

汽车变速箱花键轴多工位锻造工艺模拟及应用

逯云杰^{1,2}, 宋志峰^{1,2}

(1. 濮阳职业技术学院 机电与汽车工程学院, 河南 濮阳 457000; 2. 河南大学 濮阳工学院, 河南 濮阳 457000)

摘要: 为加快生产速度, 并节约人工、材料和时间成本, 以一种汽车变速箱花键轴为研究对象, 尝试将加工工艺改为多工位锻造, 并联合 Deform-3D 软件进行同步研究。根据零件外形特征和加工材料的极限变形程度初步设计了两种理论上比较可靠的多工位自动锻造成形工艺, 通过搭建符合实际条件的虚拟锻造试验平台完成了两种工艺的成形模拟, 并根据成形结果进行了工艺评定, 分析和对比了等效应力、载荷变化规律等试验结果。结果表明: 设计的两种多工位锻造工艺基本可行, 并且工艺 1 在零件成形质量和模具寿命方面表现更好。最后, 参考工艺结果通过工业试验完成了变速箱花键轴的制造, 锻造速度快, 生产稳定, 并且零件生产质量较好, 无裂纹等缺陷, 验证了多工位锻造工艺方法的有效性。

关键词: 变速箱; 花键轴; 多工位锻造; 工艺评定; 等效应力; 载荷

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.03.003

中图分类号: TG316.8

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2024) 03-0018-09

Simulation and application on multi-station forging process for automotive transmission spline shaft

Lu Yunjie^{1,2}, Song Zhifeng^{1,2}

(1. College of Electrical and Automotive Engineering, Puyang Vocational and Technical College, Puyang 457000, China;

2. Puyang Institute of Technology, Henan University, Puyang 457000, China)

Abstract: In order to speed up the production speed and save the cost of labor, material and time, for a kind of automotive transmission spline shaft, the process was changed to multi-station forging, and the synchronous research was conducted with the help of Deform-3D. Then, according to the shape characteristics of parts and the limit deformation degree of processed material, two theoretically reliable multi-station automatic forging processes were designed preliminarily, and the forming simulation of the two processes was completed by building a virtual forging experiment platform that met the actual conditions. Furthermore, according to the forming results, the process was evaluated, and the experimental results of equivalent stress and load change law were analyzed and compared. The results show that the two multi-station forging processes are basically feasible, and the process 1 performs better in the forming quality of part and the mold life. Finally, the manufacturing of transmission spline shaft is completed by reference to the process results through industrial experiments. The forging speed is fast, the production is stable, and the quality of part is good without cracks and other defects, which verifies the effectiveness of the multi-station forging process method.

Key words: transmission; spline shaft; multi-station forging; process qualification; equivalent stress; load

多工位锻造是利用多个工位模具同步锻造, 使零件一次成形的先进自动化制造技术^[1-3], 其生产速度极快, 是实现许多汽车零部件批量生产的重要技术, 并且除了需要一人负责按时放置盘条、更换零件和收集物料框外, 无其余人工参与, 能较大地缩减生产成本, 是未来制造业的重点发展方向之一,

能有效推动国民经济发展, 具有较高的经济价值, 因此, 许多高校、科研机构、车企等均投入了大量的时间和精力研究多工位锻造, 并取得了不少实际应用的成果。如陈凌翔等^[4]开发了一种六角球销的多工位冷锻工艺, 较好地解决了传统切削加工以及楔横轧加工工艺存在的材料浪费、生产效率低的问题; 陈永强等^[5]完成了一种合金钢接头的多工位冷锻工艺开发, 将凹槽结构的加工方式由铣改为锻, 避免了材料组织的切断, 降低了凹槽断裂的风险, 产品使用寿命大幅提升; 王晓伟^[6]成功将多工位锻造工艺应用于深孔活塞套管, 不仅提高了材料的利

收稿日期: 2023-07-09; 修订日期: 2023-10-13

基金项目: 河南省高等教育教学改革研究与实践项目 (2021SJGLX753); 河南省教育科学规划课题 (2022YB0718)

作者简介: 逯云杰 (1980-), 男, 学士, 副教授

E-mail: luyunj@126.com

用率,其生产效率更是达到了每分钟80件,并且采用了合金钢材料,产品性能好,极具市场竞争力;张东民等^[7]、成美文等^[8]利用有限元技术研究了不同螺母的多工位锻造工艺,有效解决了原切削加工中存在的工序复杂、零件精度控制困难、效率低等难题,并且在三向压应力下成形的螺母性能极佳,能在比较恶劣的环境中使用。但这些应用大多针对一些结构比较简单的零件,因此,濮阳职业技术学院联合河南贝英智能科技有限公司开展了此课题,以在结构上比较复杂的变速箱花键轴作为代表性研究对象,尝试将当前采用的热模锻+切削的加工工艺改为多工位锻造工艺,从而加快生产速度,降低人工、材料和时间等成本。同时由于方案数较多,为确保各工位零件能够顺利成形,给实际锻造试验提供有价值的参考,降低失败率,联合塑性成形分析软件 Deform-3D 开展同步研究^[9-10]。

