

其 他

基于步进式加热炉的钛坯 加热过程温度场研究

向国进^{1,2}, 罗 许², 耿乃涛³, 张安康¹, 李俊洪², 于 辉¹

(1. 燕山大学机械工程学院, 河北 秦皇岛 066000; 2. 钒钛资源综合利用国家重点实验室, 四川 攀枝花 617000; 3. 成都先进金属材料产业技术研究院股份有限公司, 四川 成都 610300)

摘 要: 基于某钢厂的蓄热室步进式加热炉, 以炉内的 TA1 钛坯为研究对象, 建立传热的数学模型和加热过程的有限元模型, 开展钛坯在炉内加热过程中的温度分布研究。研究炉膛温度和钛坯入炉温度对钛坯加热过程中最大断面温差的影响, 以及预热段温度和一加热段温度对满足出炉要求钛坯芯部温度的加热时间影响。结果表明: 钛坯经过预热段和加热段加热时, 其最高温度一直位于端面角部, 最低温度位于钛坯芯部, 而经过均热段后, 角部温度最低。预热段温度每升高 5 ℃, 最大断面温差增加 1~2 ℃, 钛坯入炉温度每升高 50 ℃, 最大断面温差减小 3~8 ℃; 预热段温度每升高 10 ℃, 芯部温度满足出炉要求的时间减少 1~2 min, 一加热段温度每升高 10 ℃, 芯部温度满足出炉要求的时间减少 4~6 min。

关键词: TA1 钛坯; 步进式加热炉; 传热; 有限元模型; 温度分布

中图分类号: TF823, TG339

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2021)06-0191-08

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2021.06.028

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Study on temperature field of titanium slab heating process based on walking-beam-type furnace

Xiang Guojin^{1,2}, Luo Xu², Geng Naitao³, Zhang Ankang¹, Li Junhong², Yu Hui¹

(1. School of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066000, Heibei, China; 2. State Key Laboratory of Vanadium and Titanium Resources Comprehensive Utilization, Panzhihua 617000, Sichuan, China; 3. Chengdu Advanced Metal Material Industrial Technology Research Institute Co., Ltd., Chengdu 610300, Sichuan, China)

Abstract: Based on the walking-beam-type reheating furnace in a certain steel plant, the TA1 titanium billet in the furnace was taken as the research object, and the mathematical model of heat transfer and the finite element model of heating process were established to study the temperature distribution of titanium billet in the heating process. The effects of furnace temperature and inlet temperature of titanium billet on the maximum temperature difference of cross section in the heating process of titanium billet were studied, and the effects of preheating zone temperature and heating zone (I) temperature on the heating time to meet the requirement of tapping temperature of titanium billet core were studied. The results show that the maximum temperature of the titanium billet is always at the corner of the end face and the minimum temperature is at the core of the titanium billet when the titanium billet is heated by the preheating zone and the heating zone (I), while the corner temperature is the lowest after the soak-

收稿日期: 2021-11-08

基金项目: 河北省自然科学基金(E202103237); 中央引导地方科技发展资金项目(216 Z1002 G)。

作者简介: 于辉 (1974—), 男, 天津人, 教授, 博士研究生导师, 通讯作者, 主要从事脆、塑性材料成形研究, E-mail: yuhui@ysu.edu.cn。

ing zone. When the preheating temperature increases by 5 °C, the maximum section temperature difference increases by 1 ~ 2 °C, and when the titanium billet temperature increases by 50 °C, the maximum section temperature difference decreases by 3 ~ 8 °C. When the temperature of preheating zone increases by 10 °C, the time for the core to meet the requirement of furnace discharge reduces by 1 ~ 2 min. When the temperature of heating zone (I) increases by 10 °C, the time for the core to meet the requirement of furnace discharge reduces by 4 ~ 6 min.

Key words: TA1 titanium slab, walking-beam-type furnace, heat transfer, finite element model, temperature distribution

0 引言

加热炉是轧钢生产线上的主要耗能设备,通过对其内部的板坯加热使其温度分布适合轧制要求,生产出质量可靠的成品。加热工序在整个轧钢生产中起着十分重要的作用,板坯的加热质量好,容易获得断面形状正确、几何尺寸精确的终轧成品。板坯的加热温度包括表面温度、沿断面上的温度差及沿板坯长度方向上的温度差,加热时间的长短、出炉温度的高低和断面温度的均匀程度是衡量板坯加热质量的重要参数。

