

# 生物脱硫机理及其研究进展

## Mechanism of Biological Desulfurization and Its Progress

邓良伟 唐 一 (农业部沼气科学研究所, 成都 610041)

Deng Liangwei Tang Yi (Biogas Research Institute of Ministry of Agriculture, Chengdu 610041)

吴 彦 (中国科学院成都生物研究所, 成都 610041)

Wu Yan (Chengdu Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041)

**摘要** 生物脱硫是80年代发展起来的常规脱硫替代新工艺,通过微生物菌群的作用,可将硫化物转化成单质硫并回收。在生物脱硫过程中,氧化态的含硫污染物必须先经生物还原作用生成硫化物或 $H_2S$ ,然后再经生物氧化过程生成单质硫,才能去除。该文着重介绍了光合细菌和无色硫细菌的脱硫机理及其影响因素。光合细菌脱硫,由于条件苛刻,研究进展不大,仍处于分批试验或实验室小试阶段;无色硫细菌脱硫,近年来很活跃,并取得一些进展,已进行了中试和生产性试验,效果很好。与传统的物理化学脱硫法相比,生物脱硫具有许多优点。

**关键词:** 生物脱硫 硫化物 微生物作用 光合细菌 无色硫细菌 机理 进展

**Abstract** Biological desulfurization was developed in 1980's, considered as an alternative to physicochemical methods, in which sulfide was converted into elemental sulfur by microorganism community, moreover elemental sulfur could be recovered. In the biotechnological desulfurization process, first of all, the pollutant containing sulfur of oxidation state was changed into sulfide or  $H_2S$  as a result of biological reduction, then could be removed after being converted into elemental sulfur by biological oxidation. This paper introduced emphatically the mechanism of desulfurization by using photosynthetic bacteria and colourless sulfur bacteria and the influencing factors. Being the harsh condition, desulfurization using photosynthetic bacteria did not make great progress, only in a batch experiment or small-scale test stage. The study of desulfurization using colourless sulfur bacteria was very active in recent years, for which some progresses were made, and a medium-scale test and full-scale test have been carried out, and achieved good result. By comparison with traditional physicochemical methods, the biological desulfurization offered many advantages.

**Key words:** Biological desulfurization Sulfide Microorganism action Photosynthetic bacteria

Colourless sulfur bacteria Mechanism Progress

## 1 引言

硫对环境的影响主要表现为:大气中的 $SO_2$ 、 $H_2S$ ,废水中的硫酸盐与硫化物等所带来的污染。电力、石油炼制、有色金属冶炼、硫酸制备、化纤生产及炼焦、轻工、食品发酵、制药工业等的迅速发展,带来了大量的气态硫污染物或富含硫酸盐、硫化物的废水。硫污染的危害主要有:严重影响生态环境,危害人体健康;对金属、建筑材料和艺术品的强烈腐蚀作用;在废水好氧处理过程中,硫化物或硫酸盐过高,会促使丝状硫细菌大量繁殖,引起污泥膨胀;在厌氧生物处理过程中,硫酸盐通过对产甲烷菌初级抑制和次级抑制,严重影响废水厌氧处理的效率,甚至使厌氧发酵完全失败。传统的

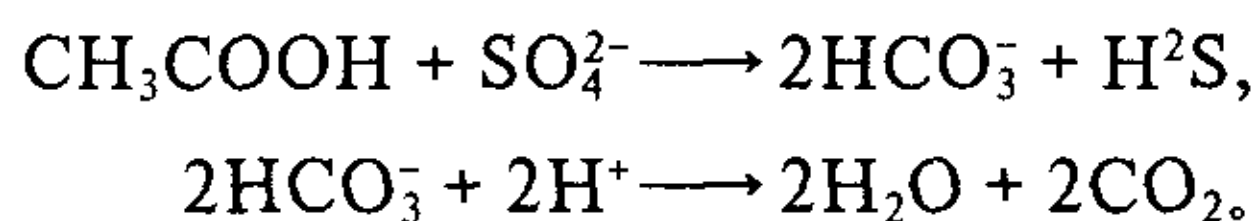
物理化学脱硫法,由于能耗高、处理费用昂贵,污泥处置困难,促使人们寻找低能耗、高效率、经济而先进的处理方法,生物脱硫则为这一领域的研究、应用,展示了新的方向。

