

# 尾矿库溃坝灾害链及断链减灾控制技术研究<sup>\*</sup>

周科平, 刘福萍, 胡建华, 高峰

(中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083)

**摘 要:** 尾矿库溃坝灾害是影响矿山安全的主要灾害之一, 其溃坝机理和控制的研究是当前的热点问题。在尾矿库事故统计分析基础上, 根据灾害系统理论, 从尾矿库溃坝灾害的形成发育过程入手, 构建了五种常见的尾矿库溃坝灾害链模型和灾害链节点横向耦合形成的复杂灾害链网, 分析了其成灾特征, 并结合工程实例验证了理论模型的合理性。研究结果表明: ①尾矿库溃坝灾害链演变过程可划分为早期孕育阶段、中期潜存阶段和晚期诱发阶段; ②从各阶段的特征出发, 提出了相应断链减灾措施, 特别是早期孕源减灾策略; ③将尾矿库溃坝灾害链理论应用于湖南省某尾矿库工程治理上, 实现了该尾矿库灾害控制。

**关键词:** 尾矿库; 溃坝; 灾害链; 断链减灾

**中图分类号:** X45      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-811X(2013)03-0024-06

尾矿库是指筑坝拦截谷口或围地构成的, 用以堆存金属或非金属矿山进行矿石选别后排出的尾矿或其他工业废渣的场所。尾矿库具有体积大、势能高、不稳定的特点, 是人造的重大危险源, 受到外界因素激发扰动后, 易引起能量意外释放, 发生溃坝事故。尾矿库溃坝后, 库内尾矿大量泄露, 淹没并摧毁下游农田、房屋、公用设施等, 会导致巨大的人员伤亡、财产损失, 带来不良社会影响、经济影响和环境影响, 如2008年山西省襄汾县新塔矿业有限公司尾矿库溃坝, 导致277人死亡, 4人失踪, 直接经济损失达9 619.2万元。统计资料显示<sup>[1]</sup>, 2000-2011年间国内共发生了80起尾矿库事故。截至2011年底, 全国在用的尾矿库总数为5 875座, 存在的危库、病库、险库有1 095座<sup>[2]</sup>。可见目前危库、病库、险库的数量较多, 尾矿库的安全状况不容乐观。

针对危库、险库和病库存在的安全隐患和溃坝危险, 相关学者对尾矿库灾害及预防措施展开了大量研究, 但多数是针对尾矿库裂缝、滑坡、渗漏、管涌、洪水漫顶、排洪系统故障<sup>[3-7]</sup>等单类灾害发生的原因及防治对策进行的研究分析, 而对尾矿库各灾种互为因果、耦合串联的链式发生机理研究较少。在实际中, 尾矿库事故的发生具有连锁性、因果性、交叉性, 呈现链式效应, 因此分析尾矿库灾害的链式效应机理有助于加深对尾矿库灾害的认识, 整体把握尾矿库溃坝灾害发生机理, 发现尾矿库溃坝灾害的致因环节, 从而

有效地切断尾矿库溃坝灾害链, 防止灾难性的溃坝事故发生, 具有重要的防灾减灾意义。

## 1 尾矿库事故统计及分析

为全面了解尾矿库事故情况, 对2000-2011年尾矿库事故详细情况进行查询, 但因部分文献资料缺失, 仅查询得到59起尾矿库事故的详细情况<sup>[8-9]</sup>, 对这些尾矿库事故的类型和地域分布情况进行了统计。

### 1.1 尾矿库事故类型统计

从图1可以看出, 尾矿库事故类型多样, 包括溃坝、渗流管涌、排洪设施故障、洪水漫顶、滑坡等。其中尾矿库溃坝事故达56%, 是其他事故的最终表现, 而其他事故是溃坝事故发生的诱导因素。

### 1.2 尾矿库事故地区分布情况统计

从图2可以看出, 近12年内, 尾矿库事故的分布范围比较广泛, 遍及全国16个省份, 其中位于多雨地区的广西省发生的尾矿库事故最多, 有14起, 其次是位于地震带上的云南省、陕西省和河北省, 均有6起, 说明分析尾矿库事故时需考虑洪水和地震两大外因。

根据图1和图2的统计分析得出: ①尾矿库事故类型多样, 引发溃坝灾害的因素和途径多样, 可从这些常见事故类型入手, 总结尾矿库溃坝途

\* 收稿日期: 2012-12-25

修回日期: 2013-01-15

基金项目: "十二五"国家科技支撑计划项目(2012BAC09B02); 国家自然科学基金(青年基金)(51204205)

