

黑曲霉对石英砂除杂效应研究

孙茹秋^{1, 2}, 连宾^{3*}

1. 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, 贵阳 550002; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 江苏省微生物工程技术研究中心, 南京师范大学生命科学学院, 南京 210023

摘要: 研究利用黑曲霉(*Aspergillus niger*)降低石英砂中杂质含量, 提高其白度。采用不同培养基、培养状态以及培养时间来探讨黑曲霉对石英砂除杂效率的影响, 用 X 荧光光谱仪(XRF)检测不同处理石英砂化学组成, 扫描电子显微镜(SEM)观察石英砂微观形貌, 原子吸收法测定培养基中阳离子浓度。结果表明, 黑曲霉对石英砂除杂效果明显。试验最佳处理条件是: PDA 液体培养基, 28℃, 120 r/min 震荡培养 6 d, 铁杂质去除率可达 62.7%, 石英砂白度明显提高。就黑曲霉对石英砂除杂机理进行了综合分析, 强调黑曲霉-矿物聚集体及其酸性微环境有助于石英砂中杂质的浸出。

关键词: 黑曲霉; 石英砂; 除杂; 生物淋滤; 纯化

中图分类号: P 578.4⁺92 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2802(2014)06-0784-06 **doi:** 10.3969/j.issn.1007-2802.2014.06.005

Effect of *Apergillus Niger* on the Impurity Removal of Quartz Sands

SUN Ru-qiu^{1,2}, LIAN Bin^{3*}

1. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, of Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Jiangsu Engineering and Technology Research Center for Microbiology, College of Life Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China

Abstract: This paper studied the leaching process by *Apergillus niger* for reducing the impurities contents in quartz sand and for improving the whiteness of quartz. The effects of *A. niger* on the impurity removal efficiency were studied by using different culture media, culture state and leaching time. XRF was used to determine the composition of quartz sands, SEM was used to observe mineral micro-morphology, and atomic absorption method was used to detect ion concentration in culture media. The results showed that the optimum leaching condition, under which iron removal rate reached 62.7% and quartz sand whiteness improved obviously after the fungal treatment, was as follows: PDA liquid medium, 28℃, 120 r/min, and a leaching time of 6 days. The fungal-mineral aggregation and acidic micro-environment are responsible for improving the impurity removal from quartz by *A. niger*.

Key words: *Aspergillus niger*, quartz sand, impurity removal, bioleaching, purification

石英砂又称硅砂, 主要化学成分为 SiO₂, 是重要的非金属矿物原料(李勇等, 2008)。天然的石英矿常含各种伴生矿物, 如: 黏土矿物、长石和云母等(李萍等, 2011), 这些杂质尤其是含铁矿物的存在, 会严重影响石英砂的品质及其制成品的性能(Banza *et al.*, 2006; 闫勇等, 2009; 彭寿等, 2010)。中国优质石英砂矿产资源稀少, 石英矿大多品位较低, 而石

英砂的纯化技术水平与美国、日本等相比有很大差距, 这导致高纯石英在品种和规模上都不能满足中国新兴产业快速发展的旺盛需求(汪灵等, 2012)。工业生产中主要使用物理和化学方法对石英砂进行除杂纯化处理(郑翠红等, 2008), 如: 磁选法(李勇等, 2011)、超声波法(Farmer *et al.*, 2000; 赵洪力, 2004)、浮选法(郭银祥等, 2003; Mowla *et al.*,

收稿日期: 2014-07-13 收到, 09-19 改回

基金项目: 国家自然科学基金项目(41173091); 青海银达矿业有限公司企业课题

第一作者简介: 孙茹秋(1990-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 地质微生物。E-mail: ruhuadeai@126.com.

* 通讯作者简介: 连宾(1964-), 男, 教授, 博导, 研究方向: 地质微生物。E-mail: bin2368@vip.163.com.

