



“十三五”国家重点图书出版规划项目  
中国隧道及地下工程修建关键技术研究书系

地下工程建设预报预警北京市重点实验室

# 隧道地质预报手册

Tunnel Geological Prediction Manual

叶英



地面（洞外）隧道地质预报

掌子面（洞内）地质预报

掘进机地质预报

钻孔摄像与物探测孔

掌子面临近地质灾害预报

隧道综合参数及空间地质预报



人民交通出版社股份有限公司  
China Communications Press Co., Ltd.



“十三五”国家重点图书出版规划项  
中国隧道及地下工程修建关键技术研究书

地下工程建设预报预警北京市重点实验室

# 隧道地质预报手册

Tunnel Geological Prediction Manual

叶英

编著



人民交通出版社股份有限公司  
China Communications Press Co., Ltd.

## 内 容 提 要

全书共分 12 章内容,从隧道常见地质灾害的成因、类型及危害出发,阐述了地下空间点、线、面与角度的排列探测原理及方法;介绍了采用钻爆法、掘进机法施工的城市地铁和交通山岭隧道地质预报常见的仪器原理、常规的数据处理及主要的图形图像技术;对地面(洞外)隧道地质预报、掌子面(洞内)地质预报、掘进机地质预报、钻孔摄像与物探测孔技术、掌子面临近地质灾害预报预警、隧道综合参数以及空间地质预报等进行了系统阐述。最后,精选了在不同的施工方法、特点的隧道地质预报典型实例。

本书反映了作者与合作者多年来的研究成果和工程经验,可供从事地质、地球物理、隧道及地下工程等相关专业的从业人员参考,亦可供高等院校相关专业本科生、研究生等作为“隧道及地下工程施工地质预报”的主要参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

隧道地质预报手册/叶英编著. —北京:人民交通出版社股份有限公司,2016.7  
ISBN 978-7-114-12728-1

I. ①隧… II. ①叶… III. ①隧道工程—工程地质—预报—技术手册 IV. ①U452.1-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 007384 号

书 名:隧道地质预报手册

著 者:叶 英

责任编辑:王 霞 张江成

出版发行:人民交通出版社股份有限公司

地 址:(100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街 3 号

网 址:<http://www.ccpres.com.cn>

销售电话:(010)59757973

总 经 销:人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销:各地新华书店

印 刷:北京市密东印刷有限公司

开 本:787×1092 1/16

印 张:47.75

字 数:1130 千

版 次:2016 年 7 月 第 1 版

印 次:2016 年 7 月 第 1 次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-12728-1

定 价:168.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

## 作者介绍



叶英,博士,教授级高工,北京市市政工程研究院硕士生导师,山东大学、中南大学兼职博士生导师,北京市市政工程研究院副院长兼地下工程建设预报预警北京市重点实验室主任,北京市级命名的职工创新工作室负责人。

负责的省重点工程建设项目获国家鲁班奖 1 项;负责的科研项目获省部级科技进步一等奖 3 项,二等奖 2 项,三等奖 5 项。拥有专利 30 项,国家级工法 1 项;著作有《隧道施工超前地质预报》、《隧道施工信息化预警》、《运营隧道管养指南》、《粉细砂地层浅埋暗挖

法注浆加固技术指南》;以第一作者发表主要论文 50 余篇。

主要从事隧道施工检测、监测、超前地质预报、信息化施工与安全保障方面的研究工作;在隧道超前地质预报方面提出“角度偏移、综合参数”预报理论,负责研制的 USEP21 型地下工程施工综合参数与空间超前地质预报系统具有国际领先水平。在隧道施工信息化预警平台研究方面,提出了隧道施工信息化的广义概念,研制的 TMIGS 隧道施工信息化预警平台总体达到国际先进水平,其中三维动态数据监测系统达到国际领先水平。在运营隧道管养方面,提出了“移动隧道医院”的理念,研制的 TMH 隧道健康诊断、评价及快速修复一体化平台达到国际先进水平。

2008 年被评为北京市政路桥建设控股(集团)有限公司优秀共产党员、“十大标兵”、北京市交通委奥运保障先进个人、北京市国资委优秀共产党员,2010 年被评为北京市劳模、2011 年度北京市总工会授予市级“叶英创新工作室”、2011 年度科学中国人(2011)年度人物,2012 年北京市十一次党代会代表。

