

# 直流锅炉垂直管圈水冷壁低流速自补偿特性的试验研究

朱晓静, 毕勤成, 杨 冬, 王建国

(西安交通大学 能源与动力工程学院, 陕西 西安 710049)

**摘 要:** 针对试验条件下结构为  $\Phi 28.6 \times 5.8$  mm 的四头优化内螺纹管, 进行了垂直并联双管低质量流速下自补偿特性的试验研究, 结果表明: 垂直并联管组在试验参数范围内具有明显的自补偿特性; 在管内工质的汽化过程中热负荷较小的支管内工质的质量流速随着吸热量的增加先减小再增大, 当管内工质的干度随吸热量增加而达到较高时, 管内工质的质量流速逐渐接近或超过平均质量流速, 系统的自补偿特性渐渐消失。结果还表明: 工质干度较低时, 较大的热负荷偏差会强化系统的自补偿特性, 而工质干度较高时, 较大的热负荷偏差会减弱系统的自补偿特性; 另一方面, 工质干度较低时, 系统压力的增大会减弱垂直管屏的自补偿能力; 当工质干度较高时, 系统压力的增大会导致两相摩擦压降减小, 导致系统的自补偿特性增强。

**关 键 词:** 直流锅炉; 自补偿特性; 优化内螺纹管; 低质量流速

中图分类号: TK224.2 文献标识码: A

## 引 言

垂直管圈水冷壁是较为常见的一种换热器布置形式, 其制造、安装方便, 支撑结构简单, 因而被广泛地应用于电站锅炉及核反应堆蒸汽发生器中。为了克服垂直管屏水冷壁自身具有的热敏感性强, 水动力稳定性差等缺点<sup>[1~2]</sup>, 尽量减小由于并联管间的热负荷偏差而造成的工质流量偏差, 可以利用垂直管屏在较低质量流速下所具有的自补偿特性<sup>[3]</sup>, 使锅炉能够安全运行在很低的质量流速下<sup>[4~6]</sup>。在垂直管屏低质量流速自补偿特性的应用上, 德国西门子公司采用 Benson 垂直管低流速技术, 使用优化内螺纹管, 而福斯特·惠勒公司在波兰 Iagisza 的 460 MW 超临界蒸汽参数 CFB 锅炉中则采用了低流量流速的光管技术, 利用垂直并联管在低质量流速下产生的正流量响应特性(自补偿特性)减小偏差管与补偿管之间的流量及壁温偏差, 从而实现良好的锅炉运行状态。文献[7~8]对优化内螺纹管在直

流锅炉中的改造和应用进行了详细的介绍。

本研究以  $\Phi 28.6 \times 5.8$  mm 的四头内螺纹管为研究对象, 在并联管存在热负荷偏差的条件下, 对其在低质量流速下的自补偿特性进行了试验研究, 分析了系统各参数对垂直管屏自补偿特性的影响。试验参数范围为:

系统压力:  $P=11.3, 14.2, 17, 21.5$  MPa

质量流速:  $G=300, 350, 400, 450, 500, 600, 700$  kg/(m<sup>2</sup>·s)

补偿管内壁热负荷:  $q=50, 75, 100, 125$  kW/m<sup>2</sup>

不均匀加热比:  $i=1.5/1, 2.0/1, 3.0/1, 4.0/1$

## 1 试验系统及试验方法

### 1.1 试验系统

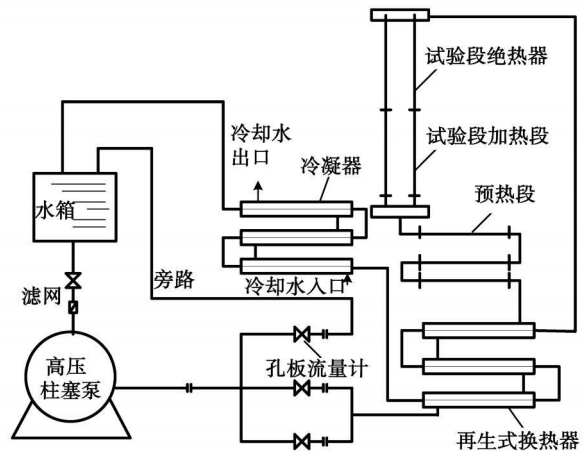


图 1 高压汽水两相流试验系统

试验回路系统如图 1 所示。试验工质从水箱经滤网过滤后, 进入由高压柱塞泵进行升压, 然后分为两路进入系统, 一路是为了调节主路的流量和压力而设计的旁路系统; 另一路是试验主回路系统。高压柱塞泵可以提供最大压力 42 MPa, 最大流量 4.5

