

# 大容量锅炉炉内喷钙辅助脱硫系统可行性研究

刘丹瑶,张 成,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:** 为解决大容量锅炉煤质变化频繁,湿法脱硫系统设计裕量小、扩容工程量大、成本高等问题,在安装有炉内喷钙系统的 220 t/h 锅炉上进行现场试验,得出喷射位置和 Ca/S 对脱硫效率的影响,并结合某 660 MW 机组的燃烧数值模拟结果,得出喷钙脱硫的最佳高度为 40.51 m 左右;通过对灰成份、灰熔点、粒径分布等测定并计算得出 660 MW 机组加装炉内喷钙辅助脱硫系统未明显加重锅炉受热面腐蚀、积灰结渣和磨损,锅炉整体效率最多降低了 0.757%,具有较好的安全经济性。研究结果,对电厂拓宽煤种适应性、增强脱硫系统可靠性、满足日益严格的排放标准等方面具有现实意义。

**关 键 词:** 大容量锅炉; 喷钙脱硫辅助系统; 效率; 腐蚀; 积灰结渣; 磨损

中图分类号: X701

文献标识码: A

## 引 言

目前,煤炭市场供求紧张,低硫煤较少,且因价格昂贵和难以保证持续供应而难以长期燃用。到 2020 年,预计火电装机容量将达到  $12 \times 10^9$  kW,  $\text{SO}_2$  产生量达 3 847 万 t(以平均硫分 0.95% 计),如果全部换烧低硫煤(以平均硫分 0.5% 计),火电  $\text{SO}_2$  产生量也将达 2 024 万 t,我国仍将面对较大的减排  $\text{SO}_2$  压力。2011 年新修订《火电厂大气污染物排放标准》(GB 13223 - 2011) 规定现有火电锅炉自 2014 年 7 月 1 日起  $\text{SO}_2$  排放限值为  $200 \text{ mg/m}^3$ 。

面对日趋严峻的环保压力,燃煤电厂特别是建厂较早的火电机组,由于初期设计脱硫裕量较小,迫切需要提高机组的脱硫能力,且我国电厂用煤煤质多变,高硫煤来量较大;直接扩容改造工程量较大,周期较长,成本高;炉内直接喷钙技术以其相对简单和低成本等优势<sup>[1]</sup>,在现有燃煤电站得到了较广泛的应用<sup>[2~3]</sup>,但在 600 MW 以上机组应用较少。为此,开展炉内干法脱硫试验研究,在不改变现有大机组湿法脱硫系统的前提下加装喷钙脱硫辅助系统,以

提高电厂总体脱硫能力,保证现有脱硫系统出现短期故障或燃用高硫煤时也能达到排放标准,拓宽煤种适应性和脱硫系统的可靠性,且比扩容湿法烟气脱硫系统成本低,见效快,对电厂取得更大社会经济效益、实现减排具有实际意义。

## 1 设备概况

### 1.1 研究对象设备现状

660 MW 锅炉系 ABB 公司的亚临界一次再热控制循环四角喷燃双切圆燃煤锅炉,电厂湿法脱硫装置设计燃煤含硫量  $S = 0.52\%$ ,存在脱硫裕量不足、来煤含硫量持续偏高等问题。若通过燃用低硫煤来达到国家排放标准,需使用  $S < 0.2\%$  的煤,市场无法保证;当脱硫系统故障停运时需停运发电机组满足环保要求,影响电厂经济效益。此时若能投运炉内喷钙脱硫辅助系统,再通过配煤掺烧控制燃煤  $S \approx 0.4\%$ ,可使机组继续运行而不会超标排放。

### 1.2 试验锅炉设备概况

220 t/h 锅炉为 NG - 220/9.8 - M9 型单汽包自然循环固态排渣炉,采用钢球磨中间储仓式热风送粉,脱硫系统仅采用炉内喷钙催化脱硫技术。锅炉主要基本参数、设计煤种特性如表 1、表 2 所示。

表 1 锅炉主要基本参数(脱硫相关部分)

Tab. 1 Main parameters of the boiler  
(Sections relating to desulfurization)

蒸发量 /t · h <sup>-1</sup>	额定压力 /MPa	额定温度 /℃	排烟温度 /℃	燃烧方式
220	9.81	540	142	四角切圆燃烧

## 2 实验方案

实验包括现场试验和实验室两部分。

收稿日期: 2011 - 12 - 20; 修改日期: 2012 - 02 - 09

基金项目: 国家自然科学基金项目(51021065); 中国博士后科学基金资助项目(20100470054)

