

新型自蓄热燃烧器设计与实验研究

张建军¹, 冯自平², 徐今强¹, 邹得球¹

(1. 中国科学院 研究生院, 北京 100039; 2 中国科学院 广州能源研究所, 广东 广州 510640)

摘 要: 基于高温空气燃烧技术, 设计一种新型自蓄热燃烧器, 以实现连续的高温空气燃烧。新型自蓄热燃烧器由燃烧器、蓄热体、四通换向阀 3 部分构成。为验证新型自蓄热燃烧器热工及阻力特性, 建立了基于直管式辐射管测试系统, 结果表明: 该自蓄热燃烧器能实现稳定的高温空气燃烧, 工作过程中排烟温度在 150℃以下, 温度效率可达 88%以上; 直管式辐射管外壁纵向最大温差低于 58℃; NO_x排放浓度不高于 3.85 mg/m³; 且该自蓄热燃烧器结构相对简单, 安装灵活, 因此对不同炉型有较强的适应性。

关 键 词: 高温空气燃烧; 自蓄热燃烧器; 温度效率; 低 NO_x排放

中图分类号: TK16 文献标识码: A

引 言

高温空气燃烧 (High Temperature Air Combustion, 简称 HiTAC) 技术是具有节能减排双重效果的先进燃烧技术。通过高效蓄热体“极限”回收烟气余热预热助燃空气, 提高燃料的理论燃烧温度, 节约燃料消耗, 减少燃烧产物排放^[1-2]。这项燃烧技术还被称为 FLOX MILD 和 LN 燃烧技术和蓄热燃烧技术^[3]。目前, 国内的 HiTAC 系统多采用双焰式高温空气燃烧方式, 双焰式 HiTAC 技术要求成对安装燃烧器, 每只燃烧器配备蓄热体, 当其中一只燃烧器处于燃烧状态时, 其蓄热体被助燃空气冷却, 相对应的燃烧器排烟, 与之相连的蓄热体被高温烟气加热, 它们按周期进行转换功能, 交替加热和冷却蓄热体从而实现“极限”回收余热^[4]。频繁火焰切换造成炉温、炉膛压力的波动, 换向瞬间燃烧不连续, 频繁的燃料通断造成燃料喷管易出现结焦、堵塞和断火等问题^[5]。如一端燃烧器出现故障, 整个系统就不能正常燃烧, 影响生产的正常进行。

为有效解决双焰式 HiTAC 系统上述不足, 国内外研究者提出了连续式蓄热燃烧的概念^[6-9], 就是

在保持烟气余热能极限回收的同时, 燃气连续供给, 在国内这种燃烧技术已经在熔铝行业取得成功, 2002 年国内某铝材公司的熔铝炉上安装连续式 HiTAC 系统后, 取得了理想的节能效果^[7], 但连续式蓄热燃烧技术在其它形式热处理炉或辐射管上应用的相关报道很少见诸公开文献。

首先介绍了新型自蓄热燃烧器的工作原理与结构组成, 然后介绍了该自蓄热燃烧器测试系统, 对其在直管式辐射管上进行了冷态蓄热体阻力特性的测试和热态燃烧器热工性能测试, 最后对测试结果进行了分析和比较。

1 新型自蓄热燃烧器的设计

1.1 新型自蓄热燃烧器的工作原理

新型自蓄热燃烧器根据高温空气燃烧技术的基本原理设计而成, 可以在 HiTAC 下连续燃烧, 具有高效回收烟气余热, 大幅降低污染物排放, 降低 NO_x 的排放浓度的特点^[10], 因燃烧过程中燃气不换向, 空气与烟气间切换周期可以缩短到 10 s 左右。自蓄热燃烧器的工作原理如图 1 所示, 在炉膛的升温段, 阀 1 关闭, 阀 2 打开, 自蓄热燃烧器中间的小燃烧器先工作, 采用非预混燃烧方式, 此时换向阀开始工作, 蓄热体 A 和 B 交替作为排烟通道并蓄热, 保证烟气排放温度在 150℃以下。当排烟温度达到 150℃左右时, 部分开启空气阀 1, 调小空气阀 2 的开度, 空气与烟气交替通过蓄热体, 实现加热助燃空气, 回收烟气余热, 如图 1 所示炉内的高温烟气进入蓄热室 B, 蓄热体 B 被加热, 同时高温烟气被冷却到 150℃以下通过四通换向阀后经引风机排出, 烟气的显热被蓄热体 B 吸收并贮存; 常温空气经过高温蓄热体 A 后被预热为高温助燃空气, 同时蓄热体 A 被冷却, 高温助燃空气喷入炉内与燃气混合后进行

