

凸台结构内丝接头的冷镦成形工艺

杨 成¹, 郑志军², 孙宝寿¹, 陈玉强², 王 英¹, 陈 兴¹

(1. 宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211; 2. 宁波阿能汽车部件有限公司, 浙江 宁波 315145)

摘要: 针对汽车刹车管路中的内丝接头零件, 其内部关键部分——凸台结构具有尺寸小、尺寸要求高等特点, 采用一种六模六冲的冷镦加工方式进行生产。首先, 根据影响凸台成形的关键尺寸因素设计了3因素3水平的正交实验。其次, 运用 Deform-3D 有限元分析软件对正交实验中凸台成形工步的等效应力、等效应变以及模具的受力分布进行分析, 计算得到工步2~工步4的变形程度分别为42.7%、66.0%和40.0%。同时, 得出多因素对凸台成形的影响程度为预成形凸台深度>法兰高度>预成形法兰上端面至顶面的距离, 得到凸台成形饱满、冲头受力最小条件下的最适尺寸组合为预成形凸台深度为9 mm、法兰高度为6 mm、预成形法兰上端面至顶面的距离为11 mm。研究成果为类似凸台件的冷镦成形提供了一定的指导性意见。

关键词: 内丝接头; 凸台结构; 冷镦; 等效应力; 等效应变; 模具受力

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.04.003

中图分类号: TG376.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2023) 04-0016-08

Cold heading process on inner wire joint with boss structure

Yang Cheng¹, Zheng Zhijun², Sun Baoshou¹, Chen Yuqiang², Wang Ying¹, Chen Xing¹

(1. School of Mechanical Engineering and Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2. Ningbo Aneng Automobile Parts Co., Ltd., Ningbo 315145, China)

Abstract: For the inner wire joint parts in automobile brake pipeline, the boss structure which is the internal key part has the characteristics of small size and high size accuracy requirement. A six-die and six-punch cold heading processing method was adopted for production. Firstly, the orthogonal experiment of three factors and three levels were designed according to the key dimension factors affecting the boss forming. Secondly, Deform-3D finite element analysis software was used to analyze equivalent stress, equivalent strain and force distribution of die for the boss forming step in the orthogonal experiments, and the calculated deformation degrees of step 2-step 4 were 42.7%, 66.0% and 40.0%, respectively. At the same time, the affecting degrees of various factors on the boss forming was obtained as preformed boss depth > flange height > distance from upper end surface and top surface of preformed flange, and the optimal size combination was found under the conditions of full boss forming and minimum punch force, that is, the preformed boss depth is 9 mm, the flange height is 6 mm, and the distance from upper end surface and top surface of preformed flange is 11 mm. The study result provides a certain guidance for the cold heading of the similar boss parts in the future.

Key words: inner wire joint; boss structure; cold heading; equivalent stress; equivalent strain; force of die

内丝接头作为汽车刹车管路上的一个重要零件, 对于整车的装配具有极为重要的作用, 既要求具有较为良好的密封性, 又要保持刹车管路中压力的稳定。因此, 在成形凸台时需要保证凸台表面光滑、无毛刺, 以及避免产生裂纹等缺陷^[1]。孙克锐等^[2]通过对比拉深工艺和冷挤压工艺的优劣, 针对双杯

壳类零件制定了冷挤压成形方案, 并进行了实验验证, 结果表明, 对双杯、壁厚不均匀的壳类件可采用预镦挤、复合挤压和反挤压多工序冷挤压成形。龙昆^[3]结合冷镦挤压设计了法兰轴零件的新工艺, 通过计算毛坯的尺寸和冷镦挤压力, 并利用 Deform-3D 进行模拟成形和优化, 进一步说明了冷镦成形能够代替切削, 在不切除材料的情况下提高了产品质量。Lee G A 等^[4]采用 Deform 软件对冷镦成形过程进行仿真, 通过应力、应变分析发现工件接触表面或者侧边容易发生侧边缺陷。褚忠等^[5]通过对冷挤压成形中模具芯部的磨损设计了4因素3水平正交实验, 结果表明, 挤压速度对模芯损耗影响最大,

收稿日期: 2022-08-17; 修订日期: 2022-11-27

基金项目: 校企合作项目 (HK2021000306)

作者简介: 杨 成 (1998-), 男, 硕士研究生

E-mail: 823911770@qq.com

通信作者: 陈 兴 (1963-), 男, 副教授, 博士

E-mail: chenxing@nbu.edu.cn

其次为摩擦因数、模具初始硬度和模具入口处的圆角半径。温煌英^[6]提出了高压开关方帽复合冷挤压成形工艺,并模拟了其成形过程,结果表明,凸模凸棱处与凹模模芯表面的应力较大,在模具转角处可能会有比较明显的磨损。唐星德等^[7]针对一种Z形截面不等厚的继电器衔铁零件,提出了采用板料折弯后再冷挤压成形的工艺,通过进一步的实验研究和工艺调整,最终加工出符合要求的零件。刘兆红等^[8]阐述分析了硬铝制产品塑性较差等特点,并通过改善模具结构和采用液压机作为挤压设备,克服了锥形凸缘螺母成形困难的问题。陈红杰^[9]通过对拖拉机气门套的加工工艺进行分析和计算,重新选择了成形模具材料,并确定了合适的热处理刚度,从而满足生产需要。

