

■ 王渭明 编著

围岩危石预测 理论与应用

煤炭工业出版社

围岩危石预测理论与应用

王渭明 编著

煤炭工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

围岩危石预测理论与应用/王渭明编著. —北京: 煤炭工业出版社, 1997. 8

ISBN 7-5020-1502-7

I. 围… II. 王… III. 围岩-岩移预报 IV. TD325

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 16352 号

围岩危石预测理论与应用

王渭明 编著

责任编辑 陈 昌

*

煤炭工业出版社 出版

(北京安定门外和平里北街 21 号)

北京密云春雷印刷厂 印刷

新华书店北京发行所 发行

*

开本 $850 \times 1168 \text{mm}^{1/32}$ 印张 $6\frac{7}{8}$ 插页 1

字数 177 千字 印数 1—1000

1997 年 8 月第 1 版 1997 年 8 月第 1 次印刷

书号 4271 定价 20.00 元

序

工程岩体的稳定性受岩体中的结构面的控制，这一事实已被越来越多的岩石力学专家所重视，众多的研究成果与工程实践表明，围岩的失稳，往往是从局部岩块冒落或片帮开始，引起相邻岩块相继松脱滑移，继而导致围岩整体失稳，这些首先发生冒落或片帮的局部岩块，就是我们所说的“危石”。掌握危石的显现规律，对围岩的维护和加固设计是十分有益的。由于切割岩体的结构面在岩体中的展布是随机的，所以围岩中的危石分布一般也是随机的。本书正是抓住了这一特点，把结构面的概率统计研究成果，成功地应用于裂隙岩体的稳定性分析和危石预测中，接着又将危石预测结果应用于巷道支护设计中，可见，该书既有理论深度，又注重解决工程实际问题，这是十分难能可贵的。

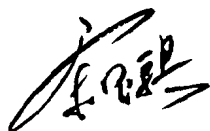
岩体中的结构面统计分析及其力学效应的研究是一个极其复杂而又非常重要的课题，近几年来备受岩石力学界的关注，掌握结构面的分布规律及其力学性质，是裂隙岩体稳定性分析的关键路线之一，本书全面、系统地阐述了结构面的统计法则，概统模型、模拟方法等等，无疑对裂隙岩体力学的发展做出了一份贡献。

煤矿井下硐室和巷道多数处在结构面发育的裂隙岩体中，涉及范围大，结构面展布复杂，结构面的统计与建模工作十分困难，本书根据地质学中的优势面理论和大小地质构造之间存在一定的相关性的特点，注意到煤矿生产重视小构造的勘探测量的实际情况，先利用小构造的统计资料，分区建立结构面初步模型，再利用巷道施工反馈的信息进行修正，逐步使模型趋向合理。这样就克服了复杂地质条件下结构面建模的困难，使巷道围岩中的危石预测成为可能，为煤矿巷道围岩稳定性分析开创了新的途径。

通观全书，思路清晰，主题鲜明，具有独创性，反映了作者

既重视理论研究，又注重工程实践的优良学风，突出了理论源自于生产实践又反过来指导实践的正确研究途径。因此，我很高兴为本书作序，并向本书作者表示祝贺。

中国科学院院士

A stylized, cursive handwritten signature in black ink, likely belonging to Chen Yizhong, an Academician of the Chinese Academy of Sciences.

1997 年 5 月

目 录

序

第一章 绪论	1
第一节 岩体的力学属性与力学模型	1
第二节 围岩中“危石”预测的基本概念	4
第二章 岩体结构面的统计与分析	6
第一节 各类结构面的特性及相关性	6
第二节 结构面间距的统计	17
第三节 结构面迹线长度的统计	27
第四节 小构造的统计与分组	36
第五节 结构面的抗剪强度	43
第三章 围岩“危石”预测的基本理论与方法	53
第一节 两个基本定理	54
第二节 块体可动性的矢量判别法	58
第三节 “危石”的判别	62
第四节 “危石”的体积及侧面积计算	65
第五节 巷道围岩中的“危石”判定	71
第六节 某大巷围岩中的“危石”确定	79
第四章 结构面的模拟与“危石”预测	95
第一节 Monte Carlo 法与随机数	95
第二节 结构面几何参数与内摩擦角的 Monte Carlo 模拟	99
第三节 结构面迹线网络的模拟	105
第四节 岩体临空面闭合网络的判别	111
第五节 “危石”的贝叶斯预测	116
第五章 巷道锚喷支护设计	130
第一节 概述	130

