

# 硫化氢的净化技术及研究进展

王卫文

(煤炭科学研究总院 杭州环保研究院, 浙江杭州 311201)

摘要:综合评述了硫化氢废气的各类净化方法及最新的研究进展。硫化氢废气常规净化的方法有氧化法、吸收法、吸附法等,目前净化硫化氢废气的主要新技术,包括生物法、臭氧氧化法、电化学法和电子束照微波分解法。重点论述了生物法和电化学法净化工艺,生物法主要用于低浓度大气量的硫化氢废气的处理,具有设备简单、运行费用低,较少形成二次污染等优点;电化学法具有处理效率高、操作简便、不产生副产物或二次污染物等优点。这两种方法发展前景非常广阔,是今后发展的一个方向。

关键词:硫化氢;净化技术;进展

中图分类号:X701

文献标识码:A

文章编号:1006-8759(2010)03-0009-05

## ADVANCES OF THE STUDY ON PURIFYING TECHNOLOGY OF HYDROGEN SULFIDE

WANG Wei - wen

(Hangzhou Environmental Protection Research Institute, CCRI, Hangzhou 311201, China)

**Abstract:** This paper summarizes the research progress of the removal of hydrogen sulfide. General methods for purifying hydrogen sulfide include oxidation, absorbent and adsorbent. New methods for purifying hydrogen sulfide include biological methods, ozone oxidation, electrochemical treatment and electron beam irradiation decomposes. A more detailed discussion was presented for biological methods and electrochemistry methods. The biological treatment is suitable for low concentrations of hydrogen sulfide emissions from processing and it's advantages include simple equipment, lower operating costs, less secondary pollution. Electrochemical treatment has the advantages of high efficiency, simple operation, none by-products and secondary pollutants. These two methods have very broad prospects for development in future.

**Keywords:** hydrogen sulfide; purifying methods; research progress

### 0 引言

硫化氢是一种有毒有害气体,主要产生于各种工业生产过程中,也存在于天然的动植物体在生态环境系统中的自然腐败过程中。工业生产过程中产生的硫化氢主要在燃气制造、合成氨工业、

煤气造气、污水处理厂和造纸厂等行业生产过程中。硫化氢不仅会引起设备和管路腐蚀以及催化剂中毒,而且会严重威胁人身安全。随着经济的发展,人们环保意识的增强,硫化氢废气污染问题越来越受到人们的关注,同时国家也制定了相应的法律法规对排放量作了严格的控制<sup>[1]</sup>。

硫化氢废气的处理方法很多,常见处理方法有氧化法、吸收法、吸附法等。近年处理硫化氢的

新技术主要有:生物法、联合工艺净化法、电化学法、电子束照微波分解法和其它新技术。

## 1 硫化氢处理技术的现状

### 1.1 氧化法

#### 1.1.1 干法氧化法

##### (1)克劳斯法

克劳斯法是将硫化氢转变为硫磺的工业方法,由英国人 C.F.Claus 于 1883 年发明。此法广泛用于煤、石油、天然气的加工过程(如合成氨原料气生产、炼厂气加工等),在脱硫产生的含硫化氢气体中回收硫,并可解决炼厂废气对大气的污染问题。克劳斯法回收硫的纯度可达到 99.8%,可作为生产硫酸的一种硫资源,也可作其他部门的化工原料<sup>[2]</sup>。

近年来,选择氧化  $H_2S$  为元素硫的技术有了突破性进展;1988 年荷兰 Comprimo 等公司合作开发了超级克劳斯工艺(SuperClaus)<sup>[3-4]</sup>,并在德国文特塞尔(Wintershall)天然气净化厂克劳斯硫回收装置(100t/d 硫)上工业化试验成功。该技术成功的关键是开发一种选择性极好、对  $H_2O$ 、过量氧均不敏感的选择性氧化催化剂,其氧化  $H_2S$  为元素硫的效率达 85%~95%,不发生其他副反应(如有机硫反应等),几乎无  $SO_2$  生成。

