

多工位级进模冲裁工序模具磨损行为的 数值分析及寿命预测

熊英超¹, 夏琴香¹, 叶福源², 陈志平²

(1.华南理工大学 机械与汽车工程学院, 广州 510641;

2.广东科龙模具有限公司, 广东 佛山 528303)

摘要: **目的** 针对多工位级进模连续冲裁所带来的模具磨损问题。**方法** 基于 Archard 磨损理论, 以凸模为研究对象, 对其磨损行为进行有限元数值模拟, 通过设计冲裁间隙、冲裁速度、模具硬度等工艺参数之间的正交试验, 获得各工艺参数对模具磨损的变化规律及最佳工艺组合; 采用磨损累计法, 对模具修模前的凸模圆角半径和使用寿命进行预测。**结果** 冲裁模具磨损区域主要分布在模具圆角处, 并得到单次最大模具磨损量为 4.30×10^{-7} mm; 得到磨钝后的圆角半径为 0.3 mm, 冲裁极限次数为 27 万次。**结论** 采用该分析方法能较好地预测磨损, 并为模具的保养修复提供一定的参考价值。

关键词: 多工位级进模; Archard 理论; 数值分析; 模具磨损; 模具寿命

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2017.03.017

中图分类号: TG44 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2017)03-0089-05

Numerical Analysis and Life Prediction of Die Wear Behavior in Multi-Position Progressive Die Blanking

XIONG Ying-chao¹, XIA Qin-xiang¹, YE Fu-yuan², CHEN Zhi-ping²

(1.School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China;

2.Guangdong Kelon Mold Co., Ltd., Foshan 528303, China)

ABSTRACT: The paper aims to solve the problem of die wear caused by continuous blanking of multi-position progressive die. Based on the Archard wearing theory, a terrace die was researched to have numerical modeling on finite element of wearing. The variation rule and optimal process combination of influences of process parameters on die wearing were obtained through orthogonal test among design of blanking clearance, blanking speed, and die hardness. Furthermore, the fillet radius and the service life of the punch die before repairing were predicted by the method of wearing accumulation. The wearing area of blanking die was mainly distributed in the fillet corner of the die, and the maximum wearing amount in the single stamping was 4.30×10^{-7} mm. And the radius of the fillet corner was 0.3 mm after blunting, and the limit time of the blanking was 270 thousand. The method can predict the wear well and provide some reference value for the maintenance of the die.

KEY WORDS: multi-position progressive die; archard theory; numerical analysis; die wearing; die life

多工位级进模现已成为实现大生产、高效率、低成本的最佳选择, 被称为现代高精密、高效率、长寿命的“三高”模具^[1]。模具磨损作为冲压模具中最常见

的故障, 不仅影响着模具的寿命, 同时还会影响冲压件的形状、尺寸和表面质量^[2]。由于冲压成形时模具承受了很大的高频载荷, 使模具的磨损情况更为严

收稿日期: 2017-04-21

基金项目: 广东省佛山市顺德区产学研合作项目 (2014CXY18)

作者简介: 熊英超 (1992—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为精密成形与模具技术。

通讯作者: 夏琴香 (1964—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为精密成形与模具技术。

重,进而给模具的设计和应用带来一系列问题,因此,对模具磨损行为的研究具有非常重要的意义。

自1953年起,Archard理论被国内外许多学者广泛应用于模具磨损分析中。毛华杰等^[3]针对斜齿圆柱齿轮旋转精冲凹模模具利用Deform-3D软件进行了磨损分析,并研究了反顶力、压边力、冲裁速度、凸凹模间隙等对模具磨损的影响关系;谢晖等^[4]系统研究了模具硬度、冲压速度和模具材料对超强钢板冲压模具磨损程度的影响。由于冲裁刃口寿命相对模具其他部位更低,需要通过反复刃磨和更换零部件。文中采用Archard磨损模型,对多工位级进模冲裁工序进行数值模拟,观察其凸模的磨损分布,并借助磨损累计法来预测模具寿命。

