

汽车哈克钉铆套多工位冷镦挤工艺开发与应用

尤富仪¹, 张铁山², 朱倩倩¹

(1. 江苏省连云港工贸高等职业技术学校 交通运输系, 江苏 连云港 222061;
2. 南京理工大学 机械工程学院, 江苏 南京 210014)

摘要: 汽车哈克钉铆套由于具有孔深、壁薄、尺寸小等特点, 成形难度较大, 通常采用的热镦配合切削加工的生产方式存在效率低、质量不稳定等问题, 故提出采用多工位高速冷镦挤生产方式。根据金属塑性成形原理, 针对铆套结构特征初步制定了 2 套多工位冷镦挤成形方案, 并借助 Deform-3D 软件分别进行了数值模拟, 获得了两种方案的铆套成形过程、最大成形载荷和金属流线分布等情况。结果表明: 方案 1 存在成形缺陷, 而方案 2 成形良好, 无缺陷, 载荷也更小。根据最佳方案设计了多工位模具结构, 并进行了生产验证。生产结果与模拟分析结果一致, 铆套质量良好, 无缺陷, 尺寸、性能均能满足实际需求, 生产效率大幅提升, 实现了对哈克钉铆套工艺的升级。

关键词: 哈克钉铆套; 冷镦挤; 载荷; 金属流线; 模具结构

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.12.006

中图分类号: TG386 文献标志码: A 文章编号: 1000-3940 (2022) 12-0031-07

Development and application on multi-station cold upsetting extrusion process for automobile Huck rivet sleeve

You Fuyi¹, Zhang Tieshan², Zhu Qianqian¹

(1. School of Transportation, Jiangsu Lianyungang Vocational and Technical College of Industry and Trade, Lianyungang 222061, China;
2. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210014, China)

Abstract: Due to the characteristics of deep hole, thin wall and small size, the forming of automobile Huck rivet sleeve is difficult. The production mode of hot upsetting and cutting is often used, which has problems such as low efficiency and unstable quality. Therefore, the multi-station high-speed cold upsetting extrusion production mode was proposed. First of all, according to the principle of metal plastic forming, two sets of multi-station cold upsetting extrusion forming schemes were preliminarily formulated according to the structural characteristics of rivet sleeve, and the numerical simulation was carried out with the help of software Deform-3D to obtain the forming process of rivet sleeve, the maximum forming load and the metal streamline distribution of the two schemes. The results show that scheme 1 has forming defects, while scheme 2 has good forming without defects and less load. Secondly, the multi-station mold structure was designed according to the best scheme. Finally, the production verification was carried out, and the results were consistent with the simulation analysis results. Thus, the quality of rivet sleeve is good without defects, the size and performance could meet the actual needs, and the production efficiency is greatly improved, which realizes the upgrading of the Huck rivet sleeve process.

Key words: Huck rivet sleeve; cold upsetting extrusion; load; metal streamline; mold structure

哈克钉 (Huck Rivet) 是一种单面盲拉铆接紧固件, 具有强度高、抗震性能好、安装快速便捷、永不松动等优点, 因此, 哈克钉能够有效延长汽车的维修周期和降低维护成本, 在汽车车身、车架结构紧固中逐渐取代了普通铆钉、螺栓连接以及焊

接^[1-2]。哈克钉的结构如图 1 所示, 由铆钉和铆套两个零件组成, 铆钉具有钉头、锁紧槽、断颈槽、夹紧槽等特征。铆接原理如图 2 所示, 利用铆钉枪压紧夹紧槽, 拉伸铆钉的同时挤压铆套, 使铆套产

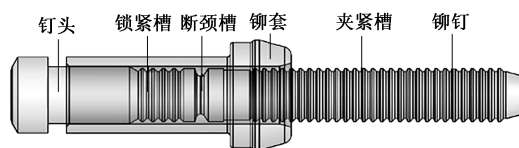


图 1 哈克钉结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Huck rivet structure

收稿日期: 2022-01-19; 修订日期: 2022-04-25

基金项目: 江苏省职业教育教学改革研究课题 (B/2020/10/120)

