

重轨万能连轧变形计算的数学模型及其应用

金 梁¹ 余驰斌¹ 叶传龙¹ 芦忆萱¹ 熊建良² 董茂松²

(1 武汉科技大学材料与冶金学院, 武汉 430081; 2 武汉钢铁集团公司, 武汉 430081)

摘要 分析了重轨万能轧制精轧机组 UR、ER/EF 和 UF 三机架的变形特点, 并建立了相应的数学模型。对 U71Mn 钢(% : 0.7C、1.0Mn、0.1Cr) 60 kg/m 重轨的连轧计算结果表明, 模拟值接近设计值, 轨头和轨底宽度中间道次误差分别为 0.13% ~ 0.66% 和 0.45% ~ 1.3%, 较好地反映了轧件轨头和轨底宽度的变化趋势。

关键词 重轨 万能轧机 变形计算

Math Model for Deformation Calculation of Universal Tandem Rolling of Heavy Rail and Its Application

Jin Liang¹, Yu Chibin¹, Ye Chuanlong¹, Lu Yixuan¹, Xiong Jianliang² and Dong Maosong²

(1 College of Material and Metallurgy Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081; 2 Wuhan Iron and Steel Group Co., Wuhan 430081)

Abstract The deformation characteristics of UR, ER/EF and UF three racks of universal tandem finishing-rolling heavy rail are analyzed and the correspondent math models are established. The calculated results for tandem rolling of steel U71Mn (% : 0.7C, 1.0Mn, 0.1Cr) 60 kg/m heavy rail show that the simulated value is quite close to the design value, the errors of width of rail head and base in middle passes are respectively 0.13% ~ 0.66% and 0.45% ~ 1.3%, which better reflect the variation tendency of width of rail head and base of rolling stock.

Material Index Heavy Rail, Universal Mill, Deformation Calculation

全万能轧机^[1~3]轧制重轨采用矩形坯, 在成品万能轧机上采用全万能孔型。其工艺流程为: 连铸坯→步进梁式加热炉→高压水除鳞→BD1 粗轧→BD2 粗轧→UR1、ER1 万能粗轧→ER2、UR2 万能中轧→UR3、EF、UF 全万能精轧→精整→成品。全线采用刚性连接, 缩短了重轨的加工周期, 生产效率大幅提高。

钢较接近, 通过假设和数学推导的办法^[4]获得了头部延伸数学模型。

$$\Delta F = C_1 \cdot \Delta V - \Delta H \quad (1)$$

式中: ΔF - 头宽展量; ΔV - 头压下量; ΔH - 腰压下量; C_1 - 宽展系数。

1 重轨万能轧制变形计算数学模型

1.1 UR 变形分析及数学模型

在计算时, 把轧件分成轨头、轨腰和轨底 3 部分(图 1a)进行研究。

轨腰近似的辊轧制, 压下可运用板带材或箱型孔的压下公式: $\Delta h = H_{\text{腰部}} - h_{\text{腰部}}$, 而相应产生的宽展, 由于受到轨头和轨底的约束, 可近似认为 $\Delta b = 0$ 。

轨头变形和万能轧制 H 型

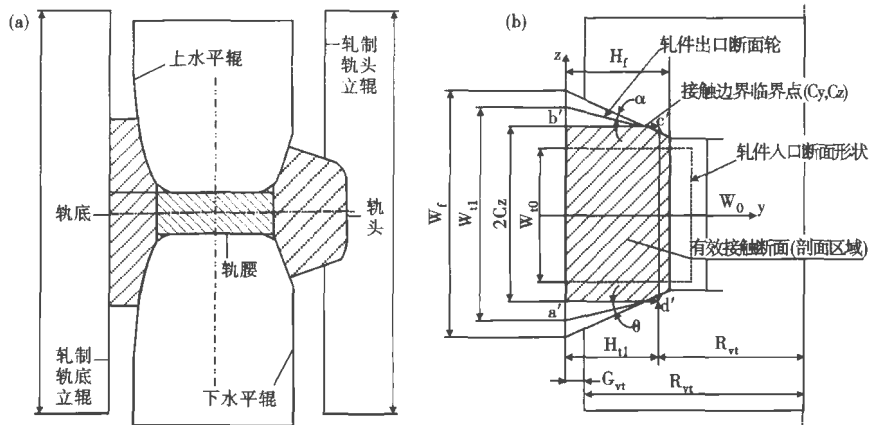


图 1 (a) UR 孔型轧制简图; (b) 轨头立辊简化示意图

Fig. 1 (a) Schematics of rolling in UR pass; (b) Simplified schematics of vertical roll for rail head

