

手柄螺丝冷镦分析及参数优化

琚 垚^{1,2}

(1. 新乡职业技术学院 交通学院, 河南 新乡 453000; 2. 乌克兰苏梅国立农业大学 技术服务部, 乌克兰 苏梅 40021)

摘要: 为了解决一种手柄螺丝车削加工生产速度慢、材料利用率低的问题, 设计了缩径、预镦、终成形的 3 工位冷镦成形工艺。通过 Deform-3D 完成了整个工艺过程的有限元建模, 预测了成形结果, 分析了工艺的合理性。并且为降低预镦及终成形工位的成形载荷, 以满足成形要求为前提, 利用正交试验法研究了预镦工位零件的上锥角、下锥角、头部下圆直径以及下锥面高度等关键尺寸参数对成形载荷的影响, 并结合极差分析法进行了优化。优化后的参数为: 上锥角为 10°、下锥角为 8°、头部下圆直径为 $\Phi 14.8$ mm、下锥面高度为 5.5 mm, 两工位的成形载荷分别降低了 22.2% 和 23.5%。最后, 进行了手柄螺丝的实际成形试验, 成形情况较好, 通过显微组织分析, 未检测出明显缺陷, 其尺寸、性能均能满足厂家需求, 说明该工艺可取代车削加工工艺。

关键词: 手柄螺丝; 冷镦成形; 成形载荷; 尺寸优化; 显微组织

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.06.004

中图分类号: TG316.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2024) 06-0034-09

Analysis on cold heading of handle screw and parameter optimization

Ju Yao^{1,2}

(1. School of Transportation, Xinxiang Vocational and Technical College, Xinxiang 453000, China;

2. Technical Services Department, Sumy National Agrarian University, Sumy 40021, Ukraine)

Abstract: In order to solve the problem of slow production speed and low material utilization rate for a kind of handle screw in turning process, a three-station cold heading process of necking, pre-upsetting and final forming was designed, and the finite element modeling of the whole process was completed by Deform-3D to predict the forming results and analyse the rationality of the process. Then, in order to reduce the forming load of the pre-upsetting and final forming stations and meet the forming requirements, the influence of key dimensional parameters such as upper cone angle, lower cone angle, head lower circle diameter and lower cone height of the pre-upsetting station part on the forming load was studied by the orthogonal experimental method, and the optimization was carried out by range analysis method. The results show that the optimized parameters are as follows: the upper cone angle is 10°, the lower cone angle is 8°, the head lower circle diameter is $\Phi 14.8$ mm, and the lower cone height is 5.5 mm, and the forming loads of the two stations are reduced by 22.2% and 23.5% respectively after optimization. Finally, the actual forming experiments are conducted on the handle screw, and the forming condition is good. Through the microstructure analysis, no obvious defects are detected. Thus, its size and performance meet the requirements of manufacturer, which indicating that this process can replace the turning process.

Key words: handle screw; cold heading; forming load; size optimization; microstructure

手柄螺丝是生活中较为常见的一种紧固件, 在汽车、航空航天、机械设备、电子设备、家庭器具等领域均有非常广泛的应用, 能够起到连接、快速调节的作用, 社会需求量极大。受其结构影响, 该零件普遍采用车削加工后搓丝的生产方式, 其材料利用率小于 23%, 随着原材料价格的不断上涨, 在

当前这种经济发展受阻、竞争激烈的社会形式下, 必须降低生产成本, 同时提高生产速度, 保证质量, 才能取得竞争优势, 其中最有效的措施即工艺创新, 采用精密成形技术来解决问题^[1-3], 因此, 本文针对该手柄螺丝提出了一种缩径、预镦、终成形的 3 工位冷镦成形工艺。此外, 为了促进研发质量, 避免不可控的成形缺陷, 通过专用软件 Deform-3D 对手柄螺丝的整个工艺过程进行有限元建模及成形模拟^[4-6], 实时掌控成形时金属的变形情况以及成形后零件的最终情况, 从而能更有效地优化或调整工艺, 帮助提高最终工艺的合理性及优越性, 为后续

收稿日期: 2023-11-14; 修订日期: 2024-02-19

基金项目: 2024 年度河南省高等教育 (高等职业教育类) 教学改革研究与实践项目 (273)

作者简介: 琚 垚 (1983-), 男, 硕士, 副教授

E-mail: juyao831214@163.com

的实际生产应用提供坚实的基础。

1 手柄螺丝成形工艺设计

手柄螺丝零件图如图 1a 所示, 属于典型的回转体零件, 由手柄部和杆部组成, 手柄部的滚花和杆部的螺纹可分别通过滚花轮和搓丝获得。手柄螺丝材料为 45 钢, 具有良好的综合力学性能, 其冷成形性能一般, 退火软化后的变形程度在 60% 左右。由图 1a 可知, 手柄部尺寸与杆部尺寸相差较大, 一次冷镦成形, 零件变形量极大, 会直接导致零件开裂, 因此, 通过计算合理分配后, 制定了 3 工位成形工艺, 如图 1b 所示。其中, 坯料尺寸为 $\Phi 12 \text{ mm} \times 46.5 \text{ mm}$, 可通过线径为 $\Phi 12 \text{ mm}$ 的盘条直接下料获得; 工位 1 为缩径, 用于成形螺丝的杆部, 利于后续工位成形时零件的定位; 工位 2 为预镦, 用于对头部材料进行预分配, 便于终成形; 工位 3 为终成形。

