

燃用高硫煤火电机组旋流雾化超洁净排放试验研究

刘定平¹, 马佩佩¹, 周俊²

(1. 华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510640; 2. 广东埃森环保科技有限公司, 广东 广州 510640)

摘要:针对脱硫塔直径小、烟气流速高, 燃用高硫煤时烟气脱硫除尘难以超洁净排放的难题, 以某300 MW 火力发电机组为例, 采用旋流雾化脱硫除尘一体化技术进行改造, 研究液气比、入口烟气温度对脱硫效率和除尘效率的影响。结果表明, 采用旋流雾化脱硫除尘一体化技术, 脱硫塔入口粉尘浓度为 $30 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ 时, 脱硫塔出口粉尘浓度实现小于 $5 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ 的超洁净排放要求, 不需在脱硫塔后加装湿电除尘器, 即可在脱硫单塔协同完成脱硫除尘。在一定液气比下, 烟气入口温度及 SO_2 浓度对脱硫塔的效率影响不大, 脱硫效率稳定在 99.29% 以上, 脱硫塔除尘效率高达 90.84%, 旋流雾化脱硫除尘一体化技术具有较好的工况适应性和系统稳定性。

关键词: 烟气超低排放; 高硫煤; 脱硫除尘一体化; 旋流雾化

中图分类号: X773

文献标志码: A

文章编号: 1006-6772(2018)06-0101-06

Experimental study on ultra-low emission of high-sulfur coal combustion in thermal unit by swirl atomization

LIU Dingping¹, MA Peipei¹, ZHOU Jun²

(1. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. Guangdong Essen Environmental Technology Co., Ltd., Guangzhou 510640, China)

Abstract: Due to small diameter of desulfurization tower and high flow rate of flue gas, the flue gas desulfurization and de-dusting are difficult to achieve ultra-low emission. Taking a 300 MW thermal power generating unit as example, the swirling atomization desulphurization and de-dusting integrated technology was upgraded to study the effects of liquid-gas ratio and inlet flue gas temperature on desulfurization efficiency and dust removal efficiency. The results show that the dust concentration of inlet and outlet in desulfurization tower are $30 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ and less than $5 \text{ mg}/\text{Nm}^3$, respectively with the swirling atomization desulphurization and de-dusting integrated technology, and desulfurization and de-dusting can complete in the single desulfurization tower without humidification. At a certain liquid-gas ratio, the flue gas inlet temperature and SO_2 concentration have little effect on the efficiency of desulfurization tower, the desulfurization efficiency can be stabilized above 99.29%, and the desulfurization tower dust removal efficiency is as high as 90.84%, indicating the swirling atomization desulphurization and de-dusting integrated technology has good adaptability and system stability.

Key words: ultra-low fuel gas emission; high-sulfur coal; desulphurization and de-dusting integration; swirl atomization

0 引言

依据 GB 13223—2011《火电厂大气污染物排放标准》要求, 燃煤电厂 SO_2 排放浓度需控制在 $35 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ 以下, 粉尘排放浓度需控制在 $5 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ 以下。截至 2016 年底, 化石燃料用量增多, 仅我国

已投运火电厂机组容量约 8.8 亿 kW, 占煤电机组容量的 93%。采用传统技术的高硫煤火电机组烟气超洁净排放改造出现了脱硫除尘系统投资高、能耗高、系统复杂等诸多问题, 发展高效节能的烟气脱硫除尘一体化技术尤为重要。

目前国内外火力发电机组超低排放改造方案主

收稿日期: 2018-06-28; 责任编辑: 白娅娜 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.18062802

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51576072); 广州市科技计划资助项目(201604020130)

作者简介: 刘定平(1965—), 男, 湖北汉川人, 副教授, 博士, 研究方向为能源清洁与转化。E-mail: liudingping@126.com

引用格式: 刘定平, 马佩佩, 周俊. 燃用高硫煤火电机组旋流雾化超洁净排放试验研究[J]. 洁净煤技术, 2018, 24(6): 101-106.

