

· 安全与环保 ·

## 尾矿库安全评价的未确知测度模型\*

阳富强<sup>1</sup> 高进<sup>2</sup> 张玉柱<sup>3</sup> 汤洪伟<sup>4</sup>

(1. 中南大学资源与安全工程学院; 2. 湖北大冶有色金属公司丰山铜矿;  
3. 浙江省交通工程建设集团第三交通工程有限公司; 4. 浙江省宏途交通建设有限公司)

**摘要:**基于未确知测度理论,建立了尾矿库的安全评价模型。选取尾矿库的全库容、坝高、最小安全超高、最小滩长、最小安全系数、洪水重现期、安全管理、应急救援预案、安全检查等9项指标作为未确知测度模型的判别指标;根据实测数据建立各指标的未确知测度函数;利用信息熵理论可以获取各判别指标的权重,依照置信度识别准则进行等级判定,最后得出尾矿库的安全评价结果。将这种新方法尝试应用到尾矿库安全评价当中,可以对安全评价过程中的诸多因素不确定的问题进行定量评价。

**关键词:**尾矿库;未确知测度模型;置信度识别;安全评价

**中图分类号:**TD926.4 **文献标识码:**A **文章编号:**1674-6082(2010)08-0044-04

### Safety Assessment on Tailing Pond by Uncertainty Measurement Model

Yang Fuqiang<sup>1</sup> Gao Jin<sup>2</sup> Zhang Yuzhu<sup>3</sup> Tang Hongwei<sup>4</sup>

(1. School of Resources and Safety Engineering, Central South University; 2. Fengshan Copper Mine of Daye Non-ferrous Metals Group; 3. The Third Traffic Engineering Co., Ltd. Zhejiang Transportation Engineering Construction Group; 4. Zhejiang Provincial Hongtu Transportation Construction Co., Ltd)

**Abstract:** Based on uncertainty measurement theory, the safety assessment model of tailing pond was established. Nine main factors as the discriminant index of uncertainty measurement model were taken into account, including whole storage capacity, dam height, minimum free height, minimum beach width, minimum safety coefficient, flood recurrence interval, safety management, emergency rescue plan, and safety check; the uncertainty measurement function of each index was established based on measured data; information entropy theory can be used to calculate the index weight of all indexes, and safety assessment results of the tailing pond can be further obtained by using the rules of credible recognition criteria to carry out grade judgment. This new safety assessment method can be attempted to used in safety evaluation of tailing pond during mine production process, quantitative evaluation could be done on uncertainty problems of many factors in safety assessment process.

**Keywords:** Tailing pond; Uncertainty measurement model; Credible degree recognition; Safety assessment

### 1 我国尾矿库安全现状

尾矿库是筑坝拦截谷口或围地构成的用以堆存

金属、非金属矿山进行矿石选别后排出尾矿的场所,是维持矿山正常生产的必要设施,也是金属、非金属矿山的重大危险源<sup>[1]</sup>。美国克拉克大学公害评定小组的研究表明,尾矿库事故造成的危害,在世界93种事故、公害隐患中名列第18位,它仅次于核武器爆炸、DDT、神经毒气、核辐射以及其他13种灾害<sup>[2]</sup>。表1列举了自2000年以来我国尾矿库的重

\* 资助项目:《科技导报》博士生创新研究资助计划(kjdb200902-7);中南大学研究生学位论文创新基金资助(1960-71131100023)

