

# 硅酸盐细菌煤炭脱硫实验研究

谢作晃, 赵海霞, 黄海燕, 连 宾

(中国科学院 地球化学研究所 环境地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002)

**摘 要:** 煤炭生物脱硫技术是目前和将来的重要研究内容之一。采用生长在含高硫煤培养基中的硅酸盐细菌来去除煤炭中的硫。研究表明, 硅酸盐细菌对所用高硫煤样有脱硫效果, 全硫含量从原煤样的 5.45% 降至处理后的 3.45%, 全硫脱除率达 36.70%, 其中细菌有效脱除率达 9.91%。摇床培养的硅酸盐细菌比静止培养的硅酸盐细菌对煤炭脱硫效果更好。含氮培养基培养的硅酸盐细菌比无氮培养基培养的硅酸盐细菌脱硫效果要好。初步研究结果显示, 硅酸盐细菌不仅对煤中硫化铁硫存在氧化作用, 同时也对煤中有机硫和无机硫存在吸收与代谢转化作用。认为硅酸盐细菌对煤炭的脱硫作用存在两种机理: ①硅酸盐细菌及其代谢产物对煤中硫产生氧化作用; ②硅酸盐细菌对煤中硫进行了吸收与代谢转化。两种机理同时存在, 且作用对象包括煤中所有形态的硫。该实验结果显示硅酸盐细菌在脱硫研究中有潜在应用前景。

**关键词:** 硅酸盐细菌; 煤; 脱硫; 微生物吸附; 微生物转化

**中图分类号:** P618.11; X701.3; Q939.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6524(2009)06-0587-06

## Biological desulfurization of coal by silicate bacteria

XIE Zuo-huang, ZHAO Hai-xia, HUANG Hai-yan and LIAN Bin

(State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China)

**Abstract:** The bio-desulfurization of coal technology is one of the important research topics both at present and in future. In this study, the silicate bacteria growing in media that contained high-sulfur coal were used to remove sulfur in coal. The results show that the silicate bacteria could be used to desulfurize high-sulfur coal. Total sulfur content was reduced from 5.45% to 3.45% after the treatment. The total sulfur removal rate reached 36.70%, in which the effective removal rate reached 9.91%. Compared with the static cultivation manner for silicate bacteria, the shake cultivation manner shows much better desulfurizing effect on coal. The silicate bacteria cultured in nitrogen-containing culture media show better desulfurization effect than those cultured in nitrogen-free media. Preliminary data obtained indicate that the silicate bacteria not only cause oxidation of sulfide iron-sulfur in coal, but also result in absorption and metabolism of the organic sulfur and inorganic sulfur in coal. It is suggested that there exist two mechanisms for coal desulfurization by the silicate bacteria: ① silicate bacteria and their metabolites result in sulfur oxidation in coal; ② the sulfur in coal experiences absorption and metabolic conversion by the silicate bacteria. There are two kinds of mechanisms which have the effect on all forms of sulfur in the coal sample. The study also implies that silicate bacteria have the latent application potential in the study of coal desulfurization.

**Key words:** silicate bacteria; coal; desulfurization; microbial adsorption; microbial transformation

矿物燃料是当今世界的主要能源, 其中煤炭是目前使用量最大的矿物燃料之一, 在煤的开采与利用过程中, 有害物质以各种形式进入周围环境, 造成环境污染, 其中最突出的污染物  $\text{SO}_2$  是形成酸雨的主要物质。随着优质煤资源的逐渐减

收稿日期: 2009-10-12; 修订日期: 2009-10-23

基金项目: 中国科学院知识创新工程项目(kzcx2-yw-135-2); 国家自然科学基金委创优群体项目(40721002); 贵州省优秀科教人才省长专项基金课题(黔省专合字[2005]356号)

作者简介: 谢作晃(1983-), 男, 硕士, 主要从事环境微生物方面的研究; 通讯作者: 连 宾, E-mail: bin2368@vip.163.com。

少和煤层开采深度的增加,我国主要煤炭矿区的含硫量都有逐渐增加的趋势(邱建辉等,2001)。因此寻找一种经济、安全、高效的煤炭脱硫技术已成为当今煤炭加工利用方面的研究热点之一。

