

基于计算机模拟的六角冲头磨损分析与参数优化

张 爽¹, 焦 智²

(1. 廊坊技师学院 机械工程系, 河北 廊坊 065000; 2. 北华航天工业学院 机电工程学院, 河北 廊坊 065000)

摘要: 为了减小某汽车变速箱齿轮轴六角内孔成形冲头的磨损量, 通过 Deform-3D 软件建立了挤孔模型并进行研究。首先, 研究了加工材料 20MnCr5 合金钢的冷塑性变形规律以及六角冲头的硬度和磨损系数随温度的变化规律, 保证了挤孔模拟试验的可靠性; 其次, 研究了 3 种不同形式的六角冲头在挤孔过程中的受力和磨损状况, 确定了梯面六角冲头为最优形式; 最后, 以减小冲头磨损为目标, 利用正交试验对冲头斜角、冲头平面直径、冲头过渡半径和挤孔速度这 4 个工艺参数进行了优化, 并研究了 TiAlN 涂层对梯面六角冲头表面的减磨效果。研究结果表明, 挤孔最优工艺参数为: 冲头斜角为 20°, 冲头平面直径为 $\Phi 4.5$ mm, 冲头过渡半径为 0.6 mm, 挤孔速度为 $20 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 优化后冲头寿命为优化前的 1.22 倍, 同时表面涂覆涂层后冲头寿命为优化前的 2.20 倍。

关键词: 冷塑性变形; 六角冲头; 挤孔; 磨损; TiAlN 涂层

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.12.032

中图分类号: TG386

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2024) 12-0257-08

Wear analysis and parameter optimization on hexagonal punch based on computer simulation

Zhang Shuang¹, Jiao Zhi²

(1. Department of Mechanical Engineering, Langfang Technician College, Langfang 065000, China;

2. Mechanical and Electrical Engineering College, North China Institute of Aerospace Engineering, Langfang 065000, China)

Abstract: In order to reduce the wear amount of punch for hexagonal inter hole forming in an automotive gearbox gear shaft, a hole extrusion model was established researched by software Deform-3D. Firstly, the cold plastic deformation laws for the processed material of 20MnCr5 alloy steel and the variation laws of hardness and wear coefficient for the hexagonal punch with temperature were studied, and the reliability of the hole extrusion simulation test was ensured. Secondly, the stress and wear conditions of three different forms of hexagonal punches during the hole extrusion process were studied, and the optimal form of the trapezoidal hexagonal punch was determined. Finally, with the aim of reducing punch wear, the process parameters such as punch angle, punch plane diameter, punch transition radius and hole extrusion speed were optimized by orthogonal experiments, and the anti-wear effect of TiAlN coating on the surface of the trapezoidal hexagonal punch was also studied. The research results show that the optimal process parameters for hole extrusion are the punch angle of 20°, the punch plane diameter of $\Phi 4.5$ mm, the punch transition radius of 0.6 mm, and the extrusion speed of $20 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. After optimization, the life of the punch is 1.22 times that before optimization. At the same time, the life of the punch with surface coating is 2.20 times that before optimization.

Key words: cold plastic deformation; hexagonal punch; hole extrusion; wear; TiAlN coating

随着汽车工业的进步, 汽车零部件朝着高强度、高精密度、低表面损伤的方向发展, 而冷锻技术恰好符合这一要求^[1-3], 并且还具有高效生产和成本低等优点, 因此在该行业的应用较为广泛, 例如传动零部件、悬挂系统零部件、发动机零部件和紧固件等的生产制造。河北润远变速箱制造厂的一款齿轮轴同样采用冷锻方式生产, 齿轮轴模型图如图 1

所示, 因其结构的复杂性, 各特征必须分步有序成形, 成形过程依次为正挤压、预锻粗及预冲孔、镦齿形、挤内孔和冲连皮, 如图 2 所示。该工艺稳定可靠, 制造的齿轮轴精度高、质量好, 完全符合厂家需求, 但在长期生产中也暴露出了问题, 挤内孔工位的六角冲头磨损极其严重, 使用寿命短、更换频率高, 这不仅影响了齿轮轴的产能, 且生产成本也会超过预算, 导致利润低下, 因此应厂家需求, 在尽可能保持生产工艺不变的前提下, 对六角冲头的类型、关键工艺参数、冲头表面强化等方面进行研究。