阳富强(1982-),男,湖南耒阳人,博士研究生,410083 湖南省长沙市。

大安全事故<sup>[1,3-6]</sup>,由此表明我国尾矿库的安全现状不容乐观。

表1 2000年以来我国尾矿库的重大安全事故统计

尾矿库名称	事故发生时间	事故发生地点	事故造成的主要损失
广西南丹鸿图选矿厂	2000-10-18	广西南丹县大厂镇	28人死亡,56人受伤,70间房屋不同程度毁坏
云南武定德昌钛矿厂	2001-07-10	云南省武定县	7人死亡
山西临汾峰光、城南选矿厂	2005-11-08	山西省临汾市	9人死亡
河北迁安庙岭沟	2006-04-23	河北省迁安市	6人死亡
陕西镇安黄金矿业	2006-04-30	陕西省商洛市镇安县	17人死亡,5人受伤,冲毁村庄、农田、水土氰化物污染
山西娄烦新阳光选矿厂、银岩选矿厂	2006-08-15	山西省太原市娄烦县	7人死亡,1人重伤,20人轻伤,冲毁房屋26间,烧毁1个储油罐,淹没土地0.667余公顷,直接经济损失约200万元
辽宁海城鼎洋矿业有限公司选矿厂	2007-11-25	辽宁海城市	15人死亡,2人失踪,38人受伤,冲毁房屋几十间
山西襄汾新塔矿业公司	2008-09-08	山西省襄汾县	276人死亡,财产损失9000多万元,影响极其恶劣

及时开展尾矿库的安全评价工作,可以发现尾矿库建设、运行过程中存在或可能出现的危险因素,对提高尾矿库的本质安全水平,降低尾矿库的生产风险,保护企业及下游居民的财产安全,维护库区周边的社会稳定等方面都具有重要意义。由于影响尾矿库安全的因素有很多<sup>[7]</sup>,包括自然因素与管理因素,而且各因素互相影响、相互作用,不可能用单因素法来评价其安全状况,而且现有的用于定量评价尾矿库安全的方法并不多见。曾有文献基于模糊数学理论进行了尾矿库风险评价研究,但该方法在处理诸多不确定性影响因素过程中带有较强的主观性<sup>[8,9]</sup>,难免会对评价结果产生一定的影响。鉴于尾矿库安全评价过程中存在有许多不确定性的因素,笔者尝试将未确知数学理论运用到尾矿库的安全评价当中,并对其进行定量分析。

2 未确知测度理论概述

未确知数学理论由王光远教授于1990年提出,是一种不同于模糊信息、随机信息和灰色信息的新的不确定性信息理论<sup>[10]</sup>。而后,许多学者将该理论应用到各个学科领域当中,其中成果最多的是未确知测度评价模型的应用<sup>[11-16]</sup>。

设评价对象组成的集合为评价对象空间,记为X,则评价对象空间 $X = \{X_1, X_2, X_3 \dots X_n\}$ 。如果某个评价对象有m个评价指标,用 $I_1, I_2 \dots I_m$ 表示,则指标空间可表示为 $I = \{I_1, I_2 \dots I_m\}$ ,若 $x_{ij}$ 表示第i个评价对象 $X_i$ 关于第j个评价指标 $I_j$ 的测量值,则 $X_i$ 可表示为一个m维向量: $X_i = (x_{i1}, x_{i2} \dots x_{im})$ 。对 $x_{ij}$ 有p个评价等级 $C_1, C_2 \dots C_p$ ,评价等级空间记为U,则 $U = \{C_1, C_2 \dots C_p\}$ ;设第k级比第k+1级危险性大或安全程度高,记为 $C_k > C_{k+1}$ ;若 $C_1 > C_2 > \dots > C_p$ ,或 $C_1 < C_2 < \dots < C_p$ ,则称 $\{C_1, C_2 \dots C_p\}$ 是评价等级空间U上的一个有序分割类<sup>[12]</sup>。在采场硫化矿石爆堆的自然危险性评价当中,评价等级空间则表示前一个等级比后一个等级的危险程度大。

如果 $\mu_{ijk} = \mu(x_{ij} \in c_k)$ 表示测量值 $x_{ij}$ 属于第k个评价等级 $C_k$ 的程度,且 $\mu$ 满足:

$$0 \leq \mu(x_{ij} \in c_k) \leq 1 \quad (i = 1, 2 \dots n; j = 1, 2 \dots m; k = 1, 2 \dots p) \quad (1)$$

$$\mu(x_{ij} \in U) = 1 \quad (i = 1, 2 \dots n; j = 1, 2 \dots m) \quad (2)$$

$$\mu \left| X_{ij} \in \bigcup_{l=1}^k C_l \right| = \sum_{l=1}^k \mu(X_{ij} \in C_l) \quad (k = 1, 2 \dots p) \quad (3)$$

