

82B 钢 4 道次预精轧过程的计算机模拟和分析

林希峰 胡衍生

(武汉科技大学钢铁冶金及资源利用省部共建教育部重点实验室, 武汉 430081)

摘要 采用非线性有限元分析软件 ABAQUS, 通过建立的线材与轧辊的 3 维热机耦合模型, 对钢厂 82B 钢 (/% : 0.79 ~ 0.86C, 0.15 ~ 0.35Si, 0.60 ~ 0.90Mn, ≤ 0.030S, ≤ 0.030P) Φ20 mm 至 Φ16.5 mm 4 道次预精轧过程中轧件的温度场、应力-应变场和轧制力进行数值模拟和分析。结果表明, 数值模拟结果与实测结果相符; 预精轧过程轧件心部温度和表面温度的差值为 ~130 °C; 运用该模型对现场轧制过程中的前滑进行了分析, 得出了影响前滑的因素主要有延伸系数、轧制孔型尺寸、轧制速度以及辊径与轧件厚度比值。

关键词 82B 钢 软件 ABAQUS 数值模拟 预精轧 温度场 热机耦合 前滑

Computer Simulation and Analysis on Four Pass Pre-finishing Rolling Process of Steel 82B

Lin Xifeng and Hu Yansheng

(Key Laboratory for Ferrous Metallurgy and Resources Utilization of Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081)

Abstract The numerical simulation and analysis on temperature field, stress-strain field and rolling force for Φ20 mm to Φ16.5 mm 4 pass pre-finishing rolling process of steel 82B (/% : 0.79 ~ 0.86C, 0.15 ~ 0.35Si, 0.60 ~ 0.90Mn, ≤ 0.030S, ≤ 0.030P) at steelworks are carried out by using nonlinear finite element method analysis software ABAQUS and an established 3-dimensional thermo-mechanical coupling model between wire and roller. Results show that the simulated results conform to the measured results; The difference between center temperature and surface temperature of stock during pre-finishing rolling process is ~130 °C; and with using this model to analyze front-sliding during rolling at work-site, it is obtained that main factors to influence the front-sliding are elongation coefficient, rolling groove size, rolling speed and ratio between roll diameter and stock thickness.

Material Index Steel 82B, Software ABAQUS, Numerical Simulation, Pre-finishing Rolling, Temperature Field, Thermo-Mechanical Coupling, Front-Sliding

随着国内高速线材生产线技术的快速发展, 对应用广泛的 82B 线材的生产技术也提出了较高的要求, 虽然引进了国外的先进技术^[1-3], 但在生产过程中还出现一些新问题, 诸如轧件的内部变形、温度控制、应力变化以及轧制时伴有的前滑等, 这些都严重影响了轧件的性能。本文采用有限元方法^[4,5]对 82B 钢轧制过程进行了模拟和分析, 并利用该模拟研究平台, 对现场工艺进行分析。

1 基本假设以及热机耦合计算原理

基本假设条件为: (1) 轧件为变形体, 材料的物理性能参数随时间的变化而变化, 包括比热容、导热系数、摩擦系数、热膨胀系数、弹性模量; (2) 轧件的材质均匀, 为各向同性; (3) 轧辊定义为刚体, 没有变形; (4) 轧制接触摩擦过程采用库伦摩擦模型; (5) 材料遵循 Von Mises 屈服准则; (6) 塑性变形区内的行为服从流动准则和硬化定律。

为更加准确分析轧制过程温度和应力的变化规

律, 必须把温度场和应力场^[6]的分析综合考虑^[7]。通过 Lagrange 方法描述的与温度场相互耦合的非线性大变形热弹塑性分析的增量形式表达为: 对面积 S , 体积 V 的连续介质, 其能量守恒方程为:

$$\int_V \rho v_i \frac{\partial v_i}{\partial t} dV + \int_V \frac{\partial p}{\partial t} U dV = \int_V \rho (Q + b_i v_i) dV + \int_S (P_i v_i - H) dS \quad (1)$$

式中: v_i - 速度场; U - 内能; Q - 体积热流; b_i - 体积力; P_i - 单位上的边界力; H - 边界 S 上的单位面积的热流强度。

对体积 V 质量密度 ρ 的连续介质, 其积分形式的力平衡方程为:

$$\int_V \rho \left(b_i - \frac{\partial v_i}{\partial t} \right) dV = \int_S P_i dS; P_j = n_i \sigma_{ij} \quad (2)$$

