

“博士后文库”序言

1985年，在李政道先生的倡议和邓小平同志的亲自关怀下，我国建立了博士后制度，同时设立了博士后科学基金。40年来，在党和国家的高度重视下，在社会各方面的关心和支持下，博士后制度为我国培养了一大批青年高层次创新人才。在这一过程中，博士后科学基金发挥了不可替代的独特作用。

博士后科学基金是中国特色博士后制度的重要组成部分，专门用于资助博士后研究人员开展创新探索。博士后科学基金的资助，对正处于独立科研生涯起步阶段的博士后研究人员来说，适逢其时，有利于培养他们独立的科研人格、在选题方面的竞争意识以及负责的精神，是他们独立从事科研工作的“第一桶金”。尽管博士后科学基金资助金额不大，但对博士后青年创新人才的培养和激励作用不可估量。四两拨千斤，博士后科学基金有效地推动了博士后研究人员迅速成长为高水平的研究人才，“小基金发挥了大作用”。

在博士后科学基金的资助下，博士后研究人员的优秀学术成果不断涌现。2013年，为提高博士后科学基金的资助效益，中国博士后科学基金会联合科学出版社开展了博士后优秀学术专著出版资助工作，通过专家评审遴选出优秀的博士后学术著作，收入“博士后文库”，由博士后科学基金资助、科学出版社出版。我们希望，借此打造专属于博士后学术创新的旗舰图书品牌，激励博士后研究人员潜心科研，扎实治学，提升博士后优秀学术成果的社会影响力。

2015年，国务院办公厅印发了《关于改革完善博士后制度的意见》（国办发〔2015〕87号），将“实施自然科学、人文社会科学优秀博士后论著出版支持计划”作为“十三五”期间博士后工作的重要内容和提升博士后研究人员培养质量的重要手段，这更加凸显了出版资助工作的意义。我相信，我们提供的这个出版资助平台将对博士后研究人员激发创新智慧、凝聚创新力量发挥独特的作用，促使博士后研究人员的创新成果更好地服务于创新驱动发展战略和创新型国家的建设。

祝愿广大博士后研究人员在博士后科学基金的资助下早日成长为栋梁之才，为实现中华民族伟大复兴的中国梦做出更大的贡献。



中国博士后科学基金会理事长

序

矿产品是推动社会物质文明发展与建设的关键基础资源，采矿工业直接关系到国计民生和国家安全。“十四五”时期是我国采矿业实现转型与升级的关键阶段。《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》明确强调，加强矿山深部开采与重大灾害防治等领域先进技术装备创新应用，从而显著提升安全生产水平。在此背景下，对当前阶段矿山边坡防治关键技术的研发提出了更新、更高要求。

矿山开采主要包括露天开采和地下开采两种形式。其中，露天开采凭借其空间限制小、劳动生产率高、作业成本低、矿石损失贫化小、基建周期短、劳动条件较好等优势，已成为我国固体矿产资源开发的主要方式。然而，露天采矿的生产环境复杂，易受多种外部因素干扰，常面临一系列安全问题，影响生产进程。尤其随开采深度增加，边坡稳定性逐渐成为制约采矿剥岩作业的关键问题，直接关系到矿山整体运营效益。因此，保障露天矿山边坡稳定性、实现安全高效开采，具有重大现实意义。

露天采场边坡是指矿场四周的倾斜表面。其中，反倾岩质边坡是指边坡走向与岩层走向平行或近似平行，但倾向相反的一类岩质边坡。传统认识中，自然形成的反倾岩质边坡因岩层与坡面倾向相反，被认为具有较强的自稳能力，不易形成贯通滑动面进而引发滑坡。然而，在露天开采过程中，由于卸荷作用，反倾岩质边坡易向临空方向发生弯曲、折断，即所谓“点头现象”。若未采取有效防控措施，边坡岩体可能发生倾倒大变形，最终导致失稳事故，国内外曾发生多起典型案例，如智利丘基卡玛塔露天矿、西班牙瓦伦西亚露天矿、我国宜昌盐池河磷矿山体崩塌及甘肃金川大型露天矿边坡倾倒破坏。

内蒙古长山壕露天采场是我国重要金矿产地之一，赋存两个低品位、近地表黄金矿床。该采场正在进行的两项露天采矿作业，日开采处理能力达 60000t。自 2006 年投产以来，围绕其边坡稳定性问题已开展 20 余项研究。然而，随着东北、西南两采场向深部延伸，边坡高度持续增大，失稳事故频发，屡次导致生产中断，并对人员与设备安全构成严重威胁。仅在 2017 年下半年，单侧采场就出现多处台阶失稳，属于国内罕见、规模较大的反倾岩质边坡倾倒失稳事故。鉴于边坡失稳频发，矿方曾委托设计研究院实施常规加固措施，试图治理

边坡变形与失稳,但治理后仍发生多次规模不等的崩塌、滑坡及倾倒变形,严重危及矿区安全。其原因在于,传统小变形支护结构难以阻止反倾岩质边坡“倾倒式”大变形的渐进发展,最终导致支护结构失效。此后,矿方特邀中国科学院何满潮院士赴现场调研。何院士系统分析了大规模倾倒失稳的原因,并在不调整现有采矿方案的前提下,创新性地提出了采用负泊松比(NPR)锚索防治对策,以解决边坡失稳带来的安全隐患。

