

超临界循环流化床下降水冷屏流量 分配特性试验研究

张冬青¹, 杨冬¹, 刘计武¹, 肖峰²

(1. 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安; 2. 上海锅炉厂有限公司, 200245, 上海)

摘要: 针对 350 MW 超临界循环流化床锅炉的结构参数, 建立空气-水试验台, 模拟了超临界循环流化床锅炉在 25%、50% 和 70% 3 种额定负荷下气液两相流在下降水冷屏并联支管中的分配特性. 采用快关阀门法和分相测量法分别测量了下降水冷屏各并联支管内的体积流量含气率分布、干度分布、各相流量分布和差压分布. 试验发现: 在进口集箱干度为 0.3~0.9 的范围内, 25% 负荷下的体积流量含气率、干度分布和差压分布最均匀, 并且随着锅炉负荷的增加, 各并联支管内的相分配偏差增加; 25% 负荷下各并联支管内各相的流量分配均匀性最差, 并且随着锅炉负荷的增加, 各并联支管内流量分配均匀性得到改善.

关键词: 下降水冷屏; 气液两相流; 分配特性; 超临界; 循环流化

中图分类号: TK223.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)05-0032-06

Distribution Characteristics of Downward Water-Cooling Panel in Supercritical Circulating Fluidized Bed Boiler

ZHANG Dongqing¹, YANG Dong¹, LIU Jiwu¹, XIAO Feng²

(1. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. Shanghai Boilers Works Ltd., Shanghai 200245, China)

Abstract: An air-water test-bed was designed according to the configuration and parameter characteristics of the water-cooling panel of a supercritical circulating fluid bed boiler to study the flow distribution characteristics of the water-cooled screen at three operational loads of 25% ECR, 50% ECR and 70% ECR, respectively. The volumetric fractions of air content, the quality distribution, the phase flow distribution, and the pressure distribution in each branch were measured by the quick-close valve method and the phase measurement method. The results show that the volumetric fraction of air content, the quality distribution, and the pressure distribution in the parallel branches were most uniform at the load of 25% ECR when the inlet quality was 0.3-0.9. The deviation of the phase distribution in the branches increased with an increase in the load. In addition, the uniformity of the flow distribution increased with the load, indicating that the flow distribution was the worst at the load of 25% ECR.

Keywords: downward water-cooling panel; gas-liquid two-phase flow; distribution characteristics; supercritical; circulating fluid

循环流化床是近几十年发展起来的一项高效、低污染燃烧技术, 具有燃烧效率高、煤种适应性广、

负荷调节范围大、灰渣可综合利用等优点,且炉膛温度远低于煤粉炉,温度随炉膛高度分布更均匀。因此,大容量、高参数的超临界循环流化床锅炉具有优良的技术优势,对其的自主研制具有深远意义^[1]。

随着全社会用电负荷的变化,目前 350 MW 等级的中等容量超临界机组具有相当大的市场需求,这种容量的机组具有造价低、运行性能优、调峰性能好、容易满足电网需求等优点。为了降低炉膛高度,增加蒸发受热面,上海锅炉厂对 350 MW 超临界循环流化床锅炉进行设计时,在炉膛中布置了类似屏式过热器结构的下降水冷屏。国内外许多学者通过数值模拟或试验等手段,对超临界循环流化床锅炉水冷壁的分配特性进行了研究^[2-5],在超临界循环流化床水冷壁管内气液两相流量及压降分布等方面得到了很多有价值的研究成果。然而,国内亚临界或超临界循环流化床锅炉设计中采用的多是炉外下降管引入中部的分配集箱,流体进入一次上升的炉膛翼墙屏式蒸发受热面^[6]。在炉膛内布置向下流动的蒸发受热面,目前尚未见到实例,且气液两相流在其中的分配均匀性会直接影响到锅炉的安全运行。因此,水冷屏内部流体分配特性的研究,对锅炉的设计具有重要的参考意义。

