

# 低质量流速垂直管屏技术的原理与应用分析

李 燕, 赵新木, 岳光溪, 刘 青

(清华大学 热能工程系, 北京 100084)

**摘 要:** 低质量流速垂直管屏技术的核心为 Benson 内螺旋管。分析了 Benson 管的基本原理, 并对低质量流速垂直管屏技术的应用进行了探讨。低质量流速垂直管屏能够产生自然循环特性, 在满足较低质量流速的同时保证锅炉的安全运行。因此低质量流速垂直管屏技术有优势, 尤其是在强制循环的煤粉炉和必须采用垂直管的超临界循环流化床锅炉中, Benson 管可以减小蒸汽温度偏差, 并降低水冷壁流动阻力, 可以保证水冷壁更安全, 其性能优于光管和普通内螺旋管。低质量流速垂直管屏技术在我国姚孟电厂 1 号机组的改造工程和波兰超临界循环流化床中均有应用。

**关 键 词:** Benson 管; 低质量流速; 垂直管屏; 煤粉炉; 循环流化床

中图分类号: TK229. 6

文献标识码: B

## 1 前 言

大容量锅炉的水冷壁通常采用多回路管屏或螺旋管圈以保证其具有较低的壁面温度和较小的工质温度偏差。而采用这两种管屏在解决以上问题的同时也带来了无法克服的缺陷: 支吊复杂, 管内流动阻力较大, 制造和运行成本增加。与之相比较, 垂直管屏结构简单, 管内流动阻力较小, 变压运行适应性好, 可以有效节约成本。但是其本身存在的热敏感性强、水动力稳定性差等问题一直制约着它的发展。Benson 低质量流速垂直管屏直流技术(低质量流速 OTU 技术)可以有效解决这个问题。该技术中, 采用称之为 Benson 管的优化内螺旋管, 使采用垂直管屏的直流锅炉水冷壁中产生自然循环特性, 有效降低热偏差, 使得锅炉在很低的质量流速下依然能够安全地运行, 因此受到了高度重视<sup>[1~2]</sup>。

## 2 Benson 管原理与特点

管内工质的阻力特性决定了受热面的水力流动情况, 进而影响了管子布置的可行性与安全性。一

般的, 管内阻力由重位压降  $\Delta p_w$ 、摩擦压降  $\Delta p_{mc}$  和加速压力降  $\Delta p_f$  组成。在亚临界压力范围内, 由于加速压降  $\Delta p_f$  很小, 可以将之忽略。在受热一定的条件下, 摩擦压降  $\Delta p_{mc}$  与重位压降  $\Delta p_w$  随质量流速的变化如图 1 所示。可以看到, 当质量流速小于该负荷下的临界质量流速  $G_0$  时, 重位压降  $\Delta p_w$  的变化率大于流动阻力的变化率, 因此重位压降  $\Delta p_w$  为管内总阻力的控制部分。在这种情况下, 若管子吸热增加, 管内工质平均密度会减小, 引起重位压降  $\Delta p_w$  减小, 流动阻力亦即摩擦压降  $\Delta p_{mc}$  增大。因此受重位压降  $\Delta p_w$  的控制, 总阻力  $\Delta p_{total}$  降低, 管内工质流速必须增大以弥补总阻力的降低。当质量流速大于  $G_0$  时, 管内总阻力受流动阻力控制, 当工质吸热量增大时, 管内含汽率增大, 流动阻力迅速增加, 从而总阻力增大, 引起管内质量流速降低。因此, 当质量流速小于  $G_0$  时, 吸热量增大, 流速也增大, 这种流动特性被称为正流量响应特性, 此时流动具有自补偿能力, 因此又被称为自然循环特性; 当质量流速大于  $G_0$  时, 吸热量增大, 流速减小, 这种流动特性被称为负流量响应特性或直流特性<sup>[3]</sup>。在超临界压力下, 各阻力的变化类似于两相流<sup>[4]</sup>, 因此以上特性在超临界压力时也会出现。

上述流动特性普遍存在于管内流动中。不同的热负荷对应的临界质量流速有所不同。热负荷越大, 重位压降随质量流速的变化越缓慢, 临界质量流速降低。则水冷壁内工质质量流速应该小于最大热负荷下的临界质量流速才能保证水冷壁在额定热负荷下也具有自补偿特性。在自然循环锅炉中, 通过提高循环倍率可以使得回路在具有自补偿能力的范围内安全运行。而对于直流锅炉, 不得不提高工质质量流速以防止传热恶化。此时直流锅炉已失去了自补偿特

收稿日期: 2006-02-27; 修订日期: 2006-08-01.

