

文章编号:1001-6988(2004)01-0001-03

# 大型真空抽气系统性能测试

王 庆<sup>1</sup>,巴德纯<sup>1</sup>,靳雨菲<sup>2</sup>,王晓冬<sup>1</sup>,陈锦松<sup>2</sup>

(1. 东北大学 机械工程与自动化学院, 沈阳 110004; 2. 上海宝钢集团公司, 上海 201900)

**摘 要:**真空抽气系统抽气性能的好坏直接影响 RH-KTB 精炼的脱气、脱碳、脱氮的效果,极限真空度高低决定了钢水最终的气体含量。测试结果表明:相同负荷下真空度最终稳定在某一值。在无负荷抽真空工况下的稳定真空度(极限真空度)最大,系统稳定真空度随着负荷的增加而下降。对系统性能下降的原因进行了分析,水蒸汽的入口温度、压力、流量的变动及冷凝器的冷凝效果不佳而导致的真空泵抽气能力下降以及系统泄漏是导致系统性能下降的主要原因。

**关键词:** RH-KTB; 炉外精炼; 真空抽气系统; 测试

**中图分类号:** TF131+.3

**文献标识码:** A

## Performance Measurement of RH-KTB Refining Process Vacuum Extraction System

WANG Qing<sup>1</sup>, BA De-chun<sup>1</sup>, JIN Yu-fei<sup>2</sup>, WANG Xiao-dong<sup>1</sup>, CHEN Jin-song<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering &amp; Automation, Northeastern University, Shenyang 110004, China;

2. Baoshan Iron and Steel Co. Ltd, Shanghai 201900, China)

**Abstract:** Vacuum extraction system of extraction performance affects behavior of degassing, decarburization, denitrating and so on in RH-KTB refining process. Final vacuum determine final gas ingredient of molten steel. The measurement results show, on condition that identical load, vacuum is stabilized in one value. When no-load creation of vacuum, stable vacuum obtains maximum. With increasing load of system, stable vacuum decline stage by stage. The reason of RH-KTB system performance declining is analyzed. Not only owing to entry temperature, pressure, flux of water vapor and condenser's bad effect, extraction ability of vacuum pump declines but also there are leaks in vacuum system result in system performance declining.

**Key words:** RH-KTB; refining process; vacuum extraction system; test

## 1 前言

超纯净钢生产的技术研发已经成为全球钢铁业关注的热点领域之一。而超纯净钢生产要完成一系列复杂的工艺过程,其中主要完成脱氢、脱碳、脱硫、脱氧等工艺<sup>[1~6]</sup>。RH-KTB 炉外精炼是完成上述主

要工艺、实现超纯净钢生产的有效手段之一。RH-KTB 炉外精炼设备包括熔池(真空室)和真空抽气系统(蒸汽喷射泵成套真空系统)。鉴于市场的需求和 RH-KTB 炉外精炼的重要性,近年来国内外许多学者对 RH-KTB 炉外精炼工艺进行了研究并取得了一些成果。但绝大多数是针对熔池进行的研究,特别是熔池内钢水的流动和脱气行为的研究,没有考虑熔池真空度的变化对脱气的影响,而对真空抽气系统抽气性能的研究却少见报道。然而钢水的脱气行为不仅与钢水的流动、熔池内的化学反应有关,还与真空抽气系统对熔池的抽气行为有更直接的关系。

收稿日期:2003-10-08;修回日期:2003-12-07

基金项目:教育部博士基金资助项目(2000014520);辽宁省科技基金重点资助项目(9910200102)。

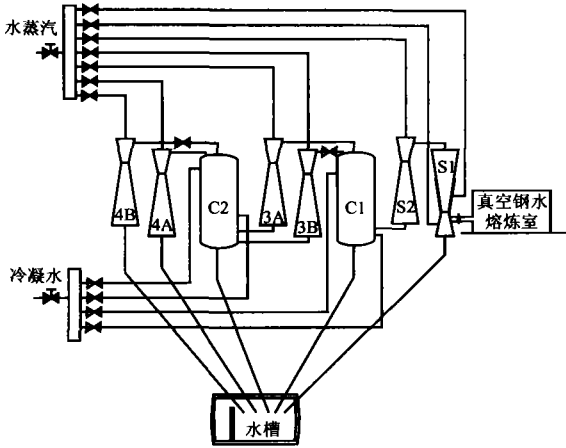
作者简介:王 庆(1970—),男,辽宁人,讲师、博士研究生;  
巴德纯(1954—),男,辽宁人,教授,博士生导师。

