大型钢坯加热炉多炉况同步加热钛坯技术研究

郭 宏

（攀钢集团攀枝花钢钒有限公司热轧板厂，四川 攀枝花 617000）

摘 要：钛由于其具有各种优异的性能，被广泛应用于国防及民用领域。高效、低成本地连续生产大卷重钛带卷，利用常规热连轧生产线进行钛、钛合金-钢共线生产是大卷重钛带卷生产的发展趋势。对于钢-钛共线轧制热轧钛带卷，加热是关键环节。在某 1 450 mm 热带钢连轧线基础上，针对钛带卷生产效率低、加热能耗大等问题，通过 ANSYS 有限元建立钢坯加热炉实体模型，Fluent 仿真得到加热炉内温度场和流场，分析了钛板坯在加热炉中不同阶段的温度分布，成功突破了大型钢坯加热炉多炉况同步加热钛坯技术，实现了钛带卷的高效高质量生产。

关键词：钛带卷；钢-钛共线轧制；有限元；空燃比

中图分类号：TF823,TG156　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1004−7638(2022)03−0176−09

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2022.03.027　　**开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID)：**

听语音 聊科研 与作者互动

Research on multi-condition synchronous heating of titanium billet in large billet heating furnace

Guo Hong

(Hot Rolling Plate Factory of Panzhihua Vanadium Steel Co. Ltd., Panzhihua 617000, Sichuan, China)

Abstract: Titanium is widely used in national defense and civil fields due to its various excellent properties. In order to continuously produce large coils of heavy titanium strip with high efficiency and low cost, conventional hot tandem rolling production lines for co-linear production of titanium, titanium alloys and steel are the development trend. For steel-titanium co-linear rolling of hot-rolled titanium coil, reheating is the key step. Based on the 1 450 mm hot strip rolling line, in order to solve the problems of low efficiency and high energy consumption of titanium coils, a solid model of the billet heating furnace through ANSYS finite element had been developed to analyze the fluid conditions in the furnace through Fluent simulation calculation. The temperature distribution of titanium slab at different stages in the reheating furnace under optimal air-fuel ratio had been studied. The technology of synchronously reheating titanium billets in large billet reheating furnaces had been well established from this research and successfully been used to achieve efficient and high-quality production of titanium coils.

Key words: titanium coil, steel-titanium collinear rolling, finite element, air-fuel ratio

0 引言

钛属于稀贵有色金属，被称为“第三金属”和“全能金属”，具有轻质、高强、耐腐、耐热、无磁和耐低温等一些列优良性能，广泛应用于国防工业以及石油、化工、冶金、电力、交通、医疗、海洋、环保、

收稿日期：2022−04−17

作者简介：郭宏 (1979—)，男，高级工程师，主要从事钢铁新材料研发和热连轧工艺技术研究，联系电话：0812-3390206，E-mail: guoh@pzhsteel.com.cn。

建筑、体育及旅游休闲等民用行业。我国已经探明的钛矿基础储量为 3.5 亿 t, 排名全球第一。四川攀西地区是一个超大型的钛矿储藏区, 它由攀枝花、红格、白马和太和等十几个矿区组成, 其总储量占全国储量的 95.1%[1]。2001 年至今, 我国钛工业按年均 22% 的增长速度快速发展, 已形成万吨级海绵钛厂家十余家、钛材千吨级厂家十余家, 产量达到世界第一[2]。

在钛材产品方面, 主要有板材、棒材、管材、丝材、铸件等, 中国的钛材产品以板材为主。带卷式轧制法生产钛板带材具有诸多优点: 如生产成本低, 效率高; 产品规格范围广; 表面质量和板带材平整度以及力学性能稳定性高等。

采用卷式法生产高精度薄钛板及带材是纯钛板带材生产的发展趋势。钛带材生产的关键在于热轧, 国外成熟的生产经验是利用热连轧或炉卷轧机进行钢-钛共线生产模式生产钛热轧卷。目前世界上只少数国家掌握了纯钛卷热连轧生产技术, 日本新日铁钛板产品质量和生产技术处于世界领先水平[3]。自 2007 年来, 我国华菱涟钢、攀钢、宝钢等相继采用各自热带钢轧机生产线成功轧制出大卷重热轧钛带卷, 实现产业化[4–6]。虽然我国已成功实现热连轧钛带卷生产, 但钛卷产品质量保证和高效稳定生产仍存在着关键性难题。

笔者基于某钢厂大型步进式加热炉, 利用有限元软件建立了加热炉瞬态三维流体动力学模型, 分别考虑加热炉膛内传热和钛坯内导热微分方程瞬态导热, 模拟了加热炉内的流动特性、燃烧过程和钛坯传热过程。同时通过改变不同的空燃比, 建立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。最后, 基于有限元分析结果, 开展了大型钢坯加热炉多炉况同步加热钛坯技术研究, 提供了一种有效保证钛及钛合金加热质量及加热稳定性的方法, 成功实现了钛带卷的高效生产。

1　基本情况

纯钛带材卷式法生产的主要工艺流程为: 钛板锭→加热→热轧 (热连轧机或炉卷轧机) →卷取→退火→抛丸处理→酸洗→冷轧→除油→ (中间真空退火—冷轧—除油) →成品真空退火→矫平→表面修磨→成品剪切。由于钛及钛合金板带的热轧工艺和设备需针对其特性进行专门开发和设计, 所以利用现有热连轧机组进行钛带卷技术开发及工业化生产的技术难度大、开发周期长。在工业生产中, 钢-钛共线高效轧制热轧钛带卷, 加热是关键环节, 也是研究难点。