1 试验系统及原理

1.1 350 MW 超临界循环流化床锅炉概况

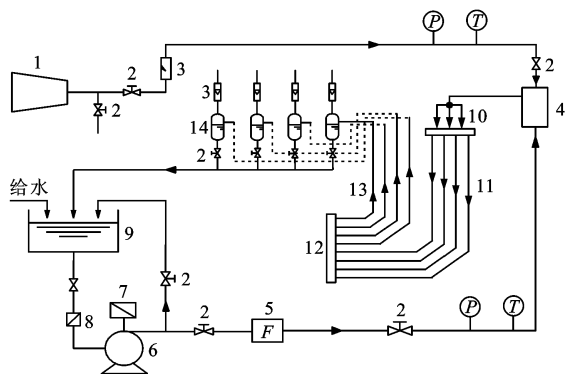
上海锅炉厂 350 MW 超临界循环流化床锅炉的炉膛宽度为 28 190 mm,深度为 9 166 mm。为了增加换热面积,在炉膛上部水冷壁出口处布置了下降水冷屏受热装置。由水冷壁来的工质通过引出管进入垂直于侧墙布置的 $\Phi 356\text{ mm}\times 40\text{ mm}$ 屏进口集箱,标高为 59 800 mm。沿水冷屏进口集箱轴线方向,引出 10 片水冷屏,相邻两片水冷屏间隔为 616 mm,每片水冷屏由 19 根 $\Phi 51\text{ mm}\times 7.5\text{ mm}$ 的下降管组成。工质经下降管在炉内受热后流入垂直布置在前墙的 $\Phi 219\text{ mm}\times 35\text{ mm}$ 水冷屏中间混合集箱下部。在混合集箱中工质沿轴线方向上升流动进入集箱上部,然后流入布置在集箱上部的上升管。上升管来的工质进入垂直于左、右侧墙布置的 $\Phi 457.2\text{ mm}\times 30\text{ mm}$ 水冷屏出口集箱,标高为 59 800 mm。随后工质通过引入管进入水冷屏出口混合集箱,最后流入气水分离器。

1.2 试验系统与结构设计

若采用实际高温高压蒸汽,蒸汽耗量大且难以进行可视化观察,因此试验利用相似原理,采用常压

空气-水两相流动对实际锅炉工况进行模拟。水冷屏中间混合集箱和进口集箱的尺寸均取 $\Phi 45\text{ mm}\times 5\text{ mm}$,材料为有机玻璃,限于试验条件,试验段选择 4 根下降管。

试验系统如图 1 所示,由液相水回路、空气回路、试验段及测量系统等组成。水回路提供的单相水与空气回路提供的空气在混合器中混合后进入试验段,在试验段中完成测量后,进入分离系统测量各单管中的气相和液相流量。试验段结构如图 2 所示。



1:压缩机;2:阀门;3:转子流量计;4:混合器;5:电磁流量计;6:水泵;
7:变频器;8:滤网;9:水箱;10:进口集箱;11:水冷屏下降管;
12:混合集箱 13:水冷屏上升管;14:气水分离器

图 1 试验系统图

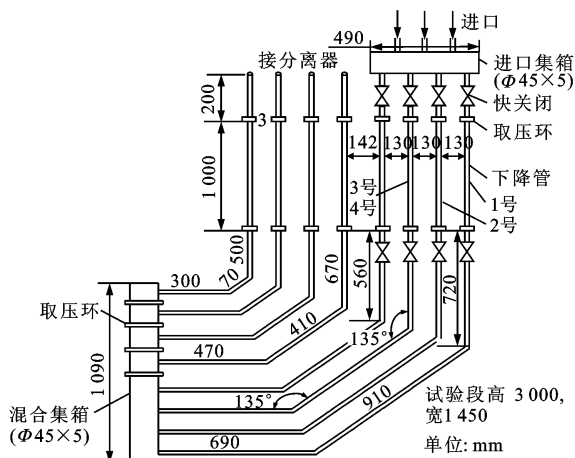


图 2 试验段结构图

1.3 试验测量系统

1.3.1 支管内气液两相流流量测量 试验段内空气体积流量由空气转子流量计测得,水的体积流量由电磁流量计测量。将试验段后的气液两相流引入气水分离器分离,分离后的气相通过玻璃转子流量计测量;液相存储在分离器下部,通过读取单位时间

