

岩体工程地质力学问题

中国科学院地质研究所 著

科学出版社

08-
2

岩体工程地质力学问题

中国科学院地质研究所 著

一九七六年七月五日

科学出版社

1976

内 容 简 介

本书根据我国工程实践经验及科研成果,提出了岩体工程地质力学问题,认为将地质力学与岩体力学相结合,是解决岩体工程建设问题发展工程地质学的一个方向。

全书共有五篇论文。第一篇介绍了岩体工程地质力学的基础和方法,对构造体系、岩体结构、岩体稳定问题作了概要的叙述。第二、三篇重点介绍地下工程的工程地质问题及岩体稳定的评价。第四、五篇介绍了小型构造分析及赤平极射投影方法的应用。所讨论的问题与水电、交通、国防、矿山等部门的工程建设实践有密切的联系。

本书可供广大地质和水文、工程地质人员以及工矿设计部门的工程设计及施工人员、有关院校师生参考。

岩体工程地质力学问题

中国科学院地质研究所 著

*

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1976年4月第 一 版	开本: 787×1092 1/16
1976年4月第一次印刷	印张: 7 1/2 插页: 4
印数: 0001—7,450	字数: 167,000

统一书号: 13031·420

本社书号: 633·13-14

定价: 0.90 元

目 录

岩体工程地质力学的基础和方法.....	工程地质研究室 (1)
在地下工程设计施工中应注意的工程地质问题.....	许 兵 (46)
地下工程围岩稳定性与岩体结构的关系.....	黄鼎成、王振山 (56)
狮河水库溢洪道小型构造分析.....	黄鼎成 (73)
赤平极射投影方法及其应用.....	王思敬 (83)

岩体工程地质力学的基础和方法

工程地质研究室

前 言

工程地质力学研究的目的，就是解决建筑物基础岩体稳定问题，防止重大事故，保证施工顺利，为合理的工程设计提供依据。

在我国的各项工程建设，如水电、矿山、桥隧以及大型地下工程往往遇到复杂的地质条件，岩体稳定产生问题，对工程的安全可靠和经济合理影响很大。因此，解决岩体稳定问题的研究日益感到迫切需要。

大量工程实践表明，岩体在工程作用下的变形及破坏，归根到底在于它的内在结构原因。例如，坝肩花岗岩体沿节理开裂而滑移，大面积边坡沿凝灰质页岩软弱夹层发生滑塌，长隧道穿过断层破碎带时连续塌方及冒落等等，无不与岩体结构有密切的联系。因此，必须抓住岩体的结构，用地质力学观点分析它的形成和发展过程，并以物理和力学的方法手段考察在工程作用下它的变形和破坏规律，预见它未来的变化，制订有效的防治措施。为此，必须发展工程地质力学的理论基础和研究方法。

目前，国际上岩体力学有很大进展，对工程地质力学的研究很有启发，许多物理力学的方法和技术也是值得引用的。李四光同志所创导的地质力学，是抓住地质构造形迹，用力学观点加以阐明，进行构造体系及地壳运动理论研究的，在地质、地震等领域成功地得到推广和应用。这里，它也为工程地质力学研究指出了探索的方向和工作方法。

本文概要地介绍了研究室近年来工作的一些想法和方法，其摘要内容，曾以题为“岩体工程地质力学的原理和方法”刊于“中国科学”1972年第一期。本文还仅是对所提课题的初步讨论，敬希读者批评、指正。

一、构造体系的地质力学研究

(一) 褶皱断裂体系的形成过程

岩体的结构是长时期地质历史发展的产物，主要取决于构造变形过程。这个过程实质上是岩体内部应力应变依时间进程的具体表现。

为了研究岩体构造变形的规律，我们对不同物性的材料进行了力学试验。从泥巴试验，石膏模型试验，一直到岩石的单轴及三轴试验，在外力作用下试件内产生应力及应

变, 应力能转化为应变能, 并引起试件的变形及破裂。其基本规律可以概括如下:

1. 三轴应力下应变的规律是发生应变椭球体, 它的几何轴与主应力轴一致, 在最大主应力方向上产生压缩变形, 而在最小主应力方向上产生拉伸变形。当中间主应力与最小主应力相等时表现为圆形截面的椭球。如果三个主应力都相等, 则产生球形压缩。

2. 试件内, 应力的规律可用摩尔圆来表示, 即在任一与主应力斜交方向上产生法向应力及剪应力。它们与三轴主应力的关系如下:

法向应力

$$\sigma_n = \sigma_1 \cos^2 \alpha + \sigma_2 \cos^2 \beta + \sigma_3 \cos^2 \gamma$$

$$\text{剪应力 } \tau = \sqrt{\sigma_1^2 \cos^2 \alpha + \sigma_2^2 \cos^2 \beta + \sigma_3^2 \cos^2 \gamma - \sigma_n^2}$$

式中 $(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$ 为三轴主应力, (α, β, γ) 为任意与主应力斜交面上法线与相应主应力轴 $(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$ 之间的夹角。

在最大主应力与最小主应力交角平分线上产生最大剪应力, 为:

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$

3. 剪应力的发展达到极限强度时, 在大体上与最大主应力相交为 $45^\circ - \frac{\varphi}{2}$, 并与最大剪应力相交为 $\frac{\varphi}{2}$ 的方向上出现一对共轭的剪切面, 产生剪切破坏。 φ 通常称为内摩擦

角, 实际上它与主应力值及主应力间相互比例有关系, 应以 $\varphi(\sigma)$ 表示。当围压很大, 即最小主应力值很大时, φ 值变小, 因此, 一对共轭的剪切面有时竟接近于直角相交。剪切破裂在发展剧烈时, 形成由雁行排列或羽状排列的破裂面所构成的剪切带。在围压较小或单轴压力试验时, 试件侧面出现张应力, 形成与最大主应力交角很小的张扭性或张性破裂面。

4. 主应力的继续作用, 可以导致试件进一步的变形及破坏。在较大的围压下, 压应力可使岩石颗粒压扁, 重新排列, 或再结晶; 有时有巨大的塑性变形, 并产生压劈理、流劈理。剪应力则使试件沿剪切面产生位移, 形成迭瓦式的错动面及次一级的羽状裂隙。在张应力作用下使破裂的试件向侧向膨胀, 沿原有的破裂面错动并拉开。

