

# 现代燃煤电站锅炉火焰检测综述

华彦平, 邹煜, 吕震中

(东南大学 动力系, 江苏 南京 210096)

**摘要:** 对现代燃煤电站锅炉火焰检测技术进行了综述, 指出现有火检应用中存在的一些问题, 如火检探头视角小, 装置静态整定值与实际运行的动态值不相符等。文中重点介绍了近年刚出现的, 并得到实际应用的新型数字火检和图像火检。对它们的应用情况进行了说明, 肯定了它们具有的优良性能, 并对其发展前景进行了展望。最后介绍了我们所设计的一个火焰图像检测系统。

**关键词:** 电站锅炉; 炉膛安全保护; 火焰检测; 火焰图像; 图像火检

中图分类号: TM621.2

文献标识码: A

## 1 引言

电站锅炉燃烧的基本要求在于建立和保持稳定的燃烧火焰。燃烧不稳定, 不仅会降低锅炉热效率, 产生污染物和噪声, 而且在极端情况下会引起锅炉炉膛灭火, 如处理不当就会诱发炉膛爆炸, 造成事故。为了能及时、灵敏、可靠地检测炉内燃烧工况, 防止在点火、低负荷等燃烧不稳定工况下发生炉膛爆炸事故, 电站锅炉必须配备功能齐全、性能可靠的炉膛安全监视系统。燃烧火焰是表征燃烧状态稳定与否最直接的反映, 炉膛安全监视系统投运成功与否, 在很大程度上, 取决

于所用的火焰检测器和炉膛灭火保护装置是否可靠与完善。因此, 准确、可靠地检测炉膛火焰, 是防止炉膛爆炸、确保锅炉安全运行的重要手段。

## 2 现代燃煤锅炉火焰检测技术

燃料经燃烧器喷入炉内进行燃烧, 在燃烧的化学反应过程中将释放出大量的能量, 包括光能, 如紫外线、可见光和红外线, 热能和声辐射能等。这些不同的能量形式构成了检测炉膛火焰存在与否的基础, 应用不同的火焰特征可以构成不同类型的火检器。

现代锅炉火焰检测技术可分为直接式和间接式两大类:

(1) 直接式火检一般用于点火器的火焰检测, 常用的有检出电极法、差压法、声波法和温度法等。

检出电极法利用电极电阻值在着火前后的变化来判别点火是否成功。其在轻油点火枪的火焰检测上取得成功; 差压法利用着火后气体膨胀产生的瞬间压力变化, 建立风箱和检测处的差压的变化关系, 以此作为着火与否的信号。这种方法简单, 但可靠性欠佳; 声波法利用火焰噪声进行火焰检测, 不能在有电动机、风机

等声源噪音的现场中实际应用; 温度法检测火焰发热, 利用火焰温度变化检测火焰, 由于炉内温度具有较大的惯性, 并且燃料种类不同, 灭火温度也有较大的差异, 火检器参数难于整定。这几种火检器或对应用环境要求较高, 或存在较大的局限性, 目前已基本淘汰。

(2) 间接式火检是一般意义上的火检, 也就是主燃料火检, 通常利用不同形式的辐射能量检测火焰。

### 2.1 辐射光能火焰检测

利用辐射光能原理检测炉膛火焰, 是目前使用最广泛, 也是较行之有效的办法。常用辐射光能火检基本上都是基于燃烧过程中火焰辐射出的红外线、可见光和紫外线等进行检测。

紫外线火检利用火焰本身特有的紫外线强度来判别火焰的有无, 其光电器件为紫外光敏管。紫外光敏管对相邻燃烧器火焰有较高的鉴别力, 通常用作单火嘴的火焰检测器。但是紫外线易被介质吸收, 当紫外光敏管被烟灰、油雾等污染物污染时, 灵敏度明显下降, 所以在燃用重油和煤粉的锅炉中, 紫外线火检并不可靠, 尤其在煤粉炉上, 当锅炉低负荷运行时, 紫外线大量减少, 其灵敏度更低。因此紫外线检测适用于

燃用气体或轻油燃料的锅炉,不适用于燃用重油和煤粉燃料的锅炉。

红外线火检通过检测燃烧火焰放射的红外线强度和火焰频率来判别火焰是否存在,探头采用硫化铅光电管或硅光电二极管。由于炉膛完全燃烧着火区火焰闪烁频率通常不超过 2 Hz,因此通过滤波电路,红外线火检能区分燃烧器火焰和背景火焰。红外线探测器在不同煤种的锅炉上都有良好的监视效果,得到了广泛的应用,典型产品有 FORNEY 公司的 IDD-HI。

