

文章编号 1004-924X(2011)09-2072-07

大型管件的模压式精确缩径矫圆

殷 璟, 赵 军*, 孙红磊, 展培培
(燕山大学 机械工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要:提出以模压式缩径矫圆的方式代替机械扩径以减小管件椭圆度,提高其承压强度。模压式缩径矫圆采用闭合后模腔为一整圆的上、下模具对椭圆管坯进行矫圆,为减小矫圆后管坯的回弹,须使整个管坯内外壁均进入压缩塑性变形,即有足够的压缩率。本文采用小曲率曲梁平面压弯的分析方法对模压式缩径矫圆工艺进行了理论分析,推导出缩径矫圆弹复方程,该方程表示了管坯截面壁厚中心线上任意一点弹复后的曲率半径与管坯初始几何参数、材料性能、缩径率间的关系。工程中管线钢管的椭圆度技术要求一般为 $0.5\% \sim 1\%$,采用本文方法缩径矫圆后的管坯椭圆度 $< 0.12\%$,完全满足技术要求。理论分析与实验结果的椭圆度相对偏差 $< 0.09\%$,几何尺寸相对偏差 $< 0.19\%$,表明模压式缩径矫圆在工程实际中具有应用价值。

关键词:缩径矫圆;平面压弯;回弹;椭圆度

中图分类号: TG386.31 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111909.2072

Precise compression and setting round by mold for large pipes

YIN Jing, ZHAO Jun*, SUN Hong-lei, ZHAN Pei-pei

(*Institute of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China*)

* *Corresponding author, E-mail: zhaojun@ysu.edu.cn*

Abstract: A new method called compression and setting round was proposed to replace the mechanical expanding to reduce the ellipticity and increase the compressive strength of large pipes. The compression and setting round by mold was completed by a upper die and a lower die whose cavities could be closed to a whole round. In order to reduce the springback, the within and outside walls of the pipe must be compressed into the plastic deformation, namely, the compression rate must be sufficient. In this paper, the small curvature plane bending theory of curved beam was used to analyze the compression and setting round of the pipe. The springback equation of the compression and setting round was deduced to express the relationship between the curvature radius of any poin on cross-section center line after springback and the initial geometric parameters, material properties and the compression rate of the pipe. After a compression experiment, the ellipticity is less than 0.12% , which fully meets the technical requirements of line pipes for 0.5% to 1% in practice. Furthermore, the relative ellipticity deviation of theoretical analysis and experimental results is less than 0.09% and the relative geometric size deviation is less than 0.19% . Experimental results verify that the springback equation of

收稿日期:2010-12-13;修订日期:2011-01-26.

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(No. 50805126);河北省自然科学基金资助项目(No. E2009000389)

compression and the setting round method have important application values.

Key words: compression and setting round; compress-bending; springback; ellipticity

1 引言

大型管件的椭圆度是影响管件质量的重要因素之一。目前,大型直缝焊管多采用机械扩径方式对其全长分段扩径以实现矫圆并提高钢管强度^[1-5]。但是大型机械扩径机结构复杂,设备成本高,目前国内所用的扩径机多为国外进口^[6-7],使大型管件的生产成本很高。参考文献^[8]提出多瓣模机械缩径矫圆的构想——即扩径矫圆的逆过程,并进行了数值模拟研究,结果表明该方法同样可以起到减小大型管件椭圆度、提高钢管强度的作用,缩径矫圆后大型管件的承压强度较扩径矫圆前的管件提高了46.8%,较扩径矫圆后的管件提高了17%。此外,缩径矫圆时的压缩变形更容易减小管件原材料上的细小裂纹或孔洞缺陷,而扩径矫圆时的拉伸变形有可能使这类原始缺陷扩大。因此,从材料性能的提高方面考虑,缩径矫圆优于扩径矫圆。

