

高温空气燃烧新型锅炉及特性分析

(中南工业大学应用物理与热能工程系, 湖南 长沙 410083)

蒋绍坚 彭好义 艾元方 杨卫宏 萧泽强 周子民

摘要: 介绍了采用高温空气燃烧技术的新型锅炉, 其关键部件包括蜂窝陶瓷蓄热体、实现分级燃烧和炉内烟气再循环的燃烧器及四通高频切换阀。详述了其工作原理及过程, 探讨了开发该锅炉的基本思路, 对其基本特性进行了分析, 最后讨论了在我国推广应用该新型锅炉的意义。

关键词: 高温空气燃烧; 新型锅炉; 换热器; 燃烧器; 特性分析

中图分类号: TK229.8 文献标识码: A

1 前言

高温空气燃烧技术(High Temperature Air Combustion, 简称 HTAC)是近十余年来国际燃料燃烧领域诞生的一项全新型的燃烧技术。它具有高效节能、低污染及缩小装置尺寸等多种优点。在日、美、欧等发达国家和地区, 该技术已应用于钢铁、冶金、机械、建材等部门的多种工业窑炉的技术改造, 到 1995 年, 国际上就已有 800 余台套工业窑炉应用该技术^[1]。目前, 该技术日趋成熟, 已在全世界范围内大力推广应用。

锅炉是电力生产、工业生产与供热的重要设备。将 HTAC 新技术应用于传统工业炉的技术改造, 对提高锅炉热效率, 减少环境污染, 降低金属消耗, 提高其运行的经济性等具有极其重要的意义。日本已成功地开发了采用高温空气燃烧的锅炉——HTAC 锅炉, 并建造了示范工厂。本文阐释了 HTAC 锅炉的工作原理及过程, 详述了其关键技术, 探讨了开发该锅炉的基本思路, 并对其基本特性进行了分析, 以及对我国研究推广应用该新型锅炉起到一定的推动作用。

2 工作原理及过程

HTAC 锅炉结合了高温空气燃烧技术与传统锅炉技术, 其工作原理与带再生燃烧器的工业炉相似。

图 1 表明了 HTAC 锅炉的工作原理。图中所示的烧嘴成对安装, 可在同一侧, 亦可相对放置。锅炉水管均匀密布在燃烧室四周。当烧嘴 A 工作时, 常温空气经四通阀进入蓄热体被加热, 迅速升温到 $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上, 然后高速喷入燃烧室, 抽引燃烧室内的烟气形成一股含氧量低于 15% 的贫氧气流。燃料与高温空气平行喷入燃烧室, 二者混合后迅速燃烧。燃烧释放的大部分热量以辐射换热为主的形式传给水管内的水, 得到高温高压蒸汽。燃烧后的高温烟气经由烧嘴 B 排出, 与蓄热体换热后温度降至 $120\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 排入大气中。A、B 烧嘴交替地工作, 由四通阀进行切换, 切换周期为 $15 \sim 30$ 秒。通过这种交替运行方式, 实现所谓“极限余热回收”和助燃空气的高温预热。

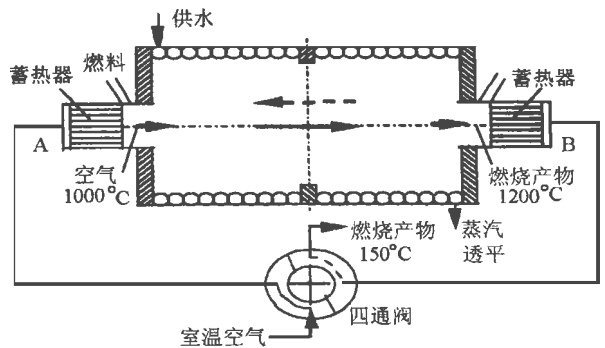


图 1 HTAC 锅炉工作原理图

3 关键技术与关键部件

HTAC 锅炉的关键之处就在于采用了高温空气燃烧技术, 该技术的关键部件包括实现“极限余热回收”的蜂窝陶瓷蓄热体、采用分级燃烧及炉内烟气再循环的燃烧器、高频四通切换阀。