2008)和酸浸法(Zhang *et al.*, 2012;李永安等, 2013)等。磁选法可去除石英砂中有磁性的杂质(Tuncuk and Akcil, 2014),如铁,但石英砂中的常见伴生矿物非磁性物质——长石则无法去除;超声波法纯化石英砂可以达到很好的效果,但价格昂贵(李勇等,2008);浮选法可以去除石英砂中的非磁性物质和次生铁,却对环境产生严重污染(王军锋等, 2013);利用酸浸除石英砂杂质是目前使用最广泛、效果较好的化学方法,但其成本高昂,废液对环境污染严重(郑翠红等,2008)。

生物浸出技术是利用一些微生物将固相中某些不溶性的重金属、硫及其他金属离子等分离浸提的一种技术(任婉侠等,2007)。相对于物理和化学方法,生物浸出具有成本低、操作简单、环境友好等优势(余润兰等,2013)。利用微生物对石英砂除杂,尤其是清除其中的铁,对提高玻璃用石英砂的透明度是有效的(斯蒂里亚科娃等,2007)。黑曲霉已被证明能对多种矿物产生风化作用,如钾长石(胡婕等,2011a,2011b)、磷矿石(谌书等,2009)等,以及对炉甘石(又称极异矿)和硅镁镍矿中锌和镍有较好的去除效果。目前,黑曲霉作为相关研究和应用中重要且常见的浸矿菌种已被广泛利用。

为进一步研究黑曲霉对石英砂的除杂纯化效果,提高其除杂率,作者探讨黑曲霉处理石英砂的最优条件,并分析其除杂机理。

1 材料和方法

1.1 石英砂

石英砂由青海银达矿业有限公司提供,XRD分析其主要矿物组成为石英(含量大于90%)、斜长石和少量钾长石。粉碎并过200目筛,XRF(X荧光光谱仪,Axios-PW4400)分析其主量成分,其中SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃、CaO、MgO、TiO₂、MnO含量分别为92.2%、3.43%、0.59%、0.1%、0.08%、0.07%和0.03%。

1.2 菌种及培养

采用PDA液体培养基,接入一环黑曲霉菌种(由中国科学院地球化学研究所环境生物科学与技术研究中心提供),置28℃,120 r/min震荡培养2天,形成大小较均匀的菌丝球(直径约3 mm),用作后续对比发酵试验。

1.3 黑曲霉对石英砂的除杂作用

按表1设置5个实验组。分别是活菌组(在加入10 g石英砂的150 mL PDA培养液中,接入1.2中培养的3个菌丝球)、死菌组(接灭活菌丝球,其他

同活菌组)、无菌组(不接菌,其他同活菌组)、无砂组(不加石英砂,其他同活菌组)以及纯水组(在150 mL水中加入10 g石英砂)(表1)。

表1 各处理组添加石英砂和接种情况

Table 1 Added quartz sands and inoculation for different treatment groups

组别	培养基(mL)	石英砂(g)	接种菌丝球(个)
活菌组	PDA 150	10	3
死菌组	PDA 150	10	3
无菌组	PDA 150	10	无
无砂组	PDA 150	0	3
纯水组	超纯水 150	10	无

以上各实验组均设置3个重复,28℃,120 r/min,震荡培养10天。取出菌丝球,先用镊子小心剥开,然后用超纯水冲洗黑曲霉包裹的石英砂,取适量石英砂充分混合,XRF分析其主量成分。

1.4 黑曲霉浸矿条件

1.4.1 最佳培养基 选取4种常用的真菌液体培养基,分别是:PDA液体培养基、沙氏液体培养基、察氏液体培养基(CZA)和10%豆芽汁葡萄糖培养基。分别在250 mL三角瓶中添加150 mL上述1种培养基,再加入10 g石英砂(依序分别记为A、B、C、D四组),灭菌,接种(同上)。置28℃,120 r/min震荡培养10 d,每组均设置3个重复。培养结束后,XRF分析4组处理中菌丝球包裹的石英砂主量成分(同1.3),并按纯化效果优劣挑出一种最佳培养基。