首先钢坯加热炉的炉型结构、尺寸及工艺控制均是按产线钢坯或连铸坯的工艺和尺寸设计, 钛及钛合金坯较通常钢坯尺寸短 35% 以上及重量小 60% 以上, 原炉型结构下合理布料需要突破; 其次, 钛及钛合金坯的加热及出炉温度比钢坯低 300 ~ 400 ℃, 现行加热炉工艺保证难度大, 而钛及钛合金在加热炉内如何布料直接决定了常规热连轧生产线能否生产加工钛及钛合金板带及能否稳定、优质、高效地加工钛及钛合金板带; 同时在全流程的钢铁企业中, 常规热连轧通常有步进梁式加热炉 2 ~ 4 座, 钛及钛合金每次生产量相对较小, 均分于每座加热炉进行生产, 工艺稳定性及经济性差, 通常集中于一座加热炉进行加热生产, 而钛及钛合金坯热工制度具有特殊性, 煤气用量很小, 此状况下钛坯的加热及布料方式尤其重要。因此, 为实现钛带的高效生产, 必须突破双炉同步加热钛坯的技术, 而双炉同步加热钛坯过程如何实现煤气用量的平衡和热值调整, 保证钛坯加热质量及炉间温差控制, 是本文研究的重点。

2　计算模型建立

2.1　有限元模型建立

笔者以某 1 450 mm 热连轧生产线的 1#、2#步进式加热炉为研究对象, 该加热炉的基本组成部分主要包括燃料喷嘴和炉膛, 加热炉有效加热炉长为 43.5 m,为了对钢坯实现有效的加热, 加热炉沿炉长方向分为五段: 预热段 9 m、一加热段 12.5 m、二加热段 10 m, 均热段 12 m, 由于实际情况复杂, 我们对加热炉模型进行了部分结构简化, 简化后模型结构如图 1 所示。燃烧喷嘴、炉膛结构和板坯的网格划分如图 2 所示。加热板坯典型尺寸为 180 mm×1 220 mm×7 500 mm。

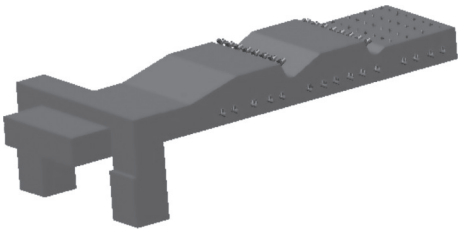
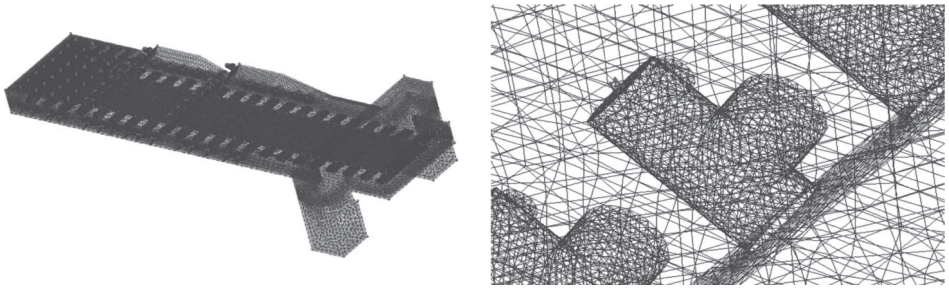


图 1　加热炉三维模型(1∶1)
Fig. 1　3D model of heating furnace



(a) 炉膛结构 (b) 烧嘴结构

图 2 加热炉网格模型

Fig. 2 Mesh model of reheating furnace

2.2 物理模型

加热炉运行时，气体燃料与助燃空气由各自的通道分别流入燃烧室，在流入燃烧室的过程中开始混合，并在燃烧室内边混合边燃烧，这种流动属于强湍流扩散燃烧过程。因此在计算过程中必须综合考虑湍流流动与换热、燃烧化学反应与火焰传热、加热工件的固体导热以及污染物 NO_x 的生成。

利用数值模拟方法对加热炉内燃烧过程进行研究，在阅读大量文献后发现，在模拟燃料和空气有较大回流的强湍流流动方面，标准的 $\kappa-\varepsilon$ 双方程模型得到普遍应用，本次模拟中也采用标准的 $\kappa-\varepsilon$ 双方程模型。

模拟气相燃烧时，依据实际结构及燃烧情况，可以认为燃烧器点火位置处燃气与空气完全混合均匀。在模拟燃气在炉膛内燃烧时选用适应范围较广的 Species Transport 燃烧模型。该模型选择 Volumetric 容积反应；湍流-化学反应相互作用模型选择 Eddy-Dissipation 涡流耗散模型：选项为 Diffusion Energy Source、Full Multicomponent Diffusion、Thermal Diffusion 扩散源。

加热炉炉膛内的换热过程十分复杂，但由于炉膛内的温度较高，根据文献 [7−9]，炉膛内辐射换热占总换热的 90% 以上，因此在对燃烧过程的模拟中，辐射源项的处理尤为重要，根据加热炉结构分析，选择了 P-1 模型。

燃料在加热炉内燃烧时，不断产生着氮氧化物等气体，气体燃料的高温空气燃烧以生成热 NO_x 为主，但必须考虑快速生成型 NO_x 的影响，采用热力型(Thermal NO Model)和快速型(Prompt NO Model)模拟燃烧过程中的 NO_x 的生成过程。在计算时采用经典的 SIMPLE 算法。

