

附件 1:

西安理工大学

博士创新基金项目

申 请 书

项目名称: 异质轻型齿形功能件冷滚打精确  
成形控制方法研究

申 请 者: 崔莅沐

导 师: 陈学东/李 言

学科名称: 机械制造及其自动化

联系电话: 18637326567

起止时间: 2021.01-2022.06

入学年月: 2018.09

攻读方式: 脱 产

申请日期: 2020.10

西安理工大学研究生院制

二〇一三年五月



项 目 名 称	异质轻型齿形功能件冷滚打精确成形控制方法研究												
申请项目类别 (在相应类别上画“√”)			<input type="checkbox"/> 基础研究 <input checked="" type="checkbox"/> 应用研究 <input type="checkbox"/> 开发研究										
所属学科			机械工程										
起止时间						申请金额		3 万					
项 目 申 请 人	姓 名		崔莅沐		性 别		男		出生年月		1992. 11		
	已获学位 及获学位时间		工学硕士 2018. 06				专业技术职务						
	入学时间		2018. 09				攻读方式		脱产				
	承担或参加其他科学研究基金项目及研究情况: 1. 2015.09-2018.12, 参与国家自然科学基金项目“高速单点冷滚打成形过程材料变形行为及控形控性机制研究”(项目编号: 51475366)。 2. 2020.09-, 参与国家自然科学基金项目“异质轻型齿形功能件单点冷滚打成形及其精确控制方法研究”(项目编号: 52075437)。 成果列表: [1] 崔莅沐, 肖继明. 冷滚打成形中打入量对残余应力的影响规律仿真研究[J]. 机械强度, 2019, 41 (04): 927-934. [2] 崔莅沐, 肖继明. 公转速度对冷滚打成形制件回弹影响研究[J]. 宇航材料工艺, 2018, 48 (04): 27-33. [3] 李玉玺, 李言, 崔莅沐, 杨明顺, 肖继明, 崔凤奎. 丝杠冷滚打成形参数控制研究[J]. 中国机械工程, 2017, 28 (19): 2388-2393. [4] 李龙, 李言, 崔莅沐, 黄赓, 杨明顺. 冷滚打成形力及金属变形的有限元数值模拟[J]. 中国机械工程, 2017, 28 (16): 1951-1959. [5] 李玉玺, 李言, 崔莅沐, 苗志鸿. 丝杠冷滚打变形力影响因素研究[J]. 中国机械工程, 2020, 31 (09): 1065-1073.												
项 目 组 主 要 成 员	姓 名		性别		年龄		技术职务		主要承担工作任务			本人签字	
	陈学东		男		57		教授		总体技术指导			陈学东	
	李 言		男		60		教授		总体技术指导			李言	
	杨明顺		男		46		副教授		理论分析与实验方案指导			杨明顺	
	袁启龙		男		50		副教授		滚打装置设计、实验及测试工作			袁启龙	
	王楠楠		男		27		硕士生		成形试件的制备及测试			王楠楠	
	霍永强		男		25		硕士生		有限元分析与本构方程研究			霍永强	
	刘迪娜		女		25		硕士生		实验测量和数据分析			刘迪娜	

## 一、立项依据

### 1、研究项目的国内外概况、科学意义和应用前景：

#### 1) 研究意义

在工业转型发展进入新时期的今天，生态环境与工业发展已经联结为一个互为支撑的有机整体，节约资源，降低能耗是新时期和新环境下解决环境保护与工业发展矛盾的必由之路，也是保能源安全、阻止环境恶化的首要推动力和绿色发展的根本任务<sup>[1,2]</sup>。面对这一新形势，在航空、航天、高铁、汽车、高速机床以及高端工程装备等高端制造领域，具有高性能、轻量化和高功效等特点的零件加工制造技术愈发受到重视<sup>[3-5]</sup>，其中机械零件轻量化的加工制造是集设计、制造和材料为一体的综合性技术，其最终目标是满足机械性能的同时减轻零件重量以提高使用效能，探索和发展新的工艺方法实现机械零件轻量化加工制造已成为制造领域研究的重要组成和发展趋势。

齿轮、齿条、花键等具有齿形结构的功能零件作为各类运载及高速运动装备的重要零件其应用量大面广，而由于其结构和功能的特殊性，轻量化一直是其加工制造的难题之一。探索齿形功能零件轻量化制造技术已成为不可避免的重要研究课题<sup>[6,7]</sup>。目前，对齿形功能零件的轻量化主要通过结构优化和材料组合两种手段实现<sup>[1,8,9]</sup>，以齿轮为例，通过结构优化去除材料形成如图 1(a)、(b)所示的轮辐式齿轮、薄壁杯形齿轮，这种改变零件结构的方式会导致整体强度以及传动精度的变化，无法应用于较高强度要求的场合<sup>[10,11]</sup>；通过材料组合方式，目前多见利用键或螺钉将轻质材料芯轴与外齿圈连接的材料组合方式实现轻量化，如图 1(c)所示，这种方法降低了零件的可靠性和传动效率，为解决上述问题，发展出一种如图 1(d)所示的一体化复合齿轮，以这种一体化复合齿轮为代表的异质材料齿形功能件，在不改变原齿轮结构基础上，充分发挥内层和外圈金属材料性能，具有较高的可靠性和动态特性<sup>[12-14]</sup>。

