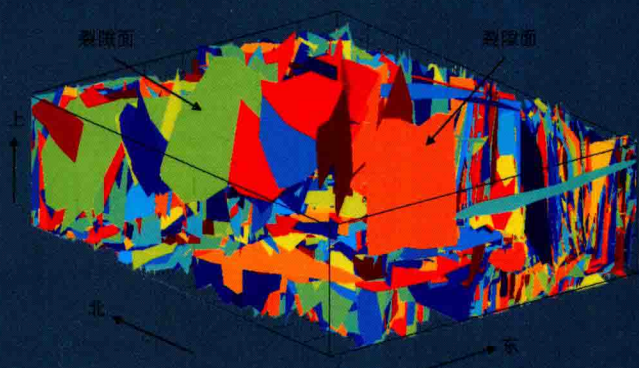
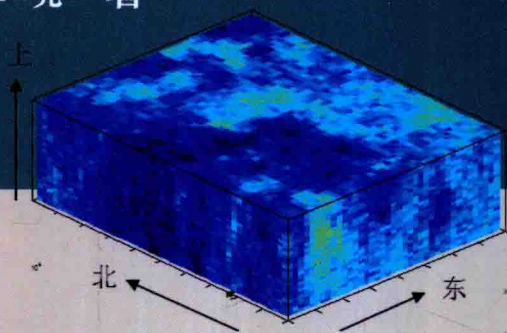




地学中方向性变量的 多尺度空间分布模拟

刘春学 倪春中 吕磊 谭晓 著



科学出版社

地学中方向性变量的多尺度空间分布模拟

刘春学 倪春中 吕磊 谭晓 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书针对自然界中广泛存在的方向性变量,如断裂、断层、裂缝、裂纹、节理等,研究方向性变量各属性间的关系、跨维数转换、跨尺度联系、跨尺度三维空间分布模拟的理论方法体系,编写相关的程序,并根据在云南个旧锡矿高松矿田获取的一维、二维裂隙样本数据模拟裂隙网络的三维空间分布,为地质资源预测、工程稳定性评价、地质灾害预报、核废料处置等领域的研究和工作提供科学的定量依据。

本书可供地球科学及其相关领域主管部门和企业的管理人员、工程技术人员参考,也可作为科研院所和高等院校的科研人员和研究生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

地学中方向性变量的多尺度空间分布模拟/刘春学等著. —北京:科学出版社, 2017.6

ISBN 978-7-03-052959-6

I. ①地… II. ①刘… III. ①地质学-变量-三维-空间-分布模型
IV. ①P5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 116478 号

责任编辑:刘浩旻 韩 鹏 陈姣姣/责任校对:何艳萍

责任印制:张 伟/封面设计:耕者

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>

北京九州迅驰传媒文化有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年6月第一版 开本:787×1092 1/16

2017年6月第一次印刷 印张:9 1/2 插页:1

字数:220 000

定价:88.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

方向性变量在自然界的各个尺度上都广泛存在,其发达程度和空间分布影响着地质体的稳定性和工程建设的安全性,在地质资源勘探和开采、水利水电、地质环境等领域具有重要意义。

近年来,方向性变量研究主要集中在裂隙的几何和物理特性、属性关系,以及裂隙网络特征和模拟等方面。而裂隙样本数据主要是基于钻孔或岩墙等获取的一维或二维资料,三维样品数据虽可用核磁共振等方法观测,但能观测的样品尺寸非常微小(厘米级),远不能满足实际应用中最重要中尺度(米级、千米级)研究。

本书通过解明方向性变量的跨维数、跨尺度联系,建立能对方向性变量的多尺度三维空间分布进行模拟和预测的理论方法体系,实现用少量的、低维的、不全面的观察数据来预测和模拟方向性变量的中尺度三维空间分布(网络),并根据云南个旧锡矿区的实际应用,建立更精确的理论方法体系,编制相应的程序。本书主要包括以下内容:

方向性变量各属性间的关系。通过云南个旧锡矿区的资料总结方向性变量各属性之间的关系,包括位置、方向、大小、隙宽、密度、充填物等。

方向性变量的跨维数转换。从低维一维和二维迹线资料反演推断方向性变量的三维分布,包括方向性变量的各种属性和特征由一维向二维、一维向三维、二维向三维转换的途径和方法。

方向性变量的跨尺度联系。根据方向性变量尺度不变性和统计自相似性,应用分形理论归纳总结方向性变量的跨尺度规律,具体包括长度分布、密度分布、丛聚规律、空间相关规律、裂隙数目等。

方向性变量跨尺度三维空间分布模拟的理论方法体系。建立方向性变量三维空间分布模拟的理论方法体系,包括方向性变量属性分解、密度估计、位置生成、主成分分析及反演、方向分布估值、属性综合、网络联结等。

云南个旧锡矿高松矿田应用。根据云南个旧锡矿高松矿田实际观察和实验得到的样本裂隙资料数据进行裂隙网络空间分布的模拟,并根据实际情况进行验证、修改裂隙网络模拟方法的缺陷。