关于轧线加热炉内的板坯加热问题,国内外学者开展了许多研究。金明等^[1]以某公司热轧带钢厂的三段步进式加热炉为研究对象,使用 ANSYS 软件研究了板坯在炉内加热过程中的温度分布,分析炉内均热段的温度和保温时间及氧化铁皮厚度对板坯温度场的影响。果晶晶等^[2]以加热炉内炉气与钢坯的热量交换为研究对象,采用 CFD 数值方法建立了不同燃料配比情况下炉气在炉内传热过程以及钢坯加热过程的数学模型。冯光宏等^[3]模拟计算了冷装和热装两种加热制度的板坯温度场分布,表明热装板坯在整个加热过程中表面与芯部的温差要低于冷装铸坯。Kim 等^[4]分别考虑炉室中的热辐射和板坯内导热微分方程的瞬态传热,采用有限体积法研究了不同钢坯吸收系数和发射率对钢坯传热特性的影响。Tang 等^[5]建立了瞬态三维计算流体动力学 (CFD) 模型,模拟了再加热炉内的流动特性、燃烧过程和多尺度传热过程。目前对加热炉的研究多是针对加热钢坯的步进梁式加热炉,由于钛与碳钢的物理性质相差较大,加热工艺不同^[6],针对钛坯加热研究较少。

笔者基于某钢厂蓄热室步进式加热炉,以 TA1 钛坯为研究对象,建立钛坯加热的传热数学模型,基于 FLUENT 软件平台研究钛坯加热过程中的温度场分布和温度变化情况,并与现场情况对比验证模

型的正确性。分析钛坯最大断面温差随炉膛内预热段温度和钛坯入炉温度的变化规律,以及钛坯芯部温度满足出炉要求的时间与炉膛温度的变化规律,研究结果对于建立合理的钛坯加热制度具有指导意义。

1 纯钛 TA1 的加热工艺要求

金属钛在高温环境中的还原能力极强,能与氧、氢、氮以及其他许多元素化合。常温下钛与氧气化合生成一层极薄致密的氧化膜;当温度达到 500 °C 时钛氧化膜会成为多孔状,氧元素通过钛氧化膜中小孔不断向基体扩散,形成硬脆层使其塑性降低;当温度达到 700 °C 以上时,钛与氮发生反应会形成表面吸气层,在还原性气氛中加热时,钛的强烈吸氢效果使氢扩散到其内部而减低其塑性^[7-8]。

为此,在进行工业纯钛板卷轧制生产时,将钛坯加热温度设定为在低于 β 相变点 50 ~ 150 °C 的 $\alpha+\beta$ 区域上限,即加热温度确定为 850 °C $\pm$ 10 °C,纯钛板坯的来料厚度一般小于 100 mm,加热时间确定为 1.0 ~ 1.3 min/mm(坯料厚度)^[9],其导热系数和比热容随温度变化曲线如图 1 所示。

2 温度场计算模型

2.1 传热的数学模型

钛坯表面从外界接受热量,然后以热传导的方式将热量传到钛坯内部,在被加热的钛坯上定义一个各边长度分别为 dx, dy, dz 的微元体,其钛坯内热量传递过程如图 2 所示。

建立钛坯三维非稳态导热方程直角坐标下的数学模型并添加内源项^[10]:

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

由于钛坯表面高温环境下极易生成氧化层^[7],计算时引入系数 ψ ($\psi=0.8 \sim 0.9$) 考虑氧化层对钛坯加热的影响。

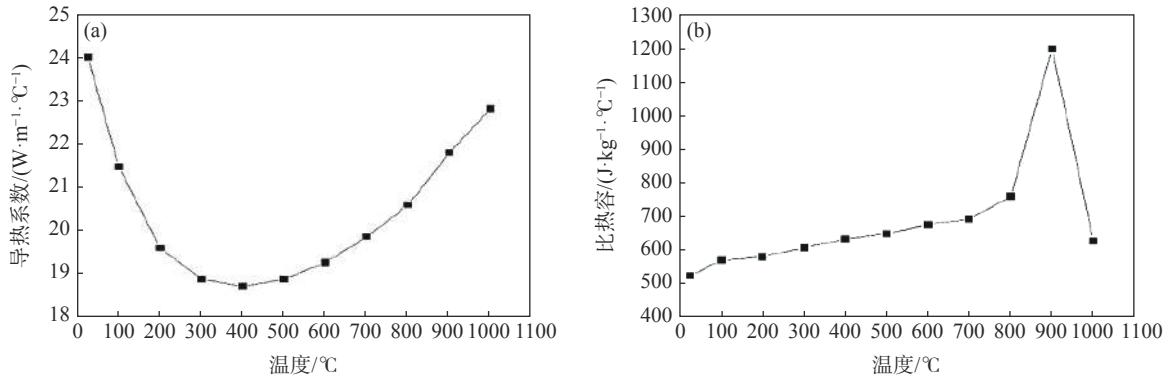


图1 TA1 导热系数、比热容随温度的变化曲线

Fig. 1 Variation of thermal conductivity and specific heat of TA1 with temperature

