

doi:10.3969/j.issn.1671-5152.2017.11.005

蓄热式加热炉的传热及流动特性研究概述

□ 同济大学机械与能源工程学院 (201804) 秦朝葵 徐鹏飞

摘 要: 较之传统加热炉, 蓄热式加热炉在炉内传热和流动特性上具有鲜明的特点, 其影响因素众多, 实际情况复杂, 在设计与运行中常通过改变结构参数与运行参数的方法对其进行调节控制。掌握其影响因素与生产能力的内在关系, 对于保证炉内工件加工质量和节能降耗具有重要的指导作用。

关 键 词: 蓄热式燃烧 传热 流动特性

The Research Summary of Heat Transfer and Flow Characteristics of Regenerative Heating Furnace

Qin Chaokui, Xu Pengfei College of Mechanical and Energy Engineering, Tongji University

Abstract: Compared with the conventional furnace, the regenerative heating furnace has distinct characteristics in its heat transfer and flow characteristics, which are influenced by many complex factors. Adjusting the structure and operation parameters is the most common method in design and operation. It is critical to understand relationship between these factors and production capacity so as to ensure the quality of the workpiece, save energy and reduce consumption.

Keywords: regenerative furnace heat transfer flow characteristics

蓄热式燃烧技术又称高温空气燃烧技术, 英国于19世纪中叶就开始使用蓄热室来预热助燃空气, 但由于成本较高、设备庞大、阻力损失大的缺点, 该技术并未得到普及。1982年, 英国HotWork Development公司与英国燃气公司合作开发了第一套蓄热式陶瓷燃烧器系统RCB (Regenerative Ceramic Burner), 即第1代蓄热式燃烧技术, 新技术在设备尺寸、节能效果等方面取得了显著改善, 但在 NO_x 控制上依然存在不足, 使得该技术仍未得到广泛应用。20世纪80年代末期, 日本学者田中良一对RCB技术进行了改进, 创造性地提出了高温空气燃烧技术 (High Temperature Air

Combustion, HTAC), 即第2代蓄热式燃烧技术, 同时实现了节能降耗和降低排放的目标。经过不断的发展与改进, 目前该技术已在各国炉窑领域取得了广泛应用。20世纪90年代初我国开始涉足相关领域并最先在轧钢加热炉上进行了应用, 取得了极大的节能环保成效^[1]。

1 蓄热式燃烧技术的基本原理与特点

一个蓄热式燃烧单元主要包括以下部分: 两个燃烧器、两个蓄热室、供风及排烟系统、换向阀与配

套的控制系统以及加热炉烧嘴。基本原理如图1^[2]所示。助燃空气进入左侧蓄热室吸收其在上一个工作周期内所吸收的热量后升温至接近炉膛温度，后经由烧嘴进入炉膛与同时被喷射出的燃料混合燃烧，燃烧产生的烟气经由右侧蓄热室排出，其热量被蓄热体吸收。一定时间后换向阀动作，系统反向运行，空气由右侧进入，燃烧系统和排烟系统互换。

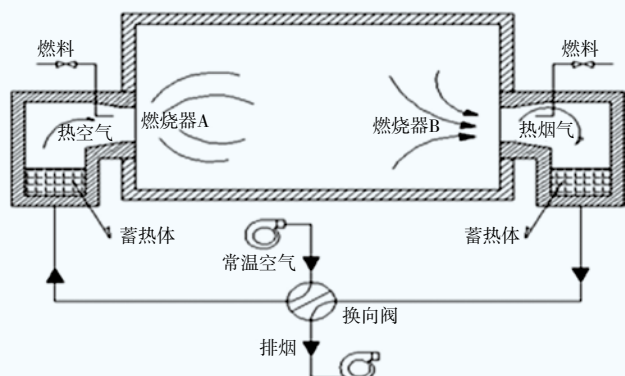


图1 蓄热式燃烧系统基本原理

与传统燃烧技术相比，蓄热式燃烧技术具有以下显著特点：

（1）热效率高。传统加热炉采用换热器和蓄热体对烟气进行余热回收，热效率仅30%~50%；而蓄热式燃烧技术将高温烟气所携带的余热由蓄热体吸收后释放给助燃空气，增加了空气物理热，避免了能量浪费。经过处理后的废气温度可降低到150℃~200℃，若采用冷凝技术，甚至能实现余热的“极限”回收^[1]。

