

# 薄壁铝合金弯管差温成形数值模拟研究

薛凯, 李斌琦, 楼浩轩, 危立明\*, 程甜, 吴义旺

南昌航空大学科技学院机械与材料学部, 江西 南昌

收稿日期: 2026年4月1日; 录用日期: 2026年5月2日; 发布日期: 2026年5月12日

## 摘要

薄壁弯管作为气、液输送的管道广泛地应用于航空航天、石油、电力等领域。为解决铝合金管成形中易出现的外侧破裂和内侧起皱等缺陷, 本文采用推弯工艺有限元模型数值分析方法, 探究了成形温度条件、差温区域分布及加热区温度对推弯成形质量的影响规律。结果表明: 相较于常温成形工艺, 热-力耦合差温成形工艺可显著改善壁厚分布的均匀性, 当差温区域分布位置为 $r_2$ 与冷却区为 $c_2$ 时, 成形质量最好, 当冷却区固定为室温 $20^{\circ}\text{C}$ 时,  $400^{\circ}\text{C}$ 加热条件下等效塑性应变分布最均匀。

## 关键词

铝合金, 推弯成形, 热-力耦合, 有限元分析

# Research on Numerical Simulation of Differential Temperature Forming for Thin-Walled Aluminum Alloy Bent Pipes

Kai Xue, Binqi Li, Haoxuan Lou, Liming Wei\*, Tian Cheng, Yiwang Wu

Department of Mechanical and Materials, Science and Technology College of NCHU, Nanchang Jiangxi

Received: April 1, 2026; accepted: May 2, 2026; published: May 12, 2026

## Abstract

Thin-walled bent pipes are widely used as gas and liquid transmission pipelines in aerospace, petroleum, electric power and other fields. To solve the defects such as outer wall fracture and inner wall wrinkling that are prone to occur during the forming of aluminum alloy pipes, a numerical analysis

\*通讯作者。

文章引用: 薛凯, 李斌琦, 楼浩轩, 危立明, 程甜, 吴义旺. 薄壁铝合金弯管差温成形数值模拟研究[J]. 材料科学, 2026, 16(5): 58-65. DOI: 10.12677/ms.2026.165099

method based on the finite element model of the push-bending process was adopted to investigate the influence laws of forming temperature conditions, differential temperature zone distribution and heating zone temperature on the push-bending forming quality. The results show that compared with the room temperature forming process, the thermo-mechanical coupled differential temperature forming process can significantly improve the uniformity of wall thickness distribution. The forming quality is optimal when the differential temperature zone is set as r2 and the cooling zone as c2. When the cooling zone is fixed at room temperature (20°C), the equivalent plastic strain distribution is the most uniform under the heating condition of 400°C.

## Keywords

Aluminum Alloy, Push-Bending Forming, Thermo-Mechanical Coupling, Finite Element Analysis

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

管材弯曲成形作为金属塑性加工领域的核心技术之一，凭借其构件轻量化、强韧化及空间布局灵活性等优势，已成为航空航天、汽车制造、能源装备等高端工业领域不可或缺的关键工艺[1]。尤其在航天发动机燃料传输系统中，弯管件需同时满足小弯曲半径、高尺寸精度与优良力学性能的严苛要求，其成形质量直接决定了装备的可靠性与服役寿命。随着现代工业向集成化、小型化方向发展，相对弯曲半径(R/D)小于1.5的小半径弯管及大径厚比薄壁管件的应用日益广泛，但此类管件在弯曲过程中极易出现内侧起皱塌陷、外侧过度减薄破裂、截面椭圆度超标及回弹等缺陷成为技术突破的核心瓶颈[2][3]。