收稿日期: 2009-09-23 修订日期: 2010-03-30

基金项目: 中国科学院广州能源研究所所长基金资助项目 (08073)

作者简介: 张建军 (1973-), 男, 河南开封人, 中国科学院研究生院硕士研究生, 中国科学院广州能源研究所工程师。

燃烧。

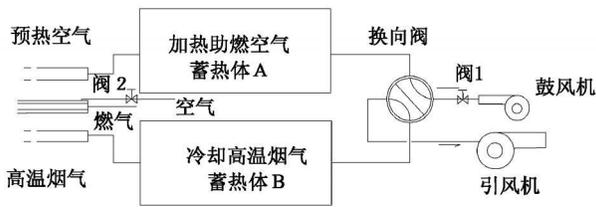


图 1 自蓄热燃烧系统示意图

半个周期后换向阀换向，炉内的高温烟气进入蓄热室 A 蓄热体 A 被加热，同时高温烟气被冷却到 150 °C 以下通过换向阀后经引风机排出，烟气的余热被蓄热体 A 吸收并贮存；常温空气经过高温蓄热体 B 后被预热为高温助燃空气，同时蓄热体 B 被冷却，高温助燃空气喷入炉内与燃气混合后进行燃烧。炉膛温度达到 850 °C，阀 1 全开，阀 2 部分开启，此时为二级燃烧方式。由以上的分析可以看出，在燃烧过程中，燃气不再频繁的通断，燃气喷管内不会出现堵塞、结焦、断火和不燃等现象。

1.2 新型自蓄热燃烧器的结构

新型自蓄热燃烧器由燃烧器、蓄热体与换向阀 3 部分组成。从图 2 可以看出，燃烧器的中间部分是升温燃烧器，它由空气管道、燃气管道、空气分布板和点火电极组成。升温燃烧器四周均匀布置了 4 个管道，分别与蓄热体相连，在工作过程中，两根管道并联作为预热空气喷口，另外两根管道并联作为烟气排放管，并定期互换功能，火焰的检测是通过 UV 火焰检测器进行，燃料连续供应，取消了燃气自动切换装置。



图 2 新型自蓄热燃烧器

2 实验系统

为了对自蓄热燃烧器的蓄热体阻力特性与热工性能进行测试分析，搭建了如图 3 所示测试系统。本系统是由燃烧器、蓄热器、换向阀、辐射管、试验炉、鼓风机和引风机等组成。

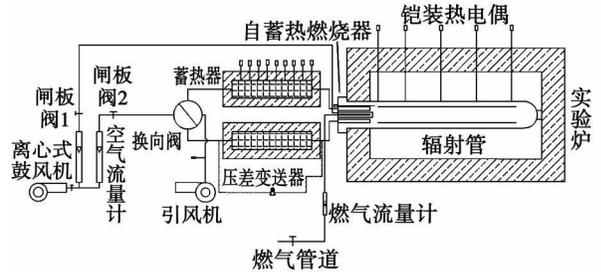


图 3 自蓄热燃烧器实验系统示意图

燃料为瓶装液化石油气配瓶装氮气，蓄热器内蓄热体为莫来石质蜂窝陶瓷蓄热体。用到的测量仪器有浮子流量计、UV 检测火焰装置、TESTOM300—型烟气分析仪、压力变送器、铠装 K 型热电偶、铠装 S 型热电偶和台式电脑等。在升温阶段，闸板阀 2 关闭，闸板阀 1 开启，换向阀正常运行，随着蓄热体内温度升高，逐渐关小闸板阀 1，逐渐开启闸板阀 2 当辐射管内温度达到 850 °C 时，闸板阀 2 开启，进入高温低氧燃烧阶段。

