

节理岩体采动 损伤与稳定

JIELIYANTI CAIDONG
SUNSHANG YU WENDING

■ 常来山 著 ■



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

辽宁科技大学学术专著出版基金资助出版

节理岩体采动损伤与稳定

常来山 著

北京

冶金工业出版社

2014

内 容 提 要

本书系统总结了作者近十年的研究成果,针对目前露天矿节理岩体边坡的稳定性工程评价中存在的岩性参数不考虑时空效应的不足,通过引入岩石损伤力学、断裂力学、数值模拟等理论和技术,以鞍钢眼前山铁矿南帮节理岩体边坡为工程实例,系统探讨了岩体采动损伤演化规律,以及稳定性、可靠性因采场下降、卸荷损伤而呈现的动态变化规律,并进一步应用到露井联采边坡的稳定性评价中。

本书可供采矿、路桥、坝工等工程领域从事岩体开挖的研究、设计、生产的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

节理岩体采动损伤与稳定/常来山著. —北京:冶金工业出版社, 2014. 10

ISBN 978-7-5024-6735-7

I. ①节… II. ①常… III. ①节理岩体—采动—边坡稳定性—稳定分析 IV. ①P583

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 208796 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcb@cnmp.com.cn

责任编辑 宋 良 美术编辑 吕欣童 版式设计 孙跃红

责任校对 李 娜 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-6735-7

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;三河市双峰印刷装订有限公司印刷
2014 年 10 月第 1 版, 2014 年 10 月第 1 次印刷

148mm×210mm; 5.125 印张; 149 千字; 153 页

28.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街 46 号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgy.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

前 言

大型深凹露天矿山生产的关键技术难题是高陡边坡的稳定性评价与控制，总体边坡角的陡缓 1° 之差，关系到数亿元剥弃岩石费用，同时也关系到边坡稳定或失稳的安全风险，严重者可致露天矿提前闭坑。目前边坡稳定性定量分析所用的方法主要是数值模拟和极限平衡计算，随着计算机技术、岩土分析技术的迅速发展和大量岩土工程软件的出现，其模拟分析与计算技术取得重大进展，从而使工程稳定分析的正确性更多地取决于岩体力学参数的合理性。

对于露天矿节理岩体边坡的稳定性分析，目前通常的做法是：根据现场节理发育程度和岩石室内实验结果，按照经验强度准则确定边坡岩体的力学参数，对同一岩性赋予相同的力学参数，进行稳定性计算并做出评价。这种做法与工程实际不尽相符，存在重大缺陷。极限平衡优化搜索确定的危险滑面既高又深，边坡高度是关键因素，且对内摩擦角的取值非常敏感；而通常的矿山边坡岩体，在无大型结构面控制的条件下，其变形破坏大多仅涉及数个台阶的几十米高度范围内，而力学参数中则对黏聚力较为灵敏。现有分析方法出现这一不足的实质，是计算中未考虑到岩体因采动损伤而导致的力学参数的时空效应，边坡面附近的岩体受开挖爆破、采动卸荷影响较大，次生卸荷、爆破结构面发育，岩体破

碎，且伴随采场向下延伸而更趋严重。

岩体是含有断层、节理、层理、片理、微裂隙、晶格缺陷等形态各异、尺寸悬殊的结构面的多裂隙复杂介质。岩体中的节理通常由多次构造运动形成，具有明显的成组性，多组优势节理必然导致岩体力学参数的各向异性。同时，岩体也是伴随着开挖施工，特别是矿山几十年服务期内的采矿爆破生产而质量逐渐劣化的工程岩体，岩体内各点的次生应力场频繁变化调整，卸荷裂隙的产生及原生裂隙的扩展会导致节理裂隙分布规律发生变化，进而表现为强度的非均匀性。伴随着矿山生产开挖及次生应力场的调整，岩体中的节理裂隙可能进一步扩展，导致岩体损伤的增加。开挖扰动对岩体的影响不仅表现为在空间上是变化的，距开挖区越近，岩体的损伤越大，强度越低；而且随着露天采场的下降，岩体的强度进一步降低，具有卸荷意义上的时间效应，是一个不可逆的过程。因此，在岩体边坡稳定性分析中，考虑到多裂隙岩体力学参数的这种时间和空间效应，探讨一条合理解决问题的途径，无疑具有重要的理论价值和实际意义。