作者简介: 尤富仪 (1987-), 男, 硕士, 讲师

E-mail: youfy009@163.com

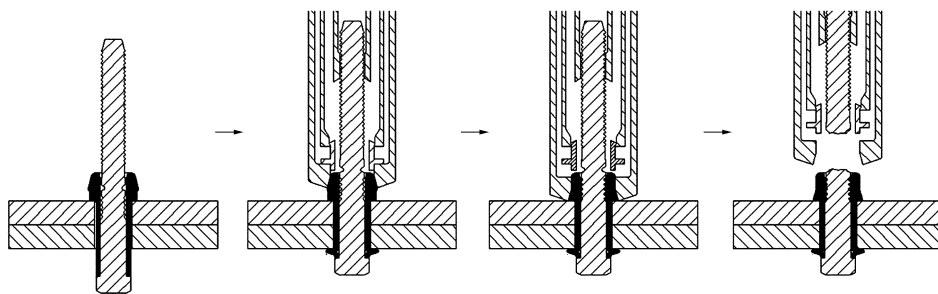


图 2 哈克钉的铆接原理图

Fig. 2 Riveting principle diagram of Huck rivet

生塑性变形, 铆套尾部形成镦头, 铆套头部材料变形, 进入铆钉锁紧槽内, 实现紧密配合, 铆钉枪继续拉伸直至铆钉断颈槽断裂, 铆接过程结束^[3]。

由于国内汽车市场极大, 单纯依靠进口采购成本较高, 因此, 必须提高自主生产能力。目前, 铆钉通过冷搓生产, 实现了近净成形^[4-5], 既能保证生产效率, 又能保证铆钉质量; 而铆套由于孔深、壁薄、整体尺寸小等特点, 成形难度较大, 目前常采用热镦配合切削的加工工艺, 存在生产效率低、质量不稳定等问题, 显然已经无法满足生产需求, 不具备市场竞争力。因此, 引进国外先进的冷镦技术, 完成铆套新工艺的开发是非常有必要的, 使产品的机械强度、表面光洁度、产品质量稳定性、材料利用率、生产效率等均得到明显提升^[6]。同时, 有限元技术在工艺开发方面的应用价值已被诸多试验证明^[7-9], 不仅能实现指定工艺下零件的虚拟成形, 达到检验工艺、指导设计的目的, 还能节省大量的制模、试模和修模时间, 缩短开发周期, 降低成本。因此, 本文根据金属塑性成形原理, 针对哈克钉铆套的结构特征, 初步制定了两套多工位冷镦挤成形方案, 并借助 CAE 分析软件 Deform-3D 分别进行了成形模拟, 以期获得更合适的成形方案。

1 哈克钉铆套工艺分析与方案制定

哈克钉铆套的零件图如图 3 所示, 材质为 SWRCH10A 钢, 化学成分见表 1。由图 3 可知, 哈克钉铆套主要包括铆套头和通孔两个主要特征。根据金属塑性成形原理确定铆套头通过镦粗成形, 而通孔经反挤压后冲连皮成形。由图 3 可计算得到铆套的孔深与直径的比值为 3.93, 大于 2.5 (一次成形的极限孔径比), 可知为深孔挤压, 一步成形时凸模工作部分的长径比太大, 容易引起凸模轴向失稳弯曲, 致使裂纹产生而折断^[10], 影响凸模寿命, 因此宜采

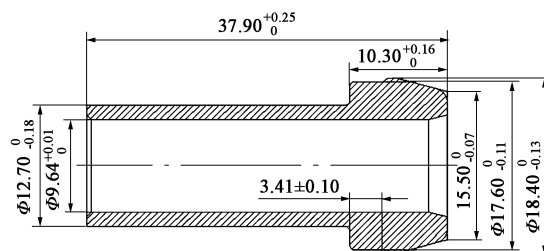


图 3 哈克钉铆套零件图

Fig. 3 Part diagram of Huck rivet sleeve

表 1 SWRCH10A 钢的化学成分 (% , 质量分数)

Table 1 Chemical compositions of SWRCH10A steel (% , mass fraction)

C	Si	Mn	P	S	Al	Fe
0.08~0.13	≤0.10	0.30~0.60	≤0.03	≤0.035	≥0.02	余量

用“两次反挤压+冲连皮”成形或者“一次反挤压+复合镦挤+冲连皮”成形工艺。

以不超过材料许用变形程度的 80% 为前提, 合理设计各工位的零件图, 最终制定了如图 4 所示的两套多工位冷镦挤成形方案。两种方案的下料尺寸相同, 工位 1、工位 2、工位 5、工位 6 相同, 工位 3 和工位 4 不同。多工位具体为: 工位 1, 整形; 工位 2, 反挤压初步成形孔; 工位 3, 方案 1 为将零件翻转放入模具, 对铆套头进行预成形, 方案 2 为二次反挤压, 加深孔深; 工位 4, 方案 1 为复合镦挤, 铆套头进一步成形、加深孔深, 方案 2 为将零件翻转放入模具, 铆套头预镦; 工位 5, 终镦成形铆套头; 工位 6, 冲连皮。利用 Deform-3D 软件分别进行成形模拟, 研究各工位零件的成形情况, 并对比两套方案。由于冲连皮为剪切断裂过程, 成形简单且不易出现缺陷, 因此本文不再做分析。