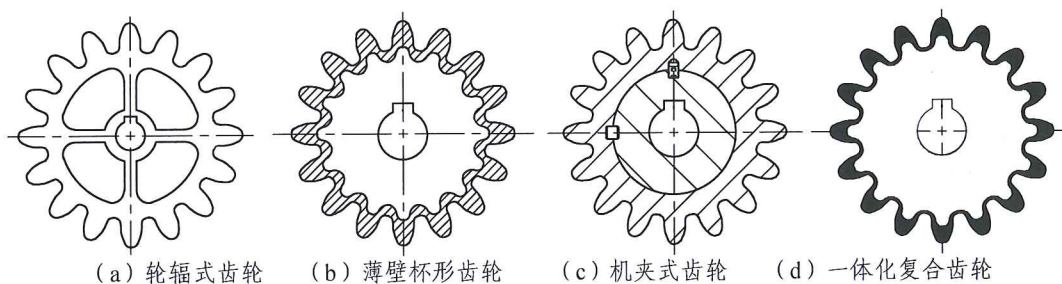


图 1 齿形功能零件轻量化

当前异质材料齿形功能零件主要采用离心铸造、切削加工以及模锻、挤压等塑性成形方法实现，其中塑性成形利用被加工材料的塑性，在工具或模具的外力作用下进行等体积成形，对原料的利用率高，且能够使制件内部形成均匀连续分布的纤维组织结构、改善和提高晶粒及组织细化程度、减少或修复微观缺陷，使制件的机械强度和抗疲劳强度得到显著提高，相较于其他工艺方法塑性成形工艺具有“成形与改性”的双重作用，但模锻、挤压等塑性方法需要复杂模具、设备吨位大能耗高，适合特定目标零件的批量生产，成本高柔性差。因此，迫切需要探索针对异质材料齿形功能零件高效柔性、省力低耗的新型绿色成形方法<sup>[15-18]</sup>。

冷滚打成形技术是一种常温下利用滚打轮对工件进行高频冲击和滚压相复合的塑性成形技术。冷



滚打成型的基本原理如图 1 所示，滚打主轴上装有滚打轮，当主轴以 A 为轴心以角速度  $w_1$  转动时，滚打主轴将带动滚打轮以 A 为轴心公转，打击到工件时滚打轮和工件在摩擦力作用下以 B 为轴心自转，其角速度为  $w_2$ ，且与  $w_1$  反向，主轴每转动一周，滚打轮打击一次工件，工件被击打表面发生塑性变形，其成形廓形和滚打轮的外廓形直接相关，同时工件以速度  $v$  不断进给，每次击打造成的塑性变形量逐步积累，最终在工件表面形成所需的形状。该成形技术可用于质复合金属材料的加工，最终成形具有高精度、高性能的轻型花键轴、齿条、齿轮、丝杠等多类型具备功能齿形的零件。

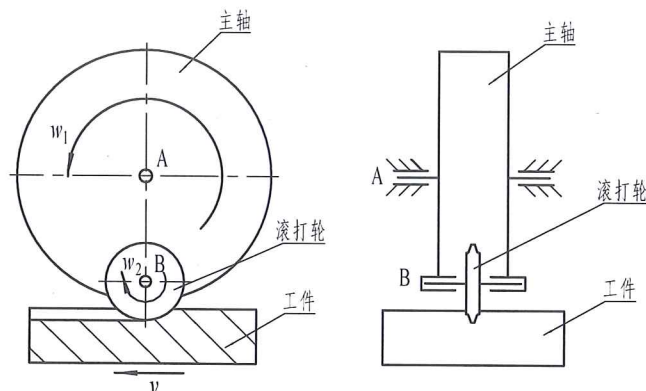


图 2 异质材料冷滚打成形齿形功能零件成形原理

本项目主要研究在这种成形方法下金属塑性流动行为以及成形精度、表面质量及其材料性态的精确控制机制，为这种先进成形方法真正成为功能表面成形的实用技术奠定理论基础，并在此理论上通过对加工参数和工艺系统的控制，预测成形时金属的变形变性情况，提高成形形位精度和表面质量，为这种方法的实际应用提供技术支持和实验基础。前期对于单一材料冷滚打成形技术的研究表明，在无模无约束条件下实现结构形状和尺寸的塑性成形，其成形过程控制已有很难度。而对于本研究，由于不同力学和物理性能的材料在同载荷加载条件下的变形行为不同，并且材料结合部对载荷传递和变形的影响复杂，使得由异质金属成形一体化复合齿形功能零件难度更大。如何选取和匹配材料、控制不同材料变形和应力场、选择和优化工艺参数，是实现异质材料冷滚打成形齿形功能零件的关键问题。

异质复合材料在冷滚打成形过程中，由于两种材料不同的力学特性以及一体成形时异质金属结合部的非线性作用，使得成形过程金属塑性流动的行为更加复杂，不能以单一金属材料变形情况来推演双金属材料条件下的复合成形，使得精确控制不同区域金属塑性变形十分困难。迫切需要对其成形过程中的金属成形机理，尤其是对异质材料特性匹配、毛坯结构与尺寸以及成形工艺参数之间的内在关系进行系统研究，形成可以实际应用工艺方法，因此项目具有重要的理论意义和科学价值。

在当今可持续发展、节能减排、保护环境趋势下，轻量化设计已成为机械装备绿色设计与制造的研究热点。大型精密汽车零部件轻量化成形技术的开发和应用已成为汽车及航空等产业重要研究和方向，传动系统结构轻量化一直是动力系统追求的目标<sup>[19-21]</sup>。本项目正是从传动系统中的重要部件齿形功能零件出发，在单一材料冷滚打成形原理和方法的基础上，进行异质材料下的齿形功能零件冷滚打成形，重点研究该工艺下成形制件成形质量的控制方法，实现齿形功能零件的轻量化制造，具有广阔的应用前景和工程实际意义。