可见光火检同时检测火焰闪烁频率和可见光亮度,并进行逻辑加运算来检测燃烧火焰的存在。同时采用火焰平均光强和脉动闪烁频率双信号,可提高检测的可靠性。另外,可见光探测器有滤红外光功能,能排除烟尘、热烟气、炉渣和炉壁的红外辐射,进一步提高了火焰检测的可靠性。但是,可见光容易被油雾、烟雾及未燃烧的煤粉阻挡和吸收,而红外线则有一定的穿透能力,因此红外线检测比可见光检测更理想。可见光火检器用光纤和光电二极管识别火焰特性,典型产品有 CE 公司的 SAFESCAN, BAILEY 公司的 FLAMEON。

组合探头火检器结合了两者的优点,组合了紫外线和红外线两种检测探头,它具有同时检测各种燃料的能力。采用光电二极管及一个硫化铅或硒化铅光敏电阻的双色镜头,扩大了红外的响应范围。

## 2.2 相关原理火焰检测

相关性火焰检测器由英国 Land Combustion 公司推出。它同时使用两只相同的探测器,使检测区域在燃烧区域相交,利用相

关理论分析方法,根据相关系数的大小判断燃烧器的燃烧状况。当火焰存在时,两探测器获得的火焰信号是相似的,相关系数比较大。当火焰不存在时,相关性系数低,而且火焰的漂移和不稳定也将引起相关系数降低。因此根据火焰相关系数的变化可判断火焰燃烧状况。

相关性火焰检测方法在原理上具有独到之处,原则上不受负荷变化的影响,适应范围广。它不仅能监视燃烧器是否有火,而且能间接地反映着火点位置和着火状态的变化。但是,相关性火检的优点是以两个探测器特性完全一致为前提,而实际运用中,因设计、制造等方面的原因,及运行中污染状况等因素的影响,两个探测器特性难以保证完全一致,这严重影响其优势的彻底发挥。同时,使用相关性火检与使用一般火检相比,火检器数量增加一倍,无疑会使安装、调试及运行维护费用大大增加,因此其推广应用受到一定的限制。

## 3 现有燃煤锅炉火焰检测技术应用中的若干问题

从上述火检器的工作原理,我们知道,目前应用最广的红外和可见光火检均采用双信号检测判别法,根据火焰亮度(直流分量)和火焰闪烁频率(交流分量)的相对关系来判断火焰是否存在,利用各燃烧器火焰交流分量的不同,采用选频鉴频的方法来区别单燃烧器火焰。实际运行中这种原理存在若干缺点,火焰检测器可靠性也因此受到一定影响。从 1995、1996 两年,电力部所属 200 MW 及以上大型机组,热控装置发生事故和一类故障的元部

件分类统计情况来看,火焰检测器占有较高的比例。

### 3.1 火检参数静态整定与火焰状态动态变化的矛盾

燃烧火焰的闪烁频率是一个随机函数,它和燃料种类、风煤配比都有关系。而且,火检参数往往在安装调试时,针对特定燃料和负荷范围一次设定。当燃料种类频繁变化,机组运行方式不断变换时,火检难于协调高负荷时鉴别力与低负荷时可靠性的矛盾。

### 3.2 火检探头小视场角与火焰大幅度飘移的矛盾

要准确地检测火焰,就必须将检测探头对准燃烧器火焰着火区,即火焰根部的光亮部分。实际运行中,一方面,由于煤种的变化、燃烧的调整等,火焰经常漂移。另一方面,为尽量减少其他燃烧器火焰和背景火焰对火检器的干扰和影响,探头视角一般限制为  $10^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 。这样,小视场角的检测器探头难于随时对准漂移的火焰着火区。因此当煤质、负荷、风量等发生变化时,检测器就显得不灵敏,有时甚至误动而错发灭火信号。

### 3.3 火检探头安装与调整的矛盾

分辨率不高,有“偷看”现象,是火检器普遍存在的问题。改变探头观测角度是克服偷看、提高火检正确性的主要手段,但几乎所有电厂都采用固定式安装,从外部无法调节探头观测角度。

