

# 煤炭脱硫技术研究进展

袁 鉴

(中煤招标有限责任公司,北京 100011)

**摘要:**为提高煤炭的利用效率,实现煤炭的洁净利用,分析了煤炭燃前脱硫、燃中固硫和燃后脱硫的应用情况、脱硫效果和发展前景。结果表明:从成本最低考虑,燃前脱硫最经济,燃后脱硫成本最高。从我国国情分析,燃前脱硫无疑是最好的发展方向,燃中固硫、燃后脱硫作为辅助手段予以补充。因此实际应用中经常会把燃前、燃中、燃后多种方法结合起来,是未来脱硫技术的发展方向。

**关键词:**脱硫;燃前脱硫;燃中固硫;燃后脱硫

中图分类号:X701.3 文献标志码:A 文章编号:1006-6772(2015)04-0099-05

## Research progress of coal desulfurization

YUAN Jian

(China Coal Tendering Co., Ltd., Beijing 100011, China)

**Abstract:** To realize clean and efficient use of coal, the application, effects and development of desulfurization before combustion, sulfur fixation and post combustion desulfurization were analyzed. The results showed that considering cost, desulfurization before combustion was economical, the cost of post combustion desulfurization was enormous. Based on the data and information collected, desulfurization before combustion was the best development direction, sulfur fixation and post combustion desulfurization as supplementary means to be added. Actual application often combined many kinds of desulfurization methods, which was the development direction of desulfurization technology.

**Key words:** desulfurization; desulfurization before combustion; sulfur fixation; post combustion desulfurization

## 0 引 言

煤炭燃烧过程中会释放  $\text{SO}_2$ 、 $\text{SO}_3$  和  $\text{H}_2\text{S}$  等有毒有害气体,不仅腐蚀设备,而且污染空气,甚至形成酸雨,对生态环境造成严重危害并影响人体健康。因此,煤中的硫已成为制约煤炭大规模利用的难点。煤中的硫分为有机硫和无机硫,其中有机硫多以硫醇、硫醚、硫醌、噻吩等形态存在;无机硫主要以硫化物(黄铁矿,白铁矿,砷铁矿)、单质硫、硫酸盐(石膏、绿矾等)形式存在。据统计,煤中无机硫占60%~70%,有机硫占30%~40%<sup>[1]</sup>。其中无机硫大多以硫化物形式存在,且以黄铁矿为主。通常有机硫比无机硫更难脱除。李彪等<sup>[2]</sup>在分析我国煤中硫的分布和赋存状态基础上,阐述了各种煤炭燃前脱硫技术的原理、特点及应用;郭方遒等<sup>[3]</sup>采用

不同的吸收剂作为脱硫剂对煤中硫的脱除进行了比较研究,证明通过吸收剂把大部分的硫固定在煤灰中是一种高效简易的脱硫方法;林晓芬等<sup>[4]</sup>介绍了几种烟气脱硫技术,着重介绍了应用最为广泛的湿法烟气脱硫技术。对于燃前脱硫的新技术,燃中固硫的新工艺,烟气脱硫的新方法没有完整的综合叙述,本文旨在概括总结煤炭脱硫的各种技术、工艺并加以分析对比,以期对煤炭脱硫技术的后续研究有所帮助。

## 1 燃前脱硫技术

燃前脱硫技术是将原煤中的硫分和灰分脱除,从而降低燃煤后的  $\text{SO}_2$  排放。燃前脱硫技术主要分为物理脱硫技术、化学脱硫技术、温和净化脱硫技术及微生物脱硫技术等。

收稿日期:2014-12-16;责任编辑:孙淑君 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.2015.04.026

作者简介:袁 鉴(1981—),男,重庆人,工程师,硕士,从事洁净煤技术与煤炭行业招标工作。E-mail:yuanjian8109@126.com

引用格式:袁 鉴.煤炭脱硫技术研究进展[J].洁净煤技术,2015,21(4):99-103.

YUAN Jian. Research progress of coal desulfurization[J]. Clean Coal Technology, 2015, 21(4): 99-103.