基于以上分析,本文提出采用模压式缩径矫圆方式代替目前通常采用的机械扩径方式对大型管件进行矫圆。该方式与机械扩径或机械缩径相比,具有模具简单,设备成本低,操作方便等优点,对非直线型管件的矫圆亦十分有效。由于变形过程中上、下模与管坯外壁的接触面积不断增大,不会出现扩径矫圆时由瓣模间隙产生的“直边段”,因此更符合截面形状的曲率连续性。

本文从模压式缩径矫圆工艺过程分析入手,借助小曲率曲梁的平面压弯应变分析,给出了缩径矫圆弹复后管坯截面壁厚中心线上任意一点曲率半径的表达式,为合理制定模具参数提供了理论依据。采用与大型直缝焊管几何相似的无缝钢管作为实验管坯,使用精密的日本小松伺服曲柄压力机进行模压式缩径矫圆实验,管坯实验前后的几何参数由高精度的星科柔性三坐标测量系统进行测量,因此实验数据准确可靠,且与理论预测结果十分吻合,为模压式缩径矫圆的工业应用奠定了基础。

2 模压式缩径矫圆过程分析

模压式缩径矫圆过程如图1所示。壁厚为 t 的初始管坯截面为椭圆,截面壁厚中心线的长半轴为 a_0 ,短半轴为 b_0 ,任意一点的曲率半径为 ρ_0 。模具由型腔尺寸相同的上、下模组成,上、下模合模后为一整圆。在管坯与上、下模接触的初始阶段,模具与管坯外壁为线接触。随着上模的不断下行,管坯截面的椭圆度不断减小,截面周长基本没有发生变化,认为这一过程为纯弹性变形阶段。由于实际情况中大型管件的初始椭圆度一般不大^[9-10],故在整圆阶段不会出现塑性压应变。上模继续下行至合模,管坯外壁与模具完全贴合,合模后管坯截面壁厚中心线曲率半径为 R_1 ,显然 R_1 的大小由模具型腔半径和管坯壁厚决定。由

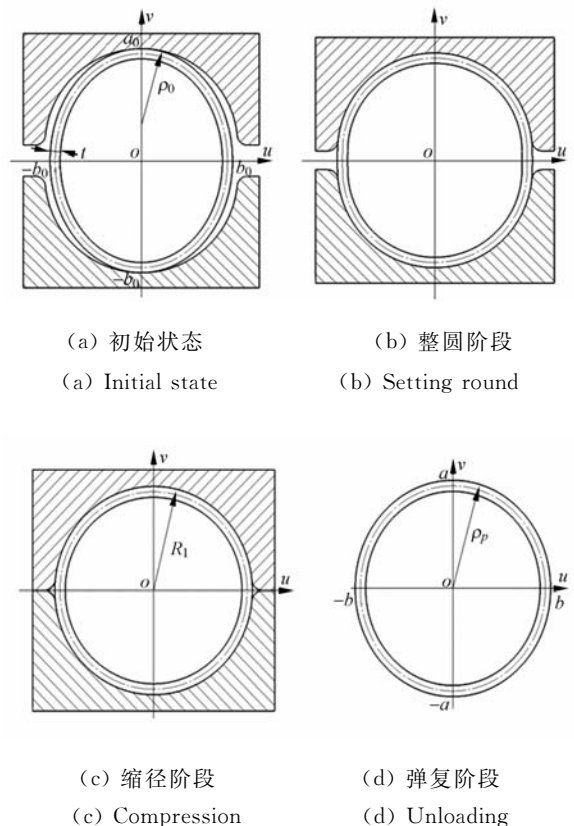


图1 缩径矫圆工艺过程

Fig.1 Process of compression and setting round

于合模后管坯截面壁厚中心线的周长小于初始椭圆管坯截面壁厚中心线的周长,管坯周向产生一定的压缩变形,长轴附近受切向压力和与初始曲率方向相反的弯矩作用,为反向压弯变形区,短轴附近受切向压力和与初始曲率方向相同的弯矩作用,为同向压弯变形区。合模保压后上模抬起,管坯产生弹性卸载,设回弹后截面壁厚中心线上任意一点的曲率半径为 ρ_0 ,如果认为卸载后管坯截面仍为椭圆,则卸载后管坯截面壁厚中心线的长半轴为 a ,短半轴为 b 。

