

汽车传动轴轴套的近净成形工艺研究与应用

高 琳¹, 史海红², 任 燕³

(1. 安阳市中等职业技术学校 机电交通部, 河南 安阳 455000; 2. 安阳职业技术学院 安阳市高级技工学校 汽车工程系, 河南 安阳 455000; 3. 河南理工大学 鹤壁工程技术学院, 河南 鹤壁 458030)

摘要: 为解决一种汽车传动轴轴套切削加工生产效率低、成本高的问题, 根据其结构特点并基于塑性成形理论设计了两种全新的加工工艺, 即先通过冷镦加工制坯, 后经少量切削完成最终成形, 可使材料利用率从 26.9% 提高至 86.1%。利用有限元软件 Deform-3D 对这两种工艺的冷镦部分进行成形模拟, 评估了两种工艺的可行性, 并对两种工艺各工位的等效应力、成形力、损伤值等进行了对比。结果表明: 两种工艺均能满足成形需求, 获得预期的制坯件, 并且采用方案 2 时, 等效应力和损伤值分布更好, 同时所需成形力更小, 利于提高制坯件质量和降低模具冲击。最后, 将方案 2 应用于轴套的加工, 完成了生产试验, 最终得到的制坯件成形较好, 无缺陷, 与模拟结果一致, 经最终少量切削后, 轴套尺寸完全符合需求, 与之前工艺相比, 效率和成本均得到明显改善。

关键词: 传动轴轴套; 冷镦; 切削; 等效应力; 成形力; 损伤值

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.09.004

中图分类号: TG316.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2023) 09-0023-09

Research and application on near net forming process for automobile transmission shaft bushing

Gao Lin¹, Shi Haihong², Ren Yan³

(1. Ministry of Mechanical, Electrical and Transport, Anyang Secondary Vocational and Technical School, Anyang 455000, China;
2. Department of Automotive Engineering, Anyang Senior Technical School, Anyang Vocational and Technical College, Anyang 455000, China;
3. Hebi Institute of Engineering and Technology, Henan Polytechnic University, Hebi 458030, China)

Abstract: In order to solve the problems of low production efficiency and high cost in the cutting of an automobile transmission shaft bushing, two new machining processes were designed according to its structural characteristics and plastic forming theory, namely, the billet was made by cold heading firstly, and then the final forming was completed by a small amount of cutting, which increased the material utilization rate from 26.9% to 86.1%. Then, the forming of the cold heading part for the two processes was simulated by finite element software Deform-3D, respectively, the feasibility of the two processes was evaluated, and the equivalent stress, forming force and damage value of each station for the two processes were compared. The results show that the two processes can meet the forming requirements and obtain the expected billet parts. When the scheme 2 is adopted, the distributions of equivalent stress and damage values are better and the required forming force is smaller, which is beneficial to improve the quality of billet part and reduce the mold shock. Finally, the scheme 2 was applied to the machining of the shaft bushing, and production experiments were completed. The final billet part is well formed without defects, which is similar to the simulation results. After a small amount of final cutting, the size of shaft bushing fully meets the requirements, and compared with the previous process, the efficiency and cost are significantly improved.

Key words: transmission shaft bushing; cold heading; cutting; equivalent stress; forming force; damage value

汽车零部件成形制造工艺主要包含切削加工、楔横轧、辊弯成形、锻压、热成形和复合成形等,

近年来取得了大量积极成果, 如曹建国等^[1]完成了一种异型管辊弯成形工艺优化, 解决了角度偏差大、精度低的难题; 赵妍洁等^[2]对一种汽车的 B 柱加强板的冲压工艺进行了研究, 对冲压参数进行了优化, 控制了减薄率, 有效地降低了成形缺陷, 提高了合格率; 曹建国等^[3]采用 COPRA 建立异型管辊弯成形的有限元模型, 对十二机架完整辊弯成形过程进

收稿日期: 2023-07-04; 修订日期: 2023-08-19

基金项目: 河南省高等学校重点科研项目 (23B460027)

作者简介: 高 琳 (1975-), 女, 学士, 高级讲师

E-mail: gaolin19750@126.com

行有限元仿真,得到了过弯缺陷产生的主因,提高了实际生产的新辊型成形质量;朱文礼等^[4]对一种高强钢的温冲压工艺进行了研究,了解了钢板的延展性随成形温度和保温时长的变化规律,使得该材料能更好地应用于各类汽车冲压件;汪建武等^[5]对一种控制臂的楔横轧制坯工艺进行了研究,并采用铝合金材料,不仅实现了产品的轻量化,也解决了以往工艺存在的材料利用率低、效率低、缺陷多、质量差的难题。以上研究表明,汽车零部件制造工艺对于汽车工业的发展意义重大,良好的制造工艺不仅能加快生产效率、提高零件质量、减少人力资源、降低生产成本,对汽车整车性能的提高也有较大帮助,因此,汽车零部件先进制造技术具有极高的研究价值,能有效促进市场竞争力的提升。河南莱利汽车传动件制造厂采用切削加工生产一种国产汽车的传动轴轴套,该轴套零件图如图 1 所示,截面形状复杂,各处尺寸多变,其最常规的加工方式为切削加工,但材料切除量高达 73.1%,造成大量浪费,并且由于加工工序较多,导致单个零件的加工时间较长,生产效率较低,批量生产时价格较高,不利于提高销量,因此,寻求工艺创新,以保证轴套生产质量为前提,通过提高加工效率和材料利用率来缩减成本,从而打造价格优势。应以上需求,本文根据轴套的结构特点并基于塑性成形理论设计了两种全新的加工工艺,以实现近净成形^[6-8],具体为先通过冷锻加工制坯,再通过少量切削完成难成形部分的成形,其中冷锻阶段由于需要将材料许用变形程度、零件结构复杂性、模具设计寿命等考虑其中^[9-12],因此,基本不可能采用一步直接成形,而需采用多道次成形,其中任一工位出现缺陷均会影响零件的最终质量,因此,为促进开发效率、降低开发成本,利用有限元软件 Deform-3D 对这两种工艺的冷锻部分进行成形模拟^[13-14],评估工艺的可行性,并适时调整、寻优,以提高成功率。