2 铆套冷镦有限元分析

2.1 建模与参数设定

通过 Solidworks 软件进行坯料与两套方案中各

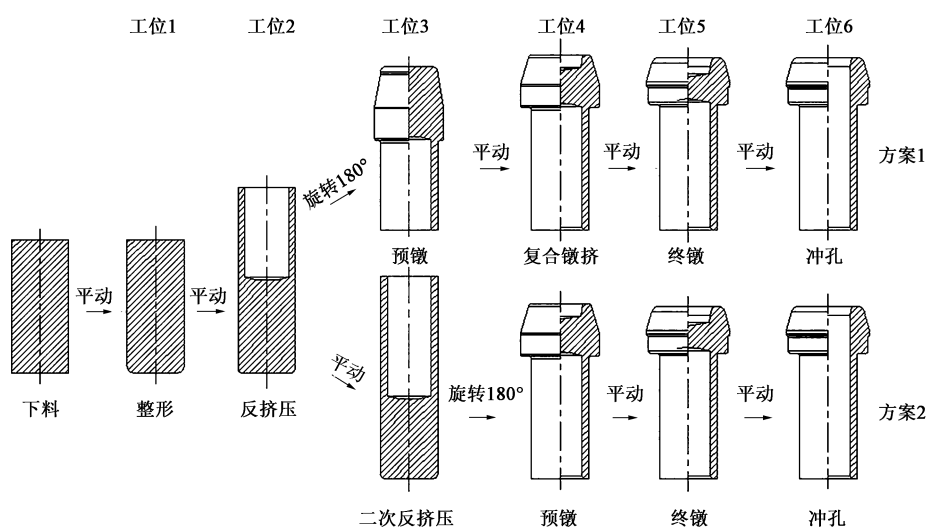


图 4 哈克钉铆套多工位冷镦挤成形方案

Fig. 4 Multi-station cold upsetting extrusion forming schemes of Huck rivet sleeve

工位上、下模的绘制，并确定好位置关系，由于铆套为回转件，取 1/2 模型以 Stl 格式导入 Deform-3D 软件中进行参数设定。坯料材料为 SWRCH10A 钢，选择塑性体，网格划分为 40000 个，模具选择刚性体；冷镦温度为 20 ℃；设置动模的方向和速度大小；摩擦方式为剪切摩擦，摩擦因数为 0.12；在边界条件中确立对称面；在模拟控制中确定动模行程、模拟步长和模拟步数，并生成模拟文件。两方案的工位 1 完成计算后，以此为基础，对上、下模进行替换，继续进行工位 2 的参数设定与计算，以此类推，直至完成剩余 5 个工位的计算^[11]。

2.2 铆套成形情况分析

两种方案的铆套成形模拟结果如图 5 所示。由图 5a 可知，方案 1 中整形、反挤压、预镦工位成形良好，未出现缺陷，而复合镦挤工位的部分材料未

流向指定位置，进入了上、下模间隙中，导致铆套薄壁下端出现了充不满的缺陷以及铆套头中间部位出现了不良飞边。采用该方案，在实际生产中不仅无法获得外形完整的铆套，还会损坏上、下模，因此，未对终镦工位进行模拟。方案 1 中各工位的载荷变化曲线如图 6a 所示，其中反挤压工位的成形前期，随着坯料与上、下模接触面积的增加，载荷不断增大，而在成形中后期，上模工作带、下模内壁与坯料已完全接触，同时模具型腔并不是封闭形式，因此载荷变化不大，趋于平稳；其余工位的载荷均随着成形中坯料与模具接触面积的增加而增大，受封闭式型腔的影响，在成形完成时达到最大值，而复合镦挤工位，成形后期受到飞边的影响，导致载荷急剧上升。各工位的最大载荷分别为 52.5、87.4、163.1 和 351.4 kN。