3 基本假设

管件的管径与壁厚之比通常大于 10,因此可将缩径矫圆问题视为矩形截面小曲率曲梁的平面压弯问题^[1]。沿管坯轴线切取宽度为 B 的微梁段,如图 2 所示,则管壁厚度 t 为微梁段的高度, ρ_0 为微梁段的初始曲率半径。本文引入如下基本假设:

- (1) 管壁任意截面矫圆后仍保持为平面,截面不发生畸变,且忽略管壁截面尺寸的变化。
- (2) 成形过程中,管壁截面上任意一点的应力——应变状态近似为单向拉伸或压缩。
- (3) 不考虑各向异性;忽略包辛格效应,即材料具有拉压一致性;满足经典弹塑性理论的卸载规律;采用双线性硬化材料模型,即:

$$\sigma = \begin{cases} E\epsilon & |\epsilon| \leq \epsilon_E \\ D\epsilon \pm \sigma_0 & |\epsilon| > \epsilon_E \end{cases}, \quad (1)$$

其中

$$\epsilon_E = \frac{\sigma_s}{E}, \quad (2)$$

$$\sigma_0 = \sigma_s \left(1 - \frac{D}{E}\right), \quad (3)$$

式中 σ 为应力, ϵ 为应变, E 为弹性模量, D 为塑性切线模量, σ_s 为材料拉伸初始屈服应力, σ_0 为截距应力, ϵ_E 为弹性极限应变。拉伸时 σ_0 前的符号为正,反之则为负。

- (4) 整圆阶段的变形为纯弹性变形。
- (5) 忽略管坯与模具间摩擦的影响。

(6) 初始管坯截面壁厚中心线为椭圆,其长半轴为 a_0 ,短半轴为 b_0 ,任意一点的曲率半径为 ρ_0 。

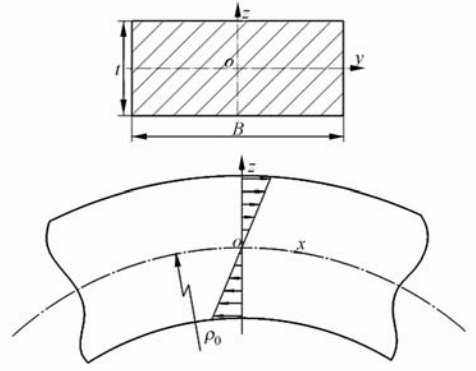


图 2 初始管坯微梁段示意图

Fig. 2 Initial micro-beam of pipe

如图 2 所示,以微梁段截面几何中心为坐标原点建立 $oxyz$ 坐标系,由基本假设(1)可知,微梁段的初始曲率可以用初始当量应变 ϵ_0 来予以考虑,即:

$$\epsilon_0 = \frac{z}{\rho_0}, \quad -\frac{t}{2} \leq z \leq \frac{t}{2}. \quad (4)$$