## 前 言

隧道开挖地质预报技术从早期的地下采矿业就有所应用,当时主要以掌子面的地质编录法为主,后期也有在掌子面做一些勘测工作的,方法仍以地面的勘测方法为主。国内真正意义、大规模的交通、铁路隧道超前地质预报工作是在1990年以后进行的。随着交通隧道的快速发展和TSP系统的大量引入,隧道地质预报引起了国内对隧道施工安全的重视,在2004年经交通部批准的《公路隧道设计规范》将超前地质预报列为施工的一个工序,进一步促使和推动隧道地质预报技术的发展。随后我国掀起了大量的隧道施工超前地质预报的研究热潮,但大多仍是将地面的地质勘探手段用到地下,同时结合TSP系统进行预报方法和应用技术的研究工作。这一时期国外的大多研究主要是结合施工方法的仪器和设备研究。国内有代表性的研究如:1990年,中国科学院地质研究所、铁道部隧道工程局编写的《军都山隧道快速施工超前地质预报指南》;2001年,刘志刚、赵勇编著的《隧道隧洞施工地质技术》;2006年,作者的博士论文《岩溶隧道施工超前地质预报方法研究》;2006年,何发亮、李苍松、陈成宗编著的《隧道地质超前预报》;2011年,作者所著《隧道施工超前地质预报》;2012年,王锦山、王力、张延新、刘志刚所著《隧道施工超前地质预报理论基础与方法》;2012年,吴从师、阳军生等编著的《隧道施工监控量测与超前地质预报》等;相关的研究论文有万余篇。但迄今真正复杂地质条件下的隧道地质预报问题仍没有切实有效解决,还是依靠综合方法和预警理论来实现。例如,针对岩溶隧道施工超前地质预报,国内普遍采用了极其复杂的组合方法,即“TSP、GPR、超前钻探、红外探水”,但这一综合方法是否就万无一失呢?答案是否定的,主要原因是组合方法有盲区。作者在书中一些章节也主要讨论了这类问题,组合方法的合理性与科学性是一个较为复杂的问题。

隧道地质是本书探讨的中心词,第一章就从隧道常见地质灾害的成因、类型及危害出发进行了较长篇幅的论述,目的是让读者对常见的隧道地质灾害有所认识:在开挖过程中围岩是施工人员能够直接接触、直观看到结构构造、亲临面对地质现象、感受一些临近征兆、通过经验能预知灾害后果的实体,这在临近预报中是非常重要的。无论有怎样的地球物理方法,地下空间探测也离不开对隧道区域地质环境的认识。这里用“盲人摸象”的道理,来比喻地球物理勘探的作用。如果对所要研究的区域地质情况不了解,就很难对所获得的地球物理资料作出符合实际的解释。地球物理方法就像盲人摸象一样,在摸到大象腿时,只知道它是一根粗粗的柱子,摸到象鼻子时,只能描述它是一条弯弯的管子。只有在区域地质环境的基础上进行的地球

物理探测和隧道超前地质预报工作,才能进行符合实际的解释,才能站在大象的整体结构上推测和描述它的局部,也才能提供隧道施工所需的地质信息和资料。

隧道预报是以岩、土与水、空气不同介质耦合的地质围岩为地球物理或化学模型,书中按照城市隧道和山岭隧道的钻爆法、掘进机法来分别论述。在建立隧道地质灾害的概念后,针对不同现场条件的隧道开挖方法,从地下空间点、线、面与角度的排列探测方法讨论常见的装置排列,即位置偏移和角度偏移。位置偏移法在地面勘测中应用较多,作者针对典型的几种灾害类型总结了不同的地面预报方法;角度偏移法在地下探测中更有利,作者认为隧道掌子面地质预报应以角度偏移为主,适当结合位置偏移预报。掘进机地质预报法仍处在尝试和起步阶段,有一些研究,但没有广泛的应用,书中参考了 Kneib 等(2000)SSP(声波探测)、Taylor 等(2001)振动锤弹性波反射法和 Lorenzo Petronio and Flavio Poletto(2002)SWD(噪声波场的分析法)。作者也正在立项开展掘进机地质预报研究工作,基本原理仍是 SWD 技术,这是掘进机地质预报的方向。

书中对钻孔地质预报主要介绍了弹性波、电性波的单孔、跨孔、井孔成像技术以及随钻随测技术,目前应用较少。但在复杂地质情况下,也是好的预报方法。临近地质灾害征兆预报是让隧道施工现场技术人员掌握的基本技能,可以在施工前对掌子面附近的施工人员进行培训,让直接面对危险的施工人员,遇到危险征兆,及时撤离;临近监测预警是对开挖面的变形、塌落条件加以判断的一种预报方法。书中最后介绍了综合地质预报方法,也说明了预报信息与施工的具体关系,以及如何利用地质预报资料进一步指导隧道围岩的细化分级。

