

高速线材 10 道次精轧过程的有限元模拟

刘 升¹ 牛海云² 杭乃勤¹ 陈鼎勋¹

(1 省武汉科技大学材料与冶金学院, 武汉 430081; 2 济源职业技术学院, 济源 454650)

摘 要 通过对钢厂高速线材热连轧过程的传热分析, 借助 ABAQUS 软件建立了线材与轧辊的 3 维热机耦合模型, 对 42A 钢(0.39% ~0.46% C)从 $\Phi 16$ mm 精轧至 $\Phi 5.5$ mm 轧材的 10 道次精轧过程的温度场, 应力-应变场和轧制力进行了模拟。得出精轧后轧件心部温度升高 130 $^{\circ}\text{C}$, 表面温度降低 10 $^{\circ}\text{C}$, 轧件降温主要是轧件的热辐射和水冷造成的。10 道次轧制力的计算值与实测值的相对误差为 1.88% ~4.50%。

关键词 高速线材 精轧 温度场 ABAQUS

Finite Element Simulation on 10 Passes Finishing Process of High-Speed-Rolled Wire Rod

Liu Sheng¹, Niu Haiyun², Hang Naiqin¹ and Chen Dingxun¹

(1 College of Materials Science and Metallurgical Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081; 2 Jiyuan Vocational and Technical College, Jiyuan 454650)

Abstract The simulation of temperature field, stress-strain field and rolling force of stock during 10 passes finishing rolling process from $\Phi 16$ mm rolling to $\Phi 5.5$ mm wire of steel 42A (0.39% ~0.46% C) has been carried out by analysis on heat transfer in high speed continuous rolling process at steel works and by means of established 3D thermo-mechanical coupling model between wire and roller with ABAQUS software. It is obtained that after finishing rolling the temperature of center of stock increases by 130 $^{\circ}\text{C}$ while the temperature of surface of stock decreases by 10 $^{\circ}\text{C}$, which is caused by radiation of stock-self and water cooling. The relative error between calculated and measured value of rolling force in 10 passes is 1.88% ~4.50%.

Material Index High-Speed-Rolled Wire Rod, Finishing Rolling, Temperature Field, ABAQUS

南昌航空大学的董洪波等利用有限元软件对轧制过程进行了模拟^[1], 取得了一定成果, 使得优化设计和提高产品质量成为可能。为更加接近实际过程, 本实验采用弹塑性有限元模型, 依据 ABAQUS 软件建立 10 道次轧制有限元模型, 并研究了应力场、应变场、温度场和轧制力的变化情况。

1 有限元模型

1.1 几何模型基本假设条件和建立

本文模型的假设条件有:

(1) 轧制为变形体, 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。

精轧过程中 10 道次各道次孔型尺寸如图 1 所示, 末机架孔型直径为 $\Phi 5.5$ mm。轧件进入精轧机组前的直径为 $\Phi 16$ mm, 考虑到计算时间和轧件的对称性, 因此取轧件的 1/4 作为模型的研究对象。

轧辊定义为刚性体, 轧辊模型直接取左辊和上辊为研究对象, 并且其几何形状用解析刚体描述, 计

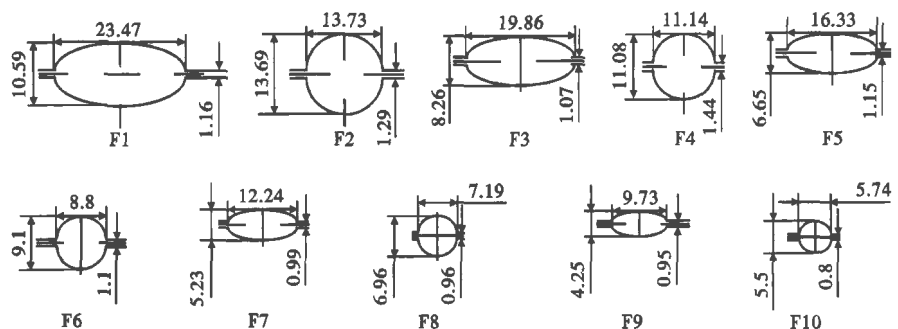


图 1 10 道次精轧孔型图 Fig. 1 Schematics of roll-pass for 10 passes finishing rolling

算证明,解析刚体更有利于曲面法线和摩擦的计算,其计算精度高,还可以节约计算时间。现场前面5道次的轧辊直径为Φ228.38 mm;后面5道次为Φ170.66 mm。轧辊间距5道次和6道次之间距离为798 mm,其余均为820 mm,在模拟过程中,轧辊几何模型尺寸与现场一致,轧辊间距适当缩小。有限元模型如图2所示。

