



不同化学条件下孔隙比对尾矿砂渗透性影响试验

诸利一^{1,2}, 杨 鹏^{2,3}, 吕文生^{1,2}, 程晓亮⁴, 王 昆⁵

(1. 北京科技大学 金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室, 北京 100083;

2. 北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083;

3. 北京联合大学 北京市信息服务工程重点实验室, 北京 100101;

4. 中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司, 北京 100020;

5. 山东科技大学 矿业与安全工程学院, 青岛 266590)

摘 要:为探究在不同酸碱性流体环境作用下孔隙比、浸泡时间对尾矿砂渗透性的影响规律,选取 7 组不同孔隙比试样,设计变水头渗透室内试验;通过控制变量法,研究 8 种浸泡时间下尾矿砂渗透性变化规律,并利用扫描电镜和 X 射线能谱仪分析不同化学条件下孔隙比对尾矿砂渗透性影响机理。结果表明:在化学条件下尾矿砂的孔隙比与渗透系数存在“似指数”变化关系。当控制试样孔隙比为 0.65 时,在强酸溶液中(pH=3),尾砂的渗透系数随浸泡时间延长而增加,表现为二次抛物线关系,浸泡 1600 s 较浸泡 200 s 增加了 56.92%;在强碱环境下(pH=11),尾砂的渗透系数随浸泡时间呈 Logistic 函数下降,浸泡 1600 s 较浸泡 200 s 下降了 73.66%。基于太沙基、柯森、刘杰等渗透理论拟合得到酸性、碱性、中性三种条件下的修正关系模型。根据试验结果分析和扫描电镜观察发现,酸性条件下小颗粒尾砂被侵蚀,大颗粒尾砂棱角凸显,结合水膜变薄,孔隙增大,渗透系数变大;碱性条件下,尾砂颗粒表面与尾砂颗粒间有沉淀胶体覆盖或填充,结合水膜变厚,孔隙减小,渗透系数随之减小。

关键词:尾矿砂;化学环境;渗透系数;孔隙比;微观结构

文章编号: 1004-0609(2020)-09-2190-11

中图分类号: TD853

文献标志码: A

尾矿坝是指在矿产资源开发利用中将目前技术经济条件下难以进一步选别的固体废弃材料有序堆存的坝体^[1-3],是一个体量大、势能高的重大危险源,一旦发生溃坝,将对下游的人员造成惨重伤亡以及难以修复的生态破坏^[4-5]。然而,尾矿坝稳定性影响因素众多,如坝体本身结构、堆积坝的尾矿特性和渗透性、地震液化以及暴雨漫顶等^[6-8]。其中尾矿砂的渗透性是影响尾矿坝稳定性的关键性因素,尾矿砂的渗透性好坏直接影响尾矿库浸润线高低变化,进而影响坝体的稳定性。影响砂土的渗透性因素很多,比如砂土的孔隙比、砂土颗粒的结合水膜、流体介质的性质等,孔隙比和流体介质是其中的两个主要影响因素。尾矿的渗透性可通过渗透系数来表征。孔隙特性是影响尾矿渗透性的重要因素^[9],由于金属矿山特别是金属硫化物矿山,经过选别后产出的尾矿中硫化物成分如黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿在表生条件下,与氧气反

应产生高浓度的酸性水,而铅锌矿尾矿废水大多呈现碱性,在这些化学条件下尾矿砂的孔隙结构容易发生变化,进而影响尾矿的渗透性。因此,研究不同化学条件下孔隙比与尾矿砂的渗透性关系对尾矿坝的安全维护与稳定性分析具有重要意义。

多年来,综合国内外学者的研究发现,国外学者基于化学因素对尾矿坝稳定渗透性研究甚少,主要重点集中在环境污染的预防与治理上。MASCARO 等^[10]和 KIM 等^[11]针对化学离子对环境的污染等进行了研究,QUIGLEY 等^[12]、MOHAMED 等^[13]和 KRAFT^[14]研究了水化学环境下金属离子的运移规律。而至于国内学者研究工作,饶运章等^[15]通过对某黄铁铅锌矿 14 年的废水监测,将 pH 值与重金属污染情况联系起来,并建立了数学模型。马少建等^[16]、林美群等^[17]对尾矿重金属离子及酸碱溶液浸出规律进行了研究。白云鹏^[18]应用有限元分析软件,研究了酸碱溶液作用下的

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFC0804604); 国家自然科学基金资助项目(51774045)

收稿日期: 2019-09-05; 修订日期: 2020-08-20

通信作者: 杨 鹏, 教授, 博士; 电话: 010-64900509; E-mail: yangpeng@buaa.edu.cn

尾矿坝稳定性。张媛等^[19]研究了含硫的尾矿砂在不同水化学环境条件下渗透特性的变化规律。程晓亮等^[20]利用激光粒度分析、电镜扫描观察、X 射线衍射分析等室内试验研究了化学环境下尾矿颗粒的沉降、微观形貌、物质组成以及粒径级配等指标参数变化,并建立了应力-渗流两场耦合关系模型。不难看出,国内研究人员针对尾矿库内化学因素影响尾砂渗透性的研究虽然比国外多,但主要集中在流固耦合理论、溶浸采出以及基于软件的数值模拟等方面,对多化学环境下尾矿坝渗透性试验及其影响机理方面研究甚少。

为此,本文作者从 pH=3、pH=7、pH=11 的多化学作用条件出发,模拟 3 种酸性、中性、碱性环境,选配 7 组不同孔隙比尾矿砂试样,利用自制变水头渗透试验装置,研究了不同化学条件下孔隙比对尾矿砂渗透性影响,得到了孔隙比与渗透系数的变化规律;利用控制变量法固定孔隙比,探究尾矿砂在多化学环境下浸泡渗透时间对渗透性影响,拟合分析得到浸泡时间与渗透系数的关系;并基于经典土体渗透理论,建立了修正关系模型;同时利用扫描电镜和能谱分析从微观角度揭示化学条件下的孔隙比对尾矿砂渗透性影响机理,以期尾矿坝稳定维护和工程实践提供理论支撑,具有一定指导意义。

1 实验

1.1 试验材料

选取河北省某铁矿的尾砂作为本试验的试样,通过 LMS-30 激光粒度分析仪测得其粒径组成,如图 1 所示。其中,该尾砂的不均匀系数 C_u 为 8.42, 曲率系数 C_c 为 1.02, 说明尾砂的级配良好, 小于 $19\text{ }\mu\text{m}$ 尾砂含量为 45.92%(质量分数), 小于 $74\text{ }\mu\text{m}$ 的尾矿占 87.49%, 该尾砂属于中细粒尾砂。将尾矿进行 EDS 成分分析, 结果如表 1 所列, 发现该尾矿试样中以 Si 为主要元素, 含有一定量的 Fe、Ca、Mg 等元素以及少量的 Al 元素。

