

连轧张力公式的实验验证和分析

张进之¹, 赵厚信², 王喆², 王保罗²

(1. 钢铁研究总院, 北京 100081; 2. 宝钢股份公司热轧厂, 上海 201900)

[摘要] 连轧张力公式是连轧理论和实践的核心问题, 该问题国内外都有大量的研究, 20 世纪 60 年代笔者推导了连轧张力微分方程、多机架动态张力公式、稳态张力公式, 理论上已作过深入、广泛的分析讨论。日本在 20 世纪 70 年代对连轧张力公式进行了理论上的推导和实验验证, 特别是浅川基男等人的连轧实验结果更为重要。为此引用了浅川基男的实验数据和宝钢 2 050 mm 热连轧机上的实测数据, 验证了连轧张力公式。

[关键词] 连轧张力公式; 实验验证; 解析解; 定常性

[中图分类号] TG335.13 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2008)04-0073-05

由于张力在连轧过程中的重要性, 国内外许多连轧工作者对它进行了研究。这方面的历史情况已在“评连轧张力公式”^[1], “连轧张力变形微分方程的分析讨论”^[2]等文章中作了比较详尽的介绍。近年来, 国内外由于连轧过程控制发展的需求, 对连轧张力公式有进一步研究, 日本新日铁由于连轧型钢的要求, 推出了正确的两机架动态张力公式和多机架稳态张力公式^[3]。国内对连轧张力公式的研究更多, 如文献[4~6]。但是这些文章未给出多机架动态张力公式, 其原因与对连轧动态过程的性质有关。由于连轧过程可认为是定常线性系统, 所以早在 20 世纪 70 年代推出了多机架动态张力公式^[7]。由于张力公式发表很早, 一般读者难于找到, 所以于 2007 年重新发表^[8], 以上文章都是用数学方法推导的, 用实验来证明其公式的正确性是有必要的。这项工作一方面引用浅川基男的连轧机实验的实验数据^[9, 10]来证明, 并得到日本学者的认可, 而连轧动态过程由宝钢 2 050 mm 热连轧机上的实时记录数据得到定性验证。

1 稳态张力公式的实验验证

1979 年住友金属浅川基男(简称浅川)、美坂佳助等^[9, 10]为了研究棒、线材连轧过程中张力对孔型中变形的影响, 设计了直接测量张力的装置, 在模型

轧机上实现了精确地检测张力值, 得出了连轧速度不匹配下张力与 $\Delta n/n$ 之间的定量关系图、张力对前滑、宽展、压下量等的影响系数值或图线等实验结果; 为了在棒、线材连轧过程中进行精确的无张力控制, 推导了连轧张力公式, 指出了精确控制张力和系统的稳定必须考虑各机架间张力的相互影响, 画出了考虑或不考虑张力相互影响的控制系统框图, 并进行了电子计算机模拟实验。

浅川的连轧张力实验研究, 对连轧理论发展具有十分重要的意义, 可用它来验证连轧张力公式的正确性, 从而使连轧张力理论在连轧生产实践中起指导作用。

根据浅川等的实验结果对连轧张力公式进行验证分析和讨论。

1.1 浅川张力公式与实测张力值的比较

浅川在文献[9]中, 引用秒流量相等条件等公式:

$$A_i V_i = M \quad (1)$$

$$V_i = F_i V_{Ri} \quad (2)$$

$$F_i = F_{0i} (1 + f_{bi} \sigma_{i-1} + f_{fi} \sigma_i) \quad (3)$$

并将式(1)至式(3)按台劳级数展开, 取一次项

得

$$\Delta A_i / A_i + \Delta V_i / V_i = \Delta M / M \quad (4)$$

$$\Delta V_i = F_i \Delta V_{Bi} + V_{Ri} / \Delta F_i \quad (5)$$

[作者简介] 张进之(1937-), 男, 山西榆次市人, 钢铁研究总院教授级高工

$$\Delta F_i = F_{0i}(f_{bi}\sigma_{i-1} + f_{fi}\Delta\sigma_i) \quad (6)$$

式中 A_i 为 i 机架间轧件截面积,

F_i, F_{0i} 为 i 机架前滑及其初始值(无动力前滑),

$f_b(f_f)$ 为后(前)张力对前滑的影响系数,

σ_i 为 i 机架前张力,

V_{Ri} 为 i 机架轧辊表面线速度,

V_i 为 i 机架轧件出口平均速度,

M 为秒体积流量。

忽略轧件截面积变化,即 $\Delta A_i = 0$,将式(4)至式(6)整理,推导得浅川稳态张力公式的分式:

$$f_{bi}\Delta\sigma_{i-1} = (f_{fi} - f_{bi-1})\Delta\sigma_i - f_{fi+1}\Delta\sigma_{i+1} = \Delta V_{Ri+1}/V_{Ri+1} - \Delta V_{Ri}/V_{Ri} = \Delta V_i \quad (7)$$

对于两机架连轧,式(7)可写成

$$(f_{fi} - f_{bi-1})\Delta\sigma_i = \Delta V_i \quad (8)$$

假定张力初始值为零,则 $\sigma_i = \Delta\sigma_i$,可以得到两机架浅川张力计算公式

$$\sigma = \Delta V / (f_{fi} - f_{bi}) \quad (9)$$

在文献[10]的图1中,取得 $\Delta V = 20\%$ 时的张力值为 1.9 kg/mm^2 。文献[10]给出的热轧钢时的 $f_f = 0.0134, f_b = -0.0335$ 。把 $\Delta V, f_f$ 和 f_b 代入式(9)得

$$\sigma = 0.2 / (0.0134 + 0.0335) = 4.2 \text{ kg/mm}^2。$$

4.2 远大于 1.9,计算值比实验值大一倍多,表明浅川张力公式是不够精确的。由于在推导张力公式时,忽略张力对截面积影响是造成浅川张力公式不准确的原因。因此,在推导张力公式时不应当假定 $\Delta A_i = 0$ (原田在推导张力公式时,也有相同的假定^[31])。应用文献[7]中的连轧张力公式(理论公式)可以更好地与实验结果一致。

1.2 连轧张力公式的验证

针对型钢、线材等两机架连轧,文献[7]中理论张力公式写成

$$\sigma = (A_2/A_1 V_{R2}(1+S_2)(V_{R1}(1+S_1)) / (A_2/A_1 V_{R2}(a_2 + a'_2 + S_2(a_2 + a'_2 + b_2)) + V_{R1} b_1 S_1) \quad (10)$$

式中 A_i 为轧件在无张力连轧时的截面积;

a_2 为后张力对轧件宽展影响系数;

a'_2 为后张力对轧件高度影响系数;

S 为前滑系数;

b_1, b_2 分别为前张力和后张力对前滑系数的影响系数。

根据文献[9, 10]中的公式、曲线图,得出用式

(10)计算张力值的各种数据。

1)前滑系数的计算。文献[5]中的前滑计算公式为

$$S = h/D_p(0.7\gamma^{1/2} - 1) + 0.214\gamma + 0.258\gamma^2 \quad (11)$$

式中 h 为轧件高度, D_p 为轧辊直径, γ 为截面压缩率。

从文献[10]中取 $h_1 \approx h_2 = 50 \text{ mm}$ (由于菱方孔型系统,故假定2个机架轧件高度相同), $D_{p2} = D_{p1} = 230 \text{ mm}, \gamma_1 = \gamma_2 = 0.2$,代入式(11)得

$$S_1 = S_2 = -0.1023$$

2)轧辊线速度计算。令机架1轧辊初始线速度 $V_{R01} = 1$,平衡状态下的速度为

$$V_{R02} = (V_{R1}(1+S_1)/(1+S_2))A_1/A_2 = 1.25。$$

第一机架速度不变,第二机架增加20%,则

$$V_{R1} = 1, V_{R2} = 1.50$$

3) a_2 系数的确定。从文献[5]的图2中取得 $\sigma/k = 0.3$ 时, $\Delta b/b = 8.5\%$, $k = 143 \text{ kN}$,则张力变化 10 kN 时的宽度变化量可以算出 $a_2 = 0.01981$ 。

4) a'_2 系数的确定。从文献[10]看出,张力对轧件厚度的影响与宽度的影响相比较,不很明显,取 $a'_2:10:1$,则 $a'_2 = 0.00198$ 。

