

大型直缝焊管多次三点弯曲压力矫直控制策略

赵 军, 宋晓抗, 曹宏强, 刘 娟

(燕山大学 先进锻压成形技术与科学教育部重点实验室, 066004 河北 秦皇岛)

摘 要: 为了减少大型直缝焊管的直线度误差,提出了一种针对大型管件多次三点弯曲压力矫直工艺的定量控制策略。首先,基于所建立的平面弯曲弹复理论及过弯矫直等价原理,给出了基于管件初始挠度曲线分布的理论矫直弯矩,并揭示了多次压力矫直工艺的矫直机理:以锯齿形折线分布弯矩逼近理论矫直弯矩光滑曲线。基于此,提出了多次压力矫直控制策略,依据该策略只需一次性测量管件初始挠度分布,即可给出多次三点弯曲压力矫直所需的工艺参数。其次,为提高矫直效率且保证矫直精度,提出了载荷修正系数的概念。实验结果表明:当矫直次数一定时,随着修正系数的增加,管件的残余挠度减小;而随着矫直次数的增加,将管件矫直所需的修正系数逐渐减小。以小尺寸管件的物理模拟试验验证了多次压力矫直控制策略的可行性、可靠性,这为大型管件矫直过程的自动化、智能化提供了理论依据。

关键词: 管件; 三点弯曲; 压力矫直; 控制策略; 工艺参数

中图分类号: TG306

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2014)01-0090-07

Press straightening control strategy of multi-step three-point bending for LSAW pipes

ZHAO Jun, SONG Xiaokang, CAO Hongqiang, LIU Juan

(Ministry of Education Key Laboratory of Advanced Forging & Stamping Technology and Science, Yanshan University, 066004 Qinhuangdao, Hebei, China)

Abstract: To minimize the straightness error of deflected Longitudinally Submerged Arc Welding (LSAW) pipes, a quantitative control strategy of pressure straightening process with multi-step three-point bending is studied. Based on the springback equation of small curvature plane bending and the equivalent principle for over-bend straightening, this paper proposes a theoretical straightening moment which corresponds with the initial deflection distribution of pipes. The principle of the multi-step pressure straightening process is revealed, and the parameters in three-point bending process for each step can be obtained only by measuring the initial deflection distribution once. To improve the straightening efficiency and ensure the straightening accuracy, the concept of load correction coefficient is firstly proposed. Experimental results show that when the number of straightening step is fixed, the residual deflection of the pipe is reduced with the growth of load correction coefficient. Meanwhile, as the number of straightening step increases, the load correction coefficient decreases. The feasibility and the reliability of the control strategy are verified by the physical simulation experiments of small pipes.

Keywords: pipes; three-point bending; pressure straightening; control strategy; process parameter

直线度是衡量大型直缝焊管质量的一个重要指标。根据美国 API Spec 5L 行业标准,成品焊管

的直线度,即成品管的最大挠度,不得超过管长度的 0.2%^[1]。在大型直缝焊管的生产过程中,由于焊管材料性能的不均匀、焊接热应力、成形设备及模具整体直线度等因素的影响,使最终成形的焊管的整体直线度不满足要求,需对其进行矫直。

根据大型直缝焊管的几何特殊性,目前生产

收稿日期: 2013-03-10.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51175452).

作者简介: 赵 军(1957—),男,教授,博士生导师.

通信作者: 赵军, zhaojun@ysu.edu.cn.

