

煤粉掺烧干化污泥的燃烧特性及能效分析

张 成 王 丹 夏 季 陈 刚

(华中科技大学 煤燃烧国家重点实验室 湖北 武汉 430074)

摘 要: 针对某电厂 420 t/h 四角切圆煤粉炉进行掺烧污泥的改造, 根据煤与污泥掺混后在煤粉炉上的着火、稳燃、结渣等特性分析了煤粉炉掺烧干化污泥的可行性, 并利用焓平衡分析方法对煤粉炉掺混不同比例、不同含水率污泥时锅炉效率及各受热面焓损情况进行了分析。结果表明, 当污泥掺混比例小于 1:4 时, 泥煤混合燃烧特性与煤相似, 且烟效率略大; 污泥掺混大于该比例后, 其灰熔点下降明显, 有明显结渣倾向, 且排烟损失显著增加。以上研究结果可为电厂掺烧干化污泥的可行性提供了必要的实验和理论依据。

关 键 词: 混烧; 污泥; 煤粉炉; 燃烧特性; 烟效率
中图分类号: TK121 文献标识码: A

引 言

污泥和煤混烧作为一种新型的污泥处置方式在我国已有成功掺烧的实例, 但应用炉型仅限于循环流化床锅炉^[1-3]。对于在煤粉炉上掺烧污泥, 目前还鲜有案例, 煤粉炉上掺烧污泥较流化床炉相比制粉系统难度加大, 由于煤粉炉燃烧温度较高, 可在很大程度上抑制污泥燃烧过程中二噁英的生成^[4]。

在某电厂 420 t/h 四角煤粉炉掺烧污泥的改造项目中, 基于电厂干化设备的干燥能力和污泥处理量的需求, 利用热重分析及滴管炉试验研究了煤和

不同含水率的污泥在不同掺混比例的泥煤混合物的燃烧特性, 并利用焓平衡分析方法对燃煤锅炉掺混不同比例不同含水率污泥的锅炉效率及各受热面焓损进行了分析, 为电厂掺烧干化污泥的可行性提供了必要的理论依据和实验数据。

1 实验部分

1.1 样品处理及常规分析

泥煤混合样品为某电厂设计煤种(山西煤), 污泥样品来自生活污水处理厂经干化处理后的污泥。将干化污泥和原煤按质量比配置不同比例的泥煤混合样品, 经逐级粉碎、缩分后, 研磨过 200 目筛, 装瓶备用。各样品名称定义为: 单煤(C), 干化污泥(S), 污泥: 煤 = 1:1(SC11), 污泥: 煤 = 1:2(SC12), 污泥: 煤 = 1:4(SC14), 污泥: 煤 = 1:6(SC16), 污泥: 煤 = 1:9(SC19)。

工业分析使用美国 Leco 公司的 MAC - 500 工业分析仪进行测定。元素分析使用德国 Elementar 公司 Vario 元素分析仪进行测定, 结果如表 1 所示。

表 1 样品工业分析和元素分析

Tab. 1 Industrial and elementary analysis of samples

样品	元素分析(wt % ,ar)					工业分析(wt %)				$Q_{ar,net}$ /kJ · kg ⁻¹
	C	H	O*	N	S _t	M _{ar}	M _{ad}	A _{ad}	V _{daf}	
C	54.40	4.00	7.47	1.04	0.54	12.60	2.41	22.28	39.43	22.29
S	19.63	3.32	11.19	3.21	0.70	20.00	2.79	50.98	87.05	7.28
SC11	37.02	3.66	9.33	2.13	0.62	16.30	2.60	36.63	63.24	14.79
SC12	42.81	3.77	8.71	1.76	0.59	15.07	2.54	31.85	55.30	17.29
SC14	47.45	3.98	8.25	1.45	0.57	13.66	2.35	27.98	46.00	17.38
SC16	49.71	3.87	8.15	1.36	0.55	13.59	2.54	25.68	43.20	19.03
SC19	50.92	3.80	7.90	1.24	0.55	13.34	2.43	25.05	42.48	19.26

