

DOI:10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20200597

基于极限静摩擦力矩的轧机打滑预测模型

施剑睿^{1,2} 孙文权^{1,2}, 陈禄祯^{1,2}, 袁铁衡^{1,2}, 张喜榜^{1,3}, 李立刚^{1,3}

(1. 北京科技大学国家板带生产先进装备工程技术研究中心, 北京 100083; 2. 北京科技大学高效轧制国家工程研究中心, 北京 100083; 3. 北京科技大学设计研究院有限公司, 北京 100083)

摘 要: 冷连轧轧制过程中, 当轧制转矩大于轧辊与轧件间的极限静摩擦力矩时, 轧辊与轧件之间将出现相对滑动, 从而导致打滑的发生。为减少因打滑导致的冷轧带钢带钢表面缺陷, 以板带轧制塑性变形基本公式为基础, 将前滑区与后滑区的单位轧制力分布做线性简化, 继而推导出极限静摩擦力矩模型。并以实测数据验证该模型的准确性, 且从轧制转矩与极限静摩擦力矩差值的变化趋势中发现, 随着轧制公里数的增加, 差值有逐渐减小到零的趋势。同时利用差值小于设定阈值的方式来判定工作辊是否发生打滑, 并应用于现场在线打滑预警系统中。实践证明, 该模型对冷连轧工作辊打滑判定具有重要意义。

关键词: 冷轧; 极限静摩擦力矩; 轧制转矩; 打滑; 表面缺陷

文献标志码: A **文章编号:** 0449-749X(2021)09-0096-06

Rolling mill slip prediction model based on limit static friction torque

SHI Jian-rui^{1,2}, SUN Wen-quan^{1,2}, CHEN Lu-zhen^{1,2},
YUAN Tie-heng^{1,2}, ZHANG Xi-bang^{1,3}, LI Li-gang^{1,3}

(1. National Engineering Technology Research Center of Flat Rolling Equipment, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. National Engineering Research Center for Advanced Rolling Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 3. Design and Research Institute Co., Ltd., University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: In the process of cold continuous rolling, when the rolling torque is greater than the limit static friction torque between the roll and the rolled piece, the relative sliding will occur between the roll and the rolled piece, which will lead to the occurrence of sliding. For reducing the surface defect caused by slip, based on the basic formula of the plastic deformation in strip rolling, the unit rolling force distribution in the forward and backward sliding regions is simplified linearly, and then the ultimate static friction torque model is derived. The accuracy of the model is verified by the measured data. From the changing trend of the difference between rolling torque and ultimate static friction torque, it is found that the difference value gradually decreases to zero with the increase of rolling kilometers. At the same time, the method that the difference value is less than the set threshold is used to determine whether the work roll is slipping or not. It has been proved that the model is of great practical significance for the judgment of the work roll slippage in the tandem cold rolling.

Key words: cold rolling; ultimate static friction torque; rolling torque; slip; surface defect

冷轧中的打滑现象具体表现为轧辊与带钢表面的相对滑动, 当轧制过程中出现轧辊打滑时, 一方面会使轧件表面产生划痕影响带钢表面质量; 另一方面打滑引发的轧机震动将会造成带钢的纵向波纹, 严重时会造成断带堆钢^[1-4]。因此, 对打滑现象的研究在实际生产中具有重要的意义。

对于实际生产中出现的轧机打滑现象, 国内外

学者对打滑进行了很多研究。白振华等^[5]指出: 传统方法以前滑值或中性角的绝对值大小来判断打滑出现的概率是不科学的, 利用表征中性面在变形区内相对位置这一方法提出打滑因子, 给出了一个通用的打滑判断条件。宋浩源等^[6]根据轧制参数的变化, 直观判断打滑发生机架, 通过提高轧辊粗糙度, 对轧制规程的设定进行调整, 有效防止打滑的发生。

当式(4)中 θ 等于 α 时可得到 H_1 , 见式(5)。

$$H_1 = 2 \sqrt{\frac{R}{h_1}} \tan^{-1} \left(\sqrt{\frac{R}{h_1}} \alpha \right) \quad (5)$$

式中: p_θ^+ 为前滑区单位轧制力; p_θ^- 为后滑区单位轧制力; h_θ 为任意角度厚度; μ 为摩擦因数; τ_f 为单位前张力; τ_b 为单位后张力。