煤炭脱硫按燃烧过程分为燃烧前脱硫、燃烧中脱硫和燃烧后脱硫,根据其控制措施又可分为物理法、化学法和生物法。在所有脱硫方法中,燃烧前的微生物煤炭脱硫,可在常温常压下进行,利用微生物作用使煤中的硫得以去除,具有安全、环保、低耗和高效的特点,目前国内外报道的主要方法为生物浸出和生物浮选,应用的微生物种主要有氧化亚铁硫杆菌(徐毅等,1990)、红球菌(Ma Cuiqing *et al.*, 2006)、恶臭假单胞菌(Karina Boltes *et al.*, 2007)、枯草杆菌(Kohtaro Kiri-mura *et al.*, 2001)、黄孢原毛平革菌(杨朝晖等,2006)、球红假单胞菌(张明旭等,2001)、白腐菌(巩冠群等,2006)等,此外,还有将磁化技术应用于微生物煤炭脱硫的研究(张东晨等,2005)。硅酸盐细菌在煤炭脱硫技术中的应用尚未见报道,但该菌在生物肥料(连宾,1998;李定旭,2003)、矿物生物加工(孙德四等,2006)以及污水处理(Lian Bin *et al.*, 2004, 2008)等方面已有大量研究。本文报道了硅酸盐细菌在煤炭脱硫方面的初步研究结果,以期拓展硅酸盐细菌的应用范围并探讨新的生物脱硫技术。

## 1 材料与方法

### 1.1 煤样与处理样品

煤样采自贵阳市金乡镇镇煤矿,全硫含量为5.45%,其中无机硫含量为3.70%,有机硫含量为1.75%,属高硫煤。将煤样粉碎后分别过0.075 mm和0.150 mm分样筛,得粒度为0.075~0.150 mm煤样备用。

取纯度大于95%黄铁矿样品,粉碎后过0.075 mm的分样筛,得粒度为小于0.075 mm的黄铁矿样品。

取分析纯硫化亚铁(纯度大于85%),粉碎过0.075 mm分样筛,得粒度为小于0.075 mm的硫化亚铁样品。

### 1.2 菌种

采用硅酸盐细菌GY03菌株,其菌种特性和培养方法同以前报道(连宾,1998; Lian Bin *et al.*, 2004; Chen Ye and Lian Bin, 2005),但在培养基方面做了部分改进。将实验用煤样粉末代替原有培养基中的矿粉。固体斜面培养基配方:蔗糖5.0 g,  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  5.0 g,  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  0.5 g,  $\text{FeCl}_3$  0.002 g,煤粉1.0 g,琼脂18 g,蒸馏水1 000 mL。液体培养基配方:蔗糖5.0 g,  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  5.0 g,  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  0.5 g,  $\text{FeCl}_3$  0.002 g,煤粉1.0 g,蒸馏水1 000 mL。

### 1.3 方法

针对煤炭脱硫实验的需要,采用以下3种液体种子液培养基配方来培养菌株:

配方1:采用常规含煤样液体培养基,按10%接种量接入液体菌种(见1.2),30℃下摇床(150 r/min)培养5 d后待用。

在此培养基中获得的培养物记为1号培养物。

配方2:与配方1相比,培养基中不添加  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{FeCl}_3$ ,同上接种,30℃下摇床(150 r/min)培养5 d后待用。在此培养基中获得的培养物记为2号培养物。