第二节	地质资料的收集与要求	134
第三节	锚杆支护设计	140
第四节	锚杆承载能力	150
第五节	喷射混凝土设计	166
第六节	锚杆和喷射混凝土支护设计	172
第六章	危石预测与支护程序设计	173
第一节	统计程序分析系统	174
第二节	危石分析程序系统	184
第三节	贝叶斯预测程序系统	197
第四节	应用软件的使用说明	205
后记		207
参考文献		208

第一章 绪 论

第一节 岩体的力学属性与力学模型

岩体是指在一定工程范围内的自然地质体，它经历了漫长的自然历史过程，经受了各种地质作用，并在地应力的长期作用下，在其内部保留了各种永久变形的形象和各种各样的地质构造形迹，例如，假整合、断层、层理、节理、劈理等，这些构造形迹往往统称为结构面。岩体由于受结构面的纵横切割而成裂隙（岩）体，有时又称这为块体的聚合体。围岩的变形规律、破坏机理、稳定状态受结构面的力学性质及其空间形态控制。

结构面的力学性质及其空间形态不是孤立的，而是与其成因及其形成过程密切相关。只有在研究结构面成因及其分布规律的基础上，才能认识和掌握结构面的力学性质和几何特性，因此，在进行结构面力学特性研究时，必须以地质成因研究为基础对结构面天然特性进行研究，掌握结构面的地质特点，为研究其力学性质打下基础。

结构面的地质成因类型有三种：

(1) 原生结构面。主要指在岩体形成过程中形成的结构面。如岩浆冷却收缩时形成的原生节理面、流动构造面、与早期岩体接触的各种接触面、沉积岩内的层理面、不整合面、变质岩内的片理等。

(2) 构造结构面。它是在岩体形成后，地壳运动的过程中，在岩体内产生的各种破裂面，如断层面、错动面、节理面及劈理面等。

(3) 次生结构面。指在外力作用下产生的风化裂隙面，开挖等卸荷过程引起的裂隙面等。

原生结构面，除岩浆岩中的原生节理面外，一般多为非开裂式的，即结构面有大小不等的连结力。次生结构面多为张裂隙，结构面不平坦，产状不规则，多为不连续，延展性不大。它常使与有效应力一致的一组或几组原生结构面显现为开裂式。

在岩体内上述三种类型面往往是重复混合出现。从结构特点看，岩体包含了连续介质、裂隙介质和散体介质；从力学性能看，岩体几乎包括了所有固体材料的力学属性——粘性、弹性、塑性、流变性、各向异性以及非均质性。不同岩体其力学属性不同，而同一岩体的物理力学参数也具有明显的分散性和不确定性。确定岩体的力学属性是解决岩体力学问题的一个关键。

严格来说，岩体多数属于非连续、非均质、具有流变和大变形特性的各向异性介质。若要求太严格，就会误入“理论”的死胡同，无论从理论解析、实验手段、计算方法上目前都无法满足这种严格要求。若要求太松，基本假设与实际岩体差别太大，分析结果不可信，或可信度低，也不利于问题的解决。

正确的方法是，根据不同的岩体，作适当的简化和假设，选择较合适的力学介质模型进行研究。谷德振教授将岩体结构进行分类，根据类型提出相应的力学介质模型（见表 1-1），具有重要意义。

