

N_2 稀释对合成气扩散火焰流场的影响

郭培卿 臧述升 葛 冰

(上海交通大学 动力机械与工程教育部重点实验室, 上海 200240)

摘 要: 对带有 N_2 稀释的中热值合成气旋流燃烧火焰的热态流场进行了 PIV(粒子图像速度仪)测量,分析了不同稀释量对燃烧流场的影响规律。实验结果表明, N_2 的存在主要改变了射流区的尺寸,火焰的宽度基本不受影响,最高回流速度随稀释量的增加而增大,回流区内的脉动则随之减小,同时稀释量的增加会降低回流区内的湍动能,从而引起火焰温度的降低。

关 键 词: 扩散燃烧; 合成气; PIV; 氮气稀释

中图分类号: TK16 文献标识码: A

引 言

整体煤气化联合循环(Integrated Gasification Combined Cycle IGCC)将煤气化技术和高效的联合循环相结合,是目前世界公认的未来能源清洁高效利用的重要发展方向。合成气燃气轮机则是 IGCC 系统中的重要核心单元,合成气的基本可燃成分分为 H_2 和 CO,其热值通常仅为天然气的 1/3 甚至更低,如何合理组织燃烧室内的流通以及如何提高燃烧稳定性、高效性和低污染性是合成气燃气轮机燃烧室设计时面临的主要难点。此外,为了降低 NO_x 排放量,常用对燃料或空气进行稀释的方法,降低参加化学反应的反应物浓度,从而降低燃烧温度^[1~3]。但稀释剂的加入会导致燃烧稳定性变差,因此更需要对燃烧流场进行合理组织。

目前,工业燃气轮机大都采用旋流方式组织燃烧室流场,因此合成气燃气轮机采用旋流燃烧也是很现实的选择^[4]。由于合成气中包含的 CO、 H_2 等可燃成分的燃烧反应机理不同于 CH_4 ,国内外许多学者就合成气展开了大量的实验和数值模拟^[5~9],其中非接触式光学测量手段由于具有对流场的干扰小、测量精度高等优点而受到越来越多的重视和应

用。由于扩散火焰中燃烧速度由混合速度决定,而混合速度主要取决于流场的结构,因此本研究利用粒子图像测速仪(PIV),对 N_2 进行稀释的 H_2 、CO 以及合成气的旋流扩散火焰进行直接测量,研究 N_2 作为稀释剂加入后对合成气燃烧流场内部速度分布和回流区特性的影响。

1 实验系统

1.1 实验系统及工况

采用轴对称突扩旋流燃烧室进行实验。燃烧室周向四面安装有石英玻璃窗口。直叶片平面旋流器安装在燃烧室头部轴线上,叶片安装角为 54° ,内、外径分别为 28 和 70 mm,燃料通过位于旋流器中心直径为 4 mm 的单孔喷嘴进入燃烧室。空气在旋流叶片的作用下,在燃烧室内形成低速回流区从而成为稳定的点火源。实验中对该区域内的速度场进行 PIV 测量。

实验选用 H_2 、CO 以及合成气 3 种燃料,合成气中 H_2 、CO 和 N_2 的体积比为 0.373:0.478:0.149,热值为标准状态的 10 MJ/m^3 。选择 N_2 作为稀释剂稀释燃料,因为与水蒸气和 CO_2 等稀释剂相比, N_2 的比热最小,有利于维持火焰。 H_2 、CO 和 N_2 经过各自管道进入混合腔,在腔内进行充分混合后再通入喷嘴。通过风机变频器调节空气流量,通过流量计与控制阀控制 3 种气体的流量。实验及测量系统如图 1 所示。

实验中空气流量保持 0.053 34 kg/s ,改变燃料各组分体积百分比的同时保持总流量 28 L/min 。选取其中 12 个工况进行分析,如表 1 所示, $N_2\%$ 表示稀释剂 N_2 在燃料中的体积分数。

收稿日期: 2010 - 04 - 14; 修订日期: 2010 - 05 - 19

基金项目: 国家重点基础研究发展计划基金资助项目(2007CB210102)

