

## 微生物烟气脱硫中硫酸盐还原阶段的限制性因素及其影响

高凯 冯守帅 陈金才 计云鹤 杨海麟\*

(教育部工业微生物技术重点实验室 江南大学生物工程学院 江苏 无锡 214122)

**摘要:**【目的】利用硫酸盐还原菌(SRB)厌氧活性污泥进行烟气脱硫,探索硫酸盐生物还原的最适条件及重金属离子对硫酸盐生物还原的影响,以提高硫酸盐还原阶段的效率。【方法】对取自污水处理厂的SRB厌氧活性污泥进行高浓度硫酸盐胁迫驯化。分析生物脱硫过程中SRB厌氧污泥还原硫酸盐的限制性因素及影响。【结果】在最适生长条件下(pH 6.5, 32 °C),经驯化获得的SRB厌氧活性污泥有较强的硫酸盐还原能力。 $\text{Fe}^{2+}$ 的适量添加对硫酸盐还原有一定促进作用。SRB厌氧污泥还原硫酸盐的 $\text{ThCOD}/\text{SO}_4^{2-}$ 最适值为3.00,  $\text{ThCOD}=3.33$ 为最适理论化学需氧量,硫酸盐还原率可达72.15%。SRB厌氧污泥还原硫酸盐反应体系中抑制SRB活性的硫化物浓度为300 mg/L。 $\text{Pb}^{2+}$ 和 $\text{Ni}^{2+}$ 在较低的浓度下(1.0 mg/L和2.0 mg/L)对硫酸盐的还原产生较强的抑制作用,而 $\text{Cu}^{2+}$ 在稍高的浓度下(8.0 mg/L)显示出明显的抑制作用。【结论】经驯化,SRB厌氧活性污泥显示出较强的硫酸盐还原能力,具有应用于工业烟气生物脱硫的潜力。去除重金属离子 $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Ni}^{2+}$ 和 $\text{Cu}^{2+}$ 可有效解除对硫酸盐生物还原作用的抑制。

**关键词:** 硫酸盐还原菌, 生物烟气脱硫, 厌氧活性污泥, 重金属离子

## Restrictive factors and their effects on microbial sulfate-reducing phase during flue gas desulfurization

GAO Kai FENG Shou-Shuai CHEN Jin-Cai JI Yun-He YANG Hai-Lin\*

(The Key Laboratory of Industrial Biotechnology, Ministry of Education, School of Biotechnology, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

**Abstract:** [Objective] Sulfate reducing bacteria (SRB) anaerobic activated sludge was used in the process of flue gas desulfurization. This study aimed on the exploring optimal conditions for SRB to carry out sulfate bio-reduction, and analyze the impacts of heavy metal ions on sulfate bio-reduction. [Methods] The SRB anaerobic activated sludge obtained from an anaerobic sludge pool was domesticated under high sulfate concentration. The restrictive factors suppressing sulfate bio-reduction ability of SRB anaerobic sludge was investigated during the flue gas desulfurization. [Results] The domesticated SRB anaerobic activated sludge had a strong ability of sulfate reduction in a optimal culture condition (pH 6.5 and 32 °C). The function of sulfate reduction was obviously enhanced with additional  $\text{Fe}^{2+}$ . In the sulfate reduction process, the optimum value of  $\text{ThCOD}/\text{SO}_4^{2-}$  and ThCOD (theoretical chemical oxygen demand) were found of 3.00 and 3.33, respectively, and the

基金项目: 江苏省创新计划项目(No. CXZZ11\_0481); 江南大学博士研究生科学研究基金项目(No. JUDCF11013)

\*通讯作者: Tel: 86-510-85918119; 19891996@sina.com, bioprocessor@aliyun.com

收稿日期: 2013-12-19; 接受日期: 2014-02-20; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2014-02-26

sulfate reduction rate reached 72.15%. The activity of SRB was suppressed by 300 mg/L sulfide in the system of sulfate reduction. The heavy metal ions,  $\text{Ni}^{2+}$  and  $\text{Pb}^{2+}$ , showed strong inhibition on SRB sulfate reduction ability at the level of 1.0 mg/L and 2.0 mg/L, respectively, meanwhile,  $\text{Cu}^{2+}$  inhibition at rather higher concentration (8.0 mg/L). **[Conclusion]** After domestication, the SRB anaerobic activated sludge shows a strong sulfate reducing function under optimal conditions, and it would be of great industrial potential for flue gas bio-desulfurization. In addition, the heavy metal ions which have negative impacts must be removed to ensure the efficient sulfate bio-reduction.