1.4.2 最佳浸矿状态 用1.4.1实验所得最佳培养基进行浸矿状态优化实验。在250 mL三角瓶中添加150 mL培养基和10 g石英砂矿粉,灭菌后,接入3个菌丝球。置28℃,120 r/min震荡培养,即为震荡组。将三角瓶置于28℃,恒温静置培养,即为静置组。均培养10天,并设置3个重复。

观察震荡组与静置组黑曲霉与矿物相互作用的表观特征,测培养液pH值,同上取培养后石英砂,XRF分析其主量成分。

1.4.3 最佳浸矿时间 用得到的最佳培养基和最佳浸矿状态进行实验,设置以下2组:

E组:在250 mL三角瓶中添加150 mL培养基(1.4.1实验选出的最佳培养基)和10 g石英砂矿粉,分别接种培养1天、2天、4天、6天、8天、10天,均设3个重复。

取培养后菌丝球,同1.3取出石英砂,并分析其主量成分。

用PHS-25B酸度计测定两组培养液pH值;然

后将培养液用 0.45 μm 滤膜过滤,滤液用硝酸(浓度为 10%)酸化,原子吸收法测定滤液中阳离子(Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Fe^{3+})浓度。

F 组:为研究石英砂对培养体系的影响,设置相对 E 组的对照 F 组,即培养体系中不加石英砂,其余同 E 组处理。

1.5 黑曲霉-石英砂包裹体的形态观察及能谱分析

将 E 组和 F 组培养得到的部分菌丝球或菌块取出,用超纯水冲洗菌体表面后,用镊子挑开,取矿粉样干燥后在扫描电子显微镜(SEM, JSM-6460LV)下观察其微观形貌特征并做能谱分析。

2 结果与讨论

2.1 黑曲霉对石英砂的除杂作用

在 4 个不同培养条件下,活菌组中黑曲霉逐渐生长,培养液由浑浊逐渐变清,直至石英砂大都被包裹在黑曲霉所形成的菌丝球和大块菌膜(由黑曲霉主动包裹石英砂形成)中。在无砂组中,黑曲霉形成菌丝球,充盈培养液中,没有形成大块菌膜。而死菌组和无菌组一直处于无活菌生长的状态,培养液浑浊,无明显变化。图 1 为活菌组、死菌组和纯水组处理后所获得的石英砂的表观特征对比效果。显然,相对死菌或水洗处理,采用活菌处理,能使石英砂的

白度明显提高。



图 1 不同处理石英砂白度对比

Fig. 1 Effect of different treatment on the whiteness of quartz sands

将 1.3 中 4 组处理后石英砂与未处理石英砂进行 XRF 检测,经过多区域多次检测,其元素含量测定值规律性极好。表 2 为不同处理后石英砂化学成分含量。

表 2 不同处理后石英砂化学组成

Table 2 Chemical compositions of quartz sands in different treatments

组别	SiO_2	Al_2O_3	K_2O	Na_2O	Fe_2O_3	CaO	MgO	TiO_2	BaO	MnO	P_2O_5	%
活菌组	93.44	3.07	1.16	0.74	0.22	0.07	0.04	0.06	0.03	0.02	0.01	
死菌组	92.31	2.82	1.09	0.66	0.44	0.08	0.05	0.06	0.03	0.01	0.02	
无菌组	92.34	2.97	1.12	0.69	0.45	0.13	0.05	0.07	0.03	0.01	0.02	
纯水组	92.3	3.33	1.36	0.78	0.6	0.12	0.07	0.07	0.03	0.01	0.02	

显然,采用黑曲霉活菌对石英砂处理除杂效果明显,其中 Al、Ca、Fe、K、Mg、Mn 元素的含量均有不同程度的下降,特别是铁含量平均下降 62.7%。而采用死菌、无菌、纯水处理石英砂,杂质的去除率低。

