

Research on Biological Flue Gas Desulfurization

Chen Mingxiang, Zhang Yu*, Zhou Jiti

Key Laboratory of Industrial Ecology and Environmental Engineering (MOE), School of Environmental Science and Technology, Dalian University of Technology, Dalian, P. R. China, 116024
zhangyu@dlut.edu.cn

Abstract: With the deterioration of air environment and the development of biological technology, the research on biological flue gas desulfurization has obtained increasing attention. This paper reviews the principle of biological flue gas desulfurization, introduces relevant research works for biological flue gas desulfurization technology at home and abroad in recent years, summarizes the advantages and disadvantages of direct and indirect biological method for flue gas desulfurization, and forecasts the research directions in the future.

Keywords: biological methods; flue gas desulfurization (FGD)

生物法烟气脱硫工艺研究进展

陈明翔, 张 玉*, 周集体

大连理工大学环境学院, 工业生态与环境工程教育部重点实验室, 大连, 中国, 116024
zhangyu@dlut.edu.cn

摘 要: 随着大气污染的日益严重及生物技术的不断发展, 微生物烟气脱硫技术受到人们的广泛关注。本文综述了生物法烟气脱硫的原理, 介绍了近年来国内外对生物法烟气脱硫工艺的研究进展, 总结了直接法微生物烟气脱硫和间接法微生物烟气脱硫的优缺点, 并对其研究方向进行了展望。

关键词: 生物法; 烟气脱硫(FGD)

1 概述

二氧化硫(SO₂)是大气的主要污染源之一, 是导致酸雨的主要原因, 给环境带来了广泛的危害。SO₂ 的污染源绝大部分来自燃煤, 而煤炭是我国的主要能源。因此, 随着人们环保意识的不断提高, 脱除 SO₂ 的研究, 已经成为了环境领域的焦点。

目前, 控制 SO₂ 污染的方法有很多种。其中, FGD 是目前应用最为广泛的工业 SO₂ 控制工艺^[1], 其包括一系列的物理、化学方法。但传统的 FGD 需要添加额外的化学物质和能量, 并大多会造成二次污染。

生物法脱硫是近年来才发展起来的常规脱硫替代工艺, 该技术的原理是利用微生物参与硫循环这一特性来去除烟气中的 SO₂。与已经工业化的各种物理和化学脱硫工艺相比, 微生物法脱硫有着反应条件温和、操作简单、成本低、能耗少、无二次污染等优点^[2], 显示出广阔的应用前景。自上世纪 80 年代起, 许多学者开始致力于生物法烟气脱硫的研究与开发。

资助信息: 工业生态与环境工程教育部重点实验室开放课题 (KLIEEE-08-09)

2 直接法微生物烟气脱硫

2.1 原理

直接法生物烟气脱硫工艺的原理是: 使烟气中的 SO₂ 溶解于碱性溶液中并转化为亚硫酸盐、硫酸盐, 在厌氧和有碳源的环境中, 直接利用硫酸盐还原菌 (Sulfate Reduction Bacterial, SRB) 将硫酸盐、亚硫酸盐还原成硫化物。一般情况下, 产生的硫化物会进行近一步的处理, 有两种方法, 其一, 使用硫氧化细菌将其氧化为单质硫或硫酸根; 其二, 通过三价铁离子(Fe³⁺ 离子)还原硫化氢(H₂S)或使用化学-生物协同的方法进行间接还原, 即利用 Fe³⁺ 离子将 H₂S 还原, 再利用化能自养的氧化亚铁硫杆菌(*Thiobacillus ferrooxidans*)将二价铁离子(Fe²⁺ 离子)氧化成 Fe³⁺ 离子。