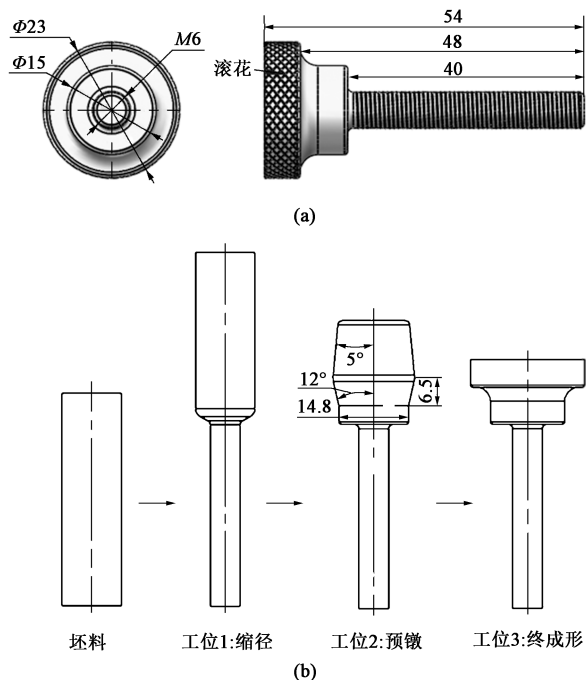


图 1 手柄螺丝零件图 (a) 及成形工艺 (b)

Fig. 1 Part drawing (a) and forming process (b) of handle screw

2 工艺建模与分析

2.1 有限元模型的建立

根据成形工艺图设计各工位对应的模具结构, 同时利用 UG 完成三维建模, 为更好地观察模拟成形时各工位零件的变形过程, 取 1/2 模型进行模拟, 正确调整坯料与模具之间的装配关系, 避免干涉问题后以 STL 格式导出。首先, 进行缩径工位的有限

元建模, 将坯料及对应的模具导入 Deform-3D 中, 坯料选为塑性体, 由于 45 钢在冷镦前的软化处理过程基本类似, 因此, 其材料模型可参考赵庆雨等^[7]建立的模型, 流变曲线导入结果如图 2 所示, 采用绝对划分法通过四面体网格对坯料进行分割, 设定最小网格尺寸为 0.1 mm, 后续模拟步长可取该值的 1/3~1/10^[8]; 模具选择为刚体, 其中凸模为运动件, 需按设计要求施加一定速度, 设置为 $15 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 其余模具均为固定件, 成形时金属与模具间的相对流动会产生摩擦, 因此, 设定摩擦因数为 0.12; 成形环境为室温, 但高速冷镦会产生变形热和摩擦热, 因此, 设定热传递系数为 $11 \text{ N} \cdot (\text{s} \cdot \text{mm} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ 。完成模拟控制条件设置后开始进行模拟, 结束后再依次进行预镦工位和终成形工位的有限元建模与模拟, 过程类似。各工位的有限元模型建模情况如图 3 所示。