5. 由于不同试件的物质材料不同, 它们的变形过程及表现的变形、破裂形式有显著差异, 有的以塑性变形为主, 有的以脆性破裂为主, 各具不同的特点。

上述一些规律, 大体上反映了构造变形过程, 但是实际的褶皱断裂体系是极为复杂的。图 1 概括了各类地区的一次运动构造体系。从比较简单的平缓岩层地区, 直至强烈褶皱地区, 表现了岩体在不同阶段构造变形的发展过程。

1. 平缓岩层区 也可以看作岩层变形的初期, 刚出现平面上的 x 型节理, 断层较少。这是一对高倾角的剪切节理, 有时只发育其中的一组, 而另一组较不发育。在岩层受到一定变形, 产状有所倾斜时, 沿 x 节理可能发生一些平移性扳断层。

2. 岩层褶皱区 变形有了进一步的发展, 剪节理延展并衔接起来, 沿它们拉开, 构成锯齿状的张裂面, 成为横断层。这里出现侧面上的 x 节理, 并逐渐形成冲断层, 在平面上就是走向断层。冲断层既可以是仰冲的、也可能是俯冲的, 而在软硬相间的层状岩体内, 往往还以层间错动的形式出现。冲断层受横断层及扳断层切断及错开, 在平面上

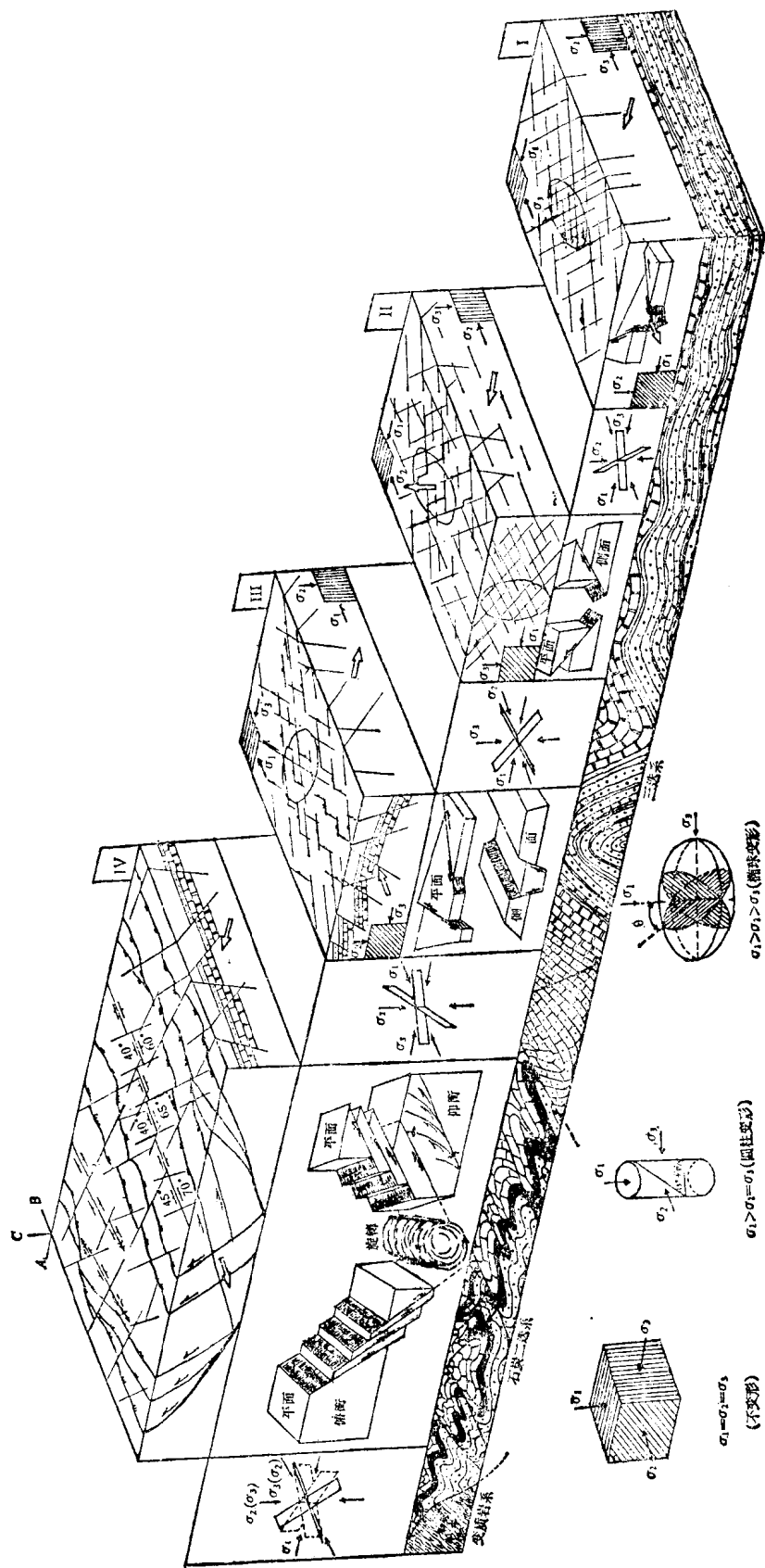


图1 褶皱断裂体系形成过程及地质力学分析

组成米字型的断裂组合形式。与平缓岩层相比较,这里中间主应力的方向发生了转化,由原来的铅直向改变为水平向。这种转化与岩层受褶皱弯曲而产生隆起变形是有联系的。

3.背斜轴部地区 当岩层紧逼褶皱隆起时出现次一级应力场,产生垂直于背斜轴的张应力。在这里形成与背斜轴交角很小的x型节理,逐渐拉开,发展成为纵向张断裂。在平面上具褶线状特征,在侧面上构成与褶皱轴平行的地垒、地堑式构造。

4.岩层强烈褶皱区 构造变形达到累积阶段。岩层在变形上褶皱紧密,甚至倒转,层间塑性流动变形显著。侧向断裂面发展成为迭瓦式冲断层、交叉式冲断层,并出现缓倾角的规模巨大的逆掩断层。有时还出现旋转构造及帚状构造。在平面上走向断层受横断层及捩断层的分割及错动,有时影响到冲断层的走向方位。在垂直于最大主应力的切面上由横断层、捩断层构成地堑、地垒式构造。由于这里冲断层、逆掩断层、捩断层等往往错距很大,常导致次一级应力场,产生拖拉构造、羽状构造等。