本文以84°凸台结构内丝接头为研究对象,制定了一种新的加工工艺路线,设计了3因素3水平正交实验,得到凸台成型的主要影响因素,给出合理的预成形的尺寸组合并进行模拟,最后在冷镦机上进行实际的加工验证,得到的实际生产件与模拟

成形件基本一致,为以后类似件的生产提供了一定的指导。

1 冷镦成形理论分析

1.1 毛坯的选用

根据凸台结构内丝接头的使用性能选用毛坯材料为15钢,应用三维软件SolidWorks对产品进行建模,如图1所示,得到产品体积 $V_0 = 4158 \text{ mm}^3$ 。由于塑性变形对材料的体积不产生影响,根据体积不变原则^[10],可以推算出毛坯体积 $V_{\text{毛}} = V_0 = 4158 \text{ mm}^3$ 。由此可得到毛坯的质量 $M_{\text{毛}}$ 为:

$$M_{\text{毛}} = \rho V_0 = 32.6 \text{ g} \quad (1)$$

式中: ρ 为材料密度。

为了方便毛坯在冷镦机上的加工和装夹,在此选用毛坯直径 $D_{\text{毛}} = \Phi 4.7 \text{ mm}$,则毛坯的高度 H 为:

$$H = \frac{4 \times V_{\text{毛}}}{\pi D_{\text{毛}}^2} = 24.5 \text{ mm} \quad (2)$$

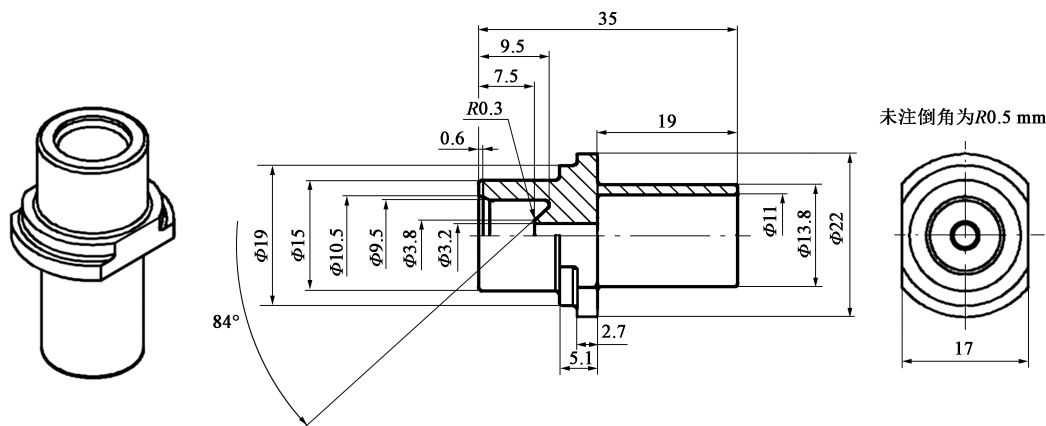


图1 内丝接头零件图

Fig. 1 Part drawing of inner wire joint

1.2 内丝接头的加工方案对比

图2为内丝接头的新旧两种生产加工的工艺路线简图。原方案采用6个工步进行冷镦,对工件粗成形,使其满足产品外观尺寸要求,如图2a所示,后续还需对84°凸台结构进行车削、钻中间通孔、对两对边进行切边加工,其NC加工工序较多,经济效益低。而新方案在原方案的基础上同样采用6个工步进行冷镦,不仅对84°凸台结构进行了成形,还完成了中间通孔和切对边的处理,如图2b所示,可大大节省机加工工序、提高生产效益。

但由于一些工步的成形较为复杂,需考虑产品

成形过程中是否满足变形程度的要求,因此,对该工件的主要成形工步的变形程度进行计算。

1.3 挤压和镦粗变形程度的计算

通过查阅资料可得到挤压和镦粗工步的变形程度的计算公式^[11]。

(1) 反挤压筒形件:

$$\varepsilon_{\text{反}} = \frac{F_1 - F_2}{F_1} \times 100\% \quad (3)$$

式中: $\varepsilon_{\text{反}}$ 为反挤压的变形程度,%; F_1 和 F_2 为反挤压前后的断面面积, mm^2 。

(2) 正挤压缩径:

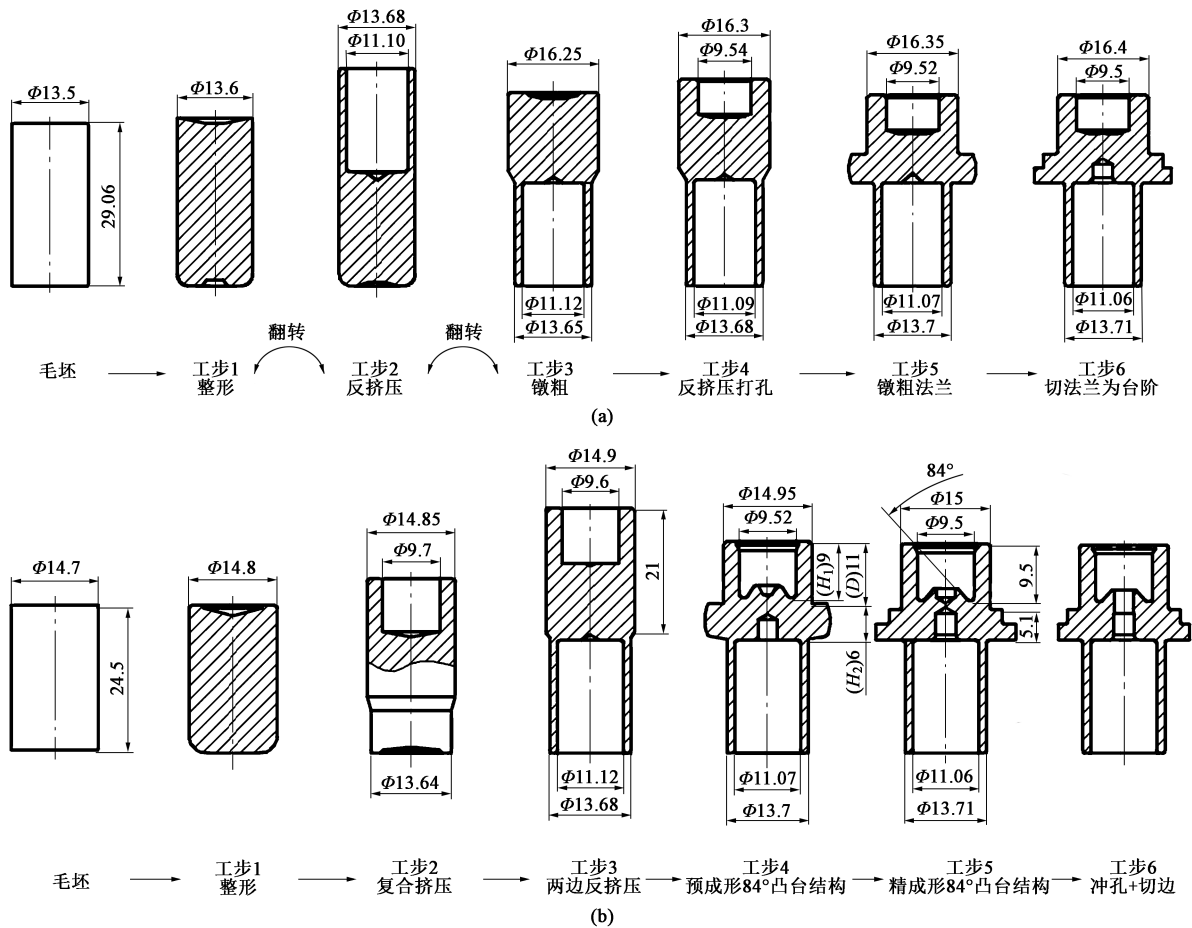


图 2 两种方案的工艺路线简图
(a) 原方案 (b) 新方案
Fig. 2 Schematic diagrams of process route for two schemes
(a) Original scheme (b) New scheme

$$\varepsilon_{\text{正}} = \frac{D_0^2 - D_1^2}{D_0^2} \times 100\% \quad (4)$$

式中： $\varepsilon_{\text{正}}$ 为正挤压的变形程度，%； D_0 和 D_1 为缩径前后的直径，mm。

(3) 镦粗的变形程度通常用材料变形前后的高度减缩率^[12]来表示，即：

$$\varepsilon_{\text{h}} = \frac{h_0 - h_1}{h_0} \times 100\% \quad (5)$$

式中： ε_{h} 为高度减缩率，%； h_0 和 h_1 为镦粗前后的高度，mm。

综上可得，新方案的冷锻加工工艺路线各工步对应的变形程度为：整形工步中，变形程度 $\varepsilon_{\text{整}} = 1.3\%$ ；复合挤压中， $\varepsilon_{\text{反}} = 42.7\%$ 、 $\varepsilon_{\text{正}} = 15.6\%$ ；两边反挤压中， $\varepsilon_{\text{反}} = 66\%$ ；预成形 84°凸台结构中， $\varepsilon_{\text{h}} = 40\%$ ；精成形 84°凸台结构与工步 4 大致相同，为整形过程；工步 6 为冲孔+切边成形，由于其成形过程相对简单，在此不进行变形程度的计算。而一般

