

大法兰螺母冲连皮冲头磨损分析及寿命改善

刘先生¹, 陈 波², 田亚丁³

(1. 新乡职业技术学院 数控技术学院, 河南 新乡 453006; 2. 新乡学院 机械工程学院, 河南 新乡 453006;
3. 新乡职业技术学院 智能制造学院, 河南 新乡 453006)

摘要: 针对大法兰螺母多工位冷镦成形过程中冲连皮冲头磨损严重、寿命不足的问题, 采用 Deform-3D 软件进行了数值模拟分析。基于实际工艺建立了冲连皮有限元模型, 同时构建了材料流动应力模型、断裂模型及冲头磨损模型, 并通过模拟结果验证了模型的可靠性。分析了关键工艺参数对冲头磨损的影响, 并结合正交试验设计, 研究了不同参数组合下冲头的磨损情况。极差分析结果表明, 最优工艺参数组合为冲头锥面角度为 6° 、斜面角度为 20° 、圆角半径为 $R0.6\text{ mm}$ 、锥面直径为 $\Phi 10.9\text{ mm}$ 、冲孔间隙为 0.10 mm 、冲断速度为 $15\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 此时冲头磨损深度最小。模拟和生产试验结果表明, 优化后的冲头在保证内孔质量的同时显著提高了使用寿命, 且模拟与试验结果吻合良好。

关键词: 冲头磨损; 冲连皮; 断裂模型; 磨损模型; 使用寿命

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2025.07.004

中图分类号: TG316.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2025) 07-0029-07

Wear analysis and life improvement on punch of flash trimming for large flange nut

Liu Xiansheng¹, Chen Bo², Tian Yading³

(1. College of Numerical Control Technology, Xinxiang Vocational and Technical College, Xinxiang 453006, China;
2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Xinxiang University, Xinxiang 453006, China;
3. Intelligent Manufacturing College, Xinxiang Vocational and Technical College, Xinxiang 453006, China)

Abstract: For the problems of severe wear and insufficient service life for punch of flash trimming during the multi-station cold heading process of large flange nut, the numerical simulation analysis was conducted by software Deform-3D. Based on the actual process, a finite element model of flash trimming was established. Meanwhile, the material flow stress model, fracture model and punch wear model were constructed, and the reliability of the models were verified by the simulation results. The influence of key process parameters on the wear of punch was analyzed, and combining with the orthogonal experimental design, the wear conditions of punch under different parameter combinations were studied. The range analysis results show that the optimal process parameters are the punch cone angle of 6° , the slope angle of 20° , the fillet radius of $R0.6\text{ mm}$, the cone diameter of $\Phi 10.9\text{ mm}$, the punching clearance of 0.10 mm and the punching speed of $15\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, at this time, the wear depth of punch is the least. The simulation and production test results show that the optimized punch significantly improves the service life while ensuring the quality of inner hole, and the simulation results are in good agreement with the test results.

Key words: punch wear; flash trimming; fracture model; wear model; service life

大法兰螺母作为一种重要的紧固件, 在汽车工业、机械设备、船舶制造、矿山设备等领域应用广泛, 因此需求量极大。为提高产品生产产量和生产速度, 同时控制成本和保证产品质量, 并响应国家

节能减排的政策, 生产方式由切削生产、热镦生产等转变为多工位冷镦生产^[1-2]。改进后工艺的稳定性较好, 生产效率和产品质量等也均满足要求, 但在冲连皮工位处由于冲头受力较大, 导致了严重的磨损问题, 加快了冲头的失效, 不仅影响产品的内孔质量, 还增加了生产成本。因此, 对冲连皮冲头的磨损情况进行研究, 明确影响冲头磨损的重要因素并进行改进, 对提高冲头使用寿命和优化生产工艺具有重要意义。

收稿日期: 2025-02-24; 修订日期: 2025-05-06

基金项目: 2024 年度河南省科技厅科技攻关项目 (242102220005)

