

·系统与装置·

# 大方坯连铸温度场动态仿真系统的开发与应用

王国新<sup>1</sup>, 张家泉<sup>1</sup>, 王玉昌<sup>2</sup>, 赵殿清<sup>2</sup>

(1. 北京科技大学 冶金与生态工程学院, 北京 100083; 2. 包头钢铁(集团)有限责任公司)

**摘要:**基于凝固传热学基本理论与对大方坯连铸工况进行分析,建立了大方坯动态铸坯温度场跟踪模型、动态工况模型和设备与工艺参数库,开发了大方坯连铸温度场动态仿真系统。利用包钢新建大方坯连铸机仿真系统对 20<sup>#</sup>, 45<sup>#</sup>, U75V 三个钢种在不同工况下的温度场进行了模拟。射钉实验证明,仿真结果达到工艺要求的精度,仿真系统能够真实准确地模拟连铸浇铸全过程中铸坯温度场分布,再现大方坯浇铸的动态过程,并精确计算大方坯连铸的凝固终点位置,为大方坯动态二冷配水与动态轻压下新技术的在线控制系统的应用提供了重要技术支持。该仿真系统设计界面友好、操作简捷,可作为生产过程中工艺参数优化和离线仿真的有效平台。

**关键词:**大方坯连铸;实时温度场;动态仿真系统

**中图分类号:** TF777. 2; TP273 **文献标志码:** B **文章编号:** 1000-7059(2009)02-0028-05

## Development and application of dynamic simulation system for temperature field of bloom casting

WANG Guo-xin<sup>1</sup>, ZHANG Jia-quan<sup>1</sup>, WANG Yu-chang<sup>2</sup>, ZHAO Dian-qing<sup>2</sup>

(1. School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Baotou Iron & Steel (Group) Co., Ltd.)

**Abstract:** Based on solidification and heat transfer theory and analysis of operation conditions for bloom casting, dynamic tracking model for real-time temperature field, dynamic operation condition model, and equipment and process parameter database were established, and dynamic simulation system for temperature field of bloom casting was developed accordingly. Combining with newly installed bloom caster in Baotou Iron & Steel (Group) Co., Ltd., real-time temperature fields in different operating condition for 20<sup>#</sup>, 45<sup>#</sup> and U75V three steel grades were simulated. The simulated results have been validated by rivet pin shooting results. Results show that the simulation system can meet requirement of process precision, simulate temperature field distribution of bloom in whole casting process, and calculate position of final solidification point which is the precondition and guarantee for development and application of modern dynamic secondary cooling water control and dynamic soft reduction control technologies. The simulation system has a friendly human machine interface and is easy to manipulate, and provides an effective simulation platform for optimization of process parameters in production.

