

# 生物质气与煤混燃锅炉分离式燃尽风反切消旋数值模拟

张小桃, 黄勇, 赵伟, 李柯颖, 段佛元

(华北水利水电大学电力学院, 河南郑州450011)

[摘要]为了研究分离式燃尽风(SOFA)水平摆动形成反切角度对生物质气与煤粉混燃切圆锅炉出口速度偏差和温度偏差的影响,基于Fluent模拟软件搭建了纯煤掺烧松木气模型,对某电厂330MW机组掺烧10%松木气的燃煤锅炉SOFA反切、反切10°、反切15°、反切20°等4种工况的燃烧过程进行数值模拟,分析不同工况下主燃烧区、折焰角、炉膛出口的速度场、温度场的分布特征。结果表明:在主燃烧区,SOFA反切对其流场影响较小;当SOFA开始反切时,折焰角残余切圆消失,流场趋于均匀,有效削弱了烟道的残余旋转,出口烟气速度偏差和温度偏差明显降低;当SOFA反切角度达到15°,出口左右侧速度偏差比和温度偏差比达到最低,其中心温度集中在其中心区域,速度场和烟气温度场的均匀性最好;当SOFA反切角度增大到20°时,出口烟速偏差比和烟气温度偏差比有所增大,其中心温度开始向其右侧偏移,速度分布和温度分布的均匀性下降。因此,最佳的SOFA水平摆动形成的反切角度为15°。

四角切圆燃煤锅炉在水平烟道处常常存在方向朝上的烟气气流残余旋转,造成了在炉膛出口左右两侧的烟气温度与烟气速度的不均匀性分布,而且会降低碳的燃尽率,还会引起炉膛上部的大屏换热器超温爆管。有学者认为导致炉膛出口左右烟气温度分布不均匀的最主要原因是炉膛主燃烧器上部的气流残余旋转[1-2]。目前,对降低炉膛出口气流残余旋转的研究较多。文献[3-4]基于Fluent软件对切圆锅炉出口残余旋转的模拟结果和实验结果进行比较,验证了模拟的正确性,通过改变燃烧器喷射和偏置气流的角度等可降低炉膛出口的残余旋转;文献[5]得出了改造前墙及重新布置过热器能较好降低炉膛出口热偏差;文献[6]通过降低上层一次风量,增加上层二次风量使炉膛出口温度偏差从74降至34;文献[7]发现了二次风反切能明显降低切圆锅炉出口烟气分布不均匀性,但削弱了炉内气流的旋转动量;文献[8]认为一次风反切能有效地降低水平烟道处烟气的残余旋转,但一定程度上影响了主燃烧区的稳定燃烧;文献[9]得出了燃尽风反切角度在15°时,炉膛出口烟气分布最为均匀;文献[10]研究了生物质气与煤粉混燃锅炉的燃烧特性,但目前针对其出口烟气分布不均匀性的研究较少。

针对生物质气与煤粉混燃四角切圆燃煤锅炉炉膛出口烟气存在不均匀性分布的问题,本论文基于掺烧10%生物质气的330MW四角切圆燃煤锅炉,模拟分析其分离式燃尽风(SOFA)反切角度对炉膛出口烟气残余旋转及其不均匀性分布的影响,为生物质气的合理利用以及降低其与煤粉混燃四角切圆燃煤锅炉炉膛出口烟气分布不均性提供理论依据。

## 1 生物质气与煤粉混燃过程理论基础

目前降低炉膛出口烟气不均匀性分布的主要措施有:优化炉膛结构、燃烧器水平摆动布置和锅炉运行调整等,其中调整燃烧器水平摆动布置在实际运行中应用最为广泛。本论文也是基于该消旋措施对掺烧生物质气的四角切圆燃煤锅炉出口存在的烟气不均匀性分布进行模拟研究。

燃煤锅炉掺烧生物质气进行耦合发电流程是,将生物质原料通过送料系统送入气化炉并在炉内进行不完全燃烧,发生气化反应,主要生成CO、H<sub>2</sub>和CH<sub>4</sub>等可燃合成气,经过净化后的可燃合成气被送入锅炉与煤粉混合燃烧。

### 1.1 研究对象

以某电厂SG-1117/17.5-M749型亚临界330MW机组自然循环锅炉为研究对象,该锅炉炉膛采用四角切圆燃烧方式,其截面尺寸为15390mm×13640mm(宽×深),主燃烧器高11m,共配有14层喷口,其中5层一次风喷口、1层生物质气喷口和8层二次风喷口,距主燃烧器最上一层二次风喷口上方5m处布置3层紧凑式SOFA喷嘴。锅炉结构和燃烧器布置如图1所示。