作者简介: 李 燕(1981-), 女, 陕西西安人, 清华大学博士研究生.

性, 运行在负流量响应特性区域。在低质量流速下工作的水冷壁, 尤其是使用光滑管的水冷壁, 根本无法满足传热的需要。而内螺纹管通过改变管子结构, 在考虑传热需要的同时, 兼顾考虑管内工质具有尽可能高的临界质量流速, 具有较好的应用前景。

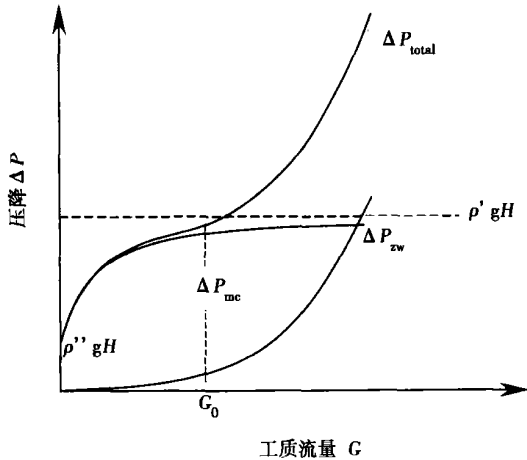


图 1 Benson 管原理

研究表明, 采用内螺纹管可以推迟甚至抑制传热恶化, 在高干度区域也很难形成膜态沸腾<sup>[5]</sup>。现在用于锅炉中的内螺纹管主要分为单头和多头内螺纹管。单头内螺纹管造成的流体紊流效应很大, 可以有效推迟或抑制传热恶化, 但是其摩擦阻力压力降很大, 耗能大, 因此成本比较高, 造价比较昂贵。普通的多头内螺纹管摩擦阻力较单头的小, 但是其造成的紊流效应没有单头的大。Siemens 公司通过 20 多万个实验数据在各种内螺纹管中优选一种内螺纹管<sup>[5]</sup>, 称为 Benson 内螺纹管 (简称 Benson 管)。和以上两种内螺纹管相比, Benson 管具有非常高的冷却能力, 即使在质量流速很低的情况下, 传热特性仍然良好。Benson 管的另一个优势是在保证壁面附近强烈的紊流的同时, 管内摩擦阻力降低<sup>[6]</sup>。

垂直管屏直流锅炉具有结构简单、流动阻力小、成本低等特点, 因此在锅炉逐渐大型化的过程中越来越受到重视, 而采用了 Benson 管的低质量流速技术的出现更加推动了这一技术的进步<sup>[7]</sup>, 其结构如图 2 所示。

Benson 低质量流速垂直管屏直流技术, 在满足低质量流速的同时能够保证水冷壁不发生传热恶化。实验表明, 工质质量流速降到  $1\ 000\ \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  时, 就出现类似于汽包炉的自然循环特性<sup>[9]</sup>。因此降低了管屏对热偏差的敏感程度, 减少了管屏出口工质的温度偏差, 保证了锅炉的安全运行。采用

Benson 管的垂直管屏将有效降低成本。在保证锅炉的安全运行的前提下能够简化锅炉支吊, 降低成本与给水泵能耗, 提高了发电机组的供电效率。锅炉启动负荷低, 启动简单。对于螺旋管圈, 通常在 35% 左右就需要采用再循环方式, 而采用低质量流速的 Benson 锅炉, 其最小直流负荷降到 20% 左右仍能安全运行<sup>[6]</sup>。

