

Fenqu Kaicai Lutian Meikuang

Bianpo Wendingxing Fenxi Lilun Yu Shiyen Yanjiu

江苏省基础研究计划（自然科学基金）-青年基金项目资助（BK20160259）
中国博士后科学基金面上项目资助（2015M580491）
国家自然科学基金面上项目资助（51574222、51674245）
江苏省博士后科研资助计划资助项目（1601177C）

分区开采露天煤矿 边坡稳定性分析理论与实验研究

韩流 舒继森 罗伟 尹正文 著



中国矿业大学出版社

江苏省基础研究计划(自然科学基金)—青年基金项目资助(BK20160259)

中国博士后科学基金面上项目资助(2015M580491)

国家自然科学基金面上项目资助(51574222、51674245)

江苏省博士后科研资助计划资助项目(1601177C)

分区开采露天煤矿边坡 稳定性分析理论与实验研究

韩 流 舒继森 罗 伟 尹正文 著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书根据时效边坡理论,综合运用岩石力学、边坡工程学、露天采矿学的基本知识对露天矿采、排动态时空发展过程中高陡边坡形成机理、岩体流变特性及稳定性进行了全面、细致的研究。基于岩体时效强度、外部力学因素建立边坡时效稳定分析的理论模型;结合排土场散体物料重塑强度的实验规律,揭示了排土场的动态稳定性;根据排土场力学结构,给出了“自锁”及“解锁”状态的判别准则,提出了排土场参数调整及稳定控制方案。

图书在版编目(CIP)数据

分区开采露天煤矿边坡稳定性分析理论与实验研究 /
韩流等著. —徐州:中国矿业大学出版社, 2017. 3

ISBN 978-7-5646-3458-2

I. ①分… II. ①韩… III. ①煤矿开采—露天开采—
边坡稳定—研究 IV. ①TD824.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 026192 号

书 名 分区开采露天煤矿边坡稳定性分析理论与实验研究

著 者 韩 流 舒继森 罗 伟 尹正文

责任编辑 李 敬 郭 玉

出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)

营销热线 (0516)83885307 83884995

出版服务 (0516)83885767 83884920

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司

开 本 850×1168 1/32 印张 4.625 字数 120 千字

版次印次 2017 年 3 月第 1 版 2017 年 3 月第 1 次印刷

定 价 26.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)



前 言

大型近水平煤层露天煤矿在我国的建设 and 生产已经初具规模,分区开采方式极大地减少了采场边坡的服务时间,为采场端帮边坡角度的加陡提供了条件。本书基于时效边坡理论,对露天矿时空发展过程的边坡结构及应力发展规律进行研究,分析了边坡中存在的应力类型及露天开采诱发的感生应力,并总结出重力场和水平应力场在开挖降段和靠帮开采过程中的感生规律。

书中在老化理论的基础上衍生了软岩抗剪强度衰减规律,基于力学参数的时效表达式推导出了软岩边坡平面和圆弧两种失稳模式的时效稳定系数计算公式。根据硬岩结构面的渐进破坏模式,研究了渐进破坏过程中的时效稳定性分析原理,推导出了滑体发育过程的时效稳定系数迭代计算方法,揭示了平面和折面滑坡在渐进破坏过程中的时效稳定性变化规律。将水产生的动、静水压力以及爆破振动产生的横、纵方向主应力纳入到边坡稳定性分析中,分别推导出考虑水压力和振动效应的稳定系数计算公式。同时,借助数值模拟揭示了多点同、异时振动对边坡稳定系数和变形情况的影响规律。

内排土场稳定性一直是影响露天矿生产安全的重要因素。内排土场散体物料的物理力学性质会随堆载时间和深度的变化而变化,本书通过实验证明了散体物料在重塑过程中平均孔隙比不断降低,抗剪强度呈线性增长,同时给出了不同岩性散体物料黏聚力和内摩擦角在重塑过程中的发展规律。借助理论分析,给出了排土场基底自锁及解锁状态的判别准则,采用数值模拟,分析得到了