* : 氧含量差减法计算得出。

收稿日期: 2011 - 06 - 24; 修订日期: 2011 - 11 - 15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51021065 51006042); 广东省教育部产学研结合项目基金资助(2009B090300304)

作者简介: 张 成(1980 -) 男, 湖北武汉人, 华中科技大学博士后。

1.2 样品灰熔点及灰成份分析

样品的灰熔点测定采用英国 CARBOLITE 公司生产的灰熔点分析仪灰成份测试仪器为荷兰帕纳科公司的 AXIOS advanced X 射线荧光光谱仪。样品的灰熔点和灰成份测定结果如表 2 所示。

表 2 样品灰成份及灰熔点

Tab.2 Ash component and melting point of samples

	样品名称						
	C	S	SC11	SC12	SC14	SC16	SC19
SiO ₂ /%	53.40	44.48	47.35	48.34	50.32	51.57	51.71
Al ₂ O ₃ /%	30.51	22.29	24.94	26.02	27.67	28.55	28.95
Fe ₂ O ₃ /%	3.72	6.50	5.60	5.11	4.68	4.31	4.25
CaO /%	3.68	3.97	3.88	3.80	3.78	3.90	3.74
MgO /%	1.67	2.71	2.38	2.19	2.03	1.77	1.87
K ₂ O /%	1.20	2.69	2.21	1.95	1.71	1.56	1.48
Na ₂ O /%	0.79	2.42	1.90	1.62	1.35	1.21	1.10
TiO ₂ /%	1.35	0.80	0.98	1.06	1.16	1.22	1.25
SO ₃ /%	2.14	0.63	1.12	1.35	1.62	2.13	1.85
P ₂ O ₅ /%	0.28	11.7	8.04	6.15	4.23	2.37	2.45
MnO /%	0.04	0.16	0.12	0.10	0.08	0.07	0.06
其它 /%	1.22	1.63	1.50	1.42	1.36	1.34	1.30
DT /°C	1150	1064	1060	1068	1072	1200	1176
ST /°C	1438	1210	1280	1310	1330	1340	1370
FT /°C	1474	1272	1324	1324	1426	1444	1472

1.3 热重实验

分别选取单煤、单泥和泥煤不同比例混合样进行热重实验。热重实验采用的是德国 NETZSCH STA409C 型差式热天平,实验条件: 取样质量 20

mg; 样品粒径 < 90 μm; 空气气氛(O₂: N₂ = 1: 4); 气流流量为 100 mL/min; 升温速率为 20 °C /min; 温度范围从室温到 1 100 °C。

2 结果与分析

2.1 基本特性分析

由表 1 数据可以看出, 污泥具有典型的高挥发分、高灰分的特点。为保证泥煤掺混后热值, 所研究的最大污泥掺混比例为 50%。

从表 2 灰成份分析数据看出, 污泥中硅铝酸盐含量较煤中含量偏低, 碱土金属 Ca、K、Na、Mg 的含量和 Fe 含量较煤中偏高污泥的灰熔点较单煤明显偏低, 掺混样品的灰熔点位于单煤和单泥的灰熔点之间。

2.2 热重实验分析

单煤、污泥及其不同比例混合物的热重 TG、DTG 曲线如图 1 所示。从图中可以看出, 污泥的 DTG 曲线存在有 3 个明显的失重峰, 分别位于 100、380 和 500 °C 3 个温度。100 °C 左右温度区间短峰值较小, 判断这一阶段为污泥脱水干燥失重过程; 380 °C 左右温度区间的失重峰较陡峭, 为污泥内部大量挥发分的析出和燃烧; 500 °C 温度段出现的失重峰则是污泥中固定碳的燃烧过程。对于单煤来说, DTG 曲线仅在 300 ~ 670 °C 温度范围内观察到与固定碳燃烧过程相对应的明显的失重过程, 最大失重峰出现在 500 °C 左右。由此可见, 煤粉的燃烧过程中起主要作用的是固定碳的燃烧, 而污泥在燃烧过程中, 其高挥发分的析出和燃烧起主要作用。

