

塑性成形

平面变曲率管件成形工艺获取策略研究

宋朝阳¹, 吴建军¹, 徐鑫良², 吴为², 刘龙¹, 喻忠平¹, 张宗彩¹, 王孟原¹, 高昇¹
(1.西北工业大学 机电学院, 西安 710000; 2.中国航空制造技术院, 北京 100000)

摘要: **目的** 获取平面管件在弯曲成形过程中的初始工艺参数。**方法** 基于平面圆弧管件弯曲成形原理, 将成形管件划分为稳定段和过渡段。针对稳定段, 分析了平面圆弧管件的弯曲半径与弯曲模偏移量之间的映射关系, 并通过二次曲线拟合得到非线性方程, 以方便预测管件稳定区的成形工艺参数; 针对过渡段, 通过分析不同时间内不同模式下弯曲模偏移量对整体管件成形的影响, 以确定最佳过渡方式。基于管件成形工艺知识库, 提出了平面管件弯曲成形工艺参数的规划与预测方法, 并通过成形实例管件进行了验证。**结果** 整个管件的逼近残差为 0.230 1 mm, 最大偏差为 0.390 7 mm, 逼近残差和最大偏差与管件总长度的比值分别为 0.127 4%和 0.216 2%。**结论** 所提出的方法可以有效获取平面变曲率管件的成形工艺参数。

关键词: 管件成形; 工艺知识; 工艺规划

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2022.09.001

中图分类号: V261.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2022)09-0001-09

Acquisition Strategy of Forming Process of Flat Variable Curvature Pipe Fitting

SONG Chao-yang¹, WU Jian-jun¹, XU Xin-liang², WU Wei², LIU Long¹, YU Zhong-ping¹,
ZHANG Zong-cai¹, WANG Meng-yuan¹, GAO Sheng¹

(1. School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710000, China;
2. AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100000, China)

ABSTRACT: The work aims to obtain the initial process parameters of flat pipe fittings in bending forming. Based on the bending forming principle of flat arc pipe fitting, the forming pipe fitting was divided into stable section and transition section. For the stable section, the mapping relationship between the bending radius of the flat arc pipe fitting and the bending die offset was analyzed, and the nonlinear equation was obtained by quadratic curve fitting to facilitate the prediction of the forming process parameters in the stable section of the pipe fitting; For the transition section, the optimal transition mode was determined by analyzing the effects of the deflection of the bending die in different modes on the forming of the integral pipe fitting. Combined with the above analysis, based on the knowledge base of pipe fitting forming process, a method for planning and predicting the process parameters of flat pipe bending was put forward and was verified through forming simulation. The approximate residual error of the whole pipe fitting was 0.230 1 mm, the maximum deviation was 0.390 7 mm, the ratio of the approximate residual error and the maximum deviation to the total length of the pipe was 0.127 4% and 0.216 2% respectively. It is verified that this method can effectively obtain the forming process parameters of flat variable curvature pipe fittings.

KEY WORDS: pipe fittings forming; process knowledge; process planning

收稿日期: 2022-03-08

基金项目: 基础加强计划重点基础研究项目(173计划)(2020-JCJQ-ZD-188-01); 陕西省重点研发计划(S2020-YF-ZDCXL-ZDLGY-0029)

作者简介: 宋朝阳(1998—), 男, 硕士生, 主要研究方向为金属材料塑性加工及成形技术。

通讯作者: 吴建军(1963—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为金属材料塑性加工及成形技术。

管件因易于满足轻质量、低能耗、高强度、高精度和高效率等方面的要求,被广泛应用于大型客机、航空发动机和宇宙飞船等复杂工业装备中,用来实现油气输送或机构运动控制等功能^[1]。

尚琪等^[2-3]通过虚拟实验分析了工艺参数对管件成形过渡区曲率波动的影响,结果表明,随着进给速度的增加,工艺参数对管件过渡区成形的影响逐渐减小;随着弯曲模弯曲速度的加倍增加,增大进给速度会导致管件过渡区曲率波动幅度增大、波动区区间减小;增加扭转速度会导致管件过渡区曲率波动幅度逐渐变小,而波动区区间几乎不变。王安等^[4-5]以管件的壁厚减薄率和截面畸变率为优化目标,应用贝叶斯理论,求解了成形质量指标参数的正态分布特性,利用多目标决策理论得到了多目标优化后的最优妥协解以及质量评价参数的可信域,最终通过反向神经网络得到了满足管件成形质量要求的工艺参数优化区间。李海峰等^[6]根据薄壁管弯曲质量标准、有限元模拟和实验结果等大量数据,汇编了薄壁管领域的专家知识,研究开发了基于数据库技术的薄壁管数控弯曲知识库系统,结果表明,该系统可以指导实际的数控弯管制造过程,并可以为操作者和专家提供快速有效的建议。Guo等^[7-9]通过AA6061-T6管材的弯曲试验,建立了弯曲模偏移量和管件成形半径的映射关系以预测工艺参数,结果表明,实验值与预测值一致,该预测方法对粉末硬化铝合金圆管的成形具有良好的适用性。Engel等^[10-11]针对三辊轮推弯成形过程进行了研究,通过实验结果对管件轴线曲率进行了分析,并且针对成形过渡区曲率分布表现出来的震荡现象提出了优化方法:通过改变模具的运动轨迹来减小过渡段长度;通过实验验证,发现过渡段长度减小后,曲率震荡区域也相应减小,整段管件轴线的曲率分布更加均匀。Song等^[12]基于Abaqus有限元分析软件,比对了显式和隐式算法成形后的回弹过程以及Abaqus有限元计算结果和实验结果,还研究了C3D8R单元和SC8R单元类型对回弹预测准确性的影响,发现C3D8R单元和SC8R单元的预测精度要高于S4R单元的,SC8R单元的计算效率则低于C3D8R单元的。郭玲等^[13-14]总结了工程数据库管理系统的特点,说明了工程数据库是面向工程应用的,并介绍了几何特征、物理特征、工艺特征和其他实体特征之间的关系。Zhang等^[15-16]和Wu等^[17-20]研究了弯曲半径、扭转角、残余弯曲半径和残余扭转角之间的联系,提出了管件成形过渡区的几何描述方法,并在此基础上建立了过渡区几何特征参数集与工艺参数集的映射关系,并基于Frenet标架的空间管件拼接逼近技术完成了从目标形状到工艺模型的转换方案,提出了一种预测工艺参数并对其进行补偿的

