

引文格式: 郭训忠, 杨秋成, 程诚, 等. 型材构件六轴自由弯曲成形机理及成形质量控制研究[J]. 航空制造技术, 2022, 65(10): 24-32.

GUO Xunzhong, YANG Qiucheng, CHENG Cheng, et al. Research on six-axis free bending forming mechanism and forming quality control of profile components[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(10): 24-32.

# 型材构件六轴自由弯曲成形机理及成形质量控制研究\*

郭训忠<sup>1</sup>, 杨秋成<sup>1</sup>, 程 诚<sup>1</sup>, 刘春梅<sup>1</sup>, 徐 勇<sup>2</sup>, 白雪山<sup>3</sup>, 李光俊<sup>4</sup>

(1. 南京航空航天大学, 南京 210016;

2. 中国科学院金属研究所, 沈阳 110016;

3. 航空工业沈阳飞机工业(集团)有限公司, 沈阳 110850;

4. 航空工业成都飞机工业(集团)有限责任公司, 成都 610092)

[摘要] 六轴自由弯曲成形技术作为复杂弯曲构件整体成形领域中一项高自由度的制造技术,能够实现具有复杂轴线的弯管构件及具有截面扭转特征的型材弯曲构件的整体精确成形。从六轴自由弯曲成形技术的基本原理入手,对关键装备结构的设计、弯曲模运动轨迹的算法解析等进行了介绍。采用有限元模拟与试验相结合的方法研究了方管成形时壁厚分布的特点,并分析了截面扭转对成形构件的弯曲半径和弯曲方向的影响规律。

关键词: 六轴自由弯曲成形; 截面扭转; 型材弯曲; 运动轨迹; 有限元模拟

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2022.10.024



郭训忠

教授,工学博士,研究方向为柔性成形技术及装备、虚拟成形技术及系统、成形机器人、三维自由弯曲成形技术及装备等。

型材弯曲件作为重要的承力结构件在航空航天、高铁、汽车、建筑等工业领域被广泛应用<sup>[1]</sup>。特别在航空和汽车领域,金属型材极大地减轻了飞机的重量,增强了飞机零部件的抗应力腐蚀性能和抗疲劳性能,同时型材弯曲构件作为新能源汽车的承力部分,有利于降低能耗,节约资源<sup>[2-3]</sup>。目前,该类构件在国内多采用拉弯、压弯、滚弯及内高压等成形方法。由于内高压成形方法存在开模、试模、修模等过程,导致生产效率较低,且成本高昂<sup>[4]</sup>。传统弯曲工艺一方面只能成形出空间几何构型较简单的构件,难以满足复杂轴线构件的成形需求<sup>[5]</sup>;另一方面,构件在成形过程中容易产生截面扁化等缺陷,成形质量难以控制<sup>[6-8]</sup>。因此,目前航空工

业成形复杂型材弯曲构件时,大多基于手工矫形法,耗费了极大的人力和物力<sup>[9]</sup>。

三维自由弯曲成形技术在复杂弯曲构件的整体成形方面具有突出优势<sup>[10-11]</sup>。但是作为目前国内研究重点的三轴自由弯曲成形技术只适用于普通圆管构件和一些简单型材构件成形的需求<sup>[12-15]</sup>。对于复杂的型材弯曲构件,在成形时除了需要考虑构件轴线形状的变化外,还需要关注型材截面位置是否在弯曲过程发生扭转<sup>[16]</sup>。因此由于自由度的限制,被动式的三轴自由弯曲技术则存在一定的局限性。德国 J. Neu (诺意)公司在日本学者 Murata 等提出五轴自由弯曲的概念上,针对型材弯扭构件于 2002 年最早研发出了六轴自由

\* 基金项目: 国家自然科学基金(U1937206, 52175328, 52105362)。

弯曲成形装备并实现商业化<sup>[17-18]</sup>。六轴自由弯曲装备的弯曲模因为可实现绕 $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 轴的转动,能够实现型材弯曲过程中截面的主动扭转,显著提高了自由弯曲工艺的适用范围和成形能力,在航空航天和汽车制造领域具有广阔的前景<sup>[19]</sup>。德国 Tekkaya 院士研究小组<sup>[20-21]</sup>在2010年针对汽车用高强钢型材弯曲构件,根据六轴自由弯曲的原理,提出了一种新的扭矩叠加空间弯曲工艺及算法,并对成形时的受力状态进行了研究,通过采用闭环控制的方法实现了对回弹的动态调控。德国科学家 Staupendahl 等<sup>[22]</sup>揭示了六轴自由弯曲成形过程中各种应力对弯矩和回弹的影响规律。目前关于六轴自由弯曲成形技术的相关研究工作主要集中于德国、日本,国内方面尚未涉及。

本文从六轴自由弯曲成形技术的原理入手,对关键装备的结构设计、成形轨迹的算法解析等进行了介绍。采用有限元模拟与成形试验结合的方法研究了方管无芯六轴自由弯曲成形时壁厚分布的特点,并分析了截面扭转对成形构件的弯曲半径和弯曲方向的影响规律。

## 1 六轴自由弯曲成形原理

六轴自由弯曲成形系统主要由主动式弯曲模、导向机构、压紧机构及推进机构等4部分组成,原理如图1所示。坯料在推进机构的连续推动下依次通过导向机构和弯曲模,当坯料通过弯曲模时,弯曲模在空间内沿特定角度做偏转和扭转复合运动。弯曲模的中心点与导向机构出口处中心点在垂直方向的距离为偏心距 $U$ ,在水平方向上的距离为构件弯扭变形区长度 $A$ 。由于型材六轴弯曲设备通常为偏心结构,成形过程中 $A$ 值会随转动角度的改变发生变化, $U$ 和 $A$ 共同决定了弯曲半径大小。成形时坯料被轴向的作用力 $P_L$ 从导向机构中推入弯曲模中,同时弯曲模对

