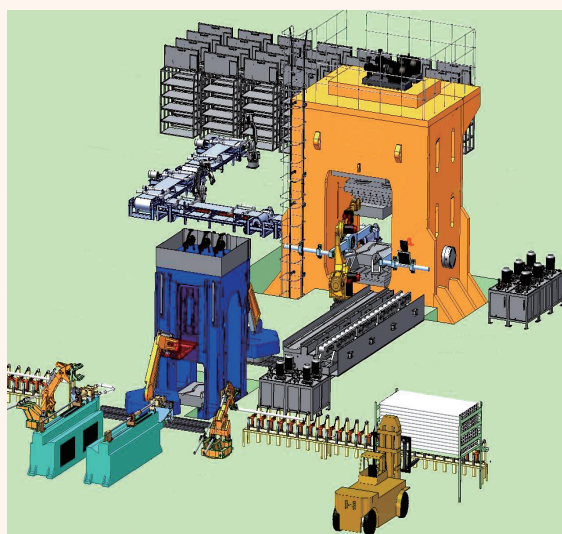


# 锻造·冲压·钣金篇

Metal Forming

## 汽车零部件 锻压技术专题

无疑，锻造、冲压、钣金加工技术在汽车生产中的应用最多，随着汽车保有量的逐年攀升，汽车制造业的规模化、自动化、高效化生产，对锻压工艺和装备的升级需求也上升到一个新的高度，“突破传统，创新高效”倍受业内的重视。本期特别推荐目前汽车产业着力发展的关键技术，如摆辗技术、铝镁合金成形技术、内高压成形技术等。



栏目主持：王建宏



# 中国的摆动辗压技术

■ 胡亚民

**摘要：**介绍了摆辗技术的发展，我国在摆辗方面取得的成果及国内摆辗理论研究和摆辗设备研制情况，介绍了今后摆辗领域的主要工作是实现摆辗机国产化，推广粉末冶金、双金属和其它金属摆辗成形，以及优化摆辗工艺，延长模具寿命，开发生产强度更高、形状更复杂的摆辗件，推广摆辗复合精密成形等。

## 一、摆辗技术的发展

摆动辗压简称摆辗，是通过连续局部成形对被加工件实现整体成形的一种回转成形加工技术。其可以实现绿色生产，近净成形加工，省力，完成同样成形所需的力大致是传统锻压设备的1/10~1/5。摆辗时冲击小、振动小、噪声低、金属容易充填模腔，摆辗所采用的设备小、投资少、占地面积少、模具寿命高。摆辗易实现机械化和自动化。摆辗件尺寸精度达0.02mm，粗糙度Ra达0.4~0.8 μm。采用摆辗技术节能、节材，扩大了塑性加工范围，在机械制造、汽车等许多工业领域得到了广泛应用。

与传统切削过程相比，摆辗一般可节材30%，降低制造成本25%。由于摆辗模具与坯料间的接触面积小，金属容易流动，加之模具与坯料表面间的摩擦主要为滚动摩擦，摩擦系数低，因而，摆辗工艺最适宜齿形零件的齿形成形和带薄法兰轴类零件的

法兰成形。

20世纪60年代以来，摆辗技术受到不少国家的重视。国外生产的摆辗成形件如图1~图3所示。

图4是我国昆山精密模具导向件公司20世纪90年代后期生产的冷摆辗件；图5为郑州亚泰精锻公司生产的冷摆辗件。外国能生产的摆辗成形件我国基本上都能生产，而我国摆辗生产的带枝丫端面齿轮和螺旋锥齿轮多年来未见外国有关报道。

对于碳素钢、不锈钢、轴承钢、工具钢、18CrMnTi、20CrNiMo及大多数有色金属等，可以进行冷摆辗加工。摆辗还可进行热辗和温辗，原则上适合各种塑性材料加工。

