网络首发时间：2025-12-31 14:56:45　网络首发地址：https://link.cnki.net/urlid/11.3449.TG.20251230.1443.004

第 33 卷 第 x 期
2026 年 x 月

塑性工程学报
JOURNAL OF PLASTICITY ENGINEERING

Vol. 33　No. x
xx.　2026

引文格式：刘　杰，范玉斌，徐雪峰，等. 0.8*D* 弯曲半径铝合金薄壁管推-旋一体弯曲成形关键参数影响研究［J］. 塑性工程学报，2026，33
LIU Jie，FAN Yubin，XU Xuefeng，et al. Study on key parameters affecting push-spin integrated bending forming of aluminum alloy thin-walled tubes with a 0.8*D* bending radius［J］. Journal of Plasticity Engineering，2026，33

0.8*D* 弯曲半径铝合金薄壁管推-旋一体弯曲成形关键参数影响研究

刘　杰[1]，范玉斌[1]，徐雪峰[1]，刘杰松[1]，肖　洁[1]，曾　祥[1]，谢　君[2]

（1. 南昌航空大学 航空制造与机械工程学院，江西 南昌 330063；
2. 南昌航空大学 工程训练国家级实验教学示范中心，江西 南昌 330063）

摘　要：为提升 5A02 铝合金小弯曲半径薄壁管的弯曲成形极限，针对 Φ30 mm×1.0 mm、弯曲半径为 0.8*D* 的管坯，开展了推-旋一体弯曲成形关键参数影响研究。结合 Abaqus 有限元模拟与工艺实验，系统探究了管坯进给速度 V_1、旋轮转速 V_2、反推压强 *P* 及其加载路径对成形质量的影响。结果表明：降低管坯进给速度 V_1 可有效抑制内侧起皱，当 V_1 由 15 mm·s^{-1} 减小至 3 mm·s^{-1}，内侧增厚率降低了 5.1%。旋轮转速 V_2 对改善成形质量具有关键作用，与旋轮固定形式相比，当旋轮转速增大至 $V_2=1.5V_1$ 时，内侧增厚率降低了 8.0%、输出端伸长量延长了 107.8%，但继续增大 V_2，其改善效果趋于饱和。反推压强 *P* 需精确控制，*P* 小于 70 MPa 易导致不贴模与起皱，大于 70 MPa 则会加剧壁厚不均并抑制材料伸长。据此确定了较优工艺窗口：在 70 MPa 的反推压强 *P* 下，结合 D 加载路径（*P* 经线性变化在 3/4 管坯行程时达到最大值），可获得无缺陷、质量良好的弯管。

关键词：铝合金薄壁管；推-旋一体弯曲；小弯曲半径；输出端伸长量；旋轮转速

中图分类号：TG386　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1007-2012（2026）00-0000-00

Study on key parameters affecting push-spin integrated bending forming of aluminum alloy thin-walled tubes with a 0.8*D* bending radius

LIU Jie[1]，FAN Yu-bin[1]，XU Xue-feng[1]，LIU Jie-song[1]，XIAO Jie[1]，ZENG Xiang[1]，XIE Jun[2]

（1. School of Aviation Manufacturing and Mechanical Engineering，Nanchang Hankong University，Nanchang 330063，China；
2. School of National Denonstration Center for Experimental Engineering Training Education，
Nanchang Hangkong University，Nanchang 330063，China）

Abstract：To enhance the bending forming limit of 5A02 aluminum alloy thin-walled tubes with small bending radius，the influence of key parameters in push-spin integrated bending forming for Φ30 mm×1.0 mm tube blanks with a bending radius of 0.8*D* was investigated. Combining Abaqus finite element simulation with process experiments，the influence of tube blank feed rate V_1，spin wheel speed V_2，back pressure *P* and its loading path on forming quality were systematically investigated. The results indicate that reducing the tube blank feed rate V_1 can effectively suppress inner wrinkling，when V_1 decreases from 15 mm·s^{-1} to 3 mm·s^{-1}，the inner wall thickening rate decreases by 5.1%. Spin wheel speed V_2 plays a crucial role in improving forming quality，compared to a fixed spinneret configuration，increasing V_2 to 1.5V_1 reduces inner wall thickening rate by 8.0% and extends the stick-out length by 107.8%，however，further increases of V_2 shows diminishing returns. The back pressure *P* requires precise control，the value below 70 MPa may cause non-adherence to the die and wrinkling，while values above 70 MPa exacerbate wall thickness non-uniformity and inhibit material elongation；based on this，an optimal process window is determined：under the back pressure *P* of 70 MPa，combined with the D loading path（where *P* undergoes linear change and reaches the maximum value at 3/4 of the tube blank stroke），high-quality bent tubes without defects can be produced.

基金项目：江西省自然科学基金资助项目（20224BAB214050）；国家自然科学基金资助项目（52365050；52265052）；江西省重点研发计划项目（20243BBG71002）

通信作者：范玉斌，男，1987 年生，博士，副教授，主要从事管材介质成形技术研究，E-mail：yubin_fan@nchu.edu.cn

第一作者：刘　杰，男，2000 年生，硕士研究生，主要从事管材介质成形技术研究，E-mail：425653790@qq.com

收稿日期：2025-10-11；**修订日期**：2025-12-11

Key words: aluminum alloy thin-walled tube; push-spin integrated bending; small bending radius; stick-out length; spin wheel speed

引言

管路系统是航空航天器的“生命线”，高性能铝合金小弯曲半径薄壁管（$t/D\leqslant 0.05$，$R/D\leqslant 1.5$，其中 t 为壁厚，D 为外径，R 为弯曲半径）由于其轻量化、强度高、结构紧凑等优势成为现代航空航天装备中至关重要的组成部分[1-4]。推弯成形技术是实现小弯曲半径薄壁管的关键技术之一，然而随着对铝合金小弯曲半径薄壁管提出更高的成形极限要求，其在成形过程中更易出现外侧壁厚过度减薄甚至开裂、内侧起皱、截面畸变以及输出端伸长量不足等缺陷[5-7]。