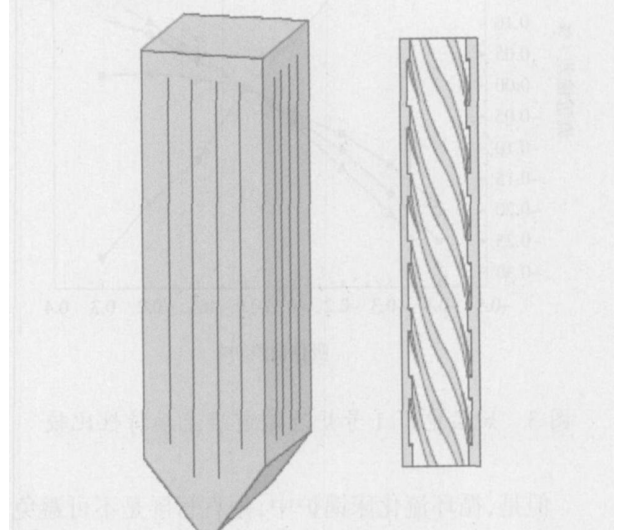


图 2 Benson 低质量流速垂直管屏直流锅炉

### 3 低质量流速 OTU 技术应用分析

我国姚孟电厂 1 号机组的改造成功是 Benson 低质量流速 OTU 技术在世界锅炉技术中的第一次应用。该电厂采用了 Mitsui-Babcock 公司提供的锅炉改造方案。水冷壁采用较大直径的 Benson 管进行低质量流速设计。改造前, 该锅炉在 100% BMCR 负荷时的工质质量流速高于  $1\ 800\ \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , 流动特性呈现直流特性, 当发生吸热偏差时, 吸热最多的管子流量最小, 极易发生传热恶化, 造成水冷壁管温度急剧增加。改造后, 该锅炉的工质质量流速, 不到改造前的 40%。100% BMCR 时, 工质质量流速最高仅为  $687\ \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ <sup>[8]</sup>。此时水冷壁系统的流动特性呈现自然循环特性, 具有自补偿能力, 吸热最多的管子中流量最大, 极大改善了传热条件, 降低了管壁温度以及热偏差, 如图 3 所示。实践证明, 虽然改造后的水冷壁管内工质质量流速很低, 但是即使在最恶劣的条件下, 其流动特性也是非常稳定的, 水冷壁得到有效冷却, 能够保证锅炉的安全运行。

实际上, 低质量流速垂直管屏的矛盾在 800 MW 以下锅炉中普遍存在。由于可以采用螺旋管圈, 以提高质量流速, 避免使用或者尽量少使用具有自然循环特性的内螺纹管, 而大于 800 MW 容量时, 垂

直管屏的工质流速已经可以满足传热的需要。因此,一般认为在煤粉锅炉设计中,可以避免使用包括 Benson 管在内的内螺纹管。这一认识已经为大量的实践所验证。

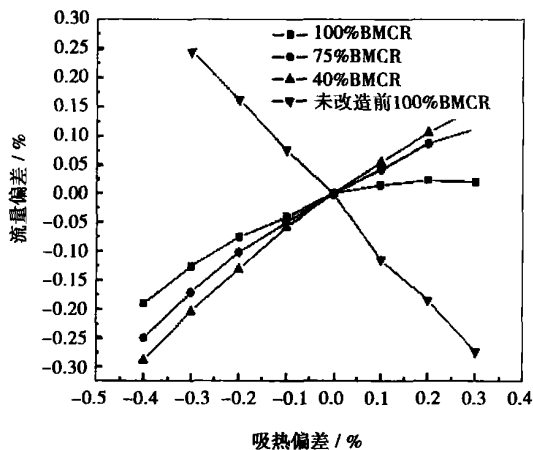


图 3 姚孟电厂 1 号炉改造前后流动特性比较

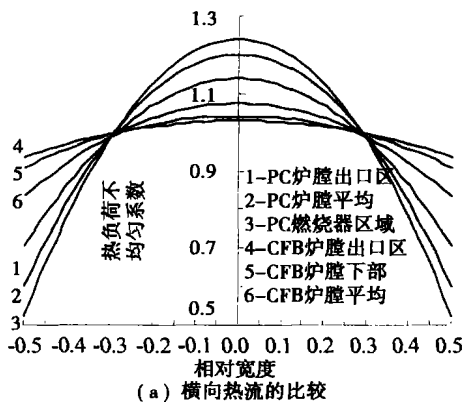
但是,循环流化床锅炉中,垂直管屏是不可避免的,这是由炉内流动对受热面的冲刷磨损特点决定的<sup>[9]</sup>,因此在超临界条件下,垂直管屏是唯一选择。与此同时,由于流化速度的限制,水冷壁的周界长度比较大<sup>[10]</sup>,在此条件下,对于 600 MW 以下容量,其管内质量流速不可避免地较低。因此,超临界循环流化床锅炉要重点考虑的问题之一是水冷壁低质量流率下的传热和流动对管子结构的要求。这一问题已经引起人们的高度重视。

传热对质量流率的要求严重依赖于受热面的热流及其不均匀性。研究表明<sup>[11]</sup>,在煤粉锅炉中,热流密度严重不均,而在循环流化床锅炉中热流密度不仅较低,而且热流的不均匀性要小得多(见图 4)。这一分布特点是由循环流化床锅炉内部的流动<sup>[12]</sup>、燃烧特点决定的<sup>[13]</sup>。因此,即使在较低的管内质量流速条件下,依然可以得到较小的热偏差。所以循环流化床内条件并不严峻。尽管 FW 公司也认为在循环流化床中不需要采用内螺纹管,但是为了设计的安全性,还是在燃烧室上部采用了内螺纹管。

