

# 一株产絮凝剂硅酸盐细菌的筛选及其絮凝特性

冯雅丽<sup>1</sup>, 王宏杰<sup>1</sup>, 李浩然<sup>2</sup>, 杜竹玮<sup>2</sup>, 罗小兵<sup>1</sup>

1. 北京科技大学 土木与环境工程学院, 北京, 100083;
2. 中国科学院过程工程研究所 生化工程国家重点实验室, 北京, 100080)

**摘要:** 从土壤中筛选到一株产絮凝剂的硅酸盐菌株B12。对其絮凝剂产生条件进行优化, 并考查其絮凝特性。以质量浓度为 8 g/L 的葡萄糖和 0.15 g/L 的 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 作为碳源和氮源, 调节初始pH值至 6.9, 在温度为 31 °C、转速为 150 r/min的摇床中培养 72 h后, 菌株的絮凝活性最高, 絮凝率可达 93.6%。絮凝剂特性研究表明: 供氧可提高细菌的生长量, 但不利于絮凝剂的生成。分段培养有利于提高絮凝率。该菌起絮凝作用的主要是其胞外代谢物, 其适用pH值范围广, 为 0.5~12, 絮凝率大于 90%; B12 菌生物絮凝剂稳定性好, 与其他无机絮凝剂相比, 其絮凝活效果好、无毒、无二次污染, 在矿浆固液分离及矿物废水处理方面有着广阔的应用前景。

**关键词:** 硅酸盐细菌; 微生物絮凝剂; 絮凝活性; 絮凝率

**中图分类号:** X703; X74      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1672-7207(2008)05-0934-06

## A bioflocculant-producing silicate bacteria screening and its flocculating activity

FENG Ya-li<sup>1</sup>, WANG Hong-jie<sup>1</sup>, LI Hao-ran<sup>2</sup>, DU Zhu-wei<sup>2</sup>, LUO Xiao-bing<sup>1</sup>

- (1. School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. National Key Laboratory of Biochemical Engineering, Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Science, Beijing 100080, China)

**Abstract:** A flocculant-producing silicate strain, B12, was isolated from soil. Its flocculant producing conditions and flocculation characteristics were studied. The results show that, adding 8 g/L glucose and 0.15 g/L  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  as the source of carbon and nitrogen, adjusting the initial pH value at 6.9, culturing 72 h at 31 °C and the shaking speed of 150 r/min, the highest flocculating rate reaches 93.6%. Providing oxygen can enhance the bacterium growth rate, but will be disadvantageous to product flocculant. B12 is cultured in sections, which is benefit for promoting the flocculating rate. The extracellular metabolites of B12 strain mainly takes the flocculant, and could apply in pH range of 0.5-12 with highly stability, and the flocculant rate is above 90%. Compared with other inorganic flocculants, the bioflocculant is high effective, non-toxic and with no secondary pollution, and it will have a good prospect of application in the solid-liquid separation and mineral pulp wastewater treatment.

**Key words:** silicate bacteria; microbial flocculant; flocculating activity; flocculating rate

硅酸盐细菌是由Alexandrov在1950年从土壤中分离得到的<sup>[1]</sup>, 是一类兼性好氧的化能异养细菌, 可利用蔗糖、葡萄糖、淀粉等多种碳源, 在无氮培养基上

生长。目前, 国内外对硅酸盐细菌在肥料、饲料、冶金及瓷业等方面已进行大量研究, 由于其具有脱硅、解钾、除铝等特性, 所以, 硅酸盐细菌在矿冶工

收稿日期: 2007-12-15; 修回日期: 2008-03-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(20576137); 国家“863”计划资助项目(2007AA05Z158); 国家支撑计划资助项目(2006BAB02A11)

通信作者: 李浩然(1968-), 男, 甘肃合水人, 副研究员, 硕士生导师, 从事矿物微生物研究; 电话: 010-82627064; E-mail: hrli@home.ipe.ac.cn

