### 增量成形技术专题

# 三维自由弯曲成形装备及其关键技术

陶杰<sup>1,2</sup>, 熊吴<sup>1,2</sup>, 万柏方<sup>3</sup>, 魏文斌<sup>1,2</sup>, 程旋<sup>1,2</sup>, 王林涛<sup>3</sup>, 余耀晖<sup>1,2</sup>, 王成<sup>1,2</sup>, 郭训忠<sup>1,2</sup>

(1. 南京航空航天大学 材料科学与技术学院, 南京 210016;

2. 江苏省核能装备材料工程实验室, 南京 210016;

3. 江苏图南合金股份有限公司, 江苏 丹阳 212352)

摘要:作为一种新型柔性成形技术,三维自由弯曲技术特别适用于具有复杂空间轴线、异形截面的空心构件。主要综述了三维自由弯曲成形技术的发展历程、成形装备的发展过程以及国内外的研究现状。在此基础上,重点分析了三维自由弯曲成形装备的5种典型构型及其机构运动原理,介绍了5种构型的各自特点及工程应用,并对自由弯曲成形装备的关键技术如过渡段处理技术、有限元数值模拟技术、难变形材料自由弯曲热成形技术等方面进行综述,并结合笔者的研究经历对管材自由弯曲成形研究中存在的问题进行了简要分析。最后,对管材三维自由弯曲成形技术及装备在航空航天、核电、汽车、医疗等领域的应用前景进行了分析和展望。

关键词: 自由弯曲; 装备; 典型构型; 关键技术; 工程应用 DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2018.04.001 中图分类号: TG38 文献标识码: A 文章编号: 1674-6457(2018)04-0001-13

#### **3D** Free-bending Forming Equipment and Key Technology

TAO Jie<sup>1,2</sup>, XIONG Hao<sup>1,2</sup>, WAN Bo-fang<sup>3</sup>, WEI Wen-bin<sup>1,2</sup>, CHENG Xuan<sup>1,2</sup>, WANG Lin-tao<sup>3</sup>, YU Yao-hui<sup>1,2</sup>, WANG Cheng<sup>1,2</sup>, GUO Xun-zhong<sup>1,2</sup>

College of Material Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;
 Jiangsu Key Laboratory of Nuclear Energy Equipment Materials Engineering, Nanjing 210016, China
 Jiangsu ToLand Alloy Co., Ltd., Danyang 212352, China)

**ABSTRACT:** As a new flexible forming technology, three-dimensional free-bending technology is very suitable to be used for hollow component of complex space axis and deformed section. In this paper, development process of free-bending forming technology and forming equipment as well as current research status at home and abroad were introduced in details. Characteristics, working principles and engineering application of five typical configurations were analyzed selectively on this basis. Afterwards, key technologies of the free-bending system such as the transition section processing technology, FE simulation technology and hot bending technology were systematically explained and problems in free-bending forming of pipes were analyzed in combination with experience of the author. In the end, the engineering application and the potential application prospect of the system were analyzed and prospected.

KEY WORDS: free-bending; equipment; typical configuration; key technology; engineering application

三维自由弯曲成形技术是弯曲加工领域的一项 重要技术创新,属于基于三维轨迹控制的柔性成形领 域的一项典型代表性技术,其能够实现复杂轴线(如 连续变曲率、空间多弯)以及异形复杂截面的管材/

收稿日期: 2018-06-10

基金项目:国家自然科学基金委员会国际(地区)合作与交流项目(51711540301)

作者简介: 陶杰(1963—), 男, 教授, 主要研究方向为金属先进成形技术。

通讯作者:郭训忠(1981-),男,博士,副教授,主要研究方向为金属塑性成形工艺及装备。

型材的一次整体精确成形<sup>[1-2]</sup>。采用该技术制造的三 维复杂弯曲构件在航空航天、核能、石化、汽车、医 学工程以及建筑造型等领域发挥了重要作用。

三维自由弯曲成形最初称之为 MOS Bending 技术,是由发明该技术的三名日本学者的姓氏英文首字母命名的<sup>[3]</sup>。1990年,Murata等在日本和德国分别申报了该技术专利<sup>[4—5]</sup>,并在 1992年申报了美国专利<sup>[6]</sup>。 1996年,Murata首次研究了自由弯曲成形工艺中弯曲模的倾斜角对弯管截面畸变、成形力以及成形极限的影响规律<sup>[7]</sup>。随后,德国研究人员Gantner等<sup>[8]</sup>系统揭示了自由弯曲的成形机制、三轴成形装备的结构形式以及CNC控制软件系统的主要模块,同时建立了不同材料在三维自由弯曲成形时形成的弯曲半径*R*与偏距 *U*之间的数学模型以及轴向推进距离与弯管对应的弯曲角度之间的定量关系。另外,阐述了三维自由弯曲成形工艺和装备的开发提供了重要的方向。

随着相关基础研究工作的逐步完善,日本 Nissin 公司及德国 J.NEU 多家企业陆续推出了商业化的自 由弯曲成形装备<sup>[9–12]</sup>。尤其是德国 J.NEU 公司已经 完成了系列自由弯曲成形装备的研发工作,可以满足 不同规格、不同材料、不同几何构型的管材/型材三 维复杂弯曲构件整体成形的工程需求。现在综合性能 最为优越的 J.NEU 自由弯曲装备适用于外径为 6~90 mm 管材的三维自由造型,且最小相对弯曲半径可达 2.5D。管材最大进给速度可达 400 mm/s。另外,该 机型更可实现空心构件轴线扭转成形。

上述主流自由弯曲成形装备的弯曲模主要靠伺服 电机驱动,驱动力不足且机头整体刚度低。在成形大 尺寸、厚壁管材时,随着偏距 U 值的增大,相对弯曲 半径的减小,轴向推力将显著增大,从而导致机头整 体变形,直接影响了三维复杂弯曲构件的几何精度。 并联机器人机构通常有电液伺服系统驱动,具有刚度 重量比大、承载能力强、误差累计小、动态性能好、 结构紧凑、综合制造成本低等优势,在需要高刚度、 高精度或者大载荷而无须很大工作空间的领域内得到