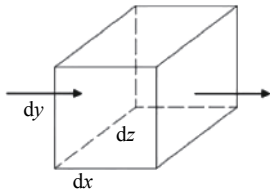


图2 微元体内部热量传递过程

Fig. 2 Heat transfer process inside the cell

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \psi \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \psi \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \psi \frac{\partial T}{\partial z} \right) + S \quad (2)$$

式中 ρ —钛坯密度, kg/m³;

c —钛坯比热容, J/(kg·°C);

T —钛坯温度, °C;

τ —钛坯在炉时间, s;

λ —钛坯导热系数, W/(m·°C);

ψ —表面氧化层影响系数;

S —内热源;

x 、 y 、 z —笛卡尔坐标。

钛坯在加热炉内加热,一方面与炉气,炉墙发生热辐射,另一方面与炉气发生对流换热,图3为炉膛内钛坯的热量交换示意^[10]。

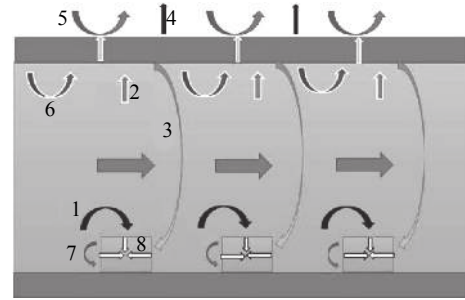
低温状态的钛坯进入加热炉后,高温炉气和炉墙与钛坯发生对流,辐射换热,在钛坯内部由热传导将热量由钛坯表面传入芯部,引入表面氧化层影响的系数,辐射热量计算公式为

$$Q_{qbm} = \frac{\varepsilon_q \varepsilon_m \psi [1 + \phi_{bm}(1 - \varepsilon_q)]}{\varepsilon_q + \phi_m(1 - \varepsilon_q)[\varepsilon_m + \varepsilon_q(1 - \varepsilon_m)]} \times C_0 \left[\left(\frac{T_q}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_m}{100} \right)^4 \right] A_m \quad (3)$$

式中 Q_{qbm} —炉气、炉墙对钛坯的辐射传热, W;

ε_q —炉气黑度, $\varepsilon_q=0.3$;

ε_m —钛坯黑度, $\varepsilon_m=0.8$;



1-炉气向钢坯辐射; 2-炉气向炉墙辐射; 3-炉墙向钢坯辐射; 4-炉墙向外面对流散热; 5-炉墙向外对流传热; 6-炉气向炉墙对流散热; 7-炉气向钢坯对流散热; 8-内部传导热

图3 加热炉内热交换示意

Fig. 3 Schematic diagram of heat exchange in heating furnace

T_q —炉气温度, °C;

T_m —钛坯表面温度, °C;

C_0 —绝对黑体的辐射系数, 5.675 W/(m²·°C⁴);

ψ —表面氧化层影响系数;

ϕ_{bm} —炉墙对钛坯的角系数。

在式(3)中, 令

$$\sigma_{qbm} = \frac{\psi \varepsilon_q \varepsilon_m [1 + \phi_{bm}(1 - \varepsilon_q)]}{\varepsilon_q + \phi_m(1 - \varepsilon_q)[\varepsilon_m + \varepsilon_q(1 - \varepsilon_m)]} C_0 = \varepsilon_{qbm} C_0 \quad (4)$$

有:

$$Q_{qbm} = \varepsilon_{qbm} C_0 \left[\left(\frac{T_q}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_m}{100} \right)^4 \right] A_m = \sigma_{qbm} \left[\left(\frac{T_q}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_m}{100} \right)^4 \right] A_m \quad (5)$$

式中 σ_{qbm} —炉气和炉墙对金属的导出辐射系数, W/(m²·°C⁴);

ε_{qbm} —体系总黑度。

对流换热计算公式:

$$Q_{对} = \alpha_{qbm} (T_q - T_m) A_m \quad (6)$$

式中 α_{qbm} —炉气对钛坯换热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C^4)$;

对流换热系数:

$$\alpha_{qbm} = \frac{N_u \lambda}{l} \quad (7)$$

式中 N_u —特征温度努尔赛系数;

λ —导热系数;

l —特征尺寸。

钛坯在加热炉内从炉气和炉墙获得的总热量:

$$Q_{\Sigma qbm} = \alpha_{qm}(t_q - t_m)A_m + \sigma_{qbm} \left[\left(\frac{T_q}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_m}{100} \right)^4 \right] A_m \quad (8)$$

式中 $Q_{\Sigma qbm}$ —炉气、炉墙给钛坯总热量。

虽然钛坯加热时炉膛内温度与碳钢加热时相比温度较低,但依旧是辐射换热占据主导,可以采用将

对流换热的方式将对流换热的热量换算为辐射换热,将对流换热的热量折合为辐射换热热量的 10%。

$$Q_{\Sigma qbm} = 1.1 \sigma_{qbm} \left[\left(\frac{T_q}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_m}{100} \right)^4 \right] A_m \quad (9)$$