新策略——B&T技术,并进行了常见空间管件的成形验证,显著降低了回弹误差,该工作对工艺参数的优化以及工艺决策方案的制定有一定的指导作用。

为了实现管件成形的智能制造^[21],有必要建立平面管件成形工艺的知识表示方法^[22-24],进而构建管件成形工艺知识库,并基于管件成形工艺知识库,建立合理有效的工艺获取策略。

1 平面变曲率管件成形工艺知识表示

1.1 平面成形管件的轴线特征变化机制及成形工艺分析

典型的平面管件成形过程如图1所示^[25],夹钳推动管坯前进一段距离产生直线段,然后在前进的过程中,弯曲模从起始位置竖直运动至目标位置;随后固定弯曲模不动,夹钳继续推动管坯前进,形成圆弧管件,这时形成的管件为直线-圆弧型管件。

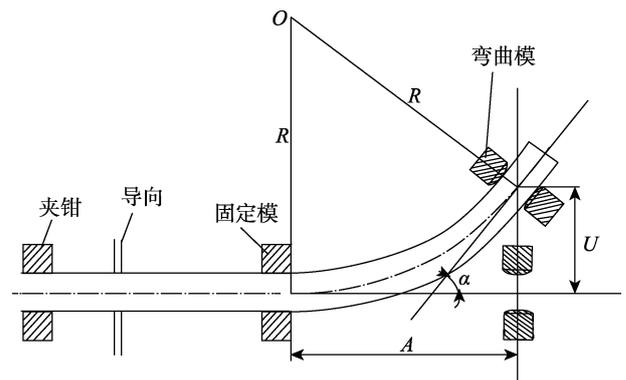


图1 平面管件成形过程示意图
Fig.1 Schematic diagram of forming geometry of flat pipe fittings

弯曲模的旋转角度 α 是随着偏移量 U 的变化而变化的,而固定模与弯曲模之间的水平距离 A 是不变的,当 A 较小时成形部分可近似为圆弧,理论上管件与弯曲模相切时 α 的计算如式(1)所示。

$$\alpha = 2 \arctan \frac{U}{A} \quad (1)$$

弯曲模偏移量可以决定平面管件的弯曲半径 R 。弯曲模偏移量与理论弯曲半径的关系如式(2)所示。

$$R = \frac{A^2 + U^2}{2U} \quad (2)$$

通过分析平面管件成形过程可知,在弯曲模位置固定不动时,由于管件上每个成形单元经历的路径与速度大小是一致的,因此,该过程会产生一个稳态的圆弧型管件,称为稳定段。而在弯曲模位置变化时,管件上每个成形单元经历的路径和速度大小前后是不一致的,因此该过程成形的是一个非稳态管件,称

为过渡段。平面管件单元的几何特征参数模块如图 2a 所示, 每一个点代表一个稳定段的几何特征参数, 而由一个初始点到另一个点的变化轨迹则代表 2 个稳定段之间的过渡段。平面成形管件的稳定段和过渡

段单元所对应的工艺参数模块如图 2b 所示, 图中每一个点代表一个稳定段的工艺参数, 当其他工艺参数不变时, 弯曲模偏移量变化轨迹则代表过渡段所对应的工艺参数。

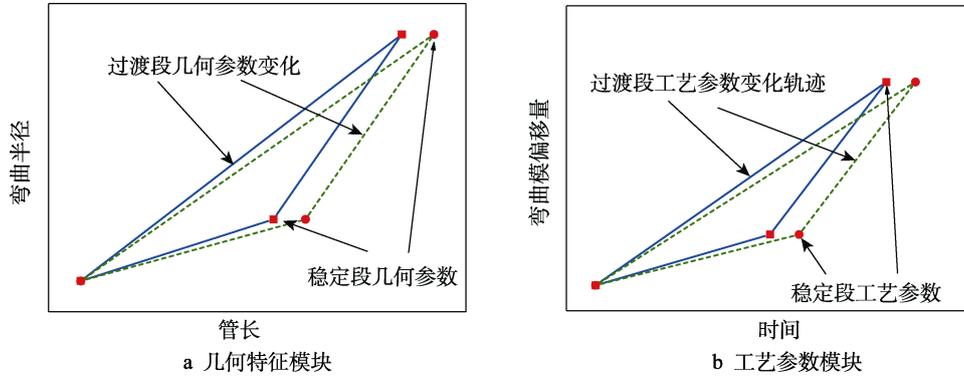


图 2 特征变量组成的参数坐标系

Fig.2 Parameter coordinate system composed of characteristic variables

1.2 平面管件的成形工艺知识表示方法

平面管件的几何参数包括管件编码、管件长度、管件厚度、管件直径、曲率等; 平面管件弯曲成形工艺参数包括成形仿真试验编码、弯曲模偏移量、夹钳推进时间和推进速度等。其详细表达如图 3 所示。

基于仿真模拟和理论分析以及平面成形工艺参数和管件几何参数, 最终形成了平面管件弯曲成形工艺知识表示方法。知识库中的知识以结构化形式存储, 并建立了多层级的知识单元。将平面管件成形仿真数据映射为平面管件成形工艺知识, 以便于管件成形工艺参数的设计与预测。

2 平面管件初始工艺参数获取

通过仿真模拟或管件加工实验建立能够描述平面管件稳定区与过渡区单元几何特性的管件成形知识库, 该知识库应该同时包括稳定区和过渡区几何特征等效的工艺参数。

在进行一次等效逼近时, 用管件成形知识库中已知所有几何特征信息的稳定区单元逼近目标平面管件。如图 4 所示, 从知识库中检索得到 3 段不同半径 (R_1 、 R_2 和 R_3) 的圆弧管件, 进行拼接之后可以最佳逼近目标管件, 并可以得到各段圆弧管件对应的弯曲模偏移量 U_1 、 U_2 和 U_3 。

由于成形过程中必然有过渡区的存在, 所以需要二次优化确定出过渡区的变化时间。基于得到的稳定区几何特征检索对应的过渡区变化时间, 进而确定稳定区的推进时间以及各单元的时间节点, 最终可以获得整个平面管件的初始工艺参数。