针对上述难题，国内外研究学者基于不同工艺及不同成形参数对弯管成形工艺进行了广泛研究。李宁等[8]基于数控弯曲成形工艺对钛合金导管进行的研究表明，弯曲模具与管坯之间相对弯曲速度等对成形弯管的最大截面畸变和最大外侧减薄具有显著影响，但数控弯曲成形工艺往往针对的是弯曲半径较大的弯管，对于小弯曲半径弯管成形并不适用。方继钊等[9]基于冷胀推弯成形技术，通过有限元仿真分析从聚氨酯填料和顶缸压力等方面研究出高温合金管冷胀推弯的最优工艺条件，并通过实验验证了工艺参数的准确性。李艳芳等[10]、郭伟等[11]和 PENG M L 等[12]基于有限元数值模拟对小弯曲半径弯管成形进行探究，实验结果表明对于小弯曲半径管推弯成形，采用合适的内压能明显抑制起皱和端口畸变，并且内外侧壁厚分布也更为均匀。XIE W 等[13]和 JIANG W 等[14]以不锈钢薄壁管为研究对象，探究了聚氨酯芯棒与管坯之间的接触压力分布规律，即反推压强，结果表明增大接触压力可以有效减少弯管截面的扁平化，使得壁厚分布更加均匀。这些研究表明推弯成形中的内压对弯管的壁厚状态影响显著，是推弯成形中的关键因素。XIAO J 等[15]为获得足够的直段延长长度并解决小弯曲半径弯管在成形过程中易产生起皱等缺陷的问题，通过大量数值模拟和实验分别探究了管坯几何尺寸和反推力等因素对其成形的影响，实验与模拟结果吻合良好，并得到了直段延长且壁厚分布均匀的弯管。该研究也说明了合适的内压不仅能改善弯管壁厚分布，还能够有效延长弯管输出段长度。以上研究对内压研究较为深入，但缺少对其加载路径的深入探讨，且研究集中于 1D 及以上弯曲半径弯管，缺少对 1D 以下弯曲半径弯管的研究。KONG D 等[16]针对较小相对弯曲半径薄壁管提出了一种结合旋转拉弯和液压成形的弯曲-胀形工艺，并实现较高精度和均匀壁厚弯管的制造；XIE J 等[17]和 LIU J S 等[18]针对 0.9D 铝合金小弯曲半径薄壁管采用推-旋一体弯曲成形方法进行研究，结果表明通过改变旋轮运动方式、选取合适的反推压强能够使得壁厚分布更为均匀，并显著抑制弯管内侧起皱等缺陷，研究虽实现了 1D 以下弯曲半径弯管的成形，但未对旋轮具体运动速度进行研究而是聚焦于旋轮运动方式对弯管成形质量的影响。

以上研究对于小弯曲半径薄壁管的弯曲成形具有重要的指导作用，工艺参数中的管坯进给速度、反推压强等对成形影响显著。为进一步探究小弯曲半径薄壁管弯曲极限，研究其成形机理，本文以外径 $D=\Phi 30$ mm、壁厚 $t=1$ mm、弯曲半径 $R=0.8D$ 的 5A02 铝合金管为研究对象，从管坯进给速度 V_1、旋轮转速 V_2、反推压强 P 及其加载路径等工艺参数方面着手分析研究，结合有限元数值模拟和成形实验进行管材的推-旋一体弯曲成形工艺研究，以期获得弯曲半径为 0.8D 的铝合金极小弯曲半径薄壁管。

1 推-旋一体弯曲成形原理

1.1 成形原理

推-旋一体弯曲成形示意图如图 1 所示。在常规推弯基础上，推-旋一体弯曲成形将型腔弯曲段内侧改为可转动的旋轮，并可通过右缸推动齿条啮合齿轮带动旋轮旋转。在成形过程中，当旋轮保持不动时即为常规推弯成形；当使用齿轮齿条传动装置带动旋轮旋转时，可实现推-旋一体弯曲成形。旋轮与管坯之间通过面接触产生滑动摩擦，并可调整旋轮运动状态改变摩擦力，从而有效控制弯曲内

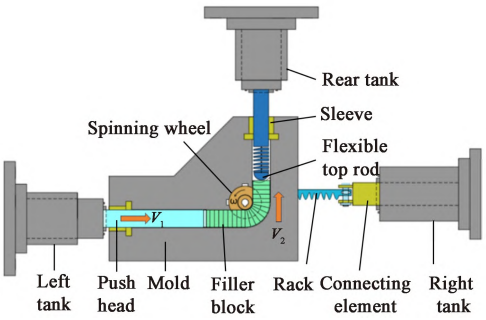

图 1 推-旋一体弯曲成形示意图

Fig. 1 Schematic diagram of push-spin integrated bending forming

侧应力应变状态，降低弯管内侧起皱风险，增加弯管输出端伸长量。

1.2　力学分析

推-旋一体弯曲成形受力与应力应变分析如图 2 所示。在径向方向上，弯管内外侧分别受凹模型腔提供的支持力 N_{in} 和 N_{ex}、填充介质压缩对弯管内外侧产生的支持力合力 N_{r1} 和 N_{r2}；在轴向方向上，弯管受推力 F_1、反推力 F_2，弯管外侧受凹模型腔的摩擦力 f_{ex} 和填充介质的摩擦力 f_{r2}；弯管内侧受凹模型腔的摩擦力 f_{in}、填充介质的摩擦力 f_{r1} 和内腔旋轮的摩擦力 f_s。

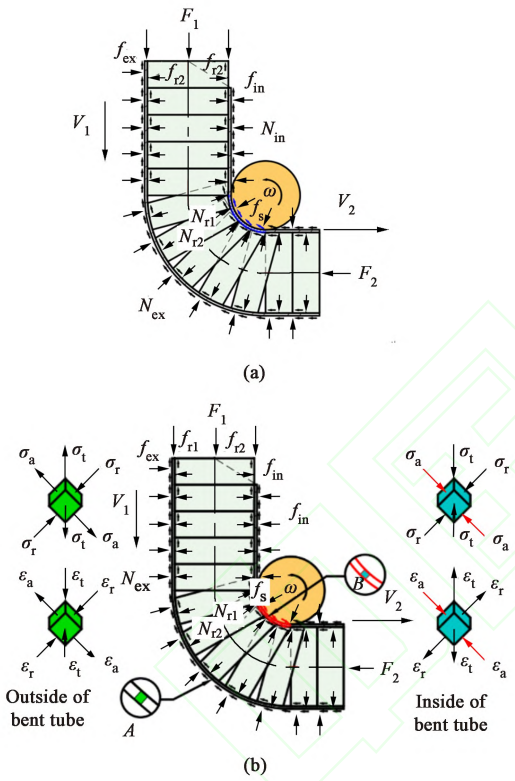

图 2　推-旋一体弯曲成形受力与应力应变分析

（a）$V_2<V_1$　（b）$V_2>V_1$

Fig. 2　Analysis of force, stress and strain in push-spin integrated bending forming

