

W 型火焰锅炉冷态空气动力特性的测试研究

车 刚, 徐通模, 许卫疆, 惠世恩

(西安交通大学 热能工程系, 陕西 西安 710049)

摘 要: 针对引进的配备直流缝隙式燃烧器的法国 Stein 公司 360 MW 的 W 型火焰锅炉进行了冷态模型的空气动力特性研究。利用热线风速仪测量炉内的流场速度, 得出了不同工况下炉内 W 型气流的流场图, 并对不同工况流场的气流速度分布规律、炉内气流的充满度、气流行程、炉膛出口处的速度偏差等进行了分析, 研究了炉内空气动力场的特性和变化规律, 测试了 W 型火焰锅炉火焰短路与炉膛出口速度偏差的性能。

关 键 词: W 型火焰; 煤粉锅炉; 火焰短路; 速度偏差; 冷态模型实验; 空气动力场

中图分类号: TK223. 23 文献标识码: A

符号说明

L ——燃烧器中心至冷灰斗下缘的距离(燃烧室)或炉膛出口转弯处至顶部的距离(燃尽室);

X —— X 方向无量纲长度, $X = x/L$; Y —— Y 方向无量纲长度

$Y = y/L$; 1K——一次风; 2K——二次风; 3KS——上三次风;

3KX——下三次风; FK——乏气; W_1 ——一次风喷口风速;

W_2 ——二次风喷口风速; W_3 ——上三次风喷口风速; W_4 ——下三次

风喷口风速; W_5 ——乏气喷口风速; F_1 ——一次风喷口面积;

F_2 ——二次风喷口面积; W_x —— x 方向气流速度; W_y —— y 方向气流

速度; M_1 ——一次风动量流率; M_2 ——二次风动量流率;

M_3 ——上三次风动量流率; M_4 ——下三次风动量流率; M_5 ——乏气

动量流率; V_{yp} ——炉膛内向下气流的平均速度; V_{\max} ——炉膛内向下

气流的无量纲最大速度, $V_{\max} = (W_y)_{\max}/W_{ZS}$; V_{\max} ——炉膛出口处某

$y-z$ 截面上的速度最大值; V_{cp} ——炉膛出口处某 $y-z$ 截面上的

速度平均值; V_{\max} ——炉膛出口处某一点 (X, Y) 沿 z 方向的速度最大

值; V_{cp} ——炉膛出口处某一点 (X, Y) 沿 z 方向的速度平均值;

W_{ZS} ——拱部风折算速度, $W_{ZS} = \sqrt{\frac{F_1 \times W_1^2 + F_2 \times W_2^2}{F_1 + F_2}}$;

CH ——向下有效气流的无量纲穿透深度, 是表示向下有效气流在燃烧室内深入程度的一个参数, 其数值等于燃烧器中心至向下有效气流转折点的垂直距离;

M ——速度不均匀系数, $M = V_{\max}/V_{cp}$; LM ——局部速度不均匀系

数, $LM = V_{\max}/V_{cp}$; ϵ ——充满度, $\epsilon = \sum \Delta F / F_0$; $\sum \Delta F$ ——有效气流区域所占的炉膛截面积, F_0 ——炉膛的截面积($x-y$ 截面, 取单位宽度);

有效气流是指炉膛内速度比 $\sqrt{W_x^2 + W_y^2}/W_{ZS} \geq 0.2$ 的气流

坐标方向说明: 本文中把高度方向作为 y 方向, 炉深方向为 x 方向, 炉宽方向为 z 方向, 并且对不同的问题有两个坐标系, 具体的坐标方向如图 2 中所示。

本文中各物理量皆采用国际单位制。

1 前言

国内的电站锅炉在燃烧无烟煤时主要选用固态排渣煤粉炉并采用直流燃烧器四角切圆燃烧方式, 在运行中普遍存在着着火不好、燃烧不稳定、燃料的灰熔点低时易结渣、飞灰可燃物含量高及低负荷燃烧必须投油等问题; 电厂在运行中如何使锅炉安全经济的燃烧无烟煤等低反应能力的煤种是电力工业迫切需要解决的问题。而 W 型火焰锅炉由于采用了煤粉浓缩、长火焰、分级送风燃烧、敷设卫燃带等技术措施, 有利于燃料的着火、火焰的稳定以及燃料的燃尽, 在煤种适应性、低负荷稳燃能力、飞灰燃尽率等方面显示出极大的优势。