内分离器的液位来计量水的体积流量。

1.3.2 支管平均截面含气率测量 快关阀门法具有结构简单、易于实现、测量精度高等优点,所以试验中采用快关阀门法测量试验段各支管的截面含气率^[7]。支管内截面含气率由下式求得

$$\alpha = \frac{(H-h)\pi d^2 + V_{top}}{H\pi d^2 + V_{top} + V_{down}} \tag{1}$$

式中: h 为水柱高度; H 为上下取压环之间的高度; D 为管径; V_{top} 为上部取压环距阀间的管内容积; V_{down} 为下部取压环距阀间的管内容积。

1.4 试验参数

根据实际锅炉的设计参数,采用相似准则,对 25%、50%和 70% 3 种额定负荷下的工况进行模拟。为了较全面获得锅炉在这 3 种负荷不同干度 x 下的运行结果,试验对于度在 0.3~0.9 范围内的工况进行了模拟。通过计算得到气液两相流在 3 种负荷、7 种干度共 21 种工况下的折算流速,见表 1。

表 1 不同负荷下气液两相流折算流速

$x/\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	25%负荷		50%负荷		70%负荷	
	U_G	U_L	U_G	U_L	U_G	U_L
0.3	0.11	0.26	0.22	0.52	0.31	0.73
0.4	0.15	0.22	0.30	0.45	0.42	0.63
0.5	0.19	0.19	0.37	0.37	0.52	0.52
0.6	0.22	0.15	0.45	0.30	0.63	0.42
0.7	0.26	0.11	0.52	0.22	0.73	0.31
0.8	0.30	0.07	0.60	0.15	0.84	0.21
0.9	0.35	0.04	0.67	0.07	0.94	0.10

注: U_G 为气相折算流速; U_L 为液相折算流速。

2 试验结果及分析

2.1 气水两相流分配特性评价标准^[8]

质量流量、体积流量含气率及干度是直接表征支管中两相流流量和相含率的参数,因此本文定义如下指标来评价并联管系统分配特性的优劣

$$\eta_{\beta_n} = [(\beta_n - \bar{\beta})/\bar{\beta}] \times 100\% \tag{2}$$

式中: η_{β_n} 为第 n 根并联支管体积流量含气率不均匀系数; β_n 为第 n 根并联支管体积流量含气率; $\bar{\beta}$ 为并联支管平均体积流量含气率。

$$\eta_{x_n} = [(x_n - x)/x] \times 100\% \tag{3}$$

式中: η_{x_n} 为第 n 根并联支管干度不均匀系数; x_n 为第 n 根并联支管的干度; x 为进口集箱内干度。

$$\eta_n = [(V_n - \bar{V})/\bar{V}] \times 100\% \tag{4}$$

式中: η_n 为第 n 根并联支管体积流量不均匀系数;

V_n 为第 n 根并联支管的体积流量; $\bar{V}$ 为并联支管平均体积流量。

2.2 并联支管内体积流量含气率的分布及分析

图 3~5 为采用快关阀测量得到的 350 MW 超临界循环流化床锅炉在 25%、50%和 70% 3 种负荷工况下运行时,体积含气率不均匀系数随进口集箱内干度变化的关系图。由图可知:在 3 种负荷下,各支管内体积含气率不均匀系数随 x 的增大而越趋稳定;在相同 x 下,体积含气率不均匀系数随负荷的增加而增大,即 25%负荷下气液两相流的体积流量分配偏差最小,仅为 -3% ~ 2%,70%负荷下气液两相流的体积流量分配偏差最大,达到了 11% ~ 5%。