摆辗机结构较复杂，对刚度要求高，这是由于它要实现复杂的摆动运动，偏心受载。国内关于摆辗的理论研究与生产实践基本上与日本、瑞士同步。

20世纪70年代初，上海机械制造工艺研究所和武汉汽车齿轮



图1 波兰生产的冷摆辗成形件



图2 日本生产的冷摆辗成形件



图3 瑞士生产的冷摆辗成形件

厂等单位先后研制出小型摆辗机，上海电机锻造厂研制的1600 kN摆辗机辗压生产汽车半轴。哈尔滨工业大学和哈尔滨齿轮厂、清华大学和北京工具厂、上海机械制造工艺研究所和上海新华轴承厂，以及天津锻造厂、北京第二汽车厂等不少单位开展摆辗技术研究。

中国兵器工业第五九所（以下简称“五九所”）1984年引进波兰PXWP-100C摆辗机，着手研究摆辗机的传动原理、结构及零部件，设计制造了6300kN摆辗机，为了冷摆辗成形大型汽车同步环、大型被动螺旋锥齿轮、兵器零件及其他产品。1994年投料制作，是我国第一次涉足制造具有四种运动轨迹的摆辗机。

1984年，“~面凸轮的冷摆辗成形研究”、“JH70型摩托车启动齿轮、启动棘轮深端面齿形摆辗成形研究”、“轴向齿圈的冷摆动辗压成形工艺研究”和“可燃药筒底板冷摆辗成形工艺及设备的研究”等部级科研项目，在波兰摆辗机上开发生产了多种产品，其中摩托车端面齿轮和棘轮摆辗件代替进口件，得到国营建设机床厂的高度评价。五九所累计生产端面齿轮和棘轮等摆辗成形件1000多万件，开创了国内冷摆辗技术工程化应用的先河。

1986年12月，兵器部在五九所举行“启动齿轮端面齿形的冷摆辗成形研究”鉴定会，武汉工学院（现武汉理工大学）院长姜奎华教授主持了鉴定会。鉴定会认为CY80型摩托车启动齿轮摆辗件（见图6）冷摆辗成功，达

到国际先进水平，并对五九所国内第一家对摆辗时摆辗件内部温度场进行测量和国内第一家应用光塑性法研究摆辗变形时摆辗件的金属流动作了高度评价。

1991年，哈尔滨工业大学、武汉工学院与五九所合作编著《摆动辗压》，这是国内外第一本关于摆辗技术的专著。1994年武汉汽车工业大学与五九所共同编著《回转塑性成形工艺及模具》，摆辗是重要章节之一；1998年合作编写《摆辗技术》。

台湾1996年购进一台波兰PXW-200型摆辗机，1996年12月曾派人到五九所和武汉理工大学考察摆辗。

粉末摆辗是对粉末冶金烧结体用摆辗机代替传统锻造设备成形，从而获得高密度、高强度的零件。武汉工学院1988年对直齿锥齿轮粉末温摆辗成形进行科学研究和产品开发，图7是他们温摆辗成形的直齿锥齿轮和所使用的粉末冶金烧结体坯料。由于摆辗成形时，单位挤压力高，粉末件材料易于流动，容易提高摆辗成形件的密度和密度均匀性，大幅提高了抗拉强度。

国内外有工厂生产粉末冶金螺旋锥齿轮和直齿锥齿轮、圆柱齿轮、凸轮、螺母及套筒、环等零件，如采用摆辗，成形力只需传统锻压设备的1/5，而密度大幅超过传统锻压设备锻造的粉末件，达7.8 g/cm<sup>3</sup>。国内开发的部分粉末冶金冷摆辗成形件如图8所示。