1 结构分析及工艺制定

通过对图 1 所示的零件结构图分析可知,轴套上端特征比较复杂,且尺寸较小,若通过塑性成形,则需要制造具有同样特征的模具,加工比较困难,成本较高,因此该特征仍采用原来的切削加工成形。另外,对于轴套下端的锥形特征,其壁厚越来越小,会增大摩擦阻力,增加成形难度,也不利于提高模具寿命,因此,将锥形特征补充为柱形特征,冷锻

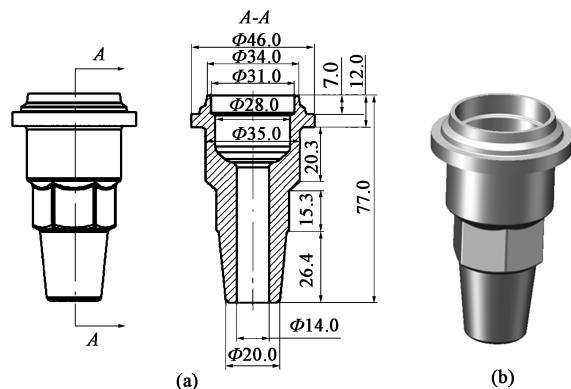


图 1 轴套零件图

(a) 二维结构图 (b) 三维模型图

Fig. 1 Part drawings of shaft bushing

(a) 2D structure diagram (b) 3D model diagram

完成后再通过切削成形,最终确定的制坯件结构如图 2 中工位 6 零件所示。随后结合塑性成形原理来确定制坯件各特征的成形方式^[15],例如,制坯件上端及中间六角特征可采用镦粗成形,下端柱形特征采用正挤压成形,中心孔采用复合挤压后冲断连皮成形等,同时充分考虑生产材料 ML35CrMo 钢的许用变形程度^[16],在满足成形要求的前提下,选择合理的变形工位数进行中间各序零件的设计,以降低制件开裂风险及各工位模具受力,经过反复调整,最终确定了如图 2 所示的两种 6 工位冷锻方案。两方案采用的坯料尺寸完全相同,均为 $\Phi 27 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$,工位 1 相同,由于坯料通过切料装置完成下料后会出现偏心现象,为保证冷锻质量,均需对坯料进行整形^[17];工位 6 也相同,均为冲断连皮;两种方案的材料实际利用率均为 86.1%。

2 建立材料及仿真模型

采用 Deform-3D 软件对制坯件的两种冷锻成形工艺进行模拟试验,其中两方案中工位 6 为冲断连皮,过程比较常规,因此不再进行仿真分析,为保证研究结果的可信度,利用万能试验机完成了 ML35CrMo 钢的常温压缩试验^[18],获得了材料在不同条件下的实际力学性能数据,拟合曲线如图 3 所示,并将其导入 Deform-3D 中生成仿真材料模型。利用 Solidworks 软件对图 2 中两种工艺各工位模具分别进行三维建模,随后以 STL 格式导入 Deform-3D 中建立仿真模型。以方案 2 为例,如图 4 所示,坯料及各工位零件设定为塑性体,同时进行网格划分,网格类型采用四面体单元,划分数量为 50000 个,

