

# 一种 Zr-4 厚壁管矫直行程计算方法

翟 华<sup>1,2</sup>, 刘 洋<sup>1</sup>, 丁曙光<sup>1</sup>, 钟华勇<sup>1</sup>, 陈 奇<sup>1</sup>, 赵 韩<sup>1</sup>

(1. 合肥工业大学 机械与汽车工程学院, 安徽 合肥 230009)

(2. 合肥工业大学 工业与装备技术研究院, 安徽 合肥 230009)

**摘 要:** Zr-4 厚壁管件是核电站燃料供给系统中的重要零件, 挤压成形后需要三点弯矫直工艺减少后续加工量。其矫直过程是微小弹塑性变形过程, 通过分析弹性、弹塑性和回弹三阶段的应力应变变化, 形成管件  $M-\xi-\beta$  方程, 反映弹塑性弯曲变形和卸载间关系。基于 Zr-4 管材料特性, 建立弹性线性强化本构模型, 计算矫直挠度, 提出 Zr-4 厚壁管矫直行程计算方法。经过对多根最大弯曲变形 20 mm, 具有 6 个检测点、长 5 m 厚壁 Zr-4 管进行矫直实验, 矫直后弯曲量均小于 0.50 mm, 矫直时间由手工矫直 1.5 h/根减少到 22.5 min/根, 表明该矫直行程计算方法具有一定的实用性。

**关键词:** 矫直; 锆合金; 厚壁管

中图分类号: TG302

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2016)12-3330-05

核反应堆中核燃料包壳管和压力管等零件主要使用 Zr-4 管件<sup>[1]</sup>, 其加工技术很大程度上反映了一个国家锆合金材料加工生产综合水平<sup>[2]</sup>。由于多辊矫直会导致表面接触应力变化, 因此轧机挤出的 Zr-4 管如出现弯曲变形<sup>[3]</sup>, 需要通过三点弯局部精密矫直, 才能进入内外表面抛光、内壁酸洗、清洗、喷砂、无损检测(超声和涡流)等后续加工操作<sup>[4]</sup>。如果 Zr-4 管直线度超差, 直接进入抛光工序, 容易造成管壁不均, 不能保证产品质量, 所以必须高度重视 Zr-4 管精密矫直工艺, 提高厚壁管矫直效率和质量。

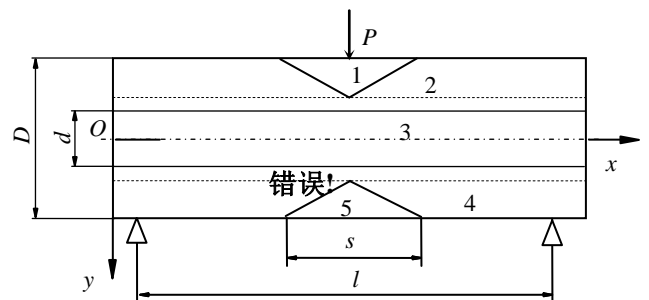
钦明浩等<sup>[5]</sup>通过有限元软件建立轴类零件载荷-挠度模型。闫晶等<sup>[6]</sup>基于铝合金大直径薄壁管弯曲过程动力显式三维弹塑性有限元模型, 提出了管材最小弯曲半径搜索算法。刘芷丽等<sup>[7]</sup>研究了有芯轴薄壁圆管压扁过程中芯轴支撑作用, 矫正了成形后期圆弧部分的扁化。宋飞飞等<sup>[8]</sup>研究管件弯曲卸载后回弹对管件几何和形状精度产生的显著影响。关于 Zr-4 厚壁管三点弯矫直行程计算问题鲜见到相关文献。

Zuev 等<sup>[9]</sup>发现锆合金管坯挤压中残余应力引起的管件微小变形, Zr-4 厚壁管矫直是微小弹塑性变形过程, 将经历弹性、弹塑性和回弹三阶段。本研究基于 Zr-4 材料特性研究弹塑性弯曲变形和卸载过程之间的关系, 计算加载后挠度变化值, 建立矫直行程计算方法。