LIU Dingping, MA Peipei, ZHOU Jun. Experimental study on ultra-low emission of high-sulfur coal combustion in thermal unit by swirl atomization[J]. Clean Coal Technology, 2018, 24(6): 101-106.



移动阅读

要是燃烧低硫煤,采用湿法烟气脱硫装置,且配套湿电除尘器装置的技术路线。孟炜等^[1]采用低低温静电除尘器和电场湿式静电除尘器除尘改造方案,结合脱硫吸收塔内交互喷淋技术,对设计煤种硫含量0.8%的百万千瓦机组进行超洁净排放改造,该改造方案存在系统复杂、造价高以及能耗大等缺点。Sui等^[2]使用湿法烟气脱硫烟气装置且配套湿电除尘器装置对火力发电机组进行脱硫除尘改造,以实现烟气超低排放。日本碧南电厂1 000 MW机组采用分级燃烧技术和新型燃烧器、SCR脱硝、干式静电除尘器、湿法烟气脱硫装置以及湿式静电除尘器的技术路线实现烟气超低排放,具有改造费用高、系统复杂的缺点^[3]。张军等^[4]针对2台1 000 MW火力机组,采用低氮燃烧器、SCR脱硝装置、干式静电除尘器、湿法烟气脱硫装置和湿式静电除尘器的技术路线实现烟气的超洁净排放。当前国内外火力发电机组超低排放改造方案均具有系统复杂、改造费用高等问题^[5-9]。对于高硫煤电机组,国内目前多采用双塔双循环技术对其改造,但具有系统复杂、占地面积大、能耗高等缺点^[10-11]。考虑到实际运行的可靠性和经济性,硫含量大于2.2%时,双塔双循环技术难以在现有脱硫增效措施下完成SO₂的超低排放^[11]。

针对上述问题,本文提出高效旋流雾化脱硫除尘一体化技术以解决现有高硫煤电机组在烟气超洁净排放改造中遇到的诸多问题。该技术可在单塔、高烟气流速、低液气比条件下在脱硫塔内同时完成脱硫除尘过程,实现烟气超洁净排放。本文对高硫煤电火力发电机组烟气脱硫塔开展高效旋流雾化脱硫除尘一体化改造试验,通过改造前后性能试验,分析增装旋流雾化层后,液气比、进口烟气温度、进口SO₂浓度、进口粉尘浓度与脱硫效率、除尘效率的关系,为高硫煤电火力发电机组的烟气超洁净排放提供一条新的技术路线。

1 旋流雾化脱硫除尘一体化技术机理

1.1 旋流雾化喷嘴

旋流雾化喷嘴是一种气力式新型双流喷嘴,采用双通道结构,中心管通入压缩空气,外环管通入液相工质;液相入口贴壁切向布置。其雾化机理为:2个通道中流动的气体和液体之间存在较大的相对速度,加强了气体对液体的扰动,形成不稳定波。高压气流通过拉瓦尔喷管射出,带动四周的液流将其破碎成液滴,形

成剧烈湍动的气液两相流喷入外部环境中。由于旋流雾化喷嘴内外压差的剧烈变化,使气流进一步膨胀,将包裹在其周围的液膜进一步破碎成为更细小的液滴^[12]。旋流雾化喷嘴如图1所示。



图1 旋流雾化喷嘴

Fig. 1 Swirl atomizing nozzle

1.2 技术机理

本文运用自主研发的高效旋流雾化脱硫除尘一体化技术,通过在脱硫塔壁上切圆布置的旋流雾化器实现脱硫浆液的微细雾化,形成切圆喷雾湍流旋流场。在高效旋流雾化器中,脱硫浆液被雾化成细小颗粒,粒径由传统喷淋层的1 500~3 000 μm降到50~150 μm^[13],气液接触比表面积提高400~900倍,吸收反应速率显著提高。同时通过旋流雾化切圆布置技术,烟气凭借切圆湍流旋流场的作用而不断螺旋上升,大大延长了烟气在脱硫塔内的停留时间,提升了烟气中SO₂与浆液颗粒的脱硫反应机率,从而提高了脱硫效率。