收稿日期: 2009-09-14 修订日期: 2010-10-26

作者简介: 朱晓静(1979-), 男, 宁夏银川人, 西安交通大学博士研究生。

在试验主回路系统中, 试验工质经流量调节阀和孔板流量计调节流量后, 进入套管式换热器, 在其中吸收从试验段出来的高温工质热量后, 流入预热段, 加热到试验所需的试验段进口温度之后, 进入试验段加热至沸腾, 由试验段出来的汽水混合物经换热器和冷却器冷却后回到储水箱。

1.2 试验段结构

试验段为双管并联形式, 单根管子结构如图 2 所示, 四头内螺纹管结构参数如表 1 所示。试验段主要分为 3 个部分, 即垂直加热段、垂直绝热阻力段及水平绝热阻力段, 每一段的入口, 均有 600 mm 的稳定段以保证其入口流动充分发展。试验段设计为垂直管与水平管组合的形式, 便于对气液两相流体进行有效的双参数测量。

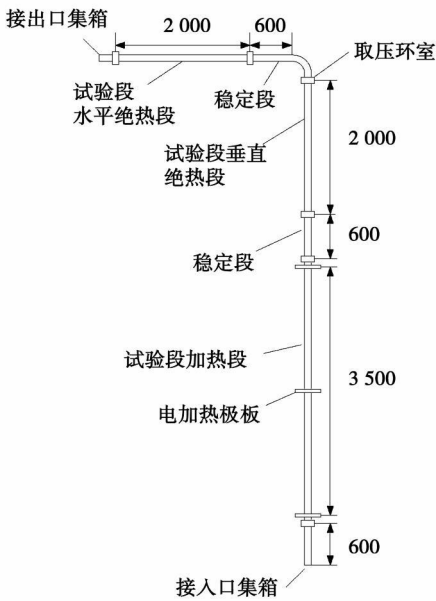


图 2 自补偿特性试验段结构 (mm)

为了便于描述所得到的试验现象, 试验时根据试验模型, 将内壁热负荷等于拟定工况平均热负荷的试验管称为补偿管, 另一根试验管称为偏差管。试验参数中所给出的不均匀加热比, 其值即为偏差管的内壁热负荷除以补偿管的内壁热负荷。自补偿特性的强弱采用热负荷较低的管子, 即补偿管内工质质量流速的大小来衡量。

2 试验结果及分析

2.1 质量流速的影响

图 3 给出了垂直管圈水冷壁水动力特性转变曲线<sup>[7]</sup>。从图中可以看出, 质量流速对锅炉水冷壁自

补偿特性的影响很大: 当质量流速较小时, 锅炉水动力特性曲线处在正流量响应区, 水冷壁具有明显的自补偿特性, 即吸热量较大的偏差管内工质质量流速较大; 随着质量流速的增加, 锅炉水冷壁自补偿特性逐渐减弱, 当水动力特性曲线位于负流量响应区时, 水冷壁自补偿特性消失, 意味着锅炉水冷壁出现较为恶劣的运行状况。

表 1 四头内螺纹管结构参数

参 数	
材料	SA-213 T2
规格 /mm	28.6×5.8
外径 A/mm	28.60±0.15
大内径 B/mm	15.84±0.15
最大壁厚 D/mm	5.80
螺纹头数 E/头	4
螺纹顶宽 (周向) F/mm	4.8 (参考值)
螺纹顶宽 (轴向) S/mm	8.30±1.04
螺纹高度 H/mm	0.85±0.30
螺纹侧边角度 K/(°)	54±15
螺纹角半径 L/mm	0.13~1.3
螺距 M/mm	21.55±3.18
导程 N/mm	86.19±12.7
螺旋升角 P/(°)	30 (参考值)