## 1 Zr-4 厚壁管件矫直过程

如图 1 所示, 管件矫直过程是微小非线性弹塑性形变过程, 随着载荷  $P$  值增大, 管件矫直分 3 个阶段。 $P$  值较小时, 处于弹性变形。当  $P$  值大于管件弯曲弹性极限, 进入弹塑性变形, 区域 1 受弹塑性压缩, 区域 2 和 4 将作刚性转动, 区域 3 属弹性变形阶段, 区域 5 受弹塑性拉伸。3 区由于是弹性变形区域, 其应力应变关系满足虎克定律。当  $P$  值达到矫直变形要求时, 需要及时卸载, 即弹性回复阶段, 管件弹性变形部分恢复, 但仍有少数残留塑性变形, 弥补弯曲值, 实现管件矫直。

精密控制压力  $P$ , 可以控制管件变形。但目前实际生产用压力传感器的控制精度最高为量程的



Region 1-elastic plastic compress; Region 2, 4-rigid rotation  
Region 3-elastic deformation; Region 5-elastic plastic stretch

图 1 锆合金厚壁管矫直微小弹塑性变形区域划分  
Fig.1 Micro elastic-plastic deformation region of zirconium alloys thick walled pipe straightening

收稿日期: 2015-12-21

基金项目: 国家自然科学基金(51305116); 2013年度安徽省合芜蚌自主创新试验区专项(20130205)

作者简介: 翟 华, 男, 1973 年生, 博士, 教授, 合肥工业大学机械与汽车工程学院, 安徽 合肥 230009, 电话: 0551-62905105, E-mail: jxzhaihuajx@sina.com

0.01%，当载荷量程达到 1000 kN 时，控制精度仍有 100 N，对管件微小非线性弹塑性形变过程仍不能满足精密控制需求，因此一般作为安全压力进行控制，防止管件在压机失控下超压，造成管件损坏，其控制不当可能导致管件断裂<sup>[10]</sup>。

手工矫直是一种行程控制方式。对一批具有相同初始弯曲变形特点的管类零件，如果矫直压点、支点位置固定不变，操作者可根据经验将可能出现的初始弯曲变形值划分成几个区域，在矫直机压头下压轨迹上标定相应的记号，依据记号控制滑块行程进行矫直。当材料、压点支点位置稍微变化，完全凭经验的手工矫直需要重新摸索经验，废品率高。因此必须提出合适的矫直行程算法以满足不同管件三点弯精密矫直工艺要求。

厚壁管可以不考虑截面畸变<sup>[11]</sup>，矫直变形计算问题可表述为：已知管件的初始弯曲变形  $y_0$ ，材料特性参数  $U$ ，几何特性参数  $G$ ，已知压点、支点位置集合  $\pi$  等条件，求解在压点处零件变形  $y$ ，将初始弯曲变形减少到设计精度要求内<sup>[12]</sup>。矫直行程算法可以用函数 (1) 表示：

$$y = \mathcal{G}(y_0, \pi, U, G) \quad (1)$$

通过分析应力应变变化，研究矫直行程和初始弯曲变形之间的关系，建立式 (1) 具体形式，可以应用于矫直行程计算方法研究。

## 2 Zr-4 厚壁管件矫直中应力应变分析

图 2a 为应力分布图， $R$  为管件外径， $r$  为管件内径，假设 I 区为弹性变形区  $A_1$ ，靠近外层纤维的 II 区为塑性变形区  $A_2$ 。

I 区高度为  $h_s$ ，弹区比参数  $\xi = h_s / (R - r)$ ，反映弹性区深度和应力分布状况， $\xi$  取值范围 [0, 1]，当  $\xi = 1$ ，刚

开始发生塑性变形， $\xi = 0$ ，塑性变形已扩展内边界，整个截面完全塑性。I 区和 II 区交界处的应力值为屈服应力  $\sigma_s$ ，I 区内任意一点距中性层高为  $h_1$ ，其内应力为：

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_s(h_1 - r)}{h_s} = \frac{\sigma_s(h_1 - r)}{\xi(R - r)} \quad (2)$$

Zuev 测试了商业用锆合金管<sup>[13]</sup>，认为锆合金管件材料由于添加的 Nb、Sn、Fe 等元素种类和含量不同，其材料特性近似弹性理想塑性材料模型和弹性线性强化材料模型。根据弹性理想塑性材料模型假设，塑性区内应力为  $\sigma_2 = \sigma_s$ 。由图 2b 应变示意图， $\varepsilon_s$  为最大弹复应变， $E$  为弹性模量，则  $\varepsilon_s = \sigma_s / E$ 。

