

摩擦与润滑

基于数值模拟的汽车深孔螺母件反挤压冲头磨损性能研究

张宇杭, 张甲瑞

(重庆工商职业学院 智能制造与汽车学院, 重庆 401520)

摘要: 针对某深孔螺母零件一次挤压成形过程中出现的冲头磨损严重、更换频繁、报废率高的问题, 提出了在冲头表面涂层, 同时改进冲头结构, 以达到冲头磨损最小化的目的。基于数值分析软件 DEFORM-3D, 建立了冲头磨损模型及挤压仿真模型, 研究了未涂层冲头、单一涂层冲头和不同膜厚的 TiN-TiCN 复合涂层冲头在挤压过程中的磨损情况, 并采用正交试验法对关键冲头参数进行优化。结果表明: 未涂层冲头磨损最为严重, 膜厚为 4 μm 的 TiN-TiCN 复合涂层冲头的磨损最小; 当冲头前角为 8° 、过渡角为 33° 、圆角半径为 0.2 mm、头部外径为 $\Phi 19.46$ mm 时, 冲头的磨损量最小。经实际验证, 采用涂层技术及最优参数的冲头, 其使用寿命提高了 5.5 倍。

关键词: 冲头磨损; 深孔螺母件; 复合涂层; 磨损模型; 磨损量

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.02.029

中图分类号: TG376.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2022) 02-0180-06

Research on wear performance of reverse extrusion punch for automotive deep hole nut based on numerical simulation

Zhang Yuhang, Zhang Jiarui

(College of Intelligent Manufacturing and Automobile, Chongqing Technology & Business Institute, Chongqing 401520, China)

Abstract: For the problems of serious wear, frequent replacement and high scrap rate of punch during one-time extrusion forming process of a deep hole nut parts, the coating on the punch surface and the improvement of punch structure were proposed to minimize the punch wear, and based on the numerical analysis software DEFORM-3D, the wear model of punch and the extrusion simulation model were established. Then, the wear conditions of uncoated punch, single-coated punch and TiN-TiCN composite coating punch with different film thicknesses during the extrusion process were studied, and the important parameters of punch were optimized by orthogonal test method. The results show that the wear of uncoated punch is the most serious, and the wear for TiN-TiCN composite coating punch with the film thickness of 4 μm is the smallest. When the front angle of punch is 8° , the transition angle is 33° , the fillet radius is 0.2 mm and the outer diameter of head is $\Phi 19.46$ mm, the wear amount of punch is the smallest. It has been proved that the service life of punch with coating technology and optimal parameters is increased by 5.5 times.

Key words: punch wear; deep hole nut; composite coating; wear model; wear amount

挤压工艺是近年来塑性加工领域采用较多的一种工艺, 以其省材, 生产效率高, 生产的产品质量好、性能佳, 能够成形变形量大、结构复杂的零件等特点^[1-2], 受到汽车紧固件加工行业的青睐。然而, 在长期的生产实践中仍存在问题, 例如变形抗力大造成的模具磨损严重问题^[3], 其直接决定

了模具的使用寿命, 决定了企业的生产成本。因此, 许多企业联合科研机构在降低模具磨损方面做了大量的研究, 影响模具磨损的因素有很多, 包括模具材料、模具结构、加工材料的软硬程度、润滑条件以及工艺参数设计等^[4-5]。在模具材料方面, 白植雄等^[6]对两种不同模具材料在 100~700 $^\circ\text{C}$ 温度区间的磨损性能进行了研究, 并通过光学仪器进行了微观组织的研究, 分析了磨损机理, 结果表明 HTCS-130 钢为更耐磨的材料; 在模具结构方面, 张东民等^[7]针对某六角开槽螺母在成形盲孔时下冲头磨损严重的问题, 通过改进下冲头的结构参数并采用浮动式凹模结构, 有效地降低了冲头的磨损; 在润滑