为杜绝类似事故再次发生,深入研究大型反倾岩质边坡倾倒失稳特征及 NPR 锚索的锚固机理至关重要。该书以内蒙古长山壕露天采场多次边坡倾倒失稳事故为工程背景,首先基于多次现场调研,系统归纳了边坡倾倒破坏模式,深入阐释了大型反倾岩质边坡倾倒失稳的形成机制。其次,以材料的脆性断裂最大拉应力准则为失效判据,结合叠合悬臂梁理论,建立了适用于该矿区反倾岩质边坡倾倒失稳分析的力学模型,推导出岩层条块倾倒破坏折断带深度的解析公式。随后,以陡倾反倾岩质边坡为研究对象,依托工程灾变物理模型试验系统,基于相似理论开展了边坡失稳过程的物理模型试验,验证了模型的合理性与准确性,在模型尺度重现了反倾岩质边坡在分层开挖条件下发生倾倒失稳的全过程,揭示了边坡内部应变场、温度场、位移场与塑性区等多物理场的演化规律。进一步,系统介绍结构型负泊松比(1G-NPR)锚索/材料型负泊松比(2G-NPR)锚索的设计理念,并通过静力拉伸试验证明了两代 NPR 锚索均具备超常力学性能,表现出优于普通泊松比(PR)锚索的负泊松比效应。1G-NPR 锚索借助恒阻体在套筒内的滑移实现高恒阻与高延伸特征;2G-NPR 锚索则利用内部 NPR 晶体微观延展获得整体均匀大变形的能力。基于相似理论,研发了适用于物理模型试验的 1G/2G-NPR 锚索模型,并通过对比锚索加固后反倾岩质边坡在开挖作用下的变形响应特征,揭示其对边坡失稳的控制机理,证明该类锚索能通过结构或材料的大变形吸能促使失稳岩体重新达到力学平衡,从而避免大规模倾倒失稳事故发生。通过分析牛顿力监测曲线的演化特征,可实时评估边坡稳定性,为建立临滑预警机制提供依据。特别是建立了 2G-NPR 锚索-反倾岩体互馈作用模型,揭示了 NPR 材料对岩体本构行为的改良机制。最后,基于物理模型试验构建了 2G-NPR 锚索-层状反倾岩体精细化数值模型,并通过参数分析探讨了岩体性质、岩层倾角、锚索布置对边坡力学响应的影响规律,结合矿山采场原型数据建立工程尺度数值模型,深入揭示了 2G-NPR 锚索对矿山反倾岩质边坡的加固机理与控制效果。

综上所述,该书融合现场踏勘、理论分析与物理模型试验,形成了一套综合研究方法,所应对的科学问题符合“需求牵引、突破瓶颈”的导向,研究成果可为新一代露天矿山边坡安全开采与灾害防治技术研发提供理论支撑。因

此,《强卸荷作用下反倾岩质边坡倾倒失稳机理及防控方法》是一部在露天矿山边坡地质灾害防治领域具有重要参考价值的专业著作,有助于科研与工程人员深入理解大型反倾岩质边坡倾倒失稳机理与 NPR 锚索支护技术。

朱 淳

2025 年 12 月

前 言

矿产资源是支撑国民经济发展和社会物质文明建设的重要基础性资源，采矿业在保障国家资源安全和推动经济社会高质量发展中具有重要的战略地位。随着我国矿产资源开发由浅部向深部、由中低边坡向高陡边坡不断推进，露天矿山边坡灾害问题日益突出，已成为制约矿山安全生产与持续运营的关键因素之一。“十四五”时期，我国明确提出加强矿山深部开采与重大灾害防治等领域先进技术装备创新应用，对露天矿山边坡稳定性理论与工程灾害防治技术提出了更高要求。

露天矿山边坡类型复杂，其中反倾岩质边坡因岩层结构组合特殊、变形破坏模式多样而具有显著工程复杂性。传统工程认识多认为反倾边坡具有一定自稳能力，但大量工程实践表明，在露天采矿持续卸荷及多场耦合作用下，此类边坡极易发生弯曲、折断及整体倾倒等大变形破坏，且破坏过程呈现明显的渐进演化特征。一旦边坡失稳，往往规模大、影响范围广、治理难度高，对矿山安全和稳健生产构成严重威胁。因此，系统认识大型反倾岩质边坡倾倒破坏机理，并发展与之相适应的大变形支护与控制技术，具有重要的理论意义和工程价值。

本书以我国典型大型露天矿山内蒙古长山壕露天采场反倾岩质边坡为研究对象，结合采场多次倾倒失稳事故的工程实践，围绕反倾岩质边坡倾倒失稳机理与防控方法展开系统研究。相关研究工作依托国家自然科学基金项目“露天矿山反倾岩质边坡新型 NPR 锚索加固机理研究”（52104125）项目及中国博士后科学基金优秀学术专著项目基金（2025CBZZ15）的支持，在长期现场调研、试验研究与理论分析的基础上逐步形成。撰写本书的目的在于：通过系统总结上述研究成果，深化对反倾岩质边坡倾倒破坏演化规律的认识，构建适用于反倾岩质边坡的倾倒稳定分析与岩层大变形支护控制理论方法，为露天矿山边坡地质灾害防治提供可借鉴的研究思路和关键技术。

本书重点围绕以下几个方面展开。首先，系统归纳大型反倾岩质边坡在露天开采条件下的主要失稳模式，阐明倾倒变形破坏的结构特征与演化过程；其次，基于岩层弯折折断力学行为，建立反倾岩质边坡倾倒破坏的力学分析模型，给出关键破坏参数的解析表达；再次，通过工程灾变物理模型试验，重现反倾

岩质边坡在分层卸荷条件下的倾倒失稳全过程，揭示边坡模型多物理场协同演化规律，在此基础上，系统介绍 1G/2G-NPR 锚索的设计理念、力学性能及本构特性，阐明其在控制反倾岩质边坡大变形方面的作用机制；最后，结合室内模型尺度和现场工程尺度的数值模拟分析，验证 NPR 锚索对反倾岩质边坡失稳防控的有效性，并探讨关键参数对边坡力学响应的影响规律。

本书的主要特点在于：以典型工程灾害案例为牵引，将反倾岩质边坡倾倒失稳机理与新型大变形支护技术相结合；注重理论分析、物理模型试验与数值模拟的协同验证；突出 NPR 锚索在岩层大变形协同调控方面的独特优势，为传统岩体工程支护体系提供有益补充。相关研究成果具有较强的工程针对性和推广潜力。

衷心感谢何满潮院士和陶志刚教授在项目研究和本书撰写过程中给予的悉心指导和帮助，同时感谢所有给予支持和帮助同仁，以及相关矿山企业和工程技术人员在现场调研与工程实践方面的帮助。