蓄热式加热炉热效率高的这一特点在众多工业应用中都得到了验证，日本NKK钢管公司福山热轧厂热轧步进式加热炉采用蓄热式燃烧技术改进后，在保证加工质量不变的情况下，排烟热损失从33.6%下降至11%^[3]。在我国，迁钢2160热轧2号加热炉通过换用蓄热式烧嘴后，成功将能耗由1.52GJ/t降低至1.21GJ/t^[4]。

（2）炉膛内温度分布均匀。蓄热式加热炉内稳定的温度场是建立在对炉窑结构参数（喷口倾角）与运行参数（燃气、助燃空气特性）等进行合理调整控制的基础上，前人对此已进行了深入的研究讨论，总结了众多的经验教训。

研究表面：燃气与空气喷口倾角是影响炉内温度场分布的重要因素之一，增大烧嘴和燃料喷口夹角

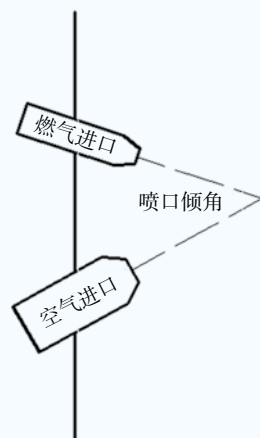


图2 燃气与空气喷口倾角

可以起到加强混合的作用。但过大的倾角会在靠近烧嘴处催生局部高温区并减小火焰体积，对整个炉膛的温度均匀不利且易缩短烧嘴使用寿命。而过小的夹角则易导致烟气回流减弱，并使烧嘴出口处氧气浓度增加，难以形成低氧气氛且减小火焰体积。一般情况下，10°~20°的喷口角度可以在取得较大火焰体积，确保炉膛内紊流程度良好的基础上保证空气与燃气回流程度适中，取得均匀的温度场^[5]。

调节燃气和助燃空气特性也是维持炉内均匀温度场的主要措施之一。其中燃气和助燃空气预热温度是决定蓄热式加热炉平均温度的最主要因素，提高预热温度意味着气体物理热的提高，可减弱低温气体进入炉膛后对炉内热量的吸收，进而提高炉膛平均温度^[6]。另外，提高助燃空气压力一方面可使助燃空气获得更多的物理热，另一方面可增大空气过量系数，使得燃烧更加充分，保证较高的炉膛平均温度^[7]。而降低助燃空气氧气浓度也可使喷口处燃气消耗量减少，将燃烧扩展到整个炉膛之中，对缓解炉内局部高温和提高温度均匀性具有重要作用。较常规的做法是采用某些气体作为稀释剂，研究表面：与N₂、Ar和He相比，考虑其高热容和低湍流强度的特点，选择CO₂作为稀释剂可以在降低火焰局部高温和提高炉膛温度均匀性方面取得更好的成效^[8]。

与传统炉窑相比，蓄热式加热炉独特的换向运行方式反而不利于稳定温度场的建立。在实际运行中过长的换向间隔虽可保证较为稳定的温度场，但会导致助燃空气预热温度和火焰温度降低、炉内热交换弱化。而过短的换向间隔则会导致炉内温度波动频繁，

不稳定性加大。通常情况下,在选择合适的换向间隔时,若炉内受热物体温度明显低于火焰温度,应主要考虑蓄热体热量利用的影响,反之应主要考虑炉膛换热情况^[9]。

蓄热式加热炉常用的换向方式有全同侧、分段同侧和交错三种(见图3)。研究表明,三种换向方式中分段同侧换向由于其同时具有平行射流相互干涉和交错射流相互扰动的特点,可以在炉膛内形成较大的回流区,对稳定燃烧和炉温均匀性都具有积极的作用。同时,如果能实现相邻烧嘴换向时间交错,可进一步起到稳定炉温的作用^[10]。