武汉工学院1989年发表论文“摆头运动分析和最佳进给量的确定”。2003年，发表论文“摆

动辗压接触面积率的精确计算及简化表达”。



图4 中国昆山精密模具导向件公司生产的冷摆辗成形件



图5 中国郑州亚泰公司生产的冷摆辗成形件

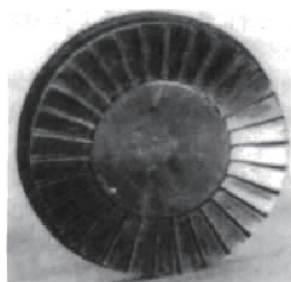


图6 五九所采用波兰PXWP-100C摆辗机生产的CY80型摩托车启动齿轮

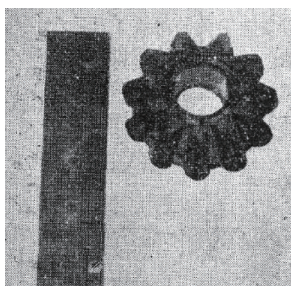


图7 武汉理工大学温摆辗直齿锥齿轮和粉末冶金件坯料

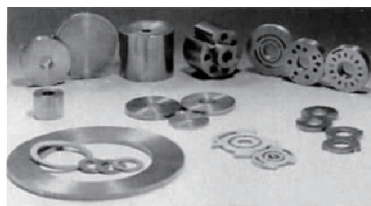


图8 国内开发的粉末冶金冷摆辗成形件

2004年, 武汉理工大学华林教授课题组的“汽车齿轮冷摆辗精密成形技术”项目获湖北省科技进步一等奖, “汽车摩托车齿轮类零件的冷摆辗精密成形关键技术及应用”项目获2005年国家科技进步二等奖, 合作单位还有湖北车桥有限公司、江苏太平洋精锻科技股份有限公司、五九所、重庆理工大学和昆山精密模具导向件公司。

江苏太平洋精锻科技股份有限公司有瑞士Schmid公司产摆辗机3台。他们建厂初期的摆辗项目立项和摆辗技术的开发是在五九所的支持下进行的。该公司在摆辗复合精密成形技术应用和开发领域也取得了重大突破, 许多科技成果在该公司转化为生产力。图9是江苏太平洋精锻科技股份有限公司生产的汽车差速器半轴锥齿轮。

1990年, 结合江苏太平洋精锻科技股份有限公司的有关无链条自行车直齿锥齿轮的项目, 五九所和吉林工业大学联合培养了一名硕士研究生。

## 二、摆辗产品开发与技术研究

清华大学在20世纪80年代就将研究摆辗过程中的“中心拉薄”现象作为硕士论文选题, 1999年, 哈尔滨工业大学对摆辗过程进行有限元分析, 采用三维刚塑性有限元法对圆盘件的摆辗成形进行数值模拟, 针对具体案例进行圆盘件摆辗中心变薄缺陷的预测, 并对所提出的缺陷防止办法进行了数值模拟, 提出可避免中心变薄的工艺优化方案。

### 1. 端面齿轮

1987年五九所国内第一家采用冷摆辗工艺生产产品。图6为五九所采用波兰PXWP-100C摆辗机生产的CY80型摩托车启动齿轮, 齿形不再加工, 代替了日本进口件。现国内可生产各种端面齿轮, 如图10所示。

1996年10月, 五九所摆辗成功符合图样要求的转向齿圈军工零件(见图11), 一次摆辗成形。节省了工时, 生产率提高了10倍多, 材料利用率提高110%。该零件材料为40Cr钢, 加工硬化严重, 而且一个端面有两个独立的螺旋面, 一个端面有70个端面齿。江西理工大学2004年开始进行摆辗成形过程有限元模拟研究, 2007年进行了摆辗成形工艺CAD系统的研制, 他们以节油器内花键套为对象, 建立了预制坯的体积计算模型及其结构设计模型, 确立了摆动模的设计模型和凹模的力学分析模型, 给出了摆辗工艺参数和力能参数的设计模型。

### 2. 汽车半轴

摆辗汽车半轴工艺, 以其投资少、成本低、质量好、无噪声等显著优点被各汽车厂所青睐。经过二三十年的生产实践, 人们发现由于半轴法兰盘较大, 摆辗时不易成形, 摆辗前要对坯料进行一次或两次头部镦粗制坯, 采用二火工艺锻造, 氧化皮严重, 造成环境污染, 也影响表面质量, 掌握不好还会造成材料过烧。为此, 太原科技大学付建华教授提出了一火摆辗锻造新工艺, 并设计了适用于这种工艺的