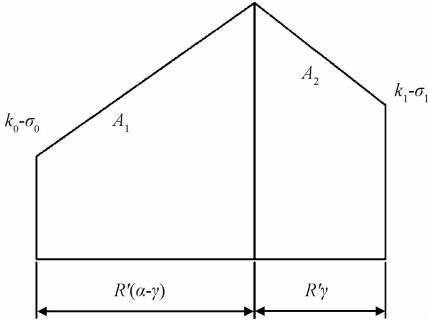


图 3 简化单位轧制力分布

Fig. 3 Simplify distribution of rolling force per unit

因此,轧制区任意一点的轧制力见式(6)和式(7)。

$$p_\theta^+ = k_1 - \tau_f + A_2 R' \theta \quad (6)$$

$$p_\theta^- = k_0 - \tau_b + A_1 R' (\gamma - \theta) \quad (7)$$

为了求出直线的斜率,必须先求出中性角处的轧制力,中性角处的轧制力公式见式(8)和式(9)。

$$p_\gamma^+ = \frac{h_\gamma k_1}{h_1} \left(1 - \frac{\tau_f}{k_1} \right) e^{\mu H_\gamma} \quad (8)$$

$$p_\gamma^- = \frac{h_\gamma k_0}{h_0} \left(1 - \frac{\tau_b}{k_0} \right) e^{\mu (H_1 - H_\gamma)} \quad (9)$$

中性角处厚度 h_γ 计算公式见式(10)。

$$h_\gamma = h_1 + 2R(1 - \cos \gamma) \quad (10)$$

H_γ 计算公式见式(11)。

$$H_\gamma = 2 \sqrt{\frac{R}{h_1}} \tan^{-1} \left(\sqrt{\frac{R}{h_1}} \gamma \right) \quad (11)$$

在得到两个点的数据后便可求出简化轧制力分布函数的斜率

$$A_1 = - \frac{p_\gamma^- - (k_0 - \tau_b)}{R'(\alpha - \gamma)} \quad (12)$$

$$A_2 = \frac{p_\gamma^+ - (k_1 - \tau_f)}{R' \gamma} \quad (13)$$

带入式(6)和式(7)便可以得到变形区内轧制力的分布,其公式见式(14)和式(15)。

$$P_1(\theta) = k_1 - \sigma_1 + \frac{\theta \times k_1 \times h_\gamma}{\gamma \times h_1} \left(1 - \frac{\sigma_1}{k_1} \right) e^{\mu \times H_\gamma} - \frac{(k_1 - \sigma_1) \theta}{\gamma} \quad (14)$$

$$P_2(\theta) = k_0 - \sigma_0 + \frac{(\alpha - \theta) \times k_0 \times h_\gamma}{\gamma \times h_0} \left(1 - \frac{\sigma_0}{k_0} \right) e^{\mu \times (H_1 - H_\gamma)} - \frac{(k_0 - \sigma_0)(\alpha - \theta)}{\alpha - \gamma} \quad (15)$$

2.2 极限静摩擦力矩模型的建立

由于需要从力矩的角度对工作辊打滑进行判定,因此需要对轧辊所受到的极限静摩擦力矩进行推导,而在推导前需提出以下几点假设:

- (1) 由于微滑移对滚动摩擦贡献很小^[12],所以假设轧辊和轧件全滑动,并且遵守库伦摩擦定律;
- (2) 轧件在轧制过程中某一瞬间是匀速运动;
- (3) 上下辊辊径相同;
- (4) 忽略展宽。

考虑到前滑区和后滑区受力情况的差异,带入不同区域的单位轧制力公式式(14)和式(15),得到不同区域单位摩擦力公式见式(16)和式(17)。

前滑区单位摩擦力 F_1

$$F_1 = \mu \times P_1(\theta) \times b \times R \quad (16)$$

后滑区单位单位摩擦力 F_2

$$F_2 = \mu \times P_2(\theta) \times b \times R \quad (17)$$

式中: b 为带钢宽度。

由于轧件上表面和下表面均与轧辊接触,存在极限静摩擦力矩,因此总极限静摩擦力矩 M_f 可表示为

$$M_f = 2 \times \left(\int_0^\gamma dM_1 + \int_\gamma^\alpha dM_2 \right) \quad (18)$$