本书系根据多年科研工作成果总结编写而成，介绍了系统开发的相应计算分析程序，特点是：以损伤力学基础理论为主线，以解决工程实际问题为目标；系统探讨了考虑岩体因采动损伤而导致的强度空间变异性、时效性和各向异性的稳定性评价问题，论点新颖且贴近客观实际。

十余年的研究过程中，得到了中国矿业大学（北京）

王家臣教授的辛勤指导和煤炭科学研究总院李绍臣博士的大力协助，以及辽宁科技大学同仁和国内众多专家的亲切关怀与大力支持，在此表示衷心感谢。

本书的研究还较肤浅，作者水平所限，书中难免存在谬误和不当之处，敬请读者批评指正。

常来山

2014年8月于辽宁鞍山

冶金工业出版社部分图书推荐

书 名	作 者	定价(元)
中国冶金百科全书·采矿卷	编委会 编	180.00
现代金属矿床开采科学技术	古德生 等著	260.00
采矿工程师手册(上、下册)	于润沧 主编	395.00
我国金属矿山安全与环境科技发展前 瞻研究	古德生 等著	45.00
露天转地下开采围岩稳定与安全防范	南世卿 等	36.00
露天矿深部开采运输系统实践与研究	邵安林 等	25.00
地质学(第4版)(国规教材)	徐九华 主编	40.00
采矿学(第2版)(国规教材)	王 青 主编	58.00
矿产资源开发利用与规划(本科教材)	邢立亭 等编	40.00
矿山安全工程(国规教材)	陈宝智 主编	30.00
矿山岩石力学(本科教材)	李俊平 主编	49.00
高等硬岩采矿学(第2版)(本科教材)	杨 鹏 编著	32.00
金属矿床露天开采(本科教材)	陈晓青 主编	28.00
露天矿边坡稳定分析与控制(卓越工程 师配套教材)	常来山 等编	30.00
地下矿围岩压力分析与控制(卓越工程 师配套教材)	杨宇江 等编	30.00
现代充填理论与技术(本科教材)	蔡嗣经 主编	26.00
矿产资源综合利用(高校教材)	张 佶 主编	30.00
矿井通风与除尘(本科教材)	浑宝炬 等编	25.00
冶金企业环境保护(本科教材)	马红周 等编	23.00
矿冶概论(本科教材)	郭连军 主编	29.00
金属矿山环境保护与安全(高职高专教材)	孙文武 主编	35.00
金属矿床开采(高职高专教材)	刘念苏 主编	53.00
岩石力学(高职高专教材)	杨建中 等编	26.00
矿井通风与防尘(高职高专教材)	陈国山 主编	25.00
矿山企业管理(高职高专教材)	戚文革 等编	28.00
矿山地质(高职高专教材)	刘兴科 主编	39.00
矿山爆破(高职高专教材)	张敢生 主编	29.00
采掘机械(高职高专教材)	苑忠国 主编	38.00
矿山提升与运输(高职高专教材)	陈国山 主编	39.00