4 缩径矫圆弹复分析

如前所述,在缩径矫圆过程中管坯截面既有同向压弯段,也有反向压弯段,由于这两种情况的推导过程相似,且结果也相同,在此只以同向压弯段为例进行推导分析。

4.1 压弯弹复方程

对微梁段施加切向压力 T 和与初始挠曲方向同向的弯矩 M ,使之产生弹塑性弯曲应变 ϵ ,其当量应变分布如图 3 所示。

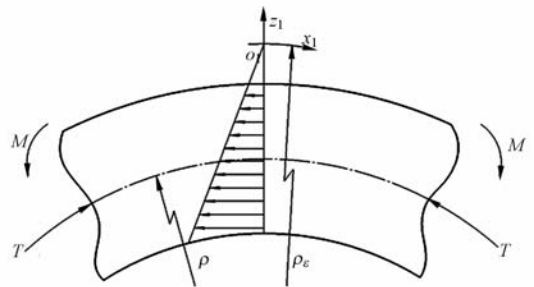


图 3 加载后当量应变

Fig. 3 Equivalent strain after loading

设截面几何中心层曲率半径为 ρ ,压弯当量应变中性层曲率半径为 ρ_ϵ 。沿压弯当量应变中性层设定 $x_1o_1z_1$ 坐标系,由基本假设(1),有

$$\frac{z_1}{\rho_\epsilon} = \epsilon + \epsilon_0$$

因为
则

$$z_1 = z + \rho - \rho_\epsilon$$

$$\epsilon = z \left(\frac{1}{\rho_\epsilon} - \frac{1}{\rho_0} \right) + \frac{\rho - \rho_\epsilon}{\rho_\epsilon}, \quad -\frac{t}{2} \leq z \leq \frac{t}{2}. \quad (5)$$

卸载弹复后截面的残余当量应变仍呈线性分布, 设残余的塑性应变为 ϵ_p , 弹复后截面几何中心层曲率半径为 ρ_p , 当量应变中性层曲率半径为

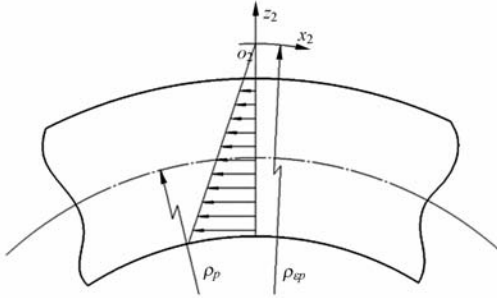


图 4 卸载后残余当量应变:

Fig. 4 Equivalent strain after unloading

ρ_{ep} , 沿残余当量应变中性层设定 $x_2 o_2 z_2$ 坐标系, 如图 4 所示, 同理有:

$$\epsilon_p = z \left(\frac{1}{\rho_{ep}} - \frac{1}{\rho_0} \right) + \frac{\rho_p - \rho_{ep}}{\rho_{ep}}, \quad -\frac{t}{2} \leq z \leq \frac{t}{2}. \quad (6)$$

将如图 2 所示初始微梁段视为完全弹性体, 并对其施加与压力 T 和弯矩 M 大小相等、方向相反的拉力 T_e 和弯矩 M_e , 如图 5 所示, 使之产生

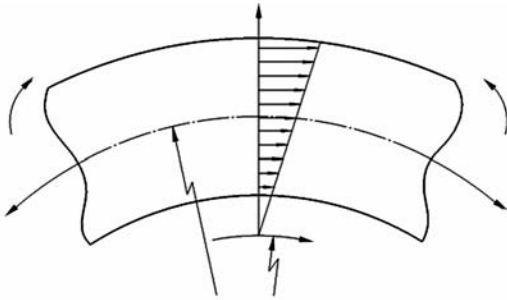


图 5 反向加载弹性变形当量应变

Fig. 5 Elastic equivalent strain under reverse loading

完全弹性应变 ϵ_e 。设此时截面几何中心层曲率半径为 ρ_e , 弹性拉弯当量应变中性层曲率半径为 ρ_{ee} , 则有:

$$\epsilon_e = z \left(\frac{1}{\rho_{ee}} - \frac{1}{\rho_0} \right) + \frac{\rho_e - \rho_{ee}}{\rho_{ee}}, \quad -\frac{t}{2} \leq z \leq \frac{t}{2}. \quad (7)$$

根据基本假设(3), 微梁段卸载弹复的弹性应

变等价于对初始微梁段施加与其弹塑性加载时大小相等、方向相反的载荷, 并使其产生完全弹性变形时的应变。再根据小变形理论的应变可叠加性质可知, 微梁段卸载弹复后的残余应变可等效为弹塑性加载时产生的应变与反向加载弹性应变的叠加, 即:

$$\epsilon_p = \epsilon + \epsilon_e, \quad (8)$$

将式(5)、式(6)、式(7)代入式(8)化简, 得

$$z \left(\frac{1}{\rho_{ep}} - \frac{1}{\rho_e} - \frac{1}{\rho_{ee}} + \frac{1}{\rho_0} \right) = \frac{\rho}{\rho_e} + \frac{\rho_e}{\rho_{ee}} - \frac{\rho_p}{\rho_{ep}} - 1, \quad (9)$$

