



“十三五”国家重点出版物  
出版规划项目

废物资源综合利用技术丛书

HUODIANCHANG TUOLIU SHIGAO ZIYUAN ZONGHE LIYONG

# 火电厂脱硫石膏资源 综合利用

王志轩 潘荔 杨帆 等编著

非外借



化学工业出版社



“十三五”国家重点出版物  
出版规划项目

❖ 废物资源综合利用技术丛书

HUODIANCHANG TUOLIU SHIGAO ZIYUAN ZONGHE LIYONG

# 火电厂脱硫石膏资源 综合利用

王志轩 潘 荔 杨 帆 等编著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书在总结已有成果及经验基础上,为促进脱硫石膏综合利用工作而编著。全书共分6章,分别介绍了脱硫石膏基本情况、脱硫石膏在新型建材方面综合利用、脱硫石膏在水泥和混凝土方面综合利用、脱硫石膏在筑路和回填方面综合利用、脱硫石膏在农业方面综合利用以及脱硫石膏综合利用相关法规政策。

本书可供从事电力环境保护、资源综合利用的管理者、科研人员和技术人员使用,也可供高等学校环境科学与工程、资源循环科学与工程及相关专业师生参考。

#### 图书在版编目(CIP)数据

火电厂脱硫石膏资源综合利用/王志轩等编著. —北京:  
化学工业出版社, 2017.9  
(废物资源综合利用技术丛书)  
ISBN 978-7-122-30267-0

I. ①火… II. ①王… III. ①火电厂-烟气脱硫-工业  
废物-石膏-废物综合利用 IV. ①X705

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第173871号

---

责任编辑:刘兴春 刘 婧  
责任校对:宋 玮

装帧设计:王晓宇

---

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 装:三河市延风印装有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张17½ 字数414千字 2018年1月北京第1版第1次印刷

---

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址:<http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

---

定 价:85.00元

版权所有 违者必究

# 《废物资源综合利用技术丛书》

## 编委会

主任：岑可法

副主任：刘明华 陈冠益 汪 苹

编委成员（以汉语拼音排序）：

程洁红 冯旭东 高华林 龚林林 郭利杰 黄建辉

蒋自力 金宜英 梁文俊 廖永红 刘 佳 刘以凡

潘 荔 宋 云 王 纯 王志轩 肖 春 杨 帆

杨小聪 张长森 张殿印 张 辉 赵由才 周连碧

周全法 祝怡斌

# 《火电厂脱硫石膏资源综合利用》

## 编著人员

编著者：王志轩 潘 荔 杨 帆 毛专建 刘志强 石丽娜

张吉秀 张 晔 季 涛 张 博 孟 清

环境保护与资源节约是我国的基本国策。根据国家节能减排相关法规政策要求,我国火电厂都已安装并运行脱硫设施,且以高效石灰石-石膏湿法脱硫技术为主。根据中国电力企业联合会统计分析,截至2015年年底,全国已投运火电厂烟气脱硫机组容量约 $8.2 \times 10^8$  kW,占全国火电机组装机容量的81.55%,如果考虑具有脱硫作用的循环流化床锅炉,全国脱硫机组占比接近100%。在烟气脱硫工艺中,石灰石-石膏湿法脱硫技术占92.87%(含电石渣法等),海水法占2.58%,氨法占1.81%,烟气循环流化床法占1.80%,其他占0.94%。火电厂烟气湿法脱硫设施大规模投运在极大促进了电力二氧化硫减排的同时,产生的脱硫副产石膏总量也逐年增加。据中国电力企业联合会统计分析,2015年脱硫石膏产生量约为 $7.2 \times 10^7$  t。部分火电企业由于难以消纳逐年增多的脱硫石膏而只能将其堆存,不仅占用大量土地,增加灰场的投资,而且处置不好还会对周围环境造成二次污染,成为火电环境保护领域的新问题。

目前,对于脱硫石膏的最佳消纳方式是综合利用,如脱硫石膏经加工处理后作为资源综合利用,可用于建筑材料、筑路回填、土壤改良剂及制作高强石膏等,达到“减量增效、变废为宝”的目的。日本、欧美等主要发达国家和地区对脱硫石膏综合利用的研究起步较早,现在已形成较为完善的研究、开发、应用体系。我国相关工作虽然起步较晚,但发展较快,脱硫石膏综合利用水平逐年提高,如全国脱硫石膏综合利用率由2005年的不足10%提高到2015年的72%。近年来,在《中华人民共和国国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要》《中共中央国务院关于加快推进生态文明建设的意见》《国务院关于印发“十三五”生态环境保护规划的通知》等文件中对大气污染控制及资源综合利用都提出了更高要求,电力二氧化硫等大气污染物排放控制及脱硫石膏综合利用仍然任重道远。