了广泛应用[13]。三维自由弯曲装备若采用此种多足并 联结构机头,将大大提高装备的整体刚度及承载能力, 进而适应于大尺寸厚壁三维复杂弯管的成形。2008年 起,基于各种形式多足并联机构的自由弯曲成形技术 获得更多关注,相关成形装备也得到了发展。日本东 京工业大学[14-15]、德国蒂森克虏伯公司[16]、德国弗朗 霍夫学会模具和成型技术研究所[17]相继研发了基于 多足并联机构的自由弯曲成形装备。国内学者在三维 自由弯曲成形技术及装备方面也进行了初步的探索 研究。中航工业北京航空制造工程研究所曾元松研究 员[18]在著作《航空钣金制造技术》中首次公开介绍三 维自由弯曲成形技术,并指出其潜在的技术优势和应 用前景。吉林大学李明哲教授等[19-20]发明了一种弯 曲模与导向机构无配合连接的自由弯曲成形装备,并 应用 ABAQUS 有限元仿真软件对基于该结构的管材 三维自由弯曲成形过程进行了有限元模拟,获得了相 对弯曲半径低至1.7的碳钢弯管。南京航空航天大学 先进材料及成形技术研究所聚焦该技术在航空航天 领域的工程应用,在管材变形应力应变分析、工艺程 序解析、有限元数值模拟、控制软件系统以及硬件机 械研发方面开展了系统的研究工作[21-24]。

### 1 三维自由弯曲成形装备典型构型

三维自由弯曲成形装备中弯曲模中心的运动轨 迹及自身姿态(主要指倾斜角 α)是决定弯曲构件形 状及尺寸精度的关键参数。根据成形装备轴数的不 同,可将装备分为三轴、五轴及六轴自由弯曲装备, 见图 1 所示。根据弯曲模的运动方式又可将装备构型 分为被动式及主动式两种。三轴属于被动式,五轴、 六轴及基于并联机构的自由弯曲结构属于主动式。被 动式与主动式的主要区别在于弯曲模在从零点向偏 心距为 U 过程中的转动是否是主动发生的,三轴构 型中弯曲模的转动姿态随管材形状的变化而变化,而 三轴过渡构型中弯曲模的转动则是通过弯曲模和导 向机构之间的一个接触配合来实现,即球面轴承在 xy 平面内平动时,弯曲模随之也产生平动和转动;五



a J.NEU 三轴





图 1 三维自由弯曲成形装备典型构型 Fig.1 Representative configuration of three-dimensional free-bending system

轴、六轴及基于并联机器人的自由弯曲构型中弯曲模 在各个方向上的平动和转动则都是由伺服电机或电 液伺服系统驱动完成的。

#### 1.1 三轴及过渡构型

三轴及三轴过渡构型主要由弯曲成形机构、导向 机构和推进机构 3 大部分组成。见图 2 所示,弯曲成 形机构包括弯曲模、球面轴承、xy 轴方向的伺服电机 等,导向机构包括导向装置、管材接近感应开关、管 长测量装置等,推进机构包括送料推块、送料链条、 送料电机等。

三轴及其过渡构型的一般成形过程为:在初始时刻,推进机构、导向机构与弯曲模处于同一轴线上(z向)。管材在推进机构的作用下开始轴向送进(z向),并被推入导向机构与弯曲模之间的变形区内,管材在由于弯曲模的偏距而产生的力矩的作用下产生弯曲变形。弯曲模不断变换运动轨迹和姿态,实现管材多段、多个方向连续弯曲成形。在弯曲变形区长度(A值)一定的情况下,偏心距 U的大小决定了弯曲半径,U值较大时管材被弯制成较大的弯曲半径。由于弯曲模可实现 x 和 y 两个方向的直线运动,管材为 z

向的直线推进,因此将这种自由弯曲装备称为三轴构型。三轴及其过渡构型的差异在于弯曲模与导向机构之间是否存在配合接触。图 3a 所示为三轴构型,弯曲模不与导向机构连接,成形过程中弯曲模的运动姿态随管材形状的变化而变化。图 3b 所示为三轴过渡构型,弯曲模除了与球面轴承接触之外,其尾部还与导向机构连接;在弯曲模偏心运动过程中,其尾部和导向机构之间的接触约束可控制弯曲模的偏转角度, 三轴过渡构型中弯曲模运动的稳定性更高。

#### 1.2 五轴构型

三维自由弯曲装备五轴构型的成形原理与三轴 构型基本相同,即通过弯曲模在 xy 平面内偏离管材 轴线产生弯矩,同时管材轴向(z向)送进被推入弯 曲模与导向机构之间的变形区内,进行弯曲变形。图 4 所示为五轴构型的主要组成部件。与三轴构型相比, 五轴构型增加了两台用于控制弯曲模运动轨迹的伺 服电机,实现了弯曲模转动角速度及转动角度的主动 控制,其成形精度相比三轴构型更高。三轴构型的弯 曲模在 xy 平面内的平动依靠球面轴承带动,弯曲模 绕 xy 二轴的转动则依靠弯曲模与球面轴承、导向机 构之间的连接实现。这种条件下弯曲模的转动角度完



Fig.3 Schematic diagram



Fig.4 main parts of five-axis configuration

全由弯曲模偏心距离决定,无论是在成形过渡段1或 是圆弧段过程中,弯曲模转动角度都无法达到与管材 弯曲轴线垂直的角度,导致管材弯段截面受到附加的 横向剪力作用,使弯段横截面畸变程度增加。另外, 由于三轴构型中弯曲模与球面轴承、导向机构之间配 合连接,弯曲模的最大偏心距受到模具几何约束的限 制,进而导致三轴构型所能达到的管材成形极限较 低,最小弯曲半径仅为 3.0D,而五六轴构型能达到



a 第二旋转轴垂直管材轴线

2.0D。五轴构型在三轴构型的基础上对弯曲模的转动 自由度进行释放。具体表现为取消弯曲模与球面轴 承、导向机构的连接设计,并通过增加伺服电机将弯 曲模的转动自由度都设置为主动。相较于三轴构型, 五轴构型的优势在于:① 弯曲模的转动角度不受弯 曲模偏心距影响,可主动调整,通过调整弯曲模转动 角,使其与管材弯曲轴线保持实时垂直,可使管材弯 段的横截面程度降低;② 由于取消了弯曲模与其他 模具的连接结构,弯曲模与导向机构的设计自由度更 大,因此五轴构型可以适用于各种异形截面形状管 材、型材的弯曲造型。

