

Q345C 钢连铸板坯热送热装过程中温度场和应力场模拟

王生朝 孙斌

(湖南工业大学冶金工程学院, 株洲 412007)

摘要 考虑板坯钢种弹性模量、导热系数、比热容及线膨胀系数对模拟精度的影响,通过 ABAQUS 有限元分析软件对 Q345C 钢 250 mm × 1 500 mm 单块连铸板坯冷却过程应力场和温度场进行模拟,经处理得出应力 (<20 ~ 148 MPa)、温度 (769 ~ 1 000 °C) 和时间 (0 ~ 1 200 s) 三者的关联信息。计算结果表明,板坯空冷温度沿宽度方向分布不均匀,板坯表层边部降温速率 0.46 °C/s,板坯表层距边部 200 mm 以外,基本具有相同的温降速率 (0.23 °C/s);铸坯堆垛空冷速度较低,约为 15 °C/h,和现场实测结果吻合。应将连铸坯从火焰切割机到板坯加热炉输送时间降到最短,以及增加保温措施,防止表面热应力过大而形成缺陷。

关键词 连铸板坯 温度场 应力场 导热系数 比热容 数学模拟

Simulation of Temperature Field and Stress Field of Steel Q345C Casting Slab during Delivery and Hot Charging Process

Wang Shengzhao and Sun Bin

(School of Metallurgical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007)

Abstract Based on considering the effect of slab steel elastic modulus, thermal conductivity, specific heat capacity and linear expansion coefficient on simulation precision, the simulation of stress field and temperature field of steel Q345C 250 mm × 1 500 mm single-piece casting slab during cooling process has been carried out by ABAQUS finite element analysis software to get the relative information between stress (<20 ~ 148 MPa), temperature (769 ~ 1 000 °C) and time (0 ~ 1 200 s). Calculated results show that the distribution of temperature of slab along width direction during cooling process is not uniform, the cooling rate of slab surface edge is 0.46 °C/s, but the slab distance from slab surface edge more than 200 mm basically has same cooling rate (0.23 °C/s); the cooling rate of slab stacking is rather low, it is about 15 °C/h, which conforms to measuring results in situ. The convey time from flame cut off machine for casting slab to heating furnace decreases to minimum with adopted holding measures to prevent defects formation being due to excessive thermal stress at slab surface.

Material Index Casing Slab, Temperature Field, Stress Field, Thermal Conductivity, Specific Heat Capacity, Math Simulation

连铸板坯无论在加热或者冷却过程中,同时存在内应力、相变以及温度三者耦合作用,三者的影响效果并非独立存在的,它们存在不同程度的相互作用^[1]。结合热装热送过程中连铸坯容易形成热裂纹质量缺陷,本课题对其进行仿真模拟,自板坯火焰切割至加热炉工序间,分析连铸坯的应力场、温度场与时间的相互关系,从中获得热装热送工艺的理论指导。

1 有限元模型

在 ABAQUS 模型树 part 中,建立连铸板坯尺寸 (mm) 为 250 × 1 500 × 8 000,材料为 Q345C 钢。钢板尺度上,长度的量级远超过宽度以及厚度,其温度于长度方向的梯度变化不作考虑,同时认为连铸板坯的左右两面以及上下两面的冷却环境一致,在冷却过程可通过对建立连铸板坯断面的二维瞬态传热过程数学模型。

1.1 板坯传热数学模型

对流及传导是连铸板坯表面和外部进行换热的基本模式。由 Fourier 传热定律 (heat transfer theorem) 和能量守恒定律 (energy conservation theorem)^[2],通过分析热连铸板坯空冷过程,以 dx, dy, dz 分别表示选取的微元体各方向尺寸,于微时间段 dt 期间,通过对微元体作能量平衡可知,对于各向同性体而言,其热传导瞬态温度场 $T(x, y, z, t)$ 符合下式:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}$$

式中: T - 温度/°C; t - 时间/s; x - 板坯宽度坐标值/m; y - 板坯厚度坐标值/m; $\alpha = k/\rho c$ 为材料导温系数,其中 ρ - 材料密度/(kg · m⁻³); c - 材料比热容/[J · (kg · K)⁻¹]; k - 材料热导率/[W · (m · K)⁻¹]; q - 凝固发生相变释放的潜热^[3-4]。