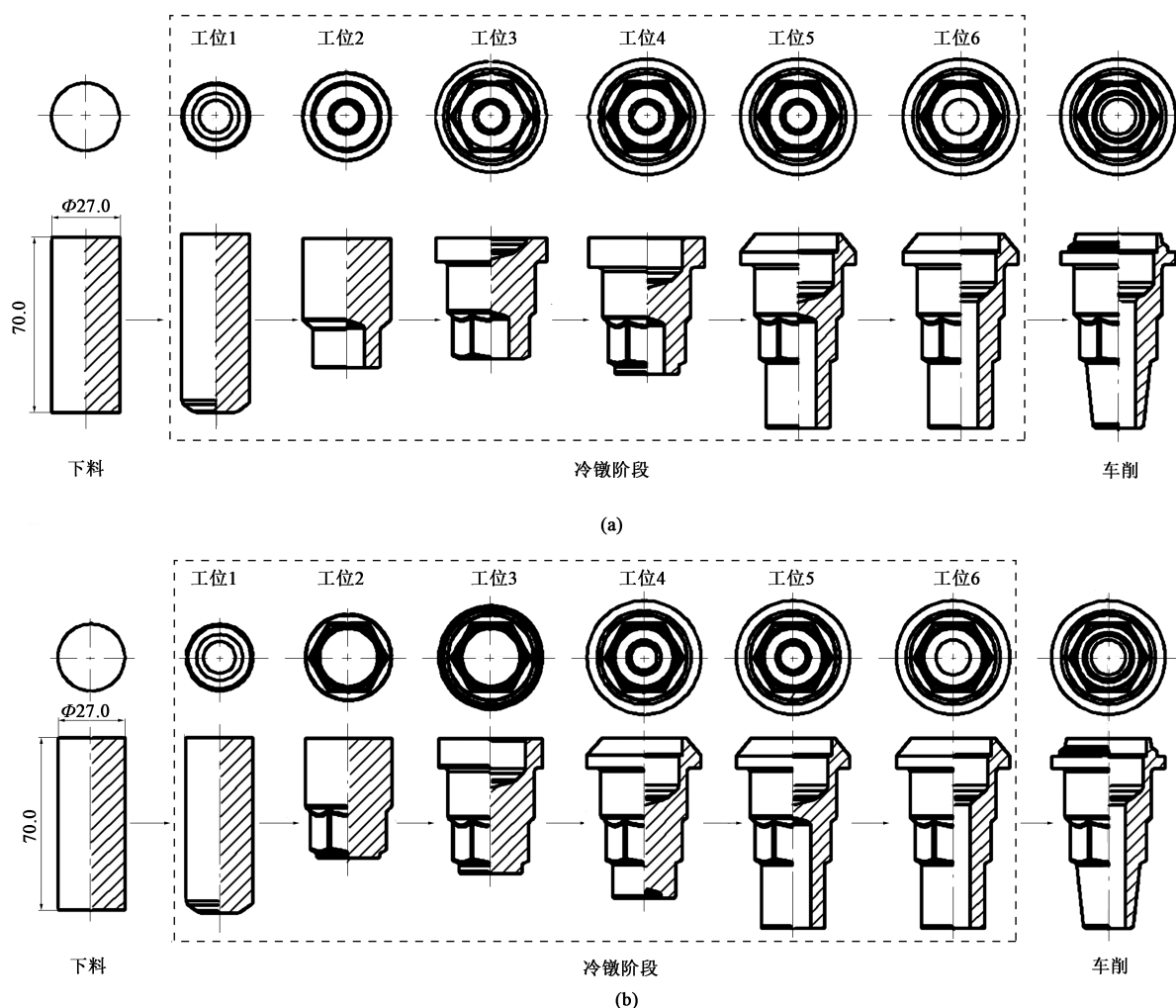


图2 轴套的成形工艺

(a) 方案1 (b) 方案2

Fig. 2 Forming processes of shaft bushing

(a) Scheme 1 (b) Scheme 2

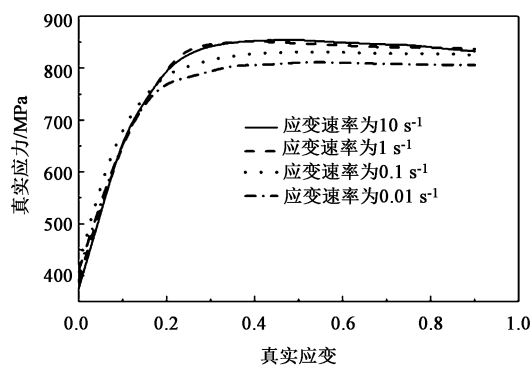


图3 ML35CrMo 钢的真实应力-真实应变曲线

Fig. 3 True stress-true strain curves of ML35CrMo steel

其材料为上述建立的 ML35CrMo 钢材料；模具设定为刚体，同时对动模进行加载条件设置，如各工位的上模以及个别工位的下模；由于本文采用 1/2

模型进行模拟，因此需要在边界条件中完成对称面的设置；坯料发生变形时与模具间存在相对摩擦，因此按实际情况设定摩擦因数为 0.12；最后设置好模拟控制条件后，生成文件开始模拟。

3 仿真结果分析

3.1 工艺可行性分析

对工艺的可行性进行判断，主要依据两个方面：(1) 成形外观能否达到要求，可通过模具填充情况得出结论^[19]；(2) 成形过程中是否存在成形缺陷，可根据变形后各工位零件的断面流线图来判断^[20]。模拟结束后，进入软件后处理模块得到两种方案各工位模具的填充情况，如图 5 所示。两方案各工位模具均能填充充分，不存在未填充的空腔，这表明