弹塑性弯曲中，断面  $OO_1$  移到  $OF$  位置，其周边纤维相对伸长率  $\varepsilon_h$ ，由图 2b， $\varepsilon_h = \sigma_s / \xi E = \varepsilon_s / \xi$ 。

阴影区面积  $A$  可写成 2 个面积之和， $A = A_1 + A_2$ ，外部弯曲力矩  $M$  应和内力矩平衡，所以： $M = 2 \int_A \sigma h dA$ 。

截面内弯矩可以通过以下公式计算求得：

$$M = \frac{2\sigma_s}{h_s} \int_{A_1} (h - r) h dA + 2\sigma_s \int_{A_2} h dA \quad (3)$$

如果  $I_y$  是对中性层惯性矩，则材料周边纤维达到屈服时对应临界外力矩  $M_s = \sigma_s I_y / R$ ，外力矩  $M$  与  $M_s$  比值为：

$$\frac{M}{M_s} = \frac{2R}{I_y} \left( \frac{1}{h_s} \int_{A_1} h^2 dA - \frac{r}{h_s} \int_{A_1} h dA + \int_{A_2} h dA \right) \quad (4)$$

卸载后，断面  $OF$  由于弹复变形，移到折线  $ODB$  所示的位置，由伯努利假设<sup>[10]</sup>，该断面应保持平面，即卸载后应移到  $OC$  位置，因此压应力和拉应力并存，在  $h_H$  点处，应力为 0。设  $\sigma_{cy}$  表示弹复后断面上的残余应力， $\sigma_{cy1}$  为 I 区残余应力， $\sigma_{cy2}$  为 II 区残余应力，断面平衡必要条件为： $\int_A \sigma_{cy} h dA = 0$ ，同样可写成两个积分之和，

如下式所示

$$2 \int_{A_1} \sigma_{cy1} h dA + 2 \int_{A_2} \sigma_{cy2} h dA = 0 \quad (5)$$

对 I 区进行分析， $\varepsilon_{cy}$  为周边纤维卸载后残余应变，令  $\beta = \varepsilon_{cy} / \varepsilon_s$ ， $\beta$  反映截面残余变形和最大弹复变形之比，由图 2b 可知， $\varepsilon_{ch1} = \frac{\varepsilon_{cy}}{(R - r)} (h_1 - r)$ ，所以

$$\sigma_{cy1} = E \varepsilon_{ch1} = \frac{E \varepsilon_{cy}}{(R - r)} (h_1 - r) = \frac{\sigma_s}{(R - r)} \beta (h_1 - r) \quad (6)$$

对 II 区则有：

$$\varepsilon_{ch2} = \frac{\varepsilon_{cy}}{(R - r)} (h_2 - r) - \frac{\varepsilon_h - \varepsilon_s}{R - r - h_s} (h_2 - h_s - r)$$

又因为：

$$\frac{\varepsilon_h - \varepsilon_s}{R - r - h_s} = \frac{\frac{\sigma_s}{\xi E} - \frac{\sigma_s}{E}}{(R - r)(1 - \xi)} = \frac{\sigma_s}{(R - r)\xi E} = \frac{\varepsilon_s}{(R - r)\xi}$$

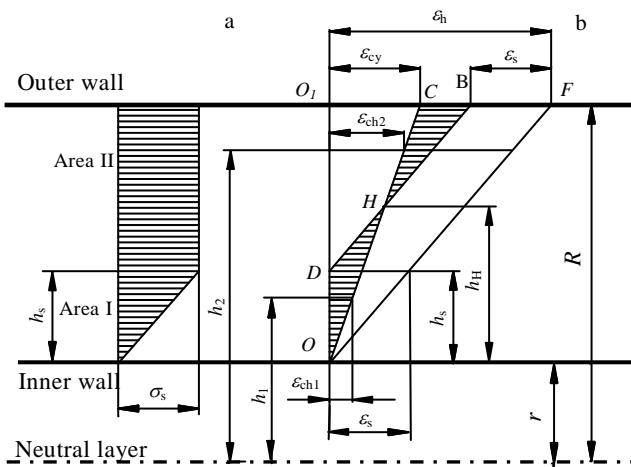


图 2 厚壁管弯曲中的内部应力和应变分布

Fig.2 Inner stress (a) and strain (b) distribution during thick walled pipe bending

