

(英) E. Hoek J. W. Bray 著

岩石边坡工程

冶金工业出版社

岩石边坡工程

〔英〕 E. Hoek J. W. Bray 著

卢世宗 李成村
夏继祥 钱惠国
雷化南 译
王继光 廖国华 校

冶金工业出版社

内 容 提 要

《岩石边坡工程》是根据英国1977年出版的《Rock Slope Engineering》一书（修订版）翻译的。全书共十二章，系统地论述了边坡破坏的基本力学，抗剪强度的试验和确定，以及边坡破坏类型和稳定性分析方法。

本书是国外一本系统论述岩石边坡的专著。书中既阐述了有关理论，又列举了大量的实例，比较全面地反映了国外边坡研究的最新成果。

本书可供地质、矿山、水利、水电、铁道、建筑以及国防等部门从事岩石边坡设计、科研、施工的技术人员以及有关大专院校师生参考。

岩 石 边 坡 工 程

(英) E. Hoek J. W. Bray 著

卢世宗 李成村 雷化南 译

夏继祥 钱惠国

王继光 廖国华 校

冶金工业出版社出版

(北京灯市口74号)

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

787×1092 1/16 印张 21 1/4 字数 502 千字

1983年5月第一版 1983年5月第一次印刷

印数00,001~3,500册

统一书号: 15062·3873 定价2.20元

译者序

近年来,随着露天采矿、水电、道路和国防建筑等工程的发展,在岩体中挖掘的大型边坡日益增多。在解决复杂岩体中的边坡稳定性问题和进行合理的边坡设计时,广泛地应用了工程地质学和岩体力学等学科的成果,国内外岩石边坡稳定性的研究,在理论和实践两方面都取得了很大的进展。随着我国社会主义建设的进展,新建露天矿不断增多,原有露天矿逐渐往深部发展,露天边坡稳定问题日益突出,亟待我们去研究解决。为了适应这一需要,我们翻译了这本《岩石边坡工程》(《Rock Slope Engineering》)。

《岩石边坡工程》一书是英国伦敦皇家矿业学院E.Hoek教授领导下的专门研究人员,在国外十几家矿业公司的支助下,于1968年至1972年间对露天矿边坡稳定性进行系统研究的总结。

本书第一版于1974年出版,全书共分十章,书中简要地介绍了与边坡稳定性研究有关的经济和计划问题,阐述了地质数据的图解表示和收集方法;边坡破坏的基本力学,岩体抗剪强度测定和地下水研究方法;详细讨论了边坡岩体中的平面、楔体和圆弧形破坏的分析计算;最后简要介绍了控制爆破、排水和边坡监测等有关问题,并附有楔体破坏的详细分析方法等三个附录。

1977年出版了该书的修订第二版。第二版根据国外边坡研究的新进展,对地质数据表示、岩体抗剪强度和边坡稳定分析等原有章节进行了补充和修改,增加了倾倒破坏和爆破两章,以及楔体快速运算解法和加固后岩石边坡的安全系数两个附录。

本书是国外一部系统论述岩石边坡问题的专著。书中既阐述了有关边坡稳定性方面的理论,又引用了大量的边坡研究实例,比较全面地反映了国外关于岩石边坡研究方面的最新成果,对问题的阐述应用了易于理解的图表和分析方法。本书对于从事岩石边坡设计和研究工作的人员有很大的参考价值。

《岩石边坡工程》修订的第三版已于1981年出版,为了使本译文内容新颖,冶金工业出版社请廖国华同志编译了“《岩石边坡工程》修订第三版增减的内容”附于本书后面。

本书译者和校者的署名系按姓氏笔划为序。

对书中存在的问题,根据我们对问题的理解,以译注的形式进行了改正和说明,希读者阅读时注意。

由于我们水平所限,译文难免有不妥和错误之处,希望读者批评指正。

译者

1981年11月

ROCK SLOPE ENGINEERING

Preface to Chinese edition

During a visit to China in 1981 I was surprised to find that many engineers and geologists in this country are familiar with the English edition of Rock Slope Engineering. I was gratified to find that the information contained in the book has been very well understood and that much of it has been applied to the solution of practical mining and civil engineering rock slope problems in China.