为克服超弯管成形质量问题，国内外许多学者都开展了热辅助条件下的管件成形技术研究。一些学者主要针对理想的圆形截面管件进行了研究，方秀荣等[4]采用理论分析和数值模拟相结合的方法确定了影响X80管线钢感应加热的主要工艺参数及其对管材加热效果的影响；李兰云等[5]对大口径厚壁管感应加热推弯成形过程进行了电磁-热-力多场耦合模拟。杨东等[6]在大径厚比不锈钢管内胀冷推弯研究中发现，采用补偿端头结构、分区域润滑及合理匹配反推力，可有效抑制内侧起皱，提升材料流动均匀性。郭伟等[7]基于Abaqus平台建立大径厚比薄壁铝管冷推弯有限元模型，通过正交试验确定了管坯与凹模间隙、顶推压力等关键参数的最优组合；此外，国外学者Lee等[8]和Xun等[9]结合试验设计和有限元数值模拟方法，对局部感应加热弯管过程中的工艺参数进行了优化。这些研究为管材感应加热弯曲成形的发展提供了强有力的支撑，但是他们建立的有限元模型没有经过试验验证，结果的准确性和精度有待进一步考证。

本文针对推弯成形中的热-力耦合问题，开展铝合金弯管模拟分析研究。通过建立铝合金薄壁管推弯成形工艺有限元模型，探索了室温与高温、温度区域分布与不同温度对材料应力应变及壁厚的影响。结果显示，相较于常温成形工艺，热-力耦合差温成形工艺可显著改善壁厚分布的均匀性，当差温区域分布位置为r2与冷却区为c2时，成形质量最好，当冷却区固定为室温20°C时，400°C加热条件下等效塑性应变分布最均匀。本研究成果可为小半径、大径厚比管件的推弯工艺优化提供理论支撑与技术参考。

## 2. 热-力-弹性体耦合差温推弯成形原理

热-力耦合差温推弯成形是将分块式弹性体弹性耐热橡胶介质填入设计的管坯内，在冲头和顶推杆

提供的推力  $F_1$  和反推力  $F_2$  的作用下膨胀变形，提供内压支撑管坯弯曲变形。因推力抵消部分弯曲外侧拉力，从而减轻了传统弯曲极易出现的管外侧变薄。通过控制不同变形区域材料的温度，从而控制材料的塑性，最终达到提高薄壁管弯曲的成形能力。如图 1 所示，即弯曲内侧通水冷却，提高材料刚性，抵抗弯管弯曲内侧起皱，弯曲外侧加热有利于材料的流动，并且提高了材料塑性，防止外侧减薄破裂。

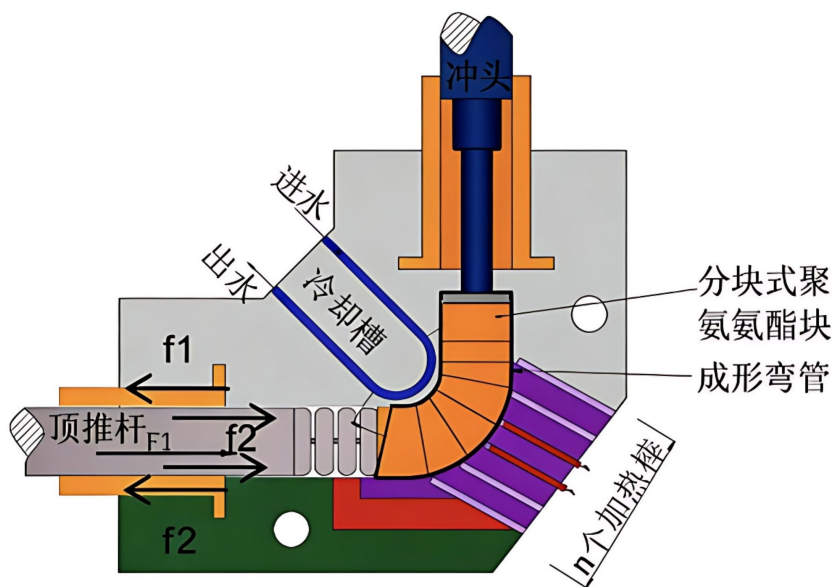


Figure 1. Schematic diagram of differential temperature push-bending forming  
图 1. 差温推弯成形原理图

