

文章编号: 1005-0523(2021)03-0130-07

## 某铁矿厂尾矿固化体蒸发量模型研究

徐贞珍<sup>1,2</sup>, 刘东锋<sup>3</sup>, 蒋亚龙<sup>1,2</sup>

(1. 华东交通大学江西省岩土工程基础设施安全与控制重点实验室, 江西 南昌 330013; 2. 华东交通大学土木建筑学院, 江西 南昌 330013; 3. 武汉大学土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072)

**摘要:**以某矿项目为工程依托,通过土-水特征曲线模型、蒸发率-基质吸力模型、含水量-蒸发率模型的推导,建立尾矿固化体蒸发量模型,确定不同龄期固化体的含水量。研究表明:对于65%浓度的尾矿固化体,由于初始含水量较高,不同类型尾矿1d与3d的含水量变化区别不大,到7d时,黏土矿物含量多的尾矿含水量大;对于72%浓度的尾矿,黏土含量对含水量的影响较明显,黏土含量越大,白泥添加越多,固化体7d的含水量越高,其主要原因为黏土矿物的存在使固化体中的蒸发量变小。

**关键词:**尾矿固化体;黏土含量;含水量;蒸发量模型

中图分类号:TU43

文献标志码:A

本文引用格式:徐贞珍,刘东锋,蒋亚龙.某铁矿厂尾矿固化体蒸发量模型研究[J].华东交通大学学报,2021,38(3):130-136.

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.20210706.003

## Study on Evaporation Model of Tailings Cemented Paste from an Iron Ore Plant

Xu Zhenzhen<sup>1,2</sup>, Liu Dongfeng<sup>3</sup>, Jiang Yalong<sup>1,2</sup>

(1. Jiangxi Key Laboratory of Infrastructure Safety and Control in Geotechnical Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 3. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** In this study, through the soil-water characteristic curve model, evaporation rate-matric suction model and moisture content-evaporation rate model, the evaporation model of tailings cemented paste was established to determine the moisture content of tailings cemented paste at different ages. According to research findings, while the concentration of tailings cemented paste is 65%, different types of tailings have little difference in change of moisture content for 1 d and 3 d, because the initial water content is higher. Tailings cemented paste with more clay content have higher moisture content for 7 d. While the concentration of tailings cemented paste is 72%, the moisture content is obviously affected by the clay content. High clay content means high clay particles, and moisture content in the tailings cemented paste is higher, which is because clay minerals reduce evaporation in the tailings cemented paste.

**Key words:** solidified body of tailings; clay content; moisture content; evaporation model

**Citation format:** XU Z Z, LIU D F, JIANG Y L. Study on evaporation model of tailings cemented paste from an iron ore plant[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2021, 38(3): 130-136.

收稿日期: 2021-03-22

基金项目: 国家自然科学基金(41972291); 江西省教育厅自然科学基金(GJJ190300)

作者简介: 徐贞珍(1991—), 女, 助理实验师, 硕士, 研究方向为改性混凝土材料力学性能。E-mail: xzz2013@whu.edu.cn。

针对不同的工程条件,铁尾矿的处理方法有很多种,但都需要尾矿具有一定的强度,即需要对其进行固化<sup>[1-5]</sup>。固化剂的选择与铁尾矿的性质密不可分,需要进行大量的配方试验来确定固化剂类型及添量。水泥作为一种经济实用的常规固化剂,在铁尾矿固化中应用最为广泛<sup>[6-8]</sup>。特别地,由于部分铁矿所在区域地层土体富含黏土矿物,通过就地取材,选用该类土为固化剂主要配方对铁尾矿进行固化干堆,在很大程度上能降低经济成本,并且实现对周边环境的有效保护<sup>[9]</sup>。