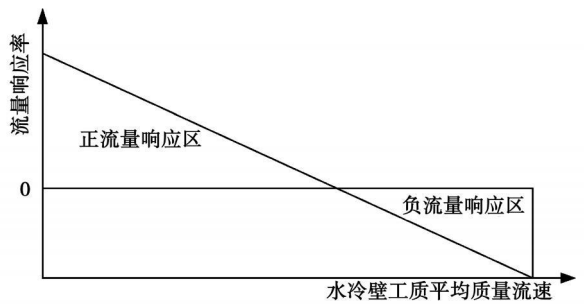
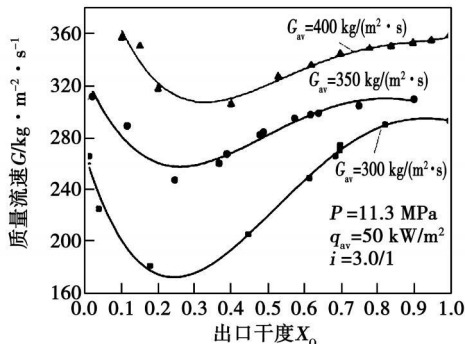


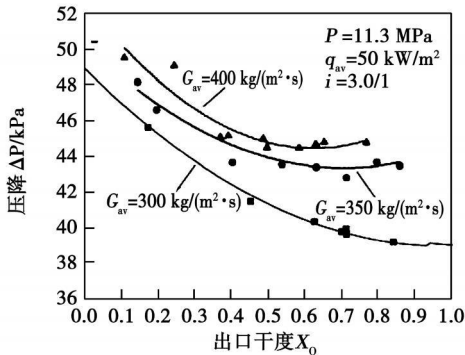
图 3 垂直水冷壁水动力特性转变曲线

图 4(a) 给出的曲线是补偿管内工质的质量流速随出口干度变化的情况。由图 4(a) 可以看出, 在图示的工况下, 垂直上升内螺纹管具有明显的自补偿特性, 在管内平均质量流速为 300 kg/(m²·s) 时 (40% THA), 热负荷的偏差造成了明显的流量差异: 热负荷小的补偿管质量流速小于 300 kg/(m²·s), 并且随着管内工质吸热量的增加逐渐减小, 在工质干度等于 0.25 附近到达最小值, 之后, 由于管内工质密度的不断减小, 使其重位压降的减小量逐渐小于摩擦压降的增大量, 系统自补偿特性逐渐减弱, 热

负荷小的补偿管内质量流速开始增大。由图中还可以看出,当管内平均质量流速由  $300 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  增加至  $400 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  时,补偿管内质量流速的相对变化幅度逐渐减小,从这一点同样可以说明质量流速的增大会使锅炉水冷壁系统自补偿特性减弱。从图 4 (b)可以看出,随着工质干度的增加,垂直上升管压降不断减小,当干度较高时,减小的趋势逐渐平缓,此时管内流量变化趋势也相对较缓。