《火电厂脱硫石膏资源综合利用》就是在这一背景下,在总结已有成果及经验基础上,为促进脱硫石膏综合利用工作而编著。全书分为脱硫石膏基本情况、脱硫石膏在新型建材方面综合利用、脱硫石膏在水泥和混凝土方面综合利用、脱硫石膏在筑路和回填方面综合利用、脱硫石膏在农业方面综合利用以及脱硫石膏综合利用相关法规政策6章。全书具有以下特色:一是内容全面丰富,针对脱硫石膏综合利用技术情况进行了全面介绍,包括脱硫石膏的产生、处理技术和综合利用途径等;二是结构科学合理,既有概括性综述,又有专业性说明,还有应用实例,层次清晰分明;三是表述清晰简洁,综述性章节凝练、概括,便于读者快速了解火电厂脱硫石膏综合利用形势,把握法规政策动向,理顺各种综合利用技术;技术性章节表述准确、注解详细、图文并茂,并辅以实际典型案例加以说明,既有技术深度又深入浅出,便于读者准确把握相关技术要点,并用以指导实际工作。

本书由王志轩、潘荔、杨帆等组织编著,具体分工如下:第1、2章主要由杨帆编著;

第3章主要由毛专建编著；第4章主要由刘志强、张博编著；第5章主要由石丽娜、孟清编著；第6章主要由季涛编著；各章节中的应用实例主要由北京建筑材料科学研究总院张吉秀、张晔等编著。感谢原国家电网公司教授级高级工程师王卓昆、上海申欣环保公司高级工程师徐建刚对本书做出的贡献。书稿最后由王志轩、潘荔统稿并定稿。

本书内容全面，实用性强，可作为从事电力环境保护、资源综合利用的管理者、科研人员和技术人员等的专业参考书，也可作为高等学校环境科学与工程、资源循环科学与工程及相关专业本科生和研究生的教学参考书。

限于编著者水平和时间，书中难免有疏漏和不足之处，恳请读者不吝指正。

编著者  
2017年10月

## 第 1 章 脱硫石膏基本情况

1.1 脱硫石膏的生成 .....	001
1.1.1 石膏分类 .....	001
1.1.2 脱硫石膏 .....	002
1.2 脱硫石膏的基本特性 .....	009
1.2.1 与天然石膏的差异 .....	009
1.2.2 化学成分 .....	010
1.2.3 颗粒特性 .....	010
1.2.4 物相分析 .....	012
1.2.5 差热分析 .....	015
1.2.6 性能分析 .....	016
1.2.7 主要影响因素 .....	017
1.3 脱硫石膏应用通用处理工艺及设备 .....	018
1.3.1 建筑石膏的制备 .....	018
1.3.2 高强石膏的制备 .....	020
1.3.3 石膏加工设备 .....	022
1.4 脱硫石膏综合利用现状 .....	031
1.4.1 中国脱硫石膏综合利用现状 .....	031
1.4.2 国外脱硫石膏综合利用情况 .....	038
参考文献 .....	042

## 第 2 章 脱硫石膏在新型建材方面综合利用

2.1 纸面石膏板 .....	043
2.1.1 发展情况 .....	043
2.1.2 主要特点 .....	044
2.1.3 纸面石膏板的质量标准 .....	045
2.1.4 生产工艺 .....	047
2.1.5 杂质对纸面石膏板性能的影响 .....	047
2.1.6 纸面石膏板生产对脱硫石膏品质的要求 .....	047
2.1.7 应用实例 .....	048
2.2 石膏砌块 .....	054

2.2.1	发展情况	054
2.2.2	主要特点	055
2.2.3	石膏砌块的质量标准和技术性能	056
2.2.4	生产工艺	057
2.2.5	应用实例	058
2.3	石膏空心条板	061
2.3.1	主要特点	061
2.3.2	石膏空心条板的规格、质量标准和技术性指标	061
2.3.3	生产工艺	063
2.3.4	应用实例	063
2.4	石膏刨花板	065
2.4.1	发展情况	065
2.4.2	主要特点	065
2.4.3	石膏刨花板的技术要求	066
2.4.4	生产工艺	067
2.4.5	应用实例	069
2.5	装饰石膏板	071
2.5.1	产品介绍	071
2.5.2	主要特点	072
2.5.3	种类与应用	072
2.5.4	装饰石膏板的规格、质量标准和技术性指标	073
2.5.5	应用实例	074
2.6	纤维石膏板	077
2.6.1	产品介绍	077
2.6.2	主要特点	077
2.6.3	生产工艺及设备	078
2.6.4	应用实例	083
2.7	建筑砂浆	085
2.7.1	抹灰石膏	085
2.7.2	特种干粉砂浆	087
2.7.3	复合胶凝材料	089
2.7.4	配制抹灰石膏	089
2.7.5	内墙腻子	091
2.7.6	应用实例	091
2.8	防火中的应用	092
2.8.1	防火密封	092



