文章编号: 1004-0609(2013)10-2921-07

不同粒径分布分维数铀矿石的浸出规律

叶勇军,丁德馨,李广悦,扶海鹰,宋键斌,胡 南

(南华大学 铀矿冶生物技术国防重点学科实验室, 衡阳 421001)

摘 要:为了研究堆浸铀矿石粒径分布对堆浸效果的影响,配置5组不同粒径分布分维数的铀矿样进行室内柱浸试验,测定不同时刻浸出液的铀浓度和 pH 值,计算对应时刻的浸出率和酸耗。结果表明:分维数越大的铀矿样,浸出液中铀离子浓度峰值出现得越迟、峰值越小,且在峰值出现后,铀离子浓度越大;在浸出初期,分维数越大的铀矿样,浸出率越低,这种差距在浓度峰值出现之前逐渐增大,峰值过后逐渐减小;而在浸出后期,分维数大的铀矿样的浸出率,成次逐渐超过分维数较小的铀矿样的浸出率,并保持进一步扩大的趋势;在浸出初期,若要获得相同的浸出率,分维数越大的铀矿样,其酸耗量也越大,酸耗量的差距随着浸出时间的延长先增大而后逐渐减小;在浸出后期,要获得相同的浸出率,酸耗则出现相反的变化情况。 关键词:铀矿石;堆浸; 粒径分布;分维数

中图分类号: TF111; D868 文献标志码: A

Leaching behavior of uranium ore with different fractal dimensions of particle size distribution

YE Yong-jun, DING De-xin, LI Guang-yue, FU Hai-ying, SONG Jian-bin, HU Nan

(Key Discipline Laboratory for National Defense for Biotechnology in Uranium Mining and Hydrometallurgy, University of South China, Hengyang 421001, China)

Key words: uranium ore; heap leaching; particle size distribution; fractal dimension

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10975071)

收稿日期: 2012-10-26; 修订日期: 2013-07-23

通信作者: 丁德馨, 教授, 博士; 电话: 0734-8282534; E-mail: dingdxzzz@163.com

堆浸是堆置浸出法的简称,堆浸提铀工艺是我国 铀矿冶生产的主体工艺之一[1],采用该种工艺生产的 天然铀产量约占总产量的35%~40%^[2]。堆浸铀矿堆是 由经过破碎的粒径不同且分布不均的矿石颗粒组成的 集合体,掌握不同尺寸矿石颗粒和不同粒径分布特征 矿堆的铀金属浸出行为,对实际生产具有重要的参考 价值。国内外学者在矿石颗粒大小对浸出效果影响方 面开展了大量的理论和实验研究^[3-10],如 MELLADO 等[7]研究了两种单一粒径矿石分开浸出和混合浸出之 间的关系; OGBONNA 等^[8]将3种单一粒径的矿石按 不同比例混合进行试验,研究了其不同比例情况下的 浸出性能; LIZAMA^[9]研究了离散粒径分布的矿石浸 出与单一粒径矿石浸出的关系; GHORBANI 等^[10]综 述了大颗粒矿石对化学和生物浸出行为的研究进展, 指出颗粒尺寸大小对浸出效果具有明显的影响。目前, 国内外在不同粒径分布特征矿堆的金属浸出行为方面 的研究还比较少,但零星出现的研究报道指出金属的 浸出效果与矿岩破碎块度分布之间有着密切的联 系^[11]。因此,以我国实际生产的堆浸铀矿石为对象, 开展不同粒径分布分维数铀矿石浸出规律的研究是非 常必要的。

堆浸铀矿石来自破碎场, 粒径分布的规律取决于 破碎的方法和矿石的力学性质,由于矿石加工破碎的 随机性,同一筛孔规格破碎矿石颗粒的几何形状和特 征尺寸并不完全相同, 粒径分布呈现一定的随机性和 不规则性,很难用常规数学语言准确描述。分形是研 究自然界中大量存在的不规则现象的新的理论工具, 国内外研究结果表明:岩石由爆破冲击力或其他机械 破碎力作用下由整体破碎为碎块过程中,表现出具有 自相似特征的分形分布, 岩石颗粒的粒径分布能用矿 石的最大线性尺寸和分维数进行较好的描述^[12-15]。为 此,本文作者对我国南方某铀矿山新上堆场的破碎矿 石进行了筛分实验和级配分析,在确定最大颗粒尺寸 为9mm, 粒径分形维数为1.901之后, 配置了5组粒 径分布分维数的矿样,在室内进行酸法柱浸实验,获 得不同浸出时间浸出液的铀质量浓度和 pH 值,分析 粒径分布分维数对矿堆浸出率和酸耗等技术指标的影 响规律。