厂家多采用压力矫直的方法修正其直线度.压力矫直又称三点式压力矫直,是将带有初始挠曲的金属工件支承在支距可调的两支点之间,在工件挠曲最大处施以压力,使工件经反向弯曲后最终回复到平直状态^[2].长期以来,大型直缝焊管压力矫直工艺的实施多由操作者凭经验和估计确定矫直行程,反复测量和试校.这种传统的做法不仅矫直效率低、劳动强度高,而且矫直精度不易保证,远远不能适应市场发展的需要.近年来国内外学者对压力矫直工艺进行了研究,其中崔甫等^[3-4]从弹塑性理论出发对矫直的反弯过程进行了力学分析,建立了矫直曲率方程式,进而计算出最大挠度处的矫直行程.T.Katoh 等^[5-6]阐述了依据矫直过程中载荷-挠度的关系,通过在线测量计算弹性回弹量,达到矫直控制的目的.由于上述理论体系在实际应用中只针对于将最大挠度处矫直,每次矫直前均需要测量整体挠度,从而确定支点、压点位置、矫直行程等工艺参数,矫直效率极低,不易满足生产需求;并且上述理论体系中均未涉及不同初始挠度分布对矫直效果的影响及多次压力矫直对工件最终形状的影响^[7],实践^[8]表明:这些理论和计算公式对初始挠度较小的梁具有一定的精度,对初始挠度较大的梁则有相当大的误差.

为克服现有模型的不足,本文基于建立的平面弯曲弹复理论^[9]及过弯矫直等价原理^[10],从理论矫直弯矩出发,一次性给出多次三点弯曲压力矫直控制策略,以解决上述问题.

1 管件理论矫直弯矩及弯矩实例

1.1 管件理论矫直弯矩

当作用在梁上的所有外力都在纵向对称平面内时,梁的轴线变形后也将是位于这个对称平面内的曲线,这种弯曲称为平面弯曲.由于大型直缝焊管的挠曲特征为挠曲线在同一平面^[11],且其矫直过程为曲梁的反向纯弯曲,故对于管件的矫直问题可采用平面弯曲弹复理论进行研究.由基于该理论推导所得的过弯矫直等价原理可知,曲梁经纯弯曲矫成直梁所需的弯矩等于等价直梁经纯弯曲弯成待矫曲梁所需的弯矩,即研究曲梁的矫直可以从研究直梁的纯弯曲入手.图 1、2 所示为受纯弯矩 M 作用的直管微段应变分布及截面几何特征.

以截面几何中心设定坐标原点,则薄壁环形截面惯性矩 I 和应变 ε 分布为

$$I = \pi R_m^3 t, \tag{1}$$

$$\varepsilon = Kz = KR_m \sin \theta. \tag{2}$$

式中: R_m 为管件中径; t 为管件壁厚; K 为管件微段中性层的曲率; z 为质点至中性层的距离; θ 为质点与坐标原点连线与 y 轴的夹角.

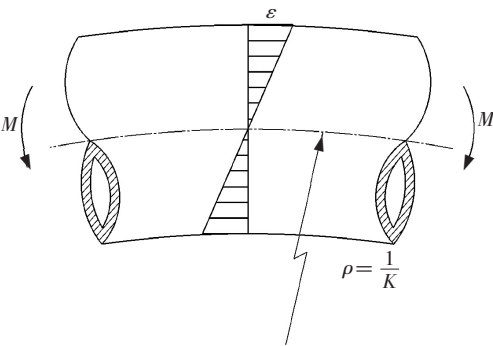


图 1 纯弯矩 M 作用的直管微段

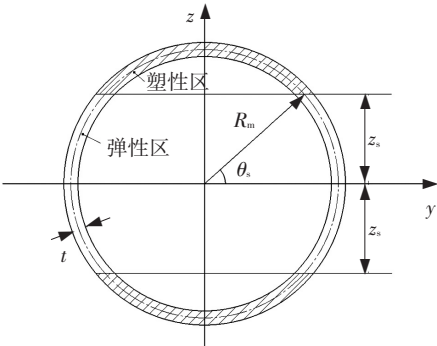


图 2 管件截面特征

管件过弯矫直属于小变形弹塑性问题,采用双线性硬化材料模型,以保证弹性区和塑性区都有较高的吻合精度.

$$\begin{cases} \sigma = E\varepsilon, & \varepsilon \leq \varepsilon_s; \\ \sigma = \sigma_0 + D\varepsilon, & \varepsilon > \varepsilon_s. \end{cases} \tag{3}$$

其中

$$\sigma_0 = \sigma_s \left(1 - \frac{D}{E} \right). \tag{4}$$

式中: E 为弹性模量; D 为塑性切线模量; σ_s 为材料初始屈服应力; σ_0 为截距应力; $\varepsilon_s = \frac{\sigma_s}{E}$ 为弹性极限应变.

