

文章编号: 1004-8774(2014)06-0031-06

生物质锅炉防止受热面结渣的降低烟温方法分析

刘 峰¹ 李之光¹ 梁耀东² 陈 彬³

(1. 大连之光锅炉研究所 辽宁 大连 116013;

2. 辽宁盛昌绿能锅炉有限公司 辽宁 营口 115000;

3. 大连旅顺锅炉有限公司 辽宁 大连 116048)



摘 要: 对烟气再循环与掺冷空气两种降低烟温方法进行了全面对比分析,并指出二者的各自优缺点;对于容量不是很大的生物质锅炉,采用掺冷空气方法较适宜。

关键词: 烟气再循环; 掺冷空气; 生物质锅炉

中图分类号: TK229.92

文献标识码: A

第一作者: 刘 峰 (1973-) ,毕业于东北大学,高级工程师,主要从事锅炉的设计与研发工作,参与《工业锅炉现代设计与开发》、《锅壳锅炉原理与设计》的撰写工作并发表多篇锅炉方面的论文。

Analysis of the Flue Gas Temperature Lowering Methods to Avoid Slagging on Heat-transfer Surface for Biomass Fired Boilers

LIU Feng¹ ,LI Zhi-guang¹ ,LIANG Yao-dong² ,CHEN Bin³

(1. Zhi-guang Boiler Research Institute ,Dalian 116013 , Liaoning ,China;

2. Liaoning Shengchang Bioenergy S&T Co. Ltd. , Yingkou 115000 , Liaoning ,China ;

3. Dalian Lüshun Boiler Co. Ltd. , Dalian 116048 , Liaoning ,China)

Abstract: Comprehensively compares two lowering flue gas temperature methods (recirculation flue gas and mixing cold air) and points out their advantages and disadvantages. It is a better way to use the method of mixing cold air for the small capacity biomass fired boiler.

Key words: flue gas recirculation; mixing cold air; biomass fired boiler

0 前言

生物质锅炉较燃煤锅炉存在诸多问题^[1-2]: 受热面结渣、磨损、积灰、燃烧层结焦(结渣)、进料困难等(不同生物质燃料,程度不同)。对于常用的生物质燃料(豆秸、棉秸、麦秸、稻壳、玉米秸、向日葵杆等),由于灰熔点(常指灰的软化温度 ST)较低^[3],受热面结渣问题最突出。

按我国锅炉设计方法^[4],为防止结渣,炉膛出口烟气温度应不高于灰的开始变形温度 DT ;另外,从技术经济(辐射受热面与对流受热面最佳匹配)与有利于燃烧考虑又不宜低于 $950\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。这对于上述常用生物质燃料(灰的开始变形温度 DT 较低)不采取专门措施是不可能同时兼顾到的。生物质锅炉首先应满足技术经济与有利于燃烧的基本要求,而受热面结渣可采取其它措施来防止。目前,防止结渣的直接

有效且技术经济可行的措施是降低烟气温度。

常用的降低烟气温度的方法是烟气再循环(将尾部低温烟气靠再循环风机抽出并引入对流受热面前部或炉膛下部)。此方法尽管基本不影响锅炉热效率,但需要增加再循环风机与烟气管道,并需考虑它们在锅炉房内的布置,也要关注再循环风机能耗问题。掺冷空气(靠烟道负压自行吸入外界空气)方法也可达到同样目的,而且颇为简易,由于担心热效率下降,故习惯上不采用。但如果热效率下降值不大,仍能满足节能规范对热效率的要求,未尝不是一种可行措施(我国“TSG G0002—2010 锅炉节能技术监督管理规程”是针对以煤、油、气为燃料的锅炉,而其它燃料参照执行)。实际上,有些直接加热式热风炉为防止空气加热器壁温过高,采用掺冷空气方法来降低烟温,此时热效率虽有些下降,但仍能满足热风炉技术条件对热效率的要求^[5-6]。有些水泥窑余热锅炉为防止受热面结渣,掺冷空气也是一