作者简介: 刘丹瑶(1987 -), 女, 湖北随州人, 华中科技大学硕士研究生。

进行不同负荷、Ca/S 及脱硫系统投运方式的 15 个工况的现场试验(仅选取有代表性的几个工况分析)测量炉膛温度并观测炉内结焦情况,对飞灰取样和分析,测量烟气成份和排烟温度,研究不同 Ca/S、喷射位置等对脱硫效率  $\eta$ 、灰品质的影响。

表2 锅炉设计煤种特性(电厂提供数据)

Tab.2 Characteristics of coal ranks in the boiler design  
(Data provided by a power plant)

数值		数值	
$C_{ar}/\%$	47.53	$M_{ar}/\%$	17.83
$H_{ar}/\%$	3.43	$V_{ar}/\%$	22.16
$O_{ar}/\%$	6.75	$Q_{net\ ar}/MJ \cdot kg^{-1}$	17.53
$N_{ar}/\%$	0.80	$DT_1/^\circ C$	1260
$S_{ar}/\%$	0.45	$ST_2/^\circ C$	1340
$A_{ar}/\%$	23.21	$FT_3/^\circ C$	1430
$FC/\%$	36.80		

注:DT、ST 和 FT 分别为煤灰的变形温度、软化温度和流动温度。

使用 Pro/E 对 660MW 锅炉的炉膛进行三维几何建模,导入 Gambit 中划分网格。采用非一致性网格生成技术分区划分,在流场复杂和燃烧集中区域加密网格,划分总网格数为 1 553 433。选用速度入口边界和压力出口边界条件。Fluent 中选取带旋流修正的 Realizable  $k-\varepsilon$  模型模拟气相湍流输运, Non-premixed/PDF 模型模拟气相湍流燃烧,欧拉-拉格朗日方法模拟煤粉颗粒的运动,煤粉燃烧过程中挥发分热解和煤焦燃烧分别选用双方程竞争反应模型(two-competing-rates)和动力/扩散控制模型(kinetics/diffusion-limited)模型,P1 辐射模型计算炉内的辐射换热。在 Fluent 中选择压力基 Pressure Based 求解器,对流项的插值方法选用 First-Order Upwind 一阶精度,压力插值采用 PRESTO! 方法,压力速度耦合采用 SIMPLE 算法求解。

利用实验室先进仪器对现场试验采样的飞灰进行样品常规分析、灰样及脱硫剂粒度分布和灰成份、灰熔点测定,根据实验结果计算 660 MW 机组脱硫前后的烟气露点、反映积灰、结渣、磨损特性的指数和锅炉热损失,得到炉内喷钙脱硫对大容量机组锅炉受热面及锅炉整体效率的影响评估预测。

### 3 结果与分析

#### 3.1 喷射位置对脱硫效率的影响

理论计算表明,石灰石的表面积首先会因为煨

烧而增加,随后会由于烧结而降低,煨烧石灰石在 1 100  $^\circ C$  时可获得最大表面积 47  $m^2/g$ ,高于 900  $^\circ C$  的 27  $m^2/g$ <sup>[4]</sup>。脱硫效率的主要影响因素是产物  $CaSO_4$  在高于 1 200  $^\circ C$  时的热不稳定性。220 t/h 试验锅炉使用的 AG 系列固硫剂催化反应温度 1 100 ~ 1 200  $^\circ C$ 。

以 220 t/h 锅炉炉内喷钙位置设计为例,在标高 21.6 m 炉膛两侧原吹灰器插入孔测得温度为 1 162  $^\circ C$  和 1 149  $^\circ C$ ,符合固硫剂的最佳反应温度,在该层安装喷钙喷嘴,前墙安装双喷嘴,左右墙上靠近后墙处各安装一个喷嘴,采用对冲直吹喷射方式来提高烟气与固硫剂混合程度,同时为适应锅炉负荷和煤质变化导致的烟温变化,在标高 19.5 m,离四角 0.8 m 处开直径 200 mm 的圆孔安装喷嘴,固硫剂在该层四角喷射且喷射方向与燃烧器方向一致,喷嘴布置如图 1 所示,可延长固硫剂在炉内反应时间,增强混合程度,以提高脱硫效率和石灰石利用率,降低脱硫成本。每排喷嘴最大出力为额定负荷,使用设计煤种,Ca/S = 2.5 时固硫剂的喷射量。喷射速度 30 ~ 100 m/s,给料机调节喷射量,根据负荷、煤种、烟气中  $SO_2$  浓度切换喷嘴,适应峰谷负荷和煤种变化。