直梁纯弯曲的基本方程为

$$M = \int_A \sigma z dA, \tag{5}$$

$$K_p = K - \frac{M}{EI}. \tag{6}$$

式中: A 为管坯截面面积; K 、 K_p 分别为管件弹复前后曲率.

定义 θ_s 为弹性区与塑性区分界处质点与坐标原点连线与 y 轴的夹角,则

$$\sin \theta_s = \frac{\varepsilon_s}{KR_m}.$$

(7)

定义 $\theta_s = \frac{\pi}{2}$ 处刚发生塑性变形时的弯矩为弹性极限弯矩 M_s , 则其表达式为

$$M_s = \frac{\sigma_s \cdot I}{R_m}.$$

(8)

外加弯矩小于该值时, 卸载后管坯将复直.

当外加弯矩大于 M_s 时, 将式(1) 代入式(5) 可得

$$M = \frac{1}{\pi}(E - D)IK(2\theta_s - \sin 2\theta_s) + 4\sigma_0 R_m^2 t \cos \theta_s + IDK,$$

(9)

将式(7)代入式(9)整理得

$$\frac{M}{EI} = \frac{D}{E}K + \frac{K}{\pi}\left(1 - \frac{D}{E}\right)(2\theta_s + \sin 2\theta_s).$$

(10)

由上述过弯矫直等价原理可知, 初始曲率分布为 $K_0(x)$ 的曲管经纯弯曲矫成直管等价于直管经纯弯曲弯成曲率分布为 $K_0(x)$ 的曲管. 故由弹复方程式(6) 有

$$K_0(x) = K(x) - \frac{M(x)}{EI}.$$

(11)

联立式(10) 和式(11), 可得直管弯成最终曲率分布为 $K_0(x)$ 的曲管时弹复前的曲率分布 $K(x)$ 为

$$K(x) = \frac{E}{E - D}K_0(x) + \frac{K(x)}{\pi}(2\theta_s + \sin 2\theta_s).$$

(12)

将式(12) 代入式(9), 即可得到理论矫直弯矩分布 $M(x)$.

定义 $k = R_m K$ 为量纲一的曲率, $k_0(x) = R_m K_0(x)$ 为量纲一的初始曲率分布, $m = \frac{R_m M}{EI}$ 为量纲一的弯矩, 则由上述分析可得

$$\begin{cases} \sin \theta_s = \frac{1}{k} \cdot \frac{\sigma_s}{E}, \\ k_{i+1} = \frac{E}{E - D}k_0(x) + \frac{k_i}{\pi}(2\theta_s + \sin 2\theta_s), \\ (i = 0, 1, 2, \cdots; k_0 = k_0(x)), \\ m = \frac{D}{E}k + \frac{k}{\pi}\left(1 - \frac{D}{E}\right)(2\theta_s + \sin 2\theta_s). \end{cases}$$

(13)

式(13) 给出了管件矫直所需量纲一的弯矩分布的具体确定方法. 采用量纲一的表达形式, 式(13) 仅与管件材料性能参数 E 、 D 、 σ_s 及管件轴线的初始曲率分布 $k_0(x)$ 有关, 而与管件的截面

尺寸参数 R_m 、 t 无关, 使表达结果更具普遍性.

1.2 管件矫直弯矩实例

如图 3 所示, 对某大型直缝焊管生产企业生产线上不满足直线度要求的管件进行了测量. 测量采用美国星科 (CimCore) 公司生产的 3000iTM 系列便携式三坐标测量仪, 其测量精度为 0.01 mm. 管件的几何参数及其材料性能参数如表 1、2 所示.



