

国家杰出青年基金项目资助

矿井工程地质理论与实践

Theory and Practice of Mining Engineering Geology

彭苏萍 孟召平 著

地质出版社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书针对矿井工程地质特点,采用多学科理论与综合研究方法,系统地介绍了矿井开采地质条件、岩石(体)工程地质条件和矿井工程围岩稳定性分析及控制技术等矿井工程地质理论与方法。在矿井开采地质条件研究的基础上,系统地分析了决定沉积岩石力学性质的主要因素,建立了沉积岩石成分、结构和赋存环境等因素与宏观力学性质之间的相关关系;剖析了沉积岩体结构及其力学特征和岩体中地应力的分布规律,构建了沉积岩体结构地质力学模型;通过物理模拟试验和数值模拟计算,揭示了煤炭开采过程中巷道和采场围岩应力分布及其变形破坏规律,介绍了矿井工程围岩稳定性评价理论与控制技术。

本书可供从事煤田地质、水文地质与工程地质和采矿工程等专业的科技人员和高等院校相关专业的教师和研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

矿井工程地质理论与实践/彭苏萍,孟召平著.-北京:地质出版社,2002.1
ISBN 7-116-03502-8

I. 矿… II. ①彭…②孟… III. 矿井-工程地质 IV. TD163

中国版本图书馆CIP数据核字(2001)第080368号

责任编辑:屠涌泉 郝梓国 杨天启
责任校对:王 军 关风云
出版发行:地质出版社
社 址:北京海淀区学院路31号,100083
电 话:(010) 82310758;(010) 82324508
网 址:<http://www.gph.com.cn>
传 真:(010) 82310759
印 刷:北京印刷学院实习工厂
开 本:787×1092 1/16
印 张:20.875
字 数:480千字
印 数:1—1200册
版 次:2002年1月北京第一版·第一次印刷
定 价:36.00元

ISBN 7-116-03502-8/T·97

(凡购买地质出版社的图书,如有缺页、倒页、脱页者,本社发行处负责调换)

前 言

矿井工程地质学作为工程地质学的一个分支，是研究与矿山规划、设计、施工和开采有关的地质条件和地质问题的一门学科。它是以地质学科为主体，介于地质学、岩石（体）力学和采矿工程学科之间的边缘学科。由于中国 90% 以上的煤炭产量是由井工开采的，因此，本书以我们多年在煤炭工业方面的科研工作为基础，重点研究工程地质与地下煤矿开采之间的相互作用关系，并注重探讨采掘活动所影响的那部分岩体和采动影响下于其内部所发生的一切物理过程和力学现象。也就是说，研究在地壳的部分岩体中进行采掘活动后，所形成的矿井工程（巷道、峒室、采场）周围岩体的变形、破坏和如何控制其变形发展的问题。

我国煤矿工程地质的研究，经过了几个发展阶段。在 20 世纪 70 年代初期以前，煤矿工程地质研究是煤田地质研究的有机构成部分，主要研究煤田范围内煤层的赋存特征，重点是煤岩层对比和煤矿开发中的地质构造。20 世纪 80 年代后期，我国著名地质学家、矿井地质的奠基人柴登榜教授组织力量对我国矿井地质进行了全面总结，系统提出了矿井地质工作方法，主编了第一本大学教材《矿井地质及矿井水文地质》，并出版了《矿井地质工作手册》一书。在他的倡导下，成立了中国煤炭学会、中国地质学会矿井地质专业委员会。他多次在不同的场合指出，由于矿井地质是一个非常复杂的研究体系，目前研究成果还构不成矿井地质学，还需要进一步潜心研究，来构建矿井地质的理论基础。矿井地质研究重点要对煤矿开采中急需解决的关键难题开展攻关，矿井地质工作要实现物探化。这些谆谆教诲，作者至今难忘！1985 年煤炭工业部拨专款进行煤矿工程地质研究，发表了一批煤矿地质研究成果，如于双忠教授结合我国有关煤矿巷道的研究，出版了《煤矿工程地质研究》，龙荣生教授以矿井构造为重点，编写了《矿井地质学》教材。这些研究成果逐渐形成了适合于煤炭工业部门的矿井工程地质研究理论和方法，有力地推动了我国矿井工程地质的的发展。

在前人研究的基础上，近些年来，我们针对矿井工程地质的特点，采用多学科理论与综合研究方法，对矿井开采地质条件、岩石（体）工程地质条件和矿井工程围岩稳定性分析与控制技术等矿井工程地质理论与方法进行了一些探索，取得了一些阶段性的研究成果。然而，矿井地质所面临的任务是艰巨的。随着矿山开采机械化程度的提高，矿山开采向深部延深、开采规模加大，以及在许多特殊条件下开采（如“三下”采煤）等，所遇到的工程地质问题将更加复杂，迫切需要可靠的理论支撑体系。这就需要全国有关地质工作者进一步探讨和磋商，相互借鉴经验。因此，我与孟召平博士合作将近些年来有关的研究成果编辑出版，希望与专家和同行们共同探讨，以促进矿井工程地质科研工作的发展。

在此，我向关心培养我的研究生导师蓝昌益副教授、博士生导师韩德馨院士和张鹏飞教授表示衷心的感谢！正是在他们的引导下，我才走上地质科学研究道路的。同时，我还要感谢叶连俊院士、范维唐院士、钱鸣高院士、谢和平院士、宋振骐院士、杨起院士，胡省三教授、张炳光教授级高工、孙茂也教授级高工、任德贻教授、唐修义教授、刘天放教