1 实验

1.1 实验矿石

实验矿石来自中低温热液充填交代花岗岩单铀矿 床,矿石中的矿物由热液矿物和围岩残留矿物组成。 在南华大学铀矿冶生物技术国防重点学科实验室对所 用矿石的化学成分进行了实验分析,主要成分分析结 果见表 1。由表 1 可知,该矿石化学成分复杂,脉石 矿物主要是硅酸盐类矿物,Al₂O₃和 CaO 的含量较高, 矿石含有四价铀U(IV)与六价铀U(VI)两种价态的铀化 合物,且六价铀的含量约占铀元素总量的 45%~50%, 所以该矿石氧化性较差,属于较难浸出矿石。

该矿山提供的矿物分析资料表明矿石的脉石矿物 为石英、微斜长石、萤石、绿泥石和方解石,铀矿物 以条状形式被其他矿物包裹,而整个铀矿又被石英矿 物包裹。主要铀矿物为沥青铀矿及少量铀的次生矿物, 并与黄铁矿、石英等共生。对矿样的 XRD(日本理学 株式会社 D/max-2550PC 型 X 射线衍射仪)分析结果 见图 1。



图1 铀矿石的 XRD 谱

Fig. 1 XRD pattern of uranium ore

通过对该矿山铀矿石的铀金属品位、铀矿物种类、 脉石矿物种类等的分析,以及谭建华等对该矿山的铀 矿石进行的不同酸度溶浸液的浸出试验^[16],该类型铀 矿石适合开展酸法实验研究。为此,本文作者针对酸 法浸出开展不同粒径分布分维数铀矿石浸出规律实验 研究。

表1 实验铀矿石主要化学成分

 Table 1
 Main chemical compositions of uranium ore (mass fraction, %)

U	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P_2O_5	MnO
0.177	0.677	78.21	7.13	0.018	0.116
CaO	FeO	Fe ₂ O ₃	CO3 ²⁻	F^{-}	Na ₂ O
2.89	0.587	0.289	1.92	0.301	0.358

将矿石样筛分成粒径<0.5 mm、0.5~1 mm、1~2 mm、2~3 mm、3~4 mm、4~5 mm、5~6 mm、6~7 mm、7~8 mm 和 8~9 mm 等 10 个粒级,并根据式(1)^[17-18] 配制了粒径分布分维数分别为 1.6、1.8、2.0、2.2、2.4 的 5 组试验矿样,每组矿样质量 10 kg。不同粒径分维数矿样的级配及铀品位见表 2。

$$M(< R) = M \left(\frac{R}{R_L}\right)^{3-D} \tag{1}$$

式中: *M* 表示颗粒集合体总质量; *M*(<*R*)表示粒径 小于 *R* 的颗粒的总质量; *R*_L表示该颗粒集合体中最大 粒径; *D*表示分维数。

1.2 实验原理

浸出试验不加氧化剂,利用空气中的氧气作为氧 化剂,与铀浸出有关的化学反应可能有

$$2UO_2 + O_2 \longrightarrow 2UO_3 \tag{2}$$

$$UO_2 + 2Fe^{3+} \longrightarrow UO_2^{2+} + 2Fe^{2+}$$
(3)

$$4Fe^{2+}+O_2+4H^+ \longrightarrow 4Fe^{3+}+2H_2O$$
 (4)

$$UO_3 + 2H^+ \longrightarrow 2UO_2^{2+} + H_2O \tag{5}$$

$$UO_2^{2+} + SO_4^{2-} \longrightarrow UO_2SO_4 \tag{6}$$

$$\mathrm{UO}_2\mathrm{SO}_4 + \mathrm{SO}_4^{2-} \longrightarrow \mathrm{UO}_2(\mathrm{SO}_4)_2^{2-} \tag{7}$$

$$\mathrm{UO}_{2}(\mathrm{SO}_{4})_{2}^{2-} + \mathrm{SO}_{4}^{2-} \longrightarrow \mathrm{UO}_{2}(\mathrm{SO}_{4})_{3}^{4-}$$

$$\tag{8}$$

四价铀与硫酸直接反应十分缓慢,且对酸度要求 很高,矿石中的四价铀主要是通过氧化成四价铀,再 与硫酸反应浸出。没有加氧化剂的情况下主要的氧化 反应有(2)~(4)。而进入溶液的铀可以通过反应式(5)~(8) 这几种反应同时生成,其量的多少取决于堆浸体系中 酸和铀的浓度、温度等因素。

