

摘 要

本文在总结前人研究成果的基础上,归纳总结岩体顶板结构的力学性质和破坏机理,采用了理论分析和数值模拟相结合的方法,对顶板稳定性和最小安全厚度进行了分析计算,同时,将模糊灰元与矿岩稳定性评价相结合,对矿岩稳定性等级和优劣排序进行了模糊灰元评价。

针对矿岩稳定性评价的模糊性,从矿山开采的角度选取参数,在模糊物元理论、灰色系统理论和关联函数运算的基础上,建立了矿岩稳定性评价的模糊灰元模型,经关联变换及从优隶属度处理构造关联系数模糊灰元。采用求和归一法与熵值法相结合确定评价指标组合权重系数的方法,通过关联度计算和最大关联度原则,对广东大宝山矿矿岩稳定性等级和优劣排序进行了模糊灰元评价。

利用 Matlab,结合鲁佩涅伊特理论和数值分析方法分析计算顶板应力分布情况,发现空区顶板的拉应力是关系顶板稳定性的关键因素,并得到了不同采空区跨度下不同厚度顶板内最大拉应力的关系曲线。

结合广东大宝山矿业有限公司露天地下联合开采的工程实例,根据目前露天地下开采坑底隔离层顶板安全厚度的计算方法,选择了具有代表性的五种理论计算方法和数值模拟方法进行计算,发现各种方法得到的结果变化趋于相同,最后对结果进行了求和归一法数据处理和多项式数值逼近,得到了不同空区跨度与顶板安全厚度的关系,根据这种关系可以计算出随机采空区跨度的顶板安全厚度。

关键词: 顶板稳定性, 模糊灰元, 关联度, 安全厚度, 数值模拟

ABSTRACT

Based on the predecessor's research, this paper summed up the mechanical properties, damage mechanism and analysis of stability of rock mass-roof structure, analysed the roof stability and calculated the safety thickness by using the methods of five representative ways and three dimension numerical simulation, combined the fuzzy grey element with ore stability evaluation, evaluated the ore stability classification and the arrangement of fine-bad sequence.

Aiming at the fuzzy of ore stability evaluation, the parameters in underground mining were taken into account for evaluation. On the basis of fuzzy-matter-element theory, grey system theory and dependent function calculation, a fuzzy grey element model calculating procedure is proposed. Then a fuzzy-grey-element of correlative coefficient is constructed by connecting with correlative transformation and processing the optimal subordinate degree. Establishing the combinatorial weight coefficient of evaluation index by combining summation normalization method with entropy method, calculating the dependent degree and choosing the max to the ore stability classification and the arrangement of fine-bad sequence of Dabaoshan Mine Mine.

This paper analysed and calculated the situation of roof's stress distributing by Using Matlab, K.B.Lu Peinie theory and the method of numerical simulation. It was found that the tensile stress is the main factor of the roof stability and had the curve of max tensile stress of the different thickness of roof in different span

Through the conditions of Dabaoshan Mine of open pit and underground mining and many methods of calculating the boundary pillar's safety thickness, the boundary pillar's safety thickness has been calculated in five representative ways and three dimension numerical simulation. The results have compared and analysed each other. Through summing up the calculation results by summation normalization method and approximating the result by polynomial numerical approximation method, the relationship between the span of mine-out areas and the boundary pillar's safety thickness has been established and could calculate the safety thickness in different span of mine-out.

KEY WORDS: roof stability, fuzzy grey element, dependent degree, safety thickness, numerical simulation

原创性声明

本人声明，所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了论文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得中南大学或其他单位的学位或证书而使用过的材料。与我共同工作的同志对本研究所作的贡献均已在论文中作了明确的说明。

作者签名：岩小明 日期：____年__月__日

关于学位论文使用授权说明

本人了解中南大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留学位论文，允许学位论文被查阅和借阅；学校可以公布学位论文的全部或部分内容，可以采用复印、缩印或其它手段保存学位论文；学校可根据国家或湖南省有关部门规定送交学位论文。

作者签名：岩小明 导师签名：李强 日期：____年__月__日

第一章 绪论

1.1 课题来源及研究意义

1.1.1 课题来源

本文依托 973 课题的子课题“复杂工程岩体动力学特性及其随机力学规律研究”和科研所的横向课题“复杂安全条件露天地下联合开采的可靠性分析与研究”及“大型露天矿复杂地下采空区精确探测与安全开采研究”，在地下岩体工程动力稳定及随机可靠性等问题研究的大背景下，研究采空区顶板稳定性以及确定顶板安全厚度。

1.1.2 选题目的和意义

随着经济技术的发展和人们生活水平的不断提高，大量地下岩体空间的开发都得到了飞速发展，世界各国地下岩体工程开挖量与日俱增，我国地下岩体工程开挖工作量非常大，为国防和民用目的而在地下开挖的各种坑道、厂房、仓库、机库、地下存储洞室、油库、城市地铁、隧道、隧洞以及矿山井巷等工程，在国家基建费用中占有重要的比重。对于地下岩体工程其工程稳定及建设成本是业主和设计者非常关注的问题。确保工程的长期安全稳定，是需要解决的根本问题。

对于地下岩体工程，顶板稳定性主要是由岩体顶板力学性质及其岩体中应力分布规律所决定。顶板稳定性问题是岩体结构复杂性与地下岩体工程适应性和协调性的综合反映。在我国地铁、隧道工程中，经常遇到各种各样的岩体，而地铁、隧道围岩失稳是复杂的力学问题，因此研究地下岩体工程顶板稳定性问题，具有重要的理论和实际应用价值。

我国当前在大型矿山工程、水电工程中，普遍面临着开采深度加大的问题。如何确立岩体工程的稳定性是水电工程和矿山安全的关键技术问题。针对地下工程的安全施工，特别是矿山当中的冒顶事故，研究岩体顶板稳定性，对巷道、采场、硐室等顶板的稳定与加固技术具有重要的指导作用。矿山工程中露天转地下开采时深层巷道围岩稳定、岩层顶板稳定、分区优化支护等问题，是一个受到多因素相互控制的复杂问题，这个问题解决的好坏直接影响着矿山安全开采和效益。

1.2 地下岩体工程顶板稳定性研究现状

1.2.1 地下岩体工程顶板结构类型

许多学者对岩体结构类型进行了划分，我国岩体结构类型划分最具代表性的是谷德振和孙广忠教授分别提出的。谷德振教授将其分为块状结构、镶嵌结构、

碎裂结构、层状结构、层状碎裂结构和散体结构^[1]。孙广忠教授提出岩体是具有一定的成分、一定的结构、赋存于一定地质环境中的客体，岩体结构控制论是岩体力学的核心，应在岩体结构研究基础之上开展岩体变形、破坏及其力学性质的研究，并将岩体分为一级的块裂结构、板裂结构，二级的完整结构、断续结构、碎裂结构和过渡型的散体结构^[2-3]。钱鸣高教授将沉积岩划分为整体结构、块状结构、层状结构、碎裂结构和散体结构^[4]，并描述了各种类型岩体的结构特征和巷道、硐室的稳定性，在总结采区巷道破坏形式和主要原因时，列举了一些顶板破坏形式与岩体结构的关系^[4]，如散体结构顶板发生规则拱行冒落，块状结构顶板形成危石冒落，层状结构顶板形成下沉变形和阶梯形冒落等。何满潮教授在讨论软岩围岩机理时，将软岩分为整体结构、块状结构、层状结构、薄层结构、镶嵌结构、层状碎裂结构、碎裂结构、散体结构^[5]，并提出岩体结构控制着围岩的失稳破坏方式。侯公羽博士将煤巷顶板结构分为均质顶板、层状顶板和松散介质^[6]。

1.2.2 顶板岩层力学性质研究现状

国内外学者对顶板岩层力学性质进行了大量的理论分析和试验研究工作，主要有两个方面：一是基于连续梁假设岩层发生溃屈破坏和尖点失稳的性质研究；二是岩层铰接拱性质研究。

1. 溃屈破坏研究

(1)孙广忠教授将顶板岩层简化为两端固支弹性梁，顶板失稳是在纵向和横向两个方向载荷作用下的溃屈破坏运用能量平衡原理进行了力学分析，得出单层岩石发生溃屈破坏的临界纵向载荷公式^[7]：

$$p_{cr} = \frac{4\pi^2 EI}{s^2} - \frac{q \sin \alpha}{2} s \quad (1-1)$$

式中 E 、 I 、 s 分别为岩层弹性模量、梁的惯性矩和跨度； q 、 α 分别为梁的横向载荷和倾角。

(2)秦四清、白晨光、邵爱军和谢卫红等将顶板岩层简化为简支梁或固支梁，顶板岩层承受纵向和横向应力，应用尖点突变理论分析了地下硐室顶板岩层的失稳条件^[8-11]。两端固支水平岩层挠度函数取为：

$$y = \frac{u}{2} \left(1 - \cos \frac{2\pi x}{s}\right) \quad (1-2)$$

得到失稳的充要条件为：

$$\left(\frac{4\pi^2 EI}{s^2} - p\right)^3 + \frac{27}{4} Elq^2 = 0 \quad (1-3)$$

式中 p 、 q 、 s 的含义见图 1-1 所示。从此式可以看出，岩层发生尖点失稳条件取决于岩层性质、几何条件以及载荷组合，与岩层强度无关。

2. 铰接拱力学性质研究

(1) 我国学者钱鸣高、贾喜荣、朱德仁等把顶板视作梁或板，力学模型如图 1-2 所示，利用材料力学及梁或板的理论进行力学分析，对煤矿采场老顶裂隙体梁稳定平衡理论进行了试验和理论分析研究，提出了裂隙体梁平衡的 S-R 稳定理论 [12~16]

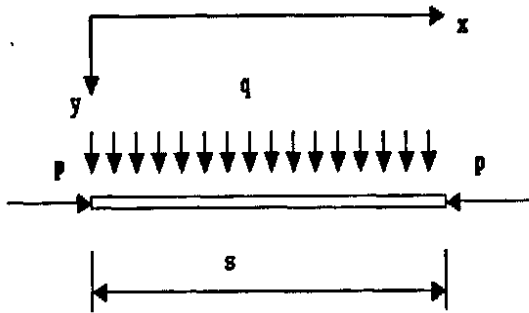


图 1-1 力学模型

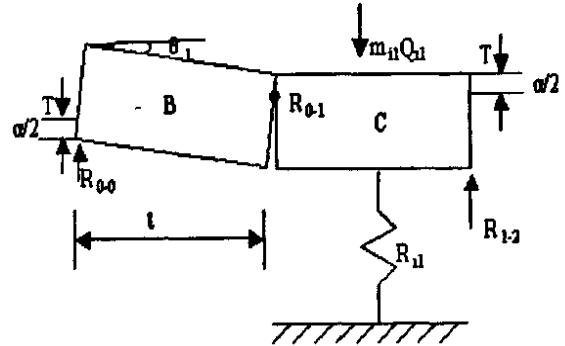


图 1-2 砌体梁力学模型

(2) 缪协兴用光弹实验法^[17]研究了裂隙体梁砌块间纵向载荷分布规律，如图 1-3 所示。张志文用石膏块模拟老顶岩石制作裂隙体梁（图 1-4），研究了拱铰压碎破坏的强度条件及横向载荷、纵向载荷与挠度的关系^[18]。

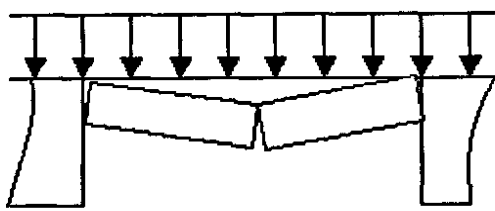


图 1-3 裂隙体梁结构模型

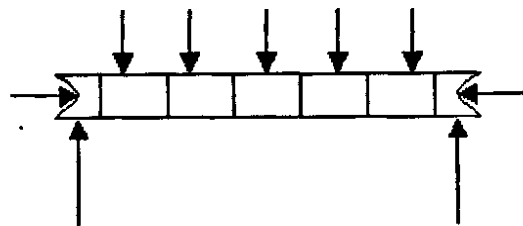


图 1-4 裂隙体梁试验模型

(3) Sterling R.L.对 660×75×75mm 岩梁进行了力学性质试验研究^[19-20]，用伺服式压力机施加横向载荷，由四根拉杆施加纵向变形约束，试验测量了梁跨中挠度与横向载荷的关系，以及横向载荷与纵向载荷的关系如图 1-5 所示。

