

凸焊螺栓多工位冷镦成形工艺及模具设计

吴小亮¹, 蔡丹云², 周裕鹏¹, 蔡雅芳^{2,3}, 方 洁^{2,3}, 陈万吉²

(1. 自立紧固科技(湖州)有限公司, 浙江 湖州 313009; 2. 浙江水利水电学院 机械与汽车工程学院, 浙江 杭州 310018;
3. 中国计量大学 机电工程学院, 浙江 杭州 310018)

摘要: 针对凸焊螺栓多工位镦挤与冲床切边相结合的工艺成形效率低下、成本高的问题, 将其原有工序重新组合, 设计出 6 工位凸焊螺栓冷镦成形工艺。利用 Deform-3D 软件对凸焊螺栓冷镦成形工艺各工序进行有限元仿真, 从金属流动规律、填充饱满度和载荷分布状态等角度对模拟结果进行分析, 验证工艺的可靠性; 在此基础上, 对各工位的模具结构进行设计, 通过将切边挤孔复合模具的主模模芯设计为浮动结构, 解决了该工序坯料杆部过短导致的夹钳传递困难的问题, 并在切边挤孔时为坯料下表面提供支撑力, 确保其下表面的平面度。凸焊螺栓批量试制结果表明: 各工位制件表面光洁, 填充完整, 尺寸公差均在设计要求范围之内, 新工艺生产效率提高了 80%, 可用于指导异形短杆螺栓的冷镦成形工艺开发和模具设计。

关键词: 凸焊螺栓; 多工位冷镦; 复合模具设计; 金属流动; 载荷分布

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.06.009

中图分类号: TG376.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2024) 06-0081-07

Multi-station cold heading process and mold design for projection welding bolt

Wu Xiaoliang¹, Cai Danyun², Zhou Yupeng¹, Cai Yafang^{2,3}, Fang Jie^{2,3}, Chen Wanji²

(1. Zili Fastening Technology (Huzhou) Co., Ltd., Huzhou 313009, China;

2. College of Mechanical and Automotive Engineering, Zhejiang University of Water Resources and Electric Power, Hangzhou 310018, China;

3. College of Mechanical and Electrical Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: In order to solve the problems of low forming efficiency and high cost caused by the combination process of multi-position upsetting-extrusion and punching-trimming of projection welding bolt, a six-station cold upsetting process for projection welding bolt was designed by recombining the original process, and each station of cold heading process for projection welding bolt was finite element simulated by Deform-3D. Then, the simulation results were analyzed from the perspectives of metal flow laws, filling fullness and load distribution status, which verified the reliability of the process. Furthermore, on this basis, the mold structure of each station was designed, and the problem of difficult clamp transmission caused by the short rod of the blank in this station was solved by designing the main mold core of trimming-extrusion composite mold as a floating structure. In addition, the support force was provided for the lower surface of the blank during trimming-extrusion process to ensure its flatness. The batch trial production results of projection welding bolts show that the surface of workpieces at each station is smooth, the filling is complete, and the dimensional tolerance is all within the required range. The new process increases the production efficiency by 80%, which can be used to guide the development of cold heading process and mold design for special-shaped short-rod bolt.

Key words: projection welding bolt; multi-station cold heading; composite mold design; metal flow; load distribution

凸焊螺栓是汽车中常用的一种紧固件^[1], 可利用凸焊的方式在汽车前围板、地板和通风盖板等区域固定电器、内饰件和底盘, 获取高强度的连接,

故其需求量较大。凸焊螺栓零件图如图 1 所示, 其特点为长方形头部结构, 上、下表面各有 4 个凸焊工艺需求的凸点和盲孔, 杆部有倒角, 长度较短。根据凸焊螺栓的结构和尺寸要求, 采用多工位冷镦成形, 可以获取较高的材料利用率、成品表面质量和尺寸精度^[2]。凸焊螺栓初始成形工艺包括缩径、预整形、预镦粗、镦粗与倒角、挤孔和切边共 6 道工序, 但是在实际成形过程中, 完成镦粗头部与倒角工序之后由于杆部过短, 存在夹钳无法顺利夹持

收稿日期: 2024-04-21; 修订日期: 2024-05-28

基金项目: 浙江省重点研发计划项目 (2020C01062)