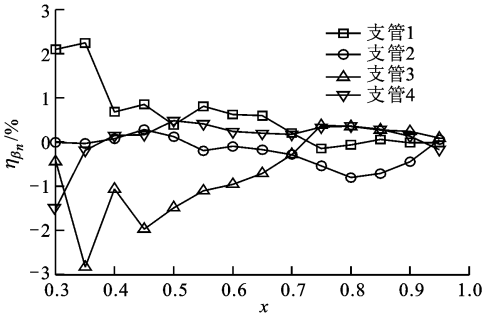


图 3 25%负荷时各支管 η_{β_n} 随 x 的变化

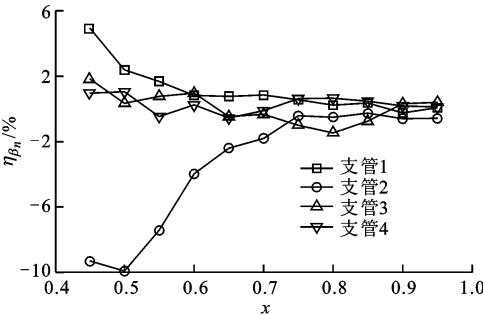


图 4 50%负荷时各支管 η_{β_n} 随 x 的变化

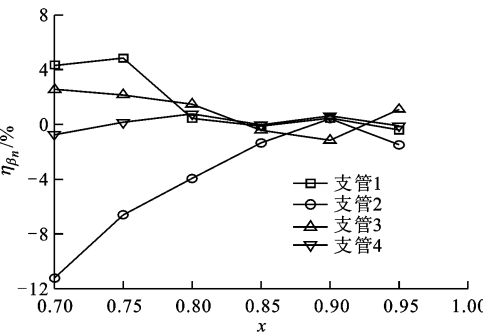


图 5 70%负荷时各支管 η_{β_n} 随 x 的变化

造成以上试验结果的原因主要是随着超临界循

环流化床锅炉负荷的增加,各支管内液相的折算流速升高,而气相的折算流速降低,下降水冷屏进口集箱内气液两相流中液相的动能增加,气相的动能减少,因此随着负荷的增加在进口集箱内更容易形成泡沫状流,从而导致各支管内体积流量含气率不均匀系数随着负荷的增加有所增加。

2.3 并联支管内干度分布及分析

体积流量含气率不均匀系数描述分配特性是不尽合理的,而干度分配不均匀系数是一个合理而且敏感的指标.图 6~8 为 350 MW 循环流化床锅炉在 25%、50%和 70% 3 种负荷工况下运行时,各支管内干度不均匀系数随进口集箱内干度变化的关系图.由图可知:在同一负荷下,各支管内干度不均匀系数随 x 的增加而减小;在相同 x 下,各支管内干度不均匀系数随锅炉负荷的增加而增加.50%负荷下,各支管内干度不均匀系数随 x 变化最大,达到 $-25\% \sim 20\%$;25%负荷下,各支管内干度不均匀系数随 x 变化最小,仅为 $-16\% \sim 16\%$ 。

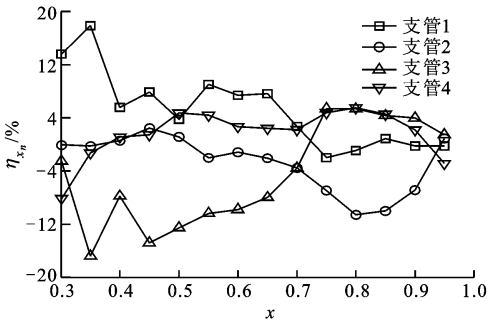


图 6 25%负荷时各支管 η_{x_n} 随 x 的变化

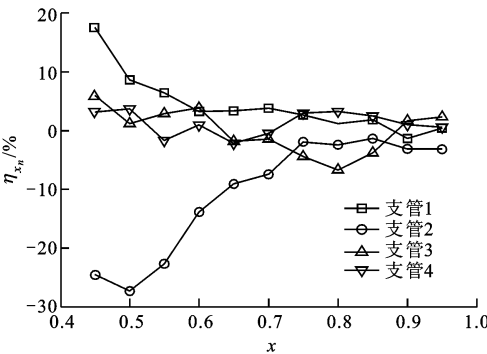


图 7 50%负荷时各支管 η_{x_n} 随 x 的变化

由图 6~8 可以看出,在 25%负荷下气液两相流的相分配最均匀,并随着进口集箱内干度的增加而更加均匀.由此可见,各支管内干度不均匀系数随进口集箱内干度的变化趋势与体积含气率不均匀系数随进口集箱内干度变化的趋势一致,从而更加说