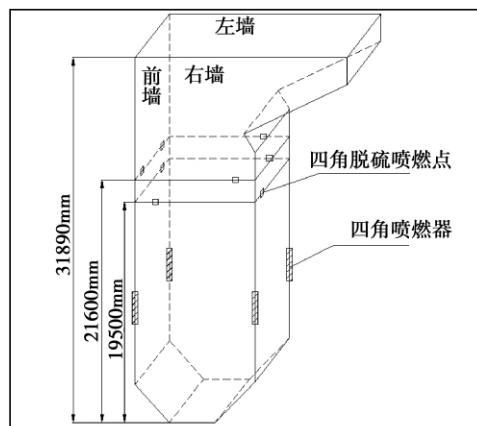


图1 炉膛本体上、下排脱硫喷射点

Fig.1 Desulfurization jet flow points of the furnace proper on the upper and lower row

采用 Fluent 数值模拟 660 MW 锅炉炉膛温度场,取合适温度范围来确定相应喷射位置,炉膛中心面温度场分布如图 2 所示,且该锅炉热态试验测得 42 m 层观火孔处温度约 1 100  $^\circ C$ ,与模拟结果吻合。脱硫剂适宜温度 1 223 ~ 1 473 K 对应高度范围 40.51 ~ 49 m。为保证脱硫剂的吸附效率,延长其在炉内停留时间,防止脱硫剂和脱硫产物烧结,选择折

焰角处 40.51 m 左右安装吸附剂喷口,同时借鉴试验锅炉的安装方式,上层安装前墙直吹、左右墙对冲喷嘴;下层锅炉四角附近安装 4 个喷嘴且使其与燃烧器喷射方向一致,以达到加强炉膛内扰动,延长吸附剂与煤粉混合、反应时间的效果,保证脱硫效率。

### 3.2 Ca/S 对脱硫效率的影响

待锅炉负荷稳定,投入炉内喷钙脱硫系统,控制 Ca/S,对锅炉电除尘出口的两侧烟道烟气取样点分别进行取样,测定 SO<sub>x</sub> 浓度,结合烟气流量计算各工况下炉内喷钙的脱硫效率,具体数值列于表 3。

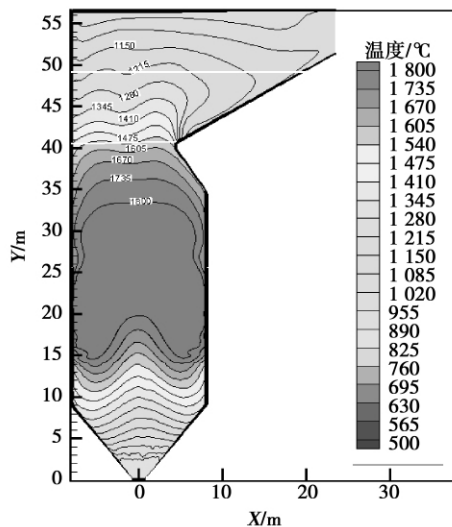


图 2 660 MW 锅炉炉膛中心截面温度分布  
Fig. 2 Temperature distribution in the central section of a 660 MW boiler furnace

表 3 220 t/h 锅炉各工况下脱硫效率

Tab. 3 Desulfurization efficiency of a 220 t/h boiler under various operating conditions

工况	负荷/%	Ca/S	SO <sub>2</sub> 浓度 /mg · m <sup>-3</sup>	烟气流量 /m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup>	炉内喷钙 脱硫率/%
1	100	1.87	252.05	118 456	69.9
2	100	1.33	333.2	114 586	61.5
3	100	0.8	393.34	112 568	55.3
4	100	—	906.46	109 370	—
5	85	1.99	247.5	95 921	72.5
6	75	2.26	166.13	150 249	74

由表 3 得知: 吸附剂喷入后 SO<sub>2</sub> 浓度减低,且锅炉负荷不变时脱硫效率随 Ca/S 的增加而增大,100% 负荷的最高脱硫率为 69.9%; Ca/S ≈ 2 的工况 1、5 和 6,随负荷降低,脱硫率升高。可能是由于负荷较低时,炉膛内温度较低,喷入吸附剂不易烧结,

且固硫产物不会在高温下分解。由此可得出结论:在一定范围内增加 Ca/S 有利于提高脱硫效率。

某 660 MW 机组的设计煤种 S<sub>ar</sub> = 0.52%, 配套石灰石-石膏湿法脱硫系统最高可脱除的燃煤含硫量 S<sub>ar</sub> = 0.78%, 脱硫率 η = 91%。表 4 为该电厂 2011 年某月随机十天入炉煤的收到基含硫量 S<sub>ar</sub>, 实际燃煤 S<sub>ar</sub> > 0.78% 的有 5 天: 极端情况 S<sub>ar</sub> = 1.80%, 其余 S<sub>ar</sub> ≈ 1%。计算得喷钙辅助脱硫系统脱硫率达 22% 时,便可辅助解决 S<sub>ar</sub> ≈ 1% 入炉煤的脱硫问题,即使极端情况 S<sub>ar</sub> = 1.80%, 喷钙辅助脱硫率为 56% 即可。220 t/h 试验锅炉的炉内喷钙脱硫率最高可达 74%, 即使该 660 MW 机组相对以上脱硫效果略有降低,也能通过调整 Ca/S 和脱硫剂喷入区间来保证辅助喷钙脱硫率达到 22%, 对极少数 S<sub>ar</sub> = 1.80% 的入炉煤也可通过尾部增湿或配煤掺烧来保证脱硫效果。