作者简介: 吴小亮 (1987-), 男, 硕士

E-mail: wxl@zlftec.com

通信作者: 蔡丹云 (1975-), 女, 硕士, 讲师

E-mail: 740797754@qq.com

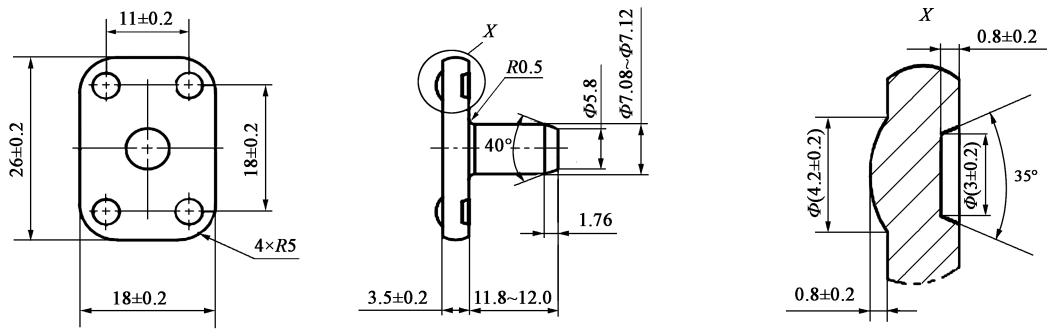


图 1 凸焊螺栓零件图

Fig. 1 Part drawing of projection welding bolt

工件传递至下一工序的问题；同时，在切边时存在该工序工件位置与模具无法正确定位的问题，以至于切边需要单独在冲压机上完成，提高了生产成本，降低了生产效率。由此可见，仅仅依靠原有的生产经验进行凸焊螺栓的成形工艺开发及模具设计，很难高效地生产出合格的产品。

Deform-3D 常用于紧固件冷镦成形过程模拟，一方面可以根据金属流动分布状态发现其成形缺陷，指导改善成形工艺；另一方面可以根据模具的受力状态，优化模具结构，提高模具寿命^[3-4]。丛兵兵等^[5]基于 Deform-3D 有限元仿真，分析了马车螺栓各冷镦工位的成形缺陷与模具结构的相关性，通过改善模具结构消除了多类成形缺陷。陈永强等^[6]对 SCM435 合金钢接头的冷镦工艺进行有限元仿真分析，从成形过程的金属流动规律、成形零件的饱满度、成形载荷的变化规律以及损伤值等角度验证了工艺的可行性。赵庆雨等^[7]通过压缩试验建立了 45 钢的材料本构方程，并将其用于汽车六角螺母冷镦成形工艺模拟，模拟结果与试制产品一致。李旋等^[8]利用 Deform-3D 进行成形工艺正交试验，获取了模具成形角、缩径比、成形速度和摩擦因数的最优参数，消除了八角杆螺栓冷镦成形过程中的卷边折叠缺陷。借鉴上述成功案例，本文将 Deform-3D 软件用于凸焊螺栓的多工位冷镦成形新工艺研究，以检验工艺和模具结构的可行性，并将其用于指导实际生产。

1 凸焊螺栓工艺方案分析

凸焊螺栓材料为 20MnTiB 钢，其为高强度钢，主要用于 10.9 级螺栓冷镦成形^[9]，其材料化学成分和力学性能分别见表 1 和表 2。针对原成形方案存在的问题，新改进的工艺方案如图 2 所示。下料阶

段，根据 GB/T 18685—2017^[10] 确定线材直径为 $\Phi 11.6\text{ mm}$ ，根据体积不变原则，计算出其坯料下料长度为 30.32 mm；工位 1 为缩径阶段，通过正挤压的方式使坯料杆部直径由 $\Phi 11.6\text{ mm}$ 缩小至 $\Phi 6.9\text{ mm}$ ；由于凸焊螺栓的头部与杆部尺寸变化较大，为了保证合理的变形量以免造成产品缺陷和模具损坏，工位 2~工位 4 对凸焊螺栓头部结构进行多次镦锻^[11]；工位 5 通过切边与挤孔复合，成形凸焊螺栓头部的盲孔和凸点特征及其外形结构，保证凸焊螺栓的 4 个盲孔与凸点的定位要求；杆部倒角单独放在工位 6，以解决杆部过短坯料无法通过夹钳传递的问题，至此凸焊螺栓冷镦完成。