2.2 有限元模型建立

本文研究的蓄热室步进式四段加热炉的炉体有效加热长度为 43.2 m, 根据加热炉实际尺寸构造建立加热炉模型如图 4 所示, 钛坯尺寸为 8 014 mm × 1 024 mm × 221 mm。钛坯在炉内加热过程中依次经过预热段、一加热段、二加热段和均热段。由于加热炉体积较大, 而且钛坯在加热炉内的加热过程比较复杂。为了研究不同加热制度对钛钢复合板的影响, 基于 fluent 软件建立了加热过程的流固耦合有限元模型, 研究钛坯加热过程中的温度分布规律。

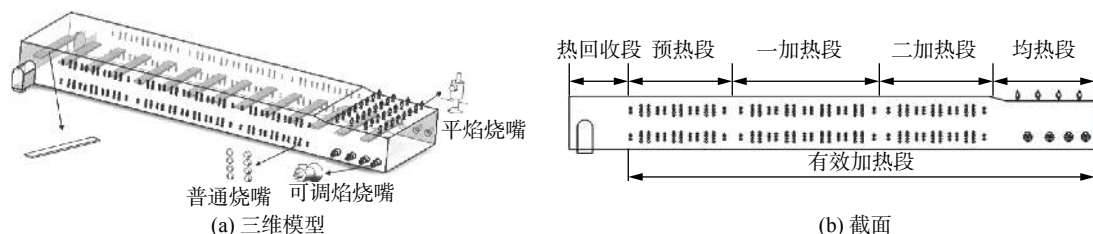


图 4 加热炉三维模型与截面
Fig. 4 3D model and section diagram of heating furnace

2.3 初始条件和边界条件

钛坯入炉温度 68 $^\circ C$, 钛坯在加热炉内的加热制度由现场钛坯在加热炉内向前运行时, 炉膛内的温度变化进行简化, 图 5 为实际炉膛内温度和计算得到温度变化曲线。得到钛坯的加热制度如表 1 所示。

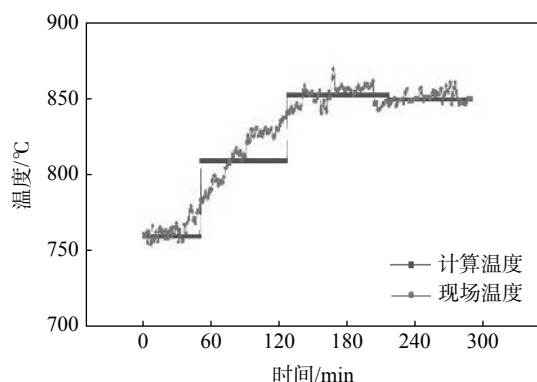


图 5 现场炉膛温度及计算温度

Fig. 5 On-site furnace temperature and the calculated temperature

3 结果分析

3.1 钛坯温度场分析

图 6 为钛坯稳定加热时的加热炉温度场分布,

加热炉炉膛内烧嘴处温度最高, 达到 1 200 $^\circ C$ 以上, 其他部位温度分布较为均匀, 从热回收段到二加热段炉膛温度不断升高, 沿加热炉炉长方向二加热段温度最高, 热回收段温度最低。

表 1 钛坯加热制度
Table 1 Heating system of titanium slab

	加热温度/ $^\circ C$	加热时间/min
预热段	710 ~ 780	50±10
加热段一	800 ~ 830	70±10
加热段二	850 ~ 860	80±10
均热段	850±10	70±10

图 7 为钛坯加热过程中, 随着时间推移, 钛坯芯部和边界的温度以及断面温差的变化曲线。在预热段和一加热段时, 由于钛坯初始温度和环境温度差别较大, 钛坯整体升温较快, 边界与炉气直接接触, 在最开始时钛坯边界和角部升温较钛坯芯部快, 钛坯边界和芯部温差不断增加, 最大温差为 147.13 $^\circ C$, 然后温差不断缩小, 离开预热段时, 钛坯边界温度快速升高到 607.84 $^\circ C$, 钛坯芯部温度升高到 518.25 $^\circ C$ 。