作者简介: 周科平(1964-), 男, 湖南衡阳人, 教授, 博士生导师, 主要从事深部采矿与矿山岩石力学与工程等方面的教学与研究  
工作。E-mail: kpzhou@vip. 163. com

径, 分析尾矿库溃坝灾害链式效应; ②洪水和地震是分析尾矿库溃坝时不可忽视的重要外界因素。

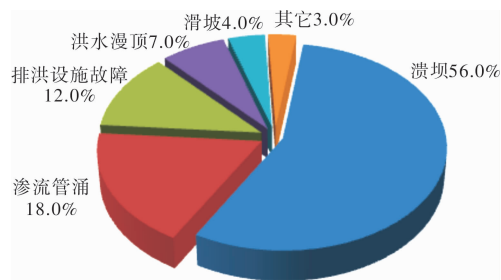


图1 尾矿库事故类型统计图

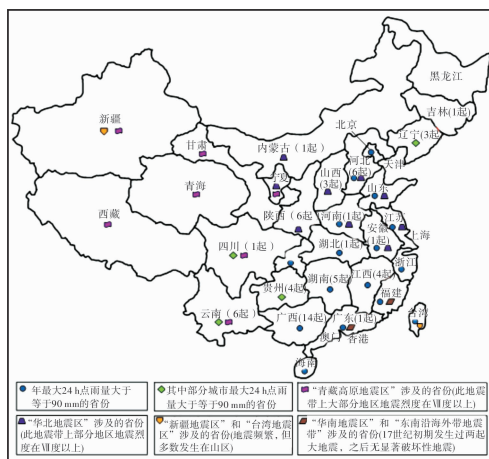


图2 尾矿库事故地域分布情况

## 2 尾矿库溃坝灾害链式效应分析

1987年, 我国著名的地震学家郭增建首次提出了灾害链的概念, 开启了灾害研究的新模式<sup>[10]</sup>。灾害链是将宇宙间自然活动或人为因素导致的灾害, 抽象为灾害载体的共性特征, 用以表征单一或多种灾害的形成、渗透、转化、分解、合成、耦合等一系列相关过程的物理量<sup>[11]</sup>。参照地质灾害链的定义<sup>[12]</sup>, 尾矿库溃坝灾害链可以定义为由一系列时间上有先后, 空间上彼此相依, 成因上相互关联, 呈连锁反应依次出现, 最终引起尾矿库溃坝的几种尾矿库灾害组成的灾害链。

### 2.1 尾矿库溃坝灾害链

一个完整的尾矿库灾害链包括致灾环、激发环、损坏环和断链环<sup>[13]</sup>。致灾环是指破坏尾矿库本质安全的因素, 如库区地形地质、排洪构筑物地质条件等; 激发环是指触发尾矿库灾害的外界因素, 主要包括地震和降雨; 损坏环是灾害链形成后对下游造成的危害; 断链环是指切断溃坝灾害链的工程措施。尾矿库溃坝灾害是自然因素、设计因素、施工因素、技术因素、管理因素、社会因素及外界因素的综合作用结果<sup>[8]</sup>。在尾矿溃

坝灾害链中, 库区地形地质因素、设计因素、施工因素、技术因素和社会因素为溃坝灾害链致灾源的形成提供了条件, 在致灾环中起关键作用; 外界因素的诱导激发为灾害的启动提供了条件, 在激发环中起关键作用; 管理因素则影响着溃坝灾害链的整个过程和所有环节。

在图1事故类型的统计基础上, 分析尾矿库事故表现形式, 总结了五种常见的尾矿溃坝灾害链: 坝体变形→坝坡失稳→溃坝; 坝体超高/陡→坝体滑坡→溃坝; 坝体渗流→管涌→坝体塌陷→溃坝; 洪水漫顶→溃坝; 尾砂液化→坝体喷水冒砂→坝体震陷→溃坝。

#### 2.1.1 坝体变形→坝坡失稳→溃坝

“坝体变形→坝坡失稳→溃坝”灾害链成灾机理如图3所示。选址不合理, 库区地质不良; 设计考虑不周, 参数选取不合理; 施工时坝体碾压不密实, 施工不符合设计要求等, 及尾矿库在运行过程中长期受到自然的风化侵蚀作用而引起坝体变形, 为溃坝灾害埋下灾害隐患; 在地震震动或暴雨冲刷作用下, 坝体变形增加, 诱发第一级坝坡失稳灾害; 若管理人员未及时采取加固措施, 在地震或暴雨的持续作用下, 坝体结构遭受巨大破坏, 坝体变形大幅增加, 使得库内尾矿借助自身巨大重力势能突破坝体, 涌向下游, 形成严重的溃坝灾害。