表 1-1 岩体结构类型及其相应的力学介质模型

结构类型		I 类		力学介质模型
代号	名 称	代号	名 称	
I	整体块状结构	I ₁	整体结构	连续介质
		I ₂	块状结构	连续或不连续介质
II	层状结构	II ₁	层状结构	不连续介质
		II ₂	薄层状结构	
III	碎裂结构	III ₁	镶嵌结构	似连续介质
		III ₂	层状碎裂结构	不连续介质
		III ₃	碎裂结构	不连续介质似连续介质
IV	散体结构			似连续介质

这里把岩体看成是由结构面及其所包围的结构体（岩石块体）组成的集合体，岩体结构类型，则是指这种结构面与结构体的组合形式。表 1—1 中所指的连续，是从总体上，从统计平均的意义上来说的。严格来说，即使是岩体的实体部分，组成岩块的颗粒之间还存在空隙和裂隙；岩体本身还包含各种各样的结构面，应该说一切岩体都是不连续的。但有时还是把它看成连续介质，其原因为：（1）所谓连续，实质上是指应力、应变和位移的连续变化。对于处在各向压缩条件下的岩体，小空隙和小型结构面往往不影响这种连续性；（2）当空隙、裂隙所占的体积与实体颗粒相比很小时，总体上按连续体考虑不会引起很大的误差。

另外，在弹性力学、塑性力学、粘性力学等固体材料力学中，除假设介质连续外，还假设介质是均质的和各向同性的，同样是从宏观上，统计平均的意义上来看，对某些完整性好或较好的岩体来说，近似成立。正是这些近似、假设和简化，使得固体材料力学的理论在岩体力学中得到应用和发展，解决了许多岩体工程中的实际问题。

对于层状结构、碎裂结构之类的岩体，又可统称为裂隙岩体，围岩的稳定状态，主要受岩体中的结构面控制，这一事实被越来越多的岩石力学工作者所重视，近十几年来关于裂隙岩体力学模型与分析方法得到迅速发展。其中含少数节理的岩体，仍采用连续介质力学模型，利用数值计算方法，把岩体中的节理（结构面）处理成节理单元。而对密集节理岩体的处理途径主要有两种，一种途径是连续介质力学模型等效处理法，例如材料参数等效法、能量等效法、变形等效法、断裂力学法、损伤力学法等；另一种途径是非连续介质力学处理方法，例如离散单元法、不连续变形分析法（DDA）、块体理论分析法、刚块—弹簧法（RSM）。

此外，还有散体理论分析法、工程类比法等。无论哪种力学模型和分析方法，都是针对岩体某些主要特征，在做出某些基本假设的基础上提出的，因而这些方法都具有一定的实用范围和一定的局限性。在用于接近其基本假定的一类岩体中，将会有较好

的准确性；而对另一类岩体则完全无能为力。因此，岩体工程分析的一条重要原则就是要具体问题具体分析，根据不同的岩体结构采用不同的力学模型和分析方法。

第二节 围岩中“危石”预测的基本概念

在较坚硬的节理岩体中，岩体被各种各样的结构面切割成各类型的空间镶嵌块体。在自然状态下，这些空间块体处于静力平衡状态。当进行工程开挖时，原始的平衡状态被破坏，围岩内的应力重新分布，暴露在临空面上某些块体失去平衡，而首先沿着结构面滑动、失稳，进而产生连锁反应，造成整个工程破坏。这里把首先失稳的块体称之为“危石”，对于巷道来说，就是通常所说的冒顶、片帮。研究目的就是预测裂隙岩体工程中的这种危石，为工程的开挖与维护提供依据。