W 型火焰锅炉在燃用无烟煤方面的应用前景无疑是广阔的, 但是国内外对于大型 W 型火焰锅炉的炉内空气动力场系统的理论、实验研究还远远不够, 国内的企业也还没有很好地掌握如何获得最佳燃烧性能; 而合理的炉内空气动力场对锅炉的燃烧过程十分重要, 燃烧器各次风与前后墙各级风的配合直接影响到炉内空气动力场的好坏, 若配风不当, 可能引起炉内空气动力场恶化, 引起火焰短路, 过热器超温、炉膛喉口部位结渣、火焰冲墙、冷灰斗严重结渣等问题, 严重威胁锅炉的安全运行。本文根据相似模化理论, 针对珞璜电厂引进的 W 型火焰锅炉, 制造了 1:20 的模型, 进行了冷态流场的模化实验研究, 检验 W 型火焰锅炉是否容易发生火焰短路以及炉膛出口速度偏差的大小, 为锅炉的安全运行提供科学的依据。本文的研究结果对指导国内外大型 W 型火焰锅炉的设计与安全运行有比较重要的参考价值。

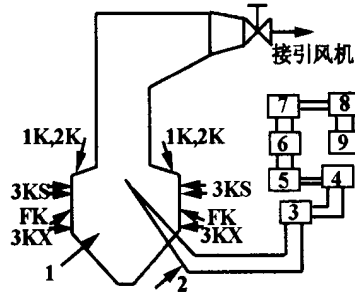
2 实验技术与实验系统

锅炉炉膛在进行空气动力场模化研究时, 由于其

自身结构的复杂性,完全满足模型实验所应遵守的条件是无法实现的,只能作相对可靠的等温模化,并根据相似原理遵守以下三个原则:

- (1) 模型与原型保持几何相似;
- (2) 保持气流流动状态进入第二自模化区;
- (3) 燃烧器各喷口的气流动量流率比相等即边界条件相似。

条件相似。



1—实验台;2—热线探头及电缆;3—恒温热线风速仪;4—关联器;5—均方根表;6—A/D转换器;7—计算机采集系统;8—打印机;9—打印结果

图 1 实验系统图

本实验始终都是在严格遵守这三个原则下进行的。

实验模型所采用的原型为珞璜电厂的W型火焰锅炉,将原型的结构尺寸按1:20的比例缩小得到模型各部分的几何尺寸;燃烧器原型是直流缝隙式燃烧器(一、二次风喷口沿炉宽方向相间

布置),模型喷口的尺寸均按几何相似1:20的比例严格缩小得到。

在本次实验中,作者现场测出了W型火焰锅炉的临界雷诺数 $Re_{lj} = 45\ 000$,并且实验的各个工况均保证炉膛截面处的 Re 数大于此 Re_{lj} ,所以本实验所测

表 1 工况设置表

工 况	拱部风速 / $m \cdot s^{-1}$		前后墙风速 / $m \cdot s^{-1}$			各次风动量流率比				
	一次风	二次风	上三次风	乏 气	下三次风	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5
	W_1	W_2	W_3	W_5	W_4					
1	7.68	28.02	15.37	30.97	24.67	1:	18.93:	0.21:	3.65:	1.37
2	7.68	31.54	20.99	35.97	32.98	1:	23.99:	0.39:	4.92:	2.44
3	7.68	28.02	23.05	35.97	27.85	1:	18.93:	0.47:	4.92:	1.74
4	7.68	28.02	34.94	38.0	45.0	1:	18.93:	1.08:	5.49:	4.54

3.1 炉内流场图分析

工况 1 是实验的标准工况,是由电厂的实际运行工况参数模化而来,工况 2、3、4 的拱部风与前后墙风动量流率比都比工况 1 小,并且动量流率比依次减小。

从图 3a 中可以看出,作为运行工况的工况 1,其炉内气流的整体分布还是较为合理的,气流的行程较长,无量纲穿透深度 $CH = 0.44$,基本到达了冷灰斗的上缘,充满度较好,不存在火焰短路的问题;拱部的一、二次风在向下流动的过程中与前后墙所布置的三