配方3:与配方2相比,添加2‰酵母膏,同上接种,30℃下摇床(150 r/min)培养5 d后待用。在此培养基中获得的培养物记为3号培养物。

### 1.4 煤样后处理

将处理后煤样用定性滤纸过滤,蒸馏水冲洗数次,80℃烘干,分析。

### 1.5 煤样分析与结果计算方法

(1)全硫分析:按照GB/T214-2003(煤中全硫的测定方法,艾士卡法)来测定。

(2)各形态硫测定:按照GB/T215-2003(煤中各种形态硫的测定方法)来测定煤样中各种形态硫含量。有机硫采用全硫减去无机硫计算获得。

(3)处理后液体中的硫酸根测定:按照HJ/T342-2007(水质硫酸盐的测定,铬酸钡分光光度法)来测定。

(4)煤样脱硫除率按下述公式进行计算: $C = (A - B) / A \times 100\%$ ,式中C为全硫(无机硫、有机硫)脱除率,A为处理前煤样全硫(无机硫、有机硫)含量,B为处理后煤样全硫(无机硫、有机硫)含量。

(5)细菌有效脱除率采用下式计算: $F = (D - E) / A \times 100\%$ ,式中F为细菌有效脱除率,D为经蒸馏水对照处理后煤样全硫含量,E为微生物处理后煤样全硫含量,A为处理前原煤样全硫含量。

## 2 结果与讨论

### 2.1 硅酸盐细菌在含煤培养基中的生长

与常规硅酸盐细菌培养基相比(Lian Bin *et al.*, 2004; Chen Ye and Lian Bin, 2005),将矿粉变为少量处理对象的煤粉。此法一是为了避免矿粉对处理后煤样纯度的影响;二是为了增强该细菌对煤粉的耐受性,提高处理效果。

硅酸盐细菌在含少量煤粉的培养基里生长良好,在含煤斜面固体培养基中生长的细菌显示出了很好的光泽,但一旦煤粉过量,细菌生长就变得缓慢,究其原因可能是煤粉里含有的部分元素对细菌产生了毒害作用,这种作用在煤粉过量时超过细菌所能承受的程度。在种子液方面,1号培养物、2号培养物及3号培养物都显示出很好的粘稠性,说明该细菌在其中生长良好。

### 2.2 菌株经含少量煤粉培养基培养后对煤样的脱硫效果

煤样处理方法如下:

方法1:取1号培养物100 mL直接和6 g煤样混合,30℃摇床(150 r/min)处理7 d后取样分析。设置灭活菌,相应灭菌培养基及无菌水对照3个处理,重复3次。

方法2:取2号培养物30 mL与含6 g煤样及70 mL蒸馏水的煤浆混合,30℃摇床(150 r/min)处理7 d后取样分析。设置灭活菌,相应灭活菌培养基及无菌水对照3个处理,重复3次。

用1号培养物和2号培养物处理煤样后,分别与对照相比,结果如表1和表2所示。

表1 两种细菌培养物的脱硫效果

%

Table 1 The effects of desulfurization by using two kinds of bacterial cultures

	蒸馏水对照		培养基对照		灭活菌对照		细菌作用		
	全硫量	脱除率	全硫量	脱除率	全硫量	脱除率	全硫量	脱除率	有效脱除率
1号培养物	3.98	26.97	3.95	27.52	3.91	28.26	3.88	28.81	1.84
2号培养物	3.98	26.97	3.89	28.62	3.85	29.36	3.61	33.76	6.79

注:表中数据均为3次重复测定平均值。

表2 两种细菌培养物处理后煤样分析结果

%

Table 2 Coal sample analyses after the bacterial treatment

	总硫	无机硫		有机硫	煤样回收率
		硫化铁硫	硫酸盐硫		
方法1	3.88	2.87	0.18	0.83	94.33
方法2	3.61	2.78	0.15	0.68	97.44
原煤	5.45	3.49	0.21	1.75	

表中数据均为3次重复测定平均值;煤样回收率为回收煤样与投加煤样的质量分数。

表1结果表明,两种处理方法对煤炭脱硫都有一定效果,特别是2号培养物,硫脱除率达33.76%,明显高于26.97%的蒸馏水对照,细菌有效脱除率达6.79%。处理后,含硫量降至3.61%,与原煤的5.45%相比降低显著。