收稿日期: 2024-03-20; **修订日期:** 2024-06-18

作者简介: 张 爽 (1975-), 女, 硕士, 高级讲师

E-mail: xyr929@aliyun.com

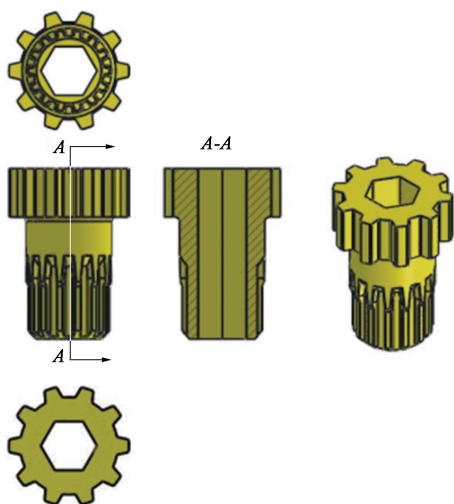


图 1 齿轮轴的模型图

Fig. 1 Model diagram of gear shaft

模具寿命问题是塑性变形中的常见问题, 研究价值巨大, 直接影响经济效益, 因此广受行业关注。但通过反复试模的方式研究, 不仅无法起到降本的目的, 最终方案也未必是最优, 因此, 可采用有限元方法进行研究, 并基于模拟数据进行对比分析, 明确优化方向, 从而减少对试模的依赖。例如, 王培安等^[4]通过 Deform-3D 软件模拟了活塞销挤压成形时的凸模磨损情况, 并进行了多方案对比试验, 最终确定了合理的工艺参数组合, 降低了凸模磨损量; 张东民等^[5]为了解决铆套通孔成形冲头的实际磨损问题, 通过 Deform-3D 软件建立了冲孔模型, 并使用正交试验对冲头相关尺寸参数和工艺参数进行了优化; 李彦奎等^[6]针对航空叶片模具磨损严重的问题, 利用 Deform-3D 软件研究了不同设计参数对模具寿命的影响, 进行了合理优化, 并通过实际

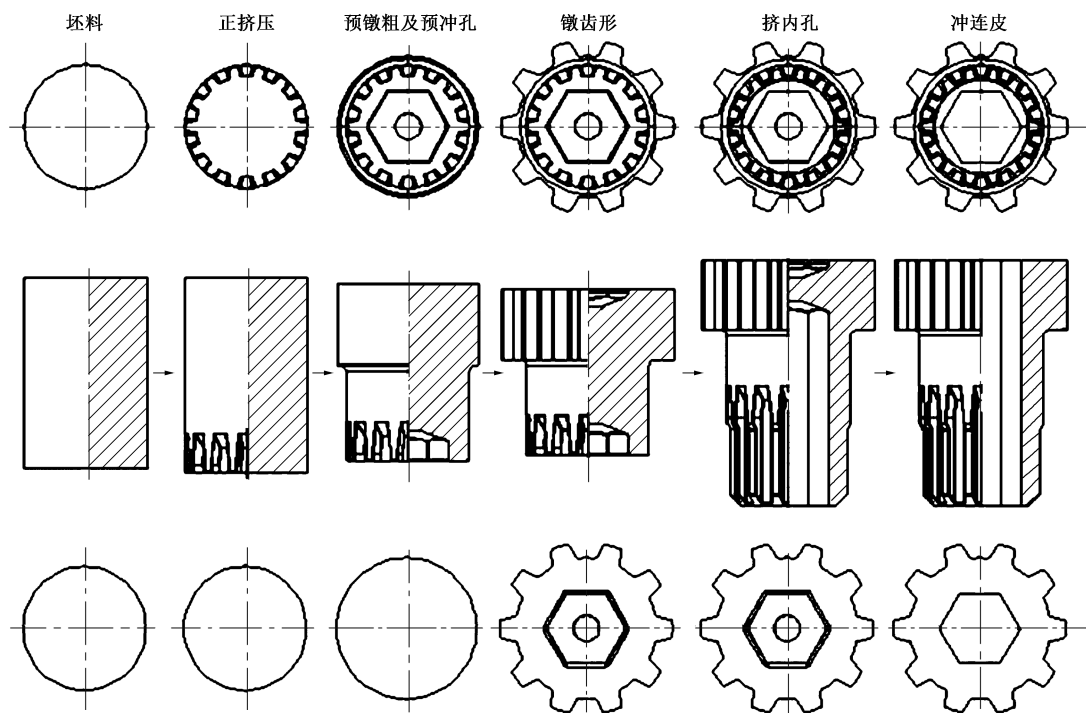


图 2 齿轮轴 5 工位冷锻方案

Fig. 2 Five-station cold heading scheme for gear shaft

试模进行了对比验证, 有效降低了成本; 任燕等^[7]为提高三柱槽壳反挤压凸模的寿命, 利用 Deform-3D 软件进行了反挤压过程的模拟仿真, 理清了凸模的磨损规律及影响因素, 对工艺参数进行了优选, 并通过涂层技术对凸模表面进行了强化, 使得凸模寿命提高了 1 倍。因此, 本文以有限元法为技术支撑, 通过建立挤孔模型来研究六角冲头的磨损状况, 根据不同类型冲头的受力和磨损程度来确定采用何

种冲头, 同时以减小冲头磨损为目标, 利用正交试验对工艺参数进行优化, 最后对冲头表面涂覆涂层, 以进一步减少磨损和提高寿命。

1 模拟试验准备

1.1 材料模型的导入

齿轮轴的加工材料为 20MnCr5 合金钢, 其球化

退火后冷墩性能较佳，为保证挤孔模拟试验的可靠性，必须将该材料模型导入 Deform-3D 软件中，因此，利用压缩试验对该材料的冷塑性规律进行了研究，采集不同条件下的多组应力、应变数据并将其输入软件模型库中，生成的 20MnCr5 合金钢的真实应力-真实应变曲线如图 3 所示。

