

12架微张力减径机壁厚变化数学模型的研究

袁 泉¹, 吕立华¹, 陈国金¹, 李赤波², 张定潮², 胡严政², 刘 鹏²

(1. 重庆大学, 重庆 400044; 2. 攀钢集团成都钢铁有限责任公司, 四川 成都 610066)

摘 要: 在12架三辊式微张力减径机上, 实测了增壁率、减径率、壁厚系数、减径温度、减径速度、张力等主要参数, 分析研究了这些参数对生产典型品种无缝钢管壁厚精度的影响程度, 通过计算机回归处理得出壁厚不均数学模型公式, 经现场实践证明该数学模型是有效的。

关键词: 12架三辊式微张力减径机; 增壁率; 减径率; 壁厚系数

中图分类号: TG335 **文献标识码:** B **文章编号:** 1001-2311(2003)06-0005-04

Study of the Math Model of WT Variation in 12-stand Mini-stretch Reducing Mill

Yuan Quan¹, Lü Lihua¹, Chen Guojin¹, Li Chibo², Zhang Dingchao², Hu Yanzheng², Liu Peng²

(1. Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. Pangang Group Chengdu I&S Co., Ltd., Chengdu 610066, China)

Abstract: The parameters such as wall thickness upset rate, diameter reduction rate, wall thickness coefficient, diameter reduction temperature, stretch force are measured in practice on 12-stand 3-roll mini-stretch reducing mill and the effects of these parameters on the wall thickness accuracy of typical varieties of seamless steel pipes are analyzed and studied. The math model formula for the calculation of non-uniform wall thickness is derived from the computer-aid regressive processing and the math model proves to be effective on the spot in practice.

Key words: 12-stand 3-roll mini-stretch reducing mill; Wall thickness upset rate; Diameter reduction rate; Wall thickness coefficient

0 前 言

长期以来, 壁厚精度问题一直是困扰无缝钢管生产的一个技术难题, 但影响壁厚精度的因素很多, 且各个因素之间又存在着复杂的内在联系。原成都无缝钢管厂216车间(现攀钢集团成都钢铁有限责任公司周轧厂)于1981年引进了德国曼内斯曼—米尔公司制造的三辊式减径机, 经实测米尔公司所给的增壁率计算公式不够准确, 使得热轧壁厚不好控制。热轧壁厚控制线制定的准确与合理直接影响到钢管的成材率。该厂曾对增壁率进行了数次

测试, 在实际的减径过程中由于受各种内部参数和外部因素的影响, 如材质、减径率、壁厚系数、减径实际温度、减径速度、张力等, 钢管的实际壁厚与标准值偏差较大。为解决这一问题, 本实验对常规薄壁钢管的几种规格进行了测量, 分析了各种因素对增壁率的影响, 并对主要影响因素进行了回归分析, 建立起适当的数学模型, 用于指导现场生产。

1 实 验

1.1 实验设备

实验在攀钢集团成都钢铁有限责任公司周轧厂的12架三辊式微张力减径机上进行。

1.2 实验方法

生产工艺流程为: 钢锭→Φ20m环形炉加热→

袁 泉(1974-), 男, 四川威远人, 硕士研究生, 从事钢铁压力加工基础理论及材料成型工艺计算机模拟等研究工作。

<http://gang.josen.net> 常州仁成金属精密钢管厂 钢管购买热线: 13337883086 (微信同号)

10MN 水压机冲孔→Φ8mm 盘式炉再加热→延伸机延伸→Φ216mm 周期轧管机轧管→热锯→步进炉加热→12架减径机减径→冷床冷却(后续工序略)。

轧制坯料为 20 钢圆坯, 减径前荒管规格为 Φ219, 203, 170, 141mm。经减径获得 Φ203, 194, 168, 159, 141, 127, 121, 114, 108mm 共 9 种规格的钢管。

