

# 超临界变压运行直流锅炉 中间集箱分配特性的试验研究

朱玉琴<sup>1</sup>, 毕勤成<sup>2</sup>, 陈听宽<sup>2</sup>

(1. 西安石油大学石油炼化工程技术研究中心, 陕西 西安 710065;

2. 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

**摘 要:** 针对 600 MW 超临界锅炉炉膛下部的螺旋管圈水冷壁与炉膛上部垂直管水冷壁之间过渡联接的中间集箱的结构和参数特点, 利用空气-水模拟了超临界锅炉在 35% ECR、50% ECR 和 75% ECR 负荷下气-液两相流在中间集箱中的分配特性。通过观察和高速摄影法, 对分配集箱并联支管中的流型进行了测量和分析。采用快关阀门法和摩擦阻力法分别测量了各支管的含气率和流量。试验结果表明, 在 3 种工况下, 入口干度  $x=0.7\sim 0.95$  的范围内, 空气-水两相流通过分配集箱并联支管内的流量分配较为均匀, 绝大多数情况下流量偏差小于 10%。

**关 键 词:** 超临界直流锅炉; 集箱; 分配特性; 空气-水两相流

中图分类号: TK229.5 文献标识码: A

## 引 言

由于超临界和超超临界发电是迄今世界上最先进的火力发电技术, 具有容量大、参数高、能耗低、可靠性高、环境污染小和可大幅度提高机组效率等特点<sup>[1]</sup>, 因此, 我国正大力引进、研制和生产 600 MW 及以上的超临界变压运行直流锅炉。

为了适应变压运行, 超临界锅炉由炉膛下部的螺旋管圈水冷壁与炉膛上部垂直管圈水冷壁组成, 上、下部分之间用中间集箱过渡联接。锅炉运行至亚临界压力以下带部分负荷时, 通过中间集箱的是蒸汽和水两相流体。如果两相流体在中间集箱内发生汽水分离, 通过中间集箱的垂直水冷壁管内的流量就会有较大偏差, 部分受热面蒸发管工质流量较小, 可能发生工质焓增加过大, 壁温过高而损坏的危险性, 直接影响锅炉的安全运行。因此, 研究超临界直流锅炉在启动和低负荷运行时, 汽-水两相流通过中间集箱的分配特性及其影响因素, 对于保证国产 600 MW 超临界直流锅炉水冷壁的安全运行具有

重要的工程意义。

由于气-液两相流在管道中流动的复杂性, 到目前为止, 尽管世界各国这方面的研究人员已经取得了大量的研究成果<sup>[2-6]</sup>, 但这些成果远远不能满足实际工程的需要, 因此, 对于这类问题还需做大量的实际研究工作。本文利用空气-水两相介质, 对我国首台研制开发的 600 MW 超临界直流锅炉炉膛中间集箱及垂直水冷壁管, 在低负荷运行时的分配特性进行了试验研究。

## 1 试验装置及参数

### 1.1 试验装置

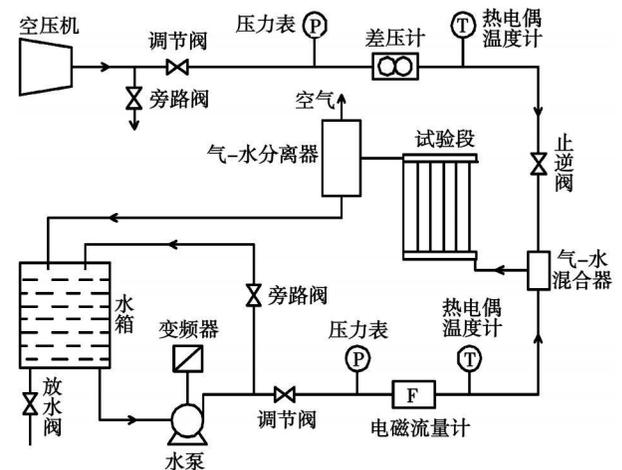


图 1 试验装置示意图

试验装置如图 1 所示, 主要由水回路部分、气路部分、试验段及测量系统等部分组成。利用 E-mag E 型电磁流量计和接在毕托管上的 Rosemount ST3000 差压变送器分别测量试验段入口水和空气的流量。