2500kN热摆辗机, 一火完成汽车半轴的锻造成形。

其主要原理是将复动成形(分模模锻)技术用于摆辗机上, 在摆辗前不需要对长棒料预镦粗制坯, 实现对有较高的高径比的头部镦粗。在摆辗机开始摆辗工作时, 摆头与坯料接触加压, 这与一般摆辗机摆辗时的情况相同, 但摆辗变形到一定程度时, 组合模具(凹模)可以向后平行移动, 继续摆辗一段时间摆辗过程才结束。

2010年、2012年太原理工大学继续针对汽车半轴摆辗成形进行了工艺分析, 采用大型体积成形模拟软件DEFORM-3D对整个成形过程进行了有限元数值模拟与理论研究。



图9 江苏太平洋精锻生产的汽车差速器半轴锥齿轮



图10 摩托车端面齿轮冷摆辗成形件

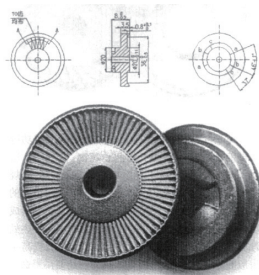


图11 转向齿圈冷摆辗成形件

### 3. 直齿锥齿轮

1988年,西安交通大学与五九所合作培养研究生,其课题是关于汽车差速器直齿锥齿轮的摆动辗压成形,有关论文曾公开发表。

2005年,重庆工商大学和北京机电所共同进行了汽车差速器锥齿轮的温锻制坯后冷摆辗成形的复合成形工艺研究和生产实践,他们致力于改进模具的热处理工艺,提高模具寿命。

2006年、2007年,武汉理工大学根据齿轮零件及摆辗模具原型,利用三维造型软件UG,建立直齿圆锥齿轮摆辗成形的有限元分析模型,应用三维刚塑性有限元算法对直齿圆锥齿轮摆辗成形过程进行了模拟分析,得出变形中金属的流动状态和等效塑性应力应变分布规律,直观表示了齿轮成形过程及等效应力和等效应变。

他们在研究直齿圆锥齿轮摆辗工艺的基础上,利用有限元法分析了齿形形成过程中金属填充规律,阐述了直齿圆锥齿轮摆辗成形特点,研究了三种毛坯形状对直齿锥齿轮成形质量的影响,分析了鼓形毛坯最优形状尺寸。并发现,直齿圆锥齿轮摆辗成形的辗压力随摆头倾角、下模进给速度、摩擦系数及摆辗阶段等因素的变化而变化。通过有限元模拟分析,对最大辗压力与下模进给速度和摩擦系数的关系进行了研究,总结出了直齿锥齿轮冷摆辗成形工件与模具的温度分布及变化规律。

2007年,河南科技大学也进行了轿车半轴齿轮冷摆辗成形和

精密锻造研究。

### 4. 螺旋锥齿轮

五九所1990年冷摆辗生产出模数为1.7、齿数为28的螺旋锥齿轮(见图12a)。武汉理工大学2005年根据汽车后桥从动螺旋锥齿轮的锻件图样设计并制造了预制坯和摆辗试验模具,铅试件辗压试验结果证明辗压成形工艺和模具设计可行,成形试验和网格试验显示了齿形的充填过程和内部金属网格的变化,揭示出从动螺旋锥齿轮辗压成形金属流动规律和应变分布状态,测试了螺旋锥齿轮辗压力一压下量曲线,提出了消除齿端充填不足的措施。螺旋锥齿轮模拟件如图12b所示。

华中科技大学、武汉理工大学2010年基于直齿锥齿轮和螺旋锥齿轮三维实体几何模型、三维塑性变形有限元力学模型,通过解决材料模型、网格划分、边界条件等关键建模技术,以DEFORM-3D为平台建立了精确的锥齿轮冷摆辗成形三维刚塑性有限元模拟模型。基于该有限元模型研究了直齿锥齿轮和螺旋锥齿轮冷摆辗成形过程中毛坯的变形规律,金属的流动规律,成形载荷的变化规律及等效应变的分