由于大容量机组炉内温度高,为防止石灰石和产物烧结,选择的石灰石喷入位置偏高,会减少其在炉内停留时间而降低脱硫剂对 SO<sub>2</sub> 吸收率,因此在模拟炉膛温度的同时最好进行现场试验的验证。另外可根据入炉煤的实际含硫量调整喷钙 Ca/S,使得在 Ca/S 较低时也能满足大多数情况下的辅助脱硫需求,以减轻喷钙对锅炉运行和经济性的影响。

表 4 660 MW 机组 2011 年某月 10 日入炉煤报表

Tab. 4 Statement of coal fed into the boiler on 10th day of a month in 2011 in a 660 MW unit

日期	S <sub>ar</sub> /%
1 日	0.34
2 日	0.36
3 日	0.39
4 日	0.46
5 日	1.03
6 日	0.93
7 日	0.65
8 日	0.94
9 日	1.80
10 日	0.90

### 3.3 大容量机组炉内喷钙对受热面影响评估

#### 3.3.1 炉内喷钙对锅炉受热面腐蚀影响

由文献 [5] 可知: 炉内喷钙脱硫能降低受热面的高温腐蚀。低温腐蚀主要受烟气含氧量,燃料含硫量、含钙量,低温受热面处烟气流速、烟温变化以及锅炉负荷变动等因素影响<sup>[6]</sup>。炉内喷钙脱硫时

因钙基的加入,降低了 SO<sub>2</sub> 含量的同时会增加受热面积灰。

因此,必须严格控制使脱硫后烟温高于酸露点温度,减弱对烟道和除尘器的腐蚀。根据文献 [7] 对烟气露点公式进行的修正,并基于现场试验数据对 6 个工况的露点温度进行计算,结果如表 5 所示。

由表 5 得:在实验 Ca/S = 0 ~ 2, 100% 负荷下,烟气露点随 Ca/S 增加而升高; Ca/S ≈ 2 的工况 1、5 和 6 烟气露点很接近。喷入吸附剂虽会使烟气露点略有增加,但低于对应的排烟温度,且脱除了烟气中 SO<sub>2</sub>,所以不会加重烟道、尾部受热面和电除尘器等的低温腐蚀,理论上可缓解腐蚀。但由于烟气露点随 Ca/S 增大的趋势,应对喷钙量有所限制。

表 5 锅炉不同工况受热面腐蚀特性分析

Tab. 5 Analysis of corrosion characteristics of the heating surface of a boiler under different conditions

	水露点 $t_{sl}/^{\circ}\text{C}$	烟气露点 $t_{ld}/^{\circ}\text{C}$	排烟温度 $t_{py}/^{\circ}\text{C}$
工况 1	45.742	119.529	143.5
工况 2	45.737	119.524	145
工况 3	45.732	119.52	144
工况 4	45.723	119.511	145
工况 5	45.747	119.535	145.6
工况 6	45.741	119.528	142.5

根据 660 MW 机组(烟温 127 °C) 煤质、烟温特性和吸附剂含水量的换算结果,由修正公式计算不同 Ca/S、满负荷运行时的烟气露点温度,如表 6 所示。

表 6 某 660 MW 锅炉的烟气露点温度

Tab. 6 Dew point temperature of the flue gas of a 660 MW boiler

	Ca/S	水露点 $t_{sl}/^{\circ}\text{C}$	烟气露点 $t_{ld}/^{\circ}\text{C}$
工况 1	0.5	40.852	106.599
工况 2	1	40.853	106.6
工况 3	1.5	40.854	106.601
工况 4	2	40.855	106.602
工况 5	2.5	40.8562	106.604

表 6 显示:由于锅炉受热面低温腐蚀主要受烟气中含水率  $\Phi_{\text{H}_2\text{O}}$  的影响,AG 脱硫剂  $\Phi_{\text{H}_2\text{O}} < 1\%$ ,此处按 1% 计算,得喷钙后烟气露点  $t_{ld}$  远小于  $t_{py}$ 。同时固硫剂喷入后与 SO<sub>x</sub> 反应生成 CaSO<sub>4</sub>,降低 SO<sub>3</sub> 浓度以减轻低温受热面的腐蚀;且固硫剂从炉膛上部

