

冲裁间隙对弯链板冲孔断面质量及凸模磨损的影响

汪永明^{1,2}, 董书豪^{1,2}, 李 侃^{1,2}

(1. 安徽工业大学 机械工程学院, 安徽 马鞍山 243032; 2. 安徽工业大学 特种重载机器人安徽省重点实验室, 安徽 马鞍山 243032)

摘要: 为了研究冲裁间隙对销合链弯链板冲孔断面质量及凸模磨损的影响, 运用 DEFORM 软件建立了 4 组不同冲裁间隙的冲孔仿真模型, 通过仿真得到了不同冲裁间隙下的凸模行程与冲裁力变化曲线。分析了断面质量和凸模最大磨损量随冲裁间隙的变化趋势, 并制作了冲孔模具进行试验验证。仿真结果表明: 随着冲裁间隙的增大, 断面光亮带长度和凸模磨损深度会随之减小。根据不同冲裁间隙下的冲裁力曲线, 绘制冲裁功曲线, 确定最佳冲裁间隙值为 0.2 mm。此时, 冲孔断面光亮带长度的仿真值为 2.11204 mm, 凸模的使用寿命预测为 62000 件。进行了冲孔试验, 试验发现, 当冲裁间隙为 0.2 mm 时, 冲裁件的冲孔断面光亮带长度的实测值为 2.19 mm, 与仿真值的相对误差仅为 3.7%, 验证了仿真结果的准确性, 为冲孔模具研发提供了有效指导。

关键词: 弯链板; 冲裁间隙; 冲孔; 断面质量; 凸模磨损

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.03.009

中图分类号: TG386

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2023) 03-0068-08

Influence of blanking clearance on punching section quality and punch wear for bend chain plate

Wang Yongming^{1,2}, Dong Shuhao^{1,2}, Li Wei^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243032, China;

2. Anhui Province Key Laboratory of Special Heavy Load Robot, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243032, China)

Abstract: In order to study the influence of blanking clearance on punching section quality and punch wear for pin-joint bent chain plate, the punching simulation models with four sets of different blanking clearance were established by DEFORM software, and the change curves of punch stroke and punching force under different blanking clearances were obtained by simulation. Then, the variation trend of the section quality and the maximum wear amount of punch with the blanking clearance were analyzed, and the punching die was made for experimental verification. The simulation results show that the length of section bright band and the depth of punch wear decrease as the punching clearance increases. Based on the punching force curves at different punching clearances, the punching power curve is plotted, and the optimal punching clearance value is determined to be 0.2 mm. At this time, the simulated value of the length of bright band on the punching section is 2.11204 mm, and the service life of punch is predicted to be 62000 pieces. The punching test was carried out and the test results find that when the punching clearance is 0.2 mm, the measured value of the length of bright band on the punching section is 2.19 mm, and the relative error with the simulated value is only 3.7%, which verifies the accuracy of the simulation results and provides effective guidance for the development of punching dies.

Key words: bend chain plate; blanking clearance; punching; section quality; punch wear

冲裁是利用冲压模具使金属发生断裂分离的一种塑性加工方式。冲裁工艺参数的选取对冲裁件的断面质量、产品质量乃至模具寿命均有重要影响^[1-3]。其中, 冲裁间隙作为 1 个关键参数, 一直以来备受关注。例如: 王心可等^[4]在同一冲头、不

同冲裁间隙条件下, 对无取向电工钢圆片进行冲裁加工, 发现随着冲裁间隙的增大, 电工钢磁性能的劣化程度先减小后增大, 从而确定了 10%~15% 板厚为最佳冲裁间隙范围。郑海涛等^[5]以板厚为 6 mm 的 T2 铜板为试验材料, 在不同冲裁间隙下对板料展开冲裁试验, 确定了当冲裁间隙为板厚的 16.67% 时, T2 铜板的断面质量最为理想。廉冰娴等^[6]使用 Deform-3D 软件对汽车异形不锈钢板件进行冲压数值分析, 以凸、凹模的磨损深度为优化目标, 基于响应面法对压边力、冲压速度、冲压间隙等冲压工

收稿日期: 2022-05-17; 修订日期: 2022-08-27

基金项目: 安徽省重点研究与开发计划项目 (202004a05020008)