旋轮角速度为 ω，当旋轮运动且旋轮转速 V_2 小于管坯进给速度 V_1 时，内腔旋轮对弯管内侧的摩擦力 f_s 的方向与凹模型腔对弯管内侧的摩擦力 f_{in} 方向一致，会阻碍弯管弯曲内侧材料流动，如图 2a 所示。而当旋轮转速 V_2 大于管坯进给速度 V_1 时，如图 2b 所示，内腔旋轮对弯管内侧的摩擦力 f_s 的方向与凹模型腔对弯管内侧的摩擦力 f_{in} 方向相反，会促进弯管弯曲内侧材料流动，可有效延长弯曲段内侧输出段的长度。

2　实验材料和设备

2.1　实验材料

本文研究材料为 5A02 铝合金管材，外径 $D=\Phi30$ mm，初始壁厚 $t=1$mm，弯曲半径 $R=0.8D$。

5A02 铝合金常温下的密度为 2.68 g·cm^{-3}，按照 GB/T 228.1—2021 标准[19] 设计管拉伸试样，利用拉伸实验获得管材拉伸真应力-真应变曲线如图 3 所示，其弹性模量为 73.7 GPa、泊松比为 0.33、屈服强度为 91 MPa、抗拉强度为 204 MPa、伸长率 13.3%。

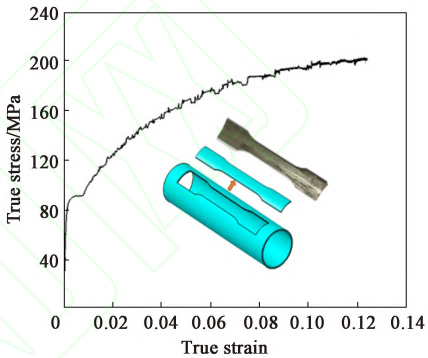

图 3　5A02 铝合金真应力-真应变曲线

Fig. 3　True stress-true strain curve of 5A02 aluminum alloy

2.2　实验设备

如图 4 所示，本实验所需成形设备为 MHF-400t 伺服比例数控管板充液成形试验机，实验模具由上下模具、垫板、推头、柔性顶杆、旋转装置以及传动齿条等装配而成。其在常规推弯的基础上，在模具内侧加装可拆卸的旋轮装置，旋轮装置通过阶梯轴从上到下依次由旋轮、补偿块、轴套筒以及齿轮串连而成，并固定在轴承座上；齿轮与传动齿条之间啮合配合，传动齿条通过与右缸相连从而拉动旋轮使其旋转，并可通过控制右缸的进给速度控制旋轮旋转速度。

3　有限元模型与可靠性验证

基于推-旋一体弯曲成形原理，使用 Abaqus 有限元模拟仿真分析平台建立 0.8D 弯管推-旋一体成形仿真模型。为提高计算效率，考虑到模型的对称性，所以部件均采用 1/2 模型构建。模型包含模具、旋轮、推头、聚氨酯填块以及管坯；模具、旋轮和推头为离散刚体，采用 R3D4 网格类型；聚氨酯填块和管坯定义为可变形体，其网格类型分别为 C3D8R 和 S4R，如图 5 所示。

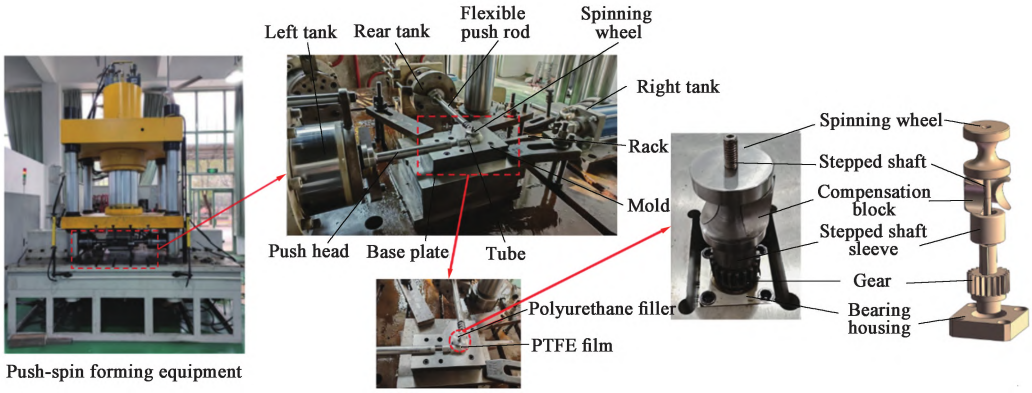

图 4 实验成形设备及模具

Fig. 4 Experimental forming equipment and molds

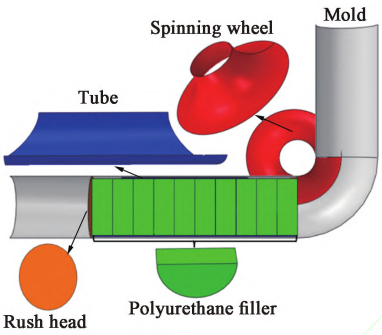

图 5 推-旋一体弯曲成形有限元模型

Fig. 5 Finite element model of push-spin integrated bending forming

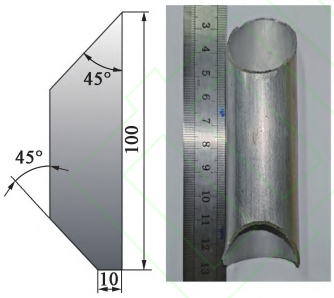

图 6 初始管坯尺寸[20]

Fig. 6 Initial tube blank dimensions[20]

为了验证有限元模型可靠性，在模拟与实验条件一致的情况下，开展推-旋一体弯曲成形实验研究。初始管坯尺寸如图 6 所示[20]，为了对比模拟与实验中内、外侧壁厚与输出端伸长量，分别在成形弯管上取点进行测量，测量点分布如图 7 所示。