**Key words:** bloom continuous casting; real-time temperature field; dynamic simulation system

### 0 引言

连铸过程是一个铸坯温度场连续变化的过程,不合理的铸坯温度分布往往会导致裂纹等缺陷,因此对铸坯温度场进行动态的跟踪监测和优

化控制是获得高质量铸坯的前提和保证<sup>[1]</sup>。

在实际生产过程中,由于连铸环境恶劣,连铸过程在线监测与控制一直是个难题。随着计算机仿真技术的进步,利用基于凝固传热数学模型的

收稿日期: 2008-09-23; 修改稿收到日期: 2009-01-05

作者简介: 王国新(1975-),男,河北石家庄人,博士研究生,研究方向为连铸过程数学模拟与自动控制。

数值模拟对铸坯凝固温度场进行动态仿真已成为解决这一难题的重要途径。

根据国内自主开发现代连铸过程动态轻压下技术的需要,北京科技大学开发了大方坯连铸温度场动态仿真系统,并在包头钢铁(集团)有限责任公司炼钢厂 2006 年筹建的 5#大方坯铸机中得到成功应用。该铸机长度 34 m,铸机半径 12 m,铸坯断面 280 mm ×380 mm。此外,为了改善冷却控制效果,铸机设计了 5 个冷却区,可对铸坯宽面和窄面的冷却分别进行控制,并采用六机架工位(其中一个机架为预留)在线动态轻压下装置。基于上述设备特点,所开发的连铸过程温度场动态仿真系统可以离线模拟实际的连铸工况,对铸坯温度场和凝固终点进行动态跟踪和计算;从而不仅为过程动态二冷配水与动态轻压下在线控制系统的实现提供了重要保证,还可以降低开发在线控制系统的风险、成本和周期,同时为连铸技术和操作人员提供了优化工艺参数、制定合理生产制度的离线连铸工艺仿真平台<sup>[2]</sup>。

## 1 结构设计

大方坯连铸温度场动态仿真系统是一个特殊的计算机应用系统,该系统的目标是真实地模拟连铸浇铸全过程中铸坯温度场分布对实际工况的动态响应,因而仿真系统要力争以客观、真实、生动的形式来表现连铸生产系统的状态与行为。仿真系统应包括下列三方面内容。

- (1) 对连铸生产系统工况的描述:包括各种典型的稳态、非稳态连铸生产工况;
- (2) 对连铸生产设备和工艺的描述:包括铸机参数、各钢种物性参数等;
- (3) 对铸坯传热行为的描述:包括铸坯在不同工况下的传热机理和处理方式。

另外,大方坯连铸温度场动态仿真系统不仅具有传统数字仿真的能力,还应当具有可视交互和动画展示能力,据此构造如图 1 所示的大方坯连铸温度场动态仿真系统。

如图 1 所示,动态仿真系统将仿真对象(连铸生产系统)抽象为两套模型和一个参数库。其中动态铸坯温度场跟踪模型着重反映铸坯温度场变化的特征规律,而动态工况模型和设备与工艺参数库着重反映连铸生产系统的物理构成,这三部分构成了大方坯连铸温度场动态仿真系统的核心基础。

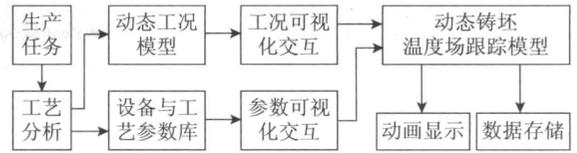


图 1 大方坯连铸温度场动态仿真系统结构

Fig 1 Diagram of the dynamic simulation system for temperature field of bloom casting

## 2 模型的建立

### 2.1 动态工况模型

动态工况模型是基于对实际连铸生产中不同生产过程及相应过程中浇铸条件变化的经验积累,将连铸生产过程中各稳态和非稳态浇铸工况抽象成若干个典型的工况模块,工况模块真实地还原了设定工况下的连铸浇铸过程,离线动态地表现相应工况中各浇铸条件的操作参数变化。

动态工况模型将连铸生产过程中各种工况抽象为引锭杆插入、准备浇铸、开浇、正常浇铸、快换水口、换钢包、快换中间包、更换断面、出尾坯、漏钢等工况模块。每种工况模块根据设定的对应浇铸条件触发,动态工况模型将该工况模块设定的拉速、浇铸温度、冷却条件等操作参数下发给动态铸坯温度场跟踪模型。

动态工况模型根据不同的生产设备条件和浇铸产品规格,存储了多套操作参数变化曲线。其中针对几种典型规格的铸机和浇铸产品,动态工况模型依据工厂长期现场实际生产经验的积累,制定了标准操作参数变化曲线,操作人员选定标准参数变化曲线后,动态工况模型将仿照实际现场的标准生产工艺将各操作参数实时下发给动态铸坯温度场跟踪模型。

为了进一步方便操作人员更真实地模拟浇铸过程、了解铸坯温度场变化与各种浇铸条件的关系,仿真系统提供了工况可视化交互平台。通过该平台,操作人员可以设置新的操作参数变化曲线并让仿真系统按此曲线运行,也可以在仿真系统按选定的操作参数变化曲线运行的同时,独立地改变各操作参数,观察铸坯温度场变化与该参数的对应关系。