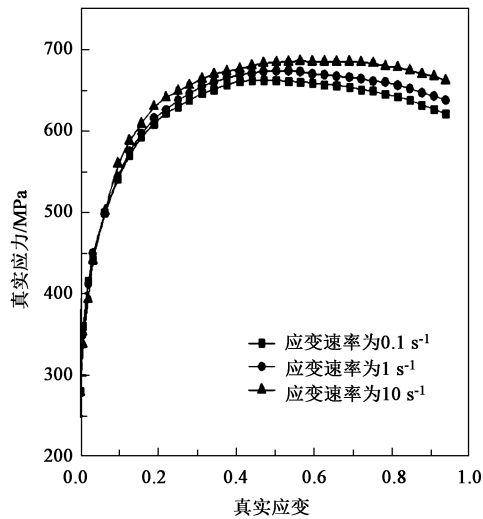


图 3 20MnCr5 合金钢的真实应力-真实应变曲线
Fig. 3 True stress-true strain curves of 20MnCr5 alloy steel

1.2 挤内孔模型建立及模拟条件设置

利用 Solidworks 建立挤内孔工位的模具装配简图，包括凸模、凹模、零件和六角冲头，由于各部件在外形上都是对称的，因此导入 Deform-3D 软件时可取 1/4 模型，对提高模拟精度和模拟效率均有显著效果^[8]，如图 4 所示。模型中，将零件选为塑性体，并将前文建立的 20MnCr5 合金钢材料模型作为零件材料，将零件离散为四面体网格，数量为

64000 个，试验温度为室温；将凸模、凹模、六角冲头选为刚性体，六角冲头材料为 W6Mo5Cr4V2 钢，其主要性能参数如表 1 所示，其余模具材料根据现场情况设定，同样离散为四面体网格，数量为 32000 个。在运动条件设置中，根据挤内孔模型将凸模和凹模设置为运动件，速度为 $20\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ，六角冲头则为固定件；挤内孔时会存在大量摩擦，因此在接触条件设置时，将摩擦因数根据现场润滑条件设为 0.1，并且为更契合实际挤内孔情况，将成形热效应列入考虑，设定热传递系数为 $24\text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ 。在模拟控制条件设置中，将凸模选为主模，将凸模行程作为模拟完成的依据。六角冲头有 3 种类型，如图 5 所示，其中， D 为冲头平面直径，mm； R 为冲头过渡半径，mm； θ 为冲头斜角， $(^\circ)$ 。当下工艺中采用的是锥面六角冲头，依次进行挤内孔模拟。

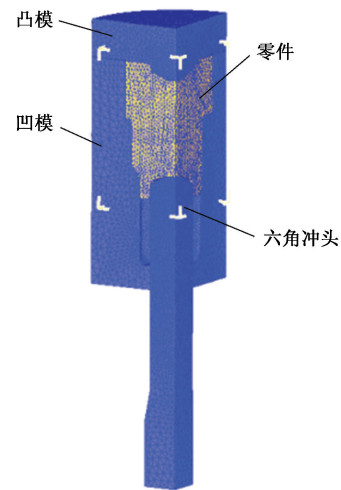


图 4 挤内孔模型
Fig. 4 Model of inner hole extrusion

表 1 W6Mo5Cr4V2 钢的主要性能参数
Table 1 Main performance parameters of W6Mo5Cr4V2 steel

参数	比热容/ ($\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$)	密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	弹性模量/ GPa	硬度/HRC	熔点/ $^\circ\text{C}$	热膨胀系数/ K^{-1}	断裂韧性/ ($\text{J} \cdot \text{cm}^{-2}$)	伸长率/%
数值	644	8.2	218	68	1380	11.2×10^{-6}	13.0	8~10

1.3 冲头磨损模型建立

磨损模型是在 Archard 模型的基础上进行修正^[9-10]，Archard 模型的数学表达式如式 (1) 所示。

$$W_d = \int K \frac{P^a v^b}{H^c} dt$$

(1)

式中： W_d 为模具表面的磨损深度； K 为磨损因子，与模具材料相关； P 为接触压力； v 为滑移速度； H 为模具的硬度； t 为接触时间；变量 a 、 b 、 c 则由模具材料决定，对于钢材， a 、 b 均取值为 1，而 c 取值为 $2^{[11]}$ 。

