



露天矿边坡工程

王家臣 孙书伟 著



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

露天矿边坡工程

王家臣 孙书伟 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书针对露天矿边坡工程研究需要,结合作者多年研究经验,系统介绍露天矿边坡工程研究的总体思路、研究方法、基础理论和知识,以及一些工程实践和露天矿边坡研究新进展。主要内容包括露天矿边坡工程特点、露天矿典型滑坡实例、岩体力学基础知识、岩体结构面调查与统计分析、边坡二维与三维极限平衡分析方法、极限平衡分析方法对比、边坡可靠性分析基础、边坡数值分析、露天矿边坡加固、排土场主要破坏模式与稳定分析,以及露天矿边坡监测等。

本书可供从事采矿工程、岩土工程、工程地质、交通运输等方面的工程技术人员及相关专业师生参考和使用,也可作为高等院校相关专业的高年级硕士生、博士生的教学用书。

图书在版编目(CIP)数据

露天矿边坡工程/王家臣,孙书伟著. —北京:科学出版社,2016.2
ISBN 978-7-03-046064-6

I. ①露… II. ①王… ②孙… III. ①露天矿—边坡—道路工程
IV. ①U416.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 249608 号

责任编辑:李 雪 / 责任校对:郭瑞芝
责任印制:张 倩 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京市通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年2月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2016年2月第一次印刷 印张:34

字数:806 000

定价:228.00元

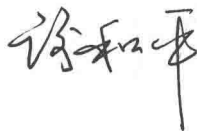
(如有印装质量问题,我社负责调换)

序 一

露天矿边坡是露天矿开采过程中涉及的重要岩石力学问题,世界最大的边坡高度达千余米,我国最大的露天矿边坡高度也有 500 多米,随着开采继续进行,露天矿边坡高度还会加大,国内外许多露天矿由于边坡失稳造成了重大经济损失,甚至人员伤亡,因此合理设计和形成露天矿边坡是十分重要的科学与工程问题。

露天矿边坡首先是一个岩石力学问题,因此对其稳定分析需要遵循岩石力学的基本原理,研究边坡岩体的基本力学性质、结构面分布、影响边坡稳定因素等,在此基础上对边坡稳定性进行科学的计算与分析。其次露天矿边坡也是采矿工程问题,边坡的组成及其结构要满足露天矿采剥工程、开采程序、开拓运输等需要。边坡工程设计要兼顾岩石力学分析和采矿工程需要,因此露天矿边坡不是单纯的岩体稳定问题,它与自然斜坡稳定等问题是显著不同的。《露天矿边坡工程》一书从露天矿边坡特点、研究程序、影响露天矿边坡稳定因素、岩体力学基础、结构面分布、极限平衡分析、可靠性分析、数值计算、边坡加固等方面介绍了露天矿边坡研究的基础理论、方法与进展。书中既有岩石力学的一般知识介绍、边坡稳定分析的常用方法,也有针对露天矿边坡所取得的研究工作成果,深入浅出。相信对从事露天矿边坡及相关方面的科技工作者有参考和借鉴作用,同时也是采矿工程、岩土工程等专业学生一本很好的参考书。王家臣教授多年来一直坚持放顶煤开采和露天矿边坡这两个研究方向,并且进行了深入的研究,坚持和重视现场工作,取得了优秀的学术成果,在此祝贺作者出版此书,并希望此书对于推动露天矿边坡方面的研究起到积极作用。

