

向心汽轮机与热电冷三联产 ——热电联产工程系列报告之三

虞洪庆 叶兆谷 强国芳

(哈尔滨船舶锅炉涡轮机研究所)

[摘要] 本文首先介绍新近开发的纯径流式向心复速级背压汽轮机的性能、结构及若干技术细节。然后对这种背压汽轮机在热电联产(含供冷)工程中的典型应用方案进行探讨。

关键词 向心汽轮机 复速级 热电冷三联产

分类号 TM611

1 前言

三年前,我们首次推出了节能型径向——轴向式向心背压汽轮机,其特点是高转速、高效率、全周进汽、双级方案和快装式结构^[1]。随着热电联产工程和节能技术的发展,自1993年下半年起又着手开发了一型纯径流式向心复速级背压汽轮机。该机的工作转速适中,效率适中、可以部分进汽、单转子复速级方案和快装式结构^[2]。

在此期间,为加强基建和技改项目的节能审查,保证工程项目合理利用和节约能源,国家有关部门以文件形式正式规定:凡“单台容量10吨/时及以上、年运行4000小时及以上的工业锅炉应采用热电联产”。

我们在文献[3]中曾经指出,根据中国国情,以燃气轮机为主机实现热电联产尚难很快提上日程,而采用锅炉及汽轮机为主的方案可使热电联产的热/电比值在0~25的范围内变化(其中抽凝式汽轮机的热电比约0

~8,抽背式汽轮机的热电比则约为5~25),也就是说,藉此可以大量供热以适应各种工艺过程及取暖制冷的需求。

即使是柴油机发电装置,根据我们的估算,只要电功率在3000kW以上,只是利用气缸冷却水及排气的余热,就有可能获得足以发出250kW以上电力的低压蒸汽(当进行补燃时出力更大),用此规格和数量的蒸汽进行冷暖空调,也是大有可为的。

热电冷三联产仍属于热电联产的范畴,但又是后者的发展。

城市的中心热电站,既供热又发电,再配置溴化锂吸收式制冷机,不但具有节电、节能和调节峰谷负荷的作用,还可改善人们的工作和生活条件。

此外,诸如水泵、风机和压缩机等辅机的共同发展方向乃是高速、高效和小型化。向心汽轮机乃是可与它们匹配的更新换代节能产品。有时这被称为“热动冷三联产”^[4]。

实现热电冷三联产可以利用各种不同形

收稿日期 1994-11-28

本文联系人 强国芳 男 61 教授级高工 214151 无锡市 117 信箱

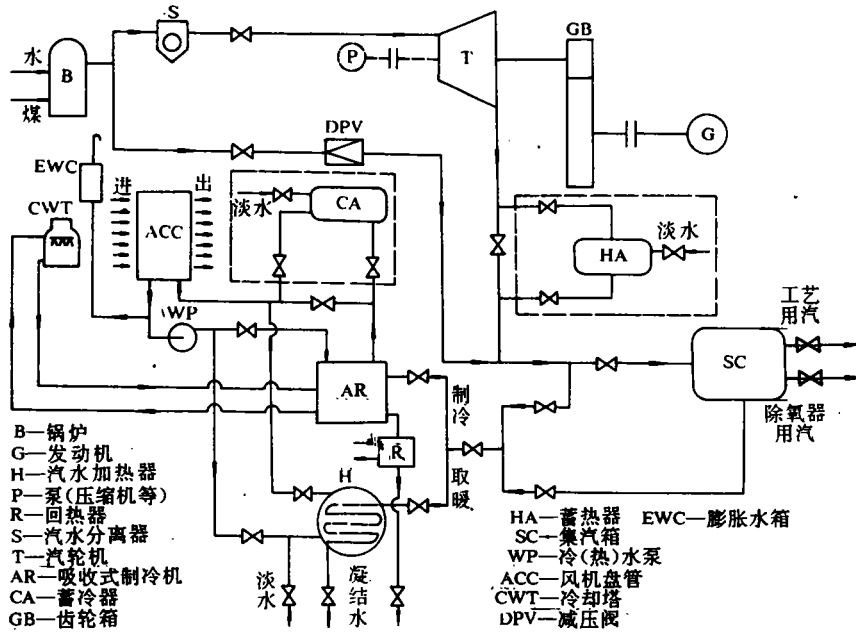


图1 利用向心式汽轮机实现热电冷三联产

式的发动机,关键是对低压和次中压蒸汽参数和功率在 1500~3000 kW 以下的机组来说,向心式汽轮机具有尺寸紧凑、重量轻、安装布置简单和热效率高等诸多优点。因此,热电联产工程需要有这些性能的新机型,而向心汽轮机组的开发又开始促进工程的起步。