收稿日期: 2014-03-31

种有效措施。

本文以北京盛昌绿能科技有限公司 10 t/h 新型水火管燃煤锅炉改烧棉秸(段)为例,对这两种降温方法进行详细对比分析。

本文给出的计算方法也适用于新设计的各种燃料锅炉,对于高温烟气加热空气的直接加热式热风炉换热器,本文给出的计算分析方法同样适用。

本文计算依据是层状燃烧及流化床燃烧工业锅炉热力计算方法^[4],此方法源于原苏联锅炉热力计算标准(炉膛辐射传热公式验证了近千个试验数据,标准适用燃料甚广^[7],就影响辐射传热的发热量、挥发分、成分等而言,也涵盖了各种生物质燃料^[3])。生物质燃料锅炉热力计算可以参照此计算方法进行。因而,本文计算结果具有足够可靠性。

1 烟气再循环法

1.1 应考虑的问题

由图 1 可见,再循环烟气引入炉膛出口(八字烟道入口偏低一些,与主流烟气混合后进入),以防止八字烟道受热面管壁结渣(此处不结渣时,烟管入口不会结渣)。由于引入于炉膛上部出口处,则基本不影响炉排与炉膛热力工况(炉排燃烧、炉膛空间燃尽、辐射换热)。

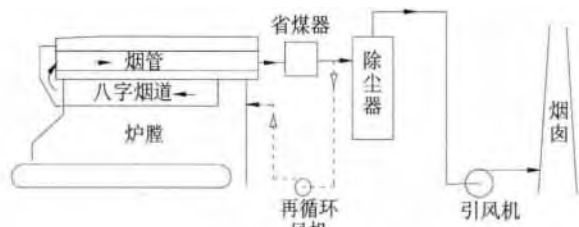


图 1 烟气再循环示意图

对已有锅炉增设烟气再循环时,应考虑存在以下问题:

①再循环烟气抽出与引入点之间的八字烟道排管、烟管与省煤器中的烟温下降,使温压减小,但烟速增加,使传热系数增大。二者共同决定传热效果。

②由于八字烟道、烟管与省煤器中的烟速增加,应注意原有引风机的扬程是否够用,另外,也应考虑烟速增加与灰粒增多使磨损趋势增大问题。

③再循环风机的扬程较大,等于八字烟道、烟管与省煤器中烟速增加后的流阻,再加上再循环管路的流阻。

④再循环烟气一般由除尘器之前抽出,则再循环风机磨损加快;如在除尘器之后抽出,再循环风机的扬程加大。

对新设计锅炉设置烟气再循环时,由于新设计烟速合理,无需考虑上述问题②。

1.2 热力与烟气流阻计算特点

①热力计算

根据再循环的烟量(再循环系数)建立再循环烟气引入与抽出点之间的烟气焓—温关系,仍按锅炉热力计算惯用的焓—温表方法进行计算^[4]。原苏联 1957 版与 1973 版锅炉机组热力计算方法中,均有“烟气再循环”计算的原则性介绍^[7]。

再循环系数:

$$\beta = V_{\text{再循环}} / V_{\text{抽出}}$$

式中 $V_{\text{再循环}}$ ——再循环的烟气容积, m^3/kg (标态)

$V_{\text{抽出}}$ ——抽出点以后的烟气容积(不存在再循环的烟气容积), m^3/kg (标态)