对工程围岩中的危石进行预测，要抓住围岩的稳定性受“危石”的控制，而危石存在的尺度及其分布规律又与岩体中的结构面和开挖面产状密切相关这一特点。在对工程进行预测之前，必须对岩体中的结构面进行探测、统计分析。通过对现有工程或露头或试验导洞围岩进行抽样调查，建立结构面产状、密度、延伸长度、结构面的内摩擦角、内粘结力等参数的概率统计（以下简称概统）模型。针对一个矿来说，应充分利用以往的地质勘测资料，根据大构造走向趋势将本矿的井田范围划分成若干个地质区域，把构造走向趋势类似的地层划为同一地质区域。然后在每个地质区域内，对巷道的开挖面作好地质素描，开展地质检查和小构造的统计，建立分区概统模型，对同区域内的未来开挖巷道围岩内的结构面进行计算机模拟。同一区域内的不同方向的巷道，或同一方向的巷道，在不同的轴线位置上，结构面的产状、密度、力学参数还会有变化，但因为处于同一地质区，其概统模型基本相同，只要根据现场反馈信息不断调整模型中的敏感参数，就能保持计算机模拟结果与实际围岩中的结构面展布规律基本相符。

结构面分布概统模型建立后，就可随机产生岩体中的空间结

构面，并通过旋转变换把岩体空间的各组结构面与开挖面相交的结构面迹线模拟出来，这种结构面迹线网络图，可通过调整敏感参数产生动态变化，使模拟的结构面迹线网络图与跟踪施工地质素描保持基本相符。结构面的模拟迹线网络与工程中实际素描（包括：抽样量测的基本参数）相似，说明岩体中的结构面分布状态与模拟产生结构面空间相似。利用这些结构面（若干组）的分布参数，引用“块体理论”方法，预测工程岩体中的危石存在情况。结合块体的有限性判别条件，删除工程开挖面上的结构面迹线网络图中的树枝，保留网络图上的迹线闭合环路，再根据块体的可动性条件，标记出可能出现“危石”的位置，为工程支护提供依据。

另外，利用分区内的结构面概统模型和有关统计参量，根据蒙特卡罗法原理，大量模拟产生与“危石”有关的原始信息，每模拟产生一个参数，就进行一次“危石”的计算，并以“危石”的体积和“净滑力”为观测参数空间，以结构面产状、密度、内摩擦角等有关参数为影响参数空间，建立“危石”的贝叶斯预测模型。同一区域的巷道可用同一模型进行危石预测，在进行预测实施的过程中，还可以根据施工信息的反馈不断修正模型，使预测结果趋于准确。所有的建模和运算工作都由微机完成，反应非常迅速，可以满足工程的安全监测的要求。

第二章 岩体结构面的统计与分析

岩体存在各种各样的、随机分布的结构面。岩体中的结构面系指岩体在生成过程中，以及生成后若干地质年代中，受地壳构造作用形成的各种断裂面，有时还包括工程开挖扰动形成的新的断裂面，也就是通常所说到的裂隙、节理、断层、破裂面的总称。岩体可视为由结构面和由结构面切割的块体的集合体。块体的形状、大小、分布规律与结构面的几何特性、分布状态密切相关；结构面力学性质、几何特征、分布规律对岩体的稳定性起着决定性的作用。在进行岩体的稳定性分析，或工程围岩中的“危石”预报及分析之前，必须首先研究一下结构面的存在状态。岩体中的结构面，除个别大型结构面，可单独测定其几何特征，描述其力学性质外，多数结构面相对工程规模来说是很小的，且分布复杂，因此不可能用确定性的方法来描述结构面的分布密度与几何特征，只有用概率统计方法来研究。本章主要内容就是讨论结构面几何特性的概率统计描述方法，为“危石”的预报打下基础。

第一节 各类结构面的特性及相关性

岩体的结构面分布复杂，研究起来困难重重。各类结构面既存在相关性又具有各自独立的特性。掌握有关结构面的一些特性和相关性，对结构面分布规律的研究大有帮助。从影响工程稳定性范围内对结构面产生的力学效应考虑，可将岩体中的结构面分为层面、节理和断层三类。其中，层面是岩体沉积过程中形成的结构面，特征很明显，规律性较强，容易勘测和描述，本节将着重讨论节理和断层的特性及其相关性。