这里应该指出,图1只描述了一次以水平压力为主的构造运动所形成的褶皱断裂体系的一般规律,但在有的地区所见到的情况却更为复杂一些,这时要考虑以下一些因素:

1.各地区岩层物性不同,变形、破裂的特点有所不同。在层状岩体中,尤其是软硬相间的岩层中,易受褶皱变形,发生中间应力轴的转化,往往产生迭瓦式冲断层。但是,块状岩体,尤其是侵入岩体,在同等构造应力作用下较多地表现为高角度剪切断裂,或是交叉式断层。此外,在同一地区,同一构造体系中,脆性岩体中共轭剪切面的夹角较在塑性强的岩层中为小,在其接触带处断裂的方位或倾角会发生改变,从而使断裂组合形式复杂起来。

2.各地区基底形态不同,相对于基底的部位不同,在同一构造运动中应力分布不均。因此,虽然区域构造运动压力方向基本上是稳定的,但局部地区主应力方向也可能发生偏转,就是说主应力轨迹弯曲或转折,因而所形成的断裂体系的方位有可能发生变化。此外,在褶皱的不同部位,如在翼部及端部,断裂体系与岩层关系也有所不同。

3.在巨大的变形、断裂和错动中产生次一级,甚至第三级应力场,导致相应一级的变形和破裂。例如,在褶皱轴部地区所见到的张性破裂,其走向与形成褶皱的构造压力方向接近垂直,但是并不代表区域构造应力场特征,而是局部应力场的作用。又如在大型平移断层的侧盘所见到的拖拉褶皱及入字形断裂,也是由次一级应力场所引起的。这些也使构造体系的形态复杂起来。

4.从构造运动的作用力来看,在一般情况下符合水平压力的作用。但是有的地区出现以扭力作用为主的扭动构造体系;有的地区,如岩浆侵入活动地区,也可能出现垂直顶托作用。属于扭动构造体系的除直线扭动构造体系(如入字形,多字形,棋盘格式构造等)外,还有旋扭构造,包括莲花状构造,S及反S型构造,大型歹字型构造,旋转漩涡式构造,柱状构造等。有些构造体系受压力加扭力的作用,出现压扭性的断裂,如山字形构造翼部。同时,就以水平压力而言,由于基底形态不同,构造部位不同,也不是经常保持绝对水平的,这样也使断裂产状及组合有一定的变化。

5.地壳运动是多期的。晚期的构造运动在很大程度上与早期的构造体系复合,使之复杂起来。由于在早期构造运动中已经发生了变形和破裂,形成了强度的不连续性。因此,在晚期构造运动中断裂面主要迁就早期断裂而发展,出现继承性。但是,由于应力

场已经不同,断裂面上的应力状态也随之不同,使早期断裂在力学成因上受到改变,相应地特征也有所变化,而不利于鉴定。同时,新应力场中也可能在某些部位,沿某些方向产生新的断裂。这样,晚期构造产物与早期的构成多种多样的复合关系,如交接、截接、复合、反接等复杂的相互穿插关系。

总之,构造体系的规律性是客观存在,有赖于人们去研究、认识。虽然,许多地区的地质构造很是复杂,但关键在于从实际的构造形迹的特征出发,用力学方法,抓住主要方面,进行认真的分析。

(二)构造体系的地质力学分析

根据褶皱断裂体系形成过程中的客观规律,以及多年来在工程建设地区的实践经验,我们提出以下方法步骤,进行岩体范围内构造体系的地质力学分析。

1. 确定构造线

对工程建设地区进行地质构造调查研究,并掌握褶皱、断裂等构造形迹的基本资料后,便可着手地质力学分析。首先,就是确定构造线。所谓构造线是指与构造运动压力相垂直的平面与地面的交线,亦即岩体受压缩而产生三维变形的最大延伸方向。垂直构造线的方向,是代表压力的最大主应力方向,它是变形、破裂的主导因素。因此,抓住了构造线,就等于抓住了矛盾的主要方面,就便于掌握整个应力场的情况。

构造线方向可由下列构造形迹作代表:

(1)褶皱轴走向,即背斜轴面、向斜轴面、倒转等斜褶皱轴面的走向,尤其是紧逼线性褶皱最具代表性,但要注意是否为横断层所切割、错位拖拉而引起方位上的改变。

(2)区域性陡倾,直立岩层、片理、片麻结构等走向,要注意是否是断层带附近的拖拉褶皱或受岩浆岩顶托等所造成的局部岩层陡立,避免局部现象的误解。

(3)冲断层(包括仰冲、俯冲、逆掩断层、层间错动等)的走向,也要注意是否为横断层错断而改变方位。

(4)平卧柱状构造轴向,带状构造走向,线排列展布方位,应力矿物定向排列的方位等,这些小型构造及微构造,经过细致研究,也可以作为构造线的标志。

确定构造线是构造分析的基础,要根据多种标志综合判断。并且应结合区域构造地质情况分析,以免将局部构造方向误认为构造线方向。

2. 分析构造线的次序

一个地区往往经受多次强烈的构造运动,应力场也发生过不止一次的变化,在一地区可能发现几组构造线方向。分析构造线次序就是认识某地区有几次应力场,各代表哪次构造运动幕次,也即是不同应力场的先后次序。

为此,要调查区域地质发展史,并弄清构造线的分布,以及各组构造线的互相穿插关系。必须收集该地区的下列基本资料,掌握建造特征:

