

基于轴向推进增量式滚轧的齿类零件成形装备及试验研究

冯东晓¹ 苏振华¹ 范玉林¹ 于黎明³ 石鑫生¹ 崔敏超²

1. 中国重型机械研究院股份公司 陕西 西安 710018

2. 西北工业大学 陕西 西安 710072

3. 台海玛努尔核电设备有限公司 山东 烟台 264000

摘要: 本文首先介绍了一种轴向推进增量式滚轧成形的齿类零件成形工艺,以花键轴为试验对象,在轴向进给增量式滚压成形装置中进行了初步的试验探索,对不同尺寸的坯料和模具的转速进行了滚压测试。研究发现:当坯料直径为50.85毫米时,花键轴的横截面上齿顶部分明显出现了拉尖的情况。各个花键轴的齿根圆直径普遍存在略微的超标现象,其平均偏差大约为+0.47mm。各模具转速下成形花键轴的齿形齿顶较为平整,齿廓形状一致。对比花键轴齿形的测量结果可知,在多种模具转速条件下,所形成的花键轴其齿顶端圆直径保持相近,而齿根部位圆直径的偏差大致在+0.5mm左右。该成果证实了采用轴向进给增量式滚轧技术进行外花键一体化成形与成性加工的实用性,同时为该工艺的进一步开发与应用奠定了理论基础。

关键词: 齿类零件; 制造工艺; 滚轧成形; 花键轴

引言

滚轧成形广泛应用于航空航天、汽车制造和船舶等领域^[1-6]。花键轴作为一类具备多条轴向键槽的轴类部件,其主要功能在于机械装置中实现轴与轮毂之间的动力及扭矩的有效传递。为实现与内花键构造的轮毂形成花键联结,该联结允许轮毂与花键轴实现同步回转,并能够在花键轴方向上进行轴向移动^[7]。花键联接技术以其高承载能力、优秀的对中性及导向性以及较高的信赖度而受到重视,因此在汽车、航空航天、机床、建筑机械及船舶等多个工业部门得到了广泛应用^[8-11]。该技术的制造质量直接关系到机械系统的整体性能与稳定性。在制造业迅猛前进的背景下,尤其是汽车产业,对于产品运行的性能和可靠性标准日益严苛。传统的矩形花键连接方式正逐步被渐开线花键所替代,广泛应用于传动半轴、传动总成以及变速器输出轴等核心传动部件,这主要归功于渐开线花键能够确保汽车传动系统的平稳运作和增强承载能力。随着汽车性能的不断提高,对关键传动部件的性能和使用耐久度也提出了更为苛刻的条件。

同时,塑性成形技术近年来成为花键轴生产工艺领域的研究热点,由于其具有高生产效率、高材料利用率、成形的花键齿形机械性能好等特点,符合汽车轻量化发展趋势,吸引了国内外学者开展了广泛的研究工作。多数学者对花键轴冷搓齿成形工艺开展了系列研究,在工艺过程、有限元分析及成形设备等方面取得了

一定研究成果。例如,针对花键轴冷搓齿成形工艺及设备进行研究,分析滚轧成形过程中金属流动规律以及成形力,提出冷搓齿成形机床设计方案,分析机床所使用的液压系统。利用DEFORM-3D程序,本研究对渐开线冷搓齿加工过程中模具与工件相互作用、成形力及变形特性进行了详尽探讨。通过逆向设计方法,对渐开线花键搓齿成形模具的核心参数进行了优化设计,并对模具参数与搓齿成形花键轴齿形精度之间的关联进行了深入分析与调整。因此,探究轴向推进增量式滚轧齿类部件的成形制造工艺具有至关重要的价值。

本文首先阐述了一种针对齿类零件的轴向推进增量式滚轧成形技术。选取花键轴作为实验样本,在轴向进给增量式滚轧成形装置上进行了初步的试验研究。通过调整不同坯料直径和模具转速,进行了相应的滚轧实验。初步成果表明,轴向进给增量式滚轧工艺可以有效地实现外花键的一体化成形与成性制造。此外,该研究为该工艺的进一步应用提供了有益的借鉴。