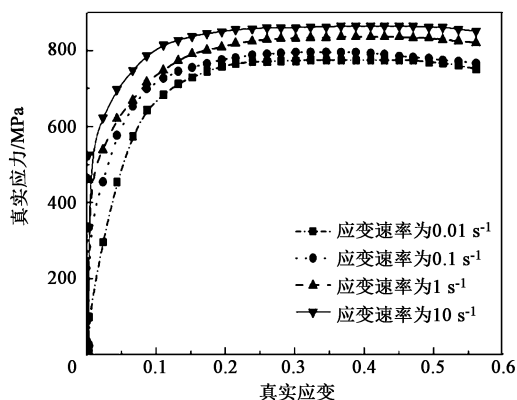


图 2 45 钢的流变曲线

Fig. 2 Rheological curves of 45 steel

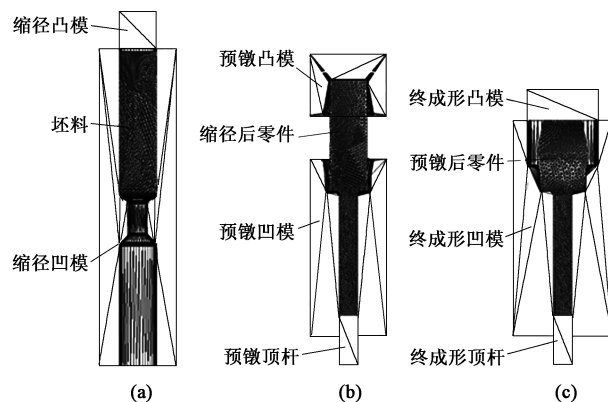


图 3 各工位有限元模型

(a) 缩径工位 (b) 预镦工位 (c) 终成形工位

Fig. 3 Finite element models for each station

(a) Necking station (b) Pre-upsetting station

(c) Final forming station

2.2 成形情况分析

手柄螺丝各工位成形时的金属流动过程如图 4

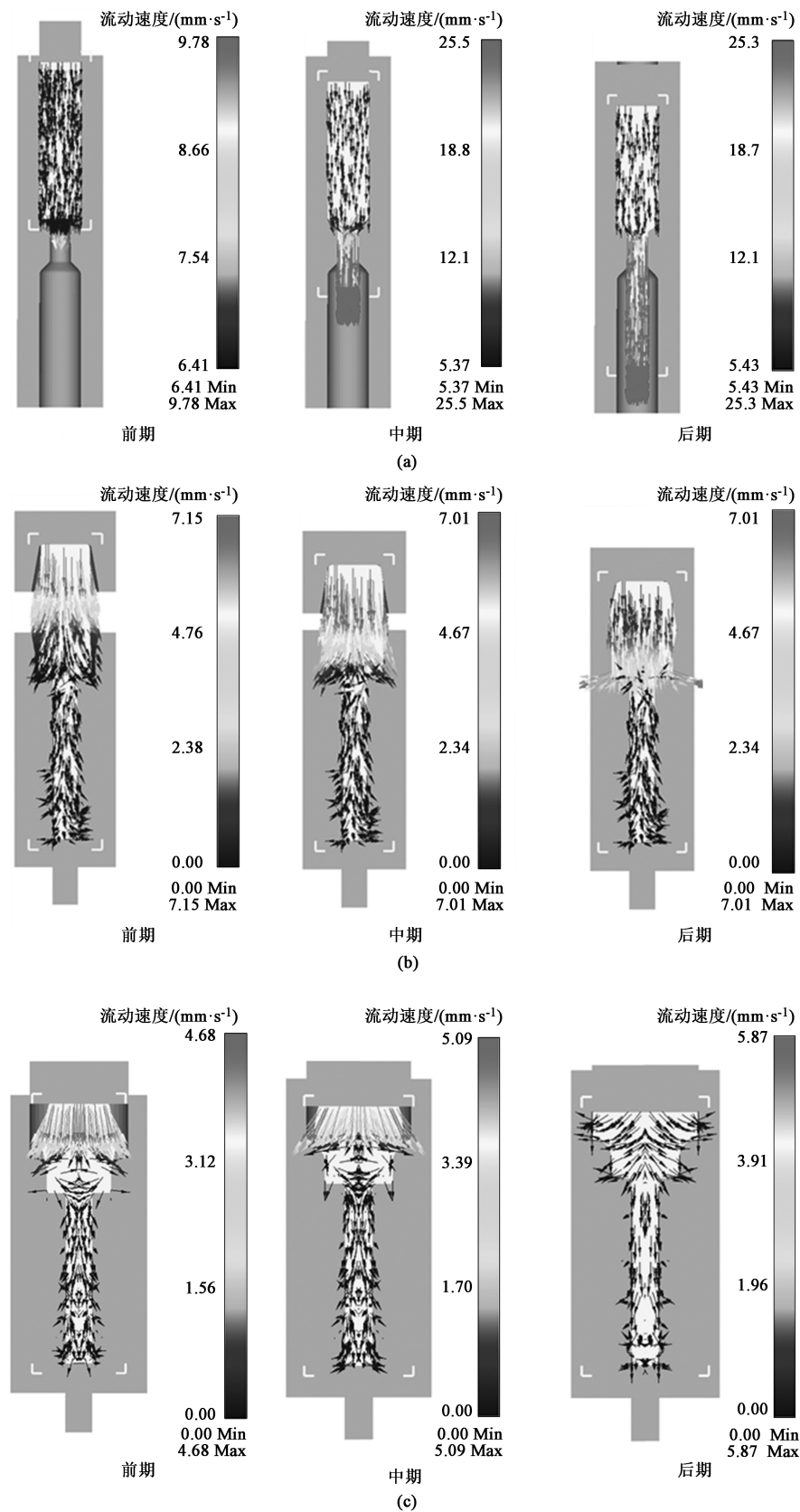


图 4 各工位金属流动过程

(a) 缩径工位 (b) 预锻工位 (c) 终成形工位

Fig. 4 Metal flow processes of each station

(a) Necking station (b) Pre-upsetting station (c) Final forming station

所示。缩径时, 金属在缩径凸模的镦挤下沿着凹模壁向下流动, 由于模具为非封闭式结构, 因此, 向下流动的金属不受约束, 金属的流动速度相对较快, 但成形过程中金属不存在异常流动现象, 成形后零件内部的流线情况如图 5a 所示, 无折叠等不良缺陷; 零件成形结果如图 6a 所示, 由于凹模自身结构原因, 零件区域 I 不与凹模接触, 其余表面均与模腔充分接触, 说明成形饱满, 零件外形尺寸能满足设计要求。缩径工位的载荷变化情况如图 7 所示, 载荷先稳定增