(1)沉积环境及沉积历史 通过地层剖面的研究,了解发育地层及缺失地层的时代,以及不同时代岩层沉积的特征。在这里应特别注意不整合或假整合界面的时代。

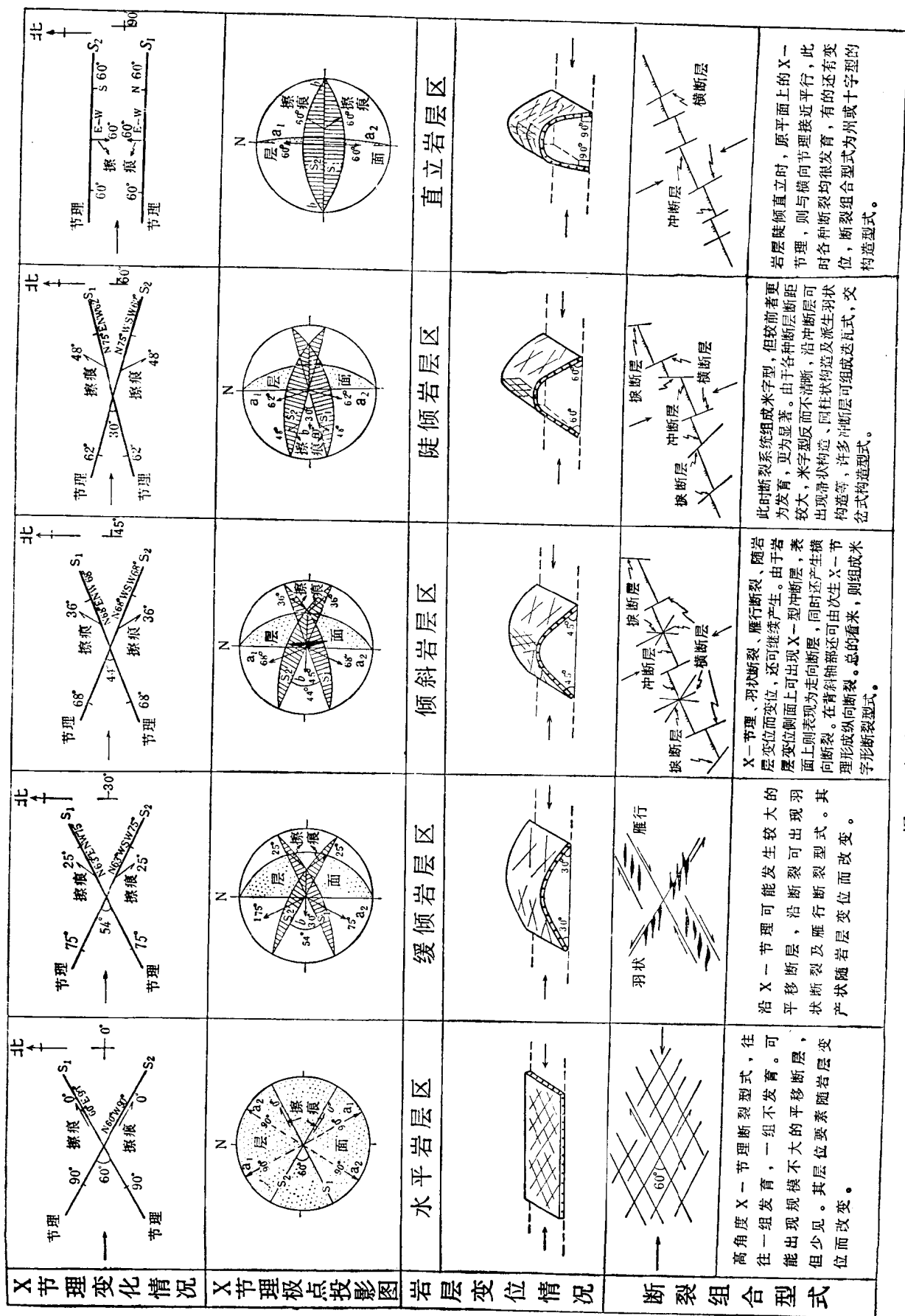


图2 不同产状下断裂发育变化及组合形式

(2) 岩浆活动历史 根据岩浆岩体与围岩地层穿插关系, 岩脉的产状, 及其相互穿插和与断层切割的关系, 分析岩浆活动期及时代。

(3) 变质特征 通过岩石的鉴定研究, 对变质、浅变质及非变质岩层进行划分。

在这基础上, 对构造线的空间分布, 它与地层的切穿关系进行分析。把构造线与地层、岩浆活动及变质作用的时代联系起来, 从而确定每一构造线所代表的构造运动。在有些地区, 几组构造线相互切割, 其复合的关系更有助于构造线生成先后次序的鉴定。

3. 划分构造体系

划分构造体系的工作是对一组构造线所代表的一次构造体系进行配套, 也就是确定同一构造运动应力场中产生的, 有成生联系各组构造形迹相对于构造线的从属关系。

图 2 表示不同产状条件下, 同一构造应力场中断裂的组合形式, 可以按此图作划分的参考。

在这里应注意次一级应力场的作用。图 3 表示主次应力场的关系。在划分构造体系时, 应将次级构造形迹纳入相应的主应力场, 概括为一次构造线所代表的构造体系, 而不应误认为又一次构造运动的产物。次级应力场除入字形构造中主次构造线呈斜交外, 还有褶皱轴部及端部的次级, 垂直构造线的张应力场; 一对共轭剪切面产生位移时断裂面内侧岩层中垂直于构造线方向的压应力场; 以及地堑、地垒式构造中的次级应力场等, 都应予以注意。

4. 构造体系复合关系分析

这个工作是对一地区应力场转化过程中所产生的多次构造体系进行总的构造配套。

晚期构造运动中岩体的变形、破裂在很大程度上迁就早期的构造, 在性质上使之改变, 但是在有些方位上也可能出现新的构造形迹。在进行构造体系复合分析中必须依靠大量构造形迹特征的实际资料, 如断裂面上擦痕的组数及方向; 岩层、岩脉沿断裂上下盘的错动方向; 断裂面互相切割及错动的方向; 岩脉断层岩的错断、重胶结及再破坏; 不同时代岩浆岩的分布, 岩脉的方向及不同时代岩脉的穿插关系等。

构造体系的复合问题比较复杂, 尤其是在一地区有大规模扭动构造与水平压力构造体系相复合时所产生的复合现象, 要求对地区的构造特征进行系统的研究, 而且在理论上也有待于进一步的探索。

以下举例说明上述的构造体系的地质力学分析。

某露天矿地区发育前震旦纪变质岩系, 由结晶混合岩组、云母、石英片岩、片麻岩组及大理岩组构成。本地区有两次构造线, 一次是以区域性片理、片麻结构产状及迭瓦式的走向冲断层 F_1 、 F_6 、 F_{10} 、 F_9 等所代表的北西向构造线; 另一次是以冲断层 F_8 为代表的近东西向构造线(图 4)。