作者简介: 郭培卿(1982 -),男,江苏启东人,上海交通大学博士研究生。

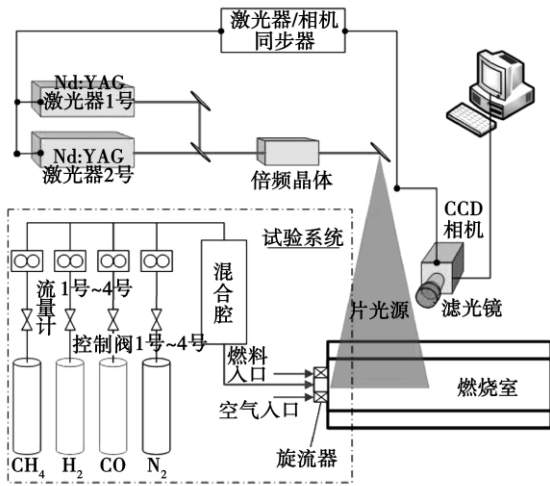


图 1 合成气/CH₄ 燃烧室 PIV 测量系统

表 1 实验工况

工况	燃料	N ₂ %	工况	燃料	N ₂ %
A1	H ₂	0	B1	CO	0
A2	H ₂	10	B2	CO	10
A3	H ₂	20	C1	合成气	15
A5	H ₂	40	C2	合成气	26
A6	H ₂	50	C3	合成气	36
A7	H ₂	60	C4	合成气	49

1.2 PIV 测量系统

PIV 系统主要由激光光源、图像拍摄、数据采集

分析以及同步系统组成,如图 1 所示。双脉冲 Nd:YAG 激光器工作频率为 10 Hz,输出波长为 532 nm,光束经过光导臂后形成厚约 1 mm、20°张角的片光源。采用 1 000 万像素的 CCD 相机进行拍摄,在镜头前安装有平均通过波长为 532 nm、通光带宽为 6 nm 的滤光镜,以减少火焰自发光对拍摄图像的影响。激光器的功率以及双曝光时间通过同步系统设定和调节,根据不同燃气速度的工况调整拍摄时的双曝光时间,以适应流场变化。使用直径为 1 μm 的 MgO 粉末作为示踪粒子。每个工况连续拍摄 300 对有效照片,在计算分析得出瞬态流场的数据的基础上,对数据进行统计平均,获取各工况下的平均速度场、速度脉动量等信息。

2 实验结果和分析

2.1 平均速度分布

图 2 给出了经 PIV 图像分析处理和统计平均后得到的 H₂、CO 以及合成气 3 组工况下轴向速度等值线和速度矢量图。旋流器及中心燃气喷嘴位置如图 1 中所示,燃烧室中心轴线为 y = 0 mm,喷嘴出口的轴向位置为 x = -5 mm。从图 2 中可以看出,各工况下的流场分布基本上都可以分为 4 个区域,分别是中心燃气射流区、中心回流区、旋流空气突扩区以及边角回流区。旋流空气与燃气射流形成反向锥形,与轴线夹角约为 30°。

