

燃煤火电厂紧凑式湿法烟气脱硫技术

李传统¹, Bernd Neukirchen²

(1 南京师范大学 动力工程学院, 江苏, 南京 210042 2 斯特雅克集团公司, 埃森, 德国)

[摘要] 介绍了紧凑式湿法脱硫新技术, 给出了这种湿法脱硫技术的工艺流程、脱硫塔内的化学反应方程式、应用实例。现场运行结果表明该脱硫工艺的脱硫效率超过 95%, 最大可达到 98.5%, 脱硫工艺的副产品石膏的水分、 CaCO_3 、硫、氯等的含量, 以及石膏中微量元素的含量完全能满足市场石膏产品质量的要求。该工艺具有系统安全性、经济性、可靠性高和节省占地面积的特点, 是一种值得在我国推广应用的一种新型湿法脱硫工艺。

[关键词] 烟气脱硫, 石膏, 燃煤电厂

[中图分类号] TK 16 **[文献标识码]** B **[文章编号]** 1672-1292(2007)02-0024-05

A Compact Wet Flue Gas Desulfurization Technology in Coal-Fired Power Plant

Li Chuantrng¹, Bernd Neukirchen²

(1 School of Power Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China 2 Steag AG, Essen, Germany)

Abstract This paper introduced a compact wet flue gas desulfurization technology in details, including its technological process, the chemical reaction equation within the desulfurization tower, and some practical examples. Practical running results indicated that the desulfurization efficiency of this technology is more than 95%, while the maximum is as high as 98.5%. The quality of the by-products, gypsum, could meet the requirement of the market, such as the contents of water, CaCO_3 , sulfur, chlorine, and low concentration elements in the gypsum. Its system is safe, economic, highly reliable, and occupies less area. It is a new wet desulfurization technology that is worth popularizing in China.

Key words flue gas desulfurization, gypsum, coal-fired power plant

0 引言

我国目前的酸雨区已超过国土面积的三分之一。2005 年的 SO_2 排放量达到 2549 万吨, 超过总量控制指标 749 万吨, 加剧了我国的大气污染。火电厂是 SO_2 的主要排放源^[1]。我国 2004 年 1 月 1 日实施的 GB13223-2003《火电厂大气污染物排放标准》按时段规定了火电厂的大气污染物最高允许排放值, 加快了我国火电厂脱硫装置的投入使用。对于单机容量超过 20MW 的大型燃煤火电机组, 国内外目前流行的脱硫工艺是采用湿法脱硫, 在完成脱硫要求的同时, 可以同时产生副产品石膏, 实现脱硫副产品的资源再利用^[2]。我国现在运行的许多火电厂在原设计中没有考虑脱硫装置的安装位置, 这使运行的火电厂增加脱硫装置带来了困难。未来 10 年装机容量 3×10^5 MW 的火电机组均需要安装烟气脱硫装置^[3-5]。因此, 我国现在运行的火电厂急需一种既具有高脱硫效率且节省占地面积的湿法脱硫新工艺。母公司为德国鲁尔集团公司 (Ruhr AG) 的德国斯特雅克集团公司 (Steag AG) 自 1969 年开始研发以 CaO 或 CaCO_3 为脱硫剂的紧凑式湿法脱硫新工艺。该工艺具有脱硫效率高、占地面积小的独特优点。1977 年在德国 W ilhelmshaven

收稿日期: 2006-12-06

基金项目: 煤炭加工与利用高效洁净利用教育部重点实验室开放基金 (CPEUKF06-02) 资助项目。

作者简介: 李传统 (1954-), 教授, 博士, 主要从事新能源与可再生能源的教学与研究。E-mail: lict2003@hotmail.com

通讯联系人: Bernd Neukirchen (1940-), 教授, 博士, 斯特雅克 (Steag) 集团公司执行总裁, 主要从事火电厂的运行与管理。

E-mail: b.neukirchen@web.de

第一套具有商业化使用价值的紧凑型湿法脱硫工业化试验设备对 $5 \times 10^5 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 的燃煤电厂烟气进行脱硫, 相应的汽轮发电机组的电功率为 140MW; 1982 年第一台工艺脱硫设备在该电厂投入运行, 脱硫的烟气量为 $1.5 \times 10^6 \text{ Nm}^3/\text{h}$, 相应的汽轮发电机组的电功率为 450MW. 该工艺到 2000 年已成功应用的火电机组容量超过 $2 \times 10^4 \text{ MW}$, 单台锅炉的最大额定烟气流量为 $2.29 \times 10^6 \text{ Nm}^3/\text{h}$, 单台汽轮发电机组的最大额定电功率为 750MW^[6-7]. 紧凑型湿法脱硫工艺特别适用于已运行电厂增加脱硫装置的改造方案, 对我国大批火电厂的增加脱硫装置的改造方案具有重要的实用价值.