### 3. 建立有限元模型

#### 3.1. 建立预热管材热分析有限元模型

如图 2 所示，差温推弯使用加热棒对模具一侧加热，通过模具与管材之间接触传递热量。由于热-力耦合差温推弯成形上下对称，为节省模拟计算时间，采用模型一半进行模拟试验。模型部件主要包括：管坯、模具、推头以及分块式弹性橡胶，其中顶推杆直接在模型上对填充橡胶施加力进行代替，模具上有多个加热孔和分段式水槽，各个部件均设置为可变形实体。在热分析过程中采用 Abaqus/Standard 求解器进行模拟，分析步采用热传递分析步，模拟出来的结果在后续应力分析过程中作为温度场使用[10]。

根据本模型特点以热传导为主，管坯的传导率与温度有关，具体如表 1 所示。将图 3 所示的单向拉伸实验得到的不同温度下应变速率为  $0.01 \text{ S}^{-1}$  的 5A02 铝合金的本构关系导入到模型中，实现对 5A02 铝合金管材料的定义。硅橡胶的本构关系选择 Mooney-Rivlin 方程来定义，泊松比为 0.499；Rivlin 系数  $C_{10}$ 、 $C_{01}$  分别为 0.861 和 -0.777，材料参数为 0.0238，弹性硅橡胶的传导率设置为  $180 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。模具和冲头的传导率设置为  $200 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，接触对之间的给热系数设置为  $40 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{C})$ 。模具网格类型为十结点传热四面体单元 DC3D10，冲头和橡胶的网格类型为八结点传热六面体单元 DC3D8，管坯的网格类型为四结点传热四边壳单元 DS4。弯曲过程采用 Abaqus/Explicit 求解器、动力-显示分析步进行模拟计算。管坯与模具型腔采用分区域润滑方式，内侧变形区的摩擦系数设置为 0.03，外侧变形区与传导区的摩擦系数设置为 0.1，其他接触对之间的摩擦系数全部设置为 0.03。边界条件设置为模具完全固定，冲头沿移动方向设置一特定的位移值(Z 方向)，反推力为  $F = 30 \text{ MPa}$ 。通过在最后一块橡胶上施加压力的方式代替柔性顶杆。