**Keywords:** Sulfate reducing bacteria, Biological flue gas desulfurization, Anaerobic activated sludge, Heavy metal ions

近年来,我国出现雾霾天气越来越频繁,持续时间越来越长,严重影响人们生产生活和身体健康。空气中的灰尘、硫酸和硝酸等造成视觉障碍的叫霾。二氧化硫、氮氧化物和可吸入颗粒物这三项是雾霾主要成分。我国一直非常重视对  $\text{SO}_2$  排放的控制,“十一五”要求  $\text{SO}_2$  排放量比“十五”末减少 10%，“十二五”比“十一五”末减少 8%。然而,传统的烟气脱硫技术存在设备建设费用高、运行费用大和二次污染等<sup>[1]</sup>缺陷,微生物烟气脱硫越来越受到人们的重视。

微生物烟气脱硫技术充分利用了生物硫循环<sup>[2]</sup>机理,该技术一般与碱吸收  $\text{SO}_2$  技术相结合<sup>[3]</sup>,故此技术主要包含 3 个阶段:碱吸收阶段、硫酸盐还原阶段及硫化物氧化阶段。碱吸收阶段是使烟气中的  $\text{SO}_2$  通过吸收塔溶解于水并转化为亚硫酸盐和硫酸盐;硫酸盐还原阶段是在厌氧环境及外加碳源条件下,利用硫酸盐还原菌(Sulfate reducing bacteria, SRB)将亚硫酸盐、硫酸盐还原成硫化物<sup>[4]</sup>;然后再利用硫氧化光合细菌<sup>[5]</sup>或无色硫细菌<sup>[6]</sup>氧化硫化物为单质硫,从而达到将硫从系统中去除并回收单质硫的目的。

在硫酸盐还原阶段中,从不同环境中采样驯化得到的微生物对环境的适应能力存在差异。影响微生物群落变化及代谢产物组成的非生物因子主要有  $\text{COD}/\text{SO}_4^{2-}$ 、pH 值、温度、底物浓度及硫酸盐容积负荷与污泥负荷等。目前国内外对硫酸盐生物还原的研究主要集中在碳硫比( $\text{COD}/\text{SO}_4^{2-}$ )对硫酸盐还原率和 COD 去除率的影响<sup>[4,7-9]</sup>,但硫酸盐生物还原的影响因子较多,目前的研究不够系统全

面。本研究以高浓度硫酸盐胁迫驯化 SRB 厌氧活性污泥为接种污泥,比较系统地考察了烟气生物脱硫体系中各种限制性因素对硫酸盐还原的影响,对于烟气硫化物的脱除研究与应用具有一定的借鉴意义,为烟气生物脱硫技术的工业应用提供了基础。

此外,由于燃煤烟气成分比较复杂,不仅含有硫氧化物,还有一定数量的重金属物质等<sup>[10]</sup>。而化学脱硫副产物含有一定数量重金属污染元素<sup>[11]</sup>,碱吸收阶段肯定也有重金属离子随  $\text{SO}_2$  一同被碱液吸收,继而进入后续的微生物反应。目前对抑制 SRB 硫酸盐还原的重金属离子浓度的报道存在较大差异<sup>[12]</sup>,故这些重金属离子及其浓度对 SRB 硫酸盐还原反应的影响也是本研究重点关注的问题之一。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 菌种来源

样品来源于无锡某污水处理厂厌氧池污泥。

### 1.2 富集培养基

采用 Postgate C 型培养基(g/L)<sup>[13]</sup>:  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  0.50,  $\text{NH}_4\text{Cl}$  1.00,  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  0.06,  $\text{CaSO}_4$  1.00,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  4.50,  $\text{CaCl}_2 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  0.06, 柠檬酸钠 0.30, 乳酸钠 2.60, 酵母浸膏 1.00, pH 7.0。

### 1.3 SRB 污泥的富集、驯化

(1) 污泥预处理:将污泥样品自然沉降浓缩,去除杂质及表面悬浮物;剩余活性污泥经 250 目的筛子过滤,去除其颗粒物和杂质以备用。

(2) 污泥的厌氧培养驯化:将实验污泥加入驯

化培养基,培养基达到快要装满的状态,密封后将污泥瓶放入生化培养箱中 30 °C 恒温培养 6 d,重复 3 次,得到 SRB 菌种占优势的污泥。

(3) 污泥指标及还原性检测:取 SRB 培养基 200 mL 加入到 250 mL 三角瓶中,10%的接种量接种污泥,每天测定硫酸根的去除率及硫化物的生成量。

#### 1.4 检测方法

硫酸盐分析:采用铬酸钡分光光度法<sup>[14]</sup>。

硫化物分析:参照文献[15]中“H<sub>2</sub>S 的分析法”的碘量法进行。

## 2 结果与讨论

### 2.1 SRB 厌氧污泥硫酸盐还原能力检验

细菌对外界环境具有较强的适应能力,细菌的驯化即提供合适的外界环境使其产生或分解某种成分的能力得到增强,在驯化过程中,那些对环境不适应的细菌受到抑制或死亡,而某些适应能力较强的细菌会得到富集,演变成适应性更强的菌群,成为高效菌群。本研究以高浓度的硫酸盐胁迫驯化 SRB 厌氧污泥,得到高效硫酸盐还原菌群,可作为后续的工业用菌。