见图 5 所示, 五轴构型主要包括两种形式。其中, 图 5b 与图 1b 五轴装备为同一种形式, 即第二旋转轴  $\beta$  方向平行于管材轴线方向。图 5a 为五轴构型的另 一种形式, 即 $\beta$ 方向通过弯曲模中心且平行于y轴方 向。图 5b 中的弯曲模要实现绕垂直管材方向的转动 (图 5a 中的 $\beta$ 向), 需经过两个步骤(先绕图 5b 中  $\beta$ 向转动一定角度后再绕  $\alpha$ 方向转动), 而图 5a 直接 绕其  $\beta$ 向转动即可。正是由于这一点, 图 5b 形式的 五轴弯曲装备不能完成方管、线材、型材等非圆形截 面坯料的空间弯曲成形。



b 第二旋转轴垂直与管材轴线重合

图 5 五轴自由弯曲构型的两种形式 Fig.5 Two forms of five-axis free-bending configuration

### 1.3 六轴构型

六轴构型的主要机构简图见图 6。与五轴构型相



图 6 六轴自由弯曲成形装备 Fig.6 Six-axis free-bending forming equipment

比,其在弯曲成形构件中增加了一个伺服电机,控 制弯曲机构绕 z 轴的转动运动,以进一步提高弯曲 模的转动自由度,进而可在弯曲过程中实现轴线扭 曲弯制。

在五轴和六轴构型的自由弯曲装备中,有时需要 在弯曲模与导向机构之间设置柔性芯棒,以减小弯曲 变形区内管材的截面畸变程度与壁厚减薄量。对于大 口径薄壁管及异形截面坯料,通常需要利用柔性芯棒 辅助成形。图7所示为自由弯曲装备通常配备的芯棒 及其主要的类型。

## 1.4 基于串联机器人的三维自由弯曲成形 装备

在汽车行业,高强度钢已应用于车身结构,以提



图 7 自由弯曲装备的芯棒及其主要类型<sup>[17]</sup> Fig.7 Mandrel of the free-bending system and its main types

高碰撞安全性和实现轻量化车身。高强钢热冲压成形 只适用于开放横截面结构件,对于具有连续的封闭截 面的空管状结构件,目前常用的液压成形的最大拉伸 强度仅达到 980 MPa,无法成形一些拉伸强度超过 1400 MPa 的超高强度钢。用于成形超高强度封闭截 面构件的方法是热冲压点焊,但这种方法成形后往往 附带一个凸缘,降低结构完整性和整体刚度。针对这 个问题,日本新日铁和住友金属公司开发了一种基于 串联机器人的三维热弯及在线淬火技术(3DQ-Three-Dimensional Hot Bending and Direct Quench Using Robot)<sup>[25-27]</sup>。

图 8 所示为基于串联机器人的三维热弯及在线 淬火技术(3DQ)过程的原理示意图。成形初始时刻, 管材的尾端规定于推进器上,中间直段部分固定于支 撑辊或支撑导向器中。成形过程开始后,管材在推进 器的作用下通过加热及淬火装置,被感应加热器迅速 加热后进行直接淬火,淬火温度高于 Ac3。与此同时, 弯曲或扭曲的力矩通过机器人施加到管材前部夹持 段上。由于加热部分的屈服应力低,因此该时刻的变 形集中在该加热部分中。弯曲部分通过水冷淬火,拉 伸强度提高到 1470 MPa 或更高。通过连续进行该工 序,可以得到具有复杂的三维弯曲形状的超高拉伸强 度的构件。3DQ 技术具有以下特点: ① 成形构件的 抗拉强度达到 1470 MPa 或更高;② 回弹量极小,高 成形精度;③ 构件的残余应力较低;④ 可以成形中 空管状结构,相交传统技术,零件及模具数量,成本 降低; ⑤ 可以一次整体成形复杂弯曲形状构件。通 过将 3DQ 技术应用于汽车部件,预计将有助于减轻 汽车的重量同时提高碰撞安全性。目前利用 3DO 技 术制造的部件已应用于车门防撞梁和座椅部件,预计 在不久的将来应用于车身结构部件。

图 9 所示为基于单臂串联机器人的 3DQ 装备机 构简图。该装备具有非常简单的结构,并且由于可以 通过机器人的关节柔性而不需要增加特殊的扭转机 构,所以实现了机器设备的简单和紧凑。该装备适用 于成形中小尺寸的管材及简单形状的部件。这种类型 是最通用的 3DQ 装备。图 10 所示为基于双臂串联机 器人的 3DQ 装备机构简图。在单臂型中,当弯曲复 杂部件时,机器人以高速执行复杂的轨迹运动,存在 移动量和加速度增加的趋势,反复频繁的加速和减速 引起振动和延迟,导致轨道偏差,影响成形精度。而 在双臂式 3DQ 装备中,3 个机器人是协作控制的。"加 热淬火机器人"安装了冷却装置、支撑辊以及加热线 圈,并且在该系统中是仅有的单臂机器人。"弯曲机 器人"夹持管材前端并在成形过程的后半段对管材进 行弯曲加工。"送料机器人"夹持管材尾端对管材产生



图 9 基于单臂串联机器人的 3DQ 装备机构简图 Fig.9 Single arm robot type 3DQ machine



图 10 基于双臂串联机器人的 3DQ 装备机构简图 Fig.10 Dual arm robot type 3DQ machine

推进作用。通过优化每个机器人的操作,可以大大降 低其加速度,从而提高产品的尺寸精度。

## 1.5 基于并联机器人的三维自由弯曲成形 装备

图 11 所示为基于 Stewart-Gough platform 并联机构的六轴自由弯曲装备示意图。基于并联机构的六轴自由弯曲装备与上述三轴、五轴以及六轴构型主要区别在于对弯曲模运动的控制方式,三轴、五轴以及六轴构型的自由弯曲装备中对弯曲模各个运动自由度