### 2.2 设备与工艺参数库

设备与工艺参数库包括铸机参数数据库和工艺参数数据库。铸机参数数据库主要保存连铸机的浇铸长度、浇铸断面、结晶器长度、二冷各区长度等基本设备参数;工艺参数数据库的功能则是

为动态铸坯温度场跟踪模型提供计算所需的各钢种的液相线温度、固相线温度、密度、导热系数、比热容等物性参数以及结晶器热流密度、二冷区传热系数、冷却介质物性参数等综合工艺参数。

与动态工况模型相同,设备与工艺参数库也建立了与动态铸坯温度场跟踪模型之间的可视化交互平台,通过此平台,操作人员可以对结晶器热流密度、二冷区传热系数等可调的综合工艺参数进行调试及优化,以提高模型的准确性。

### 2.3 动态铸坯温度场跟踪模型

动态铸坯温度场跟踪模型是整个动态仿真系统的核心,它根据动态工况模型和设备与工艺参数库实时下发的操作参数和设备与工艺参数动态计算铸坯从结晶器弯月面到模型控制区末端的中心温度、表面中心线温度、角部温度、固液相凝固前沿等数据,实时描绘铸坯温度场。

如图 2 所示,动态铸坯温度场跟踪模型将铸坯从结晶器弯月面到模型控制区末端等分为若干个切片,对于每个切片,以铸坯厚度方向为  $x$  轴,宽度方向为  $y$  轴,铸坯运动方向为  $z$  轴,建立切片坐标系。考虑到铸坯几何与冷却条件的对称性,取  $1/2$  厚度断面为研究对象。对于每个切片忽略沿拉坯方向上的传热,在限定的条件下,就可得到下面的传热微分方程:

$$c \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( K \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial y} \right) \quad (1)$$

式中,  $K$  为导热系数;  $c$  为比热容;  $T$  为温度;  $\rho$  为密度;  $t$  为时间。

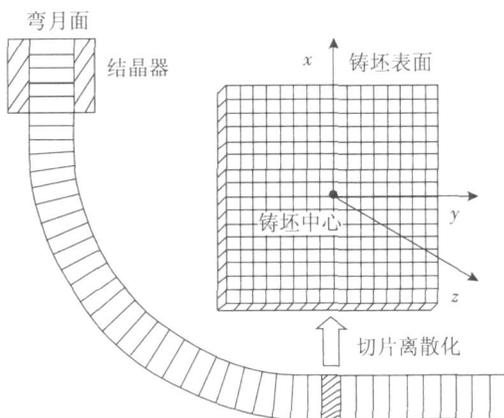


图 2 铸坯切片的划分示意图

Fig. 2 Discretization of bloom casting strand and grid generation of tracing slice

式 (1) 结合切片的初始条件与边界条件就成了切片的非稳态凝固传热的数学模型。将切片的凝固传热微分方程进行有限差分法处理,推导出能由计算机软件处理的计算公式。

通过上面对每个切片建立非稳态凝固传热数学模型,每个切片就成为独立的信息单元,这些信息包括切片的“寿命”、中心温度、表面温度、位置等。在实际生产过程中,由于实际拉速、中包钢水过热度、各冷却区的实际水量等因素不断变化,因而切片在不同时刻具有不同的信息,通过每个切片的“寿命”、位置等信息确定不同时刻下该切片的凝固传热微分方程边界条件,对每个切片的凝固传热微分方程进行周期性的求解,就可以动态描述每个切片在不同时刻、不同位置下的温度场。由于每个切片温度场的变化代表该切片所处位置上铸坯温度场的变化,因而将所有切片串起来,就可以动态描述整个铸流的温度场分布。

### 3 动画显示与数据保存

动态仿真系统采用面向对象的程序设计语言 VC++ 6.0 编制而成,窗口式设计。仿真系统将铸坯的中心温度、表面中心线温度、角部温度、固液相凝固前沿等温度场数据以动态曲线的形式在界面上直观地显示出来,界面友好,便于操作人员及时准确地了解温度场的变化。图 3 是动态仿真系统运行时的主界面。