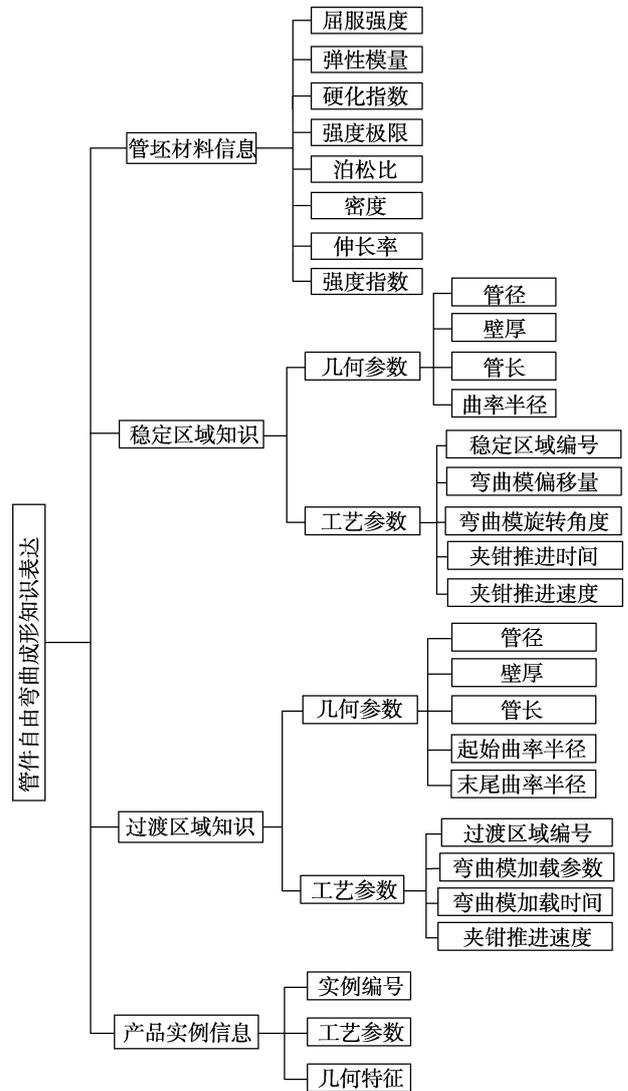


图 3 平面管件成形工艺知识表示

Fig.3 Representation of knowledge about forming process of flat pipe fittings

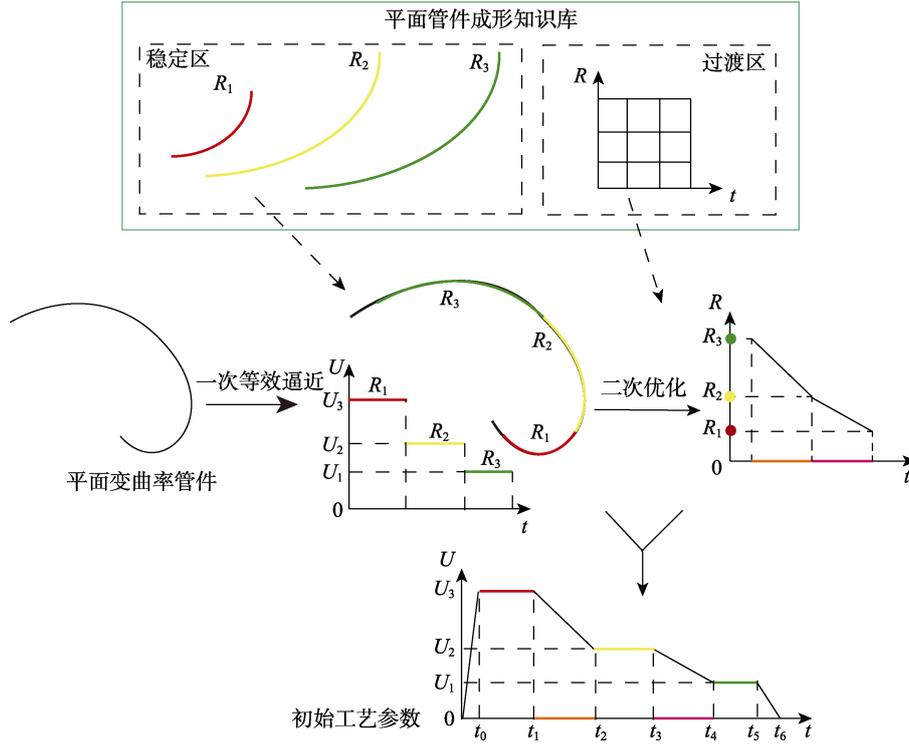


图4 基于一次等效逼近、二次优化的平面管件初始工艺参数获取

Fig.4 Acquisition of initial process parameters of flat pipe fittings based on first-order equivalent approximation and second-order optimization

3 平面变曲率管件成形工艺知识的应用

3.1 平面管件成形有限元分析

以 10 mm×2.5 mm (直径 D ×厚度 t) 的铝合金管 (其应力-应变曲线及力学性能参数如图 5 所示) 为研究对象、管材毛坯为变形体进行有限元分析, 网格类型为 C3D8R。固定模、弯曲模、导向和夹钳为刚体, 单元类型为 R3D4。有限元模型如图 6 所示。