在尾矿干堆固化试验中发现,尾矿及固化剂中的黏土矿物质对固化体的强度有较大的影响,主要是由于黏土矿物失水产生的胶结作用<sup>[10]</sup>。含水量影响着黏土矿物的胶结强度,在一定范围内,黏土矿物含水量越低,其胶结强度越大,尾矿固化干堆稳定性越好<sup>[11]</sup>。但在实际工程中无法实时测量固化体的含水量,需要建立尾矿固化体蒸发量模型,来计算不同黏土矿物含量、不同龄期固化体的含水量,为固化体强度预测提供理论依据。

本文以国外某铁矿项目为工程依托,首先通过室内接触式滤纸法获取 2 种典型尾矿及固化剂(白泥)的基质吸力,拟合得到土水特征曲线模型;在此基础上推导得到尾矿固化体蒸发率-基质吸力模型、含水量-蒸发率模型,从而用于确定不同龄期固化体的含水量。

## 1 试验材料

### 1.1 尾矿

对某铁矿项目进行采样,经选矿工艺流程生产出 1#~6# 尾矿样品,其黏土质含量和含砂率均不相同。其中 1# 和 6# 尾矿表现为两种极端:6# 尾矿保

水性最好、颜色最深,1# 尾矿保水性能最差、颜色最浅。对两种极端尾矿进行不同质量比例的配比,以使固化剂配方可适用于不同开采地点、不同开采阶段产生的尾矿,最终形成 H1#,H2#,H3#,H4# 4 种混合尾矿进行固化体蒸发量规律研究。H1#,H2#,H3#,H4# 混合尾矿中 1# 尾矿与 6# 尾矿的质量比分别为:4:6,3:7,2:8,1:9。

### 1.2 固化剂

选择两种固化材料为主要原料,一种是工业水泥(PCC 水泥),用于实现尾矿颗粒间化学胶结增强作用;另一种是矿区地表覆盖的大量类高岭土黏土物质(白泥),初期用于吸附水分,减少尾矿颗粒间的自由水,使化学胶结结构尽快建立,脱水后具有一定的粘聚力,组成尾矿颗粒间的物理胶结结构。

试验中针对不同的尾矿浓度和类型,确定了尾矿固化剂配方,65%浓度的尾矿固化体配方为:尾矿固化体 65%+粗骨料 20%+外加剂 1%+(磨细 PCC+白泥)14%,72%浓度的尾矿固化体配方为:尾矿固化体 72%+粗骨料 20%+外加剂 1%+(磨细 PCC+白泥)8%。

## 2 尾矿固化体蒸发量模型

### 2.1 土-水特征曲线模型

尾矿固化体中水分的散失几乎全部由蒸发引起。作为一种非饱和土体,尾矿固化体的水分蒸发与基质吸力相关。尾矿固化体刚排放时是处于饱和状态,随着水泥水化的消耗,表面水分的蒸发及内部水分的迁移,尾矿固化体逐渐变为非饱和状态。非饱和土体中土水势能的一种表现形式为基质吸力(土体吸力),是由土体孔隙中液相和气相界面压力不等而产生。

表 1 H1#-H4# 混合尾矿的比重及初始孔隙比  
Tab.1 Specific gravity and initial void ratio of H1#-H4# tailings mixture

尾矿类型	比重	65%浓度初始孔隙比 白泥添加量				72%浓度初始孔隙比 白泥添加量			
		6%	4.5%	4%	0%	5.5%	4%	2.5%	0%
H1#	2.414	1.19	1.24	1.25	1.30	0.88	0.90	0.91	0.94
H2#	2.388	1.18	1.22	1.23	1.29	0.87	0.89	0.90	0.93
H3#	2.362	1.17	1.21	1.22	1.27	0.87	0.88	0.89	0.92
H4#	2.336	1.15	1.20	1.21	1.26	0.86	0.87	0.88	0.91