## 1.1 物理脱硫技术

物理脱硫包括重选、电选、磁选脱硫等选煤技术。跳汰选煤、重介质选煤、空气重介质流化床干法选煤、风力选煤、溜槽和摇床选煤等均属于重力选煤。重力选煤是利用煤中有机质与黄铁矿存在的密度差异,实现两者分离,是主流的物理选煤脱硫方法,工艺简单,处理量大,分选效果好,可以有效脱除黄铁矿,但对有机硫无能为力<sup>[5-8]</sup>。

1)跳汰法脱硫。适合精选粗粒煤,避免粉碎过度,单位面积处理能力大。也可用于精选作业,视原煤中黄铁矿单体解离程度而定,分选下限在0.5 mm左右。脱硫降灰过程中,对0.5 mm以上煤矸石以及0.3 mm以上的单体解离黄铁矿分选效果良好。不足是分选精度差,对硫分高且黄铁矿细粒多的煤用纯跳汰工艺分选效果不理想<sup>[9-10]</sup>。

2)水介质旋流器脱硫。设备占地面积相对较小,处理量大,构造简易,分选效果好。河南观音堂选煤厂对跳汰中煤脱硫,利用的是直径200 mm水介质旋流器,可使2.26%硫分降至1.47%,黄铁矿硫也降低了1.48%,脱除率达90%以上。缺点是设备易磨损,生产指标波动大,功耗大。英国诺丁汉大学对煤炭脱硫进行研究,使用的是小直径自生水介质旋流器,脱硫效果也很显著<sup>[11]</sup>。

3)微细重介质旋流器脱硫。美国能源部近年来重点开发了采用微细磁铁矿粉分选细粒煤的工艺技术,具有效率高、分选下限低的优点。美国和南非均建立了相应的选煤厂。煤炭科学研究总院唐山分院也对该工艺进行了研究,效果不错。南桐矿选煤厂和定州焦化厂重介质旋流器脱硫工艺能脱除85%以上的无机硫<sup>[12]</sup>。

4)摇床法脱硫。作为脱硫工艺不可或缺的设备,摇床具有富矿比高,适合3 mm以下粒度分选等优势。不足之处是单位面积处理能力差,只对单体检离的黄铁矿分选效果好。因此摇床往往用于处理螺旋选矿机、跳汰机和溜槽分选后所得的粗精矿<sup>[13]</sup>。

5)离心力脱硫。重力场中,微细粒惯性小,沉降速度低,所以分选效果不佳。利用离心力场强化微细粒矿物的分选可以改善重力分选效果。近年来美国、加拿大等国在强化细粒矿物的分选方面做了大量工作,研制出了诸如Falcon离心选矿机、Altair离心跳汰机、Kelsey离心跳汰机等一系列高效分选设备。国内的陶有俊等<sup>[14-15]</sup>也做了相关研究,Fal-

con离心选矿机脱除细粒煤中硫,结果表明,Falcon分选的精煤全硫为2.20%,浮选分步释放精煤全硫为3.20%,说明Falcon分选机对细粒煤的脱硫效果优于传统的浮选法。

电选是对煤与矿物质之间存在的介电性质差异加以利用实现分选。按照带电方式的不同,电选机分为:摩擦静电分选机、静电分选机、高压分选机。其中,摩擦静电分选机对煤中黄铁矿的脱除效果较好。美国匹兹堡能源研究中心进行了摩擦静电选试验表明<sup>[16]</sup>,入料灰分为24.5%、黄铁矿含量1.69%时,得到灰分为1.7%、硫分0.08%,产率40.8%的超低灰精煤,以及灰分20.88%、硫分3.41%的中煤和灰分72.4%、硫分3.38%的尾煤,脱硫降灰效果显著,但煤种适应性差。Hayashi<sup>[17]</sup>对煤进行了微波辐射脱硫研究,取得了一定效果。