SRB 厌氧污泥硫酸盐还原能力检测的培养时间为 8 d。图 1 是驯化前后的 SRB 活性污泥硫酸盐还原能力对比,可见,高浓度硫酸盐驯化后的 SRB 厌氧污泥硫酸盐还原能力远远强于驯化前,驯化后的 SRB 不仅硫酸盐最大还原率超过驯化前的 2 倍,而且其达到最大还原率的时间也比驯化前提前了

1 d。图 1 和表 1 表明,驯化后的 SRB 厌氧污泥硫酸盐去除率和硫离子的生成量都是在第 5 天达到最大值,之后的 3 d 硫酸盐去除率稳定在 20%左右,而检测到硫化物的量在不断减少。硫化物的检测值(Measured values)低于观测值(Observed values),这是由于部分硫化物以 H<sub>2</sub>S 气体的形式溢出体系。SRB 的生长周期约为 5 d 左右,生长达到旺盛的时期为 2-5 d,这与相关报道<sup>[16]</sup>基本吻合。

### 2.2 SRB 厌氧污泥硫酸盐还原条件优化

2.2.1 最佳初始 pH 和温度优选: pH 对微生物活性的影响是氢离子与细胞膜中的酶相互作用的结果,其对细胞膜上酶活性的影响直接关系到微生物的生长代谢。适宜的 pH 环境是 SRB 还原转化硫酸盐所必需的, [H<sup>+</sup>] 的高低直接影响硫酸盐还原酶系的构象性质及生物学活性。

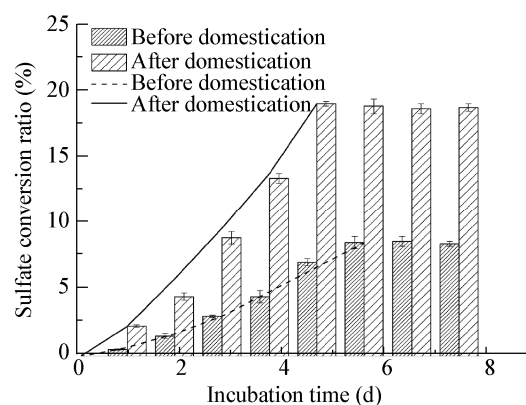


图 1 SRB 污泥驯化前后硫酸盐去除率随时间的变化  
Figure 1 Comparison of sulfate removal by SRB sludge with or without domesticated

表 1 硫酸盐生物还原过程中硫化物浓度变化时间表  
Table 1 Time table of sulfide concentration changes during bio-desulfurization

检测指标 Test index	时间 Time (d)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Initial SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)	3 780	3 780	3 780	3 780	3 780	3 780	3 780	3 780
Final SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)	3 685	3 595	3 413	3 228	2 998	3 005	3 013	3 009
S <sup>2-</sup> <sub>O</sub> (mg/L)	32	62	122	184	261	255	256	257
S <sup>2-</sup> <sub>M</sub> (mg/L)	32	60	115	170	238	225	210	196
S <sup>2-</sup> <sub>O</sub> /S <sup>2-</sup> <sub>M</sub>	1.00	1.03	1.06	1.08	1.10	1.13	1.22	1.31

Note: S<sup>2-</sup><sub>O</sub>: Observed values of sulfide; S<sup>2-</sup><sub>M</sub>: Measured values of sulfide.

针对 SRB 的生长特性及后续反应器设计制作和操作的要求, 选取偏中性的不同 pH 条件来确定最适的硫酸盐还原 pH 值, 试验结果如图 2 所示, pH 6.5 时硫酸盐的转化率高其他 pH 值, 其硫酸盐转化率为 24.10%。pH 6.5 向碱性和酸性偏移时, 其硫酸盐转化率呈递减的趋势。而在 pH 6.0–7.0 条件下, 硫酸盐转化率基本保持在 20%以上, 说明 SRB 还原硫酸盐的最适 pH 为微偏酸性。这与万海清等<sup>[8]</sup>认为 pH 6.0–6.5 是 SRB 生长的最适宜 pH 的结果基本一致。