图 2 示出各处烟气容积分布(结合各点空气过量系数 α 值)。

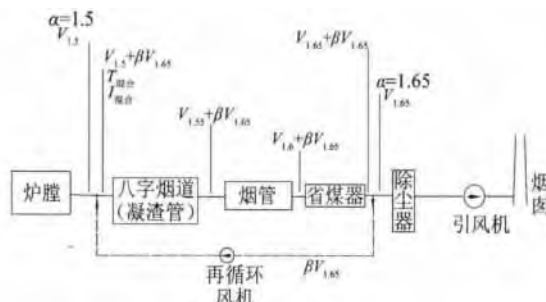


图 2 烟气容积平衡示意图

②烟气流阻计算

烟气再循环锅炉烟道中的烟气压力变化情况见图 3。

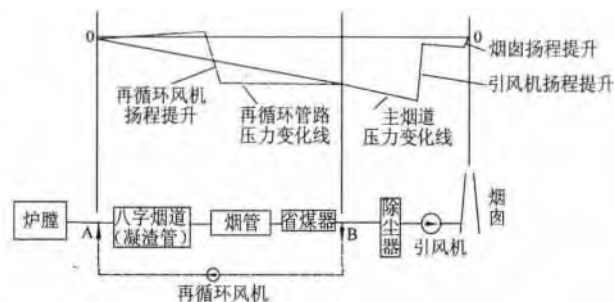


图 3 烟气压力变化线

由图 3 可见:

对于主烟道: $p_B = p_A - \Delta p_{A-B}$

对于再循环烟道: $p_B - \Delta p_{B-A} + H_{\text{再循环}} = p_A$

于是得再循环风机的扬程为

$$H_{\text{再循环}} = \Delta p_{A-B} + \Delta p_{B-A}$$

即再循环风机的扬程 $H_{\text{再循环}}$ 等于考虑烟速增加后的八字烟道、烟管与省煤器中的流阻 Δp_{A-B} , 再加上再循环管路的流阻 Δp_{B-A} 。

此结果由图 3 中的压力变化线亦可看出。

再循环风机的流量等于 $\beta V_{1.65}$ 。

引风机的扬程 H 应考虑由于八字烟道、烟管与省煤器中的烟速增加而使流阻的增大。

引风机的流量不考虑再循环流量的存在。

2 掺冷空气法

由图 4 可见,掺冷空气口位于后墙略低于八字烟道入口位置,使冷空气与炉膛出口烟气混合降温后一并进入八字烟道。

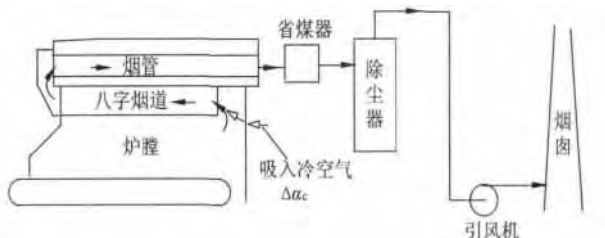


图 4 掺冷空气示意图

2.1 应考虑的问题

对已有锅炉采用掺冷空气法应考虑以下问题:

①冷空气引入点之后的八字烟道、烟管与省煤器中的烟温下降,使温压减小,但烟速增加,使传热系数增大。二者共同决定传热效果。

②由于冷空气引入点之后的八字烟道、烟管、省煤器、除尘器与烟道中的烟速增加,原有引风机的扬程是否够用,另外,也应考虑因烟速增加使磨损趋势加大问题。

对新设计锅炉掺冷空气时,由于新设计烟速合理,不存在上述问题之②。

2.2 热力与烟气流阻计算特点

掺冷空气法的热力与烟气流阻计算与一般计算基本相同,相当于炉膛出口处过量空气系数明显加大的情形。

3 案例分析

以 10 t/h 新型水火管燃煤锅炉改烧棉秸(段)为例。热力计算用的燃料特性见表 1。

表 1 燃料的元素分析与工业分析特性

燃料	$C_{ar}/\%$	$H_{ar}/\%$	$O_{ar}/\%$	$N_{ar}/\%$	$S_{ar}/\%$	$W_{ar}/\%$	$A_{ar}/\%$	$V_{daf}/\%$	$Q_{net,ar}/(kJ \cdot kg^{-1})$
Ⅱ类烟煤	46.55	3.06	6.11	0.86	1.94	9.00	32.48	38.5	17 693
棉秸	46.11	5.9	35.0	0.32	0.18	9.92	2.57	71.1	16 460

