

文章编号: 1009-9700(2006)02-0028-03

# 冷轧张力公式的数模研究及张力值的选定

张灵杰, 程晓茹, 任 勇  
(武汉科技大学, 湖北 武汉 430081)

**摘 要:** 介绍各种冷轧张力公式, 动态变规格轧制与稳态轧制时张力微分方程的区别, 以及生产中如何选定张力值。

**关键词:** 张力公式; 冷轧; 张力值

**中图分类号:** TG 335.12; TG 113.25 **文献标识码:** A

## Mathematic modeling of tension formulas and selection of tension values for tandem cold mills

ZHANG Ling-jie, CHENG Xiao-ru, REN Yong  
(Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081)

**Abstract:** Various tension formulas for tandem cold mills are presented, the difference between the dynamic tapered rolling and steady-state rolling in their differential equations for tension calculation indicated, and the criterion for selecting the tension values for practical production given in the paper.

**Key words:** tension formula; cold rolling; tension value

### 1 引言

轧制张力是冷轧带钢生产过程中必需严格控制的重要参数, 它不仅影响轧制工艺条件, 影响产品尺寸精度与板形质量, 甚至使得整个轧制过程变得不稳定<sup>[1]</sup>。随着张力取值的增加, 连轧机架间轧件的应变以及张力变化对带钢轧制的影响已经成为研究者们应该重视的问题。在大力发展连轧生产的同时, 必须完善连轧理论, 研究连轧的一些特殊规律。要正确控制连轧过程, 需要研究张力变化的规律和它与轧制诸因素之间关系的数学模型, 它不仅用于张力调厚控制, 在整个连轧过程控制中也要用到<sup>[2]</sup>。而连轧张力变形微分方程是连轧理论的核心问题。针对稳态冷连轧和变规格轧制张力在国内外已经有一些代表性的方程, 对于张力变化的描述不少文献的讨论也不同, 了解各种张力数学模型和选用合适条件下的张力方程对于解决和改善板形问题很有必要。

### 2 稳态和动态变规格轧制张力的数学模型

假设在第  $i$  机架和第  $i+1$  两机架上进行张力轧制,  $v'_{i+1} > v_i$  在任意时刻  $t$ , 带材被拉伸的速度<sup>[3]</sup>

$$\frac{d\Delta L}{dt} = v'_{i+1} - v_i \quad (1)$$

并由  $\Delta L = \varepsilon(L - \Delta L)$

$$\text{微分} \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{(l + \varepsilon)^2}{L} (v'_{i+1} - v_i) \quad (2)$$

轧件服从虎克定律并推导出(A). II. 切克马廖夫张力公式

$$\frac{d\sigma}{dt} = \frac{E}{L} v'_{i+1} - v_i \left[ 1 + \frac{\sigma}{E} \right]^2 \quad (3)$$

$v_i$ — $i$  机架轧件出口速度;

$v'_{i+1}$ — $i+1$  机架轧件入口速度;

在上面公式中, 如果

$$d\varepsilon/dt = [v'_{i+1} - v_i(1 + \varepsilon)] / (1 - \Delta L) \quad (4)$$

则得出由 Ю. М. 费因别尔推出的公式为

收稿日期: 2005-08-18

作者简介: 张灵杰(1979-), 男, 武汉科技大学材料加工工程在读硕士研究生。

$$\frac{d\sigma}{dt} = \frac{E}{L} [v'_{i+1} - v_i (1 + \frac{\sigma}{E})] \quad (5)$$

如果上式中

$$d\varepsilon/dt = (v'_{i+1} - v_i) (1 + \varepsilon)/L \quad (6)$$

则得出张进之推导的公式为

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{E}{L} v'_{i+1} - v_i [1 + \frac{\sigma}{E}] \quad (7)$$

由于在实用张力范围内,  $\sigma_i < E$ ,  $\sigma_i/E = 1/1\ 000$ ,  $[1 + \frac{\sigma_i}{E}]^2$  近似为 1, 故由式(3)得常用的张力微分方程

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{E}{L} (v'_{i+1} - v_i) \quad (8)$$

(8)对弹性范围内的所有连轧情况都适用,其误差仅由忽略  $\sigma/E$  项引起. 由它与总张力相等方程联立得出的离散型张力公式完全适用于变截面情况<sup>[9]</sup>.