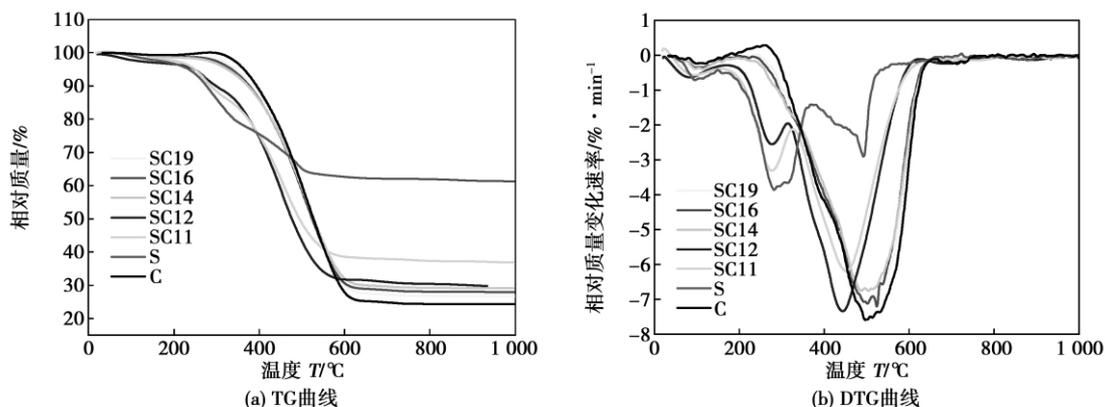


图 1 单煤、污泥及其不同比例污泥和煤混合物的 TG、DTG 曲线

Fig.1 TG and DTG curves of single coal, sludge and mixture in different proportions of sludge and coal

分析泥煤不同比例掺混后混合样品的热重曲线

可以看出, 当污泥掺混比例小于等于 1:4 时, 混合样

的 DTG 曲线基本和单煤保持一致,当掺混比例大于等于 1:2 时,混合样品在 380 °C 温度段出现了明显的失重峰,说明混合样中挥发分的释放行为表现为污泥中的挥发分释放特征,同时混合样的固定碳的最大失重峰在掺混后较单煤有所提前。这是由于污泥掺混比例增大,挥发分提前析出量增大,为固定碳的燃烧提供了足够的热量和空隙,使得固定碳燃烧的最大失重峰较单煤有所提前。

通过 TG/DTG 曲线确定着火温度、最大失重速率 $(dW/dt)_{max}$ 、最大失重温度 T_{max} 、易燃峰最大反应速率 R_{1max} 、燃尽温度 T_h 和燃尽时间 Γ_{98} ,如表 3 所示。

表 3 样品燃烧特征参数

Tab. 3 Combustion characteristic parameters of samples

	C	S	SC11	SC12	SC14	SC16	SC19
$T_i / ^\circ\text{C}$	388	212	326	330	377	379	382
$(dW/dt)_{max} / \% \cdot \text{min}^{-1}$	7.58	3.86	6.17	7.34	6.74	7.12	7.06
$T_{max} / ^\circ\text{C}$	498	281	451	443	502	502	504
$R_{1max} / \text{mg} \cdot \text{min}^{-1}$	1.52	0.77	1.23	1.47	1.35	1.42	1.41
$T_h / ^\circ\text{C}$	604	457	537	537	590	588	592
Γ_{98} / min	10.8	12.3	10.6	10.4	10.7	10.5	10.5

从表 3 可以看出,污泥的着火点较单煤要明显偏低,随着污泥掺烧比例的增加,混合样品着火温度略有降低,当污泥与煤混合比小于 1:4 时,着火性能与煤的相差不大,但当混合比超过 1:4 时,着火性能明显降低,这主要是由于污泥中含有的大量挥发分的燃烧促进了着火性能。从燃尽特性方面比较,掺混后混合物的燃尽温度较单煤略低,而燃尽时间较单煤和单泥都缩短,可能是由于煤掺混污泥后挥发分含量升高使得泥煤混合物燃烧初期由于挥发分的析出和燃烧,为固定碳的着火提供了更多热量,使固定碳着火提前,从而缩短泥煤混合物的燃尽时间。

