

充压镦形对先进高强钢弯曲管状件回弹的控制效果

林才渊¹, 简翰鸣¹, 寇晗涛¹, 宋 柯¹, 冯苏乐¹, 赵耀邦¹, 孙 磊², 初冠南²

(1. 上海航天精密机械研究所, 上海 201600; 2. 哈尔滨工业大学(威海) 材料科学与工程学院, 山东 威海 264209)

摘要: 为了解决先进高强度钢弯曲管状零件存在的严重回弹缺陷问题, 提出了一种利用充压镦形工艺来控制此类零件回弹的新方法。该工艺的力学原理是通过上模的合模运动(垂直于弯曲轴线), 对弯管施加环向压缩使环向材料发生塑性变形和后继屈服, 使内、外侧的轴向弯曲应力完全转化为轴向压应力, 消除了由弯曲引起的内层压应力和外层拉应力之间的轴向应力差, 实现了基本控制回弹的目的, 这与拉弯法的力学原理正好相反。采用有限元分析和实验验证两种方法来揭示充压镦形控制管状件弯曲回弹的力学机理。研究表明, 管材的弯曲回弹量随着压缩量的增加而减小, 并且存在一定的临界压缩量。对于抗拉强度分别为 600 和 800 MPa 的先进高强钢, 通过该方法可将回弹量降低 95% 以上。

关键词: 充压镦形; 先进高强钢; 弯曲管状件; 回弹控制; 临界压缩量

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.05.016

中图分类号: TG376

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2023) 05-0117-07

Control effect of hydro-forging on springback for advance high-strength steel bending tube component

Lin Caiyuan¹, Jian Hanming¹, Kou Hantao¹, Song Ke¹, Feng Sule¹, Zhao Yaobang¹, Sun Lei², Chu Guannan²

(1. Shanghai Aerospace Research Institute of Precision Machinery, Shanghai 201600, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology (Weihai), Weihai 264209, China)

Abstract: In order to overcome the problem of advance high-strength steel (AHSS) bending tube component with serious springback defect, a new method to control the springback of such parts by hydro-forging process was proposed. Its mechanical principle was to apply a certain amount of compression along the circumferential direction for the bending tube through the clamping motion of upper die (perpendicular to the bending axis) to lead the plastic deformation and subsequent yield of circumferential material, so that the inner and outer axial bending stresses were all transformed into the axial compressive stress, that led to eliminate the axial stress difference between the compressive stress on inner layers and the tensile stress on outer layers which caused by bending, so reaching the purpose of basically eliminating springback. This is contrary to the mechanical principle of the stretch bending method. Finite element analysis and experimental verification were adopted to reveal the mechanical mechanism of controlling tube component bending springback by hydro-forging. The research results show that, the bending springback amount decreases with the increasing of the compression amount of tube, and there is a certain critical compression amount. For AHSS with the tensile strengths of 600 and 800 MPa respectively, the springback amount could be reduced by more than 95% by this method.

Key words: hydro-forging; advance high-strength steels; bending tube component; springback control; critical compression amount

近年来, 薄壁空心管件在适应轻量化和节约材料的制造技术发展趋势的同时, 还能充分发挥材料的抗弯、抗扭潜能, 被广泛地应用于航空航天与车

身制造中^[1]。轴线弯曲管件制造的一个难点是回弹

问题。尤其是 2010 年后 DP、QP 和 Trip 钢的成功开发, 使材料的抗拉强度提高至 1000 MPa, 其回弹问题更为突出。同时, 由于高强钢存在残余奥氏体转化、位错堆积等现象, 导致其材料性能随着变形而发生改变, 进一步增加了其回弹的控制难度^[2-4]。因此, 高强钢弯曲管状件的回弹分析和相应的抑制措施成为了热点研究话题。

现有的回弹控制方法从原理上可分为两大类。

(1) 回弹规律利用法: 回弹是不可避免的, 但可根据回弹理论预测模型, 提前对模具的形状和尺寸进行相应地补偿, 进而获得接近理想形状的零件, 即

收稿日期: 2023-03-09; 修订日期: 2023-05-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (U1937205); 山东省重大科技创新工程 (2020CXGC010303)