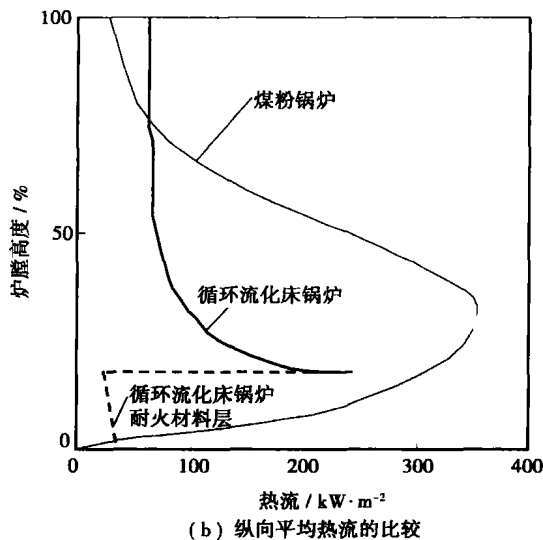
ABB 公司提出的 24.1 MPa/538 °C/538 °C 滑压运行超临界循环流化床锅炉,也是采用普通内螺纹管垂直管屏,以推迟或抑制传热恶化<sup>[14]</sup>。

FW 公司在波兰的 Lagisza 电厂安装了世界上第一台 460 MW 超临界循环流化床,如图 5 所示。锅炉即采用低质量流速 OTU 技术。由于采用了 Benson 垂直管屏技术,全负荷时管屏出口处管壁温度偏差仅为 35

°C,管屏入口到分离器入口处压力降为 0.27 MPa<sup>[9]</sup>。



(a) 横向热流的比较



(b) 纵向平均热流的比较

图 4 循环流化床与煤粉炉水冷壁热流密度比较

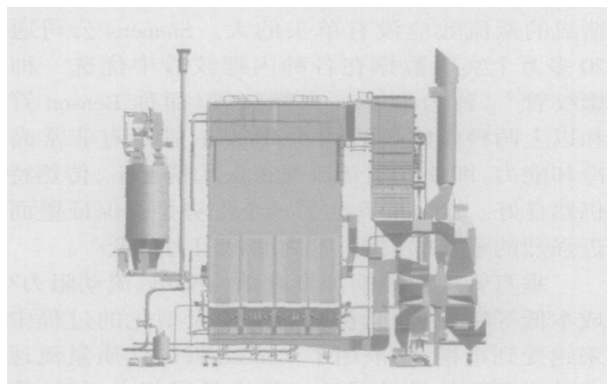


图 5 460 MW 超临界 CFB

以图 4 所示的热流密度,对稀相区截面尺寸为 17 430 mm × 25 394 mm、布风板距离顶棚为 63 040 mm 的炉膛进行计算,计算中水冷壁的外径为 32 mm,壁厚为 8 mm,管节距为 44 mm,在水冷壁管内工质流速为 1 460 kg/(m<sup>2</sup>·s)。管子结构选择光滑

管、普通内螺纹管和 Benson 管。

以单根管的某高度上的微元管段 (1 m) 作为计算单元, 进行该单元的水力计算。通过逐段的水动力计算, 完成整根管的水动力计算。每一计算单元内, 取统一的热负荷强度, 工质参数取平均值。模型中忽略了燃烧过程及传热过程对燃烧室烟气侧温度的影响。在完成单管的水动力计算基础上, 再进行并联管组的计算。假定工质各管流量和出口压力, 根据在出口集箱处流体的均压条件, 考察全部垂直管的最终出口压力是否满足均压条件, 不满足则修正并联管的流量, 重新进行计算。然后将各回路在同一压降下流量相加, 与设计流量比较。误差不能满足许可范围时, 改变假定压力, 直到计算流量值与设计值相差满足误差要求为止。

计算过程中采用二分法, 多次迭代逼近。

计算结果表明, 即使使用光滑管, 管子出口蒸汽温度的偏差最大为  $45^{\circ}\text{C}$ , 水冷壁压降为  $0.22\text{ MPa}$ 。若采用普通内螺纹管, 温度偏差最大为  $36^{\circ}\text{C}$ , 水冷壁压降为  $0.44\text{ MPa}$ 。若采用 Benson 管, 温度偏差最大为  $28^{\circ}\text{C}$ , 水冷壁压降为  $0.25\text{ MPa}$  (见图 6)。