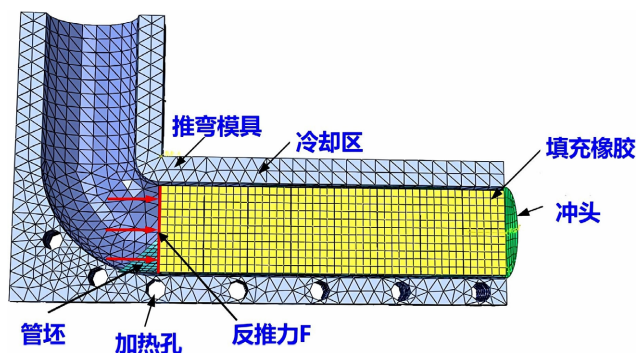


Figure 2. Finite element model of differential temperature push-bending

图 2. 差温推弯有限元模型

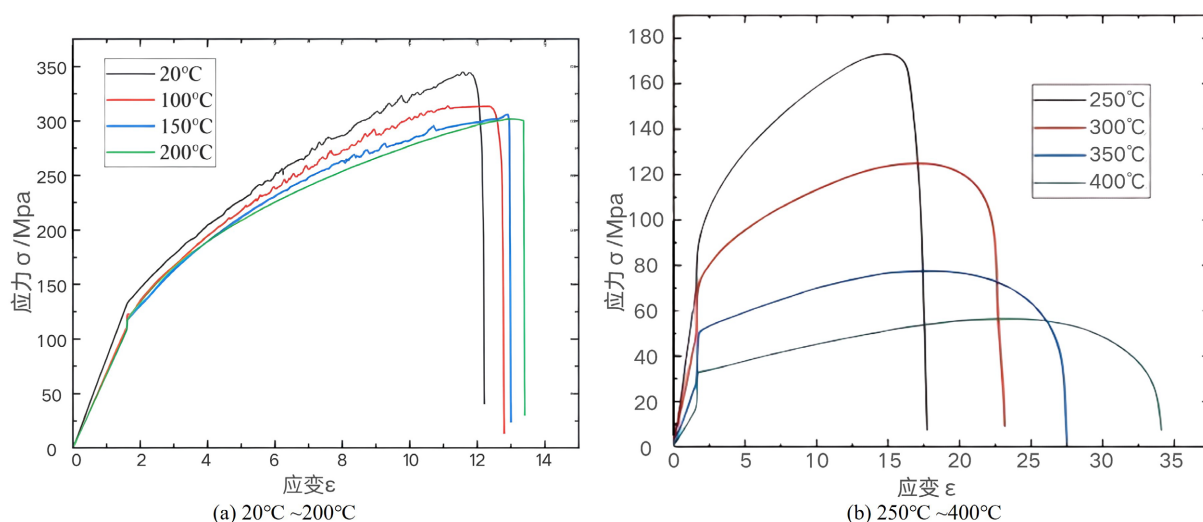


Figure 3. Stress-strain curves of 5A02 aluminum alloy under different strain rates

图 3. 不同应变速率下 5A02 铝合金应力 - 应变曲线

Table 1. Thermal conductivity of tube blank

表 1. 管坯热传导率

导率(W/(m·K))	温度(°C)
146.5	20
154.9	200
159	300
159.1	400

### 3.2. 有限元模型温度区域划分

在进行热 - 力 - 弹性体耦合差温推弯成形时, 为实现管材差温的区域稳定, 需在模具内有一个保温的过程。由于热量从模具传递给管坯, 故模具的型腔内需有一个恒定的差温温度场, 利用 Abaqus 有限元软件分析了模具温度场的变化对管坯温度分布的影响。为了清晰地显示不同温度区域, 将在实验模具的三维模型上进行划分。如图 4 所示, 固定加热棒的加热孔区域分为 r1、r2、r3, 通水槽冷却区分为 c1、c2、c3。

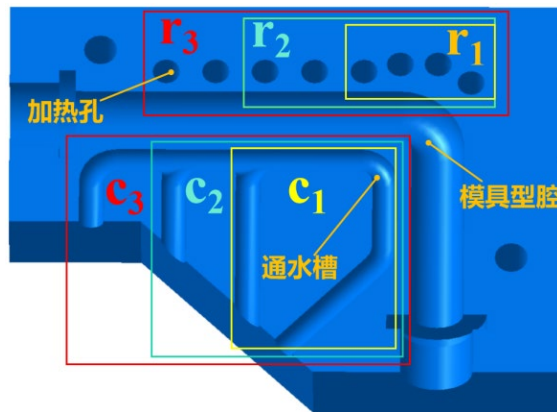


Figure 4. Die temperature zoning diagram  
图 4. 模具温度分区图

## 4. 模拟结果与分析讨论

### 4.1. 差温和常温对推弯成型的影响

由图 5 不同成形条件下的壁厚分布云图可知，差温推弯成形的弯管相较于冷推弯成形的弯管壁厚分布更均匀。图 5(a)中，弯管最大减薄接近 30%，在常温下，已近乎 5A02 材料最大延伸率；故常温下，成形弯管的弯曲外侧易破裂，且成形弯管最大壁厚增加严重，易出现起皱、端口畸变等成形缺陷。由图 5(b)可知，差温推弯成形的弯管直段有材料堆积现象，这使得管坯弯曲内侧容易产生增厚起皱的缺陷；而差温推弯中，弯管直段的增厚量较小，弯管的弯曲外侧壁厚减薄量较小，根据 5A02 材料在该温度下的延伸率可知，弯管的弯曲外侧并不会出现减薄破裂的缺陷产生。因此，相比于常温下的冷推弯，热-力-弹性体耦合差温推弯成型的方法有利于提高小弯曲半径弯管的成形极限，拓宽了推弯成形的工艺窗口。

