

·系统与装置·

板坯加热炉三维温度场数学模型系统的开发及应用

商桂梅,焦吉成,张世建,邓君堂,赵传领

(济钢集团有限公司 技术中心, 山东 济南 250101)

摘要:提供一种步进式板坯加热炉三维温度场数学模型系统在线应用的技术思想及实施方案。模型系统分别与一级、三级系统通信,实现了坯料在加热炉内各位置、各时间段内的动态跟踪以及温度的实时预报。系统吸收了国内外相关模型的优点,融入了最新的计算机仿真技术、数据挖掘技术,优化了加热制度,减少了氧化烧损,为加热炉操作者提供了科学、直观的操作指导,系统预报温度准确率达到 93%以上,误差在 $\pm 10^\circ\text{C}$ 以内,运行效果良好。

关键词:加热炉;三维温度场;动态跟踪;实时计算

中图分类号: TG061.2; TP273 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7059(2009)02-0038-05

Development and application of 3D temperature field mathematic model system for slab reheating furnace

SHANG Guimei, JIAO Ji-cheng, ZHANG Shi-jian, DENG Jun-tang, ZHAO Chuan-ling

(Technology Center of Jigang Group Co., Ltd., Jinan 250101, China)

Abstract: An idea and solution of on-line application of 3D temperature field mathematic model system for walking beam slab reheating furnace is presented. The system can communicate with L1 and L3. Real forecasting of slab temperature was achieved through dynamic tracking of slab position in reheating furnace at different time. In the system, advantages of related models in home and abroad were absorbed, and the latest computer simulation and data mining technologies were adopted. With the help of the system, reheating rule was optimized, oxidation rate was decreased, a scientific and objective operation guide was provided for reheating furnace operator. Temperature forecasting accuracy was reached to 93%, error was within $\pm 10^\circ\text{C}$, and operation effect was good.

Key words: reheating furnace; 3D temperature field; dynamic track; real calculation

板坯加热炉作为板材生产线中的重要环节,在整个轧钢生产过程中起着举足轻重的作用。加热炉的能量消耗直接关系到整个轧线的生产成本;钢坯温差必须满足温度要求,才能轧制出高质量的板材。由于加热炉工况的多样化,某些反映加热炉状况的主要热工参数不能直接或连续地检测,如钢坯在加热炉内的温度变化过程,因此研究和开发加热炉数学模型已成为冶金行业研究的热

点之一。加热炉内铸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,针对不同的研究对象和研究目的,国内外学者提出了多种形式的加热炉数学模型^[1],但是不管哪种形式的离线、在线模型,大都采用了一维、二维的炉膛、坯料传热数学模型。本文结合济钢集团有限公司厚板厂 3 号加热炉的实际情况,给出一种步进式板坯加热炉三维温度场数学模型系

收稿日期: 2008-09-10;修改稿收到日期: 2008-12-20

作者简介:商桂梅(1969-),女,山东郓城人,高级工程师,主要从事电气自动化技术开发及应用工作。

统在线应用的技术思想及实施方案,通过把现场信号与数值模拟技术相结合,很好地完成了在线指导操作人员对加热炉的控制。

1 系统组成

三维温度场数学模型系统,利用三维传热数学模型计算方法,通过计算机应用软件计算坯料在加热炉中各个位置、各个时间段内的动态温度分布,通过等温面的方法显示计算结果,为操作人员提供指导。整个系统由加热炉一级信号检测系统及网络通信数据系统、三维温度场模型系统、模型结果验证系统组成。系统结构简图见图 1。

