

汽车油管螺栓挤孔冲头磨损分析与优化

张海燕

(湛江科技学院 智能制造学院, 广东 湛江 524037)

摘要: 针对汽车油管螺栓孔成形时挤孔冲头受力大、表面磨损严重的问题, 借助 Deform-3D 软件对油管螺栓的挤孔成形过程进行数值仿真, 对冲头表面的磨损情况进行预测和优化。对油管螺栓原材料 (40CrNiMoA 钢) 的常温力学特性进行了研究, 并拟合得到了 J-C 本构方程, 从而为仿真试验结果的准确性提供了保障; 研究了冲头材料 (M2 钢) 和涂层材料 (TiAlN) 在不同温度下的硬度及磨损系数的变化规律, 建立了可靠的磨损模型; 比较了 3 种不同结构冲头的磨损、受力和温度变化等情况, 确定了更利于金属流动的冲头结构; 研究了表面涂层技术对各冲头表面磨损的影响, 并对冲头寿命进行了预测。研究结果表明: 锥面冲头的效果最好, 使用寿命最长, 并且经过涂层处理后, 冲头寿命提高至原来的 2.08 倍。

关键词: 油管螺栓; 挤孔; J-C 本构方程; 冲头结构; 表面涂层技术

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.04.005

中图分类号: TG316.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2024) 04-0041-07

Wear analysis and optimization on hole extrusion punch for automotive oil pipe bolt

Zhang Haiyan

(Intelligent Manufacturing College, Zhanjiang University of Science and Technology, Zhanjiang 524037, China)

Abstract: Aiming at the problems of heavy force and serious surface wear of extrusion punch during the forming of automotive oil pipe bolt hole, the forming process of hole extrusion for oil pipe bolt was numerically simulated by Deform-3D software to predict and optimize the wear condition on the surface of punch. Then, the mechanical properties of raw material for oil pipe bolt (40CrNiMoA steel) at room temperature were studied, and J-C constitutive equation was obtained by fitting, which provided guarantee for the accuracy of simulation test results. Furthermore, the change laws of hardness and wear coefficient of punch material (M2 steel) and coating material (TiAlN) at different temperatures were studied, and a reliable wear model was established. By comparing the wear, force and temperature change of three kinds of punches with different structures, the punch structure which was more conducive for metal flow was determined. Finally, the influence of surface coating technology on the surface wear of various punches was studied, and the service lives of punches were predicted. The results show that the cone punch has the best effect and the longest service life, and the service life of punch is increased to 2.08 times of the original punch after the coating treatment.

Key words: oil pipe bolt; hole extrusion; J-C constitutive equation; punch structure; surface coating technology

油管螺栓能起到紧固和通油的作用, 是汽车发动机燃油系统中的重要零部件, 如图 1 所示, 其结构复杂, 主要包括六角头、法兰、轴杆、深孔等特征。在以往常采用切削加工对油管螺栓进行生产, 但随着社会需求的增加、对产品质量要求的提升、制造技术的进步等诸多原因, 其生产工艺逐渐发展为效率更高、成本更低的冷锻工艺^[1-2]。但是, 在实际生产中发现其挤孔工位冲头的表面磨损比较严

重, 寿命要远低于其他模具, 导致了换模次数增加, 使得产品的生产速度以及模具的成本控制均无法达到预期, 因此, 急需优化冲头磨损情况, 并且由于受变形金属加工硬化的影响, 冷成形模具的受力较大, 其寿命问题一直是锻造行业的探讨热点^[3-5], 因此研究意义巨大。

近年来, 有限元技术被应用于大量材料成形难题的研究, 并且效果显著, 节省了大量的试验成本, 例如, 王晓伟^[6]通过有限元技术对十二角半轴螺母的冷锻工艺全过程进行了模拟, 详细分析了零件外观及内部的成形情况, 并预测了零件的开裂风险以及成形力大小等, 最终成功完成了该工艺的应用,