图1示有利用背压式向心汽轮机实现热电冷或热动冷三联产的原则性示意图。

对于用锅炉来提供蒸汽和热水的各种工业和民用场合,(向心)汽轮机利用压差发电和排汽供热,部分热量又作为热源通过溴化锂制冷机来制冷空调,其节电和节能效果已为众多文献和实践所证实^[5,6]。

根据较保守的估算,对于 $P_0 = 1.275$ MPa, $t_0 = 300$ °C, $G = 10$ t/h 及 $P_2 = 0.39$ MPa ($t_2 = 218$ °C) 的 RFT-400 型向心汽轮机,除发电 385 kW 外,其排汽可制冷 6977 kW。当环境温度 36 °C,空调时室内温度控制

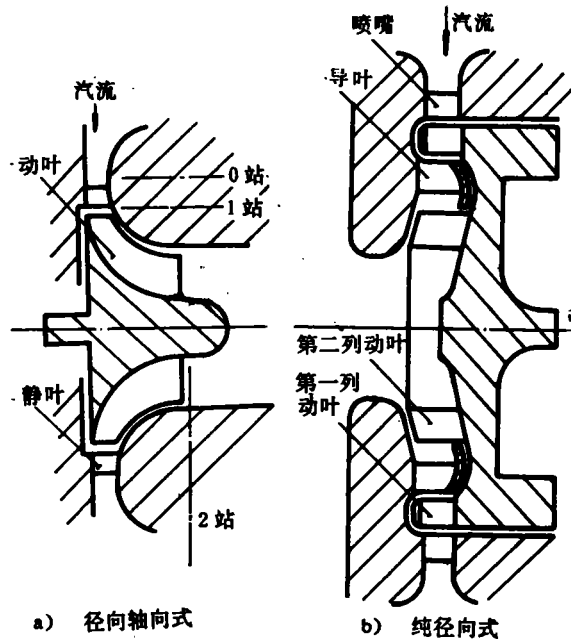


图2 两型向心汽轮机的通流部分简图

表1 两型向心汽轮机的主要工作参数

项 目	符 号	单 位	XQ—B0.4 13/5	RFT—400
最大电功率	N_{\max}	kW	400	750(1000)
最大蒸汽量	G_{\max}	t/h	10	20
汽轮机最高转速	$n_{1\max}$	r/min	25 000	8 000
发电机转速	$n_{2\max}$	r/min	3 000	3 000/1 500
进汽压力	P_0	MPa	1.275	2.35/1.275
进汽温度	t_0	℃	300	390/300
排汽压力	P_2	MPa	0.49	0.29/0.39/0.49 0.785/0.98
排汽温度	t_2	℃	210	270 ~ 300/190 ~ 250
总体尺寸	$L \times B \times H$	m	3.4 × 2.5 × 2.2	3.4 × 2.0 × 2.2
总重	W	t	5	5.5($n_2 = 1 500$ r/min) 4.5($n_2 = 3 000$ r/min)

28℃时,可供宾馆、大厦、商店和居民住宅60 000 m²的建筑面积空调之用。同样,在冬季取暖时,上述排汽供60 000 m²建筑面积亦绰绰有余(假定户外温度为0℃,室内回风温度为21℃,并计及了汽—水热交换器的效率与其它损失),可见制冷空调与取暖的用热量基本是平衡的。

下面,再分别对向心复速级背压汽轮机及近年来实际接触到的几个典型热电联产场合进行一些讨论和分析。

2 RFT—400 向心复速级背压汽轮机

图2b示有向心复速级汽轮机通流部分的简图(向心压力级的简图则示于图2a,以资比较)。该机只有一个外径为400 mm的轮盘,其上有两列动叶,整个叶轮系由锻件整体铣切加工而成。静子部分则由喷嘴和导叶组成,它与叶轮组合成所谓的“向心复速级”蒸汽由轮周径向往中心流动。

向心汽轮机的一般特点已在文献

[1][2]中作了详细阐述。对于向心复速级来说,其结构更为简单紧凑。在相同的蒸汽参数和流量下,向心复速级的热效率约比轴流式的高出15%左右,一般可达(60~65)%,但比向心压力级则低出(10~15)%左右。