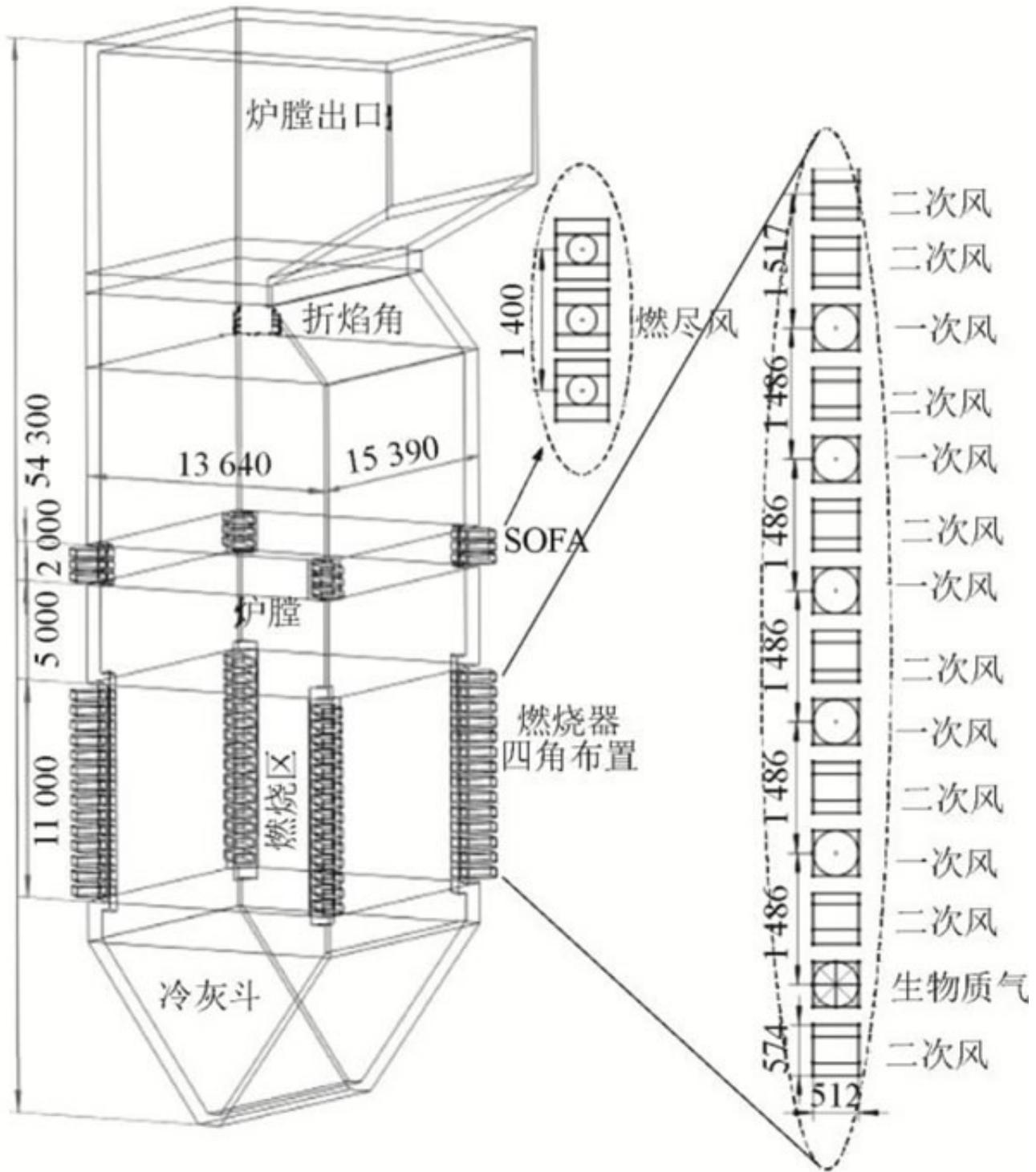


图 1 锅炉结构及燃烧器布置 (mm)

Fig.1 The boiler structure and burner arrangement (mm)

1.2边界条件设置

选取掺烧比为10%的松木合成气与义马烟煤在炉膛进行混合燃烧，其中，松木气成分基于AspenPlus模拟平台根据松木特性模拟获得[11]，煤质分析结果和松木合成气特性分别见表1和表2。用松木气替代部分煤粉由最下层喷口喷入，

易燃的松木气替代了煤粉的裂解过程，降低了煤粉的着火高度，并且单位时间内松木气燃烧释放的热量低于煤粉的低热值，松木气流速较一次风会增大，而炉膛最高温度有所降低，降低了热力型NO<sub>x</sub>和燃料型NO<sub>x</sub>的生成，有助于出口NO<sub>x</sub>的减排[12]。一次风、二次风和SOFA的入口截面定义为速度进口，炉膛出口截面定义为压力出口，压力为-100Pa。模拟工况均为满负荷工况，均采用20%燃尽风率，过量空气系数选取1.2。对切圆燃煤锅炉掺烧生物质气模拟分析中发现，炉膛出口烟气存在速度和温度偏差，对此采取了SOFA反切消旋的解决方案。

表 1 煤工业分析和元素分析  
Tab.1 Proximate and ultimate analysis of the coal

工业分析/%				元素分析/%					低位热值/(kJ·kg <sup>-1</sup> )
w <sub>ad</sub> (M)	w <sub>ad</sub> (A)	w <sub>ad</sub> (V)	w <sub>ad</sub> (FC)	w <sub>ar</sub> (C)	w <sub>ar</sub> (H)	w <sub>ar</sub> (O)	w <sub>ar</sub> (N)	w <sub>ar</sub> (S)	
5.50	27.15	16.55	50.80	84.53	4.69	6.28	1.95	2.55	21 318

表 2 高温松木气特性  
Tab.2 Characteristics of the pine gas at high temperatures

松木气体积分数/%						密度ρ/ (kg·m <sup>-3</sup> )	温度T/ ℃	显热Q/ kJ	低位热值/ (kJ·m <sup>-3</sup> )
CO	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O				
26.20	21.02	0.39	6.89	41.90	3.60	0.324 4	600.00	2 530.25	5 711.37

### 1.3 生物质气掺烧过程

在松木气掺烧过程中，松木气替代一部分煤粉在炉膛进行混燃，单位体积松木气在温度  $x$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) 下燃烧所释放的总热量  $Q_{\text{syngas}}$  为

$$Q_{\text{syngas}} = \frac{Q_x + Q_{\text{net,syngas}} \times V_{\text{syngas}}}{V_{x,\text{syngas}}} \quad (1)$$

式中： $Q_x$  为在温度  $x$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) 下松木气的显热，kJ； $Q_{\text{net,syngas}}$  为标准状态下松木气的低位热值，kJ/m<sup>3</sup>； $V_{\text{syngas}}$  为标准状态下松木气体积，m<sup>3</sup>； $V_{x,\text{syngas}}$  为在温度  $x$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) 下松木气的体积，m<sup>3</sup>。

掺烧比  $\alpha$  为生物质合成气燃烧输入锅炉热量占送入炉膛总热量的百分比。故生物质气在温度  $x$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) 下的体积流量  $V_q$  为

$$V_q = \frac{\alpha B_0 \times Q_{\text{net,ar}}}{Q_{\text{syngas}}} \quad (2)$$

式中： $B_0$  为锅炉进行纯煤燃烧单位时间内煤粉消耗量，kg/s； $Q_{\text{net,ar}}$  为煤粉的低位热值，kJ/kg。

相比于进行纯煤燃烧时，松木气与煤粉混燃在单位时间内输入炉膛的空气量有所降低，本文选取过量空气系数为 1.2，故单位时间内混燃所需的实际空气量为

$$V = 1.2 \times (V_{\text{coal,o}} + V_{\text{syngas,o}}) \quad (3)$$

式中： $V$  为松木气与煤粉混燃所需的实际空气量，m<sup>3</sup>/s； $V_{\text{coal,o}}$  为煤粉燃烧所需的理论空气量，m<sup>3</sup>/s； $V_{\text{syngas,o}}$  为松木气燃烧所需的理论空气量，m<sup>3</sup>/s。

