

一种新的湿法脱硫强制氧化技术

田凤国¹, 吴江^{1,3}, 章明川¹, 马春元²

(1. 上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200240; 2. 山东大学能源与动力工程学院, 山东 济南 250061; 3. Materials Characterization Center, Western Kentucky University, US Bowling Green 42101)

摘 要: 强制氧化是防止湿法脱硫系统结垢和堵塞以及脱硫废渣二次污染问题的关键。文中提出将射流曝气技术应用于石灰石/石膏湿法脱硫的强制氧化工艺, 并利用双膜理论针对射流曝气强制氧化工艺的气液相际传质特点进行了理论分析, 结果表明, 射流曝气器作为一种气液两相介质化学反应传质混合设备, 充分利用强烈混合作用, 提高了能量的综合利用率, 对某湿法脱硫工程能耗的计算结果表明: 采用射流曝气方式能耗节省达 20% 以上, 脱硫成本降低, 有利于实现关键脱硫设备的国产化。

关 键 词: 湿法脱硫; 强制氧化; 射流曝气

中图分类号: X701.3 文献标识码: A

1 引 言

石灰石/石膏湿法脱硫系统中, 烟气自身含氧可氧化部分亚硫酸钙, 即发生自然氧化。在自然氧化中如果氧化率达不到一定程度, 则不能产生足够的石膏晶种使石膏晶种迅速增长, 导致石膏在脱硫设备内生成 CSS 垢 (Calcium Sulfate and Sulfite, 亚硫酸钙与硫酸钙的混合晶体)^[1]。脱硫系统的结垢和堵塞在湿法工艺中常发生, 而且非常严重, 高硫煤电厂中尤为突出。

实施强制氧化, 降低石膏浆液中亚硫酸钙的含量是防止 CSS 垢的关键。强制氧化是通过向洗涤液中鼓入空气, 使氧化反应趋于完全, 氧化率高于 95%, 并保持足够的浆液含固量 (12%), 以提供石膏结晶所需的晶种。此时, 石膏晶体的生长占优势, 可有效控制结垢。强制氧化的引入还有助于提高脱硫效率, 为减小液气比提供了可能性; 烟气处理量及 SO₂ 浓度变化时的负荷适应性都比自然氧化形式优越; 石灰石利用率高; 脱硫副产品为石膏, 具有较高的商业价值, 同时也避免了二次污染。

目前, 强制氧化系统大都依赖鼓风机或空气压缩机作为强制氧化空气动力源, 在氧化槽内通过空气分配管路, 最后经由空气喷射器鼓入压缩空气; 为了破碎气泡、增加气液接触面积, 防止沉淀结垢堵塞, 需加设机械搅拌装置。这类系统比较稳定, 适应性广泛。但是这种方式对风机有较高的技术要求, 不利于实现脱硫关键设备的国产化。同时还存在着设备复杂、结构物体积大、占地多、氧的利用率低、运行费用高、基建投资大、噪声高、维护管理困难等缺点。

为克服当前鼓风曝气的缺点, 借鉴水处理中的曝气工艺, 本文提出将射流曝气技术应用于石灰石/石膏湿法脱硫强制氧化工艺中的新概念, 利用射流曝气机自然吸气方式代替现有强制氧化风机以及机械搅拌装置。

2 射流曝气的氧传质分析

湿法脱硫强制氧化工艺过程中, 空气气泡中的氧先行通过气泡壁面, 即气液界面, 溶解于浆液溶液, 然后再与 Ca(HSO₃)₂ 进行化学反应。因此, 氧的吸收, 或者说氧的气液相际传质成为整个反应过程的控制过程。强制氧化过程中, 射流曝气氧的传质主要是射流曝气器内部氧的快速转移和曝气池异重流中环流气泡内氧的转移。

2.1 气液相际传质的影响因素

针对气体吸收过程的传质, W. G. Whitman 和 W. K. Lewis 提出了双膜相际传质模型^[2]。该理论认为在气液界面存在着两层膜 (即气膜和液膜), 如图 1 所示。这两层薄膜使气体分子从一相进入另一相时形成了阻力。当气体分子从气相向液相传递时,