脱硫塔内,烟气与浆液微粒在切圆式旋流场及圆周剪切力的综合作用下形成强烈湍流^[14],加上高效旋流雾化器对浆液颗粒的破碎撕裂与声波雾化,形成湍流凝并、声波凝并与相变凝并的复合作用,烟气中携带的微细颗粒不断聚集长大,粒径由<20 μm增大到150 μm以上^[15-16],实现了高效凝并。凝并的大颗粒再由高效复合相变除雾器捕捉除去,可显著提高脱硫塔的除尘效率,从而实现了协同脱硫除尘。

2 改造试验

2.1 改造前系统状况

某燃用高硫煤的火力发电机组采用石灰石-石膏湿法脱硫工艺,一炉一塔布置。脱硫塔前设有静电除尘设备。脱硫塔为逆流喷淋塔,脱硫塔直径为12 m,总高度44 m。吸收区自上而下布置

有 A、B、C、D、E 五层喷淋层和 5 台浆液循环泵,浆液循环泵的规格参数见表 1。除雾系统由两级屋脊式除雾器组成。在额定工况下,烟气流量为 150 万 m^3/h ,脱硫塔内流速为 3.69 m/s ,入口烟气温在 120 $^{\circ}\text{C}$ 左右。

表 1 浆液循环泵规格参数

Table 1 Specifications of slurry circulation pump

参数	A 层	B 层	C 层	D 层	E 层
流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	7 500	7 500	7 500	5 000	5 000
扬程/m	18.42	20.12	21.82	23.52	25.22

改造前锅炉燃用硫含量 1.5% 的煤,脱硫塔入口 SO_2 质量浓度 4 500 mg/Nm^3 ,出口 SO_2 质量浓度 55 mg/Nm^3 左右;脱硫入口粉尘质量浓度 30 mg/Nm^3 ,出口粉尘浓度 25 mg/Nm^3 。烟气在脱硫塔流速为 3.686 m/s ,粉尘二次携带严重。

2.2 系统改造

对上述脱硫塔进行旋流雾化脱硫除尘一体化改造。在原 A、B、C、D、E 五层喷淋层下增设一层旋流雾化层 F,对应配套一台流量为 3 500 m^3/h 浆液循环泵,扬程为 36 m。在旋流雾化层 F,沿脱硫塔壁切圆式布置 36 个旋流雾化器。通过加装高效凝并除雾器对烟气中的粗粒径粉尘进行捕捉,达到超洁净除去微细粉尘颗粒的目的。改造方案如图 2 所示。

3 试验结果及分析

3.1 改造前后试验结果

为研究改造前后系统性能,选取不同煤种进行试验。由于环境排放限制,改造前只能选取含

硫量为 1.5% 的试验煤种,入口 SO_2 质量浓度为 4 000 ~ 4 500 mg/Nm^3 ,控制入口烟气流量为 150 万 m^3/h ,入口烟气温度在 120 $^{\circ}\text{C}$ 左右,入口粉尘质量浓度不超过 30 mg/Nm^3 。改造前系统出口 SO_2 质量浓度只维持在 55 mg/Nm^3 ,出口粉尘质量浓度维持在 20 ~ 25 mg/Nm^3 。