收稿日期: 2023-09-07; 修订日期: 2023-12-12

作者简介: 张海燕 (1983-), 女, 学士, 高级讲师

E-mail: zhanghaiyan0283@163.com

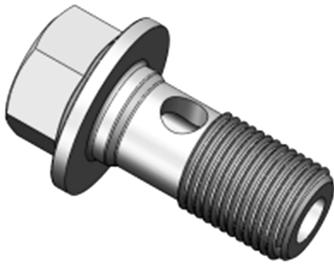


图 1 油管螺栓模型图

Fig. 1 Model diagram of oil pipe bolt

有效解决了原热锻工艺生产中的不足；薛勇等^[7]利用有限元模拟对一种螺栓的两种不同的冷挤压工艺进行了研究，对比了螺栓的成形质量及成形载荷情况，为工艺的优化提供了有效帮助，利于指导生产实践；姜天亮等^[8]为解决花键轴成形尺寸不合格的问题，利用 Deform-3D 进行了模拟研究，并确定了是由于预制坯各部位金属分配不当造成的，最后结合正交试验对预制坯各尺寸进行了优化，有效地解决了问题；范建祥等^[9]针对六角螺母终锻工位下冲头磨损快的问题，采用 Deform-3D 模拟了终锻成形过程，同时基于 Archard 磨损模型对下冲头磨损情况进行了预测，找出了关键影响因素，并基于正交试验对其进行了优化，最终有效地降低了下冲头磨损。因此，本文也以有限元技术为研究手段，对油管螺栓的挤孔成形过程进行数值仿真，以对冲头表面的磨损情况进行预测和优化。

1 油管螺栓生产工艺

油管螺栓的原材料为 40CrNiMoA 钢，该材料的冷塑性变形能力较差，因此，在成形结构复杂的零件时，通常需要经过多次变形，同时该材料在成形

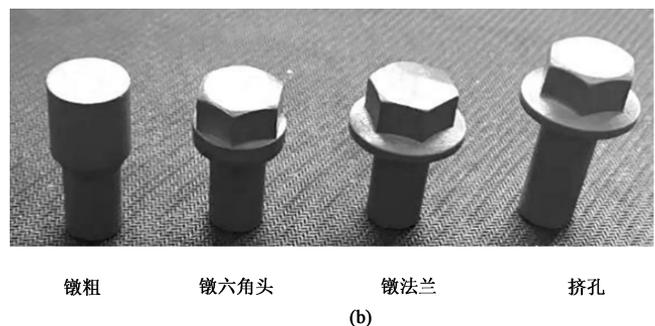
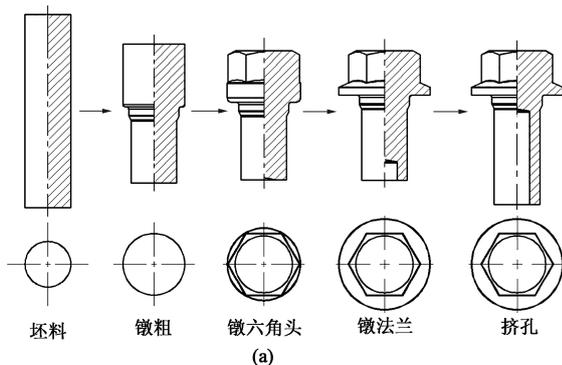


图 2 油管螺栓生产工艺

(a) 冷锻成形方案 (b) 各工位零件冷锻实物

Fig. 2 Production process of oil pipe bolt

(a) Cold heading scheme (b) Physical parts for each station in cold heading

前需要经过球化退火来改善金相组织，以提高塑性能力，从而降低开裂风险，退火后的硬度可下降至 165~180 HB 左右。根据螺栓结构可知，通过线材锻造成形时，变形较大部位主要在零件头部和心部，其中头部可通过锻粗聚料成形，而心部为深孔特征，其孔径比为 2.91，接近一次成形的极限值 3^[10]，可通过反挤压成形，经反复计算，设计了如图 2a 所示的冷锻方案。成形设备采用 TW19B-4S 冷锻机，切料、成形一次完成，第 1 步为对金属进行预分配；第 2 步为成形六角头特征；第 3 步为成形法兰特征，同时对深孔特征进行预成形，能为最终的挤孔过程起到导向作用，从而防止偏心现象；第 4 步为成形深孔。最终冷锻结果如图 2b 所示，各工位零件均成形饱满，零件外观及内部检测均无缺陷，完全满足要求，但用于生产后发现，其挤孔工位冲头的表面磨损比较严重，寿命要远低于其他模具，导致了换模次数增加，影响了产品生产效率和成本。考虑到该生产工艺是可行的，仅挤孔工位下冲头的寿命无法达到预期，为降低风险，避免影响生产进度，保持工艺和其他模具结构不变，对冲头结构进行优化，通过改善孔成形时的金属流动情况以降低冲头的磨损程度，同时研究了表面涂层技术对冲头抗磨损能力的影响。