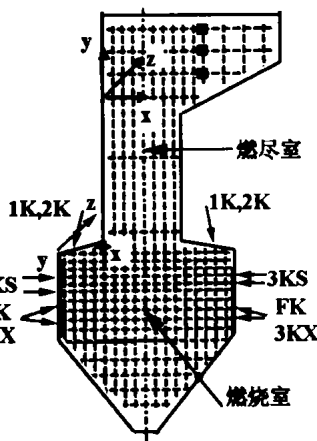


图 2 测点布置图

试的工况均处于第二自模化区。

为了进行实验研究,建立了冷态模型实验台,实验系统如图 1 所示,实验台为钢架结构,采用三维封闭式冷态模型,模型两侧墙全为有机玻璃,一面用来观察气流方向,另一面布置测孔,测孔位置如图 2 所示,共有 284

个测孔。模型内流动介质为空气,水平烟道与引风机入口管道连接,实验时启动引风机,空气由各喷口进入炉膛,整个系统为负压系统。

实验采用的主要设备有:1050 A 型双通道恒温热线风速仪及配套的单丝探头,数据采集板 (IMP3539-IC)、计算机、打印机 (EPSON LQ-150K)、电子微压计 (ZEPHYR) 以及引风机等。

3 实验工况设计及结果分析

实验的工况设置如表 1 所示:

次风和乏气混合,在冷灰斗上缘处转弯,沿炉膛的中轴线上,形成对称的 W 型火焰。但气流由燃烧器喷出后直接冲向前后墙,会引起前后墙上部的严重结渣和高温腐蚀;前后拱的下部有明显的烟气回流,形成两个比较对称的涡旋,并且回流烟气速度较大,会冲刷前后拱,可能引起喉口部位的严重结渣;在燃尽室的转弯处存在死滞区,充满度差,有明显的烟气短路。