排土场动态发展过程的稳定系数变化规律。结合影响排土场稳定性的关键因素,制订排土场结构和稳定性的优化方案。

本书的出版得到了中国矿业大学研究生院的大力支持,感谢中国矿业大学矿业工程学院露天开采及边坡工程研究所各位老师的帮助,特别感谢舒继森教授的悉心指导。感谢在参考文献中列出的以及没有列出的所有给予我启发的研究成果的作者。

由于作者水平有限,书中难免有不足之处,希望广大读者提出批评和改进意见。

作 者

2017 年 1 月

目 录

1 绪论	1
1.1 选题背景与研究意义	1
1.2 国内外研究现状	4
1.3 主要研究内容和方法	14
1.4 创新点	17
2 露天矿时空发展过程边坡结构及应力发展规律	19
2.1 时空发展过程边坡几何结构变化规律	19
2.2 边坡应力分异规律	20
2.3 端帮时效稳定系数发展规律	33
2.4 本章小结	37
3 边坡原始岩体时效强度及稳定性变化规律	39
3.1 软岩抗剪强度衰减规律	39
3.2 软岩边坡时效稳定性分析方法	41
3.3 硬岩结构面破坏模式	50
3.4 渐进破坏过程的时效稳定系数计算原理	52
3.5 本章小结	64
4 外部因素对露天矿边坡致损规律研究	65
4.1 水对边坡稳定性的影响	65
4.2 振动对结构面渐进破坏的影响	71

4.3	爆破振动对边坡稳定性的影响规律·····	76
4.4	爆破振动造成的边坡变形·····	83
4.5	本章小结·····	90
5	散体物料重塑强度发展规律实验研究·····	92
5.1	散体重塑变形规律及影响因素·····	92
5.2	实验方案设计·····	95
5.3	实验研究及结果分析·····	97
5.4	排弃物综合抗剪强度原位实验测定·····	105
5.5	排土场时效稳定性研究·····	112
5.6	本章小结·····	115
6	露天矿煤层底板几何及力学特性与排土场结构的 耦合研究·····	117
6.1	露天矿煤层底板几何及力学特征·····	117
6.2	排土场稳定性控制因素分析·····	122
6.3	排土方案及排土场几何参数优化·····	128
6.4	本章小结·····	132
7	结论和建议·····	133
7.1	结论·····	133
7.2	建议·····	135
	参考文献·····	136

1 绪 论

1.1 选题背景与研究意义

1.1.1 选题背景

能源作为国民经济发展的基础动力,推动着中国改革开放和社会建设的飞速发展。煤炭在我国能源结构中一直占据主要地位,尽管新型能源不断发展,削弱了煤炭所占的能源市场份额,但其控制地位依然没有被撼动,因此,在相当长的一段时间内,煤炭仍扮演着主力能源角色。

露天开采作为一种基本的开采方式^[1],凭借开采成本低、生产效率高、资源回收率高等优点,而被越来越广泛地应用到煤炭资源开采中。统计数据显示,2013 年我国露天煤矿年产总量已达到 6 亿 t,占全国煤炭年产总量的 17%左右,而且近几年的露天采煤量呈现出良好的增长势头。中国大型能源企事业单位在露天煤矿建设方面的投资逐步加大,露天开采成为未来能源回收的主要发展方向。

目前,中国已经形成初具规模的露天矿群,其中神华准格尔能源有限责任公司下辖黑岱沟和哈尔乌素两大露天矿,年产原煤总量超过 60 Mt,剥离量超过 2 亿 m³。中煤平朔集团有限公司拥有安太堡、安家岭和平朔东露天矿 3 座千万吨级大型露天矿山,仅该煤业公司年露天产煤量就接近 1 亿 t。内蒙古锡林浩特胜利煤田