2 仿真试验模型的建立

2.1 40CrNiMoA 钢材料模型的建立

为了保证仿真试验结果对实际生产具有指导意义，必须按生产原材料建立精确的材料模型，因此，对退火后的 40CrNiMoA 钢线材进行制样并通过材料试验机进行常温压缩试验。根据试验可得到不同条

件下的 40CrNiMoA 钢的工程应力-工程应变曲线，而工程应力与工程应变之间的关系可根据式 (1) 和式 (2) 转化为真实应力和真实应变之间的关系，最终转化结果如图 3 所示。由于材料挤压过程中存在加工硬化现象和变形热效应，因此，采用 Johnson-Cook(J-C) 本构方程更能准确地描述出材料的力学行为^[11]，其数学模型如式 (3) 所示。

$$\varepsilon_{\text{真实}} = \ln(1 + \varepsilon_{\text{工程}}) \quad (1)$$

$$\sigma_{\text{真实}} = \sigma_{\text{工程}} \times (1 + \varepsilon_{\text{工程}}) \quad (2)$$

$$\sigma = (A + B\varepsilon_e^n) \left[1 + C \ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}_e}{\dot{\varepsilon}_0}\right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_0}{T_1 - T_0}\right)^m \right] \quad (3)$$

式中： $\varepsilon_{\text{真实}}$ 为真实应变； $\sigma_{\text{真实}}$ 为真实应力； $\varepsilon_{\text{工程}}$ 为工程应变； $\sigma_{\text{工程}}$ 为工程应力； σ 为流动应力； ε_e 为塑性应变； $\dot{\varepsilon}_e$ 为塑性应变速率； $\dot{\varepsilon}_0$ 为参考应变速率，一般为 0.001 s^{-1} ； T 为材料温度； T_0 为室温 ($20 \text{ }^\circ\text{C}$)； T_1 为 40CrNiMoA 钢的熔点温度 ($1460 \text{ }^\circ\text{C}$)； A 、 B 、 C 、 m 、 n 为材料常数。

材料常数可通过压缩试验结果推导获得，结果如表 1 所示，将数据输入 Deform-3D 中即可生成新的材料模型，保存后用于后续仿真试验。

2.2 挤孔模型的建立

首先，通过 UG 软件对挤孔工位的零件和模具进行三维建模，其中各模具结构可进行简化，仅需

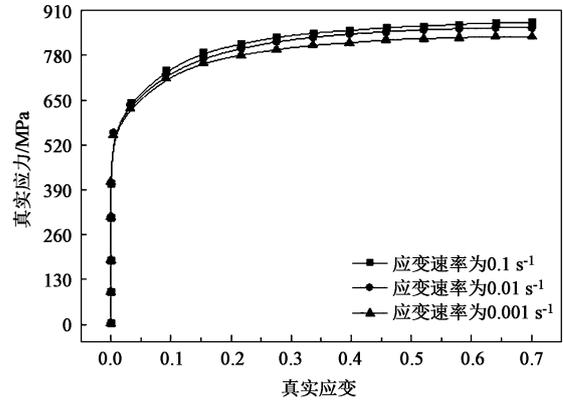


图 3 常温下 40CrNiMoA 钢在不同条件下的真实应力-真实应变关系曲线

Fig. 3 True stress-true strain relationship curves of 40CrNiMoA steel under different conditions at room temperature

表 1 40CrNiMoA 钢的本构模型常数

Table 1 Constitutive model constants of 40CrNiMoA steel

参数	A/MPa	B/MPa	C	m	n
数值	542.3	407.8	0.02465	0.3981	0.3182

保证成形需要的特征即可，需要研究的 3 种冲头结构如图 4 所示，图 4a~图 4c 依次为平面冲头、锥面冲头以及半球冲头，其中平面冲头为现工艺采用的冲头结构。完成各对象建模和位置关系装配后，以 STL 格式导入 Deform-3D 中，将零件设置为塑性体，