#### 2.1.2 坝体超高/陡→坝体滑坡→溃坝

“坝体超高/陡→坝体滑坡→溃坝”灾害链成灾机理如图4所示。管理和施工的失误, 如擅自加高坝体, 随意改变子坝边坡比等, 导致坝体过高或边坡过陡, 诱发潜在的灾害源; 坝体高度或边坡角度到达某一临界值时, 在坝体自身的重力作用下, 瞬间发生失稳滑坡, 形成第一级灾害, 若同时受到降雨或地震的作用, 更易促成第一级灾害; 无加固措施和挡土措施的情况下, 地震降雨的进一步耦合作用导致坝体滑坡面积不断加大, 最终诱发溃坝灾害的发生。

#### 2.1.3 坝体渗流→管涌→坝体塌陷→溃坝

“坝体渗流→管涌→坝体塌陷→溃坝”灾害链成灾机理如图5所示。排渗设施质量不符合要求或排渗设施失效; 放矿不均匀, 坝体局部浸润线过高; 岸坡杂物未清除等坝体自身的设计施工或管理缺陷诱发了渗流灾害源; 若未及时更换反滤层或采取其他有效措施, 尤其是同时遇降雨情况, 渗流范围逐渐扩大, 诱发第二级灾害管涌; 管涌不断拉大坝体缺口, 侵蚀坝体骨架, 诱发第三级灾害坝体塌陷; 坝体塌陷, 尾矿大量外泄, 爆发尾矿库溃坝灾害。