业上主要用于矿石富集、提取有价金属等<sup>[2-4]</sup>。另外,这类特殊的芽胞杆菌可产生十分丰富的胞外多糖,是一种良好的生物絮凝剂<sup>[3]</sup>。传统的无机盐类絮凝剂絮凝效果不理想,有机高分子絮凝剂虽然效果很好,但是,它的单体具有强烈的神经毒性,会导致“三致效应”,其应用受到极大限制,而微生物絮凝剂以其高效、无毒、无二次污染和絮凝范围广泛等特点,日益受到研究者重视<sup>[4-6]</sup>。一般微生物的培养成本过高,且所产絮凝剂活性低,导致絮凝剂用量过高,严重阻碍其推广应用<sup>[5]</sup>。在此,本文作者筛选出一株硅酸盐细菌B12,对其培养条件进行优化,提高其絮凝活性。将其用于絮凝回收、分选矿物,絮凝矿山废水中微细颗粒及胶体,取得了良好的效果。

## 1 实验

### 1.1 实验材料

#### 1.1.1 菌种来源

菌种从菌肥(购自中国农业科学研究院)和土壤(采自北京郊区)中分离得到。

#### 1.1.2 用于分离、纯化的培养基组成

用于分离、纯化的培养基组成为:蔗糖,5.0 g/L; Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>, 2.0 g/L; MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O, 0.5 g/L; FeCl<sub>3</sub>, 0.005 g/L; CaCO<sub>3</sub>, 0.1 g/L; 高岭土, 0.5 g; 琼脂, 15~18 g/L。

#### 1.1.3 用于发酵的培养基组成

用于发酵的培养基组成为:蔗糖, 5.0 g/L; Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>, 2.0 g/L; MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O, 0.5 g/L; FeCl<sub>3</sub>, 0.005 g/L; CaCO<sub>3</sub>, 0.1 g/L; 高岭土, 0.5 g/L。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 菌种分离及富集培养

将土样和菌肥加入发酵培养基中,在温度为31℃、转速为150 r/min的摇床中富集培养48 h。然后,采用平板划线法在细菌分离培养基中进行菌种分离。硅酸盐细菌的菌落特征是:菌落光滑,边缘齐、透明、隆起、黏稠,1~2 d菌落直径为1~3 mm,3~7 d菌落直径为5~10 mm。在营养琼脂平板上及营养肉汤中均不生长。该菌大多为革兰氏染色阴性,细胞直径为1.2~1.8 μm,长为3~10 μm,两端钝圆,有肥厚荚膜,荚膜比菌体直径大3~5倍。悬滴标本观察菌体不运动<sup>[7-9]</sup>。将分离纯化的菌种斜面保存,进行下一步筛选实验。

#### 1.2.2 菌种复筛

将80 mL发酵培养基装入200 mL锥形瓶中,灭菌,加入分离富集的硅酸盐细菌接种,在温度为31℃、

转速为150 r/min下培养96 h后,取上清液进行絮凝活性测定。筛选出具有优良絮凝活性的菌株即为复筛菌种。

#### 1.2.3 絮凝活性的测定

絮凝活性用絮凝率来表示。在100 mL量筒中加入98 mL含0.4 g/L高岭土的悬浊液,2 mL培养液,搅拌3 min后静置5 min,用721分光光度计测定其上清液吸光度,波长选用550 nm。同时,以蒸馏水代替培养液作对照实验,通过以下公式确定絮凝率 $\eta$ 。

$$\eta = [(A-B)/A] \times 100\%$$

其中:A为对照上清液550 nm处的光密度;B为样品上清液550 nm处的光密度。

#### 1.2.4 细胞生长量的测定

采用ATP荧光法检测细菌数<sup>[10]</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 菌种分离筛选

经过分离筛选、鉴定得到15株硅酸盐细菌。以高岭土悬浊液为测试材料,测定每株菌种发酵培养液的絮凝活性。经过复筛,获得了一株絮凝活性较高的硅酸盐细菌菌株B12。

### 2.2 B12菌的生长及产絮凝剂曲线

将2 mL菌种接入到80 mL发酵培养基中,调节pH值至7.5,在温度为31℃、转速为150 r/min的摇床中连续培养144 h,每隔24 h测定培养液pH值、细胞生长量、絮凝率。B12菌的生长及絮凝剂产生曲线如图1所示。