1 工艺分析

花键轴外形特征如图1所示,其头部、中部、底部存在不同的齿形特征,且底部有盲孔,结构比较复杂。加工材料为 ML40Cr 钢,其极限变形程度在 50%~60% 之间,属于比较难冷锻的材料,为降低材料锻裂风险及锻模受力,需要采用较多的工位数进行成形。在选择坯料规格时,需考虑预防锻粗失稳、控制成形力大小、坯料的定位等问题,并通

过塑性成形前后体积不变原理确定坯料体积^[11]。然后,根据零件的不同特征确定成形次序、制定合适的成形方法和模具结构方案。按此思路初步设计了两种理论上比较可靠的多工位锻造工艺,如图2所示,设计的成形工位均为6个,坯料规格也完全相同,均为 $\Phi 22\text{ mm} \times 80\text{ mm}$,两种工艺中间各工位零件外形均不相同,但花键轴各特征的成形方法基本一致,头部成形采用镦粗聚料,头部齿形成形采用反挤压+整形,中部齿形、尾部齿形及尾部盲孔成形均采用正挤压。

2 虚拟锻造试验平台的建立

2.1 ML40Cr 钢室温力学性能测定

虚拟锻造试验借助 Deform-3D 软件进行,实际锻造材料在冷锻前需进行软化处理以提高塑性能力,因此,为了获得有价值的试验结果,有必要进行压缩试验以获得 ML40Cr 钢在室温下的力学性能。ML40Cr 钢退火软化工艺为随炉加热至 $760\text{ }^{\circ}\text{C}$,进行 12 min 的保温,随后随炉降温至 $680\text{ }^{\circ}\text{C}$,进行 4 h 的保温,最后出炉空冷至室温。压缩试样按照 GB/T 7314—2017^[12] 制作,试验时需对试样两端进行润滑,按不同条件加载,最后得到如图3所示的真实应力-真实应变曲线,将其导入 Deform-3D 中作为后续模拟用材料。