所以得:

$$\sigma_{cy2} = E\varepsilon_{ch2} = \frac{\sigma_s}{\xi(R-r)}(\beta\xi - 1)(h_2 - r) + \sigma_s \quad (7)$$

把式 (6) 和式 (7) 代入式 (5) 可得方程 (8):

$$\frac{\sigma_s\beta}{(R-r)} \int_{A_1} (h-r)hdA + \sigma_s \int_{A_2} hdA + \frac{\sigma_s}{\xi(R-r)}(\beta\xi - 1) \int_{A_2} (h-r)hdA = 0 \quad (8)$$

由  $I_y$  表达式:  $\int_{A_1} h^2dA + \int_{A_2} h^2dA = \frac{I_y}{2}$ , 截面静矩  $S_y$  表达

$$\text{式: } \int_{A_1} hdA + \int_{A_2} hdA = \frac{S_y}{2}, \text{ 从方程 (8) 可以计算 } \beta \text{ 值为:}$$

$$\beta = \frac{2}{(I_y - rS_y)} \left[ \frac{1}{h_s} \int_{A_2} h^2dA - \frac{r}{h_s} \int_{A_2} hdA - (R-r) \int_{A_2} hdA \right] \quad (9)$$

令截面系数  $W = \frac{R(I_y - rS_y)}{I_y(R-r)}$ , 由式 (4) 和式 (9) 并

结合  $I_y$ 、 $S_y$  计算式可得到:

$$\frac{M}{M_s} = W \left( \frac{1}{\xi} - \beta \right) \quad (10)$$

方程 (10) 称为管件  $M$ - $\xi$ - $\beta$  方程, 必须满足条件  $M_s \leq M \leq M_p$ , 否则此方程无意义。当  $M=M_s$  时方程左边为 1, 为完全弹性变形状态, 所以没有残余变形, 故  $\xi=1$ ,  $\beta=0$ , 两边相等, 方程也是成立的。

当管件的中性层和形心重合,  $S_y=0$ , 此时  $W=R/(R-r)$ 。当  $r$  增大,  $W$  值越大, 反映出管件抗弯能力越强。但是当  $R/(R-r) \leq 20$ , 属于薄壁管件, 需要考虑截面畸变情况,  $M$ - $\xi$ - $\beta$  方程也不再适用。当  $r=0$ ,  $W=1$ , 此时为实心轴情况。

从  $M$ - $\xi$ - $\beta$  方程可以看出, 外部弯矩导致了塑性变形层深度变化, 卸载后最终结果产生残余应变值, 反映了整个弹塑性弯曲变形和卸载过程之间的联系。

### 3 Zr-4 厚壁管矫直行程计算方法

由管件  $M$ - $\xi$ - $\beta$  方程, 外部弯矩、材料参数影响残余应变, 最终表现在式 (1) 中的矫直行程具体函数表达式。管件弹性阶段的挠度变化可依据材料力学相关公式进行分析, 挠度为:

$$y = -\frac{Ml^2}{12EI} \quad (11)$$

令  $C_t = -\frac{l^2}{12EI}$ , 式 (11) 可改写成:  $y=C_tM$ 。

由锆合金管件材料特性近似弹性线性强化材料模型假设, 弹性区部分的应力值仍同式 (2), 在塑性区部分应力值应根据线性强化材料模型假设来确定, 本构方

程为<sup>[14]</sup>:

$$d\varepsilon^e = \frac{d\sigma}{E}$$

$$d\varepsilon^p = \frac{d\sigma}{E_p} \quad \text{当 } (\sigma - E_p\varepsilon^p) - \sigma_s = 0 \text{ 且 } d\sigma > 0$$

$$d\varepsilon^p = 0 \quad \text{对 } (\sigma - E_p\varepsilon^p) - \sigma_s < 0 \text{ 且 } d\sigma < 0$$