最近马文博,徐光等人用对数应变表示连轧变形进一步推导的连轧张力微分方程为<sup>[4]</sup>

$$\frac{d\sigma}{dt} = \frac{E}{L} [v_{2H} - v_{1h} (1 + \frac{\sigma}{E})] (1 + \frac{\sigma}{E})^2 \quad (9)$$

$V_{1h}$ —末机架轧出速度

$V_{2H}$ —卷取机速度

以上公式对因速度差存在而产生的张力给出了正确的解析,也引入了时间的概念,但由于没有反映出生产时张力的自调作用,不能反映稳态平衡破坏后,经过一段时间后可能“自动”达到新的稳态平衡. 没有把张力对速度差的反影响表达出来. 在赵志业等所著的塑性变形和轧制理论中又对(8)式进行了进一步推导,引用 H. H. 德鲁日宁的实验结果

$$S_h = S_{h0} + a\sigma \quad (10)$$

进一步用速度表示前滑后变为

$$v_i = v(1 + S_{h0} + a\sigma) \quad (11)$$

$S_{h0}$ —无张力(或无张力变化)时的前滑;

$a$ —系数

$v$ — $i$  机架轧辊线速度

$\sigma$ —单位前张力或单位张力差,  $\sigma = \bar{\sigma}/Bh$

$\bar{\sigma}$ —前张力或前后张力差

由此进一步得到张力动态方程

$$\frac{d\sigma}{dt} = \frac{E}{L} (v'_{i+1} - v_{i0} - v_i a\sigma) \quad (12)$$

式中  $v_{i0} = v(1 + S_{h0})$

进一步得出

$$\sigma = (v'_{i+1} - v_{i0}) (1 - e^{-\frac{Et}{L}}) \quad (13)$$

动态曲线如下图 1.

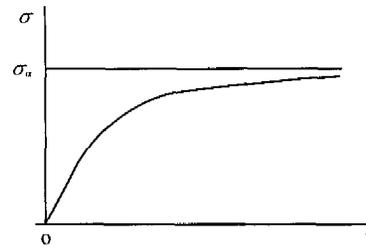


图 1 动态曲线

张力动态曲线

$\sigma_a$ —表示达到新的平衡时新的张力值,  $\sigma_a < \sigma_s$

马文博对(9)式也作了进一步推导得张力动态方程<sup>[4]</sup>

$$\frac{d\sigma}{dt} = \frac{E}{L} [v_{2H} - v_1 (1 + S_{h0} + a\sigma)] (1 + \frac{\sigma}{E}) (1 + \frac{\sigma}{E})^2 \quad (14)$$

$v_1$ —末机架轧辊线速度

进一步得到连轧状态方程

$$\sigma = \frac{E [V_{2H} - V_1 (1 + S_{1h})]}{-2V_{2H} + V_1 S_{1h} bE + 3V_1 (1 + S_{1h})} \left\{ 1 - e^{\frac{1}{L} [-2V_{2H} + V_1 S_{1h} bE + 3V_1 (1 + S_{1h})]} \right\} \quad (15)$$

$S_{1h}$ —无张力(或张力变化前)时的前滑值

$b$ —前滑系数

上述张力方程的推导都是基于轧件受到弹性拉伸并利用力学条件导出的,公式(15)考虑了多方面的因素,其精度相对要高一些.

对于在极短的时间内由前一卷带钢的轧制规格切换到下一卷带钢的轧速度差间的动态变规格微分关系,王军生等人以  $i$  机架出口到  $i+1$  机架入口的带钢张力轧制状态为研究对象<sup>[5-8]</sup>.

假设:1)带钢在张力作用下的变形是弹性变形服从虎克定律;2)变规格前后的带钢横断面上变形、应力是均布的;3)带钢轧制过程中为无宽展的平面变形. 得出动态变规格变形微分方程:

$$V_h - V_H = \frac{L}{(1 + \varepsilon_1)^2} \frac{d\varepsilon_1}{dt} + \frac{L_2}{(1 + \varepsilon_2)^2} \frac{d\varepsilon_2}{dt} + \frac{\varepsilon_1}{(1 + \varepsilon_1)^2} \frac{dL_1}{dt} + \frac{\varepsilon_2}{(1 + \varepsilon_2)^2} \frac{dL_2}{dt} \quad (16)$$

$V_H$ —动态变规格前带钢的出口速度

$V_h$ —动态变规格后带钢的入口速度

$L_1, L_2$ —弹性变形后变规格点前后带钢长度

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$ —变规格点前后带钢的相对伸长量  
进一步得到变规格张力微分方程

$$\frac{dT_i}{dt_i} = \left[ \frac{L_{1(i+1)}}{E_{i+1} \cdot h_{i+1} \cdot w_{i+1}} + \frac{L_{2i}}{E_i \cdot H_i W_i} \right] \quad (17)$$