的运动控制(包括弯曲模在 xy 平面的两个平动自由 度及其绕 xyz 轴的 3 个转动自由度)是由多个伺服电 机联合驱动的,而基于并联机构的六轴自由弯曲装备 中弯曲模固定在并联机构的运动平台上,通过电液伺 服系统并行调控伸缩杆件的长度,可准确实现弯曲模 在空间内全自由度的复杂运动轨迹。得益于并联机构 的高精度、高刚度及较大的承载能力,与传统构型的 自由弯曲装备相比,基于并联机构的自由弯曲装备在 成形大尺寸厚壁管材时仍能获得较好的成形质量和 成形精度;同时并联机构所需的工作空间较小,对于 同一种尺寸的管材,基于并联机构的六轴自由弯曲装 备比传统构型的自由弯曲装备的空间体积更小,制造 成本也更低。

目前,三维自由弯曲装备控制弯曲模的并联结构 主要有以下两种形式:德国弗朗霍夫学会模具所和日本机床促进会技术研究院所研发的基于 Stewart-Gough platform 并联机构的自由弯曲成形装备;日本 东京工业大学机械工程系研发的基于 3-RPSR 并联机 构的自由弯曲成形装备。并联机构可采用不同的固定 形式,图 12 所示为基于立式并联机构的自由弯曲成 形装备,并联机构安装固定方向与管材轴向垂直,弯 曲模固定于动平台之上;图 13 中的并联机构安装固 定方向与管材同轴,弯曲模嵌套于动平台中心,这种 形式被称为基于卧式并联机构的自由弯曲成形装备。



1.静平台 2.球铰 3.伸缩杆件 4.虎克铰 5.弯曲模运动平台 6.成形管件 7.弯曲模 8.导向机构 9.推块 10.芯轴 11.丝杆螺母

图 11 基于 Stewart-Gough platform 并联机构的三维自由弯曲成形装备 Fig.11 Free-bending forming equipment based on Stewart-Gough platform parallel mechanism



a 德国Fraunhofer IWU

b 日本东京工业大学

图 12 基于立式并联机构的自由弯曲装备 Fig.12 Free-bending forming equipment based on vertical parallel mechanism



图 13 基于卧式并联机构的自由弯曲成形装备<sup>[15]</sup> Fig.13 Free-bending forming equipment based on horizontal parallel mechanism

### 2 三维自由弯曲成形关键技术

#### 2.1 三维自由弯曲成形数值模拟关键技术

三维自由弯曲成形为复杂非线性动态问题,涉及 材料非线性、边界条件非线性、载荷非线性等,这种 问题的求解计算需要具有显式求解器的仿真程序如 LS-DYNA、ABAQUS 等有限元数值模拟软件才能完 成。三维自由弯曲成形有限元数值模拟过程可以分为 以下 4 大步骤。

 确定模具尺寸。根据坯料的尺寸(如外径、 壁厚等)、空心弯曲构件的设计尺寸(如最小弯曲半 径、总长度等)及管件的质量要求(如表面质量、壁 厚均匀性等),确定各模具的具体尺寸,特别是弯曲 模和导向机构前端的距离 A 值、各模具与坯料之间的 间隙大小 Δc 及各处模具的圆角半径大小。

2) CAD 建模。根据确定好的各模具尺寸,利用 CATIA、UG 等三维绘图软件建立简化的 CAD 模型。

3) 工艺计算。根据直段和弯段的过渡段 1、圆弧 段、过渡段 2 对目标管件进行分段,建立上述每一小 段过程中 x, y, z 三个方向驱动机构运动速度 u 与运动 时间 t 之间的函数关系。如下所示,为工艺计算示例:

分段长度计算: 段 1 (直线段 1):  $L_1 = l_1$ 段 2 (过渡段 1):  $S_1 = (\pi \times R_1 \times \arcsin(A/R_1))/180^\circ)$ 段 3 (圆弧段 1):  $S_2 = (\pi \times R_1)/2 - S_1$ 段 4 (过渡段 2):  $S_3 = A$ 段 5 (直线段 2):  $L_2 = l_2 - A$ 段 6 (过渡段 3):  $S_4 = (\pi \times R_1 \times \arcsin(A/R_2)) / 180^\circ)$ 段 7 (圆弧段 2):  $S_5 = (\pi \times R_2)/2 - S_4$ 段 8 (过渡段 4):  $S_3 = A$ ...... 分段速度计算: 设置 z 向运动速度为匀速,速度为 v,弯曲模运

动速度为 u ( $u_x = u\cos \varphi_n$ ,  $u_y = u\sin \varphi_n$ )。

$$\begin{array}{l} {\displaystyle \mathfrak{B} \ 1: \ \bar{\mathbf{x}} \mathbb{E} \ u_{1} = 0, \ t_{1} = L_{1} / v \\ {\displaystyle \mathfrak{B} \ 2: \ \bar{\mathbf{x}} \ \mathbb{E} \ u_{2} = \frac{v}{R_{1} \left(\cos \frac{vt}{R_{1}}\right)^{2}} [A - R_{1} \sin \frac{vt}{R_{1}}] \ , \\ t_{2} = \frac{\pi \times R_{1} \times \arcsin\left(A / R_{1}\right)}{180v} \\ {\displaystyle \mathfrak{B} \ 3: \\ \bar{\mathbf{x}} \mathbb{E} \ u_{3} = 0, \ t_{2} = \frac{\pi \times R_{1} \times \theta_{n}}{180v} - \frac{\pi \times R_{1} \times \arcsin\left(A / R_{1}\right)}{180v} \\ {\displaystyle \mathfrak{B} \ 4: \ \bar{\mathbf{x}} \mathbb{E} \ u_{4} = \frac{\left(vt - A\right) \times v}{\sqrt{1 - \left(\frac{A - vt}{R_{1}}\right)^{2}}}, \ t_{4} = \frac{A}{v} \\ {\displaystyle \mathfrak{B} \ 5: \ \bar{\mathbf{x}} \mathbb{E} \ u_{5} = 0, \ t_{5} = \frac{L_{5}}{v} \\ {\displaystyle \mathfrak{B} \ 6: \ \bar{\mathbf{x}} \ \mathbb{E} \ u_{5} = 0, \ t_{5} = \frac{L_{5}}{v} \\ {\displaystyle \mathfrak{B} \ 6: \ \bar{\mathbf{x}} \ \mathbb{E} \ u_{6} = \frac{v}{R_{2} \left(\cos \frac{vt}{R_{2}}\right)^{2}} [A - R_{2} \sin \frac{vt}{R_{1}}] \ , \\ t_{6} = \frac{\pi \times R_{2} \times \arcsin\left(A / R_{2}\right)}{180v} \\ {\displaystyle \mathfrak{B} \ 7: \\ \bar{\mathbf{x}} \mathbb{E} \ u_{7} = 0, \ t_{7} = \frac{\pi \times R_{2} \times \theta_{n}}{180v} - \frac{\pi \times R_{2} \times \arcsin\left(A / R_{2}\right)}{180v} \\ {\displaystyle \mathfrak{B} \ 8: \ \bar{\mathbf{x}} \mathbb{E} \ u_{8} = \frac{\left(vt - A\right) \times v}{\sqrt{1 - \left(\frac{A - vt}{R_{2}}\right)^{2}}}, \ t_{8} = \frac{A}{v} \\ \end{array}$$

