

康红普. 煤炭开采与岩层控制的空间尺度分析[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2020, 2(2): 023538.

KANG Hongpu. Spatial scale analysis on coal mining and strata control technologies[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2020, 2(2): 023538.

## 煤炭开采与岩层控制的空间尺度分析

康红普<sup>1,2,3</sup>

(1. 天地科技股份有限公司 开采设计事业部, 北京 100013; 2. 煤炭科学研究总院 开采研究分院, 北京 100013; 3. 煤炭资源高效开采与洁净利用国家重点实验室, 北京 100013)

**摘要:** 论述了煤炭开采与岩层控制研究中涉及到的不同空间尺度, 从全球尺度到煤体中的纳米级微孔隙。包括全球煤炭资源、煤田、矿区与井田、采掘钻空间、岩石力学试验、煤岩组分与结构、支护与加固材料组分及结构的尺度分布。介绍了不同尺度范围内煤炭开采与岩层控制的主要研究内容及研究方法。指出煤炭开采与岩层控制研究的空间尺度集中分布在 $10^{-10} \sim 10^7$  m之间, 跨17个数量级。不同尺度研究的重点内容不同, 研究方法也不同。岩层控制中的一些岩层结构只能出现在一定尺度内。巷道与采场顶板中形成的梁、拱、层、壳等结构的尺度一般为 $10^{-1} \sim 10^2$  m, 远离这些尺度, 岩层结构无法形成。岩层控制研究中, 有些问题, 如软岩遇水软化和膨胀, 煤层的渗透性等必须从微观尺度开始研究; 有些问题, 如研究巷道和采场周围应力场与位移场分布, 一般只需了解煤岩层的宏观物理力学性质即可; 而还有些问题, 如岩石的破裂, 需从微观到宏观不同尺度进行研究。目前, 从宏观、细观到微观的多尺度研究方法已在煤炭开采与岩层控制研究中得到广泛应用, 不同尺度之间的相互联系非常重要。

**关键词:** 煤炭开采; 岩层控制; 空间尺度; 宏观; 微观; 研究方法

中图分类号: TD82; TD32 文献标志码: A 文章编号: 2096-7187(2020)02-3538-26

## Spatial scale analysis on coal mining and strata control technologies

KANG Hongpu<sup>1,2,3</sup>

(1. Coal Mining and Designing Department, Tiandi Science and Technology Co., Ltd., Beijing 100013, China; 2. Coal Mining and Designing Branch, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 3. State Key Laboratory of Coal Mining and Clean Utilization, Beijing 100013, China)

**Abstract:** The various spatial scales involving in coal mining and strata control are discussed in this paper, which are from global scale to nanopore in coal. The scale distributions of global coal reserves, coal field, coal mining area and well field, coal working, driving and boring, rock mechanics tests, composition and structures of coal and rock, and composition and structures of support and reinforcement materials are analyzed. The main research contents and methodologies about coal mining and strata control under various scales are introduced. It is also pointed out that the spatial scales on coal mining and strata control are in the limits of  $10^{-10} \sim 10^7$  m, stepping across 17 orders of magnitude. The different research contents and methodologies depend on the different spatial scales. Some rock structures in strata control can only exist on fixed scales. The spatial scales of rock structures formed in roadways and working faces, such as beam, arch, layer and shell, are generally in the limits of  $10^{-1} \sim 10^2$  m. It's closely related to the formation of rock structures. Different scales are used to study the corresponding problems of rock formation

control. for example, water softening and swelling of soft rocks, permeability of coal must be studied from micro scales; macro physical and mechanical properties are sufficient for studies on stress and displacement distributions around a roadway or working face. However, there are still some problems, such as rock fracturing, which should be studied from both macro and micro scales. At present, the multi-scale methodology from macro, meso to micro scales is widely applied in coal mining and strata control. It is important to connect various scales with each other.

**Key words:** coal mining; strata control; spatial scale; macroscopy; microscopy; methodology

尺度一般表示物体的尺寸,是很多学科的基本概念。尺度涉及3方面的含义:客体(被观察对象)、主体(观察者,通常指人)及时空。本文主要分析空间尺度。

物理学是研究物质结构、物体相互作用和物体运动最一般规律的科学,尺度效应至关重要<sup>[1]</sup>。尺度不同,往往导致相互作用力不同,物质性能及运动规律发生本质变化。物理学研究对象的空间尺度如图1<sup>[2]</sup>所示,大致分为宇观、宏观、介观及微观。宏观物理学以人类自身的大小为尺度,研究人眼能够直接观察到的宏观物体,尺度主要分布在 $10^{-4} \sim 10^3$  m(有的学者认为,宏观尺度的上限为太阳系的尺度,即 $3 \times 10^{16}$  m)。微观物理学研究分子、原子及更深层次各种粒子(原子核、质子、中子、电子、中微子、夸克等),尺度一般为 $10^{-9}$  m(纳米)以下。包括:原子和小分子尺度 $10^{-10} \sim 10^{-9}$  m;原子核尺度 $10^{-15} \sim$

$10^{-14}$  m;夸克和电子尺度 $10^{-18}$  m,直到普朗克长度 $10^{-35}$  m。介观物理学研究介于宏观和微观尺度之间的客体,尺度大致为 $10^{-4} \sim 10^{-9}$  m(有的学者将 $10^{-4} \sim 10^{-6}$  m定义为显微观)。宇观是指包括星团、星系、星系团、超星系团、总星系及遍布宇宙空间的射线和引力场所构成的物质系统。目前,可观测的宇宙边缘距离达到 $10^{27}$  m量级。上述从微观到宇观,物理学研究的空间尺度共跨62个量级。

煤炭开采与岩层控制是研究采煤技术、工艺、装备及岩层移动、破坏和控制的学科,其基础学科为地质学、岩石力学及采矿学等,研究对象从全球煤炭资源分布、区域地质构造与地应力分布、大型煤田与矿区规划、矿井开拓部署、采煤工艺与装备、采场岩层控制、巷道支护、钻孔钻进,到煤岩体矿物成分与组织结构、微孔隙裂隙等,空间尺度从 $10^{-10} \sim 10^7$  m,共跨17个量级,见表1。

本文以空间尺度为主线,介绍煤炭开采与岩层控制在不同尺度范围内的主要研究内容、研究方法和典型实例,分析不同尺度之间的关系。

## 1 全球与煤田尺度

煤炭是在地球上开采,因此,可以认为煤炭开采与岩层控制研究的最大尺度是地球的尺度( $10^7$  m)。煤炭是地球上储量最丰富的化石燃料,但地球上煤炭资源分布很不平衡。通过在全球尺度上分析煤炭资源分布情况,如图2<sup>[3]</sup>所示,发现70%的煤炭资源集中在北半球北纬 $30^\circ \sim 70^\circ$ 之间。其中,亚洲煤炭资源最丰富,占全球地质储量的1/2以上;其次是北美洲,占1/3左右;欧洲煤炭资源较少。

煤炭是由植物经过漫长、复杂的生物化学、物理化学作用而形成的<sup>[4]</sup>。成煤条件包括植物、气候、古地理和地壳运动等。在全球尺度上研究地壳运动、板块构造与煤层赋存条件的关系具有战略意义。

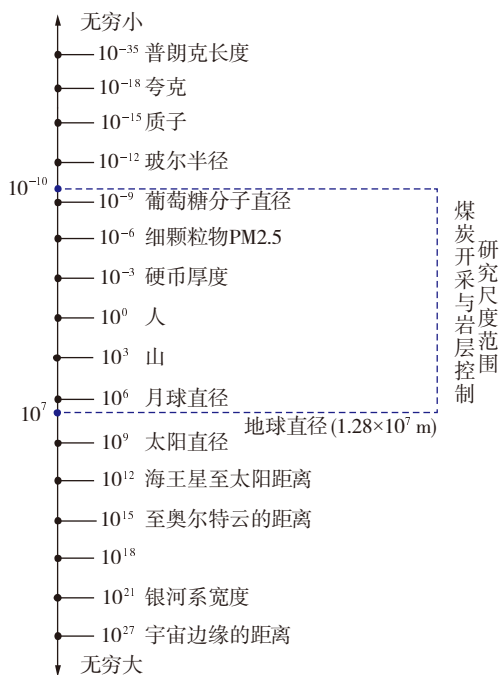


图1 物理学与采矿工程研究的空间尺度分布  
Fig. 1 Spatial scale distribution of physics and mining engineering

表1 煤炭开采与岩层控制空间尺度  
Table 1 Spatial scales of coal mining and strata control

尺度/m	典型实例描述
$10^7$	地球直径,全球尺度,板块构造,全球地应力分布规律
$10^6$	区域大型地质构造,郯庐断裂带,在中国境内延伸超过2 400 km
$10^5$	大型煤田,鄂尔多斯煤田南北长约600 km,东西宽约400 km
$10^4$	矿区,潞安矿区南北长约74.6 km,东西宽约63.1 km
$10^3$	矿井,晋城寺河煤矿东区井田东西、南北尺寸为7~9 km
$10^2$	采煤工作面,工作面长度一般为150~400 m
$10^1$	采场上覆岩层垮落带、裂隙带高度
$10^0$	巷道,巷道宽度一般为3~6 m,高度大多为2~5 m;液压支架高度、宽度;锚杆、锚索长度等
$10^{-1}$	大直径钻孔,大直径瓦斯抽采钻孔直径120~220 mm;实验室煤岩样高度100 mm
$10^{-2}$	中小直径钻孔,直径多为28~92 mm;锚杆、锚索直径为16~25 mm;实验室煤岩样直径50 mm
$10^{-3}$	锚杆螺纹尺寸,锚杆托板、钢带厚度等;极粗砂颗粒直径
$10^{-4}$	肉眼可见的煤岩体裂纹宽度
$10^{-5}$	超细水泥最大粒径,一般<20 $\mu\text{m}$
$10^{-6}$	黏土颗粒尺寸,一般<5 $\mu\text{m}$ ;煤岩中的微米级孔隙
$10^{-7}$	煤孔隙过渡孔尺寸,一般为100 nm~1 $\mu\text{m}$
$10^{-8}$	黏土吸水膨胀的最大层间距离(10 nm)
$10^{-9}$	纳米级孔隙尺寸
$10^{-10}$	极微孔隙尺寸



图2 全球煤炭资源分布<sup>[3]</sup>  
Fig. 2 Global distribution of coal resources<sup>[3]</sup>

张泓等<sup>[5]</sup>分析比较了世界11个主要产煤国家的煤田地质条件得出以下结论:

(1) 位于大型稳定地台(地盾、克拉通地块)的煤田构造简单,而褶皱带或过渡带上的煤田构造复杂;

(2) 我国大陆由众多小型陆块组成,煤盆地容易受挤压发生变形,且遭受后期多次、多方向的构造运动改造,导致我国煤田地质条件,除鄂尔多斯煤盆地外,比美国、澳大利亚、德国、南非及印度等国家的煤田复杂得多;

(3) 对于我国煤田,华南、滇藏地区的煤田构造

条件最复杂,其次是华北地区煤田,之后是东北和西北地区煤田。

煤炭开采、岩层控制与地应力密切相关。地应力是地壳在地质历史过程中,受物理化学、热力学、地质力学等作用不断积累形成的<sup>[6]</sup>。地应力的成因非常复杂,主要与地球的各种动力运动过程有关,包括地心引力、板块边界挤压、地幔热对流、地球旋转、岩浆侵入和地壳不均匀扩容等。在全球尺度上研究地应力形成机制、地应力与地壳运动和板块构造的关系、地应力分布特征,对地球资源开发与地下空间利用具有不可替代的重要作用。

为研究全球现今构造应力分布规律,20世纪90年代启动了“世界应力地图项目”(The World Stress Map project),来自18个国家的30多位科学家参与其中。2008年发布的“世界应力地图数据库”(The World Stress Map database)及“世界应力地图”,包含了21 750个数据<sup>[7-8]</sup>。根据该数据库绘制了世界地应力图,如图3所示,并分析了全球地壳应力分布特征<sup>[9]</sup>。

我国在地壳应力研究方面也做了大量工作,建立了“中国大陆地壳应力环境基础数据库”<sup>[10]</sup>。以地应力数据为依据,以中国大陆地质构造格局及

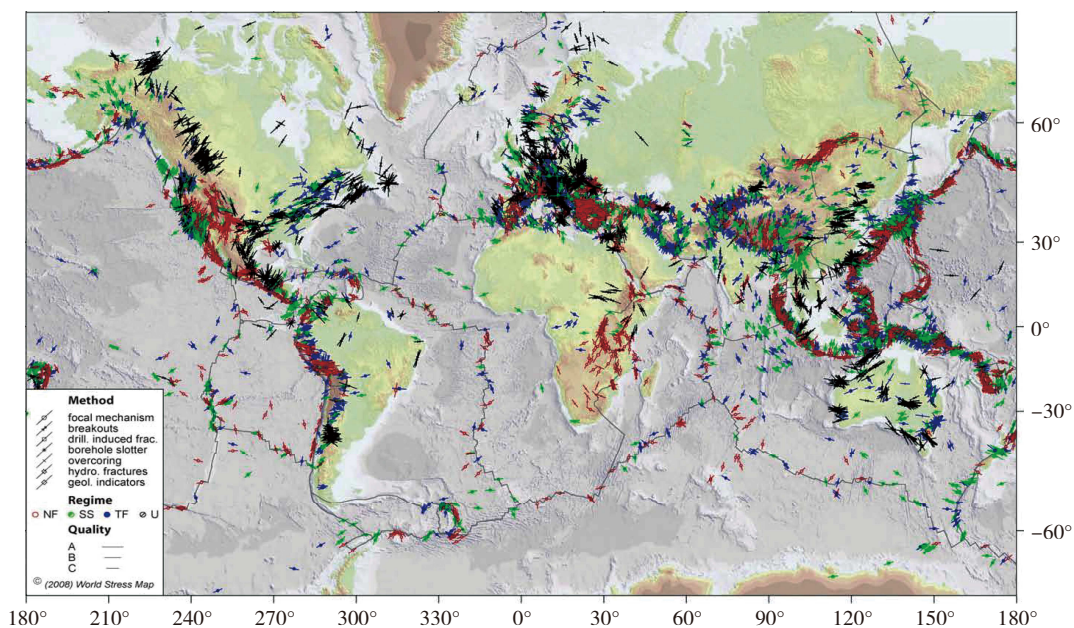


图3 全球地应力图(根据2008年发布的WSM数据库绘制)<sup>[9]</sup>

Fig. 3 Global crustal stress map (after the World Stress Map database release 2008)<sup>[9]</sup>

构造演化为背景,绘制了“中国现代构造应力场图”,并进行了中国大陆地壳应力环境与构造应力分区及分布特征研究<sup>[11]</sup>。这些地应力成果对研究煤田和矿区有重要参考价值。

在煤炭行业,煤炭科学研究总院开采研究分院基于我国煤矿地应力实测数据,建立了“中国煤矿井下地应力数据库”,绘制了分区煤矿地应力图和中国煤矿矿区地应力图,研究了我国煤矿井下地应力分布规律和主要影响因素<sup>[12-14]</sup>。图4为山西省煤矿区井下地应力分布。分析图4可得出:山西煤矿矿区从北到南,最大水平主应力方向出现较大变化。北部矿区最大水平主应力方向为NNE ~ NEE;靠东部与西部偏向NW;在中部、东南部出现了多变的的方向。通过分析地应力测试资料,在山西省全省尺度上(东西宽约290 km,南北长约550 km,总面积 $1.567 \times 10^5 \text{ km}^2$ ),对煤矿区井下地应力分布特征有了比较清楚的了解,对山西煤矿开拓部署、巷道布置等工作有重要指导作用。

大型煤田的尺度一般在 $10^4 \sim 10^5 \text{ m}$ ,表2所列为我国的一些典型煤田。在这个尺度上可进行以下研究工作:

- (1) 勘探煤田中煤炭资源分布情况,煤田煤炭资源储量,煤层赋存形态与地质条件,水文地质条件等;
- (2) 勘探分析煤田中大型地质构造分布情况,测

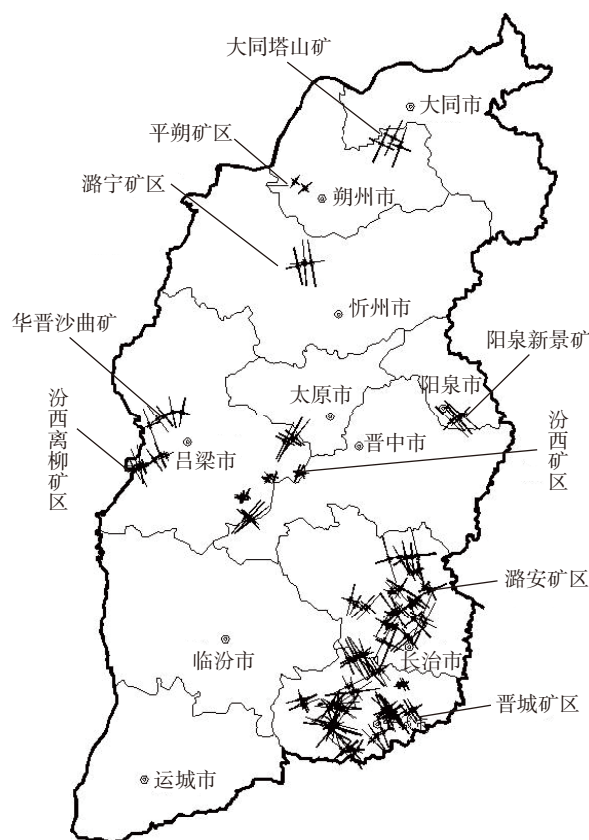


图4 山西煤矿矿区井下地应力分布

Fig. 4 Underground in-situ stress distribution map for Shanxi coal mining fields

试分析煤田地应力总体分布规律;

