

岩体力学性质

李先炜 编著

煤炭工业出版社

内 容 提 要

本书的特色是以现场岩体的力学性质及其规律的研究为主要内容。

第一章岩体结构,讲述组成它的结构面、结构体的状况和赤平极射投影;第二章为进行岩体试验的各种方法;第三章和第四章分别为对岩体的变形和强度特性的详细论述,并附有试验资料;第五章对岩体特性有重要影响的结构面的各种断裂性质进行了探讨;第六和第七章叙述了岩石的工程分类和岩石水力学。

本书可供采矿、地质、水利电力、交通与国防部门有关工程技术人员、科研人员及院校师生参考。

责任编辑:田克运

岩 体 力 学 性 质

李 先 炜 编 著

*

煤炭工业出版社 出版

(北京安定门外和平门北街21号)

煤炭工业出版社印刷厂 印刷

新华书店北京发行所 发行

*

开本 $850 \times 1168 \text{mm}^1/32$ 印张 $16^{3/8}$

字数435千字 印数1—1,320

1990年3月第1版 1990年3月第1次印刷

ISBN 7-5020-0340-1/TD·319

书号 3144

定价 7.20元

目 录

第一章 岩体结构	1
第一节 结构面	1
第二节 结构体	30
第三节 岩体结构类型	35
第四节 赤平极射投影	39
第二章 岩体试验	78
第一节 变形试验	78
第二节 强度试验	112
第三章 岩体变形	132
第一节 变形曲线	132
第二节 岩体变形的影响因素	147
第三节 岩体的弹性参数	163
第四节 岩体的蠕变	205
第四章 岩体的强度特性	240
第一节 岩体的抗压强度	240
第二节 岩体的抗拉强度	256
第三节 岩体的抗剪强度	261
第五章 结构面岩石的力学性状	281
第一节 结构面的变形特性	281
第二节 岩石的摩擦	294
第三节 沿结构面滑动理论	301
第四节 沿结构面滑动时的性状	317
第五节 结构面岩石的断裂	344
第六节 软弱夹层	416
第六章 岩石工程分类	433
第一节 概述	433
第二节 代表性的岩石工程分类	433
第三节 岩体工程分类独立因素的分析及岩体工程分类	475
第七章 岩石水力学	479

第一节	渗流的基本定律	479
第二节	岩体中水的渗流理论	488
第三节	水弹性力学及应用——圆形隧洞含水围岩的 弹性分析	498
第四节	岩体内孔隙水压力的作用	503
第五节	水对岩石边坡工程的影响	506
第六节	水力压裂	508
参考文献		513

第一章 岩体结构

岩体，是指地壳上部与工程方面有关的大块体^[1]。随着所针对问题不同、工程性质不同以及工程地质勘测阶段不同，所要考察的岩体范围也不同。例如矿山井巷工程，如以开掘后影响应力分布区域而论，只考查3~5倍巷道半径范围就够了，但如考虑井巷所受地质构造应力，则必须考察矿区应力场甚至区域应力场范围内的岩体状况；又如工程选址阶段与技术设计阶段比较，对构造形迹的追索，岩溶分布和对地下水运动规律认识，都要在区域范围内进行分析。

岩体是在漫长的地质历史中，受到了多种、多次地质作用，形成了自然状况极为复杂的岩体结构。在岩体内存在着不同成因，具有一定产状、方向延展大、厚度小的地质界面。它包括物质分异面和不连续面，如断层面、层理面、节理面以及其他分离面，这些面统称结构面。由于它们与结构体相比是相对软弱的，故又称作弱面或软弱面。结构面是泛指在岩体中的面、缝、层、带状的地质界面。面是指结构体间刚性接触，无任何充填的地质界面，如节理、片理等；缝是指有充填物，且有一定厚度的裂缝；层是指岩层中相对的软弱夹层；带是指具有一定厚度的构造破碎带、接触破碎带，风化槽等。由一系列结构面分别组合将岩体切割成为岩石块体（在岩体中未取出的），这种岩石块体称为结构体。岩体结构由结构面和结构体两要素构成。换句话说，岩体结构是由结构面分割并包围的结构体的组合体。