实验采用自制的柱浸装置,其示意图如图2所示。

表2 不同粒径分布分维数矿样级配及铀品位



图2 串联柱浸实验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of experiment device of series leaching column: 1—Mariotte bottle; 2—Valve; 3—Sealing cover; 4, 8—Quartz sand; 5—Ore; 6—Organic glass column; 7—Flange; 9—Pore plate; 10—Buffer space; 11—Liquid collecting barrel

采用 4 段单元柱通过法兰连接串联而成。实验柱由内 径 88 mm、壁厚 6 mm 的有机玻璃管加工而成,顶端 和底部单元柱的高度均为 280 mm,中间两个单元柱 高度均为 250 mm,上部密封盖和下部缓冲空间高度 均为 50 mm,实验柱高 1.16 m,由于在柱底部和顶部 分别装有 30 mm 厚的石英砂,因此,矿石高度为 1 m。装矿前在底部孔板上垫一张孔径为 0.5 mm 的耐酸纱 网,防止石英砂和矿石流失。布液前在石英砂表面放

Fractal dimension	Mass/kg								Uranium		
	<0.5 mm	0.5–1 mm	1–2 mm	2–3 mm	3–4 mm	4–5 mm	5–6 mm	6–7 mm	7–8 mm	8–9 mm	grade/%
1.6	0.174 8	0.286 6	0.756 2	0.930 4	1.065 3	1.178 3	1.277 0	1.365 4	1.445 9	1.520 2	0.172
1.8	0.311 7	0.404 3	0.928 9	1.030 9	1.103 2	1.160 4	1.208 0	1.249 1	1.285 4	1.318 1	0.173
2.0	0.555 5	0.555 5	1.111 1	1.111 1	1.111 1	1.111 1	1.111 1	1.111 1	1.111 1	1.111 1	0.175
2.2	0.990 3	0.733 9	1.277 9	1.150 3	1.074 6	1.021 6	0.981 2	0.948 9	0.922 1	0.899 2	0.179
2.4	1.765 4	0.910 4	1.380 0	1.117 1	0.974 6	0.880 7	0.812 5	0.759 8	0.717 4	0.682 3	0.180

一块扁平鹅卵石,当溶浸液滴在鹅卵石上时,向四周 溅开,使布液均匀。布液时将马氏瓶置于高位布液, 由阀门调节布液强度。

1.4 实验过程与测试方法

为避免矿石从高处倒落产生偏析,依次从下向上 将配制好的矿样分别均匀地装在各段实验柱中并进行 串联连接。装好试样后,盖上密封盖,并调节好顶部 布液管位置,确保布液均匀且不溅出。

在本实验中,按照液固比 0.1 L/kg 进行布液,布 液强度为 20.55 L/(h·m²),每天布液时间为 8 h,浸出 时间 35 d,实验期间气温在 25~35 ℃之间。浸出采用 单一硫酸作为溶浸剂,溶浸液硫酸初始浓度为 20 g/L, 之后根据浸出液 pH 值的变化调整,以 5 g/L 为一个单 位,使后期浸出液 pH 值保持在 1~2 之间。每天布液 前,收集前一天的浸出液,并测量体积和 pH 值,分 析铀离子浓度。pH 测量采用 PHS-3C 精密 pH 计,铀 的测定采用三氯化钛还原/钒酸铵氧化滴定法。

2 结果与讨论

不同粒径分布分维数矿样浸出液中铀离子浓度 和浸出率的变化

不同粒径分布分维数(D)矿样浸出液中铀离子质量浓度与时间的关系如图 3 所示。由图 3 可知, 矿样浸出液中铀离子浓度受粒径分布分维数的影响,具有以下规律:1) 所有矿样浸出液中铀离子质量浓度在浸出初



图 3 不同粒径分布分维数矿样浸出液中铀离子浓度随浸 出时间的变化曲线

Fig. 3 Variation curves of U ion concentration in leaching solution of uranium ore with different fractal dimensions of partied size distribution with leaching time