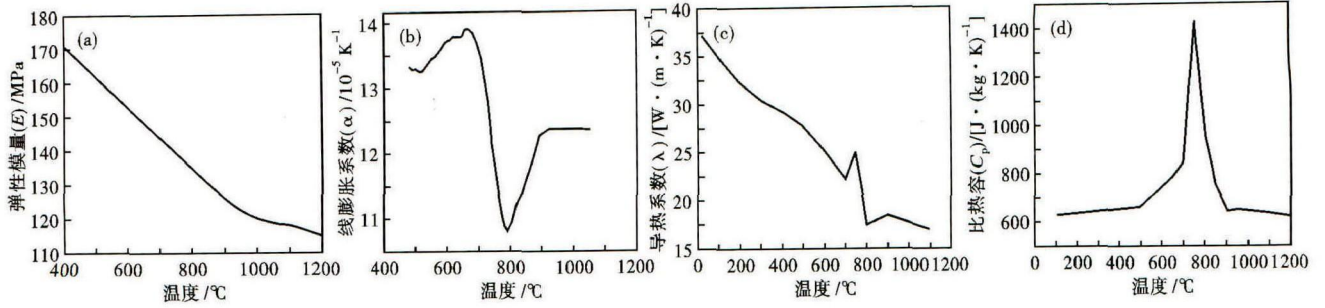


图 1 Q345C 钢弹性模量 E(a)、线膨胀系数 α (b)、导热系数 λ (c) 和比热容 C_p (d) 随温度变化曲线

Fig. 1 Curves of elastic modulus E (a), leaner expansion coefficient α (b), thermal conductivity λ (c) and specific heat capacity of steel Q345C changing with temperature

1.2 应力场模型

辊道输送时,连铸板坯无外热载荷作用,主要是因为温度梯度的存在而导致膨胀量差异,并形成热应力与热变形,所以分析考虑上述过程的应力/应变,应当划归于热弹塑性或者热弹性范围。如果应力超出了材料的屈服范围,其与应变将会形成非线性关系。

材料的 α (线膨胀系数)、 μ (泊松比)、 E (弹性模量),它们皆与温度(T)相关,其关系曲线如图 1 所示。求解出连铸板坯的温度场,依此计算应力随温度变化情况。对有限元模型应力求解过程中进行物性参数设定时,应当考虑到线膨胀系数受到诸如相变等因素的作用^[5-7]。

1.3 初始和边界条件

空冷状态下,热对流与热辐射是连铸板坯冷却首要换热形式。以板坯切割机出口温度为初值,此处为 1 000 °C 左右;将板坯同环境发生的辐射、板坯与空气发生的对流两种换热方程作为边界条件。取 $t = 0$ 时刻,以下式表征初始的边界条件:

$$T(x, y, z, 0) = T_0$$

在辊道输送或大气中静置的热板坯,基本认为经由对流和辐射两种形式产生特定的能量耗散。将

表 1 模拟 Q345C 钢的化学成分 / %

Table 1 Chemical composition of simulated steel Q345C / %

C	Si	Mn	P	S	Cu	Al	Als	Cr	Mo	Nb + V + Ti
0.13	0.25	1.38	0.018	0.006	0.04	0.036	0.033	0.027	0.003	0.057

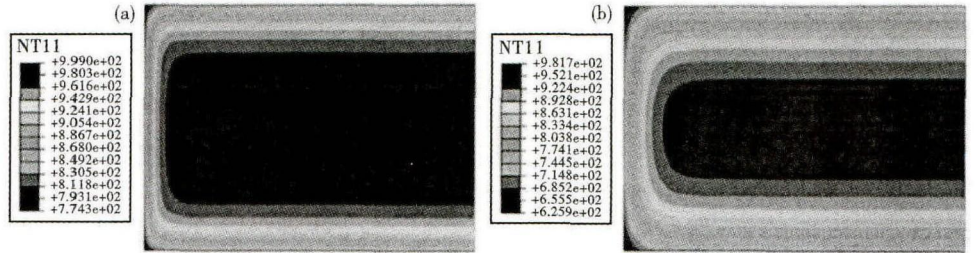


图 2 Q345C 钢 250 mm × 1 500 mm 板坯断面温度场:空冷(a)120 s 和 480 s(b)