15 钢的许用变形程度为 80%^[13] 左右，因此，每工步均满足成形要求。

2 冷锻成形工艺的有限元模型建立

根据零件图纸采用 SolidWorks 软件对 84°凸台结构内丝接头进行三维建模，依照制定的加工工艺路线对相应的模具进行三维设计，并保存为 Stl 文件格式，导入至 DEFORM-3D 有限元软件中，毛坯定义为塑性体，材料选择为 AISI-1015，工件网格划分为 50000 个单元，其余模拟参数数值见表 1。

表 1 模拟参数设置
Table 1 Setting of simulation parameters

参数	摩擦类型	摩擦因数	冲头的运动速率/ (mm · s ⁻¹)	温度/℃	网格划 分数
数值	剪切	0.08	50	20	50000

冲模冲头、凹模和凹模顶杆均设置为刚性体，且不考虑弹性变形^[14]，建立其相对于工件变形的有限元模型，如图 3 所示。



图 3 有限元模型
Fig. 3 Finite element model

3 正交实验

3.1 正交实验因素水平的确定

分析凸台结构内丝接头的冷镦成形的变形过程，发现变形程度较大的几个工步均能满足许用变形程度的要求，在此基础上，深入分析凸台结构内丝接头的成形过程，影响其形成的主要因素有：

(1) 预成形法兰的上端面至顶面的距离（图 2b 工步 4 中，尺寸 D ），其影响镦制法兰的厚度，从而影响凸台成形的形状；

(2) 预成形凸台深度（图 2b 工步 4 中的尺寸 H_1 ），此因素影响凸台成形的饱满性，如果尺寸过小，在精成形凸台阶段冲头受力会变大，造成冲头破裂，如果尺寸过大，凸台材料无法完全填充模具内部空间，产生成形缺陷；

(3) 法兰高度（图 2b 工步 4 中的尺寸 H_2 ），由于凸台成形是镦制法兰时金属材料向内挤压流动的结果，因此，法兰的厚度很大程度上影响了凸台的成形。

综上所述，以上 3 个主要因素会对凸台成形的饱满性产生一定的影响，将这 3 个因素在适当的尺寸范围内进行组合，绘制如表 2 所示的正交实验因素水平表^[15]。

3.2 正交实验结果

根据表 2 进行有限元模拟仿真分析，以工步 4 和工步 5 下成形凸台的冲模受力最小为优化目标，从而保证冲头不易损坏，实验结果如表 3 所示。

表 2 正交实验因素水平表 (mm)
Table 2 Factors and levels of orthogonal experiment (mm)

水平	预成形法兰的上端面至顶面的距离 D	预成形凸台深度 H_1	法兰高度 H_2
1	10.0	8.5	6.0
2	10.5	9.0	6.5
3	11.0	9.5	7.0

表 3 正交实验结果
Table 3 Orthogonal experiment results

序号	D/mm	H_1/mm	H_2/mm	工步 4 冲模受 力/kN	工步 5 冲模受 力/kN
1	10.0	8.5	6.0	275	397
2	10.0	9.0	6.5	250	405
3	10.0	9.5	7.0	263	408
4	10.5	8.5	6.5	308	422
5	10.5	9.0	7.0	276	384
6	10.5	9.5	6.0	253	406
7	11.0	8.5	7.0	269	419
8	11.0	9.0	6.0	239	373
9	11.0	9.5	6.5	275	413

3.3 极差分析

正交实验结果一般采用极差分析来判断各因素对冲模受力的影响程度。工步 4 中的工件尺寸为凸台预成形后的尺寸，而工步 5 需要将该预成形尺寸加工为成品尺寸。在实际的生产过程中，成形凸台的冲头容易损坏，因此，成形凸台时的各因素组合对工步 4 和工步 5 的冲模受力以及成形后的成品尺寸要求均有很大的影响。由于模具受力越大，对冲头的破坏程度就越大，从而产生破裂，导致成本增加，所以，需要寻找一个合适的最优预成形尺寸组合，以保证凸台精成形的冲模受力最小。

正交实验的极差分析结果如表 4 所示，由表 4 可得，对于工步 4 和工步 5 下的冲模受力而言，极差值最大的均为预成形凸台深度 H_1 ，其次为法兰高度 H_2 ，最小的为预成形法兰的上端面至顶面的距离 D 。因此，影响凸台成形的因素的大小顺序为：预成形凸台深度 H_1 >法兰高度 H_2 >预成形法兰的上端面至顶面的距离 D 。

