

基于有限元分析的车用空心六角头杆件芯模寿命研究

赵慧真, 崔华丽

(郑州经贸学院 智慧制造学院, 河南 郑州 451191)

摘要: 在某种车用空心六角头杆件的挤深孔工序中, 负责成形深孔的芯模受力极大, 表面磨损严重、失效快。为解决该问题, 基于经典的粘着磨损理论, 通过 Deform11.0 软件, 研究了 5 种不同结构的芯模的挤压过程, 对比了芯模表面的最大磨损深度和严重磨损面积, 结果发现同等条件下锥面芯模的寿命更长。以降低磨损为目的, 通过正交试验对锥面芯模的尺寸参数进行了优化, 同时研究了不同涂层对芯模表面的降磨损作用, 结果表明在 TiAlN 涂层的降磨损效果更好。采用改进后的芯模进行零件的深孔成形, 孔的成形质量较好, 芯模寿命为原来的 2.48 倍。

关键词: 空心六角头杆件; 深孔挤压; 磨损模型; 芯模结构; TiAlN 涂层

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.07.024

中图分类号: TG376.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2023) 07-0177-07

Study on service life of core mold for vehicle hollow hexagonal rod based on finite element analysis

Zhao Huizhen, Cui Huali

(Institute of Intelligent Manufacturing, Zhengzhou University of Economics and Business, Zhengzhou 451191, China)

Abstract: In the deep hole extrusion process for a vehicle hollow hexagonal rod, the core mold responsible for forming deep holes has great force, the surface wear is serious, and the failure is rapid. Therefore, in order to solve this problem, based on the classic adhesive wear theory, the extrusion processes of five kinds of core molds with different structures were studied by software Deform 11.0, and the maximum wear depth and the severe wear area on the core mold surface were compared. The results show that the service life of tapered core mold is longer under the same condition. For the purpose of reducing wear, the size parameters of tapered core mold were optimized by orthogonal test. At the same time, the wear reduction effect of different coatings on the core mold surface was studied. The results show that the wear reduction effect of TiAlN coating is better. Thus, the deep hole forming of parts is conducted by the improved core mold, the forming quality of hole is better, and the service life of core mold is 2.48 times that of the original mold.

Key words: hollow hexagonal rod; deep hole extrusion; wear model; core mold structure; TiAlN coating

冷挤压成形技术是在常温下依靠模具实现金属的大量转移而使零件按指定形状成形的一种加工手段^[1], 与温挤压、热挤压相比, 无需加热设备, 后续加工更少、节能省材、效率更高, 更重要的是, 制件的尺寸精度和机械性能更好^[2-3], 随着多工位挤压设备的发展, 使得冷挤压技术能一次成形形状复杂、变形量较大或者材料塑性较低的零件^[4-5], 因此该技术迅速得到推广。但同时冷挤压相较于温、热挤压需要更大的成形力, 所以生产中普遍存在模具寿命低的困扰, 其中最主要的原因是磨损失效^[6-8], 因此根据 Archard J F 教授^[9]提出的磨损理论, 通过

有限元模拟技术, 结合实际模具磨损问题进行研究是非常有必要的, 可以更好地进行模具的设计工作, 针对性地提出解决方案, 有效地提高模具寿命, 减小试验成本。本文以车用空心六角头杆件为例, 以挤深孔工序为建模模拟对象, 通过对比 5 种不同结构芯模的磨损情况, 对芯模结构进行优选, 然后以降低磨损为目的, 对优选后的芯模结构进行尺寸参数优化, 同时研究了涂层对芯模寿命的提升作用。

1 空心六角头杆件介绍

空心六角头杆件的模型及实物图如图 1 所示, 上端为六角, 对边尺寸为 21 mm, 下端为阶梯杆, 外径分别为 $\Phi 20.8$ 和 $\Phi 14$ mm, 内部为 M10 螺纹孔, 孔深为 24.5 mm, 螺纹长度为 20 mm。零件材

收稿日期: 2022-05-24; 修订日期: 2022-08-26

基金项目: 校级青年科研基金项目 (QK2114)