中国工程院院士、四川大学校长



2016 年 1 月

序 二

如何分析和设计露天矿边坡一直是露天开采必须解决的重要科学问题,设计和开挖一个既经济、又稳定的边坡是露天矿边坡研究的核心任务。我国的金属矿产是以露天开采为主,国外其他先进的矿业国家无论是煤炭开采还是非煤开采,都是以露天开采为主,因此露天矿边坡问题在国内外都得到重视,尤其是欧美国家在 20 世纪 60~80 年代,开展了大量的露天矿边坡研究工作,取得了一些重要的学术成果,如 Hoek 的 *Rock Slope Engineering* (1974 年、1981 年出版)、Sarma 于 1979 年提出的边坡稳定计算倾斜分条方法等有力地促进了边坡研究和工程实践的进步。我国的露天矿边坡研究在 80~90 年代十分活跃,与欧美等国(地区)进行了大量的学术交流,国外一些岩石力学、边坡研究的新成果迅速用于我国边坡工程实践中。边坡研究队伍也迅速壮大,许多院、所、高等院校等都有一支露天矿边坡的研究队伍,极大地促进了我国露天矿边坡理论与技术的进步。但当时由于计算技术、监测技术的限制,许多边坡研究侧重于工程地质调查、理论分析与评价、模拟试验等基础工作。近年来计算技术和无线监测技术发展迅速,露天矿边坡研究除了传统的基础研究以外,数值模拟和工程监测得到了广泛应用,这对于提升边坡的研究水平、滑坡预测预报起到了积极作用。

王家臣教授多年来一直从事露天矿边坡的研究工作,在边坡三维极限平衡分析、可靠性计算、节理岩体边坡、空间随机场等方面都有深入研究,尤其是近些年来与鞍钢矿业集团合作,在金属露天矿硬岩边坡研究方面取得了优秀研究成果,并以此为基础与孙书伟合作,撰写此书,是一件可喜的事情,相信此书的出版会对露天矿边坡工程研究有积极推动作用。

中国科学院院士、中国矿业大学(北京)教授



2016 年 1 月

前 言

露天矿边坡工程是一门涉及露天采矿、工程地质与水文地质、岩石力学、土力学、爆破工程、露天矿机械等多个领域的综合性工程技术,其研究的目的就是寻求经济开采与安全生产之间的平衡点,在保障开采安全、露天矿边坡整体稳定的前提下,最大限度地提高边坡角,减少剥离量,以期获得最大开采效益。我国是一个矿业大国,也是露天开采大国,是世界上露天矿数量和露天矿产量最多的国家。我国的大型露天矿大多建于或者改扩建于20世纪50~70年代,目前都已进入了深凹露天开采阶段,边坡高大、问题突出。

我国露天矿边坡的系统研究始于新中国成立后。20世纪50~70年代,主要是借鉴苏联的理论与技术;80~90年代,开始借鉴一些欧美国家的理论与技术,边坡研究十分活跃;进入21世纪,以数值模拟、局部加固、利用先进仪器和技术进行监测等为主,边坡研究平稳推进,有效地保障了我国露天矿的安全、高效和经济开采。

露天矿边坡可分为三种类型:一类是金属露天矿硬岩边坡,其特点是以断层、节理等地质结构面控制边坡的破坏类型为主,因此需充分重视工程地质与岩体特性等基础工作。硬岩露天矿爆破作业频繁,靠帮时的合理控制爆破对于维护边坡稳定非常重要,一些结构面控制的局部破坏也可以通过加固工程得到有效解决。另一类是露天矿软岩边坡,该类边坡以软弱岩层控制为主,沿煤层底板等弱层的滑动为主要破坏模式,尤其是有水参与时,即使坡角很小,也会发生滑动(蠕动)。对该类边坡研究应充分重视软弱岩层的力学和水理性质,并从开采设计、开采程序、合理内排上解决边坡的稳定问题。还有一类是露天矿排土场边坡,这类边坡的特点是剥离的散体岩土物料人工堆积在自然山坡或沟谷中,排土场滑动模式大多是下部以沿山坡基岩上的土层为主,上部剪切排弃物料,形成滑动面。本书基本涵盖上述三种边坡类型。