1.3 实测方法

在管子的圆周上大致均分并画上 4 条纵向线, 从距管端头、尾约 50mm 处起, 在长度 1 400~2 000mm 范围内, 每隔 200mm 标一个点, 在样品中部每间隔 500mm 标一个点, 把这些点作为测试标记。再用卷尺测量每相邻两点的实际距离, 用超声波测厚仪测量各标记点四周壁厚并取其平均值, 用它们作为减径机的来料参数; 在 *L* 速度系列下测量各段钢管减径后的长度和各点的壁厚, 可得到减径后管子的参数。实测减径率、增壁率计算公式为

$$\Delta D/D_0 = (D_0 - D)/D_0 \quad (1)$$

$$\Delta S/S_0 = (S - S_0)/S_0 \quad (2)$$

式中, D_0 、 D 、 S_0 、 S 分别为减径前、后钢管的直径和壁厚, 壁厚系数为 S_0/D_0 , 并对计算出的壁厚系数、减径率及增壁率取自然对数。

钢管端头长度区间按以下公式^[1]确定

$$L_c = K \cdot \mu_\Sigma \cdot C_d \quad (3)$$

式中 L_c —— 管端切头长度;

K —— 切头长度修正系数;

μ_Σ —— 总延伸率;

C_d —— 机架间距。

2 减径影响因素的分析

2.1 减径温度的影响

减径温度过低会引起钢管温度不均匀, 各部分变形抗力相差较大。如规格为 Φ219mm 的钢管减径至 Φ194mm, 实测减径温度为 760℃, 低于正常减径温度 (890℃), 减径后壁厚呈锯齿状无规律分布, 纵向厚度差加大 (图 1)。若减径温度过高, 则金属烧损严重, 钢管表面缺陷多。

2.2 速度波动对减径的影响

根据实测数据绘出了在 *L*、*M*、*H* 3 个速度系列下, 钢管增壁率沿钢管长度方向的变化规律图 (图 2)。*L*、*M* 速度系列的变化比较平缓, *H* 速度系列的严重变化不均。故实验以 *L* 系列作为数据采集的依据, 以减少误差, 提高回归模型的精度, 而且对现场

生产更具有针对性(常规品种均采用 *L* 系列生产)。

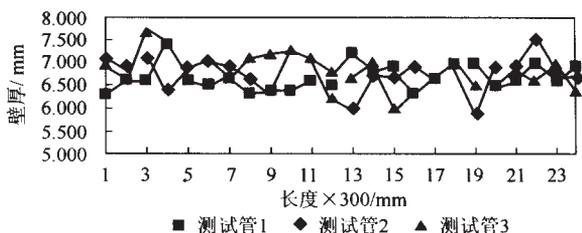


图1 低温(760℃)定径时对钢管壁厚的影响

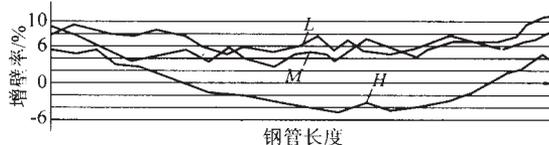


图2 在不同速度系列下增壁率沿长度方向的变化规律

2.3 张力的影响

由图 3 可知, 钢管的壁厚在长度方向的变化曲线为凹型, 即两端增厚。原因在于钢管的两端为不稳定的轧制过程, 其张力制度和金属的流动发生了变化。以前端为例, 钢管前端被逐机架咬入后, 前端一定长度范围内的钢管(小于两机架间间距)轧制时均无前张力; 另外, 前端瞬间的冲击, 将对第 1 组机架产生较大的动态速降, 引起张力变化, 其速降恢复的过程将引起壁厚变化, 后端的情况与前端相同^[2]。这样与中间稳定轧制相比, 两端的壁厚增加就较大, 因此张力对减径过程中的壁厚影响是很复杂的。

