

尾矿库溃坝灾害风险分析 理论与实践

◎ 袁利伟 李素敏 / 著



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

尾矿库溃坝灾害风险分析 理论与实践

袁利伟 李素敏 著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书在分析我国尾矿库的特征及其风险灾害特点的基础上,详细论述了尾矿库溃坝灾害风险分析的理论及其在工程实践中的应用,构建了其风险评价方法、分析步骤及评价手段,讨论了其风险等级的判定方法。在分析过程中,采用多种方法、多种软件,综合评价了溃坝灾害的风险等级,为尾矿库选址、设计论证、风险评估、分级监督管理等提供了重要的理论与实践技术,也为加强尾矿库的安全监管、控制溃坝事故的发生提供了基础理论依据与实践方法。

本书可供矿山安全管理的工程技术人员、科研人员、安全监管人员使用,也可供高等院校师生参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

尾矿库溃坝灾害风险分析理论与实践 / 袁利伟, 李素敏著. —北京: 电子工业出版社, 2017.7
ISBN 978-7-121-32692-9

I. ①尾… II. ①袁… ②李… III. ①尾矿—溃坝—灾害—风险分析 IV. ①TD926.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 223290 号

责任编辑: 杨秋奎 (yangqk@phei.com.cn)

印 刷: 北京七彩京通数码快印有限公司

装 订: 北京七彩京通数码快印有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 720×1 000 1/16 印张: 11.75 字数: 230 千字

版 次: 2017 年 7 月第 1 版

印 次: 2017 年 7 月第 1 次印刷

定 价: 45.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式: (010) 88254694; QQ: 106605162。

前 言

目前,我国矿山的安全生产形势依然严峻,尾矿库的安全运行对矿山企业的发展更是至关重要。影响尾矿库安全运行的不利因素较多,这些因素多为动态的,变化快且无规律,使得在工程实践中尾矿库的安全管理与监管显得更加重要。本书旨在通过尾矿库溃坝灾害风险分析凸显高风险的尾矿库,从而把有限的安全管理资源与监管人员的关注点放到高风险的尾矿库上,有效地遏制尾矿库重大、特大事故的发生。

提高和加强高后果灾难性事故的安全管理是当前重要的研究课题之一,也是避免重大伤害事故发生的前提。尾矿库溃坝事故属于低概率高后果类型,即发生的频率不是很高,但一旦发生其事故后果是巨大的、灾难性的。对尾矿库溃坝灾害进行风险分析与评价,可以将风险控制在可接受的范围之内,有效地减少或避免溃坝事故的发生。

本书根据我国尾矿库现状,针对溃坝灾害风险,构建了其风险评价方法、分析步骤及评价手段,讨论了其风险等级判定方法,以区分出高风险性的尾矿库,为加强安全监管、控制溃坝事故发生提供了基础理论依据。本书对我国尾矿库的现状及安全特征进行了调查统计和分析,总结归纳了溃坝事故发生的规律及其影响因素。使用事故树、等级全息建模及风险过滤评级等不同方法与手段进行了尾矿库溃坝风险因素辨识,详细论述了其事故灾害的风险分析基本理论及灾害风险分析方法与技术,并结合工程实例,构建了其灾害风险评价方法体系,对洪水漫坝进行了验算,讨论了坝体稳定性和溃坝影响程度的分析方法、计算步骤、分析过程、软件的使用、数据可靠性分析,综合评定了溃坝灾害的风险等级。在数值模拟方面,采用 ABAQUS 软件分析了坝体的稳定性,对渗流场与应力场耦合作用下的坝坡影响特性进行了数值分析,采用 Fluent 软件对溃坝演进过程进行了二维模拟、三维模拟。分析了溃坝后果灾害程度,改进了“快速指标权重”风险评价方法,提出了易操作、适用性强、可推广的尾矿库溃坝灾害风险评价体系,对控制溃坝灾害风险、降低事故的发生、保障生命与财产安全有着重要的现实意义。

本书所涉及的项目在研究过程中得到了北京科技大学金龙哲教授的详细指导,同时也得到了昆明理工大学陈玉明教授的指导,朱宁、彭博等硕士参与了许多软件分析工作,特此表示感谢!