表 1 20MnTiB 钢的化学成分（%，质量分数）

Table 1 Chemical compositions of 20MnTiB steel
(%, mass fraction)

C	Si	Mn	Cr	Ti	Fe
0.17~0.23	0.17~0.37	0.80~1.10	1.10~1.30	0.04~0.10	余量

表 2 20MnTiB 钢的力学性能

Table 2 Mechanical properties of 20MnTiB steel

参数	抗拉强度 R_m/MPa	屈服强度 R_{eL}/MPa	伸长率 $A/\%$	断面收缩率 $Z/\%$	硬度/ HB
数值	≥ 1130	≥ 930	≥ 10	≥ 45	≤ 217

2 成形方案的模拟

2.1 模拟参数设置

利用 UG 软件对坯料和各工位的凸、凹模等成形零件进行三维造型和定位装配，将其转换为 STL 格式后导入 Deform-3D 软件中。模拟过程参数设置如下：采用钢塑性有限元法，凸、凹模及顶针类型为刚体，坯料为塑性体，在材料库中新建 20MnTiB

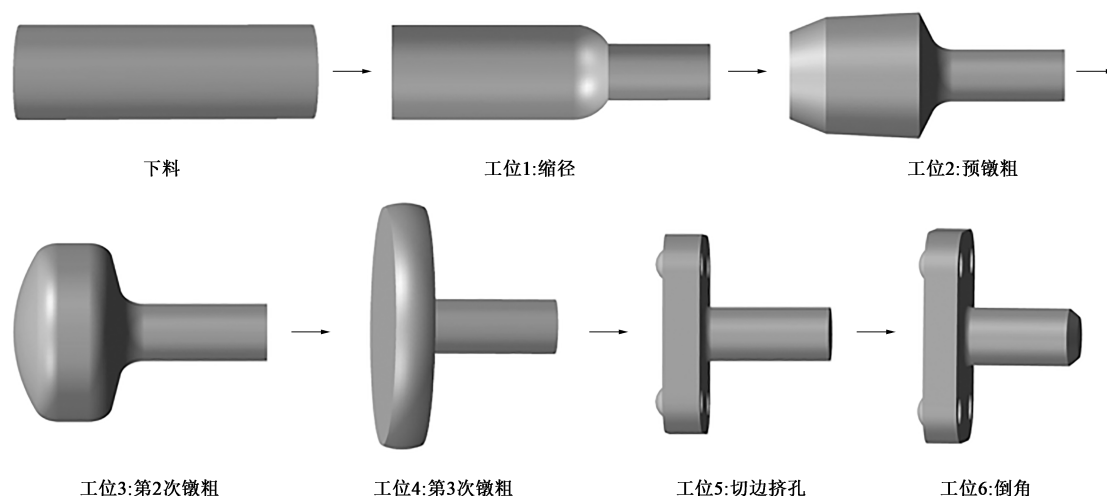


图2 凸焊螺栓冷镦成形工序图

Fig. 2 Cold heading process diagram of projection welding bolt

钢,选用四面体网格,网格数量为15000个,通过体积补偿以保证模拟过程中零件体积不变,从而提高模拟结果的准确性;在6个工位中将凸模和切边挤孔复合工位的主模模芯定义为运动状态,运动速度为 $10\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$,根据实际润滑条件,摩擦因数为0.12,步长为0.2 mm,各工序模拟停止条件由上、下模间隙确定,数值在0.0~3.5 mm之间;在切边挤孔复合工位,由于存在材料断裂,当4个相连网格断裂时,系统自动删除网格,以保证模拟的正常进行。