书中还介绍了主要地质预报方法的物性前提、常见的仪器原理、常规的数据处理及主要的图形图像技术。国内相关的研究现状,如刘云祯展开了针对 TSP 系统的 TGP12 仪器研究工作;赵永贵研究员展开了针对 TRT 排列的 TST 系统研究工作;李术才教授及课题组展开了针对 BEAM 的激发极化法地质预报研究工作。作者针对地下工程开挖的现场条件开展“角度+位置偏移的联合体系”和“综合参数+长短结合”的 USEP21 研究工作。作者在研究综合方法探测时,注重研究探测的方法、仪器、数据处理与成像,就目前而言,要对隧道超前地质预报工作在研究方法和探测的应用技术上有较大改进,在理论上很难有所突破和创新。因为,目前的地球物理仪器基本都是按照固定排列而设定的软件,想做改变几乎很难。况且很多仪器采集的数据文件格式都相互保密,这就更加限制了理论研究的难度。作者正在研究的综合参数与空间地质预报系统,就是要跨越排列装置,力求能有适合各种装置的排列,同时还可以进行单次采集和实时采集,并配有远程传输功能,实现遥测地质预报。该系统可进行电性探测与弹性波探测的有效结合,同时适用于隧道开挖钻爆法和掘进机法地质预报,这更便于对地质预报组合方法的研究。众所周知,软壳甲虫在挖洞的过程中,要感知土体的软硬、干湿、冷热、气味等参数,以此判断掘进面和周围的安全。作者正在带领团队从仿生学的角度,研制一套综合立体预报预警的系统设备,试图解决隧道开挖各种地质灾害预报的系列问题,极大降低隧道开挖过程的风险。综合立体预报预警系统是利用波速差异获知前方围岩的软硬(包括:围岩地质、密实度、岩体强度、既有地下构筑物、管线、电缆、基础等),利用电阻率差异获知前方围岩的干湿(包括:含水率、承压水等),利用温度差异变化获知前方围岩的冷热(地下热导体等),利用瓦斯、CO<sub>2</sub>、其他气体等气味浓度的变化感知周围灾害体的临近,这套系统目前已在大连大东山前石隧道试验成功,有望实现更加广泛的应用。

书中始终贯穿地震反射法对构造敏感,电性探测对水敏感的理念,推崇“波速+电阻率”相结合的综合预报模式。这对作者总结综合参数法有很大启示,“波速+电阻率”的地下空间探测模式已得到较为广泛的应用。就现有技术结合现场条件而言,“岩、土、气、水”的多相性与耦合派生了隧道施工的各种地质灾害,波速和电阻率的组合在判别岩土体介质的灾害体时有较好的物性前提,这种“震电效应”也是作者长期研究和总结地下探测的基础和起点。书中详细探讨以地震反射法为主的隧道长距离地质预报和以电性探测为主的隧道短距离地质预报的有效配合,说明在地下空间应充分利用弹性波和电性波两种独立波系进行综合探测的优势。

预报的空间探测核心是接收器的排布和波的偏移归位工作,通过对地震反射法位置偏移技术的大量研究,作者在研究“城市暗挖隧道施工超前地质预报”项目时,利用角度偏移法构建隧道掌子面前方空间地震波数据,并通过系统软件实现了三维地下空间数据的采集、处理与图形图像的显示。在寻找理论依据时,受到苏联科学家甘布尔采夫所著的《对比折射法》和加尔彼林所著的《地震观测方位法》、《地震勘探偏振法》、《垂直地震剖面》的启发和影响。研究波的偏移归位时分别研究了结合几何地震学偏移方法的二维数据像图、线图、矢量图、投影图(乌尔夫网)、立体图,三维数据的像图、多等值面图、矢量图,并从眼睛功能的仿生学原理出发,提出了“角度+位置偏移的联合体系”,这是地下工程前方探测的主要方法和发展趋势。

预报的时间序列是不同阶段预报方法的优选与配合,作者提出了“综合参数、长短结合、内外兼顾、长期跟踪、灾害预案”的地下空间前方地质预报安全原则。书中介绍了隧道综合参数超前地质预报的围岩细化动态分级方法,使隧道地质预报工作切实成为隧道施工密不可分的环节。

作者有幸从2001年开始负责交通部联合攻关项目“雁门关隧道施工超前地质预报应用技术研究”;2007年,主持北京市科委重大科技需求专项“城市暗挖隧道施工超前地质预报系统研究”和国家863项目“复杂地质条件下隧道施工地质灾害预警装备与系统研究”;2008年,负责交通部西部项目“隧道施工多元信息预警与安全管理决策系统研究”、“不同地质灾害发生后的应急救援方案研究”;2009年,负责交通部联合攻关项目“浅埋、大跨度、穿越煤系地层市政隧道信息化施工”;2010年,主持北京市政路桥集团“基于钻孔与地面相结合的地震波空间探测方法研究”;2011年,主持北京市科委重大项目“地下管线及地下空洞综合探测技术研究”;2012年,参与项目“瞬变电磁隧道超前地质预报关键技术与应用”;2014年,主持北京市政路桥集团“掘进机施工地质预报系统研究”;2015年,主持北京市政路桥集团“城市浅层瞬变电磁雷达的研制与应用”等。期间参与了城市隧道(大连石门山、大连大东山前石、北京卧龙岗、108国道南村等),公路隧道(山西大运线雁门关、薛公岭、陕西小康线包家山、大棕坡、王家台等),铁路隧道(石太线太行山),海底隧道(青岛胶州湾)以及地铁隧道(北京4号线、大兴线)的超前地质预报工作。在本书的编写中,作者曾多次得到恩师王梦恕院士的创新性启迪,得到恩师瞬变电磁专家牛之链老师的指导。期间也得到交通、铁路及市政系统多位同行的协助与支持,在此表示感谢。