(a) 质量流速对补偿管内工质质量流速的影响



(b) 质量流速对补偿管内压降的影响

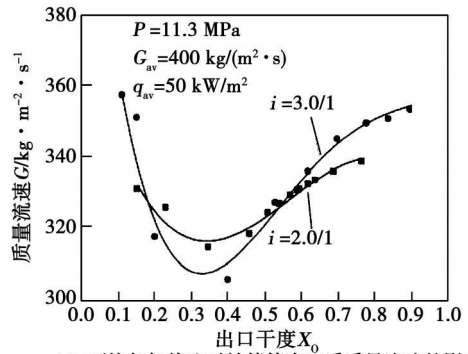
图 4 质量流速对自补偿特性的影响

### 2.2 不均匀加热比的影响

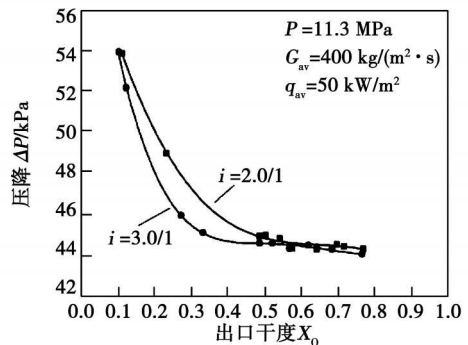
图 5 (a)和 (b)分别给出了不均匀加热比对补偿管内质量流速及压降随工质干度变化的影响。图示工况下,当出口干度小于 0.56 时,随着不均匀加热比的增大,补偿管内工质的质量流速减小,系统自补偿特性增强;当出口干度大于 0.56 时,随着不均匀加热比的增大,补偿管内工质的质量流速增大,系统自补偿特性减弱。对实际锅炉水冷壁来讲,工质干度的不同范围,意味着水冷壁管高度方向的不同区域。不均匀加热比对系统自补偿特性的这种影响趋势,说明在锅炉水冷壁高度方向的不同区域,相同的热负荷偏差会造成不同的工质流量的分配结果:距离水冷壁出口越近,则垂直水冷壁系统的自补偿特性越弱,其运行条件越恶劣。因此,在对电站锅炉进行设计时,依高度方向尽量减小水冷壁管间的热

负荷偏差是很有必要的。

观察图 5 还可以发现,在系统其它参数不变的情况下,不均匀加热比增大,则补偿管内工质的最低质量流速越小,即系统发生自补偿特性时,管内工质质量流速变化幅度越大。换言之,垂直并联管组管间热负荷偏差的增大,会造成加热过程中管内工质流量波动幅度的增大,既不利于锅炉水冷壁系统水动力的稳定性,也有可能造成水冷壁管造成长期交变热应力的影响而发生爆管。



(a) 不均匀加热比对补偿管内工质质量流速的影响



(b) 不均匀加热比对补偿管内压降的影响

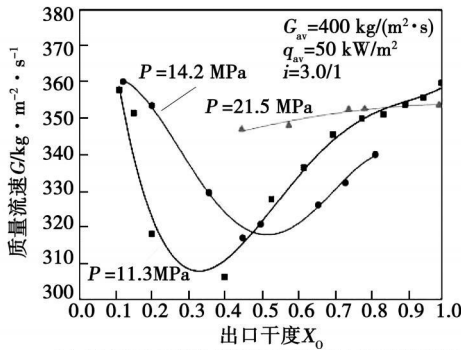
图 5 不均匀加热比对自补偿特性的影响

### 2.3 压力的影响

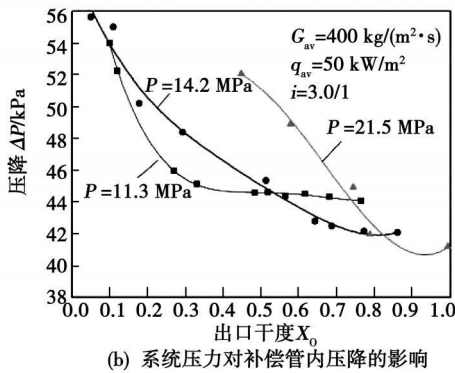
图 6 给出了压力对垂直并联管组自补偿特性的影响。从图 6 (a)可以看出,图示工况下当工质出口干度小于 0.48 时,在相同内壁热负荷偏差的条件下,当压力由 11.3 MPa 升至 14.2 MPa 时,补偿管内工质质量流速的显著增大,即随着并联管内工质压力的升高,垂直管屏自补偿特性呈现减弱的趋势。当系统压力升高到 21.5 MPa 时,补偿管工质质量流速随出口干度变化的趋势发生了较为明显的改变:随着出口干度的增加,补偿管质量流速单调增大且增幅很小。当工质出口干度大于 0.48 时,随着压力的升高,系统的自补偿特性则出现增强的趋势。

垂直管屏如果具有自补偿特性,必须满足的条件是某些支管内的阻力随着吸热量的增加而减小。

在管内工质开始汽化的初期, 工质密度迅速减小, 导致管内工质的重位压降迅速减小, 此时管内工质的摩擦压降则随吸热量的增加线性增大, 二者综合作用的结果, 使得管内总阻力减小, 相应质量流速增大; 随着汽化过程的不断进行, 管内工质重位压降的减小幅度逐渐降低, 当重位压降的减小量小于摩擦压降的增加量时, 管内总阻力开始增大, 相应管内工质的质量流速则开始减小, 这种情况就意味着垂直管屏的自补偿能力逐渐消失。从以上分析可知, 垂直管屏的自补偿特性的发生, 是建立在管内工质热物性, 尤其是密度剧烈变化的基础上的。



