



工业脱硫 及综合利用技术



国防工业出版社
National Defense Industry Press

工业脱硫及综合利用技术

吕天宝 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

前 言

我国现阶段及今后一段时间内使用的能源仍以煤为主,同时冶金、有色冶炼及硫酸工业也是我国的主要原材料消耗行业。它们的生产使用对大气的污染日渐严重,使我国居世界三大酸雨区之首,对人民生活环境造成了严重危害,每年造成上千亿的经济损失。进入 21 世纪,国家颁布了许多环保法规、法律,以目标的形式下达了环境排放指标,加大了节能减排执法力度,2008 年发布《国家酸雨和二氧化硫污染防治“十一五”规划》,排入大气 SO_2 的治理是重中之重。

我国工业脱硫技术特别是烟气脱硫技术,从引进、消化吸收到自主研发,花费了大量的人力和财力,在近 10 年来取得了长足的进步,以电厂脱硫为主要使用行业,带动了该领域技术的发展壮大。常用的脱硫方法多达几十种,由于行业不同、装置不同、地理环境不同,选择脱硫的方法也不同。随着国家环境保护政策的加强,环境保护工程建设成为热门行业,脱硫方法及技术层出不穷,使用单位需要这方面的书籍。目前 90% 的脱硫使用石灰/石灰石—石膏法以及其他方法都副产大量的石膏,本书详细介绍了石膏制硫酸联产水泥技术,用循环经济理念解决脱硫问题,做到废物资源化。

根据多年来的科研、生产管理积累的资料和经验进行了总结、整理,并查阅了有关材料,终于出版此书。本书介绍常用和有发展前途的

脱硫方法及其脱硫原理、特点、适用范围,并以工程实例具体介绍工艺、设备参数、投资、运行情况及存在问题。对副产物脱硫石膏、脱硫亚硫酸镁、脱硫磷铵肥及电子束技术进行了重点阐述。希望通过本书能推动脱硫行业技术的推广、进步与发展。

限于编者水平和时间仓促,本书难免存在不妥之处,欢迎广大读者提出批评意见。

编 者
2011 年·春

目 录

一	总论	1
二	石灰/石灰石—石膏脱硫及综合利用技术	15
三	氧化镁法脱硫联产硫酸技术	26
四	海水烟气脱硫技术	37
五	柠檬酸钠—硫回收脱硫技术	44
六	磷铵肥法烟气脱硫技术	48
七	双碱法烟气脱硫技术	55
八	氨法脱硫技术	61
九	电子束—硫铵脱硫脱硝技术	69
十	干法(半干法)脱硫技术	79
十一	微生物法烟气脱硫技术	98
十二	焦炉煤气脱硫技术	103
十三	烧结烟气脱硫技术	115
十四	碱式硫酸铝法烟气脱硫技术	123
十五	钠碱法脱硫技术	127
十六	工业碱性废液脱硫技术	128
十七	微波辐照脱硫技术	130
十八	天然气脱硫技术	136
十九	气动脱硫技术	147
二十	自动控制技术	151

二十一	常用脱硫技术的综合比较分析·····	157
二十二	对目前脱硫问题分析及措施·····	159
二十三	2×600MW 机组石灰石法脱硫规程 ·····	171
二十四	石膏制硫酸联产水泥技术·····	207
二十五	脱硫可行性研究报告的编写·····	243
	结束语·····	248
	参考文献·····	250

一 总 论

根据环境状况评估报告,我国排放到大气中的 SO_2 已经从 1995 年连续多年超过 2000 万 t,居世界首位。 SO_2 使我国的酸雨污染逐年加重,酸雨面积不断扩大,使我国成为三大酸雨区之首。每年酸雨和 SO_2 污染造成农作物、森林和人体健康等方面的经济损失约为 1100 多亿元,已接近当年国民生产总值的 2%,成为制约我国经济和社会发展的的重要因素。燃煤火电厂的二氧化硫排放量约占全国总排放量的 40%。2008 年 1 月 3 日发布的《国家酸雨和二氧化硫污染防治“十一五”规划》要求确保到 2010 年全国 SO_2 排放总量比 2005 年减少 10%,控制在 2294.4 万 t 以内。