4) 数值模拟。将自由弯曲的三维模型导入 ABAQUS(实体单元)或LS-DYNA(壳单元)等仿真 模拟软件后,完成具体的参数设置过程并提交计算。

图 14 所示为三维自由弯曲的三轴构型、五轴构 型的 ABAQUS 有限元模型。对于三轴构型来说,管 材设置为变形体壳体,网格划分为 S4R 类型,弯曲 模设置为可变形实体,网格划分为 C3D10M。其余模 具部件均设置为刚体,网格划分为 C3D8R 类型。分 析步设置为动力显式,增加壁厚、坐标输出设置。所 有部件之间的相互接触均为通用接触,通用接触设置 为全局切向罚函数,摩擦因数设置为 0.02~0.10 (模 具内壁附有润滑膜,故模具和管之间的摩擦因数非常 小)。载荷设置中压紧机构和导向机构设置为 xyz 方





向完全固定,推进机构设置沿 z 向的预定运动速度, 其余方向速度设为 0,球面轴承设置沿 x 和 y 方向的 预定运动速度,其余方向速度设为 0。对于五轴、六 轴构型来说,弯曲模为主动运动,和其他机构一样设 置为刚体,网格类型设为 C3D10M。管材设置为变形 体壳体,网格划分为 S4R 类型。分析步、接触设置 等设置过程与三轴构型有限元模型类似。载荷设置中 压紧机构和导向机构设置为 xyz 方向完全固定,推进 机构设置沿 z 向的指定运动速度,其余方向速度设为 0,弯曲模在局部坐标系中定义其平动速度和转动角 速度。图 15 所示为液压系统用空间复杂管件的分步 模拟结果。





#### 2.2 几何尺寸的一次校正及在线纠偏技术

在管材三维自由弯曲成形过程中, 原始管坯的截 面尺寸、弯曲刚度、弹性模量、屈服强度等参数均会 影响成形后的弯曲半径精度。对于不同材料、不同截 面尺寸的原始管坯,即使弯曲模偏心距U不发生变化, 弯曲半径 R 仍会在一定范围内呈现出不同的数值。在 针对空心构件进行弯曲成形时,需针对不同的弯曲半 径提出相应的修正系数,以实现对理论公式的修正, 因此,三维自由弯曲成形装备需包含一套完备的材料 偏心距 U和弯曲半径 R 关系数据库,针对不同材料、 几何尺寸、热处理状态的坯料成形,需首先找到针对 理论公式的弯曲修正系数。然后根据管件实际尺寸(通 过导入 IGES、STEP 数据或通过接触式测量、激光扫 描得到)确定相应修正系数的大小,制定相应的工艺 参数,并将工艺参数发送到仿真模拟系统中实施模拟。 模拟过程中实时对比已经成形出的管材尺寸与 CAD 模型的尺寸偏差,并对成形工艺参数进行反复迭代计 算和数据校正以实现首次纠偏,最终得到初步的工艺 参数。将经过首次纠偏后的成形工艺参数发送至自由 弯曲成形装备,执行实际弯曲成形过程。成形过程中, 实时测量已经成形出的弯曲构件各节点之间的相对位 置关系,与CAD模型再次对比,并根据对比结果对尚 未成形管材的成形工艺参数进行进一步在线修正,实 现几何尺寸的在线纠偏。图 16 为仿真模拟系统中的模 拟成形界面,图 17 为实际成形管件与设计模型的对比 界面。经过几何尺寸的一次校正及在线纠偏后,可实 现管件的高精度、自动化生产。

#### 2.3 难变形材料的温热自由弯曲成形技术

随着航空航天事业的高速发展,对钛合金、高温



图 16 仿真模拟系统<sup>[12]</sup> Fig.16 Simulation system



图 17 实际成形管件与 CAD 模型的对比 Fig.17 Comparison between actual formed tube and CAD model

合金等其他难变形材料弯曲成形的需求逐渐增多。对 于钛合金板材来说,目前一般采用激光束照射材料表 面所形成的温度梯度而导致的热应力应变使金属板 材达到预定的变形,并改善其性能。钛合金管材的激 光弯曲成形机制是 Buckling 机制和增厚机制的叠加, 弯曲过程中弯曲内侧增厚现象明显,同时加工硬化对 金属材料的硬度有较大影响<sup>[28]</sup>。高温合金在成形加工 过程中,存在常温下变形抗力巨大、零件回弹严重、 材料加工硬化严重等问题。以上缺陷导致上述难变形 材料在室温条件下进行塑性成形较为困难,而温热弯 曲成形则可有效降低难变形材料的变形抗力,提高其 塑性。