露天矿边坡、露天矿爆破、卡车自动调度系统、钻采运设备是露天矿的四个重要研究方向。随着露天矿逐年延深,边坡问题更加突出。采矿、岩石力学、工程地质等领域都曾开展了一些露天矿边坡的研究工作,也相继出版了一些边坡方面的学术著作,相对而言,专门的露天矿边坡方面的著作较少。从事露天矿边坡研究时,可以借鉴相关方面的著作,有些原理、方法是相通的,但是差别也是显而易见的,如露天矿边坡既要考虑岩体稳定条件,也要考虑露天矿的延深、露天矿的工程布置,以及开采的时间性等,所以才有了撰写本书的想法。

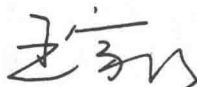
我1982年毕业于鞍山钢铁学院(现辽宁科技大学)采矿工程专业,1984年进入北京钢铁学院(现北京科技大学)攻读采矿工程专业硕士学位研究生,开始系统学习岩石力学和露天矿边坡方面的知识。2000年以后在鞍钢矿业集团的露天矿进行了持续的露天矿边坡工程研究和实践,本书就是根据自己多年的露天矿边坡学习和研究成果,联合孙书伟副教授共同撰写的。孙书伟于2009年获得中国铁道科学研究院岩土工程专业博士学位,2011年清华大学水利系博士后出站,成为我的同事。他主要擅长边坡加固、数值分析等

方面的研究工作。全书共分为 10 章,第 1~5 章由我撰写,第 6~10 章由孙书伟撰写。本书从实用角度出发,介绍露天矿边坡研究的基本理论和方法,以及所开展的工程研究,希望本书对于从事露天矿边坡及相关工作的科技与管理人員,以及相关专业的研究生有参考价值。由于我们的水平和对知识的理解还有欠缺,有些观点和內容可能会有不当之处,敬请读者与同仁批评指正。书中也包含一些通用知识、他人的研究成果以及我们与合作单位共同完成的科研成果,在此引用,是为了保持书中体系的完整性与可读性,对于引用的成果,已尽可能注明,若有个别遗漏,请谅解,并在此对引用成果的作者表示衷心的感谢。

在本书出版之时,特别感谢我的博士生导师中国矿业大学钱鸣高院士、骆中洲教授,硕士生导师北京科技大学杜竞中教授对我多年的培养;感谢谢和平院士、何满潮院士对本书的指导和对我一贯的支持与鼓励,并为本书作序;感谢鞍钢矿业集团总经理邵安林院士的支持与指导;感谢国家科学技术学术著作出版基金资助。

感谢多年来与我合作的中国矿业大学(北京)陈忠辉教授;鞍钢矿业集团马旭峰部长、邓鹏宏助理、邓克部长、姜科教授、张宝才高工、吴庆深矿长、王海龙高工、张德辉高工等;辽宁科技大学常来山教授、中勘冶金勘察设计研究院王广和副院长、包头稀土研究院杨占峰院长、中国钢铁协会牛京考主任等对我研究工作的支持。

中国矿业大学(北京)



2015 年 10 月

目 录

序一	
序二	
前言	
第1章 概论	1
1.1 露天矿边坡工程特点	1
1.2 露天矿边坡工程研究的意义和内容	4
1.3 露天矿边坡研究概况	6
1.4 露天矿边坡常见破坏类型	8
1.5 影响露天矿边坡稳定的因素	11
1.5.1 岩石物理力学性质	11
1.5.2 岩体结构面	12
1.5.3 地下水	16
1.5.4 原岩应力	24
1.5.5 爆破震动	28
1.5.6 边坡几何形状	28
1.6 露天矿典型滑坡	32
1.6.1 海州露天煤矿典型滑坡实例	32
1.6.2 平庄西露天煤矿滑坡实例	33
1.6.3 义马北露天煤矿滑坡实例及治理	34
1.6.4 大冶铁矿象鼻山北帮边坡变形破坏	35
1.6.5 金川露天矿上盘西区滑坡倾倒滑移复合破坏	36
1.6.6 本钢南芬露天铁矿边坡破坏实例	37
1.6.7 露天矿排土场滑坡	38
参考文献	39
第2章 岩体力学基础	41
2.1 岩石基本物理性质	41
2.1.1 岩石质量指标	41
2.1.2 岩石孔隙性	42
2.1.3 岩石水理性质	42
2.2 岩石强度特征	42
2.2.1 岩石抗压强度	43
2.2.2 岩石抗拉强度	45
2.2.3 岩石抗剪强度	46