3.1 热力计算

(1) 燃棉秸(有烟气再循环)与燃Ⅱ类烟煤

以下按燃Ⅱ类烟煤(无烟气再循环 $\beta = V_{再循环}/$

$V_{抽出}=0$)与燃棉秸($\beta = 0.0.2$ 与 0.3)对比计算,计算结果见表 2。

表 2 热力计算结果对比表(有、无烟气再循环)

序号	名称	符号	单位	燃料	再循环系数 β	炉膛	八字烟道	螺纹烟管	省煤器
0	受热面	H	m^2	Ⅱ类烟煤棉秸	0	23	20.7	163	49.5
1	入口烟温	θ'	$^{\circ}C$	Ⅱ类烟煤	0	—	984	769	236
				棉秸	0.2	—	839	684	236
					0.3		788	650	236
				Ⅱ类烟煤	0	984	769	236	162
2	出口烟温	θ''	$^{\circ}C$	Ⅱ类烟煤	0	—	984	769	236
				棉秸	0.2	971	684	236	167
					0.3		650	236	169
				Ⅱ类烟煤	0	—	11.56	19.5	18.8
3	烟气流速	w_y	m/s	Ⅱ类烟煤	0	—	12.17	20.7	19.9
				棉秸	0.2	—	13.45	24.3	24.1
					0.3		14.03	26.0	26.1
				Ⅱ类烟煤	0	—	678	205	79
4	平均温压	Δt	$^{\circ}C$	Ⅱ类烟煤	0	—	670	205	79
				棉秸	0.2	—	565	184	79
					0.3		523	175	79
				Ⅱ类烟煤	0	—	0.070 1	0.076 1	0.083 4
5	传热系数	K	$kW/m^2 \cdot ^{\circ}C$	Ⅱ类烟煤	0	—	0.072 3	0.080 3	0.087
				棉秸	0.2	—	0.077 5	0.091 5	0.100 1
					0.3		0.080 0	0.096 6	0.106 1
				Ⅱ类烟煤	0	—	0.070 1	0.076 1	0.083 4

续表 2 热力计算结果对比表(有、无烟气再循环)

序号	名称	符号	单位	燃料	再循环系数 β	炉膛	八字烟道	螺纹烟管	省煤器
6	吸热量	Q	kJ/kg	Ⅱ类烟煤	0	6 092	2 394	6 187	793
					0		2 269	6 071	769
				棉秸	0.2	5 245	2 046	6 195	883
					0.3		1 955	6 220	936
7	热效率 [*]	η	%	Ⅱ类烟煤	0			80.4	
					0			84.0	
				棉秸	0.2			83.8	
					0.3			83.7	
8	燃料耗量	B	kg/h	Ⅱ类烟煤	0			1 609	
					0			1 656	
				棉秸	0.2			1 660	
					0.3			1 660	

注: * 取固体未完全燃烧损失 $q_4 = 8\%$ (Ⅱ类烟煤) , 4% (棉秸) 。

(2) 燃棉秸(有无掺冷空气) 与燃Ⅱ类烟煤

温下降情况与烟气再循环时基本相同, 计算结果见

以下按燃Ⅱ类烟煤(不掺冷空气 $\Delta\alpha_c = 0$) 与燃

表 3。

棉秸($\Delta\alpha_c = 0, 0.31$ 与 0.5) 对比计算 $\Delta\alpha_c$ 取值使烟

表 3 热力计算结果对比表(有、无掺冷空气)