本区前震旦纪碎屑岩及碳酸盐岩建造, 经吕梁运动产生强烈褶皱及变质作用, 形成混合岩、片岩片麻岩及大理岩组, 并有花岗岩、白岗岩、伟晶花岗岩的侵入, 以后本区隆起变为古陆。这时已经形成北西向构造线。

本区第二期岩浆岩为正长花岗岩, 伟晶花岗岩, 斜长细晶岩等, 大致属加里东期。第三期岩浆岩为花岗斑岩、辉绿岩等多种岩浆岩, 大致属海西期。从主要岩浆岩的展布

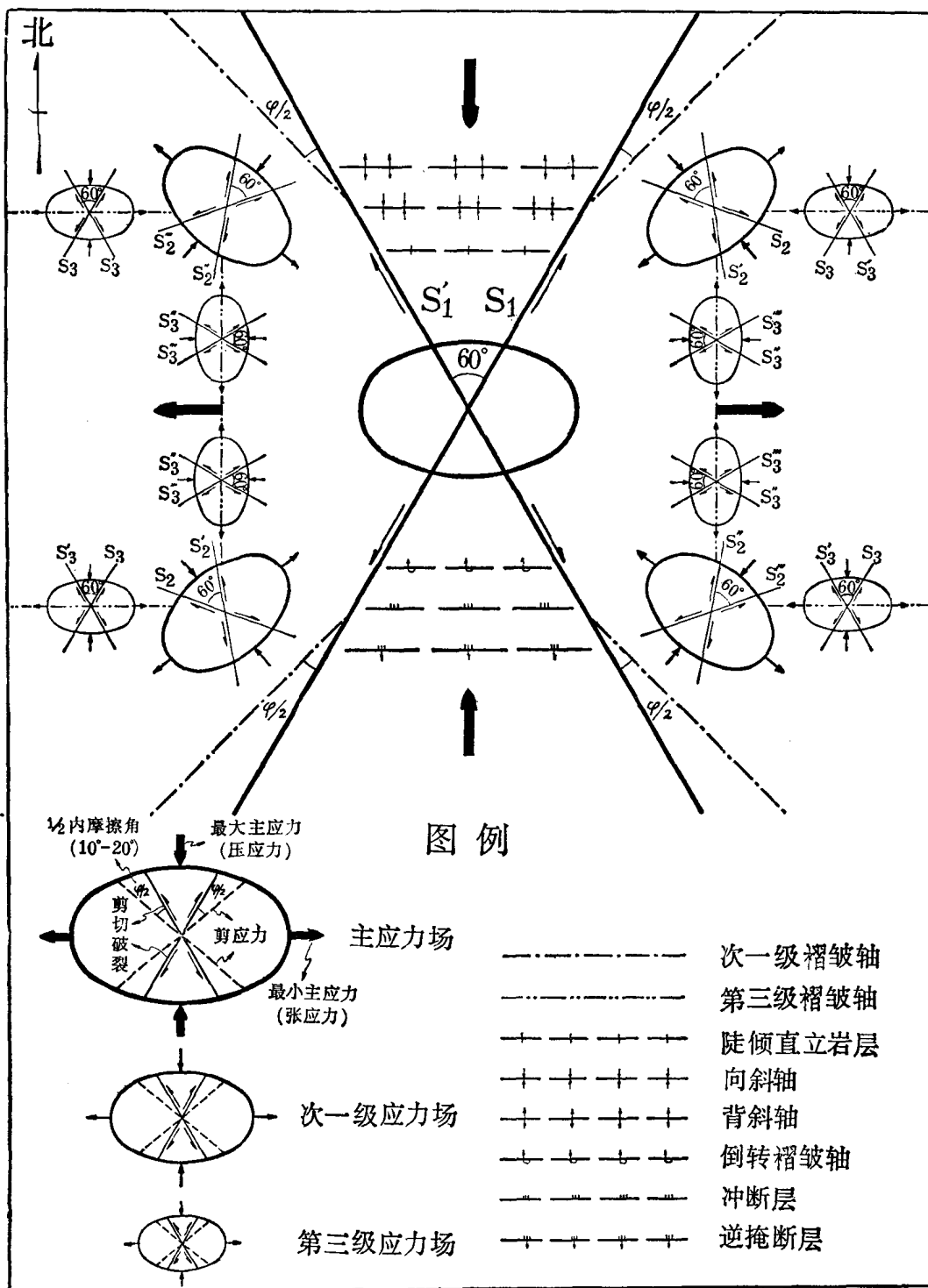


图3 一次构造运动中主、次应力场的相互关系

说 明

1. 南北向压应力的主应力场，最先产生 X- 剪切裂隙组，即 $N30^{\circ}E(S_1)$ 与 $N30^{\circ}W(S'_1)$ ，逐渐形成东西向构造线，可以下列构造方向表示之：(1) 东西向褶皱轴（特别是紧逼线性的向斜轴及背斜轴）及等斜倒转褶皱轴；(2) 东西向陡倾直立岩层、片理、片麻结构等（要大面积分布）；(3) 东西向冲断层（仰冲、俯冲）；(4) 东西向逆掩断层（高角度、低角度）；(5) 东西向柱状构造、帚状构造、线性排列等。

2. 当主应力场的剪应力发生强烈作用时，沿主平移断裂 S_1 或 S'_1 均可产生次一级应力场如：(1) 北东向压应力的应力场；(2) 北西向压应力的应力场。

此时应力场均可产生次一级 X- 剪切裂隙组，前者为 $N15^{\circ}E(S''_2)$ 及 $N75^{\circ}E(S''_2)$ ，后者为 $N15^{\circ}W(S'_2)$ 及 $N75^{\circ}W(S_2)$ 。在此等压应力作用下，逐渐形成北西向及北东向两种次一级构造线，类似主应力场构造类型，一般规模小，延伸不远。