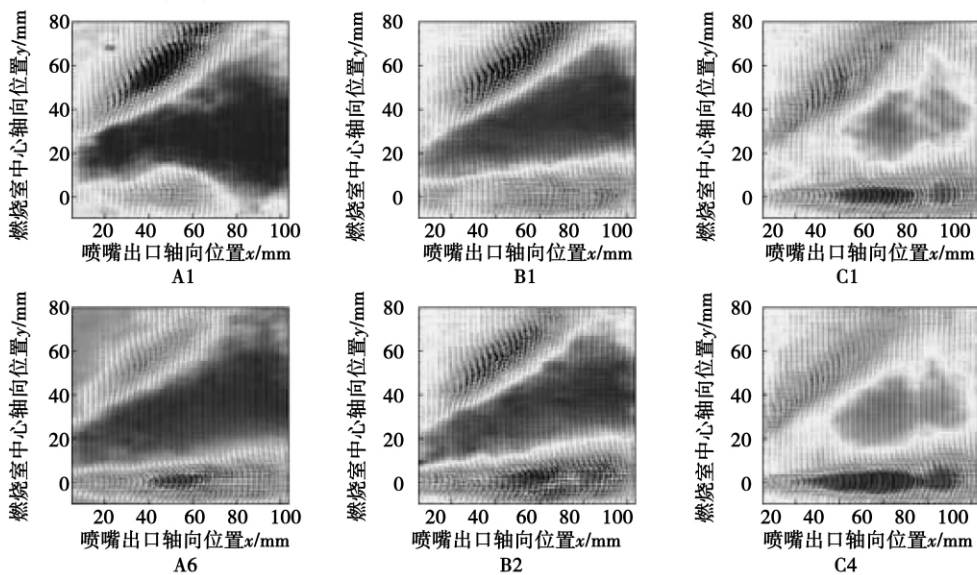


图 2 轴向速度等值线及速度矢量

3 组工况均显示:回流区径向尺寸沿轴线方向逐渐增大; N_2 掺入燃料后,随着 N_2 含量的提高,射流区域的轴向长度有所增加,当 N_2 稀释量到 50% 时, H_2 射流长度增加约 1 倍;回流区内的反向速度略有增加,说明回流强度有所增强。由于高温燃烧产物在回流过程中不断与新鲜空气混合并提供稳定的点火源,回流强度的增加就意味着有利于火焰的稳定,同时 N_2 的稀释也会降低燃料浓度,从而导致反应速率变慢不利于火焰的稳定。在实验工况范围内火焰均能够稳定燃烧,继续增大 N_2 稀释量后,则会出现燃烧不稳定现象。

综合 3 组工况分析:纯 H_2 火焰的稳定性受 N_2 稀释量影响较小;纯 CO 火焰由于自身反应速率很慢 N_2 的稀释对其影响最大;合成气中的 H_2 在燃烧时产生的 OH 基能加速 CO 的氧化,因此其火焰的稳定性较纯 CO 火焰大大提高。另一方面,在 $x = 50$ mm 位置上的 H_2 、CO 和合成气的回流区径向尺寸分别保持在 30、25 和 20 mm 左右。由于回流区边

界基本可以认为是射流扩散火焰锋面所在位置^[10],可见 N_2 稀释燃料对喷嘴下游区域内的火焰宽度基本没有影响。

图 3 为 $x = 15$ mm 处的轴向截面上轴向、径向和平均速度的分布情况。3 种燃料呈现出相似的速度分布形式,即由轴线开始射流最高速度迅速减小,同时,径向速度逐渐增大且随轴向距离的增加呈现先增大后减小的变化趋势。从图中可以看到, H_2 火焰中,随着 N_2 掺混量的不断增加,中心射流的轴向速度随之提高,最大回流速度略有增加,回流区宽度基本保持不变,顺流区的轴向和径向速度亦随 N_2 在燃气中含量的变化而变化,这是由于 N_2 的加入改变了反应区的位置和尺寸,从而影响到靠近旋流器一侧回流区边界处的流场。CO 火焰中, N_2 加入使轴线附近的轴向速度增大。合成气火焰中, N_2 掺混量的增加使得回流区内的平均轴向速度分布趋于平缓,顺流区内的速度变化形式类似于 H_2 火焰。

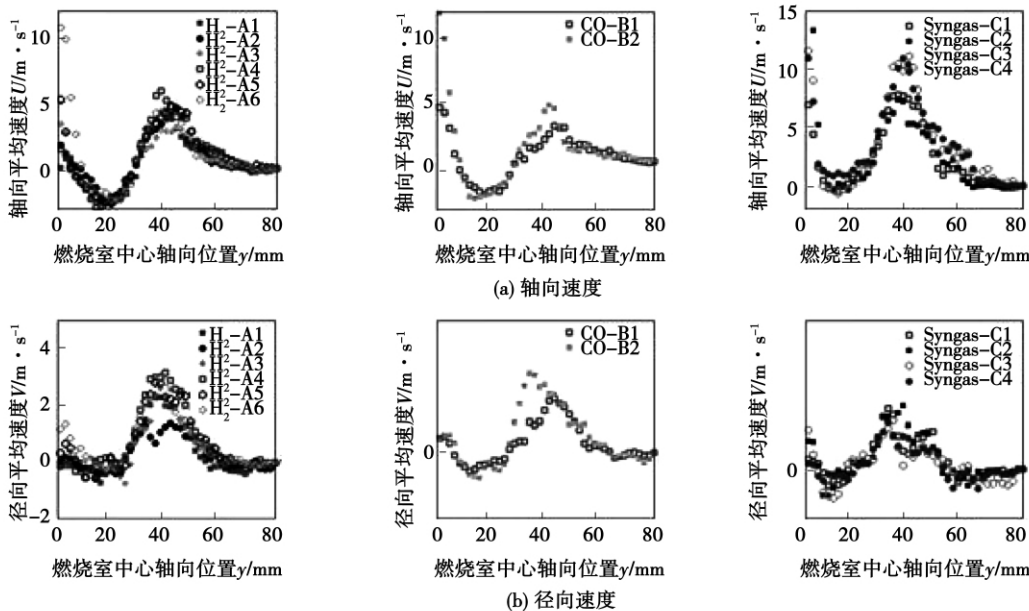


图 3 平均速度分布

2.2 速度脉动分布

图 4 为合成气工况下 3 个轴向位置截面处的轴向和径向均方根速度脉动量的分布情况。合成气火焰中回流区内的轴向、径向脉动速度均随 N_2 含量的增大而减小,而在回流区内外边界的两个切应力层位置上速度脉动则有所增加,说明 N_2 的加入增强了该区域内的湍流扩散和能量耗散。