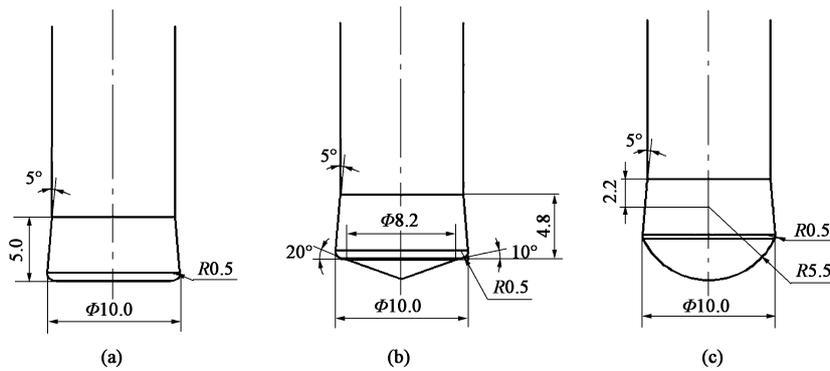


图 4 冲头结构

(a) 平面冲头 (b) 锥面冲头 (c) 半球冲头

Fig. 4 Punch structures

(a) Plane punch (b) Conical punch (c) Hemispherical punch

并选择建立的 40CrNiMoA 钢材料，模具设置为刚体。按实际情况分别设置材料，其中下冲头材料为 M2 钢，材料参数如表 2 所示，零件和模具均通过四面体网格进行划分，其中对下冲头头部进行网格细化以更好地观察表面的磨损情况^[12]。当研究涂层冲

头时，可在网格划分选项的详细设置中对冲头表面添加 TiAlN 涂层材料，同时为了保证 TiAlN 涂层与 M2 钢之间的结合力，根据经验设置涂层厚度为 $4 \mu\text{m}$ ，最终建立的挤孔模型如图 5 所示。挤孔过程采用了浮动模具结构^[13]，因此，上冲头、上模

表 2 M2 钢的材料参数

Table 2 Material parameters of M2 steel

参数	硬度/ HRC	弹性模量/ GPa	比热容/ (J · (g · °C) ⁻¹)	密度/ (g · cm ⁻³)
数值	65	209	0.46	7.85

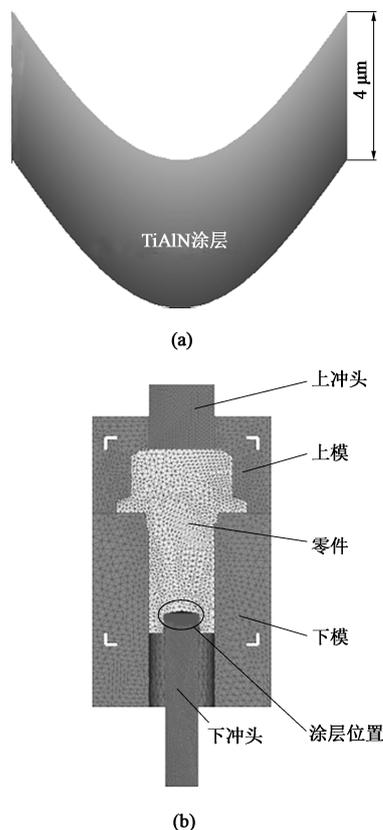


图 5 挤孔有限元模型

(a) 涂层模型 (b) 挤孔模型

Fig. 5 Finite element models of hole extrusion
(a) Coating model (b) Hole extrusion model

及下模均为运动件，速度按照 $60 \text{ 件} \cdot \text{min}^{-1}$ 进行设置，成形温度设置为室温，同时需考虑摩擦与变形热效应的影响，设置成形时的摩擦因数和传热因子分别为 0.12 和 $22.3 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ 。

2.3 磨损模型的建立

通过生产数据可知，当平面冲头的平均挤孔次数达到 4250 次后，螺栓深孔表面会逐渐出现拉毛缺陷，需要立即更换，由三坐标测量仪可测得冲头表面的局部最大磨损深度在 0.075 mm 左右，因此，可以此作为冲头的失效标准。基于此采用经典的 Archard 模型^[14]，数学模型如式 (4) 所示。

$$W = \int K \frac{Pv}{H^2} dt \quad (4)$$

式中： W 为磨损深度； K 为磨损系数； P 为模具表

面的压力； v 为滑移速度； H 为硬度； t 为时间。

但深孔挤压时会产生大量的热量，使冲头表面温度升高，从而影响冲头材料性能及涂层材料性能，使硬度等发生变化，因此，需要对磨损模型进行改进，优化为如式 (5) 所示的模型。

$$W(T) = \int K(T) \frac{Pv}{[H(T)]^2} dt \quad (5)$$

式中： $W(T)$ 、 $K(T)$ 、 $H(T)$ 分别为不同温度下的磨损深度、磨损系数及硬度。

冲头材料 (M2 钢) 和涂层材料 (TiAlN) 在不同温度下的硬度及磨损系数的变化规律可分别利用硬度试验和摩擦磨损试验获得，试验结果如图 6 所示，通过多项式拟合，可得到如式 (6) ~ 式 (9) 所示的数学模型，通过子程序接口导入至 Deform-3D 软件。

$$H_1(T) = -4.46429 \times 10^{-5} T^2 + 1.85 \times 10^{-3} T + 64.90595 \quad (6)$$

$$H_2(T) = -1.42196 \times 10^{-5} T^2 - 4.25 \times 10^{-3} T + 82.17407 \quad (7)$$

$$K_1(T) = 3.72024 \times 10^{-5} T^2 + 6.84524 \times 10^{-4} T + 16.48393 \quad (8)$$

$$K_2(T) = 1.68155 \times 10^{-5} T^2 + 3.42 \times 10^{-3} T + 1.73942 \quad (9)$$