本书得到了国家安全生产监督管理总局“安全生产重大事故防治关键技术重点科技计划项目”（项目编号：10-101）和昆明理工大学自然科学基金省级人培项目（项目编号：KKSY201421072）的支持。

由于著者水平所限，书中不足之处，恳请各位专家和广大读者批评指正！

著 者
2017 年 6 月

目 录

第1章 绪 论	1
1.1 研究的必要性及重要意义	1
1.2 研究背景及现状	2
1.2.1 研究背景	2
1.2.2 国内外研究现状	4
第2章 尾矿库溃坝灾害事故分析	10
2.1 我国尾矿库的现状与特征	10
2.1.1 尾矿库及分类	10
2.1.2 我国尾矿库的现状	12
2.1.3 尾矿库灾害风险监管层次划分现状及存在的问题	14
2.2 尾矿库灾害事故分析	16
2.2.1 尾矿坝失事的主要原因	17
2.2.2 尾矿坝失事与坝高的关系	17
2.3 小结	19
第3章 尾矿库溃坝事故风险分析基本理论	20
3.1 风险与灾害的关系	20
3.1.1 灾害风险评价的过程和内容	21
3.1.2 灾害风险评价的主要方法	22
3.1.3 极端事件的风险	22
3.2 尾矿库溃坝事故风险分析	23
3.3 尾矿库溃坝事故灾害风险评价的内容和步骤	24
3.3.1 风险识别	25
3.3.2 风险分析	25
3.3.3 制订风险计划	26
3.3.4 风险跟踪与反馈	26
3.4 尾矿库溃坝灾害风险因素辨识方法分析	27
3.4.1 利用事故树分析尾矿库溃坝事故风险因素	28
3.4.2 基于等级全息建模的风险辨识	28

3.4.3	尾矿库灾害的风险过滤、评级和管理方法	30
3.4.4	影响尾矿库溃坝事故的主要因素分析	35
3.5	小结	39
第4章	尾矿库溃坝灾害风险分析方法研究	40
4.1	尾矿坝坝体的稳定性分析方法研究	40
4.1.1	尾矿坝坝体的稳定性分析	40
4.1.2	尾矿坝坝体稳定性的主要影响因素	44
4.1.3	应力场与渗流场耦合分析	46
4.1.4	非线性有限元软件 ABAQUS 介绍	49
4.2	溃坝机理分析	50
4.2.1	基于耗散结构理论的溃坝演化灾变特征分析	50
4.2.2	溃坝事故类型	52
4.2.3	溃坝原因分析	52
4.2.4	溃坝模式	53
4.3	溃坝演进过程分析方法研究	54
4.3.1	溃坝事故模拟模型	54
4.3.2	尾矿浆浆体流变特性	58
4.3.3	溃坝演进过程数学模型及参数分析	59
4.3.4	溃坝后砂流滑移距离的主要影响因素	63
4.3.5	流场分析软件 FLUENT 介绍	63
4.4	溃坝事故后果分析方法研究	69
4.4.1	溃坝事故所造成的生命损失	69
4.4.2	溃坝事故造成的经济损失	71
4.4.3	溃坝事故造成的生态环境影响	74
4.5	溃坝灾害风险等级判定方法研究	76
4.5.1	溃坝灾害风险等级判定的主要方法	76
4.5.2	改进的“快速指标权重”风险评价方法	77
4.5.3	监管部门对尾矿库的关注度划分方法	82
4.6	小结	83
第5章	溃坝灾害风险分析方法在吉座尾矿库中的应用	84
5.1	吉座尾矿库工程概况	84
5.1.1	库区气象情况	85
5.1.2	库区工程地质构造	85

5.1.3	工程勘查结论	86
5.1.4	工程设计方案	86
5.2	尾矿库溃坝事故风险因素辨识	88
5.2.1	尾矿库溃坝事故树分析	88
5.2.2	溃坝灾害的风险过滤和评级	94
5.2.3	风险因素辨识结果讨论	98
5.3	吉座尾矿坝溃坝及稳定性分析	99
5.3.1	漫顶溃坝分析	99
5.3.2	渗流破坏溃坝分析	102
5.3.3	抗滑失稳溃坝分析	107
5.3.4	渗流场与应力场的耦合作用影响分析	119
5.4	吉座尾矿库溃坝砂流演进及灾害影响后果分析	128
5.4.1	溃坝砂流演进计算分析	128
5.4.2	基于数值模拟的二维溃坝砂流演进过程分析	129
5.4.3	溃坝灾害影响后果分析	139
5.5	溃坝灾害风险等级判定及监管关注度的划分	141
5.5.1	吉座尾矿库溃坝灾害风险等级判定	141
5.5.2	风险等级判定分析	142
5.5.3	吉座尾矿库监管关注度划分	142
5.6	小结	143
第 6 章	溃坝灾害风险分析方法在李子箐尾矿库中的应用	145
6.1	李子箐尾矿工程概况	145
6.2	李子箐尾矿库二维数值模拟研究	145
6.2.1	模型计算的条件设定	147
6.2.2	不同溃坝高度对尾矿砂运移距离的影响	149
6.2.3	不同溃坝高度对尾矿砂运移速度的影响	152
6.2.4	不同溃坝高度对下游河道冲击压力的影响	154
6.2.5	不同溃坝高度对尾矿砂运移淹埋泥深的影响	157
6.2.6	模拟结果分析	158
6.3	李子箐尾矿库溃坝三维数值模拟研究	158
6.3.1	计算工况介绍	159
6.3.2	模拟计算条件的设定	159
6.3.3	模拟计算结果	159