(a) 系统压力对补偿管内工质质量流速的影响



(b) 系统压力对补偿管内压降的影响

图 6 压力对自补偿特性的影响

图 7 给出了不同压力下水的密度随温度的变化关系。从图中可以看出, 随着压力的升高, 工质的汽水密度差异逐渐减小, 当压力上升到近临界甚至超临界后, 汽、水间的密度差异逐渐消失, 汽、水间将不存在明显的分界点。由此可以判断, 当管内工质干度较小时, 系统压力的升高抑制了管内工质密度在汽化过程中的剧烈变化, 从而阻碍了管内总阻力在工质汽化过程中减小的趋势, 因此势必减弱垂直并联管组的自补偿特性。而当工质干度较高时, 管内总阻力中摩擦阻力占据了较大的份额, 所以摩擦阻力的变化对管内工质流量的变化起到了决定性的影响。

图 8 给出了亚临界压力下所研究的四头内螺纹管内两相摩擦倍率随干度的变化趋势。从图中可以看出, 随着压力的升高, 两相摩擦倍率是减小的, 由此可见, 在其它条件相同的情况下, 当工质干度较高时, 压力的增加会导致管内摩擦阻力的减小, 因而会增强垂直并联管组的自补偿特性。

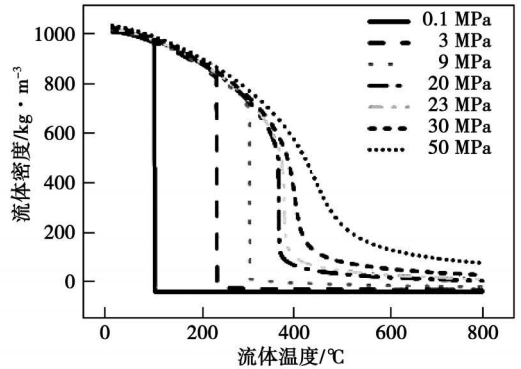


图 7 压力对工质水密度的影响

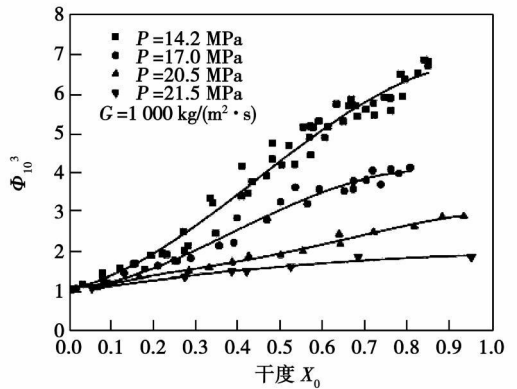


图 8 压力对两相摩擦倍率随的影响

从图 6 可知, 尽管压力的变化在不同的工质干度范围内对自补偿特性的影响结果不同, 但是压力的升高有效抑制了管内工质流量的变化幅度, 从而使垂直并联管组的水动力特性趋于稳定, 对锅炉水冷壁而言, 则更有利于保证锅炉安全稳定得运行。

### 3 结论

试验研究在压力  $P = 11.3 \sim 21.5 \text{ MPa}$ , 质量流速  $G = 300 \sim 700 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , 内壁热负荷  $q = 50 \sim 125 \text{ kW}/\text{m}^2$ , 不均匀加热比  $i = 1.5 \sim 4.0$  的条件下进行。研究发现  $\Phi 28.6 \times 5.8 \text{ mm}$  的四头内螺纹管在低质量流速下具有自补偿特性。虽然由于试验条件的限制, 无法在试验中真实模拟锅炉的实际运行状

况,但是,试验中得出的结论揭示了垂直并联管组发生自补偿特性的机理,并详细分析了各个系统参数对此类特性的影响,因此,对超临界循环流化床的设计和运行具有较为重要的指导意义。实验所得结论如下所示:

(1)四头内螺纹管在试验工况内发生了明显的自补偿特性,即在垂直并联管存在内壁热负荷偏差的条件下,在管内工质的汽化过程中,热负荷较低的支管内工质质量流速小于平均质量流速,而热负荷较高的支管内工质质量流速大于平均质量流速。吸热量小的支管内工质的质量流速随着管内工质吸热量的增加先减小,后增大,表明在管内工质干度较大时,垂直管屏的自补偿特性减弱。