2.2 锻造模型建立及试验条件设置

由于花键轴为对称性零件,因此,可取 1/4 结

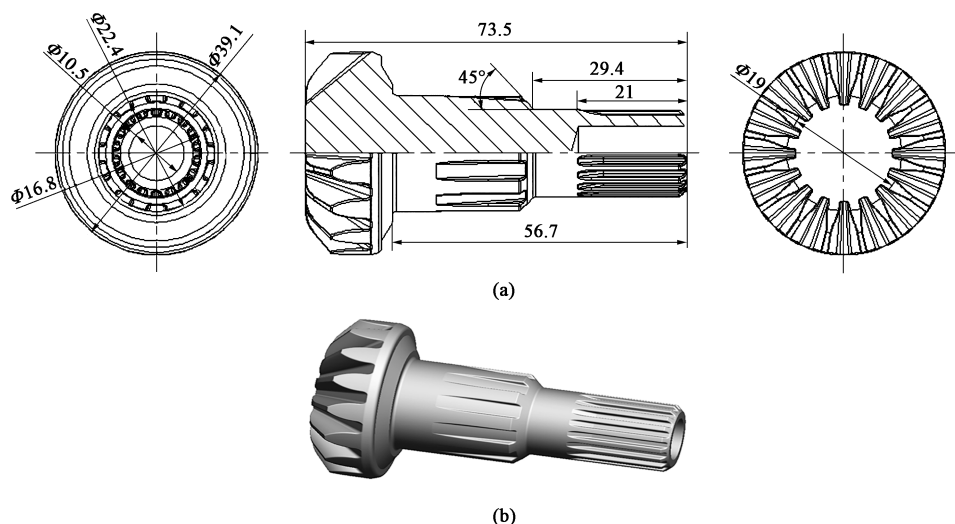


图1 花键轴结构特征图

(a) 尺寸图 (b) 三维建模图

Fig. 1 Structural feature diagrams of spline shaft

(a) Dimensional drawing (b) 3D modeling diagram

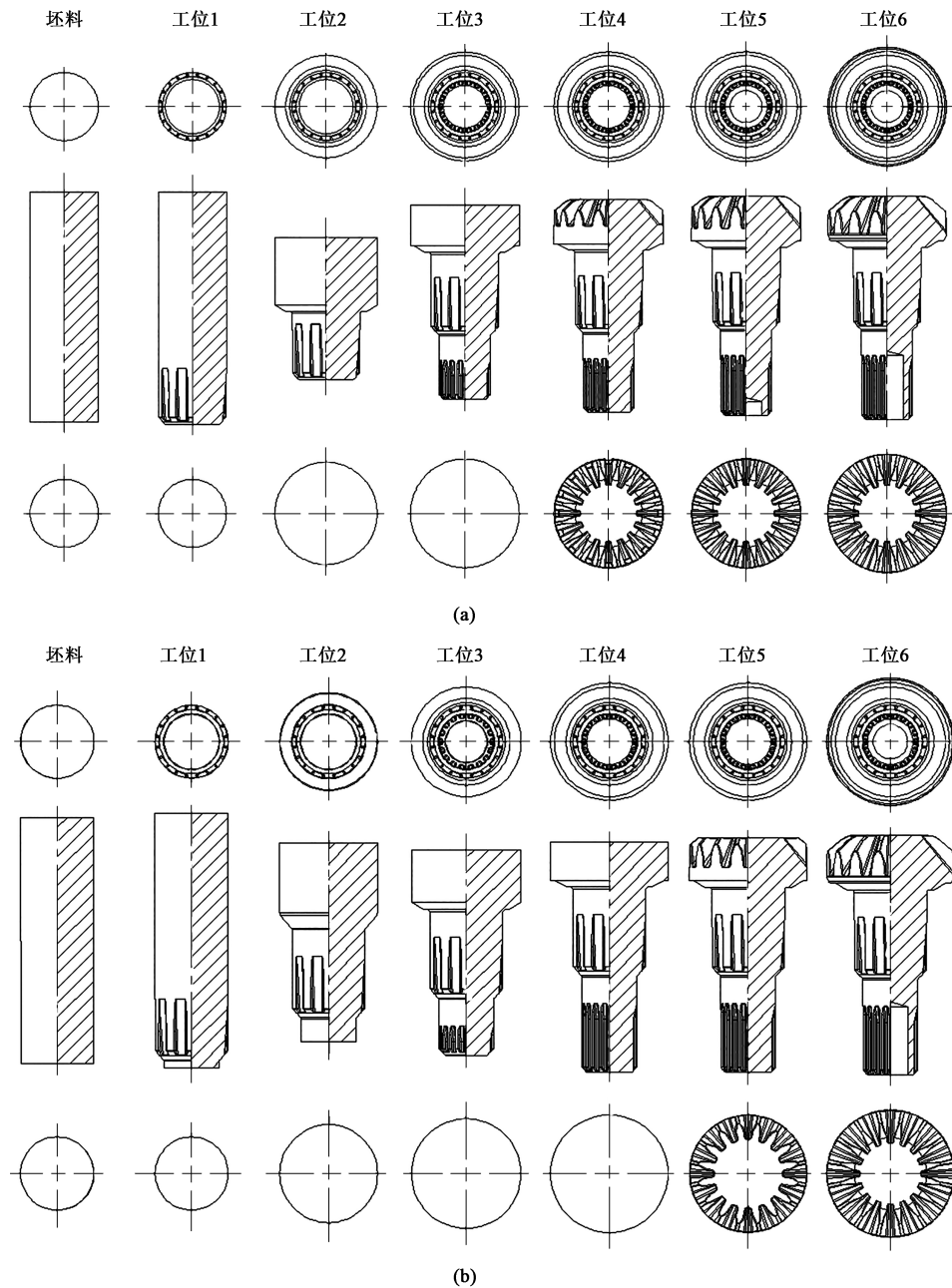


图 2 花键轴的多工位锻造工艺

(a) 工艺 1 (b) 工艺 2

Fig. 2 Multi-station forging processes for spline shaft

(a) Process 1 (b) Process 2

构作为研究对象来简化锻造模型,利用UG进行两种工艺坯料和各工位模具的1/4结构建模。由于两种工艺的模拟过程基本相似,因此,本文以工艺1为例,如图4所示,将坯料及工位1模具通过STL格式导入Deform-3D中,并调整位置关系,避免干涉等情况,将坯料设置为塑性体,同时将上文试验材料模型选为坯料材料,利用四面体网格对坯料进行划分,采用绝对网格划分,最小网格单元设置为

0.3 mm;将模具设置为刚体,其中上模为动模,工位4、工位5和工位6中下模也为动模,速度按照实际生产节拍设定;试验温度设置为20℃;坯料变形时与模具间伴有相对流动,设置摩擦类型为剪切摩擦,摩擦因数为0.1^[13];试验控制条件中选择主模位移控制方法,单位位移取最小网格单元的1/3^[14]。工位1模拟结束后,保留模拟零件,将模具更换为工位2模具,并重新调整相互位置和设定

