

三维自由弯曲成形技术及在航空制造业中的潜在应用

郭训忠¹, 马燕楠¹, 徐勇², 周曙君³, 张士宏², 陶杰¹

(1. 南京航空航天大学先进材料及成形技术研究所, 南京 211100;

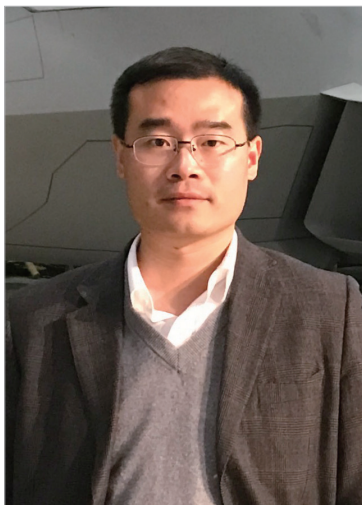
2. 中国科学院金属研究所, 沈阳 110016;

3. 南京合信智能装备有限公司, 南京 210046)

[摘要] 三维自由弯曲成形技术作为金属塑性成形领域近年来一项重要的技术创新,能够实现管材、型材、线材在各种弯曲半径条件下的精确成形,对传统弯曲成形技术带来了巨大的挑战。从三维自由弯曲成形技术的基本原理入手,对三轴、五轴以及基于并联机构的六轴自由弯曲系统的技术优势、关键工艺参数与成形缺陷、相关技术及装备研究进展情况等进行了系统介绍,并对其在航空复杂弯曲构件制造领域的应用前景进行了分析和展望。

关键词: 三维自由弯曲成形; 柔性成形; 复杂空心弯曲构件; 航空制造

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2016.23/24.016



郭训忠

南京航空航天大学材料学院副教授,主要研究方向为金属材料成形数值模拟与加工研究。拥有成形仿真软件著作权和专利 10 余项。参与和承担了国家自然科学基金、江苏省重大科技成果转化、江苏省科技支撑计划项目等多项国家及省、市课题。

复杂空心弯曲构件在航空器或航空发动机的燃油、滑油、环控等管路系统中具有广泛的应用,主要承担各种重要介质的输送^[1-4]。另外,具有复杂异形截面的弯曲件作为承力结构件在航空器中同样具有非常广泛的应用^[5-7]。目前对于金属复杂弯曲构件,常见的成形方法主要包括绕弯、拉弯、压弯、推弯、辊弯等^[8-10]。但现有弯曲方法适用于几何形状较简单、弯曲半径不连续变化的管材弯曲成形。对于空间弯曲构件或者弯曲半径连续变化的复杂弯曲构件,则具有一定的局限性。复杂空心构件的弯曲成形具有一些共性问题,主要包括空心构件弯曲成形后的回弹、截面过度畸变、弯曲段壁厚不均匀等^[11-14]。由于影响因素很多,对于具有更为复杂特征的弯曲构件,需要应用诸多算法进行弯曲变形规律的系统研究^[7,15-16]。

三维自由弯曲成形技术是近年来塑性成形领域的一项重要技术创

新^[17]。复杂构件的三维自由弯曲能够实现管材、型材、线材在各种弯曲半径条件下的精确无模成形,对传统金属构件弯曲成形技术形成了巨大的挑战。虽然国内对于三维自由弯曲成形技术的研究报道较少,但作为一种对于复杂异形截面的弯曲件的高效精确制造具有明显竞争优势的柔性成形工艺,未来在航空制造技术领域必将受到广泛的关注和应用。

本文从三维自由弯曲成形技术的基本原理入手,系统介绍了三轴、五轴、六轴自由弯曲系统的成形原理、关键工艺参数与成形缺陷、国内外相关技术及装备的研究进展,并对其在航空空心复杂弯曲构件制造领域的应用前景进行了分析和展望。

管材三维自由弯曲成形系统工作原理及技术优势

1 三轴自由弯曲成形系统原理

三轴自由弯曲系统关键部分如

图1所示。该系统主要由弯曲模、球面轴承、导向机构和推进机构4部分组成,其中弯曲模与球面轴承相接触的球面半径相同。其工艺原理是:管材在推进机构的连续推动作用依次通过导向机构和弯曲模,在管材通过弯曲模时,球面轴承在 X/Y 平面内作偏心运动,而弯曲模随着球面轴承的偏心运动发生转动,当球面轴承在 X/Y 平面内偏离平衡位置为 u 时,管材在弯曲部位产生偏心距 u ,进而实现弯曲成形。

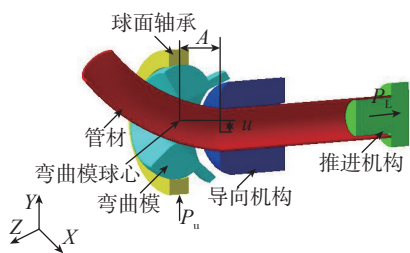


图1 三轴自由弯曲系统关键部位示意图
Fig.1 Schematic diagram of three-axis free bending system key parts

随着 Z 轴方向的送料,管材逐渐弯曲出较大的弯曲角。偏心距 u 的大小决定了弯曲半径 R 的大小,当 u 很大时,弯曲半径 R 将会很小。从弯曲模球心到导向机构前端之间在 Z 轴方向的距离为 A ,当 A 值大小超过正常范围时,即使 u 值很大,同样无法弯曲出较小的弯曲半径。在三轴自由弯曲系统中,管材在弯曲时受到轴向推进机构所施加的推力 P_L 和球面轴承所施加的弯曲力 P_u 。在 P_L 和 P_u 的共同作用下产生弯矩 M ,使管材发生弯曲,其中:

$M = P_u \times A + P_L \times u$ (该公式为标量计算)。

弯曲力 P_u 的大小取决于管材材料本身的性质以及偏心距 u 和 A 的大小,当管材材料不变时, A 值越大, u 值越小,则弯曲力 P_u 越小。球面轴承和轴向推进机构可在伺服电机的驱动下实现 $X/Y/Z$ 3个方向的自由运动,故将该弯曲方法命名为三轴自由弯曲系统。