授、金奎励教授、曹代勇教授、刘钦甫教授、邵龙义教授、刘焕杰教授、秦勇教授、丁恩保研究员、何鸣鸿研究员、柴育成研究员、朱旺喜研究员、王金安博士，他们在我科学研究过程中，对我给予了充分的关心、支持和指教。在这方面研究过程中，一直得到国家自然科学基金委员会和教育部跨世纪优秀人才培养计划的支持和资助，先后获得的国家自然科学基金项目有：(复合型三角洲聚煤模式及其在矿山开采中的应用)(编号：8900017)，(煤层顶板稳定性的地层控制)(编号：59774003)、(煤层气开发后煤炭开采地质模型的研究)(编号：49872053)和国家杰出青年基金项目(中国东部深部煤炭开采地质保障系统)(资助号：50025413)，在此也表示衷心的感谢！

需要指出的是，本书是我们研究集体的共同成果。参加这方面研究的成员还有王希良博士，孙凡、刘风才、李阳兵、贺日兴、屈洪亮和罗立平硕士等。博士研究生张慎河和张许良，硕士研究生王英坡、刘亚川、潘结南等为本书的插图进行了计算机清绘。在此特表谢意！同时，还要感谢书中引用文献作者的支持和帮助。

中国矿业大学(北京) **彭苏萍**
“长江学者计划”特聘教授

2002年1月于北京

目 录

绪论	(1)
第一节 矿井工程地质学的基本概念	(1)
第二节 矿井工程地质学的研究目的与意义	(2)
第三节 国内、外矿井工程地质学的研究现状及其进展	(3)
第四节 矿井工程地质学研究的内容和方法	(6)

第一篇 矿井开采的基本地质条件研究

第一章 煤厚变化及其预测技术	(8)
第一节 煤层的形成机理与煤厚变化的控制因素	(8)
第二节 煤厚变化规律与煤炭开采技术	(22)
第三节 煤厚变化的探测技术	(25)
第四节 煤厚变化的评价与预测技术	(29)
第二章 含煤岩系的沉积学分析及其研究意义	(33)
第一节 含煤岩系主要相模式及其工程地质特征	(33)
第二节 沉积学研究在巷道设计与布置中的应用	(41)
第三节 沉积学在煤矿顶板控制与管理中的应用	(43)
第三章 矿井地质构造分析原理及其方法	(47)
第一节 矿井地质构造的基本类型及其特征	(47)
第二节 矿井地质构造评价与预测技术	(57)
第三节 矿井构造的综合评价方法	(69)
第四章 矿井水文地质	(75)
第一节 矿井水文基本地质条件	(75)
第二节 区域水文地质条件分析	(84)
第三节 矿井水文地质条件分析	(87)
第四节 矿井综合水文地质状况分析与评价	(90)
第五节 矿井突水机理与突水预测	(102)
第六节 矿井水的防治	(115)
第七节 矿井水文地质条件探查技术	(122)

第二篇 岩石(体)工程地质条件评价

第五章 岩石力学特性试验研究	(126)
----------------------	-------

第一节	岩石力学试验	(128)
第二节	沉积岩性(相)类型的力学特征	(131)
第三节	沉积岩石成分和结构与其力学性质的关系	(132)
第四节	沉积岩石的变形特性	(138)
第五节	不同侧压下的岩石变形与强度特征	(143)
第六节	水对岩石力学性质的影响	(146)
第七节	岩石全应力-应变过程渗透试验研究	(147)
第六章	岩石的屈服与破坏准则	(152)
第一节	Coulomb-Mohr 屈服与破坏准则	(153)
第二节	Drucker-Prager 屈服准则	(154)
第三节	格里菲斯(Griffith)强度理论	(157)
第四节	霍克-布朗岩石(体)破坏准则(Hoek-Brown Criterion)	(162)
第七章	沉积岩体结构及其力学特征	(165)
第一节	沉积岩体结构面的成因及特征	(165)
第二节	结构面分布的地质统计特征	(168)
第三节	顶板岩体结构有限变形力学几何场特征	(171)
第四节	沉积岩体结构力学特性	(176)
第五节	沉积岩体结构分类	(186)
第八章	岩体中的地应力分布规律	(189)
第一节	岩体中地应力的形成	(189)
第二节	地应力的分布规律	(191)
第三节	沉积岩体结构对地应力场分布的影响	(196)
第四节	初始地应力测量	(202)
第五节	岩体中地应力的地质分析方法	(209)
第六节	地应力场数值模拟分析	(214)
第七节	地应力与矿井工程的关系	(218)

第三篇 矿井工程围岩稳定性分析与控制技术

第九章	矿井工程围岩应力分布	(223)
第一节	弹性岩体中圆形水平硐室围岩应力分布	(223)
第二节	弹性岩体中水平椭圆形硐室围岩应力分布特征	(226)
第三节	长壁回采工作面围岩应力分布	(228)
第四节	综放工作面矿压显现特征	(235)
第五节	沉积岩体结构对矿压分布的影响	(237)
第十章	矿井工程围岩变形与破坏	(245)
第一节	岩石破坏特征	(245)
第二节	巷道围岩变形与破坏	(247)
第三节	采场围岩变形破坏	(252)

第四节	岩体结构对采场围岩变形破坏的影响	(263)
第十一章	矿井工程围岩稳定性评价	(270)
第一节	沉积岩石工程地质类型	(270)
第二节	沉积岩体的空间分布特征	(272)
第三节	影响地下硐室围岩稳定性的因素	(278)
第四节	巷道围岩稳定性判据及位移预报	(282)
第五节	巷道围岩稳定性分类	(284)
第六节	煤层顶板稳定性的评价	(285)
第十二章	改善地下硐室围岩稳定性条件的措施	(290)
第一节	地下硐室围岩支护与加固	(290)
第二节	支护与加固的基本类型	(300)
第三节	围岩控制技术	(303)
第四节	采准巷道支护设计	(307)
第五节	软岩巷道支护设计	(312)
第六节	软岩巷道支护设计工程实例	(314)
参考文献	(320)