收稿日期: 2020-12-10; **修订日期:** 2021-03-08

基金项目: 重庆市教育委员会科学技术研究项目 (KJQN202104013);

重庆自然科学基金资助项目 (cstc2020jcyj-msxmX0940)

作者简介: 张宇杭 (1989-), 女, 硕士, 讲师

E-mail: jackson1211@sohu.com

条件方面,王培安等^[8]、褚忠等^[9]分别研究了冷、热挤压中不同摩擦因数对于模具磨损的影响。而本文主要从模具角度进行研究,在改进模具结构的同时,通过在模具表面喷涂涂层^[10],以提高模具的耐磨性、降低模具与加工工件之间的摩擦,从而达到降低模具磨损的目的。

某深孔螺母件通过下料—挤压成形—攻螺纹—表面处理等工序实现生产,零件图如图1a所示,挤压成形过程如图1b所示,冲头与模芯以一定速度向下运动,模芯到达指定位置后停止,冲头继续向下挤压工件,在模腔作用下成形螺母件,成形结束后

冲头及模芯回到初始位置,工件由顶杆顶出。在长期的生产中发现,挤压冲头磨损严重,使用寿命低。因此,本文以深孔螺母件反挤压冲头为研究对象,通过 DEFORM-3D 软件建立符合实际的冲头磨损模型及挤压仿真模型,研究其磨损性能;并通过多次模拟,研究未涂层冲头、单一涂层冲头以及不同膜厚的 TiN-TiCN 复合涂层冲头在同等条件下进行螺母件挤压成形时的磨损情况,以确定合适的涂层结构及涂层厚度。最后,基于上述条件,通过多因素多水平的正交仿真试验,获得合适的冲头设计参数。

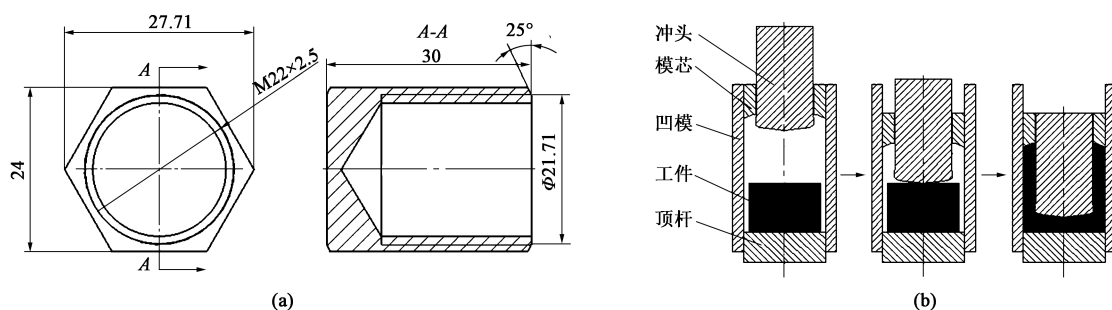


图1 螺母件零件图及挤压成形过程

(a) 螺母件零件图 (b) 螺母件挤压成形过程

Fig. 1 Part drawing and extrusion forming process of nut

(a) Part drawing of nut (b) Extrusion forming process of nut

1 建立有限元模型

1.1 建模及参数设置

通过三维制图软件 Solidworks 建立冲头、模芯、凹模、顶杆等实体模型。根据零件的对称性,为降低数值计算时间,均取 1/2 实体模型导入 DEFORM 中进行有限元建模。将工件设置为塑性体,其余均设置为刚体,并分别设置对称边界条件,工件材料选择 SWRCH35K 冷锻钢,冲头材料选择 SKH51 高速钢,分别进行网格划分,冲头及模芯速度设置为 $15 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$,工件及模具间的传热系数设置为 $11 \text{ N} \cdot (\text{s} \cdot \text{mm} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ 。