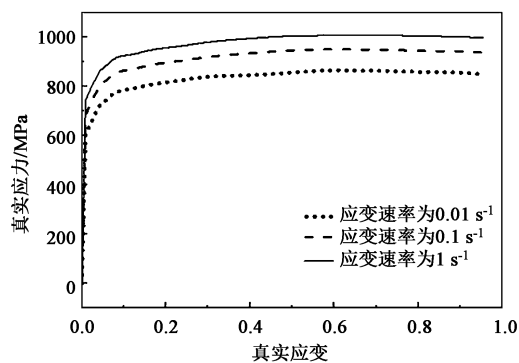


图3 ML40Cr钢的真实应力-真实应变曲线

Fig. 3 True stress-true strain curves for ML40Cr steel

相关试验条件, 继续进行工位2的模拟试验, 同理, 直至如图4所示的工艺过程模拟结束。

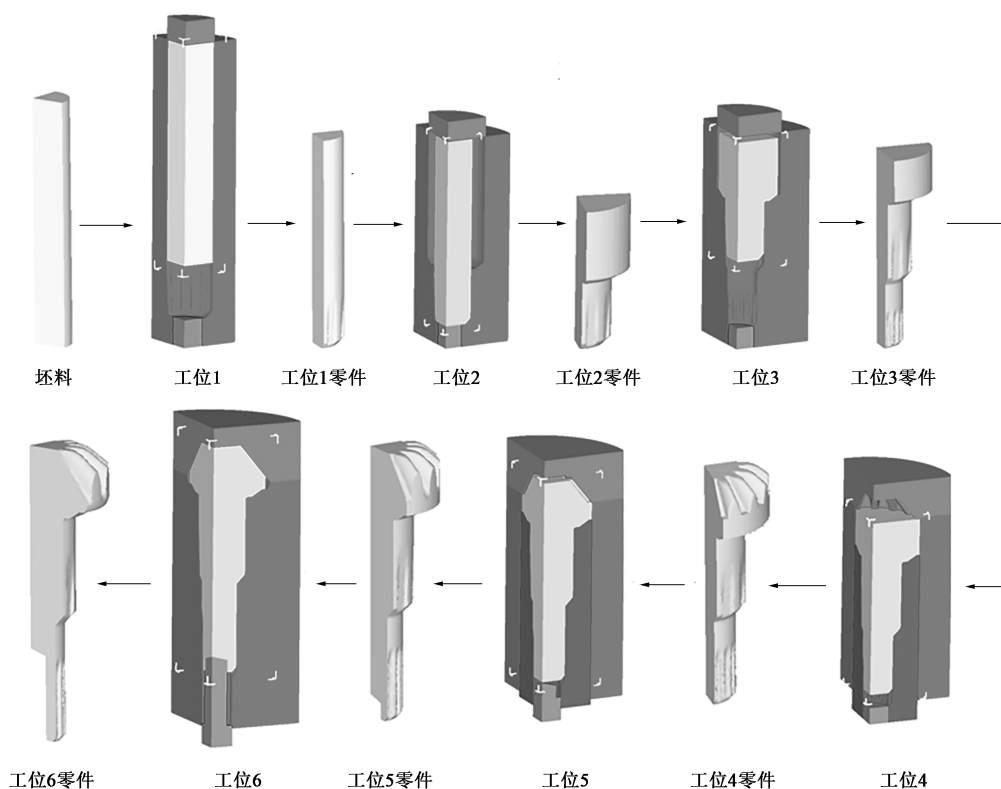


图4 工艺1模拟过程

Fig. 4 Simulation process of process 1

时材料流动情况较好, 不会产生内部材料折叠等情况。综上分析可知, 设计的两种多工位锻造工艺基本可行。

3.2 等效应力分析

两种工艺的各工位零件的等效应力分布情况如图6所示, 等效应力是被锻零件发生变形后试图恢复原样而在零件内部产生的相互作用力^[15], 因此, 变形量大和变形难度大的部位所产生的应力值相对

3 试验结果分析

3.1 成形结果分析

两种工艺的模拟成形结果如图5所示, 两工艺各工位零件均能在设计的模腔中较好地成形, 未发现未充满的空腔, 零件表面均能与模具全面接触, 这表明只要在实际生产中控制好生产模具的尺寸精度和表面粗糙度, 所锻造的零件必然能达到要求的外形条件, 因此, 在这两种工艺下成形的零件在尺寸方面不存在问题。其次, 根据图5中显示的成形后零件断面的网格变形情况可知, 各工位网格变形较小, 说明每个工位的材料变形量较小, 有利于零件的成形, 对降低锻模受力也有帮助, 此外网格流线无断裂、紊乱、穿流等情况, 说明各工位零件成形

较大, 例如: 工艺1中工位1、3、5的大变形主要发生在零件底部, 工位2、4的大变形主要发生在零件头部, 工位6的大变形主要发生在盲孔附近, 这些区域的应力值要大于其他区域, 也是最容易出现局部疲劳损伤, 形成微裂纹甚至断裂的区域。因此, 在满足成形要求后, 必须对应力值大小进行严格约束, 从而降低零件开裂的风险, 提高使用寿命。由图6可得, 工艺1中, 各工位的最大等效应力值分