## 2 硫酸盐还原菌的作用

在生物脱硫过程中,氧化态的污染物如 $SO_2$ 、硫酸盐、亚硫酸盐及硫代硫酸盐,必须先经生物还原作用生成硫化物或 $H_2S$ ,然后再经生物氧化过程生成单质硫,才能去除。参与这类硫污染物还原的微生物是硫酸盐还原菌(SBR),还原过程的实质是以硫酸盐作为有机物氧化

第一作者邓良伟,男,1966年生,1996年南京大学硕士研究生毕业,助研。

时的受氢体。脱硫弧菌(*Desulfovibrio desulfuricans*),是具有强烈硫还原作用的典型的代表,能将硫酸盐还原成 $H_2S$ <sup>[11]</sup>:

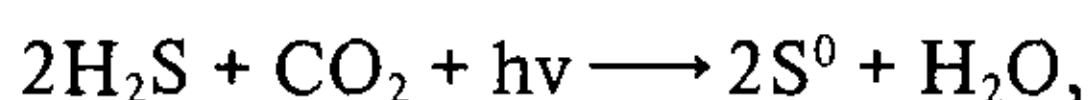


### 3 光合细菌脱硫

#### 3.1 机理

光合细菌在自然界硫的转化过程中起着重要的作用,是自然界中单质硫沉积的主要作用者。光合细菌的种类繁多,但只有紫色硫细菌(*Chromatiaceae*)和绿色硫细菌(*Chlorobiaceae*)的一些种,能代谢硫化物<sup>[2,3]</sup>,紫色无硫细菌(*Rhodospirillaceae*)只有极少数,能忍受并利用较高浓度的硫化物。

在厌氧光照条件下,光合细菌以 $H_2S$ 为供氢体,还原 $CO_2$ 合成菌体细胞,而 $H_2S$ 被氧化成 $S^0$ 或进一步氧化成硫酸。光合细菌的脱硫反应可表示如下<sup>[4,5]</sup>:



在绿色硫和紫色硫科的细菌中,硫化物首先氧化成 $S^0$ ,其氧化反应 $S^{2-} \longrightarrow S^0$ ,是非酶反应,极易进行。紫色硫细菌在进行 $H_2S \longrightarrow S^0$ 反应的同时,也进行 $S^0 \longrightarrow SO_4^{2-}$ 的反应,但后者反应很慢,在反应过程中生成的硫粒蓄积在细胞内,而绿色硫细菌在 $H_2S$ 存在的情况下,只能进行 $H_2S \longrightarrow S^0$ 反应,生成的硫粒附着在细胞外<sup>[6,7]</sup>。

#### 3.2 影响因素

自Cork<sup>[8]</sup>提出用光合细菌脱硫作为替代传统脱硫的方法以来,许多研究者进行了这方面的研究。如, Khanna等<sup>[9]</sup>研究了用光合细菌和硫酸盐还原菌处理硫代硫酸盐废水,使硫代硫酸盐转化成单质硫和硫酸,形成的硫酸经硫酸盐还原菌的作用,还原成硫化物,硫化物再被光合细菌转化成单质硫,可以回收大约70%的单质硫。从有关文献看,研究主要集中在光强度、 $H_2S$ 负荷或浓度、反应器和光波长等,对光合细菌脱硫的影响。

##### 3.2.1 光照

光照是影响光合细菌脱硫的关键因素。光照不足, $H_2S$ 的转化效率下降,光照过量,发生 $S^0 \longrightarrow H_2SO_4$ 反应,单质硫的产量降低,硫酸积累。Rahul<sup>[10]</sup>等的研究表明,光强度高, $H_2S$ 去除率高,在27min相同停留时间(GRT),2个150W的光源, $H_2S$ 转化率为99.5%;2个100W的光源, $H_2S$ 转化率为95.5%。Cork<sup>[11]</sup>等的研究表明,在相同 $H_2S$ 流速条件下,2000W/m<sup>2</sup>的光照,生