2.3 初始条件和边界条件

钛坯入炉温度 25 ℃，加热炉的燃料为混合煤气(高炉煤气和焦炉煤气 2∶1)，混合煤气成分组成如表 1 所示，空气预热温度为 600 ℃。纯钛的热物性参数 (导热系数和比热容) 与温度有关，钛坯导热系数和比热容随温度变化曲线如图 3 所示[7]。钛坯密度随温度变化不大，取定值 5 840 kg/m^3。

表 1 混合煤气的成分组成

Table 1 Chemical composition of mixed gas %

CO_2	C_mH_n	O_2	CO	H_2
9.4	0.8	0.2	17.8	26.1

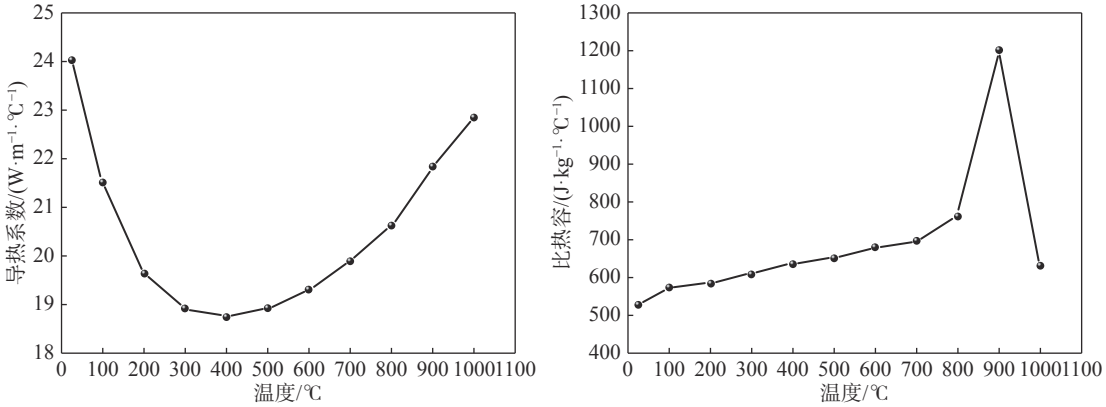


图 3 TA1 导热系数、比热容随温度的变化曲线

Fig. 3 Variation of thermal conductivity and specific heat of TA1 with temperature

根据需要给定湍流、燃烧模型等各种物理模型，完善加热炉边界条件，加热炉烧嘴边界条件设置根据现场工况确定；加热炉出口采用 pressure-out 出口，出口压力采用负压(−10 Pa)；加热炉壁面有隔热层，加热炉壁面向外界无散热，壁面边界条件采用无滑移绝热边界；板坯和炉墙黑度取 0.8。

3　计算结果分析

3.1　炉膛内物理场分析

得到整个炉膛内燃料轨迹线如图 4 所示，煤气与空气从管道流入烧嘴时即开始混合，边混合边燃烧，烟气经预热段后从烟道流出。

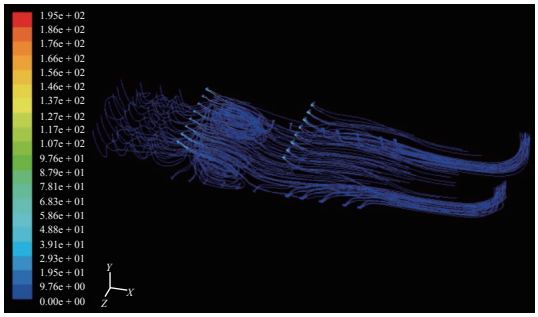


图 4　炉内燃料轨迹线

Fig. 4　Fuel trajectory diagram in furnace

均热段底部气流速度最低，局部区域出现小部分流动死角，最小流动速度为 0.5 m/s。均热段大部分区域有回流现象产生，但靠近炉底气流速度较小，可能引起燃料空气不充分燃烧。

如图 5 所示，在加热段 2 上部，烧嘴喷口附近气流速度最大，且在二加热段的区域内有较大范围的气体回流，据此判断此处燃料和空气混合较充分。在一加热段处，气流流动顺畅。烟气最后经预热段后从烟道流出，由于壁面和炉体结构影响，在拐角处有小部分流动死角。烟道出口速度较大，大部分区域流动顺畅，拐角处有较小的流动死角。

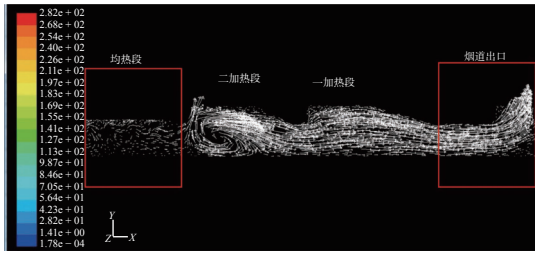


图 5　炉膛内气体速度场

Fig. 5　Gas velocity field in furnace

加热炉内温度分布如图 6 所示。最高温度在烧嘴附近处，烧嘴火焰中心温度最高达 2 060 ℃。预热段温度范围 1 000 ~ 1 150 ℃，且温度梯度较大；加热段温度范围为 1 200 ~ 2 000 ℃，大部分区域温度范围在 1 200 ~ 1 400 ℃，温度分布较均匀。均热段温度范围 1 000 ~ 1 300 ℃，坯料温度在1 000 ℃ 左右，坯料附近区域温度分布均匀，靠近炉底区域温差较大。燃烧室内 X=22.222 m 处的截面温度场如图 7 所示，加热炉中心温度为 1 200 ℃ 左右，温度从炉体中心沿壁面递减，靠近壁面温度为 700 ℃。