The publication of the Chinese edition of this book will make this information available to a much larger number of readers and I hope that these readers will find the contents of this book useful in understanding the subject and in solving practical rock slope problems.

The authors would welcome comments and suggestions from Chinese readers and would be particularly interested in details of interesting rock slope problems and their solutions.

E. Hoek

E. HOEK
Changsha, China.
November, 1981.

作者为中译本撰写的前言

1981年在中国访问期间，我惊奇地发现这个国家的许多工程师和地质师都熟知《岩石边坡工程》的英文版。我还愉快地发现人们已经很好地理解了此书所包含的知识，且许多知识已被用来解决中国的采矿和土建工程中实际遇到的岩石边坡问题。

本书中文版的出版将使多得多的读者能够得到这些知识，我希望读者们将会发现本书的内容有助于了解书中的议题，有助于解决实际岩石边坡问题。

作者欢迎中国读者对本书提出意见和建议，作者尤其对有趣的岩石边坡问题及其解决方法的细节特别感到兴趣。

E. Hoek

1981年11月于中国 长沙

第 一 版 前 言*

在采矿和土木工程中，巨大的挖掘边坡的设计日益增多，工程师面临着两个互相矛盾的要求：一方面，加陡边坡使挖掘量减少，可以节省大量资金；另一方面，过分地削陡某个特定的边坡而导致它破坏，可能引起生命财产的严重损失。工程师怎样才能得到一个最优的——既能达到经济上可采纳的陡度，又足以维持安全的缓度的边坡设计呢？

由于每个边坡后面的岩体各有特点，因此没有一个标准的或例行的解法来保证每次应用时都会得到正确的答案。一个实际的解决办法是根据基本地质资料、岩石强度数据、地下水观测资料 and 良好程度的工程常识拟定出来的。这些要素要针对每种情况按不同的比例进行协调，而唯一有益的是汇集那些有利于工程师迅速而有效地收集和按一定方式处理这些资料的方法和技术。

本书将讲述这些方法和技术，并通过一些实例说明它们在实际问题中的应用。书中尽可能地不用高深的数学，但包括有大量简单的设计曲线图和图解方法，以使非专业工程师能迅速地获得问题的近似答案。这样的近似答案通常是够用的了，但是，在某些情况下，工程师还希望请岩土工程专家来帮助。当工程师想要给自己解决问题时，他也就能够将他的需要充分地转达给岩土工程专家，并同专家一起作出最切合实际的工程解法。

Evert Hoek

John Bray

1973年11月于伦敦

* 本前言略有节译。——译注

修 订 第 二 版 前 言

三年前本书第一版问世以来，对本书的内容究竟能在多大程度上满足实际工程和教学的要求，作者有机会进行了估价。虽然这些要求似乎已得到较好满足，显然也还需要进行某些修改、变更和补充，于是决定出版这个修订的第二版。

第二版除印刷质量有所改进之外，有几章经过了大量的修订，同时又新增加了两章和两个附录。其中一章论述倾倒破坏，而另一章讨论爆破问题。增加的新附录论述楔形岩体的稳定性计算方法和加固岩坡安全系数的计算问题。

本版中的很多改进都是缘起于许多人士的建设性批评和意见，他们不辞来往书信之劳与作者讨论本书。尽管作者没有再次修订本书的打算，然而，作者仍然乐于听取任何人对进一步改进本书提出的各种意见和建议。