作者简介: 汪永明 (1971-), 男, 博士, 教授

E-mail: wangym@ahut.edu.cn

艺参数进行了优化,使模具寿命得到大幅提升。Mucha J 等^[7]发现硬度为 55 HRC 的薄钢板在斜面局部冲裁过程中,冲头磨损是导致斜面挠度值发生明显变化的主要原因,而当间隙为板厚的 15% 时,冲头磨损情况会得到明显改善。Sahli M 等^[8]以厚度为 4.6 mm 的 16MnCr5 钢板为研究对象,使用 LSDYNA 有限元软件对其冲裁过程进行了仿真,发现冲裁间隙的减小会导致裂纹萌生的延迟。He J 等^[9]基于金属的表面层理论,探究了某粗晶无取向电工薄板在不同冲裁间隙下,受剪切面的单个晶粒的变形行为,并确定了该薄板的最佳冲裁间隙为板厚的 13.8%。

目前,以竖直冲孔模为依托而展开的板料冲裁工艺研究较多。但是,建立在水平冲孔模具基础上的冲裁工艺研究较少。为实现销合链弯链板的自动化冲压加工,需将传统的竖直冲孔方式改为水平冲孔方式。因此,本文以销合链弯链板水平冲孔为例,借助 DEFORM 仿真软件,对不同冲裁间隙下的冲孔过程进行仿真,探究冲裁间隙对断面质量和凸模磨损的影响规律,从而为销合链水平冲孔模具确定最佳的冲裁间隙值,并对凸模的使用寿命做出预测。最后进行冲孔试验,以验证仿真结果的准确性。

1 弯链板冲孔理论分析

销合链的单个链节为带有侧孔的 U 形弯链板,如图 1 所示。其原材料为厚度为 4.3 mm 的 40Mn 钢板。弯链板的成形过程分为落料、弓形折弯、U 形折弯和冲孔 4 道工序。

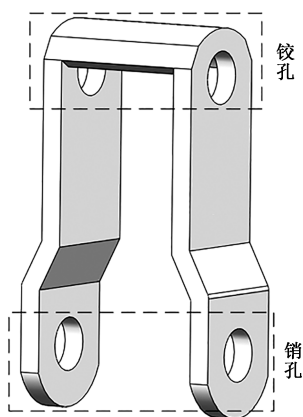


图 1 弯链板结构示意图

Fig. 1 Structure schematic diagram of bent chain plate

冲孔工序是在 U 形工件上对称冲制出直径为 $\Phi 11.1$ mm 的两组孔,分别作为销孔和铰孔。水平冲孔方式是利用斜楔机构将冲床的竖直运动转换为

凸模的水平运动,从而在水平方向上完成冲孔,如图 2 所示,其中, d_T 为凸模直径, d_A 为凹模直径, t 为弯链板厚度。

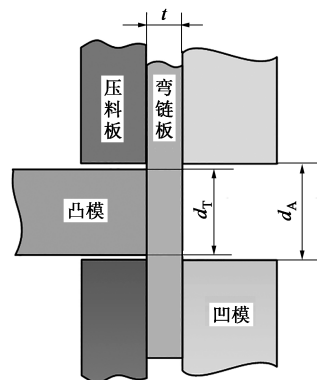


图 2 弯链板水平冲孔方式示意图

Fig. 2 Schematic diagram of horizontal punching for bent chain plate

板料的冲裁过程可以分为弹性变形、塑性变形和断裂分离 3 个阶段^[10-11]。在弯链板的冲孔过程中,当凸模刚接触板料时,在极短的时间内会发生弹性变形,处于凸、凹模刃口附近的板料由于冲裁间隙的存在将产生弯曲和拉伸变形。随着凸模的推进,此处的材料会被挤入凹模孔内,从而在断面上形成塌角。当凸模压入弯链板时,材料内应力达到屈服极限,塑性变形开始。板料被凸模挤入凹模孔内,处于冲裁间隙内的材料受到凸模侧面的剪切和挤压作用,将在断面上形成一条与板料平面垂直的光亮带。随着凸模的推进,当刃口处材料的内应力达到抗拉强度极限时,塑性变形结束,凸、凹模刃口附近将产生微裂纹。在拉应力的作用下,裂纹沿着剪切力方向向板料内部扩展直至重合,从而形成一条向板料内倾斜的粗糙断面,称为断裂带。最后,在凸、凹模的作用下板料被完全切断。断裂时,由于裂纹的起点在刃口附近,所以不可避免地产生了毛刺。

由此可知,在对弯链板进行冲孔后,冲孔断面上将呈现 4 个明显的特征区域,从工件外表面起,依次为塌角、光亮带、断裂带和毛刺^[12],如图 3a 所示。而在被切断分离的废料上,4 个特征区依次为毛刺、断裂带、光亮带和塌角,如图 3b 所示。图 3 中, a 为塌角宽度, b 、 c 、 d 、 e 依次为塌角、光亮带、断裂带和毛刺的长度。