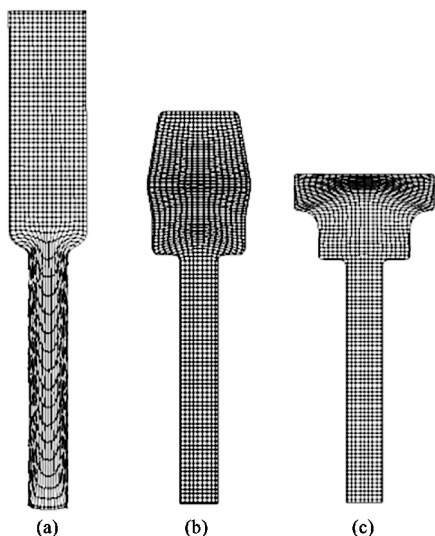


图 5 各工位零件内部流线情况

(a) 缩径工位 (b) 预镦工位 (c) 终成形工位

Fig. 5 Internal streamline situation of parts at each station

(a) Necking station (b) Pre-upsetting station
(c) Final forming station



图 6 各工位零件成形结果

(a) 缩径工位 (b) 预镦工位 (c) 终成形工位

Fig. 6 Forming results of parts at each station

(a) Necking station (b) Pre-upsetting station
(c) Final forming station

长后趋于平稳, 这是因为: 到了成形后期, 变形后的零件已经与模具型腔完全接触, 接触面积不再增加, 摩擦阻力不再上升, 最大载荷为 259 kN 左右。

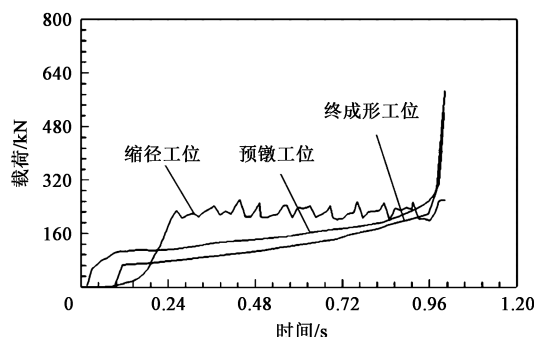


图 7 各工位载荷随时间的变化曲线

Fig. 7 Variation curves of load at each station with time

预镦时, 变形主要发生在零件上部, 从截面看, 受镦挤的金属由于受到顶杆和凹模型腔的制约, 仅能朝两边流动, 金属流向相反, 因此, 不会形成金属折叠等问题, 成形后零件内部流线情况如图 5b 所示, 分布有序; 零件成形结果如图 6b 所示, 零件外表面被接触节点包围, 与模具充分接触, 成形零件能达到尺寸要求; 预镦工位载荷变化情况如图 7 所示, 由于设计为封闭式模具结构, 载荷整个过程均稳定增长, 最大载荷为 522 kN 左右。

终成形时, 变形也发生在零件上部, 也是镦粗过程, 与预镦工位变形过程相似, 因此, 也不存在金属异常流动的现象, 成形后零件内部流线情况如图 5c 所示, 未见缺陷; 零件成形结果如图 6c 所示, 表面接触节点分布均匀饱满, 说明获得的零件外形尺寸能满足设计要求; 工位 3 的载荷变化情况如图 7 所示, 同样设计为封闭式模具结构, 载荷始终稳定增长并在成形结束时达到最大, 最大载荷为 587 kN 左右。

各工位零件的等效应力分布情况如图 8 所示, 等效应力是为了抵抗外力而产生的内力, 通过等效应力分析可以直观了解应力集中部位, 如缩径工位的应力主要集中在凹模出模口, 预镦工位的应力主要集中在零件头部, 终成形工位的应力主要集中在零件顶部, 能够有效指导后续模具结构的设计。同时, 可知各工位零件最大等效应力值分别为 914、907 和 909 MPa, 对比不同模具材料的许用应力, 为模具材料的确定提供依据, 从而降低实际生产中模具的开裂风险。综上分析可知, 设计的 3 工位镦挤成形工艺比较合理, 各工位成形过程中均未出现成形缺陷, 并且最终零件能达到外形尺寸要求, 但预

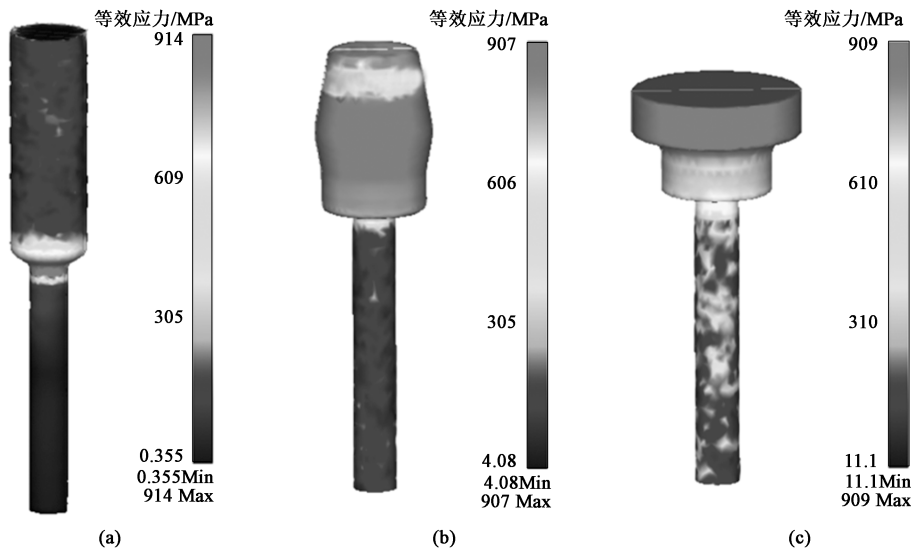


图 8 各工位零件等效应力分布
(a) 缩径工位 (b) 预镦工位 (c) 终成形工位

Fig. 8 Distributions of equivalent stress for parts at each station
(a) Necking station (b) Pre-upsetting station (c) Final forming station