1 模具磨损机理及有限元模型的建立

1.1 模具磨损机理

理解模具工作时的磨损机理对预测模具磨损具有非常重要的意义。模具磨损后,不能通过修复而继续服役即认定该模具已失效。在模具失效中,磨损失效占70%左右^[5]。模具磨损失效是由多种因素影响的复杂过程,按其磨损的机理可以分为磨粒磨损、粘着磨损、疲劳磨损和腐蚀磨损等类型。模具在冲裁过程中,随着凸模的运动,与板坯之间存在着很大的压力和强烈的摩擦,由于摩擦副之间产生相对运动,使模具材料的颗粒被工件带去,从而造成磨损。磨损后模具的尺寸及表面质量发生变化,导致不能继续服役而失效。

1.2 Archard 磨损理论

1953年美国的ARCHARD J F提出了简单的磨损计算公式——Archard 磨损公式,见式(1)^[6]。

$$dV = K \frac{dN \cdot dL}{H} \quad (1)$$

式中: dV 为磨损体积量; dN 为模具与工件接触的法向压力; dL 是模具与工件之间的相对滑移长度; H 为模具硬度; K 为磨损系数,根据 ARCHARD 等的试验, K 值约在 $10^{-2} \sim 10^{-7}$ 范围内变化,当表面润滑良好时, K 值约为 $10^{-6} \sim 10^{-7}$,取 $K=10^{-6}$ 。

设 dW 为磨损深度; dA 为接触面积; p 为工件与板料接触面的法向压力; u 为相对滑移速度; t 为滑移时间。将式(1)中的 dV , dN , dL 用下式替代:

$$\begin{cases} dV = dW \cdot dA \\ dN = dp \cdot dA \\ dL = u \cdot dt \end{cases} \quad (2)$$

$$dW = K \frac{pu}{H} dt \quad (3)$$

为便于其在 Deform 软件中进行有限元分析,将 Archard 磨损模型公式积分变形为式(4)。

$$W = \int K \frac{p^a u^b}{H^c} dt \quad (4)$$

式中: a, b, c 为修正系数,对于钢有 $a=1, b=1, c=2$ ^[7]。

1.3 多工位级进模磨损分析有限元模型的建立

模具用于生产西班牙大众汽车某零件(见图1),该零件由度为2 mm的DX52D+Z140镀锌板制成,包括冲孔、修边、翻边、整形、弯曲、成形等18个工位(见图2)^[8]。材料的屈服强度为140~300 MPa,抗拉强度为270~420 MPa,泊松比为0.3,弹性模量为210 GPa^[9]。

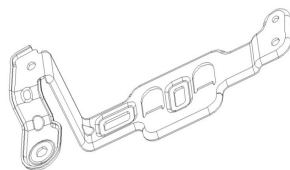


图1 某汽车结构件零件
Fig.1 Structural part of a car



图2 某汽车结构件零件排样
Fig.2 Structural part's layout of a car

由于冲裁过程中凸模所受的侧压力要远远大于凹模,致使凸模侧壁和端面最容易发生磨损,因此选取凸模为研究对象,利用 Deform 软件对冲裁过程中凸模的模具磨损进行分析。将模具模型中所有冲裁工序分出,得到的有限元模型见图3。

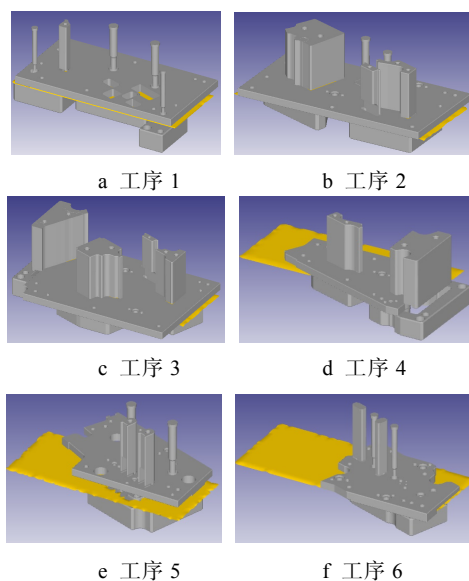


图3 冲裁工序有限元模型
Fig.3 Finite element model of blanking process

在有限元分析时，设置分析所需的参数如下：① 模具材料为 Cr12MoV，凸模模具硬度设为 HRC60；② 对于冲裁工序而言，由于板料的变形主要集中在凸模、凹模刃口附近，在通过网格删除的方法模拟板料的破坏过程中，为了减少计算误差，同时减小网格规模，在变形比较大的冲裁区域进行局部网格细化分；③ 凸模行程设为 25 mm，冲压速度为 10 mm/s^[10]，模具与板料间的摩擦因数为 0.15。