提高石英砂白度的关键是去除石英砂中显色杂质,如:Fe、Mn、Ti 等。XRF 检测该石英砂原矿中硅含量为 92.2%,Mn 和 Ti 含量分别为 0.03%、0.07%,含量很少,对石英砂白度的影响不明显;而其中含量为 0.59%的铁,则对石英砂质量影响很大,故除去该石英砂中铁杂质尤为重要。

2.2 黑曲霉对石英砂除杂纯化条件优化

2.2.1 最佳培养基 检测 1.4.1 中 4 种不同培养条件下所处理的石英砂主量元素含量,用下列公式计算每组实验的杂质去除率:

Q 除杂率(%)=

$$\frac{\text{原矿中 Q 杂质含量} - \text{处理后 Q 杂质含量}}{\text{原矿中 Q 杂质含量}} \times 100\%$$

表 3 中列出了处理效果差异明显的 Fe^{3+} 、 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 去除率。

表 3 四种培养基培养下黑曲霉对 Fe^{3+} 、 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 的去除率

Table 3 Effect of *A. niger* on Fe^{3+} , Mg^{2+} and Ca^{2+} removal rate in four culture conditions (%)

检测项目	A 组	B 组	C 组	D 组
Fe_2O_3	56.11±4	55±5	16.67±5	22.22±4
MgO	47.14±8	42.86±6	28.57±8	28.57±4
CaO	17	67±15	—	10±2

结果表明,4 种不同培养基培养黑曲霉,都能使其中的石英砂中的杂质得到不同程度的降低;其中

A 组和 B 组作为浸矿除杂培养基效果相对较好,对 Fe^{3+} 的去除率均超过 55%。由于 PDA 液体培养基除杂率高且成本相对较低,所以认为在 4 种培养基中,PDA 液体培养基效果最好。

2.2.2 最佳浸矿状态 观察 1.4.2 中两组实验,震荡组培养液由浑浊逐渐变清,底部形成大块黑曲霉菌膜,将石英砂包裹住,上部有菌丝球或菌丝块形

成;而静置组中石英砂始终在底部,未被菌体包裹,黑曲霉菌丝块浮于液体表面,随培养时间增加,该菌丝块逐渐变厚,但始终与石英砂呈分离状态。

对培养后收集的石英砂进行 XRF 检测,同 2.2.1 计算得到静置组和震荡组中不同杂质的去除率,如表 4 所示。

表 4 静置和震荡培养的除杂率
Table 4 Impurity removal rates at static or shaky cultivation (%)

组别	Al_2O_3	CaO	Fe_2O_3	K_2O	MgO	MnO	Na_2O	P_2O_5	TiO_2
PDA 静置组	4.76 ± 0.6	3.33 ± 2	40.74 ± 1	6.82 ± 0.7	23.81 ± 0.8	—	6.17 ± 2	—	9.52 ± 1
PDA 震荡组	11.57 ± 2	17 ± 2	56.11 ± 3	8.86 ± 1	47.14 ± 4	—	8.64 ± 3	—	18.57 ± 6

由表 4 可知,震荡培养均比静置培养的除杂率高。可能的原因有:①震荡培养条件下,黑曲霉生长更快,生物量更多,更有利于微生物对矿物作用;②震荡培养条件下,黑曲霉形成菌丝球或菌丝块,将石英砂矿粉包裹在菌丝球或菌块中,使黑曲霉细胞与矿粉直接接触,对矿物作用更强。而静置培养,黑曲霉在培养基表面形成菌膜,与矿粉分离,对矿粉的作用基本只依靠其产生的有机酸和分泌的大分子物质对矿粉产生作用,对各杂质离子的除杂效果均弱于震荡培养下的除杂效果。