式中: M_1 为前滑区极限静摩擦力矩; M_2 为后滑区极限静摩擦力矩。

由于力矩等于力与力臂的乘积,综合式(16)~式(18)可得

$$M_f = 2 \times \left(\int_0^\gamma F_1(\theta) \cdot R d\theta + \int_\gamma^\alpha F_2(\theta) \cdot R d\theta \right) \quad (19)$$

积分后可得到前滑区极限静摩擦力矩 M_1 为

$$M_1 = R^2 \mu \gamma b \left[\frac{h_\gamma k_1}{2 h_1} \left(1 - \frac{\sigma_1}{k_1} \right) e^{\mu \times H_\gamma} + \frac{k_1 + \sigma_1}{2} \right] \times Z_p \quad (20)$$

后滑区的极限静摩擦力矩 M_2 为

$$M_2 = R^2 \mu b (\alpha - \gamma) \left[1.5 \times (k_0 - \sigma_0) - \left(1 - \frac{\sigma_0}{k_0} \right) e^{\mu \times (H_1 - H_\gamma)} \times \frac{h_\gamma k_0}{2 h_0} \right] \times Z_p \quad (21)$$

式中: Z_p 为极限静摩擦力矩自适应系数。

理论分析时,轧制转矩应等于前滑与后滑极限摩擦力矩的差值^[13],但在实际轧制生产中,为了避免轧辊打滑现象的发生,提高轧制稳定性,轧制转矩

应略小于极限静摩擦力矩。

2.3 模型的验证

为了保证极限静摩擦力矩计算结果可靠性,首

先需要验证单位轧制力简化公式。获取某冷轧厂轧制某卷时前 4 机架的实时生产数据,计算其简化后的轧制力与极限静摩擦力矩,计算结果见表 1。

表 1 轧制力与极限静摩擦力矩计算结果
Table 1 Calculation results of rolling force and ultimate static friction moment

机架号	前滑区摩擦力矩/ (kN·m)	后滑区摩擦力矩/ (kN·m)	实际轧制力/N	计算轧制力/N	轧制转矩/(kN·m)	极限静摩擦力矩/ (kN·m)
1	87.20	83.60	14 470	15 210	335.86	341.82
2	133.90	94.50	16 350	17 050	328.27	387.06
3	62.60	52.80	14 000	14 770	204.15	230.98
4	26.13	21.91	11 110	11 800	75.70	96.10

表 1 中展示了 4 个机架简化轧制力与极限静摩擦力矩的计算结果,结果表明:简化轧制力公式的计算结果与实际轧制力的误差为 5%~6%,符合使用要求。因此,使用简化轧制力分布公式推导得到的极限静摩擦力矩公式,其精度得到了保证。此外将计算得到的轧制转矩与极限静摩擦力矩对比可知,该示例为正常轧制时的数据,且 4 个机架均未存在打滑的倾向。

为了验证轧制整卷时轧制力的计算精度,抽取某卷带钢在 S3 的轧制数据,并将实际轧制力与计算轧制力作对比,结果如图 4 所示。

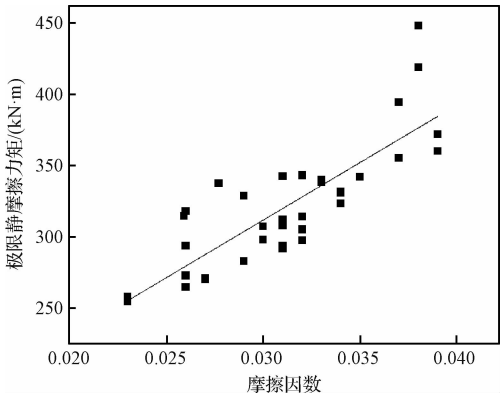


图 5 摩擦因数-极限静摩擦力矩变化趋势
Fig. 5 Trend diagram of friction coefficient-friction torque variation