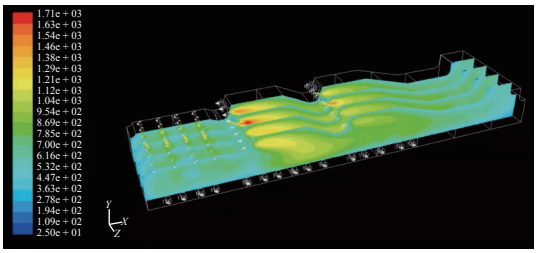


图 6　加热炉温度全貌

Fig. 6　Full view of heating furnace temperature

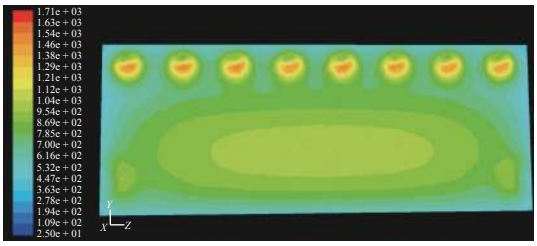


图 7　燃烧室宽度截面温度场

Fig. 7　Temperature field of combustion chamber width section

3.2　模型验证

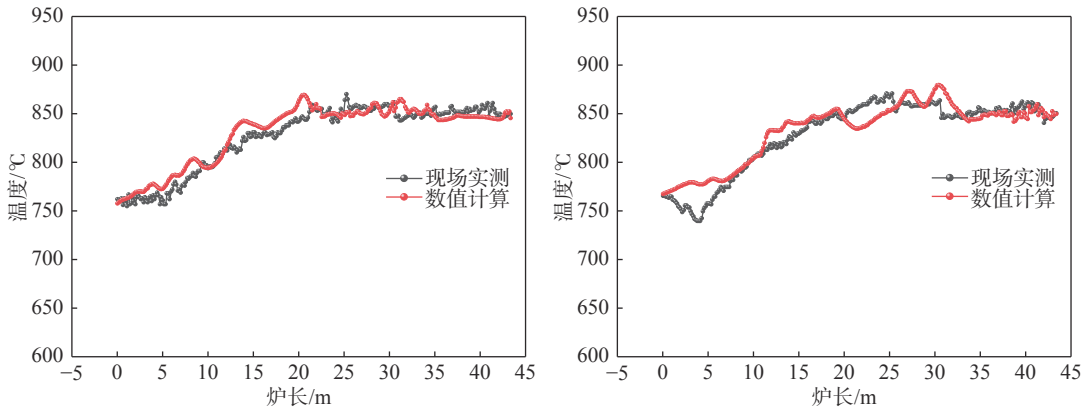
对该模型的准确性进行校核，如图 8 所示，为现场提取的上炉膛和下炉膛沿炉长方向的温度与该数值计算模型得到的温度的对比曲线，由图 8 可以看出，计算值与实际值整体变化趋势相同，相同位置处的温度值之间的最大差值不超过 50 ℃，误差控制在 5% 以内，计算结果与现场数据吻合较好，因此本文的三模型可以用于步进式加热炉内的温度调控。

3.3　不同空燃比的加热炉内各物理场分析

考虑到双炉同时同步加热钛坯，加热炉头尾各装 6 ~ 10 块冷装钢坯用于控制加热钛坯所需的炉温及平衡煤气热值，并为了保证炉温调控在 850 ℃ 左右，需适量增加煤气用量，此情况下要实现充分燃烧，空燃比也需要发生变化。为此设计了三种不同空燃比(见表 2)，分析燃烧效果和残余气体在加热炉中体积平均残余量。

图 9 为不同空燃比不同加热炉位置的温度对比，图 9(a)、(b)、(c) 分别代表加热段一、加热段二和均热段的不同空燃比下加热炉内部宽度方向温度变化。

A、B 和 C 分别代表情况一、二和三的空燃比。由图 9(a) 加热段一中看出，宽度两端的温度较高，大部分温度较低，为正常温度；A、B、C 的总体温度依次降低，这是调整空燃比的正确趋势，在 C 中为最优的板坯加热炉温，大约在 800 ℃。同样可知图 9(b)、(c) 的温度也是 C 最好。由 A 到 B，空气量增加来增加空燃比，温度虽然有所降低，但不是很明显，所以在此基础上减少燃料 C，温度降低，达到适合加热板坯温度。三图相比，温度是下降的，这正符合加热温度高，均热温度稍低的实际情况。



(a) 加热炉炉膛上部　(b) 加热炉炉膛下部

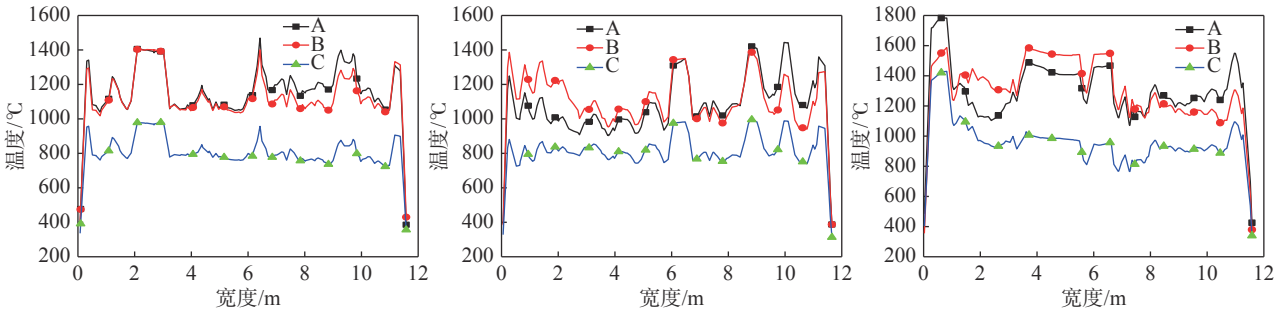
图 8　加热炉炉长方向上测量温度与计算温度对比

Fig. 8　Comparison between calculated temperature and field temperature

表 2　加热炉不同情况的空燃比

Table 2　Air fuel ratio of reheating furnace under different conditions

不同部位	加热段一炉顶	加热段一两侧	加热段二炉顶	加热段二两侧	均热段炉顶	均热段两侧
方案1(A)	3.50	4.70	3.50	4.70	5.10	2.80
方案2(B)	4.60	5.87	4.67	5.87	7.65	4.20
方案3(C)	8.00	10.0	8.00	9.0	10	6