上式在定义域内恒成立的充分必要条件是:

$$\begin{cases} \frac{1}{\rho_{ep}} - \frac{1}{\rho_e} - \frac{1}{\rho_{ee}} + \frac{1}{\rho_0} = 0 \\ \frac{\rho}{\rho_e} + \frac{\rho_e}{\rho_{ee}} - \frac{\rho_p}{\rho_{ep}} = 1 \end{cases}. \quad (10)$$

设微梁段材料的弹性模量为 E , 则根据基本假设(2)和(3), 初始微梁段反向加载弹性变形产生的截面应力 σ_e 的分布可由式(11)表示:

$$\sigma_e = E\epsilon_e = zE \left(\frac{1}{\rho_{ee}} - \frac{1}{\rho_0} \right) + E \left(\frac{\rho_e}{\rho_{ee}} - 1 \right), \quad -\frac{t}{2} \leq z \leq \frac{t}{2}. \quad (11)$$

截面应力对截面面积的积分为截面受力 T_e , 截面应力以几何中心层取矩对截面面积的积分为截面弯矩 M_e 。设 A 为微梁段截面的面积, I_y 为截面惯性矩, 应用平面图形的几何性质和微梁段截面平衡条件由式(11)可求得:

$$\begin{cases} T_e = \int_A \sigma_e dA = EA \left(\frac{\rho_e}{\rho_{ee}} - 1 \right) \\ M_e = \int_A \sigma_e \cdot z dA = EI_y \left(\frac{1}{\rho_{ee}} - \frac{1}{\rho_0} \right). \end{cases} \quad (12)$$

微梁段的卸载弹复平衡方程可表达为

$$\begin{cases} T + T_e = 0 \\ M + M_e = 0 \end{cases}, \quad (13)$$

由式(10)、式(12)、式(13)联合求解, 得:

$$\rho_p = \frac{\frac{T}{EA} \rho_e}{1 - \frac{M}{EI_y}}. \quad (14)$$

式(14)称为压弯弹复方程。

4.2 缩径矫圆弹复方程

如图 1(c)所示, 合模后管坯截面壁厚中心线的曲率半径为 R_1 , 因此在式(14)中 $\rho = R_1$, 此时壁厚中心线上各质点的周向应变由式(5)可知:

$$\epsilon|_{z=0} = \frac{\rho - \rho_e}{\rho_e} = \frac{R_1 - \rho_e}{\rho_e}. \quad (15)$$

另一方面,令图 1(a)所示初始管坯截面壁厚中心线椭圆周长为 L_0 ,其当量圆的半径为 R_0 ,即 $L_0 = 2\pi R_0$;令合模后其周长为 L_1 ,显然 $L_1 = 2\pi R_1$ 。管坯缩径矫圆前后截面壁厚中心线层的平均周向应变可表达为:

$$\bar{\varepsilon}|_{z=0} = \frac{L_1 - L_0}{L_0} = \frac{R_1 - R_0}{R_0} = -\delta, \quad (16)$$

式中 δ 为缩径率。比较式(15)和式(16)可得:

$$\rho_\varepsilon \approx R_0. \quad (17)$$

欲使管坯缩径矫圆后的椭圆度大幅度减小,则需使整个管坯内、外壁的应变均为压应变,且内、外壁均进入塑性变形状态,由式(1)、式(5)和式(17)得

$$\sigma = D \left[z \left(\frac{1}{R_0} - \frac{1}{\rho_0} \right) + \delta \right] - \sigma_0, \quad -\frac{t}{2} \leq z \leq \frac{t}{2}. \quad (18)$$

对壁厚方向应力积分,可得截面周向所受拉力;壁厚方向应力对几何中心层取矩,可得截面所受弯矩,即

$$\begin{cases} T = B \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} \sigma dz = A(D\delta - \sigma_0) \\ M = B \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} \sigma \cdot z dz = DI_y \left(\frac{1}{R_0} - \frac{1}{\rho_0} \right) \end{cases}, \quad (19)$$