#### 2.1.4 洪水漫顶→溃坝

“洪水漫顶→溃坝”灾害链成灾机理如图6所

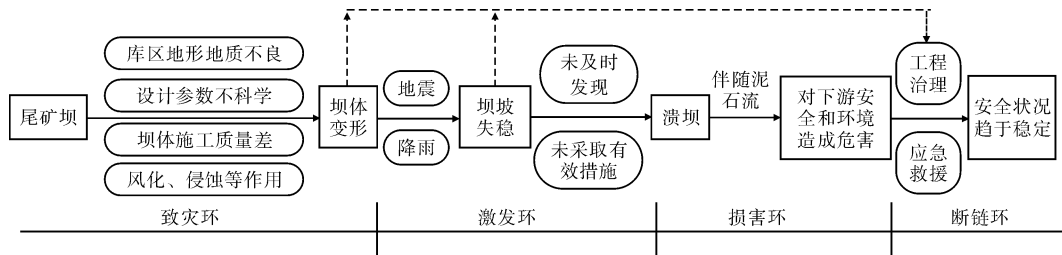


图3 “坝体变形→坝坡失稳→溃坝”灾害链

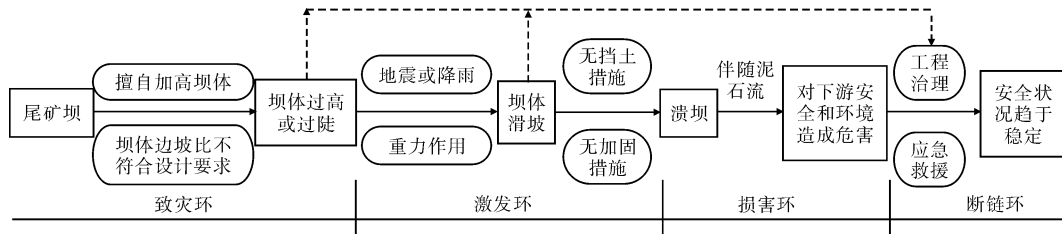


图4 “坝体超高/陡→坝体滑坡→溃坝”灾害链

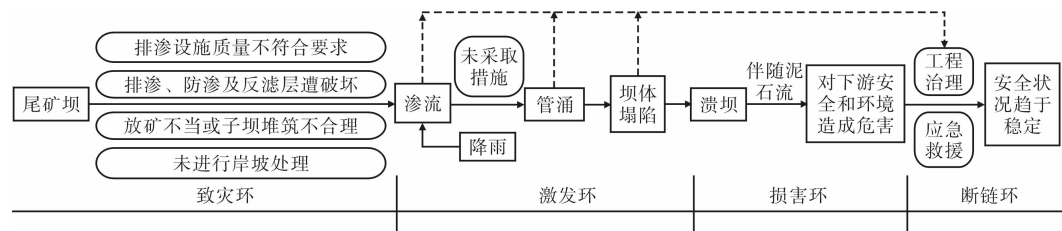


图5 “坝体渗流→管涌→坝体塌陷→溃坝”灾害链

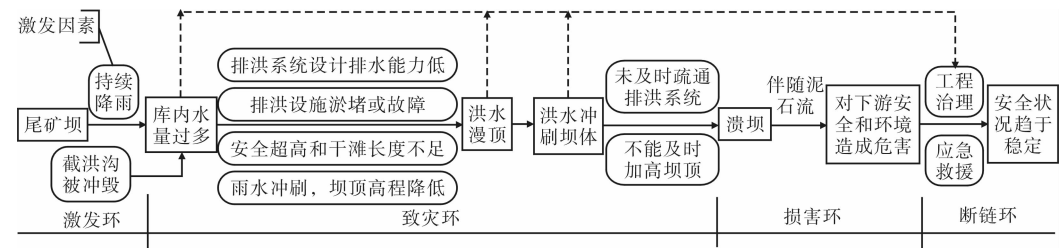


图6 “洪水漫顶→溃坝”灾害链

示。多雨季节，持续降雨导致库内洪水量增加，库内水位抬高，若同时库外截洪沟被冲毁，山洪等汇入库内，水位上升将更加迅速，为灾害链的启动提供充分的动力条件；排洪系统设计排水强度不足，排洪系统发生变形、断裂、破损、堵塞等故障阻止库内洪水正常排出；安全超高不足或坝体在雨水作用下沉陷下降等导致库体调洪库容不能满足实际要求，在其中某一因素或多重因素的耦合作用下诱发灾害源洪水漫顶；洪水漫出坝外，冲刷坝体，引起坝面沼泽化，破坏坝体稳定性，若不能及时排出洪水降低水位，最终将诱发溃坝灾害。

#### 2.1.5 尾砂液化→坝体喷水冒砂→坝体震陷→溃坝

“尾砂液化→坝体喷水冒砂→坝体震陷→溃坝”灾害链成灾机理如图7所示。在地震烈度大于Ⅵ度

的区域，地震是激发尾矿库溃坝灾害链的主要因素之一，在地震作用下，尾矿间孔隙水压力增加，促使尾砂液化，形成尾矿库溃坝灾害链的灾害源；在地震波的继续作用下，尾砂液化程度加重，诱发第一级灾害坝体喷水冒砂；若地震作用持续进行，坝体喷水冒砂将演化成第二级灾害坝体塌陷，进一步破坏坝体结构，最终诱发溃坝灾害。在非地震区，若库区范围内有违规采矿作业，则采矿爆破震动作用是诱发溃坝灾害的激发因素。

根据尾矿库溃坝灾害链分类，总结各尾矿库溃坝灾害链的典型特征和对应典型案例，如表1所示。

#### 2.2 尾矿库溃坝灾害链共同成灾特征

上述五条尾矿库溃坝灾害链除了具有不同表现形式和自身突出特点外，还具有以下四大共同成灾特征。



响应包括:坝体轻微变形、坝体过高过陡、坝体局部渗流、库内水位升高及尾砂部分液化。早期阶段,危险因素不易察觉,破坏作用力极微弱或尚未形成破坏力,能量也处于初始聚集或耦合阶段,此时采取断链减灾措施最为有效,不需要很大的投入,就可收到显著的效果<sup>[17]</sup>。根据早期阶段诱发致灾源的主要因素,考虑从选址、设计、施工、技术、管理和社会调节等方面采取孕源减灾断链措施阻隔灾源的演化。

(1)管理措施:严格遵守《尾矿库安全技术规程》,合理选址;确保尾矿库设计单位资质符合要求;并聘请专业管理人才进行尾矿库管理。

(2)技术措施:构建实时监测系统,实现安全预警;采用无损检测设备,探测坝体损伤,提前采取预防措施。

(3)特殊区域措施:多雨地区<sup>[18]</sup>(如图3所示),确保排洪系统可靠,调洪库容满足要求;对于位于地震带上的库体(如图3所示),尤其是位于“青藏高原地震区”和“华北地震区”的库体采取一定的加筋补强措施,如国外采取的分层铺设钢筋混凝土梁的方法,采用钢塑复合加筋带处理坝体的方法,通过加强坝体密实程度防止尾矿材料液化的方法及绿色加筋技术<sup>[19]</sup>。