序号	名称	符号	单位	燃料	掺冷空气系数 $\Delta\alpha_c$	炉膛	八字烟道	螺纹烟管	省煤器
0	受热面	H	m ²	Ⅱ类烟煤棉秸	Ⅱ类烟煤棉秸	23	20.7	163	49.5
1	出口过量 空气系数	α''	—	Ⅱ类烟煤	0		1.55	1.60	1.65
					0	1.5	1.55	1.60	1.65
				棉秸	0.31		1.86	1.91	1.96
					0.5		2.05	2.10	2.15
2	入口烟温	θ'	℃	Ⅱ类烟煤	0	—	984	769	236
					0		971	766	236
				棉秸	0.31	—	844	687	236
					0.5		784	646	235
3	出口烟温	θ''	℃	Ⅱ类烟煤	0	984	769	236	162
					0	971	766	236	164
				棉秸	0.31	974	687	236	167
					0.5	977	646	235	167
4	烟气流速	w_y	m/s	Ⅱ类烟煤	0	—	11.56	19.5	18.8
					0		12.17	20.7	19.9
				棉秸	0.31	—	13.40	24.2	23.9
					0.5		14.13	26.2	26.4
5	平均温压	Δt	℃	Ⅱ类烟煤	0	—	678	205	79
					0		670	205	79
				棉秸	0.31	—	569	185	79
					0.5		519	173	78
6	传热系数	K	kW/m ² ·℃	Ⅱ类烟煤	0	—	0.070 1	0.076 1	0.083 4
					0		0.072 3	0.080 3	0.087
				棉秸	0.31	—	0.077 2	0.090 8	0.099 5
					0.5		0.080 4	0.097 1	0.107 1
7	吸热量	Q	kJ/kg	Ⅱ类烟煤	0	6 092	2 394	6 187	793
					0	5 245	2 269	6 071	769
				棉秸	0.31	5 208	2 016	6 071	863
					0.5	5 170	1 894	6 005	907

续表3 热力计算结果对比表(有、无掺冷空气)

序号	名称	符号	单位	燃料	掺冷空气系数 $\Delta\alpha_c$	炉膛	八字烟道	螺纹烟管	省煤器
8	热效率*	η	%	Ⅱ类烟煤	0		80.4		
					0		84.0		
				棉秸	0.31		82.2		
					0.5		81.3		
9	燃料耗量	B	kg/h	Ⅱ类烟煤	0		1 609		
					0		1 656		
				棉秸	0.31		1 692		
					0.5		1 710		

注: * 取固体未完全燃烧损失 $q_4 = 8\%$ (Ⅱ类烟煤), 4% (棉秸)。

(3) 分析

由表2、表3可见:

①烟气再循环的 $\beta = 0$ 与 0.2、0.3 时,八字烟道入口烟温由 971 ℃ 降至 839 ℃ 与 788 ℃; 掺冷空气的 $\Delta\alpha_c = 0$ 与 0.31、0.5 时,八字烟道入口烟温由 971 ℃ 降至 844 ℃ 与 784 ℃。这对于大部分灰熔点较低的生物质燃料,能起有效防止结渣作用。

②采用烟气再循环法或掺冷空气法时,平均温压下降(八字烟道最明显、螺纹烟管次之、省煤器很小),烟速与传热系数上升(后部受热面较前部明显),吸热量是八字烟道减小、螺纹烟管变化不大、省煤器增大(总吸热量不变)。综合结果是:采用烟气再循环时,排烟温度、锅炉热效率变化很小;采用掺冷空气时,排烟温度变化很小、锅炉热效率下降(排烟损失 q_2 增大引起的)。

③掺冷空气使热效率降低,但降低值不大,即使掺冷空气系数 $\Delta\alpha_c$ 达 0.5,热效率仅降低 2.7 个百分点,仍达 81.3%。为达到额定出力 10 t/h,需要少许增加燃料耗量 ($1\,710 - 1\,656 = 54$ kg/h),不会影响炉排上的燃烧。

④燃棉秸与燃Ⅱ类烟煤,皆无烟气再循环($\beta = 0$)、不掺冷空气($\Delta\alpha_c = 0$)时,锅炉各处烟温、烟速彼此差别不大,则采用统一辐射与对流受热面是可行的。至于不同生物质的能量密度明显小、挥发物含量明显大、灰熔点偏低等特点可在供料设备、挥发物燃尽措施、烟气再循环或掺冷空气等方面给以考虑。