1. SO_2 污染源

我国主要的 SO_2 污染源归纳为如下四个主要方面:

(1) 硫酸制造厂尾气排放的 SO_2 。目前虽然采用两转两吸工艺,总转化率达 99.5% 以上,但仍有 0.5% 的 SO_2 存在于尾气中,应进一步脱除。

(2) 有色金属冶炼过程排放的 SO_2 。有色金属如铜、铅、镍、金、锌、银、钴等,其矿物质都是硫化矿,在冶炼过程排放大量 SO_2 ,因浓度低且不稳定,有的直接排空;用于制造硫酸尾气也含一定的 SO_2 ,应进一步脱除。

(3) 燃煤烟气中的 SO_2 。我国是以煤炭为主要能源的国家,产量居世界第一,煤炭含硫较高。在煤炭消费中,84% 以上的直接燃用,燃烧过程中排放大量的 SO_2 。

(4) 石油、天然气中含有硫,使用中排出 SO_2 。

排放到大气中的 SO_2 是我国最主要的污染源,所以烟气脱硫任重

道远。

2. 硫的作用

1) SO₂ 的危害

SO₂ 是当今人类面临的主要大气污染物之一,其污染源分为两大类:天然污染源和人为污染源。天然污染源约占 1/3,由于其量少、面广、易稀释和净化,对环境的危害不大;人为污染源占 2/3,由于量大、集中、浓度高,对环境造成严重的危害。

SO₂ 的污染属于低浓度、长期的污染,其存在对自然生态环境、人类健康、工农业生产、建筑物及材料等方面都造成了一定程度的危害。

空气中不同体积分数的 SO₂ 对人体的影响列于表 1-1 中,SO₂ 对人体健康的影响主要是通过呼吸道系统进入人体,与呼吸器官作用,引起或加重呼吸器官的疾病,如支气管炎、鼻炎、咽喉炎、支气管哮喘、肺气肿、肺癌等。北京、上海、天津、沈阳、太原等地的调查表明,重污染区内居民的慢性支气管炎、鼻炎患病率比轻污染区高 0.5 倍 ~ 1 倍。研究表明,大气中 SO₂ 的浓度每年增加 10 $\mu\text{m}/\text{m}^3$,呼吸系统疾病的死亡人数将增加 5%。

表 1-1 空气中不同体积分数的 SO₂ 对人体的影响

体积分数 ($\times 10^{-6}$)	对人体的影响	体积分数 ($\times 10^{-6}$)	对人体的影响
0.01 ~ 0.1	由于光化学反应生成分散颗粒,引起视野距离缩小	10.0 ~ 100	对动物进行试验时出现种种症状
0.1 ~ 1.0	植物及建筑结构材料遭受损害	20	人因受到刺激而引起咳嗽、流泪
1.0 ~ 5.0	对人有刺激作用,感觉到 SO ₂ 的存在	100	人仅能忍受短时间的操作,咽喉有异常感,喷嚏、疼痛、哑嗓、咳嗽、胸痛并呼吸困难
5.0 ~ 10.0	人在此环境下进行较长时间的操作尚能忍受	400 ~ 500	立刻引起人严重中毒,呼吸道闭塞而致窒息死亡

SO₂ 是一种无色具有强烈刺激性气味的气体,易溶于人体的体液和其他黏性液中,长期的影响会导致多种疾病,危害人类健康。SO₂ 在氧化剂、光的作用下,会生成使人致病甚至增加病人死亡率的硫酸盐气溶胶,据有关研究表明,当硫酸盐年浓度在 10μg/m³ 左右时,每减少 10% 的浓度能使死亡率降低 0.5%;SO₂ 往往被飘尘吸附,SO₂ 和飘尘的协同效应使其对人体的危害更大。吸附 SO₂ 的飘尘可将 SO₂ 带入人的肺部,使其毒性增加 3 倍~4 倍。在光照下,飘尘中的 Fe₂O₃ 等物质可将 SO₂ 催化转化成 SO₃,遇水可形成硫酸雾并被飘尘吸附。此飘尘经呼吸道吸入肺部,滞留在肺壁上,可引起肺纤维性病变和肺气肿,硫酸雾的作用比 SO₂ 强 10 倍。历史上与 SO₂ 污染有关的污染事故如表 1-2 所列。