6.3.4	模拟结果分析	165
6.3.5	小结	166
6.4	尾矿库溃坝后果严重度评价及灾害治理防治措施	166
6.4.1	尾矿库溃坝后果严重度评价模型	166
6.4.2	尾矿坝溃坝后果严重程度的评价	167
6.5	小结	171
第 7 章	主要研究结论与展望	172
7.1	主要研究结论	172
7.2	展望	173
参考文献		175

第1章 绪 论

1.1 研究的必要性及重要意义

对尾矿库溃坝造成的灾害后果进行风险评价分析是尾矿库危险程度分级与隐患辨别的重要依据。探索和研究尾矿坝坝体的稳定性分析方法是分析溃坝灾害的主要前提。判别事故灾害风险等级的传统评价方法主要是从事故发生的可能性与伤害程度来进行分析,然而尾矿库溃坝属于极端灾难事件。从统计数据来看,发生的概率相对较低,但事故发生后造成伤害与影响特别严重,是灾难型的;死亡人数多、伤害范围广、经济损失大、社会影响深,是低概率高结果事件。单纯地取可能性与伤害程度两个值的乘积作为风险值的参考是不科学的、不合理的。

进行尾矿库溃坝灾害风险分析研究对安全生产重大事故的防治起着重要的作用。《尾矿库安全监督管理规定》(安全监管总局令第38号)与《尾矿库安全技术规程》(AQ 2006—2005)中均明确了尾矿库建设项目要进行安全评价,但主要是针对尾矿库工程本身的安全度,也就是说只针对风险分析中事故发生的可能性进行了评价分析,而对于事故发生的严重程度(如对冲击区域的生命、财产、环境等影响),间接的、直接的伤害损失未进行分析,多是一言带之,只是描述性地指出下游居民与设施情况的分布与数量。但具体到该尾矿库工程是否对下游造成伤害,或伤害程度怎样,却未进行评价与分析,未在相关文件中进行明确。而这些内容恰是决策者或监管者非常关心的,对于一个评价后认为是“正常库”,但由于尾矿库的使用与管理是动态的,安全条件会受生产的运行、天气的变化等各方面原因的影响而发生变化,若其发生事故的危害程度极大,该如何监管呢?如果监管机构能够清楚地了解到该尾矿库在运行到哪一时期、哪一阶段会伤害到哪些区域,对伤害范围会造成哪种程度的影响,对居民、建筑、公共设施、田地、环境等会造成何种伤害、破坏程度怎样等,才能更加准确地判定该尾矿库的危险程度,从而制定出正确的治理方案,决定合理的安全设施经济投入,完善符合实际的应急救援体系,以保证人民群众的生命与财产安全,真正地起到对重大事故的防治作用。

换言之,无论尾矿库设计的情况如何、安全度如何、管理体系如何,都要弄清楚一旦发生溃坝其伤害后果如何。如何确定这种低概率高结果的监管层次、关注度及风险水平,是本书研究的主要目的与内容。

本书的研究结果可以指导项目论证及选址分析,设计单位可以根据分析结果合理地调整设计参数;中介评估评价机构可以有效地确定尾矿库的风险等级或风险水

平;为企业单位提供对库区下游居民搬迁范围、重要设施保护程度等决策依据,以确定安全投入,制定风险防范措施;为当地安监部门提供监管级别的决策依据,制定符合实际的应急预案与防控对策,实现尾矿库危险源风险灾害等级划分的管理,确定监管层次以及行政机构对其的关注度,有效地遏制事故的发生,减小事故发生后造成的伤害程度。本课题的研究在对重大事故防治方面具有深远的意义。

