

文章编号:1673-9469(2009)04-0017-03

## 热轧板坯加热温度场有限元模拟

李建新<sup>1</sup>,何宜柱<sup>2</sup>

(1.河北钢铁集团邯郸钢铁股份有限公司,河北邯郸 056015;2.安徽工业大学材料工程学院,安徽马鞍山 243002)

**摘要:**采用有限元法,建立了热轧步进式加热炉内板坯三维温度场的数值计算模型。通过现场拖偶实验确定了板坯加热的边界条件,并验证了模型计算结果的准确性。计算结果表明,在保证板坯加热质量的前提下,提高加热炉预热段炉温、板坯入炉温度有利于缩短板坯在加热炉内的加热时间,提高加热炉生产效率。

**关键词:**板坯加热;温度场;有限元

**中图分类号:** TF062

**文献标识码:** A

### FEM simulation of slab temperature field during reheating

LI Jian-xin<sup>1</sup>, HE Yi-zhu<sup>2</sup>

(1. Handan Iron and Steel Group Co., LTD, HBIS, Hebei Handan 056015, China; 2. School of Materials Science & Engineering, Anhui University of Technology, Anhui Maanshan 243002, China)

**Abstract:** A mathematical model for numerical simulating the temperature distribution in reheating furnace of hot rolling process is developed by using FEM method. The heat transfer boundary condition of slab is determined by Furnace black box testing, while the validity of the numerical simulation is verified by using the black box testing experimental data. The results indicate that raising the temperatures of preheating section and the slab initial could shorten the slab heating time, guarantee the final quality of slab and improve the reheating furnaces productivity.

**Key words:** slab reheating; temperature field; FEM

板坯加热在钢铁材料生产过程中占有重要地位,随着能源的短缺、钢铁行业内部竞争加剧,在保证产品质量的前提下节能降耗,提高生产效率,已是目前冶金行业共同追求的目标<sup>[1]</sup>。加热过程是一个复杂的物理化学过程<sup>[2]</sup>,随板坯的入炉温度、板坯尺寸、热物性参数、炉子尺寸、燃料的种类、炉子各段炉温情况的不同而影响加热过程,因此,分析有关影响因素的影响规律和影响程度对控制加热过程有着重要的意义<sup>[3]</sup>。本文采用 SY-SWELD 有限元软件建立了步进梁式加热炉内加热的板坯温度场数学模型,利用“黑匣子”试验验证了模型的正确性。

### 1 有限元模型

本文以某热轧厂的1座步进梁式加热炉为

例,预热段没有安装烧嘴,炉温由炉尾逐渐升高;其余三段安装有烧嘴。板坯依次通过加热炉各区进行加热,温度场求解域随板坯移动不断变化。

#### 1.1 基本假设

板坯在炉内加热过程中,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过程。如此复杂的热工过程难以进行准确的数学描述,因此必须进行合理的简化。本文对加热炉内板坯温度场建模时,做如下假设:

(1)假设炉膛温度分布均匀且不随时间变化;(2)板坯匀速运动;(3)炉墙热特性和炉气黑度不随时间和温度变化;(4)不考虑步进梁与板坯之间的传热,认为板坯周围全是炉气;(5)板坯与炉气的对流、辐射传热视为与无限大环境的传热;(6)忽略板坯表面氧化对传热的影响。

### 1.2 边界条件

温度场有限元模型边界条件有两种:板坯表面与炉膛气氛接触的对流边界和辐射边界。加热炉中炉温一般高达 1 000℃ 以上,传热过程中辐射传热量占总传热量的 90% 以上<sup>[4]</sup>,由于加热炉内炉气的对流换热系数很难确定,边界条件通过辐射换热乘系数加以补偿处理。

炉膛传热计算以热电偶温度为基准,采用总括热吸收率法计算公式计算板坯表面的热流密度  $q_u$ <sup>[5]</sup>,其表达式为

$$q_u = \phi\sigma(T_f^4 - T_s^4) \quad (1)$$

式中  $q_u$ —表面辐射热流密度,  $W/m^2$ ;  $\sigma$ —Stefan-Boltzman 常数;  $\phi$ —炉膛总括热吸收率;  $T_f$ —板坯所处炉温, K;  $T_s$ —板坯表面温度, K。