称式(2)为 $\mu$ 对评价空间U满足归一性;式(3)为 $\mu$ 对评价空间U满足可加性;称满足式(1)~式(3)的 $\mu$ 为未确知测度<sup>[14]</sup>。

2.1 单指标未确知测度

根据未确知测度的定义构造单指标测度函数 $\mu(x_{ij} \in c_k)$ , ( $i = 1, 2 \dots n; j = 1, 2 \dots m; k = 1, 2 \dots p$ ),以便求出某一评价因素 $x_i$ 的各个指标测度值 $\mu_{ijk}$ ,那么称 $(\mu_{ijk})_{m \times p}$ 为单指标测度评价矩阵<sup>[15]</sup>。

2.2 指标权重的确定

设 $w_i$ 表示测量指标 $x_{ij}$ 与其他指标相比具有的相对重要程度,要求 $w_i$ 满足: $0 \leq w_i \leq 1, \sum_{i=1}^n w_i = 1$ ,则 $w = \{w_1, w_2 \dots w_m\}$ 称为指标权重向量。在此,利用熵确定权重<sup>[17]</sup>,即:

$$v_j = 1 + \frac{1}{\lg p} \sum_{i=1}^n \mu_{ijk} \lg \mu_{jk} \quad (4)$$

$$w_j = v_j / \sum_{i=1}^n v_i \quad (5)$$

由于单指标测度评价矩阵是已知的,可以通过式(4)、式(5)两式求得 $w_i$ 。

2.3 多指标未确知测度

设 $w_i$ 为评价指标 $I_j$  ( $j = 1, 2 \dots n$ )的权重,如果存在 $\mu_{ik}$ 满足: $0 \leq \mu_{ik} \leq 1, \mu_{ik} = \sum_{j=1}^n w_j \mu_{ijk}$  ( $k = 1, 2 \dots p$ ),则称矩阵(7)为多指标未确知测度矩阵<sup>[13]</sup>。

$$(\mu_{ik})_{n \times p} = \begin{bmatrix} \mu_{11} & \mu_{12} & \dots & \mu_{1p} \\ \mu_{21} & \mu_{22} & \dots & \mu_{2p} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \mu_{n1} & \mu_{n2} & \dots & \mu_{np} \end{bmatrix} \quad (6)$$

如果  $\mu_k = \mu(X_i \in C_k)$  表示评价对象  $X_i$  属于第  $K$  等级的程度,则有:

$$\mu_{ik} = \sum_{i=1}^n w_i \mu_{ik} \quad (k=1, 2, \dots, p) \quad (7)$$

显然有  $0 \leq \mu_{ik} \leq 1, \sum_{k=1}^p \mu_{ik} = 1$ , 所以由式(6)所确定的  $(\mu_{ik})_{n \times p}$  是未确定测度矩阵, 称向量  $\mu_k = (\mu_{1k}, \mu_{2k}, \dots, \mu_{pk})$  为  $x_i$  的多指标综合测度评价向量<sup>[15]</sup>。

### 2.4 置信度识别准则

可引入“置信度”评价准则<sup>[12]</sup>来获得评价对象的最终评价结果, 设  $\lambda$  为置信度 ( $\lambda \geq 0.5$ , 通常取  $\lambda = 0.6$  或  $0.7$ ), 如果  $C_1 > C_2 > \dots > C_p$ , 且令

$$k_0 = \min \left\{ k: \sum_{i=1}^k \mu_i > \lambda, k=1, 2, \dots, p \right\} \quad (8)$$