2.2.3 最佳浸矿时间 检测 1.4.3 中 E 组在不同培养时间处理的石英砂中各元素的含量,发现在培养第 6 天, Fe^{3+} 、 Al^{3+} 、 Mg^{2+} 等的含量快速下降,其中铁含量变化如图 2 所示。即:培养第 6 天铁含量为 0.31%,第 10 天铁含量降至于 0.29%。从提高浸矿效率的角度考虑,认为浸矿时间为 6 天较佳。

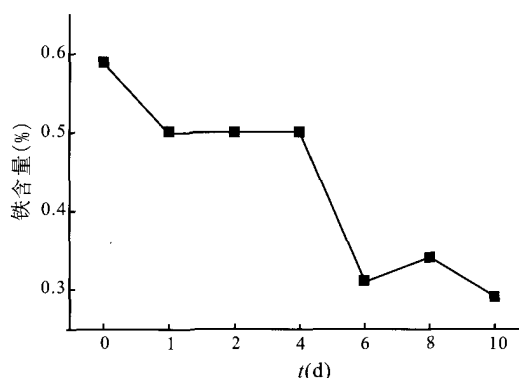


图 2 石英砂中铁含量随培养时间的变化
Fig. 2 Change of iron content in quartz sands along with the incubation time

此外,用原子吸收光谱测得 1.4.3 中 E 组和 F 组培养物上清液中 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Fe^{3+} 的离子浓度随时间变化情况,如图 3 所示。

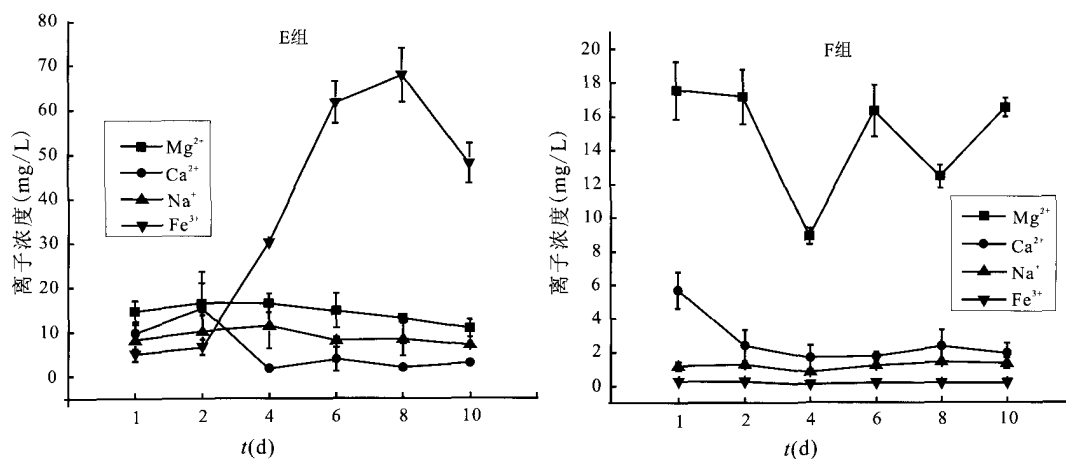


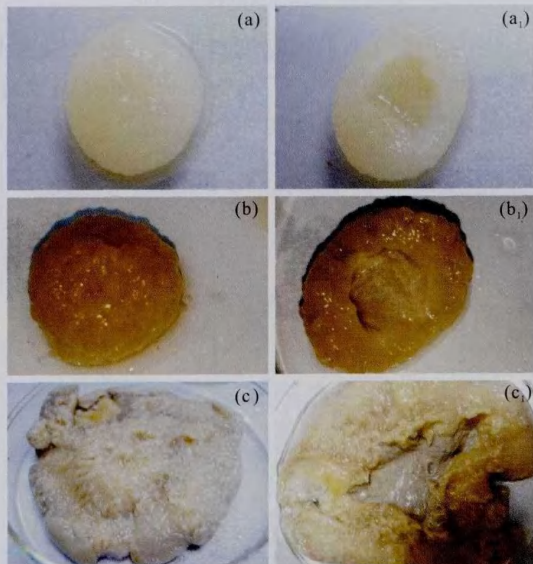
图 3 E 组和 F 组中各离子浓度随培养时间的变化

Fig. 3 Change of iron concentration in the culture supernatant of group E and F along with the incubation time