受研究条件和认识水平所限，书中相关结论仍有进一步深化和拓展的空间，期待在今后的研究与工程实践中不断完善。

朱 淳

2025 年 12 月

目 录

“博士后文库” 序言

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 边坡稳定性评价方法	1
1.1.1 极限平衡法	1
1.1.2 物理模型试验法	2
1.1.3 数值模拟法	3
1.2 反倾岩质边坡破坏机理研究现状	4
1.2.1 工程地质分析法研究现状	4
1.2.2 物理模型试验法研究现状	6
1.2.3 数值模拟法研究现状	7
1.3 反倾岩质边坡变形控制方法研究现状	9
1.3.1 小变形支护措施	9
1.3.2 大变形支护措施	11
1.3.3 基于负泊松比理念的锚杆/索	13
1.4 研究关键问题与技术瓶颈	15
第 2 章 内蒙古长山壕露天采场概况	18
2.1 地质条件	18
2.1.1 地理位置	18
2.1.2 气象水文	18
2.1.3 地形地貌	19
2.1.4 地质构造	19
2.1.5 地层岩性	20
2.1.6 历史地震	21
2.1.7 采场特征	21
2.2 边坡岩体质量预测与评价	22
2.2.1 三维地质建模及数据库建立	22
2.2.2 克里格插值法预测三维空间岩体 RQD	24

第3章 反倾岩质边坡倾倒变形破坏机理	32
3.1 矿区边坡倾倒破坏实例	32
3.1.1 采场北帮 1570~1594 区段滑坡	32
3.1.2 采场北帮 7000~7250 勘探线之间的滑坡	33
3.1.3 采场北帮 7200~7600 勘探线之间的滑坡	33
3.1.4 采场北帮 8600~8900 勘探线之间的滑坡	33
3.2 倾倒破坏模式	34
3.2.1 原生倾倒破坏	34
3.2.2 次生倾倒破坏	35
3.3 倾倒岩层稳定性分析	36
3.4 倾倒岩层力学模型	39
3.4.1 力学模型构建	39
3.4.2 悬臂梁受力分析	40
3.4.3 悬臂梁条块接触面之间法向应力求解	42
3.4.4 岩层折断带深度计算	44
3.5 倾倒变形破坏机理分析	45
3.5.1 变形破坏特征	45
3.5.2 倾倒变形破坏模式及成因	46
3.5.3 折断带深度计算	46
第4章 反倾岩质边坡大变形失稳破坏物理模型试验	48
4.1 物理模型试验系统及相似性判据分析	48
4.1.1 物理模型试验系统组成	48
4.1.2 物理模型试验相似性判据分析	49
4.2 反倾岩质边坡物理模型试验	50
4.2.1 物理模型试验内容	50
4.2.2 物理模型模拟边界的确定	51
4.2.3 岩性及物理力学参数选取	51
4.2.4 物理模型相似常数计算	51
4.2.5 相似材料力学特性试验	52
4.3 测试方法、原理及系统组成	53
4.3.1 静态应变数据采集系统	53
4.3.2 红外热成像仪及原理	54
4.3.3 数字散斑位移测试系统及原理	55
4.4 物理模型设计	59
4.4.1 物理单元板的制作	59

4.4.2	应变片布设	61
4.4.3	加载设计	61
4.5	物理模型搭建	62
4.5.1	试验准备	62
4.5.2	试验过程	64
4.6	试验结果及分析	65
4.6.1	边坡失稳破坏过程	65
4.6.2	试验结果分析	66
4.6.3	边坡损伤破坏特征全过程对比分析	71
4.7	数值模拟验证及分析	74
4.7.1	离散单元 3DEC 计算方法及原理	74
4.7.2	数值模型建立	75
4.7.3	数值结果分析	76
4.7.4	数值模拟与物理模型试验结果对比	77
第 5 章	NPR 锚索概述及力学性能测试	79
5.1	负泊松比材料的物理力学特性与控制理念	79
5.1.1	负泊松比材料的物理力学特性	79
5.1.2	负泊松比材料的控制理念	81
5.2	工程尺度 1G-NPR 锚索	82
5.2.1	锚索构成	82
5.2.2	边坡加固工作原理	83
5.2.3	静力拉伸室内试验	84
5.2.4	静力拉伸数值试验	95
5.3	工程尺度 2G-NPR 锚索	103
5.3.1	2G-NPR 锚杆/索新材料	104
5.3.2	边坡加固工作原理	105
5.3.3	静力拉伸试验	105
5.3.4	2G-NPR 锚杆/索负泊松比效应本构模型	114
第 6 章	反倾岩质边坡 NPR 控制物理模型试验	118
6.1	模型尺度 NPR 锚索研制	118
6.1.1	1G-NPR 锚索	118
6.1.2	2G-NPR 锚索	122
6.2	1G-NPR 锚索加固控制物理模型试验	124
6.2.1	物理模型试验设计	124
6.2.2	物理模型试验过程	125

6.2.3	物理模型构建	127
6.2.4	试验结果及分析	131
6.3	2G-NPR 锚索加固控制物理模型试验	140
6.3.1	边坡变形破坏过程	140
6.3.2	监测结果分析	141
6.3.3	反倾岩质边坡 2G-NPR 锚索和 PR 锚索控制效果对比分析	145
6.4	2G-NPR 锚索-反倾岩体互馈作用分析及模型	146
6.4.1	2G-NPR 锚索-反倾岩体互馈作用分析	146
6.4.2	2G-NPR 材料本构模型	147
6.4.3	反倾岩体本构模型	148
6.4.4	2G-NPR 锚索-反倾岩体互馈作用模型	149
第 7 章	反倾岩质边坡 2G-NPR 控制数值模拟	150
7.1	物理模型尺度 2G-NPR 锚索加固性能数值仿真分析	150
7.1.1	数值模型建立	150
7.1.2	数值模型验证	152
7.1.3	加固参数敏感性分析	159
7.1.4	岩层参数敏感性分析	172
7.2	工程尺度 2G-NPR 锚索加固性能数值仿真分析	179
7.2.1	数值模型建立	179
7.2.2	计算结果	182
7.2.3	加固参数敏感性分析	189
第 8 章	反倾岩质边坡倾倒失稳控制机理核心认识与未来发展趋势	199
8.1	反倾岩质边坡倾倒失稳控制机理核心认识	199
8.2	未来发展趋势	200
参考文献		202
编后记		212