1 轴向推进增量式滚轧成形制造工艺

如图1展示的轴向推进增量式滚轧成形制造设备,其成形过程主要由三套滚轧模具、后置驱动顶尖、原料以及前部回转顶尖等核心部件构成。这三套滚轧模具环绕原料圆周均匀分布,每个模具的结构沿轴向划分为入口刃角区和校正区两大部分。入口刃角区负责对花键轴齿形进行初步滚轧,而校正区则对花键轴初步成形的齿形

进行细致修整。后驱动顶尖采用带有齿轮的柱状设计,这些齿轮的参数与待成型的花键轴齿轮参数保持一致。通过齿轮啮合,后驱动顶尖与滚轧模具之间实现动力传递。此外,通过调整不同滚轧模具齿轮的初始相位,进行精确的分度定位,确保在滚轧初始阶段对花键轴齿轮进行准确分齿,从而防止错齿现象,避免成形过程中的失败。

花键轴的轴向推进增量式滚轧成形工艺,大体上可划分为如图2所展示的滚轧前、滚轧中以及滚轧后三个主要阶段。具体流程如下:在滚轧前阶段,花键轴的坯料被前端的回转顶尖和后端的驱动顶尖固定夹持,三个滚轧模具实现同步、同向、同速旋转。依据齿轮啮合传动原理,滚轧模具驱动后端的驱动顶尖以一定转速旋转,进而使坯料以相同的转速进行旋转,确保坯料与滚轧模具接触时的线速度保持一致。滚轧过程中,坯料在前后顶尖的夹持下,以恒定速度沿轴向推进。在滚轧模具的刃角段齿形进行径向预滚轧的作用下,坯料的表层金属主要发生径向的塑性变形。经过多次预滚轧,塑性变形累积,齿形高度随之增加。预成形的齿形在滚轧模具的校正段进行校正滚轧,进一步提升了齿形的尺寸精度和表面品质。滚轧完成后,滚轧模具沿坯料径向轻微外移,成形后的花键轴由后端的驱动顶尖反向推出,恢复至起始位置,从而完成整个成形过程。

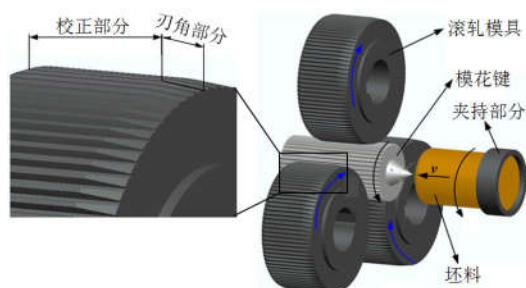


图1 轴向推进增量式滚轧成形制造工艺系统

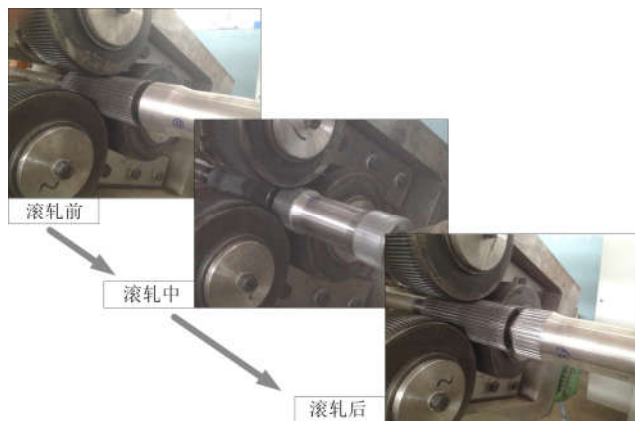


图2 花键轴轴向推进增量式滚轧成形的工艺过程

2 轴向推进增量式滚轧成形花键轴滚轧试验研究

2.1 试验装置

轴向推进增量式滚轧成形花键轴滚轧试验装置如图3所示。该设备主要包含了主动力交流伺服电机、行星减速机、同步带传动区、滚轧模具及工位、模具调整交流伺服电机及蜗轮减速机、万向联轴器等部分,鉴于执行机构普遍搭载交流伺服电机系统,此设备展现出高控制精度、迅速响应以及卓越的可靠性等显著特性。由于模具加工费用高昂,本研究仅开展了不同推进速度和不同模具转速的试验研究。