1.2 研究背景及现状

1.2.1 研究背景

尾矿库溃坝是安全生产过程中的重大事故类型之一^[1]。随着矿业经济的快速发展,尾矿库数量急剧增加。2004 年国家安监总局统计的尾矿库数量为 2762 座^[2],2008 年 6 月统计的数量为 8541 座,2015 年底统计为 11946 座^[3]。尾矿库溃坝事故频发,并且逐年上升,重特大事故时有发生,严重威胁着人民群众的生命与财产安全^[4],如 1962 年个旧火谷都尾矿库溃坝 171 人死亡,1994 年大冶龙角山尾矿库溃坝 30 人死亡,2000 年南丹宏图尾矿库溃坝 28 人死亡,2008 年襄汾尾矿库溃坝 281 人死亡(该事故死亡人数超过了智利埃尔尾矿库群溃坝死亡 270 人的灾难性纪录^[5])。据统计,自 2001 年以来发生较大事故的次数占总事故的比例达 13%^[4]。

自 2005 年安监总局印发《关于加强金属非金属矿山尾矿库安全生产监管工作的通知》开始,政府日益加强了对尾矿库的监督管理。2005 年底发布了《尾矿库安全技术规程》(AQ 2006—2005);2006 年发布了《尾矿库安全监督管理规定》,并于 2009 年进行了更新;2007 年安监总局、发改委、国土资源部和环保总局四部委联合下发了《关于印发开展尾矿库专项整治行动工作方案的通知》;2007 年 5 月安监总局又印发了《尾矿库事故灾难应急预案》指导文件;2008 年开展了尾矿库隐患全面排查治理工作。在这样大的监管力度下,尾矿库安全事故仍居高不下,甚至逐年上升,说明了进一步提高与加强尾矿库安全研究的重要性和紧迫性。

据联合国环境规划署(UNEP)对尾矿库事故统计和分析^[6],坝高较低的尾矿库失事率较高,坝高低于 20m 的尾矿坝失事数量占到总数的 57%。对我国 1962 年以来有记录的 14 起尾矿库重大失事事故统计表明^[3],四等库、五等库失事的共 10 例占 71.4%,死亡人数为 547 人占 69.2%。上述分析表明,尾矿库等级越低,失事的风险越高,这与我国安全监管体系中以尾矿库规模大小为划分依据的监管方式不对等。

我国对尾矿库灾害风险等级划分没有一个完善的评价体系和评价方法。由于前期对尾矿库监管不规范,因此导致尾矿库建设过程中存在较多问题,如无设计或设计不规范,不按设计施工或降低施工要求,有的选址不合理,威胁到城镇与居民的

安全,再加上我国的尾矿库等别及安全标准低,更是增加了安全隐患。目前,安全监管部对尾矿库的风险评价主要是依据安全评价中介机构出具的安全评价报告,安全评价报告中给出了尾矿库的安全度,即“正常库、病库、险库、危库”等四类,对于属于“正常库”的可发安全生产许可证。然而安全度的评判依据却不充分,多以定性成分进行评价且未体现对下游的危害情况,尾矿坝稳定性分析方法中仍使用传统的极限平衡法,尾矿库的等级划分标准及安全系数要求上明显偏低。

我国一直未形成完善的尾矿库危害分类或分级体系。1995年4月,劳动部在《尾矿设施安全监督管理办法(试行)》(186号)中,将尾矿库危害严重程度分为三类,最低类别三类尾矿设施指可能造成死亡10人以下或经济损失100万元以下的,这一点显然已无法与时代相适应。2004年,国家安监总局在《关于开展重大危险源监督管理工作的指导意见》(56号)中仍然使用了这种分类办法,但在形成结论的时候,却使用了一条标准即四等库以上为重大危险源,说明即使是不合适的分类办法也未起到相应的作用。2012年,安监总局进行《尾矿库重大危险源辨识与分级标准》征求意见工作,新的征求意见中将四等以上尾矿库按评价指数分为四个级别,主要依据是对影响尾矿库安全的17个指标进行了权重赋值,将各指标的评价分值乘以权重值再汇总得到评价指标,根据评价指标得出尾矿库的危险源级别。在尾矿库危害的量化分析方面,该标准具有一定的操作性,但该标准仍将冲击范围内的危害仅作为一项指标,其权值虽高,但也仅为18.34%^[3],淹没了这个危害指标的影响程度,并且将五等尾矿库排除在外,具有明显的不合理性。