第1章 绪 论

边坡稳定性分析受到地质构造与外部环境等多因素的综合影响，其研究方法逐步经历了从经验判断到理论推演、从定性评估到定量分析的发展过程，已形成较为系统的研究框架与丰富的研究成果^[1-5]。本节将重点综述边坡稳定性定量评价中常用的极限平衡法、物理模型试验法与数值模拟法。

1.1 边坡稳定性评价方法

1.1.1 极限平衡法

早期学者尝试借助土力学的研究成果来解决边坡稳定性问题。其中，库仑 (Coulomb) 和朗肯 (Rankine) 先后提出了库仑土压力理论与朗肯土压力理论，为极限平衡法的发展奠定了理论基础^[6,7]。在此基础上，彼得松 (Pettersen) 首次提出了“瑞典圆弧法”理论，随后费莱纽斯 (Fellenius)^[8,9]对其进行了改进，将潜在滑动面简化为圆弧面，并假设各土条间不产生相互作用，该方法被称为极限平衡条分法。此后，Taylor^[10]和 Terzaghi^[11]对瑞典圆弧法进行了优化，重新确定了最危险滑动面的位置。Terzaghi^[12]还指出，对数螺旋线更贴近实际土体破坏时的滑面形态。Janbu^[13]提出了适用于任意滑动面稳定性计算的普通条分法。Bishop^[14]则对安全系数进行了严格定义，并引入了修正条分法，以提高计算精度。

我国学者高庚和张咸恭^[15]对边坡的地质条件与类型进行了系统分类与研究，奠定了边坡工程地质分析的基础。Müller^[16]提出了边坡岩体结构理论，为分析岩体结构与边坡稳定性的关系提供了理论依据。孙玉科和李建国^[17]采用实体比例投影法，对边坡稳定性进行了定性评价。潘家铮^[18]提出了滑坡稳定性的极值原理，为滑坡问题的力学分析提供了新思路。张天宝^[19]通过构建边坡稳定性系数的数学函数，探索了最危险滑动面的变化规律，并于 1981 年进一步指出复合土坡中最危险滑动面呈多极值分布特征^[20]。Goodman 和 Bray^[21]系统分析了岩体结构特性与边坡稳定性之间的内在联系，为边坡稳定性评价提供了结构控制机制的视角。近年来，学者对非均质性与各向异性的研究不断深入。邓东平等^[22]围绕强度空间非均质性及各向异性条件下的边坡稳定性开展了系统

研究,其成果有助于全面揭示非均质性及各向异性条件下的边坡破坏机制。周凤玺等^[23]基于变分法与极限平衡法的基本原理,对土质边坡的稳定性问题进行了理论研究,为边坡稳定性分析提供了更加科学合理的计算方法。

孙君实^[24,25]从力学与数学相结合的视角,对土质边坡稳定性问题进行了深入系统的研究。陈祖煜和邵长明^[26,27]基于莫尔-库仑强度准则推导出了静力平衡方程的闭合解,并通过数值算例验证了所求得的稳定性安全系数最大值和最小值与工程实际高度吻合,证明了该理论的实用性与准确性。黄梦宏和丁桦^[28]通过引入载荷系数,并考虑模型中各约束条件的变化,探讨了不同假定条件对极限平衡法计算结果可能带来的误差,为方法合理性分析提供了量化依据。黄润秋等^[29-31]基于大量边坡工程实例研究,将岩质边坡破坏模式归纳为四类:倾倒变形型、滑移-拉裂-剪断三段式、阶梯状蠕滑-拉裂型及高应力-强卸荷深部破裂型,并针对不同破坏模式提出了相应的稳定性分析方法。在传统理论框架基础上,学者不断引入力学、地质、数学等多学科知识,推动理论的交叉融合,衍生出大量新型分析方法与理论体系,为边坡稳定性研究提供了良好的发展平台^[32]。此外,在极限平衡法的应用中,Raghuvanshi^[33]指出,最精确的计算方法应同时满足力矩平衡与力平衡条件,并通过对土条间相互作用力施加不同假设,以提高边坡稳定性分析的精度与适用性。

1.1.2 物理模型试验法

物理模型试验是一种基于相似理论,通过缩尺模拟特定工程地质问题的方法,因其能够较全面地反映复杂的地质力学过程,已成为边坡稳定性研究的重要手段之一。

国外在该领域的研究起步较早,并逐步建立了较为成熟的相似理论体系。自20世纪70年代我国科研机构也陆续开展物理模型试验研究,并取得了诸多成果。中国科学院武汉岩土力学研究所、河海大学等单位在此方面开展了系统性研究^[34-43]。在具体研究方面,Adhikary等^[44]利用离心模型试验探究了反倾岩质边坡的变形机制。黎志恒^[45]通过降雨模拟试验分析了地表水入渗量对边坡稳定性的影响。黄涛等^[46]则进一步探讨了累计入渗水量与边坡变形量之间的关系。郝建斌等^[47]采用二维振动台模型研究了黄河大柳树水电站坝址区倾倒变形滑体的动力响应特性。Zhang等^[48]通过离心模型试验分析了与岩层倾向正交的次级结构面对折断面形态的影响。彭红明^[49]在阐明贵州省开阳磷矿洋水矿区地质环境条件的基础上,分析了崩塌发育的基本特征和规律,采用物理模拟和数值方法,对崩塌的形成机理进行了分析。肖先煊等^[50]则对三峡库区某典型边坡

进行了模型试验稳定性评价。毕芬芬^[51]利用离心模型手段分析了贵州某中缓倾、上硬下软型边坡的失稳机理。此外, Lai 等^[52]借助大型物理模型评价了高陡边坡的稳定性与优化设计。柳墩利^[53]通过边坡应力与位移演化的模型试验,结合数值模拟分析了隧道开挖对边坡稳定性的影响。吴昊等^[54]以玻璃为相似材料开展了多组反倾岩质边坡离心模型试验,探讨了不同岩层倾角和坡脚组合对边坡稳定性的影响。Tao 等^[55]基于相似理论,研制了模型尺度的 NPR 锚索,并依托自主研发的“工程灾害模型试验系统”,开展了 NPR 锚索与普通锚索对层状反倾岩质边坡加固机理的对比研究。王文才等^[56]为解决露天端帮开采中的边坡失稳问题,构建了多种开采工况下的边坡结构模型,并结合雷达监测系统,系统分析了原岩结构、稳定性劣化与时效稳定性之间的相互关系。