作者简介: 林才渊 (1994-), 男, 博士, 中级工程师

E-mail: leyhiter@163.com

通信作者: 初冠南 (1979-), 男, 博士, 教授

E-mail: chuguannan@hit.edu.cn

回弹规律利用法的基本思路。回弹规律利用法需要能够提前准确地预测卸载后的回弹量,因此,回弹理论计算以及相关的数值模拟得到了很大的发展。但是基于理论计算的回弹量和补偿量存在较大误差,并且由于高强钢的力学性能(高屈强比^[5]、变弹性模量^[6]、包辛格效应^[7])使得该现象更为突出,需要不停地修改工艺参数和弯曲模具,因此,存在报废率高、效率低、成本高等问题^[8]。(2) 应力状态改变法:弯曲变形区轴向应力差是引起回弹的根本原因,改变该应力状态可以抑制回弹。拉弯法是一种典型的应力状态改变法,其通过在弯曲零件轴向上施加一定的拉伸变形来减小弯曲变形区的轴向应力差,从而减小回弹^[9]。虽然该方法能够控制回弹,但是当该方法应用在管材类零件时,极易产生破裂^[10]、截面畸变^[11]、壁厚减薄^[12]等缺陷,同时不能应用于三维弯曲管材^[13]。

通过上述分析可以发现,现有的回弹控制工艺存在或多或少的缺点,因此,如何在很好地消除高强钢管材回弹的同时保证其截面形状精度,成为亟需解决的现实问题。Chu G N 等^[14]指出在足够的法向支撑作用下,管材环向可以通过上模的合模被压缩,该工艺被称为充压镦形技术。基于该结论并在拉弯法的启发下,本文提出可以利用充压镦形工艺来减小高强钢薄壁弯管的回弹,即通过模具的径向压缩使管材产生环向压缩来减小弯曲回弹。本文对该技术进行了理论解释,并通过模拟和实验进行了验证。

1 充压镦形消除截面回弹的原理

充压镦形控制弯曲管材回弹的核心思想是对弯曲零件沿环向(垂直于弯曲轴线)施加一定量的压缩变形,使材料的应力状态全部转为压应力,从而消除弯曲产生的内压外拉的轴向应力差异,达到降低乃至消除回弹的目的,这与拉弯法的力学原理恰好相反。

以图 1 为例来说明充压镦形工艺控制弯曲管材回弹的力学原理。其中, φ 、 θ 、 γ 分别为管材环向、轴向和径向, R 为弯曲半径, l 为截面直壁段高度, M 为弯矩, p 为内压, $\sigma_{\varphi}^{\text{bd}}$ 、 $\sigma_{\theta}^{\text{bd}}$ 为弯曲时环向和轴向应力, $\sigma_{\varphi}^{\text{hf}}$ 、 $\sigma_{\theta}^{\text{hf}}$ 为充压镦形时环向和轴向应力, $\varepsilon_{\gamma}^{\text{bd}}$ 、 $\varepsilon_{\varphi}^{\text{bd}}$ 为弯曲时径向和环向应变, $\varepsilon_{\gamma}^{\text{hf}}$ 、 $\varepsilon_{\varphi}^{\text{hf}}$ 为充压镦形时径向和环向应变。图 1a 为弯曲变形过程中形成的应力特征,即内外层材料的轴向弯曲应力 $\sigma_{\theta}^{\text{bd}}$