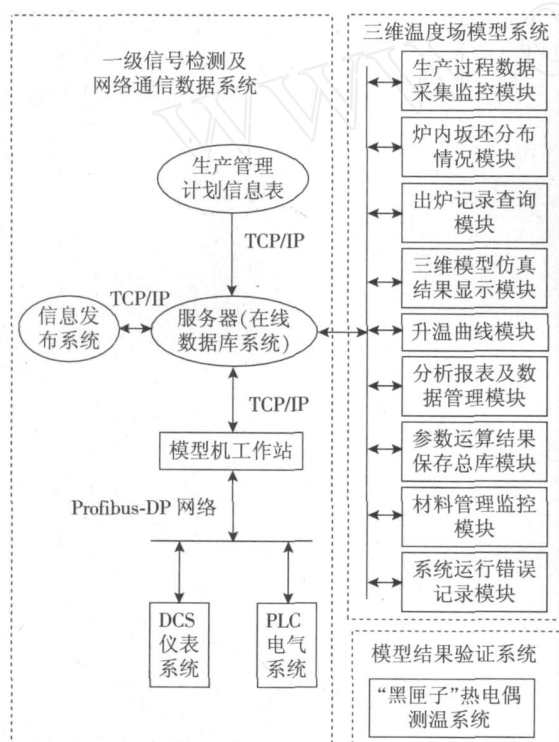


图 1 系统结构简图

Fig. 1 Scheme of the system

加热炉一级信号检测系统主要包括 PLC 电气系统和 DCS 仪表系统的信息。其中电气系统信息主要包括坯料入炉、辊道、装钢、步进和出钢等,用于对坯料的实时跟踪。DCS 仪表系统信息主要包括炉膛内预热段、一加热段、二加热段、均热段实时炉气温度检测、支撑梁水流量信号等仪表信号,主要用于模型的传热计算。

网络通信系统主要包括如图 1 所示的模型机与一级系统,模型机与服务器之间,以及服务器与三级(生产管理信息网 MES)之间的通信。充分考虑到系统的安全性,把一级网络与生产管理网络隔离。模型机与一级系统之间采用 Profibus-DP 网

络进行通信,服务器与模型机以及与生产管理网之间的通信采用以太网,采用双网卡把系统设置在不同的网段上。模型系统数据采集模块分别把 L1 级实时数据、L3 级生产管理信息数据传入系统数据库,而生产管理网络信息主要是指与坯料有关的钢种、炉号、坯号等计划信息。

2 模型系统的建立与求解

2.1 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。本系统以矩形加热炉为研究对象,建立如图 2 所示的物理模型,加热炉尺寸长×宽×高为:39 700 mm×7 500 mm×4 819 mm,沿炉长分为预热段、一加热段、二加热段和均热段共四段;钢坯尺寸为(2 000~3 200) mm×(1 050~2 100) mm×(180~270) mm,钢坯单重 4.064~6.972 t/根。

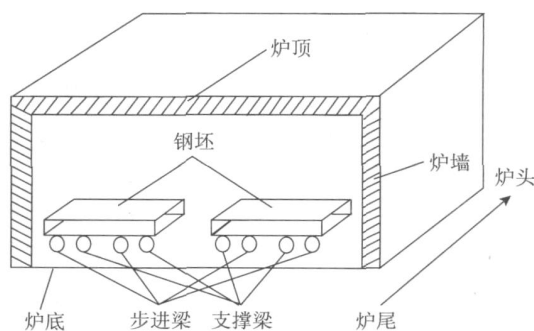


图 2 加热炉钢坯加热过程物理模型示意图

Fig. 2 Physical model of slab reheating process in the furnace

为了简化模型及计算作如下假设:

(1)忽略炉气横向温度差。纵向炉气温度为热电偶在各个加热段所测炉墙(四个测点)、炉顶(四个测点)温度的算术平均值,并将此温度沿炉长方向作差线性处理。

(2)钢坯在加热炉内的步进运动为匀速运动,每次步幅为定值,在本系统为 550 mm。

所建铸坯热量计算三维温度场数学模型如下。

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + S \quad (1)$$

式中, ρ 为钢坯的密度; c 为钢坯的比热容; λ 为炉气与钢坯表面间的综合给热系数; T 为钢坯的瞬态

温度; t 为加热时间; x, y, z 分别为钢坯入炉截面长度、宽度和高度方向坐标; S 为源项, 由于钢坯在加热过程中, 无内热源, 所以不考虑 S 项。

2.2 数学模型的求解

系统采用常用的有限差分法对数学模型求解, 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格划分。系统把铸坯从 x, y, z 方向分为 $21 \times 11 \times 9$ 个节点, 取三维求解区域中的一点 P , 其控制容积为 $\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z$, 它有六个相邻节点, 分别从前后、左右、上下六个方向导热。表面节点有五个导热方向, 边角中部有四个导热方向, 边角边部有三个导热方向。然后再对微分方程进行积分求解计算, 在本系统中采用显式差分格式进行求解, 即节点的新值完全取决于节点

本身以及和它相邻的节点旧值。为了保证求得了解的的有效性, 必须满足三维不稳定态传导传热显式差分格式的稳定性条件^[2], 即满足显式差分格式方程中各系数为正的条件。