绪 论

第一节 矿井工程地质学的基本概念

在土木工程的发展过程中,存在着一类以地质体为建筑材料、以地质体为工程结构、以地质环境为建筑环境的特殊工程,如地基工程、边坡工程、隧道工程和地下采矿工程等。这类以地质体为基础而新兴起的工程,人们称之为地质工程(Geoengineering)^[1]。工程地质学就是研究这种人类工程建设活动与自然环境相互作用和相互影响的一门地质科学。它以地质科学的理论为基础,应用数学、力学等方面的知识和成就及工程学科的技术与方法来解决工程规划、设计、施工和运营有关的地质问题。矿井工程地质学是工程地质学的一个分支,是研究与煤炭开采有关的地质问题的科学。它是以地质学科为主体,介于地质学、岩石(体)力学和采矿工程学科之间的边缘学科。由于中国90%以上的煤炭产量来自井下开采,因此,矿井工程地质研究重点是工程地质与地下采矿工程之间相互作用关系,特别注重探讨采掘活动所影响的那部分岩体和采动影响下于其内部所发生的一切物理过程和力学现象。也就是说,研究在地壳的部分岩体中进行采掘活动后,所形成的矿井工程(巷道、峒室、采场)周围岩体的变形、破坏和如何控制其变形发展的问题。

众所周知,煤炭开发大体经历远景规划、矿区总体设计、矿井设计、矿井建设和矿井生产等阶段。每一阶段都必须以相应的地质工作为基础,以提供的地质资料为依据。一般说来,远景规划阶段主要是解决煤炭工业整体布局,选择煤炭工业基地和划分矿区的问题。煤田普查工作成果是远景规划的地质依据。矿区总体设计阶段是对区内各矿井统一布局和确定开发规划。其基本任务是确定开发规模和开发顺序,划分井田,选择井筒位置和开拓方式,拟定煤炭加工工艺和选煤厂建设,选定运输线、供电线和供水线,以及布置矿区主要工业设施等。矿区详查工作成果是矿区总体设计的地质依据。

矿井设计阶段主要任务是确定待建矿井的开拓布置。其基本任务是选定井筒和工业广场位置,确定开拓方式,划分开采水平,布置第一水平主要巷道和采区,以及进行建设工程、通风安全、提升运输和煤炭加工等一系列技术设计。井田精查工作成果是矿井设计的地质依据。

矿井建设阶段主要是解决矿井建设工程和首采区建设的问题。其基本任务是编制建设工程施工组织设计和进行井巷施工。建井地质工作就是直接为矿井建设工程服务的地质工作。而矿井生产阶段主要是解决矿井煤炭生产和准备的问题。其基本任务是编制采掘设计和组织采掘施工。生产地质工作就是直接为矿井生产服务的地质工作。

综上所述,为远景规划、矿区总体设计和矿井设计服务的地质工作,合称为煤炭资源勘探;为矿井建设和矿井生产服务的地质工作,总称为矿井工程地质工作。可见,煤矿工程地质工作是从矿井基本建设开始,直到矿井开采结束为止所进行的全部工程地质工作。它贯穿于建井、开拓、掘进和回采,即矿井生产建设的全过程。

井下开采的煤矿工程包括巷道和采场，其中井下巷道大体上可分为开拓巷道、准备巷道和回采巷道。其中开拓巷道包括井筒，井底车场和大巷等。准备巷道是指为一个采区内采煤和掘进服务的巷道。回采巷道是指直接为一个采煤工作面服务的巷道。开拓巷道服务年限较长，一般选择在岩性较好的岩层中掘进，极少受到采动的影响，所以对它们的支护相对来说不很复杂。而准备巷道和回采巷道因直接为采煤服务，在位置选择上受到很大的限制，只能在煤层中或其下部围岩中掘进，服务期间不可避免地受到强烈的采动影响，其支护问题在煤矿生产中越来越突出^[2]。

煤矿工程与其它地下工程（如隧道、地下厂房和储存库房等）没有什么本质区别，但解决问题时所考虑的许多因素有很多不同之处，具体表现为：

(1) 煤矿矿井工程施工地点是根据煤层赋存规律确定的，因而施工地点条件无选择余地，而其它地下工程施工地点往往是可选择的。

(2) 在煤矿矿井工程（巷道、峒室和采场）中，除大巷和井筒外，大多数采区巷道则为“临时性”工程，如阶段巷道、采准巷道等存在年限有限，一般不超过 10 a，服务于采场（工作面）的巷道（机巷和风巷）从施工到报废一般为 1~2 a；而大巷和井筒存在年限与矿井存在年限一致，时间较长。因此，在考虑维护措施时，就不应持解决其它地下工程的手段来解决该类问题，应根据不同情况，采取不同的措施。

(3) 在煤矿工程中，随着煤炭开采，回采空间的形状与规模、数量都在变化（在时间和空间上均在变化），因此煤矿矿井工程可视为一种“可变性工程”，围岩中应力同样处于不断变化之中，并相互影响，而其它地下工程建成后，在一般的条件下围岩中应力不会再发生变化。

第二节 矿井工程地质学的研究目的与意义

矿井工程地质学研究煤炭开采地质条件和井巷及采场附近岩体应力状态的变化及其稳定性问题。研究的目的在于查明开采地质条件，减小顶底板移近量和工作面冒落、防止矿井动力现象产生、尽量减小煤柱尺寸以降低煤炭资源损失，从地质的角度确保煤矿建设及生产经济合理和安全可靠，为煤炭生产服务。

