

无缝钢管张减过程张力对壁厚分布的影响

杜凤山¹, 于 辉¹, 刘玉文², 王起江²

(1. 燕山大学机械工程学院, 河北 秦皇岛 066004; 2. 上海宝钢集团公司钢管分公司, 上海 200941)

摘 要: 通过对典型规格张减过程的分析, 研究了张力对壁厚分布的影响, 并进行了试验研究和有限元模拟, 通过对比验证了可靠性, 基于机架伸长率计算了增厚段切除长度, 为掌握张力和钢管壁厚分布之间的关系, 实现预定壁厚钢管的生产提供了依据。

关键词: 无缝钢管; 张力减径; 张力分布; 壁厚分布

中图分类号: TG335 **文献标识码:** A **文章编号:** 0449-749X(2005)09-0036-05

Influence of Tension on Wall Thickness Distribution during Stretch Reducing of Seamless Tube

DU Feng-shan¹, YU Hui¹, LIU Yu-wen², WANG Qi-jiang²

(1. Mechanical Engineering Department of Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China;

2. Tube Subcompany of Baoshan Iron and Steel Co., Shanghai 200941, China)

Abstract: The influence of tension on wall thickness distribution was investigated. The length of crop ends was calculated based on elongation percentage of the stand by FEM. The results were verified by the experiments. The study provided the basis to determine the relation between the tension and tube wall thickness distribution and produce tubes with preset wall thickness.

Key words: seamless tube; stretch reducing; tension distribution; wall thickness distribution

张力减径作为热轧无缝钢管生产中的最后一道工序, 可方便地通过调整各机架轧辊的转速轧出不同壁厚的成品钢管, 使无缝钢管生产的经济效益和产品质量显著提高, 目前国内外钢管生产厂家在热轧无缝钢管生产中已广泛应用张力减径技术。张减机组一般由多架带孔型的三辊或二辊轧机组成, 热轧荒管经加热后, 进入张减机组进行定径或减径, 通过预先设定机组各机架的轧辊速率产生张力, 使钢管壁厚产生变化, 对钢管进行连续加工。轧制不同规格产品钢管相当简便, 不需使用内部工具, 只需改变机组所产生的附加张力即可, 即通过调整各机架轧辊的速率差来实现。因此, 张力成为张减工艺中的主要技术参数之一^[1]。

本文根据张减过程的特点, 研究了张减机组的钢管壁厚变化规律, 特别是钢管头尾管端增厚段的壁厚变化。把张力作为边界条件进行有限元模拟, 得到钢管壁厚变化规律, 根据钢管单机架伸长率计算了增厚段切除长度, 并在宝钢钢管公司进行了试验验证, 模拟结果与工业试验数据基本吻合, 对于掌握张力和钢管壁厚变化之间的关系, 实现预定壁厚钢管的生产、缩短头尾切除损失, 具有重要意义。

1 张减过程中的张力问题

在张减过程中, 机架间的张力分布影响钢管的受力状态, 对钢管的壁厚变化产生影响, 由于钢管头尾端承受的张力小于中段承受的张力, 中段的张力分布大体上可看作固定不变的(管坯假定是均匀的), 而在头尾段张力分布随着管坯被咬入机架或离开机架而变化, 从而使头尾端产生管壁增厚现象, 纵向壁厚严重不均, 导致尺寸精度不符合要求而被切除。传统上对张减过程的张力研究都是针对钢管中段的稳态变形过程, 对于头尾端非稳态变形过程的管壁增厚问题, 许多学者通过试验对增厚段的管壁进行实测, 采用拟合或回归得到多维的数学解析模型^[2~4], 认为分布形态基本上不受工艺因素的影响, 但实际张减生产中偶然因素较多, 特别是随着管端控制系统 CEC、纵向壁厚控制系统 WTCL、平均壁厚控制系统 WTCA 等技术的应用^[5,6], 机组的若干轧机实现了动态调速, 工艺因素具有不确定性, 因此, 解析模型局限性较大, 且不能反映钢管金属的流动和变形情况。通过建立张减过程的张力模型, 掌握了机架轧辊速率产生的张力分布, 在此基础上进

