

金属管材弯曲成形回弹问题研究

Research on Springback in Tube Bending Process

西北工业大学现代设计与集成制造技术教育部重点试验室 张 深 吴建军 王 强 梁正龙



张 深

西北工业大学航空宇航制造工程博士研究生,主要从事精密加工与成形技术、计算机辅助成形与仿真研究,作为主要成员参与了国家“863”计划项目、国家自然科学基金以及航空科学基金等科研项目研究。

由于管材结构具有强度、刚度高,以及节省材料、外形美观的特点,同时具有较好的成形加工性能,因此以各种金属管材为主的中空结构广泛应用在航空航天、船舶、车辆、石油化工、建筑、医疗器械及压力容器等领域^[1-3],以满足工业构件的轻量化、

多种材料(不锈钢、铝、铜、钛合金、镁合金、双层金属复合管等)及不同截面形状(圆截面、矩形截面、其它不规则截面等)的平面及空间构型金属弯管零件广泛应用于航空航天等众多维系国计民生的领域,以满足工业构件高强度轻量化、高精度复杂化的发展趋势。

高性能复杂化发展趋势及要求。

金属管材弯曲成形技术作为管材塑性加工的一个重要分支,易于满足产品轻量化、强韧化和低耗高效、精确制造等方面的要求,近年来得到了迅速发展,已成为先进塑性加工技术面向 21 世纪研究与发展的一个重要方向^[4-5]。尤其金属管材零件在塑性弯曲成形过程中将不可避免地存在回弹问题,由此造成零件的实际成形几何尺寸偏离设计要求,产生一定偏差,当回弹量超出误差允许范围,零件的几何精度和形状精度将难以满足要求,从而影响部件间的连接性、密封性和产品内部结构。回弹问题严重影响金属弯管成形质量、制造

效率及生产成本,这已成为弯管高效精密加工技术的瓶颈之一。

金属管材弯曲成形方法分类

管材弯曲成形分类方法多样,根据弯曲时有无模具可分为有模弯曲与无模弯曲两大类,有模弯曲指刚性模具直接作用于管坯弯曲变形区进行的弯曲,特点是可重复性高而且速度快,为提高弯曲精度,通常要利用调整刚性模具工作部分的形状和尺寸来补偿件卸载后发生的回弹;无模弯曲是指弯曲变形区不受到刚性模具的直接作用,管材最终的形状由工具和工件的相对运动决定的弯曲;根据管坯在弯曲时是否加热,

可分为热弯加工与冷弯加工两大类;根据弯曲方式的不同,可分为拉弯、压弯、推弯、绕弯、滚弯与挤弯等;根据弯曲时有无芯料填充可分为有芯弯曲与无芯弯曲。具体应用中,金属管材弯曲成形工艺的选取要依据实际零件的结构性能要求和加工条件而定^[6-7]。管材弯曲成形方法的分类总结如图1所示。其中,管材的冷作弯曲加工,大都是采用绕弯方式,绕弯也是最常用的金属管材弯曲成形方法^[8]。

金属管材定曲率弯曲成形回弹研究

在管材弯曲成形过程中,管壁弯曲外侧易减薄、破裂,内侧易增厚、起皱,管材易发生横截面畸变,外力卸载后产生回弹,这些一直是包括板料弯曲成形在内的工程界未能有效解决的技术难题,也是当今国内外塑性加工学科研究的难点和热点。目前,国内外研究学者和工程技术人员,主要是针对大口径薄壁管小弯曲半径件和难变形材料(钛合金等)管的平面定曲率弯曲加工技术进行研究,偶尔提及的空间弯管,基本上也是指每次弯曲都在某一平面上完成的多拐直管类零件,仍可归结为平面定曲率管材弯曲成形问题。

管材弯曲成形过程中,管坯在外载荷作用下产生的变形由塑性变形

和弹性变形组成。当外载去除后,管坯的塑性变形保留下来,而弹性变形会完全消失,弯曲变形区外侧因弹性恢复而缩短,内侧因弹性恢复而伸长,使弯管的形状和尺寸发生变化而与模具尺寸不一致,称为弯曲回弹。