作者简介: 赵慧真 (1988-), 女, 硕士, 讲师

E-mail: zhz8812@163.com

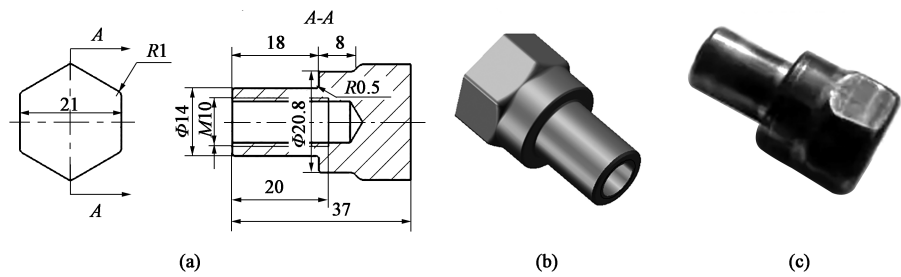


图 1 空心六角头杆件模型及实物图

(a) 零件图 (b) 三维图 (c) 实际产品图

Fig. 1 Model and physical drawings of hollow hexagonal rod

(a) Part drawing (b) Three-dimensional drawing (c) Actual product drawing

料为德系 19MnB4 钢，挤压性能优良，化学成分如表 1 所示。当前生产方式为：先通过 4 工位冷挤压成形，再进行攻丝，零件性能好，并且生产速度快，冷挤压工艺方案如图 2 所示，包含整形、反挤压、挤六角以及挤深孔共 4 道工序，其中挤深孔工序的模具结构示意图如图 3 所示，挤压前后工件变形较大，同时在成形时因工件与凹模的接触面积较大，需要较大的成形力来克服阻力作用，因此，下端芯模需要承受

表 1 19MnB4 钢的化学成分（%，质量分数）

Table 1 Chemical compositions of 19MnB4 steel
(%, mass fraction)

C	Si	Mn	P	S	Cr	B	Fe
0.17~	≤0.4	0.08~	≤	≤	0.9~	0.001~	余
0.24		1.15	0.030	0.030	1.2	0.005	量

极大的冲击力，导致芯模表面磨损较快而失效。

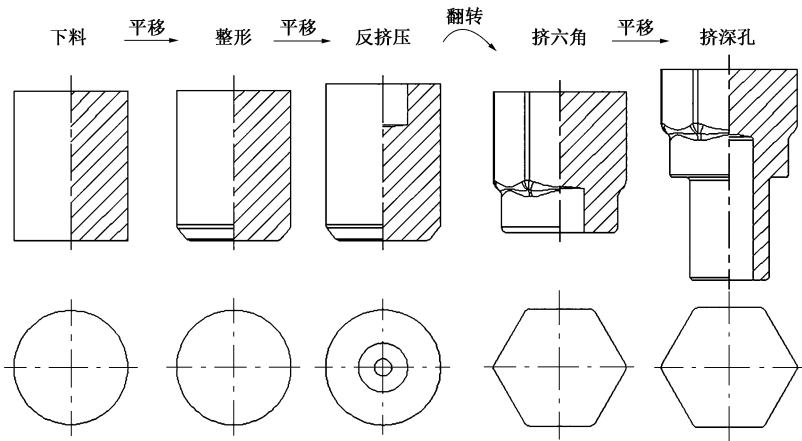


图 2 空心六角头杆件成形工艺图

Fig. 2 Forming process diagram of hollow hexagonal rod

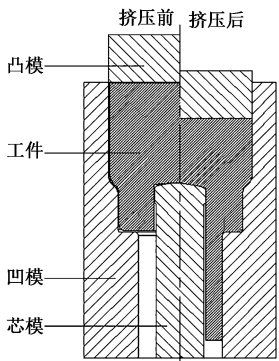


图 3 挤深孔工序挤压前后模具结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of mold structure before and after extrusion in deep hole extrusion process

根据生产数据，芯模现在的平均寿命为 3840 件，未达到预期标准，模具成本超出预算。采用表面轮廓测量仪对多个失效芯模表面进行测量后可知，芯模允许的总磨损深度必须限制在 0.06 mm 以内，即当前芯模经过一次挤压后的表面最大磨损深度在 1.562×10^{-5} mm 左右，因此以该数据作为磨损优化的参照标准。由于挤深孔工序凸、凹模以及其他工序模具的寿命均比较正常，因此，本文保留现有生产工艺，尝试从芯模结构、芯模尺寸参数方面对芯模进行优化，以改善挤深孔时的材料流动情况，达到降磨损的目的，同时通过在芯模表面添加涂层来增加芯模的耐磨性，进一步提高芯模寿命。

2 芯模结构优化

2.1 有限元模型的建立

5种芯模的结构如图4所示,分别为平底锥面芯模(当前的芯模结构)、平面芯模、锥面芯模、球面芯模以及弧面芯模,通过UG依次建模,同时完成图3中凸模、凹模、工件的建模并按要求进行装配,然后以STL格式导入Deform11.0软件中。工件属性为塑性体,划分网格数量为50000个,网格类型为四面体网格,工件材料为19MnB4钢,常温下的流动应力模型可由王凌浩等^[10]做的研究获得,具体公式如式(1)所示,导入Deform11.0软件后生成流动应力曲线。

$$\sigma = (310 + 553.4705\varepsilon^{0.5225}) \left(1 + 0.0432 \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \quad (1)$$