第一节 结构面

结构面在岩体受力后的变形和破坏过程中所起的作用，在很大程度上取决于结构面的自然特性，因此必须研究结构面的成因与自然特性。

一、结构面的成因类型

按照地质成因的不同，可将结构面划分为原生的、构造的和次生的三类。

(一) 原生结构面

原生结构面系指那些在成岩过程中所形成的结构面。

1. 沉积结构面

这类结构面是指沉积建造中所形成的物质分界面。它包括层面、软弱夹层及沉积间断面（不整合面、假整合面等）。它的产状一般与岩层一致，空间延续性强。海相岩层中，此类结构面分布稳定，陆相及滨海相岩层中呈交错状，易尖灭。层面软弱夹层等结构面较为平整；沉积间断面多由碎屑、泥质物质构成，且不平整。国内外较大的坝基滑动及滑坡很多由此类结构面所造成，如法国的 Malpasset 坝的破坏，意大利 Vajont 坝的巨大滑坡等。

2. 火成结构面

这类结构面系指岩浆侵入及冷凝过程中所形成的原生结构面。包括岩浆岩体与围岩接触面、多次侵入的岩浆岩之间接触面、软弱蚀变带、挤压破碎带、岩浆岩体中冷凝的原生节理，以及岩浆侵入流动的冷凝过程中形成的流纹和流层的层面等。

岩浆岩侵入时的温度条件及围岩的热容量性质，决定了它们的接触面的融合及胶结情况；融合胶结得致密的接触面，又无后期破碎状况，就不是软弱面；岩浆岩与围岩之间呈现裂隙状态的接触或侵入岩附近沿接触带的围岩受到挤压而破碎呈现破碎接触，构成软弱面。

岩浆岩体中的冷凝原生节理常具有张性破裂面的特征。在岩浆岩侵入岩体时，岩浆在冷凝过程中，边部散热快，先凝成硬壳，脆性大，易收缩拉断。当内部岩浆继续冷却使体积收缩，因而产生拉应力，使岩浆产生裂隙面。它一般都是张开的，而向深部逐渐闭合，其发育深度有限，从冷却表面向深处一般为数米到一、二十米。

岩浆岩在侵入冷凝过程中，会形成流纹、流层，它们一般集

中发育在侵入体的边部，特别是岩墙、岩床边缘部分，发育得极为明显而典型。

这种类型的结构面一般不造成大规模的岩体破坏，但有时与构造断裂配合，形成岩体滑移。

3. 变质结构面

变质结构面是在区域变质作用中形成结构面，如片理、片岩夹层等。区域变质与接触变质不同，它是伴随强烈的地壳运动而产生的，在较广阔的空间中进行的动热变质作用。片理即在这种动热作用下形成。片状构造为片理的典型特征。变质作用与深度有关，一般说来，在一定深度以下是逐渐变化，但不显著。片岩软弱夹层含片状矿物，呈鳞片状。片理面一般呈波状，片理短小，分布极密，但这种密集的片理，会像层理那样，延展范围可以很大。

变质较浅的沉积变质岩（如千枚岩等）路堑边坡常见塌方。片岩夹层有时对工程及地下洞体的稳定也有影响。

（二）构造结构面

构造结构面是指岩体受地壳运动（构造应力）的作用所形成的结构面，如断层，节理、劈理以及由于层间错动而引起的破碎层等。其中，以断层的规模最大，节理的分布最广。

1. 断层结构面

断层，一般是指位移显著的构造结构面。就其规模来说，大小有很大的不同，有的深切岩石圈甚至上地幔，有的仅限于地壳表层，或地表以下数十米。断层破碎带往往有一系列滑动面，而且还存在一套复杂的构造岩。

断层因应力条件不同而具有不同的特征。根据应力场的特性，可分张性、压性及剪性（扭性）断层，也就是正断层、逆断层及平移断层。

张性断层由张（拉）应力或与张断层平行的压应力形成。张裂面上参差不齐、宽窄不一、粗糙不平、很少擦痕。裂面中常充填有附近岩层的岩石碎块。有时沿裂面常有岩脉或矿脉充填，或

有岩浆岩侵入。平行的张裂面往往形成张裂带，每个张裂面往往延长不远即行消失。

压性断层主要指压性逆断层、逆掩断层。破裂的压性结构面一般均呈舒缓波状，沿走向和倾向方向都有这种特征，沿走向尤为明显。断层面上经常有与走向大致垂直的逆冲擦痕。断面上片状矿物如云母、叶腊石等呈鳞片状排列，长柱状矿物或针状矿物如角闪石、绿帘石等呈定向排列，它们的劈面大都与主要挤压面平行。一系列压性断层大致平行集中出现，则构成一个挤压断层带。