- (3) 依据煤田地质条件,结合地面条件与设施及国家需求,从空间与时间2个方面规划煤田的开发;

表2 我国典型煤田空间尺度  
Table 2 Spatial scales of typical coal fields in China

序号	煤田名称	尺寸
1	鄂尔多斯煤田	地跨陕、甘、宁、内蒙古、晋5省区,东西宽约400 km,南北长约600 km
2	沁水煤田	山西省中南部,南北长约300 km,东西宽约100 km,面积约 $3 \times 10^4 \text{ km}^2$
3	河东煤田	山西省西部离柳、乡宁等地区,面积约 $1.5 \times 10^4 \text{ km}^2$
4	准东煤田	新疆准噶尔盆地东部,东西长约220 km,南北宽约60 km,面积约 $1.4 \times 10^4 \text{ km}^2$
5	兖州煤田	山东省,跨济宁、邹县、兖州、曲阜、巨野、枣庄等12个县市,面积约3 400 $\text{km}^2$
6	淮南煤田	安徽省,跨淮南、滁县、阜阳等地,长度约100 km,宽度20 ~ 30 km,面积约2 500 $\text{km}^2$
7	大同煤田	山西省北部,跨大同、怀仁、山阴、左云、右玉等5市县,呈椭圆形,面积约1 828 $\text{km}^2$
8	开滦煤田	河北省,跨唐山、滦县、滦南、丰润、丰南等5市县,呈北东向长条状,面积约670 $\text{km}^2$

(4) 划分矿区,优化布局,实现煤田的合理、高效开发。

大型地质构造,如褶皱、断层等的尺度很多在 $10^5 \sim 10^6 \text{ m}$ ,对区域地应力和煤层地质条件产生显著影响。如郯庐断裂带是东亚大陆上的一系列北东向巨型断裂系中的一条主干断裂带。它南起湖北广济,向北穿苏、鲁、皖、渤海湾、东三省入俄罗斯境内,全长达3 600 km,在我国的延伸达2 400  $\text{km}^{[15]}$ 。它切穿我国东部不同大地构造单元,规模宏伟,结构复杂,影响和控制了沿带的主要沉积特征和构造演化。对沿带分布的煤田盆地形态与演化、煤层赋存状态及地质构造产生了显著影响。

又如规模比较小的晋获断裂带,位于山西与河北境内。北起河北省获鹿县,向南经左权、长治至晋城西南<sup>[16]</sup>。总体走向北北东,延伸长度350 km,宽1 ~ 8 km,最大断距达1 000 m。晋获断裂带的构造活动,对沁水煤田东部构造格局形成和演化、煤系赋存状况具有重要的控制作用。晋获断裂带横穿晋城矿区的中部,将矿区分为东西2个不连续含煤区。地应力测量表明,晋获断裂带引起了矿区最大水平主应力方向发生扭转,造成该区域最大水平主应力的显著变化<sup>[17]</sup>。可见,大型地质构造对矿区地应力分布有重大影响。

## 2 矿区与井田尺度

矿区的范围常根据煤炭资源的规模而定,尺度大多在 $10^4 \sim 10^5 \text{ m}$ 。矿区是统一规划和开发的煤田或其中的一部分,包括若干煤矿,有完整的煤炭生产、运输、通讯及生活服务等设施。

我国煤炭开采划分了很多矿区,通常小型煤田由一个矿区开发,大型煤田由数个矿区开采,如在

沁水煤田上就分布有阳泉、潞安、晋城等矿区。随着煤矿开采强度增加及老矿区煤炭资源的枯竭,矿区的开采范围越来越大。很多煤业集团公司跨区域、跨省建设煤矿,使得煤炭开采条件更加复杂化、多样化。

在矿区尺度上可以进行以下研究工作:

(1) 勘探分析矿区煤层赋存形态和空间分布,研究煤系地层构成及物理力学性质,矿区水文地质条件及地形、地物等情况;

(2) 探测分析矿区大型地质构造分布情况,煤岩层结构特征,测试分析矿区地应力大小与方向,研究地应力场分布规律;

(3) 基于矿区煤层地质条件,结合水、电、交通运输、材料设备供应及矿区地面条件,进行合理的矿区开发规划与部署;

(4) 根据矿区煤炭资源分布、大型地质构造、开采技术条件、地面行政区划等情况,合理划分矿井井田,保证井田有合理的尺寸与边界,实现矿区的高效开发。

图5为山西潞安矿区井下地应力分布<sup>[18]</sup>。该矿区位于沁水煤田中段,矿区南北长约74.6 km,东西宽近63.1 km。地应力测试结果表明:潞安矿区地应力总体上水平应力占优势。由于埋深不同及地质构造原因,矿区内各矿地应力场差别较大。受文王山、二岗山、余吾等大断层的影响,矿区最大水平主应力方向从南到北变化较大,构造应力场呈现多变的形态。通过地应力测量,弄清了潞安矿区地应力分布特征与主要影响因素,为矿区的开发布局提供了依据。

划分给一个矿井开采的煤田称为井田,其尺度多为 $10^3 \sim 10^4 \text{ m}$ 。一般小型矿井井田走向长度不小

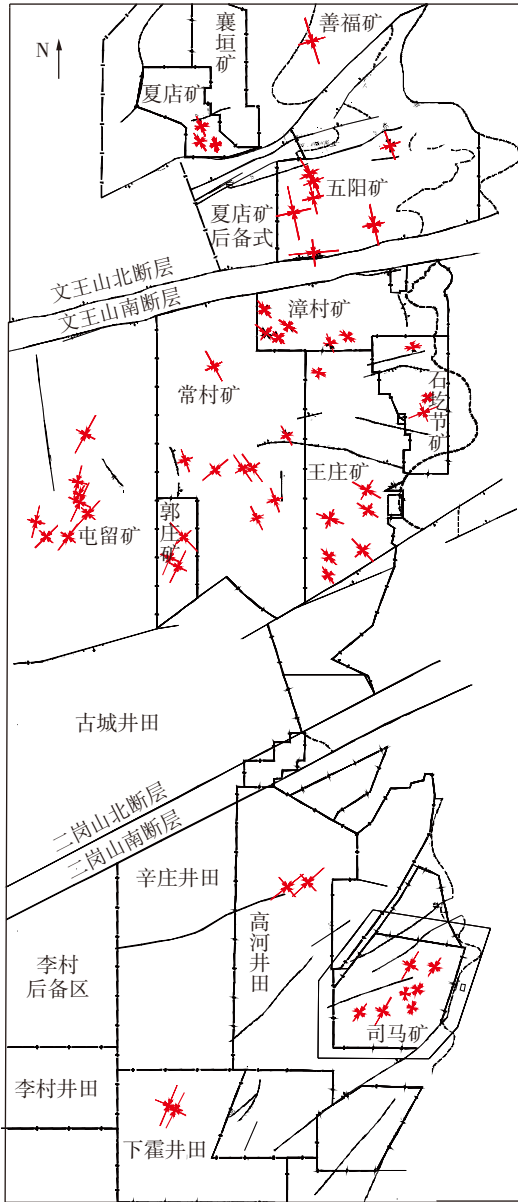


图5 潞安矿区地应力分布

Fig. 5 In-situ stress distribution map in the Lu'an coal mine area

于1 500 m, 中型矿井不小于4 000 m, 大型矿井不小于7 000 m<sup>[19]</sup>。在井田尺度上可以开展以下研究工作:

(1) 根据井田的尺寸、煤层赋存条件、开采技术、地面条件等因素确定矿井生产能力、井型及服务年限;

(2) 井田地质构造探测与分析, 煤岩层物理力学性质与结构特征研究, 地应力测量与井田地应力场分布规律分析;

(3) 进行矿井开拓部署与开采设计, 包括井田开拓方式, 开拓巷道布置, 开拓延伸与技术改造等; 开展准备方式研究及采区设计, 包括采区范围确定,

准备巷道布置及参数, 煤层群开采顺序等; 进行采煤工作面巷道布置, 确定工作面参数;

(4) 选择合理的采煤方法, 确定采煤工艺与装备, 实现工作面快速推进, 保证工作面和矿井的安全、高效开采。

在进行井田开拓与巷道布置时, 应充分考虑地应力对井巷工程稳定性的影响。根据井田地应力大小与方向, 将长度大、工程量大的巷道布置在受力有利的方向具有事半功倍的作用。

晋城寺河矿东区井田东西、南北尺寸为7~9 km。图6为寺河煤矿井田的地应力分布<sup>[17]</sup>。寺河矿主采煤层为3号煤层, 平均厚度为6.34 m, 倾角大多小于5°, 属近水平煤层。实测的地应力以水平应力占优势。在这种条件下, 将巷道轴线沿最大水平主应力方向布置最为有利。对照图6, 提出有利的回采巷道布置方向为: 在井田东区南部与西部、西区南部, 最大水平主应力方向近似EW向, 巷道布置方向应为EW向; 在东区东北部, 最大水平主应力方向近似SN向, 将巷道布置为SN向比较有利。

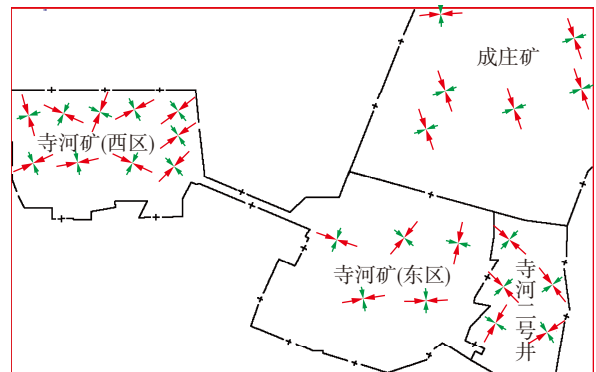


图6 晋城寺河煤矿地应力分布

Fig. 6 In-situ stress distribution map in the Sihe Coal Mine in the Jincheng coal mining area

寺河矿初期开采井田的东区南部, 当时无地应力实测数据, 沿SN向布置工作面巷道, 近似与最大水平主应力方向垂直, 导致部分巷道破坏剧烈、变形量大。之后进行了地应力测量, 根据图6将工作面巷道改为沿EW向布置, 明显改善了巷道应力状态, 使得巷道变形、破坏范围大幅减少, 起到了加强支护无法达到的效果。该实例充分证明了地应力对巷道布置与支护的重要性。

### 3 采掘钻空间尺度

井工煤矿开采需要在井下形成大大小小的空

间,以满足生产、运输、通风、行人等要求。按照空间大小,可分为采煤工作面、巷道和硐室及各种钻孔。

### 3.1 采煤工作面

采煤工作面的空间尺度包括3方面:一是采煤工作面至地表的距离,即埋藏深度,我国井工煤矿开采最浅的埋藏深度仅为几十米,最深为1 501 m,大多在200~1 200 m之间,处于 $10^2 \sim 10^3$  m的量级;二是采煤工作面横向尺度,包括工作面长度、推进长度及煤柱宽度等。工作面长度一般为150~400 m,推进长度从几百米到几千米不等,处于 $10^2 \sim 10^3$  m的量级;煤柱宽度多为3~50 m,处于 $10^0 \sim 10^1$  m的量级;三是采煤工作面纵向尺度,主要是采高。根据煤层厚度的不同,可分为薄煤层(<1.3 m)、中厚煤层(1.3~3.5 m)、厚煤层(3.5~8 m)及特厚煤层(8 m以上)。薄及中厚煤层、较厚煤层采用采煤机一次采全高开采方法;厚及特厚煤层大多采用放顶煤开采方法。目前,薄煤层的最小采高为0.6 m,特厚煤层综放开采的采高达20 m。但大多工作面采高在1.5~10 m之间,处于 $10^0 \sim 10^1$  m的量级。在工作面尺度上,主要研究以下内容:

(1) 采煤工作面巷道布置与参数优化,煤柱设计与优化;

(2) 采煤工艺选择,采煤装备(液压支架、采煤机及输送机)的选型、结构及参数设计;

(3) 采场岩层运动、破断规律及岩层结构特征,采煤工作面周围应力分布规律及影响范围;

(4) 液压支架与围岩相互作用关系,确定支架合理的支护强度。

采用的研究方法主要有:

(1) 理论分析。根据采煤工作面围岩条件,进行必要的简化,建立力学模型,提出假说,推导出力学公式,采用相关力学理论研究岩层运动、破坏与结构特征,围岩应力分布,支架与围岩相互作用原理,以指导岩层控制工程实践。

(2) 模拟研究。包括数值模拟和物理模拟。数学模拟计算灵活方便,随着计算机技术的快速发展及数值计算软件的多样化,应用越来越广泛和富有成效;物理模拟,可按一定比例模拟原型,能直观反映岩层运动与破坏过程。2种方法配合原型研究,是解决岩层控制问题的有效途径。

(3) 现场监测。在井下布置测点,监测岩层运动、破坏及应力分布情况,支护体受力,通过实测数据分析矿压规律,检验理论与模拟研究结果的可靠性。

已有的研究成果表明,从纵向分析,长壁工作面上覆岩层运动和破坏状况,如图7<sup>[20]</sup>所示。煤层开采后,从直接顶到地面的所有上覆岩层均会受到不同程度的采动影响。至下而上形成3个区域:冒落带、裂隙带及弯曲下沉带。同时,工作面开采引起的岩层移动会波及到地面,在地面形成沉陷盆地。冒落带厚度一般为采高的2~8倍,裂隙带厚度一般为采高的30~50倍。以采高4 m计算,冒落带、裂隙带的厚度分别为8~32,120~200 m,处于 $10^0 \sim 10^2$  m的量级。

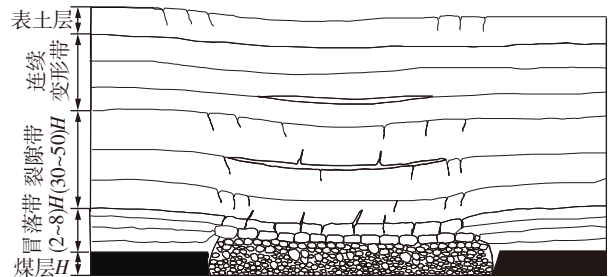


图7 长壁工作面开采上覆岩层运动和破坏示意<sup>[20]</sup>

Fig. 7 Movement and broken diagram for rock layers overlying a longwall coal working face<sup>[20]</sup>

在采煤工作面附近,岩层在运动、破坏过程中,会形成各种结构,如压力拱、悬臂梁、铰接岩梁、砌体梁<sup>[21]</sup>及传递岩梁<sup>[22]</sup>等结构,且随着工作面的推进不断移动、变化。这些结构的跨度一般从十几米到数十米不等,处于 $10^1$  m的量级。

从横向分析,采煤工作面的影响范围较大,其周围应力分布如图8<sup>[23]</sup>所示。对于正常尺寸的工作面,超前支承压力影响范围可从数米到上百米;侧向支承压力影响范围也可达数米到数十米。对于长度300 m、推进长度3 000 m的工作面,采动影响范围可达500 m×3 200 m,处于 $10^2 \sim 10^3$  m的量级。当相邻多个工作面开采后,采动影响范围会成倍增加。

工作面采煤设备包括采煤机、输送机和液压支架(图9)。液压支架是工作面岩层控制的核心设备。通过研究液压支架与围岩在强度、刚度、稳定性等方面的相互作用关系,可确定合理的架型与参数<sup>[24]</sup>。

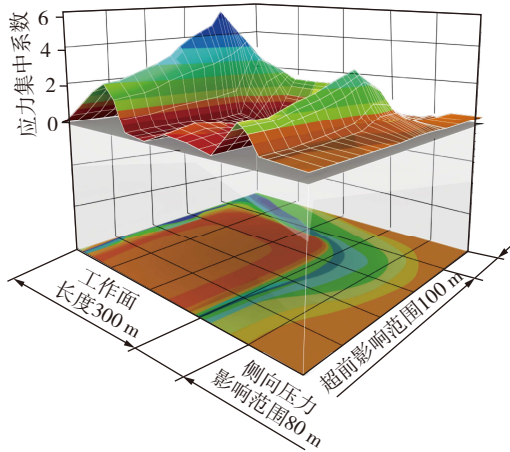


图8 采煤工作面周围应力分布

Fig. 8 Stress distribution around a longwall coal working face



图9 工作面采煤设备布置

Fig. 9 Coal mining equipment in a working face

表3是7 m超大采高液压支架及构件的几何参数<sup>[25]</sup>。可见,液压支架的主要几何参数在 $10^0$  m的量级。

表3 ZY18800/32/72D型液压支架几何参数

Table 3 Shield parameters of type ZY18800/32/72D

参数	数值
支架高度/mm	3 200 ~ 7 200
支架宽度/mm	1 960 ~ 2 210
支架中心距/mm	2 050
顶梁长度/mm	4 894
掩护梁长度/mm	4 418
护帮板长度/mm	3 200
质量/t	69.79