## 2) 研究现状

异质金属复合结构件日益受到重视。在航空航天、轨道交通等领域,为了节能、减重、降低成本、满足不同工况条件要求,异种材料的焊接技术和异质金属复合结构日益受到重视<sup>[22, 23]</sup>。美国 Delta IV 火箭贮箱、日本 H2B 火箭推进剂贮箱等均采用铝合金/钢异质金属制备,双金属复合管兼有基层和复层的所有优点,相对于整体合金管能有效降低成本,具有优异的综合性能和经济效益,在石化、电力、建材、机械制造等领域广泛应用。铝/钢异质金属复合结构能够满足结构性能和轻量化设计的双重技术要求,但对其塑性成形中的关键问题仍没有得到有效的解决,针对异质金属材料成形工艺及成形机理研究已成为国内外学者关注的前沿热点<sup>[24-26]</sup>。其中双金属复合齿轮能充分发挥齿圈材料和基体材料的特性,在轻量化设计领域得到关注。北京科技大学王宝雨院士<sup>[14]</sup>等通过实验和仿真相结合的方式对 AISI-8620 钢/铝合金 2014 双金属齿轮锻造成形过程中不同阶段材料的流动行为、齿圈与内芯间隙和高度差以及齿圈厚度对金属变形和成形负荷的影响进行分析。英国学者 Politis D J 等<sup>[13]</sup>对铜/铅、钢/铜、钢/铅不同组合下双金属齿轮锻造成形过程中材料流动和厚度分布进行研究(如图 3 所示),重点对齿圈厚度、摩擦和不同金属组合对金属流动的影响进行研究。Kacmarcik 等<sup>[27]</sup>对铝合金/铜双金属齿形件冷挤压成形过程中的负载-行程关系进行研究。

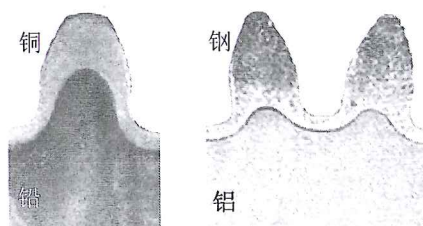


图 3 异质材料复合齿形模锻成形制件

冷滚打成形技术发端于上世纪 50 年代中期,由瑞士学者 KraPfenbauer 和 Ernst Grob 提出<sup>[28]</sup>,发展至今该技术已得到了较成熟的工业化应用,出现了针对花键轴、花键套筒等零件生产的专用冷滚打成形装备,但受限于技术保密,国外针对该技术的相关文献资料和研究报道很少,国内针对冷滚打成形技术的研究主要集中在西安理工大学先进制造课题组以及河南科技大学的崔凤奎教授团队和太原科技大学的李永堂教授团队,目前已在冷滚打成形工艺应用、工艺特性、成形质量以及成形装备等方面取得了一系列的研究成果。在冷滚打成形原理运动特性方面,刘志奇<sup>[29]</sup>等从运动学角度分析了冷滚打成形单次击打过程滚打轮与工件接触面积的变化情况,分析了局部变形量与工件进给量的关系,建立了单次击打时滚打轮与工件的累计接触面积,其研究表明,冷滚打成形过程每次击打产生的变形量以及滚打轮与工件的累计接触面积很小,进一步说明了冷滚打成形条件下齿形的最终成形是微量变形累积的结果。杨明顺等<sup>[30-31]</sup>分析了冷滚打成形过程中滚打轮的外沿轨迹曲线,发现冷滚打成形断续击打的工艺特征会使成形后的齿底产生一定的残余高度,并给出了该残余高度的数学表达式,其研究指出齿底残余高度受滚打方式、进给速度、滚打速度以及滚打轮回转和公转半径影响,当在低速大进给情况下会在齿向方向产生明显的鳞纹现象。

在冷滚打成形过程成形力的研究方面,张璐<sup>[32]</sup>等应用主应力法对圆弧齿形冷滚打成形过程最大成形力进行了解析求解,并在简化模型的基础上推导出了圆弧齿单次击打成形力最大值的解析方程,并



依据试验所得数据结果通过回归分析的方法对解析方程进行了修正。赵智渊<sup>[33]</sup>和张璐<sup>[34]</sup>利用数值模拟方法分别获得了单次直接击打条件下的成形力的变化情况。袁启龙<sup>[35]</sup>利用数值模拟的方法进一步分析和探讨了不同材料冷滚打成形过程中打入量、进给量、滚打转速对变形力的影响规律。李龙<sup>[36]</sup>建立了冷滚打全过程的有限元仿真模型,获得了完整成形过程下的成形力变化规律。梁小明<sup>[37]</sup>利用有限元分析模拟方法,分析了顺打和逆打条件下冷滚打成形全过程以及单次击打成形力的变化特点。

在冷滚打成形过程金属流动特性研究方面, Kahnjetter<sup>[38]</sup>利用有限元方法对渐开线花键在轴对称加载和非轴对称加载情况下的接触情况进行了分析,描述了在扭矩不断增大时应力应变的变化情况和应力集中分布情况,从数值模拟角度对冷滚打过程中金属流动特性进行了初步探索。崔凤奎<sup>[39]</sup>从理论上将滚打轮与工件的接触过程分为点接触、线接触、面接触三个阶段,分析了各个阶段的金属变形规律,并将变形区域分为由滚打轮直接作用而发生变形的区域和由工件内力作用为主导且遵照最小阻力定律的周边变形区域,同时指在滚打轮打出和脱离时变形区域会发生一定回弹。文献[40]和[41]对冷滚打单次击打过程通过 ABAQUS 建立了相应的仿真模型,获得了多次滚打情况下材料所受等效应力以及齿廓形状随时间的变化规律,张璐<sup>[42]</sup>以冷滚打丝杠为研究对象,通过数值模拟的方法获得了丝杠一次滚打成形过程中应力和等效塑性应变的变化情况,获得了成形过程中若干个节点各方向的等效塑性应变随时间的变化曲线图,定性的描述了丝杠在冷滚打成形过程中的金属流动规律。李永堂团队<sup>[43]</sup>以花键冷滚打成形为对象,采用间歇分度模拟了相邻两齿的成形过程,得到了工件多次击打后相邻两个齿槽的应力和应变情况,其研究表明在成形过程中材料变形仅集中在被击打区域,等效塑性应变范围始终未扩展至相邻齿形结构,证明冷滚打成形连续标准模数齿形时,相邻齿形结构成形时相互间不会发生变形干涉。