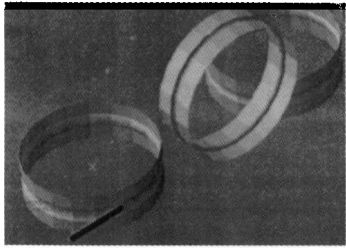


图2 有限元模型
Fig.2 Model of finite element method

1.2 轧件材料的物理性能参数

在热力耦合计算中,材料的弹性模量、热膨胀系数、导热率和比热容均为温度的函数,轧件材料的泊松比为

0.3,密度7 800 kg/m³,轧件初始温度900 ℃。轧件成分以及与物理性能参数分别见表1和表2。

表1 42A 钢化学成分/%
Table 1 Chemical composition of steel 42A /%

C	Si	Mn	P	S
0.39~0.46	0.15~0.35	0.30~0.60	<0.03	<0.03

1.3 热机耦合的原理

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:对边界条件 S,体积 V 的连续介质,其能量守恒方程可表示如下:

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

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

表2 轧材热物性能参数
Table 2 Thermo-physical parameters of rolling material

温度/℃	比热容/[J·(kg·K) ⁻¹]	热传导率/[W·m ⁻² ·K ⁻¹]
200	533	43.2
300	568	41.4
400	611	39.1
500	677	36.7
600	778	34.1
800	716	30.0
1 000	695	32.8
1 500	778	34.1

对体积为 V、质量密度为 ρ 的连续介质,其积分形式的力平衡方程为:

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

$$P_j = n_i \sigma_{ij} \quad (3)$$

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:

$$\int_V \left\{ \rho \left(Q - \frac{\partial U}{\partial t} \right) + \sigma_{ij} \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right\} dV = \int_S H dS \quad (4)$$

1.4 边界条件

轧件在整个轧制过程中,温度的边界条件是很重要^[2-4]的。本文计算温度场时,热边界条件的选取如下:

(1) 取实际轧件的1/4进行研究,假设轧件几何对称面的两侧温度分布也是对称的,在对称面上没有热量的交换,因此认为对称面上为绝热边界条件。

(2) 轧制过程的传热方式主要由3部分组成:由于辐射引起的轧件在各道次之间的热损失、轧制过程中的变形热以及与轧辊接触时轧件向轧辊的传热。轧件在轧制过程中的热传导方程为:

$$\frac{\rho C}{k} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{\dot{q}}{k} \quad (5)$$

式中: ρ - 轧件密度/(kg·m⁻³); C - 比热容/[J·(kg·K)⁻¹]; k - 热导率/[W·(m·K)⁻¹]; \dot{q} - 内热源强度/(W·m⁻³),可表达为:

$$\dot{q} = \eta \bar{\sigma} \cdot \dot{\bar{\epsilon}}$$

式中: η - 塑性功向热量转换的百分数; $\bar{\sigma}$ - 等效应力; $\dot{\bar{\epsilon}}$ - 等效应变速率。

在第三种边界条件上。式(1)可表达为:

$$-k \left[\frac{\partial T}{\partial x} l_x + \frac{\partial T}{\partial y} l_y + \frac{\partial T}{\partial z} l_z \right] = h(T - T_\infty) \quad (6)$$

式中: T_∞ - 环境温度/K; l_x, l_y, l_z - 分别为边界法向上的方向余弦; h - 热传导系数/[W·(m²·K)⁻¹]。

一般情况取值 0.07~0.1 kW/(m²·K),本文采用现场数据 0.08 kW/(m²·K)。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:

$$q = h_i(T - T_R) \quad (7)$$

式中: h_i - 热阻放热系数; T_R - 轧辊温度。一般情况下取 9.5~15 kW/(m²·K),本文采用现场的数据取 9.5 kW/(m²·K)。其他参数设定如下:环境温度

度 20 ℃; 轧辊温度 40 ℃; 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, 本模型中取值 0.5。