3.1 关键技术—高温空气燃烧

高温空气燃烧技术(HTAC)是日本田中良一等人于 20 世纪 80 年代末提出的一种新型燃烧技术,

在西欧一些国家, 简称为 HPAC (Highly Preheated Air Combustion), 亦称为无焰燃烧技术 (Flameless combustion)。它与传统燃烧技术(空气中氧气体积浓度 $\geq 21\%$, 预热温度不高于 $600\text{ }^\circ\text{C}$)迥然不同。它的燃烧过程是在高温低氧气氛中进行。高温是指空气温度预热到 $800\text{ }^\circ\text{C}\sim 1\ 000\text{ }^\circ\text{C}$ 以上; 低氧是指燃烧区内氧气浓度低于 15% , 甚至低至 $3\%\sim 5\%$ 。这种条件下形成的火焰具有体积大、亮度低、颜色浅、噪音低、炉膛内温度分布均匀和 NO_x 形成受到抑制的特点。与传统燃烧技术相比, 该技术具有明显的优点, 主要表现在^[2-3]: (1) 节能 30% 以上; (2) CO_2 排放量降低 30% 以上; (3) NO_x 排放浓度极大减少, 低至 $30\sim 50\text{ mL/m}^3$; (4) 燃烧装置尺寸大幅度缩小, 设备投资可减少 $10\%\sim 20\%$; (5) 燃烧噪音降低; (6) 用能范围扩大; (7) 过剩空气系数降低, 燃烧稳定, 不存在点火及脱火问题。

3.2 关键部件

3.2.1 蓄热体

蓄热体是高温空气燃烧技术的关键部件, 应具有蓄热量大、换热速度快、结构强度高、耐高温高压、抗氧化与腐蚀、阻力损失小和经济耐用等特点。传统的陶瓷球蓄热体, 尽管换热能力较大, 高温烟气换热后, 可降至 $200\text{ }^\circ\text{C}$ 左右, 常温空气可升温到 $800\text{ }^\circ\text{C}$ 以上, 但是其比表面积较小, 阻力损失较大, 通常需要较大的体积, 且动力消耗也较大^[4]。日本近来开发了高性能蓄热体——蜂窝陶瓷蓄热体^[5], 其材料主要成份为氧化铝, 蜂窝壁厚仅 $0.2\sim 0.5\text{ mm}$, 单元间距为 $1\sim 3\text{ mm}$ 。与陶瓷球蓄热体相比, 它具有更大的比表面积(参见表 1)。蜂窝陶瓷蓄热体比表面积显著增大, 使其换热能力大幅度提高。具有相同换热能力的蜂窝陶瓷蓄热体与常规蓄热体相比, 体积仅为常规蓄热体的 $1/3\sim 1/6$, 重量仅 $1/6\sim 1/10$ 。由于该蓄热体的高速蓄热和释热, 使得切换时间也由常规蓄热体的 $2\sim 3$ 分钟缩短到 $20\sim 30$ 秒, 进一步改善了空气预热的动态换热特性, 更有利于均化炉内温度场。蜂窝通道呈直线, 流通截面积较大, 压力损失较小, 不易发生粉尘堵塞。压力损失通常在 $1\ 000\text{ Pa}$ 以下, 一般只有陶瓷球的 $1/3$ 。由于综合考虑了余热回收率、耐久性能、蜂巢形状、网目、壁厚分割的最佳组合以及对最大回收率的最佳切换时间, 实现了最佳的传热特性和耐久性能。该蓄热体温度效率高达 95% , 热回收率达 80% 以上。

表 1 两种典型陶瓷蓄热体比表面积

陶瓷球	陶瓷球					蜂窝体						
	直径 /mm	10	12	15	20	25	孔数 /n.m ⁻²	7.75	15.5	23.1	31	46.5
比表面积 /m ² .m ⁻³	378	315	252	189	151	比表面积 /m ² .m ⁻³	1021	1389	1646	1860	2176	

3.2.2 燃烧器

采用分级燃烧及炉内烟气循环的新型燃烧器是实现低氧燃烧的又一技术关键。该燃烧器工作原理简图如图 2^[7] 所示。通过采取一次燃料与二次燃烧分级燃烧及气流高速喷入卷吸炉气回流, 实现炉内低氧弥散燃烧、低 NO_x 生成与排放, 是高温空气燃烧技术的核心。一次燃料与二次燃料的比例及炉气回流的比率, 直接关系到 NO_x 生成与排放量。由于一次燃料与高温空气在燃烧器内发生氧浓度为 21% 的扩散燃烧反应, 必然导致大量的 NO_x 生成, 因此一次燃料的比例不能过高。一次燃料与二次燃料的比例可在 $0/100\sim 30/70$ 之间调节^[9]。一次燃料与高温空气燃烧后的混合气体高速喷入燃烧室内, 抽引周围静止或低速气流, 形成含氧浓度低于 15% 的贫氧气氛, 大量的二次燃料就在这种高温低氧气氛中迅速发生扩散燃烧, 得到与传统燃烧完全不同的火焰特性。为保证二次燃料在合适的低氧浓度下燃烧, 必须对喷口形状和尺寸、燃料供给通道、二次燃料入口的位置等参数进行优化设计。这主要依靠实验并辅以数值模拟加以确定。