图 3 待矫大型直缝焊管测量现场

表 1 管件几何参数

mm

管件编号	管长	初始最大挠度	外径	壁厚
LJ23-1	12 213	70.89	457.2	12.7

表 2 管件材料性能参数

牌号	E /GPa	D /MPa	σ_s /MPa
A516Gr60	200	1 833.3	345

对编号为 LJ23-1 的管件实测挠度分布进行分段拟合, 其结果如图 4 所示.

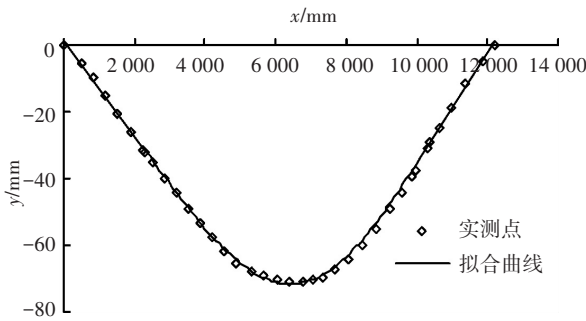


图 4 LJ23-1 管件挠曲线分布

已知 LJ23-1 管件的挠度分布, 由计算可得其初始曲率分布, 如图 5 所示. 已知管件的初始曲率分布, 由式(13) 即可得到其理论矫直弯矩 $M(x)$, 如图 6 所示. 由图 6 可知, $x \in [2\ 400, 10\ 200]$ 区域的曲率大于零, 说明该区域需在弯矩 $M(x)$ 的作用下发生弹塑性变形卸载后才能矫直, 故该区域的理论矫直弯矩均大于管件截面弹性极限弯矩 M_s ; 而 $x \in [0, 2\ 400] \cup [10\ 200, 12\ 000]$ 区域的曲率为零, 说明该区域无需矫直, 在该区域弯矩 $M(x)$ 可以是小于 M_s 的任意值.

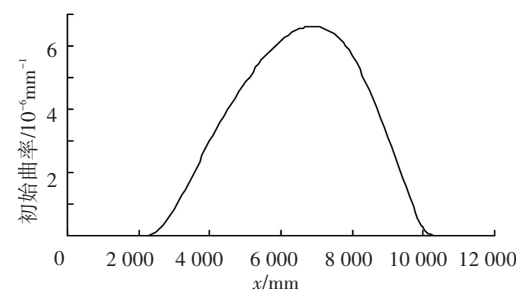


图 5 LJJ23-1 管件初始曲率分布

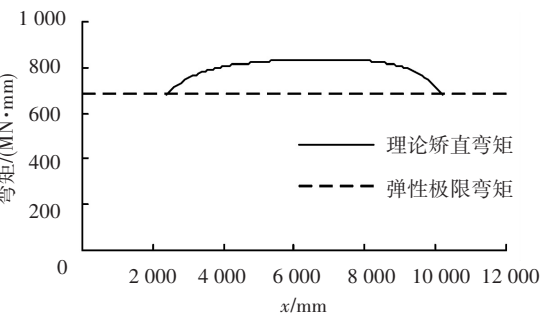


图 6 LJJ23-1 管件理论矫直弯矩图

2 多次三点弯曲压力矫直工艺的矫直机理

在实际生产中,厂家多采用专用设备对大型直缝焊管进行矫直.该设备的两支点对称分布于压头两侧,每次压力矫直的实质为对称式三点弯曲,其力学模型与受集中载荷的外伸梁相似,形式如图 7 所示.由图 7 可知,单次矫直的弯矩图为等腰三角形,由于三点弯曲力学模型的局限性,其塑性变形区域集中在压点附近,故单次的压力矫直只能将管件由单弧度的大弯矫正为双弧度的小弯.