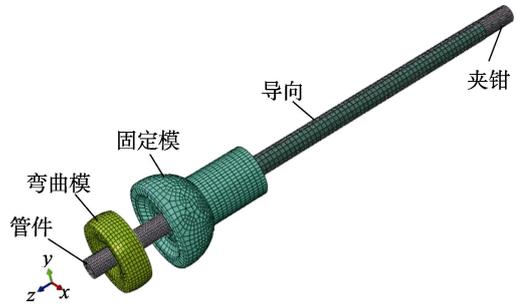


图6 管件成形有限元模型

Fig.6 Finite element model of pipe forming

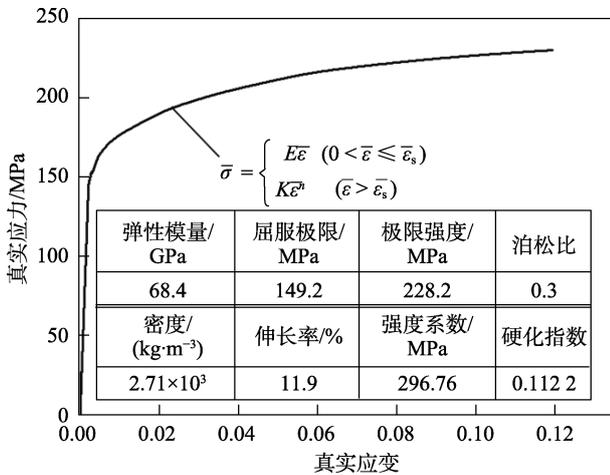


图5 铝合金应力-应变曲线及力学性能参数

Fig.5 Strain-stress curve and mechanical properties of aluminum alloy

3.2 平面管件稳定区工艺参数预测

在成形过程中, 平面管件的稳定区成形是一个均匀变形过程, 每个单元的边界条件是一样的。因此, 当管件的材料参数和几何参数确定时, 弯曲模偏移量 (对应理论弯曲模角度) 和管件成形弯曲半径是一一对应的关系, 那么就可以通过非线性拟合的方式来拟合工艺参数和管件成形弯曲半径之间的关系。

仿真模拟设计采取单一变量的方法, 管件直径为 10 mm, 管件厚度为 2.5 mm。弯曲模的偏移量分别为 17、18、19、20、21、22、23、24、25、26、27、28 mm。

根据仿真结果可对管件轴线曲率进行描述。通过二次曲线方程可对偏移量 U 与成形弯曲半径 R 之间的映射关系进行非线性拟合, 结果如图 7 所示, 拟合得到 $U-R$ 曲线方程为 $U=0.002\ 366R^2-0.711\ 9R+$

69.93, 相关系数为 0.999 1, 说明拟合程度很好。

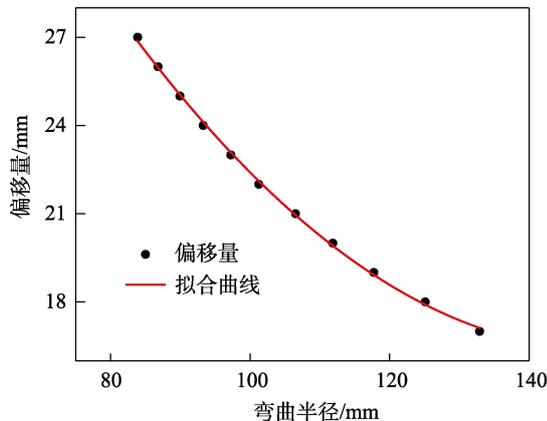


图 7 弯曲模偏移量与弯曲半径的关系

Fig.7 Relationship between bending mode offset and bending radius

根据知识表示模型, 将得到的平面稳定区仿真结果数据储存在知识库中的平面稳定区部分, 以方便获取对应的弯曲模偏移量, 并且根据弯曲模偏移量与弯曲半径的对应关系对知识库中未存在的弯曲模偏移量进行预测。

3.3 平面管件过渡区工艺参数优化

平面管件的稳定区可以通过上述 $U-R$ 关系进行预测, 而过渡区目前还没有准确的描述方法, 所以该区域的成形不易控制, 从而平面多弯管件的成形偏差主要集中在过渡区内, 因此平面弯曲成形应重点研究过渡区管件的工艺参数, 以降低过渡区目标管件的误差为最终目标。如图 8 所示, 过渡区管件的成形与时间长短和工艺参数是否线性变化有关。管件弯曲仿真模拟采用控制变量法来逐一分析不同弯曲模偏移速度变化曲线对成形管件几何特征的影响, 以管件成形偏差为响应量来分析不同加载模式对过渡区成形的影响。

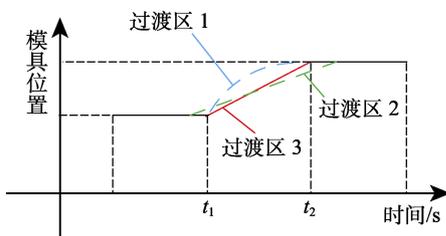


图 8 过渡区变化类型

Fig.8 Types of changes in the transition zone

以目标管件轴线 (如图 9 所示) 为例, 根据管件几何逼近方法, 首先对平面稳定几何特征进行分析, 将轴线划分为 2 个稳定段, 直线段对应的偏移量为 0 mm (弯曲角度为 0 rad), 圆弧段对应的弯曲模偏移量为 20 mm (弯曲角度为 -0.761 rad), 通过成形直线-

圆弧型管件来分析不同过渡方式对成形的影响, 成形过程设置直线段为起始成形端。

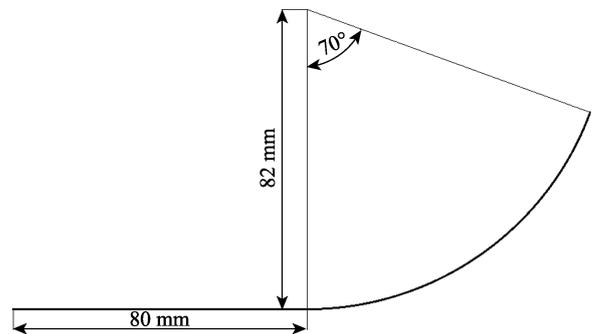


图 9 平面目标管件轴线

Fig.9 Target pipe fitting axis of flat pipe fitting

3.3.1 过渡方式对管件成形的影响

在对平面管件进行多弯曲成形时, 选择不同的加载模式对过渡区进行仿真试验, 由于弯曲模变化的速度不同, 那么成形曲率以及最终管件形状也不相同。

过渡区的变化曲线采取二次函数曲线 ($at^2+bt+c=0$), 其中 a 、 b 、 c 为常数, $b=(1-at^2)/t$ 。设置过渡时间 t 为 1 s, a 的取值为 0.3、0.5、0.7、0.9、1.1、1.3, 分别对应 F1—F6 加载模式, 过渡区的具体加载幅值曲线如图 10 所示。