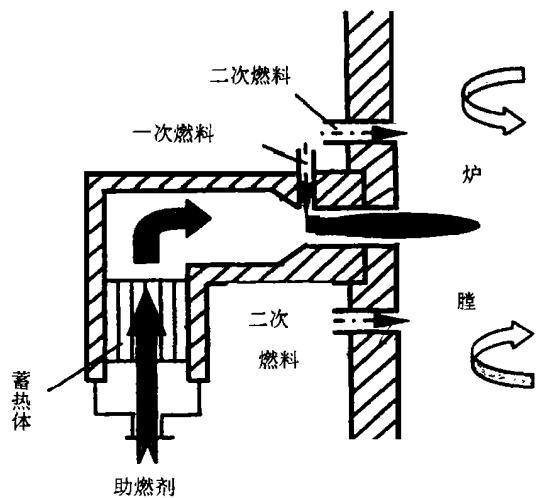


图 2 HTAC 蓄热式烧嘴结构及工作原理图

3.2.3 切换阀

切换阀也是实现空气和烟气高频切换的关键部件。尽管烟气换热后温度很低, 切换阀是在低温条

件下作业,对材料无特殊要求,但由于切换周期短,仅20~30秒,加之烟气中含有较多的微小粉尘,高频切换作业必然会带来较大的磨损,因此,切换阀材质必须耐磨。另外,切换阀还必须具有一定的耐压、抗冲击能力。采用四通高频切换阀切换烟气与空气,易于实现自动控制。

4 特性分析

同传统锅炉比较,HTAC 锅炉具有如下特性。

4.1 换热效率提高

传统锅炉通常采用空气预热器和省煤器回收烟气余热,热回收效率低,排烟损失大;而 HTAC 锅炉由于采用实现“极限余热回收”的蜂窝陶瓷蓄热体,热回收效率高达80%以上。又由于高温低氧燃烧,火焰体积成倍增大,炉内温度分布均匀,平均温度大大提高,炉气辐射能力大大增强,高温炉气与锅炉水管的换热得以明显改善,换热效率显著提高。图3说明 HTAC 锅炉换热效率比传统锅炉提高了很多^[7]。

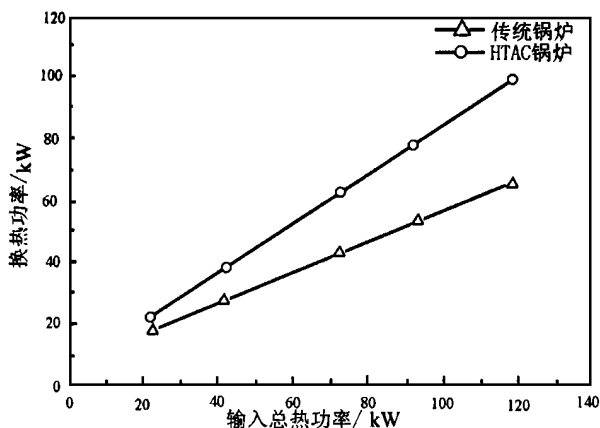


图3 HTAC 锅炉与传统锅炉换热效率比较

4.2 体积大大缩小

由斯—玻定律: $E_b = \epsilon_b T^4$ 可知,高温炉气的辐射力与温度四次方成正比。由于炉气平均温度提高,其辐射力大大增强,炉内以辐射换热为主,仅需辐射段就可获得与传统锅炉一样的热输出。由于省去了传统锅炉的对流换热段,HTAC 锅炉的体积大大缩小。

4.3 污染显著降低

采用高温空气燃烧,一方面由于换热效率提高,节约了大量能源,使得CO₂的排放量大大减少;另一

方面,由于温度分布均匀,没有形成局部高温区,热力型NO_x生成量大大减少;加之部分燃料型NO_x在还原性气氛中被还原,与传统燃烧方式相比,NO_x排放浓度成数量级减少。另外,高温抑制了二恶英的生成,烟气与蓄热体热交换后迅速冷却,也有效地阻止了二恶英的再合成。因此,该新型锅炉对大气污染显著降低,其烟气的排放完全符合甚至远低于国家环保规定。

4.4 燃料适应性范围扩大

HTAC 锅炉能够很好地燃用低热值的燃料而不存在点火困难和脱火问题。实验表明,热值从12~42 MJ/m³的燃料均可稳定地燃烧^[7]。因此,可以把该锅炉应用到许多工业部门,有效地利用生产过程中产生的副产品燃气。但目前该锅炉还仅适合于直接燃用气体及部分液体燃料,固体燃料必须气化或燃气后才能利用。