与2号培养物相比,1号培养物效果较差。其原因可能为1号培养物培养基里除了含有煤粉外还含有少量的含硫物质( $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ ),它的存在对处理后煤样的纯度有一定的影响,也为硅酸盐细菌的前期培养提供充足的S元素,导致细菌对煤中S元素的需求减少,降低处理效果。对处理后煤样各硫分进行分析(表2)也可以看出,在培养基不含 $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ 的情况下,硅酸盐细菌对硫元素的需求更为主动,煤样中无机硫和有机硫的降低程度更为显著,无机硫脱除率达20.81%。

利用硅酸盐细菌及其培养物进行脱硫研究,其机理可能在于该细菌能对部分元素进行吸附及吸收转化。相对1号培养物,2号培养物的培养基里不含可直接利用的Fe、S等元素,而煤中的S元素主要以硫铁矿的形式存在,硅酸盐细菌经

含少量煤及不含可直接利用Fe、S等元素的培养基培养后,虽然菌体数量及代谢产物相对1号培养物要少,但是这种培养物里的细菌对含煤炭微环境产生一定的适应性,可能会有助于对煤中Fe、S等元素的吸收转化。

### 2.3 含煤样培养基培养细菌后煤样的脱硫效果

煤样处理方法:在6%的煤浆(含6 g煤样和100 mL蒸馏水)中添加0.5 g蔗糖和0.5 g  $Na_2HPO_4 \cdot 12H_2O$ ,接种量15%,30℃条件下分摇床(150 r/min)和静止处理,7 d后取样分析。设置灭活菌,相应灭活菌培养基及无菌水对照3个处理,重复3次。

将细菌接至含煤样培养基之后,细菌将利用培养基里所拥有的养分(蔗糖和 $Na_2HPO_4$ )以及煤样里含有的各种元素进行生长繁殖。如图1所示,在接种硅酸盐细菌静止培养以后,煤样与硅酸盐细菌牢牢吸附与瓶底,形成细菌-矿物复合体(连宾,1998; Lian Bin *et al.*, 2004)。

用含煤样培养基培养细菌后,煤样中的含硫量及脱除率如表3所示,静止培养和摇床培养两种方式处理后煤样中不同形态的硫分析结果见表4。由表3可知,将煤样6 g与蔗糖0.5 g、 $Na_2HPO_4 \cdot 12H_2O$  0.5 g、蒸馏水100 mL组成特殊培养基,按15%的接种量接种硅酸盐细菌,生长繁殖7 d后也存在一定的脱硫效果。由表3、表4结果可知,摇床培养优于静止培养,总硫脱除率分别为35.78%和29.17%,其中细菌有效脱除率分别为8.62%和2.75%,总无机硫脱除率分别为23.78%和20.00%,原因可能是摇床培养提供了充足的溶解氧,有利于细菌的生长繁殖,另外摇床条件下能提供细菌与煤样更多的碰撞、接触与相互作用机会。

利用硅酸盐细菌的生长繁殖来脱除煤炭中的S元素,显

表3 含煤样培养基培养细菌后的脱硫效果

%

Table 3 The desulfurization effect by using the silicate bacteria in the culture media that contained coal sample

	蒸馏水对照		培养基对照		灭活菌对照		细菌作用		
	全硫量	脱除率	全硫量	脱除率	全硫量	脱除率	全硫量	脱除率	有效脱除率
静止培养	4.01	26.42	3.93	27.89	3.94	27.71	3.86	29.17	2.75
摇床培养	3.97	27.16	3.90	28.44	3.83	29.72	3.50	35.78	8.62

表中数据均为3次重复测定平均值。



图1 含煤样培养基接种静止培养7 d后的对比照片

Fig.1 The contrast of the bacterial liquid cultures in coal media after static cultivation for 7 days

a—接无菌水对照; b—接灭菌培养基对照; c—接灭活种子液对照; d—接种硅酸盐细菌

a—asepsis water as inoculate; b—asepsis culture media as inoculate; c—autoclaving bacterial culture as inoculate; d—bacterial culture as inoculate

表4 两种培养方式处理后煤样分析 %

Table 4 Coal sample analyses after two kinds of treatment

	总硫	无机硫		有机硫	煤样回收率
		硫化铁硫	硫酸盐硫		
静止培养	3.86	2.81	0.15	0.90	97.83
摇床培养	3.50	2.68	0.14	0.68	93.06
原煤	5.45	3.49	0.21	1.75	