温度直接决定 SRB 的生长速度与代谢活动, 温度太低或太高均会抑制 SRB 的生长代谢活动。SRB 通常分为中温 SRB 和嗜热 SRB, 最适宜生长温度分别为 28–38 °C 和 54–70 °C。本研究选取 5 个温度梯度研究了 28–44 °C 条件下的硫酸盐还原情况, 试验结果如图 3 所示, 可证明本研究所用 SRB 属于中温菌, 其适宜生长的温度为 28–40 °C, 最适宜温度为 32 °C, 其硫酸盐的去除率达到了 26.85%。在最适 pH 和温度条件下, SRB 厌氧污泥对硫酸盐的还原效率比驯化条件下提高了 6%以上。

**2.2.2 确定最大硫酸盐还原效率的 Fe<sup>2+</sup>添加量:** 关于 Fe<sup>2+</sup>对 SRB 的影响, 李华等<sup>[10]</sup>认为其存在可以提高 SRB 的硫酸盐还原效率, Alphenaar 等<sup>[17]</sup>认为, SRB 对铁的需求较大, FeS 的沉淀将使铁减

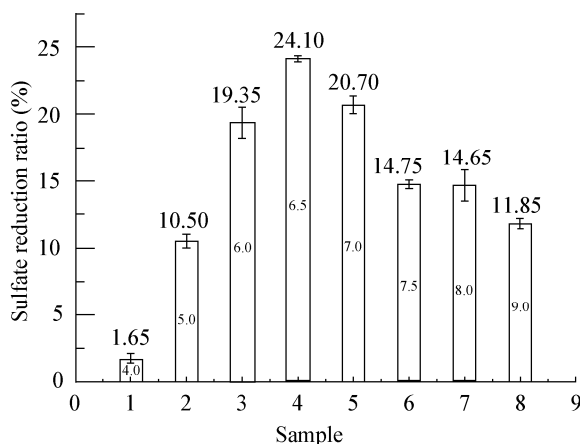


图 2 初始 pH 对硫酸盐还原的影响  
Figure 2 Effects of initial pH on sulfate reduction

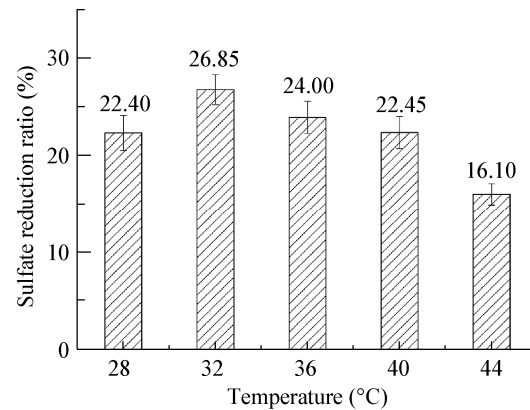


图 3 温度对硫酸盐还原的影响  
Figure 3 Effects of temperature on sulfate reduction

少, 从而抑制 SRB 的生长, 但 Isa<sup>[18]</sup>采用厌氧滤器进行试验时未发现铁对 SRB 产生任何影响。

本研究以不同的 Fe<sup>2+</sup>浓度来确定其是否对 SRB 的硫酸盐还原有催化作用及达到最大催化作用的 Fe<sup>2+</sup>浓度, 结果如图 4 所示, 在实验浓度范围内, Fe<sup>2+</sup>的添加对硫酸盐还原都有一定的促进作用, 硫酸盐去除率在亚铁离子浓度为 2 mg/L 时达到最大值, 其去除率为 31.51%, 比不添加 Fe<sup>2+</sup>的对照组硫酸盐转化率提高了 4.5%以上。添加 Fe<sup>2+</sup>促进 SRB 硫酸盐还原的原因主要有以下两点: (1) Fe<sup>2+</sup>是微生物细胞中各种酶(如细胞色素 C、铁还原酶、红素还原酶、过氧化氢酶等)的活性基成分, 溶液含有适当浓度的 Fe<sup>2+</sup>可以促进 SRB 的生长; (2) 由于溶液中含有铁离子, 可与硫酸盐还原产生的 S<sup>2-</sup>结合生 FeS 沉淀, 降低了 H<sub>2</sub>S 对 SRB 的抑制作用, 从而使更多的硫酸盐被还原。

**2.2.3 初始硫酸盐浓度对硫酸盐还原的影响:** SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>质量浓度直接影响基质与微生物之间的平衡关系, 初始 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>质量浓度对硫酸盐还原的影响见图 5, 可以看出, 硫酸盐去除率随硫酸盐初始浓度的升高而降低, 但其硫酸盐的去除量比较稳定, 基本都是在 1 000 mg/L 左右, 这说明在硫酸盐浓度高于 1 000 mg/L 时, 硫酸盐是过量的。形成以上结果的原因主要有两个方面: 一是碳源一定的条件下, 硫酸盐的量超过 SRB 利用已有碳源所能还原