作者简介: 刘先生 (1979-), 男, 硕士, 副教授

E-mail: 370095153@qq.com

近年来数值模拟技术快速发展,通过建立虚拟试验环境能有效替代实际物理试验,不仅能缩短研究周期,保证研究结果的可靠性,还能有效节省资源,降低成本,因此,在各行各业得到迅速推广。其中,Deform-3D 软件专用于金属塑性成形的模拟,已在该领域解决了许多难题,例如新工艺开发、工艺参数优化、模具结构优化、微观组织预测、缺陷预测等^[3-6],同时联合 Archard 磨损模型^[7],也能较准确地预测模具的磨损情况。因此,本文旨在利用 Deform-3D 软件,深入分析冲连皮冲头的磨损行为,探讨工艺参数对冲头磨损的影响规律,并提出相应的改进措施,为提高冲头寿命、降低生产成本提供理论支持和实践指导。

1 大法兰螺母的生产工艺

大法兰螺母的零件图如图 1 所示,其最大特点为法兰面积大,从而可增强紧固能力,适用于对安全性要求较高的场合。虽然零件结构的复杂程度一般,但螺母的制造材料为 40CrNiMoA 钢,常温下锻造会产生较大的变形抗力,容易造成零件开裂、模具寿命缩短等问题。因此,可分多个步骤完成螺母成形以降低单次变形量,另外螺母的通孔及螺纹

特征也无法一次成形,所以,最终设计的多工位成形工艺如图 2a 所示。生产实践表明,该工艺的成形效果良好,正常情况下的产能、质量、材料利用率等均可得到保证,但冲连皮工位存在瑕疵,其冲头因磨损严重导致失效较快,对产品质量、设备、成本等均存在较大影响,因此必须解决。冲连皮工位的模具结构及成形过程简图如图 2b 所示,模具设计采用浮动模形式^[8],凸模为主动件,凹模随凸模运动,冲头固定,成形结束后凸模撤出,由顶杆顶出零件。

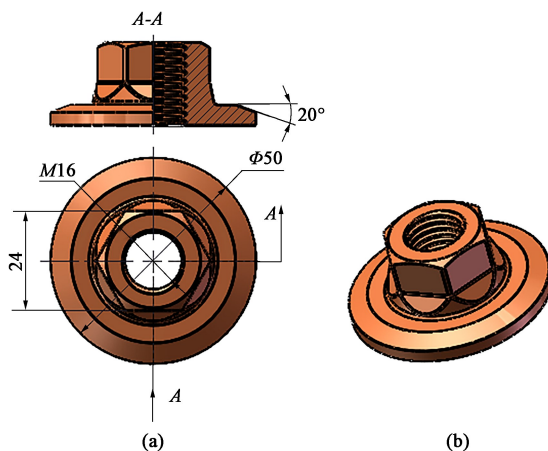


图 1 大法兰螺母的零件图

(a) 2D (b) 3D

Fig. 1 Part drawing of large flange nut

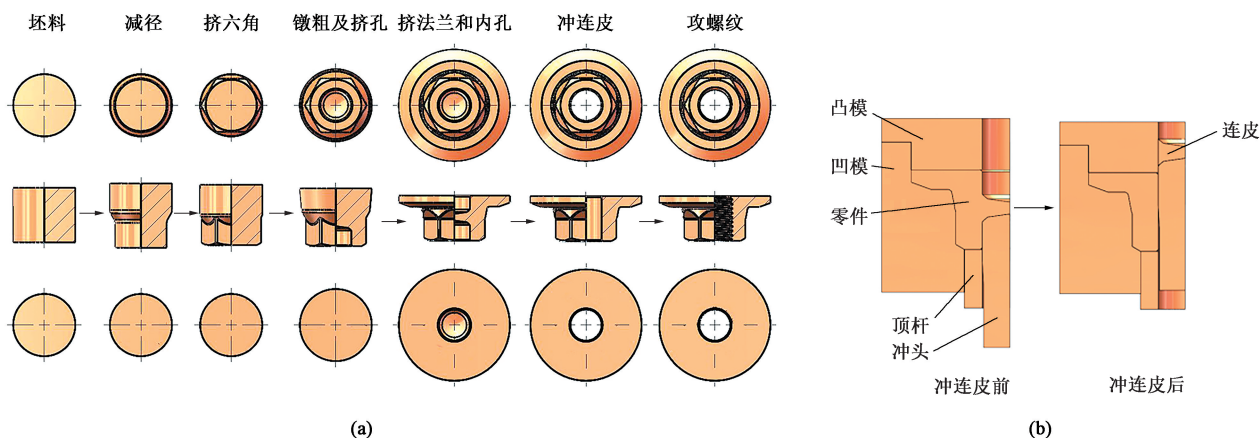


图 2 大法兰螺母的多工位成形工艺 (a) 和冲连皮过程简图 (b)