通过调节和测量的水和空气在空气—水混合器混合,形成空气—水两相流进入试验段。

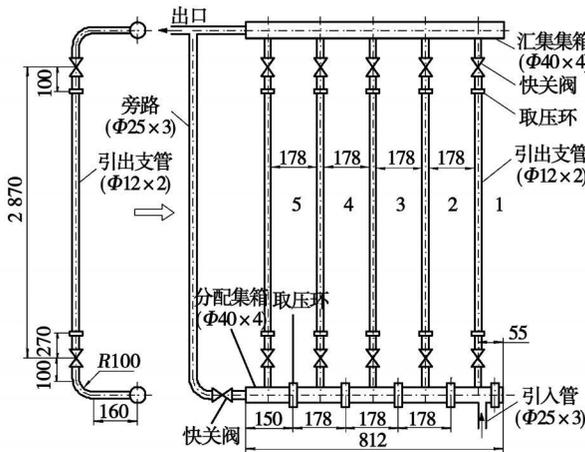


图 2 试验段示意图

由于磁力泵和空气压缩机所提供的流量限制,根据我国首台 600 MW 超临界锅炉中间集箱的结构,试验段采用了模型设计,主要由分配集箱、汇集集箱、并联支管、旁路系统及快速关闭阀门系统等组成。为了保证试验条件与锅炉实际运行时的条件

相同,在设计试验段具体尺寸时,使试验段中集箱引入管的折算流速、集箱中折算流速和并联引出管内的折算流速与实际运行时的折算流速相等,从而使试验结果能反映实际情况。具体结构如图 2 所示。为了便于观察和分析气液两相流的流动状态,试验段用透明有机玻璃管制成。从分配集箱进口开始并联支管的编号依次为 1、2、3、4 和 5 号支管。

利用快关阀门法测量各支管的截面含气率。通过测量支管内的流动摩擦阻力,利用流动摩擦阻力与含气率及流量的对应关系,即可确定出支管内流量的大小。

1.2 试验参数

在对中间集箱进行气—液两相流分配特性研究时,选取 600 MW 超临界直流锅炉在 35% ECR、50% ECR 和 75% ECR 3 种负荷时的参数进行模拟。600 MW 超临界直流锅炉在最低负荷即 35% ECR 工况下运行时,中间集箱的干度达到 0.8,因此试验干度取为 0.7~0.95。通过计算得出 600 MW 超临界直流锅炉在 35% ECR、50% ECR 和 75% ECR 3 种负荷、6 种干度共计 18 种工况下进入分配集箱的气液两相流体的折算流速、截面含气率等特性参数,如表 1 所示。

表 1 分配集箱引入管的汽—液两相流体的特性参数 (m/s)

干度	35% ECR		50% ECR		75% ECR	
	气相折算流速	液相折算流速	气相折算流速	液相折算流速	气相折算流速	液相折算流速
0.7	9.926	0.396	9.11	0.501	6.48	0.983
0.75	10.63	0.33	9.76	0.42	6.94	0.82
0.8	11.34	0.264	10.42	0.33	7.4	0.66
0.85	12.05	0.18	11.07	0.25	7.86	0.49
0.9	12.76	0.132	11.72	0.17	8.33	0.33
0.95	13.47	0.066	12.37	0.08	8.79	0.16

1.3 分配集箱分配特性的评价指标

气液两相流流经分配集箱的过程,既是一种带有分支管的复杂流动系统中的两相流动过程,又是一种变质量的两相流动过程。对于计算两相流在分配集箱各支管中的流量分配,实际上就是计算各支管的流量偏差。各支管的流量偏差用流量不均匀系数  $\eta_L$  表示,其表达式为:

$$\eta_{Li} = m_i / \bar{m} \quad (1)$$

流量标准相对误差  $\Phi_L$  为:

$$\Phi_L = \sqrt{\frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 (\eta_{Li} - 1)^2} \quad (2)$$

式中:  $\eta_{Li}$ —第  $i$  根支管的流量不均匀系数;  $m_i$ —第  $i$  根支管的质量流量, kg/s;  $\bar{m}$ —各支管质量流量的平

均值, kg/s。

2 试验结果及分析

2.1 流型实验结果及分析

由于不同的气液两相流流型具有不同的水动力和传热特性,因而研究并设法预测管内气液两相流流型对于存在气液两相流的 600 MW 超临界直流锅炉水冷壁系统的设计和安全运行是十分重要的。本文采用观察和高速摄像相结合的研究方法来判断流型,结果如表 2~表 4 所示。各种流型用字母表示如下: a 为弥散泡状流型; b 为气弹状流型; c 为块状流型; d 为带纤维的环状流型; e 为环状流型。

