

转向螺杆冷温复合成形工艺

刘 丹, 王 涛, 刘光辉, 刘 华, 孙红星

(郑州机械研究所有限公司, 河南 郑州 450001)

摘要: 转向螺杆为典型的杯杆零件, 结构形状复杂, 杆部尺寸和表面质量要求较高, 成形难度大。通过对转向螺杆结构和形状的特点进行分析, 结合冷、温成形特点, 提出了转向螺杆冷温复合成形工艺方案。该工艺充分利用了冷成形尺寸精度高、表面质量好和温成形变形抗力小的优势, 在较低的成形载荷下精确成形了转向螺杆。利用有限元模拟软件 DEFORM-3D 对转向螺杆冷温复合成形工艺过程中的 3 道工序进行了数值模拟分析, 分析了成形过程中的金属流动规律和应力分布状况, 预测了成形载荷。对成形工艺进行了工艺试验, 得到的转向螺杆充填饱满, 尺寸和表面质量满足设计要求, 无成形缺陷。结果表明该工艺具有可行性。

关键词: 转向螺杆; 冷温复合成形; 金属流动; 应力分布; 成形载荷

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.07.007

中图分类号: TG316

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2023) 07-0045-05

Cold and warm composite forming process for steering screw

Liu Dan, Wang Tao, Liu Guanghui, Liu Hua, Sun Hongxin

(Zhengzhou Research Institute of Mechanical Engineering Co., Ltd., Zhengzhou 450001, China)

Abstract: The steering screw is a typical cup rod part with complicated structure and shape, high requirements on rod size and surface quality and big forming difficulty. Therefore, the cold and warm composite forming process scheme of steering screw was put forward by analyzing the structure and shape characteristics of steering screw and combining with the features of cold and warm forming, and the steering screw was accurately formed under low forming load by making full use of the advantages of high dimensional accuracy and good surface quality of cold forming, and small deformation resistance of warm forming. Then, three procedures in the cold and warm composite forming process of steering screw were numerically simulated by finite element simulation software DEFORM-3D, the flow laws of metal and stress distribution in the forming process were analyzed, and the forming load was predicted. Furthermore, the process test was carried out on the forming process, the obtained steering screw was fully filled, its size and surface quality met the design requirements, and there was no forming defects. The results show that the forming process is feasible.

Key words: steering screw; cold and warm composite forming; metal flow; stress distribution; forming load

转向螺杆是循环球转向器的重要零件, 其形状为典型的杯杆状, 杯部粗大、杆部细长。如果采用传统的切削加工方式, 需要以杯部尺寸备料, 这样细长的杆部需要切削掉大量的金属材料, 造成材料利用率低、切削加工量大、耗时长、效率低、成本高, 已不能适应当下汽车零部件的高效、低能耗、高性能、低成本的生产趋势^[1-4]。

冷成形具有高效、耗能低、表面质量好、尺寸

精度高的优势, 但其成形过程中材料在冷态下的塑性差、变形抗力大。这就需要较大的成形载荷使材料变形流动, 在大的成形载荷下, 模具承受的力和冲击也大, 容易造成模具开裂报废, 降低模具的使用寿命, 所以, 冷成形只能成形变形量小、形状较简单的零件。温成形因坯料加热至一定温度, 塑性好、变形抗力较小, 容易成形形状较复杂、变形量较大的零件。但因坯料在加热过程中表面发生氧化, 成形零件的表面质量较低、尺寸精度不高^[5-9]。转向螺杆是典型的复杂杯杆类零件, 难以用单一的冷成形或温成形实现其近净成形。本文在结合转向螺杆的形状结构特点和冷、温成形的优点的基础上, 提出了转向螺杆冷温复合成形工艺。利用数值模拟软件对该工艺成形过程中的金属流动规律、应力分

收稿日期: 2022-09-28; 修订日期: 2023-01-11

基金项目: 郑州市重大科技专项资助项目 (152PZDZX007)

