

基于 Sysweld 软件的步进加热炉板坯三维温度场分析

卢云,何宜柱,李建新

(安徽工业大学 材料学院,安徽 马鞍山 243002)

摘要:考虑板坯实际温度分布不均匀的事实,结合某钢厂的一座步进式加热炉建立了板坯加热过程的三维数学模型及其离线仿真系统。应用 Sysweld 有限元软件的热处理模块对加热炉内板坯温度场进行计算,并与黑匣子拖偶测试数据进行比较验证。计算结果显示在保证板坯加热质量的前提下,得到了板厚以及入炉温度与板坯所需加热时间的关系式,表明提高板坯入炉温度有利于提高加热效率,缩短板坯在加热炉内的加热时间,降低板坯氧化烧损量。

关键词:步进式加热炉;三维温度场;Sysweld 软件;有限元模拟

中图分类号:TF062 文献标识码:A 文章编号:1001-6988(2010)03-0032-05

3-D Temperature Fields Analysis of Slabs Heating in Walking Beam Reheating Furnace Based on Sysweld Software

LU Yun, HE Yi-zhu, LI Jian-xin

(College of Materials, Anhui University of Technology, Maanshan 243002, China)

Abstract: A 3-D mathematical model and its off-line simulation system are built for slab heating process combined with a walking beam reheating furnace of some plant considering the uneven distribution of slabs temperature. By using heat treatment module of Sysweld finite element software, the temperature fields of slabs in the reheating furnace are calculated and validated by the black box test data. The results indicate that under the premise of quality, the relation between heating time and the thickness and the initial temperature of the slabs is obtained. It is indicated that raising the initial temperature of slabs can improve heating efficiency, shorten reheating time, and decrease energy consumption.

Key words: walking beam reheating furnace; 3-D temperature fields; Sysweld software; finite element simulation

加热炉内板坯的加热过程是一个包含流体流动、化学反应、传热与传质等的复杂物理化学过程,随板坯的装入温度、板坯尺寸和热物性参数,炉子的尺寸和热物性参数,燃料的种类,炉子各段的加热温度情况的不同而影响加热过程^[1]。因此分析有关影响因素的规律和程度对控制加热过程有着重要的意义。对于板坯在加热炉内的升温过程,很多研究者进行的是应用二维的有限差分法原理,利用计算机高级语言自行编程进行计算^[2-5]。本文结合某钢厂一座步进式加热炉的实际情况,考虑板坯实际温度分布不均匀的事实,建立了一种板坯三维温度场的数

学模型系统。通过有限元软件 Sysweld 系列^[6]产品中的热处理模块研究板坯在加热炉内的温度变化情况以及在不同加热条件下的升温情况。Sysweld 软件是法国 ESI 公司开发的大型商业化软件,广泛用于重型工业、汽车工业、航空航天、国防工业。在热计算中 Sysweld 允许考虑晶相转变及同一时间晶相转变潜热和晶相组织对温度的影响,因此, Sysweld 的热计算精度高。模拟计算结果为钢厂生产实践时加热板坯过程优化提供依据和指导。

1 模型的建立与求解

1.1 数学模型的建立

钢坯在加热炉内受到炉气辐射和对流传热,坯内各点温度时刻在变化,由于炉气温度在各个加热

收稿日期 2010-02-02

作者简介:卢云(1977—)女,工学博士,主要研究方向为材料科学与工程应用。

段随时间波动发生变化,因此钢坯在炉内的传热是一个不稳定态的传热过程,无论建立模型还是边界条件的处理都是比较复杂的。本系统以加热炉为研究对象,建立如图1所示的物理模型,加热炉有效长度27 000 mm,内宽18 660 mm。加热炉内供热段和不供热段高度不同,沿炉长方向上炉和下炉分别分为预热段、一加热段、二加热段和均热段共四段;钢坯尺寸为(6 800~17 600)mm×(2 000~3 200)mm×(150~260)mm。