图 5 为不同轴向位置上的湍动能沿径向分布情况。由图可知,合成气燃烧时,中心回流区内各轴向位置的湍动能很小,湍流特性较弱,成为稳定的点火源。在射流燃气与回流区的边界上的湍动能迅速增大,说明燃气与回流气体在该区域内得到较好的混合。 N_2 含量的增加将会增强该区域内的混合,同时降低回流区内的湍动能,从而减小了放热率,可能是

导致随着 N₂ 含量增加,火焰中心温度降低、NO 排放量减少的原因之一^[11]。

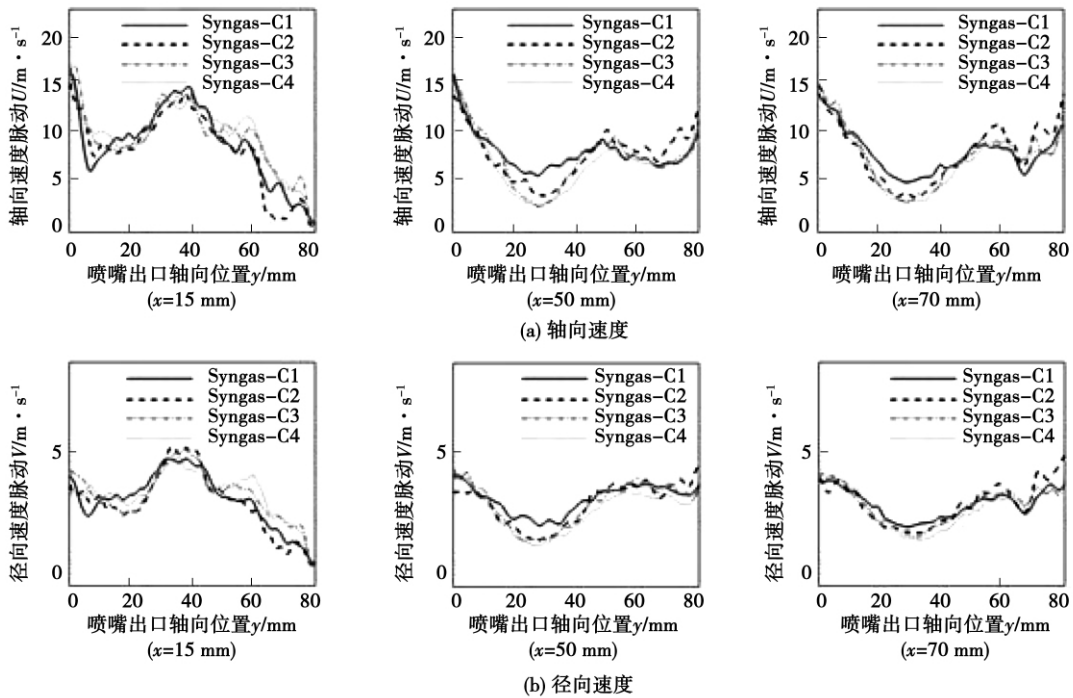


图 4 合成气火焰脉动速度分布

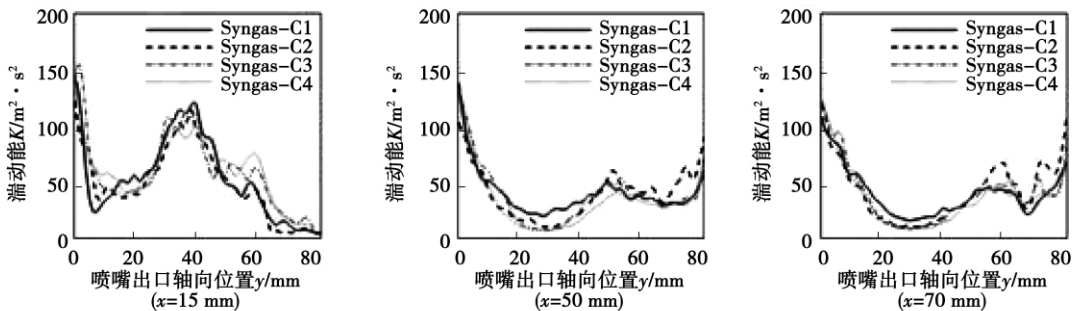


图 5 合成气火焰不同轴向截面上湍动能分布

3 结 论

对含有 N₂ 稀释的纯 H₂、纯 CO 以及合成气火焰的热态流场进行了 PIV 测量,研究 N₂ 稀释量对 3 种燃料燃烧速度场的影响,得到结论:

(1) 平均流场的分布规律相似,可分为中心燃气射流、中心回流、旋流空气突扩及边角回流区等 4 个区域,在燃料中掺入 N₂ 后,射流区域变长,火焰宽度基本不受影响;

(2) 中心射流轴向速度随着 N₂ 掺混量的增加而提高,同时最大回流速度略有增加,回流区宽度基

本保持不变;

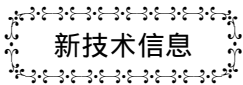
(3) 合成气火焰中回流区内的速度脉动随 N₂ 稀释量的增大而减小,而在切应力层附近的速度脉动有所增加。

(4) 中心回流区内湍流特性较弱,因此成为稳定的点火源。N₂ 稀释量的增加会降低回流区内的湍动能,减小放热率,有可能导致火焰温度降低。

参考文献:

[1] DANIEL E G, SIBENDU S, SURESH K A. NO_x emission characteristics of counterflow syngas diffusion flames with air stream dilution[J]. Fuel, 2006, 85(12 - 13): 1729 - 1742.

- [2] FOTACHE C G ,YAN T ,SUNG C J , et al. Ignition of CO/H₂/N₂ versus heated air in counterflow: experimental and modeling results [J]. Combustion and Flame ,2000 ,120(4) : 417 -426.