1 燃煤火电厂紧凑型湿法脱硫工艺

紧凑型湿法脱硫工艺的流程图如图 1 所示. 来自电除尘器 (1) 温度为 $120 \sim 130^\circ\text{C}$ 的待脱硫的烟气进入回转式烟气加热器 (2), 把热量放给来自脱硫塔 (4) 温度为 $40 \sim 45^\circ\text{C}$ 的净化烟气, 净化后的烟气是经过立式风机 (3) 使其压力升高来克服回转式烟气加热器的流动阻力. 净化后的烟气温度升高到 $80 \sim 90^\circ\text{C}$ 后排入烟囱 (17), 以达到烟气进入烟囱的温度要求. 放热后的烟气从脱硫塔底部进入脱硫塔向上流动. 在脱硫塔内待脱硫的烟气与来自脱硫塔底部经泵 (6), 升压后从分布在脱硫塔上部的喷嘴 (5) 喷出的脱硫剂浆液进行混合发生化学反应达到脱硫目的. 化学反应产物从脱硫塔上部流向脱硫塔下部, 与经风机 (8) 送入脱硫塔的空气进一步进行化学反应, 形成烟气脱硫的副产品石膏的浆液. 石膏浆液进入经浆泵 (9) 送入分离器 (10), 分离出来的浓石膏浆液进入石膏生产系统 (11), 产生石膏产品. 从石膏生产系统 (11) 分离出来的废液与分离器 (10) 分离出来的废液进入混合器 (12). 流出混合器 (12) 的浆液分成 3 部分, 一部分进入脱硫剂制浆系统 (16), 另一部分进入脱硫塔再循环利用, 还有一部分经浆泵 (13) 升压后送入分离器 (14), 分离出来的废水送入废水处理系统 (15) 进行净化处理. 浆泵 (7) 将浆液升压后在脱硫塔下部进行搅拌, 防止脱硫塔下部浆液沉淀. 脱硫所需的工艺用水经水泵送入脱硫塔. 随着脱硫剂的不断补充, 就可以使脱硫系统连续运行, 完成对烟气的连续脱硫.

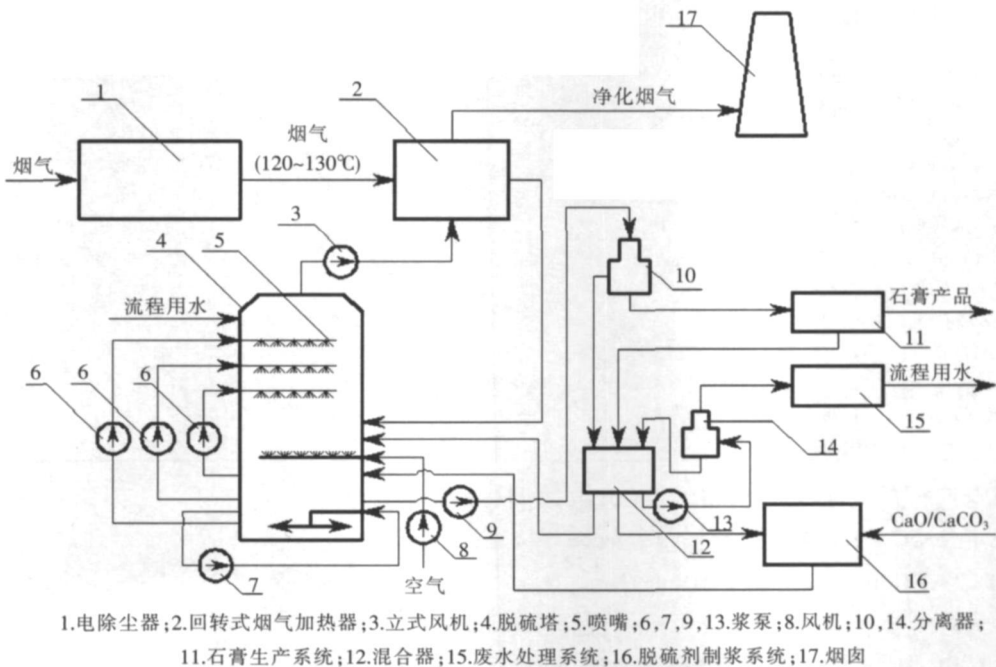
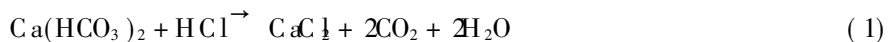