2.2 两步法处理 SO₂ 吸收液

2.2.1 直接处理硫化物的两步法

Cork 等人^[1]研究了一种利用 SRB 和光合作用的硫氧化菌将硫酸盐/硫化物转化为单质硫的脱硫工艺。该

工艺分为两步：第一步，在严格厌氧环境中利用以乙酸为碳源的 SRB(*Desulfovibrio postgateii*)将硫酸根转化为硫化氢(H_2S)；第二步， H_2S 被严格厌氧的光能自养菌泥生绿菌(*Cblorobium limicola*)转化为单质硫。

由于光能自养菌在工业应用上有一定的难度，故又有人提出在第二步的反应中，采用化能自养菌来将其替代。Badri 等^[3]在连续反应体系中，先用脱硫硫弧菌(*Desulfovibrio desulfuricans*) 将吸收液中的 SO_2 还原为 H_2S ，再用化能自养的脱氮硫杆菌(*Thiobacillus denitrificans*)将生成的 H_2S 氧化成硫酸盐，各阶段的还原或氧化转化率能达到 100%。Lee 等人^[4]也做出了类似的研究，*D. desulfuricans* 在与 SO_2 接触仅 1-2s 内，可将 SO_2 完全转化为 H_2S 。同时，他们发现 *D. desulfuricans* 能与异养型发酵细菌共同生长于同一反应器中，而葡萄糖可以作为唯一碳源，即通过合理的混合培养，使只利用多糖为碳源的 SRB 也可以利用单糖，这大大减少了微生物烟气脱硫的成本。在我国，邱广亮等人^[5]首次采用了磁性稳态流化床反应器，采用磁性多孔珠为载体，利用 SRB 和无色硫细菌处理吸收的 SO_2 和生成的 H_2S ，研究表明，该工艺中的厌氧硫酸盐还原磁性稳态流化床反应器可以在 9.6L/h 的高负荷下进行， SO_2 的去除率可达到 95%，单质硫的产量可达到 51.7g/d。刘立清等人^[6]利用硫酸盐还原菌和无色硫细菌进行 SO_2 吸收-亚硫酸盐还原-生物脱硫串联工艺研究，在将 H_2S 氧化成单质硫的同时，可以将吸收液再生。

这种两步法的思路已经部分应用到了工业中。荷兰 Paque 公司和 Hoogovens 能源和环境技术服务公司共同开发了 Biostar 工艺^[7]。在该工艺的过程中， SO_2 先被吸收并同氢氧化钠(NaOH)反应转化为亚硫酸盐，然后硫酸盐还原细菌将亚硫酸盐转化为 H_2S ，最后 H_2S 由硫醚杆状细菌转化为元素硫。该技术在荷兰一造纸厂的工业装置产硫量可达 0.2t/d。我国宜兴引进了该技术，首创将柠檬酸厂产生的高浓度有机废水作为碳源，设计脱硫率可达到 95%， SO_2 的处理能力为 24.5t/d，产硫量可达到 12.24t/d^[8]。美国爱达荷国家工程实验室也开发出了采用 SRB 处理烟气 SO_2 产生 H_2S ，再将 H_2S 转化为单质硫的工艺^[9]。

2.2.2 间接处理硫化物的两步法

Ebrahimi^[10]设计了一套可以同时去除 SO_2 和 H_2S 的新型工艺。采用碳酸氢钠($NaHCO_3$)吸收尾气中的 SO_2 ，利用 SRB 将吸收的 SO_2 还原为 H_2S ，这其中以

氢气(H_2)为能源，以二氧化碳(CO_2)做碳源而使 $NaHCO_3$ 再生，生成 H_2S 被硫酸铁($Fe_2(SO_4)_3$)氧化生成单质硫和 Fe^{2+} 离子， Fe^{2+} 离子被空气氧化而使 $Fe_2(SO_4)_3$ 再生。该工艺中不但将 SO_2 和 H_2S 的吸收液再生，还可以将生物反应器中的 H_2S 吹扫干净，比传统的工艺更为节能。