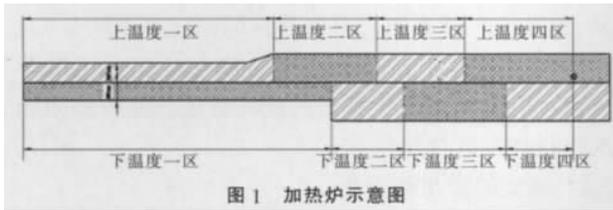


图1 加热炉示意图

板坯加热过程数学模型用于求解板坯在不同生产条件(如不同规格、钢种、产量等)、不同炉温制度下的温度场的变化规律。板坯在炉内的加热过程中,涉及到燃料燃烧、气体流动、板坯导热以及氧化烧损等复杂的物理化学现象。如此复杂的热工过程难以进行准确的数学描述,因此不论是在线控制为目的还是以离线研究为目的的数学模型,都必须进行合理的简化^[2]。本文紧密结合某钢厂的设备 and 工艺条件,进行了合理假设:

- (1)加热炉温度分布不随时间变化。
- (2)炉膛内各段温度分布均匀,忽略炉长方向各段之间的辐射换热。
- (3)板坯在加热炉内匀速运动。
- (4)加热炉炉衬内表面和板坯表面黑度为常数。
- (5)板坯边界与气体之间的对流传热按照经验将其折算到辐射传热上去。在高温情况下,传向金属的热量90%以上是辐射换热,对流换热部分仅占2%~10%^[3-5]。而且由于炉子的形状复杂,温度的不均匀性、金属的布料特点、烧嘴的作用、炉内气体的运动方式等均具有极其复杂的特点,因此对流给热系数的确定相当困难。通常建立模型考虑到对流给热的影响而将辐射给热系数加以修正。
- (6)忽略板坯表面氧化对传热的影响。认为炉气温度等于炉膛温度,忽略板坯加热过程的内热源。

板坯断面在不停的运动中随时间的变化,其温度分布不断变化(根据单元体的能量平衡原理)。在直角坐标系下,所建板坯内部导热的三维温度场数学微分方程如下所示^[6-8]:

$$\rho C_p \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda \frac{\partial t}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda \frac{\partial t}{\partial z} \right] \quad (1)$$

式中: λ 为板坯的导热系数; C_p 为板坯的比热容; t 为板坯温度; ρ 为板坯密度。板坯的导热系数、比热容以及密度等物理量随温度变化都会有所变化。本研究利用JMatPro热力学软件^[9]计算材料的导热系数等物理量随温度的变化情况,并应用到温度场方程的计算中。

1.2 数学模型的求解

采用有限元法对数学模型求解,首先对求解的区域进行离散化处理,即对求解对象坯料进行网络划分。由于研究对象的对称性,为了减少计算量可只计算工件的一半。采用Sysweld中的六面体八节点单元进行网格划分,系统将一半板坯分为60×40×10个节点。板坯炉内加热过程中,内部热传导发生在长宽高三个方向上,板坯加热过程中单元控制体简化模型如图2所示,在 x, y, z 三个方向上分别有热流产生。

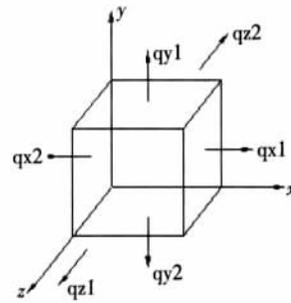


图2 单元控制体简化模型示意图

1.3 边界条件的处理

初始条件:对板坯加热入炉温度可视为初始温度,即板坯初始温度。钢坯进入加热炉时初始温度由预置的断面温差图确定。冷装初始温度为入炉时刻红外测温仪检测的钢坯表面温度,钢坯所有节点温度相等,即:

$$T(x, y, z) = T_0(x, y, z) \quad (2)$$

边界条件有两种:对流、辐射边界和绝热边界。板坯外表面与炉气接触,是对流及辐射边界。板坯对称面是绝热边界。表面温度随时间、位置而变化。

(1)板坯上表面热流密度 q_u 的计算:

$$q_u = \alpha_{u对} (t_{t1} - t_2) + k\phi \left(\left(\frac{T_{t1}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right) \quad (3)$$