#### 1.4 炉膛出口烟气分布不均匀性分析

四角切圆燃烧锅炉在未采取消旋措施下出口烟气常常存在速度偏差和热偏差，从炉膛四角射入的气流会在炉膛中心形成切圆，旋转的气流会不断地卷吸周围的介质使燃料和空气在主燃烧区域充分混合，并提供很好的燃烧氛围；同时，在均等配风的方式下，旋转燃烧的气流会促进喷口周边煤粉的着火，提高了煤粉的着火稳定性，并且呈螺旋状的燃烧烟气随着炉膛的高度上升至炉膛出口，在这个过程中加长了煤粉在炉膛的停留时间，加强了粉煤的燃尽。这种燃烧方式虽然在主燃烧区的旋转气流会随着炉膛高度的上升，其旋转强度会减弱并逐渐趋于均匀，但在水平烟道和炉膛出口仍然存在烟气流体的残余旋转[13]。当主燃烧区气流切圆为逆时针旋转时，在水平烟道处仍存在逆时针的残余旋转，炉膛出口右侧烟速高于左侧，其水平烟道烟气速度偏差形成原理如图2所示[14]。其中， $v_0$ 为炉膛宽度方向的速度， $v_1$ 为引风机作用下的牵引速度， $v_2$ 为在水平烟道处 $v_0$ 和 $v_1$ 的合成速度。因此理论分析认为造成炉膛出口烟气速度偏差的根本原因是，在其出口处存在烟气残余旋转；反之则左侧高于右侧。

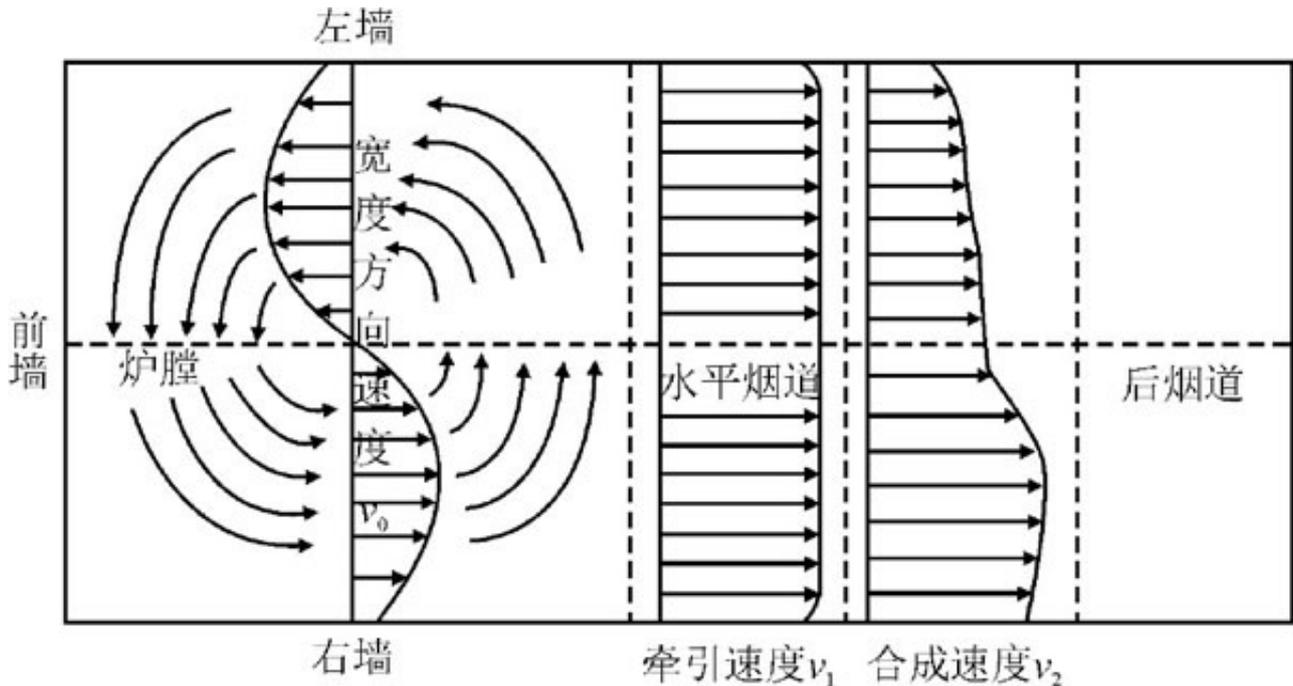


图 2 水平烟道（俯视图）速度偏差形成原理  
Fig.2 Formation principle of velocity deviation at the furnace outlet (top view)

虽然在炉膛顶部布置的大屏换热器会对从炉膛出来的旋转气流起到一定的分流和消除作用，但由于其数量少且布置不够合理对水平烟道气流残余旋转的消除程度有限，所以气流残余旋转会造成水平烟道烟速分布的不均匀性。当烟气通过等距离的水平烟道时，相比高烟速气流，烟速低的气流花的时间更长，单位质量烟气释放的热量更多，烟气温度更低。因此，炉膛出口的烟速偏差会引起烟气温度偏差，烟速较大的一侧烟气温度也较高。

#### 1.5 各项燃烧特性参数的定义

为了进一步描述SOFA反切对炉膛出口左右侧烟气速度场的影响，根据文献[15]，本文引入了平均速度偏差比Z来描述炉膛出口截面左右侧烟气平均速度偏差。

$$Z = \frac{\bar{v}_L}{\bar{v}_R} \quad (4)$$

式中： $\bar{v}_L$  为出口截面左侧烟气的平均速度，m/s； $\bar{v}_R$  为出口截面右侧烟气的平均速度，m/s。

为描述炉膛出口截面上烟气速度的最大值对其速度场分布不均匀性的影响，沿炉膛宽度方向在出口截面上均分选取 15 个竖直截面(L1、L2...L15)来反映炉膛出口烟气的整体分布特征(图 3)，根据文献[16]引入最大速度偏差  $M$ ，其定义为

$$M = \frac{v_m + 3\sigma_v}{v_m} \quad (5)$$

式中： $v_m$  为炉膛出口截面上的最大速度，m/s； $\sigma_v$  为

标准速度方差， $\sigma_v = \left[ \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2 \right]^{0.5}$ ， $n$  为沿炉

膛宽度方向在出口截面上选取的竖直截面个数； $v_i$  为第  $i$  个竖直截面上的平均速度，m/s； $\bar{v}$  为沿炉膛宽度方向在出口截面上所选取的竖直截面的速度平均值，m/s。