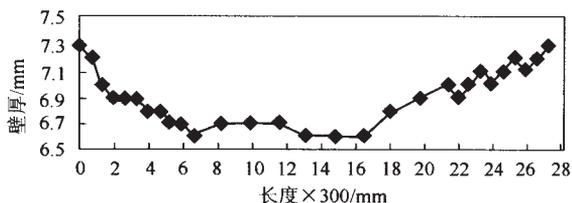


图3 在钢管长度方向的壁厚变化

2.4 分析

综上所述, 从生产工艺方面来讲, 减径温度由步进炉加热制度来控制, 控制温度约 890℃; 减径速度由速度制度来控制; 对于张力的影响, 目前多数人认为, 张力系数 $Z > 0.5$ 时为张力减径, $0.5 \geq Z > 0$ 为微张力减径, $Z = 0$ 为无张力。理论上 $S_T/S_0 = 1$ (其中 S_T 为成品管壁厚, S_0 为荒管壁厚)。本实验的 S_T/S_0 均在 1.1 以下, 故该工艺近似为微张

力减径。当张力比较小时，轧制过程中对壁厚的影响属多因素影响。在建立解析模型时，若把张力作为主要因素，会使得模型复杂不易求解。但如果对中间部分和端头分别建立回归模型，就能够很好地解决这一问题。因此在这些给定的条件下，主要考虑减径率和壁厚系数对壁厚变化的影响。

3 回归分析

3.1 建立回归数学模型的思想

把壁厚系数、减径率作为影响增壁率的主要因素，采用指数曲线拟合得

$$\Delta S/S_0 = e^{b_0} \cdot (\Delta D/D_0)^{b_1} \cdot (S_0/D_0)^{b_2}$$

两边取对数得线性回归方程

$$\ln(\Delta S/S_0) = b_0 + b_1 \ln(\Delta D/D_0) + b_2 \ln(S_0/D_0) \quad (4)$$

式中 b_0 —— 温度、速度等因素影响系数；

b_1 —— 减径率影响系数；

b_2 —— 壁厚影响系数。

通过EXCEL2000对数据作分段回归分析，确定系数 b_0 、 b_1 、 b_2 ，并用相关系数检验法检验线性回归的显著性，确定相关后再回代，就得到回归方程。

3.2 第1组回归结果

采用的第1组回归数据是由1根钢管上4条线的原始数据除去不准确的点（烧损和超声波测厚仪误差）后线性拟合而成，根据所有长度数据算得总延伸率而计算出端头、中部长度，再去除端头不准确点（速度波动造成）后，根据实测点的数据，计算增壁率、减径率及壁厚系数。根据这些数据（表1）得到以下回归公式。

表1 12架微张力减径机实验回归数据

钢管规格D/mm		减径率数据			沿管总长数据			第1组中部数据		第2组中部数据		端头数据	
减径前	减径后	$\ln(\Delta D/D_0)$	$\ln(\Delta S/S_0)$	$\ln(S_0/D_0)$									
203	159	-1.529	-2.486	-3.493	-2.736	-3.488	-2.763	-3.451	-2.340	-3.496			
203	159	-1.529	-2.481	-3.452	-2.758	-3.451	-2.739	-3.489	-2.325	-3.452			
203	168	-1.758	-2.616	-3.387	-2.956	-3.399	-2.908	-3.399	-2.478	-3.380			
170	141	-1.769	-2.588	-3.274	-2.663	-3.271	-2.664	-3.273	-2.480	-3.278			
170	141	-1.769	-2.563	-3.249	-2.621	-3.252	-2.628	-3.231	-2.475	-3.278			
219	203	-2.616	-3.339	-3.477	-3.367	-3.474	-3.364	-3.491	-3.293	-3.483			
141	127	-2.310	-3.213	-2.727	-3.353	-2.720	-3.359	-2.721	-3.081	-2.738			
141	121	-1.953	-2.711	-2.980	-2.784	-2.979	-2.770	-2.977	-2.649	-2.983			
141	121	-1.953	-2.694	-2.690	-2.742	-2.692	-2.737	-2.694	-2.641	-2.689			
141	114	-1.653	-2.509	-2.620	-2.586	-2.630	-2.589	-2.631	-2.334	-2.617			
141	114	-1.653	-2.417	-2.718	-2.481	-2.732	-2.512	-2.726	-2.306	-2.707			
141	108	-1.452	-2.333	-2.966	-2.381	-2.973	-2.357	-2.973	-2.138	-2.959			
141	108	-1.452	-2.370	-2.731	-2.409	-2.732	-2.415	-2.732	-2.115	-2.731			
219	194	-2.170	-2.964	-3.455	-3.043	-3.470	-3.090	-3.441	-	-			