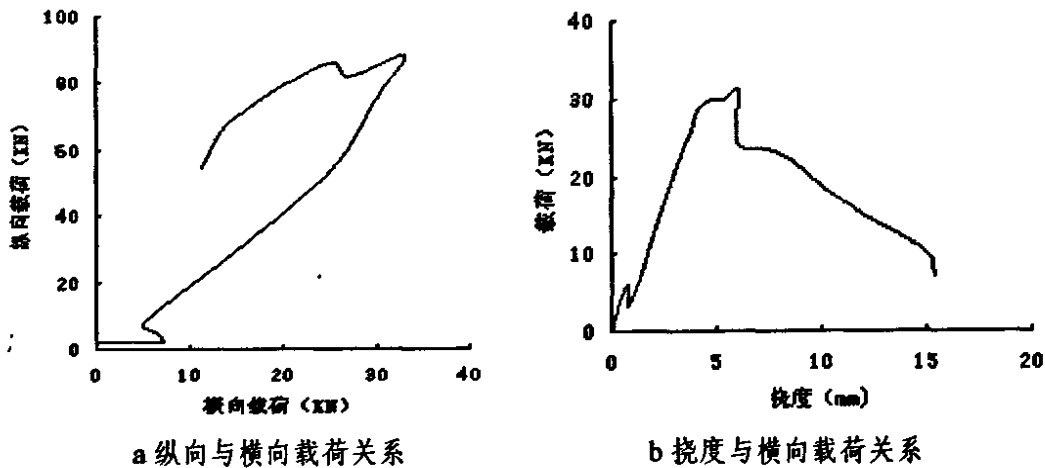


图 1-5 sterling 试验结果

(4) Passaris E.K.S.用混凝土模拟岩石, 将两块材料对接成总长 0.9-1.4m, 厚 0.13-0.18m 的岩梁为试件, 并结合有限元分析结果, 对裂隙体梁强度、拱铰处纵向载荷分布和量值计算等问题进行了研究^[21], 得到了铰接拱纵向与横向载荷关系(图 1-6)及铰接拱承受的横向最大均布载荷与跨厚比关系(图 1-7)。

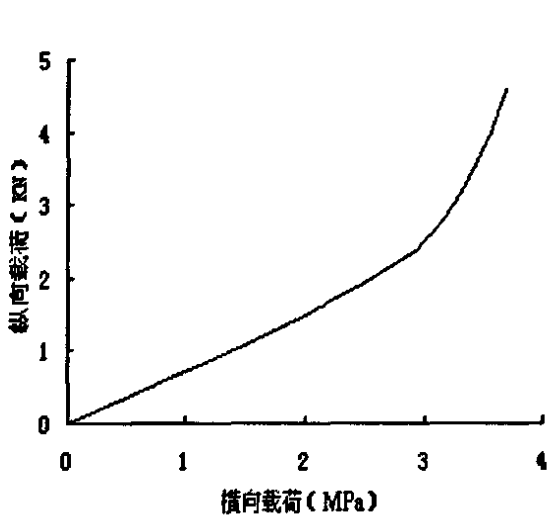


图 1-6 纵向与横向载荷关系

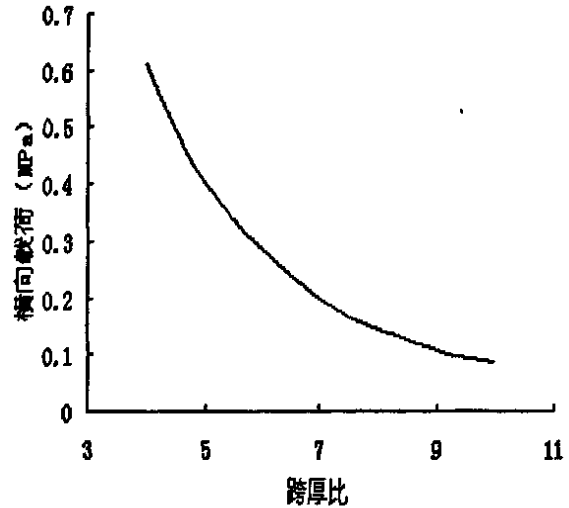


图 1-7 横向最大均布载荷与跨厚比关系

(5) 蔡美峰等用相似材料试件模拟顶板岩层^[22-23], 由伺服式压力机施加横向载荷, 纵向施加弹性约束和初始载荷, 装置示意图如图 1-8 所示。试验中调整顶板岩层跨厚比和初始纵向载荷, 研究跨厚比和初始纵向载荷的影响规律和顶板岩层铰接拱变形失稳破坏条件。

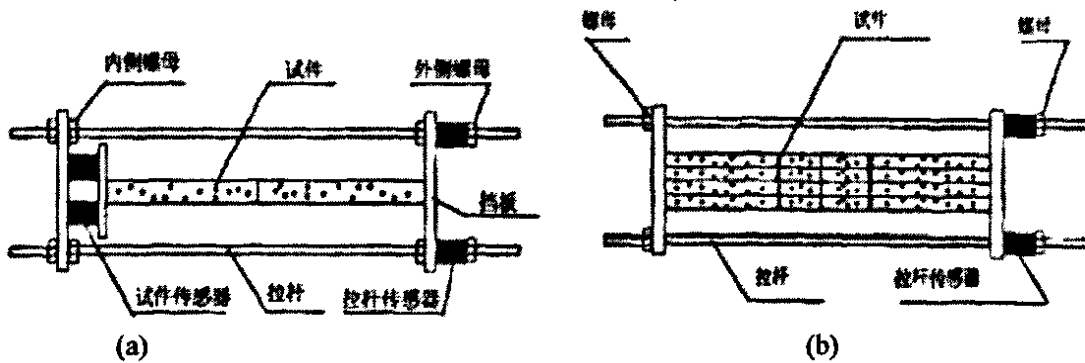


图 1-8 试验装置示意图

1.2.3 顶板岩层结构的研究方法

研究顶板岩层结构时, 若目的不同、对岩层认识的出发点不同, 则采用的研究手段及方法也会不同, 岩层控制领域的专家学者在这方面作了许多有益的探索, 但研究方法总的可归纳为: 力学模型理论分析方法、相似材料模拟研究方法和数值模拟计算研究方法。采用力学模型理论分析方法进行研究时, 首先把顶板岩层看作某种介质或结构, 建立起力学模型, 然后利用相应的数学、力学理论进行分析、计算。例如, 把顶板岩层视作塑性体或均质线弹性体, 则利用塑性理论或弹性理论进行研究; 若把顶板岩层视作松散体, 则利用散体介质理论进行研究; 也

可以把岩层作为梁或板利用有关梁或板的理论进行研究。在顶板岩层控制研究领域,往往把破断前的岩层视作梁或板,利用材料力学及板的理论进行有关的力学分析;对于破断之后的岩层,往往处理为由岩石块体通过某种结合方式组成的岩梁,利用静力学分析的手段进行研究。该方法的关键是如何处理岩层的介质或结构属性。由于在建立力学模型时不可避免地做了一些理想化的假定,往往使得研究结果与工程实际有一定差距,或者说这些研究结论只能在特定的条件下成立。相似材料模拟研究方法在岩层控制研究领域经常采用,该方法可以根据需要对岩层存在条件进行变换,直观研究顶板岩层的移动及破坏过程,但由于被模拟岩石的力学参数的选取及模型制作工艺等对实验结果影响很大,只能得出一些定性的结论,所以,尽管它可以作为一种独立的研究方法使用,但有一定的局限性。数值模拟计算研究方法是随着计算机技术的发展而发展起来的快捷、方便的方法,目前使用的数值计算方法有有限元法、边界元法、离散元法、神经元法等。数值计算方法可以采用多种不同的数学模型进行计算,计算分析的时间相对较短,但由于受计算模型的限制,对岩石这种材料也只能得到定性的结论。

由于岩层是一种存在节理、裂隙和结构面的非均匀介质,再加上岩层所受载荷的灰色特性,无论单独采用哪种研究方法,所得结果都会与实际情况有一定差异,因此,研究结果最终应用于工程实际都需要用现场实测数据进行检验和修正。就研究问题的方法而论,现在对采场上覆岩层结构进行研究所采用的方法更趋于综合化,即将以上三种方法综合运用、互相补充,这样会收到比较好的研究效果。

1.3 研究内容和研究方法

本文在前人的研究成果上,进一步改进与创新,通过总结岩体顶板破坏机理和稳定性力学模型分析,结合工程实际分析了大宝山矿露天地下联合开采顶板的稳定性,并对隔离层最小安全厚度进行了确定;运用模糊灰元理论对矿岩的稳定性级别和优劣排序进行评价;主要内容如下:

1. 顶板破坏机理和稳定性力学模型分析

全面归纳岩体顶板结构力学性质研究现状及其破坏机理、破坏判据,总结了岩体顶板稳定性力学模型分析方法,明确了岩体顶板结构稳定性影响因素。

2. 矿岩稳定性的模糊灰元评价

将模糊灰元与矿岩稳定性评价相结合,从地下开采的角度选取能够反映矿岩稳定性的参数进行评价。在模糊物元理论、灰色系统理论和关联函数运算的基础上,建立了矿岩稳定性评价的模糊灰元模型,经关联变换及从优隶属度处理构造关联系数模糊灰元。采用求和归一法与熵值法相结合确定评价指标组合权重系数的方法,通过关联度计算和最大关联度原则,对广东大宝山矿矿岩稳定性等级和优劣排序进行了模糊灰元评价。

3. 岩体顶板稳定性分析

(1) 结合 Matlab 和鲁佩涅伊特理论计算顶板应力分布情况，发现顶板的应力集中在顶板中心和两边处，这两个部位是破坏的始发位置，同时得到了不同采空区跨度下不同厚度顶板内最大拉应力的曲线关系。

(2) 本文以大宝山矿露天地下开采的工程实例，采用数值分析方法，对隔离层顶板稳定性进行分析计算，发现空区顶板的拉应力是关系隔离层顶板稳定性的关键因素。

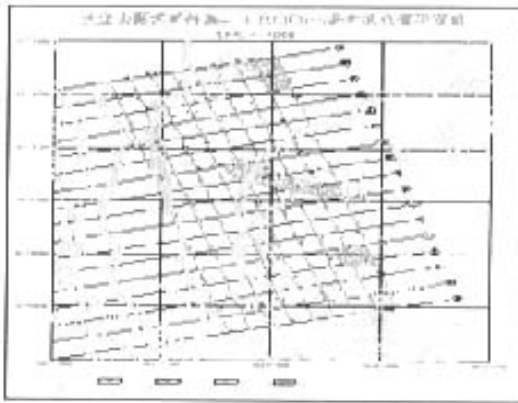
4. 岩体顶板最小安全厚度的确定

综合考虑各种计算隔离层顶板安全厚度的方法，选择了具有代表性的数值模拟方法和五种理论计算方法，对各种计算结果进行了比较和评价，最后就各计算结果进行了求和归一法数据处理和多项式数值逼近，得到了不同空区跨度与隔离层顶板安全厚度的关系。

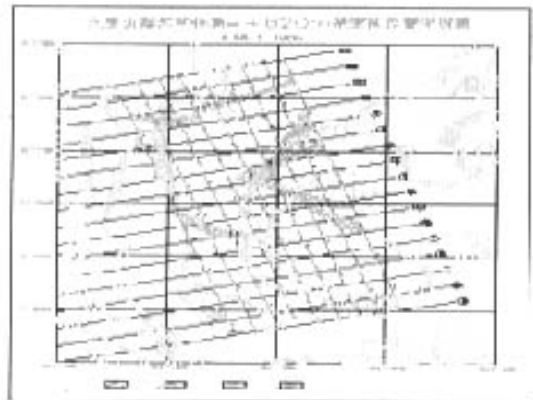
第二章 工程背景及矿岩力学试验

2.1 工程概况

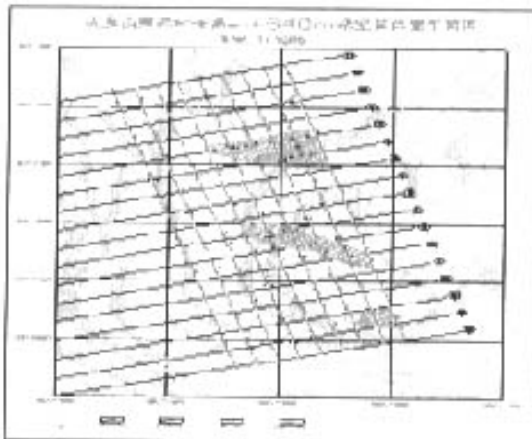
大宝山多金属矿床铁矿体裸露地表，为典型的铁帽状矿床，铜、铅、锌、硫矿体赋存于铁矿之下。因而井下铜矿开采与露天铁矿开采并行，构成了大宝山矿露天地下开采同时进行的矿山开采模式，在时空上为矿山开采带来了极大的安全隐患。并且矿区内井下民采现象严重，外加矿山地采超前，在露天隔离层四周及坑底用空场法开采，导致大量采空区残留其中，留下了许多大小不一采空区群（见图 2-1），且坑底已有两处发生了坍塌（见图 2-3），造成了资源的很大浪费。随着露天矿向深部延深和下部的采空区岩石自然冒落（见图 2-2），在露天开采坑底下面将出现许多大小不一的地下空洞，很可能造成更多的地表下沉、边坡坍塌、地表泥石流淹井或水灾等重大工程灾害，或发生矿柱的多米诺骨牌坍塌效应，从而引发大面积地压活动，发生重大的人员伤亡与设备损失，严重危及到露天和地下开采的安全。