从图3可以看出,E组、F组上清液中离子浓度变化都具有一定的规律性。F组培养液中除 Mg^{2+} 浓度波动较大,其余3种离子基本随培养时间的增加呈逐渐下降的趋势;这说明黑曲霉菌丝吸收了培养液中的 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 和 Fe^{3+} 离子以维持其生命活动和生长,使离子浓度逐渐下降。而E组培养液中添加了石英砂,培养液中各离子浓度均随时间增加先上升后下降;其中在培养第6~8天中,离子浓度达到最高值(Ca^{2+} 除外)。说明通过黑曲霉的作用,使石英砂中的离子溶出,并使其离子浓度整体高于F组。其中 Fe^{3+} 浓度在E组中最高达67.61 mg/L,而在F组中 Fe^{3+} 含量最高仅有0.25 mg/L,这说明石英砂中 Fe^{3+} 在黑曲霉作用下被去除,该结果与表3中A组的高除铁率结果相符。

3 黑曲霉除杂机理分析

黑曲霉和黑曲霉-矿物聚集体的形态如图4所示。比较E组中形成的黑曲霉-矿物聚集体和F组黑曲霉菌丝球,可以看出,在震荡培养条件下,不加矿粉的黑曲霉一般会形成大小较均匀的菌丝球;而黑曲霉-矿物聚集体主要有2种形态:球状和膜块状。用镊子挑开其表面菌丝,无矿粉的菌丝球内外菌丝均为乳白色,而黑曲霉-矿物聚集体外部菌丝为白色偏黄,内有灰白色石英砂粉末,紧贴菌丝球内壁。



(a)黑曲霉菌丝体;(b)球状黑曲霉-矿物聚集体;(c)块状黑曲霉-矿物聚集体;a₁、b₁、c₁分别为a、b、c用镊子挑开后形态

图4 黑曲霉菌丝体和黑曲霉-矿物聚集体形态对比

Fig. 4 Morphological characteristics of *A. niger* mycelium and *A. niger*-mineral aggregation

将部分黑曲霉菌丝体和黑曲霉-矿物聚集体干燥后在SEM下进行微观形态观察,并进行能谱微区成分分析,结果如图5。

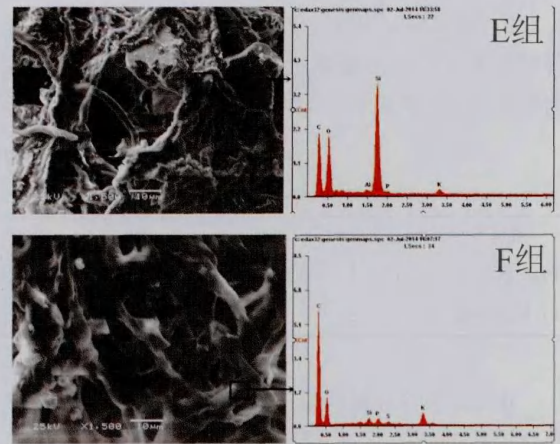


图5 黑曲霉菌丝体及黑曲霉-矿物聚集体扫描电镜和能谱分析

Fig. 5 SEM and energy spectrum analysis of *A. niger* mycelium and *A. niger*-mineral aggregation

可明显观察到E组中黑曲霉菌丝缠绕矿物,而F组仅观察到黑曲霉的菌丝体。结合能谱分析得出,E组不仅检测到碳、氧、磷等生物成分,还检测出大量构成石英砂的硅、铝等元素。F组中仅检测出构成生物体的碳、氧、磷等元素,而不含石英砂中的主要矿质元素。这表明E组中形成的是由矿粉颗粒和菌丝体共同构成的黑曲霉-矿物聚集体。