表中数据均为3次重复测定平均值;煤样回收率为回收煤样与投加煤样的质量分数。

示了一定的效果。在含煤培养基培养过的细菌对煤产生了一定的耐受性。随着细菌的生长繁殖,煤中硫的含量也被不断吸收转化,显示出一定的脱硫效果。

#### 2.4 细菌经含氮与不含氮培养基培养后对煤样的处理

配置含氮处理液(蔗糖 5.0 g,  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  5.0 g, 酵母膏 2.0 g, 蒸馏水 1 000 mL)和无氮处理液(蔗糖 5.0 g,  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  5.0 g, 蒸馏水 1 000 mL)。各取无氮处理液和含氮处理液 70 mL, 并加煤样 10 g, 然后分别接 2 号培养物和 3 号培养物 30 mL, 30℃ 条件下摇床(150 r/min)处理 7 d 后取样分析。设置灭活菌, 相应灭菌培养基及无菌水对照 3

个处理, 重复 3 次。

2 号培养物与 3 号培养物的差别在于 3 号培养物是经过含氮培养基的培养。在硅酸盐细菌培养基中添加氮元素, 造成细菌数量增加, 多糖物质含量减少(连宾, 1998)。用以上两种培养物对煤炭进行脱硫研究, 结果(表 5)表明, 硅酸盐细菌经含氮培养基培养后, 并且在后续处理液中添加氮源的脱硫效果更为显著, 达到 36.70%, 其中细菌有效脱除率达 9.91%。这可能是由于前期培养基及后续处理液中碳氮比降低, 细菌生长旺盛, 导致其对煤中硫元素的需求也大为增加。对含氮培养物处理后煤样中各硫组分进行分析表明(表 6)无机硫含量和有机硫含量都有所降低, 分别达到 25.88% 和 60.00%。对处理煤样后液体中硫酸根含量进行了分析对比, 结果见表 7。对处理煤样后液体中硫酸根含量进行检测发现, 细菌作用过后硫酸根含量与对照及培养基初始值相比都明显要高。在增加的这部分硫酸根里面有一部分来源于煤中部分硫酸盐硫直接溶解。笔者对原煤样的含硫量分析表明, 其主要来源可能来自于细菌对煤中硫元素的氧化, 即对硫铁矿的氧化, 同时发现硅酸盐细菌对有机硫也存在脱除作用。为回答该细菌是否能氧化煤样中的硫素, 下面研究了细菌对黄铁矿和硫化亚铁的作用。

表5 两种细菌培养物的脱硫效果 %

Table 5 The effects of desulfurization by using two kinds of bacterial cultures

	蒸馏水对照		培养基对照		灭活菌对照		细菌作用		
	全硫量	脱除率	全硫量	脱除率	全硫量	脱除率	全硫量	脱除率	有效脱除率
无氮	3.99	26.79	3.95	27.52	3.93	27.89	3.59	34.13	7.34
含氮	3.99	26.79	3.94	27.71	3.89	28.62	3.45	36.70	9.91

注:表中数据均为3次重复测定平均值。

**表 6 两种细菌培养物处理后煤样分析结果** %  
**Table 6 Coal sample analyses after two kinds of treatment of bacterial culture**

	总硫	无机硫		有机硫	煤样回收率
		硫化铁硫	硫酸盐硫		
2号培养物	3.59	2.77	0.15	0.67	97.50
3号培养物	3.45	2.59	0.16	0.70	94.39
原煤	5.45	3.49	0.21	1.75	

表中数据均为 3 次重复测定平均值；煤样回收率为回收煤样与投加煤样的质量分数。

**表 7 处理煤样后液体中硫酸根含量对比** mg/L  
**Table 7 The contrast of the content of sulphuric acid radical in liquid after the treatment of coal sample**

	蒸馏水对照	培养基对照	灭活菌对照	细菌作用	培养基量
无氮	657.24	815.36	841.25	1078.59	463.29
有氮	674.41	795.35	869.78	1192.61	463.29