当 D 为 11.0 mm 时，工步 4 和工步 5 的冲模受力均值最小，分别为 261.000 和 401.667 kN；当 H_1

表 4 极差分析结果 (kN)
Table 4 Range analysis results (kN)

工步	水平	D	H_1	H_2
4	1	262.667	284.000	255.667
	2	279.000	255.000	277.667
	3	261.000	263.667	269.333
	极差	18.000	29.000	22.000
	优水平	261.000	255.000	255.667
5	1	403.333	413.667	392.000
	2	404.000	387.333	413.333
	3	401.667	409.000	403.667
	极差	2.333	26.334	21.333
	优水平	401.667	387.333	392.000

为 9.0 mm 时, 工步 4 和工步 5 的冲模受力均值最小, 分别为 255.000 和 387.333 kN; 当 H_2 为 6.0 mm 时, 工步 4 和工步 5 的冲模受力均值最小, 分别为

255.667 和 392.000 kN。显然, 工步 4 和工步 5 的优水平组合均为 $D = 11.0$ mm、 $H_1 = 9.0$ mm、 $H_2 = 6.0$ mm, 因此, 以该组数据作为建模基准, 对其进行仿真模拟。

4 优化组合的有限元分析验证

4.1 模具载荷分析

利用 Deform 的静力学分析, 将模具的刚性体更改为弹性体, 设置模具材料为 AISI-H-13 模具钢, 进行相对应的网格划分, 再根据正交实验结果, 利用有限元仿真模拟凸台成型的主要工步 (工步 4、工步 5), 得到等效应力分布与模具载荷-时间曲线如图 4 所示。从图 4 中可以看出: 关键工步的模具所受的载荷随着该工步成形时间的增大而增加, 且随着变形程度的增大, 其所受的载荷也随之增加。

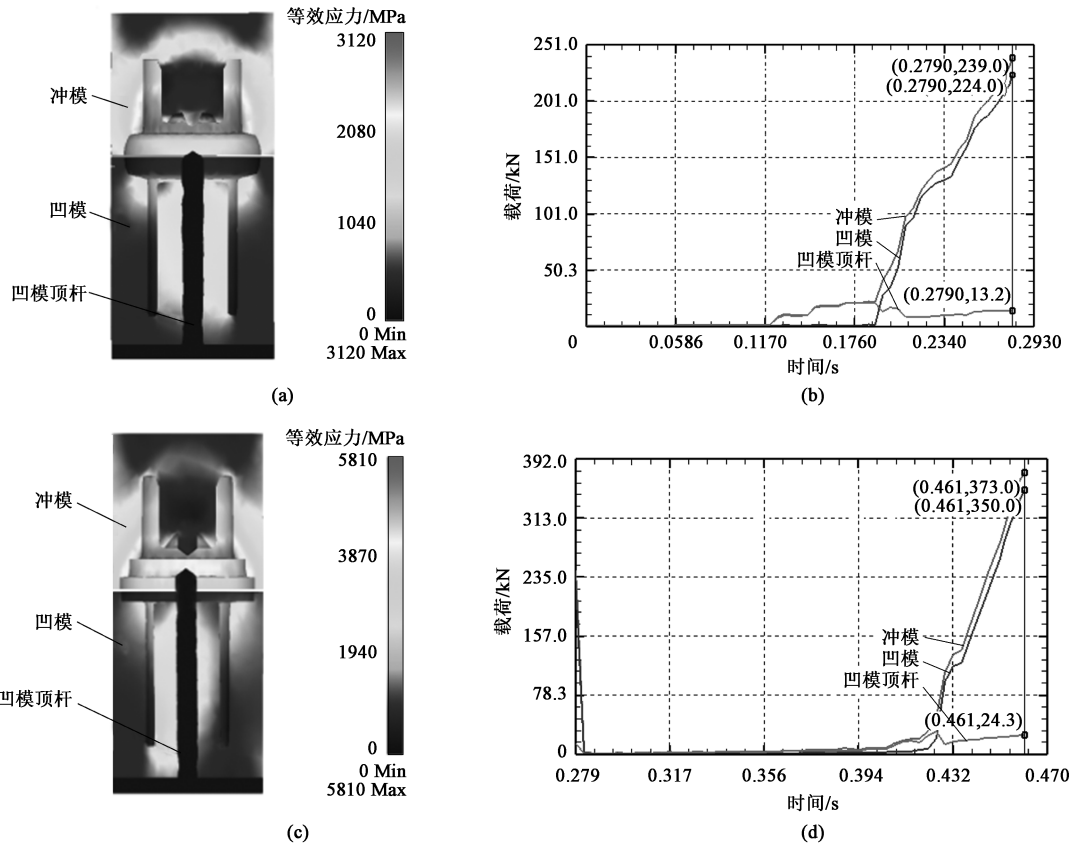


图 4 工步 4、工步 5 下的等效应力分布与模具载荷-时间曲线

(a) 工步 4, 等效应力 (b) 工步 4, 模具载荷-时间曲线 (c) 工步 5, 等效应力 (d) 工步 5, 模具载荷-时间曲线

Fig. 4 Equivalent stress distributions and mold load-time curves at step 4 and step 5