如何对尾矿库溃坝的灾害进行风险评价,其理论与方法一直不统一。人们普遍采用风险期望值方法进行分析评价。风险期望值是在所有事件集合中将每一事件的发生概率同发生频率相乘,再将这些乘积加总运算得来的。这种运算方式将高结果低概率的不利事件与低结果高概率事件进行了同等度量^[7]。

从公共政策的观点来看,对决策者或监管者来说,发生概率较小的灾难性工程同发生概率很大的小事故相比,其性质是根本不一样的。从最终产生的期望值函数来看,上面这种差异是很明显的,任何涉及尾矿库管理的行政人员都很清楚,这两个事件是不能采用单一的同等数学数值进行衡量的。

对尾矿库溃坝事故而言,一个重要的影响因素就是坝体的稳定性。坝体的稳定性直接关系到矿山企业的安全生产,同时也影响到尾矿库周边,特别是库区下游人民群众的生命与财产的安全,所以尾矿坝坝体的稳定性分析是一项重要的内容。我国工程应用中长期使用极限平衡法分析尾矿坝的稳定性。极限平衡法沿用的是土力学分析方法。尾矿库储存的尾矿其物理力学性质极为复杂,同时受尾矿水的影响以及筑坝方式特殊性的影响,使得极限平衡法在尾矿坝稳定性分析应用中有很大的局限性,如极限平衡法无法考虑渗流场与应力场耦合作用影响,无法分析浸润线的位置,无法分析破坏过程等。目前,已出现概率分析法、数值分

析法等多种坝体稳定性分析方法。概率分析法是从稳定性概率或失稳破坏概率的角度给出的结果,在应用上也有一定的局限。由于数值分析法建立模型的灵活性、软件计算的强大功能性、对非线性问题的适用性以及显示应力应变过程的优越性,受到工程人员及科研人员的广泛青睐。数值分析法主要是有限元的应用,然而目前人们在使用有限元对尾矿坝稳定性分析时却不能直接给出安全系数,在计算分析时对模型简化太多而达不到真实效果,对渗流场与应力场耦合作用也多数没有考虑。由于尾矿库的特殊性,整个尾矿坝的稳定性受到固结沉降过程的影响,所以应该考虑变形场和渗流场的耦合作用。故探索使用数值分析方法对分析尾矿库坝体稳定性分析是一项重要的研究课题。

在尾矿坝溃坝后的灾害模拟、砂流演进过程分析等方面,目前有效的解决手段与方法仍然不多,而全面分析溃坝后对下游区域的生命、财产、生态环境等各方面的影响,掌握尾矿库的伤害程度,分析其风险的大小是至关重要的。

1.2.2 国内外研究现状

1.2.2.1 灾害风险评价研究现状

灾害风险是风险的一类,灾害风险评价包含了灾害评价的相关内容。灾害风险管理将灾害管理工作上升到一个新高度,是一种更加自觉的人类行为,它由救灾上升到科学的防灾、避灾,确保灾害损失的最小化。在1997年风险分析学会的大会报告中,S. Kaplan^[8]将风险表示为有害事件、事件可能性的概率、与事件结果等三个的向量相关性表述。Kolluru^[9]则认为上述表述没回答怎样度量结果的严重程度,同时提出了风险认识的三步骤:认识一个组织的目标和受到威胁的资源“有害”;认识那些能够威胁资源价值的时间;度量影响的严重程度。Maskrey^[10]于1989年提出易损度的概念——“由极端事件而导致的被损害的可能”;而Tobin^[11]则认为上面的提法没有反映出承灾体的本质属性;Deyle^[12]则认为易损度为“人类居住地对自然灾害有害影响的敏感性”;Panizza^[13]则明确地指出“易损度是在人类介入的情况下,可能直接或间接敏感于物质损失的某一地区所存在的一切人和物的综合体”。

近些年,在溃坝滑坡等灾害风险评估领域,国内外学者所进行的研究内容主要有危险性评价、敏感性分析及风险评估等几个方面。相关研究表明^[14],对于溃坝滑坡所形成的灾害风险分析仍然不够,并且对受灾体的时空易损性分析评价尚不能够进行比较准确的估计。Galli等^[15]在对不同区域的建筑、道路破坏情况以及对Umbria地区的上百个滑坡情况进行资料统计分析的基础上,建立了滑坡灾害时受灾体的易损性临界值曲线,为风险评价提供了分析方法。