变形后得:

$$q_u = \alpha_{u对} (t_{t1} - t_2) + \alpha_{u辐} (t_{t1} - t_2) = \alpha_{u\Sigma} (t_{t1} - t_2) \quad (4)$$

$$\text{其中 } \alpha_{u \text{ 辐}} = \frac{f\phi \left(\left(\frac{T_{f1}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right)}{(t_1 - t_2)}$$

式中: k 为系数; ϕ 为炉膛总括热吸收率; $\alpha_{u \text{ 对}}$ 是板坯上表面对流换热系数; t_{f1}, T_{f1} 分别为板坯上部炉气的温度与绝对温度; t_2, T_2 分别为固体表面温度与绝对温度; α_{Σ} 为板坯上表面综合换热系数, $\alpha_{\Sigma} = \alpha_{\text{对}} + \alpha_{\text{辐}}$ 。

(2) 板坯下表面热流密度 q_d 计算:

$$q_d = \alpha_{d \text{ 对}}(t_{d1} - t_2) + \alpha_{d \text{ 辐}}(t_{d1} - t_2) = \alpha_{d \Sigma}(t_{d1} - t_2) \quad (5)$$

式中: t_{d1} 为板坯下部炉气温度。

(3) 绝热表面热流密度为零。

(4) 板坯侧面热流密度 q_s 的计算

由于步进式加热炉内板坯是间隙放置, 板坯侧面的热流不能忽略, 但板坯侧面热流密度的推导很麻烦, 所以作如下的简化处理:

$$q_s = \beta(q_u + q_d) \quad (6)$$

式中, β 值取决于角系数。

在加热炉加热过程中, 影响综合给热系数的主要因素有: 炉子结构、热电偶的位置、火焰长度和形状、炉内气氛、板坯的表面性质、对流和辐射的相对比例等。因素复杂多变, 很难采用理论公式准确计算, 通常根据“黑匣子”实验结果来修正加热炉各段的热流密度。在模型中先通过实验获取数据, 再利用焓增法分段计算以获得各段具体的给热系数。通过对 SS400 钢进行黑匣子拖偶实验, 计算可得各段上、下表面以及侧表面的综合给热系数。一般很难获得加热炉热过程数学模型的解析解法, 只能利用计算机进行数值计算。本研究采用有限元法对公式 [1] 进行求解。结合具体的加热炉的物理模型, 将加热炉分为 7 段, 调整参数, 得到各段综合换热系数。

2 结果验证与分析

2.1 数学模型的验证

系统确定后, 利用“黑匣子”热电偶测温装置对系统运行结果进行评价和分析。经过实测结果与模型运算结果的比较分析来验证和完善模型。测试钢坯规格为: 150 mm × 2 500 mm × 15 000 mm, 钢种为 SS400, 冷装入炉。实验结果与模型计算结果的对比见图 3。

从图 3 中可以看出冷坯的典型点实测与模型计算的温度变化规律相一致, 钢坯在冷装情况下, 中心点在加热升温过程中虽然模拟和实测存在一定的误

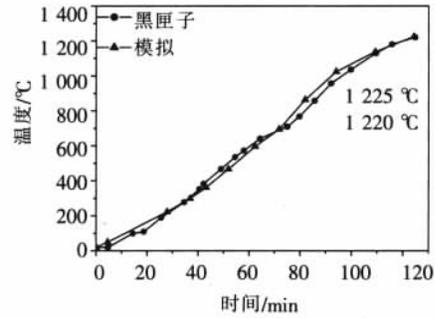


图 3 模拟与黑匣子测试中心点比较图

差, 但在出炉时实测与模型计算的温度基本吻合, 温度误差完全满足工艺所要求的 $\pm 10^\circ\text{C}$ 。由此可以看出通过有限元方法计算出的板坯温度, 能较准确地反映板坯实际加热情况。