模拟与实验结果如图 8 所示，结合式（1）可以得到模拟与实验结果中，内、外侧壁厚和输出端伸长量最大相对误差分别为 9.27%、3.98%、13.37%，误差均在允许范围内[21]，表明有限元模型可靠。

$$e = \frac{|A_{sim} - A_{exp}|}{A_{exp}} \times 100\% \tag{1}$$

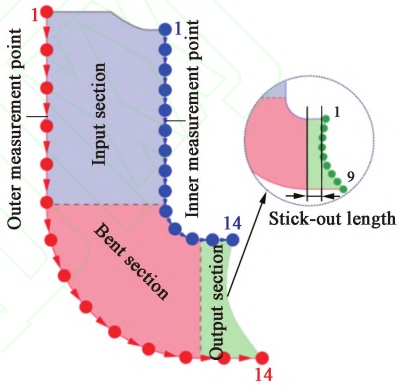

图 7 测量点分布图

Fig. 7 Distribution map of measurement points

式中：e 为实验与模拟相对误差；A_{sim} 为模拟值；A_{exp} 为实验值。

4 有限元模拟结果分析

为探究管坯进给速度 V_1、旋轮转速 V_2、反推压强 P 及其加载路径等工艺参数对相对弯曲半径为 0.8D 的 5A02 铝合金薄壁管推-旋一体弯曲成形中内、外侧壁厚和输出端伸长量的影响，分别对各参数进行有限元数值模拟分析。

4.1 管坯进给速度模拟分析

管坯进给速度 V_1 是影响弯管成形质量和效率的关键工艺参数之一，它直接关系到管坯材料在成形过程中的流动状态，从而影响弯管壁厚分布[21]。

管坯进给速度 V_1 分别设置为 3、9 和 15 mm·s^{-1}，旋轮固定，反推压强为 60 MPa，加载路径为 B。图 9 所示为不同进给速度下的仿真模拟结果。随着进给速度增大，管坯整体所受应力呈现上升趋势，高应力区域覆盖面分布更加广泛。如图 9c 所示，在较

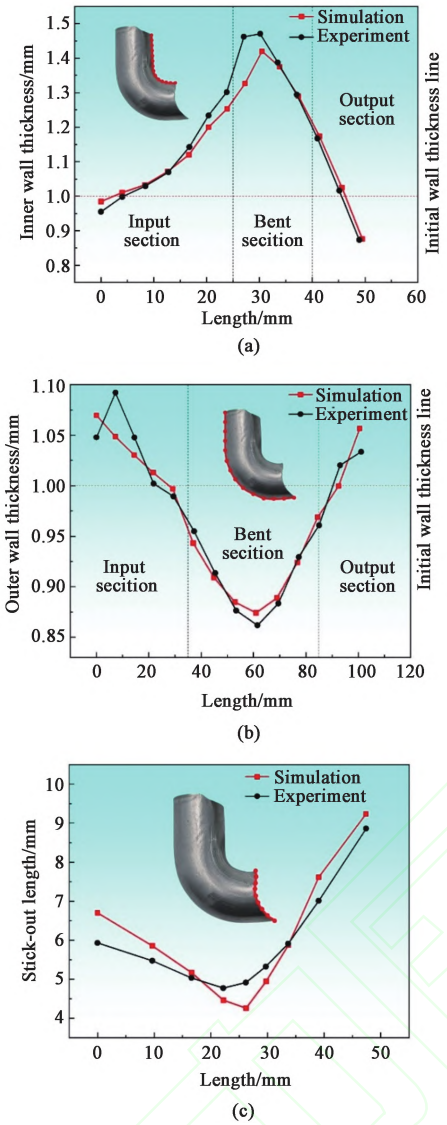

图 8　模拟与实验可靠性验证

（a）内侧壁厚　（b）外侧壁厚　（c）输出端伸长量

Fig. 8　Simulation and experimental reliability verification

（a）Inner wall thickness　（b）Outer wall thickness

（c）Stick-out length

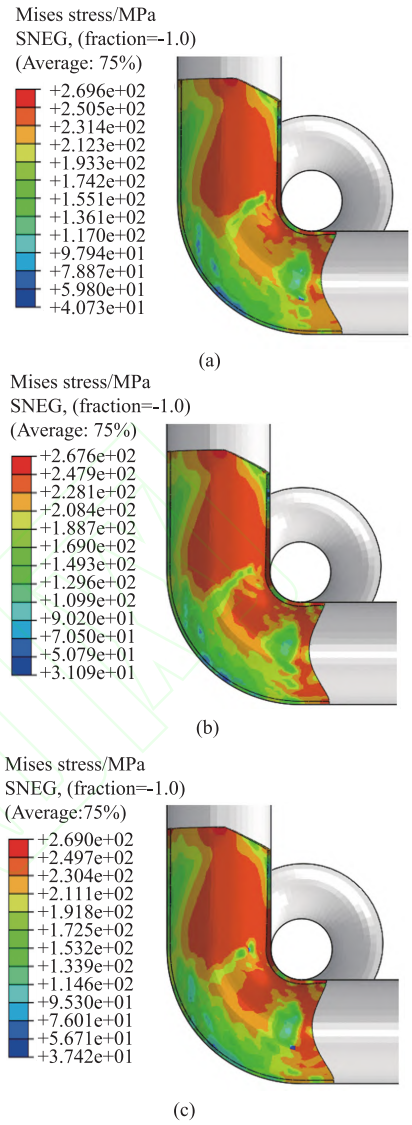

图 9　不同管坯进给速度下的 Mises 等效应力分布云图

（a）3 mm · s^{-1}　（b）9 mm · s^{-1}　（c）15 mm · s^{-1}

Fig. 9　Mises equivalent stress distribution nephgrams with different tube blank feed rates

大的进给速度下，弯管弯曲段内侧压应力增大且高应力分布区域范围较广，使得弯管内侧容易出现过度增厚甚至起皱风险；而在弯管外侧，较大的进给速度会加剧该处材料流动，导致弯管外壁进一步减薄。如图 9a 和 9b 所示，当进给速度较小时，弯曲段内侧应力状态得到明显改善，高应力区域分布范围减小，应力分布更为均匀，避免了局部应力过度增大而导致缺陷产生。表 1 所示为不同管坯进给速度 V_1 下的模拟仿真数据，随着 V_1 减小，弯管最大增厚率和最大减薄率均呈现明显降低趋势；在 V_1 = 15 mm · s^{-1} 下，其最大增厚率和最大减薄率分别为

表 1　不同管坯进给速度下的模拟仿真数据

Tab. 1　Simulation data at different billet feed rates

V_1/（mm · s^{-1}）	The maximum thickening rate/%	The maximum thinning rate/%	Stick-out length/mm
3	42.0	9.3	2.26
9	45.1	10.0	2.51
15	47.1	10.8	2.83

47.1%和 10.8%，当 V_1 降低至 3 mm · s^{-1} 时，与 V_1 = 15 mm · s^{-1} 时相比管件的最大增厚率和最大减薄率分别降低了 5.1%和 1.5%，壁厚分布更加均匀。弯管输出端伸长量随着 V_1 的增大而增大，但增加的长度有限，对比 V_1 = 3 和 15 mm · s^{-1} 时，其输出端伸长量仅