现阶段针对金属管材定曲率弯曲成形回弹问题,从理论分析、试验研究、有限元数值模拟等方面开展相关研究,并取得不少具有实用价值的研究成果。

1 理论研究

H. A. Al-Qureshi^[9]对管材弹塑性弯曲回弹进行了研究,根据截面梁回弹理论,推导了弯管回弹的计算公式,研究了外径、壁厚、屈服应力和弹性模量等参数对弯管回弹的影响,并研究了橡胶芯棒对弯管回弹的影响。

NC. Tang^[10]利用塑性变形理论研究了管材弯曲的塑性变形,忽略径向压力影响,研究了管材弯曲的塑性变形,推导出管材弯曲过程中的相关理论公式,并进行了试验验证,在管坯变形前、壁厚很小的情况下吻合较好。

A. El. Megharbel等^[11]通过定量分析,着重研究了应变强化理论在管材弹塑性弯曲成形过程中对回弹及残余应力的作用规律。

张立玲^[12]对管材在弯曲条件下的应力、应变状态进行了理论分析,忽略径向应变及管件壁厚变化,求出

弯曲力矩,然后把卸载看成是施加反向弯矩,在中性层长度不变的假设下推导出回弹量的近似计算公式,并讨论了回弹角和回弹半径的影响因素。

鄂大辛等^[13]在管材弯曲变形的基本假设和简单应力状态下的线性强化材料模型的基础上,对管材弯曲进行了变形分析,弯管横截面上垂直于弯曲平面方向的对称轴两侧存在很小的弹性区,对弯曲卸载后的回弹产生一定影响。

张尽染等^[14]基于塑性力学全量理论,假设弯管过程中各纤维层只存在单轴应变和应力,在考虑楔形角和中性层偏移角的基础上,对大直径薄壁导管弯曲段建立力学解析模型,从而计算得出回弹角。解析计算表明,大直径薄壁导管弯曲回弹随弯曲角、相对弯曲半径以及材料强度系数的增大而增大,随材料硬化指数的增大而减小。

胡忠等^[15-16]基于平截面假设,对中频感应局部加热弯管过程进行了系统的力学分析,对在不同钢管材料及规格、不同弯曲半径及弯曲角度等工艺参数时的加载和卸载的力能参数、应力应变进行了理论分析和试验研究,提出了中频感应局部加热弯制大直径钢管的回弹理论。

2 试验研究

Kim .A. Stelson等^[17]通过大量试验对管材绕弯成形中的回弹角的预测与控制作了比较全面的阐述:在弯曲角大于10°时,弯管回弹角与弯曲角呈线性关系;小于10°时呈非线性关系。在此基础上,提出实现回弹角预测的3步方案:(1)对特定规格管材,分别作一次小角度弯曲和一次大角度弯曲,通过两次弯曲的回弹数据建立两段直线回弹模型;(2)在弯管件的实际生产过程中,实时测量更多的回弹角数据;(3)修改、完善历史回弹模型以便更精确地对回弹进行预测。同时指出,管材弯曲工程中存在复加载效应,所以基于实测回