灾害所造成的损失方面,魏庆朝等^[16]建立了灾害损失的指标,主要有两类:一是属性指标,二是货币指标。属性指标又分为人员伤亡与所形成的灾害能持续的时间指标;货币指标也分为灾害造成的财产损失、因救灾产生的费用、因灾害发生造成的不利的效益方面的损失等指标。赵阿兴等^[17]提出了应根据灾害所造成的损失情况对灾害进行等级划分,形成不同的灾害级别,提供灾害治理救援等分类支持。

马宗晋等^[18]提出了“灾度”这一概念,人们已将其广泛应用于灾害损失评估领域。在此基础上又出现了与此相近的灾害损失划分的理论与方法,如刘燕华等^[19]分别从受灾人口数、死亡人数、受灾害面积数、成灾面积数和直接经济损失值5个方面作为灾害损失评估的绝对指标,以受灾人数占总人数的比值、受灾面积占总面积的比值和直接经济损失占工农业生产总值的比值等三个指标为灾害损失的相对指标,以上述指标为标准划分了灾害损失的等级,并将其分为特大灾害、重灾害、较重灾害与较轻灾害四个层次,我国民政部门就是依据此类指标将事故灾害划分为特大灾、大灾、中灾和小灾四类。张力等^[20]探讨了在灾害中将人员的死亡采用货币的形式进行换算的灾害损失估算方法。于庆东^[21]提出了使用“圆弧”对灾度进行划分的方法,该方法是用灾害死亡人数来乘以生命价值系数来计算灾害所造成的生命损失,然后再以生命的损失与灾害造成的社会财产损失的平方和为基准,来划分灾害层次。在灾害等级划分方面有人提出可以将灾害损失评估作为一个模式识别问题,这样就可以采用模式识别理论和方法来对灾害所造成的损失程度进行评估,并划分层次。如任鲁川^[22]利用前面提出的“灾度”概念,使用模糊模式理论,又提出了“模糊灾度”的概念,构建了以“模糊灾度”的等级隶属函数,并采用该函数来划分灾害等级,由此形成了灾害损失评估的模糊灾度综合分析方法。另外,李祚泳等^[23]提出了基于“物元分析”的灾害评估模型;金菊良等^[24]使用“遗传算法”和“神经网络模型”等来评估灾害损失;杨仕升^[25]采用自然灾害的“灰色关联度”方法进行了灾度程度划分并进行了比较分析。丁继新^[26]借助于“灾害熵”的概念,提出了区域泥石流灾害危险性定量分析的方法,将泥石流灾害的危险性和区域社会经济易损性进行分级,建立风险评价矩阵,在此基础上对区域泥石流灾害的风险进行了分级。张进滔等^[27]采用广义 Pareto 方法,对风险价值、预期损失进行估计,并引进 Omega 新风险指标计算其分布的尾部特性,探讨了极端事件下尾部风险度量分析方法。由于极端事件脱离了正常演化状态,是系统演化的极端状态或系统受到外界扰动而导致的异常状态。杨萍等^[28]利用“去趋波动分析法”确定极端风险事件的阈值来衡量系统在某一时间尺度内深化的相关性,取得了较好的效果。

1.2.2.2 坝体稳定性研究现状

尾矿库的主要安全问题是尾矿坝的稳定性问题,尾矿坝主要是由选厂排出的尾矿构成,而这种尾矿又是一种比较特殊的物质,因此尾矿坝的安全性问题也显得尤为特殊。尾矿坝稳定性分析技术发展较晚,由于其坝体结构的复杂性与特殊性,导致分析的方法与条件要求也较高,至今大多仍使用土力学领域的传统分析方法,而自身尚未形成独立的分析解算体系。目前,尾矿坝稳定性的分析方法主要有三种,第一种是数值分析法,也是通常意义上的应力-应变法,常见的有“有限元法”、“拉格朗日元法”(即 FLAC 法)以及边界元法等;第二种称为极限平衡法,形成工程应用的有“瑞典圆弧法”、“余推力法”、“毕肖普法”以及“SARMA 法”等;第三种称为概率分析法,常用的有“统计矩阵法”、“蒙特卡洛法”等。