Fig. 2 Temperature field of 250 mm × 1 500 mm slab cross section of steel Q345C air cooling for 120 s (a) and 480 s (b)

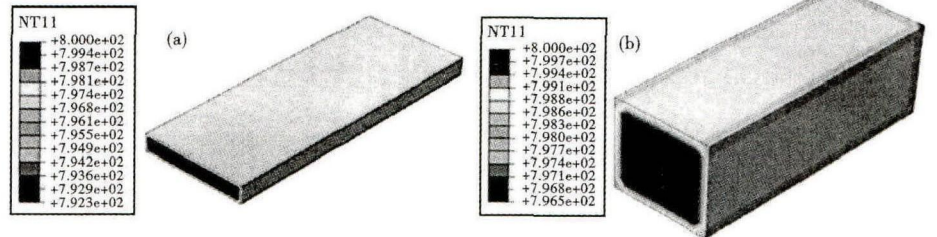


图 3 Q345C 钢 250 mm 单块板坯冷却 3 600 s (a) 和 6 块板坯堆垛冷却 6 000 s (b) 时温度分布云图

Fig. 3 Cloud figure of temperature distribution of 250 mm single slab cooling for 3 600 s (a) and 6 slab pieces stacking cooling for 6 000 s (b), steel Q345C

上述两个影响进行综合考虑,可用下式表示新的散热系数^[8]:

$$q_r = \sigma \cdot \varepsilon \cdot (T_w^4 - T_a^4) / (T_w - T_a)$$

$$q_\Sigma = q_r + q_c = \sigma \cdot \varepsilon \cdot (T_w^4 - T_a^4) / (T_w - T_a) + q_c$$

式中: σ - Stefan-Boltzmann 常数, $\sigma = 5.768 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; ε - 热连铸板坯的辐射率,由实验测得; T_a 、 T_w - 环境与板坯表面温度/K。

由于热物性参数随温度的变化,换热边界条件是一个高度非线性的数值,综合换热系数 q_s 的确定,需经多次拟合修正。实验室校准板坯冷却模型时,设定初始温度为 1 000 °C,温度拟合起始点以实测温度为准,设定周围环境平均温度为 25 °C。

2 试验材料及物性参数

以 Q345C 钢作为研究对象,化学成分如表 1 所示。借助于 ABAQUS 对其进行仿真模拟,该过程中将用到的物理量包括热膨胀系数、辐射换热系数、弹性模量、导热系数、泊松比、比热容、材料密度等。这些参数是和温度相关的函数^[9]。它们与温度的关系曲线如图 1。模拟方法采用顺序耦合对板坯温度场和应力场进行计算。

3 数值计算结果与分析

3.1 温度场计算结果分析

图 2 所示为 250 mm × 1 500 mm 连铸板坯的单坯冷却 120,480 s 时测得的断面温度场。单坯冷却 3 600 s 和 6 块堆垛冷却 6 000 s 云图如图 3(a, b)。表层沿宽度各点 240, 600, 960, 1 200 s 时温度分布如图 4(a), 可以看出距板坯边沿 200 mm 温降较快, 沿板坯宽向内温降较慢, 各部分温度同中点并无较大差异。图 4(b) 所示为板坯横断面中心温度、表层中点温度、边部温度与时间的关系。表 2 为热板坯的模拟值和现场用红外感应测温仪测得的温度。