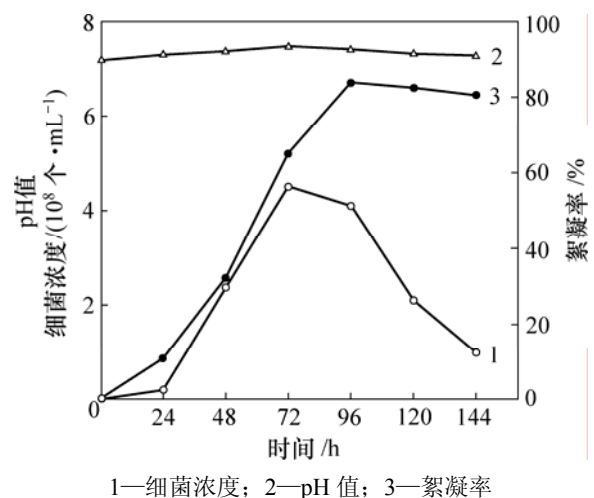


图1 B12菌的生长及产絮凝剂曲线

Fig.1 Growth and flocculant production curves of bacterium B12

由图 1 可以看出, B12 菌的生长曲线可分成 4 个时期, 即停滞期、对数生长期(0~72 h)、稳定期(72~96 h)和衰减期(96 h 以后)。培养液的絮凝率随着细胞生长量的增加而同步上升, 培养 96 h 时达到最大值, 稳定期后期和衰减期前期是收获絮凝剂的最佳时期。此后, 随着培养时间的延长, 发酵产物的絮凝活性略有下降, 但变化不大。这说明絮凝活性物质是细菌的代谢产物, 而非细菌细胞本身。96 h 后絮凝率有所下降, 可能因为生长期后期的营养物质耗尽, 絮凝剂作为一种有机大分子被菌体吸收利用。另外, 培养液 pH 值存在一个先升高后降低的过程, 细菌生长初期, 随着细菌对高岭土矿物的利用而使 pH 值上升, 当细菌处于稳定期之后, 大量代谢物的生成使体系 pH 值下降。

### 2.3 培养条件优化

#### 2.3.1 碳源种类的选择

碳源对絮凝剂的生成有较大的影响, 不同絮凝剂产生菌的最适碳源不同<sup>[11]</sup>。实验中分别采用蔗糖、可溶淀粉、葡萄糖、麦芽糖、乳糖和糖蜜废液作为培养基中唯一碳源, 其余培养条件不变, 考察不同碳源对 B12 菌絮凝活性的影响, 其结果见表 1。

表 1 不同碳源对 B12 菌絮凝活性的影响

Table 1 Effect of different sources of carbon on flocculating activity of bacterium B12

| 碳源   | 絮凝率/% |
|------|-------|
| 葡萄糖  | 85.1  |
| 淀粉   | 66.3  |
| 蔗糖   | 83.3  |
| 乳糖   | 73.6  |
| 糖蜜废液 | 55.6  |
| 麦芽糖  | 70.2  |

从絮凝活性看, 葡萄糖和蔗糖为碳源时菌种有较高的絮凝活性, 淀粉、乳糖、麦芽糖和糖蜜废液为碳源时絮凝率较低。实验结果表明, 葡萄糖是 B12 菌株最佳碳源。

#### 2.3.2 碳源含量的确定

以葡萄糖为碳源, 分别取葡萄糖浓度为 2, 3, 5, 8, 10, 20 和 40 g/L, 其余培养条件不变, 得出较适宜的碳源浓度。实验结果见图 2。

由图 2 可知, 从絮凝率来看, 以 8 g/L 葡萄糖作为碳源时, 菌株对高岭土絮凝率最高, 达到最高(88.7%); 从菌种生长来看, 以 5 g/L 的葡萄糖作为碳源时细菌浓度最高, 过高或过低的糖浓度都不利于该菌株生长。这是由于糖浓度过低不能提供足够的能量