在冷滚打成形工艺条件下材料特性研究方面,李玉玺<sup>[44]</sup>在分析了冷滚打成形过程材料变形特点的基础上,探讨了变形量、变形速率和变形温度对流变应力的影响,认为研究冷滚打成形工艺条件下材料的变形特性应考虑材料大应变,高应变速率时的流变特性。崔凤奎<sup>[45-47]</sup>研究了冷滚打工艺条件下工件材料的动力学特性,通过万能材料试验机和霍普金森压杆试验装置获得了不同应变速率和温度下的材料流变曲线,根据测得的数据利用 Johnson-Cook (J-C) 本构模型和 Zener-Hollomon 本构模型,给出了 40Cr 和 20 钢的本构关系,以此表征在冷滚打成形工艺条件下材料的流变特性。

在制件性能特性研究方面,徐红玉<sup>[48]</sup>和崔凤奎<sup>[49-50]</sup>对冷滚打成形后齿形表面的硬度情况进行了研究,指出冷滚打成后的形齿表面会形成明显的加工硬化层,齿顶硬化程度较低且硬化层最薄,分度圆处的硬化程度最高。李玉玺<sup>[51]</sup>分析了冷滚打成形后齿形表面金属的金相组织变化情况,发现冷滚打成后的形齿表层金属的晶粒得到细化,并形成沿齿形齿廓分布的纤维组织。王晓强<sup>[52]</sup>建立了冷滚打成形宏观变形和微观位错密度变化之间的联系,通过位错密度变化解释了冷滚打成形表面强化的现象。崔凤奎团队<sup>[53-55]</sup>通过仿真和实验的手段研究了冷滚打成形后齿形表面的残余应力分布规律,指出冷滚打成形后的齿廓表层会形成残余压应力层,齿形不同部位的残余应力值大小与金属变形程度直接相关,齿顶残余压应力值最小,齿根处最大。

在成形质量方面,梁小明<sup>[56]</sup>为预测并控制变形回弹对齿形精度的影响,采用仿真手段分别研究了滚打深度和滚打轮公转速度与成形齿形切向、轴向和径向回弹量之间的关系。李龙<sup>[57]</sup>利用有限元模



拟和试验方法分析了冷轧打成形齿形端面飞边以及齿向弓形变形产生的原因,并给出了滚打方式、滚打轮公转速度以及进给速度等工艺参数对飞边长度的影响规律。刘志奇<sup>[58]</sup>通过数值模拟研究揭示了花键冷轧打成形过程中齿形端面塌陷和齿面皱褶缺陷的产生机理,并探讨了滚打速度和进给速度对这类缺陷的影响。崔凤奎<sup>[59]</sup>等对冷轧打成形的花键表面粗糙度、残余应力和硬度进行了以滚打轮公转速度和工件进给速度为变量的工艺分析,其研究表明滚打轮公转速度和工件进给速度对个目标量的影响程度不同,且花键齿形表面粗糙度和硬化程度对于工艺参数变化的响应趋势与花键残余应力响应变化趋势相反,进一步表明冷轧打成形工艺参数与成形质量间存在复杂的耦合关系。

上述研究表明,冷轧打成形方法具有无模具、设备功率小、成形力小、柔性大、节能环保、成形过程柔性大等特点,是一种具有潜在优势和应用前景的精密成形技术。本课题团队在国家自然科学基金连续支持下,采取不同形式的工艺方式,对该工艺方法进行了较为系统的研究,通过理论、仿真和实验研究,探明了冷轧打成形的机理,获得了单一材料成形过程中金属变形、应力应变分布、滚打成形力的变化规律。揭示冷轧打成形工艺下制件特性形成规律,掌握了工艺参数对冷轧打成形质量的影响规律及其控制策略。

对本项目提出的异质材料冷轧打成形齿形功能零件工艺而言,直接相关研究尚未见到报道,但从双金属复合齿轮以及单一材料冷轧打成形相关研究成果来看,随着材料组合和工艺条件的变化,成形过程中不同材料特性匹配以及异质材料结合部状态对冷轧打成形制件的形态和性态有着非常重要的影响,各要素相互影响与耦合,使得异质材料冷轧打成形过程十分复杂,许多问题尚需进一步探索和研究,其中亟待解决的问题集中在以下两点,一是探索不同材料特性、结构和尺寸组合以及不同工艺参数条件下,异质材料在冷轧打成形中的塑性变形行为和成形机理;二是形成有效的异质材料匹配以及冷轧打工艺参数选取准则,避免材料分离、表层破裂等现象的发生,并获得异质材料匹配和工艺参数对成形质量的影响规律。本项目异质材料冷轧打成形齿形功能零件工艺方法及其成形机理研究正是围绕以上两点所展开,该项目的研究为实现齿形功能零件轻量化成形提供新的工艺方法,具有重要的理论意义和实用价值。

#### 参考文献

- [1] Z. G. Wang, K. Hirasawa, Y. Yoshikawa, et al. Forming of light-weight gear wheel by plate forging[J]. CIRP Annals, 2016, 65(1): 293-296.
- [2] H. C. Möhring. Composites in Production Machines[J]. Procedia CIRP, 2017, 66: 2-9.
- [3] L. Kroll, P. Blau, M. Wabner, et al. Lightweight components for energy-efficient machine tools[J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2011, 4(2): 148-160.
- [4] 黄伟, 罗世彬, 王振国. 临近空间高超声速飞行器关键技术及展望[J]. 宇航学报, 2010, 31(5): 1259-1265.
- [5] Runze Huang, Matthew Riddle, Diane Graziano, et al. Energy and emissions saving potential of additive manufacturing: the case of lightweight aircraft components[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 135: 1559-1570.
- [6] A. Erman Tekkaya, N. Ben Khalifa, Goran Grzanic, et al. Forming of Lightweight Metal Components: Need for New Technologies[J]. Procedia Engineering, 2014, 81: 28-37.
- [7] S. Wernicke, S. Gies, A. E. Tekkaya, Manufacturing of hybrid gears by incremental sheet-bulk metal forming[C]. //ICAFT/SFU/AutoMetForm 2018, 2019.
- [8] Mark A. Carruth, Julian M. Allwood, Muir C. Moynihan. The technical potential for reducing metal requirements through lightweight product design[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2011, 57: 48-60.
- [9] Daozhong Li, Il Yong Kim. Multi-material topology optimization for practical lightweight design[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2018, 58(3): 1081-1094.