### 2 有限元模型验证

为了校核模型计算结果的可靠性,准确地确定板坯在加热炉内加热过程的边界条件,在某钢厂进行了加热炉“黑匣子”测温试验,“黑匣子”试

验过程中所测钢种为 SS400,板坯规格是 150mm × 2 500mm × 15 000mm,通过反复模拟计算并与“黑匣子”试验数据进行对比,最终确定了较为准确的板坯表面与炉气之间的总括热吸收率,炉温、板坯上表面中心点的模拟温度和测试温度如图 1 所示,可以看出,在板坯整个加热过程中,计算值与实测值吻合良好。

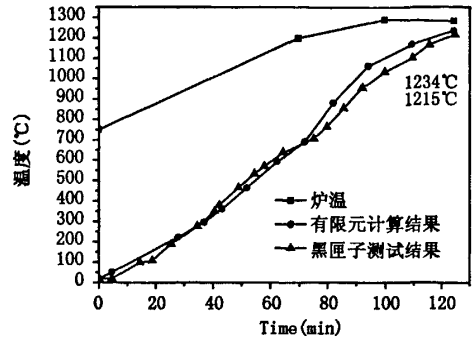


图1 模拟与黑匣子测试中心点比较图

Fig.1 Comparison between the numerical simulation and black box testing

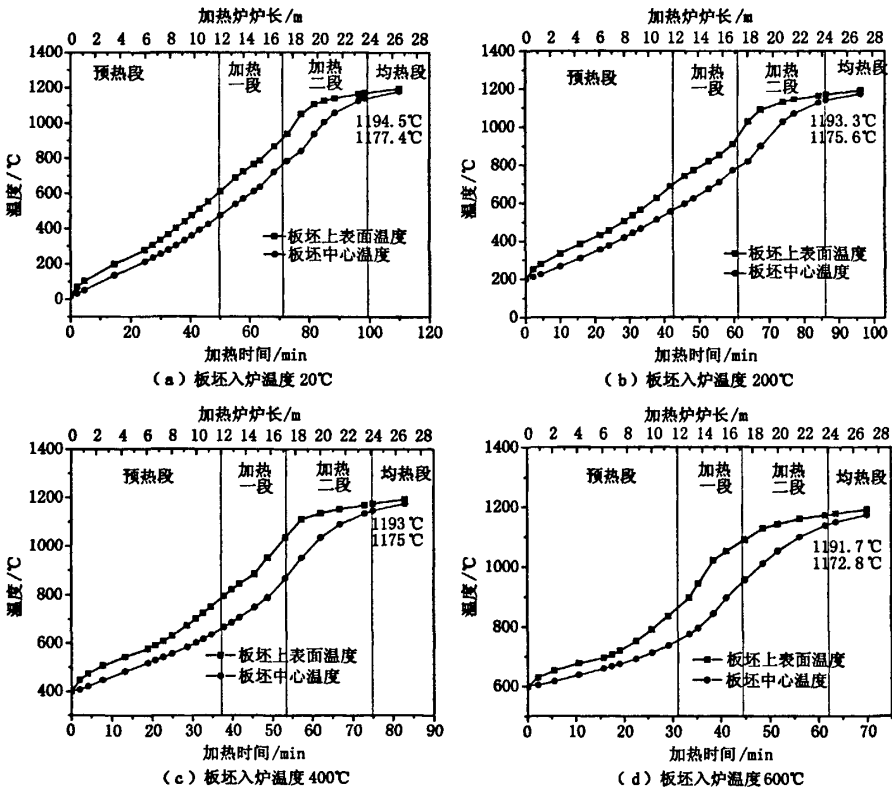


图2 不同入炉温度情况下板坯表面温度与中心温度变化

Fig.2 Temperature changing of slab surface and its center at different slab initial temperature

### 3 有限元计算结果及讨论

#### 3.1 入炉温度对板坯加热的影响

板坯入炉温度有冷装和热装,不同板坯入炉温度加热工艺见表1。

表1 加热工艺  
Tab.1 Heating process

段	预热段	加热一段	加热二段	均热段
炉温(℃)				
上加热区	826	1180	1250	1220
下加热区	840	1098	1220	1227
上加热区在炉时间(min)	50	21	18	21
200℃入炉	43	19	15	19
400℃入炉	39	15	14	15
600℃入炉	32	13	12	13