(a) 预热段　(b) 加热段　(c) 均热段

图 9　不同空燃比下加热炉各段沿炉宽方向上温度分布情况

Fig. 9　Temperature contrast diagram of different air-fuel ratio and different heating furnace positions

图 10 为充分燃烧后，残余气体在加热炉中体积平均残余量。可见，随着空燃比的增加，CH_4 和 H_2 的残余量在减小，O_2 的残余量在增加。

综上，在三种不同空燃比对比图中，煤气用量按 30 000 m^3/h 控制情况下，方案 A、B、C 的总体温度依次降低，这是调整空燃比的正确趋势，C 为最优板坯加热炉温，C 方案空燃比最符合加热炉加热板坯的情况，所以选择最佳方案 3(C)空燃比分布。

3.4　钛坯温度场分析

在提高煤气用量、增大空燃比的情况下，进一步分析钛坯在步进式加热炉中不同位置的温度场分布，为了减小计算量，以单块板坯进行研究。钛坯在加热炉流体网格中流动，所以利用 UDF 将钛坯设置为动态网格，设置移动速度 0.005 m/s，钛坯从入口进入到出炉时间大约 2.5 h。

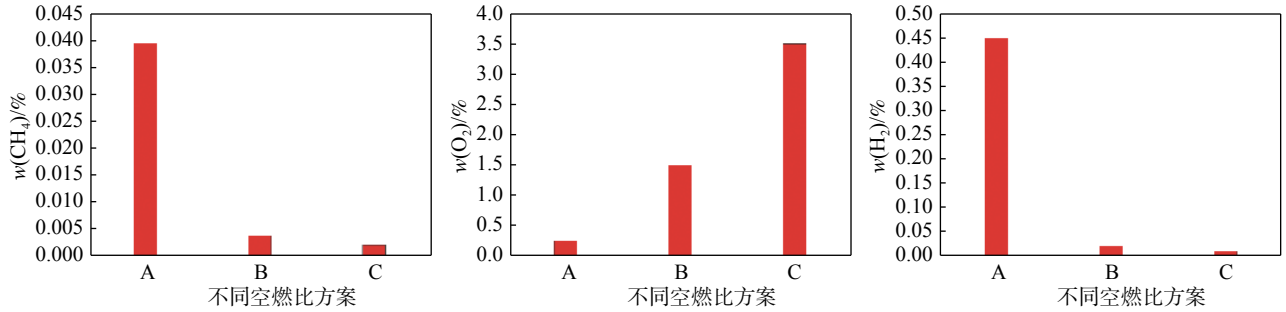


图 10　不同空燃比下加热炉内残余气体质量分数对比

Fig. 10　Comparison of residual gas mass fraction in reheating furnace under different air-fuel ratios

图 11 是钛坯为 C 方案在步进式加热炉中不同位置的坯料温度场分布，在整个加热过程中，坯料经历预热段、加热段一、加热段二、均热段。针对钛坯表面主要为辐射传热，其传热快，而中心是靠钛板本身导热，传热慢，表面温度高于中心温度这一特征。通过前述优化空燃比，以空气量增加来增加空燃比，充分燃烧，混合煤气温度虽然有所降低，但不是很明显，所以在此基础上适量减少燃料(C 方案)，温度虽有所降低，但能达到适合加热板坯温度。同时步料靠在加热喷嘴一侧，该方位加热段的炉顶和侧墙都有烧嘴，烟气燃烧反应剧烈，使加热段气体的温度相对于预热段急剧上升，使钛坯吸收的热量相对预热段有很大提高，达到坯料温度与烟气温度的差值逐步减小的目的。在均热段，通过优化喷嘴流量，并使炉内的氧气含量比较充足，改进炉内传热，上炉气的温度变化不大，基本处于恒温状态，板坯温度区域均匀，整个板坯的温度最多也只相差 10 ℃ 左右，温度梯度明显减小，达到了均热的作用。

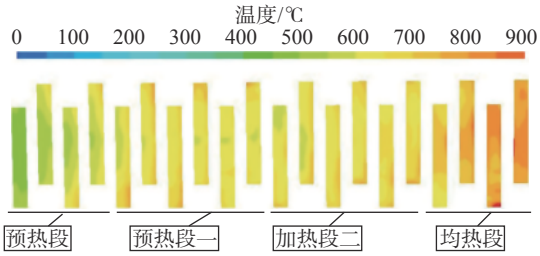


图 11　钛坯在加热炉中不同阶段的温度分布

Fig. 11　Temperature distribution of titanium billet at different stages in the heating furnace