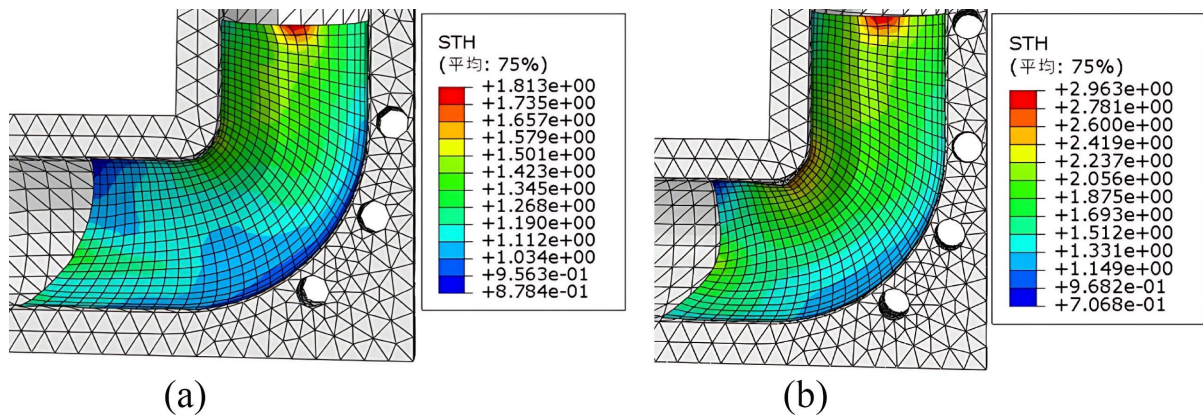


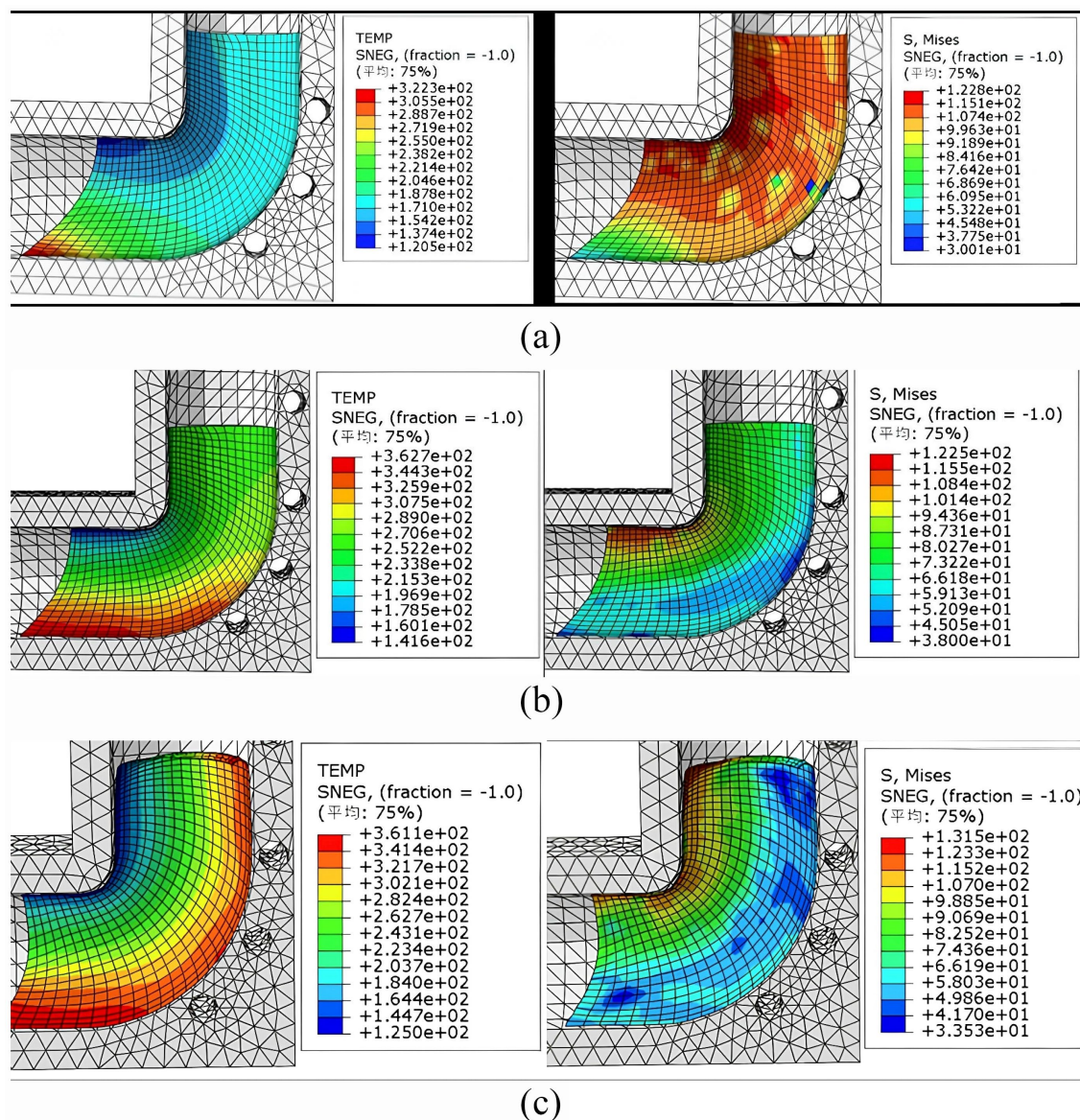
Figure 5. Wall thickness distribution diagrams under different push-bending forming conditions: (a) Simulation results of cold push-bending forming; (b) Simulation results of differential temperature push-bending forming