1.2 冲头表面涂层设置

在材料库中根据 TiCN 涂层及 TiN-TiCN 复合涂层的特性分别新建 4 种冲头材料,基体为 SKH51 高速钢材料,表面分别镀有膜厚为 $2 \mu\text{m}$ 的 TiCN 复合涂层、膜厚为 $2 \mu\text{m}$ 的 TiN-TiCN 复合涂层、膜厚为 $4 \mu\text{m}$ 的 TiN-TiCN 复合涂层、膜厚为 $6 \mu\text{m}$ 的 TiN-TiCN 复合涂层,如图 2 所示。不同模型选取对应材料进行仿真,有限元模型如图 3 所示。

1.3 冲头磨损模型设置

深孔螺母件的反挤压成形是一个大变形过程,采用 Archard J F^[11] 提出的粘着磨损模型来描述冲头磨损最为合适,其表达式如式(1)所示:

$$Q = K \frac{P \cdot L}{H} \quad (1)$$

式中: Q 为冲头磨损体积, mm^3 ; P 为法向载荷, N ; L 为滑移距离, mm ; H 为硬度, HRC ; K 为磨损系数。

将式(1)进行转化,可得到关于冲头磨损深度的表达式,如式(2)所示:

$$dW = K \frac{\sigma_n \cdot u}{H} dt \quad (2)$$

式中: W 为冲头磨损深度, mm ; t 为时间, s ; u 为滑移速度, $(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$; σ_n 为法向应力, $(\text{N} \cdot \text{mm}^{-2})$ 。

由于冲头正常磨损是非均匀的,因此,将式(2)进行积分,可获得冲头磨损的修正模型,如式(3)所示:

$$W = \int K \frac{P^a V^b}{H^c} dt \quad (3)$$

式中: a 、 b 、 c 为常数,对于钢材成形,通常取 $a=1$, $b=1$, $c=2$, $K=0.00000002$ ^[12]; V 为材料的变形速度。