5) b_1, b_2 的确定。 $S_1 b_1 = 0.0134; S_2 b_2 = 0.0335$ 。

除前滑系数外,按原公式推导时定义全取正号。把 $S_i, a_i, S_i b_i$ 等代入式(10)得

$$\sigma = 2.176 \text{ kg/mm}^2$$

由式(10)计算出的张力值为 2.176 kg/mm^2 ,与实测值 1.9 kg/mm^2 是比较接近的,相差 0.276 kg/mm^2 ,由此证明式(10)是比较符合实际的,基本上反映了连轧规律。

由于引用了浅川基男等的实验数据,引用该数据有些要经过变换方能代入连轧张力公式中,为了达到正确引用数据,于1980年6月把该文寄给浅川基男先生等,以求得他们的指正。1980年10月,浅川基男,近藤胜也先生来函讨论问题。1980年10月冈本丰彦先生来中国讲学,进行了两次张力公式的讨论。1981年5月24日,冈本丰彦先生寄来有关张力公式的意见书,给出了张力公式计算值与实测结果的对比如(见图1)。

图1表明,笔者推出的连轧张力理论公式是符合实际的,轧辊速度差在大范围内变化与浅川基男

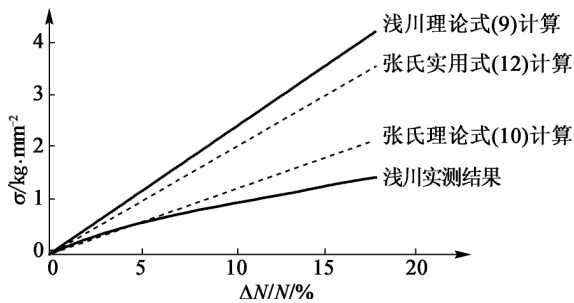


图1 机架间张力随速度差变化的实测值与计算值
Fig.1 Actual data and calculated data of tension change following speed difference between stands

实测结果接近。

1.3 连轧张力公式在 2 050 mm 热连轧中应用验证

20 世纪 70 年代末 80 年代初由于能源危机,在日本和德国开展了无活套支撑器的热连轧工业实践,增大入精轧机坯厚和降低加热温度,实现节能的目标。宝钢 2050 热连轧采用了该套支撑器的技术,德国与日本无活技术的主要差别是张力观测器的不同(5 个参数与一个参数),西门子有 5 个参数,而新日铁、日本钢管只有一个参数,无活套支撑器应用最成功的日本钢管直接指明 5 参数的不足。目前 2050 热连轧机的张力观测器已改成一个参数,为实现模型参数自适应和提高张力控制精度提供了有利条件。由于采用单参数张力观测器,大大提高了张力控制精度,文献[12]报导了改用单参数模型的效果。据统计,2002 年热轧微张力起套或拉钢一年中共发生 27 次,在新模型投入运行一年中共发生 3 次,且起套或拉钢程度明显减轻。

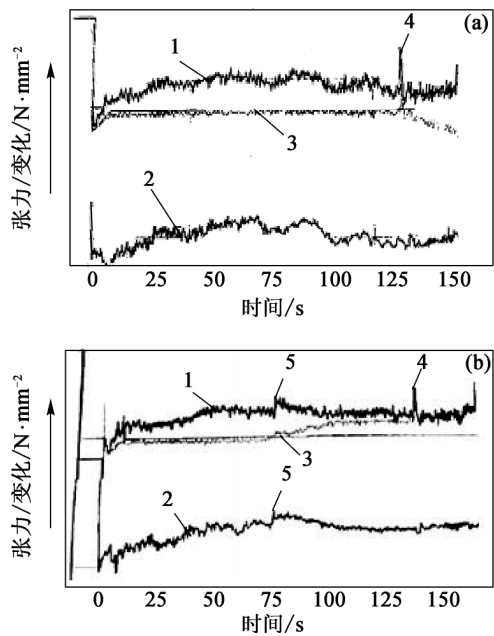
2002 年 6 月份在宝钢 2050 热连轧上测量了如图 1 所示规格的新日铁和连轧张力公式的张力预报值,其中两张张力预报曲线见图 2a 和图 2b。