在漫长的研究期间,与中南大学柳建新教授、北京大学李正斌教授、山东大学李术才教授、长安大学李貅教授、中科院地球物理所薛国强研究员、北京市勘察设计研究院周宏磊总工、北

京交通大学各位老师和师兄弟进行交流、合作。得到北京市政路桥集团、北京市市政工程研究院领导对研究工作的大力支持。

本书的编写得到了地下工程建设预报预警北京市重点实验室团队、项目组的协助与合作；中铁二院专家审稿并提出了宝贵意见，在这里一并表示感谢。

作者于北京  
2016年1月21日





# 目 录

<b>第 1 章 隧道常见地质灾害的类型及危害</b> .....	1
1.1 断层 .....	2
1.2 岩溶.....	34
1.3 软岩.....	60
1.4 岩爆.....	70
1.5 瓦斯.....	73
1.6 不整合接触带.....	77
1.7 地下水.....	81
本章参考文献 .....	88
<b>第 2 章 地质预报概念、方法与分类</b> .....	90
2.1 基本概念(物理场).....	93
2.2 装置与排列 .....	104
2.3 测点偏移 .....	113
2.4 空间排列 .....	117
2.5 “照亮”地下 .....	120
本章参考文献.....	125
<b>第 3 章 地质预报仪器</b> .....	126
3.1 常见仪器介绍 .....	129
3.2 综合类数据采集器研制 .....	138
3.3 各种类型激发外设 .....	165
本章参考文献.....	172
<b>第 4 章 数据处理与可视化技术</b> .....	173
4.1 数据处理 .....	173
4.2 数据可视化技术 .....	234
本章参考文献.....	275
<b>第 5 章 地面(洞外)地质预报</b> .....	276
5.1 隧道围岩常用勘测技术 .....	276

5.2	断层破碎带 .....	288
5.3	岩溶 .....	301
5.4	软岩 .....	317
5.5	岩爆 .....	317
5.6	瓦斯 .....	319
5.7	不整合接触带 .....	320
5.8	地下水 .....	320
5.9	地面(洞外)地质预报方法总结 .....	332
	本章参考文献 .....	335
<b>第 6 章</b>	<b>掌子面(洞内)地质预报</b> .....	<b>336</b>
6.1	隧道(掌子面)地质预报概述 .....	336
6.2	长距离超前地质预报 .....	339
6.3	短距离超前地质预报 .....	423
6.4	掌子面(洞内)地质预报方法总结 .....	470
	本章参考文献 .....	472
<b>第 7 章</b>	<b>掘进机地质预报方法</b> .....	<b>474</b>
7.1	掘进机地质预报方法概述 .....	474
7.2	地质分析方法 .....	480
7.3	钻孔探测法 .....	483
7.4	振动监测法(连续探测系统) .....	485
7.5	声波反射法 .....	486
7.6	BEAM 法 .....	489
7.7	雷达扫描法 .....	502
	本章参考文献 .....	507
<b>第 8 章</b>	<b>钻孔摄像与物探测孔技术</b> .....	<b>509</b>
8.1	钻孔摄像技术 .....	510
8.2	地球物理测井(孔)技术 .....	522
	本章参考文献 .....	591
<b>第 9 章</b>	<b>掌子面临近地质灾害预报预警</b> .....	<b>594</b>
9.1	掌子面临近地质灾害征兆预报 .....	594
9.2	掌子面地质信息数字编录识别技术 .....	602
9.3	掌子面稳定性监测预警 .....	618
9.4	隧道施工超前地质预报的灾害防控体系 .....	620
	本章参考文献 .....	625
<b>第 10 章</b>	<b>隧道综合参数与空间地质预报</b> .....	<b>626</b>
10.1	隧道地质灾害综合预报基础 .....	626
10.2	复杂地质条件下隧道地质预报方法 .....	627
10.3	“综合参数法”超前地质预报 .....	632

10.4	空间超前地质预报	647
10.5	时序(时间)超前预报	657
10.6	综合参数与空间超前地质预报	660
	本章参考文献	674
<b>第 11 章</b>	<b>隧道地质预报在施工中的应用</b>	<b>675</b>
11.1	隧道地质预报与施工信息化的结合	675
11.2	隧道地质预报与围岩分级	683
11.3	隧道超前地质预报信息与动态设计	703
	本章参考文献	708
<b>第 12 章</b>	<b>隧道地质预报典型应用实例</b>	<b>709</b>
12.1	在山岭隧道施工中的应用	709
12.2	在城市地铁施工中的应用	736
	本章参考文献	750