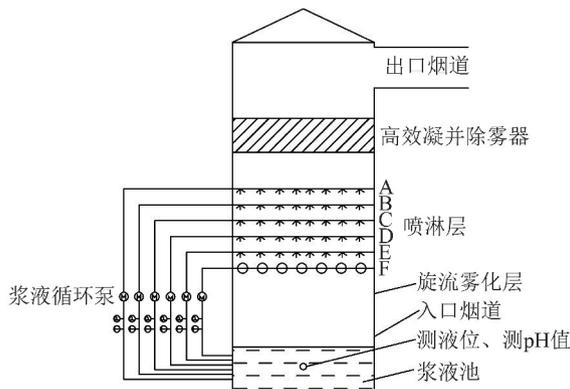


图 2 旋流雾化脱硫除尘一体化改造示意

Fig. 2 Transformation diagram of swirl atomization desulfurization and de-dusting integrated technology

改造后,选取试验煤种硫含量为 2.5% ~ 2.7%,控制入口烟气流量为 15 万 m^3/h ,入口烟气温度在 120 $^{\circ}\text{C}$ 左右,入口 SO_2 质量浓度 5 600 ~ 6 200 mg/Nm^3 ,入口粉尘质量浓度不超过 30 mg/Nm^3 。启动旋流雾化层 F,选取 4 种不同运行方式 ABCDE、ABCEF、BCDEF、ABCDEF 进行试验。分析 4 种运行方式下液气比、入口烟气温度、入口 SO_2 浓度、入口粉尘浓度、出口 SO_2 浓度、出口粉尘浓度等测试数据。对现场测得的 354 组数据进行整理,其中 9 组重要测试数据见表 2。

表 2 旋流雾化脱硫除尘一体化改造前后实测数据

Table 2 Measurement data of swirl atomization desulfurization and de-dusting integrated technology before and after transformation

序号	运行方式	入口烟气温度/ $^{\circ}\text{C}$	入口 SO_2 质量浓度/ $(\text{mg} \cdot \text{Nm}^{-3})$	入口粉尘质量浓度/ $(\text{mg} \cdot \text{Nm}^{-3})$	出口 SO_2 质量浓度/ $(\text{mg} \cdot \text{Nm}^{-3})$	出口粉尘质量浓度/ $(\text{mg} \cdot \text{Nm}^{-3})$	液气比/ $(\text{L} \cdot \text{m}^{-3})$	脱硫效率/%	脱硫塔除尘效率/%
1	ABCDE	126.7	4 499	27.8	53.5	5.2	21.67	98.81	81.29
2	ABCDE	127.8	4 148	27.2	50.6	5.2	21.67	98.78	80.88
3	ABCEF	124.4	4 895	27.3	29.5	2.8	19.93	99.40	89.74
4	ABCEF	126.3	4 534	28.1	27.5	2.9	19.93	99.39	89.68
5	BCDEF	127.6	4 925	28.7	29.6	3.1	18.27	99.40	89.20
6	BCDEF	131.2	4 675	29.0	28.7	3.2	18.27	99.39	88.97
7	ABCDEF	125.3	6 200	27.3	30.0	2.5	23.27	99.52	90.84
8	ABCDEF	126.0	4 938	28.0	25.1	2.7	23.27	99.49	90.35
9	ABCDEF	134.1	4 560	30.0	26.8	3.3	23.27	99.41	89.00

3.2 液气比对脱硫效率的影响

为研究液气比对脱硫效率的影响,选取 ABCDE (无旋流雾化层运行)、ABCEF、BCDEF 和 ABCDEF 四种运行方式进行性能测试。试验结果如图 3 所示。运行方式 ABCDE、ABCEF、BCDEF 和 ABCDEF 对应的液气比分别为 21.7、19.9、18.3、23.3 L/Nm³,平均脱硫效率分别为 98.77%、99.35%、99.34%、99.44%。说明改造后脱硫效率较改造前有较大提升。特别是投运旋流雾化层后,平均脱硫效率都高于 99%。随着液气比的升高脱硫效率可高达 99.44%。

