

# 目 次

<b>1 绪论</b> .....	1
1.1 深部岩体力学研究的基本任务 .....	1
1.2 深部巷道围岩变形与破坏特征 .....	3
1.3 深部巷道围岩灾害监测 .....	5
1.4 深部巷道围岩破坏及控制研究展望 .....	7
参考文献 .....	7
<b>2 深部岩体力学性质</b> .....	17
2.1 概述 .....	17
2.2 深部岩体变形 .....	18
2.3 深部岩体破坏 .....	24
2.4 深部地温及孔隙水压对岩体力学性质的影响 .....	34
参考文献 .....	36
<b>3 深部采掘工程中的应力场特征</b> .....	39
3.1 深部原岩应力场 .....	39
3.2 深部采动支承压力分布规律 .....	42
3.3 深部采动支承压力的主要影响因素 .....	50
3.4 不同采动影响下的深部巷道围岩应力特征 .....	58
3.5 深部采动应力作用下围岩流变规律 .....	63
3.6 深部巷道围岩的温度场及热应力分布规律 .....	69
参考文献 .....	74
<b>4 深部巷道围岩破裂机制及特征</b> .....	76
4.1 深部巷道围岩破裂演化研究现状 .....	76
4.2 深部不同类型的顶板内破裂探测研究 .....	78
4.3 深部不同采动条件下顶板内破裂演化规律 .....	85
4.4 深部巷道围岩破裂机理讨论 .....	89
参考文献 .....	91
<b>5 深部巷道围岩稳定性评价方法</b> .....	93
5.1 影响深部巷道围岩稳定性因素 .....	93
5.2 深部巷道围岩稳定性应力评价方法 .....	95
5.3 深部巷道围岩稳定性位移评价方法 .....	100
5.4 深部巷道围岩稳定性模糊识别模型 .....	107
5.5 深部巷道围岩稳定性神经网络识别模型 .....	111
参考文献 .....	118

<b>6</b>	<b>深部巷道围岩流变规律及 GA - FLAC 反演方法</b>	120
6.1	深部岩石流变实验研究	120
6.2	深部加锚岩石的流变特征	127
6.3	流变本构模型及 FLAC 实现	131
6.4	深部围岩流变规律的 GA - FLAC 反演方法	143
	参考文献	153
<b>7</b>	<b>深部巷道围岩稳定性控制</b>	156
7.1	深部巷道围岩控制机理	156
7.2	深部巷道围岩控制方法	157
7.3	不同采动条件下锚杆支护安全潜力评价理论	167
7.4	深部巷道锚固支护设计及实践	181
	参考文献	201
<b>8</b>	<b>深部巷道围岩稳定性监测技术</b>	202
8.1	深部巷道围岩地应力测试方法	202
8.2	深部巷道围岩内部变形监测与分析方法	217
8.3	深部巷道围岩高应力电磁辐射测试方法	222
8.4	深部巷道围岩破裂的微地震监测技术	229
8.5	深部巷道围岩破坏钻孔摄像探测方法	237
	参考文献	242

# CATALOGUE

<b>1 Introduction</b>	1
1.1 The basic task of research mechanics of rocks at depth	1
1.2 Deformation and failure characteristics of rock mass at depth	3
1.3 The monitoring and prediction of rock mass at depth	5
1.4 Research prospect of rock mass failure and control at depth	7
Reference	7
<b>2 Mechanics properties of rocks at depth</b>	17
2.1 General introduction	17
2.2 Deformation of rocks at depth	18
2.3 Failure of rocks at depth	24
2.4 The influence to mechanics properties of rocks brought by temperature and pore water pressure at depth	34
Reference	36
<b>3 Stress field characteristics in mining engineering at depth</b>	39
3.1 Situ stress field at depth	39
3.2 The law of mining abutment stress distribution at depth	42
3.3 The influencing factors of mining abutment stress at depth	50
3.4 Stress characteristics of rocks at depth under different mining condition	58
3.5 Rheology rule of deep rocks under stress action	63
3.6 The law of temperature field and thermal stress distribution in deep surrounding rocks	69
Reference	74
<b>4 Zonal disintegration mechanism and characteristics of surrounding rock in deep roadway</b>	76
4.1 Zonal disintegration of surrounding rock in deep roadway	76
4.2 The research on zonal disintegration of different roof at depth	78
4.3 Zonal disintegration evolution law of deep roof under different mining conditions	85
4.4 Discussion on zonal disintegration mechanism of surrounding rock in deep roadway	89
Reference	91
<b>5 Assessment method of surrounding rock stability at depth</b>	93
5.1 Stability influencing factors of surrounding rock at depth	93