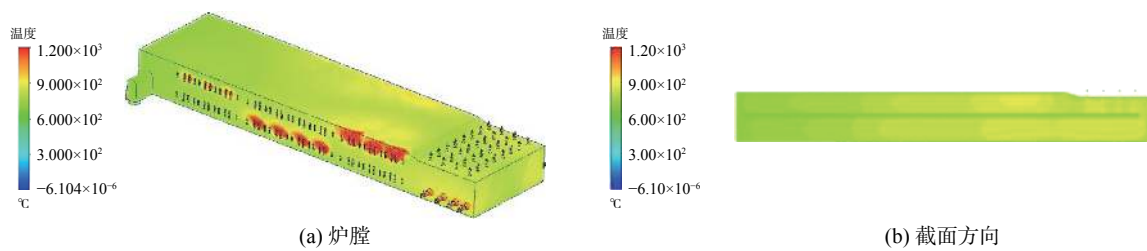


图 6 加热炉温度场分布

Fig. 6 Temperature field distribution of the heating furnace

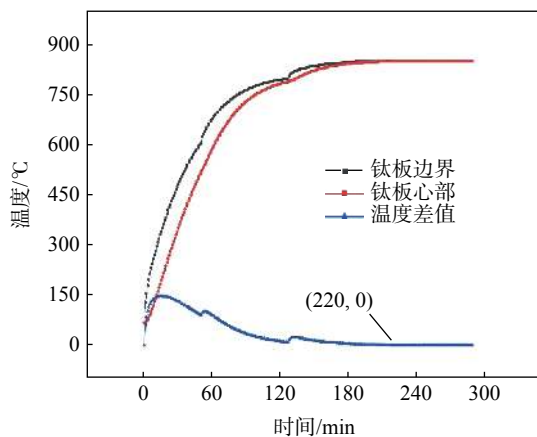


图 7 钛坯温度及断面温差随加热时间的变化

Fig. 7 Changes of temperature and sectional temperature difference of titanium slab with heating time

钛坯进入二加热段和均热段后, 钛坯温度继续升高, 此时钛坯升温速率较慢, 钛坯边界和钛坯中心的温差也越来越小, 钛坯加热到 209 min 时, 钛坯芯部温度达到 850 °C, 此时进入均热段进行保温, 由于均热段炉膛温度低于钛坯边界, 此时钛坯边界温度下降, 芯部保温, 到 220 min 时, 板坯断面温差为 0 °C。钛坯温差达到 0 °C, 之后钛坯处于保温状态。

图 8 (a)、(b)、(c) 分别为钛坯在 20、180 min 和 288 min 时的温度分布云图, 图 (a) 为钛坯刚进入加热炉时, 因为最开始的受热面在上下表面和两端面, 所以此时钛坯角部温度较高, 最高温度为 624.81 °C, 钛坯芯部时, 此时是通过上下表面和梁端面吸收外部热量进行热传导而升温, 热传导相对外部升温较慢, 因此钛坯芯部温度最低, 最低温度 248.68 °C。

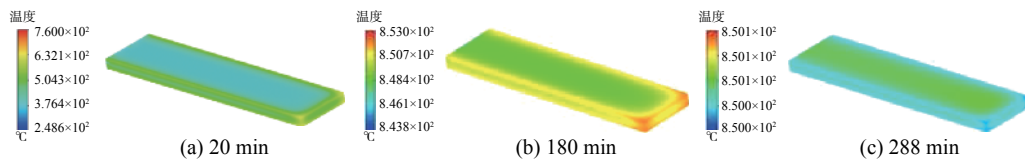


图 8 加热过程中钛坯温度分布云图

Fig. 8 Temperature distribution cloud diagram of titanium slab during heating

图 (b) 为钛坯进入二加热段一段时间后, 此时由图可知钛坯最高温度依旧在钛坯角部, 最低温度在钛坯芯部, 此时钛坯依旧处于吸热状态, 但这时钛坯边界和芯部的温差特别小, 温差为 4.3 °C。

钛坯在经过 288 min 的在四段加热后出炉, 此时钛坯最高温度 850.21 °C, 最低温度为 850.17 °C。从图 8(c) 中可以看处此时钛坯芯部温度高于表面温度, 这是由于在均热段钛坯表面和芯部都达到了出炉要求, 但是芯部与钛坯表面进行换热, 同时表面较芯部散热较快, 最终出炉时钛坯温度和炉膛温度一致。

3.2 模型验证

为校核模型计算结果的准确性, 将计算的钛坯

芯部和钛坯边界的温度与现场采集的数据进行对比校核, 由图 9 可知计算结果与实测数据吻合较好, 最大误差小于 5%, 计算模型能准确反映钛坯实际的加热情况。

4 加热制度优化

4.1 断面温差控制

钛坯在加热时, 表面温度和中心温度存在着断面温差, 钛坯断面温差过大会导致热应力过大, 严重时会造成被加热的钛坯出现断裂的现象^[1], 为此, 研究了钛坯在加热过程中钛坯表面和钛坯芯部的最大温差随加热炉预热段温度和钛坯入炉温度的变化规律, 以此对钛坯加热的加热制度提供参考。