2 模拟结果的分析与讨论

2.1 模具磨损分析

冲裁工序磨损模拟所得结果见图 4，可知，模具磨损区域主要集中在模具的圆角处。这是因为圆角处流入的坯料较多，模具与板料接触区域比其他部位更大，使其磨损量达到最大，成为模具磨损失效的主要区域。随着冲裁工序的进行，模具不断与板坯接触摩擦，使磨损量不断增加；模具的相对滑移速度会由于板坯的阻碍不断减小；凸模与板坯的接触面不断增大，使凸模的接触压力不断增大。模拟所得的冲裁工序 1—6 的凸模单次冲裁最大磨损量分别为 2.71×10^{-7} 、 4.30×10^{-7} 、 2.87×10^{-7} 、 1.76×10^{-7} 、 4.24×10^{-7} 、 1.52×10^{-7} mm，磨损量在第 2 冲裁工序处最大，单次冲裁最大磨损量为 4.30×10^{-7} mm。

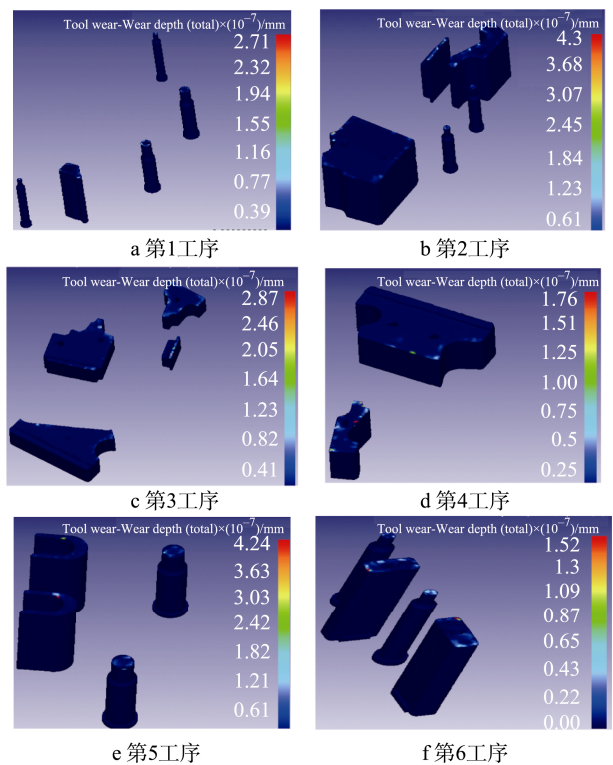


图 4 不同冲裁工序下凸模磨损模拟结果
Fig.4 Simulation results of punch wear under different blanking processes

2.2 不同冲压工艺参数对磨损量的影响

模具磨损受到模具间隙、冲压速度、模具硬度、

摩擦因数等因素的影响，为了得到减小磨损的最佳冲压工艺参数，选取此四者作为试验因素，每个因素取 4 个水平，以磨损量作为标准，设计正交试验。采用第 1 冲裁工序中典型圆形轮廓冲裁进行分析。由于模具间隙为板厚的 0.1~0.15 倍时，磨损最小^[11]。冲压速度设置在 10~50 mm/s^[12]。选用的摩擦模型为剪切摩擦模型，因为在塑性成形中，正压力一般大于制件材料的屈服应力，采用库伦摩擦模型求得的摩擦应力往往偏高^[13]。试验因素的设置见表 1。

