

# 岩体工程地质力学问题

(七)

中国科学院地质研究所 编

科学出版社

# 岩体工程地质力学问题

( 七 )

中国科学院地质研究所 编

科学出版社

1987

## 内 容 简 介

本文集共收入十五篇文章。第一篇探讨了目前我国煤炭开采中存在的主要工程地质问题,并提出了岩体改造的原则,第二篇讨论了地质体结构的级序性问题。第三篇至第六篇研究了岩体的变形特性、流变试验、断裂构造对矿区地压的影响和钻孔岩心的片状开裂。第七、八篇介绍了边坡模型振动实验和现代构造应力场作用的光弹模拟实验研究。第九、十篇简述了位移反分析原理及其应用、围岩变形量测与险情预报。第十一至第十四篇介绍了直剪流变试验等测试技术的研究。第十五篇研究了泥灰岩风化壳的环境工程地质问题。

本书可供地质和水文地质工程地质人员,水电、矿山、交通、国防工程系统的勘测设计施工人员,以及大专院校有关专业师生参考。

207P/3P 15

## 岩体工程地质力学问题

(七)

中国科学院地质研究所 编

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

\*

1987年9月第一版 开本:787×1092 1/16

1987年9月第一次印刷 印张:10 1/4 插页:5

印数:0001—1,750 字数:239,000

统一书号:13031·3668

本社书号:5281·13-14

定 价: 2.90 元

# 目 录

|                                   |                 |     |
|-----------------------------------|-----------------|-----|
| 我国煤炭开发中的工程地质问题·····               | 孙广忠 曲永新 王 杰 姚宝魁 | 1   |
| 论工程地质评价中地质体结构的级序性问题·····          | 黄鼎成             | 15  |
| 砖红色粘土岩单轴压流变试验研究·····              | 周瑞光             | 25  |
| 高地应力地区碎裂岩体变形特征研究·····             | 郭 志             | 35  |
| 断裂构造对黄沙矿区岩移影响的力学分析·····           | 丁恩保 李中林         | 43  |
| 钻孔岩心片状破裂的应力分析·····                | 黄建安 王思敬         | 54  |
| 边坡模型振动实验研究·····                   | 王存玉 王思敬         | 65  |
| 渡口-西昌地区现代构造应力场作用的光弹模拟实验研究 ·····   | 许学汉 陈月娥         | 75  |
| 位移反分析法原理及其在岩体工程地质力学中的应用·····      |                 |     |
| ·····                             | 杨志法 刘竹华 王思敬 张连第 | 85  |
| 围岩变形量测与险情预报·····                  | 邢念信 徐复安         | 95  |
| 单试件现场大型直剪流变试验研究·····              | 陈诗才             | 101 |
| 岩石力学试验中加载伺服控制装置研制·····            | 林文祝 孙广忠         | 105 |
| 通用快速傅里叶变换算法设计及其在岩体声波频谱分析中的应用····· | 戴 桦 吴志勇         | 113 |
| 声频大地电场仪在边坡岩体工程地质调查中的应用·····       |                 |     |
| ·····                             | 孙玉科 牟会宠 张年学 徐嘉谟 | 119 |
| 云南蒙自盆地热带泥灰岩风化壳的环境工程地质问题·····      |                 |     |
| ·····                             | 曲永新 时梦熊 徐晓岚 吴芝兰 | 126 |

# 我国煤炭开发中的工程地质问题

孙广忠 曲永新 王 杰 姚宝魁

在我国能源消耗总量中,煤炭占70%以上。为了实现本世纪末国民经济产值翻两番,必须加速开发煤炭资源。我国煤炭资源比较丰富,至1980年底探明储量超过 $6.4 \times 10^{13} \text{t}$ 。如果进一步提高地质勘察水平,加速勘察进度,至本世纪末可以达到规划指标需要的资源储量。显然,实现本世纪末煤炭年产 $12 \times 10^8 \text{t}$ 的任务,关键在于采、运、用的问题。本文仅就对煤炭开采具有一定的控制作用和应该积极组织研究解决的一个重大课题——煤炭开采中工程地质问题研究的意义、内容及措施做简略探讨。

## 一、问题的提出

如何加速煤炭开发,一般很容易想到,主要措施应是提高技术和发展重型机械。这是问题的一方面;但是,还有另外一方面,即技术和机械使用条件。它控制着采用的技术和机械是否能够发挥作用,这项控制因素就是工程地质条件。它在煤炭开发的许多环节中都起作用。

加速开发煤炭资源,第一个措施就是加快立井、岩巷建设速度。加速立井,岩巷建设速度的正确措施应从两方面考虑:(1)提高机械化水平;(2)加强建井中的工程地质工作。目前我国建井速度相当慢,远远落后于世界先进国家。究其原因有许多方面,而最主要的还是工程地质工作不利。煤炭部基建司1983年6月召开的建井地质会议已经明确地认识到这一点。该会议纪要指出,在建井过程中地下水、流砂、瓦斯、地温、断层、煤层变化等各种地质因素时刻在影响和威胁着井下施工。能否预先了解它、掌握它的规律,就成为能否顺利进行施工的关键。了解了这些条件,掌握了这些条件,就可使施工顺利进行,缩短建井工期,节省国家投资。如淮南潘集3号井由于弄清了水文地质条件,采用了有效的措施,使井筒施工提前了十个月,节省投资240余万元。反之,由于地质条件不清,因此施工中出现意外事故,致使停工处理,拖延工期,增加投资。显然为了加速煤炭开发,仅考虑提高技术和机械水平是不够的,必须对建井的工程地质条件进行研究。大量实践经验表明,控制建井速度的地质因素主要有四方面:(1)地质构造;(2)破碎岩和软岩;(3)地应力;(4)地下水。考虑到本世纪末煤炭采掘深度将达1000m,随之将出现热害问题。而这一问题目前已经出现。如平顶山八矿深550m处地温达34—35℃,最高达37℃;长广矿牛头山7号井1000m深处工作面地温高达38℃。显然,地温也应作为深井建设中必须查明的重要地质课题之一。