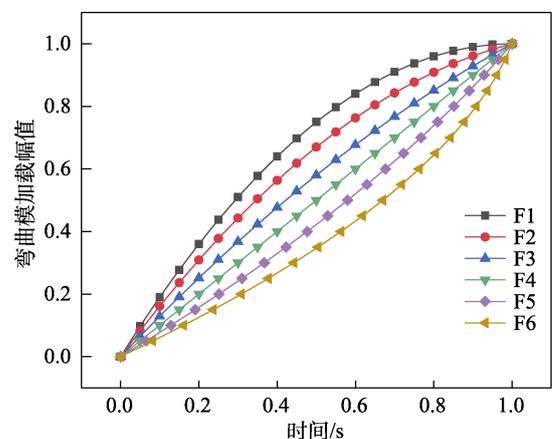


图 10 过渡区 F1—F6 加载模式幅值曲线

Fig.10 F1-F6 loading mode of transition zone

由于平面管件成形仅受弯曲模偏移量影响, 因此可以用曲线的起始端和终点端的切线夹角来表示曲线的弯曲角度。试验管件轴线与目标轴线的比对方法如下: 将圆弧段对齐重合, 比对另一端端点的切线偏移角度和两点间的偏移距离。当成形管件轴线的弯曲程度大于目标管件轴线的弯曲程度时, 切线夹角数值为正值, 小于时为负值。

测量过渡区 F1—F6 加载模式的管件轴线与目标管件轴线的偏移角度与偏移距离, 结果如图 11 所示。

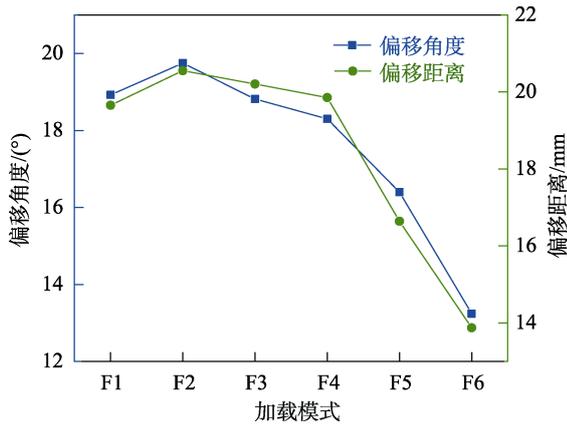


图 11 过渡区 F1—F6 加载模式的管件轴线与目标管件轴线的偏移角度与偏移距离

Fig.11 Offset angle and offset distance between the pipe axis and the target pipe axis in F1-F6 loading mode of transition zone

对比仿真模拟结果可知,在该段时间内,通过改变加载方式可以影响过渡区偏差,但是距离目标管件的偏差还是很大,所以需要通过改变时间来继续分析和优化过渡区加载轨迹。

3.3.2 过渡时间对管件成形的影响

在不同的过渡时间下将过渡区的区间范围分为 3 种情况进行讨论。

1) 过渡区的区间长度占起始段和末尾段区间长度各一半。设置弯曲模的幅值曲线如图 12 所示,偏移量的变化时间为 0.3、0.6、0.9、1.2、1.5、1.8 s,对应的加载模式分别为 M1、M2、M3、M4、M5、M6。

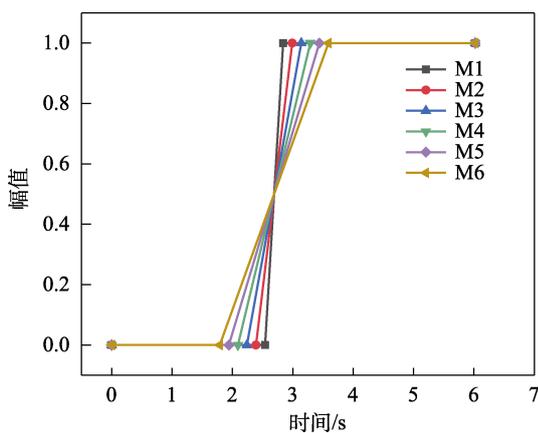


图 12 过渡区 M1—M6 加载模式

Fig.12 M1-M6 loading mode of transition zone

2) 过渡区的区间长度占起始段区间长度。设置弯曲模的变化幅值曲线如图 13 所示,偏移量的变化时间为 0.3、0.6、0.9、1.2、1.5、1.8 s,对应的加载模式分别为 L1、L2、L3、L4、L5、L6。

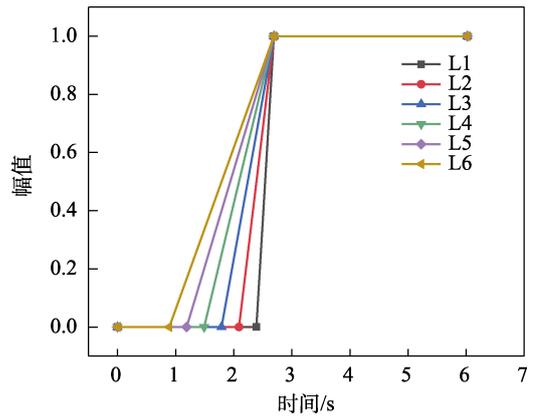


图 13 过渡区 L1—L6 加载模式

Fig.13 L1-L6 loading mode of transition zone

3) 过渡段的区间长度占末尾段区间长度。设置的幅值曲线如图 14 所示,偏移量的变化时间为 0.3、0.6、0.9、1.2、1.5、1.8 s,对应的加载模式分别为 N1、N2、N3、N4、N5、N6。

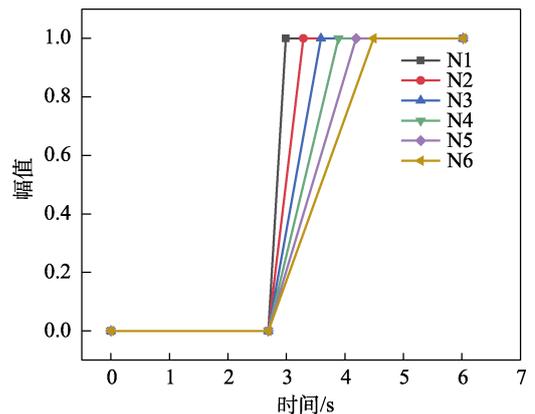


图 14 过渡区 N1—N6 加载模式

Fig.14 N1-N6 loading mode of transition zone

分析以上 3 种情况可知, L、M 和 N 模式在相同时间下的过渡段弯曲角度是相同的;在同一模式、不同时间下,过渡段的弯曲角度随着时间的增长而变大。

当成形管件轴线过渡区在 M 加载模式下时,数值模拟结果如图 15 所示,目标管件轴线介于 M5 和 M6 加载模式之间,对应的时间在 1.2~1.8 s 之间;当成形管件轴线过渡区在 L 加载模式下时,数值模拟结果如图 16 所示,目标管件轴线大于 L6 加载模式下的,对应的时间也大于 1.8 s;当成形管件轴线过渡区在 N 加载模式下时,数值模拟结果如图 17 所示,目标管件轴线介于 N3 和 N4 加载模式之间,对应的时间在 0.9~1.2 s 之间。过渡区 N 加载模式代表占较大曲率稳定区的模式, L 代表占较小曲率稳定区的模式, M 代表占 2 个稳定区的模式。而模式 N 的过渡区长度最短,其次为模式 M 的,模式 L 的过渡区长度最长。综上所述,一般选取加载模式 N。