表 1 中性条件下尾砂的 EDS 分析

Table 1 EDS analysis of tailings under neutral conditions

Element	Atomic number	Series	Mass fraction/%	Mole fraction/%
Si	14	K-series	80.64	85.53
Fe	26	K-series	9.71	5.18
Ca	20	K-series	4.96	3.69
Mg	12	K-series	2.96	3.63
Al	13	K-series	1.73	1.92

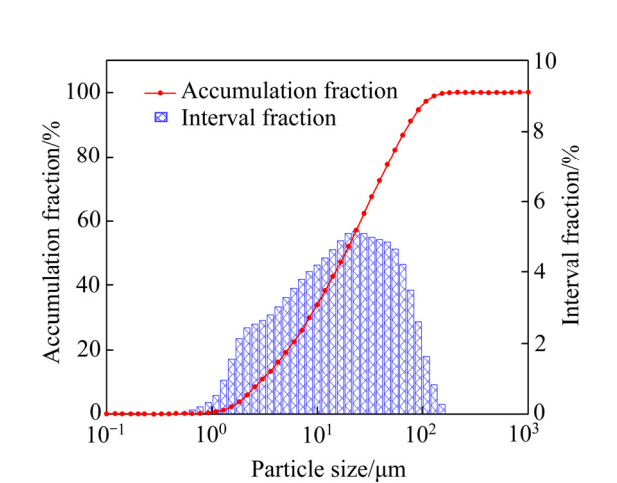


图 1 尾砂的粒径组成曲线
Fig. 1 Particle size curves of tailings

根据土工试验规程^[21], 并结合试验用的环刀实际体积, 设定尾矿孔隙比变化范围为 0.5~0.9。在室内分别测得孔隙比为 0.5、0.55、0.6、0.65、0.7、0.8、0.9 七组尾矿试样的制备参数, 如表 2 所列。

1.2 试验装置

试验采用变水头方法测试出中性、酸性、碱性条件下不同孔隙比的尾矿试样渗透系数。选用 TST-55 型渗透仪进行试验, 渗透仪包括上盖、底座、透水石、环刀、套座、螺杆等, 环刀内径为 $d\ 61.8\text{ mm}$, 高 40 mm , 整个试验装置结构如图 2 所示。

1.3 试验方法

- 1) 选用标准浓度 $c(\text{H}_2\text{SO}_4)=0.500\text{ mol/L}$ 的溶液、质量分数为 25% 的 NaOH 溶液、蒸馏水分别配制一定量 pH=3、pH=11、pH=7 的酸性、碱性、中性化学溶液, 试剂温度均为 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 。
- 2) 按照孔隙比将制好的环刀试样放入渗透仪套筒内, 旋转螺母压紧试样, 保证试样在渗流测试过程中不会漏气和漏水。
- 3) 将渗透仪容器下端的进水口与变水头管连接,

表 2 不同孔隙比试样制备参数

Table 2 Preparation parameters of different pore ratio samples

Porosity ratio	Specific gravities	Moisture content/%	Water density/(g·cm ³)	Ring knife volume/cm ³	Sample quality/g
0.50	2.67	9.93	0.996	120	233.87
0.55	2.67	9.93	0.996	120	226.30
0.60	2.67	9.93	0.996	120	219.25
0.65	2.67	9.93	0.996	120	212.61
0.70	2.67	9.93	0.996	120	206.35
0.80	2.67	9.93	0.996	120	194.88
0.90	2.67	9.93	0.996	120	184.63

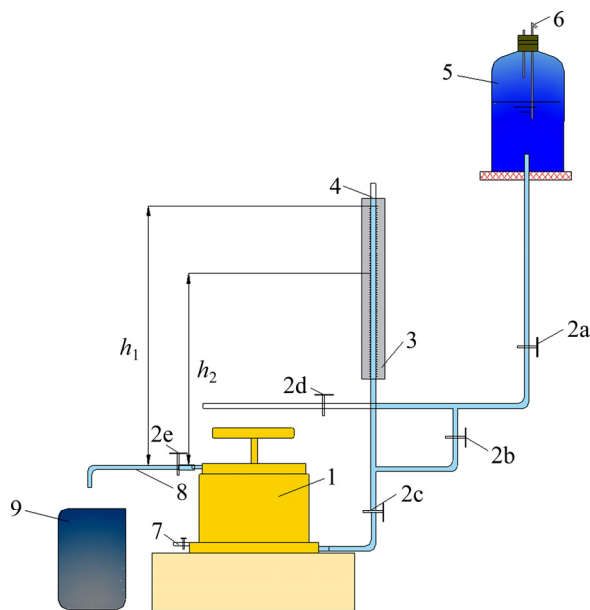


图 2 变水头渗透实验装置结构图
Fig. 2 Variable head penetration experimental device structure diagram: 1—Penetration test device; 2—Sealing clip device; 3—Scale; 4—Variable head device; 5—Chemical solution; 6—Water injection hole; 7—Venting device; 8—Outlet hole; 9—Beaker

将止水夹 2a、2b、2c 打开，关闭止水夹 2d，使供水装置与测压管渗透仪相连接，当排气管 7 流出的液体不再带有气泡，此时关闭排气管，供水装置进水使试样饱和。

4) 当出水管 8 有水流出时，此刻的试样已经饱和，关闭止水夹 2c，向变水头管内注水。

5) 当变水头管内水位达到一定高度时，关闭止水夹 2a，打开止水夹 2c，启动秒表开始记录起始水头高度 h_1 ，起始时间 t_1 ，以及时间 t_2 时刻终止水头高度 h_2 ，并用温度计记录水温 T 。

6) 改变水力坡度重复试验，控制误差在允许范围内。

7) 酸性、碱性条件下，尾矿试样在化学试剂的作用下会产生微观的变化，随着作用时间延长渗流系数也会随之变化，在化学试剂作用尾矿试样一段时间后，测得的渗流系数处于较稳定状态时，然后测压管内置换成蒸馏水进行渗透系数的测试。