2.8.2	防火涂料 .....	093
2.8.3	应用实例 .....	093
2.9	高强石膏粉 .....	094
2.9.1	蒸压时间的影响 .....	095
2.9.2	蒸压温度的影响 .....	095
2.9.3	干燥温度的影响 .....	097
2.9.4	转晶剂的影响 .....	099
2.9.5	粉磨时间的影响 .....	101
2.9.6	应用实例 .....	103
2.10	自流平材料 .....	109
2.10.1	发展情况 .....	109
2.10.2	外加剂 .....	111
2.10.3	配制工艺 .....	112
2.10.4	应用实例 .....	120
2.11	新型墙体材料 .....	122
2.11.1	产品介绍 .....	122
2.11.2	石膏膨胀珍珠岩保温墙体材料 .....	125
2.11.3	发泡石膏墙体材料 .....	132
2.11.4	石膏基相变墙体材料 .....	135
2.11.5	应用实例 .....	140
	参考文献 .....	141

### 第3章 脱硫石膏在水泥和混凝土方面综合利用

3.1	水泥缓凝剂 .....	142
3.1.1	作用机理 .....	142
3.1.2	脱硫石膏作水泥缓凝剂 .....	144
3.1.3	应用实例 .....	145
3.2	制酸联产水泥 .....	148
3.2.1	脱硫石膏的化学成分 .....	148
3.2.2	脱硫石膏在不同煅烧工艺下的脱硫率 .....	149
3.3	普通混凝土 .....	154
3.3.1	用作胶凝材料 .....	154
3.3.2	用作激发剂 .....	154
3.3.3	用作膨胀剂 .....	155
3.3.4	应用实例 .....	158

3.4 加气混凝土 .....	159
3.4.1 研究现状 .....	159
3.4.2 水化机理 .....	160
3.4.3 制备工艺研究 .....	161
3.4.4 应用实例 .....	162
参考文献 .....	164

## 第4章 脱硫石膏在筑路和回填方面综合利用

4.1 路基材料 .....	165
4.2 采空区充填材料 .....	165
4.3 应用实例 .....	166
4.3.1 路基材料 .....	166
4.3.2 采空区充填材料 .....	167
参考文献 .....	167

## 第5章 脱硫石膏在农业方面综合利用

5.1 改良酸性土壤 .....	168
5.1.1 研究进展情况 .....	168
5.1.2 试验案例 .....	169
5.2 改良碱性土壤 .....	170
5.2.1 土壤盐碱化相关问题 .....	171
5.2.2 石膏用于碱性土壤改良 .....	173
5.2.3 应用(试验)案例 .....	174
5.3 作为肥料使用 .....	182
5.4 应用实例 .....	183
参考文献 .....	185

## 第6章 脱硫石膏综合利用相关法规政策

6.1 相关政策文件综述 .....	186
6.1.1 法规政策体系 .....	186
6.1.2 综合性引导政策 .....	188
6.1.3 税收优惠政策 .....	188
6.2 法律 .....	189
6.2.1 中华人民共和国环境保护法 .....	189

6.2.2	中华人民共和国固体废物污染环境防治法 .....	197
6.2.3	中华人民共和国循环经济促进法 .....	206
6.3	行政法规 .....	213
6.3.1	《国务院关于印发“十三五”节能减排综合工作方案的通知》 (国发〔2016〕74号) .....	213
6.3.2	《“十三五”生态环境保护规划》(节选) .....	218
6.4	部门规章 .....	221
6.4.1	《废物资源化科技工程“十二五”专项规划》 .....	221
6.4.2	《“十二五”资源综合利用指导意见》和《大宗固体废物综合利用 实施方案》 .....	235
6.4.3	《大宗工业固体废物综合利用“十二五”规划》 .....	245
6.4.4	《中国资源综合利用技术政策大纲》(节选) .....	256

## 索引

# 第 1 章

# 脱硫石膏基本情况

## 1.1 脱硫石膏的生成

### 1.1.1 石膏分类

石膏按其理化性质分为生石膏、熟石膏和硬石膏，见图 1-1。

#### (1) 生石膏（二水硫酸钙）

生石膏又称二水硫酸钙或二水石膏（ $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ），根据来源不同，分为天然石膏和工业副产石膏，脱硫石膏属于后一类。