表 2 35% ECR 负荷下各支管流型

干度	支管 1	支管 2	支管 3	支管 4	支管 5
0.70	e	e	e	e	e
0.75	e	e	e	d	d
0.80	e	e	e	e	d
0.85	e	e	e	e	d
0.90	e	e	e	e	d
0.95	e	e	e	e	d

表 3 50% ECR 负荷下各支管流型

干度	支管 1	支管 2	支管 3	支管 4	支管 5
0.70	d	e	d	d	c
0.75	d	e	e	d	c
0.80	d	e	e	d	d
0.85	d	e	e	d	d
0.90	e	e	e	d	d
0.95	e	e	e	d	d

表 4 75% ECR 负荷下各支管的流型

干度	支管 1	支管 2	支管 3	支管 4	支管 5
0.70	e	e	d	b	b
0.75	e	e	d	c	b
0.80	e	e	d	c	c
0.85	d	e	d	c	c
0.90	e	e	d	d	c
0.95	e	e	e	d	d

实验结果表明, 3 种工况下并联支管中的流型基本上是环状流型和带纤维的环状流型, 这与文献 [7] 中的图 2-3 所示的垂直上升管流型图预测的环状流型一致。600 MW 超临界直流锅炉在变压运行时, 气液两相流体在水冷壁管中间集箱的干度在 0.7 以上, 进入垂直水冷壁管内的干度较高, 所以, 垂直水冷壁管内的流型一般为环状流。由此可知, 用水-空气模拟 600 MW 超临界锅炉中间集箱垂直水冷壁管内的流型与实际运行时的流型基本一致。

表 2~表 4 所示流型分布与实验段结构有关, 因为气液两相流是从分配集箱的一端从下向上径向引入, 并联支管沿集箱中心轴线水平方向引出之后再垂直向上进入汇集集箱, 实验段所用介质为密度相差很大的空气-水两相混合物。在 35% 负荷时, 气相的折算流速较大, 液相的折算流速较小, 气液两相流以波状分层流或弹状流进入分配集箱, 即气体主要集中于集箱的上部。由于气体的动能小于液相的动能, 气相更易从侧支管流出, 所以, 靠近集箱进

口端的支管 1、2、3 和 4 的含气率较大, 形成环状流型; 而靠近集箱末端的支管 5 的含气率相对较低, 形成带纤维的环状流型。

随着锅炉负荷的增加, 在相同入口干度的条件下, 气相的折算流速减少, 液相的折算流速增加, 即进入分配集箱的液体流量增加。因为水的密度远大于空气的密度, 所以, 随着液体流量的增加, 液相所具有的动能增加, 气液两相流在集箱入口强烈冲击集箱上部。液体在集箱入口端由垂直于轴线方向转向轴线方向向下游流动时又造成对集箱后端部的撞击, 形成剧烈湍动不稳定的气液两相流, 造成在 50% 负荷入口干度  $x=0.7 \sim 0.85$  时, 第一根支管的含气率低于第二根和第三根支管的含气率, 形成表 4 所示的流型分布。在 75% 负荷工况下, 各支管的流型分布最不均匀, 如表 4 所示。

