

国家自然科学基金项目专题

复杂型面轴类件高效高性能精密滚轧成形工艺及装备探讨

赵升吨, 李泳峰, 刘辰, 范淑琴, 梁锦涛

(西安交通大学 机械工程学院, 西安 710049)

摘要:为解决诸如花键轴、螺纹、丝杠、蜗杆等高性能复杂型面轴类件的庞大需求量,对该类复杂型面轴类件高效高性能精密滚轧成形的基本工艺原理、特点进行了简介,并重点对其典型的平板模具滚轧、径向进给式滚轧、径向同步式滚轧以及轴向进给式滚轧成形工艺方式,以及其装备应用等情况,进行了分析介绍。

关键词:复杂型面轴类件; 滚轧成形; 工艺与装备

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2014.05.001

中图分类号: TG306

文献标识码: A

文章编号: 1674-6457(2014)05-0001-08

Discussion on the High-efficiency High-performance Precise Rolling Forming Process and Equipment of Shaft Parts with Complex Shape

ZHAO Sheng-dun, LI Yong-yi, LIU Chen, FAN Shu-qin, LIANG Jin-tao

(School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

ABSTRACT: In order to solve the huge demand of the high-performance shaft parts with complex shape such as spline shaft, thread, ball screw and worm, etc., the basic process principle and characteristics of the high-efficiency high-performance precise rolling forming process of shaft parts with complex shape were introduced, especially, the typical rolling forming process types including flat dies rolling, radial infeed rolling, radial synchronous rolling and axial infeed rolling, as well as the relevant equipments were analyzed and introduced in detail.

KEY WORDS: shaft parts with complex shape; rolling forming process; process and equipment

复杂型面轴类件主要指在轴的外表面带有键槽、齿形、螺纹等结构的轴类零件,该类零件通常作为基础关键零部件广泛应用于汽车、机床、航天、航空、兵器装备等工业领域中,用于实现传递运动、转换运动形式以及联接紧固等功能^[1-3]。常用的复杂型面轴类件有:花键轴、螺杆、丝杠、蜗杆、行星丝杠

滚柱等。

如图1所示,上述复杂型面轴类件中的花键轴,是一种在轴的外表面有多个纵向键槽的轴类件,通常在机械系统中用于传递轴与轮毂间的运动和转矩,并与含内花键结构的轮毂组成具有承载能力强、对中性 and 导向性好、可靠性高的花键联接。滚柱,是

收稿日期: 2014-08-25

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51335009);陕西省自然科学基金(2014JQ7273)

作者简介: 赵升吨(1962—),男,博士,教授,博士研究生导师,主要研究方向为先进材料成形技术及装备、复杂机电系统设计与控制。

一种在轴的外表同时含有齿形及螺纹结构的轴类件,与丝杠、保持架等组成具有传递效率高、承载能力强、使用寿命长等特点的行星丝杠^[4-5]。



图1 典型复杂型面轴类件示意图

Fig.1 Shaft parts with complex shape

随着现代制造业的快速发展,诸多工业领域对上述复杂型面轴类件的使用性能和需求量要求不断提高,而目前针对上述量大面广的复杂型面轴类件的主要生产方式,即切削加工存在机械性能降低、浪费材料、生产效率低、不符合轻量化生产等不足,限制了复杂型面轴类件使用性能和生产效率的提高^[6-7]。

在2010年,国家自然科学基金委员会编写的《机械工程学科发展战略报告(2011~2020)》中指出:“高性能精确成形制造科学与技术”将成为今后10年我国机械工程学科的重要发展方向,该技术对于提升国家制造技术、工业发展水平以及重大、核心关键技术装备的自主创新能力具有重要影响。高性能精确成形技术,是指在力场、温度场等多场耦合条件下,通过成形过程使零件的宏观、微观性能在坯料性能的基础上,得以显著提高的一种先进成形技术,该技术在节省材料和保证轻量化的同时,更好地发挥了零件的使用性能。因此,针对上述复杂型面轴类件开展高效高性能精密成形工艺及装备研究,可为我国解决基础关键零部件的庞大需求量提供途径,掌握形成性一体化调控理论和方法,并为探索、推广高效高性能精确成形制造技术奠定基础^[8]。

文中对复杂型面轴类件的高效高性能精密滚轧成形的基本工艺原理、特点以及典型的工艺方式和装备应用等情况进行分析,为推广、实现复杂型面轴

类件的高效高性能精密滚轧成形制造提供参考依据。

1 高效高性能精密滚轧成形基本工艺原理及特点

1.1 基本工艺原理

复杂型面轴类件的滚轧成形工艺,以金属塑性成形理论为基础,是利用金属在常温下具有一定塑性的特点,通过带有齿形、螺纹等结构的滚轧模具,对轴类件表层局部区域的滚轧压入作用,使该区域金属发生明显塑性变形而成形齿形、螺纹等复杂型面的一种无屑、近净、渐进式塑性成形工艺^[3,7]。