1.1.3 数值模拟法

随着计算机科学技术的飞速发展,学者开始尝试使用数值模拟法求解边坡稳定性问题,在此过程中涌现了多种具有商业性质的岩土计算软件^[57-66]。如 Midas GTS NX 软件^[67]、Geo-Slope 软件^[68]、FLAC3D 和 FLAC/SLOPE 软件^[69]、Phase2 V6.0 软件^[70]、PLAXIS 2D 和 PLAXIS 3D 软件^[71,72]、Z-SOIL.PC 软件^[73]、GEO4FEM 软件^[74]和 RFPA 软件^[75]。在实际研究中,众多学者利用上述软件对边坡稳定性问题展开了深入分析。例如,孙东亚等^[76]使用非连续变形分析(discontinuous deformation analysis, DDA)法分析了反倾岩质边坡的失稳机制;赵尚毅等^[77]通过节理岩质边坡的非线性有限元强度折减分析,拓展了稳定性研究的新思路;万林海等^[78]采用 FLAC3D 评估了黄土边坡的稳定性;蔡跃等^[79]通过 UDEC 软件模拟了日本某水电站倾倒边坡的破坏过程;张国栋等^[80]提出了基于有限元法的抗震设计分析方法。在方法比较方面,周世良等^[81]对有限差分法和极限平衡法进行了对比,分析了剪胀角、泊松比和抗拉强度对边坡稳定性的影响;邓琴等^[82]采用边界元法进行稳定性分析,并与其他方法进行验证。对于边坡破坏过程的模拟,石露等^[83]采用 FLAC3D 分析了降雨对露天矿边坡稳定性的影响;石崇等^[84]利用离散元法研究了边坡破坏的扩展演化机制;Miki 等^[85]构建了数值流形方法与非连续变形分析(coupled numerical manifold method and DOA, NMM-DDA)耦合模型,模拟了地震诱发滑坡;Zhang 等^[86]基于有限元法分析了边坡应变软化过程;李剑等^[87]提出了基于 FLAC3D 的滑面识别方法。在方法集成与精度优化方面,刘兴宁等^[88]联合有限差分法和极限平衡法搜索了最危险滑弧;Kelesoglu^[89]提出了边坡曲率与安全系数之间的关系;沈华章等^[90]基于矢量和法与通用离散元程序(vector sum method - universal

distinct element code, VSM-UDEC)评估了锦屏水电站边坡稳定性;王述红等^[91]运用 NMM 模拟了岩体破坏过程。此外, Singh 等^[92]对二维与三维模型的模拟结果进行了对比,验证了其安全系数的一致性;张彦飞和陈浩^[93]针对洞口段边坡分析了不同工况下的稳定性并提出了加固建议;任强^[94]基于 FLAC3D 得出了最危险破裂面的安全系数;闫俊等^[95]利用离散元法分析了开采前后高陡边坡的稳定性;邢军等^[96]结合隧道施工与暴雨情境研究了滑坡体边坡稳定性;Espada 等^[97]分析了白鹤滩左岸边坡局部破坏机制。近年来研究仍在不断深化, Mebrahtu 等^[98]运用有限元极限平衡法和强度折减法,研究了由多种岩性组成的复杂边坡的稳定性;王东等^[99]则采用数值模拟方法分析了采场深部边坡的潜在滑坡机制,并拟合了潜在滑体的空间形态方程。

1.2 反倾岩质边坡破坏机理研究现状

1.2.1 工程地质分析法研究现状

早期学者一般通过现场地质调查对反倾岩质边坡的破坏特征与机理进行研究,这种基于专家经验的定性总结边坡变形破坏机理的方法称为工程地质分析法。其中 Talobre^[100]首次描述了反倾岩质边坡的倾倒变形。具有开创性的是 Freitas 和 Watters^[101]将倾倒变形作为一种特殊的边坡变形类型。

Goodman 和 Bray^[21]将边坡的倾倒破坏归纳为三种基本类型:弯曲倾倒破坏、块体倾倒破坏和块状弯曲倾倒破坏。此外, Goodman 和 Bray 还提出了次生倾倒破坏的概念,指出其主要破坏机制是由于岩体强度的弱化或剪切滑移诱发的继发性倾倒变形。Evans^[102]进一步指出,岩体由于风化、蠕变及应力重分布等因素引起的强度降低及不均匀变形,是次生倾倒发生的主要原因。王耕夫^[103]则从地质背景出发,定性分析了反倾岩质边坡发生倾倒变形的机制,强调了边坡倾倒破坏与区域地质构造背景和边坡体自身的结构条件密切相关。Cruden 和 Hu^[104]在加拿大艾伯塔地区发现了顺层倾倒的现象,并将其细分为三种类型:块状弯曲倾倒、多重块体倾倒和人字形倾倒。

Nichol 等^[105]指出,反倾岩质边坡中存在两种截然不同的破坏行为模式:①延性、自稳性的弯曲倾倒,常出现在仅发育单一优势节理组的软弱岩石中,典型表现为在变质岩中出现的大挠曲型倾倒,具有一定的延展性和自我稳定能力。②脆性、突变性的块体倾倒,通常发生于存在持续性且与坡面走向相交(沿下坡方向或水平交叉)节理的强岩石中,如花岗岩类的岩体,其破坏过程更具突然性,呈现典型的块体倾倒失稳特征。Sagaseta 等^[106]则进一步发展了相关理