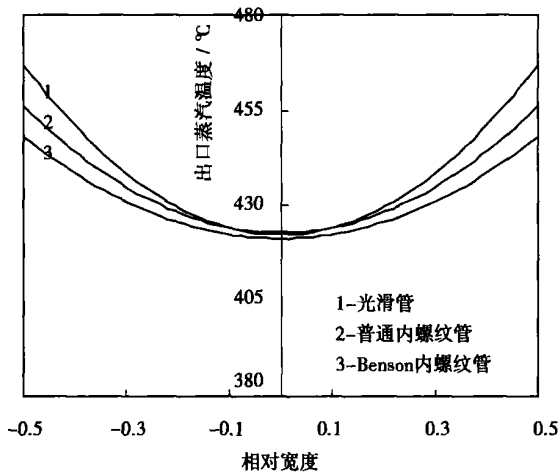


图 6 不同管子类型水冷壁出口蒸汽温度

可见, 采用内螺纹管, 尤其是采用低质量流速 OTU 技术, 蒸汽温度的偏差得到相当的改善。一般看来, 采用光滑管是可行的, 但是在炉膛上部, 由于热流密度的分布趋于不均匀 (见图 4), 因此在该区域采用内螺纹管, 可以有效改善蒸汽温度的非均匀程度。

因此, 低质量流速 OTU 技术是一种全新的设计思路, 通过采用优化的内螺纹管, 使得水冷壁在较低的工质流量下产生自然循环特性, 既降低了整个流动回路的压降损失, 又保证锅炉的安全运行, 并降低电站成本。

低质量流速 OTU 技术是基于煤粉锅炉发展起来的, 然而这种新技术与超临界循环流化床燃烧技术 (SUC-CFB) 的结合将使得这种新型锅炉在市场中更具竞争力。循环流化床锅炉占地面积小, 可以有效降低污染物排放, 且燃料适应性好, 能够满足日益严格的环保要求, 有效解决资源紧张问题; 而超临界技术将使得 CFB 的运行更加灵活、电站效率进一步提高; 再加上低质量流速 OTU 技术, CFB 的优势将会进一步体现, 并能有效降低锅炉成本。采用这些技术的循环流化床凭借其优良的性能将会成为未来锅炉发展的重要方向之一。

## 4 结 论

低质量流速垂直管屏技术在降低给水泵电耗、流动安全性方面, 在直流煤粉锅炉中有着优势。在必须采用垂直管和低质量流速的直流循环流化床锅炉中, 也有着良好的应用前景。

低质量流速垂直管屏技术的核心为 Benson 内螺纹管, Benson 管充分利用了流动阻力与流动的关系, 在低质量流速下, 垂直管屏能够产生自然循环特性, 在满足较低质量流速的同时保证锅炉的安全运行。因此低质量流速垂直管屏技术是有优势的。

对循环流化床锅炉水冷壁的热流分布分析表明, 由于热流密度较低而且相对均匀, 因此即使在较低的管内质量流速条件下, 采用光滑管也可以得到较小的热偏差。但是在炉膛上部, 由于热流密度的分布趋于不均匀, 因此在该区域采用内螺纹管, 可以保证水冷壁更加安全。

对稀相区截面尺寸为  $17\ 430\text{ mm} \times 25\ 394\text{ mm}$ 、布风板距离顶棚为  $63\ 040\text{ mm}$  的炉膛进行计算, 其中水冷壁的外径为  $32\text{ mm}$ , 壁厚为  $8\text{ mm}$ , 管节距为  $44\text{ mm}$ , 水冷壁管内工质流速为  $1\ 460\text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , 管子结构选择光滑管、普通内螺纹管和 Benson 管。计算表明, 使用光滑管, 管子出口蒸汽温度的偏差最大为  $45^{\circ}\text{C}$ , 水冷壁压降为  $0.22\text{ MPa}$ 。若采用普通热螺纹管, 温度偏差最大为  $36^{\circ}\text{C}$ , 水冷壁压降为  $0.44\text{ MPa}$ 。若采用 Benson 管, 温度偏差最大为  $28^{\circ}\text{C}$ , 水冷壁压降为  $0.25\text{ MPa}$ 。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.