本书在成书和相关研究工作开展的过程中得到了云南财经大学、昆明理工大学、云南锡业股份有限公司等单位的大力支持;课题组成员燕永锋、雷迪、尹宏等同志,崔翔、贾玉伟、邓明翔、季正伟、李春雪、李婕、詹怡勤、雷荣林、李悦、金欢、翟羽佳、屈

秋实、张蔚、秦建楠、杨花平、葛露婷、赵婧雯、游泽兴、潘宁宁、杨智鹏、王程民、郑宇、李宝、徐爽、徐玉昆、陆思桥、任园园等研究生做了大量的工作；云南锡业股份有限公司的武俊德、童祥、韦松、朱文捷、康德明、陆荣宇、唐国忠、芦磊、赵博等给予了极大的支持；云南省地质矿产勘查开发局的郭良、昆明理工大学的陈刚、云南财经大学的朱洁等做了卓有成效的工作；日本京都大学的小池克明和久保大樹、北京理工大学的李建武、云南财经大学的张洪等专家学者都提出了很好的意见建议。在此表示由衷的谢意。

本书的主体是国家自然科学基金项目的研究成果，在研究和出版过程中均得到了国家自然科学基金（NSFC）项目（40902058）、云南锡业股份有限公司、云南财经大学西南边疆山地区域开发开放协同创新中心研究项目的资助。

由于作者水平有限，书中难免存在疏漏之处，敬请广大读者批评指正。

著 者

2017年2月

目 录

前言

第一章 方向性变量的属性特征	1
第一节 裂隙(网络)概述	1
一、裂隙的概念	1
二、裂隙的分类	3
三、裂隙的作用	6
四、裂隙的研究	8
第二节 调查取样	14
一、取样方法	15
二、取样偏差	17
三、误差校正	18
第三节 形成机理	23
一、岩石的力学性能	24
二、裂隙形成的过程	25
三、裂隙形成的特点	27
第四节 属性特征	28
一、裂隙属性表达	28
二、裂隙属性分布	35
三、裂隙属性关系	36
第二章 方向性变量的跨维数转换	42
第一节 密度的跨维数转换	42
一、密度的定义	43
二、密度的跨维数转换	44
三、密度的跨维数分析	45
第二节 长度的跨维数转换	47
一、长度的跨维数联系	48
二、长度的跨维数转换	50
三、长度的跨维数实现	52
第三节 方向的跨维数转换	55
一、方向的分布	55
二、方向的跨维数关系	55
三、方向的跨维数转换	56

第三章 方向性变量的跨尺度联系	58
第一节 尺度不变性	58
一、尺度的概念	58
二、尺度相似性	59
第二节 分维的测量	60
一、分维的定义	60
二、盒计数法	60
三、两点函数法	61
第三节 指数的估计	62
一、指数的估计	62
二、指数的特点	64
三、指数估计的精确性	66
四、长度指数的估计	67
第四章 方向性变量的空间分布模拟	69
第一节 位置模拟	70
一、密度的计算	70
二、密度分布的估计	72
三、空间位置的生成	76
第二节 方向模拟	76
一、方向转换	76
二、主成分计算	78
三、方向生成	80
第三节 裂隙连接	80
一、裂隙元的连接	81
二、裂隙的生成	82
第五章 个旧锡矿高松矿田裂隙空间分布模拟	83
第一节 区域及矿区地质	83
一、区域地质	83
二、矿田地质	85
第二节 资料分析	92
一、小尺度数据	92
二、中尺度数据	100
三、大尺度数据	102
四、岩石声发射分析	103
第三节 小尺度裂隙网络模拟	106
一、样本裂隙提取	106
二、裂隙网络模拟	107

三、结果及分析·····	110
第四节 中尺度裂隙网络模拟·····	111
一、矿田构造·····	111
二、裂隙网络模拟·····	111
三、结果及分析·····	115
第五节 大尺度裂隙网络模拟·····	115
一、矿区构造·····	116
二、线性构造提取·····	116
三、结果及分析·····	121
第六节 跨尺度联系·····	123
一、跨尺度特征·····	123
二、跨尺度联系·····	124
三、结果及分析·····	125
第六章 结论与展望·····	127
一、研究结论·····	127
二、不足与展望·····	129
参考文献·····	130
彩图	

第一章 方向性变量的属性特征

由于在实际观察中很难获得方向性变量所有属性的资料,而这些属性对于方向性变量在相关领域中的影响又非常重要,在矿产资源形成和赋存、基础设施建设和利用等领域均有重要意义,因此归纳提取方向性变量各属性之间的关系是弥补其属性数据缺失的重要途径。