Evert Hoek

John Bray

1977年1月于伦敦

目 录

译者序

作者为中译本撰写的前言

第一版前言

修订第二版前言

第一章 经济和规划方面的考虑	1
第一节 引言	1
第二节 边坡失稳的经济后果	1
第三节 稳定性研究的计划	5
第二章 边坡破坏的基础力学	9
第一节 边坡稳定性分析的连续介质力学方法	9
第二节 开挖边坡的最大坡高和最大坡角的关系	9
第三节 不连续面在边坡破坏中的作用	10
第四节 摩擦角、粘结力和容重	12
第五节 重力荷载引起的滑动	13
第六节 水压对抗剪强度的影响	14
第七节 有效应力定律	15
第八节 张裂缝中水压的作用	16
第九节 防滑加固	16
第十节 边坡的安全系数	16
第十一节 可以计算安全系数的边坡破坏	18
第十二节 极限坡高与坡角的关系	18
第十三节 无法计算安全系数的边坡	20
第十四节 边坡设计的概率论方法	22
第三章 地质数据的图解表示	23
第一节 引言	23
第二节 地质术语的定义	23
第三节 几何术语的定义	25
第四节 表示数据的图解技术	25
第五节 等面投影	27
第六节 表示一平面的大圆和极点的作图法	29
第七节 二平面交线的确定	30
第八节 确定二特定线的夹角	31
第九节 求两平面交线的另一方法	31
第十节 野外测量资料的成图和分析	32
第十一节 对潜在边坡问题的评价	39
第十二节 为露天矿设计推荐的数据图式和分析方法	42
第四章 地质资料的收集	44
第一节 引言	44

第二节	区域地质的调查	44
第三节	裸露构造的测绘	46
第四节	裸露构造的摄影测量绘图	49
第五节	表面粗糙度的测量	50
第六节	研究地质构造用的金刚石钻探	52
第七节	地质资料的表达	56
第五章	岩石的抗剪强度	58
第一节	引言	58
第二节	平面型不连续面的抗剪强度	58
第三节	水对平面型不连续面抗剪强度的影响	59
第四节	斜面剪切	60
第五节	表面粗糙度	61
第六节	岩石不连续面的剪切试验	65
第七节	节理的抗压强度和摩擦角的估算	69
第八节	夹有充填物的不连续面的抗剪强度	73
第九节	密集节理岩体的抗剪强度	76
第十节	密集节理岩体的试验	78
第十一节	曲线型抗剪强度曲线在边坡设计中的意义	82
第十二节	通过边坡破坏反分析确定抗剪强度	83
第十三节	试样的采集和制备	84
第六章	地下水流、渗透性和水压	89
第一节	引言	89
第二节	岩体中的地下水流	89
第三节	流网	95
第四节	渗透系数的野外测定	97
第五节	水压测量	101
第六节	总评	104
第七章	平面破坏	105
第一节	引言	105
第二节	平面破坏的一般条件	105
第三节	平面破坏分析	105
第四节	边坡稳定性的图解分析	110
第五节	地下水对稳定性的影响	112
第六节	张裂缝的临界深度	113
第七节	张裂缝是不稳定性的标志	115
第八节	破坏面的临界倾角	116
第九节	切割坡脚的影响	117
第十节	边坡的加固	118
第十一节	沿粗糙面的破坏分析	118
第十二节	实例之一	119
第十三节	实例之二	124
第十四节	实例之三	126