则认为评价对象属于第  $k_0$  个评价等级  $C_{k_0}$ 。

## 3 尾矿库安全评价指标体系的建立

尾矿库的安全评价是一项极其复杂的系统工程, 影响尾矿库安全的因素大致可以分为尾矿库自身因素和管理因素两大类: 前者包括尾矿库的全库

容、坝高等; 后者指尾矿库的维护管理等。文章给出的整个评价体系结构尽量全面而且简单。

在评价过程中, 由于定性指标可参考大量文献、经验资料及相关法律规程后, 通过特定的处理方法将定性指标转化为半定量指标, 这类指标包括尾矿库的安全管理水平、安全检查, 以及应急救援预案等。文章采用分级标准量化法对各指标进行分级和取值, 将每个指标分为 4 级, 评判集为  $\{c_1, c_2, \dots, c_p\}$ , 即 I 级、II 级、III 级、IV 级, 分别表示危险性极大、危险性大、危险性一般、危险性小, 每级都规定一个取值标准或数值区间。由于尾矿库按筑坝方式可分为上游式、中线式、下游式等<sup>[18]</sup>, 每种构筑式对最小滩长的要求不一样; 坝坡抗滑稳定最小安全系数在正常运行、洪水运行以及特殊运行等情况下也有不同要求, 故笔者仅考虑了尾矿库启用初期上游式尾矿坝在正常运行时各指标的设定<sup>[19]</sup>, 具体见表 2, 表 3。

表 2 尾矿库安全评价的定量指标分级标准

影响程度分级	全库容 $I_1/m^3$	坝高 $I_2/m$	最小安全超高 $I_3/m$	最小滩长 $I_4/m$	最小安全系数 $I_5$	洪水重现期 $I_6$
I ( $C_1$ )	>10000	>100	<0.7	<70	<1.20	100~200
II ( $C_2$ )	1000~10000	60~100	1.0~0.7	70~100	1.25~1.20	50~100
III ( $C_3$ )	100~1000	30~60	1.5~1.0	150~100	1.30~1.25	30~50
IV ( $C_4$ )	<100	<30	>1.5	>150	>1.3	20~30

表 3 尾矿库安全评价的定性指标分级标准

影响程度分级	赋值	安全管理 $I_7$	应急救援预案 $I_8$	安全检查 $I_9$
I ( $C_1$ )	1	没有建立尾矿库设施的安管理制度, 未对尾矿工进行培训; 未编制作业计划, 未安排和实施尾矿输送、分级、筑坝及排洪管理; 未执行尾矿库的安全规定; 没有进行日常巡检和观测	没有编制应急救援预案; 即使编制了应急救援预案, 但内容极不完整, 没有实用价值	未进行防洪安全检查 (包括水位、排洪构筑物、排水井、排水斜槽、排水隧洞等), 未进行尾矿坝的安全检查及尾矿库库区安全检查
II ( $C_2$ )	2	尾矿库设施的安管理制度不够健全, 尾矿工没有进行定期培训; 作业计划不完整, 尾矿输送、分级、筑坝及排洪管理未落实好; 未严格执行尾矿库的安全规定; 日常巡检马虎	应急救援预案编制不完善, 未组织演练; 救援预案内容不够完整, 机构、通讯保障、救援人员、资金、物质准备等阐述不深	未严格进行防洪安全检查 (包括水位、排洪构筑物、排水井、排水斜槽、排水隧洞等), 尾矿坝安全检查及尾矿库库区安全检查不够认真
III ( $C_3$ )	3	尾矿设施安管理制度比较健全, 对尾矿工进行过专门培训; 作业计划编制比较完整, 统筹安排和实施尾矿输送、分级、筑坝及排洪管理; 比较严格地执行尾矿库的相关安全规定; 较好地进行了日常巡检和定期观测	比较认真地编制了应急救援预案, 并组织演练; 应急救援预案内容比较完整, 包括了机构、通讯保障, 救援人员、资金、物质准备等	比较严格地进行防洪安全检查 (包括水位、排洪构筑物、排水井、排水斜槽、排水隧洞等), 尾矿坝安全检查及尾矿库库区安全检查 (周边山体稳定性、违章建筑、违章施工及采选作业) 比较细心
IV ( $C_4$ )	4	建立健全尾矿设施安管理制度, 对尾矿工进行专门培训, 监督作业人员日常工作; 编制作业计划, 统筹安排和实施尾矿输送、分级、筑坝及排洪管理; 严格执行尾矿库的相关安全规定; 做好日常巡检和定期观测	认真编制应急救援预案, 组织演练; 应急救援预案内容完整, 包括机构、通讯保障, 救援人员、资金、物质准备等; 根据实际情况进行预案内容的补充	严格地进行了防洪安全检查 (包括水位、排洪构筑物、排水井、排水斜槽、排水隧洞等), 尾矿坝安全检查, 尾矿库库区安全检查 (周边山体稳定性、违章建筑、违章施工及采选作业)