# 第1章 隧道常见地质灾害的类型及危害

地质灾害的分类,有不同的角度与标准,十分复杂。就其成因而论,主要由自然变异导致的地质灾害称自然地质灾害;主要由人为作用诱发的地质灾害,称为人为地质灾害。就地质环境或地质体变化的速度而言,可分突发性地质灾害与缓变性地质灾害两大类。根据地质灾害发生区的地理或地貌特征,可分为山地地质灾害,如崩塌、滑坡、泥石流等;平原地质灾害,如地质沉降等。隧道及地下工程常见的地质灾害属人为地质灾害,通常是由于人为施工所引发的系列危害及影响。

随着隧道施工开挖,有些断层、溶洞等不稳定地质体发生坍塌。这些不稳定的地质体在构造应力和上覆岩层重力作用下,会严重影响隧道施工,甚至造成重大的地质灾害。

描述隧道施工常见的地质灾害之前,先简要阐述不同岩性的工程性质。

## 1) 岩浆岩的工程性质

岩浆岩的工程地质性质主要与岩浆凝固时的环境条件有关,不同成因条件,其矿物成分、结构、构造和产状差别很大,岩石颗粒间的连接力也有很大差异。

(1)侵入岩:是岩浆在地下缓慢冷凝结晶生成的,矿物结晶良好,颗粒之间连接牢固,多呈块状构造。因此,侵入岩孔隙率低、抗水性强、力学强度及弹性模量高,具有较好的工程性质。常见的侵入岩有花岗岩、闪长岩及辉长岩等。从矿物上看,石英、长石、角闪石及辉石的含量越多,岩石强度越高,云母含量增加使岩石强度降低。从结构上看,晶粒均匀细小的岩石强度高,粗粒结构及斑状结构岩石强度相对较低。

(2)喷出岩:是岩浆喷出地表后迅速冷凝生成的,由于地表条件复杂,使喷出岩具有很独特的地质特征。具有隐晶质结构、致密块状构造的粗面岩、安山岩、玄武岩等,工程性质良好,其强度甚至可大于花岗岩。但当这类岩石具有明显的流纹、气孔构造或含有原生节理时,工程性质变差,孔隙度增加,抗水性降低,力学强度及弹性模量减小。

在具体评述岩浆岩的工程性质时,还必须充分考虑它的节理发育程度及风化程度。

## 2) 沉积岩的工程性质

沉积岩具有层理构造,层状及层理对沉积岩工程性质的影响主要表现为各向异性,因此,沉积岩的产状及其与工程建筑物位置的相互关系对建筑物的稳定性影响很大。同时由于组成岩石的物质成分不同,也具有不同的工程地质特征。

(1)碎屑岩:是碎屑颗粒被胶结构胶结在一起而形成的岩石。它的工程性质主要取决于胶结物成分与胶结方式。从胶结物成分看,按硅质、钙质、铁质、黏土质的顺序,强度依次降低。从胶结方式看,基底式胶结的岩石胶结紧密,强度较高,受胶结物成分控制;孔隙式胶结岩石的工程性质与碎屑颗粒成分、形状及胶结物成分有关,变化很大;接触式胶结岩石的孔隙度大,透水性强,强度低。

(2)黏土岩:是工程性质最差的岩石之一。黏土岩强度低、抗水性差、亲水性强。当黏土岩有较多节理、裂隙时,一旦遇水浸泡,工程性质迅速恶化,常产生膨胀、软化或崩解。在常见的三类黏土矿物中,富含蒙脱石的黏土岩工程性质最差,含高岭石的相对较好,含伊利石的介于两者中间。此外,若黏土岩节理、裂隙很少时,它是很好的隔水层。

(3)化学岩和生物化学岩。化学岩中最常见的是石灰岩和白云岩类岩石,这类岩石一般情况下工程性质良好。它们具有足够高的强度和弹性模量,有一定的韧性,是较好的建筑材料,但要特别注意它们是否被溶蚀,是否形成了对工程建筑不利的溶隙和空洞。此外,化学岩中的石膏岩或碳酸盐类岩石中的石膏夹层、石膏成分,工程性质都是很差的,它们强度较低,吸水膨胀,可溶性较大,溶于水后生成有害的硫酸,必须给予足够重视。生物化学岩中常见的煤层及常与之共生的煤系地层,工程性质较差,要注意地下工程中常常遇到的瓦斯问题。

### 3)变质岩的工程性质

变质岩结构和构造,对岩石的工程性能有很大的影响。大部分变质岩都是在一定应力条件下形成的,这就形成了变质岩所特有的板状、片状、片麻状构造和碎裂构造等。这种结构、构造使岩石的强度减弱,并使岩石的力学性质有明显的各向异性及不均一性,造成不良的工程地质条件。如断裂带或片理发育的千枚岩、片岩地区,很容易发生严重的塌方、滑落现象。

(1)具有片理构造的变质岩:片岩、千枚岩及板岩的片理构造发育,工程性质具有各向异性。千枚岩、滑石片岩、绿泥石片岩、石墨片岩等岩石强度低,抗水性很差,特别是沿这些岩石的片理或节理面,抗剪、抗拉强度很低,遇水容易滑动,沿片理、节理容易剥落。