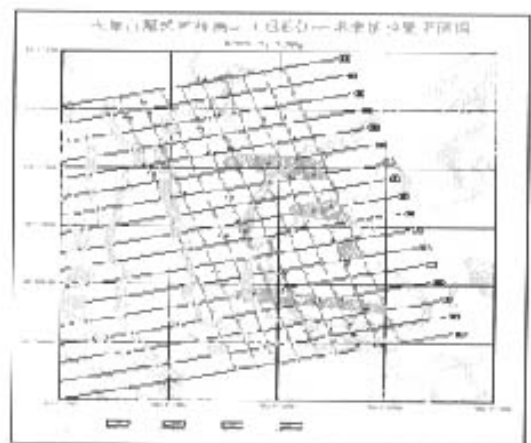
(a) 600m 位置



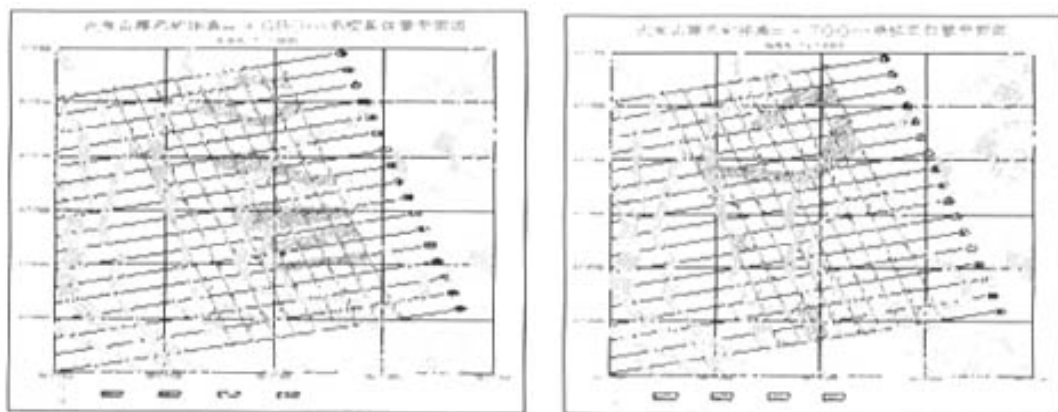
(b) 620m 位置



(c) 640m 位置



(d) 660m 位置



(e) 680m 位置

(f) 700m 位置

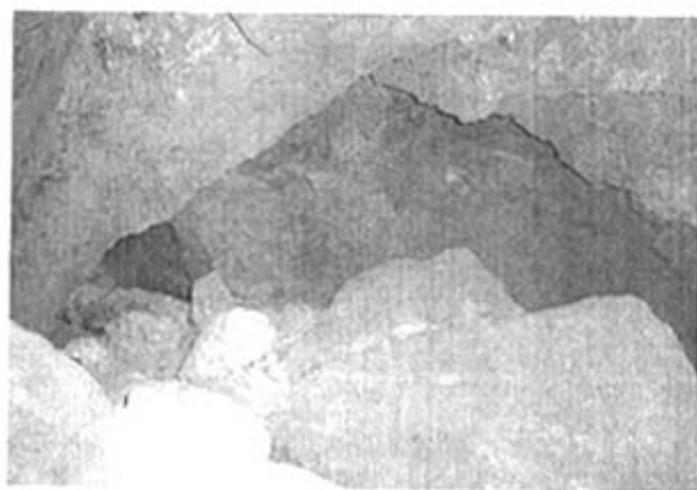
图 2-1 采空区位置平面图



(a) 顶板脱层冒落

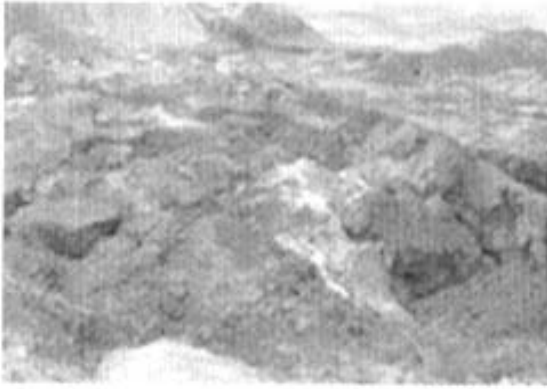


(b) 大块冒落



(c) 采空区大面积冒落

图 2-2 采空区岩石自然冒落



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

图 2-3 坑底坍塌

2.2 地质背景

2.2.1 地层

大宝山矿区内出露的主要地层为中泥盆统东岗岭组和中下泥盆统柱头群。矿区外露的地层有：东侧的上泥盆统天子岭组和帽子峰组，西侧的下侏罗统兰塘群，北侧的寒武系浅变质岩。

(1)中下泥盆统柱头群 (D_{1-2gt}) 地层可分为上下两个亚群。上亚群底部为砾岩和砂砾岩，上部为粗砂岩、石英砂岩及长石石英砂岩。下亚群底部为砂砾岩，石英砂岩，粉砂岩，上部为绢云母页岩与粉砂岩互层。

柱头群呈角度不整合覆盖于寒武系之上，与上复东岗岭组则呈连续过渡关系。地层总厚度 1300m。

(2)中泥盆统东岗岭组 (D_{2d}) 地层为本区的主要含矿层位，可分为上下两个亚组：

上亚组 (D_{2da}) 为一套浅海沉积的泥质灰岩、白云岩、钙质页岩、粉砂岩、热液沉积岩，含铜铅锌多金属矿层。厚度 120~160m。

下亚组 (D_{2db})：以中酸性火山碎屑岩为主，夹粉砂质页岩、泥岩、含黄铁矿层和菱铁矿层。厚度 60~100m。

2.2.2 地质构造

大宝山矿区内主要发育有两组构造带，即北北西向和北东东向。北北西向构造带包括褶皱和断裂。大宝山向斜位于矿区中部，轴向北北西，延长约 2km。向南北两端渐趋开阔而过渡为单斜构造。向斜轴部由东岗岭组地层组成，东翼较陡 ($60^{\circ}\sim 70^{\circ}$)；西翼较缓 ($40^{\circ}\sim 50^{\circ}$)。本区主要铜硫矿体即赋存在此向斜之槽部。北北西向断裂十分发育，主要的有 $Fa1Fa3$ 断裂，属成矿前的控矿构造。北东东向主要表现为成矿后的断裂构造，即 Fc 组断裂，它们破坏了矿体的完整性。

(1)褶皱：为一向斜构造，位于大宝山与方山之间，轴向北北西，两翼由两列近南北的断裂所夹持，向斜向南翘起，向北倾伏。

(2)断层：矿区断裂构造比较发育，有北北西向 (Fa)，北北东向(Fb)及北东东向(Fc)三组断裂。其中北北西向断裂在成矿前形成，为控矿构造。北东东向断裂为成矿后压扭性断裂，切断了北北西向断裂及矿体。

(3)节理：矿区主要发育有三组剪性节理，第一组节理走向近南北，与褶皱轴大致平行；第二组走向北东东，发育于大宝山流纹斑岩及花岗闪长斑岩体中；第三组走向北西西，也发育于大宝山流纹斑岩及花岗闪长斑岩中。

2.2.3 矿体与矿石特征

大宝山矿矿区内的主要矿产为风化淋滤型褐铁矿、海相火山喷发沉积型菱铁矿、斑岩型钼矿、及铜、铅、锌、硫等多金属矿。矿体的形态、产状明显受大宝山向斜构造的控制，轴部厚大，两翼较薄。矿体一般呈层状、似层状、随岩层褶皱起伏。矿体走向北北西，倾向东或北东，倾角平缓，多为 25° 左右。

矿石构造有蜂窝状构造、海绵状构造、角砾状构造、粒状构造、多孔状构造、交代溶蚀状构造、固溶体分离状构造、胶状构造及压碎状构造构造等。

露天褐铁矿结构有致密块状、疏松块状、粉状和土状。主要矿石矿物有褐铁矿、针铁矿。次要矿物有赤铁矿、菱铁矿，伴生矿物有黑钨矿、白钨矿、辉钼矿、铌钽铁矿等。主要有益成分有 Fe、Cu、Pb、Zn、S，有害组分为 As 和 F。

铜铅锌硫多金属矿矿石结构有条带状、块状、团块状、浸染状、脉状等构造。矿石类型有黄铁矿型铜矿石，磁铁矿型铜矿石，黄铁矿石，磁黄铁矿石和铅锌矿石。矿石中主要有益组份为 Cu、S、Pb、Zn，伴生有 Ag、Au、W 等，有害组份为 As 和 F。

氧化作用在本区极为发育，地表及浅部大规模褐铁矿（铁帽）的存在，即为其佐证。但就现存的硫化物矿床来说，其氧化作用则相对较弱，仅在矿床顶部的局部地段见有零星的氧化矿石。此外，在褐铁矿体（铁帽）底部的局部地段有小规模的次生硫化物（辉铜矿）富集。

大宝山露天铁矿由 6 个矿体及坡积矿组成，A+B+C+D 级储量 10504 万 t，其中 I 号矿体 9493 万 t，占铁矿总储量的 91.72%。I 号矿体出露于大宝山脊及东部山坡，呈不规则狭长状，沿北北西—南南东延伸，南至 16 线，北至 55 线，全长 2280m，平均宽 600m，出露面积 0.909km^2 ，出露标高 +1014m，最低标高 +636m。倾向北东东，倾角 $10^\circ \sim 30^\circ$ ，产状基本与地层一致，局部呈不规则透镜状。全铁含量为 40%~55%，平均 48.21%。富铁位于矿体的轴中心，边缘及尾端品位较低。

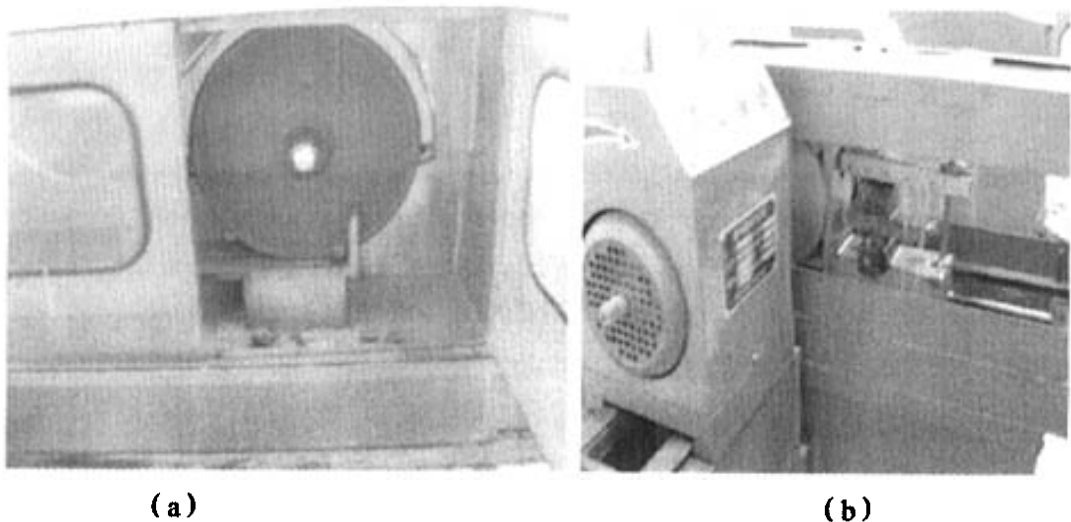
铜铅锌多金属矿床赋存在东岗岭下亚组地层中，北起 69 线，南至 34 线，长达 3100m，平均宽 400 m，矿化面积 1.24km^2 。矿床由大小 33 个矿体组成，其中 I 号矿体规模最大，其它为 II 号、XIV 号和 XVI 号矿体，其余皆为零星小矿体。I 号矿体分布在 69~18 线（主要集中在 47~27 线），全长 2640m，平均宽 350m，平均厚 55m，最厚达 160m。铜金属占全区总储量的 94%。受断层的破坏，以 Fa4 断层为界划分为 1-E 矿体和 1-W 矿体。1-E 矿体分布在 69~17 线之间，1-W 矿体则分布在 41~18 线之间。在 0 线以北以铜硫矿体为主，夹有零星的铅锌矿体；在 0 线以南，则以铅锌矿体为主。矿体轴部厚大，两翼较薄。矿体呈层状、似层状，随岩层褶皱起伏。走向北北西，倾向东或北东，倾角平缓，多为 25° 左右。矿体赋存标高 +857m~+270m 之间，主要分布在 +650m~+550m 之间。