1.2 工艺特点

复杂型面轴类件滚轧成形工艺具有以下明显特点:

1) 复杂型面轴类件上的齿形、螺纹等结构内部纤维组织连续、晶粒细化,组织密度增加,机械性能好,并且由于滚轧模具多次滚轧压入作用产生残余压应力,抗疲劳强度和硬度明显提高;

2) 滚轧成形过程中,滚轧模具对轴类件坯料连续滚轧作用,轴类件上齿形、螺纹等复杂型面成形效率高,并且由于复杂型面是通过金属塑性变形而成形,齿形、螺纹间的材料无需切削去除,材料利用率高,生产成本低;

3) 滚轧模具对坯料的作用方式为局部接触加载,与其他整体接触加载形式的成形工艺相比,滚轧模具与坯料间的摩擦状况由滑动摩擦改为滚动摩擦,摩擦力明显下降,并且在滚轧模具作用下轴类件上的复杂型面渐进成形,成形力大幅度降低^[3,7,9]。

2 典型滚轧成形工艺研究及装备应用

鉴于滚轧成形工艺生产复杂型面轴类件所具备的高效率、高性能和高精度优势,国内外众多学者及机构持续对其开展了系统深入的研究及创新,不断促进了高效高性能精密滚轧成形工艺的发展以及在实际生产中的推广及应用。尤其在欧美发达工业国家,例如德国 PROFIROLL 公司、法国 Escofier 公司、美国 KINEFAC 公司等,这些机构在复杂型面轴类件

高效高性能精密滚轧成形工艺及装备的研究上处于领先地位,并积累了丰富的设计经验,所研发的滚轧成形装备也基本代表了目前复杂型面轴类件滚轧成形装备的最高水平。在国内,从20世纪80年代起,不少高校、科研单位也陆续对诸如花键轴、螺杆等复杂型面轴类件的滚轧成形工艺及装备开展了研究,并取得了一定的研究成果。由于高效高性能精密滚轧成形对设备的精度和刚度要求高,技术难度大,基础理论研究缺乏,并且国外对先进滚轧成形装备技术保密,致使国内在复杂型面轴类件高效高性能精密滚轧成形工艺及装备的研究上,与国外存在差距。

目前,复杂型面轴类件的滚轧成形工艺根据模具结构以及工艺特点的不同,大体上可分为平板模具滚轧成形、径向进给式滚轧成形、径向同步式滚轧成形和轴向进给式滚轧成形4种^[3,7,10]。

2.1 平板模具滚轧成形

复杂型面轴类件的平板模具滚轧成形原理如图2所示,平板模具对称布局在轴类件坯料两侧,并且平板模具分为轧入段和校正段两部分。滚轧成形过程中,坯料由前后顶尖支承,平板模具绕坯料以相同速度作相对平行交错的运动,在摩擦力矩的作用下,平板模具带动坯料旋转,模具上轧入段逐渐增高的齿形、螺纹等结构连续滚轧压入坯料表层,使滚轧处金属连续发生塑性变形,逐渐成形轴类件上的齿形、螺纹等结构。通常平板模具滚轧成形工艺可加工阶梯轴类的花键轴、螺栓等复杂型面轴类件,生产效率高、表面质量好。但该工艺需专用成形设备,成形力大,模具制作困难,易磨损,滚轧轴类件的尺寸受模具尺寸限制,通常用于小尺寸的复杂型面轴类件的滚轧成形^[11]。