磁选脱硫是通过高梯度强磁分离煤脱硫。煤中有机硫一般呈逆磁性,无机硫则呈顺磁性。物料进入磁场后,通过磁场中受力的不同从而达到分离的目的。曾鸣等<sup>[18]</sup>用高梯度磁选法对煤中细粒黄铁矿的脱除进行探讨,对中梁山高硫煤进行了高梯度磁选进行脱硫,脱硫率高达47.7%~60.7%。

## 1.2 化学脱硫技术

化学脱硫有2种:物理化学脱硫(浮选脱硫),纯化学脱硫。

浮选是细粒及极细粒物料分选过程中使用最为广泛的方法。根据矿物表面物理化学性质的差异,进行精煤与矸石的分离。为了提高精煤的纯度与产率,通常需要加入浮选药剂,以强化矿物表面的疏水性作用<sup>[19]</sup>。浮选脱硫是最为经济有效的脱硫方法之一,其中浮选柱对煤中黄铁矿的脱除尤为有效。

纯化学脱硫有以下几种。代表性的碱水溶液法:MCL法、稀碱溶液浸提脱硫法、F-L法、微波加热MCL法等;部分氧化法:氧化氢-醋酸氧化法、Mayers法、氯化法、铜盐氧化法、次氯酸钠氧化法、高锰酸钾氧化法;氯解法。虽然工艺条件要求苛刻,但脱硫效果好,能脱除近乎全部的无机硫,部分脱除有机硫,但设备成本较高,可能破坏煤的结构与性质<sup>[20]</sup>。

## 1.3 温和净化脱硫技术

操作条件极其温和是温和净化脱硫的特点。一般在常压,温度不高的条件下便可以进行脱硫,对煤质影响很小,如:微波辐射法、电化学法、化学法。

煤中最易吸收微波的是黄铁矿,有机硫次之,而

煤基质基本不吸收微波。在微波电磁场中,由于硫分产生极化作用,削弱了煤中硫原子与其他原子化学吸附力,促使煤中硫与浸提剂化学反应生成可溶硫化物,通过洗涤达到与煤分离的目的<sup>[21]</sup>。

煤的电化学分离法利用了电解槽内,煤发生的电化学氧化还原反应,将煤中的黄铁矿和有机硫氧化成可溶性硫化物(电化学氧化脱硫)或者将煤还原脱硫后加氢(电化学还原脱硫),从而实现了脱硫。

煤温和化学净化法是新兴的煤净化技术,主要有溶剂温和抽提、有机金属化合物脱有机硫、单电子转移反应脱有机硫。基本都是通过有机溶剂抽提煤,对于有机硫脱除效果较好。

相比碱处理法和化学氯化法,溶剂萃取脱硫法的脱硫率偏低,但不破坏煤的化学结构,较为经济。诸如四氯化乙烯(PCE)、乙醇、三氯乙烷等都是常用的有机溶剂。

美国李尚久等以俄亥俄州和宾夕法尼亚州的5种高硫煤为样本,利用PCE脱硫法进行试验,结果显示,120℃温度下萃取30 min脱除有机硫42%~55%。PCE萃取工艺有选择性地对有机硫进行脱除,脱硫的同时,完好保留了煤中的碳氢化合物和矿物质成分,不破坏有机质的化学特性。

#### 1.4 微生物脱硫技术

微生物脱硫方法的研究有脱硫工艺研究和微生物菌的筛选两方面。适宜脱硫的微生物菌主要有硫化叶菌属,硫杆菌属,细小螺旋菌属。微生物脱硫可以有效脱除黄铁矿硫,同时脱除部分有机硫<sup>[22]</sup>,但是要求条件苛刻,脱硫速度较慢。目前技术成熟并应用前景良好的工艺方法有:

1) 浸出脱硫法。采用浸出法工艺,利用微生物菌对煤脱硫。浸出时间长,酸性液体处理困难,设备易腐蚀等是存在的问题。

2) 助浮脱硫法。选煤设备中,悬浊液下方通入微生物气泡,通过微生物对黄铁矿的吸附,改良黄铁矿亲水性,使其与气泡脱落沉降,实现煤和黄铁矿分离,时效性好,并能兼顾降灰。