(下转第 647 页)

已经过 4 个采暖期的可靠运行, 表现出了燃烧效率高、排放特性良好的特性。

#### 4 水煤浆流化-悬浮燃烧锅炉的应用前景

仅 2002 年, 胜利油田应用水煤浆流化-悬浮燃烧新技术对 4 座锅炉房进行改造, 至此全油田共计改造和新增锅炉 20 台(个别锅炉由雾化-悬浮燃烧改为流化-悬浮燃烧), 总容量达 300 t/h, 单台最大容量为 75 t/h, 当年燃烧水煤浆  $6.54 \times 10^4$  t, 共节约费用 2 400 万元。该技术已经于 2004 年 10 月通过了山东省科技厅组织的技术鉴定, 结论为“该技术成功解决了水煤浆燃烧存在的诸多技术难题, 在中小容量锅炉水煤浆工程应用中有技术突破, 达到了国际领先水平”。并获得了山东省 2005 年技术进步二等奖。

水煤浆流化-悬浮燃烧技术实现了水煤浆的低温、高效洁净燃烧。不仅具有负荷调节性能好、运行费用低、劳动强度低、对水煤浆的适应性强、辅助配套系统简洁可靠和设备投资少等优点, 而且拓宽了制浆的煤种范围并降低制浆成本; 在燃烧过程中直接脱硫脱氮, 不仅燃烧效率高, 而且环保特性好。

水煤浆流化-悬浮燃烧新技术在全国工业锅炉燃烧水煤浆应用方面积累了宝贵的经验, 起到了良好的示范作用, 对洁净煤技术的发展将产生深远的影响。

#### 5 结 论

胜利油田一直致力于水煤浆的技术开发和推广工作, 开始采用水煤浆雾化-悬浮燃烧技术, 在积累一定的经验后, 又发展了水煤浆流化-悬浮燃烧技

术, 目前正在推广应用之中。

水煤浆流化-悬浮燃烧技术采用专用的水煤浆雾化器, 将水煤浆以颗粒形式喷入燃烧室, 省略了用于雾化浆枪的复杂雾化系统, 因此, 系统简单, 可靠性高, 而且避免了浆枪的堵塞和磨损等难题的困扰, 不仅燃烧效率高, 而且抑制了热力型  $\text{NO}_x$  的生成, 由于床料中加入了一定量的石灰石, 可以实现水煤浆燃烧过程中的直接脱硫, 具有良好的环保特性。在胜利油田 20 余台锅炉采用该技术, 经过 4 个采暖期的可靠运行, 锅炉运行稳定, 操作简单, 已经燃烧水煤浆  $29.7 \times 10^4$  t, 替代石油  $13.5 \times 10^4$  t, 经济效益相当显著。

水煤浆流化-悬浮技术在工业锅炉和小容量电站锅炉上的应用实例表明, 其经济和社会效益良好, 进一步的研究方向是锅炉本体结构的优化、提高燃烧过程的脱硫效率以及控制热力型  $\text{NO}_x$  的生成等, 有关这方面的研究还需要不断积累运行经验, 进行深入的理论分析。

#### 参考文献:

- [1] 马玉峰, 李建强, 万启科, 等. 水煤浆燃烧技术及其发展[J]. 洁净煤技术, 2003(3): 13-17.
- [2] 姜秀民, 马玉峰, 万启科, 等. 水煤浆流化悬浮高效洁净燃烧工艺[P]. 中国专利: ZL02109852.2.
- [3] 马玉峰, 姜秀民, 万启科, 等. 水煤浆流化悬浮高效洁净燃烧装置[P]. 中国专利: ZL02273489.9.
- [4] 马玉峰, 万启科. 一种具有疏通和冷却功能的水煤浆或泥煤浆锅炉给浆装置[P]. 中国专利: 200520085303.4.
- [5] 姜秀民, 孙 键, 郝志金, 等. 组合式高温旋涡分离器[P]. 中国专利: ZL96121228.4.

(何静芳 编辑)

(上接第 643 页)

- [3] 唐人虎, 胡志宏, 陈听宽, 等. 国产 UP 直流炉水冷壁改造方案分析[J]. 热能动力工程, 2002, 17(6): 641-643.
- [4] 郑建学, 陈听宽, 罗毓珊, 等. 超临界压力下 600 MW 直流锅炉水冷壁内螺旋管摩擦阻力特性研究[J]. 热力发电, 2000, 2: 15-26.
- [5] 郑建学, 陈听宽, 陈学俊, 等. 600 MW 变压运行直流锅炉水冷壁内螺旋管内壁换热特性的研究[J]. 中国电机工程学报, 1996, 16(4): 271-275.
- [6] RAGNAR LUNDQVIST, ANDRE SCHRIED, PERITI KINNUNEN, *et al.*. A major step forward the supercritical CFB boiler[A]. **Power Gen International 2003**[C]. Nevada; Steven Wood, 2003. 1-22.
- [7] JOACHIM FRANKE, RUDOLF KRAL. Benson boiler best choice[J]. **Siemens Power Journal Online** 2001(10): 1-4.
- [8] 马本锋. 国产 300 MW 机组 UP 型直流锅炉调峰技术改造研究[J]. 中国电力, 2003, 36(3): 5-9.
- [9] 冯俊凯, 岳光溪, 吕俊复. 循环流化床燃烧锅炉[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [10] LU JUN FU, FENG JUN KAI. On design of CFBC boiler[A]. Xu Xu

Chang. **Proceeding of the 5th International Symposium on Coal Combustion**[C]. Nan Jing Dongnan University Press, 2003. 309-313.