8) 将不同酸、碱液渗透后的尾砂取出，研究其表面变化(见图 3)，利用扫描电镜和 X 射线能谱仪观察尾砂颗粒微观形貌、孔隙以及元素变化。

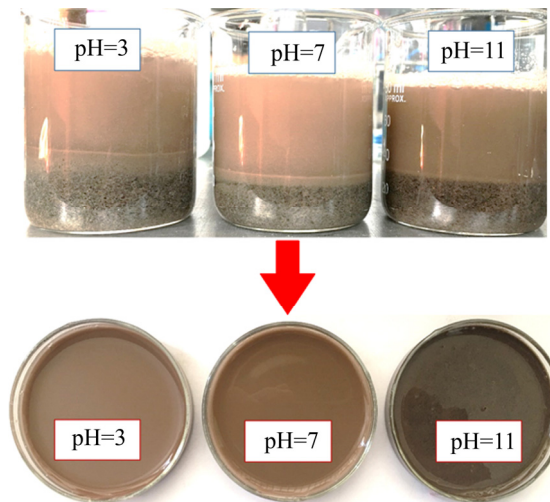


图 3 不同化学环境下尾矿砂浸泡后表面变化
Fig. 3 Apparent change of tailings after soaking in different chemical environments

2 结果与讨论

2.1 不同化学条件下孔隙比对尾矿渗透性影响规律

对中性、酸性、碱性的不同孔隙比重塑土试样渗透实验测得数据采用对数公式计算渗透系数：

$$K_T = 2.3 \frac{aL}{A\Delta t} \lg \frac{h_1}{h_2}$$

(1)

式中: K_T 为水温为 T 条件的渗透系数; a 为变水头管的断面积; L 为渗径长度; A 为渗流管道的截面面积; Δt 为从起始水头到终止水头的间隔时间; h_1 、 h_2 分别为起始水头和终止水头。

试验后测试水温为 22 ℃, 测得的渗透系数换算成 20 ℃下标准渗透系数:

$$K_{20} = 2.3 \frac{\eta_T}{\eta_{20}} \frac{aL}{A(t_2 - t_1)} \lg \frac{h_1}{h_2} \quad (2)$$

式中: η_T 、 η_{20} 分别为 T 、20 ℃时的动力黏滞系数。

分别在 pH=7、pH=3、pH=11 三种化学条件下对设定七组不同孔隙比的尾矿试样进行渗透实验, 通过式(1)计算试验条水温条件下的渗透系数, 并通过式(2)换算得到 20 ℃下标准渗透系数, 得到表 3、4、5 数据。绘制不同化学条件下孔隙比与渗透系数的关系图(见图 4)。从图 4 可知, 尾矿试样的渗透系数随孔隙比的增大而增大, 但不是简单的线性关系, 存在“似指数”关系模型。在相同孔隙比下, 酸性的化学作用对试样的渗透系数影响最大, 碱性条件下影响最小, 即相同孔隙比下, 酸性条件下渗透系数最大, 渗透性最好。

表 3 中性条件下渗透试验记录

Table 3 Test data record of permeation test under neutral conditions

Porosity ratio	$\lg \frac{h_1}{h_2}$	$\Delta t/s$	Temperature/℃	$\frac{\eta_T}{\eta_{20}}$	$\bar{K}_T / (\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	$K_{20} / (\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$
0.50	0.389	277.71	22	0.963	1.61×10^{-4}	1.55×10^{-4}
0.55	0.389	146.14	22	0.963	3.06×10^{-4}	2.95×10^{-4}
0.60	0.389	85.81	22	0.963	5.21×10^{-4}	5.02×10^{-4}
0.65	0.389	56.68	22	0.963	7.89×10^{-4}	7.60×10^{-4}
0.70	0.389	48.09	22	0.963	9.30×10^{-4}	8.96×10^{-4}
0.80	0.389	28.75	22	0.963	1.56×10^{-3}	1.50×10^{-3}
0.90	0.389	17.67	22	0.963	2.53×10^{-3}	2.44×10^{-3}

表 4 酸性条件下渗透试验记录

Table 4 Test data record of permeation test under acidic conditions

Porosity ratio	$\lg \frac{h_1}{h_2}$	$\Delta t/s$	Temperature/℃	$\frac{\eta_T}{\eta_{20}}$	$\bar{K}_T / (\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	$K_{20} / (\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$
0.50	0.389	165.78	22	0.963	2.70×10^{-4}	2.60×10^{-4}
0.55	0.389	92.23	22	0.963	4.85×10^{-4}	4.67×10^{-4}
0.60	0.389	55.10	22	0.963	8.12×10^{-4}	7.82×10^{-4}
0.65	0.389	42.00	22	0.963	1.07×10^{-3}	1.03×10^{-3}
0.70	0.389	31.00	22	0.963	1.44×10^{-3}	1.39×10^{-3}
0.80	0.389	19.55	22	0.963	2.29×10^{-3}	2.21×10^{-3}
0.90	0.389	10.95	22	0.963	4.09×10^{-3}	3.94×10^{-3}

表 5 碱性条件下渗透试验记录

Table 5 Test data record of permeation test under alkaline conditions

Porosity ratio	$\lg \frac{h_1}{h_2}$	$\Delta t/s$	Temperature/℃	$\frac{\eta_T}{\eta_{20}}$	$\bar{K}_T / (\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	$K_{20} / (\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$
0.50	0.389	493.36	22	0.963	9.07×10^{-4}	8.73×10^{-4}
0.55	0.389	376.31	22	0.963	1.19×10^{-4}	1.15×10^{-4}
0.60	0.389	300.32	22	0.963	1.49×10^{-4}	1.43×10^{-4}
0.65	0.389	234.64	22	0.963	1.91×10^{-3}	1.84×10^{-3}
0.70	0.389	149.78	22	0.963	2.99×10^{-3}	2.88×10^{-3}
0.80	0.389	80.19	22	0.963	5.58×10^{-3}	5.37×10^{-3}
0.90	0.389	55.59	22	0.963	8.05×10^{-3}	7.75×10^{-3}

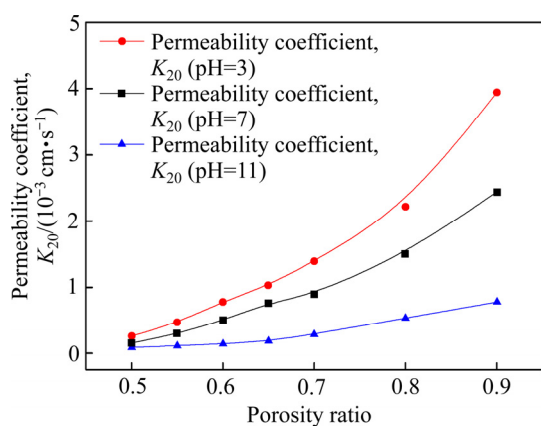


图4 不同化学条件下孔隙比与渗透系数的关系

Fig. 4 Relationship between pore ratio and permeability coefficient under different chemical conditions

其主要原因是酸性溶液与尾矿中存在的 CaCO_3 、 MgCO_3 等碳酸化合物反应, 改变尾矿的粒径和级配, 在一定程度上起到了通透作用。而在碱性作用下, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等又会产生氢氧化合物, 沉淀或裹覆在尾砂表面, 堵塞作用显著。