式中: σ 为流动应力, MPa; ε 为等效应变; $\dot{\varepsilon}$ 为应变率, s^{-1} ; $\dot{\varepsilon}_0$ 为静态应变率, s^{-1} 。

凸模、凹模、芯模的属性为刚体,由于研究磨损情况,因此同样需要网格划分,划分为25000个四面体网格,凸模挤压速度为 $6 \text{ mm} \cdot s^{-1}$,工件和各模具的温度均为 20°C ,摩擦类型为剪切摩擦,摩擦因数大小取决于润滑方式,实际冷挤压过程中采用 MoS_2 润滑剂,摩擦因数在 $0.10 \sim 0.14$ 之间,本文摩擦因数取为 0.12 。以平底锥面芯模为例,取 $1/6$ 模型可以提高模拟精度并缩短模拟时间,创建的有限元模型如图5所示。

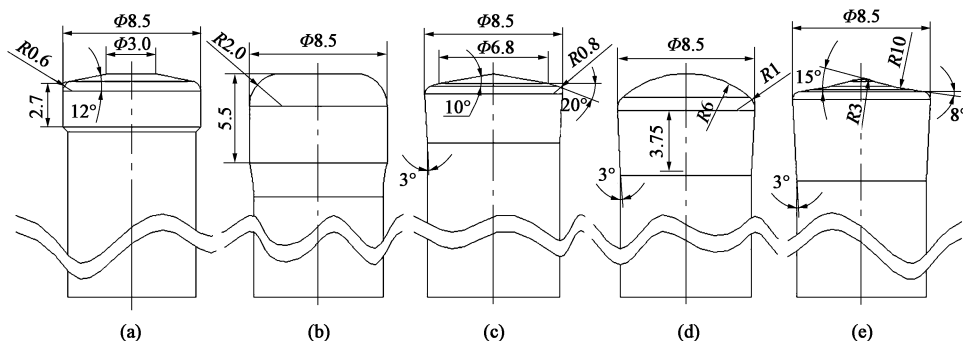


图4 芯模结构

(a) 平底锥面芯模 (b) 平面芯模 (c) 锥面芯模 (d) 球面芯模 (e) 弧面芯模

Fig.4 Core mold structures

(a) Flat bottom tapered core mold (b) Plane core mold (c) Tapered core mold (d) Spherical core mold (e) Arc surface core mold

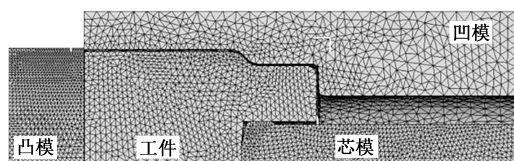


图5 有限元模型

Fig.5 Finite element model

磨损模型采用 Archard J F 教授提出的磨损理论,具体公式如式(2)所示^[11]。

$$W = \int K \frac{p^a v^b}{H^c} dt \quad (2)$$

式中: W 为模具的磨损深度, mm; p 为接触压力, MPa; v 为材料变形速度, $(\text{mm} \cdot s^{-1})$; K 为磨损系数; H 为模具硬度, HRC; t 为时间, s; a 、 b 、 c 为常量,一般取 $a=b=1$, $c=2$ 。

本文研究的芯模材料为 W6Mo5Cr4V2 高速钢,通过张智华^[12]的试验可知, W6Mo5Cr4V2 高速钢的磨损系数 K 为 1.696128×10^{-7} ,硬度 H 为 63 HRC,

而接触压力 p 及材料变形速度 v 可由仿真试验获得,从而得到芯模的磨损深度。

2.2 模拟结果分析及芯模结构优化

经模拟,5种芯模的表面磨损情况如图6所示,磨损深度最大的部位均在各芯模圆角处,其中平底锥面芯模一次挤压的最大磨损深度为 $1.616 \times 10^{-5} \text{ mm}$ (图6a),与芯模实际磨损数据相比,误差为 3.46%,说明本文选择的磨损模型能较好地反映实际芯模表面的磨损行为,模拟数据能提供较高的分析与指导价值。平面芯模一次挤压的最大磨损深度为 $1.900 \times 10^{-5} \text{ mm}$ (图6b),锥面芯模一次挤压的最大磨损深度为 $1.209 \times 10^{-5} \text{ mm}$ (图6c),球面芯模一次挤压的最大磨损深度为 $2.104 \times 10^{-5} \text{ mm}$ (图6d),弧面芯模一次挤压的最大磨损深度为 $1.322 \times 10^{-5} \text{ mm}$ (图6e),对比之下可知,锥面芯模的磨损情况明显要好于其余4种结构;其次,综合图6可看出,锥面芯模表面的严重磨损面积也更小,同等条件下寿命更长。因此,空心六角头杆件的挤深孔