2.2 有限元模拟结果分析

2.2.1 金属流动规律分析

凸焊螺栓6个工位成形过程中的金属流动情况如图3所示。缩径工位为正挤压(图3a和图3b),在成形中期材料跟随凸模运动,向下流动,但在成形末期未缩径段的材料向上流动导致零件的长度和直径增加。头部镦粗成形包括了3个工位(图3c~图3h),每个工位的成形中期,在凸模和凹模顶针的共同作用下,头部材料均向下流动,杆部材料向上流动,在填充头部形状的同时缩短零件长度;在成形末期,杆部材料向下流动,杆部直径增加。从切边挤孔工位末期(图3i)可以看出,金属材料在挤孔冲头的作用下向上流动,在凸模形状的限制下,零件顶部形成凸包。倒角工位(图3j)的工作行程长度小于2 mm,材料仅在倒角处向上流动,使其在此处的直径缩减。

2.2.2 各工序成形零件饱满度分析

凸焊螺栓多工位冷镦成形模拟结果如图4所示,根据成形零件与凸、凹模壁面的贴合程度对零件的

成形饱满度进行分析。从图4中可以看出,各工位零件在变形区域与凸、凹模的接触节点无缺失,并且分布均匀,表明零件在各工位填充完整,冷镦工艺方案可行。

2.2.3 成形载荷分析

各工位的成形载荷随行程变化的关系曲线如图5所示,各工位成形载荷的变化趋势一致。在合模阶段,成形载荷为0 kN;当凸模接触坯料,材料在凸模与凹模形成的空间内流动,载荷平稳增加;在成形结束阶段,零件变形程度增大,金属流动阻力急剧上升至峰值。而在切边挤孔工位,在切边完成的瞬间,成形阻力瞬间减小。各工位的最大成形载荷分别为544、519、837、1089和575 kN,除了切边挤孔复合工位的成形载荷较大,其余各工位模具受力比较均衡。

3 凸焊螺栓冷镦模具设计

根据成形工艺方案确定了6个工位的镦锻件尺寸,依次设计各工位冷镦模具的结构,模具外形尺寸需根据冷镦机所提供的模腔结构确定。各工位的坯料均在凹模上固定,工作时凹模不动,凸模和顶针运动。所有工位的凸模和凹模均采用组合式镶拼结构,一是过盈装配在模具的成形部件内产生切向压应力,可用于抵消冷镦挤时产生的切向拉应力,从而增加模具强度;二是模具采用不同材料和不同热处理方式,成形零件采用钨钢材质,模套材料选用H13钢,顶针选用SKH55钢,镶拼结构中零件损