片麻岩片理构造不太发育,当石英、正长石含量较多时,工程性质比较好。但是,由于片麻岩多为年代久远的岩石,要注意其受构造运动影响而破碎和风化的程度。

(2)块状构造变质岩:常见的是石英岩和大理岩,除大理岩微溶于水外,它们都是结晶连接、矿物成分稳定或比较稳定的单矿物岩石,且强度高,抗风化能力强,有良好的工程性质。

(3)由动力变质作用形成的岩石:由动力地质作用形成的岩石一般较破碎,强度差,裂隙发育,常形成渗水通道和滑动面。

描述三大岩性之后,下面分别对断层破碎带、岩溶、软岩、岩爆、瓦斯、不整合接触带和地下水作简要介绍。

## 1.1 断层

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称为断层,如图 1-1 所示。

断层长度变化很大,从几厘米至几百公里不等,两盘之间的位移量也可有这样大的变化。

断层是构造运动中广泛发育的构造形态。它大小不一、规模不等,小的不足一米,大到数百、上千千米,但都破坏了岩层的连续性和完整性,在断层带上往往岩石破碎,易被风化侵蚀。沿断层线常常发育为沟谷,有时出现泉或湖泊。

是什么力量导致岩层断裂错位呢?其实是地壳运动中产生强大的压力和张力,超过岩层本身的强度对岩石产生破坏作用而形成的。岩层断裂错开的面称为断层面。两条断层中间的岩块相对上升,两边岩块相对下降时,相对上升的岩块叫地垒。常常形成块状山地,如我国的庐山、泰山等。而两条断层中间的岩块相对下降,两侧岩块相对上升时,形成地堑,即狭长的凹陷地带。著名的东非大裂谷和我国的汾河平原、渭河谷地都是地堑。

节理是未发生位移或无明显位移的断裂(图 1-2)。褶皱构造是岩层因在构造运动的作用下,岩石塑性变形的表现形式(图 1-3)。断层是发生位移的断裂。广义的节理是由地壳运动应力产生,分布受应力场控制和岩浆冷凝中形成的节理,节理分为张节理和剪节理。

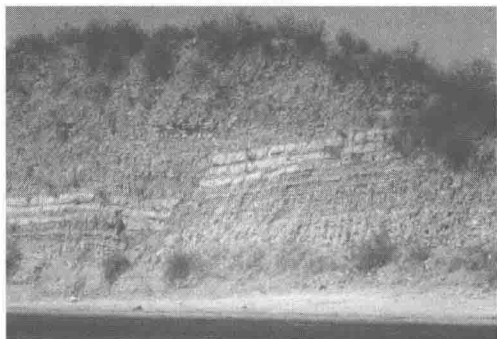


图 1-1 断层



图 1-2 节理

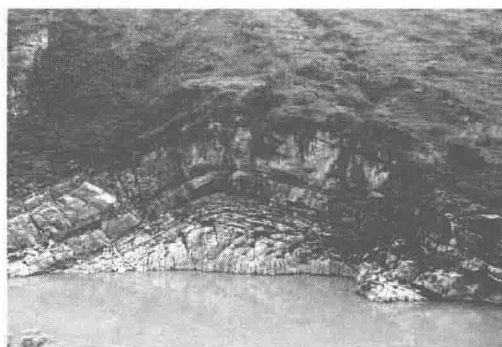


图 1-3 褶皱

岩层受地应力作用后发生破裂,在力的继续作用下沿破裂面两侧岩块发生显著相对位移的断裂构造,称为断层。断层的规模大小不一,其形态和类型繁多,分布广泛,是地壳中最重要的构造之一。大型断层常构成一个地区的构造格架,不仅控制区域地质的结构和演化,而且影响区域成矿作用和煤田的分布;一些中小型断层直接决定矿床和矿体的形态和产状,对石油、天然气、地下水的分布、运移、储聚也有重要影响。现代活动性断层则直接影响水文工程建设,甚至引发地震。因此,研究断层具有重要的理论意义和实践意义。

### 1.1.1 断层要素

#### 1.1.1.1 断层的几何要素

为了描述断层的空间形态和性质,将断层的各个基本组成部分冠以一定的名称。这些断层的基本组成部分,称为断层要素(图 1-4)。

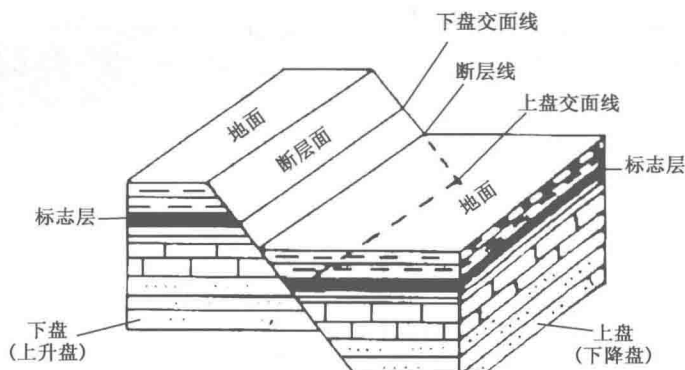


图 1-4 断层要素示意图

### 1) 断层面

断层的破裂面称为断层面。断层面的形态有平直的,也有舒缓波状的;断层面的产状有直立的,也有倾斜的。断层面可以用走向、倾向和倾角三要素来表示。有的断层找不到一个完整的断层面,而是一个断层破碎带。破碎带的宽度一般为数十厘米至数十米。