将式(17)和式(19)代入式(14),化简得

$$\rho_p = \frac{\left(1 + \frac{\sigma_0}{E}\right) + \left(1 - \frac{D}{E}\right)\delta}{1 - \frac{D}{E} \left(1 - \frac{R_0}{\rho_0}\right)} \cdot R_0, \quad (20)$$

式(20)称为缩径矫圆弹复方程,且有 $\rho_{pa} =$

$$\rho_p|_{\rho_0=\rho_{0a}}, \rho_{pb} = \rho_p|_{\rho_0=\rho_{0b}}.$$

缩径矫圆弹复后管件的椭圆度可表示为:

$$\beta = \frac{2(a-b)}{a+b}, \quad (21)$$

其中

$$\begin{cases} a = \sqrt{2\rho_{pa} \cdot \rho_{pb}^2} \\ b = \sqrt{3\rho_{pa}^2 \cdot \rho_{pb}} \end{cases}, \quad (22)$$

5 缩径矫圆实验

缩径矫圆模具由上模、下模和定位销组成,其中上、下模闭合时型腔为一整圆,其半径为 $\Phi 45$ mm。管坯材料为 20# 钢,其材料性能如图 6 和表 1 所示。

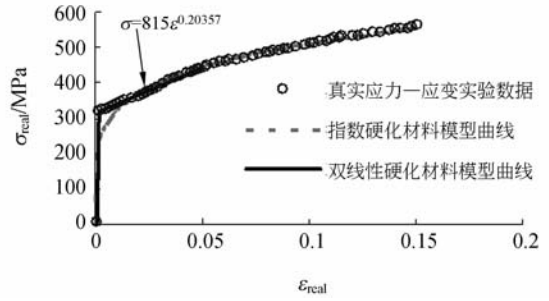


图 6 实验管坯材料性能参数

Fig. 6 Material parameters of pipe

表 1 20# 钢双线性硬化材料模型参数

Tab. 1 Bilinear hardening material parameters of 20# steel

E/MPa	D/MPa	σ_0/MPa	ε_E
206 000	2 533	295	0.001 45

实验所用的压机为日本小松(KOMASTU)公司生产的 H1F80S 伺服曲柄压力机,下死点精度为 $\pm 10 \mu\text{m}$ 。实验前先将管坯加工成尺寸相同的圆形管坯,壁厚设定为 3mm,与大型直缝焊管的相对厚度相当以保证几何相似性。再将圆形管坯在伺服压机上进行预压,使其具有初始椭圆度。由于工程实际中需要矫圆的管坯初始椭圆度并不大,为保证相似性,实验设计的预压量非常小,不会使管坯产生较大的塑性变形而导致材料性能参数变化较大。预压后采用美国星科(CimCore)公司生产的 3000iTM 系列柔性三坐标测量系统对初始管坯外表面进行点接触式检测,该测量系统单点球测精度可达 ± 0.005 mm。通过 CATIA 和 Imageware 逆向工程软件对所测点云进行处理,

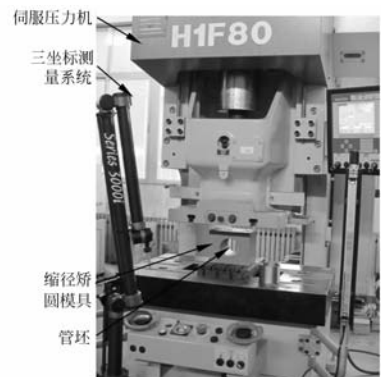


图 7 缩径矫圆实验现场

Fig. 7 Experimental site of compression and setting round

提取初始管坯几何尺寸。将检测好的管坯放入缩径矫圆模具,合模保压 10 s 后取出,再采用上述检测设备和软件对其进行精确的尺寸提取,以获得管坯缩径矫圆弹复后的几何尺寸。实验现场如图 7 所示。管坯缩径矫圆弹复后几何尺寸的理论值由式(20)~(22)计算可得。管坯的初始几何尺寸、实验值、理论值和理论值对实验值的相对偏差如表 1 所示,其中 $E_{\beta,r}$ 为椭圆度相对偏差, $E_{a,r}$ 为长半轴相对偏差, $E_{b,r}$ 为短半轴相对偏差。