剪性断层主要指平移断层，一部分正断层。剪裂面产状稳定，断面平直光滑，有时甚至呈镜面出现。断面上常有平移擦痕，有的具羽痕。组成断层带的构造岩以角砾岩为主，而它往往因碾磨甚细而成糜棱状。断层带的宽度变化，比前两种为小。剪裂面常成对出现，为共轭的X型断层。平移断层，往往咬合力小，摩擦系数低，含水性和导水性一般；正断层则含水性和导水性较好，摩擦系数多较平移断层为高。

压性、张性和剪性断层，是断层中最基本的类型。单一性质的断裂一般比较容易鉴别。但有时构造运动多次发生，由于先后作用的应力性质不同，构造形迹越来越复杂，甚至出现互相“矛盾”的现象。例如在图1-1所示早期的张性断裂破碎带之中，出现许多挤压片理和由张性角砾岩组成的挤压扁豆体。又如绝大多数逆断层属压性断层，大部分正断层属张性断层，但在个别场合，也可能出现“矛盾”。如图1-2所示的挤压断层带中的个别压性断层表现出正断层的状况。这种状况是由于断层两侧岩块发生快慢不同的相对运动所造成。左数第三块运动较快，而第四块虽然也是向上运动的（逆断层特征），但比较慢，这就造成逆断层群中有个别正断层出现。

2. 节理结构面

节理可分张节理、剪节理及层面节理。

张节理是岩体在张应力作用下形成的一系列裂隙的组合。其

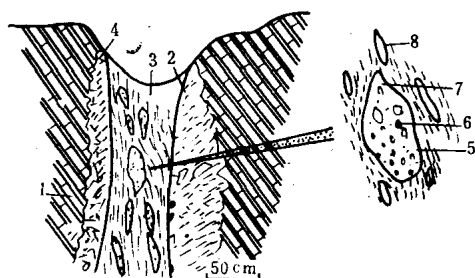


图 1-1 早期张性断裂破碎带中出现的后期挤压破碎带

1—硅质条带白云岩；2—早期张性角砾岩；3—后期挤压扁豆体及片理；4—裂隙；5—白云岩张性角砾；6—燧石角砾；7—钙质胶结物；8—斑岩透镜体

特点是裂隙宽度大，裂隙面延伸短，尖灭较快，曲折，表面粗糙，分布不均，在砾岩中裂隙面多绕砾石而过。

剪节理是岩体在剪应力作用下形成的一系列裂隙的组合。它通常以相互交叉的两组裂隙同时出现，因而又称X节理或共轭节理；有时

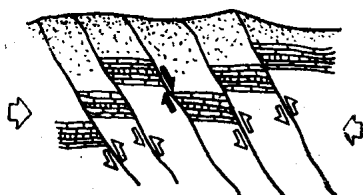


图 1-2 挤压断层带中出现的个别正断层示意图

只有一组比较发育。剪节理的特点是裂隙闭合，裂隙面延伸远且方位稳定，一般较平直，有时有平滑的弯曲，无明显曲折；面光滑，常具有磨光面、擦痕、阶步、羽裂等痕迹。在砾岩中，裂隙面常切穿砾石而过。

层面节理是指层状岩体在构造应力作用下，沿岩层层面（原生沉积软弱面）破裂而形成的一系列裂隙的组合。岩层在褶曲发育的过程中，两翼岩层的上覆层与下覆层发生层间滑动，便形成剪性层面节理；而在层间发生层间脱节，形成张性层面节理。