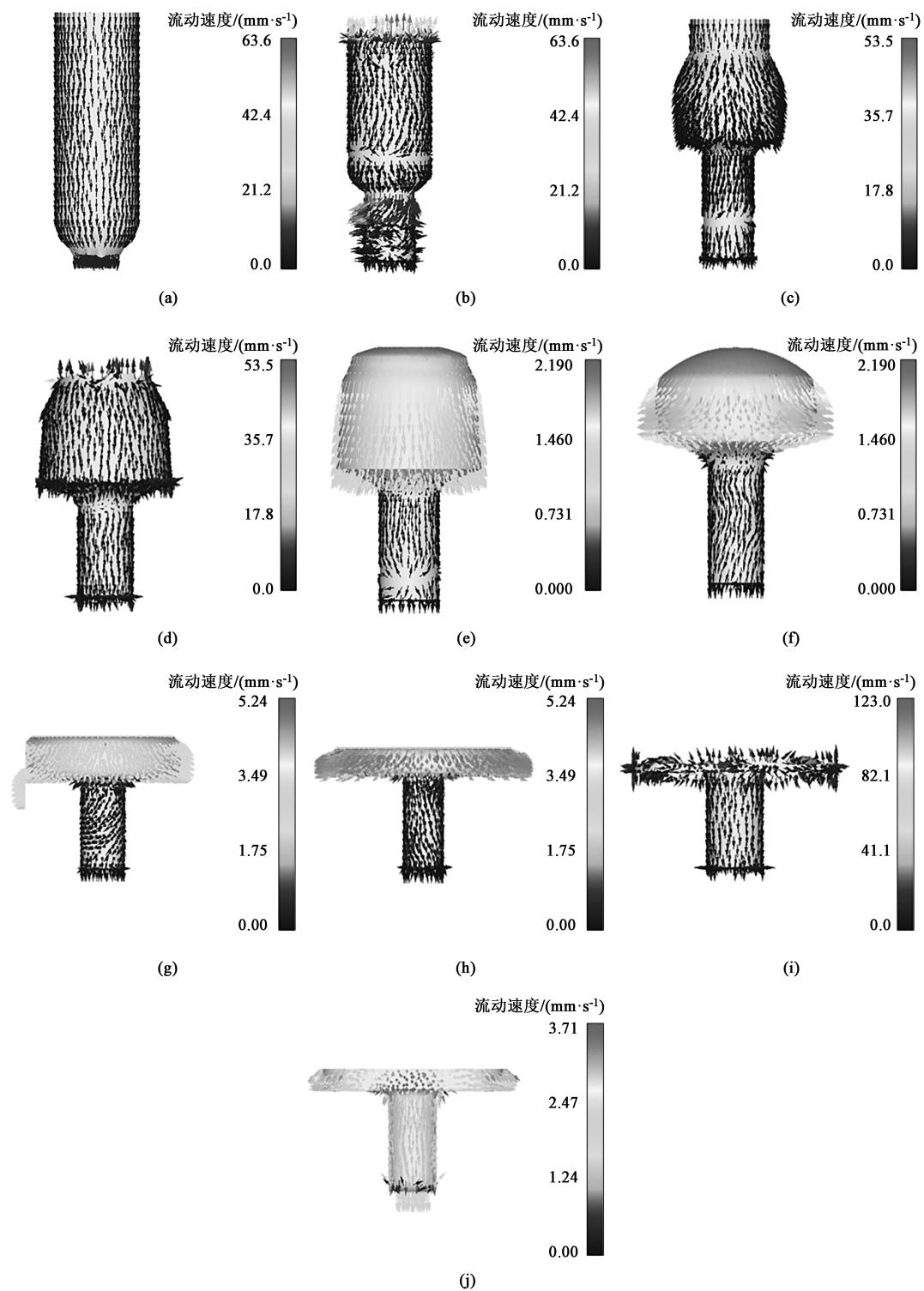


图 3 凸焊螺栓冷镦成形过程中各工位金属流动状态图

(a) 缩径中期 (b) 缩径末期 (c) 预镦粗中期 (d) 预镦粗末期 (e) 第 2 次镦粗中期
(f) 第 2 次镦粗末期 (g) 第 3 次镦粗中期 (h) 第 3 次镦粗末期 (i) 切边挤孔 (j) 倒角

Fig. 3 Metal flow state diagrams of each station for projection welding bolt in cold heading process

(a) Middle stage of necking (b) End of necking (c) Middle stage of pre-upsetting (d) End of pre-upsetting
(e) Middle stage of the second upsetting (f) End of the second upsetting (g) Middle stage of the third upsetting
(h) End of the third upsetting (i) Edge trimming and hole burnishing (j) Chamfering