Fig. 2 Multi-station forming process of large flange nut (a) and schematic diagram of flash trimming process (b)

2 建模

2.1 有限元模型的建立

将图 2b 所示的冲连皮前的三维模型通过 STL 格式导入到 Deform-3D 软件中,模型中的凸模、凹模、顶杆和冲头均设定为刚体,零件为塑性体。零件材

料属性需根据实际情况重建才能发挥模拟价值,螺母实际用材 40CrNiMoA 钢的流动应力模型建模结果可参考文献 [9],导入软件后设定为零件材料,零件按模拟需要划分为 80000 个四面体网格,同时对后续冲断部位进行网格细化以提高精度。研究磨损问题时各模具也需进行网格划分^[10],根据精度需求分别设定合适的网格数量,各模具材料也按实际情

况设定,冲头所用材料为 M2 高速钢。约束条件包括运动条件、温度条件、边界条件、接触条件等,如实际冲断速度为 $10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$,凸模、凹模和顶杆的运动情况按此进行设定;建模时采用 1/4 结构,因此,需进行对称面设置来限制刚性运动;模拟温度按室温设定,冲连皮过程存在热传递,因此,根据经验设定热传递系数为 $24.7 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$;磨损问题与摩擦密切相关,选择剪切摩擦类型,设定摩擦因数为 0.1。生成的有限元模型如图 3 所示。

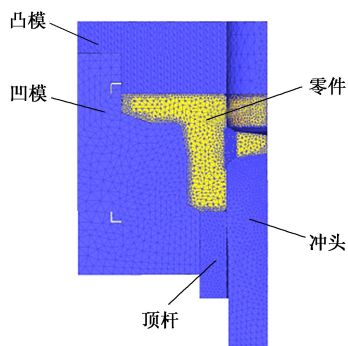


图3 冲连皮有限元模型

Fig. 3 Finite element model of flash trimming

2.2 各辅助模型的建立

为反映连皮的冲断过程,建立 40CrNiMoA 钢的断裂模型。Deform-3D 软件本身自带多种断裂模型,其中,Normalized Cockcroft & Latham 模型不仅适用于本研究,可靠性也较高,如式 (1) 所示。

$$C = \int_{\bar{\epsilon}_f}^{\bar{\epsilon}} \frac{\sigma^*}{\bar{\sigma}} d\bar{\epsilon} \quad (1)$$

式中: C 为材料的极限损伤值,为一个常数; $\bar{\epsilon}_f$ 为材料断裂初现时的应变; σ^* 为最大主应力; $\bar{\sigma}$ 为真实应力; $\bar{\epsilon}$ 为真实应变。

C 值需通过拉伸试验和拉伸仿真协同获得,该值设定后,同时配合断裂单元的设置^[11],在冲连皮过程中零件任何部位的损伤超过该值,则系统判定为断裂出现,从而删除该部位的网格单元。 C 值的获取步骤为: (1) 制备 40CrNiMoA 钢的拉伸试样,借助万能试验机进行拉伸试验,以恒定速率拉伸至裂纹出现; (2) 利用 Deform-3D 软件建立与试验一致的拉伸模型,输入弹性模量、泊松比等材料参数,并设置相同的加载条件和拉伸距离,进行仿真计算; (3) 在后处理中通过试样的损伤值分布图获得极限损伤 C 值; (4) 根据 C 值建立断裂模型,并设置断裂单元,再次进行拉伸仿真,约束条件保持不变,观察试样是否出现断裂,完成验证,最终获得的 C 值为 0.643。

为反映冲头的磨损情况,还需建立冲头的磨损模型。鉴于温度对材料性能的影响,采用 Lee R S 等^[12]提出的修正模型以提高结果的准确性,如式 (2) 所示。

$$W = \int G(T) \frac{F \cdot v}{[H(T)]^2} dt \quad (2)$$

式中: W 为冲头的磨损深度; F 为接触压力; v 为滑动速度; $G(T)$ 为材料在温度 T 下的磨损系数; $H(T)$ 为冲头在温度 T 下的表面硬度; t 为时间。

