

抛煤机链条炉增拱冷态空气流场实验与数值研究

滕叶,张忠孝,周托,朱明,赵超,蔡海军

(上海理工大学 能源与动力工程学院,上海 200093)

摘要:某厂 65 t/h 抛煤机锅炉增设前拱后,通过数值模拟得到炉内冷态空气流场的模拟结果,并与实验测得数据相比误差较小,因此可以验证该数值模型的正确性及可靠性。并以数值模拟的结果研究增拱后炉内冷态空气动力场的特性。

关键词:抛煤机锅炉;前拱;数值模拟;冷态实验;空气流场

中图分类号:TD94;TK224

文献标识码:A

文章编号:1006-6772(2011)01-0051-04

抛煤机锅炉的燃烧是火床燃烧与悬浮燃烧的结合,具有着火条件优越、运行稳定、煤种适应性强、燃烧效率高和可靠性好等优点^[1],这些优点使抛煤机锅炉得到了广泛的应用。但是目前大多数的抛煤机锅炉均为开式炉膛结构,炉膛水冷度大,因此炉膛温度偏低。除此之外,抛煤机锅炉烟尘排放量、烟囱冒黑烟是其最显著的缺陷,既严重污染了环境,又浪费了大量资源。随着环保要求的日益提高,这些缺点亟需得到改善。

研究表明,造成抛煤机锅炉冒黑烟的原因主要有 3 个^[2-3]:一是炉膛温度相对较低,进入炉膛内的细煤粉末尚未燃烧就直接逸出炉膛;二是炉膛中未燃尽的焦炭和灰粒较多(绝大多数是从火床上吹扬起的);三是烟气中含有大量的碳黑粒子。上述这些情况主要是由于燃料在炉膛内燃烧不良造成的。改善炉膛内的燃烧状况,使燃料尽可能得充分燃烧,在一定程度上,可以抑制抛煤机锅炉冒黑烟,进而提高锅炉的运行效率。

1 改进措施

国内生产的抛煤机锅炉炉膛容积热负荷取值偏小,炉膛水冷度大,造成实际运行中锅炉炉膛温度偏低^[2]。由于采用了开式炉膛,没有设置前后

拱,使得炉膛内的过量空气系数过大,而煤粒与空气并没有充分混合,着火性能和化学燃烧反应进程都很差,有不完全燃烧现象^[4]。要使煤粉颗粒燃烧完全,可以通过提高炉膛温度,延长燃料在炉膛内的停留时间,在炉膛内增拱的方法来实现。

在抛煤机锅炉炉膛内增设前拱可以起到 2 个作用:一是积蓄炉内辐射热,并以辐射等方式提高炉膛温度,有助于煤的燃尽,同时前拱对抛煤起遮挡作用,可以防止细煤粉颗粒随引风直接飞出炉膛;二是增拱后,抛射风粉气流在进入出口烟窗之前,必须绕过前拱的前沿,这个部位接近火焰燃烧中心,因而形成了迅速着火和充分燃烧的极好条件,大大强化了炉内扰动,有效抑制了挥发分析出碳黑,防止黑烟的产生^[5]。

某企业热电厂的 1 台 65 t/h 抛煤机锅炉投运时间长,运行中存在冒黑烟等问题,表 1 列出了该锅炉的主要运行参数。

表 1 某 65 t/h 抛煤机锅炉主要参数

额定蒸发量 /(t·h ⁻¹)	额定蒸汽压力 /MPa	额定蒸汽 温度/℃	给水温度 /℃	排烟温度 /℃
65	5.3	450	150	140

先在抛煤口上方增加前拱,将原先的开式炉膛

结构改造为半开式炉膛结构(如图1所示),前拱将炉膛分成了上部燃尽区和下部燃烧区2个部分。这样可以减少上半部分水冷壁对下半部分火床炉室空间火焰的冷辐射作用,使炉拱下方形成高温区域,提高了炉膛内温度水平,既强化了燃烧,又能保证烟气得到有效冷却^[6]。燃烧区保持高温,有利于煤的引燃;而燃尽区则有利于可燃气体的燃尽以及高温烟气的冷却,从而有效提高了锅炉的效率,并扩大了煤种的适应范围。