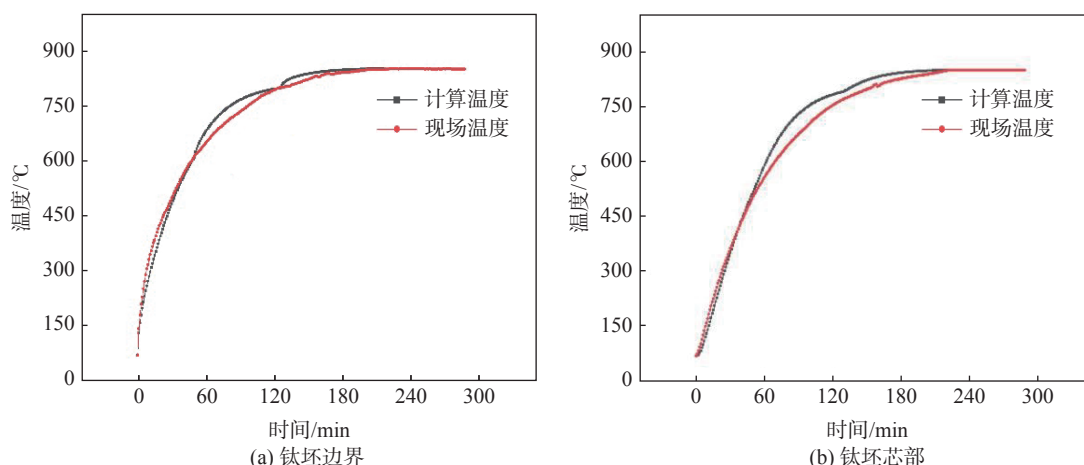


图9 钛坯计算温度与现场温度对比

Fig. 9 Comparison between calculated temperature and field temperature of titanium slab

钛坯在加热炉中加热时,断面最大温差随着加热炉预热段温度升高而增加,随着钛坯入炉温度增大而增大,需要建立钛坯加热时断面最大温差与预热段温度和钛坯入炉温度的关系式,断面最大温差与预热段温度函数关系见式(10),断面最大温差与钛坯入炉温度函数关系见式(11)。

$$\Delta T_{\max} = 0.640T_{\text{pre}} - 337.740 \quad (10)$$

$$\Delta T_{\max} = -0.938T_0 + 151.688 \quad (11)$$

式中 $\Delta T_{\max}$ —钛坯断面最大温差, °C;

T_{pre} —炉膛预热段温度, °C;

T_0 —钛坯入炉温度, °C。

图10(a)为钛坯加热过程中最大断面温差随预热段温度变化的有限元分析曲线与数学分析曲线,由图可知发现钛坯入炉温度 68 °C,随着预热段温度升高,钛坯最大断面温差变大,预热段温度为 750 °C 时,最大断面温差 140.59 °C,当预热段温度增加到 770 °C 时,断面最大温差达到 153.75 °C 预热段温度每提高 5 °C,钛坯最大断面温差增加 2~4 °C,数学分析结果与有限元分析结果基本吻合。

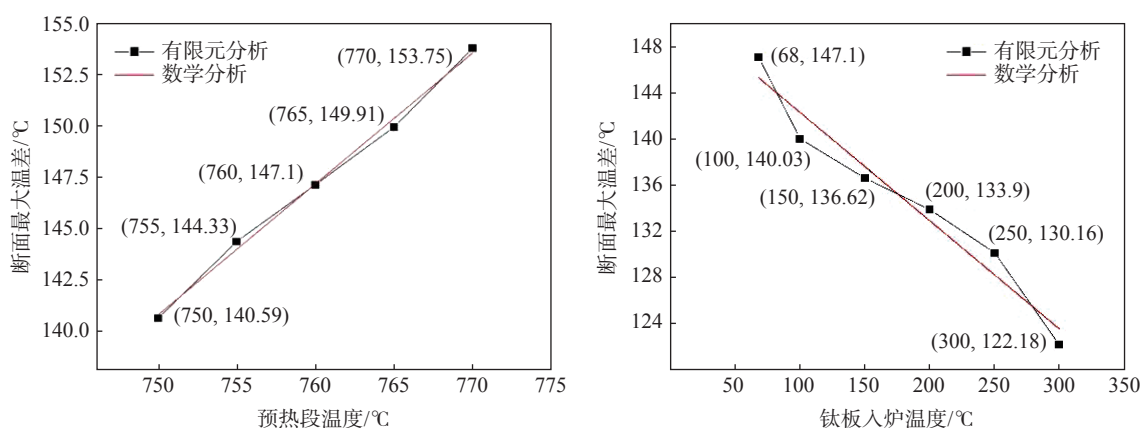


图10 钛坯最大断面温差随预热段温度和钛坯初始温度的变化

Fig. 10 Variation of maximum temperature difference with preheating zone temperature and initial temperature

图10(b)为钛坯加热时最大断面温差随钛坯入炉初始温度变化有限元分析曲线和数学分析曲线,由图可知在钛坯初始温度为 68 °C 时,整个加热过程中钛坯的最大断面温差约 147.10 °C,随着钛坯初始温度提高至 100 °C 和 200 °C 时,钛坯最大断面温差也逐渐减小到 140.03 °C 和 133.90 °C,当钛坯