4.5 易获得高温高压蒸汽

由于以辐射换热为主,锅炉水管密布在燃烧室四周,炉内燃气对锅炉水管腐蚀小,而不像传统锅炉,采用烟气直接横掠水管,造成酸、灰尘等严重腐蚀水管。因此,HTAC 锅炉容易获得高温高压蒸汽,水管炸裂的潜在危险大大减少。

4.6 经济效益提高

由以上分析可知,HTAC 锅炉换热效率高,节能显著;锅炉尺寸可大大降低,设备投资减少;污染显著降低,无需烟气降污处理设施;用能范围扩大,可以有效地利用低热值燃料。因此,HTAC 锅炉的经济效益显著提高。

5 我国开发 HTAC 锅炉的讨论

锅炉是电力生产、工业生产及供热的重要设备。我国锅炉用量大面广,但燃料消耗远远高于国际先进水平,有害物的超标排放相当严重。在我国开发HTAC 锅炉,对提高我国锅炉的燃料利用效率及大幅度降低NO_x排放量,具有极其重要的意义。

开发出具有高效换热能力的蓄热体,是HTAC 锅炉开发的最关键点。蓄热体材料的选择十分重要,材料比热 C_p (kJ/kg) 要大,导热系数 λ (W/(m·°C)) 值要高,结构强度要好,抗腐蚀性要强,价格要便宜。这样才能实现蓄热能力大,换热速度快,耐压耐磨耐腐蚀,抗氧化,且经济可行。1995年,我国已开发出余热回收率达70%~80%的氧化铝陶瓷球

蓄热体^[5]。在此基础上,借鉴日本开发的蜂窝陶瓷蓄热体,一定能够开发出具有高效换热能力的蓄热体。

HTAC 锅炉到目前为止,还只适合于燃气、液体燃料,固体燃料必须转化成燃气后才能利用。因为固体燃料的燃烧,烟气中粉尘含量较多;多尘烟气的处理是余热回收的技术性障碍。日本已开发出综合燃气制造和供能系统(IGCC)^[4]。它以煤、垃圾等为燃料,采用高温空气气化使之转变为燃气,净化处理后用作 HTAC 锅炉的燃料,该系统总的热效率可高达 46%。我国锅炉大多以燃煤为主,液体燃料次之,燃气燃料的相当少。因此,燃煤型 HTAC 锅炉应成为燃烧研究工作的重大课题。

6 结论

(1)HTAC 新型锅炉回收烟气余热效率高,炉内温度分布均匀,平均温度提高,辐射能力增强,NO_x生成量少,二恶英的形成受到抑制,具有换热效率高、对大气污染小、装置尺寸大大缩小、可有效地利用低热值燃料、易获得高温高压蒸汽,经济效益显著提高等特点,是一种综合节能、环保的高性能新型锅炉。

(2)HTAC 锅炉的关键技术为高温空气燃烧技术,其技术关键包括高效余热回收的蓄热体、实现燃料分级燃烧及炉内烟气循环的燃烧器、高频切换的四通阀。HTAC 锅炉适合于气体、液体燃料的燃烧,

对固体燃料须转化成燃气后才能使用。

(3)我国锅炉燃料耗量大,效率较低,污染较大,在我国开发 HTAC 锅炉具有巨大的开发潜力和应用前景。

参考文献:

- [1] 范光中,黄中静.重油蓄热式自身预热烧嘴在锻造炉上的成功应用[J].工业炉,1991(1):32.
- [2] Hasegawa T, Tanaka R, Niioka T. High temperature air combustion contributing to energy saving and pollutant reduction in industrial furnace[C]. Beijing: **Proceeding of High Temperature Air Combustion Symposium**, 1999, 10, 102-114.
- [3] Kobayashi H, Kawai K, Yoshikawa K. Gasification power generation system and boiler performance using high temperature air[C]. Beijing: **Proceeding of High Temperature Air Combustion Symposium**, 1999, 10, 90-100.
- [4] 蔡九菊,于娟等.陶瓷球蓄热室传热特性的研究[J].钢铁,1999,34(2):54-58.
- [5] 刘夏丹,于宏等.陶瓷蜂窝体的结构特性及其蓄热燃烧系统的应用[J].冶金能源,1999,18(4):28-31.
- [6] Jun sudon, Toshiaki Hasegawa. Development of an advanced industrial burner for high temperature air combustion[C]. Japanese Flame Days-JFRC 20th Anniversary, 1998, 1-14.
- [7] J-S. Tsai, Yoshikawa K, et al. Thermal performance of a high-temperature air combustion boiler[C]. Proc. of 27th Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, 1998, 3135-3146.