$G(T)$ 需通过摩擦磨损试验获得,采用的设备为摩擦磨损试验机,通过表面轮廓仪测量磨损量,并结合设置的接触压力、滑动速度和时间反推出不同温度下的磨损系数,拟合后可得到式 (3) 所示的 $G(T)$ 的表达式。由硬度试验获得不同温度下的硬度值后直接拟合出 $H(T)$ 的表达式,如式 (4) 所示。

$$G(T) = 2.758 \times 10^{-9} T^3 + 2.965 \times 10^{-6} T^2 + 2.683 \times 10^{-3} T + 18.539 \quad (3)$$

$$H(T) = -1.655 \times 10^{-8} T^3 - 2.575 \times 10^{-5} T^2 - 2.361 \times 10^{-3} T + 68.028 \quad (4)$$

利用 Fortran 完成该模型的代码编译,如图 4 所示,然后利用 User Subroutine 调用该模型。

```
SUBROUTINE USER_WEAR(T, F, v, dt, W)
  IMPLICIT NONE
  REAL*8, INTENT(IN) :: T, F, v, dt !输入参数
  REAL*8, INTENT(OUT) :: W !磨损量
  (累积值)
  REAL*8 :: G_T, H_T, wear_rate !中间变量

  !计算 G(T)
  G_T = 2.758e-9 * T**3 + 2.965e-6 * T**2 +
  2.683e-3 * T + 18.539

  !计算 H(T)
  H_T = -1.655e-8 * T**3 - 2.575e-5 * T**2 -
  2.361e-3 * T + 68.028

  !计算磨损率
  wear_rate = (G_T * F * v) / (H_T**2)

  !累积磨损量
  W = W + wear_rate * dt

  RETURN
END SUBROUTINE USER_WEAR
```

图4 磨损模型的代码编译

Fig. 4 Code compilation of wear model

3 模拟结果分析及模型可靠性验证

模拟得到的冲连皮过程如图 5 所示,零件在凸模作用下向下运动,由于冲头的阻碍使得连皮朝反向运动,因设置了断裂模型,当材料损伤超过极限时会发生断裂进而删除网格,因此,最终能够实现连皮与零件的分离,表明所建立的断裂模型较为准确。冲连皮工位当前冲头的磨损模拟结果如图 6 所示,