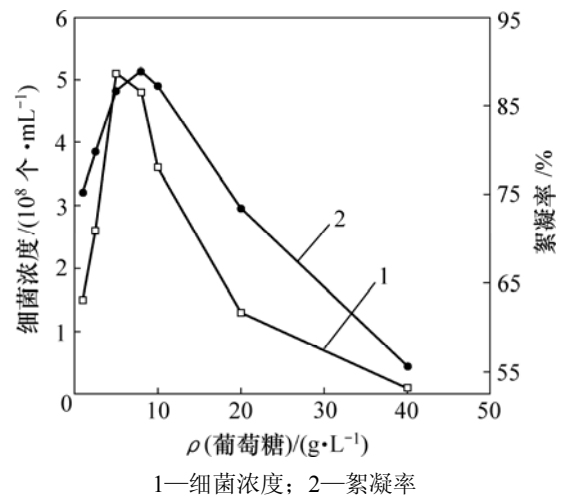


图 2 葡萄糖浓度对 B12 絮凝活性的影响

Fig.2 Effect of concentration of glucose on flocculating activity of bacterium B12

和物质来源; 而糖浓度过高会引起发酵液中渗透压过高, 使细胞失水, 生长受到抑制<sup>[12]</sup>。

#### 2.3.3 氮源对菌株絮凝活性的影响

硅酸盐细菌在无氮培养基上生长良好, 而在肉汤和蛋白胨培养基中不生长, 说明少量无机氮源可促进细菌的生长<sup>[7]</sup>。以 8 g/L 葡萄糖为碳源, 其他条件不变, 分别加入 0.1, 0.15, 0.2, 0.3, 0.5 和 0.8 g/L (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 考察氮源对 B12 的生长及产物絮凝活性的影响, 结果见图 3。

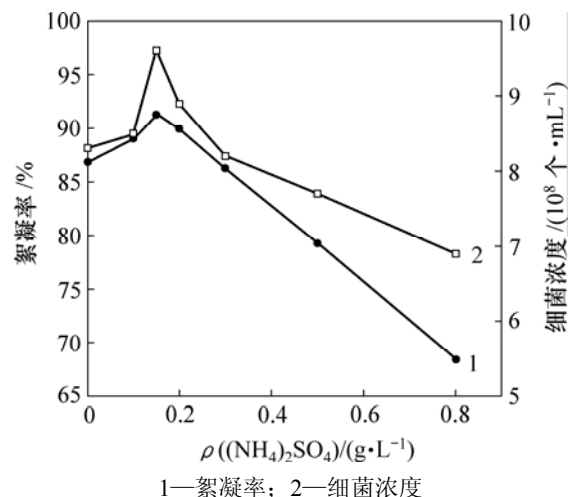


图 3 (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 浓度对 B12 絮凝活性的影响

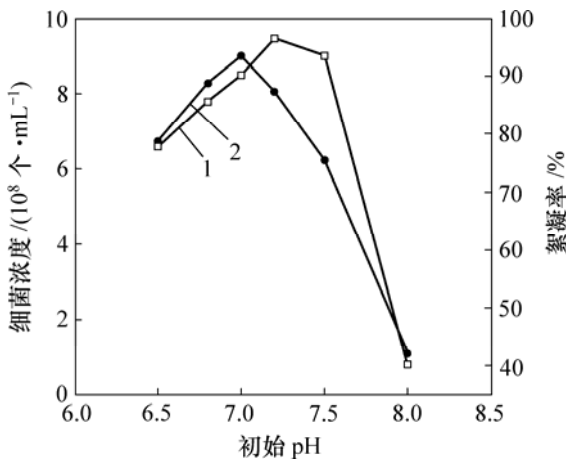
Fig.3 Effect of concentration of (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> on flocculating activity of B12

从图 3 可以看出, 少量氮源的存在不仅使细菌的生长量大大提高, 同时, 有利于絮凝活性物质的生成。

当 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 质量浓度为 0.15 g/L时, B12 菌的细菌浓度最高, 菌株培养液对高岭土的絮凝率达到最大值 (90.3%), 而随着  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 浓度的提高, 细菌的浓度和絮凝率均逐渐降低。说明在碳氮比(即 $m(\text{葡萄糖}):m((\text{NH}_4)_2\text{SO}_4)$ )为 54 时, 最有利于细菌的生长和絮凝活性物质的生成。