表中数据均为 3 次重复测定平均值。

### 2.5 含氮培养液中细菌对黄铁矿和硫化亚铁作用研究

配置含氮处理液(蔗糖 5.0 g, Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>·12 H<sub>2</sub>O 5.0 g, 酵母膏 2.0 g, 蒸馏水 1000 mL)。各取含氮处理液 70 mL, 分别加黄铁矿样品和硫铁矿样品各 1.0 g, 接 3 号培养物 30 mL。30℃ 条件下摇床(150 r/min)处理 7 d 后取样分析。设置灭活菌, 灭菌培养基及无菌水对照 3 个处理, 重复 3 次。将处理对象由煤样换为黄铁矿和硫化亚铁, 旨在专门观察该细菌对低价态的无机硫是否具备氧化作用。实验结果(表 8)表明, 硅酸盐细菌与黄铁矿和硫化亚铁分别作用 7 d 后, 跟对照相比, 其处理液中硫酸根含量要高出一些。从对照上看, 特别是从灭活菌的对照上看, 它的作用与活菌作用比较接近, 这说明灭活菌中的某些物质可能对低价态的无机硫产生了氧化作用。该结果表明, 能对低价态无机硫产生氧化作用的物质包括活菌及其代谢产物, 而且该代谢产物具有一定的热稳定性。

### 2.6 硅酸盐细菌煤炭脱硫机理分析

对以上实验数据进行分析, 认为硅酸盐细菌对煤中硫铁矿存在氧化作用, 硫酸盐即为氧化产物。与脱除无机硫相比, 硅酸盐细菌对有机硫的脱除是本研究的一个意外发现。不排除煤样粉碎后部分硫在液体环境中流失的可能, 但是硅酸盐

**表 8 处理黄铁矿和硫化亚铁后液体中硫酸根含量对比** mg/L  
**Table 8 The contrast of the content of sulphuric acid radical in liquid after the treatment of pyrite and ferrous sulphide**

	蒸馏水对照	培养基对照	灭活菌对照	细菌作用	细菌有效作用
黄铁矿	752.61	750.20	800.25	827.98	75.37
硫化亚铁	790.89	927.31	1056.20	1168.88	377.99

表中数据均为 3 次重复测定平均值；细菌有效作用为细菌作用与蒸馏水对照的差值。

细菌对煤中硫元素吸收转化利用也是存在的。目前比较公认的有机硫脱除机理是以碳代谢为中心的 Kodama 途径(Kodama *et al.*, 1973)和以硫代谢为中心的 4S(sulphoxide/sulphone/sulphonate/sulphate)(Isbiter *et al.*, 1988)途径。另外, Ju Lu-Kwang(1992)认为微生物除了对有机硫直接氧化分解外, 在未分解状态下也能直接吸收利用。如前文所述, 硅酸盐细菌在缺乏含硫培养基的情况下培养出的产物能体现出更好的脱硫效果, 这表明硅酸盐细菌在缺乏硫素养料的情况下, 在处理煤样时对煤中的硫进行了吸收及代谢转化作用, 其中包括无机硫和有机硫。这与一些研究者采用其他微生物菌株开展微生物脱硫(周群英等, 2001)及微生物煤炭转化研究(王龙贵, 2006)所得出的结论是一致的。硅酸盐细菌对黄铁矿和硫化亚铁的作用结果进一步论证了硅酸盐细菌对低价态无机硫存在氧化作用。

结合上述硅酸盐细菌对煤作用后处理液中硫酸根含量的变化及煤样中各硫分含量的变化情况, 笔者认为硅酸盐细菌对煤的作用存在两种机理: ①硅酸盐细菌及其代谢产物对煤中硫产生氧化作用; ②硅酸盐细菌对煤中硫进行了吸收与代谢转化。两种机理同时存在, 且作用对象包括煤中所有形态的硫。