2 弯链板冲孔的有限元模型

2.1 仿真材料模型

本文基于 DEFORM 有限元软件建立二维和三维

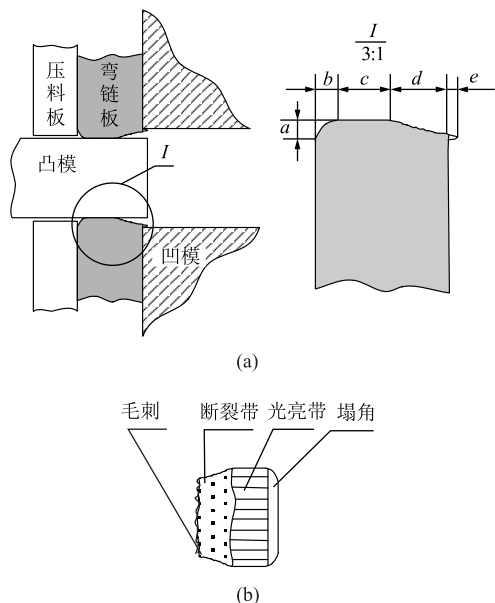


图 3 弯链板冲孔断面形成机理

(a) 冲孔断面 (b) 冲孔废料

Fig. 3 Formation mechanism of punching section for bent chain plate

(a) Punching section (b) Punched scrap

仿真模型, 分别用于分析冲孔断面和凸模磨损。为了使仿真结果能够准确地反映冲孔过程, 弯链板材料的参数设置应尽可能接近材料的真实属性。因此, 参照 GB/T 228.1—2021^[13], 对弯链板 40Mn 钢板料进行拉伸试验, 获得 40Mn 钢材料的应力-应变曲线, 如图 4 所示, 而后导入 DEFORM 材料库中。此外, 凸、凹模材料为 Cr12MoV 钢, 其热处理硬度为 55~60 HRC, 该材料对应于 DEFORM 有限元软件材料库中的 AISI-2D 材料。

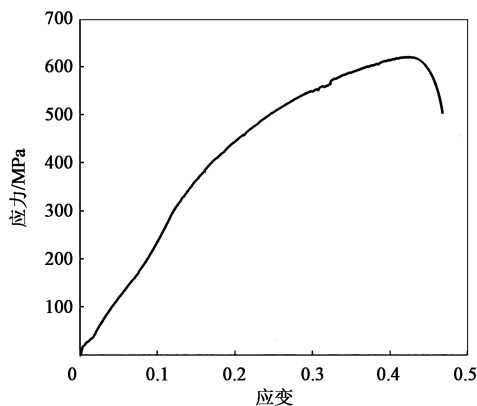


图 4 弯链板材料 40Mn 钢的应力-应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curve of 40Mn steel for bent chain plate material

2.2 仿真模型及仿真参数设定

根据销合链弯链板的冲孔生产经验, 其冲孔模具的单边冲裁间隙值在 0.10~0.25 mm 范围内选取

时, 均能冲压出合格零件。为制作水平冲孔模具样机, 需在 0.10~0.25 mm 的范围内确定出最佳的冲裁间隙值。本文借助 Pro/E 三维软件分别建立了冲裁间隙值为 0.10、0.15、0.20 和 0.25 mm 的 4 组销合链弯链板冲孔几何模型, 并将其导入至 DEFORM 软件中, 用于分析冲裁间隙对弯链板冲孔性能的影响。该模型包括凸模、凹模、压料板和弯链板。

几何模型导入 DEFORM 后, 将弯链板设置为 Plastic (塑性体), 其他零件设置为 Rigid (刚性体)。然后, 设置各零件的材料属性, 在实际生产中, 凸模和凹模材料为 Cr12MoV 钢, 选用材料库中的 AISI-2D。再对弯链板和凸模进行网格划分, 弯链板网格总数设定为 50000 个, 凸模网格总数设定为 32000 个。由于冲孔变形区主要集中在狭小的冲裁间隙内, 为防止网格产生畸变, 采用梯度网格划分法对凸模刃口和弯链板待冲孔区域的网格进行局部细化。其中, 二维仿真模型用于分析冲孔断面, 因此, 仅对模型中的弯链板进行网格划分。

断裂准则的建立是决定仿真能否真实反映实际冲裁情况的关键因素, 本文选用可以较为稳定地反映金属断裂情况的 Normalized C&L 断裂准则, 并通过拉伸试验和仿真共同确定断裂阈值为 4.5; 选用剪切摩擦条件来分析冲孔过程中的摩擦问题, 摩擦因数选取定值 Cold Forming 0.12; 关于凸模的磨损, 选用根据磨损深度来描述磨损情况的 Archard 磨损模型^[3], 并将凸模硬度设为 55 HRC, 磨损系数 k 取为 2.0×10^{-6} 。最后, 根据实际冲裁速度设置凸模的运动条件, 完成有限元模型的构建。图 5 和图 6 分别为弯链板冲孔的二维仿真 1/2 对称模型和三维仿真模型。