物理模拟是研究采煤工作面岩层控制问题比较直观的方法。图10为模拟晋城寺河煤矿大采高工作面顶板岩层垮落的模拟结果<sup>[26]</sup>,其中,物理模拟模型尺寸(长×高×宽)为 $5.0\text{ m}\times 1.85\text{ m}\times 0.4\text{ m}$ ,几何相似比为40,模拟真实岩层范围为 $200\text{ m}\times 74\text{ m}\times 16\text{ m}$ 。由图10看出,在物理模型尺度上,可直观展示顶板岩层垮落形态。

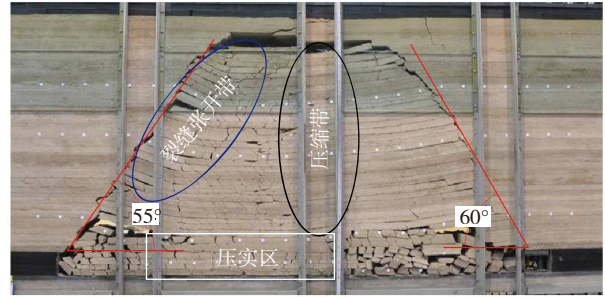


图10 采煤工作面顶板岩层垮落状态的物理模拟

Fig. 10 Collapse pattern of roof strata overlying a working face in a physical model

### 3.2 掘进工作面与巷道及硐室

井工煤矿开采需要在井下开掘大量巷道,巷道的类型多种多样。按用途可分为大巷、准备巷道及回采巷道。巷道轴线方向的尺寸远大于断面尺寸,可当作平面应变问题研究。硐室是空间3个方向尺寸相差不大的巷道,包括变电所、水泵房、火药库、输送机头硐室等。

巷道断面有矩形、梯形、拱形、圆形等形状,尺度大多在 $10^0$  m的量级。巷道宽度一般为3~6 m(开切眼宽度较大,一般为6~10 m),高度2~5 m。在巷道断面尺度上,主要有以下研究内容:

- (1) 巷道断面形状与尺寸优化;
- (2) 巷道围岩应力分布特征,围岩变形与破坏机理;
- (3) 巷道围岩与支护相互作用关系,提出合理的支理论;
- (4) 巷道支护形式与参数选择;
- (5) 巷道施工工艺与装备;
- (6) 巷道矿压监测与分析反馈。

采用的研究方法与采煤工作面类似,包括理论分析、物理模拟试验、数值模拟及井下实测等。

图11为经典的在连续、均质、各向同性介质中开挖圆形巷道后,围岩应力分布与分区状况。从应力分布划分,可分为应力降低区、应力升高区、原岩应力区;从变形破坏划分,可分为破碎区、塑性区、弹性区及未扰动区。

巷道开挖引起的应力扰动区,从弹性力学分析,可达到5倍巷道半径。当巷道围岩出现破碎区、塑性区时,扰动范围更大,甚至超过10倍巷道半径。若巷道半径为2 m,应力扰动范围可达10~20 m,处于 $10^1$  m的量级。破碎区、塑性区半径因巷道条件不同,差别很大。董方庭等<sup>[27]</sup>根据松动圈对

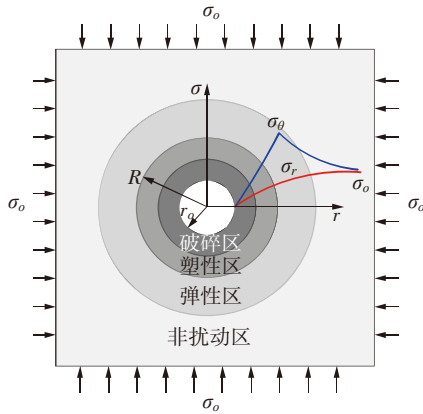


图11 圆形巷道围岩应力分布及弹塑性分区

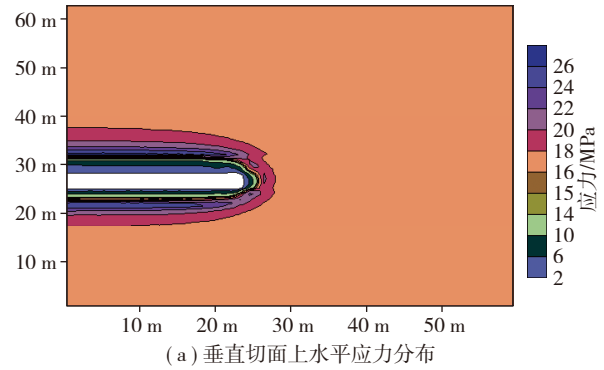
Fig. 11 Stress distribution and elastoplastic zoning around a circular roadway

围岩进行分类:稳定及较稳定围岩松动圈 $<1\text{ m}$ ;一般围岩松动圈 $1\sim 2\text{ m}$ ;不稳定围岩松动圈 $2\sim 3\text{ m}$ ;极不稳定围岩松动圈 $>3\text{ m}$ 。可见,对于一般及不稳定巷道围岩,破碎范围尺度在 $10^0\text{ m}$ 的量级。

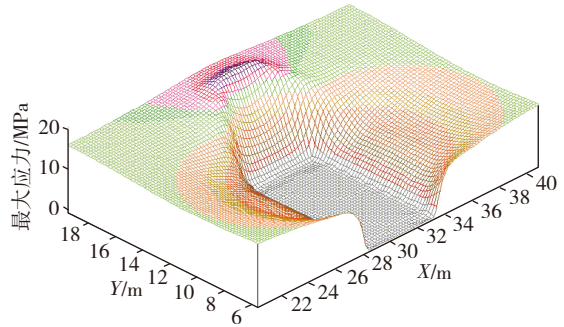
掘进工作面周围不能简化为平面应变问题,应采用三维空间方法研究。图12为采用FLAC3D数值模拟软件计算得出的晋城寺河矿回采巷道掘进工作面周围应力分布状况<sup>[28]</sup>。掘进工作面开挖后,对原岩应力场产生扰动。在掘进工作面前方相当于巷道宽度的距离处,围岩应力开始发生变化,围岩位移开始增加。在工作面附近应力变化最为剧烈,顶板下沉量达到总下沉量的 $1/3$ 以上;在掘进工作面前方 $1.5$ 倍巷道宽度的距离后,围岩应力与位移变化趋于稳定,接近于平面应变巷道围岩状况。掘进工作面前后的影响范围在 $10^0\sim 10^1\text{ m}$ 的量级。

硐室是矿井的重要组成部分,其断面几何尺寸一般比巷道大,围岩稳定性分析也应采用三维空间方法。图13为潞安屯留矿副井井底车场硐室群围岩应力分布<sup>[29]</sup>。硐室最大宽度为 $7.5\text{ m}$ ,最大高度达 $5.7\text{ m}$ 。硐室开挖后,两帮出现应力集中,集中区域沿垂直硐室轴线方向延伸到约 $2$ 倍的硐室宽度。在硐室交叉处和拐角处,应力集中进行 $2$ 次叠加,应力集中范围更大。硐室围岩出现不同程度的剪切或拉伸破坏。由于硐室群几何尺寸大、距离近、相互影响,导致其应力扰动区、围岩破坏范围均比同条件下的巷道大。

巷道支护包括金属支架、锚杆支护、砌碇、喷射混凝土等形式。金属支架一般由工字钢、U型钢制成<sup>[30]</sup>。我国煤矿常用的工字钢型号为 $9, 11, 12$ 号,



(a) 垂直切面上水平应力分布



(b) 最大主应力分布

图12 掘进工作面附近应力分布

Fig. 12 Stress distribution around a heading face

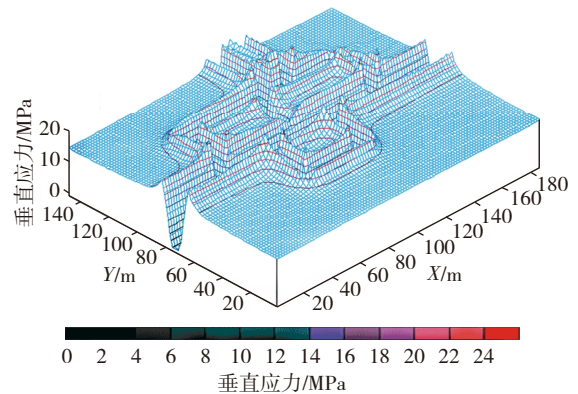


图13 屯留矿副井井底车场垂直应力分布

Fig. 13 Stress distribution around an underground station around the auxiliary shaft in Tunliu Coal Mine

其断面高度分别为 $90, 110, 120\text{ mm}$ ,最大宽度分别为 $76, 90, 95\text{ mm}$ 。U型钢型号有U18、U25、新型U25、U29、U36,其断面高度分别为 $100, 110, 118, 121, 138\text{ mm}$ ,最大宽度分别为 $122, 134, 141, 151, 171\text{ mm}$ 。刚性金属支架顶梁、柱腿一般与巷道宽度、高度相当;可缩性金属支架多由 $3\sim 5$ 节支架和连接件构成,支架节的长度一般在 $2.0\sim 3.5\text{ m}$ 之间。锚杆支护构件如图14<sup>[31]</sup>所示,其尺度见表4。可见,除个别支护构件长度方向的尺寸外,支护构件的尺寸大多处于 $10^{-3}\sim 10^0\text{ m}$ 的量级。在该尺度上,可开展以下研究工作:

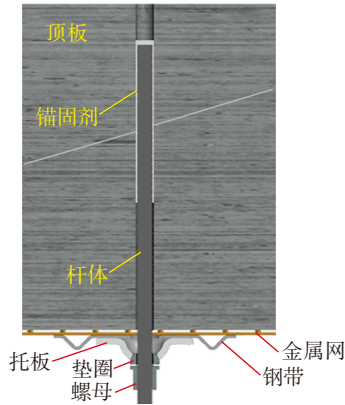


图14 锚杆支护构件

Fig. 14 Rock bolting components

表4 锚杆支护构件几何参数

Table 4 Geometric sizes of rock bolting components

尺度/m	锚杆支护构件及参数
$10^1$	长度超过10 m的长锚索、锚索束
$10^0$	锚杆长度(一般为1.5~3.0 m), 锚索长度(多为4~9 m), 钢筋托梁和钢带长度(多为2.5~5.5 m), 金属网尺寸; 锚杆间排距(1 m以上)
$10^{-1}$	锚杆、锚索托板长度、宽度与高度, 钢带宽度, 树脂锚固剂长度; 锚杆间排距(1 m以下)
$10^{-2}$	锚杆直径, 螺纹钢横肋间距, 锚索直径, 托梁钢筋直径, 锚杆托板厚度(10 mm以上), 锚索托板厚度, 螺母、球形垫圈尺寸, 树脂锚固剂直径
$10^{-3}$	锚杆托板厚度(10 mm以下), 钢带厚度, 螺纹螺距与齿高, 螺纹钢横肋宽度与高度, 钢绞线钢丝直径, 金属网铁丝、钢筋直径

(1) 支护构件形状、尺寸及材质优化;

(2) 支护构件在不同受力状态下的力学性能测试与分析;

(3) 支护构件相互匹配性研究, 以提高支护系统的整体支护能力;

(4) 支护构件与围岩之间力学传递机制, 相互作用机理;

(5) 支护构件受力、变形及破坏的井下监测与分析。

采用的研究方法包括实验室试验、优化设计、材料分析、数值模拟及井下实测等。

巷道表面位移、顶板离层及深部位移是井下监测的重要内容。煤矿巷道类型很多, 围岩位移的变化幅度很大。如回采巷道表面位移从几十毫米到几米不等。图15为晋城赵庄矿一回采巷道围岩表面位移曲线, 两帮移近量达1.5 m<sup>[32]</sup>。有的大变形巷道累计底臃量甚至超过巷道高度。顶板离层从几毫米到几百毫米不等。可见, 巷道位移在 $10^{-3}$ ~ $10^0$  m的量级。

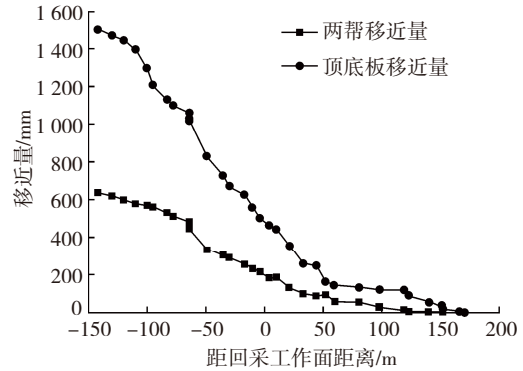


图15 晋城赵庄矿33012巷表面位移曲线

Fig. 15 Convergence curves of entry 33012 in Zhaozhuang Coal Mine in Jincheng coal mining area

### 3.3 钻孔

在煤炭开采过程中, 需要施工大量钻孔。按照用途划分有: 地质勘探钻孔、瓦斯抽采钻孔、探放水钻孔、钻爆法钻孔、锚杆锚索钻孔、注浆钻孔、水力压裂钻孔及各种测试钻孔等。

地质勘探钻孔大多是垂直地表向下钻进的钻孔, 有时也采用斜孔、水平孔。根据地质任务不同可分为探煤孔、构造孔、水文孔、取样孔、井筒检查孔等<sup>[4]</sup>。钻孔的深度根据需要确定, 从数十米、数百米到上千米; 钻孔开孔直径一般比较大, 正常段直径多数小于100 mm, 如91, 76, 56 mm等规格。在特殊情况下需要取大尺寸样品时, 可采用大孔径, 如150~300 mm, 甚至更大。可见, 地质勘探钻孔直径在 $10^{-2}$ ~ $10^{-1}$  m的量级。

瓦斯抽采钻孔分地面和井下施工的钻孔。地面钻孔深度根据储层的位置确定, 钻孔直径一般是变化的, 上大下小。图16为淮南矿区地面抽采瓦斯钻孔结构<sup>[33]</sup>, 钻孔直径从上到下分别为295, 216, 152, 94 mm。井下瓦斯抽采钻孔, 按深度可为浅孔(<300 m)、中深孔(300~500 m)和深孔(>500 m)。按钻孔直径分, 常规瓦斯抽采钻孔直径一般小于100 mm, 大直径钻孔孔径不小于150 mm<sup>[34]</sup>。水平长钻孔孔径有113, 133, 153和193 mm等规格。可见, 瓦斯抽采钻孔直径在 $10^{-2}$ ~ $10^{-1}$  m的量级。

煤矿岩石巷道大多采用钻爆法施工, 需要钻孔、装药、爆破。钻孔直径一般在30~45 mm, 配用炸药药卷直径为25~35 mm<sup>[35]</sup>。采用气腿式凿岩机时, 钻孔深度一般为1.8~2.5 m; 采用凿岩台车时, 钻孔深度可达3 m以上。

锚杆、锚索是煤矿巷道的主体支护方式, 需要

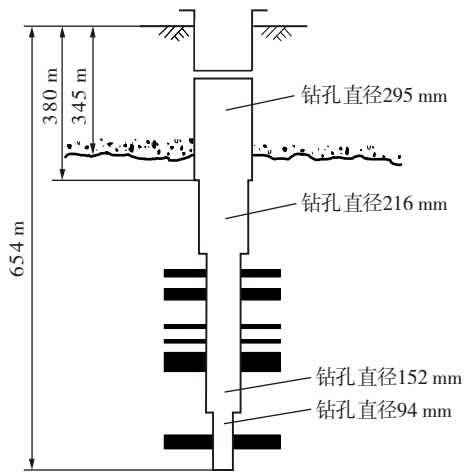


图16 淮南矿区地面抽采瓦斯钻孔结构<sup>[33]</sup>

Fig. 16 Structure of borehole for draining methane from surface in Huainan coal mining area<sup>[33]</sup>

在巷道围岩中施工钻孔。保守的估计,我国煤矿每年施工的锚杆、锚索钻孔累计长度达 $4 \times 10^9$  m左右。锚杆钻孔的直径在28 ~ 43 mm之间,尤以28 ~ 33 mm为多见<sup>[36]</sup>,钻孔深度为1.5 ~ 3.0 m;单体锚索钻孔直径在28 ~ 35 mm之间,主要为28 ~ 30 mm,钻孔深度一般为4 ~ 9 m;锚索束钻孔直径一般在50 mm以上,随着钢绞线数量增加,钻孔直径可达100 mm以上。钻孔深度可从十米到数十米。

注浆是破碎围岩加固的有效技术措施,钻孔是必不可少的环节。根据注浆施工地点与规模的不同,钻孔尺寸也有较大差别<sup>[37]</sup>。从地面注浆一般钻孔深度大、注浆规模大,要求的钻孔直径也比较大。钻孔开口直径可超过200 mm,正常段的直径可达120 ~ 150 mm。在井下巷道周围注浆,钻孔比较浅,从几米到几十米,直径也比较小,常用的钻孔直径有42, 56, 75, 91 mm等。