我国是一个煤炭资源大国（资源量约为 5×10^{12} t），煤炭产量居世界首位，煤炭占我国一次能源生产和消费总量的 75% 左右，据资料预测，在未来 20~50 a 内，我国一次能源生产和消费以煤炭为主的格局不会改变^[3]。我国许多煤田具有可采煤层层数多、煤层厚度大、煤层埋藏深（煤层采深多在 300m 以下）。由于采深大、单层采高大、同一地区煤层复采次数多，使煤矿开采工程地质条件复杂多变，煤层顶、底板管理困难。在有的煤矿开采中普遍遇到“三软”（软的顶板岩层、软的主采煤层和软的煤层底板岩层）工程地质难题，使煤矿开采时综采机组扎底、推移困难，甚至造成整个综采工作面被压情况。特别是我国东部煤矿区具有新生界覆盖层厚、煤层埋藏深、基底为奥陶系承压含水层的特点。目前，区内新建矿井多为深井开发，首采区多在距地表 400 m 以下深度；大部分生产矿井的开采深度已达 500~1000 m。由于过去对深部地质条件下开采技术的协调配合研究极少，深井开采引发的工程灾害日趋严重，主要表现在矿井突水事故剧增。自 1984 年 6 月 2 日开滦矿务局范各庄矿发生井下岩溶陷落柱特大突水灾害以来，先后在淮北杨庄矿、

义马新安矿、峰峰梧桐矿、皖北任楼矿、徐州张集矿又相继发生特大型奥陶系灰岩岩溶突水淹井事故，初步估计，经济损失超过 15 亿元。由于煤矿开采，造成地表和地下水系的破坏，使很多矿区人畜吃水困难，并对矿区生态环境造成若干负效应。

由原始沉积作用和后期构造作用造成的含煤岩系表现为非连续性和非均质性，随着煤炭采深的增加引起的上覆岩石自重压力的增大和构造应力的作用，围岩发生剧烈变形、巷道和采场失稳、并易发生破坏性的冲击地压，给支护和顶板管理带来许多困难。据不完全统计，仅在安徽淮南、淮北、江苏大屯、徐州和山东兖州等矿区内井筒断裂就达 49 个，严重地影响矿井的安全生产。仅在 1990~1995 年，淮南矿务局潘一矿和潘三矿便因顶板事故造成压架 500 余架，直接经济损失 4000 余万元。辽宁沈北矿务局的煤矿巷道几乎全部位于第三系软岩中，由于地压而造成前屯一矿全坑口报废，前屯二矿、三矿停产数年，蒲河煤矿井筒坍塌，大桥立井井底车场报废。采深增加还引起瓦斯高度聚积、诱发严重的安全事故。由于瓦斯突出和爆炸引起的死亡 10 人以上的大型煤矿安全事故 70% 出现在中国深部开采矿井。

由于深部开发过程中工程地质问题给矿井设计和生产带来的影响是巨大的。安徽淮南矿务局潘集二号井，在煤田勘探阶段由于工程地质条件研究程度很低，给矿井设计带来很大盲目性，1977 年破土动工建井，两翼运输大巷遇到大量未查明的软弱破碎岩体，地压大进尺缓慢，巷道支护方法先后变更十余次，造成该矿建成至今连续亏损十余亿元。由于随着开采深度增加而引发的矿井工程地质问题日趋严重，给生产带来极大影响。据统计，我国综采面开机率为 25%，从造成系统工作面不可靠及事故影响因素来看，主要有顶板、瓦斯和水等事故。据调查，仅工作面端面顶板冒落所造成的工作面停产时数与总产时数的比值高达 40%~60%^[4,5]。因此加强矿井工程地质研究具有重要的理论和实际应用价值。

第三节 国内、外矿井工程地质学的研究现状及其进展

矿井工程地质的发展是与矿业发展密切相关的，并随着岩石（体）力学、工程地质学和采矿工程学的发展而发展。采矿工程是运用工程地质和力学理论进行设计和开采的。在井下开采过程中，人们最为关心的问题都可以粗略地称为“地层控制”，即控制由于采矿活动所形成的各种地下峒室的围岩变形。地下矿井常常是观测岩体不同组成部分极限状态的理想场所，因此，矿井工程地质实际工作都积极致力于地质学和岩石（体）力学在采矿工程中的应用。

世界一些主要产煤大国如英、德、法、原苏联、美国、澳大利亚和南非等国家，在矿井工程地质研究方面做了大量工作。20 世纪 70 年代，由于美国矿业法的修改，对煤矿的安全指标大大提高。美国联邦矿业局和美国联邦地质调查所组织其所属有关研究中心并资助高等院校开展了长达 20 余年煤矿开采地质条件综合研究。查明了影响煤矿顶板岩层稳定性的主要地质因素有冲刷与顶、滑面、擦痕、夹薄顶煤层的砂页岩互层等，因此，他们在对有关矿山进行系统研究的基础上，建立了煤矿开采地质对话系统（Geologic Diagnosis）^[6~11]。同时，在矿井构造复杂的一些矿区，多采用岩巷钻探和无线电造像（RIM）测量法以及计算机模拟法来保证矿井长壁工作面开采的效益。利用微地震法预测煤矿开采过程中的煤岩层与瓦斯突出，利用地质雷达探测工作面前方地质构造和地质异常体等技术亦

日渐成熟。相对来讲,原苏联地区的地质学家则更重视利用各类地质参数预报地质变化等,如研究煤的物理、化学特征来预测断层,统计地质数据进行构造变形规律分析;联邦德国在鲁尔矿区采用构造裂隙解析法、沿煤层水平钻探、槽波地震构造综合勘探技术,认为槽波探测小构造是最具前景的方法;而澳大利亚的一些公司已尝试应用沿煤层钻探、横波地震、地面地震、航磁、地面地磁以及地震填图等多种手段进行采前研究和预测煤炭开采过程中地质灾害。