基质吸力受到许多物理化学作用的影响,这些影响因素各自所起的作用大小取决于非饱和土-水-气三相系统中的含水量。当非饱和土处于吸力值相对较高且含水量相对较低的情况下,孔隙水则主要以薄膜形式吸附于土颗粒表面,其吸力主要由相对短程的吸附作用形成。当非饱和土处于相对较高含水量和相应较低吸力值时,孔隙水主要以毛细水的形式存在,而毛细作用主要受土颗粒、孔隙结构以及孔隙尺寸分布等因素影响。土体类型决定了其吸力值处于受控于毛细作用的低吸力区或受控于短程吸附作用的高吸力区。例如,砂土表面积较小,在初始的颗粒表面发生水合作用时,吸收的水分较少,大部分非饱和含水量以毛细作用为主;而黏土由于其颗粒表面积较大,需要更多的水分满足于高吸力区形成的水合作用能量要求。

土-水特征曲线(SWCC)即是用于描述这种土吸力与含水量之间本构关系的函数曲线。对于沙土,其表面电荷与表面积均较小,在大多数非饱和状态下,砂土内的土体吸力主要由毛细作用提供。对于粉土,其表面积比同体积的砂土表面积大得多,粉土在短程吸附作用下吸附的孔隙水比砂土多。同样,黏土的颗粒比表面积更大,颗粒表面电荷密度更高,在同等的短程吸附作用条件下,黏土吸附的孔隙水要比砂土与粉土更多。

对于非饱和土体土-水特征曲线的研究和应用有很多,其中 Fredlund 等<sup>[12]</sup>提出了一种适用于各种非饱和土体的土-水特征曲线模型

$$\theta(\Psi, a, n, m) = C(\Psi) \frac{\theta_s}{\{\ln[e + (\Psi/a)^n]\}^m} \quad (1)$$

式中: $\theta$ 为体积含水量; $\theta_s$ 为饱和状态下的体积含水量; $\Psi$ 为基质吸力,kPa; $a, n, m$ 为拟合参数,需要试验数据进行拟合; $C(\Psi)$ 为校正函数,其表达式为

$$C(\Psi) = 1 - \frac{\ln[1 + (\Psi/\Psi_r)]}{\ln[1 + (1\ 000\ 000/\Psi_r)]} \quad (2)$$

式中: $\Psi_r$ 为残留状态下体积含水量 $\theta_r$ 对应的基质吸力。

根据以上理论,采用接触式滤纸法测得 1#,6# 尾矿及白泥不同含水量下的基质吸力(图 1,图 2),对其水土特征曲线进行了拟合。

滤纸法有接触式和非接触式两种,两种方法均可间接测定非饱和土吸力,其原理为滤纸与非饱和

土样接触时,水分产生迁移并达到平衡,通过测定平衡状态时滤纸的含水量以及预先确定的滤纸的校准曲线(基质吸力与滤纸含水量之间的对应关系),来间接确定土样的吸力值。

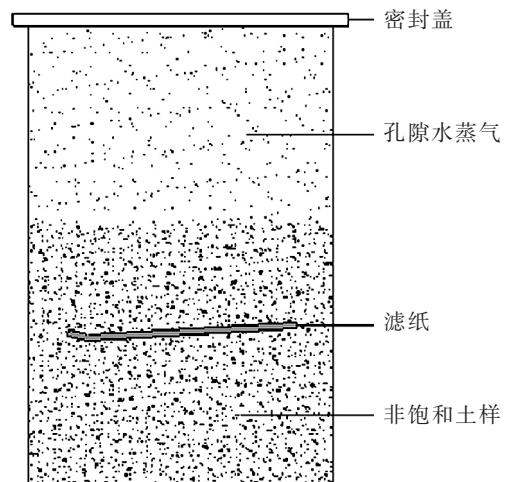


图 1 接触式滤纸法示意图

Fig.1 Schematic diagram of contact filter paper method



图 2 接触式滤纸法室内试验

Fig.2 The laboratory test of contact filter paper method

接触式滤纸法要求滤纸与土样保持直接接触。由于土样迁移到滤纸中的水分受毛细作用和土颗粒表面吸附力的控制,而不体现渗透吸力的影响,因此接触滤纸法测定的含水率仅能反映土体总吸力中的基质吸力部分。