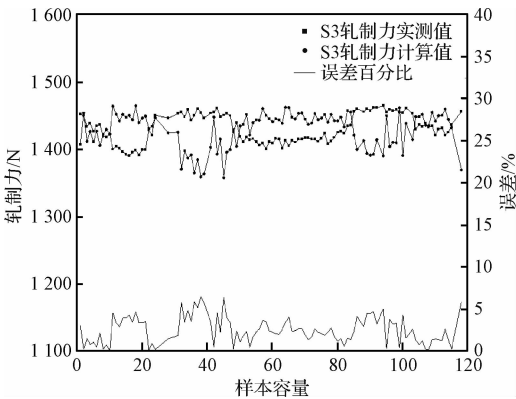


图 4 实测轧制力与计算轧制力对比
Fig. 4 Comparison diagram of measured rolling force and calculated rolling force

从图 4 中可看出,S3 轧制力实测值与计算值的最大误差为 5%~6%。与计算示例误差接近,从而进一步说明简化轧制力公式的可靠性。

为了验证极限静摩擦力矩模型,抽样采集了 S2 工作辊从上机到下机的相关数据,并绘制摩擦因数与极限静摩擦力矩的变化趋势如图 5 所示。

率应逐渐增大,根据本文对打滑的定义,绘制轧制公里数与极限静摩擦力力矩与轧制转矩差值图,拟合趋势曲线后如图 6 所示。

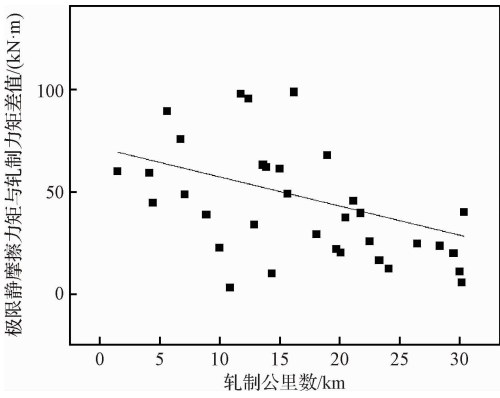


图 6 极限静摩擦力矩与轧制转矩差值变化趋势
Fig. 6 Trend diagram of difference between static friction moment and rolling moment

由图 5 可知,随着摩擦因数的逐渐增大,极限静摩擦力矩的值也逐渐增大,该趋势符合式(17)和式

随着轧制公里数的增加,轧机工作辊打滑的概

(18)中摩擦因数与极限静摩擦力矩的关系。由图 6 可知,随着轧制公里数的增加,极限静摩擦力矩与轧制转矩的差值有着逐渐减小且趋近于 0 的趋势。该趋势符合实际生产中随着轧制公里数增加,摩擦因数减小,工作辊打滑概率增大的事实。

通过示例计算,验证了该极限静摩擦力矩模型的可靠性。从图 5 中摩擦因数与极限静摩擦力矩的关系中可知,为了防止打滑现象的发生,应从提高摩擦因数的角度出发采取相应的预防措施。因此,该模型可以对冷轧工作辊打滑现象进行预测,对现场生产具有指导作用。

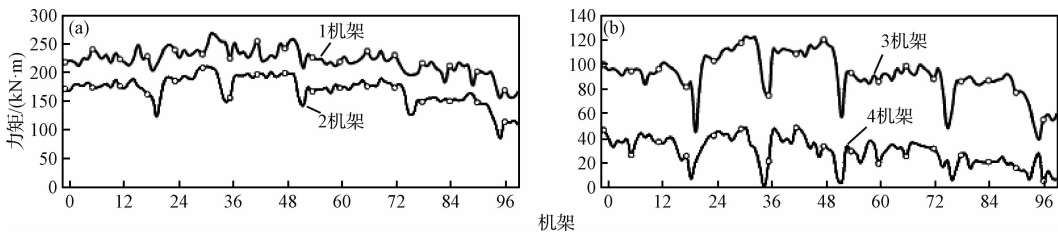
3 冷轧工作辊打滑在线预测模型在线应用

该预警模型基于某钢厂 2 130 生产线的酸轧和

连退机组生产工艺模型集成优化及智能分析系统,该系统在对实际生产过程数据进行分析的同时,采用关键工艺技术的优化模型,对生产过程中潜在的不稳定性因素进行分析、预警,并对提升产品质量和生产效率提出优化指导。

为了有效防止在生产实际中出现的工作辊打滑现象,根据第 1 章中以力矩对打滑进行判定的方法,将轧制转矩与极限静摩擦力矩的差值定义为力矩判定曲线。通过设定一个轧制转矩与极限静摩擦力矩差值的阈值来实现对工作辊打滑的判断,如图 7 所示。