(3) 低 NO_x 燃烧。燃气燃烧产生的 NO_x 以热力型为主,生成受燃烧温度、反应区氧含量和燃烧产物在反应区停留时间的影响。蓄热式燃烧本身温度分布均匀的特点保证了炉内燃烧可扩展到炉膛大部,减少了高温区对 NO_x 的生成。故现有维持炉内均匀温度场的措施(调节喷嘴角度、降低 O_2 浓度等)都对减少炉内 NO_x 生成具有一定的作用。此外,炉窑周期换向运行也减少了燃烧产物在炉膛内的停留时间,使得炉内无稳定的火焰锋面,有效抑制了热力型 NO_x 的生成^[11]。难点在于 NO_x 生成随空气预热温度的提高而增加,在温度超过某一限定值时明显增多,其降低的转折点随燃气种类而变化。钟水库^[12]等人指出 700°C 作为焦炉煤气的转折点,而祁海鹰^[13]等人指出 $1\ 300^\circ\text{C}$ 作为 CH_4 的转折点,故在具体操作时对不同炉窑应考虑燃气种类、热效率及加工质量,条件允许时可加以实验测量,最终合理确定空气预热温度。

(4) 工件加工质量高。在传统的三段式加热炉中,工件主要在预热区和加热区完成加热,其最大温差出现在加热段。预热、加热和均热段相互协调,共同保证加工质量。其中预热段温度对整个炉窑的能耗具有关键的影响,而对工件温差只存在一定影响。加热段温度对二者都有比较大的影响,是炉内热流最大

处。均热段温度则对整个炉窑能耗几乎没有影响,但却是决定工件温差的关键因素,通常情况下需保证稍高于工件要求的出炉温度。由于工件大部分热量来自于预热段和均热段,而最终温度及均匀性则受均热段影响。因此,更小的预热段温度,更高的加热段温度以及更精确的均热段温度是目前最佳的设计趋势。除此之外,传统炉窑为保证钢坯出炉温度的均匀性,不得不采取延长加工时间的做法,导致更多的能源浪费^[14]。

而蓄热式加热炉取消了预热段,紧凑了炉窑结构,缩短了加热时间,提高了生产效率。炉内热流呈贝尔曲线分布,从喷口处增加,在炉膛中心达到峰值后又逐渐减小^[15]。与传统加热炉不同,蓄热式加热炉将流动方向由炉长方向转换为炉宽方向,保证了钢坯长度方向上温度的均匀性^[17]。通常来说,蓄热式加热炉内钢坯温度呈现出以下特点。在预热段,由于整个空间充满了高温烟气,无强烈燃烧发生,钢坯温度对称分布。在加热段,钢坯温度沿工件长度方向出现不对称分布,接近气体进口处温度更高,最高温度出现在钢坯拐角和边缘处。这种温度不均匀性在加热区尤其明显,在均热段则逐渐减小。在均热段,钢坯表面温度升高速度降低,中心温度持续升高,内外温差逐渐减小,最终可以保证温差小于 30°C ^[16]。因此,为保证加工质量,应合理控制加热区温度均匀性,稳定均热区温度,并尽量减小换向造成的影响。

除此之外,传统加热炉采用冷空气助燃,空气系数大,导致钢坯氧化烧损严重(烧损率 $1.5\%\sim 2.5\%$),而蓄热式加热炉预先预热空气且炉内为厌氧环境的特点减少了氧化烧损,也是该技术的一大优势。

2 国内外研究现状

目前蓄热式燃烧技术的研究主要通过实验与模拟

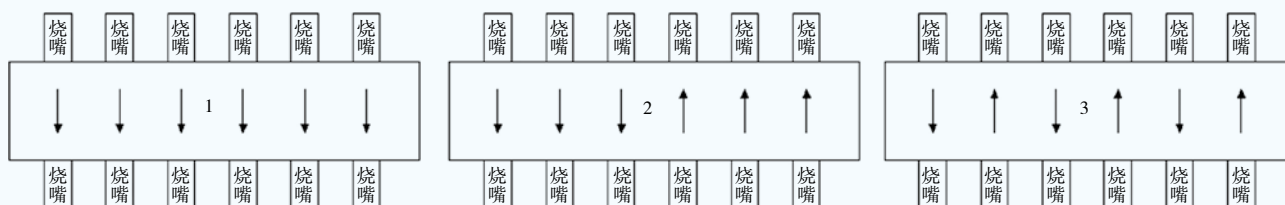


图3 蓄热式加热炉换向方式简图(1-全同侧,2-分段同侧,3-交错)