(何静芳 编辑)

简 讯

利用镧和钇改进含镍合金的性能

据“ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power”1999年1月号报道,在最新型大型商用航空发动机最大功率时涡轮进口温度已接近1650℃,导致更高的效率和超过445kN的推力。为达到高的可靠性和使用寿命,设计中结合了涡轮叶片先进的空气冷却、应力和气动力设计技术、开发并应用含镍的镍基单晶超耐热合金以及应用包括陶瓷热障涂层的先进涂层。

对铸造叶片超耐热合金加入镍不仅改进了抗蠕变和热力机械疲劳强度,而且也改进了涂层的性能。对应用于涡轮叶片含3%镍的CMSX-4单晶超耐热合金进行了改进,使硫和磷含量减小到少于 2×10^{-6} ,并添加 $10 \times 10^{-6} \sim 30 \times 10^{-6}$ 的镧和钇。试验表明,CMSX-4[La+Y]单晶合金的性能有了明显改善,可使其循环氧化寿命增加约10倍。

(思娟 供稿)

大型汽轮机控制系统的技术现状及发展= **Technical Status Quo and Development Trend of Control Systems of Large-sized Steam Turbines** [刊, 汉] / WENG Yi-wu (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power . — 2000, 15(4). — 333 ~ 335, 359

This paper describes the current technical level of control systems of large-sized steam turbines and analyzes some existing issues to be dealt with. With a variety of proposals offered for their resolution the author forecasts the development trend of the above-mentioned control systems. **Key words:** large-sized steam turbine, control system, digital electro-hydraulic control system

我国的燃气—蒸汽联合循环发电技术前景良好= **Bright Prospects for the Development of Gas and Steam Turbine Combined Cycle Plant-based Power Generation Technology in the People's Republic of China** [刊, 汉] / TU Shan, MAO Jing-ru, SUN Bi (Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi, China, Post Code 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power . — 2000, 15(4). — 336 ~ 338

In connection with the energy-source structure and energy policy of the People's Republic of China the authors point out that the construction of gas and steam turbine combined cycle plants represents a major and cost-effective avenue for enhancing electrical power generation efficiency and resolving environmental pollution-related issues. This is especially so in the case of an integrated gasification gas-steam combined cycle (IGCC) plant and a pressurized fluidized bed combustion combined cycle (PFBC-CC) plant, the two types of coal-fired combined cycle power generation technology universally recognized as having the best potential for further development. The present paper briefly covers the major aspects of each type of the above-mentioned technology. **Key words:** combined cycle plant, gas and steam turbine combined cycle plant, supercharged fluidized bed combined cycle plant, new energy sources, development

燃气轮机的技术和应用: 现状和展望= **Current Status and Future Prospects of Gas Turbine Technology and Its Applications** [刊, 汉] / Ji Gui-ming, LIU Chang-he (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power . — 2000, 15(4). — 339 ~ 343, 347

Based on a broad overview of the recent developments of gas turbine technology and its applications the authors give a comprehensive and systematic account of the state-of-the-art advances of the said technology in various engineering sectors. Analyzed is the trend of its technical development and applications, specifically, likely advances and prospects of development in the People's Republic of China. Some decisive steps for the development and consolidation of the gas turbine industry in China are also proposed and briefly discussed. **Key words:** gas turbine, design, technology, applications, power engineering

燃生物废料流化床锅炉= **Biomass-fired Fluidized Bed Boilers** [刊, 汉] / BIE Ru-shan, LI Bing-xi, LU Hui-lin, et al (Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power . — 2000, 15(4). — 344 ~ 347

This paper depicts the current status of development and utilization of biomass both at home and abroad and methods for the selection of biomass-fired boiler types. The measures adopted for resolving the agglomeration problems related to biomass-firing are proposed along with a brief description of a series of biomass-fired fluidized bed boilers developed by the Harbin Institute of Technology as well as their operation experiences. **Key words:** biomass, fluidized bed boiler, agglomeration

高温空气燃烧新型锅炉及特性分析= **A New Type of High Temperature Air-fired Boiler and An Analysis of Its Specific Features** [刊, 汉] / JIANG Shao-jian, PENG Hao-yi, AI Yuan-fang, et al (Department of Applied Physics and Heat Engineering, China National Southern University, Changsha, Hunan, China, Post Code: 410083) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power . — 2000, 15(4). — 348 ~ 351