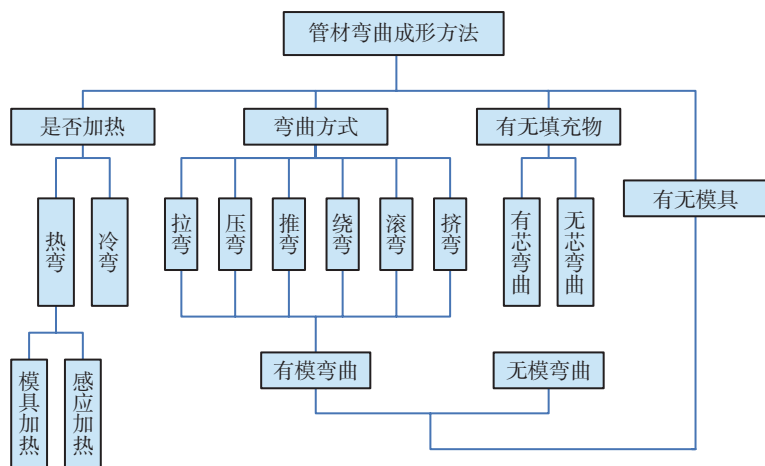


图1 管材弯曲成形方法分类

弹角数据的回弹补偿可能不完全。

Mohamed Shahin 等^[18]通过大量钢管纯弯曲试验数据,借助人工神经网络进行数据处理,得到能够预测钢管最终弯曲能力的神经网络模型。

Toshihiko Kuwabara^[19]通过试验方法,重点研究了不同加载路径下的管材各向异性,从而建立较为准确合理的管材模型。

鄂大辛等^[20-21]在大量试验的基础上开展了管材弯曲回弹的试验研究,利用沿弯曲线切向和管壁厚方向的变形关系,推导出基于弯管外侧材料变形卸载后弯曲回弹角的近似计算公式,并对影响管材弯曲回弹的变形条件和材料力学性能进行了简要分析。

刘光武^[22]针对弯管机冷弯加工的实际情况,结合已有的试验数据,提出了一种弯管加工过程中弯矩随弯角变化的模型。在此基础上,推导出任意弯曲角度下的弯管回弹规律,它能较好地说明小角度弯曲情况下弯管的回弹行为,同时在大弯曲角度范围内与现有的弯管回弹规律保持一致。

杨合等^[23]运用试验方法分析了工艺参数对薄壁管材弯曲成形中外壁减薄、内壁增厚、回弹和截面椭圆化等质量缺陷的影响规律。其研究的成果对进行有限元数值模拟和实际生产具有参考价值。

3 有限元数值模拟研究

M. Murata 等^[24]利用有限元数值模拟及试验方法,重点研究了材料硬化指数对管材弯曲成形性能(弯曲半径、应变分布、回弹、截面椭圆度等)的影响规律。

Welo T 和 Paulsen F 等^[25-27]采用弹塑性有限元软件分析了铝合金单双室矩形管的绕弯过程,研究了弯曲半径和摩擦对外侧翼板的塌陷和回弹的影响,模拟过程中认为压块随管坯以相同速度运动,二者之间无摩擦,这与实际的管材弯曲过程差别

较大。采用有限元软件 MARC5.2 对挤压铝合金单双室矩形管绕弯和拉弯过程进行了三维弹塑性数值模拟,研究了材料、工艺及模具参数对成形过程的影响。结果表明,采用预拉工艺能减少起皱和回弹,减小应变硬化指数和增大轴向力,有助于回弹的减小。

李增楼^[28]在数值仿真和试验的基础上,探讨了弯曲角、相对弯曲半径、弯曲速度对回弹角的影响。研究认为在一定范围内,弯管的回弹角与弯曲角成近似线性关系,由过渡区域回弹角和与弯曲角度成正比的弯曲段回弹角组成。

张旭光^[29]深入研究了管材数控弯曲及回弹过程的特点,针对弯管的弯曲段和过渡段分别建立了不同的回弹预测解析模型,进而提出了一种以刚塑性有限元法来计算管材数控弯曲过程的应力场与所建立的预测模型有机结合来实现管材回弹预测的新方法。

詹梅、栗振斌等^[30-31]基于弹塑性有限元软件 ANSYS 建立了管材数控弯曲及回弹的有限元模型,以不锈钢管件和铝合金管件为例,分析了部分弯曲工艺参数及材料性能参数对管材数控弯曲回弹的影响规律。

王泽康等^[32]基于显/隐式弹塑性有限元仿真结合试验研究,对大口径厚壁不锈钢管数控弯曲卸载后的回弹现象进行了研究,芯棒伸出量、芯球个数和弯曲角度对卸载回弹有显著影响。发现随着管材弯曲角度增加,316L 不锈钢管卸载回弹角线性增加,而当芯棒伸出量增加时,卸载回弹角线性减小,随着芯球个数 n 的增加,卸载回弹角同样线性增大,但当芯球个数在 4 个以上回弹基本保持稳定不变。