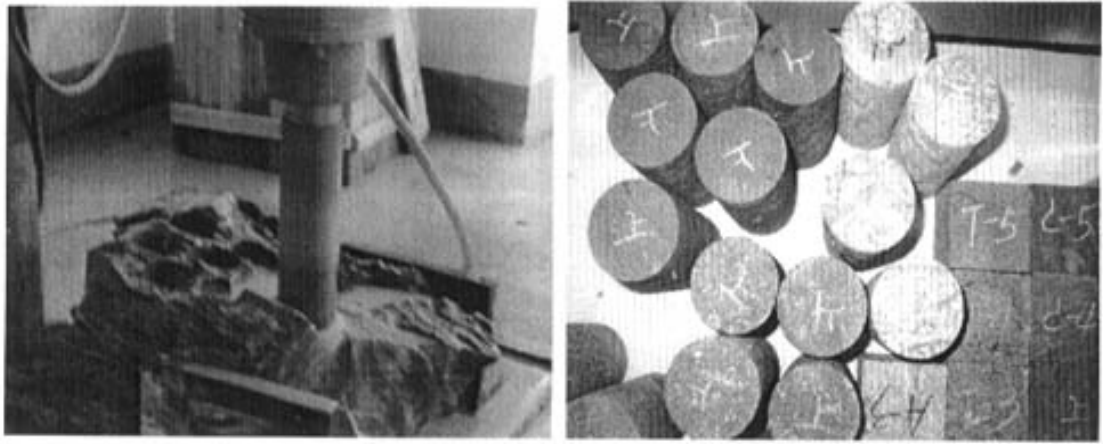
II号矿体分布在59~43线，长600m，平均宽432m，平均厚9m，铜金属储量只占全区总储量的2.8%。呈似层状产于I号矿体之上，两矿体相距5~50m。矿体赋存于标高+735~+585m之间，系一铜硫矿体。

矿区岩石力学性质：矿区出露地表从老到新有寒武系(t)、泥盆系中下统桂头群(D1-2gt)、泥盆系中统东岗岭组(D2d)、泥盆系上统天子岭组(D3t)、帽子峰组(Dam)、侏罗系下统蓝塘群(J1ln)及第四纪沉积物(Q)。其中泥盆系中统东岗岭组泥质灰岩及生物碎屑灰岩为主要含矿层位。主要火成岩为流纹斑岩和花岗闪长斑岩，并见少量辉绿岩、粗玄武岩等岩脉。矿区围岩普遍遭受强烈的蚀变，主要有硅化、钾长石化、绢云母化、绿泥石化、矽卡岩化、角岩化等。

2.3 矿岩力学性质实验

为科学了解矿体及围岩的稳固情况，判断大宝山矿业有限公司矿体开采的安全性，以便为采矿方法设计选择、采场地压管理、矿柱设计及露天地下联合开采安全隔离层稳定性分析提供科学依据，对其开采区域内矿体及其上下盘具有代表性并能够基本反映井下矿岩的基本物理力学性质的矿岩进行了现场取样，进行了试件加工（见图2-4），在试验室对试件进行了多项物理力学试验（见图2-5），得到的矿岩力学参数如表2-1。

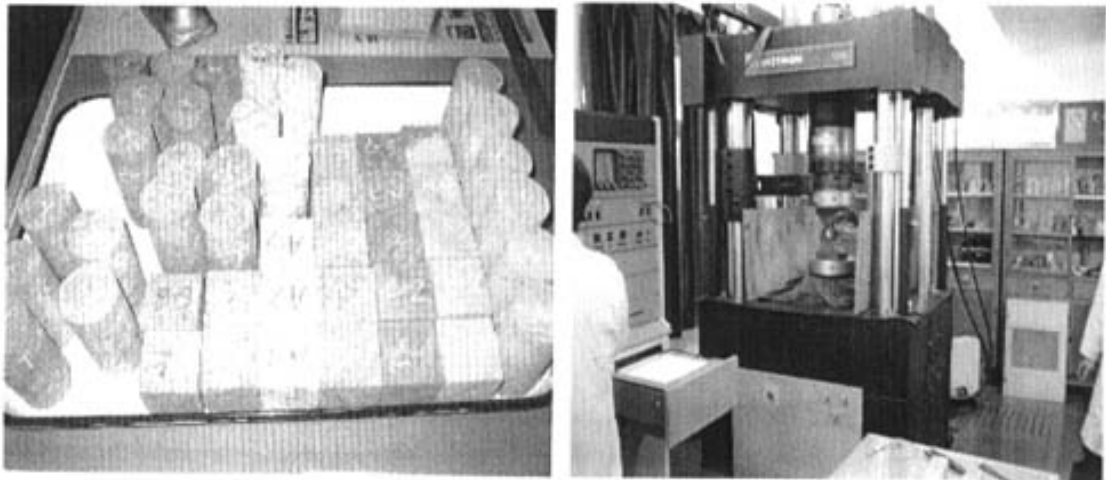




(c)

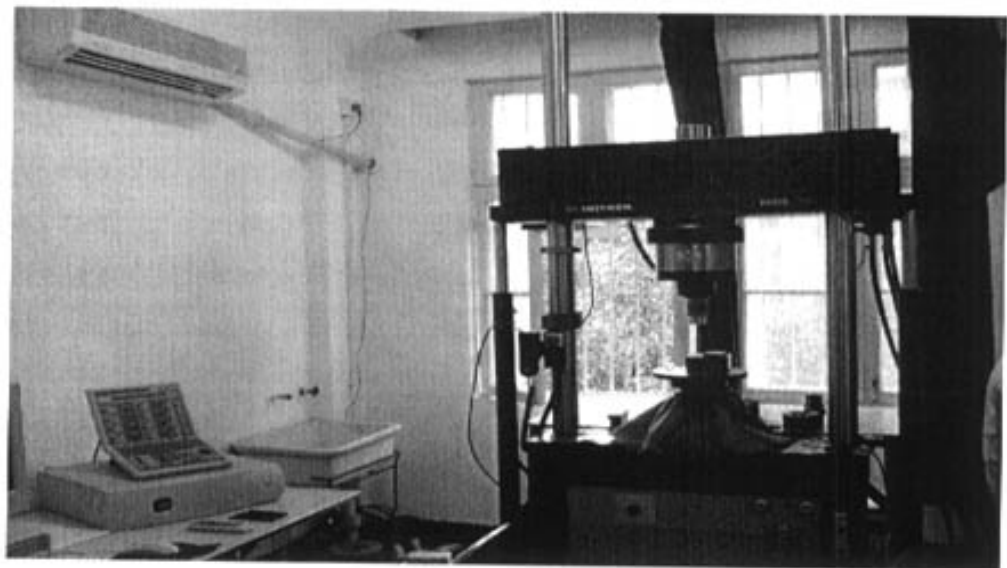
(d)

图 2-4 岩石试件制作图



(a) 剪切压缩试验所用岩石试件

(b) Instron-1342 型电液伺服控制材料试验机



(c) 岩石力学试验正在进行中

图 2-5 岩石力学试验

表 2-1 大宝山露天矿岩石力学参数

岩石	密度(g/cm ³)	抗压强度(MPa)	弹性模量(GPa)	泊松比	抗拉强度(MPa)
页岩	2.62	73.84	19.04	0.22	5.43
磁黄铁矿	4.53	44.39	21.06	0.29	4.07
硅化石英岩	3.34	149.35	29.82	0.27	8.33
硅化灰岩	2.80	62.74	28.80	0.25	7.14
黄铁矿	3.38	91.29	25.43	0.23	6.29

由于实验室所测试的岩石力学参数是在理想状态下进行的, 没有考虑岩体内岩石的非均质性及节理、裂隙等的存在及不同介质之间的弱面与水等因素的存在与影响, 因而计算顶板岩体力学参数时, 有必要对实验室所得的岩石力学试验数据进行分析并作适当的工程折减^[24~25], 以便确保理论分析与计算时足够的准确性。

根据大宝山露天矿露天开采现场岩性特征, 参照岩石力学标准与相关经验, 我们选取了合理的岩石折减系数, 对大宝山露天采场的岩石力学参数进行调整, 得到本次理论分析与计算中使用的岩体力学参数, 如表 2-2 所示。

表 2-2 大宝山矿理论计算用到的主要岩石力学参数

岩石	密度(g/cm ³)	抗压强度(MPa)	弹性模量(GPa)	泊松比	抗拉强度(MPa)
页岩	2.62	44.30	4.76	0.22	1.09
磁黄铁矿	4.53	26.63	5.27	0.29	0.81
硅化石英岩	3.34	89.61	7.46	0.27	1.67
硅化灰岩	2.80	37.64	7.20	0.25	1.43
黄铁矿	3.38	54.77	6.36	0.23	1.26

2.4 岩体质量分级及评价

大宝山铜铁矿区因历史原因, 经历了四十余年不合理的地下开采, 在现有矿山露天开采境界内, 既存在有大规模分段凿岩阶段落矿空场法留下的大空区; 也存在有为数众多且大小不详的民采空区。这些采空区形态十分复杂, 千奇百怪, 在空间位置上层层叠叠, 高低不同, 致使整个矿体千疮百孔, 给矿山露天开采带

来极大的安全隐患与危险。

随着露天开采坑底临近采空区，在探明其坑底内的采空区位置、大小等情况的同时，也得对岩体质量评价进行评价，以便分析岩体顶板的稳定性和确定出露天开采时人员、设备作业安全的隔离层厚度。

2.4.1 大宝山铜铁矿矿体岩体质量的 RMR 分级与评价

目前，世界上比较通用的工程岩体分类系统主要有：*RQD*、*Q*系统、*RMR*系统等不下几十种^[24-25]。*RQD* (Rock Quality Designation)即岩石质量指标分类法是由 Deer 提出的一种简单的岩体分类方法，其优点是使用简单，受到普遍欢迎。但由于 *RQD* 是以岩心回收率这一单一指标作为参数对岩体进行岩质分类，忽略了岩石强度、节理特征和环境因素等诸多参数对岩石质量的影响，显然它不能单独作为评价岩体质量的根据。*Q*系统在 *RQD* 系统的基础上前进了一步，它以为 *RQD* 为基数，综合考虑了节理数量及状况对岩体质量的影响，但也未考虑岩石的重要质量指标——岩石的强度。*RMR* 分类系统比 *Q* 系统更前进了一步，它是一个总的岩体评分值，这个评分值取决于多个通用参数，因此相对 *Q* 系统更具系统性和全面性。目前已成为国际上最成熟的工程岩体分类系统之一，并在工程界得到广泛应用。

RMR 即 Rock Mass Rating 由 Bieniawski 于 1974 年提出。*RMR* 分类系统包括 5 个基本参数，即岩石单轴抗压强度 σ_c 、岩石质量指标 *RQD*、节理间距、节理条件、地下水状态等。此外，还有 6 个参数，即节理的走向和倾角的影响。如表 2-3、表 2-4、表 2-5 所示。

表 2-3 分类参数及其评分值

参数		数值变动范围							
1	完整岩石强度 (MPa)	点载荷强度指标	>10	4~10	2~4	1~2	对于这种低值范围单轴抗压强度最好是		
		单轴抗压强度	>250	100~250	50~100	25~50	5~25	1~5	<1
	评分	15	12	7	4	2	1	0	
2	岩石质量指标 (%)	90~100	75~90	50~75	25~50	<25			
	评分	20	17	13	8	3			
3	节理间距	>2m	0.6~2m	200~600mm	60~200mm	<60mm			
	评分	20	15	10	8	5			
4	节理条件	节理面很粗糙、不连续、未张开、壁面未风化	节理面轻微粗糙、宽度小于1mm, 节理面轻微风化	节理面稍粗糙、宽度小于1mm, 节理面严重风化	节理面光滑或软弱夹层<5mm, 节理连续, 开口1~5mm	含厚度大于5mm的软弱夹层, 开口宽度大于5mm, 节理连续			
			评分	30	25	20	10	0	
5	地下水	每10m长的隧道涌水量 (L/min)	0	<10	10~25	25~125	>125		
		节理水压/最大主应力	0	<0.1	0.1~0.2	0.2~0.5	>0.5		
		总条件	完全干燥	潮	湿	滴沥	水流		
	评分	15	10	7	4	0			

表 2-4 按节理产状修正评分值

节理走向和倾向	非常有利	有利	一般	不利	非常不利
隧道	0	-2	-5	-10	-12
地基	0	-2	-7	-15	-25
边坡	0	-5	-25	-50	-60

表 2-5 按总评分值确定岩体的级别

评分值	100~90	90~75	75~50	50~25	25~0
分类级别	I	II	III	IV	V
质量描述	非常好的岩体	好岩体	一般岩体	差岩体	非常差岩体