期处于较低的水平,随着浸出反应的进行迅速增大, 到达峰值后逐渐减小,最后趋于平稳并缓慢降低;2)粒 径分布分维数越大的矿样,浸出液中铀离子质量浓度峰 值出现的时间越迟,且峰点铀离子质量浓度越小;3)浸 出液中铀离子质量浓度峰值出现之前,粒径分布分维 数大的矿样浸出液中铀离子质量浓度低于粒径分布分 维数小的矿样,而峰值出现之后则出现相反的情况。

不同粒径分布分维数矿样铀浸出率与时间的关系 如图 4 所示。由图 4 可知,在浸出前期,粒径分布分 维数越大的矿样的浸出率低于粒径分布分维数小的矿 样的浸出率;随着浸出反应的进行,这种差距先增大 而后逐渐减小;最后,粒径分布分维数大的矿样的浸 出率依次逐渐超过粒径分布分维数小的矿样的浸出 率,并有进一步拉大的趋势。



图 4 不同粒径分布分维数矿样铀浸出率随浸出时间的变 化曲线

Fig. 4 Variation curves of U leaching rate of uranium ore with different fractal dimension of particle distribution with leaching time

2.2 不同粒径分布分维数矿样酸耗与浸出率的关系

不同粒径分布分维数矿样浸出液 pH 随时间的变 化曲线如图 5 所示。由图 5 可知,前期矿石耗酸比较 大,浸出液 pH 值相对初始溶浸液急剧升高;随着矿 石中耗酸物质的不断溶解,后期矿石耗酸不断减少, 浸出液的 pH 值相对初始溶浸液升高幅度较小,趋于 稳定。由图 5 还可以看出,在浸出的前几天,pH 值甚 至超过 7.0 而成碱性,这主要是矿石中含有碳酸盐等 易于硫酸反应的物质,造成在浸出前期酸耗大,加入 的酸在上部矿层即被消耗,因此,在矿样一定高度处, 溶浸液呈中性,当溶浸液继续向下渗流时,矿石中含 有的少量碳酸盐将溶解在溶浸液中而呈弱碱性^[19],图 3 的规律可以证明这一点。由于铀在中性条件下的溶 解度最小,当 pH 值呈弱碱性时,矿石中的铀将与 CO₃²⁻、HCO₃ 反应而溶解出来;随着 pH 值降低至中 性时,受到铀离子溶解度的约束,此时浸出液中铀浓 度值最小;而当 pH 值继续降低呈酸性时,矿石中的 铀将与SO₃²⁻等反应而溶解出来。

矿堆矿石破碎粒径分布不仅对不同浸出期间的浸 出率和酸耗指标有重要的影响,而且对矿堆的渗透特 性也有重要的影响^[20]。不同粒径分布分维数矿样酸耗 与浸出率的关系曲线如图 6 所示。由图 6 可知,在浸 出前期,获得相同浸出率时粒径分布分维数大的矿样



图 5 不同粒径分布分维数铀矿样浸出液 pH 随浸出时间的 变化曲线

Fig. 5 Variation curves of pH in leaching solution of uranium ore with different fractal dimension of particle size distribution with leaching time



图 6 不同粒径分布分维数铀矿样酸耗与铀浸出率的关系 曲线

Fig. 6 Relationship between acid assumption and U leaching rate of uranium ore with different fractal dimension of particle size distribution

酸耗量大,酸耗量差距随着浸出时间的增长先增大而 后又逐渐减小,在浸出后期,获得相同浸出率时,粒 径分布分维数小的矿样酸耗量依次逐渐超过粒径分布 分维数大的矿样。

2.3 不同粒径分布分维数矿样渣计和液计浸出率的 对比

为了对比 5 组矿样渣计和液计浸出率的一致性, 浸出实验结束后测定了 5 组矿渣中的剩余铀含量,计 算得到分形维数为 1.6、1.8、2.0、2.2 和 2.4 的矿样渣 计浸出率分别为 68.16%、69.79%、71.95%、73.33% 和 74.08%;测得的最终液计浸出率分别为 67.51%、 68.86%、69.73%、71.42%和 72.00%。可以看出,5 组 矿样渣计浸出率均高液计浸出率,但渣计和液计浸出 率都随着矿样粒径分布分维数的增大而增大,具有相 同的变化趋势。