式中： $H_1(T)$ 和 $H_2(T)$ 分别为不同温度下 M2 钢和 TiAlN 涂层的硬度； $K_1(T)$ 和 $K_2(T)$ 分别为不同温度下 M2 钢和 TiAlN 涂层的磨损系数。

3 结果分析与寿命预测

经模拟，得到不同冲头的表面温度情况如图 7 所示，材料与冲头间的高速摩擦使得冲头表面温度上升明显，各冲头表面局部最高温度分别达到了 404、346 和 372 °C，温度越高，对冲头产生的软化作用就越明显，会加快冲头的磨损，因此，采用锥面冲头的效果会更好。不同冲头的受力情况如图 8 所示，冲头受力越小，冲头单次挤孔后受到的损伤就越小，有利于降低磨损。由图 8 可知，平面冲头的最大受力在 180 kN 左右，半球冲头的最大受力在 140 kN 左右，锥面冲头的最大受力在 100 kN 左右，因此，采用锥面冲头时，深孔成形时金属的流动性更好，利于成形。

不同冲头的磨损结果如图 9 所示，与上述分析一致，锥面冲头的磨损情况更好些，其表面最大磨

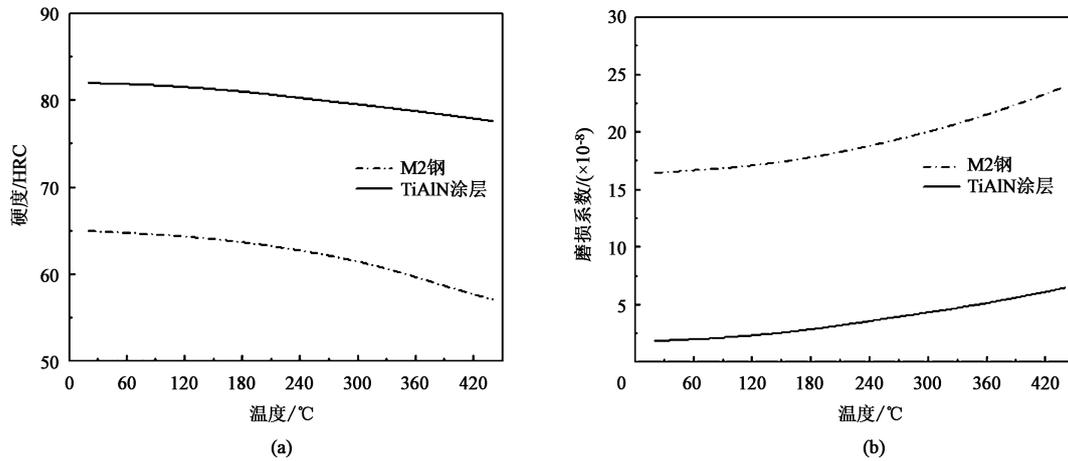


图 6 不同温度下硬度 (a) 及磨损系数 (b) 的变化规律

Fig. 6 Change laws of hardness (a) and wear coefficient (b) at different temperatures