分析曲线变化规律可知, 于初始 1 200 s 内表面温度下降较快, 是因为早期连铸板坯较高的温度, 此时板坯进行辐射传热的作用更为显著, 连铸板坯的

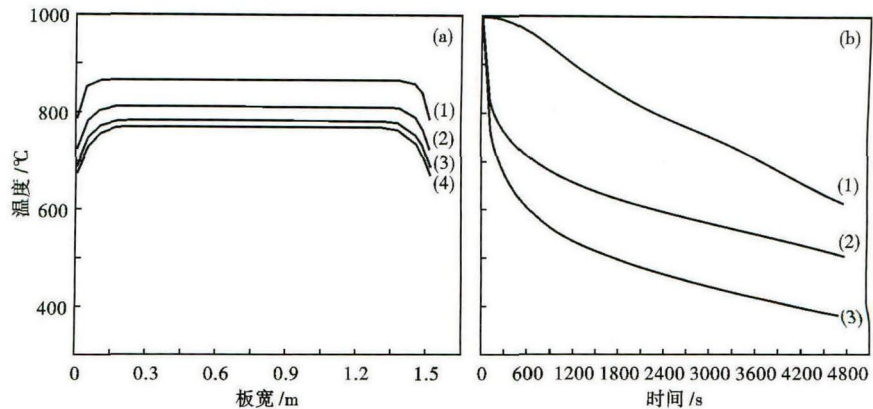


图 4 (a) 冷却 240 s(1), 600 s(2), 960 s(3) 和 1 200 s(4) 时板坯表层温度沿宽度的分布; (b) 板坯表层沿板宽边部(1), 中点(2) 和断面中心温度(3) 随冷却时间的变化

Fig. 4 (a) distribution of surface temperature along width of slab cooling for 240 s (1), 600 s (2), 960 s (3) and 1 200 s (4); (b) temperature of slab surface along slab width edge (1), surface center point (2) and cross section center (3) changing with cooling time

外部与内部温差也十分显著, 由图 2 和表 2 可知, 经过 1 200 s, 连铸板坯的表面温度温降已经达到 230 °C 左右, 计算平均值, 可知空冷条件下其降温的速率约为 0.23 °C/s, 角部的降温速率约为 0.46 °C/s。此后, 板坯中心与上表面中心点温度基本维持 120 °C 的差值, 其主要原因是由于辐射能力减弱。

3.2 应力计算结果分析

进行冷却时, 板坯内部温度较高内力表现为压应力, 表层则相反表现为拉应力。心部的压应力和表层的拉应力, 随开始空冷时较大的温度梯度而增加; 之后伴随不断缩小的温差, 内力随之降低。如图 5 所示, 为 250 mm × 1 500 mm 板坯仿真得到的 1 200, 3 600 s 后的断面应力场; 图 6(a) 所示为沿宽度方向连铸板坯表层 1/4 位置、1/2 位置(表层中点)、角部的热应力-时间变化关系。分析图 6 可得, 板坯角部以较快的速度降温, 不过其温度梯度不大, 热应力小于 20 MPa。在 768 °C 时, 表层应力达到峰

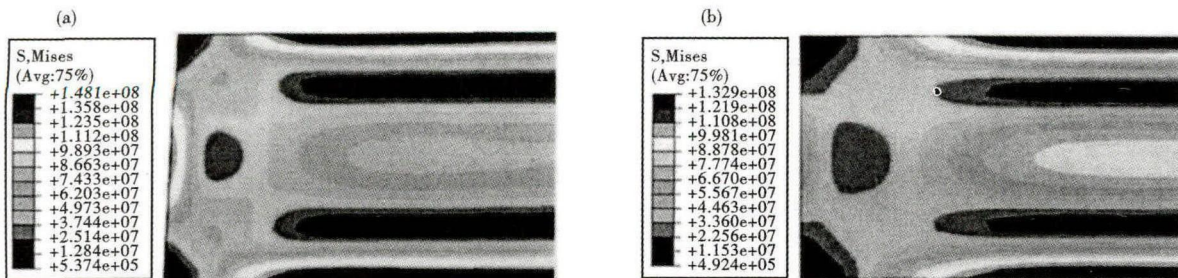


图 5 Q345C 钢 250 mm × 1 500 mm 板坯断面应力场: 空冷(a) 1 200 s 和(b) 3 600 s

Fig. 5 Stress field of cross section of 250 mm × 1 500 mm slab air cooling for 1 200 s (a) and 3 600 s (b), steel Q345C