3.2 烟气阻力计算

3.2.1 采用烟气再循环法

燃用棉秸,按再循环系数 $\beta = V_{\text{再循环}} / V_{\text{抽出}} = 0$ 与 0.2、0.3 的计算结果见表4。

表4 烟气阻力计算结果——有、无烟气再循环

Pa

再循环系数 β	炉膛	八字烟道	前烟箱	螺纹烟管	后烟箱	省煤器	除尘器	烟道	烟囱	自生抽力	全压降
0		103	6	1 047	16	687			154	-142	2 891
0.2	-20	137	10	1 486	23	999	900	100	157	-145	3 687
0.3		154	10	1 720	27	1 162			157	-146	4 104

3.2.2 采用掺冷空气法

燃用棉秸,按掺冷空气系数 $\Delta\alpha_c = 0$ 与 0.31、

0.5 的计算结果见表5。

表5 烟气阻力计算结果——有、无掺冷空气

Pa

掺冷空气系数 $\Delta\alpha_c$	炉膛	八字烟道	前烟箱	螺纹烟管	后烟箱	省煤器	除尘器	烟道	烟囱	自生抽力	全压降
0		103	6	1 047	16	687			154	-142	2 891
0.31	-20	137	10	1 477	23	981	900	100	221	-145	3 724
0.5		159	12	1 744	28	1 191			272	-145	4 281

3.2.3 分析对比

由表4、表5可见:

采用烟气再循环法或掺冷空气法皆使全程烟气阻力增大。

如燃煤(Ⅱ类烟煤)锅炉改烧棉秸,已有引风机

扬程无余量时,可在低负荷下运行,例如掺冷空气系数 $\Delta\alpha_c = 0.5$ 时,可在以下负荷下运行:

$$D = \sqrt{\frac{2\,891}{4\,281}} \times D_e = 0.82 D_e$$

即可在 82% 额定负荷 D_e 下运行。如引风机扬程有余量,则可在大于 $0.82 D_e$ 条件下运行。

如水冷壁结渣明显时,再循环烟气或冷空气可引入炉膛下部最高烟温区,其计算方法与前述相同。此时,炉膛的烟温下降较明显,但炉膛出口烟温下降较小,其原因是加入再循环烟气后,因烟温下降,导致辐射吸热量明显减小所致。为使各处烟温均下降到防止结渣程度,再循环烟气或冷空气量应大于前述值。

3.3 再循环风机功率

再循环风机功率按下式计算:

$$N = \frac{VH}{1000\eta} \text{ kW}$$

式中 V ——再循环风机的工作流量, m^3/s , $V = K_V \beta V_{\text{再循环}} = 1.1 \times 0.3 \times 13151 = 4340 \text{ m}^3/\text{h} = 1.21 \text{ m}^3/\text{s}$, 其中 $V_{\text{再循环}}$ 取自锅炉热力计算书

H ——再循环风机的工作扬程, Pa

$$H = K_H (\Delta H_{\text{主}} + \Delta H_{\text{再循环}}) K_p$$

由表4,再循环系数 $\beta = 0.3$ 时,烟气引入点与抽出点之间的主烟道阻力 $\Delta H_{\text{主}} = 154 + 10 + 1720 + 27 + 1162 = 3073 \text{ Pa}$; 取再循环烟道的阻力 $\Delta H_{\text{再循环}} = 200 \text{ Pa}$, 则

$$H = K_H (\Delta H_{\text{主}} + \Delta H_{\text{再循环}}) K_p = 1.2 \times (3073 + 200) \times 0.89 = 3496 \text{ Pa}$$

式中 K_p ——修正到风机介质设计状态时的修正系数

$$K_p = \frac{1.293}{\rho_0} \times \frac{\theta_{yt} + 273}{200 + 273} \times \frac{101325}{b_k} = \frac{1.293}{1.34} \times \frac{165 + 273}{200 + 273} \times \frac{101325}{101325} = 0.89$$