##### (2)氧化铁脱硫法

氧化铁脱硫法是经典而有效的脱硫方法<sup>[5-6]</sup>,其工艺简单、操作容易、能耗低,所以至今仍被广泛应用于城市燃气、天然气的脱硫工艺中。

脱硫剂中的主要成分是活性氧化铁,邢同春曾指出<sup>[7]</sup>,只有  $\alpha$ 、 $\gamma$  型氧化铁才是脱硫剂中的有效成分,即活性氧化铁。呼德龙、马凤美研究了氧化铁的活性问题指出<sup>[8]</sup>,在氧化铁几种形态中,只有  $\alpha$ - $Fe_2O_3$ 、 $\gamma$ - $Fe_2O_3$  活性较高;他们还比较了各种氧化铁脱硫剂的活性,认为用赤泥作为脱硫剂,活性铁含量很高,寿命比沼铁矿和人工氧化铁长得多,如果其活性铁含量少,可通过人工氧化进行提高;该文还首次提出  $FeO$  也可看作活性铁。李彦旭、田青平等指出<sup>[9]</sup>,以赤泥为主要原料制备的氧化铁高温煤气脱硫剂的还原及硫化动力学行为可用等效粒子模型加以表征,并且,还原和硫化过程均存在着由表面化学反应向扩散控制的动力学转移过程,且扩散活化能大于表面反应过程的活化能。

### (3)复合锌脱硫法

研究表明<sup>[10]</sup>,氧化锌虽具有较高的脱硫效果,但其硫化动力学慢,再生能力不足,而且在硫化过程中,氧化锌被还原成锌,而锌在高温下易气化。为了充分利用氧化锌的脱硫效果,后来开发了多种锌的复合金属脱硫剂,铁酸锌就是典型的一种。

铁酸锌由于硫容高,与  $H_2S$  反应迅速,具有较高的脱硫效率,在还原性气氛下,铁酸锌易分解成  $ZnO$  和  $Fe_3O_4$ ,因此其操作温度一般在  $600\text{ }^\circ\text{C}$  左右。卢朝阳等<sup>[11]</sup>人对铁酸锌的脱硫动力学作了研究表明,铁酸锌脱硫剂的反应活性随着  $H_2S$  浓度及硫化温度升高而升高,脱硫在温度  $500\text{ }^\circ\text{C}$  时,脱硫剂硫容量最高,脱硫剂的物理性质基本保持不变;硫化反应可用未反应核收缩模型描述,得到了转化率与时间的动力学方程。

### (4)锰矿法

天然锰矿含二氧化锰 90%左右,脱硫时用于先将四价的锰还原成二价的锰以具有脱硫活性,脱硫机理也是将有机硫转化为硫化氢<sup>[12]</sup>,然后按以下方程式反应:



该反应是可逆的,温度升高会使反应逆向进行,适宜的操作温度为  $400\text{ }^\circ\text{C}$ 。被饱和后锰矿脱硫剂一般要废弃。

#### 1.1.2 湿法氧化法

##### (1)氧化铁悬浮液的吸收法

该类方法的脱硫原理都是以  $H_2S$  与碱性化合物(碳酸钠或氨)的反应为基础的,并利用硫氢化物与水合氧化铁的反应,发生过程是借吹入空气使硫化铁转化为硫和氧化铁。

该类方法的代表有费罗克斯(Ferrox)法<sup>[13]</sup>和曼彻斯特(Manchester)法。该法脱除效率约为 85%~99%,可与干式氧化法相比,并且减少了占地面积。由于气体中氰化氢含量和副产物硫代硫酸盐的生成速度不同,可有 70%~80%的  $H_2S$  被氧化成硫而得以回收,该循环液具有腐蚀性,对碳钢设备不利。

##### (2)有机催化剂的吸收氧化法

该方法是采用适量水溶液酚类化合物盐类作催化剂或氧载体的碱性溶液,这些有机化合物能借氧化态转变为还原态而使  $H_2S$  很快转化为硫,而本身与空气接触时很容易再氧化,所以可循环使用。与其他氧化法相比,该类方法的吸收液无毒

且排出物无污染,副产硫的质量好,净化效率高。因此得以广泛应用。常用的方法主要有对苯二酚催化法和 APS 法两种。

### (3) 砷碱法(Thylox 法)

采用含砷的碱性溶液脱除气体中硫化氢的方法,是湿式氧化法中历史最悠久的一种方法,曾被广泛用于各种原料气中脱硫。该法于 20 世纪 50 年代由美国 Koppers 公司工业化<sup>[1,14-15]</sup>,洗液由  $K_2CO_3$  或  $Na_2CO_3$  和  $As_2O_3$  组成,以砷酸盐或硫代砷酸盐为硫氧化剂,主要成分是  $Na_4As_2S_5O_2$ 。