2.2 模型的应用和分析

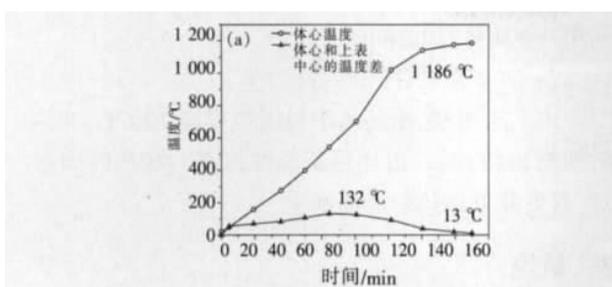
(1) 加热过程中板坯温度变化情况

图 4 所示为加热过程中 (预热段温度 820°C , 加热一段温度 $1\ 150^\circ\text{C}$, 加热二段温度为 $1\ 235^\circ\text{C}$, 均热段温度 $1\ 205^\circ\text{C}$, 150 mm 厚坯的材料 A), 板坯体中心温度升高趋势和该点与上表面中心点温度差的变化曲线 (图 4a), 以及经过 150 min 加热后板坯温度分布的等温云图 (图 4b)。由于板坯表面直接接受对流和辐射换热, 在预热段初期板坯表面和中心点的温度差逐渐增加, 一直到上温度二区后段温度差开始减少, 温度差最大达到 132°C 。板坯表面点和中心点由于加热段温度很高, 板坯在加热段内受到很强的辐射换热, 其温度迅速升高, 特别是角部升温最快。到了均热段后由于均热段的炉温接近于板坯出炉温度, 板坯表面温度没有升高, 而中心温度则继续升高, 两者间温差缩小。均热段的作用是均匀截面温度差, 使其达到工艺要求值。图 4b 可直观地看出板坯受热后的温度场的分布情况。

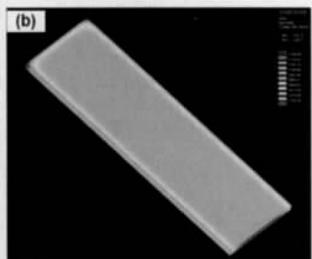
(2) 板坯厚度对加热时间及板坯吸热的影响

板坯厚度对加热时间的影响如图 5 所示。炉温制度相同的前提下, 对 150 mm 及 180 mm 厚的板坯进行模拟, 计算得到了达到同样加热质量要求时的板坯中心温度和上表面的加热曲线, 以及板坯吸热含量变化曲线。

图 5 中 150 mm 和 180 mm 厚板坯加热曲线总的变化趋势相同。相对于 150 mm 厚坯料, 达到同等要求的加热质量, 180 mm 厚坯料的加热时间需延长约 30 min。所以在相同的炉温制度下, 板坯规格变厚相应加热时间延长。厚坯料最大温差加大, 造成消



(a)体中心点升温曲线以及体心和上表中心的温差变化曲线图



(b)经 150 min 加热后板坯温度分布的等温云图

图 4 150 mm 厚板坯升温情况图

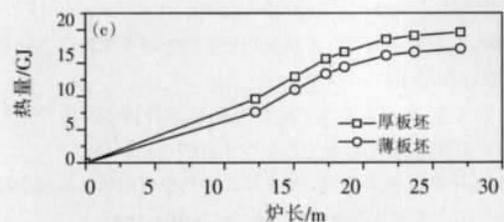
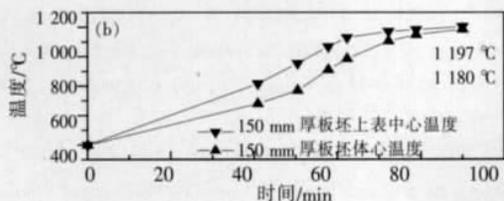
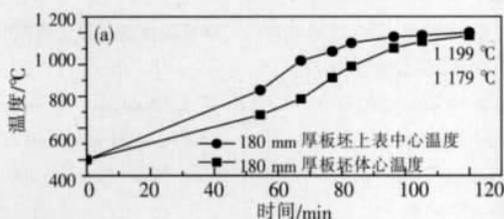