试验时,为了防止滤纸被污染,一般将 3 张滤纸叠加,中间滤纸用于测量,上下两张滤纸起保护作用。试验采用的滤纸为无灰、定量的 Whatman #42 滤纸。在做接触式滤纸试验之前,需要获得滤纸的校准曲线。试验采用的是根据 ASTM D5298 标准得到的 Whatman #42 型滤纸的校准曲线。

试验时,首先在 105℃ 的烘箱中放入滤纸,将其烘干,取出在干燥器内冷却后称重,再放回烘

箱中继续烘干,冷却后称重,直至重量不再变化,天平精度应达到 0.000 1 g。之后用适当的玻璃容器装 30~50 g 左右的土样,把 3 层滤纸放在土样中,将玻璃容器密封并在隔离环境中放置 7~10 d,隔离环境的温度变化应控制在 0.1 ℃ 以内,保证试验达到平衡状态。试验结束后,将滤纸取出,并立即称重。称重后将滤纸烘干并再次称量,确定试验达到平衡状态时滤纸的含水量。试验时,每种土样取 8 个含水量,拟合出各土样的土-水特征曲线。

根据尾矿及白泥的比重和粉末状态下的容重,求得它们自然饱和状态下的含水量,如表 2。根据试验结果(表 3~表 5),拟合出 1#,6# 尾矿及白泥的土-水特征曲线,如图 3~图 5。

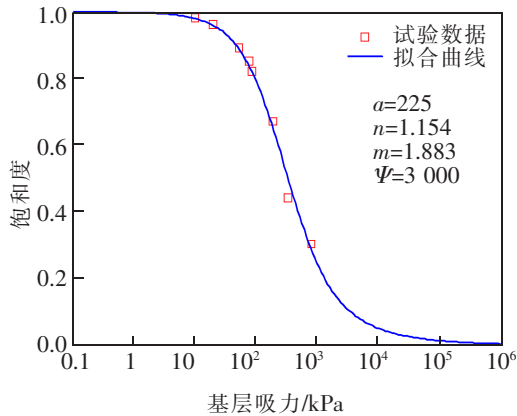


图 3 1# 尾矿水土特征曲线  
Fig.3 Soil-water characteristic curve of 1# tails

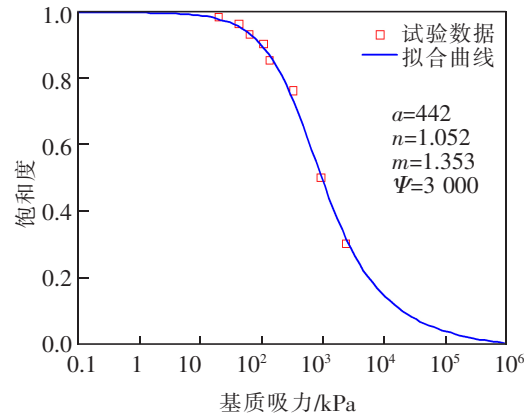


图 4 6# 尾矿水土特征曲线  
Fig.4 Soil-water characteristic curve of 6# tails

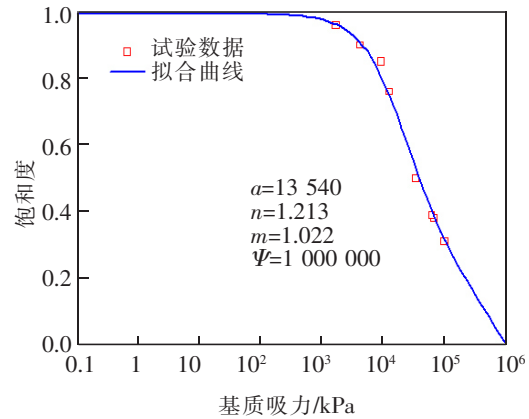


图 5 白泥水土特征曲线  
Fig.5 Soil-water characteristic curve of white clay

表 2 1#,6# 尾矿及白泥的饱和含水量  
Tab.2 Saturation moisture content of 1#,6# tails and white clay