表1示有两型向心汽轮机的主要工作参数。RFT—400系列的最大电功率为750 kW(1 000 kW),汽轮机最高转速为8 000 r/min,发电机的转速则有3 000和1 500 r/min两档,可由用户任选。此外,向心复速级设计得可适用于次中压的蒸汽参数($P_0 = 2.35$ MPa, $t_0 = 390$ ℃),蒸汽流量可为20 t/h,因此,最适用于次中压和低压工业锅炉的节能改造,变单纯供热为热电联产以至热电冷三联产。

RFT—400向心复速级汽轮机是系列化设计,对气动热力参数进行了优化选择。一般情况下,只要改变各列叶型的节距和安装角或叶高和部分进汽度,即可适应不同参数的变化发出相应的功率($N_{\max} = 750 \sim 1 000$ kW)。仅在特殊情况下才需另选叶型或改变工作转速。

图3示有两组计算曲线,分别给出在:

$P_0 = 1.275 \text{ MPa}, t_0 = 300 \text{ }^\circ\text{C}, G = 10 \text{ t/h}$
 及 $P_0 = 2.35 \text{ MPa}, t_0 = 390 \text{ }^\circ\text{C}, G = 14 \text{ t/h}$ 的条件下,该机可以发出的电功率随背压的变化关系(发电机效率取为 0.94)。图中的虚线是折算的数据。

有关 RFT-400 向心汽轮机的机械、调节、保安、附件及结构布置等技术细节和考虑原则,基本上与文献[1]中对 XQ-B0.4 13/5 相近。图 4 为该汽轮机发电机组的外形布置简图。

RFT-400 机组在前面提及的参数和功率范围内,汽轮机排汽温度分别在 $190 \sim 250 \text{ }^\circ\text{C}$ 及 $270 \sim 300 \text{ }^\circ\text{C}$ 的范围内变化,完全满足取暖或制冷的要求,适合进行热电冷或热动冷三联产。

3 几个典型用户的工程分析

机组的开发促进了工程的起步。在机组设计和试制阶段,我们就已开始接触若干用

户,包括现场调查、方案探讨和粗略的经济分析等,结论都比较乐观和可行。下面是三个比较典型的应用场合(制冷空调要到第二阶段才予考虑)。

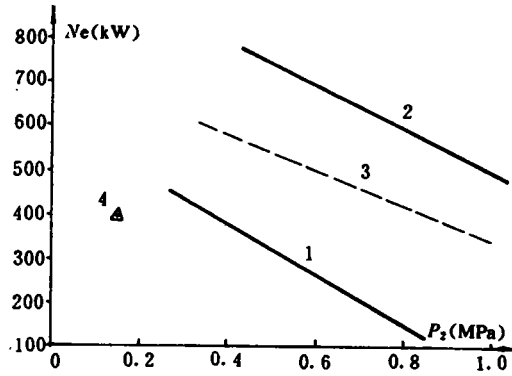


图 3 RFT-400 向心汽轮机在不同背压下的电功率

- 1. $P_0 = 1.275 \text{ MPa}, t_0 = 300 \text{ }^\circ\text{C}, G = 10 \text{ t/h}$
- 2. $P_0 = 2.35 \text{ MPa}, t_0 = 390 \text{ }^\circ\text{C}, G = 14 \text{ t/h}$
- 3. $P_0 = 2.35 \text{ MPa}, t_0 = 390 \text{ }^\circ\text{C}, G = 10 \text{ t/h}$
- 4. $P_0 = 0.98 \text{ MPa}, t_0 = 245 \text{ }^\circ\text{C}, G = 8.5 \text{ t/h}$