在我国 20 世纪 70 年代以来,尤其是 20 世纪 70 年代后期,随着煤炭开采向大规模及深部发展,出现了大量的矿井工程地质问题,开展了矿井工程稳定性分析和矿井地质灾害预测研究;制定了符合我国实际的矿井地质规程;编著了我国第一部《矿井地质及矿井水文地质》^[12]教材和《矿井地质工作手册》^[13]。20 世纪 80 年代初期中国煤炭学会成立了矿井地质专业委员会,煤炭系统院校相继成立了矿井地质和水文地质及工程地质专业。1985 年煤炭工业部拨专款进行煤矿工程地质研究,发表了一批煤矿工程地质研究成果,逐渐形成了适合于煤炭工业部门的矿井工程地质研究理论和方法^[14]。

由于复杂多变的各种因素使得地质条件差异明显,用地质方法难以预测这种变化,更不能确定它们的位置。正是这些地质异常体往往成为直接控制和影响坑道围岩稳定性的重要原因。如在开挖过程中,某一断层、裂隙带和陷落柱等小型不连续构造的突然出现,就会严重制约开挖的顺利进行。同时,这些小型不连续构造的存在,还常常是诱发顶板冒落、突水和煤与瓦斯突出等事故的主要根源。在工程实践中如何准确、快速地把脉岩体中的软弱结构面及岩体结构,许多学者在探测仪器及技术等方面做了很多研究工作。从 20 世纪 60 年代以来,矿井地球物理勘探方法受到人们的普遍重视。如岩体原位应力测量、高精度重磁探测、各种波法、直流电场层析成像,放射性红外测量、孔中电视与防爆测井、磁偶源频率测深与地电法等^[15~17]。王辉、黄鼎成(2000)^[18]根据岩体结构理论和地震波在软弱结构面中的传播特性,利用地震层析成像技术,实现了岩体稳定性的准确探测与软弱结构面的空间定位。彭苏萍、王希良(2000)^[19]应用地震在邢台显德汪矿主运输坑道进行了松动圈形状及厚度的探测。董方庭应用超声波法对软岩坑道松动圈形状及厚度进行了探测,同时提出了以松动圈厚度为指标的围岩分类方案^[20]。蔡德所(1998)在三峡工程左岸临时船闸现场,利用地震 CT 技术确定了岩体的损伤破坏范围。程增庆(1996)^[21]探讨了煤矿坑道前方断层的 CTSP 方法。目前,地下工程松动圈厚度探测常用钻孔超声波法,由于超声波传播的距离有限,且在岩体破碎带中传播的性能差,尽管精度较高,但不易控制全局。地质雷达比较可靠实用,逐渐受到人们的重视。它是利用电磁波的传播时间来确定所需探测反射体(断层、陷落柱、岩溶等地质小构造)的距离,是一种用于超前探测的有用工具。1970 年美国地球物理勘探服务公司(GSI)首先研制成 SIR 型地质雷达仪,随后在加拿大、日本、瑞典等国也受到广泛关注。20 世纪 70 年代末,特别是 20 世纪 80 年代以来,开始应用地质雷达于煤矿井下进行超前探测。我国煤炭科学研究总院重庆分院于 1988 年研制成 KDL-2 型矿井地质雷达仪,并在开滦、焦作、邯郸等矿务局的煤矿试验获得成功。矿井地质雷达探测是煤矿井下超前探测(探距 30~40m)的有用工具;施工占地面积小,既可进行垂直方向探测,又可进行水平方向探测,探测的精度也比较高。地质雷达探测以其精度高和探测范围广成为软弱结构面空间定位和岩体结构精确探测的有力的技术和手段,在解决坑道支护问题过程中,利用地质雷达技术进行围岩结构探

测可为支护设计提供可靠直观的地质依据^[22~24]。

围岩控制技术是一个涉及工程地质学、岩体力学、支护理论等多学科、多因素、综合性的工程技术。人们经过长期工程实践与研究,提出多种地下硐室围岩支护的基本理论。地下工程支护结构理论的一个重要问题是如何确定作用支护结构上的荷载。因此,支护结构理论的发展离不开地压理论或围岩压力理论的发展。从这方面看,支护结构理论的发展大致可分为三个阶段:①20世纪20年代以前主要是古典的压力理论阶段,这种理论是基于一些简单的假设。②20世纪20年代至60年代的松散体理论阶段。这一理论是把岩体视作松散体,认为作用在支护结构上的荷载是围岩塌落拱内的松动岩体重量。有代表性的是泰沙基和普氏理论。③20世纪60年代前后发展起来的支护与围岩共同作用的现代支护理论。由此逐渐形成了以岩体力学原理为基础的、以锚喷支护为代表的、考虑支护与围岩共同作用的现代支护理论^[25~30]。随着施工的地质环境复杂性的增加,出现了以“新奥法”为代表的施工方法,它以全新的围岩支护结构论来指导地下工程施工的全过程,从此以后,以“新奥法”理论为指导、以锚喷支护为手段的地下工程施工全面开展起来,并取得了巨大成功^[31,32]。

地下工程研究中,有代表性的支护理论是新奥法理论、联合支护理论、围岩松动圈理论、二次支护理论、位移反分析理论以及复杂岩体工程地质力学理论等,这些理论从不同方面、不同角度阐述了锚喷支护作用机理,在许多复杂工程地质条件的矿井中得到了具体的应用。特别是我国引进的澳大利亚以地质力学评估为基础的锚杆支护设计方法对复杂工程地质条件下坑道的支护起到了重要的作用,扩大了锚喷支护的使用范围^[33~39]。