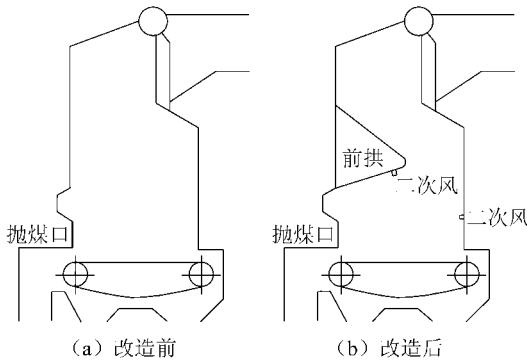


图1 锅炉改造前、后炉膛结构

是否合理组织炉内气流是决定抛煤机锅炉燃烧优劣的关键之一,因此,在前拱上布置二次风,使之与一次风、后墙二次风配合组织炉内气流。研究表明^[6-7]:当二次风与一次风的动量流率比达到5时,炉内气流才会产生强烈的湍动,一次风被二次风扰动后产生强烈的旋涡,炉内悬浮燃烧得以加强。前后拱之间“喉口”与二次风的封锁压制,炉拱蓄热的高温辐射,在拱下空间形成了一个高温高效燃烧区,大大延长了煤粒的燃烧时间,减少了飞灰量,

降低了对尾部受热面的磨损。

2 冷态实验与数值模拟

2.1 实验方法

锅炉炉内冷态空气动力场试验采用飘带与风速仪测量结合的方式进行。用飘带网来观察某一截面的气流状况,用风速仪测量炉膛内选定点的速度大小。飘带法简单易行,在需要观察的测试区域中拉线,并将飘带按一定间距扎在拉线上,根据通风后各个飘带的飘动方向就能得到该区域的空气流动方向。由于炉内工质流动状况比较复杂,因此测点的布置是根据网格法原理,选择一些具有代表性的测点来反映整个炉内空气速度的分布规律。实验中,飘带分别布置在锅炉前后墙距炉排70,90,150 cm 3处,相邻2个测点的水平距离为50 cm。而速度的大小,则可以通过热球风速仪测得。分别测量了锅炉在不同负荷下4个抛煤口中心截面上各点的风速。

2.2 数学模型

抛煤机锅炉炉内气流流动属于湍流流动,选用湍流模型为宜。在定常条件下,三维直角坐标系下湍流模型控制方程形式如下^[8]:

$$\frac{\partial(\rho u \phi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v \phi)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w \phi)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) + S$$

其中 ϕ 为因变量, Γ 为广义扩散系数, S 为源项,具体含义见表2。

表2 控制方程中各项含义

方程	ϕ	Γ	S
连续方程	1	0	0
x方向动量方程	U	μ_{eff}	$-\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{eff} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_{eff} \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right)$
y方向动量方程	V	μ_{eff}	$-\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{eff} \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_{eff} \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right) \right)$
z方向动量方程	W	μ_{eff}	$-\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{eff} \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_{eff} \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right) \right)$
湍流动能方程	k	μ_{eff}/σ_k	$G - \rho \varepsilon$
湍流动能耗散率方程	ε	$\mu_{eff}/\sigma_\varepsilon$	$C_1 G \frac{\varepsilon}{k} - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k}$

注: $\mu_{eff} = \mu + \mu_1$, $\mu_1 = C_\mu \rho k^2 / \varepsilon$ 。

$k - \varepsilon$ 湍流模型中各项经验常数的取值比较一致^[8],笔者选用的各项系数见表3。

表3 湍流模型中的系数

C_μ	C_1	C_2	σ_k	σ_ε
0.09	1.44	1.92	1.0	1.3

3 数值模拟与结果分析

3.1 边界条件选取

由于是冷态模拟,因此计算中选择的流体为常温下的空气,其密度为 1.293 kg/m^3 ,动力粘度为 $1.506 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。

(1) 入口边界:因为空气是可压缩流体,其密度 ρ 是变化的,所以入口边界设定为质量流量入口;

(2) 出口边界:出口边界为定压强设置,选择压强出口,根据与大气的相对压力,选取 -80 Pa ;

(3) 壁面边界:壁面边界条件用于限定流体和固体区域。壁面满足无滑移边界条件,即 $u = v = w = 0$ 。

3.2 模型检验

Fluent 数值计算采用 SIMPLE 压力-速度耦合方法,经过迭代达到收敛,得到炉内冷态流场分布的数值计算结果,并与实验实测值进行对比,如图 2 所示。

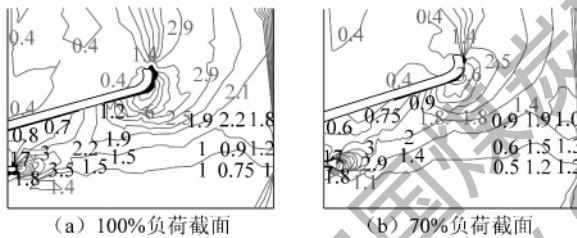


图 2 不同负荷下模拟与试验速度对比

图 2 中,黑色数值为实验测量值,浅色数值为模拟值,浅色细线为等速率线。图 2(a) 是 100% 负荷某截面的对比,比较 2 组数据,除去个别点外,剩余的误差较小(约在 5% 以内),由此认为该数值模型在 100% 负荷下适用。图 2(b) 是 70% 负荷某截面的对比,大部分的测点误差在 10% 以内,因此可以认为,该模型能较为精确地反映出不同负荷下,炉内冷态气流流场的特性。