节理在自然界岩石中，不是均匀分布着的，它受着下列因素的影响。

1) 岩石性质：岩石就破坏的状况而论，有两种典型岩石：脆性岩石和塑性岩石。典型岩石之间还有一系列过渡性岩石。脆性岩石如石英岩、硅质砾岩等，应力传递性强，强度大，抗剪强度远大于抗拉强度。它受力后，主要以脆性破裂来释放应力，塑性变形很小。因此，在同样作用力和同一边界条件下，脆性岩石比塑性岩石的节理发育，所形成的裂隙较长、较宽、分布较稀，切穿性大。塑性岩石如泥质页岩、凝灰岩等，应力传递性能弱，强度低，受力后主要以塑性变形来释放应力。它受力后，很快便达到了弹性极限，继之进入较大的塑性变形阶段，至破裂前已产生很大的塑性变形，破裂形式以剪断为主，产生大量不明显的隐蔽裂隙，而不易产生开口裂隙。裂隙的特征是较窄、较短，分布较密。即使产生张裂隙，也易被本身泥质破碎物充填。过渡性岩石如砂岩、砂质页岩、石灰岩、大理岩、片麻岩及各种岩浆岩等，其力学特性介于二者之间，其中有的近于脆性，有的近于塑性。由脆性向塑性方向过渡排列的顺序大致是：石英岩—硅质砾岩—石灰岩与白云岩—长石砂岩—酸性岩浆岩—中性岩浆岩—基性与超基性岩浆岩—砂质页岩—泥灰岩—云母片岩—绿泥石片岩。这个顺序由于所处侧限压、温度、应力作用的时间不同，也会有变化。

在成层岩体中，如果相邻各层力学性质相差较大，如砂岩与页岩互层，砾岩与凝灰岩互层，经过构造变动后，前者表现为脆性破裂，节理发育；后者则主要表现为塑性变形，节理不发育，构成相对不透水层。我国中生代地层中常见这种情况。

2) 岩体的原生构造：自然界的岩体，一般都在不同程度的或明显或隐蔽地存在有原生的弱面，如沉积岩的层理面、岩浆岩的隐蔽原生节理面、变质岩的板理面以及侵入岩体与围岩的接触面等。在构造运动中，岩体首先沿着或继承这些已有的弱面破坏。所以岩体中原生弱面发育的地方，节理也一定发育。

3) 岩层厚度：岩层的单层厚度对节理发育有明显的影晌。一般地说，在同样构造应力作用下，岩层单层厚度越大，节理发

育越疏，则张开程度越大。
 例如图1-3所示，灰岩就具有这种特征。另外，根据在砂岩中进行的试验^[69]，节理频率（每平方米的节理数）与层厚的关系，如图1-4所示。从图中看出，随着层厚的增厚，节理的频率减小，曲线呈双曲线型，有如下两种：