表 1-2 历史上与 SO₂ 污染有关的污染事故

时间	地点	简况	后果
1930 年 12 月 1 日—5 日	马斯河谷 (比利时)	烟尘和 SO ₂ ,一周内平均死亡率剧增	患者 6000 多人,死亡 60 多人
1948 年 10 月 26 日—31 日	多诺拉 (美国)	烟尘和 SO ₂ ,大雾看不见人	患者 5900 多人,死亡 17 人
1952 年 12 月 5 日—9 日	伦敦 (英国)	烟尘和 SO ₂ ,逆温层,无风、大雾	4 天内死亡 4000 人,2 个月死亡 8000 多人
1956 年 1 月 3 日—6 日	伦敦 (英国)	烟尘和 SO ₂	死亡 1000 多人
1957 年 12 月 2 日—5 日	伦敦 (英国)	烟尘和 SO ₂	死亡 400 多人
1961 年—1972 年	四日市 (日本)	烟尘和 SO ₂ ,著名的“四日市哮喘病”	患者 6300 多人,死亡 30 多人
1960 年 12 月 5 日—6 日	伦敦 (英国)	烟尘和 SO ₂	死亡 750 多人
1970 年	东京 (日本)	光化学烟雾加 SO ₂ ,无风	受害者近万人

SO₂ 对植物的危害主要是通过叶面气孔进入植物体,在细胞或细胞液中生成 SO₃⁻ 或 HSO₃⁻ 和 H⁺。如果其浓度和持续时间超过本身的自解能力,就会破坏植物正常的生理机能,使其生长缓慢,对病虫害的抵抗力降低,严重时会的枯死。研究表明,在高浓度 SO₂ 的影响下,植物会产生急性危害,叶片表面产生坏死斑,或直接使植物叶片枯萎脱落;在低浓度 SO₂ 的影响下,植物的生长机能受到影响,造成产量下降,品质变坏。据 1983 年对我国 13 个省市 25 个工厂企业的统计,因 SO₂ 造成的受害面积达 2.33 万公顷,粮食减少 1.85 万 t,蔬菜减少 500 t,危害相当严重。

SO₂ 对金属的腐蚀,大气中的 SO₂ 对金属的腐蚀主要是对钢结构的腐蚀。据统计,发达国家每年因金属腐蚀而带来的直接经济损失占国民经济总产值的 2% ~4%。金属腐蚀造成的直接损失远大于水灾、风灾、火灾、地震造成损失的总和。金属腐蚀直接威胁到工业设施、生活设施和交通设施的安全。

SO₂ 给人类带来最严重的问题是酸雨,这是全球性的问题。大气中 SO₂、NO_x 与氧化性物质 O₃、H₂O 和其他自由基进行化学反应生成硫酸和硝酸,最终形成 pH 值小于 5.6 的酸性降雨(即酸雨)返回,它们占酸雨总量的 90% 以上。酸雨对环境最为突出的危害是它会使湖泊变成酸性,导致水生生物死亡。酸雨对生态系统的影响及破坏主要表现在使土壤酸化和贫瘠化,农作物及森林生长减缓,湖水酸化,鱼类生长受到抑制,对建筑物和材料有腐蚀作用。酸雨还加速了许多用于建筑结构、桥梁、水坝、工业装备、供水管网、地下储罐、水轮发电机组、动力和通信设备等材料的腐蚀,对文物古迹、历史建筑、雕刻等重要文物设施造成严重损害。另外,酸雨对人体健康也产生间接的影响,酸雨使地面水呈酸性,地下水中的金属含量也增高,饮用这种水或食用酸性河水中的鱼类会对人体健康产生危害,同样也会波及到野生动物。