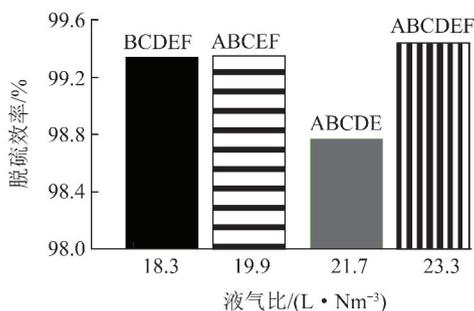


图3 液气比对脱硫效率的影响

Fig. 3 Effect of liquid-gas ratio to desulfurization efficiency

通过多工况反复试验,表明旋流雾化脱硫除尘一体化技术可更好地适应液气比的变化,烟气入口 SO₂ 质量浓度 4 000 ~ 4 500 mg/Nm³、液气比 18.3 L/Nm³ 的情况下就可以实现烟气脱硫的超洁净排放。液气比 23.3 L/Nm³、烟气入口 SO₂ 质量浓度 6 200 mg/Nm³ 的条件下也可实现烟气脱硫的超洁净排放。

3.3 入口烟气温度对脱硫效率的影响

为了研究入口烟气温度对脱硫效率的影响,选取烟气入口温度为 124 ~ 136 °C,在 ABCDE、ABCEF、BCDEF 和 ABCDEF 四种浆液泵运行方式下进行对比分析,试验结果如图 4 所示。

由图 4 可知,运行方式 ABCDE、ABCEF、BCDEF 和 ABCDEF 的脱硫效率均随着入口温度的升高而缓慢降低。对比运行方式 ABCDE 和 ABCEF、BCDEF,保持喷淋层运行层数不变,改设旋流雾化层 F 后,平均脱硫效率分别提高了 0.58% 和 0.57%。旋流雾化脱硫除尘一体化技术可以更好地适应入口烟气温度的变化,脱硫效率可稳定控制在 99.29% 以上。

3.4 液气比对除尘效率的影响

为研究液气比对除尘效率的影响,选

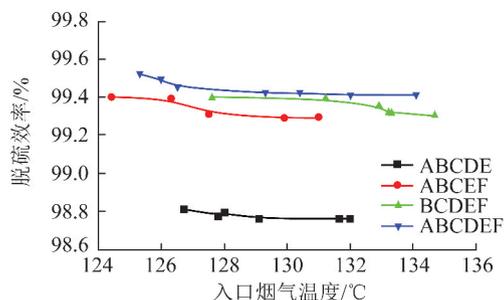


图4 入口烟气温度对脱硫效率的影响

Fig. 4 Effect of inlet gas temperature on desulfurization efficiency

取 ABCDE、ABCEF、BCDEF 和 ABCDEF 四种运行方式进行对比,试验结果如图 5 所示。由图 5 可知,运行方式 ABCDE、ABCEF、BCDEF 和 ABCDEF 对应的液气比分别为 21.7、19.9、18.3、23.3 L/Nm³,平均除尘效率分别为 80.0%、89.57%、88.81%、89.92%。旋流雾化改造后,脱硫塔的除尘效率明显提升。特别是投运旋流雾化层 F 后,除尘效率随着液气比的升高而升高,运行方式 ABCDEF 的平均除尘效率为 89.92%,最高可达 90.84%。说明旋流雾化脱硫除尘一体化技术可有效去除脱硫塔尾部微细颗粒物,且投运旋流雾化层后除尘效率可更好地适应液气比的变化。