2.2 不同化学环境下尾矿砂浸泡时间与尾矿渗透关系

将尾矿在 pH=3 和 pH=11 的酸、碱溶液中分别浸泡 200 s、400 s、600 s、800 s、1000 s、1200 s、1400 s、1600 s, (试验浸泡时间不宜设置太长, 否则会产生固定渗透通道, 渗透系数值将会发生较大波动, 导致误差增大)。由于在实际尾矿库中, 库内液体是进行流动的, 为模拟尾矿库液体的流动带走细微小颗粒的影响效果, 同时避免化学试剂与试样反应后减弱作用效果, 因此试验中每隔一定时间将上清液过滤并置换成新配置酸碱溶液。通过尾砂级配分析得到如图 5 所示结果。将图 5 与图 1 对比可以明显看出强酸环境下尾砂的中值粒径 $d_{50}=27.62 > d_{50}=18.35$ (中性环境), 说明细微颗粒的占比减小, 原因是在浸泡过程中, 存在细微颗粒溶蚀严重的可能性, 期间定期将上清液置换为新液体时, 细微颗粒流失所造成。在强碱作用下尾砂颗粒集中表为粒径增大 ($d_{50}=132.58$), 大颗粒尾砂占有比例较大, 可能是浸泡过程中胶结物质的生成所致, 与颗粒间黏结有关。同时可以发现经过酸、碱溶液浸泡后尾砂颗粒的级配均变差。

将试样的孔隙比控制在 0.65, 探究尾砂渗透试验时浸泡时间对尾矿渗透系数的影响关系。由图 6(a)可知, 尾砂的渗透系数随强酸溶液中的浸泡时间呈二次抛物线增长, 浸泡 1600 s 较浸泡 200 s 增加了 56.92%; 由图 6(b)可以看出, 强碱环境下尾砂的渗透系数随浸泡时间呈 Logistic 函数下降, 前 1000 s 表现为快速下

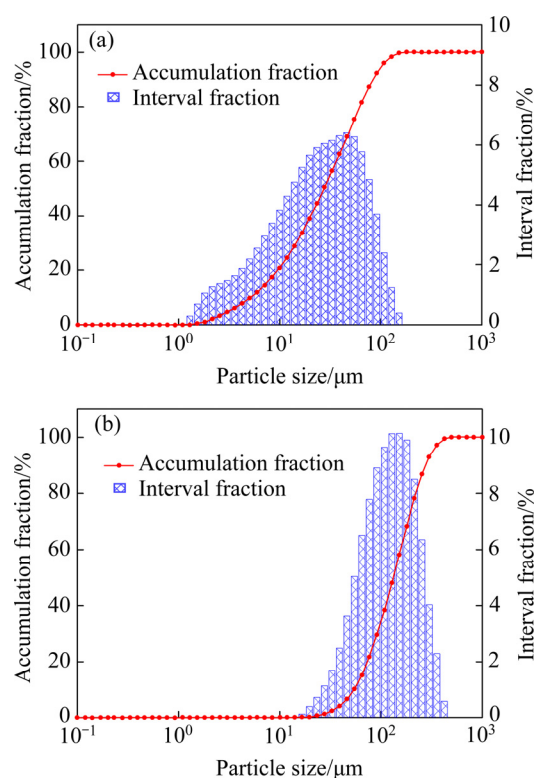


图5 酸、碱溶液浸泡后粒径变化

Fig. 5 Particle size change after soaking in acid and alkali solutions: (a) pH=3; (b) pH=11

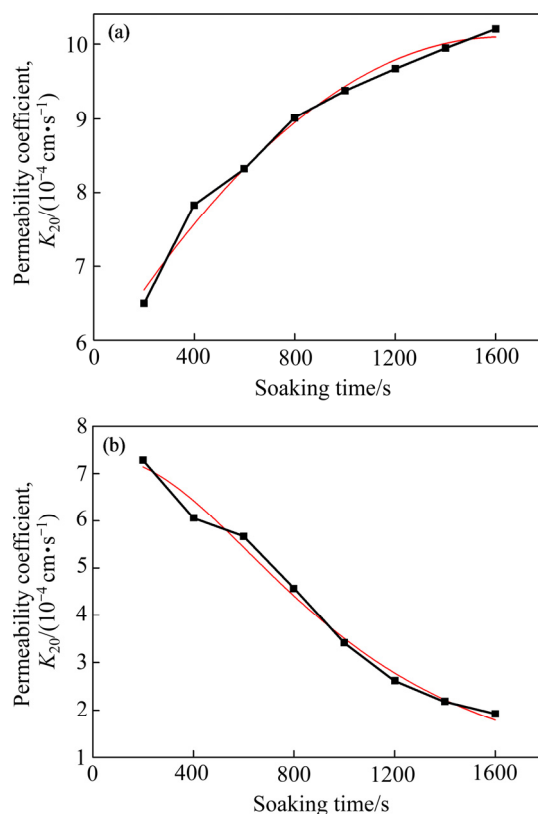


图6 尾砂浸泡时间与渗透系数的变化关系

Fig. 6 Relationship between soaking time and permeability coefficient of tailings: (a) pH=3; (b) pH=11

降趋势，1000 s 后则下降变缓，浸泡 1600 s 较浸泡 200 s 下降了 73.66%。

2.3 孔隙比与渗透系数的关系模型

从渗透试验中初步可知孔隙比与渗透系数为“似指数”关系，为进一步准确地得到不同化学条件下孔隙比与尾矿试样的渗透系数影响关系具体模型，根据太沙基公式、柯森公式、刘杰公式，设置拟合方程形式，如式(3)、(4)、(5)所示：

太沙基公式，

$$K = 2d_{10}^2 e^2 \Rightarrow y = ax^2 \tag{3}$$

柯森公式，

$$K_{18} = 780 \frac{n^3}{(1-n)^2} d_9^2 \xrightarrow{n=\frac{e}{1+e}} K_{18} = 780 d_9^2 \frac{e^3}{1+e} \Rightarrow y = a \frac{x^3}{1+x} \tag{4}$$

刘杰公式

$$K_{10} = 234 n^3 d_{20}^2 \xrightarrow{n=\frac{e}{1+e}} K_{10} = 234 d_{20}^2 \left(\frac{e}{1+e} \right)^3 \Rightarrow y = a \left(\frac{x}{1+x} \right)^3 \tag{5}$$

利用 OriginPro 2018 软件按照上述设置的方程形式进行拟合，结果如表 6 所列。从表 6 可知，在中性、酸性、碱性三种化学条件下，采用柯森公式对试验中得到的孔隙比与渗透系数进行拟合效果最好，因此采用柯森公式进行表征不同化学条件下孔隙比与渗透系数的变化规律。