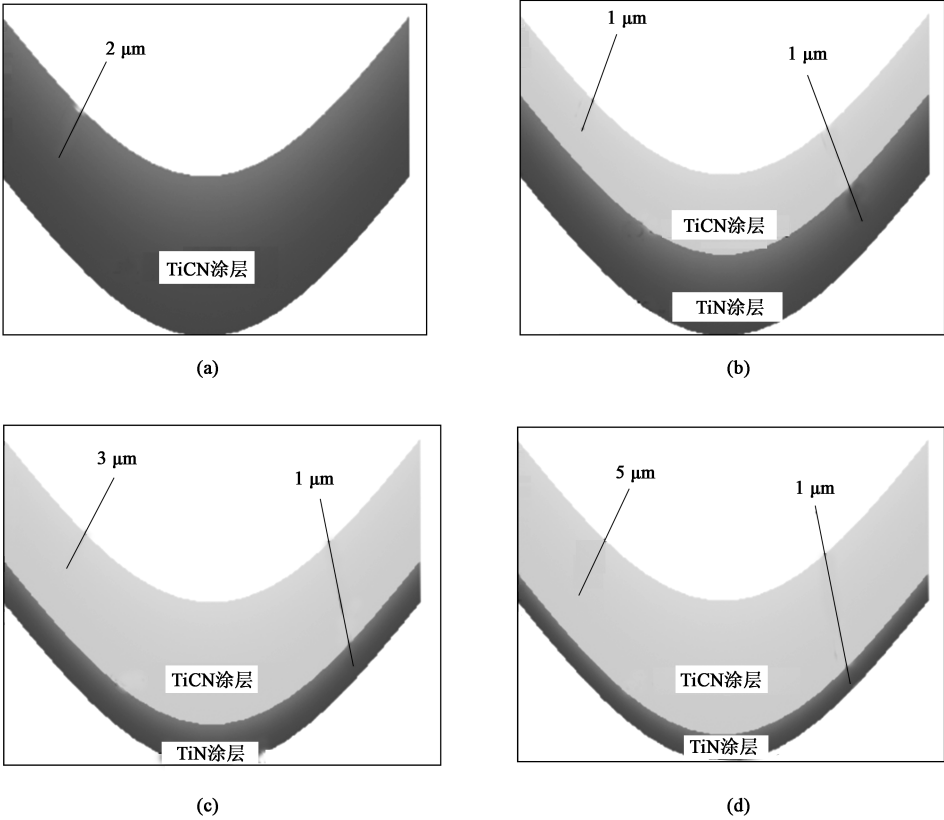


图 2 不同涂层结构

(a) 2 μm 的 TiCN 涂层 (b) 2 μm 的 TiN-TiCN 复合涂层 (c) 4 μm 的 TiN-TiCN 复合涂层 (d) 6 μm 的 TiN-TiCN 复合涂层

Fig. 2 Different coating structures

(a) TiCN coating of 2 μm (b) TiN-TiCN composite coating of 2 μm (c) TiN-TiCN composite coating of 4 μm

(d) TiN-TiCN composite coating of 6 μm

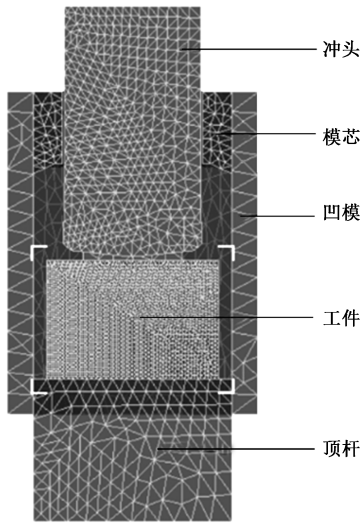


图 3 有限元模型

Fig. 3 Finite element model

2 有限元模拟结果与分析

2.1 未涂层冲头与涂层冲头磨损结果比较

图 4 为未涂层冲头与涂层冲头的磨损结果，由

图 4 可得，冲头磨损最快的部位均为冲头边缘过渡区域，冲头磨损量由边缘至内部逐渐递减，这是由于工件成形时，冲头运动方向与材料流动方向相反，存在接触摩擦力，冲头与工件间的摩擦力由边缘至内部逐渐减小。从图 4 可知，未涂层冲头磨损是涂层冲头磨损的 3 倍多，表明涂层能够有效地减小冲头与工件间的摩擦，其中 TiN-TiCN 复合涂层减小摩擦更为明显，更能降低冲头的磨损，延长冲头的使用寿命。

2.2 不同膜厚的 TiN-TiCN 复合涂层冲头磨损结果比较

在模拟试验中发现，并不是冲头表面的涂层越厚，冲头磨损就越缓慢。图 5 为不同膜厚的 TiN-TiCN 复合涂层冲头的磨损结果，磨损最快区域同样为冲头边缘部位。从图 5 中可以明显看出，冲头表面镀有膜厚为 4 μm 的 TiN-TiCN 复合涂层的冲头磨损量最小，仅为 $1.26 \times 10^{-5} \text{ mm}$ ，因此，在冲头表面镀膜厚为 4 μm 的 TiN-TiCN 复合涂层最有利于延长冲头使用寿命。