增大 0.57 mm，故 V_1 对输出端伸长量影响较小。

4.2 旋轮转速模拟分析

推-旋一体弯曲成形实验中，旋轮转速 V_2 是最为关键的工艺参数之一，通过控制旋轮的运动状态改变管坯内侧与模具型腔的摩擦方式和方向。当旋轮固定时，管坯内侧与旋轮为滑动摩擦方式，摩擦方向与管坯进给方向相反；当 $0<V_2<V_1$ 时，管坯内侧与旋轮为滚动摩擦方式，摩擦方向与管坯进给方向相反；当 $V_2=V_1$ 时，管坯内侧与旋轮为静摩擦方式，无相对滑动；当 $V_2>V_1$ 时，管坯内侧与旋轮为滚动摩擦方式，摩擦方向与管坯进给方向相同。

图 10 所示为不同旋轮转速 V_2 下的模拟仿真结果。由图可知，旋轮转速 V_2 对管坯内、外侧壁厚及输出端伸长量 3 个因素存在不同程度的影响。

与旋轮固定方式相比，随着旋轮转速 V_2 增大，管坯弯曲段内侧增厚呈现下降趋势，内侧壁厚分布更为均匀，最大增厚率显著下降；在旋轮固定形式下，其最大增厚率为 47.1%。与之相比，4 种旋轮转速 V_2 下的最大增厚率分别下降了 3.3%、5.9%、8.0%、9.2%，如图 10a 所示。这是由于旋轮主动旋转方式改变了管坯弯曲段内侧摩擦形式，避免了管坯内侧区域局部的应力集中现象，使得应力分布更为均匀，促进了管坯内侧材料向前流动，避免了内侧材料的堆积，可有效避免管坯内侧过度增厚甚至起皱等问题。

与管坯壁厚增厚率相比，其减薄率显现出相反的结果。随着旋轮转速增大，管坯弯曲段外侧壁厚减薄变大；在旋轮固定形式下，其最大减薄率为 10.8%。与之相比，4 种旋轮转速 V_2 下的最大减薄率分别增大了 0.5%、1.2%、1.8%和 2.2%，如图 10b 所示。这是由于旋轮旋转在带动内侧材料流动的同时，能够间接影响管坯弯曲段外侧应力分布，与固定方式相比，旋轮旋转下同等应力分布区域扩大，由内侧扩散到了外侧区域，促进了外侧材料一定程度的流动。

输出端伸长量对于旋轮转速 V_2 敏感性较高。与旋轮固定不动方式相比，旋轮主动旋转可极大增长输出端伸长量。当旋轮固定不动时，其输出端伸长量仅为 2.83 mm，而在旋轮主动旋转状态下，其长度分别延长了 75.6%、97.9%、107.8%和 115.5%，如图 10c 所示。

综上所述，旋轮转速 V_2 对管坯弯曲段壁厚和输出段伸长量会产生显著影响，而对输入段和输出段内外侧壁厚影响较小。旋轮转速 V_2 对管坯输出端伸长量影响最大，可极大延长输出端长度；对管坯内侧材料增厚影响次之但也较为显著，可降低管坯内侧最大增厚率，且使得壁厚分布更为均匀；但对管坯外侧壁厚影响较小。同时对比 $V_2=1.5V_1$ 和 $V_2=2V_1$ 两组结果可以发现，当旋轮转速 V_2 大于管坯进给速度 V_1 时，即摩擦方向已经改变时，继续增加旋轮转速 V_2 对管坯成形影响较小，其内侧壁厚增厚率、外侧壁厚减薄率以及输出端伸长量仅仅相差 1.2%、0.4%和 7.7%。

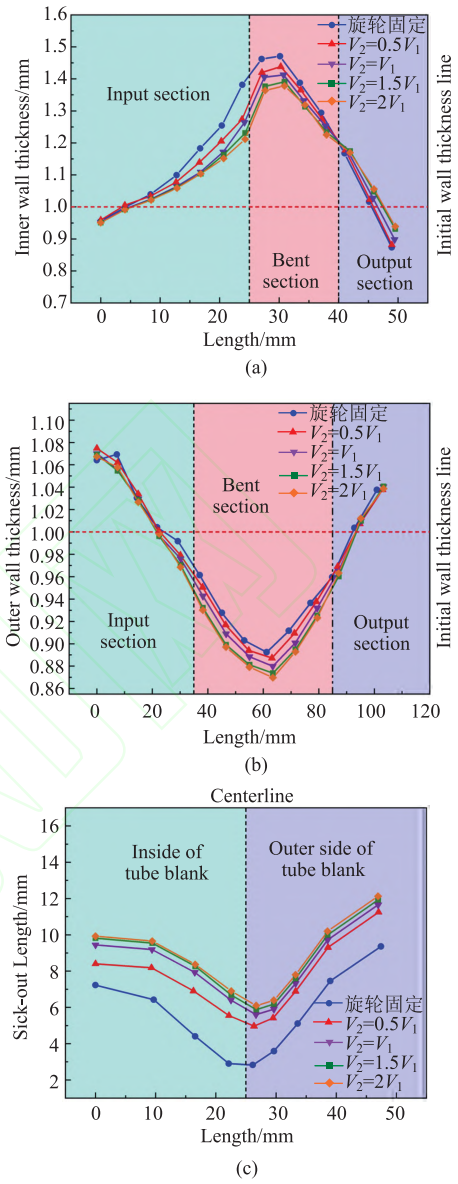

图 10 不同旋轮转速下的模拟仿真结果

(a) 内侧壁厚 (b) 外侧壁厚 (c) 输出端长度

Fig. 10 Simulation results with different spin wheel speeds

(a) Inner wall thickness (b) Outer wall thickness (c) Stick-out length

4.3 反推压强及其加载路径模拟分析

在推-旋一体弯曲成形过程中，反推压强 P 是

管坯成形最为关键的因素之一，合适的反推压强 *P* 不仅可以改善弯管在成形过程中的应力分布情况、避免弯管内侧不贴膜、壁厚分布不均以及失稳起皱等缺陷，而且可以有效调控输出端伸长量。以下研究均在旋轮主动旋转、其他工艺参数均一致的条件下，探究反推压强 *P* 及其加载路径对管坯成形参数的影响。