区域喷入,对炉膛区域的影响很小,不会加重炉内高温腐蚀。因而,采用含水量较低的 AG 系列脱硫剂,不会加重 660 MW 大机组受热面的腐蚀。

### 3.3.2 炉内喷钙对锅炉沾污和结渣影响

影响飞灰沉积和结渣因素有烟气流速及方向、烟气温度、煤质特性、壁面温度、飞灰浓度、炉内局部热负荷、过量空气系数、管径和节距等<sup>[6~8]</sup>。用 AX-IOS advanced 波长色散型 X 射线光谱仪测定喷钙前后灰成份(仅列出显著影响沾污结渣成份)。

利用 CAF digital imaging 灰熔点分析仪测定煤灰的熔融温度 ST,计算结渣和沾污特性指数<sup>[6]</sup>,通过与积灰结渣判别界限对比,预测结渣沾污特性。

表 7 脱硫剂与灰样成份分析

Tab. 7 Desulfurating agent and ash sample composition analysis

成份	脱硫剂	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4
SiO <sub>2</sub>	3.49	42.51	40.14	41.28	46.72
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.06	30.82	29.76	26.22	33.1
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.40	2.7	2.47	2.84	2.67
CaO	52.85	15.25	16.53	19.61	8.24
MgO	0.58	0.2	0.22	0.53	0.29
K <sub>2</sub> O	0.24	0.69	0.88	1.09	0.82
Na <sub>2</sub> O	—	0.083	0.08	0.12	0.11
TiO <sub>2</sub>	—	0.96	1.15	1.23	1.46

表 8 220 t/h 锅炉受热面结渣、沾污特性分析

Tab. 8 Slagging and fouling characteristics of the heating surface of a 220 t/h boiler

		工况 1	工况 2	工况 3	工况 4
灰熔点 $T_2/^{\circ}\text{C}$		1402	1398	1422	>1500
		轻微	轻微	轻微	轻微
碱酸比 $B/A$		0.255	0.284	0.352	0.149
		中等	中等	中等	轻微
结渣特性	硅比 $G$	70.1	67.6	64.2	80.7
		中等	中等	中等	轻微
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		1.38	1.35	1.57	1.41
		轻微	轻微	轻微	轻微
结渣综合指数 $R$		1.55	1.63	1.79	1
		中偏轻	中偏轻	中等	轻微
沾污特性	沾污特性	0.021	0.023	0.042	0.016
	指数 $R_{ul}$	轻微	轻微	轻微	轻微

由表 8 得:喷钙后,灰熔点较未喷钙工况降低,碱酸比升高,硅比降低。从灰熔点判断,喷钙前后各工况均属轻微结渣范围;从酸碱比和硅比判断,喷钙

工况均为中等结渣,较未喷钙工况 4 略有恶化; SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>判断,各工况均为轻微结渣,工况 1 较 4 程度更轻;按综合指数 R 判断,喷钙后均由轻微结渣转为中等结渣,且工况 1 和 2 结渣程度中偏轻,工况 3 中等。喷钙后沾污指数虽较未喷钙略有升高,但均属轻微沾污。随 Ca/S 增加,结渣和沾污特性向更有利于锅炉安全的中偏轻、轻微方向发展。

通过对灰成份观察:喷钙后各工况的灰中 CaO 含量增加,说明钙基固硫反应不完全;随 Ca/S 增加,灰中 CaO 含量降低,但降幅减小,符合钙基固硫率随 Ca/S 的增加而增加但增幅降低的规律。

总之,喷钙后积灰结渣特性变化不大,积灰均为轻微沾污,结渣程度也均为轻微和中等结渣。在 0~1.87 范围内增加 Ca/S,可提高脱硫率,且对积灰结渣影响较小,可根据实际所需脱硫率选择 Ca/S。

### 3.3.3 炉内喷钙对锅炉受热面磨损影响

影响飞灰磨损的因素有飞灰硬度、金属材料硬度、SiO<sub>2</sub>和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量、飞灰形态、温度等。灰磨损特性可由灰磨损系数 H<sub>m</sub>表示<sup>[6]</sup>。根据灰成份分析数据计算各工况灰磨损系数,预测灰磨损特性。

表 9 220 t/h 锅炉灰磨损特性分析  
Tab. 9 Analysis of the ash-caused wear characteristics of a 220 t/h boiler

	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4
SiO <sub>2</sub> / %	42.51	40.14	41.28	46.72
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / %	30.82	29.76	26.22	33.1
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / %	2.7	2.47	2.84	2.67
H <sub>m</sub>	20	19.1	18.3	21.7
磨损特性	中等	中等	中等	严重