作者简介: 刘 丹 (1981-), 男, 硕士, 高级工程师

E-mail: 13592445859@163.com

通信作者: 刘 华 (1962-), 男, 博士, 研究员

E-mail: 13903832971@163.com

布、成形载荷进行了分析,为了验证数值模拟结果和工艺的可行性,进行了工艺试验。

1 工艺分析

工艺的合理性和可靠性直接影响了成形设备的选取、模具的设计和寿命、成形质量,因此,在制定成形工艺方案时需对零件的形状结构特点和成形难度进行分析^[10-11]。图 1 为某型号转向螺杆锻件图,材料为 20CrMnTi 钢,杯部粗大、杆部细长,内孔尺寸和杆部尺寸的精度要求高,热成形难以保证。杯部和杆部的横断面积差较大,在断面变化的过渡部位,不均匀变形程度加剧,容易导致模具局部过载,应采用多道工序成形^[12]。结合转向螺杆的结构特点和尺寸精度要求,利用温成形的优势成形变形量大的部分,利用冷成形优势成形尺寸精度高的部分,制定了如图 2 所示的工艺方案。

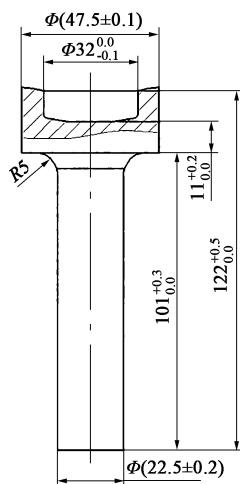


图 1 转向螺杆锻件图

Fig. 1 Forgings diagram of steering screw

具体的工艺路线为:下料→软化退火→润滑→正冷挤压→温镦粗→软化退火→润滑→反冷挤压。由于汽车零部件是批量较大的产品,在实际生产过程中工艺的稳定性 and 可靠性尤为重要,因此在工艺设计时采用小变形量多道工序的原则。

第 1 道工序为正冷挤压,选用较粗的坯料,正挤压成形出细长杆部,冷挤压的尺寸精度高,能保证杆部的尺寸精度要求。计算出断面缩减率 $\varepsilon_A = 52.7\%$ 。第 2 道工序为温镦粗杯部,因变形量较大,尺寸精度要求较低,采用温成形以降低成形载荷,保证模具寿命和工艺的稳定性,镦粗时高径比 $H_0/D_0 = 1.2$ (H_0 为锻件高度, D_0 为锻件直径),不会出现失稳、纵向弯曲的问题^[13]。第 3 道工序为反冷挤压,因杯部内孔尺寸精度要求较高,利用反挤压成形杯部内孔,计算出断面缩减率 $\varepsilon_A = 44.4\%$,满足反挤压单位压力在 $\varepsilon_A = 40\% \sim 60\%$ 时最低的要求^[14-15]。

2 数值模拟分析

材料选用 20 钢,冷成形的工艺参数为:坯料温度为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$,凸模、凹模温度为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$,摩擦因数为 0.12,凸模运动速度为 $6\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。温成形的工艺参数为:环境温度为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$,坯料温度为 $800\text{ }^{\circ}\text{C}$,凸模、凹模的温度为 $250\text{ }^{\circ}\text{C}$,摩擦因数为 0.3,凸模的运动速度为 $6\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

2.1 第 1 道工序成形过程数值模拟分析

第 1 道正挤压工序,此阶段为正挤压成形杆部过程,金属坯料在接近凹模口时在力的作用下发生变形,但变形过程中的金属流动不均匀,心部金属流动快,外层金属流动慢,主要是由于凹模内壁与金属坯料外表面间存在摩擦,导致外层金属的流动