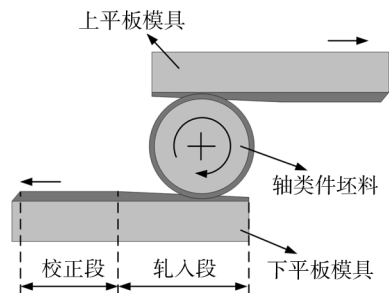


图2 平板模具滚轧成形工艺

Fig. 2 Process of flat dies rolling

平板模具滚轧成形工艺出现最早,技术成熟,应用广泛。在2004年,Pater等人对平板模具滚轧成形螺纹轴类件开展了数值分析及模具结构设计,并研制了相应的滚轧成形装置^[12]。2008年,Kinoshita等人发明了一种针对同时含螺纹(或蜗轮)、花键轴类件滚轧成形的平板模具和方法^[13];Kukiela等人建立了螺纹轴类件滚轧成形的数学模型并开展了有限元分析,结果表明摩擦因数严重影响成形螺纹的材料位移和应变分布^[14]。2010年,王志奎等人采用反推设计方法对花键轴滚轧成形中平板模具的关键参数进行了设计,分析并修正了模具参数与花键轴齿形成形精度的关系^[15];Pater等人对螺纹、蜗杆等轴类件的滚轧成形过程进行了数值分析和试验研究,获得了滚轧温度、模具结构对成形过程的影响以及材料流动、滚轧力、温度变化的规律^[16]。2012年,Hettich等人发明了一种针对变节距螺纹轴类件滚轧成形的平板模具及方法^[17]。

2.2 径向进给式滚轧成形

复杂型面轴类件的径向进给式滚轧成形原理如图3所示,滚轧前,将轴类件坯料置于对称安装的2个圆形滚轧模具间,滚轧成形过程中,滚轧模具同步、同向、同速旋转,并沿坯料径向以相同速度逐渐进给,在摩擦力矩作用下带动坯料旋转,同时模具上的齿形、螺纹等结构连续滚轧压入坯料表层,使滚轧处金属连续发生塑性变形,逐渐成形轴类件上的齿形、螺纹等结构。该工艺中滚轧模具需沿坯料径向进给,模具中心距变化^[18-19]。

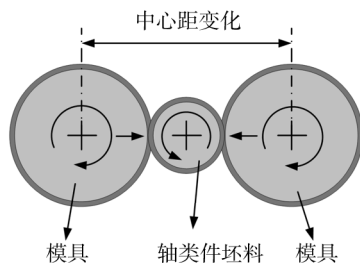


图3 径向进给式滚轧成形工艺

Fig. 3 Process of radial infeed rolling

针对径向进给式滚轧成形工艺,在2007年,Neugebauer等人对花键、齿轮等轴类件的滚轧成形工艺进行了系统研究,共同分析了该方式以及平板模具滚轧成形过程中齿距变化的现象及原因,进而

提出了消除齿距变化的途径,并分析了滚轧成形设备结构、CNC 运动系统等因素对齿形轴类件成形质量的影响^[20-21]。2010 年,王明福等人通过 DEFORM-3D 有限元分析软件对花键轴滚轧成形进行了三维动态分析,获得了成形力-行程曲线、等效应力和等效应变的分布情况^[22];王素燕等人对花键轴滚轧成形设备的液压系统,通过 AMESim 软件进行了动态仿真,引入 PID 控制提高了液压系统载荷位移控制的精度^[23];黄祖尧对滚珠丝杠螺纹高效、低耗、绿色制造技术的发展方向进行了深入探讨,重点分析了精密滚轧滚珠丝杠工艺的现状优缺点,并对我国螺纹制造技术发展方向的选择提出了建议^[24-25];宋欢等人对滚轧成形以及切削加工的螺纹轴类件的金属组织变形进行了研究,结果表明滚轧成形的螺纹内部组织连续、晶粒细化,并且螺纹的强度和硬度明显提高^[26];Łyczko 等人共同分析了径向进给式以及平板模具滚轧成形螺纹轴类件时工作条件、运动关系对模具结构尺寸的影响^[27]。2011 年,刘志奇等人对花键轴滚轧成形过程中单位平均压力、接触面积、坯料直径、滚压力以及滚压力矩进行了求解,试验研究了成形花键轴的金属流动规律、组织成形机理及塑性变形对成形性能的影响^[28];Nitu 等人对滚轧成形螺纹轴类件开展了试验和有限元分析,并对成形螺纹区的硬度进行了测量比较^[29]。2014 年,张大伟等人对行星丝杠中的滚柱(同时含齿形、螺纹结构)滚轧成形过程进行了研究和数值仿真,结果表明通过合理控制滚轧模具的运动同步性,可同时完成齿形、螺纹的滚轧成形^[30]。