3 试验结果与分析

3.1 新型自蓄热燃烧器蓄热体的阻力特性

蓄热体的阻力损失是指气体流过蓄热体时形成的压力差，这个数值的大小直接影响到整个系统的运行效果，影响燃烧的稳定性，系统设计中必须综合考虑^[1]。本次实验中单台蓄热器内安装长度为 1 000 mm 的莫来石质蜂窝陶瓷蓄热体，整套蓄热器全流程为 2 000 mm 为得到不同长度蓄热体在不同流量时的阻力特性及最大流量、最长蓄热体时的阻力值，分别对蓄热体长度为 500、1 000、1 500 和 2 000 mm 在不同空气流量下进行了阻力损失测试，空气流量计的测量精度为 ±1 m³/h 压力变送器的测量精度为 ±0.5 Pa 气体的流量变化范围是从 20 ~ 100 m³/h 从测量结果图 4 中可以看出，当气体流量一定时，阻力损失随蓄热体的高度增大而增加；当蓄热体的高度一定时，阻力损失随气体的流量增大而增加，当流量 100 m³/h 蓄热体长度 2 000 mm

时, 阻力损失 750 Pa 左右, 同等条件下的陶瓷小球作为蓄热体的阻力损失约 1 400 Pa^[12]。

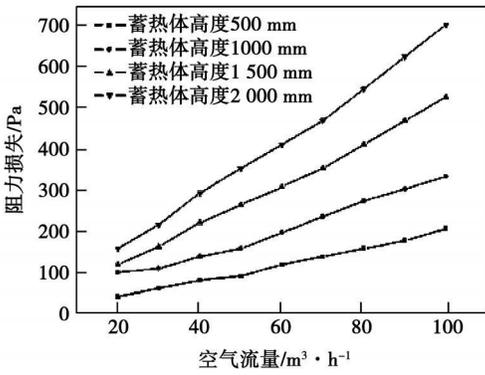


图 4 蓄热体高度、阻力损失和流量的关系

3.2 辐射管外壁的温度分布

由辐射管外壁的温度梯度引起的应力大小是影响辐射管寿命的重要因素, 在实际应用过程中发现, 辐射管一般从燃烧器附近“烧穿”, 这是因为, 在辐射管内燃烧器附近的辐射管壁内温度梯度大, 由此产生的热应力大, 在这些点温度最高, 氧化最严重, 所以往往从这些地方损坏, 这种现象在直管式辐射管上尤为严重。在直管式辐射管上采用自蓄热燃烧器后, 整个过程中沿辐射管的纵向表面最大温差不过 58 °C, 特别是当辐射管内温度超过 850 °C 以后, 图 3 中闸板阀 2 打开, 实现高温贫氧燃烧, 火焰体积变大, 管内的温度更加均匀, 管壁的最大温差有减小的趋势。从图 5 实测数据也可以看出, 随着实验炉内温度的提高, 辐射管表面的最大温差有变小的趋势, 同其它类型的辐射管燃烧时辐射管壁的温度差相比^[13-14], 配备新型自蓄热燃烧器的直管式辐射管不但安装方便, 表面最大温差也大大降低, 如表 1 所示。

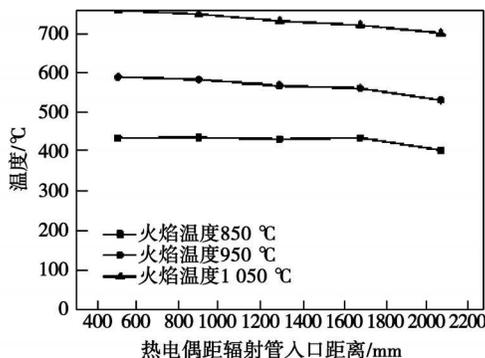


图 5 直管式辐射管外壁纵向温度变化曲线

表 1 辐射管表面最大温度差比较

辐射管类别	燃烧方式	表面最大温差 / °C	备注
U 型辐射管	双焰式蓄热燃烧	82	焦炉煤气
U 型辐射管	双焰式蓄热燃烧	65	天然气
直管式辐射管	自蓄热燃烧	58	IFG