工况 4 是测试火焰短路的一种典型工况,在这种工况下,前后墙风的风速已经很大,动量流率比工况 1 增加一倍有余,射流的刚性最弱,从图 3d 中可以看

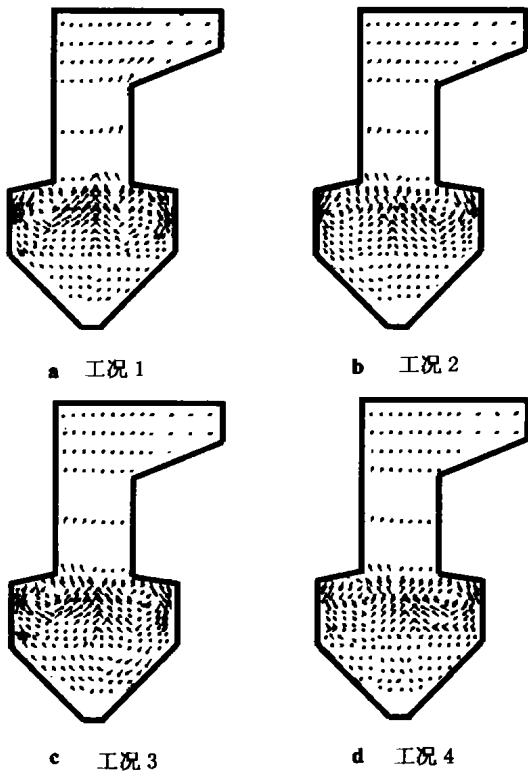


图 3 工况 1 至工况 4 流场图

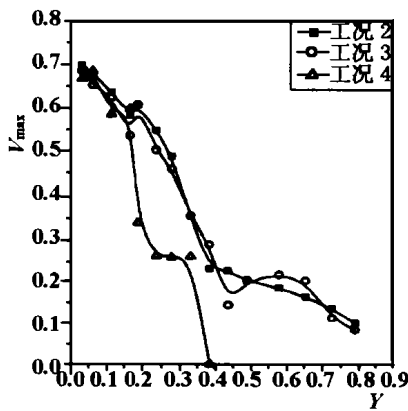


图 4 最大速度衰减曲线

出, 气流在下冲的过程中受较强大的三次风、乏气的作用, 远未冲到冷灰斗的上缘就已转弯向上, 气行程在三个工况中是最短的, 燃烧室上半部的充满度很好, 下半部的充满度则较差, 即使这样, 这时仍然不存在火焰短路的问题, 无量纲穿透深度达到 $CH = 0.34$, 气流仍形成对称的 W 形, 并且在实际运行中由于前后墙风远不能达到这种程度, 这种情况是不太可能发生的, 即使发生了也不会造成火焰短路, 这就说明了这种 W 型锅炉是不易发生火焰短路的; 前后拱下的回流区减小, 对拱的冲刷加大, 喉口部位的结渣加剧; 气流仍然冲刷前后墙, 引起前后墙结渣和高温腐蚀。这种工况在实际运行中还是应该避免, 因为不仅前后墙风速不能布置得这样大, 并且由于这种工况的 CH 低, 不利于煤粉的燃烧和燃尽,

很容易造成飞灰含碳量增加。

工况 2、3 的前后墙风动量流率较小, 气流行程较长, CH 分别为 0.39 和 0.34, 气流充满度、流场分布比工况 4 好一些, 也未发生火焰短路, 但前后墙和喉口结渣的问题依然存在。

由以上的分析可以看出法国 Stein 公司生产的这种 W 型火焰锅炉不易发生火焰短路的情况, 同时也说明加大三次风和乏气并无助于解决火焰冲墙的问题, 反而会使问题加重, 在实际运行中应避免这样做。

3.2 炉内向下气流无量纲最大速度 V_{max} 的衰减规律

图 4 是工况 2、3、4 的炉内向下气流无量纲最大速度 V_{max} 的变化曲线, 从图上可以看出, 受较强的前后墙风的作用, V_{max} 衰减较快, 并且随着动量流率比的减小 V_{max} 的衰减加快, 工况 4 表现的尤为明显, 在 Y 约为 0.4 处由于气流已全部转弯向上, 所以向下气流的速度衰减为零。

3.3 炉内向下气流沿水平方向的分布规律

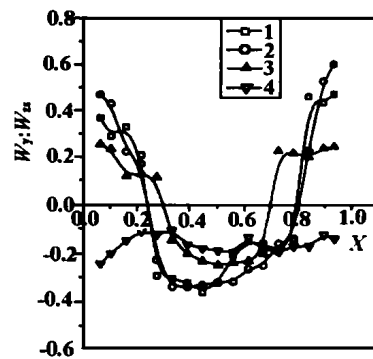


图 5 水平速度分布

图 5 是工况 4 的炉内向下气流无量纲速度 W_z/W_{zs} 沿水平方向的分布图。从图中可以清楚的看出, 曲线在 $X = 0.1$ 和 $X = 0.9$ 附近有两个峰值; 随着 X 的增加, 气流向下的速度急剧减小, 在 X 约为 0.2 和 0.8 处气流开

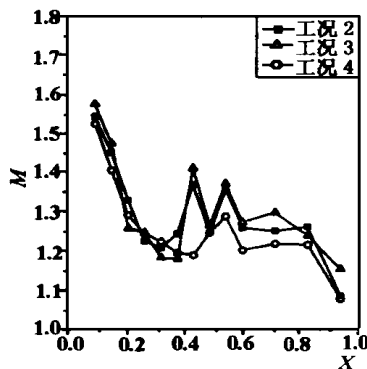


图 6 速度不均匀系数分布

始向上流动, $X = 0.5$ 附近达到向上流动速度的峰值; 随着 Y 的增加, 向下气流逐渐衰减, 气流开始转弯向上, 峰值渐渐减小, 截面 3 由于已处于主气流区边缘, 向上气流速度与处于主气流区的 1、2 截面相比已大为减小, 所以谷底有所升高, 而截面 4 处已无向下的气流, 图中截面 4 处的速度都为负值而且分布比较均匀。由图 5 也可以看出工况 4 是一个典型的测试 W 型火焰锅炉短路性能的工况。