总体来说,污泥和煤的混合物的燃烧特性表现为污泥与煤共同作用的结果。泥煤混合物的燃烧特性与污泥的掺混比例有密切关系,研究选取的污泥和煤样品分析结果看出,当污泥掺混比例小于等于 1:4 时,泥煤混合物的燃烧特性趋近与单煤的燃烧特性,某些方面优于煤单独燃烧的结果。当污泥掺混比例增大到 1:2 时,混合物的燃烧特性受污泥影响较大。

2.3 结渣特性分析

污泥的灰成份和煤相比有一定差异,在与煤混

合后,由于矿物质的组成、含量发生变化以及它们之间的相互影响、相互制约,使得不同矿物质发生化学反应,从而改变了泥煤混合物的灰熔融特性。本研究对样品结渣特性的判别采用哈尔滨电站设备成套设计研究所提出的结渣程度最优分割准则^[5],如表 4 所示。根据样品的灰熔点和灰成份分析,综合考察了污泥掺烧后对锅炉结渣特性的影响,如表 5 所示。从结渣特性看来,随着污泥的掺入,混合样品的灰熔点下降趋势较明显,混合后的样品处于中等结渣范围,但从灰成份判别指标看,泥煤混合物的结渣特性与单煤相比没有产生较大变化,仍位于轻微结渣范围。

表 4 常用结渣程度判别指标

Tab. 4 Commonly-used index for judging slagging degree

判别指标	结渣程度			置信度 / %
	轻微	中等	严重	
灰熔点 $T_2 / ^\circ\text{C}$	>1390	1390 ~ 1260	<1260	83
碱酸比 B/A	<0.206	0.206 ~ 0.4	>0.4	69
硅比 G	>78.8	78.8 ~ 66.1	<66.1	67
$\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$	<1.87	1.87 ~ 2.65	>2.65	61

表 5 单煤和单泥的结渣指数

Tab. 5 Slagging exponent of single coal and sludge

样品名称	结渣指数							
	$T_2 / ^\circ\text{C}$	结渣程度	B/A	结渣程度	硅比	结渣程度	硅铝比	结渣程度
C	1438	轻微	0.13	轻微	85.5	轻微	1.75	轻微
S	1210	严重	0.27	中等	77.1	中等	2	中等
SC11	1280	中等	0.22	中等	79.8	轻微	1.9	中等
SC12	1310	中等	0.19	轻微	81.3	轻微	1.86	轻微
SC14	1330	中等	0.17	轻微	82.8	轻微	1.82	轻微
SC16	1340	中等	0.16	轻微	83.8	轻微	1.81	轻微
SC19	1370	中等	0.15	轻微	84	轻微	1.79	轻微

2.4 掺烧污泥锅炉能效的焓分析

结合锅炉特性参数,针对不同含水率的干化污泥与煤粉按不同比例掺混后的样品进行了焓平衡计算分析。通过计算,得到不同掺混比例下炉内各受热面的传热量、介质进出口参数和锅炉各项热损失和焓损失分布情况,以及各混烧样品的焓效率,并对锅炉设备及各个组成部分的性能和能量利用状况进行了全面的评价。焓平衡分析法不但能反映燃煤电站锅炉掺烧污泥过程中锅炉的外部损失如排

烟、散热等损失,而且能揭示能量转换利用过程的内部损失,即不可逆过程损失,还能较为完善地分析电站锅炉中各受热面的能量利用情况^[6~7]。

2.4.1 锅炉内部烟损失

锅炉内部烟损失包括燃烧烟损失和传热烟损失,是锅炉整体烟损的主要部分。因此,针对单煤、单泥及泥煤掺混后锅炉的内部烟损失进行了计算分析,结果如表6所示。

表6 单煤、单泥及混合样品内部烟损失(%)