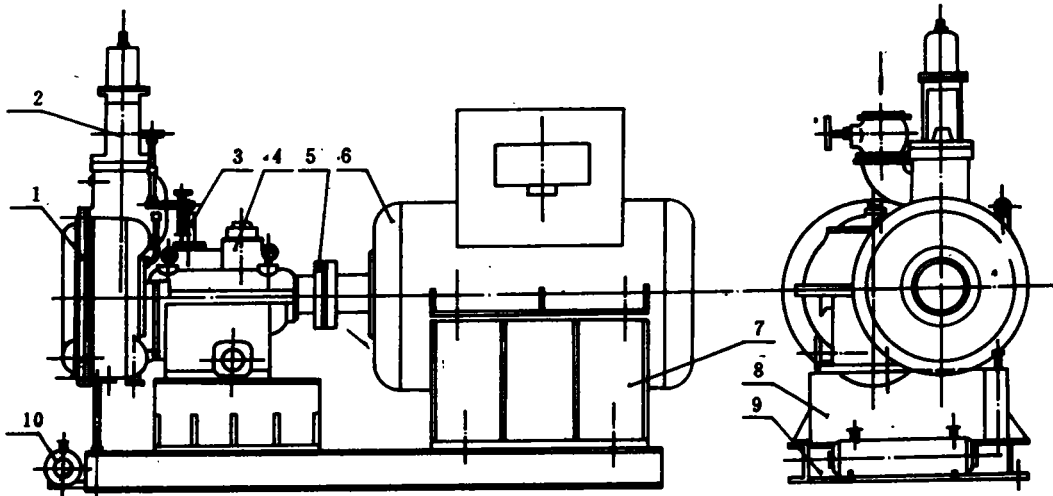


图 4 RFT-400 向心式汽轮机发电机组的外形布置简图

- 1. 汽轮机 2. 油动机 3. 调速器 4. 减速箱 5. 联轴器
- 6. 发电机 7. 电机座 8. 油箱系统 9. 底座 10. 冷油器

3.1 热电联产与热电分产(锅炉单纯供热、柴油机单独发电)的方案比较

江苏某明胶化工厂实行三班制,工艺过程需用 0.49 MPa 的饱和蒸汽,由两台 4 t/h 快装式低压工业锅炉供汽,正常运行供汽压力为 0.785 MPa。因电网经常拉电,厂方另配 2×100 kW 柴油发电机备用供电。但厂方长期缺电 400 kW 左右。该地区燃煤热值 23 023 kJ/kg,每吨 260 元,柴油每吨 2 500 元,电价每度 0.40 元。

原方案是购置一台 500 kW 的柴油发电机组,实行热电分产。购置机组及有关费用总计约 58.6 万元。因机组油耗 $210 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$,故 24 小时共耗油 6 300 元,发电 12 000 度。即使不计其它运行、维护、管理及折旧费用,每度电成本即达 0.525 元,为高价电。

采用 RFT—400 向心汽轮机时,可发电 385 kW(排汽温度 208℃),即每小时产值为 $385 \times 0.40 = 154$ 元/时。考虑机组单价 55 万元,加上过热器、汽水分离器、减温减压装置、厂内配电线路及其它土建等费用共需初投资约 100 万元。此外,锅炉从现行参数($P = 0.8826 \text{ MPa}$, $t = 174.53 \text{ }^\circ\text{C}$, $i = 2772 \text{ kJ/kg}$)改变到汽轮机要求的 $P = 1.373 \text{ MPa}$, $t = 310 \text{ }^\circ\text{C}$, $i = 3063 \text{ kJ/kg}$ 需要多烧煤,但汽轮机排汽焓值要比原锅炉供汽的焓来得高。综合起来,2 台 4 t/h 锅炉每小时增加烧煤量 88.7 公斤,折合 23.05 元。故发电收益 130.95 元/时,发电成本仅为 0.06 元,远比分产方案合算(与柴油机方案一样,不计初投资及燃料以外的其它费用)。

因此,采用向心复速级背压汽轮机实行热电联产的方案,静态投资回收期为 $1\ 000\ 000/(130.95 \times 24) = 318$ 天,远远低于我国节能项目回收期应小于 3 年的期限规定。

3.2 热电联产与单纯供热方案的比较

山东某酒厂已安装有一台 20 t/h 的次中压工业锅炉,汽压 2.45 MPa,汽温 400℃,向

其酒精车间的蒸煮、发酵和蒸馏过程提供 0.785 MPa 的蒸汽。生产基本上是三班制,全年热负荷均匀。全厂各种生产用机械设备的功率约 1000 kW,电负荷亦均匀。由外单位供应的电每度 0.32 元。由于近年来电力供应渐趋紧张,厂方决心先实行热电联产,然后解决空调问题。

该厂锅炉单纯供汽时,平均蒸发量仅为 12~14 t/h,外售蒸汽每吨核价 55 元。该地区燃用兖州煤,发热量高于 20935 kJ/kg,进价每吨仅 180 元。

在技术方案中,选用 $G = 14 \text{ t/h}$, $P_0 = 2.35 \text{ MPa}$, $t_0 = 390 \text{ }^\circ\text{C}$ 及 $P_2 = 0.785 \text{ MPa}$ 。此时 RFT—400 向心汽轮机可发电 $N_e = 600 \text{ kW}$,排汽温度 $t_2 = 290 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