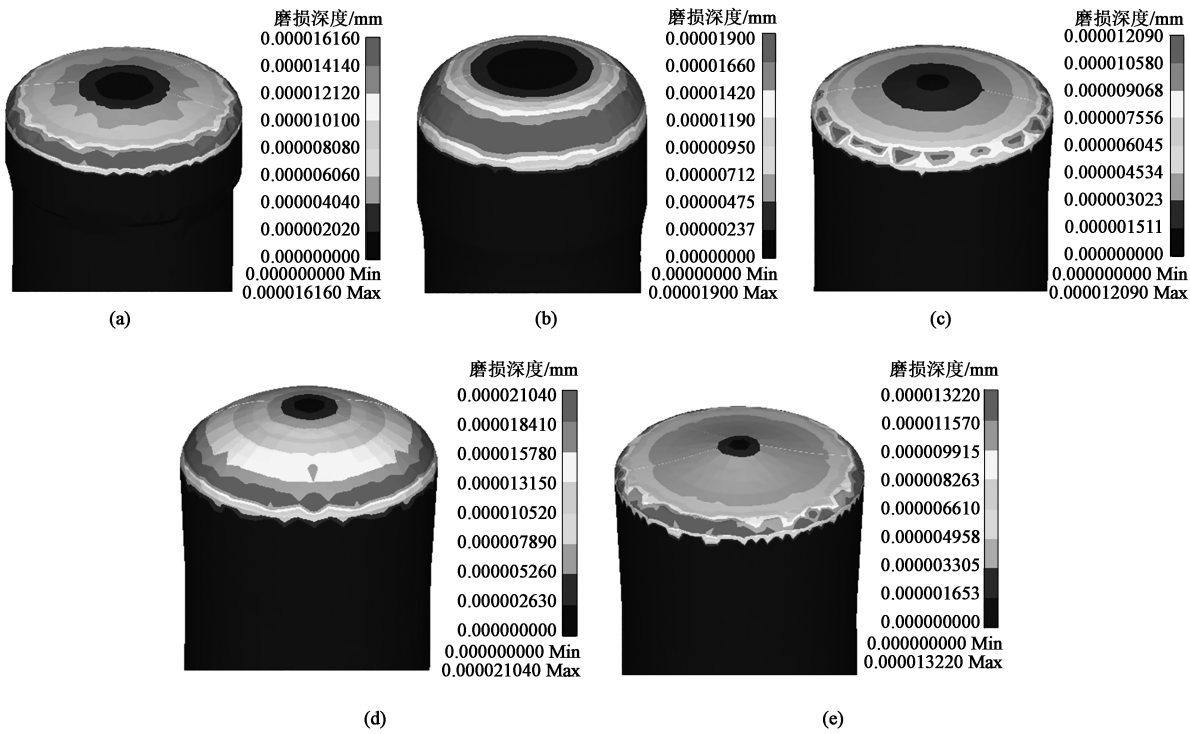


图 6 不同芯模结构的表面磨损情况

(a) 平底锥面芯模 (b) 平面芯模 (c) 锥面芯模 (d) 球面芯模 (e) 弧面芯模

Fig. 6 Surface wear conditions of different core mold structures

(a) Flat bottom conical core mold (b) Plane core mold (c) Tapered core mold (d) Spherical core mold (e) Arc surface core mold

工序中，将当前的平底锥面芯模结构改为锥面芯模结构的效果更好，能改善挤深孔时的材料流动情况，磨损降低了 22.6%。

3 基于正交的芯模尺寸参数优化

由于模具尺寸参数的差异对模具寿命也会产生极大的影响，因此，本文通过正交试验对锥面芯模的尺寸参数进行优化，以最大程度地减小芯模磨损。锥面芯模的重要尺寸参数如图 7 所示，包括锥面直径 d 、过渡圆角半径 R 、锥角 α 以及过渡角 β ，因此，将这 4 个参数作为正交试验因素，根据模具设计经验各取 3 个水平，建立了如表 2 所示的 4 因素 3 水平正交试验方案，通过 Deform11.0 软件对表 2 中各方案进行模拟，从而获得不同尺寸锥面芯模的最大磨损深度。从表 2 中可看出，不同尺寸的锥面芯模的最大磨损深度的差异较大，最小值为 1.128×10^{-5} mm，最大值为 1.392×10^{-5} mm，说明 4 个参数对锥面芯模磨损的影响较大，下面通过极差分析法对数据进行分析^[13]，比较 4 个参数的重要程度，并对各参数在水平内进行优选。