5.2	The stress assessment method of surrounding rock stability at depth .....	95
5.3	The displacement assessment method of surrounding rock stability at depth .....	100
5.4	The fuzzy identification model of surrounding rock stability at depth .....	107
5.5	The neural network identification model of surrounding rock stability at depth .....	111
	<i>Reference</i> .....	118
<b>6</b>	<b>Rheology rule and GA – FLAC inversion method of surrounding rocks at depth</b> .....	120
6.1	The research on rheological experiment of rock at depth .....	120
6.2	Rheological characteristics of reinforced rock at depth .....	127
6.3	The rheological constitutive model and its FLAC implementation .....	131
6.4	GA – FLAC inversion method of deep surrounding rock's rheology rule .....	143
	<i>Reference</i> .....	153
<b>7</b>	<b>Control of surrounding rocks stability at depth</b> .....	156
7.1	The control mechanism of surrounding rocks at depth .....	156
7.2	The control method of surrounding rocks at depth .....	157
7.3	The bolting safety assessment theory under different mining conditions .....	167
7.4	Anchorage support design and practice in deep roadway .....	181
	<i>Reference</i> .....	201
<b>8</b>	<b>Monitoring technology of surrounding rocks stability at depth</b> .....	202
8.1	The ground stress test method of surrounding rocks at depth .....	202
8.2	Internal deformation monitoring and analysis method of surrounding rocks at depth .....	217
8.3	High stress electromagnetic radiation testing method of surrounding rocks at depth .....	222
8.4	Zonal disintegration microseismic monitored technology of surrounding rocks at depth .....	229
8.5	Borehole camera detecting method of surrounding rocks failure at depth .....	237
	<i>Reference</i> .....	242

# 1 绪 论

## 1.1 深部岩体力学研究的基本任务

深部资源的开采已经成为全球关注的热点问题<sup>[1]</sup>。据不完全统计<sup>[2-6]</sup>，在国外有近百座金属矿山其开采超千米，如南非 Anglogold 的西部金矿已达 3700 m；印度的 Kolar 金矿区的开采深度已经超过 2400 m；加拿大、美国、澳大利亚的一些有色金属矿山采深亦超过 1000 m。在煤矿开采方面，国外一些主要产煤国家从 20 世纪 80 年代就开始涉足深井开采，如原联邦德国 1987 年已将近达 900 m；前苏联有一半以上产量来自 600 m 以下深部。但是由于中国高强度的煤炭开采，其开采深度以每年 8~12 m 的速度增加，使得向深部开采的转移速度成为世界之最。如新汶矿业集团孙村煤矿开采深度已经超过 1360 m，居亚洲之首。同时，在今后 10~20a 内，我国金属和有色金属矿山将进入 1000~2000 m 深度开采<sup>[1]</sup>。

随着开采深度的不断增加，岩体力学灾害日趋增多，如矿井冲击地压、煤与瓦斯突出、矿井突水、剧烈矿压显现、巷道围岩大变形、不稳定流变、地温升高等，对深部资源的安全高效开采造成了巨大威胁。因此，深部资源开采过程中所产生的岩石力学问题已成为国内外研究的焦点<sup>[7-8]</sup>。

因此，以探索深部岩体力学灾害形成的机理、特征、类型，并提出相应的预防和控制途径，便成为深部岩体力学研究的核心。深部岩体力学研究的主要任务涉及深部岩石力学性质、破坏机理、灾害类型及其监测、灾害控制等各个方面。

### 1.1.1 深部岩体力学性质

与浅部相比，深部岩体的力学性质有了很大变化，主要体现在：由浅部的脆性向着延性转化<sup>[9-12]</sup>；物性流变和扩容流变增强<sup>[13-15]</sup>，即使硬岩也不例外<sup>[16]</sup>；突变大变形诱发冲击地压、岩爆等<sup>[17]</sup>。这些岩石力学性质的差异，不仅在基本岩石力学理论上需要深入探讨，更需要在深部岩石力学应用过程中加以研究。