成18.0%的 $S^0$ 、51.5%  $SO_4^{2-}$ 、25.3%  $S_2O_3^{2-}$ ;145.8W/m<sup>2</sup>的光照,生成79.1%的 $S^0$ 、2.9%  $SO_4^{2-}$ 、19.9%  $S_2O_3^{2-}$ 。Kim<sup>[12]</sup>等研究了光合细菌在批式反应器中脱硫生长动力学,结果表明,超过饱和光强度,光合细菌的增长率随光强增加而指数下降。在 $H_2S$ 浓度为5mmol/L,光抑制强度为40000lx,绿硫细菌在红外光区的764nm、840nm处有最大吸收峰。在光能50~8000W/m<sup>2</sup>, $H_2S$ 流速1~2mmol/L·h时,绿硫细菌对可见光和红外光的需求与菌体增长率及硫化物形成的关系: $H_2S$ 流速相同情况下, $H_2S$ 转化成 $S^0$ 需要的光能,可见光比红外光多,预示红外光对绿硫细菌生长以及转化 $H_2S$ 为 $S^0$ 更有效<sup>[13,14]</sup>。

##### 3.2.2 硫化物浓度及负荷

硫化物负荷或浓度,是影响光合细菌脱硫的又一重要因素。高的硫化物负荷有利于单质 $S^0$ 的形成,抑制 $SO_4^{2-}$ 的产生,但是高浓度的硫化物对光合细菌有抑制作用。Cork等<sup>[15]</sup>研究废气脱硫结果显示, $H_2S$ 的流速与 $H_2S$ 转化成 $SO_4^{2-}$ 的百分率呈反相关,可用提高 $H_2S$ 流速及增大浓度,来抑制硫酸盐的产生。 $H_2S$ 流速2.5mmol/L时达到临界点,大于此流速时,硫酸盐生成率为零。Kim等<sup>[12]</sup>的实验表明,硫底物抑制发生在硫化物浓度5.7mmol/L。

##### 3.2.3 反应器

小林正泰等<sup>[16]</sup>用填充柱生物膜系统和淹没式系统,研究光合细菌去除厌氧处理流出液中 $H_2S$ 的实用性,结果表明,填充柱固定的光合细菌,能较有效地去除 $H_2S$ ,停留时间24h,去除率81%~95%,残余的 $H_2S$ 仍留在流出液中。淹没式光管系统有相当的改进,在最终流出液中可以完全避免 $H_2S$ ,而且达到同样的95%去除率,只需停留24.6min,而填充柱系统需停留18h。光管系统的负荷1.6g( $S^{2-}$ )/L·d,填充柱系统为0.01g( $S^{2-}$ )/L·d,光管中的微生物通常为绿硫细菌。

Kim等<sup>[17,18]</sup>进行了固定化和自由光合细菌细胞去除硫化氢的研究,在分批反应器中,与自由细胞反应器相比,固定化细胞反应器节约光能30%,固定化细胞的活性是自由细胞的2.4倍,但40h后由于硫粒在固定介质内沉积,固定化细胞反应器效果显著下降。如果自由细胞反应器加一个硫沉淀循环装置,可以去除细胞分泌单质硫的80%,而且使光的透射比没有沉淀器高50%,使沉淀循环反应器比固定化反应器能更好地去除 $H_2S$ 。而Rahul用有硫分离器的连续搅拌反应器的研究结果也显示,在相同停留时间,具硫分离器的反应器,转化 $H_2S$ 的效率更高, $S^0$ 的回收显著改善。

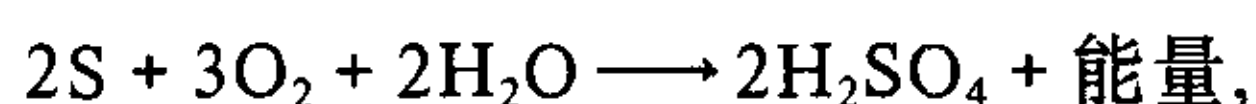
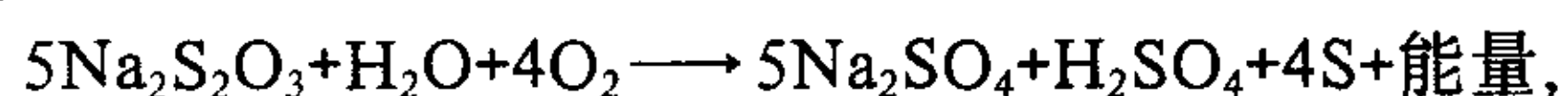
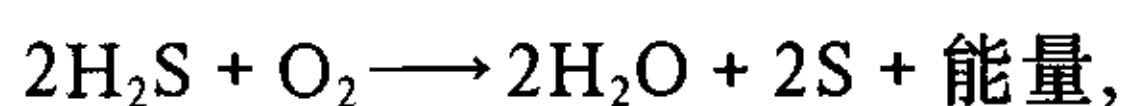
##### 3.2.4 pH值