如图 1(b) 所示, 出口断面上轧件的应力自由表面不和箱形孔型的侧壁接触, 可认为该表面是倾斜的平面, 斜面的倾角 θ 随着最大宽展值 Δb 的不同从 0 到 α 变化。所以 θ 表达式^[5] 为:

$$\theta = W_f \alpha \quad (2)$$

式中: 加权系数 $W_f = \frac{\Delta b}{2H_f \tan \alpha}$; H_f - 孔型的高度; α - 箱型孔型的侧壁斜度。

出口轧件宽度 W_{f1} 与入口轧件宽度 W_{f0} 的关系式为: $W_{f1} = W_{f0} + \Delta b$; 箱型孔型宽度 $W_f = W_{f0} + 2H_f \tan \alpha$ 。

当轧件在孔型中无宽展时, 加权系数为 0, 所以 θ 为 0。当轧件变形后充满孔型时, 出口轧件的宽度 W_{f1} 等于箱型孔型的宽度 W_f , 所以最大宽展值 Δb 为 $2H_f \tan \alpha$, 因此加权系数为 1, θ 正好等于 α 。

轧件在箱型孔型中的宽展系数 β 可以由修正后的斯米尔诺夫公式求得:

$$\beta = 1 + m C_0 \left[\frac{1}{\eta} - 1 \right]^{C_1} A^{C_2} a_0^{C_3} a_k^{C_4} \delta_0^{C_5} \phi^{C_6} (\tan \alpha)^{C_7} \quad (3)$$

式中: $A = \frac{R_w - H_f + G_w}{H_f}$; $a_0 = \frac{H_{f0}}{W_{f0}}$; $\frac{1}{\eta} = \frac{H_{f0}}{H_f}$; $C_0 \sim C_7$ 均根据轧制系统所取的系数; A - 轧辊折算直径; a_0 - 轧前轧件的轴比; a_k - 孔型轴比; δ_0 - 按轧制顺序前一孔型的充满度; ϕ - 接触表面的摩擦指数; α - 箱型孔侧壁斜度; m - 轧件材料影响系数^[6]; 本文 60 kg/m 重轨为 U71Mn; m 值为 1.4; G_w - 立辊的辊缝值; R_w - 立辊的最大直径; H_{f0} - 轧件的入口高度。

轨底是平辊轧制, 但是金属流动情况基本和轨头轧制相近, 同样受到立辊压下和腰部宽展的影响。同样获得腿部延伸数学模型。

$$\Delta F = C_1 \cdot \Delta V - \Delta H \quad (4)$$

式中: ΔF - 底宽展量; ΔV - 底压下量; ΔH - 腰压下量; C_1 - 宽展系数。

通过几何推导的方法获得了重轨腿部宽展系数的求解公式^[7]:

$$\beta_f = \frac{(1 + \lambda_1)^2}{1 + \lambda_1 \xi + (\xi - 1) d_1 / 2H_{f1}} - \frac{\lambda_1}{\xi} \quad (5)$$

式中: λ_1 - 轧件腰腿面积比值; d_1 - 来料腰厚; ξ - 腰腿延伸比; H_{f1} - 来料腿宽。

1.2 ER/EF 变形分析及数学模型

ER/EF 孔型(图 2a) 是开口对称的二辊轧制, 接触面积亦可近似地按平均高度法公式来计算, 此

时取压下量和轧辊半径均为平均值 $\bar{\Delta h}$ 和 \bar{R} , 即:

$$\bar{\Delta h} = \frac{F_H}{B} - \frac{F_h}{b} \quad (6)$$

式中: F_H 、 F_h - 分别为轧前、轧后轧件断面面积; B 、 b - 分别为轧前、轧后轧件的最大宽度。

ER 孔中轧件的宽展也可以分轨头、轨腰和轨底 3 部分考虑。因为腰部无压下, 则尺寸与前一道次的相同, 根据宽展公式, 无压下即无宽展, 从而不存在延伸, 但是实际情况却是轨腰和轨头有非常接近的延伸, 那就表示轨头和轨底的金属有一部分流动到了轨腰而变成轨腰的延伸, 而一部分则成为轨头和轨底的宽展。可应用横向宽展变形模型- 巴赫契诺夫公式, 该公式的导出是根据移动体积与其消耗功成正比的关系, 即: $\frac{V_{\Delta b}}{V_{\Delta h}} = \frac{A_{\Delta b}}{A_{\Delta h}}$ (7)

式中: $V_{\Delta b}$ 、 $A_{\Delta b}$ - 分别为向宽度方向移动的体积与其所消耗的功; $V_{\Delta h}$ 、 $A_{\Delta h}$ - 分别为向高度方向移动的体积与其所消耗的功。

从理论上导出宽展公式, 忽略宽展的一些影响因素后得出实用的简化公式如下:

$$\Delta b = 1.15 \frac{\Delta h}{2H} \left(\sqrt{R \Delta h} - \frac{\Delta h}{2f} \right) \quad (8)$$

摩擦系数 f 可按下式计算:

$$f = k_1 k_2 k_3 (1.05 - 0.0005 t) \quad (9)$$

式中: k_1 - 轧辊材质与表面状态的影响系数; k_2 - 轧制速度影响系数; k_3 - 轧件化学成分影响系数; t - 轧制温度/°C。

1.3 UF 变形分析及数学模型

UF 孔(图 2b) 是半万能孔型, 由上下平辊和轨底立辊组成的 3 辊轧制, 上下平辊对轨腰和轨头进行压下, 而立辊对轨底进行压下。根据轧件的变形特点, 把轧件头和腰看成是一个整体, 则平均压下为: $\bar{\Delta h} = \frac{F_H}{B} - \frac{F_h}{b}$ 。

在平辊上轧制时, 横向变形阻力仅为轴向上的外摩擦力, 而在孔型中轧制时由于有孔型侧壁, 使横向变形阻力不只决定于外摩擦力且与孔型侧壁上的正压力有关, 从而影响到轧件的纵横变形比。图 2(c) 孔型中的横向阻力为: $W_2 = N_2 + T_2$ (10)

比在平辊轧制时的横向阻力大, 因此宽展减小, 而延伸增加。而在靠近中轴线的地方受到孔型壁的约束, 再者压下比较小, 宽展超过孔型头部的可以忽

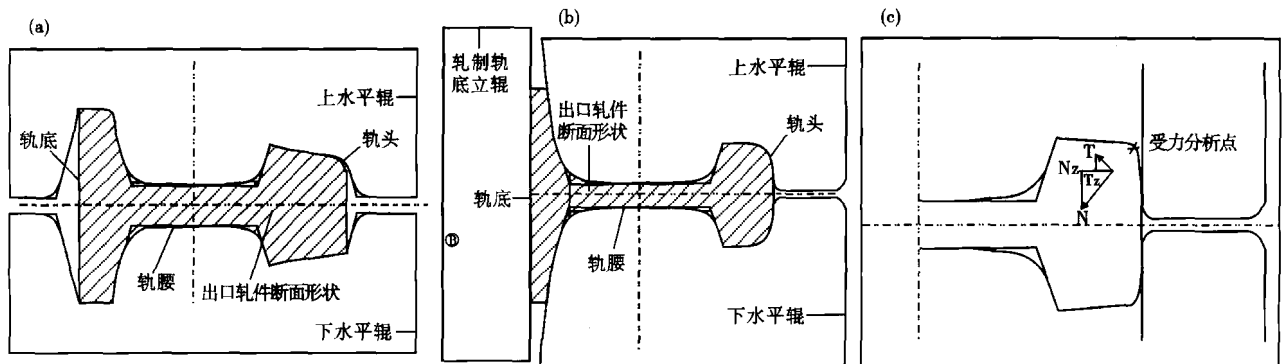


图2 (a)ER/EF孔型轧制简图;(b)UF孔型轧制简图;(c)轨头受力图

Fig. 2 Schematics of rolling in ER/EF pass (a) and in UF pass (b); figure of force at rail head (c)