2.3 径向同步式滚轧成形

复杂型面轴类件的径向同步式滚轧成形原理如图 4 所示,其工艺系统组成与径向进给式滚轧成形

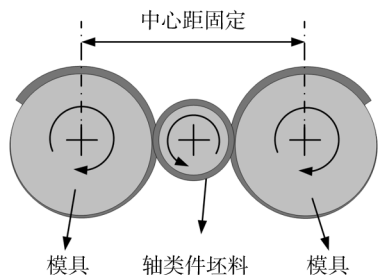


图 4 径向同步式滚轧成形工艺

Fig. 4 Process of radial synchronous rolling

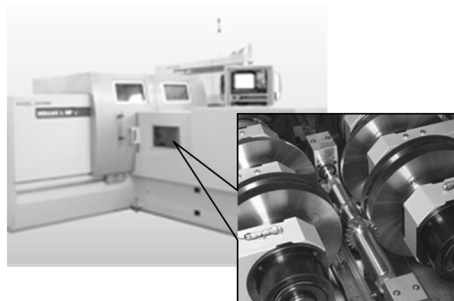
工艺系统类似,但在模具结构上存在明显差异。在该方式中,模具上的齿形、螺纹高度沿圆周方向逐渐增加,并形成类似于平板模具中的轧入、校正两部分,滚轧前,滚轧模具与坯料无接触,滚轧成形过程中,滚轧模具同步、同向、同速旋转,在摩擦力矩作用下带动坯料旋转,同时滚轧模具上轧入段逐渐增高的齿形、螺纹等结构连续滚轧压入坯料表层,使滚轧处金属连续发生塑性变形,逐渐成形轴类件上的齿形、螺纹等结构。该工艺方式中滚轧模具无需沿坯料径向进给,模具中心距固定^[19]。

针对径向同步式滚轧成形工艺,在 2012 年,赵升吨等人研究了该方式以及平板模具滚轧成形花键轴时齿顶分流方式、温度效应等对降低成形力和提高齿形成形质量的影响特点^[31];陈飞等人研究了滚轧成形螺纹轴类件时滚丝轮转速、进给速度和精整时间等滚压参数对螺纹成形质量的影响规律^[32]。2013 年,赵升吨等人研究了径向同步式以及平板模具滚轧成形花键轴时,容易出现分齿不均、乱齿及齿形材料折叠等工艺缺陷,并提出了一种改进的动力增量式滚轧成形工艺^[33]。

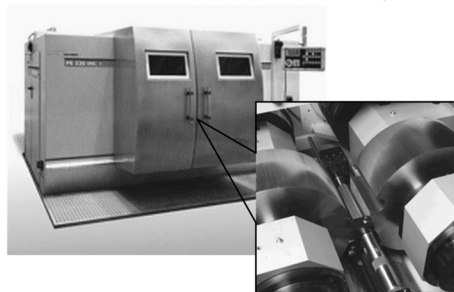
上述复杂型面轴类件的径向进给式和同步式滚轧成形工艺通用性强,生产效率高,模具制作、维护简单,但需专用成形设备,成形力大,通常适合于滚轧成形中小型尺寸的复杂型面轴类件。

在复杂型面轴类件径向进给式、同步式滚轧成形装备应用方面,德国 PROFIROLL 公司作为一家长期从事金属塑性成形工艺研究的企业,在花键轴、螺纹等轴类件的精密滚轧成形工艺及装备研究上取得了不少成果。图 5 所示为 ROLLEX 和 PR320 INC 花键轴滚轧成形机,其中 L-HP 型号的花键轴滚轧成形机采用径向进给式滚轧成形方式,最大滚轧模具直径为 320 mm,最大成形花键轴坯料直径和长度分别为 100,500 mm,总机质量 11 t,设备整机及其滚轧工位如图 5a 所示。PR320 INC 型号的花键轴滚轧成形机及滚轧工位如图 5b 所示,该滚轧机中采用径向同步式滚轧成形方式,因此滚轧成形过程中滚轧模具无需径向进给运动,并且滚轧机中采用了智能化的齿形自动对准系统,具有快速、自动化程度高及精度高的特点^[34]。

此外,PROFIROLL 公司针对螺栓、丝杠、蜗杆等螺纹轴类件高精度滚轧成形,研发了 2-PR100CNC/AC 螺纹滚轧机,该滚轧机采用高刚度 C 型机身框



a ROLLEX滚轧成形机及滚轧工位



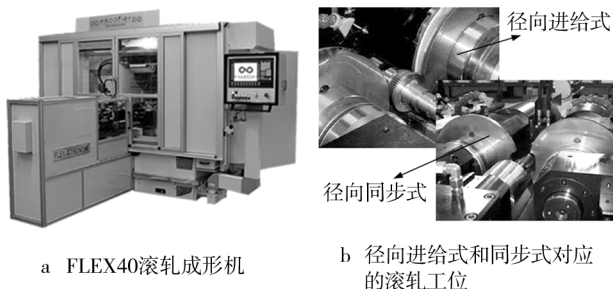
b PR320 INC滚轧成形机及滚轧工位

图5 德国 PROFIROLL 公司花键轴滚轧成形机

Fig. 5 Spline shaft rolling forming machine of the German company PROFIROLL Technologies