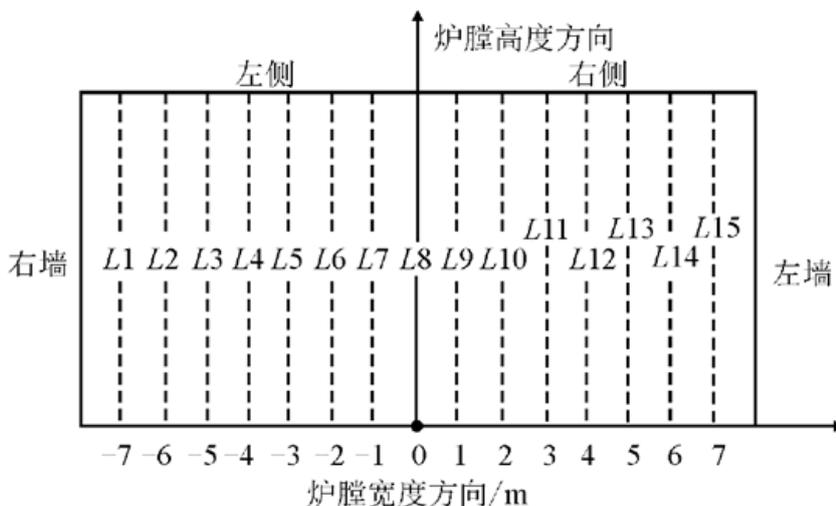


图 3 炉膛出口左右侧区域划分

Fig.3 Division of left and right sides at the furnace outlet

同理，引入平均温度偏差比  $G$  来描述出口截面上左右侧烟气平均温度的偏差，其定义为

$$G = \frac{\bar{T}_L}{\bar{T}_R} \quad (6)$$

式中： $\bar{T}_L$  为出口截面上左侧烟气的平均温度，K； $\bar{T}_R$  为出口截面上右侧烟气的平均温度，K。

为研究各截面上局部温度最大值对温度不均匀性的影响，引入最大温度偏差  $N$ ，定义为

$$N = \frac{T_m + 3\sigma_T}{T_m} \quad (7)$$

式中： $T_m$  为所研究截面的最大温度，K； $\sigma_T$  为标准速度方差， $\sigma_T = \left[ \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})^2 \right]^{0.5}$ ， $T_i$  为第  $i$  个竖直截面温度，K； $\bar{T}$  为沿炉膛宽度方向在出口截面上所选取的竖直截面温度平均值，K。

#### 1.6反切方案的确定

为了降低炉膛出口的残余旋转，利用部分燃烧器反切达到消旋效果的主要措施有：1) 一次风反切技术，虽适用于难燃烧的劣质煤大容量锅炉，但一次风动量较小，对降低炉膛出口气流残余旋转的效果有限；2) 二次风反切技术，二次风速通常相对较大，虽能有效降低炉膛出口的气流残余旋转，但是会对炉膛出口的飞灰颗粒和烟气温度造成一定的影响；3) 燃尽风反切技术，由于燃尽风风温较低、速度相对较大及通常布置在距离炉膛出口较近的燃烧器最上方，采用恰当的反切角度进行燃尽风反切，不仅实现了空气分级，降低出口 $\text{NO}_x$

的质量浓度，还能有效地降低炉膛出口的气流残余旋转。本文以燃尽风不反切燃烧工况为参照工况（工况1），对混燃锅炉拟设置 $10^\circ$ （工况2）、 $15^\circ$ （工况3）和 $20^\circ$ （工况4）等3种不同SOFA反切角度工况，比较分析不同工况下混燃锅炉出口烟气温度和烟速分布，从而确定最佳的SOFA反切角度。其反切示意如图4所示，其中为SOFA反切角

度。各工况模拟的初始参数见表3。

## 2结果及分析

### 2.1 SOFA水平摆动对主燃烧器区速度场的影响

在不同SOFA反切工况下，对主燃烧区最下层松木气、最上层二次风及燃尽风的速度场进行对比分析，其各速度场随炉膛高度分布如图5所示。

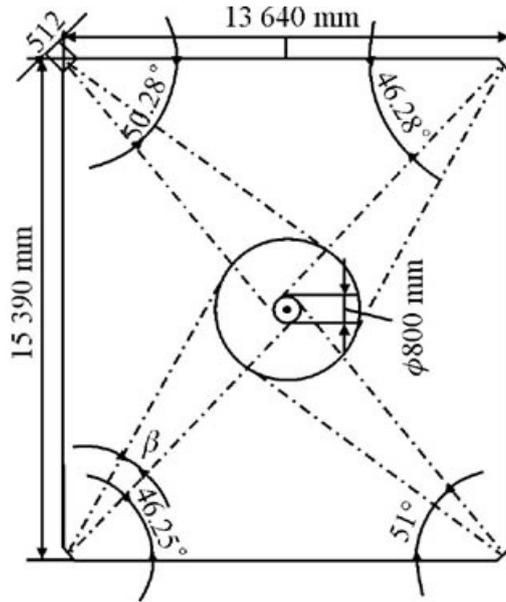


图 4 炉膛 SOFA 反切示意

Fig.4 Schematic diagram of the SOFA reverse tangent

表 3 初始参数

Tab.3 The initial parameters

	松木气	一次风	二次风	SOFA
风速/(m·s <sup>-1</sup> )	41.90	22.50	40.67	54.72
风温/K	873	607	614	614
煤粉消耗量/ (kg·s <sup>-1</sup> )	松木气流量/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )		总空气量/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	
37.30	10.97		278.80	