根据图 1 的尾砂粒级组成可知，尾砂试样的有效粒径 $d_9=0.00317\text{ cm}$ ，基于柯森公式进行变换拟合公式得到三种不同化学条件下高拟合优度的公式如下，并得到拟合曲线如图 7 所示。

表 6 不同形式的方程拟合结果

Table 6 Fitting results of different equations

Formula type	Neutral (pH=7)		Acidic (pH=3)		Alkalinity (pH=11)	
	Fitting results	R squared	Fitting results	R squared	Fitting results	R squared
TERZAGHI formula	$K_{20} = 0.00227e^2$	0.810	$K_{20} = 0.00351e^2$	0.786	$K_{20} = 7.34416 \times 10^{-4} e^2$	0.805
KOSEN formula	$K_{20} = 0.00535 \frac{e^3}{1+e}$	0.910	$K_{20} = 0.00831 \frac{e^3}{1+e}$	0.890	$K_{20} = 0.00173 \frac{e^3}{1+e}$	0.906
LIU JIE formula	$K_{20} = 0.01615 \left(\frac{e}{1+e} \right)^3$	0.752	$K_{20} = 0.02501 \left(\frac{e}{1+e} \right)^3$	0.726	$K_{20} = 0.00524 \left(\frac{e}{1+e} \right)^3$	0.747

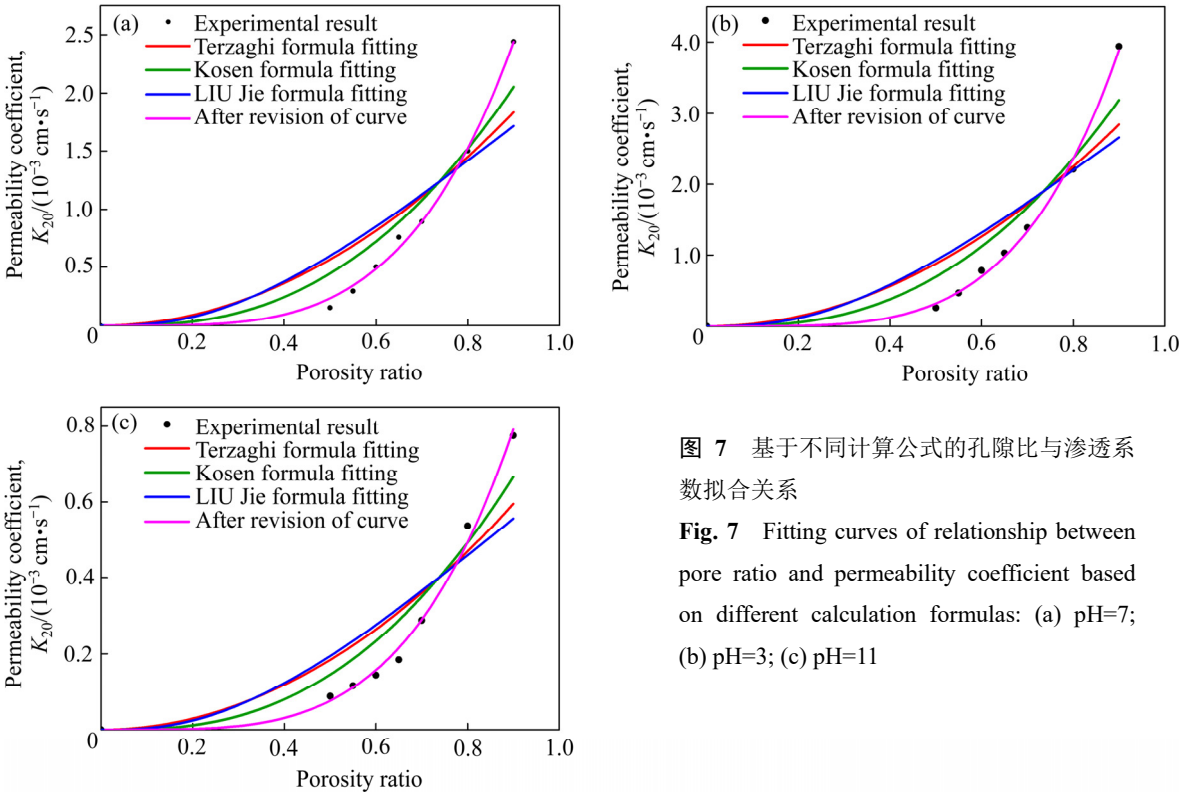


图 7 基于不同计算公式的孔隙比与渗透系数拟合关系

Fig. 7 Fitting curves of relationship between pore ratio and permeability coefficient based on different calculation formulas: (a) pH=7; (b) pH=3; (c) pH=11

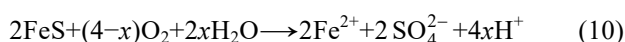
$$K_{20} = 532.4 \frac{e^3}{1+e} d_9^2 \quad (\text{pH}=7, R^2=0.994) \quad (6)$$

$$K_{20} = 826 \frac{e^3}{1+e} d_9^2 \quad (\text{pH}=3, R^2=0.995) \quad (7)$$

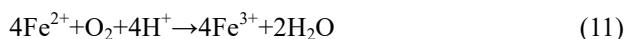
$$K_{20} = 172.2 \frac{e^3}{1+e} d_9^2 \quad (\text{pH}=11, R^2=0.989) \quad (8)$$

3 不同化学条件下孔隙比对尾矿渗透性影响机理与微观分析

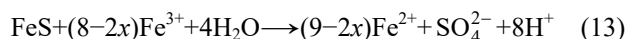
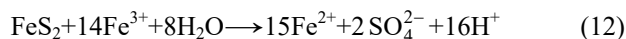
在含有硫化矿物的磁铁矿和黄铁矿尾矿中常常在氧气的作用下产生 H_2SO_4 以及游离的 Fe^{2+} , Fe^{2+} 继续氧化形成 Fe^{3+} 。由于 Fe^{3+} 具有强氧化性, 氧化速率是 O_2 的 10 倍多^[22], 因此尾矿中氧化物变为两种, 铁的硫化物极易继续被氧化还原形成更多的 H^+ , 使尾矿中酸性增强, 溶解尾矿颗粒表面及颗粒间的 CaCO_3 、 MgCO_3 等碳酸化合物, 改变尾砂颗粒形貌和孔隙比, 增强尾矿间的通透性。同时 Fe^{3+} 与 H_2O 发生反应形成碱性的氢氧化合物胶体, 沉淀物裹覆尾砂颗粒表面并将颗粒间的孔隙通道填堵, 形成堵塞作用, 致使尾砂颗粒的渗透性显著的下降。在不同化学条件下尾砂颗粒形状与孔隙变化如图 8 所示。酸碱条件下的化学方程式如下:



Fe^{2+} 易被氧化



氧化反应继续:



碱性环境反应:



另外, 尾矿砂表面带有负电荷, 在其周围形成电场, 吸附着水中的阳离子形成结合水膜^[23], 由于结合水膜受电场力作用对孔隙中的自由水存在一定黏滞作用, 故结合水膜的厚度一定程度上能反映尾砂的渗透性。尾矿颗粒在酸性环境中小颗粒被逐渐地溶蚀, 表面结合水膜变薄, 增加尾砂的渗透系数^[10]; 而在碱性环境中由于化学反应形成的沉淀胶状物带有正电性, 致使结合水膜变厚, 导致尾矿砂渗透性下降。

为进一步研究不同化学条件对尾矿颗粒微观结构影响和成分变化, 本文利用蔡司 ZEISS EVO18 型扫描电子显微镜, 观察尾矿颗粒的微观结构, 对比中性、酸性、碱性环境下的结构差异, 得到结果如图 9 所示。利用 X 射线能谱仪, 分析不同环境作用后, 尾矿砂成分元素的变化, 结果如表 7 和表 8 所列。从图 9(a)可以看出, 在 $\text{pH}=7$ 的中性环境下, 尾砂颗粒粒径分布离散, 既有大于 $75 \mu\text{m}$ 的大颗粒粒径, 也有小于 $20 \mu\text{m}$ 的小颗粒粒径, 小颗粒尾砂松散地分布在大颗粒尾砂表面, 颗粒与颗粒间距较为连续均匀。从图 9(b)可以看出, 当尾矿砂处在 $\text{pH}=3$ 的酸性环境中, 小颗粒尾砂大量被大量侵蚀, 大颗粒尾砂呈散乱分布, 且颗粒表面凸显出明显的棱角, 颗粒间孔隙较大, 通道较深。因此尾矿砂在酸性环境下孔隙比扩大, 渗透系数变大, 渗透性变好。从表 7 可以看出, 经过酸性液浸泡后尾矿砂仍以 Si 元素主要形式存在, 其中的 Fe、Ca、Mg 等元素的比重也适当增加, 但各元素的占比顺序基本

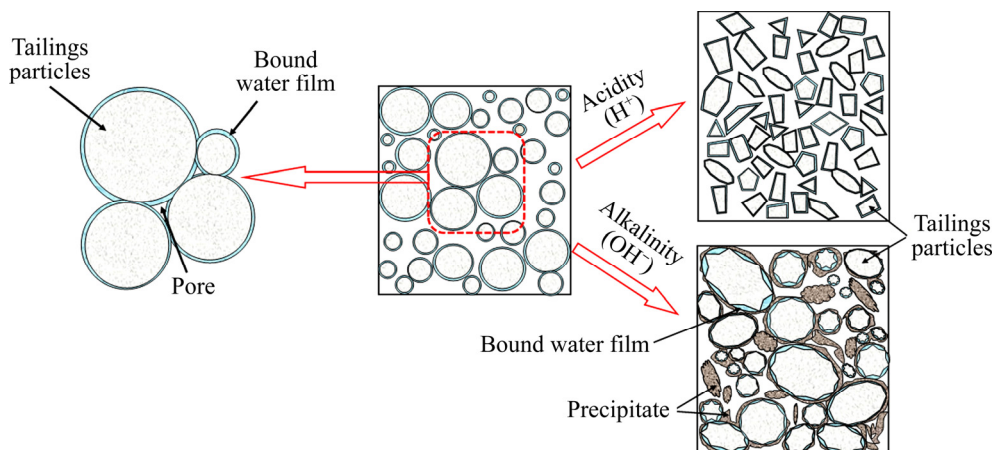


图 8 不同化学条件下尾砂颗粒形状与孔隙变化示意图

Fig. 8 Schematic diagram of shape and pore change of tailings under different chemical conditions

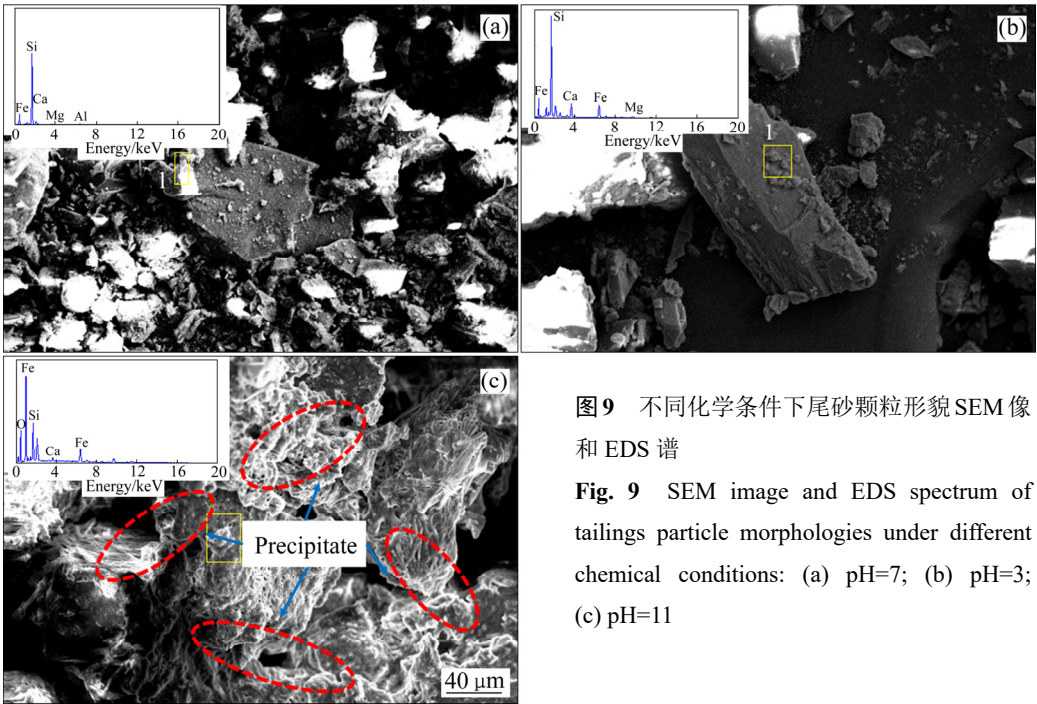


图 9 不同化学条件下尾砂颗粒形貌 SEM 像和 EDS 谱

Fig. 9 SEM image and EDS spectrum of tailings particle morphologies under different chemical conditions: (a) pH=7; (b) pH=3; (c) pH=11

