



张力减径管增厚段壁厚分布数学模型

卢于述

杨华峰

(北京科技大学)

(钢铁研究总院)

通过对张减管增厚段壁厚分布形态的测量和分析,给出了较有实用价值的数学解析式。

A MATHEMATIC MODEL OF THICKNESS DISTRIBUTION OF HEAVY WALLED SECTION OF STRETCH REDUCED PIPES

Lu Yuqiu

(Beijing Science & Technology University)

Yang Hualeng

(Central I&S Research Institute)

Some valuable mathematic formulas are obtained through measurements and analysis on thickness distribution of heavy walled section of stretch reduced pipes.

1. 前言

张力减径作为现代钢管生产中的一项先进技术,在扩大机组产品规格范围,提高生产率方面具有重要意义,现已广泛为各国所采用。但在张减过程中,钢管头尾两段是分别在张力建立和张力消失过程中轧制的,因此头尾管段产生壁厚增厚现象,造成切头损失。因而研究降低切头损失的新工艺是发展张力减径技术的重要课题之一。近几年,出现了张力减径前荒管头尾部管壁预减薄以平衡张减时增厚的新工艺,这种工艺可以显著降低张减管的切头损失。但此工艺的应用必须以张减管增厚段壁厚分布形态为重要依据,因而对壁厚分布形态的数理分析显得十分重要。

本文以国内两种类型的张力减径机为研究对象,在实测其增厚段壁厚分布形态后,采用无约束最优化方法中的BFGS变量

度算法进行壁厚曲线拟合,从而建立涉及各种主要工艺因素的增厚段壁厚分布的数学模型。

2. 实测张减管增厚段壁厚分布

试验分别在 $\phi 114\text{mm}$ 集体传动——集中差速式张力减径机和 $\phi 108\text{mm}$ 集体传动——液压单独差速式张力减径机上进行。试验用管为 $\phi 114\sim 115\times 4.0\sim 4.5\text{mm}$ 普碳钢管。

对不同参数包括张力系数、减径量、来料壁厚、传动方式、机架间距等进行试验研究,实测张减管前后段壁厚分布形态等,见图1所示。

3. 关于数学模型的一些说明

$$S(x) = (a_1x + a_2) \text{EXP}(a_3x^2 - a_4x) + a_5 \quad (1)$$

上式为壁厚分布曲线拟合函数。

所选函数为非线性函数,且无法进行线

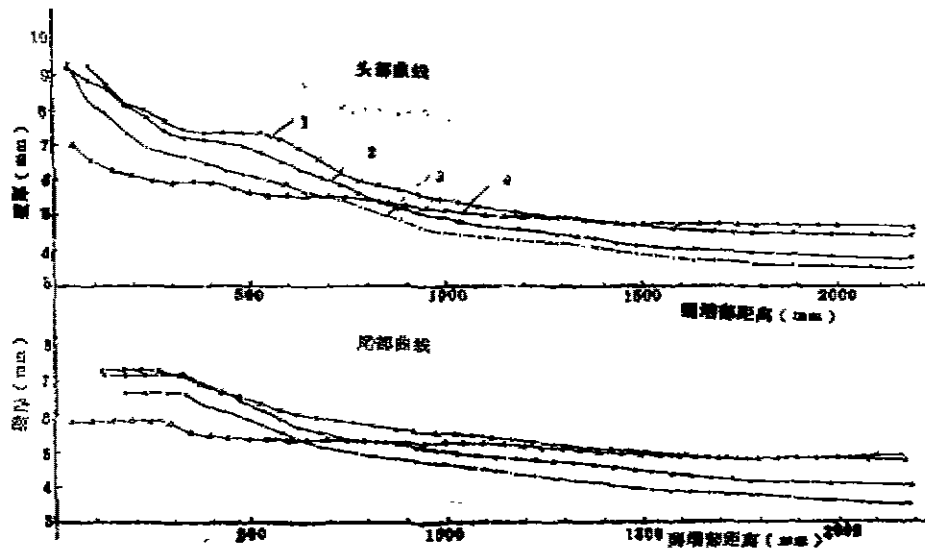


图 1 张力减径管增厚段壁厚分布曲线

- 1—减径量66.8%，Z=0.58，S₀=4.85mm，集体差速
- 2—减径量66.8%，Z=0.74，S₀=4.85mm，集体差速
- 3—减径量66.8%，Z=0.74，S₀=4.45mm，集体差速
- 4—减径量33.9%，Z=0.68，S₀=4.98mm，单独差速