其中:  $\varepsilon^p$  为塑性应变部分;  $\varepsilon^e$  为弹性应变部分;  $E_p$  为塑性模量。

对应上述本构方程, 由本构方程可得弹性曲率增量  $dk^e$ 、曲率半径  $U$ 、外载  $M$  之间的表达式<sup>[10]</sup>:

$$dk^e = \frac{d\varepsilon^e}{U} = \frac{d\sigma}{EU} = \frac{dM}{EI}$$

相应的塑性曲率增量  $dk^p$ :

$$dk^p = \frac{d\varepsilon^p}{U} = \frac{d\sigma}{E_pU} = \frac{dM}{E_pI}$$

如图 1 所示, 设  $s$  区间内发生塑性变形。在  $(l-s)/2$  和  $(l+s)/2$  处, 弯矩都等于弹性极限弯矩, 即:

$$M|_{x=(l-s)/2} = M|_{x=(l+s)/2} = M_s$$

由曲率增量公式和位移增量公式可写成如下两式:

$$-\frac{d^2}{dx^2} dy = dk^e = \frac{dPx}{2EI}, \quad 0 \leq x \leq (l-s)/2 \text{ 或 } (l+s)/2 \leq x \leq l$$

$$-\frac{d^2}{dx^2} dy = dk^e + dk^p = \frac{dPx}{2EI} (1 + \lambda), \quad (l+s)/2 < x < (l-s)/2$$

将上式积分 2 次, 利用边界条件  $dy(0)=0, dy'(l/2)=0$ , 并令斜率和位移增量在  $x=s$  处相等, 因此中点的位移增量  $y$  为:

$$-\frac{12EI}{M_s l^2} dy = (1 + \lambda) d\left(\frac{M}{M_s}\right) - \lambda \left(\frac{M_s}{M}\right)^3 d\left(\frac{M}{M_s}\right)$$

当  $\frac{M}{M_s} > 1$  时, 积分结果为:

$$\frac{12EIy}{M_s l^2} = \frac{M}{M_s} + \lambda \left(\frac{M}{M_s} - 1\right) + \frac{\lambda}{2} \left[\left(\frac{M_s}{M}\right)^2 - 1\right] \quad (12)$$

现将塑性变形量  $y_p$  用下式表示:

$$y_p = \frac{M_s l^2}{12EI} \left\{ \lambda \left(\frac{M}{M_s} - 1\right) + \frac{\lambda}{2} \left[\left(\frac{M_s}{M}\right)^2 - 1\right] \right\} \quad (13)$$

则式 (12) 可写成:

$$y = C_t M + y_p \quad (14)$$

当对管件施加的外载荷  $P$  卸除时, 可采用简单卸载定理<sup>[11]</sup>, 施加反向载荷  $P$ , 应力与应变呈线性关系, 而

且在整个截面上都适用。卸载时，弹塑性变形加载值  $M$  减小到 0，挠度变化依据简单卸载定理可以表示为：

$$y = C_1 M, \quad dM < 0 \quad (15)$$

综合式 (11)、(14) 和 (15)，各变形阶段的挠度计算式可以统一为下式：

$$y = \begin{cases} C_1 M; & dM > 0, \quad M < M_s \\ C_1 M + y_p; & dM > 0, \quad M_s \leq M < M_p \\ C_1 M; & dM < 0, \quad M < M_p \end{cases}$$

取变形向下为正方向，初始弯曲变形量  $y_0$  一般为负值，假设初始弯曲变形与所加载荷相互独立<sup>[12]</sup>，则位移增量仅和所加弯矩有关系。根据矫直工艺要求，卸载后弹塑性变形和回弹变形之差应相等，即：

$$y_0 = C_1 M + y_p - C_1 M = y_p \quad (16)$$

因此建立如下锆合金厚壁管矫直行程计算方法：1) 检测初始弯曲变形  $y_0$ ；2) 应用式 (16) 和式 (13) 计算所需要的  $M/M_s$  值；3) 将  $M/M_s$  值代入式 (12)，求得压头下压行程。