论,给出了反倾岩质边坡中块体倾倒破坏的极限平衡一般解析解,为定量分析此类变形破坏提供了理论基础。

Alzo'ubi 等^[107]指出,抗拉强度是控制反倾岩质边坡倾倒破坏的关键因素,而完整岩石的摩擦角对倾倒破坏机制的影响不显著。Majdi 和 Amini^[108]认为,岩层结构中的弱面对拉应力极其敏感,反倾岩体中岩层倾斜叠加引起的弯矩拉应力是导致破坏的主要原因。张以晨等^[109]利用弯曲-拉裂模型研究了反倾岩质边坡破坏模式,通过力学分析建立了反倾岩质边坡各块的力学模型,研究发现板梁容重越大、高度越大、宽度越小,其倾倒破坏越明显。林葵^[110]通过对北非某反倾岩质边坡的工程地质调查,系统分析了其倾倒破坏机理,并归纳了不同演化阶段的破坏特征。李霍等^[111]以贵州某倾倒变形边坡为例,在失稳过程分析基础上,提出了结构面控制下边坡失稳的四个阶段模型,为工程判识提供了阶段性依据。李高勇等^[112]基于时效变形理论,提出了反倾岩质边坡倾倒破坏的时空演化规律,强调了长期作用下变形积累对最终破坏的重要性。Wang 等^[113]研究发现,三峡库区软岩互层边坡的倾覆破坏机制与以往认知不同,其倾倒破坏过程起始于冲蚀缺口的形成;采用地质力学方法,推导了安全系数计算公式,并据此估算出该边坡发生倾倒破坏所需时间约为 50 年。蔡静森^[114]利用悬臂梁极限平衡力学分析发现,随着岩层倾角增大,倾倒变形量增大,倾倒区先增大后减小,倾倒破坏由难变易再变难;同时,随着岩层厚度的增大,抗弯曲倾倒能力增强。王林峰等^[115]建立了由一组结构面切割时反倾岩质边坡的基于断裂力学计算的模型,并引入 Kelvin 蠕变模型为反倾岩质边坡的防治与监测提供了理论依据。

Alejano 等^[116]通过理论分析与室内试验系统研究了矩形棱柱体试块边缘圆角对其在实验室及现场抗倾覆稳定性的影响,指出圆角处理对试块的受力状态具有不可忽视的调节作用。郑允等^[117]基于极限平衡分析法得出了破坏基准面与层面的法向夹角与切坡角度成正比,与厚度成反比;自然坡度越陡,破坏区范围越大;随着切坡角度增大,破坏模式由倾倒-滑坡破坏转变为倾倒破坏。Liu 等^[118]提出了一种定性评分系统,为大型深层变质岩体倾倒过程的定量研究提供了分析基础。同时,有学者指出,自然边坡中发生的大规模倾倒变形,可视为深部蠕变变形的结果。Zhang 等^[119]将倾倒边坡划分为稳定区、拉伸区与剪切带三部分,提出了最危险潜在破坏面的倾角随边坡倾角和高度的增加而增大,而稳定系数则与坡角和坡高呈负相关关系。赵华等^[120]将变形过程划分为倾倒启动阶段、稳态变形阶段、快速失稳阶段,分别对应衰减蠕变、稳态蠕变、加速蠕变的变形特征,并以此来判别倾倒边坡稳定性。冯细霞等^[121]探究了地震作用下动力响应特性对反倾岩质边坡的影响,得出了近坡处剪切裂缝和张拉裂缝相互贯通,形成台阶式破坏,边坡主体沿节理面发生破坏的结论。Mu

等^[122]研究了岩体块体倾倒型边坡破坏及时预测的演化机制,考察了边界形成与倾倒破裂面渐进发展的关系。Wang 等^[123]提出了一种新的软硬互层反倾岩质边坡稳定性评价理论方法。

1.2.2 物理模型试验法研究现状

随着相似理论的发展,各类物理模型试验系统如雨后春笋般兴起,广泛应用于反倾岩质边坡稳定性研究中,极大丰富了该领域的试验基础和认识手段。左保成^[124]开展了多组物理模型试验,系统探讨了某高速公路段反倾岩质边坡的稳定性;其后,左保成等^[125]通过室内物理模型试验发现,反倾岩质边坡的主要变形破坏形式为倾倒变形折断破坏,且破坏最先发生于坡顶,具有明显的先导特征。卢增木等^[126]基于物理模型试验,指出岩层层厚及层面强度是影响反倾岩质边坡稳定性的关键因素,揭示了结构面的控制作用。蔡国军和裴钻^[127]结合西南某大型水电站边坡开挖工程实例,选取典型主剖面,采用底摩擦模型试验法进行了开挖稳定性分析,提出了合理的开挖坡比建议。Adhikary 和 Dyskin^[128]利用离心模型试验研究了反倾岩质边坡的破坏机制,结果表明,岩层层面的内摩擦角在决定边坡破坏模式方面具有重要作用。陈孝兵等^[129]同样采用底摩擦模型试验,深入探讨了边坡倾倒破坏机理,进一步印证了结构控制与几何特征对倾倒变形行为的影响。罗先启和葛修润^[130]基于相似现象与相似理论,推导演算了滑坡模型试验 17 个常用参数的相似判据,从理论上克服了传统相似理论用于滑坡模型试验无法保证模型与原型之间主要物理力学参数严格相似的问题。

刘云鹏等^[131]开展了扰动力作用下反倾岩质边坡的物理模型试验,结果表明在动态荷载条件下,软弱岩层易发生张拉破坏,并诱发整体倾倒失稳,突出了地震、爆破等外部扰动对倾倒行为的放大效应。一些学者进行了反倾岩质边坡倾倒破坏过程的物理模型试验^[132-134]。如肖慧^[135]以云南磷化集团尖山磷矿为研究对象,以河沙和石膏为材料进行模型试验,研究了边坡开挖深度、岩层角度、岩层厚度对边坡稳定性的影响。何博等^[136]通过室内岩石力学试验选取河沙与石膏作为模拟现场岩体的材料,并结合模糊数学综合评判法对不同砂膏比的材料进行择优分析,最终确定用砂膏比 8:1 的材料模拟该铝土矿地下开采。陈博照和张崇岐^[137]提出的混料模型混合准则最优设计方法,弥补了以往单一准则选型的局限性,为模型材料配比优化奠定了理论基础。侯定贵^[138]进行了室内物理模型试验并研发了小型监测锚杆进行深部围岩巷道稳定性的监测预警,结合数值模拟试验为工程应用提供了参考依据。陈从新等^[139]通过物理模