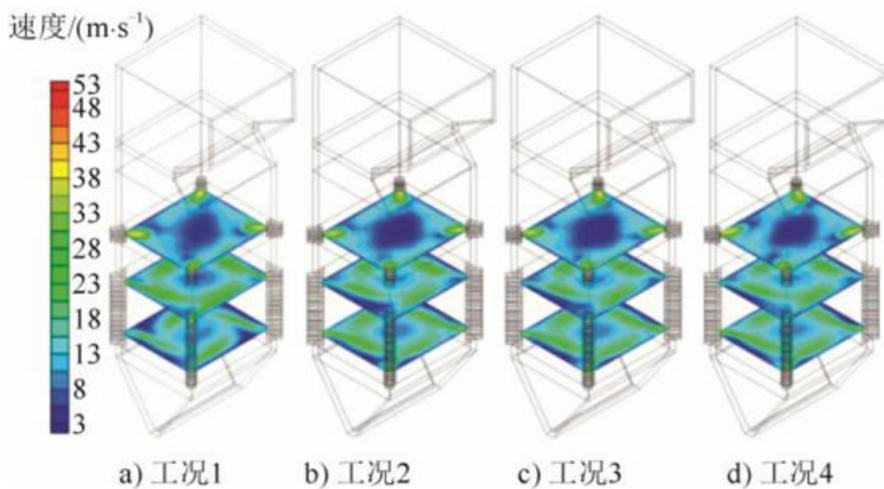


图 5 燃烧器各速度场沿炉膛高度分布

Fig.5 Distribution of velocity in each cross section

降低出口烟气分布不均匀性时,首先要保证SOFA反切对主燃烧区流场稳定性的影响较小,而SOFA喷口距主燃烧区较远,在主燃烧区形成的气流向上流动,因此在理论分析上SOFA水平摆动不会对主燃烧区流场造成明显的影响。从图5可知:在主燃烧区,由于松木气射流强度低于煤粉射流强度,相比于煤粉切圆直径,松木气切圆直径有所增大[17],但松木气与粉煤在主燃烧区的混燃流场稳定,且易燃的松木气提高了炉膛下层煤粉的着火性;相比于不反切工况,由于SOFA反切降低了燃尽风区烟气的顺时针旋流强度,致使反切工况下燃尽风切圆直径有所增大,但主燃烧区最下层松木气和最上层二次风切圆直径变化不大,且其整体速度分布均较为相似。由此可知,SOFA水平摆动不会对主燃烧区流体速度场造成明显的影响。

### 2.2 SOFA水平摆动对主燃烧区温度场的影响

图6为不同SOFA反切工况下炉膛宽度中心截面上烟气温度和炉膛水平截面上烟气平均温度沿炉膛高度分布。由图6可知:在最下层松木气区,由于松木气发热量相对煤粉较小,导致局部烟气温度偏低,随着松木气与煤粉混燃向上卷吸,烟气温度逐渐升高;在主燃烧区中上部,由于大量的煤粉和空气喷入并剧烈燃烧,烟气温度升高至峰值,随后由于煤粉质量浓度的降低以及无氧供给,烟气温度开始降低;但在燃尽风区,由于大量冷空气再次喷入致使未燃尽的煤粉继续燃烧并释放热量,烟气温度再次上升至第二个峰值,其中,SOFA反切工况峰值低于不反切工况,这是因为SOFA反切降低了燃尽风区焦炭与空气的混合程度,影响了煤粉充分燃烧;沿炉膛出口,由于热量的传递,烟气温度逐渐降低。由图6e)可知,SOFA反切对主燃烧区烟气温度影响不明显,且整体温度沿炉膛高度分布一致。因此SOFA适当反切对主燃烧区域的温度场影响不大。

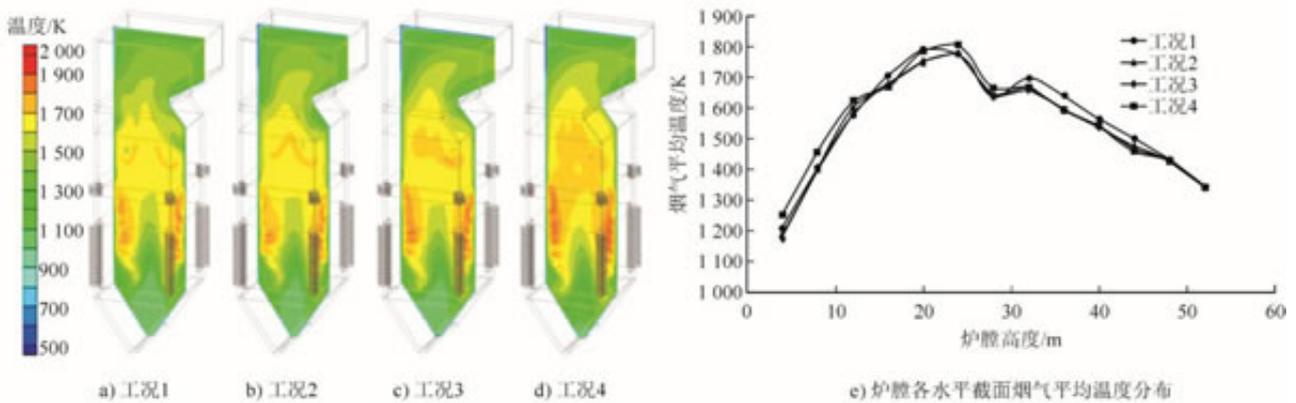


图 6 炉膛宽度中心截面烟气温度和水平截面烟气平均温度沿炉膛高度分布

Fig.6 Distribution of temperature on vertical and horizontal cross-sections along the furnace height direction

### 2.3 SOFA水平摆动对炉膛出口烟气分布不均匀性的影响

图7为在不同的SOFA反切工况下折焰角水平截面和炉膛出口截面的烟气速度场分布。由图7可知:在不反切工况下折焰角处烟气存在明显的切圆,较大的残余旋转致使出口烟速偏差较大;当SOFA开始反切时,折焰角前墙处的烟气高速区逐渐减少且无明显的切圆,这有利于水平烟道的流场均匀性;随着反切角度增至15°时,前墙附近的烟气高速区几乎被消除,其流场分布更加均匀;当反切角度为20°时,折焰角截面开始形成2个较明显切圆,不利于折焰角处烟气流场的均匀性。具体的出口截面烟气速度参数如图8所示。