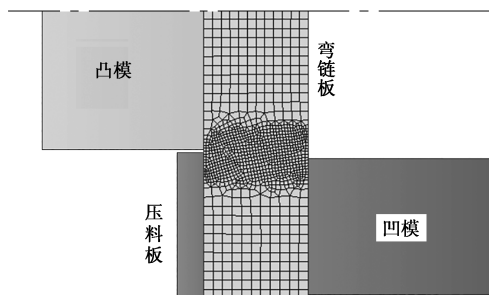


图 5 1/2 对称二维仿真模型

Fig. 5 2D simulation model of 1/2 symmetry

3 弯链板冲孔的仿真结果分析

3.1 弯链板冲孔过程与断面形成

由于弯链板的 4 个孔是同步冲裁的, 故本文仅

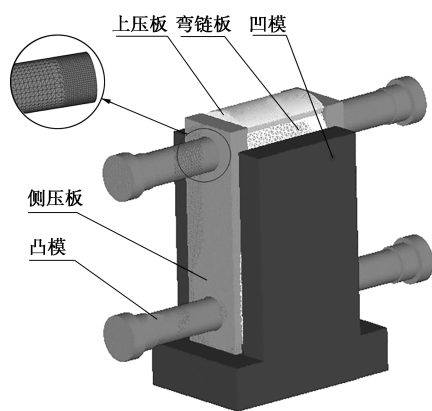


图6 三维仿真模型

Fig. 6 3D simulation model

对单个孔展开分析。为了解冲孔过程中板料的变形情况及断面的形成过程,通过 DEFORM 软件对弯链板的冲孔过程进行有限元仿真,得到不同冲裁间隙下的冲裁力-凸模行程曲线,如图 7 所示。对比发现,图 7 中不同冲裁间隙值对应的冲裁力-凸模行程曲线的总体变化趋势一致,均呈现急剧增长、缓慢增长和急剧下降 3 个阶段。由前文中的理论分析可知,弯链板冲孔过程历经弹性变形、塑性变形和断裂分离 3 个阶段,而冲裁力-凸模行程变化曲线刚好反映了弯链板的冲孔过程。当凸模接触弯链板时,板料发生弹性变形,但此阶段时间较短,可忽略不计。当板料进入塑性变形阶段时,凹、凸模刃口附近的材料由于受到剪切作用而发生加工硬化,使得变形抗力增大,导致冲裁力急剧增大。随着凸模推

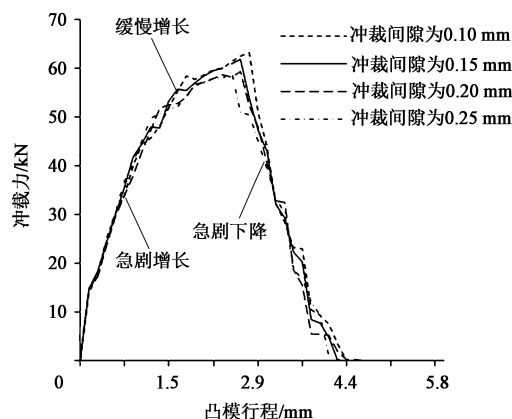


图7 冲裁力-凸模行程曲线

Fig. 7 Curves of blanking force-punch stroke

进,塑性剪切面积逐渐减小,硬化作用也逐渐降低,所以,冲裁力-凸模行程曲线的上升趋势变缓。当冲裁力增至最大点后,又开始急剧下降,这是由于凹、凸模刃口附近材料出现了微裂纹,板料变形步入了断裂分离阶段,直至裂纹重合,板料完全断裂分离时冲裁力降为 0;此外,从图 7 中可以看出:4 条曲线的最大冲裁力点由高至低对应的冲裁间隙依次为 0.10、0.15、0.20 和 0.25 mm。可见,最大冲裁力随着冲裁间隙的增大逐渐降低。

为了直观地观察断面的形成过程,以及断面形成过程中板料的应力变化情况,以冲裁间隙为 0.25 mm 的二维冲孔模型为例,截取弯链板在不同冲孔行程中的等效应力分布图,如图 8 所示。