由于地质环境的复杂性以及岩体工程力学行为的非线性,使得解析解只适应于简化条件过多而较多地失去地质原貌的理想化情况,因此,随着现代数学和力学的发展,岩土工作者致力于数值法的研究已成为工程岩体力学计算的主导方向,尽管由于受地质体客观条件的限制而难以给出定量解,但各种数值算法还是定性地模拟了地下工程开挖后工程岩体的力学行为,在这一研究领域可以说是百花齐放、流派众多。早在20世纪60年代,Zienkiewicz^[40](1977)、Goodman^[41](1968)、Desai等就将有限元法引入地质力学研究中。美国矿山局十分重视数值分析在矿山设计中的应用研究,20世纪70年代早期,矿山局丹佛研究中心采用有限单元模型模拟了地下采矿坑道稳定性问题,同时还专门研制了用于采矿岩石力学问题的ADINA程序。到20世纪80年代,矿山局扩大了数值分析的应用范围,丹佛研究中心进行了煤矿长壁坑道煤柱设计和顶板破坏的分析研究工作。斯普肯研究中心进行了采场设计以及顶板支护系统的数值分析研究工作^[42,43]。国内一些有远见的工程地质力学工作者,从20世纪70年代起就开始了岩体工程地质力学数值方法及计算机软件的开发研究工作,至今,随着岩土工程介质及开挖环境的日益复杂,数值法也越来越广泛地应用于岩土工程的设计中。康红普^[44](1993)用有限元法模拟了软岩坑道底鼓的机理。陈卫忠^[45](1998)、朱维申^[46](1998)用弹簧块体理论进行了节理岩体中围岩稳定性的大变形数值模拟。金丰年^[47](1996)应用非线性粘弹性模型,对全断面隧洞的开挖过程进行了三维有限元计算。唐兴仪^[48](1999)使用平面粘弹塑性有限元法对隧道开挖后围岩支护体系的稳定性进行了评价。对于复杂工程地质条件下的坑道而言,由于其自身的特殊性和非线性,一种专门为岩土工程非线性大变形的显式有限差分软件(FLAC),迅速在岩土工程界得到了广泛的应用。C. Fairhurst全面论述了岩土工程中的各种数值方法的特性,

重点介绍了 FLAC 应用的岩石力学原理和各种模拟方法，并在矿山采场开挖和加固中得到了具体的应用。在国内彭苏萍（1999）、孟召平（1999）、王泳嘉（1996）、康红普（1999，2000）、谢和平等（1999）分别在煤层顶板稳定性、边坡、锚杆支护、注浆加固、开采沉降等领域应用 FLAC^{2D}、FLAC^{3D}进行了数值模拟，取得了比较理想的成果^[49~54]。

总之，通过正确评价工程地质条件，获取符合实际的工程岩体力学参数，突出地应力的作用和地质工程赋存环境的复杂性；建立可靠的工程地质力学模型，选取安全、合理、可靠、经济的最佳支护方案，将使复杂的地下工程设计与施工决策更趋于合理与可靠。

第四节 矿井工程地质学研究的内容和方法

矿井工程包括井筒、巷道、峒室和采场等工程。从工程地质方面考虑，井巷工程的位置一般应选择在地质条件简单，岩体完整，水文地质条件不复杂的地段，应避免断裂构造、岩溶、滑坡和崩塌现象发育，且对工程场地的稳定性有危害或威胁的地段，对于巷道如无法避开断层破坏带，在线路选择上，适宜与之垂直或成大角度斜交通过，其井筒口应选择在山体稳定、覆盖层薄、无不良地质现象的地段。

矿井工程地质学具体的研究内容有三项，即查明矿井开采地质条件，正确地进行矿井工程稳定性评价，提出正确合理的设计与施工方案以及对不良地质条件提出改造建议（支护对策）。

（1）矿井开采地质条件是影响煤矿开采的各种地质因素的综合，包括对煤层厚度变化、地质构造、岩浆岩侵入、岩溶陷落柱、瓦斯、地温、地压和地下水等地质因素的观察、评价和预测等内容。

（2）矿井工程稳定性评价包括岩石（体）工程地质力学性质评价和矿井工程（巷道或采场）围岩稳定性分析等内容。矿井工程围岩稳定性主要由岩体力学性质及其岩体中应力分布规律所决定的，所以，矿井工程稳定性评价主要研究岩石力学性质和岩体结构及其力学特征，在此基础上，进一步分析岩体中地应力的分布规律和在采动影响下矿井工程围岩应力分布及变形破坏规律。

（3）从长远发展来看，由于工程地质人员对客观的工程地质条件了解最清楚，所以应参与设计与施工工作。因此，在矿井开采地质条件和矿井工程稳定性评价的基础上，还应提出合理的设计与施工方案和对不良地质条件提出改造建议。

如上所述，矿井工程地质学研究的对象是人类开采活动与地质环境之间的矛盾。研究它们产生的地质条件、力学机制、探讨它们的发展趋势，以便正确地评价和提供合理的防治措施。

为了能对上述问题深入研究，必须采用合理的研究方法。因为任何问题研究的成败都与所采用的研究方法有直接关系，目前研究矿井工程地质问题时，广泛采用综合研究方法。

首先，研究这些地质问题或地质作用，绝对不能离开地质分析或自然历史分析这一基本方法。这种分析不仅研究地质体与周围因素的相互关联和相互制约的方式，还要研究它随时间而发展演化的历史和发展的阶段性。所得的结果虽然是定性的，因为它往往是区域性或趋势性的规律，所以对采区划分、工作面布置和支护对策，有很重要的指导意义，同