三维自由弯曲成形装备所包括的温热成形模块 能够实现常温下难变形材料的温热自由弯曲成形。 图 18 所示为温热弯曲成形装置示意图,其中的感应 线圈加热模块包括高频感应线圈和绝缘隔热层,通 电后高频感应线圈产生交变磁场,在工件中产生出 同频率的感应电流,这种不均匀分布的感应电流产 生集肤效应,可使工件表面迅速加热,而绝缘隔热 层可防止热量散失,通过此模块能够将进入弯曲模 的管材加热至设定温度,进而实现难变形材料的温 热弯曲成形。



图 18 温热自由弯曲成形装置 Fig.18 Schematic diagram of warm free-bending forming equipment

# 3 三维自由弯曲成形装备及技术的 工程应用

空心弯曲构件是工业各领域的重要零部件,各种 截面形状的复杂弯曲构件在航空航天、核电、汽车、 舰船、石化、建筑以及其他民用工业等诸多领域具有 重要而广泛的应用<sup>[29]</sup>。常规弯曲成形技术,如数控绕 弯、型模推弯、加热拉弯<sup>[30-31]</sup>以及由上述基本工艺 衍生出的弯曲工艺等仅适用于几何形状较简单、弯曲 半径不连续变化及存在过渡直段弯曲构件的成形。对 于具有三维空间轴线、异型复杂截面、变曲率半径、 无直段连续弯曲等特征弯曲构件,常规弯曲成形技术 则具有一定的局限性,无法满足上述复杂构件的快速 一次成形。三维自由弯曲成形技术是塑性成形领域近 年来的一项重要的技术创新<sup>[32]</sup>,能够实现管材、型材 复杂弯曲构件的快速精确三维成形。与传统弯曲成形 方法相比,该技术主要通过控制弯曲模具在三维空间 内的运动轨迹实现弯曲空心构件的柔性、精确成形, 显著提高了构件的几何精度及复杂程度。另外,在三 维自由弯曲成形过程中,管坯与弯曲模紧密贴合,弯 曲段的截面畸变被抑制;管坯受到轴向附加压应力, 从而使管坯应变中性层由弯曲内侧向外移动,改善了 弯曲段外侧的壁厚减薄情况,提高了弯曲构件的壁厚 整体均匀性。

#### 3.1 航空航天工程领域

在航空领域,飞机及其发动机对重量及空间的要 求越来越严格, 变弯曲半径、轴线为空间曲线的复杂 弯管的空间构型更为灵活,可以有效利用发动机的外 部空间大大降低管路系统重量,对提高航空发动机的 推重比具有重要意义, 广泛应用于航空飞机上的操纵 部件、压气机部件、引气管路、空调管路、液压管路、 燃油滑油管路以及用于各类装备间物料流通的管道 等。图 19 所示为飞机发动机复杂管路系统。对于规 格众多的复杂弯曲构件,国内外航空航天制造单位甚 至依然采用半自动工制造的方法[33],其形状、尺寸以 及性能都难以保证。目前利用常规制造技术生产导管 类部件无法进行三维空间轴线的自由化设计,无法充 分利用飞机有限的内部空间,进而导致整个管路系统 重量增加,所占内部空间增大,飞机各部分组件的整 体结构紧凑性降低,造成装备管路或其他结构设计过 度冗余,导致飞机空间利用率、使用寿命、安全性等 重要指标难以保证。相较于传统成形技术,三维自由 弯曲成形技术具备较大的技术优势,采用该技术能够 轻松满足航空器用空心复杂弯曲构件的成形精度和 成形质量要求。



图 19 航空发动机复杂管路系统 Fig.19 Aero engine tube line

在航天领域,各种形状的弯曲构件作为管路系统 的主要元件,对保证火箭动力系统和控制系统的稳定 工作发挥了重要作用(见图 20)。空间运载火箭中液 态氢和液态氧的燃料管道系统和加油管路系统中均 需要大量的复杂空心弯曲构件,以承担介质的运输任 务。目前,制造这些性能要求较高的管件一般采用无



图 20 运载火箭管路系统中的管件 Fig.20 Tubes in carrier rocket tube system

缝焊接技术,此方法虽然可以有效提高零件的精度、 光洁度和外观可观性<sup>[34]</sup>,但是也存在着工序繁杂、耗 时较长等缺陷,且管路发生漏油的概率也较高。三维 自由弯曲成形技术可以实现复杂弯管的一次性整体 成形,成形效率较高,且避免了焊接弯管焊接接头处 容易漏油等缺陷。

#### 3.2 核能工程领域

在核电工程各种管道回路、蒸汽发生器、热交换器、冷凝水供水管路等系统中,各种复杂形状的异径、

异型截面管对提高核管路系统的柔性、稳定性和安全 性具有重要意义。如图 21 所示,上述构件得到了广泛 的应用。弯管成形工艺是管道制造中的核心技术,大 直径小弯曲半径管道弯曲成形过程中空间尺寸的精确 控制给主管道的制造带来了巨大的挑战,也是管道国 产化制造中的技术难点之一<sup>[35]</sup>。核电管道用复杂管件 的弯制大多采用冷弯方式进行,为了精确控制管材尺 寸,传统核电系统弯管成形方法必须综合考虑弯管用 芯模的设计、芯模的装填方式以及水压机的性能;另 外,对接管嘴位置的尺寸控制也为技术难点之一。



图 21 核电冷却剂管道中的复杂弯管构件 Fig.21 Complex bend member in nuclear power coolant pipeline

采用三维自由弯曲成形装备进行复杂弯管弯曲成 形时,可以通过装备配备的模拟仿真软件对比模拟成形 后的弯管和所要弯曲的 CAD 模型的尺寸偏差,并进而 修正弯曲成形工艺参数。成形后的弯管也可以通过装备 配备的激光扫描系统扫描成形后弯管的弯曲半径、弯曲 角度、直段长度等尺寸参数,并再次与所要弯曲的 CAD 模型对比,从而彻底解决材料回弹引起的尺寸偏差。同 时,可通过定义管材节点坐标的方法,实现弯曲段和直 段各处节点坐标的精确控制。相较于传统金属构件弯曲 成形方法,采用三维自由弯曲成形装备成形核电管道构 件时具有更高的尺寸精度和更低的生产制造成本,成形 后管件的壁厚均匀性也可以得到明显改善。