水力压裂技术在煤矿围岩控制与低渗透煤层增透等领域已得到比较广泛的应用。在围岩控制方面,主要用于回采工作面坚硬难垮顶板控制、高应力巷道围岩卸压及冲击地压防治<sup>[38-39]</sup>。水力压裂实施前需要钻孔,分地面钻孔和井下钻孔。地面钻孔类似地面瓦斯抽采钻孔,孔径大、深度大。如在大同塔山矿地面进行的水力压裂,钻孔深度为443 m,开口孔径311 mm,正常段孔径216 mm。井下压裂一般在巷道中实施,钻孔浅(20 ~ 50 m)、孔径小(56, 75, 91 mm等)。

在井下进行各种测试与试验时,经常需要打钻孔。进行地应力测量,采用应力解除法时,应先钻

进大孔(孔径130 ~ 150 mm),再钻进小孔(孔径36 ~ 38 mm),在小孔中安装探头,然后套孔测量;采用水力压裂法时,应根据测试仪器的尺寸钻进相应孔径的钻孔,常用的孔径有56, 75, 91 mm。进行钻孔结构观察时,钻进合适的钻孔是必要条件。图17为采用数字全景钻孔摄像系统在潞安漳村矿巷道顶板钻孔的观察图像<sup>[40]</sup>。钻孔直径56 mm、深度10 m,可清晰地观察到裂隙的位置、分布特征,以及间距、倾角、张开度等参数。另外,采用锚杆、锚索钻孔(28 ~ 32 mm)可进行大量、常规化的钻孔结构观察。在井下钻孔中进行煤岩体强度、变形模量等力学参数测试,也需要根据探头的直径,钻进配套的钻孔。

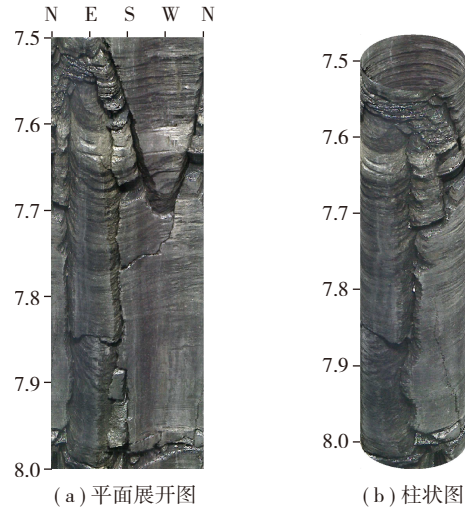


图17 漳村矿巷道顶板结构观测图像

Fig. 17 Borehole camera images of roadway roof in Zhangcun Coal Mine

矿压监测需要在井下安装仪器,很多需要钻孔。如顶板离层指示仪,安装孔直径28 ~ 32 mm,深度5 ~ 8 m;深部多点位移计、钻孔应力计的安装孔直径多为42 ~ 56 mm。

综上所述,煤矿钻孔的尺度在 $10^{-2} \sim 10^{-1}$  m的量级,在这个尺度上,采用的研究方法 with 巷道类似,主要区别是巷道人可以到达,进行肉眼观察和仪器观测;钻孔人无法进入,只能借助各种仪器、设备进行观测。在钻孔尺度上可开展以下研究工作:

- (1) 钻头与围岩相互作用关系,破岩机理,以提高钻孔质量与钻进速度;
- (2) 钻孔结构与断面尺寸优化设计;
- (3) 钻孔结构观察,结构面(节理、层理、裂隙及裂纹)分布特征分析,进而推断钻孔周围煤岩体的结构特征;

(4) 钻孔周围应力、位移分布与破坏范围, 钻孔的稳定性, 塌孔机理与影响因素分析;

(5) 钻孔安设套管时, 钻孔与套管的相互作用机理, 套管材质与参数的设计。

#### 4 岩石力学试验尺度

岩石力学试验是了解岩石物理力学性能, 测定物理力学参数, 为岩石力学研究与工程提供基础数

据的重要方法与途径。

岩石力学试验按试验场所可分为实验室试验与井下原位试验。实验室试验是从井下采集煤岩样品, 然后加工成试件, 进行各种物理力学性能与指标试验。表5为常规的岩石物理力学性质实验室试验样品尺寸<sup>[41]</sup>, 除压缩试件高度、弯曲试件长度达到或超过100 mm外, 其他试件尺寸均在 $10^{-2}$  m的量级。

表5 测试岩石物理力学性质的实验室试验样品尺寸

Table 5 Sample sizes for testing rock physical and mechanical properties in laboratory

序号	试验内容	样品尺寸
1	块体密度	试件可采用圆柱体、方柱体、立方体, 最小尺寸不小于50 mm
2	吸水性	规则试件要求同上。不规则试件边长40 ~ 60 mm的浑圆状岩块
3	膨胀性	自由膨胀率试验: 圆柱体, 直径48 ~ 54 mm, 高度等于直径; 正方体, 边长48 ~ 65 mm。侧向约束膨胀率和膨胀压力试验: 直径50 ~ 65 mm, 高度不小于20 mm
4	单轴和三轴压缩	圆柱体试件直径48 ~ 54 mm, 高度与直径比2.0 ~ 2.5
5	抗拉强度	圆柱体试件直径48 ~ 54 mm, 厚度与直径比0.5 ~ 1.0
6	直剪试验	试件直径与边长不小于50 mm, 高度与直径、边长相等
7	弯曲试验	试件为长方体, 常用尺寸为50 mm × 50 mm × 250 mm
8	点载荷	不规则块体试件, 尺寸宜为50 mm ± 35 mm

除常规岩石力学试验外, 还加工一些特殊的试件进行专门的试验。如在实验室进行应力解除法地应力测量试验, 为了满足边界条件, 要求试件尺寸一般不小于300 mm × 300 mm × 300 mm<sup>[42]</sup>。进行室内水力压裂试验时, 为了更真实地研究裂缝的扩展规律及影响因素, 煤岩试件的尺寸不断增加<sup>[43]</sup>, 从300 mm × 300 mm × 300 mm到500 mm × 500 mm × 500 mm, 个别试件尺寸达到1 000 mm左右。

现场原位测试在井下煤岩体中进行, 在实际井下地质环境中测试, 而且试件和测试范围较大, 能够考虑非均质性、各向异性、结构面等多种因素, 测试结果更接近岩体。

承压板试验要求板的直径或边长不小于300 mm, 试点中心至巷道帮或顶底板的距离应大于承压板直径或边长的2倍; 至临空面的距离应大于承压板直径或边长的6倍; 试点表面以下3倍承压板直径或边长深度范围内的岩体性质应相同。岩体(结构面)直剪试验要求试件底部剪切面(结构面)面积不小于250 000 mm<sup>2</sup>, 试件最小边长不小于500 mm, 试件高度应大于推力方向试件边长的1/2。岩体的压缩试验分单轴压缩与三轴压缩, 试件制作的要求与岩体直剪试验基本相同。长江科学院曾采用尺寸为2 800 mm × 1 400 mm × 2 800 mm的

试体进行压缩试验<sup>[44]</sup>。BIENIAWSKI<sup>[45-46]</sup>在南非煤矿井下进行过不同尺寸的煤试体原位单轴压缩试验。小尺寸试体边长仅为75 mm; 中尺寸试体边长为460 mm; 大尺寸立方体试体边长达2 m。可见, 现场原位试验试体的尺寸一般在 $10^{-1}$  ~  $10^0$  m的量级。

井下原位试验试体的力学性能与试体的尺寸有很大关系。BIENIAWSKI<sup>[45]</sup>总结分析了不同尺寸煤试体的试验结果, 得出如图18所示的曲线。随着试体边长增加, 单轴抗压强度不断降低。当边长增加到1.5 m时, 曲线趋于稳定。该值称为临界尺寸, 大于该尺寸后, 继续增加试体尺寸, 煤体强度将保持恒定。

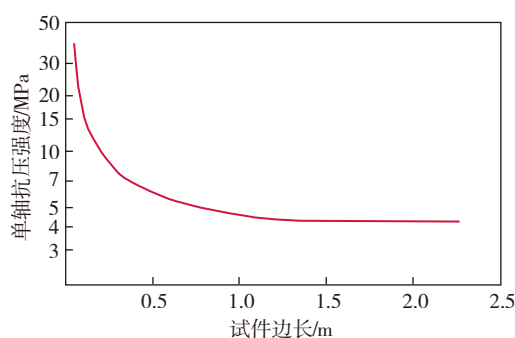


图18 煤体强度的尺寸效应<sup>[45]</sup>

Fig. 18 Effect of specimen size on strength of coal<sup>[45]</sup>

## 5 煤岩组分与结构的尺度

### 5.1 岩石颗粒尺度

煤系地层主要是沉积岩。沉积岩可分为碎屑岩和化学岩。碎屑岩又分为砾岩、砂岩、粉砂岩、黏土岩;化学岩主要是石灰岩。碎屑岩的结构包括碎屑颗粒的结构、杂基和胶结物的结构、孔隙的结构及其空间组合关系。碎屑颗粒的结构特征包括粒度、球度、形状、圆度及颗粒的表面结构<sup>[47]</sup>。表6为碎屑颗粒粒度分级。砾岩类岩石主要由2 mm以上的岩石碎屑组成;砂岩类岩石由50%以上的0.05 ~ 2 mm的岩石碎屑组成,按粒度大小可进一步分为极粗砂岩(1 ~ 2 mm)、粗砂岩(0.5 ~ 1 mm)、中砂岩(0.25 ~ 0.5 mm)及细砂岩(0.1 ~ 0.25 mm);粉砂岩类岩石由50%以上的0.005 ~ 0.1 mm的岩石碎屑组成,进一步分为粗粉砂岩(0.05 ~ 0.1 mm)和细粉砂岩(0.005 ~ 0.05 mm);黏土岩类岩石,包括泥岩、页岩,主要由小于0.005 mm的碎屑、黏土矿物及胶体物质组成。

表6 碎屑颗粒粒度分级

Table 6 Gradation of clastic grain sizes

粒级划分	颗粒直径/mm	尺度/m
砾	>2	10 <sup>-3</sup> 及以上
砂	极粗砂	1 ~ 2
	粗砂	0.5 ~ 1
	中砂	0.25 ~ 0.5
	细砂	0.1 ~ 0.25
粉砂	粗粉砂	0.05 ~ 0.1
	细粉砂	0.005 ~ 0.05
黏土	<0.005	10 <sup>-6</sup> 及以下

神东矿区粉砂岩、细砂岩、中砂岩颗粒尺寸的测试结果如图19<sup>[48]</sup>所示。粉砂岩粒径约2/3分布在40 ~ 80 μm之间,平均为62.2 μm;细砂岩粒径主要分布在80 ~ 160 μm之间,平均为135.6 μm;中砂岩粒径集中在200 ~ 400 μm之间,平均为313.8 μm。从粉砂岩到中砂岩,颗粒粒径成倍增大。

在碎屑岩的颗粒间隙之间,充填有杂基和胶结物等物质。杂基是以机械方式沉积下来的细粒组分,粒度一般小于0.03 mm,以泥为主,也可含部分细粉砂。胶结物是以化学沉淀方式形成的物质,主要为硅质、碳酸盐等。

黏土矿物是具有层状或链状结晶格架的铝硅酸盐,由硅氧四面体和铝氧八面体2个主要部分组

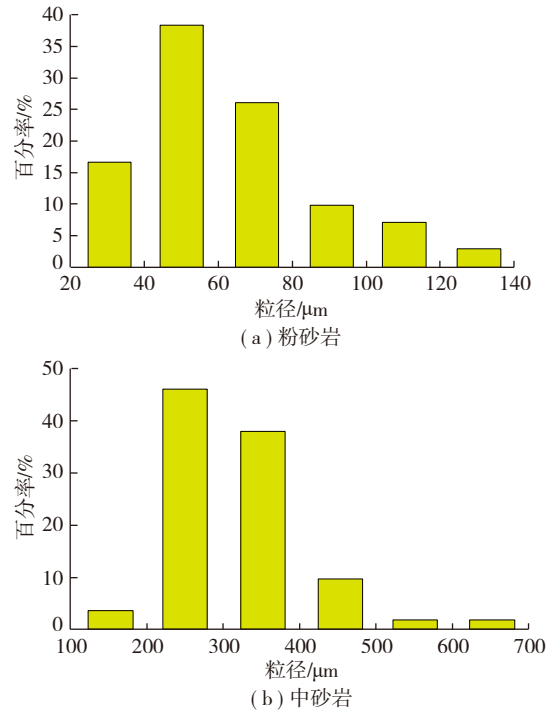


图19 神东矿区岩石颗粒粒径分布<sup>[48]</sup>

Fig. 19 Distribution of rock particle sizes in Shendong coal mining area<sup>[48]</sup>

成。由这两种基本单元的不同组合,形成高岭石、伊利石、蒙脱石等矿物<sup>[49]</sup>。高岭石晶体结构的晶格常数为 $a=5.15 \text{ \AA}$ ,  $b=8.94 \text{ \AA}$ ,  $c=7.40 \text{ \AA}$ ;蒙脱石晶体结构的晶格常数为 $a=5.18 \text{ \AA}$ ,  $b=8.98 \text{ \AA}$ ,  $c=15.00 \text{ \AA}$ 。由于蒙脱石层间域较大,层间含水和一些交换阳离子,导致蒙脱石吸水后有较大的膨胀性。

黏土矿物表面结构及化学反应研究尺度可从亚埃级的羟基团相互作用到1 μm近颗粒大小的级别<sup>[50-51]</sup>,如图20所示。尺度可分为3个等级:一是氢原子大小(0.1 nm);二是黏土与有机质、水发生相互作用的距离,及黏土吸水膨胀的最大层间距离(10 nm);三是黏土颗粒和聚集体的尺寸。但从根本上,纳米级尺度的相互作用决定了黏土矿物的特性。因此,研究黏土岩的物理、化学、力学特性,遇水软化、崩解、膨胀特性,必须研究黏土岩的微结构及变化。

### 5.2 岩石孔隙尺度

岩石是一种天然的多孔材料,其内部含有大量不规则、跨尺度的孔隙,这些孔隙直接影响着岩石的宏观物理、力学和化学性质,如强度、弹性模量、渗透性、电导率、波速、岩石储层产能等。探明孔隙结构与岩石宏观物理力学性质之间的内在关系,对于解决石油、地质、采矿、冶金、土木和水利工程中

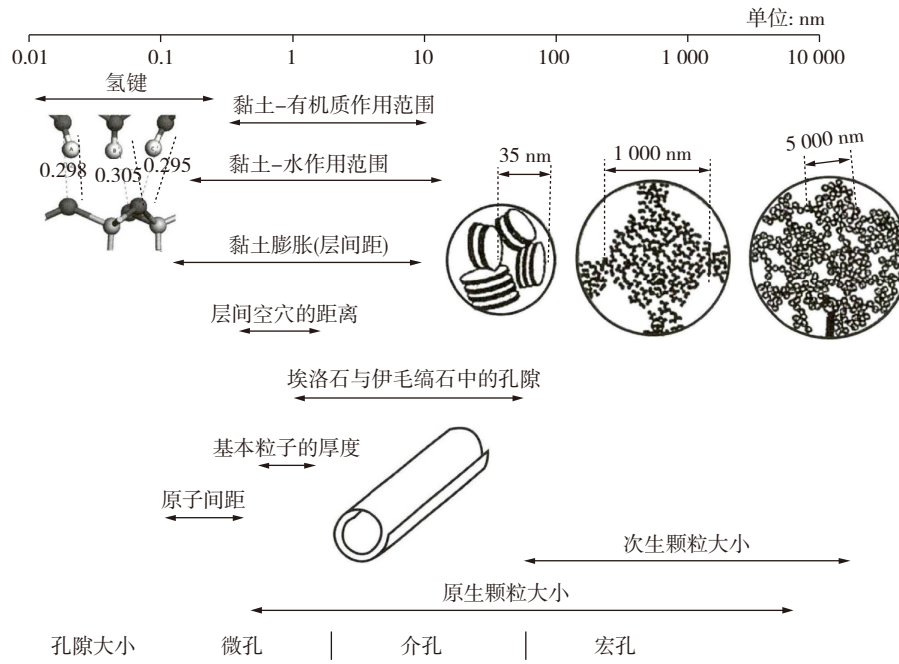


图20 黏土矿物结构及表面化学作用的尺度<sup>[50]</sup>

Fig. 20 Length scales associated with the structure and surface chemistry of clay minerals<sup>[50]</sup>

的实际问题具有十分重要的意义。

在碎屑岩中存在大量孔隙,其间可充填甲烷、二氧化碳及水等气体和液体。孔隙可分为原生孔隙和次生孔隙。原生孔隙是碎屑颗粒原始粒间孔隙;次生孔隙是成岩中后期,岩石组分发生溶解、收缩、挤压破碎等作用形成的裂隙、裂纹。