目 录

1 绪论	1
2 节理聚类与统计	3
2.1 露天矿边坡工程特点	3
2.2 眼前山铁矿概况	4
2.3 节理聚类分析	6
2.4 节理参数随机统计	12
2.5 本章小结	18
3 节理网络模拟与损伤张量	20
3.1 损伤力学简介	20
3.2 节理岩体损伤张量	24
3.3 节理网络模拟	28
3.4 损伤张量与随机分布	32
3.5 本章小结	37
4 岩体采动损伤分析原理	39
4.1 节理岩体损伤力学分析模型	39
4.2 FLAC 开挖模拟与采动损伤耦合分析	42
4.3 断裂力学与损伤演化	46
4.4 损伤演化模拟步骤	51
4.5 本章小结	52
5 边坡岩体采动损伤与稳定分析	53
5.1 FLAC 建模与开采模拟	53
5.2 边坡岩体采动损伤与演化	57

5.3	节理岩体强度与采动损伤	80
5.4	矿山边坡采动损伤与稳定性	83
5.5	本章小结	96
6	边坡岩体采动损伤与可靠性分析	98
6.1	露天矿边坡可靠性分析基本思路	98
6.2	岩体强度的空间变异性	100
6.3	概率损伤与演化	110
6.4	采动岩体概率损伤	112
6.5	矿山边坡可靠性动态变化	114
6.6	本章小结	120
7	露井联采边坡岩体损伤与稳定	122
7.1	平朔矿区概况	122
7.2	边坡工程地质调查	125
7.3	露井联采 FLAC 分析模型	128
7.4	节理岩体损伤与强度关联模型	132
7.5	露天开采与边坡岩体损伤	134
7.6	井工开采与边坡岩体损伤	144
7.7	露井联采岩体损伤与强度	147
7.8	采动损伤与极限平衡分析	148
7.9	本章小结	151
	参考文献	152

1 绪 论

采矿业是提供原料和能源的工程领域,是国民经济的基础。我国冶金矿山 80% 的矿石量来自于露天开采。露天矿山对我国钢铁工业的可持续发展具有特殊重要的意义。我国大多数大中型露天矿山已由山坡转入深凹露天开采,其最终将形成垂高 400 ~ 700m 的高陡边坡;国外也有很多类似的实例,加拿大 Carlo Lake 铁矿和 Mont Wright 铁矿的最终采深将达到 400m,南非 Palabora 铜矿将达 836m,智利 Chuquicamata W. W. 铜矿将达 1000m。随着露天矿开采深度的增加,其边坡逐渐增高加陡,影响安全稳定的因素增多,边坡岩体的变形破坏机制更加复杂,高陡边坡稳定性的控制与维护的技术难度也越来越大,已成为露天矿深部开采的重大难题。

边坡工程是人类生产建设工程中古老而又常新的课题,并一直是采矿工程、岩土工程、地质工程、工程力学等学科的重要课题之一。近二十余年来,我国在水利、铁路、公路、矿山等方面进行了大量的边坡稳定性研究,在工程实践和基础理论方面均取得了一系列的成果。随着我国现代化建设事业的迅速发展,大型露天矿、水利工程等岩体开挖工程的建设项目将不断涌现,在复杂地质环境条件下人为开挖的各种高陡边坡将日益增多,因此,深入研究和探讨边坡稳定性的评价问题,非常迫切和必要,并可创造巨大的社会效益和经济效益。

露天矿边坡工程问题与矿山生产的企业效益息息相关,尽可能加陡露天矿固定帮边坡角,最大限度减小剥岩量或增加采出矿石量,是采矿设计面对的关键技术问题。露天矿加陡固定帮边坡角可获取巨大的经济效益,但以增大边坡的滑坡风险为代价,边坡安全与矿山效益是一对自始至终伴随露天矿生产的矛盾。如何评价和预测矿山岩体边坡的稳定性及采取相应的工程治理措施,确保矿山高效开采,是岩体工程界必须解决的重要课题。对于一个大型露天矿山,最终边坡角增加 1° ,即可获得亿元级的经济效益,这一点已得到业界的共识。鞍