2.3.4 培养基初始 pH 值对菌株絮凝活性的影响

以 8 g/L葡萄糖为碳源, 0.15 g/L  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 为氮源, 其余条件不变, 培养液的初始pH值分别为 6.5, 6.8, 7.0, 7.2, 7.5 和 8.0。考察初始pH值对菌株絮凝活性的影响, 结果见图 4。



1—细菌浓度; 2—絮凝率

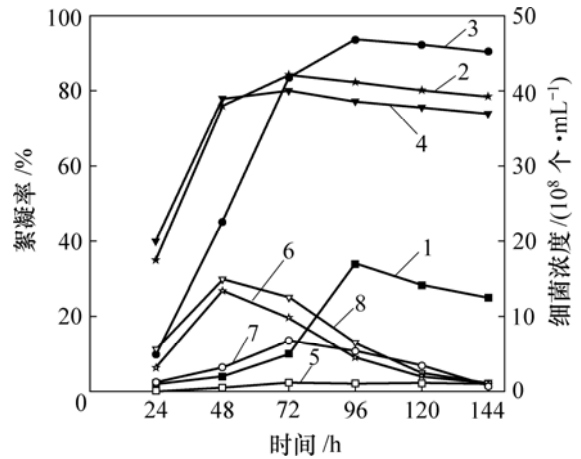
图 4 培养基初始 pH 值对菌株絮凝活性的影响

Fig.4 Effect of different initial pH values on flocculating activity of B12

由图 4 可以看出, B12 菌生长最适pH值在 7.2 左右。pH值过低或过高都会引起微生物表面电荷的改变, 不利于细胞对营养物质的吸收; 且pH值改变将使有机化合物离子化, 不利于有机化合物渗入细胞<sup>[4]</sup>。对于絮凝剂的产生, 初始pH值为 6.9, 絮凝率可达 93.6%。这是因为在一定量氮源存在的条件下, B12 菌的培养液呈微弱酸性, 发酵 96 h后初始pH值为 6.9 的培养液可降至 6.75, 有利于絮凝剂的产生。由此可知, 可采用分段培养方式, 对数生长期前pH值控制在 7.2, 以利于菌株的生长, 稳定前期将pH值控制在 6.9, 利于絮凝活性物质的生成, 提高絮凝率。

2.3.5 通气方式对菌株絮凝活性的影响

其他条件固定的前提下, 分别采用静止、摇床(31 °C, 150 r/min)、通空气、通氧气等培养方式, 考察不同通气方式对菌株絮凝活性的影响, 结果如图 5 所示。



1, 5—静置培养; 2, 6—通入空气;

3, 7—摇床培养; 4, 8—通入氧气

曲线 1~4: 絮凝率; 曲线 5~8: 细菌浓度

图 5 通气方式对菌株絮凝活性的影响

Fig.5 Effect of ventilation methods on flocculating activity of B12

由图 5 可以看出, 供气方式不同, B12 的生长和絮凝活性差异很大。从菌种生长看, 静止培养菌株生长缓慢, 细胞生长量很小; 通空气和通氧气培养的菌株停滞期短, 培养 48 h 就进入对数生长期, 细胞生长量也大大高于摇床培养; 通氧气培养的菌株生长状况略优于通空气培养。菌种生长情况由大到小排序为: 通氧气, 通空气, 摇床, 静止。从絮凝率看, 静止培养的菌株絮凝率增长缓慢, 最大值仅为 34%左右; 通空气和通氧气培养的菌株絮凝率比摇床培养的低, 通空气培养的菌株 72 h 絮凝率达到最大值; 而通氧气的在培养 48 h 后絮凝率就接近最大, 约为 78%, 低于通空气培养的 83%。4 种通气方式絮凝活性由大到小排序为: 摇床, 通空气, 通氧气, 静止。由此可知, B12 为好氧菌, 通氧气有利于其生长, 但供氧不利于絮凝剂的生成。其原因在于氧气充足的条件下, 细菌迅速繁殖, 营养物质消耗过快, 生成的胞外代谢物作为营养物质被细菌重新利用。