光合细菌脱硫一般在中性条件下进行, Henshaw 等<sup>[19]</sup>研究发现, 在 pH6.9 以上, 单质硫的转化率与 pH 呈反相关, 相关系数为 0.82, 可能是因为硫酸盐比单质硫在高 pH 值下更稳定。

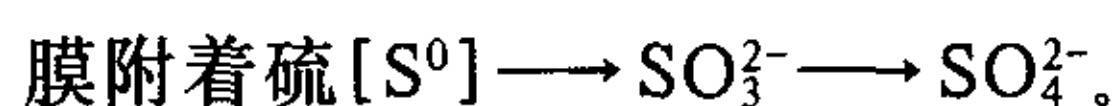
## 4 无色硫细菌脱硫

### 4.1 机理

无色硫细菌包括严格化能自养菌及化能异养菌, 也有一些过度类型。土壤与水中最重要的化能自养无色硫细菌是多种硫杆菌 (*Thiobacillus*), 能够氧化硫化氢、元素硫、硫化硫酸盐和四硫酸盐等, 而形成硫酸, 并从此过程中获得能量。



常见的化能自养无色硫细菌有氧化硫硫杆菌 (*Thiobacillus thiooxidans*)、排硫硫杆菌 (*Thiobacillus thioparus*)、氧化亚铁硫杆菌 (*Thiobacillus ferrooxidans*)、以及脱氮硫杆菌 (*Thiobacillus denitrificans*)。不是每一种硫杆菌都能氧化所有的无机硫化物, 其中  $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$  是它们都可以氧化的, 仅氧化过程有差异。只有少数种能氧化  $\text{H}_2\text{S}$ <sup>[20]</sup>。在硫杆菌中, 无机硫化合物的氧化途径最可能如下<sup>[21, 22]</sup>:



硫化物氧化成硫酸分两步进行, 第一步快, 硫化物失去两个电子, 膜附着聚合硫形成; 第二步慢, 单质硫被进一步氧化为亚硫酸、硫酸。

丝状硫细菌是另一类化能自养型无色硫细菌, 其从氧化硫化氢和元素硫的过程中取得能量。有的菌专性不强, 也能进行腐生生活, 硫化氢氧化后生成的硫磺粒可贮存菌体内(习惯称硫磺细菌)。当环境中缺少  $\text{H}_2\text{S}$  时, 则将体内的硫磺进一步氧化成硫酸。主要代表有贝氏硫菌属 (*Beggiatoa*)、辨硫菌属 (*Thioploca*)、发硫菌属 (*Thiothrix*)<sup>[23]</sup>。

### 4.2 影响因素

影响无色硫细菌脱硫的主要因素有: 溶解氧浓度、硫化物负荷、pH、反应器及填料、化学氧化等。

#### 4.2.1 溶解氧与硫化物负荷

溶解氧与硫化物负荷是影响无色硫细菌脱硫最为重要的因素, 而且彼此互相关联。Buisman<sup>[24]</sup>在生物脱硫反应器中研究了单质硫产生的最佳条件, 在硫化物浓度 90mg/L, 停留时间 45min, 溶解氧低于 1mg/L

时, 产生极少的硫酸 (<10%), 在溶解氧超过 5mg/L 时, 生成的硫酸盐稳定在 52%; 在溶解氧 1mg/L 时, 单质硫的产率最大, 当硫化物浓度高于 20mg/L 时, 即使高氧浓度, 也仅有 5% 的硫化物转化为硫酸; 当硫化物浓度低于 20mg/L 时, 硫酸盐的生成随溶解氧浓度的增大而急剧增加。左剑恶<sup>[25]</sup>进行无色硫细菌氧化废水中硫化物的研究发现, 在不同的硫化物负荷下, 反应器内都存在一个最佳的溶解氧 (DO) 值, 此时反应器对硫化物的去除率较高 (90% 以上), 绝大部分  $\text{S}^{2-}$  转化为  $\text{S}^0$ , 基本不生成  $\text{SO}_4^{2-}$ , 最佳 DO 与硫化物负荷呈线性关系:

$$\text{DO} = 1.37 + 0.365F_v (F_v \text{ 为硫化物负荷, 单位 } \text{kg}/\text{m}^3 \cdot \text{d}).$$