由于 *T. ferrooxidans* 的存在能大大提高 H_2S 的氧化速率，故在工业中，一般采用的是化学-生物的协同方法。日本 Dowa 矿业公司早在 1984 就建立了一套完整的工艺，统计发现该工艺的总成本只是烧碱工艺的 1/3，印度的国家环境研究所随后对该工艺进行了改良^[11]。

2.3 其他的研究

除了传统的两步法工艺，还有许多学者进行了其他方面的研究：1) 在两步法工艺的基础上，优化和改良工艺；2) 研究细菌的固定化，提高反应器的性能；3) 将其他的工业污染物与烟气脱硫体系结合起来，达到两种污染物同时处理的目的；4) 引进新工艺，拓展烟气脱硫的思路，探索生物法脱硫的新途径。

Philip^[12]采用好氧生物滴滤塔及一个后处理装置，来处理烟气中的 SO_2 。其中，生物滴滤塔能在 6s 内完全吸收并转化 300ppm-1000ppm 的 SO_2 ，而该工艺的后处理装置，是一个厌氧或微厌氧生物反应器，可将 SO_2 产生的硫酸根和亚硫酸根与其还原生成的 H_2S 在一个反应器中同时处理，而单质硫的生成率也可达到 80%。

时彦卫等人^[13]研究了硫酸盐还原菌生物滴滤塔-脱氮硫杆菌生物滤塔串联的烟道气脱硫性能。在该工艺中，节省了吸收装置，当 SO_2 的进口浓度达到 1800ppm 时，脱硫率在 99%以上。

Selvaraj 等人^[14]研究了混合的 SRB 在各种固定化细胞反应器中脱除 SO_2 的效率，发现采用 BIO-SEPTM 做载体固定 SRB 细胞的稳定性较高，在柱状反应器中，每克的固定化混合 SRB 每小时能还原 9.5mM 亚硫酸根。我国的王东红等人^[15]采取生物膜法，以陶粒作为菌种的载体，以生物滴滤塔作为生物反应器，进行了脱硫工艺的研究，在被吸收的 SO_2 浓度为 3000ppm 时，脱硫率可达 95%以上。

苏丹等人^[16]将烟气脱硫与垃圾渗滤液的氨氮吹脱相结合，利用垃圾渗滤液的高碱度吸收二氧化硫，同时，利用高温烟气吹脱垃圾渗滤液中的氨氮，而吸收

的 SO_2 先被 SRB 转化成硫化物,又被硫细菌转化成单质硫。结果表明, SO_2 的吸收率可达 90%, 垃圾渗滤液中的氨氮的浓度也有一定的下降。

Rao 等人^[17]利用药厂的有机废水作为混合培养的 SRB 碳源, 采用厌氧流化床反应器进行 SO_2 的处理。研究发现, 以该有机废水做碳源, 能抑制其他厌氧微生物, 当 COD/S 为 2.2 时, 整个工艺运行良好。

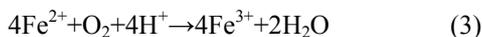
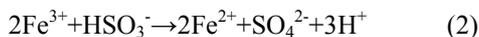
贾立山等人^[18]进行了微生物吸附 SO_2 的研究, 制备了微生物吸附剂, 测定了吸附剂吸附和再生性能, 并探讨了其吸附机理。结果表明, 氧气(O_2)对吸附剂的影响不大, 而温度和水汽则对吸附有一定的影响; 吸附剂的再生性良好, 可以连续使用; 并确立了等温吸附方程。

程为等人^[19]提出生物还原-化学沉淀的烟气脱硫思路, 碱液吸收 SO_2 , 吸收的亚硫酸根经 SRB 还原成硫化物, 硫化物与 FeCl_2 或 ZnCl_2 发生化学沉淀, 并对其进行了摇瓶试验, 发现该体系的去除率在 80% 以上。