2 五轴自由弯曲系统原理

图2为五轴自由弯曲系统^[18]。五轴自由弯曲系统基本原理与三轴相同,即通过推进机构轴向送料与弯曲模的平动和转动过程相结合来弯管,而弯曲模的主动运动轨迹则决定了弯管的形状。

五轴自由弯曲系统与三轴自由弯曲系统主要差别在于:三轴自由弯曲系统中弯曲模随着球面轴承的运动而运动,其运动自由度受到一定限制,在弯管过程中弯曲模通常无法保持与管材截面的实时垂直,进而导致弯曲后的管材截面畸变程度较大,表面质量较差。同时,由于三轴自由弯曲系统中弯曲模只能随球面轴承的运动而转动,自由度较小,因此其所能弯曲的构件几何构型复杂程度也受到限制。而五轴自由弯曲系统除了可以实现弯曲模在 X 、 Y 向以及推进机构在 Z 向的运动之外,还可以实现弯曲模绕着自身轴线的 α 角度转动,以及绕着管材轴线方向的 β 角度转动。弯曲模在 α 和 β 角度上的主动转动使得:(1)弯曲过程中可以通过弯曲模转动角度随弯管形状的主动调整,实现弯曲模与管材截面在成形部位始终保持垂直,进而提高管材弯曲的表面质量,减小截面畸变率;(2)弯曲模的多自由度运动可以满足更加复杂构型的空心构件的弯曲过程。五轴自由弯曲成形系统具有更加柔性的特点,因此其弯曲模形式可以根据坯料的不同而更换,能满足多种构件的弯曲成形,如管材、棒材、线材、型材等,其中空心构件的截面可以是复杂或异形截面。

3 基于并联机构的六轴自由弯曲系统原理

图3(a)为基于并联机器人的六轴自由弯曲系统实物图^[19],图3(b)为六轴并联机器人运动原理示意图。六轴自由弯曲系统从基本原理上来说与三轴和五轴自由弯曲系统相似,均是通过控制弯曲模的

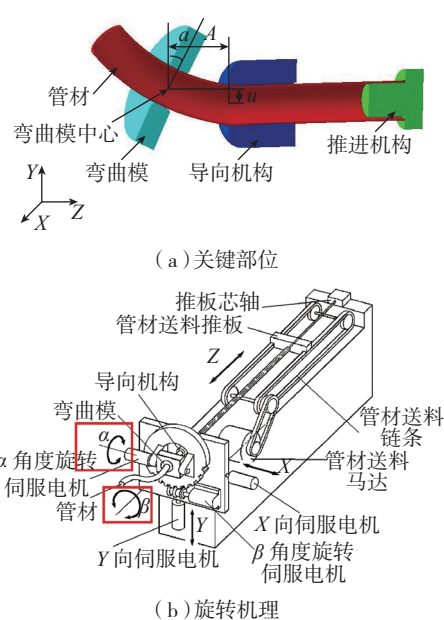
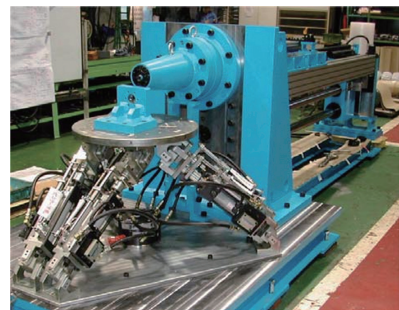
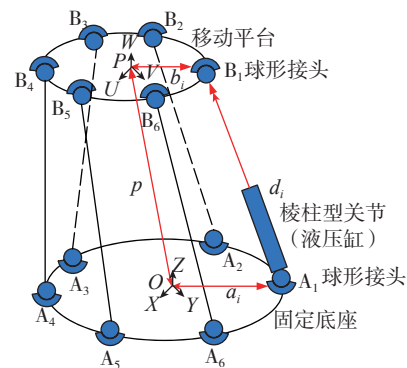


图2 五轴自由弯曲系统示意图
Fig.2 Schematic diagram of five-axis free bending system



(a) 实物图



(b) 原理示意图

图3 六轴自由弯曲系统
Fig.3 Six-axis free bending system

运动轨迹以实现不同形状管材的弯曲。五轴自由弯曲系统中弯曲模运动轨迹的改变通过4个伺服电机对弯曲模的同步驱动来实现,而在六轴自由弯曲系统中,弯曲模运动轨迹的

改变则通过并联机器人在各轴的合成运动来实现。通过 Stewart-Gough Platform 并联机构的合成运动,最终实现对弯曲模复杂运动轨迹的控制。同时,六轴自由弯曲系统相对于三轴和五轴自由弯曲系统所具有的一个显著优势还在于其可以实现管材的轴线扭曲弯制,满足更加复杂构型空心构件弯曲成形的要求。

管材三维自由弯曲成形工艺分析流程及成形缺陷

1 工艺分析流程

三维复杂空心构件的弯曲工艺主要包括以下基本过程:提取所要弯曲的复杂空心构件的轴线,并将其轴线分为首尾连续相接的圆弧段和直线段;然后测量每一直线段和圆弧段的直段长度 L_n 、圆弧段弯曲半径 R_n 、弯曲角 θ_n 、弯曲方向 ϕ_n 等尺寸参数。图 4 所示为对一复杂弯管的轴线进行几何分段。

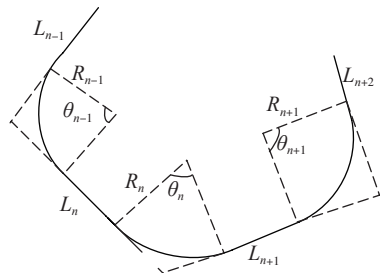


图4 复杂弯管几何分段示意图

Fig.4 Schematic diagram of cutting operation to pipe line

在空间构件的自由弯曲过程中,弯曲一个圆弧时通常需要经历3个阶段(图5):过渡段1为球面轴承从平衡位置运动至偏心距为 u 位置的过程;圆弧段为球面轴承固定在预定偏心距位置,同时推进机构轴向送料的过程;过渡段2为球面轴承从偏心距为 u 的位置返回平衡位置的过程。在这3个阶段中,球面轴承适用不同的运动规律。在完成对复杂弯管轴线进行分段的过程中,需在圆弧段和直线之间补充如图5所示的过渡段。建立每小段中 L_n 、 R_n 、 θ_n 、 ϕ_n