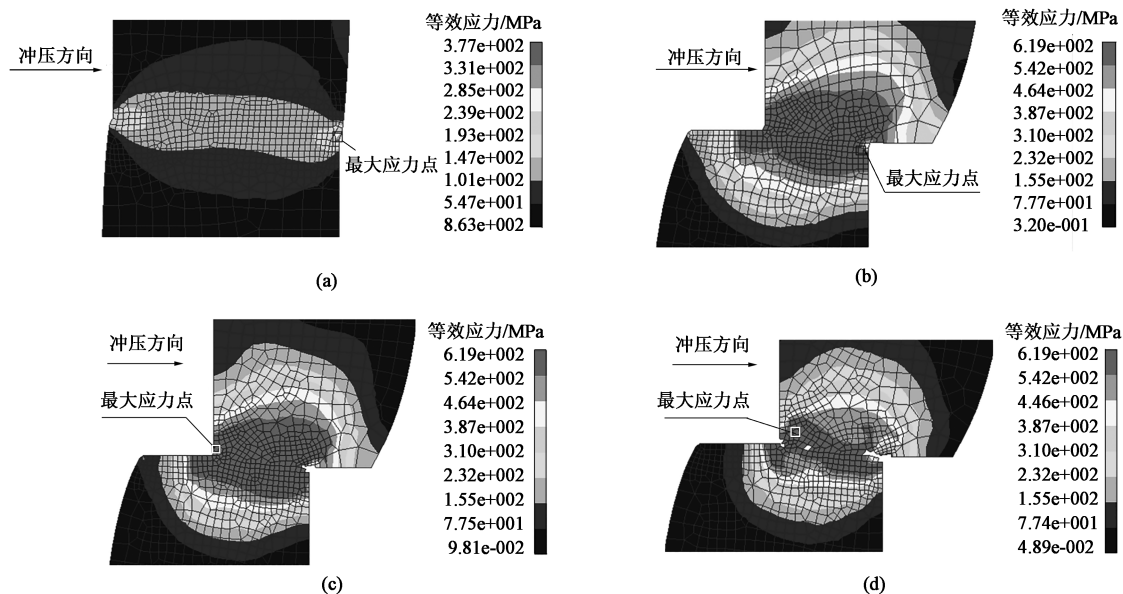


图8 冲孔过程中弯链板的应力分布

(a) Step 11 (b) Step 116 (c) Step 118 (d) Step 120

Fig. 8 Equivalent stress distributions of bent chain plate during punching process

由图 8 可知,冲孔过程中弯链板的等效应力和变形主要集中在凸、凹模刃口间隙所形成的狭小空间内,且距离凸、凹模刃口越远,其等效应力的数值越小。其中,从 Step11 至 Step116 可以明显观察到断面形成了塌角和与板料平面垂直的光亮带,等效应力值由 377 MPa 增至 619 MPa,并且最大等效应力点均在凹模刃口区域。但在 Step118 时,凹模刃口处出现了裂纹,最大等效应力点出现在凸模刃口区域,说明凹模刃口区域某点处的材料内应力已

达到极限值,率先进入断裂分离阶段;到 Step120 时,凸模刃口处产生了裂纹,同时可以观察到,在刃口附近形成的裂纹有向板料内部倾斜的趋势,即开始形成断裂带。

3.2 冲裁间隙对断面质量的影响

冲裁断面的光亮带长度常作为断面质量的衡量标准^[12]。因此,通过对比 4 组仿真模型下弯链板冲孔断面光亮带的长度,即可探究冲裁间隙对弯链板冲孔断面质量的影响,如图 9 所示。

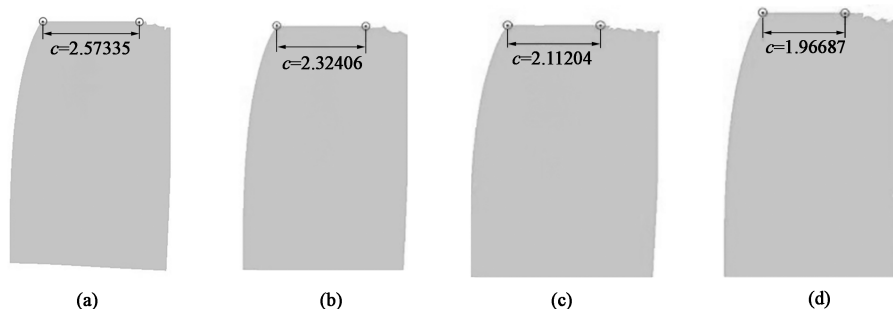


图 9 不同冲裁间隙条件下的冲孔断面

(a) 0.10 mm (b) 0.15 mm (c) 0.20 mm (d) 0.25 mm

Fig. 9 Punching sections under different blanking clearance conditions

由图 9 可知,以 0.10、0.15、0.20 和 0.25 mm 为冲裁间隙值,仿真出的 4 组冲孔断面光亮带的长度分别为 2.57335、2.32406、2.11204 和 1.96687 mm,同时测量出毛刺长度分别为 0.0008、0.0013、0.0150 和 0.2040 mm,根据以上数据绘制光亮带和毛刺长度随冲裁间隙的变化趋势图,如图 10 所示。