- [10] Catera P G, Gagliardi F, Mundo D, et al. Multi-scale modeling of triaxial braided composites for FE-based modal analysis of hybrid metal-composite gears[J]. Composite Structures, 2017, 182: 116-123.
- [11] Shadi Shweiki, Antonio Palermo, Domenico Mundo. A Study on the Dynamic Behaviour of Lightweight Gears[J]. Shock and Vibration, 2017, 2017: 1-12.
- [12] Shadi Shweiki, Ali Rezayat, Tommaso Tamarozzi, et al. Transmission Error and strain analysis of lightweight gears by using a hybrid FE-analytical gear contact model[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 123: 573-590.
- [13] D. J. Politis, J. Lin, T. A. Dean, et al. An investigation into the forging of Bi-metal gears[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(11): 2248-2260.
- [14] Pengfei Wu, Baoyu Wang, J. Lin, et al. Investigation on metal flow and forming load of bi-metal gear hot forging process[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 88(9-12): 2835-2847.
- [15] M. Kleiner, M. Geiger, A. Klaus. Manufacturing of Lightweight Components by Metal Forming[J]. CIRP Annals, 2003, 52(2): 521-542.
- [16] Stanislav Dedov, Gunter Lehmann, Rudolf Kawalla. Application of Combined Casting-Forging Process for Production of Durable Lightweight Aluminum Parts[J]. Key Engineering Materials, 2013, 554-557: 264-273.
- [17] D. Gröbel, R. Schulte, P. Hildenbrand, et al. Manufacturing of functional elements by sheet-bulk metal forming processes[J]. Production Engineering, 2016, 10(1): 63-80.
- [18] 黄华贵, 季策, 杜凤山. 双金属复合管固-液铸轧复合轧制力模型研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(10): 10-17.
- [19] Hans-Willi Raedt, Frank Wilke, Christian-Simon Ernst. The Lightweight Forging Initiative Automotive Lightweight Design Potential with Forging[J]. ATZ Worldwide, 2014, 116(3): 40-45.
- [20] 李艳, 向东, 李啟文, 等. 起重机快速轻量化设计系统研究及应用[J]. 机械工程学报, 2018, 54(9): 205-213.
- [21] 魏东, 石友安, 杨肖峰, 等. 高超声速飞行器隔热瓦结构的变厚度轻量化设计方法[J]. 宇航学报, 2018, 39(3): 285-291.
- [22] Ken-ichiro Mori, Niels Bay, Livan Fratini, et al. Joining by plastic deformation[J]. CIRP Annals, 2013, 62(2): 673-694.
- [23] Ken-ichiro Mori, Yohei Abe. A review on mechanical joining of aluminium and high strength steel sheets by plastic deformation[J]. International Journal of Lightweight Materials and Manufacture, 2018, 1(1): 1-11.
- [24] 程可, 徐文斌, 陆晓峰. 20/316L 双金属复合管旋压成形数值模拟与分析[J]. 塑性工程学报, 2015, 22(1): 119-125.
- [25] 袁其炜, 王建华, 靳凯, 等. Cu/Al 双金属复合管旋压复合成形规律研究[J]. 精密成形工程, 2018, 10(4): 48-54.
- [26] 范淑琴, 王琪, 华毅, 等. 双金属复合管直角法兰双辊夹持旋压起皱分析[J]. 西安交通大学学报, 2018, 52(9): 15-23.
- [27] K. Essa, I. Kacmarcik, P. Hartley, et al. Upsetting of bi-metallic ring billets[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212(4): 817-824.
- [28] Ernst Grob, Krapfenbauer H. Roller Head For Cold Rolling of Splined Shafts or Gears, US: Ernst, Grob (Mannedorf, CH) 1973.
- [29] 刘志奇, 卢泓昱, 曲博, 等. 花键冷敲精密成形接触面积数值计算与分析[J]. 太原科技大学学报, 2015, 36(4): 250-254.
- [30] 杨明顺, 李言, 袁启龙, 等. 板料冷滚打成形鳞纹影响因素解析及试验研究[J]. 机械科学与技术, 2013, 32(9): 1363-1367.
- [31] 蒋显伟, 李言, 杨明顺, 等. 高速冷滚打齿块侧面残余高度解析与试验研究[J]. 机械科学与技术, 2018, 37(1): 89-99.
- [32] 张璐, 杨明顺, 李言, 等. 高速冷滚打过程变形力解析方法及其修正[J]. 塑性工程学报, 2011, 18(5): 1-7.
- [33] 赵智渊, 杨明顺, 袁启龙, 等. 基于 ABAQUS 的丝杠冷滚打变形力仿真[J]. 锻造技术, 2011, 32(8): 1165-1169.
- [34] 张璐, 李言, 杨明顺, 等. 高速冷滚打成形过程的有限元数值模拟[J]. 机械工程材料, 2012, 36(86-88): 86-88.