架设计,可采用径向进给式和同步式2种滚轧成形方式,实现多轴CNC自动控制,具备图形用户界面、过程可视化、数据管理等功能。该滚轧机所提供的最大径向滚轧力为100 t,滚轧模具轴直径为130 mm,最大滚轧模具直径为300 mm,滚轧螺纹轴类件坯料直径范围为20~200 mm,最大滚轧轴类件坯料有效长度为300 mm,总机质量为13 t。该滚轧机可开展公制/英制螺纹、梯形螺纹、圆螺纹、滚珠丝杠、蜗杆、滚花等的精密滚轧成形工艺^[35]。

法国的Escofier公司在对花键轴、螺纹等轴类件的滚轧成形装备设计、滚轧模具设计制造、滚轧成形过程设计等方面积累了丰富的经验。图6a所示为该公司FLEX40型号的花键轴滚轧成形机,此外FLEX系列花键轴滚轧成形机包括了径向进给式和同步式2种滚轧成形方式,对应的滚轧工位如图6b所示。FLEX40滚轧成形机可提供最大径向滚轧力约为40 t,最大滚轧模具直径为300 mm,最大滚轧模具宽度为100 mm,滚轧模具转速范围为0~30 r/min,最大成形花键轴模数为1.25 mm,最大成形花键轴坯料直径和有效长度分别为50,90 mm,整机功率为40 kW,质量为10 t^[19]。



a FLEX40滚轧成形机

b 径向进给式和同步式对应的滚轧工位

图6 法国 Escofier 公司花键轴滚轧成形机

Fig. 6 Spline shaft rolling forming machine of the French company Escofier

2.4 轴向进给式滚轧成形

复杂型面轴类件的轴向进给式滚轧成形原理如图7所示,多个滚轧模具沿轴类件坯料圆周方向均布(以图中2个为例),并且滚轧模具沿轴向分为进入刃角段和校正段两部分。滚轧前,坯料置于滚轧模具前方,滚轧成形过程中,坯料沿轴向以一定速度推进,多个滚轧模具同步、同向、同速旋转,并在摩擦力矩作用下带动坯料旋转,在滚轧模具进入刃角段齿形、螺纹等结构的预滚轧作用下,坯料表层金属连续发生塑性变形,塑性变形区域较小,成形的齿形、螺纹等结构高度逐渐增加;由于坯料不断轴向推进,预滚轧成形后的齿形、螺纹等结构在滚轧模具校正段的校正作用下,继续提高成形精度和表面质量,轴类件坯料上的齿形、螺纹等结构逐渐沿轴向成形。轴向进给式滚轧成形相对前述的3种滚轧成形工艺,渐进式成形效果更加明显,成形力大幅度降低,成形效率更高,所成形的齿形、螺纹等结构由于累积塑性变形带来的加工硬化效果更加突出,抗疲劳强度和硬度显著提高^[36]。

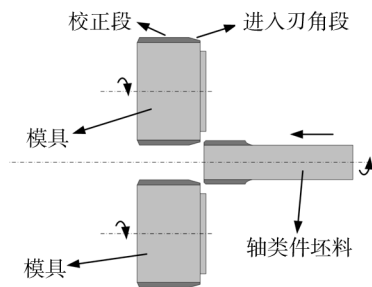


图7 轴向进给式滚轧成形工艺

Fig. 7 Process of axial infeed rolling

美国 KINEFAC 公司是全世界金属冷滚轧成形

技术的领导者,长期致力于花键轴、螺纹、丝杠、蜗杆等轴类件精密滚轧成形工艺及装备的研究,针对花键轴零件研发了三模具轴向推进滚轧成形工艺及对应的 MC-9 卧式圆形模具滚轧机,滚轧机及滚轧工位如图 8 所示,3 个滚轧模具在空间呈 120° 分布,滚轧成形过程中 3 个滚轧模具同步、同向、同速旋转,由集成驱动式顶尖带动花键轴坯料旋转,同时坯料由前后顶尖夹紧并轴向推进,在滚轧模具的作用下沿轴向逐渐成形花键轴。该滚轧机提供的最大径向滚轧力为 44.4 t,滚轧模具直径范围为 107 ~ 152 mm,最大成形花键轴模数为 1.5 mm,最大成形花键轴坯料直径和有效长度分别为 80,300 mm,加工效率大于 1.5 mm/s,整机功率 23 kW,滚轧成形花键轴精度为 6h 级。该轴向推进三模具增量式花键滚轧成形工艺及装备代表了目前花键轴零件滚轧成形的最高水平^[36]。