为了加速煤炭开发,除了扩大和提高井采水平外,还增加了五大露天矿开发。为了开发五大露天矿,必须改变目前露天开采技术和装备落后的面貌,同时也必须重视露天开采

中的一个重大技术经济课题,即工程地质问题。这个问题与露天矿规划设计密切相关。它关系到开采能否顺利地按计划进行,也关系到排土场,储煤仓,附属企业布置,也直接关系到剥离量的大小问题。抚顺西露天矿边坡破坏危害可以借鉴。抚顺西露天矿有记录的滑坡近 50 次,造成了巨大损失,其中:

(1) 1960 年南帮 W1200 滑坡破坏了提升煤炭主要设施西大卷,国家投资两千多万元进行西大卷滑坡加固工程。

(2) 据统计 1949—1980 年滑坡清理方量达  $6.5 \times 10^7 \text{m}^3$ ,支出费用达 1 亿元。

(3) 西北帮由于边坡不稳,可能达不到原设计境界。由于设计时对边坡问题缺乏研究,目前炼油厂建于北帮边上,使露天中部开采和扩采受到限制。事实证明,露天开采中必须重视边坡角研究。

建国三十三年,我国煤矿采掘机械化只占 40%(其中综采机械化仅 18%),而德意志联邦共和国达 98%,英国达 94%。必须大力发展以采掘运机械化为中心的机械化。目前伴随综采机械化出现了一个尖锐的矛盾,盘区内小断层分布状况不清,综采机械生产经常遇阻,给生产带来困难。一般来说,一台综采机日采 10,000t 煤,排除 1 次小断层遇阻事故,少则需半个月,多则一个多月,即一次事故将减产 300,000t。从工程地质来说,这不是一个理论问题,而是一项急待解决的重大实际问题,即小构造的定量规律和探测技术问题。这个问题已经引起重视,但这项研究进度十分缓慢,势必影响煤炭综采机械化的发展和利用效益。

我国目前井下采掘的安全状况很不好,百万吨煤伤亡率比世界先进国家高很多。矿井死亡事故构成中顶板事故占 41.6%,煤炭部同志已经认识到,为了预防顶板事故,要积极发展综采和单体液压支柱,正确选择采煤方法;同时要重点抓住改进顶板支护技术,提高支护质量;完成顶板监测手段三个环节。应当指出,用支架支护顶板防止冒落的效果如何,不仅仅是由支架支护能力决定的,而更重要的是必须了解顶板特性,地压大小,合理的选择支护方案才能办到。不了解顶板来压大小,仅从加大支架吨位来解决支护问题是带有很大的盲目性的。看来,这个问题还没有引起重视。这是一项煤炭开采中急待解决的又一项工程地质和岩体力学问题。这个问题包括五方面的课题:(1)岩体结构;(2)地应力;(3)岩体力学性能;(4)采场结构;(5)采矿方法等。前三者是基础性资料,后二者是地压活动条件。在进行地压分析时,必须将这两方面很好结合起来。

近年来愈来愈多的煤矿提出软岩问题。这个问题表现形式为巷道大规模收敛变形,使巷道维护工程量猛烈增加。实际上这些巷道的岩体并不比地面岩体软,关键是埋深大了,地应力高,相对之下岩体强度不足以支撑开采后形成的二次应力场中井巷围岩的应力状态,以致岩体进入流动变形状态,从而表现为软岩。

随着开采深度增大,地应力对采矿的影响愈来愈大,它表现为两种形式:一种是强迫井巷围岩呈脆性破裂,而表现为岩爆;另一种是使岩体屈服,而表现为流动变形。不论岩爆和流变都与地应力状况有关。关于地应力的一般规律目前积累的资料已有显示。而对具体矿区来说,由于受具体地质背景所控制不能简单地对比,必须组织量测。

软岩现象还有另外一种成因,即粘土岩与水接触膨胀形成的。具有这一机制的软岩称膨胀岩,因此,对岩体力学性质研究的同时,必须对其膨胀性和水文地质条件进行研究。

煤炭开采中普遍存在着井巷维护问题。传统的支护原理都是支撑理论,即视岩体为一被动的荷载。而对岩体的自撑能力没有给予重视。这个概念必须改变,应当看到井巷围岩是井巷工程结构的基本部分,井巷破坏应采用加固围岩的办法来解决。喷锚支护是加固井巷围岩的有效技术之一。煤炭部在煤矿使用 25 年喷锚支护得到的经验效果(与料石或混凝土支护对比)是:喷锚支护巷道施工速率提高 0.5—1 倍,减少工程开挖量 15—20%,节省劳动力一半以上,成本降低 30—50%。北票煤矿的竖井深部扩建施工的大量井巷采用喷锚支护法施工,1980 年 11 月底统计资料是:用喷锚支护井巷工程有 11,372m,其中井筒长度为 949m,井筒通过岩层自上而下为 30m 冲积层,372m 含煤地层。煤系基底为砾岩,其下为安山岩、集块岩、凝灰岩互层。安山岩内有两个明显的高压水段。由于施工前有充分了解,因此采取了适当措施,而 949m 的井筒在施工四年后完整无损。这说明喷锚支护不仅可以作为临时支护,而且可以作为半永久支护。但也有的工程中喷锚支护不成功的实例。这不外乎有两个原因:(1)由于地质条件不清,支护方案不当;(2)支护机制不清,使用不当造成的。今后应从这两个方面对喷锚支护在煤矿井巷中应用问题进行研究。

煤炭开采中还有一项重大课题,即采空区的地面沉降。这方面造成的影响已经开始显示出来,如:抚顺市因胜利矿地下开采使地面下沉而引起工程建筑物多处开裂,这个问题曾提出两个解决方案,或者抚顺市搬迁,或者胜利矿停产。最后选择是胜利矿停产。另一例是包头石拐子矿因地下采矿而引起地面下沉,使生活区一古滑坡体复活,毁坏公路和民用建筑,使居民点迁移。这个问题已受到煤炭部重视,70 年代中期曾组织过“三下采煤”攻关课题。如开滦煤矿,在京山线下压煤 7 亿多吨,由于采煤后可能引起地面下沉,而不敢采掘。实际上这是一个环境工程地质问题。