2.4 絮凝条件实验

2.4.1 絮凝活性分布

发酵液以 10 000 r/min 的转速离心 5 min, 将菌体用灭菌水洗涤后, 分别测定上清液和菌体絮凝活性, 结果如图 6 所示。离心后上清液的絮凝活性与原发酵液的絮凝活性相近, 细胞悬液几乎无絮凝活性。由此可知, 絮凝剂主要存在于上清液中, 起絮凝作用的是发酵过程中产生并释放到细胞外的代谢产物。

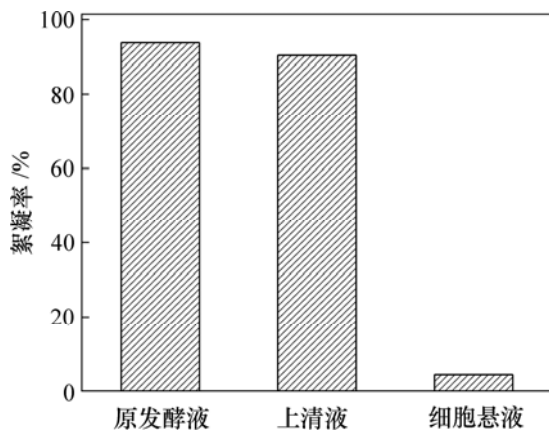


图 6 B12 絮凝活性的分布

Fig.6 Distribution of flocculating activity of B12

#### 2.4.2 絮凝的热稳定性

据报道, 高温影响某些生物絮凝剂的絮凝性能, 例如 *R.erythropolis* 所产絮凝剂在 100 °C 的水中加热 15 min 后, 其絮凝活性下降 50%<sup>[13-14]</sup>。将 B12 菌生物絮凝剂经压力为 0.1 MPa 和温度为 121 °C 热处理 20 min, 检测其絮凝活性, 结果表明处理后的絮凝剂保持了 90% 以上的絮凝活性。进一步说明生物絮凝剂的絮凝活性不是菌体本身产生的, 且 B12 菌生物絮凝剂具有强热稳定性, 这将利于工业化生产, 即絮凝剂的进一步提取、纯化和精制。

#### 2.4.3 絮凝体系 pH 对絮凝效果的影响

pH 值不仅影响絮凝剂的表面电荷性质、形态结构, 还影响水体中悬浮物质的电荷性质, 从而影响它们的相互作用, 因此, 微生物絮凝剂对任一废水的絮凝都有 1 个最适的 pH 值, 使絮凝反应速度最快, 絮体溶解度最小, 絮凝作用最大<sup>[15]</sup>。

水样(高岭土悬液)pH 对絮凝效果的影响见图 7。pH 值为 0.5~12 时, B12 菌生物絮凝剂的絮凝率均大

于 90%, 特别是在中性及偏酸环境下具有更高的絮凝能力, 由此反映出该菌株所产生的絮凝剂具有良好的适应性与稳定性。

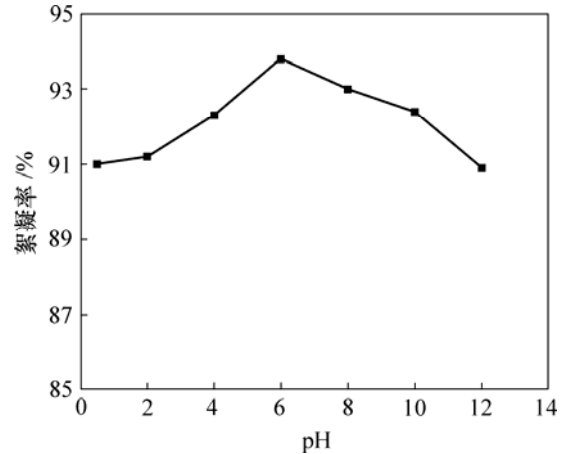


图 7 水样 pH 值对絮凝效果的影响

Fig.7 Effect of different pH values of sample on flocculating activity of B12

#### 2.4.4 与其他絮凝剂的对比实验

将 B12 菌在发酵培养基中培养 72 h, 对熟化后的黄磷电尘、活性炭粉、土壤悬浊液进行絮凝实验, 方法同高岭土悬浊液絮凝率的测定, 并用硫酸铝、聚合氯化铝(PAC)、聚丙烯酰胺(PAM)作对比实验, 结果见表 2。