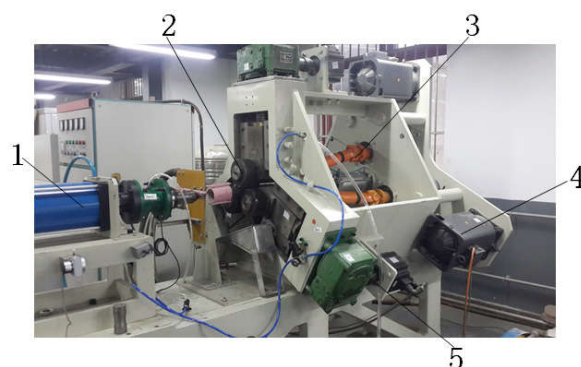


图3 试验装置

1驱动伺服装置 2滚轧加工工位 3万向接头的动力传递 4核心交流伺服马达 5交流伺服模具调节系统

2.2 不同花键轴坯料直径试验

各类坯料直径进行滚轧成形后所得花键轴的形状及其横截面如图4所示。所选横截面位于花键轴从进入端起算20mm的位置。具体的花键轴齿形尺寸测量数据详见表1。可以看出:1)在滚轧初期,花键轴轴向推进滚轧成形工艺成功设定了精确的初始啮合传动状态,确保了齿形在坯料圆周方向的精确分布。2)形成的齿形及其齿槽在整个齿形区域均匀分布,无任何变形,特别是当坯料直径增加时,这一特征表现得尤为突出。3)花键轴齿顶端圆的直径随着原材料直径的增大而相应增加。在原材料直径达到50.85毫米的条件下,花键轴齿顶端圆的直径为51.83毫米,这一数值满足了理论上的标准要求,从而证明了采用轴向推进滚轧技术成形花键轴工艺的实用性与成功。在直径为50.85毫米的坯件上,键轴的横截面齿顶端部观察到显著的尖锐形态。分析表1所提供的齿根圆直径数据,明显观察到各花键轴的齿根圆普遍偏大,其平均偏差约为+0.47毫米。这一现象主要是由于滚轧模具与花键轴在成形过程中的相对位置调整不够精确,其中中心距偏大是关键因素。这导致了滚轧模具对花键轴坯料齿槽区域的径向滚轧压力不足,从而影响了压入量。

表1 不同坯料直径下滚轧成型的花键齿形尺寸测量结果

坯料直径/mm	齿数	齿顶圆直径/mm	齿根圆直径/mm
理论值	40	51.75	48.70
50.15	40	50.51	49.15
50.50	40	51.48	49.19
50.85	40	51.83	49.19

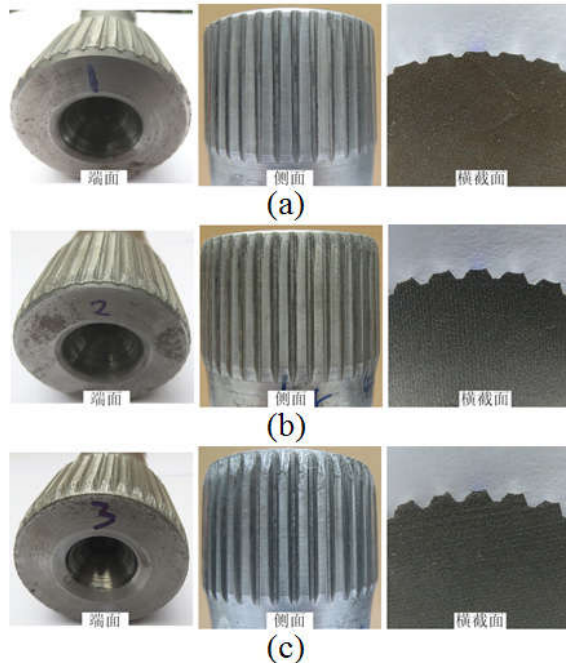


图4 不同坯料推进速度下滚轧成型的花键轴端面及侧面形状

(a) $D_{坯} = 50.15\text{mm}$ (b) $D_{坯} = 50.50\text{mm}$ (c) $D_{坯} = 50.85\text{mm}$