及 F_1 大断层活动情况看,构造压力方向长期没有改变。中生代期间在本区古陆外侧形成一系列红色盆地,仍作北西方向延展。同时 F_1 断层使变质岩系逆掩于红层之上,说明北西向构造线未变。但是红色盆地中又发育东西向的冲断层及南北向的张性横断层,切穿第四系底部的地层。矿区 F_8 断层使变质岩系逆冲于老第四纪砂岩及粘土岩上,并截断北西向 F_1 等一系列走向断层。这就是东西向构造线,可能是较新的构造体系。

北西向构造线是由北东-南西向区域水平压力所造成的。除走向北西的一系列冲断层外,还形成一对平面的X型剪切断裂,其中左行逆时针错动的为北东东向小断层 f_1-f_5 及 F_8 ;右行顺时针错动的为北北东向断层 f_6 。另外,北北东向断层 f_7-f_9 在产状上看也可能属于北西向构造线中的扭断裂,但其错动方向明显地表示受东西向构造线控制,即南北向压力的影响。

东西向构造线,是由近南北向压力所造成的。较新构造体系基本上是在老构造体系上发展的。其中代表构造线的断层 F_9 ,在老构造体系中为拆断层,北盘西移达500米之多,但在较新构造体系中表现为变质岩系与下第四系之间的冲断层。北北东一组小断层 f_7-f_9 ,由原剪切节理发展而来,在南北向压力作用下北西盘向西南移动。至于北西向断层除小断层 $f_{11}-f_{14}$ 外,还可能迁就原走向断层产生活动,在断层面上见有斜向及多组擦痕,角砾岩错碎,但纯为剪切性的北西向断裂尚很罕见。此外,矿区有一组近南北向,但走向曲折的张性横断层,如 f_{10} ,也是受南北向压力的明显标志。

地震是最新构造应力场的表现。本区近期地震活动性强烈,震中沿北西方向分布,受北西向构造线控制。但是根据地震台站观测的资料分析属于扭性错动,水平压力的方向来自北 60° 东,这是值得注意的。

总之,由于长期地壳变动的结果,构造体系十分复杂。在分析时要具有应力场、应力-应变、强度理论、破坏机制、断裂面组合、应力场转化、构造线、运动轮迴、应力再分配、构造复合等等基本概念,这就是地质力学方法。正确运用这些概念的关键是掌握地质建造及构造形迹特征(改造)的第一性资料。但是由于地质条件的复杂,往往仍有许多构造现象一时不能认识清楚,不应忽视或曲解,而有待于深入地、认真地研究。

二、岩体结构特征

(一)基本概念

关于岩体结构的概念是在工程实践及地质力学研究中逐渐形成的。无论是从影响岩体稳定的实际问题来看,还是从其形成及构造变形过程来看,岩体结构应包括两方面要

3. 当次一级应力场的剪应力发生强烈作用时,沿次一级平移断裂 S_2, S'_2, S''_2 或 S'''_2 ,仍可产生第三级应力场如:(1)近东西向压应力的应力场;(2)近南北向压应力的应力场。

此时各个应力场均可产生第三级X-剪切裂隙组,前者为 $N60^\circ W(S''_3)$ 及 $N60^\circ E(S'''_3)$,后者为 $N30^\circ E(S_3)$ 及 $N30^\circ W(S'_3)$ 。在此等压应力作用下,逐渐形成近东西向及近南北向不显著的第三级构造线,但规模更小,延伸更近,仅为局部现象。近东西向构造线则与主应力场的褶皱断裂接近一致而使其强化。