一、节理的成因及类型

节理的成因很复杂，其类型多种多样，有构造形成的，有沉

积形成的，有冷却收缩形成的，也有风化形成的。按其力学性质，有剪切节理、张节理，也有综合成因的压扭性及张扭性节理等等。按其形态特征，有平面的或直线的，也有曲面的或弧形的。按其形成顺序则有主有从。按其规模则有长有短，按其充填性则有有充填和无充填之分，充填的物质有的是泥，有的为岩脉，有的为矿物薄膜等。随着岩性不同，构造部位不同，岩层变形不同，分布高程不同，其数量与性质也大不相同。

虽然节理的成因复杂，种类繁多，但构造节理最为重要。在岩层发生褶皱的晚中期，最易在褶曲的轴部发育张节理，而在其两翼发育剪节理（图 2—1）。

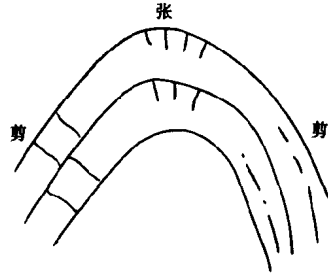


图 2—1

在岩层发生断裂时，由于两盘岩体发生相对运动，所以在两

盘岩体中派生羽状排列的张节理和剪节理（图 2—2）。羽状张节理（ T ）常与主断层呈 45° 角相交。派生的剪节理一般有两组，一组（ S_2 ）与主断层呈 15° 以下夹角相交，但不甚稳定。一组（ S_1 ）与主断层呈直交或大角度相交，比较稳定。其次，不仅断层面附近会出现节理，据目前研究发现，在断层两侧一定范围

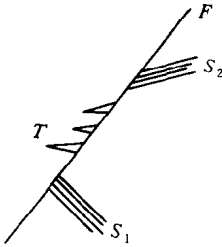


图 2—2

F —主断层； T —张节理；
 S_1, S_2 —剪节理

围内（称为断层影响带），与断层相关的节理也会出现。例如俄罗斯某煤矿在观测某条落差较大的逆断层时，常发现断层影响带中煤层节理在距断层 200m 左右时有 4 组，距断层 140~160m 处有

6组，距断层80~100m处有8组，靠近断层10~20m处有9~10组。

节理的类型有多种多样，按节理与岩产状关系分类有（图2-3）：

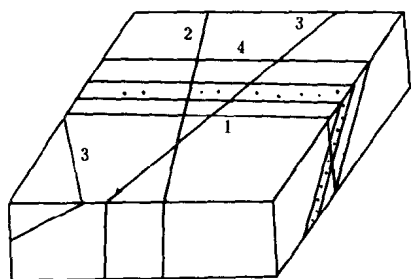


图 2-3

1—走向节理；2—倾向节理
3—斜向节理；4—顺层节理

（1）走向类型。节理走向与岩层走向大致平行的节理。

（2）倾向节理。节理走向与岩层走向大致直交的节理。

（3）斜向节理。节理走向与岩层走向斜交的节理。

（4）顺层节理。节理面与岩层面大致平行的节理。

的节理。

按节理面与褶皱面交线关系分类有（图2-4）：

（1）纵节理。节理面与褶皱面交线平行于褶皱轴向的节理。

（2）横节理。节理面与褶皱面交线直交于褶皱轴向的节理。

（3）斜节理。节理面与褶皱面交线斜交于褶皱轴抽的节理。

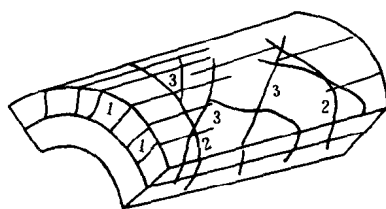


图 2-4

1—纵节理；2—横节理；3—斜节理

按节理力学性质又可分为剪节理和张节理（图2-5）：

1. 剪节理

剪节理是由剪应力产生的破裂面，具有以下特征：

(1) 产状稳定,沿走向和倾向较远,穿切不同岩层时倾角有所变化;