Tab.6 Inner exergy loss of single coal, sludge and mixture samples

	燃烧不可逆烟损失	传热烟损失	内部烟损失	混样内部烟损失与单煤的差值
C	31.87	17.58	49.45	-
SC19	32.83	16.38	49.21	-0.232
SC16	32.92	16.33	49.25	-0.194
SC14	33.93	15.50	49.43	-0.012
SC12	33.10	16.47	49.56	0.118
SC11	34.11	15.80	49.91	0.461
S	40.24	12.00	52.24	2.799

由结果可以看出,在锅炉内部,炉膛的燃烧不可逆烟损失最大。随着污泥掺混比例的增加,锅炉燃烧不可逆烟损失逐渐增加。这主要是由于污泥挥发分含量较高,碳含量较低,热值较低,在炉膛内燃烧后产生的燃气烟比煤燃烧后产生燃气烟要小。因此相比煤燃烧而言,污泥燃烧时燃气的烟与燃料和空气的烟差值较大,因此燃烧不可逆烟也较大。对于锅炉传热烟损失来说,随着污泥掺混比例增加,传热烟损失减小。这是由于单煤燃烧时,烟气温度较污泥燃烧时高,与工质间传热温差大,因而传热烟损失大。

从整体而言,当污泥和煤掺混比例较小,比例不大于1:4时,混合样品内部烟损失小于单煤,而是当掺混比例大于等于1:2时,混样内部烟损失大于单煤。因此,在煤中适当掺混污泥,可以减少内部烟损失,提高燃烧烟效率,但污泥和煤掺混比例应不宜过大,可以污泥和煤比例1:4作为参考。

2.4.2 烟平衡效率分析

锅炉烟平衡效率计算结果如图2所示。从图中可以看出,在相同的掺混比例下,20%和30%含水率的污泥掺混燃烧时对锅炉整体烟效率影响不大;在相同污泥含水率下,随着污泥掺混比例的增加,烟效率先增大后变小。而当混样泥煤掺混比例

小于等于1:4时,烟效率略大于单煤可能是因为污泥的加入使得烟气与工质的温差变小,传热烟损失降低,燃烧得到优化。而当泥煤掺混比例增加时,燃烧不可逆烟损失比例增加,所占比例超过了燃烧优化带来的传热烟损的降低,使得总烟效率降低。

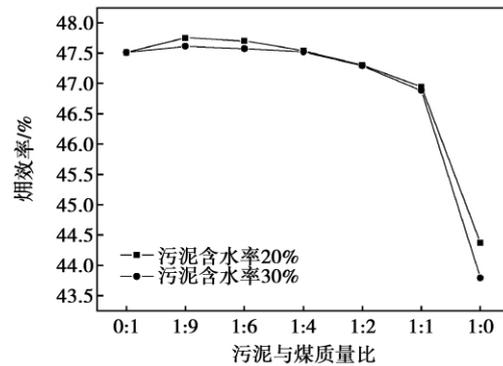


图2 不用含水率污泥掺混后锅炉烟平衡的效率比较

Fig.2 Comparison of the efficiencies of boiler exergy equilibrium after dilution and mixing of sludge without any water content

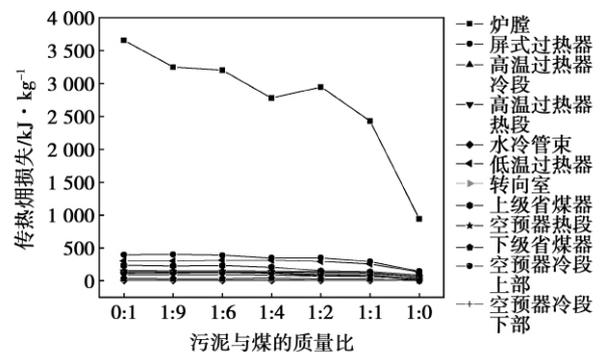


图3 受热面传热烟损失(20%含水率污泥)