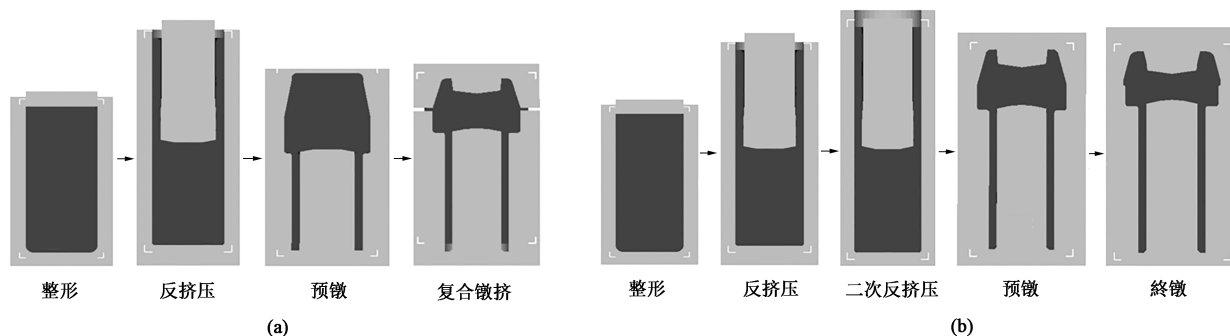


图 5 哈克钉铆套成形结果示意图

(a) 方案 1 (b) 方案 2

Fig. 5 Schematic diagrams of forming results for Huck rivet sleeve

(a) Scheme 1 (b) Scheme 2

方案 2 中各工位零件的成形情况如图 5b 所示。工位 1、工位 2 与方案 1 相同；工位 3 通过二次反挤压优先完成铆套薄壁的成形，避免了方案 1 中的充不满缺陷；工位 4 由于在铆套头成形中无多余材料，避免了材料向上、下模间隙流动，从而避免了飞边的产生；工位 5 完成了铆套头的最终成形。由图 5b 可知，方案 2 中各工位零件均成形良好，未见不良缺陷，这表明方案 2 在理论上能实现铆套的成形。方案 2 中各工位的载荷变化曲

线如图 6b 所示。二次反挤压工位载荷的变化规律与反挤压工位一致，先稳定增长后趋于平稳，最大载荷为 106.7 kN；预镦工位的载荷随坯料与模具接触面积的变化先缓慢增加后迅速增大到最大值，最大载荷为 198.4 kN。与方案 1 相比，工位 1、工位 2 和工位 5 的最大载荷相同（方案 1 中工位 5 虽未模拟，但理论上是相同的），但工位 3 和工位 4 的载荷明显更小，更利于提高模具寿命、降低模具成本^[12]。

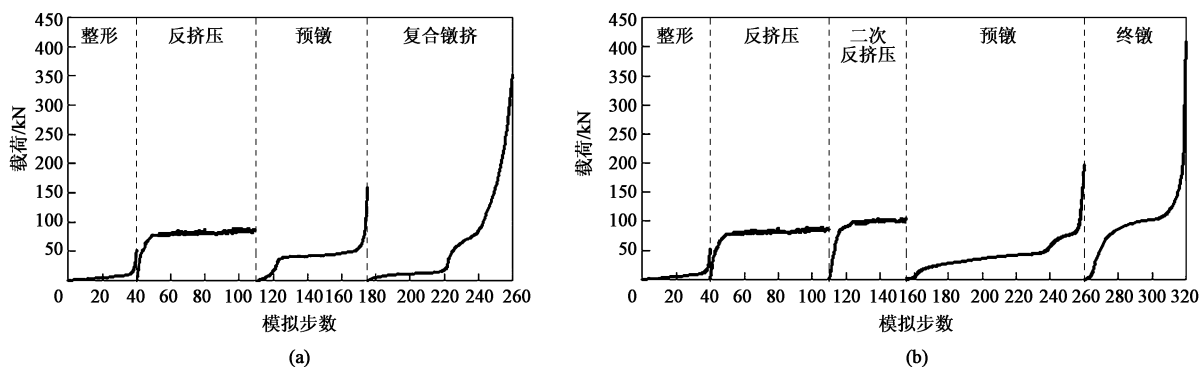


图 6 各工位成形载荷变化曲线

(a) 方案 1 (b) 方案 2

Fig. 6 Variation curves of forming loads at each station

(a) Scheme 1 (b) Scheme 2

2.3 材料流动过程分析

对两种方案下两个不同工位的材料流动情况进行分析。方案 1 中预镦工位主要进行铆套头的预成形，由于该工位不进行孔加深，因此，在上模挤压下坯料孔壁以及下端与下模之间的微小间隙很快被完全填充，材料向下流动受阻，只能转向径向流动，完成铆套头部的镦粗成形（图 7a~图 7c），材料流动合理。零件成形完成后的金属流线图如图 8a 所示，流线连续，无缺陷产生。方案 1 中复合镦挤前期在上模挤压下，材料向下流动加深内孔，但随着坯料与下模接触面积的增大，阻碍了材料向薄壁填充，使得材料向阻力更小的下模铆套头型腔填充（图 7d）；到复合镦挤中期，下模铆套头型腔填充完成，一部分材料继续向下流动填充薄壁，而另一部分材料流入阻力较小的上、下模间隙中，形成了不良飞边（图 7e）；复合镦挤后期，飞边的存在影响了上、下模合模，实际生产中会损坏模具，同时铆套薄壁下端形成充不满的缺陷（图 7f）。零件成形完成后的金属流线如图 8b 所示，铆套头部变形较大，头部中间出现飞边缺陷，而铆套薄壁处的材料基本不发生变形，仅向下做刚性平移。