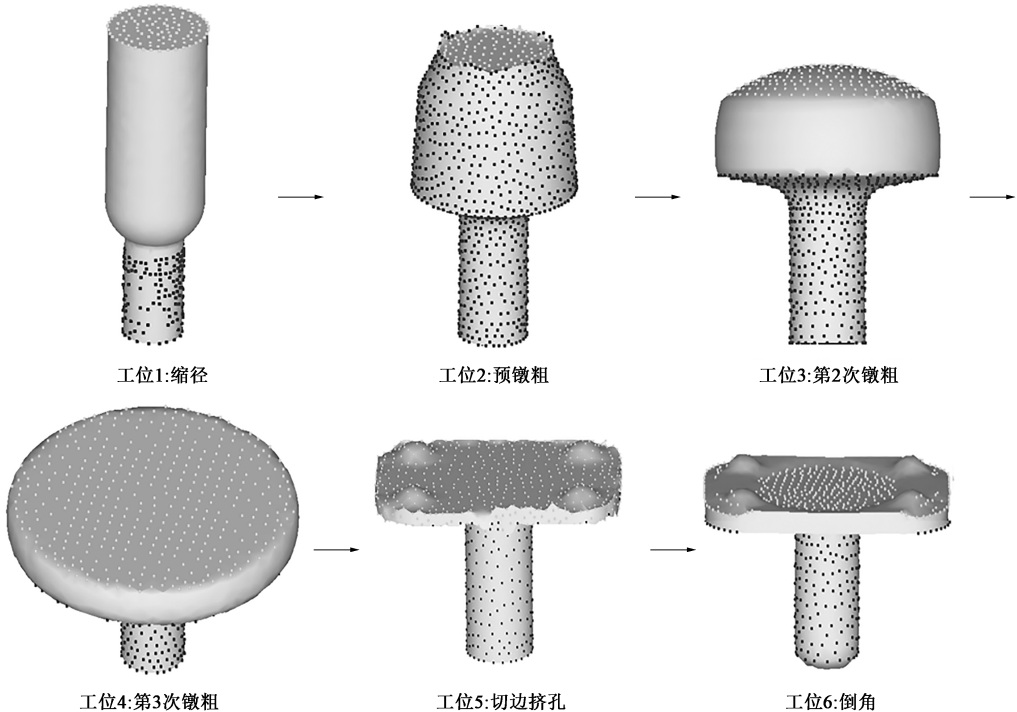


图4 各工位成形零件形状

Fig. 4 Shapes of formed parts for each station

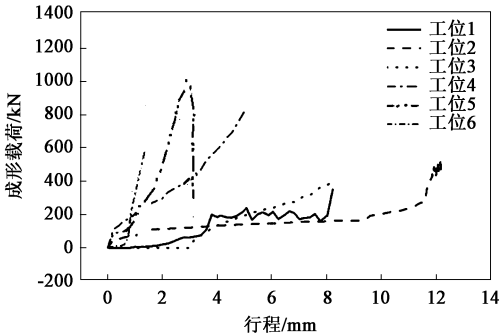


图5 各工位的成形载荷-行程变化曲线

Fig. 5 Forming load-stroke variation curves for each station

坏后可以单独更换，这些均降低了模具制作成本。

凸焊螺栓多工位冷镦成形中5个工位均为单工序成形，其模具结构较为简单，见图6。工位1缩径模具主要根据其断面收缩率 Z 来确定模具结构，本工序 Z 值为64.1%，故采用闭式强束模具结构。为了提高缩径模具的寿命，缩径凹模的工作带导向角度 α 取 44° ，定径带长度取 $1.8\text{ mm}^{[12]}$ ，具体结构尺寸见图7。工位2~工位4均为头部镦粗：工位2模具的作用是将螺栓头部断面整形，以保证镦粗头部时受力均匀，冲头一般取 2° 锥角；工位3和工位4采用开式模具结构，第2次镦粗头部高度的 $2/5$ 在上模凹槽内，第3次镦粗是将头部镦平，主要通过合模之后凸、凹模的间隙来保证头部的厚度。工位6的倒角原理与缩径类似，在此不再赘述。

切边挤孔复合模具解决了需在压力机上单工序切边的难题，其结构如图8所示。为了解决凸焊螺栓杆部较短，工位之间坯料传递困难的问题，主模模芯10采用浮动形式，同时，该浮动主模模芯上安装矩形模具弹簧11，弹簧在成形时产生压缩力，切边挤孔时浮动主模模芯通过该压缩反作用力支撑坯料的下端面，确保坯料下端面不变形。工作时，机械夹钳将坯料放入浮动主模模芯的定位孔中，切边挤孔凸凹模5向右运动，推动浮动主模模芯跟随其一起运动，切边挤孔凸凹模与切边凹模8、挤孔顶针7配合完成切边和挤出螺栓底部盲孔，盲孔中材料流入挤孔凹模，形成表面凸包，完成该工位的成形过程。开模时，浮动主模模芯在弹簧力作用下向左移动复位，脱料板6在前垫块1的作用下将废料从切边凸模上推出，成形工件在浮动主模模芯中间通过顶针14推出，由机械夹钳放入后续工位。

4 试制

将制作好的模具安装在6工位冷镦机ZBP-200L上进行试模验证，20MnTiB钢线材经过酸洗、磷皂化处理后，经送料器送料，矫正轮校直后进入下料工序，夹钳为各工位之间传递坯料，坯料经过6个工位冷镦成形，冷镦成形期间需喷洒FRO310成形