第一节 裂隙(网络)概述

方向性变量在地球科学中广泛存在,是地球科学中的一类重要变量,如断裂、断层、裂隙、裂缝、裂纹、节理等。方向性变量在各个尺度上都广泛存在,大到卫星上才看得全的几十千米、几百千米的区域性大断裂,小到在显微镜下才看得清楚的几纳米、几微米的岩石晶体裂纹等。

一、裂隙的概念

1. 裂隙的定义

裂隙(fracture)是在一系列矿物形成岩石之后,受地应力(如剪切、拉伸、压迫、振动等)的变化影响而产生变形,造成岩体产生破裂,随后被一些物质充填(或没有充填)就形成了各种揭露面上看到的不连续性,其形状看起来无规律可言,主要与岩体性质、地应力大小及方向有关。

裂隙在不同的学科中有不同的定义。地质地貌学中裂隙是断裂构造的一种,通常指岩体中产生的无明显位移的裂缝。水文地质学中裂隙是指固结的坚硬岩石(沉积岩、岩浆岩和变质岩)在各种应力作用下破裂变形而产生的空隙。

本书关于裂隙的定义为地球表层岩石中的不连续间断面,小到几微米的晶体裂纹,大到几千千米的断裂带。裂隙网络(fracture network)是指一组可能相交或可能不相交的独立的裂隙的集合。

2. 裂隙的表征

裂隙的表征包括位置、大小、形状、方向等因素。裂隙的空间位置可以用裂隙面中心点的 p 在笛卡尔直角坐标系(或者极坐标系)中的坐标来表示。裂隙的确切形状目前还无法获得,但一般可以被近似地视为大致的平面或曲面,形状上可以被认为是不规则的多边形(Dershowitz and Einstein, 1988)或薄圆盘(Einstein and Baecher, 1983; Long and Witherspoon, 1985),本书假设裂隙为圆盘。裂隙的大小一般总是假设用一个单一的长

度来描述,对圆盘形裂隙可以用其直径 $2R$ 表示,对多边形裂隙可以用其外接圆的直径 $2R$ 表示。裂隙的方向可以用裂隙面的单位法线来表示,也可以用地质上常用的方位(包括走向、倾向、倾角)来表示。

考虑 XYZ 的直角坐标系,裂隙面在三维空间的表征如图 1-1 所示。裂隙的位置为 $p(x, y, z)$; 裂隙的大小用圆盘直径 $2R$ (或半径 $2r$) 表示; 裂隙的方向可以用其走向 α 和倾角 β 来表示,也可以用其单位法线矢量 $\mathbf{n}$ 来表示; 裂隙的宽度用 b 表示。

裂隙单位矢量法线 $\mathbf{n}$ 在球面坐标上的表示为

$$\begin{aligned}\mathbf{n} &= (n_x, n_y, n_z) \\ &= (\sin \theta \cos \varphi, \sin \theta \sin \varphi, \cos \theta)\end{aligned}\quad (1-1)$$

式中, φ ($0 \leq \varphi < 2\pi$) 为裂隙面单位法线矢量在 XY 平面的投影线与 X 轴之间的角度, θ ($0 \leq \theta < \pi/2$) 为裂隙面单位法线矢量与 Z 轴的夹角。

若用裂隙面的走向、倾角表示,则其方向可以用裂隙面中的 pp_0 方向的单位矢量在 XYZ 轴的分量表示,形式如下:

$$(\sin \beta \cos \alpha, \sin \beta \sin \alpha, -\cos \beta)$$

实际观察中一般难以直接观察三维的裂隙,而只能通过三维裂隙与一维和二维观察窗口的交切痕迹进行测量,即一维交切线上的点和二维交切面上迹线(trace)。迹线的长度用 l 表示(图 1-2)。

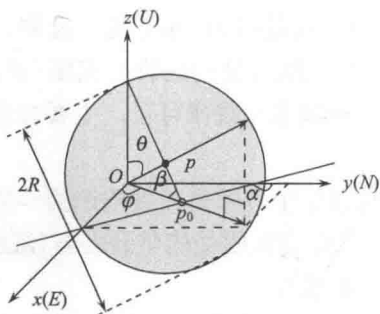


图 1-1 裂隙的空间表征

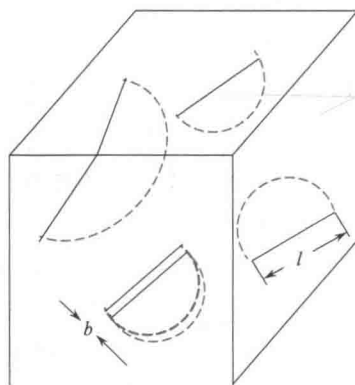


图 1-2 裂隙迹线示意图

3. 裂隙的特点

自然界中的岩石由于成分及应力的不均,其中的裂隙具有一些显著的、区别性的特点,主要可以归纳为以下几个方面。

1) 范围广

裂隙在自然界中的分布范围非常广泛。在规模上裂隙可以覆盖从亚毫米的裂纹到数百千米长的断裂,在领域上裂隙可以包括自然岩体(石)和人工建造物。其观察和测量方

法也非常广泛,可以包括卫星、飞机上获取的遥感影像,也包括电子显微镜下的矿物图像。

2) 观察难

裂隙的观察主要依赖于二维迹线图,而三维裂隙网络与其二维截面之间有很大的差异。近来在三维裂隙网络观察方面取得了许多进展,其中一个例子是把一块有细密纹理的花岗石锯成平行的9片,在每个岩片上画出裂隙,并在每片贴上相同的标签(Ledesert et al., 1993)。