坯料施加垂直于进给方向的力 $P_u$ 和绕轴线方向的扭转力 $\tau$ 。在 $\tau$ 的作用下产生扭矩 $T$ ,使坯料发生扭转, $T$ 由控制扭转轴的电机参数和成形坯料的材料属性及截面形状共同决定。 $P_u$ 和 $P_L$ 的共同作用下产生弯矩 $M$ ,使坯料产生弯曲变形。

$$M = P_u \times A + P_L \times U \quad (1)$$

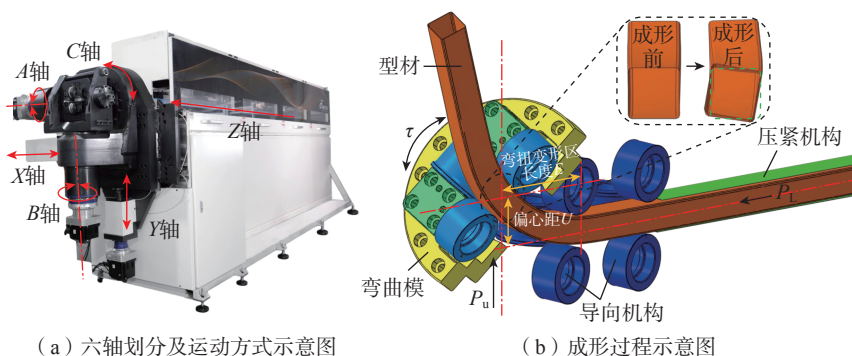
与三轴自由弯曲结构相比,六轴结构弯曲模不再随球面轴承被动运动,同时弯曲模的转角也不受弯曲模与导向机构之间连接结构的限制。通过在机头位置新增的 $A$ 轴、 $B$ 轴使构件弯曲成形时可以随轴线形状主动调整弯曲模绕 $X$ 轴和 $Y$ 轴的转动角度,实现弯曲模与构件轴线在成形区始终保持垂直,进而减小构件弯曲成形受到的阻力,提高成形极限及表面质量,减小截面畸变率。位于机头位置后侧的 $C$ 轴可以在弯曲时带动整个机头绕 $Z$ 轴转动,使构件的截面

产生主动扭转,满足具有截面扭转特征的复杂型材弯曲构件的成形要求。

## 2 六轴自由弯曲成形装备研制

### 2.1 六轴自由弯曲成形装备总体介绍

图1(a)所示为南京航空航天大学柔性成形技术团队研发的国内首台六轴自由弯曲成形工程样机。该装备机身总长6.5m、高2.3m、宽1.8m,轴向电机最大推力50t,坯料最大推进速度200mm/s,最大可加工线长度4m、外接圆直径60mm的圆管或型材,最小弯曲半径 $\leq 2.4D$ 。该装备包含由数控系统控制的3个由电机、减速机、丝杠机构驱动的直线轴以及3个由电机、减速机驱动的转动轴。同时为降低构件成形时的截面畸变,提高成形极限,该装备还配备有芯棒,芯棒的送入和拔出通过位于装备尾部的芯轴独立控制,装备各轴的参数如表1所示。坯料安装可采



(a) 六轴划分及运动方式示意图

(b) 成形过程示意图

图1 六轴自由弯曲成形原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of six-axis free bending forming principle

表1 六轴自由弯曲工程样机各轴参数

Table 1 Parameters of each axis of the six-axis free bending engineering prototype

轴名称	轴类型	电机功率/kW	最高速度	重复精度	行程
$X$ 轴	水平运动轴	2	50mm/s	$\pm 0.02$ mm	$\pm 52.5$ mm
$Y$ 轴	垂直运动轴	2	50mm/s	$\pm 0.02$ mm	$\pm 52.5$ mm
$Z$ 轴	推进运动轴	11	200mm/s	$\pm 0.025$ mm	4000mm
$A$ 轴	绕 $X$ 轴旋转轴	2	19r/min	$\pm 0.2^\circ$	$\pm 49^\circ$
$B$ 轴	绕 $Y$ 轴旋转轴	2	19r/min	$\pm 0.2^\circ$	$-19^\circ \sim 30^\circ$
$C$ 轴	绕 $Z$ 轴旋转轴	2	18r/min	$\pm 0.2^\circ$	$\pm 180^\circ$
$V$ 轴	芯轴运动轴	2	10mm/s	$\pm 0.02$ mm	200mm

用前插式装入或者将后侧夹紧部分打开直接放入两种模式。

该装备程序输入和控制通过分离式的操作柜,可独立移动以方便调整其位置。操作面板触摸屏显示标准操作模式为 Windows 运行下的二次开发界面,有工作界面和调试界面两个主要界面,如图 2 所示。工作界面下可选择模型输入和参数输入两种方式,包含模型三维显示窗口和构件几何尺寸显示窗,通过内部嵌入的工艺解析算法,可将读取的构件几何形状参数自动转变成各轴的运动参数。调试界面包括操作系统编辑窗口、各轴基本参数调整窗口等,可以切换装备采用单轴控制或多轴联动两种模式,分别适用于样件调形和生产加工。

## 2.2 型材弯曲模具结构设计

异形截面形状的型材由于截面多具有棱角、凹槽、翅片等特征,坯料在自由弯曲时与模具间的磨损比较严重,极易产生局部堆积、截面严重畸变及表面刮伤等缺陷。而圆管自由弯曲模具设计中可以通过在弯曲模和导向机构上镶嵌陶瓷内衬来减少管坯受到的摩擦力,并提高模具的耐磨性。但是异形截面陶瓷内衬的型面研磨与抛光成本高昂、成品率低,因此为了减小型材构件成形时受到的摩擦和提高模具使用寿命,摒弃了传统整体式弯曲模和导向机构的结构,设计了基于型材截面形状的主动式多辊结构自由弯曲成形模具,将构件成形时受到的滑动摩擦力转变为滚动摩擦力,提高了材料的流动性,如图 3 所示。该种模具结构的主体是 4 组辊轮,分别位于待成形型材的上下左右 4 个方向。这种辊轮模具的排布不仅在平面弯曲过程中能够对型材起到很好的导向作用,而且因为增加了左右两侧的辊轮,使坯料空间弯曲甚至截面发生扭转时,也能够有效促进坯料扭转内侧和外侧材料的流动。

弯曲模和导向机构的辊轮设计

除了需要满足辊轮组合后能对型材起到包覆作用外,还必须要考虑到坯料在通过辊轮时易产生的一些缺陷,如坯料发生侧弯、卡死及压痕等。图 4 所示为由于上下和左右辊轮之间接触间隙位置设置不当,造成构件在弯曲扭转时材料弯曲内侧受挤压往辊轮间间隙流动形成的条状压痕缺陷。因此相邻辊轮之间接触位置的选择应充分考虑型材构件轴线的分布情况,避免将间隙位置设置在弯曲半径较小的方向,防止缺陷的产生。图 5 给出了几种不同截面的型材构件多辊结构弯曲模设计示意图和实物图。