如表 2 所示，分别设置 9 组模拟仿真对照组，其中 1~5 组为在加载路径 B 下、反推压强 *P* 依次为 50、60、70、80 和 90 MPa 时的对照组；6~9 组为在反推压强 *P* 为 70 MPa 下、加载路径依次为 A、B、C、D、E 时的对照组。其中 5 种加载路径如图 11 所示，设定管坯总行程为 *s*，反推压强 *P* 达到峰值时管坯行程分别为 0、0.25*s*、0.5*s*、0.75*s* 和 1*s*，幅值为 100%时反推压强 *P* 为 70 MPa，其大小与管坯行程呈线性相关。

表 2　不同反推压强及加载路径模拟结果

Tab. 2　Simulation results for different back pressures and loading paths

Number	Pressure/MPa	Load path	The maximum thinning rate/%	The maximum thickening rate/%	Stick-out length/mm
1	50	B	12.52	43.26	5.41
2	60	B	13.23	37.52	5.74
3	70	B	13.46	40.76	6.06
4	80	B	14.12	43.58	5.25
5	90	B	14.32	45.07	2.74
6	70	A	13.52	43.58	4.37
7	70	C	13.45	37.71	6.16
8	70	D	13.43	37.05	6.32
9	70	E	13.45	44.67	5.12

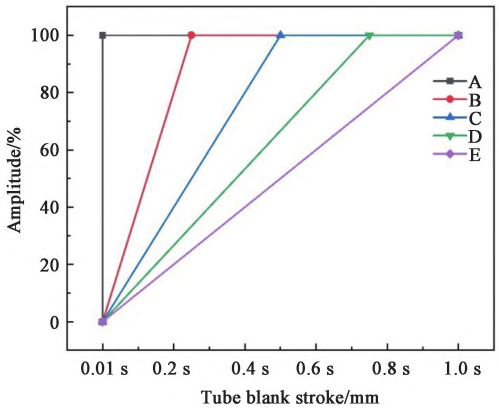

图 11　加载路径示意图

Fig. 11　Schematic diagram of loading path

不同反推压强 *P* 下的模拟仿真结果关系曲线如图 12a 和图 12b 所示。典型成形缺陷如图 13 所示。结果表明，随着 *P* 从 50 MPa 增大到 90 MPa，管坯外侧壁厚最大减薄率逐渐增大，管坯内侧壁厚最大增厚率先减小后增大，输出端伸长量先增大后减小。这是由于随着 *P* 逐渐增大，管坯内聚氨酯块受力压缩，对管坯的径向支撑力逐渐增大导致管坯与模具

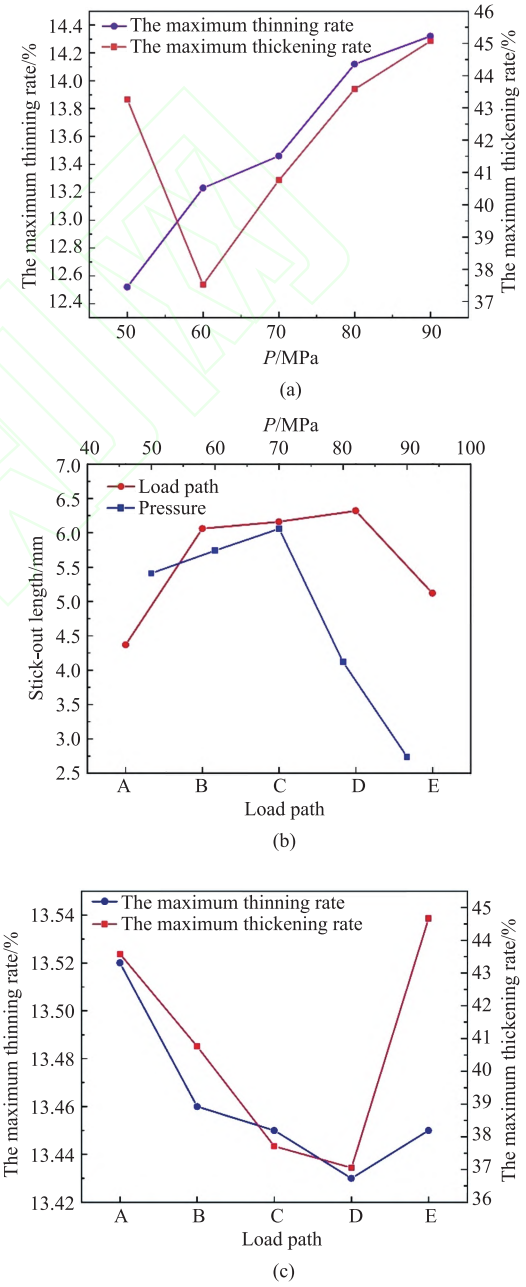

图 12　不同反推压强及加载路径下模拟结果变化曲线

（a）压强-壁厚　（b）压强、加载路径-伸长量　（c）加载路径-壁厚

Fig. 12　Variation curves for simulation results under different back pressure and loading paths

（a）Pressure-wall thickness　（b）Pressure, load path-elongation　（c）Load path-wall thickness

型腔摩擦力增大，外侧弯曲段材料受拉减薄且输入段材料流向弯曲段受阻，材料得不到充分补充而减薄；内侧弯曲段材料受压材料向输出段流动受阻从而堆积造成壁厚增厚加剧，但当 P 为 50 MPa 时，其大小不足以使得聚氨酯块充分支撑管坯造成管坯内外侧不贴膜甚至起皱，使得局部区域出现异常增厚现象（图 13a）；输出端伸长量在 P 为 70 MPa 时达到最大，P 在大于 70 MPa 时由于材料流动进一步受阻使得其输出端伸长量逐渐减小甚至出现不足的问题（图 13b），在 P 小于 70 MPa 时由于压强不足可能会出现管坯不贴模造成输出端伸长量减小（图 13a）。综合考虑下，最佳反推压强 P 为 70 MPa。