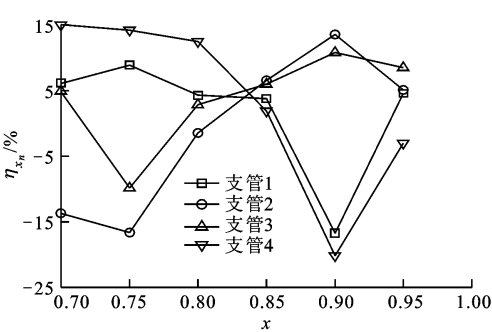


图 8 70%负荷时各支管 η_{x_n} 随 x 的变化

明了试验结果的合理性。

2.4 并联支管内流量分布及分析

图 9~图 11 为 350 MW 循环流化床锅炉在 25%、50%和 70% 3 种负荷工况下运行时,各支管内空气流量不均匀系数随进口集箱内干度变化的关系图。

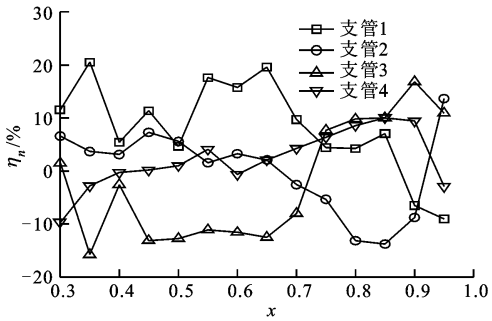


图 9 25%负荷时各支管 η_n 随 x 的变化

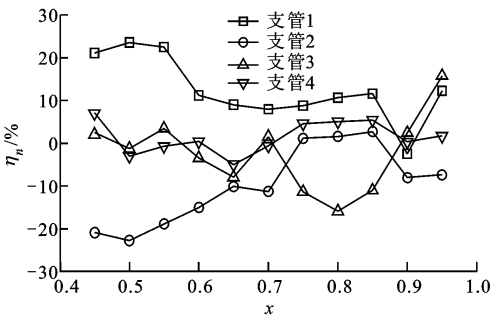


图 10 50%负荷时各支管 η_n 随 x 的变化

由图 9 可知,25%负荷下,在 x 为 0.3~0.9 的范围内,空气体积流量不均匀系数在 $-15\% \sim 20\%$,且当 x 在 0.8~0.9 的范围内时,空气体积流量分配较为均匀,流量偏差均在 10%内.空气流量不均匀系数总体随进口集箱内干度的增加呈减小趋势,但变化不大。

由图 10 可知,50%负荷下,在 x 为 0.4~0.9 的范围内,空气体积流量不均匀系数在 $-25\% \sim 25\%$,

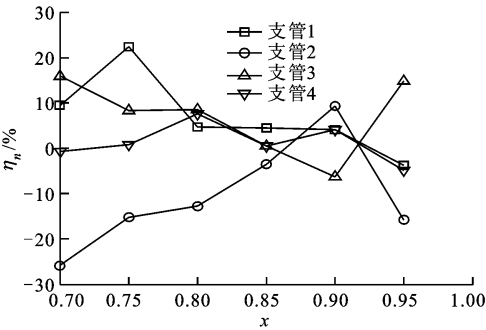


图 11 70% 负荷时各支管 η_v 随 x 的变化

空气流量不均匀系数总体随进口集箱内干度的增加呈明显减小趋势。

由图 11 可知,70% 负荷下,在 x 为 0.7 ~ 0.95 的范围内,空气体积流量不均匀系数在 -25% ~ 25%,空气流量不均匀系数随进口集箱内干度的增加呈减小趋势。

由图 9~11 还可以看出,当 x 大于 0.9 后,各支管内的空气体积流量不均匀系数不再存在上述的变化规律. 这是因为随着 x 的进一步增加,气相的含量增加,且折算流速不断增大,液相的含量减小,且折算流速不断减小,因此两者的动能差距增大,从而使得空气的流量不均匀系数增大。