Song 等^[33]对高强薄壁钛管的弯曲回弹预测进行了研究,发现在模拟过程中,应用 C3D8R 单元能很好地模拟回弹。在文献[34]中基于

ABAQUS 平台建立了 TA18 高强钛管数控弯曲、抽芯及回弹三维弹塑性有限元模型,并进行可靠性评估。通过虚拟正交试验,研究工艺参数对 TA18 高强钛管数控弯曲回弹的影响显著性及规律,并采用多元逐步线性回归方法建立了回弹角与显著工艺参数之间的预测模型。

Li 等^[35]以高性能薄壁 6061-T4 铝合金管为研究对象,采用单因素试验分析和基于全过程三维有限元模拟的正交方法,获得多个弯曲成形参数对 6061-T4 薄壁铝合金管数控弯曲回弹的影响。结果表明:(1)弯管回弹角随弯曲角度的增大而总体呈线性增大;(2)影响弯管回弹的显著性因素依次为芯棒-管材间隙、弯曲半径、压模-管材摩擦、防皱块-管材间隙、压模-管材间隙、助推速度、芯模-管材摩擦和芯球个数;(3)显著性成形参数对回弹的影响规律与不锈钢和钛合金相似。

朱英霞等^[36]通过有限元数值模拟手段,重点研究了压块的摩擦因数、夹持压力和助推速度对 H96 矩形管回弹与截面变形的影响规律。结果表明摩擦因数和夹持压力越大,回弹角和横截面高度变形越小;芯头支撑区域内助推速度的变化能够影响回弹量,且不会加剧截面变形;并提出变助推速度的压块边界条件组合方案,以达到同时降低回弹量与横截面高度变形量的目的。

4 工艺系统研究

M. Strano^[37]针对冷绕弯的工艺设计是一个复杂的、基于经验的过程,通过数值计算补偿回弹,估计弯曲的刚度(发生缺陷的风险系数),并计算了材料变化对工艺的敏感度,然后以材料特性、弯管的几何参数以及计算出的变量作为输入参数对模具设计进行了模糊逻辑设计,从而产生了一个综合的、基于计算机技术设计绕弯工艺的方法——TUBE PROBES。

李振强^[38]对导管数控弯曲成形机理进行了较深入的研究,建立针对大直径薄壁导管成形特点的回弹解析模型,开发了导管数控弯曲工艺数据库,为实现大直径薄壁导管数控弯曲成形提供了有价值的参考。

潘昌平^[39]本着理论分析与工程实际相结合的原则,针对薄壁管弯曲回弹控制方案进行设计,并采用VB6.0开发具有回弹补偿功能的弯管机控制系统,从而为薄壁管弯曲回弹的补偿提供了一条可行途径。

此外,西北工业大学的杨合(刘郁丽、詹梅、李恒等)教授团队^[40-42]针对薄壁管塑性弯曲过程中出现的缺陷,运用能量法与有限元相结合的方法进行了大量基础研究,在预测管材弯曲过程中的失稳起皱、确定成形极限、回弹等方面积累了一定的研究基础,开发了基于数据库技术的数控弯管仿真系统(NCTBS),集成了数控弯管工艺的CAD/CAPP/CAE/CAM技术,初步实现数控弯管从设计、仿真到数控生产的工艺规程系统化和规范化,对有效实现数控弯管工艺的质量控制具有重要意义。近年来,利用有限元数值模拟技术,针对难成形材料(钛合金)管材的数控弯曲也进行了相关研究^[43-44]。

金属管材空间变曲率弯曲成形回弹研究

由于设计性能、安装空间以及轻量化等要求,管件的设计形状也变得日趋复杂^[40,45-46]。如在航空航天、车辆以及发动机等应用领域,越来越多的管件结构被设计为复杂空间构型,这里所讲的空间构型并非传统的每次弯曲都在某一平面上完成的多拐直管类零件,而是某些部位的弯曲是在非平面上完成的空间变曲率弯管,即弯曲段管材轴线挠率不恒等于零的空间构型弯管。