型试验分析了弯曲倾倒破坏的全过程及其控制机制,揭示了不同演化阶段的应力响应与形变特征。Amini 等^[140]指出,坡脚部位是倾倒破坏的起始区域,坡脚岩块受上部滑体压力产生翻转,随后诱发整体失稳,提出了边坡局部—整体失稳的连续演化模式。秦洪岩等^[141]采用正交试验设计方法确定了试验方案,应用多元线性回归和高斯消去法解出最优配比。赵华等^[120]对反倾岩质边坡的变形过程进行了阶段划分,对应于不同的蠕变行为(衰减、稳态、加速),提出了动态演化的判断准则。冯细霞等^[121]研究了地震作用下的动力响应特征对边坡稳定性的影响,指出地震扰动会显著加快倾倒破坏的发生与扩展。Li 等^[142]通过大型振动台试验,揭示了不同类型边坡在地震作用下的差异性破坏特征,强调了岩性差异对变形机制的主导作用。Zhao 等^[143]制作相似材料进行反倾层状灰岩边坡和页岩边坡物理模型试验,研究结果成功复现了反倾岩质边坡的整个倾倒变形过程,揭示了不同岩性的变形机制和破坏模式。

1.2.3 数值模拟法研究现状

随着计算机技术的快速发展,数值模拟法在边坡工程中的应用逐渐普及,为深入揭示反倾岩质边坡在不同工况下的倾倒变形机制提供了强有力的工具支撑。各国学者基于不同的数值模拟法与岩石力学理论,对多种典型工况下的破坏过程进行了定量研究,取得了重要成果。Nichol 等^[105]采用 UDEC 软件研究发现了反倾岩质边坡存在两种典型的破坏行为:一是在具有单一优势节理组的软弱岩石中表现为延性、自稳性的弯曲倾倒,如变质岩中的大挠曲倾倒;二是在具有持续性、下坡方向或水平交叉节理的坚硬岩石中,倾倒破坏呈现为脆性、突发性的块体倾倒,如花岗岩边坡的失稳特征。徐佩华等^[144]利用 FLAC3D 模拟了河谷下切过程中反倾岩质边坡的响应特征,揭示了地形演化过程对边坡失稳的深层次影响机制。León-Buendía 等^[145]同样采用 UDEC 进行了倾倒变形机理的模拟分析,进一步验证了节理结构对变形模式的主控作用。杨绪波等^[146]聚焦于“上硬下软”结构组合的反倾边坡,通过数值模拟法再现了边坡开挖过程中的变形与失稳过程,指出软弱岩层的蠕变破坏常是破坏的先导机制。纪玉石等^[147]将采矿活动诱发的倾倒变形过程作为研究对象,通过动态开挖-卸荷模拟展示了不同采深和节理组合对倾倒趋势的影响。庞波^[148]利用流变理论探究了倾倒变形的时效性,将弯曲倾倒岩体抽象成悬臂梁的叠加,研究了倾倒变形发展演化历史。范鹤等^[149]基于相似理论,在模型上逐层填土、分级加载来模拟现场施工过程,用有限元软件 ANSYS 进行涵洞受力全过程的数值模拟,并将数值模拟结果与模型试验推算出的原型结构应力数据加以对比。谢莉等^[150]

以黄登水电站边坡为案例,采用块体离散元法,模拟其开挖过程中诱发的倾倒破坏过程,重点揭示了结构面贯通对破坏演化的关键影响。Brideau 和 Stead^[151]利用三维离散元程序研究了边坡剖面走向对倾倒破坏机制的影响,发现沿走向延展的坡面更容易引发大规模三维块体倾倒失稳,且在后期大变形过程中具有显著的控制作用。

Zhang 等^[152]提出的数值流形法可有效处理岩体中高度不连续结构,该方法在模拟反倾岩质边坡倾倒破坏过程中能更真实地再现节理扩展和块体失稳的全过程。Tatone 和 Grasselli^[153]开发了一套基于蒙特卡罗法的概率分析程序,创新性地将分析过程集成至电子表格中,用于快速评估反倾岩体边坡在不确定性条件下的稳定概率。宋彦辉等^[154]应用节理有限元法研究发现,剪切应力是诱发反倾边坡失稳的重要控制因素,节理面的方向性与力学参数对破坏模式具有显著影响。刘海军^[155]通过数值模拟揭示了反倾岩质边坡的破坏演化路径:从早期的弯曲变形发展至弯曲倾倒,再至倾倒折断和最终的滑移剪断,明确了破坏过程的阶段性和渐进性。刘顺昌^[156]以如美水电站边坡为例,采用离散元法成功模拟了开挖条件下的倾倒破坏过程,重点分析了坡脚失稳对整体破坏的牵引作用。何传永等^[157]运用 DDA 模拟了倾倒变形中的“制动”阶段,即在某些约束条件下,边坡变形出现短暂停滞或减缓现象,为灾变前识别提供了思路。Mohtarami 等^[158]建立了适用于反倾岩质边坡的圆弧倾倒组合破坏理论模型,并配套开发了计算程序,实现了对组合破坏模式的高效求解。王立伟等^[159]基于 UDEC 分析了影响反倾岩质边坡稳定性的多种因素,如岩层倾角、节理特征及边坡几何形态等,提出了影响程度排序及其物理机制。谢良甫^[160]结合岩体实验与模拟分析,指出影响倾倒破坏的关键因素依次为几何特性、坡脚结构、岩体密度和岩层厚度,其次是岩层倾角与内摩擦角,且倾倒变形随坡度和倾角增大而增强,随岩层厚度增加而减弱。Li 等^[161]提出的连续-离散元法可实现从连续破坏到不连续失稳的渐进模拟,特别适用于反倾岩质边坡这种耦合型非连续变形体系。岑夺丰等^[162]采用 PFC 分析发现,岩层倾角与节理强度对块体滑动路径和速度具有决定性影响,模拟再现了块体从接触到整体倾倒的全过程。Lian 等^[163]使用 Distinct Lattice Spring Model 模拟了节理边坡的微观破裂过程,揭示了细观结构对整体变形机制的控制路径。赵鑫^[164]基于 RFPA2D-SRM 建立了二维边坡模型,比较了无节理、自然状态及加固状态下的安全系数,证实节理是反倾岩质边坡失稳的首要诱因。龚逸非等^[165]开展相似材料物理模型试验并着重研究反倾岩质边坡在构造应力、河流快速下切以及降雨条件下发生块状-弯曲倾倒变形失稳的各阶段演化过程,并结合离散元数值试验分析边坡岩层在