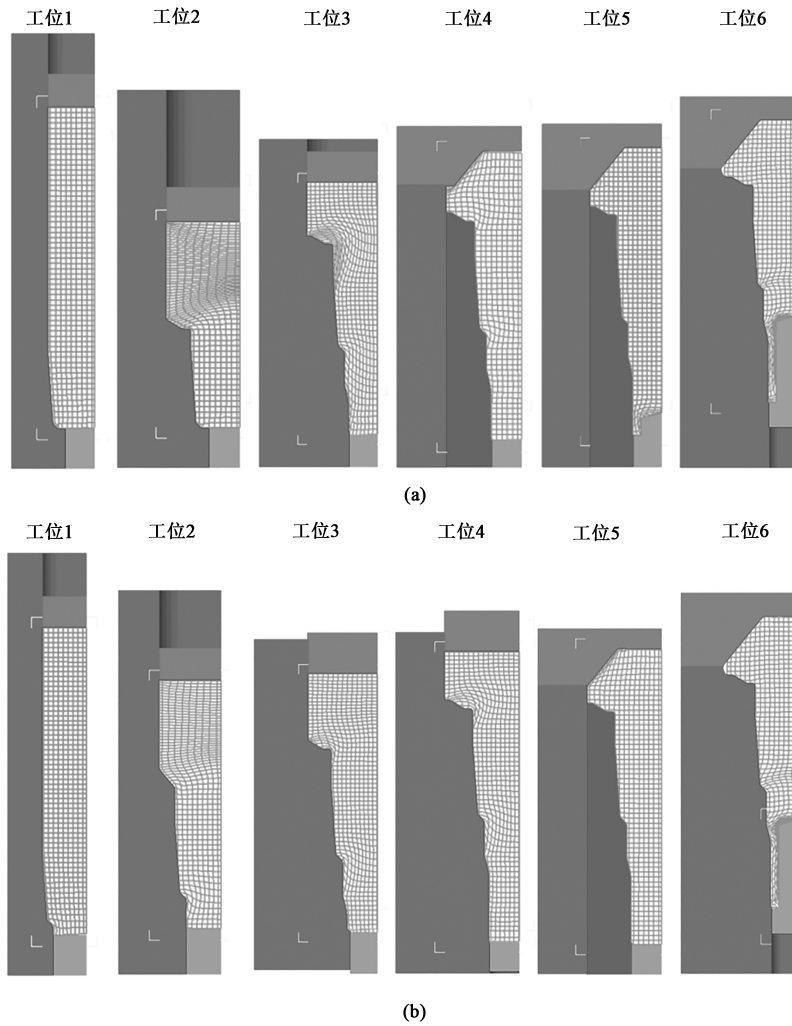


图 5 不同工艺下各工位成形结果

(a) 工艺 1 (b) 工艺 2

Fig. 5 Forming results of each station under different processes

(a) Process 1 (b) Process 2

别为 917、925、931、936、929 和 935 MPa；工艺 2 中，各工位的最大等效应力值分别为 917、942、946、943、944 和 952 MPa。除工位 1 的等效应力相同外，剩余工位均为工艺 1 更小，这表示工艺 1 设计的更加妥当，各阶段零件成形时材料流动情况更好，受阻碍小，产生的应力小，更有利于提高花键轴质量。

3.3 载荷变化规律分析

两种工艺的各工位载荷变化曲线如图 7 所示，为了能够实现净成形，直接获得满足尺寸要求的花键轴零件，两工艺的各工位零件均采用封闭式模腔锻造成形，因此，随着各工位零件的变形，零件与模具之间的接触面积会随之增大，同时模腔空间会随之减小，从而增大材料流动的难度。而为了达到最终成形的目的，促进材料流动，必须加大成形载

荷，因此，各工位的载荷变化均随着变形的进行而增长，如图 7 所示。但成形载荷越大，模具的受力就越大，在模具材料相同的情况下，模具寿命相对较低，因此，在满足成形要求后，必须对成形载荷大小进行严格约束。由图 7 可得：工艺 1 中，各工位最大载荷分别为 1160、1855、1952、2184、1627 和 1366 kN；工艺 2 中，各工位最大载荷分别为 998、2130、2154、2489、2137 和 1750 kN。除工位 1 的载荷为工艺 2 比较小外，剩余工位均为工艺 1 更小，因此采用工艺 1 明显更好。