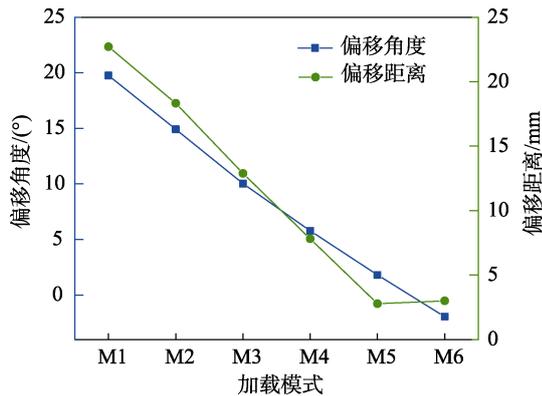


图 15 过渡区 M1—M6 加载模式的管件轴线与目标管件轴线的偏移角度与偏移距离
Fig.15 Offset angle and offset distance between the pipe axis and the target pipe axis in the transition zone M1-M6 loading mode

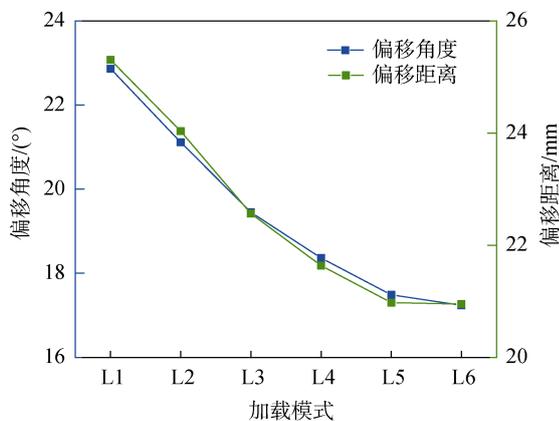


图 16 过渡区 L1—L6 加载模式的管件轴线与目标管件轴线的偏移角度与偏移距离
Fig.16 Offset angle and offset distance between the pipe axis and the target pipe axis in the transition zone L1-L6 loading mode

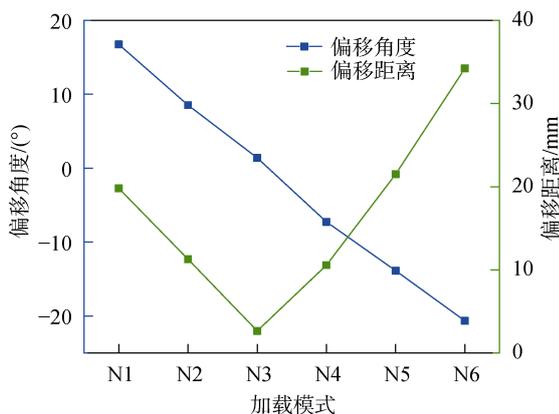


图 17 过渡区 N1—N6 加载模式的管件轴线与目标管件轴线的偏移角度与偏移距离
Fig.17 Offset angle and offset distance between the pipe axis and the target pipe axis in the N1-N6 loading mode in the transition zone

由于弯曲模偏移量是直接对成形管件的曲率造成影响, 在针对模式 N 时, 可对弯曲角度与弯曲模

线性变化时间进行关系拟合, 由于管件过渡区的成形复杂, 因此用非线性二次曲线函数对其拟合, 拟合结果如图 18 所示, 拟合曲线方程为 $y=1.159 \times 10^{-4}x^2 - 0.03941x + 0.9307$, 相关系数为 0.9993, 说明拟合程度很好。由曲线拟合的结果可以计算出偏移角度为 0° 时过渡区的时间为 0.93 s, 将该时间和过渡区两端稳定区的半径等数据存储在知识库中, 以方便之后获取该段过渡区的工艺参数。

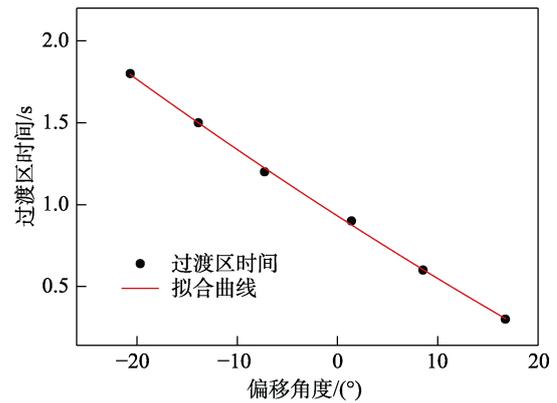


图 18 N 模式过渡区时间与偏移角度的关系
Fig.18 Relationship between transition time and offset angle of N mode

4 实例验证

以图 9 所示的轴线为目标管件轴线进行成形, 分段提取其几何信息并进行工艺分析, 得到第 1 段管长为 80 mm 的直线型管件, 第 2 段管长为 100.18 mm、半径为 82 mm 的圆弧型管件, 且第 1 段与第 2 段之间的过渡区为直线-圆弧型。

保持管件推进速度为 50 mm/s 不变, 平面管件弯曲成形工艺参数主要包括弯曲模偏移量和推进时间。对于直线型管件, 弯曲模偏移量为 0 mm, 根据推进速度和直线长度得到推进时间为 1.6 s; 对于圆弧型管件, 基于管件成形知识库, 根据管径、管厚、管长与半径等几何参数检索出偏移量为 28 mm、时间为 2.0036 s, 如图 19 所示; 对于直线-圆弧型过渡区管件, 基于管件成形知识库, 根据管径、管厚、管长、起始端半径 1 和终点端半径 2 检索出过渡时间为 0.93 s, 如图 20 所示。