微生物本身,如活性,对温度的敏感性等问题,是微生物脱硫面临的主要问题。煤中有机硫的脱除要比无机硫困难,这是因为煤中有机硫本身是碳网中的有机组成部分,不对碳网结构进行破坏就很难实现脱除;另外有机硫本身结构形式多变,脱硫代谢机理不同。所以,目前微生物脱硫大多针对无机硫

脱除。

由于微生物脱硫存在能耗小、成本低、环境友好等诸多优势,日后必将成为煤炭脱硫的研究重点。

美国匹兹堡能源研究中心使用氧化亚铁硫杆菌(TBF)对无机硫的脱除进行研究。在pH=2.0条件下,利用微生物对小于0.074 mm的煤粉进行处理,无机硫经两周脱除80%,30 d后脱除高达95%。美国矿业局研究所研究显示,在pH=1.8的酸性条件下,对不同粒度煤进行试验252 d,可脱除黄铁矿硫61%~68%。美国爱达华工程试验所生物加工技术部,利用伊利诺6号煤的破碎样,0.15 mm以下的粒级达到74%,在充气水煤浆生物反应器内进行试验,经10~40 d黄铁矿硫脱除率可达70%。

微生物对煤中有机硫脱除的研究,同样有喜人的突破。美国气化工艺所脱除伊利诺煤中的有机硫时,使用了自己培育的混合菌杆IGT-S8,将煤样粉碎到0.074 mm,经IGT-S8菌种处理历时3周,有机硫的脱除可达64%。

国内进行的煤炭生物脱硫研究也同样取得了一定进展,徐毅等<sup>[23]</sup>利用从松藻煤矿分离的细菌处理黄铁矿,8 d黄铁矿硫脱除率达70%。钟慧芳<sup>[24]</sup>、张东晨<sup>[25]</sup>用菌株脱除南桐煤中黄铁矿硫86.11%~95.16%。何德文等<sup>[26]</sup>用真菌在常温下对温度、pH值、煤浆浓度、煤粒度等影响因素进行了试验研究,结果表明:温度45℃、pH值6、煤浆浓度10%、粒度0.15 mm条件下,2 d内全硫最高脱除43.75%,无机硫脱除率最高达54.84%。张东晨等<sup>[27]</sup>用草分枝杆菌选择性吸附煤表面,实现了煤的絮凝,并有效地脱除了煤中黄铁矿硫。

## 2 燃中固硫技术

燃中固硫技术一般指在燃烧煤炭的锅炉内喷入脱硫剂(石灰石、白云石、熟石灰和生石灰等),脱硫剂在炉内较高的温度下,与燃煤排放的SO<sub>2</sub>及SO<sub>3</sub>反应,转化为亚硫酸盐或硫酸盐形式的炉渣排出。燃中固硫技术的主要手段有炉内直接喷钙技术、流化床燃烧技术、型煤固硫技术和水煤浆燃烧技术等,其中应用最为广泛的当属循环流化床炉内脱硫技术。

1) 炉内直接喷钙技术。固硫剂磨细以后喷入燃烧的炉膛内,使煤中硫以硫酸盐炉渣的形式排出,该方法操作简单,设备简易,但是固硫效果相对较差,同时结渣易导致锅炉磨损和堵塞。

2) 流化床燃烧技术。从炉底鼓风,使物料呈有规律的悬浮分布,燃烧呈流态化。该方法煤种适应性广,固硫效率好,而且煤的燃烧效率高,但该方法只适合中小型锅炉,易结渣,锅炉易磨损<sup>[28]</sup>。

3) 型煤固硫技术。将煤粉与适当比例的固硫剂、黏结剂等混合在一起,加工成具有一定物理化学性能和形状的块状物料,该方法燃烧效率高,技术成熟,便于推广,但是固硫效果较差,成本较高,灰渣处理困难<sup>[29]</sup>。