3.3 换向时间对排烟温度及温度效率的影响

在自蓄热燃烧器正常工作过程的任一换向周期中, 如图 6 所示, 前半周期内, 蜂窝体把热量传递给空气, 靠测点的温度成线性下降, 而后半个周期, 烟气把热量传递给蜂窝体, 被测点的温度变化呈抛物线上升。所采用热电偶的精度等级为 2 级, 测量误差每吨为 0.25%, 既对于 1 000 °C 左右的火焰测量误差在 3 °C 以内。换向时间的长短对排烟温度和温度效率有较大的影响, 换向时间为 60 s 时, 排烟温度波动为 85 °C, 换向时间为 20 s 时, 排烟温度波动为 23 °C。

蓄热系统的换热温度效率 E 是用来评价烟气中余热被利用的程度。烟气换热温度效率 E 的定义为:

$$E = \frac{T_j - T_c}{T_j - T_s} \quad (1)$$

式中: T_j 、 T_c —高温烟气的进出蓄热体的温度; T_s —环境温度, 从式 (1) 可以看出, 烟气的出入口温差越大, 蓄热器的温度效率越高, 余热的回收效果越好。实际测量时环境温度为 32 °C, 分别对出入口温度求周期内的平均值, 代入式 (1) 中, 当切换时间为 60 s 时, $T_j=439.6$ °C, $T_c=97.6$ °C, 可得出其温度效率是 84%; 切换时间为 20 s 时, $T_j=474.5$ °C, $T_c=85$ °C, 可得出其温度效率是 88%。

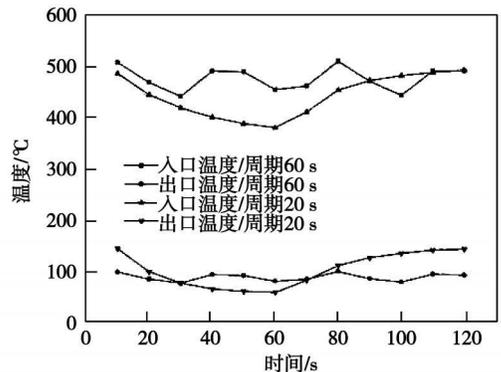


图 6 不同切换周期下烟气进出口温度变化

虽然缩短切换周期对蓄热器的温度效率有利, 当然对于具体工程也不是换向时间越短越好, 因为

换向时间太短,对换向阀的要求提高,会影响到换向阀的寿命,要根据具体情况,确定蓄热材料的数量,保证自蓄热燃烧器中蓄热体的热饱和时间为 10 ~ 20 s 为佳,换向时间与其饱和时间相对应。

3.4 氮氧化物的排放

燃料燃烧过程中生成的 NO_x按其类型可分为 3 类,热力型 NO_x、快速型 NO_x和燃料型 NO_x。对于 LPG 燃料而言,在燃烧过程中主要是热力型 NO_x。火焰的温度对 NO_x排放浓度影响较大。实验表明,如图 7 所示,当自蓄热燃烧器的火焰温度在 900 °C 以下时,几乎没有氮氧化物产生。当火焰温度达到 1 200 °C 时,NO_x的排放浓度(折算到烟气含氧量 O₂ = 6% 时的干烟气 NO_x数值)只有 3.85 mg/m³,NO 的排放浓度为 1.98 mg/m³。烟气中 NO_x排放浓度较低的原因是由于新型自蓄热燃烧器在设计过程中采取了以下措施:一是采用分级燃烧方式;二是在高温段为高温空气燃烧;三是排烟口与燃气喷口相距较近,排烟流动方向与燃气和助燃空气的流动方向相反,加强了燃烧区域烟气与燃气的扰动与混合,降低了空气射流中氧的浓度和燃气射流中燃气的浓度。