参数	1# 尾矿	6# 尾矿	白泥
比重	2.57	2.31	2.12
饱和含水量	27%	42%	102%
粉末状态下容重	1.93	1.66	1.35

表 3 1# 尾矿滤纸法测试结果  
Tab.3 Test results of filter paper method for 1# tails

参数	含水量							
	8%	12%	18%	22%	23%	24%	25.9%	26.5%
对应饱和度	0.3	0.44	0.67	0.82	0.85	0.89	0.96	0.98
基质吸力/kPa	760	312	180	80	73	50	19	9.6



表4 6#尾矿滤纸法测试结果  
Tab.4 Test results of filter paper method for 6# tails

参数	含水量							
	12.6%	21%	32%	35.7%	37.8%	39%	40%	41%
对应饱和度	0.3	0.5	0.76	0.85	0.9	0.93	0.96	0.98
基质吸力/kPa	2 340	921	325	134	108	64	43	20

表5 白泥滤纸法测试结果  
Tab.5 Test results of filter paper method for white clay

参数	含水量							
	31.4%	38.6%	39.9%	51%	77.5%	86.7%	91.8%	97.9%
对应饱和度	0.31	0.38	0.39	0.5	0.76	0.85	0.9	0.96
基质吸力/kPa	100 000	67 000	62 000	34 000	12 400	9 100	4 160	1 670

不考虑水泥的影响,尾矿固化体由不同比例的1#,6#尾矿及白泥组成,当整体含水量为 $w_{水}$ 时,可以计算出3种土体的饱和度及基质吸力,但含水量相同时,3种土体的基质吸力是不同的,水分会由基质吸力低的土体向基质吸力高的土体迁移,直至吸力达到平衡,如果3种土体混合均匀,则最终1#、6#尾矿及白泥的含水量 $w_{1\#}$ 、 $w_{6\#}$ 、 $w_B$ 有如下关系

$$\begin{cases} \frac{w_{1\#}}{27} = \left(1 - \frac{\ln[1+(\Psi/3\ 000)]}{5.81}\right) \frac{1}{\{\ln[e+(\Psi/225)]^{1.154}\}^{1.883}} \\ \frac{w_{6\#}}{42} = \left(1 - \frac{\ln[1+(\Psi/3\ 000)]}{5.81}\right) \frac{1}{\{\ln[e+(\Psi/442)]^{1.052}\}^{1.353}} \\ \frac{w_B}{102} = \left(1 - \frac{\ln[1+(\Psi/1\ 000\ 000)]}{0.69}\right) \frac{1}{\{\ln[e+(\Psi/13540)]^{1.213}\}^{1.022}} \end{cases} \quad (3)$$

$$w_{1\#} \times n_{1\#} + w_{6\#} \times n_{6\#} + w_B \times n_B = w_{水}$$

式中: $n_{1\#}$ 、 $n_{6\#}$ 、 $n_B$ 分别为1#尾矿、6#尾矿和白泥在固化体中所占的质量比; $w_{1\#}$ 、 $w_{6\#}$ 、 $w_B$ 分别为1#尾矿、6#尾矿和白泥的含水量; $\Psi$ 为达到平衡时的基质吸力,即固化体的基质吸力。