3) 随机性

从许多例子中都可以清楚地观察到裂隙的随机性,这就需要对真实的裂隙网络或迹线图作统计分析。例如,在迹线图上可以得到裂隙数目、长度等的概率密度。

4) 过同一位置

裂隙(面)的一个重要特点就是在同一空间位置可以有若干个裂隙通过。这显著区别于一般的在同一空间位置只有一个物质存在的现象,如矿物、污染物等在某一特定的空间位置只能排他性的存在。

二、裂隙的分类

裂隙按照不同的标准和用途可以分为不同的种类。

1. 按裂隙规模分类

根据裂隙的发育规模,不同尺度的裂隙可以包括断裂带(fracture zone)、断层(fault)、层理(stratification)、节理(joint)、矿脉(vein)、裂缝(crack)、裂纹(fissure)、解理(cleavage)等(图1-3)。

断裂带是指由主断层面及其两侧破碎岩块,以及若干次级断层或破裂面组成的地带,亦称“断层带”。

断层是指地壳岩层因受力达到一定强度而发生破裂,并沿破裂面有明显相对移动的构造,剪切断层两盘移动方向平行于断层面,其规模可达几千千米。

节理是指岩石裂开而裂面两侧无明显相对位移的裂缝,可有一定的张开度,但没有矿物充填发生,往往是决定岩石或岩体强度最主要的因素,一般为 $10^0 \sim 10^3$ m。节理的一般岩体受“拉”和“剪”作用形成剪节理或张节理,一般是正对岩体说的,没有位移的断裂。一般来说剪节理较为规则,张节理有时规则有时不规则,如X型共轭剪节理、雁列式张节理、树状张节理等。一般来说,节理能明显地反映岩体的受力方向,但是裂隙则不能。