图 1 燃煤火电厂紧凑型湿法烟气脱硫工艺流程图

Fig.1 Process scheme of the compact wet flue gas desulfurization technology for coal power plant

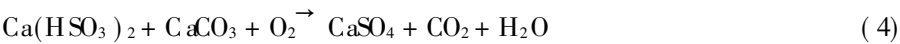
脱硫塔从上到下分为吸收反应区、氧化反应区和石膏晶体形成区 3 个区, 脱硫塔中从上到下依次进行化学反应.

以 CaCO_3 为例, 在脱硫塔上部吸收反应区内, pH 保持在 $4.5 \sim 5.5$ 待脱硫的烟气中的 SO_2 、 HCl 、 HF 与脱硫剂之间进行的化学反应为:

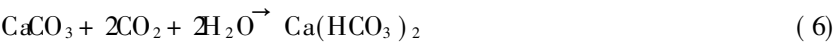




在脱硫塔中部的氧化区内, pH 保持在 4~ 5 鼓入空气中所含氧气与脱硫塔上部吸收反应区内中形成的 $\text{Ca}(\text{HSO}_3)_2$ 进一步反应生成 CaSO_4 , 并进而与水反应产生石膏 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$:



在脱硫塔下部石膏晶体形成区, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 形成石膏晶体从脱硫塔底部经泵送到石膏生产系统; 而作为脱硫剂的 CaCO_3 与水反应生成 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$.



在脱硫塔底部, 含有 CaCO_3 、 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 的水溶液经泵再送到脱硫塔上部吸收反应区进行下一个脱硫反应循环.

2 紧凑式湿法烟气脱硫工艺的应用实例

紧凑式湿法脱硫工艺与常见的湿法脱硫工艺相比, 主要差别是脱硫净化后的烟气经立式风机升压后送入回转式烟气加热器升温, 然后再送入烟囱排入大气中.

紧凑式湿法脱硫工艺已在德国、荷兰、土耳其、印尼、意大利、西班牙、巴西等十几个国家得到推广和应用. 脱硫剂分别可以采用 CaO 、 $\text{CaO} / \text{CaCO}_3$ 、海水. 电厂的燃料可以是烟煤、褐煤、石油焦等, 长期实际运行的脱硫效率从早期的 90% 达到目前的 95% 以上, 最高可达 98. 5%. 表 1 列出了紧凑式湿法脱硫工艺的部分实例.

表 1 紧凑式湿法脱硫工艺实例
Table 1 Example of coal power plants with the compact wet flue gas desulfurization technology

序号	电厂名称	煤种	电功率 / MW	烟气流量 / ($10^6 \text{ Nm}^3 / \text{h}$)	入口 SO_2 浓度 / (mg / Nm^3)	脱硫 效率 /%	脱硫剂	石膏产 量 /(t / h)	SO_2 排放浓度 /(mg / Nm^3)	投运 时间
1	德国 L. nen	无烟煤		0. 05	4 000	88	CaO	0. 47	480	1969
2	德国 W ilhelm s-haven	无烟煤	140	0. 5	3 000	90	CaO	3. 63	300	1977
3	德国 W ilhelm s-haven	无烟煤	450	1. 5	3 000	90	CaO	10. 88	300	1982
4	德国 W ilhelm s-haven	无烟煤	450	1. 5	3 000	90	CaO / CaCO ₃	10. 88	300	1982
5	德国 W ilhelm s-haven	无烟煤	375	1. 3	3 000	95	CaO	9. 96	150	1985
6	德国 Frim mersdorf	褐煤	12 × 150	12 × 1. 07	5 300	95	CaCO ₃	12 × 14. 48	265	1987/1988
7	土耳其 Cay irhan	褐煤	2 × 150	2 × 0. 721	21 400	95	CaCO ₃	2 × 39. 39	1 070	1990
8	台湾台中电厂	无烟煤	4 × 550	4 × 2. 0	3 200	94	CaCO ₃	4 × 16. 17	192	1995
9	德国 Franken II	无烟煤	750	1. 80	3 400	98. 5	CaCO ₃	16. 20	51	1996
10	德国 Leuna	石油焦	3 × 60	3 × 1. 72	7 500(含 SO_3)	97. 5	CaCO ₃	3 × 33. 80	188	1996
11	德国 L ippendorf	褐煤	2 × 900	4 × 1. 80	10 000(含 SO_3)	96	CaO	4 × 45. 96	400	1999
12	土耳其 Y atagan	褐煤	3 × 210	3 × 1. 45	10 240	95	CaCO ₃	3 × 37. 90	512	1998
13	印尼 Palton II	无烟煤	2 × 660	2 × 2. 29	1 921	95	海水	2 × 11. 23	96	1999