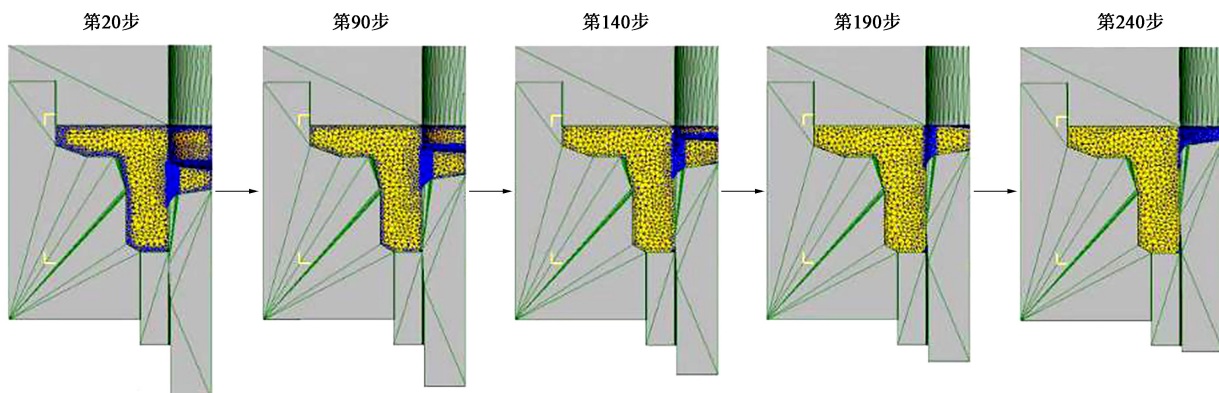


图 5 冲连皮过程

Fig. 5 Process of flash trimming

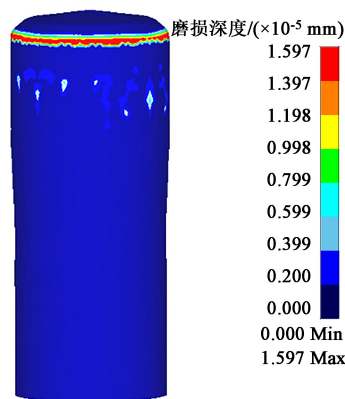


图 6 当前冲头的磨损模拟结果

Fig. 6 Simulation result of wear for current punch

最大磨损部位位于冲头圆角处, 与实际失效冲头相符, 在成形过程中该处与材料接触最多, 摩擦最剧烈, 其磨损深度为 1.597×10^{-5} mm。通过查看生产记录可知, 实际生产中冲连皮工位冲头的平均寿命为 3223 件左右, 此时冲头的磨损已达到允许极限, 导致螺母的孔壁质量开始变差。同时, 冲头允许的磨损总深度也可通过表面轮廓仪测定, 得到该值为 0.05 mm, 计算得到冲连皮冲头的单次最大磨损深度约为 1.551×10^{-5} mm, 与预测结果相近, 误差仅为 2.97%, 表明建立的冲头磨损模型较为准确, 可起到良好的预测作用, 有助于指导参数优化工作。

4 工艺参数优化及生产试验

影响冲头磨损的因素主要包含外部因素和自身因素两个方面: 外部因素中被加工材料的特性、润滑情况、环境因素等均是确定的, 所以只需要重点研究加工条件, 如冲孔间隙 L 、冲断速度 V ; 自身因

素中的冲头材料和热处理工艺等是确定的, 所以只需要重点研究影响冲头外形的参数, 如锥面角度 α 、斜面角度 β 、圆角半径 r 、锥面直径 φ 。因此, 最终确定的优化参数为锥面角度 α 、斜面角度 β 、圆角半径 r 、锥面直径 φ 、冲孔间隙 L 以及冲断速度 V 这 6 个参数, 当前冲头各外形参数如图 7a 所示。首先, 根据设计经验在各参数的取值范围内, 将每个参数分为 5 个水平, 如表 1 所示; 然后, 利用正交试验完成不同参数、不同水平组合的模拟试验方案的设计, 共 25 组, 如表 2 所示; 最后, 依照各方案提供的参数依次重新进行建模、条件设定及仿真试验, 得到的对应冲头的最大磨损深度如表 2 所示。

通过对各磨损数据的极差分析可以确定各参数对冲头磨损的影响程度以及各参数的最优水平^[13], 所有方案冲头磨损数据的极差分析结果如表 3 所示, 其中, k_i 为第 i 水平下 5 组试验冲头最大磨损深度的平均值, $i=1, 2, 3, 4, 5$ 。极差值大小直接反映了各参数对冲头磨损深度影响的主次顺序, 其值越大越重要, 即 $\alpha > L > \varphi > \beta > r > V$, 在参数水平确定过程中, 若遇到冲突, 可依据该优先级顺序进行决策。每个参数在各水平下的 5 组试验冲头最大磨损深度的平均值则能直接反映出各参数的最优水平, 由于以冲头磨损越小越好为原则, 因此, 该平均值越小表示该水平越优, 即各参数的最优取值分别为: 冲头锥面角度为 6° 、斜面角度为 20° 、圆角半径为 $R0.6$ mm、锥面直径为 $\Phi 10.9$ mm、冲孔间隙为 0.10 mm、冲断速度为 $15 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