真空抽气系统工作异常而单方面对熔池的研究意义不大。因此真空抽气系统性能好坏直接关系到 RH-KTB 精炼的整体效果。然而保证真空抽气系统长期稳定可靠的工作却面临一系列问题。原因在于:(1)理论研究不成熟。真空抽气系统(蒸汽喷射泵成套真空系统)是利用高压水蒸汽抽吸低压气体致使封闭熔池内产生一定的真空度的装置。而目前的抽吸理论基本上是定压混合理论和定常混合面积理论,它们都是一维设计理论,对气体的流动模型进行了简化。同时能源介质的稳定性能及系统的内漏外漏决定了理论与实际有较大的差距。(2)实验研究不够充分。我国大部分 RH-KTB 设备都是从国外引进的,没有统一的标准,同时也缺少足够的技术储备。因此急需对现有设备进行消化吸收。对真空抽气系统进行系统的实验研究,特别对其在不同工况下的抽气能力特性的实验研究尤为迫切。实践表明真空抽气系统抽气性能下降会对 RH-KTB 脱气效果产生不良影响。本文通过对宝钢 RH-KTB(2RH) 炉外精炼抽气系统进行的性能测试,确定了不同负荷下的稳定真空度。希望对指导钢铁生产和进一步的理论研究有一定的参考。

2 实验条件

本文以上海宝钢集团公司钢水真空精炼用的 RH-KTB 炉外精炼真空系统为例进行分析。实验设备有:宝钢 RH-KTB 炉外精炼抽气系统(4 级立式高架式真空泵组,工作真空度 67 Pa, 系统漏气量 15 kg/h, 塔式双喷头冷凝器,冷凝水流量 1 680 m<sup>3</sup>/h, 冷凝水入口温度 34 ℃, 蒸汽耗量 34 t/h, 蒸汽压力 13 kg/cm<sup>2</sup>);11 个压力传感器分别用于各级泵入口的真空度的测量及水蒸汽、冷凝水压力的测量;3 个温度传感器及 2 个流量计用于水蒸汽、冷凝水过程量的测量;工业控制计算机完成信号的采集与处理;其它设备略。RH-KTB 系统是多级高架式水蒸汽喷射真空泵与多级冷凝器串联而成,用来对真空室内的钢水脱碳、脱氢、脱氧处理及成分、温度调整。如图 1 所示,工作时(以高真空脱氢脱氧为例),首先打开 4A、4B 的蒸汽阀,使 4A、4B 真空泵对真空室预抽真空;1 min 左右启动 3A、3B,再过 1 min 左右分别启动 S2 及 S1 并关闭 3A、4B,大约过 2 min 真空室内的气体压力达到高真空稳定值(2.5 mbar),这时开始对真空室内的钢水进

行脱氢、脱氧,直到气体含量达到指标,实现钢水的真空精炼。



S1——一级泵, S2——二级泵, 3A——三级泵 A; 3B——三级泵 B, 4A——四级泵 A, 4B——四级泵 B, C1——冷凝器 1, C2——冷凝器

图 1 RH-KTB 真空系统简图

RH-KTB 系统工作目的是在真空室内创造出清洁真空环境,从而使钢水内气体分压大于钢水外的气体分压,加速钢水除气。产生真空环境的真空泵在能源介质(水蒸汽、冷凝水等)综合作用下工作。因此,真空系统各种状态表现都与能源介质的状态有直接的关系。

3 实验方法

3.1 无负荷抽真空

关闭真空系统主阀,依次启动各级泵:4A、4B—4A、4B,3A、3B—4A、3A, S2—4A、3A, S2, S1 (其中:4A 为四级 A 泵;4B 为四级 B 泵;3A 为三级 A 泵;3B 为三级 B 泵;S2 为二级 S 泵;S1 为一级 S 泵)。对系统无负荷抽真空,同时工控机每隔 10 s 记录系统真空度随时间的变化值,直到真空度达到稳定状态后停止实验。打开真空系统主阀,关闭蒸汽阀、冷凝水阀。重复实验 3 次。

3.2 有负荷抽真空

关闭真空系统主阀,分别以不同漏气量(50 kg/h, 1 000 kg/h, 1 500 kg/h, 2 200 kg/h, 4 000 kg/h, 6 400 kg/h)的标准漏孔为负荷,依次启动各级泵对系统抽真空,同时工控机每隔 10 s 记录系统真空度随时间的变化值,直到真空度达到稳定状态后停止实验。打开真空系统主阀,关闭蒸汽阀、冷凝水阀,