### 4 Zr-4 厚壁管矫直计算与实验

已知 Zr-4 管件，其直径  $D=86$  mm，内径  $d=48$  mm，支点距  $l=1100$  mm，初始弯曲变形最大发生在中点， $y_0=20$  mm，相关锆合金材料参数  $E=104$  GPa， $\sigma_s=635$  MPa， $\lambda=0.11$ <sup>[15]</sup>，反弯矫直行程计算过程如下：首先根据式 (13)，得：

$$y_p = \frac{\sigma_s l^2}{6ED} \left\{ \lambda \left( \frac{M}{M_s} - 1 \right) + \frac{\lambda}{2} \left[ \left( \frac{M_s}{M} \right)^2 - 1 \right] \right\} \quad (17)$$

令  $M/M_s=r$ ， $y_p=y_0=20$  mm，将相关参数代入后解得  $r=2.236$ ，并将上述结果代入式 (12)，矫直行程为 64 mm。

矫直行程计算方法为自动矫直设备开发提供理论基础，锆合金管件矫直成套设备可以实现管材自动矫直。选取长 5 m 的 Zr-4 厚壁管件为实验对象，其直径 86 mm，内径 48 mm，采用 7 个支座，管件全长上均布 6 个检测点，检测方法采用直接接触式测量方法<sup>[16]</sup>，当检测点处弯曲量小于 0.50 mm，该检测点矫直合格。

对某公司生产的 5 根最大初始弯曲量超过 20 mm 的 Zr-4 管件进行矫直实验，采用锆合金厚壁管矫直行程计算方法，矫直结果如表 1 所示，“Ini.”表示各点初始弯曲变形值，“Str.”表示矫直后各点弯曲变形值， $M_1 \sim M_6$  表示 6 个测试点， $t$  表示 6 点矫直合格后总的矫直时间。

由表 1 可知，6 个检测点经矫直后弯曲量均小于 0.50 mm，矫直时间最长为 22.5 min/根。相比原手工矫直，由于全部工艺动作为自动完成，矫直时间由手工矫直 1.5 h/根减少到 22.5 min/根，矫直时间缩短为原有时间的 1/4，矫直效率大大提高。

表 1 锆合金厚壁管矫直结果

Table 1 Results of zirconium alloys thick walled pipes straightening experiment

No.		$M_1/$ mm	$M_2/$ mm	$M_3/$ mm	$M_4/$ mm	$M_5/$ mm	$M_6/$ mm	$t/$ min
1	Ini.	10.33	15.17	20.28	25.39	20.62	17.78	17.3
	Str.	0.17	0.29	0.42	0.47	0.38	0.23	
2	Ini.	9.15	12.80	24.17	32.09	19.85	13.06	19.2
	Str.	0.23	0.45	0.48	0.39	0.27	0.17	
3	Ini.	12.87	18.80	29.30	27.10	21.54	14.76	22.5
	Str.	0.36	0.40	0.49	0.43	0.37	0.25	
4	Ini.	11.38	18.73	24.17	21.64	15.28	12.35	20.8
	Str.	0.15	0.23	0.38	0.41	0.18	0.09	
5	Ini.	10.87	13.46	18.09	21.73	15.90	9.06	13.2
	Str.	0.12	0.36	0.42	0.27	0.32	0.21	

### 5 结论

基于弹塑性理论分析了锆合金厚壁管件矫直中的应力和应变变化过程，研究了管件弹屈比  $\xi$  和弹塑性弯曲比  $M/M_s$  关系，导出了弹塑性弯曲比和残余应变之间的  $M-\xi-\beta$  方程，反映了弹塑性弯曲变形和卸载过程之间的关系。基于锆合金材料特性弹塑本构模型、加载后矫直挠度值和反弯矫直工艺要求，建立了锆合金厚壁管矫直行程计算方法。5 根最大初始弯曲量超过 20 mm 的 Zr-4 厚壁管件进行矫直实验，6 个检测点经矫直后弯曲量均减少到全长小于 0.50 mm，符合管材直线度要求。相比原手工矫直，由于全部工艺动作自动完成，矫直时间由手工矫直 1.5 h/根减少到 22.5 min/根，矫直时间缩短为原有时间的 1/4，矫直效率大大提高。

### 参考文献 References

[1] Zhao Wenjin(赵文金), Zhou Bangxin(周邦新), Miao Zhi(苗志) et al. *Atomic Energy Science and Technology*(原子能科学技术)[J], 2005, 39(S1): 2