性转换，函数的初值范围是未知的，只能任意设定。根据这些特点，经比较和试算，决定选用无约束最优化方法中的BFGS算法。

BFGS算法是一种拟牛顿法，即采用沿负梯度方向进行一维搜索，逐步趋近并求得极小值点。在求极小值的迭代过程中，是以BFGS校正公式修正构造矩阵的。此方法的优点是对函数的初值要求不严格，计算精度较高。

在计算中以残差平方和为求极小值的目标函数，即

$$\Phi(X) = \sum_{i=1}^m [S_i - S_i(X)]^2 \quad (2)$$

其中 $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ 是曲线拟合函数中的系数向量，m是数据组数，S_i是实测壁厚值，S_i(X)是拟合函数计算壁厚值。

计算中所选用的一维搜索方法为 Hermite插值法。计算框图见图2。

4. 壁厚数学模型的建立

4.1 对各试验管的壁厚分布进行曲线拟

合(头部和尾部分别进行)，求出拟合函数式中的各系数。计算所得目标函数值(残差平方和)均在1.00以下，因此，曲线拟合效果较好。

4.2 根据上述计算所得的各系数值的范围，对曲线拟合函数进行数学分析。

1) 当 $a_3 < 0, a_4 < 0$ 时

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} S = \lim_{x \rightarrow +\infty} [(a_1 x + a_2) \text{EXP}(a_3 x^2 + a_4 x) + a_5] = a_5$$