2.2.4	岩石点荷载强度	49
2.3	岩石变形特征	50
2.3.1	岩石基本变形特征	51
2.3.2	岩石流变性	52
2.4	岩石强度准则	57
2.4.1	岩石破坏类型	57
2.4.2	莫尔-库仑(Mohr-Coulomb)强度准则	58
2.4.3	格里菲斯(Griffith)强度准则	62
2.5	岩体结构面力学特征	64
2.5.1	结构面的法向变形	64
2.5.2	结构面的剪切变形	66
2.5.3	结构面抗剪强度	66
2.6	岩体强度	70
2.6.1	岩体强度分析	70
2.6.2	岩体强度估算	73
2.6.3	霍克-布朗(Hoek-Brown)强度准则	76
2.7	岩体工程分类	82
2.7.1	岩石质量指标(RQD)分类法	82
2.7.2	岩体质量评价(RMR)分类法	83
2.7.3	Q系统分类法	86
	参考文献	91
第3章	结构面调查与分析	92
3.1	结构面概述	92
3.1.1	结构面几何特征	92
3.1.2	结构面调查	94
3.2	结构面几何特征参数的统计分析	97
3.2.1	间距分布	98
3.2.2	RQD指标与结构面间距的关系	100
3.2.3	迹长分布	102
3.2.4	结构面倾向分布	105
3.3	结构面三维网络模拟	108
3.3.1	三维网络模拟基本原理	108
3.3.2	结构面三维网络模拟实例	109
3.4	结构面统计方法	117
3.4.1	结构面玫瑰花图	117
3.4.2	赤平极射投影	118
3.5	结构面极点图	122
3.6	边坡稳定分析的图解法	125

3.6.1	边坡滑动方向分析	125
3.6.2	边坡稳定的初步判断	126
3.6.3	工程实例	128
3.7	岩体结构面的三维不接触测量	131
3.7.1	系统组成	132
3.7.2	系统工作基本原理	132
3.7.3	工程实例	134
	参考文献	136
第4章	边坡稳定性极限平衡分析	138
4.1	边坡稳定性分析基本原理	139
4.2	平面滑坡	141
4.2.1	边坡内有确定结构面情况	142
4.2.2	最危险滑面确定	144
4.2.3	边坡临界高度	146
4.2.4	张裂面的临界深度	147
4.3	追踪结构面滑坡分析	149
4.3.1	追踪两组结构面滑坡分析	149
4.3.2	沿不贯通结构面滑坡分析	149
4.3.3	双滑面滑坡	151
4.4	楔体滑坡	155
4.5	圆弧滑坡	158
4.5.1	费勒纽斯法	158
4.5.2	毕绍普简化法	159
4.5.3	费辛科法	164
4.6	任意曲面滑坡	166
4.6.1	简布法	166
4.6.2	摩根斯坦法	170
4.6.3	萨尔玛法	175
4.7	各种条分法的精度分析	181
4.8	最危险滑面位置的确定	184
4.8.1	圆弧滑面	184
4.8.2	其他形状的滑面	187
4.9	三维极限平衡计算法	189
4.9.1	加权平均计算法	190
4.9.2	不考虑条柱间作用力的三维方法	190
4.9.3	考虑条柱间作用力的三维方法	193
4.9.4	三维滑体形态	201
4.10	露天铁矿边坡稳定性计算实例	208