此法脱除硫化氢很有效果,能产生含硫化氢  $< 5mg/m^3$ (标)的气体。但随着环保要求严格,砷是剧毒物质,因此,目前砷碱法已被其他一些脱硫方法所取代,工业上已很少使用。

### (4) LO-CAT 工艺

20 世纪 70 年代,美国空气资源公司开发了 LO-CAT 工艺<sup>[1,16-17]</sup>,该法是典型的铁基工艺<sup>[1,18]</sup>,已在处理天然气、炼厂气、页岩干馏气及合成气等过程中得到推广。因采用铁螯合物,克服了以往只加铁而生成副产物的缺陷,脱硫效率大大提高。

20 世纪 80 年代,美国公司采用 EDTA 来稳定铁,中间还加了一种羟基化糖,进一步稳定溶液。这种试剂活性高,脱硫效率高达 99.99%,低浓度而无毒,因而很受用户欢迎。

维也纳技术大学和奥地利联合工程公司开发的 Sulfint<sup>[19]</sup>工艺,是对 LO-CAT 工艺的改进,可减少试剂损失,降低成本。

## 1.2 吸收法

### 1.2.1 化学吸收法

目前化学吸收法一般不采用强碱性溶液作为吸收剂,而大多 pH 值在 9~11 之间强碱与弱酸的盐溶液。常用乙醇胺法、氨法和碳酸钠法。

乙醇胺法是利用乙醇胺易与酸性气体反应生成的盐类,在低温下吸收,在高温下解吸的性质可除  $H_2S$  等酸性气体,常用一乙醇胺(MEA)和二乙醇胺(DEA)等,并分别称为 MEA 法和 DEA 法。一乙醇胺(MEA)是吸收  $H_2S$  较好的溶剂,价格低,反应能力强,稳定性好,且易回收,但蒸气压高,溶液损失大,可采用简单的水洗法从气流中吸收蒸气的胺来加以回收。

氨水吸收法因其设备简单,脱硫剂价廉,尤其是合成氨厂及焦化厂可就地取才而被广泛采用。当气体中含  $COS$ 、 $CS_2$ 、 $HCN$ 、有机酸、含氮有机磷

类及其他杂质时,用煤气中的氨进行脱硫。但该法脱硫效率不高,一般只有 70%~80%。

碳酸钠法属碱性盐溶液的化学吸收法。这些盐类使吸收液呈碱性,能吸收酸性气体,而且由于弱酸性的缓冲作用,在吸收酸性气体时,pH 值不会很快发生变化,保证了系统的操作稳定性。此外,碳酸钠溶液吸收  $H_2S$  比吸收  $CO_2$  快,当两种酸性气体同时存在时可以部分地选择吸收。

该方法的主要优点是设备简单、经济;主要缺点是一部分碳酸钠变成了重碳酸钠而吸收效率降低,一部分变成硫酸盐而被消耗。用真空蒸馏再生的碳酸钠溶液吸收  $H_2S$  的方法称为真空碳酸钠法。

### 1.2.2 物理吸收法

目前,物理吸收法的吸收溶剂以有机溶剂为主,克服了化学吸收法需在加热条件下才能解吸的不经济性。该法要求  $H_2S$  在气体中的浓度要高。当被处理气体的纯度要求高时,残余的  $H_2S$  一般采用化学吸收法再度处理。常用的物理吸收法有冷甲醛法、N-甲基-2-吡咯烷酮法、碳酸丙烯酯法等。

### 1.2.3 物理化学吸收法

最常用的物理化学吸收法是环丁砜法,该法的特点是兼有物理溶剂和醇胺化学吸收溶剂的特性,其物理特性来自环丁砜(二氧四氢噻吩),而化学特性来自 ADIP(二异丙醇胺)和水。在  $H_2S$  气体分压高的条件下,环丁砜允许很高的酸性气体负荷,具有较大的脱硫能力,而化学溶剂 ADIP 可使处理过气体中的  $H_2S$  残余到最低值。