### 3.4 火检功能与燃烧诊断的矛盾

现有锅炉使用的火检,功能单一,只检测火焰有无,为锅炉灭火保护提供信号。但这种灭火保护是消极的,它没有积极预防灭

火的功能。火检不能诊断燃烧火焰状态和稳定性,不利于运行人员发现潜在的燃烧故障,更谈不上有针对性地进行燃烧调整。

#### 4 新型燃煤锅炉火焰检测技术的探索

从前面我们看到,现有的火焰检测设备虽能在一定程度上满足火焰检测的要求,具有一定的实用性。但是,也应该注意到,它们都有一些不尽人意的地方,应用于现代大型锅炉仍然存在不少问题。近年来,国内外学者及火检器生产厂商不断深化和细化火焰检测技术,进行了许多有益的探索。一个重要的发展方向就是利用成熟的计算机技术,推出基于计算机系统的智能型数字火检器。计算机技术的应用使火焰信号的处理变得更加准确可靠,而且灵活性和通用性得以大大提高。另一个发展中的方向就是将火焰电视与多媒体计算机系统结合,利用数字图像处理技术,开发基于火焰图像信号的火检。

##### 4.1 数字式火检器

数字式火检器以 FORNEY 产品为代表,该火检采用独特的火焰检测方法,使用微处理器及相应的软件算法,通过检测目标火焰的幅度和频率,并与在学习方式下存储的背景火焰图像进行比较,从而精确确定火焰的有无。每个燃烧器的火焰有着与其他燃烧器不同的火焰图像,这类似于人类指纹。在实际运行时,它通过比较目标火焰信号与存储的火焰图像信号来精确地确定火焰的状态。由于现场客观条件的制约,不能满足理论上的学习要求, FORNEY 数字式火检提供三个独

立文件用来存储三种不同的学习图像,这有利于现场应用中的灵活性。

为了获得最佳的视线角度,使火检的视线最大限度地与火焰的主燃烧区相交,且尽量少看甚至不看邻近或相对的火焰,在现场调试中必须调整火检的视线角度。FORNEY 数字式火检提供了现场实时对准功能。

FORNEY 数字式火检器与传统火检器相比,有如下创新:指纹式鉴别火焰有无方式;不同负荷工况下选择不同的鉴别图像文件;对准功能使火检视角更佳。

该火检器将背景参数整定变为自学习并提供手段帮助对准火检视角,因此能更精确地确定火焰的状态。但是它并没能从根本上摆脱传统火检器的定值比较判断工作方式,尽管可在不同工况下选择不同的鉴别图像文件,但仍然无法适应实际运行中多变的工况。视角对准功能方便了现场调试,但只有在静态调整时才有用,仍不能克服运行中无法跟踪因各种动态因素导致的火焰漂移问题。

##### 4.2 图像型火检

图像型火检是基于火焰电视、综合多媒体计算机和数字图像处理技术发展起来的,它继承了火焰电视直观、形象的优点,又充分发挥计算机强大的处理计算能力,使火检功能得到了质的提升。

###### 4.2.1 锅炉全炉膛火焰数字图像处理与监测系统

系统由光学系统、CCD 摄像机和计算机处理系统构成。光学系统为内窥光学潜望镜,利用它获取炉内火焰图像并经棱镜转向后直接投射在 CCD 摄像机靶面

上。光学系统一般采用风冷, CCD 摄像机采用气体涡流制冷管冷却。光学系统安装于锅炉上部,其视野能有效地覆盖整个炉膛断面,获得全炉膛完整的火焰燃烧图像,并以此计算反映燃烧室辐射能的图像灰度参数。基于全炉膛火焰图像灰度参数,结合 FSSS 有关重要开关量,系统可以进行炉内总体燃烧状态评价:当灰度参数处于较高水平时,炉内燃烧良好;当灰度参数处于较低水平或急剧大幅度下降时,炉内燃烧恶化,系统发出预警信号,提醒运行人员注意燃烧调整或采取稳燃措施;当灰度参数低至预设定值时,系统判断炉内熄火,并向 FSSS 发出灭火证实信号。通过通信网络,DCS 和 DAS 能获得火焰参数。