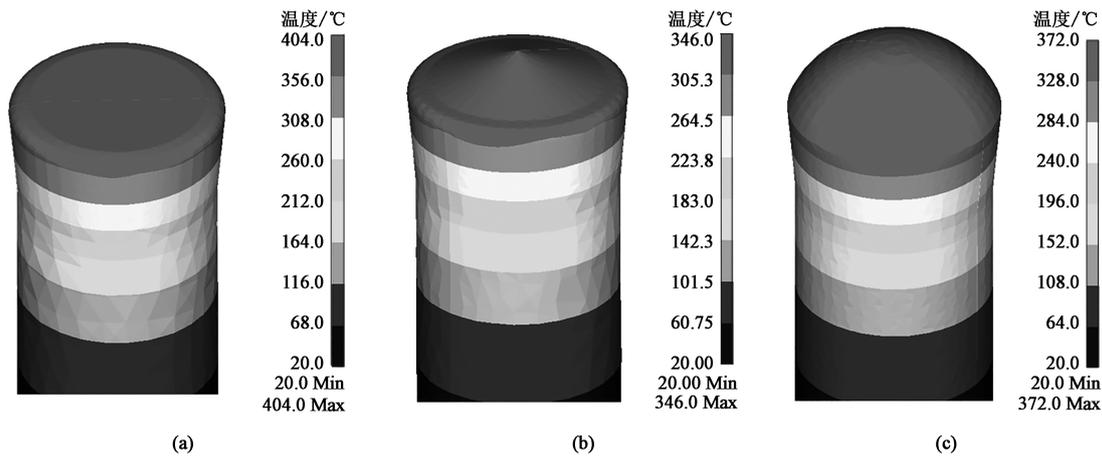


图 7 不同冲头的温度分布

(a) 平面冲头 (b) 锥面冲头 (c) 半球冲头

Fig. 7 Temperature distributions of different punches

(a) Plane punch (b) Conical punch (c) Hemispherical punch

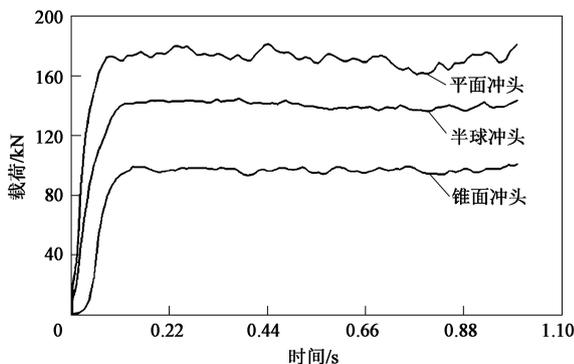


图 8 不同冲头的受力情况

Fig. 8 Force conditions of different punches

损深度为 1.507×10^{-5} mm，而平面冲头和半球冲头的表面最大磨损深度分别达到了 1.803×10^{-5} 和 1.659×10^{-5} mm。平面冲头的预测寿命为 4159 次，与实际平均寿命相比，误差仅为 2.14%，说明预测

精度较高，以上建模与分析过程比较可靠，能够用于指导实际生产中冲头结构的优化。同理可知，锥面冲头和半球冲头的预测寿命分别为 4976 和 4520 次，采用锥面冲头后，冲头寿命能提高至原来的 1.17 倍左右。涂覆 TiAlN 涂层后不同冲头的磨损结果如图 10 所示，与未涂层冲头相比，磨损严重的面积及磨损程度均得到了较大改善，各冲头最大磨损深度分别为 1.287×10^{-6} 、 1.075×10^{-6} 和 1.173×10^{-6} mm，根据涂层厚度可预测涂层磨损时期，各冲头的寿命分别为 3108、3720 和 3410 次，加上冲头基体磨损时期的寿命，总寿命能够分别达到 7267、8696 和 7930 次。结果表明，实际生产中若采用涂层后锥面冲头，冲头寿命能够提高至原来的 2.05 倍左右。各挤孔冲头实物如图 11a 所示，经生产验证，均能满足挤孔要求，并且实际使用寿命与模拟预测结果