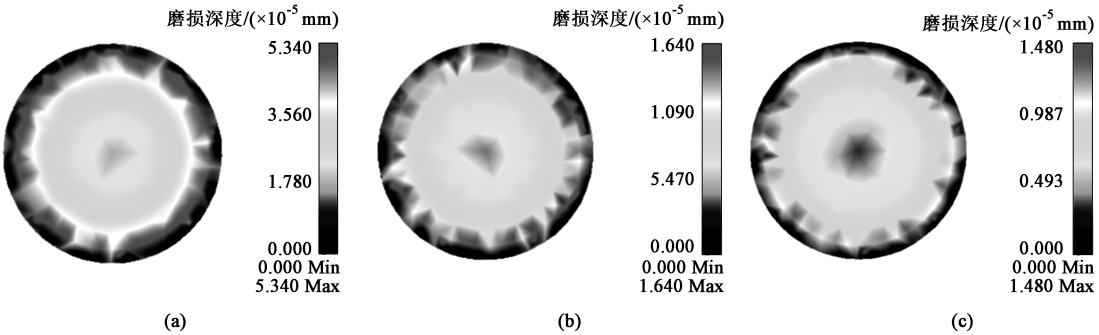


图 4 未涂层冲头与涂层冲头磨损结果
(a) 未涂层冲头 (b) 2 μm 的 TiCN 涂层冲头 (c) 2 μm 的 TiN-TiCN 复合涂层冲头

Fig. 4 Wear results of uncoated punch and coated punch

(a) Uncoated punch (b) TiCN coating punch of 2 μm (c) TiN-TiCN composite coating punch of 2 μm

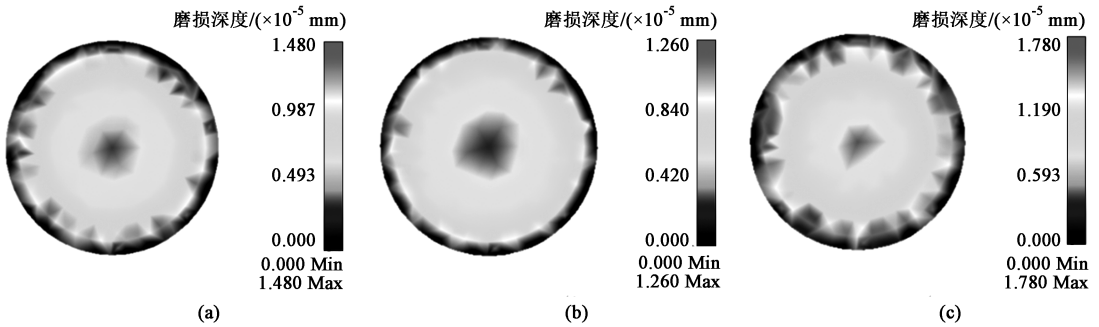


图 5 不同膜厚的复合涂层冲头磨损结果
(a) 2 μm 的 TiN-TiCN 复合涂层冲头 (b) 4 μm 的 TiN-TiCN 复合涂层冲头 (c) 6 μm 的 TiN-TiCN 复合涂层冲头

Fig. 5 Wear results of composite coating punch with different film thicknesses

(a) TiN-TiCN composite coating punch of 2 μm (b) TiN-TiCN composite coating punch of 4 μm (c) TiN-TiCN composite coating punch of 6 μm

3 基于正交试验的冲头参数优化

3.1 关键参数的确定

不考虑润滑、冲压速度等外部因素，本文重点考虑冲头参数对冲头磨损的影响，深孔反挤压冲头结构如图 6 所示，冲头与工件接触部位材料流动越平顺，摩擦阻力越小，冲头磨损越缓慢。影响参数

包括冲头前角 α 、过渡角 β 、圆角半径 r 以及头部外径 D ，选取以上参数作为正交试验因素，分别取 3 个水平，建立的因素水平表如表 1 所示。

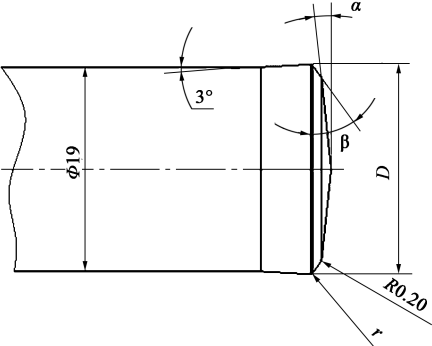


图 6 深孔反挤压冲头结构

Fig. 6 Structure of deep hole reverse extrusion punch

表 1 正交试验因素水平表
Table 1 Factors and levels of orthogonal test

水平	因素			
	冲头前角 α / ($^{\circ}$)	过渡角 β / ($^{\circ}$)	圆角半径 r / mm	头部外径 D / mm
1	6	30	0.2	$\Phi 19.40$
2	8	33	0.4	$\Phi 19.46$
3	10	36	0.6	$\Phi 19.52$