### 1.1.2 深部岩体破坏的强度准则

岩体强度准则的研究，是岩石力学长期关注的问题。迄今为止，已经出现了各种各样的岩体强度准则，例如：Mohr - Coulomb 准则<sup>[18]</sup>和 Hoek - Brown 准则<sup>[19-20]</sup>、Misses 准则<sup>[21]</sup>、Drucker - Prager 准则<sup>[22]</sup>、双剪强度理论<sup>[23-25]</sup>等。深部岩体处于高地应力状态，其强度特性明显区别于浅部岩体。例如，脆性岩石在高地应力状态下开挖卸荷有可能发生岩爆，而另外一些岩石有可能发生延性破坏或剪缩破坏<sup>[26]</sup>。适于浅部的岩石强度准则受到了挑战，周小平等<sup>[27]</sup>通过与 RMR 岩体地质力学分类指标建立联系，探讨能反映深部岩体高应力状态下特有的韧性（或称延性）破坏或剪缩破坏的深部岩体破坏准则；汪斌等<sup>[28]</sup>采用已有的二次抛物线型、双曲线型、幂函数型等型式的包络线来研究强度特征的非线性；结果表明，幂函数型 Mohr - Coulomb 准则能够作为在高应力加载和卸荷应力路径

下的岩石破坏的强度判据。虽然在探讨深部岩石强度特征方面国外学者早有研究报道<sup>[29-31]</sup>，但离深部岩石力学工程的要求相差甚远。在今后相当长的一段时间内，对于深部岩石破坏准则的探讨，应该结合实际工程的特点，根据不同类型的岩石材料，在进行大量的岩石力学试验的基础上，进行分类试验拟合，应当成为发展的方向，因为离开了具体的工程背景，强度准则将大大降低其适用性。

### 1.1.3 深部岩石工程稳定性研究

正是由于进入深部以后，岩石的物理力学性质有了很大的改变，再加之高应力的作用，塑性流变变形与剪胀扩容变形成为深部岩石力学工程中常见现象<sup>[32-36]</sup>。特别在深部煤矿巷道围岩中，还要受到回采工作面一次乃至多次采动的影响<sup>[37-39]</sup>，使得深部巷道中顶板下沉、底板鼓起、两帮严重挤出与片裂等现象越来越凸显。因此，开展深部岩石工程中的围岩稳定性及其控制研究，已经成为深部煤矿开采的核心课题之一。

### 1.1.4 深部岩体的破坏力学机理、破坏形态展布及演化

与浅部相比，深部岩体力学行为发生了变化，其中在深部岩体施工开挖后围岩中产生了断续交替的破裂区和相对完整区的现象，即所谓的分区破裂化现象<sup>[40-41]</sup>。近些年来，在钱七虎院士的倡导下，我国学者也对分区破裂问题进行了卓有成效的研究<sup>[42-48]</sup>。作为深部含有缺陷结构的层状岩体表现了凸显力学现象，其产生的力学机理应从围岩物性结构及力学性质和深部高应力2个方面进行考察。其中，围岩物性结构及力学性质是第一要素，深部高应力是第二要素。同时，由于对既定类型的岩石，要产生破裂都存在其特定的临界深度，若简单认为破裂仅在深部发生而浅部不存在是不严谨的。因此，对于深部破裂机理的认识需要全面、系统地去探讨，它极有可能为我们防治岩石动力灾害带来新认识。

### 1.1.5 深部岩体工程中的力学灾害机理及特征

随着埋深的增加，岩石力学灾害机理及其特征也发生了改变。由于在浅部岩石的破坏通常表现为一个渐进过程，其冲击动力学现象往往具有明显的破坏前兆<sup>[49-54]</sup>；而深部岩体的破坏表现往往具有突发性和强烈的冲击破坏特性<sup>[1]</sup>。同时，到了深部以后承压水位高，水头压力大，而且采掘扰动造成断层或裂隙活化，突水灾害往往具有明显的瞬时突发性，可预测性程度降低。在深部高应力作用下，煤层内瓦斯气体的存在，使得煤岩体中积聚了大量的气体能量，采掘工程的扰动将会导致煤与瓦斯突出更为严重。因此，把握深部岩石力学灾害的共性问题，深入探讨各类岩石力学灾害的孕育机理、形成条件，具有重要意义。特别是利用非线性分叉理论和混沌动力学来研究深部煤岩体灾变失稳演化全过程，将成为今后主要的攻关方向。