有胜利东二号和胜利西一号露天矿,设计年产量均在 20 Mt 以上。除此之外,内蒙古还有白音华、霍林河、伊敏河等多个矿区,云南省有先锋和小龙潭等大型露天煤矿。中国的露天煤矿正朝着大型化、规模化和集群化的方向发展。

1.1.2 研究意义

我国大型露天煤矿煤层多数为复合煤层近水平赋存、采深多达数百米,采用分区开采、高强度推进,并实行压帮内排^[2]。为了采出有用矿物,需要对上层覆盖物进行率先剥离,剥离的土石方移运至排土场排弃,在采、排交替动态发展过程中^[3],深凹采场和高陡边坡逐渐形成,因此,露天矿的动态推进过程可以形象地诠释为“在实体上构造空间”和“在空间上构造实体”的交互过程。

露天开采有诸多独具特色的优点:生产能力大,最大的年产量已达到 35 Mt;回收率高,可以达到 95% 以上;劳动生产率高,全员劳动生产率高达 100 t/工以上;生产成本低;安全程度高;劳动条件好,机械化程度和集中化程度高^[4],便于实现现代化管理;露天煤矿生产与生态环境重建一体化。露天开采的诸多优点促使其在当前的社会形势下迅速发展,但近几年也暴露出一些问题,这些问题促进露天开采技术推陈出新、不断进步。

随着能源政策及煤炭市场的不断变化,为了保持良好的市场竞争力,降低开采成本、提高矿山经济效益已成为我国大型能源集团的主要发展方向。剥采比作为衡量露天开采效率的重要指标,已成为现有大型露天矿着力降低的指标之一。由于采场工作帮、非工作帮、端帮、排土场高陡边坡的形成、几何参数、服务状态是一个动态变化过程,具有典型的时效性,因此,提高端帮的整体边坡角,实行陡帮开采,并在端帮稳定期限内利用内排压帮保证其稳定,已成为我国大型露天矿降低剥采比、提高经济效益的主要方

式。时效边坡理论的提出,为我国大型露天矿实行靠帮开采、降低剥采比提供了有力的技术支持和理论保障^[5]。

露天开采过程中,对原始地表的高强度开挖破坏了原始地应力平衡状态,不平衡应力分异卸荷,造成边坡临空面或表层岩石圈松动变形。受到地质条件、自然风化等因素的影响,原岩边坡完整性逐步退化,结构面渐进发育,边坡的稳定问题逐渐凸显出来。高陡边坡的稳定性在露天煤矿生产过程中至关重要^[6],一直是困扰矿山安全生产与环境生态的重大事件。因此,对于大型露天矿山的高陡边坡岩体强度衰减机理、结构面渐进破坏特征及稳定性发展规律的研究,能够促进露天矿山边坡失稳预测及治理方案的不断发展,同时,在明确岩体时效特性和边坡时效稳定性的前提下,能够更好地实施端帮靠帮开采,降低剥采比,这也是露天开采及边坡工程技术人员一直致力研究的科研课题。

传统的采场、排土场边坡角度设计标准是基于静态、长久稳定的理想状态,边坡角度取值过于保守。同时,为了简化分析程序,将不规则三维边坡简化为二维问题处理,得到的稳定系数并不能全面反映露天矿三维边坡的稳定性。而且采场边坡均按照永久服务期限设计,并未考虑采排过程中边坡周期性形成、消失以及时效服务期限缩短等因素的影响。以上诸多因素导致整体边坡角取值过于保守。在当前的市场竞争形势下,迫切地需要提高煤炭资源回收率、降低剥采比、压缩生产成本,以保证露天开采的煤炭具有良好的市场竞争力。这些目标的实现均依靠边坡评价与设计理念、标准的不断发展和完善。