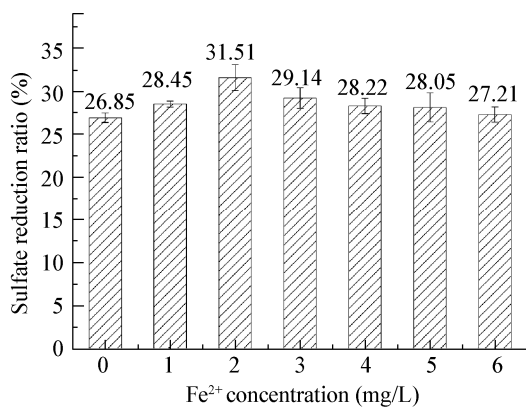
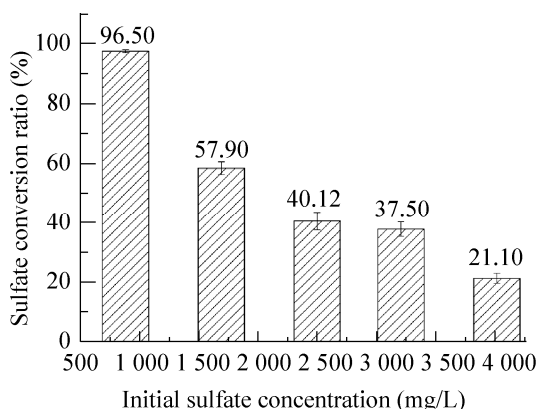
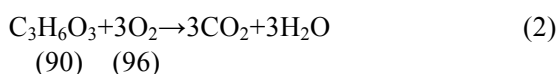
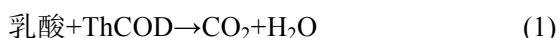
图4 Fe<sup>2+</sup>浓度对硫酸盐还原的影响Figure 4 Effects of Fe<sup>2+</sup> concentration on sulfate reduction

图5 初始硫酸盐浓度对硫酸盐还原的影响

Figure 5 Effects of initial sulfate concentration on sulfate reduction

的最大值;二是硫酸盐还原生成的H<sub>2</sub>S对SRB有抑制毒害作用<sup>[13,19]</sup>。是否上述两个因素都对结果存在影响,仍需进一步试验验证(2.2.4)。

**2.2.4 碳硫比及最适碳硫比条件下碳源的变化对硫酸盐还原的影响:**用来衡量底物中有机碳浓度的理论化学需氧量(ThCOD)定义为氧化相同量的有机碳(mg/L)所需氧含量(mg/L)。通过下列方程式来计算ThCOD<sup>[20]</sup>:



因此,通过式(2),ThCOD=(96/90)=1.07[乳酸]。

为了确保ThCOD的准确性,培养基中不再添加柠檬酸和酵母浸膏,ThCOD仅由乳酸钠提供。按照R=0.75、1.50、2.00、2.25、3.00、3.75和4.40 (R=ThCOD/SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)配制培养液,测定SRB还原硫酸盐的能力,结果如图6A所示,在最佳硫酸盐还原培养条件下,硫酸盐还原率随R值的升高而升高。当R值大于3时,硫酸盐转化率都超过了72%,在R=4.4时达到最大值95.75%,但此时硫酸盐的去除量不足720 mg/L。而在R=3.00和R=3.75时,其硫酸盐转化率都在74%左右,且在R=3.00时,其硫酸盐去除量超过830 mg/L,高于R=3.75时的678 mg/L,因此确定R=3.00是最适碳硫比。按照R=ThCOD/SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>=3.00,改变ThCOD,相应改变SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>质量浓度,各成分见表2。

按表2配制培养液,接种SRB厌氧污泥,培养后测定SRB还原硫酸盐的能力,结果如图6B所示,在最适碳硫比条件下,硫酸盐还原率随ThCOD的升高而降低。当ThCOD值小于3.33时,硫酸盐转化率都超过了72%,在ThCOD=0.84时达到最大值85.15%,但此时硫酸盐的去除量不足240 mg/L。而在ThCOD为1.68和R=3.33时,其硫酸盐转化率都在74%左右,且在ThCOD=3.33时,其硫酸盐去除量超过830 mg/L,高于R=3.75时的434 mg/L,故认为ThCOD=3.33是最适碳硫比条件下的最适理论化学需氧量(ThCOD)。