2.2 蒸发率-基质吸力模型

尾矿固化体在地表排放时,水分会不断地通过蒸发作用消散,消散速率通常用蒸发率来衡量。对于非饱和土体,其蒸发率不仅取决于外部气候条件,还取决于自身的基本特征。水体及保持饱和状态的土体(即有水源使得土体一直处于饱和状态)蒸发模型是相同,相对于非饱和土体,可以称为位蒸发或潜在蒸发,由Thornthwaite<sup>[13]</sup>最先提出,是蒸发率的最大值,它可以用Dalton方程计算<sup>[14]</sup>

$$E_p = f(u)(e_s - e_a) \quad (4)$$

式中: $E_p$ 为潜在蒸发率,mm/day; $e_s$ 为某温度下水面

的饱和水气压,kPa; $e_a$ 为实际水气压,kPa; $f(u)$ 为动荡交换方程,受蒸发面大气特征的影响。

但式(4)中的3个参数都不好获得,很难用于直接计算。实验室中 $E_p$ 可以通过试验测得,工程现场 $E_p$ 可通过彭曼方程计算得到。在实验室通过对8组不同固化剂不同龄期的固化体的含水量监测,假定试验过程中室内条件(温度、湿度)处于平均水平,计算出实验室内 $E_p$ 平均值。8组试件不同龄期质量和含水量的平均值如图6所示。

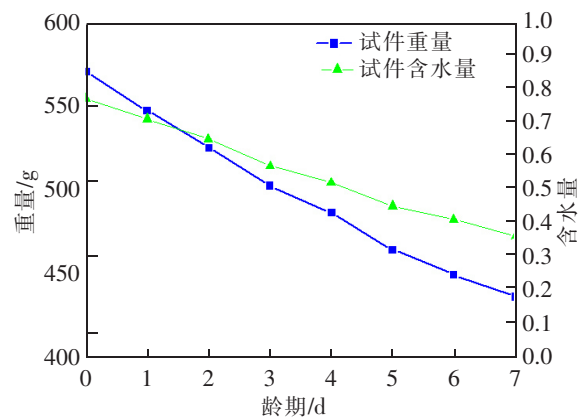


图6 固化体试件含水量监测

Fig.6 Moisture monitoring of solidified specimen

由图6可以看出,试件在前3d,固化体的重量呈直线型减少,即每天水分散失的量相等,到第5d,水分减少速率开始放缓。在第4d时,水分减少速率有一定的波动,是由当天的温度湿度的影响造成的。可以认为固化体表面在前3d一直处于饱和状态,以1d为计算周期,前3d平均每天的水分散失值为21.3g,以此来计算实验室内平均值。由于模具及脱模剂的影响,试件的有效蒸发面取为3,得到实

验室内平均  $E_p=1.42 \text{ mm/d}$ 。

然而在现实中,固化体表面并非一直处于饱和状态,实际的蒸发率( $E_A$ )在土体表面不再是饱和状态时开始减小,而减小程度与土体的自身性质有关<sup>[15-16]</sup>。也就是说土体实际的蒸发率不仅取决于气候条件(决定着  $E_p$ ),还与土体本身的特性如含水率、粒径分布、渗透系数等有关(决定着  $E_A/E_p$ )。Newson 等<sup>[17]</sup>充分考虑土体的自身特性,建立了非饱和土体  $E_A/E_p$  与基质吸力之间的关系。此关系的建立基于 Fredlund 等<sup>[18]</sup>提出的非饱和土体相对湿度与基质吸力之间的关系

$$H_r = \exp\left(\frac{M_w \Psi}{\Theta R \rho_w}\right) \quad (5)$$

式中: $H_r$ 为土体表面的相对湿度,即为实际的蒸汽压力与饱和蒸汽压力之比; $M_w$ 为水的摩尔质量,  $0.018 \text{ kg/mol}$ ;  $\Psi$ 为土水势,即基质吸力,  $\text{kPa}$ ;  $R$ 为气体常量,  $8.314 \text{ J/(mol}\cdot\text{K)}$ ;  $\Theta$ 为温度,  $\text{K}$ ;  $\rho_w$ 为水的密度,  $1 \text{ 000 kg/m}^3$ 。

假设  $f(u)$  在土体表面和水面是相同的,根据式(5)可以得到

$$\frac{E_A}{E_p} = \frac{e_0 - e_a}{e_s - e_a} \quad (6)$$

式中: $e_0$ 为土体表面的实际水气压; $e_s$ 为饱和水气压。

假设大气、水和土体的温度相等,式(6)右边同时除以  $e_s$  得

$$\frac{E_A}{E_p} = \frac{H_r - H_a}{1 - H_a} = \frac{\exp\left(\frac{M_w \Psi}{\Theta R \rho_w}\right)}{1 - H_a} \quad (7)$$