2006年,中国矿业大学才庆祥教授提出了时效边坡理论^[2],在进行边坡稳定性评价及分区开采的露天矿端帮角度设计时,充分考虑边坡的暴露时间^[7]及服务周期,规避了传统分析方法和设计标准过于保守的问题,开创了露天矿边坡优化设计的新局面。时效边坡理论出现之后,中国矿业大学成功地将该理论应用于中

煤平朔安家岭露天煤矿的靠帮开采作业上,成功实现了将端帮整体角度由 36° 提高到 42° ,增加煤炭资源回收量 26.56 万 t,经济效益超过 2 500 万元,经济效益和社会效益显著。

在良好的地质条件下,露天矿端帮可以有效地实施靠帮开采,其操作方式是通过提高边坡角度来降低整体剥采比。为了保证端帮边坡角加陡之后依然满足工程上的稳定性要求,需要采用内排土场高段排土台阶及时跟进,将坑底距离缩短至现场作业所需的最小安全距离^[8]。降低边坡暴露高度的同时,提供了回填土体的三维弹性支撑,进而确保了端帮边坡的安全稳定。

露天矿时空动态发展过程中,岩体强度具有时效特性,对于边坡临空面岩体,长时间暴露在自然环境中,经历开采作业和风化共同影响,其结构完整性和单元体强度会随时间增长逐步衰减;对于边坡内部岩体,受到纵、横结构面的交错切割,强度受控于结构面强度,随着结构面的渐进贯通,岩体抗剪强度逐步弱化;对于排土场排弃的松散岩体,其强度取决于自身的重塑胶结强度;对于季节性冻土地区,岩体强度会随冻融循环而呈现周期性变化。岩体的时效强度直接影响边坡稳定性,因此,对于岩体时效强度变化规律的研究,是时效边坡理论发展及应用的基础。本书借助理论分析和实验手段,研究岩体的时效强度特性及其对露天矿边坡稳定性的影响规律,研究成果对于扩大靠帮开采的应用范围、提升作业的安全性具有良好的工程意义。

1.2 国内外研究现状

露天煤矿作为采掘作业的主要场所,涉及众多的设备和人员。由于地质因素、自然条件及人为因素的交互影响,露天煤矿高陡边坡经常出现滑坡现象。露天矿滑坡作为一种重大的矿山灾害,常常中断交通、侵占采场、摧毁设备、危及人员安全,甚至酿成灾难。

因此,露天矿边坡稳定性问题逐渐成为矿山生产安全的主要问题,滑坡地质灾害也成了制约矿山工程建设的主要因素。虽然国内外对边坡工程的研究一直非常重视,但是边坡工程问题是一个涉及多学科的综合问题,人们距离科学认识采矿活动过程的灾害发生规律和科学防治滑坡灾害仍有较大差距。随着现代力学、计算技术以及计算机科学的发展,国内外在边坡稳定分析方法上一直进行着探索研究,围绕边坡稳定性分析评价核心问题开展研究,使边坡工程这一复杂的强非线性力学问题通过力学模型和新的稳定分析方法进行评价成为可能。迄今为止,已经有很多学者致力于露天矿边坡稳定性的研究,同时在该领域也取得了丰硕的成果^[9]。边坡稳定性评价方法也实现了由定性分析向定量分析、定性和定量综合分析的方向过渡。

1.2.1 国外研究现状

从 20 世纪 50 年代开始,国外的一系列大型边坡崩毁、滑坡等事故,使人们清醒地认识到了边坡破坏力学机理研究的不足,从而促进了边坡稳定性研究。早期对边坡的研究多以长期观测的资料为基础,采用地质历史分析方法进行定性描述。这种方法主要用于天然斜坡的稳定性评价。它主要是在研究斜坡所处位置区域构造运动及地质历史演变的基础上,根据斜坡岩土体的结构、构造等特性,采用“将今论古”的思想,追溯斜坡形成及演化的全过程,对斜坡的稳定状况、发展趋势作出定性评价。