各工况下的宏观变形特征、关键点的位移变化规律、最大弯折面的演化、岩层塑性区的分布等。

综上所述,由于反倾岩质边坡的变形破坏模式复杂多样,影响因素众多,且通常不存在单一、明确的滑动基准面,传统的连续介质力学理论难以全面解释其实际工程中的变形破坏现象。此外,不同结构类型的岩体(如板状、片状、块状)在变形破坏特征上存在显著差异,无法通过单一破坏机理进行统一解释。因此,必须综合运用理论分析、数值模拟与物理模型试验等研究手段,系统识别和筛选出影响反倾岩质边坡破坏机制的关键参数或参数组合。值得注意的是,无论采用哪种研究方法,其所依赖的地质力学参数的准确性、可靠性和代表性,都直接影响机理分析结果的科学性与实用性。因此,在开展倾倒机制研究之前,必须对地质概化模型、力学模型、岩体基本力学参数及有效边界条件等进行严格的反演与动态修正,确保其反映出的破坏特征与实际工况具有较高的一致性。只有在此基础上,才能在不同工况和影响因素下进一步开展系统的理论分析、数值模拟和物理模型试验,通过解析解、数值解与试验解的相互验证,深入揭示反倾岩质边坡的倾倒变形与破坏机制。

1.3 反倾岩质边坡变形控制方法研究现状

1.3.1 小变形支护措施

Aydan 和 Kawamoto^[166]提出了一种用于分析不同加载条件下边坡倾倒破坏的力学方法,并在此基础上引入了考虑完全黏结锚杆加固的防护措施。娄国充和周德培^[167]针对软岩高边坡开展了土钉支护稳定性研究,系统分析了土钉加固在提升边坡稳定性方面的力学作用机理。吕庆^[168]通过建立边坡稳定性有限元分析法,论证了该方法的特点和优点;通过建立土拱形状的回归方程,揭示了桩土相互作用的变化规律,提出了充分利用桩后土拱效应加强支护效果的策略;通过建立三维有限元分析法,揭示了锚索框格梁外锚结构加固破碎岩质边坡的力学实质。叶海林等^[169]通过 FLAC3D,基于动态强度折减理论研究了地震荷载作用下的锚杆加固边坡的稳定性,求解了其安全系数。结果表明,强度折减的动力分析方法相比于传统的拟静力分析方法可以充分考虑地震荷载的动力作用,以及锚杆与岩体之间的相互作用。

Li 等^[170]提出了一种粒子群优化算法与支持向量机算法相结合再联合数值分析的综合方法,可以有效确定桩间距、桩长、截面尺寸等合适的加固参数,

既保证了边坡稳定,又降低了工程造价。李宇男^[171]提出了对边坡治理要充分考虑到外界条件限制,采用多种加固手段相结合的联合支护措施,对影响效果的因素采用正交法处理以便对方案进行优化以达到最佳效果。Liu 等^[172]根据弹性地基梁理论,建立了土工格室加固边坡计算模型,通过有限元计算模型比较了不加筋只加抗滑桩的情况,得出采用抗滑桩和土工格室加固边坡可以增加桩间距或减小桩截面,从而提高边坡稳定性的结论。王祥任^[173]采用经典力学理论对反倾岩质边坡进行了研究,通过建立不同的力学模型,得出反倾岩质边坡具有结构承载调整—结构强度弱化—结构失稳的变形破坏规律,并根据此结果提出了采用预应力锚杆/索对反倾岩质边坡进行支护的方法,采用坡顶水平位移计、垂直位移计、深孔位移计对边坡进行监测。敬静等^[174]利用 FLAC3D 系统分析了桩基对节理岩质边坡的加固效果,重点探讨了节理倾角、桩基长度、桩基位置及桩基自身应力变化与边坡稳定性的关系。王智德等^[175]提出了一种预支护加固岩质边坡的支护方法,研究了该方法的最佳支护水平角,并给出了相应的计算公式。随后,采用 UDEC 软件对边坡稳定性及该加固方法的适用性进行了数值模拟分析。

胡亚东^[176]通过研究苗尾-功果桥水电站右岸坝反倾岩质边坡结构特征及倾倒变形发育特征,对反倾岩质边坡提出了采用堆渣压坡、系统锚固支护、边坡排水的加固措施组成的五种加固方案,并通过离散元数值模拟和极限平衡力学分析法对加固方法进行了分析验证。杨逾和郭锐^[177]基于强度折减理论,采用 FLAC3D 对不同开挖与支护顺序下预应力锚索对边坡加固效果进行了对比分析。郑允等^[178]提出了反倾岩质边坡在锚杆局部加固后的力学模型与稳定性分析方法,并认为在使用全长黏结型锚杆对反倾岩质边坡弯曲倾倒破坏进行加固时,应对边坡的叠合倾倒区进行重点加固,并减小锚杆与岩层面的夹角,这将有助于充分发挥锚杆对岩层的阻滑作用。通过建立锚杆局部加固的边坡力学模型,并采用 UDEC 进行计算分析,结果为理论解与模拟值高度一致。余寿全等^[179]针对该类边坡的倾倒变形特征,提出了“预应力锚索+锚筋桩+钢筋混凝土挡墙”的综合治理措施。付晓^[180]依据相似理论,通过振动台试验模拟了边坡加固效果,提出了框架锚索-抗滑桩支护可在地震作用下保持较强结构抗性,两者协同作用可为地震区支护结构提供指导,具有重要的工程应用和理论意义。Luo 等^[181]介绍了路堑边坡的加固与防护技术,通过对国内外边坡加固技术进行比较,提出了模糊综合评判与层次分析法相结合的评价方法,对今后路堑边坡的发展提供了很好的参考。Liu 等^[182]通过现场调查、变形监测和