镦及终成形工位的成形载荷相比于缩径工位要大很多，因此，考虑对预镦工位的零件尺寸进行优化，以改善成形时的金属流动情况，从而降低成形阻力。

3 工艺优化

预镦零件的关键尺寸参数如图 9 所示，分别为上锥角 α 、下锥角 β 、头部下圆直径 D 以及下锥面高度 H ，因此，选取这 4 个参数作为优化对象，以预镦工位及终成形工位最大载荷作为优化目标，并通过正交试验法进行方案设计与分析^[9-10]，同时通过数值模拟进行载荷数据的获取。根据设计经验，在各参数的合理区间内分别取 4 个水平，得到的 16 组方案以及两个工位对应的最大载荷数据如表 1 所示，其中第 4 组方案即为优化前尺寸参数。

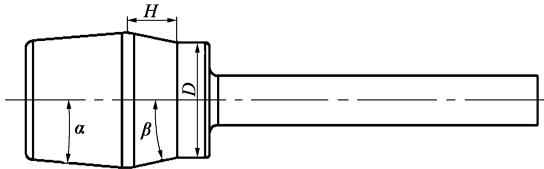


图 9 预镦零件关键尺寸参数
Fig. 9 Key dimensional parameters of pre-upsetting part

极差分析简单、可靠，通过对不同方案下的载荷数据进行极差计算能快速了解各尺寸参数对载荷的影响程度^[11]，极差数值越大表示该参数越重要，选择时更需要慎重，最终计算结果见表 2 和表 3。

表 1 设计方案及载荷模拟结果

Table 1 Design schemes and load simulation results

方案	上锥角 $\alpha/(\circ)$	下锥角 $\beta/(\circ)$	头部下 圆直径 D/mm	下锥面 高度 H/mm	预镦工位 最大载荷/ kN	终成形工 位最大载 荷/kN
1	5	5	$\Phi 13.6$	5.0	581	653
2	5	8	$\Phi 14.0$	5.5	446	499
3	5	10	$\Phi 14.4$	6.0	572	641
4	5	12	$\Phi 14.8$	6.5	522	587
5	8	5	$\Phi 14.0$	6.0	558	623
6	8	8	$\Phi 13.6$	6.5	441	488
7	8	10	$\Phi 14.8$	5.0	525	593
8	8	12	$\Phi 14.4$	5.5	536	602
9	10	5	$\Phi 14.4$	6.5	487	536
10	10	8	$\Phi 14.8$	6.0	429	472
11	10	10	$\Phi 13.6$	5.5	469	521
12	10	12	$\Phi 14.0$	5.0	498	546
13	12	5	$\Phi 14.8$	5.5	517	555
14	12	8	$\Phi 14.4$	5.0	438	481
15	12	10	$\Phi 14.0$	6.5	539	611
16	12	12	$\Phi 13.6$	6.0	547	619

由表 2 和表 3 可得， $R_1(\beta) > R_1(\alpha) > R_1(H) > R_1(D)$ ， $R_2(\beta) > R_2(\alpha) > R_2(H) > R_2(D)$ ，因此，各参数对两个工位载荷的影响程度大小顺序是一致的，均为下锥角 $\beta >$ 上锥角 $\alpha >$ 下锥面高度 $H >$ 头部下圆直径 D 。

各参数对两个工位最大载荷的影响趋势如图 10 所示，可明显看出：当上锥角 $\alpha = 10^\circ$ 时，两个工位的最

表 2 预镦工位最大载荷极差分析结果 (MPa)

Table 2 Range analysis results of maximum load for pre-upsetting station (MPa)

参数	上锥角 α	下锥角 β	头部下圆直径 D	下锥面高度 H
均值 1	530.25	535.75	509.50	510.50
均值 2	515.00	438.50	510.25	492.00
均值 3	470.75	526.25	508.25	526.50
均值 4	510.25	525.75	498.25	497.25
极差 R_1	59.50	97.25	12.00	34.50

表 3 终成形工位最大载荷极差分析结果 (MPa)

Table 3 Range analysis results of maximum load for final forming station (MPa)

参数	上锥角 α	下锥角 β	头部下圆直径 D	下锥面高度 H
均值 1	595.00	591.75	570.25	568.25
均值 2	576.50	485.00	569.75	544.25
均值 3	518.75	591.50	565.00	588.75
均值 4	566.50	588.50	551.75	555.50
极差 R_2	76.25	106.75	18.50	44.50

大载荷在水平内均最小, 分别为 470.75 和 518.75 kN; 当下锥角 $\beta=8^\circ$ 时, 两个工位的最大载荷在水平内均最小, 分别为 438.50 和 485.00 kN; 当头部下圆直径 $D=\Phi 14.8\text{ mm}$ 时, 两个工位的最大载荷在水平内均最小, 分别为 498.25 kN 和 551.75 kN; 当下锥面高度 $H=5.5\text{ mm}$ 时, 两个工位的最大载荷在水平内均最小, 分别为 492.00 和 544.25 kN。因此, 可得预镦零件尺寸参数的最优组合为: 上锥角为 10° 、下锥角为 8° 、头部下圆直径为 $\Phi 14.8\text{ mm}$ 、下锥面高度为 5.5 mm 。优化后零件外形如图 11 所示, 按此外形重新进行模具设计及建模仿真, 零件成形结果仍能满足设计要求, 最终预镦工位和终成形工位的载荷结果如图 12a 和图 12b 所示, 成形过程中载荷明显降低, 优化后两工位的最大载荷分别为 406 和 449 kN, 与优化前相比, 分别降低了 22.2% 和 23.5%, 一定程度上能够降低模具受力, 提升使用寿命。优化后最终成形零件的内部流线情况如图 13 所示, 由于仅是对预镦零件尺寸参数做略微调整, 因此, 内部流线情况与优化前变化不大, 并且也不会出现缺陷。