[2] Yang He(杨合), Li Luoxing(李落星), Wang Qudong(王渠东) et al. *Journal of Mechanical Engineering*(机械工程学报)[J], 2010, 46(12): 31

[3] Lei Ming(雷鸣), Liu Wenqing(刘文庆), Yan Qingsong(严青松) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2007, 36(3): 467

[4] Ma Yuxuan(马余选), Yu Xingxu(余兴旭). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2000, 29(1): 68

[5] Qin Minghao(钦明浩), Ke Zunzhong(柯尊忠), Zhang Xiangjun(张向军) et al. *Journal of Mechanical Engineering*(机械工程学报)[J], 1997, 33(2): 48

[6] Yan Jing(闫晶), Yang He(杨合), Zhan Mei(詹梅) et al. *Sci China Tech Sci*(中国科学: 技术科学)[J], 2010, 40(6): 601

- [7] Liu Zhili(刘芷丽), Zhan Mei(詹梅), Yang He(杨合). *Journal of Plasticity Engineering*(塑性工程学报)[J], 2008, 15(5): 101
- [8] Song Feifei(宋飞飞), Yang He(杨合), Li Heng(李恒) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2013, 42(1): 43
- [9] Zuev L B, Semukhin B S, Avodchikov S Y. *Materials Letters*[J], 2002, 57(4): 1015
- [10] Yang Yashe(杨亚社), Nan Li(南莉), Yang Yongfu(杨永福) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2014, 43(1): 214
- [11] Liu Hongwen(刘鸿文). *Advanced Material Mechanics*(高等材料力学)[M]. Beijing: Higher Education Press, 1985: 136
- [12] Xiong Zhuhua(熊祝华). *Basic Knowledge of Plastic Mechanics*(塑性力学基础知识)[M]. Beijing: Higher Education Press, 1986: 1
- [13] Zuev L B, Danilov V I, Poletika T M *et al. International Journal of Plasticity*[J], 2004, 20(7): 1227
- [14] Martin J B. *Plasticity: Fundamentals and General Results* [M]. Boston: The MIT Press, 1975: 123
- [15] Huang Jiahu(黄嘉琥). *Nonferrous metal container*(有色金属制容器)[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009: 319
- [16] Zhai Hua(翟华), Zhang Hongmei(张宏梅), Zhong Huayong(钟华勇) *et al. China Mechanical Engineering*(中国机械工程)[J], 2011, 22(19): 2278

## Straightening Stroke Algorithm of Zr-4 Alloy Thick Walled Pipes

Zhai Hua<sup>1,2</sup>, Liu Yang<sup>1</sup>, Ding Shuguang<sup>1</sup>, Zhong Huayong<sup>1</sup>, Chen Qi<sup>1</sup>, Zhao Han<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

(2. Institute of Industry and Equipment Technology, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** Zr-4 alloy thick walled pipes are important parts in a nuclear power station fuel supply system, whose processing capacity can be reduced through three points straightening after extrusion. In the present paper, the micro stress and strain variation during pipe elastic deformation, elastic-plastic deformation, and rebound deformation has been analyzed based on the elastic-plastic theory, and the  $M-\xi-\beta$  equation has been built, which can express the relation between elastic-plastic bending deformation and unloading procedure of Zr-4 alloy thick walled pipes. The elastic-linear hardening constitutive model of Zr-4 alloy thick walled pipes has been built based on the material characteristics to compute the straightening deflection and to propose a straightening stroke algorithm of Zr-4 alloy thick walled pipes. Several 5 m long pipes with the maximum deformation more than 20 mm and 6 detecting points have been used for the straightening experiment. Results show that all of the pipes' straightness are less than 0.50 mm and the straightening time is reduced from 1.5 h/pcs by hand-straightening to 22.5 min/pcs by automation, indicating that the algorithm is practical.

**Key words:** straightening; Zr-4 alloys; thick walled pipe

---

Corresponding author: Zhai Hua, Ph. D., Professor, School of Mechanical and Automotive Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, P. R. China, Tel: 0086-551-62901750, E-mail: jxzhaihuajx@sina.com