导向机构的结构设计与弯曲模类似,采用 4 组辊轮包覆型材,保证了型材在进给到弯曲模之前在 XY 平面内材料不会发生堆积,同时为了在 Z 方向上减少型材进给的阻力和防止型材在导向区内发生失稳,需要在第 1 对辊轮的后面额外增加第 2 对辊轮,如图 6 (a) 和 (b) 所示。对于压紧机构来说,只在坯料推进过程中起到防止后端翘曲失稳的作用,因此只需要根据型材截面形状设计上下两瓣式的分模将坯料完全包裹住即可。同时为了防止压紧后对坯料表面造成损伤,压紧机构选用聚丙烯材料进行制造,如图 6 (c) 所示。



图 2 六轴自由弯曲程序界面

Fig.2 Six-axis free bending program interface

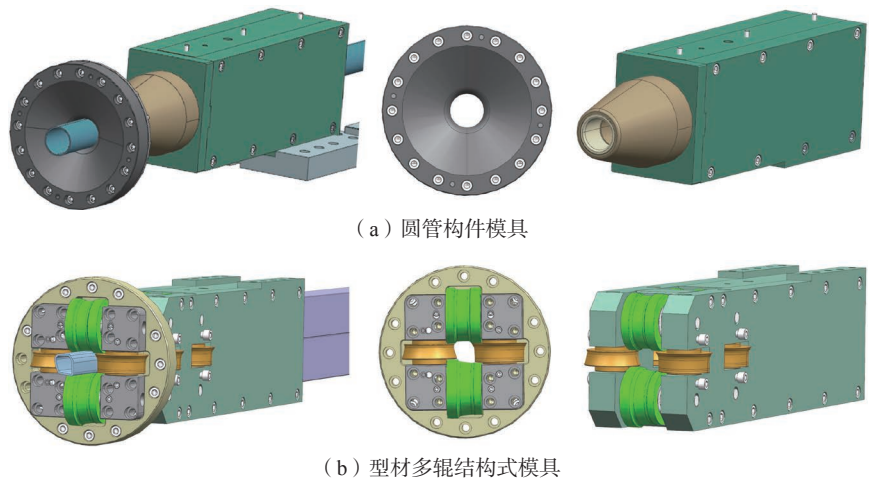
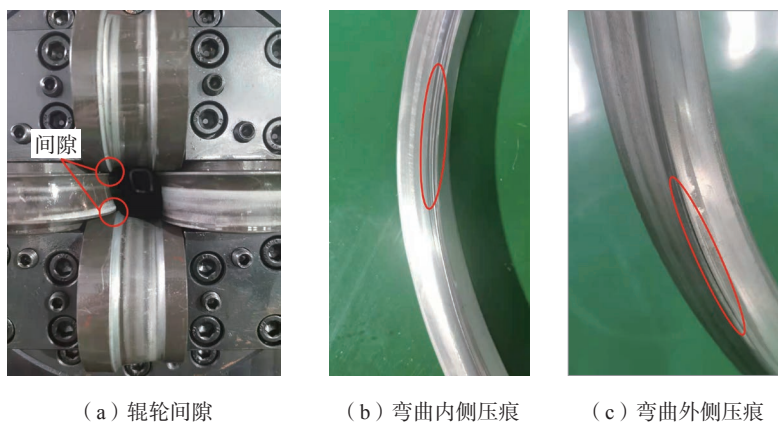


图 3 六轴自由弯曲成形模具示意图

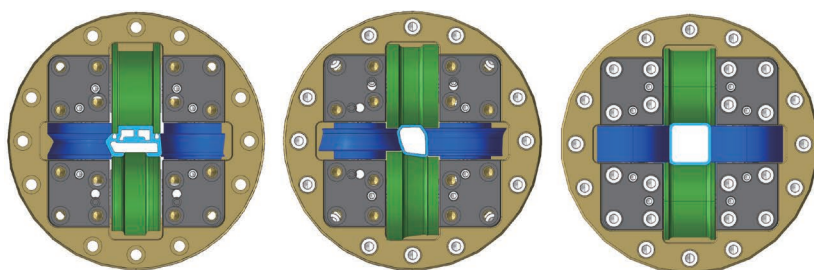
Fig.3 Diagram of six-axis free bending forming mold



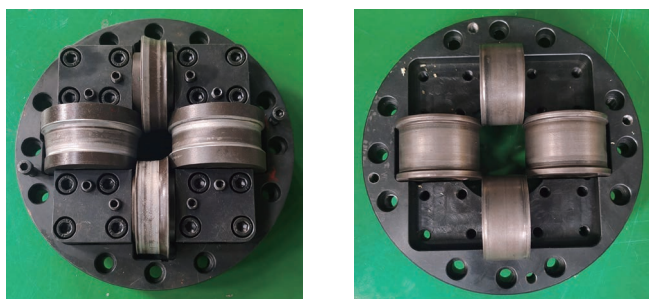
(a) 辊轮间隙 (b) 弯曲内侧压痕 (c) 弯曲外侧压痕

图4 多辊模具成形时的压痕缺陷

Fig.4 Indentation defects during multi-roll mold forming



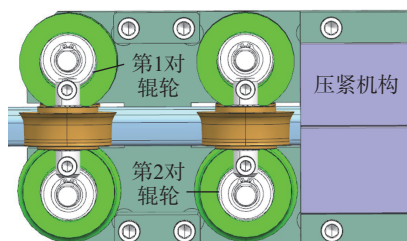
(a) 3种不同截面型材成形模具数模



(b) 非对称截面型材弯曲模 (c) 方管实际弯曲模

图5 不同截面型材多辊模具设计及加工

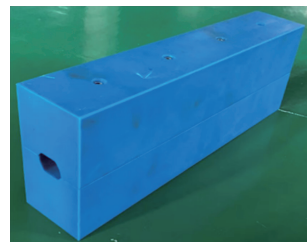
Fig.5 Design and processing of multi-roll molds for different cross-section profiles