考虑不支护自稳时间及分类级别的意义参见表 2-6。

表 2-6 岩体分类级别的含义

分类级别	I	II	III	IV	V
平均自稳时间	15m 跨度	10m 跨度	5m 跨度	2.5m 跨度	1m 跨度
岩体内聚力 (kPa)	>400	300~400	200~300	100~200	<100
岩体的内摩擦角	>45°	35°~45°	25°~35°	15°~25°	<15°

采用 RMR 分类法首先根据工程中获得的地质数据, 由表 2-2 和表 2-3 的 2-7 个参数评分及修正后, 将各项参数得分累加得到岩体的总评分值 RMR, 然后从表 2-5 中确定岩体的分类级别。根据大宝山矿矿体实际地质数据和资料, 最终得出岩体的 RMR 分类结果如表 2-6 和表 4.6 所示。表中数据一部分根据所落在的数值范围得出评分值, 在没有得到某个参数的实际精确数值而知道其取值范围时不失为一种有效的方法。

表 2-7 大宝山钢铁矿矿体各分类参数及其评分值

类参数	黄铁矿		磁黄铁矿		硅化灰岩		硅化石英砂岩		页岩	
	数值范围	评分值	数值范围	评分值	数值范围	评分值	数值范围	评分值	数值范围	评分值
单轴抗压强度	50~100	7	25~50	4	25~50	4	50~100	7	25~50	4
RQD	84	13	48	8	36	8	82	13	42	8
节理间距	60~200mm	8	60~200m	8	60~200m	8	60~200m	8	60~200m	8
节理条件	节理宽度小于 1mm, 轻微风化	21	节理宽度小于 1mm, 风化	16	断层泥 <5mm, 节理连续, 开口 1~5mm	13	节理面轻微粗糙、宽度小于 1mm, 节理面轻微风化	25	断层泥 <5mm, 节理连续, 开口 1~5mm	15
地下水状态	潮	10	潮	10	湿	7	湿	7	湿	7
		59		46		40		60		42

按节理产状修正评分值最后得到岩体的总评分值 RMR 如下表 2-8:

表 2-8 各岩体总评分值 RMR 及岩体级别

岩体名称	页岩	磁黄铁矿	硅化石英岩	硅化灰岩	黄铁矿
RMR 值	42	46	60	40	59
分类级	IV	IV	III	IV	III

2.4.2 根据 RMR 确定岩体力学参数

(1) 变形模量

试验结果综合得出各岩体的变形模量如下表 2-9 所示:

表 2-9 各岩体变形模量

岩体名称	页岩	磁黄铁矿	硅化石英	硅化灰	黄铁矿
变形模量	4.76	5.27	7.46	7.20	6.36

(2) 由 RMR 值估计变形参数

Hock 和 Brown 根据自己在岩石性态方面的理论和实践积累起来的经验,建立了岩体破坏的主应力关系,即 Hock-Brown 准则。通过该准则,与 RMR 联系起来,来估计岩体的强度参数。

Hock-Brown 准则有如下关系:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m\sigma_{c3}\sigma_3 + s\sigma_c^2} \quad (2-1)$$

式中 σ_1 ——破坏时的最大主应力;

σ_3 ——作用在岩体上的最小主应力;

m, s ——岩石材料常数。

应用上式的关键在于确定岩石材料参数的 m 和 s 值。Hock 和 Brown 将 RMR 分类系统应入到准则中来,提出用下式来估计材料参数的 m 和 s 值:

$$\left. \begin{aligned} \frac{m}{m_i} &= \exp\left(\frac{RMR-100}{14}\right) \\ s &= \exp\left(\frac{RMR-100}{6}\right) \end{aligned} \right\} \quad (2-2)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{m}{m_i} &= \exp\left(\frac{RMR-100}{28}\right) \\ s &= \exp\left(\frac{RMR-100}{9}\right) \end{aligned} \right\} \quad (2-3)$$

式中, m 和 s ——岩体的材料参数;

m_i ——完整岩石的 m 值,可由三轴实验结果确定。

当无实验数据时, m_i 值可由表 2-10 进行估算。

表 2-10 不同岩石类型的 m_i 近似值

具有充分发育的结晶解理的碳酸盐岩石(白云岩、石灰岩、大理岩)	$m_i = 7$
泥质岩石(泥岩、页岩和板岩(垂直于解理))	$m_i = 10$
强烈结晶、解理不发育的砂质页岩(砂岩和石英岩)	$m_i = 15$
细粒、多矿物火成结晶岩(安山岩、灰绿岩、玄武岩和流纹岩)	$m_i = 17$
粗粒、多矿物火成变质岩(角闪岩、灰绿岩、片麻岩、花岗岩和花岗闪云火岩)	$m_i = 25$

在确定 m 和 s 值后, 就可以采用式 (2-1) 来确定岩体的强度值。在岩体稳定性分析后, 根据 J.ray(1983)、Ucar(1986、1988)等推导的一系列关系式由 m 和 s 来确定 Mohr-Coulumb 准则中的内聚力 C 和内摩擦角 φ 值。这时可以首先估计破坏面上的正应力 σ_n , 在根据 Hoek-Brown 准则定义中的主应力圆的包络线的切线来确定 C , φ 值, 求解公式如下

$$h = \frac{1 + 16(m\sigma_n + s\sigma_c)}{3m^2\sigma_c} \quad (2-4)$$

$$\theta = \frac{\left[90 + ar \cot \left(\frac{1}{\sqrt{4h \cos^2 \theta - 1}} \right) \right]}{3} \quad (2-5)$$

$$\varphi = ar \cot \left(\frac{1}{\sqrt{4h \cos^2 \theta - 1}} \right) \quad (2-6)$$

$$\tau = \frac{(\cot \varphi - \cos \varphi)m\sigma_c}{8} \quad (2-7)$$

$$c = \tau - \sigma_n \tan \varphi \quad (2-8)$$

据公式 (2-2)、(2-3) 及表 2-9 及表 2-10, 求出 Hoek-Brown 准则中的参数 m , s 值, 列表 2-11 如下:

表 2-11 各岩体 Hock-Brown 参数 m, s

岩体	页岩	磁黄铁矿	硅化石英岩	硅化灰岩	黄铁矿
m	0.158774	0.359181	0.861489	0.096347	0.909047
s	6.33607E-05	0.00012341	0.001272634	4.53999E-05	0.001077261
m_i	10	17	15	7	17

由 Hock-Brown 准则估计岩体强度变形参数:

根据表 2-11 中的 m, s 值和公式 (2-1), (2-5)~(2-8) 可求得岩体的抗压、抗拉强度以及 c, φ 值, 各岩体强度参数如表 2-12 所示。

表 2-12 各岩体强度参数

岩体名称	弹性模量 (GPa)	泊松比	容重 (t/m^3)	内聚力 (MPa)	内摩擦角 ($^\circ$)	抗拉强度 (MPa)	抗压强度 (Mpa)
页岩	4.76	0.22	2.62	2.56582	41.3	1.09	44.30
磁黄铁矿	5.27	0.29	4.53	1.135212	38.2	0.81	26.63
硅化石英岩	7.46	0.27	3.34	6.064589	42.1	1.67	89.61
硅化灰岩	7.20	0.25	2.80	1.7819	37.9	1.43	37.64
黄铁矿	6.36	0.23	3.38	3.911329	42.1	1.26	54.77

第三章 矿岩稳定性的模糊灰元评价

矿岩稳定性是进行地下开采设计、地压控制和安全管理的依据，矿岩稳定性评价是地下采矿工程的重要环节，对地下开采具有十分重要的现实意义。地下采矿工程矿岩信息具有多样不相容性、可变不确定性和不完全性，凭有限的信息，对地下采矿矿岩稳定性进行评价，是一个复杂的问题。1983年我国学者蔡文教授提出的物元分析理论是解决现实矛盾不相容问题的一种新方法^[26]。本章在物元分析理论的基础上结合模糊数学和灰色系统理论^{[11][40-41]}，结合矿岩稳定性评价指标^[28]，进行关联函数运算和隶属度处理，建立模糊灰元分析模型^[29-31]，通过求和归一法与熵值法的组合权重系数的确定和关联度计算^[32-35]，以定量的结果给出矿岩稳定性等级和优劣排序，为矿岩稳定性评价提供了一种新的途径。

3.1 矿岩稳定性模糊灰元评价

3.1.1 模糊灰元

在物元分析中，用“事物、特征、量值”三要素组成物元来描述事物，如果其中量值既有模糊性，又有灰色性，便成了模糊灰量值，同样可有用“事物、特征、模糊灰量值”三个要素来描述事物，这样，就组成了模糊灰元。所谓模糊灰元，就是用“事物、特征、模糊灰量值”组成有序三元组来描述事物的基础元，记作 $\tilde{\otimes}R$ 。设 M 表示事物； C 表示其特征； $\tilde{\otimes}$ 表示该事物特征的模糊灰量值，为了与物元相区别，则 $\tilde{\otimes}R$ 的表达式可写为

$$\tilde{\otimes}R = \begin{bmatrix} M \\ C \quad \tilde{\otimes} \end{bmatrix} \quad (3-1)$$

如果事物 M 用 n 个特征 C_1, C_2, \dots, C_n 及其相应的模糊类量值 $\tilde{\otimes}_1, \tilde{\otimes}_2, \dots, \tilde{\otimes}_n$ 来描述，则称为 n 维模糊灰元，记作事物 $\tilde{\otimes}R_n$ 。如果 m 个事物的 n 维物元组合在一起，使构成 m 个事物 n 维白化模糊灰元，记作

$$\tilde{\otimes}R_{mn} = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & \dots & M_m \\ C_1 & \tilde{\otimes}_{11} & \tilde{\otimes}_{21} & \dots & \tilde{\otimes}_{n1} \\ C_2 & \tilde{\otimes}_{12} & \tilde{\otimes}_{22} & \dots & \tilde{\otimes}_{n2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ C_n & \tilde{\otimes}_{1n} & \tilde{\otimes}_{2n} & \dots & \tilde{\otimes}_{nn} \end{bmatrix} \quad (3-2)$$

式中： $\tilde{\otimes}R_{mn}$ 为 m 个事物 n 维模糊灰元； M_j 为第 j 个事物， $j=1,2,\dots,m$ ； C_i 为第 i 项特征， $i=1,2,\dots,n$ ； $\tilde{\otimes}_{jn}$ 为第 j 个事物第 i 项特征对应的白化模糊灰量值。

3.1.2 矿岩稳定性模糊灰元评价模型

1. 影响矿岩稳定性分级指标因素的选取

影响矿岩稳定性分级指标的因素是多方面的,从大的方面来可分为两大类,即自然因素和人为的工程因素。具体来说,它受到地层岩性、地质构造、岩体结构、原岩应力状态、岩体力学性质、水文地质条件、地应力分布、采场断面形状及大小、采矿方法等诸多因素的影响。通过大量岩体综合指标的资料计算分析,总结出影响其稳定性的因素有:单轴抗压强度、体积裂隙数 η 、节理面充填物状态、断裂性质、断裂规模大小、裂隙水、原岩应力、实测 RQD 值、节理裂隙产状、隙壁状态等因素中选出以下五个指标作为矿岩稳定性评价的综合指标:

- (1) 实测 RQD 值;
- (2) 单轴抗压强度 R_c ;
- (3) 体积裂隙数 η ;
- (4) 隙壁状态指标 J_s ;
- (5) 裂隙水指标 J_w 。

按照五级稳定性体系,对矿岩稳定性的等级划分为稳定、较稳定、中等稳定、不稳定、极不稳定五级。表 3-1 是上述参数对矿岩稳定性影响的单因素指标。

表 3-1 影响矿岩稳定性的单因素指标

J (分级指标)	稳定	较稳定	中等稳定	不稳定	极不稳定
实测 $RQD, \%$	90~100	80~90	60~80	30~60	10~30
单轴抗压强度 R_c, MPa	150~200	125~150	90~125	40~90	10~40
体积裂隙数 η	0~0.1	1~3	3~10	10~30	30~40
隙壁状态 J_s	28~50	20~28	10~20	7~10	2~7
裂隙水 J_w	9~15	8~9	6~8	2~6	0.5~2

2. 矿岩稳定性级别评价隶属函数

分类参数的值均具有模糊性、离散性,当观测值较多时,可近似认为这些数据为同一类别的隶属函数^[36]。因此矿岩稳定性级别评价隶属函数可取正态型,即

$$\mu(x) = e^{-\left(\frac{x-a}{b}\right)^2} \quad (3-3)$$

式中 $a > 0, b > 0$,且 a 为所属区间的平均值。另外表 3-1 中所给因素指标范围的边界值基本是从一种级别到另一种级别的过渡值,是一种模糊边界,同时属于对应的两种级别,即

$$e^{-\left(\frac{x_1-x_2}{b}\right)^2} \approx 0.5, \quad b = \frac{x_1 - x_2}{1.665} \quad (3-4)$$