$w_i, w_{i+1}$ —i 机架变规格点前后带钢宽度

$T_i$ —机架带钢所受总张力

该式表明,动态变规格过程张力的变化不仅与前后机架的出入口速度差有关,而且与前后卷带钢的宽度、厚度等规格有关,还与变规格点在机架间所处的位置有关。这正是动态变规格轧制与稳态轧制时张力微分方程的区别所在。

当  $L_{1(i+1)} = 0$  或  $L_{2i} = 0$  时,式(17)就变成稳态轧制时常用的张力微分方程(8)。

张进之用弹塑性理论中的位移-变形-应力方法推导出了更具普遍意义能精确描述变截面情况(设  $x$  点处速度为  $v$ )的分布函数张力微分方程<sup>[9]</sup>。

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial \sigma}{\partial x} v = (E + \sigma) \frac{\partial v}{\partial x} \quad (18)$$

### 3 张力值的选定

所给定的张力值,一般要求以不致于使加工硬化的带钢因裂口等被拉断为原则。也可根据某道次出口侧带钢的横断面及单位力来决定:

$$\text{即: } T = \sigma \cdot b \cdot h$$

$T$ —张力 N;

$b$ —带钢宽度, mm;

$h$ —带钢厚度, mm;

单位张应力  $q$  可根据带钢屈服点  $\sigma_s$  和带钢横断面面积  $F$  之比求得:

$$\sigma = \sigma_s / F$$

一般理论值中的单位张应力不超过  $0.5\sigma_s$ , 通常为  $(0.3 \sim 0.5)\sigma_s$ , 亦即:  $\sigma = T/F = (0.3 \sim 0.5)\sigma_s$ 。

实际使用时可能超过这个范围,不同的轧机,不同的轧制道次,不同的品种规格甚至不同的原料条件,要求单位张力与之相适应。一般对于较厚的带钢或硬、脆性能的带钢及带钢边缘状况较差的带钢其单位张应力应取小值;对于薄带钢或变形较均匀且原料比较理想和工人操作水平较高时,单位张应力可取大值。成品轧机与卷取机之间的单位张应力约为通常张应力的  $1/3$ , 即

$$\sigma = (0.10 \sim 0.15)\sigma_s$$

在实际生产中,一般先选择较小的前张力,这一点尤其对较薄带钢的冷轧更为重要。当所轧制的带钢出现波浪时,就可适当增加前张力来消除,而且板形的好坏易于观察,便于及时调整及防止断带。可减少出现中部波浪增加前张力时,带钢两边部受拉易出现裂边或断带的现象。如果带钢的厚度达到辊径的  $1/100$  或更薄时,采用后张力不小于前张力(第一道除外)的方法在许多情况下是有利的,这在厚度小于  $0.5 \text{ mm}$  的薄带轧制过程中更为明显;同时,后张力能有效地促进变形。由于后张力对轧制压力的影响比前张力大,这样对减少轧制压力有利,再者带钢进入轧辊时较平稳,在同一卷带钢轧制时易于调整前张力;对于可逆轧机,逐道次变换张力时,只需要变换一方的张力。当带钢厚度的偏差较小时,可用改变后张力的方法进行精确调整<sup>[10]</sup>。

另外轧制过程中单独加大前张力时,对边部的影响效果大于对中部的影响效果。后张力对轧件变形的影响趋势一致,且影响效果更大。但同时加大前后张力比单独增加前、后张力对轧件变形的影响趋势一致作用更大<sup>[11]</sup>。

### 4 结语

1) 冷轧中张力问题已越来越引起研究者关注,特别是在冷轧薄带钢迅速发展的今天,对板形的要求日益提高,需要更进一步的系统研究,以提高我国冷轧行业的技术含量。

2) 加强在线解决张力问题的软件开发,推广有限元建模,计算机仿真等先进手段在冷轧张力调节过程中的应用,以适应高精度产品的要求。

### 参考文献

- [1] 史小路, 邹家祥. 冷连轧轧制张力稳定性[J]. 北京科技大学学报, 2000, 22(3): 370-373.
- [2] 矾 土. 关于连轧张力微分方程的讨论[J]. 钢铁, 1978, (1): 87-91.
- [3] 赵志业. 金属塑性变形与轧制理论[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1980. 413-418.
- [4] 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, 132(33): 28-31.
- [5] Ikuya Hoshino, Observe-based multivariable control of the aluminum cold tandem mill[J], Automation, 1988, 24(6): 741-754.