式中: P_j - 轧制力; n_i - 表面 S 的单位法线方向; σ_{ij} - 柯西应力分量。将力平衡方程引入能量守恒方程 (1), 可得到热机耦合的能量守恒方程为:

$$\int \left\{ \rho \left(Q - \frac{\partial U}{\partial t} \right) + \sigma_{ij} \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right\} dV = \int H dS \quad (3)$$

2 建模及计算过程

2.1 轧件材料的物理性能参数和边界条件

热力耦合计算中,材料的导热系数和比热容均为温度的函数^[8-10],泊松比为 0.3,密度为 7 832 kg/m³,轧件的初始温度为 890 ℃(表 1 和表 2)。

轧件轧制过程的传热方式主要由辐射引起的热损失、变形热以及与轧件轧辊的接触传热 3 部分组成,其导热方程为:

$$\frac{\rho C}{k} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{\dot{q}}{k} \quad (4)$$

式中: ρ - 轧件密度/(kg · m⁻³); C - 比热容/[J · (kg · K)⁻¹]; k - 导热率/[W · (m · K)⁻¹]; \dot{q} - 内热源强度/(W · m⁻³),可表达为 $\dot{q} = \eta \bar{\sigma} \cdot \dot{\epsilon}$,其中 η - 塑性功向热量转换的百分数; $\bar{\sigma}$ - 等效应力; $\dot{\epsilon}$ - 等效应变速率。在第 3 种边界条件上。式(4)表达为:

$$-k \left[\frac{\partial T}{\partial x} l_x + \frac{\partial T}{\partial y} l_y + \frac{\partial T}{\partial z} l_z \right] = h(T - T_\infty) \quad (5)$$

式中: T_∞ - 环境温度/K; l_x, l_y, l_z - 分别为边界法向上

表 1 82B 钢的化学成分/%
Table 1 Chemical composition of steel B82 / %

C	Si	Mn	S	P
0.79 ~ 0.86	0.15 ~ 0.35	0.60 ~ 0.90	≤ 0.030	≤ 0.030

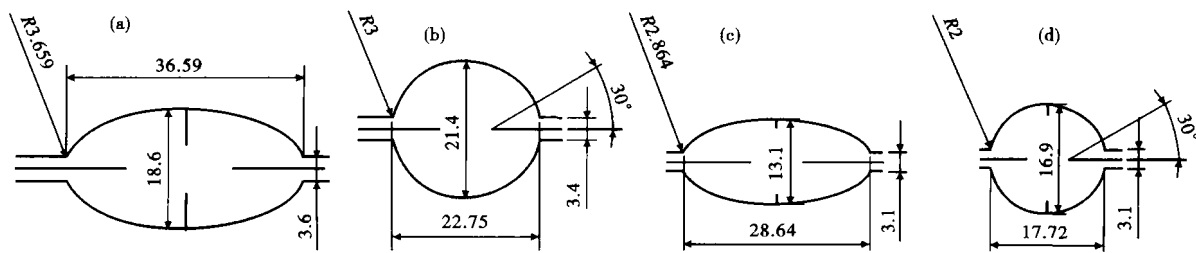


图 1 预精轧第 1(a),第 2(b),第 3(c)和第 4(d)道次孔型图

Fig. 1 Pass schedule of (a) first, (b) second, (c) third and (d) fourth pass of pre-finishing rolling process

3 模拟结果的分析

3.1 模拟结果与实测结果的比较

现场 82B 钢轧制工艺流程为:冷方坯(120 mm × 120 mm)加热→粗轧机组(8 道次)→中轧机组(8 道次)→预精轧(4 道次)→精轧(10 道次)→斯太尔摩空冷→减定径机组精整。

表 2 82B 钢的热物性能参数
Table 2 Thermo-physical parameters of steel B82

温度/℃	比热容/ [J · (kg · K) ⁻¹]	导热系数/ [W · (m ⁻² · K ⁻¹)]
400	529	32.32
500	559	30.00
600	635	25.96
700	756	28.80
745	1 080	34.81
800	577	23.38
900	624	25.68
1 050	720	26.92