矿脉是指以板状或其他不规则形状充填在各种岩石裂缝中的矿床。矿化前裂缝可能经历过剪切位移,矿化后期裂缝的宽度扩大,提供容矿空间。

裂缝是指长度通常大于 5mm、宽度大于 0.5mm 的裂隙。

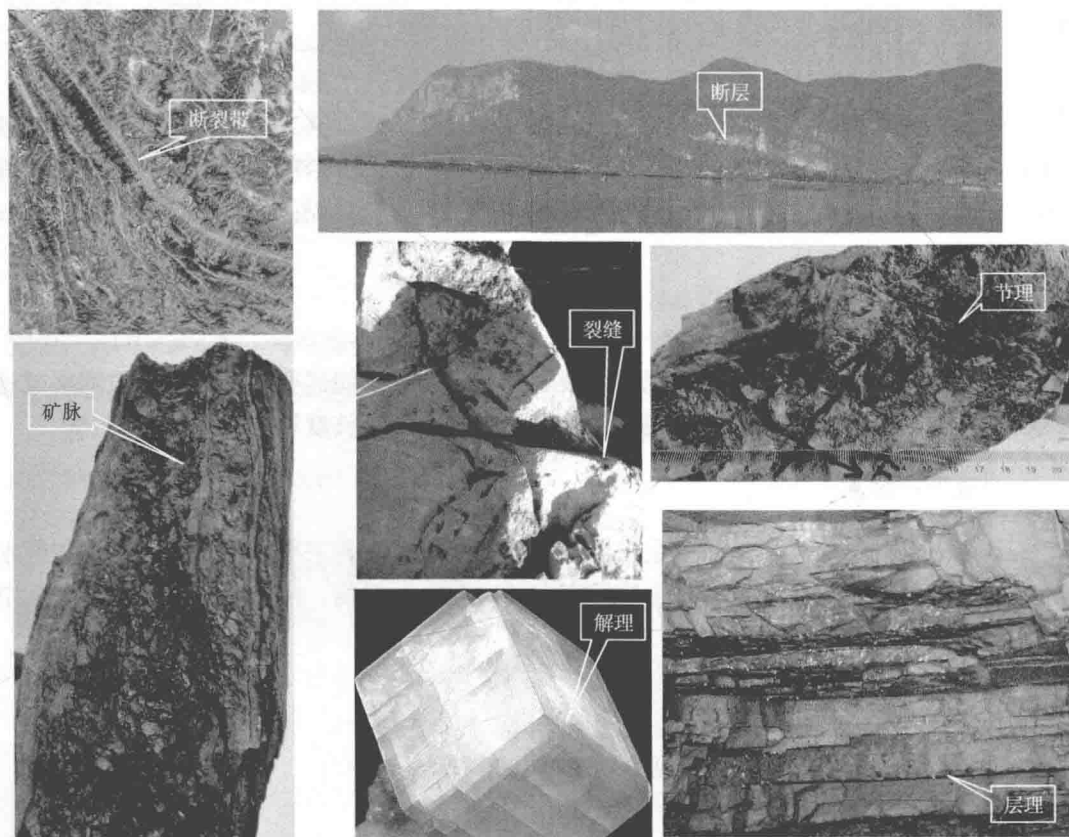


图 1-3 裂隙类型图

裂纹是指岩石在应力作用下长度小于 5mm、宽度小于 0.5mm 的裂隙，如岩石样品中矿物内部的小裂纹，长仅几微米。

解理是指在矿物中存在的，呈 2 组或 3 组交叉，把矿物分成一些规则的块体，解理的形成与矿物结晶后内部结构和受到外力打击有关，如方解石有 3 组解理，所以当用肉眼观察方解石矿时，会看到一个大的平行六面体内又有许多小的六面体。

2. 按裂隙成因分类

由构造应力作用形成的裂隙叫做构造裂隙或节理。由于构造应力在一个地区有一定的方向性，因此由构造应力形成的各种构造裂隙在自然界中的分布是有规律的，排布方向是一定的。

构造裂隙按力学性质分类，可分为张裂隙和剪切裂隙两种(张文佑，1962；唐辉明、晏同珍，1993；沈成康，1996；范天佑，2003)。另外，对形态微细、分布密集、相互平行排列的构造裂隙，又称为劈理。根据断裂力学理论，按固体中的裂隙面与附加应力之间的关系，从力学上将裂隙分为三种基本状态，即张开型裂隙、剪切型裂隙和撕开型裂

隙,如图 1-4 所示。

张开型裂隙:裂隙受垂直于裂隙面的拉应力作用使裂隙面产生垂直于裂隙面的张开位移,是自然界和工程建设中最常见的一种裂隙模式。张开性裂隙具有产状不甚稳定、延伸不远,单条节理短而弯曲,常侧列产出;表面粗糙不平、无擦痕;在胶结不太坚实的砾岩或砂岩中的节理常常绕砾石或粗砂粒而过,如切穿砾石,破裂面也凹凸不平;多开口,一般被矿脉充填的特征。脉宽变化较大,随深度而减小,壁面不平直;有时呈不规则的树枝状,各种网络状,有时追踪 X 型节理、单列或共轭雁列式张节理,有时呈放射状或同心圆状组合形式。

剪切型裂隙:也叫滑开型裂隙,是指裂隙受平行于裂隙面,并且垂直于裂隙前缘的剪应力作用,使裂隙面在其平面内相对滑开。剪切裂隙产状较稳定,沿走向和倾向延伸较远;较平直光滑,有时具有因剪切滑动而留下的擦痕,未被矿物充填时是平直闭合缝,如被充填,脉宽较为均匀,壁面较为平直;发育于砾岩和砂岩等岩石中的剪节理,一般穿切砾石和胶结物;典型的剪节理常常组成 X 型共轭节理系, X 型节理发育良好时,则将岩石切成菱形,剪性结构面往往成等距排列;主剪裂面由羽状微裂面组成,羽状微裂面与主剪裂面的交角一般为 $10^{\circ}\sim 15^{\circ}$,相当于内摩擦角的一半。