上面讨论结果表明,煤炭开发中提出来的问题,从采矿工程角度来考虑,可概括为四组课题,即:

- (1) 井巷地压预测及围岩加固问题;
- (2) 采场地压预测及顶板控制问题;
- (3) 露天边坡稳定性分析及加固问题;
- (4) 煤炭开采中环境工程地质问题。

这四组课题实际上是矿山岩体工程问题。另一方面,从工程地质角度或从解决这四组课题的地质基础或工程地质条件来考虑,则可归纳为如下四组主要课题:

- (1) 岩体结构研究;
- (2) 软岩问题;
- (3) 地应力问题;
- (4) 地下水问题。

## 二、矿山岩体工程问题研究状况

采矿工程实际上是岩体工程。国外先进国家都十分重视工程地质、岩体力学在采矿工程中的应用问题。从井工开采来说,岩体力学分析结果是确定井巷围岩和采场顶板控制或支护支架吨位选择的理论依据,使井巷围岩加固和采场顶板控制建立在科学的基础上。

井巷地压主要是静压,而采场地压是动压,特别是冲击压力。采场地压研究比井巷要困难得多。为了使井巷加固和采场顶板控制(支护支架选择)建立在科学的基础上,必须加强矿山工程地质和岩体力学研究。

井巷是半永久性工程,要求岩体有比较长期的稳定。对不稳定岩体要求进行加固,对软弱岩体要求做适当的支护,以确保井巷能正常运用。实践表明,喷锚技术是解决这个问题适宜的技术。当前这项工作中还存在较大盲目性。为了确保喷锚技术发挥作用,必须对喷锚机制,喷层厚度,锚杆长度,锚固力大小,在工程地质研究基础上,采用岩体力学理论作出科学分析。否则,随着采深加大,事故将会愈来愈多,不仅将延误工期,而且造成生命、财产损失。必须清醒地看到这一点。

目前井下开采中大都采用长壁法。对破碎顶板可采用自然崩落。坚硬顶板冒落问题是难题之一,我国大同矿务局做了一些研究,但问题还是没有得到科学的解决。坚硬顶板的特点,不仅是岩石坚硬,而且更重要的是结构完整。可见,要解决这个问题,其主要途径应该采取将完整结构改造为破碎结构的方法。这一理论可以用有控水压致裂来实现。采场掘进中另一重大问题是顶板支护问题。目前先进国家大力推广液压支架支护。我国机采中已有 18% 采用这一技术。不论用液压支架还是用 U 型钢支架支护都存在一个支护吨位选择问题。我国曾出现过由于顶板地压不清致使 U 型钢支架连续破坏,液压支架爆炸等事故。为了保护国家财产,避免伤亡事故,必须加强地压研究,实现支架选用科学化。

目前我国露天矿边坡角选定主要是以天然岩体开挖后稳定性分析为依据。随着露天矿采深加大,露天矿边坡角陡缓对剥离量大小和坡脚压煤量大小具有重要影响。露天矿边坡角分析不是简单的力学计算问题,而是必须考虑边坡加固,爆破控制及疏干排水状况。从 60 年代开始,美国和加拿大等国已经开始采用预应力锚索加固边坡,可使边坡角提高  $10^{\circ}$ — $15^{\circ}$ 。我国金属矿山也已采用这项技术来处理失稳段边坡。用预应力锚索对边坡进行处理,提高边坡角,减少剥离量,加速开发,减少压煤损失具有重要意义。

煤炭开发中的环境工程地质问题主要表现在地下采空区引起的地面沉降,导致地面灾害及灾害防治问题。地下采空区致使地面沉降是采煤的必然后果。问题在于地下采空区引起的地面下沉量大小及成灾可能性问题,从而影响到城镇规划。这是一项重大的环境工程地质问题。煤炭部在 70 年代曾提出过“三下”采煤问题,即城市下,道路(公路和铁路)下,水体下(地表水和地下水)采煤问题。因为煤炭是层状矿体,采空引起的地面下沉范围一般比较大。对这个问题进行预报具有重要意义。

目前地下采空区引起地面下沉预报的理论是以散体介质为对象建立的。岩体多受地质构造或岩体结构控制。软弱结构面控制着地下采空区岩移活动,控制着地面下沉活动规律。今后应加强在工程地质工作基础上对地下采空区地面下沉速度和范围的预报,以便对“三下”采煤成灾可能性作出评价,避免由于地下采空引起城市和交通破坏,河道断流,地下水源枯竭,采场被淹等事故。

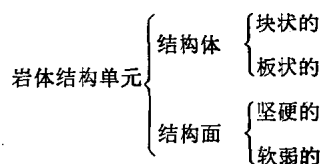
### 三、岩体工程地质条件研究状况及方向

前面提到的必须加强工程地质研究的问题,具体来说,在煤炭开采中遇到最多的、控

制作用最大的有四个问题,这就是岩体结构、软岩、地应力、地下水。

## (一) 岩体结构

岩体结构的基本特点是不连续性,或者说,岩体在各种结构面切割下具有一定的结构。切割岩体的结构面,按其力学性质可分为两类,即软弱结构面和坚硬结构面。随此,岩体结构可分为两级,即在软弱结构面切割下形成的块裂结构和板裂结构属于一级结构。在硬性结构面切割下形成的岩体结构属于二级结构。硬性结构面切割下形成的二级岩体结构,按结构面切割程度又可分为:完整结构,碎裂结构及散体结构(表1)。岩体结构单元亦有两类,详细内容如下:



岩体中发育的结构面有自己的规律,它控制着岩体结构规律,同时也规定着岩体力学模型,控制着岩体力学作用和岩体力学性质。

在结构面力学性质控制下,断层一类软弱结构面,一般不超过四组,而坚硬结构面可多至六组。这表明,岩体内发育各类结构面组数是有限的(表1)。

岩体内所见到的软弱结构面有两种重要类型。除上述的断层类软弱结构面外,还有一类系由层间错动和软弱夹层构成。在构造运动过程中层间错动是非常普遍的,它不仅存在于层状岩体内,而且发育于块状岩体内。在层间错动或软弱夹层控制下,在剖面上常构成构造层。结构面的规模与构造层规模是相对应的,即一定级序的结构面发育于一定级序的构造层内,超越级序的现象是不多见的,它决定着结构面不切层现象和延展深度有限性。

表1 岩石结构级序及类型

| 级序   | 类型   | 亚类                         | 划分依据           | 力学作用控制因素          |
|------|------|----------------------------|----------------|-------------------|
| I-1  | 块裂结构 | 块状块裂结构<br>层状块裂结构           | 软弱结构面<br>块状结构体 | 软弱结构面             |
| I-2  | 板裂结构 | 块状的板裂结构<br>层状的板裂结构         | 软弱结构面<br>板状结构体 | 软弱结构面及<br>板状结构体   |
| II-1 | 完整结构 | 块状的完整结构<br>层状的完整结构         | 坚硬结构面<br>连续性   | 岩性及结构面<br>连续性     |
| II-2 | 碎裂结构 | 块状碎裂结构<br>层状碎裂结构<br>镶嵌碎裂结构 | 坚硬结构面<br>贯通切割  | 坚硬结构面组数、<br>产状、数量 |
| II-3 | 散体结构 | 粗碎屑的<br>糜棱化的               | 结构面无序状<br>分布   | 结构体大小及<br>数量      |

岩体内发育的结构面,对应着它的构造层明显地存在着等距性规律。一般来说,结构面间距大体上等于不同级序结构面对应的构造层厚度的1—2倍。

在构造层控制下结构面的等距性和切割有限性是结构面的重要地质特征和规律,这

些特征和规律不是绝对的,它与研究区的构造运动强度相对应,具有一定的相对性。

上述的结构面发育规律,为岩体力学研究由地质信息抽象地质模型,进而转化为力学模型提供了基础。岩体力学模型的基础是岩体结构。岩体结构控制着岩体变形和破坏机制及规律,据此可将岩体划分为若干力学介质,最基本的有四种:(1)块裂介质;(2)板裂介质;(3)碎裂介质;(4)连续介质。散体也可独立的划分为一种力学介质。但考虑到散体力学,除破坏判据外,与连续介质力学并无特殊区别,故未单独分出。它有的属于连续介质(细颗粒部分),有的属于碎裂介质(粗碎屑部分),不具有独立性。这四种力学介质具有各自的力学法则,构成了完整的岩体力学理论体系。问题的关键之一是查清岩体结构,特别是小构造。为此,必须加强地质构造探测,特别是物探研究,定值、定量的研究,断层、煤层变化,岩体物理力学性质,顶底板岩体活动性等研究工作。主要有四项技术:①煤田测井;②地面物探;③孔间物探;④井下物探。

### 1. 煤田测井

煤田测井常用的方法有:声波、电阻率、中子等方法。测定内容有:岩石密度、力学性质、岩体产状等。各国根据本国地质条件采用适合本国特点的测井法,如英国石炭纪岩层致密,就采用声波-密度组合测井;加拿大白垩纪煤系砂页岩不够致密,声能耗损大,就采用电阻率-密度组合测井;德意志联邦共和国石炭纪煤系挥发分高,就用中子-密度组合测井。我国在水电、铁道等部门早已开始声波测井,而这项技术如何在煤炭工业中应用还刚刚开始。

### 2. 地面物探

70年代以来,英国、德意志联邦共和国、美国、苏联等国纷纷应用或研究以地震勘探为主的地面物探。地震勘探已全面实现数字化。英国高分辨率地震法可以确定断层产状,圈定煤系未扰动区,沿测线能分辨埋深500—600m,断距大于10m的断层。德意志联邦共和国用二维地震仪可清楚辨认深达1000m,断距大于15m的断层,用三维地震法能测出深达800—900m处断距为5—15m的小断层。而我国地震勘探方法十分落后,只能探明大于30m的断层。

### 3. 孔间物探

地面物探近期不可能测出深部太小的地质构造。国外有些学者认为孔间物探是提高煤田地质构造探测的主要途径之一。方法有:电对比法,地震槽波法,高分辨率孔间地震法,孔间声波透视以及雷达法等。研究中的对比法可测出孔距500m以内断距为5—10m的小断层。地震槽波法中的机械震源穿透距离可达125m,爆炸震源可达500m。高分辨率孔间地震法在孔距200m内可测出断距大于3m的断层。孔间声波透视距离可达200m。甚高频雷达脉冲穿透距离可达100m。我国孔间物探基本上是空白,仅在物性测试方面开始探索。

### 4. 井下物探

井下物探的目的是勘探小构造。最佳方法之一是地震槽波反射法,目前处于试验阶

段,可靠率为60—70%,德意志联邦共和国最大透视距离为1780m,英国能探测出工作面前方450m处断距为1.3m的小断层,最近又有报道可测出0.5m的小断层。槽波地震法在我国仅有少数单位开始研究。

井下物探的第二个方法是井下钻孔测井,它可以准确地确定顶底板岩层位置,对比煤层,解释产状,并据此分析断层位置及断距。

## (二) 软弱岩体问题

无数事实说明,无论是矿山边坡的崩塌、滑动、倾倒,还是地下巷道的冒顶、片帮、底鼓,甚至露天矿运输道的变形破坏,往往都受软弱岩体或软弱结构面所控制。所谓的软弱岩体(weak rock mass)通常包括:软岩(soft rock),风化岩和破碎岩,实际上还应包括含盐含石膏的岩体。鉴于这些软弱岩体对工程的严重危害和性质复杂,国际岩石力学协会曾于1981年9月召开过软弱岩石的国际讨论会。煤炭开发中遇到的软弱岩体主要有软岩及破碎岩。