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50344036)、河北省自然科学基金资助项目(500214)

作者简介: 杜凤山(1960-), 男, 博士, 教授; **E-mail:** fsdu@ysu.edu.cn; **修订日期:** 2004-11-12

行有限元研究,可对钢管壁厚分布进行机理分析,以进一步优化张减工艺。

机组平均张力系数 x_m :

$$x_m = \left(\frac{\varphi_{r_z}}{\varphi_{t_z}} \times (2 - \varepsilon_m) + (1 - 2\varepsilon_m) \right) / \left(\frac{\varphi_{r_z}}{\varphi_{t_z}} \times (1 - \varepsilon_m) - 2(\varepsilon_m - 1) \right) \quad (1)$$

式中, φ_{r_z} 为总切向变形; φ_{t_z} 为总径向变形; ε_m 为平均壁径比。

机架平均张力系数 x_{im} :

$$x_{im} \approx (x_i + x_{i-1}) / 2 \quad (2)$$

式中, x_i 为 i 机架的前张力系数; x_{i-1} 为 i 机架的后张力系数。

机架最大张力系数 x_{max} :

$$x_{max} = (x_m \phi_{t_z} - \sum_0^n x_1 \phi_t) / \sum_0^k \phi_t \quad (3)$$

式中, x_m 为机组平均张力系数; $\sum x_1$ 为张力升起和张降机架的单机架张力系数; ϕ_{t_z} 为总切向变形; ϕ_t 为单机架切向变形; $\sum \phi_t$ 为具有最大张力 x_{max} 的所有机架的切向变形之和。

在张减过程中,减径率、孔型设计、速度分配、传动特性等都影响张力系数,因此,在计算张力系数分布时,需要进行修正。张力系数不可能大于 1,否则被拉断,最大允许值在 0.65~0.84 之间,为防止机架间的轴向压力而出现堆钢的危险,按照张力系数必须大于 0,第一机架的后张力和最末机架的前张力为 0。

2 试验研究

试验在宝钢钢管公司 18 机架张减机组上进行,目的是调查钢管全长壁厚分布情况,以及头尾端壁厚增厚情况。

2.1 试验条件

荒管尺寸为 152.5 mm×6.0 mm,产品尺寸为 73.03 mm×5.51 mm,孔型为 B-D。选用材料为 20 号钢的 5 根管坯,机架是 13+5(精整),入口速度为 2.47 m/s,出口速度为 5.75 m/s。

2.2 取样测量

荒管加热后进入预先配制好孔型的张减机组进行轧制, γ 射线在线测厚装置测量张减管壁与长度。从中抽取 5 根如图 1 所示, A、C 段头尾壁厚用便携式超声波测厚仪测厚,在管子头、尾部分别取一定长度,按照图 2 所示位置进行纵向壁厚测量,按图 3 所示进行圆周方向(横向)壁厚测量,圆周方向每

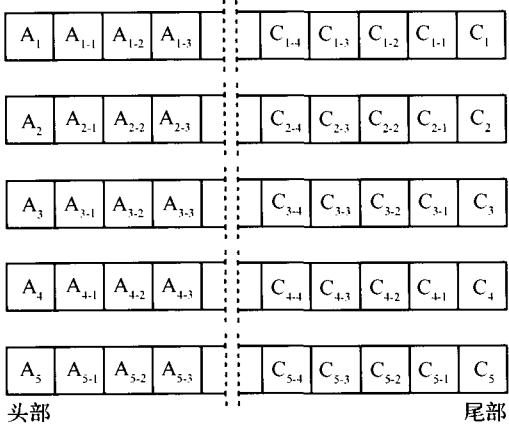


图 1 取样钢管

Fig. 1 Tube sampling

一截面测 8 点。

2.3 结果分析

这里仅列出 A_1 、 C_1 段的测量壁厚值,其余管段相差不大。该产品壁厚公差要求为 12.5%,故壁厚波动允许范围为 4.82~6.20 mm。 C_1 段(尾部)壁厚测量结果见表 1,尾部切除点对应图 2 中的第 14 点,切尾长度为 1.45 m,壁厚最大值、壁厚最小值和平均壁厚值分布形式见图 4(a), A_1 段(头部)壁厚测量结果见表 2,头部切除点对应图 2 中的第 11 点,切头长度 1.3 m,壁厚最大值、壁厚最小值和平均壁厚值分布形式见图 4(b)。