### 2) 断盘

断层面两侧相对位移的岩块称为断盘。相对上升的岩块称为上升盘;相对下降的岩块称为下降盘。当断层面倾斜时,位于断层面上方的岩块称为上盘;位于断层面下方的岩块称为下盘。当断层面直立时,则无上、下盘之分,可根据断盘所处的方位来命名,如断层走向南北,位于断层西侧的称为西盘,东侧的称为东盘。

### 3) 断层线

断层面与地面的交线称为断层线。若地面平坦,断层线的方向代表断层的走向;若地面起伏不平,断层在地表的出露线就不能反映断层的延伸方向。断层线有时呈直线,有时呈曲线,主要取决于断层面的形状及地形起伏情况。

#### 1.1.1.2 断距

断层两盘同一岩层面相对位移的距离称为断距。断距可反映断层规模大小。通常,断距是根据不同方向剖面上岩层被错开的相对位置来确定的。目前,断距的名称较多,这里只介绍常用的几个断距术语。在垂直于岩层走向的剖面上可测得的断距有:

(1) 地层断距:指断层两盘上同一岩层面被错开的垂直距离(图 1-5 中的  $h_0$ )。

(2) 水平地层断距:指断层两盘上同一岩层面被错开的水平距离(图 1-5 中的  $hf$ )。

(3) 铅直地层断距:指断层两盘上同一岩层面被错开的铅直距离(图 1-5 中的  $hg$ )。在矿山开采中,为设计竖井和平巷的长度,还常常采用落差和平错这类断距术语。

(4) 落差:指垂直于断层走向的剖面上断层两盘同一岩面对应点的高程差(图 1-6 中的  $ab$ )。

(5) 平错:指垂直于断层走向的剖面上断层两盘同一岩面对应点的水平距离(图 1-6 中的  $bc$ )。

断层的断距和滑距空间关系如图 1-7 所示。需要指出,同一条断层的断距沿断层的走向和倾斜方向均可能发生变化,要尽可能地在断层的不同部位多测一些数据,以便弄清断距的变化情况。

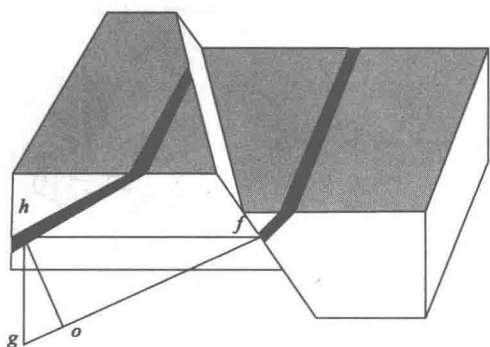


图 1-5 断距示意图

$ho$ -地层断距; $hf$ -水平地层断距; $hg$ -铅直地层断距

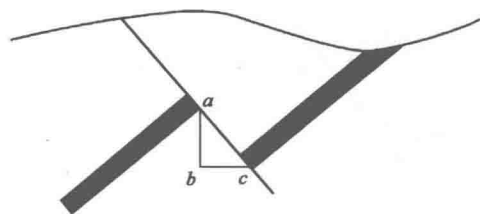


图 1-6 断层落差平错示意图

$ab$ -落差; $bc$ -平错

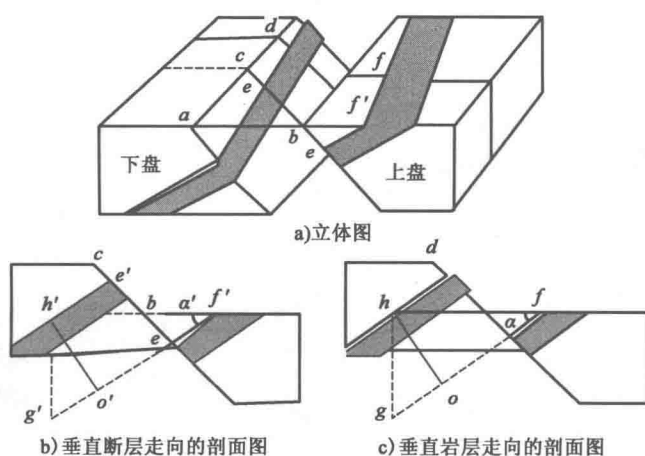


图 1-7 断层的断距和滑距空间关系

$ab$ -总滑距; $ac$ -走向滑距; $bc$ -倾向滑距; $ho$ -地层断距; $h'o'$ -视地层断距; $h'g'=hg$ -铅直地层断距; $hf$ -水平地层断距; $\alpha$ -岩层倾角; $\alpha'$ -岩层视倾角