当煤质变差、燃烧器断层运行或锅炉处于低负荷燃烧工况时,燃烧稳定性变差,容易引起个别或部分燃烧器灭火。当未燃尽的积存燃料在炉内被其他燃烧器明火点燃时,可能引发爆燃。因此,实现单只燃烧器火焰的探测与鉴别,判断层火焰的稳定性及火焰是否存在有重要意义。基于此,现有炉膛火焰监视和保护的指导思想,基本参照 FORNEY 模式,在单个燃烧器(包括轻、重油枪、煤粉燃烧器)火焰(即局部火焰)监视基础上,进行全炉膛火焰的安全监视和判断,通过对单个燃烧器局部火焰的监视构成全炉膛火焰监视和燃烧状态判断。这种保护策略可以有效地防止局部爆燃、炉膛燃烧火焰中心严重偏离等事故,但也会因某种扰动,尤其是燃烧煤种偏离设计值、炉膛压力波动、运行工况发生偏离、给粉机下粉不均等,出现不必要的临界火焰保护动作或角火焰消失

保护动作等。针对这些问题,结合全炉膛火焰数字图像处理与监测系统和常规 FSSS 系统,将两者“全炉膛灭火”信号进行逻辑处理,共同决定是否动作 MFT,可从根本上提高 FSSS 系统灭火保护的可靠性。

#### 4.2.2 分散型智能锅炉燃烧器火焰检测装置

该装置由传像光纤图像传感器、上位机系统和下位机系统组成。其工作原理如下:由 CCD 摄像机和传像光纤组成的图像传感器摄取各燃烧器着火区的火焰图像,各路视频信号由同轴电缆送入视频信号分配器,不衰减地将每路信号分为 3 路送出,一路至上位机的视频信号切换器;另两路分别至下位机视频信号切换器。上位机系统由计算机控制视频信号切换器,以一定频率扫描,将每个燃烧器的火焰图像依次送入计算机。在计算机上显示单个燃烧器的实时火焰图像或某段 4 个燃烧器的火焰图像。下位机系统由两台计算机构成双机系统。由视频分配器送来的视频信号分别至视频信号切换器 A 和 B,两台视频信号切换器分别由计算机 A、B 控制,以一定频率扫描,将彩色火焰图像依次送入图像采集卡进行采集。下位计算机对一层 4 个燃烧器的火焰数字图像进行处理运算,根据判据分析火焰的燃烧状况,发出关于火焰燃烧与否的开关量信号。上、下位机以网络的方式进行通讯联系。

#### 4.2.3 新型电站锅炉火焰监测报警系统

我们为浙江某电厂设计开发了基于火焰图像处理的火焰监测报警系统,该系统由图像采集和显示系统,图像处理和报警系统、

操作显示系统、图像和数据通讯系统以及冷却吹扫系统四部分组成。图像采集系统的图像监测探头为光学探头,分上、下两层布置:上层探头观察上层煤火焰和上层油火焰全景;下层探头观察二、三层煤火焰和下层油火焰全景。这样,对全部 20 个燃烧器的监视由上下两层 4 角共 8 只独立的探头完成。图 1 给出了一层图像传感器布置图。8 路火焰图像信号经四画面分割器、视频多路转换器同步匹配、放大预处理后,分别送至两台计算机进行处理和显示。两台计算机功能上有所不同,一般情况下一台计算机负责完成全部 20 个燃烧器的火焰图像的显示及一层火焰图像处理,另一台只处理另一层火焰图像。这种结构既能充分发挥计算机的功能,又可在系统出故障时实现双机冗余,从而保证系统运行的可靠性。显示时既可循环显示 20 个燃烧器的火焰图像,也可显示某层一个角的火焰图像,或某层四个角燃烧器火焰的合成图像。两台计算机通过高速图像采集卡切换后的图像信号,完成对全部 8 路图像信号的高速采集和智能处理。当燃烧器燃烧恶化时能及时捕获并送出相应的报警信号。

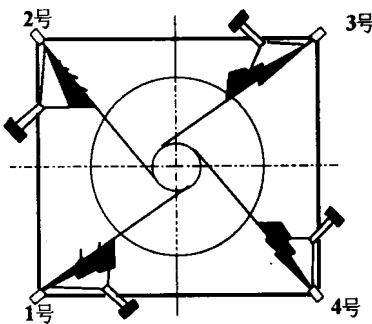


图 1 图像探头布置图

该系统与其他图像型火检系统相比有如下优点:

(1) 探头部分采用光学系统替代传像光纤,使得系统更加耐高温,使用寿命显著增加,而且传像质量更好。

(2) 探头布置在燃烧器的侧面,而不是布置在二次风风道里,较好地解决了“偷看”的问题。

(3) 在不牺牲性能的前提下,用两台计算机实现了三台计算机的功能,使系统小型化,降低了成本。

#### 4.2.4 图像型火检特点

从上面几个系统,可以归纳出图像型火检的一些共同特点:

(1) 火焰图像可方便运行人员直接观察炉内燃烧的真实情况。通过图像,尤其是单燃烧器火焰图像,运行人员可在集控室内直接观察到燃烧器或燃烧器层的真实火焰图像,能在把握炉内燃烧真实情况的基础上合理组织燃烧,从而提高燃烧稳定性,提高燃烧效率和减少污染物生成。

(2) 图像传感器具有较大的视角(70°~100°),能覆盖炉内较大的区域。运行过程中,各种动态因素导致的火焰窜动影响火检可靠性的问题,基本得以解决。

(3) 结合计算机技术,火检判断算法得以更新。由于数字图像处理、人工智能技术的大量应用,火检器能有效克服炉膛背景热辐射和相邻燃烧器火焰的干扰,提高了鉴别力。同时,增强了对负荷、煤质及运行工况的适应性,工作更加准确可靠。

(4) 利用计算机系统丰富的软件功能,图像型火检能以曲线、棒状图、伪彩色图等不同的方式展示炉内燃烧工况,使运行人员能从不同的角度更精确地掌握燃烧状况。软件系统的数据分析和处理能力,图像存储和回放能力,将大大方便燃烧系统事故和故障

的分析、诊断。

(5) 输出 ON/OFF 开关量信号,可方便地与各种类型的锅炉灭火保护装置联接。另外计算机系统与 FSSS、DCS 和 DAS 等系统的联网通信,为数据资源共享提供了可能,使这些系统能相互集成并优势互补,进一步增强锅炉燃烧操作的控制、调节和故障诊断功能。

## 5 结束语

现有的火焰检测设备虽能在一定程度上满足火焰检测的要求,具有一定的实用性,但是仍然存在不少问题。数字式火检和图像火检是发展中的新型火检,有

优良的性质和广泛的应用前景。尤其是图像火检,通过对火焰图像的计算机分析和处理,可极大地提高燃烧火焰检测的可靠性。并且,通过指导运行人员燃烧操作和燃烧调整,图像火检在提高燃烧效率和预防污染物生成方面起到积极作用。因此,基于火焰图像计算机分析的燃烧火焰检测技术是很有发展潜力的一项新技术。目前该领域主要的发展方向有:

(1) 结合新技术、新理论的出现,不断寻找高效的火焰图像的计算机处理方法,提高对燃烧状况判断的准确性、可靠性。

(2) 加快图像处理的速度,实现实时化,这主要通过开发各

种图像处理硬件的方法来解决。

(3) 通过对含有丰富信息的火焰图像的分析处理,对锅炉燃烧的经济性、排放物的成分作出判断,从而提高锅炉燃烧的整体效益,降低对环境的污染。

## 参考文献:

- [1] 邹煜,吕震中. 锅炉全炉膛火焰数字图像处理与监测系统开发与研究[J]. 热能动力工程, 1998, 13(4): 261-263.
- [2] 徐伟勇,余岳峰. 分散型智能锅炉燃烧器火焰检测装置的研究开发[J]. 中国电力, 1997, 30(10): 20-22.
- [3] 田绪文,姜义道. 锅炉炉膛火焰数字式检测系统[J]. 电站系统工程, 1996, 12(1): 44-46, 62.

(何静芳 编辑)

## 奉献春天——宏特实业

哈尔滨宏特实业有限公司是以哈尔滨工业大学董珊教授为首,集科研、教学生产为一体的高科技企业。公司连续多年荣获哈尔滨高新技术开发区“先进高新技术企业”称号。

宏特实业是以研制 SZW、SHW、QXW 等系列锅炉为主,开发生产汽水两用锅炉,往复推动,往复错动和下饲式炉排等燃烧设备系列的实业公司。

公司的许多产品属国内首创。多项获国家、省部级科技奖 6 项,专利 4 项,开发研制的 46 MW 倾斜往复炉排热水锅炉填补了国内空白。

产品具有的热效率高,节省燃料、煤种适应性广,燃烧稳定,出力足,操作简单,维修方便等特点。

宏特实业云集高科技人才,可靠的质量保证,一流的售后服务,为用户服务打下了坚实的基础。

“为上帝奉献春天”是宏特的宗旨。

## 欢迎垂询, 欢迎合作

公司地址: 哈尔滨南岗区海河路 202 号

联系电话: 0451-2317344 6282128

总经理: 董珊 副总经理: 王文宇

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