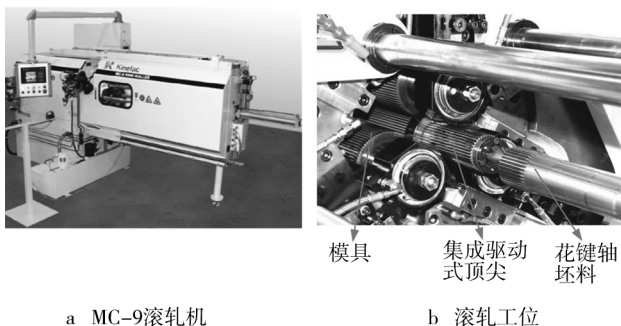


图 8 美国 KINEFAC 公司花键轴滚轧成形机

Fig.8 Spline shaft rolling forming machine of the American company KINEFAC

同时,KINEFAC 公司针对航天、航空、潜艇、军工和核电等工业领域对大尺寸、高强度和高精度螺纹轴类件的需求,研发了 MC 系列螺纹滚轧成形机,其中的 MC-200 螺纹滚轧成形机如图 9a 所示,该设备采用 2 个圆形模具和箱式结构设计,滚轧成形螺纹轴类件时,可采用径向进给式和轴向推进式两种滚轧成形方式,所提供的最大径向滚轧力为 177.9 t,最大滚轧模具转矩为 4745 Nm,模具轴直径为 152 mm,模具直径范围为 254 ~ 381 mm,最大滚轧成形螺纹轴类件直径达 177 mm。目前,通过该滚轧机可完成压力容器螺柱、缸盖螺栓、涡轮壳螺栓、风机轴、管法兰螺栓等螺纹轴类件的高效高性能精密滚轧成形^[37]。此外,MC 系列中 300 型号的螺纹滚轧机径

向成形力更是高达 293.6 t,滚轧模具转矩达 13 558 N·m,其滚轧工位及所滚轧成形用于核电装备中的高强度、高精度螺柱,如图 9b 所示,该设备也代表了目前螺纹轴类件滚轧成形的最高水平。

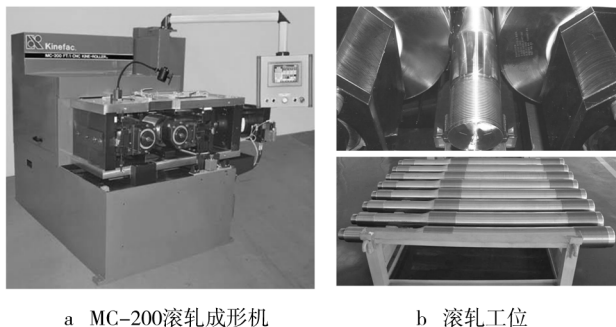


图 9 美国 KINEFAC 公司螺纹滚轧成形机

Fig.9 Thread rolling forming machine of the American company KINEFAC

3 结论

1) 滚轧成形工艺具有成形件机械性能好、节省材料、生产效率高、成形力小、成形精度高、表面质量好等特点,可实现花键轴、螺纹、丝杠、蜗杆等复杂型面轴类件的高效高性能精确成形制造。

2) 复杂型面轴类件的滚轧成形工艺根据模具结构以及工艺特点的不同,可分为平板模具滚轧成形、径向进给式滚轧成形、径向同步式滚轧成形以及轴向进给式滚轧成形 4 种,其中平板模具滚轧成形方式出现较早,工艺较为成熟,所成形的轴类件尺寸受模具尺寸限制,成形力相对较大;径向进给式和同步式滚轧成形方式通用性强,模具制作、维护简单,应用广泛,成形力较大;轴向推进式滚轧成形方式渐进成形效果最为明显,成形力大幅度下降,成形质量显著提高。

3) 在国内开展复杂型面轴类零件高效高性能精密滚轧成形工艺及装备的研究,可解决诸多工业领域对高性能复杂型面轴类件的庞大需求量,同时可为推广高效高性能精确成形制造技术奠定基础。

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.