根据上述有关单指标测度函数的定义和表 1、表 2 中关于各评判指标的赋值标准, 构建尾矿库安全评价的各指标测度函数, 以便求得各评价指标的未确知测度值。其中, 尾矿库的全库容、坝高、最小

安全超高、最小滩长、最小安全系数、洪水重现期等定量指标的单指标测度函数分别见图 1~图 6; 尾矿库的安全管理、应急救援预案, 以及安全检查等定性指标的单指标测度函数见图 7。

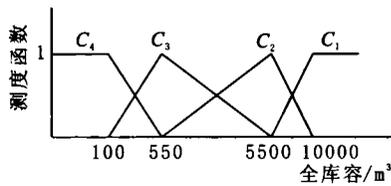


图1 全库容的单指标测度函数

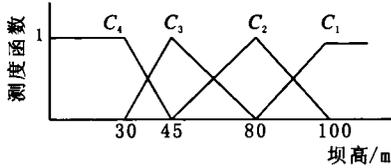


图2 坝高的单指标测度函数

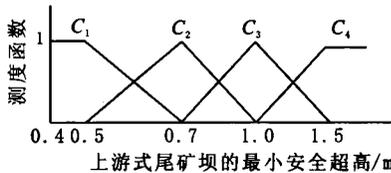


图3 最小安全超高的单指标测度函数

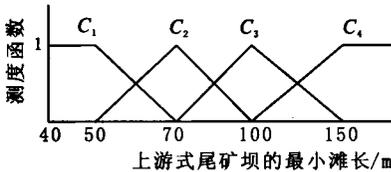


图4 最小滩长的单指标测度函数

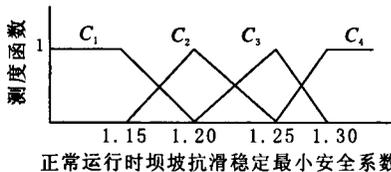


图5 最小安全系数的单指标测度函数

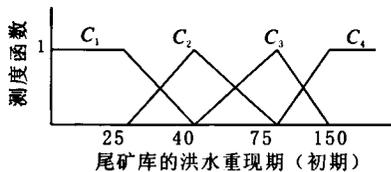


图6 洪水重现期的单指标测度函数

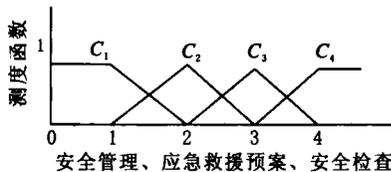


图7 安全管理、应急救援预案、安全检查的单指标测度函数

将要进行评价的尾矿库的各个指标值,分别代入图1~图7相应的单指标未确知测度函数中,就可计算求得各尾矿库的单指标评价矩阵,由式(4)~(5)来确定各评价指标的权重。由多指标测度评价向量式(6)可以求出各尾矿库的多指标综合测度评价向量,取置信度  $\lambda = 0.6$ ,并结合置信度评价准