另外,系统还将铸机的生产状态、钢种、拉速、浇铸温度、冷却工艺以及铸坯温度场数据等实时仿真结果数据存入系统自带的 Access 数据库中,作为历史数据以供查询,同时便于工艺和研究人员对整个仿真过程和结果做进一步的研究,为系统的优化提供数据支持。

### 4 应用与结果分析

#### 4.1 动态仿真系统准确性的射钉试验验证

大方坯连铸温度场动态仿真系统结合包钢 5<sup>#</sup> 大方坯连铸机,对 20<sup>#</sup>、45<sup>#</sup>、U75V 三个典型钢种在不同工况下的温度场进行了模拟仿真,计算出了铸坯的坯壳厚度分布。为了验证模拟结果,同时分别在铸机矫直点处(距结晶器弯月面 15.9 m)、第 2 架拉矫机与第 3 架拉矫机之间(距结晶器弯月面 18.8 m)、第 5 架拉矫机前(距结晶器弯月面 22.2 m)三个位置通过射钉实验对仿真结果进行了校验,系统仿真结果和射钉实验数据如表 1 所示。

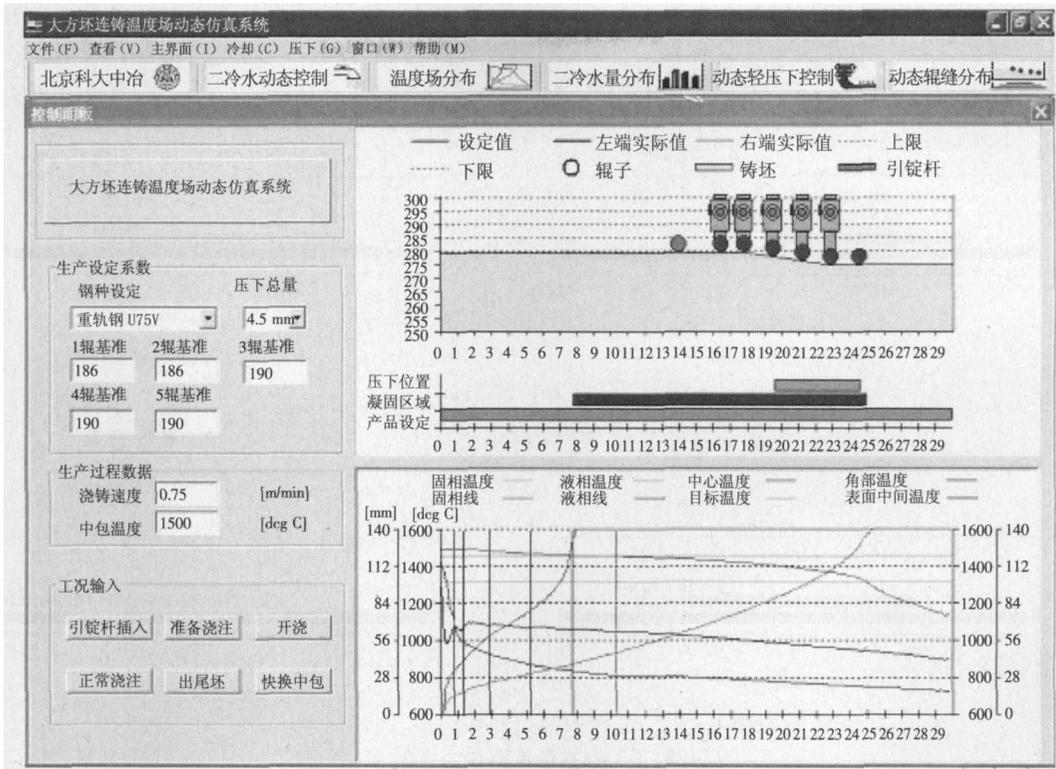


图 3 动态仿真系统主界面

Fig. 3 Interface of the dynamic simulation system for temperature field of bloom casting