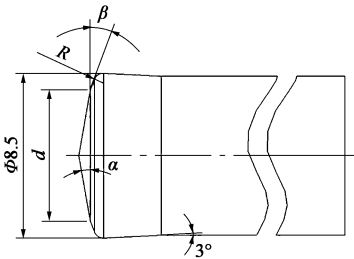


图 7 锥面芯模结构示意图及尺寸参数

Fig. 7 Structural schematic diagram and dimensional parameters of conical core mold

表 2 芯模尺寸参数正交试验方案及磨损结果
Table 2 Orthogonal test schemes and wear results for dimensional parameters of core mold

方案	锥面直径 d/mm	过渡圆角半径 R/mm	锥角 $\alpha/$ ($^{\circ}$)	过渡角 $\beta/(\text{ }^{\circ})$	芯模最大磨损深度/ ($\times 10^{-5}$ mm)
1	$\Phi 6.0$	0.4	8	20	1.189
2	$\Phi 6.0$	0.6	10	25	1.314
3	$\Phi 6.0$	0.8	12	30	1.392
4	$\Phi 6.4$	0.4	10	30	1.232
5	$\Phi 6.4$	0.6	12	20	1.128
6	$\Phi 6.4$	0.8	8	25	1.132
7	$\Phi 6.8$	0.4	12	25	1.376
8	$\Phi 6.8$	0.6	8	30	1.201
9	$\Phi 6.8$	0.8	10	20	1.209

极差公式如式 (3) 所示：

$$C = \max \{K_1, K_2, K_3\} - \min \{K_1, K_2, K_3\} \quad (3)$$

式中： C 为极差； K_i 为各参数取第 i 水平时对应的 3 组方案的芯模最大磨损深度的平均值， $i=1, 2, 3$ 。

用于分析各参数的最优水平，各参数中 K_1 、 K_2 、 K_3 中的最小值即对应最优水平， C 用于反映参数对芯模磨损的重要程度，极差值越大越重要。对表 2 所示的磨损数据进行计算后，极差结果如表 3 所示，因此，可得出结论：4 个参数对锥面芯模磨损的影响顺序为：锥面直径>锥角>过渡角>过渡圆角半径，锥面芯模的尺寸参数最优组合如下：锥面直径为 $\Phi 6.4$ mm，过渡圆角半径为 $R0.6$ mm，锥角为 8° ，过渡角为 20° 。按此参数再次对锥面芯模进行建模及挤压模拟后，表面的磨损情况如图 8 所示，一次挤压的最大磨损深度为 1.043×10^{-5} mm，磨损深度较表 2 明显降低，与当前的平底锥面芯模相比，磨损降低了 33.2%。

表 3 芯模磨损深度极差分析结果 ($\times 10^{-5}$ mm)

Table 3 Analysis results of wear depth range for core mold ($\times 10^{-5}$ mm)

参数	锥面直径 d	过渡圆角半径 R	锥角 α	过渡角 β
K_1	1.298	1.266	1.174	1.175
K_2	1.164	1.214	1.252	1.274
K_3	1.262	1.244	1.299	1.275
C	0.134	0.052	0.125	0.100

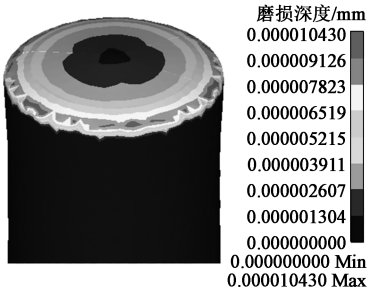


图 8 尺寸优化后锥面芯模表面磨损结果

Fig. 8 Surface wear result of tapered core mold after size optimization

4 锥面芯模表面涂层处理寿命预测

涂层具有高硬度、耐磨、摩擦因数低等特点，涂覆在模具表面能够有效地延缓磨损，同时由于涂层厚度较薄，对零件尺寸不会产生影响，因此，本文通过在锥面芯模表面添加涂层来进一步提升寿命。模具表面涂层太厚会影响涂层与模具基体的结合力，