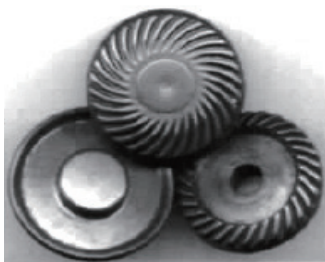
布规律。探究了下模进给速度、上模转速、上模倾角、摩擦因子、毛坯尺寸等工艺参数对锥齿轮冷摆辗成形中力能参数、金属流动和锻件损伤因子值分布的影响规律,揭示了锥齿轮冷摆辗精密成形机制和规律。

采用冷摆辗工艺成形具有复杂齿形的螺旋锥齿轮,主要采用图13所示的生产工艺。

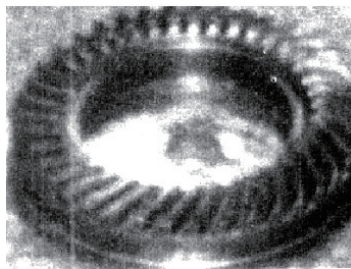
2006年,合肥工业大学也研究了螺旋伞齿轮摆辗成形,模拟结果是接触区域内坯料上端金属先发生变形,金属沿着轮齿螺旋面自上而下逐渐充填齿腔,下端齿腔在最后完全充填。他们设计出带向心轴承的凹模,齿形型腔可沿螺旋齿轮轴线自由旋转。顶杆对锻件施加轴向向上力时,螺旋齿轮成形件通过轮齿螺旋面对凹模施加切向力,使齿形型腔沿齿轮轴线同时旋转,锻件被旋出凹模。

### 5. 铁路车轮

2011年,西南交通大学根据铁路车轮原型,利用三维成形软件UG对车轮及摆辗加工上、下模具进行实体造型,得到车轮摆辗成形的成形坯料及模具模型,为摆辗成形有限元模拟分析提供了前提条件。图14为直径



(a) 电动工具螺旋锥齿轮摆辗成形件



(b) 汽车螺旋锥齿轮模拟件

图 12

840mm的整体车轮示意，具体尺寸参考GB8601-88。该车轮适用于标准轨距，轴重不大于23t的铁路客、货车车辆，以及其它铁路用辗钢体车轮。

他们基于刚塑性有限元理论，建立了车轮摆辗成形的有限元分析数值模型。利用有限元分析模拟软件Deform-3D，应用三维刚塑性有限元算法对车轮摆辗成形过程进行模拟分析，得出铁路车轮摆辗成形过程中金属坯料的填充规律和金属流动特点，研究了不同毛坯形状对车轮成形质量的影响，通过对不同毛坯成形过程分析，得出摆辗加工车轮最优毛坯形状，并且对最优毛坯进行数值模拟分析，得出优选毛坯等效应力分布规律和摆辗模具受力情况，最后与模锻时模具受力进行了比较。他们结合车轮成形规律分析模拟轨道轮摆辗加工时的金属流动规律，探索了利用摆辗技术加工滚动试验台轨道轮的可行性。

### 三、今后摆辗领域的主要工作

摆辗的发展才方兴未艾，摆辗技术的发展没有如某些人说的那样进入死胡同。白俄罗斯明斯克拖拉机厂原先采用圆拉法切削加工拖拉机差速器直齿锥齿轮，2009年引进瑞士新型T-300摆辗机（见图15）生产拖拉机差速器半轴锥齿轮和行星锥齿轮。国内对摆辗感兴趣的人也越来越多。

应该进一步深入研究摆辗机摆头运动轨迹的运动学和动力学的有关问题，研究摆辗机的运动轨迹和摆辗机刚度之间的关系，

研究不同摆头运动轨迹下的金属变形特征与力能参数的关系，优化最佳预成形件形状及摆辗成形模具的加工工艺参数、结构设计、选材、热处理等影响模具寿命的基本因素，建立更符合摆辗生产实际的数学模型，掌握摆辗机摆头运动轨迹与摆辗成形件的成形精度与模具寿命的关系。