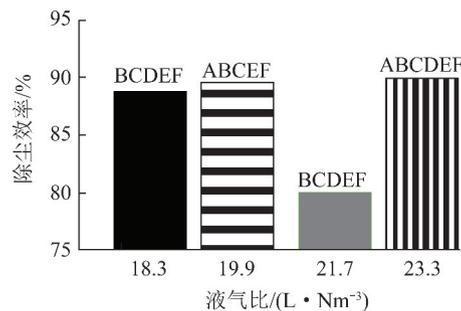


图5 液气比对除尘效率的影响

Fig. 5 Effect of liquid-gas ratio on de-dusting efficiency

3.5 入口烟气温度对除尘效率的影响

为了研究入口烟气温度对除尘效率的影响,选取 ABCDE、ABCEF、BCDEF 和 ABCDEF 四种运行方式进行性能试验,结果如图 6 所示。

由图 6 可知,在运行方式 ABCDE 下,入口烟气温度由 126 °C 升高到 132 °C 时,脱硫塔除尘效率随由 81.29% 降至 79.04%;在 ABCEF、BCDEF 和 ABCDEF 运行方式下,入口烟气温度由 124 °C 升高到 135 °C 时,脱硫塔除尘效率随由 90.84% 降低到 88.52%。由此可见投运旋流雾化层,烟气温度对脱硫塔除尘效率的敏感性变小。

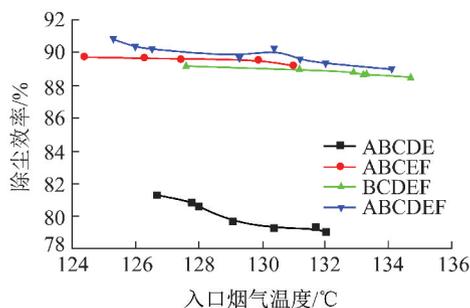
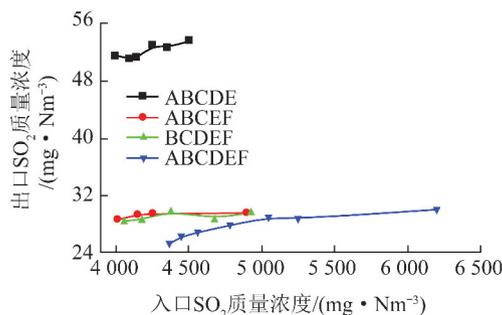


图6 入口烟气温度对除尘效率的影响

Fig. 6 Effect of inlet gas temperature on de-dusting efficiency

3.6 入口 SO₂ 浓度对出口 SO₂ 浓度的影响

为了研究入口 SO₂ 浓度对出口 SO₂ 浓度的影响,选取 ABCDE、ABCEF、BCDEF 和 ABCDEF 四种运行方式进行性能试验,结果如图 7 所示。

图7 入口 SO₂ 浓度对出口 SO₂ 浓度的影响Fig. 7 Effect of inlet SO₂ concentration on outlet SO₂ concentration

由图 7 可知,ABCDE 运行方式下,因环保要求不允许超标排放,入口 SO₂ 质量浓度为 4 000 ~ 4 500 mg/Nm³,若继续提高入口 SO₂ 浓度,出口 SO₂ 浓度将瞬间上升到 50 mg/Nm³ 以上,无法满足超低排放的要求。投运旋流雾化层后,在运行方式 BCDEF、ABCEF 和 ABCDEF 下,入口 SO₂ 质量浓度为 4 000 ~ 6 200 mg/Nm³,出口 SO₂ 浓度随入口 SO₂ 浓度的升高而缓慢升高,出口 SO₂ 质量浓度稳定控制在 35 mg/Nm³ 以内。旋流雾化脱硫除尘一体化技术可更好地适应入口 SO₂ 浓度的变化,在燃用高硫煤的情况下,脱硫塔入口烟气 SO₂ 质量浓度达到 6 200 mg/Nm³ 时,出口烟气 SO₂ 质量浓度稳定在 30 mg/Nm³,符合超低排放的要求。

3.7 入口粉尘浓度对出口粉尘浓度的影响

由于烟气经过静电除尘器,脱硫塔入口粉尘质量浓度在 26 ~ 30 mg/Nm³,入口粉尘浓度对出口粉尘浓度的影响如图 8 所示。

由图 8 可知,在 ABCDE 运行方式下,出口粉

尘质量浓度始终超出 5 mg/Nm³,并随入口粉尘浓度的增加而增加,不能满足超低排放的要求。在改设旋流雾化层后,运行方式 BCDEF、ABCEF 和 ABCDEF 的出口粉尘浓度随入口粉尘浓度的升高而缓慢升高,出口粉尘质量浓度稳定控制在 3.3 mg/Nm³ 以内。在 ABCDEF 运行方式下,入口粉尘质量浓度达到 30.0 mg/Nm³ 时,出口粉尘质量浓度达到 3.3 mg/Nm³,符合超低排放要求。旋流雾化脱硫除尘一体化技术可较好地适应入口粉尘浓度的变化。