若气体的溶解度较低,则阻力主要来自液膜。

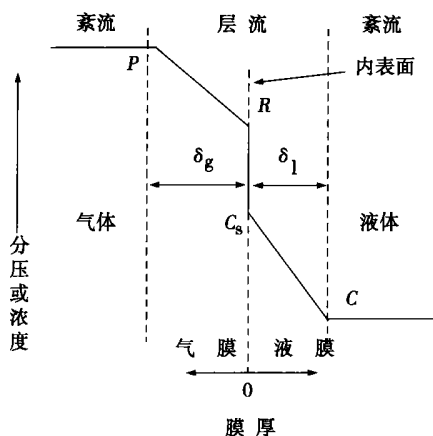


图1 气液传质双膜理论简图

在废水处理系统中,氧是难溶的气体,它的传递速率通常正比于溶液中氧的饱和浓度差,即:

$$dC/dt = K_{La}(C_s - C) \quad (1)$$

其中:

dC/dt —溶液中气体的传递速率, $\text{mg}/(\text{l} \cdot \text{s})$;

K_{La} —总的传质系数, l/s ;

$K_{La} = K_g \cdot A/V$;

K_g —气体扩散系数, m^2/s ;

A —气体扩散通过的面积, m^2 ;

C_s —气体在溶液中的饱和浓度, g/m^3 ;

C —气体在溶液中的浓度, g/m^3 ;

V —溶液中气体体积, m^3 。

K_{La} 反映了传递气体的扩散性能和曝气的混合条件等因素,混合越强、紊流越剧烈,则气体的传递速率越大。

从搅拌角度来看,最重要的能动因素是传质表面积。表面积取决于气体滞留量 φ 和平均泡径 d_{32} ^[3]。气体滞留量 φ 定义为气体在分散系中的体积系数;平均泡径 d_{32} 是统计平均值,即:

$$d_{32} = \sum n_i d_i^3 / (\sum n_i d_i^2) \quad (2)$$

式中: n_i —直径为 d_i 的气泡数。

由 φ 和 d_{32} 即可计算出单位体积分散系的相际表面积:

$$a = 6\varphi/d_{32} \quad (3)$$

式中: a —单位体积分散系的相际表面积 (m^2/m^3),

即为 $K_{La} = K_g \cdot A/V$ 中的 A/V , 于是可得:

$$dC/dt = K_g a (C_s - C) \quad (4)$$

显然,气体滞留量 φ 相等时,平均泡径 d_{32} 愈小,气

液相际传质接触面积愈大,则溶液中气体的传质速率 dC/dt 增大。

2.2 射流曝气器内部氧的转移

液气射流曝气器是一种流体输送机械和混合反应设备,如图2所示。混合震荡是射流曝气器的重要压缩过程。在此过程中气液质点间强烈扰动掺混,射流曝气器内发生严重的不可逆混合耗散,系统的熵增加,能量品质下降。实践表明,射流曝气器的实际工作效率一般仅在 30% ~ 40%。

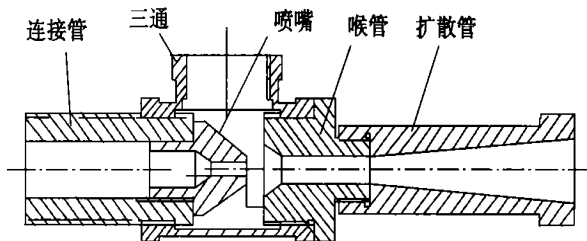


图2 射流系结构示意图

混合过程中,混合设备的单位质量能量耗散率是一重要参数,射流曝气器作为一种强烈的连续混合设备,正越来越多地运用于化工混合,通过分析比较典型的搅拌器、静态混合器、射流曝气器实验数据,可以得出三者的单位质量能量耗散率关系^[4]:

$$\epsilon_{\text{射流泵}} > \epsilon_{\text{静态混合器}} > \epsilon_{\text{搅拌器}}$$

由于射流曝气器依靠液体质点间的相互撞击来传递能量,因此在混合过程中产生大量旋涡,在喉管内壁产生摩擦损失以及在扩散管中产生扩散损失都会引起大量的水力损失,射流曝气器的单位质量能量耗散率较搅拌器和静态混合器都高,是一种较强烈的连续混合装置。射流曝气器作为泵使用,其效率较低,应用场合受到限制,但作为混合设备,损失的能量大部分转换为紊动扩散的能耗率,强化混合作用,强烈的混合,加速更新。

气液界膜,对流氧传质加强,因此获得了较高的氧传质效率 K_{La} 。这说明射流曝气器混合与作为升压、输送设备的泵的使用有着本质的区别。辩证地看射流曝气器的用途不同,其能量利用率有着高低差异。作为一种气液两相介质化学反应传质混合设备,充分利用了这种强烈混合作用,变不利因素为有利条件,提高了能量的综合利用率,这正是本文将射流曝气技术引入湿法脱硫强制氧化工艺的思想出发点。