Fig.3 Heating surface heat transfer exergy loss(sludge with 20% water content)

2.4.3 单个受热面烟损分析

分段计算了锅炉不同受热面的传热烟损失,结果如图3所示。从图中可以看出,相比其它换热器,炉膛传热烟损失占全部传热烟损失的60%~70%,随着污泥和煤质量比的增加,传热烟损失整体呈下降趋势。除炉膛外,屏式过热器传热烟损失最大,下级省煤器、转向室、水冷管束的传热烟损失较小。由此可见,炉膛受热面烟损失是锅炉各受热面烟损失的主要部分,这主要是由于炉膛燃烧温度高,烟气与工质温度梯度较大所产生。

3 结 论

(1) 污泥具有典型的高挥发分、高灰分和低固定碳、低热值的特点,煤粉的燃烧过程中起主要作用的是固定碳的燃烧,而污泥燃烧过程中,高挥发分的析出和燃烧起主要作用。

(2) 污泥掺烧比例大于 1:4 时,混合燃烧特性相似于污泥;小于等于 1:4 时,混合燃烧特性与煤相似。污泥的灰熔点较低,灰成份较单煤有较大差异,单煤掺混污泥后灰熔点下降明显。

(3) 通过锅炉烟效率计算表明,当泥煤掺混比例不大于 1:4 时,锅炉的排烟损失增加不显著,当掺混比例大于 1:4 时,排烟损失显著增加。随着泥煤掺混比例的增加,锅炉烟效率是先增大后变小。当污泥掺混比例小于等于 1:4 时,烟效率略大于单煤。而当泥煤掺混比例进一步增加时,燃烧不可逆烟损失比例增加,其增加幅度超过了燃烧优化带来的烟效率的上升,使得锅炉整体烟效率降低。

(4) 总体来说,燃煤锅炉掺烧少量干化污泥进行燃烧是可行的,但应控制泥煤掺烧比例小于 1:4。

参考文献:

[1] 穆晓军,王学涛.城市污泥与煤 CFB 混烧研究进展[J].电站系统工程,2008,24(4):1-3.
MU Xiao-jun,WANG Xue-tao. Advances in the study of the blen-

ded combustion of municipal sludge and coal in a CFB [J]. Power Plant Systematic Engineering, 2008, 24(4): 1-3.

[2] 吴成军,段钰锋.循环流化床内污泥与煤混烧时汞的浓度和形态分布[J].动力工程,2008,28(2):308-313.
WU Cheng-jun,DUAN Yu-feng. Mercury concentration and morphological distribution in a CFB when burning a mixture of sludge and coal [J]. Power Engineering, 2008, 28(2): 308-313.

[3] Gulyurtlu I, Helena Lopes M. The study of partitioning of heavy metals during fluidized bed combustion of sewage sludge and coal [J]. Journal of Energy Resources Technology, 2006, 128: 104-110.

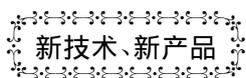
[4] 李润东,聂永丰,李爱民,等.垃圾焚烧飞灰熔融过程中二噁英分解特性[J].化工学报,2004,55(4):668-672.
LI Run-dong, NIE Yong-feng, LI Ai-min, et al. Decomposition characteristics of dioxin when melting flying ash during incineration of garbage [J]. Journal of Chemical Industry, 2004, 55(4): 668-672.

[5] 哈尔滨普华煤燃烧技术开发中心.大型煤粉锅炉燃烧设备性能功能设计方法[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2002.
Harbin Puhua Development Center for Coal Combustion Technology. Method for designing the performance and functions of large-sized pulverized coal boiler combustion equipment [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2002.

[6] Sengupta S, Datta A, Duttgupta S. Exergy analysis of a coal-based 210 MW thermal power plant [J]. International Journal of Energy Research, 2007, 31: 14-28.

[7] Kwak H Y, Kim D J, Jeon J S. Exergetic and thermoeconomic analyses of power plants [J]. Energy, 2003, 28: 343-360.