目前，生石膏主要用于生产熟石膏（中间产品）和用作水泥添加剂、盐碱地改良剂等。优级天然石膏（雪花石膏、纤维石膏）磨细 180 目以上成为食用石膏粉，可用于饲料加工、食用菌栽培、豆腐制作、药片生产和食品添加剂等。

#### (2) 熟石膏（半水石膏）

熟石膏又名半水硫酸钙或半水石膏，是由二水石膏经过加热脱去其中一个半结晶水制成的，主要作为胶凝材料，用于生产石膏制品和制作各种模具。根据结晶形态的不同，半水石膏又可以分为  $\alpha$  型半水石膏和  $\beta$  型半水石膏。

1)  $\alpha$  型半水石膏 一般需要在溶解或压力条件下由二水硫酸钙脱水生成，硬化后具有较高的密实度和强度，可用作高强度材料，如陶瓷模具、雕塑、石膏线条、粉笔和高档建筑部品等。

2)  $\beta$  型半水石膏 是建筑石膏的主要成分。建筑石膏生产方便，成本低，在常压条件下便可以脱水制备，硬化后具有很好的绝热性能、吸声性能和较好的防火性能、吸湿性能。主要用于生产石膏板、石膏砌块、嵌缝石膏粉、抹灰石膏粉、黏结石膏等。

#### (3) 硬石膏（无水石膏）

当二水石膏加热至  $400^\circ\text{C}$  以上时，石膏将完全失去水分，成为硬石膏。硬石膏分为天然

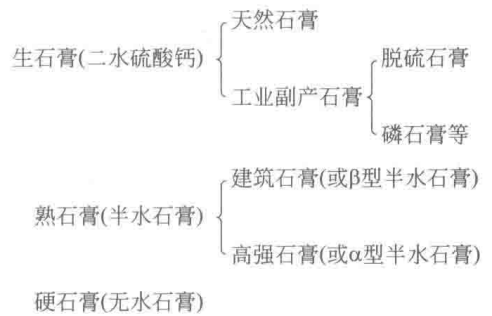


图 1-1 石膏按理化性质分类

硬石膏和煅烧硬石膏。硬石膏主要用于制造化肥和作硅酸盐水泥的缓凝剂。

## 1.1.2 脱硫石膏

### 1.1.2.1 脱硫石膏定义

脱硫石膏又称烟气脱硫石膏、排烟脱硫石膏或 FGD 石膏 (Flue Gas Desulphurization Gypsum), 是对含硫燃料 (煤、油等) 燃烧后产生的烟气进行脱硫净化处理而得到的工业副产石膏, 其成分以二水硫酸钙 ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) 为主<sup>[1]</sup>。

### 1.1.2.2 脱硫石膏产生

火电厂脱硫石膏主要由石灰石-石膏湿法脱硫工艺产生。相关研究表明, 在目前国内外开发出的上百种脱硫技术中, 石灰石-石膏湿法烟气脱硫技术已经有几十年的发展历史, 技术成熟可靠, 适用范围广泛, 是我国火电厂大中型机组烟气脱硫的首选方案。据统计, 90% 以上的脱硫机组采用的是石灰石-石膏湿法脱硫工艺。

该方法以石灰石为脱硫剂, 通过向吸收塔内喷入吸收剂浆液, 与烟气充分接触混合, 并对烟气进行洗涤, 使得烟气中的  $\text{SO}_2$  与浆液中的  $\text{CaCO}_3$  以及鼓入的强氧化空气反应, 最后生成二水硫酸钙。