等尺寸参数与 X 、 Y 、 Z 3个方向的驱动机构运动速度 U_x 、 U_y 、 U_z 以及运动时间 t 之间的函数关系:

$$\begin{aligned} L_n &= f(U_z, \Delta t) \quad , \\ R_n &= f(U_x, U_y, \Delta t) \quad , \\ \theta_n &= f(U_x, U_y, U_z, \Delta t) \quad , \\ \phi_n &= f(U_x, U_y) \quad . \end{aligned}$$

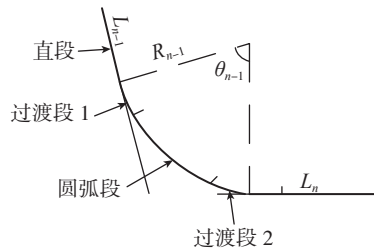


图5 补充过渡段示意图

Fig.5 Schematic diagram of adding the transition sections

2 工艺适用范围及主要成形缺陷形式

三维自由弯曲成形技术除了能满足常规空心构件的弯曲成形外,特别适合于具有下列特征的弯曲构件的成形:(1)结构复杂、轴线为空间复杂曲线的弯曲构件,如带直段弯管、螺旋形弯管、空间弯管等;(2)弯曲半径连续变化,且最小低至 $2.5D \sim 3D$ 的弯曲构件;(3)弯曲角度在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 之间任意变化的弯曲构件;(4)中小尺寸外径的弯管,由于成形力的限制,目前可成形的管材口径一般在 110mm 以下。

三维自由弯曲成形技术的主要成形缺陷形式包括:(1)内弧起皱:空心件弯曲过程中,若球面轴承从初始位置向偏心距为 u 的位置移动过程中速度过快,轴向补料不及时,则极易造成内弧起皱;(2)外弧表面凹凸不平,表面质量较差:弯曲过程中,当球面轴承的偏心距 u 过大时,则弯曲模无法与空心件弯曲部位截面保持垂直,此时空心件外弧的表面会由于弯曲模的刮蹭而导致表面凹凸不平,表面质量较差;(3)回弹过程所引起的弯管尺寸偏差:空心件弯曲成形过程中,弯曲后回弹是一个

无法避免的现象,而回弹程度与材料的变形抗力、管材几何尺寸等因素相关。在三维自由弯曲过程中,若缺乏精确的回弹补偿机制或者针对回弹的工艺修正过程,则极易导致成形后尺寸偏差;(4)弯曲过程中管材发生自转,进而导致弯管发生扭曲:若管材在轴向运动过程中,沿轴向没有完全固定,发生了自转,则弯曲出的弯管会发生扭曲,与所设定的形状差距较远;(5)润滑不良造成管材表面划伤:润滑对三维自由弯曲过程极为重要,相关部位是否润滑良好对管材的表面质量具有很大的影响,当局部润滑不良时,则很容易在管材表面造成划伤。

三维自由弯曲成形技术国内外研究进展

1 自由弯曲成形技术国外研究进展

自由弯曲成形技术首次由日本3位研究人员 Makoto Murata、Shinji Ohashi、Hideo Suzuki 共同提出,并以3人姓氏的首字母组成该技术的名称,所以曾一度称之为 MOS Bending 技术^[18]。

针对该技术的相关研究首先围绕有限元数值模拟及弯管过程的相关数学模型展开。2004年,德国阿伦应用技术大学在三维自由弯曲成形数值模拟方面开展了相关工作^[20],采用 LS-DYNA 对管材三轴自由弯曲成形过程进行了有限元模拟,并将模拟结果与实际弯曲结果进行了对比,图6(a)为其所建立的三维模型,图6(b)为对管材进行连续弯曲的模拟结果。模拟结果与实际弯曲结果的对比显示,模拟结果与实际弯曲结果相接近。

2007年,德国阿伦应用技术大学系统提出了三轴及五轴自由弯曲成形过程中圆弧段和过渡段的偏心距 u 与弯曲半径 R 的关系方程以及过渡段计算公式^[21]。

随着相关基础科学研究的逐步

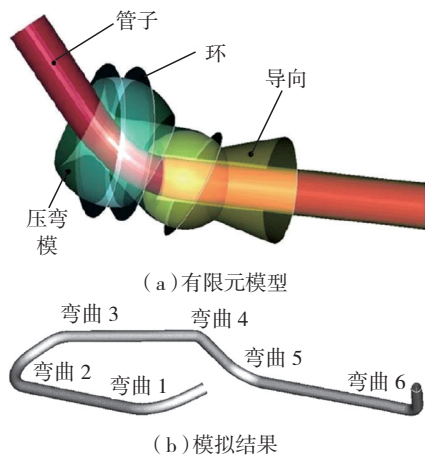


图6 管材自由弯曲成形有限元模拟
Fig.6 Finite element simulation of tube free bending

完善,日本及德国多家企业陆续推出了商业化的自由弯曲成形设备。图7所示为德国的J. NEU公司(德国诺意)研发的三轴、五轴、六轴自由弯曲系统^[22]。该系统可以满足外径为6~90mm管材的任意弯曲角度、任意弯曲方向、最小低至2倍外径的任意弯曲半径三维造型,且管材最大进给速度可达400mm/s。更换弯曲模后,五轴和六轴机型还可以满足异形截面型材的自由弯曲成形,其中,六轴机型可实现空心构件轴线扭曲弯制。该弯曲系统所配备的三维自由弯曲专用控制软件“Premium 3D Freeform”主要由激光扫描测量、自由造型以及模型对比3个模块构成。激光扫描模块可以对目标自由弯曲管件以及弯曲成形后的自由弯曲管件进行测量,得到弯曲管件的弯曲半径、弯曲角、弯曲方向等几何参数,并自动生成弯曲管件的三维几何模型;自由造型模块主要包括在可视化触摸屏上进行弯曲过程编程、IGES/STEP数据转换/导入/导出、形状预览等功能,可以实现自由弯曲管件几何构型的精确导入;模型对比模块则可以对比目标自由弯曲管件和成形后自由弯曲管件的几何尺寸差异,进而对弯曲工艺参数进行修正,彻底解决材料回弹过程引起的尺寸偏差,实现自由弯曲管件的高精度成形。