第十五节 实例之四	136
第十六节 实例之五	140
第八章 楔体破坏	142
第一节 导言	142
第二节 楔体几何形状的确定	143
第三节 楔体破坏分析	143
第四节 包括粘结力和水压在内的楔体分析	146
第五节 只含摩擦力的楔体稳定性曲线图	149
第六节 楔体分析实例	155
第九章 圆弧形破坏	159
第一节 导言	159
第二节 圆弧形破坏的条件	159
第三节 圆弧形破坏算图的推导	159
第四节 地下水流的假定	161
第五节 圆弧形破坏算图的绘制	163
第六节 圆弧形破坏算图的使用	164
第七节 危险破坏圆和张裂缝的定位	165
第八节 实例之一	170
第九节 实例之二	170
第十节 实例之三	174
第十一节 Janbu的非圆弧形破坏分析	176
第十章 倾倒破坏	183
第一节 导言	183
第二节 倾倒破坏的类型	184
第三节 次生倾倒模式	185
第四节 倾倒破坏的分析	187
第五节 实例	191
第六节 倾倒破坏极限平衡分析的安全系数	193
第七节 倾倒破坏小结	193
第十一章 爆破	194
第一节 导言	194
第二节 生产爆破	194
第三节 生产爆破设计	203
第四节 爆破效果的评价	205
第五节 爆破方法的改进	206
第六节 爆破危害及其控制	210
第七节 用于改善边坡稳定性的特殊爆破技术	218
第十二章 有关边坡稳定性的其它问题	223
第一节 导言	223
第二节 边坡曲率对稳定性的影响	223
第三节 边坡的减压	225
第四节 坡面防护	229

第五节	落石的控制	232
第六节	边坡位移的监测和解释	232
第七节	展望未来	236
附录 1	楔体破坏分析	240
第一节	导言	240
第二节	问题	240
第三节	第一部分——工程图解法	241
第四节	第二部分——球面投影解法	250
第五节	第三部分——解析解法	267
附录 2	楔体快速运算解法	278
第一节	导言	278
第二节	简解	278
第三节	繁解	281
附录 3	加固岩石边坡的安全系数	292
附录 4	三角函数表	294
附录 5	换算系数	297
参考文献		299
	《岩石边坡工程》修订第三版增减的内容	311

第一章 经济和规划方面的考虑

第一节 导 言

本书论述了岩石边坡的稳定性及评价这种稳定性的各种方法，论述了改善有潜在危险边坡的稳定性的各种技术。岩石边坡的破坏，或为防止破坏所需要的整治措施，是需要经费的。因而在专心于边坡性态的详细考察之前，考虑这种性态的某些经济含义是适宜的。

许多作者^{1~8*}曾讨论过边坡角对露天采场设计和经济的影响，感兴趣的读者可参考那些与本题有关的比这个引言要更充实的出版物。这些论述反映出最明显的事实是：为了采出矿体而必须把采掘的废石压缩到最小数量，矿山的最终边坡一般要挖成尽可能最陡的角度。然而以这种方式得到的经济利益，可能被一次大的边坡破坏所抵消，所以评价最终边坡的稳定性是露天采场设计中的一个重要部分。

Stewart和Kennedy^{2**}指出，在一个露天矿中，不仅仅最终边坡的坡度对于生产的总利润具有影响，而且根据现金流通计算，往往有相当大的经济收益是在初期剥离过程中采用边坡所获得的。这些作者还强调了这样一个事实，即除稳定性以外，在一个露天采场，还有几个决定边坡陡度的因素。大型采矿设备不能在窄台阶上操作，运输道口的坡度必须保持在由卡车或火车的最佳适宜的运行条件所决定的限度内，而这样，通常就意味着较平缓的边坡，而且，在某种情况下，台阶的最大高度和宽度是由地区采矿规程规定的。

从整个采矿作业的经济观点来说，总边坡显然是重要的，与此同时单个台阶的稳定性，却往往是和负责日常采矿作业的工程师更为直接有关的事。支承着主要运输道的、或是临近厂房边界的、或是临近重要设备的台阶边坡的破坏，会使采矿计划严重地破坏。也正是在这些可能只发生微小预兆的、相对小的破坏中，生命就可能丧失，而设备会遭到毁坏。

单个台阶的稳定性是受局部地质条件，该地段总边坡的形态，局部地下水条件控制的，而且，也受边坡所用的开挖技术控制。对于不同的采矿环境，这些控制因素，其变化显然是这样的广泛，以致对于台阶应当是多高多陡才能保证其稳定性，要订出一个通用准则来是不可能的。当对一个在特定的采矿作业中是重要的台阶的稳定性有所怀疑时，那末，它的稳定性就必须根据地质构造、地下水条件以及发生在该指定边坡中的其它控制因素来加以评价。本书就是致力于为进行这种评价的工程师和地质师提供这方面技术的。