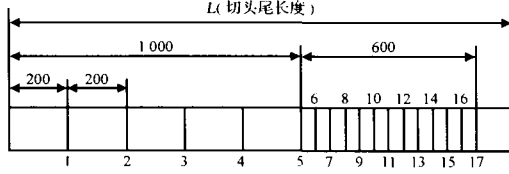


图 2 钢管头尾段纵向壁厚测量位置

Fig. 2 Measurement position of longitudinal wall thickness at the both ends

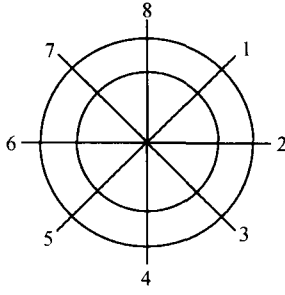


图 3 圆周方向(横向)壁厚测量位置

Fig. 3 Measurement position of circular wall thickness

表 1 C₁ 段(尾部)测量壁厚
Table 1 Measured wall thickness of C₁ section (end section)

横向	纵向																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	7.46	7.33	6.41	6.25	6.07	6.00	5.88	5.83	5.82	5.91	5.81	5.78	5.81	5.83	5.82	5.75	5.74
2	7.96	7.43	6.45	6.35	6.14	6.02	5.90	5.85	5.87	5.75	5.75	5.90	5.80	5.73	5.75	5.67	5.68
3	7.87	7.18	6.33	6.04	5.91	5.78	5.72	5.60	5.60	5.61	5.57	5.55	5.50	5.52	5.53	5.42	5.41
4	7.66	7.44	6.40	6.31	6.10	5.92	5.90	5.85	5.69	5.69	5.71	5.75	5.75	5.69	5.66	5.66	5.61
5	7.60	7.44	6.52	6.42	6.19	6.05	5.98	6.02	5.86	5.85	5.84	5.88	5.87	5.86	5.78	5.66	5.69
6	7.59	7.61	6.85	6.72	6.03	6.42	6.30	6.18	6.33	6.15	6.23	6.30	6.28	6.25	6.16	6.05	6.08
7	7.33	7.41	6.61	6.50	6.37	6.28	6.23	6.21	6.12	6.11	6.14	6.14	6.16	6.12	6.04	6.05	5.91
8	7.28	7.30	6.51	6.28	6.19	6.03	5.98	6.01	5.93	5.97	5.92	5.89	5.85	5.85	5.73	5.82	5.72
均值	7.59	7.39	6.51	6.36	6.13	6.06	5.99	5.94	5.90	5.88	5.87	5.90	5.88	5.86	5.81	5.76	5.73

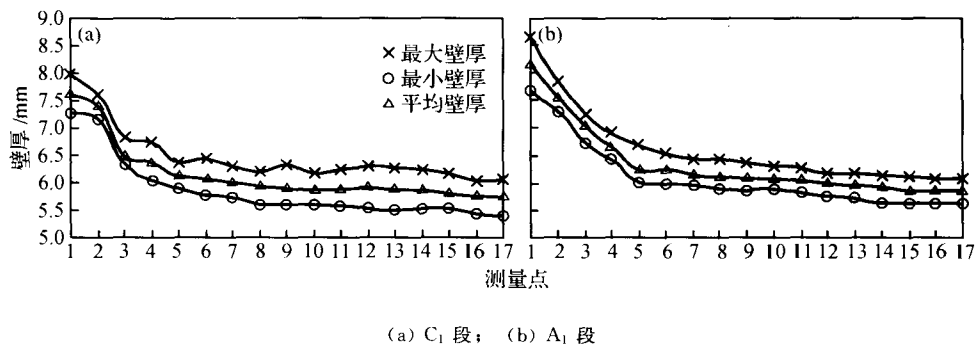


图 4 C₁ 段(尾部)和 A₁ 段(头部)测量壁厚分布

Fig. 4 Wall thickness distribution of C₁ and A₁ sections

表 2 A₁ 段(头部)测量壁厚
Table 2 Measured wall thickness of A₁ section (head section)