2) 硫是一种资源

硫在自然界以单质硫和硫化物形成存在,单质硫即硫磺,硫化物存在于硫铁矿、煤、石油、天然气、有色金属硫化物、石膏等。SO₂ 是污染环境的罪魁祸首,硫也是一种资源,我国是缺硫国家,是世界上最大的硫进口国,2008 年进口硫磺量达 1500 万 t,我国也是世界上最大的硫

酸生产和消费国,2008 年硫酸生产量为 5400 万 t。硫的用途如下:

(1) 大部分的硫被用做制造磷肥的原料。我国是农业大国,化肥用量世界第一,为世界上许多快速发展的国家提高农业生产力做出了巨大贡献。硫被转化为硫酸除了制造磷肥产品外,还广泛用于生产其他化学和工业产品,例如,用于滤取含有金属的岩石,农用化学品的生产,塑料和合成橡胶的生产,纸浆和纸的生产过程,以及普通化学品的生产及军工需要。

(2) 硫磺属多功能药剂,除有杀菌作用外,还能杀虫。用于防治各种作物的白粉病和叶螨等。蔬菜还使用硫磺胶悬剂,主要用于防治瓜类白粉病。

(3) 硫磺还是一味中药,是一种矿物质,它性酸,温,有毒,可杀虫止痒。

(4) 随着运输业的发展,子午线轮胎将逐步取代斜胶胎,由此,不溶性硫磺作为生产子午线轮胎的主要硫化剂更加引人注目。

如何将工业用煤(石油、天然气、有色冶炼)中的硫既不污染环境又变为资源,并发挥经济效益,是摆在我们面前急需解决的问题。在国家强化节能减排、循环经济、低碳经济的今天,其意义更加重大。

3) 地球硫循环

地球中的硫大部分储存在岩石、矿物和海底沉积物中,以黄铁矿、石膏和水合硫酸钙的形式存在。

大气圈中天然源的硫包括 H_2S 、 SO_2 和硫酸盐。 H_2S 来自火山活动、沼泽、稻田和潮滩中有机物的嫌气(缺氧)分解等途径; SO_2 来自火山喷发的气体;大气圈中硫酸盐(如硫酸铵)则来自海浪花的蒸发。

大气圈中硫的 $1/3$ (包括硫酸盐的 99%) 来自人类活动,人类活动产生的硫 $2/3$ 来自含硫化石燃料(煤和石油)的燃烧,其余来自炼油和冶金工业和其他工业过程。

进入大气层的 H_2S 和 SO_2 均可氧化成 SO_3 ,进一步与水汽反应生成硫酸。 SO_2 和 SO_3 也可与大气层中的其他化学品反应生成亚硫酸盐和硫酸盐。这些硫酸和硫酸盐都是酸沉降的组成部分。图 1-1 为全球硫循环。