4) 水煤浆燃烧技术。将煤磨细至70%通过0.074 mm的细煤粉,按煤70%,水30%的比例再加入0.5%~1.0%的分散剂(保证其流动性)和0.02%~0.10%的稳定剂配制而成。在制备水煤浆的过程中,可以添加固硫剂,起到在燃烧中固硫的作用。水煤浆具有与燃料油一样的流动性,可以管道运输、贮存和燃烧<sup>[30]</sup>。燃烧时,水煤浆从喷嘴高速喷出,雾化,水分迅速蒸发,煤中挥发分析出而着火,同时伴有水煤气反应,着火温度比煤粉还要低100℃。

燃中固硫一般可脱除50%~60%的硫。温度是制约脱硫效率的重要因素,另外固硫剂的磨制需要大量能源的消耗,并且由于固硫剂的加入,导致了煤炭燃烧后锅炉排灰量的显著增加。燃中固硫降低烟气中硫的排放效果有限,只能一定程度上缓解烟气污染问题。另外该技术仍不成熟,诸如锅炉结渣、磨损和堵塞等问题尚需进一步研究,成本过高也是燃中固硫大范围应用面临的问题。

### 3 燃后脱硫技术

目前世界范围内控制燃煤导致的SO<sub>2</sub>排放最为有效、也应用最广的技术当属燃后烟气脱硫技术(Flue Gas Desulphurization,简称FGD),该方法是对煤炭燃烧后产生的废气进行脱硫处理。根据脱硫剂形态分类有干法、湿法和半干法3种工艺。

1) 干法烟气脱硫。采用碱性的生石灰、石灰石等作为脱硫剂,该工艺采用干态的脱硫剂,而脱硫的产物也是干态。在整个烟气的净化过程中没有明显的降温,净化以后烟气温度比较高,有利于烟气稀释扩散,因为整个过程为干态,所以没有污水、废酸等排出,不腐蚀设备。但是存在脱硫效率相对较低,反应速度较慢,设备庞大等问题<sup>[31]</sup>。

2) 湿法烟气脱硫。将石灰石、NaOH等脱硫剂制成浆液,或者以海水为脱硫剂,生成的脱硫产物以

亚硫酸盐或硫酸盐的形式存在于水溶液或者浆液中,即脱硫剂是湿态的,脱硫产物也是湿态的<sup>[32]</sup>。该方法脱硫反应速度快、设备简单、脱硫效率高,因为是湿态的,避免了堵塞,运行可靠,但是存在废水腐蚀设备、运行维护费用高等问题。

3) 半干法烟气脱硫。脱硫剂在干态下脱硫,在湿态下再生;或者在湿态下脱硫在干态下处理脱硫产物,既有湿法脱硫反应速度快、脱硫效率高,又有干法无污水废酸排出、脱硫后产物易于处理等优点<sup>[33]</sup>。

我国学者进行了大量研究,取得了一批经济性能较好,脱硫效率较高的实用技术,如湿式除尘脱硫<sup>[34]</sup>、掺烧含钙物质炉内脱硫、废碱液脱硫<sup>[35]</sup>、湿式筛网脱硫、浙江大学开发的分段脱硫技术、多段脱硫技术等。

### 4 结 语

随着经济发展,世界范围内对环境污染问题逐渐加以重视。煤炭脱硫技术将是煤炭利用过程中不可或缺的重要环节。燃前脱硫中的物理法工艺简单、处理量大但无法脱除有机硫;化学法脱硫效果好但操作成本高并影响煤质;微生物法效果理想但效率低,操作条件苛刻等。燃中固硫和烟气脱硫成本高,运行费用也高。从成本方面考虑,燃前脱硫最经济,燃后脱硫成本最高。从我国国情分析,燃前脱硫无疑是最好的发展方向,燃中固硫、燃后脱硫作为辅助手段予以补充。因此实际应用中经常会把燃前、燃中、燃后多种方法结合起来,是未来脱硫技术的发展方向。选择合理的脱硫手段相互结合进行脱硫,才能让煤炭的利用更为洁净与高效。