2.4 讨论

从图 3~6 分析结果可知, 粒径分布分维数对铀矿 石堆浸效果有明显的影响, 且在浸出前期和后期, 不 同粒径分布分维数矿样的铀浸出率和酸耗量等指标表 现出相反的变化情况。从表2可知,粒径分布分维数 越大的矿样中小粒径矿石质量含量高于分维数越小的 矿样,造成了粒径分布分维数越大的矿柱内固体与液 体接触的总表面积越大,与酸反应的铀及其他耗酸物 质也越多,在浸铀过程中需要耗费更多的酸与其他耗 酸物质进行反应,因此,在浸出初期,粒径分布分维 数越大的矿样浸出液中铀离子质量浓度和浸出率越 低,获得相同浸出率的酸耗量也越大。在浸出初期, 分维数越小的矿样中矿石表层易溶于酸的物质减少得 越快,实验柱内与矿石表层铀反应的酸越来越多,因 此,分维数越小的矿样浸出液中铀离子质量浓度峰值 越早出现,浸出率也越高。随着矿石表层铀与其他耗 酸物质逐渐耗尽,浸出反应向矿石颗粒内部进行,根 据浸出反应的收缩核动力学模型,相同酸性条件下, 粒径越大的矿石颗粒铀的浸出速率越低,浸出相同质 量的铀金属将需要耗费更多的酸。此时,对于含大颗 粒矿石越多的矿样,浸出液中铀质量浓度越低,总的 浸出率增长得越缓慢,获得相同的浸出率将需要消耗 更多的酸。因此,在浸出后期,粒径分布分维数越小 的矿样浸出液中铀质量浓度越低,浸出率和获得相同 浸出率的耗酸量逐渐依次被粒径分布分维数大的矿样 超过。

3 结论

 1) 铀矿石堆浸过程中,浸出液铀离子浓度会出现 峰值,分维数越大的矿样,峰值出现的时间越迟,且 峰值越小;在峰值出现之前,分维数越大的矿样浸出 液中铀离子质量越低,在峰值出现之后则出现相反的 变化情况。

2) 浸出初期, 铀浸出率随着矿样分维数的增大而 减小,随着反应的进行,差距先增大后减小;最后, 分维数大的矿样浸出率依次逐渐超过粒径分布分维数 小的矿样浸出率,并保持进一步拉大的趋势。

3) 在浸出初期,获得相同浸出率时粒径分布分维 数大的矿样酸耗量大,酸耗量的差距随着浸出时间的 增长先增大而后又逐渐减小,在浸出后期获得相同浸 出率时粒径分布分维数小的矿样酸耗量依次逐渐超过 粒径分布分维数大的矿样酸耗量。

4)在实际生产过程中,一方面,应针对具体矿物 特性的矿石,选择合适的破碎工艺或配置最佳粒径分 布分形维数的矿石样筑堆,从浸出工艺上优化矿堆的 渗透效果和缩短浸出周期;另一方面,应针对矿堆的 粒径分布特征,合理调控不同浸出期间溶浸液的硫酸 强度,减少硫酸的消耗,提高堆浸浸铀的经济效益。

REFERENCES

- 曾毅君, 牛玉清, 张飞凤, 钟平汝. 中国铀矿冶生产技术进展 综述[J]. 铀矿冶, 2003, 22(1): 24-27.
 ZENG Yi-jun, NIU Yu-qing, ZHANG Fei-feng, ZHONG Ping-ru.Overview of technical progresses in uranium mining and metallurgical industry in China[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2003, 22(1): 24-27.
- [2] 阙为民,王海峰,牛玉清,张飞风,谷万成.中国铀矿采治技术发展与展望[J].中国工程科学,2008,10(3):44-53.
 QUE Wei-min, WANG Hai-feng, NIU Yu-qing, ZHANG Fei-feng, GU Wan-cheng. Development and prospect of China uranium mining and metallurgy[J]. Engineering Sciences, 2008, 10(3): 44-53.
- [3] MELLADO M E, CISTERNAS L A. An analytical-numerical method for solving a heap leaching problem of one or more solid reactants from porous pellets[J]. Computers and Chemical Engineering, 2008, 32: 2395–2402.
- [4] MELLADO M E, CISTERNAS L A, GÁLVEZ E D. An analytical model approach to heap leaching[J]. Hydrometallurgy,

2009, 95: 33-38.