图 5. 不同条件下推弯成形壁厚分布图: (a) 冷推弯成形模拟结果; (b) 差温推弯成形模拟结果

### 4.2. 差温区域对推弯成型的影响

在差温推弯成型中，管坯温度区域的控制是保证弯管成形质量的重要因素。根据管坯弯曲成形时，不同变形部位的受力情况不同，通过温度改变管坯材料的力学特性，使材料达到成形的最佳状态。图 6(a)所示，当差温区域为加热  $r_1$ 、冷却  $c_1$  时，成形弯管弯曲内侧有起皱产生，弯管内侧与模具的型腔不能很

好贴合,且弯管的应力集中较为严重,不利于弯管的成形;当差温区域为加热 r2、冷却 c2 时,如图 6(b)所示,加热与冷却区控制在弯管变形区,弯管成形无缺陷,应力集中区域较小;当差温区域为加热 r3、冷却 c3 时,如图 6(c)所示,由于管坯外侧整体加热,导致被推端材料的刚性降低、管坯传力性能降低,在弯管成形时,管坯被推端端口起皱卷曲,且弯管弯曲内侧起皱。管坯差温区域的控制对弯管成形结果的影响显著,根据管材成形的力学分析,被推端材料保证刚性,使其在管材推弯成形时达到传力的目的,弯曲变形外侧提高温度,使外侧材料在拉伸变形时保证足够的塑性不断裂,降低弯曲变形内侧材料的温度,使其受压变形时不易失稳起皱。



**Figure 6.** Simulation results of bent pipe forming under different regional temperature distribution: (a) Cloud maps of temperature distribution and stress distribution in heating zone c1 and cooling zone r1; (b) Cloud maps of temperature distribution and stress distribution in heating zone c2 and cooling zone r2; (c) Cloud maps of temperature distribution and stress distribution in heating zone c3 and cooling zone r3

**图 6.** 不同区域温度分布的弯管成形模拟结果: (a) 加热区 c1、冷却区 r1 温度分布云图和应力分布云图; (b) 加热区 c2、冷却区 r2 度分布云图和应力分布云图; (c) 加热区 c3、冷却区 r3 度分布云图和应力分布云图

图7所示是在不同温度分布下,成形弯管弯曲内、外侧壁厚的测量结果。当弯管加热区为c1、冷却区为r1时,弯管弯曲内侧弯弧段壁厚增加较为明显,弯曲外侧壁厚减薄量最大;当弯管加热区为c3、冷却区为r3时,弯管弯曲内、外侧直段增厚十分严重,当弯管加热区为c2、冷却区为r2时,弯管弯曲内、外侧壁厚分布较为均匀。