3 间接法微生物烟气脱硫

3.1 原理

间接法微生物烟气脱硫工艺, 是根据利用 *T. ferrooxidans* 和 Fe^{3+} 离子的脱除硫化氢工艺演化而来的。人们在研究中发现, Fe^{3+} 离子能将四价硫氧化成硫酸根^[20]。故间接法微生物烟气脱硫工艺, 就是用 Fe^{3+} 离子将 SO_2 溶于水生成的亚硫酸根氧化, 再通过 *T. ferrooxidans* 将 Fe^{2+} 离子转化为 Fe^{3+} 离子。该过程是利用菌的间接氧化作用, 即利用微生物-铁离子共同催化氧化及吸收作用, 来脱除烟气中的 SO_2 。其脱硫原理如下:



3.2 间接法微生物烟气脱硫的研究现状

由于该方法使用的是好氧的化能自养型细菌, 可以在简单的无机盐中生长, 依靠氧化 Fe^{2+} 离子和亚硫酸根离子获取能量, 而不需要昂贵的碳源, 能适应烟气中的 O_2 、 CO_2 及高浓度的重金属离子和灰分。 SO_2 脱除后而生成的稀硫酸及盐, 可根据当地资源特点生产硫酸盐产品, 如硫酸亚铁、硫酸铁、聚合硫酸铁等^[10]。间接法工艺相对于直接法更为简单, 且运行成本

也较低, 国内许多学者对其进行了研究。

王永川等人^[21]报道了一种微生物与过渡金属催化相结合脱除电厂烟气中 SO_2 的实验方法。结果表明, 实验室条件下使用微生物方法脱除烟气中 SO_2 的效果能达到 80% 以上, 并摸索出了一些影响该方法脱硫效率的关键因素, 氧化铁的离子化浓度、pH 值及液气比等, 并对脱硫的机理也进行了一些探讨, 但是该方法的稳定性仍需进一步的研究。王安等人^[22]也做了类似研究, 并与传统的稀硫酸吸收法进行了对比。研究结果表明: 当液气比在 $12.5\text{L}/\text{Nm}^2$ 以上、 SO_2 的浓度为 $1000\text{-}5000\text{mg}/\text{m}^3$ 、 Fe^{3+} 离子浓度在 $0.6\text{g}/\text{L}$ 以上时, 该法的脱硫率能达到 98% 以上。在常温常压操作条件下, 微生物法的脱硫率远优于稀硫酸吸收法。

王小燕^[23]对 *T. ferrooxidans* 脱除 SO_2 工艺的条件进行了探讨。实验表明: 酸性水溶液中 Fe^{3+} 能催化氧化 SO_2 , 这种催化氧化效果随着 Fe^{3+} 浓度的升高、pH 值的增大而变得明显。当 pH 值为 2.0、 Fe^{3+} 为 $1.5\text{g}/\text{L}$ 时, 通气时间近 170min, 脱硫率高达 90%。而且, 在研究中发现, *T. ferrooxidans* 不仅具有氧化 Fe^{3+} 的能力, 还具有氧化四价硫的能力, 该能力在 Fe^{3+} 浓度 $1.5\text{g}/\text{L}$, pH 值 1.5 时效果最为明显。

童小双等人^[24]则证明了 *T. ferrooxidans* 间接催化氧化作用占主导, 并提出了协同催化氧化 SO_2 的产酸动力学方程。该课题组还提出一种利用软锰矿与微生物联合催化氧化烟气 SO_2 的工艺, 该工艺是由二氧化锰(MnO_2)、氧化铁(Fe_2O_3)固相吸附催化氧化 SO_2 体系协同反应产生的 Mn(II)、Fe(II)液相催化 SO_2 体系组成, 微生物将 Mn(II)和 Fe(II)重新氧化成 Mn(III/IV)和 Fe(III)^[25], 并对高液固比软锰矿浆与烟气 SO_2 产酸的动力学进行了初探^[26]。