#### (1) 典型的系统构成

典型的石灰石/石灰-石膏湿法烟气脱硫工艺流程如图 1-2 所示, 实际运用的脱硫装置的范围根据工程具体情况有所差异。

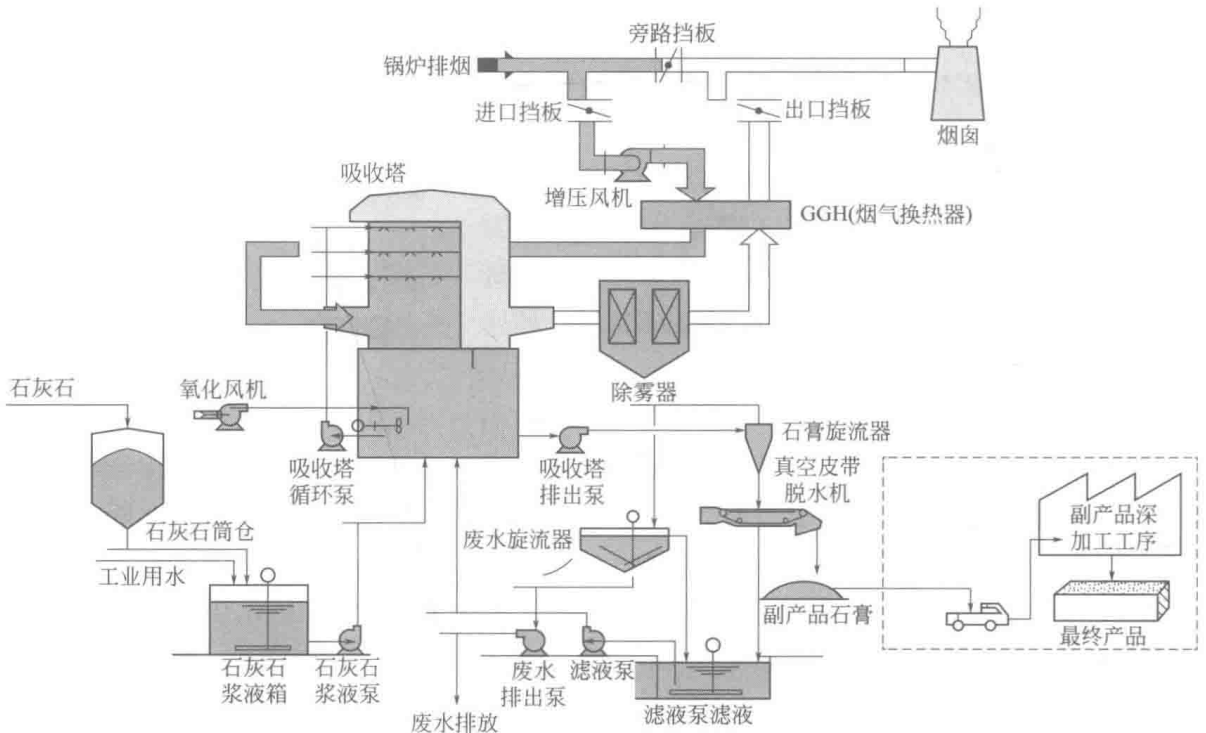


图 1-2 石灰石/石灰-石膏湿法烟气脱硫工艺流程

#### (2) 反应原理

1) 吸收原理 吸收液通过喷嘴雾化喷入吸收塔, 分散成细小的液滴并覆盖吸收塔的这个断面。这些液滴与塔内烟气逆流接触, 发生传质与吸收反应, 烟气中的  $\text{SO}_2$ 、 $\text{SO}_3$  及

HCl、HF 被吸收。SO<sub>2</sub> 吸收产物的氧化和中和反应在吸收塔底部的氧化区完成并最终形成石膏。

为了维持吸收液恒定的 pH 值并减少石灰石耗量，石灰石被连续加入吸收塔，同时吸收塔内的吸收剂浆液和氧化空气、被搅拌机吸收塔循环泵不停地搅动，以加快石灰石在浆液中的均布和溶解。

2) 化学过程 强制氧化系统的化学过程描述如下。

① 吸收反应。烟气与喷嘴喷出的循环浆液在吸收塔内有效接触，循环浆液吸收大部分 SO<sub>2</sub>，反应如下：

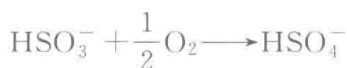


吸收反应的机理：吸收反应是物质传质和吸收的过程，SO<sub>2</sub> 被水吸收属于中等溶解度的气体组分的吸收，根据双膜理论，传质速率受气相传质阻力和液相传质阻力的控制。

吸收速率 = 吸收推动力 / 吸收系数（传质阻力为吸收系数的倒数）

吸收反应的强化措施：a. 提高 SO<sub>2</sub> 在气相中的分压力（浓度），提高气相传质动力；b. 采用逆流传质，增加吸收区平均传质动力；c. 增加气相与液相的流速，高的雷诺数改变了气膜和液膜的界面，从而引起强烈的传质；d. 强化氧化，加快已溶解 SO<sub>2</sub> 的电离和氧化，当亚硫酸被氧化后，它的浓度就会降低，会促进 SO<sub>2</sub> 的吸收；e. 提高 pH 值，减少电离的逆向过程，增加液相吸收推动力；f. 在总的吸收系数一定的情况下，增加气液接触面积，延长接触时间，如增大液气比、减小液滴粒径、调整喷淋层间距等；g. 保持均匀的流场分布和喷淋密度，提高气液接触的有效性。

② 氧化反应。一部分 HSO<sub>3</sub><sup>-</sup> 在吸收塔喷淋区被烟气中的氧所氧化，其他的 HSO<sub>3</sub><sup>-</sup> 在反应池中被氧化空气完全氧化，反应如下：