表 2 缩径矫圆实验与理论预测结果对比

Tab. 2 Comparison of experimental and theoretical results

几何参数	管坯序号			
	1	2	3	4
R_0/mm	43.84	43.84	43.74	44.03
a_0/mm	44.42	44.43	44.33	44.63
b_0/mm	43.25	43.25	43.15	43.43
$\beta_0/\%$	2.67	2.69	2.70	2.73
t/mm	3.02	2.98	3.04	2.96
R_1/mm	43.49	43.51	43.48	43.52
$\delta/\%$	0.80	0.75	0.60	1.16
a_{ex}/mm	43.60	43.65	43.63	43.64
b_{ex}/mm	43.58	43.62	43.58	43.60
$\beta_{ex}/(\%)$	0.05	0.07	0.12	0.09
a/mm	43.56	43.58	43.55	43.60
b/mm	43.55	43.57	43.54	43.58
$\beta/\%$	0.03	0.03	0.03	0.03
$E_{\beta,r}/(\%)$	-0.02	-0.04	-0.09	-0.06
$E_{a,r}/(\%)$	-0.08	-0.07	-0.19	-0.10
$E_{b,r}/(\%)$	-0.15	-0.12	-0.10	-0.04

表 2 中数据表明:

(1) 理论预测值与实验值吻合,理论分析方法正确,缩径矫圆弹复方程可用于缩径矫圆弹复后管坯几何尺寸的预测或反求缩径矫圆模具的最佳尺寸。

(2) 相对偏差均为负,理论预测值略小于实

验值,即管坯的实际回弹量较理论预测值略大。

(3) 缩径率较小时(0.6%),缩径矫圆弹复后椭圆度相对较大(0.12%);缩径率为 0.8% 左右时,弹复后椭圆度最小(0.05%);缩径率继续增大(1.16%),弹复后椭圆度略有增大(0.09%),这是因为随着材料的应变硬化,同向弹复的差值略有增大。

(4) 在实验的缩径率下,管坯缩径矫圆后的椭圆度在 0.05%~0.12%,达到了矫圆的目的。

6 结 论

本文提出采用模压式缩径矫圆方式代替常用的机械扩径方式对大型管件进行矫圆,并针对大型直缝焊管几何相似的无缝钢管进行了矫圆实验。实验结果显示:(1) 缩径矫圆后管坯的椭圆度 $<0.12\%$,理论预测结果为 0.03%,理论分析和实验结果均表明模压式缩径矫圆工艺可以起到减小椭圆度,提高承压强度的作用,完全可以替代目前大型管件生产中所采用的机械扩径方式,从而降低设备成本。(2) 缩径矫圆工艺过程可认为是小曲率平面曲梁先弯后压的平面压弯过程,且整圆阶段可认为是纯弹性变形过程。(3) 提出了当量应变和当量应变中性层的概念,借助经典弹塑性卸载规律和应变叠加原理得到了缩径矫圆弹复方程。该方程可用于管坯缩径矫圆弹复后几何尺寸的理论预测和缩径矫圆模具最佳几何参数的反求。(4) 双线性硬化材料模型能更好地反映常用钢管材料在小变形时的应力应变关系,从而能更准确地反映缩径矫圆的弹复规律。(5) 缩径矫圆实验验证了缩径矫圆弹复方程的预测准确性,其中理论分析与实验的得到的椭圆度相对偏差 $<0.09\%$,几何尺寸相对偏差 $<0.19\%$,表明理论预测精度满足工程实际的应用需要。

参考文献:

[1] LI J, ZHAO J, ZHAN P P. Design and development of quality inspection system for forming the longitudinal-seam submerged arc pipes with JCOE process [C]. *Proceedings of the 2009 WRI World Congress on Computer Science and Information Engineering*. Los Angeles: 2009:376-381.