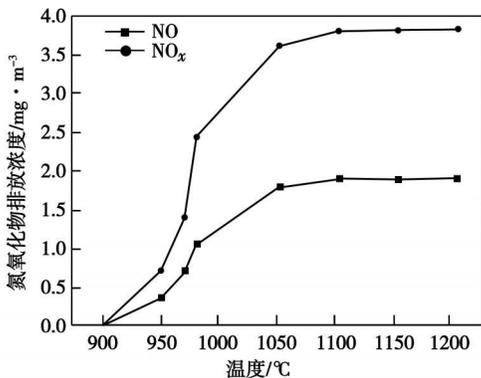


图 7 氮氧化物排放浓度随火焰温度的变化

4 结 论

新型自蓄热燃烧器既具有双焰式高温空气燃烧技术节能减排的优点,又成功地克服其燃烧过程中温度场波动、燃料管道出口处结焦、堵塞等不足,实现在蓄热方式下连续稳定燃烧,并成功的在直管式辐射管上进行冷态阻力特性与热工性能的测试,得出以下结论:

(1) 新型自蓄热燃烧器在冷态下阻力损失随蓄热体高度增加而增大,对高度一定的蓄热体,流量或

风速增加时阻力损失也相应增加,当流量 100 m³/h 蓄热体长度 2 000 mm 时,阻力损失 750 Pa 左右,同等条件下的陶瓷小球作为蓄热体的阻力损失约 1 400 Pa。

(2) 新型自蓄热燃烧器用在直管式辐射管加热器时,辐射管壁面纵向的最大温差为 58 °C,优于双焰式蓄热燃烧方式在 U 型辐射管上的应用效果。

(3) 换向时间对温度效率和排烟温度及其波动有较大影响,缩短换向时间可以提高温度效率,降低排烟温度的波动。

(4) 新型自蓄热燃烧器在结构设计上采取措施以降低 NO_x的排放浓度,当火焰温度 1 200 °C 左右时 NO_x排放浓度不超过 3.85 mg/m³。

参考文献:

- [1] 王关晴,程乐鸣,骆仲决. 高温空气燃烧技术中燃烧特性的研究进展[J]. 动力工程, 2007 27(1): 86-94
- [2] 周怀春,盛 锋,姚 洪,等. 高温空气燃烧技术 21 世纪关键技术之一[J]. 工业炉, 1998 20(1): 19-29
- [3] ROMAN WEBERA, SMARTA JOHN P. On the (MILD) combustion of gaseous, liquid and solid fuels in high temperature preheated air[J]. Proceedings of the Combustion Institute 2005 30: 2623-2630
- [4] 田子平,缪正清,吴国江. 高温空气燃烧技术的最新进展[J]. 锅炉技术, 2000 31(3): 16-20
- [5] 黄文革,梅鸣华,李 治. 高温空气燃烧技术在推广应用中的再认识[J]. 工业炉, 2008 30(6): 8-13
- [6] 张建军,邹得球,肖 睿,等. 自蓄热式高温空气燃烧技术的开发[J]. 工业炉, 2009 31(4): 1-4
- [7] 窦松筠. 连续稳定火焰蓄热式高温空气燃烧装置的研究[J]. 铝加工, 2004 155(2): 31-35
- [8] 夏德宏. 连续式高温空气燃烧技术的开发[J]. 冶金能源, 2008 27(5): 46-49
- [9] 张欣茹,姜泽毅,张欣欣,等. 新型档位蓄热器的开发与研究[J]. 工业加热, 2005 34(5): 26-29
- [10] LUPANT D. Numerical and experimental characterization of a self-regenerative flameless oxidation burner operation in a pilot-scale furnace[J]. Proceedings of the European Combustion Meeting 2005(1): 1-5
- [11] 高 阳. 蜂窝陶瓷蓄热体传热与阻力特性的热态实验研究[J]. 冶金能源, 2008 27(5): 25-29
- [12] 靳世平,严 亮,张喜来. 陶瓷蓄热体换热性能和阻力性能的实验研究[J]. 湖北电力, 2007 31(2): 6-9
- [13] 郑剑辉,伍成波,徐少春,等. U 型辐射管加热装置的性能分析[J]. 工业炉, 2009 31(2): 15-19
- [14] 丁翠娇,蒋扬虎,曾汉生. 蓄热式辐射管烧嘴的实验研究[J]. 工业炉, 2009 31(1): 1-4