即此时 $S = a_5$ 为函数的水平渐近线。

2) 当 $a_3 > 0, a_4 < 0$ ，且 $|a_3| \ll |a_4|$ 时，函数在各区间有不同变化。由

$$S' = [(a_1 x + a_2) \text{EXP}(a_3 x^2 + a_4 x) + a_5]' = 0$$

即

$$2a_1 a_3 x^2 + (2a_2 a_3 + a_1 a_4) x + (a_1 + a_2 a_4) = 0$$

求得

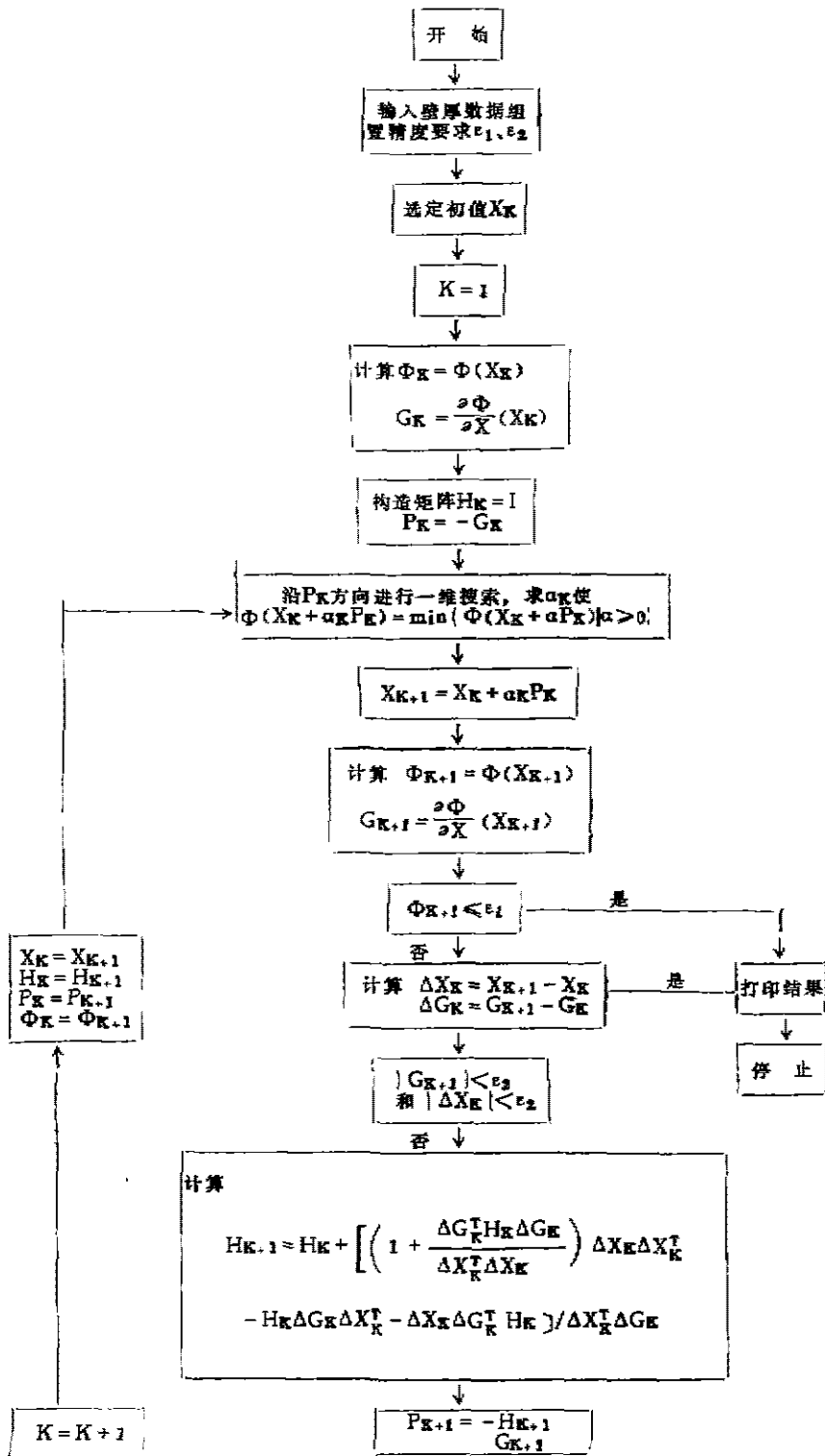


图2 曲线拟合计算框图

$$x_1 = \frac{-2a_2a_3 - a_1a_4 - \sqrt{(2a_2a_3 + a_1a_4)^2 - 4 \times 2a_1a_3(a_1 + a_2a_4)}}{2 \times 2a_1a_3} = A$$

$$x_2 = \frac{-2a_2a_3 - a_1a_4 + \sqrt{(2a_2a_3 + a_1a_4)^2 - 4 \times 2a_1a_3(a_1 + a_2a_4)}}{2 \times 2a_1a_3} = B$$

可以证明

$$B > \left| \frac{a_4}{2a_3} \right|$$

当 $A > 0$ 时, 函数在区间 $(0, A)$ 上升, 在区间 (A, B) 下降, 趋近于 $S = a_3$;

当 $A < 0$ 时, 函数在区间 $(0, B)$ 单调下降, 随 x 的增大而趋近于 $S = a_3$ 。

因 $|a_3| \ll |a_4|$, 故 $(0, B)$ 为一较大区间, 适应所研究的范围, 因此, 可以认为函数以 a_3 为渐近线。

3) 在计算值的范围内, 作出改变一个系数而固定其他系数的曲线图形, 分析其曲线形态的变化。

4.3 根据钢管张减理论, 结合拟合函数的数学分析, 再经曲线拟合计算的验证, 确定曲线拟合函数中各系数与工艺参数的关系, 由此建立壁厚分布数学模型。

1) 由计算所得 a_4 值较为稳定, 对不同工艺参数的试样, 头部和尾部分别有很相近的 a_4 值。因此, 可以推断 a_4 是此试验中固定的工艺参数的影响因子。

本试验研究中的不变工艺因子是: 机架间距 C_2 和壁厚系数 $(S/D)\gamma$ 。

根据变形理论分析, γ 增大则金属纵向流动阻力增加。对张减管来说, 在张力过渡作用下, 愈靠近管端部, 管壁 S 值越大; 当来料 γ 增大时, 愈接近管端的金属纵向流动阻力愈大, 因而对于 γ 增大而引起的增壁量距端部越近就越大; 在距端部一定距离后, 张力达到一定值, 使变形金属纵向流动大量增加。因此使得壁厚曲线的下降段变化剧烈, 曲线下凹严重。这一分析与数学分析—— a_4 是变化曲线下降段凸凹程度——是相

符合的。因此可以认为 a_4 是壁厚系数 γ 的影响因子。验算结果证明上述分析是正确的。

2) 计算结果表明, 不同工艺参数试样的 a_3 值, 头尾部分别有较接近的数值。由函数分析得知, a_3 在 $|a_3| < |a_4|$ 时, 确定曲线下降段长度; 根据张减理论中影响增厚段长度因素和本试验研究的因素条件, 确定 a_3 为机架间距的影响因子。验算对 a_3 的分析是正确的。