初始温度为 300 °C 时,板坯最大断面温差降至 122.18 °C。由此可见,随着钛坯初始温度的提高,钛坯最大断面温差逐渐减小,入炉温度平均每增加 50 °C,钛坯最大断面温差减小 3~8 °C 左右。

4.2 芯部温度控制

钛坯在加热时的出炉条件应该是加热过程中温

度最小的部位达到出炉要求 850 ℃, 因此应该在保持二加热段和均热段温度不变的情况下减少钛坯在加热炉内的停留时间。考虑通过改变预热段温度和一加热段温度来分析预热段温度和一加热段温度对钛坯在二加热段达到 850 ℃ 的时间, 即钛坯芯部满足出炉要求的时间。

钛坯在加热炉中加热时, 钛坯芯部满足出炉要求的时间随着预热段和一加热段温度升高而减少, 并根据得到的规律建立钛坯加热时钛坯芯部温度满足要求的时间与预热段温度和一加热段的温度的函数关系式:

$$t = -0.140T_{\text{pre}} + 313.700 \quad (12)$$

$$t = -0.500T_1 + 613.500 \quad (13)$$

式(12)、(13)为钛坯芯部满足出炉要求的时间

与加热炉炉膛内预热段温度和一加热段温度的函数关系式。

式中 t —钛坯芯部满足出炉要求的时间, min;

T_{pre} —预热段温度, ℃;

T_1 —一加热段温度, ℃。

图 11(a)为钛坯芯部满足出炉要求的时间与预热段温度的关系, 由图分析可知, 预热段温度变化对钛坯芯部满足出炉要求的时间影响较小, 当预热段温度 740 ℃, 钛坯芯部在 210 min 时满足出炉要求; 预热段温度 750 ℃ 时, 钛坯芯部在 209 min 满足出炉要求; 经过对比分析当每当预热段温度升高 10 ℃, 钛坯满足出炉要求的时间减少 1~2 min, 数学分析结果与有限元分析结果一致。

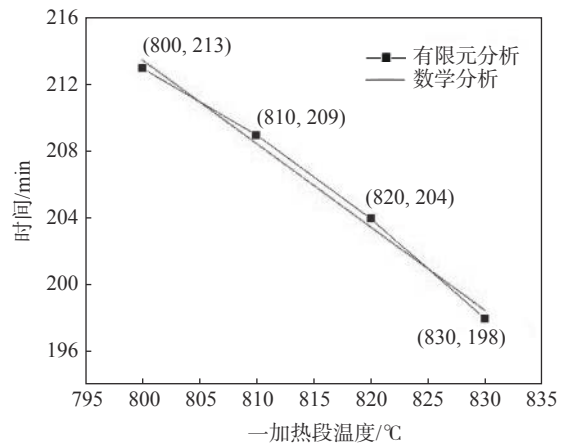
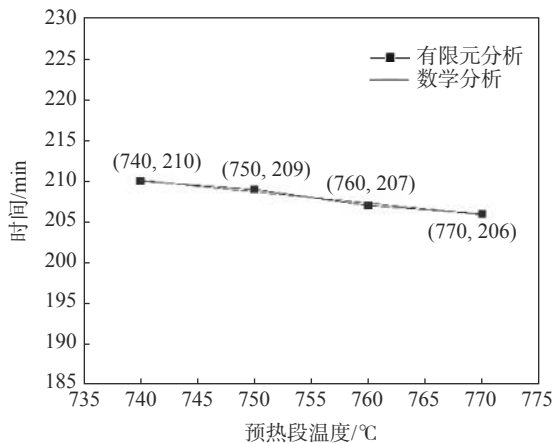


图 11 钛坯芯部满足出炉要求时间随炉膛温度的变化

Fig. 11 The variation of the time with the furnace temperature when the titanium slab core meets the furnace discharge

图 11(b)为钛坯满足出炉要求的时间随一加热段温度的变化曲线, 由图分析发现, 与预热段相比, 一加热段温度值对钛坯芯部满足出炉要求的时间影响较大, 当一加热段温度 800 ℃ 时, 钛坯芯部在 213 min 满足出炉要求; 钛坯芯部在 210 min 时满足出炉要求; 预热段温度 810 ℃ 时, 钛坯芯部在 209 min 满足出炉要求; 经过对比分析当每当预热段温度升高 10 ℃, 钛坯满足出炉要求的时间减少 4~6 min, 数学分析结果与有限元分析结果一致。

由以上分析发现, 钛坯芯部满足出炉要求的时间随加热炉内的温度增加而减少, 影响关系可以用函数关系式表示出来; 由于预热段温度对钛坯芯部满足出炉要求的时间的影响较小, 在钛坯加热时, 可以尽量减少预热段的温度, 不仅可以避免钛坯被氧化, 还可以减小钛坯刚进入加热炉时产生的热应力;