射流抽气过程中, 高速液流强烈切割气泡, 气—液分散成为极小的离散相微粒, 粒度在 $40\ \mu\text{m} \sim 75\ \mu\text{m}$, 基本呈正态分布, 如图 3 所示。射流曝气抽吸空气形成均质乳化液, 平均泡径 d_{32} 同其它曝气方式相比, 要小得多, 比表面积显著增大。试验表明: 射流曝气器作为微气泡曝气设备, 氧的利用率超过 30%, 比其它曝气方式高 3 ~ 5 倍, 如表 1 所示。对于双级射流曝气器, 由于两级喷射使活性污泥和空气接触面两次更新, 射流的能量得到充分利用, 因此氧的利用率最高可以达到 90%, 具有明显的优势。

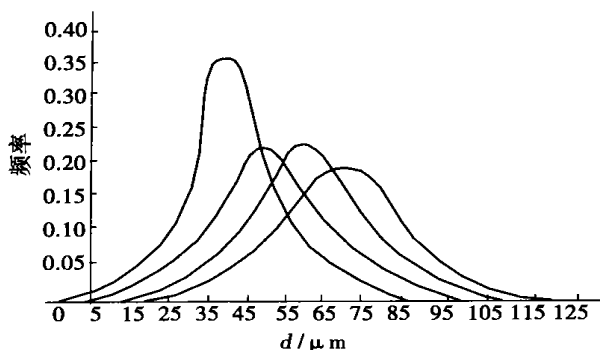


图 3 射流乳 化气泡直径正态分 布

表 1 不同气泡尺寸曝气设备的性能比较

曝气设备(扩散空气系统)	氧传递率 / $\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$
射流曝气器(微气泡)	40 ~ 120
小气泡	40 ~ 60
中气泡	20 ~ 30
大气泡	10 ~ 20
低速表面曝气器	10 ~ 90
低速表面曝气器加导管	60 ~ 90

另一方面, 等温压缩增大了气泡内氧传质动力——氧压力梯度, 间接地表现为式(1)中气体浓度梯度($C_s - C$)的增加。

2.3 曝气池中氧的转移

射流与异重流均属于三相体系, 亚硫酸钙与氧在三相间的传质过程简化为整个过程包括传质、吸附和合成。相应的传质阻力与速率可分为外传质阻力与速率和内传质阻力与速率。研究表明, 内传质阻力是影响总反应速率的主要因素。从影响气液相际传质的因素来看, 循环氧化槽内, 射流切割搅拌脱硫浆液内的悬浮固体颗粒, 减少大粒径体积所占比例, 增加了它和空气的接触面积, 同时它可以直接从气泡中吸氧和抑制气泡团聚合并, 提高总的传质系数 $K_L a$, 内传质阻力减小, 气体的传递速率相应增大, 强

化了气液间的质量传递。

另外, 射流曝气器出口附近的气泡密集区同周围浆液因含气量不同, 而存在较大的密度差, 连同气泡上逸, 形成强烈的池内循环, 即异重流循环。异重流循环一方面裹挟乳化液循环流动, 延长气—液有效反应时间; 另一方面又促进大气泡的剪碎, 保持动态平衡, 并不断向浆液供氧。此外, 还能起到搅拌作用, 有助于浆液中固体颗粒处于悬浮状态, 防止沉淀。

3 经济性分析

本文首次提出将射流曝气技术应用于石灰石/石膏湿法脱硫强制氧化工艺, 为了验证其经济可行性, 特选取某电厂在建湿法脱硫工程项目作为实例进行了初步能耗比较计算, 计算结果如表 2 所示。

表 2 某湿法脱硫工程不同曝气方式能耗比较

	公式或来源	计算结果
1	理论比例关系 $\text{SO}_2 - \text{CaSO}_3 - \frac{1}{2} \text{O}_2$	—
2	SO_2 生成量 / $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ $(Q_{\text{烟气}} \times d_{\text{SO}_2} \times 10^{-6}) / \rho_{\text{SO}_2, 0}$	1 394.3
3	理论 O_2 量 / $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ $Q_{\text{SO}_2} / 2$	697.15
4	理论空气量 / $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ $Q_{\text{O}_2} / d_{\text{O}_2}$	3 327.7
曝气器	曝气器能耗 / kW $(Q_{\text{空气}} / Q_{\text{曝气器流量}}) \times W_{\text{曝气器能耗}}$	115.3
气	氧利用率 / % 40	—
器	实际曝气器能耗 / kW $(W_{\text{曝气器能耗}} / \eta_{\text{O}_2}) \eta_{\text{SO}_2}$	275
鼓风机	本工程能耗 / kW —	360
节省率 / %	$(360 - 275) / 360 \times 100$	23.6