20 世纪 20 年代初,人们认识到边坡稳定性研究必须将地质分析与力学机制分析结合起来,这期间,主要采用极限平衡法^[10]。1916 年,瑞典人彼德森最早提出了条分法,瑞典条分法一般假定滑动面为圆弧,并且不考虑条块间的相互作用力。之后,Fellenius (1936 年)、Bishop (1955 年)、Morgenstern 和 Price (1965 年)、Janbu (1973 年) 等许多学者对条分法进行了改进^[11]。其中,

Bishop重新定义安全系数为沿整个滑裂面的抗剪强度与实际产生剪应力的比值,使得物理意义更明确。简化 Bishop 法假定条块之间只有水平作用力而没有垂向作用力,即要求条块在滑动过程中无垂向的相对运动趋势,运用起来效果更加明显。Janbu 普通条分法假定条块间合力作用点的位置,通过调整作用点的位置以获得比较精确的安全系数。之后产生的 Spencer 法克服了其他方法中只适用于对称性问题的缺点,不需已知滑动方向,还可根据滑面的几何特征,进一步得到各条块局部的稳定性系数及其潜在的滑动方向^[12]。Sarma 法分析节理岩体边坡稳定较为合理,因为该法考虑了滑体本身的强度,可以处理具有复杂结构面的边坡,可以根据坡体内的各类结构面来划分条块并且不要求各条块保持垂直。

近 20 年来,以上常用的极限平衡分析法主要经历了由二维向三维的发展过程^[11],同时考虑了地下水、地震作用等的影响。在边坡稳定分析中,尽管条分法有着多种不足,但因其简单而得到最广泛的应用。有许多学者研究了露天矿边坡稳定的基础、稳定性分析方法、滑坡预测方法等,取得了长足进展。Budiansky Bernard 等^[13]对裂隙材料的弹性模量进行了研究(1976);A. Serrano 等^[14]对各向异性裂隙岩体的极限荷载进行过研究(1998);N. D. Rose 等^[15]用反速法预测露天矿岩石边坡的失稳(2007);T. R. Stacey 等^[16]研究了深凹露天矿边坡的稳定性(2003);A. R. Bye 等^[17]2001 年对南非 Sandsloot 露天矿边坡的稳定性进行了分析并对边坡进行了设计;D. Noon 等^[18]用雷达监测管理露天矿有滑坡危险的边坡(2007);Patnayak Sibabrata 等^[19]采用极限平衡法和数字法分析了一个铅锌露天矿边坡的稳定性(2002);K. M. Moffitt 等^[20]对强风化岩石边坡的稳定性进行了分析(2007)。但是,国外学者较少对高陡露天矿边坡进行系统的研究,也未形成相应的、较为完善的理论。

露天矿边坡几何结构常受到矿体形态和开采方式的影响,长期研究发现,不同几何形态的边坡,其稳定性差异较大。对于相同岩性的边坡,凹形边坡由于处于压缩拱状态,侧向阻力大,因此,其稳定性优于平面边坡,更优于凸形边坡。在相同稳定系数 F_s 的前提下,不同形状边坡可以达到的角度(这里称之为等效角度)不同。E. Hoek 等^[21]提出,当露天矿上部境界平面曲率半径与坡高之比 $R/H < 1$ 时,坡角可加陡 10° ;当 $R/H > 2$ 时,可不考虑曲率影响。苏联 H. H. Ермаков^[6]在 20 世纪 60 年代通过模型试验,得到了 R/H 与极限坡角的关系曲线。当 $R/H > 2$ 时,凹形边坡角与平直边坡角相近;当 $R/H = 1$ 时,二者相差 $7^\circ \sim 12^\circ$;而当 $R/H < 1$ 时,二者有明显差异。