图2为计算所得到的不同入炉温度条件下板坯表面温度、中心温度随时间的变化曲线。在出炉温度和温差基本相同的条件下,板坯入炉温度不同,加热时间有很大区别。板坯入炉温度20℃、200℃、400℃、600℃对应的加热时间为110min、96min、83min、70min,随着入炉温度的提高,加热时间减少,说明热装达到了提高生产效率 and 节能降耗的目的。

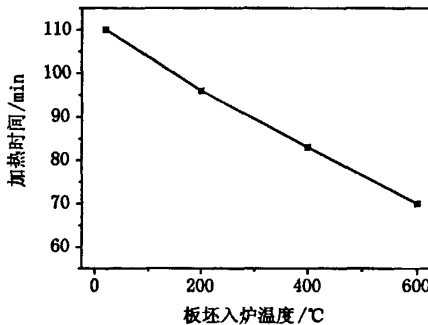


图3 板坯入炉温度对加热时间的影响

Fig.3 The influence of slab initial temperature for heating time

由图3可以看出,板坯入炉温度与加热时间基本成线性关系。通过回归,得到加热炉入炉温度与加热时间的关系  $t = 110.64 - 0.068T$

由上式可知,板坯入炉温度提高100℃,加热时间缩短6.8min。

#### 3.2 预热段炉温变化对板坯加热的影响

通过对加热炉大量实际生产数据统计,预热段炉温最高870℃,最低为720℃。图4中,炉温1的预热段炉温为870℃,炉温2的预热段炉温为720℃。

炉温1情况下,板坯中心温度在预热段和加热段内的平均升温速率分别为9.15℃/min和

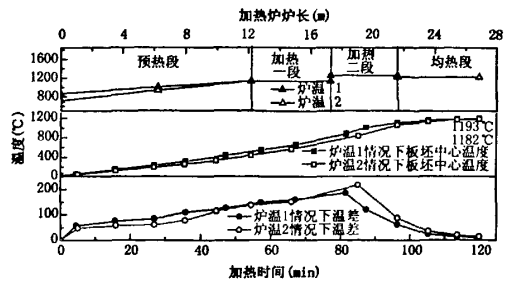


图4 预热段炉温变化对板坯表面温度和温差的影响

Fig.4 The influence of preheating section temperature for temperature and temperature difference of slab surface

10.35℃/min,这与炉温2的7.65℃/min和11.37℃/min相比,前者在预热段内的升温速率比后者高,但加热段内的升温速率低于后者。这说明,提高预热段炉温,可以缩短加热段的加热时间。

板坯加热过程中内外温差变化如图4所示,板坯处于预热段时,炉温1情况下产生的温度差大于炉温2,这会增大板坯的热应力,使得板坯破裂,因此对于高合金钢的加热,需要根据实际情况控制加热段炉温。

### 4 结论

1)采用有限元法,建立了热轧步进式加热炉内板坯三维温度场有限元模型,模型计算值与实测值吻合良好。

2)板坯入炉温度提高100℃,加热时间缩短6.8min。提高板坯入炉温度和预热段炉温,有利于提高生产率,降低能耗。

3)提高预热段炉温,同时会增大板坯热应力,对于高合金钢的加热,需要根据实际情况控制加热段炉温。

#### 参考文献:

- [1] 刘新忠,韩静涛,余万华.步进梁式加热炉内钢坯温度场数值模拟[J].塑性工程学报,2008,15(3):199-203.
- [2] 李俊洪,林霞,刘勇.热轧板坯加热温度场数值模拟及应用[J].钢铁,2009,44(1):43-46.
- [3] 青格勒,程素森,杨天钧.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.
- [4] BOINEAU P, GRIFFAY G. Numerical simulation of a batch metallurgy furnace equipped with flame less oxidation regenerative burners [J]. Revue de Metallurgie, 2007, 104(3): 142-148.
- [5] LARS SANDSTROM, DONALD MALMBERG. On-line in situ monitoring of oxygen concentration and gas temperature in a reheating furnace utilizing tunable diode-laser spectroscopy [J]. Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2002, 58(11): 2449-2455.

(责任编辑 刘存英)