方案 2 中二次反挤压工位的金属流动情况如图 9a、图 9b 所示，上模下压，材料受下模限制无法向下流动，沿着上模工作带、下模内壁向上流动。零件的金属流线图如图 8c 所示，与上模接触处的周围材料变形较大，下方材料无变形，薄壁处材料向上做刚性平移，无折叠等缺陷产生。方案 2 中预镦工位，由于前面工位已实现铆套薄壁的成形，因此，该工位仅需完成铆套头成形工作，其金属流动情况与方案 1 中预镦工位类似（图 9c~图 9e）。成形后零件的金属流线图如图 8d 所示，薄壁处不发生变形，头部变形大，存在大变形区、小变形区和难变形区 3 个区域^[13]，但流线连续均匀，未见折叠等缺陷。

3 工艺试验

基于上述分析结果，根据方案 2 进行多工位模具结构设计，采用组合式模具以提高模具寿命，各工位零件与下模间的间隙为 0.02 mm，模具结构如图 10 所示，各工位的零件通过机械手夹钳传送，通过液压式顶杆完成脱模。通过多工位高速冷镦机进行工艺试验，坯料为直径为 $\Phi 12.5$ mm 的 SWRCH10A

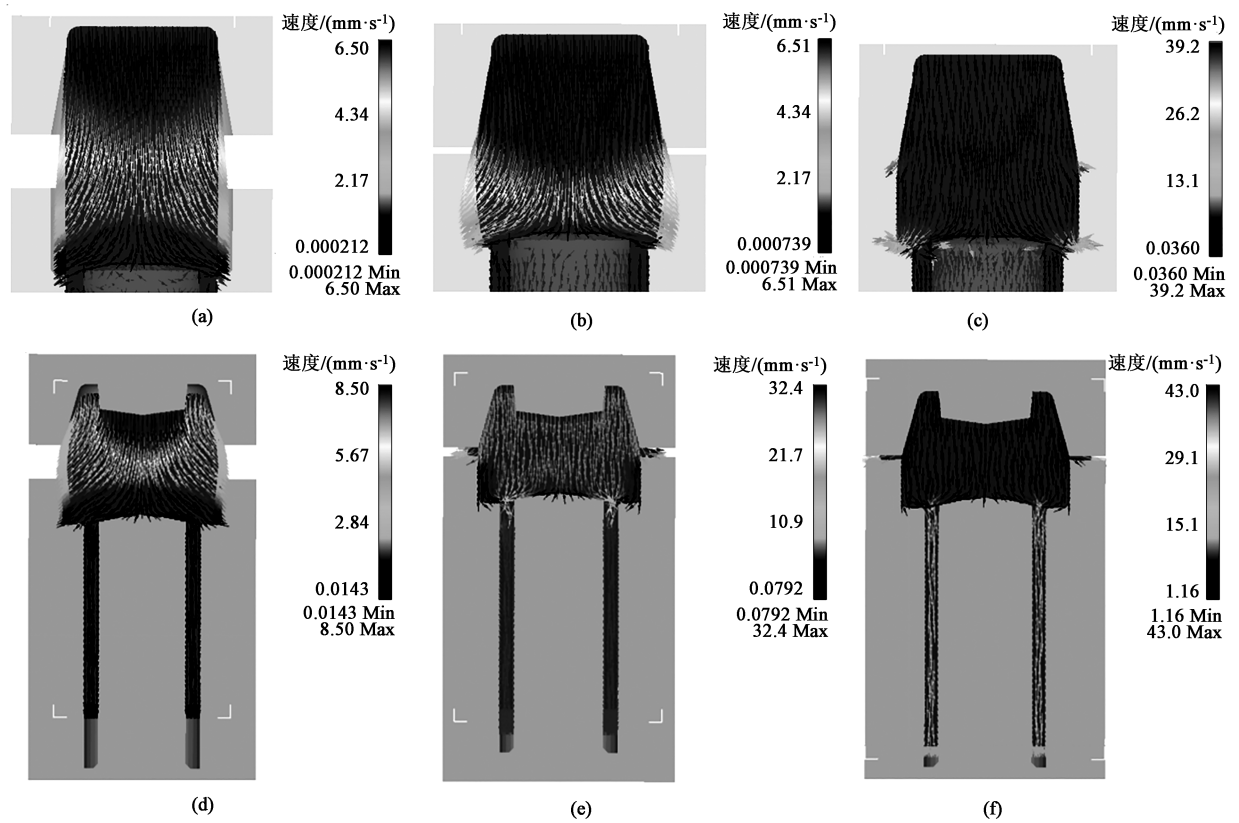


图 7 方案 1 的材料流动情况
(a) 预镦前期 (b) 预镦后期 (c) 预镦结束 (d) 复合镦挤前期 (e) 复合镦挤中期 (f) 复合镦挤后期

Fig. 7 Material flow of scheme 1