此模型认为磨损因子与模具硬度是恒定的，与

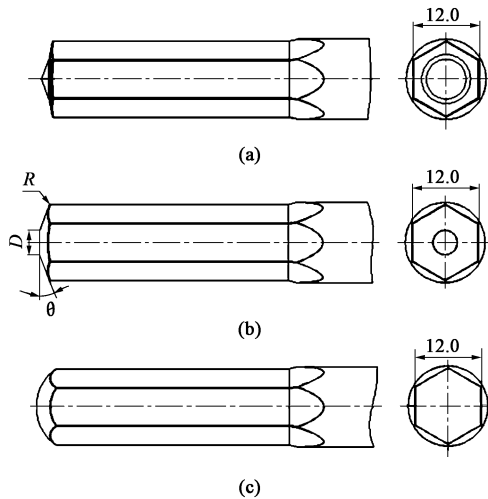


图 5 六角冲头类型

(a) 锥面六角冲头 (b) 梯面六角冲头 (c) 球面六角冲头

Fig. 5 Types of hexagonal punches

(a) Conical hexagonal punch (b) Trapezoidal hexagonal punch

(c) Spherical hexagonal punch

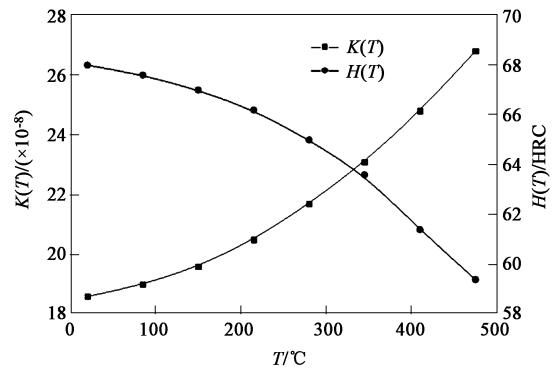
实际挤内孔情况明显不符, 由于剧烈摩擦会使六角冲头表面温度瞬间升高, 对冲头表面性能必然会产生一定的影响, 若直接采用该模型会存在较大误差, 因此, 宜采用修正后的式 (2) 所示模型, 考虑温度因素。

$$W_d(T) = \int K(T) \frac{P^a v^b}{[H(T)]^c} dt \quad (2)$$

式中: $K(T)$ 、 $H(T)$ 、 $W_d(T)$ 分别为随温度变化的磨损因子、模具硬度和磨损深度。

其中, 磨损因子的变化规律可由磨损试验获

得, 而硬度的变化规律可由硬度试验获得, 如图 6 所示, 通过求解器的二次开发嵌入到 Deform-3D 软件中。

图 6 W6Mo5Cr4V2 钢的 $K(T)$ 和 $H(T)$ 随温度的变化规律Fig. 6 Variation laws of $K(T)$ and $H(T)$ for W6Mo5Cr4V2 steel with temperature

2 结果分析与优化

2.1 磨损和受力结果分析

当下采用的锥面六角冲头实物如图 7a 所示, 当其表面磨损达到一定深度后, 内孔便会出现拉毛问题, 降低齿轮轴通孔的质量, 影响使用, 因此必须及时换新。经生产统计, 锥面六角冲头在失效前可生产的零件平均数为 4480 件, 同时经表面轮廓测量仪测量得知, 若干失效锥面六角冲头的平均表面最大磨损深度均在 0.06 mm 左右, 因此, 后续可根据该数据来预测六角冲头的大致寿命。通过计算可知,

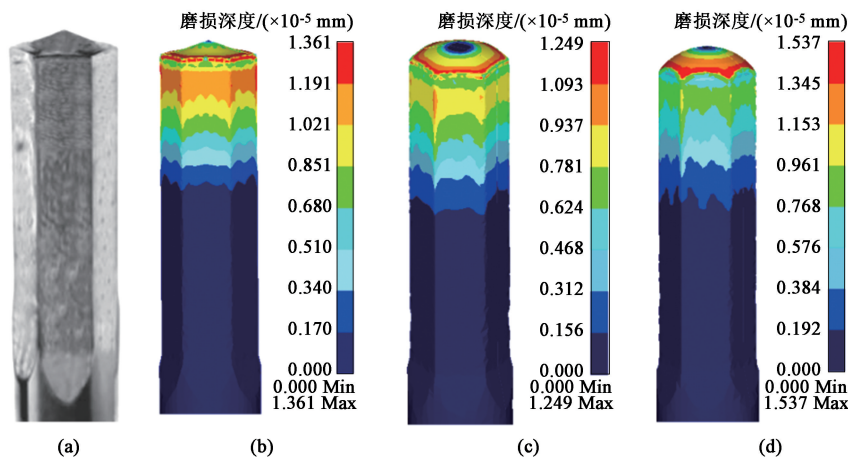


图 7 六角冲头表面磨损分布

(a) 锥面冲头实际磨损情况 (b) 锥面冲头模拟磨损结果 (c) 梯面冲头模拟磨损结果 (d) 球面冲头模拟磨损结果

Fig. 7 Surface wear distributions of hexagonal punches

(a) Actual wear of conical punch (b) Simulation wear result of conical punch (c) Simulation wear result of trapezoidal punch