优化后的冲头外形参数, 如图 7b 所示, 按此重新建模并修改加工条件再次进行仿真计算, 得到的冲头磨损模拟结果如图 8 所示, 最大磨损深度为

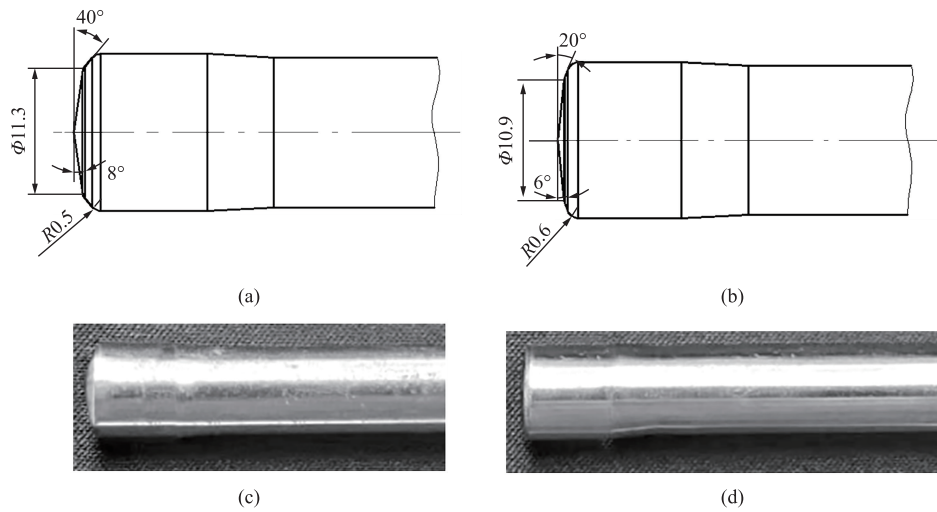


图 7 冲连皮冲头的外形示意图
(a) 优化前冲头参数 (b) 优化后冲头参数 (c) 优化前冲头实物 (d) 优化后冲头实物

Fig. 7 Schematic diagrams of punch appearance for flash trimming
(a) Parameters of punch before optimization (b) Parameters of punch after optimization (c) Physical punch before optimization (d) Physical punch after optimization

表 1 正交试验各参数的水平

Table 1 Levels of various parameters for orthogonal experiment

水平	参数					
	锥面 角度	斜面 角度	圆角 半径	锥面 直径	冲孔 间隙	冲断速 度 $V/$
	$\alpha/(\circ)$	$\beta/(\circ)$	r/mm	φ/mm	L/mm	$(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$
1	4	20	R0.2	$\Phi 10.5$	0.04	10
2	6	30	R0.3	$\Phi 10.9$	0.06	15
3	8	40	R0.4	$\Phi 11.3$	0.08	20
4	10	50	R0.5	$\Phi 11.7$	0.10	25
5	12	60	R0.6	$\Phi 12.1$	0.12	30

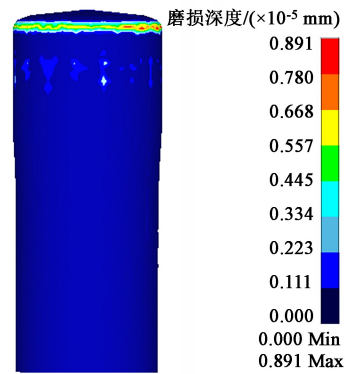


图 8 优化后冲头的磨损模拟结果

Fig. 8 Wear simulation result of punch after optimization

表 2 不同参数组合下的正交试验方案及结果

Table 2 Schemes and results of orthogonal experiment under different parameter combinations

试验方案	锥面角度 $\alpha/$ (\circ)	斜面角度 $\beta/$ (\circ)	圆角半径 $r/$ mm	锥面直径 $\varphi/$ mm	冲孔间隙 $L/$ mm	冲断速度 $V/$ $(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	冲头最大磨损深度/ $(\times 10^{-5} \text{ mm})$
1	4	20	R0.2	$\Phi 10.5$	0.04	10	1.388
2	4	30	R0.3	$\Phi 10.9$	0.06	15	1.254
3	4	40	R0.4	$\Phi 11.3$	0.08	20	1.643
4	4	50	R0.5	$\Phi 11.7$	0.10	25	1.182
5	4	60	R0.6	$\Phi 12.1$	0.12	30	1.443
6	6	20	R0.3	$\Phi 11.3$	0.10	30	0.934
7	6	30	R0.4	$\Phi 11.7$	0.12	10	1.056
8	6	40	R0.5	$\Phi 12.1$	0.04	15	1.024
9	6	50	R0.6	$\Phi 10.5$	0.06	20	1.013
10	6	60	R0.2	$\Phi 10.9$	0.08	25	0.967

表 2 (续)
Table 2 (Continued)

试验方案	锥面角度 α / ($^{\circ}$)	斜面角度 β / ($^{\circ}$)	圆角半径 r / mm	锥面直径 φ / mm	冲孔间隙 L / mm	冲断速度 V / ($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	冲头最大磨损深度/ ($\times 10^{-5} \text{ mm}$)
11	8	20	R0.4	$\Phi 12.1$	0.06	25	1.356
12	8	30	R0.5	$\Phi 10.5$	0.08	30	1.554
13	8	40	R0.6	$\Phi 10.9$	0.10	10	1.079
14	8	50	R0.2	$\Phi 11.3$	0.12	15	1.482
15	8	60	R0.3	$\Phi 11.7$	0.04	20	1.513
16	10	20	R0.5	$\Phi 10.9$	0.12	20	1.212
17	10	30	R0.6	$\Phi 11.3$	0.04	25	1.411
18	10	40	R0.2	$\Phi 11.7$	0.06	30	1.587
19	10	50	R0.3	$\Phi 12.1$	0.08	10	1.611
20	10	60	R0.4	$\Phi 10.5$	0.10	15	1.111
21	12	20	R0.6	$\Phi 11.7$	0.08	15	1.324
22	12	30	R0.2	$\Phi 12.1$	0.10	20	1.147
23	12	40	R0.3	$\Phi 10.5$	0.12	25	1.677
24	12	50	R0.4	$\Phi 10.9$	0.04	30	1.287
25	12	60	R0.5	$\Phi 11.3$	0.06	10	1.727