略不计。

2 变形计算及分析

本文以轧制 60 kg/m 重轨为例,原料钢种为 U71Mn,主要成分为 0.7% C、1.0% Mn、0.1% Cr。轧件进入万能机组时的轧制温度为 1 014 ℃。轨底宽度、轨头宽度及横截面积计算结果变化趋势如图 3 所示。

图 3(a)为连轧过程腿部宽度的变化。UR 道次

金属流动比较复杂,误差为 0.13% ~ 0.66%,而 UF 轨底宽度误差只有 +0.2 mm,符合重轨轨底宽度允许偏差(+1.0 ~ -0.5 mm)的要求。

头部宽展(图 3b)在 UR 段的误差为 2.6% ~ 6.8%,小于在轧制过程中的允许误差 20%。

轧件的横截面积(图 3c)模拟值的误差主要是在 ER 和 UR 段,为 0.45% ~ 1.3%,在允许误差范围之内。

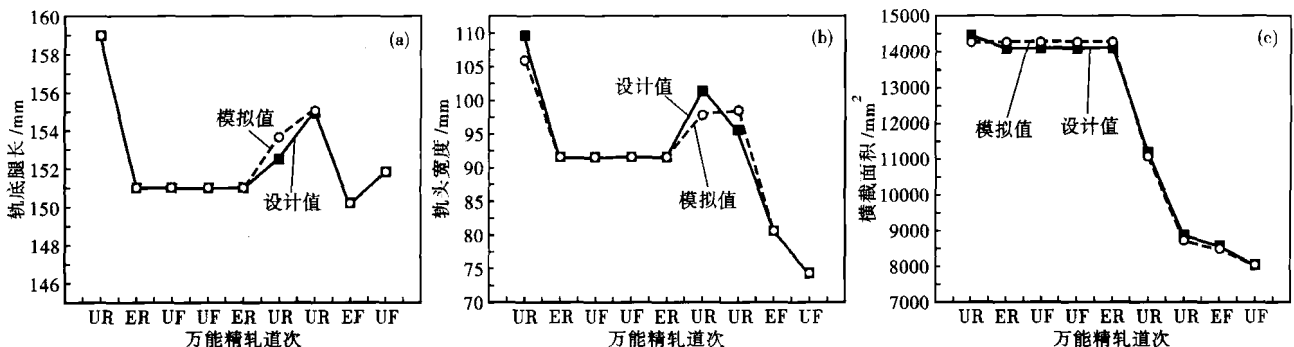


图3 重轨连轧过程轨底宽度(腿部宽度)(a),轨头宽度(b)和横截面积(c)的变化

Fig. 3 Variation of base width (flange spread) (a), head width (b) and cross sectional area (c) in tandem rolling of heavy rail

3 结论

变形模型基本模拟了轨头和轨底宽展的变化规律,较为精确,中间道次误差大小分别为 0.13% ~ 0.66% 和 0.45% ~ 1.3%,而成品的轨头和轨底宽度与设计值的误差分别为 0 和 0.2 mm,均在误差允许范围之内。

参考文献

- Heller W. Rail Production at Krupp Stahl AG. Steel Times, 1982(4): 184
- 吴迪,赵宪明. 万能孔型轧制高精度重轨的研究. 轧钢, 2000, 17(3): 12

- 王艳敏,吴迪,赵宪明,等. 60 kg/m 高精度重轨的万能轧制及有限元模拟. 钢铁研究, 2006, 34(4): 42
- 土屋健治,加茂川喜郎,土屋孝男,等. 型钢ミル 计算制御システム. 铁と钢, 1976, 62(6): 92
- 董永刚,张立志,宋剑锋. 应用刚塑性体的变分原理求解钢轨万能轧制过程的力能参数. 北京科技大学学报, 2008, 30(2): 169
- 薛懿德,高崇. 特殊钢压力加工. 北京:冶金工业出版社, 2000
- 赵松筠,唐文林,戴浩. 在万能孔型中轧制 H 形轧件是凸缘变形的研究. 钢铁, 1985, 20(9): 25

金 梁(1983-),男,研究生,材料成型工艺和计算机模拟研究。

收稿日期:2009-05-11