- [35] 袁启龙, 李言, 杨明顺, 等. 块体材料冷滚打成形变形力研究[J]. 中国机械工程, 2014, 25(2): 251-256.
- [36] 李龙, 李言, 崔莅沐, 等. 冷滚打成形力及金属变形的有限元数值模拟[J]. 中国机械工程, 2017, 28(16): 1951-1959.
- [37] Xiaoming Liang, Yan Li, Limu Cui, et al. The Effect of Different Roll-beating Methodson Deformation Forces of Rack Cold Roll-beating[J]. Revista de la Facultad de Ingenieria, 2016, 31(8): 164-174.
- [38] Kahnjetter Z L, Wright S. Finite Element Analysis of an Involute Spline[J]. Journal of Mechanical Design, 2000, 122(2): 239-244.
- [39] Fengkui Cui, Xiaoqian Wang, Fengshou Zhang. Metal Flowing of InVolute Spline Cold Roll-beating Forming[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2013, 26(5): 1056-1062.
- [40] Feng Kui Cui, Ya Fei Xie, Xiao Dan Dong, et al. Simulation Analysis of Metal Flow in High-Speed Cold Roll-Beating[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 556-562: 113-116.
- [41] Yan Li, Ming Shun Yang, Qi Long Yuan, et al. Simulation Study on the High-Speed Single-Point Accumulation Forming Process of Involute Spline[J]. Key Engineering Materials, 2010, 450: 441-444.
- [42] 张璐, 李言, 杨明顺, 等. 丝杠冷滚打成形过程金属流动规律研究[J]. 中国机械工程, 2012, 23(13): 1623-1628.
- [43] 牛婷, 李永堂, 王利民, 等. 冷敲花键相邻齿槽之间成形影响的分析[J]. 锻压技术, 2017, 42(11): 66-72.
- [44] 崔凤奎, 郭超, 李玉玺. 40Cr 钢的塑性流动应力特征及本构关系[J]. 河南科技大学学报: 自然科学版, 2012, 33(6): 1-6.
- [45] F. K. Cui, K. G. Xie, Y. F. Xie, et al. Constitutive model of cold roll-beating forming of 40Cr[J]. Materials Research Innovations, 2015, 19(sup8): S8-284-S8-287.
- [46] Cui Feng Kui, Ling Yuan Fei, Xue Jin Xue, et al. The dynamic characteristics and constitutive model of 1020 steel[J]. Emerging Materials Research, 2017, 6(1): 124-131.
- [47] 徐红玉, 刘玉会, 卜敏, 等. 高速冷滚打成形花键表面加工硬化试验[J]. 锻压技术, 2017, 42(3): 165-169.
- [48] 崔凤奎, 凌远非, 薛进学, 等. 花键冷滚打成形表层加工硬化研究[J]. 兵工学报, 2017, 38(2): 358-366.
- [49] Fengkui CUI, Yuanfei LING, Jinxue XUE, et al. Work Hardening Behavior of 1020 Steel During Cold-Beating Simulation[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2017, 30(2): 321-331.
- [50] 李玉玺, 李言, 崔莅沐, 等. 基于微观组织的齿轮冷滚打成形硬度研究[J]. 机械强度, 2018, 40(5): 1097-1104.
- [51] 王晓强, 崔凤奎, 燕根鹏. 40Cr 冷滚打成形中位错密度变化研究[J]. 中国机械工程, 2013, 24(16): 2248-2252, 2256.
- [52] 王晓强, 解克各, 崔凤奎, 等. 热力耦合作用下冷滚打花键的残余应力仿真分析[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2017, 36(4): 68-77.
- [53] Fengkui Cui, Yongxiang Su, Kege Xie, et al. Analysis of Metal Flow Behavior and Residual Stress Formation of Complex Functional Profiles under High-Speed Cold Roll-Beating[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2018, 2018: 1-10.
- [54] 崔凤奎, 苏涌翔, 解克各, 等. 花键冷滚打成形表层残余应力分布规律研究[J]. 兵工学报, 2018, 39(5): 1022-1032.
- [55] 梁小明, 李言, 杨明顺, 等. 冷滚打成形件表面鳞纹表征参数的解析及修正研究[J]. 机械科学与技术, 2016, 35(4): 606-613.
- [56] 李龙, 李言, 杨明顺, 等. 冷滚打工艺参数对成形力及金属变形影响研究[J]. 兵工学报, 2018, 40(2): 420-429.
- [57] 贾燕龙, 刘志奇, 宋建丽, 等. 滚打速度对花键冷敲精密成形过程的影响规律[J]. 太原科技大学学报, 2015, 36(4): 264-267.
- [58] F. K. Cui, F. Liu, Y. X. Su, et al. Surface Performance Multiobjective Decision of a Cold Roll-Beating Spline with the Entropy Weight Ideal Point Method[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2018, 2018: 1-7.



## 2、主要研究内容

本项目的主要针对异质复合金属冷滚打成形有限元仿真模型的建立，滚打过程中双金属层在滚打轮高速滚打作用下发生塑性流动时变形行为以及双金属成形质量成形质量等方面进行研究。

### (1) 异质材料冷滚打成形过程建模及精细仿真方法研究

确定以多次冲击加载为特征的考虑应变率影响的异质材料本构关系，寻求大变形和非均匀变形条件下异质金属材料结合部的力学特性的表征方法，建立适用于单点局部加载、整体累积变形及异质材料物理性状不连续条件下的有限元仿真模型，从而建立可靠的异质材料冷滚打成形过程有限元模型，为异质材料冷滚打成形齿形功能零件工艺方法及其成形机理研究提供技术支撑。

### (2) 异质材料冷滚打成形过程材料变形行为特性研究

研究不同材料特性组合、不同尺寸组合以及工艺参数组合条件下，冷滚打过程中齿顶、齿侧和齿根等不同区域材料变形特征，揭示里外层金属因不同力学特性而产生的非连续非均匀塑性变形行为机理；研究异质材料在局部冲击加载情况下的响应特性，重点分析里外层金属材料的流动特性和结合部的宏观变形及微观组织变化规律，探索成形缺陷产生机理，为异质材料冷滚打成形齿形功能零件工艺实现和成形工艺参数控制提供理论支撑。

### (3) 异质材料冷滚打成形齿形功能零件工艺参数及制件质量研究

重点研究材料特性组合、尺寸组合以及工艺参数对制件齿形形状、异质材料分布情况，及齿形整体机械性状之间的影响规律，探索工艺参数对成形缺陷形成的影响规律，形成异质材料齿形件不良变形的抑制方法及期望良好变形的工艺选择准则与条件，为实现异质材料冷滚打成形齿形功能零件提供工程参考。

## 3、研究特色和创新点：

利用冷滚打成形技术无模具、小功率、轻量化、柔性化塑性的特点，为成形轻型异质复合金属齿形功能件提供一条有效的途径。

(1) 通过揭示局部动态加载条件下的冷滚打成形中过程异质金属流动和塑性变形规律，获得材料匹配与工艺参数对异质金属一体塑性变形行为的影响规律，为异质材料一体化齿形功能零件无模具、小功率、轻量化、柔性化塑性成形提供一条有效的途径。