### 3.2 中期潜存阶段断链减灾

尾矿库溃坝灾害链中,中期潜存阶段的链式响应包括:坝体滑坡、坝体部分塌陷、管涌和洪水漫顶。中期潜存阶段已经形成了潜在的破坏力,受到外界因素诱导激发时,库体能量可能突然释放,灾害突然启动爆发,因此需及时采取措施,避免次级灾害发生。针对不同特征采用的断链措施有:

(1)坝体滑坡时,放缓坝坡,采用废石压坡体或设置抗滑桩;

(2)管涌时,及时在冒水孔周围垒土袋,筑成围井,如果险情面积较大,险口附近地基良好时,可筑成水堤,形成蓄水池;

(3)洪水漫顶时,及时疏通堵塞的排洪设施,对沉陷断裂的排洪设施进行注浆加固。

总之,尾矿库在运行过程中需要有全面的规划管理,以便在事故发生时可以立即启动应对措施。

### 3.3 晚期诱发阶段断链减灾

尾矿库溃坝灾害链中,晚期诱发阶段的链式响应包括:坝体大面积塌陷、溃坝并伴随泥石流。据统计70%以上的尾矿库跨坝伴生泥石流或泥浆灾害<sup>[8]</sup>。尾矿库溃坝后形成大规模泥石流灾害,泥石流势能大、速度快,能迅速淹没下游地区,使下游受灾程度不断加剧。管理人员应立即开展

应急救援,迅速疏散下游人群。因此,矿山应事先编制有尾矿库应急管理预案,并定期组织应急演练。灾害形成后,结合下游地形地貌,运用GIS技术分析下游受灾情况,开展灾后重建。此外,泄露的尾砂堆存于河流和地表,长期污染农田土壤及灌溉用水,而且由于重金属的富集效应,尾矿中重金属物质不断在食物链中累积,威胁人体健康。因此,在灾后重建过程中需采取长期的污染治理措施。

## 4 工程实践应用

某铅锌矿位于湖南省郴州市苏仙境内,其尾矿库位于该矿部北面山沟中,与矿部直线距离约800 m,初期坝高15 m,坝体总高74 m。

设计认为该尾矿库属于病库,存在的安全隐患有:①库内尾矿交错分布,且薄层、夹层多见;②部分高程上的堆积坝坡边坡过陡;③排渗井施工不当,井壁只有预制砼井圈连接缝可渗水,渗水量甚小,而且由于尾矿沉积不规律,浸润线处于较高位置;④因排渗不当,尾矿堆积坝坡上有五处塌陷现象;⑤尾矿库采用坝顶集中放矿的方式排放尾矿,放矿口经常移动,由于管理不严格,导致干滩长度较短,正常水位较高;⑥排水平巷6#拐点与斜槽7#拐点之间顶板有一严重破损。

根据尾矿库溃坝灾害链式机理,尾矿库溃坝灾害链的致灾因子已经形成。安全隐患①和②可能导致“坝体超高/陡→坝体滑坡→溃坝”灾害链的形成;安全隐患③和④可能演变成“坝体渗流→管涌→坝体塌陷→溃坝”灾害链;尾矿库处于多雨地区,在洪水作用下,安全隐患⑤和⑥下可能诱发“洪水漫顶→溃坝”灾害链。尾矿库下游有民房、旅社、河流等,溃坝后果十分严重,为防止尾矿库溃坝灾害链的形成,在此阶段采取措施切断致灾环显得刻不容缓。目前,该尾矿库严格规范放矿管理,防渗排洪系统已经得到修复。并在新筑子坝坝坡上覆土种草,同时构建了实时在线监测系统,如图9所示。尾矿库安全状况正在逐渐好转,次级灾害得到遏制。



图9 尾矿库危险控制措施

## 5 总结

(1) 本文在尾矿库事故统计和溃坝事故后果分析的基础上, 得出了从常见事故类型着手分析尾矿库溃坝途径的方法及分析溃坝灾害时需考虑洪水和地震两大外因。

(2) 引入灾害链的概念, 总结了常见的五种尾矿库溃坝链式模型及复杂的溃坝灾害链网, 分析了尾矿库溃坝灾害链的发育成因、发育过程和成灾特征。

(3) 根据灾害链演变过程特征, 将尾矿库溃坝灾害链的成灾过程划分为三个阶段, 提出每一阶段的断链减灾措施。早期孕育阶段是灾害源的产生时期, 随着灾害链的延伸, 承灾体类型趋多, 控制灾害难度增大, 为有效控制灾害链的破坏效应, 应注重采取充分措施控制灾害源的产生, 尽早切断灾害链, 防止溃坝灾害网的形成, 起到防灾减灾的作用。这在湖南某尾矿库治理中得到了具体应用, 使该尾矿库安全状况趋于稳定, 实现了灾害控制。