采用环丁砜溶剂脱硫,吸收力强、净化率高。不仅可脱除  $H_2S$  等酸性气体,还可以脱除有机硫。由于其吸收能力强,所以溶液循环低,不易发泡,稳定性较好,使用过程中胺变质损耗少,腐蚀性小,而且溶液加热再生较容易,耗热量低,特别当  $H_2S$  分压高时,该法更为适用。

## 1.3 吸附法

### 1.3.1 活性炭吸附法

活性炭是常用的一种固体脱硫剂,在常温下具有加速  $H_2S$  氧化为硫的催化作用并使之被吸附。活性炭吸附法净化<sup>[20]</sup>气体中低浓度硫化物,有操作温度低、工艺简单、效果好、成本低等优点,受到化工、轻工等行业的广泛重视。活性炭脱硫一般认为是在氧的存在下,活性炭表面的醌酚基将

H<sub>2</sub>S 催化氧化为单质硫。从而打破吸附平衡,使活性炭脱 H<sub>2</sub>S 的能力提高数十倍。

如果将活性炭浸渍过渡金属如 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CuO 等可显著增强活性炭的催化活性,既降低了脱硫温度又大大提高脱硫容量。我国的黄岳元、赵天成等人将活性炭浸渍过碳酸钠后发现<sup>[21]</sup>,该改性后的活性炭吸附 H<sub>2</sub>S 能力比普通活性炭大为提高。谭小耀等研究了浸渍活性炭脱除 H<sub>2</sub>S 的反应动力学<sup>[22]</sup>,认为脱硫过程主要是 H<sub>2</sub>S 在活性炭的吸附水膜内离解后被活化的氧分子以及活性氧原子氧化生成单质硫逐渐沉积在炭表面<sup>[23]</sup>,并提出了脱硫动力学方程。

活性炭是一种优良的 H<sub>2</sub>S 吸附催化剂,但价格昂贵且消耗日益增多,硬度低,再生过程中炭损失严重,重复利用率低,价格高,一时难以在我国大规模推广<sup>[24]</sup>。

### 1.3.2 分子筛法

分子筛吸附剂已广泛用于脱硫气体中的 H<sub>2</sub>S。分子筛具有大的表面积,同时还具有高度局部集中的极电荷,这些局部集中的电荷使分子筛能强烈吸附有极性可极化的化合物如 H<sub>2</sub>S 等。分子筛对极性分子的吸附选择性,对硫化物产生了高的容量,由于它对有机硫化物同对 H<sub>2</sub>S 一样具有很大的化学亲和力,因此分子筛不仅可以除去 H<sub>2</sub>S,而且对于 CS<sub>2</sub>、硫醇等其他含硫化合物亦有较好的去除效率。

### 1.3.3 凹凸棒石粘土脱除法

采用凹凸棒石脱硫剂在常温常压下脱除高浓度 H<sub>2</sub>S,以凹凸棒石为主原料、添加 20% -30% (质量分数)的活性组分后,对高浓度低流速的 H<sub>2</sub>S 具有较高的脱除效率和较大的硫容量。由于凹凸棒石的结晶习性、结晶形态、沉积方式和内部孔道等多种因素的影响而赋予很高的比表面积,凹凸棒石表面固有的原子结构和活化处理产生的表面电荷不平衡现象形成了吸附中心,二者的结合使凹凸棒石具有良好的吸附性能。凹凸棒石粘土脱硫剂是种性能优良的常温脱硫剂,在常温常压的条件下,既可以满足脱硫效率又可达到较高的硫容量。凹凸棒石粘土脱硫剂不但对 H<sub>2</sub>S 有吸附作用,而且有化学转化作用<sup>[25]</sup>。

## 2 硫化氢处理技术的发展趋势

### 2.1 生物处理法

生物法<sup>[1, 26-27]</sup>是近年发展起来的处理低浓度恶臭气体(如 H<sub>2</sub>S)的较为有效的方法。生物法投资和运行费用相对较低,且操作简单<sup>[28]</sup>。生物法通常包括:生物膜法<sup>[29-30]</sup>和生物过滤法。“生物脱硫”是近年来才发展起来的常规脱硫技术的替代新工艺,此法虽优于传统的物理化学脱硫法,但在优化工艺、更有效地控制溶解氧、提高单质硫的产率等方面仍需努力。