的方向余弦; h - 导热系数/[W · (m⁻² · K⁻¹)].轧件与轧辊的接触面上发生热交换,此为热流连续,温度不连续的热阻问题,表达式为:

$$q = h_i(T - T_R) \quad (6)$$

式中: h_i - 热阻放热系数; T_R - 轧辊温度。对于大多数金属,其塑性变形功的 90% 可转化为热量,即热功转换系数为 0.9;轧件与轧辊有相对滑动,故有摩擦生热转换系数。

2.2 有限元模型

预精轧过程 4 道次中的各道次孔型尺寸见图 1。孔型的布置为椭圆-圆-椭圆-圆孔型,进入预精轧机组的轧件为 $\Phi 20$ mm,经预精轧机组轧制完成后其尺寸为 $\Phi 16.5$ mm,有限元建立模型见图 2。

模型考虑到计算的时间和轧件的对称性,取轧件的 1/4 作为研究对象。现场轧机的轧辊直径为 $\Phi 285$ mm,轧辊间距为 3 000 mm,轧辊几何模型尺寸与现场一致。

取线材长 100 mm,模型共划分为 1 500 个单元,中心线处的边界条件为绝热,在几何外表面施加第 3 类传热边界条件,初始温度为进入预精轧机组的温度,取其为 890 ℃,由反算法确定的 $\Phi 5.5$ mm 线材的导热系数为 450 W/(m² · K)。利用 ABAQUS 有限元软件计算得出的 $\Phi 5.5$ mm 线材的温度变化

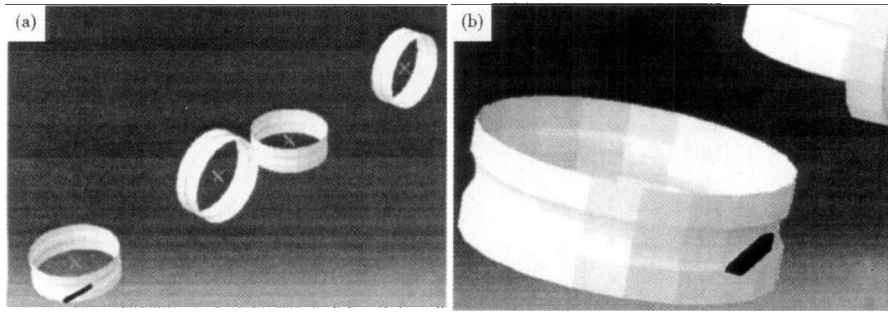


图 2 预精轧有限元模型
Fig. 2 Finite element method model for pre-finishing rolling process

曲线,以及用红外线温度测量仪对预精轧机组轧制过程中线材温度进行的分段测量,将同一点的模拟温度与实测温度进行比较(图 3a),得出模拟和实测结果比较符合。

整个轧制过程的温度变化如图 3(b)所示,在进行预精轧时轧件心部和表面的温度差异很大,这是由于轧制时轧件尺寸随着孔型尺寸变化很大,且在轧制时轧制速度很快所造成的。并且心部温度稳定上升,这是由于心部温升主要来自于塑性变形热,轧件的热传导所损失的热量只有很小的一部分。表面温度呈现齿状分布,是由于轧件与轧辊的接触换热和摩擦生热,轧件与空气的对流和辐射换热以及轧件塑性变形热综合作用的结果,图 3(b)可以得出,轧件表面和心部的温差在 130 ℃ 左右。

3.2 应力应变场的变化规律

由图 4(a)可见,轧件每经过一个道次等效塑性应变都会上升,其上升的幅度反映了轧件通过这个道次时的变形情况,预精轧道次中,轧件与水平轧辊接触通过椭圆孔型时,等效塑性应变的变化幅度比通过立辊圆孔型时的变化幅度小。根据图 4(a)中应变产生所对应的时间,也可以看出轧制时轧件的速度越来越快,使得应变水平梯度越来越小。

分析图 4(a)可知,轧件在轧

制过程中由于温度较高,在变形过程中能够自由变形,累计的等效应变较大;轧件表面所有与轧辊接触部分每个道次都在轧辊的直接作用下变形,累计的等效应变较大;轧件的侧面只有与平辊或者是立辊接触,没有与轧辊接触时变形是在其他部分的流动挤压下产生的,因而累计的等效应变较小。