4.10.1	边坡现状分析与计算剖面确定	208
4.10.2	边坡破坏模式分析	211
4.10.3	计算参数的选取	212
4.10.4	边坡稳定性计算	214
	参考文献	218
第5章	边坡工程可靠性分析	220
5.1	边坡工程中的不确定性	220
5.2	边坡工程可靠性分析基本原理	222
5.3	可靠性分析基础	224
5.4	蒙特卡罗法	226
5.5	一次二阶矩法	228
5.5.1	中心点法	229
5.5.2	验算点法	230
5.6	概率矩点估计法	233
5.7	边坡工程可接受的可靠指标	237
5.7.1	最小可靠指标 β 的确定	237
5.7.2	边坡可接受的可靠指标建议值	238
5.8	工程实例	238
5.8.1	鞍钢大孤山露天铁矿边坡可靠性研究	238
5.8.2	鞍钢弓长岭露天铁矿独木采区北帮边坡可靠性研究	245
5.8.3	鞍钢眼前山露天铁矿南帮边坡可靠性研究	247
5.8.4	义马北露天煤矿边坡的可靠性研究	248
	参考文献	252
第6章	边坡稳定性数值分析	253
6.1	岩土数值分析方法	253
6.2	数值分析的关键问题	255
6.2.1	边坡模型的概化	255
6.2.2	结构面的模拟	256
6.2.3	单元尺寸的选取	257
6.2.4	初始应力条件	257
6.2.5	边界条件	262
6.2.6	地下水	263
6.3	边坡稳定性的数值分析方法	263
6.3.1	边坡稳定性的判定标准	263
6.3.2	边坡稳定系数的数值求解	266
6.3.3	层状岩体单轴抗压试验模拟	270
6.3.4	顺层滑动破坏	274
6.3.5	倾倒破坏	276

6.4	加固边坡稳定性的数值分析方法	279
6.4.1	抗滑桩加固边坡稳定性分析	279
6.4.2	锚杆加固边坡稳定性分析	288
6.4.3	柔性桩-锚联合支护边坡稳定性分析	292
6.5	边坡动力响应数值模拟分析	301
6.5.1	拟静力法	301
6.5.2	完全非线性分析方法	301
6.6	工程实例	306
6.6.1	工程地质概况	306
6.6.2	网格模型	307
6.6.3	分析方法	307
6.6.4	监测方案	307
6.6.5	计算结果	310
	参考文献	312
第7章	露天矿边坡监测与预警	313
7.1	边坡变形监测	313
7.1.1	监测方法	313
7.1.2	工程实例	315
7.2	激光微小位移监测	320
7.3	边坡应力监测	321
7.3.1	工作原理	321
7.3.2	系统组成	322
7.4	边坡红外热像监测	323
7.4.1	基本原理	323
7.4.2	监测设备	324
7.4.3	工程实例	325
7.5	边坡遥感监测	326
7.6	合成孔径雷达干涉测量	327
7.7	时间域反射测试技术	329
7.8	声发射监测技术	330
7.9	水的监测	333
7.10	露天矿边坡预警	334
7.10.1	露天矿边坡预警的发展	334
7.10.2	露天矿边坡预警阈值的选取	335
7.10.3	露天矿边坡安全等级的划分	335
7.11	露天矿边坡预警系统的构建	336
7.12	露天矿边坡的预警实例	344
7.12.1	监测点设计	345