#### 1. 摆辗机的国产化

目前，摆辗机的发展正处在一个关键时期，由于某些原因，国产精密摆辗机虽然有过不少报道，但尚未有一台稳定用于生产，而国外摆辗机价格20多年一直居高不下。因而，发展我国摆辗技术必须实现摆辗机国产化。

国内从1981年起就有人研究摆辗轨迹和摆辗机滑块工作行程速度方程，在双偏心套驱动摆辗轨迹方面已取得重大进展。我国的半轴摆辗机也是具有自己的独特结构。有人估计中国目前已有250多台生产汽车半轴的专用摆辗机。

某些单位正在着手研发精密摆辗成形机。但如对摆辗设备生产没有太多经验，研发摆辗的时间不长，经验不是很多，其前进道路可能不会那么平坦。

希望国内生产锻压设备的厂家能重视研发摆辗机，充分发挥设备生产厂家的生产优势，这样一定能大幅缩短摆辗机国产化的时间。

实现摆辗机的国产化，在开发新设备的同时，也可致力于对厂矿闲置设备，如油压机和水压机的改造，使其能用于摆辗成形。也可以改造一些报废了的摆

辗机，让其继续用于生产。

#### 2. 粉末冶金、双金属及其它金属摆辗成形的推广

国内以前有人关于高速钢件的摆辗成形研究和生产实践取得不少经验。现在应该进一步扩大应用范围，开发摆辗生产不锈钢和其他难变形材料零件。

1986年国内开发成功了第一个粉末冶金摆辗产品双金属减摩轴承零件（YB351叶片泵配油盘），1988年申报专利成功。1991年列为国家级火炬计划项目和北京市重大科技成果推广项目。粉末冶金的摆辗成形能生产难以加工制造的特种复合金属材料及轴承，烧结铜合金材料相对密度在98%以上，大幅超过了原来的93%~97%。

采用先在无缝钢管内壁烧结



图13 螺旋锥齿轮的成形过程

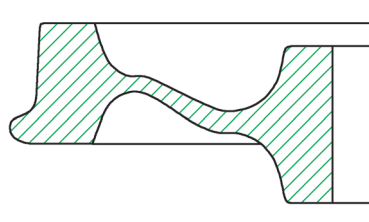


图14 整体车轮示意



图15 白俄罗斯2009年引进的瑞士新型T-300摆辗机

铜合金,再采用径向摆辗机将烧结上的铜合金衬层的工艺生产双金属轴套,衬层的相对密度超过98%。这种双金属轴套为整圆,无接缝、刚度好、保持精度好,便于在自动生产线上自动化装配,生产效率高,完成一支轴套平均工时不到3s。主要设备只需2~3台套,占地面积小,钢和铜合金的利用率接近100%,制造成本低。可取代GB/T18324—2001铜合金整体轴套中直径100~220mm或更大尺寸的整体铸铜轴套。

采用对双金属板卷制轴套后再摆辗成形法兰部位,效果更好。铜合金和钢材利用率达100%。所摆辗成形的双金属整圆止推轴套见图16。其完全取代了原采用的由烧结双金属止推环与卷制的套筒摩擦对焊所制造的止推轴套。因此,应大力推广粉末冶金摆辗技术和双金属成形技术。

### 3. 进一步优化摆辗工艺,延长模具寿命,开发生产强度更高、形状更复杂的零件

某公司生产同步环冷摆辗成形件如图17所示,虽然可满足生产要求,但是模具设计不合理,寿命低,且需要较大毛坯,浪费金属,增加了加工余量,必须进一步优化摆辗工艺,提高材料利用率和模具寿命,降低生产成本。