图 5 150 mm 和 180 mm 厚板坯吸收热和加热曲线对应图

除板坯加热时产生的温差更加困难。虽然图 5(a)和 5(b)中两种厚度板坯出炉温度及出钢温差相差不大,但是在加热时间上并不是与板厚同比例增加,厚板所需均热时间更长。对于热应力较敏感的钢种,厚料加热时尤其应注意板坯内部温差的控制,防止在加热过程中产生裂纹。

从板坯吸热含量沿炉长分布曲线来看,在相同入炉温度和出炉温度情况下,厚板坯吸收热明显多于薄板坯,两种板坯吸收热的比例与板坯体积比例

基本相同,如图 5(c)。

通过模拟计算,归纳出如下板坯厚度变化后相对于 150 mm 板坯加热时间的经验关系公式:

$$\tau' = \tau \left(1 + 1.315 \Psi \frac{B-150}{150} \right) \quad (7)$$

式中: τ' —变化板厚后的加热时间, min

τ —150 mm 厚板坯所需的加热时间, min

B —板坯厚度, mm

Ψ —板坯厚度调整系数

板坯厚度与调整系数关系如图 6 所示。

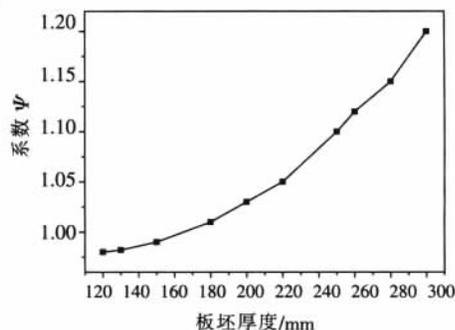


图 6 板坯厚度与参数 Ψ 的关系图

通过对式(7)的应用,可以预测不同板厚的在炉时间,为生产节奏的安排提供依据。同时为特厚板坯的加热工艺制定提供依据和参考。并在实际生产中指导了该钢厂 300 mm 厚板坯的加热工艺的制定,效果良好。

(3)入炉温度对加热时间及板坯吸热的影响

图 7 为相同炉温制度下,入炉温度分别为 200 °C、400 °C、600 °C、800 °C 时的加热曲线和板坯吸热的变化曲线。入炉温度对加热时间影响很大。入炉温度越高,所需加热时间越短。结合图 7 及图 5,冷坯入炉(20 °C)时,加热时间为 120 min,热坯(600 °C、800 °C)加热时间分别为 80 min 和 70 min,加热时间分别缩短了 40 min 和 50 min,也就是说板坯从冷装到热装加热时间可以缩短 30%~40%。产量提高 50%左右。因此,采用热送热装工艺,提高入炉温度是提高产量的重要途径。

从板坯吸收热含量减少速率来看,入炉温度越高,吸热速率越慢,当板坯 800 °C 入炉时,上表面在温度一区的温升只有 150 °C,而板坯芯部温升不到 100 °C;所以,如能将较高入炉温度的板坯缩短在温度一区的时间,将大大减少板坯的加热时间,同时也能减少板坯的氧化烧损。