即使这样, 这时仍然不存在火焰短路的问题, 无量纲穿透深度达到 $CH = 0.34$, 气流仍形成对称的 W 形, 并且在实际运行中由于前后墙风远不能达到这种程度, 这种情况是不太可能发生的, 即使发生了也不会造成火焰短路, 这就说明了这种 W 型锅炉是不易发生火焰短路的; 前后拱下的回流区减小, 对拱的冲刷加大, 喉口部位的结渣加剧; 气流仍然冲刷前后墙, 引起前后墙结渣和高温腐蚀。这种工况在实际运行中还是应该避免, 因为不仅前后墙风速不能布置得这样大, 并且由于这种工况的 CH 低, 不利于煤粉的燃烧和燃尽,

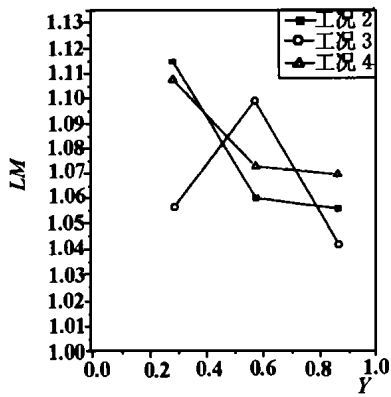


图7 局部速度不均匀系数

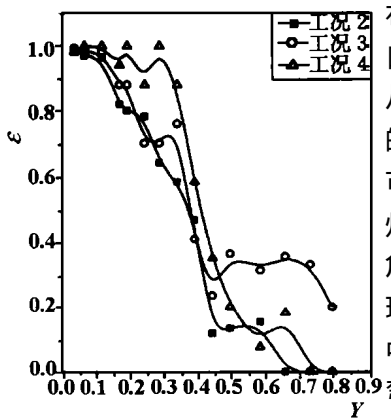


图8 充满度变化曲线

3.4 炉膛出口的速度偏差分析

图6和图7分别是工况2、3、4炉膛出口速度不均匀系数 M 和局部速度不均匀系数 LM 的分布图。

M 和 LM 是衡量速度偏差大小的量度,从炉膛出口速度不均匀系数分布可以看出炉膛出口速度的均匀性,从而推出温度分布的均匀性。从图6可以看出,由于锅炉结构中没有折烟角,存在烟气短路现象,气流比较集中,在炉膛出口转弯处 $X = 0.4 \sim 0.6$ 的局部速度水平比较高, M 相对较大。

尽管 M 较大,但 LM (以测点 10, 23, 36 所在 $y-z$ 截面为例,位置如图2中小黑方块所示) 的变化却很小,图7清楚的显示出这一点,说明速度沿 z 向的分布比较均匀,偏差很小,这是因为 W 型火焰锅炉的结构和燃烧方式是采用四角切圆燃烧方式的锅炉不同的,前者的结构与配风对称并且炉膛出口没有后者中存在的残余旋转,所以前者炉膛出口速度的左右分布较均匀,速度偏差不大。因此从 M 、 LM 两方面来考虑, W 型火焰锅炉的速度偏差不大,对锅炉的安全运行十分有利。

3.5 炉内气流的充满度变化规律

图8是工况2、3、4充满度 ϵ 的变化曲线,从图8上可以看出,在燃烧室的上半部由于射流急剧衰减并转弯向上,同时又处于燃烧室的出口,使区域内的气流速度水平保持较高水平,所以气流的充满度刚开始就

比较高,接近 1.0,并且变化比较平缓;此后随着 Y 的增加,向下有效气流已经衰减完毕,此区域的速度水平大大降低,致使充满度急剧降低;在三个工况中由于工况4气流转弯最早,结果燃烧室上半部分即 $Y < 0.4$ 的区域内的气流保持较高的速度水平,充满度接近 1.0,随着 Y 的增加,离开了向下有效气流区,气流的速度水平剧烈降低,使充满度急剧降低并接近 0。

4 结论

- (1) 所研究的珞璜电厂使用的法国 Stein 公司生产的这种 W 型火焰锅炉不易发生火焰短路的情况;
- (2) W 型火焰锅炉的炉膛出口气流速度偏差很小,速度左右分布均匀,有利于受热面的安全运行;
- (3) 原型的结构存在缺陷,没有折烟角,燃尽室的转弯处存在死滞区,充满度差,有明显的烟气短路;火焰冲刷前后墙,气流冲刷拱部,会造成严重结渣;
- (4) 为了获得良好的炉内流场,必须解决原型所出现的问题,保证锅炉安全高效的运行,应对锅炉的结构进行改造或调整风量配置;
- (5) 随着拱部风与前后墙风动量流率比的减小,射流的刚性减弱,充满度 ϵ 、向下气流无量纲最大速度 V_{max} 的衰减加快;
- (6) 加大前后墙的三次风和乏气会使火焰冲墙的问题加重,在实际运行中应该避免这样操作。