1989 年,我国武汉钢铁学院力学教研室陈敬钰^[29]进行了“用有限单元法分析坝体的静力稳定性”的研究,利用某尾矿坝的钻探资料、土工试验所提供的物理力学性质,在用渗流分析方法确定了坝体内浸润线位置的基础上,应用有限单元法,对某尾矿坝的静力稳定性进行了分析。马鞍山矿山研究院余振锡、项宏海^[30]建立了“岩体渐进崩落计算模型”,主要讨论分析了对在矿山开采后塌陷区域改造成尾矿库的情况进行稳定分析评价,初步建立了利用塌陷区场地排放尾矿的评价方法。曹金海等^[31]采用交域不规则柱体稳定性分析法和弹塑性有限元分析法,对采空区上方建设尾矿库的覆岩稳定性进行研究,并推导了其理论公式。祝玉学^[32]在 1998 年时就提出为了提高尾矿坝的稳定性,可以采用坝内或库基排渗降压孔群等技术手段。毛宏宇、乐陶^[33]利用有限元差分法计算程序 FLAC^{2D} 对尾矿坝在地震荷载作用下进行数值模拟,采用 Finn 本构模型分析了尾矿坝在地震荷载作用结束时的位移及应力,为高烈度地震区的尾矿坝安全稳定性设计方法提供了参考依据。东北大学资源与土木工程学院梁力等^[34]进行了“尾矿库坝体稳定性数值分析方法”研究,应用 ANSYS 软件对某尾矿坝进行了静力稳定性数值分析,通过应用不同方法对尾矿坝的静力稳定性计算,得出了尾矿坝的稳定安全系数和可能滑动面的形状,研究结果表明数值方法在尾矿库坝体稳定计算中具有显著优势,其结果能直观而有效地反映尾矿坝的稳定性。西安理工大学岩土工程研究所王平等^[35]进行了“陶家沟尾矿坝三维静力和动力稳定性分析”研究,采用邓肯-张模型对陶家沟尾矿坝进行了三维静力和动力有限元分析。

邓敦毅等^[36]进行了“自然状态下尾矿坝边坡稳定性的数值模拟研究”,针对自然状态下攀枝花尾矿坝边坡,利用 FLAC^{3D} 软件进行三维数值模拟研究,获得尾矿坝变形的基本特点及稳定性现状。扬州大学岩土工程研究所费康、刘汉龙^[37]进行了“ABAQUS 的二次开发及在土石坝静、动力分析中的应用”,利用 UMAT 子程序,在 ABAQUS 中开发了用于静力分析的邓肯非线性弹性模型和用于动力

分析的等效线性模型,丰富了 ABAQUS 软件的材料库,针对土石坝的分级填土施工、新填土层的位移修正、土石坝蓄水后的浸水湿化效应、坝体材料的液化判别和地震永久变形计算等土石坝分析中的特定问题在 ABAQUS 中实现了相应的解决方案。西安理工大学岩土工程研究所柳厚祥等^[38]进行了“考虑应力场与渗流场耦合的尾矿坝非稳定渗流分析”,根据弹性力学和渗流理论提出了耦合问题的力学模型及其控制微分方程,然后导出这一问题的有限元计算公式及相应程序,并进行尾矿坝的非稳定渗流分析。马鞍山矿山研究院段蔚平等^[39]建立了含水率与基质吸力的经验模型,经过对黄岭铅锌矿尾矿坝的试验室模拟分析验证,预测的结果与实测数据非常吻合。秦柯等^[40]对降雨条件下干式尾矿堆存坝的稳定性进行了计算分析,指出了降雨条件是影响干式尾矿堆积坝稳定性的主要因素。陈国强等^[41]分别使用传统公式及数值模拟方法对龙泉尾矿坝的渗流场进行对比,验证了采用辐射井对降低坝体浸润线可以达到较好的工程效果。马鞍山矿山研究院曾霄祥^[42]也在尾矿坝渗场稳定性方面做了三维场的研究工作。