呈内压外拉分布。如在此状态下卸载必然产生回弹,充压镦形可改变此应力状态,如图 1b 所示,在内压 p 的支撑下沿径向对管材继续施加一定量的压缩量 Δ ,使其产生环向压缩变形并发生后继屈服,使轴向弯曲应力 $\sigma_{\theta}^{\text{hf}}$ 全部转变为压应力,消除了弯曲导致的内压外拉应力差异。并且由于平面应变状态($\varepsilon_{\theta}^{\text{hf}}=0$)时,轴向应力数值均约等于环向应力 $\sigma_{\varphi}^{\text{hf}}$ 的 1/2,换言之,各单元轴向应力 $\sigma_{\theta}^{\text{hf}}$ 在数值上也基本相等,如图 1c 所示。压缩后内外层材料的轴向应力 $\sigma_{\theta}^{\text{hf}}$ 均为压应力且数值相当,回弹显著降低。

2 实验验证

2.1 方案制定

本文在绕弯的基础上研究了充压镦形工艺对消除弯曲回弹的影响,如图 2 所示。充压镦形工艺流程为:首先将绕弯获得的管材放置于下模中,然后在内压 p 的支撑下,上模径向压缩合模 Δ ,管材的环向周长被压缩 2Δ 。图 2b 为绕弯卸载后的管材回弹,而图 2c 为充压镦形卸载后的管材,没有发生回弹。

2.2 实验装置

实验分为两部分:绕弯实验和充压镦形实验。首先通过数控(Computer Numerical Control, CNC)弯管机,进行不同弯曲半径的管材弯曲实验。图 3a 为 CNC 绕弯实验装置图,主要由弯曲模、夹模、压块和芯棒组成。管材弯曲成形并卸载后,可得到不同弯曲半径的回弹件。图 3b 为充压镦形实验装置图,主要由上模和下模组成。

2.3 实验结果分析

2.3.1 回弹量与压缩量的关系

图 4 为 DP800 双相高强钢管材的弯曲半径分别为 150 和 200 mm 时,不同压缩量下的实验结果。从图 4 中可以明显看出:随着压缩量的增大,成形件与模具之间的偏差逐渐减小,即管材的回弹量得到控制。对于弯曲半径为 150 和 200 mm 而言,两者仅需 2 mm 的压缩量,他们的回弹基本可以得到控制。此外,由于在内压和模具的共同作用下,通过充压镦形工艺获得的成形件的形状精度更高。

图 5 为 DP800 双相高强钢管材在弯曲半径分别为 150 和 200 mm 时,管材回弹角随压缩量的变化规律。两者弯曲后的最大回弹角分别为 6.5° 和 9.0°,而随着压缩量的增大,弯曲回弹角逐渐减小。弯曲半径为 150 mm 的情况下,当压缩量达到 2.5 mm 时,回弹角仅为 0.26°(减小了 96%);弯曲半径为