7.12.2 监测结果分析	346
参考文献	347
第8章 边坡加固的一般方法	349
8.1 露天矿边坡加固工程的特点	349
8.2 露天矿边坡加固技术及原则	350
8.2.1 常用加固技术	350
8.2.2 露天矿边坡加固原则	353
8.3 抗滑桩	355
8.3.1 抗滑桩作用原理	355
8.3.2 抗滑桩设计荷载的确定	356
8.3.3 抗滑桩计算方法	358
8.3.4 抗滑桩的设计	375
8.4 锚杆(索)	376
8.4.1 锚杆(索)作用原理	376
8.4.2 锚杆加固边坡稳定性计算	376
8.4.3 锚杆加固边坡设计	377
8.5 注浆	378
8.5.1 注浆作用原理	378
8.5.2 渗入性注浆	379
8.5.3 劈裂注浆	381
8.5.4 注浆设计	382
8.5.5 注浆效果评价	384
参考文献	386
第9章 露天矿边坡加固新技术	387
9.1 分体式全长注浆锚固方法	387
9.1.1 临界锚固长度	388
9.1.2 基本构造	389
9.1.3 受力机制	391
9.1.4 力学模型	411
9.1.5 设计计算方法	412
9.2 预应力硇锚	414
9.2.1 基本构造	414
9.2.2 工程应用	415
9.3 微型抗滑桩群	416
9.3.1 工程分类	417
9.3.2 微型抗滑桩群水平承载力	418
9.3.3 微型抗滑桩受力机制	425
9.3.4 设计计算方法	440

9.4 柔性桩-锚索系统	448
9.4.1 技术特点	448
9.4.2 受力机制	450
9.4.3 力学模型	475
9.4.4 设计计算方法	477
参考文献	480
第10章 排土场边坡稳定性分析	482
10.1 排土场边坡的变形破坏模式	483
10.2 排土场基底岩土体力学特性	483
10.2.1 基本物理力学指标及试验方法	484
10.2.2 含水量随深度变化规律	489
10.2.3 固结特性分区研究	491
10.3 排土场岩土的材料模型	492
10.3.1 屈服准则	493
10.3.2 流动法则	494
10.3.3 硬化规律	495
10.4 排土场边坡稳定性分析	495
10.4.1 分析方法	495
10.4.2 工程实例	497
10.5 排土场边坡可靠性、敏感性分析	501
10.5.1 排土场边坡可靠性分析	501
10.5.2 排土场边坡敏感性分析	502
10.6 地震稳定性完全非线性动力耦合分析	502
10.6.1 分析方法	502
10.6.2 模型和参数	504
10.6.3 分析结果	506
10.7 排土场边坡变形机理地质力学模型试验	510
10.7.1 试验目的	510
10.7.2 试验原理	510
10.7.3 试验工点概况	511
10.7.4 模型试验设计	512
10.7.5 试验方法及量测系统	514
10.7.6 试验过程	515
10.7.7 试验结果及分析	516
参考文献	525

第 1 章 概 论

1.1 露天矿边坡工程特点

露天开采在固体矿床开采中占有重要的地位。我国铁矿石产量的 80% 来自露天开采,有色金属矿石 50%、化工原料矿石 70%、建筑材料 100%,煤炭的露天开采产量占 15%。美国煤炭露天开采所占比例为 60%,澳大利亚为 61%,俄罗斯为 60%。由于露天开采的安全条件好,资源回收率高、机械化程度高,所以在条件适宜的矿床,首先选择露天开采方法。

随着露天开采的延深,世界各国相继出现了许多高陡的露天矿边坡。目前我国设计的最高露天矿边坡达 800 余米,已形成的露天矿边坡已达 400 余米高,200~300m 高的露天矿边坡比比皆是,而且还正在以每年 10m 左右的速度向下延深。世界上最深的露天矿边坡已高达 1000 余米,如图 1-1~图 1-4 所示。



图 1-1 鞍钢大孤山露天铁矿高陡边坡



图 1-2 神华哈尔乌素露天煤矿采场



图 1-3 美国宾汉姆露天铜矿采场



图 1-4 智利楚基卡玛露天矿采场

由于露天矿边坡的高陡,经常发生滑坡等破坏,严重威胁边坡上及下部采矿作业的安全,并造成了巨大经济损失。有些露天矿每年要花费数千万元甚至上亿元的费用用于露天矿边坡的维护与加固治理等,因此露天矿边坡的稳定分析、加固、治理与设计等在露天矿开采中占有极其重要的地位。