表 3 冲头磨损深度极差分析结果 ($\times 10^{-5} \text{ mm}$)
Table 3 Range analysis results of wear depth for punch
($\times 10^{-5} \text{ mm}$)

参数	锥面角度 α	斜面角度 β	圆角半径 r	锥面直径 φ	冲孔间隙 L	冲断速度 V
k_1	1.382	1.243	1.314	1.349	1.325	1.372
k_2	0.999	1.284	1.398	1.160	1.387	1.271
k_3	1.397	1.402	1.291	1.439	1.420	1.273
k_4	1.386	1.315	1.340	1.332	1.019	1.319
k_5	1.432	1.352	1.254	1.316	1.374	1.361
极差值	0.433	0.159	0.144	0.279	0.329	0.101

$0.891 \times 10^{-5} \text{ mm}$ ，明显低于当前以及正交试验中的所有方案，其大致寿命为 5612 件，说明优化效果较好。将优化后的冲头用于生产试验，得到优化后的冲头实物如图 7d 所示，制得的大法兰螺母内孔质量仍然较佳，如图 9 所示。经长期生产统计可知，优化后冲头的平均寿命能达到 5825 件，相近于预测结果，误差仅为 3.8%，说明预测模型较为准确，该冲头寿命为图 7c 所示当前冲头寿命的 1.81 倍，能有效解决冲头的寿命问题，降低生产成本。

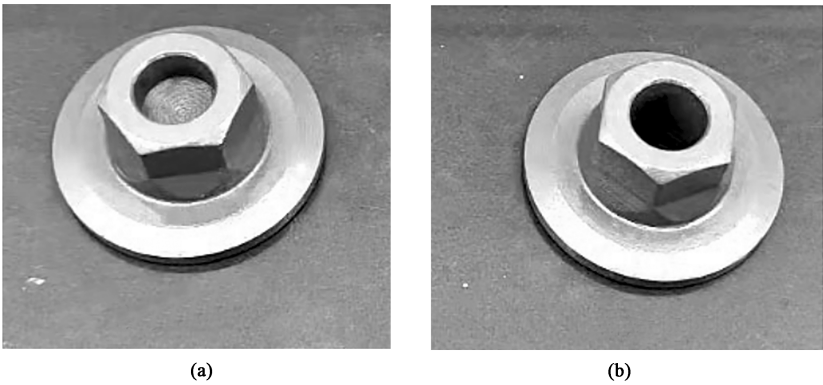


图 9 冲连皮前后的法兰螺母
(a) 冲连皮前 (b) 冲连皮后
Fig. 9 Large flange nuts before and after flash trimming
(a) Before flash trimming (b) After flash trimming

5 结论

(1) 为解决大法兰螺母多工位冷镦成形中遇到的冲连皮工位冲头寿命短的问题,采用 Deform-3D 软件对冲连皮过程进行了数值模拟分析,并建立了冲连皮有限元模型以及材料流动应力模型、材料断裂模型、冲头磨损模型等辅助模型。

(2) 通过对比当前工艺的模拟结果和实际情况验证了所有模型的可靠性,并借助正交试验,以降低冲头磨损为目标,得到优化的关键工艺参数为:冲头锥面角度为 6° 、斜面角度为 20° 、圆角半径为 $R0.6\text{ mm}$ 、锥面直径为 $\Phi 10.9\text{ mm}$ 、冲孔间隙为 0.10 mm 、冲断速度为 $15\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

(3) 对优化后的工艺参数进行模拟及生产试验,结果表明,冲头外形优化后仍能获得内孔质量较佳的大法兰螺母,冲头寿命得到大幅提升,并且模拟结果与试验结果具有较好的一致性。