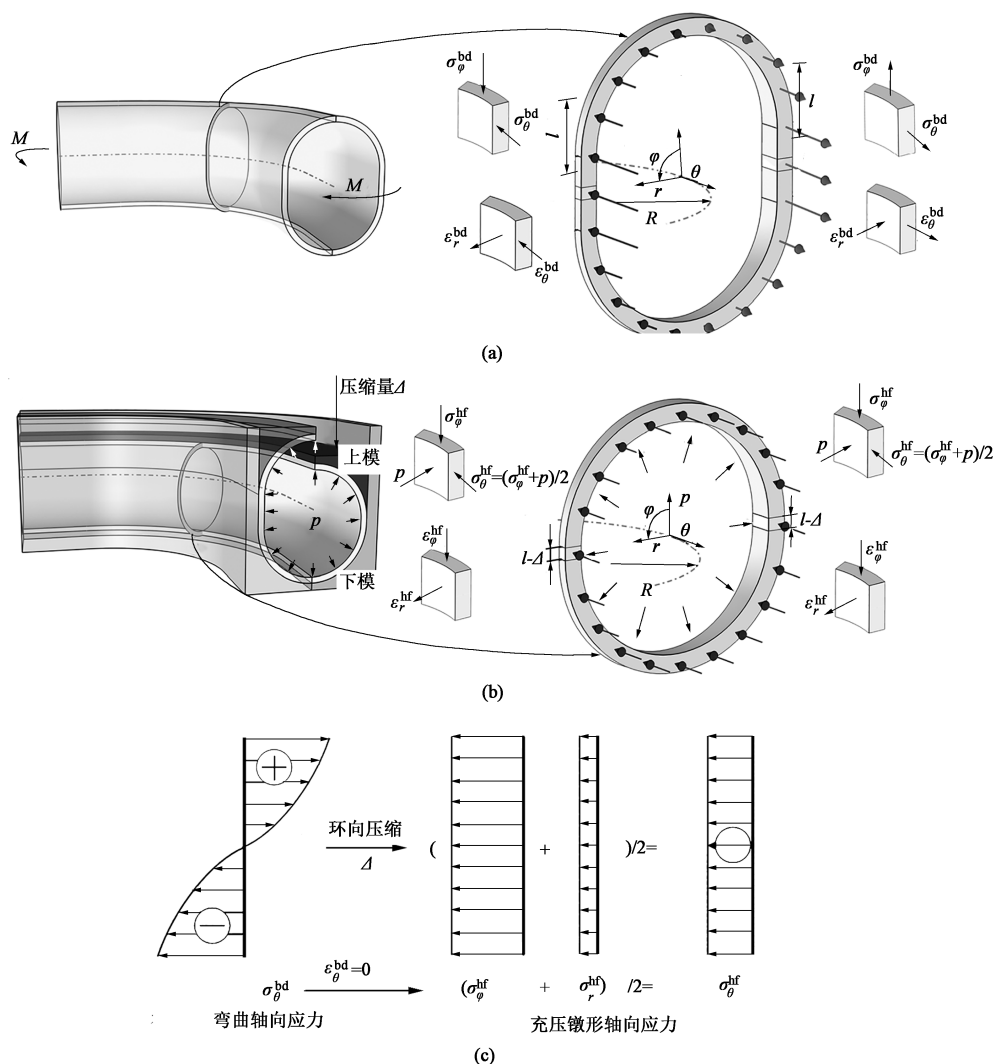


图1 充压锻造工艺的力学原理图

(a) 弯曲时应力、应变分布 (b) 充压锻造时应力、应变分布 (c) 轴向应力变化过程

Fig. 1 Mechanical principle diagram of hydro-forming process

(a) Stress-strain distribution during bending (b) Stress-strain distribution during hydro-forming (c) Variation process of axial stress

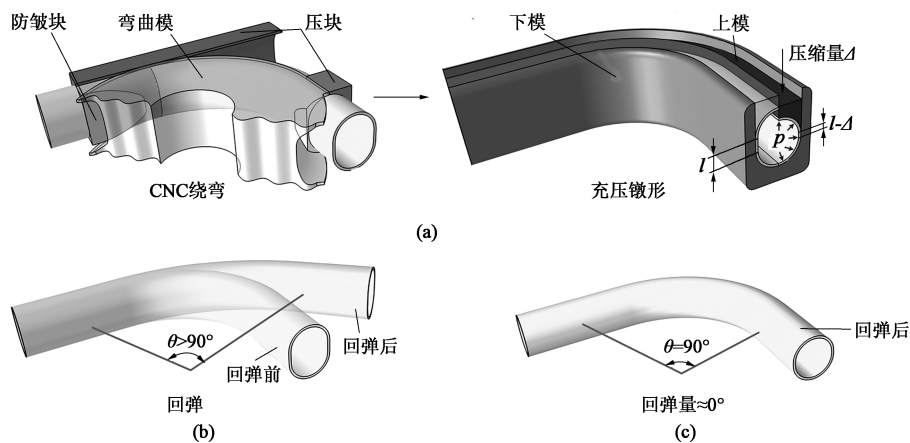


图2 充压锻造工艺流程图及回弹控制效果

(a) 充压锻造工艺流程图 (b) 绕弯卸载后的管材回弹 (c) 充压锻造卸载后的管材回弹

Fig. 2 Flow chart of hydro-forming process and springback control effect

(a) Flow chart of hydro-forming process (b) Tube springback after bending unloading (c) Tube springback after hydro-forming unloading