露天矿边坡是开采矿石后遗留下来的开采边界,从经济开采角度讲,露天矿边坡的角度越大(越陡)开采效益越好,可以少剥离岩石,减少剥离费用,降低开采成本。但过大的边坡角必然导致边坡滑坡等破坏的风险增大,因此,确定经济合理的边坡角是露天矿边坡设计的核心内容。

如图 1-5 所示,露天矿边坡是指由露天采场四周的台阶、平台和运输道等构成的倾向采场的岩体。露天矿边坡可以分为两大类,即工作帮边坡和非工作帮边坡。

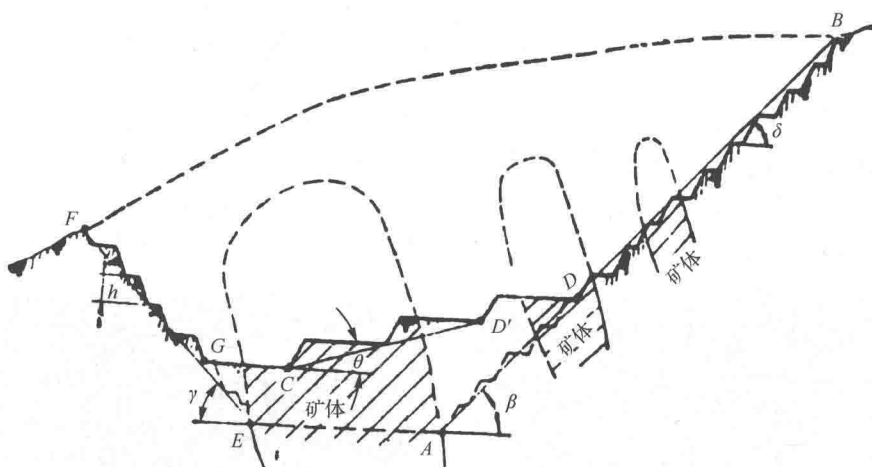


图 1-5 露天矿边坡及构成

工作帮边坡是指正在进行采矿或剥岩作业的边坡,如图 1-5 中的 GCD 。通过最上部工作台阶坡底线与最下部工作台阶坡底线的假想平面(图 1-5 中的 CD')与水平面的夹角 θ 称为工作帮坡角。工作帮坡角的大小取决于采矿条件。工作帮边坡由于坡角较小,且属于临时边坡,所以一般不存在边坡稳定问题。

非工作帮边坡是指由露天矿境界台阶(永久台阶)组成的不进行采矿或剥岩作业的边坡,如图 1-5 中的 FG 和 BD 两部分,其中 h 称为台阶高度。 B 和 F 是最上一个永久台阶的坡顶,而 D 和 G 是下部永久台阶的坡底。通过 D 和 B 以及 G 和 F 的假想平面与水平面的夹角称为非工作帮边坡角。非工作帮边坡上有许多台阶,这些台阶是采矿作业和维持边坡稳定所必需的。各种台阶的几何尺寸取决于采矿工艺、采矿设备规格、穿孔爆破方法以及整体边坡和台阶边坡稳定的要求。一般而言,台阶高度为 $10\sim 15\text{m}$,但实施最终边坡台阶并段时,即将 2 个或 3 个正常台阶在靠帮时合并成一个大台阶,则台阶高度可为 $20\sim 40\text{m}$ 。台阶坡面角 δ 为 $60^\circ\sim 65^\circ$,台阶宽度根据功能不同,差异较大,如安全平台宽度一般为 $3\sim 5\text{m}$,清扫平台宽为 $7\sim 10\text{m}$,运输平台宽为 $10\sim 15\text{m}$ 。

随着露天开采的进行,露天矿采场必然逐渐延深,最终达到露天矿的设计境界 $FEAB$ 。 $FEAB$ 也称露天矿最终境界, FE 和 BA 称为露天矿最终边坡,其边坡角称为露