(a) Step 4, equivalent stress (b) Step 4, mold load-time curves (c) Step 5, equivalent stress (d) Step 5, mold load-time curves

工步 4 和工步 5 分别为预成形 84°凸台结构和精成形 84°凸台结构, 冲模受力最大分别为 239 和

373 kN, 主要受力部位均为冲模模具壁边缘, 而冲头相比来说受力较小, 工步 5 将法兰整形为台阶面,

对法兰进行切割, 因此, 金属流动较为剧烈, 载荷较工步4的大, 集中在台阶面周围 (图4)。

4.2 工件的等效应力、等效应变及金属流动结果分析

工件的等效应力和等效应变的分布可以很直观地反映工件的受力状态和变形程度, 而金属流动速度云图在一定程度上能够反映成形时内部金属晶粒的流向, 可观察到应力集中点。图5为关键工步 (工步4与工步5) 工件的金属流动速度云图以及等效应力云图和等效应变分布云图。

在工步4, 如图5a~图5c所示, 金属材料会随着冲模冲头的下压完成凸台的预成形。由于镦制法兰为径向挤压过程, 外侧金属材料会随着冲模冲头下压向外扩散, 从而自然成形为法兰, 而内侧的金属材料会向内挤压, 加上底部的小孔冲棒支撑, 材料会向上流动完成与冲头形状相同的凸台预成形, 同时伴随着打孔深度的不断增加, 冲头受力也逐渐增大, 其最大等效应力和等效应变均集中在成形小孔和镦法兰处, 如图5d~图5f所示。

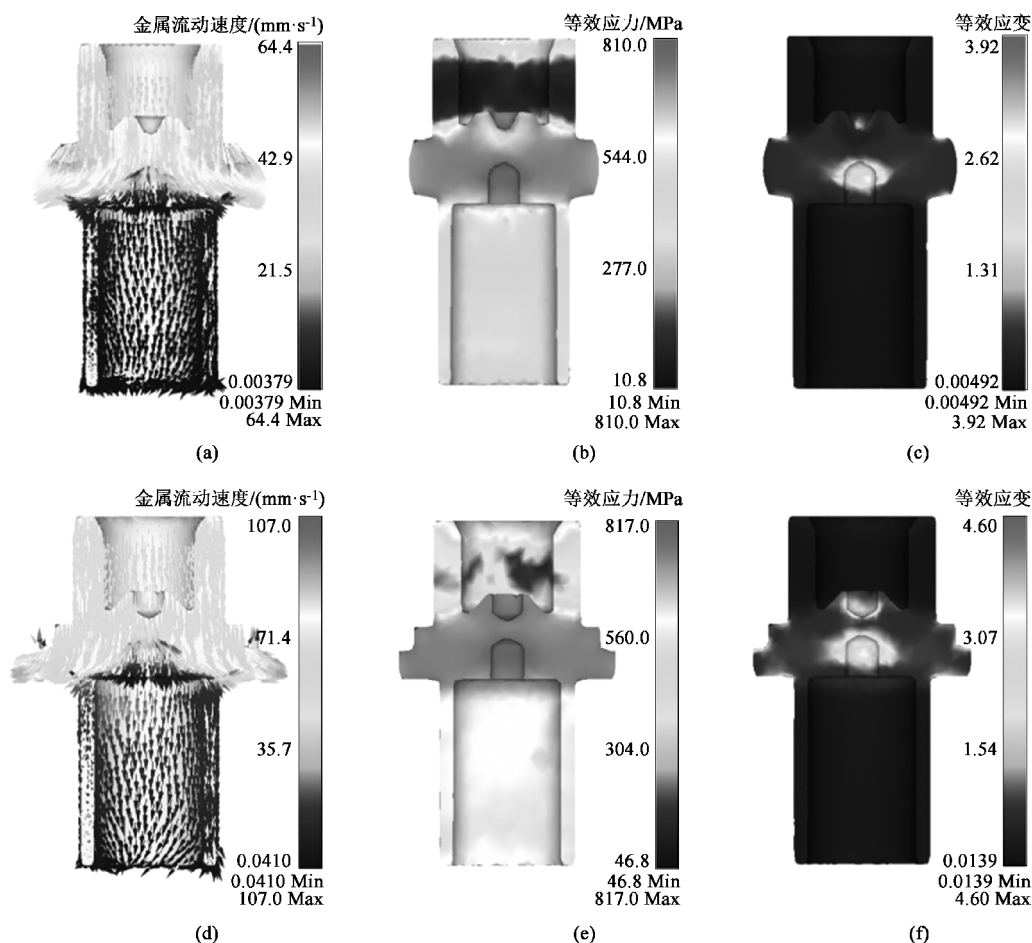


图5 工步4与工步5的金属流动速度、等效应力与等效应变云图

(a) 工步4, 金属流动速度 (b) 工步4, 等效应力 (c) 工步4, 等效应变 (d) 工步5, 金属流动速度
(e) 工步5, 等效应力 (f) 工步5, 等效应变