第二节 边坡失稳的经济后果

对于这个题目也许最好用一个例子来介绍，这个例子既包括控制岩石边坡性态的最重要的因素的考虑，又包括不稳定的经济后果的考虑。

图1所示的边坡中，两个大型的不连续面在开挖的初期就暴露出来。测出此二不连续

* 此数字系指书末所列的参考文献。

** 原文误为1，已改正。——译注

面的倾向和倾角，并将这一量测结果投射到岩体之中结果表明，当边坡高达100英尺时，不连续面的交线就将出露在坡面上。这就需要研究这个边坡的稳定性，如果发现边坡不稳，还需要估算对于因而引起的问题采取对策所用的各种方法的费用。

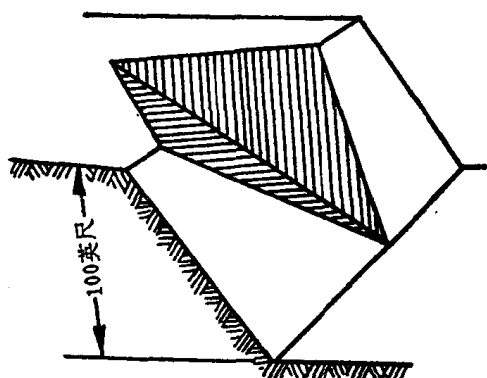


图 1 台阶稳定性分析实例中楔体破坏的几何形状

本分析中所用的楔体几何形状和材料性质的细节：

楔体在其上滑动的两个不连续面，倾角各为 45° ，走向与坡面各成 45° ，构成一个对称的楔体。两个不连续面的摩擦角都是 30° ，粘结强度为各 1000 磅/英尺²，岩石的容重是 160 磅/英尺³



插图 1-1 露天矿台阶楔体破坏一例

图 2 所示是两种极端情况下各种坡角的边坡的安全系数*：一种是干燥边坡，一种是开挖在地下水位很高的岩体中的边坡。在本书后面的详细讨论中将会清楚边坡中地下水的存在对其稳定性产生极其重要的影响，因而排除地下水则是增强边坡稳定性的最有效的措施之一。

如果安全系数降至 1 以下，边坡就会破坏，由图 2 可见，若开挖的坡角陡于 64° ，饱水边坡就会破坏。理论上干燥边坡在任何坡角下都是稳定的，但是为了保证边坡的稳定，即使安全系数接近 1.2 也不能认为是足够高的。大部分采矿条件下，只要求边坡在较短期内保持稳定，因而 1.3 的安全系数通常认为是可以接受的。对于比较永久性的边坡，例如运输道经过的边坡，1.5 的安全系数是比较合适的。