横向	纵向																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	7.88	7.39	6.81	6.51	6.23	6.12	6.09	5.96	5.95	6.00	5.99	5.98	5.92	5.93	5.85	5.82	5.81
2	8.19	7.66	6.98	6.75	6.42	6.42	6.30	6.22	6.16	6.10	6.14	6.14	6.14	6.08	6.01	5.98	5.95
3	8.35	7.46	6.91	6.69	6.35	6.22	6.20	6.16	6.17	6.11	6.14	6.08	6.08	5.96	5.95	5.92	6.01
4	8.62	7.76	7.21	6.92	6.67	6.51	6.42	6.37	6.35	6.29	6.28	6.16	6.16	6.15	6.10	6.09	6.07
5	8.55	7.82	7.23	6.87	6.02	6.45	6.26	6.42	6.22	6.24	6.25	6.12	6.07	6.09	5.96	5.95	5.94
6	7.91	7.41	6.92	6.54	6.07	6.09	6.00	6.03	6.06	5.97	5.88	5.83	5.82	5.81	5.75	5.67	5.65
7	8.00	7.62	7.12	6.59	6.21	6.05	6.03	5.94	5.93	5.94	5.90	5.82	5.78	5.78	5.74	5.70	5.67
8	7.66	7.28	6.71	6.42	6.02	5.99	5.94	5.88	5.87	5.88	5.82	5.76	5.74	5.65	5.62	5.65	5.65
均值	8.15	7.55	6.99	6.66	6.25	6.23	6.16	6.12	6.09	6.07	6.05	5.99	5.96	5.93	5.87	5.85	5.84

由图 4 可以看出,头尾部壁厚分布曲线近似,越靠近端部曲线下降越快,距端部较远时,曲线下降趋于平缓,最后在一个较小范围内波动,其余管段头尾增厚段壁厚分布规律相似。

3 有限元模拟

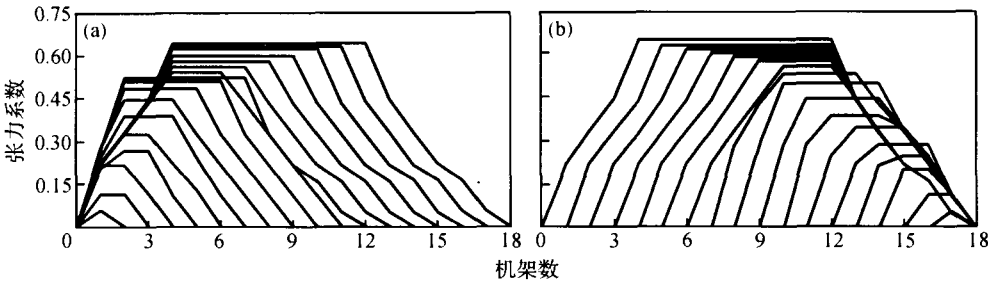
3.1 张力系数确定

在进行有限元模拟时,张力作为边界条件需首先确定,根据相应的张减理论^[1],建立钢管从头部开

始咬入到稳定轧制时张力系数分布、钢管从稳定轧制到尾部完全离开时张力系数分布,见图 5。

3.2 有限元模拟轧制

在进行模拟轧制时,由于机架较多,计算过程中容易引起网格畸变,计算耗时较长,很难对 10 个机架以上的连轧过程进行模拟^[7],因此针对该机组 18 机架的张减过程,不可能采取整根钢管建模。为了保证模拟结果的真实性,提高仿真效率,本研究采用组元建模技术,建立耦合计算模型^[8],开发了张减过