相结合的方式,并辅以工业应用。在我国,上海交通大学、东北大学、中南大学、中钢集团鞍山热能研究所、北京神雾公司等机构都进行了相应研究,取得了很多成果。

T.Hasegawa^[17]对蓄热式燃烧技术的火焰特性、烟气成分等参数进行了实验测量。实验对不同空气预热温度和氧气浓度下的火焰形状、NO_x浓度、温度分布等方面进行了研究。结果表明:空气预热温度的增加导致可视火焰亮度的增加;冲淡氧气的增加降低了火焰亮度,提高了炉膛火焰均匀性;氧气浓度和空气预热温度的降低导致NO_x浓度的降低。上海交通大学的张福宝^[18]着重于HTAC技术的NO_x生成方面,从燃料射流和空气射流速度、燃料射流倾斜角度、燃烧空气散布角、空气预热温度、燃料预热温度、过剩空气系数等参数入手,分析总结了这些因素对NO_x生成量的影响,为后续工程实践提供改造建议。提出了尽量增大燃料射流倾斜角度,增大燃料喷嘴与空气喷嘴间距等减少NO_x排放的建议。

Mario Sánchez^[19]通过实验测量的方法,比较了采用蓄热式无焰燃烧器在不同氧浓度下的燃烧性能。实验发现,不同氧浓度下的燃烧器效率及产量都不会有显著变化,NO_x排放也基本保持不变,但由于分离反应区域的存在,CO浓度较正常燃烧增多,在炉窑内,沿中心向外,CO浓度先增大后减小。燃烧器壁面温度差异也有稍许增加,从19℃~27℃增加到31℃~34℃。鞍山科技大学的刘坤^[20]分析比较了稳态时,不同喷嘴布置方式和角度下的蓄热式加热炉加热段的温度场和浓度场,研究发现,喷嘴喷口布置方式是决定炉内温度场的重要因素;适度改变喷嘴喷口倾角,可以十分有效的改进炉内温度及浓度场的分布情况;与传统加热炉的流场不同,蓄热式加热炉的流动主流方向由原来的沿炉长方向变成炉宽方向,更好的保证了钢坯受热的均匀性,提高了钢坯的加热质量。

尽管近年来国内研究成果很多,但依然存在较多定性报道节能效果的文章,而理论研究较少的问题,质量评价多从炉窑整体气氛出发,对工件加工质量有所忽视,少有对工件加热形式与能耗分配的内在关系进行研究;再加之国内外燃料结构差异,国内研究多以高炉煤气、混合煤气和发生煤气为主,导致单纯模仿国外先进研究存在与国内实情不符的问题,因此,

国内研究还需基于工业炉发展方向与技术要求,因地制宜地发掘研究重点。

3 存在的问题

蓄热式技术在炉窑领域已得到了一定程度的推广应用,但在实际使用过程中依然存在着一些问题,其中炉压偏高、压力波动较大是最常见的问题。

受蓄热式加热炉炉体结构的影响,炉气流入炉膛时,会在入口处形成一定的低压区;进一步流动时,由于流动截面积的扩大,流速减小,炉压上升;当炉气充满炉膛后压力又逐渐降低;当排出炉膛时由于截面积减小,回流加强,炉压再次上升^[21]。

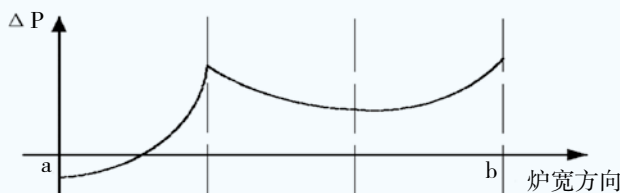


图4 蓄热式加热炉炉内压力场分布特点
(a-炉气进口, b-炉气出口)