对新疆哈密矿区侏罗系弱胶结砂岩的孔隙度及孔隙结构测试结果表明<sup>[52]</sup>:砂岩孔隙度高达21.8%~34.5%。孔隙直径主要分布在0.1~10 μm之间,小孔与微孔较少(图21)。

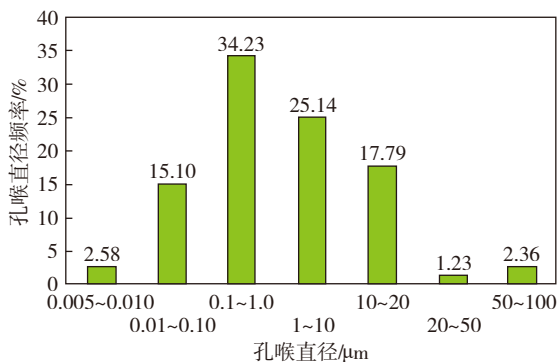


图21 哈密矿区弱胶结砂岩孔隙直径分布<sup>[52]</sup>

Fig. 21 Pore size distribution of sandstone with weak cementation in Hami coal mining area<sup>[52]</sup>

神东矿区顶板岩石孔隙尺寸分布特征<sup>[48]</sup>为:粉砂岩孔隙直径主要分布在25~45 μm之间;细砂岩孔隙直径超过1/2分布在50~110 μm之间;中粒砂岩

孔隙集中分布在50~150 μm之间。从粉砂岩到中砂岩,孔隙直径显著增大。

对于黏土岩孔隙尺寸分布已有大量的研究成果。吉利明<sup>[53]</sup>等认为黏土岩孔隙直径介于3~100 nm之间,且主要分布区间为3~6 nm的小孔和20~80 nm的中-大孔。蒙脱石、高岭石和伊蒙混层孔隙率均较高,其中蒙脱石中小孔占绝大多数,伊蒙混层中小孔和中-大孔都很发育,高岭石则以中-大孔为主。

图22~25分别为陕西高家堡煤矿粗砂岩、细砂岩、粉砂岩及铝质泥岩的显微结构照片。由图中看出以下几点:

(1) 粗砂岩石英颗粒间孔缝大小<1~20 μm。粒

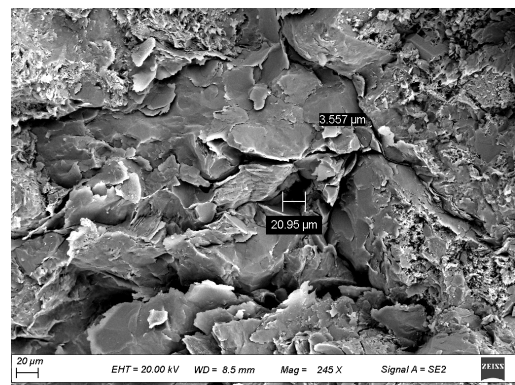


图22 粗砂岩扫描电镜图片(陕西高家堡矿)

Fig. 22 SEM image of coarse sandstone (Gaojiapu Coal Mine, Shaanxi)

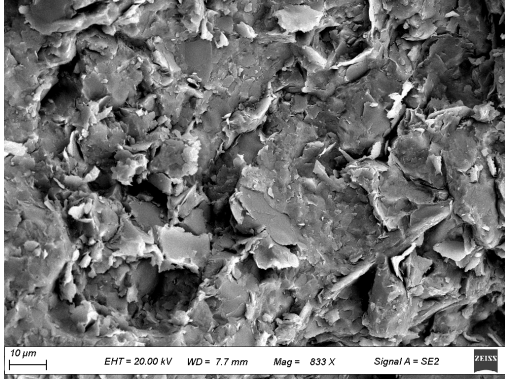


图23 细砂岩扫描电镜图片(陕西高家堡矿)  
Fig. 23 SEM image of fine sandstone  
(Gaojiapu Coal Mine, Shaanxi)

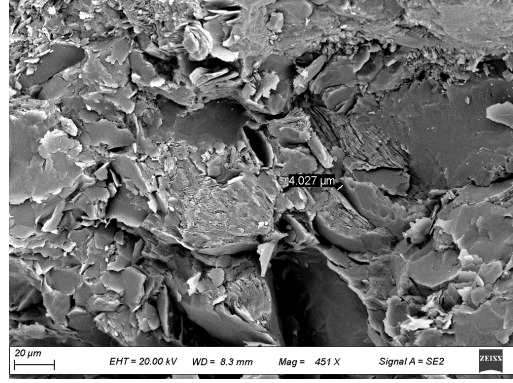
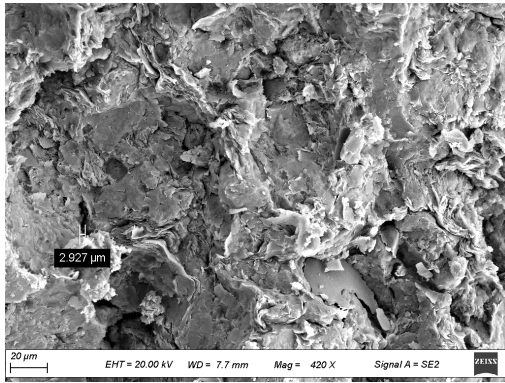
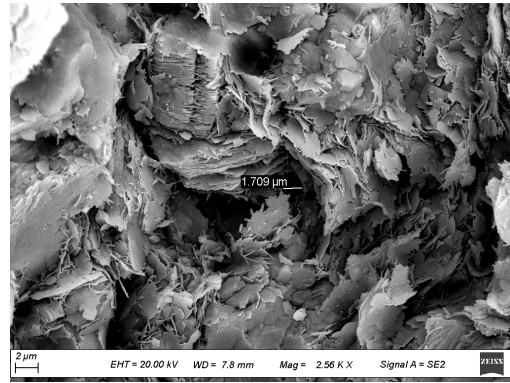


图24 粉砂岩扫描电镜图片(陕西高家堡矿)  
Fig. 24 SEM image of siltstone  
(Gaojiapu Coal Mine, Shaanxi)



(a) 420倍



(b) 2 560倍

图25 铝质泥岩扫描电镜图片(陕西高家堡矿)

Fig. 25 SEM image of bauxitic mudstone(Gaojiapu Coal Mine, Shaanxi)

间存在高岭石、伊利石等黏土填隙物,及粒间残余孔隙、碎屑颗粒溶孔和晶间孔隙等。晶间孔隙大小 $<1 \sim 5 \mu\text{m}$ 。

(2) 细砂岩颗粒间存在伊利石等黏土填隙物及粒间残余孔隙,粒间孔隙大小 $<1 \sim 9 \mu\text{m}$ 。

(3) 粉砂岩颗粒间存在伊利石、伊蒙混层、高岭石等黏土矿物及粒间残余孔隙、晶间孔隙。粒间孔隙尺寸 $<1 \sim 5 \mu\text{m}$ ,晶间孔隙尺寸 $<1 \sim 2 \mu\text{m}$ 。

(4) 铝质泥岩颗粒间存在高岭石、片状伊利石、伊蒙混层等黏土矿物,孔隙分为粒间残余孔隙和晶间孔隙,前者尺寸 $<1 \sim 3 \mu\text{m}$ ,后者尺寸 $<1 \sim 2 \mu\text{m}$ 。

(5) 从粗砂岩、细砂岩、粉砂岩到泥岩,粒间残余孔隙尺寸不断减小,最大一般不超过 $20 \mu\text{m}$ ,最小在 $1 \mu\text{m}$ 以下。晶间孔隙的尺寸比较稳定,一般不大于 $2 \mu\text{m}$ 。

研究岩石颗粒、孔隙结构大多在实验室进行。采用的方法有:毛管压力曲线法(包括半渗透隔板法、压汞法和离心机等)、铸体薄片法、扫描电镜

法、CT扫描法及核磁共振法等<sup>[54-56]</sup>。在实验室测试数据基础上,采用统计分析方法研究孔隙的大小及分布特征,以及对岩石物理、力学及化学性质的影响。

### 5.3 煤层孔隙与裂隙尺度

煤是固体可燃有机岩,为具有复杂孔隙、裂隙结构的多孔介质,含有大量孔隙、裂隙,尺度从宏观的断层、层理、节理,到微米、纳米孔隙。

煤的孔隙尺寸与结构不仅影响其物理力学性质,而且决定煤层瓦斯吸附解吸和渗透特性。已有的研究成果表明,煤中有多种成因的孔隙。图26为陕西高家堡煤矿煤样的电子扫描图片,煤中存在不同尺寸的孔隙,大的超过了 $10 \mu\text{m}$ ,小的在 $1 \mu\text{m}$ 以下。

在国外,GAN<sup>[57]</sup>等将煤孔隙划分为分子间孔、煤植物孔、热成因孔及裂隙孔等。在国内,郝琦<sup>[58]</sup>将煤孔隙按成因划分为气孔、植物组织孔、溶蚀孔、矿物铸模孔、晶间孔、原生粒间孔等。张慧<sup>[59]</sup>在大

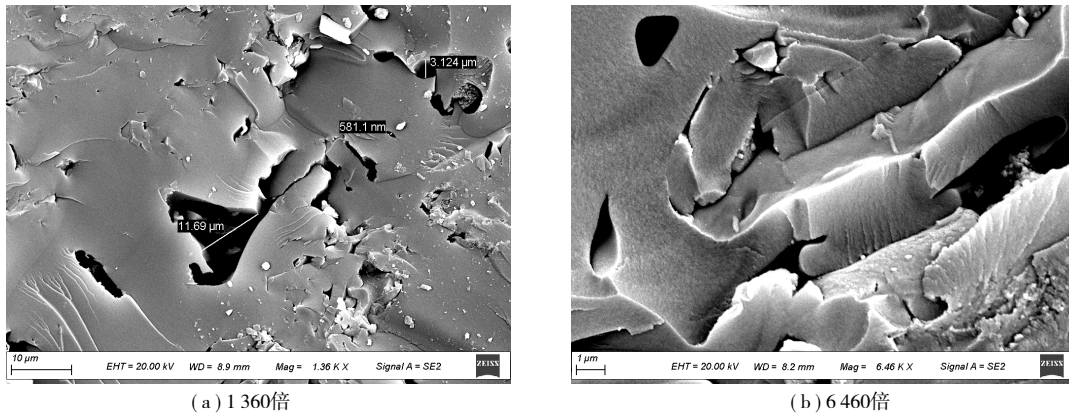


图26 煤扫描电镜图片(陕西高家堡矿)

Fig. 26 SEM image of coal(Gaojiapu Coal Mine, Shaanxi)

量扫描电镜观察结果的基础上,根据成因将煤孔隙划分为四大类十小类:原生孔、外生孔、变质孔、矿物质孔。原生孔包括胞腔孔和屑间孔,孔径从几微米至几十微米不等;外生孔有角砾孔、碎粒孔及摩擦孔3种,角砾孔尺寸一般为2~10 μm,碎粒孔为0.5~5 μm,而摩擦孔尺寸相差悬殊,从1~2 μm到几百微米不等;变质孔包括链间孔和气孔,链间孔的尺寸为0.01~0.1 μm,气孔尺寸大多在0.1~3 μm;矿

物质孔常见的有铸模孔、溶蚀孔和晶间孔,孔的尺寸以 $10^{-6}$  m的量级为主。

国内外很多学者对煤孔隙的尺寸进行了分类。有的学者将煤孔隙分为纳米孔(2~100 nm)、过渡孔(100 nm~1 μm)和微米孔(大于1 μm)<sup>[60]</sup>。还有些学者进行了更细的分类<sup>[61-65]</sup>,见表7。由表7可见,煤孔隙的尺度主要分布在 $10^{-10}$ ~ $10^{-5}$  m的量级之间。

表7 煤孔隙尺寸分类

Table 7 Classification of pore sizes in coal

文献	微孔	小孔/过渡孔	中孔/过渡孔	大孔	备注
ХОДОТ В В <sup>[61]</sup>	<10	10~100	100~1 000	>1 000	
GAN H <sup>[57]</sup> 等	0.4~1.2	1.2~30(过渡孔)		30~2 960	
秦勇 <sup>[62]</sup> 等	<15	15~50(过渡孔)	50~400	>400	高煤阶煤
傅学海 <sup>[63]</sup> 等	<8	8~20(过渡孔) 20~65(小孔)	65~325(中孔) 325~1 000(过渡孔)	>1 000	
刘常洪 <sup>[64]</sup> 等	<10	10~100(过渡孔)	100~7 500	>7 500	
琚宜文 <sup>[65]</sup> 等	<2.5(极微孔) 2.5~5(亚微孔) 5~15(微孔)	15~100	100~5 000	5 000~20 000(大孔) >20 000(超大孔)	构造煤

由于煤孔隙大小不同且分布范围很广,因此采用多种实验方法与仪器进行测试与分析,包括前述研究岩石颗粒、孔隙结构的压汞法、扫描电镜、CT扫描及核磁共振,以及低温液氮吸附法、小角X射线散射分析、中子散射分析、投射电镜、原子力显微镜等。上述方法各有优势、可测孔隙尺度的范围及适用条件。如原子力显微镜可直接观察纳米煤孔隙的结构,多角度对纳米孔隙进行三维定量测量,将煤微孔隙研究深入到分子级水平<sup>[66]</sup>。

煤裂隙是线状的空隙,其发育程度、连通性、规模和性质决定着煤层的完整性、渗透性和稳定

性。根据裂隙的空间尺度,傅雪海<sup>[67]</sup>等将煤裂隙分为大裂隙、中裂隙、小裂隙、微裂隙,其中大裂隙高度为0.5 m到数米,长度为数十米到数百米;中裂隙高度为0.05~0.5 m,长度为数米;小裂隙高度为数毫米到数厘米,长度为数厘米到1 m;微裂隙高度为数毫米,长度为数厘米到数十厘米。

微裂隙是指宽度为微米级的裂隙,刘大锰<sup>[68]</sup>等对微裂隙又进行了细分:A型,宽度 $\geq 5 \mu\text{m}$ ,长度 $\geq 10 \text{mm}$ ;B型,宽度 $\geq 5 \mu\text{m}$ ,长度 $< 10 \text{mm}$ ;C型,宽度 $< 5 \mu\text{m}$ ,长度 $\geq 300 \mu\text{m}$ ;D型,宽度 $< 5 \mu\text{m}$ ,长度 $< 300 \mu\text{m}$ 。

很多学者<sup>[69]</sup>对煤微裂隙的成因与分类进行了研究,普遍按成因将煤裂隙分为内生裂隙和外生裂隙。内生裂隙是指在煤化作用过程中,煤中凝胶化物质受温度、压力影响,内部结构发生一系列物理、化学变化,体积收缩产生内张力而形成的裂隙<sup>[70]</sup>。内生裂隙可进一步划分为失水裂隙、缩聚裂隙和静压裂隙。失水裂隙宽度一般为几至几十微米,对应于表7中的大孔级;缩聚裂隙的特点是短小、密集、无序,宽度为0.1~2 μm或更小,长度为2~5 μm或更小,与表7中的中孔级对应;静压裂隙等同于煤层气地质学中的割理<sup>[71]</sup>。割理又分面割理和端割理,两者常常相互垂直,且与煤层层面垂直。面割理常呈连续分布,延伸距离较长,而端割理较短,在面割理之间呈断续分布。

外生裂隙是指煤在构造变形过程中应力作用

下形成的裂隙。根据应力状态可分为张性裂隙、压性裂隙、剪性裂隙、松弛裂隙等。外生裂隙的规模尺度相差很大,而且可延续到煤层顶底板中。可见,煤裂隙尺度主要分布在 $10^{-7}$ ~ $10^2$  m的量级。

#### 5.4 岩体结构面尺度

岩体中存在不同类型的结构面,对岩体的完整性与稳定性有显著影响。沉积岩中的结构面按成因可分为原生结构面、构造结构面和次生结构面。原生结构面在成岩过程中形成,包括层理、层面、软弱夹层、沉积间断面及不整合面等;构造结构面在构造运动过程中形成,包括断层、节理和层间错动面等;次生结构面是成岩后在外力作用下产生的裂隙,包括卸荷裂隙、爆破裂隙、风化裂隙及泥化夹层等。岩体结构面按规模、尺度可划分为5类<sup>[72]</sup>,见表8。

表8 沉积岩体宏观结构面分级及尺度

Table 8 Gradation and sizes of macroscopic structures in sedimentary rock masses

级序	分级依据	岩体结构规模	空间尺度
I	井田边界断裂,或贯穿全井田,延伸数千米至数十千米以上的特大型断层,断层落差大于30 m,破碎带宽数米至数十米	区域地质结构	长度: $10^3$ ~ $10^4$ m; 落差: $10^2$ m; 宽度: $10^0$ ~ $10^1$ m
II	采区边界断裂,或贯穿1~2个采区的大型断层。属井田内构造,延伸数百米至数千千米,断层落差20~30 m,破碎带宽为几厘米至数米	井田地质结构	长度: $10^2$ ~ $10^3$ m; 落差: $10^1$ m; 宽度: $10^{-2}$ ~ $10^0$ m
III	工作面边界断裂,或贯穿1~2个工作面的中型断层。属采区内构造,延伸十几米至数百米,断层落差为5~20 m,破碎带宽小于1 m	采区地质结构	长度: $10^1$ ~ $10^2$ m; 落差: $10^0$ ~ $10^1$ m; 宽度: $10^{-1}$ m
IV	工作面内断裂,延伸短,一般几十米之内的小型断层。断层落差小于5 m,无破碎带或破碎带很窄,断层内不夹泥,有的具泥膜	工作面地质结构	长度: $10^1$ m; 落差: $10^0$ m
V	节理、劈理、片理、层理等小结构面,及微小裂隙,连续性差,无落差	工程岩体结构	长度: $10^{-4}$ ~ $10^0$ m ( $10^{-4}$ m为肉眼可见尺度)