时它又是进一步定量评价的基础。

除自然历史分析法（地质学方法）外，矿井工程地质学必然要求对主要矿井工程地质问题进行定量评价，以便为工程设计或防护措施设计提供必要的定量数据。为此就必须运用岩石（体）力学的基本原理，通过试验、物理模拟和数值模拟等方法，阐明各主要工程地质问题产生的力学机制。只有较深刻地理解其力学机制，才能对各种因素在该问题产生和发展中的作用，各种参数在定量计算中的意义，有较系统和透彻的理解。在此基础上就可以建立各种岩体工程地质力学模型，进行数值计算。由于地质条件十分复杂，有时还不得不依靠类比法进行定量评价，也就是根据条件类似采区（或工作面）的已有工程地质问题的观测资料，对研究中的问题进行定量预测，如矿井地质条件预测等。

无论是进行地质分析或是力学机制分析还是模拟分析，都需要深入观察、研究和观测地质现象。野外和井下地质现象的观察研究所获得的资料，是工程地质分析所应依据的最基本的第一手资料，因为有些野外观察是难于用室内模拟所代替的，如地应力场、地应力集中所造成的一些现象等。当然，物理模拟和数值模拟也有其特有的优点，这主要是它能在短期内重现作用的全过程，所以，它可以对根据现象作出的分析判断进行实验验证，两者应该密切结合而不应有所偏废^[25,26]。

第一篇 矿井开采的基本地质条件研究

影响煤炭矿井开采的地质因素很多，重要的有：煤层厚度及其变化，煤层顶底板岩层组合及其空间变化，地质构造（包括断层、褶曲等），矿井水文地质及瓦斯地质，煤层中的地质异常体（如岩浆侵入体等）及地温、地压等。查清这些地质因素对不同矿井煤炭开采的影响程度，为煤炭开采提供可靠的地质依据，是矿井工程地质学的主要研究内容。

第一章 煤厚变化及其预测技术

煤层是矿井开采的对象，是自然界中由植物遗体转变而成的成层可燃沉积矿产，由有机质和混入的矿物质所组成。煤层作为含煤岩系的有机组成部分，在含煤岩系中常常赋存于一定的层位，与其它共生的岩石类型构成特定的沉积序列。由于受煤层形成时基底构造、原始成煤环境、后期冲刷作用和构造作用的影响，造成不同煤田、矿井或同一矿井的不同采区、工作面的煤层厚度不同，或出现增厚、变薄现象。当煤层厚度小于实际开采高度时，在工作面煤壁表现为破顶或破底，给综采设备维护带来困难；当煤层厚度大于工作面实际开采高度并撇顶煤时，由于煤层松软，极易造成漏顶，给顶板管理造成困难。因此，开展煤层厚度及其变化的研究，对于采区的合理布置，采煤方法的正确选择，储量的准确计算，煤炭资源的充分回收等都具有重要的意义。

第一节 煤层的形成机理与煤厚变化的控制因素

一、煤层的形成机理

煤是植物遗体经过复杂的生物、地球化学、物理化学等一系列作用转变而成的。从植物死亡、堆积到转变为煤需要经过一系列的演变过程，这个过程称为成煤作用。成煤作用大致可分为两个阶段：第一阶段是植物在泥炭沼泽、湖泊或浅海中不断繁殖，其遗体在微生物参加下不断分解、化合、聚积的过程。在这个阶段中起主导作用的是生物地球化学作用，低等植物经过生物地球化学作用形成腐泥，高等植物形成泥炭，因此，称为腐泥化阶段或泥炭化阶段。当已形成的泥炭和腐泥，由于地壳下沉等原因被泥砂等沉积物覆盖后，

在顶板沉积物压力作用下，发生了压紧、失水、胶体老化和固结等一系列变化，生物化学作用逐渐消失，同时泥炭的化学组成也发生了缓慢的变化，泥炭变成了比重较大、较致密的褐煤。一般把泥炭变成褐煤的过程称为煤的成岩作用阶段。当褐煤层继续沉降到较深处时，受到不断增高的温度和压力的影响，引起煤的内部分子结构、物理性质和化学性质方面的重大变化，如腐殖酸消失、出现粘结性、光泽增强等。从褐煤转变为烟煤和无烟煤过程中，随着煤化程度增高，煤的碳含量增高，氢含量、氧含量和挥发分减少，而煤的反射率增高、容重增大（表 1-1）。

表 1-1 植物、泥炭、褐煤、烟煤和无烟煤的化学组成和性质

	C ^r /%	H ^r /%	O ^r /%	水分/%	挥发分/%	腐植酸/%	容重	反射率 R_o /%
木本植物	50	6	44			0		
木本泥炭	66		26	>40	70	53	1.0	
褐煤(煤化程度低)(云南)	67	5.85	25		59	68		
褐煤(煤化程度中等)(内蒙古)	71	4.84	22	10~30	44	22	1.1	
褐煤(煤化程度较高)(广西)	74	5.49	17		45	3		
烟煤	80~90	4~6	5~15			0	1.2~1.4	0.48~2.22
无烟煤	90~98	1~4	1~3		<10	0	1.4~1.8	2.00~10.45

(引自中国煤田地质学,1979)

由表 1-1 可看出：在自然界中从植物转变成泥炭、煤的过程是一个从低级到高级的发展过程，也是一个逐渐由量变到质变的过程。在不同的地质条件下，温度与压力的差异导致不同煤化程度煤的产生。通常按煤化程度由低到高把烟煤划分为 6 个阶段，即所谓长焰煤、气煤、肥煤、焦煤、瘦煤和贫煤阶段。无烟煤阶段的煤化程度更高。个别情况下，无烟煤可进一步变为石墨。