3.3 轧制力的变化规律

轧件在穿过孔型时,轧件的压缩变形主要发生在两个与轧辊轴线相垂直的方向上,在椭圆形孔型中轧件的压下率要略高于圆孔孔型的,图 4(b)是轧

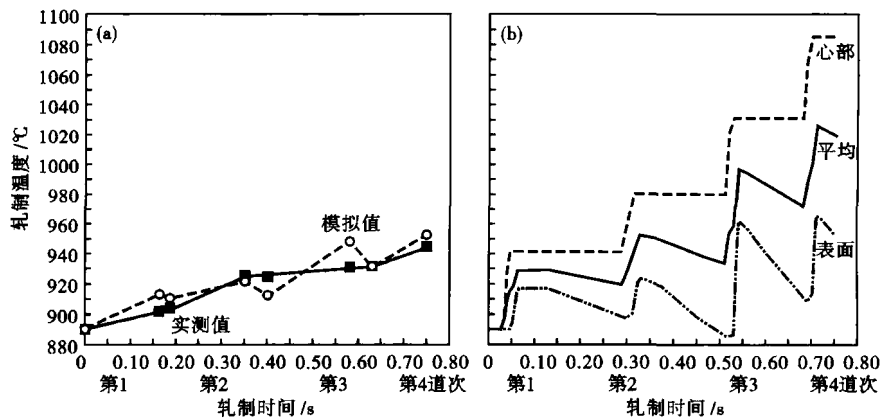


图 3 预精轧过程轧件温度模拟值和实测值的对比(a);模拟的轧件心部和表面温度

Fig. 3 Comparison between simulated value and measured value of stock temperature (a) and simulated center and surface temperature of stock (b) during pre-finishing rolling process

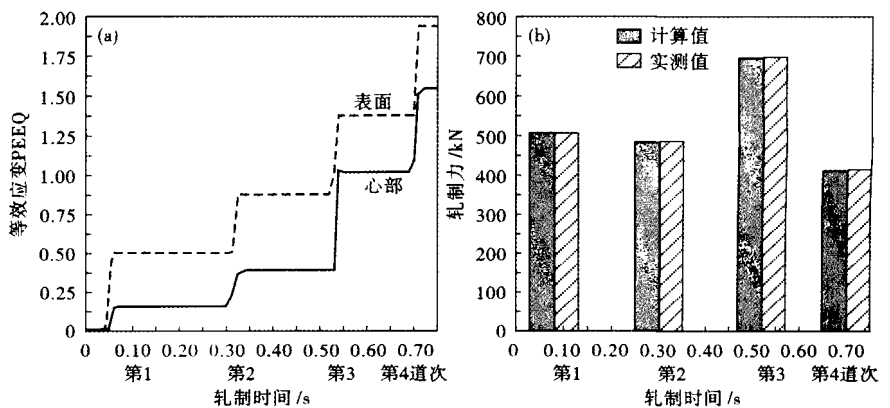


图 4 预精轧过程轧件心部和表面等效应变曲线(a);预精轧过程轧制力计算值与实测值对比(b)

Fig. 4 (a) Curves of equivalent strain of center and surface of stock during pre-finishing rolling process; (b) Comparison between calculated value and actual measured value of rolling force during pre-finishing process

制过程中,轧制压力在各道次的变化情况,在第3道次时的轧制力明显高于其他3个道次,这是由于进入第3道次的轧件变形量较大引起的。

根据图4(b)的变化规律可以看出,在椭圆形孔型中,轧制力比较大;随着孔型尺寸的减小,轧制力也变小,这是因为轧件变形量减少,轧制力也相应减小。图4(b)中还可看出,椭圆孔型时的轧制力比圆形孔型轧制力最大能大220 kN左右,最小也有5 kN左右。图4(b)中可以看出计算值与实测值基本一致,并且孔型的不同也决定了轧制力的大小。

3.4 现场轧制工艺中的前滑因素分析

连轧过程中要求必须保持各机架之间速度协调,各机架的速度比是在稳态条件下设计的结果,但是在实际连轧过程中,由于摩擦力、压力、轧制特点等因素的影响,速度会产生变化,如果不考虑速度的变化,则会破坏秒流量的相等条件,此时产生的后果可能是堆钢或是拉钢事故。为准确控制机架件张力,需要研究轧辊的名义线速度以及前滑因素^[11,12]。在有限元模拟平台下,得出相关参数值,以及前滑值(如表3所示)。