由表 9 知:喷钙后磨损系数减小,即灰磨损程度降低。但灰磨损系数随 Ca/S 增大而增大。结合灰成份分析,喷钙后灰中 SiO<sub>2</sub>和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>等显著降低,可能是生成(3CaO·3Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·CaSO<sub>4</sub>)<sup>[9]</sup>(在 JCPDS 粉末衍射文件中是磺酸铝炉渣的主要成份,可由石灰、氧化铝和 CaSO<sub>4</sub>混合加热到 1350℃合成)或在 CaO-SiO<sub>2</sub>-SO<sub>3</sub>的高温相平衡下生成 Ca<sub>5</sub>(SiO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>和 2Ca<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>·CaSO<sub>4</sub>,或是形成了一种新的耐热晶相 CaFe<sub>3</sub>(SiO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>OH(由熔融 Fe-Si-Ca 包裹硫化产物 CaSO<sub>4</sub>产生),消耗了煤中 SiO<sub>2</sub>和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的缘故。

对屏过及处于水平烟道的过热器,需考虑喷钙后飞灰浓度增大对受热面管壁的冲刷磨损。据 1973 年锅炉热力计算标准<sup>[6]</sup>,考虑烟气流过对流管

束的实际情况并修正,得管壁最大磨损量 E<sub>m</sub>(mm)经验公式:

$$E_{max} = aM\mu k_{\mu} \tau (k_v v_g)^{3.3} R_{90}^{2/3} \times \left(\frac{1}{2.85k_D}\right)^{3.3} \left(\frac{S_1-d}{S_1}\right)^2$$

根据炉膛中心线截面处数值模拟结果取 v<sub>g</sub> = 6 m/s。

假设 660 MW 机组与 220 t/h 锅炉采用相同的炉内喷钙脱硫系统,估算工况 1 和工况 6 时烟尘量分别为 25 136.32 和 23 935.66 kg/h,最大磨损量 E<sub>max</sub>分别为 0.083 和 0.079 mm。100% 负荷,Ca/S = 1.87 时烟尘量增加最多的恶劣工况下,喷钙造成的最大磨损量增大 ΔE<sub>max</sub> = (0.083 - 0.079) / 0.083 = 4.8%。

从灰磨损特性指数和最大磨损量指标综合判断,喷钙脱硫并未明显加剧总体磨损。

### 3.4 炉内喷钙对锅炉效率的影响

炉内喷钙脱硫对锅炉效率的影响表现为:(1) 石灰石煅烧吸热与固硫反应放热的净能得失;(2) 石灰石粉输送喷射造成过剩空气量;(3) 灰渣物理显热损失;(4) 石灰石粉输送的动能消耗;(5) 制粉系统能耗。

由于工况 5 中 Ca/S ≈ 2,且排烟温度最高,如表 5 所示,锅炉热效率受影响也最大,取该工况计算值在表 10 中列出。

表 10 炉内喷钙脱硫对锅炉效率影响的计算  
Tab. 10 Calculation of the influence of the in-furnace calcium spraying desulfurization on the boiler efficiency

已知量	含硫量 / %	发热量 / kJ · kg <sup>-1</sup>	CaCO <sub>3</sub>	脱硫
			假设分解率 / %	反应率 / %
	0.45	17530	85	25
(1) 损失	CaO 固硫放热损失 0.023%		CaCO <sub>3</sub> 分解吸热 0.045%	锅炉效率下降 0.068%
(2) 损失	排烟温度升高 6.5 °C		石灰石输送喷射造成过剩空气量引起 效率下降 0.35%	
(3) 损失	飞灰量增加 12.24%		喷钙引起的物理显热使锅炉 效率下降 0.034%	

按表 10 计算,前 3 项锅炉热损失 0.452%,电厂相关测试得 220 t/h 锅炉(4)(5)两项能耗占厂用电 0.25%。所以喷钙脱硫使锅炉总效率最多降低 0.7%。

对于660MW机组,根据文献[10]和电厂试验,该机组燃用含硫量0.52%的低硫煤时,飞灰增加引起的物理热损失(3)不会超过0.1%。而对大容量机组(4)(5)能耗占厂用电的比率会比小容量机组更小,所以,该部分的能耗损失低于0.25%。按表10计算(1)(2)两项热损失,当炉内喷钙Ca/S比最大为2.5时,锅炉热效率共下降0.407%,预测锅炉总效率的最大降幅为 $0.407 + 0.1 + 0.25 = 0.757\%$ 。

## 4 结 论

基于已装设炉内喷钙系统的220 t/h锅炉现场试验,结合实验室分析计算和数值模拟,得出660 MW机组应选取高度40.51 m折焰角附近安装吸附剂喷嘴,并借鉴试验锅炉上层前墙直吹左右墙对冲、下层四角喷射的方式满足不同负荷和煤种的脱硫需求。脱硫效率随Ca/S增加而增大;Ca/S相同时,脱硫率随负荷升高而降低。220 t/h锅炉脱硫率为55%~74%,计算得660 MW机组喷钙辅助脱硫率达22%时就能满足基本的整体脱硫需求。在大容量机组加装炉内喷钙脱硫设备不会明显加重锅炉受热面的腐蚀、沾污结渣和磨损,对锅炉效率影响较小。