3.3 结果分析

图 3 是 100%、70% 负荷下,二次风喷口截面的流线轨迹。增拱后将二次风布置于前拱形成的喉口处,在二次风和前拱的共同作用下,强化了气流的混合扰动。从图 3 中可以看出,在二次风作用下,气流流动方向偏转,这能促进气流的混合,同时增加了烟气在炉膛内的停留时间;伸入炉膛的前拱将抛煤机口和炉膛出口隔开,杜绝了细煤末的短路飞行。另外,增拱后的炉膛为半开式结构,炉内气流呈现出 S 形流动轨迹,在拱的上部区域会产生一个

明显的回流区。

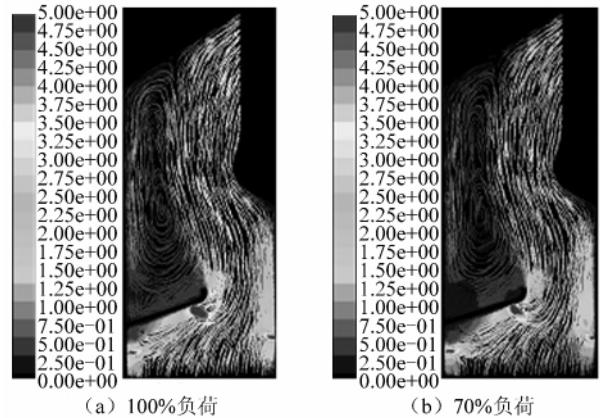


图 3 不同负荷下二次风喷口截面流线轨迹

从图 3 中可以清晰地看出,回流区气流速度明显小于其周围气流速度。气流从炉膛下部上升过程中,经过回流区附近时流速很小,难以携带较大的粉尘颗粒,而炉膛出口处的折焰角又迫使其向回流区偏移,被带入回流区的粉尘颗粒最终落至前拱。在抛煤机炉拱上开有卸料口,当拱上颗粒积累到一定程度时,打开卸料口这部分颗粒就会落入炉膛继续燃烧。而无前拱的炉膛为开式结构,不会产生回流区,气流携带着未完全燃烧的煤粉颗粒直接飞出炉膛,使燃料的化学和机械不完全燃烧损失增加,同时也增大了烟尘的排放浓度。

图 4(a) 是 100% 负荷下,抛煤口中心截面的冷态空气流场;图 4(b) 是 70% 负荷下,抛煤口中心截面的冷态空气流场。3.2 中已验证了该模型能较为精确地反映出不同负荷下,炉内冷态气流流场的特性,由此可以认为:数值模拟的结果和实炉冷态测试的结果吻合较好,并且变化规律也趋于一致。

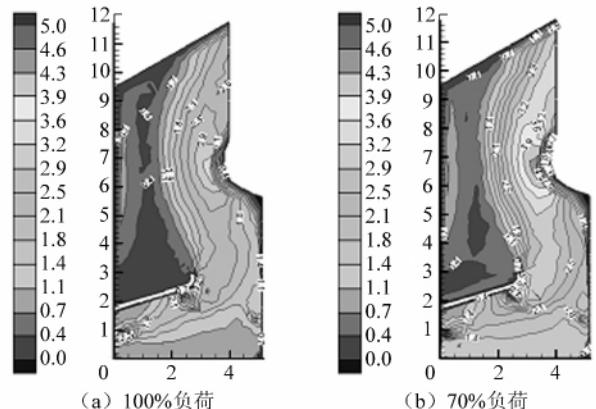


图 4 不同负荷同截面流场速度分布

比较后可以发现,回流区的面积随着锅炉负荷的

升高而缩小,且回流区的中心离前墙的距离约为拱在水平面射影长度的 $1/2$,其高度约为炉膛总高度的 $2/5$ 。在锅炉负荷从 70% 提升到 100% 过程中,对应的是炉排上的一次风风速提高,而抛煤风风速则保持 15 m/s 不变。随着锅炉负荷的提高,抛煤风的轨迹逐渐向上移动,这主要是由于一次风风速的逐渐加强,使得一次风与抛煤风的动量比不断提高,因此抛煤风发生了偏转,并沿着前拱向炉膛上部流动。