(2) 通过探索动态单点累计冲击载荷状态下具有不同本构关系的两种材料的复合变形，重点研究异质材料结合部的力学特点和动力学行为以及材料整体变形机理，形成冷滚打工艺条件下异质材料复合成形全过程仿真模拟方法，为异质金属材料一体复合成形相关理论研究提供基础支撑。

(3) 通过以制件最佳形态及性态为目标进行异质金属材料匹配、冷滚打过程工艺参数和滚轮结构参数的综合优化，获得能够精确控制变形过程制件形状、精度、表面质量及机械物理性能的最佳工艺参数，形成控形控性策略及最佳参数匹配选择准则。

## 二、研究方法和技术路线

### 1、拟采取的研究方法和技术路线：

#### (1) 研究方法

冷滚打成形利用成形工具断续击打和滚碾制件表面迫使金属流动产生局部塑性变形，并通过工件的进给和分齿运动使被击打部位不断变化，形成累积效应，最终形成所需制件，本身已具有非线性加载，大变形等工艺特点。而在异质材料冷滚打成形过程中，两层材料因其力学特性不同，其变形情况更加复杂。对这样一个局部非均匀加载下的异质材料复合变形成形过程进行研究，任何单一的研究思路和方法都是困难的，为此本项目拟采用理论分析、数值仿真模拟与实验相结合的方法进行研究，以期获得完整、系统的研究结果。

首先对异质材料冷滚打成形过程进行理论分析，明确其成形原理和工艺特性，确立所要研究的异质材料力学特性要素以及冷滚打工艺参数要素，利用有限元手段和虚拟材料方法建立成形过程仿真模型，并搭建相应的实验和测试系统，然后以此为基础研究异质材料冷滚打成形中的复合变形行为，探索成形机理和成形缺陷发生机制，进而掌握不同材料特性组合、尺寸组合以及工艺参数对成形质量的影响规律，最后确立合适的材料匹配及工艺参数选取方法。最终形成完整的异质材料冷滚打成形齿形功能零件工艺方法。

#### (2) 技术路线

本项目的研究思路是：

1) 借助于单一金属冷滚打成形方法的理论基础，结合异质复合金属中表层、基层金属组织的力学性能以及结合层的非线性作用，对异质复合成形过程中金属变形特点进行分析，从变形行为、缺陷形成等方面对异质金属材料的匹配、毛坯结构与尺寸等进行研究，选择具有外层强韧、内层轻质特点的复合金属材料作为原材料进行冷滚打成形试验；

2) 对复合金属的表层、基层以及复合层的材料性能进行测试，获得各层材料的应力应变曲线，并建立各层金属的本构模型；

3) 在单一金属冷滚打成形有限元模拟方法的基础上，利用虚拟材料方法，通过反演分析异质材料结合部本构特性，进而建立异质材料冷滚打成形过程仿真模型；

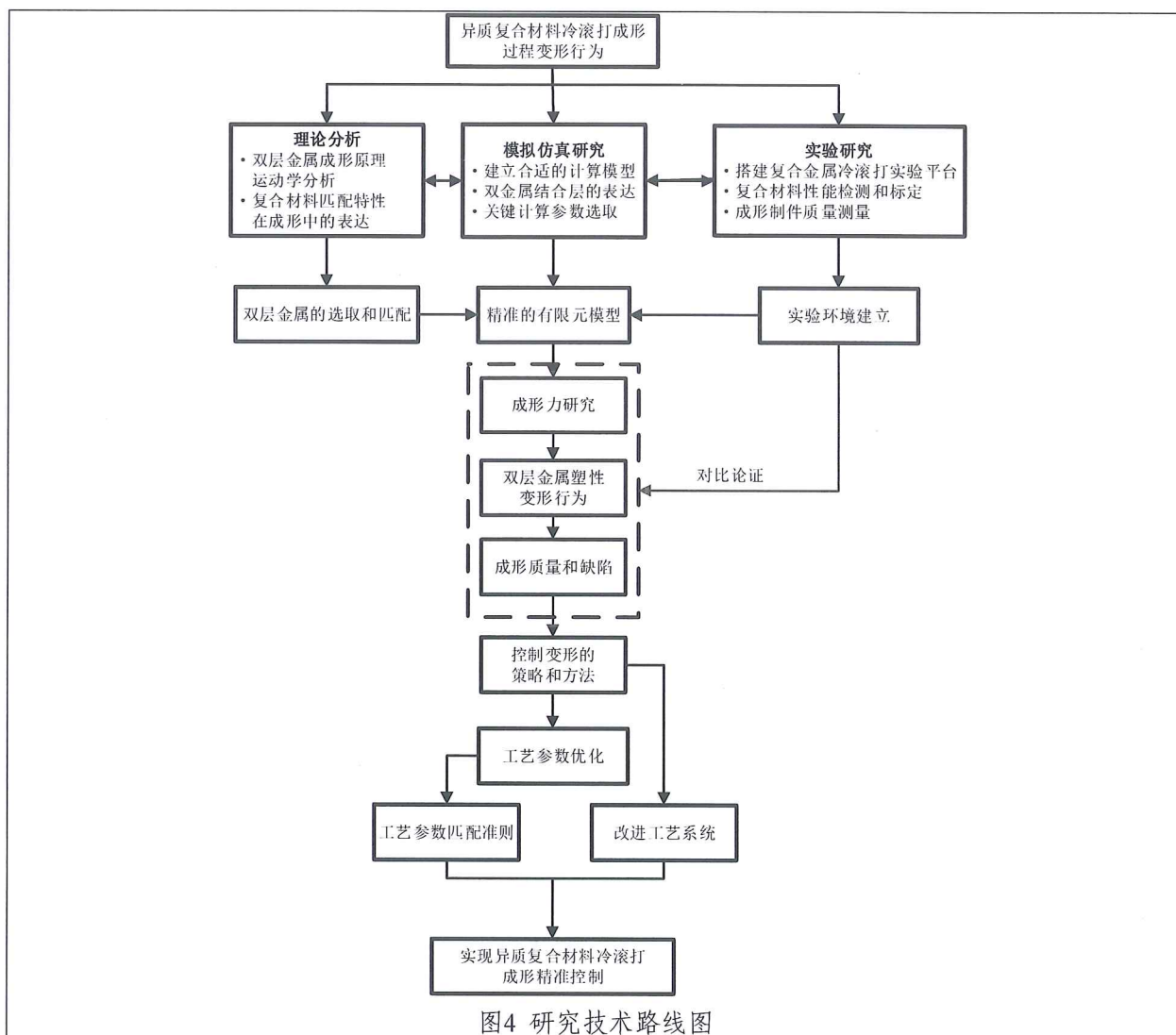
4) 借助有限元模拟仿真方法研究成形过程中双层金属在滚打轮的作用下变形区域发生塑性流动的趋势，探索工艺参数对成形力、成形精度的影响规律；