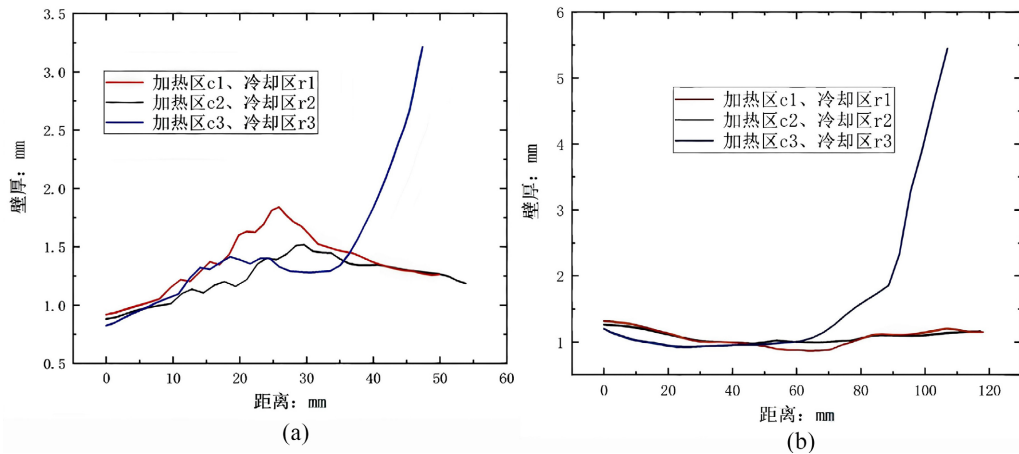


Figure 7. Measuring results of wall thickness of forming bent pipe under different heating zones: (a) Measuring results of curved inner wall thickness; (b) Measuring results of curved outer wall thickness

图7. 不同加热区域下成形弯管壁厚测量结果: (a) 弯管内侧壁厚测量结果; (b) 弯曲外侧壁厚测量结果

### 4.3. 加热区不同温度对成形质量的影响

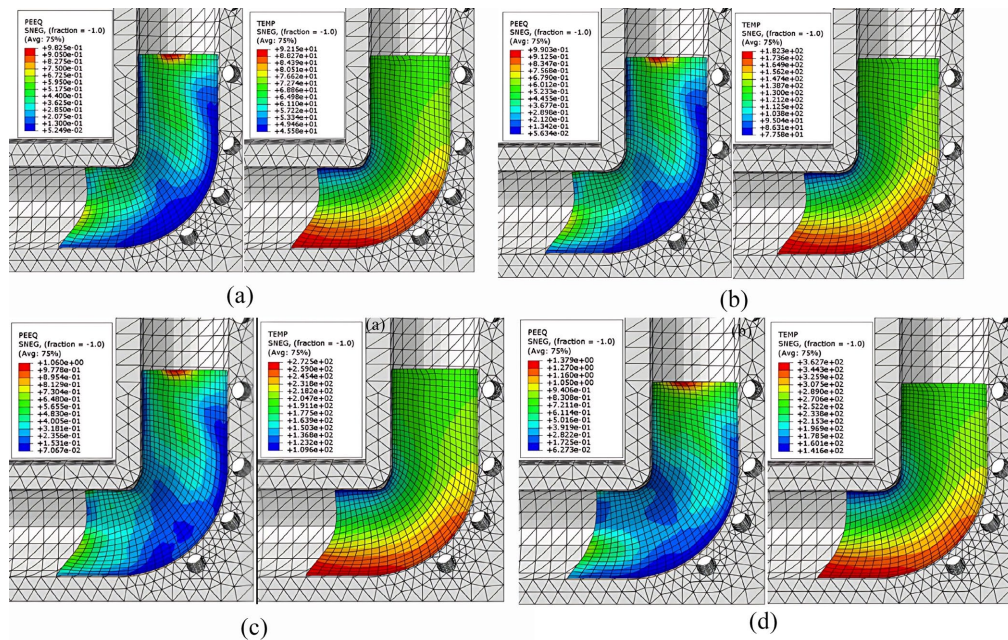


Figure 8. Cloud maps of equivalent plastic strain (PEEQ) distribution and temperature distribution at different temperatures: (a) Cloud maps of equivalent plastic strain distribution and temperature distribution at 100°C; (b) Cloud maps of equivalent plastic strain distribution and temperature distribution at 200°C; (c) Cloud maps of equivalent plastic strain distribution and temperature distribution at 300°C; (d) Contour nephograms of equivalent plastic strain and temperature distribution at 400°C