用酸度计测定E组和F组上清液pH值,结果如图6。

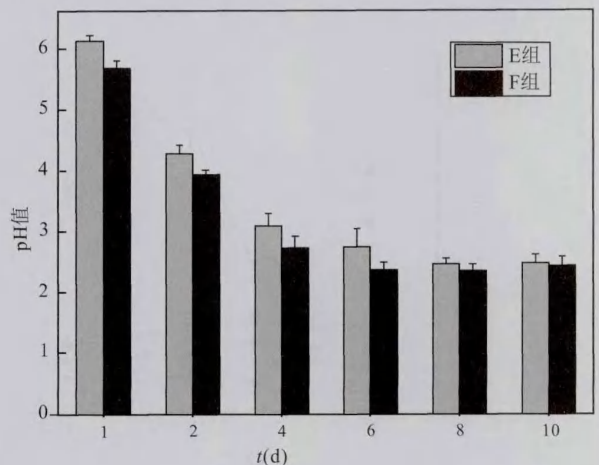


图6 E组和F组pH值变化

Fig. 6 pH value change of group E and group F along with the incubation time

在培养过程中,黑曲霉产酸,使培养微环境呈酸性,随着培养时间的增加,pH 值逐渐降低。E 组培养的第 1~4 天,pH 下降快,从 6.12 下降到 3.10;第 4~10 天,pH 值缓慢下降,从 3.09 下降到 2.48;第 8 天后,pH 值基本保持稳定。F 组在第 1~4 天,pH 值下降速率快,从 5.68 下降到 2.73;4 天后,pH 值基本保持稳定。比较 E 组和 F 组,两组自第 6 天后 pH 值似乎没有显著差异,但石英砂的存在延缓了培养体系 pH 值的下降。黑曲霉产生的有机酸显然有利于石英砂中金属离子的溶出。

产生有机酸并非是石英砂除杂的唯一方式,比较震荡组和静置组(见 1.4.2)培养黑曲霉 10 天后的 pH 值(分别为 2.71 和 2.52),发现震荡条件下 pH 值略高于静置培养状态的 pH 值,但相差不明显,震荡条件下黑曲霉对石英砂的除杂效果要好得多(表 4),说明黑曲霉对石英砂除杂的原因不仅只依靠其创造的酸性环境。由于震荡条件下黑曲霉生长更快,生物量更多,并且产生大量的有机酸和分泌的大分子物质更有利于微生物对矿物的风化作用。此外,震荡培养条件下,黑曲霉菌丝体的生长、缠绕和包裹形成黑曲霉-矿物聚集体,将石英砂矿粉包裹在菌丝球或菌块中,导致对矿粉的直接风化作用。

4 结 论

用黑曲霉处理石英砂能使其中的杂质浸出,并对铁杂质的去除最为明显,去除率达到 62.7%。石英砂白度明显提高。实验获得的黑曲霉纯化石英砂的最佳浸矿条件为:用 PDA 液体培养基,28℃,120 r/min,震荡培养 6 天。

黑曲霉对石英砂除杂作用应该是由多因素协同作用下的综合效果。黑曲霉生长形成的酸性环境,分泌的胞外物质都有利于石英砂中杂质的浸出。在震荡培养条件下,黑曲霉与石英砂形成真菌-矿物聚集体,使真菌细胞与矿粉直接接触,导致更多的杂质被浸出。

致谢:感谢青海银达矿业有限公司提供石英砂原料!