- [3] MU K J ,ZHANG Y S ,ZHANG Z D , et al. Effect of fuel dilution on the stability characteristics of syngas diffusion flames [R]. ASME Paper ,GT -2008 -50327 ,2008.
- [4] 张永生 穆克进 张哲巛 等. 不同空气和燃料旋流强度下合成气稀释扩散火焰特性研究[J]. 中国电机工程学报 ,2009 ,29(2) : 63 -68.
- [5] CASARSA L ,MICHELI D ,PEDIRODA V , et al. Investigations of pyrolysis syngas swirl flames in a combustor model [R]. ASME Paper ,GT -2009 -59610 ,2009.
- [6] HASEGAWA T ,SATO M ,NAKATA T. A study of combustion characteristics of gasified coal fuel [J]. ASME Journal of Engineer- ing for Gas Turbines and Power 2001 ,123:22 -32.
- [7] STRAKEY P ,SIDWELL T ,ONTKO J. Investigation of the effects of hydrogen addition on lean extinction in a swirl stabilized combustor [J]. Proceedings of the Combustion Institute ,2007 ,31(2) : 3173 -3180.
- [8] 张文兴,穆克进,王 岳,等. 合成气-甲醇掺烧火焰研究[J]. 热能动力工程 ,2009 ,24(2) : 236 -241.
- [9] 赵晓燕,李祥晟,丰镇平. 燃气轮机低热值合成气燃烧室内三维湍流流动的数值模拟研究[J]. 动力工程 ,2009 ,29(4) : 330 -334.
- [10] 杨浩林 赵黛青 杨卫斌. 扩散燃烧流场的 PIV 测试方法探讨 [J]. 工程热物理学报 ,2007 ,28(增刊 2) : 233 -236.
- [11] 惠 鑫. 合成气稀释火焰的实验和数值研究[D]. 北京: 中国科学院工程热物理研究所 ,2007.