#### 2.1.1 生物膜法

通常用吸收-生物膜模型描述生物膜降解污染物质的机理。孙佩石和黄兵<sup>[31]</sup>等人通过一系列的实验研究,提出了吸附-生物膜模型,并通过对实验数据的拟合得到的吸附生物膜模型的动力学公式。对生物膜填料塔的研究表明:净化硫化氢的菌群通过分析认为,主要菌种为脱硫杆菌<sup>[32]</sup>。

生物膜法净化低浓度硫化氢恶臭气体的主要影响因素有<sup>[26, 30]</sup>:进气负荷、液体喷淋量、气体流量、pH 值和填料材质等。当进气负荷较小时,生物膜上微生物能有效地降解硫化氢气体,随着进气负荷的增加,净化效率迅速提高;当进气负荷增加到一定程度时,由于污染物浓度较高,氧很快被表层的生物膜所消耗,靠近填料的生物膜因得不到充足的氧,不能有效地利用硫化氢,说明该生物膜填料塔已达到最大生化去除率<sup>[26, 33]</sup>。

#### 2.1.2 生物过滤法

生物过滤法<sup>[30-31, 34]</sup>是将滤料装填在生物滤塔中构成滤床,在气流通过滤床时,硫化氢从气流中转移到生物膜层上被微生物代谢<sup>[31]</sup>。其 H<sub>2</sub>S 气体的除去效率主要取决于气相污染物在固液结合相上的反应速率。生物过滤器与活性炭吸附不同,它是通过生物作用吸附,去除污染物,并不是简单的物化的吸附过程。

#### 2.1.2 生物活性碳法

利用活性炭的微生物性能的方法就是生物活性炭法,生物活性炭具有活性炭和微生物两者的性能。生物净化硫化氢过程一般要经过以下几个步骤:①废气中的硫化氢由气膜扩散进入液膜;②溶解于液膜中的硫化氢在浓度差的推动下进一步扩散到生物膜,并被其中的生物所捕获、吸收;③进入微生物细胞的硫化氢在生物体内的代谢过程中作为能源和营养物质被分解,经生化反应最终转化为单质硫、亚硫酸、硫酸等<sup>[35, 36]</sup>。

### 2.2 臭氧氧化法

臭氧去除硫化氢、硫醇等臭味物质的基本原理是利用臭氧在催化剂存在或紫外线照射下快速分解出来的具有极高化学活性的原子氧的强氧化性,将硫化氢、硫醇等臭味物质氧化,使之生成无臭味的物质<sup>[37]</sup>。氧化过程中即使有过量的臭氧,也会因为催化剂的存在而迅速分解。

影响净化性因素主要有:臭氧浓度、停留时间和催化剂种类<sup>[5,37]</sup>。提高氧化塔进口气相中臭氧浓度,对废气中硫化氢和硫醇的脱除有利,但臭氧本身就是一种臭味物质,过度提高进口气相中的臭氧浓度,导致出口气相臭氧浓度的增加,将造成不必要的能量消耗。

### 2.3 电化学法

电化学法是采用电极反应实施氧化还原反应脱除硫化氢和二氧化硫的一种新方法<sup>[5]</sup>。该方法因其处理效率高、操作简便、易实现自动化、环境兼容好、不采用任何催化剂和添加剂,从而不产生副产物或二次污染物、清洁生产、环境友好等优点,从而使其发展前景非常广阔<sup>[7]</sup>。脱除硫化氢的原理是:首先将硫化氢溶于碱性水溶液中生成硫化钠溶液,电解该水溶液,在阳极可得单质硫,阴极产生氢气。此法属于一种新型工艺,但硫化氢(硫化钠)电解转化设备的效率、经济性等尚需进一步研究。

### 2.4 电子束微波分解法

该方法是针对工业废气处理而开发的,可将其中的  $H_2S$  和  $CS_2$  通过以电子加速器为辐射源产生的电子束分解转化成  $SO_2$ 、 $SO_3$  等毒性相对较小,较易脱除的物质。该法适合于在污染量较低的情况下处理。

据马文等<sup>[38]</sup>的研究,在微波作用下,以硫化亚铁为催化剂,可发生将硫化氢分解为氢气和硫磺的反应。该方法可利用微波的特性从分子内部激发  $H_2S$  分子,提高分子能级,从而在短时间内使其转化率达 87%~95%。