由图 10 可知,断面光亮带长度随着冲裁间隙的增加而不断减小,而毛刺长度随着冲裁间隙的增加而增加,即冲裁间隙的增大将导致断面质量变差。分析其原因为:冲裁间隙的增大,使冲孔过程中材料的内部压应力减小,材料的硬化程度减轻,塑性降低,塑性变形时间有所缩短,从而使裂纹提前产生,导致断面光亮带的比例有所减少。此外,观察图 9 的断面形状可知,冲裁间隙的增大还导致了断裂带逐渐变得粗糙,并且斜度增大。

3.3 冲裁间隙对凸模磨损的影响

为了研究冲裁间隙与凸模磨损之间的关系,在 DEFORM-3D 平台上对不同冲裁间隙的弯链板冲孔过程进行仿真,得到凸模磨损深度云图,如图 11 所示。磨损主要发生在凸模刃口的端面位置,并向侧面延伸。冲裁间隙值为 0.10、0.15、0.20 和 0.25 mm 时对应的凸模的最大磨损深度分别为 1.19×10^{-6} 、 1.05×10^{-6} 、 9.64×10^{-7} 和 8.89×10^{-7} mm。由此,绘制出凸模的最大磨损深随冲裁间隙的变化

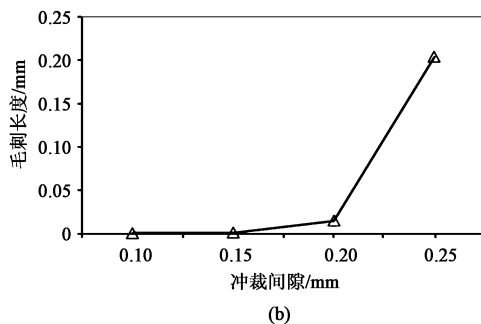
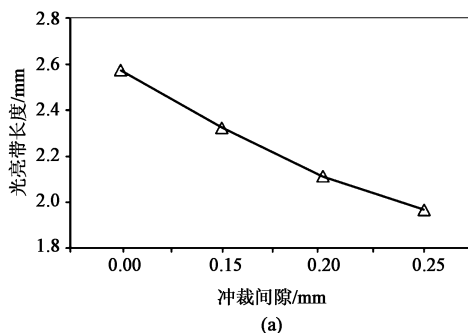


图 10 冲裁间隙与断面质量的关系图

(a) 光亮带长度 (b) 毛刺长度

Fig. 10 Relationship diagrams between blanking clearance and section quality

(a) Bright band length (b) Burr length

曲线,如图 12 所示。发现随着冲裁间隙的增大,凸模的最大磨损深呈下降趋势。考虑其原因为:冲孔过程中,凸模刃口与板料在高压情况下接触,塑性

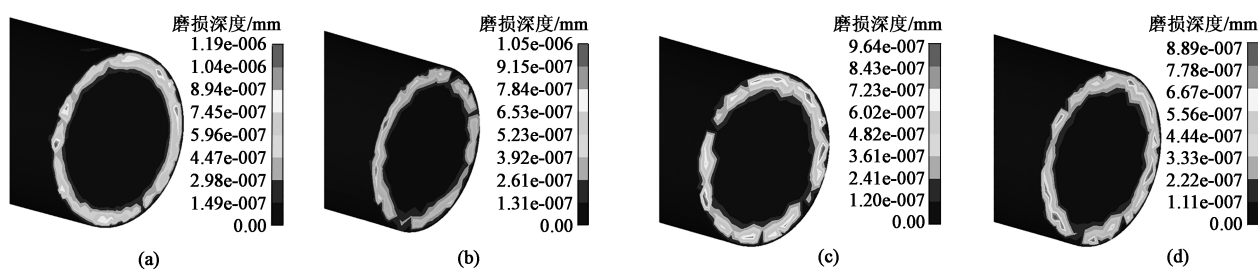


图 11 不同冲裁间隙下的凸模刃口磨损深度云图

(a) 0.10 mm (b) 0.15 mm (c) 0.20 mm (d) 0.25 mm

Fig. 11 Nephograms of punch edge wear depth under different blanking clearances

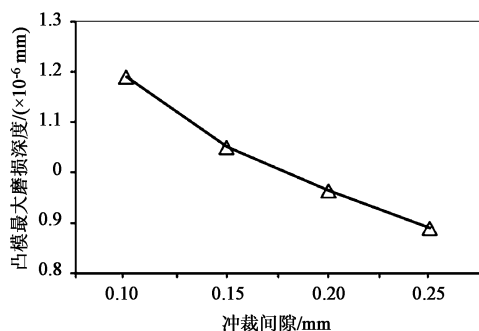


图 12 冲裁间隙与凸模最大磨损深度关系图

Fig. 12 Relationship diagrams between blanking clearance and punch maximum wear depth