2.3 边界条件的处理

由于钢坯在入炉时刻炉内表面、内部节点、边角节点的传热不同, 所以必须对坯料的边界条件进行合理处理。

初始条件: 钢坯进入加热炉时初始温度由预置的断面温差图确定, 如图 3 所示。即根据钢坯在入炉时刻红外测温仪检测的钢坯表面温度, 由系统推荐其内部温度, 从而很好地解决了热装模型的初值问题。

冷装初始温度为入炉时刻红外测温仪检测的

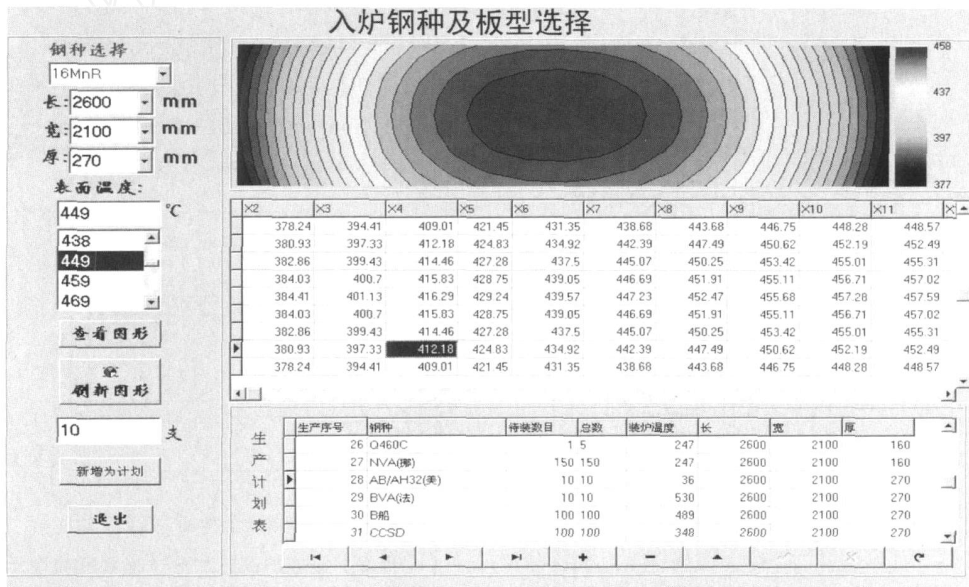


图 3 热装初始值

Fig. 3 Initial temperature data of the hot slab

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: 由于表面节点加热为热辐射和对流两种传热方式, 钢坯表面在加热炉内受到炉气辐射和对流传热, 表面温度随时间、位置而变化, 按式 (3) 进行计算^[3]:

$$q = \alpha_{\text{对}} (t_1 - t_2) + c \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \quad (3)$$

变形后得:

$$q = \alpha_{\text{对}} (t_1 - t_2) + \alpha_{\text{辐}} (t_1 - t_2) = \alpha_{\Sigma} (t_1 - t_2) \quad (4)$$

其中, $\alpha_{\text{辐}} = c \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] / (t_1 - t_2)$

式中, q 为热流密度; $\alpha_{\text{对}}$ 为对流给热系数; c 为气体对固体表面辐射系数; t_1, T_1 分别为气体的温度与绝对温度; t_2, T_2 分别为固体表面温度与绝对温度; α_{Σ} 为综合给热系数, $\alpha_{\Sigma} = \alpha_{\text{对}} + \alpha_{\text{辐}}$ 。

2.4 综合给热系数的计算

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。既可以通过理论方法也可以通过实验方法计算给热系数。在本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。就每段而言, 在每个采样周期内,

可把炉坯之间、坯内之间的传热简化为稳态传热过程。按照加热炉的长度 (39 700 mm)、坯料的宽度 (2 100 mm) 可以分为 18 段,计算出每段的位置,再根据推钢节奏计算坯料在每段停留的时间。然后根据具体位置和钢坯停留时间,获得焓增量,再根据式 (5) 计算 α_{Σ} 。

$$\alpha_{\Sigma} = - \frac{G\Delta H_i}{\sigma_0\Delta T^4}$$

(5)

式中, G 为板坯密度; ΔH_i 为焓增量; σ_0 为 Stefan-Boltzmann 常数; ΔT 为炉内气体和固体的表面温度差。本项目通过对 16MnR 钢进行黑匣子拖偶实验,得各段上下表面综合给热系数,见表 1。