监控 HMI 图如图 8 所示,当差值小于一定范围时,轧机发生打滑的概率更大。若连续预警次数小于一定阈值时,则工作辊正常工作,但若超出阈值时,系统则会给出语音警告,此时应采取降速,调节后张力等措施,避免轧辊打滑的发生。



(a) 1/2 机架; (b) 3/4 机架。

图 7 力矩判定曲线

Fig. 7 Torque judgment curve

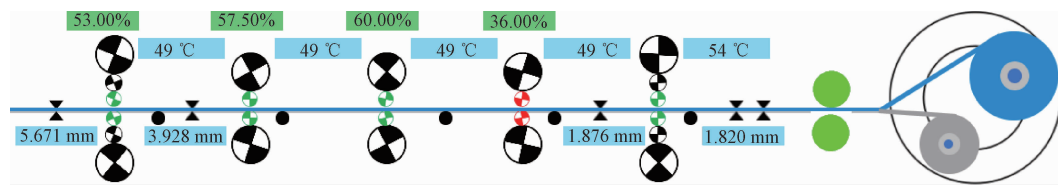


图 8 监控 HMI 图

Fig. 8 Monitor HMI diagram

4 结论

(1)以力矩的角度对冷轧工作辊打滑给出定义,推导相关公式,并进行算例验证,其中轧制力计算误差为 5%~6%,通过极限静摩擦力矩的变化趋势确认该模型的计算结果符合生产实际。

(2)结合文中打滑定义,将极限静摩擦力矩的值与轧制转矩的值进行对比,当轧制转矩与极限静摩擦力矩的差值连续超过设定阈值时,判定工作辊有很大概率会发生打滑,此时给出降速、调张等建议。

(3)该模型对于优化生产计划和换辊吨位有较

大的应用价值,能为现场生产提供较好的辅助手段。

参考文献:

[1] 曾武. 冷连轧机打滑时工艺参数分析及其在生产中的应用[J]. 钢铁研究, 1989(1): 34. (ZENG Wu. Analysis of process parameters and its application in production of tandem cold rolling mill[J]. Research on Iron and Steel, 1989(1): 34.)

[2] 张维召. 邯钢 2 180 mm 酸轧机组打滑原因分析及其对策[J]. 轧钢, 2017, 34(6): 71. (ZHANG Wei-zhao. Cause analysis of slippage of 2 180 mm pickling-tandem cold mill of Hansteel and its countermeasures[J]. Steel Rolling, 2017, 34(6): 71.)

[3] 沈新玉,宫峰,裴洪涛,等. 冷连轧打滑机理分析与控制研究[J]. 轧钢,2020,37(3):36. (SHEN Xin-yu,GONG Feng, PEI Hong-tao et al. Study on mechanism and control of slipping in cold tandem mill[J]. Steel Rolling,2020,37(3):36.)

[4] 李洋龙,王永强,文杰,等. 平整机升速过程带钢与张力辊打滑分析[J]. 中国冶金,2020,30(1):63. (LI Yang-long, WANG Yong-qiang,WEN Jie, et al. Analysis on slipping between strip and bridle roll of skin pass mill during speed-up process[J]. China Metallurgy,2020,30(1):63.)

[5] 白振华,王骏飞. 冷连轧机的打滑判断条件及打滑防治措施[J]. 上海金属,2004,26(4):27. (BAI Zhen-hua,WANG Jun-fei. The condition of judgment about slip in cold tandem mill and the prevention measures[J]. Shanghai Metals,2004, 26(4):27.)

[6] 宋浩源,陈基超,张生,等. 冷连轧机打滑机架判别与打滑防控手段研究[C]//第十一届中国钢铁年会论文集. 北京:中国金属学会,2017:671. (SONG Hao-yuan,CHEN Shen-chao, ZHANG Sheng, et al. Distinguishing slip stands and research on preventing slip on cold tandem mill[C]//Proceedings of the 11th China Iron and Steel Annual Meeting. Beijing:The Chinese Society for Metals, 2017:671.)

[7] 赵新秋,韩伟,王茜,等. 一种基于数据驱动的轧制过程打滑诊断及预测的方法:中国,104985003A[P]. 2015-10-21. (ZHAO Xin-qiu,HAN Wei,WANG Qian, et al. A Method for Diagnosis and Prediction of Rolling Slip Based on Data: China,104985003A[P]. 2015-10-21.)