撕开型裂隙:裂隙受平行于裂隙面,并且平行于裂隙前缘的剪应力作用,使裂隙相对错开。

如果裂隙同时受正应力和剪应力的作用,或正应力与裂隙成一角度,这时就同时存在在张开型和剪切型裂隙,或张开型和撕开型裂隙,称为复合型裂隙。

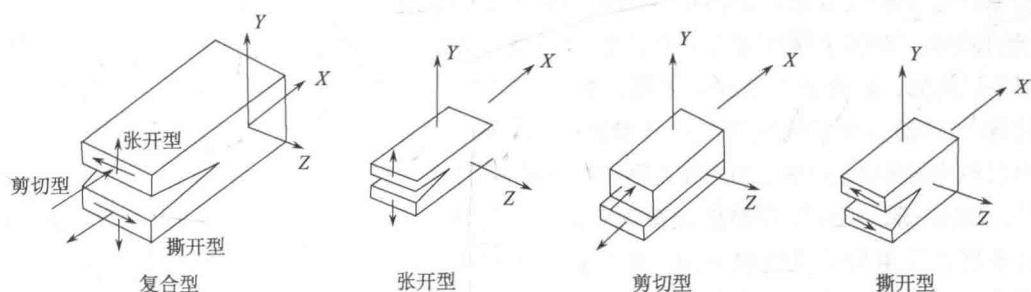


图 1-4 裂隙成因类型图

3. 按裂隙位置分类

裂隙也可以按照其在岩石中的位置进行分类,一般可以分为穿透裂隙、表面裂隙和埋藏裂隙三种裂隙,如图 1-5 所示。

穿透裂隙:通常是指裂隙延伸到岩石厚度一半以上的视为穿透裂隙,并作理想裂隙处理,即裂隙尖端的曲率半径趋近于零。穿透裂隙可以是直线、曲线或其他形状的。

表面裂隙:位于岩石表面或裂隙深度相对岩石厚度较小就作为表面裂隙处理。对于表面裂隙常简化为半椭圆形裂隙。

埋藏裂隙：位于岩石内部，常简化为椭圆片状裂隙或圆片裂隙。

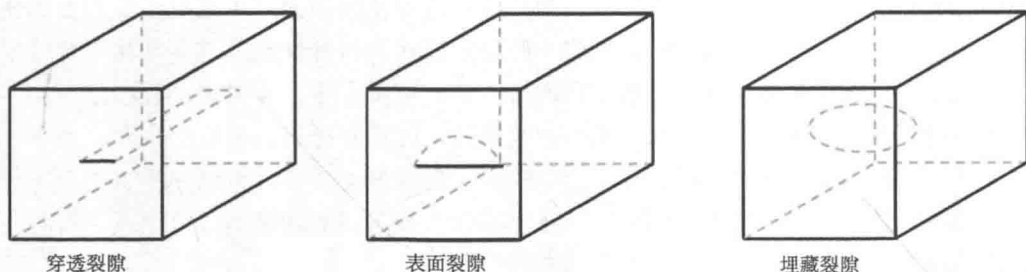


图 1-5 裂隙位置类型图

三、裂隙的作用

方向性变量控制着许多地质资源的形成及空间赋存，其发达程度和空间分布也影响着地质体的稳定性和工程建设的安全性，在地质找矿、地震预测、地质灾害防治、矿山开采、核电站选址、高危放射性核废料储埋库、水库大坝、交通建设等领域具有重要意义。

矿产资源的开发与利用，在我国国民经济发展和西部大开发战略中无疑具有重要的意义。裂隙系统的形成和演化与成矿具有密切的内在联系，地壳中矿产的分布是受一定的地质构造控制的，矿区内经常发育不同时期、不同规模、不同产状和不同性质的断裂构造，是含矿气液流体运移扩散的通道和沉淀、赋存的空间，控制着不同规模和不同产状的矿体。许多金属和非金属矿产的形成及空间赋存都与断裂构造和次级节理裂隙密切相关。例如，云南个旧地区原生锡、铜矿床的矿床形成和分布与断裂构造关系密切(庄永秋等，1996)，断裂构造交汇点一般被认为是矿床分布的重要因素。我国的许多金矿，如山东焦家金矿(张佳楠，2012)、贵州黔西南金矿(张蕾等，2012)、广西明山金矿(王立德等，2008)等，矿区断裂控矿规律性强，构造及裂隙为矿床形成过程中含矿热液的运移及富集提供了重要的通道和空间。此外，许多已形成的矿产还会受到后来构造运动的影响而变形。因此，地质构造与矿产形成之间的时空规律在矿产普查勘探和采矿过程中起着重要的作用。

断层是金属、煤矿开采中常见的一类地质构造形态，众多的巷道群往往无法避开(黄超，2012)。在断层形成过程中通常伴随着巨大的能量释放，因此断层带附近围岩一般比较破碎。这些断层通常产生次生断层及破碎带，围岩节理发育明显，岩层破碎松软，裂隙渗水大，围岩变形呈现出软岩特征。断层的出现给矿井安全生产和掘进工作造成了极大的影响，当掘进工作面与断层相遇时，由于顶板破碎程度高、破碎范围大，巷道极易发生冒顶事故。因此，断层的性质及空间分布，对巷道的掘进、冒顶及片帮事故的发生具有重要影响(王振等，2012)。

在爆破作业工作中，断层破碎带是药室布置时要考虑的首要因素。由于破碎带中裂隙发育，应尽可能减小药室在破碎带中的穿越长度，使药室与破碎带呈正交或大角度斜

交(李艳青, 2012)。

煤层中赋存的瓦斯严重威胁井下安全生产, 其生成、运移、保存条件、赋存都与断裂构造有着密切的关系(季荣生等, 2005)。一般压性断层受到较大压应力, 导致结构致密, 透气性很差, 周围煤岩体的瓦斯沿断层向上运移过程中阻力较大, 因此压性断层易于保存瓦斯。而受张应力生成的张性断层则由于结构松散, 断层泥发育, 易于瓦斯逸散。且越靠近断层处瓦斯压力及含量值越小, 瓦斯涌出量越小。煤与瓦斯突出还与断层的空间方位有很大的关联, 几乎总是发生在沿着平移断层、逆断层或正断层变形强烈的区域。断层附近构造应力集中, 当采掘工作面邻近时, 受采动影响, 一部分吸附瓦斯会解吸为游离瓦斯, 瓦斯压力及含量都显著增大, 一旦采掘影响到前方的应力集中区, 诱发该部位应力突然释放, 就有可能发生煤与瓦斯突出事故(陈书平, 2010; 李普等, 2011; 谢法桐等, 2011)。