德国对电厂排放要求十分严格, 燃煤火电厂烟气的排放限定值 SO_2 为 $400 \text{ mg} / \text{Nm}^3$, 脱硫效率要大于 85%, NO_x 为 $200 \text{ mg} / \text{Nm}^3$, 烟尘 $50 \text{ mg} / \text{Nm}^3$. 这使电力生产中为环保支出的成本十分可观. 在德国燃煤火力发电厂电力成本的构成中: 燃料成本 65%、湿法脱硫及生产石膏 15%、脱氮成本 9%、除尘成本 5%、噪音治理 2%、水费 3%、厂区生态维护费用 1%. 德国燃煤电厂实际的烟气排放值优于排放限定值, 某电厂烟气脱硫的实际运行记录绘出的烟气 SO_2 进口含量如图 2 所示. 图 3 给出了图 2 对应的烟气 SO_2 出口含量和实际运行的脱硫效率. 图中表明, 脱硫前烟气中的 SO_2 浓度约为 $11\,000 \text{ mg} / \text{Nm}^3$, 脱硫后

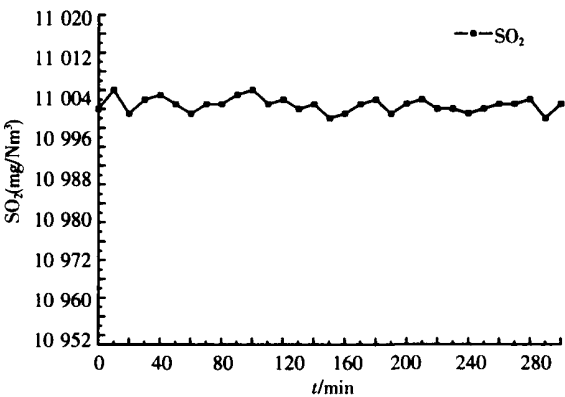


图 2 燃煤火电厂烟气 SO_2 进口浓度随时间的变化
Fig.2 Changes of SO_2 volumetric concentration with time in coal power plant

烟气中的 SO₂ 浓度约为 33 mg /Nm³, 脱硫效率为 99.7%。紧凑型湿法脱硫过程产生的石膏产量可由下式计算:

$$M = 10^{-6} V_{SO_2} \frac{V_y}{3600} \frac{M_1}{M_2} \eta_s \tag{7}$$

式中, M 为石膏的产量 /(kg /s); V_{SO₂} 为容积浓度 /(mg /Nm³); V_y 为烟气流量 /(Nm³ /s); M₁ 为石膏的摩尔分子量 /(g/mol); M₂ 为 SO₂ 的摩尔分子量 /(g/mol); η_s 为脱硫效率 %。

当某电厂烟气 pH 值为 4.8 时, 将该电厂紧凑型湿法烟气脱硫产生的石膏产品的数据和用户对烟气脱硫石膏产品质量的合同要求与天然石膏进行了比较, 如表 2 所示. 表 3 对脱硫石膏产品中的微量元素与天然石膏中的微量元素进行了比较. 当紧凑型湿法脱硫工艺中烟气的 pH 值控制在 4.6 时, 石膏中的 CaCO₃ 质量成分更低, 经过取样分析测得的 CaCO₃ 结果为 0.1% ~ 0.4%。表 2 和表 3 的数据表明, 脱硫产生的石膏完全能够满足市场对石膏产品的质量要求. 自 1999 年以来, 德国燃煤电厂脱硫生产的石膏产品已不能满足国内市场对该石膏产品的需求, 出现供不应求的局面。