(d) Simulation wear result of spherical punch

锥面六角冲头实际单次挤孔后的表面最大磨损深度为 1.339×10^{-5} mm。图 7b~图 7d 分别为锥面六角冲头、梯面六角冲头以及球面六角冲头单次挤孔后的表面磨损分布模拟结果，剧烈磨损部分均集中在冲头头部，这是温升最大的区域，同时圆角处磨损最为严重，这是因为该处材料流动最为频繁。图 7b 的图例显示锥面六角冲头的表面最大磨损深度为 1.361×10^{-5} mm，与实际磨损数据非常接近，说明建立的材料模型和磨损模型均比较准确，模拟结果具有可信度，其值要略大于实际磨损深度，说明实际挤孔时的润滑条件较好，起到了安全裕度的作用。梯面六角冲头和球面六角冲头的表面最大磨损深度分别为 1.249×10^{-5} 和 1.537×10^{-5} mm，明显梯面六角冲头的磨损深度更小，说明梯面六角冲头结构下的材料流动更为顺畅，利于孔成形。3 种六角冲头挤孔时的受力情况如图 8 所示，锥面六角冲头的最大受力为 297 kN，球面六角冲头的最大受力为 337 kN，梯面六角冲头的最大受力为 226 kN，受力越大，材料与冲头的摩擦越严重，冲头磨损深度也越大，与磨损分析数据一致，因此，确定梯面六角冲头为最优形式。

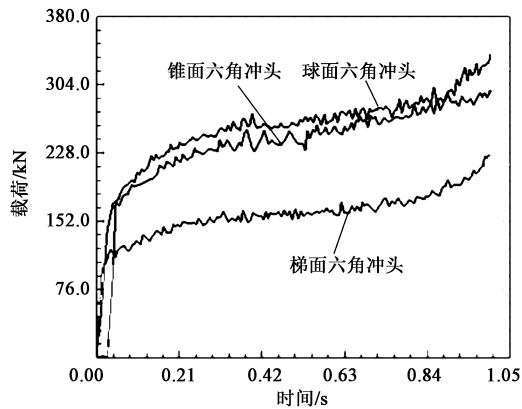


图 8 3 种六角冲头的受力变化曲线

Fig. 8 Variation curves of force for three types of hexagonal punches

2.2 工艺参数优化

除冲头形式外，各工艺参数对冲头的磨损影响也较大，因此，需在确定了梯面六角冲头形式的基础上对工艺参数进行优化。六角冲头头部参数的变化会直接改变冲头头部与零件的接触面，如图 5 所示，这对材料的流动性影响极大，而挤压速度更是直接影响材料的流动速度，因此，本文将冲头斜角 θ 、冲头平面直径 D 、冲头过渡半径 R 以及挤孔速度 V 列为重点研究对象，以减小梯面六角冲头磨损为目标，利用正交试验手段进行优化研究^[12]。表 2 为

建立的正交试验方案，根据各方案中的参数组合重新进行建模仿真以获得各自冲头的最大磨损深度 W_{dmax} ，很明显各数据之间差距较大，并且存在多组磨损数据小于图 7c 中的磨损深度（对应试验方案 8），说明优化空间极大。表 3 为将所有方案磨损数据处理后的极差分析表。通过极差值大小可判断各参数对冲头磨损的影响程度，极差值越大表示对应的参数越关键，因此，可知影响程度排序为： $\theta > D > R > V$ 。而通过 4 组均值可判断各参数的最优水平，均值越小表示对应水平下的最大磨损深度的平均值越小，该水平越优。因此，可知最优工艺参数为：冲

表 2 正交试验方案及冲头磨损结果
Table 2 Orthogonal experimental scheme and punch wear results

试验 方案	$\theta /$ ($^{\circ}$)	$D /$ mm	$R /$ mm	$V /$ (mm \cdot s $^{-1}$)	$W_{dmax} /$ ($\times 10^{-5}$ mm)
1	10	$\Phi 4.0$	R0.2	10	1.338
2	10	$\Phi 4.5$	R0.4	20	1.271
3	10	$\Phi 5.0$	R0.6	30	1.334
4	10	$\Phi 5.5$	R0.8	40	1.345
5	15	$\Phi 4.0$	R0.4	30	1.321
6	15	$\Phi 4.5$	R0.2	40	1.293
7	15	$\Phi 5.0$	R0.8	10	1.329
8	15	$\Phi 5.5$	R0.6	20	1.249
9	20	$\Phi 4.0$	R0.6	40	1.198
10	20	$\Phi 4.5$	R0.8	30	1.172
11	20	$\Phi 5.0$	R0.2	20	1.244
12	20	$\Phi 5.5$	R0.4	10	1.131
13	25	$\Phi 4.0$	R0.8	20	1.311
14	25	$\Phi 4.5$	R0.6	10	1.288
15	25	$\Phi 5.0$	R0.4	40	1.352
16	25	$\Phi 5.5$	R0.2	30	1.356

表 3 六角冲头最大磨损深度极差分析结果 ($\times 10^{-5}$ mm)

Table 3 Range analysis results of maximum wear depth for hexagonal punch ($\times 10^{-5}$ mm)

参数	θ	D	R	V
水平 1 的均值	1.322	1.292	1.308	1.272
水平 2 的均值	1.298	1.256	1.269	1.269
水平 3 的均值	1.186	1.315	1.267	1.296
水平 4 的均值	1.327	1.270	1.289	1.297
极差值	0.141	0.059	0.041	0.028