参考文献:

- [1] 陈剑, 张东民, 周伟民, 等. 球头销多工位冷镦挤工艺研究及模具设计 [J]. 热加工工艺, 2018, 47 (11): 153-156.
Chen J, Zhang D M, Zhou W M, et al. Process research and die design of multi-station cold upsetting-extrusion of ball head pin [J]. Hot Working Technology, 2018, 47 (11): 153-156.
- [2] 郑鹏辉, 关悦, 许吉星, 等. A286 高温合金十二角法兰面螺栓多工位冷镦成形工艺 [J]. 制造技术与机床, 2022 (7): 45-50.
Zheng P H, Guan Y, Xu J X, et al. Multi station cold heading process of A286 superalloy twelve point flange bolt [J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2022 (7): 45-50.
- [3] 王敏, 李旭辉, 陈天赋, 等. 电控差速锁壳体热锻工艺方案设计与优化 [J]. 精密成形工程, 2024, 16 (12): 264-273.
Wang M, Li X H, Chen T F, et al. Design and optimization of hot forging process for electronically controlled differential lock shell [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2024, 16 (12): 264-273.
- [4] 王云海, 龚志华, 赵吉庆, 等. 9Cr3W3Co 耐热钢锻造工艺数值模拟及实验研究 [J]. 塑性工程学报, 2024, 31 (10): 17-26.
Wang Y H, Gong Z H, Zhao J Q, et al. Numerical simulation and experimental study on forging process of 9Cr3W3Co heat-resistant steel [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2024, 31 (10): 17-26.
- [5] 张巍. 车用 2A12 铝合金连接锻件变形规律分析与工艺设计 [J]. 材料科学与工艺, 2022, 30 (1): 90-96.
Zhang W. Deformation analysis and process design of 2A12 aluminum alloy connecting forgings for vehicles [J]. Materials Science and Technology, 2022, 30 (1): 90-96.
- [6] 邱仟, 王克鲁, 鲁世强, 等. SP700 钛合金热压缩失稳变形数值模拟研究 [J]. 稀有金属材料与工程, 2022, 51 (8): 2985-2991.
Qiu Q, Wang K L, Lu S Q, et al. Numerical simulation research on hot compression instability deformation of SP700 titanium alloy [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2022, 51 (8): 2985-2991.
- [7] 张帅帅, 张彦敏, 韩文奎, 等. 基于响应曲面法的 QCr0.5 铜合金热挤压冲头磨损数值分析 [J]. 塑性工程学报, 2021, 28 (9): 80-85.
Zhang S S, Zhang Y M, Han W K, et al. Numerical analysis of punch wear of QCr0.5 copper alloy in hot extrusion based on response surface method [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28 (9): 80-85.
- [8] 高利宁, 余龙新. 基于 Deform 软件的模具结构对链轮挤压锻造性能的影响分析 [J]. 煤矿机械, 2019, 40 (7): 79-81.
Gao L N, Yu L X. Analysis on influence of die structure based on deform software on extrusion forging performance of sprocket [J]. Coal Mine Machinery, 2019, 40 (7): 79-81.
- [9] 田亚丁, 刘德波. 基于有限元分析的汽车用大法兰螺母冷镦成形技术 [J]. 锻压技术, 2023, 48 (10): 31-37, 52.
Tian Y D, Liu D B. Cold heading technology on automotive large flange nut based on finite element analysis [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (10): 31-37, 52.
- [10] 车路长, 蒋平, 刘俊, 等. Ti-6Al-4V 钛合金筋板类吊挂锻造成形工艺优化及模具磨损研究 [J]. 精密成形工程, 2022, 14 (7): 106-115.
Che L C, Jiang P, Liu J, et al. Optimization of Ti-6Al-4V titanium alloy ribbed plate type hanging forging forming process and die wear [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2022, 14 (7): 106-115.
- [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] Lee R S, Jou J L. Application of numerical simulation for wear analysis of warm forging die [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 140 (1-3): 43-48.
- [13] 董奇, 金飞翔, 秦强, 等. 基于正交试验齿圈座热锻成形工艺优化 [J]. 塑性工程学报, 2021, 28 (8): 18-22.
Dong Q, Jin F X, Qin Q, et al. Optimization of hot forging forming process based on orthogonal test for gear ring seat [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28 (8): 18-22.