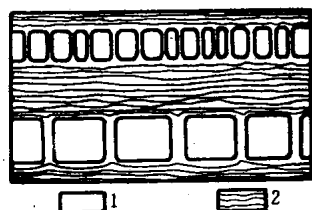


图 1-3 节理厚度与岩层厚度的关系
 1—灰岩；2—页岩

$$y = \frac{a_1}{x} + b_1 \quad (1-1)$$

$$y = \frac{a^2}{x^{b_2}} \quad (1-2)$$

式中 x —— 岩层厚度 (cm) ;
 y —— 每平方米的节理数;
 a_1, b_1, a_2, b_2 —— 常数。

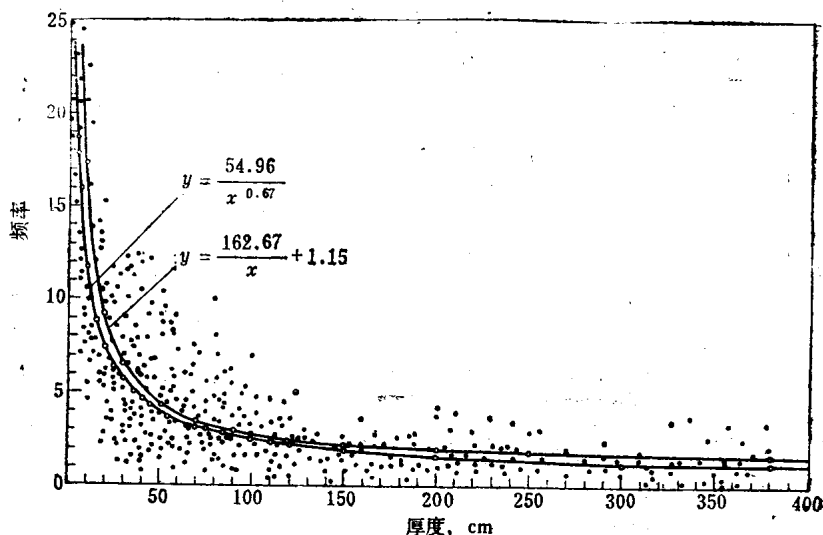


图 1-4 节理的频率与层厚的关系

从图上看,两种曲线在数值上相差不大。

4) 地区构造应力^[2]: 节理是岩体在构造应力作用下发生的破裂变形。构造应力集中分布的地方,常常就是节理最发育地方,形成节理密集带。

与褶皱有关的节理发育带,往往分布在褶皱轴部位、褶皱枢纽起伏的背斜隆起部位、平面上呈弧形弯曲的褶皱枢纽急剧弯曲部位,以及岩层产状急剧改变的部位。褶皱轴部为构造张力带,形成第二序次的纵张节理密集带。节理面与褶皱轴走向一致,并垂直于岩层,向岩层弯曲外侧张开,而向内侧闭合,并常被层面节理截切。轴部的这种宽大而密集的节理,向两翼变小而稀,以致消失。这种节理只发育在背斜张力带,在挤压带常有层间脱节及层面节理。在向斜轴部不一定发育纵张节理。若向斜轴部埋藏深,侧限压大,易产生流变和剪断,不易产生脆性拉断;若埋藏浅,可能产生纵张节理。平卧褶皱或倒转褶皱轴部,岩层弯曲大,一般都发育有纵张节理及层面节理的密集带。枢纽起伏的背斜隆起部位,除纵张节理外,还发育横张节理,有时也有层面节理。倾伏背斜的急剧倾伏端部位,也有这样情况。在平面上呈弧形弯曲的褶皱枢纽急剧弯曲部位,形成弧顶发育放射状的横张节理密集带。岩层产状急剧改变部位,一般都为脆性岩石构成,这里也易产生节理密集带。

与断层有关的节理发育带,一般分布在断层旁侧,为大量的张节理和剪节理,它的密度以断层规模和岩性而定。该带宽度一般由数米到数十米不等,而且在沿断层走向与倾向的方向上宽度变化也很大。此外,主干断层与支叉断层的交接部位,几条断层交会或交叉部位,大断层两端消失的部位等(图1-5),都是节理密集带。

5) 深度: 节理发育的深度是很大的,且随构造环境不同,其发育深度的差别也很大。总的说来,剪节理比张节理发育深度大;与断层有关的节理比区域性的节理发育深度大;一般节理的发育强度随深度增加而逐渐减弱,但一些与大断层和侵入体有关

的节理例外。从宝顶煤田节理发育的深度变化曲线（图1-6）看出：从地表至50m以内的岩体，节理最发育，以后深度增加裂隙

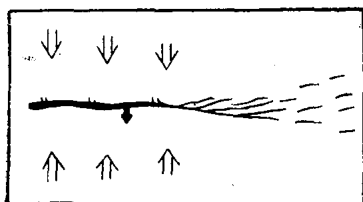


图 1-5 大断层端部节理带的形成图

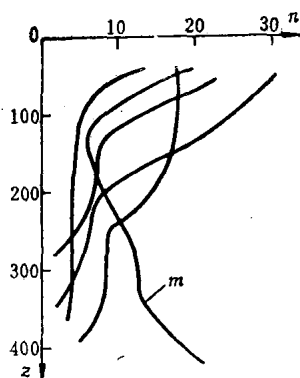


图 1-6 宝顶煤田节理发育的深度变化曲线

z —深度 (m)； n —裂隙总条数；
 m —断层影响带节理

逐渐减少，至300~400m深度以下，岩体裂隙闭合、不含水，趋于消失。欧洲Bulgaria处对节理密度与深度的关系进行了研究，结果如图1-7。从图中亦可看出，裂隙随深度的增加而降低，而且深度越大，降低的幅度越小，这与图1-6的规律也相符。但是大断层和侵入岩体接触带有关的节理，则不服从此项规律，从图1-6中的 m 曲线也可以看出来。很多资料证实，这种节理发育的深度可以很大，有时到地下数千米，甚至更深。

3. 劈理结构面^[3]

在地应力作用下，岩石沿着一定方向产生密集的，大致平行的破裂面，它有的是明显可见的、有的则是隐蔽的，岩石的这种平行密集的破开现象，一般称为劈理。一般把组成劈理的破裂面叫劈面；相邻劈面所夹的岩石薄片叫劈石；相邻劈面的垂直距离叫劈面距离，一般间距在几毫米至几厘米之间。