(2) 节理面平直光滑,当有小错距时可见因剪切而留下的擦痕。节理未被矿物充填时是闭合的,如被充填,脉宽较为均匀,脉壁较为平直;

(3) 节理切穿砾石和胶结构(图 2-5);

(4) 常形成其共轭为“X”型节理系。X 节理发育良好时,则将岩石切成菱形或棋盘格式。如一组发育另一组不发育,则成一组平行延伸的节理(图 2-6);

(5) 多条平行节理往往等距分布;

(6) 主要剪切面由羽状细微裂面组成,羽状微裂面与主剪裂面交角一般为 $5^{\circ} \sim 15^{\circ}$,呈雁行状排列(图 2-7);

(7) 尾端变化有三种形式:折尾、菱形结环和分叉(图 2-8)。

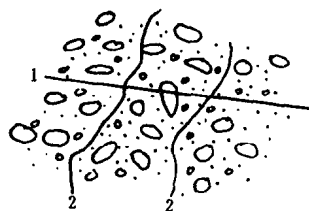


图 2-5

1—剪节理; 2—张节理

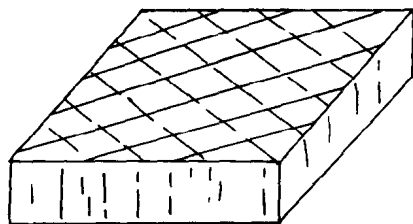


图 2-6

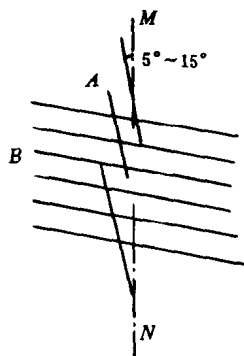


图 2-7 A 组微裂面呈羽状分布

MN—主裂面

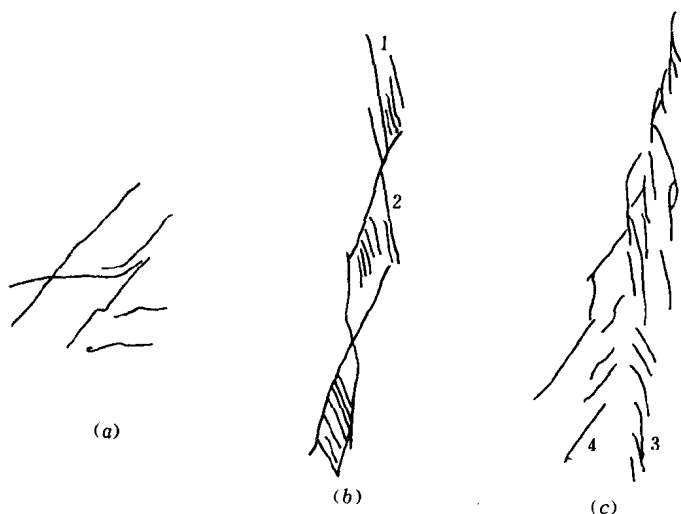


图 2-8

a—折尾；*b*—菱状结环；*c*—节理分叉；1、2、3、4—为共轭剪节理

2. 张节理

张节理是由张应力产生的破裂面，具有以下特征：

(1) 产状不甚稳定、延伸短。单条节理短而弯曲，一组节理常见到（图 2-9）；

(2) 节理面粗糙不平，无擦痕；

(3) 常绕砾石或粗砂而过，即使切穿砾石，破裂面也凹凸不平（图 2-5）；

(4) 节理多开口，具有缝隙，一般被矿脉充填。脉宽变化较大，脉壁不平直；

(5) 有时呈不规则的树枝状，各种网络状，放射状等；

(6) 尾端变化有三种形式：树枝状、多级分叉、杏仁状等（图 2-10）。

二、节理的观测

不管什么类型的节理，都可能是形成“危石”的重要因素，因而要仔细观测和记录，其步骤如下：