### 1. 软岩

它通常指软弱、强度低的岩石,就岩石类型来说,它包括泥岩、粘土质页岩、泥灰岩、粘土质粉砂岩和一部分凝灰岩。由于它的性质软弱,水稳定性差,成分和胶结强度千变万化,因此,它是一种性质极为复杂的岩石。

### 2. 破碎岩

这是指碎裂结构和散体结构的破碎岩体。它们通常分布在大断层破碎带、断层影响带以及断层交汇带内或附近。它包括断层泥、糜棱岩、压碎岩、节理密集带,火成岩体周围的挤压变质带等。由于不少断层带遭受多次构造活动和长期地下水淋滤蚀变作用,构造断裂带的岩石往往都呈泥夹块或块夹泥的状态,极为软弱。因此,凡是井巷,边坡遇到这种富水的破碎岩体,如不事先防护,几乎都要造成严重塌方。

当前,我国正处在煤炭资源大规模地开发中,泥岩、页岩的工程危害问题非常广泛,如淮南、淮北煤炭基地的建设,邯郸煤炭基地建设,内蒙古伊敏河大型露天煤矿,内蒙古赤峰平庄大型露天及地下煤炭矿井的建设和开发;山东龙口新生代煤田的开发以及吉林舒兰、辽源、沈阳煤田、浙江长广煤矿、广东茂名、石鼓煤矿等,所遇到的最关键问题都是泥岩、页岩巷道稳定性和支护问题,而其核心是泥岩、页岩天然工程地质特性的利用和改造问题。在这些矿井中,有不少煤矿,随着采深的加大,泥岩变形越严重,支护破坏也越严重,支护也越来越困难,有的支护甚至2—3个月就要翻修一次;有的数千米坑道被压垮报废,巷道变形量往往数十厘米,最大竟达1.3m(邯郸康城煤矿)。有的底鼓量达1.2m(舒兰矿)。规模不大的舒兰矿每年用于料碴支护的费用就达450万元。但有趣的是同一矿区同一开掘深度在砂岩中巷道则相当稳定,因此只要避开粘土岩,工程地质问题就少得多。人们形容泥岩巷道为“易攻难守”。

粘土岩基本特性如下:

(1) 在其物质组成中含大量的亲水性粘土矿物(如蒙脱石、伊利石、高岭石),显然粘

粒含量越高,特别是蒙脱石含量越高,性质越软弱、越活动。

(2) 因富含高分散的粘土矿物,岩石富含吸附水,其天然含水量一般 5—15%,个别高达 35—50%,蒙脱石含量越高,含水量也越高。因此,喷射混凝土时很难吃浆,效果差。

(3) 这种岩石对外界湿度变化极为敏感,干燥脱水收缩,二次浸水后软化或泥化,有侧限时产生膨胀压。这种随湿度变化而变化的敏感性又以蒙脱石为强,高岭石则相对稳定,因此,封闭措施的实施极为重要。

(4) 泥岩、页岩大部分属于弱胶结的岩石,即非水稳性的岩石,它们具有膨胀、崩解特性,风干的原状样自由膨胀率一般在 25—100%,膨胀力一般为零点几 MPa 到几 MPa,膨胀性的大小除与粘粒含量有关外,主要与蒙脱石的含量和类型有关,含有较多蒙脱石的岩石通常具有巨大的膨胀性,从而导致工程的破坏,因而称它们为膨胀岩。目前我们已经发现和证实不少煤矿有膨胀岩的分布,如内蒙古的平庄矿、山东龙口煤田、沈北煤田、舒兰煤矿、辽源梅河矿、鸡西穆稜煤矿,随着对膨胀岩测试的广泛展开,必将发现更多的膨胀岩。其中内蒙古平庄矿、山东龙口煤田膨胀岩分布最普遍,膨胀性也最强,在很多泥岩中蒙脱石含量高达 25—50%,自由膨胀率超过 70%,对巷道产生严重破坏。因此在井巷建设中对膨胀岩的鉴别及工程地质预报十分重要。由于膨胀岩在工程建设中的特殊地位,因此 1979 年国际岩石力学协会成立了膨胀岩专门委员会,从而受到国际范围的注意。作为矿山边坡和露天矿路基、膨胀岩,因易受到环境湿度影响,而使其强度衰减或丧失,使变形增大,进而导致工程破坏。因此从粘土岩水稳性的工程地质分类到膨胀岩的辨别和分级;从快速施工,快速封闭措施研究到性能优越的封闭材料(如胶结树脂)的研究,是解决这一问题的基本途径。

(5) 岩石强度低,单轴抗压强度一般  $<20.0\text{MPa}$ ,有的只有  $3.3\text{MPa}$ ,甚至零点几 MPa。泥岩的强度随着岩石含水量的不同,强度高低不同,富含蒙脱石的泥岩单轴抗压强度通常  $<10.0\text{MPa}$ 。尤其要指出的是,泥岩失去水后二次浸水强度剧烈衰减,强度可丧失 40—100%,因此不少泥岩巷道的变形破坏与泥岩随环境的湿度变化而产生的工程性质的变化密切相关。

(6) 流变特性显著,围岩移动量大,持续时间长。这对于埋深较大的软岩巷道和地应力较高的软岩巷道十分明显,如辽源梅河矿三井片状页岩中巷道,围岩移动量达 62cm;邯鄲煤矿基地巷道两帮移动量 20cm 之多。围岩移动量和底鼓量随开挖深度加大明显加大。许多泥岩巷道都是如此。如苏联顿巴斯矿井,采深 1000m,6 个月底鼓量达 1.5m,有趣的是在硬岩层巷道,围岩移动量和底鼓量均很小,巷道稳定性很好。这有力地说明,泥岩在不太大,甚至  $2—3\text{MPa}$  地应力作用下,便可以产生明显的流动变形。

上述这些事实清楚地表明,泥岩本身的性质是造成井巷变形的控制因素。而工程周围地应力的大小,湿度的条件变化是产生上述工程作用不可缺少的环境因素,当然这些因素对坚硬岩石来说是不太敏感的。就是粘土岩本身来说,由于蒙脱石含量的不同、类型不同,胶结剂的含量和成分不同,其本身性质的变化也有巨大的差别。