表 1 坯料在各段上下表面的综合给热系数

Table 1 Synthesize coefficient at the top and bottom surface of the slab in every segment

表面	段号																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
上	0.71	0.54	0.45	0.44	0.35	0.33	0.23	0.30	0.50	0.24	0.33	0.37	0.33	0.24	0.22	0.20	0.20	0.20
下	0.69	0.54	0.44	0.42	0.36	0.32	0.20	0.33	0.49	0.24	0.32	0.35	0.33	0.22	0.20	0.20	0.20	0.20

从表 1 中可以看出坯料上表面换热效果稍好于下表面换热,这与蓄热式加热炉本体有关,并且下部水梁也对下表面换热造成一定的影响。

3 系统软件及模型主要功能

根据上述数学模型和参数计算以及济钢中厚板加热炉的实际情况,用 Delphi 7.0 开发了钢坯加热过程的温度场数值计算软件,数据库采用 SQL Server 2000,操作系统为 Windows 2000,一级组态软件采用 WinCC 5.1 版本。本模型系统共分生产过程数据采集监控模块、炉内板坯分布情况模块、出炉记录查询模块、三维模型仿真结果显示模块、升温曲线模块、分析报表及数据管理模块、参数运算结果保存总库模块、材料管理监控模块、系统运行错误记录模块等九部分。

生产过程数据采集监控模块主要完成模型与一级系统 PLC 和 DCS 的通信,生产过程的各相关参数变量以 3 s 为周期进行数据采集并传入模型系统数据库。炉内板坯分布情况模块主要是根据一级检测系统数据,利用模式识别的方法,与生产管理信息相互匹配,完成坯料在加热炉内的动态跟踪。出炉记录查询模块主要完成对出炉的每一块坯料进行信息记录及查询。三维模型仿真结果显示模块的后台程序主要完成坯料的温度分布预报。可根据实际需要分两种情况进行选择,一是自动计算,按周期对每一块料进行跟踪,实时计算,自动运行模型系统的主程序(如图 4 所示),进一步调用瞬态温度场算法子程序,对所对应的板坯进行仿真处理,并把数据保存到数据库。二是根据实际需要选择地对相应的坯料进行实时计算,处理结果在三维模型仿真结果分析模块中显示。显示信息主要包括:平均温度、上表面温度、

下表面温度、上下表面温差、上表面与中心温差、下表面与中心温度等,另外还显示坯料的三维剖分切面,供技术人员、操作人员随时掌握所仿真钢坯内部的温度分布情况,以便发现问题及时调整炉况。坯料升温曲线图以及坯料上下表面温差与中心温差图在升温曲线模块中显示。分析报表及数据管理模块是根据生产需要,按日自动生成 Word 文档;参数运算结果保存总库模块主要保存生产过程操作参数,形成参数数据库,并可生成参数历史曲线图;材料管理模块主要对生产现场所有钢种的热物性参数进行管理,主要包括每一钢种的化学成分、比热容、热导率曲线、液相线、固相线温度、热导率以及不同温度下的钢的密度等参数,形成钢种热物性数据库,用于模型运算。系统运行错误记录模块自动记录系统运行过程中产生

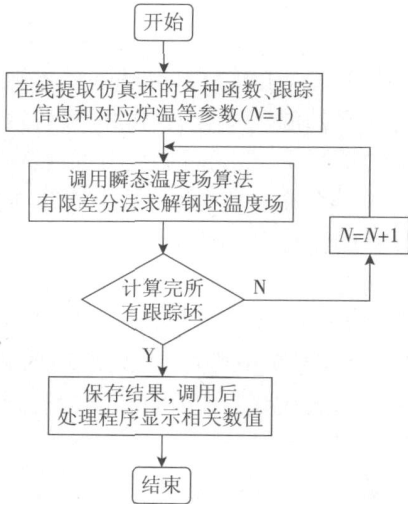


图 4 模型系统主程序流程图

Fig. 4 Flow chart of the model

N —钢坯个数

的各种错误信息等。

4 结果验证与分析

系统实施后,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,经过多次实测结果与模型运算结果的比较分析来验证和完善模型。本系统共测试八次,其中某次测试结果如下:钢坯规格为 $2\,360\text{ mm} \times 2\,100\text{ mm} \times 270\text{ mm}$,钢种