表 1 试验因素与试验水平
Tab.1 Experimental factors and experimental levels

试验水平	试验因素			
	模具间隙/mm	冲压速度/(mm·s ⁻¹)	模具硬度(HRC)	摩擦因数
1	0.01	10	50	0.10
2	0.05	20	54	0.15
3	0.10	30	58	0.20
4	0.15	40	62	0.25
5	0.20	50	66	0.30

将所得试验数据和模拟所得的模具磨损量利用 Spass 软件进行正交分析，得到模具间隙、冲压速度、模具硬度、摩擦因数对模具磨损的影响趋势，见图 5。可知，冲裁间隙和速度对磨损量影响的趋势不是非常明显，这是因为在不同间隙和速度下以不同的磨损形式产生。当冲裁速度较低、间隙适当时，主要发生磨粒磨损；冲裁速度中等、间隙较小，主要发生粘着磨损；冲裁速度较高、间隙较小时，主要发生冲击磨损；冲裁速度较高、间隙较大时，主要发生疲劳磨损^[14]。适当增大模具间隙对减小磨损量是非常有效的，在一定条件下，模具硬度越大，磨损越小。摩擦因数的选取需和实际结合，并不是越小越好。当模具磨损达到最小时，其冲压工艺参数中，模具间隙为 0.05 mm、冲压速度为 10 mm/s、模具硬度为 HRC66、摩擦因数为 0.30。利用此参数进行数值模拟分析，得到的磨损量均小于试验中的磨损量。当然冲压参数的选取不仅仅只考虑这些，如模具的冲压速度的选取需考虑生产效率的问题，模具硬度要考虑热处理的成本等。

2.3 模具刃口圆角及模具寿命的预测

随着冲压次数的增加，模具表面与工件本身的接触次数增多，使模具之间的接触型面发生变化，影响下一次冲压过程的磨损。板材进行冷冲压时，其成形零件尺寸精度受许多因素的影响，模具磨损量也受到了相应的限制。在模具的使用过程中，凸模、凹模磨损后刃口尺寸发生变化，引起冲裁间隙的变大，当冲裁间隙达到最大极限值时，此时达到模具的允许磨损量。相关数据表明，厚度为 1.5~2 mm 的低碳钢、有

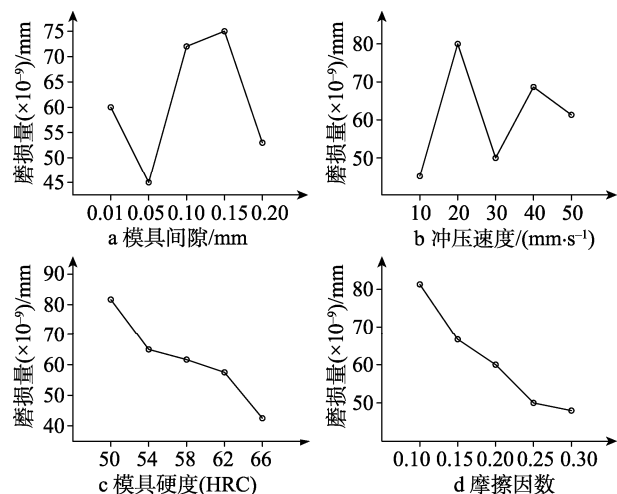


图5 各因素对模具磨损的影响趋势

Fig.5 Influence of various factors on die wear

色金属进行冲裁时,凸模、凹模允许磨损量为 0.10mm;厚度为 2~3 mm 的低碳钢、有色金属进行冲裁时,凸模、凹模允许磨损量为 0.15 mm;厚度为 1.5~2 mm 的中、高碳钢进行冲裁时,凸模、凹模允许磨损量是 0.12 mm;厚度为 2~3 mm 的中、高碳钢进行冲裁时,凸模、凹模允许磨损量是 0.2 mm^[15]。