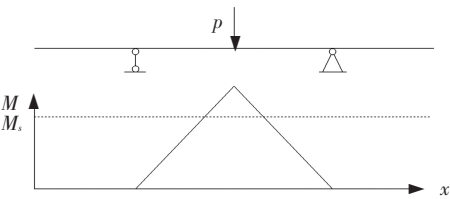


图 7 单次矫直弯矩图

当待矫管件初始挠度较小时,1 次压力矫直可将其直线度修正到要求以内,而当初始挠度较大时,需要多次矫直才能达到提高整体直线度的目的.以 3 次压力矫直为例,图 8 为 3 次压力矫直时弯矩分布示意图.由图 8 可知,3 次压力矫直时其弯矩为 3 个等腰三角形,且它们之间存在着交叉,那么位于交叉区域的管件微段就经历了多次的三点弯曲弹塑性变形.

由式(5)和式(6)可知,弯矩与曲率关系如图 9 所示.由图 9 可知,管件微段在弯矩 M_1 的作用

发生弹塑性变形卸载后残余塑性曲率为 K_{p1} ,当再次加载时,若弯矩 $M_2 < M_1$,则卸载后其曲率不变仍为 K_{p1} ;若弯矩 $M_2 > M_1$,则卸载后其曲率为 K_{p2} .由此可知反复加载和卸载时,管件微段的最终曲率等于较大的弯矩值所对应的弹复后曲率.

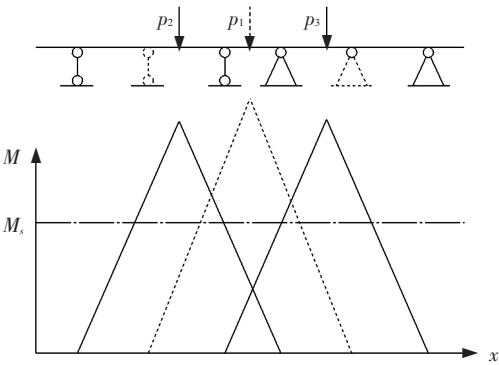


图 8 3 次压力矫直弯矩图

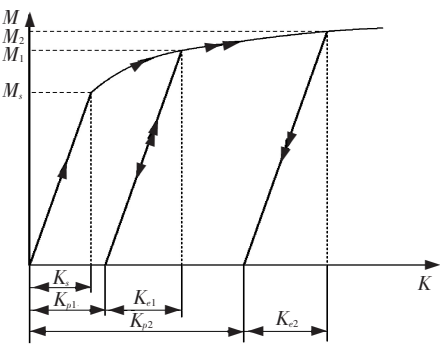


图 9 弯矩-曲率关系

故当多次三点弯曲压力矫直时,影响管件最终形状的弯矩为图 10 中所示的锯齿形弯矩.

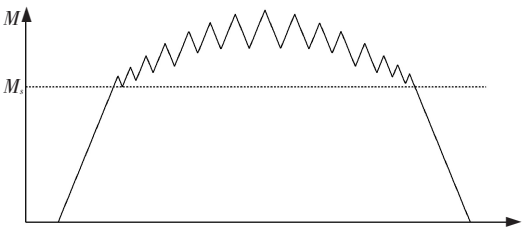


图 10 多次压力矫直弯矩图

3 多次三点弯曲压力矫直控制策略

由图 6 可知大型直缝焊管的理论矫直弯矩是一条光滑曲线,将该弯矩施加于管件截面,理论上可将其一次性完全矫直.但在实际生产中无法施加该理论弯矩.由图 10 可知实际生产中多次压力矫直时施加于管件截面的弯矩为锯齿形折线,结合上述分析,提出多次压力矫直控制策略,即当获得管件理论矫直弯矩后用锯齿形的折线去逼近该

曲线,示意图如图 11 所示.由图 11 可知,该锯齿形弯矩与理论弯矩的交点的 x 坐标为各次压力矫直时的压点位置,锯齿形折线的延长线与 x 轴的交点为其相应的左、右支点,即制定出了三点弯曲多次矫直的控制策略.