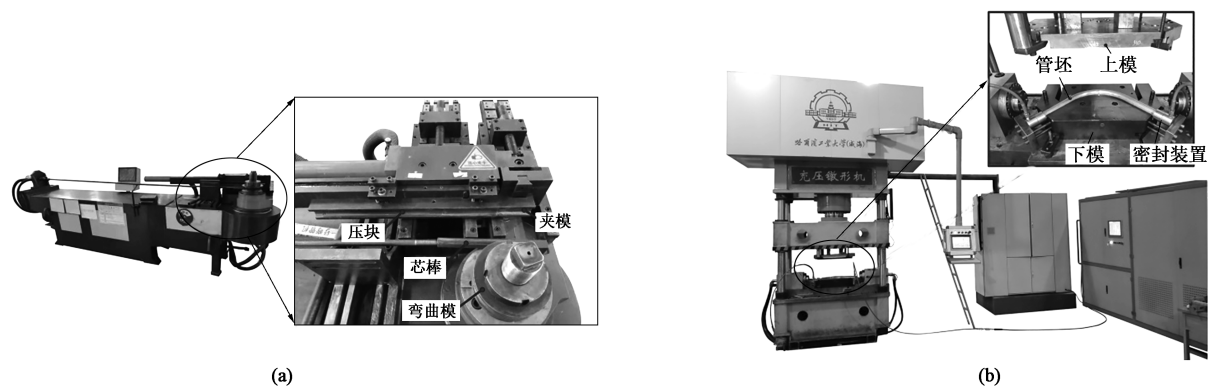


图 3 实验装置
(a) CNC 绕弯实验装置 (b) 充压锻形实验装置
Fig. 3 Experimental devices
(a) CNC bending experiment device (b) Hydro-forging experiment device

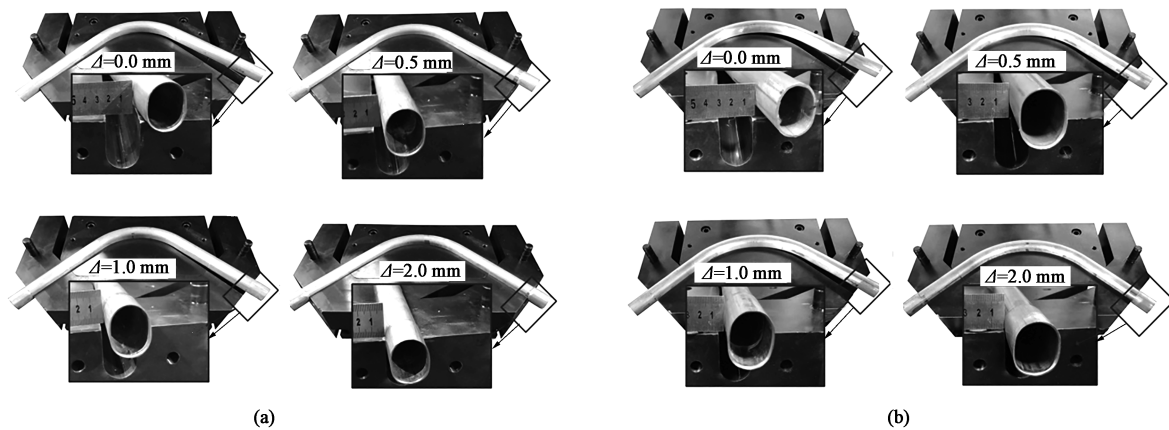


图 4 DP800 双相高强钢管材不同压缩量下的实验结果
(a) $R=150$ mm (b) $R=200$ mm
Fig. 4 Experimental results of DP800 dual-phase high-strength steel tube under different compression amounts

200 mm 的情况下, 当压缩量达到 2.0 mm 时, 回弹角仅为 0.52° (减小了 94%)。可见, 通过充压锻形, 弯曲回弹基本可以得到控制。此外, 从图 5 中