- CHEN Guo-ding, CHEN Xiao-nan. Basis of Mechanical Design [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2005: 334—339.
- [2] 关文达. 汽车构造 [M]. 第3版. 北京: 机械工业出版社, 2010: 224—310.
- GUAN Wen-da. Automobile Structure [M]. Third Edition. Beijing: Mechanical Industry Press, 2010: 224—310.
- [3] 崔凤奎, 李言, 李春梅. 渐开线花键加工方法进展 [J]. 矿山机械, 2007, 35(2): 116—119.
- CUI Feng-kui, LI Yan, LI Chun-mei. Review on the Machining Method of Involute Spline [J]. Mining & Processing Equipment, 2007, 35(2): 116—119.
- [4] SKF Group. Roller Screws [EB/OL]. [2013-05-18]. <http://www.skf.com/files/779280.pdf>.
- [5] Exlar Company. PRS/PRR Component Roller Screws [EB/OL]. [2013-05-18]. http://www.exlar.com/product_lines/26-PRS-PRR-Series-Roller-Screws.
- [6] 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, 47(3): 74—77.
- ZHAO Sheng-dun, LI Yong-yi, FAN Shu-qin, et al. Overview about Production Process of Spline Shaft Part for Automobile [J]. China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology, 2012, 47(3): 74—77.
- [7] 李泳峰, 赵升吨, 孙振宇, 等. 花键轴高效精密批量化生产工艺的合理性探讨 [J]. 锻压技术, 2012, 37(3): 1—6.
- LI Yong-yi, ZHAO Sheng-dun, SUN Zhen-yu, et al. Investigation on Rationality of High-efficient Precision and Batch Production Process for Spline Shaft [J]. Forging & Stamping Technology, 2012, 37(3): 1—6.
- [8] 国家自然科学基金委员会工程与材料科学部. 机械工程学学科发展战略报告(2011—2020) [M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [9] 彭树杰, 贾代金. 汽车中小模数齿轮冷滚轧技术研究 [J]. 精密成形工程, 2009, 1(2): 39—43.
- PENG Shu-jie, JIA Dai-jin. Research on the Cold Rolling Technology for the Small and Medium Module Gear in Automobile [J]. Journal of Netsshape Forming Engineering, 2009, 1(2): 39—43.
- [10] KLEPIKOV V V, BODROV A N. Precise Shaping of Splined Shafts in Automobile Manufacturing [J]. Russian Engineering Research, 2003, 23(12): 37—40.
- [11] 孙十宝, 崔世强, 高才良, 等. 渐开线冷搓成形模具设计及制造 [J]. 锻压技术, 1999, 24(4): 43—46.
- SUN Shi-bao, CUI Shi-qiang, GAO Cai-liang, et al. Design and Manufacture of Cold Rolling Tools for Involute Spline [J]. Forging & Stamping Technology, 1999, 24(4): 43—46.
- [12] PATER Z, GONTARZ W, WEROŃSKI W. New Method of Thread Rolling [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 153/154: 722—728.
- [13] KINOSHITA Y, HIGUCHI M, UMEBAYASHI Y. Rolling Die and Method for Forming Thread or Worm and Spline Having Small Number of Teeth by Rolling Simultaneously: US, 7392680 [P]. 2008-01-01.
- [14] KUKIELKA K, KUKIELKA L. The Numerical Analysis of the External Round Thread Rolling [J]. Pamm, 2008, 8(1): 10731—10732.
- [15] 王志奎, 赵军. 冷搓花键模具的反推设计与成形仿真 [J]. 塑性工程学报, 2010, 17(1): 36—40.
- WANG Zhi-kui, ZHAO Jun. Back-stepping Die Design and Forming Simulation for Cold-rolling of Spline [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2010, 17(1): 36—40.
- [16] PATER Z, ŁUKASIK K, STEBLIUK V I. Numerical Simulations of Screw Spike, Worm and Gear Rolling [J]. 2010.
- [17] HETTICH U. Method and Rolling Die for Producing a Screw with a Variable Thread Pitch: US, 0309548 [P]. 2012-12-06.
- [18] ZHANG D W, LI Y T, FU J H, et al. Rolling force and Rolling Moment in Spline Cold Rolling using Slip-line Field Method [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 22(5): 688—695.
- [19] Escofier Company. Spline rolling [EB/OL]. [2014-05-18]. http://www.escofier.com/roulage_cannelur_es.php.
- [20] NEUGEBAUER R, PUTZ M, HELLFRITZSCH U. Improved Process Design and Quality for Gear Manufacturing with Flat and Round Rolling [J]. Annals of the CIRP, 2007, 56(1): 307—312.
- [21] NEUGEBAUER R, KLUG D, HELLFRITZSCH U. Description of the Interactions during Gear Rolling as a Basis for a Method for the Prognosis of the Attainable Quality Parameters [J]. Prod Eng Res Dev, 2007(1): 253—257.
- [22] 王明福, 付建华, 刘志奇, 等. 花键冷滚压成形过程有限元分析 [J]. 锻压技术, 2010, 35(4): 155—159.
- WANG Ming-fu, FU Jian-hua, LIU Zhi-qi, et al. Finite Element Analysis of Spline Cold Roll Forming Process [J]. Forging & Stamping Technology, 2010, 35(4): 155—159.
- [23] 王素燕, 刘志奇, 武宗才, 等. 花键滚轧机液压系统仿真与优化 [J]. 液压气动与密封, 2010(6): 35—38.