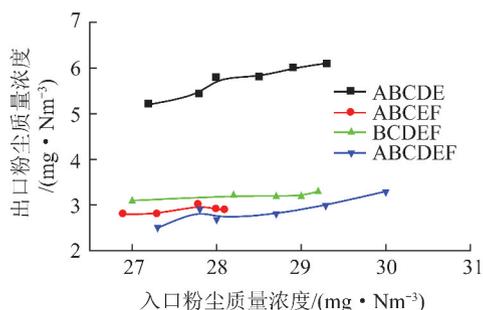


图8 入口粉尘浓度对出口粉尘浓度的影响

Fig. 8 Effect of inlet dust concentration on outlet dust concentration

4 结 论

1) 对某 300 MW 火力发电机组采用高效旋流雾化脱硫除尘一体化技术进行改造,在锅炉燃用高硫煤,采用直径 12 m 单塔,不增加湿电除尘器情况下实现了烟气脱硫与除尘的超洁净排放。锅炉燃煤出口 SO₂ 质量浓度由 53.5 mg/Nm³ (硫含量 1.5%) 降至 30 mg/Nm³ (硫含量 2.7%),实现了燃用高硫煤的情况下,在单塔高烟气流速下的超洁净排放。

2) 采用旋流雾化脱硫除尘一体化技术,脱硫塔入口粉尘质量浓度为 30 mg/Nm³ 时,出口粉尘质量浓度实现小于 5 mg/Nm³ 的超洁净排放要求,不需在脱硫塔后加装湿电除尘器,可在脱硫单塔协同完成脱硫除尘。烟气入口 SO₂ 质量浓度为 6 200 mg/Nm³ 时,液气比 23.3 L/Nm³ 即可实现烟气脱硫的超洁净排放,解决了高硫煤需要高液气比的难题。

3) 采用旋流雾化脱硫除尘一体化技术,在一定液气比下,烟气入口温度及 SO₂ 浓度对脱硫塔的效率影响不大,脱硫效率可稳定在 99.29% 以上,脱硫塔除尘效率高达 90.84%。该示范工程为实现燃煤烟气 SO₂ 和粉尘的协同超低排放提供了稳定可靠的运行结果。

参考文献(References):