通过计算发现, 采用射流曝气技术, 比现有鼓风机曝气节约能耗高达 23.6%, 这意味着运行成本大大降低, 对当前造价昂贵的湿法脱硫工程是一个有力的促进。

射流曝气器是新近发展的扩散器。通过分析, 射流曝气技术利用气泡扩散和水力剪切这两个作用达到曝气和混合的目的, 同传统曝气技术相比, 具有如下优点:

(1) 池子深度较普通曝气池深, 氧利用率的提高, 缩减了曝气设备尺寸和占地面积。

(2) 浆液在曝气池中的停留时间比其它曝气池中短。

(3) 在圆形射流曝气池内, 射流曝气器尾管出口沿圆池切线方向喷射, 形成旋流上升, 使全池浆液随水力旋流而均匀地漂浮, 从而不需要搅拌装置, 既节能也有利于简化系统。

(4) 用负压自吸的射流器取代鼓风机, 可以避

免鼓风机引起的噪声。

另一个很重要的方面是,随着深井曝气工艺的发展,我国开发出深度达10 m的射流曝气装置,该系统具有良好的异重流混合特性。现有曝气处理设备的几何尺寸及处理废水规模与湿法脱硫强制氧化设备规模和几何尺寸相差不大,这更增强了将射流曝气技术应用于石灰石/石膏湿法脱硫强制氧化系统实践的可行性。

4 结 语

强制氧化是防止湿法脱硫系统中结垢和堵塞以及脱硫废渣二次污染问题的关键,本文提出将射流曝气技术应用于石灰石/石膏湿法脱硫强制氧化工

艺的新概念。射流曝气强制氧化工艺的气液传质分析表明,此种曝气方式具有较高的氧转移能力;结合某湿法脱硫工程所作能耗比较的计算结果表明:采用射流方式能耗节省达20%以上;通过合理设计曝气系统,可以省去搅拌装置,减小设备尺寸,简化系统结构,降低脱硫成本提供了可能性,对关键脱硫设备的国产化与我国环保事业的发展具有积极意义。

参考文献:

- [1] 颜 俭. 湿法脱硫工艺的控制氧化[J]. 电力环境保护 1997, 13(2): 41—44.
- [2] 袁 一. 化学工程师手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [3] 大卫·阿兹贝尔. 化学工程中的两相流[M]. 北京: 化学工业出版社, 1987.
- [4] 李廷浩. 射流泵混合的单位质量能耗散率[J]. 机电工程技术, 2000, 29(4): 39—41.

新技术

新的水和蒸汽热力性质公式 IAPWS—IF97 和计算程序

水和蒸汽热力学性质的 IAPWS1997 工业公式(简称为 IAPWS—IF97)是国际水和蒸汽性质协会在1998年9月建议开始使用,从1999年1月该计算公式已开始应用于商业合同中。

IAPWS—IF97 公式的优点表现在如下几个方面:一是计算精度有显著提高。二是在各子区域的分区边界上计算结果有更好的一致性。三是计算速度有很大的提高,计算速度平均提高5倍以上,有的分区甚至快12倍以上。四是扩大了公式的使用范围。

鉴于 IAPWS—IF97 计算模型的众多优点,国外动力行业正日益广泛地使用该系列工业公式。笔者认为有必要在国内宣传推广这一系列新公式和计算方法,以适合国际经济技术交流和国际国内商务合同的需要。

根据 IAPWS—IF97 工业公式,笔者开发了功能强大的“水和水蒸气热力性质计算程序”。它可以在水和水蒸气在全区域内根据压力、温度、焓、熵,比容、湿蒸汽干度等六个物理量中任意两个已知参量(共15种组合)求解出其它所有参量(含多解的情况),同时可以根据用户的需要输出内能、定压比热、定容比热、等熵指数、音速等状态量,还可以计算出表面张力、静介电常数、光折射率、流体粘度、普朗特数、导热系数等所有平衡态和非平衡态的热物性和迁移性物理量。该程序还能在自动绘出的焓熵图上标注出所计算的状态点,并描述热力过程的参量变化(如焓差、熵变、效率等)。