氧化反应的机理：氧化反应的机理基本同吸收反应，不同的是氧化反应是液相连续、气相离散的。水吸收 O<sub>2</sub> 属于难溶解的气体组分的吸收，根据双膜理论，传质速率受液膜传质阻力的控制。

氧化反应的强化措施：a. 降低 pH 值，增加氧气的溶解度；b. 增加氧化空气的过量系数，增加氧浓度；c. 改善氧气分布的均匀性，减小气泡平均粒径，增加气液接触面积。

③ 中和反应。吸收剂浆液被引入吸收塔内中和氢离子，使吸收液保持一定的 pH 值。中和后的浆液在吸收塔内再循环。中和反应如下：

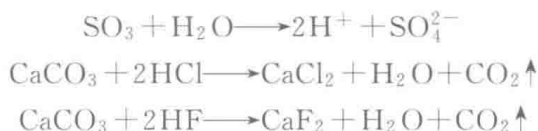


中和反应的机理：中和反应伴随着石灰石的溶解和石膏的结晶，由于石灰石较为难溶，因此本环节的关键是如何增加石灰石的溶解度，反应生成的石膏如何尽快结晶，以降低石膏过饱和度。中和反应本身并不困难。

中和反应的强化措施：a. 提高石灰石的活性，选用纯度高的石灰石，减少杂质；b. 细化石灰石粒径，提高溶解速率；c. 降低 pH 值，增加石灰石溶解度，提高石灰石的利用率；

d. 增加石灰石在浆池中停留时间；e. 增加石膏浆液的固体浓度，增加结晶附着面，控制石膏的相对饱和度；f. 提高氧气在浆液中的溶解度，排挤溶解在液相中的  $\text{CO}_2$ ，强化中和反应。

④ 其他副反应。烟气中的其他污染物如  $\text{SO}_2$ 、氯、氟和尘都被循环浆液吸收和捕集。 $\text{SO}_3$ 、 $\text{HCl}$  和  $\text{HF}$  与悬浮液中的石灰石按以下反应式发生反应：

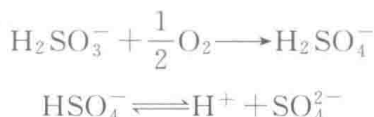


副反应对脱硫反应的影响及注意事项：脱硫反应是一个比较复杂的反应过程，其中一些副反应，有的有利于反应的进程，有的会阻碍反应的发生。

下列反应应当予以重视。

I. Mg 的反应。浆池中的 Mg 元素主要来自于石灰石中的杂质，当石灰石中可溶性 Mg 含量较高时（以  $\text{MgCO}_3$  形式存在），由于  $\text{MgCO}_3$  活性高于  $\text{CaCO}_3$ ，会优先参与反应，对反应的进行是有利的，但  $\text{MgCO}_3$  过多时，会导致浆液中生成大量的可溶性  $\text{MgSO}_3$ ，过多的  $\text{SO}_3^{2-}$  会导致  $\text{SO}_2$  吸收化学反应推动力的减小，而使  $\text{SO}_2$  吸收恶化。

此外，吸收塔浆液中  $\text{Mg}^{2+}$  浓度增加，会导致浆液中  $\text{MgSO}_4$  (I) 的含量增加，即浆液中的  $\text{SO}_4^{2-}$  增加，会导致吸收塔中悬浮液的氧化困难，从而需要大幅度地增加氧化空气量。氧化反应原理如下：



因为上式中第 2 个反应为可逆反应，从化学反应动力学的角度来看，如果  $\text{SO}_4^{2-}$  的浓度太高，不利于反应向右进行。因此，喷淋塔一般会控制  $\text{Mg}^{2+}$  的浓度，当其高于  $5000\text{mg/L}$  时，需要排出更多的废水。

II. Al 的反应。Al 主要来源于烟气中的飞灰，可溶解的 Al 在  $\text{F}^-$  浓度达到一定条件下形成氟化铝络合物（胶状絮凝物），包裹在石灰石颗粒表面，形成石灰石溶解闭塞，严重时会导致反应严重恶化的重大事故。

III. Cl 的反应。在一个封闭系统或接近封闭系统的状态下，烟气脱硫工艺的运行会把吸收液从烟气中吸收溶解的氯化物增加到非常高的浓度。这些溶解的氯化物会产生高浓度的溶解钙，主要是氯化钙，如果高浓度溶解的钙离子存在于烟气脱硫系统中，就会使溶解的石灰石减少，这是由“共同离子作用”造成的，在“共同离子作用”下，来自氯化钙的溶解钙就会妨碍石灰石中碳酸钙的溶解。控制氯离子浓度在  $(12\sim 20) \times 10^{-3}\text{mg/L}$  是保证反应正常进行的重要因素。