因此,在已有湿法脱硫系统的大机组上加装技术成熟、成本低的炉内喷钙辅助脱硫系统,可提高机组整体脱硫能力,拓宽煤种适应性,保证在燃用高硫煤或现有湿法脱硫系统短期故障时也能排放达标,较好地满足了机组安全经济运行和排放标准。

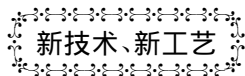
## 参考文献:

- [1] Guilin Hu, Kim Dam-Johansen, Stig Wedel, et al. Review of the direct sulfation reaction of limestone [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2006, 32(4): 386-407.
- [2] Fernandez J, Renedo M J, Pesquera A, et al. Effect of CaSO<sub>4</sub> on the

structure and use of Ca(OH)<sub>2</sub>/fly ash sorbents for SO<sub>2</sub> removal [J]. Powder Technology, 2001, 119(2): 201-205.

- [3] 张秀云, 郑继成. 国内外烟气脱硫技术综述[J]. 电站系统工程, 2010, 26(4): 1-2.  
ZHANG Xiu-yun, ZHENG Ji-cheng. Survey of FGD technology both in domestic and abroad [J]. Engineering for Power Plant Systems, 2010, 26(4): 1-2.
- [4] XU Xu-chang, CHEN Chang-he, QI Hai-yin, et al. Development of coal combustion pollution control for SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> in China [J]. Fuel Processing Technology, 2000, 62(2): 153-160.
- [5] 周新刚, 苗长信. 电站锅炉高温腐蚀产生的原因及防范措施[J]. 华电技术, 2010, 32(1): 49-53.  
ZHOU Xin-gang, MIAO Chang-xin. Causes of the high-temperature corrosion in utility boilers and measures for prevention [J]. Huadian Technology, 2010, 32(1): 49-53.
- [6] 岑可法, 樊建人, 池作和, 等. 锅炉和热交换器的积灰、结渣、磨损和腐蚀的防止原理与计算[M]. 北京: 科学出版社, 1994.  
CEN Ke-fa, FAN Jian-ren, CHI Zuo-he, et al. Preventive theory and calculation of the fouling, slagging, wear and corrosion in a boiler and heat exchanger [M]. Beijing: Science Press, 1994.
- [7] 李鹏飞, 佟会玲. 烟气酸露点计算方法比较和分析[J]. 锅炉技术, 2009, 40(6): 1-3.  
LI Peng-fei, TONG Hui-ling. Comparison and analysis of the methods for calculating the acid dew point of flue gas [J]. Boiler Technology, 2009, 40(6): 1-3.
- [8] Vuthaluru H B, Kotadiya N, Vuthaluru R, et al. Mineralogical composition of boiler fouling and slagging deposits and their relation to fly ashes: The case of Kardya power plant [J]. Applied Thermal Engineering, 2011, 31(8): 1368-1380.
- [9] Cheng Jun, Zhou Junhu, Liu Jianzhong, et al. Sulfur removal at high temperature during coal combustion in furnaces: a review [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2003, 29(5): 381-405.
- [10] 刘福国, 郑秀华, 房中海, 等. 炉内喷钙脱硫对锅炉性能影响的试验研究[J]. 山东电力技术, 2009(3): 3-5.  
LIU Fu-guo, ZHENG Xiu-hua, FANG Zhong-hai, et al. Experimental study of the influence of limestone sprayed into the furnace on the boiler performance [J]. Shandong Electric Power Technology, 2009(3): 3-5.

(陈滨 编辑)



## 温度对汽轮机高温部件和蒸汽管道蠕变速率的影响

据《Энергетика》2011年7-8月刊报道,白俄罗斯国立技术大学的专家分析了高温对蒸汽管道以及高压和中压汽轮机部件强度特性的影响。

给出了扩散蠕变和温度的关系图,表明温度具有决定性作用。计算了钢的自扩散系数。

金属自扩散系数取决于温度给出的关系式,以便更精确地计算所应用钢的寿命特性。

(吉桂明 摘译)

**Information Fusion Technology** [刊, 汉] ZUO Wei-heng, LIU Tong, ZUO Pei-xin ( National Key Laboratory on Power Transmission and Distribution Equipment Items, System Safety and New Technologies, Chongqing University, Chongqing, China, Post Code: 400044) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012, 27(4). - 464 ~ 467