在最适碳硫比及最适ThCOD条件下,硫酸盐的去除量仅为830 mg/L左右,低于2.2.3中提到的1000 mg/L左右的去除量,说明酵母浸膏内的某些活性因子有助于硫酸盐生物还原反应的进行。由于调整碳源添加量并未使硫酸盐还原量超过1000 mg/L,因此上述(2.2.3)硫酸盐过量的主要原因是生成的硫化物对SRB的硫酸盐还原有抑制作用而非碳源不足,造成抑制的硫化物浓度为300 mg/L。硫化物对硫酸盐还原抑制作用的机制目前尚未确定,一种观点认为未解离的H<sub>2</sub>S渗入细胞破坏胞内蛋白使细胞失活<sup>[13]</sup>,另一种观点认为

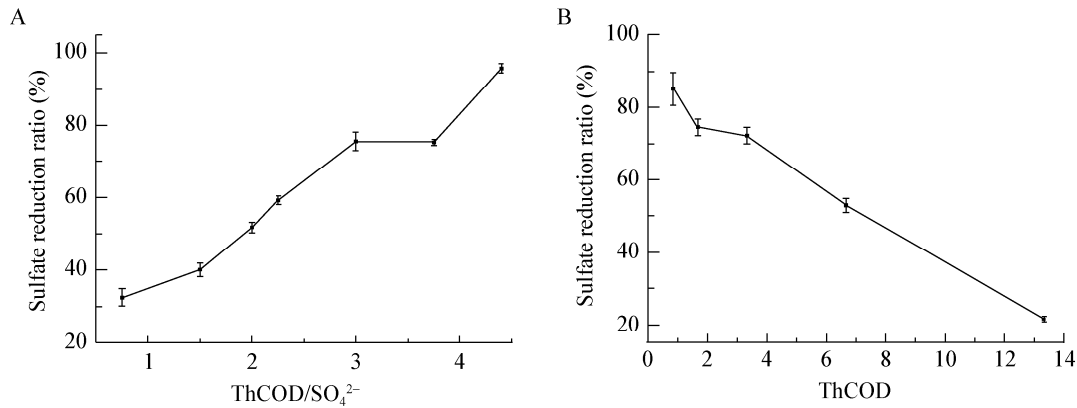


图 6 碳源的变化对硫酸盐还原的影响

Figure 6 Effects of carbon source concentration on sulfate reduction

注: A: 碳硫比对硫酸盐还原的影响; B: 最适碳硫比条件下碳源变化对硫酸盐还原的影响。

Note: A: Effects of carbon-sulfur ratio on sulfate reduction; B: Effects of carbon source concentration under the optimum carbon-sulfur ratio on sulfate reduction.

表 2 不同底物浓度对 ThCOD 数值的影响  
Table 2 The relations between concentration of lactate and ThCOD

ThCOD (lactic acid) (g/L)	0.84	1.68	3.33	6.66	13.32
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0.28	0.56	1.11	2.22	4.44
Sodium lactate	0.97	1.93	3.87	7.74	15.48
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0.00	0.41	1.23	2.87	6.15
MgSO <sub>4</sub>	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
FeSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
CaCl <sub>2</sub>	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
NH <sub>4</sub> Cl	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

H<sub>2</sub>S 与金属反应生成金属硫化物沉淀, 使 SRB 胞内酶因失去重要的微量元素而不能被激活<sup>[19]</sup>。因此在 SRB 的培养及硫酸盐还原过程中, 为了减少硫化物对 SRB 生长的抑制, 应定时用 N<sub>2</sub> 驱出溶液中的 H<sub>2</sub>S, 或添加相应物质让 H<sub>2</sub>S 转变为硫化物沉淀, 缓解 H<sub>2</sub>S 的抑制作用。

### 2.3 SRB 厌氧污泥还原硫酸盐的金属离子耐受性

煤炭中含有多种重金属元素, 如 Pb、Cu、Zn、Ni、Hg、As、Se、Cd、Cr 等, 这些元素在燃烧中生成了多种不同的化合物, 一部分随烟气进入吸收塔, 溶解于吸收液中, 并不断在吸收液的循环过程

中积累, 从而对 SRB 的硫酸盐还原能力产生影响。本研究选取常见几种重金属离子讨论其对硫酸盐还原的影响。

在培养液中添加相应浓度的重金属离子, 接种 SRB 厌氧污泥, 培养后测定 SRB 还原硫酸盐的能力, 结果如表 3 所示, 在试验浓度内, Zn<sup>2+</sup>对硫酸盐还原没有抑制作用, 反而有一定程度的促进作用; 低浓度的 Cu<sup>2+</sup>对硫酸盐还原几乎无影响, 而当其浓度达到 8.0 mg/L, 有相当程度的抑制作用; Ni<sup>2+</sup>和 Pb<sup>2+</sup>在浓度较低的情况下(1.0 mg/L 和 2.0 mg/L)即对硫酸盐生物还原产生较强的抑制作用。综上所述, 有些重金属离子即使是少量的存在