## 1.1.2 断层的基本类型

断层分类涉及较多因素,如地质背景、运动方式、力学机制和各种几何关系等方面,因此,有各种不同的断层分类,现仅对目前常用的分类加以介绍。

### 1.1.2.1 按断层与有关构造的几何关系分类

1) 根据断层走向与岩层走向的关系划分(图 1-8)

- (1) 走向断层。断层走向与岩层走向基本一致。
- (2) 倾向断层。断层走向与岩层走向基本垂直。
- (3) 斜向断层。断层走向与岩层走向斜交。

2) 根据断层走向与褶皱轴向之间的几何关系划分(图 1-9)

- (1) 纵断层。断层走向与褶皱轴向基本一致。



(2)横断层。断层走向与褶皱轴向基本垂直。

(3)斜断层。断层走向与褶皱轴向斜交。

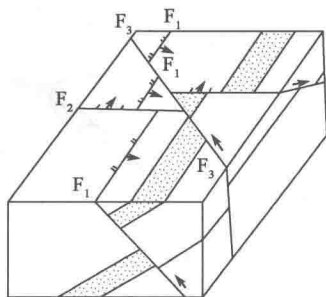


图 1-8 断层与岩层产状的关系示意图  
F<sub>1</sub>-走向断层;F<sub>2</sub>-倾向断层;F<sub>3</sub>-斜向断层

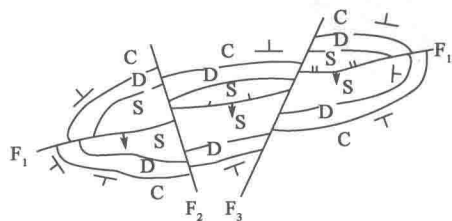


图 1-9 断层与褶皱轴向的关系  
F<sub>1</sub>-纵断层;F<sub>2</sub>-横断层;F<sub>3</sub>-斜断层

### 1.1.2.2 按断层两盘相对运动方式分类

根据断层两盘的相对运动,可将断层分为正断层、逆断层和平移断层(图 1-10)。图 1-10a)为正断层表示方法,长线代表断层出露位置和断层线延伸方向,带箭头的短线代表断层面的倾向,数字为断层面倾角,不带箭头的双短线所在的一侧为断层的下降盘。图 1-10b)为逆断层表示方法,符号与上同。图 1-10c)为平移断层表示方法,箭头代表本盘相对滑动的方向,短线代表断层面倾向,度数表示断层面的倾角。

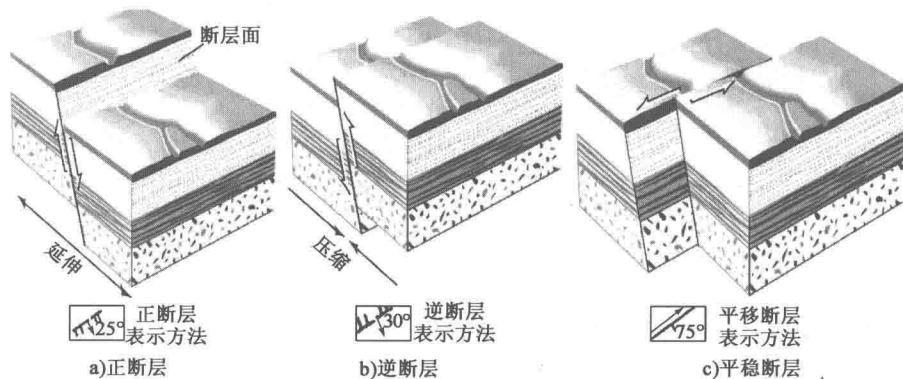


图 1-10 常见断层立体示意图

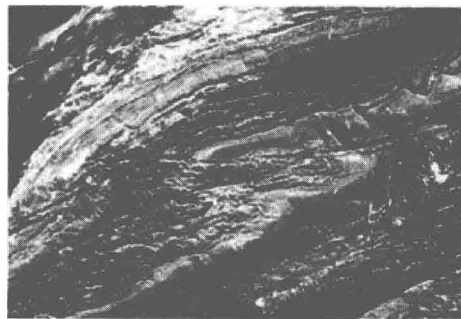


图 1-11 小型低角度正断层

#### (1)正断层

正断层的上盘沿断层面相对向下滑动,下盘相对向上滑动[图 1-10a)],正断层倾角一般较陡,大多在 45°以上,常大于 60°。近年研究发现,也有一些正断层的倾角很低缓(图 1-11)。有些大型正断层陡直的断层面,向地下深处常常变缓。在伸展地区浅部的高角度正断层,向深处变缓呈铲形,若干个高角度正断层联合成一个较大规模的低角度正断层,这类断层称为剥离断层。剥离断层常造成浅层次年轻地