露天矿剥离物集中至排土场混合堆载排弃,随着堆载高度的加大,下部散体所承受的堆载压力逐渐增大,随着地表水下渗和地下水位在毛细作用下不断抬升,散体物料开始重塑胶结,胶结强度受到胶结时间、压力和水等多种因素的共同影响。Bojana Dolinar 和 Ludvik Trauner^[22]研究了黏土结构对其不排水抗剪强度的影响,研究表明黏土不排水抗剪强度与含水量之间满足二元非线性函数关系。Shriwantha Buddhi Vithana 等^[23]通过环剪实验研究了超固结比对于抗剪强度的影响规律,结果证明了超固结样本相对于普通固结样本,会在相对较小的剪切位移时达到峰值摩擦系数。2012 年,Binod Tiwari 等^[24]发表了一个新的重塑黏土压缩指数的相关性方程,迅速得到了广泛的认可。P. Vinod 等^[25]探讨了重塑岩体在塑性和半固体状态时的抗剪强度,为研究脆性材料的强度提供了新的视角。

1.2.2 国内研究现状

1960~1970 年,中国科学院武汉岩土力学研究所对大冶铁矿边坡进行了系统的研究,通过勘察试验和计算分析,对边坡稳

定性进行了评价。中国科学院地质研究所在国内首次应用岩体工程地质力学的理论对金川有色金属(集团)股份有限公司露天矿的边坡稳定和岩体变形进行了深入系统的研究。从 20 世纪 70 年代末到现在,国家相继组织“露天矿边坡工程研究”、“高陡边坡综合治理措施研究”、“露天矿边坡岩体类型的研究”、“露天矿边坡稳定性分析综合集成智能研究”、“高陡边坡变形破坏机理试验研究”等“六五”、“七五”、“八五”国家重点科技攻关研究专题,在解决实际边坡工程难题的同时,也提高了我国的边坡工程研究水平,促进了科技发展与进步。

从不同的角度对边坡体的结构及稳定性影响因素等进行分析,极大地推动了边坡稳定性的研究。其中,我国广泛应用的方法之一是不平衡推力法。它适用于任意形状的滑裂面,而假定条间力的合力与上一土条的底面相平行,根据力的平衡条件,逐条向下推求,直到最后一条的推力为零。1994 年,张雄^[26]把刚体极限平衡法和有限元法相结合,采用刚体弹塑性夹层模型把结构离散成任意凸多边形刚性单元,用有限元法进行边坡稳定性分析评价。进入 20 世纪 90 年代,许多新方法被用来解决边坡稳定性问题。1995 年,李文秀用模糊数学模型分析边坡稳定性^[27];1999 年,陈新民和罗国煜用灰色系统分析与评价边坡稳定性^[28];1996 年,夏元友用神经网络评估岩质边坡稳定性^[29];1999 年,冯树仁等提出了边坡稳定性的三维极限平衡分析法^[30]。朱大勇、钱七虎等^[31]提出临界滑动场,能够方便准确地确定任意形状边坡的临界滑动面,临界滑动场本身还可同时反映边坡整体和局部的稳定性。田景富等^[32]利用离散单元方法,分析确定了缓倾斜层状岩质高陡边坡采石切坡前后的变形破坏和演变规律。

随着计算机技术的不断进步,数值模拟被越来越多地应用到边坡稳定性分析中^[33],目前应用比较广泛的有 Geo-Studio、FLAC 等二维模拟软件。另外,FLAC3D^[34]、ANSYS 等三维模拟软件的

应用也比较广泛,其核心的方法是有限单元法^[35-38]。有限元法是一种成熟的数值分析方法,在岩土介质的力学分析中,该方法可以考虑很多地质因素,通过计算滑坡内部的应力场和位移场,给出弹性区、塑性区、张拉区的位置和大小以及坡体的隆起区和塌陷区,便于分析边坡力学机理^[39]。但是,该方法虽然可以采用节理单元模拟坡体的结构面,但问题之一是节理单元的数量不能太多,之二是节理单元本质上仍然是一种有限单元,单元开裂后的力学行为无法模拟下去^[35],因此节理单元有限元法岩体边坡结构模型上有其局限性。