表 7 酸性条件下 EDS 分析

Table 7 EDS analysis under acidic conditions

Element	Atomic number	Series	Mass fraction/%	Mole fraction/%
Si	14	K-series	43.19	55.14
Fe	26	K-series	35.43	22.75
Ca	20	K-series	16.23	14.52
Mg	12	K-series	5.15	7.60

表 8 碱性条件下 EDS 分析

Table 8 EDS analysis under alkaline conditions

Element	Atomic number	Series	Mass fraction/%	Mole fraction/%
O	8	K-series	45.31	68.83
Fe	26	K-series	35.16	15.30
Si	14	K-series	15.53	13.44
Ca	20	K-series	4.00	2.43

与中性条件下相似。从图 9(c)可以看出，当尾矿砂处在 pH=11 的碱性条件下，尾砂颗粒被胶体沉淀物包裹，且紧密地粘结在一起形成网状蜂窝结构，大的蜂窝絮状体间被沉淀结晶物填充。因此，碱性环境下的尾砂渗透系数明显下降，渗透性降低。从表 8 可以发现，经过强碱作用后，尾矿砂的个元素占比发生了较大变化，其中 Fe 占比显著增大，主要由于尾砂中游离的 Fe 离子与碱反应，生成氢氧化铁所致，这与化学式(14)的得出提供了有力支撑条件。

4 结论

1) 在一定的化学条件下，渗透系数随孔隙比的增大而增大，存在“似指数”关系。不同的化学条件作用下对尾矿砂的渗透性存在明显的影响，在相同的孔隙比下，酸性环境尾砂渗透性>中性环境尾砂渗透性>碱性环境尾砂渗透性。

2) 在相同化学环境不同浸泡时间下对尾矿砂渗透性存在较大影响,当孔隙比控制为 0.65 时,在 pH=3 强酸溶液中,尾砂的渗透系数随浸泡时间呈二次抛物线增长,浸泡 1600 s 较浸泡 200 s 增加了 56.92%;在 pH=11 强碱环境下尾砂的渗透系数随浸泡时间呈 Logistic 函数下降,浸泡 1600 s 较浸泡 200 s 下降了 73.66%。

3) 对不同化学条件作用下尾矿砂孔隙比与渗透系数研究分析,基于太沙基公式、柯森公式、刘杰公式拟合得到 pH=7、pH=3、pH=11 三种环境下的尾矿砂孔隙比与渗透系数的高精度关系修正模型,利用经验性渗透计算公式可为化学作用下的改善尾矿渗流特性提供指导。

4) 不同化学条件下孔隙比对尾矿渗透性影响的机理在于:含硫化物的铁矿尾砂会经过系列氧化还原反应形成酸和碱环境,酸性作用下溶蚀部分细颗粒使孔隙通道变大,渗透性升高,碱性作用下形成胶体沉淀物裹覆颗粒表面,淤堵颗粒间孔隙,降低尾砂的渗透系数;尾砂颗粒表面形成的结合水膜有黏滞作用一定程度降低渗透性,酸性条件下结合水膜变薄,尾砂渗透系数上升,碱性环境下结合水膜变厚,渗透系数下降。

REFERENCES

- [1] 蔡嗣经, 杨 鹏. 金属矿山尾矿问题及其综合利用与治理[J]. 中国工程科学, 2000, 2(4): 89–92.
CAI Si-jing, YANG Peng. Tailings problems and tailings utilization and treatments in the metal mines[J]. Engineering Science, 2000, 2(4): 89–92.
- [2] 李长洪, 卜 磊, 陈龙根. 尾矿坝致灾机理研究现状及发展态势[J]. 工程科学学报, 2016, 38(8): 1039–1049.
LI Chang-hong, BU Lei, CHEN Long-gen. Research situation of the disaster-causing mechanism of tailing dams and its developing trend[J]. Chinese Journal of Engineering, 2016, 38(8): 1039–1049.
- [3] 王 昆, 杨 鹏, HUDSON-EDWARDS K, 吕文生, 卜 磊. 尾矿库溃坝灾害防控现状及发展[J]. 工程科学学报, 2018, 40(5): 526–539.
WANG Kun, YANG Peng, HUDSON-EDWARDS K, LÜ Wen-sheng, BU Lei. Status and development for the prevention and management of tailings dam failure accidents[J]. Chinese Journal of Engineering, 2018, 40(5): 526–539.
- [4] 于广明, 宋传旺, 潘永战, 李 亮, 李 冉, 路世豹. 尾矿坝安全研究的国外新进展及我国的现状和发展态势[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(增刊 1): 3238–3248.
YU Guang-ming, SONG Chuan-wang, PAN Yong-zhan, LI Liang, LI Ran, LU Shi-bao. Review of new progress in tailing dam safety in foreign research and current state with development trend in china[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics Engineering, 2014, 33(Suppl 1): 3238–3248.
- [5] KOSSOFF D, DUBBIN W E, ALFREDSSON M, EDWARDS S J, MACKLIN M G, HUDSO-EDWARDS K A. Mine tailings dams: characteristics, failure, environmental impacts, and remediation[J]. Applied Geochemistry, 2014, 51: 229–245.
- [6] 李全明, 王云海, 廖国礼. 尾矿库安全评价中的科学问题及评价方法探讨[J]. 中国安全生产科学技术, 2006, 2(6): 53–57.
LI Quan-ming, WANG Yun-hai, LIAO Guo-li. Study on scientific issue and evaluation method in safety assessment of tailing reservoir[J]. Journal of Safety Science Technology, 2006, 2(6): 53–57.
- [7] RICO M, BENITO G, SALGUEIRO A R, DIEZ-HERRERO A, PEREIRA H G. Reported tailings dam failures. A review of the European incidents in the worldwide context[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 152(2): 846–852.
- [8] ZANDRÍN M T, OLDECOP L A, RODRÍGUEZ R, ZABALA F. The role of capillary water in the stability of tailing dams[J]. Engineering Geology, 2009, 105(1): 108–118.
- [9] 党发宁, 刘海伟, 王学武, 薛海斌, 马宗源. 基于有效孔隙比的黏性土渗透系数经验公式研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(9): 1909–1917.
DANG Fa-ning, LIU Hai-wei, WANG Xue-wu, XUE Hai-bin, MA Zong-yuan. Empirical formulas of permeability of clay based on effective pore ratio[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics Engineering, 2015, 34(9): 1909–1917.
- [10] MASCARO I, BENVENUTI M, CORSINI F, COSTAGLIOLA P. Mine wastes at the polymetallic deposit of Fenice Capanne (southern Tuscany, Italy). Mineralogy, geochemistry, and environmental impact[J]. Environmental Geology, 2001, 41(3): 417–429.
- [11] KIM K K, KIM K W, KIM J Y, KIM I S, CHEONG Y W, MIN J S. Characteristics of tailings from the closed metal mines as potential contamination source in South Korea[J]. Environmental Geology, 2001, 41(3/4): 358–364.
- [12] QUIGLEY R M, FERNANDEZ F, YANFUL E, HELGASON T, MARGARITIS A, WHITBY J L. Hydraulic