表8描述了肉眼可见的岩体中的宏观断层、节理、裂隙等结构面。在岩石中,还存在2类尺度的裂隙。一类是微观尺度的裂隙,在微米级及以下的微结构面,存在于矿物颗粒内部、矿物颗粒及集合体之间,包括矿物解理、晶格缺陷、晶体位错等;另一类是细观尺度裂隙,介于宏观与微观之间,裂隙尺度为 $10^{-3}$ ~ $10^{-6}$  m。岩石细观力学的主要研究对象就是这类裂隙<sup>[73]</sup>。

岩石破裂是岩石力学的核心问题之一,煤炭开采与岩层控制涉及的煤岩破碎和围岩支护加固均与煤岩破裂有密切关系。岩石破裂过程与微裂纹的萌生、扩展、相互作用、交叉汇合,最终形成宏观裂纹,研究尺度涉及微观、细观、宏观多个尺度。

岩体结构面的研究方法包括实验室测试与观察、统计分析、理论研究与力学模型建立、物理模拟

与数值模拟及现场监测等。室内测试方法与研究煤岩颗粒、孔隙及裂隙的方法类似;现场监测也有多种方法,包括声波波速法、声发射法、微震法、红外检测法等。

## 6 支护与加固材料组分及结构的尺度

井下开采空间的维护需要大量支护与加固材料。如前所述的采煤工作面液压支架,巷道金属支架、锚杆与锚索及注浆加固等,由各种金属和非金属材料制成,其组分与结构显著影响材料及构件的物理力学性能。下面以锚杆钢材、注浆材料及树脂锚固剂为例进行介绍。

### 6.1 锚杆钢材

锚杆大多由热轧带肋钢筋制成,也有少量锚杆采用普通圆钢制作。高强度锚杆在煤矿已得到广泛应用,对锚杆钢材的要求是不仅强度高,而且具

有足够的延伸率和冲击韧性,避免在较高载荷或动载条件下破断。锚杆钢材的力学性能在很大程度上取决于钢材内部的显微结构—金相组织。“锚杆用热轧带肋钢筋”标准明确规定,锚杆钢筋的金相组织主要是铁素体加珠光体,不得有影响使用性能的其他组织<sup>[74]</sup>。对钢材的晶粒度也有要求,见表9<sup>[75]</sup>,不得粗于7级。通过提高晶粒度级别,可改善钢材力学性能。

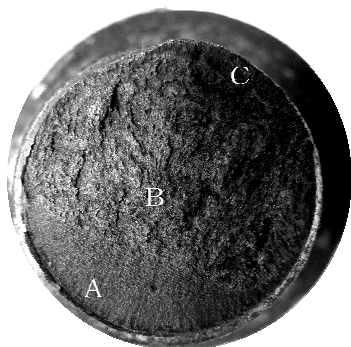
表9 钢材晶粒度分级

Table 9 Grades of grain sizes in steel

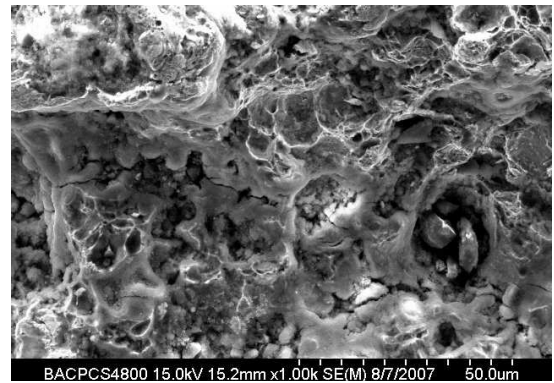
晶粒度分级	平均粒径/ $\mu\text{m}$	晶粒度分级	平均粒径/ $\mu\text{m}$
1	254.0	8	22.5
2	179.6	9	15.9
3	127.0	10	11.2
4	89.8	11	7.9
5	63.5	12	5.6
6	44.9	13	4.0
7	31.8	14	2.8

在高应力、大变形巷道中,锚杆受力大、应力状态复杂,易出现破断现象。通过分析断裂面形貌、微结构分布特征、微裂纹扩展规律,可揭示锚杆破断机理,为防止锚杆破断提供理论基础。图27为潞安漳村煤矿井下一锚杆断口的宏观形貌与显微图片<sup>[76]</sup>。可见,断口断裂明显分为3个区:裂纹缓慢扩展区A、裂纹快速扩展区B及瞬断区C。高倍放大形貌特征为准解理+解理+少量韧窝,个别区域出现沿晶特征。基于上述对锚杆微观破断机理的认识,在杆体材质、螺纹加工工艺、锚固方式、构件匹配性方面进行了优化与改善,显著减少了破断锚杆的数量。

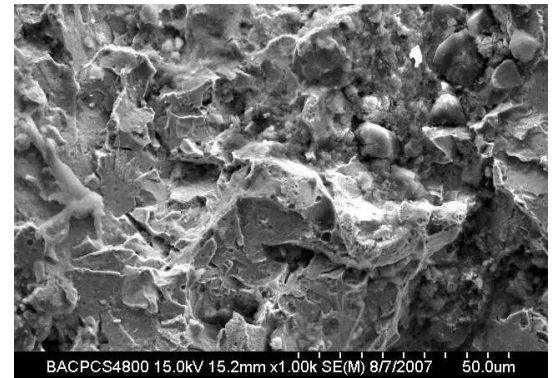
可见,锚杆材料与结构的研究尺度从宏观的厘米、毫米级(宏观裂纹),到显微结构的微米级(晶粒、微裂纹),甚至更小。



(a) 宏观形貌



(b) A区高倍放大形貌



(c) B区高倍放大形貌

图27 锚杆断口形貌

Fig. 27 View of the bolt fracture surface

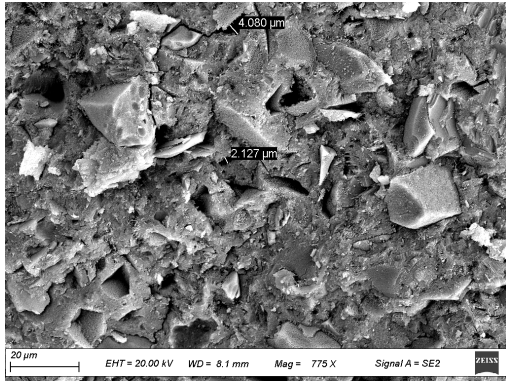
## 6.2 注浆材料

注浆是指采用物理或化学方法,将可以固化的液体材料通过注浆泵或其他手段注入到岩体裂隙或孔隙,从而改善其物理力学性能的方法和过程。因此,根据岩体中裂隙、孔隙的大小及分布状况,确定合理的注浆材料、参数、工艺与设备是注浆成败的关键。

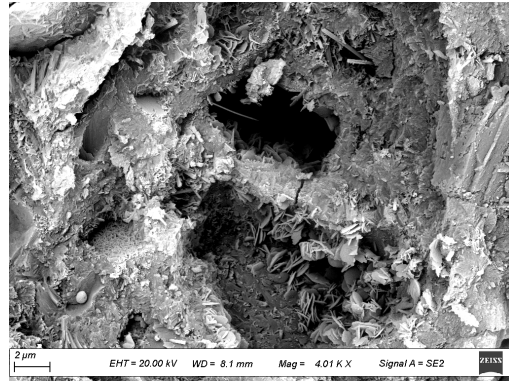
目前的注浆材料可分为水泥类、化学类和复合注浆材料。水泥类注浆材料是目前应用最广泛的注浆材料。水泥浆液的稳定性、渗透性、扩散范围与水泥颗粒的大小与分布有密切关系<sup>[77-78]</sup>。KUHLMANM<sup>[79]</sup>等将水泥熟料粉颗粒大小分为4级:0~3, 3~25, 25~60, >60  $\mu\text{m}$ 。颗粒粒级不同,对水泥各龄期强度的贡献不同。已有的研究结果普遍认为:<3  $\mu\text{m}$ 的细颗粒对水泥的早期强度(3 d)贡献最大,而>60  $\mu\text{m}$ 的粗颗粒对水泥强度的贡献很小,中间颗粒主要对水泥强度的增长做贡献。较理想的粒度分布为:<3  $\mu\text{m}$ 的颗粒占比不超过10%, 3~32  $\mu\text{m}$ 的颗粒占65%~70%, 32~45  $\mu\text{m}$ 的颗粒占10%左右, >45  $\mu\text{m}$ 的颗粒占6%~8%, >65  $\mu\text{m}$ 和<1  $\mu\text{m}$ 的颗粒最好没有。

图28, 29分别为水灰比0.8:1的纯水泥浆固结体、添加XPM水泥浆固结体的扫描电镜图片。对于纯水泥浆固结体, 颗粒间分布有大小不同的孔隙,

尺寸 $<1 \sim 8 \mu\text{m}$ 。颗粒表面呈针叶片状, 含针状矿物。添加了XPM后, 粒间孔隙大小 $<1 \sim 10 \mu\text{m}$ , 分布有球状颗粒, 周围有孔缝。



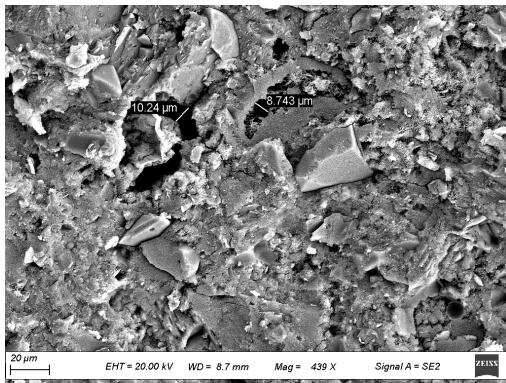
(a) 775倍



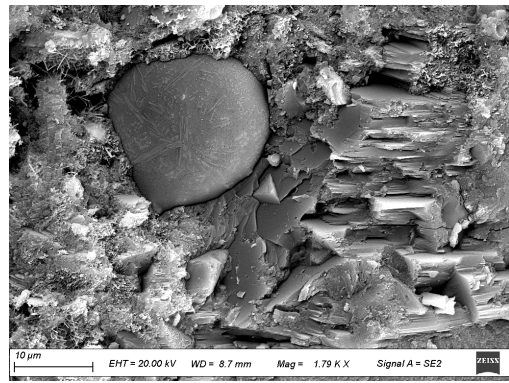
(b) 4010倍

图28 纯水泥浆固结体扫描电镜图片

Fig. 28 SEM image of pure cement slurry consolidated body



(a) 439倍



(b) 1790倍

图29 添加XPM水泥浆固结体扫描电镜图片

Fig. 29 SEM image of cement slurry consolidated body with additive of XPM

普通水泥的颗粒比较大, 渗透能力有限, 一般只能注入大于0.1 mm的裂隙, 很难注入微小的裂隙中。已有的研究成果表明, 岩体裂隙宽度大于水泥颗粒直径的3~5倍时, 浆液才能顺利注入裂隙中, 如图30所示。为了提高水泥浆液的可注性, 国内外开发了超细水泥注浆材料<sup>[80]</sup>。一般认为超细水泥的颗粒尺寸为: 最大粒径 $<20 \mu\text{m}$ , 平均粒径 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ , 比表面积 $>1000 \text{ m}^2/\text{kg}$ 。煤矿也开发应用了超细水泥<sup>[81]</sup>, 粒度分布达到 $D_{99} \approx 10 \mu\text{m}$ ,  $D_{50} \approx 1.9 \mu\text{m}$ 。超细水泥浆液可注性高, 能够渗透到微细裂隙中, 显著提高了注浆效果。

除水泥基注浆材料外, 高分子注浆材料在煤矿煤岩体加固中也得到广泛应用。高分子树脂液体属于真溶液, 能够注入到更微小的裂隙中, 渗透能力更强。高分子注浆材料还具有固化速度快、固化

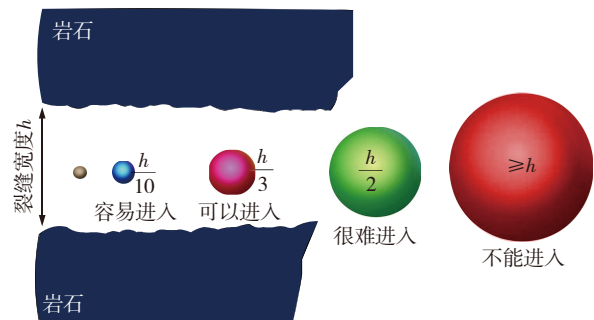


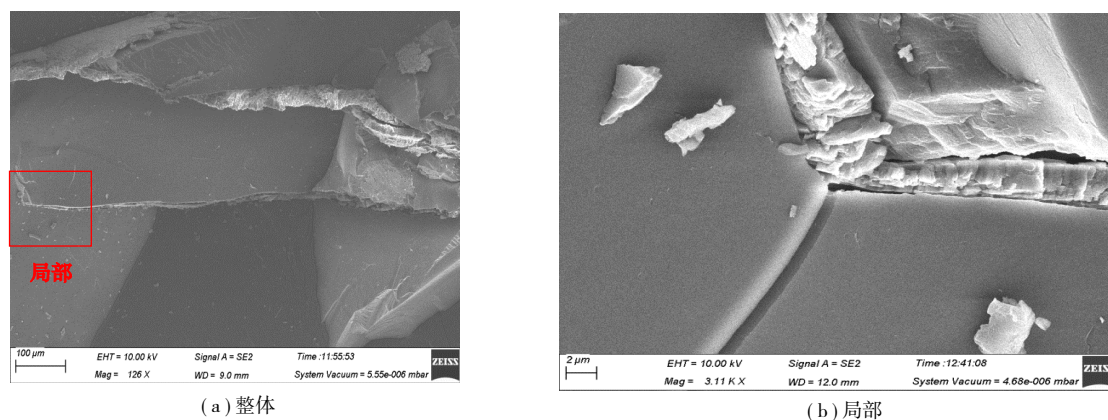
图30 注浆颗粒与裂缝大小的比较

Fig. 30 Comparison of grouting particle and fracture sizes

时间可调等优点, 在工期要求紧张、临时性工程中更能发挥其优势。高分子注浆材料主要有: 聚氨酯类、环氧树脂类、丙烯酸酯类、不饱和聚酯树脂类、脲醛树脂类等<sup>[82]</sup>, 目前煤矿应用最多的是聚氨酯类注浆材料。

无机有机复合材料是注浆材料的一个发展方向。为了降低高分子注浆材料的成本,又能保留其优异的力学性能,煤炭科学研究总院开采研究分院开发出硅酸盐改性聚氨酯注浆材料<sup>[83]</sup>。最近,在国家重点研发计划项目“煤矿千米深井围岩控制及智能开采技术”资助下<sup>[84]</sup>,河南理工大学开发出高胶凝性无机注浆材料、亲煤岩性有机调节剂、高效

微纳米增强材料,形成微纳米无机有机复合注浆新材料。其中,制备的零维纳米锂铝类水滑石增强剂,粒径为90 nm。注浆材料粒径 $D_{95}=7\ \mu\text{m}$ ,可注入20  $\mu\text{m}$ 以下的裂缝中,如图31所示。无机有机复合注浆材料能注入细小的裂缝中,注浆效果得到显著提高,同时与高分子材料相比,注浆成本大幅降低。



(a) 整体

(b) 局部

图31 微纳米复合注浆材料注入岩石中的形貌

Fig. 31 SEM view of injected micron-nano-sized composite grouting material in rock fractures

### 6.3 树脂锚固剂

树脂锚杆是煤矿锚杆支护的主要锚杆类型之一,树脂锚固剂用量较大,所用树脂绝大部分为不饱和聚酯树脂<sup>[85]</sup>。树脂锚固剂的组成成分为:不饱和聚酯树脂、固化剂、促进剂、触变剂和填料等。一般把树脂、促进剂、触变剂和填料作为一组分,混合成树脂胶泥;另一组分为固化剂。将2个组装入彼此隔离的同一包装袋中,封口后制成树脂锚固剂。表10为树脂锚固剂中粉状组分的尺寸,图32~37为树脂锚固剂中各粉状组分的扫描电镜图片。由图32~37可见,树脂锚固剂粉状成分颗粒形状各