增加涂层剥落的风险，太薄则延缓效果不明显，因此，涂层厚度通常为 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ ，取涂层厚度为 $4\ \mu\text{m}$ ，通过软件 Deform11.0 研究 TiAlCrN 和 TiAlN 涂层对锥面芯模寿命的提升幅度。由文献 [12] 可知，TiAlN 涂层的耐磨性比 TiAlCrN 涂层更好，TiAlCrN 和 TiAlN 涂层的磨损系数分别为 9.78632×10^{-8} 和 7.984925×10^{-8} ，同时，测得 TiAlCrN 和 TiAlN 涂层的硬度分别为 89 和 83 HRC，输入软件 Deform11.0 中完成涂层磨损模型的建立。以 TiAlCrN 涂层为例，在网格划分模块中按图 9 进行设置，将 TiAlCrN 涂层材料添加到芯模表面。

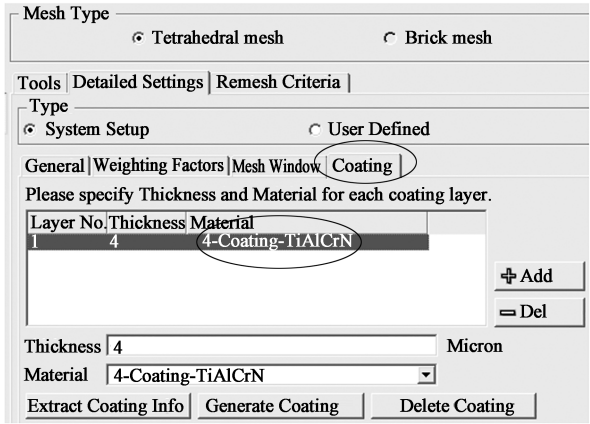


图 9 芯模表面添加涂层设置

Fig. 9 Setting of adding coating on surface of core mold

模拟后得到锥面芯模的具体磨损数据如图 10 所示，TiAlCrN 涂层一次挤压最大磨损深度为 1.134×10^{-6} mm，TiAlN 涂层一次挤压最大磨损深度为 1.057×10^{-6} mm，与图 8 未涂层模芯磨损相比，降磨损效果显著，其中涂覆 TiAlN 涂层的效果更好，磨损深度比 TiAlCrN 涂层还要低 6.79%。将当前的平底锥面芯模结构改为厚度为 $4\ \mu\text{m}$ 的 TiAlN 涂层锥面芯模后，磨损过程可分为两个时期，前期的涂层磨损阶段，以及后期的模具基体磨损阶段，因此，芯模的寿命也由这两部分组成，TiAlN 涂层磨损阶段可完成 3527 次挤压，W6Mo5Cr4V2 高速钢模具基体磨损阶段可完成 5752 次挤压，最终芯模寿命为 9279 件，该寿命是原来的 2.42 倍。

制作 4 件未经涂层处理的锥面芯模（尺寸优化后）和 4 件涂覆 TiAlN 涂层的锥面芯模（尺寸优化后），进行空心六角头杆件的挤深孔试验，零件的孔的成形质量较好，能满足要求，试生产至芯模磨损失效，如图 11 所示，最先失效部位均位于锥面芯模过渡圆角区域，与有限元分析结果高度一致，说