### (3) 烟气脱硫系统描述

烟气脱硫 (FGD) 装置采用高效的石灰石-石膏湿法工艺，整套系统由以下子系统组成：  
a.  $\text{SO}_2$  吸收系统；b. 烟气系统；c. 石灰石浆液制备系统；d. 石膏脱水系统；e. 供水和排放系统；f. 压缩空气系统；g. 废水处理系统。

1)  $\text{SO}_2$  吸收系统 烟气由进气口进入吸收塔的吸收区，在上升过程中与石灰石浆液逆流接触，烟气中所含的污染气体绝大部分因此被清洗入浆液，与浆液中的悬浮石灰石微粒发

生化学反应而被脱除，处理后的净烟气经过除雾器除去水滴后进入烟道。

吸收塔塔体材料为碳钢内衬玻璃鳞片。吸收塔烟气入口段为耐腐蚀、耐高温合金。

吸收塔内烟气上升流速为  $3.2\sim 4\text{m/s}$ 。塔内配有喷淋层，每组喷淋层由带连接支管的母管制浆液分布管道和喷嘴组成。喷淋组件及喷嘴设计成均匀覆盖吸收塔上流区的横截面。喷淋系统采用单元制设计，每个喷淋层配一台与之相连接的吸收塔浆液循环泵。

每台吸收塔配多台浆液循环泵。运行的浆液循环泵数量根据锅炉负荷的变化和对吸收浆液流量的要求来确定，在达到要求吸收效率的前提下，可选择最经济的泵运行模式以节省能耗。

吸收了  $\text{SO}_2$  的再循环浆液落入吸收塔反应池。吸收塔反应池装有多台搅拌机，氧化风机将氧化空气鼓入反应池。氧化空气分布系统采用喷管式，氧化空气被分布管注入搅拌机浆叶的压力侧，被搅拌机产生的压力和剪切力分散为细小的气泡并均布于浆液中。一部分  $\text{HSO}_3^-$  在吸收塔喷淋区被烟气中的氧气氧化，其余  $\text{HSO}_3^-$  在反应池中被氧化空气完全氧化。

吸收剂（石灰石）浆液被引入吸收塔内中和氢离子，使吸收液保持一定的 pH 值。中和后的浆液在吸收塔内循环。

吸收塔排放泵连续地把吸收浆液从吸收塔送到石膏脱水系统，通过排浆控制阀控制排出浆液流量，维持循环浆液浓度在  $8\%\sim 25\%$ （质量分数）。

脱硫后的烟气通过除雾器来减少携带的水滴，除雾器出口的水滴携带量不大于  $75$ （标） $\text{mg/m}^3$ 。两级除雾器采用传统的顶置式布置在吸收塔顶部或塔外部，除雾器由聚丙烯材料制成，形式为 Z 型，两级除雾器均用工艺水冲洗，冲洗过程通过程序控制自动完成。

吸收塔入口烟道侧板和底板装有工艺水冲洗系统，冲洗自动周期进行。冲洗的目的是为了避免喷嘴喷出的石膏浆液带入入口烟道后干燥黏结。

在吸收塔入口烟道装有事故冷却系统，事故冷却水由工艺水泵提供。

当吸收塔入口烟道由于吸收塔上游设备意外事故造成温度过高而旁路挡板未及时打开或所有的吸收塔循环泵切除时，事故冷却系统启动。

2) 烟气系统 从锅炉来的热烟气经增压风机增压后进入烟气换热器（GGH）降温侧，经 GGH 冷却后，烟气进入吸收塔，向上流动穿过喷淋层，在此烟气被冷却到饱和温度，烟气中的  $\text{SO}_2$  被石灰石浆液吸收。除去  $\text{SO}_2$  及其他污染物的烟气经 GGH 加热至  $80^\circ\text{C}$  以上，通过烟囱排放。

GGH 利用热烟气所带的热量加热吸收塔出来的冷的净烟气。在设计条件下且没有补充热源时，GGH 可将净烟气的温度提高到  $80^\circ\text{C}$  以上。

烟气通过 GGH 的压损由一在线清洗系统维持。正常运行时清洗系统每天需使用蒸汽吹灰 3 次。此外，系统还配有 1 套在线高压水洗装置（约 1 月用 1 次）。在热烟气的进口与 GGH 相连的烟道出口安置 1 套可伸缩的清洗设备，用来进行常规吹灰和在线水冲洗。清洗装置都有单独的、可伸缩的矛状管和带有单独的辅助蒸汽和水喷嘴的驱动机械。GGH 配 1 台在线的冲洗水泵，该泵为在线清洗提供高压冲洗水。自动吹灰系统可保证 GGH 的受热面不受堵塞，保持承诺的净烟气出口温度。吹灰器自动控制。