由于飞机发动机上的导管众多,如图2所示,要求尽可能节省其所占

空间,因此必须将导管弯曲成各种空间形状,以避免在有限的空间相互干涉。又例如美国设计生产的太阳能STERLING发电机中散热管系统中的某管材零件,其材料为高强度合金钢,管件轴线为空间曲线设计。

由于这种变曲率弯管的弯曲形状不规则,与传统定曲率弯曲相比存在不均匀性特点,从而强化了其几何非线性和边界非线性程度,回弹问题复杂,严重增加了对其研究的难度,

并为管材成形技术提出了新的课题与挑战。

1 国外空间变曲率弯管成形工艺研究

德国的Peter Gantner等^[47]提出一种能够较好适合空间任意曲线成形的“自由弯曲(Free-Bending)”新方法,如图3所示。这一方法的核心是将管材逐步推过一个可以在空间一定角度范围内自由转动的弯曲模型腔,几乎能够成形任意外形的弯管,但是弯曲半径要是管材半径的

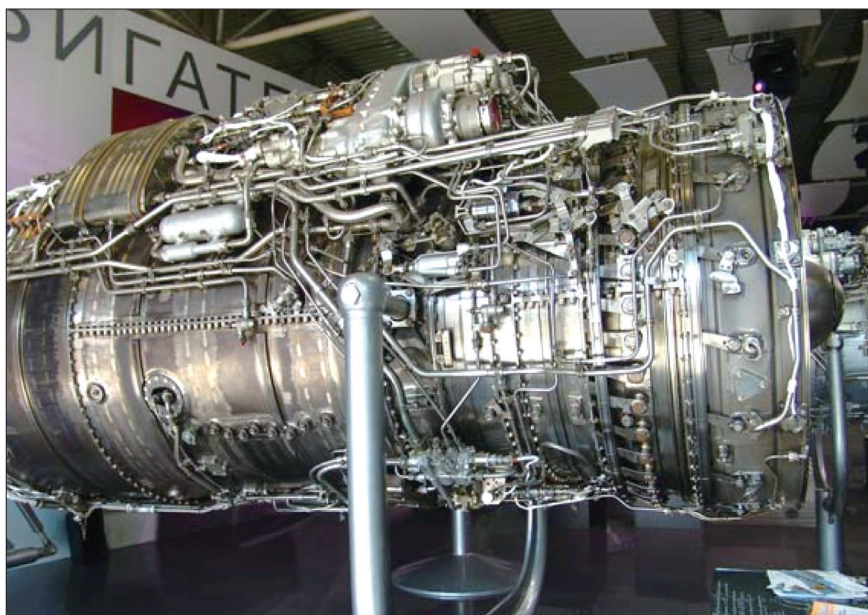


图2 弯管在航空发动机上的应用

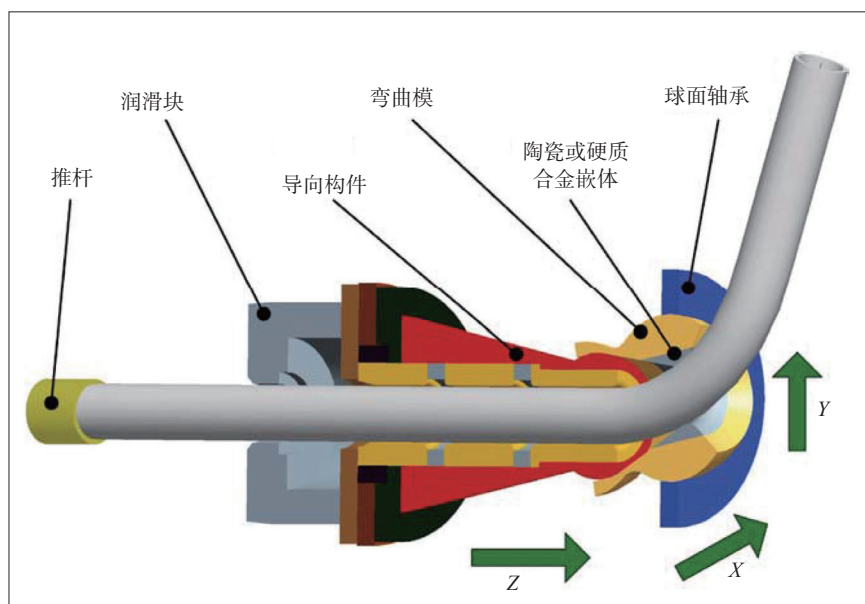


图3 自由弯曲(Free-bending)方法^[47]