粘土岩的工程特性和变形破坏的特点表明,无论是采用传统的料石碇衬砌方法,还是当代一般的喷锚支护方法,往往难以收到良好的支护效果。吉林舒兰煤矿,根据我们所提供的泥岩水稳定性和膨胀性判别的结果,在围岩分类基础上,采用不同的支护形式获得较好的效果。

为了弄清某一具体矿山泥岩巷道变形破坏的原因,必须对围岩的应力场、湿度场、岩石的物质组成、强度、软化性、膨胀性以及支护形式、支护时间、支护强度等进行全面研究,才能确定究竟是泥岩的哪一种或哪几种性质在起作用,才能弄清它们的变形破坏机理,可是目前许多矿山只开展了某些方面的研究工作,尚缺乏全面的基础研究。

### (三) 地应力问题

随着国民经济的不断发展,不但生产矿山增多,而且矿山的开采深度亦明显增加。解放前,我国的矿山工业很薄弱,主要为掠夺式开采,一般开采深度有限,地应力对矿山开采的影响尚不太明显。解放后,我国的采矿工业大致经历过三个阶段:50年代主要对已有矿山进行恢复和改造。这时矿山开采的深度比较浅,一般为200—400m左右。50年代后期及60年代前期为我国采矿工业大发展的时期,这期间的主要特点在于矿山开采向广度方面的发展。虽然新开采矿山不断增加,但开采深度一般仍比较浅。70年代以后,我国的矿山工业面临着发展过程中的一个新时期,这时矿山工业逐渐向生产的深度发展,其开采深度亦逐渐增加,如开滦煤矿的平均开采深度已达700m左右。其中马家沟矿已达1028m,赵各庄矿最深,已达1058m。其它矿山,如北票、枣庄等较老的矿山,其最大开采深度亦已接近或已达到1000m左右。露天矿山亦向深凹露天发展,最大开挖深度达300m左右。这就引起了日益突出的矿山岩石力学问题。深埋矿体的开采与浅埋矿体有很大的差别,井巷及采场地压现象日趋明显。露天矿的边坡稳定问题亦日益增多,从而使人们对岩体中的初始应力状态(地应力)引起较为广泛的注意与重视。

岩体中存在的应力是岩体产生变形破坏的力学依据。矿山开采,使岩体中的初始应力受到扰动,产生应力集中和消散;加之开挖空间又提供了临空条件,所以常常使岩体产生变形破坏以致产生失稳现象。由于开挖引起的重分布应力受岩体初始应力的控制,而岩体初始应力场在目前矿山开采深度范围内具有一定的分布规律,从而使矿山开挖过程中的岩体变形破坏及失稳现象表现出一定的规律性。

矿山开挖过程中的地压现象及岩体的变形破坏现象随着开采深度的增加而日趋明显。这一事实已逐渐为人们所认识。随着采深的增加,巷道变形逐渐加剧,产生各种形式的变形破坏,诸如围岩的鼓邦折断、底鼓开裂、离层破坏等,采场地压现象亦逐渐加剧,以致在深部开采时产生岩爆现象。这种情况,在各类深采矿山均有体现,开滦煤矿、北票及枣庄矿务局的生产实践清楚地说明了这一现象。对于露天开采来说,则表现为深凹露天边坡的变形破坏现象比浅挖露天要严重很多。产生这种现象的主要原因,在于岩体中初始应力具有随深度呈线性增加的分布特性,引起围岩破坏现象。

松软岩体中的井巷变形破坏及脆性岩体的岩爆现象更加清楚地显示出随矿山开采深度增加而增加的规律。沈阳矿务局前屯矿及舒兰矿务局丰广四井均属松软地层,这里的巷道围岩变形及稳定状态与开挖深度之间存在着明显关系。沈北前屯矿底板泥质页岩中的运输大巷,在相同地质及支护条件下,距地150m以下的深度巷道的稳定性比浅部明显恶化。舒兰矿务局丰广四井砂岩、砂页岩及灰质页岩中的巷道仅在超过200m埋深时变形破坏现象才趋于严重,且愈向深部表现愈加明显。显然,上述深度体现了影响矿山井巷稳定状态的临界深度。由于该临界深度不仅与岩体中的原始应力状态,而且还与岩体的

结构条件及岩性有关;对于各个矿山来说,由于上述条件的差异,从而井巷稳定状态的临界深度显然也不相同。而该临界深度值只能根据矿山的具体条件来确定。

矿山的岩爆是地压显现的一种形式,多发生于硬脆性岩体中。其本质是岩体的快速断裂,瞬时释放出大量的应变能现象。显然,岩爆现象亦需具备一定的应力条件。从而使矿山工程的岩爆现象表现具有一定的临界深度。枣庄矿务局陶庄煤矿采深大于480m才发现岩爆。抚顺胜利矿产生煤爆的临界深度为250m左右,且发现煤质愈硬,爆炸现象愈严重,呈现爆炸与煤层特性间的关系。京西矿务局及开滦煤矿的煤(岩)爆现象亦是到一定的开采深度才出现的。由上述可知,各矿山的临界煤(岩)爆深度虽然不同,但是总体上来看,岩体的岩爆临界深度比煤体爆裂的临界深度要大。

地壳岩体中的地应力状态是不均匀的应力场,它受多种地质因素的作用与影响,然而在一定的程度上它又呈现出区域性及方向性特征。在存在显著地质构造应力的地区,表现则更加明显。从而表现出区域地应力场对矿山工程稳定状态总体上存在着控制作用。由于矿山工程的复杂性,不但数量大,而且在空间上形成网络,这就为我们分析区域性构造应力场对井巷稳定性总体上的控制作用提供了有利条件。

为了保证工程岩体具有较好的稳定状态,在可能的情况下应该使巷道走向与区域性构造应力作用方向平行或者夹有较小的锐角。特别是对于那些服务年限长,断面大的洞室工程更应该如此。切忌将洞体的走向与区域性构造应力作用方向垂直布置或者夹有较大的钝角。这是评价工程设计是否合理的重要标志。因为在后一种情况下,围岩中的应力集中现象特别显著,围岩的应力状态及变形状态都十分不利。从而具有较差的工程稳定条件。上述表明,地应力研究对指导矿山开发具有十分重要的意义。