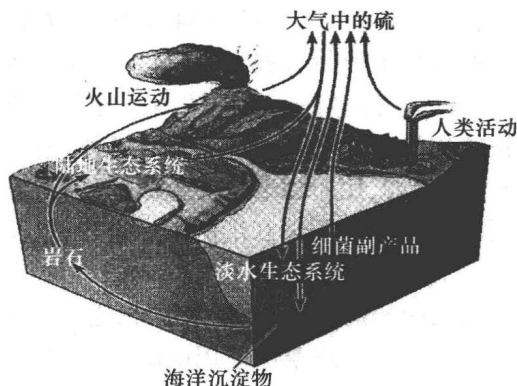


图 1-1 全球硫循环

3. 煤炭

煤炭是地球上蕴藏量最丰富,分布地域最广的化石燃料(图 1-2)。据世界能源委员会的评估,世界煤炭可采资源量达 4.84×10^4 亿 t 标准煤,占世界化石燃料可采资源量的 66.8%。据《1997 世界能源统计评论》统计,至 1996 年年底,世界煤炭探明的可采储量为 1.03×10^4 亿 t,储采比为 224,其中 7 个储量最大的国家依次为美国、俄罗斯、中国、澳大利亚、印度、德国和南非。中国煤炭资源丰富,除上海以外其他各省区均有分布,但分布极不均衡。在中国北方的大兴安岭至太行山再到贺兰山之间的地区,地理范围包括煤炭资源量大于 1000 亿 t 以上的有内蒙古、山西、陕西、宁夏、甘肃、河南 6 省区的全部或大部,是中国煤炭资源集中分布的地区,其资源量占全国煤炭资源量的 50% 左右,占中国北方地区煤炭资源量的 55% 以上。在中国南方,煤炭资源量主要集中于贵州、云南、四川三省,这三省煤炭资源量之和为 3525.74 亿 t,占中国南方煤炭资源量的 91.47%;探明保有资源量也占中国南方探明保有资源量的 90% 以上。

中国是世界上最早利用煤炭的国家,目前能源仍以煤炭为主。辽宁省新乐古文化遗址中,就发现煤制工艺品,河南巩义市也发现西汉时用煤饼炼铁的遗址。《山海经》中称煤为石涅,魏、晋时称煤为石墨或石炭。明代李时珍的《本草纲目》首次使用煤这一名称。希腊和古罗

马也是用煤较早的国家,希腊学者泰奥弗拉斯托斯在公元前约 300 年著有《石史》,其中记载有煤的性质和产地;古罗马大约在 2000 年前已开始用煤加热。



图 1-2 煤炭

虽然煤炭的重要位置已被石油所代替,但在今后相当长的一段时间内,由于石油的日渐枯竭,必然走向衰败,而煤炭因为储量巨大,加之科学技术的飞速发展,煤炭汽化等新技术日趋成熟,并得到广泛应用,煤炭必将成为人类生产生活中的无法替代的能源之一。

1) 煤炭的分类及组成

根据成煤的原始物质和条件不同,自然界的煤可分为三大类,即腐植煤、残植煤和腐泥煤。

(1) 构成煤炭有机物质的元素主要有碳、氢、氧、氮和硫等,此外,还有极少量的磷、氟、氯和砷等元素。碳、氢、氧是煤炭有机物质的主体,占 95% 以上;煤化程度越深,碳的含量越高,氢和氧的含量越低。碳和氢是煤炭燃烧过程中产生热量的元素,氧是助燃元素。煤炭燃烧时,氮不产生热量,在高温下转变成氮氧化合物和氨,以游离状态析出。硫、磷、氟、氯和砷等是煤炭中的有害成分,其中以硫最为重要。煤炭燃烧时绝大部分的硫被氧化成二氧化硫(SO_2),随烟气排放,污染大气,危害动、植物生长及人类健康,腐蚀金属设备;当含硫多的煤用于冶金炼焦时,还影响焦炭和钢铁的质量。所以,硫分含量是评价煤质的重要指标之一。煤中的有机质在一定温度和条件下,受热分解后产生的可燃性气体,称为“挥发分”,它是由各种碳氢化合物、氢气、一氧化碳等化合物组成的混合气体。挥发分也是主要的煤质指标,在确定煤炭的

加工利用途径和工艺条件时,挥发分有重要的参考作用。煤化程度低的煤,挥发分较多。如果燃烧条件不适当,挥发分高的煤燃烧时易产生未燃尽的碳粒,俗称黑烟;并产生更多的一氧化碳、多环芳烃类、醛类等污染物,热效率降低。因此,要根据煤的挥发分选择适当的燃烧条件和设备。

(2) 煤中无机物质含量很少,主要有水分和矿物质,它们的存在降低了煤的质量和利用价值。矿物质是煤炭的主要杂质,如硫化物、硫酸盐、碳酸盐等,其中大部分属于有害成分。水分对煤炭的加工利用有很大影响。水分在燃烧时变成蒸汽要吸热,因而降低了煤的发热量。煤炭中的水分可分为外在水分和内在水分,一般以内在水分作为评定煤质的指标。煤化程度越低,煤的内部表面积越大,水分含量越高。灰分是煤炭完全燃烧后剩下的固体残渣,是重要的煤质指标。灰分主要来自煤炭中不可燃烧的矿物质。矿物质燃烧灰化时要吸收热量,大量排渣要带走热量,因而灰分越高,煤炭燃烧的热效率越低;灰分越多,煤炭燃烧产生的灰渣越多,排放的飞灰也越多。一般,优质煤和洗精煤的灰分含量相对较低。