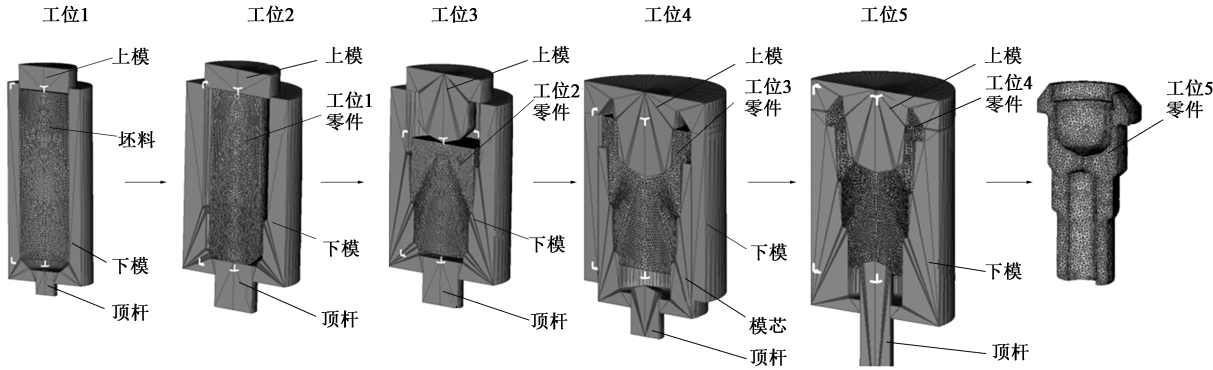


图 4 方案 2 多工位冷锻有限元模型

Fig. 4 Finite element model of multi-station cold heading for scheme 2

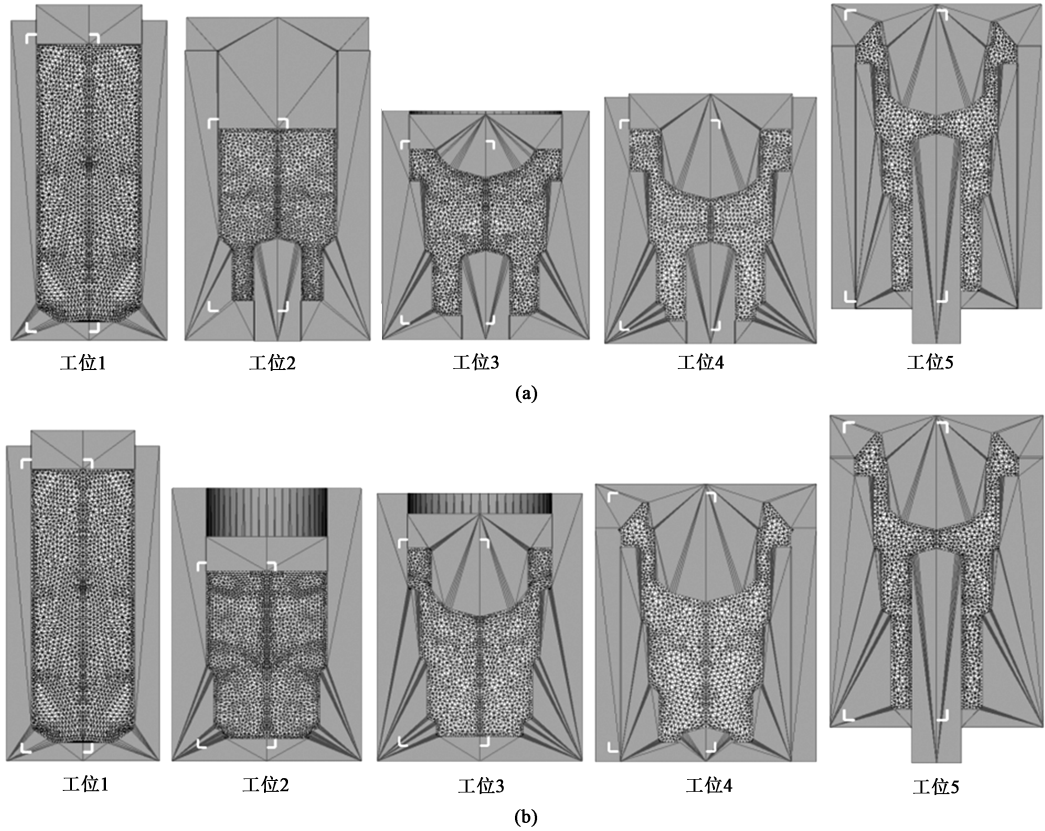


图 5 不同方案下各工位模具填充情况

(a) 方案 1 (b) 方案 2

Fig. 5 Mold filling at each station under different schemes

(a) Scheme 1 (b) Scheme 2

零件完全能够按照模具组成的型腔成形，因此，只要模具的加工精度是符合要求的，最终制坯件的尺寸必能满足要求。图 6 为两种方案各工位零件的断面流线图，各工位零件成形时若金属沿着模腔正常流动，成形后零件断面的金属流线应顺着零件轮廓有规律且无交错分布，当流线出现乱流、回流、穿流、交错等现象时，则表示金属出现异常流动、在零件内部形成了折叠缺陷，影响零件质量，易产生疲劳

裂纹。从图 6 中可看出，两种方案成形后各工位零件的断面流线图均无交错等问题，分布层次分明，连续无断裂，这表明这两种方案下成形的制坯件的内部质量均较好。通过以上分析可知，这两种方案均是可行的，均满足成形需求，可获得预期的制坯件。

3.2 等效应力分析

由于两种方案均可行，因此对两方案进行比较，其中两种方案工位 1 的成形过程相同，不做比较。

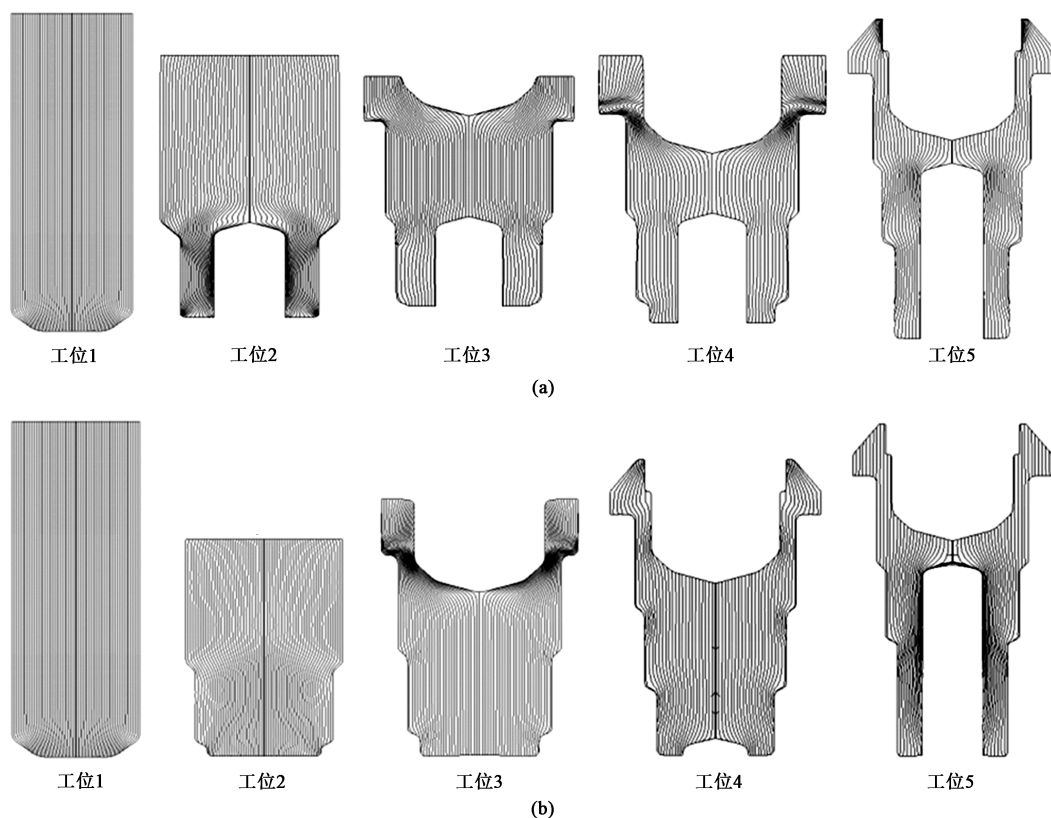


图6 不同方案下各工位零件的断面流线图

(a) 方案1 (b) 方案2

Fig. 6 Cross-section streamline diagrams of parts at each station under different schemes