为船板 AH36。测试共进行两次,冷坯和热坯各入炉一次。先按设计尺寸分别在钢坯的上下表面及中心点预埋热电偶,然后随冷坯入炉跟踪测试,测试装置出炉后,实验钢坯进行炉外冷却降温,温度降到 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右后,再进行一次入炉跟踪测试,直至测试装置出炉。实验结果与模型计算结果的对比见图 5。

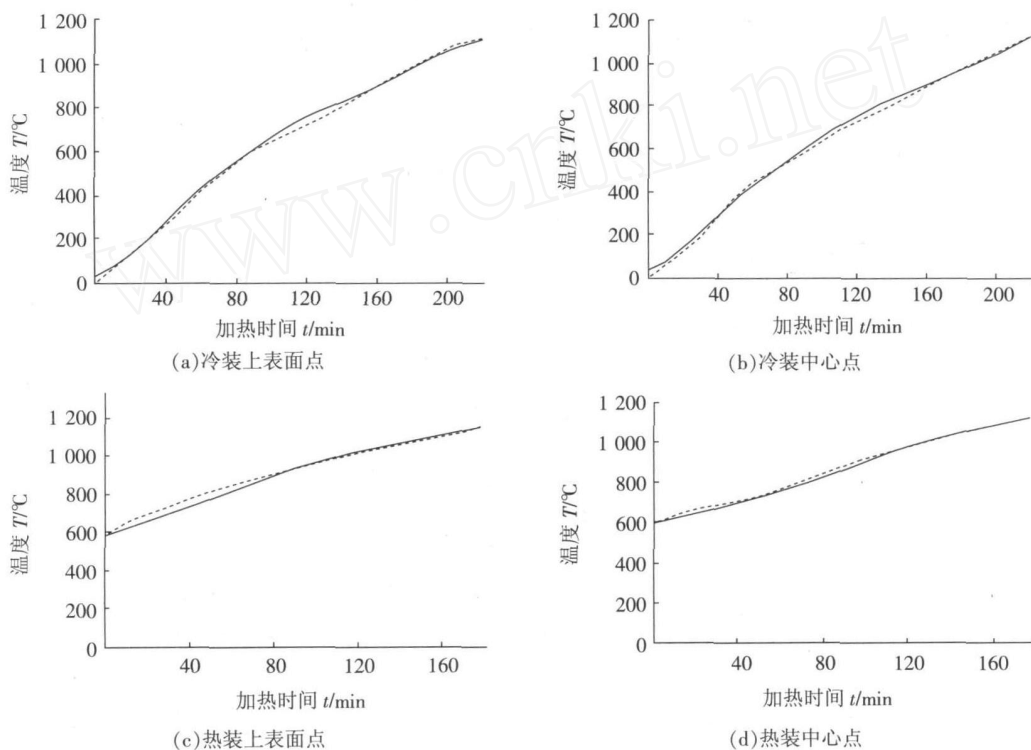


图 5 钢坯实测温度与模型温度的比较

Fig 5 Comparison of experimental data and model simulation results

——实测温度;——模型计算温度

从图 5 中可以看出冷坯和热坯的各典型点实测与模型计算的温度变化规律相一致,钢坯在热装和冷装的情况下,上表面点与中心点在加热升温过程中虽然存在一定的误差,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 $\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$,系统预报准确率达到 93% 以上。对入炉的冷装坯及热装坯分别进行了测试和模拟计算,从图 5 中可以看出,冷坯加热需 220 min,而热装加热坯只需 170 min 就能达到工艺要求的出炉温度。

5 结束语

该系统自 2007 年 5 月安装到厚板厂 3 号加热炉以来,经过逐步完善,系统运行稳定,为加热炉

操作者提供了科学、直观的操作指导,运行效果良好。它吸收了国内外相关模型的优点,融入了最新的计算机仿真技术、数据挖掘技术,无论从系统的稳定性还是系统模型的二次开发来看,都达到了先进水平,产业化和推广应用的广阔前景。

参考文献:

- [1] 郝小红. 连铸系统热过程综合 BP 网络模型及其在线应用 [D]. 北京: 北京科技大学, 2007.
- [2] 贺友多. 传输过程的数值方法 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1991.
- [3] 蔡乔方. 加热炉 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1983.

[编辑:魏 方]