坯料冲裁厚度为 2 mm,材料为 DX52D+Z140 镀锌(中等强度钢),可知该模具允许的磨损量为 0.12 mm。随着模具的不断磨损,刃口逐渐磨钝,形成一定的圆角。圆角与磨损深度的几何关系见图 6。 R_i 、 R_{i+1} 分别为第 i 次及第 $i+1$ 次冲裁后的凸模圆角半径; W_{i+1} 为第 $i+1$ 次冲裁时的模具磨损深度值。 d_i 、 d_{i+1} 分别表示第 $i+1$ 次冲裁前后凸模圆角的轮廓线上距离最大的两点,两者间的距离近似等于刃口处的最大磨损深度。即 $|d_i d_{i+1}| = W_{i+1}$ 。由图 6 中的关系,可以得到式(5)。

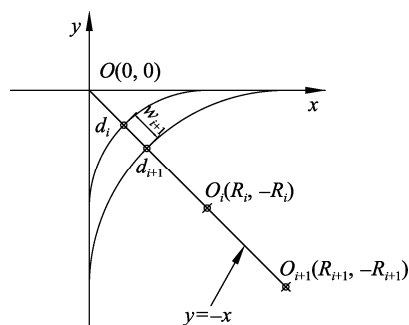


图6 磨损深度与模具圆角的几何关系

Fig.6 Geometric relationship between wear depth and die fillet

$$\begin{cases} y = -x \\ (x - R_i)^2 + (y + R_i)^2 = R_i^2 \\ (x - R_{i+1})^2 + (y + R_{i+1})^2 = R_{i+1}^2 \end{cases} \quad (5)$$

由式(5)进一步可以得到式(6)。

$$R_{i+1} = R_i + (1 + \sqrt{2})W_{i+1} \quad (6)$$

初始时模具无圆角,达到模具允许磨损量时,模具圆角约为 0.3 mm。由于各冲裁工序单次磨损量已求得,假定每次冲裁过程中模具的磨损量相同,则当模具磨损量超过 0.12 mm 时,需要进行修模以确保不会冲压出尺寸不良的产品。从而计算得到各冲裁工序中需要修模时的极限冲压次数分别为 44 万、27 万、41 万、68 万、28 万、78 万。

3 结论

利用 Archard 磨损模型,借助 Deform 软件对多工位级进模中的冲裁工序进行模具磨损分析,并对模具寿命进行了预测,从中得到了以下结论。

1) 对多工位级进模中的冲裁工序进行凸模模具磨损分析,表明模具冲裁磨损区域主要集中在模具凸模圆角处,各冲裁工序的凸模单次最大磨损量为 2.71×10^{-7} , 4.30×10^{-7} , 2.87×10^{-7} , 1.76×10^{-7} , 4.24×10^{-7} , 1.52×10^{-7} mm。

2) 通过正交试验,对各试验进行数值模拟,表明对磨损量的影响从大到小分别为模具硬度、冲压速度、模具间隙、摩擦因数,并得到了最优的工艺参数组合,通过数值模拟,验证了正交试验法对冲裁级进模磨损工艺优化的正确性和有效性。

3) 模具达到允许磨损量时,模具磨钝后形成的圆角半径约为 0.30 mm,根据磨损累加法,可知在模具达到极限冲压次数 27 万后,需要进行第 1 次修模。

参考文献:

- [1] 陈志平,徐腾,夏琴香,等.大型复杂多工位级进模装配工艺研究[J].机电工程技术,2014(8):36—40.
CHEN Zhi-ping, XU Teng, XIA Qin-xiang, et al. Assembly Technology of Large Complex Multi-Position Progressive Die[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2014(8): 36—40.
- [2] 张灵晓,文学洙.浅谈影响冷冲压模具寿命的因素及提高寿命的措施[J].装备制造技术,2013(2):106—108.
ZHANG Ling-xiao, WEN Xue-zhu. Acting Factors and Countermeasures of the Cold Punching Die's Service Life[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2013(2): 106—108.
- [3] 毛华杰,蒋厚生,刘艳雄,等.斜齿圆柱齿轮旋转精冲过程模具磨损模拟分析[J].锻压技术,2016,41(3):88—93.
MAO Hua-jie, JIANG Hou-sheng, LIU Yan-xiong, et al. Simulation Analysis on Die Wear in Rotational Fine Blanking for Helical Gears[J]. Forging & Stamping Technology, 2016, 41(3): 88—93.
- [4] 谢晖,李江曼,王诗恩,等.超高强钢板冲压模具磨损 CAE 分析研究与应用[J].湖南大学学报(自然科学版),2015(8):15—21.