除了以上三维自由弯曲成形系统设备外,从2008年起,基于并联机器人机构的自由弯曲成形系统等相关衍生自由弯曲系统也得到了逐步的发展。

2008年,日本东京工业大学机械科学与工程系给出了六轴自由弯曲成形过程中Stewart-Gough并联机构的数学模型^[19],同时通过试验发现,偏心距 u 与 $1/R$ 为线性关系。图8(a)所示为基于多轴并联机构开发的三维自由弯曲系统^[23],该系统的弯曲模运动轨迹通过三轴并联机

器人进行实时控制,同时通过竖直方向的送料机构进行送料,其实质为4轴小型及微型弯曲系统。该系统中,弯曲模在任意方向的倾角最大可达 45° ,且适宜弯曲的管材外径为8mm。经项目团队研究发现,影响该自由弯曲系统成形精度的主要因素为管材与弯曲模之间的间隙大小以及弯曲模的倾角大小。图8(b)为采用该设备弯曲出的复杂弯曲构件,目前该技术主要应用在医疗行业。

图9为德国蒂森克虏伯钢铁股份公司于2008年提出的自由弯曲系



图7 德国诺意公司开发的自由弯曲系统
Fig.7 Free bending system developed by J. NEU

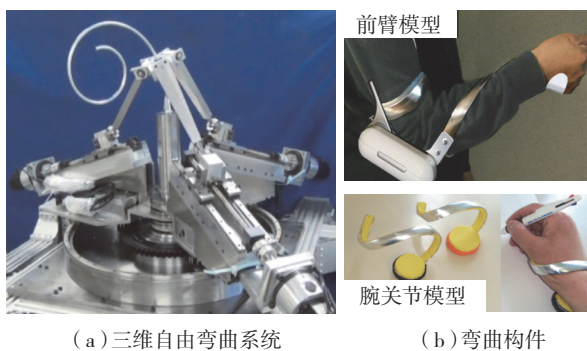


图8 日本东京工业大学四轴自由弯曲成形系统及辅助弯曲件
Fig.8 Four-axis free bending system developed by Tokyo Institute of Technology

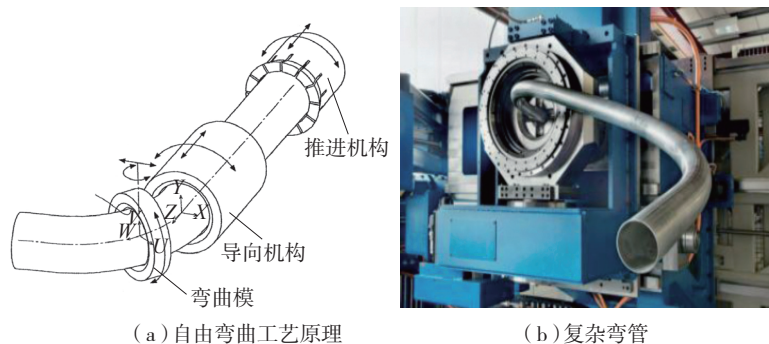


图9 德国蒂森克虏伯钢铁股份公司自由弯曲系统
Fig.9 Free bending system developed by Germany Thyssen Krupp Iron and Steel Company

统的原理及成形设备^[24]。该系统主要由推进机构,导向机构与弯曲模3部分组成。不过与德国诺意公司开发的自由弯曲成形设备不同的是,在该设备中导向机构可以实现轴向独立运动,进而满足弯曲模与导向机构前端之间距离实时调整的要求。同时,推进机构与导向机构可以实现同向同时旋转管材,能够满足复杂构型空心构件弯曲成形的需要。在研制成形的设备中管材内部设有内置芯棒,芯棒的加入能显著提高管材的成形质量,且芯棒的位置可以借助于电机进行实时调节。图10所示为德国蒂森克虏伯公司采用自由弯曲成形技术成形的复杂弯曲构件。

2013年,日本东京工业大学机械科学与工程系给出了其自行研发的四轴并联机器人控制过程的数学模型^[25]。同年,德国Fraunhofer IWU(弗朗霍夫学会模具和成型技术研究所)研发了自由弯曲成形系统,如图11所示^[26]。该系统主要采用并联机床实现弯曲模在空间内的平动与转动,但弯曲成形的核心思想还是源于日本科学家提出的自由弯曲技术。另外,在该系统中使用了柔性芯棒以减小弯曲部位的截面畸变与壁厚过度减薄^[26]。需要注意的是,芯棒形式、长度、固定位置及固定方式都是需要系统研究的。

2 自由弯曲成形技术国内研究进展

国内在3D自由弯曲成形方面的研究起步相对较晚。2014年,中航工业北京航空制造工程研究所曾元松^[27]在国内首次公开报道了自由弯曲设备以及弯曲原理,并且介绍了该技术相对于传统空心构件弯曲成形技术所存在的优势。2016年,吉林大学李明哲等^[28-29]应用Abaqus有限元模拟软件对管材以及型材的自由弯曲成形过程进行了有限元模拟,研究中应用了一种新的三轴自由弯曲成形的弯曲模。另外,研究发现,在相同 A 值条件下,弯管曲率随偏心



图10 德国蒂森克虏伯钢铁股份公司自由弯曲成形系统成形的复杂弯曲构件
Fig.10 Complex bending component formed by free bending system developed by Germany Thyssen Krupp Iron and Steel Company

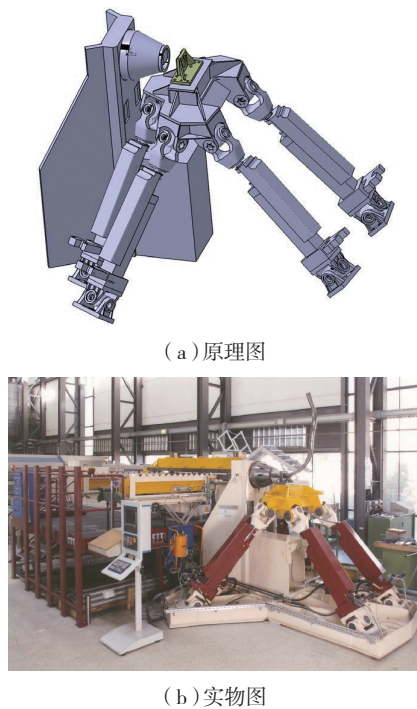


图11 德国Fraunhofer IWU 2013年研发的HexaBend自由弯曲成形系统
Fig.11 HexaBend free bending system developed by Fraunhofer IWU in 2013