武淑文等人^[27]采用的是海藻酸钠包埋法来固定微生物来净化 SO_2 烟气, 结果表明: 固定化后的微生物的稳定性较高, 在 SO_2 气体的入口浓度为 $5\text{g}/\text{m}^3$ 的条件下, 固定床反应器净化 SO_2 气体的净化效率可达 95%。孙珮石等人^[28]采用生物膜填料塔, 以陶粒为载体, 净化低浓度的 SO_2 废气, 王英刚等人^[29]也采用陶粒作为挂膜载体进行了脱硫生物膜滴滤塔固定化启动工艺特性研究。

4 结论及展望

4.1 结论

从国内外的研究成果看, 一般将微生物烟气脱硫

技术与湿法脱硫相结合。在当今的脱硫工艺中，直接法微生物烟气脱硫工艺是最早开发的，部分已经工业化。该工艺具有设备简单、费用低等优点。但同时，其只适用于低浓度 SO_2 的脱除，若负荷较大，则要求更长的停留时间，加大占地面积、提高成本；同时 SRB 对生长环境的要求也较为苛刻，SRB 的碳源也是成本增加的因素之一。

而以 *T. ferrooxidans* 和铁离子的复合体系为基础构建的间接法微生物脱硫工艺，正处于实验室研究阶段。该工艺虽然比直接法更为经济，但是该技术对于 pH 的要求而使工艺复杂化，同时反应体系中的低 pH 给设备防腐也带来了一定的难度，从而使该工艺尚未以及应用到工业中去。

目前，生物法脱硫工艺仍处于研究阶段，工业化程度不高。主要是受到微生物生长要求的限制，及高效脱硫工艺和设备的制约。

4.2 展望

尽管还存在许多问题，但生物法脱硫对环境的友好程度是其它脱硫工艺无可比拟的，今后进一步研究微生物烟气脱硫工艺，应侧重以下 2 个方面。

1 提高微生物的适应能力。采用混合培养的方式建立微生物的协同体系，降低微生物的对环境的要求，例如，采取混合培养的方式使 SRB 接受葡萄糖为碳源。或者深入优化固定微生物的载体，进一步增大其传质能力，并提高生物反应器负荷。

2 优化脱硫工艺方案。选择合适的生物反应器，加大传质，减少停留时间，进一步减小反应器体积；开发新型的反应器；精简工艺流程。

References (参考文献)