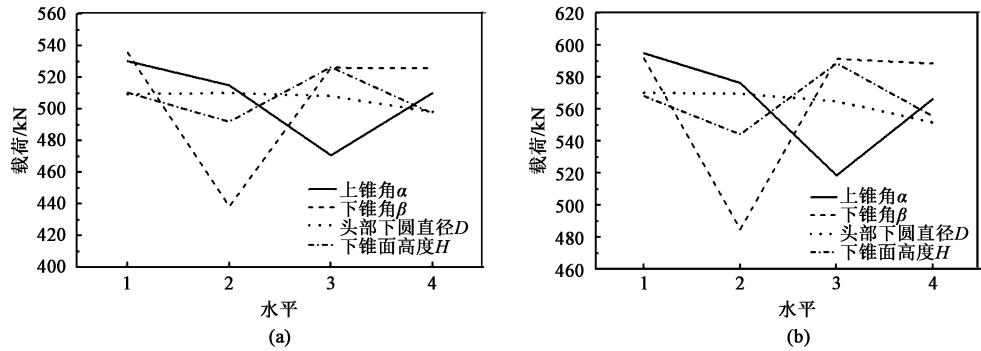


图 10 预镦零件各尺寸参数对载荷的影响趋势

(a) 预镦工位 (b) 终成形工位

Fig. 10 Influence trend of various size parameters of pre-upsetting part on load

(a) Pre-upsetting station (b) Final forming station

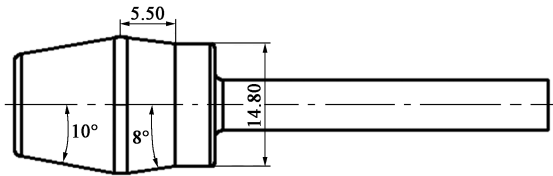


图 11 优化后预镦零件外形

Fig. 11 Shape of pre-upsetting part after optimization

4 手柄螺丝生产试验

基于以上分析结果, 采用 TD17B-3S 三模三冲

冷镦机对手柄螺丝进行成形试验, 图 14a 为所用设备。加工材料采用 45 钢盘条线材, 线径为 $\Phi 12\text{ mm}$, 如图 14b 所示。首先, 经过球化退火, 其工艺如下: 加热至 $670\sim 690\text{ }^\circ\text{C}$, 保温 $5\sim 6\text{ h}$, 随后炉冷至 $560\text{ }^\circ\text{C}$ 左右, 保温 3 h 后出炉缓冷, 处理后硬度在 135 HB 左右; 然后, 经过酸洗池去氧化皮、磷皂化表面润滑等^[12]。直接通过冷镦机送料、切料, 切料长度为 46.5 mm , 再经过缩径、预镦、终成形 3 步成形, 各工位模具结构如图 15 所示, 冷镦结果如图 16 所示, 与模拟结果完全相符, 成形饱满, 表面质量好, 未见明显缺陷。由设备上的仪表

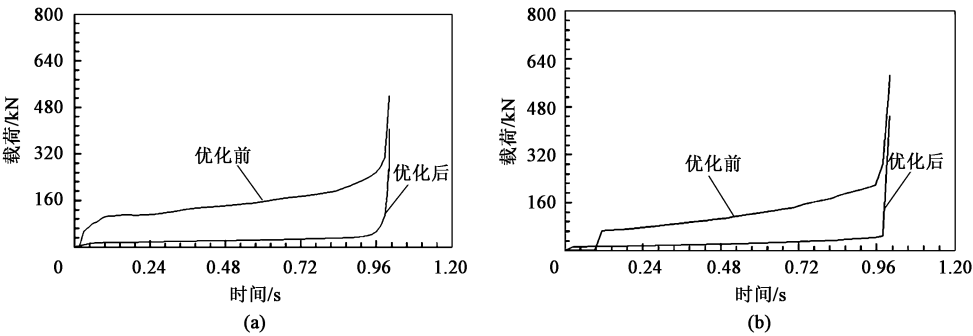


图 12 优化后预镦工位 (a) 和终成形工位 (b) 的载荷曲线

Fig. 12 Load curves of pre-upsetting station (a) and final forming station (b) after optimization

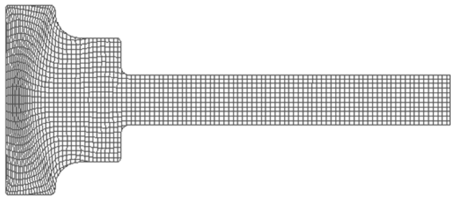


图 13 优化后终成形零件内部流线

Fig. 13 Internal streamline of final forming part after optimization

盘可知，各工位的实际载荷峰值分别为 232、388 和 421 kN，而模拟结果分别为 259、406 和 449 kN，误差极小，说明仿真精度较高。零件各尺寸检验结果如表 4 所示，其中， $D1 \sim D3$ 为关键的直径参数， $L1 \sim L4$ 为关键的长度参数。由表 4 可以发现，检验结果与模拟结果的误差极小，并且均处于规定尺寸范围内，能够满足厂家需求。手柄螺丝不同部位的