表 2 燃煤火电厂紧凑型湿法烟气脱硫的石膏产品参数

Table 2 Parameters of gypsum from the compact wet flue gas desulfurization process in coal power plant

序号	成分名称	脱硫产生的石膏实测数据 %	石膏质量要求 %
1	石膏	98.1	≥ 94
2	含湿量	8.4	≤ 10
3	CaCO ₃	0.6	≤ 3
4	硫	< 0.01	≤ 0.5
5	氯	< 0.008	≤ 0.01
6	盐酸	< 0.7	≤ 5

表 3 石膏中微量元素的含量

Table 3 Low concentration elements in the gypsum
单位: mg/kg

序号	元素名称	天然石膏	脱硫产生的石膏	德国允许值
1	砷	0.22 ~ 3.79	0.21 ~ 2.70	—
2	铅	0.46 ~ 21.40	0.27 ~ 22.00	100
3	镉	0.03 ~ 0.30	0.003 ~ 0.29	3
4	氟	0.01 ~ 0.06	0.01 ~ 0.07	—
5	镍	0.30 ~ 13.40	0.30 ~ 12.90	50
6	汞	0.006 ~ 0.05	0.03 ~ 1.32	2

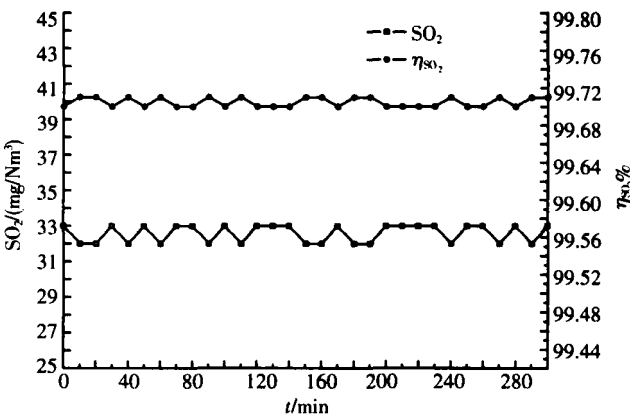


图 3 燃煤火电厂紧凑型湿法脱硫运行结果

Fig.3 Operation results of the compact wet flue gas desulfurization in a coal power plant

3 紧凑型湿法脱硫工艺应用过程中的改进措施

在紧凑型湿法脱硫工艺的实用过程中, 为了进一步提高该脱硫工艺的安全性、经济性和可靠性, 主要进行了如下几个方面的技术改进:

3.1 提高设备运行的可靠性

采用耐磨材料和螺旋型大口径喷嘴, 解决了喷嘴的堵塞和磨损问题, 不仅提高了喷嘴的耐磨性能和浆液流场的均匀性, 而且使喷嘴的压差由改进前的 0.20MPa 下降到 0.08MPa, 实现了喷嘴节能超过 30%。

脱硫塔内部采用橡胶内衬结构, 不仅节省了钢材, 而且提高了脱硫塔的耐腐蚀性能, 从而也提高了脱硫塔的使用寿命和运行可靠性。

3.2 减少脱硫装置的占地面积和初投资

采用立式风机给进入烟气加热器的净化烟气升压, 节省了紧凑型脱硫装置的安装尺寸, 节约了烟气管道的长度, 不仅可以大幅度降低烟气的流动阻力, 而且节约了该脱硫工艺的占地面积和降低了该脱硫工艺的初投资, 便于在已运行的燃煤机组上采用此脱硫工艺. 如单机容量 400MW 燃煤机组的脱硫塔的直径为 12.5m, 回转式烟气加热器的直径为 10m。

3.3 优化脱硫工艺的运行方式和参数

为了改善净化后的烟气中液体颗粒的分离效果, 使气液分离器采用瓦楞板折返结构, 在增加气液分离面积和增加气液分离流程的同时, 降低了分离器的高度, 从而也达到了降低脱硫塔高度的效果。

在脱硫塔底部采用浆液循环搅拌措施, 使脱硫塔底部的浆液的浓度变得十分均匀, 提高了脱硫塔底部的容积有效利用率, 从而降低了脱硫塔的高度, 如 930MW 燃煤机组的锅炉高度为 175m, 而紧凑型脱硫塔

的高度为 48 m

将脱硫塔内的喷嘴层设为 6 层, 每两层喷嘴用一台浆泵供给喷嘴浆液, 使喷嘴的流量可以调节, 从而保证不同烟气 SO_2 浓度时均能达到较高的脱硫效率, 以增强该脱硫工艺对燃料的适应性.