表3 轧件预精轧中前滑参数表
Table 3 Front-sliding parameters of stock in pre-finishing rolling

道次	轧制速度/(m·s ⁻¹)		接触弧长/ mm	轧件高- 宽比	工作辊径- 轧件厚度比	延伸系数	前滑值/ %
	理论	计算					
1	1.989	2.056	32.32	0.51	15.32	1.304	3.82
2	2.468	2.513	34.81	0.94	13.32	1.218	6.53
3	2.971	2.742	36.25	0.457	21.76	1.24	5.11
4	3.685	3.778	35.68	0.954	16.86	1.223	6.48

圆孔型侧壁对轧件的夹持作用较椭圆大,故圆孔型轧件的宽展较椭圆孔型小,而前滑则相反。椭圆进圆孔时轧件前滑随其延伸系数及工作辊径与轧件厚度比值增大而增加;圆孔进椭圆轧件前滑随其延伸系数及工作辊径与轧件厚度比值的增大而增加,并随其高宽比的增加而增加。

4 结论

(1)82B 钢预精轧时,接触热传导对轧件表面温度影响不大,机架间轧件的辐射散热使得表面温度有所降低,但是由于轧件轧制速度较快,变形较大,塑性变形功转化为塑性变形热并且大于轧件的

辐射和热交换,使得轧件温度又升高。预精轧过程轧件表面和心部的温差在130℃左右。

(2)82B 钢在预精轧过程中,其应变在缓慢中逐渐增加,并且表面的应变比心部的应变大,椭圆孔型的形变大于圆孔型。

(3)圆孔型侧壁对轧件的夹持作用较椭圆大,故圆孔型轧件的宽展较椭圆孔型小,而前滑则相反。椭圆进圆孔时轧件前滑随其延伸系数及工作辊径与轧件厚度比值增大而增加;圆孔进椭圆轧件前滑随其延伸系数及工作辊径与轧件厚度比值的增大而增加,并随其高宽比的增加而减少。

参考文献

- Slater R A C. Engineering Plasticity Theory and Application to Metal Forming Process. London: The Macmillan Press Ltd, 1977
- William F H. Metal Forming Mechanics and Metallurgy. Englewood Cliffs: Prentice-Hall PTR, 1983
- 韩静涛. 钢铁生产短流程新技术. 北京: 冶金工业出版社, 2000
- Galantucci L M, Tricarico L. Thermo-Mechanical Simulation of a Rolling Processing With an FEM Approach. Journal of Materials Processing Technology, 1999, 92-93: 494
- 刘升, 牛海云, 杭乃勤, 等. 高速线材10道次精轧过程的有限元模拟. 特殊钢, 2010, 31(2): 14
- 陈火红, 薛小香, 杨剑, 等. 新编 Marc 有限元实例教程. 北京: 机械工业出版社, 2007
- 蔡丹, 赵嘉蓉. 82B 线材控冷工艺及性能模拟. 武汉科技大学学报(自然科学版), 2003, 26(1): 6
- 张云祥, 杭乃勤, 余驰斌, 等. 82B 钢奥氏体等温相变动力学方程的测定. 武汉科技大学学报(自然科学版), 2005, 28(4): 323
- Jaroslav M, Henryk D, Marcin K. Theoretical Analysis of the Asymmetric Rolling of Sheets on Leader and Finishing Stands. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 138(1-3): 183
- 杭乃勤, 万五霞, 王伯文, 等. 82B 线材在斯太尔摩线上的温度场模拟. 武汉科技大学学报(自然科学版), 2009, 32(3): 229
- 王廷薄, 齐克敏. 金属塑性加工学. 北京: 冶金工业出版社, 2001
- 王栋, 韩变枝, 王忠文. 铝杆连轧过程中前滑现象的理论研究. 机械工程与自动化, 2008, 12(6): 90

林希峰(1974-), 男, 博士研究生, 1998年武汉科技大学毕业, 高精轧制工艺研究。

收稿日期: 2011-10-16