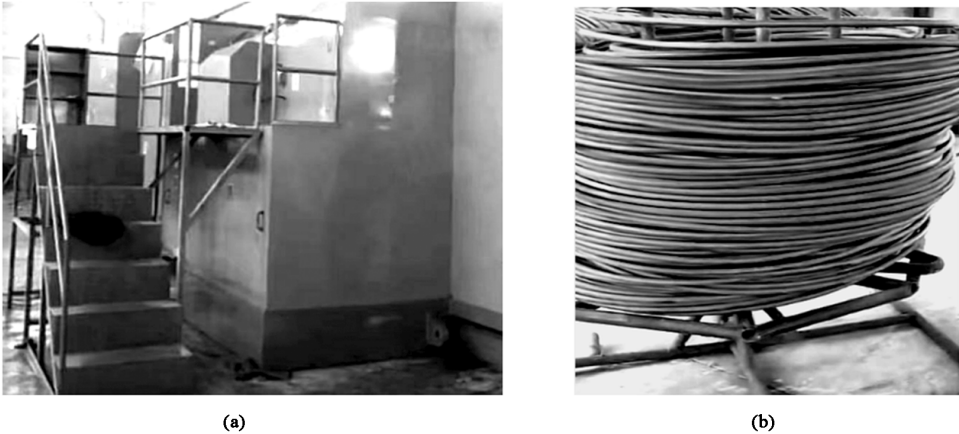


图 14 手柄螺丝冷镦试验设备和材料

(a) TD17B-3S 三模三冲冷镦机 (b) 45 钢盘条线材

Fig. 14 Equipment and material of cold heading test for handle screw

(a) TD17B-3S three-die three-punch cold heading machine (b) 45 steel wire rod

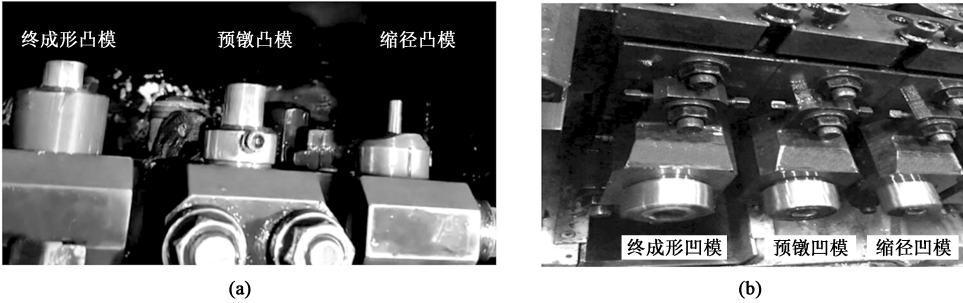


图 15 各工位模具结构示意图

(a) 凸模 (b) 凹模

Fig. 15 Schematic diagrams of die structure at each station

(a) Punch (b) Die

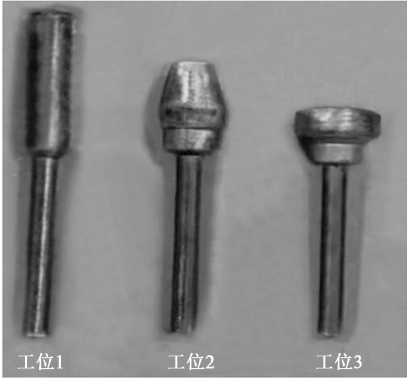


图 16 手柄螺丝冷镦试验各工位零件

Fig. 16 Parts of each station in cold heading test for handle screw

显微组织如图 17 所示，由于各部位的变形程度不同，因此，显微组织具有多样性。部位 A 主要为镦粗变形，晶粒沿着横向延伸成条状，并且比较密集；部位 B 的变形相对较小，晶粒尺寸相对较大，但大小较为均匀；部位 C 发生减径变形，晶粒沿着轴向被拉长。总体来看，组织内部并未产生折叠、裂纹等缺陷，零件质量较好，与模拟结果一致，验证了工艺的可靠性。最后，经滚花和搓丝后即可获得最终零件，该工艺生产速度在每分钟 70 件左右，速度快，螺丝质量稳定，完全能够用于取代车削加工工艺，解决了材料利用率低的问题，大大提高了经济效益。

表 4 手柄螺丝各尺寸设计要求及检验结果对比

Table 4 Comparison of dimensions between design requirements and test results for handle screw

零件尺寸图	关键参数	尺寸范围 (设计要求)/mm	检验结果/mm	检验工具	模拟结果/mm	误差/%
	D1	$\Phi 22.9 \sim \Phi 23.1$	$\Phi 22.93$	数显卡尺	$\Phi 22.97$	0.17
	D2	$\Phi 14.9 \sim \Phi 15.0$	$\Phi 14.98$	数显卡尺	$\Phi 14.94$	0.27
	D3	$\Phi 5.8 \sim \Phi 5.92$	$\Phi 5.88$	数显卡尺	$\Phi 5.83$	0.85
	L1	53.6~54.0	53.86	数显卡尺	53.76	0.19
	L2	47.9~48.1	47.96	数显卡尺	47.98	0.04
	L3	44.95~45.05	45.01	数显卡尺	45.04	0.07
	L4	39.9~40.0	39.94	数显卡尺	39.99	0.13