(a) 辊子分布示意图



(b) 导向机构



(c) 压紧机构

图6 导向和压紧结构示意图

Fig.6 Schematic diagram of guiding and pressing structure

### 3 六轴自由弯曲成形模具运动参数解析

#### 3.1 偏心模结构成形工艺参数计算

由于型材成形时多采用多辊结构的弯曲模与导向机构,若采用传统弯曲模中心与模具旋转中心重合的结构,在成形相对弯曲半径较小的构件时,由于机头转动角度过大,弯曲模与导向机构会产生干涉。解决此问题的方法通常是增大弯曲模与导向机构间的距离,即增大  $E$  值,但根据自由弯曲成形原理,随着  $E$  的增加,构件弯曲的最小相对弯曲半径会随之增大,降低了构件的成形极限。因此,为了避免干涉并提高弯曲构件的成形极限和成形精度,设计出弯曲模中心偏离模具旋转中心的“偏心模”结构,如图7所示。使弯曲模在绕  $X$  轴转动的过程中,弯曲模中心能够同时实现  $Y$  方向偏心距的增加和  $Z$  方向上  $E$  值的动态减小,从而减小了弯曲模的偏转幅度,提高了成形极限。

对于偏心模结构模具运动的工艺解析,首先需要获得构件弯曲半径  $R$  与成形所需偏心距的  $U$  的对应关系;其次需要分别计算出偏心值  $F$  随转动角度  $\theta$  带来的  $Y$  方向上额外偏距的大小以及模具在  $Y$  轴方向上的实际位移  $y$ 。

$$U = R - \sqrt{R^2 - E^2} \quad (2)$$

$$\theta = \arcsin\left(\frac{E - F + F \cos \theta}{R}\right) \quad (3)$$

$$y = U - F \sin \theta \quad (4)$$

### 3.2 六轴弯曲模转动角解析

由于六轴自由弯曲装备引入了3个新的自由度,在计算弯曲模的运动参数时,还需额外计算绕X、Y、Z轴的转动角的大小。构件各个弯曲段在装备全局坐标系中的位置及成形时弯曲模的空间位姿,可以通过弯曲方向 $\gamma$ 和弯曲模整体的转动角度 $\omega$ 来表示,如图8所示。

对于绕X轴的转动角 $\omega_x$ 和绕Y轴的转动角 $\omega_y$ 可以通过变量 $\omega$ 和弯曲方向角 $\gamma$ 来计算。首先分别构建弯曲模的旋转矩阵 $M$ 及表示弯曲方向的矩阵 $M_{(\gamma)}$ ,然后通过弯曲平面的法向

量 $\vec{n}_i$ 分别在YZ和XZ平面上投影得到的法向量 $\vec{n}_i$ YZ和 $\vec{n}_i$ XZ来确定绕X轴和Y轴的旋转角度 $\omega_x$ 和 $\omega_y$ ,同时定义绕转动轴做逆时针转动为正方向。

$$M = \begin{pmatrix} \cos \omega + (1 - \cos \omega) \cdot a_1^2 & (1 - \cos \omega) \cdot a_1 a_2 + a_3 \sin \omega & (1 - \cos \omega) \cdot a_1 a_3 - a_2 \sin \omega \\ (1 - \cos \omega) \cdot a_1 a_2 + a_3 \sin \omega & \cos \omega + (1 - \cos \omega) \cdot a_2^2 & (1 - \cos \omega) \cdot a_2 a_3 + a_1 \sin \omega \\ (1 - \cos \omega) \cdot a_1 a_3 - a_2 \sin \omega & (1 - \cos \omega) \cdot a_2 a_3 + a_1 \sin \omega & \cos \omega + (1 - \cos \omega) \cdot a_3^2 \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$M_{(\gamma)} = \begin{pmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$\vec{n}_i = \begin{pmatrix} -\cos \gamma \sin \omega \\ -\sin \gamma \sin \omega \\ \cos \omega \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{cases} \vec{n}_i YZ = \begin{pmatrix} 0 \\ -\sin \gamma \sin \omega \\ \cos \omega \end{pmatrix} \\ \vec{n}_i XZ = \begin{pmatrix} -\cos \gamma \sin \omega \\ 0 \\ \cos \omega \end{pmatrix} \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} \omega_x = \cos^{-1} \frac{\cos \omega}{\sqrt{(\sin \gamma)^2 (\sin \omega)^2 + (\cos \omega)^2}} \\ \omega_y = \cos^{-1} \frac{\cos \omega}{\sqrt{(\cos \gamma)^2 (\sin \omega)^2 + (\cos \omega)^2}} \end{cases} \quad (9)$$