当 GGH 停机后，换热元件可用一低压水清洗装置进行清洗。此低压水清洗装置每年使用两次。每台 GGH 上有两个固定的水冲洗装置用来进行离线冲洗。每个固定的水清洗装置



配有带喷嘴的直管，从有一定间隔的喷嘴中均匀地向换热面喷冲洗水。

设置 1 套密封系统保证 GGH 漏风率小于 1%。

烟道上设有挡板系统，以便于烟气脱硫（FGD）系统正常运行和事故时旁路运行。每套 FGD 装置的挡板系统包括 1 台 FGD 进口原烟气挡板、1 台 FGD 出口净烟气挡板和 1 台旁路烟气挡板，挡板为双百叶式。在正常运行时，FGD 进出口挡板开启，旁路挡板关闭。在故障情况下，开启烟气旁路挡板门，关闭 FGD 进出口挡板，烟气通过旁路烟道绕过 FGD 系统直接排到烟囱。所有挡板都配有密封系统，以保证“零”泄漏。密封空气设 2 台 100% 容量的密封空气风机（1 台备用）和二级电加热器，加热温度不低于 70℃。

烟道包括必要的烟气通道、冲洗和排放漏斗、膨胀节、法兰、导流板、垫片/螺栓材料以及附件。

在锅炉最大连续蒸发量（BMCR）工况下，烟道内任意位置的烟气流速不大于 15m/s。烟道留有适当的取样接口、试验接口和入孔。

对于每台锅炉的 FGD 系统，配置 1 台 100%BMCR 烟气量的增压风机（BUF），布置于吸收塔上游的干烟区。增压风机为动叶可调轴流风机，包括电动机、密封空气系统等。

3) 石灰石浆液制备与供给系统 由汽车运来的石灰石卸至石灰石浆液制备区域的地斗，通过斗提机送入石灰石储仓（储仓的容量按需要的石灰石耗量设计），在石灰石储仓出口由皮带称重给料机送入石灰石湿式磨机，研磨后的石灰石进入磨机浆液循环箱，经磨机浆液循环泵送入石灰石旋流器，合格的石灰石浆液自旋流器溢流口流入石灰石浆液箱，不合格的从旋流器底流再送入磨机入口再次研磨。

系统设置 1 个石灰石浆液箱，每个吸收塔设置 2 台石灰石浆液供浆泵。吸收塔配有 1 条石灰石浆液输送管，石灰石浆液通过管道输送到吸收塔。每条输送管上分支出 1 条再循环管回到石灰石浆液箱，以防止浆液在管道内沉淀。

脱硫所需要的石灰石浆液量由锅炉负荷、烟气的 SO<sub>2</sub> 浓度和 Ca/S 来联合控制，而需要制备的石灰石浆液量由石灰石浆液箱的液位来控制，浆液的浓度由浆液密度计通过开启/关闭旋流器的个数来控制。

4) 石膏脱水系统 机组 FGD 所产生的 25%（质量分数）浓度的石膏浆液由吸收塔下部布置的石膏浆液排放泵（每塔 2 台石膏浆液排放泵，1 运 1 备）送至石膏浆液旋流器。系统设置 2 套石膏旋流站，2 套石膏旋流站底流自流进入 2 台真空皮带脱水机。每台真空皮带脱水机的设计过滤能力为 2 台机组脱硫系统石膏总量的 75%。

石膏脱水系统包括以下设备：a. 石膏旋流站；b. 真空皮带过滤机；c. 滤布冲洗水箱；d. 滤布冲洗水泵；e. 滤液水箱及搅拌器；f. 滤液水泵；g. 石膏饼冲洗水泵；h. 废水旋流站给料箱；i. 废水旋流站给料泵；j. 废水旋流站；k. 石膏输送机；l. 石膏库。

① 石膏旋流站和废水旋流站。浓缩到浓度大约 55% 的旋流站的底流浆液自流到真空皮带脱水机，旋流站的溢流自流到废水旋流站给料箱，一部分通过废水旋流站给料泵送到废水旋流站，其余部分溢流到滤液水箱。废水旋流站溢流到废水箱，通过废水输送泵送到废水处理系统，底流进入滤液箱。

② 真空皮带脱水机。设置 2 套容量为 2 台机组脱硫系统石膏总产量 75% 的脱水系统。真空皮带脱水机和真空系统按此容量设计。

石膏旋流站底流浆液由真空皮带脱水机脱水到含 90% 固形物和 10% 水分，脱水石膏经