由于生产实践中提出来的地应力问题愈来愈多,以及矿山设计及施工对岩体稳定性的要求愈来愈高,矿山开采中的地应力问题日益引起人们的重视。自60年代以来,一些科研及生产单位重视矿山地应力场的研究及其对矿山工程稳定性影响的研究,取得了较好的效果。国内外常用的地应力测量方法有:钻孔变形计、钻孔包体式应力计、钻孔孔底应变计、钻孔三轴应变计、水压破裂法、钢弦应力计、声发射法等。在这个领域内我国许多单位已达到国际水平。问题在于上列方法都以弹性理论为基础,要求岩体完整,并适用于对由坚硬岩石组成地段的地应力测量。而煤矿中的问题很大一部分是破碎岩和软岩问题。据统计,38个主要机采矿区中破碎顶板占54%。破碎岩体和软岩弹性区间很小,主要处于塑性状态。对于由这类岩体组成地段的地应力测量技术至今仍未得到解决。

需要指出,地应力测量及其对矿山工程稳定性影响的研究,虽然已取得了一定的进展,但各类矿山的发展是不平衡的。一般来说,金属矿山开展得较好,而煤矿系统进行现场实际量测尚较少,并缺乏比较系统的研究。这是今后应该注意加强和发展的。其次目前的岩体应力测量方法多适用于完整和比较完整而坚硬的岩体,对于比较软弱和破碎岩体,特别是对松软岩体目前尚没有一种比较实用可靠的量测方法,这是今后应该研究解决的重要课题及侧重发展的方向。

#### (四) 地 下 水

地下水是影响岩体工程稳定性的重要的地质条件之一。它的作用表现在多方面,对

煤炭开发工程来说,主要表现在涌水、突水和岩体软化两个方面。

## 1. 涌水、突水

在第一部分曾指出过,我国建井速度太慢,其原因之一是建井过程出现意外的涌水、突水,处理这类事故拖延了工期。淮南煤矿潘集矿区经验表明,已施工的井巷基建工程工期有 73—85% 主要被打钻、注浆、封水、应付突水和处理排水设备故障所占据。

在华北地区石炭-二叠系煤田开发中,特别是太行山前地带煤田,一旦煤层下隔水底板被揭穿,奥陶系马家沟灰岩中丰富的喀斯特水会突然涌进巷道(突水),使整个巷道系统被淹没,造成生命财产的巨大损失。这类煤矿喀斯特水的突水灾害也常发生在西南二叠系煤系上部的栖霞灰岩中。矿山涌水是十分重要的工程地质问题之一。目前来说,解决这个问题的方法一般是疏干排水、封水、止水等,关键是能否查清地下水蓄存在什么地方、压力多大、水量多少。这里存在两个问题,一是蓄水构造,另一是地下水量测。

蓄水构造实际上是地质构造问题。谷德振教授曾提出过水文地质结构概念,认为地下水蓄存条件是由含水层、隔水层及地质构造所控制。张文佑教授最近曾明确地指出过,搞地下水必须搞清褶皱、断裂格局,要搞清含水层特点及各小构造单元间水力联系。显然探查地下水问题首先是搞清地质构造,其次是地下水测量。

地下水测量要求测量地下水埋藏位置,静止水位及涌水量。地下水埋藏界限一般可以测准,而地下水位低于 200m 时测量就有些困难。美国已研制成功用压力传感器测量深度大于 300m 的水位,我国目前还解决不了这个问题。而当前许多基建井深部都接近 1000m,这也是急需研究解决的问题。在水量研究方面,分层止水技术尚未过关,小井抽水量如何换算成大井涌水量也还存在问题。这就给井巷基建留下了隐患。

## 2. 软化作用

岩石和岩体与土和土体一样都是三相(固、液、气)体系。岩体工程地质的进一步发展,要求我们不仅要深入研究固相部分,而且要研究液相和气相的含量、成分、存在形式、迁移运动规律及其对岩体变形和破坏的影响,由于它们是活动的易变组分,人类的工程建设活动所引起的环境变化,常导致其迁移和聚集,从而对岩体的性状产生巨大的影响。因此必须从环境动力学的观点加以研究。遗憾的是,这种研究还没有系统、全面地开展起来。现仅从水对岩石或岩体变形和破坏影响的角度来简单说明。

虽然各种天然岩体和岩石都含水,任何岩石的强度都随含水量的增加而降低,即所谓的湿度效应,但湿度效应最明显的还是粘土质岩石,特别是膨胀岩。粘土质岩石是富含高分散粘土矿物的含水较多的岩石。但这种岩石中的水是靠库仑力或氢键而吸附在粘土颗粒表面或晶层间的,它不受重力的影响而运动。岩石膨胀是岩石含水量增加的结果。但保持天然结构的完整泥岩、粘土岩直接放入水中时不具有崩解现象,膨胀量也微乎其微。然而一旦被风干或烘干(含水量降低 2—3% 以下),二次浸水后便会产生强烈的膨胀或崩解变形。含水量损失越大,膨胀(崩解)作用越明显,岩石也由固态变为流态。因此,对粘土质岩石来说,湿度环境的变化对其性质的影响极为敏感。而压力对湿度变化的影响则极为迟钝,如富含蒙脱石的泥岩通常具有很高的含水量(10—20%,有的高达 35—50%),在几百 MPa 压力作用下也不会挤出。但在干燥环境中极易发生风干脱水,使岩石的微结

构发生潜在破坏。就是非膨胀的强胶结的粘土岩随着干-湿循环的变化,随着岩石含水量的增加,强度的降低也极为显著。

实际的粘土岩边坡和粘土页岩边坡的滑动,往往是在一场大雨之后一、二个昼夜发生的。这是由于粘土岩和粘土页岩吸水,强度衰减而引起的。湖北盐池河碳酸盐岩边坡的大崩塌,也是在一场降雨(降水量 80mm)之后渗透水流入使滑动面软化、强度降低而引起的。河北平泉某蒙脱石化次安山玢岩洞体底鼓 1.1m 的膨胀破坏也是在长期干旱之后,降一场大暴雨,岩石吸水后产生巨大的膨胀变形,并使自己从固态变为塑态而发生的。