(编辑 陈 滨)

直流锅炉垂直管圈水冷壁低流速自补偿特性的试验研究 = Experimental Study of the Low Flow Speed Self-compensation Characteristics of the Vertical Coil-tube Water Wall of an Once-through Boiler [刊, 汉] / ZHU Xào-jing, BIQín-cheng, YANG Dong, et al (College of Energy Source and Power Engineering, Xian Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(4). — 418 ~ 422

With $\phi 28.6 \times 5.84$ -head optimized inner threaded tubes serving as a structure under test conditions, experimentally studied were the self-compensation characteristics of two vertical parallel tubes at a low mass flow speed. The test results show that such a vertical parallel tube group enjoys conspicuous self-compensation characteristics within the test parameter range. During the vaporization of the working medium in the tubes, the mass flow speed in the branch tubes with a relatively small heat load will first decrease and then increase with an increase of the heat absorbed. When the dryness of the working medium in the tubes reaches a relatively high one with an increase of the heat absorbed, the mass flow speed of the medium in the tubes will gradually approach or exceed the average mass flow speed and the self-compensation characteristics of the system will gradually disappear. The test results also indicate that when the medium dryness is relatively low, a relatively big heat load deviation can strengthen the self-compensation characteristics of the system. When the medium dryness is relatively high, a relatively big heat load deviation can weaken the self-compensation characteristics of the system. On the other hand, when the medium dryness is relatively low, an increase of the system pressure may weaken the self-compensation capability of the vertical tube plate. When the medium dryness is relatively high, an increase of the system pressure may result in a decrease of the two-phase friction pressure drop, leading to an enhancement of the self-compensation characteristics of the system. Key words: once-through boiler; self-compensation characteristics; optimized inner threaded tube; low mass flow speed

新型自蓄热燃烧器设计与实验研究 = Design and Experimental Study of a New Type Self-heat storage Burner [刊, 汉] / ZHANG Jian-jun, XU Jin-qiang, ZOU De-qiu (Postgraduate College, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, Post Code: 100039), FENG Zi-ping (Guangzhou Energy Source Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, China, Post Code: 510640) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(4). — 423 ~ 426

Based on a high-temperature air combustion technology, designed was a new type self-heat storage burner to realize a continuous high-temperature air combustion. The new type burner is composed of a burner, a heat accumulation body and a four-way inverter valve totaling three portions. To verify the thermodynamic and resistance characteristics of the burner, a testing system was set up on the basis of straight tube type radiant tubes. The research results show that the above burner can realize a stable high-temperature air combustion and during the operation, the exhaust flue gas temperature is below 150°C . The temperature efficiency can hit over 88%. The maximal longitudinal temperature difference on the external wall of the straight tube type radiant tubes is not higher than 58°C . The concentration of NO_x emissions is not greater than 3.85 mg/m^3 . Moreover, the burner in question is relatively simple in structure and flexible for installation, thus enjoying a relatively strong adaptability to various boiler types. Key words: high-temperature air combustion; self-heat storage burner; temperature efficiency; low NO_x emissions

O_2/CO_2 燃烧方式下燃煤 Hg 排放试验研究 = Experimental Study of Hg Emissions from Coal Combustion Under O_2/CO_2 Combustion Mode [刊, 汉] / WU Hui, QU Jian-rong, ZENG Han-cai, et al (National Key Laboratory on Coal Combustion, Central China University of Science and Technology, Wuhan, China, Post Code: 430074) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(4). — 427 ~ 431

By using a sedimentation furnace test system and an on-line coal-fired flue gas Hg analyzer, experimentally studied