Buisman 等<sup>[26]</sup>用混合培养的自由悬浮细胞, 研究了硫化物负荷对细菌产率和氧化率的影响。结果显示, 至少存在两种细菌, 即硫酸产生菌 (A 型菌, 在硫化物负荷 200mg/L·h 条件下生长) 和单质硫产生菌 (B 型菌, 在更高的硫化物负荷条件下生长)。A 型菌产率为 5.6g/mol, B 型菌产率 0.4g/mol, A 型菌对硫化物具有高亲合性, 在硫化物超过 10mg/L 时, 受到抑制, B 型菌对硫化物的亲合力低, 不受硫化物抑制, 但受氧抑制。

#### 4.2.2 反应器及填料

Buisman<sup>[27]</sup>等用 3 种反应器: 完全混合反应器 (CSTR)、旋转反应器及上流式反应器, 研究无色硫细菌脱硫的适用性。在硫化物出水浓度低于 2mg/L 的条件下, 3 种反应器的去除率分别为: 2.4、10、11kg/m<sup>3</sup>·d, 其差异主要是因为生物量的不同。在进水浓度 100mg/L, 出水浓度小于 2mg/L 的条件下, 3 种反应器所需的停留时间分别为: 35、10、13min。在相同条件下, 硫酸盐的产率, 旋转反应器与上流式反应器比 CSTR 低。Buisman<sup>[28]</sup>等用 20L 的升流式反应器和 6L 的旋转式反应器, 研究了不同填料 (聚氨酯颗粒、聚氨酯片和拉西环) 对造纸废水厌氧处理流出液脱硫的影响。结果显示, 对升流式反应器, 使用 3 种填料都发生堵塞, 对旋转反应器, 使用聚氨酯片时发生堵塞, 使用拉西环时, 转速 46r/min 可以避免堵塞, 在此条件下, 硫化物去除负荷 620mg/L·h, 水力停留时间 13min, 去除率达 95%。低转速下, 去除率严重恶化, 用聚氨酯片或聚氨酯粒代替拉西环, 旋转反应器去除效率降低。

#### 4.2.3 pH 值

Buisman<sup>[29]</sup>等用无色硫细菌进行废水脱硫研究发现, 硫化物转化为单质硫的最适 pH 为 8.0 ~ 8.5, 在 pH6.5 ~ 7.5, 或 pH9 时, 转化率显著降低, pH9.5 时反应恶化。左剑恶发现, 由  $\text{S}^{2-}$  转化为  $\text{S}^0$  的过程是一个产碱的过程, 会引起出水 pH 值的上升<sup>[25]</sup>, 其升高值与硫

化物去除负荷呈线性关系:  $\Delta \text{pH} = 0.74 + 0.053\text{Fr}$ 。

#### 4.2.4 化学氧化

Buisman<sup>[26]</sup>等用无色硫细菌脱硫体系上清液,测定了化学氧化对脱硫的贡献,在硫化物出水浓度小于2mg/L时,化学氧化占的比率小于1%,出水硫化物浓度越大,化学氧化所占的比率越高,当出水硫化物浓度为162mg/L时,化学氧化占40.1%。Buisman<sup>[30]</sup>研究水溶液中硫化物非催化氧化与生物氧化的结果表明,在硫化物浓度小于10mg/L时,生物氧化速率是化学氧化速率的75倍,在硫化物浓度达到600mg/L时,生物氧化速率大约是化学氧化速率的6倍。