- [1] 孟炜,李清毅,胡达清,等. 百万千瓦燃煤机组烟气超低排放设计及应用[J]. 热能动力工程,2016,31(1):111-117.
MENG Wei, LI Qingyi, HU Daqing, et al. Design and applications of the ultra low emissions of flue gases from a 1 000 MW coal-fired boiler unit[J]. Journal of Engineerinf for Thermal Enerfy and Power,2016,31(1):111-117.
- [2] SUI Zifeng, ZHANG Yongsheng, PENG Yue, et al. Fine particulate matter emission and size distribution characteristics in an ultra-low emission power plant[J]. Fuel,2016,185:863-871.
- [3] 宋卫东. 日本中部电力公司碧南发电厂的环保技术[J]. 国际电力,2002,6(1):56-58.
SONG Weidong. Environmental protection techniques applied in Kelinan Thermal Power Plant of Chubu Electric Power Company in Japan[J]. International Electric Power for China,2002,6(1):56-58.
- [4] 张军,郑成航,张涌新,等. 某1 000 MW 燃煤机组超低排放电厂烟气污染物排放测试及其特性研究[J]. 中国电机工程学报,2016,36(5):1310-1314.
ZHANG Jun, ZHENG Chenghang, ZHANG Yongxin, et al. Experimental investigation of ultra-low pollutants emission characteristics from a 1 000 MW coal-fired power plant [J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(5):1310-1314.
- [5] HAO Runlong, ZHANG Yaoyu, WANG Zhaoyue, et al. An advanced wet method for simultaneous removal of SO₂ and NO from coal-fired flue gas by utilizing a complex absorbent [J]. Chemical Engineering Journal,2017,307:562-571.
- [6] WU Hao, YANG Linjun, YAN Jinpei, et al. Improving the removal of fine particles by heterogeneous condensation during WFGD processes[J]. Fuel Processing Technology,2016,145:116-122.
- [7] YAN Jinpei, CHEN Liqi, LIN Qi. Removal of fine particles in WFGD system using the simultaneous acoustic agglomeration and supersaturated vapor condensation[J]. Powder Technology,2017,315:106-113.
- [8] 舒心. 新型湿法斜板塔除尘脱硫实验与理论研究[D]. 长沙:湖南大学,2011:17-18.
- [9] 陈海林,杨春平,甘海明,等. 螺旋型垂直筛板布气的喷射鼓泡脱硫除尘塔的研制和性能[J]. 环境科学学报,2010,30(2):294-301.
CHEN Hailin, YANG Chunping, GAN Haiming, et al. Development and evaluation of a jet bubble reactor using vertical sieves in a spiral housing as a gas in jet device for dust removal and desulfurization [J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2010,30(2):294-301.
- [10] 史文峥,杨萌萌,张绪辉,等. 燃煤电厂超低排放技术路线与协同脱除[J]. 中国电机工程学报,2016,36(16):4308-4318.
SHI Wenzheng, YANG Mengmeng, ZHANG Xuhui, et al. Ultra-low emission technical route of coal-fired power plants and the cooperative removal [J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(16):4308-4318.
- [11] 李博,赵锦洋,吕俊复. 燃煤电厂超低排放技术方案应用[J]. 中国电力,2016,49(8):144-147.
LI Bo, ZHAO Jinyang, LYU Junfu. Application of ultra-low emission technical roadmaps of coal-fired power plants [J]. Electric Power,2016,49(8):144-147.
- [12] 刘定平,徐开华,方磊. 新型双流喷嘴石灰石浆液雾化及流量特性实验[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),2013,41(5):112-117.
LIU Dingping, XU Kaihua, FANG Lei. Experimental investigation into atomization and flux characteristics of limestone slurry in a new-type two-fluid nozzle [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2013, 41 (5): 112 - 117.
- [13] 刘定平,陆培宇. 旋流雾化技术在464 000 m³/h 烟气湿法脱硫中的应用[J]. 中国电力,2015,48(8):130-134.
LIU Dingping, LU Peiyu. Application of swirl spray technology in 464 000 m³/h wet flue gas desulphurization [J]. Electric Power, 2015, 48(8):130-134.
- [14] 刘定平,肖尚. 切圆喷雾式湿法脱硫塔内流场数值模拟及优化分析[J]. 环境工程,2015,33(10):55-60.
LIU Dingping XIAO Shang. Numerical simulation and optimization analysis flow field in a tangentially spray wet desulfurization tower [J]. Environmental Engineering,2015,33(10):55-60.
- [15] 刘定平,张亚曦,周俊. 旋流雾化脱硫塔除尘效果试验研究[J]. 环境工程,2017,35(2):68-71.
LIU Dingping, ZHANG Yaxi, ZHOU Jun. Experimental research on effects of dedusting in swirl atomizing desulfurization tower [J]. Environmental Engineerin,2017,35(2):68-71.
- [16] 刘定平,罗伟乐. 种子颗粒联合声波凝并微细颗粒的研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),2017,45(6):131-138.
LIU Dingping, LUO Weile. Investigation into coagulation of fine particles by combination of seed particles with acoustic wave [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2017, 45 (6): 131 - 138.