2.5 倍,对材料参数的变化也较为敏感。通过调整弯曲模型腔转动来控制弯管成形形状(回弹),并且这一研究工作尚处于起步阶段,未见相关理论研究的报道。

多特蒙德大学(德)成形技术与轻量化结构研究所(IUL)的 S. Chatti, M. Hermes, A. Weibrich, A. E. Tekkaya 等^[48-50]针对扭矩叠加空间弯曲工艺 TSS (Torque Superposed Spatial Bending) 及 Three-Roll-Bending 工艺方案进行数值模拟研究,基于滚弯工艺,通过动态调整弯曲外形和施加扭矩,控制成形工艺参数,来达到弯曲不同半径和角度的目的,如图 4 所示。在此基础上通过相关试验及半解析计算方法对应力叠加方法作用于任意二维、三维管件弯曲回弹的影响规律进行简要分析,但对于回弹的控制未做深入研究。

日本的 Hiroyuki Goto 等^[51]提出了一种新多功能弯管机,如图 5 所示。将管坯送入固定模具(Fixed die)和移动模具(Mobile die),通过调整移动模具的位置来实现弯曲。弯曲半径由移动模与管坯的相对距离和方向来控制,弯曲角度通过调整管坯的进给长度来控制,进而通过控制相关参数来调整弯管成形的几何尺寸(包括回弹影响)。移动模由液压伺服驱动的 6 自由度并联控制

(PKM)。

2 国内空间变曲率弯管回弹研究

西北工业大学李雁鹏、吴建军^[52-53]针对空间非平面弯管做了一部分前期研究,提出用离散的平面圆弧曲线去近似逼近空间弯管三维轴线,对离散成若干段圆弧的弯管回弹分别给予补偿,将离散圆弧拼接确定整个回弹补偿后的弯管形状,以此作为加工模具的型面。从而为加工考虑回弹的空间非平面弯管提供了一种新途径。

张深、吴建军^[54]在此基础上,以小直径厚壁空间非平面弯管回弹成形缺陷为研究目标,提出将空间回弹离散平面化后,分别考虑其平面的回弹特征,再进行二维到三维回弹转换,最终拼接、修正的数值模拟回弹预测方法(3D-2D-3D 解析方法)。并以此为基础,针对空间弯管绕弯成形以转动为主,大几何位移变形且回弹量大的特点,提出弯曲回弹对应节点位移矢量与曲线局部 Frenet 标架相结合的节点几何补偿法,利用迭代算法对空间弯管绕弯模具型面进行回弹补偿修正^[55],有效控制弯曲回弹误差,保证空间变曲率

弯管几何精度。从而建立了一种将空间变曲率管材弯曲回弹问题合理简化为多平面回弹问题的初步解决方案,并为空间变曲率弯管回弹补偿提出了一种新的研究思想。

金属管材弯曲成形回弹研究存在问题及发展趋势

在冲压成形领域,随着有限元数值分析技术的日益完善,以及材料性能测试与试验手段的提高,板料成形回弹的预测、补偿和控制已经有了很好的基础。然而,对于管材弯曲回弹这一问题,由于问题的复杂性、目前理论预测局限性以及材料性能测试的难度,仍然无法解决好。尤其针对空间变曲率弯曲回弹,更是包括板料弯曲成形在内的塑性加工学科的难点与热点。