头斜角 θ 为 20° , 冲头平面直径 D 为 $\Phi 4.5$ mm, 冲头过渡半径 R 为 $R0.6$ mm, 挤孔速度 V 为 $20 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。由 Deform-3D 软件模拟获得该方案下的梯面六角冲头磨损分布图, 如图 9a 所示, 表面最大磨损深度为 1.098×10^{-5} mm, 磨损量减小了 12.1%。冲头受力情况如图 9b 所示, 最大受力为 197 kN, 磨损量和受

力情况较优化前均有较大改善, 该梯面六角冲头的预计寿命为 5464 件, 是优化前锥面六角冲头的 1.22 倍。该冲头挤压下的零件成形情况如图 9c 所示, 六角内孔质量好, 无刮伤、缺料等问题, 外形成形完整, 中间截面流线顺滑无断裂, 有利于提高零件的力学性能。

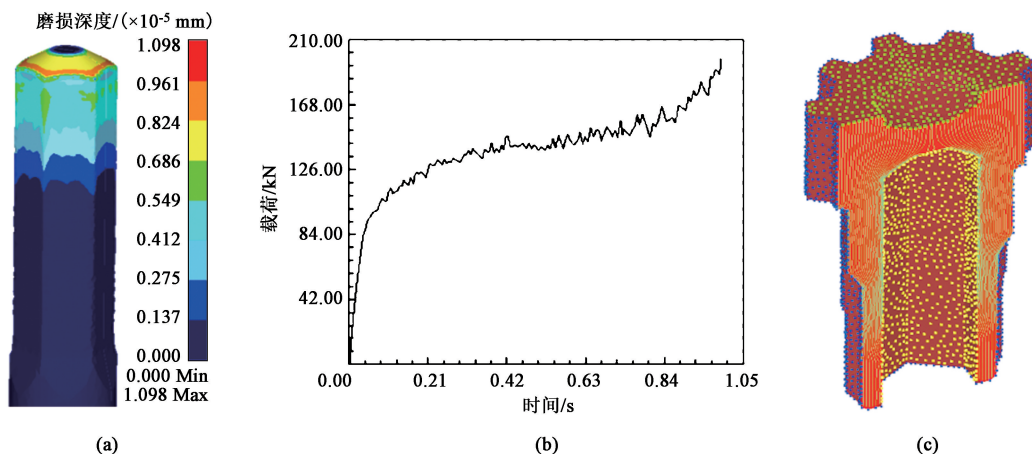


图 9 工艺参数优化后结果

(a) 尺寸改进后梯面六角冲头的表面磨损分布 (b) 冲头受力变化曲线 (c) 成形零件情况

Fig. 9 Results after process parameter optimization

(a) Surface wear distribution of trapezoidal hexagonal punch after dimension improvement (b) Variation curve of force for punch
(c) Formed part

3 冲头表面涂层研究

为进一步强化梯面六角冲头, 可在冲头表面涂覆 TiAlN 涂层, TiAlN 涂层具有较好的抗摩擦、磨损性能, 但涂层厚度过厚会影响冲头表面的粗糙度以及冲头与涂层之间的结合力^[13], 故不宜取过厚, 而涂层太薄又达不到强化效果, 浪费成本, 因此一般涂覆厚度为 $4 \mu\text{m}$ 。利用 Deform-3D 软件研究 TiAlN 涂层的减磨效果。由于需要分析冲头表面 TiAlN 涂层的磨损情况, 因此, 同样需要通过式 (2) 建立 TiAlN 涂层的磨损模型, TiAlN 涂层的磨损因子 $K'(T)$ 和硬度 $H'(T)$ 随温度变化的规律如图 10 所示, 通过求解器的二次开发嵌入到 Deform-3D 软件中。生成的 $4 \mu\text{m}$ 涂层模型如图 11a 所示, 在网格划分选项卡中添加到冲头表面, 将冲头与零件之间的摩擦因数由 0.1 改为 0.08, 其余模拟条件均维持原状, 模拟计算完成后得到图 11b 所示的涂覆涂层后的六角冲头的表面磨损分布情况。各位置磨损程度分布与未涂层冲头基本相同, 但磨损量显著减小, 表面最大磨损深度只有 0.992×10^{-6} mm。根据涂层

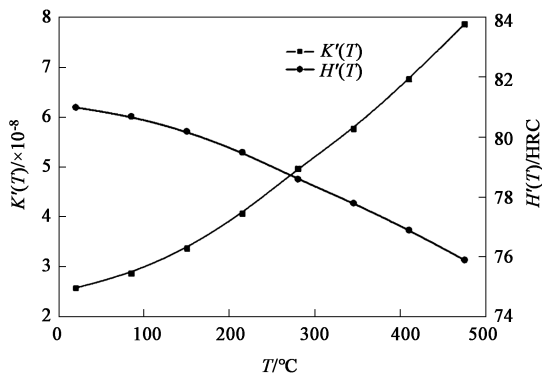


图 10 TiAlN 涂层的 $K'(T)$ 和 $H'(T)$ 随温度的变化规律

Fig. 10 Variation laws of $K'(T)$ and $H'(T)$ for TiAlN coating with temperature

厚度预计在涂层失效前可生产的零件数为 4032 件, TiAlN 涂层梯面六角冲头的总寿命为 9496 件, 是优化前锥面六角冲头的 2.12 倍。未涂层梯面六角冲头和 TiAlN 涂层梯面六角冲头的实物图如图 12 所示, 均进行了挤内孔试生产, 未涂层冲头进行了 1 次生产, 失效前生产零件 5709 件, 误差为 4.48%, TiAlN 涂层冲头进行了 3 次生产, 失效前平均生产零件 9844 件, 误差仅为 3.67%, 表明模型预测精度较高, 研究过程准确。采用涂层梯面六角冲头后,