距 u 的增大而线性增加,当偏心距 u 相同时, A 值越小,弯管曲率越大。

基于国内外已有的关键技术及装备整体研究进展,南京航空航天大学先进材料及成形技术研究所与中国科学院金属研究所开展了深入的合作研究,重点着眼于该技术在航空航天复杂弯曲构件的潜在应用,在工艺精确解析、有限元仿真及在线迭代优化以及关键技术装备研发方面开展了系统的研究工作。以航空器常见的平面S形环控系统管件和液压系统用空间弯管的弯曲过程为例(图12),解析了空心构件三维自由弯曲

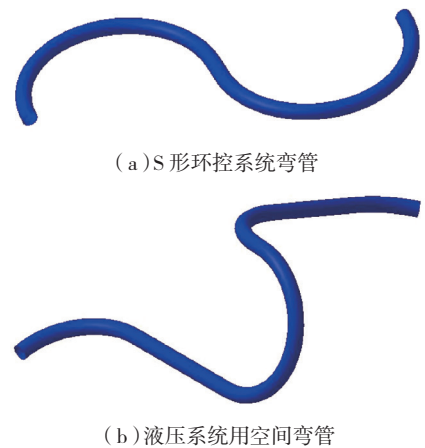


图12 弯管几何模型
Fig.12 CAD model of bend tube

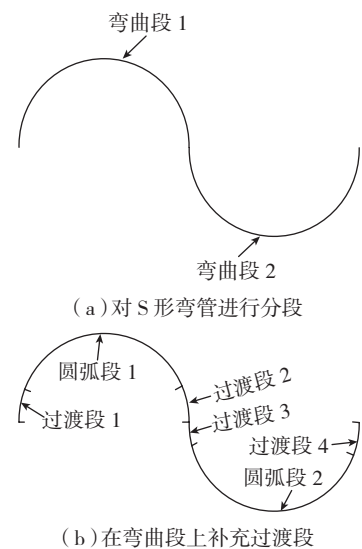


图13 成形工艺分析
Fig.13 Bending process analysis

成形的工艺过程。针对如图12(a)所示的S形弯管,如图13(a)所示,首先提取其轴线,并将其划分为两个弯曲段,其次,如图13(b)所示,在两个弯曲段上补充过渡段。

在三轴自由弯曲系统中,对于一

个复杂弯管,其形状由直段长度 L ,圆弧段弯曲半径 R ,弯曲角 θ ,以及弯曲模在 X/Y 平面上的弯曲方向 ϕ 决定。而三轴自由弯曲系统的控制则通过该设备在 $X、Y$ 方向上的偏心距 $U_X、U_Y$ 以及管材轴向送料长度 W 决定。因此,建立下列 $L、R、\theta、\phi$ 等尺寸参数与 $U_X、U_Y、W$ 等工艺参数之间的关系非常重要。

(1) 弯曲半径 R 与偏心距 u 的关系:当 A 值与管材截面尺寸一定时,偏心距 u 与弯曲半径 R 在理论上满足如下关系^[21]:

$$u = R - R \cos \frac{s \times 180}{\pi \times R} + \tan \frac{s \times 180}{\pi \times R} \left(A - R \sin \frac{s \times 180}{\pi \times R} \right)$$

其中, $s = (\pi \times R \times \arcsin A/R)/180$ 。

值得注意的是, u 与 R 的关系通常不仅与管材几何尺寸以及 A 值相关,还与管材的抗弯强度、杨氏模量等材料参数相关。因此对于同一尺寸、不同材料的管材,即使 u 的大小不变, R 的大小也会发生变化,在实际弯管时,需要得到特定管材的 u 和 R 之间的准确关系。 u 与 R 关系是否足够准确直接决定了管材弯曲成形的尺寸精度。

(2) 弯曲角 θ 与送料长度 W 的关系:在弯曲半径为 R ,弯曲角为 θ 的圆弧时,根据弧长公式可得,所需送料长度为 $W = (\pi \times \theta \times R)/180$ 。

(3) 弯曲模偏转方向 ϕ 与偏心距 $U_X、U_Y$ 的关系:弯曲模偏转方向 ϕ 为三维自由弯管的关键工艺参数之一, ϕ 是否精确直接决定了管材弯曲的形状是否准确,而 u 和 R 关系的精确度决定了管材弯曲尺寸是否足够精确。在实际弯管时,对于相邻圆弧的弯曲过程,弯曲模的偏转方向 ϕ 满足如下关系:

$$\phi_n = \phi_{n-1} + \phi_{n,n+1} - \phi_{n-1,n-2}$$

对于弯曲半径为 R 的圆弧,通过计算可得偏心距为 u ,又由于其弯曲模偏转方向为 ϕ ,此时 $U_X = u \cos \phi$,

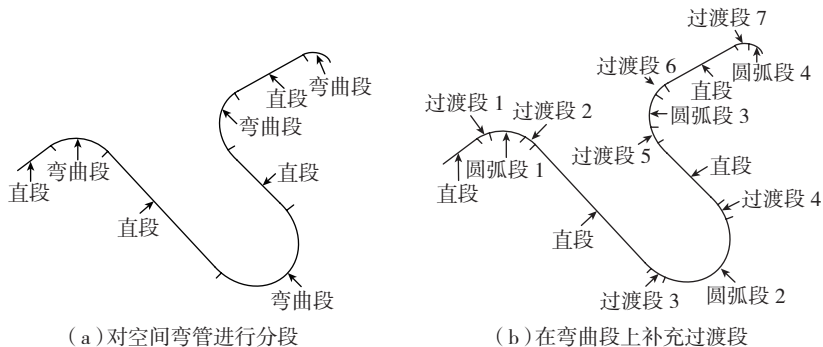


图14 弯曲成形工艺分析

Fig.14 Bending process analysis

$U_Y = u \sin \phi$ 。

根据直段的长度、圆弧弯曲半径、弯曲角度、偏转方向等尺寸参数推导出 $U_X、U_Y、U_Z$ 与 t 的关系,进行实际弯曲过程。针对如图12(b)中所示的空间弯管,首先提取出该弯管的轴线,并对其按照直段和圆弧的标准进行划分。图14(a)为对空间弯管划分后的示意图。其次,在直段与圆弧段之间补充过渡段,如图14(b)所示。然后,根据每一直段的长度、圆弧弯曲半径、弯曲角度、偏转方向等尺寸参数推导出 $U_X、U_Y、U_Z$ 与 t 的关系,进行实际弯曲过程。