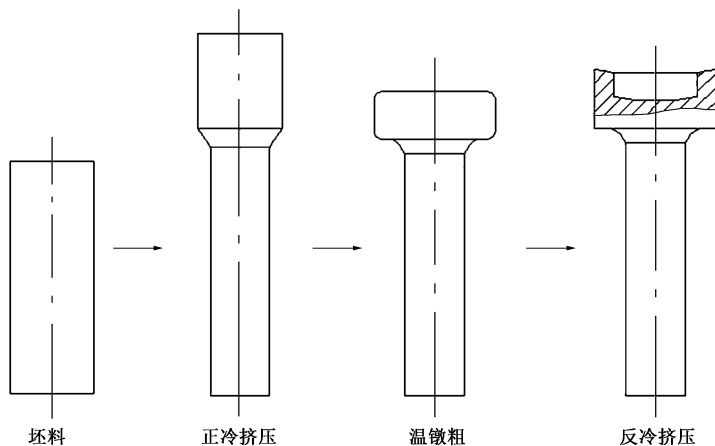


图 2 转向螺杆冷温复合成形工艺示意图

Fig. 2 Schematic diagram of cold and warm composite forming process for steering screw

阻力大,阻碍了金属的流动。图3为第1道工序第57步的等效应力分布图,等效应力较大处主要集中在坯料与挤压杆部的过渡结合部分,反映了变形主要集中在模具孔口附近,离开该主要变形区,金属材料几乎不变形,仅做刚性平移。从图4看出,变形的初始阶段,在力的作用下金属在凹模口处产生变形,载荷逐渐增加,随着变形过程的进行,材料离开变形区后,仅做刚性平移,此时成形载荷在一个比较窄的区间内浮动,当变形的杆部接触到模具顶杆时,顶杆限制了下端材料的刚性平移,此时成形载荷有个较大幅度的增加。第1道工序整个成形过程中的最大成形载荷为 1.3×10^6 N。

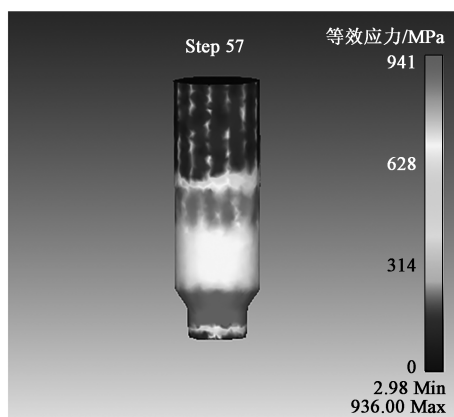


图3 第1道工序第57步等效应力分布图

Fig. 3 Equivalent stress distribution diagram of step 57 in the first procedure

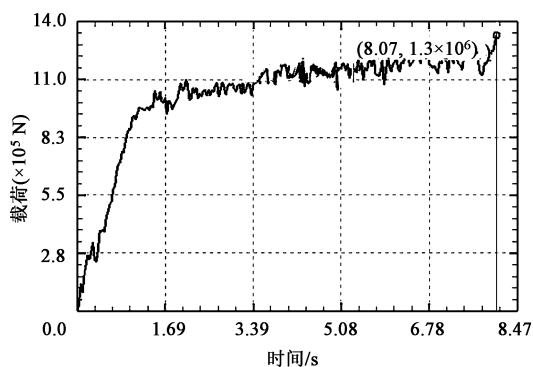


图4 第1道工序的成形载荷-时间曲线图

Fig. 4 Forming load-time curve diagram of the first procedure

2.2 第2道工序成形过程数值模拟分析

第2道工序为温镦粗工序,此阶段为闭式镦粗成形过程。成形过程初期,金属坯料在凸模的作用下沿轴向和径向流动,沿径向的流动速度不均匀,上下端面处的流动速度慢、中间部分的流动速度快,形成中间鼓肚现象,如图5所示。主要是由于坯料上下端面与模具接触,摩擦力阻碍了

金属的流动,而中间部分开始向径向流动时由于坯料与模具内壁之间存在间隙,相当于自由流动,金属流动速度快。随着变形过程的进行,中间流动快的金属与模具内壁之间的间隙越来越小,在接触到模具内壁后沿模具内壁进行轴向流动,直至镦粗变形完成。成形过程中的等效应力分布如图6所示,应力主要分布在镦粗变形部分,分布比较均匀,未出现应力集中现象。从图7所示的成形载荷-时间曲线看出,随着镦粗变形过程的进行,成形载荷逐渐缓慢增大,在最后阶段由于金属与模具接近形成闭式型腔,变形量很小但载荷急剧增加,最大成形载荷为 7.6×10^5 N。