3.2 试验结果与分析

通过 DEFORM 软件对 9 组试验分别完成建模，并在冲头表面设置膜厚为 4 μm 的 TiN-TiCN 复合涂层，获得的各组冲头磨损情况如表 2 所示。极差分析是正交试验中判断因素主次顺序的重要手段，极差结果越大，表明该参数对冲头磨损的影响越大^[13]。因此，由表 2 可知，冲头前角 α 对冲头磨损

表 2 各组试验的冲头磨损结果
Table 2 Wear results of punch for each group

试验	冲头前角 $\alpha/(^{\circ})$	过渡角 $\beta/(^{\circ})$	圆角半径 r/mm	头部外径 D/mm	磨损深度/ $(\times 10^{-5} \text{ mm})$
1	6	30	0.2	$\Phi 19.40$	2.23
2	6	33	0.4	$\Phi 19.46$	2.15
3	6	36	0.6	$\Phi 19.52$	2.92
4	8	30	0.4	$\Phi 19.52$	1.71
5	8	33	0.6	$\Phi 19.40$	1.32
6	8	36	0.2	$\Phi 19.46$	1.19
7	10	30	0.6	$\Phi 19.46$	2.33
8	10	33	0.2	$\Phi 19.52$	2.18
9	10	36	0.4	$\Phi 19.40$	2.45
均值 $K_1/$ $(\times 10^{-5} \text{ mm})$	2.433	2.090	1.867	2.000	
均值 $K_2/$ $(\times 10^{-5} \text{ mm})$	1.407	1.883	2.103	1.890	
均值 $K_3/$ $(\times 10^{-5} \text{ mm})$	2.320	2.187	2.190	2.270	
极差 $R/$ $(\times 10^{-5} \text{ mm})$	1.026	0.304	0.323	0.380	

的影响最大，其次为冲头头部外径 D ，过渡角 β 对冲头磨损的影响最小。表 2 中 K_1 、 K_2 、 K_3 分别为该列因素在水平 1、2、3 下磨损深度的均值，通过均值可判断各参数的最优水平，均值越小，表明冲头

的磨损越小，对应的参数水平越优。因此，由表 2 可知，当冲头前角取水平 2，即 α 为 8° ，过渡角取水平 2，即 β 为 33° ，圆角半径取水平 1，即 r 为 0.2 mm ，头部外径取水平 2，即 D 为 $\Phi 19.46 \text{ mm}$ 时，冲头的磨损深度最小，为冲头参数最优水平组合。

3.3 冲头最优参数组合验证

根据以上获得的冲头最优参数组合进行冲头设计，并进行建模及深孔反挤压仿真，最终获得的冲头磨损情况如图 7 所示。由图 7 可知，冲头最大磨损深度为 $1.120 \times 10^{-5} \text{ mm}$ ，与以上各试验相比，磨损较小，使用寿命得到提升，根据冲头实际失效条件预估冲头使用寿命，约能完成 8928 次挤压。经螺母件实际生产，获得的深孔螺母样件如图 8c 所示，产品外观良好，无不良缺陷，性能满足要求；冲头如