#### 3.3 汽车制造领域

由于空心管状零件具有较好的刚度和减重效果, 已逐渐取代汽车底盘和空间框架中的点焊钣金零件。 这些零件大多通常是先进行弯曲并附加液压成形。然 而,传统的弯曲过程旋转拉弯或滚弯往往不适合这些 几何形状。三维自由弯曲成形得益其三维柔性制造的 特点,特别适用于作为液压成形前的弯曲工序。图 22 所示为三维自由弯曲成形技术在汽车制造中的应用。



图 22 三维自由弯曲成形技术在汽车制造中应用 Fig.22 Application of 3D free-bending forming technology in automobile manufacturing

#### 3.4 医疗工程领域

在医疗工程领域,弯曲构件由于其自身的柔性结构特点,作为辅助人体运动的医疗器械,图 23 所示为弯曲状的拐杖和抗震颤矫形器。此类产品通常应该根据不同患者的个体差异性或要求而定制,从而通常具有不同的弯曲半径,且形状较为复杂。三维自由弯曲成形技术得益于其柔性成形的优势,在制造定制医疗器械时具有极大的灵活性和便利性,能够提高此类零件的成形效率,并显著降低制造成本。

#### 3.5 建筑装饰领域

在建筑工程领域,各种形状的弯曲承力构件广泛 分布在涵洞、桥梁、铁塔等大型支撑弯曲型钢结构中, 见图 24。这些弯曲承力件通常尺寸较大,即拥有非



常大的弯曲半径和较大的弯曲弧长,制造这些构件的 传统方法是采用压弯或拉弯再分段焊接,这种方法生 产效率低,同时由于焊缝可能在使用过程中出现疲劳 裂纹,经过长期使用后较易出现安全隐患。三维自由 弯曲成形装备针对大的弯曲半径无需采用大尺寸模 具,只需弯曲模发生小的位移,材料即可弯制成大半 径弧度。同时由于是一次弯制成形,三维自由弯曲成 形的构件相比于传统弯曲装备成形的构件在高强高 压的工作环境下拥有更高的强度极限。

复杂形状的弯曲产品在建材装饰领域也有着广 泛的应用,如室内家具和城市外景工艺品等,见图 25。充分发挥了三维自由弯曲成形装备柔性成形以及 可实现弯曲半径和弯曲方向连续变化的优势,能够最 大程度上实现设计师的设计思路。



图 23 弯曲状的拐杖和抗震颤矫形器 Fig.23 Curved crutch and anti tremororthosis



图 24 弯曲承力构件在建筑工程领域的应用 Fig.24 Application of bending component in construction engineering



图 25 三维自由弯曲技术在建筑建材领域的应用 Fig.25 Application of three dimensional free-bending in architecture and decoration

### 4 结论

三维自由弯曲成形技术是一种新兴的柔性、精确、高效管材弯曲成形方法。三维自由弯曲成形装备整合了弯曲数值模拟技术、几何尺寸一次校正及在线技术、难变形材料的温热自由弯曲成形技术等关键技术,相较于传统数控弯曲装备具有极大的技术优势和发展空间。随着三维自由弯曲成形技术相关理论研究的完善以及相关装备的研发,三维自由弯曲成形技术 及其装备必将在我国各工程领域得到广泛应用。

#### 参考文献:

- MURATA M, KUBOKI K. CNC Tube Forming Method for Manufacturing Flexibly and 3-Dimensionally Bent Tubes[C]// 60 Excellent Inventions in Metal Forming, New York: Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2015: 363—368.
- [2] GUO Xun-zhong, XIONG Hao, XU Yong, et al. Freebending Process Characteristics and Forming Process Design of Copper Tubular Components[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018(8): 1—17.
- [3] MURATA M, OHASHI N, SUZUKI H. New Flexible Penetration Bending of A Tube: 1st Report, A Study of MOS Bending Method[C]. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series C, 1989, 55(517): 2488—2492.
- [4] MURATA M. Push-through Bending Method and Bending Device by this Method: Japan, JPH02299722 (A)[P]. 1990-12-12.
- [5] MURATA M. Verfahren Und Maschinezumbiegeneinesstabfoermigenteils: German, DE4015117 (A1)[P]. 1990-11-22.
- [6] MURATA M. Penetration Bending Method and Penetration Bending Machine Therefor: USA, US5111675 (A)[P]. 1992-05-12.
- [7] MURATA M. Effects of Inclination of Die and Material of Circular Tube in MOS Bending Method[J]. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers C, 1996, 62(601): 3669–3675.
- [8] GANTNER P, HARRISON D K, SILVA A K D, et al. The Development of a Simulation Model and the Determination of the Die Control Data for the Free-Bending Technique[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture, 2007, 221(2): 163—171.
- [9] CHATTI S, HERMES M, TEKKAYA A E, et al. The New TSS Bending Process: 3D Bending of Profiles with Arbitrary Cross-sections[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2010, 59(1): 315—318.
- [10] COONEY. CNC Tube Bending[EB/OL]. Cooney International Co., Ltd., (2011-01-01), [2018-06-10], http://www.

cooneymarine.co.uk/pages/tube-bending.html.