- conductivity of contaminated natural clay directly below a domestic landfill[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1987, 24(3): 377-383.
- [13] MOHAMED A M O, YONG R N, MAZUS M T. Contaminant migration in engineered clay barriers due to heat and mois[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1995, 32(1): 40-59.
- [14] KRAFT C. The effects of mining in Northern Romania on the heavy metal distribution in sediments of the rivers Szamos and Tisza (Hungary)[J]. CLEAN-Soil, Air, Water, 2006, 34(3): 257-264.
- [15] 饶运章, 侯运炳. 尾矿库废水酸化与重金属污染规律研究[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2004, 23(3): 430-432.
- RAO Yun-zhang, HOU Yun-bing. Study on law of acidification of wastewater in tailings reservoir and heavy metals pollution[J]. Journal of Liaoning Technical University (Science and Technology), 2004, 23(3): 430-432.
- [16] 马少健, 胡治流, 陈建华, 陈建新, 林美群. 硫化矿尾矿重金属离子溶出实验研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2002, 27(4): 273-275.
- MA Shao-jian, HU Zhi-liu, CHEN Jian-hua, CHEN Jian-xin, LIN Mei-qun. Experimental study on heavy metal release of sulfide mine tailings[J]. Journal Guangxi University (Science and Technology), 2002, 27(4): 273-275.
- [17] 林美群, 马少健, 王桂芳, 刘平, 苏秀娟, 覃祥敏. 环境因素对硫化矿尾矿重金属溶出影响的模拟试验[J]. 金属矿山, 2008(6): 108-111.
- LIN Mei-qun, MA Shao-jian, WANG Gui-fang, LIU Ping, SU Xiu-juan, TAN Xiang-min. Simulation study on influence of environmental factors on release of heavy metal ions out of sulfide ore tailings[J]. Metal Mine, 2008(6): 108-111.
- [18] 白云鹏. 酸碱溶液作用下尾矿坝变形机理研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2010: 1-8.
- BAI Yun-peng. Deformation of the tailings dam under the action of acid and alkali solution[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2010: 1-8.
- [19] 张媛, 张兵, 梁冰, 张二军. 酸碱溶液对含硫尾矿砂渗透特性的影响研究[J]. 非金属矿, 2017, 40(6): 48-50.
- ZHANG Yuan, ZHANG Bin, LIANG Bin, ZHANG Er-jun. Study on the effect of acid and alkali solution on the permeability of sulfur-containing tailings[J]. Non-Metallic Mines, 2017, 40(6): 48-50.
- [20] 程晓亮, 杨鹏, 吕文生, 王昆. 化学环境下的应力-渗流耦合对尾矿库稳定性影响试验[J]. 中国安全科学生产技术, 2018, 14(2): 112-118.
- CHENG Xiao-liang, YANG Peng, LÜ Wen-sheng, WANG Kun. Experimental study on effect of stress-seepage coupling on stability of tailing pond under chemical environment[J]. Journal of Safety Science Technology, 2018, 14(2): 112-118.
- [21] 土工试验规程: SL237—1999[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
- Geotechnical test code: SL237—1999[S]. Beijing: China Water & Power Press, 1999.
- [22] NORDSTROM D K. Aqueous pyrite oxidation and the consequent formation of secondary iron minerals[J]. Soil Science Society of America, 1982(3): 37-56.
- [23] 尹升华, 齐炎, 谢芳芳, 陈勋, 王雷鸣. 不同孔隙结构下风化壳淋积型稀土的渗透特性[J]. 中国有色金属学报, 2018, 28(5): 1043-1049.
- YIN Sheng-hua, QI Yan, XIE Fang-fang, CHEN Xun, WANG Lei-ming. Permeability characteristic of weathered crust elution-deposited rare earth ores under different pore structures[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2018, 28(5): 1043-1049.

Experimental on influence of pore ratio on tailings sand permeability under different chemical conditions

ZHU Li-yi^{1,2}, YANG Peng^{2,3}, LÜ Wen-sheng^{1,2}, CHENG Xiao-liang⁴, WANG Kun⁵

(1. Key Laboratory of High-Efficient Mining and Safe of Metal, Ministry of Education, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

3. Beijing Key Laboratory of Information Service Engineering, Beijing Union University, Beijing 100101, China;

4. Power China Beijing Engineering Corporation Limited, Beijing 100020, China;

5. School of Mining and Safety Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: In order to explore the feature rule of pore ratio and soaking time on the permeability of tailings sand under the action of different acid and alkaline fluid environments, seven groups of samples with different pore ratio were prepared. A laboratory experiment of variable head permeability was designed to analyze the permeability of tailings sand. The permeability variation of tailings under eight soaking times was studied by the method of controlling variables. The scanning electron microscope and X-ray energy spectrometer was used to investigate the mechanism between pore ratio and permeability of tailings under different chemical conditions. The results show that a similarity index relationship between pore ratio and permeability coefficient of tailings under different chemical conditions. When the void ratio of the sample is 0.65, in strong acid solution (pH=3), the permeability coefficient of tailings increases with the increase of soaking time, showing a quadratic parabolic relationship. The permeability coefficient of the tailings soaked for 1600 s increases by 56.92% compared with that soaked for 200 s. In the strong alkali environment (pH=11), the permeability coefficient of tailings decreases with the soaking time as a logistic function, and the permeability of tailings decreases by 73.66% in 1600 s compared with that in 200 s. Based on the penetration theory of TERZAGHI, KOSEN and LIU JIE, the modified relationship model is obtained under acidic, alkaline and neutral conditions. According to the analysis of test results and the images observed from scanning electron microscopy, it is found that under acidic conditions the small tailings are eroded and large tailings have prominent edges and corners. Meanwhile, the bound water film thinner, the pore size increases, and the permeability coefficient increases. However, under alkaline conditions, the surface of tailings particles and tailings particles are covered or filled with precipitated colloids. Furthermore, the bound water film becomes thicker, the porosity decreases, and the permeability coefficient decreases accordingly.

Key words: tailings sand; chemical environment; permeability coefficient; pore ratio; microstructure

Foundation item: Project(2017YFC0804604) supported by the National Key Research Development Program of China; Project(51774045) supported by the National Science Foundation of China

Received date: 2019-09-05; **Accepted date:** 2020-08-20

Corresponding author: YANG Peng; Tel: +86-10-64900509; E-mail: yangpeng@buu.edu.cn

(编辑 王超)