- [5] 陈家富.不同粒度柱浸浸铀试验研究[J].有色金属: 冶炼部 分, 2010(1): 40-42.
 CHEN Jia-fu. Study on different particle size of uranium ore leaching[J]. Nonferrous Metals: Extractive Metallurgy, 2010(1): 40-42.
- [6] 习 泳, 吴爱祥, 朱志根. 矿石堆浸浸出率影响因素研究及 其优化[J]. 矿业研究与开发, 2005, 25(5): 19-22.
 XI Yong, WU Ai-xiang, ZHU Zhi-gen. Study on the factors influencing the recovery of ore heap leaching and their optimization[J]. Mining Research and Development, 2005, 25(5): 19-22.
- [7] MELLADO M E, CISTERNAS L A, GÁLVEZ E D X. An analytical model approach to heap leaching[J]. Hydrometallurgy, 2006, 95: 33–38.
- [8] OGBONNA N, PETERSEN J, LAURIE H. An agglomerate scale model for the heap bioleaching of chalcocite[J]. The Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, 2006, 106: 433–442.
- [9] LIZAMA H M. A kinetic description of percolation bioleaching[J]. Minerals Engineering, 2004, (17): 23–32.
- [10] GHORBANI Y, BECKER M, MAINZA A, FRANZIDIS J P, PETERSEN J. Large particle effects in chemical/biochemical heap leach processes: A review[J]. Minerals Engineering, 2011, 24: 1172–1184.
- [11] 曾 晟, 谭凯旋. 矿岩破碎块度分布分形特征对铀浸出率的 影响[J]. 矿冶工程, 2011, 31(1): 16-18.
 ZENG Cheng, TAN Kai-xuan. Effect of fractal feature of the crushing size distribution on uranium leaching rate[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2011, 31(1): 16-18.
- [12] 李广悦. 原地爆破浸出工艺待浸矿堆块度的分形特征研究[J]. 矿业工程, 2003, 1(6): 48-50.
 LI Guang-yue. Fractal feature of ore size distribution in leaching heap blasted directly from stope[J]. Minerals Engineering, 2003, 1(6): 48-50.
- [13] 谢和平,高峰,周宏伟,左建平.岩石断裂和破碎的分形研究[J].防灾减灾工程学报,2003,23(4):1-9.
 XIE He-ping, GAO Feng, ZHOU Hong-wei, ZUO Jian-ping. Fractal fracture and fragmentation in rocks[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2003, 23(4): 1-9.
- [14] 李仕斌. 深井岩石破碎规律及破碎的分形机理研究[D]. 沈阳: 东北石油大学, 2006.
 LI Shi-bin. Study on rock-breaking rule in deep wells and rock-breaking fractal mechanism[D]. Shenyang: Northeast
- [15] TAŞDEMIR A. Fractal evaluation of particle size distributions of chromites in different comminution environments[J]. Minerals

Petroleum University, 2006.

Engineering, 2009, (22): 156-167.

- [16] 谭建华,韩 伟,黄云柏,黄齐金.南方某铀矿石堆浸酸度试验[J].铀矿冶,2008,27(4):221-224.
 TAN Jian-hua, HAN Wei, HUANG Yun-bai, HUANG Qi-jin.
 Experiments of lixiviant's acidity for heap leaching of a uranium ore[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2008, 27(4): 221-224.
- [17] GUI Dong-wei, LEI Jia-qiang, ZENG Fan-jiang, MU Gui-jin, ZHU Jun-tao, WANG Hui, ZHANG Qiang. Characterizing variations in soil particle size distribution in Oasis Farmlands: A case study of the Cele Oasis[J]. Mathematical and Computer Modelling, 2010, 51: 1306–1311.
- [18] TYLER S W, WHEATCRAFT S W. Fractal scaling of soil particle size distributions: Analysis and limitations[J]. Soil

Science Society of America Journal, 1992, 56(2): 362-369.

- [19] SHAKIR K, AZIZ M, BEHEIR S G. Studies on uranium recovery from a uranium bearing phosphatic sandstone by a combined heap leaching-liquid-gel extraction process. 1—Heap leaching[J]. Hydrometallurgy, 1992, 31: 29–40.
- [20] 叶勇军,丁德馨,李广悦,宋键兵,李 峰. 堆浸铀矿堆液体 饱和渗流规律的研究[J]. 岩土力学学报,2013,34(8): 2243-2248.

YE Yong-jun, DING De-xin, LI Guang-yue, SONG Jian-bing, LI Feng. Regularities for saturated water seepage in uranium leaching heap[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(8): 2243–2248.

(编辑 李艳红)