(a) Scheme 1 (b) Scheme 2

等效应力是零件为抵抗变形而在内部萌生的相互作用力,零件变形越大的部位的应力值越大,应力值越大,对成形零件质量的影响越大,会增大材料的疲劳损伤,增加裂纹风险,等效应力是检验工艺好坏的重点分析对象,必须严格控制其大小。图7为两种方案各工位零件的等效应力分布云图,方案1中,工位2的最大等效应力为861 MPa,工位3的最大等效应力为872 MPa,工位4的最大等效应力为854 MPa,工位5的最大等效应力为846 MPa;方案2中,工位2的最大等效应力为839 MPa,工位3的最大等效应力为850 MPa,工位4的最大等效应力为846 MPa,工位5的最大等效应力为848 MPa。可见,方案2除工位5外,其余工位的最大等效应力均小于方案1,并且工位5的等效应力基本相同,这表明采用方案2时,对制坯质量的提高更有利,更能减小裂纹风险。

3.3 损伤值分析

损伤值是反映材料断裂趋势的物理量,是判断成形零件质量好坏的重要参数。图8为两方案各工位零件的损伤值分布云图,由图8可知,损

伤值分布较大的区域均是变形量大、与模具发生频繁摩擦的部位,方案1中,工位2的最大损伤值为0.425,工位3的最大损伤值为0.558,工位4的最大损伤值为0.585,工位5的最大损伤值为0.678,方案2中,工位2的最大损伤值为0.202,工位3的最大损伤值为0.343,工位4的最大损伤值为0.389,工位5的最大损伤值为0.354。明显方案2全面占优,变形后材料的损伤更小,断裂风险更小,制坯件的质量会更好,并且各工位零件损伤值比较接近,说明材料变形量在各工位的分配更加合理。

3.4 成形力分析

由于冷态下材料的变形抗力较大,因此,促使材料成形需要极大的成形力,成形力越大,冷镦模具需要承受的冲击载荷就越大,在模具制作材料和模具结构相同的条件下,会加剧磨损和增大损伤,降低寿命,因此,在满足成形要求后,应尽量减小成形力。图9为两种方案不同工位的成形力变化曲线图,所有工位成形力的变化趋势完全一致,均随着成形的进行而不断增大,完全满足成形原理;