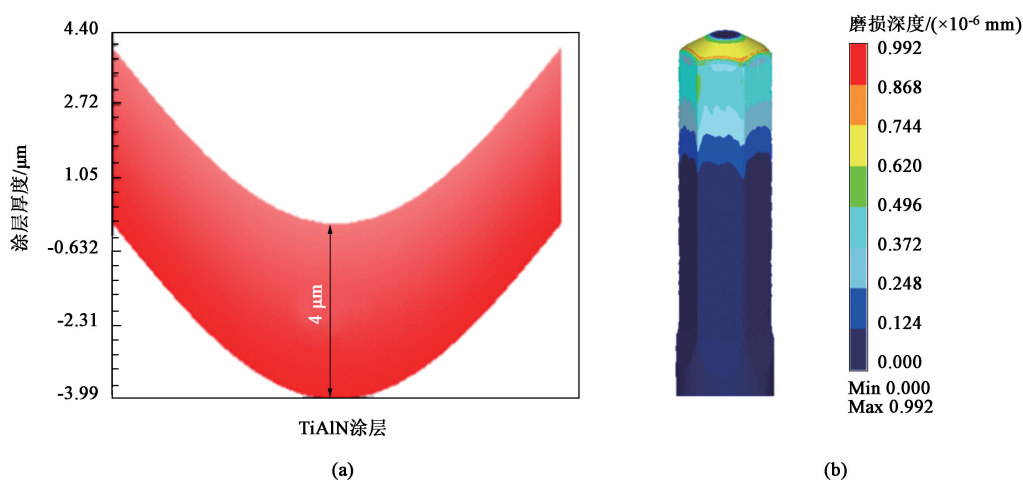


图 11 TiAlN 涂层建模与磨损结果
(a) 涂层模型 (b) 涂层冲头的表面磨损分布
Fig. 11 Modeling of TiAlN coating and wear results
(a) Coating model (b) Surface wear distribution of coated punch

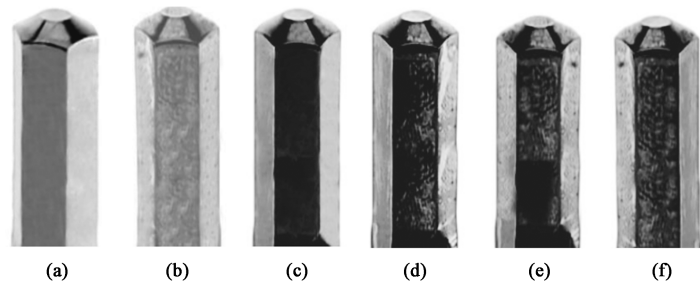


图 12 梯面六角冲头实物
(a) 无涂层、未磨损样品 (b) 无涂层、磨损 1 次样品 (c) TiAlN 涂层、未磨损样品 (d) TiAlN 涂层、磨损 1 次样品
(e) TiAlN 涂层、磨损 2 次样品 (f) TiAlN 涂层、磨损 3 次样品

Fig. 12 Physical objects of trapezoidal hexagonal punches
(a) Uncoated and unworn sample (b) Uncoated sample and worn once (c) TiAlN-coated and unworn sample (d) TiAlN coated sample and worn once
(e) TiAlN-coated sample and worn twice (f) TiAlN-coated sample and worn three times

实际冲头寿命能较未优化前提升 1.20 倍，有效解决了润远变速箱制造厂面临的难题，提高了经济效益。

4 结论

(1) 研究了加工材料 20MnCr5 合金钢的冷塑性变形规律以及六角冲头的硬度和磨损因子随温度的变化规律，从而建立了准确的材料模型和冲头磨损模型，保证了挤孔模拟试验的可靠性。

(2) 研究了 3 种不同形式的六角冲头在挤孔过程中的受力和磨损状况。结果表明，梯面六角冲头的受力和磨损更小，并基于此结果对工艺参数进行了优化，优化结果为：冲头斜角为 20°，冲头平面直径为 $\Phi 4.5\text{ mm}$ ，冲头过渡半径为 $R0.6\text{ mm}$ ，挤孔速度为 $20\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ，优化后冲头的寿命为优化前的 1.22 倍。

(3) 通过涂层磨损模型研究了 TiAlN 涂层对梯面六角冲头表面的强化作用，并通过实际生产进行了验证，结果表明，采用涂层梯面六角冲头后，冲头的寿命为优化前的 2.20 倍。

参考文献：

[1] 高琳, 史海红, 任燕. 汽车传动轴轴套的近净成形工艺研究与应用 [J]. 锻压技术, 2023, 48 (9): 23-31.
Gao L, Shi H H, Ren Y. Research and application on near net forming process for automobile transmission shaft bushing [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (9): 23-31.