故当测量得到管件的初始挠度分布后,通过上述理论可以获取管件矫直所需的理论弯矩,相应的多次三点弯曲压力矫直策略的工艺参数制定方法如下:

1) 首先,需选取合适的两支点间距 L ,一般其值为管长的 $1/2$.由图 11 可以看出,当支点间距较大时,其单次矫直时的塑性区域增大,矫直效果较优,但理论弯矩曲线的端部区域则受到该因素的制约不能进行矫直;而当两支点的间距较小时,其单次矫直时的塑性区域较窄,但总的矫直范围可以通过增加矫直次数的方式增大.

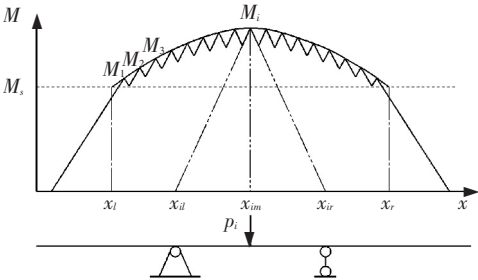


图 11 矫直弯矩示意图

2) 为获得较大的矫直范围,若总的矫直次数为 n ,则第 1 次矫直时的左支点位置 x_{1l} 与第 n 次矫直时的右支点位置 x_{nr} 分别选在待矫管件的左、右端部附近;故相应第 1 次矫直时的压点位置 x_{1m} 、右支点的位置 x_{1r} 为

$$x_{1m} = x_{1l} + L/2, \tag{14}$$

$$x_{1r} = x_{1l} + L. \tag{15}$$

第 n 次矫直时的压点位置 x_{nm} 、左支点的位置 x_{nl} 为

$$x_{nm} = x_{nr} - L/2, \tag{16}$$

$$x_{nl} = x_{nr} - L. \tag{17}$$

3) 当已知 x_{1m} 和 x_{nm} 时,将其余 $(n - 2)$ 次压力矫直时的压点均布在其之间,则第 i $(1 < i < n)$ 次矫直时压点的位置 x_{im} 为

$$x_{im} = x_{1m} + \frac{i - 1}{n - 1}(x_{nm} - x_{1m}). \tag{18}$$

第 i 次矫直时左、右支点的位置 x_{il} 和 x_{ir} 分别为

$$x_{il} = x_{im} - L/2, \tag{19}$$

$$x_{ir} = x_{im} + L/2. \tag{20}$$

4) 第 i 次矫直时压点施加的矫直力 p_i 的大小为

$$p_i = \frac{M_i(x_{ir} - x_{il})}{(x_{ir} - x_{im})(x_{im} - x_{il})}. \tag{21}$$

式中, M_i 为压点 x_{im} 处的理论矫直弯矩值.

4 载荷修正系数

由图 11 可知,只有当三点弯曲压力矫直的矫直次数趋于无限多次时,其实际加载的锯齿形折线弯矩的矫直效果才能与理论矫直弯矩相当,进而将待矫管件完全矫直.但在实际生产中为提高矫直效率,则需减少矫直次数.为达到提高矫直效率同时又保证矫直精度的目标,采用较少的矫直次数去获得与理论弯矩相当的矫直效果,在此引入载荷修正系数 λ 的概念,其中第 i 次矫直时压点 x_{im} 处的修正后弯矩 M_i' 与理论弯矩的关系为

$$M_i' = \lambda M_i. \tag{22}$$

当 λ 较小时,矫直后管件的直线度有可能仍不达标,矫直效果不佳;而当 λ 过大时,则可能将管件反弯过去,同样达不到矫直的效果.

采用有限元模拟的方法对多次三点弯曲压力矫直时载荷修正系数的取值进行初步探讨.依据有限元分析软件 ABAQUS 建立模型,单元类型为非协调单元 C3D8I,泊松比 $\nu = 0.3$.模具参数与该大型直缝焊管生产企业的矫直设备相同,两支点间距为 $L = 6\,000\text{ mm}$,对称分布在压点两侧.根据美国 API Spec 5L 行业标准,成品管的最大挠度,不得超过管长度的 0.2% ,编号 LJ23-1 的管件矫直后最大挠度不超过 24.43 mm 即满足要求.分别采用 3、4、5 次三点弯曲对管件进行矫直,其矫直参数及仿真结果如表 3 所示.由表 3 可知,这 3 种方法均不能将其矫直到要求以内.但随着矫直次数的增多,其实际矫直弯矩更逼近理论矫直弯矩,管件的残余挠度越小,故可推断当无限次增加矫直次数时,可将管件矫直到要求以内.