#### 参考文献:

- [1] 陈鹏. 中国煤炭性质分类和利用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 398-404.
- [2] 李彪, 沙杰. 煤炭燃前脱硫方法及其应用现状[J]. 矿山机械, 2010, 38(20): 9-11.
- [3] 郭方道, 黄兰芳, 刘祖庚. 四种吸收剂用于煤中硫脱除的研究[J]. 煤炭转化, 2002, 25(4): 42-44.
- [4] 林晓芬, 张军, 尹艳山, 等. 烟气脱硫脱氮技术综述[J]. 能源环境保护, 2014, 28(1): 1-4.
- [5] 郝吉明, 王书肖, 陆永琪. 燃煤二氧化硫污染控制技术手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001: 1-5.
- [6] 诺天兵, 武建军, 韩甲业. 燃煤污染现状及其治理技术综述[J]. 煤, 2006, 15(2): 1-7.
- [7] 孙德朝. 煤炭企业发展环保产业的思考[J]. 煤炭经济研究,

- 2006(3):23-24.
- [8] 李 斌.高硫煤热解、部分气化预脱硫技术基础性研究[D].太原:中国科学院山西煤炭化学研究所,2003:1-5.
- [9] 石 斌.高硫煤燃前脱硫及强化脱硫方法[J].选煤技术,2011(4):68-69.
- [10] 张明旭,范肖南,陆向阳,等.皖南高硫煤的分布特性及可选性的研究[J].煤炭科学技术,2000,28(1):37-40.
- [11] 董连平,樊民强.大锥角水质旋流器工艺参数研究与分选效果[J].选煤技术,2010(3):54-57.
- [12] 徐建平,蔡昌凤,王晓婷.实现细粒煤深度脱硫产业化的研究[J].安徽工程科技学院学报,2004,19(1):6-10.
- [13] 刘 峰,杨俊利,徐建平,等.FHMC-SF分选工艺实现煤炭深度脱硫降灰的探讨[J].煤炭科学技术,1999,27(6):40-43.
- [14] 陶有俊,高 敏,沈正义,等.细粒煤离心重力分选脱硫试验研究[J].煤炭科学技术,2003,31(11):17-19.
- [15] 陶有俊,陶东平,刘炯天,等.Falcon离心分选机对细粒煤的脱硫试验研究[J].金属矿山,2004,332(2):41-43.
- [16] Butcher David A, Bowson Neil A. Desulfurization of coal in intensified magnetic, electrostatic and gravitational fields[J]. Recent Adv Coal Process, 1996:223-228.
- [17] Hayashi J I. The role of microwave radiation in coal desulfurization with molten caustics[J]. Fuel, 1990, 6(6):436-472.
- [18] 曾 鸣,郑建中,邵绪新,等.高梯度磁选脱硫的理论基础及实验研究[J].洁净与空调技术,1996(1):38-40.
- [19] 胡 军,康文泽.浮选药剂 BET 与煤和黄铁矿作用机理[J].北京科技大学学报,2004,26(4):349-352.
- [20] 李成峰,任建勋,杜美利.煤脱硫技术研究进展[J].煤炭技术,2004,23(3):83-85.
- [21] 姬 丽,付汝三.选煤脱硫技术[J].科技传播,2010(8):157-158.
- [22] 朱申红,杨卫东,姜性义.煤炭脱硫技术现状及高梯度磁分离技术在脱硫中的应用[J].青岛建筑工程学院学报,2001,22(2):26-29.
- [23] 徐 毅,钟慧芳.微生物脱除煤炭中黄铁矿硫[J].微生物学报,1990,30(2):134-140.
- [24] 钟慧芳.利用微生物进行煤炭脱硫[D].北京:中国科学院微生物研究所,2000:5-9.
- [25] 张东晨.微生物脱除煤炭中的黄铁矿硫[M].合肥:合肥工业大学出版社,2005:4-10.
- [26] 何德文,柴立元,宋卫峰.真菌煤炭脱硫的试验因素和规律研究[J].环境科学与技术,2004,27(1):5-6.
- [27] 张东晨,张明旭,陈清如,等.草分枝杆菌选择性絮凝脱除煤中黄铁矿的研究[J].煤炭学报,2004,29(5):585-589.
- [28] 贾小宁.二氧化硫污染控制方法综述[J].甘肃科技,2005,21(12):138-139.
- [29] 贾培胜.浅谈燃煤 SO<sub>2</sub> 污染控制技术[J].科技情报开发与经济,2003,13(6):116-117.
- [30] 姜彦立,周新华,郝 宇.国内外燃煤脱硫技术的研究进展[J].矿业快报,2007(1):7-9.
- [31] 徐 明.烟气二氧化硫污染控制技术现状及现状[J].安徽师范大学学报:自然科学版,2001,24(2):187-189.
- [32] 杨柳春.二氧化硫污染控制的湿法技术[J].华东交通大学学报,2005,22(1):26-28.
- [33] 王 乾,段钰锋.半干法烟气脱硫技术[J].能源研究与利用,2007(4):1-4.
- [34] 任金锁.对燃煤烟气脱硫技术的探讨[J].大众标准化,2003(2):47-48.
- [35] 姚惠娟.煤炭脱硫技术的对比与分析[J].广东化工,2013,40(9):102-103.