参考文献 (References):

- Banza A N, Quindt J, Gock E. 2006. Improvement of the quartz sand processing at Hohenbocka[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 79(1): 76-82.
- Farmer A D, Collings A F, Jameson G J. 2000. Effect of ultrasound on surface cleaning of silica particles[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 60(2): 101-113.
- Mowla D, Karimi G, Ostadnezhad K. 2008. Removal of hematite from silica sand ore by reverse flotation technique[J]. *Separation and Purification Technology*, 58(3): 419-423.
- Tuncuk A, Akcil A. 2014. Removal of iron from quartz ore using different acids: A laboratory-scale study[J]. *Reactor Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 35(4): 217-28.
- Zhang Z Z, Li J S, Li X X, Huang H Q, Zhou L F, Xiong T T. 2012. High efficiency iron removal from quartz sand using phosphoric acid[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 114-117: 30-34.
- 郭银祥, 张兄明, 薛艳水, 邹蔚蔚, 贾燕萍, 胡阳惠. 2003. 硅砂有氟浮选与无氟浮选分离工艺研究[J]. *中国非金属矿工业导刊*, (6): 32-36.
- 胡婕, 连宾, 郁建平, 胡星. 2011a. 黑曲霉-矿物集合体的形成与多糖研究[J]. *微生物学报*, 51(6): 756-765.
- 胡婕, 郁建平, 连宾. 2011b. 黑曲霉对含钾矿物的解钾作用与机理分析[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 30(3): 277-285.
- 斯蒂里亚科娃 I, 郭秀平, 肖力子. 2007. 应用生物浸出和磁选法生产玻璃砂[J]. *国外金属矿选矿*, 12: 15-18.
- 李萍, 汪灵, 殷德强, 孔芹, 范博文. 2011. 四川沐川黄丹石英砂岩浮选除铁提纯试验研究[J]. *中国矿业*, 20(6): 96-100.
- 李勇, 王玉连, 秦炎福, 李倩, 官邦贵, 吕跃凤. 2008. 石英砂除铁方法的研究[J]. *安徽科技学院学报*, 22(2): 35-38.
- 李勇, 杨久峰, 张雪梅, 刘慧. 2011. 凤阳湿法石英砂中铁含量与粒度的关系[J]. *非金属矿*, 34(2): 43-45.
- 李永安, 易发成, 王哲, 谢丽革, 汝伟. 2013. 安徽某地石英砂的混酸浸除铁试验[J]. *西南科技大学学报*, 28(1): 62-64.
- 彭寿, 吴建新, 谷翠红, 于永琪. 2010. PPM 级低铁石英砂的浮选技术及规模化生产实践[J]. *建材世界*, 31(1): 49-52.
- 谌书, 刘丛强, 连宾. 2009. 一株黑曲霉对磷矿的风化作用[J]. *矿物学报*, 29(1): 103-108.
- 任婉侠, 李培军, 何娜, 范淑秀, Verkhovina E V. 2007. 异养微生物在金属生物淋滤技术中的应用[J]. *生态学杂志*, 26(11): 1835-1841.
- 汪灵, 李彩侠, 王艳, 殷德强. 2012. 我国高纯石英加工技术现状与发展建议[J]. *矿物岩石*, 31(4): 110-114.
- 王军锋, 汪徐春, 毛杰, 姚悦. 2013. 石英砂除铁方法概述[J]. *广州化工*, 41(11): 22-23.
- 闫勇, 卢义飞, 郑翠红, 朱伟长. 2009. 石英砂除铁钛杂质的新工艺研究[J]. *矿产综合利用*, (1): 16-19.
- 余润兰, 石丽娟, 周丹, 邱冠周, 曾伟民. 2013. 生物浸出过程中微生物协同作用机制的研究进展[J]. *中国有色金属学报*, 23(10): 3006-3014.
- 赵洪力. 2004. 用超声波进行的石英砂除铁试验研究[J]. *玻璃与搪瓷*, 32(2): 44-49.
- 郑翠红, 孙颜刚, 杨文雁, 朱伟长, 闫勇. 2008. 石英砂提纯方法研究[J]. *中国非金属矿工业导刊*, (5): 16-18.