由上述计算结果进一步优化了二加热段和均热段的步料行进节奏(减速度)，计算后取板坯的温度分布情况分析，如图 12 所示。图中点 1、2 和 3 分别为钛板坯下表面节点、中心节点和上表面节点温度随时间的变化曲线，整个板坯的温度能实现控制在 850 ℃ 左右，表明在增大煤气用量、空燃比情况下，减缓加热段、均热段的步料行进节奏，采用双炉同时同步加热钛坯的方案可行。

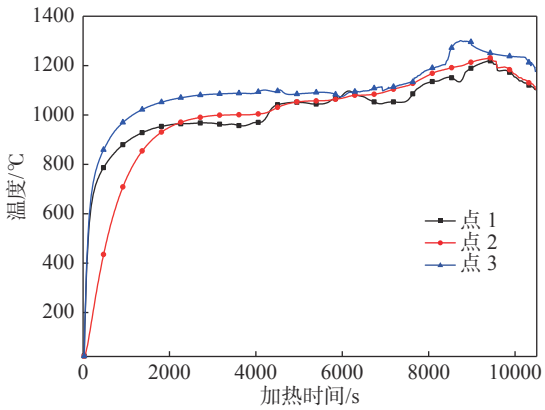


图 12　钛坯不同节点温度随时间变化曲线

Fig. 12　Temperature curve of titanium billet at different nodes with time

4　双炉同时同步加热钛坯工业实践及效果

根据上述研究分析结果，制定了大型钢坯加热炉双炉同步加热钛坯的技术方案。

1)双炉布料技术方案

钛坯头尾各装 6 ~ 10 块冷装钢坯，头、尾钢坯与相邻钛坯间距控制为 1 000 ~ 1 100 mm，控制加热钛坯所需的炉温及平衡煤气热值。图 13 为双炉同时同步加热钛坯布料方案。

2)烧嘴着火控制方案

两炉空炉，均上、均下烧嘴全部着火；预下、加下烧嘴，开口度为 50% 着火；预上留东侧起第 3、4、7 烧嘴，加上留东侧起第 2、5 烧嘴，开口度为 50% 着火，炉子降温。装炉前 1 h 调整预下、加下烧嘴火焰(长度最长达到 1.5 m 以上)，炉温调控在 850 ℃ 左右。双炉同时同步加热钛坯的烧嘴着火控制见图 14。

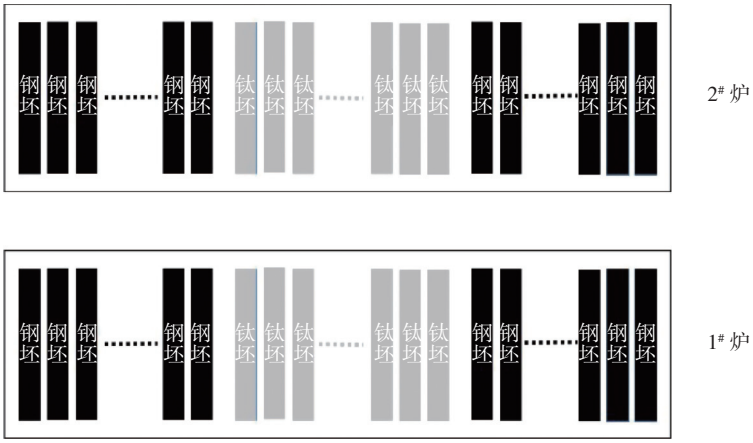


图 13 双炉同时同步加热钛坯的布料方案

Fig. 13 Distribution scheme of titanium billet simultaneously heated by double furnace

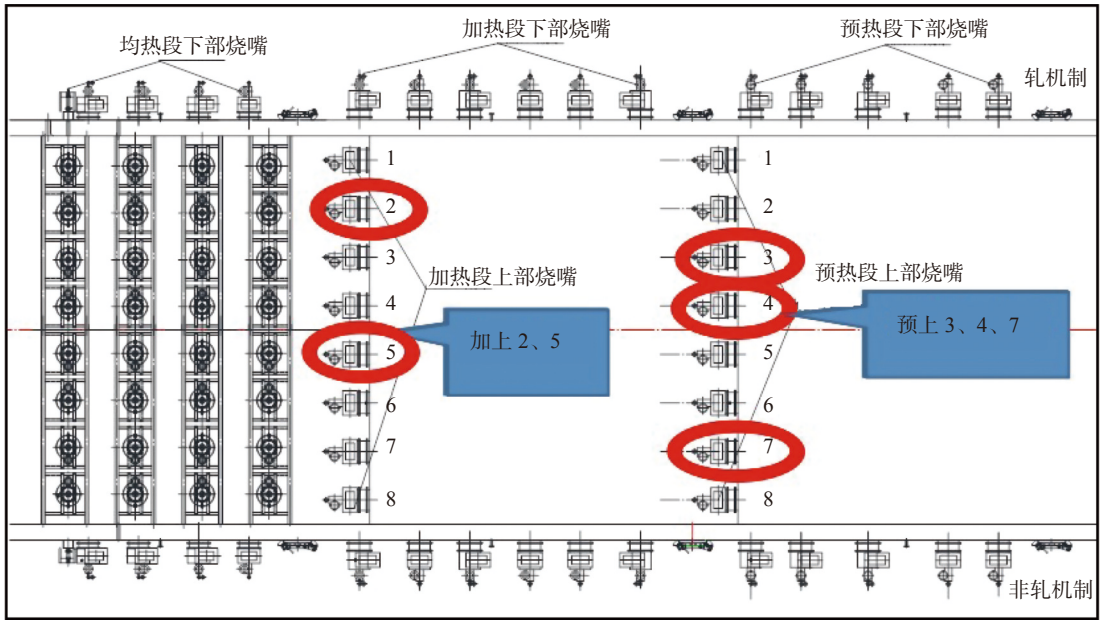


图 14 双炉加热烧嘴布置及着火方案

Fig. 14 Double furnace heating burner layout and burner ignition scheme

3)煤气用量及热值控制

为确保炉膛温度控制在 850 ℃ 左右,需适量增加煤气用量,兼顾煤气热值控制,当煤气用量按 30 000 m^3/h、煤气热值按 2 000 ×4.18 kJ/m^3 左右控制,以便于炉膛温度的控制与实现。