2 模拟结果及分析

2.1 轧制过程中应力应变的变化

根据图 3(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, 在精轧的道次中, 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。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累计的等效应变较大; 轧件的侧表面累计的等效应变较小。

2.2 轧制温度

由图 3(b) 可见, 在进行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大及轧制速度快造成的。

图 3(b) 中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。

实际测得的数据: 精轧入口处温度 890 ℃, 出口处温度 850 ℃。

2.3 轧制力的变化情况

根据表 3 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。表 3 还可

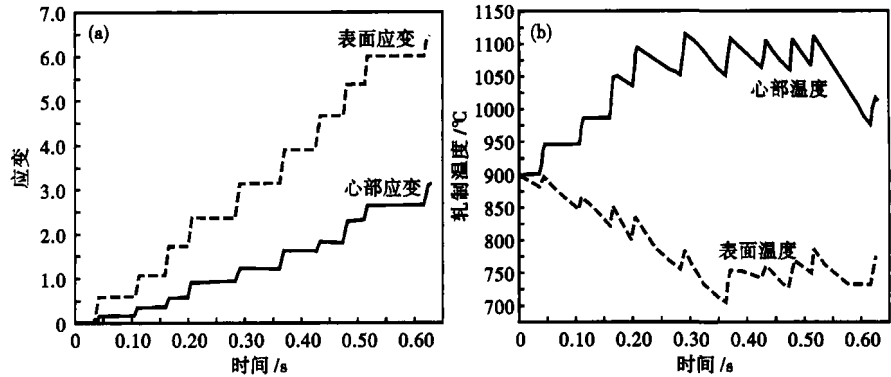


图 3 精轧过程轧件等效应变(a)和温度(b)曲线
Fig.3 Curves of equivalent strain (a) and temperature (b) of stock during finishing rolling process

看出, 椭圆孔型时的轧制力比圆形孔型轧制力大 17 kN 左右, 最小也有 2 kN。

2.4 现场实测数据与模型数据对比

钢坯经预精轧出来后, 进入精轧机组 10 道次中轧制, 所测得的精轧入口温度为 900 ℃, 模拟过程中所计算出各道次的最大轧制力以及现场所测得的数值比较如表 3。由表 3 可见, 1~9 道次轧制力计算值与实测值的相对误差为 2.20%~4.50%, 第 10 道次相对误差为 1.88%。

3 结论

(1) 轧件轧制完成后心部温度升高 130 ℃, 表面降低 10 ℃, 并且在轧制过程中轧件表面和心部的温差较大, 最后两者温度的差距会越来越小, 这主要是因为轧件的热辐射和水冷造成的。

(2) 10 道次轧制力计算值与实测值的相对误差为 1.88%~4.50%。

参考文献

- 董洪波, 王高潮. 第十届全国塑性工程学术年会、第三届国际塑性加工先进技术研讨会论文集. 2007:48
- 隋凤利, 陈礼清, 刘相华, 等. Inconel 718 圆钢热连轧温度场的热力耦合分析. 轧钢, 2008, 25(6):25
- 吕军义, 章静, 阎军, 等. 高速线材热连轧过程温度场数值模拟. 塑性工程学报, 2007, 14(6):33
- 李茂. DEFORM 和 Marc 平台下棒线材热连轧过程的数值模拟: [学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2006

刘升(1984-), 男, 硕士研究生, 轧制工艺优化及计算机模拟。

收稿日期: 2009-09-18

表 3 轧件轧制力的实测与计算值

Table 3 Calculated value and measured value of rolling force of stock

机架号	轧辊直径/mm	轧辊速度/(m·s ⁻¹)	实测最大轧制力/kN	计算得到轧制力/kN	相对误差/%
F1	228.38	17.36	8.93	9.162	2.56
F2	228.38	21.51	1.75	1.799	2.58
F3	228.38	26.71	14.61	15.125	3.50
F4	228.38	33.13	3.4	3.542	4.20
F5	228.38	40.6	18.13	18.816	3.80
F6	170.66	50.17	1.49	1.521	2.20
F7	170.66	62.35	17.55	18.335	4.50
F8	170.66	77.25	3.12	3.194	2.40
F9	170.66	96.64	5.64	5.801	2.85
F10	170.66	105	2.33	2.368	1.88