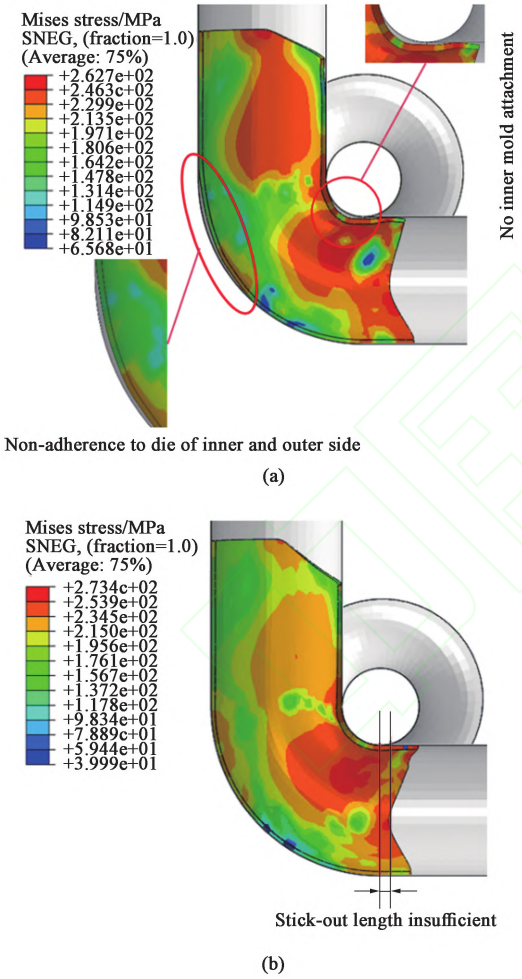

图 13 典型成形缺陷

（a）内外侧不贴膜 （b）输出端长度不足

Fig. 13 Typical forming defects

（a）Non-adherence to die of inner and outer side

（b）Stick-out length insufficient

不同加载路径下的模拟仿真结果关系曲线如图 12b 和图 12c 所示。结果表明，最大减薄率、最大增厚率和输出端伸长量均在路径 D 下达到最优值；其中从路径 A 到路径 D，最大减薄率和最大增厚率逐渐减小，输出端伸长量逐渐增大；从路径 D 到路径 E，最大减薄率和最大增厚率反而增大，输出端伸长量反而减小。这是由于在弯管弯曲成形过程中，其形变应力逐渐增大，而路径 E 下反推压强增速缓慢，聚氨酯块对管坯的支撑力不足以适应应力变化导致管坯出现内外侧不贴模甚至起皱等缺陷，从而出现异常参数变化。综合 5 组试验数据可以发现，管坯最大减薄率对加载路径的变化敏感性较低，结果受其影响表现得并不显著。

5 成形实验

通过上述实验设备和成形模具进行推-旋一体弯曲成形实验。根据上述成形仿真模拟，选择实验成形参数为管坯进给速度 $V_1 = 3\ \mathrm{mm \cdot s^{-1}}$、旋轮转速 $V_2 = 1.5V_1$，反推压强 $P = 70$ MPa、加载路径 D 进行实验；其中，由于模拟中反推压强直接作用于最前端聚氨酯块，而实验中反推压强由顶缸提供，实验设备上显示的压强为顶缸内室压强，故需要经过转换公式（式（2））进行换算，仿真模拟中 70 MPa 经由换算，得到实验中压强大小为 1.01 MPa。

$$P = \frac{ph^2}{H^2} \tag{2}$$

式中：P 为模拟中施加在聚氨酯块端面的反推压强；p 为顶缸内室压强，即实验压强；H 为有限元模拟中聚氨酯块的直径；h 为顶缸内室直径。

实验结果如图 14 所示，弯管整体成形效果较好，输出端伸长量理想且内外侧壁厚分布均匀。将实验与仿真模拟成形结果进行对比，结果如表 3 和图 15 所示。管件的最大增厚率相差 3.94%，最大减薄率相差 1.7%，实验输出端伸长量比仿真结果长 0.18 mm。总体来说，实验弯管外侧壁厚先减小后

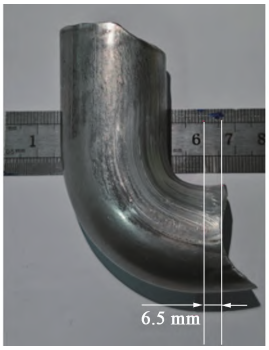

图 14 弯管成形实物图

Fig. 14 Physical image of bent tube

表 3　模拟与实验弯管成形结果对比

Tab. 3　Comparison of simulation and experimental tube bending results

Forming results	The maximum thickening rate/%	The maximum thinning rate/%	Stick-out length/mm
Simulation	37.43	13.43	6.32
Experiment	41.37	14.50	6.50

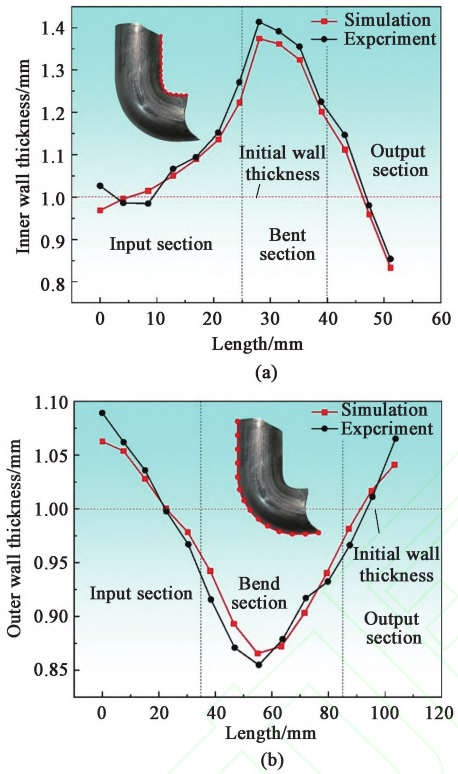

图 15　模拟与实验壁厚对比

（a）内侧　（b）外侧

Fig. 15　Comparison of simulated and experimental wall thickness

（a）Inner side　（b）Outer side

增大，内侧壁厚先增大后减小，输出端伸长量理想，整体趋势与模拟仿真结果相符合，具体数值存在微小差异但在合理范围之内，这是由于数值模拟中各种参数获取的不精确性以及实验中存在的系统与随机误差等导致[23]。

6　结论

（1）降低管坯进给速度 V_1 可改善弯管内侧应力状态，降低起皱风险，壁厚分布更加均匀；弯管增厚率明显降低，减薄率和输出端伸长量对进给速度敏感性较低，影响较小；数值模拟结果表明，$V_1 = 3\ \mathrm{mm \cdot s^{-1}}$ 时，管坯成形效果最佳。

（2）旋轮转速 V_2 对弯管成形影响显著。与旋轮固定形式相比，随着 V_2 增大，可极大延长输出端伸长量，管坯内侧增厚率也显著降低，壁厚分布更加均匀；但当 $V_2 = 1.5V_1$ 时，继续增大 V_2 对管坯成形影响并不显著，故旋轮转速 V_2 选择约为 $1.5V_1$ 即可达到较优参数范围。

（3）反推压强 *P* 过大或过小均会对弯管成形造成不良影响。压强大于 70 MPa 时壁厚增厚和减薄加剧，伸出量不足；压强小于 70 MPa 时，管坯内腔得不到有效支撑容易产生内外侧不贴模以及内侧起皱等缺陷。由仿真和实验结果表明，在 *P* = 70 MPa、加载路径 D 时，可得到成形稳定、质量较好的弯管。

参考文献：

[1]　WANG Y, HAN C, YUAN S J. Effect of internal pressure on corner radius and thickness distribution of shear hydro-bending of 5A02 aluminum alloy tube [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22: 376-381.