1.2.2.3 溃坝机理及演进研究现状

溃坝机理的分析研究仍沿用了岩土力学方面的研究成果。林振山^[43]运用灾变与耗散结构理论对溃坝演化过程进行讨论,从微观变形的角度将坝体变形的作用过程分为两种类型,即应变硬化作用与应变软化作用。前者是在特定的边界条件下,坝体的变形会受到内部微观变形的阻止作用;后者则是某些变形机制会消除应变硬化作用产生阻止的作用,而让变形能够继续延续下去。无论是应变硬化作用还是应变软化作用,都是将体系外作用于坝体结构的能量转化为体系内部的应变能,或者将坝体体系内部的应变能转化为体系的热能,这样能量就可能形成利用率从高向低的转化,这个能量转化与传递交换过程,称为能量的耗散过程。能量的耗散过程理论是从均匀的随机空间分布微破裂发展到规则的局部化变形,直到变形贯通而最终断裂,这个过程本质是系统状态偏离了原来的平衡状态,而这一系统的失衡也是由原来的无序结构的破坏与新的有序结构的重新形成所导致的。S. K. Kim 等^[44]从边坡滑动演化的协同学理论进行了滑动演化、失稳时间预报的分析,将协同学理论与坝体演化的分岔论联系起来,推导出坝体深化的协同-分岔序参量方程,建立了坝体失稳时间预报的协同-分岔模型。能量突变模型也在岩体工程系统失稳分析中得到了广泛的应用,该模型是在有限元计算中结合现场实例数据,从系统及能量突变的观点出发,提出新的岩体工程系统破坏失稳的能量突变判断准则,解决了在选择破坏准则时刻刻意避开那些“仅仅认为受单元破坏方式”准则的问题,并提出了突变理论中的尖点,根据尖点分叉集理论,推导了系统发生突变的判据准则,蔡美峰等^[45]结合金川矿区的开采工艺验证了判断岩体工程系统破坏失稳能量突变准则的正确性和可行性。

对溃坝模型的研究也产生许多新的进展。一般对溃坝模型的研究有两个方面：一是基于参数的模型，二是基于物理过程的模型。前者主要针对研究对象的关键参数，利用时变过程来分析模拟坝体开始溃口处的发展特征，通过研究库容与坝高、库容与溃口尺寸、库容关键参数与溃砂流量、流速等之间的回归方程来对溃坝过程进行模拟分析。后者则是从溃坝水力学、工程土力学等相关学科知识来搭建符合时变过程的溃坝演化线、过程线来进行模拟分析的，目前应用的有“BEED 模型”、“BREACH 模型”及“P-T 模型”等^[46,47]。

1.2.2.4 溃坝风险评价研究现状

目前国内外在该领域有一定的研究成果。葡萄牙学者 Ana Rita Salgueiro 于 2008 年在《Risk Analysis》杂志上发表了《地中海地区尾矿坝破坏风险分析》，主要是依据对以前案例的统计数据，预测尾矿坝发生的破坏情形。南非金山大学 Blight G. E. 教授通过统计分析对尾矿溃坝形成的泥石流对地表的伤害进行了风险预测分析。Stefano Mambretti^[48]建立了实验室模型并运用圣维南方程进行了计算，将两者进行对比分析，对溃坝的后果情形进行了预测分析。Jeffrey T.^[49]针对丹佛科罗拉多州的樱桃大坝进行了溃坝预测，建立了 UNET 与 HEC-1 预测模型，确定了下游淹没区域，计算了下游人口所面临的风险及潜在的经济损失等。此外，还有多名学者^[50]围绕尾矿坝溃坝机理及风险影响评价进行研究分析，详见相关文献。

1995 年，河海大学水利水电科学研究所陈青生等^[51]发表了《矿山尾矿库溃坝砂流的计算模拟》的论文，提出溃坝后砂流对坝体下游的影响预测方法，所采用的数学模型考虑了尾矿的物理力学性质及其在流动中的变形，采用 MAC 法的交错网格进行计算，其分析结果在覆盖范围与厚度方面较为吻合。东北大学资源与土木学院郑欣等^[52]提出了尾矿坝规模、生命损失、经济损失和社会环境影响四个因子。该单位的吴娇、秦华礼等^[53]同时也进行了“尾矿库溃坝风险评价与分级技术研究”，研究结论体现了“事故后果严重度”对溃坝风险大小的影响作用，兼顾风险评价指标体系中的全面性和指标之间的相对独立性，分级技术显得更为合理，采用动态聚类分析法和工程模糊集理论所构建的数学分析模型能够实现对尾矿库溃坝的风险评价及分级。中钢集团马鞍山矿山研究院代永新等^[54]设计开发了对尾矿库工程的灾害管理系统，在溃坝灾害的可能性和溃坝后果造成的危害程度等方面做出判断与评估，用于指导尾矿库的安全管理，以避免尾矿库工程灾害的发生。徐玉文等^[55]使用层次分析法合理地确定了尾矿库灾害风险的生态因子权重。朱君星等^[56]改进了传统层次分析法，使用了“不确定型层次分析法”建立了尾矿库安全评价模型，确定了风险指标体系。重庆大学冀红娟、杨春和等^[57]于 2009 年进行了“尾矿库溃坝灾害风险评估体系及风险管理体系的研究”，通过风险评估得出溃坝的风险度及风险度是否被接受进行了判断。中国安全生产科学研究院李全明