(2)质量流速、管间的不均匀加热比、系统压力等参数对垂直并联管的自补偿特性都有着明显的影响。

(3)质量流速增加,垂直管屏自补偿特性减弱,在其它参数相同的条件下,质量流速的增加会导致垂直管屏在发生自补偿特性时,管内质量流速变化的幅度减小;不均匀加热比越大(管间热偏差越大),管内工质质量流速变化幅度越大。工质干度较低时,较大的热负荷偏差会强化系统的自补偿特性;而工质干度较高时,较大的热负荷偏差会减弱系统的自补偿特性。另一方面,当工质干度较低时,系

统压力的增大会减弱垂直管屏的自补偿能力;当工质干度较高时,系统压力的增大会导致两相摩擦压降减小,导致系统的自补偿特性增强。

(4)压力的升高有效抑制了管内工质流量的变化幅度,更有利于保证锅炉水冷壁水动力的稳定性。

#### 参考文献:

- [1] 张彦军,杨冬. 600 MW超临界循环流化床锅炉水冷壁的选择及水动力研究[J]. 动力工程, 2008 28(3): 339-344
- [2] 李会雄,汪斌,陈听宽. 垂直并联多通道内高温高压汽水两相流密度波型不稳定性的实验研究[J]. 动力工程, 2005 25(1): 55-59
- [3] 林宗虎,陈立勋. 锅内过程[M]. 西安:西安交通大学出版社, 1998.
- [4] 李燕,赵新木,岳光溪,等. 低质量流速垂直管屏技术的原理与应用分析[J]. 热能动力工程, 2006 21(6): 640-643
- [5] 辛建,吕俊复,岳光溪,等. 发展超临界循环流化床的讨论[J]. 热能动力工程 2002 17(5): 439-441
- [6] 于龙,吕俊复,王智微,等. 循环流化床燃烧技术的研究展望[J]. 热能动力工程 2004 19(4): 336-342
- [7] 王富文. 低质量流速设计在直流锅炉上的应用[J]. 华中电力, 2004 17(1): 38-41
- [8] 王富文. 优化内螺纹管在低质量流速直流锅炉设计中的应用[J]. 中国电力, 2003 36(12): 17-20.

(编辑 陈滨)

#### 新技术、新工艺

## 蒸燃联合装置余热锅炉管系使用寿命的延长方法

《Теплоэнергетика》2010年1月号提供了蒸燃联合装置(ПГУ)余热锅炉(KV)管系金属在运行和停炉期间侵蚀—腐蚀破坏性分析的结果,确定了KV管系金属变薄起支配作用的机理,并介绍了实行利用形成薄膜的联氨提高这些锅炉管子耐侵蚀—腐蚀性工艺的效果。

提议了有关延长在单相和二相流中工作的ПГУ余热锅炉管系使用寿命的建议。

ПГУ—450蒸燃联合装置余热锅炉低压蒸发器(ИНД)管系部件金属变薄起支配作用的机理是局部的侵蚀—腐蚀(在运行期间)和停炉(大气的)腐蚀(在停炉期间)。

在利用形成薄膜的联氨封存时,不仅形成受热面和汽水通路整个设备有效的保护使它们免受停炉腐蚀,而且也降低了使用期间侵蚀—腐蚀过程的强度。

为了防止低压和高压蒸发回路运行的侵蚀—腐蚀,可以建议定期地(一年2~3次)给这些回路局部定量地加入减蚀剂。

为了保证蒸燃联合动力装置汽水通路高的运行可靠性并相当大的延长余热锅炉管系的使用寿命,应该从运行一开始就采用有效的方法防止停炉腐蚀并利用低合金钢12X1MФ制造低压蒸发器管系的弯头。

(吉桂明 摘译)

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, BI Qín-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  $150^\circ\text{C}$ . 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  $58^\circ\text{C}$ . The concentration of  $\text{NO}_x$  emissions is not greater than  $3.85 \text{ mg/m}^3$ . 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  $\text{NO}_x$  emissions

$\text{O}_2/\text{CO}_2$  燃烧方式下燃煤 Hg 排放试验研究 = Experimental Study of Hg Emissions from Coal Combustion Under  $\text{O}_2/\text{CO}_2$  Combustion Mode [刊, 汉] / WU Hui, QIU 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