### 2.2 并联支管流量分布及分析

图 3~图 5 为 3 种工况下并联支管流量分配的实验结果。

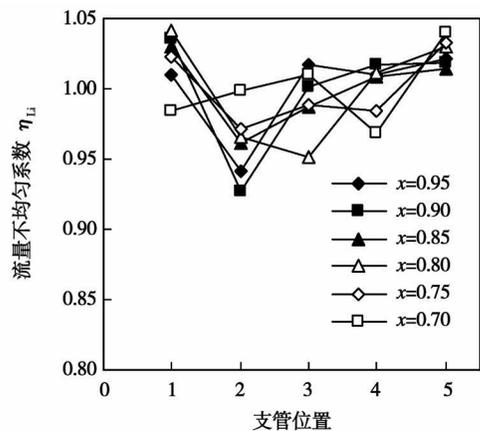


图 3 35% 负荷下各支管的流量分布

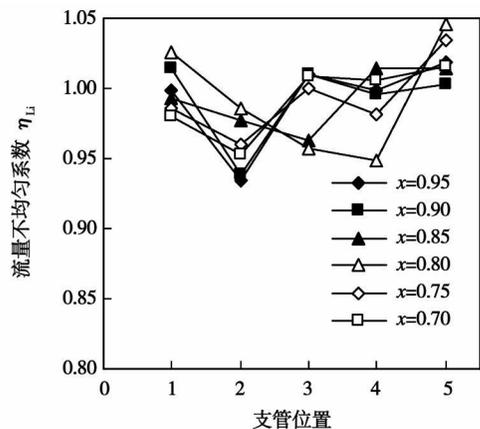


图 4 50% 负荷下各支管的流量分布

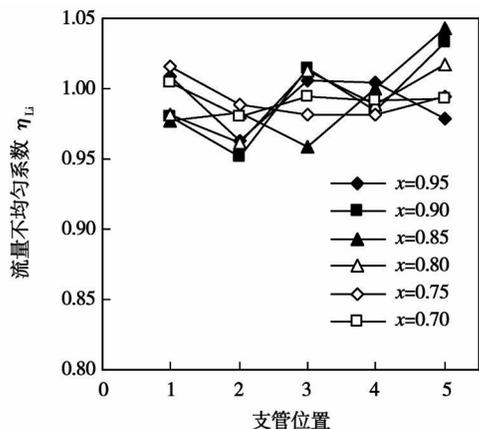


图 5 75%负荷下各支管的流量分布

在 35% 负荷时, 入口干度  $x=0.7 \sim 0.95$  范围内, 气液两相的流量不均匀系数相差 6.1% ~ 10.7%, 且绝大多数情况下的流量偏差小于 10%。这是因为实验装置是模拟 600 MW 超临界直流锅炉的中间分配集箱和垂直水冷壁系统, 气-液两相流在并联支管的摩擦压降是并联支管内的主要压降, 在分配集箱和汇集集箱内的压力变化不大, 即并联支管内的压降相差不大。虽然各支管的含气率不同, 但是, 由于空气的密度远小于水的密度, 所以, 进入并联支管内的气-液两相的质量流量相对均匀。50% 负荷下, 入口干度对并联支管流量分配的影响也不显著, 同样没有明显的变化趋势, 如图 4 所示。在入口干度  $x=0.7 \sim 0.95$  范围内, 并联支管间的流量偏差为 5.38% ~ 10.02%, 流量分配较为均匀。

在 75% 负荷工况下, 流量分配最为均匀, 在入口干度  $x=0.7 \sim 0.95$  范围内, 并联支管间的流量偏差为 2.49% ~ 8.41%。

由 30%、50% 和 75% 负荷下的流量标准相对误差  $\Phi_L$  分别为 0.023 6 ~ 0.038、0.021 2 ~ 0.038 和 0.007 95 ~ 0.029 9 也可知, 在 75% 负荷下, 流量分配最为均匀。因为在实际锅炉运行过程中, 随着运行负荷的增加, 气液两相流在水冷壁管内的质量流速增加, 汽-液两相的密度差减小, 并且进入中间集箱内的蒸汽干度增加, 这些因素都有利于气液两相流在分配集箱并联支管内流量的均匀分布。

### 3 结 论

(1) 在 30% ECR、50% ECR 和 75% ECR 3 种工况和集箱入口干度 0.7 ~ 0.95 范围内, 实验测得各支管中的流型基本上是环状流型和带纤维的环状流型, 与常使用的文献 [7] 中图 2-3 所示的流型图预测的环状流型一致。600 MW 超临界直流锅炉在变压运行时, 气-液两相流在水冷壁管中间分配集箱的干度为 0.8 以上, 垂直水冷壁管内的流型一般为环状流。所以, 用水-空气模拟 600 MW 超临界锅炉中间分配集箱垂直水冷壁管内的流型与实际运行时的流型基本一致。

(2) 随着负荷的增加, 气液两相流通过分配集箱的流量分配均匀性增加。但总的来说, 在 3 种工况下, 空气-水两相流通过分配集箱在并联支管内的流量分配相对较为均匀, 流量偏差绝大多数情况下不大于 10%。