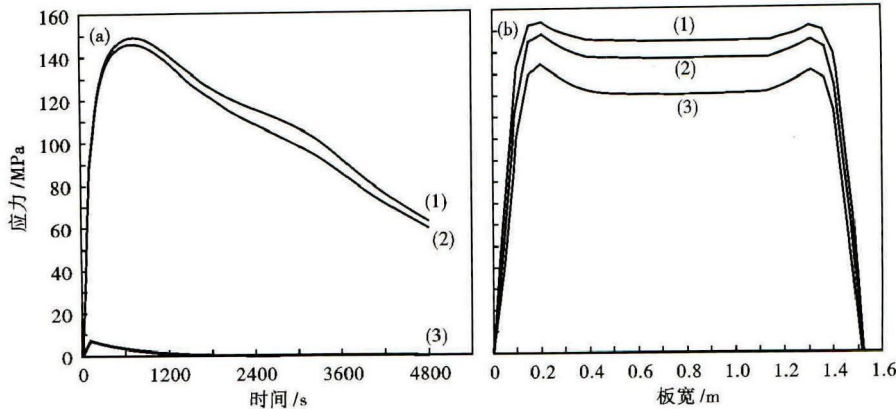


图 6 (a)板坯表层边部(1),中心(2)和1/4处(3)热应力随时间变化曲线;(b)空冷 600 s(1),1 200 s(2)和1 800 s(3)时板坯表层热应力沿宽度变化曲线
Fig.6 (a) thermal stress curves of slab surface edge (1), center (2) and 1/4 width changing with time; (b) thermal stress curves of slab surface along width of slab air cooling for 600 s (1) 1 200 s (2) and 1 800 s (3) changing

表 2 Q345C 钢 250 mm × 1 250 mm 板坯表层中心点温度的模拟值与实测值

Table 2 Simulated value and measured value of temperature at center of 250 mm × 1 250 mm slab surface of steel Q345C

时间 /s	模拟值 /℃	实测值 /℃
0	1 000	1 000
120	903	911
240	865	876
360	842	851
480	825	832
600	811	819
720	799	805
840	790	801
960	782	788
1 080	775	781
1 200	769	774

值148 MPa,应力则伴随降温到相变点,以及温度梯度逐步缩小,因此其等效应力也慢慢下降。

通过仿真过程数据可知,若冷速逐步增大,表层将产生更大的拉应力。因此热送热装工艺中引入保温辊道或者多坯堆冷的形式十分必要,尤其是自火焰切割机至加热炉工序间,将冷却速率降低,防止产生较大的温差,从而热应力减小,确保其最大值不大于材料的高温强度,特别对合金钢可以减少热送表面裂纹的产生可能。

4 结束语

(1)构建了自然空冷条件下单个连铸板坯的应

力场和温度场的模型,经过实测发现仿真数据有较高的可信度,在距离边部 200 mm 范围内的连铸板坯表层,其降温速度大体一致,平均温降速率为 0.23 ℃/s左右,而角部的降温速率约为 0.46 ℃/s。

(2)进行单个连铸坯空冷时,铸坯冷却太快将引起热应力过大,应力较大区域在沿板宽距边部 200 mm 以外,并且基本具有相同的应力值,其峰值达到 148 MPa。角部冷却速率虽大,热应力并不大,只有 20 MPa 左右。

湖南省科学技术厅科技计划项目资助 (2014GK3169)

参考文献

[1] 周娜,于明,王丙兴,等.中厚板控冷过程热-应力-组织耦合模拟分析[J].中国冶金,2008,18(4):28-29.
 [2] 蔡正,王国栋,刘相华,等.热轧带钢在冷却中温度与相变的耦合解析[J].塑性工程学报,2000,7(2):16-19.
 [3] 俞昌铭.热传导及其数值分析[M].北京:中国工业出版社,1981:451-458.
 [4] 李长生,何晓明,刘相华,等.固相板坯空冷过程温度场有限元分析[J].东北大学学报,2000,21(4):427-428.
 [5] 余万华,张中平.热轧钢板在加速冷却时的温度模型[J].北京科技大学学报,2005,27(5):567-570.
 [6] Hamouda A M, Sulaiman S, Lau C K. Finite Element Analysis on the Effect of Workpiece Geometry on the Quenching of ST50 Steel[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 119(1):354-355.
 [7] 彭良贵,刘相华,王国栋.超快冷却条件下温度场数值模拟[J].东北大学学报(自然科学版),2004,25(4):360-362.
 [8] 王海儒,万爱霞,王颖旺,等.高线穿水冷却过程温度场的数值模拟[J].燕山大学学报,2004,29(6):476-479.
 [9] 王宝同,王邦文,贾爱红,等.中厚板控冷过程三维温度场的数值模拟[J].冶金设备,2005,18(6):14-17.

王生朝(1970-),男,博士生(武汉科技大学),副教授,1998年包头钢铁学院(本科)毕业,材料加工研究。
E-mail:steelboy2006@163.com

收稿日期:2015-09-24