Fig. 5 Nephograms of metal flow velocity, equivalent stress and equivalent strain at step 4 and step 5

(a) Step 4, metal flow velocity (b) Step 4, equivalent stress (c) Step 4, equivalent strain (d) Step 5, metal flow velocity
(e) Step 5, equivalent stress (f) Step 5, equivalent strain

5 实验验证

根据正交实验的最优结果并通过有限元模拟仿真得到的成形工艺参数, 设计并制作出相关模具, 并在高速多工位冷镦机 (春日 CBP-136L) 上进行

实验, 冷镦机油液为 MPS02A 号油液。实验结果如图6~图8所示, 可以看出, 工件成形良好, 对于凸台的斜角而言, 其成形的饱满性较好, 凸台表面无裂纹, 尺寸精度高, 符合要求。实验结果与模拟仿真结果高度一致, 从而验证了模拟仿真结果的准确性。

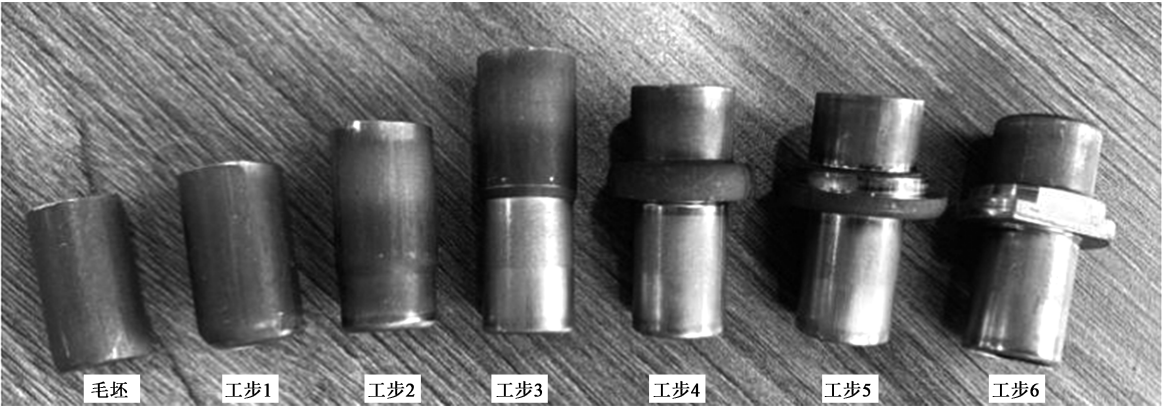
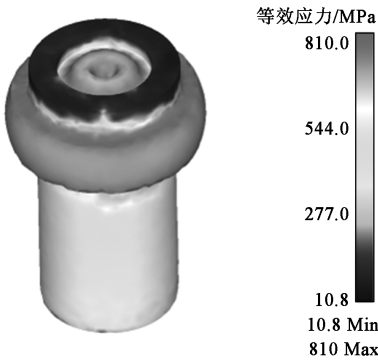


图 6 工步 1~工步 6 的样件图
Fig. 6 Sample drawing from step 1 to step 6



(a)

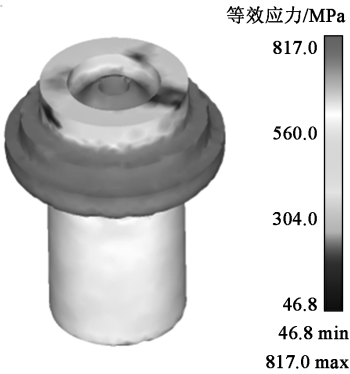


(b)

图 7 工步 4 的凸台成形对比图
(a) 样件图 (b) 模拟仿真图
Fig. 7 Boss forming contrast drawings at step 4
(a) Sample drawing (b) Simulation diagram



(a)



(b)

图 8 工步 5 的凸台成形对比图
(a) 样件图 (b) 模拟仿真图
Fig. 8 Boss forming contrast drawings at step 5
(a) Sample drawing (b) Simulation diagram

6 结论

(1) 以 84°凸台结构的内丝接头为研究对象，在满足产品变形程度的基础上，根据产品结构制定了一种“整形→复合挤压→两边反挤压→预成形

84°凸台结构→精成形 84°凸台结构→冲孔+切边”的加工工艺路线。

(2) 通过有限元模拟方法，观察到模具在成形过程中的受力情况，主要集中在与产品的接触处，且随着工件变形程度越发复杂，其所承受的载荷也越大。而工件的最大等效应力和等效应变分布也同