众多研究表面:进出炉膛的流体流量不平衡是造成炉压偏高的根本原因,而换向运行方式则是造成炉压波动较大的主要因素。

目前,研究人员已针对性地提出了一系列改善措施并在众多炉窑上取得了应用。其中,增设副烟道是解决炉压偏高的常见措施之一。炉膛内多余的烟气可通过副烟道排出。当燃烧产生的烟气体积明显大于燃气与助燃空气体积时,设置副烟道是必要的。虽然当两者相差不大时,可不设置副烟道,完全依靠换向运行的方式排出全部烟气,但考虑到加热炉正常老化以及蓄热体、换向阀损坏及老化问题,一般情况下依然建议设置副烟道。除此之外,增大排烟风机抽气压力也对降低炉压具有显著作用。但提高抽气压力只能降低炉压整体水平,无法改善炉压分布情况。故单纯只增加抽气压力的做法对解决炉压偏高、炉门冒火现象并无太大改善。

同时,蓄热式加热炉换向运行的特点导致换向瞬间易存在明显的压力波动,若存在换向阀到烧嘴之间的盲区,换向瞬间压力甚至将瞬间减小至零,燃料重

新供入后易发生爆燃现象,使炉压突然增大,对安全生产有重大影响,通常可通过延时交错换向的方式加以改善。换向前,烧嘴A停止排烟运行晚于烧嘴B停止燃烧;换向后,烧嘴A开启燃烧晚于烧嘴B开启排烟。同时,烧嘴由排烟状态转换为换向时,应先进行空气换向,后进行燃气换向。当烧嘴由燃烧状态转换为排烟状态时,则应先进行燃气换向,后进行空气换向^[22]。

对这两项难题的解决目前依然是蓄热式加热炉工业应用中的难点,由于炉窑老化以及蓄热体堵塞等因素的影响,其解决措施仍需进一步研发讨论,实现综合节能和安全生产依然需要充足的准备。

4 结论

与传统加热炉相比,蓄热式加热炉炉内传热及流动特性更为复杂,对其的影响因素多有研究,结果表明:

(1) 炉内均匀的温度场是建立在合适的喷嘴角度、燃气及助燃空气预热温度和压力的基础上。除此之外,适当降低 O_2 浓度,对均匀温度场的实现也具有重要作用。

(2) NO_x 浓度更多地受炉内温度的影响,提高空气预热温度是降低其浓度的主要方法之一,但实际运用中还需注意各燃气的预热峰值。

尽管蓄热式加热炉与传统炉窑相比具有很多优势,但在实际运用之中还存在着炉压不稳定,炉门冒火的情况,其根本原因在于蓄热式加热炉周期换向的特点影响,在今后的研究中需更多地从控制策略方面进行研究与改善,寻求更合适的换向策略并相应改善炉窑结构。

参考文献

- 1 吴存宽,吴彬林. 高温空气燃烧技术的发展与应用[J]. 工业炉, 2003; 25(2): 13-18
- 2 刘承林. 基于蓄热式燃烧技术的加热炉控制系统[D]. 天津: 天津理工大学控制工程, 2014: 4-5
- 3 吴道洪, 谢善清. 蓄热式高温空气燃烧技术的应用[J].

工业加热, 2000; 3: 5-8

4 陈迪安, 苗为人. 高效蓄热式燃烧技术在迁钢加热炉上的应用[J]. 冶金能源, 2015; 2: 32-34

5 唐勃. 蓄热燃烧式炉内热特性数值模拟研究[D]. 鞍山: 辽宁科技大学材料与冶金学院, 2012: 35: 30-43

6 赵博宁, 李健. 天然气预热温度对高温蓄热式加热炉内燃气流动影响的数值模拟研究[J]. 化学工程与设备, 2010; 8: 27-29

7 Yu Jin Jang. An Estimation of a Billet Temperature during Reheating Furnace Operation[J]. International Journal of Control Automation & Systems, 2007; 5(1): 43-50

8 Jianwei Yuan & Naruse.I. Effects of Air Dilution on highly Preheated Air Combustion in a Regenerative Furnace[J]. Energy & Fuels, 1999; 13: 99-104