印度获得由 LM2500 驱动的战舰

据《Warship Technology(军舰技术)》2010 年 7 ~ 8 月号报道 ,GE Marine 通报 ,印度海军的护卫舰 INS Shivalik 已于 4 月 29 日在孟买的印度海军造船厂交付使用。

由 Mazagon Dock Ltd(MDL) 公司建造的该级第一艘护卫舰是由两台 GE LM2500 燃气轮机和两台柴油机组成的 CODOG(柴燃交替联合使用) 装置驱动的。该项目标志了第一艘由 LM2500 驱动的战舰进入印度海军服役。

4 600 t 的 Shivalik 长 143 m 宽 17 m。该隐形护卫舰在以燃气轮机运行时可达到 30 节的最大航速 ,在以柴油机运行时可达到 18 节的巡航速度。

印度海军预期还将服役该级舰的两艘姊妹舰 -Satpura 和 Sahyadirt ,每艘舰将由在 CODOG 系统中的两台 LM2500 燃气轮机或两台柴油机驱动。

GE Marine 最近也给班加罗尔的 Hindustan Aeronautics Ltd(HAL) 公司提供了 4 台 LM2500 成套装置。HAL 公司将负责总装并试验这四套装置 ,它们将用于印度海军一艘国产的航空母舰。已于 2009 年 2 月举行了该航空母舰龙骨铺放开工建造的仪式。

(吉桂明 摘译)

the requirements for overall performance type tests stipulated in GB/12246-2006. The research findings have filled the technical gap in domestic that only the testing requirements are presented but no real testing conditions are currently available in China. **Key words:** pressure reducing and stabilizing , dynamic testing , type test , error

N₂ 稀释对合成气扩散火焰流场的影响 = Influence of N₂ Dilution on a Synthetic Gas Diffusion Flame Flow Field [刊 汉] GUO Pei-qing , ZANG Shu-sheng , GE Bing (Education Ministry Key Laboratory on Power and Mechanical Engineering , Shanghai Jiaotong University , Shanghai , China , Post Code: 200240) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2011 , 26(2) . - 224 ~ 228

A PIV (Particle Image Velocimetry) measurement was performed of a combustion flame hot state cyclone flow field of a medium heating value synthetic gas diluted with nitrogen. Moreover , the law governing the influence of different nitrogen dilution amounts on the combustion flow field was analyzed. The test results show that the presence of nitrogen can mainly change the size of the jet flow zone and the width of the flame is basically not affected. The maximum return flow speed will increase with an increase of the nitrogen dilution amount while the fluctuation in the return flow zone , however , will decrease accordingly. In the meantime , to increase the nitrogen dilution amount may reduce the kinetic energy of the turbulence in the return flow zone , thereby resulting in a drop in the flame temperature. **Key words:** diffusion combustion , synthetic gas , PIV (Particle Image Velocimetry) , nitrogen dilution

利用吸收光谱技术对 SO₂ 和 NO 浓度评估的研究 = Study of the Evaluation of SO₂ and NO Concentration by Employing the Absorption Spectrum Technology [刊 汉] WANG Hua-shan , WU Shao-hua , QIN Yu-kun (College of Energy Science and Engineering , Harbin Institute of Technology , Harbin , China , Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2011 , 26(2) . - 229 ~ 232

Based on the absorption characteristics of SO₂ and NO in the ultraviolet zone , a new method was presented for simultaneously measuring the concentrations of two gases. During the test , a concentration measurement was completed in the presence of sole SO₂ and both SO₂ and NO₂ simultaneously. By processing both transmission spectrums , the SO₂ concentration was obtained and a formula for measuring the concentration of SO₂ gas was established. On this basis , the influence of the presence of SO₂ on NO concentration was also acquired. In addition , the influence of the presence of NO₂ on the measurement of SO₂ concentration was also analyzed and obtained. Finally , the on-site SO₂ on NO emissions from a utility boiler were monitored , the result of which objectively reflected the variation law of gas emission concentrations. Compared with some traditional commercial detection devices , the system under discussion enjoys a relatively big edge in response time and performance etc. , further satisfying the requirements for monitoring exhaust gas emissions from current power plants. **Key words:** absorption spectrum , SO₂ , NO , concentration , measurement

用于支撑 HTR-10GT 氦气轮机的磁力轴承设计研究 = Study on Design of the Magnetic Bearings for Supporting a HTR-10GT Helium Turbine [刊 汉] MA Yun-xiang , ZHANG Zhi-jian (College of Nuclear Science and Technology , Harbin Engineering University , Harbin , China , Post Code: 150001) , YU Xiao-li , YU Su-yuan (Nuclear Energy and New Energy Source Research Institute , Tsinghua University , Beijing , China , Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2011 , 26(2) . - 233 ~ 237

The design principle and technical features of the magnetic bearings for use in a 10 MW high temperature reactor-