边坡稳定性分析的定性、定量方法,在露天煤矿边坡均得到过较好的应用,并取得了显著的效果。对于现代化大型露天煤矿的生产,既是在地壳实体上构造空间,又是在空间上构造矿山实体的复杂过程,边坡的时效性要在边坡稳定性分析的时候,作为一个重要影响因素充分地纳入其中。

2006年,时效边坡理论^[2,5]的提出,为露天煤矿边坡设计与稳定性分析提供了广义的理论基础。时效边坡作为一种代表露天矿设计分析的新理念,采用动态的参数对露天煤矿边坡进行评价与设计。随着露天采矿设备和采矿技术的发展,露天矿的合理开采深度在不断增大,边坡高度也随之增大,如果边坡角增大,经济效益将显著增加。时效边坡理论在安家岭大型露天煤矿得到了实际生产应用,并研究了开采程序与开采参数对边坡空间形态的影响,初步引入了高陡边坡动态分析理念。在边坡稳定这样一个复杂的力学问题上,引入了时效性因素,不仅从力学机制上科学地分析边坡稳定性及失稳机制,也从时间上合理地控制稳定系数,给露天煤矿的边坡稳定研究提供了新的技术和思路。

在长期的应力作用下,岩体会出现不同程度的塑性变形或弹性松弛,在物理上表现为塑性流变。流变是岩石固有的一种性质,软岩的流变性尤为突出,在蠕变过程中岩体的物理力学参数^[40]都

在不断变化,其中 C 、 φ 等力学参数弱化较为显著,传统的边坡稳定性评价均是选取实验测定的软岩瞬时强度,很少考虑软岩抗剪强度的时效性变化,参数的准确度对边坡稳定性分析结果存在重大影响^[41]。芮勇勤等^[42,43]通过实验测定了软岩边坡蠕变变形失稳机理,并根据老化理论提出了软岩夹层的流变方程,建立了长期抗剪强度与应力作用时间变化的关系,这些研究模型较好地实现了时间因素与岩体强度的有机结合。

露天矿时空动态发展过程的本质是岩体的剥离—移运—排弃,对首采区进行开采时,不具备内排空间,剥离物就近排弃至沿帮排土场。在采排过程中,逐渐形成了几十米至几百米高的复合边坡。由于岩体具有弹、塑性及流变特性^[44],开挖堆载产生的不平衡应力会导致周围区域岩体变形,甚至诱发边坡失稳。开挖堆载造成周围土体的位移已经得到岩土工程界的普遍认可,关于这方面的研究成果也非常丰富。林刚等^[45]借助数值模拟手段研究了不平衡堆载作用下深基坑开挖支护结构形状,揭示了基坑两侧围护结构内力、位移存在的差异,并总结出了有参考价值的基本规律。唐燕蕾、杨石飞^[46]研究了大面积堆载对土地水平位移的影响规律,分析了不同影响因素对水平位移和沉降在空间变化上的影响规律,获得了大面积堆载对周边环境影响的定量分析方法。杨敏等^[47]通过对堆载引起某厂房坍塌事故的分析,揭示了长期堆载是引起邻近桩基较大侧向位移及导致厂房屋顶坍塌的主要原因,同时提出了堆载大小和桩基变位的控制标准。梁迪^[48]对软土地区堆载与基坑开挖对邻近桩基础建筑物稳定性的影响效果进行了分析,根据有限元分析结果确定了建筑物地基的安全开挖深度、安全堆载高度和堆载距离。以上研究为露天煤矿采排工程中的时空发展特点,以及开挖堆载作用下地表岩移规律的研究提供了良好的基础条件。

露天开采会对地层结构及应力状态产生严重的影响,尤其