(陈 滨 编辑)



新技术、新产品

FT4000 航改型燃气轮机

据《Gas Turbine World》2011年11-12月号报道,基于Pratt的PW4000级航空涡轮风扇发动机,Pratt & Whitney公司正在研制下一代FT4000航改型燃气轮机。在超过850台航空发动机上,PW4000级涡扇发动机已累计运行2600万飞行小时。

除了修改的核心压气机和工业动力涡轮外,FT4000保持与PW4170和PW4000母型航空发动机超过90%的零件的通用性。

工业型机组的特征是具有湿压缩,以便改进在超过15.6℃环境温度下的性能,并在没有外部冷却的情况下得到超过41%的简单循环效率。

在冷态启动时,在10 min内,它就能够从零功率达到全部输出功率。

如同FT8系列那样,FT4000将被组装成单和双燃气轮机结构,额定输出功率分别为60 MW和120 MW(两台发动机被连接到一台发电机),用于峰值负荷、中间范围负荷和基本负荷电力生产。

将在2013年得到第一台样机,并于2014年展开全面的生产。

(吉桂明 摘译)

1 000 MW 级核主泵内部非定常流动特性 = **Unsteady Flow Characteristics of a 1 000 MW Nuclear Power Plant Main Pump** [刊 汉] ZHU Rong-sheng, ZHENG Bao-yi, LI Xiao-long, FU Qiang (Research Center for Fluid Machinery Engineering Technologies, Jiangsu University, Zhenjiang, China, Post Code: 212013) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012 27(3). - 377 ~ 382

To analyze in depth the flow field inside a 1 000 MW nuclear power plant main pump, numerically simulated was the main pump by using the commercial computational software CFD with the pressure fluctuation characteristics of the pump in question being obtained. The research results show that the pressure fluctuation inside the pump assumes a periodic change and the frequencies influenced by the impeller blades on the fluid are those integral number times of the rotational speed frequency $f = 24.2$ Hz and of its harmonic waves. The amplitude of the pressure fluctuation inside the impeller increases gradually from the leading edge to the trailing edge of the blades while that in the guide blades decreases gradually from the leading edge to the trailing edge. The change in the volute of the pump is relatively small. Under different operating conditions, the amplitude of the pressure fluctuation is minimum at the rated-load operating condition but maximum under the operating condition at a smallest flow rate. The more deviates from the rated flow rate, the worse the pressure fluctuation. **Key words:** nuclear power plant main pump, unsteady flow, pressure fluctuation, main frequency, numerical simulation

煤粉掺烧干化污泥的燃烧特性及能效分析 = **Combustion Characteristics and Analysis of the Energy Efficiency of a Coal-fired Boiler Burning Coal Diluted and Mixed With Dried Sludge** [刊 汉] ZHANG Cheng, WANG Dan, XIA Ji, CHEN Gang (National Key Laboratory on Coal Combustion, Central China University of Science and Technology, Wuhan, China, Post Code: 430074) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012 27(3). - 383 ~ 387

For a construction project of a 420 t/h tangential pulverized coal-fired boiler, analyzed was the feasibility of the pulverized coal-fired boiler to burn coal diluted and mixed with dried sludge from such characteristics as ignition, steady combustion and slagging etc. and the exergy balance analytic method was used to analyze the efficiency of the boiler and the exergy loss of various heating surfaces when burning coal mixed and diluted with sludge in various proportions and water contents. The research results show that when the proportion of sludge mixed and diluted is less than 1:4, the sludge-coal blended combustion characteristics are similar to coal and meanwhile the exergy efficiency of the mixture is slightly higher than that of coal. After the proportion of sludge mixed and diluted is greater than 1:4, the ash melting point of the mixture sample will drop obviously, tend to slag conspicuously and the exhaust gas loss will increase remarkably. The foregoing can offer a necessary experimental and theoretical basis for analyzing the feasibility of a power plant to burn coal diluted and mixed with dried sludge. **Key words:** mixed combustion, sludge, coal-fired boiler, combustion characteristics, exergy