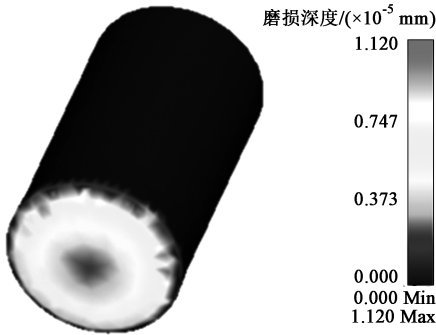


图 7 最优冲头参数下的冲头磨损情况
Fig. 7 Punch wear condition under optimal punch parameters

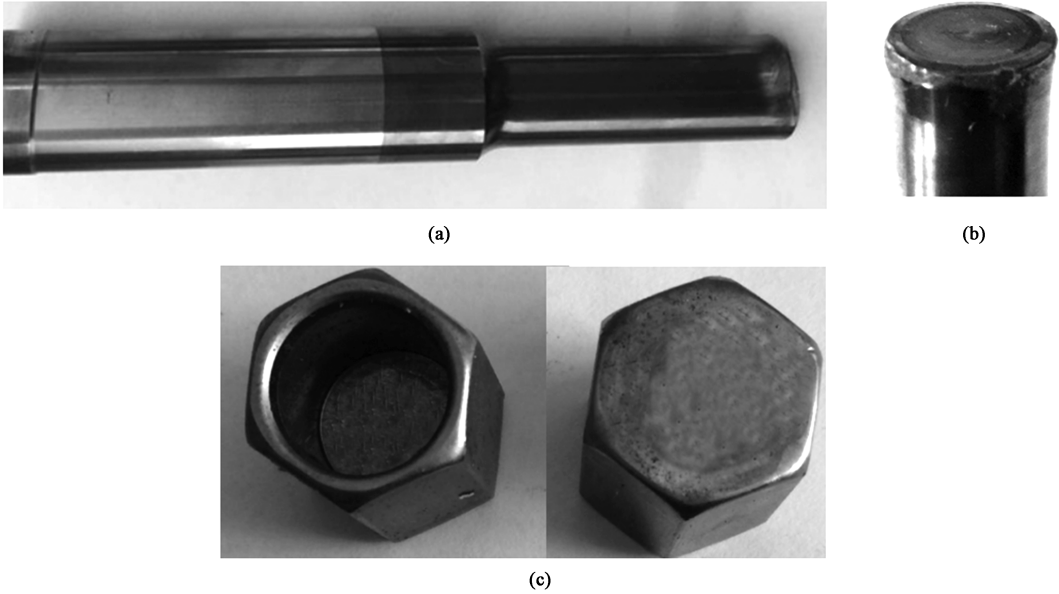


图 8 冲头及螺母样件实物图
(a) 冲头 (b) 冲头磨损 (c) 螺母样件
Fig. 8 Actual drawings of punch and nut sample
(a) Punch (b) Wear of punch (c) Nut sample

图8a所示,最终冲头在完成10106次挤压后达到失效条件,与未涂层冲头相比提高了5.5倍;冲头磨损情况如图8b所示,磨损严重部位与仿真结果一致,位于冲头边缘。冲头实际使用寿命与仿真预估使用寿命误差约为10%,可以指导工作人员及时更换冲头,避免出现不合格的产品。

4 结语

本文针对某深孔螺母件在实际生产中产生的冲头磨损严重、使用寿命短的问题,提出在冲头表面采用涂层技术,同时通过优化冲头参数,以降低冲头磨损。通过Solidworks及DEFORM完成了挤压模型的三维建模及包含磨损模型、涂层模型的有限元建模,研究了未涂层冲头、单一涂层冲头 and 不同膜厚的TiN-TiCN复合涂层冲头的磨损情况,结果表明:涂层技术能够有效地降低磨损,膜厚为4 μm 的TiN-TiCN复合涂层的效果最佳。其次,采用正交试验方法获得了冲头的最优参数组合,即冲头前角为 8° 、过渡角为 33° 、圆角半径为0.2 mm、头部外径为 $\Phi 19.46$ mm。最后合理地预估了冲头的使用寿命,以指导工作人员及时更换冲头,并通过实际生产进行了验证。

参考文献:

- [1] 梁复明,夏华,朱雄. 异形轴套冷挤压成形工艺优化研究[J]. 热加工工艺, 2016, 45 (17): 123-125.
Liang F M, Xia H, Zhu X. Research on process optimization of profiled shaft sleeve cold extrusion forming [J]. Hot Working Technology, 2016, 45 (17): 123-125.
- [2] 范建祥,程道来,倪伟豪. 基于正交试验汽车六角螺母冷挤压模具磨损规律分析及优化[J]. 铸造技术, 2018, 39 (4): 929-932.
Fan J X, Cheng D L, Ni W H. Process analysis and optimization on die wear in cold extrusion for vehicle hex nut [J]. Foundry Technology, 2018, 39 (4): 929-932.
- [3] 刘俊英. 基于正交试验的车用螺母成形分析及模具磨损优化[J]. 锻压技术, 2020, 45 (02): 182-187, 193.
Liu J Y. Forming analysis and mould wear optimization on nuts for vehicle based on orthogonal test [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (2): 182-187, 193.
- [4] Behrens B A, Schaefer F. Prediction of wear in hot forging tools by means of finite-element-analysis [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 167 (2-3): 309-315.
- [5] 曾珊珊,丁毅. 模具寿命与失效[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
Zeng S Q, Ding Y. Die Life and Failure [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.
- [6] 白植雄,左鹏鹏,计杰,等. 两种热作模具钢的高温摩擦磨损性能[J]. 工程科学学报, 2019, 41 (7): 906-913.
Bai Z X, Zuo P P, Ji J, et al. High temperature friction and wear properties of two hot work die steels [J]. Chinese Journal of Engineering, 2019, 41 (7): 906-913.
- [7] 张东民,盛育东,周伟民,等. SCM435 合金钢线材浮动反挤压成形模拟及参数优化[J]. 铸造技术, 2017, 38 (11): 2698-2700.
Zhang D M, Sheng Y D, Zhou W M, et al. Forming simulation and parameter optimization of floating back extrusion for SCM435 alloy steel wires [J]. Foundry Technology, 2017, 38 (11): 2698-2700.
- [8] 王培安,吴淑芳,郭欢欢,等. 基于正交试验的轴承端盖的挤压特性分析及工艺参数研究[J]. 北方工业大学学报, 2018, 30 (5): 77-82.
Wang P A, Wu S F, Guo H H, et al. Analysis of extrusion characteristics and process parameters of bearing end cap based on orthogonal test [J]. Journal of North China University of Technology, 2018, 30 (5): 77-82.
- [9] 褚忠,瞿伟,刘铭心,等. 冷挤压模具磨损优化设计[J]. 铸造技术, 2017, 38 (12): 2895-2899.
Chu Z, Qu W, Liu M X, et al. Optimum design of cold extrusion die wear [J]. Foundry Technology, 2017, 38 (12): 2895-2899.
- [10] 张而耕,朱州,张体波. 超硬纳微米PVD涂层技术在模具领域的发展[J]. 表面技术, 2014, 43 (5): 118-123.
Zhang E G, Zhu Z, Zhang T B. Development of superhard nano micron PVD coating technology in the field of mold [J]. Surface Technology, 2014, 43 (5): 118-123.
- [11] Archard J F. Contact and rubbing of flat surfaces [J]. Journal of Applied Physics, 1953, 24 (8): 981-988.
- [12] 朱宇. 薄壁六角法兰螺母精冲工艺分析及参数优化[J]. 锻压技术, 2020, 45 (10): 106-111.
Zhu Y. Process analysis and parameter optimization for fine blanking of thin-wall hexagon flange nut [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (10): 106-111.
- [13] 张东民,朱景秋,周伟民,等. 拉铆套冲孔成形模具磨损分析及工艺参数优化[J]. 热加工工艺, 2020, 49 (3): 119-123.
Zhang D M, Zhu J Q, Zhou W M, et al. Wear analysis and process parameter optimization of punching of riveting sleeve [J]. Hot Working Technology, 2020, 49 (3): 119-123.