另外, 在含水层中进行矿床开采时, 需要研究裂隙对水的隔离性能及对底层的复合性破坏作用, 防止突水事故。断层突水是煤矿突水事故中的重要类型, 直接威胁着矿井的安全。当地下煤炭资源被采出后, 采区原有的三向应力状态被打破, 上覆岩层失去支撑力而变形、破断甚至移动, 并且这种移动有可能延展至地表, 最终诱发地表沉陷(周瑞光等, 2000)。

地热、矿泉及地下水的开采, 需要根据裂隙的空间分布和联通情况制定科学的开采方案, 并创造出更好的破裂面和渗流条件以提高开采率。石油、天然气通常分布在背斜的顶部或具圈闭条件的断裂构造中。我国含油气盆地的形成与分布都受深大断裂的控制, 几乎所有无机成因的烃都是通过深大断裂从地下深处运移上来的(杜春国等, 2004)。断裂对油气成藏的控制表现在深大断裂控制着深源无机二氧化碳气藏的形成与分布, 平面上延伸较远的大断裂往往有利于油气侧向运聚成藏, 断裂除了作为油气垂向运移的通道外, 较大的断裂还可以作为油气侧向运移的通道, 使油气沿断层进行侧向运移和聚集。断层垂向封闭性及其变化则控制着油气的聚集, 首先较好的断层垂向封闭性有利于油气的运移与聚集, 其次断层在垂向上封闭性变化控制着油气分布层位断层活动和封闭控制不同类型圈闭的形成。

水利水电工程建设中, 在修建水利设施、水电工程时因开挖会引起岩石裂隙的延展和贯通, 无论渠壁、坝肩、坝基、边坡或地下厂房都会发生强度和稳定性的恶化或渗流问题, 威胁水工建筑的安全, 造成安全事故, 如法国的马帕塞、意大利的瓦依昂大坝、巴西的伊泰普坝、印度的巴克拉坝、澳大利亚的沃勒甘巴坝, 以及我国的龙羊峡、葛洲坝、二滩、三峡等世界著名的大型水电工程都存在由裂隙产生的问题, 有的甚至产生了灾难(廖建忠、文军, 2012)。

核废料、高污染化学废料、二氧化碳等的地下存储需要特别关注裂隙问题, 若处置不当则会通过裂隙由地下水将污染物带入人类的生存地域, 严重危害生态环境。近年来, 我国核能获得了较大的发展, 必须安全的处置核动力反应堆产生的大量放射性废物, 将其与人类环境相隔离(李洪训, 2008)。目前放射性废物一般都建在和计划建在基岩中, 如花岗岩、玄武岩、盐岩和泥质岩等, 在这些基岩中, 往往存在断层和节理, 是核污染

物向环境迁移的最主要通道。核废物在基岩裂隙介质中进行地质处置是否可以确保安全,在相当程度上取决于裂隙岩体对废物的屏障功能和作为核废物迁移载体的裂隙水的运动特征。

在地质灾害领域,断裂节理可能会间接或直接造成地表形变、地裂缝、崩塌、滑坡和泥石流的形成(王帅等,2012),导致诸多地质灾害的发生,其中地表形变与地裂缝虽然形成过程非常缓慢,但如果活动断裂贯穿于城市地区,将会引起建筑物产生不均匀形变,造成建筑物倾斜、变形、开裂甚至倒塌(朱江皇、蒋方媛,2008);此外,给排水管道、燃气管道等生命线工程也可能造成不同程度的破坏,从而导致各种灾害呈链式发生。

在基础设施工程建设中,如各种交通隧道和桥梁、城市地铁、公路,也都因为底层的破裂和透水性影响了工程的稳定性或造成事故。断层地段岩体破碎松散、自稳能力差,常导致工程岩体失稳(李志厚等,2008),所以公路和隧道工程选线,应尽量使隧道避开断层,但很多情况不可避免地需要穿越断层(邵江、许吉亮,2008;李建军等,2009)。因此需要系统了解断层区域的应力、地质、工程、环境条件及其对隧道开挖的影响规律及防治对策,满足我国基础设施工程建设的需求。

四、裂隙的研究

近年来,方向性变量的研究一直是一个活跃的领域,国内外不同的学者针对不同领域中的方向性变量开展了大量的研究。按照方向性变量研究的侧重点不同,目前关于方向性变量的研究可以分为裂隙和裂隙网络两个方面。

1. 裂隙研究现状

关于裂隙的研究涉及很多科学和领域,不同的学者根据各自的研究侧重点开展了许多深刻的研究,主要集中在方向性变量的几何特性(产状、大小、迹线长度)、表面形态、水力特性、能量传递、演化机理、破裂模式等方面的探讨,或是方向性变量的各种属性的分布规律及其相互关系的探讨。