参考文献:

- [1] 毕玉森. W 型火焰锅炉及其 NO_x 排放[J]. 热力发电, 1994, (4): 5-11.
- [2] 冯俊凯. 根据燃煤性质论电站锅炉燃烧方法的发展[J]. 动力工程, 1995, 15(3): 34-38.
- [3] 池作和. W 型火焰锅炉配风方式的研究[J]. 动力工程, 1994, 14(3): 16-18.
- [4] 邹忠学. 燃煤对 W 型火焰锅炉运行经济性的影响[J]. 热力发电, 1998 (3): 12-16.
- [5] 樊泉桂. W 型火焰锅炉的性能评价[J]. 动力工程, 1994 14(6): 45-49.
- [6] 岑可法. 锅炉燃烧实验研究方法及测量技术[M]. 北京: 水利电力出版社, 1987.

(复 编辑)

现代燃煤电站锅炉火焰检测综述 = **A Comprehensive Survey of Flame Detection Techniques Used in Modern Coal-fired Utility Boilers** [刊, 汉] / Hua Yan Ping, Zou Yu, Lu Zhen-zhong (Power Engineering Department, South-eastern University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(1). — 1 ~ 5

A comprehensive review is given of the flame detection techniques employed for modern coal-fired utility boilers, pinpointing some problems involved in their applications. Such problems include a small visual angle of the flame detection probe, a divergence between the static-state set values and actual operation dynamic ones, etc. The present paper focuses on some novel digital and image flame detection methods, which have emerged in recent years. The results of their practical application have confirmed their outstanding performance. After an assessment of their prospects for future development the authors have depicted a flame image detection system designed by them. **Key words:** utility boiler, furnace safety protection, flame detection, flame image, image flame detection

齿轮动态设计分析研究的现状及展望 = **Present Status and Future Prospects of the Analytic Research of Power Transmission Gear Dynamic Design** [刊, 汉] / Chang Shan, Wen Xue-you, Xu Zhen-zhong (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(1). — 6 ~ 10

A fairly comprehensive assessment is given of the present status of the analytic research on the dynamic design of power transmission gears both at home and abroad. In the light of the actual situation prevalent in China proposed in this paper are the major study objectives concerning the comprehensive transmission performance of gear units and the related key techniques. **Key words:** gear transmission, dynamic design, reliability design, modal experimental technique

循环流化床流体动力学研究进展 = **Recent Progress in the Study of Circulating Fluidized Bed Hydrodynamics** [刊, 汉] / Zhu Ting-yu, Xiao Yun-han (Institute of Engineering Thermophysics under the Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, Post Code: 100080) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(1). — 11 ~ 15
Discussed in this paper is the recent progress in the study both at home and abroad of circulating fluidized bed hydrodynamics. The overview has been focused on a variety of hot topics, such as the problem of circulating fluidized particle flow, particle agglomeration and heat transfer, and a circulating fluidization mathematical model, etc. In addition, some new development trends have been highlighted in the current study of circulating fluidized bed hydrodynamics. **Key words:** progress, hydrodynamics, circulating fluidized bed, mathematical model

城市固体废弃物的燃烧特性实验研究 = **Experimental Study of the Combustion Characteristics of Municipal Solid Waste** [刊, 汉] / Jiang Fan, Pan Zhong-gang, Jiang Shu-qin, Fang Jian-hua (Institute of Engineering Thermophysics under the Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, Post Code: 100080) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(1). — 16 ~ 18, 38

Through the use of thermogravimetry technology an experimental study was conducted of several typical components in city municipal solid waste, resulting in the determination of the combustion characteristics of mixed solid waste in a thermogravimeter. Furthermore, a fruitful discussion has been carried out regarding the mechanism of mixed burning of city solid waste. **Key words:** thermogravimetric analysis, municipal solid waste, combustion characteristics