笔者可以根据用户的不同需要提供不同的软件产品:即可以提供具有友好界面的标准版可执行文件;也可以提供有源代码的企业版,以供企业二次开发之用;也可以提供动态链接库文件,供专业程序员使用各种程序语言(如VB、VC、Fortran等)调用;还制作了供Excel调用动态链接库的例程,用户可以很方便地直接在Excel表格软件中使用该程序。

该系列软件可供热能动力设备的设计、运行、试验和研究单位使用,也可供所有要用到水和蒸汽的各行各业技术人员使用。

(汪国山 供稿)

近期多相流过程层析成像技术的发展 = **Recent Developments in Process Tomography for Multi-phase Flows** [刊, 汉] / ZHANG Xiu-gang, WANG Dong, LIN Zong-hu (College of Energy & Power Engineering under the Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(3). — 221 ~ 226

Process tomography for multi-phase flows plays a major role in the exhaustive exposition of multi-phase flow basic laws, promoting the development of multi-phase flow theories and their engineering applications. The authors give a brief account of the use and development of several types of tomographic techniques as represented by X and γ rays, ultrasonic waves, electric resistance, capacitance and mesh electrodes in the detection and measurement of multi-phase flow parameters. An analysis is given of a variety of key issues, such as image reconstruction, the design and selection of sensors, real-time character, etc. In conclusion, application prospects and development trends of the process tomography are forecast. **Key words:** process tomography, two-phase flow, multi-phase flow, image reconstruction, on-line measurement

电除尘器阴极收尘潜力的研究 = **A Study of the Dust Removal Potential by the Cathode of an Electrostatic Precipitator** [刊, 汉] / HU Man-yin, GAO Wei-ying, BAI Zheng-guang, et al (Department of Environmental Engineering, North China Electric Power University, Baoding, China, Post Code: 071003) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(3). — 227 ~ 229

A preliminary analysis and an experimental study were performed of the various functions of the cathode of an electrostatic precipitator. They include: corona discharge, the establishment of a high field intensity, dust collection, the reduction of secondary dust-emission loss, the weakening and elimination of counter-corona harmful effects as well as the prevention of low voltage and high current-related unfavorable operations. It is suggested that cathode structure improvement can lead to a reduction of the cathode secondary dust-emission loss and the enhancement of the cathode dust-collection effectiveness as well as to a suppression of counter-corona. Meanwhile, it is also conducive to a stable operation of the electrostatic precipitator under the condition of a high voltage and relatively low current, thus achieving the aim of high dust-removal efficiency. The resolution of the above-mentioned issues can provide helpful reference data for the design, modification and operation of electrostatic precipitators. **Key words:** electrostatic precipitator, dust removal by a cathode, cathode secondary dust-emission

一种新的湿法脱硫强制氧化技术 = **New Technology of Forced Oxidation for a Wet Flue-gas Desulfurization System** [刊, 汉] / TIAN Feng-guo, ZHANG Ming-chuan (College of Mechanical & Power Engineering under the Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200240), MA Chun-yuan (College of Energy & Power Engineering under the Shandong University, Jinan, China, Post Code: 250061), WU Jiang (Materials Characterization Center under the Western Kentucky University, KY 42101, USA) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(3). — 230 ~ 233

Forced oxidation plays a key role in the prevention of agglomeration and blockage in a wet flue-gas desulfurization (WFGD) system and the reduction of secondary pollution caused by desulfurization waste dregs. A jet-flow aeration technique is proposed for use in the forced oxidation process of limestone/gypsum WFGD system. Moreover, a theoretical analysis is conducted of the gas/liquid interphase mass-transfer features of the jet-flow aeration forced-oxidation process by the use of a dual film theory. The results of the analysis indicate that a jet-flow aerator as a kind of mixing device for the chemical reaction mass-transfer of gas/liquid two-phase media can give full play to its intensive mixing action, thus enhancing energy comprehensive utilization rate. The calculation results of the energy consumption of a WFGD project show that the adoption of the jet-flow aeration mode has resulted in energy-savings of more than 20%. The reduction of desulfurization cost is conducive to promoting the domestic manufacture of key desulfurization equipment. **Key words:** wet flue-gas desulfurization, forced-oxidation process, jet-flow aeration

微型鼓泡床中石灰石溶解特性的实验研究 = **Experimental Investigation of Limestone Dissolution Characteristics in a Micro-sized Bubbling Bed** [刊, 汉] / SHI Zheng-hai, ZHAO Cai-hong, ZHOU Qu-lan, et al (College of En-