不相同,大小分布也不均匀。有的颗粒内存在微裂缝,有的颗粒积聚成更大的球状体。颗粒的尺度分布较广,从 $<1\ \mu\text{m}$ 到100  $\mu\text{m}$ 以上。不仅各组分的配比显著影响树脂锚固剂的性能,而且组分的颗粒大小及分布也起重要作用。为了提高树脂锚固剂的抗剪性能,有的学者<sup>[86]</sup>研究了添加钢质骨料的作用,在锚固剂胶泥中分别添加了粒径1.5, 2.0, 2.8 mm的钢砂和1.4, 2.0, 2.5 mm的钢丸,锚杆平均锚固力分别提高了6.4%和9.4%。这进一步证明了不同材质、不同颗粒大小及分布对树脂锚固剂性能的影响。

表10 树脂锚固剂粉状组分的尺寸

Table 10 Grain sizes of powdery composition in resin capsules

组分名称	颗粒尺寸分布
石粉	固体颗粒大小不均匀,粒径1~23 $\mu\text{m}$
白炭黑	固体颗粒大小不均匀,粒径1~25 $\mu\text{m}$
滑石粉	固体颗粒呈菱面体和不规则形状,粒径1~45 $\mu\text{m}$ 。颗粒内有微裂缝
纤维素	肠状颗粒,直径7~25 $\mu\text{m}$
过氧化苯甲酰	柱状颗粒,颗粒大小5~40 $\mu\text{m}$ 。颗粒内有微裂缝
2,4-二氯过氧化苯甲酰	柱状颗粒,粒径1~8 $\mu\text{m}$ 。呈球状集合体,球体大小107 $\mu\text{m}$

图38, 39为树脂锚固剂经锚杆搅拌后凝结体的扫描电镜图片。图38为沿锚杆径向的锚固剂切面,图39为沿锚杆轴向的锚固剂切面。在径向切面上

存在大量孔隙,呈蜂窝状分布,孔隙大小相差悬殊,从 $<1\ \mu\text{m}$ 到最大160  $\mu\text{m}$ 。不同尺寸的固体颗粒呈晶粒状,存在晶间孔隙和晶内孔隙,晶间孔隙大小

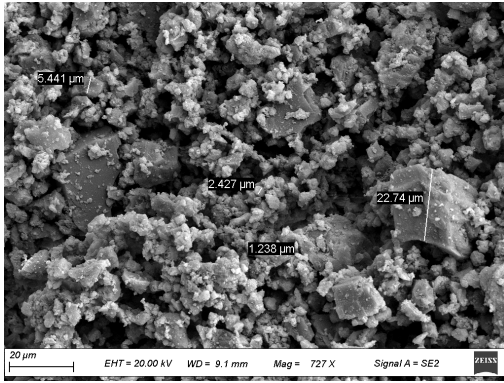


图32 石粉扫描电镜图片  
Fig. 32 SEM image of stone powder

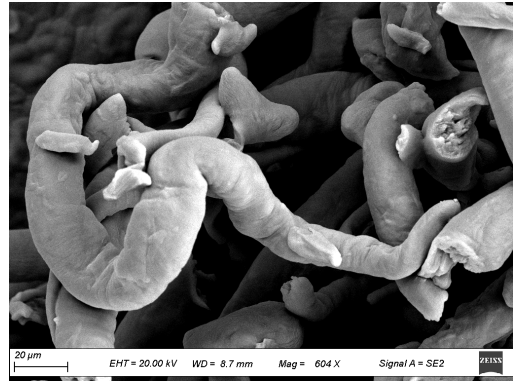


图35 纤维素扫描电镜图片  
Fig. 35 SEM image of cellulose fibers

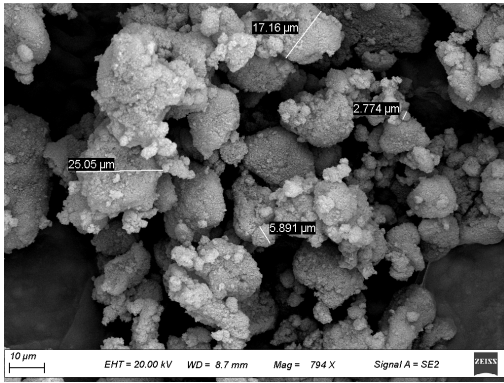


图33 白炭黑扫描电镜图片  
Fig. 33 SEM image of white carbon black

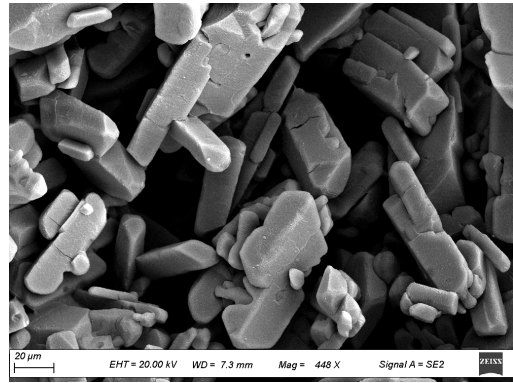


图36 过氧化苯甲酰扫描电镜图片  
Fig. 36 SEM image of benzoylperoxide

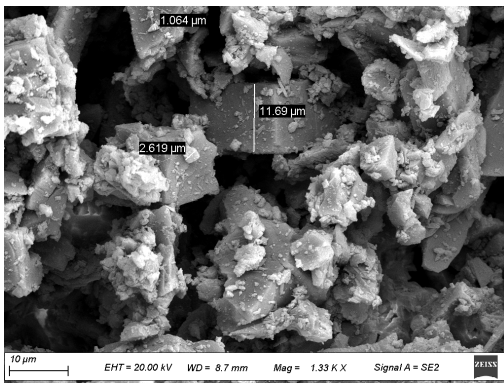


图34 滑石粉扫描电镜图片  
Fig. 34 SEM image of talc powder

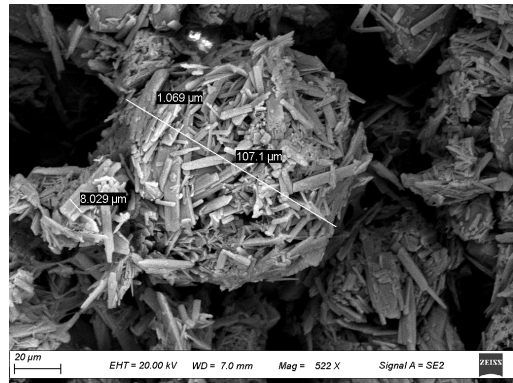


图37 2,4-二氯过氧化苯甲酰扫描电镜图片  
Fig. 37 SEM image of 2,4-dichlorobenzoyl peroxide

<math>1 \sim 2 \mu\text{m}</math>。在轴向切面上,存在多种粒级的晶粒状固体颗粒,分布有晶间孔隙及晶内孔隙,晶间孔隙大小<math><1 \sim 5 \mu\text{m}</math>。可见,锚固剂在径向比较疏松,而在轴向比较密实,这可能与搅拌速度、推力、杆体形状及钻孔与锚杆的直径差等因素有关。锚固剂固化后微结构疏松,会对锚固力产生明显的影响。

## 7 结 论

(1) 煤炭开采与岩层控制研究的空间尺度集中分布在<math>10^{-10} \sim 10^7 \text{ m}</math>之间,跨17个数量级。从全球尺度到煤体中的极微孔。

(2) 不同尺度研究的内容不同。在全球尺度上可研究地壳运动、板块构造、地应力分布等与煤层赋存条件的关系;在矿区尺度上,可根据矿区煤炭

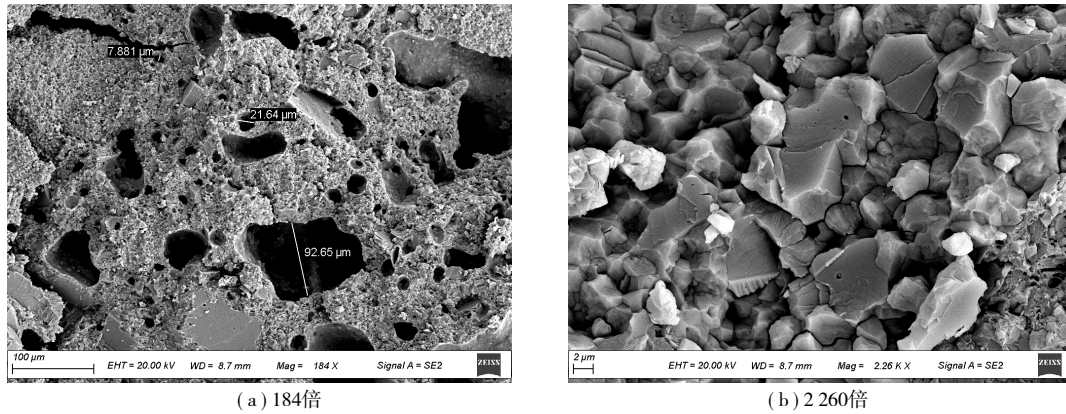


图38 树脂锚固剂固结体扫描电镜图片(沿锚杆径向)

Fig. 38 SEM image of resin capsule cured body (along radial direction of bolt)

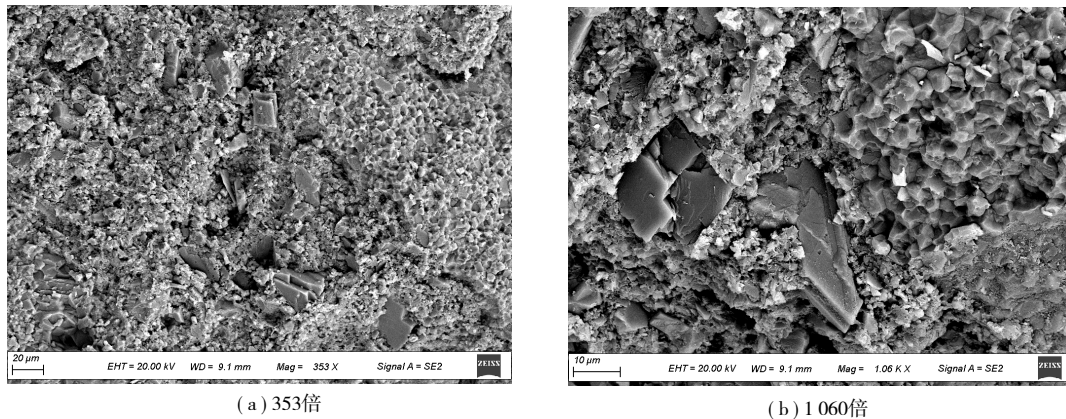


图39 树脂锚固剂固结体扫描电镜图片(沿锚杆轴向)

Fig. 39 SEM image of resin capsule cured body (along axial direction of bolt)

资源分布、地质构造及地面条件等,合理划分井田尺寸与边界,实现矿区的高效开发;在微米尺度上,可分析煤岩体颗粒、孔隙与裂隙分布对煤岩体物理力学特性的影响。

(3) 不同尺度研究方法不同。在煤田尺度上,可采用地质勘探方法研究煤田中煤炭资源分布、储量及大中型地质构造等,从空间与时间上规划煤田的开发;在工作面与巷道尺度方面,可采用力学理论、实验室试验、数值模拟及井下实测等方法开展研究;对于肉眼看不到的研究对象,需要借助各种显微镜、CT扫描法、核磁共振法及一些间接法开展研究。

(4) 岩层结构只能出现在一定尺度内。如巷道顶板中形成的梁、拱、层等结构的尺度一般为 $10^{-1} \sim 10^0$  m;长壁工作面采空区岩石形成的梁、拱、壳等结构尺度大多在 $10^0 \sim 10^2$  m范围内。远离这些尺度,岩层结构无法形成。相似材料模型试验可缩小原型的尺度,便于在实验室进行研究,但应保证模型与

原型的各个参数尽量相似。

(5) 岩层控制研究中一些问题必须从微观开始研究。如软岩遇水软化与膨胀的机理,应了解软岩的矿物成分和微结构,矿物颗粒与水、阳离子的相互作用;对于煤层的渗透性,就需要测试与分析煤体中的微纳米孔隙、裂隙的分布。而对于岩层控制研究中的另一些问题,一般只需了解煤岩层的宏观物理力学性质即可。如在研究巷道或采场围岩的应力场与位移场分布时,只需建立力学模型,将所需煤岩体的宏观参数输入后分析计算即可,没必要了解煤岩体中的微结构尺度与分布。

(6) 岩层控制中从宏观、细观到微观的多尺度研究方法已得到广泛应用,不同尺度之间的相互联系显得非常重要。例如,如何将实验室小尺度煤岩样的试验参数与井下原位大尺度的煤岩体参数相联系?如何将煤体中的微纳米孔隙、裂隙分布与煤层的渗透性、强度、刚度及完整性等宏观参数相联系?这些问题还有待于做更深入细致的研究。

## 参考文献(References):

- [1] 程守洙,江之永. 普通物理学(上册)[M]. 北京:高等教育出版社, 2006.
- [2] 大卫·布拉特纳(David BLATNER). 宇宙的尺度:从无穷大到无穷小[M]. 北京:北京联合出版公司, 2017.
- [3] THOMAS L. Coal geology [M]. Chichester, New York, Brisbane, Toronto, Singapore: Wiley & Sons., 2002.
- [4] 曹运江,蒋建华,资锋. 煤矿地质学[M]. 徐州:中国矿业大学出版社, 2014.
- [5] 张泓,晋香兰,李贵红,等. 世界主要产煤国煤田与煤矿开采地质条件之比较[J]. 煤田地质与勘探, 2007, 35(6): 1-9.  
ZHANG Hong, JIN Xianglan, LI Guihong, et al. Comparison of coal-fields and coal-mining geological conditions of the main coal-producing countries in the world[J]. Coal Geology & Exploration, 2007, 35(6): 1-9.
- [6] 康红普. 煤岩体地质力学原位测试及在围岩控制中的应用[M]. 北京:科学出版社, 2013.  
KANG Hongpu. In-situ geomechanics measurements for coal and rock masses and their application on strata control[M]. Beijing: Science Press, 2013.
- [7] HEIDBACH O, TINGAY M, BARTH A, et al. The world stress map database release, 2008[DB]. doi: 10.1594/GFZ.WSM.Rel2008.
- [8] HEIDBACH O, TINGAY M, BARTH A, et al. The world stress map based on the database release, 2008[DB]. Commission for the Geological Map of the World, Paris, 2009. doi: 10.1594/GFZ.WSM.Map, 2009.
- [9] HEIDBACH O, TINGAY M, BARTH A, et al. Global crustal stress pattern based on the world stress map database release, 2008. Tectonophysics, 2010, 482: 3-15.
- [10] 谢富仁,陈群策,崔效锋,等. 中国大陆地壳应力环境基础数据库[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(1): 131-136.  
XIE Furen, CHEN Qunce, CUI Xiaofeng, et al. Fundamental database of crustal stress environment in continental China[J]. Progress in Geophysics, 2007, 22(1): 131-136.
- [11] 谢富仁,崔效锋,赵建涛,等. 中国大陆及邻区现代构造应力场分区[J]. 地球物理学报, 2004, 47(4): 654-662.  
XIE Furen, CUI Xiaofeng, ZHAO Jiantao, et al. Regional division of the recent tectonic stress field in China and adjacent areas[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2004, 47(4): 654-662.
- [12] 康红普,林健,颜立新,等. 山西煤矿区井下地应力场分布特征研究[J]. 地球物理学报, 2009, 52(7): 1782-1792.  
KANG Hongpu, LIN Jian, YAN Lixin, et al. Study on characteristics of underground in-situ stress distribution in Shanxi coal mining fields[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52(7): 1782-1792.
- [13] 康红普,伊丙鼎,高富强,等. 中国煤矿井下地应力数据库及地应力分布规律[J]. 煤炭学报, 2019, 44(1): 23-33.  
KANG Hongpu, YIN Bingding, GAO Fuqiang, et al. Database and characteristics of underground in-situ stress distribution in Chinese coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(1): 23-33.
- [14] KANG H, ZHANG X, SI L, et al. In-situ stress measurements and stress distribution characteristics in underground coal mines in China[J]. Engineering Geology, 2010, 116: 333-345.
- [15] 钟和清,朱炎铭,朱宝,等. 郑庐断裂带对辽中煤田构造的控制作用初探[J]. 中国煤炭地质, 2010, 22(6): 1-4.  
ZHONG Heqing, ZHU Yanming, ZHU Bao, et al. Structural controlling of Tancheng-Lujiang faulted zone on structures in central Liaoning coalfields[J]. Coal Geology of China, 2010, 22(6): 1-4.
- [16] 关英斌,李海梅. 晋获断裂带的构造特征及成因机制[J]. 煤, 1999, 8(6): 10-13.
- [17] 康红普,姜铁明,张晓,等. 晋城矿区地应力场研究及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(1): 1-8.  
KANG Hongpu, JIANG Tieming, ZHANG Xiao, et al. Research on in-situ stress field in Jincheng coal mining area and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(1): 1-8.
- [18] 康红普,林健,张晓,等. 潞安矿区井下地应力测量及分布规律研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(3): 827-831, 844.  
KANG Hongpu, LIN Jian, ZHANG Xiao, et al. In-situ stress measurements and distribution law in Lu'an underground coal mines[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(3): 827-831, 844.
- [19] 徐永圻. 煤矿开采学[M]. 徐州:中国矿业大学出版社, 2015.
- [20] SYD S Peng. 长壁开采[M]. 北京:科学出版社, 2011.  
SYD S Peng. Longwall mining[M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [21] 钱鸣高,缪协兴,何富连. 采场“砌体梁”结构的关键块分析[J]. 煤炭学报, 1994, 19(6): 557-563.  
QIAN Minggao, MIAO Xiexing, HE Fulian. Analysis of key block in the structure of voussoir beam in longwall mining[J]. Journal of China Coal Society, 1994, 19(6): 557-563.
- [22] 宋振骥. 实用矿山压力控制[M]. 徐州:中国矿业大学出版社, 1988.
- [23] 陈炎光,陆士良. 中国煤矿巷道围岩控制[M]. 徐州:中国矿业大学出版社, 1994.
- [24] 王国法,庞义辉. 液压支架与围岩耦合关系及应用[J]. 煤炭学报, 2015, 40(1): 30-34.  
WANG Guofa, PANG Yihui. Relationship between hydraulic support and surrounding rock coupling and its application[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(1): 30-34.
- [25] 任怀伟,王国法,李首滨,等. 7 m大采高综采智能化工作面成套装备研制[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(11): 116-121.  
REN Huaiwei, WANG Guofa, LI Shoubin, et al. Development of intelligent sets equipment for fully-mechanized 7m height mining face[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(11): 116-121.
- [26] KANG Hongpu, LOU Jinfu, GAO Fuqiang, et al. A physical and numerical investigation of sudden massive roof collapse during longwall coal retreat mining[J]. International Journal of Coal Geology, 2018, 188: 25-36.
- [27] 董方庭,宋宏伟,郭志宏,等. 巷道围岩松动圈支护理论[J]. 煤炭学报, 1994, 19(1): 21-32.  
DONG Fangting, SONG Hongwei, GUO Zhihong, et al. Roadway sup-