根据获得的各段工艺参数最后可得到整个管件的初始工艺参数, 弯曲模加载幅值曲线如图 21 所示。数值模拟的参数设置同上节一致, 直线段对应的弯曲模偏移量为 0 mm, 圆弧段对应的偏移量为 28 mm, 推进速度为 50 mm/s, 过渡区时间为检索得到的 0.93 s。

在数值模拟过程中, 为了分析过渡段对整段目标管件带来的影响, 利用式 (3) 计算逼近结果的总体偏差, 逼近结果和偏差分布云图如图 22 所示。可以

管件成形工艺知识											
材料参数	首页										
平面稳定区管件工艺知识	添加										
平面过渡区管件工艺知识	材料: Al6061										
空间稳定区管件参数工艺知识	管径: 10	管厚: 2.5	管长: 100.18	半径: 82	搜索						
空间过渡区管件参数工艺知识	实验编码	材料名称	管径/mm	管厚/mm	管长/mm	半径/mm	时间/s	偏移量/mm	弯曲角度/(°)	推进速度/(mm·s ⁻¹)	操作
	0	Al6061	10.0	2.5	100.18	82.0	2.003 6	28.0	-1.02	50.0	编辑 删除

图 19 平面稳定区管件工艺知识
Fig.19 Process knowledge of pipe fittings in the plane stability zone

管件成形工艺知识														
材料参数	首页													
平面稳定区管件工艺知识	添加													
平面过渡区管件工艺知识	材料: Al6061													
空间稳定区管件参数工艺知识	管径: 10	管厚: 2.5	半径1: 0	半径2: 82.0	搜索									
空间过渡区管件参数工艺知识	实验编码	材料名称	管径/mm	管厚/mm	管长/mm	半径2/mm	加载时间/s	偏移量1/mm	弯曲角度1/(°)	偏移量2/mm	弯曲角度2/(°)	推进速度/(mm·s ⁻¹)	操作	
	1	Al6061	10.0	2.5	46.5	0.0	82.0	0.93	0.0	0.0	28.0	-1.02	50.0	编辑 删除

图 20 平面过渡区管件工艺知识
Fig.20 Process knowledge of pipe fittings in the plane transition zone

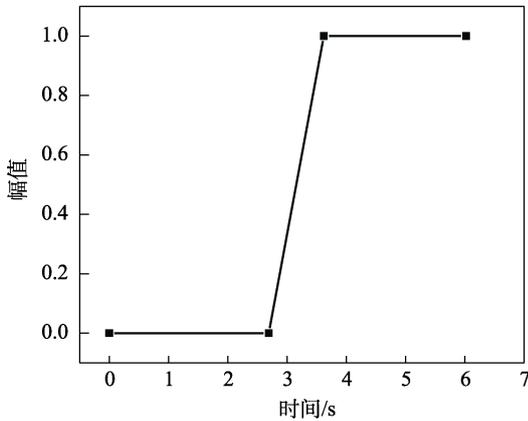


图 21 弯曲模加载幅值曲线
Fig.21 Loading amplitude curve of bending mode

与管件总长度的比值分别为 0.127 4%和 0.216 2% ,基本可以满足工程计算问题。

$$\begin{cases} \Delta e = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta l_i^2} \leq \varepsilon \\ E_{\max} = \max_{0 \leq i \leq n} \{\Delta l_i\} \leq \delta \end{cases} \quad (3)$$

式中： Δl_i 为空间曲线上节点与螺旋线对应节点之间的距离； n 为节点总个数； ε 、 δ 为逼近误差限。

5 结论

- 1) 提出了平面管件成形工艺知识表示方法。
- 2) 分析了弯曲模偏移量 U 与管件圆弧半径 R 之间的关系，得到了 $U-R$ 二次曲线方程的映射关系。
- 3) 分析了平面管件过渡区加载模式 N、M、L 对成形管件的偏移角度和偏移距离的影响，得出了加载模式 N 对过渡区的影响最小，从而降低了成形管件与目标管件之间的偏差。
- 4) 基于上述流程，提出了基于知识库的平面管件工艺获取策略，并验证了策略的有效性。

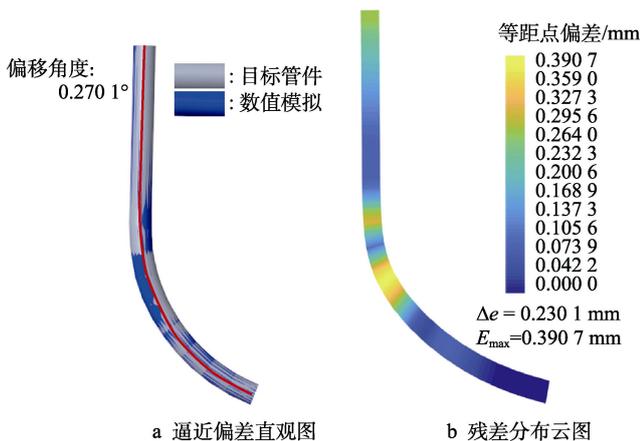


图 22 平面管件逼近结果及偏差分布
Fig.22 Approximation results and deviation distribution of flat pipe fittings

看出，在圆弧段配准的情况下，直线段与目标管件的偏移角度为 $0.270 1^\circ$ ，整个管件的逼近残差 Δe 为 $0.230 1 \text{ mm}$ ，最大偏差 E_{\max} 出现在直线-圆弧的过渡区内，为 $0.390 7 \text{ mm}$ 。逼近残差 Δe 和最大偏差 E_{\max}

参考文献:

[1] 张深, 吴建军. 空间弯管的回弹预测[J]. 航空学报, 2011, 32(5): 953-960.
ZHANG Shen, WU Jian-jun. Springback Prediction of Non-Planar Tube Bending[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 32(5): 953-960

[2] 尚琪, 乔顺成, 吴建军, 等. 管件弯曲过渡区研究及回弹控制[J]. 塑性工程学报, 2020, 27(1): 38-45.
SHANG Qi, QIAO Shun-cheng, WU Jian-jun, et al. Research on the Bending Transition Zone of Pipe Fittings and Springback Control[J]. Chinese Journal of Plastic Engineering, 2020, 27(1): 38-45.