图8. 不同温度下的等效塑性应变(PEEQ)分布云图和温度分布云图: (a) 100°C等效塑性应变和温度分布云图; (b) 200°C等效塑性应变和温度分布云图; (c) 300°C等效塑性应变和温度分布云图; (d) 400°C等效塑性应变和温度分布云图

冷却区温度设置为恒值，即室温 20℃，加热区域选取 100℃、200℃、300℃、400℃ 四个温度值，分别讨论各个温度对成形质量的影响。如图 8 是在不同差温温度下，管材弯曲成形模拟结果的等效塑性应变云图。由图可知，较大塑性应变主要发生在与冲头接触一端，直端与冲头接触一端切角处塑性应变大，这是由于在冲头作用下，管端外侧先被冲头推动，弯管外侧与内侧切角处之间材料存在相对运动，随着差温温度上升，等效塑性应变分布逐渐均匀。当温度为 400℃ 时，直端伸出端塑性应变较大，较小塑性应变区域增加，等效塑性应变分布均匀。当温度为 300℃ 时，内弧面温度低，材料刚性大，而外弧面材料此时塑性提高，但流动速度仍不足，无法及时向直端伸出端流动，在周向应力作用下，一部分材料向内弧面流动，材料堆积，弯管内弧面与模具型腔不贴合。当外弧面温度为 100℃、200℃ 时，内弧面起皱，此时材料传力性能好，但直端被推端材料塑性差，材料流动速度慢，材料易在弯曲内侧堆积，发生失稳起皱。

## 5. 结论

1) 常温冷推弯时弯管外侧最大减薄率接近 30%，已达材料延伸率极限，易引发破裂，且内侧壁厚过度增加导致起皱、端口畸变；而差温推弯通过调控管坯温度分布改善材料力学特性，显著降低了外侧减薄量与内侧堆积程度，提升了壁厚分布的均匀性，大幅提高了小弯曲半径弯管的成形极限。

2) 管坯差温区域的分布影响弯管成形质量，当加热区与冷却区仅覆盖弯管变形区( $r_2 + c_2$ )时，可通过温度梯度优化材料应力应变状态，减小应力集中，实现无起皱、无畸变的高质量成形。

3) 加热区温度对塑性与成形缺陷演化具有显著影响，100℃~200℃ 时材料塑性不足，直端推动过程中内侧材料易引发堆积起皱；300℃ 时外弧流动速度无法匹配变形需求，部分材料向内侧流动导致贴合性变差；400℃ 加热温度可使等效塑性应变分布最均匀，直端伸出端材料流动充分，无明显成形缺陷。

## 基金项目

江西省大学生创新创业训练计划项目(项目编号：S202513433017)。

## 参考文献

- [1] 鄂大辛, (美)周大军. 金属管材弯曲理论及成形缺陷分析[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2016.
- [2] 孔德帅, 郎利辉, 阮尚文. 基于自由胀形的弯曲管材变形行为[J]. 北京航空航天大学学报, 2017, 43(7): 1395-1402.
- [3] 郎利辉, 罗璇, 程鹏志, 等. 薄壁小半径弯头弯胀成形数值模拟技术研究[J]. 锻压技术, 2014, 39(12): 45-52.
- [4] 方秀荣, 吴江, 王俊峰, 等. 薄壁弯管感应加热多场耦合分析及参数优化[J]. 热加工工艺, 2018, 47(17): 121-125.
- [5] 李兰云, 徐帅帅, 张阁, 等. 大口径厚壁弯管的局部感应加热推弯成形的有限元建模研究[J]. 热加工工艺, 2018, 47(7): 132-135, 140.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Lee, H.W., Bae, J.H., Kim, M.S., et al. (2011) Optimum Design of Pipe Bending Based on High-Frequency Induction Heating Using Dynamic Reverse Moment. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 12, 1051-1058. <https://doi.org/10.1007/s12541-011-0140-6>
- [9] Xun, W., Jie, Z. and Qiang, L. (2014) Multi-Objective Optimization of Medium Frequency Induction Heating Process for Large Diameter Pipe Bending. *Procedia Engineering*, 81, 2255-2260. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.10.317>
- [10] 吴义旺. 5A02 铝合金管热-力-弹性体耦合差温推弯模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 南昌: 南昌航空大学, 2020.