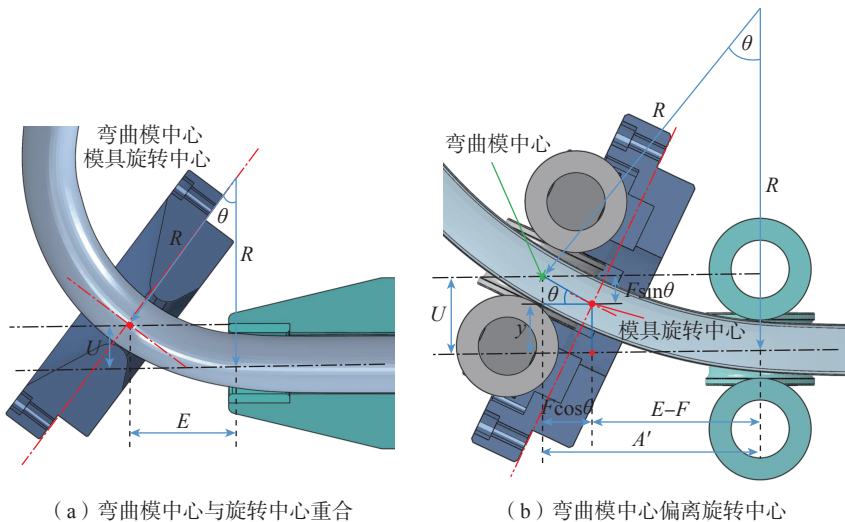


图7 六轴自由弯曲模具运动解析示意图

Fig.7 Schematic diagram of six-axis free bending mold motion analysis

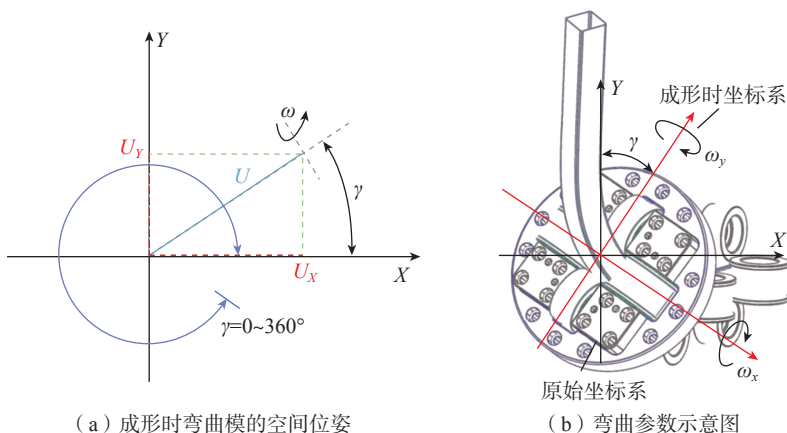


图8 六轴自由弯曲成形参数示意图

Fig.8 Schematic diagram of six-axis free bending forming parameters

## 4 304 不锈钢方管六轴自由弯曲成形模拟与试验

### 4.1 成形过程有限元模型的建立

基于六轴自由弯曲成形原理,在ABAQUS/Explicit中构建了六轴自由弯曲成形的有限元模型,其中方管坯定义为变形体,为减少计算时间,采用壳单元建模,网格类型为S4R,厚度积分点为5。弯曲模、导向机构和压紧机构设置为刚体,网格类型为C3D10M。模拟过程中的接触类型为罚接触和硬接触,其中各辊子与方管的摩擦系数设置为0.02,其余各部件的摩擦系数定为0.1,如图9所示。

本文以截面为40mm×40mm的304不锈钢方管为研究对象,其材料性能如图10所示。成形时弯曲模和坯料的载荷条件参数根据工艺解析结果进行设置,管坯沿Z方向上的推进速度设置为50mm/s,弯曲模Y方向偏距38.49mm,A轴转动角度25.34°,C轴转动角度为顺时针转0.12°。

### 4.2 方管壁厚对成形质量的影响

根据工艺解析结果,本文模拟了壁厚分别为2mm、3mm、4mm和5mm的304不锈钢方管的六轴自由弯曲

成形结果,壁厚分布云图如图 11 所示。可以看出,不同壁厚的方管成形后壁厚最大增厚处均位于弯曲内侧与扭转外表面相交的棱边上,而最大减薄处则位于弯曲外侧与扭转内表面相交的棱边上。且当壁厚为 2mm

时,成形后构件弯曲内侧会出现明显的起皱现象,此时最大壁厚增厚率和减薄率分别为 13.35% 和 2.6%。

为进一步探究 304 不锈钢方管此种工艺参数下无芯自由弯曲时临界起皱的壁厚,分别模拟了壁厚

2.2mm 和 2.5mm 方管的成形结果,如图 12 所示。其中壁厚 2.5mm 的方管成形时弯曲内侧会出现凹陷,但无起皱迹象;壁厚 2.2mm 时除了出现明显的凹陷外,在过渡段局部位置的弯曲内侧已产生波纹度,出现起皱趋势。选取壁厚 2.2mm 的 304 不锈钢方管进行试验验证,发现在靠近过渡段位置出现了局部鼓包,说明壁厚 2.2mm 为此种工艺参数下的临界起皱壁厚,如图 12 (c) 所示。对于无芯六轴自由弯曲,此种缺陷可以通过优化过渡段的推进速度或适当改变弯曲模转动角度及偏心距的匹配关系来进一步消除。

#### 4.3 扭转角度对成形质量的影响

对于有截面扭转特征的复杂型材弯曲构件,在成形时为保证尺寸精度,还需要考虑扭转角度是否会对构件的弯曲半径以及弯曲方向造成影响。本文模拟了扭转角度分别为 0°、5°、10°、15° 及 20° 时 304 不锈钢方管的成形结果,应力分布云图如图 13 所示。因为构件在成形时受到的弯矩相同,但是扭矩不同,使偏心距不变的条件下,随着 C 轴扭转角的提高,构件成形时受到的应力越大。