可以看出, 回弹角均符合随着压缩量先迅速减小, 然后慢慢下降的规律, 即只需前期少量压缩即可消除 70%~80% 的回弹量, 说明了该工艺的高效性,

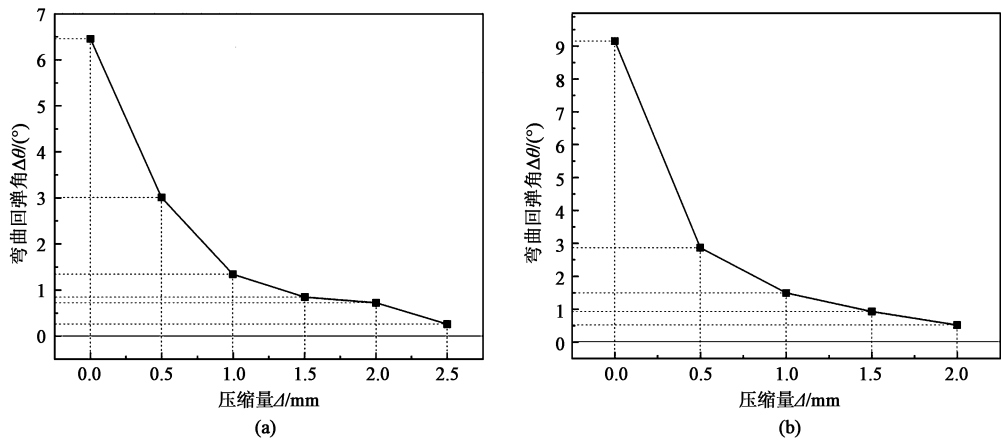


图 5 DP800 双相高强钢管材的弯曲回弹角随压缩量的变化规律
(a) $R=150$ mm (b) $R=200$ mm
Fig. 5 Changing laws of bending springback angle for DP800 dual-phase high-strength steel tube with compression amount

而这种变化趋势与弯曲半径无关。

2.3.2 临界压缩量分析

图6为DP600和DP800两种双相高强钢在不同弯曲半径下的临界压缩量实验结果。临界压缩量为

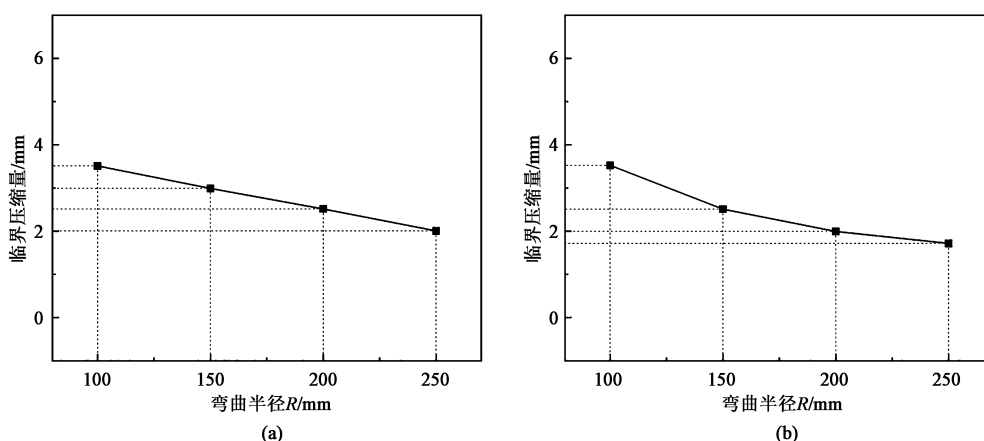


图6 DP600 (a) 和 DP800 (b) 双相高强钢临界压缩量随弯曲半径的变化曲线

Fig. 6 Changing curves of critical compression amount with bending radius for DP600 (a) and DP800 (b) dual-phase high-strength steels

3 有限元力学分析

3.1 模型建立

图7a为绕弯的有限元模型，其主要组成部分包括：压块、夹模、弯曲模、芯棒以及管材。将管材绕弯后的部件导入到充压镦形步骤中，作为该步的初始管材，保证了两个模拟部分中管材应力、应变的连续性。图7b为充压镦形步骤的有限元模型，其主要由上模、下模以及管材这3大部分组成。