劈理的密集性，与岩层的力学性质和厚度等因素有关，如图

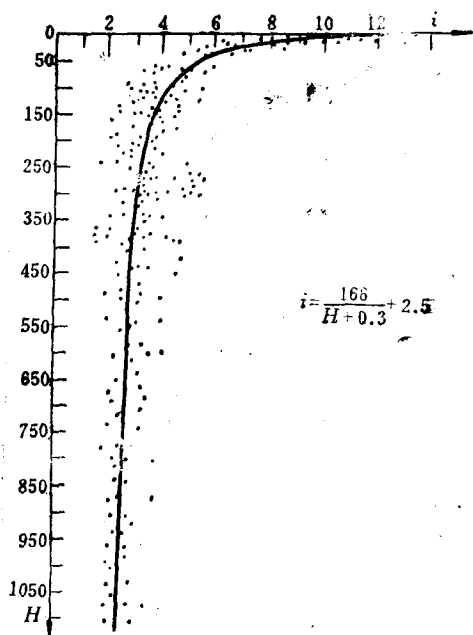


图 1-7 节理的密度随深度的增加而变化状况

i —钻孔内每米裂隙数； H —至地表的深度，m

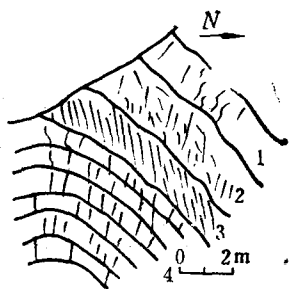


图 1-8 劈理通过软硬岩层时的
折射现象

1—石英岩；2—石英砂岩；3—砂页岩，
4—灰岩

1-8 所示。较厚岩层中的劈理相对于薄层的岩层稀疏些。同时劈理在通过不同岩性的岩层时要发生折射，构成 S 形或反 S 形的反射劈理。

根据劈理本身特征，它可分为破劈理、流劈理和滑劈理。

破劈理或称剪切劈理，它是由一组密集的、微

细的、大体平行的面组成。破裂面光滑平整，多属剪性裂面。破裂与矿物的定向排列无关，有时可见劈面切断矿物颗粒、砂粒、鲕粒或化石。破劈理不引起矿物定向排列的主要原因，是破劈理发生时不发生矿物的相变，即不伴随岩石的变质作用。破劈理如同剪节理一样，可以是由于挤压产生或剪切造成。它的形成常常和褶皱作用和断裂作用密切相关。褶皱作用可形成平行于层面的破劈理和斜交层面的扇形破劈理；断裂作用形成一对共轭的破劈理。

流劈理不仅劈面附近矿物定向排列，而且劈石内部的矿物都具有定向性，因此流劈理是岩石变形和矿物相变同时作用的结果，矿物的重结晶作用是重要因素，它的生成与变质作用紧密相关。

流劈理产生的机制，主要为两种作用：一为矿物的重结晶作用，一般认为在压力大的方向矿物溶解（溶化），在压力小的方向增长，从而使等轴状矿物变成扁平状或柱状；另一为矿物的转动或滑动，由于挤压和剪切，矿物颗粒沿着一组或两组剪面产生滑动。图1-9绘出了这些作用。

滑劈理（锯齿状或人字形劈理）是破劈理和流劈理之间的过渡型式。它主要见于微细薄层状或纹层状及片状岩石中，这类岩石往往具有不同程度的变质，如千枚岩、片岩等。沿着劈理矿物大致呈定向排列，特别是绿泥石、云母类的片状矿物在靠近劈面部分与劈面平行一致。在劈面上有时可见微细擦痕。

对于滑劈理生成的解释是假定开始劈面（ S_2 ）切截早期片理（ S_1 ），而且两者都和主压应力斜交（图1-10），随着应力的持续作用，劈面旋转变位，劈面滑移，片理揉皱加强，当劈面达到与主压应力垂直时，劈面停止转动，片理形成紧密褶皱。上述认为是先断后褶，但也有认为先褶后断的。