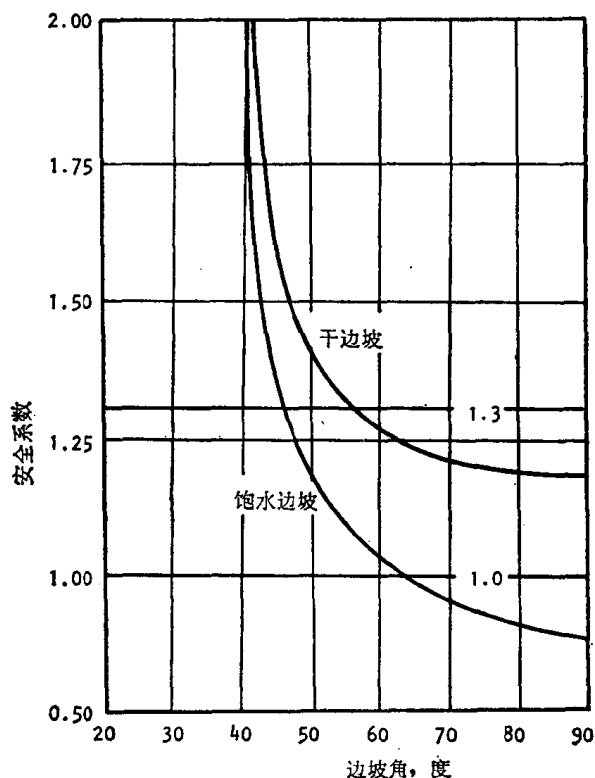


图 2 安全系数随坡角的变化

* 在稳定性分析中使用的这个术语和其它一些术语的定义在本书后面给出。不必为了这个例子，去详细了解分析方法。

** 此处漏字，已按第一版更正。——译注

在本例中，1.3的安全系数被认为是足够的了，而这也就意味着，如果不再采取其它步骤以稳定边坡的话，为达到安全系数1.3，对于饱水状态下的边坡就要挖到46°，而如果是干燥状态，就可挖到55°。

成本的估计只能在挖方或清方的吨数（如果发生塌方的话）计算出来后才能得出。对于一定范围的坡角曾经这样做了，其结果如图3所示。在削缓边坡的吨数计算中，假定所需开挖的坡面长300英尺。在许多情况下，削坡也许还会影响被削部分上面的台阶，因而吨位将会比图3所给出的多得多。

图3还包括两条代表外部荷载的曲线，这个荷载是通过在与边坡面成直角钻进的水平钻孔中设置锚索，并把它锚固在不连续面后面的岩体中所施加的，并且要求它给予干燥和饱水的边坡以1.3的安全系数。

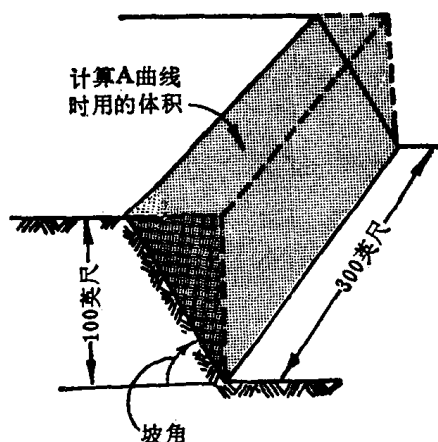
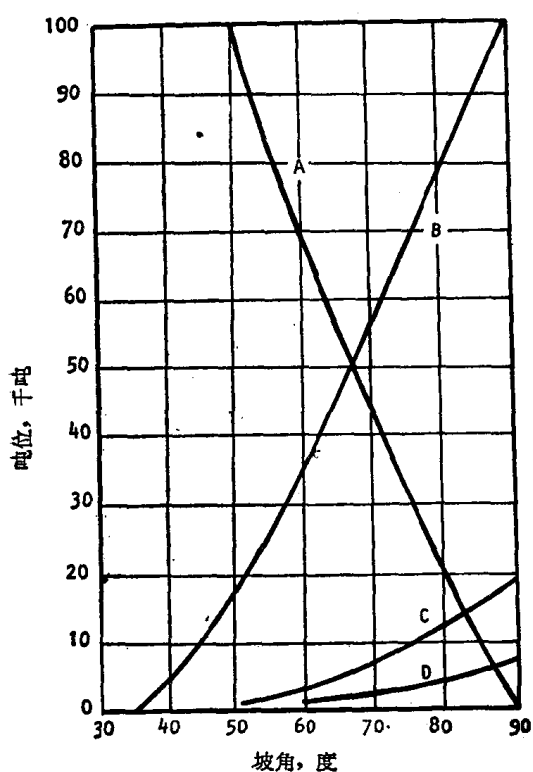