表3 不同重金属离子及浓度对硫酸盐还原的影响  
Table 3 Effects of different heavy metal ions and the concentrations on sulfate reduction

重金属离子 Heavy metal ions (mg/L)		SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 浓度	
		SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> concentration (mg/L)	
		Initial SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Final SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
Cu <sup>2+</sup>	0	1 117.0	317.2
	2	1 213.5	308.3
	4	1 213.5	298.7
	6	1 213.5	323.3
	8	1 213.5	586.4
Zn <sup>2+</sup>	0	1 117.0	317.2
	3	1 017.5	227.1
	6	1 017.5	275.6
	9	1 017.5	260.9
Ni <sup>2+</sup>	12	1 017.5	253.7
	0	1 117.0	317.2
	1	1 115.2	725.1
	2	1 115.2	745.3
	3	1 115.2	731.6
Pb <sup>2+</sup>	4	1 115.2	784.3
	0	1 117.0	317.2
	2	1 127.5	767.8
	4	1 127.5	823.3
	6	1 127.5	797.4
	8	1 127.5	784.6

也会对 SRB 硫酸盐产生强烈的抑制,而且,Utgikar 等<sup>[21]</sup>还证实不溶的金属化合物也可以通过沉积在细胞表面从而阻塞基质和其他营养物质的通道而影响 SRB 的活性。因此,利用 SRB 去除燃煤烟气碱吸收液中的 SO<sub>2</sub>,采取针对性去除重金属离子的方法,可以提高硫酸盐还原效率,对烟气生物脱硫过程的工艺提升具有一定的指导意义。

### 3 结论

(1) 经高浓度硫酸盐胁迫驯化后的 SRB 厌氧污泥用于硫酸盐还原,5 d 之后,浓度为 3 780 mg/L 的高浓度硫酸盐还原率为 20%左右。硫酸盐还原条件优化后,SRB 厌氧污泥对上述高浓度硫酸盐的还原率提高了 10%以上。

(2) 经测试,SRB 厌氧污泥还原硫酸盐的

ThCOD/SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>最适值为 3.00,在此条件下,得出 ThCOD=3.33 为最适理论化学需氧量,基于此硫酸盐还原率达到 72.15%。SRB 厌氧污泥还原硫酸盐反应体系中 SRB 活性受抑的硫化物浓度为 300 mg/L。

(3) Zn<sup>2+</sup>的存在对硫酸盐还原没有抑制作用,反而有一定程度的促进作用;Pb<sup>2+</sup>和 Ni<sup>2+</sup>在较低的浓度下(1.0 mg/L 和 2.0 mg/L)对硫酸盐的还原产生较强的抑制作用,而 Cu<sup>2+</sup>在稍高的浓度下(8.0 mg/L)显示出明显的抑制作用。在前处理过程中采取针对性去除重金属离子的方法,可解除对硫酸盐生物还原的抑制,本研究对烟气生物脱硫过程的工艺提升具有一定的指导意义。

### 参考文献

- [1] 金小达,刘广兵. 烟气生物脱硫技术的特点[J]. 环境科技, 2010, 23(2): 31-34.
- [2] Kimberley T, Vikrama B, Mehdi N. Bacteria of the sulphur cycle: An overview of microbiology, biokinetics and their role in petroleum and mining industries[J]. Biochemical Engineering Journal, 2009, 44(1): 73-94.
- [3] 张建斌,马凯,李强,等. 湿法烟气脱硫技术[J]. 精细石油化工, 2007, 24(2): 64-68.
- [4] Lopes SIC, Capela MI, Lens PNL. Sulfate reduction during the acidification of sucrose at pH 5 under thermophilic (55 °C) conditions. II: Effect of sulfide and COD/SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> ratio[J]. Bioresource Technology, 2010, 101(12): 4278-4284.
- [5] Janssen AJH, Lettinga G, de Keizer A. Removal of hydrogen sulphide from wastewater and waste gases by biological conversion to elemental sulphur: colloidal and interfacial aspects of biologically produced sulphur particles[J]. Colloids and Surfaces A-Physicochemical and Engineering Aspects, 1999, 151(1): 389-397.
- [6] Buisman CJN, Geraats BS, Ijspeer P, et al. Optimization of sulfur production in a sulfide-removal reactor[J]. Biotechnology and Bioengineering, 1990, 35(1): 50-56.
- [7] 唐红玲,严群,邹华,等. 硫酸盐生物还原的限制性生态因子的影响研究[J]. 四川环境, 2008, 27(2): 32-42.
- [8] 万海清,苏仕军,朱家骅,等. 硫酸盐还原菌的生长影响因子及脱硫性能的研究[J]. 高校化学工程学报, 2004, 18(2): 218-222.
- [9] Selvaraj PT, Sublette KL. Microbial reduction of sulfur dioxide with anaerobically digested municipal sewage biosolids as electron donors[J]. Biotechnology Progress, 1995, 11(2): 153-158.