[3] 尚琪. 空间管件回弹控制及在数控弯管机中的应用[D].

- 西安:西北工业大学,2019:17-19.
SHANG Qi. Springback Control of Space Pipe Fittings and Its Application in CNC Pipe Bending Machine[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2019: 17-19.
- [4] 王永安. 大直径薄壁管材绕弯成形缺陷分析及工艺参数优化[D]. 西安:西北工业大学,2017:13-15.
WANG Yong-an. Defect Analysis and Process Parameter Optimization of Large-Diameter Thin-Walled Pipe Bending Forming[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2017: 13-15.
- [5] 王永安,吴建军,李非凡,等. 薄壁管数控弯曲成形工艺参数区间研究[J]. 塑性工程学报,2018,25(1):111-118.
WANG Yong-an, WU Jian-jun, LI Fei-fan, et al. Study on the Parameter Interval of CNC Bending Forming Process for Thin-Walled Tubes[J]. Chinese Journal of Plastic Engineering, 2018, 25(1): 111-118.
- [6] 李海峰,杨合,詹梅,等. 基于数据库的薄壁管数控弯曲知识库的构建[J]. 塑性工程学报,2008,15(4):32-36.
LI Hai-feng, YANG He, ZHAN Mei, et al. Construction of Database-Based CNC Bending Knowledge Base for Thin-Walled Tubes[J]. Chinese Journal of Plastic Engineering, 2008, 15(4): 32-36.
- [7] GUO X, XIONG H, XU Y. El-U-R Relationship Prediction Method for Aluminum Alloy Circular Tube Free-Bending Process Based on Sensitivity Analysis of Material Parameters[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 99(58): 1967-1977.
- [8] GUO X, CHENG X, XU Y, et al. Finite Element Modeling and Experimental Investigation of the Impact of Filling Different Materials in Copper Tubes during 3D Free Bending Process[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2020, 33(2): 721-729.
- [9] GUO X, 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.
- [10] ENGEL B, KERSTEN S, ANDERS D. Spline-Interpolation and Calculation of Machine Parameters for the Three-Roll-Pushbending of Spline-Contours[J]. Steel Research International, 2011, 82(10): 1180-1186.
- [11] ENGEL B, KOPFER P. Improving the Curvature of Bent Profiles by Adjusting the Process Kinematics of the Three-Roll-Push bending Process[C]// Proceedings of the 1st International Tube and Profile Bending Conference, 2011: 127-130.
- [12] SONG F, YANG H, LI H, et al. Springback Prediction of Thick-Walled High-Strength Titanium Tube Bending[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2013, 26(5): 1336-1345.
- [13] 郭玲,杨合,邱晔,等. 具有预成形设计的薄壁弯管数据库管理系统的研究与开发[J]. 塑性工程学报,2007,14(2):80-85.
GUO Ling, YANG He, QIU Xi, et al. Research and Development of Database Management System for Thin-Walled Elbows with Pre-Forming Design[J]. Chinese Journal of Plastic Engineering, 2007, 14(2): 80-85.
- [14] 郭玲. 薄壁管数控弯曲数据库管理系统的研究与开发[D]. 西安:西北工业大学,2007:22-23.
GUO Ling. Research and Development of Database Management System for CNC Bending of Thin-Walled Tubes[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2007: 22-23.
- [15] 张增坤. 空间管件塑性成形回弹的预测及控制策略研究[D]. 西安:西北工业大学,2019:26-69.
ZHANG Zeng-kun. Research on the Prediction and Control Strategy of Plastic Forming Springback of Space Pipe Fittings[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2019: 26-69.
- [16] ZHANG Z K, WU J, LIANG B, et al. A New Strategy for Acquiring the Forming Parameters of a Complex Spatial Tube Product in Free Bending Technology[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2020, 282: 116662.
- [17] WU J, ZHANG Z, SHANG Q, et al. A Method for Investigating the Springback Behavior of 3D Tubes[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2017, 131: 191-204.
- [18] WU J, ZHANG Z. An Improved Procedure for Manufacture of 3D Tubes with Springback Concerned in Flexible Bending Process[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2021, 34(11): 267-276.
- [19] ZHANG Z, WU J, GUO R C, et al. A Semi-Analytical Method for the Springback Prediction of Thick-Walled 3D Tubes[J]. Materials & Design, 2016, 99: 57-67.
- [20] ZHANG Z, WU J, ZHANG S, et al. A New Method for Springback Control Based on Theory Analysis and Displacement Adjustment[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2016, 105: 330-339.
- [21] 丁惠忠. 基于运动控制器的智能弯管机数控系统[J]. 制造业自动化,2021,43(2):82-87.
DING Hui-zhong. Intelligent Pipe Bender Numerical Control System Based on Motion Controller[J]. Manufacturing Automation, 2021, 43(2): 82-87.
- [22] 刘梦飞,张磊,陈泳. 制造工艺知识建模与应用研究[J]. 机械设计与研究,2020,36(3):105-110.
LIU Meng-fei, ZHANG Lei, CHEN Yong. Research on Modeling and Application of Manufacturing Process Knowledge[J]. Mechanical Design and Research, 2020, 36(3): 105-110.
- [23] 李秀玲,张树生,黄瑞,等. 面向工艺重用的工艺知识图谱构建方法[J]. 西北工业大学学报,2019,37(6):1174-1183.
LI Xiu-ling, ZHANG Shu-sheng, HUANG Rui, et al. Process Knowledge Map Construction Method for Process Reuse[J]. Journal of Northwest Polytechnic University, 2019, 37(6): 1174-1183.
- [24] 王天龙,陈泳,刘梦飞. 复杂工艺参数决策知识建模与应用[J]. 上海交通大学学报,2021,55(10):1237-1245.
WANG Tian-long, CHEN Yong, LIU Meng-fei. Modeling and Application of Complex Process Parameter Decision Knowledge[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2021, 55(10): 1237-1245.
- [25] 韩景宏. 自由弯管的运动控制原理研究[D]. 秦皇岛:燕山大学,2021:15-21.
HAN Jing-hong. Research on Motion Control Principle of Free Bend[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2021: 15-21.