(上接第 86 页)

对脱硫效果至关重要,而其中 f-CaO 含量又是影响其活性的关键因素。本文探索了一种测定粉煤灰样品 f-CaO 含量的酸碱滴定方法,作为评价 NGD 用粉煤灰脱硫活性的辅助手段。实验结果证实,该测定方法基本可行,经后续优化及验证后,本方法可在煤粉锅炉 NGD 脱硫项目上进行推广应用。

#### 参考文献:

- [1] 冯现河,尚庆雨,王乃继,等.新型大容量高效煤粉蒸汽锅炉[J].工业锅炉,2013(2):8-14.
- [2] 罗 伟,何海军,纪任山,等.高倍率灰钙循环耦合脱硫除尘技术研究[J].煤化工,2012(5):73-75.
- [3] 钱 玲,侯浩波.简述粉煤灰在烟气脱硫方面的应用[J].粉煤灰综合利用,2005(2):46-47.
- [4] 陆靓燕,陈延林,鲍秀婷,等.粉煤灰对二氧化硫吸附性能的研究[J].粉煤灰综合利用,2007(1):16-18.
- [5] 李 婷,肖翠微,张 鑫,等.粉煤灰在燃煤锅炉烟气脱硫中的应用[J].洁净煤技术,2013,19(5):82-84.
- [6] 王莺歌,陈懿辉,梁 川.大型燃煤电站粉煤灰的特性及综合利用[J].东北电力技术,2011,31(11):41-45.
- [7] 王莺歌.谈大型电站粉煤灰的综合利用[J].电力技术,2010,19(8):5-9.
- [8] DL/T 498—1992,粉煤灰游离氧化钙测定方法[S].
- [9] 张丽军.用 f-CaO 测定仪快速测定粉煤灰中的游离氧化钙[J].粉煤灰综合利用,2012(5):28-30.
- [10] 胡永安.活性氧化钙含量企业标准测定方法的研究[J].宿州学院学报,2011,26(11):61-64.
- [11] GB/T 3286.1—1988,石灰石、白云石化学分析方法氧化钙量和氧化镁量的测定[S].
- [12] 刘立权.干法脱硫用生石灰活性测定方法[J].中国环保产业,2004(4):34-35.
- [13] 王 轶.NID 消化过程特点及生石灰活性的测定与分析[J].中国环保产业,2006(8):25-27.
- [14] 周屈兰,刘尧祥,惠世恩.高钙粉煤灰直接应用于烟气脱硫的试验研究[J].动力工程,2007,27(1):117-121.
- [15] 宁开桂.无机及分析化学[M].北京:高等教育出版社,2003:143-144.