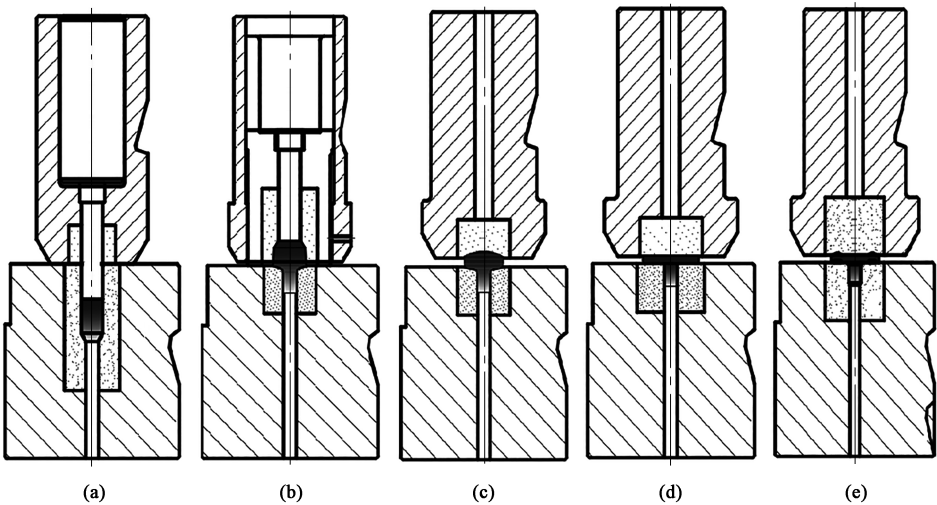


图 6 各单工序模具示意图
(a) 工位 1 (b) 工位 2 (c) 工位 3 (d) 工位 4 (e) 工位 6

Fig. 6 Schematic diagram of mold for each single station
(a) Station 1 (b) Station 2 (c) Station 3 (d) Station 4 (e) Station 6

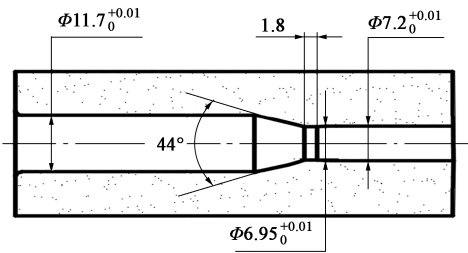


图 7 缩径凹模的结构尺寸
Fig. 7 Structure sizes of necking die

润滑油。试模后各工位的成形件见图 9，各工位的成形件尺寸与设计工艺要求相符，最后成品尺寸也在公差范围之内，证明了该新工艺及模具设计的可行性。

5 结 论

(1) 针对凸焊螺栓成形工艺存在的问题，设计了 6 工位冷镦成形工艺，与原工艺相比，改进后工艺减少了在冲床上的单独切边工序，凸焊螺栓通过多工位冷镦自动成形，减少了凸焊螺栓的生产成本，生产效率提高 80%。

(2) 利用 Deform-3D 完成了凸焊螺栓 6 工位冷镦成形模拟，从各工位的金属流动规律、零件成形的饱满度、成形载荷变化趋势 3 方面进行分析，证明了该工艺的可行性