3.2 力学分析

本节利用有限元模拟进一步揭示充压镦形消除回弹的力学机理。图8为弯曲半径为150 mm时，DP800双相高强钢管材充压镦形时其 0° 截面上的轴向应力变化情况。从图8中可知，随着压缩量的增大，内外层单元的轴向应力转变是不同步的。首先，当压缩量为0.5 mm时，管材外侧单元上的轴向应力发生转化，由初始的拉应力变为压应力。随着压缩的进行，内侧单元上的轴向应力发生转变，其应力符号不变，值减为1/2。最后当压缩量达到2.0 mm时，各单元的轴向应力全部转变为压应力，且根据平面应变原理，其数值相近，均为环向应力的1/2。

图9为充压镦形过程中 0° 截面上弯矩随压缩量的有限元模拟变化结果。从图9中可以看出：绕弯结束后 ($\Delta=0.0$ mm) 其弯矩值达到 1.2×10^6 N·mm；而随着压缩的进行，其值不断减小，当压缩量 Δ 为0.5

管材基本消除回弹所需的最小压缩量，其能指导充压镦形工艺的实际生产。临界压缩量随弯曲半径的减小而减小。结果发现，任何材料均存在临界压缩量，进一步证实了该工艺的通用性。

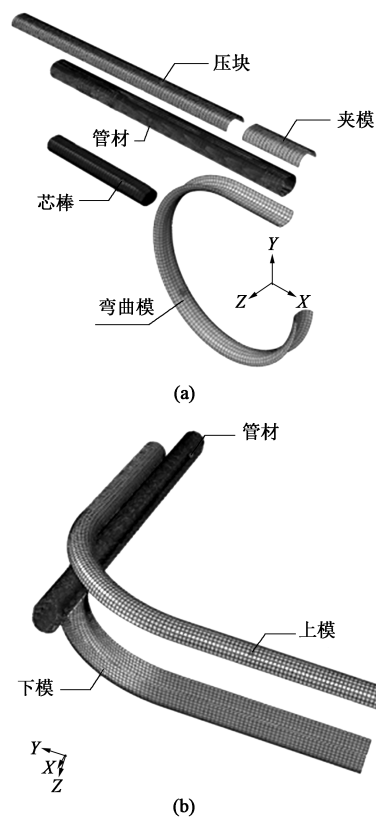


图7 有限元模型

(a) 绕弯 (b) 充压镦形

Fig. 7 Finite element models

(a) Bending (b) Hydro-forming

和1.0 mm时，其值分别为 5×10^5 和 2×10^5 N·mm；当压缩量 Δ 达到2.0 mm时，弯矩基本减小为零。

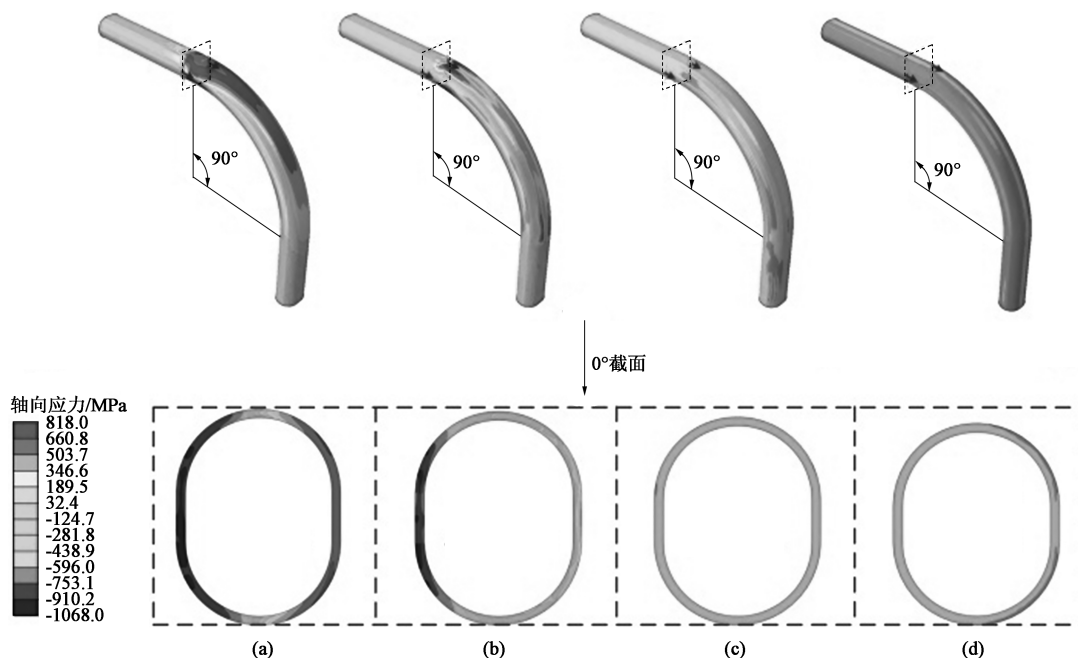


图 8 DP800 双相高强钢管材充压锻形过程中 0° 截面轴向应力的变化

(a) $\Delta=0.0$ mm (b) $\Delta=0.5$ mm (c) $\Delta=1.0$ mm (d) $\Delta=2.0$ mm

Fig. 8 Variation of axial stress at 0° cross-section for DP800 dual-phase high-strength steel tube during hydro-forming process

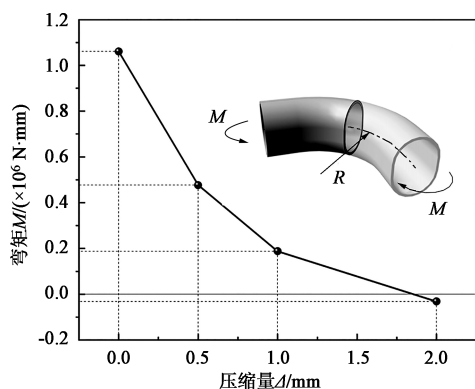


图 9 充压锻形过程中 0° 截面的弯矩变化

Fig. 9 Bending moment change at 0° cross-section during hydro-forming process