式中: $H_a$ 为大气相对湿度。

### 2.3 含水量-蒸发率模型

随着水分的蒸发,尾矿固化体的含水量降低,从

而导致基质吸力提高,蒸发率变小。假设尾矿固化体的初始含水量为  $\theta_0$ ,经过时间  $t$  后,其含水量变为

$$\theta_t = \theta_0 - S \times (E_A(t_1)\Delta t + E_A(t_2)\Delta t + \dots + E_A(t_n)\Delta t + \dots) \quad (8)$$

(共  $t/\Delta t$  项)

式中: $S$ 为固化体的摊铺面积; $E_A$ 在  $\Delta t$  内可以看做保持不变; $E_A$ 在第  $n$  个  $\Delta t$  内的值为  $E_A(t_n)$ 。

取  $\theta_n$  为经过  $n$  个后  $\Delta t$  固化体的含水量,则有

$$\begin{cases} \theta_1 = \theta_0 - S \times E_A(\theta_0)\Delta t \\ \theta_2 = \theta_1 - S \times E_A(\theta_1)\Delta t = \theta_0 - S \times E_A(\theta_0)\Delta t - S \times E_A(\theta_1)\Delta t \\ \dots\dots \\ \theta_n = \theta_{n-1} - S \times E_A(\theta_{n-1})\Delta t = \theta_0 - S \times E_A(\theta_0)\Delta t - S \times E_A(\theta_{n-1})\Delta t \end{cases} \quad (9)$$

其中  $E_A\theta_n$  表示含水量为  $\theta_n$  的固化体对应的实际蒸发率。

如果  $t_1 \sim t_n$  按照先后顺序,则有

$$\begin{cases} E_A(t_1) = E_A(\theta_0) \\ E_A(t_2) = E_A(\theta_1) = E_A(\theta_0 - S \times E_A(\theta_0)\Delta t) \\ \dots\dots \\ E_A(t_n) = E_A(\theta_{n-1}) = E_A(\theta_{n-2} - S \times E_A(\theta_{n-2})\Delta t) \\ \dots\dots \end{cases} \quad (10)$$

由以上 3 个模型可以通过迭代的方法,建立尾矿固化体蒸发量模型,计算不同固化体在不同龄期的含水量,取计算区间  $\Delta t=1 \text{ d}$ 。结果如表 6,可以看到,对于 65%浓度的尾矿固化体,由于初始含水量较高,不同尾矿类型 1 d 与 3 d 的含水量变化并没有区别,到 7 d 时,黏土矿物含量多的尾矿含水量大;而白泥添加量越多,含水量越低,这是由于白泥的加入增加了固体的比重。对于 72%浓度的尾矿,黏土含量对含水量的影响较明显,黏土含量越大,白泥添加越多,固化体 7 d 的含水量越高,这是由于黏土矿物的存在使得固化体中的水分比较难脱离。

表 6 不同黏土含量不同龄期尾矿固化体含水量

Tab.6 Moisture content of tailings cemented paste with different clay content and at different ages

固化体 浓度	白泥 添加量	H1# 尾矿			H2# 尾矿			H3# 尾矿			H4# 尾矿		
		1 d	3 d	7 d	1 d	3 d	7 d	1 d	3 d	7 d	1 d	3 d	7 d
65%	4%	47.3	38.5	21.4	47.3	38.5	21.6	47.3	38.5	21.8	47.3	38.5	22.0
	4.5%	47.2	38.4	21.4	47.2	38.4	21.6	47.2	38.4	21.8	47.2	38.4	22.0
	6%	46.5	37.9	21.3	46.5	37.9	21.5	46.5	37.9	21.7	46.5	37.9	21.9
72%	2.5%	34.0	26.1	12.1	34.0	26.2	12.6	-	-	-	-	-	-
	4.0%	33.5	25.8	12.4	33.5	25.9	12.8	-	-	-	-	-	-
	5.5%	33.0	25.5	12.7	33.0	25.6	13.2	-	-	-	-	-	-