重复实验3次。

## 4 结果与讨论

图2~图7为无负荷及各种负荷下真空系统的真空度随时间变化的实验曲线图。从图2~图7可见系统真空度随着负荷的增加而下降,随着相对时间的增加,系统真空度稳定在某一稳定值。经整理计算得,负荷为6 400 kg/h抽真空工况下的真空度最低,在17 342 Pa左右(最终启动泵组为4A+4B),负荷为2 200 kg/h时的稳定真空度为550 Pa(最终启动泵组为4A+3A+S2),负荷为1 500 kg/h时的稳定真空度为131 Pa(最终启动泵组为4A+3A+S2+S1),负荷为1 000 kg/h时的稳定真空度为88 Pa(最终启动泵组为4A+3A+S2+S1),负荷为50 kg/h时的稳定真空度为70 Pa(最终启动泵组为4A+3A+S2+S1),在无负荷抽真空工况下的稳定真空度(极限真空度)最大,其平均值为55 Pa(最终启动泵组为4A+3A+S2+S1)。略低于宝钢2RH的参考极限真空度(40 Pa)。这说明系统的抽气性能略有下降。原因在于:

(1)系统泄漏(喷嘴接头垫片内漏、法兰漏气、焊缝漏气等)。宝钢2RH的参考极限真空度在系统综合漏气量 $\leq 15$  kg/h前提下的理想值,而实际生产中

多少存在漏气现象。但系统的漏气量 $G \leq$ 其最大抽气量的10%,即110 kg/h是允许的。

(2)冷凝水的入口温度、压力、流量的变动导致冷凝器的冷凝效果不为最佳,致使蒸汽因来不及冷凝而直接进入下一级泵,加大后级泵的负荷,影响泵的抽气能力。

(3)蒸汽的过饱和度不够导致水蒸汽有一定量的湿蒸汽。

(4)泵喷嘴因磨损、堵塞等原因,使某级泵功能退化致使系统综合抽气能力下降。

(5)数据检测装置的误差等。但实际精炼中RH-KTB的工作真空度仍然能达到67 Pa,这说明尽管性能略有下降系统仍处于正常状态。

为了保证有良好的性能,生产中应尽量使极限真空度为最高状态。因为极限真空度越高,则会降低熔池内的各气体分压,加速参与反应的物质的传质,加快钢水脱气行为。在处理时间相同的条件下极限真空度越低,最终钢水中各气体含量越低,如脱碳能力随减压增强,到达预定真空度越快,脱碳速度越快,这也说明极限真空度越低,脱碳越充分<sup>[7~10]</sup>,极限真空度对钢液脱氮也具有决定性影响,极限真空度越高脱氮速度越快,钢液中氮含量越低。这也是近年来真空系统加大抽气能力的原因。

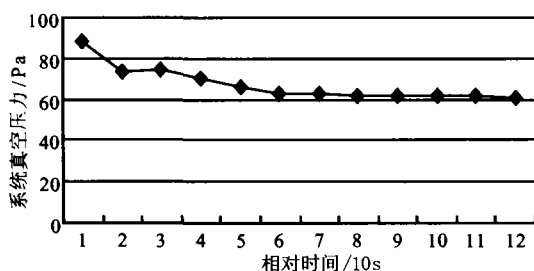


图2 无负荷抽真空曲线图

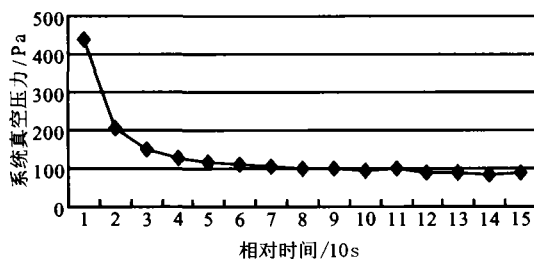


图4 有负荷抽真空(1 000 kg/h)

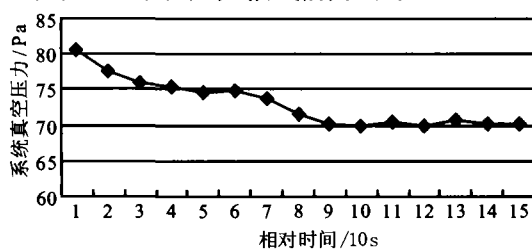


图3 有负荷抽真空(50 kg/h)

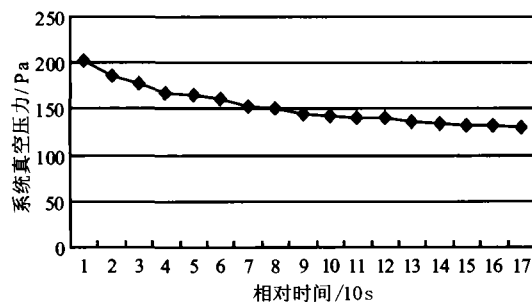


图5 有负荷抽真空(1 500 kg/h)

(下转第14页)