图 2a 中西门子预报张力值很平稳,是由张力闭环控制的一种表现现象,实际张力值应当是曲线 1、曲线 2。图 2b 中有人工干预的张力变化,这时西门子模型预报值就出现了较大差异。

图 2a、图 2b 纵模坐标定性表示单位张力值(N/mm^2),其平均张力值为 $6.3 N/mm^2$ 。在大型热连轧机上实验有较大难度,所以用计算机仿真实验方法进一步验证连轧张力公式的正确性。其内容见文献[11]。

1.4 实用张力公式

文献[7]中推导了实用连轧张力公式,在求解张力微分方程时,把张力对厚度、宽度、前滑以及轧



1—新日铁模型张力预报值;2—连轧张力公式张力预报值;
3—西门子张力预报值;4—飞剪尾冲造成;
5—人工干预

图2 规格 $38.78 \times 1180 \Rightarrow 1.57 \times 1180$
实际张力预报图

Fig.2 Standard $38.78 \times 1180 \Rightarrow 1.57 \times 1180$
forecast chart of actual tension

辊速度等影响关系代入式(10);而后又将其逆关系代入,得到实用连轧张力公式。对于两机架轧机可写成

$$\sigma = (A'_2/A'_1 V_{R2} (1 + S_2) (V_{R1} (1 + S_1))) / (A'_2/A'_1 V_{R2} S_2 b_2 + V_{R1} b_1 S_1) \quad (12)$$

式中 A'_1 为在张力影响下的轧件截面积。

如果在实验过程中把各张力水平的截面积 A_1 , A_2 测量出来,也可以计算出与理论张力公式(10)相近似的结果。文献[9]在开始推导公式时,假定 $\Delta A_i = 0$,故不能在公式中引入 A'_2, A'_1 项。理论公式与实用公式的相应关系和意义见文献[1]。

理论和实用张力公式都有实用价值,当截面积(或厚度)、轧辊线速度都用无张力时的值时,就应当用文献[7]中的理论张力公式;当这些量是在张力作用下的实测值时,就用实用张力公式(12),轧辊速度是张力作用下的实际值,而截面积是无张力作用下的值,用式(10)。与文献[7]中的理论张力公式差别在于式(10)中没有张力对轧辊速度影响的 D 系数。

2 动态张力公式的分析

多机架稳态张力公式,在文献[3,9]中都给出来了。文献[3,9]中均未给出多机架动态张力公式,只给出两机架动态张力公式;文献[7]中给出了多机架动态张力公式。下面写出板带连轧的实用多机架动态张力公式

$$\sigma(t) = \sigma_0 \exp(-\tau^{-1}At) + A^{-1}[1 - \exp(-\tau^{-1}At)]W^{-1}\Delta V \quad (13)$$

式中: τ 为连轧时间常数对角矩阵, $\tau_i = l/EW_i$,

W 为连轧刚性系数对角矩阵, $W_i = V_{Ri+1}S_{i+1}b_{i+1}h_{i+1}/H_{i+1} + V_{Ri}S_i b_i$; A 为张力系统状态矩阵。

$A =$

$$\begin{bmatrix} 1 & \frac{-\varphi_1}{W_1} & & \mathbf{0}_{(n-3) \times (n-3)} \\ \frac{-\theta_2}{W_2} & 1 & \ddots & \\ & \ddots & \ddots & \frac{-\varphi_{n-2}}{W_{n-2}} \\ \mathbf{0}_{(n-3) \times (n-3)} & & \frac{-\theta_{n-1}}{W_{n-1}} & 1 \end{bmatrix}, \quad (n-1) \times (n-1)$$

$$\varphi_i = V_{Ri+1}S_{i+1}b_{i+1}h_{i+1}/H_{i+1},$$

$$\theta_i = V_{Ri}S_i b_i,$$

ΔV 为张力系统扰动(输入)列向量,

$$\Delta v_i = V_{Ri+1}(1 + S_{i+1})h_{i+1}/H_{i+1} - V_{Ri}(1 + S_i),$$

E 为轧件弹性模数,

l 为机架间距离,

$h(H)$ 为出口(入口)轧件厚度。

式(13)是假定宽展为零的板带连轧条件下推出的,对于需要考虑宽展的型钢、棒、线材和钢管等连轧机,把厚度换成截面积就可以了。

对于两机架连轧,张力微分方程是一阶线性微分方程

$$d\sigma/dt = a(t)\sigma + b(t)\Delta V$$

式中的 a 系数是时间函数或常数均有标准解法,容易得出两机架连轧动态张力公式。但是,多机架张力微分公式是一个向量微分方程:

$$d\sigma/dt = A\sigma + B\Delta V \quad (14)$$

要找到式(14)的解析解,矩阵 A 必须是对角矩阵或者是定常矩阵。矩阵 A 不是对角矩阵,是否是定常的呢?从表面上看, A 不是定常的,因为它是连轧过程基本变量速度和厚度(或截面积)的函数。但是,由于连轧张力微分方程中的 A , B 之间的特殊关系,文献[11]中证明了在标称点附近扰动作用的情况下, A 可当作定常矩阵,这样获得了多机架动态张力公式(13)。

3 结语

1)由于浅川等连轧实验数据和张力计算公式的计算值对比相差很大,证明了在推导张力公式时,忽略张力对压下量,宽展等的影响是不允许的;

2)用浅川等的连轧实验数据,证明了理论张力公式是比较符合实际的;

3)分析方法和计算机模拟方法证明,在标称点附近扰动作用下,连轧张力系统可当作定常系统,因此可以得到多机架动态张力公式的解析表达式。

参考文献

- [1] 郑学锋. 评连轧张力公式[J], 钢铁, 1978, 2: 77-86
- [2] 张进之. 连轧张力变形微分方程的分析讨论[J]. 钢铁, 1978, (4): 85-92
- [3] 原田利夫, 中岛, 岸川官一, 等. H形钢连续压延法の開発[J]. 塑性と加工, 1975, 16(168): 60-69
- [4] 王军生, 白金兰, 刘相华, 等. 冷连轧动态变规格张力微分方程[J]. 东北大学学报, 2003, 24(8): 785-787
- [5] 马文博, 徐光, 杨永立. 冷连轧张力公式推导及分析[J], 钢铁研究, 2003(3): 28-31
- [6] 张灵杰, 程晓茹, 任勇. 冷连轧张力公式的数模研究及张力值的选定[J], 南方金属, 2006(2): 28-30
- [7] 张进之. 连轧张力公式[J]. 金属学报, 1978, 14(2): 127-138
- [8] 张进之. 连轧张力公式[J]. 南方金属, 2007(1): 4-10
- [9] 浅川基男, 近藤胜也, 美坂佳助, 等. 棒钢ミルの直接张力検出方式による無張力制御システムの開発[J], 塑性と加工, 1979, 20(224): 841-849
- [10] 浅川基男. 棒钢、线材压延におけるスタッド間張力の影響[J]. 塑性と加工, 1979, 20(225): 949-956
- [11] 张进之. 连轧张力系统的定常性质的论证[A]. 轧钢论文集(二)[M]. 北京: 轧钢理论学会, 1983
- [12] 王喆, 张进之. 热轧张力观测器模型的研究与构建[J]. 冶金自动化, 2005(3): 29-32

Experimental Demonstrations and Analysis for Continuous Rolling Tension Formula

Zhang Jinzhi¹, Zhao Houxin², Wang Zhe², Wang Baoluo²

(1. Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081, China;

2. Hot Rolling Mill of Baoshan Iron and Steel Co Ltd, Shanghai 201900, China)

[**Abstract**] The continuous rolling tension formula is the core of the theory and the application of continuous rolling system. A lot of studies have been made both in China and other countries. In 1960s, the author introduced continuous rolling differential formula, the dynamic tension formula for multi-stands and the stable state tension formula. All these formuls have been discussed in detail. The Japanese derived the tension formula in theory in 1970s and they did experimental demonstrations, among which the experimental results made by Motoho Asakawa is the most important. Herein, the tension formula is demonstrated by employing the data of the experimental results made by Motoho Asakawa and on-the-spot survey data of Baosteel 2050 heating continuous mill.

[**Key words**] tension formula; experimental demonstrations; analytic root; deterministic