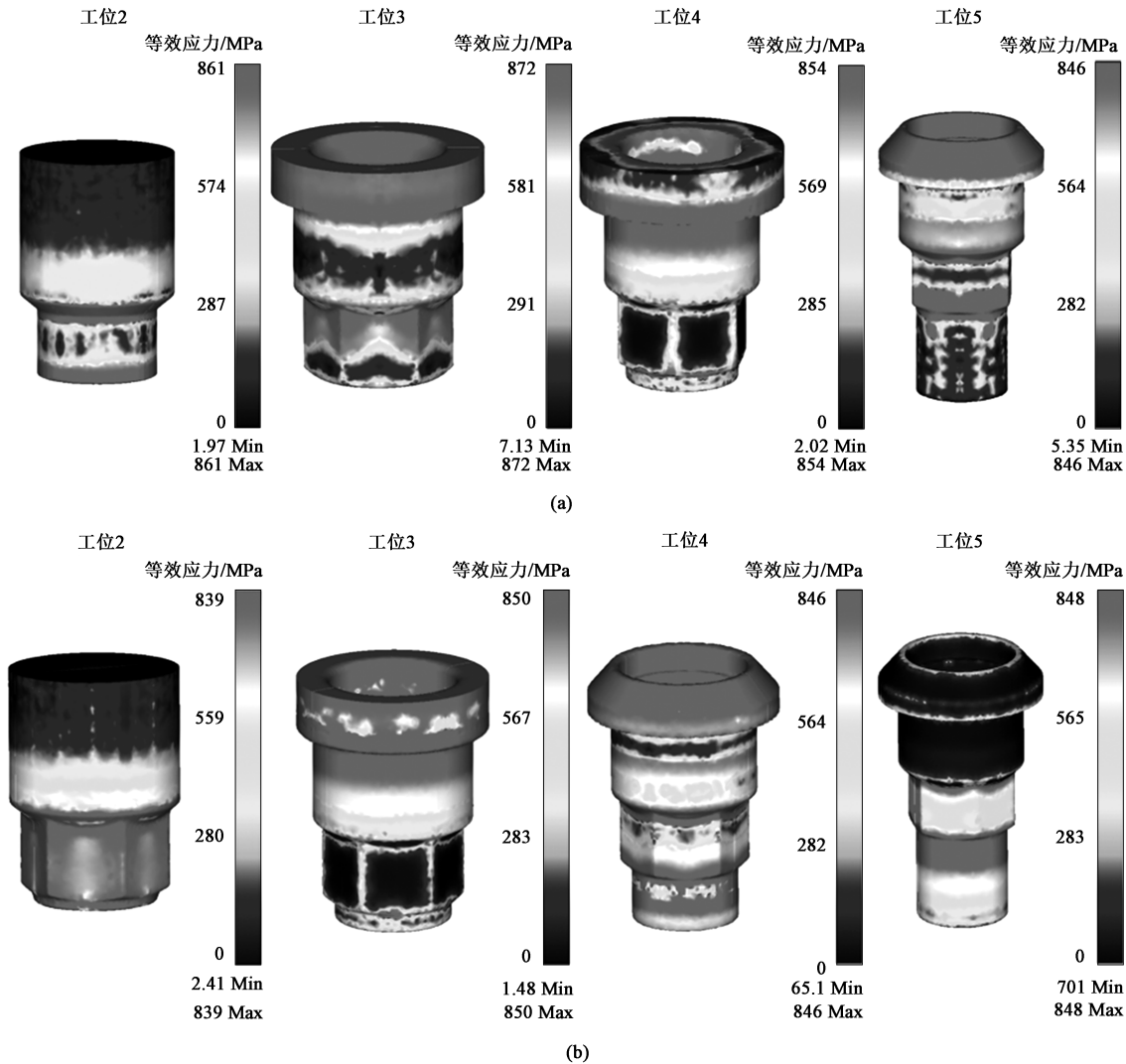


图 7 不同方案下各工位零件等效应力分布云图

(a) 方案 1 (b) 方案 2

Fig. 7 Equivalent stress distribution nephograms of parts at each station under different schemes

(a) Scheme 1 (b) Scheme 2

初始阶段,坯料与模具接触较少,阻力小,金属流动容易,需要的成形力较小;到了中期阶段,坯料与模具接触增加,阻力增大,金属流动受制约,致使成形力增长;到了后期阶段,坯料与模具近乎完全接触,阻力进一步增大,金属流动困难,使得成形力达到顶峰。从图 9 中可知,方案 1 中工位 2~工位 5 的最大成形力分别为 1.23×10^6 、 2.18×10^6 、 2.12×10^6 、 1.45×10^6 N,方案 2 中工位 2~工位 5 的最大成形力分别为 1.08×10^6 、 1.22×10^6 、 1.67×10^6 、 0.99×10^6 N。方案 2 各工位的最大成形力均小于方案 1,说明在方案 2 下,零件变形时,金属流动更顺利、受到的阻力更小、各工位模具所受冲击更小,利于提高模具寿命、缩减成本。

4 生产试验

通过对制坯件两种方案的详细分析可知,方案 2 为更好的方案,将该工艺应用于传动轴轴套的加工,进行了生产试验,试验结果如图 10 所示,得到的制坯件成形质量较好,无划痕、折叠等缺陷,与图 11 所示模拟结果一致,各处尺寸均处于要求的公差范围内。通过一段时间的应用表明冷镦制坯过程非常稳定,经车削完成轴套上端特征和下端锥形特征的最终成形,结果如图 12 所示。采用该方案进行轴套加工后,与之前工艺相比,生产产量大幅上升,实现了批量化生产,同时能使材料利用率从 26.9% 提高至 86.1%,大幅缩减成本,能帮助

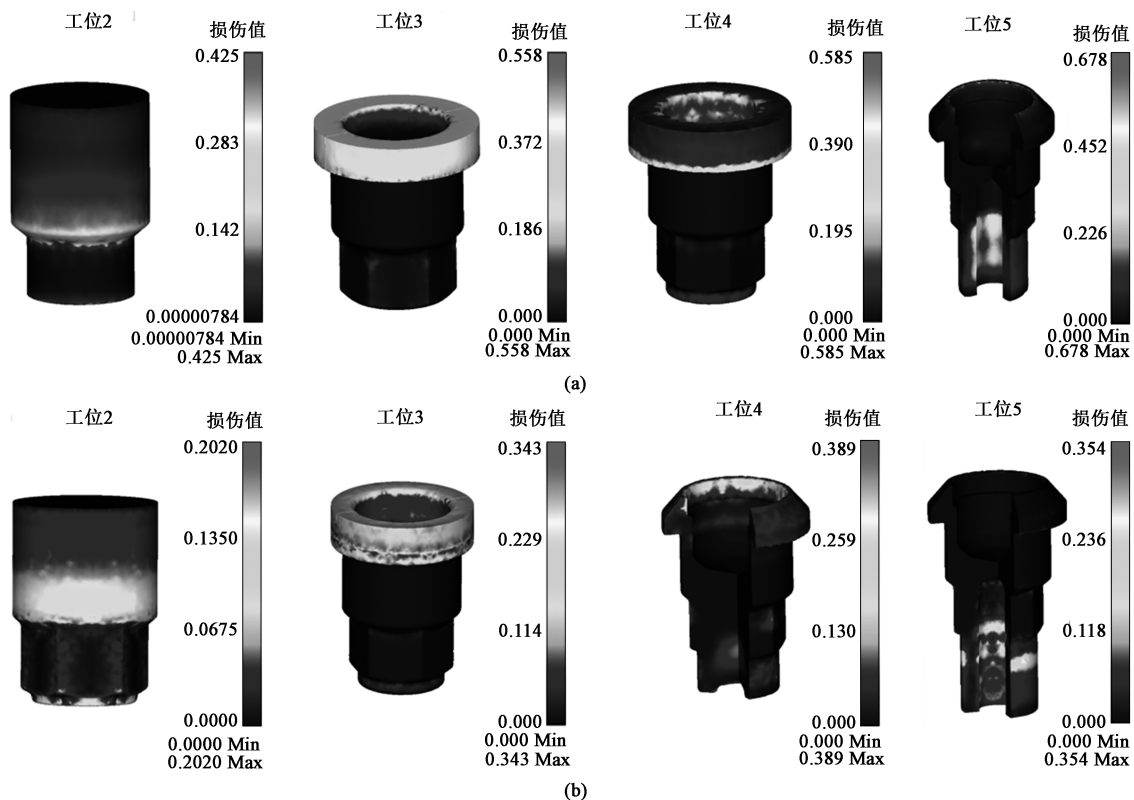


图8 不同方案下各工位零件损伤值分布云图

(a) 方案1 (b) 方案2

Fig. 8 Damage value distribution nephograms of parts at each station under different schemes