[8] 车海军,韩欣艳,杨景明,等. 基于 IAGA 的冷连轧机预防打滑的规程优化设计[J]. 工程科学学报,2010,32(10):1360. (CHE Hai-jun,HAN Xin-yan,YANG Jing-ming et al. Optimization schedule for preventing slippage on tandem cold rolling mills based on IAGA[J]. Chinese Journal of Engineering, 2010,32(10):1360.)

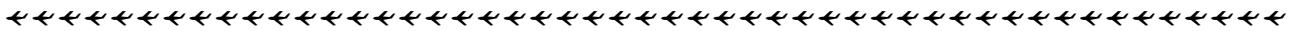
[9] Shivpuri R,Chou P C. A comparative study of slab, upper bound and finite element methods for predicting force and torque in cold rolling[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture,1989,29(3):305.

[10] 孙一康. 冷热轧板带轧机的模型与控制[M]. 北京:冶金工业出版社,2010. (SUN Yi-kang. Model and Control of Cold and Hot Strip Mill [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press,2010.)

[11] 朱建旭. 冷轧机辊缝热源及带钢非稳态温度场研究[D]. 秦皇岛:燕山大学,2014. (ZHU Jian-xu. Rresearch on Heat Source in the Roll Gap and Unsteady Temperature Filled of Strip in Cold Rolling Process[D]. Qinhuangdao:Yanshan University,2014.)

[12] Bental R H,Johnson K L. Slip in the rolling contact of two dissimilar elastic rollers[J]. International Journal of Mechanical Sciences,1967,9(6):389.

[13] 王向红,陈长. 不对称异径板带轧机轧制传动力矩[J]. 钢铁,1995,40(5):32. (WANG Xiang-hong,CHEN Chang. Research on rolling transmission torque of asymmetric reducing plate and strip mill[J]. Iron and Steel,1995,40(5):32.)



(上接第 95 页)

[5] 管现亮,孙翼洲,王凤琴,等. 热轧平整带钢 C 翘机理分析及措施[J]. 轧钢,2020,37(5):21. (ZAN Xian-liang, SUN Yi-zhou, WANG Feng-qin,et al. Mechanism analysis of C warp defects of hot rolled strip in temper and its countermeasures [J]. Steel Rolling, 2020, 37(5):21.)

[6] 张勃洋,卢兴福,张立元,等. 冷轧极薄带钢复杂板形翘曲变形行为研究[J]. 机械工程学报,2018,54(12):184. (ZHANG Bo-yang, LU Xing-fu, ZHANG Li-yuan, et al. Analysis of complex warping deformation for cold-rolled strip[J]. Journal of Mechan Ical Engineering,2018,54(12):184.)

[7] 唐伟,杜凤山,文杰,等. 镀锡板翘曲控制策略研究与应用[J]. 钢铁,2019,54(12):55. (TANG Wei, DU Feng-shan,WEN Jie,et al. Research and application of warping control strategy on tinplate[J]. Iron and Steel,2019,54(12):55.)

[8] Masui T,Kaseda Y,Ando K. Warp control in strip processing plant[J]. ISIJ International,1991,31(3):262.

[9] Nicolas Guelton, Catherine Lope' S, Henri Sordini. Cross coating weight control by electromagnetic strip stabilization at the continuous galvanizing line of arcelormittal florange[J]. Metallurgical and Materials Transactions B,2016,47,2666.

[10] 许秀飞. 钢带热镀锌技术问答[M]. 北京:化学工业出版社,2007. (XU Xiu-fei. Hot Dip Galvanizing Technology for Steel Strip[M]. Beijing:Chemical Industry Press,2007)

[11] 中华人民共和国公安部. GB 51249—2017 建筑钢结构防火技术规范[S]. 北京:中国计划出版社,2018. (Ministry of Public Security of the People's Republic of China, et al. GB 51249—2017 Code for Fire Safety of Steel Structures in Buildings [S]. Beijing:China Planning Publishing House,2018.)

[12] 徐秉业. 弹塑性力学及其应用[M]. 北京:机械工业出版社,1984. (XU Bing-ye. Elastoplastic Mechanics and Its Applications[M]. Beijing:China Machine Press,1984.)