钢眼前山铁矿自 1986 年开始,从一期境界向二期境界过渡,至 1991 年,因种种原因仅上盘落采岩石已达 1500 万吨,按设计扩帮方案的速度开采下延,已无法与一期开采境界相衔接。即便大幅增加设备投入,采场也无摆设的空间,矿山面临停产过渡的困境。鞍钢矿山公司于 1994 年开始研究实施加陡固定帮边坡角的开采方案,总体边坡角提高 $1^{\circ} \sim 3^{\circ}$,仅减少剥岩量一项即可获经济效益 2.58 亿元,从采矿生产的角度看解决了稳产过渡的难题,但边坡的破坏问题一直困扰着矿山的安全生产^[1]。

岩体边坡是含有大量裂隙的三维损伤体,在边坡的动态开挖及后续的使用过程中,随着外载条件的变化,边坡高度逐渐增大,边坡应力状态发生变化,边坡体中的裂隙要发生扩展、交汇,或产生新的裂隙,劣化了岩体的力学性质,造成边坡体的进一步损伤。由于岩体的强度和内部裂隙分布等在空间上均具有随机性,其损伤是一种概率损伤,因此对岩体边坡的可靠性进行评价时,必须将边坡岩体的概率损伤和演化与可靠性研究联系在一起,这就归结为岩体边坡的概率损伤与动态可靠性分析问题。

露天矿边坡岩体稳定性研究中,既要重视岩块力学强度的随机性,更需重视露天矿边坡岩体随采矿开挖的卸荷效应和随机分布的节理裂隙的概率损伤及演化,建立相应的动态可靠性评价模型,以真实地反映岩体边坡在露天矿不同开采深度下的可靠状态。

岩体由岩块和结构面组成,岩体强度和工程稳定状态一方面取决于岩块强度和特性,另一方面,更重要的是取决于岩体内地质结构面和优势结构面的规模和分布状态。岩体中存在的大量不同成因、不同特性的结构面,由于经受过多次构造运动,使得结构面呈现出既有规律又极为复杂的分布状态。岩体结构面的产状、规模、密度、形态及其组合关系,控制着岩质边坡的稳定性、破坏模式和破坏程度。因此,对岩体中的结构面参数进行实地测量和统计分析,以期获得结构面特征及其组合分布规律,是进行岩体工程稳定性分析和计算的基础。

2.1 露天矿边坡工程特点

露天矿边坡工程与水利、铁路、公路等岩石开挖工程所形成的高陡边坡相比,具有如下特点^[2]。

A 露天矿边坡工程赋存条件的无选择性

露天矿只能在既定的工程地质环境条件中进行开挖,这是矿山地质工程有别于其他地质工程的最突出的特点。水电坝址、隧道开挖等其他地质工程可以选线或选址,而露天矿则必须依矿体赋存条件进行开采施工,形成的边坡高度从几十米到几百米,走向长从几百米到数千米,揭露的岩层多,地质条件差异大,变化复杂。

B 露天矿边坡工程的时效性

露天矿最终边坡是由上至下随采矿生产而逐步形成,是一个漫长的过程,矿山上部边坡服务年限可达几十年,下部边坡服务年限则较短,采场边坡在采矿结束时即可废止,因此上下部边坡的稳定性要求也不相同。

C 露天矿边坡允许一定变形和破坏

露天矿边坡可以允许边坡岩体产生一定的变形,甚至产生一定的

破坏,只要这种变形及破坏不影响露天矿的安全生产即可。这是露天矿边坡不同于其他地质工程的又一个显著特点。

D 露天矿边坡工程是复杂的动态地质工程问题

露天矿开采是一个复杂的动态地质工程问题,矿山开挖及开采活动贯穿于矿山服务期限的始终,露天矿边坡的稳定性随着开采作业的进行不断发生变化。露天矿边坡上布置有铁路、公路或胶带等开拓运输系统,担负着采矿生产的矿岩运输任务,亦随采场下延而逐步发展变化,是矿山边坡的重点维护部位。