Due to a long delay and a big time constant of the combustion control system of a power plant, it is very difficult for a traditional coordination and control system to quickly and precisely realize a stabilization of the main steam pressure. The radiant energy and heat quantity signal were used to perform an information fusion and an algorithm for optimizing the air/coal ratio was designed, making it possible to realize a quick response to a change of the combustion rate. The test results show that the information fusion-based algorithm can quicken the dynamic response and the on-line regulation air/coal ratio optimization algorithm can result in a reduction of the oxygen content of the flue gas by 1.09% averagely during a stable state process, make it possible for the fuel to burn more sufficiently compared with the combustion before the optimization and reduce the coal feed by 3% - 5%, thus leading to an enhancement of the combustion cost-effectiveness. **Key words:** thermal power plant unit, combustion control system, information fusion, air/coal ratio, radiant energy

**层燃垃圾焚烧炉的冷态试验研究 = Cold-state Experimental Study of a Laminar Combustion Waste Incinerator** [刊, 汉] LIU Xiao-zhou ( College of Material and Energy Source, Guangdong University of Technology, Guangzhou, China, Post Code: 510006) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012, 27(4). - 468 ~ 471

A cold-state test and analysis were conducted of a laminar combustion waste incinerator under 8 operating conditions, of which the ratio between the front arch height and the length of the grate was 0.333, the ratio between the rear arch height and the length of the grate was 0.12 and the inclination angle of the front arch was 45 degrees. The test results show that it is comparatively appropriate for the ratio of momentum flow rate between the front and rear arch falling in a range from 1:2.1 to 1:5.4. In the space above the surface of the waste layer, the distribution of the vorticity along the direction of the grate length tends to be small in both front and rear portion of the furnace, changing in a range from 3.5% to 6%. **Key words:** laminar combustion waste incinerator, aerodynamics, cold-state test

**大容量锅炉炉内喷钙辅助脱硫系统可行性研究 = Feasibility Study of an In-furnace Calcium Spraying Desulfurization Auxiliary System for a Large-capacity Boiler** [刊, 汉] LIU Dan-yao, ZHANG Cheng, 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( 4) . - 472 ~477

To solve such problems of a large-capacity boiler as a frequent change in coal quality ,a small design allowance for the wet-method desulfurization system ,a large work load and a high cost of an extension project etc. ,an on-the-spot test was conducted of a 220 t/h boiler installed with an in-furnace calcium spraying system and the influence of the spraying location and Ca/S on the desulfurization efficiency was obtained. Furthermore ,in combination with the numerical simulation results of the combustion of a 660 MW unit ,the authors concluded that the optimum height for desulfurization by spraying calcium is around 40.51 m. By measuring and calculating the ash composition ,ash melting point and particle diameter distribution etc. ,the authors arrived at a conclusion that an additional installation of the in-furnace calcium spraying auxiliary desulfurization system to the 660 MW unit did not worsen the corrosion , ash deposition ,slagging and wear of the heating surfaces of the boiler and the overall efficiency of the boiler decreased by 0.757% at the most outside ,indicating that it has a relatively good safe and cost effectiveness. The research results are of realistic significance for power plants to widen the adaptability of their boilers for various coal ranks ,enhance the reliability of their desulfurization systems and meet increasingly strict emissions standard etc.

**Key words:** calcium spraying desulfurization auxiliary system ,efficiency ,corrosion ,ash accumulation and slagging , wear

35℃ CaCO<sub>3</sub>溶液中不锈钢 304 和 316 表面结垢特性 = **Surface Fouling Characteristics of Stainless Steel 304 and 316 in CaCO<sub>3</sub> Solution at 35 °C** [刊 汉] SHENG Jian ,ZHANG Hua ,SHI Xue-fei ,ZHAO Ping ( College of Energy Source and Power Engineering ,Shanghai University of Science and Technology ,Shanghai ,China ,Post Code: 200093) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012 27( 4) . - 478 ~482

Stainless steel 304 and 316 are commonly-used materials for heat exchangers. To study the growth characteristics of CaCO<sub>3</sub> crystallization fouls on the surface of both metals is the first step for studying the means to resist the fouling. In 0.05 g/l CaCO<sub>3</sub> solution at 35 °C ,by employing the static-state reaction method ,the authors studied the growth characteristics of CaCO<sub>3</sub> on the surface of both metals. The weights of fouls were obtained at different times by adopting the weighing method and the microscopic morphology of the fouls at different times was acquired by using a scanning electronic microscope ( SEM) . The research results show that under a same condition ,the weights of fouls on the surface of stainless steel 316 and 304 are very close. To enhance the pH value can not only increase the weight of fouls but also promote the formation of square aragonite and calcite ,and aragonite can increasingly recrystallize into the most stable crystal( calcite) in thermodynamics. To increase the pH value can make the metallic sur-