变形使得板料在刃口区域产生塑性流动,从而与凸模刃口产生摩擦,凸模在推进过程中按照先端面后侧面的顺序和板料接触,所以,凸模磨损主要在刃口端面位置并向侧面延伸。此外,由于冲裁间隙的减小,使得弯链板在冲孔过程中的塑性变形时间有所延长,从而加大了凸模刃口与板料的摩擦距离,导致冲裁间隙越小刃口磨损加剧。

3.4 最佳冲裁间隙值的确定与凸模寿命预测

根据上述分析可知,冲裁间隙过小虽然能够提高断面质量,但也加剧了凸模的磨损,而过大的冲裁间隙虽然能够降低磨损、延长模具寿命,但同时也会使得工件断面质量变差,甚至导致产品不合格。因此,在确定冲裁间隙时,需要兼顾冲裁间隙对断面质量和凸模磨损的影响。有研究表明,模具采用最佳的冲裁间隙值时,既能够保证冲裁的顺利完成,又能够使所消耗的功最小^[14]。因此,本文用冲裁功 W 来确定水平冲孔模具的最佳冲裁间隙,其表达式为:

$$W = \int_0^L F(l) dl \quad (1)$$

式中: $F(l)$ 为凸模在行程为 l 时的冲裁力; dl 为凸模行程 l 的增量; L 为总的凸模行程。

根据不同冲裁间隙下的冲裁力-凸模行程曲线,

完成冲裁功曲线绘制,如图 13 所示。由图 13 可知,冲裁间隙为 0.20 mm 时冲裁功最小,从而确定弯链板冲孔的合理冲裁间隙为 0.20 mm。

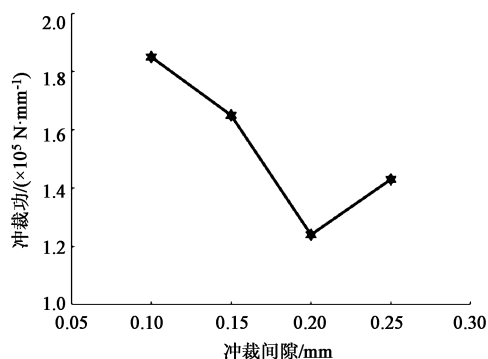


图 13 冲裁功随冲裁间隙的变化趋势图

Fig. 13 Changing trend diagram of blanking power with blanking clearance

为了给生产部门提供模具寿命参考值,在冲裁间隙为 0.20 mm 时,对凸模寿命进行预测。实际生产中,当凸模磨损深度值超过 60 μm 后会出现点蚀导致磨损加剧^[15],引起弯链板的不良品率增长,凸模快速报废。模具寿命的计算公式为:

$$N = 60/H \quad (2)$$

式中: N 为模具使用寿命; H 为一次冲孔凸模的最大磨损深度。

根据图 11 可知,当冲裁间隙值为 0.20 mm 时,凸模的最大磨损深度为 9.64×10^{-7} mm,根据式 (2) 计算,在理想情况下凸模的预期使用寿命约为 62000 件。

4 弯链板冲孔试验验证

为了验证有限元仿真结果的准确性,根据仿真简化模型分别制作冲裁间隙值为 0.10、0.15、0.20 和 0.25 mm 的 4 组弯链板水平冲孔试验样机,并借助扬力集团股份有限公司的 JH21-250B 型压力机,

对弯链板进行冲孔试验。得到冲裁件后,用线切割截取工件的冲孔断面部分,然后利用高清电子显微镜对弯链板冲孔断面光亮带的长度进行测量。

在试验条件下,弯链板冲孔断面光亮带的尺寸波动较大,为了尽可能地反映试验结果,通过测量样本截面不同位置的光亮带长度,然后求平均值的

方式来确定光亮带长度的实测值。如图 14 所示,当冲裁间隙分别为 0.10、0.15、0.20 和 0.25 mm 时,对应光亮带长度的实测平均值 AVC 分别为 2.89、2.29、2.19 和 1.95 mm,随着冲裁间隙的增大呈现逐渐减小的趋势,与仿真分析结果一致,并且与对应仿真值的误差均在 10% 范围内,误差较小。