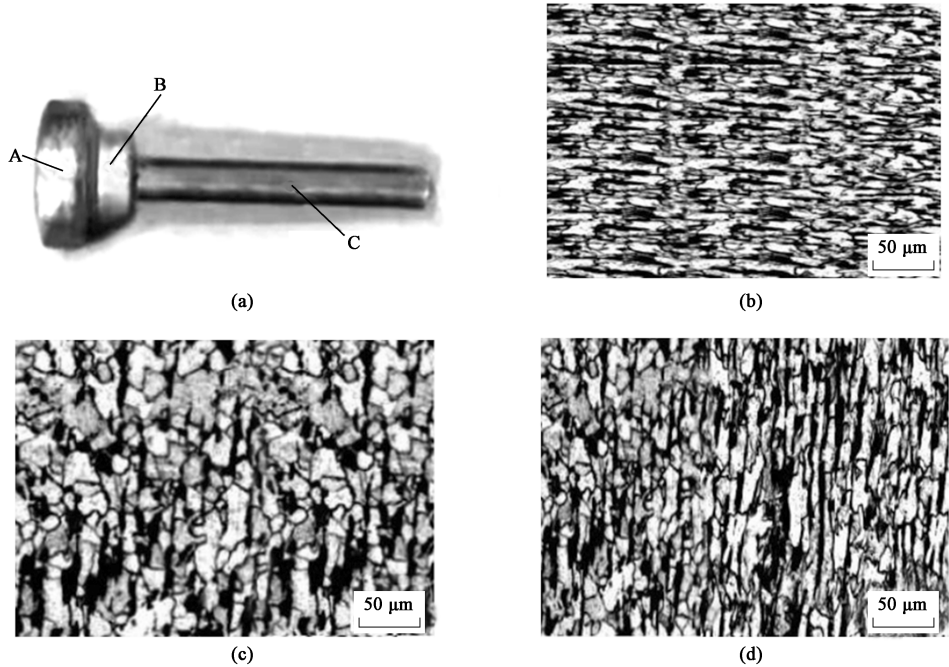


图 17 手柄螺丝不同部位的显微组织

(a) 取样位置 (b) 部位 A (c) 部位 B (d) 部位 C

Fig. 17 Microstructures of different positions for handle screw

(a) Sampling positions (b) Position A (c) Position B (d) Position C

5 结论

(1) 针对一种手柄螺丝设计了一套缩径、预镦、终成形的 3 工位冷镦成形工艺, 用来解决当前车削加工生产速度慢、材料利用率低的问题。

(2) 为控制成本, 通过 Deform-3D 对设计的 3 工位成形工艺进行了成形模拟, 预测了成形结果, 分析了工艺的合理性, 确定了优化方向。

(3) 针对预镦及终成形工位成形载荷大的问题, 利用正交试验法研究了预镦工位零件的上锥角、下锥角、头部下圆直径以及下锥面高度等关键尺寸参数对成形载荷的影响, 并结合极差分析法进行了优化。优化结果为: 上锥角为 10° 、下锥角为 8° 、头部下圆直径为 $\Phi 14.8\text{ mm}$ 、下锥面高度为 5.5 mm 。

(4) 通过手柄螺丝的实际成形试验得到了预期的手柄螺丝零件, 并进行了显微组织分析, 验证了分析过程的准确性以及新工艺的可靠性。

参考文献:

- [1] 郭广超, 陈凌翔. 直齿圆柱内齿轮双向镦挤精密成形工艺研究 [J]. 热加工工艺, 2019, 48 (5): 144-147.
Guo G C, Chen L X. Study on two-way upsetting-extrusion precision forming process of spur internal gear [J]. Hot Working Technology, 2019, 48 (5): 144-147.
- [2] 尤富仪, 张铁山, 朱倩倩. 汽车哈克钉铆套多工位冷镦挤工艺开发与应用 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (12): 31-37.
You F Y, Zhang T S, Zhu Q Q. Development and application on multi-station cold upsetting extrusion process for automobile Huck rivet sleeve [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (12): 31-37.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 徐洪磊, 闫中原, 薛世博, 等. 斜盘式汽车空调压缩机双头活塞成形坯料研究 [J]. 精密成形工程, 2022, 14 (2): 27-32.
Xu H L, Yan Z Y, Xue S B, et al. Blanks of double-headed piston forming for swash plate type automobile air-conditioning compressor [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2022, 14 (2): 27-32.
- [7] 赵庆雨, 杨嵩. 基于数值分析的汽车六角锁紧螺母冷镦工艺改进 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (10): 29-35.
Zhao Q Y, Yang S. Improvement on cold heading process for automobile hexagon lock nut based on numerical analysis [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (10): 29-35.
- [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] 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.
- [10] 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.
- [11] 吴淑芳, 王培安, 郭欢欢, 等. 基于正交试验的梭心冷挤压成形工艺研究及模具优化设计 [J]. 西华大学学报: 自然科学版, 2018, 37 (1): 92-101.
Wu S F, Wang P A, Guo H H, et al. Bobbin cold extrusion forming process and mold optimum design based on orthogonal test [J]. Journal of Xihua University: Natural Science Edition, 2018, 37 (1): 92-101.
- [12] 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.