从数值模拟结果和实验实测数据中都可以看出:在拱的下方,由前墙至炉膛中心方向,气流的流速逐渐增加。当气流进入炉膛后,由于受到一次风的作用,会迅速向上方流动,继而贴着前拱流动,当流经前拱前端拐角处时,速度增大。在 100% 负荷下,气流流速约从 0.3 m/s 逐渐增加至 1.9 m/s ,在前拱前端拐角处速度达到了约 6 m/s 。 70% 负荷也呈现了同样的规律,由于负荷的下降,拐角处流速约为 $3\sim 4\text{ m/s}$ 。这主要是因为抛煤机锅炉炉内增拱后,当气流通过由前拱产生的喉口处,由于烟气流截面最小,因此流速最大,而且几乎都是垂直向上流动,图3中气流流动轨迹也清晰地说明了这一点。

4 结 论

(1) 对某台 65 t/h 抛煤机锅炉炉内增拱改造后,测试了 100% 、 70% 这2个工况下炉内冷态空气动力场,并建立数值模型模拟,数值模拟结果和实验实测值相比误差较小,在 10% 之内,由此认为该模型能较为精确地反映出不同负荷下,炉内冷态气流流动的特性。

(2) 抛煤机锅炉炉内增拱后,炉膛由开式结构变为半开式结构,炉内气流呈现出S形流动轨迹,前拱的上方会产生回流区,回流区面积随锅炉负荷升

高逐渐缩小,其高度约为炉膛总高度的 $2/5$,回流区气流流速很小,约为 $0.1\sim 0.5\text{ m/s}$ 。

(3) 将原先的前墙二次风布置于由前拱形成的喉口处,在二次风和前拱的共同作用下,强化了气流的混合扰动。在二次风的作用下,气流流动方向偏转,对炉内气流产生了一定的扰动,使一次风与抛煤风充分混合。

(4) 炉内增拱后,随着锅炉负荷的上升,一次风风速逐渐加强,抛煤风风速保持 15 m/s 不变,一次风与抛煤风的动量比不断提高,使抛煤风发生了偏转。伸入炉膛的前拱将抛煤机口和炉膛出口隔开,杜绝了细煤末的短路飞行,气流绕过前拱时速度很快(100% 负荷时约为 6 m/s , 70% 负荷时约为 $3\sim 4\text{ m/s}$)。该区域气流流速快,混合扰动程度剧烈。

参考文献

- [1] 许建豪,张忠孝.抛煤机锅炉存在的问题及解决方法的研究[J].电站系统工程,2004,20(6):25-27.
- [2] 狄成功,兰养民.抛煤机锅炉燃烧不良原因的剖析和改进[J].节能技术,2003,20(3):24-25.
- [3] 寿明耀,茹一戈,金雷. 65 t/h 抛煤机锅炉飞灰回燃装置改造的实践[J].能源工程,2002(4):40-42.
- [4] 李飞翔,田红波,赵钦新. 10 t/h 抛煤机链条炉的节能改造数值模拟分析[J].节能,2009,28(6):25-29.
- [5] 姚志鹏,张忠孝,朱明,等.抛煤机锅炉增拱前后炉内传热对比研究[J].洁净煤技术,2009,15(4):60-63.
- [6] 步维光,杨振成,刘文鹏,等.UG-35/3.82-M1型抛煤机锅炉消烟除尘节能降耗技改措施[J].电站系统工程,2002,18(1):10-12.
- [7] 许彦雷. 35 t/h 抛煤机链条炉前后拱节能改造[J].北京节能,2000(5):30-31.
- [8] 陶文铨.数值传热学(第2版)[M].西安:西安交通大学出版社,2001.

Numerical study on cold air flow field in chain stoker boiler added front arch

TENG Ye, ZHANG Zhong-xiao, ZHOU Tuo, ZHU Ming, ZHAO Chao, CAI Hai-jun

(School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: After setting up the front arch on a 65 t/h stoker boiler, the numerical results of in-furnace cold air dynamic field is gotten with the help of numerical simulation. Compared with the experiment results, this model has smaller error, so the correctness and reliability of this mathematical model is beyond suspicion. Further, according to the numerical result of numerical simulation, the feature of the cold air dynamic field in the stoker boiler added front arch could be studied.

Key words: stoker boiler; front arch; numerical simulation; cold-state experimental; air flow field