(a) Early stage of pre-upsetting (b) Later stage of pre-upsetting (c) End of pre-upsetting (d) Early stage of compound upsetting extrusion
(e) Middle stage of compound upsetting extrusion (f) Later stage of compound upsetting extrusion

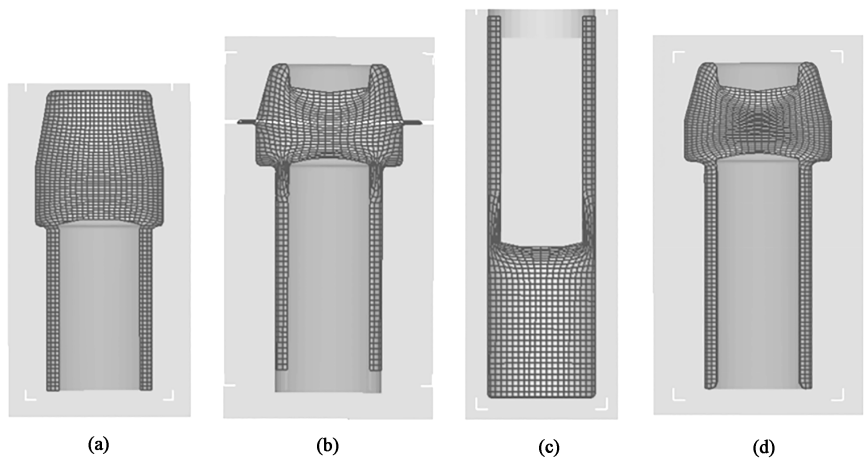


图 8 金属流线图
(a) 方案 1, 预镦工位 (b) 方案 1, 复合镦挤工位 (c) 方案 2, 二次反挤压工位 (d) 方案 2, 预镦工位

Fig. 8 Metal streamline diagrams
(a) Scheme 1, pre-upsetting station (b) Scheme 1, compound upsetting extrusion station
(c) Scheme 2, secondary reverse extrusion station (d) Scheme 2, pre-upsetting station

盘条线材，需经过退火软化以及磷皂化处理。退火工艺为：加热至 760~770℃，保温 3~4 h 后炉冷至 670~680℃，等温 4 h，炉冷至 500℃，出炉空冷。