- [1] Wang Yinggang. Research Progress on Technology of Biological Desulfurization for Flue Gas[J], *Environmental Science*, 2009, 35(4), P22-25(Ch).
王英刚, 烟道气生物脱硫技术研究进展[J], *环境保护科学*, 2009, 35(4), P22-25.
- [2] Zeng Erli, Zeng Ri, Study and Application on Purification of SO_2 Waste Gas by Using Biological Method[J], *Jiangxi Chemical Engineering*, 2009, (4), P27-29(Ch).
曾二丽, 曾睿, 生物法净化含硫废气技术研究及应用进展[J], *江西化工*, 2009, (4), P27-29.
- [3] DASU Badri N. SUBLETTE Kerry L.. Microbial Removal of Sulfur Dioxide from a Gas Stream with Net Oxidation to Sulfate[J], *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 1989, 20, 207-220.
- [4] LEE Kuoh H. SUBLETTE Kerry L.. Simultaneous combined microbial removal of sulfur dioxide and nitric from a gas stream[J], *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 1991, 28, 623-634.
- [5] Qiu Guangliang, Sulfur Dioxide Removal From Industrial Gas By Microbial Method[D], Tianjin: PhD Thesis in Tianjin University, 2006.5(Ch).
邱广亮, 微生物法脱除工业烟气二氧化硫的研究[D], 天津: 天津大学博士学位论文, 2006.5.
- [6] Liu Liqing, Experimental research on FGD with alkali absorption-microbial reduction regeneration[D], Nanjing: Master Degree Thesis in Nanjing University of Science and Technology, 2008.6(Ch).
刘立清, 碱吸收-微生物还原再生烟气脱硫实验研究[D], 南京: 南京理工大学硕士学位论文, 2008.6.
- [7] Cao Congrong, He Jianming, Biological Flue Gas Desulfurization Technology in Netherlands[J], *China Environmental Protection Industry*, 2002, (5), P38-39(Ch).
曹从荣, 柯建明, 荷兰的烟气生物脱除工艺[J], *中国环保产业*, 2002, (5), P38-39.
- [8] Huang Haipeng, Situation and Development Prospect of the Biotech Flue Gas Desulfurization Technology[C], *Tenth Annual Meeting of China Association for Science, Zhengzhou*, 2008, P339-345(Ch).
黄海鹏, 烟气生物脱硫技术的现状与发展前景[C], 第十届中国科协年会, 郑州, 2008, P339-345.
- [9] Wang Yanjin, Zheng Zheng, Zhou Peiguo et al., Research on biological flue gas desulfurization technology[J], *Electric Power*, 2006, 39(6), P56-60(Ch).
王艳锦, 郑正, 周培国等, 生物法烟气脱硫技术研究进展[J], *中国电力*, 2006, 39(6), P56-60.
- [10] EBRAHIMI Sirous. Biotreatment of SO_2 and H_2S contaminated gas streams[D]. The Netherlands: Delft University of Technology, 2005.2.
- [11] PANDEY, R. A. BISWAS, R. CHAKRABARTI T. et al.. Flue Gas Desulfurization: Physicochemical and Biotechnological Approaches[J], *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2005, 35(6), 571-622.
- [12] PHILIP Ligy DESHUSSES Marc A.. Sulfur dioxide treatment from flue gases using a biotrickling filter-bioreactor system[J], *Environ. Sci. Technol.*, 2003, 37 (9), 1978-1982.
- [13] Shi Yanwei, Study on the flue gas desulphurization by microorganism[D], Tianjin: Master Degree Thesis in Tianjin University, 2006.5(Ch).
时彦卫, 生物法脱除工业废气中 SO_2 的研究[D], 天津: 天津大学硕士学位论文, 2006.6.
- [14] SELVARAJ Punjai T. LITTLE Mark H. KAUFMAN Eric N.. Biodesulphurization of flue gases and other sulfate/sulfite waste streams using immobilized mixed sulfate reducing bacteria[J], *Biotechnol. Prog.*, 1997, 13, 583-589.
- [15] Wang Donghong. Sulfur dioxide treatment from flue gases using a biotrickling filter[D], Nanjing: Master Degree Thesis in Nanjing University of Science and Technology, 2009.5(Ch).
王东红, 生物滴滤塔净化烟气中 SO_2 的研究[D], 南京: 南京理工大学硕士学位论文, 2009.5.
- [16] Su Dan, Su Shijun, Xia Sulan, et al., Experimental study on me system of flue gas wet desulfurization with landfill leachate[J], *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2003, 4(5), P9-11(Ch).
苏丹, 苏仕军, 夏素兰等, 垃圾渗滤液烟气脱硫体系的实验研究[J], *环境污染治理技术与设备*, 2003, 4(5), P9-11.
- [17] RAO Gangagni A., RAVICHANDRA P., JOSEPH Johny et al.. Microbial conversion of sulfur dioxide in flue gas to sulfide using bulk drug industry wastewater as an organic source by mixed cultures of sulfate reducing bacteria[J], *Journal of Hazardous Materials*. 2007, 147(3), 718-725.
- [18] JIA Lishan, SONG Hao, FANG Weipin, et al.. Removal of SO_2 at low temperature using dead *Bacillus licheniformis*[J], *Fuel*. 2010, 89(3), 672-676.
- [19] Cheng Wei, Xing Baoping, Huo Xiangming, et al., Removal of