[2]　郭训忠，陶杰，王辉. 航空导管先进成形技术的研究进展 [J]. 南京航空航天大学学报，2020，52（1）：12-23.
GUO Xunzhong, TAO Jie, WANG Hui. Research progress on advanced forming technologies for aerospace tubing [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020, 52 (1): 12-23.

[3]　王浩，刘坤，吴红，等. 船舶铝合金增材制造技术的研究现状及展望 [J]. 材料开发与应用，2024，39（2）：17-27，43.
WANG Hao, LIU Kun, WU Hong, et al. Research status and outlook of additive manufacturing technology for marine aluminum alloys [J]. Material Development and Application, 2024, 39 (2): 17-27, 43.

[4]　林忠钦，黄庆学，苑世剑，等. 中国塑性成形技术和装备 30 年的重大突破与进展 [J]. 塑性工程学报，2024，31（4）：2-45.
LIN Zhongqin, HUANG Qingxue, YUAN Shijian, et al. Major breakthroughs and advances in China's plastic forming technology and equipment over the past 30 years [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2024, 31 (4): 2-45.

[5]　TAO R, XU X, FAN Y, et al. Differential flow velocities control method for push-bending of the thin-walled tube with a 0.9D bending radius by differential lubrication [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 124 (10): 3359-3369.

[6]　刘琪，徐雪峰，付春林，等. 带长直管的小弯曲半径薄壁弯头推弯成形实验研究 [J]. 锻压技术，2018，43（5）：62-67.
LIU Qi, XU Xuefeng, FU Chunlin, et al. Experimental study on push-bending forming of thin-walled elbows with small bending radius and long straight pipe sections [J]. Forging & Stamping Technology, 2018, 43 (5): 62-67.

[7] SUN H, LI H, GONG F, et al. Filler parameters affected wrinkling behavior of aluminum alloy double-layered gap tube in rotary draw bending process [J]. The In-ternational Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 119 (7-8): 5261-5276.

[8] 李宁, 孙进, 岳常迪, 等. TA18 钛合金管材数控弯曲成形研究 [J]. 航空制造技术, 2025, 68 (7): 107-116.
LI Ning, SUN Jin, YUE Changdi, et al. Research on CNC bending forming of TA18 titanium alloy tubing [J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2025, 68 (7): 107-116.

[9] 方继钊, 郭伟, 陈根发, 等. GH4169 高温合金薄壁管 1*D* 弯曲半径冷胀推弯成形研究 [J]. 航空制造技术, 2022, 65 (10): 75-81.
FANG Jizhao, GUO Wei, CHEN Genfa, et al. Study on cold expansion bending forming of GH4169 high-temperature alloy thin-wall tubes with 1*D* bending radius [J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2022, 65 (10): 75-81.

[10] 李艳芳, 徐雪峰, 范玉斌, 等. 小弯曲半径 TA18 钛管差温推弯成形影响因素研究 [J]. 塑性工程学报, 2025, 32 (10): 84-91.
LI Yanfang, XU Xuefeng, FAN Yubin, et al. Study on influencing factors of differential temperature push-bending forming for TA18 titanium tube with small bending radius [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2025, 32 (10) : 84-91.

[11] 郭伟, 杨坪川, 杨景超, 等. 大径厚比薄壁铝管冷推弯成形工艺参数研究及验证 [J]. 塑性工程学报, 2025, 32 (2): 28-37.
GUO Wei, YANG Pingchuan, YANG Jingchao, et al. Research and verification of cold push-bending process parameters of thin-walled aluminum tubes with large diameter-to-thickness ratio [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2025, 32 (2): 28-37.

[12] PENG M L, XU X F, FAN Y B, et al. Process parameters optimization of differential heating push-bending for small bending radius tube based on orthogonal experiments [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2024, 133 (7-8): 3399-3414.

[13] XIE W, JIANG W, WU Y, et al. Process parameter optimization for thin-walled tube push-bending using response surface methodology [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 118 (11-12): 3833-3847.

[14] JIANG W, XIE W, SONG H, et al. A modified thin-walled tube push-bending process with polyurethane mandrel [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 106 (5-6): 2509-2521.

[15] XIAO J, XU X F, ZUO D W. Influences on the extended length and performance of push bending for the GH4169 superalloy tube with small bending radius of 1*D* [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 112 (1): 107-119.

[16] KONG D, LANG L, RUAN S, et al. A novel hydroforming approach in manufacturing thin-walled elbow parts with small bending radius [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 90 (5): 1579-1591.

[17] XIE J, XU X F, TAO R C, et al. Bending forming method for tubes with small bending radius based on push-spin integration [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2024, 133 (1-2): 851-860.

[18] LIU J S, XU X F, PENG M L, et al. Numerical simulation and experimental study on push-pull-rotate-integrated bending forming of 5A02 aluminum alloy [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2025, 137 (11): 6091-6106.

[19] GB/T 228.1—2021, 金属材料 拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法 [S].
GB/T 228.1—2021, Metallic materials—Tensile testing—Part 1: Method of test at room temperature [S].

[20] 杨东, 徐雪峰, 范玉斌, 等. 大径厚比不锈钢弯管内胀冷推弯成形数值模拟及实验研究 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (10): 154-162.
YANG Dong, XU Xuefeng, FAN Yubin, et al. Numerical simulation and experimental study on cold expansion bending forming of large-diameter thick-wall stainless steel elbow pipes [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (10): 154-162.

[21] 施渊吉, 潘超, 夏腾飞, 等. AA5052 铝合金管材自由弯曲成形起皱缺陷预测的研究 [J]. 航空制造技术, 2025, 68 (9): 111-122.
SHI Yuanji, PAN Chao, XIA Tengfei, et al. Study on predicting wrinkle defects in free bending forming of AA5052 aluminum alloy tubes [J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2025, 68 (9): 111-122.

[22] 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.

[23] 李小曼, 钟李欣, 章文亮, 等. T 型管内高压成形模拟仿真及试验研究 [J]. 塑性工程学报, 2024, 31 (12): 34-43.
LI Xiaoman, ZHONG Lixin, ZHANG Wenliang, et al. Simulation and experimental study of high-pressure forming in T-shaped tubes [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2024, 31 (12): 34-43.