### 1.1.6 深部岩体动力灾害监测及预警理论与技术

目前，深部煤矿动力灾害的监测及预警理论研究主要是基于冲击地压发生的强度准则和能量原理。监测方法主要有经验类比法、局部探测方法和地球物理监测方法。局部探测法包括钻屑法、煤岩体变形、煤岩体应力测量法、流动地音监测法等。而地球物理监测方法主要包括微震系统监测法<sup>[55-62]</sup>和电磁辐射法<sup>[63-66]</sup>。就目前深部岩石动力灾害监测而言，手段发展很快，但要达到预警水平还相差甚远，因为单一的监测方法还存在局限性，再加之分析方法的不完善。因此，集成各种监测方法，进行建立起综合科学的分析方法，是实现科学预警的必由之路。

### 1.1.7 深部岩体力学灾害控制的科学设计方法

对于深部岩体力学灾害控制，除了进行监测预警之外，进行科学设计至关重要。例如针对深部高应力巷道支护问题，姜耀东等<sup>[67]</sup>对巷道底鼓特征及控制策略进行了探讨；余伟健等<sup>[68]</sup>针对金川三矿区深部破碎硐室地质特征，提出了三步开挖、二次支护和三次让压的设计方案，对深埋大跨度软岩硐室的长期稳定进行了有效控制，该优化设计方法有一定的推广价值；何满潮等<sup>[69-72]</sup>探讨了深部巷道围岩锚网索耦合支护技术；谭云亮等<sup>[73-79]</sup>从对深部锚固与围岩之间相互作用出发，提出了锚固安全潜力理论。对于动力灾害的防治理论，分为区域治理和局部防治2个层面。区域防治主要是通过采矿部署优化设计来达到减缓或消除冲击地压的目的，包括合理开采布置、保护层开采等。局部防治是对已具有冲击危险的区域进行解危，避免高应力集中和改善煤岩体介质性质以减弱积聚弹性能的能力<sup>[80-87]</sup>。目前，到深部开采以后，软岩也会发生冲击地压<sup>[88]</sup>，这与浅部的情形完全不同。因此，充分考虑深部复杂地质与应力环境下，深部岩石力学灾害响应所表现出的复杂非线性，使得在实施灾害控制设计时，更加贴近实际，是未来深部岩石力学灾害控制研究的重点。

## 1.2 深部巷道围岩变形与破坏特征

### 1.2.1 围岩变形与破坏随深度变化规律

随着深度的增加，巷道围岩变形和破坏范围都有明显增大<sup>[89-91]</sup>（图1-1）。就800 m采深与300 m采深情形相比，断面收缩率高达10倍之多，破坏范围增加24.5%（图1-2）<sup>[74]</sup>。

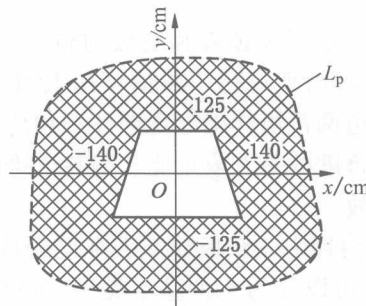


图1-1 深部回采巷道围岩破裂区边界定位坐标系

Fig. 1-1 Failure zone boundary of rock surrounding deep gate way

### 1.2.2 深部围岩变形破坏形态及基本机制

(1) 顶板变形破坏。深部顶板变形破坏具有2种形态：其一是深部巷道处于高应力中，巷道开挖以后，巷道围岩应力将重新分布，应力在巷壁附近发生高度集中，导致该区域的顶板岩层屈服进入塑性状态，形成破坏塑性区。塑性区的出现，致使应力集中区向纵深发展，当应力集中的程度超过顶板屈服强度时，将导致新的塑性区产生，从而形成所谓的松动破坏区<sup>[92]</sup>；其二是在水平高应力作用下，顶板岩层产生屈曲破坏，出现折断现象。