注:(1)X-剪切裂隙组,不一定同等发育,往往一组发育,另一组不显。

(2)剪应力与剪切裂隙的夹角为岩石内摩擦角的一半($\varphi/2$),视岩性不同而异,一般为 $10\sim 20$ 度。

(3)应力场包括压应力、张应力及一对剪应力。前二者互相垂直,但均为剪应力的平分线,压应力则为剪切裂隙的锐角平分线,张应力则为其钝角平分线。

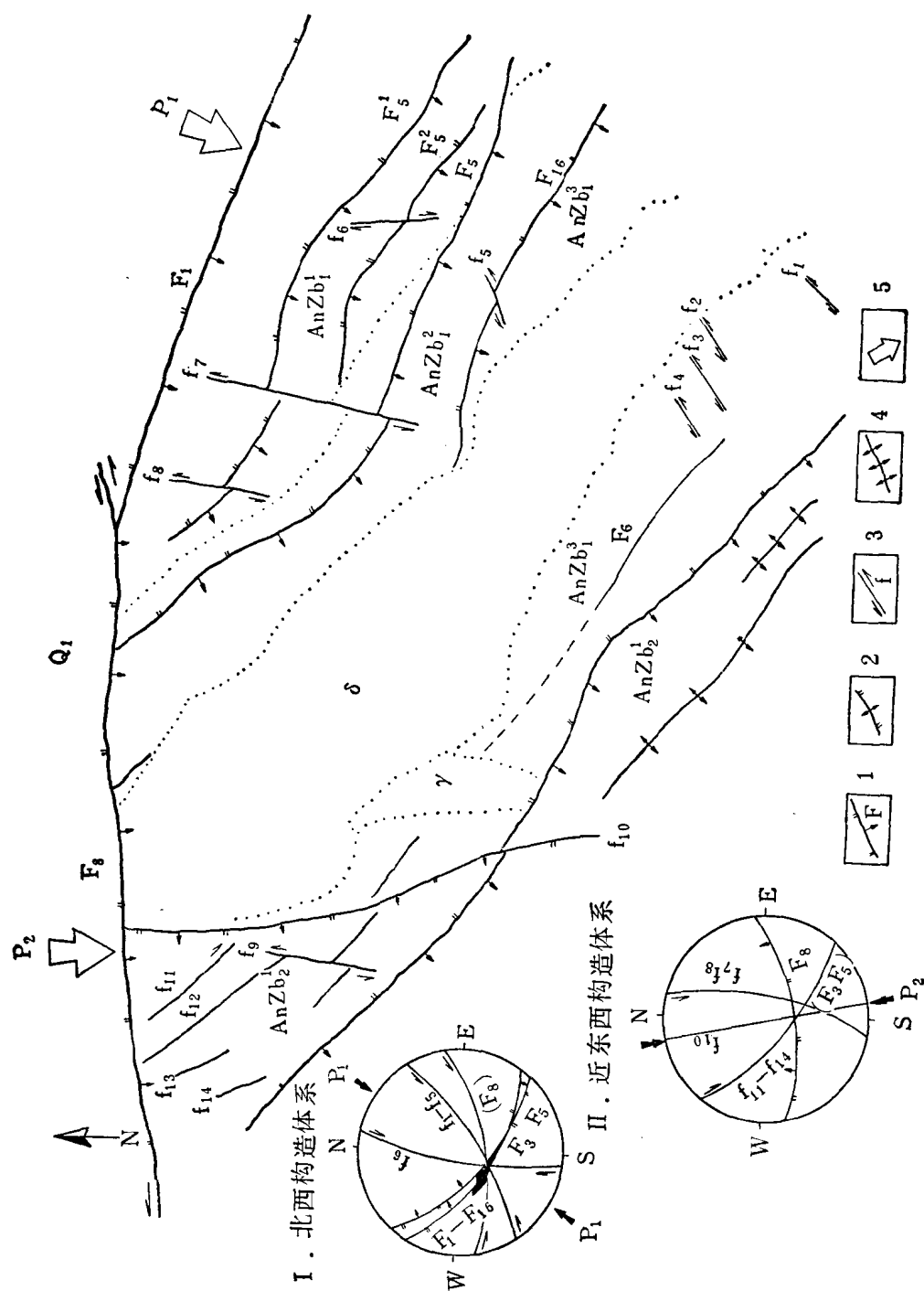


图4 某露天矿构造地质示意图

1. 冲断层; 2. 横断层; 3. 坡断层; 4. 背斜轴; 5. 区域构造压力方向; Q_1 早第四纪砂岩、粘土岩, $AnZb_2^1$ 前震旦纪条带状混合岩, $AnZb_1^3$ 大理岩, $AnZb_1^2$ 片岩片麻岩, $AnZb_1^1$ 混合岩, γ 花岗岩, δ 矿体, P_1 北西向构造线构造压力方向, P_2 东西向构造线构造压力方向。

素，即结构面和结构体。

结构面是地质发展历史中，尤其是构造变形过程中，在岩体内形成的具有一定方向，延展较大，厚度较小的两维面状地质界面，包括物质的分界面及不连续面，如层面、节理、断层等等。结构体是指由不同产状的结构面组合起来，将岩体切割而成的单元块体。结构面和结构体只是一个问题的两个互相联系的侧面，它们的特性决定岩体的不均一性和不连续性。因此，岩体可以看作是受结构面切割而构成的结构体的组合。岩体结构类型主要就是根据这两方面要素，考虑结构体的组合特征来划分的。

工程实践经验表明，大部分岩体受工程作用力的破坏过程，主要是结构体沿结构面的剪切滑移、拉开，以及整体的累积变形和破裂。所以，岩体的稳定性主要取决于：(1)结构面的性质及其空间组合；(2)结构体的性质及其立体形式。

(二) 结构面的类型及特征

1. 结构面成因类型

岩体内的结构面是在各种不同的地质作用中生成和发展的。它们的性质与成因类型有密切联系，可分为以下五种成因类型，其主要特征列于表1。

(1) 沉积结构面 这类结构面是沉积岩层在沉积、成岩过程中形成的，包括层理、层面、不整合面、假整合面（沉积间断面）、原生软弱夹层等。与岩层产状有密切联系是它们的共同特点，反应了沉积岩的成层性，但是在陆相沉积中较不稳定。

我国海相岩层大部分为中生代以前沉积，成岩作用较强，有些地区还受到浅变质作用。碎屑岩中页岩夹层，火山碎屑岩系中的凝灰质页岩，碳酸盐岩中的泥质灰岩及页岩夹层等是相对的软弱夹层。陆相岩层中一般砂岩与粘土岩或页岩互层，后者强度低，水理性质差，往往是显著的软弱夹层，但岩相变化快，易尖灭，或呈透镜体。

不整合面及假整合面（沉积间断面）对岩体稳定影响很大。陆相沉积岩层在沉积过程中往往有沉积间断，粘土岩表部受风化扰动，以后又为沉积物覆盖，形成软弱夹层。在火山岩系中也有类似情况，在火山岩流或喷发旋迴间，形成古风化夹层，胶结松散，甚至含植物残屑，且为地下水集中通道，许多坝基遇到这个问题。

(2) 火成结构面 这类结构面指岩浆侵入活动及冷凝过程中所形成的原生结构面，包括岩浆岩体与围岩的接触面，多次侵入的岩浆岩之间的接触面，以及岩体中冷凝原生节理及侵入挤压破碎结构面等。

岩浆岩体与围岩接触面的熔合及胶结情况主要取决于侵入时温度条件及围岩之热容量性质。例如某坝址花岗岩岩墙与石英岩的接触面为混熔结构面，而与云母片岩的接触面往往胶结不良。但是，在石英岩中平行于接触面常形成小型的破碎带。

岩浆岩体中冷凝原生节理具张性破裂面的特征，产状平缓或是与岩体边缘接近平行，不利于岩体稳定。浅成侵入岩体或火山岩体中发育柱状节理，对地下洞室顶部岩体稳定有一定影响。

(3) 变质结构面 受变质作用而形成的结构面有片理、片麻结构等及片岩软弱夹层。由于矿物的再结晶及重新组合，沿片理面片状矿物富集，在各类片岩中片理对岩体强度起控制作用。变质岩体中有时夹有薄层的云母片岩、绿泥石片岩、滑石片岩等，由