5) 进行异质复合金属冷滚打成形试验，获得冷滚打过程中异质金属三维塑性流动及变形的描述，探明产生制件缺陷的影响因素及影响规律，分析工艺参数对成形精度的影响以及异质金属表层和复合层在滚打作用下微观组织发生的变化；

6) 根据试验获得的规律对异质材料的匹配、复合层的尺寸、工艺参数的选择等进行优化，提出异质复合金属冷滚打控形控性的有效方法，形成一套参数的最优取值范围及参数选择准则。

技术路线图如下：





## 2、研究工作进度安排：

本项目计划用 17 个月的时间完成，具体进度安排如下：

### 2021.01 ~ 2021.06 完成如下任务：

- ① 适用于冷滚打成形的异质复合材料选择及材料性能测试；
- ② 异质材料本构模型和异质材料结合部仿真模拟建模方法研究；
- ③ 开发高速加载、局部累积成形的异质复合材料冷滚打成形模拟方法；
- ④ 滚打成形过程中异质复合材料基层、复合层以及结合层的塑性流动规律研究。

### 2021.06 ~ 2021.09 完成如下任务：

- ① 成形过程中缺陷归纳分析和成形质量表征参数确定；
- ② 工艺参数对主要功能区域材料不均匀变形行为以及成形质量的研究；
- ③ 适用于冷滚打成形的异质复合金属基层与复合层匹配问题；

### 2021.09 ~ 2022.03 完成如下任务：

- ① 异质复合材料成形齿形零件微观组织的演变观测与控制；
- ② 建立缺陷表征参数和成形质量表征参数与工艺参数的耦合关系；
- ③ 整理实验数据，发表学术论文，撰写专利；

### 2022.03 ~ 2022.06 完成如下任务：

- ① 研究多种齿形的滚打成形工艺问题；
- ② 整理分析研究资料，撰写研究报告，申请验收。

### 三、预期成果及应用前景

#### 1、预期成果形式与数量:

本课题的预期研究成果是探明成形过程中异质复合金属基层与复合层变形行为及材料形态、性态演变及制件成形缺陷的形成机制，提出精确控制方法，形成一套较为系统的异质复合金属冷滚打成形工艺方法。

#### 成果提交形式是:

- ① 发表重要学术论文 5 篇以上，其中 SCI/EI 检索 2-4 篇，学术限定期刊 3 篇以上；
- ② 揭示成形过程不同材料不均匀塑性变形行为和有效成形机制，发现材料特性匹配、材料组合几何尺寸、工艺参数与制件成形质量和机械物理性能之间的耦合关系，形成一套可实际应用的异质材料冷滚打成形齿形功能零件工艺方法。
- ③ 建立准确反映异质复合金属冷滚打成形过程基层与复合层金属塑性流动规律的有限元仿真模型；
- ④ 给出可指导实际应用的异质复合金属冷滚打成形工艺参数和实施办法；

#### 2、应用前景

在航空航天、轨道交通等领域，为了节能、减重、降低成本、满足不同工况条件要求，异种材料的焊接技术和异质金属复合结构日益受到重视。双金属复合材料兼有基层和复层的所有优点，相对于整体合金能有效降低成本，具有优异的综合性能和经济效益。在齿形传动领域，双金属复合齿轮能充分发挥齿圈材料和基体材料的特性，在轻量化设计领域得到关注。本项目所提出的异质复合金属单点累积成形的冷滚打成形技术，为该类复合金属零件高效精确成形提供了一种新的绿色制造方法，在设备小功率轻量化、过程高效率节能化、制品高质量精密化的塑性成形加工中有广阔的应用前景，获得可观的经济效益。



#### 四、经费预算

1、项目经费预算			
序号	支出科目	金额 (元)	预算依据及理由
1	试验材料费	8000	制作实验试件, 更换夹具、轴承、螺钉等易损件, 补充润滑冷却液等
2	测试/计算/分析费	10000	扫描电镜、电子显微镜、力学和机械性能、摩擦系数、残余应力、表面质量等测试费
3	论文版面费及学术交流会议费	8000	论文评审及发表版面费, 参加相关学术活动费用
4	资料费、印刷费、文献检索费	1000	资料复印、购置、打印及验收资料, 检索文献等
5	调研费	3000	调研及旅费
合 计		30000.00 元	

#### 五、指导教师意见:

(对项目可行性及拟取得成果提出明确意见)

项目拟研究合金材料冷液打或部生部的件是前  
及其成功和晚. 前期研究基础良好. 所拟定的研究  
内容合理. 技术路线可行. 能取得预期研究成果.  
同意申报。

指导教师签字:



2020 年 9 月 10 日

六、同行专家推荐意见:  
(另附)

七、学院学位委员会评审意见:

经学院学位委员会一致讨论,认为项目技术方案可行,同意申报。

主席签字:



年 月 日

八、研究生院意见:

签章:

年 月 日