- [10] 李华, 李新. 金属矿物对微生物烟气脱硫的影响研究[J]. 化工矿物与加工, 2007, 4: 27-29.
- [11] 徐胜光, 蓝佩玲, 廖新荣, 等. 燃煤烟气脱硫副产物的重金属环境行为[J]. 生态环境, 2005, 14(1): 38-42.
- [12] Utgikar VP, Tabak HH, Haines JR, et al. Quantification of toxic inhibitory impact of copper and zinc on mixed cultures of sulfate-reducing bacteria[J]. Biotechnology and Bioengineering, 2003, 82(3): 306-312.
- [13] Postgate JR. Sulfate-reducing bacteria[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1984.
- [14] [日]土壤微生物研究会编. 土壤微生物实验法[M]. 北京: 科学出版社, 1983.
- [15] Pagella C, Silvestri P, Defaveri DM. Hydrogen sulfide removal with a biochemical process: the biological step[J]. Chemical and Biochemical Engineering Quarterly, 1996, 10: 165-174.
- [16] 愈敦义, 彭芳明, 刘小武, 等. 环境对硫酸盐还原菌生长的影响[J]. 材料保护, 1996, 29(2): 1-3.
- [17] Alphenaar P, Visser A, Lettinga G. Effect of liquid upward velocity and hydraulic retention time on granulation in UASB reactors treating wastewater with a high sulphate content[J]. Bioresource Technology, 1993, 43(3): 249-258.
- [18] Isa Z. Sulfate reduction relative to methane production in high-rate anaerobic digestion[J]. Appliance Environmental Microbiology, 1986, 51(3): 572-582.
- [19] Nagpal S, Chuichulcherm S, Livingston A, et al. Ethanol utilization by sulfate-reducing bacteria: an experimental and modeling study[J]. Biotechnology and Bioengineering, 2000, 70(5): 533-543.
- [20] 缪应祺. 废水生物脱硫机理及技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 31-40.
- [21] Utgikar VP, Chen BY, Chaudhary N, et al. Acute toxicity of heavy metals to acetate-utilizing mixed cultures of sulfate-reducing bacteria: EC100 and EC50[J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2001, 20(12): 2662-2669.

## 科技信息摘录

### Science: 家庭微生物组计划最新成果公布

美国能源部 Argonne 国家实验室和芝加哥大学的科学家们, 通过家庭微生物组计划(Home Microbiome Project), 对家庭成员和居住环境中的微生物群体进行了详细的分析。该计划的最新成果发表在 Science 杂志上。

这项研究揭示了人类和微生物之间的复杂相互作用, 进一步展现了微生物群体对人体健康、疾病治疗和传播的重要影响。

研究人员对 7 个家庭进行了持续 6 周的跟踪研究, 包括 18 名人类成员, 3 只狗和 1 只猫。参与者每天用拭子提供手、脚、鼻子以及住所表面的微生物样本(包括门把手、灯开关、地板和工作台面)。随后研究人员在 Argonne 检测了这些样本的 DNA, 并通过用云计算系统进行数据分析, 鉴定其中的微生物种属。

研究人员发现, 人类对住所内的微生物群体影响很大。当 3 个家庭搬家的时候, 不到一天新房子里的微生物群体就和旧房子差不多了。人与人之间的身体接触也很重要, 例如, 已婚夫妇与他们的幼子共享最多的微生物群体。研究显示, 在同一个家庭中, 手部微生物是相似性最高的, 而鼻子的微生物群体差异较大。此外, 宠物的加入也会改变微生物群体的组成。养狗或者养猫的家庭中, 存在更多的植物和土壤菌。

研究人员还对一种潜在的致病菌(*Enterobacter*)进行了研究。这种细菌最初出现在一个家庭成员的手上, 然后出现在厨房台面上, 之后又出现在另一个人的手上。这说明, 家里的工作台面是人与人之间传递微生物的一个重要媒介。“我们看到, 人们在日常生活中就会接触到有害细菌, 不过只有当我们的免疫系统被破坏时, 它们才能引发疾病。”Gilbert 说。

Gilbert 指出, 家庭微生物组研究甚至能够成为一种司法鉴定的工具。在这项研究中, 研究人员能够根据地板微生物样本, 轻松判断出它来自哪一个家庭。研究显示, 当一个人离开住所之后, 家里的微生物群体在一天左右就会发生显著的变化, 几天之内他对家庭微生物组的贡献就会消失。

——摘自《中国生物技术信息网》2014-09-02  
<http://www.biotech.org.cn/information/123019>