9 李亚冰, 陈文仲. 蓄热式燃烧最佳换向时间的计算[N]. 东北大学学报, 2012; 33(2): 94-97

10 欧俭平, 马爱纯. 换向方式对蓄热式加热炉热过程影响数值模拟[N]. 武汉理工大学学报, 2007; 4(4): 68-71

11 刘波, 吴雨. 低 NO_x 工业燃气燃烧技术研究进展[J]. 化工进展, 2013; 32(1): 199-204

12 钟水库, 马宪国. 高温贫氧燃烧过程中 NO_x 排放的特点[N]. 动力工程学报, 2003; 23(4): 2582-2585

13 祁海鹰, 李宇红. 高温低氧燃烧条件下氮氧化物的生成特性[J]. 燃烧科学与技术, 2002; 8(1): 17-22

14 Jang Jiin-Yuh & Jun-Bo Huang. Optimization of a slab heating pattern for minimum energy consumption in a walking-beam type reheating furnace[J]. Applied Thermal Engineering, 2015; 85: 313-321

15 Gupta AK. Thermal Characteristics of Gaseous Fuel Flames Using High Temperature Air[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines & Power, 2004; 126(1): 9-19

16 Gu MingYan & Guang Chen. Numerical simulation of slab heating process in a regenerative walking beam reheating furnace[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2014; 76(6): 405-410

17 T.Hasegawa. Development of Advanced Industrial Furnace Using Highly Preheated Combustion Air. JOURNAL OF PROPULSION AND POWER. 2002; 1(2): 233-238

18 张福宝, 罗永浩, 胡璨元. 高温空气燃烧若干因素对 NO_x 生成量的影响. 热能与动力工程, 2006; 21(2): 115-118

合肥市中压B燃气管道升压运行的探讨

□ 合肥燃气集团 (230000) 张启龙

摘 要: 针对合肥市中压B燃气管道运行压力低、供气能力不足的情况,提出部分区域中压B管网升压运行的方案,阐述了试点区域的可行性研究和方案编制与实施,分析了中压B管网升压运行对企业的重要性。

关 键 词: 中压B燃气管道 升压运行 输气能力 管网优化

1 前言

合肥燃气集团目前已建成中压管网约1 862km(其中:中压A级管网1 451km,中压B级管网411km),低压2 971km。中压A管网由两处门站及高中压站供气,中压B管网由11台中、中压站供气。

从管网压力分级结构来讲,中压管网A、B两个压力级别共存会降低管网输配效率,同时也使管网的运行维护管理更为复杂。近500km的中压B管网主要由以下两类构成:

(1) 上世纪80年代合肥市老城区供应的管道燃气为人工煤气,当时的运行压力为0.06MPa,管道主要是铸铁管。该类管道在引入天然气后无法承受中压A级别的运行压力,只能将中压A气源经过中、中

压调压器降压至0.05MPa后再输送至管网。该管网我们称中压B铸铁管网,总长约88km,占中压B总管网的21%。

(2) 2003年合肥引入天然气后,受气源条件限制,老城区内新建设的道路主管道只能从中压B铸铁管网接入气源,该管网我们称中压B新建管网,其管道主要是钢管和PE管,占中压B总管网的79%。

随着合肥市用气规模的不断发展,中压B管网的用户数量和类型也不断增加,2016年中压B进口的终端调压器已经达到1 661台,其中民用负载达到40余万户,工商户额定负载每小时达到7.3万m³。从2014年开始中压B管网冬季供气已出现明显短缺,高峰段管网末端压力逼近低压。中压B管网羸弱的供气能力对老城区的用气保障和市场拓展造成严重影响。所以

19 Mario S á nchez. Experimental evaluation of a 20 kW oxygen enhanced self-regenerative burner operated in flameless combustion mode. Applied Energy. 2013; 11, 111: 240-246

20 刘坤, 韩仁志, 谢国威. 蓄热式加热炉内温度场及浓

度场的数值模拟. 冶金能源, 2005; 2: 22-24

21 谢国威. 蓄热式连续加热炉内气体流动及热工制度的研究[D]. 沈阳: 东北大学材料与冶金学院, 2008; 11: 29-39

22 吴宏. 双蓄热式加热炉炉压过高的原因分析及改善措施[J]. 工业加热, 2015; 4: 68-70