放上选定的备用下水口,启动液压站,待压力稳定,把液压缸架在支架上,用手使液压缸保持水平,按动“液压缸伸出”按钮,液压缸推杆伸出,推动备用下水口滑移至浇钢位置,同时原下水口被推出浇钢位置,新下水口代替原有下水口工作,然后按“液压缸缩回”按钮,使液压缸缩回,取下液压缸,再将滑道挡渣板放在滑道上。

## 4 定径水口快速在线更换使用效果

### 4.1 改善经济技术指标

采用定径水口快速在线更换技术,中间包连续使用从原有的8 h提高到16 h,中间包单包浇钢能力从800 t提高到1 600 t,中间包钢水注余及铸坯的切头切尾可减少为原来的一半。

连浇时间的增加,减少了送引锭次数,从而提高了结晶器铜管及引锭杆的使用寿命。

拉速和拉钢流数可以很好的控制,使中间包钢水液面高度得以提高,消除了原有因中间包钢水液面低而导致大包钢水冲击中间包冲击区的穿包事故的发生。

采用此项新技术后,合格铸坯收得率由采用前的96.0%提高到现在的97.0%。

### 4.2 生产准备用材料的消耗降低

由于连浇时间的增加,生产同样重量的铸坯,吨钢材料费用减少,是原来的一半。

### 4.3 提高连铸坯质量

采用定径水口快速在线更换技术,可大幅度提高铸坯实物质量。中间包第一炉钢质量往往不是很好,每个中间包连浇时间增加,就减少了更换中间包的次数,从而减少了第一炉钢的不良几率,提高了铸坯质量。中间包内钢水液面保持稳定,有利于钢中夹杂物的上浮,从而进一步保证了钢的质量。采用此项技术,可以避免水口烧坏、侵蚀过大而造成的拉速过

快及漏钢事故,从而稳定了拉速,提高了铸坯的质量。

## 5 存在的问题

### 5.1 弹簧失效

定径水口快速在线更换装置上用于压紧上、下两个水口的6个弹簧,在高温环境下有时达不到性能要求,弹性力降低,导致上、下水口脱离接触,缝隙中有钢水渗出而被迫停止浇铸,因此在中间包水口时必须用专用工具对弹簧测压,保证压力在1.5~2.3 MPa之间。考虑到一般钢种无保护浇注,为保证弹簧能满足使用要求,可用机械弹簧代替气体弹簧。

### 5.2 底板变形

定径水口快速在线更换装置底板在高温环境下出现不同程度的变形,导致上、下水口接触面不好,产生机构渗钢事故,对此应改进底板的材质和尺寸,同时拆下对其进行修平,以减少此类事故的发生。

### 5.3 下水口打不动

更换下水口时出现下水口推不到位,使上水口和下水口的中心线不能重合,影响钢水的流量。出现此种情况主要是液压装置液压油不够及下水口滑道粘有钢渣未清理干净,通过加强液压装置的检查及更换下水口时用钢钎清理滑道和用压缩空气吹扫滑道或加润滑油,可消除此类事故。

## 6 结论

采用定径水口快速在线更换技术,提高了连铸炉数,保证了铸机的作业率,有效地提高了连铸机的生产能力和降低了生产准备用材料的消耗,同时,大大降低了工人的劳动强度,为“电炉—精炼炉—连铸机”三位一体的生产组织提供了有力的保障,在依赖外部铁水供应的生产条件下,采用此项技术的效果尤其明显;采用此项技术,可实现中包到结晶器的保护浇注,大大降低了生产成本。

(上接第30页)

- [6] Guo RM. Analysis of dynamic behaviors of tandem cold mills using generalized dynamic and control equations [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2000, 36(3):842-853.
- [7] Zhang S T, Liu Y R. Variable section tension differential equation and dynamic digital simulation models for tandem cold mill [J]. 1981, 17(2):206-212.
- [8] 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.
- [9] 张进之. 论常用连轧张力微分方程的适用范围[J]. 钢铁研究学报, 2002, 14(5):73-75.
- [10] 徐鹤贤. 冷轧钢带张力及其控制工艺探讨[J]. 特钢技术, 2001, (3):12-17.
- [11] 刘立文,张树堂,武志平. 张力对冷轧板带变形的影响[J]. 钢铁, 2000, 35(4):37-39.
- [12] 张进之. 连轧张力变形微分方程的讨论[J]. 上海金属, 1984, 6(5):8-11.