## 3 结语

目前,各种硫化氢传统净化技术在工业上的应用较为广泛。随着环保法规的日趋严格,有关  $H_2S$  的污染问题越来越引起人们的重视,其净化新技术越来越多的浮现。硫化氢废气净化新技术相对传统净化技术在处理效果、操作简易程度和经济利益方面都具有优越性。

生物法是近年来发展起来的替代新工艺,主要用于低浓度大气量的硫化氢废气的处理。生物法与传统的处理方法相比,具有设备简单、运行费用低,较少形成二次污染等优点,尤其处理低浓度、生物可降解的气态污染物更显其经济性。电化学法具有处理效率高、操作简便、易实现自动化、环境兼容好、不产生副产物或二次污染物、清洁生产和环境友好等优点,这两种方法发展前景非常广阔,是今后发展的一个方向。

## 参考文献

- [1] 张家忠,易红宏,宁平等.硫化氢吸收净化技术研究进展[J].环境污染治理技术与设备,2002,6(3):47~52.
- [2] B.Gene Goar,Hydrocarbon Processing[M].1988,(9):248~252.
- [3] Superclaus,Hydrocarbon processing's gas processes'98 [J].HP,1998,77(4):129.
- [4] 郑子文.硫回收尾气处理技术及超级克劳工艺[J].硫酸工业,1993,2:41~44.
- [5] 王学谦;宁平.硫化氢废气治理研究进展[J].环境污染治理技术与设备,2001,4(2):77~85.
- [6] Nielsen;A.H.;Hvitved -Jacobsen;Vollertsen.J,2006a,Recent findings on sinks for sulfide in gravity sewer networks [J].Water Sci Technol,52,201~208
- [7] 邢同春.关于干式氢氧化铁脱硫剂的分析 [J].煤气与热力,1990,10(6):18~19.
- [8] 呼德龙;马凤美.关于氧化铁脱硫剂活性问题的探讨[J].煤气与热力,2000,3:126~127.
- [9] 李彦旭;田青平;郭汉贤等.氧化铁脱硫剂高温煤气脱硫行为的研究[N].燃料化学学报,1998,26(2):130~134.
- [10] 马坚;卞文章;孙小玲.氧化锌脱硫剂的研制[J].精细石油化工文摘,1999,2(13):68~69.
- [11] 卢朝阳;少兴中;鲁军等.高温煤气脱硫-铁锌基脱硫剂脱硫工艺条件及硫化动力学[N].燃料化学学报,1996,24(6):492~497.
- [12] 郑文华译.在高温下使用  $MnO-Al_2O_3$  脱除燃气中的硫化氢[J].国外炼焦化学,1996,2:108~113.
- [13] 冯永发;魏慧卿.低浓度硫化氢的回收治理[J].大氮肥,1996,5(19):353~357.
- [14] 朱世勇编.环境与工业气体净化技术[M].北京,化学工业出版社环境科学与工程出版中心,2001,19~45.
- [15] Dalrymple D A;et al,An overview of liquid redox sulfur recovery[J].Chem Eng Prog,1989,85(3):43~48.
- [16] 三废治理与利用编委会.三废治理与利用[M].北京,冶金工业出版社,1999,261~267.
- [17] 王睿;石冈;魏伟胜;鲍晓军.工业气体中  $H_2S$  的脱除方法-发展现状与展望[J].天然气工业,1999,19(3):84~90.
- [18] H. ter.Maat;J.A.Hogendoorn;G.F.Versteeg,The removal of hydrogen sulfide from gas streams using an aqueous metal sulfate absorbent Part I. The absorption of hydrogen sulfide in metal sulfate

## 4 结语

(1)自然循环净化系统由于采用比表面积大的渗滤介质,如生物炭和朽木、石头,对微生物有较好的亲和性,为固定微生物处理生活污水的效果提供了保证。

(2)自然循环净化系统可以使出水的 COD<sub>Cr</sub> 在 30~50mg/L,氨氮小于 5mg/L,总磷在 1mg/L 以下,接近中水回用的标准。

(3)自然循环系统设置不受场地条件限制,操作管理简单,运行费用低,可应用于工厂,旅游度假区,生活小区,城郊结合部等规模小、缺少配套污水管网,以及不适合进行污水集中处理的地区,

也可以应用于对地表水体的生物修复。

## 参考文献



(上接第 13 页)

solutions[J].H. terMaat et al/Separation and Purification Technology, 43(2005):183~197.