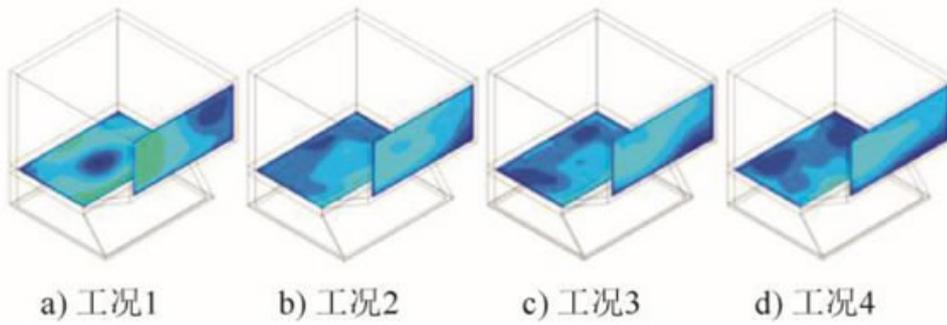
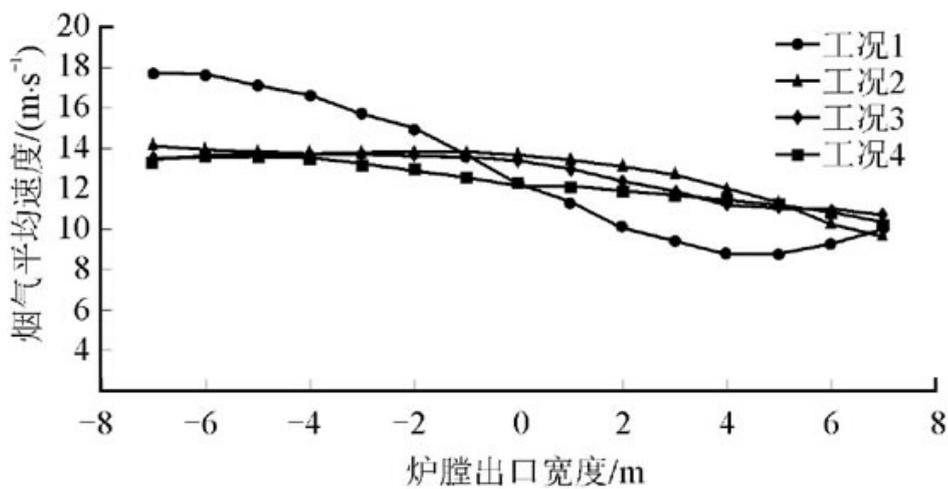
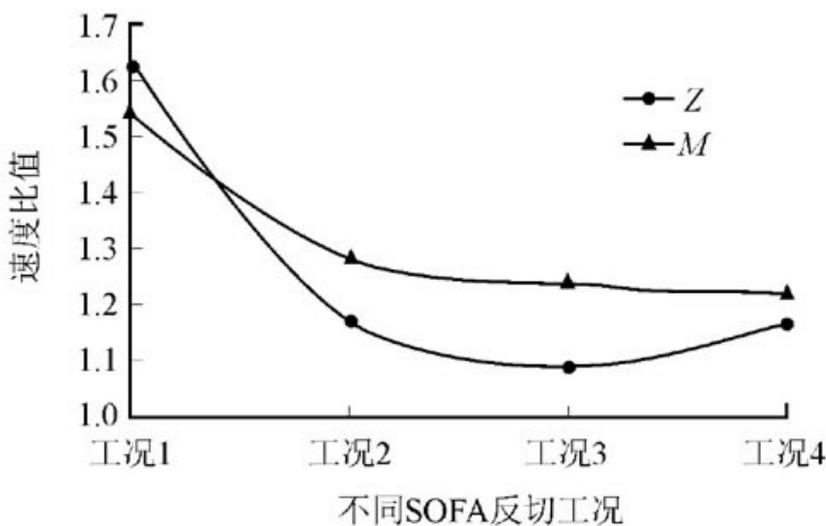


图 7 折焰角水平截面和出口截面的烟气速度场分布  
Fig.7 The velocity fields at the arch nose and furnace outlet



a) 出口截面各竖直截面上的烟气平均速度



b) 出口左右截面烟速偏差比Z和最大速度偏差M

图 8 出口截面烟速分布不均匀性分析

Fig.8 Non-uniform analysis of velocity distribution at the furnace outlet

从图8a)可知：不反切工况的炉膛出口烟气速度分布为左侧烟速高而右侧烟速低，左侧最大烟速约为18m/s，右侧最低烟速约为9m/s，左右侧存在较大的速度偏差，因此可知出口流场旋转方向与炉膛气流旋转方向相同，模拟结果与理论分析相符；当SOFA开始反切时，出口烟速曲线趋于平缓，左右侧速度偏差减小，说明SOFA反切能有效降低烟道处的残余旋转；随着反切角度增至15°时，左侧最大烟速约为13.5m/s，右侧最低烟速约为10.7m/s，左右侧速度偏差最小；反切15°时，出口截面左右侧平均速度偏差比和最大速度偏差更接近于1，当反切角度增至20°时，最大速度偏差变化不大，但平均速度偏差比开始增大。因此根据上述分析可知，当SOFA反切15°时，出口截面烟气速度分布最为均匀。