(1) 在金属管材弯曲成形理论

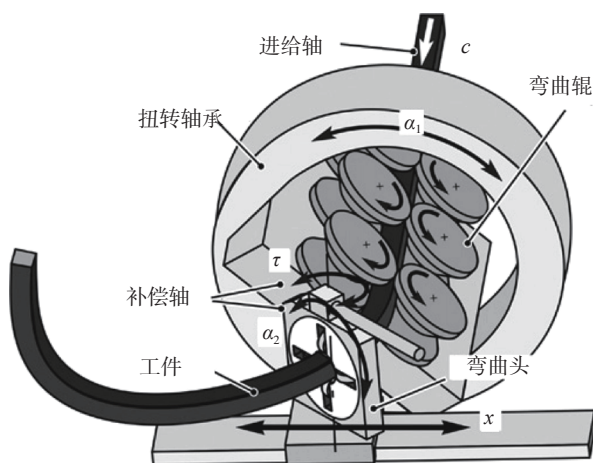


图4 扭矩叠加空间弯曲工艺TSS
(Torque Superposed Spatial Bending)^[49]

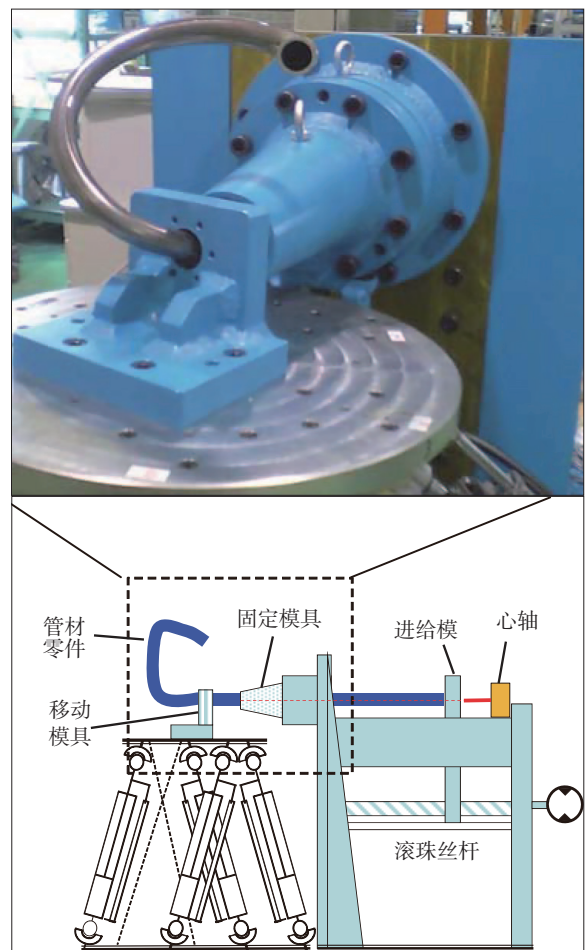


图5 六自由度并联控制 (6-DOF PKM) 弯管机^[51]

研究过程中,建立的传统力学解析模型非常复杂,且普遍做了大量的简化和假设,相关理论公式中仅包含材料参数、弯曲角和弯曲半径等基本参数,而实际生产过程中的工艺参数和模具参数等对成形质量的影响不容忽视,因此通过理论解析研究对管材弯曲回弹过程进行定性分析是可行的,但回弹预测的定量分析精度普遍不高,仅可为实际生产、试验研究以及有限元数值模拟分析提供前期指导。

(2) 试验是管材弯曲成形回弹问题研究的有效手段之一,不但可以验证管材弯曲回弹理论解析及有限元数值模拟结果的有效性,而且还可进一步研究各种参数对管材弯曲回弹的影响规律,但这种方法建立在大量试验的基础上,需要耗费大量人力、物力、财力,作为相关研究方法有效性验证手段的意义较大。同时,针对金属管材弯曲成形规律的深入研究,需要以准确获得材料的力学性能参数为基础。但目前对于材料性能的研究多集中在板材,针对管材力学性能的研究较少。由于管材生产工艺的不同,管材与板材基本力学性能存在差异。文献[56-57]针对管材成形性能参数难以确定的现状,采用液压局部胀形的方法测量管材在复杂应力状态下的材料性能参数,但由于方法复杂、影响因素众多、成本较高,试验实施比较困难。要获得材料准确的力学性能数据,需要对特定规格的管材进行深入的试验研究。