#### 4.2.5 有机物

Buisman<sup>[31]</sup>还发现,乙酸、高级脂肪酸、葡萄糖等,对 $\text{S}^{2-}$ 转化成 $\text{S}^0$ 没有显著影响。杨景亮等<sup>[32]</sup>采用硫酸盐还原—生物脱硫—甲烷化的方法,将无色硫细菌脱硫组合到含硫酸盐有机废水厌氧处理工艺中。结果表明,以拉西环为填料的厌氧滤池作为酸相反应器, $\text{SO}_4^{2-}$ 容积负荷可达 $5\text{Kg}/\text{m}^3 \cdot \text{d}$ , $\text{SO}_4^{2-}$ 去除率为80%,在脱硫反应器中,硫化物去除率大于90%,其中95%的硫化物转化为 $\text{S}^0$ 。甲烷相反应器的COD容积负荷可达 $15.8\text{kg}/\text{m}^3 \cdot \text{d}$ ,COD去除率为83.3%,整体工艺COD去除率为87.6%, $\text{SO}_4^{2-}$ 去除率99.4%~100%,说明有机物对脱硫没有影响。

#### 4.3 中试及生产性试验

Buisman<sup>[33]</sup>等进行无色硫细菌废水脱硫的中试,以 $4\text{m}^3$ 生物反应器处理含硫化物的造纸废水厌氧处理流出液,以2.5cm的勾环(pall rings)或Bio-Net 200作填料,水力停留时间19min, $\text{S}^{2-}$ 去除率大于90%,在脂肪酸存在下,网状聚氨酯不合作填料。

洗气塔组合生物反应器的废气生物脱硫生产性试验<sup>[34]</sup>表明,规模 $450\text{m}^3/\text{h}$ ,低量的NaOH就可达到高的硫去除率, $\text{H}_2\text{S}$ 可从1200降到40mg/L。在硫化物负荷大约 $2\text{kg}(\text{H}_2\text{S})/\text{m}^3 \cdot \text{d}$ 时,去除率大于99%,在此负荷下,约70% $\text{H}_2\text{S}$ 转化成 $\text{S}^0$ ,30%转化为硫酸,NaOH使用不超过 $0.5\text{kg}/\text{kg}(\text{H}_2\text{S})$ 。常规洗气塔脱硫,NaOH需要量是这种装置的6~7倍,产生的硫磺混合液含50%的单质硫和1%的灰分。

### 5 生物脱硫评述

与物化法相比,生物脱硫具有许多优点:不需催化剂和氧化剂(除空气外),不需处理化学污泥,产生很少生物污泥,低能耗,回收有价值的硫,没有或很少有硫酸盐或硫代硫酸盐排放,过程快,去除效率高,无臭味。生物脱硫的缺点是:过程不易控制,光合细菌脱硫,控

制光照强度是关键,而无色硫细菌脱硫,控制反应体系的溶解氧浓度是关键;对过高浓度、极低浓度的硫化物去除效果不好,硫化物浓度过低,将被氧化成硫酸盐,硫化物浓度过高,对光合细菌或无色硫细菌有抑制作用;光合细菌脱硫需要专门制作的光合反应器。

生物脱硫是近年来才发展起来的常规脱硫替代新工艺,它通过微生物菌群的作用使 $\text{S}^{2-}$ 氧化成 $\text{S}^0$ 。光合细菌脱硫,由于要求光照、厌氧等苛刻条件,研究进展不大,仍处于分批试验或实验室小试的探索阶段,今后的工作是光合脱硫反应器的研制,提高光合脱硫的效率,控制光照强度,解决单质硫的分离问题。无色硫细菌脱硫,近年来研究很活跃,并取得一些进展,在实验室小试的基础上,进行了中试及生产性试验,效果均不错,而且已申请了几项废水、废气生物脱硫专利<sup>[35-38]</sup>。优化工艺,更有效地控制溶解氧,提高单质硫的产率是今后仍需努力的方向。