成形过程中喷涂 M0618A 润滑油，生产中产品脱模顺畅，未出现模具损坏问题。铆套各工位的零件成形图如图 11 所示，零件成形完整，表面质量良好，

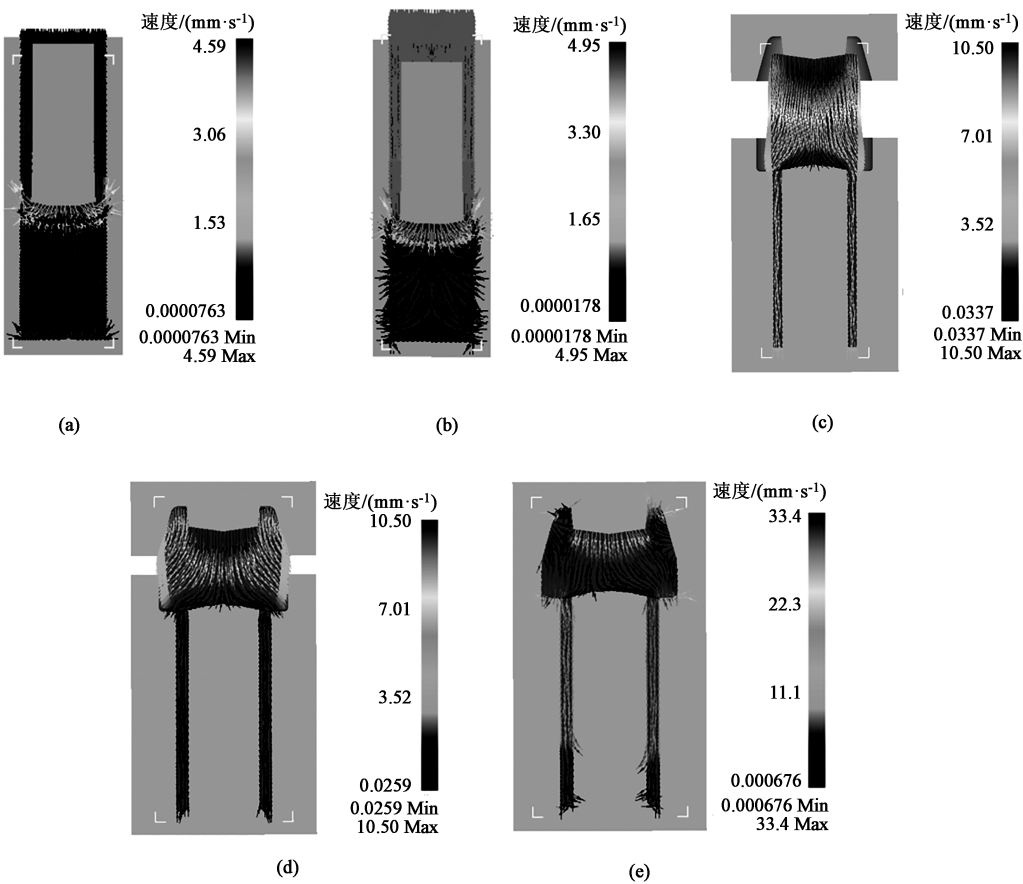


图 9 方案 2 的材料流动情况
(a) 二次反挤压前期 (b) 二次反挤压结束 (c) 预镦前期 (d) 预镦中期 (e) 预镦结束

Fig. 9 Material flow of scheme 2
(a) Early stage of secondary reverse extrusion (b) End of secondary reverse extrusion (c) Early stage of pre-upsetting
(d) Middle stage of pre-upsetting (e) End of pre-upsetting

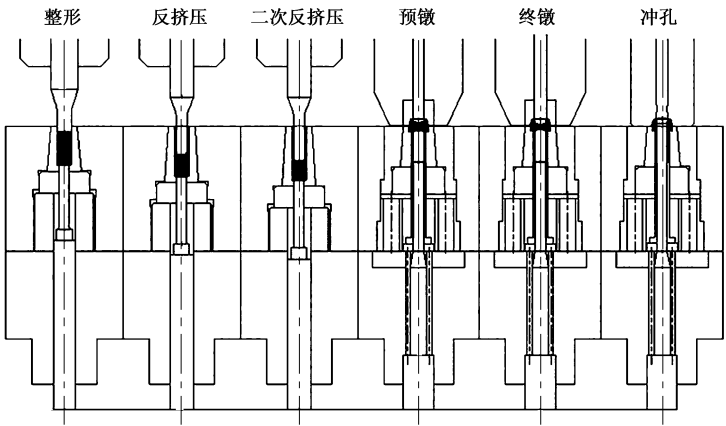


图 10 哈克钉铆套多工位冷镦挤模具结构
Fig. 10 Multi-station cold upsetting extrusion die structure of Huck rivet sleeve

无刮伤，检验结果显示，铆套内部无缺陷问题，尺寸精度等各项指标均能满足厂家需求，验证了模具结构及工艺方案的可靠性，与原工艺相比，生产效率大幅提升，实现了对哈克钉铆套工艺的升级。

4 结语

针对哈克钉铆套目前工艺中存在的效率低、质



图 11 哈克钉铆套各工位零件成形图

Fig. 11 Forming diagram of parts at each station for Huck rivet sleeve

量不稳定等实际问题，引进了国外先进的冷镦技术，结合金属塑性成形原理，提出了两套多工位冷镦挤成形方案；并利用 Deform-3D 软件分别进行了成形模拟，对比了两种方案中的铆套成形过程、最大成形载荷、金属流线分布等情况，以及时预测缺陷；分析了冷镦方案的可行性，为冷镦试验提供了依据，并基于最佳方案，设计了相应的多工位模具结构。最后，对最佳方案及模具结构进行了生产验证，成形结果与模拟结果一致，铆套质量良好，无冷镦缺陷，尺寸、性能均能满足实际需求，生产效率大幅提升，实现了对哈克钉铆套工艺的升级。