[2] 王晓伟. 基于有限元分析的汽车十二角半轴螺母冷镦工艺开发与应用 [J]. 塑性工程学报, 2023, 30 (7): 62-70.
Wang X W. Development and application of cold upsetting process for automobile twelve corner half axle nut based on finite element analysis [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2023, 30 (7): 62-70.

[3] 张东民, 盛育东, 张金玉, 等. 六角开槽螺母的冷镦工艺优

- 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.
- [4] 王培安, 吴淑芳, 苗润忠, 等. 基于正交试验的活塞销挤压成形工艺研究及模具磨损分析 [J]. 铸造技术, 2018, 39 (3): 715-719, 722.
- Wang P A, Wu S F, Miao R Z, et al. Research on piston pin extrusion process based on orthogonal test and analysis of mold wear [J]. Foundry Technology, 2018, 39 (3): 715-719, 722.
- [5] 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.
- [6] 李彦奎, 吕彦明, 倪明明. 基于正交试验的航空叶片精锻模具磨损分析 [J]. 工程设计学报, 2017, 24 (6): 632-637.
- Li Y K, Lyu Y M, Ni M M. The wear analysis of precision blanking die for aviation blades based on orthogonal test [J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2017, 24 (6): 632-637.
- [7] 任燕, 石炳欣. 汽车三柱槽壳反挤压工序模拟及模具寿命提高 [J]. 锻压技术, 2023, 48 (8): 96-103.
- Ren Y, Shi B X. Simulation of backward extrusion process and improvement of mold life for automobile three-column groove shell [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (8): 96-103.
- [8] 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.
- [9] 洪永放, 庄新村, 丁振文, 等. 不同挤压次数下板料挤压凸模磨损规律研究 [J]. 塑性工程学报, 2018, 25 (5): 130-135.
- Hong Y F, Zhuang X C, Ding Z W, et al. Tool wear investigation of sheet extrusion based on continuous extrusion strokes [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2018, 25 (5): 130-135.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 李锐, 孟亮. 基于 Deform 和正交试验的汽车轮毂盖板冲压工艺参数优化 [J]. 制造技术与机床, 2021 (8): 147-150.
- Li R, Meng L. Optimization of stamping process parameters for automobile hub cover plate based on deform and orthogonal test [J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2021 (8): 147-150.
- [13] 王自龙, 王靖文. 不同厚度 TiAlN 涂层的性能影响研究 [J]. 当代化工研究, 2022 (24): 67-69.
- Wang Z L, Wang J W. Research on properties of TiAlN coatings with different thickness [J]. Modern Chemical Research, 2022 (24): 67-69.

欢迎订阅《锻压技术》杂志 (月刊)

国内外公开发行, 全国各地邮局均可订阅, 逾期未订上者可与编辑部联系邮购

《锻压技术》杂志 1958 年创刊, 中国机械工业联合会主管、中国机械总院集团北京机电研究所有限公司和中国机械工程学会塑性工程分会主办。本刊是全国锻压行业会刊, 全国中文核心期刊, 被国内外多个著名检索系统收录。突出技术内容, 注重技术和信息相结合, 全面反映锻压行业的技术进步和发展趋势。

主要栏目: 综述、锻造、板料成形、管材成形、挤压与拉拔、轧制、特种成形、装备与成套技术、模具、摩擦与润滑、加热与热处理、测试技术、节能技术、材料与成形性能、理论与实验研究、计算机应用、技术交流、标准化、行业信息等。

读者对象: 大专院校的师生, 金属塑性成形(锻压)领域的科研、设计、生产部门的工程技术人员以及中等以上文化程度的工人等。

本刊为月刊, 每月 25 日出版, 大 16 开本, 256 页。统一刊号: CN11-1942/TG。邮发代号: 2-322。

(一) 购买期刊: ● 每册定价: 25.00 元; ● 年定价: 300.00 元。

(二) 购买合订本: ● 1991-2011 年合订本 (每本包含全年 1-6 期杂志): 110 元/本;

● 2012-2013 年合订本 (每本包含全年 1-6 期杂志): 140 元/本;

● 2014-2018 年合订本 (上册) (包含上半年 1-6 期杂志)、2014-2018 年合订本 (下册)
(包含下半年 7-12 期杂志): 180 元/本。

直接通过编辑部订阅者, 请与杂志发行部负责人林玉彤联系。并按编辑部地址汇款, 款到后我们会定期寄给您刊物。

邮局汇款信息:

地址: 北京市海淀区学清路 18 号北京机电研究所有限公司 709 室

收款人: 《锻压技术》编辑部

联系人: 林玉彤 电话: 010-62920652-804

邮编: 100083

附言处: 请注明“订阅《锻压技术》”

E-mail: fst_linyutong@163.com

《锻压技术》编辑部