插图 1-2 边坡几何形状图

图 3 挖掘吨位和锚索荷载

线A—削缓100英尺（高）×300英尺（长）的边坡要开挖的吨位

线B—如发生楔体破坏时，须清方的吨位

线C—安全系数为1.3的饱水边坡所要求的锚索荷载

线D—安全系数为1.3的干燥边坡所要求的锚索荷载

工程师现在可采用的各种方案的成本，将取决于矿山所处的地理位置、聘请专家设置排水或安装张力锚索等业务的费用以及地区的劳动力成本。在导出图4所示的各种费用时，作了如下假定：

a. 取从工作面上采掘每吨矿岩的费用为基本的费用。因此，图4中的A线可由图3中的A线直接得到；

b. 清理边坡破坏所花的费用, 假定是基本采掘费用的 $2\frac{1}{2}$ 。这样得出从 64° 边坡角开始的 B 线, 64° 的边坡是理论上能发生破坏的最缓的边坡。

c. 排水系统的设计和安装, 涉及一笔 75000 个单位的费用 (E 线), 不论坡角大小如何, 这笔费用都是不变的。

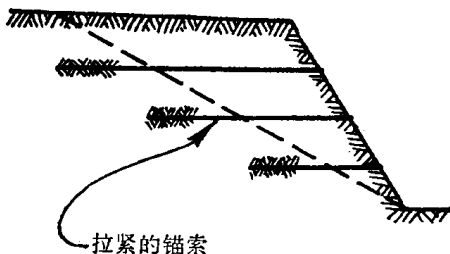


插图 1-3 拉张锚索

d. 由专家承包人安装张力锚索的费用假定为每吨荷载是 10 个单位。这就得出 C 和 D 线。

在图 4 所示数据的基础上, 工程师就能够考虑供他选择的各种方案的有关费用了。下面列举几个这样的方案:

a. 削坡到 46° , 给饱水条件下的边坡以 1.3 的安全系数 (A 线)。

总费用: 116000 单位

b. 削坡到 55° 并设置排水系统 (A 线和 E 线), 给干燥边坡以 1.3 的安全系数。

总费用: 159000 单位

c. 开挖边坡到 64° , 以诱发破坏并清除破坏的岩料 (A 线和 B 线)。

总费用: 166000 单位

d. 开挖边坡到 80° 并安装锚索, 给饱水边坡以 1.3 的安全系数 (A 线和 C 线)。

总费用: 137000 单位

e. 使边坡直立并装置排水系统和锚索, 给干燥边坡以 1.3 的安全系数 (线 A、D 和 E)。

总费用: 155000 单位

f. 根据边坡可能不会发生破坏的假定, 开挖边坡到 60° , 并作如果发生破坏的清方准备 (图 5)。

最高总费用: 159000 单位

最低总费用: 70000 单位

必须强调说明, 这些估算都是假定的, 并且只适用于这个特定的边坡。各方案的费用, 将随边坡不同而变化, 不要企图从所给的图表中导出通用的法则。

根据上面所列的估算, 大多数露天采矿工程师或许会决定削坡到 46° , 从而消除问题。这一方案的费用比所考虑的其它方案的费用都低, 除 f 项的最低费用以外。削坡到 46° 有一个重要的并胜过其它方案的优点, 那就是它不附带这样的可能性, 即已经在整治措施上花费了大量资金, 但由于意外情况的组合使边坡仍然有可能发生破坏。如果这种情况发生, 则总的费用将是很高的。