2) 煤炭的用途

煤炭的用途十分广泛,可以根据其使用目的总结为两大主要用途,即动力煤、炼焦煤。

(1) 我国动力煤的主要用途如下:

① 发电用煤:我国 $1/3$ 以上的煤用来发电,目前平均发电耗煤为标准煤 $370\text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 左右。电厂利用煤的热值,把热能转变为电能。

② 建材用煤:占动力用煤的 10% 以上,以水泥用煤量最大,其次为玻璃、砖、瓦等。

③ 一般工业锅炉用煤:除热电厂及大型供热锅炉外,一般企业及取暖用的工业锅炉型号繁多,数量大且分散,用煤量约占动力煤的 30% 。

④ 生活用煤:生活用煤的数量也较大,占燃料用煤的 20% 以上。

⑤ 冶金用动力煤:冶金用动力煤主要为烧结和高炉喷吹用无烟煤,其用量不到动力用煤量的 1% 。

(2) 炼焦煤。我国虽然煤炭资源比较丰富,但炼焦煤资源还相对

较少,炼焦煤储量仅占我国煤炭总储量 27.65%。炼焦煤类包括气煤(占 13.75%)、肥煤(占 3.53%)、主焦煤(占 5.81%)、瘦煤(占 4.01%),其他未分牌号的煤(占 0.55%);非炼焦煤类包括无烟煤(占 10.93%)、贫煤(占 5.55%)、弱碱煤(占 1.74%)、不缴煤(占 13.8%)、长焰煤(占 12.52%)、褐煤(占 12.76%)、天然焦(占 0.19%)、未分牌号的煤(占 13.80%)和牌号不清的煤(占 1.06%)。

炼焦煤的主要用途是炼焦炭,焦炭由焦煤或混合煤高温冶炼而成,一般 1.3 t 左右的焦煤才能炼 1t 焦炭。焦炭多用于炼钢,是目前钢铁等行业的主要生产原料,被喻为钢铁工业的“基本食粮”。中国是焦炭生产大国,也是世界焦炭市场的主要出口国。2003 年,全球焦炭产量为 3.9 亿 t,中国焦炭产量达到 1.78 亿 t,约占全球总产量的 46%。在出口方面,2003 年我国共出口焦煤 1475 万 t,其中出口欧盟 458 万 t,约占 1/3。2004 年,中国共出口焦炭 1472 万 t,相当于全球焦炭贸易总量的 56%,国际焦炭市场仍供不应求。2008 年我国焦炭产量总计约 32700 万 t,2009 年焦炭产量 33700 万 t。

3) 烟气脱硫(FGD)情况

我国是煤炭生产和消费第一大国,2009 年我国生产煤炭 30 亿 t,占全球的 40%。还净进口 8910 万 t,煤炭约占一次能源消费总量的 75%。由于煤炭中含有 0.3%~1.5% 的硫,所以在使用中 90% 以上硫变为 SO_2 随烟气排出。为遏制酸雨污染的进一步发展,国家颁发了 GB 13223—1996《火电厂大气污染物排放标准》,出台了一系列促进火电厂二氧化硫控制的法律、法规和政策,并采用多种措施加快二氧化硫治理。但是,我国在脱硫技术及运行方面,也给企业带来了巨大的经济负担,一是脱硫装置投资大,二是运行费用高,三是形成脱硫渣二次污染。以 $2 \times 300\text{MW}$ 火电机组为例,配套脱硫设施投资近 1 亿元(早期达 2 亿元~4 亿元),每年运行费用 3000 多万元,每年形成 3 万 t~4 万 t 脱硫渣。硫虽未到空气中,却变为到地面上二次污染。

(1) 世界烟气脱硫技术状况。1927 年英国为了保护伦敦高层建筑的需,在泰晤士河岸的巴特富安和班支赛德两电厂(共 120MW),首先采用石灰石脱硫工艺。据统计,到 1984 年已有 SO_2 控制工艺 190 种左右,目前已超过 200 种。主要可分为四类:燃烧前控制——原煤净