- WANG Su-yan, LIU Zhi-qi, WU Zong-cai, et al. The Simulation and Optimization Hydraulic System of Cold Rolling Spline [J]. *Hydraulics Pneumatics & Sea*, 2010 (6): 35—38.
- [24] 黄祖尧. 滚珠丝杠螺纹制造技术想高效、低耗、绿色发展方向(上) [J]. *金属加工(冷加工)*, 2010(20): 14—17.
- HUANG Zu-yao. Ball Screw Thread Manufacturing Technology Towards High Efficiency, Low Consumption And Green Development Direction I [J]. *Machinist Metal Cutting*, 2010(20): 14—17.
- [25] 黄祖尧. 滚珠丝杠螺纹制造技术想高效、低耗、绿色发展方向(下) [J]. *金属加工(冷加工)*, 2010(21): 29—32.
- HUANG Zu-yao. Ball Screw Thread Manufacturing Technology Towards High Efficiency, Low Consumption And Green Development Direction II [J]. *Machinist Metal Cutting*, 2010(21): 29—32.
- [26] 宋欢, 李永堂, 齐会萍. 螺纹冷滚压和切削加工的金属组织变形研究 [J]. *锻压装备与制造技术*, 2010, 45(3): 58—61.
- SONG Huan, LI Yong-tang, QI Hui-ping. Deformation Study on Metal Structure in the Thread Cold Rolling and Cutting Process [J]. *China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology*, 2010, 45(3): 58—61.
- [27] ŁYCZKO K, NIESZPOREK T. Effect of the Conditions and Kinematics of Working on the Design of Thread Rolling Tools [J]. *Proceedings in Manufacturing Systems*, 2010, 5(1): 35—38.
- [28] 刘志奇, 宋建丽, 李永堂, 等. 渐开线花键冷滚压精密成形工艺分析及试验研究 [J]. *机械工程学报*, 2011, 47(14): 32—37.
- LIU Zhi-qi, SONG Jian-li, LI Yong-tang, et al. Analysis and Experimental Study on the Precision Cold Rolling Process of Involute Spline [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47(14): 32—37.
- [29] NIȚU E, IORDACHE M, MARINCEI L, et al. FE-modeling of Cold Rolling by In-feed Method of Circular Grooves [J]. *Strojniški Vestnik—Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 57(9): 667—673.
- [30] ZHANG D W, ZHAO Sheng-dun. 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.
- [31] 李泳峰, 赵升吨, 范淑琴, 等. 花键轴增量式滚轧成形工艺的分流方式及温度效应研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2012, 46(9): 60—65.
- LI Yong-yi, ZHAO Sheng-dun, FAN Shu-qin, et al. Research on Divided Flow Method and Temperature Effect of the Incremental Rolling Forming Process for Spline Shaft [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2012, 46(9): 60—65.
- [32] 陈飞, 雷步芳, 齐会萍. 滚压参数对螺纹成形影响的实验研究 [J]. *锻压装备与制造技术*, 2012, 47(5): 76—79.
- CHEN Fei, LEI Bu-fang, QI Hui-ping. Experimental Study on Influence of Rolling Parameters on Thread Forming Process [J]. *China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology*, 2012, 47(5): 76—79.
- [33] 李泳峰, 赵升吨, 范淑琴, 等. 花键轴动力增量式滚轧成形工艺数值分析 [J]. *材料科学与工艺*, 2013, 21(3): 26—32.
- LI Yong-yi, ZHAO Sheng-dun, FAN Shu-qin. Numerical Analysis on the Power-type Incremental Rolling Forming Process of Spline Shaft [J]. *Materials Science and Technology*, 2013, 21(3): 26—32.
- [34] Profiroll Technologies. Spline Rolling Machines [EB/OL]. [2014-05-18]. <http://www.profiroll.de/en/Maschinen/Verzahnungswalzen/>.
- [35] Profiroll Technologies. CNC Thread Rolling Machines For Highest Profile Quality [EB/OL]. [2014-05-18]. http://www.profiroll.de/en/Maschinen/Gewindewalzen/Die_Innovativen/.
- [36] Kinefac Corporation. Spline Rolling Process [EB/OL]. [2014-05-18]. <http://www.kinefac.com/p-process-02-spline-rolling.html>.
- [37] Kinefac Corporation. Thread Rolling Large Diameter Parts [EB/OL]. [2014-05-18]. <http://www.kinefac.com/p-process-01-thread-rolling-large.html>.