(a) Scheme 1 (b) Scheme 2

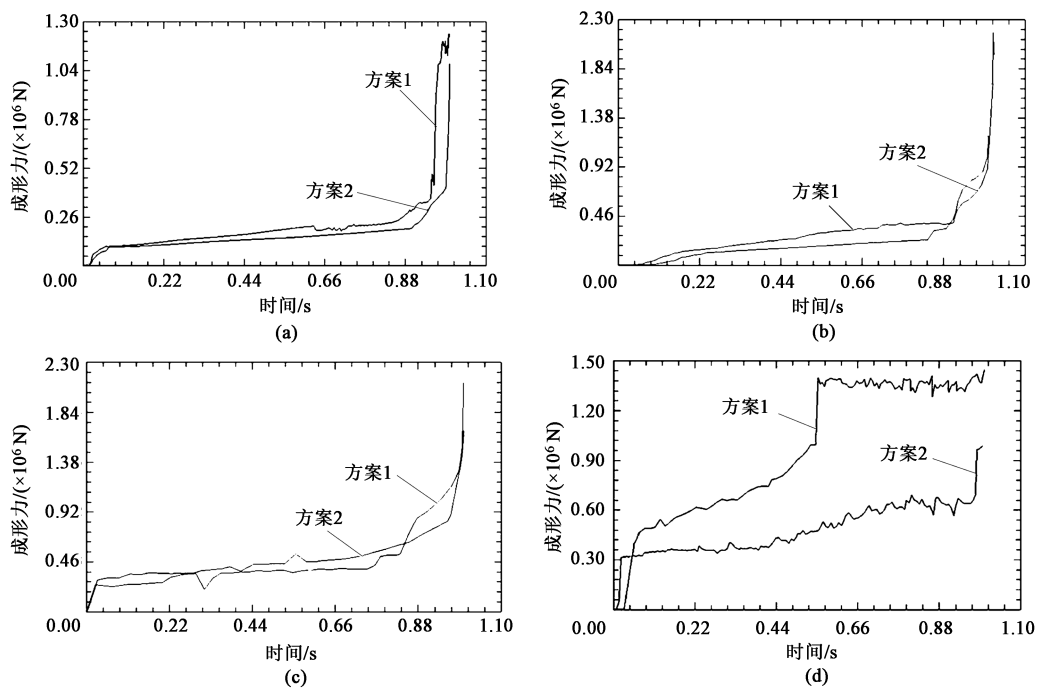


图9 不同方案下各工位成形力变化曲线

(a) 工位2 (b) 工位3 (c) 工位4 (d) 工位5

Fig. 9 Variation curves of forming force at each station under different schemes

(a) Station 2 (b) Station 3 (c) Station 4 (d) Station 5

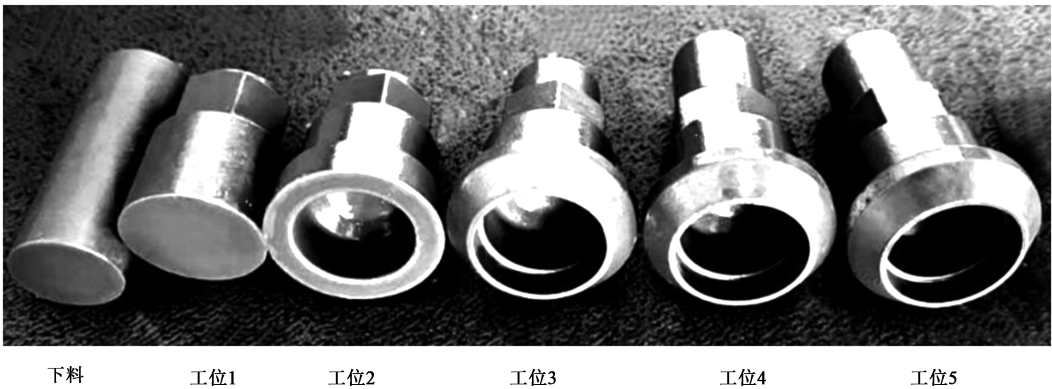


图 10 生产试验结果
Fig. 10 Production experiment results

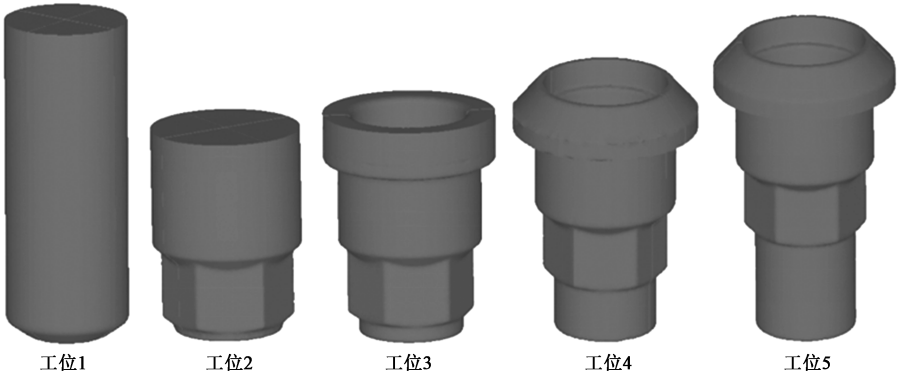


图 11 模拟结果
Fig. 11 Simulation results



图 12 传动轴轴套
Fig. 12 Transmission shaft bushing

企业打造价格优势，迅速打开市场。

5 结 论

(1) 为解决一种汽车传动轴轴套切削加工生产

效率低、成本高的问题，设计了两种近净成形加工工艺方案，即先通过冷墩加工制坯，后经少量切削完成最终成形，该工艺能使材料利用率从 26.9% 提高至 86.1%。

(2) 基于实际材料模型，利用有限元软件 Deform-3D 对两种工艺的冷墩部分进行了成形模拟，评估了两种工艺的可行性，并对两种工艺各工位的等效应力、成形力、损伤值等进行了对比，得到了方案 2 为更理想的方案。