应进一步发展复合成形工艺,将冷摆辗工艺推广用于生产形状更复杂且精度要求高的零件,或体积重量较大,冷锻力较大,需要大吨位设备而热锻又不

能达到其精度要求的零件。如变速器输入轴与输出轴接合齿轮,自动变速器行星齿轮,减速器弧齿锥齿轮等齿轮类零件,以及变速箱、减速器齿轮总成零件等。可采用冷摆辗技术对预成形件终成形加工,预成形件可热精锻成形,冷温挤压成形,也可采用其他成形方法如冲裁、精密冲裁、镦粗或局部成形工艺方法成形。如采用温锻制坯后再冷摆辗成形加工汽车差速器锥齿轮的工艺,充分发挥了各自压力加工成形的优点,效益显著。白俄罗斯明斯克拖拉机厂近几年才采用热锻制坯加冷摆辗复合成形工艺生产直齿锥齿轮。

国内尚无工厂用摆辗生产汽车可变螺距转向齿条(见图18),该产品完全可采用冷摆辗复合成形将齿形辗压成形,代替原来的切削加工,模具结构简单,齿形部分尺寸精度高。其工序是将圆棒下料到所需长度后压扁预制坯,然后磷化、皂化,最后采用直线轨迹冷摆辗成形。

通过冷摆辗可使20CrMo钢的整体强度提高1.4~1.5倍,充分利用加工硬化原理,变不利因素为有利因素,可大幅提高零件的力学性能和使用性能,降低生产成本。国内某公司用传统锻压设备生产的有色金属锻件不能满足质量要求,在进行二次冷摆辗成形加工后,大幅提高了产品的耐磨性,质量稳定,获得了可观的经济效益。

将再制造技术用于摆辗行业,如采用堆焊技术局部修复摆辗模型腔。这样就能在最少投资的情况下,延长摆辗模具寿命。

要做好对模具的失效分析和无损检测评价,在模具的选材和热处理上狠下功夫。国内在这方面取得不少成绩,应当用国产化材料生产模具,并达到具有与国际水平的寿命。

以往,在以工艺及模具参数优化为目标的集成软件开发与应用,实现摆辗工艺、摆辗材料、摆辗设备的有限元分析和无损检测评价、预测产品质量和模具寿命一体化,已经取得了不少成绩,特别不少高等院校在这方面做了不少工作。希望能进一步与生产实践相结合,解决工厂里的存在生产实际问题,为我国摆辗事业作出了更多更大的贡献。