式中： x_1 、 x_2 为对应区段相应指标的上、下边界。这样，可得矿岩稳定性等级中各参数值如表 3-2 所示。

表 3-2 矿岩稳定性等级中 $\mu(x)$ 的 a 、 b 参数值

项目		稳定	较稳定	中等稳定	不稳定	极不稳定
实测 $RQD, \%$	a	95	85	70	45	20
	b	6.006	6.006	12.012	18.018	12.012
单轴抗压强度 R_c, MPa	a	175	137.5	107.5	65	25
	b	30.030	15.015	21.021	30.030	18.018
体积裂隙数 η	a	0.05	2	6.5	20	35
	b	0.060	1.201	4.204	12.012	6.006
隙壁状态 J_s	a	39	24	15	8.5	4.5
	b	13.814	4.805	6.006	1.802	3.003
裂隙水 J_w	a	12	8.5	7	4	1.25
	b	3.604	0.601	1.201	2.402	0.901

3. 矿岩稳定性优劣评价隶属函数

矿岩稳定性优劣参数也可近似认为这些数据为同一类别的隶属函数。矿岩的实测 RQD 、单轴抗压强度 R_c 、隙壁状态 J_s 、裂隙水 J_w 等都是高一点好，故为升半正态型，即：

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ 1 - e^{-\left(\frac{x-a}{b}\right)^2}, & x > a > 0, b > 0 \end{cases} \quad (3-5)$$

体积裂隙数 η 是低一点好，为降半正态型，即：

$$\mu_1(x) = \begin{cases} 1, & x \leq a_1 \\ e^{-\left(\frac{x-a_1}{b_1}\right)^2}, & x > a_1, b_1 > 0 \end{cases} \quad (3-6)$$

由式 (3-5)、(3-6) 知，当 $x=a$ 时， $\mu(x)=0$ ，取最小值； $x=a_1$ 时， $\mu_1(x)=1$ ，故取最大值， a 、 a_1 是表 3-1 中因素指标对应总区段的最小值，即

$$1 - e^{-\left(\frac{x_1-x_2}{b}\right)^2} \approx 0.5, \quad b = \frac{x_1 - x_2}{1.665} \quad (3-7)$$

$$e^{-\left(\frac{x_1-x_2}{b_1}\right)^2} \approx 0.5, \quad b_1 = \frac{x_1 - x_2}{1.665} \quad (3-8)$$

式中： x_1 、 x_2 为对应总区段相应指标的上、下边界。

同理由表 3-1 中所给因素指标范围的边界值计算得矿岩稳定性优劣排序 $\mu(x)$ 中的 a 、 b 参数值如表 3-3 所示。

表 3-3 矿岩稳定性优劣排序中 $\mu(x)$ 的 a 、 b 参数值

项目	实测 $RQD, \%$	单轴抗压强度 R, MPa	体积裂隙数 η	隙壁状态 J_s	裂隙水 J_w
$a(a)$	10	10	1	2	0.5
$b(b_i)$	54.054	114.114	23.423	28.829	8.709

3.1.3 关联分析

1. 关联变换

凡是以代数形式来描述可拓集合量值的函数，称为关联函数，记为 $\xi(x)$ 。由于关联函数 $\xi(x)$ 与隶属函数 $\mu(x)$ 中所含元素 x 均属中介元，两者的差别仅仅是关联函数较隶属函数多一段有条件可以转化的量值范围。当关联函数中确知某一特定值时，就可求出相应的函数值，称此函数值为关联系数，记为 ξ_j 。关联系数与隶属度的相互转换称为关联变换。由于关联函数与隶属函数（隶属度）等价，故关联系数可由隶属函数加以确定，即

$$\tilde{\otimes}_f(\xi_j) = \mu_j = \mu(\tilde{\otimes}_{f_i}) \quad (3-9)$$

其中 $j=1, 2, \dots, m; i=1, 2, \dots, n$

式中 $\tilde{\otimes}_f(\xi_j)$ 、 μ_j 分别表示第 j 种事物的第 i 项评价指标相应的关联系数白化模糊量值和其相对隶属度。

2. 从优隶属度原则

所谓从优隶属度，就是各单项特征相应的白化模糊灰量值，从属于矿岩稳定状态下所对应的各特征相应的模糊灰量值。从优隶属度原则是以各单项特征的从属度作为标准来衡量的，有两种类型^{[31][37]}。通过关联度变换可求得第 j 种事物与理想事物的第 i 项指标相应两种类型的关联系数白化模糊灰量值。

(1) 越大越优型：

$$\mu_j = \frac{\tilde{\otimes}_{f_i} - \min \tilde{\otimes}_{f_i}}{\max \tilde{\otimes}_{f_i} - \min \tilde{\otimes}_{f_i}} \quad (3-10)$$

$j=1, 2, \dots, m; i=1, 2, \dots, n$

(2) 越小越优型：

$$\mu_j = \frac{\max \tilde{\otimes}_{f_i} - \tilde{\otimes}_{f_i}}{\max \tilde{\otimes}_{f_i} - \min \tilde{\otimes}_{f_i}} \quad (3-11)$$

$j=1, 2, \dots, m; i=1, 2, \dots, n$

式中， μ_j 表示第 j 种事物的第 i 项评价指标从优的相对隶属度； $\tilde{\otimes}_{f_i}$ 表示第 j 种事物的第 i 项评价指标相应的白化模糊灰量值。当指标的值越大越好时采用

(3-10)式,反之采用(3-11)式。这样保证了最终的评价结果是越大越优,方便以后的比较。

3. 关联系数模糊灰元

经关联变换和从优隶属度原则可构造关联系数模糊灰元。若以 $\tilde{\otimes}_f R_{mn}$ 表示 m 个事物 n 维关联系数白化数模糊灰元,则由式(3-10)得

$$\tilde{\otimes}_f R_{mn} = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & \dots & M_m \\ C_1 & \tilde{\otimes}_f(\xi_{11}) & \tilde{\otimes}_f(\xi_{21}) & \dots & \tilde{\otimes}_f(\xi_{m1}) \\ C_2 & \tilde{\otimes}_f(\xi_{12}) & \tilde{\otimes}_f(\xi_{22}) & \dots & \tilde{\otimes}_f(\xi_{m2}) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ C_n & \tilde{\otimes}_f(\xi_{1n}) & \tilde{\otimes}_f(\xi_{2n}) & \dots & \tilde{\otimes}_f(\xi_{mn}) \end{bmatrix} \quad (3-12)$$

式中 $\tilde{\otimes}_f(\xi_{ji})$ ($j=1, 2, \dots, m; i=1, 2, \dots, n$)表示第 j 种事物的第 i 项评价指标相应的关联系数白化模糊量值。

3.1.4 权重的确定

权重是反映各评价指标对矿岩稳定性影响程度的量,对矿岩稳定性综合评价有举足轻重的作用。由于权重往往是人为确定的,这样就是一种主观赋权法,会带来一定的偏差。为尽量合理的确定权重,将求和归一法和熵值法结合起来,组成组合权重^[38-39],对矿岩稳定性进行综合评价。

1. 求和归一法

先求出各事物每项特征关联系数之和,然后对各项特征的关联系数作归一化处理,便得出各个事物各项特征的权重。表达式如下:

$$R_w = \begin{bmatrix} C_1 & C_2 & \dots & C_n \\ w_1 & w_2 & \dots & w_n \end{bmatrix} \quad (3-13)$$

$$w_1 = \frac{\sum_{j=1}^m \xi_{j1}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \xi_{ji}} \quad w_2 = \frac{\sum_{j=1}^m \xi_{j2}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \xi_{ji}} \quad \dots \quad w_n = \frac{\sum_{j=1}^m \xi_{jn}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \xi_{ji}}$$

式中, R_w 表示权重复合物元, w_i 表示每一事物第 i 项特征的权重值, $\sum_{j=1}^m \xi_{ji}$ 表示 C_i 的关联系数之和, $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \xi_{ji}$ 表示各项特征关联系数之和。

2. 熵值法

熵(Entropy)原是统计物理和热力学中的一个物理概念,在信息论中,熵值是系统无序程度或混乱程度的度量,在信息系统中的信息熵是信息无序度的度量,

信息熵越大,信息的无序度越高,其信息的效用值越小;反之,信息的熵越小,信息的无序度越小,信息的效用值越大。在综合评价中,运用信息熵评价所获系统信息的有序程度及信息的效用值是很自然的,统计物理中的熵值函数形式对于信息系统应是一致的。故称在 m 个评价对象 n 个评价指标问题中第 i 个评价指标的信息熵值为:

$$e_i = -k \sum_{j=1}^m y_{ji} \ln y_{ji} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (3-14)$$

式中: $y_{ji} = \mu_{ji} / \sum_{j=1}^m \mu_{ji}$, $k = (\ln m)^{-1}$; $e_i > 0$; 并假定: $\mu_{ji} > 0$ 时, $\mu_{ji} \ln \mu_{ji} = 0$ 。

由于信息熵 e_i 可用来度量 i 项指标的信息(指标的数据)的效用价值,当完全无序时, $e_i = 1$, 此时, e_i 的信息(也就是 i 指标的数据)对综合评价的效用值为零。因此,某项指标的信息效用价值取决于该指标的信息熵 e_i 与 i 的差值 h_i 。

$$h_i = 1 - e_i \quad (3-15)$$

利用熵值法估算各指标的权重,其本质是利用该指标信息的价值系数来计算的,其价值系数越高,对评价的重要性就越大(或称对评价结果的贡献越大),于是 i 项指标的权重为:

$$w_i' = \frac{h_i}{\sum_{i=1}^n h_i} = \frac{1 - e_i}{n - \sum_{i=1}^n e_i} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (3-16)$$

3.组合权重

为全面反映评价指标的重要性,将求和归一法权重和熵值法权重相组合,最终确定各指标的权重为

$$w_i'' = \frac{w_i w_i'}{\sum_{i=1}^n w_i w_i'} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (3-17)$$

式中: $\sum_{i=1}^n w_i'' = 1$ 。则

$$R_w = \begin{bmatrix} C_1 & C_2 & \dots & C_n \\ w_1'' & w_1'' & w_2'' & \dots & w_n'' \end{bmatrix} \quad (3-18)$$

3.1.5 关联度计算

把矿岩的关联度复合模糊灰元记为 $\tilde{\otimes}_f R_k$, 采用 $M(\cdot, +)$ 算法,即先乘后加的运算模式,则

$$\tilde{\otimes}_f R_k = R_w \cdot \tilde{\otimes}_f R_{mn} = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & \dots & M_m \\ K_j & K_1 & K_2 & \dots & K_m \end{bmatrix} \quad (3-19)$$

$$\text{式中: } K_j = \sum_{i=1}^n w_i \tilde{\otimes}_j \xi_{ij}$$

3.2 应用实例

为判断大宝山矿业公司矿体开采的安全性，了解矿岩的稳定性情况，以便为采矿方法设计选择、采场地压管理及矿柱设计以及安全隔离层稳定性分析提供依据。根据现场工程地质调查和实验测定，大宝山矿中黄铁矿、磁黄铁矿、硅化灰岩、硅化石英砂岩、页岩五种矿岩的主要评价指标值见表 3-4。

表 3-4 影响矿岩稳定性的指标测定值

	$RQD, \%$	R_c, MPa	η	J_s	J_w
黄铁矿	84	91.29	8	20	9
磁黄铁矿	48	44.39	18	14	7
硅化灰岩	36	62.74	24	8	5
硅化石英砂岩	82	149.35	3	26	6
页岩	42	73.84	26	8	5