(3) 随着弹塑性成形有限元理论及计算机技术的飞跃发展和不断进步,人们越来越倾向于采用数值模拟技术研究管材弯曲成形回弹问题,其中主要是运用有限元模拟技术对管材弯曲成形回弹问题进行研究。国内外学者在此方面已取得丰硕成果,但由于管材弯曲成形及回弹的非线性特点,使得数值模拟技术在金属管材弯曲领域还存在许多具体难题,

如:如何建立一个能真实反映材料在成形过程中变形规律的本构关系,有限元数值模拟参数(如单元类型、高质量有限元网格划分、质量放大系数等)的选择,这些都对管材弯曲回弹影响较大,还有待进一步研究。

(4) 随着智能控制技术的不断发展,人工智能技术和数据库专家系统等智能技术也被应用在管材弯曲成形领域。例如吴光飞^[58]以改进后的BP神经网络算法,建立弯管机智能控制系统模型,利用大量试验数据和有限元模拟数据作为人工神经网络的样本数据,进行回弹、椭圆度等质量参数的预测,根据预测值,采用比例调整的方法对工艺参数进行在线调整,开发了数控弯管成形过程智能控制系统,为金属管材弯曲成形回弹问题研究提供了一种综合性研究思路。

(5) 除传统铝合金、铜及不锈钢等材料管材,各种钛合金、镁合金及高强度合金钢等非传统材料的金属管材、金属复合管弯曲回弹研究也亟待进一步深入。其中,金属复合管^[59]是由两种或两种以上不同材料构成,管层之间通过各种变形和连接技术形成紧密结合的特殊管材,它可以充分利用基材和覆层金属各自的优点,具有节约贵金属、良好性价比等特点,从而能够有效提高零件的综合机械性能和抗腐蚀能力,在航空航天及汽车等领域具有广阔的应用前景。

(6) 能够实现小曲率半径弯曲的管材剪切弯曲成形工艺^[60];具有减小截面畸变、延缓薄壁管内侧失稳起皱、提高弯曲成形极限等优点的管材内压弯曲成形工艺^[61];生产周期短、柔性大、精度高等特点的无外力非接触式管材激光(热应力)弯曲成形工艺^[62]以及其他无模弯曲等管材弯曲成形新工艺的提出,也为金属管材弯曲成形回弹问题的控制研究提出了新的解决方案。同时关于金属管材空间变曲率弯曲成形及回弹问

题的研究,尚处于起步阶段,仍需要做进一步深入研究。

结束语

多种材料(不锈钢、铝、铜、钛合金、镁合金、双层金属复合管等)及不同截面形状(圆截面、矩形截面、其他不规则截面等)的平面及空间构型金属弯管零件广泛应用于航空航天等众多维系国计民生的领域,以满足工业构件高强度轻量化、高精度复杂化的发展趋势。在金属管材弯曲成形过程中,外力卸载后将产生回弹,是工程界未能有效解决的技术难题,也是当今国内外塑性加工学科研究的难点和热点。回弹问题的有效解决,更是有利于金属管材弯曲精密成形的关键。

参考文献

- [1] 温形. 管材成形技术综述. 机械设计与制造, 2006, 16(11):77-79.
- [2] XIAO X T, LIAO Y J, SUN Y S, et al. Study on varying curvature push-bending technique of rectangular section tube. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 187-188: 476-479.
- [3] 鄂大辛, 郭学东, 宁汝新. 管材弯曲中应变中性层位移的分析. 机械工程学报, 2009, 45(3): 307-310.
- [4] 杨合, 孙志超, 林艳, 等. 管成形技术发展基础问题研究. 塑性工程学报, 2001, 8(2): 83-85.
- [5] 国家自然科学基金委员会工程与材料科学部. 机械工程学科发展战略报告(2011-2020). 北京: 科学出版社, 2010.
- [6] 高军. 金属塑性成形工艺及模具设计. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- [7] 王同海. 管材塑性加工技术. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- [8] Gu R J, Yang H, Zhan M, et al. Springback of thin-walled tube NC precision bending and its numerical simulation. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2006(S2): 631-638.

本文共有参考文献 62 篇, 因篇幅所限, 未能一一列出, 如有需要, 请向本刊编辑部索取。

(责编 杰一)