则式(8),就可以得出尾矿库的综合未确知测度及判别结果。依据评价结果,可以对所评价的尾矿库提出有针对性的安全措施及建议,进而保证尾矿库的安全运行。

#### 4 结论

(1)尾矿库的安全问题受多种因素影响。针对尾矿库安全评价过程中诸多影响因素的不确定性,综合考虑了尾矿库的自然因素以及管理等因素,基于未确知测度理论,建立了尾矿库的安全评价模型。

(2)选取了尾矿库的全库容、坝高、最小安全距离、最小滩长、最小安全系数、洪水重现期、安全管理、应急救援预案,以及安全检查等9项指标作为未确知测度模型的判别指标,使得评价体系结构尽量全面而且简洁;利用信息熵理论可以计算出各影响因素的指标权重,减少了人为主观因素的影响;依照置信度识别准则进行等级判定,根据评价结果来决定尾矿库是否需要采取有效的安全技术与措施,从而保障矿山生产的顺利开展。

(3)该方法为尾矿库的安全评价提供了一条新的途径,具有重要的理论和现实意义,可以将该方法应用到尾矿库的安全评价当中,将评价结果与实际情况进行比较,从而修正、完善各个评价指标。

#### 参考文献:

- [1] 谢旭阳,王云海,张兴凯,等.我国尾矿库数据库的建立[J].中国安全生产科学技术,2008(2):53~56.
- [2] 吕庭刚,庙延钢,等.尾矿库安全现状评价体系与方法探讨[J].矿冶,2005(3):10~15.
- [3] 门永生,柴建设.我国尾矿库安全现状及事故防治措施[J].中国安全生产科学技术,2009(1):48~52.
- [4] 袁兵,王飞跃,金永健,等.尾矿坝溃坝模型研究及应用[J].中国安全科学学报,2008(4):169~172.
- [5] 杜通,浑宝炬,张大伟,等.尾矿库的危害和安全管理措施[J].河北理工大学学报(自然科学版),2009(2):9~12.
- [6] 谢旭阳,田文旗,王云海,等.我国尾矿库安全现状分析及管理对策研究[J].中国安全生产科学技术,2009(2):5~9.
- [7] 李夕兵,蒋卫东,赵伏军.汛期尾矿坝溃坝事故树分析[J].安全与环境学报,2001(5):45~48.
- [8] 李全明,陈仙,王云海,等.基于模糊理论的尾矿库溃坝风险评估模型研究[J].中国安全生产科学技术,2008(6):57~61.
- [9] 阳富强,吴超,袁丽丽.基于模糊数学的尾矿库安全综合评价[J].矿业研究与开发,2006(B11):95~98.
- [10] 王光远.论未确知性信息及其数学处理[J].哈尔滨建筑工程学院学报,1990(4):1~9.
- [11] 吴义锋,薛联青,吕锡武.基于未确知数学理论的水质风险评估模式[J].环境科学学报,2006(6):1047~1052.
- [12] 刘开第,庞彦军,孙光勇,等.城市环境质量的未确知测度评价[J].系统工程理论与实践,1999(12):52~58.

- [13] 阳富强,吴超,李孜军.未知测度模型在矿仓硫铁矿自然危险性评价中的应用[J].岩石力学与工程学报,2008(2):323~330.
- [14] 闫乐林,王国旗,许满贵,等.煤矿安全预评价的未知测度模型及应用[J].灾害学,2004(2):18~22.
- [15] 李如忠,洪天求,熊鸿斌,等.基于未知测度理论的沉积物重金属污染评价模式[J].农业环境科学学报,2007(6):216~217.
- [16] 李树刚,马超,王国旗.基于未知测度理论的矿井通风安全评价[J].北京科技大学学报,2006(2):101~103.
- [17] 曹庆奎,刘开展,张博文.用熵计算客观型指标权重的方法[J].河北建筑科技学院学报,2000(3):40~42.
- [18] 傅联海,张阳.尾矿库危险有害因素及安全管理对策和措施[J].黄金,2008(5):49~52.
- [19] 国家安全生产监督管理总局.尾矿库安全技术规程(AQ2006~2005)[S].2005.

(收稿日期 2010-05-17)