(1)总回归

$$\ln(\Delta S/S_0) = -4.904 + 0.117 \cdot \ln(\Delta D/D_0) + 0.563 \cdot \ln(S_0/D_0) \quad (5)$$

相关系数 $r=0.260\ 53$ ，由 $n=13$ ， $(n-2)=11$ 查相关系数检验表，得 $r_{0.05}(11)=0.553$ ， $r_{0.01}(11)=0.684$ ， $r < r_{0.05}(11)$ ，说明不相关。企图在整个管子上回归出一个经验公式是不切实际的。

(2)端头回归

$$\ln(\Delta S/S_0) = -0.508 + 0.982 \cdot \ln(\Delta D/D_0) + 0.077 \cdot \ln(S_0/D_0) \quad (6)$$

相关系数 $r=0.992\ 34$ ，由 $n=13$ ， $(n-2)=11$ 查相关系数检验表，得 $r_{0.05}(11)=0.553$ ， $r_{0.01}(11)=0.684$ ， $r > r_{0.01}(11)$ ，说明高度相关，即

$$\Delta S/S_0 = e^{-0.508} \cdot (\Delta D/D_0)^{0.982} \cdot (S_0/D_0)^{0.077} \quad (7)$$

(3)中部回归

$$\ln(\Delta S/S_0) = -0.753 + 0.776 \cdot \ln(\Delta D/D_0) + 0.201 \cdot \ln(S_0/D_0) \quad (8)$$

相关系数 $r=0.911\ 51$ ，由 $n=13$ ， $(n-2)=11$ 查相关系数检验表，得 $r_{0.05}(11)=0.553$ ， $r_{0.01}(11)=0.684$ ， $r > r_{0.01}(11)$ ，说明高度相关，即

$$\Delta S/S_0 = e^{-0.753} \cdot (\Delta D/D_0)^{0.776} \cdot (S_0/D_0)^{0.201} \quad (9)$$

3.3 第2组回归结果

减径钢管的壁厚不均通常是中部最小，若小于产品的负公差则成不合格产品。第1组中部回归采用的平均数据偏离最小壁厚太大，用上述的公式虽反映全面，但没考虑这个因素，选择最小增壁率附近的10个点，得到第2组中部回归数据，从而产生第2组公式

$$\ln(\Delta S/S_0) = -0.737 + 0.781 \cdot \ln(\Delta D/D_0) + 0.200 \cdot \ln(S_0/D_0) \quad (10)$$

相关系数 $r = 0.91158$ ，由 $n = 13$ ， $(n-2) = 11$ 查相关系数检验表，得 $r_{0.05}(11) = 0.553$ ， $r_{0.01}(11) = 0.684$ ， $r > r_{0.01}(11)$ ，说明高度相关，即

$$\Delta S/S_0 = e^{-0.737} \cdot (\Delta D/D_0)^{0.781} \cdot (S_0/D_0)^{0.200} \quad (11)$$

3.4 预测与检测S值

为验证回归方程及数学模型的准确性，把1根 $\Phi 219\text{mm} \times 6.55\text{mm}$ 的钢管减径到 $\Phi 194\text{mm}$ ，预测并检测(实测值见表1未行)。

3.4.1 第1组回归预测与分析

(1) 端头回归

$$\ln(\Delta S/S_0) = -0.508 + 0.982 \cdot \ln(\Delta D/D_0) + 0.077 \cdot \ln(S_0/D_0) \quad (12)$$