3) 由对影响增厚段壁厚分布形态的各种因素的研究分析表明, 减径量变化影响增厚段壁厚分布曲线的起伏程度, 特别是靠近端部处; 张力加大会增加壁厚分布曲线的下降速度; 来料壁厚波动使头部壁厚曲线愈接近端部变化愈大, 尾部壁厚曲线各处变化则基本相同。

基于上述分析和 a_2 的数学意义, 可知 a_2 与减径量 ρ 、张力系数 Z 和来料壁厚 S_0 以及传动形式有关。由 a_2 计算值与 Z 、 S_0 的关系曲线知 a_2 与 Z 、 S_0 基本呈线性关系。不同减径量和传动形式的 a_2 分别回归得到

$$\text{对头部} \quad a_2 = b_0 + b_1 Z + b_2 S_0$$

$$\text{对尾部} \quad a_2' = b_0' + b_1' Z$$

这个关系式与试验所得结果完全吻合。

需要加以说明的是, 传动形式对 a_2 的影响主要是通过对张力的影响而产生的。因此, 回归式中事实上也已包含了轧机传动形式的影响。

验算结果表明, 拟合效果较好, 这证明对 a_2 的分析是正确的。

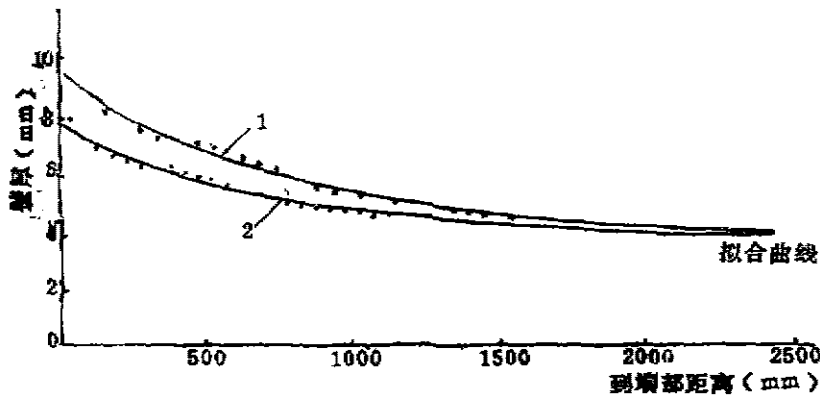
4) 计算表明, 减径量相同时, 头部和尾部的 a_1 值分别在一个较小的范围内波动。根据 a_1 的数学意义——确定曲线的端部形

状——和试验所得减径对增厚段壁厚分布形态的影响规律，可以确定 a_1 是减径量的影响因子。验算结果证实了对 a_1 的分析。

5) 由数学分析得出 a_s 为函数的水平渐近线，取 a_s 计算值与成品管稳定段壁厚比较，可以确定 a_s 为成品管稳定段壁厚值 S_K 。大量研究表明， S_K 与减径量、传动形式、荒管壁厚、张力系数等因素有关。回归作出头部和尾部分别在不同减径量和传动形式时的关系式： $a_x = C_0 + C_1 S_0 - C_2 Z$ ，将其代入(1)式，即可得到头部和尾部的壁厚分布数学模型

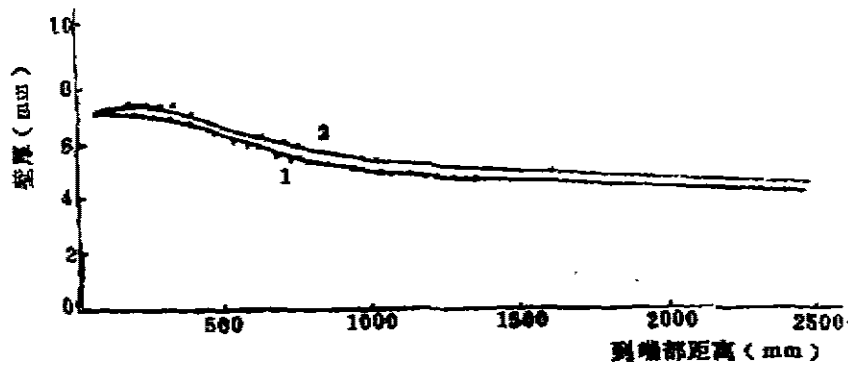
$$S(x) = (\beta_1 x + \beta_2) \times \text{EXP}(\beta_3 x^2 - \beta_4 x) + S_K \quad (3)$$