- XIE Hui, LI Jiang-man, WANG Shi-en, et al. Research and Application of Die Wear CAE Analysis of Ultra High Strength Steel Stamping[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2015(8): 15—21.
- [5] 曹珊珊, 丁毅. 模具寿命与失效[M]. 化学工业出版社, 2006.
- CAO Shan-qi, DING Yi. Die Life and Failure[M]. Chemical Industry Press, 2006.
- [6] 林高用, 冯迪, 郑小燕, 等. 基于 Archard 理论的挤压次数对模具磨损量的影响分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2009, 40(5): 1245—1251.
- LIN Gao-yong, FENG Di, ZHENG Xiao-yan, et al. Analysis of Influence of Extrusion Times on Total Die Wear Based on Archard Theory[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2009, 40(5): 1245—1251.
- [7] LAMBERT M. SURHONÉ, MIRIAM T, et al. Archard-Equation[M]. Betascript Publishing, 2010.
- [8] 周立奎, 夏琴香, 陈志平, 等. 某汽车尾箱支架多工位级进模设计[J]. 锻压技术, 2016, 41(1): 106—110.
- ZHOU Li-kui, XIA Qin-xiang, CHEN Zhi-ping, et al. Design of Multi-Position Progressive Die for Car Rear Bracket[J]. Forging & Stamping Technology, 2016, 41(1): 106—110.
- [9] 王定强, 翟敬梅, 陈志平, 等. 某汽车行李箱支架多工位级进冲压成形全工序数值模拟[J]. 民航广州教育研究, 2016, 6: 56—60.
- WANG Ding-qiang, ZHAI Jing-mei, CHEN Zhi-ping, et al. Autoform-based Simulation of Multi-station Progressive Stamping Process of a Car Trunk Bracket[J]. Civil Aviation Guangzhou Education Research, 2016, 6: 56—60.
- [10] 刘天聪. 精冲模具的磨损及其防护[J]. 精密成形工程, 2009, 1(3): 54—57.
- LIU Tian-cong. Wear and Protection of Fineblanking Dies[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2009, 1(3): 54—57.
- [11] 夏琴香. 冲压成形工艺及模具设计[M]. 华南理工大学出版社, 2005.
- XIA Qin-xiang. Stamping Forming Technology and Die Design[M]. South China University of Technology Press, 2005.
- [12] 赵中华, 张猛, 韦习成, 等. 冲裁速度对冲压件断面质量的影响[J]. 塑性工程学报, 2010, 17(4): 45—49.
- ZHAO Zhong-hua, ZHANG Meng, WEI Xi-cheng, et al. Study of Influence of Blanking Velocity on Section Quality of Stamping Workpiece[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2010, 17(4): 45—49.
- [13] 孟丽芬, 胡成亮, 赵震, 等. 金属塑性成形中摩擦模型的研究进展[J]. 模具工业, 2014, 14(4): 1—7.
- MENG Li-fen, HU Cheng-liang, ZHAO Zhen, et al. Research Progress of Friction Model in Metal Plastic Forming[J]. Die & Mould Industry, 2014, 14(4): 1—7.
- [14] 刘天聪. 大间隙冲裁对模具寿命的影响[J]. 模具工业, 2001, 1(1): 53—55.
- LIU Tian-cong. Technology of Stamping and Punching Dies The Affect of Big-Clearance Blanking to the Die Life[J]. Die & Mould Industry, 2001, 1(1): 53—55.
- [15] 匡余华. 冷冲压件尺寸误差与尺寸经济精度[J]. 南京工业职业技术学院学报, 2005, 5(2): 11—13.
- KUANG Yu-hua. Size Error and Economic Tolerance of Cold Stamping[J]. Journal of Nanjing Institute of Industry Technology, 2005, 5(2): 11—13.