同时适当提高一加热段温度, 减少钛坯在加热炉内的停留时间。

5 结论

1) 结合某钢厂蓄热室步进式加热炉的实际生产条件, 基于有限元软件 Fluent 建立了四段步进梁式加热炉的钛坯传热模型, 仿真计算的温度与现场试验测得的温度数据吻合良好, 能够满足计算要求。

2) 钛坯经过预热段和段加热时, 其最高温度一直位于端面角部, 最低温度位于钛坯芯部, 而经过均热段后, 角部温度最低; 在加热过程中, 预热段钛坯温度快速上升, 此时出现最大断面温差, 最大断面温差为 158.58 ℃, 在加热段因为芯部经过预热段加热, 断面温差较小, 均热段断面温差最小, 为 0 ℃, 符合出炉要求。

3)通过研究板坯最大断面温差随炉膛内预热段温度和钛坯初始温度的变化规律,发现预热段温度平均每升高 5 ℃,最大断面温差增加 1~2 ℃;钛坯入炉温度平均每升 50 ℃,最大断面温差减小 3~8 ℃左右;通过研究钛坯芯部温度满足出炉要求的时间

与炉膛温度的变化规律,发现预热段影响较小,预热段温度每升高 10 ℃,芯部满足出炉要求的时间减少 1~2 min;一加热段温度每升高 10 ℃,芯部满足要求时间减少 4~6 min。

参考文献

- [1] Jin Ming, Ni Hongwei, Zhang Hua, *et al.* Simulation analysis of temperature field of slab in step heating furnace[J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology, 2016, 39(4): 248–252.
(金明, 倪红卫, 张华, 等. 步进式加热炉内板坯温度场模拟分析[J]. 武汉科技大学学报, 2016, 39(4): 248–252.)
- [2] Guo Jingjin, Chen Jian. Effect of fuel ratio and slab trajectory on slab heating[J]. Shanxi Metallurgy, 2021, 44(1): 26–29, 34.
(果晶晶, 陈健. 燃料配比与钢坯运动轨迹对钢坯加热的影响[J]. 山西冶金, 2021, 44(1): 26–29, 34.)
- [3] Feng Guanghong, Zhang Hongliang. Temperature field analysis of cold and hot titanium slab heating process[J]. Special Steel Technology, 2015, 21(3): 27–31.
(冯光宏, 张宏亮. 冷装和热送钛板加热过程的温度场分析[J]. 特钢技术, 2015, 21(3): 27–31.)
- [4] Man Young Kim. A heat transfer model for the analysis of transient heating of the slab in a direct-fired walking beam type reheating furnace[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2007, 50(19): 3740–3748.
- [5] Tang Guangwu, Wu Bin, Bai Dengqi, *et al.* CFD modeling and validation of a dynamic slab heating process in an industrial walking beam reheating furnace[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 132(5): 779–789.
- [6] Wang Feilong, Zhang Yong, Long Gang, *et al.* TA1 industrial pure titanium thermophysical parameters measurement and application research[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2021, 42(2): 48–52.
(王飞龙, 张勇, 龙刚, 等. TA1工业纯钛热物性参数测量及应用研究[J]. 钢铁钒钛, 2021, 42(2): 48–52.)
- [7] Wang Junhong, Huang Yuanfeng, Yang Qi, *et al.* Industrial pure titanium heating process and its practice in slab reheating furnace[J]. Industrial Furnace, 2010, 32(2): 17–20.
(王钧洪, 黄远凤, 杨奇, 等. 工业纯钛加热工艺及其在板坯加热炉上的实践[J]. 工业炉, 2010, 32(2): 17–20.)
- [8] Sun Futao, Han Chen. Process and configuration characteristics of the first titanium strip coil hot rolling mill in China[J]. China Heavy Equipment, 2017, (1): 14–16, 19.
(孙付涛, 韩晨. 国内首台钛板带炉卷热轧机的工艺及配置特点[J]. 中国重型装备, 2017, (1): 14–16, 19.)
- [9] Du Lizhang. Industrial pure titanium slab production process research[J]. Special Steel Technology, 2008, 14(4): 19–21.
(杜礼章. 工业纯钛板材生产工艺研究[J]. 特钢技术, 2008, 14(4): 19–21.)
- [10] Liu Xiaobo. Simulation of slab temperature field in reheating furnace [D]. Shijiazhuang: Hebei University of Science and Technology, 2019.
(刘肖波. 加热炉内钢坯温度场仿真研究[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2019.)
- [11] Chen Guang, Xie Qingju, Li Jiao, *et al.* Numerical simulation of temperature difference of titanium slab section in heating furnace[J]. Metallurgical Energy, 2011, 30(2): 24–27.
(陈光, 谢庆举, 李娇, 等. 加热炉板坯断面温差数值模拟研究[J]. 冶金能源, 2011, 30(2): 24–27.)

编辑 杨冬梅