4)双炉加热效果

双炉模式下加热出炉的钛坯见图 15。加热炉炉温控制及钛坯温度控制见图 16,出炉温度精度控制统计分布见图 17,加热效率提升对比见表 3。统计数据表明,双炉工况下钛坯加热质量如下:①钛坯温度均匀:同板温差≤30 ℃、上下表面温差≤15 ℃、表中温差≤15 ℃,目标出炉温差±5 ℃ 的合格达到 95% 以上,炉间温差≤5 ℃;②加热炉生产节奏不再受单炉能力的制约,具备 100 t/h 以上的加热能力。同时,与单炉生产相比,生产效率提升 40% 以上,能耗降低 45% 以上。

图 15 双炉工况下加热的钛坯

Fig. 15 Titanium billet heated in dual-furnace condition

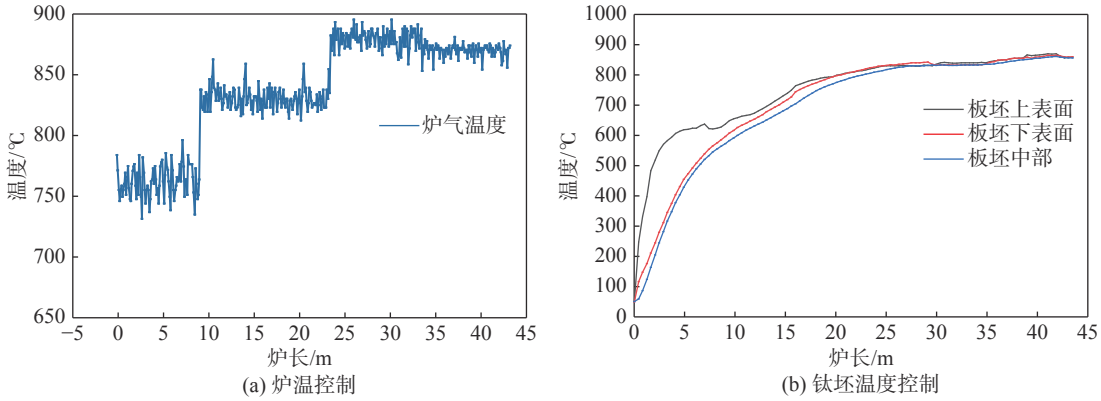


图 16　双炉工况下的钛坯加热质量

Fig. 16　Heating quality of titanium billet under dual-furnace condition

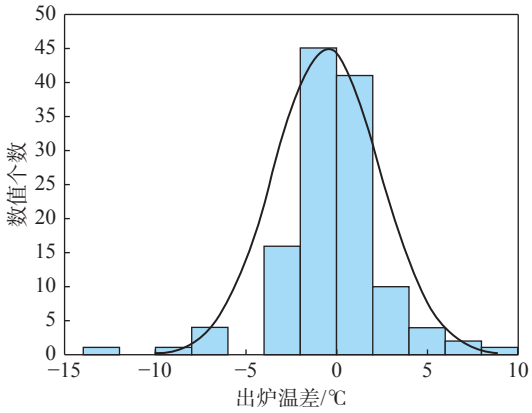


图 17　双炉工况下出炉温度偏差(实际-目标)统计分布

Fig. 17　Statistical distribution of oven temperature deviation under dual-furnace condition (actual-target)

表 3　金属钛材热连轧轧制效率及能耗对比

Table 3　Comparison of efficiency and energy consumption in metallic titanium hot continuous rolling

钛带轧制量/t	能耗/(GJ·t^{-1})	轧制时间/min	小时轧制量/t	加热方式
194.73	20.45	115.52	101.14	双炉
162.14	20.88	89.67	108.49	双炉
161.7	20.53	96.38	100.66	双炉
208.84	20.39	110.37	113.53	双炉
182.93	21.04	108.61	101.06	双炉
161.18	21.70	91.03	106.24	双炉
186.44	19.95	114.96	97.31	双炉
128.93	20.48	80.41	96.20	双炉
129.01	22.41	76.47	101.22	双炉
205.58	20.17	109.79	112.35	双炉
220.59	21.27	127.85	103.52	双炉
167.46	39.21	174.27	57.66	单炉

5　结论

1)结合某 1 450 mm 热连轧生产线的 1#、2#步进式加热炉实际生产条件,基于有限元软件建立了加热炉炉膛内燃烧传热有限元模型,得到了加热炉炉膛内温度场和流场分布,仿真计算结果与现场测量结果数据吻合良好,能够满足计算要求。

2)为保证炉温稳定控制,实现煤气充分燃烧,设定三种不同空燃比方案,比较不同方案下的加热炉温度变化和残余气体分布,方案 A、B、C 的总体温度依次降低,结合残余气体含量,方案 C 为最优板坯加热炉温,最符合加热炉加热板坯的情况。

3)选择最优空燃比状态下的炉膛内部温度场,以单块板坯为研究对象,得到钛坯在加热炉不同阶段的温度分布与不同时刻下钛坯不同节点的温度变化,表明在增大煤气用量、空燃比情况下,减缓加热段、均热段的步料行进节奏,采用双炉同时同步加热钛坯的方案可行。

4)验证了大型钢坯加热炉双炉同时同步加热钛坯方案,在双炉同步加热模式下,生产的钛坯内部温度均匀,出炉温度稳定,精度高,同时加热炉生产节奏不再受单炉能力的制约,具备 100 t/h 以上的加热能力,生产效率提升 40% 以上,能耗降低 45% 以上。

参考文献

[1]　Wang Xuezheng. Panxi has become the key development zone of metal resources in China[J]. Shanghai Nonferrous Metals, 1995, 6: 352.
(王学正. 攀西已成为我国金属资源重点开发区[J]. 上海有色金属, 1995, 6: 352.)