因锅炉及热力系统等基本不需改造,也不需另搞土建,进行热电联产改造的主要项目是添置向心汽轮机、加设旁通蒸汽管、考虑内部并网(400 V, 1000 kVA)等,估算增加的总投资为 75 万元。

在单纯供热(汽)时,锅炉只在 0.885 MPa 下供应 14 t/h 蒸汽,此时的耗煤量为

$$G_c' = [(662.1 - 20) \times 14\ 000] / (0.70 \times 5000) = 2568.4 \text{ kg/h}$$

而在热电联产时,锅炉供应的是 14 t/h 过热蒸汽($P_0 = 2.45 \text{ MPa}$, $t_0 = 400 \text{ }^\circ\text{C}$),此时的燃煤量为

$$G_c = [(774.4 - 20) \times 14\ 000] / (0.75 \times 5000) = 2816.43 \text{ kg/h}$$

即联产时多烧煤 $G_c = G_c' - G_c'' = 248.03 \text{ kg/h}$,相当于增加燃料费用 $0.248 \times 180 = 44.65$ 元/时。

此外,由于联产时要支付增加的运行维修人员的工资和奖金,以及考虑新增设备的维修和折旧费用,经估算,上述三项费用折合 12.28 元/时,故热电联产增加的总支出为 $44.65 + 12.28 = 56.93$ 元/时。

但联产时因发电 600 kW,故增产 $600 \times 0.32 = 192$ 元/时,纯收益则为 $192 - 56.93 = 135.07$ 元/时。因酒厂每年夏季 7、8 月停产,故一年运行 7272 小时,年总收益可达 982 229.04 元。故联产增加投资 75 万元可在 $750\,000/982\,229.04 = 0.7636$ 年,即在 231.4 个运行日之后全部回收。比江苏某明胶化工厂的情况更为有利。

但是实际上,单纯供汽时锅炉出口 0.885 MPa 压力下的饱和蒸汽焓仅为 2772 kJ/kg,利用向心汽轮机发电后 0.785 MPa,290℃ 条件下蒸汽焓值达 3035 kJ/kg,两者差 264 kJ/kg。这意味着联产时比单纯供热时可省煤 252 kg/h,折合 45.36 元/时。故售汽时如从按重量计价改为按实际焓值计价,则投资回收期还可大大缩短: $750\,000 / [(192 - 56.93 + 45.36) \times 7272] = 0.5716$ 年,即 173.2 个运行日。

3.3 热电厂除氧器由减温减压供汽与由向心汽轮机发电后供汽方案的比较

福建某化工厂的热电厂用 0.98 MPa、245℃ 的蒸汽节流到 0.147 MPa 后向其除氧器供汽加热,流量为 8.5 t/h。按照图 1 所示,我们专门设计了向心汽轮机以利用差压发电。如图 2 所示,每小时可多得电功率 400 kW·h,按每千瓦时电 0.35 元计费时,节约电费 $400 \times 0.35 \times 24 = 3360$ 元/日。同样考虑一年中有两个月停机检修,一年可得益 101 8000 元。但因此而增加的工作人员工资奖金及设备维修、折旧费用估计约每年 125 280 元,净收益为 892 720 元。故总投资 750 000 元可在 0.84 年即 307 天内回收。

需要说明的是,在该向心汽轮机的工作参数下,由于焓降较大,特别是第一级喷嘴是在超音速下工作,其型线需作精心设计或选择以提高其效率。本机在这方面已做了相应的工作,功率也有一定的设计裕量。

4 结束语

通过本文的讨论和分析表明在所有情况下,热电联产(及今后的三联产)均能带来明显的效益,投资回收也相当快。除江苏某明胶化工厂因进度等原因已购置柴油发电机组外,山东某酒厂和福建某化工厂均已采纳并开始实施向心汽轮机方案。该两项工程将分别于 1995 年内正式投运。

仅从汽耗和热耗指标来看,我们前已开发的 XQ-B0.4 13/5 径向轴式向心汽轮机显得更为优越一些,但 RFT-400 纯径向式机组具有更大的灵活性(指蒸汽参数及功率范围)。此两型机组在参数、功率档次、结构特点和经济性等方面都适合于推动我国工业锅炉的节能改造和实现热电(动)冷三联产工程,因而是具有吸引力和应用前景的。