在不同扭转角度下,方管成形后的轴线形状如图 14 所示。从图 14 (a) 可以看出,随着扭转角度的增大,构件轴线在 YZ 平面内的投影基本重

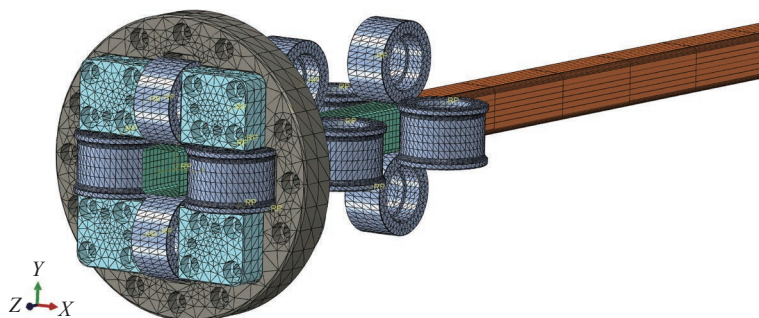


图 9 六轴自由弯曲有限元模型

Fig.9 Six-axis free bending finite element model

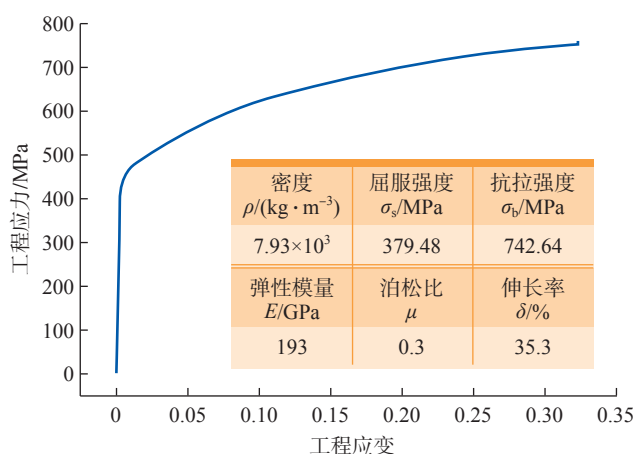


图 10 304 不锈钢力学性能参数

Fig.10 Mechanical performance parameters of 304 stainless steel

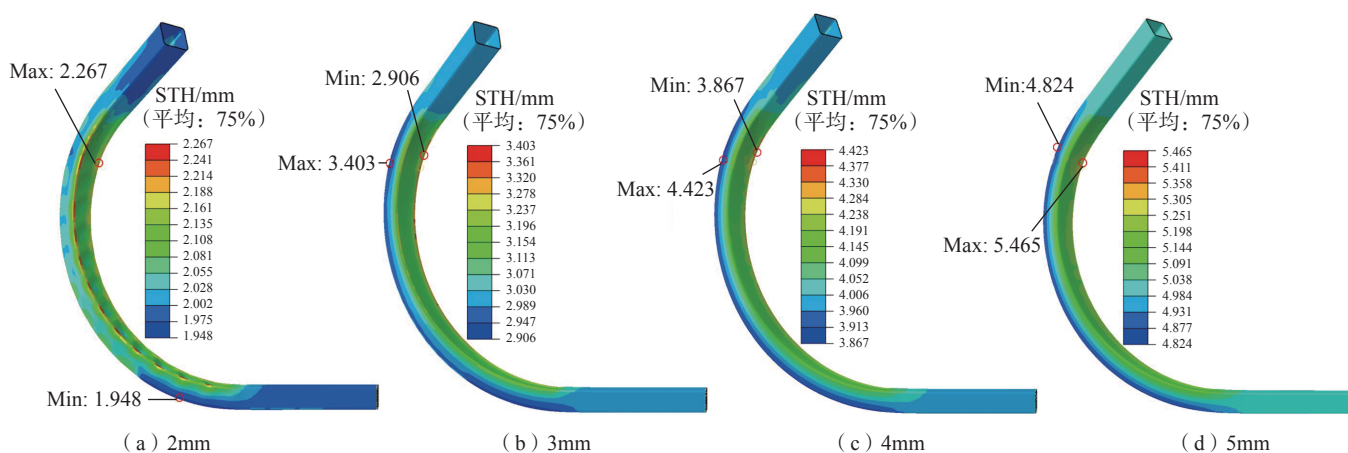


图 11 不同壁厚方管自由弯曲成形壁厚分布云图

Fig.11 Cloud diagram of wall thickness distribution in free bending forming of square tubes with different wall thicknesses

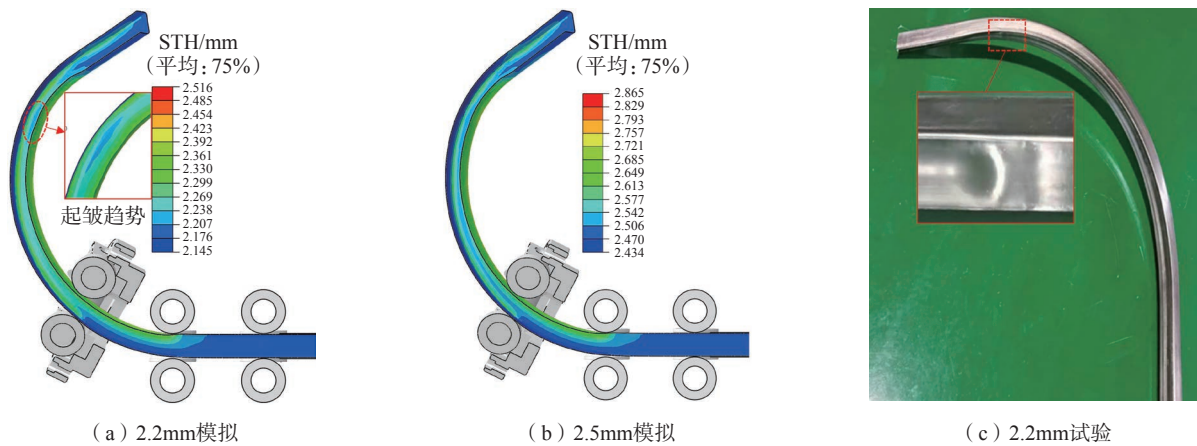


图 12 方管临界起皱壁厚研究

Fig.12 Study on the critical wrinkling wall thickness of a square tube

合,而在  $XY$  平面内的投影逐渐向扭转方向张开。因此,扭转角在方管自由弯曲成形过程中对构件弯曲半径的影响较小,但对构件的轴线形状影响较大,且随绕  $C$  轴扭转角的增大,构件弯曲方向与原来的偏差越大。这是因为六轴设备为偏心模结构,弯曲模绕  $A$  轴和  $B$  轴转动时会使偏心距  $U$  的大小发生改变,并且  $C$  轴位于  $A$  轴和  $B$  轴的后侧,当弯曲模绕  $C$  轴转动时会带动前面的  $A$  轴和  $B$  轴一起转动,使偏心模产生的偏心距的方向与后侧  $X$  轴和  $Y$  轴构成的偏距方向产生了偏差,当  $C$  轴的扭转角越大时,前后偏心距方向的偏转角就越大。同时在自由弯曲过渡段,随着成形过程的开始,偏心距和转动角度逐渐增加,构件的弯曲半径和偏转方向发生改变。到成形段后,由于  $X$ 、 $Y$  轴产生的偏心距和  $A$ 、 $B$  轴产生的转动角都达到设定值,因此构件弯曲半径不再发生改变,但是前后偏距方向之间仍存在偏转角,导致在成形段过程中,随着坯料的持续进给,构件最终的弯曲方向始终以  $C$  轴的扭转角度大小发生改变,类似螺旋轴线的形成过程。