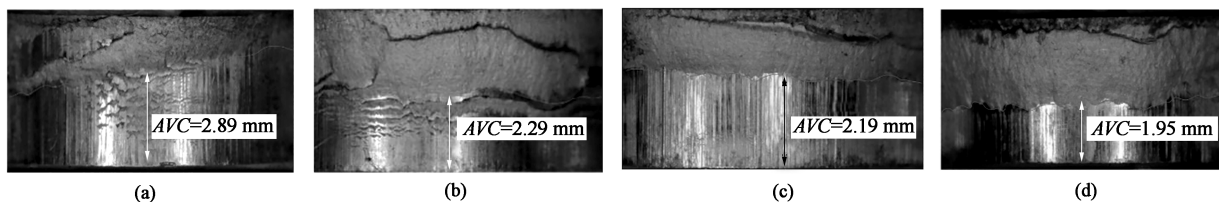


图 14 不同冲裁间隙下的冲孔断面图

(a) 0.10 mm (b) 0.15 mm (c) 0.20 mm (d) 0.25 mm

Fig. 14 Punching section diagrams under different blanking clearances

值得注意的是,当冲裁间隙为 0.10 和 0.15 mm 时,弯链板冲孔断面上的光亮带不连续,并出现了“多条光亮带”,分析其原因为:冲裁间隙过小,导致变形区内弯矩过小,凹、凸模刃口附近形成的裂纹在向板料内部扩展时不重合,并且两条裂纹之间的材料受到了二次剪切,所以产生了第 2 光亮带,这是通过仿真观察不到的现象。当冲裁间隙值增至 0.20 和 0.25 mm 时,第 2 光亮带消失,说明冲裁间隙值逐步合理,断裂时凹、凸模刃口处形成的裂纹能够重合。随着冲裁间隙增大,材料的塑性变形能力变差,塑性变形时间变短,所以光亮带变窄。当冲裁间隙值为 0.20 mm 时,弯链板冲孔断面的光亮带长度的实测值为 2.19 mm,仍然占据了整个断面的 1/2,并且与仿真值 2.11204 mm 的相对误差仅为 3.7%,说明仿真模型及其参数设置准确,其仿真结果可以用于指导生产实践。

5 结论

(1) 随着冲裁间隙的增大,光亮带长度和凸模磨损深度会随之减小。对于 40Mn 钢弯链板而言,其水平冲孔模具的最佳冲裁间隙值为 0.20 mm,此时凸模的预期使用寿命为 62000 件。

(2) 当冲裁间隙值取 0.20 mm 时,弯链板冲孔断面光亮带长度的测量平均值约为 2.19 mm,占据断面的 1/2,且与仿真值误差仅为 3.7%,验证了仿真结果的准确性,对指导企业生产具有一定的参考价值。

参考文献:

[1] 曹秒艳,田少杰,胡晗,等. 超声振动辅助铝合金板冲裁研究

[J]. 塑性工程学报, 2020, 27 (3): 1-9.

Cao M Y, Tian S J, Hu H, et al. Research on ultrasonic vibration assisted blanking of aluminum alloy sheet [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2020, 27 (3): 1-9.

[2] Aravind U, Chakkingal U, Vengopal P A. Review of fine blanking: Influence of die design and process parameters on edge quality [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2021, 30 (1): 1-32.

[3] 郑小慧. 基于 Archard 理论的汽车板件热冲压模具磨损分析 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (11): 150-154.

Zheng X H. Wear analysis on hot stamping die for automobile panel based on Archard theory [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (11): 150-154.

[4] 王心可,汪喆,崔荣高,等. 冲裁工艺对无取向电工钢叠片磁性能的影响 [J]. 上海交通大学学报, 2019, 53 (9): 1115-1121.

Wang X K, Wang Z, Cui R G, et al. Influence of blanking process on the magnetic properties of non-oriented electrical steel lamination [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2019, 53 (9): 1115-1121.

[5] 郑海涛,樊瑜瑾,杨振,等. T2 铜板冲裁间隙对冲裁力及断面质量的影响 [J]. 材料科学与工艺, 2016, 24 (6): 61-66.

Zheng H T, Fan Y J, Yang Z, et al. The effect of punching clearance on punching force and quality of cross section for T2 copper [J]. Materials Science and Technology, 2016, 24 (6): 61-66.

[6] 廉冰娟,樊文渊. 基于 RSM 的汽车不锈钢板件冲压模具磨损 CAE 分析 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (6): 113-117.

Lian B X, Fan W Y. CAE analysis on stamping mold wear for automobile stainless steel plate based on RSM [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (6): 113-117.

[7] Mucha J, Tutak J. Analysis of the influence of blanking clearance on the wear of the punch, the change of the burr size and the geometry of the hook blanked in the hardened steel sheet [J]. Materials, 2019, 12 (8): 1261-1261.

(下转第 115 页)