### 6 参考文献

- Grimm DT, Cork DJ, Uphaus RA. Dev Indust Microb, 1984, 25:709.
- Pfeng N. General physiology and ecology of photosynthetic bacteria. The Photosynthetic Bacteria (Edited by Clayton RK&Sistrom WR), Plenum Press, New York, 1978, 3.
- Triper HG. Sulfur metabolism. The Photosynthetic Bacteria (Edited by Clayton R K & Sistrom WR), Plenum Press, New York, 1978, 677.
- Van Niel C. On the morphology and physiology of the purple and sulfur bacteria. Arch Microbiol, 1932, 3:1.
- Larsen HJ. Bacterial, 1952, 64:187.
- 刘如林,刁虎欣,梁凤来等. 光合细菌及应用. 北京:中国农业科技出版社,1991.
- 朱章玉,俞吉安,林志新等. 光合细菌的研究及应用. 上海:上海交通大学出版社,1991.
- Cork DJ. Dev Ind Microbiol, 1982, 23:379.
- Khanna P, Rajkumar B, Jothikumar N. Microbial recovery of sulfur from thiosulfate bearing wastewater with phototrophic and sulfur reducing. Bacteria Curr Micro, 1996, 32:33.
- Rahul B, Sriram R, Edgar CC, James LD. Conversion of hydrogen sulfide to elemental sulfur by chlorobium thiosulfatophilum in a CSTR with a sulfur-setting separator. Appl Biochem Biotechnol, 1994, 45/46:499.
- Cork DJ, Mathers J, Maka A, Smak A. Control of oxidative sulfur metabolism of chlorobium limicola forma thiosulfatophilum. Appl Environ Micro, 1985, 49(2):269.
- Kim BW, Chang HN, Kim KI, Lee KS. Growth kinetics of photosynthetic bacteria chlorobium thiosulfatophilum in a fed-bath reactor. Biotechnol Bioeng, 1992, 40:583.
- Cork DJ, Jerger DE, Maka A. Biocatalytic production of sulfur from process waste streams. Biotchn Bioeng Symp,

- 1986, 16:149.
- 14 Maka A, Cork DJ. *Ind Microbiol*, 1990, 5:337.
  - 15 Cork DJ. Bioconversion of Coal acid gas to biomass and chemical. Barnett JP Ed, In *Coal and Biomass, The Role of Synfuels* (University of Illinois at Chicago Circle Press), 1982.
  - 16 Kobayashi HA, Stenstrom M, Mah RA. Use of photosynthetic bacteria for hydrogen sulfide removal from anaerobic waste treatment effluent. *Wat Res*, 1983, 17:579.
  - 17 Kim BW, Kim KI, Chang HN. Bioconversion of hydrogen sulfide by free and immobilized cells of chlorobium thiosulfatophilum. *Biotechnol Lett*, 1990, 12(5):381.
  - 18 Kim BW, Chang HN. Removal of hydrogen sulfide by chlorobium thiosulfatophilum in immobilized and sulfur settling free cells recycle reactors. *Biotechnol Prog*, 1991, 7:495.
  - 19 Henshaw PF, Bewtra JK, Biswas N, Franklin M. Biological removal of hydrogen sulfide from refinery wastewater and conversion to elemental sulfur. *Wat Sci Tech*, 1992, 25(3):265.
  - 20 王家玲. *环境微生物*. 北京: 高等教育出版社, 1988.
  - 21 Kelly DJ. *Microbiol Sci*, 1985, 2(4):105.
  - 22 Moriarty DJ, Nicholas DJ. *Biochem Biophys Acta*, 1970, 197:143.
  - 23 Kuenen JG. *Plant Soil*, 1975, 43:49.
  - 24 Buisman CJN, Bert G, Ijspeert P, Lettinga G. Optimization of sulfur production in a biotechnological sulfide-removing reactor. *Biotechnology and Bioengineering*, 1990, 38:50.
  - 25 左剑恶, 袁琳, 胡纪翠, 顾夏声. 利用无色硫细菌氧化废水硫化物的研究. *环境科学*, 1995, 16(6): 7.
  - 26 Buisman CJN, Ijspeert P, Lettinga G. Kinetic parameters of a mixed culture oxidizing sulfide and sulfur with oxygen. *Biotechnology and Bioengineering*, 1991, 38:813.
  - 27 Buisman CJN, Wit B, Lettinga G. Biotechnological sulfide removal in three polyurethane carrier reactors: Stirred reactor, biorotor reactor and upflow reactor. *Wat Res*, 1990, 24(2):245.
  - 28 Buisman CJN, Lettinga G. Sulfide removal from anaerobic waste treatment effluent of a papermill. *Wat Res*, 1990, 24(3):313.
  - 29 Buisman CJN, Post R, Ijspeert P, Geraats G, Lettinga G. Biotechnological process for sulfide removal with sulfur reclamation. *Acta Biotechnol*, 1989, 9(3):255.
  - 30 Buisman CJN, Ijspeert p, Ijanssen A, Lettinga G. Kinetic of biological sulfide oxidation in aqueous solutions. *Wat Res*, 1990, 24(5):667.
  - 31 Buisman CJN, Driessen W, Meijer H, Lettinga G. Effect of organic substrates on biological sulfide oxidation. *Appl Microbiol Biotechnol*, 1990, 33(4):459.
  - 32 杨景亮, 左剑恶, 胡纪翠. 两相厌氧工艺处理含硫酸盐有机废水的研究. *环境科学*, 1995, 16(3): 8.
  - 33 Buisman CJN, Lettinga G, Paasschens CWM, Habets LHA. Biotechnological sulfide removal from effluent. *Water Sci Technol*, 1991, 24(3/4):347.
  - 34 Buisman CJN, Boonstra J, de Boor T. Biotechnological H<sub>2</sub>S removal from biogas as sulfur. *Meded-Fac Landbounwked Toegepaste Biol Wet (Univ Gent)*, 1994, 58(4A):1755.
  - 35 Buisman CJN. Removal of Sulfur compounds from wastewaters such as spent scrubbing Solution. *Neth Appl NL 9201, 268(Cl. Co<sub>2</sub>F<sub>3</sub>/28)*, 01 Feb 1994, *Appl 92/1, 268*, 14 Jul 1992, 13.
  - 36 Buisman CJN. Wastewater treatment for removal of sulfides. (Paques BV) *PCT Int Appl WO 9429, 277(Cl. Co<sub>2</sub>F<sub>3</sub>/34)*, 22 Dec 1994, *NL Appl 93/1, 000*, 10 Jun 1993, 11.
  - 37 Buisman CJN. Process for removing sulfur compounds from wastewater. (Paques BV) *PCT Int Appl WO 9224, 416 (Cl. Co<sub>2</sub>F<sub>3</sub>/28)*, 09 Dec 1993, *NL Appl 92/927, 26 May 1992*, 23.
  - 38 Buisman CJN. Process for removal of sulfur dioxide from waste gas. (Paques BV) *Eur Int Appl EP451, 922(Cl. Bo<sub>2</sub> D53/00)*, 16 Oct 1991, *NL Appl 90/876*, 12 Apr 1990, 7.