4 工业试验

由前文研究可知，工艺 1 在零件成形质量和模具寿命方面表现更好，因此，参考该工艺进行多工

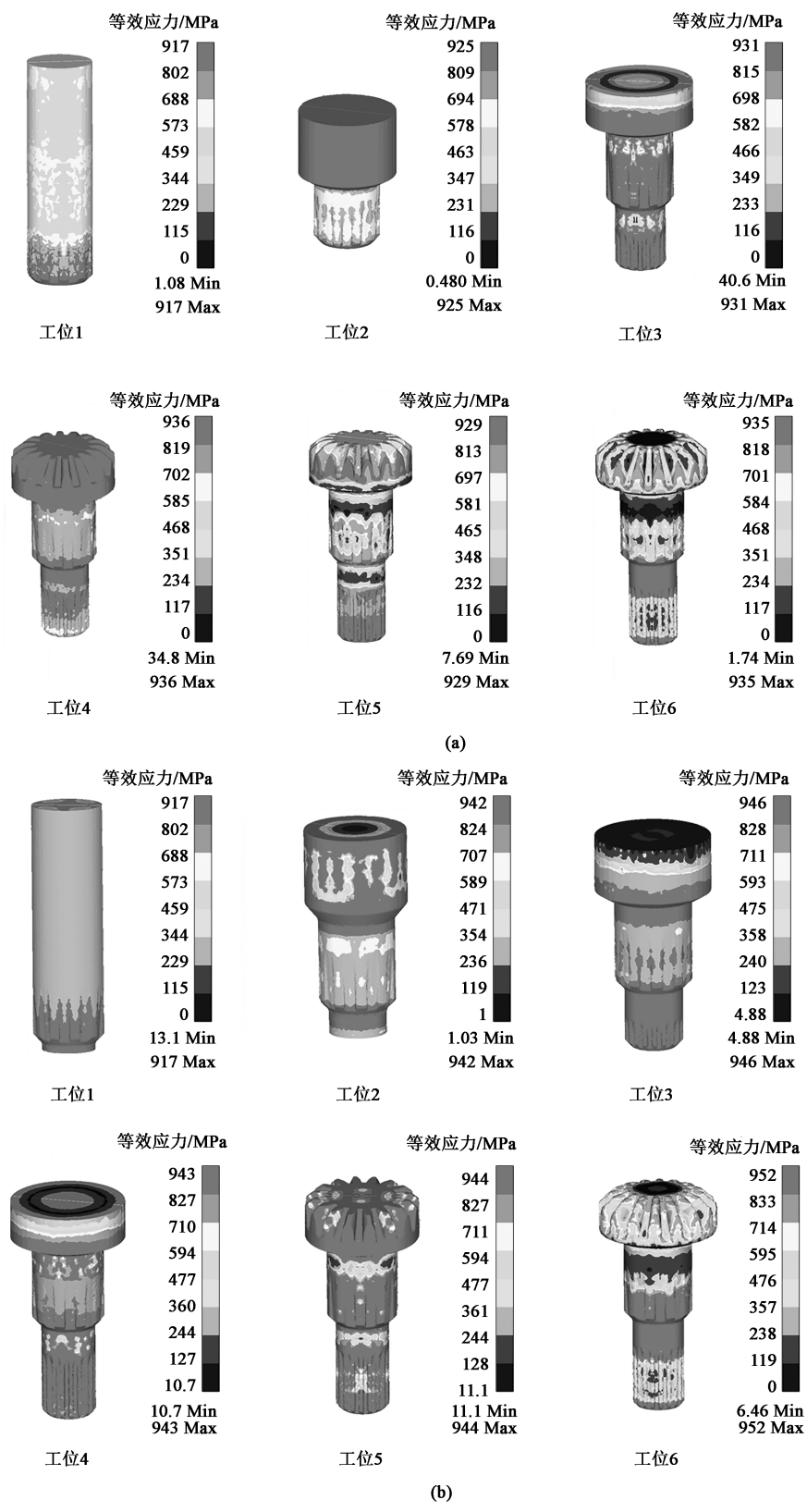


图 6 不同工艺下各工位零件的等效应力分布

(a) 工艺 1 (b) 工艺 2

Fig. 6 Equivalent stress distributions of parts at each station under different processes