(2) 两帮变形破坏。巷道开挖后，巷帮煤体由原来的三向应力状态变为二向应力状态。煤帮在集中应力作用下会从巷帮表面至里依次形成松动区、塑性区、弹性区和原岩应

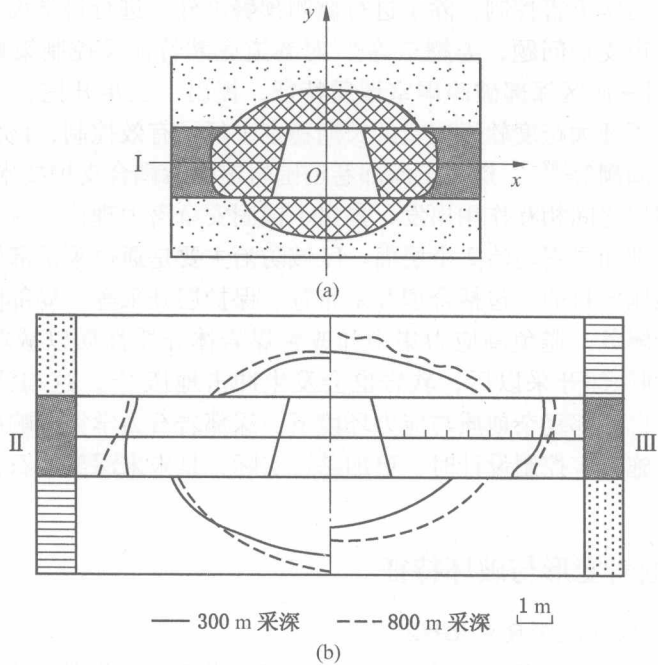


图 1-2 各类围岩结构全煤巷围岩破坏区形态

Fig. 1-2 Failure zone shape and scope of various surrounding rocks of coal entry at different depth

力区。巷帮的破坏扩展，将进一步引发顶板和底板的破坏。马念杰等<sup>[93]</sup>通过对邢东煤矿埋深 1000 m 的煤巷煤帮变形破坏特征进行了数值模拟表明，巷道开挖后，围岩破坏是由帮、底逐步向顶板发展的。巷道两帮煤体中出现塑性区和片帮会造成巷道跨度增大，而顶板岩层内的最大拉应力与巷道跨度的平方成正比。当巷道跨度过大时，顶板便有可能沿巷道两侧整体垮落，造成冒顶事故<sup>[94]</sup>。

(3) 底板破坏。深部巷道治理中，底板鼓起破坏已经成为难点之一<sup>[95]</sup>。对于底鼓的类型，按照姜耀东的观点<sup>[96-97]</sup>可以分为 4 种基本类型：挤压流动型、挠曲褶皱型、剪切错动型和遇水膨胀型。就深部底鼓形成机理而言，当围岩应力达到一定条件时，巷道底板破坏。而且围岩的水平应力大于垂直应力、垂直应力大于水平应力等都会引起底鼓。

深部巷道“顶板-两帮-底板”各部分的破坏具有极大的关联性：两帮的破坏将会加剧底板和顶板的破坏，而底板的破坏又反过来影响到两帮的破坏，这种耦合关系，使得在深部底板控制时，不得不充分考虑如何有效控制两帮的破坏<sup>[98-101]</sup>。

### 1.2.3 深部巷道围岩破裂演化

在浅部巷道开挖后，巷道围岩通常分为破裂区、塑性区和弹性区，这种分区现象可以用弹塑性力学理论进行解释。而进入深部后，巷道围岩中出现了破裂区和完整区交替分布的现象，即分区破裂化现象。

对这一分区破裂化现象的认识，一般可以追溯到 20 世纪 80 年代，E. I. Shemyakin 等在深部矿山 Маяк 开采现场采用电阻率仪发现了分区破裂化现象，并且进一步通过试验验证了该现象的存在<sup>[103]</sup>。M. B. Курленя 和 В. Н. Опарин 在对大量试验数据的分析和理论研究



的基础上,给出了各破裂区的半径和厚度表达公式<sup>[104]</sup>。我国方祖烈教授曾在金川镍矿区某深部巷道采用多点位移计探测围岩变形,得到深部巷道围岩位移交替变化现象<sup>[105]</sup>。

分区破裂化产生的机理,也成为研究的热点之一。E. I. Shemyakin 根据实际巷道和实验模型观察,围岩破裂分区时,其承受荷载变化相当缓慢,可当做静态看待,因此认为间隔破裂现象是在外部条件不变或缓慢变化时形成的,而且延续时间较长<sup>[106-108]</sup>。D. F. Malan 和 S. M. Spottiswoode 利用已有的相关探测资料,分析了采场顶板岩层间隔破裂随时间和开采活动的形成和发展,同时探讨了矿震与采场顶板围岩分区破坏的关联性<sup>[109]</sup>。Курленя 教授研究了分区破裂化效应中的时间因素<sup>[110]</sup>,他认为在高地应力水平下,围岩介质将由高应力区向卸荷区快速运动,该能量流使得围岩介质来不及产生许多微裂纹后再形成宏观裂纹,即来不及顺序地经过破坏的准备过程,而是介质位移速度超过了微裂纹的积累与聚合速度,宏观粗裂纹立即突跃产生,即材料突然地破坏,同时在其周围由于应力释放,不再产生微裂纹。如果应力水平足够高,围岩积累的变形能足够大,高速能量流过程将继续,得以在第一批裂缝的卸荷影响范围之外,继续突跃地产生第二批粗裂缝,过程将延续到应力水平不再高的情况下,此时则恢复连续平稳的变形过程。