3.2.1 矿岩稳定性等级评价

1. 评价模糊灰元

将矿岩稳定性等级即稳定、较稳定、中等稳定、不稳定、极不稳定分别记为 M_1 、 M_2 、 M_3 、 M_4 、 M_5 ，根据表 3-2、表 3-4 的数据可建立黄铁矿、磁黄铁矿、硅化灰岩、硅化石英砂岩、页岩等矿岩稳定性评价的各复合白化模糊灰元如下：

$$\tilde{\otimes}_{f1} R_{5 \times 5} = \begin{bmatrix} & M_1 & M_2 & M_3 & M_4 & M_5 \\ RQD & 0.035 & 0.973 & 0.257 & 0.009 & 0.000 \\ R_c & 0.000 & 0.000 & 0.552 & 0.465 & 0.000 \\ \eta & 0.000 & 0.000 & 0.881 & 0.369 & 0.000 \\ J_s & 0.151 & 0.500 & 0.500 & 0.000 & 0.000 \\ J_w & 0.500 & 0.501 & 0.062 & 0.013 & 0.000 \end{bmatrix}$$

$$\tilde{\otimes}_{f2} R_{5 \times 5} = \begin{bmatrix} & M_1 & M_2 & M_3 & M_4 & M_5 \\ RQD & 0.000 & 0.000 & 0.035 & 0.973 & 0.004 \\ R_c & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.624 & 0.314 \\ \eta & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.973 & 0.000 \\ J_s & 0.038 & 0.013 & 0.973 & 0.000 & 0.000 \\ J_w & 0.146 & 0.002 & 1.000 & 0.210 & 0.000 \end{bmatrix}$$

$$\tilde{\otimes}_{f3} R_{5 \times 5} = \begin{bmatrix} & M_1 & M_2 & M_3 & M_4 & M_5 \\ R_{QD} & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.779 & 0.170 \\ R_c & 0.000 & 0.000 & 0.011 & 0.994 & 0.012 \\ \eta & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.895 & 0.035 \\ J_s & 0.006 & 0.000 & 0.257 & 0.926 & 0.257 \\ J_w & 0.023 & 0.000 & 0.063 & 0.841 & 0.000 \end{bmatrix}$$

$$\tilde{\otimes}_{f4} R_{5 \times 5} = \begin{bmatrix} & M_1 & M_2 & M_3 & M_4 & M_5 \\ R_{QD} & 0.009 & 0.779 & 0.369 & 0.015 & 0.000 \\ R_c & 0.482 & 0.536 & 0.019 & 0.000 & 0.000 \\ \eta & 0.000 & 0.500 & 0.500 & 0.135 & 0.000 \\ J_s & 0.413 & 0.841 & 0.034 & 0.000 & 0.000 \\ J_w & 0.063 & 0.000 & 0.500 & 0.500 & 0.000 \end{bmatrix}$$

$$\tilde{\otimes}_{f5} R_{5 \times 5} = \begin{bmatrix} & M_1 & M_2 & M_3 & M_4 & M_5 \\ R_{QD} & 0.000 & 0.000 & 0.004 & 0.973 & 0.035 \\ R_c & 0.000 & 0.000 & 0.077 & 0.917 & 0.000 \\ \eta & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.779 & 0.106 \\ J_s & 0.006 & 0.000 & 0.257 & 0.926 & 0.257 \\ J_w & 0.023 & 0.000 & 0.063 & 0.841 & 0.000 \end{bmatrix}$$

经关联变换和从优隶属度后得到关联系数白化模糊灰元:

$$\tilde{\otimes}_{f1} R_{5 \times 5} = \begin{bmatrix} & M_1 & M_2 & M_3 & M_4 & M_5 \\ R_{QD} & 0.036 & 1.000 & 0.264 & 0.009 & 0.000 \\ R_c & 0.000 & 0.000 & 1.000 & 0.842 & 0.000 \\ \eta & 0.000 & 0.000 & 1.000 & 0.419 & 0.000 \\ J_s & 0.302 & 1.000 & 1.000 & 0.000 & 0.000 \\ J_w & 0.998 & 1.000 & 0.124 & 0.026 & 0.000 \end{bmatrix}$$

$$\tilde{\otimes}_{f2} R_{5 \times 5} = \begin{bmatrix} & M_1 & M_2 & M_3 & M_4 & M_5 \\ R_{QD} & 0.000 & 0.000 & 0.036 & 1.000 & 0.004 \\ R_c & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 1.000 & 0.503 \\ \eta & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 1.000 & 0.000 \\ J_s & 0.039 & 0.013 & 1.000 & 0.000 & 0.000 \\ J_w & 0.146 & 0.002 & 1.000 & 0.210 & 0.000 \end{bmatrix}$$

$$\tilde{\otimes}_{f3}R_{5 \times 5} = \begin{bmatrix} & M_1 & M_2 & M_3 & M_4 & M_5 \\ R_{QD} & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 1.000 & 0.218 \\ R_c & 0.000 & 0.000 & 0.011 & 1.000 & 0.012 \\ \eta & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 1.000 & 0.039 \\ J_s & 0.006 & 0.000 & 0.278 & 1.000 & 0.278 \\ J_w & 0.027 & 0.000 & 0.074 & 1.000 & 0.000 \end{bmatrix}$$

$$\tilde{\otimes}_{f4}R_{5 \times 5} = \begin{bmatrix} & M_1 & M_2 & M_3 & M_4 & M_5 \\ R_{QD} & 0.012 & 1.000 & 0.474 & 0.019 & 0.000 \\ R_c & 0.899 & 1.000 & 0.035 & 0.000 & 0.000 \\ \eta & 0.000 & 1.000 & 1.000 & 0.270 & 0.000 \\ J_s & 0.491 & 1.000 & 0.040 & 0.000 & 0.000 \\ J_w & 0.126 & 0.000 & 1.000 & 1.000 & 0.000 \end{bmatrix}$$

$$\tilde{\otimes}_{f5}R_{5 \times 5} = \begin{bmatrix} & M_1 & M_2 & M_3 & M_4 & M_5 \\ R_{QD} & 0.000 & 0.000 & 0.004 & 1.000 & 0.036 \\ R_c & 0.000 & 0.000 & 0.084 & 1.000 & 0.000 \\ \eta & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 1.000 & 0.136 \\ J_s & 0.006 & 0.000 & 0.278 & 1.000 & 0.278 \\ J_w & 0.027 & 0.000 & 0.075 & 1.000 & 0.000 \end{bmatrix}$$

2.权重的计算

(1)求和归一法。根据隶属度及 (3-13) 式求得黄铁矿、磁黄铁矿、硅化灰岩、硅化石英砂岩、页岩各指标权重为：

$$w_1 = (0.145, 0.204, 0.157, 0.255, 0.238);$$

$$w_2 = (0.175, 0.252, 0.168, 0.177, 0.228);$$

$$w_3 = (0.205, 0.172, 0.175, 0.263, 0.185);$$

$$w_4 = (0.161, 0.207, 0.242, 0.164, 0.227);$$

$$w_5 = (0.176, 0.183, 0.192, 0.264, 0.186)。$$

(2)熵值法。根据各指标的隶属度及 (3-14)、(3-16) 式可求得各指标的权重为：

$$\dot{w}_1 = (0.227, 0.221, 0.241, 0.148, 0.163);$$

$$\dot{w}_2 = (0.230, 0.156, 0.258, 0.222, 0.135);$$

$$\dot{w}_3 = (0.190, 0.247, 0.241, 0.114, 0.207);$$

$$\dot{w}_4 = (0.223, 0.212, 0.160, 0.220, 0.185);$$

$$\dot{w}_5 = (0.241, 0.225, 0.209, 0.116, 0.209)。$$

(3)组合权重。由(3-17)式可得各指标的组合权重为:

$$w_{11}^* = (0.171, 0.234, 0.196, 0.197, 0.202);$$

$$w_{12}^* = (0.208, 0.204, 0.225, 0.203, 0.160);$$

$$w_{13}^* = (0.202, 0.222, 0.219, 0.156, 0.200);$$

$$w_{14}^* = (0.182, 0.223, 0.198, 0.183, 0.214);$$

$$w_{15}^* = (0.219, 0.213, 0.208, 0.158, 0.202)。$$

3.关联度计算

将各矿岩的 R_w 和 $\tilde{\otimes}_f R_m$ 代入(3-19), 可得各相应的关联度模糊灰元为:

$$\tilde{\otimes}_{f1} R_k = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & M_3 & M_4 & M_5 \\ K_j & 0.267 & 0.569 & 0.697 & 0.286 & 0.000 \end{bmatrix};$$

$$\tilde{\otimes}_{f2} R_k = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & M_3 & M_4 & M_5 \\ K_j & 0.031 & 0.003 & 0.371 & 0.670 & 0.103 \end{bmatrix};$$

$$\tilde{\otimes}_{f3} R_k = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & M_3 & M_4 & M_5 \\ K_j & 0.006 & 0.000 & 0.061 & 1.000 & 0.099 \end{bmatrix};$$

$$\tilde{\otimes}_{f4} R_k = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & M_3 & M_4 & M_5 \\ K_j & 0.320 & 0.786 & 0.513 & 0.271 & 0.000 \end{bmatrix};$$

$$\tilde{\otimes}_{f5} R_k = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & M_3 & M_4 & M_5 \\ K_j & 0.006 & 0.000 & 0.078 & 1.000 & 0.080 \end{bmatrix}。$$

4.矿岩稳定性级别评价

根据最大关联度原则, 由关联度模糊灰元得:

$$\text{黄铁矿 } K_3(M_3) = \max K_j, j \in \{1, 2, 3, 4, 5\};$$

$$\text{磁黄铁矿 } K_4(M_4) = \max K_j, j \in \{1, 2, 3, 4, 5\};$$

$$\text{硅化灰岩 } K_4(M_4) = \max K_j, j \in \{1, 2, 3, 4, 5\};$$

$$\text{硅化石英砂岩 } K_2(M_2) = \max K_j, j \in \{1, 2, 3, 4, 5\};$$

$$\text{页岩 } K_4(M_4) = \max K_j, j \in \{1, 2, 3, 4, 5\}。$$

即硅化石英砂岩为较稳定, 黄铁矿为中等稳定且向较稳定靠近, 磁黄铁矿、硅化灰岩、页岩为不稳定, 该结果与现场的实际情况基本相符, 也与第二章中岩体质量的 RMR 分级相符。

3.2.2 矿岩稳定性优劣评价

1.评价模糊灰元

将五种矿岩即黄铁矿、磁黄铁矿、硅化灰岩、硅化石英砂岩、页岩分别记为 M_1 、 M_2 、 M_3 、 M_4 、 M_5 , 根据表3、表4的数据可建立矿岩稳定性优劣评价的复合白化模糊灰元:

$$\tilde{\otimes}_f R_{4 \times 5} = \begin{bmatrix} & M_1 & M_2 & M_3 & M_4 & M_5 \\ R_{QD} & 0.847 & 0.374 & 0.207 & 0.830 & 0.296 \\ R_c & 0.398 & 0.087 & 0.192 & 0.775 & 0.269 \\ \eta & 0.915 & 0.591 & 0.381 & 0.993 & 0.320 \\ J_s & 0.323 & 0.159 & 0.042 & 0.500 & 0.042 \\ J_w & 0.614 & 0.427 & 0.234 & 0.329 & 0.234 \end{bmatrix}$$

经关联变换和从优隶属度后得到关联系数模糊灰元:

$$\tilde{\otimes}_f R_{4 \times 5} = \begin{bmatrix} & M_1 & M_2 & M_3 & M_4 & M_5 \\ R_{QD} & 1.000 & 0.261 & 0.000 & 0.973 & 0.139 \\ R_c & 0.452 & 0.000 & 0.153 & 1.000 & 0.265 \\ \eta & 0.884 & 0.403 & 0.091 & 1.000 & 0.000 \\ J_s & 0.613 & 0.255 & 0.000 & 1.000 & 0.000 \\ J_w & 1.000 & 0.508 & 0.000 & 0.250 & 0.000 \end{bmatrix}$$

2. 权重的计算

(1) 求和归一法。根据隶属度及 (3-13) 式求得各指标权重为:

$$w = (0.232, 0.182, 0.232, 0.182, 0.172)。$$

(2) 熵值法。根据各指标的隶属度及 (3-14)、(3-16) 式可求得各指标的权重为:

$$w = (0.177, 0.169, 0.170, 0.239, 0.245)。$$

(3) 组合权重。由 (3-17) 式可得各指标的组合权重为:

$$w_i = (0.208, 0.157, 0.200, 0.222, 0.214)；$$

3. 关联度计算

将 R_w 和 $\tilde{\otimes}_f R_{mm}$ 代入 (3-19), 可得各相应的关联度模糊灰元为:

$$\tilde{\otimes}_f R_k = \begin{bmatrix} & M_1 & M_2 & M_3 & M_4 & M_5 \\ K_j & 0.805 & 0.300 & 0.042 & 0.834 & 0.070 \end{bmatrix}$$

由此得知, 按关联度大小排序有 $M_4 > M_1 > M_2 > M_5 > M_3$, 对应的矿岩稳定性优劣顺序为: 硅化石英砂岩、黄铁矿、磁黄铁矿、页岩、硅化灰岩, 该结果与现场实际情况基本相符, 与第二章中由 RMR 确定的岩体质量级别完全一样。

3.3 小结

矿岩稳定性的模糊灰元评价方法从多因素出发, 所选取的参数均不受限制, 可尽量考虑各方面的影响素, 适用于不同地下开采的矿岩特点, 使评价更切合实际。用模糊灰元理论得到关联度, 不仅可以评价矿岩稳定性的级别, 还可以评价矿岩稳定性的优劣排序, 且结果与现场情况完全相符, 也与第二章中岩体质量的

RMR 分级相符, 说明模糊灰元理论解决模糊不相容、不确定性问题切实可行。

基于求和归一法和熵值法相结合的组合权重的确定方法, 更能科学全面考虑信息, 不受人为主观因素的影响, 是一种较为有效的方法, 以此建立的模糊灰元评价模型, 使评价依据更可靠, 有较大的应用价值。