[19] Croar B G.Sulfur recovery technology [J].Energy Process,1986,6 (2):71~78.

[20] 蒋展鹏,环境工程学[M].北京:高等教育出版社,2001.

[21] 黄岳元;赵天成;杨一心等,改性活性炭吸附 H<sub>2</sub>S 和 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> 平衡研究[N].西北大学学报(自然科学版),2000,3 (30):275~277.

[22] 谭小耀;吴迪镛;袁权,浸渍活性炭脱除 H<sub>2</sub>S 的反应动力学[J].化学反应工程与工艺,1996,12(2):129~137.

[23] 李开喜;凌立成,SO<sub>2</sub> 在球状活性炭上的吸附转化研究[J].煤炭转化,1999,1 (22):76~78.

[24] 吴建芝;李春虎;于淑兰;赵伟;李国栋,炭基材料脱除 H<sub>2</sub>S 研究进展[J].煤炭转化,2006,4 (29):26~29.

[25] 李澜;王青宁;俞树荣;何荔;张飞龙,凹凸棒石粘土脱硫剂脱除硫化氢实验研究[J].环境污染与防治,2006,8(28):572~575.

[26] 黄兵;黄若华,低浓度硫化氢恶臭气体的生化处理研究[J].云南环境科学,1998,3(17):9~11.

[27] 杜永林;黄兵,生物膜法净化低浓度硫化氢气体的试验研究[J].云南化工,1998,4:17~21.

[28] 李国建;何晶晶;马肖卫,恶臭气体 H<sub>2</sub>S 生物脱除速率的研究[J].上海环境科学,1997,(7):11~13.

[29] 于淼;周理,天然气中 H<sub>2</sub>S 的脱除方法-发展现状与展望[J].天津化工,2002,5:18~20.

[30] 张永;王学谦;宁平,硫化氢废气净化新技术[J].四川化工,2005,6 (8):49~52.

[31] 孙佩石;黄兵等,生物法净化低浓度硫化氢废气的动力学模型研究[J].贵州环保科技,2002,3(8):1~4.

[32] 杜永林;黄兵,生物膜法净化低浓度硫化氢气体的试验研究[J].云南化工,1998,4:17~21.

[33] Kiseok Kim;S. K. Jeon;Catherine Vo;Chan S. Park;Joseph M. Norbeck,Removal of Hydrogen Sulfide from a Steam-Hydrogasifier Product Gas by Zinc Oxide Sorbent [J].Ind. Eng. Chem. Res. 2007,46,5848~5854

[34] A.Barona;A. El'ias;A. Amurrio;I. Cano;R. Arias,Hydrogen sulphide adsorption on a waste material used in bioreactors[J].Biochemical Engineering Journal 24 (2005) 79~86.

[35] 三废治理与利用编委会,三废治理与利用[M].北京,冶金工业出版社,1999,261~267.

[36] B.Gene Goar,Hydrocarbon Processing[M].1988,(9):248~252.

[37] 陈凡植;颜幼平,硫化氢硫酸废气的臭氧氧化试验[J].环境污染与防治,2000,3(22):8~10.

[38] 马文;王新强;倪炳华,微波催化法分解硫化氢的研究[J].石油与天然气化工,1997,1 (26):37.



(上接第 19 页)

污水中 SS 均为悬浮性污染物。通过对污水中各类污染物的存在形态的分析可为矿区生活污水处理工艺的选择提供参考,如对污水中悬浮性污染物采用一级处理或强化一级处理实现污染物有效去除,减轻后续生化处理负荷,提高出水水质。

## 参考文献:

[1] 王晓昌,金鹏康,赵红梅,孟令八.城市生活污水中的污染物分类及处理性评价[J].给水排水,30(9):38~41.

[2] 仲婧,许宁,朱延美.生活污水中污染物的排放规律探讨[J].泰山医学院学报,25(4):356~358.

[3] 国家环保局等.水和废水监测分析方法[M].北京:中国环境科学出版社,1989.