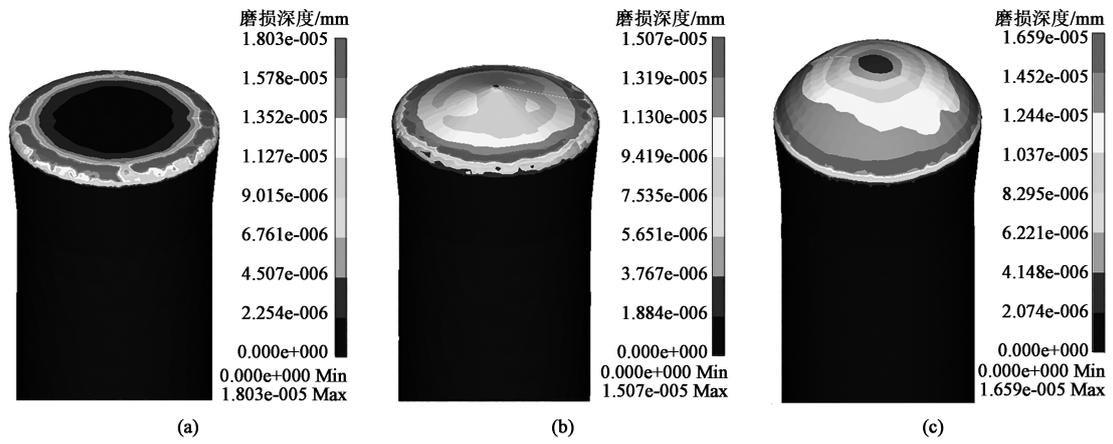


图 9 不同冲头的磨损情况

(a) 平面冲头 (b) 锥面冲头 (c) 半球冲头

Fig. 9 Wear conditions of different punches

(a) Plane punch (b) Conical punch (c) Hemispherical punch

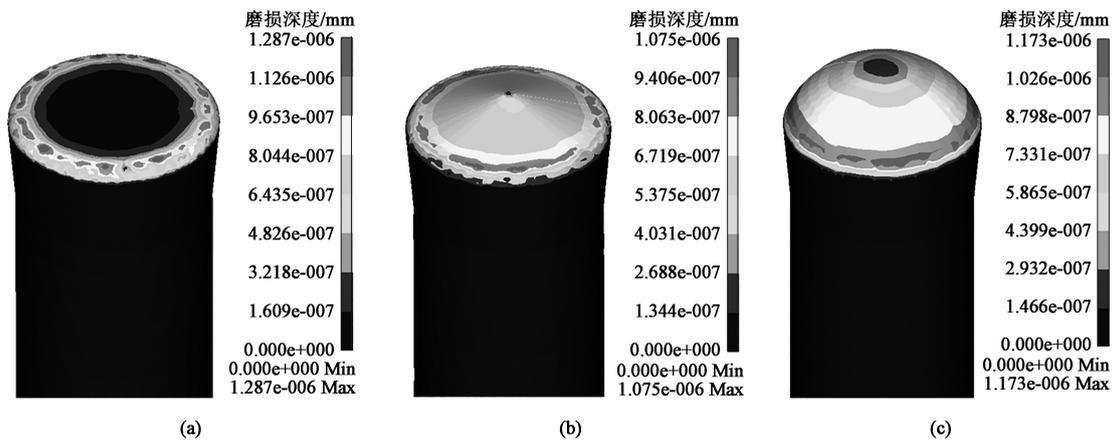


图 10 涂覆 TiAlN 涂层后不同冲头的磨损情况

(a) 平面冲头 (b) 锥面冲头 (c) 半球冲头

Fig. 10 Wear conditions of different punches with TiAlN coating

(a) Plane punch (b) Conical punch (c) Hemispherical punch

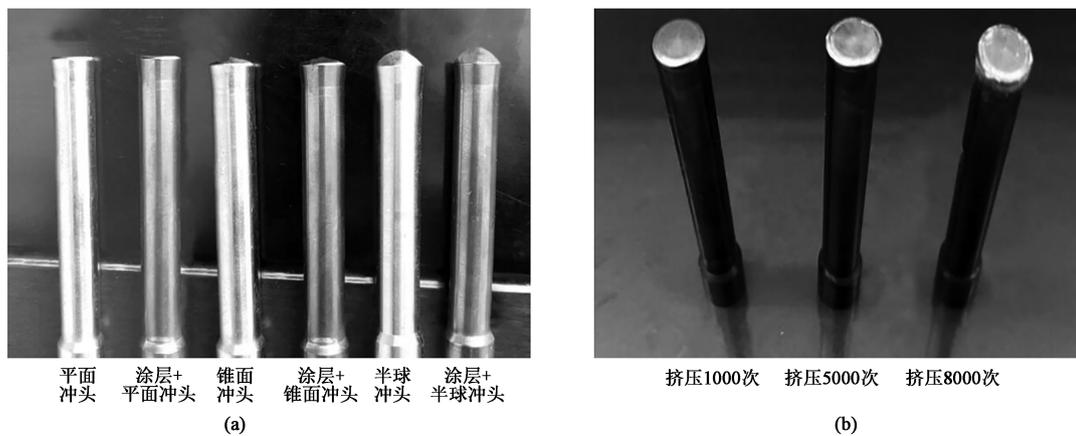


图 11 挤孔冲头实物图

(a) 不同冲头 (b) 不同挤压次数后的 TiAlN 涂层锥面冲头

Fig. 11 Physical diagrams of hole extrusion punches

(a) Different punches (b) Conical punches with TiAlN coating after different extrusion times