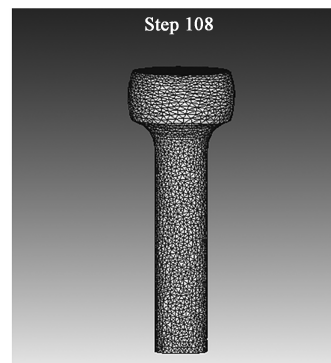


图5 第2道工序第108步成形图

Fig. 5 Forming diagram of step 108 in the second procedure

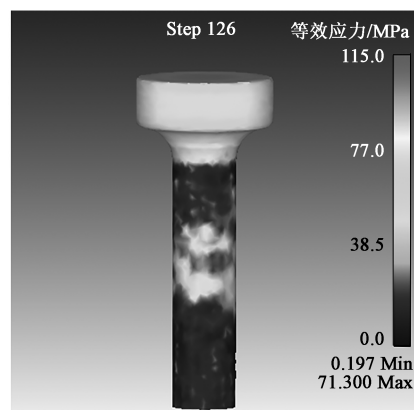


图6 第2道工序第126步等效应力分布图

Fig. 6 Equivalent stress distribution diagram of step 126 in the second procedure

2.3 第3道工序成形过程数值模拟分析

第3道工序为冷成形杯部内孔,此阶段为反挤压成形内孔过程。金属在凸模的作用下反向流动,形成杯壁。形成杯壁后就不再继续变形,在后续变形金属的推动下以刚性平移的方式向上移动,直至成形结束。成形过程中的等效应力分布如图8所示,应力主要分布在杯部变形部分,其中杯部底端和内

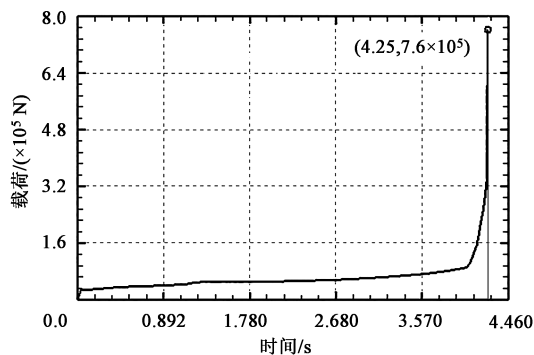


图7 第2道工序成形载荷-时间曲线图

Fig. 7 Forming load-time curve diagram of the second procedure

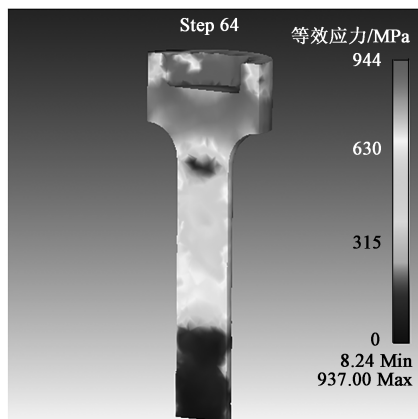


图8 第3道工序第64步等效应力分布图

Fig. 8 Equivalent stress distribution diagram of step 64 in the third procedure

壁处的应力较大,因此实际生产时应合理设计凸模的结构形状,避免出现尖角尖棱,应力的最大值为937 MPa。从图9所示成形载荷-时间曲线看出,变形的初始阶段,成形载荷增加较快,因为开始变形时需要克服材料的变形抗力和金属与模具的摩擦阻力。随着变形过程的进行,成形载荷以较慢的速度逐渐增加,最大成形载荷为 2.7×10^6 N,从整个成