(a) Process 1 (b) Process 2

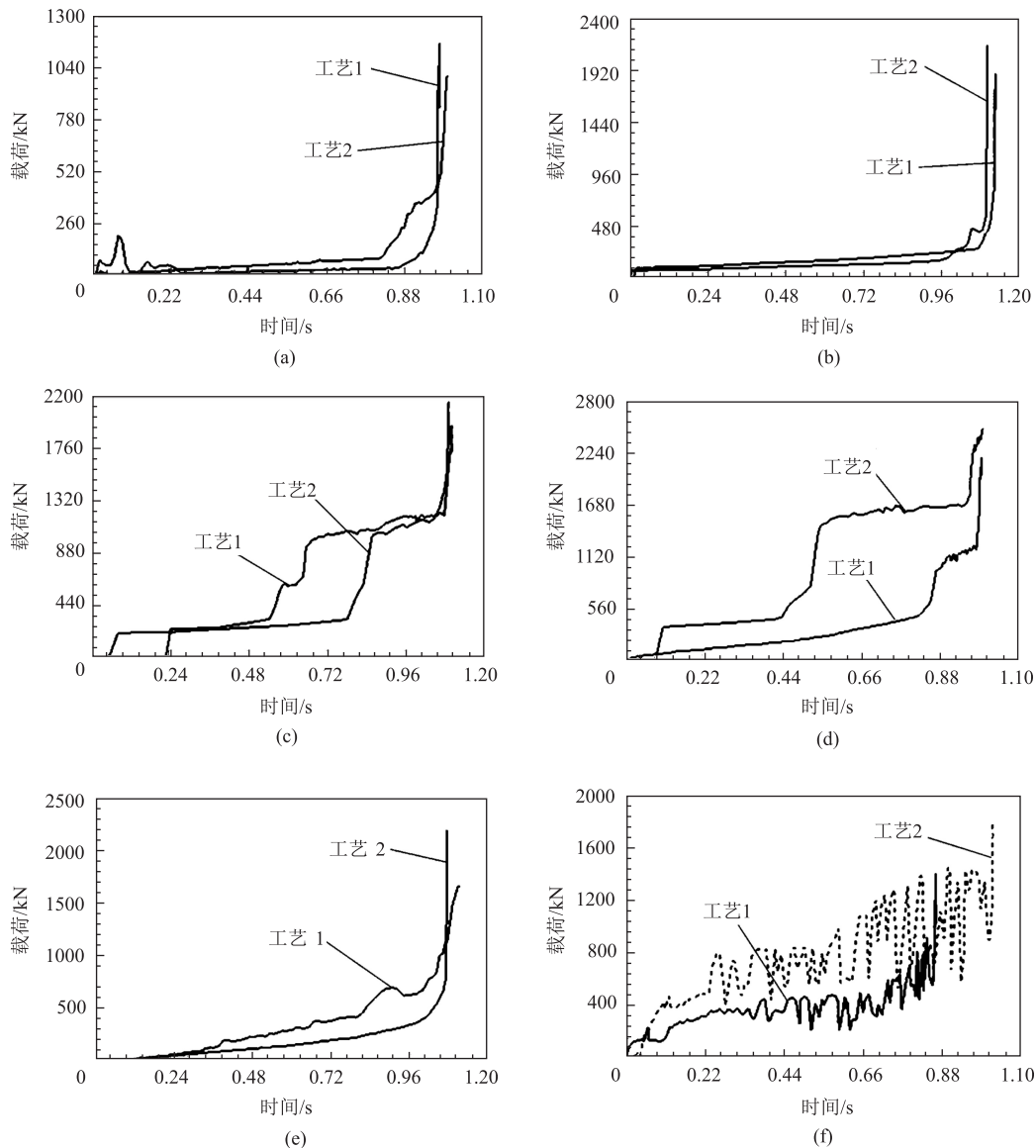


图 7 不同工艺下各工位的载荷变化规律曲线

(a) 工位 1 (b) 工位 2 (c) 工位 3 (d) 工位 4 (e) 工位 5 (f) 工位 6

Fig. 7 Load variation law curves of each station under different processes

(a) Station 1 (b) Station 2 (c) Station 3 (d) Station 4 (e) Station 5 (f) Station 6

位模具的设计制造,同时考虑到 ML40Cr 钢材料比较难冷锻,选用组合式凹模,能起到降本、提高强度、便于更换等作用。采用多工位液压生产线 YJK61M-SL2000 进行变速箱花键轴的制造,锻造坯料需通过退火软化、酸洗、磷皂化等处理,锻造期间各工位模具均需润滑,花键轴各工位零件的成形结果如图 8 所示,外形锻造完整,质量良好,未发现明显瑕疵,花键轴各处尺寸也均能满足设计要求。将花键轴零件切开腐蚀后,可得到如图 9 所示的花键轴断面流线图,其流线分布较好,连续完整,无交叉现象,表明零件内部也无缺陷,与超声波探伤

结果一致。工艺试验结果与模拟分析结果基本相符,验证了多工位锻造工艺方法的有效性。经合作企业反馈,与原工艺相比,多工位锻造工艺生产速度较快,生产效率达到每分钟 17 件,并且生产顺利,花键轴质量稳定,极大地降低了生产成本。

5 结论

(1) 为加快一种汽车变速箱花键轴的生产速度,同时解决人工、材料和时间成本高的难题,根据零件外形特征和加工材料的极限变形程度设计了

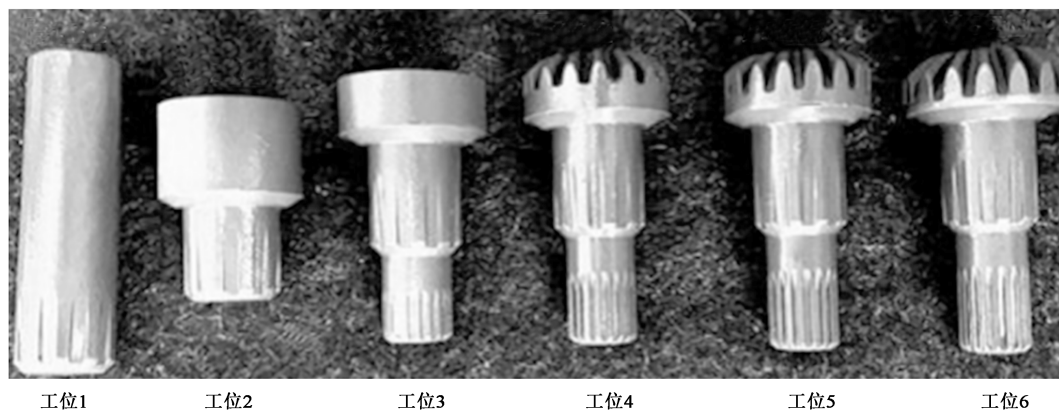


图8 花键轴各工位零件锻造结果

Fig.8 Forging results of spline shaft parts at each station



图9 花键轴断面流线

Fig.9 Cross-section streamline of spline shaft

两种多工位自动锻造成形工艺。

(2) 完成了 ML40Cr 钢锻造材料室温力学性能的测定以及多工位锻造有限元模型的建立, 搭建了符合实际条件的虚拟锻造试验平台, 保证了模拟试验的有效性。

(3) 完成了两种工艺的模拟, 根据成形结果进行了工艺评定, 并分析和对比了等效应力、载荷变化规律等试验结果, 结果表明: 设计的两种锻造工艺基本可行, 并且工艺 1 在零件成形质量和模具寿命方面表现更好。

(4) 参考工艺结果, 通过工业试验完成了变速箱花键轴的制造, 与原工艺相比, 多工位锻造工艺生产速度较快, 生产效率达到每分钟 17 件, 生产稳定, 并且零件生产质量较好, 无裂纹等缺陷, 验证了多工位锻造工艺方法的有效性。

参考文献:

- [1] 罗鹰, 冒兴峰. 基于 COLDFORM 的汽车万向节接头多级冷锻成形数值仿真 [J]. 热加工工艺, 2018, 47 (15): 123-126.
- Luo Y, Mao X F. Numerical simulation of multi-stage cold forging forming of automobile universal joint based on COLDFORM [J]. Hot Working Technology, 2018, 47 (15): 123-126.
- [2] Kim K M, Ji S M, Lee S W, et al. Flow behavior dependence of rod shearing phenomena of various materials in automatic multi-stage cold forging [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2023, 37 (1): 139-148.
- [3] 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.
- [4] 陈凌翔, 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.
- [5] 陈永强, 陈玉, 杨群. SCM435 合金钢接头的冷锻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.
- [6] 王晓伟. 减震器深孔活塞套冷锻工艺数值分析及模具结构优化 [J]. 锻压技术, 2023, 48 (3): 34-42.
- Wang X W. Numerical analysis on cold forging process and optimization on die structure for deep hole piston sleeve of shock absorber [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (3): 34-42.
- [7] 张东民, 盛育东, 张金玉, 等. 六角开槽螺母的冷锻工艺优化及数值模拟 [J]. 机械设计与制造, 2018, (3): 191-194.
- Zhang D M, Sheng Y D, Zhang J Y, et al. Numerical simulation and optimization for cold heading of hexagonal slot nut [J].

- Machinery Design & Manufacture, 2018, (3): 191-194.
- [8] 成美文, 刘风雷, 李伟强, 等. 不锈钢高锁螺母多工位锻成形组织演变规律研究 [J]. 热加工工艺, 2020, 49 (5): 103-107.
- Cheng M W, Liu F L, Li W Q, et al. Study on microstructure evolution rule of multi-station upsetting for stainless steel high-lock nut [J]. Hot Working Technology, 2020, 49 (5): 103-107.
- [9] 彭威, 曾朝伟, 孙振威, 等. 基于数值模拟和实验的 Mg/Al 复合管材成形工艺研究 [J]. 精密成形工程, 2023, 15 (6): 27-36.
- Peng W, Zeng C W, Sun Z W, et al. Forming process of Mg/Al composite tubes based on numerical simulation and experiment [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2023, 15 (6): 27-36.
- [10] 赵江波, 龚红英, 叶恒昌, 等. 基于 RSM 与 NSGA-II 的法兰件挤压成形工艺的多目标优化 [J]. 塑性工程学报, 2023, 30 (3): 9-14.
- Zhao J B, Gong H Y, Ye H C, et al. Multi-objective optimization of extrusion forming for flange based on RSM and NSGA-II [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2023, 30 (3): 9-14.
- [11] 郑轩, 纪思奇, 史雄, 等. 基于浮动凹模和分流原理的圆柱直齿轮冷锻成形过程有限元模拟 [J]. 北京石油化工学院学报, 2018, 26 (1): 30-34.
- Zheng X, Ji S X, Shi X, et al. Numerical simulation of cold forging of spur gear based on floating-die and hole divided-flow principle [J]. Journal of Beijing Institute of Petrochemical Technology, 2018, 26 (1): 30-34.
- [12] GB/T 7314—2017, 金属材料 室温压缩试验方法 [S]. GB/T 7314—2017, Metallic materials—Compression test method at room temperature [S].
- [13] 李万虎, 张敬民. 汽车转向球销锻挤成形有限元分析与工艺 [J]. 锻压技术, 2023, 48 (6): 115-123.
- Li W H, Zhang J M. Finite element analysis and process on upsetting extrusion for automobile steering ball pin [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (6): 115-123.
- [14] 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.
- [15] 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.

欢迎订阅《锻压技术》杂志 (月刊)

国内外公开发行, 全国各地邮局均可订阅, 逾期未订上者可与编辑部联系邮购

《锻压技术》杂志 1958 年创刊, 中国机械工业联合会主管、中国机械总院集团北京机电研究所有限公司和中国机械工程学会塑性工程分会主办。本刊是全国锻压行业会刊, 全国中文核心期刊, 被国内外多个著名检索系统收录。突出技术内容, 注重技术和信息相结合, 全面反映锻压行业的技术进步和发展趋势。

主要栏目: 综述、锻造、板料成形、管材成形、挤压与拉拔、轧制、特种成形、装备与成套技术、模具、摩擦与润滑、加热与热处理、测试技术、节能技术、材料与成形性能、理论与实验研究、计算机应用、技术交流、标准化、行业信息等。

读者对象: 大专院校的师生, 金属塑性成形(锻压)领域的科研、设计、生产部门的工程技术人员以及中等以上文化程度的工人等。

本刊为月刊, 每月 25 日出版, 大 16 开本, 256 页。统一刊号: CN11-1942/TG。邮发代号: 2-322。

(一) 购买期刊: ● 每册定价: 25.00 元; ● 年定价: 300.00 元。

(二) 购买合订本: ● 1991-2011 年合订本(每本包含全年 1-6 期杂志): 110 元/本;

● 2012-2013 年合订本(每本包含全年 1-6 期杂志): 140 元/本;

● 2014-2018 年合订本(上册)(包含上半年 1-6 期杂志)、2014-2018 年合订本(下册)(包含下半年 7-12 期杂志): 180 元/本。

直接通过编辑部订阅者, 请与杂志发行部负责人林玉彤联系。并按编辑部地址汇款, 款到后我们会定期寄给您刊物。

邮局汇款信息:

地址: 北京市海淀区学清路 18 号北京机电研究所有限公司 709 室

邮编: 100083

收款人: 《锻压技术》编辑部

附言处: 请注明“订阅《锻压技术》”

联系人: 林玉彤 电话: 010-62920652

E-mail: fst_linyutong@163.com

《锻压技术》编辑部