表 3 采用多次压力矫直控制策略模拟结果

管件编号	压点位置/mm					矫直力 /kN					残余挠度/ mm
	x_{1m}	x_{2m}	x_{3m}	x_{4m}	x_{5m}	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	
LJ23-1											
3 次矫直	3 500	6 100	8 700	—	—	522.67	556.00	544.00	—	—	63.67
4 次矫直	3 500	5 200	7 000	8 700	—	522.67	550.67	557.33	544.00	—	60.85
5 次矫直	3 500	4 800	6 100	7 400	8 700	522.67	547.33	556.00	556.67	544.00	57.18

分别对 3、4、5 次压力矫直时的矫直弯矩进行修正,依据修正后的矫直参数对管件进行矫直,其残余挠度与载荷修正系数的关系如图 12 所示.由图 12 可知,随着载荷修正系数的增加,残余挠度越来越小;依据不同的载荷修正系数,这 3 种方式最终均可将管件矫直到要求以内;并且随着矫直次数的增多,其所需的修正系数越小.

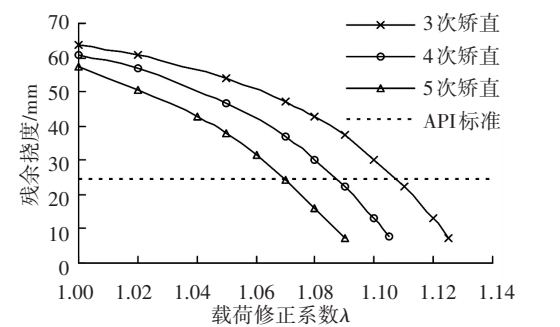


图 12 残余挠度——修正系数的关系

5 多次压力矫直控制策略实验验证

分别对 3 种不同初始挠度分布的小尺寸管坯进行多次压力矫直控制策略的验证实验.采用 WDD-LCT-150 型电子拉扭组合多功能试验机作为矫直设备,挠度的测量采用便携式三坐标测量机来完成.实验用小尺寸管坯的材料为 20 钢,其材料性能参数及几何尺寸如表 4 所示.验证实验所用模具两支点间距为 $L = 600\text{ mm}$,对称分布于压点两侧,如图 13 所示.

表 4 小尺寸管坯几何尺寸及材料性能参数

牌号	L/mm	$R_m \times t/\text{mm}$	E/GPa	D/MPa	σ_s/MPa
20	1 000	36×4	206	2 533	298.7



图 13 三点弯曲压力矫直实验模具

本实验中均采用 3 次三点弯曲压力矫直控制策略对 3 根管件进行矫直,实验流程如下:

1) 首先,采用三坐标测量这三根管坯的初始挠度分布,随后进行曲线拟合,实测值与拟合曲线如图 14 所示.

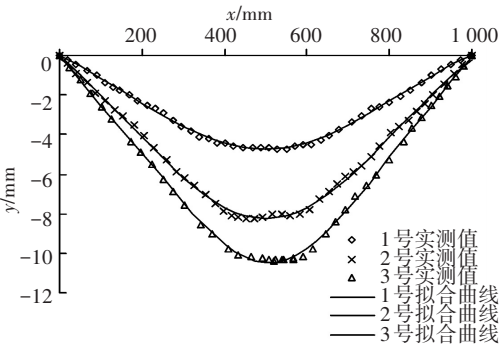


图 14 小尺寸管件初始挠度分布

2) 计算出其相应的理论矫直弯矩.