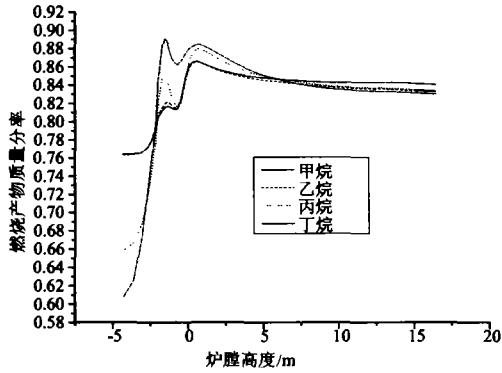


图 12 沿炉膛高度燃烧产物质量分率

## 6 结论

本文实现了对连续重整加热炉在使用不同燃料下包括三维流场、燃烧及传热耦合的数值模拟。在计算中没有对燃烧器结构和炉膛形状做任何简化,实现对整个计算区域的结构化网格划分。数值模拟

(上接第 3 页)

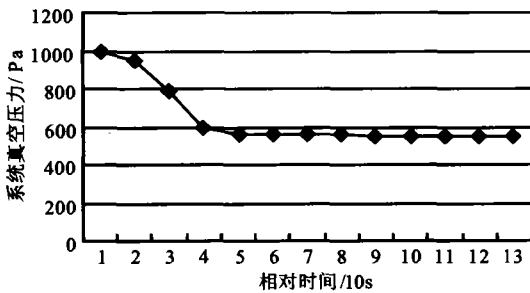


图 6 有负荷抽真空(2 200 kg/h)

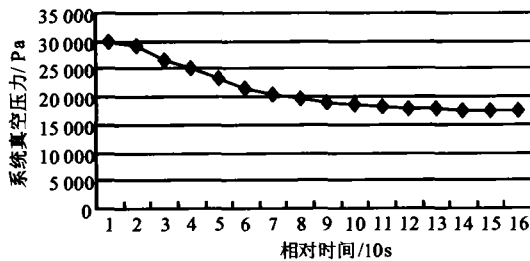


图 7 有负荷抽真空(6 400 kg/h)

## 5 结论

无负荷抽真空工况下的稳定真空度(极限真空度)最大,系统稳定真空度随着负荷的增加而下降。

结果表明不同燃料组分对火焰形状影响较大,在保证相同热值的情况下,轻组分的火焰受重力影响小,而重组分的火焰受重力影响较大,向炉膛下方倾斜。本文对该现象从数值模拟的流场和组分分布浓度场的差别给出了合理解释。本文的计算结果给连续重整加热炉以及其他管式加热炉的研究和设计提供了重要的帮助,同时对燃烧器使用不同燃料时的表现形式有了深刻理解,也说明流动和燃烧的数值模拟方法对于工程实际问题具有重要的指导作用。

### 参考文献:

- [1] 黄祖祺,等. 石油化工管式炉的模拟与计算机计算[M]. 北京: 化学工业出版社,1993.1—6
- [2] 周力行. 湍流气粒两相流动和燃烧的理论及数值模拟[M]. 北京: 科学出版社,1994.153—161
- [3] Carvalho M G, Farias T, Fontes P. Predicting radiative heat transfer in absorbing, emitting, and scattering media using the discrete transfer method[A]. In: Fiveland W A, et al. ed, Fundamentals of Radiation Heat Transfer (volume 160)[M]. ASME LTD, 1991.17—26

实际正常生产中真空系统的极限真空度略低于参考极限真空度,但可以达到工作真空度,说明随着使用时间的延长,设备的性能也在逐步下降。系统漏气、水蒸汽及冷凝水的过程量的变化对系统的性能下降有较大的影响。

### 参考文献:

- [1] Charles J L. National steel unveils vacuum degasser at Great Lakes Div [J]. Iron and Steel Engineer, 1990, 67(6): 64—65.
- [2] 住田 夫,藤井 也,小口征南,ほか. 底吹转炉とRH 流式真空脱ガス装置による 低碳素钢の制度[J]. 川崎技, 1983, 15(2): 152—157.
- [3] Mcaloon T P. RH technology update[J]. Iron and Steelmaker, 1991, 18(7): 34—35
- [4] 张春霞,刘浏,杜挺. RH-KTB 及其 RH 真空精炼方法[J]. 炼钢, 1996, 12(1): 53—59
- [5] Saitoh T, Matsumoto H, Shinnozaki K, et al. Vacuum decarburization rate at RH degasser[J]. R and D KOBE Steel Engineering Reports, 1986, 36(1): 40—42.
- [6] 汪明东,李扬洲,仲剑丽. RH 钢水真空处理技术现状[J]. 钢铁钒钛, 1997, 18(4): 35—41
- [7] 汪周勋. 炼钢真空脱气系统泄漏的控制[J]. 炼钢, 2001, 17(3): 31—33
- [8] 张鉴. 炉外精炼的理论及实践[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1993. 548
- [9] 区 铁. RH 真空处理钢水循环流量的研究[J]. 炼钢, 1993, (2): 56—60
- [10] 田中英雄,神原路晤,林顺一. RH 真空脱ガスの流量特性[J]. 制铁研究, 1978, 293: 49