表 1 系统仿真和射钉实验坯壳厚度分布结果对比

Table 1 Results of dynamic simulation system and the rivet pin shooting

距弯月 面距离 /m	20 <sup>#</sup>		45 <sup>#</sup>		U75V	
	系统仿真	射钉实验	系统仿真	射钉实验	系统仿真	射钉实验
15.9	135.47	130.00	132.32	130.20	100.36	99.00
18.8	172.40	170.07	166.22	163.10	121.60	119.10
22.2	190.00	190.00	190.00	190.00	155.18	实验失效

从表 1 可以看出,仿真结果与射钉实验数据基本吻合,最大偏差约为 5.47 mm,相对误差小于 4%,达到了工艺要求的精度。因此该仿真系统可以较好地模拟包钢 5<sup>#</sup>机的连铸温度场凝固进程,计算实际凝固终点位置,为动态二冷与动态轻压下工艺提供可靠稳定的信息保证。

#### 4.2 动态仿真系统的应用

在实际应用中,动态仿真系统可以帮助连铸技术人员和操作人员对连铸过程进行离线动态仿真,图 4 是动态仿真系统对不同拉速下铸坯凝固终点位置的变化过程进行的模拟。通过图 4 模拟结果可知,当拉速小于 0.55 m/min 或大于 0.85 m/min 时,铸坯的最佳轻压下位置不在铸机的可压下范围内,因此连铸技术人员和操作人员制定生产制度时,拉速应控制在 0.65 ~ 0.75 m/min 的范围内,以保证铸机对铸坯实施合理的轻压下。

#### 5 结论

(1)建立了大方坯动态工况模型、动态铸坯温度场跟踪模型和设备与工艺参数库,开发了大方坯连铸温度场动态仿真系统。仿真系统采用 VC++ 6.0 编制,窗口式设计,用户界面友好。

(2)大方坯连铸温度场动态仿真系统结合包钢 5<sup>#</sup>大方坯连铸机,针对典型钢种在不同工况下的温度场进行了模拟仿真,经射钉实验证明,仿真结果达到工艺要求的精度,可以精确地模拟大方坯连铸温度场凝固进程,再现大方坯浇铸的动态过程,准确计算实际的凝固终点位置。

(3)大方坯连铸温度场动态仿真系统的建立,不仅为连铸技术人员和操作人员提供了优化工艺参数、制定合理生产制度的离线连铸工艺仿真平台,而且是开发动态二冷配水与动态轻压下在线控制系统的前提和保证,对于降低在线控制