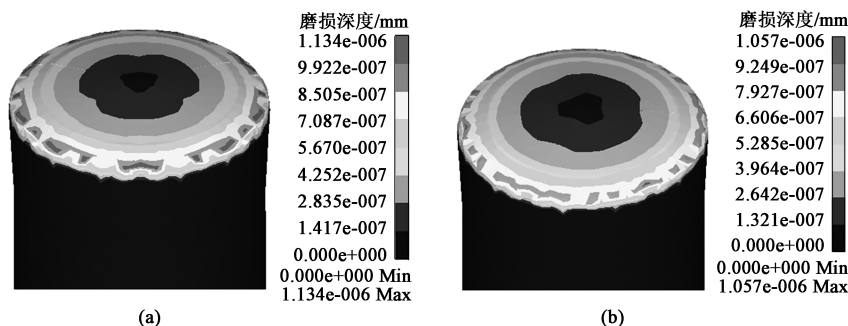


图 10 涂层处理后芯模表面磨损情况

(a) TiAlCrN 涂层 (b) TiAlN 涂层

Fig. 10 Surface wear conditions of core mold after coating treatment

(a) TiAlCrN coating (b) TiAlN coating

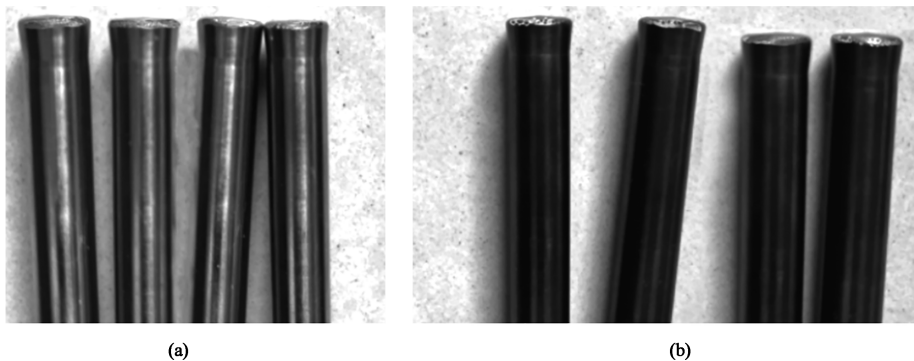


图 11 锥面芯模磨损测试

(a) 无涂层芯模 (b) TiAlN 涂层芯模

Fig. 11 Wear test of tapered core mold

(a) Uncoated core mold (b) Core mold with TiAlN coating

明有限元分析结果比较准确。分别记录各芯模失效时的生产数据,最终 4 件未经涂层处理的锥面芯模生产的零件数分别为 5995、5951、6061 和 6024 件,平均寿命为 6007 件,与模拟预测结果相差 4.43%,而 4 件涂覆 TiAlN 涂层的锥面芯模生产的零件数分别为 9625、9310、9669 和 9534 件,平均寿命为 9534 件,与模拟预测结果相差 2.75%,起到了较好的预测作用。采用厚度为 $4\text{ }\mu\text{m}$ 的 TiAlN 涂层锥面芯模后,芯模的实际寿命为原来的 2.48 倍。该研究表明,通过有限元技术建立的准确的磨损模型和材料模型能较好地预测模具磨损和模具寿命,通过大量模拟优化模具结构及尺寸,从而避免了大量的物理试验成本,可快速解决实际生产中的模具寿命难题。

5 结论

(1) 同等条件下锥面芯模的磨损情况明显要优于其余 4 种结构,寿命更长,与当前芯模结构相比,锥面芯模的磨损降低了 22.6%。

(2) 基于正交试验,得到锥面芯模的尺寸参数最优组合为:锥面直径为 $\Phi 6.4\text{ mm}$,过渡圆角半径为 $R0.6\text{ mm}$,锥角为 8° ,过渡角为 20° 。与当前芯模结构相比,优化后的锥面芯模的磨损降低了 33.2%。

(3) TiAlN 涂层的降磨损效果优于 TiAlCrN 涂层,采用厚度为 $4\text{ }\mu\text{m}$ 的 TiAlN 涂层锥面芯模后,芯模的实际寿命为原来的 2.48 倍。

参考文献:

- [1] 仇丹丹,龚红英,李会肖,等. 汽车过滤器壳体零件冷挤压成形方案研究 [J]. 热加工工艺, 2015, 44 (19): 134-136.
Qiu D D, Gong H Y, Li H X, et al. Research on cold extrusion forming process for automotive filter shell part [J]. Hot Working Technology, 2015, 44 (19): 134-136.
- [2] 夏建芳,张明强,高放军. 挤压参数及模具结构参数对某大长径比铝合金零件冷挤压流变成形载荷的影响 [J]. 现代制造工程, 2021, (10): 101-106.
Xia J F, Zhang M Q, Gao F J. Effect of extrusion parameters and die structure parameters on rheological forming load of a large aspect ratio aluminum alloy part during cold extrusion [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2021, (10): 101-106.