经过上述改进措施的实施, 使紧凑式湿法脱硫工艺具有改造费用低、节省占地面积、系统的安全性、经济性和可靠性都很高的一种新的湿法脱硫工艺, 得到广泛推广和应用, 成为运行中的大型燃煤电厂脱硫改造的首选新工艺^[8-10].

4 结束语

紧凑式湿法脱硫工艺实际长期运行的脱硫效率现在已经超高 95%, 最高已达到 98.5%, 脱硫效率可以满足燃煤电厂脱硫效率的要求;

紧凑式湿法脱硫工艺产生的脱硫石膏产品的质量和石膏中微量元素的含量, 完全可以满足市场对石膏产品的质量要求, 实现了脱硫副产品的资源化再利用;

经过改进的紧凑式湿法脱硫工艺具有改造费用低、节省占地面积、系统的安全性、经济性和可靠性高等独特优点, 是已运行的大型燃煤电厂脱硫改造的首选新工艺.

[参考文献] (References)

- [1] 张杨帆, 李定龙, 王晋. 我国烟气脱硫技术的发展现状与趋势 [J]. 环境科学与管理, 2006, 31(4): 124-128
Zhang Yangfan, Li Dinglong, Wang Jin. The development of flue gas desulfurization technology and its application in China [J]. Environmental Science and Management, 2006, 31(4): 124-128 (in Chinese)
- [2] 王华, 祝社民, 李伟峰, 等. 烟气脱硫技术研究新进展 [J]. 电站系统工程, 2006, 22(6): 5-7.
Wang Hua, Zhu Shemin, Li Weifeng et al. New development of controlling SO_2 pollution from flue gas [J]. Power System Engineering, 2006, 22(6): 5-7. (in Chinese)
- [3] 胡健民. 脱硫石膏的综合利用 [J]. 上海电力, 2006(5): 480-483.
Hu Jianmin. Comprehensive utilization of the desulfurization gypsum [J]. Shanghai Electric Power, 2006(5): 480-483 (in Chinese)
- [4] 肖万平. 湿法烟气脱硫技术在火力发电工业中的应用 [J]. 中国有色冶金, 2006, 10(5): 49-53
Xiao Wanping. Application of wet off-gas desulfurization process in the thermal power industry [J]. China Nonferrous Metallurgy, 2006, 10(5): 49-53. (in Chinese)
- [5] 赵鹏高. 加快火电厂烟气脱硫产业化发展的建议 [J]. 中国电力, 2006, 39(1): 103-105.
Zhao Penggao. Suggestions for the promotion of FGD industrialization in thermal power plant [J]. Electric Power, 2006, 39(1): 103-105. (in Chinese)
- [6] Hegemann K R. Innovation in der Rauchgas-entschwefelungstechnik als Grundlage für den Markterfolg [J]. Environment Technology Consulting, 2006, 2(2): 1-28. (in German)
- [7] Fischer M. REA-Gips Qualitätskriterien und Analysemethoden [C] // EURO-GYPSUM, Essen Deutschland Steag AG, 2005: 1-4. (in German)
- [8] 金新荣. 湿法烟气脱硫装置运行中存在问题及解决措施 [J]. 电力设备, 2006, 7(12): 73-75
Jin Xinrong. Problems existing in the operation of wet flue gas desulfurization equipment and its solving measures [J]. Electrical Equipment, 2006, 7(12): 73-75. (in Chinese)
- [9] 姜健. 湿式石灰石/石灰-石膏烟气脱硫的发展及展望 [J]. 节能技术, 2006, 24(5): 450-454
Jiang Jian. Development and future of wet flue gas desulfurization with limestone/lime gypsum method [J]. Energy Conservation Technology, 2006, 24(5): 450-454. (in Chinese)
- [10] 杜谦, 马春元, 董勇, 等. 循环浆液 pH 值对湿法烟气脱硫过程的影响 [J]. 热能动力工程, 2006, 21(5): 103-105
Du Qian, Ma Chunyuan, Dong Yong et al. The impact of the pH value of circulating slurry on a wet flue-gas desulfurization process [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2006, 21(5): 103-105. (in Chinese)

[责任编辑: 刘 健]