E 露天矿边坡受人为因素和自然因素影响较大

露天矿边坡由中深孔爆破、机械开挖等手段形成,起爆药量大,岩体破坏严重;频繁的穿孔、爆破作业和车辆行走,使边坡岩体经常受到震动影响;边坡岩体暴露时间长,一般不加维护,易受风化等影响产生次生裂隙,进一步破坏岩体的完整性。

2.2 眼前山铁矿概况

鞍钢眼前山铁矿是鞍钢集团鞍山矿业公司所属大型国有企业,是鞍钢的主要铁矿石生产基地。1994年,为解决扩帮剥岩滞后、生产能力逐年下降及难以实现向二期境界平稳过渡等难题,开始实施加陡固定帮边坡角的开采方案,台阶坡面角 65° ,安全平台宽10m,年产矿石200万吨,采剥总量600万吨,采场封闭圈标高+105m,底标高-195m,采用铁路-汽车联合运输系统运排矿岩,北帮-3m水平和南帮+21m水平设有倒装场,汽车将岩石运至北帮-3m倒装场,用铁路经南帮+21m站折返至北帮运出采场排弃;矿石用汽车运至南帮+21m倒装铁路后,经南帮和北帮铁路运出采场至鞍钢大孤山选矿厂。眼前山铁矿在实施加陡固定帮边坡角的开采工艺取得了显著经济效益的同时,因加陡固定帮而带来的边坡破坏风险也随之增加,至2004年南帮扩帮下降至+45m水平,已发生近十处的边坡滑落与破坏,对矿山安全生产造成了较大的影响。

眼前山铁矿为前震旦纪沉积变质型鞍山式铁矿,南帮边坡(图2.1)长约2000m,岩性为混合岩,岩块强度较高,但岩体节理较发育,对南帮边坡的稳定性起主要控制作用,2000年曾发生由断层与

节理组合的大型楔体滑落。研究确定南帮岩体的节理发育特征、优势节理组构成及概率模型,是探讨南帮节理岩体损伤演化规律、边坡稳定性和可靠性的基础。

依据南帮边坡岩体的性质、结构、节理分布状况及边坡空间形态,将南帮边坡从东至西分为 A、B 两个工程地质分区,以中部边坡转折处的正长斑岩岩脉为分界线。A 区与 B 区节理发育状况见图 2.2 和图 2.3。



图 2.1 眼前山铁矿南帮边坡



图 2.2 A 区节理发育状况

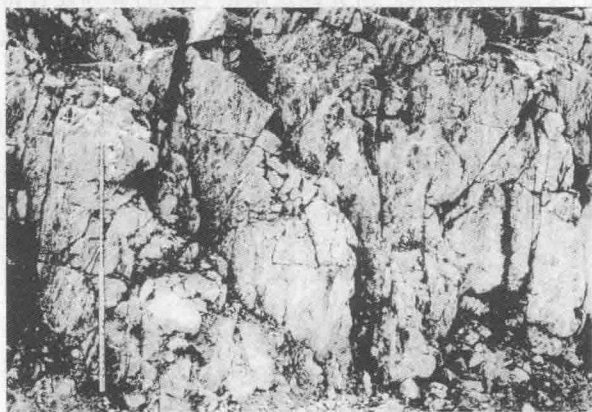


图 2.3 B 区节理发育状况

2.3 节理聚类分析

节理面的产状是构造地质学和岩石力学中研究最多的几何参数，节理面产状的要素主要包括节理的走向、倾向和倾角。结构面成因的复杂性，决定其分布既有一定的规律，同时也具有不确定性。为了对结构面进行量化描述和分析发育的规律性，国内外多名学者做过大量的研究，通常将具有某些共同特征的结构面归类，最为常见的是对结构面产状进行分组和确定优势方位。传统的结构面分组方法一般采用节理倾向玫瑰花图、节理极点图和等密度图，其优越性在于对主要结构面分布情况较易做出直观判断，但分组结果主要依靠经验，尤其是在各分组边界不明显的情况下，分组结果更缺乏客观性^[3,4]。Shanley 和 Mahtab 于 1976 年首次提出了结构面产状的聚类算法，后经 Mahtab 和 Yegulalp (1982)，Harrison 和 Curran (1998) 等人的工作，发展了用于结构面识别的模糊 C 均值 (Fuzzy C-Means, FCM) 聚类算法。模糊 C 均值聚类算法的引入较传统方法有了较大的进步，它通过优化模糊目标函数得到了每个样本点对类中心的隶属度，从而决定样本点的归属。这种模糊化的处理能较准确地反映数据的分布实际，特别适合于各类数据点在分布上有重叠的情况，并可进行有效性