岩体内的大型断层破碎带通常是地下水垂直循环的通道和蓄集场所。断层带工程性质的好坏取决于含泥和富水程度。在地下隧道和矿山井巷施工中,防止大塌方,首先要疏干断层带地下水,滑坡的整治也必须从疏干排除地下水开始,也就是说“防坍必先防水”即降低渗透压力。尤其在河下,在城市下,交通枢纽下开挖巷道,最根本的是查明破碎带和处理好破碎带地下水的问题。

吉林舒兰煤田第三纪含煤地层中,含有多层饱水的松散砂层。在井巷施工中一旦揭露它们,在渗透压力作用下,将产生严重的溃沙现象。溃沙之后往往产生地面陷落,给采掘带来巨大危害。地下水疏干后,溃沙问题便被克服了。

上述几方面使我们认识到,一旦掌握了岩石中水和岩体中水对岩体变形破坏的影响机理,我们就可以采用有效的封闭措施,保持泥岩、页岩的天然湿度;采用排水措施加固破碎带岩体;采用防渗封闭措施防止水库滑坡的发生,通过采用排水与封闭相结合的措施保证巷道、隧道特别是河下施工的安全进行。

## 四、岩体改造

岩体由于其岩性、结构及赋存环境特点所决定,不加任何处理就能满足工程建筑要求是不多见的。为了达到工程目的和要求,岩体总是或多或少地需要进行处理。在进行岩体力学研究时不考虑岩体处理方案,只考虑岩体自然特性,研究其力学性质,分析其力学作用,也是理论脱离实际的一种表现。岩体力学研究必须把岩体处理的可能方案考虑进去,作出岩体力学研究设计,以期达到研究目的。

在工程规模不大和技术经济指标不高时,出现的问题多数是在不良岩体上。为了在不良岩体内建筑工程,人们很早就研究岩体加固问题。今天工程规模大了,技术经济指标高了,又出现了一类新的问题。如煤矿中坚硬顶板在采掘过程中不能随时放下来,会引起顶板突然冒落灾害等事故。又如为了防止瓦斯爆炸,在采煤中要进行瓦斯抽放,但由于岩体结构完整,煤炭过于致密而抽放不出来。这样就提出一个与岩体加固相反的问题,要求使岩体破坏以达到工程要求的岩体条件。这个问题可以通过改造岩体结构和改变岩体物理力学性质的办法来实现。这样,我们可以通过岩体改造的手段,实现在任何岩体内都可建筑所需要的工程的目的。这一课题的研究,可以使人类从消极地选择岩体来满足工程要求的状况,转变到根据技术经济要求在任何岩体中开挖所需要工程(如果在经济上是合算的话)。显然,在岩体改造中有两类问题:(1)岩体加固,对煤矿来说,为井巷支护服务;(2)岩体破坏,对煤矿来说,为坚硬岩石放顶和瓦斯抽放服务。

在进行岩体改造时,明确下面几个观念是十分有意义的。

### 1. 明确地把岩体视为工程结构的一部分或全部

过去和现在都有许多人在考虑与工程有关的岩体力学作用问题,常常把岩体视为与人们“捣乱”的对象。把经过岩体力学作用分析发现的不稳定岩体视为荷载,为了保证岩体稳定性,则常采用支护措施,抵抗“山岩压力”对岩体进行处理。这种观念应当改变。应该认识到,在岩体内部修建工程时,岩体实际上是工程结构的一部分或全部。与此相应,对不稳定岩体不一定采取支护措施,而采用结构加固的观点对岩体进行改造(改造岩体结构或改造岩体性质),使之满足工程结构要求。这是岩体结构力学的基本观点之一。

### 2. 从改变岩体结构观点出发,进行岩体改造

从岩体结构观点出发,岩体改造的手段在于改变岩体结构。如在岩体加固工作中,对碎裂、块裂、板裂结构岩体经过处理使之转变为完整结构岩体。为此,比较有效的方法有:喷、锚、灌。岩体破坏多半是从表面开始的。喷的效果可改变岩体表层结构,提高岩体表面强度。锚的效果可提高岩体完整性,可使碎裂、块裂、板裂结构岩体转变为近似完整结构体。锚杆必须打穿控制性结构面。灌的效果可使岩体内部结构改变,同样可达到改变岩体结构的目的,这对碎裂结构岩体比较适用。另一方面,在岩体破坏(弱化)工作中,对完整结构岩体经过处理可以使之变为碎裂结构,比较有效的方法有水压致裂,爆破松动,密集钻孔等。这些方法可以改变岩体结构,降低岩体力学性质,达到工程要求。考虑岩体结构,改变岩体结构是岩体改造的又一重要观点。

### 3. 改变工程岩体应力状况

岩体变形和破坏机制有两组成分:

- (1) 材料变形和破坏;
- (2) 结构变形和破坏。关于结构因素,上面已经讨论过。而材料变形和破坏多数与工程岩体内应力状况有关。它可以通过下列措施,保护岩体,防止破坏。
  - (1) 改变工程岩体几何形状(如隧洞几何形状);
  - (2) 改变岩体力学性质(通过岩体改造);
  - (3) 附加附属工程,使应力集中带进行转移。

### 4. 提高岩体强度

这是岩体加固常用方法之一。基本方法有两种:

- (1) 用物理化学方法改变岩体成分,提高岩体力学性质,最常用的方法是灌浆。
- (2) 采用预应力锚固方法对岩体增加围压,提高岩体强度和变形模量。

上面四种是基本的,它们是由岩体地质特征特别是岩体结构所决定。

## 五、结 论

煤炭开发工程实际上是岩体工程。工程地质和岩体力学是岩体工程的基础,也就是煤炭开发的工程基础。