图15为针对S形环控系统弯管的模拟结果。

如图16所示,为针对液压系统用空间弯管的模拟结果。

如图17所示,为南京航空航天大学与南京合信智能装备有限公司联合自主开发的三维自由弯曲成形系统。

三维自由弯曲成形技术在航空制造工程领域潜在应用

在航空制造工程领域,空心复杂构件主要用于飞机发动机压气机部件、飞机的引气管路、液压管路、燃油管路、火箭和导弹的结构件以及用于各类设备间物料流通的管道等。由于飞机重量及空间的限制,一般无大尺寸空心构件,变弯曲半径、轴线为平面或空间曲线的复杂弯管空间构型较为灵活,因此可以有效利用飞机

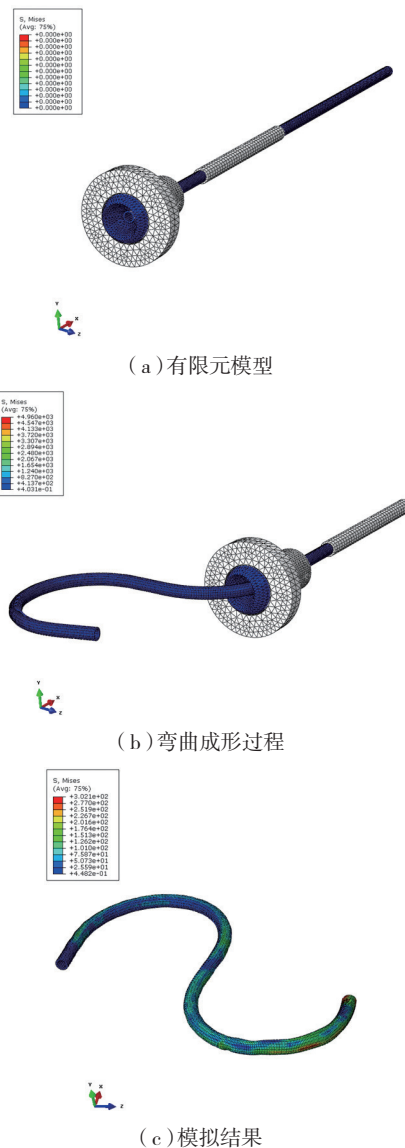


图15 S形弯管有限元模拟

Fig.15 Finite element simulation results of S shaped tube

上的空间,使飞机各部分组件的整体结构更加紧凑。另外,使用以上复杂

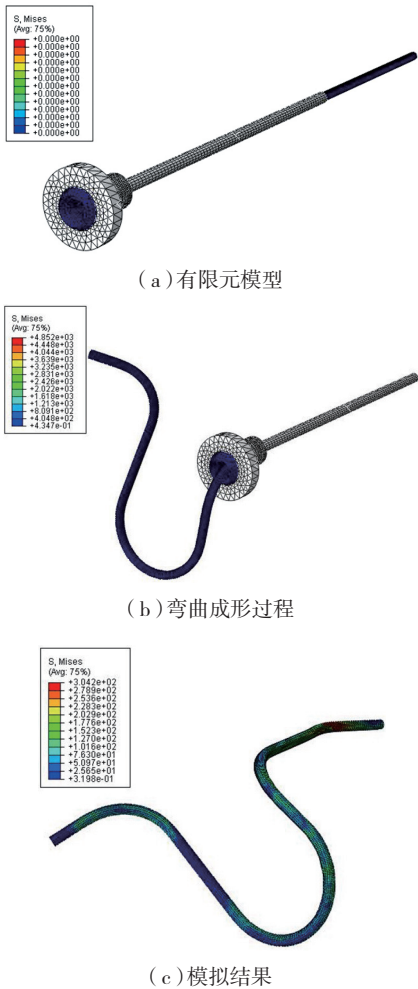


图16 空间弯管有限元模拟

Fig.16 Finite element simulation results of the spatial elbow

弯曲构件可以大大降低管路系统重量,对航空发动机非常重要。

传统的金属构件弯曲技术如压弯、拉弯、绕弯、推弯以及由上述基本工艺衍生出的弯曲工艺等在弯曲、变弯曲半径构件时需要根据弯曲半径不断更换弯曲模具,极大降低了生产效率。另外,采用以上传统弯曲工艺弯曲空间弯时,空间弯构型的复杂程度受到诸多限制,无法实现复杂金属构件的高精度弯曲成形,对于变弯曲半径、轴线为平面或空间曲线的复杂金属构件,以上传统弯曲方法均无法实现整体一次性高精度成形。

相较于传统空心构件弯曲成形技术,三维自由弯曲成形技术在制造航空器用空心复杂弯曲构件方面具



图17 联合自主开发的三维自由弯曲成形系统

Fig.17 Jointly self-developed three-dimensional free forming system

备极大的技术优势,主要表现为:

(1) 无需更换弯曲模即可改变弯曲半径。通过对弯曲模偏心距 u 的改变即可满足空心复杂构件不同弯曲半径条件下的弯曲成形,避免了传统弯曲技术需要更换模具才能实现不同弯曲半径的缺陷,大大提高了弯曲复杂构件时的效率。该技术尤其适合航空航天器复杂弯曲件单件或小批量的实际制造需求,将明显降低平均制造成本。