自2003年以来,随着深部工程的不断增加,深部一些新的岩石力学现象不断出现,中国的学者开始关注并开展了分区破裂化现象的研究。钱七虎院士<sup>[111]</sup>认为深部围岩分区破裂化现象是一个与空间、时间效应密切相关的科学现象,分区破裂化效应的产生,一方面是由于高地应力和开挖卸荷导致围岩的“劈裂”效应,另一方面是由于围岩深部高地应力和开挖面应力释放所形成的应力梯度而产生的能量流。贺永年等认为分区破裂揭示了深部隧洞围岩的另一种平衡过程及其新的平衡稳定形式<sup>[112]</sup>。顾金才<sup>[43]</sup>、潘一山<sup>[113]</sup>通过模型试验发现岩石环形裂纹的出现与矿压、加载方式和岩石力学特性有关。周小平等运用弹性力学和断裂力学,探讨并确定了破裂区和非破裂区的宽度和数量<sup>[44]</sup>。现场探测是揭示分区破裂现象的重要手段。李术才等<sup>[47]</sup>通过现场探测发现各破裂分区的半径  $R_i$  与巷道半径  $r$  的关系式为  $R_i = 2^{(i-1)}/2r$  ( $i=1, 2, 3, 4$ ),且围岩内产生了4个破裂分区。谭云亮等<sup>[46,114-117]</sup>对不同采动应力影响下的不同结构深部岩层的破裂特征进行了探测,发现在含有软弱结构的深部煤矿巷道中,深部含弱结构岩层的破裂不仅与内含弱结构和高应力两因素有关,而且随着采动影响不断扩展演化。

深部岩层破裂问题已经引起了许多专家学者的关注,是目前深部工程建设中急需解决的理论和实际问题之一。但目前关于深部巷道围岩破裂机理还未达成共识,对深部巷道围岩破裂与应力分布状态和物性、与巷道支护设计及冲击动力现象等之间的关系,还是需要深入研究的课题。

### 1.3 深部巷道围岩灾害监测

从深部巷道围岩灾害显现特征上讲,深部巷道围岩灾害可以分为突变型灾害和流变大变形型。突变型灾害属于动力型,主要指的是冲击地压、煤与瓦斯突出、围岩突水等;流变大变形型属于准静力型,主要指的是巷道围岩流变变形,如两帮鼓出、顶板离层下沉和底板鼓起。由于这两类深部巷道围岩灾害机理不同,其监测及控制技术将有很大差别。

#### 1.3.1 突变型灾害监测

在深部围岩突变型动力灾害孕育演化过程中,随着岩体破裂、裂隙扩展将释放能量并

以声波、电磁波等形式释放出来。煤矿中发生的岩爆、煤和瓦斯突出、突水等地质灾害，与产生的微地震现象有着必然的联系<sup>[119-122]</sup>。因此，基于微地震技术、电磁辐射等地球物理方法来监测深部岩石力学动力灾害，成为近些年来的热点。

(1) 微地震监测。当巷道围岩内发生破裂时，将产生地震波向周围传播。在空间上不同方位设置微震传感器，可以记录这些微地震波的到达时间、传播方向等信息，然后利用各种计算方法确定岩石的破裂点，即震源的空间位置<sup>[123]</sup>。微地震监测中震源的位置、发震时刻、震源强度都是未知的，确定这些因素恰恰是微地震监测的首要任务。国内外微地震监测技术可以分为三大类：第一类以监测大范围矿区岩层震动为主的系统，监测震动频率在 100 Hz 以内，重点是监测地震，定位精度一般在 100 ~ 500 m；第二类以监测工作面周围岩层震动为主的系统，监测震动频率在 20 ~ 300 Hz，重点是监测岩层破裂，定位精度一般在 5 ~ 10 m；第三类以监测小范围（如巷道周围）岩层破裂为主的系统，监测震动频率在 300 Hz 以上，通常被称为地音系统。地音系统监测的范围较小<sup>[123-126]</sup>。近些年来，我国利用微地震技术监测煤矿冲击地压、金属矿山岩爆、矿山突水等取得了卓有成效的工作<sup>[127-138]</sup>。可以预见，利用微地震技术，针对深部巷道围岩动力灾害孕育演化过程进行实时监测，是防灾减灾的重要手段。