(3) 将最终确定的工艺应用于轴套的加工，完成了生产试验，最终得到的制坯件成形较好，无缺陷，与模拟结果一致，并且尺寸完全符合需求，确定了冷墩制坯的可靠性，同时测试了工艺的稳定性，经最终车削后，得到了最终的传动轴轴套，该工艺与之前工艺相比，效率和成本均得到明显改善，解决了企业现有的难题。

参考文献：

[1] 曹建国, 阮康, 王雪松, 等. 邻角精确控制的异型管辊弯成形过程数值模拟 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2023, 55

- (1): 98-105.
- Cao J G, Ruan K, Wang X S, et al. Numerical simulation of special-shaped tube roll forming process based on precise control of adjacent angles [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2023, 55 (1): 98-105.
- [2] 赵妍洁, 高颖, 高静娜, 等. 高强度变厚板汽车B柱热成形数值模拟及主要参数分析 [J]. 精密成形工程, 2023, 15 (4): 112-120.
- Zhao Y J, Gao Y, Gao J N, et al. Numerical simulation and main parameters of hot forming of B-pillar of high-strength steel variable-thickness plates [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2023, 15 (4): 112-120.
- [3] 曹建国, 王乐, 刘江, 等. 基于过弯缺陷控制的异型管辊弯成型过程有限元仿真 [J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2017, 48 (9): 2345-2351.
- Cao J G, Wang L, Liu J, et al. Finite element simulation of roll forming process based on over-bend defect control of shaped tube [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2017, 48 (9): 2345-2351.
- [4] 朱文礼, 李海军, 李睿昊, 等. 高强汽车钢温冲压成形工艺探讨 [J]. 轧钢, 2023, 40 (1): 29-34.
- Zhu W L, Li H J, Li R H, et al. Study on warm stamping process of high strength automobile steel [J]. Steel Rolling, 2023, 40 (1): 29-34.
- [5] 汪建武, 李淑香, 金彪, 等. 6082 铝合金汽车后上控制臂楔横轧轴坯成形模拟研究 [J]. 兵器材料科学与工程, 2022, 45 (6): 70-74.
- Wang J W, Li S X, Jin B, et al. Forming of simulation 6082 aluminum alloy cross wedge rolling shaft for automobile rear upper control arm [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2022, 45 (6): 70-74.
- [6] 陈正科, 汝春波. 基于 FEA 的汽车用防振螺母近净成形加工技术 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (11): 42-49.
- Chen Z K, Ru C B. Near-net-forming machining technology on automotive anti-vibration nut based on FEA [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (11): 42-49.
- [7] 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.
- [8] 李坤, 赵升吨, 张超, 等. 复杂曲面齿形径向锻造近净成形工艺的探讨 [J]. 重型机械, 2021, (5): 19-23.
- Li K, Zhao S D, Zhang C, et al. Discussion of near net forming process for complex curved tooth profile using radial forging [J]. Heavy Machinery, 2021, (5): 19-23.
- [9] 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.
- [10] Byun J B, Razali M K, Lee C J, et al. Automatic multi-stage cold forging of an SUS304 ball-stud with a hexagonal hole at one end [J]. Materials (Basel, Switzerland), 2020, 13 (22): 5300.
- [11] Jo A R, Jeong M S, Lee S K, et al. Multi-stage cold forging process for manufacturing a high-strength one-body input shaft [J]. Materials, 2021, 14 (3): 532.
- [12] 陈剑, 张东民, 周伟民, 等. 球头销多工位冷锻挤工艺研究及模具设计 [J]. 热加工工艺, 2018, 47 (11): 153-156.
- Chen J, Zhang D M, Zhou W M, et al. Process research and die design of multi-station cold upsetting-extrusion of ball head pin [J]. Hot Working Technology, 2018, 47 (11): 153-156.
- [13] 郑鹏辉, 关悦, 许吉星, 等. A286 高温合金十二角法兰面螺栓多工位冷锻成形工艺 [J]. 制造技术与机床, 2022, (7): 45-50.
- Zheng P H, Guan Y, Xu J X, et al. Multi station cold heading process of A286 superalloy twelve point flange bolt [J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2022, (7): 45-50.
- [14] 赵志繁, 侯怀书, 钱瑞福, 等. 六角法兰面锁紧螺母冷锻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.
- [15] 李峰. 特种塑性成形理论及技术 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2011.
- Li F. Theory and Technology of Special Plastic Forming [M]. Beijing: Peking University Press, 2011.
- [16] 盛育东. 汽车半轴螺母冷锻成型工艺研究 [D]. 上海: 上海应用技术大学, 2017.
- Sheng Y D. Research on Cold Forging Process of Automobile Half Shaft Nut [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technology, 2017.
- [17] 尤富仪, 张铁山, 朱倩倩. 汽车哈克钉铆套多工位冷锻挤工艺开发与应用 [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.
- [18] 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.
- [19] 赵庆雨, 杨嵩. 基于数值分析的汽车六角锁紧螺母冷锻工艺改进 [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.
- [20] 李天兴, 张迅雷, 傅建中, 等. 轿车用齿坯精锻工艺参数与模具结构对金属流线的影响 [J]. 机械传动, 2015, 39 (10): 154-157, 175.
- Li T X, Zhang X L, Fu J Z, et al. Influence of the technological parameter and die structure on metal flow line for precision forging car gear blank [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2015, 39 (10): 154-157, 175.