基本相符。其中 TiAlN 涂层锥面冲头经过长期生产统计, 平均挤孔次数达到 8839 次后开始出现拉毛缺陷, 其不同挤压次数后的实际磨损情况如图 11b 所示, 该冲头寿命为原冲头寿命的 2.08 倍, 其使用有效地解决了汽车油管螺栓孔成形时挤孔冲头受力大、表面磨损严重的问题, 降低了换模次数, 促进了油管螺栓生产速度的提高。

4 结论

(1) 得到了油管螺栓原材料 (40CrNiMoA 钢) 的常温力学特性, 并拟合得到了 J-C 本构方程, 在模拟试验中能较好地反映材料真实的力学行为。

(2) 得到了冲头材料 (M2 钢) 和涂层材料 (TiAlN) 在不同温度下的硬度及磨损系数的变化规律, 并拟合得到了数学模型, 在模拟试验中能较好地反映冲头真实的磨损行为。

(3) 比较了 3 种不同结构冲头的磨损、受力、温度等变化情况, 得出了锥面冲头效果更好的结论, 同时研究了表面涂层技术对冲头寿命的提升作用, 采用 TiAlN 涂层锥面冲头, 冲头寿命能提高至原来的 2.08 倍。

参考文献:

- [1] 王敏. 基于 DEFORM-3D 汽车球头销冷挤压成形工艺研究 [J]. 机床与液压, 2018, 46 (16): 1-6.
Wang M. Study on cold extrusion forming technology of automobile ball head pin based on DEFORM-3D [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2018, 46 (16): 1-6.
- [2] 陈永强, 陈玉, 杨群. SCM435 合金钢接头的冷锻工艺研究与数值模拟 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (11): 28-35.
Chen Y Q, Chen Y, Yang Q. Research and numerical simulation on cold heading process of SCM435 alloy steel joint [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (11): 28-35.
- [3] 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.
- [4] 赵霞, 王霄. 基于数值模拟驱动的斜花齿零件冷挤压成形工艺参数优化 [J]. 机械设计与制造工程, 2021, 50 (4): 17-20.
Zhao X, Wang X. Process parameters optimization of cold extrusion forming for the oblique tooth parts based on numerical simulation driving [J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2021, 50 (4): 17-20.
- [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] 王晓伟. 基于有限元分析的汽车十二角半轴螺母冷锻工艺开发与应用 [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.
- [7] 薛勇, 杜玥, 于建民, 等. 内六方通孔圆柱螺栓精密冷挤压成形工艺研究 [J]. 塑性工程学报, 2017, 24 (2): 99-104.
Xue Y, Du Y, Yu J M, et al. Precision cold extrusion process of internal hexagon hollow bolt [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2017, 24 (2): 99-104.
- [8] 姜天亮, 龚红英, 赵小云, 等. 基于 DEFORM-3D 的花键轴坯料结构尺寸优化设计 [J]. 塑性工程学报, 2020, 27 (6): 111-115.
Jiang T L, Gong H Y, Zhao X Y, et al. Optimum design of spline shaft blank structure dimension based on DEFORM-3D [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2020, 27 (6): 111-115.
- [9] 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.
- [10] 王培安, 吴淑芳, 郭欢欢. 前筒挤压成形方案分析与参数优化 [J]. 西华大学学报: 自然科学版, 2019, 38 (3): 32-42.
Wang P A, Wu S F, Guo H H. Analysis and parameter optimization of extrusion forming process of the front tube [J]. Journal of Xihua University: Natural Science Edition, 2019, 38 (3): 32-42.
- [11] 王运, 张昌明, 张昱. 航空 Al7050 合金的静动态力学特性研究及 JC 本构模型构建 [J]. 材料导报, 2021, 35 (10): 10096-10102.
Wang Y, Zhang C M, Zhang Y. Study on static and dynamic mechanical properties of aviation Al7050 alloy and construction of JC constitutive model [J]. Materials Reports, 2021, 35 (10): 10096-10102.
- [12] 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.
- [13] 闫培泽. 基于有限元模拟的汽车专用异形螺母冷锻缺陷分析与改进 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (12): 21-26.
Yan P Z. Analysis and improvement on cold heading defect of special-shaped nuts for automobile based on finite element simulation [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (12): 21-26.
- [14] 张东民, 吕雷雷, 朱景秋, 等. 锁紧座冷成形模具磨损分析与参数优化 [J]. 热加工工艺, 2020, 49 (7): 119-122.
Zhang D M, Lyu L L, Zhu J Q, et al. Wear analysis and parameter optimization of cold forming die for locking seat [J]. Hot Working Technology, 2020, 49 (7): 119-122.