式中 η ——再循环风机的工作效率,对于一般离心式风机,为 $0.6 \sim 0.7$

则,再循环风机功率:

$$N = \frac{VH}{1000\eta} = \frac{1.21 \times 3496}{1000 \times 0.65} = 6.51 \text{ kW}$$

3.4 掺冷空气入口所需面积

靠炉内负压吸入冷空气时,冷空气入口所需面积按炉内负压与大气压力的差值等于冷空气入口的阻力计算,即

$$\Delta p = \xi \frac{\rho w^2}{2}$$

冷空气入口置于炉膛出口处, $\Delta p = 20 \text{ Pa}$, 近似取阻力系数 $\xi \approx 2$, 空气密度 $\rho = 1.293 \text{ kg}/\text{m}^3$, 得空气流速:

$$w = 3.93 \text{ m/s}$$

掺冷空气系数 $\Delta \alpha_c = 0.5$, 相当于空气量 $V \approx$

$$5945 \text{ m}^3/\text{h} = 1.65 \text{ m}^3/\text{s} \text{ (由锅炉热力计算)}。$$

则所需面积:

$$F = V/w = 1.65/3.93 = 0.42 \text{ m}^2$$

取4个空气入口,则每个尺寸:

圆形: 取 $d = 350 \text{ mm}$;

矩形: 取 $A \times B = 500 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 。

锅炉大部分时间并不在额定负荷下运行,低负荷时的烟温下降,则冷空气入口所需面积减小。因此,冷空气入口的开口面积应是可调的。

4 结语

(1) 采用烟气再循环法降低烟温,锅炉出力、热效率基本不变,但需要考虑增加再循环风机与烟气管道及其在锅炉房布置以及再循环风机能耗问题。

(2) 掺冷空气方法颇为简易,锅炉热效率略有下降,一般仍能满足节能规范对热效率的要求。

(3) 不同场合下,采用烟气再循环法或掺冷空气法,可依据具体条件而定。对于容量不大的锅炉 ($\leq 10 \text{ t/h}$ 、 $\leq 7 \text{ MW}$ 或再大一些),掺冷空气法较适宜。

(4) 对已有锅炉增设烟气再循环或掺冷空气,需要注意已有引风机扬程是否够用与受热面磨损增大问题。如已有引风机扬程的余量不够,可降低负荷运行。当然,新设计锅炉不存在此问题。

北京盛昌绿能科技有限公司 10 t/h 蒸汽锅炉燃棉秸(段)掺冷空气试验表明,掺冷空气法十分简易,对降低烟温效果明显;由于该锅炉引风机扬程余量很小,如前所述,只能在降低出力条件下运行。如不掺冷空气,经常清渣,给运行带来极大不便。

参考文献

- [1] 陈汉平,李斌,杨海平等. 生物质燃烧现状与展望[J]. 工业锅炉, 2009(5): 1-7.
- [2] 别如山,王庆功,修太春. 生物质燃烧发电过程中若干问题的探讨[J]. 工业锅炉, 2009(6): 6-10.
- [3] 刘荣厚,牛卫生,张大雷. 生物质热化学转换技术[M]. 北京: 化工出版社, 2005.
- [4] 工业锅炉设计计算方法编委会. 工业锅炉设计计算方法——层状燃烧及流化床燃烧工业锅炉热力计算方法[M]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
- [5] 李之光,王昌明. 直接加热式热风炉和新型换热器的研究与开发[J]. 工业锅炉, 2004(5): 11-15, 48.
- [6] 李之光,梁耀东,刘峰等. 工业锅炉现代设计与开发 第6章[M]. 北京: 中国质检出版社, 中国标准出版社, 2011.
- [7] 北京锅炉厂译. 锅炉机组热力计算标准方法(前苏联1973年版)[M]. 北京: 机械工业出版社, 1976.