- [11] NISSIN. CNC Tube Bender[EB/OL]. Nissin Precision Machines Co., Ltd., (2004-01-01), [2018-06-10], http:// www.nissin-precision.com/english/sindex.html.
- [12] ETAITECH, GERMANY J. NEU Free Bending Machine[EB/OL]. Etaitech, (2006-05-01), [2018-06-08], http://www.etaitech.com/about/?118.htm.
- [13] 丛爽,尚伟伟.并联机器人[M].北京:电子工业出版 社,2010.
   CONG Shuang, SHANG Wei-wei. Parallel Robot[M].
   Beijing: Electronic Industry Press, 2010.
- [14] GOTO H, ICHIRYU K, SAITO H, et al. Applications With a New 6-DOF Bending Machine in Tube Forming Processes[C]// Jfps International Symposium on Fluid Power, The Japan Fluid Power System Society, 2008: 183—188.
- [15] TAKEDA Y, INADA S, KAWASUMI S, et al. Kinematic Design of 3-RPSR Parallel Mechanism for Movable-die Drive Mechanism of Pipe Bender[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2013, 58: 49—74.
- [16] J. 齐斯维勒, M. 基宾, T. 弗莱米希, 等. 用于纵向型 材、尤其是管子的自由成形弯曲的装置以及用于纵向 型材、尤其是管子的自由成形弯曲和拉拔弯曲的装置: 中国, CN101146629 A[P]. 2008.
  ZISSWILLER, KIBBEN, FRY MI F, et al. Apparatus for Free Forming and Bending of Longitudinal Profiles, in Particular Tubes and Apparatus for Free Forming, Bending and Drawing of Longitudinal Profiles, in Particular Tubes: China, CN101146629 A[P]. 2008.
  [17] NEUGERAUER P. DROSSEL W.G. LORENZ U et al.
- [17] NEUGEBAUER R, DROSSEL W G, LORENZ U, et al. Hexabend-A New Concept for 3D-free-form Bending of Tubes and Profiles to Preform Hydroforming Parts and Endform Space-frame-components[J]. 2002.
- [18] 曾元松. 航空钣金成形技术[M]. 北京: 航空工业出版 社, 2014.
   ZENG Yuan-song. Aircraft Sheet Metal Forming Technology[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2014.
- [19] LI P, WANG L, LI M. Flexible-bending of Profiles and Tubes of Continuous Varying Radii[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016: 1-7.
- [20] LI P, WANG L, LI M. Flexible-bending of Profiles with Asymmetric Cross-Section and Elimination of Side Bending Defect[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 87(9/10/11/12): 1—7.
- [21] 郭训忠, 马燕楠, 徐勇, 等. 三维自由弯曲成形技术及 在航空制造业中的潜在应用[J]. 航空制造技术, 2016, 59(23): 16—24.
  GUO Xun-zhong, MA Yan-nan, XU Yong, et al. State-of-the-Arts in 3D Free Bending Technology and the Future Application in Aviation Manufacture[J]. Aviation Manufacturing Technology, 2016, 59(23): 16—24.
- [22] 熊昊, 马燕楠, 周曙君, 等. 三维复杂轴线空心构件自由弯曲成形技术研究[J]. 塑性工程学报, 2018, 25(1):

100-110.

XIONG Hao, MA Yan-nan, ZHOU Shu-jun, et al. Free Bending Forming Technology of Three Dimensional Complex Axis Hollow Component[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2018, 25(1): 100—110.

- [23] GUO X, MA Y, CHEN W, et al. Simulation and Experimental Research of the Free-bending Process of a Spatial Tube[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 255: 137—149.
- [24] GUO X, XIONG H, XU Y, et al. Free-bending Process Characteristics and Forming Process Design of Copper Tubular Components[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018(8): 1—17.
- [25] SHIMADA N, TOMIZAWA A, KUBOTA H, et al. Development of Three-dimensional Hot Bending and Direct Quench Technology[J]. Procedia Engineering, 2014, 81(659): 2267—2272.
- [26] UEMATSU K, SHIMADA N, TOMIZAWA A, et al. Development of Three-Dimensional Hot Bending and Direct Quench using robot[C]// International Conference on Intelligent Informatics and Biomedical Sciences, IEEE, 2016: 165—171.
- [27] KUBOTA H, TOMIZAWA A, YAMAMOTO K, et al. Finite Element Analysis of Three-Dimensional Hot Bending and Direct Quench Process Considering Phase Transformation and Temperature Distribution by Induction Heating[J]. Transactions of the Iron & Steel Institute of Japan, 2014, 54(8): 1856—1865.
- [28] 黄因慧,田宗军,高雪松,等. 难加工材料激光快速成形的研究现状与展望[J]. 航空制造技术, 2010, 53(21): 26-29.
   HUANG Yin-hui, TIAN Zong-jun, GAO Xue-song, et al.

Research Status and Prospects of Laser Rapid Forming of Difficult-to-Machine Materials[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010, 53(21): 26–29.

[29] HENG L I, SHI K P, YANG H, et al. Springback Law of

Thin-walled 6061-T4 Al-Alloy Tube upon Bending[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22(S2): 357—363.

- [30] YANG He, LI Heng, ZHANG Zhi-yong, et al. Advances and Trends on Tube Bending Forming Technologies[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2012, 25(1): 1—12.
- [31] 胡智华,陈明和,谢兰生. 2099 铝锂合金型材的变曲率 滚弯工艺[J]. 塑性工程学报, 2016, 23(3): 16—21.
  HU Zhi-hua, CHEN Ming-he, XIE Lan-sheng. Variable Curvature Roll Bending Process of 2099 Al Li Alloy Profile[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2016, 24(3): 82—87.
- [32] 张深, 吴建军, 王强, 等. 金属管材弯曲成形回弹问题 研究[J]. 航空制造技术, 2014, 57(10): 45—50.
  ZHANG Shen, WU Jian-jun, WANG Qiang, et al. Study on Springback Problem of Metal Tube Bending Forming[J]. Aviation Manufacturing Technology, 2014, 57(10): 45—50.
- [33] 王敬和,曲伸,祝文卉.现代摩擦焊技术在航空制造 业中的应用和发展[J]. 航空制造技术,2006,49(5): I0014—I0015.
  WANG Jing-he, QU Shen, ZHU Wen-hui. Application and Development of Modern Friction Welding Technology in Aviation Manufacturing Industry[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2006, 49(5): I0014—I0015.
- [34] 沈以赴,顾冬冬,陈文华. 航空航天焊接及成形典型技术[J]. 航空制造技术, 2008, 48(21): 40—44.
  SHEN Yi-zhi, GU Dong-dong, CHEN Wen-hua. Typical Aerospace Welding and Forming Technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2008, 48(21): 40—44.
- [35] 刘昇. AP1000 核电冷却剂主管道监造分析[J]. 中国核电, 2013, 6(4): 331—336.
  LIU Sheng. Supervision and Analysis of AP1000 Nuclear Power Cooler Main Pipeline[J]. China Nuclear Power, 2013, 6(4): 331—336.