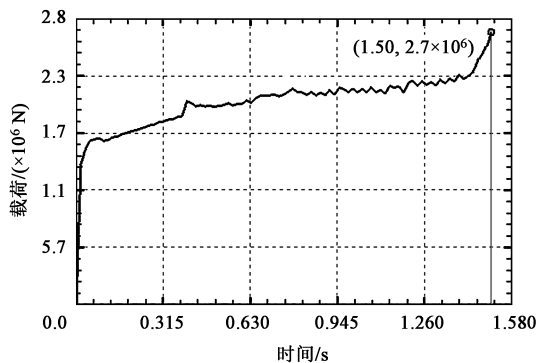


图9 第3道工序成形载荷-时间曲线图

Fig. 9 Forming load-time curve diagram of the third procedure

形过程数值模拟结果来看,各阶段成形充填饱满,未出现成形缺陷。

3 工艺试验

为进一步验证该工艺的可行性和数值模拟结果,进行了工艺试验。根据数值模拟结果预测的 2.7×10^6 N最大成形载荷,设备选用普通315 kN四柱液压机。试验材料为20CrMnTi钢,冷成形前进行软化退火,退火后硬度为130~140 HB,冷成形润滑采用水基高分子冷锻润滑剂。温成形坯料采用中频感应加热,成形温度为800℃,模具预热至250℃,采用水基石墨乳润滑剂进行润滑。成形的转向螺杆充填饱满,无折叠、裂纹成形缺陷,最大成形载荷为 2.87×10^6 N。各道工序成形出的转向螺杆如图10所示。为了进一步验证该工艺的稳定性及模具使用寿命,利用试验模具进行了小批量的试制,试制的零件质量稳定,零件的尺寸一致性好、表面质量符合设计要求,模具未出现磨损、裂纹、断裂等问题。

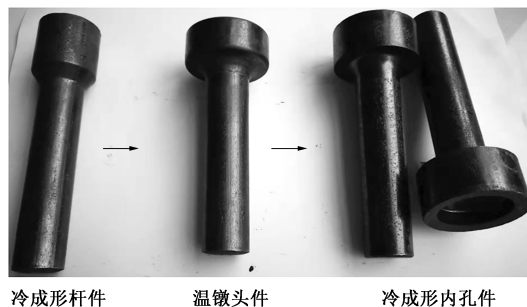


图10 试验成形的转向螺杆

Fig. 10 Steering screws formed by experiment



图11 批量试制的转向螺杆

Fig. 11 Steering screws of batch trial production

4 结论

(1) 利用有限元软件对转向螺杆的冷温复合成

形过程进行了数值模拟分析和成形载荷的预测。预测最大成形载荷为 2.7×10^6 N, 应力的最大值为 937.00 MPa, 为试验模具的设计和试验设备的选型提供了理论参考依据。

(2) 对转向螺杆的冷温复合成形工艺进行了工艺试验, 并进行了小批量的试制。成形的转向螺杆的尺寸和表面质量符合设计要求, 充填饱满, 无裂纹折叠等锻造缺陷, 最大成形载荷为 2.87×10^6 N, 与数值模拟的预测结果基本一致。

(3) 冷温复合成形工艺将冷、温锻复合到零件成形过程中, 充分利用各自优势, 在较低的成形力下完成零件的成形, 降低了设备吨位和成本, 便于工艺的实际推广应用。

参考文献:

- [1] 徐皓, 刘江. 长城 2020 转向节锻模设计及其锻造工艺生产验证 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (1): 24-28.
Xu H, Liu J. Forging die design of Great Wall 2020 steering knuckle and production verification of its forging process [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (1): 24-28.
- [2] 姚国平, 陈磊. 齿轮冷挤压成形影响因素的数值模拟研究 [J]. 热加工工艺, 2015, 44 (23): 169-171
Yao G P, Chen L. Numerical simulation research on affecting factors of gear cold extrusion forming [J]. Hot Working Technology, 2015, 44 (23): 169-171.
- [3] 周淑娟. 汽车齿轮轴闭塞式模锻成形工艺研究与试验 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (5): 25-32.
Zhou S J. Research and experiment on closed die forging process for automobile gear shaft [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (5): 25-32.
- [4] 蒋鹏, 贺小毛, 杨勇, 等. 国内精密塑性成形技术的发展及其在工业生产中的应用 [J]. 模具工业, 2020, 46 (12): 11-16.
Jiang P, He X M, Yang Y, et al. Development of domestic precision plastic forming technology and its application in industrial production [J]. Die & Mould Industry, 2020, 46 (12): 11-16.
- [5] 王德林, 陆有根, 吴兵. 温冷精锻复合成形技术应用及其发展趋势 [J]. 热加工工艺, 2013, 42 (5): 107-110.
Wang D L, Lu Y G, Wu B. Application and development of warm-cold combined precision forging technology [J]. Hot Working Technology, 2013, 42 (5): 107-110.
- [6] 黄树海, 赵祖德, 金敏伟, 等. 汽车零部件温冷复合成形加工技术及产业化应用现状 [J]. 汽车工艺与材料, 2013, (7): 45-47.
Huang S H, Zhao Z D, Jin M W, et al. Process technology and industrial application of cold and cold composite forming for automobile parts [J]. Automobile Technology & Material, 2013, (7): 45-47.
- [7] 周文, 任小鸿, 李林鑫, 等. 摩托车带爪齿轮无屑化工艺设计分析 [J]. 热加工工艺, 2013, 42 (17): 89-91
Zhou W, Ren X H, Li L X, et al. Analysis on process design of no cutting for motorcycle finger gear blanks [J]. Hot Working Technology, 2013, 42 (17): 89-91.
- [8] 杨海, 周杰, 黄亮, 等. 基于数值模拟的转向节挤压工艺优化 [J]. 热加工工艺, 2013, 42 (1): 72-74.
Yang H, Zhou J, Huang L, et al. Extrusion process optimization for steering knuckle based on numerical simulation [J]. Hot Working Technology, 2013, 42 (1): 72-74.
- [9] 林高用, 冯迪, 郑小燕, 等. 基于 Archard 理论的挤压次数对模具磨损量的影响分析 [J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2009, 40 (5): 1245-1251.
Lin G Y, Feng D, Zheng X Y, et al. Analysis of influence of extrusion times on total die wear based on Archard theory [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2009, 40 (5): 1245-1251.
- [10] 张长龙. 模锻设备的选型与比较 [J]. 精密成形工程, 2009, 1 (2): 61-64.
Zhang C L. Option and comparison of die forging equipments [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2009, 1 (2): 61-64.
- [11] 王玲, 张建民, 孙进, 等. 摩擦系数对航空铝合金三通管充液成形后壁厚分布的影响 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (4): 101-105.
Wang L, Zhang J M, Sun J, et al. Influence of friction coefficient on wall thickness distribution after hydroforming for aviation aluminum alloy tee pipe [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (4): 101-105.
- [12] 李春辉, 胡振志, 杨戈辉, 等. 厚壁长套锻件成形技术分析 with 生产试制 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (7): 34-41.
Li C H, Hu Z Z, Yang G H, et al. Forming technology analysis and production trail for thick-walled and long sleeve forgings [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (7): 34-41.
- [13] 胡亚民, 华林. 锻造工艺过程及模具设计 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
Hu Y M, Hua L. Forging Process and Die Design [M]. Beijing: China Machine Press, 2009.
- [14] 贾俐俐. 挤压工艺及模具 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
Jia L L. Extrusion Process and Die [M]. Beijing: China Machine Press, 2004.
- [15] 吴淑芳, 王培安, 郭欢欢, 等. 基于正交试验的梭心冷挤压成形工艺研究及模具优化设计 [J]. 西华大学学报: 自然科学版, 2018, 37 (1): 92-101.
Wu S F, Wang P A, Guo H H, et al. Bobbin cold extrusion forming process and mold optimum design based on orthogonal test [J]. Journal of Xihua University: Natural Science Edition, 2018, 37 (1): 92-101.