2.3 不同模具转速试验

模具转速影响花键轴滚轧成形过程中单次滚轧作用周期、齿形成过程、滚轧次数等,进而影响滚轧速度。不同模具转速下各花键轴齿形的测量结果见表2。可以看出,各模具转速下成形花键轴的齿形齿顶较为平整,齿廓形状一致。对比花键轴齿形的测量结果可知,各模具转速下成形花键轴的齿顶圆直径相差不大,改变模具转速对花键轴齿形影响较小。

表2 不同模具转速下滚轧成型的花键齿形尺寸测量结果

模具转速/ $r \cdot \text{min}^{-1}$	齿数	齿顶圆直径/mm	齿根圆直径/mm
理论值	40	51.75	48.7
15	40	51.73	49.22
20	40	51.71	49.21
25	40	51.73	49.20

结论:本文首先阐述了轴向推进增量式滚轧成形技术在齿类零件制造中的应用。选取花键轴作为研究对象,在交流伺服驱动的轴向进给增量式滚轧成形设备上进行了初步的实验研究。通过调整不同坯料直径和模具转速,进

行了滚轧试验。研究发现:当坯料直径为50.85mm时,花键轴横截面上的齿顶出现了显著的拉尖现象。同时,所有花键轴的齿根圆尺寸均偏大。平均误差约为+0.47mm。各模具转速下成形花键轴的齿形齿顶较为平整,齿廓形状一致。对比花键轴齿形的测量结果可知,各模具转速下成形花键轴的齿顶圆直径相差不大,误差约为+0.5mm。

参考文献

- [1] 陈国定,陈晓南.机械设计基础[M].北京:机械工业出版社,2005:334-339.
- [2] 赵升吨,李泳峰,范淑琴等.汽车花键轴零件的生产工艺综述[J].锻压装备与制造技术,2012, (3): 74-77.
- [3] Zhang DW, Li YT, Fu JH. Tooth curves and entire contact area in process of spline cold roll-ing[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 21(6): 94-97.
- [4] Zhang DW, Zhao SD. New method for forming shaft having thread and spline by rolling with round dies[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 70: 1455-1462.
- [5] Zhang DW, Li YT, Fu JH. Mechanics analysis on precise forming process of external spline cold rolling[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 20(3): 54-58.
- [6] 张大伟,李永堂,付建华等.外花键冷滚压成形坯料直径计算[J].锻压装备与制造技术,2007,42(2):56-59.
- [7] Shih YP, Li YJ, Lin YC, et al. A novel cylindrical skiving tool with error-free flank faces for internal circular splines. Mech Mach Theory 2022; 170: 21. Article. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2021.104662.
- [8] Xu YD, Shen GX, Zhang YZ, et al. Analysis and experimental study of metal streamline struc-ture of hot rolling forming of straight face gear. Int J Adv Manuf Technol 2023; 125: 1439-1456. Article. DOI: 10.1007/s00170-022-10756-5.
- [9] Xu YD, Shen GX, Zhang YZ, et al. Forming numerical analysis and experiment research on hot rolling of straight face gear. Int J Adv Manuf Technol 2022; 121: 8299-8311. Article. DOI: 10.1007/s00170-022-09787-9.
- [10] Sun H, Li L, Zhang W, et al. Mechanism of vibration on plastic deformation behavior of alu-minum: A molecular dynamics simulation. Mater Today Commun 2024; 40: 13. Article. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2024.109472.
- [11] Shao C, Wang ZL, Li J, et al. Investigation of microstructure evolution and mechanical properties of 2A10 aluminum alloy during ultrasonic vibration plastic forming. J Mater Res Technol-JMRT 2023; 23: 2467-2478. Article. DOI: 10.1016/j.jmrt.2023.01.185.