- [11] WU YU XIN, LU JUN FU, ZHANG JIAN SHENG, *et al.* Heat flux and hydrodynamics of the membrane wall of supercritical pressure circulating fluidized bed boiler[A]. Gou Lie Jin. **Proceedings of 5th International Symposium on Multiphase Flow, Heat Mass Transfer and Energy Conversion**[C]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2005. 149.
- [12] 吕俊复, 金晓钟, 张建胜, 等. 两相流动对流化床燃烧行为的影响[J]. 热能动力工程, 2000, 15: 217-219.
- [13] 吕俊复, 张建胜, 郭庆杰, 等. 循环流化床锅炉燃烧室边界层的实验研究[J]. 热能动力工程, 2002, 17(1): 20-22.
- [14] SKOWYRA R S, CZARNECKI T S, SUN C Y, *et al.* Design of a supercritical sliding pressure circulating fluidized bed boiler with vertical water walls[A]. **Proceedings of the 13th International Conference on Fluidized Bed Combustion**[C]. New York: ASME, 1995. 17-25.

(何静芳 编辑)

and Power Engineering under the Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(6). — 628 ~ 631

A method has been established for solving a full polarization electrochemical model for solid oxide fuel cells (SOFC) coupled with a potential equation and N-S one. A three-dimensional numerical simulation was conducted for the thermoelectric characteristics of the tubular SOFC. The calculated values of power generation characteristics of the cells obtained are in good agreement with the experimental ones. Meanwhile, the electric motive force distribution, electric current density and temperature distribution, electrochemical reaction-produced heat and Ohm heat distribution characteristics were also analyzed. The calculation results show that cathode Ohm polarization and activation polarization losses of the cells would account for 85% of the total losses, while chemical reaction-produced heat would account for about 92% and Ohm heat for 8% of the total heat generated. **Key words:** tubular solid oxide fuel cell, numerical simulation, thermoelectric characteristics

旋转型气-液雾化喷嘴的雾化特性研究 = A Study of Atomization Characteristics of "Swirling Gas-liquid Spray Atomizers" [刊, 汉] / GONG Jing-song, FU Wei-biao (Engineering Mechanics Department, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(6). — 632 ~ 634, 639

By using a laser-phase Doppler analyzer (PDA), an experimental study was conducted of the atomization characteristics of "Swirling Gas-liquid Spray Atomizers". Water was used as the liquid to be atomized instead of oil and compressed air employed as an atomization medium. The parameters of atomization characteristics under different operating conditions were measured, such as Sotyl mean diameter and particle speed of atomized droplet particles etc. The experimental measurement results indicate that the atomizer can achieve a comparatively good atomization state under the condition of a relatively small gas-liquid ratio with the average SMD of droplets at the center reaching 40  $\mu\text{m}$ . With an increase in pressure and gas-liquid ratio, the atomization level will be enhanced accordingly. However, it is scarcely affected by the structure of the atomizer. The research findings can provide an underlying basis for the practical design of atomizers. **Key words:** "Swirling Gas-liquid Spray Atomizers", PDA (Phase Doppler Analyzer), atomization characteristics

迷宫密封转子动特性三维 CFD 数值的研究 = A Study of Methods Used for Three-dimensional CFD (Computational Fluid Dynamics) Numerical Analysis of Dynamic Characteristics of Rotors with Labyrinth Seals [刊, 汉] / LIU Xiao-feng, LU Song-yuan (Vibration Control and Information System Research Institute under the Southeast University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(6). — 635 ~ 639

The aerodynamic force produced by fluid in labyrinth seals is a major factor that may lead to instability of a shaft system. This aerodynamic force can be described by a factor of seal dynamic characteristics. A vortex rotor-labyrinth seal three dimensional CFD (computational fluid dynamics) mathematical model was established. With a labyrinth seal at the inlet of a compressor serving as a specific case, the aerodynamic force at the rotor surface was calculated by using a general-purpose CFD software Fluent followed by a calculation of the seal dynamic characteristics factor. The calculated results when compared with those obtained by using another CFD software TASCflow and integrated-flow labyrinth seal calculation program DYNLAB indicate that the accuracy of loss-of-stability calculation under the three-dimensional CFD method is higher than that obtained by using the integrated-flow method. Finally, the impact of such factors as pre-swirling speed at the seal inlet, variation in clearances and cone-shaped axial clearance of seals etc. on seal stability was also calculated and analyzed in detail, thus providing a theoretical basis for decreasing steam flow excitations in seals. **Key words:** labyrinth seal, computational fluid dynamics, steam flow excitation, rotor dynamic characteristics factor