- port theory based on broken rock zone[J]. *Journal of China Coal Society*, 1994, 19(1): 21–32.
- [28] 康红普, 王金华, 高富强. 掘进工作面围岩应力分布特征及其与支护的关系[J]. *煤炭学报*, 2009, 34(12): 1585–1593.  
KANG Hongpu, WANG Jinhua, GAO Fuqiang. Stress distribution characteristics in rock surrounding heading face and its relationship with supporting[J]. *Journal of China Coal Society*, 2009, 34(12): 1585–1593.
- [29] 康红普, 林健, 杨景贺, 等. 松软破碎硐室群围岩应力分布及综合加固技术[J]. *岩土工程学报*, 2011, 33(5): 808–814.  
KANG Hongpu, LIN Jian, YANG Jinghe, et al. Stress distribution and synthetic reinforcing technology for chamber group with soft and fractured surrounding rock[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, 33(5): 808–814.
- [30] 侯朝炯团队. 巷道围岩控制[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2013.  
The team of HOU Chaojiong. Ground control of roadways[M]. Xuzhou: China University of mining and Technology Press, 2013.
- [31] 康红普, 林健, 吴拥政, 等. 锚杆构件力学性能及匹配性[J]. *煤炭学报*, 2015, 40(1): 11–23.  
KANG Hongpu, LIN Jian, WU Yongzheng, et al. Mechanical performances and compatibility of rock bolt components[J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(1): 11–23.
- [32] 康红普, 颜立新, 郭相平, 等. 回采工作面多巷布置留巷围岩变形特征与支护技术[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(10): 2022–2036.  
KANG Hongpu, YAN Lixin, GUO Xiangping, et al. Characteristics of surrounding rock deformation and reinforcement technology of retained entry in working face with multi-entry layout[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(10): 2022–2036.
- [33] 袁亮. 淮南矿区煤矿煤层气抽采技术[J]. *中国煤层气*, 2006, 3(1): 7–9, 6.  
YUAN Liang. Coal mine methane drainage technology in Huainan coal mining area[J]. *China Coalbed Methane*, 2006, 3(1): 7–9, 6.
- [34] 石智军, 姚宁平, 叶根飞. 煤矿井下瓦斯抽采钻孔施工技术与装备[J]. *煤炭科学技术*, 2009, 37(7): 1–4.  
SHI Zhijun, YAO Ningping, YE Genfei. Construction technology and equipment for gas drainage borehole drilling in underground coal mine[J]. *Coal Science and Technology*, 2009, 37(7): 1–4.
- [35] 宋宏伟, 刘刚. 井巷工程[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2006.
- [36] 康红普, 王金华. 煤巷锚杆支护理论与成套技术[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2007.
- [37] 张永成. 注浆技术[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2012.  
ZHANG Yongcheng. Cementation technology[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2012.
- [38] 康红普, 冯彦军. 煤矿井下水力压裂技术及在围岩控制中的应用[J]. *煤炭科学技术*, 2017, 45(1): 1–9.  
KANG Hongpu, FENG Yanjun. Hydraulic fracturing technology and its applications in strata control in underground coal mines[J]. *Coal Science and Technology*, 2017, 45(1): 1–9.
- [39] 于斌, 段宏飞. 特厚煤层高强度综放开采水力压裂顶板控制技术研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 31(4): 778–785.  
YU Bin, DUAN Hongfei. Study of roof control by hydraulic fracturing in full-mechanized caving mining with high strength in extra-thick coal layer[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 31(4): 778–785.
- [40] 康红普, 司林坡, 苏波. 煤岩体钻孔结构观测方法及应用[J]. *煤炭学报*, 2010, 35(12): 1949–1956.  
KANG Hongpu, SI Linpo, SU Bo. Borehole observation methods in coal and rock mass and their applications[J]. *Journal of China Coal Society*, 2010, 35(12): 1949–1956.
- [41] 中华人民共和国国家标准. 工程岩体试验方法标准[M]. 北京: 中国计划出版社, 2013.
- [42] 蔡美峰. 地应力测量原理和技术[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [43] 杨焦生, 王一兵, 李安启, 等. 煤岩水力裂缝扩展规律试验研究[J]. *煤炭学报*, 2012, 37(1): 73–77.  
YANG Jiaosheng, WANG Yibing, LI Anqi, et al. Experimental study on propagation mechanism of complex hydraulic fracture in coalbed[J]. *Journal of China Coal Society*, 2012, 37(1): 73–77.
- [44] 程久龙, 于师建, 王渭明, 等. 岩体测试与探测[M]. 北京: 地震出版社, 2000.
- [45] BIENIAWSKI Z T. The effect of specimen size on compressive strength of coal[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1968, 5: 325–335.
- [46] BIENIAWSKI Z T. In situ strength and deformation characteristics of coal[J]. *Engineering Geology*, 1968, 2: 325–340.
- [47] 朱筱敏. 沉积岩石学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2008.
- [48] 李化敏, 梁亚飞, 陈江峰, 等. 神东矿区砂岩孔隙结构特征及其物理力学性质的关系[J]. *河南理工大学学报(自然科学版)*, 2018, 37(4): 9–16.  
LI Huamin, LIANG Yafei, CHEN Jiangfeng, et al. Relationship between pore structural characteristics and physical-mechanical properties of sandstone in Shendong mining area[J]. *Journal of Henan Polytechnic University(Natural Science)*, 2018, 37(4): 9–16.
- [49] 赵健. 软岩粘土矿物的掺杂机制及其吸附特性[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2013.  
ZHAO Jian. The research on defect formation mechanism and adsorption property of clay minerals in soft rock[D]. Beijing: China University of Mining & Technology(Beijing), 2013.
- [50] 王茂桢, 柳少波, 任拥军, 等. 页岩气储层粘土矿物孔隙特征及其甲烷吸附作用[J]. *地质论评*, 2015, 61(1): 207–216.  
WANG Maozhen, LIU Shaobo, REN Yongjun, et al. Pore characteristics and methane adsorption of clay minerals in shale gas reservoir[J]. *Geological Review*, 2015, 61(1): 207–216.
- [51] JOHNSON C T. Probing the nanoscale architecture of clay minerals[J]. *Clay Minerals*, 2010, 45(3): 245–279.
- [52] 刘钦, 孙亚军, 徐智敏, 等. 侏罗系弱胶结砂岩孔隙孔隙特征及其保水采煤意义[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(3): 857–864.  
LIU Qin, SUN Yajun, XU Zhimin, et al. Pore media characteristics of Jurassic weak cemented sandstone and its significance for water-

- preserved coal mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(3): 857-864.
- [53] 吉利明, 邱军利, 宋之光, 等. 黏土岩孔隙内表面对甲烷吸附能力的影响[J]. *地球化学*, 2014, 43(3): 238-244.  
JI Liming, QIU Junli, SONG Zhiguang, et al. Impact of internal surface area of pores in clay rocks on their adsorption capacity of methane[J]. *Geochimica*, 2014, 43(3): 238-244.
- [54] 陈杰, 周改英, 赵喜亮, 等. 储层岩石孔隙结构特征研究方法综述[J]. *特种油气藏*, 2005, 12(4): 11-14.  
CHEN Jie, ZHOU Gaiying, ZHAO Xiliang, et al. Overview of study methods of reservoir rock pore structure[J]. *Special Oil and Gas Reservoirs*, 2005, 12(4): 11-14.
- [55] 张娜, 乔凤超, 张博, 等. 深部煤系沉积岩孔隙结构特征压汞试验研究[J]. *煤炭科学技术*, 2016, 44(10): 155-160.  
ZHANG Na, QIAO Fengchao, ZHANG Bo, et al. Experimental study on pore structure features of sedimentary rocks in deep coal measures by mercury intrusion porosimetry[J]. *Coal Science and Technology*, 2016, 44(10): 155-160.
- [56] 赵杰, 姜亦忠, 王伟男, 等. 用核磁共振技术确定岩石孔隙结构的实验研究[J]. *测井技术*, 2003, 27(3): 185-188.  
ZHAO Jie, JIANG Yizhong, WANG Weinan, et al. Investigation of rock pore structure using NMR technology[J]. *Well Logging Technology*, 2003, 27(3): 185-188.
- [57] GAN H, NANDI S P, WALKER P L. Nature of porosity in American coals[J]. *Fuel*, 1972, 51: 272-277.
- [58] 郝琦. 煤的显微孔隙形态特征及其成因探讨[J]. *煤炭学报*, 1987(4): 51-61.  
HAO Qi. On morphological character and origin of micropores in coal[J]. *Journal of China Coal Society*, 1987(4): 51-61.
- [59] 张慧. 煤孔隙的成因类型及其研究[J]. *煤炭学报*, 2001, 26(1): 40-44.  
ZHANG Hui. Genetical type of pores in coal reservoir and its research significance[J]. *Journal of China Coal Society*, 2001, 26(1): 40-44.
- [60] 潘结南, 张召召, 李猛, 等. 煤的多尺度孔隙结构特征及其对渗透率的影响[J]. *天然气工业*, 2019, 39(1): 64-73.  
PAN Jienan, ZHANG Zhaozhao, LI Meng, et al. Characteristics of multi-scale pore structure of coal and its influence on permeability[J]. *Natural Gas Industry*, 2019, 39(1): 64-73.
- [61] ХОДОТ В В. 煤与瓦斯地质[M]. 宋士钊等译. 北京: 中国工业出版社: 1966.
- [62] 秦勇, 徐志伟, 张井. 高煤级煤孔径结构的自然分类及其应用[J]. *煤炭学报*, 1995, 20(3): 266-271.  
QIN Yong, XU Zhiwei, ZHANG Jing. Natural classification of the high-rank coal pore structure and its application[J]. *Journal of China Coal Society*, 1995, 20(3): 266-271.
- [63] 傅雪海, 秦勇, 张万红, 等. 基于煤层气运移的煤孔隙分形分类及自然分类研究[J]. *科学通报*, 2005, 50(S1): 51-55.
- [64] 刘常洪. 煤孔结构特征的试验研究[J]. *煤矿安全*, 1993(8): 1-5.
- [65] 琚宜文, 李小诗. 构造煤超微结构研究新进展[J]. *自然科学进展*, 2009, 19(2): 131-140.
- [66] 姚素平, 焦堃, 张科, 等. 煤纳米孔隙结构的原子力显微镜研究[J]. *科学通报*, 2011, 56(22): 1820-1827.  
YAO Suping, JIAO Kun, ZHANG Ke, et al. An atomic force microscopy study of coal nanopore structure[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(22): 1820-1827.
- [67] 傅雪海, 秦勇, 李贵中. 沁水盆地中—南部煤储层渗透率主控因素分析[J]. *煤田地质与勘探*, 2001, 29(3): 16-19.  
FU Xuehai, QIN Yong, LI Guizhong. An analysis on the principal control factor of coal reservoir permeability in Central and Southern Qinshui Basin[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2001, 29(3): 16-19.
- [68] 刘大猛, 李振涛, 蔡益栋. 煤储层孔—裂隙非均质性及其地质影响因素研究进展[J]. *煤炭科学技术*, 2015, 43(2): 10-15.  
LIU Dameng, LI Zhentao, CAI Yidong. Study progress on pore-crack heterogeneity and geological influence factors of coal reservoir[J]. *Coal Science and Technology*, 2015, 43(2): 10-15.
- [69] 程庆迎, 黄炳香, 李增华. 煤的孔隙和裂隙研究现状[J]. *煤炭工程*, 2011(12): 91-93.  
CHENG Qingying, HUANG Bingxiang, LI Zenghua. Research status of pore and crack in coal[J]. *Coal Engineering*, 2011(12): 91-93.
- [70] 张慧, 王晓刚, 员争荣, 等. 煤中显微裂隙的成因类型及其研究意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 2002, 21(9): 278-284.  
ZHANG Hui, WANG Xiaogang, YUAN Zhengrong, et al. Genetic types of microfractures in coal and their significance[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2002, 21(9): 278-284.
- [71] 苏现波, 冯艳丽, 陈江峰. 煤中裂隙的分类[J]. *煤田地质与勘探*, 2002, 30(8): 21-24.  
SU Xianbo, FENG Yanli, CHEN Jiangfeng. The classification of fractures in coal[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2002, 30(8): 21-24.
- [72] 孟召平, 苏永华. 沉积岩体力学理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [73] 蔡美峰, 何满潮, 刘东燕. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [74] 中华人民共和国黑色冶金行业标准. 锚杆用热轧带肋钢筋(YB/T4364-2014)[P]. 北京: 冶金工业出版社, 2014.
- [75] 叶卫平. 实用钢铁材料金相检验[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [76] KANG H, WU Y, GAO F, et al. Fracture characteristics in rockbolts in underground coal mine roadways[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2013, 62: 105-112.
- [77] 乔龄山. 水泥的最佳颗粒分布及其评价方法[J]. *水泥*, 2001(8): 1-5.
- [78] 郑青. 基于颗粒分布对水泥性能影响机制的分析探讨水泥组份颗粒分布的优化[J]. *中国水泥*, 2019(4): 77-83.
- [79] KUHLMANM K, ELLEBRROCK H G, SPRUNG S, et al. Particle size distribution and properties of cement Part I: Strength of Portland cement[J]. *ZKG International*, 1985(6): 136-144.
- [80] 李为华, 胡毅夫, 杜耀志. 超细水泥的发展[J]. *西部探矿工程*, 2005(5): 144-145.
- [81] 管学茂, 仲启方. 超细水泥基注浆材料性能研究与工程应用[J]. *煤矿安全*, 2013, 44(6): 142-145.

- GUAN Xuemao, ZHONG Qifang. Research on the performance of micro-fine cement-based grouting material and its engineering application[J]. Safety in Coal Mines, 2013, 44(6): 142-145.
- [82] 吴怀国, 魏宏亮, 田凤兰, 等. 矿用高分子注浆加固材料性能特点及研究方向[J]. 煤炭科学技术, 2012, 40(5): 27-29.
- WU Huaiguo, WEI Hongliang, TIAN Fenglan, et al. Performances features and research orientation of mine high molecular grouting reinforced material[J]. Coal Science and Technology, 2012, 40(5): 27-29.
- [83] 冯志强, 康红普, 韩国强. 煤矿用无机盐改性聚氨酯注浆材料的研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(8): 1559-1564.
- FENG Zhiqiang, KANG Hongpu, HAN Guoqiang. Polyurethane grouting materials modified by inorganic salts in coal mines[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(8): 1559-1564.
- [84] 康红普, 王国法, 姜鹏飞, 等. 煤矿千米深井围岩控制及智能开采技术构想[J]. 煤炭学报, 2018, 43(7): 1789-1800.
- KANG Hongpu, WANG Guofa, JIANG Pengfei, et al. Conception for strata control and intelligent mining technology in deep coal mines with depth more than, 1000m[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(7): 1789-1800.
- [85] 黄乃炯, 范世平. CK型速凝树脂锚固剂的锚固机理及性能[J]. 煤炭科学技术, 1995, 23(12): 29-32.
- [86] 张明, CHEN Cao, 张怀东, 等. 树脂锚固剂中添加不同钢质骨料对锚固力的影响[J]. 煤炭学报, 2019, 44(6): 1690-1697.
- ZHANG Ming, CHEN Cao, ZHANG Huaidong, et al. Effect of anchoring force by adding steel aggregate in resin anchoring agent[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(6): 1690-1697.