化;燃烧中控制——流化床燃烧(CFB)和炉内喷吸收剂;燃烧后控制——烟气脱硫;新工艺(如煤气化/联合循环系统、液态排渣燃烧器)。其中,大多数国家采用燃烧后烟气脱硫工艺。烟气脱硫则以湿式石灰石/石膏法脱硫工艺作为主流。表1-3列出了烟气脱硫常用方法。表1-4 燃煤污染源控制SO₂污染适用技术。

表1-3 烟气脱硫常用方法

湿 法	半 干 法	干 法
石灰/石灰石—石膏法	循环半干法	循环流化床
海水脱硫法	旋转喷雾干燥法	活性炭法
氧化镁法	炉内喷钙增湿活化法	电子束照射法
磷铵肥法	悬浮吸收法	粉煤灰法
双碱法	—	—
氨法	—	—

表1-4 燃煤污染源控制SO₂污染适用技术

类 别	适 用 技 术	脱硫率/%	技术成熟程度
火电厂	循环流化床(CFBC)	≥85	成熟
	炉内喷钙/增湿活化	60~85	成熟
	喷雾干燥法	80~90	成熟
	磷铵肥法	≥99	国内已鉴定
	石灰石—石膏法	93~95	使用最多
	荷电干式吸收剂喷射法	70~90	国外成熟,国内示范
	电子束氨法	80~90	国外成熟,国内示范
	镁法	94~96	成熟
	海水法	90~95	成熟
工业及民用锅炉	燃用工业固硫型煤	40~50	已商品化
	复合式除尘脱硫器	≥80	国内推广
	喷雾干燥烟气脱硫	80~90	成熟
	湿式除尘脱硫一体化	60~80	成熟
	湿式脱硫器	≥60	小型锅炉应用较多

(续)

类别	适用技术	脱硫率/%	技术成熟程度
烧结炉	氨法	90 ~ 95	成熟
	石灰石—石膏法	90 ~ 95	
	镁法	92 ~ 96	
	电子束法	80 ~ 90	
	柠檬酸钠法	90 ~ 95	
焦炉煤气	ADA、TH、FRC、HPF、PDS	> 99	成熟
硫酸厂	氨法	90 ~ 95	成熟
	镁法	90 ~ 95	
	磷酸肥法	> 96	
有色冶炼厂	同硫酸厂	同硫酸厂	同硫酸厂

自 20 世纪 30 年代起,已经进行过大量的湿式石灰石—石膏法研究开发,60 年代末已有装置投入商业运行。ABB 公司的第一套实用规模的湿法烟气脱硫系统于 1968 年在美国投入使用。1977 年比晓夫公司制造了欧洲第一台石灰—石灰石石膏法示范装置。石川岛播磨(IHI)的首台大型脱硫装置 1976 年在矸子火电厂 1、2 号机组应用,采用文丘里管 2 塔的石灰石—石膏法混合脱硫法。日本三菱重工于 1964 年完成第一套设备,根据其运转实绩,进行烟气脱硫装置的开发。

① 第一代 FGD 系统,美国和日本 20 世纪 70 年代开始安装。早期的 FGD 系统包括以下流程:石灰基流质;钠基溶液;石灰石基流质;碱性飞灰基流质;双碱(石灰和钠);镁基流质;Wellman—Lord 流程。采用了广泛的吸收类型,包括通风型、垂直逆流喷射塔、水平喷射塔,并采用了一些内部结构如托盘、填料、玻璃球等来增进反应。第一代 FGD 的效率一般为 70% ~ 85%。除少数外,副产品无任何商用价值只能作为废料排放,只有镁基法和 Wellman—Lord 法产出有商用价值的硫和硫酸。特征是:初投资不高,但运行维护费高而系统可靠性低。结垢和材料失效是最大的问题。随着经验的增长,对流程做了改进,降低了运行维护费提高可靠性。

② 第二代 FGD 系统,20 世纪 80 年代开始安装。为了克服第一代