煤层是由泥炭层转化而来的，泥炭层的堆积主要取决于泥炭沼泽的水面和植物遗体堆积的沉积面（即泥炭层的上表面）两者间的关系。泥炭沼泽水面和植物遗体堆积面保持均衡，即泥炭层堆积面不断增长和沼泽水面不断上升保持均衡，是泥炭层不断增厚的必要条件，一旦这种均衡遭到破坏，泥炭层的堆积也就随之终止。植物遗体堆积速度和沼泽水面上升速度之间，可能出现三种不同的补偿方式^[55]：过度补偿，均衡补偿，不足补偿。

当沼泽水面上升速度小于植物遗体堆积加厚的速度时称过度补偿。过度补偿持续发展，沼泽供水条件愈来愈困难，以致已堆积的泥炭层因暴露而遭到风化剥蚀，难以形成较厚的煤层。

当沼泽水面上升速度与植物遗体的堆积加厚速度大体一致时，称均衡补偿。在均衡补偿条件下，泥炭层得以不断加厚，相对均衡状态的长期持续，便形成厚煤层。

当沼泽水面上升速度大于植物遗体堆积速度时，称不足补偿。这时沼泽水不断加深，沼泽环境发生变化，泥炭堆积作用也就停止，代之以泥砂质沉积物，形成煤层顶板或煤的夹矸。

影响沼泽水面升降的因素很多，主要有地壳的升降运动，季节性和周期性的气候变化，古地理环境的变迁和沼泽水的补给状况，冰川的消融及泥炭层等沉积物本身的压缩作

用等。其中地壳运动的性质常常具有普遍的重要意义。

地史上曾有过广泛的泥炭化作用，但泥炭层能被埋藏保存下来的仅是其中的一部分。因此，能保存泥炭层并转化为煤层的地区必须具备泥炭层堆积的条件，又同时具备泥炭层得以埋藏保存的条件。只有当地壳下降速度大于泥炭堆积速度，泥炭层才会被上覆沉积物掩埋而保存下来。

自然界中沼泽水面上升和泥炭层堆积速度间的平衡是有条件的、相对的、暂时的。泥炭层堆积的整个过程往往是不同补偿方式的反复交替，因而形成的煤层有各种不同的形态和结构。

根据煤层中有无其它岩石夹层的存在，煤层可分为两类结构：不含夹石者称简单结构；反之为复杂结构。煤层中的夹层亦称夹矸。常见的是粘土岩、炭质泥岩或粉砂岩，有时煤层夹矸为石灰岩、硅质岩、油页岩、细砂岩甚至砾岩，如广西、浙江等地晚二叠世煤系以及湘、鄂、川、陕等地的早二叠世煤系的煤层中就有石灰岩透镜体。有些中新生代煤田煤层中有油页岩的夹层。在内蒙古个别煤田中，煤层中曾见过厚1 m多，长100多米的砾岩透镜体。

煤层中夹层的多寡及其分布主要取决于聚煤期的古构造和古地理条件。华北石炭二叠纪煤田，聚煤期沉积环境比较稳定，常见简单结构的煤层。东南沿海各省中生代煤系，常因沉积环境不稳定而多复杂结构煤层。

煤层夹矸的物质来源，取决于泥炭沼泽所处的沉积环境。与河流毗邻的泥炭沼泽，夹矸主要是越岸沉积物，有从悬浮物质沉积下来的粘土、粉砂和具有底负载的砂砾堆积。根据水动力方式和沉积物特征，可进一步区分为越岸洪泛沉积和决口扇沉积。越岸洪泛沉积物粒度较细，在煤层中形成楔形薄夹层，距河床边缘越远夹石层越薄；决口扇沉积物较粗，包括底负载沉积物，夹石层平面形态呈朵状或扇状，造成煤层向河道方向分岔、变薄和尖灭。泥炭沼泽外围有火山活动时，火山喷发物可形成煤层的夹矸。如我国黔西、滇东地区晚二叠世含煤岩系的煤层中，常常发育由火山灰蚀变而成的高岭石粘土岩夹矸，成层极薄，一般厚仅几厘米至数十厘米，但其展布范围可达百余千米。高岭石粘土岩夹矸的层位稳定，特征明显，是直接识别煤层层位的良好标志层。滨海泥炭沼泽，由于风暴、潮汐作用可能遭受海水内侵，形成碳酸盐岩或硅质岩夹矸，常沿一定层位呈透镜状产出。由于地下水位的波动，泥炭沼泽和覆水盆地经常转化，覆水盆地内也可形成与煤共生的粘土岩、油页岩夹矸等。此外，煤层中的夹矸也有可能是由残余矿物质形成的，即在泥炭沼泽干涸期，泥炭层暴露于大气中，有机质遭受氧化分解，而矿物质则残留下来形成夹矸。总之，煤层中夹矸的岩石类型、层数、厚度和侧向变化主要取决于沉积-构造条件。一般情况下，稳定的拗陷盆地和滨海沉积环境下形成的煤层及夹矸，侧向较稳定，结构较简单，断陷盆地和内陆沉积环境下形成的煤层，结构复杂，有些厚煤层含夹石可达几十层，且常常呈透镜状产出。

煤层的结构对采煤方法、采掘机械的选择和原煤质量等，都有一定影响。当煤层中含有较厚夹矸时，可实行煤分层与夹石层的分采；当煤层结构复杂而难以分采时，夹石将掺入煤中，使原煤质量降低。因此在煤田地质勘探阶段，应当查明煤层结构，并作出原煤质量的初步评价。