(2) 电磁辐射监测。当煤岩体受载变形破裂时，电子等带电粒子变速运动就会向外辐射电磁波，这就是电磁辐射现象。岩石电磁辐射的研究是从地震工作者发现震前电磁异常开始的。我国和前苏联是较早开展此研究的国家，日本、希腊、美国、瑞典、德国等国也开展了这方面的研究。许多研究表明<sup>[139-141]</sup>，受载煤岩的变形破裂过程中，电磁辐射信号基本呈逐渐增强的趋势，这对于预测预报煤岩动力灾害现象具有重要意义。

窦林名等<sup>[143]</sup>现场观测表明，工作面周围不同位置，电磁辐射信号是不同的。煤体中的应力越高，变形破裂越强烈，磁辐射信号越强。王恩元<sup>[144]</sup>、聂百胜等<sup>[145]</sup>在徐州三河尖煤矿、山东华丰煤矿、抚顺老虎台煤矿等运用 KBD5 电磁辐射监测仪对冲击地压的试验与应用，获得了明显效果。王云海等<sup>[146]</sup>把电磁辐射技术用于监测回采工作面顶板的运动，结果表明，电磁辐射信号的变化与工作面顶板断裂时间有较好的对应关系。利用电磁辐射技术，监测深部巷道围岩动力灾害是值得深化研究的方向，但区分与过滤环境电磁场的影响是关键。

### 1.3.2 流变大变形灾害监测

深部巷道围岩流变包括物性流变和剪胀扩容流变，呈现出典型的软岩巷道特征，即具有四周来压、整体收敛、变形强烈等特点，而且初期变形速度通常都在 10 mm/d 以上，围岩剧烈破坏，常常造成支护体失效<sup>[147]</sup>。因此，对于围岩变形及破坏区域监测，对于巷道加固方案的制订，具有直接指导意义。通常，对于围岩变形的监测，分为表面收敛变形和深部位移监测，前者较为简单，后者多采用多点位移计或离层计。对于围岩破坏监测，可采用钻孔摄像探测和雷达探测。

(1) 围岩深部变形与破裂监测。对于围岩深部变形监测，多以监测顶板离层为主。从机械式离层仪监测<sup>[148-149]</sup>，发展到光栅位移实时监测系统<sup>[150-151]</sup>和基于电磁信号与位移转化离层遥测预警系统<sup>[152-153]</sup>，使得深部巷道围岩内部不同位置处的变形较容易获得。但问题是，如何对不同围岩条件下围岩破坏，特别是顶板塌垮的预警模式以及预警临界值的确定，仍然是深部巷道中的一大难题。

(2) 地质雷达探测。地质雷达方法是一种用于确定地下介质分布的广谱电磁技术。它是从地面发射高频电磁脉冲波, 利用其反射来探测目的体及其地质现象。由于地质雷达使用了高频、宽频带短脉冲和采样技术, 因此其探测分辨率高于其他的地球物理勘探手段。电磁波在地下介质传播时, 其路径、电磁场强度与波形将随所通过介质的电性质及几何形态而变化, 因此, 根据接收到波的旅行时间、幅度及波形特征, 便可推断介质的结构。对于巷道围岩而言, 其受力破坏都有一定范围, 在该范围内, 岩体为破裂松弛状, 电磁波在其中传播时, 波形呈杂乱无章形态, 强度较低, 且无明显同相轴, 当电磁波经过破碎带与非破坏区交界面时, 必然发生较强的反射, 从而可以根据反射波图像特征来确定破坏范围的大小<sup>[154-155]</sup>。采用地质雷达探测, 可以对不同组合巷道围岩的破裂分布进行有效探测, 并为锚杆支护参数的确定提供依据<sup>[91,156-157]</sup>, 这在华丰煤矿千米深井支护实践中得到了证实。同时, 还可以对侧向支承压力分布进行监测<sup>[158]</sup>。一方面, 雷达探测作为无损探测, 能够探测出深部巷道围岩破裂范围及分布。另一方面, 探测精度与探测范围之间矛盾还不能回避: 高频情况下, 探测精度高, 但波速衰减快, 探测范围小; 在低频情况下, 探测精度低, 但波速衰减慢, 探测范围大。因此, 需要对雷达探测的适用范围与精度要求进行系统考虑。