[2]　Wu Quanxing. Progress of titanium industry technology in China[J]. Rare Metals Letters, 2004, 23(9): 1−4.

（吴全兴. 我国钛工业技术的进展[J]. 稀有金属快报, 2004, 23(9): 1−4.）

[3] Kazuo Muraoka. Cooling production technology of industrial pure iron[J]. Nonferrous Metals Processing, 1996, (6): 30−37.
（村冈一雄. 工业纯铁的冷化生产技术[J]. 有色金属加工, 1996, (6): 30−37.）

[4] Yan Guoping. Valin chain steel hot milk unit successfully tested the first iron strip coil in China[N]. World Metal Review, 2007-08-07(15).
（严国平. 华菱链钢热乳机组成功试化出我国第一盘铁带卷[N]. 世界金属导报, 2007-08-07(15).）

[5] Xu Xinlei. Research and implementation of Baosteel 1880 mm hot rolled titanium plate rolling technology [D]. Shenyang: Northeastern University, 2014.
（徐欣磊. 宝钢1880 mm热轧钛板轧制技术研究与实现[D]. 沈阳: 东北大学, 2014.）

[6] Xin Jianqing, Zhang Huaifu. Development of technology for producing large coil weight and wide titanium strip in 1549 mm hot strip mill[J]. Shanxi Metallurgy, 2015, 38(2): 10-11.
（辛建卿, 张怀富. 1549 mm热连轧机生产大卷重宽幅钛带技术开发[J]. 山西冶金, 2015, 38(2): 10-11.）

[7] Xiang Guojin, Luo Xu, Geng Naitao, *et al*. Study on temperature field of titanium slab heating process based on walking-beam-type furnace[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2021, 42(6): 191−198.
（向国进, 罗许, 耿乃涛, 等. 基于步进式加热炉的钛坯加热过程温度场研究[J]. 钢铁钒钛, 2021, 42(6): 191−198.）

[8] Gu Mingyan , Chen Guang . Numerical simulation of slab heating process in a regenerative walking beam reheating furnace[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, 76: 405−410.

[9] Harish J, Dutta P. Heat transfer analysis of pusher type reheat furnace[J]. Ironmak. Steelmak, 2005, 32(2): 151−158.

编辑　邓淑惠

中科院金属研究所高性能超细晶含铜钛合金研究取得重要突破

（2022 年 4 月 20 日消息）与常规晶粒尺度（5 ~ 10 μm）的钛合金相比，超细晶钛合金不仅具有更高的强度与良好的塑性匹配，同时还具有更高的耐磨性和更佳的生物相容性，在航空航天、生物医学等诸多重要应用领域中极具吸引力。然而，超细晶钛合金不仅制备加工极为困难，且组织的热稳定性较差，这两大瓶颈问题制约了超细晶钛合金的发展与应用。

中科院金属研究所杨柯团队长期从事新型医用金属材料的基础与应用研究。近期，团队成员任玲、王海等通过“双相壳层包裹超细等轴晶”的显微组织设计思想，同时从热力学、动力学两方面提高超细晶钛合金组织热稳定性，并利用常规热处理与热加工的工艺组合，实现了超细晶组织的大尺寸制备，解决了超细晶钛合金制备加工难、组织稳定性差的两大瓶颈问题，获得了性能优异和热稳定性高的超细晶含铜钛合金，研究取得重要突破。

研究团队近年来一直致力于含铜钛合金的结构与生物功能一体化研究与应用。在前期研究工作基础上，团队提出“共析元素合金化→淬火→热变形”（EQD）的超细晶含铜钛合金的制备策略，实现了双相壳层包裹超细等轴晶的显微组织的设计思想。该策略通过常规的热加工设备实现了 α-Ti 晶粒尺寸在 90 ~ 500 nm 范围内的超细晶 Ti6Al4V5Cu 合金的大尺寸制备。与此同时，利用热变形过程中形成的 β/Ti_2Cu 双相蜂窝壳结构包覆 α 晶粒，显著提高了超细等轴晶组织的热稳定性，使材料的失稳温度提高至 973 K（0.55 Tm）。超细晶 Ti6Al4V5Cu 合金的室温拉伸强度最高达到 1.5 GPa，延伸率超过 10%。在 650 ℃ 和应变速率为 0.01 s^{-1} 条件下，其拉伸延伸率超过 1 000%，实现了超塑性变形。此外，超细晶 Ti6Al4V-5Cu 合金在高温拉伸的热力耦合条件下未发生晶粒的粗化长大。该 EQD 策略不仅实现了 TiCu、TiZrCu 等其它钛合金的高性能、高热稳定性超细晶组织的制备，并已经拓展至包括钢铁材料在内的其它合金体系中，为超细晶金属材料的制备提供了新途径，对超细晶金属材料的设计和研究具有重要意义。

摘自 http://www.imr.cas.cn/xwzx/kydt/202204/t20220420_6433617.html