1) 几何特性

裂隙在二维空间中是一条线,在三维空间中结构面被抽象为一种平面形态。它是对岩体裂隙面描述的基本要素。Snow(1990)研究认为,可以把裂隙面形态看成椭圆形或圆形。大量实测资料表明,在层状介质中,裂隙面平面形态为长方形,在均质接近岩体中则为近似圆形。

Baecher 等(1997)提出了测线测量法,该方法通过露头面测量裂隙面的迹线长度。Priest 和 Hudson(1981)对有限露头面上迹长分布的几何概率和半迹长的计算方法作了进一步的研究,认为迹长概率分布一般满足对数分布或负指数分布。金曲生等(1997,1998)作过此方面的研究,提出了根据测量窗口与结构面的交接关系来计算裂隙面密度。

在裂隙的形状方面,各学者先后提出了描述裂隙形态的正交结构模型,正交模型由3个正交方向的等距平面组成,是一种确定性模型。随后,有学者逐步提出了圆盘模型

和多边形模型。圆盘模型端部尖灭于完整岩石之中；而多边形模型以交接线与另一组裂隙连接。万力等(1993)提出了把裂隙面作为多边形的假定，提出了三维裂隙网络的多边形单元渗流模型。王恩志(1993)假定裂隙面为圆盘形，提出了裂隙网络非稳定渗流模型。

2) 表面形态

众多学者研究了断层表面粗糙度几何特征(Power et al., 1987, 1988; Power and Tullis, 1991; Schmittbuhl et al., 1993; Lee and Bruhn, 1996; Power and Durham, 1997; Renard et al., 2006; Sagy et al., 2007)。谢和平(1992)运用分形几何详细讨论了岩石节理面的粗糙度。张仕强等(1998)利用光电三维面形自动测量系统，测量了沉积岩裂缝的表面形态，同时对裂缝合成表面的频谱进行分析，得出了描述裂缝两表面相关性的参数裂缝特征尺度。孙洪泉和谢和平(2008)运用少量已知数据，模拟出未知岩石断裂表面。张鹏等(2009)从定义裂隙表面三维几何形态离散化后的局部倾斜角与局部坡向入手，提出描述裂隙各向异性的三维表面粗糙度参数 JRC 估计方法。Amitrano 和 Schmittbuhl(2002)研究理论断裂带断层泥如何影响断层表面的粗糙度。Peyrat 等(2004)认为断层表面的粗糙性质控制着地震滑移断层的分布，并且断层的粗糙处往往是一些活动断层的应力集中处(Marsan, 2006; Schmittbuhl et al., 2006)。

3) 水力特性

20 世纪 50 年代以来，许多学者研究了裂隙的渗流试验。Snow(1969)引入了裂隙岩体的渗透张量概念，以期更好地描述渗透系数各向异性。张奇(1994)运用有限元技术对圆形、矩形两类裂隙中接触面对水流影响进行了计算分析。马峰(2011)对黄岛地下水封石油洞库裂隙岩体的渗透性进行了研究，构建了裂隙结构面网络和裂隙渗流模型，从裂隙渗透张量以及裂隙网络连通性两方面来分析研究区的渗流特征。王鹏等(2003)确定和修正了裂隙岩体渗透张量，消除裂隙非贯通性和充填物对渗透张量的影响。柴军瑞和作彦卿(2003)、向晓辉等(2006)基于流体力学的基本理论和二维岩体裂隙网络渗流原理，推广得到了三维岩体裂隙网络渗流基本方程。将三维岩体裂隙网络渗流理论及有限元数值方法应用于主干岩体裂隙网络渗流分析中。刘继山(1987)、Tsang 和 Tsang(1987)考虑了裂隙面粗糙度对过流能力的影响。于青春等(1995)、何杨等(2007)根据实测情况进行了水力学特征三维非稳定渗流实验，介绍了非连续裂隙网络及其水流自动模拟系统，针对实测的非连续裂隙网络，就其等效多孔介质的存在性非连续裂隙网络系统的边界效应等进行了分析。Witherspoon 等(1980)、Brown(1987)、Zimmerman 和 Bodvarsson(1996)，Yeo(2001)运用格子-Boltzmann 方法模拟了粗糙裂隙表面流体的运移特征。Keehm 等(2006)对砂岩挤压带的渗透各向异性作了详细研究。很多学者使用离散裂隙网络模拟技术计算区域范围内岩体渗透系数，与抽水试验得到的结果较一致(Dershowitz and Einstein, 1988; Caine and Tomusiak, 2003; Surrrette et al., 2008; Voeckler and Allen, 2012)。Jeong 等(2001)运用地质统计学方法建立了隙宽裂隙网络，并探讨了单个裂隙内流体运移随隙宽变化的规律，总结出岩体渗透率与裂隙表面粗糙度及接触带有关，与