEUCH K, et al. AISI D2 Punch Head Damage: Fatigue and Wear Mechanism[J]. Engineering Failure Analysis, 2021, 129: 105676.
- [10] YOUSEFI M S. 3D Finite Element Modeling of Wear Effects in the Punching Process[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2022, 114: 102415.
- [11] SHIH H C, ZHOU D, KONOPINSKI B. Effects of Punch Configuration on the AHSS Edge Stretchability[J]. SAE International Journal of Engines, 2017, 10(4): 2051-2056.
- [12] KARJALAINEN J A, MÄNTYJÄRVI K M. Punching Force Reduction with Wave-Formed Tools[J]. Key Engineering Materials, 2007, 344: 209-216.
- [13] 齐延兵, 林俊峰, 苏海波, 等. 冲头形状对液压冲孔塌陷的影响[J]. 材料科学与工艺, 2013, 21(1): 62-66.
QI Yan-bing, LIN Jun-feng, SU Hai-bo, et al. Impact of Punch Shape on Hydraulic Punching Collapse[J]. Materials Science and Technology, 2013, 21(1): 62-66.
- [14] PU C, GAO Y, WANG Y, et al. Diffusion-Coupled Cohesive Interface Simulations of Stress Corrosion Inter-

- granular Cracking in Polycrystalline Materials[J]. *Acta Materialia*, 2017, 136: 21-31.
- [15] PU C, ZHOU D, MAKRYGIANNIS P, et al. A Comprehensive Study of Hole Punching Force for AHSS [C]// *Wcx World Congress Experience*, 2018: 2018-01-0802.
- [16] ACHOURI M, GILDEMYN E, GERMAIN G, et al. Influence of the Edge Rounding Process on the Behaviour of Blanked Parts: Numerical Predictions with Experimental Correlation[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 71(5/6/7/8): 1019-1032.
- [17] ARSLAN Y, ÖZDEMİR A. Punch Structure, Punch Wear and Cut Profiles of AISI 304 Stainless Steel Sheet Blanks Manufactured Using Cryogenically Treated AISI D3 Tool Steel Punches[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 87(1/2/3/4): 587-599.
- [18] BANG J, SONG J, BAE G, et al. Quantitative Evaluation of Experimental Wear Behaviour for CrN-Coated Tool Steels in Sheet Metal Forming Process of TRIP 1180[J]. *Procedia Manufacturing*, 2020, 50: 791-794.
- [19] PU C, JIA Y, ZHOU D, et al. Effects of Punch Shapes and Cutting Configurations on the Dimensional Accuracy of Punched Holes on an AHSS Sheet[C]// *Wcx World Congress Experience*, 2018: 2018-01-0800.
- [20] TOKTAS S E, DAG S. Stresses in Multi-layer Coatings in Hertzian Contact with a Moving Circular Punch[J]. *Tribology International*, 2022, 171: 107565.
- [21] SOLDATENKOV I A. Characteristic Features of the Process of Wear of a Punch and a Thin Elastic Strip with Non-Uniform Friction and Wear Parameters[J]. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 2017, 81(6): 492-498.
- [22] MA T, YANG J, YU Z, et al. Influence of the Punch with Concave Cutting-Edge on the Blanking Force in Micro Punching Process[J]. *Procedia CIRP*, 2022, 113: 166-171.
- [23] CHEN G, XU J, WANG J, et al. Numerical and Experimental Study on the Amplitude Effect of Ultrasonic Vibration-Assisted Milling of 3D Needle-Punched Cf/SiC Composite[J]. *Ceramics International*, 2022, 48(12): 17893-17914.
- [24] FALCONNET E, MAKICH H, CHAMBERT J, et al. Numerical and Experimental Analyses of Punch Wear in the Blanking of Copper Alloy Thin Sheet[J]. *Wear*, 2012, 296(1): 598-606.
- [25] GHOLIPOUR H, BIGLARI F R, NIKBIN K. Experimental and Numerical Investigation of Ductile Fracture Using GTN Damage Model on In-Situ Tensile Tests[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2019, 164: 105170.
- [26] LAMBIASE F, LLIO A D. Damage Analysis in Mechanical Clinching: Experimental and Numerical Study[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, 230: 109-120.

责任编辑：蒋红晨