(2) 可实现空心构件弯曲半径的连续变化。该技术仅需通过调整球面轴承在 X 、 Y 平面内的位置,即可改变管材偏心距 u 和弯曲模转动角度,进而实时连续改变空心构件的弯曲半径。该技术尤其在成形航空发动机所需要的连续变弯曲半径的复杂弯管时,具有极大的技术优势,可以彻底改变航空制造业内复杂空心构件半自动弯曲成形、手工成形甚至难以成形的现状,显著提高具有连续弯几何特征的复杂弯曲构件的几何精确性。

(3) 可实现多种复杂弯曲形式。该技术很容易实现变弯曲半径弯曲、变弯曲角度弯曲、螺旋形弯曲、空间弯曲等多种空心复杂弯曲构件的成形。该技术通过控制工艺参数,无须改变模具或工装即可实现航空器所需的各种异形复杂弯曲件的精确成形,属于典型、高效、新型的航空柔性制造技术。

(4) 成形精度高。通过对弯曲后的空心构件进行三维扫描,并与目标产品的三维几何模型进行尺寸对比,进而修改弯曲工艺参数,可以彻底解决传统弯曲技术所存在的弯曲后回弹问题,实现复杂空心构件高精度成形,为我国目前正在积极开展的航空发动机及燃气轮机所需要的三维复杂弯曲构件快速、精确成形提供重要技术支撑。

(5) 成形质量高。由于弯曲模内腔与管材紧密贴合,因此可以极大限制弯管成形过程中管材的截面畸变;成形过程中,由于在管坯轴向施加推力,改善了弯曲段的应力状态,使管坯中性层内移,从而减少管材外弧侧的壁厚减薄,提高了壁厚均匀性。该技术优势对于航空器承压管路系统所需的弯曲空心构件具有重要意义,可以避免传统弯曲技术形成的弯曲段外侧过度减薄导致的承压能力较差的问题。

尽管空心复杂构件自由弯曲成形技术已经得到了极大的发展,但若若要使该技术在航空制造业得到全面推广,现有的自由弯曲成形技术仍然存在以下问题亟待完善:

(1) 现有自由弯曲成形设备尚缺少热成形模块。当采用自由弯曲成形设备成形航空钛合金、高温合金以及其他难变形金属材料弯管时,通常会由于材料室温塑性差、变形抗力大导致成形后的开裂或明显回弹。

因此,需要研发热变形条件下的三维自由弯曲成形技术,即需要基于现有的自由弯曲成形设备,引入热成形模块,而加热方式、加热温度、高温润滑处理技术、弯曲工艺参数与局部加热温度的匹配等相关问题将是该方向的研究重点。

(2) 缺少完备的航空材料偏心距 u 和弯曲半径 R 关系数据库。尽管 u 和 R 的数量关系可以通过理论计算加以推导,但由于存在管材弯曲后的回弹问题、管材外表面与弯曲模的间隙等影响因素, u 和 R 的实际关系曲线往往与理论计算不符。另外,即使同一外径、同一壁厚的管材,其 u 和 R 的关系曲线也会由于管材的不同而不同。因此能否获得特定管材准确的 u 和 R 关系曲线,将直接决定复杂弯曲管件成形的几何精度。若要使三维自由弯曲成形技术在航空制造业得到广泛推广,建立完备的航空材料 u 和 R 关系数据库也将是未来航空制造工程应用的重点。

(3) 缺少工艺在线纠偏与优化系统。三维自由弯曲成形技术的工艺窗口很窄,而成形工艺参数的解析又基于多种假设。所以,实际自由弯曲成形的零件与理想几何模型将具有一定的差异。若实现在航空制造工程领域的精确制造,对于该技术而言,必须在该系统中建立工艺纠偏软件系统。基于有限元软件的反复迭代计算实现首次纠偏,基于实际弯曲件的逆向、几何轴线比对以及实际成形工艺参数修正实现二次纠偏,是必然要采取的关键技术。

(4) 内置芯棒固定方式与芯棒形式的系统研究。尽管在三维自由弯曲成形技术中,弯曲模能很好地限制管材的截面畸变,但是当偏心距 u 过大时,管材仍然有很大的截面畸变趋势,导致材料流动不畅,弯管表面划伤,成形质量较差。而芯棒的加入则可以减小弯曲部位的截面畸变与壁厚过度减薄,提高弯管的成形质

量。但是,目前对于内置芯棒固定方式与芯棒形式尚未见系统研究,该方面的研究同样也将是自由弯曲成形技术未来研究的热点。

结论

三维自由弯曲成形技术具有无需更换弯曲模即可改变弯曲半径、可实现空心构件弯曲半径的连续变化、可实现多种复杂弯曲形式、成形精度高、成形质量高等优点。随着该技术在我国航空制造领域的快速发展和广泛应用,必将促使我国航空复杂空心构件制造的整体水平得到大幅度提升,使该类零件的产品质量和生产效率大大提高。随着相关基本理论研究的不断深入和完善,以及数值模拟技术、复杂多轴控制系统、针对复杂弯管的逆向扫描系统等相关技术的快速发展,三维自由弯曲成形技术在我国航空制造工程领域必将获得重要应用。

参考文献

- [1] 白雪山,李雪罡,李小强,等. 5B02 铝合金管材数控弯曲成形试验与数值模拟研究[J]. 锻压技术, 2015,40(7):68-72.
- [2] 张尽染,王永军,王俊彪,等. 大直径薄壁导管弯曲回弹解析计算[J]. 航空制造技术, 2009(19):91-95.
- [3] HENG LI, SHI K P, HE Y. 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.
- [4] ZHANG X L, YANG H, HENG L I, et al. Warm bending mechanism of extrados and intrados of large diameter thin-walled CP-Ti tubes[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014,24(10):3257-3264.
- [5] 杨润强,王永军,刘天骄,等. 飞机球面框型材拉弯回弹有限元模拟技术[J]. 工

具技术, 2014,48(7):29-33.

YANG Runqiang, WANG Yongjun, LIU Tianjiao, et al. Elastic springback finite element simulation Technology of aircraft spherical frame profile[J]. Tool Technology, 2014,48(7):29-33.

[6] 周养萍, 亓江文. 飞机 Z 形框滚弯加工数值模拟与分析[J]. 塑性工程学报, 2010,17(5):27-31.