(a) 头部咬入到稳定轧制; (b) 稳定轧制到尾部离开

图 5 各阶段张力系数分布

Fig. 5 Tension coefficient distribution in different stages

程的三维弹塑性有限元程序,进行全系统三维弹塑性有限元模拟。由于组元建模方法是利用机架间的信息传递来实现全系统模拟的,钢管头尾的纵向壁厚测量位置很难与工业试验完全对应,为此在钢管头部和尾部分别取间隔相同的 7 个纵向位置,圆周方向(横向)8 点测量。通过模拟计算,使钢管在各机架上的伸长率 λ_i 成为可知,便可对切头切尾长度进行解析计算。

$$\lambda_i = F_{i0}/F_{i1} = ((d_{i-1} - S_{i-1})S_{i-1})/((d_i - S_i)S_i) \tag{4}$$

式中, λ_i 为单机架伸长率; F_{i0} 、 F_{i1} 为第*i*机架钢管的入口截面积和出口截面积; d_i 、 S_i 为第*i*机架钢管的外径和壁厚。

切头长度 l_1 和切尾长度 l_0 分别为:

$$l_1 = k \sum_{m=1}^j \sum_{n=0}^i \lambda_{i-j+n}^m \lambda_{i-j+n+1}^m \cdots \lambda_i^m \tag{5}$$

$$l_0 = k \sum_{m=1}^j \sum_{n=1}^i \lambda_n^m \lambda_{n+1}^m \cdots \lambda_i^m \tag{6}$$

式中, l_1 为切头长度; l_0 为切尾长度; k 为机架间距; i 为机组机架数; j 为计算头尾端增厚时所取钢管段数; λ_i^m 为第*m*段钢管在第*i*机架上的延伸系数。

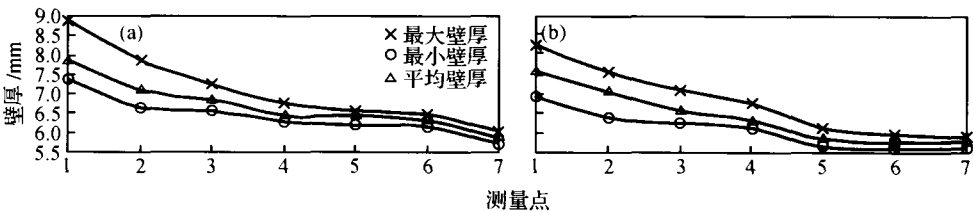
前述可知壁厚波动允许范围为 4.82~6.20 mm。钢管头部壁厚模拟计算结果见表 3,头部切除点对应表中第 6 段,按式(5)计算切头长度为 1.25 m,壁厚最大值、壁厚最小值和平均壁厚值分布形式见图 6(a),尾部壁厚模拟计算结果见表 4,尾部切除点对应表中第 4 段,按式(6)计算切尾长度为 1.38 m,壁厚最大值、壁厚最小值和平均壁厚值分布见图 6(b)。

表 3 头部壁厚模拟计算结果

Table 3 Simulation results of wall thickness of head section

mm

横向	纵向						
	1	2	3	4	5	6	7
1	8.8610	7.8490	7.2610	6.4520	6.3930	6.4910	6.0030
2	8.0203	7.1902	6.9570	6.4618	6.4493	6.4065	5.9252
3	8.0784	6.8131	6.8488	6.5239	6.4741	6.1339	5.7837
4	7.3871	6.6503	7.2300	6.7599	6.1945	6.4529	6.0157
5	7.4085	6.9400	6.6412	6.2854	6.3648	6.2492	5.8961
6	8.2422	7.1221	6.5582	6.3736	6.5111	6.2777	5.8105
7	7.4085	7.1221	6.6377	6.3937	6.5577	6.2845	5.7098
8	7.3871	6.8534	6.7156	6.3512	6.5078	6.2620	5.7232
均值	7.8491	7.0675	6.8562	6.4502	6.4315	6.3197	5.8584