[2] 赵石岩. UOE 焊管成形质量控制策略及虚拟仿真系统开发 [D]. 秦皇岛:燕山大学,2009.

ZHAO SH Y. *Study on quality control strategy and simulation system development of UOE pipe forming* [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2009. (in Chinese)

[3] 李建,赵军,马瑞. 管线钢管 JCO 精确弯曲成形技术 [J]. *光学精密工程*,2010,18(3):638-645.

- LI J, ZHAO J, MA R. Precise bending technology for forming steel pipe of pipeline with JCO process [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(3): 638-645. (in Chinese)
- [4] 郭宝峰, 聂绍珉, 金森, 等. 管筒形件的机械扩径成形条件 [J]. *中国有色金属学报*, 2002, 12(6): 1149-1153.
- GUO B F, NIE SH M, JIN M, *et al.*. Mechanical expanding forming criterion for cylindric products [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2002, 12(6): 1149-1153. (in Chinese)
- [5] 肖曙红. 管线用直缝焊管机械扩径及其影响因素研究 [J]. *石油机械*, 2007, 35(3): 1-4.
- XIAO SH H. Research on mechanical expanding process of longitudinal welded steel pipe and influencing factors [J]. *China Petroleum Machinery*, 2007, 35(3): 1-4. (in Chinese)
- [6] 李鹤林. 天然气输送钢管研究与应用中的几个热点问题 [J]. *中国机械工程*, 2001, 12(3): 349-352.
- LI H L. Some hot issues of research and application for natural gas transmission pipes [J]. *China Mechanical Engineering*, 2001, 12(3): 349-352. (in Chinese)
- [7] 王龙. 大口径直缝焊管生产用扩径机的研制 [J]. *钢管*, 2000(2): 37-39.
- WANG L. Development of expanding mill for production of large-sized straight weld pipes [J]. *Steel Pipe*, 2000(2): 37-39. (in Chinese)
- [8] HERYNK M D, KYRIAKIDES S, ONOUFRIOU A, *et al.*. Effects of the UOE/UOC pipe manufacturing processes on pipe collapse pressure [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2007, (49): 533-553.
- [9] 金森, 郭宝峰, 任运来, 等. 大口径管线钢管机械扩径工艺实验研究 [J]. *锻压技术*, 2001(3): 44-46.
- JIN M, GUO B F, REN Y L, *et al.*. Experiment study on mechanical expanding process of large-diameter line pipe [J]. *Forging and Stamping Technology*, 2001, (3): 44-46. (in Chinese)
- [10] 余大典, 王啸修. 直缝焊管机械扩径工艺技术研究 [J]. *宝钢技术*, 2008(3): 62-65.
- YU D D, WANG X X. Study on mechanical expansion techniques for LSAW pipes [J]. *Baogang Technology*, 2008(3): 62-65. (in Chinese)
- [11] 马世麟, 傅仁本. 材料力学(下册) [M]. 北京: 机械工业出版社, 1996.
- MA SH L, FU R B. *Mechanics of Materials-Next Volume* [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 1996.

作者简介:



殷 璟(1982—),女,甘肃酒泉人,博士研究生,主要从事平面弯曲弹复理论及工程应用方面的研究。E-mail: yin-jing2008love@163.com



展培培(1984—),男,河北保定人,博士研究生,主要从事大型管件矫圆理论及工程应用方面的研究。E-mail: zhanpei@ysu.edu.cn



孙红磊(1979—),男,黑龙江青冈人,博士研究生,主要从事大型直缝焊管JCOE成形方面的研究。E-mail: hlsun@ysu.edu.cn



赵 军(1957—),男,重庆铜梁人,教授,博士生导师,1981年、1984年、1997年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士和博士学位,主要从事板材成形及其智能化控制技术、精密塑性成形技术方面的研究。E-mail: zhaojun@ysu.edu.cn