## 3 结论

对硅酸盐细菌的驯化培养显示其在煤炭环境中有良好的适应能力。采用生长在含高硫煤培养基中的硅酸盐细菌来去除煤炭中的硫, 结果表明: ①硅酸盐细菌对煤炭有一定脱硫效果, 全硫脱除率最高达 36.70%, 其中细菌有效脱除率达 9.91%, 处理后煤样含硫 3.45%; ②摇床培养的硅酸盐细菌与静止培养的硅酸盐细菌相比, 前者对煤炭脱硫有更好的效果。③含氮培养基培养后的硅酸盐细菌, 脱硫效果较无氮培养基培养的硅酸盐细菌效果要好。④硅酸盐细菌对煤中硫化铁硫存在一定的氧化作用, 同时对煤中有机硫和无机硫存在吸收与代谢转化。⑤利用含氮培养基培养后的硅酸盐细菌对含低价态无机硫的黄铁矿和硫化亚铁作用结果表明, 硅酸盐细菌及其代谢产物对低价态的无机硫存在氧化作用。⑥硅酸盐细菌煤炭脱硫同时存在两种机理: 硅酸盐细菌及其代谢产物对煤中硫产生氧化作用; 硅酸盐细菌对煤中硫进行了吸收与代谢转化。

如何提高硅酸盐细菌对煤炭全硫的脱硫率、对细菌脱硫作用机理的深入研究及其实际应用等问题是需要以后进一步开展的工作。

## References

Chen Ye and Lian Bin. 2005. Ability of *Bacillus mucilaginosus* GY03 Strain to adsorb chromium irons[J]. *Pedosphere*, 15(2): 225~231.  
Ma Cuiqing, Feng Jinhui, Zeng Yiyong, *et al.* 2006. Methods for the

- preparation of a biodesulfurization biocatalyst using *Rhodococcus* sp [J]. *Chemosphere*, 65(1): 165~169.
- Gong Guanqun and Tao Xiuxiang. 2006. Research on white decay bacterium flotation and leaching for coal biological desulphurization[J]. *Coal Science and Technology*, 34(2): 49~56 (in Chinese with English abstract).
- Isbiter J D, Wyza R E, Lippold J, *et al.* 1988. Bioprocessing of coal [A]. Omenn G S and Colwell R R Proc. Conf. Reducing Risk Environ Chem Biotch. 1st ed[C]. New York: Plenum Press, 281~293.
- Ju Lu-Kwang. 1992. Microbial desulfurization of coal[J]. *Fuel Science & Technology International*, 10(8): 1251~1290.
- Karina Boltes, Raúl Alonso del Aguila and Eloy Garcia-Calvo. 2007. Biodesulfurization of alkylated forms of dibenzothiophene by *Pseudomonas putida* CECT5279[J]. *Journal of Biotechnology*, 131(2): s143~s144.
- Kodama K, Nakatani K, Umehara K, *et al.* 1973. Identification of microbial from dibenzothiophene and its proposed oxidation pathway [J]. *Agricultural and Boil Chemistry*, 37: 45~50.
- Kohtaro Kirimura, Toshiki Furuya and Yasuhiro Nishii. 2001. Biodesulfurization of dibenzothiophene and its derivatives through the selective cleavage of carbon-sulfur bonds by a moderately thermophilic bacterim *Bacillus subtilis* WU-S2B[J]. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 91(3): 262~266.
- Lian Bin. 1998. Study on the Potassium Releasing from Minerals by Silicate Bacteria[M]. Guiyang: Guizhou Science and Technology Publishing House (in Chinese).
- Lian Bin, Chen Ye, Yuan Sheng, *et al.* 2004. Study on the flocculability of metal ions by *Bacillus mucilaginosus* GY03 strain[J]. *Chinese Journal of Geochemistry*, 23(4): 380~386.
- Lian Bin, Chen Ye, Zhao Jing, *et al.* 2008. Microbial flocculation by *Bacillus mucilaginosus*: applications and mechanisms [J]. *Biore-source Technol*, 99(11): 4825~4831.
- Li Dingxu. 2003. Study on the effects of silicate bacteria on the growth and fruit quality of apples[J]. *Journal of Fruit Science*, 20(1): 6~66 (in Chinese with English abstract).
- Qiu Jianhui, Di Jianshen and Li Yingjie. 2001. Progress of biodesulfurization[J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 41(5): 650~653 (in Chinese).
- Sun Desi, Zhang Xianzhen and Zhang Qiang. 2006. Leaching effects of metabolites of silicate bacterium on silicate minerals[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 26(3): 27~29 (in Chinese with English abstract).
- The People's Republic of China National Standard. GB/T 214-2003. The Determination of Total Sulfur in Coal Method[S].
- The People's Republic of China national standard. GB/T 215-2003. Coal Determination of Various Forms of Sulfur[S].
- The People's Republic of China Environmental Protection Industry Standard. HJ/T 342-2007. Water Quality Determination of Chromic Acid Barium Sulfate Spectrophotometry[S].
- Wang Longgui. 2006. The Microbial Transformation and Utilization of Coal[M]. Beijing: Chemical Industry Press(in Chinese) .
- Xu Yi, Zhong Huifang and Cai Wenliu. 1990. Microbial removal of pyritic sulfur from coal[J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 30(2): 134~140 (in Chinese with English abstract).
- Yang Zhaohui, Deng Enjian, Zeng Guangming, *et al.* 2006. Desulfurization of coal by *Phanerochaete chrysosporium* [J]. *China Environmental Science*, 26(2): 192~196 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Dongchen, Zhang Mingxu, Chen Qingru, *et al.* 2005. Study on coal desulphurization bacterium magnetizing cultivated and the magnetic biological effect mechanism[J]. *Journal of China Coal Society*, 30(4): 484~488 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Mingxu, Li Qing, Wang Yong, *et al.* 2001. A study of biosurface modification in the seperation of Wannan pyrite coal by froth floatation[J]. *Journal of China Coal Society*, 26(6): 671~675 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Qunying and Gao Tingyao. 2001. Environmental Microbiology [M]. Beijing Higher Education Press(in Chinese) .