天矿最终边坡角,如图 1-5 中的 γ 和 β 。

根据边坡与矿体的位置关系,将位于矿体下盘一侧的边坡称为下盘边坡,位于矿体上盘一侧的边坡称为上盘边坡,位于矿体两端的边坡称为端帮边坡。对于一些近水平矿体,如露天煤矿,边坡往往是一次开挖到煤层,然后采矿工作线以水平方向推进为主,此时采场四周边坡呈现出逐渐开挖形成,采煤过后的边坡逐渐废弃的特点。

露天矿边坡即是露天开采的边界,同时也是露天开采作业的对象,还担负着提供下部矿石、岩石运输的通道作用,因此与其他岩土边坡相比,具有如下特点。

1) 露天矿边坡的形成是一动态开挖过程

露天矿边坡是随着采矿工程的延深而逐渐形成的。我国一般的露天矿年下降速度为 8~15m,因此边坡的增高速度为 8~15m/a,在露天矿开采初期,由于边坡高度较小,因此边坡问题并不突出,但对于有些矿山,由于岩层赋存条件、岩体结构等因素,即使是较小的边坡也会时常发生一些局部破坏,因此,有些露天矿山自从开采初期就遇到了边坡失稳问题,一直持续在露天开采的整个过程。这多常见于露天煤矿、边坡岩体中存在顺层结构面的边坡。

一个中型以上的露天矿山,其开采的服务年限一般都在 20 年以上,而且大部分大型露天矿山的的服务年限都在 50 年以上,这样一个露天矿山边坡的形成就要经历数十年,甚至上百年,一旦整个最终边坡按开采设计形成以后,矿山开采亦废止,边坡也就完成了它的服务功能,随即报废。由于形成过程的时间持续性,整个边坡的服务时间有很大差异,上部边坡的服务时间长,下部边坡的服务时间短;在露天煤矿,对于一些近水平的煤层,广泛采用在开采后的采场内排弃剥离岩土的内排工艺,这使得边坡不同区段的服务年限也有所不同,因此露天矿边坡与其他行业的岩土边坡有很大差异。一般行业是在边坡形成后才开始投入使用,发挥其功能,如公路、铁路的路堑或路堤边坡、码头岸坡等,均是在完工以后开始服务。露天矿边坡这种形成的渐进性以及服务的动态性是其自身的主要特点之一,即在边坡形成过程中就是边坡服务的过程,一旦最终边坡形成,边坡就完成了服务的任务。

2) 边坡工程地质条件的不可选择性

露天矿边坡是露天矿场的边界,它的形成只能根据矿体赋存位置和条件、相关的国家矿产需求状况、相关行业的经济水平、开采的技术条件等进行设计和开挖,尤其是边坡的形成位置不具有可选择性,只能是在开采的矿体周围形成,即边坡的工程地质条件、水文地质条件、岩层条件等不具有选择性,无法避开不良的工程地质区域,无法从根本上调整边坡的方位,这与其他行业的岩土边坡有本质差异。因为其他行业岩土边坡的选址并不是唯一的,同时边坡的方位可以适当调整,甚至通过合理设计,避开不良的工程地质区域等。露天矿边坡选址的唯一性,就给边坡设计、稳定维护等带来了许多困难。

3) 边坡高大且受到日常爆破震动的影响

露天矿边坡是目前各类人工形成的岩土边坡中高度最大的,一般都在百米以上,且已形成千余米高的边坡。为了追求最大的开采效益,我国有些矿山边坡设计高度达 800 余米,走向长达 6~7km,因而露天矿边坡揭露的岩层多,边坡各部分地质条件差异大,变化复杂,边坡陡立,一般的金属矿最终边坡角都在 $40^{\circ}\sim 50^{\circ}$,甚至更大,这种高大陆立的岩体