(a) 头部; (b) 尾部

图 6 头、尾部壁厚分布

Fig. 6 Wall thickness distribution of head and end sections

表 4 尾部壁厚模拟计算结果
Table 4 Simulation results of wall thickness of end section

横向	纵向						
	1	2	3	4	5	6	7
1	8.0850	7.4980	6.6190	6.0720	5.8110	5.7813	5.8012
2	7.6270	6.9533	6.4960	6.2760	5.7174	5.6745	5.7425
3	7.2585	6.4208	6.5527	6.2095	5.7825	5.7215	5.6731
4	6.9538	6.5318	6.3292	6.4249	5.7009	5.6804	5.8102
5	7.1219	6.8158	6.2949	6.1472	6.1418	5.9432	5.9467
6	7.4676	7.3108	6.4645	6.4711	5.9200	6.0123	5.7854
7	7.8769	7.2365	6.7130	6.5464	5.8781	5.7468	5.8127
8	8.2183	7.5532	7.0957	6.7772	6.0825	5.9429	5.7658
均值	7.5761	7.0400	6.5706	6.3655	5.8793	5.8128	5.7922

由模拟结果可知:钢管头尾部的壁厚变化规律与试验一致,切头、切尾长度公差要求为 8%,与试验研究相对应,切头、切尾长度波动允许范围分别为 1.20~1.40 m、1.33~1.57 m,模拟计算头部切除 1.25 m,尾部切除 1.38 m,满足纵向切除要求。同时试验和模拟结果都表明该产品钢管由于轧制时张力的升起和降落,使头部和尾部增厚明显,周向壁厚分布相差较大,头尾壁厚差别大于中部。

4 结语

无缝钢管张力减径后,头尾部和中部的壁厚分布差别较大,使得头尾部的部分金属不可避免被切除。通过张减工艺制度建立张力模型,并作为边界条件进行弹塑性有限元模拟,得到钢管壁厚的变化规律,根据各机架钢管的伸长率,建立了切头切尾计算模型,并通过与工业试验对比验证了可靠性。因此,在张减工艺确定后,采用本研究方法,可方便地对钢管壁厚分布及变形过程进行研究,对头尾切除长度进行预报。

参考文献:

[1] 龚 尧,周国盈. 连轧钢管[M]. 北京:冶金工业出版社. 1992.
[2] 马继仁,陈向明. 张减管端增厚段壁厚分布规律的研究[J].

钢铁,1999,34(2):31-34. (MA Ji-ren, CHEN Xiang-ming. Study on Wall Thickness Distribution in Thickened Section of Stretch Reduced Pipe[J]. Iron and Steel,1999,34(2):31-34.)
[3] 卢于速,杨华峰. 张力减径管增厚段壁厚分布数学模型[J]. 钢管,1990,(2):32-37. (LU Yu-qiu, YANG Hua-feng. A Mathematical Model of Thickness Distribution of Heavy Walled Section of Stretch Reduced Pipes[J]. Steel Pipe, 1990, (2):32-37.)
[4] 李亦波. 微张力减径机增壁规律研究[D]. 重庆:重庆大学, 2002. (LI Chi-bo. Research on the Law of Steel Tube Wall Thickness Variation of the Stretch Reducing Mill [D]. Chongqing: Chongqing University, 2002.)
[5] Hunger L. Use of A Process Computer for the Control of the Thickened Tube Ends on Stretch Reducing[J]. Stahl and Eisen,1982,102(22):1115-1120.
[6] Voswinchel. Process Management for Stretch Reducing Tube Rolling Mills[J]. Tube International, 1995,64(14):75-79.
[7] 臧新良,杜凤山. 张力减径过程组元建模技术及有限元模拟[J]. 中国机械工程,2003,14(19):1652-1654. (ZANG Xin-liang, DU Feng-shan. Unit Model Technology and Finite Element Simulation of Stretch Reducing Process[J]. China Mechanical Engineering,2003, 14(19):1652-1654.)
[8] 许志强,杜凤山. 钢管张力减径仿真系统与验证[J]. 燕山大学学报,2004,28(1):36-39. (XU Zhi-qiang, DU Feng-shan. A Integrated Simulation System of the Stretch Reducing of Tube and Verification[J]. Journal of Yanshan University, 2004,28(1):36-39.)