## 参考文献:

- [1] 国家安全生产监督管理局. 全国尾矿库专项整治行动年度工作总结和下一年重点工作安排[Z]. 2000-2012.
- [2] 国家安全生产监督管理总局. 全国尾矿库专项整治行动 2011 年工作总结和 2012 年重点工作安排[Z]. 2012-06-28.
- [3] 王智明. 矿山尾矿库事故预防措施探讨[J]. 西部探矿工程, 2010(2): 210-213.
- [4] 曹平. 尾矿库稳定性及灾害防治[J]. 湖南安全与防灾, 2010(7): 34-41.
- [5] 肖玲, 吴建新, 林大泽. 尾矿库的地质灾害及治理[C]//有色金属工业科学发展——中国有色金属学会第八届学术年会论文集. 北京: 中国有色金属学会, 2010: 42-43.
- [6] 郑欣, 秦华礼, 许开立. 导致尾矿坝溃坝的因素分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2008, 4(1): 51-54.
- [7] 陈德禹. 尾矿库事故分析与防治对策[J]. 安防科技, 2004(4): 20-21.
- [8] 柴建设, 王姝, 门永生. 尾矿库事故案例分析与事故预测[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.
- [9] 国家安全生产监督管理总局政府网站事故查询系统[EB/OL]. <http://media.chinasafety.gov.cn:8090/iSystem/shigumain.jsp>.
- [10] 郭增建, 秦保燕. 灾害物理学简论[J]. 灾害学, 1987(2): 25-33.
- [11] 梅涛, 肖盛燮. 基于链式理论的单灾种向多灾种演绎[J]. 灾害学, 2012, 27(3): 19-21.
- [12] 韩金良, 吴树仁, 汪华斌. 地质灾害链[J]. 地学前缘, 2007, 14(6): 11-23.
- [13] 李明, 唐红梅, 叶四桥. 典型地质灾害链式机理研究[J]. 灾害学, 2008, 23(1): 1-5.
- [14] 李景保, 肖洪, 王克林, 等. 基于流域系统的暴雨径流型灾害链——以湖南省为例[J]. 自然灾害学报, 2005, 14(4): 30-38.
- [15] 王卓理, 耿鹏旭, 王海荣. 矿山地质灾害链及其断链减灾实践研究[J]. 地域研究与开发, 2011, 30(5): 156-160.
- [16] 马保成, 王亮, 牟顺. 公路滑坡灾害链式反应阶段性识别方法研究[J]. 灾害学, 2011, 26(2): 54-58.
- [17] 王羽, 肖盛燮, 冯五一, 等. 滑坡灾害链式演化阶段及规律研究[J]. 四川建筑科学研究, 2010, 36(6): 121-124.
- [18] 水利部水文局, 南京水利科学研究所. 中国暴雨统计参数图集[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
- [19] 谢日升. 尾矿库(金属矿)灾害及其工程整治分析[J]. 中国高新技术企业, 2011(9): 82-83.

# Research of Tailings Dam-break Disaster Chain and Chain-cutting Disaster Mitigation Control Technology

Zhou Keping, Liu Fuping, Hu Jianhua, Gao Feng

(School of Resource and Engineering, Central South University, Changsha, 410083, China)

**Abstract:** Tailings dam failure disaster is one of the main disasters affecting mine safety and research on its mechanism and control is a current hot issue. Based on statistical analysis of reservoir accident, according to disaster system theory and starting from formation and development process of tailings dam-break disaster, five common tailings dam-break disaster chains and complex disaster networks formed by transverse coupling of disaster chain nodes were constructed. At the same time, disaster characteristics were analyzed. The results show that: ① Disaster chain evolution process can be divided into three stages: early nurturing stage, interim latent stage and late induction stage. ② According to characteristics of every stage, chain-cutting disaster mitigation measures corresponding to every stage have been put forward, especially, strategies for controlling disaster source during early nurturing stage. ③ Disaster control of a tailings reservoir of Hunan province was realized by applying tailings dam-break disaster chain theory to engineering treatment of this tailings reservoir.

**Key words:** tailings reservoir; dam-break; disaster chain; chain-cutting disaster mitigation