由表 2 可知, 由于结构组成、絮凝机理等方面的不同, 各絮凝剂对于悬浊液的处理效果是不同的。在这几种絮凝剂中, 聚丙烯酰胺(PAM)作为一种有机高分子聚合絮凝剂, 处理效果最好。B12 的絮凝活性略低于 PAM, 但是优于无机铝系絮凝剂, 而且投加量远远低于硫酸铝和 PAC。此外, 相对土壤和活性炭粉悬浊液, B12 菌株絮凝剂对熟化后的黄磷电尘絮凝效果优越许多, 能很快的使固液分离, 同时, 由于其高效、

表 2 B12 产生的微生物絮凝剂与其他絮凝剂絮凝效果的对比实验

Table 2 Eloculation effect of microbial flocculant produced by B12 compared with other flocculants

| 悬浊液                   | 絮凝率/%        |            |            |                |
|-----------------------|--------------|------------|------------|----------------|
|                       | B12(25 mL/L) | PAC(1 g/L) | 硫酸铝(1 g/L) | PAM(0.025 g/L) |
| 黄磷电尘悬浊液 <sup>1)</sup> | 88.6         | 73.9       | 66.6       | 89.7           |
| 活性炭粉悬浊液(2 g/L)        | 81.4         | 65.7       | 62.3       | 79.1           |
| 土壤悬浊液 <sup>2)</sup>   | 85.3         | 68.1       | 58.7       | 81.3           |
| 淀粉悬浊液(5 g/L)          | 90.6         | 74.3       | 69.8       | 92.3           |

1) 黄磷电尘悬浊液是浓硫酸熟化预处理后称取样品 5 g 加入 1 L 蒸馏水中, 沉降 30 min 后制得;

2) 土壤悬浊液是将土壤样品烘干后称取 5 g 加入到 1 L 蒸馏水中, 沉降 30 min 后制得。

无毒且环境友好,因此,有着广阔应用前景。

### 3 结 论

a. 通过复筛获得了一株对高岭土悬浊液具有较高絮凝活性的硅酸盐细菌菌株 B12,在最佳发酵培养基中絮凝率达 93.6%。

b. 实验得到的最佳培养条件为:采用 8 g/L 葡萄糖为碳源,加入 0.15 g/L  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ,调节初始 pH 值为 6.9,在温度为 31 °C、转速为 150 r/min 的摇床中培养 72 h 后,菌株的絮凝活性最高。采用分段培养方式,对数生长期前 pH 值控制在 7.2,利于菌株的生长,稳定期 pH 值控制在 6.9,利于絮凝剂的生成,提高絮凝率。

c. 该菌起絮凝作用的主要是其胞外代谢物,其适用 pH 值范围广,pH 值在 0.5~12 之间,絮凝率大于 90%;B12 菌生物絮凝剂经 0.1 MPa 和 121 °C 热处理 20 min,仍可保持 90% 以上的絮凝活性,说明该菌株絮凝剂稳定性强,利于工业生产。

d. 通过与其他絮凝剂的对比实验表明:硅酸盐絮凝活性强于硫酸铝和 PAC 等无机絮凝剂。并且该菌对熟化后的黄磷电絮凝效果较好,在矿浆固液分离及矿物废水处理方面有着广阔的应用前景。