图9为不同的SOFA反切工况下，折焰角水平截面和炉膛出口截面上的烟气温度场分布。

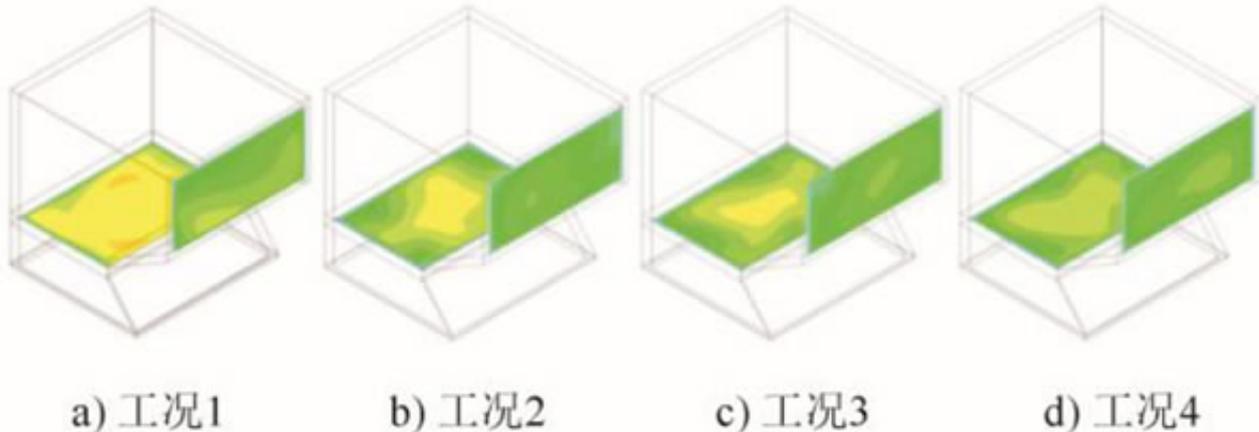
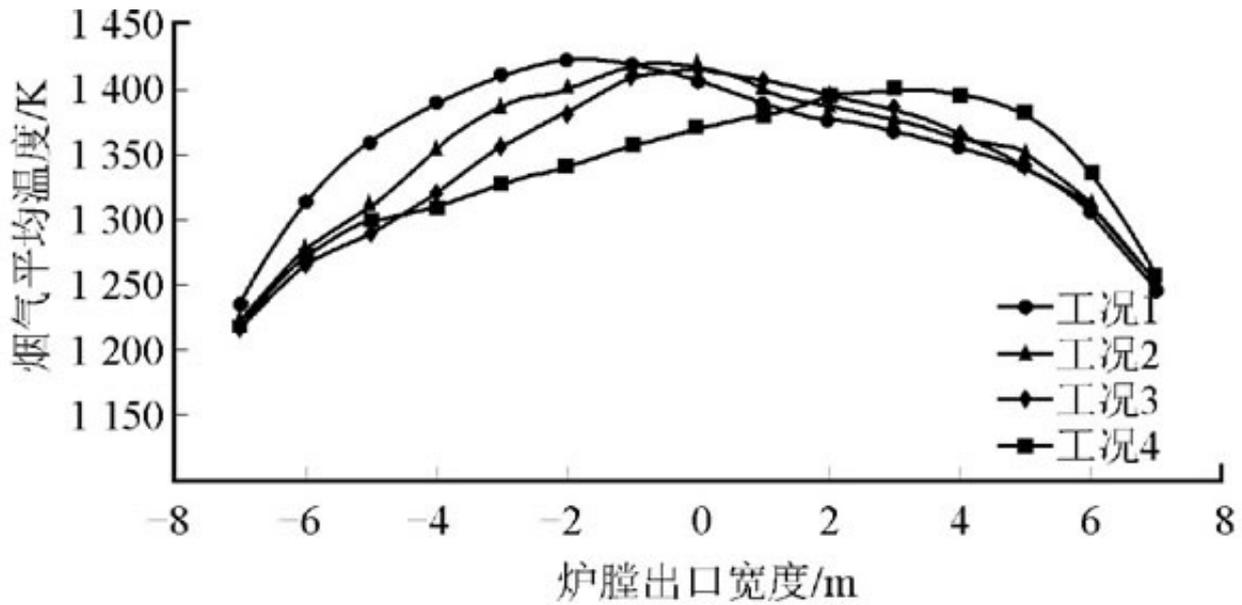
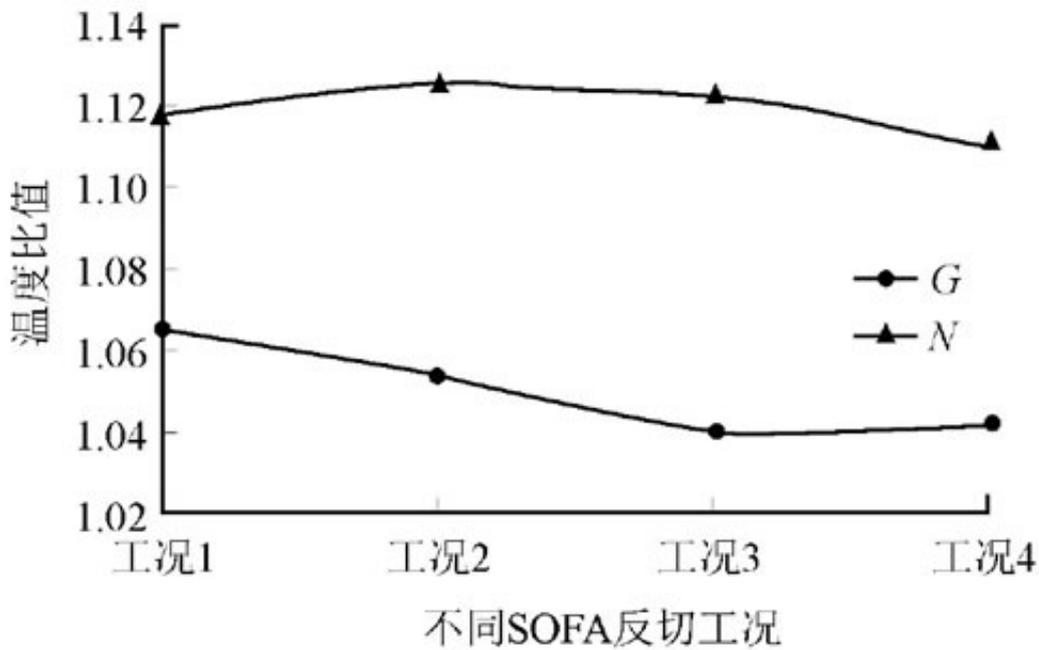


图9 折焰角水平截面和出口截面的烟气温度场分布  
Fig.9 Distribution of temperature at the arch nose and furnace outlet

由图9可知：在不反切工况下由于折焰角处未燃尽煤粉充分混合并稳定燃烧，其截面温度相对于反切工况偏高；在出口截面处，由于左右侧烟速偏差，致使其温度也存在偏差；当SOFA开始反切时，由于粉煤的混合程度降低，折焰角截面烟气温度也随之降低，出口截面中心温度开始向其中心区域偏移；当SOFA反切角度增至15°时，其截面高温区进一步降低，且出口截面中心温度集中在其中心区域；当反切角度增至20°时，折焰角截面高温区再次降低，严重影响到煤粉的充分燃烧，出口截面中心区域向其右侧偏移。具体出口截面烟气温度参数如图10所示。由图10可知：SOFA未反切时，炉膛出口中心温度集中在其左侧，左右侧烟气温度偏差较大；当SOFA开始反切且反切角度为15°时，出口截面中心温度集中在其中心区域且其左右截面平均烟气温度偏差比最低，说明当SOFA反切角度为15°时，出口左右截面烟气温度分布相比于其他2种反切工况更加均匀，而SOFA反切对出口截面最大温度偏差影响较小，均在1.12左右。因此由图9和图10分析可知：当SOFA反切角度为15°时为最佳反切角度，出口截面左右侧平均烟气温度偏差最小，截面中心温度聚集在其中心区域，烟气温度分布的均匀性最佳；相同工况下，出口左右截面速度偏差比大于其温度偏差比，其最大速度偏差大于其最大温度偏差。由此可知，同一工况下，出口烟气温度分布的均匀性较速度分布的均匀性更好。



a) 出口截面各竖直截面上的烟气平均温度



b) 出口左右截面烟气温度偏差比G和最大温度偏差N

图 10 出口截面烟气温度分布不均匀性分析

Fig.10 Non-uniform analysis of temperature distribution at the furnace outlet

3结论

1) 相比于SOFA不反切工况, 只改变SOFA水平摆动角度, 其各炉膛内烟气的速度场和温度场沿炉膛高度变化的规

律大体一致，主燃烧区流体燃烧受SOFA反切角度的影响较小。

2) 在SOFA不反切工况下，折焰角截面存在明显的残余切圆，其整体烟气温度较高，随着SOFA开始反切，其截面切圆消失，中心区域温度逐渐降低，在不影响未燃尽煤粉的充分燃烧下，当反切角度为 $15^{\circ}$ 时，出口截面流场均匀性最好。