刘锦心、金泳民、黄瑞芬等同志参与了向心式汽轮机的设计计算工作。作者也感谢李名远同志的通力合作和方洪祖、吉桂明、梅自珍等同志的热心帮助。

参 考 文 献

- 1 虞洪庆,叶兆谷,强国芳. 节能型向心式蒸汽轮机——热电联产工程系列报告之一. 热能动力工程,1991(6)
- 2 虞洪庆,叶兆谷,强国芳. New Energy Saving Centripetal Steam Turbines. International Conference, Turbomachinery ASIA' 94, July 20~22, 1994, Singapore
- 3 强国芳. 英国和欧州的热电联产——热电联产工程系列报告之二. 热能动力工程,1994(3)
- 4 林启修. 热动冷联产在制药厂的实践. 热电冷学术交流会议论文汇编,中国电机工程学会热电专业委员会,武汉,1994年10月
- 5 梅自珍. 热力学第二定律效率和企业热电改造经济性浅析. 常州节能,1987(1)
- 6 张家驹. 热电冷联供节电又节能. 热电冷学术交流会议论文汇编,中国电机工程学会热电专业委员会,武汉1994年10月

向心汽轮机与热电冷三联产——热电联产工程系列报告之三 = Centripetal Turbines and Simultaneous Production of Heat Energy, Electricity and Refrigeration-the Third In a Series of Reports Concerning the Cogeneration of Heat and Electricity [刊, 中] / Yu Hongqing, Ye Zhaogu, Qiang Guofang (Harbin Marine Boiler & Turbine Research Institute) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1995, 10(3). -129-134

The authors give a description of the performance, construction and certain technical details of a recently developed radial-flow centripetal back-pressure turbine with a Curtis stage, followed by an exploratory study of some typical engineering applications of such turbines in the cogeneration of heat and electricity (including refrigeration). Key words, centripetal steam turbine, Curtis stage, simultaneous production of heat energy, electricity and refrigeration

射水抽气器改进的方法 = A Method for the Improvement of Water-jet Air Ejectors [刊, 中] / Xiao Hancal (Changsha Electrical Power Institute) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1995, 10(3). -135-139

The structural design of certain low-efficiency water-jet air ejectors is analysed with its irrationality being pinpointed. On this basis an improved method is proposed. The author explained why a long throat tube and multiple nozzles should be utilized in preference to a short throat tube and single nozzle in order to enhance air extraction efficiency. In conclusion, by citing some specific examples presented in this paper are the design method, procedures for its improvement and comparison of results before and after the introduction of the improved design. Key words: air ejector, nozzle, throat tube, efficiency

百叶窗煤粉浓缩器气流和静压分配问题 = On the Flow Rate and Static Pressure Distribution of a Louvered Pulverized Coal Concentrator [刊, 中] / Xing Chunli, Qin Yukun (Harbin Institute of Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1995, 10(3). -140-143

The exit area ratio and blade coverage ratio of a louvered pulverized coal concentrator which exercise a major influence on its performance are studied by the authors as to their effect on the flow rate and static pressure distribution of the said concentrator. The study results show that for a given structural design of the louver there exists an exit area ratio which can ensure a uniform distribution of the flow rate and static pressure between two exits of the louvered pulverized coal concentrator. Key words: louver, concentrator, distribution

矩形平壁循环流化床冷态流动特性研究 = A Study on the Cold-state Flow Characteristics of a Rectangular Flat Wall Circulating Fluidized Bed [刊, 中] / Huang Suhua, Lu Jidong, Qian Shizhi, et al (Central China University of Science and Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1995, 10(3). -144-148

With air serving as fluidized medium and sand (0.1-0.45mm) as bed material the concentration distribution of axial and radial particles has been separately determined on a circulating fluidized bed cold-state test rig through the use of a reflexive optical fiber probe. A special study is conducted of the effect of the rectangular section circulating bed edge angle on the gas-solid dual-phase flow and the radial particle concentration distribution. Also studied is the gas-solid flow in the neighborhood of the wall surface. An sequential analysis method has been introduced to establish a parameter model for the sampled data. The experimental results can play a significant role in achieving an in-depth understanding of the gas-solid dual-phase flow in the circulating fluidized bed. Key words: circulating fluidized bed, rectangular section, particle concentration, AR model

循环流化床燃烧炉膛压降与轴向固体浓度 = The Combustion Furnace Pressure Drop of a Circulating Fluidized Bed and Axial Solid Concentration [刊, 中] / Li Yintang, Li Jun, Che Defu (Xi'an Jiaotong University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1995, 10(3). -149-153