通过回归,可以得到加热炉入炉温度与加热时

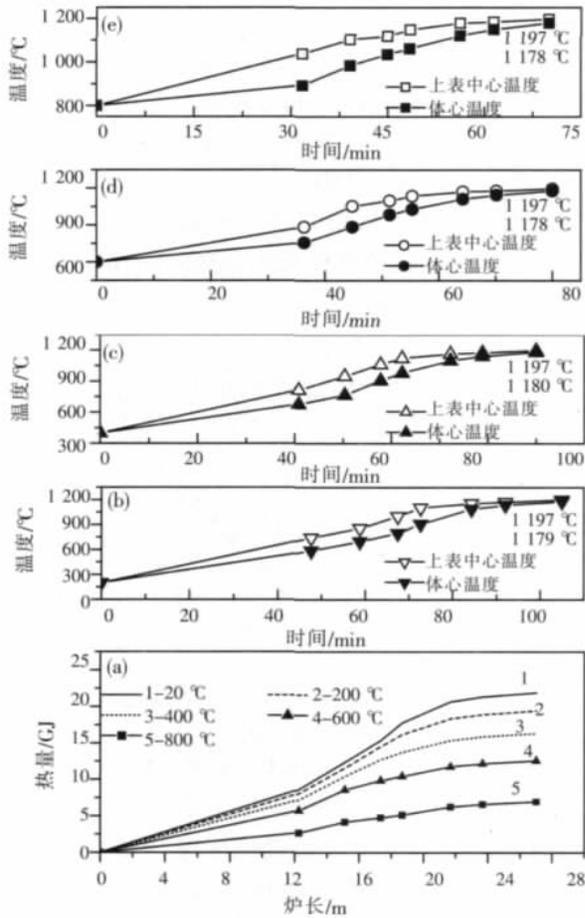


图7 入炉温度变化时加热曲线和板坯吸收热对应图

间的关系如图8和式(8)所示。

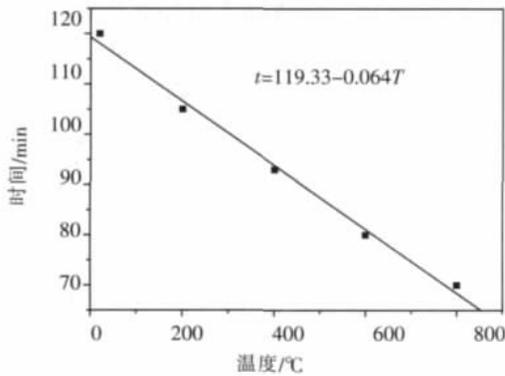


图8 入炉温度与加热时间关系图

$$t=119.33-0.064T \quad (8)$$

式中: t —加热时间,min

T —入炉温度,°C

由上式可知,板坯入炉温度每提高 100 °C,加热时间缩短约 6%。板坯热装温度越高,加热时间越短,有效降低加热炉能耗水平。

3 结论

本研究结合某钢厂加热炉实际情况,利用 Sysworld 软件有限元计算方法,建立了板坯加热过程的三维温度场传热数学模型,并经过黑匣子试验结果验证基本相符,进而实现对加热炉热送热装工艺的优化制定。通过板坯加热过程传热数学模型计算研究,优化热送热装工艺并指导生产,为加热炉操作者提供科学、直观的操作指导,运行效果良好。

参考文献:

- [1] 刘向军,赵燕,潘小兵. 步进式加热炉内板坯加热过程的模拟研究[J].钢铁,2005,40(7): 76-79.
- [2] CHEN W H, CHUNG Y C, LIU J L. Analysis on energy consumption and performance of reheating in a hot strip mill [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2005, 32(5): 695-706.
- [3] TEMLYANTSEV M V, KOLOTOV Y A, SYUSYUKIN A Y. Development of a technology for heating rail blank parts in a continuous walking-beam furnace [J].Steel in Translation, 2006 (36):52-54.
- [4] CHEN Zhigang, XU Chao, ZHANG Bin. Advanced control of walking-beam reheating furnace[J].Journal of University of Science and Technology Beijing, 2003(10): 69-74.
- [5] 陈海耿,王子弟,吴彬,等. 连续加热炉在线控制系统的仿真研究 [J].钢铁,2006,41(12): 75-78.
- [6] 王西昌,左从进,刘方军,等. 基于 Sysweld 软件的 TC4 电子束焊接过程的数值模拟[J]. 新工艺新技术,2007(1): 8-11.
- [7] 青格勒,程素森,杨天钧,等. 步进梁式加热炉内的板坯温度场数值模拟[J].北京科技大学学报,2004,26(2): 164-168.
- [8] 叶红卫. 宝钢热轧 4 号加热炉传热模型的参数确定 [J]. 宝钢技术,2001(6): 27-30.
- [9] 闵永安,刘湘江,毛远建. 应用 JMatPro 软件对比研究两种抽油杆钢的合金化特点[J]. 上海大学学报, 2008,14(5): 503-508.

循环经济是节能减排的最有效模式