低质量流速垂直管屏技术的原理与应用分析 = Analysis of Working Principle and Application of Low Mass Flow-speed Vertical Tube-platen Technology [刊, 汉] / LI Yan, ZHAO Xin-mu, YUE Guang-xi, et al (Thermal Energy

Engineering Department, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(6). — 640 ~ 643, 647

The key issues of low mass flow-speed vertical tube-platen technology lies in its inner threaded Benson tubes. The authors have analyzed the basic principle of Benson tubes and explored the application of the above-mentioned technology. The low mass flow-speed vertical tube platen features natural circulation characteristics, guaranteeing a safe operation of boilers while simultaneously meeting comparatively low mass flow-speed requirements. Hence, the low mass flow-speed vertical tube platen technology has its own technical edge, especially for forced circulation pulverized coal-fired boilers and supercritical circulating fluidized bed ones which must adopt low mass flow-speed vertical tubes. The inner threaded tubes can reduce steam temperature deviation and flow resistance in water-cooled walls and secure a safer operation of the latter. **Key words:** Benson tube, low mass flow-speed, vertical tube platen, pulverized coal fired boiler, circulating fluidized bed

水煤浆流化-悬浮燃烧技术在胜利油田的应用 = **Application of Water-coal-slurry Fluidization-suspension Combustion Technology at Shengli Oil Field** [刊, 汉] / MA Yu-feng, QIN Yu-kun (College of Energy Science and Engineering under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001), JIANG Xiu-min (College of Mechanical and Power Engineering under the Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200240), WAN Qi-ke (Shengli Power Plant, Dongying, China, Post Code: 257087) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(6). — 644 ~ 647

A new water-coal-slurry fluidization-suspension combustion technology has been studied and developed with its theory, specific features and applications at Shengli Oil Field being described. The technology features a high adaptability to various fuels, quick start-up, high efficiency and low pollution etc. The practice at Shengli Oil Field proves that medium and small-sized industrial boilers adopting water-coal-slurry fluidization-suspension combustion technology have attained a combustion efficiency as high as 85% - 91%, much higher than the average efficiency of present-day coal-fired industrial boilers in China with their energy-saving rate being over 20%. Regarding environmental protection, the above technology is conducive to a decrease in raw coal loss and pollution related to its transportation process in cities, a reduction of floating dust in the atmosphere and less emission of such pollutants as SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> and CO<sub>2</sub> etc. bringing about dramatic environmental-protection benefits. Taking into account the on-site practice, the authors have analyzed the specific features and application prospect of the technology under discussion, which is of great significance for popularization and application of water-coal-slurry instead of oil as a fuel for boilers. **Key words:** water-coal-slurry, industrial boiler, fluidization-suspension combustion

乌克兰 UGT25000 燃气轮机试验运行经验及技术改进措施 = **Trial Run Experience of Ukraine-made UGT25000 Gas Turbine and Technical Measures Taken for Their Improvement** [刊, 汉] / GONG Jian-zheng, SUN Feng-rui, ZHANG Ren-xing (College of Shipbuilding and Power Engineering under the Naval Engineering University, Wuhan, China, Post Code: 430033), LI Wei (Naval Ship Department under the Division of Naval Equipment, Beijing, China, Post Code: 100841) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(6). — 648 ~ 651

UGT25000 gas turbine is a new type of industrial gas turbine developed by Ukraine. No. 2 Unit developed by Ukraine had undergone an industrial trial run from Nov. 1995 to June 2001 at "Sofia" natural gas supercharging station in Ukraine. The authors have described the trial run conditions of the unit. During the accumulative operation totalling 25000 hours, serious faults had occurred to the unit, such as bearing damage and cracks etc. at the location of low pressure compressor, low pressure turbine and power turbine. This indicates that there exist certain defects in the structural design of the prototype and the engine reliability has failed to meet the design requirements. To cope with the above, some modifications for improving the structural design have been made, greatly enhancing the service life and reliability of the unit. These measures were implemented in the latterly fabricated units. **Key words:** gas turbine, trial run, fault, reliability