#### 参考文献:

- [1] 戴佩琨, 程钧培. 火力发电新技术发展[J]. 发电设备, 2004, 1: 1-6.
- [2] 杨 军, 朱才广. 螺旋管圈直流锅炉水平混合集箱汽水分配特性的试验研究[J]. 动力工程 1993, 13(2): 43-47.
- [3] COLLIER J.G. Single-phase and two-phase flow behaviour in primary circuit components // Proceeding of NATO Advanced Study Institute on Two-phase Flow and Heat Transfer [C]. Istanbul, Turkey, 1976. 89-96.
- [4] ZHU C. An investigation on distribution characteristics of steam-water mixture through intermediate distribution header of once through boiler // Chen Xue Jan, Nejat T. Two-phase Flow and Heat Transfer [C]. Veziroglu; Hemisphere Publishing, 1984. 445-452.
- [5] 汪 军. 分配集箱中的汽液两相流动及分配特性的研究[D]. 西安: 西安交通大学, 1987.
- [6] IAHEY R T JR. Current understanding of phase separation mechanisms in branching conduits [J]. Nuclear Engineering and Design, 1986. 95 (2): 145-161.
- [7] 林宗虎. 气液两相流和沸腾传热[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2003.

(编辑 滨)

jing, China, Post Code: 100011), HUANG Xiang, XU Yan-qiang (China Huadian Engineering (Group) Co. Ltd., Beijing, China, Post Code: 100044)// Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2009,24(1). - 73 ~ 76

A direct air-cooled condenser consists of several direct air-cooled elements. A study of its elements is of major importance. Based on a practical engineering project, the flow and heat transfer performance of a 135 MW direct air-cooled condenser sample unit has been studied. By using a numerical heat transfer (NHT) software Fluent, a numerical simulation has been performed of the air-cooled sample unit at its design and test operating conditions. The reason why the simulation results differ from the design and test data was analyzed. The simulation, analysis and study of the external air speed and temperature field of the direct air-cooled condenser can be helpful for the optimized design of the systems in question. **Key words:** direct air-cooled condenser, sample unit, numerical simulation, optimized design

常规工况下多弯头数脉动热管运行性能的实验研究 = **Experimental Study of the Operation Performance of Multi-elbow Pulsating Heat Pipes at Conventional Operating Conditions** [刊, 汉] / YANG Hong-hai, WAN Qing, HAN Hong-da (College of Environment Science and Engineering, Donghua University, Shanghai, China, 201620) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2009,24(1). - 77 ~ 80

Two groups of pulsating heat pipes consisting of 40 thin copper tube elbows with an inner diameter of 1 and 2 mm respectively were designed. Two loop types, closed or open, can be made available by opening or closing a valve in the pipe. With R123, water and alcohol serving as working media respectively, liquid filling rate ranges from 15% to 95% and the installation angle can be regulated freely. Through tests, analyzed and compared was the influence of the inner diameter, working medium, liquid filling rate, heating angle and loop type of the multi-elbow pulsating heat pipe on its startup and heat transfer performance at conventional operating conditions. **Key words:** pulsating heat pipe, number of elbows, loop type, operation performance, influencing factor

超临界变压运行直流锅炉中间集箱分配特性的试验研究 = **Experimental Study of Intermediate Header Flow Distribution Characteristics of a Supercritical Once-through Boiler Operating at Variable Pressures** [刊, 汉] / ZHU Yu-qin (Technology Research Center of Petroleum Refinery Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an, China, Post Code: 710065), BI Qin-cheng, CHEN Ting-kuan (National Key Laboratory on Multi-phase Flows in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2009,24(1). - 81 ~ 84

In the light of the structural and parameter features of an intermediate header serving as a transition connection between the spiral coil-tube water-wall at the lower part of the furnace and the vertical tube water-wall at the upper part of the furnace in a 600 MW supercritical boiler, the distribution characteristics of gas-liquid two-phase flows in the intermediate header of the supercritical boiler at a load of 35% ECR (Economical Continuous Rating), 50% ECR and 75% ECR were simulated by using an air-water test loop. Through observations and a high-speed photographic method, the flow pattern in parallel branch tubes of a distribution header was measured and analyzed. By using a quick-closing valve and friction resistance method, measured respectively were the phase and flow distribution among various branch tubes. The test results show that at three operating conditions and with inlet dryness ranging from  $x = 0.7$  to 0.95, the flow distribution of the air-water two-phase flows passing through the parallel branch tubes of the distribution header is comparatively uniform, and in most cases, the flow rate deviation is less than 10%. **Key words:** supercritical once-through boiler, header, distribution characteristics, air-water two-phase flow

氧燃烧方式下煤粉锅炉辐射传热特性分析 = **Thermodynamic Calculation of Radiative Heat Transfer in a Coal-**