由此可见,随着锅炉负荷的增加,气液两相流的流量分配特性逐渐趋于稳定. 当 x 在 0.7 ~ 0.9 的范围内时,气液两相的流量分配随着 x 的增加而越趋均匀。

2.5 并联支管内差压分布及分析

图 12~14 为 350 MW 循环流化床锅炉在 25%、50% 和 70% 3 种负荷工况下运行时,各支管内差压 Δp 随进口集箱内干度变化的关系图. 由图可知,在不同负荷下,各支管内的差压随着 x 的增加呈先增大后减小的趋势,各支管内差压分布较为均匀,差压偏差较小,差压不均匀系数在 -15% ~ 25% 内,绝大多数情况下差压不均匀系数小于 10%,并且随着 x 的增加,差压不均匀系数呈减小趋势。

由图 12~14 可见,随着锅炉负荷的增加,水冷屏内各支管的差压分布逐渐均匀,且随着进口集箱内干度的增加,差压的数值逐渐减小. 造成这种现象的原因在于气液两相流的摩擦压降是循环流化床锅炉中间分配集箱及并联支管内的主要压降,随着 x 的增加,气相的含量增加,从而导致摩擦压降低。

3 结 论

通过对气液两相流在下降水冷屏中的流量分配

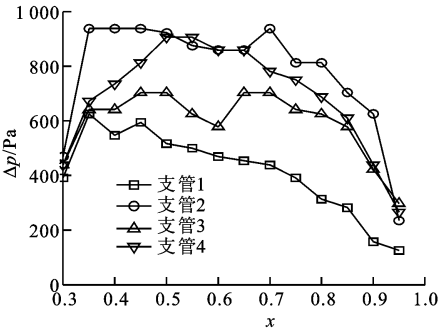


图 12 25% 负荷时各支管 Δp 随 x 的变化

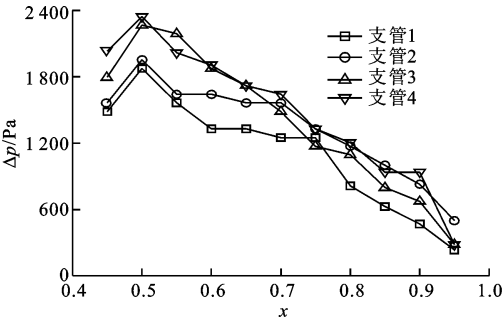


图 13 50% 负荷时各支管 Δp 随 x 的变化

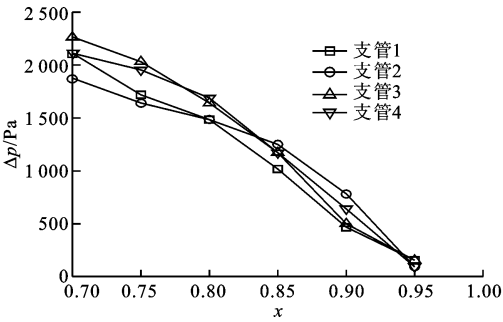


图 14 70% 负荷时各支管 Δp 随 x 的变化

和相分配特性的试验研究,得到如下结论。

- (1) 在试验参数范围内,下降水冷屏各支管中流型变化较少,多呈环状流. 各支管内体积分气率不均匀系数、干度不均匀系数随进口集箱内干度的增大而减小;在相同 x 下,体积分气率不均匀系数随着负荷的增加而增大. 若以干度不均匀系数为 $\pm 15\%$ 作为判断分配是否均匀的标准,则 25% 负荷下,应使 $x > 0.45$; 50% 负荷下,应使 $x > 0.55$; 70% 负荷下,应使 $x > 0.7$ 。
- (2) 各支管内差压随着进口集箱内干度的增加而减小,当 x 达到 0.9 时,3 种工况下各支管内的差压达到 250 Pa 左右。
- (3) 锅炉内气液两相流的流量分配随着锅炉负荷的增加而更加均匀,当 $x > 0.6$ 时,能够保证下降

水冷屏各支管内流量分配均匀。

实际锅炉运行时,随着锅炉负荷的增加,气液两相流在水冷屏下降管内的质量流速增加,产生的高压蒸汽和饱和水的密度差更小,且进入中间集箱内的蒸汽的干度增加,因此实际锅炉运行时下降水冷屏各并联支管内的分配特性较冷态试验更加均匀。