- [3] 侯红玲, 陈鑫, 常向龙, 等. 基于遗传算法优化 BP 神经网络的内螺纹冷挤压质量预测 [J]. 塑性工程学报, 2022, 29 (1): 102-109.
Hou H L, Chen X, Chang X L, et al. Quality prediction of internal thread cold extrusion based on BP neural network optimized by genetic algorithm [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2022, 29 (1): 102-109.
- [4] 张东民, 盛育东, 张金玉, 等. 六角开槽螺母的冷锻工艺优化及数值模拟 [J]. 机械设计与制造, 2018, (3): 191-194.
Zhang D M, Sheng Y D, Zhang J Y, et al. Numerical simulation and optimization for cold heading of hexagonal slot nut [J]. Machinery Design & Manufacture, 2018, (3): 191-194.
- [5] 陈凌翔, 李月超. 汽车六角球头冷锻工艺优化与数值仿真 [J]. 材料科学与工艺, 2020, 28 (5): 75-82.
Chen L X, Li Y C. Optimization and numerical simulation of cold forging process for automobile hexagonal ball head [J]. Materials Science and Technology, 2020, 28 (5): 75-82.
- [6] 张京, 吴淑芳, 陈凤龙. 气门顶杆冷挤压过程模具磨损研究 [J]. 机械工程与自动化, 2019, (2): 33-35.
Zhang J, Wu S F, Chen F L. Research on wear of cold extrusion die for valve stem [J]. Mechanical Engineering & Automation, 2019, (2): 33-35.
- [7] 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, Chen 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.
- [8] 张宇杭, 张甲瑞. 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 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (2): 180-185.
Zhang Y H, Zhang J R. Research on wear performance of reverse extrusion punch for automotive deep hole nut based on numerical simulation [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (2): 180-185.
- [9] Archard J F. Contact and rubbing of flat surfaces [J]. Journal of Applied Physics, 1953, 24 (8): 981-988.
- [10] 王凌浩, 辛选荣. 19MnB4 冷锻钢常温压缩动态力学性能及本构方程 [J]. 热加工工艺, 2016, 45 (13): 142-145.
Wang L H, Xin X R. Dynamic mechanical properties and constitutive equation of 19MnB4 cold heading steel compression at room temperature [J]. Hot Working Technology, 2016, 45 (13): 142-145.
- [11] 胡建军, 李小平. Deform-3D 塑性成形 CAE 应用教程 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2011.
Hu J J, Li X P. Deform-3D Plastic Forming CAE Application Tutorial [M]. Beijing: Peking University Press, 2011.
- [12] 张智华. 冷挤压凸模磨损数值模拟及涂层强化研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
Zhang Z H. Wear Simulation of Cold Extrusion Punch and Research of Coating Strengthening [D]. Chongqing: Chongqing University, 2017.
- [13] 张学奇, 董万鹏, 葛力华, 等. 基于正交试验的闭式挤压工艺参数优化 [J]. 塑性工程学报, 2017, 24 (3): 84-89.
Zhang X Q, Dong W P, Ge L H, et al. Processing parameters optimization of closed extrusion based on orthogonal experiment [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2017, 24 (3): 84-89.

(上接第 161 页)

- [9] 万里瑞, 王康康, 王辉. 利用增强多尺度模糊熵的齿轮故障诊断方法 [J]. 机械设计与研究, 2021, 37 (5): 73-77.
Wan L R, Wang K K, Wang H. Gear fault diagnosis method based on enhanced multi-scale fuzzy entropy [J]. Machine Design & Research, 2021, 37 (5): 73-77.
- [10] 蔡波, 黄晋英, 杜金波, 等. 基于 MEEMD 多特征融合与 LS-SVM 的行星齿轮箱故障诊断 [J]. 中国测试, 2021, 47 (9): 126-132.
Cai B, Huang J Y, Du J B, et al. Fault diagnosis of planetary gearbox based on MEEMD multi-feature fusion and LS-SVM [J]. China Measurement & Test, 2021, 47 (9): 126-132.
- [11] 李韵仪, 沈艳霞. 基于连续隐马尔可夫模型的变工况风机冷压机性能退化评估 [J]. 机械设计与研究, 2021, 37 (4): 106-109, 114.
Li Y Y, Shen Y X. Gearbox performance degradation assessment under variable operating conditions based on continuous hidden markov model [J]. Machine Design & Research, 2021, 37 (4): 106-109, 114.
- [12] 李立成, 华成丽, 梁栋. 基于粒子群优化的机械传动齿轮箱非正常振动检测算法 [J]. 现代制造工程, 2021, (8): 132-137.
Li L C, Hua C L, Liang D. Algorithm for detecting abnormal vibration of mechanical transmission gearbox based on particle swarm optimization [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2021, (8): 132-137.
- [13] 黄丽丽, 范业锐, 张文兴. 参数优化形态谱和 SVM 的行星齿轮箱故障诊断 [J]. 机械设计与制造, 2021, (8): 31-33.
Huang L L, Fan Y R, Zhang W X. Fault diagnosis of planetary gear box based on parameter optimization morphology spectrum and SVM [J]. Machinery Design & Manufacture, 2021, (8): 31-33.
- [14] 李宇恒, 蒋章雷, 梁好, 等. 基于 HEI 量化故障信息的行星齿轮箱故障诊断方法研究 [J]. 机电工程, 2021, 38 (7): 836-842.
Li Y H, Jiang Z L, Liang H, et al. Research on fault diagnosis method of planetary gearbox based on HEI quantization fault information [J]. Mechanical & Electrical Engineering, 2021, 38 (7): 836-842.
- [15] 谢锋云, 董建坤, 王二化, 等. 基于双隐层 RWPSO-BP 神经网络的齿轮箱故障诊断研究 [J]. 现代制造工程, 2021, (6): 155-160.
Xie F Y, Dong J K, Wang E H, et al. Research on gearbox fault diagnosis based on RWPSO-BP neural network with double hidden layers [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2021, (6): 155-160.