3) 由大管模拟结果可知 3 次压力矫直中当其修正系数 λ 为 1.12 左右时,可以保证将管件修正到直线度误差要求以内.依据上述所述方法及修正系数 $\lambda = 1.12$,制定出相应的矫直控制策略及工艺参数.

4) 依据该工艺参数对小尺寸管坯进行实验,实验参数及实验结果如表 5 所示.

表 5 矫直实验参数和实验结果

管坯编号	初始最大挠度/mm	压点位置/mm			修正后矫直力/kN			残余挠度/mm
		x_{1m}	x_{2m}	x_{3m}	p_1	p_2	p_3	
1	4.73	340	500	660	45.16	46.06	45.25	0.46
2	8.25	340	500	660	46.30	47.05	46.23	0.89
3	10.34	350	500	640	46.32	47.84	46.98	1.04

由表 5 可知,依据该矫直策略可将初始直线度为 0.4%~1%的管坯的直线度修正到 0.11%以内,矫直效果较优,满足工业需要.

6 结 论

1) 依据小曲率平面弯曲弹复理论和过弯矫直等价原理,给出了基于实测管件挠度曲线分布

确定理论矫直弯矩的方法和预测公式,以该分布弯矩施加于被矫直管件理论上可一次性完全矫直.矫直弯矩分布的定量化为多种压力矫直控制策略的研究奠定了理论基础.

2) 揭示了多次三点弯曲压力矫直工艺的矫直机理:以锯齿形折线分布弯矩逼近理论矫直弯矩光滑曲线.

3) 依据理论矫直弯矩,提出了管件多次三点弯曲压力矫直控制策略:只需一次性测量待矫管件的初始挠度分布,即可给出每次压力矫直时所需的工艺参数,大大提高了矫直效率.

4) 提出了载荷修正系数的概念,当矫直次数一定时,随着修正系数的增加,管件的残余挠度逐渐减小,且一定存在一个最优修正系数;而随着矫直次数的增加,将管件矫直所需的修正系数逐渐减小.确定最优修正系数的原则和方法有待深入研究.

5) 小尺寸管坯矫直的实验结果验证了多次三点弯曲压力矫直控制策略的可行性,为自动化矫直和智能化矫直提供了理论依据.

参考文献

- [1] ANSI/API Specification 5L. ISO 3183: 2007, Specification for line pipe[S].Washington DC: API Publishing Service, 2009.
- [2] 李骏,邹慧君,熊国良. 压力校直工艺理论研究的现状与展望.机械设计与研究[J], 2004,20(4):69-71.
- [3] 崔甫. 矫直理论与参数[M]. 北京:冶金工业出版社, 1994.
- [4] 钦明浩,柯尊忠,张向军,等. 精密矫直机中轴类零件矫直工艺理论研究[J]. 机械工程学报, 1997, 33(2): 48-53.
- [5] KATOH T, URATA E. Measurement and control of a straightening process for seamless pipes[J]. Journal of Engineering for Industry, 1993, 115(3): 347-351.
- [6] KIM Seung-Cheol, CHUNG Sung-Chong. Synthesis of the multi-step straightness control system for shaft straightening processes [J]. Mechatronics, 2002, 12(1): 139-156.
- [7] 管奔,臧勇,曲为壮. 矫直理论的研究发展现状与展望[J]. 机械设计与制造, 2012, (8):266-268.
- [8] 钦明浩,张向军,蒋守仁,等.轴类零件校直理论分析[J].合肥工业大学学报:自然科学版,1996,(4):22-28.
- [9] ZHAO Jun, YIN Jing, MA Rui, et al. Springback equation of small curvature plane bending[J]. Science China(Technological Sciences), 2011, 41(9): 2386-2396.
- [10] 赵军,曹宏强,展培培,等. 纯弯曲过弯矫直等价原理及其试验验证[J]. 机械工程学报, 2012, 48(8): 28-33.
- [11] 马瑞,赵军,孟宪昌. 大型直缝焊管挠度检测系统关键技术研究[J].2012, 37(5): 126-128.

(编辑 张 红)