的检验。但是,该方法本质上是一种局部搜索寻优法,较易陷入局部极小点。在解空间中,最优解附近存在着一个吸引域,只有当FCM算法初始化参数处于这个吸引域中,则可很快收敛到全局最优解。因此,用节理倾向玫瑰花图、节理极点图和等密度图确定模糊C均值聚类算法的初始参数,便可得到理想的聚类结果。

2.3.1 节理倾向玫瑰花图、极点图和等密度图

节理倾向玫瑰花图、极点图和等密度图分别见图2.4~图2.9。

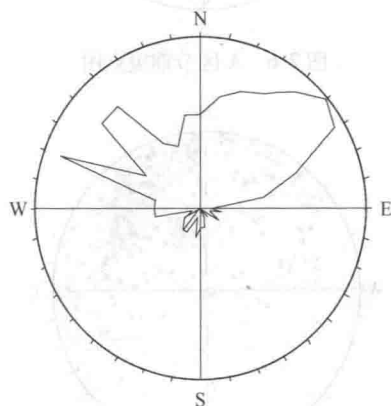


图 2.4 A 区节理倾向玫瑰花图

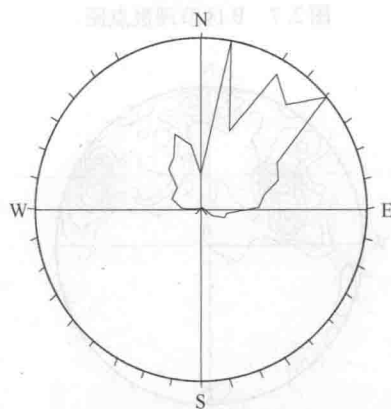


图 2.5 B 区节理倾向玫瑰花图

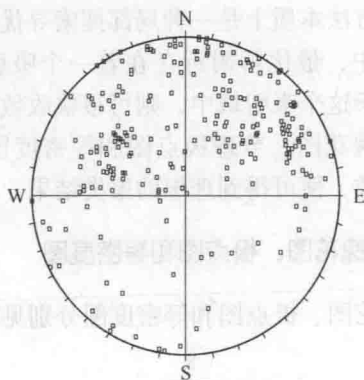


图 2.6 A 区节理极点图

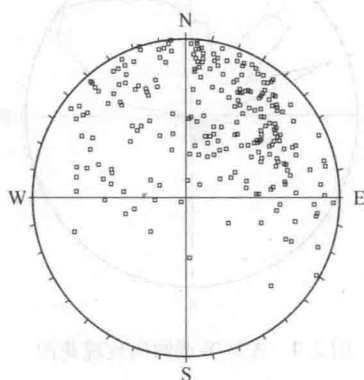


图 2.7 B 区节理极点图

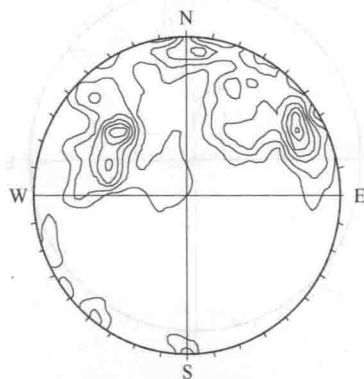


图 2.8 A 区节理等密度图