参考文献:

- [1] 孙献斌. 超临界循环流化床锅炉技术[J]. 电力学报, 2009,24(4):303-305.
SUN Xianbin. Analysis on the development of super-critical cfb boiler technology[J]. Journal of Electric Power, 2009,24(4):303-305.
- [2] 朱玉琴,陈听宽,毕勤成,等. 超临界压力 600 MW 直流锅炉流量分配特性的试验研究[J]. 锅炉技术,2006,37(5):11-14.
ZHU Yuqin, CHEN Tingkuan, BI Qincheng, et al. Investigation on flow distribution characteristics of a supercritical pressure once-through boiler[J]. Boiler Technology, 2006,37(5):11-14.
- [3] KIM N H, SIN T R. Two-phase flow distribution of air-water annular flow in a parallel flow heat exchanger [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2006, 32(12): 1340-1353.
- [4] LEE J. Branching of two-phase flow from a vertical header to horizontal parallel channels[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2009, 23 (6): 1628-1636.
- [5] 周旭,杨冬,肖峰,等. 超临界循环流化床锅炉中等质量流速水冷壁流量分配及壁温计算 [J]. 中国电机工程学报,2009,29(26):13-18.
ZHOU Xu, YANG Dong, XIAO Feng, et al. Mass flow rate profile and metal temperature calculation in water wall of an supercritical circulating fluidized bed boiler at medium mass flow rate[J]. Proceedings of the CSEE, 2009,29(26):13-18.
- [6] 吕俊复,于龙,张彦军,等. 600 MW 超临界循环流化床锅炉[J]. 动力工程, 2007, 27(4): 497-501.
LU Junfu, YU Long, ZHANG Yanjun, et al. A 600 MW supercritical circulating fluidized bed boiler[J]. Journal of Power Engineering, 2007, 27(4): 497-501.
- [7] LI K N, WU X B, YIN Y L. Experimental study of gas-liquid two-phase flow even distribution in parallel-

flow evaporator[J]. Journal of Superconductivity and Novel Magnetism, 2010, 23(6): 1111-1114.

- [8] 朱玉琴,毕勤成,陈听宽,等. 变压运行直流锅炉水冷壁中间集箱汽液分配特性的试验研究[J]. 动力工程, 2008,28(6): 834-838.
ZHU Yuqin, BI Qincheng, CHEN Tingkuan, et al. Experimental study on steam-liquid distribution characteristics of intermediate headers of the once-through boiler with variable pressure operation[J]. Journal of Power Engineering,2008,28(6): 834-838.

[本刊相关文献链接]

- 超临界汽轮机中压透平级流动传热特性研究. 2011,45(7): 9-14.
- 超临界压力水在倾斜上升管内传热的试验研究. 2011,45(5): 6-11.
- 高压高浓度 CO₂ 烟气辐射换热特性分析与计算. 2011,45(5): 17-22.
- 预干燥燃煤发电系统理论研究. 2011,45(5): 1-5.
- 超临界直流锅炉水冷壁降压及出口汽温计算. 2011,45(1): 38-42.
- 联合循环电站改造为整体煤气化联合循环的粗煤气冷却. 2010,44(11):71-76.
- 蒸发毛细弯液面热质传输特征及其稳定性分析. 2010,44(3):21-25.
- 低质量流速垂直和倾斜并联内螺旋管两相流不稳定性研究. 2010,44(1):17-21.
- 低质量流速垂直并联内螺旋管中两相流不稳定性试验研究. 2009,43(7):36-39.
- 原生生物质在超临界水流化床系统中气化制氢. 2009,43(2):111-115.
- 生物质在超临界水流化床系统中部分氧化气化制氢. 2009,43(1):5-9.
- 生物质与煤超临界水气化制氢的实验研究. 2008,42(6): 765-769.
- 超临界水中花生壳气化制氢催化剂的筛选与研究. 2008,42(7):913-918.
- 高含量煤在超临界水中气化制氢的实验研究. 2008,42(7): 919-924.
- 生物质/煤超临界水气化制氢的主要影响因素. 2008,42(3):368-371.

(编辑 荆树蓉)