第四章 顶板稳定性理论分析与计算

4.1 岩体破坏机理

岩体破坏可分为两个阶段：岩体结构联结的丧失和结构体移动或运动。岩体由连续面和结构体组成，在结构体中还存在着未开裂的结构面和微裂隙。工程中的岩体由于结构的影响、应力状态及临空的边界条件不同，有时沿结构面破坏，有时是完整岩石破坏，有时两种破坏结合在一起。但是从破坏机理来看，可分为两类：拉伸破坏和剪切破坏^[24-25]。

4.1.1 拉伸破坏

1. 结构面方向的拉伸破坏。结构面的抗拉强度很低（未开裂结构面）或接近于零（不连续面），在垂直于结构面方向存在拉应力或拉应变的情况下，最容易发生拉伸破坏。

2. 沿结构面方向的拉伸破坏。这种破坏实际上是在沿结构面方向的拉应力作用下完整岩石的拉伸破坏。如板状结构体的弯折、岩体沿结构面错动的牵引力引起的两盘岩体的拉伸破坏

3. 完整岩体的拉伸破坏。如在矿柱的顶部、底部存在软夹层时，由于软夹层的塑性变形，可引起矿柱产生纵向劈裂；在三向不等压力的应力状态下，如在最小应力方向产生拉应变，可引起沿最大主应力方向发展的张破裂。

4.1.2 剪切破坏

耶格尔和库克研究了单组结构面岩体的破坏机理和破坏判据，如下图 4-1 所示假定结构面与最大主应力方向夹角为 β ，由莫尔应力圆理论，作用于结构面的法向应力 σ 和剪应力 τ 为：

$$\begin{aligned}\sigma &= \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\cos 2\beta \\ \tau &= \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\sin 2\beta\end{aligned}\quad (4-1)$$

结构面强度服从库伦准则：

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (4-2)$$

式中， c 、 ϕ 分别为结构面的粘结力和摩擦角。

所以得到的结构面产生破坏的条件为：

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \frac{2(c + \sigma_3 \tan \phi)}{(1 - \tan \phi \cot \beta)\sin 2\beta} \quad (4-3)$$

也就是在岩体上的主应力值满足本方程时，结构面上的应力处于极限平衡状

态。

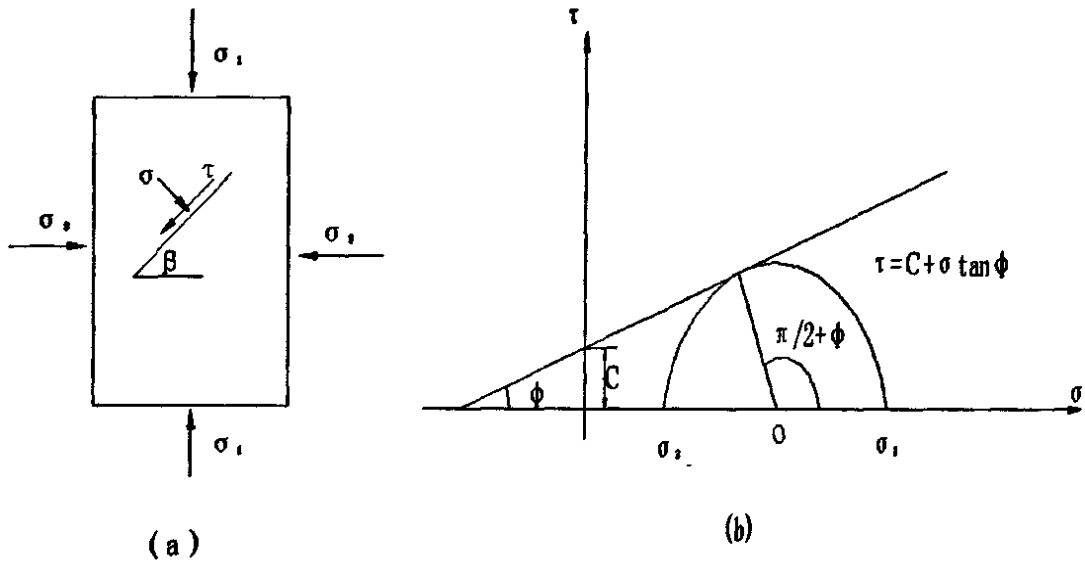


图 4-1 $\sigma - \tau$ 库论准则

4.2 顶板稳定性力学模型分析

由于地下岩体工程顶板的结构不同，可采用不同的分析方法^[43-57]。完整的结构的岩体可采用弹塑性力学分析方法，块状结构岩体可采用块体平衡理论分析方法等，碎裂和散体结构岩体可采用松散体力学分析方法。

4.2.1 弹塑性力学分析方法

1、水平顶板岩层

顶板岩层由于层间粘结力比较差，直接顶板岩层会在自重作用下与上覆岩层分离，形成一块只承受自重或加上其上部软弱层的重量板，在岩层自重应力为主作用下，可将顶板简化为两端固定的均布载荷梁，梁上任意点 x 处的剪力为：

$$V_x = \frac{qL}{2} \left(1 - \frac{2x}{L}\right) \quad (4-4)$$

在支脚处，剪力达最大值

$$V_{max} = R_1 = R_2 = \frac{qL}{2} \quad (4-5)$$

任意点 x 处的弯矩为：

$$M_x = \frac{q}{12} (6Lx - 6x^2 - L^2) \quad (4-6)$$

在梁中央，弯曲为：

$$M_{(x=\frac{L}{2})} = \frac{1}{24} qL^2 \quad (4-7)$$

在支脚处弯矩达最大值：

$$M_{\max} = -\frac{1}{12}qL^2 \quad (4-8)$$

由 (3.2) 式和 (3.5) 式可知, 在支脚处, 剪力和弯矩都达到最大值。式中 q 为板的体积力, 可看作梁上的均布载荷。

2. 倾斜顶板岩层

对于倾斜岩层:

$$q_s = q_L \cdot \cos \theta \quad (4-9)$$

式中, θ ——顶板的倾角。

当倾角小于 $10^\circ \sim 15^\circ$ 时, 一般都忽略倾角对 q 的影响, 即使倾角为 20° , 其折减系数也只有 6%。

梁上任意点 x 处的轴向力为:

$$\sigma_x = \frac{12M_x y}{d^3} \quad (4-10)$$

剪应力为:

$$\tau_{xy} = \frac{3V_x}{2} \left(\frac{d^2 - 4y^2}{d^3} \right) \quad (4-11)$$

在过 x 点的横截面上, 最大拉应力发生在梁底部, 最大压应力发生在梁顶部, 即

$$\sigma = \pm \frac{6M}{d^2} \quad (4-12)$$

最大水平和垂直剪应力在中性轴上:

$$\tau_{xy} = \frac{3V}{2d} \quad (4-13)$$

因为最大剪应力和最大弯矩的绝对值发生在固定端的端部, 因此, 最大剪应力和最大拉应力、最大压应力发生在梁端部, 支脚处剪应力为:

$$\tau_{\max} = \frac{3V_{\max}}{2} = \frac{3dL}{4d} \quad (4-14)$$

拉应力为:

$$\sigma_{\max} = -\frac{6M_{\max}}{d^2} = -\frac{6qL^2}{12d^2} = -\frac{qL^2}{2d^2} \quad (4-15)$$

如原岩应力以水平应力为主的情况下, 可将直接顶板简化为受轴向力和横向力联合作用的梁, 可将直接顶板简化为受轴向力和横向力联合作用的梁, 如图 4-2 所示。这时顶板梁将起梁柱的作用。由于轴向载荷的二次弯曲效应, 使梁柱中弯矩增大。在支脚处和梁柱中央弯矩为:

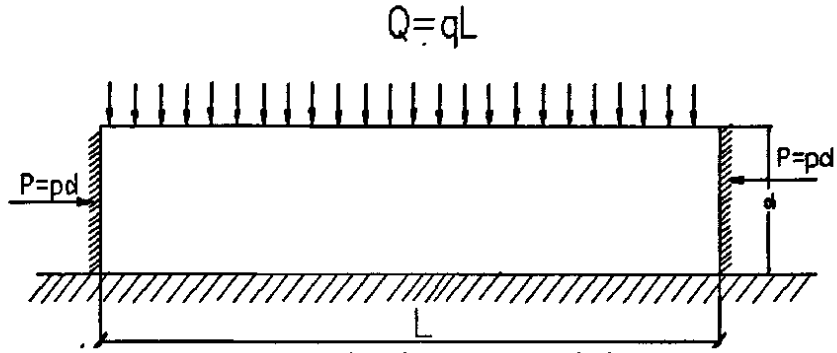


图 4-2 作用在梁上的联合载荷

$$M = \frac{qL^2}{12} \left[\frac{3(\tan V - V)}{V^2 \tan V} \right] \tag{4-16}$$

和

$$M = \frac{qL^2}{12} \left[\frac{6(V - \sin V)}{V^2 \sin V} \right] \tag{4-17}$$

式中

$$V = L \sqrt{\frac{3P}{Ed^3}} = L \sqrt{\frac{3p}{Ed^2}} \tag{4-18}$$

P ——每单位宽度上的轴向总载荷， $P = pd$ ；

p ——单位高度上的轴向载荷。

4.2.2 块体平衡理论分析法

在顶板围岩中，由于结构面的切割，形成危险结构体 ABC 如图 4-3 所示，两结构面倾角分别为 α 和 β ，在顶板上两结构面间距为 S 。由图中几何关系可知

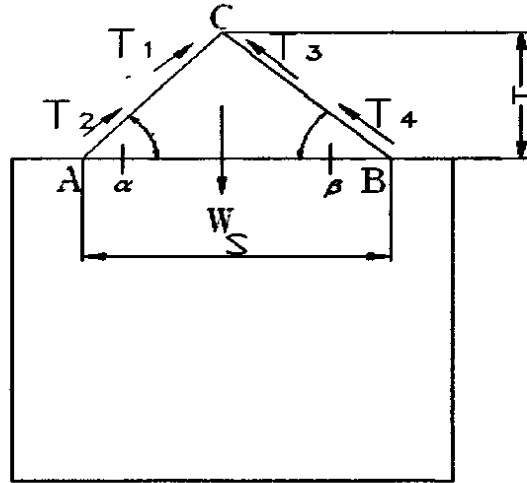


图 4-3 结构体力学分析

$$S = h \cdot \cot \alpha + h \cdot \cot \beta \tag{4-19}$$

即 $h = \frac{S}{\cot \alpha + \cot \beta}$

并且有：

$$L_1 = \frac{h}{\sin \alpha} = \frac{S}{\sin \alpha (\cot \alpha + \cot \beta)} \quad (4-20)$$

$$L_2 = \frac{h}{\sin \beta} = \frac{S}{\sin \beta (\cot \beta + \cot \alpha)} \quad (4-21)$$

结构面 AC 、 BC 上由粘结力产生的抗剪力为：

$$T_1 = c_{01} \cdot L_1 \quad (4-22)$$

$$T_3 = c_{02} \cdot L_2 \quad (4-23)$$

围岩切向应力 σ_θ 在结构面 AC 、 BC 上产生的摩擦力为：

$$T_2 = \sigma_\theta \sin \alpha \cdot L_1 \tan \phi_{01} \quad (4-24)$$

$$T_4 = \sigma_\theta \sin \beta \cdot L_2 \tan \phi_{02} \quad (4-25)$$

综合以上各式可得两结构面上总抗剪力的铅垂方向分力为 F 为：

$$\begin{aligned} F &= (T_1 + T_2) \sin \alpha + (T_3 + T_4) \sin \beta \\ &= \frac{S}{\cot \alpha + \cot \beta} [c_{01} + c_{02} + \sigma_\theta (\sin \alpha \tan \phi_{01} + \sin \beta \tan \phi_{02})] \end{aligned} \quad (4-26)$$

单位长度结构体自重 W 为

$$W = \frac{1}{2} S \cdot h \cdot \gamma = \frac{S^2 \cdot \gamma}{2(\cot \alpha + \cot \beta)} \quad (4-27)$$

式中， γ ——围岩容重。

故结构体 ABC 平衡的条件为：

$$F \geq W。$$

4.2.3 松散体力学分析

1. 普氏拱理论

普氏通过盛满干砂 ($C=0$) 的箱底开孔试验, 说明箱中之砂最后会形成穹隆形平衡, 这种穹隆以上的砂不再掉落的现象, 称为拱效应。普氏认为岩体顶板的岩石也有拱效应。为了分析拱效应, 普氏定义了一个岩石坚固性系数 f (后来俄国学者对此计算公式进行了修正):

$$f = \frac{\sigma_c}{10} \quad (4-28)$$

式中, σ_c 为岩石单轴抗压强度 (MPa)。

(1) 两帮稳定时的顶压计算

两帮岩体不发生破坏, 顶板不稳定 (如下图 4-4 (a) 所示), 由于拱效应, 顶部可能冒落的岩石拱高为 b , 而拱周边岩石相互挤压, 处于安全平衡状态时的拱高:

$$b = \frac{a}{f} \quad (4-29)$$

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/096213225120010200>