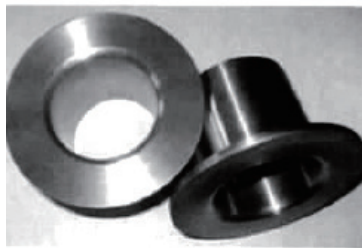


图16 双金属整圆止推轴套



图17 同步环冷摆辗成形件

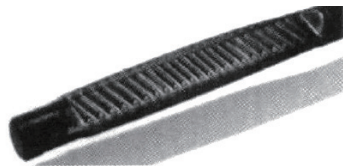


图18 汽车可变螺距转向齿条

## 参考文献

- [1] 纪澜. 国外摆动辗压工艺发展概况[J]. 国外锻压, 1973(2): 1-6.
- [2] 裴兴华, 张猛, 胡亚民. 摆动辗压[M]. 北京: 机械工业出版社, 1991.
- [3] 胡亚民, 伍太宾, 何怀波. 摆动辗压工艺及模具设计[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2008.
- [4] 伍太宾, 胡亚民. 冷摆辗精密成形[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.1.
- [5] 罗征志, 胡亚民. 摆动辗压成形工艺研究现状及发展[J]. 锻压技术, 2010, 35 (1) .
- [6] 胡亚民, 姚万贵, 冯文成. 我国摆动辗压技术现状及展望[J]. 锻压装备与制造技术, 2011, (1, 2) .
- [7] 胡亚民. 起动齿轮端面齿形的冷摆辗成形研究[J]. 兵工学报, 1992 (1) .
- [8] 车路长, 胡亚民, 等. 带枝丫起动棘轮的冷摆辗成形研究[J]. 锻压技术, 1993, 18 (1) .
- [9] 张炳梅, 丁来生, 何长光. 摆辗成形过程中压力、位移及温度分布的测试研究[J]. 金属成形工艺, 1987 (1) .
- [10] 朱明海, 范琳. 摆辗成形后的摩托车起动齿轮三维应变分布[J]. 金属成形工艺, 1987 (1) .
- [11] 张猛, 胡亚民. 回转塑性成形工艺及模具[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 1994.
- [12] 张猛, 胡亚民. 摆辗技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998, 4.
- [13] 张猛, 程培元, 华林. 粉末冶金伞齿轮摆辗模具设计与温辗工艺研究[J]. 模具技术, 1989, (5) : 65-68.
- [14] 胡长安. 双金属滑动轴承材料制备/产品加工的一体化制造技术(EB/OL) .
- [15] 温正忠, 诸文俊, 李金生, 胡亚民, 齿形零件的冷摆辗成形[J]. 金属成形工艺, 1998, 16 (6) : 13-16.
- [16] 胡亚民, 华林, 赖周艺, 等. 汽车摩托车齿轮类零件的冷摆辗精密成形[J]. 中国机械工程2006, 17(增刊):140-143.
- [17] 刘钢, 苑世剑, 王仲仁. 摆辗圆盘件中心变薄的预测及防止办法的有限元分析[J]. 塑性工程学报, 1999, 6 (1) .
- [18] 毛春燕, 付建华, 李永堂. 汽车半轴摆动辗压成形研究[J]. 锻压装备与制造技术, 2005, 40 (3) .
- [19] 刘建波. 汽车半轴聚料摆辗成形工艺与实验研究[D]. 太原: 太原科技大学, 2012.
- [20] 刘明霞, 胡亚民. 伞齿轮冷摆辗的光塑性模拟研究[J]. 模具技术, 1992,(2).
- [21] 刘明霞, 赵静远. 伞齿轮冷摆动辗压成形的试验研究[J]. 金属成形工艺, 1993,(2).
- [22] 伍太宾, 任广升. 汽车差速器锥齿轮的温锻制坯/冷摆辗成形加工技术研究[J]. 中国机械工程, 2005,16(12):1106-1109.
- [23] 程培元, 胡锐, 卢志国, 华林. 直齿圆锥齿轮摆辗成形最大辗压力的有限元研究[J]. 锻压技术, 2008, 33 (1) .
- [24] 王华君, 孙世为, 夏巨堪, 等. 从动螺旋伞齿轮摆动辗压三维有限元模拟[J]. 锻压装备与制造技术, 2005 (3) .
- [25] 胡亚民, 姚万贵, 冯文成. 我国摆动辗压技术现状及展望(2) [J]. 锻压装备与制造技术, 2011, 46 (2) .
- [26] 胡亚民. 发展我国摆辗技术必须促进摆辗机国产化[J]. 金属成形工艺, 1999, (1) .
- [27] 温正忠, 诸文俊, 胡亚民. PXW型摆辗机摆动机构运动学问题初探[J]. 金属成形工艺, 1999, 17(3):1-4.
- [28] 车路长, 胡亚民. 发展摆动辗压的新方向一在普通液压机上的摆动辗压[J]. 模具技术, 1993(1) : 46-51.
- [29] 李振雄. 液压机的国内外市场一谈液压机的产品开发方向[J]. 技术开发导报, 1993(1).
- [30] 胡亚民, 张驰. 变速箱同步齿圈的材料与成形工艺[J]. 汽车工艺, 1991(1) : 20-25.
- [31] 关天顾, 张士华. 高速工具钢的摆动热辗压[J]. 锻压技术, 1981(2) : 33-38.

作者简介: 胡亚民, 行业专家, 重庆理工大学教授。武汉理工大学兼职博士生导师。享受国务院政府特殊津贴。重庆市首届学术技术带头人。中国机械工程学会高级会员, 中国塑性加工学会(锻压学会)理事, 特种轧制委员会委员。重庆市锻压行业协会顾问。

**MW** 20151126