W 型火焰锅炉冷态空气动力特性的测试研究 = **Experimental Study of the Cold-state Aerodynamic Characteristics of a W-shaped Flame Boiler** [刊, 汉] / Che Gang, Xu Tong-mo, Hui Shi-en (Thermal Energy Engineering Department, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(1). — 19 ~ 22

A study on a cold-state model of aerodynamic characteristics was conducted of a W-shaped flame boiler equipped with a

direct-flow slit type burner. The 360 MW boiler is a product of French Stein Co. With the help of a hot-wire anemometer the velocity distribution of a flow field in the furnace was measured and the flow field diagram of W-shaped air flow in the furnace under various operating conditions obtained. An analysis has been performed with respect to the following: the law of air flow velocity distribution of the flow field under different operating regimes, the filling fullness of air within the furnace, the air flow path, velocity excursions at the furnace outlet, etc. Also studied are the in-furnace aerodynamic field characteristics and their variation law and mechanism along with a measurement of flame short circuiting of the W-shaped flame boiler and the velocity excursions at the furnace outlet. **Key words:** W-shaped flame, boiler, flame short circuiting, velocity excursion, cold-state model test, aerodynamic field

水平管道细粉高浓度分层流动阻力特性的试验研究 = **Experimental Research of the Resistance Characteristics of High-concentration Fine Powder Stratified Flow in a Horizontal Pipe** [刊, 汉] / Qiu Peng-hua, Chen Li-zhe, Wang Hong, *et al* (Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2001, 16(1). —23 ~ 25, 72

With a progressively better understanding of the advantages of a high-concentration fine powder conveying system the latter has recently become an object under extensive study by numerous scholars. A stratified flow in a horizontal pipe represents the most important form of high-concentration powder transport flow. In view of this the study of its resistance characteristics is of great significance. On the basis of a review of their work in this area over the past fifty years the authors have analyzed the merits and demerits of empiric formulas presented by various scholars. Through a series of tests on a test rig of high-concentration pneumatic conveying system, deduced is a formula for calculating the resistance characteristics of a high-concentration fine powder stratified flow in a horizontal pipe. An error analysis indicates that the above-mentioned formula can well meet the relevant requirements of general engineering design. **Key words:** pneumatic transport, hydrodynamic characteristics, resistance characteristics, gas-solid two-phase flow

论燃气轮机在天然气输气管道上的选用和配套 = **The Selection of Gas Turbines for Use in a Natural Gas Transmission Pipeline and the Supply of Necessary Supporting Auxiliaries** [刊, 汉] / Chen Reng-gui (Tarimo Petroleum Exploration and Development Command Headquarters, Kurlu City, Xingjiang Autonomous Region, China, Post Code: 841000) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2001, 16(1). —26 ~ 29

A brief analysis was conducted of the major features of natural gas transmission pipelines, natural gas compressors and gas turbines. On this basis some problems are highlighted, which merit special attention in the course of the selection of gas turbines for use in natural gas transmission pipelines and the appropriate provision of necessary supporting auxiliaries. **Key words:** natural gas transmission, compressor, gas turbine

新模式热电联产供热系统用热终端高效换热器的分析 = **The Analysis of a High-efficiency Heat Exchanger at the Heat User End for a New Mode of Cogeneration Heat Supply System** [刊, 汉] / Qiu Lin (Beijing Institute of Civil Engineering and Architecture, Beijing, China, Post Code: 100044) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2001, 16(1). —30 ~ 32

The present paper has proposed for a new mode of cogeneration low-grade heat supply system a high-efficiency heat exchanger at heat user's end, which is composed of a new type of fan coil tubes. A discussion and analysis was conducted from the perspective of technical feasibility, energy-saving potential and cost-effectiveness. The aim of the above is to provide a theoretical basis for the implementation of a new mode of cogeneration heat supply system. **Key words:** co-production of heat and electrical power, low-grade heat supply, exergy efficiency

300 ~ 3 000 K 水蒸气红外辐射谱带模型参数 = **Infrared Radiative Spectral Band-model Parameters for Water Vapor in the 300 - 3000 K Temperature Range** [刊, 汉] / Dong Shi-kui, Tan He-ping, Yu Qi-zhang, Liu Lin-hua