（三）次生结构面

次生结构面是指岩体在外营力（如风化、卸荷、应力变化、地下水、人工爆破等）作用下而形成的结构面。它们的发育多呈无序状的、不平整、不连续的状态。

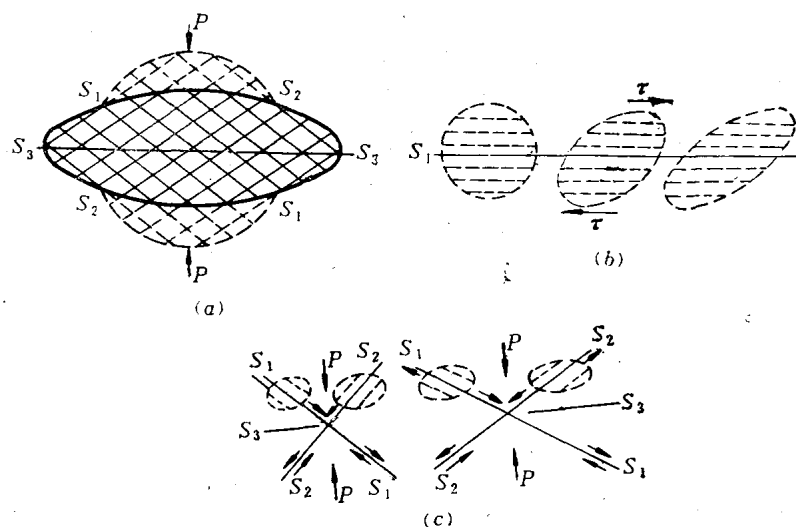


图 1-9 流劈理形成机制

a—由于最大挤压沿两组剪面滑动；*b*—由于剪切沿一组剪面滑动；*c*—由于挤压分别沿两组剪面滑动

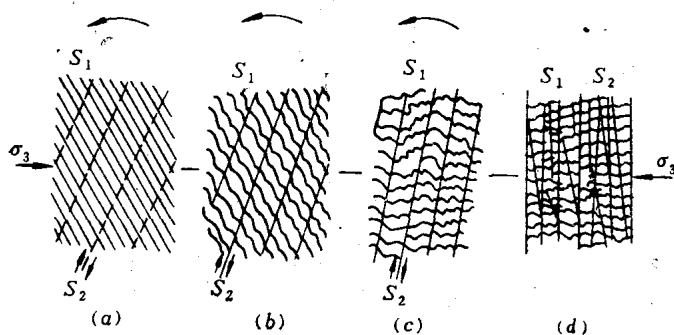


图 1-10 滑劈理生成的一种解释

S_1 —早期片理； S_2 —滑劈理

风化裂隙是由风化作用在地壳的表部形成的裂隙。风化作用沿着岩石脆弱的地方，如未开的层理、劈理、片麻构造及岩石中晶

体之间的结合面,产生新的裂隙;另外,风化作用还使岩体中原有的软弱面扩大、变宽,这些扩大和变宽的弱面,是原生作用或构造作用形成,但有风化作用参与的明显痕迹。风化裂隙的特点是裂隙延伸短而弯曲或曲折;裂隙面参差不齐,不光滑,分支分叉较多;裂隙分布密集,相互连通,呈不规则网状;裂隙发育程度随深度的增加而减弱,浅部裂隙极发育,使岩石破碎,甚至成为疏松土,向深处裂隙发育程度减弱,岩石完整,并保持有原岩的矿物组成、结构,仅在裂隙面上或附近有化学风化的痕迹。

风化裂隙由于它的密集,裂隙间的岩块又被化学侵蚀,并且普遍地存在于地壳表层的一定深度,形成一个带的风化岩石,通称风化层。风化层实际上是分布于地壳表层的软弱带。它的深度,大致在10~50m范围内,局部的,如构造破碎带,可达100m,甚至更深。

卸荷裂隙是岩体的表面某一部分被剥蚀掉,引起重力和构造应力的释放或调整,使得岩体向自由空间膨胀而产生了平行于地表面的张裂隙。若在深切的河谷,还有重力作用的剪应力分量而产生剪张裂隙,这些裂隙基本平行于岸坡表面。另外,在漫长的岁月中伴随着年复一年的地下水季节性的变动,同样可以产生与地下水面近平行的卸荷裂隙。

花岗岩和辉绿岩钻孔地质剖面表明(表1-1):它的水平卸荷裂隙延伸到离地表30~50m的深度,其水平裂隙率基本上是不同的,其规律是浅部的裂隙率较大,随着深度的增加其值逐渐变小,到一定深度(表中为50m)以下保持恒定值(即没有卸荷裂隙存在)。

卸荷裂隙的产状主要与临空面有关,多为曲折的、不连续状态。裂隙充填物包括气、水、泥质碎屑,其宽窄不一,变化多端,结构面多呈粗糙。

应力变化、人工爆破等作用可生成次生结构面。图1-11为欧洲 Bulgaria—地下巷道受爆破和巷道地压的影响产生裂隙的情况。从图中可看出,从巷道壁向深处水平距离增加,裂隙数随之