#### 附中文参考文献

- 巩冠群, 陶秀祥. 2006. 煤炭生物脱硫的白腐菌浮选和浸滤研究[J]. *煤炭科学技术*, 34(2): 49~56.
- 连宾. 1998. 硅酸盐细菌的解钾作用研究[M]. 贵阳: 贵州科技出版社.
- 李定旭. 2003. 硅酸盐细菌在苹果上的应用效果[J]. *果树学报*, 20(1): 64~66.
- 邱建辉, 邸进申, 李英杰. 2001. 生物脱硫的研究进展[J]. *微生物学报*, 41(5): 650~653.
- 孙德四, 张贤珍, 张强. 2006. 硅酸盐细菌代谢产物对硅酸盐矿物的浸溶作用研究[J]. *矿冶工程*, 26(3): 27~29.
- 王龙贵. 2006. 煤炭的微生物转化与利用[M]. 北京: 化学工业出版社.
- 徐毅, 钟慧芳, 蔡文六. 1990. 微生物法脱除煤中黄铁矿硫[J]. *微生物学报*, 30(2): 134~140.
- 杨朝晖, 邓恩建, 曾光明, 等. 2006. 黄孢原毛平革菌用于煤炭脱硫的特性[J]. *中国环境科学*, 26(2): 192~196.
- 张东晨, 张明旭, 陈清如, 等. 2005. 煤炭脱硫菌磁化培育及磁生物效应机理的研究[J]. *煤炭学报*, 30(4): 484~488.
- 张明旭, 李庆, 王勇, 等. 2001. 皖南高硫煤微生物-浮选法脱硫的研究[J]. *煤炭学报*, 26(6): 671~675.
- 中华人民共和国国家标准. GB/T 214-2003. 煤中全硫的测定方法[S].
- 中华人民共和国国家标准. GB/T 215-2003. 煤中各种形态硫的测定方法[S].
- 中华人民共和国环境保护行业标准. HJ/T 342-2007. 水质硫酸盐的测定铬酸钡分光光度法[S].
- 周群英, 高廷耀. 2001. 环境工程微生物学[M]. 北京: 高等教育出版社.