责任编辑 杨泽生 (收稿日期: 1997—07—03)

## 开发天然气汽车势在必行

汽车是现代经济社会必不可少的交通运输工具,以其现在的增长速度计算,预计到2030年世界汽车总数将达到10亿辆。按目前人类消耗石油的速度,全球已探明的石油资源仅能支撑40余年。随着石油资源的日益枯竭和天然气田的不断发现和探明,天然气的应用将越来越显示出重要地位,天然气将成为21世纪的第二大能源。我国的天然气勘探取得了令人瞩目的发展,现已探明的天然气含量达1.3万亿m<sup>3</sup>,陆地已基本形成重庆、陕甘宁和新疆3个新气区。

天然气作为新能源汽车中一个主要的发展方向,还基于改变严重的全球污染。经大量的试验与测试表明,天然气汽车与燃油相比,CO<sub>2</sub>低25%,CH化合物低8%,SO<sub>2</sub>低

70.5%,SO低99.99%,PB减少到零,颗粒杂质减少41.67%,CO减少89.73%,噪声低40%。国外开发天然气汽车时间较长,美国已安装压缩天然气汽车4万辆,全世界已安装100万辆。

我国在有气源的地区,主要是做好建站、改车两项工作。航天四院在总公司和陕西省政府的大力支持下,研制开发了复合材料气瓶,并于最近建成了年生产能力为5000只气瓶的生产线。在97年7月进行的营业性运行中,取得了圆满成功。样车运行平稳、噪音小,车箱内干净无油味,动力性能达到原车动力性能的90%左右。在点火、加速、百公里耗油量、油气转换等方面也比较理想。尾气检测结果表明CO减少97%以上,CH化合物减少约72%。整车试运行结果表明,为后续的批量改装工作奠定了基础。

(闻 心 建 艺)