(3) 设计了切边挤孔复合模具，并将主模模芯设计为浮动结构，该结构可确保夹钳顺利传递该工

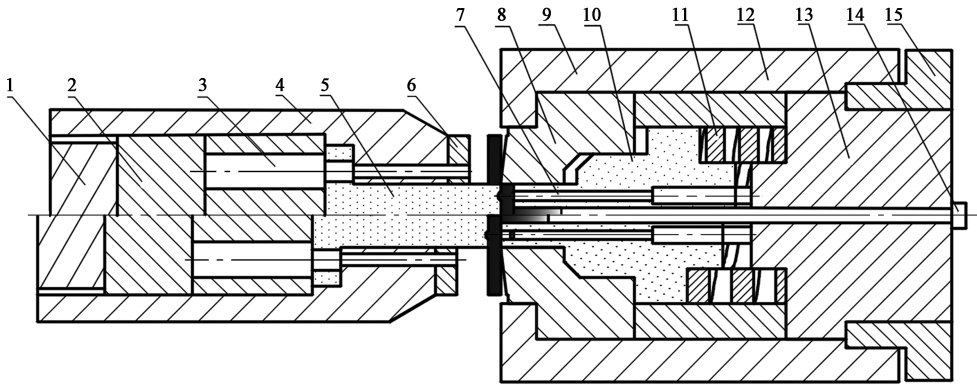


图 8 切边挤孔模具装配图
1. 前垫块 2. 移动套件 3. 脱料板推杆 4. 冲模模套 5. 切边挤孔凸凹模 6. 脱料板 7. 挤孔顶针
8. 切边凹模 9. 主模模套 10. 浮动主模模芯 11. 矩形模具弹簧 12. 中空垫块 13. 推板 14. 顶针 15. 后垫块

Fig. 8 Assembly diagram of mold for edge trimming and hole burnishing



图9 凸焊螺栓各工位成形件

Fig. 9 Formed parts of each station for projection welding bolt

序坯料,主模模芯通过压缩弹簧的反作用力支撑坯料下表面,确保切边挤孔时坯料下表面的平面度。

(4) 在多工位冷镦机上对凸焊螺栓进行批量试制,其外观和尺寸均符合设计要求,证明了改进后冷镦工艺的可靠性。

参考文献:

- [1] 张超. 汽车白车身焊接质量控制及检测和评价 [J]. 内燃机与配件, 2022, (8): 92-94.
Zhang C. Welding quality control, inspection and evaluation of automobile body-in-white [J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2022, (8): 92-94.
- [2] 紧固件专业工人技术理论培训教材编审组. 冷镦工工艺学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1993.
Editing Group of the Fastener Pipeline Worker Technology Training Materials. Cold Heading Engineering Technology [M]. Beijing: China Machine Press, 1993.
- [3] 赵辉, 李旭. 有限元分析在紧固件塑性成形领域中的应用 [J]. 新技术新工艺, 2015, (10): 58-61.
Zhao H, Li X. Application of finite element analysis in the field of fasteners plastic forming [J]. New Technology & New Process, 2015, (10): 58-61.
- [4] 肖志玲, 刘百宣, 孙红星, 等. 高强度 20MnTiB 多工位冷镦变形行为 [J]. 材料工程, 2016, 44 (3): 77-83.
Xiao Z L, Liu B X, Sun H X, et al. Multi-stage cold forging behavior of high strength steel 20MnTiB [J]. Journal of Materials Engineering, 2016, 44 (3): 77-83.
- [5] 丛兵兵, 孔明, 张弘斌, 等. 马车螺栓冷镦成形有限元模拟及模具设计 [J]. 塑性工程学报, 2022, 29 (2): 76-81.
Cong B B, Kong M, Zhang H B, et al. Finite element simulation and die design of cold heading forming for carriage bolt [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2022, 29 (2): 76-81.
- [6] 陈永强, 陈玉, 杨群. SCM435 合金钢接头的冷镦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.
- [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] 李旋, 李蓉, 莫杰, 等. 八角杆螺栓冷镦卷边折叠缺陷研究及工艺优化 [J]. 锻压技术, 2023, 48 (1): 14-23.
Li X, Li R, Mo J, et al. Research on curling and folding defects for octagonal rod bolts in cold heading and process optimization [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (1): 14-23.
- [9] 张先鸣. 碳钢和合金钢高强度螺栓用材料探讨 [J]. 金属制品, 2012, 83 (1): 57-60.
Zhang X M. Discussion of material for carbon steel and alloy steel high strength bolt [J]. Metal Products, 2012, 38 (1): 57-60.
- [10] GB/T 18685—2017, 普通螺纹搓制和滚制前的毛坯直径 [S].
GB/T 18685—2017, The blank diameters for rolling general purpose metric screw threads [S].
- [11] 张莉, 李升军. DEFORM 在金属塑性成形中的应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
Zhang L, Li S J. The Application of DEFORM in Metal Plastic Forming [M]. Beijing: China Machine Press, 2009.
- [12] 王泽斌, 杨国民. 冷镦螺栓缩径模具内孔孔型设计 [J]. 金属加工: 冷加工, 2022, (8): 64-70.
Wang Z B, Yang G M. Design of inner hole of cold heading bolt reducing die [J]. MW Metal Cutting, 2022, (8): 64-70.