#### 参考文献:

- [1] 孙德四,张强. 硅酸盐细菌在资源工程中的应用研究现状[J]. 黄金,2006,27(1): 32-36.  
SUN De-si, ZHANG Qiang. A review of silicon bacteria application in mineral engineering[J]. Gold, 2006, 27(1): 32-36.
- [2] 周吉奎,胡岳华,邱冠周. 硅酸盐细菌在矿物工程领域应用研究进展[J]. 金属矿山,2002(1): 26-28.  
ZHOU Ji-kui, HU Yue-hua, QIU Guan-zhou. Advances in the application research of silicate bacteria in mineral engineering field[J]. Metal Mine, 2002(1): 26-28.
- [3] Lian B, Prithiviraj B, Souleimanov A, et al. Evidence for the production of chemical compounds analogous to nod factor by the silicate bacterium *bacillus circulans* GY92[J]. Microbiol Res, 2001, 156: 289-292.
- [4] 郑怀礼. 生物絮凝剂与絮凝技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 91-114.  
ZHEN Huai-li. Biofloculant and flocculation[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004: 91-114.
- [5] LIAN Bin, CHEN Ye, YUAN Sheng, et al. Study on the flocculability of metal ions by *bacillus mucilaginosus* GY03 strain[J]. Chinese Journal of Geochemistry, 2004, 23(4): 381-386.
- [6] 陶然,杨朝晖,曾光明,等. 微生物絮凝剂及其絮凝微生物的研究进展[J]. 微生物学杂志, 2005, 25(4): 82-88.  
TAO Ran, YANG Zhao-hui, ZENG Guang-ming, et al. Advance in microbial flocculant and flocculent microbe[J]. Journal of Microbiology, 2005, 25(4): 82-88.
- [7] 邓述波,胡筱敏,罗茜. 微生物絮凝剂的研究和应用[J]. 国外金属矿选矿, 1998(15): 15-18.  
DENG Shu-bo, HU Xiao-min, LUO Qian. Research and application of microbial flocculant[J]. Foreign Metal Ore Beneficiation, 1998(15): 15-18.
- [8] 陈育如,杨启银. 解钾硅酸盐细菌培养基及培养条件的研究[J]. 南京师大学报: 自然科学版, 2001, 24(3): 88-92.  
CHEN Yu-ru, YANG Qi-yin. The study on *Bacteria mucilaginosus* culture media and condition optimization[J]. Journal of Nanjing Normal University: Natural Science, 2001, 24(3): 88-92.
- [9] 王平宇,张树华. 硅酸盐细菌的分离及生理生化特性的鉴定[J]. 南昌航空工业学院学报, 2001, 15(2): 78-82.  
WANG Ping-yu, ZHANG Shu-hua. Study on the isolation of silicate bacteria and its identification of biochemical characteristics[J]. Journal of Nanchang Institute of Aeronautical Technology, 2001, 15(2): 78-82.
- [10] 张菊梅,吴清平,李程思,等. 生物发光法微生物快速检测试剂的性质及其影响因素研究[J]. 微生物学通报, 2006, 33(3): 36-41.  
ZHANG Ju-mei, WU Qing-ping, LI Chen-si, et al. Study on the characteristics and influential factors of rapid detection reagent by bioluminescence[J]. Microbiology Communications, 2006, 33(3): 36-41.
- [11] 王国惠. 一株生物絮凝剂产生菌的筛选及絮凝活性研究[J]. 微生物学通报, 2006, 33(5): 107-111.  
WANG Guo-hui. Screen of a bio-flocculants-producing strain and study on flocculating activity[J]. Microbiology Communications, 2006, 33(5): 107-111.
- [12] 周礼,张永奎,陈晓,等. 一种高效微生物絮凝剂产生菌的筛选及培养基优化[J]. 环境科学学报, 2006, 26(4): 584-588.  
ZHOU Li, ZHANG Yong-kui, CHEN Xiao, et al. The screening of a flocculant-producing strain and optimizing of its culture conditions[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2006, 26(4): 584-588.
- [13] 朱艳彬,马放,黄君礼,等. 生物絮凝剂絮凝特性与絮凝条件优化研究[J]. 中国给水排水, 2006, 22(3): 4-7.  
ZHU Yan-bin, MA Fang, HUANG Jun-li, et al. Study on flocculation properties of biofloculant and optimization of flocculation conditions[J]. China Water & Wastewater, 2006, 22(3): 4-7.
- [14] 李旭,李小明,杨麒,等. 一株絮凝剂产生菌的筛选及其絮凝特性研究[J]. 生物技术, 2007, 17(1): 33-37.  
LI Xu, LI Xiao-ming, YANG Qi, et al. Screening of a biofloculant-producing strain and its flocculating characteristics[J]. Biotechnology, 2007, 17(1): 33-37.
- [15] 胡勇有,高宝玉. 微生物絮凝剂[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007: 9-57.  
HU Yong-you, GAO Bao-yu. Microbial flocculant[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007: 9-57.