### 3 结论

尾矿固化体中水分散失的主要方式为蒸发作用。本文以某铁尾矿工程项目为依托,通过土-水特征曲线模型、蒸发率-基质吸力模型、含水量-蒸发率模型的推导,建立尾矿固化体蒸发量模型,确定不同龄期固化体的含水量。研究表明:

1) 对于 65%浓度的尾矿固化体,由于初始含水量较高,不同类型尾矿 1 d 与 3 d 的含水量变化区别不大,到 7 d 时,黏土矿物含量多的尾矿含水量更大;

2) 对于 72%浓度的尾矿固化体,黏土含量对含水量的影响较明显,这是由于黏土矿物的存在使固化体中的蒸发量变小,黏土含量越大,白泥添加越多,固化体 7 d 的含水量越高。

#### 参考文献:

- [1] 印万忠. 尾矿堆存技术的最新进展[J]. 金属矿山, 2016(7): 10-19.
- [2] 侯运炳,唐杰,魏书祥. 尾矿固结排放技术研究[J]. 金属矿山, 2011(6): 59-62.
- [3] 魏书祥. 尾砂固结排放技术研究[D]. 北京:中国矿业大学, 2010.
- [4] 彭勃. 尾砂固结排放技术及其应用研究[D]. 北京:中国矿业大学, 2013.
- [5] 吴彩斌. 矿物加工技术在固废领域中的应用[J]. 华东交通大学学报, 2003, 20(4): 20-23.
- [6] 储诚富,王利娜,李小春,等. 水泥电石渣固化淤泥-铁尾矿渣的强度试验[J]. 工业建筑, 2015, 45(5): 81-86.
- [7] 张静文. 铁矿矿山充填采矿用胶结充填料研究[D]. 北京:北京科技大学, 2015.
- [8] 姜明,丁向群,龚威,等. 固化剂对道路铁尾矿基层强度的影响[J]. 硅酸盐通报, 2013, 32(2): 231-235.
- [9] LIU Q S, LIU D F, TIAN Y C, et al. Numerical simulation of stress strain behaviour of cemented paste backfill in triaxial compression[J]. Engineering Geology, 2017(231): 165-175.
- [10] 程斌,刘东玲,陈能革,等. 铁尾矿全尾砂胶结充填技术及新型固化剂的应用[J]. 现代矿业, 2013, 29(11): 158-160.
- [11] LIU Q S, LIU D G, LIU X Y, et al. Research and application of surface paste disposal for clay-sized tailings in tropical rainy climate[J]. International Journal of Mineral Processing, 2016, 157: 227-235.
- [12] FREDLUND D G, XING A. Equations for the soil-water characteristic curve[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, 31(4): 521-532.
- [13] THORNTHWAITE C W. An approach toward a rational classification of climate[J]. Geographical Review, 1948, 38: 55-94.
- [14] GRAY D M. Handbook on the principals of hydrology[M]. Ottawa: Canadian National Committee for the International Hydrological Decade, National Research Council of Canada, 1970.
- [15] BRUTSAERT W H. Evaporation into the atmosphere: theory, history and applications[M]. Dordrecht: Reidel Publishing Company, 1982.
- [16] MORTON F I. Estimating evaporation and transpiration from climatological observations[J]. Journal of Applied Meteorology, 1975, 14(4): 488-497.
- [17] NEWSON T A, FAHEY M. The effect of soil suction on evaporative fluxes from soil surfaces[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998, 34(1): 145-155.
- [18] FREDLUND D G, RAHARDJO H. Soil mechanics for unsaturated soils[M]. New York: John Wiley and Sons, 1993.