参考文献：

- [1] 吴桃. 铁路货车专用拉铆钉及套环试制工艺 [J]. 机械研究与应用, 2015, 28 (6): 187-188.
Wu T. Trail-production technology of the special pulling rivet and lantern ring for rail wagon [J]. Mechanical Research & Application, 2015, 28 (6): 187-188.
- [2] 刘洪博, 孙爱友, 聂光辉, 等. HUCK 钉在重卡自卸车型车架上的应用研究 [J]. 汽车实用技术, 2017, (3): 13-16.
Liu H B, Sun A Y, Nie G H, et al. HUCK nailed on the heavy card dump car frame of application research [J]. Automobile Applied Technology, 2017, (3): 13-16.
- [3] 陈斌, 曾柳妃. Huck 铆钉在铝合金客车车身上的应用 [J]. 客车技术与研究, 2018, 40 (5): 41-43.
Chen B, Zeng L F. Application of Huck rivet to aluminum alloy coach body [J]. Bus & Coach Technology and Research, 2018, 40 (5): 41-43.
- [4] 周志杰, 孔佑顺, 李飞, 等. 复杂薄壁 ZL101A 壳体的近净成形技术研究 [J]. 热加工工艺, 2021, 50 (21): 58-61, 57.
Zhou Z J, Kong Y S, Li F, et al. Study on near-clean forming technology of complex thin-walled ZL101A shell [J]. Hot Working Technology, 2021, 50 (21): 58-61, 57.
- [5] 王瑶, 查光成, 谢斌, 等. 螺旋伞齿轮近净成形试验研究 [J]. 塑性工程学报, 2020, 27 (4): 33-40.
Wang Y, Zha G C, Xie B, et al. Experimental research on near net shape forming of spiral bevel gear [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2020, 27 (4): 33-40.
- [6] 陈超杰. 铁路货车专用铆钉冷镦工艺分析 [J]. 凿岩机械气动工具, 2020, (1): 31-39.
Chen C J. Analysis of cold heading process for special rivets for railway wagons [J]. Rock Drilling Machinery & Pneumatic Tools, 2020, (1): 31-39.
- [7] 闫中原, 张晓波, 徐洪磊, 等. 齿套闭塞式锻造成形研究 [J]. 精密成形工程, 2022, 14 (2): 33-38.
Yan Z Y, Zhang X B, Xu H L, et al. Closed die forging forming of the truncated tooth sleeve [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2022, 14 (2): 33-38.
- [8] 马世博, 孙立科, 张双杰, 等. 多台阶电机轴镦挤复合成形工艺 [J]. 塑性工程学报, 2021, 28 (7): 28-35.
Ma S B, Sun L K, Zhang S J, et al. Upsetting extrusion composite forming process of multi-step electromotor shaft [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28 (7): 28-35.
- [9] 何伟, 董万鹏, 孙礼宾, 等. 基于 Deform-3D 的发动机齿轮轴热锻成形结构优化模拟 [J]. 塑性工程学报, 2019, 26 (6): 42-49.
He W, Dong W P, Sun L B, et al. Optimization simulation of hot forging structure of engine gear shaft based on Deform-3D [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2019, 26 (6): 42-49.
- [10] 梁强. 活塞销冷镦挤成形微折叠缺陷分析及改进措施 [J]. 塑性工程学报, 2018, 25 (6): 99-104.
Liang Q. Micro-folding defect analysis and improvement of cold upsetting-extruding process for piston-pin [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2018, 25 (6): 99-104.
- [11] 唐季平, 胡传鹏, 魏李, 等. 双筒形皮带轮多次拉深成形工艺 [J]. 精密成形工程, 2018, 10 (2): 99-102.
Tang J P, Hu C P, Wei L, et al. Multi-step deep drawing process of double barrel pulley [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2018, 10 (2): 99-102.
- [12] 赵志繁, 侯怀书, 钱瑞福, 等. 六角法兰面锁紧螺母冷镦挤成型数值模拟及优化 [J]. 热加工工艺, 2020, 49 (17): 101-104, 107.
Zhao Z F, Hou H S, Qian R F, et al. Numerical simulation and optimization of cold heading-extrusion of hexagon flange face locking nuts [J]. Hot Working Technology, 2020, 49 (17): 101-104, 107.
- [13] 陈凌霄, 李月超. 汽车六角球头冷锻工艺优化与数值仿真 [J]. 材料科学与工艺, 2020, 28 (5): 75-82.
Chen L X, Li Y C. Optimization and numerical simulation of cold forging process for automobile hexagonal ball head [J]. Materials Science and Technology, 2020, 28 (5): 75-82.