- SO₂ by Combined Processes of Microbial Deoxidization and Chemical Precipitation, *Environmental Chemistry*, 2005, 24(5), P506-509(Ch).
程为, 辛宝平, 霍祥明等, 生物还原-化学沉淀去除烟气 SO₂ 中 Na₂SO₃ 和硫化物的研究[J], 环境化学, 2005, 24(5), P506-509.
- [20] BRANDT Christian, ELDIK Van R. Transition metal-catalyzed oxidation of sulfur(IV) oxides. Atmospheric-relevant processes and mechanisms. *Chem. Rev.* 1995. 95 (1) 119-190.
- [21] Wang Yongchuan, Chen Guangming, Li Jianxin, Experimental Research in FGD by Combining Microorganism Technology and Catalysis Technology of Transition Metal[J], *Power System Engineering*, 2004, 20(1), P41-43(Ch).
王永川, 陈光明, 李建新, 微生物与过渡金属催化相结合的烟气脱硫试验研究[J], 电站系统工程, 2004, 20 (1), P41-43.
- [22] Wang An, Zhang Yongkui, Chen Hua et al., Study on Micro-Organism Method of Flue Gas Desulfurization[J], *Chongqing Environmental Science*, 2001, 23(2), P37-39(Ch).
王安, 张永奎, 陈华等, 微生物法烟气脱硫技术研究[J], 重庆环境科学, 2001, 23 (2), P37-39.
- [23] Wang Xiaoyan, Technology of Biodesulfurization from Flue Gases[J], *Environmental Science*, 2003, 24(5), P44-48(Ch).
王小燕, 微生物脱硫工艺条件的研究[J], 环境科学, 2003, 24(5), P44-48.
- [24] Tong Xiaoshuang, Study on Catalytic Oxidation of SO₂ in Flue Gas by *Thiobacillus ferrooxidans*[D], Sichuan: Master Degree Thesis in Sichuan University, 2005.3(Ch).
童小双, 生物催化氧化烟气二氧化硫的研究[D], 四川: 四川大学硕士学位论文, 2005.3
- [25] Wei Wenyen, Wang Xiangdong, Daiwei, et al, Flue Gas Desulfuration by Catalysis and Oxidation of Pyrolusite and Bacteria[J], *Environmental Science*, 2007, 28(1), P48-52(Ch).
魏文韞, 王向东, 代伟等, 软锰矿微生物催化氧化烟气脱硫[J], 环境科学, 2007, 28(1), P48-52.
- [26] Liu Chengjun, Jiang Wenju, Tan Qinwen, et al, Primary study on the kinetics of SO₂ catalytic oxidation by pyrolusite slurry[J], *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2005, 6(5), P25-28(Ch).
刘成军, 蒋文举, 谭钦文等, 软锰矿浆催化氧化烟气 SO₂ 的动力学初探[J], 环境污染治理技术与设备, 2005, 6(5), P25-28.
- [27] Wu Shuwen, Huang Bing, Cao Guiping et al, Research on SO₂ Removal using Immobilized bacterial[J], *Guizhou Environmental Protection Science and Technology*, 2004, 10(2), P1-4(Ch).
武淑文, 黄兵, 曹桂萍等, 固定化微生物处理 SO₂ 气体的实验研究[J], 贵州环保科技, 2004, 10(2), P1-4.
- [28] Zeng Erli, Sui Peishi, Wang Jie, An approach to purifying SO₂ waste gas in low concentration[J], *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2006, 7 (10), P26-29(Ch).
曾二丽, 孙珮石, 王洁, 生物膜填料塔净化 SO₂ 废气的研究[J], 环境污染治理技术与设备, 2006, 7 (10), P26-29.
- [29] Wang Yinggang, Study on SO₂ Removal from Flue Gas by Bio-trickling[D], Shengyang: PhD Thesis in Northeastern University, 2005.12(Ch).
王英刚, 生物滴滤法脱除烟气中 SO₂ 的研究[D], 沈阳: 东北大学博士学位论文, 2005.12.