而弯矩随压缩量的变化情况也是先快速减小、后缓慢减小，验证了前文中回弹量随压缩量的变化规律。

4 结论

(1) 提出了一种通过充压锻形工艺来控制高强钢薄壁弯曲管件回弹的工艺方法，实验验证该方法是可行的。

(2) 指出了回弹量随着压缩量的增大先快速减小、随后缓慢减小的变化规律。

(3) 研究了材料性能对临界压缩量的影响。随

着弯曲半径的增大，临界压缩量逐渐减小，验证了该工艺的通用性。

(4) 利用有限元模拟分析了充压锻形过程中轴向应力和弯矩的变化情况。基于平面应变，充压锻形将轴向应力全部变为压应力，且数值均匀，均为环向应力的 1/2，进一步揭示了该工艺控制回弹的力学机理。

(5) 对于抗拉强度分别为 600 和 800 MPa 的高强钢，充压锻形后回弹量能够减小 95% 以上。

参考文献:

- [1] 陈浩, 曲中兴, 张立武. 航空航天整体结构件新型校形技术研究现状 [J]. 航天制造技术, 2017, (1): 11-16.
Chen H, Qu Z X, Zhang L W. Research status of new correction technology of aerospace monolithic component [J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2017, (1): 11-16.
- [2] Ghaei A, Green D E, Aryanpour A. Springback simulation of advanced high strength steels considering nonlinear elastic unloading-reloading behavior [J]. Materials & Design, 2015, 88: 461-470.
- [3] Hassan H, Maqbool F, Güner A, et al. Springback prediction and reduction in deep drawing under influence of unloading modulus degradation [J]. International Journal of Material Forming, 2015, 9: 619-633.

(下转第 161 页)