样集中在形状成形部位,其中工步5的冲模受力最大为373 kN。

(3) 实验结果与模拟结果基本一致,说明所提出的加工工艺路线是可行的,为类似凸台结构的内丝接头的加工工艺提供了一定的指导意见。

参考文献:

- [1] 李英亮. 紧固件概论 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2014.
Li Y L. Introduction to Fasteners [M]. Beijing: China Machine Press, 2014.
- [2] 孙克锐, 徐海利. 双杯壳类零件冷挤压成形工艺及模具设计 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (7): 154-161.
Sun K R, Xu H L. Cold extrusion process and die design of double cup shell parts [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (7): 154-161.
- [3] 龙昆. 法兰轴零件的冷挤压成形工艺及模具设计 [J]. 制造技术与机床, 2018, (9): 148-150.
Long K. Extrusion forming process and die of flange shaft [J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2018, (9): 148-150.
- [4] Lee G A, Choi S G, Yoon D J, et al. Forming technology for cold forging processes of ball stud using non-heated cold forging materials [J]. Materials Science Forum, 2005, 475-479: 3247-3250.
- [5] 褚忠, 瞿伟, 刘铭心, 等. 冷挤压模具磨损优化设计 [J]. 铸造技术, 2017, 38 (12): 2895-2899.
Chu Z, Qu W, Liu M X, et al. Optimum design of cold extrusion die wear [J]. Foundry Technology, 2017, 38 (12): 2895-2899.
- [6] 温焯英. 一种高压开关方帽的冷挤压成形工艺研究 [J]. 热加工工艺, 2019, 48 (17): 79-81.
Wen H Y. Research on cold extrusion process of a high voltage switch square cap [J]. Hot Working Technology, 2019, 48 (17): 79-81.
- [7] 唐星德, 李桂华. 不等厚Z形衔铁零件冷挤压成形工艺改进 [A]. 中国航天电子技术研究院科学技术委员会. 中国航天电子技术研究院科学技术委员会2020年学术年会优秀论文集 [C]. 北京, 2020.
Tang X D, Li G H. Improvement of cold extrusion forming process for unequal-thickness Z-shaped armature parts [A]. Science and Technology Committee of China Academy of Aerospace Electronics Technology. Excellent Proceedings of 2020 Annual Conference of Science and Technology Committee of China Academy of Aerospace Electronics Technology [C]. Beijing, 2020.
- [8] 刘兆红, 柳文清, 段家现. 硬铝空心锥形凸缘螺丝成形工艺及模具 [J]. 煤矿机械, 2016, 37 (9): 49-51.
Liu Z H, Liu W Q, Duan J X. Hard aluminum hollow conical flange screw forming process and die [J]. Coal Mine Machinery, 2016, 37 (9): 49-51.
- [9] 陈红杰. 拖拉机气门套冷挤压工艺及模具设计 [J]. 中国农机化, 2011, (6): 98-101.
Chen H J. Cold extrusion process and die design of tractor valve cover [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2011, (6): 98-101.
- [10] 田福祥, 靳会洲. 高强度螺栓冷挤压成形工艺及模具设计 [J]. 锻压装备与制造技术, 2011, 46 (1): 67-69.
Tian F X, Jin H Z. Process and die design of cold extrude-upsetting for high-strength bolt [J]. China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology, 2011, 46 (1): 67-69.
- [11] 陈颂如, 聂兰启, 汪发春. 盖帽成形工艺及模具设计 [J]. 精密成形工程, 2010, 2 (5): 64-67.
Chen S R, Nie L Q, Wang F C. The forming process and die design of a metal cover [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2010, 2 (5): 64-67.
- [12] 杨长顺. 冷挤压模具设计 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1994.
Yang C S, Cold-extrusion Die Design [M]. Beijing: The National Defense Industry Press, 1994.
- [13] 阮雪榆, 俞子晓, 吴公明. 黑色金属冷挤压许用变形程度的研究 [J]. 上海交通大学学报, 1980, (1): 5-17.
Ruan X Y, Yu Z X, Wu G M. Study on the deformation degree of cold extrusion of black metal [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 1980, (1): 5-17.
- [14] 胡建军, 李小平. Deform-3D 塑性成形 CAE 教程 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2011.
Hu J J, Li X P. Deform-3D Plastic Forming CAE Tutorial [M]. Beijing: Peking University Press, 2011.
- [15] 邱尚磊, 阎峻. 车用法兰连接件冷成形工艺研究及优化 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (6): 106-111.
Qiu S J, Yan J. Research and optimization on cold forming process for vehicle flange connected part [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (6): 106-111.

请关注更加新颖的公众号

www.qctestester.com