3) 随着SOFA开始反切并增至 $15^{\circ}$ 时，出口截面左右侧烟气速度偏差比和其温度偏差比最小，截面最大速度对其烟速分布影响较明显，烟气速度和烟气温度分布的均匀性最好；当反切角度增至 $20^{\circ}$ 时，出口截面中心温度开始向其右侧偏移，且其左右侧烟气速度和烟气温度偏差有所上升，同一工况下烟气温度分布的均匀性要好于烟气速度分布的均匀性。

4) 综合考虑松木气与煤混燃切圆锅炉出口烟气存在的速度偏差和温度偏差情况，在保证SOFA反切对主燃烧区和锅炉安全运行影响较小的前提下，本文选取 $15^{\circ}$ 作为最佳的SOFA反切角度。

## [参考文献]

- [1] 王诚. 2 008 t/h 锅炉热偏差原因分析与改造[J]. 电力安全技术, 2011, 13(2): 35-37.  
WANG Cheng. Analysis and modification of the cause of thermal deviation of 2 008 t/h boiler[J]. Power Safety Technology, 2011, 13(2): 35-37.
- [2] LIU Y, FAN W, LI Y. Numerical investigation of air-staged combustion emphasizing char gasification and gas temperature deviation in a large-scale, tangentially fired pulverized-coal boiler[J]. Applied Energy, 2016, 177: 323-334.
- [3] AKKINPALLY B, SHIM J, YOO K. Numerical and experimental study on biased tube temperature problem in tangential firing boiler[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 126: 92-99.
- [4] PARK H Y, BAEK S H, KIM Y J, et al. Numerical and experimental investigations on the gas temperature deviation in a large scale, advanced low NO<sub>x</sub>, tangentially fired pulverized coal boiler[J]. Fuel, 2013, 104(2): 641-646.
- [5] YIN C, ROSENDAHL L, CONDRA T J. Further study of the gas temperature deviation in large-scale tangentially coal-fired boilers[J]. Fuel, 2003, 82(9): 1127-1137.
- [6] 张广科, 毛华. 锅炉炉膛出口烟气温度高和热偏差原因分析[J]. 大氮肥, 2013, 36(5): 306-308.  
ZHANG Guangke, MAO Hua. Cause analysis of flue gas temperature and heat deviation at furnace outlet[J]. Large Nitrogenous Fertilizer, 2013, 36(5): 306-308.
- [7] 孙春晖, 杜平, 张华. DG670t/h-8 型锅炉燃烧器反切风改造[J]. 河北电力技术, 2006, 25(3): 27-29.  
SUN Chunhui, DU Ping, ZHANG Hua. Burner reverse tangential blowing retrofit of DG670t/h-8 boiler[J]. Hebei Electric Power, 2006, 25(3): 27-29.
- [8] 潘天晟, 张金奎. 采用反切风改善水冷壁近壁气氛的实验研究[J]. 华中电力, 2012, 25(3): 22-26.  
PAN Tiansheng, ZHANG Jinkui. Experiment on improving the atmosphere near the water-wall by reverse tangential wind[J]. Central China Electric Power, 2012, 25(3): 22-26.
- [9] 李成俊. 600 MW 四角切圆燃烧锅炉炉膛出口热偏差研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015: 1-59.  
LI Chengjun. Research on thermal deviation at outlet in a 600 MW tangentially fired boiler[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015: 1-59.
- [10] 张小桃, 闻猛, 王爱军, 等. 燃煤锅炉掺烧松木气燃烧过程数值模拟研究[J]. 可再生能源, 2017, 35(11): 1595-1600.  
ZHANG Xiaotao, WEN Meng, WANG Aijun, et al. Numerical study on the combustion process of pine gas co-firing in a coal-fired boiler[J]. Renewable Energy Resources, 2017, 35(11): 1595-1600.
- [11] 张小桃, 黄明华, 王爱军, 等. 生物质气化特性研究及

- 烟分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2): 282-286.  
ZHANG Xiaotao, HUANG Minghua, WANG Aijun, et al. Characteristics of biomass gasification and exergy analysis[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 27(2): 282-286.
- [12] 张小桃, 闻猛, 丁全斌, 等. 煤粉与生物质气混燃锅炉燃烧特性数值模拟研究[J]. 热能动力工程, 2017, 32(3): 82-87.  
ZHANG Xiaotao, WEN Meng, DING Quanbin, et al. Numerical simulation study on the boiler combustion performance for biomass gas co-firing with pulverized coal[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2017, 32(3): 82-87.
- [13] 潘朝红, 梁化忠, 张新亮, 等. 反切技术减轻烟气温度偏差试验研究[J]. 河北电力技术, 2002, 21(5): 42-43.  
PAN Chaohong, LIANG Huazhong, ZHANG Xinliang, et al. An experimental research on reducing flue gas temperature deviation by counter-tangential air technology[J]. Hebei Electric Power Technology, 2002, 21(5): 42-43.
- [14] 史习仁, 张少根. 大容量锅炉烟侧热力偏差和攻关成效[J]. 锅炉技术, 1998(3): 1-8.  
SHI Xiren, ZHANG Shaogen. Thermal deviation on gas side of large capacity boilers and research results[J]. Boiler Technology, 1998(3): 1-8.
- [15] 严响林, 顾昌, 龚广雄, 等. 一次风微反切对结渣和残余旋转的影响及其数值模拟[J]. 华东电力, 2005, 33(8): 54-58.  
YAN Xianglin, GU Chang, GONG Guangxiong, et al. Influence of reverse tangential mode of primary air on slagging and residual torsion and its numerical simulation[J]. East China Electric Power, 2005, 33(8): 54-58.
- [16] 张晋, 袁益超, 刘聿拯, 等. 分隔屏布置对四角布置切圆燃烧锅炉水平烟道空气动力场的影响[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(17): 6-11.  
ZHANG Jin, YUAN Yichao, LIU Yuzheng, et al. Influence of the panel superheater layout on air dynamic field in tangentially fired boiler horizontal gas pass[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(17): 6-11.
- [17] 张小桃, 赵伟, 闻猛. 不同温度下生物质气与煤粉混燃过程及污染物排放特性[J]. 热力发电, 2017, 46(9): 47-52.  
ZHANG Xiaotao, ZHAO Wei, WEN Meng. Study on co-combustion process and pollutant emission characteristics of biomass gas and pulverized coal at different temperatures[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(9): 47-52.

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/152486.html>