减径前荒管壁厚 $S_0 = 7.013\text{mm}$

减径后钢管壁厚 $S = 7.332\text{mm}$

预测 $\ln(\Delta S/S_0) = -2.90610$

实测 $\ln(\Delta S/S_0) = -2.80351$

$$\Delta S/S_0 = e^{-0.508} \cdot (\Delta D/D_0)^{0.982} \cdot (S_0/D_0)^{0.077}$$

预测 $\Delta S/S_0 = 0.05469$

实测 $\Delta S/S_0 = 0.05999$

残差为 0.00531 (除端头不准确点)

预测 $\ln(\Delta S/S_0) = -2.77113$

实测 $\ln(\Delta S/S_0) = -2.90606$

$$\Delta S/S_0 = e^{-0.508} \cdot (\Delta D/D_0)^{0.982} \cdot (S_0/D_0)^{0.077}$$

预测 $\Delta S/S_0 = 0.06259$

实测 $\Delta S/S_0 = 0.05469$

残差为 -0.00790 (除端头不准确点)

(2) 中部回归

$$\ln(\Delta S/S_0) = -0.753 + 0.776 \cdot \ln(\Delta D/D_0) + 0.201 \cdot \ln(S_0/D_0) \quad (13)$$

减径前荒管壁厚 $S_0 = 7.013\text{mm}$

减径后钢管壁厚 $S = 7.332\text{mm}$

预测 $\ln(\Delta S/S_0) = -3.13447$

实测 $\ln(\Delta S/S_0) = -3.04335$

$$\Delta S/S_0 = e^{-0.753} \cdot (\Delta D/D_0)^{0.776} \cdot (S_0/D_0)^{0.201} \quad (14)$$

预测 $\Delta S/S_0 = 0.04352$

实测 $\Delta S/S_0 = 0.04767$

残差为 0.00415

3.4.2 第2组回归预测与分析

$$\ln(\Delta S/S_0) = -0.737 + 0.781 \cdot \ln(\Delta D/D_0) + 0.200 \cdot \ln(S_0/D_0) \quad (15)$$

减径前荒管壁厚 $S_0 = 7.013\text{mm}$

减径后钢管壁厚 $S = 7.332\text{mm}$

预测 $\ln(\Delta S/S_0) = -3.12018$

实测 $\ln(\Delta S/S_0) = -3.09033$

$$\Delta S/S_0 = e^{-0.737} \cdot (\Delta D/D_0)^{0.781} \cdot (S_0/D_0)^{0.200} \quad (16)$$

预测 $\Delta S/S_0 = 0.04549$

实测 $\Delta S/S_0 = 0.04408$

残差为 -0.00141

通过上面的预测与检验，可以得出薄壁管系列的壁厚正负公差不会超过 0.1mm 。周期轧管机的壁厚控制精度为 0.1mm ，故公式有实际的意义。

用同样的方法，对表1中各种规格的钢管，按照第2组中部回归公式进行预测与检测S值，结果预测值与实测值拟合程度较好。

4 结 语

本文综合分析了12机架微张力减径机对钢管增壁率的影响因素，利用回归数学模型的结构形式，实测生产数据导出简单实用的回归公式，用于对现场生产的指导和控制，以达到生产高精度的钢管，降低生产成本的目的。该厂制定的热轧壁厚控制线已经有几个版本，依据本实验导出的回归公式制定的热轧壁厚控制线，在现场经过一年多试用，取得了较好的效果：2002年前9个月生产的不合格产品较去年同期减少 654t ，成材率提高了 0.2% ，证明该公式具有实效性。另外，在新品种生产工艺的优化设计中，也具有参考价值。

5 参考文献

- 1 钟锡弟. 减少张力减径管管端切头量的探讨 [J]. 钢管, 1989, (4): 11~14.
- 2 太原重型机械设计科译. 张力减径机 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1976.

(收稿日期: 2003-01-10)