表1 岩体结构面类型及其特征

N	成因类型	地质类型	主要特征			工程地质评价
			产状	分布	性质	
1	沉积结构面	1.层理层面, 2.软弱夹层, 3.不整合面、假整合面, 4.沉积间断面	一般与岩层产状一致,为层间结构面	海相岩层中此类结构面分布稳定,陆相岩层中呈交错状,易尖灭	层面、软弱夹层等结构面较为平整;不整合面及沉积间断面多由碎屑、泥质物构成,且平整	国内外较大的坝基滑动及滑坡很多由此类结构面所造成的,如奥斯青、圣佛连西、马尔巴赛坝的破坏,瓦扬坝的巨大滑坡
2	火成结构面	1.侵入体与围岩接触面, 2.岩脉、岩墙接触面, 3.原生冷凝节理	岩脉受构造结构面控制,而原生节理受岩体接触面控制	接触面延伸较远,比较稳定,而原生节理往往短小密集	接触面可具熔合及破裂两种不同的特征;原生节理一般为张裂面,较粗糙不平	一般不造成大规模的岩体破坏,但有时与构造断裂配合,也可形成岩体的滑移,如弗莱瑞坝坝肩安山岩的局部滑移
3	变质结构面	1.片理, 2.片岩软弱夹层	产状与岩层或构造线方向一致	片理短小,分布极密,片岩软弱夹层延展较远,具固定层次	结构面光滑平直,片理在岩体深部往往闭合或隐闭结构面;片岩软弱夹层含片状矿物,呈鳞片状	在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稳定也有影响
4	构造结构面	1.节理(X型节理、张节理), 2.断层(冲断层、扳断层、横断层), 3.层间错动面, 4.羽状裂隙、劈理	产状与构造线呈一定关系,层间错动与岩层一致	张性断裂较短小,剪切断裂延展较远;压性断裂(如冲断层、逆掩断层)规模巨大,但有时为横断层切割成不连续状	张性断裂不平整,常具次生充填,呈锯齿状;剪切断裂较平直,具羽状裂隙;压性断层具多种构造岩成带状分布,往往含断层泥、糜棱岩	对岩体稳定影响很大,在上述许多岩体破坏过程中,大都有构造结构面的配合作用。此外常构成边坡及地下工程的塌方、冒顶
5	次生结构面	1.卸荷裂隙, 2.风化裂隙, 3.风化夹层, 4.泥化夹层, 5.次生夹泥层	受地形及原结构面控制	分布上往往呈不连续状,透镜体,延展性差,且主要在地表风化带内发育	一般为泥质物充填,水理性质很差	在天然及人工边坡上造成危害,有时对坝基、坝肩及浅埋隧洞等工程亦有影响,但一般在施工中予以清基处理

于片理极为发育,岩性软弱,矿物易受风化,所以也会形成相对的软弱夹层。

(4)构造结构面 受构造应力作用在岩体中所产生的破裂面或破碎带,包括节理、断层及层间错动面等统称为构造结构面。它们的工程地质性质与力学成因、规模、多次活动及次生变化有密切关系,而其产状,分布主要取决于构造应力场条件。

劈理是在岩层褶皱变形及断裂错动中产生的密集剪切破裂面。节理的力学成因或为平面X型剪切面,或为侧面的X型剪切面,少数张性裂隙追踪X型节理而发育。由于节理分布较密,几组节理的组合往往影响到岩体的局部稳定性。

断层为规模较大的构造结构面,有显著位移,并形成构造岩。如前所述,断层可分为冲断层(包括仰冲、俯冲、逆掩断层)、扳断层及横断层等。断层面的特征及破碎带

物质状态主要取决于断层的力学成因及岩层岩性。在工程范围内断层大都对岩体稳定有一定影响,其中有些直接威胁到工程的安全,而必须进行处理。

原生软弱夹层经构造运动影响而产生层间错动面,往往形成破碎泥化夹层。它们的特点是沿薄层软弱夹层或其顶部发育,受错动成为碎屑及鳞片,间夹泥质物或是成为角砾状碎屑含于塑性夹泥中。

构造运动作用除了促使夹层错动成破碎泥化夹层外,另一方面又可将夹层错断,使之成为不连贯的透镜体,对岩体稳定有利。

(5)次生结构面 由于岩体受卸荷、风化、地下水等次生作用所形成的结构面为次生结构面,如卸荷裂隙、风化裂隙、风化夹层、泥化夹层、次生夹泥层等。

卸荷裂隙是岩体在地表,尤其是受深切河谷影响,构造应力释放及调整所形成的破裂。它可以进一步受重力、风化及岸坡物理地质作用的影响而张开或位移。在块状脆性坚硬岩体中较为常见。

风化裂隙一般沿原结构面发育,且限于表层风化带内。但含易风化矿物的岩层所形成的风化夹层则可能延至岩体较深部位,如断层风化、岩脉风化、夹层风化等。

泥化夹层及次生夹泥层主要是在地下水作用下形成的。泥化作用在粘土岩、粘土页岩、泥质板岩、泥质灰岩等软弱夹层的顶部较为发育。其上覆砂岩或灰岩岩性坚硬,沿层面往往有过错动,地下水循环集中,以致形成泥化夹层。次生夹泥可沿层面、节理、断层形成,在两岸地下水活动带内,尤其是河床深槽两侧常见,主要是地下水所携细颗粒泥质物,重新沉积、充填而成的。

次生结构面的产状及分布受地形影响较大,对河谷及岸坡岩体稳定影响较为显著,在坝基、坝肩、隧洞口、路堑边坡等工程部位应特别注意。

2. 结构面特征的研究

岩体结构面的成因类型很多,性质很复杂,各具不同的特征,所以应结合具体工程进行细致的研究,才能正确判断影响岩体稳定的主要结构面及其影响程度,并确定合理的处理措施。从我们的实践中,感到以下几个问题应予以注意。

(1)结构面的发展历史 上述成因类型只是就形成某结构面的主要地质作用而分类的。但是在岩体的整个地质历史中,结构面也是在演化和发展的,不同的地质作用在不同阶段都会对结构面产生影响。尤其是构造运动及次生地质作用的影响较为剧烈。结构面的历史实际上也就是岩体变形、破裂、演化的历史。所以在研究结构面时,除确定其主要成因以外,还要分析它的演变历史及后期地质作用的继承性。例如,软弱夹层受构造错动而形成的层间破碎夹层比原生软弱夹层的工程地质性质差得多,而层间错动面上如果又发生次生泥化作用,则性质更差。

(2)结构面物质组成 有些结构面上物质软弱松散,含泥质物及水理性质不良的粘土矿物,抗剪强度很低,我们称之为软弱结构面,它们对岩体稳定的影响较大。软弱结构面大体上有以下几种地质类型:①粘土、页岩夹层;②不整合面及沉积间断面(包括古风化夹层);③含断层泥、糜棱岩的断层;④层间破碎夹层;⑤风化夹层;⑥泥化夹层;⑦次生夹泥层等。

由于软弱结构面常含有膨胀、崩解等特性的粘土矿物(如蒙脱土、高岭土等),除进