ZHOU Yangping, QI Jiangwen. Numerical simulation and analysis of aircraft Z shape frame roll bending process[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2010,17(5):27-31.

[7] 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 Zhihua, CHEN Minghe, XIE Lansheng. Variable curvature roll bending process of 2099 aluminum lithium alloy profile[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2016, 23(3):16-21.

[8] 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(10):45-50.

ZHANG Shen, WU Jianjun, WANG Qiang, et al. Research on springback of metal tube bending forming[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014(10):45-50.

[9] XIE W C, TENG B G, YUAN S J. Deformation analysis of hydro-bending of bi-layered metal tubes[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015,79(1):211-219.

[10] GU R J, YANG H, MEI Z, et al. Springback of thin-walled tube NC precision bending and its numerical simulation[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2006,16(S1):631-638.

[11] 熊威, 甘忠. 空间弯管仿真与回弹补偿[J]. 中国机械工程, 2013,24(23):3249-3254.

XIONG Wei, GAN Zhong. Simulation and springback compensation of space bend pipe[J]. China Mechanical Engineering, 2013,24(23):3249-3254.

[12] 周养萍. 飞机 Z 形型材滚弯回弹实验与研究[J]. 锻压装备与制造技术, 2012(1):76-79.

ZHOU Yangping. Experiment and research on roll bending springback of aircraft Z shaped section[J]. China Metal Forming Equipment & Manufacturing Technology, 2012(1):76-79.

[13] 陈鹏, 薛红前, 王杰, 等. Z 型材变曲率数控滚弯等圆弧逼近算法与实现[J]. 材料科学与工艺, 2014, 22(1):68-73.

CHEN Peng, XUE Hongqian, WANG Jie, et al. Algorithm and realization of Z profile variable curvature numerical control roll

bending[J]. *Materials Science and Technology*, 2014,22(1):68-73.

[14] NGUYEN D T, NGUYEN D T, KIM Y S. Improving formability of tube bending for a copper material using finite element simulation[J]. *Journal of Mechanical Science & Technology*, 2015,29(10):4205-4211.

[15] 贾美慧, 王成林, 孙卫华. 基于神经网络和粒子群算法的管材弯曲工艺参数优化[J]. *制造业自动化*, 2014(24):109-113.

JIA Meihui, WANG Chenglin, SUN Weihua. Optimization of pipe bending process parameters based on neural network and particle swarm optimization algorithm[J]. *Manufacturing Automation*, 2014(24):109-113.

[16] LI H, YANG H, TIAN Y L, et al. Geometry-dependent springback behaviors of thin-walled tube upon cold bending[J]. *Science China Technological Sciences*, 2012,55(12):3469-3482.

[17] MURATA M, AOKI Y. Analysis of circular tube bending by MOS bending method[J]. *Advanced Technology of Plasticity*, 1996,1:505-508.

[18] MURATA M, KUBOKI k. CNC tube forming method for manufacturing flexibly and 3-dimensionally bent tubes[M]//60 Excellent Inventions in Metal Forming. New York: Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2015:363-368.

[19] GOTO H, ICHIRYU K, SAITO H. Applications with a new 6-DOF bending machine

in tube forming processes[C]// Proceedings of the JFPS International Symposium on Fluid Power. Tokyo, 2008:183-188.

[20] GANTNER P, BAUER H, GANTNER P, et al. FEA-simulation of bending processes with LS-DYNA[C]// Proceedings of 8th International LS-DYNA Users Conference. Dearborn, Michigan, 2004.

[21] 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.

[22] Etaitech. Germany J. NEU free bending machine [EB/OL]. [2014-09-08]. http://www.etaitech.com/list/?122_1.html.

[23] KAWASUMI S, TAKEDA Y, MATSUURA D. Precise pipe-bending by 3-RPSR parallel mechanism considering springback and clearances at dies[J]. *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, 2014,80(820):343.

[24] 弗莱米希, 基宾, 齐斯维勒, 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: CN 101146629 A[P]. 2008-03-19.

FRYMI T, KIBBEN M, ZISSWILLER J, et al. Device for longitudinal profiles, in particular

for free forming and bending of pipes, and device for free forming bending and drawing of longitudinal profiles, in particular of pipes: CN 101146629 A[P]. 2008-03-19.

[25] TAKEDA Y, INADA S, KAWASUMI S, et al. Kinematic design of 3-RPSR parallel mechanism for movable-die drive mechanism of pipe bender[J]. *Rom. J. Tech. Sci.-Appl. Mechanics*, 2013,58:49-74.

[26] HOFFMANN M, LEISCHNIG S, NAUMANN C, et al. HexaBend-freiformbiegen auf einer parallel kinematischen biegemaschine[M]. *Fraunhofer: Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik*, 2013:10-19.

[27] 曾元松. 航空钣金成形技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 2014.

ZENG Yuansong. Aviation sheet metal forming technology[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2014.

[28] LI P F, WANG L Y, LI M Z. Flexible-bending of profiles and tubes of continuous varying radii[J/OL]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. [2016-10-21]. <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00170-016-8885-9>.

[29] LI P F, WANG L Y, LI M Z. Flexible-bending of profiles with asymmetric cross-section and elimination of side bending defect[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 87(9):2853-2859.

State-of-the-Arts in 3D Free Bending Technology and the Future Application in Aviation Manufacture

GUO Xunzhong¹, MA Yannan¹, XU Yong², ZHOU Shujun³, ZHANG Shihong², TAO Jie¹

(1. Institute of Advanced Materials and Forming Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211100, China;

2. Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;

3. Nanjing Hecin Intelligent Equipment Co., Ltd., Nanjing 210046, China)

[ABSTRACT] Three dimensional free form bending technology was recognized as an important technical innovation in the field of plastic forming. 3D free bending system of complex components can realize high precision and non-die forming of pipe, section bar and wire rod under different bending radii, which has formed a huge challenge to the traditional bending technology of metal components. This article systematically introduces the basic principle of free form bending technology, the technical advantages of three-axis, five-axis and six-axis free bending system, key process parameters and forming defects, research progresses of related technology and equipment and the application prospect of this technology in the manufacture field of hollow complex bending component is given.

Keywords: 3D free bending technology; Flexible forming; Hollow complex bending component; Aviation manufacturing (责编 李丹)