式中 β_1 ——与减径量有关的因子
 β_2 ——与张力、传动形式、减径量、来料壁厚有关的因子。当传动形式和减径量一定时，对头部 $\beta_2 = b_0 + b_1 Z + b_2 S_0$ ，对尾部 $\beta_2 = b'_0 + b'_1 Z$
 β_3 ——机架间距影响因子，头部取负值，尾部取正值
 β_4 ——壁厚系数影响因子，头部 $\beta_4 <$ 尾部 β_4
 S_K ——成品管稳定段壁厚(mm)，当传动形式和减径量一定时， $S_K = C_0 + C_1 S_0 - C_2 Z$
 式(3)中 S 为壁厚值(mm)， x 为到管



头部壁厚曲线

1— $Z=0.74$, $S_0=4.67\text{mm}$, 减径量66.8%, 实测点 2— $Z=0.58$, $S_0=4.30\text{mm}$, 减径量66.8%, 实测点



尾部壁厚曲线

1— $Z=0.74$, $S_0=4.85\text{mm}$, 减径量66.8%, 实测点 2— $Z=0.65$, $S_0=4.60\text{mm}$, 减径量66.8%, 实测点

图3 张减管增厚段壁厚分布曲线拟合情况

端部距离 (dm)。

4.4 根据建立的模型对各试样进行模型的残差平方和Q和剩余标准差P的计算,即

$$Q = \sum_{i=1}^m [S_i - S(x_i)]^2$$

$$P = \sqrt{Q/m}$$

计算结果表明, Q值均在2.00以下, P值在0.20以下, 由此看出曲线拟合效果较好。因此, 所得到的数学模型符合实际情况。曲线拟合情况见图3。

5. 头尾两部分曲线的分析

由图3中数学模型所描述的壁厚分布曲线可见, 头部和尾部的壁厚分布曲线形状是不同的, 各有不同的分布形态。头部壁厚分布为一单调下降曲线, 距端部越远下降越缓慢, 最后趋于水平状; 尾部曲线则为一个

机架间距的水平(弧)段和一单调下降段所组成, 在单调下降段, 离端部距离越大曲线越平缓, 最后呈水平线。模型所描述的壁厚分布曲线与实测壁厚分布形态一致。

6. 结论

研究表明, 张力减径管的增厚段壁厚分布形态可采用最优化方法中的BFGS变量度法进行曲线拟合。

研究得出, 用指数函数 $S = (a_1 x + a_2) \text{EXP}(a_3 x^2 + a_4 x) + a_5$ 可较精确地表示张力减径管增厚段壁厚分布形态。

研究得出张减管增厚段壁厚分布数学模型为 $S(x) = (\beta_1 x + \beta_2) \text{EXP}(\beta_3 x^2 - \beta_4 x) + S_x$ 。

此模型考虑了张力系数、减径量、传动形式、机架间距、壁厚系数、荒管壁厚等工艺因素。



美国普利茅斯钢管厂概况

OUTLINE OF PLYMOUTH STEEL TUBE WORKS IN USA

美国普利茅斯钢管厂的狄塞尔轧管机是第一台带限动芯棒的狄塞尔轧机。轧机延伸率2~2.5:1。轧机只用 $\phi 88.9\text{mm}$ 、 $\phi 108\text{mm}$ 和 $\phi 133\text{mm}$ 管坯生产规格范围为 $\phi 42 \times 4.2 \sim \phi 127 \times 15.875\text{mm}$ 的钢管。该轧机设计年产量4.5万t, 在安装第二座管坯加热炉后, 年产量可达到6.5万t, 多数钢管用作冷拔管坯料。为减少投资, 普利茅斯钢管厂的切坯机、穿孔机及其他辅助设备都是购置的旧设

备。该钢管厂工作人员仅有11人, 两名操作工在操纵室控制从穿孔机到冷床的各工序, 设备总装机容量为8106 kW。这套狄塞尔轧管机组的成材率为95%, D/S值约6~25, 钢管壁厚不均 $\pm 3 \sim 5\%$, 偏心率为1.9~4.6%。钢管切头损耗约0.7~4.88%。

(丁江渝 摘译自“1989年美国钢铁协会年会论文”)