为验证这一解释的准确性,将模拟中成形段的长度增加为一圈半圆周长,并在六轴自由弯曲工程样机上用壁厚为 2.5mm,边长 40mm 的

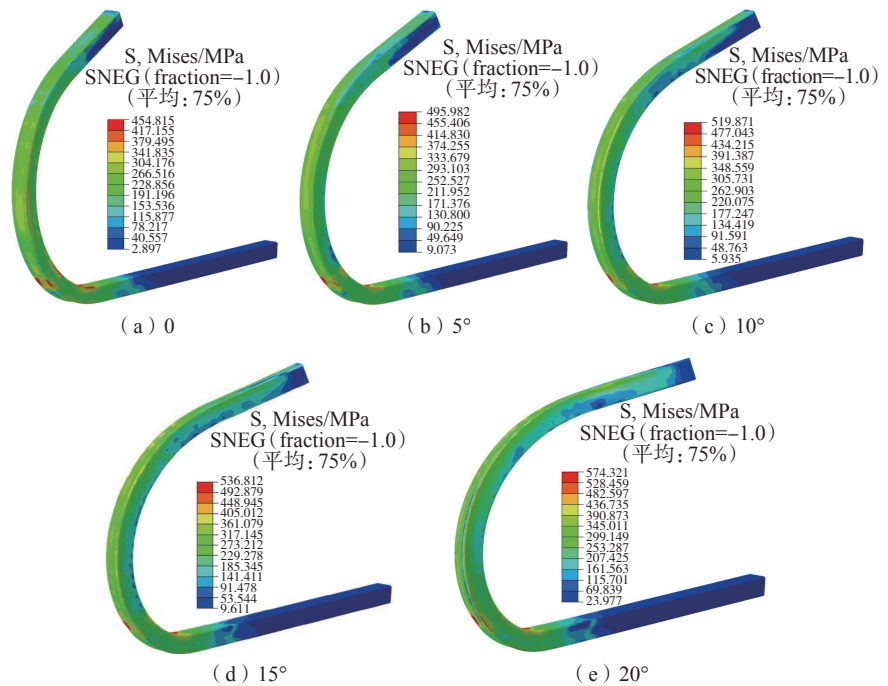


图 13 不同扭转角度下成形应力分布云图

Fig.13 Forming stress distribution cloud diagram under different torsion angles

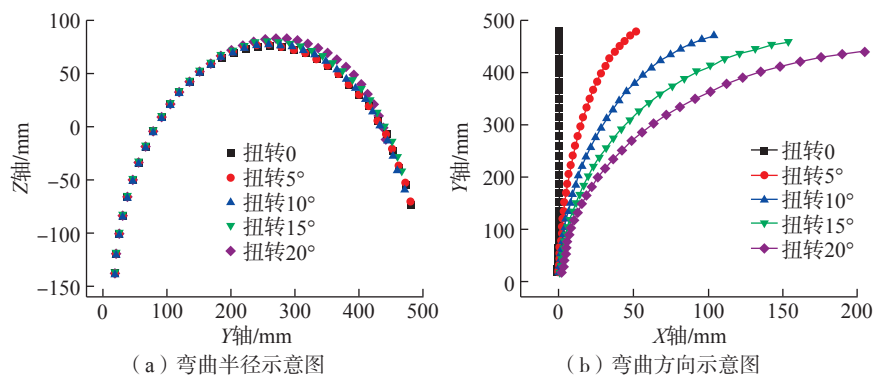


图 14 不同扭转角度下方管六轴自由弯曲成形轴线形状

Fig.14 Shape of the six-axis free bending of square tube under different torsion angles

304 不锈钢方管进行了试验验证,模拟结果和试验结果如图 15 和 16 所示。可以观察到,方管在模拟和试验中均实现了螺旋形构件的成形,并且成形结果中均未出现弯曲内侧起皱、外侧开裂及表面划伤等缺陷。

表 2 给出了 304 不锈钢方管构件设计、模拟及试验的尺寸对比结果,可以看出,实际成形构件与模拟成形构件的螺旋直径与螺距的尺寸都比较接近,证实了有限元模拟的准确性。同时,由于过渡段偏距与转角处于非稳定状态,因此模拟结果和试验结果的过渡段弯曲半径尺寸均与设计尺寸存在一定偏差。

## 5 结论

(1) 方管六轴自由弯曲成形后壁厚最大增厚处位于弯曲内侧与扭转外表面相交的棱边上,而最大减薄处则位于弯曲外侧与扭转内表面相交的棱边上。

(2) 当方管六轴自由弯曲成形时的偏心距不变,随扭转角度的增大,构件弯曲半径的大小无明显变化,但是构件弯曲方向与原来的偏差增大;在成形段时,构件弯曲方向会始终沿扭转角方向继续发生改变,使构件轴线呈现螺旋形。

(3) 基于 304 不锈钢方管的有

限元模拟结果,开展了螺旋轴线方管构件的实际成形试验,成形结果与有限元模拟结果基本吻合,证实了六轴自由弯曲有限元模拟的准确性。

## 参考文献

[1] 高嵩,于长春,梁继才,等. 铝型材多点三维拉压复合弯曲成形工艺[J]. 机械工程学报, 2019, 55(20): 152-159.

GAO Song, YU Changchun, LIANG Jicai, et al. Multi-points 3D stretch-press bending technology for aluminum profile[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(20): 152-159.

[2] 黄世军,陈凌霄,田洪才,等. 型材滚弯回弹影响因素研究[J]. 塑性工程学报, 2017, 24(4): 117-123.

HUANG Shijun, CHEN Lingxiao, TIAN Hongcai, et al. Study on the influential factors of profile roll bending springback[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2017, 24(4): 117-123.

[3] 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 for 2099 Al-Li alloy profile[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2016, 23(3): 16-21.

[4] 吴建军,刘伟萍,何文华,等. 2099 铝锂合金型材热压下陷模具结构优选[J]. 航空制造技术, 2016, 59(13): 43-49.

WU Jianjun, LIU Weipin, HE Wenhua, et al. Tool development for hot joggle forming of 2099 Al-Li alloy profile[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(13): 43-49.

[5] 李小明,杨永真,李东升,等. 型材数控拉弯装备技术研究进展[J]. 锻压技术, 2017, 42(4): 1-7.

LI Xiaoming, YANG Yongzhen, LI Dongsheng, et al. Research progress on profile CNC stretch bending equipment[J]. Forging & Stamping Technology, 2017, 42(4): 1-7.

[6] 高亚南,李彦波,曹大兴,等. 基于绕弯成形工艺的铝型材截面优化研究[J]. 材料科学与工程, 2021, 29(4): 81-86.

GAO Ya'nan, LI Yanbo, CAO Daxing, et al. Research on section optimization of aluminum profiles based on rotary-draw bending process[J]. Materials Science and Technology, 2021, 29(4): 81-86.

[7] 王贺,黄霞,孙莹,等. 铝型材拉弯成形工艺稳健性优化[J]. 塑性工程学报, 2018, 25(3): 65-72.