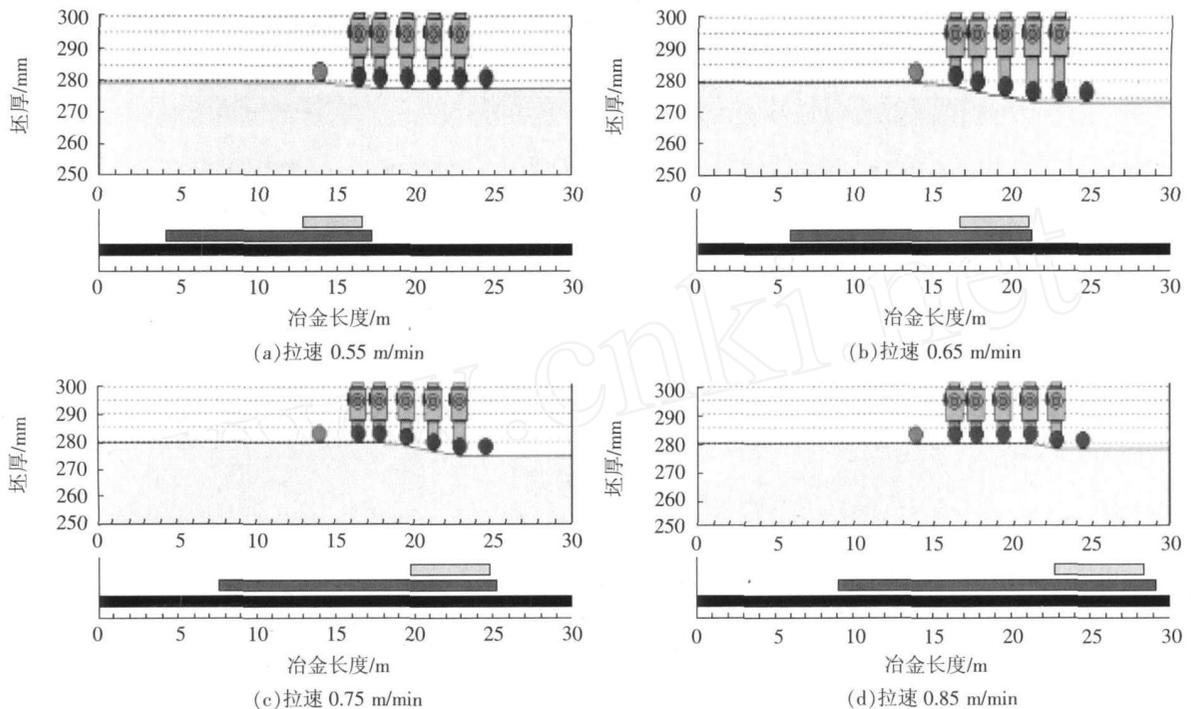


图 4 动态仿真系统的应用

Fig. 4 Application of the dynamic simulation system

□ 适合压下的区域; ■ 钢种凝固区域; ■ 钢种

系统开发的风险与成本具有重要意义。

#### 参考文献:

- [1] 蔡开科. 连铸二冷区凝固传热及冷却控制 [J]. 河南冶金, 2003, 11(1): 3-7.  
CA I Kai-ke. Solidification heat-transfer and cooling control

in the continuous casting secondary cooling zone [J]. Henan Metallurgy, 2003, 11(1): 3-7.

- [2] 王国新. 国产大方坯动态 [C] // 2007 中国钢铁年论文集 4. 北京: 冶金工业出版社, 2007: 87-88

[编辑:夏宁]

(上接第 27 页)

卷取温度命中率, 数据来源是日照 1 580 mm 热连轧机 2007 年 9 月 25 ~ 28 日的大生产数据 (不去除带钢头部, 不区分换规格、首卷钢), 钢卷的厚度范围为 5.0 ~ 11.7 mm, 共计 1 014 块, 平均命中率为 96.43%。现场应用效果表明, 本控制系统的功能完善, 控制精度高, 具有很好的推广前景。

#### 参考文献:

- [1] 孙一康. 带钢热连轧的模型与控制 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002  
[2] 陈礼斌, 王维东. 板带层流冷却控制技术评述 [J]. 河北冶金, 2003(3): 39-43.  
CHEN Li-bin, WANG Wei-dong. Review of plate and strip laminar-flow control cooling [J]. Hebei Metallurgy, 2003(3): 39-43.  
[3] 王萍, 黄贞益, 尹桂全, 等. 热轧带钢层流冷却温度

控制模型的应用分析 [J]. 钢铁研究学报, 2007, 19(4): 31-34, 61.

WANG Ping, HUANG Zhen-yi, YN Gui-quan, et al. Application analysis of temperature control models of laminar cooling for hot rolled strip [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2007, 19(4): 31-34, 61.

- [4] 彭良贵, 于明, 王昭东, 等. 热轧带钢层流冷却数学模型述评 [J]. 轧钢, 2003, 20(6): 25-29.

PENG Liang-gui, YU Ming, WANG Zhao-dong, et al. Discussion on mathematical models of laminar cooling system used in hot strip mill [J]. Steel Rolling, 2003, 20(6): 25-29.

- [5] 郑轲. 热轧带钢卷取温度控制数学模型 [J]. 鞍钢技术, 2000(4): 35-38

ZHENG Ke. Mathematical model on coiling temperature control of hot rolled strip steel [J]. Angang Technology, 2000(4): 35-38

[编辑:沈黎颖]