在某些地方, 要削坡到给出一个足够的安全系数, 并非在所有条件下都是可能的。在

这些情况下，应当考虑其它的一些方案。

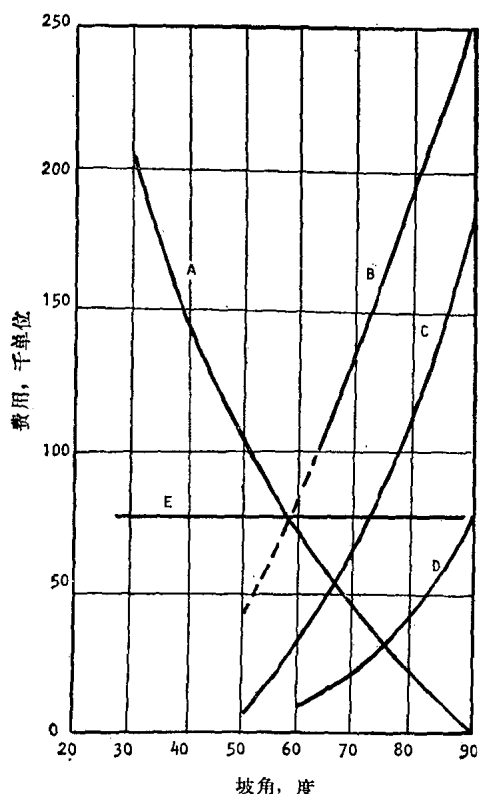


图 4 各种选择的相应费用

线A—按图3中的线A由坡面采掘矿岩*所需要的费用
线B—清除边坡破坏所需的费用
线C—在饱水边坡中安装锚索所需的费用
线D—在干燥边坡中安装锚索所需的费用
线E—边坡疏干的费用

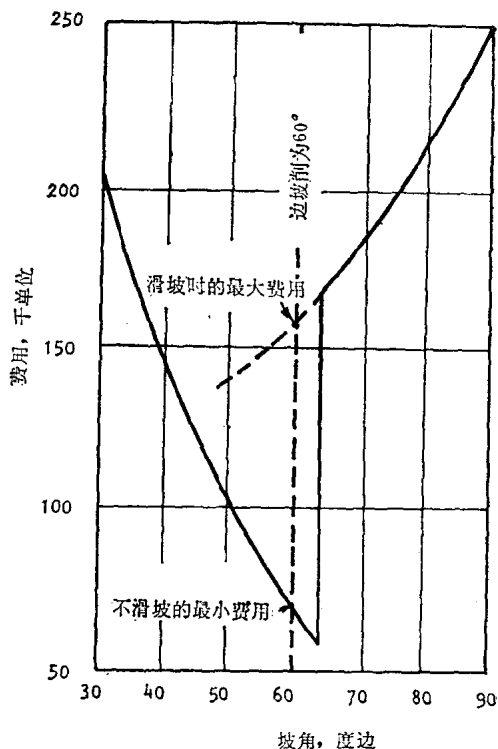


图 5 将边坡开挖到60°并承担滑坡的危险所需的费用
滑坡前的费用由图4中的线A给出。挖掘边坡和清理滑坡的费用由线A和线B费用的总和

图5所示的 f 方案是在露天矿常采用的一种决策，尽管它通常不是以本例中所提供的知识为背景的一种决策。图2表明，假如开挖坡角陡于64°，且边坡处于饱水状态时，边坡破坏是很可能的。假定这种条件仅发生在今后10~20年才可能出现一次特大的暴雨期间，也就是说，这种条件有希望不在边坡预期的存在年限内出现，露天矿山工程师可能决定把边坡挖成60°，并把边坡破坏的危险作为矿山设计内容的一部分加以考虑。如果侥幸边坡不发生破坏，则总费用就将保持在70000单位。反之，如果已做好适应和清理破坏的充分准备，即使破坏发生，它所引起的总费用是159000单位，也仍在其它方案的费用范围之内。

Kennedy等人^{9,10}论述智利Chuquicamata矿预测和成功地适应一个大滑坡的报导已证明，如果生命和设备损失的危险性能降低到最小，则把边坡破坏作为计划采矿作业的一部分是可行的。在这种情况下，如果打算使控制边坡破坏后果的任何措施取得成效，则了解边坡可能的性态是十分重要的，这种了解可从上述稳定性的分析中得到。

第三节 稳定性研究的计划

一个典型的露天矿在它的服务年限内，只可以经受二或三个边坡破坏。那么，怎样才

* 原文为采掘每吨矿岩，似误。——译注