WANG He, HUANG Xia, SUN Ying, et al. Study on process robust optimization for stretch bending of aluminum profile[J]. Journal of

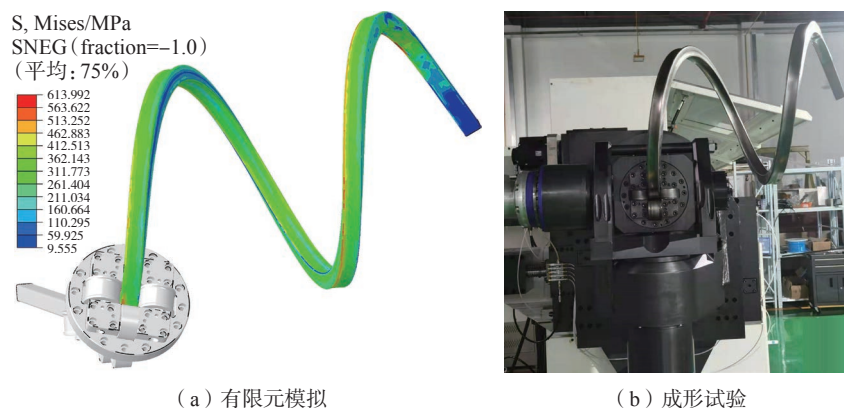


图 15 螺旋方管模拟成形及试验验证

Fig.15 Simulated forming and experimental verification of spiral square tube

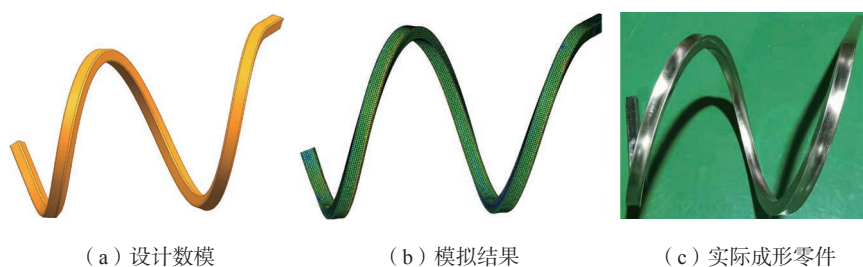


图 16 成形构件尺寸对比

Fig.16 Size comparison of formed parts

表 2 304 不锈钢方管构件设计、模拟及试验对比

Table 2 Comparison of design, simulation and test of 304 stainless steel square pipe components

参数	设计尺寸/mm	模拟尺寸/mm	试验尺寸/mm
过渡段弯曲半径	250	257.82	260.14
螺径	500	502.35	501.28
螺距	510	508.71	513.63

Plasticity Engineering, 2018, 25(3): 65–72.

[8] 梁继业, 邓钢, 方斌. L型截面铝型材拉弯成形截面畸变缺陷控制研究[J]. 锻压技术, 2016, 41(12): 42–45.

LIANG Jiye, DENG Gang, FANG Bin. Section distortion control for L-section aluminum profile part in the stretch-bending process[J]. Forging & Stamping Technology, 2016, 41(12): 42–45.

[9] 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, 47(1): 76–79.

ZHOU Yangping. Experimental research on roll-bending spring back process for aircraft Z structural section[J]. China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology, 2012, 47(1): 76–79.

[10] MURATA M. Effect of die profile and aluminum circular tube thickness with MOS bending[J]. Journal of Japan Institute of Light Metals, 1996, 46(12): 626–631.

[11] GANTNER P, BAUER H, HARRISON D K, et al. Free-bending—A new bending technique in the hydroforming process chain[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 167(2/3): 302–308.

[12] GUO X Z, XIONG H, LI H, et al. Forming characteristics of tube free-bending with

small bending radii based on a new spherical connection[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2018, 133: 72–84.

[13] WU J J, ZHANG Z K, SHANG Q, et al. A method for investigating the springback behavior of 3D tubes[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2017, 131: 191–204.

[14] GUO X, WEI W, XU Y, et al. Wall thickness distribution of Cu–Al bimetallic tube based on free bending process[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2019, 150: 12–19.

[15] 张增坤, 吴建军, 尚琪, 等. 空间管件弯扭组合加载成形及回弹规律研究[J]. 航空制造技术, 2018, 61(16): 26–31.

ZHANG Zengkun, WU Jianjun, SHANG Qi, et al. Investigation to forming and springback of spatial tubes in bending-twisting process[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(16): 26–31.

[16] GANTNER P, HARRISON D K, DE S A, 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.

[17] J. Neu. Neu free bending machine [EB/OL]. [2014-09-08]. <http://www.etaitech.com/>

list/?122\_1.html.

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

[19] 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(23/24): 16–24.

GUO Xunzhong, MA Yannan, XU Yong, et al. State-of-the-arts in 3D free bending technology and the future application in aviation manufacture[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(23/24): 16–24.

[20] 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.

[21] HUDOVERNIK M, STAUPENDAHL D, GHARBI M, et al. 3D numerical analysis of 2D profile bending with the torque superposed spatial bending method[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 59(3): 139–147.

[22] STAUPENDAHL D, TEKKAYA A E. Mechanics of the reciprocal effects of bending and torsion during 3D bending of profiles[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 262: 650–659.

## Research on Six-Axis Free Bending Forming Mechanism and Forming Quality Control of Profile Components

GUO Xunzhong<sup>1</sup>, YANG Qiucheng<sup>1</sup>, CHENG Cheng<sup>1</sup>, LIU Chunmei<sup>1</sup>, XU Yong<sup>2</sup>,  
BAI Xueshan<sup>3</sup>, LI Guangjun<sup>4</sup>

(1. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

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

3. AVIC Shenyang Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd., Shenyang 110850, China;

4. AVIC Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co. Ltd., Chengdu 610092, China)

**[ABSTRACT]** Six-axis free bending forming technology is a high-degree-of-freedom manufacturing technology in the field of integral forming of complex bending components. It can realize the overall accurate forming of tube components with complex axes and profile bending components with cross-sectional torsion characteristics. This article starts with the basic principles of six-axis free bending forming technology, and introduces the design of key equipment structure and the algorithm analysis of bending die movement trajectory. The method of combining finite element simulation and experiment is used to study the characteristics of the wall thickness distribution during the forming of the square tube, and the influence of the section torsion on the bending radius and bending direction of the formed member is analyzed.

**Keywords:** Six-axis free bending forming; Section torsion; Profile bending; Motion trajectory; Finite element simulation

(责编 大漠)