#### 1.4 深部巷道围岩破坏及控制研究展望

随着对深部岩石力学问题研究认识的深化, 深部巷道围岩破坏及控制研究方面, 需要在以下几个方面有所突破:

(1) 围岩流变大变形控制。深部巷道围岩流变大变形<sup>[159-161]</sup>不可避免, 传统的锚杆、锚索支护已经无法适应深部围岩大变形的需要。如注浆长锚索加固技术、复合材料注浆技术、封闭式新型强力支架支护等是今后深部支护的发展方向。

(2) 围岩动力灾害控制。深部巷道围岩动力灾害已经成为威胁人身安全的重要组成部分, 如掘进工作面产生冲击地压等<sup>[162]</sup>。因此深入开展深部围岩动力灾害控制机理及技术, 如松动卸压、高强度柔性支护材料等, 应成为深部动力灾害控制的重要研究课题。

(3) 温度应力耦合破坏机制。进入深部开采以后, 围岩温度升高, 当应用通风、制冷等降温技术后, 围岩因温度变化引起应力变化<sup>[163-165]</sup>, 使得深部围岩破坏演化受到温度场变化的影响。因此, 作为深部开采中新的岩石力学问题——温度变化诱发的围岩破坏不容忽视, 是一个值得开展的新研究方向。

(4) 围岩破坏与变形演化实时监测。在煤矿开采中, 随着开采工作的不断进行, 围岩在采动支承应力的作用下, 将处在一个不断演化的动态过程中。采用实时在线监测技术, 并对深部巷道围岩破坏失稳预警, 是今后重要研究方向。

(5) 深部采动对围岩破坏影响。正如上所述, 采动应成为深部围岩破裂演化<sup>[166]</sup>的重要因素之一。如何深入揭示不同采动包括多次采动叠加强对深部巷道的影响, 特别是建立起深部开采扰动与破裂演化及深部岩石力学灾害之间的关系, 已经成为深部巷道控制领域亟待解决的重大课题。

#### 参考文献

[1] 何满潮, 谢和平, 彭苏萍, 等. 深部开采岩体力学研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24

(16): 2803 - 2813.

- [2] DIERING D H. Ultra - deep level mining: future requirements [J]. Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, 1997, 97 (6): 249 - 255.
- [3] GURTUNCA R G, KEYNOTE L. Mining below 3000 m and challenges for the South African gold mining industry [A]. Proceedings of Mechanics of Jointed and Fractured Rock [C]. Rotterdam: A. A. Balkema, 1998: 3 - 10.
- [4] DIERING D H. Tunnels under pressure in an ultra - deep Wifwatersrand gold mine [J]. Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, 2000, 100: 319 - 324.
- [5] VOGEL M, ANDRAST H P. Alp transit - safety in construction as a challenge health and safety aspects in very deep tunnel construction [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2000, 15 (4): 481 - 484.
- [6] JOHNSON R A S. Mining at ultra - depth, evaluation of alternatives [A]. Proceedings of the 2nd North America Rock Mechanics Symposium [C]. Montreal: NARMS'96, 1996: 359 - 366.
- [7] 谢和平. 深部高应力下的资源开采 - 现状、基础科学问题与展望 [A]. 香山科学会议编. 科学前沿与未来: 第六集 [C]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 179 - 191.
- [8] 何满潮. 深部开采工程岩石力学的现状及其展望 [A]. 中国岩石力学与工程学会编. 第八次全国岩石力学与工程学术大会论文集 [C]. 北京: 科学出版社, 2004: 88 - 94.
- [9] PATERSON M S. Experimental deformation and faulting in Wombeyan marble [J]. Bull. Geol. Soc. Am., 1958, 69: 465 - 467.
- [10] MOGI K. Deformation and fracture of rocks under confining pressure: elasticity and plasticity of some rocks [J]. Bull. Earthquake Res. Inst. Tokyo Univ., 1965, 43: 349 - 379.
- [11] MOGI K. Pressure dependence of rock strength and transition from brittle fracture to ductile flow [J]. Bull. Earthquake Res. Inst. Tokyo Univ., 1966, 44: 215 - 232.
- [12] HEARD H C. Transition from brittle fracture to ductile flow in Solenhofen limestone as a function of temperature, confining pressure, and interstitial fluid pressure [J]. Bull. Geol. Soc. Am., 1960, 79: 193 - 226.
- [13] PUSCH R. Mechanisms and consequences of creep in crystalline rock [A]. HUDSON J A ed. Comprehensive Rock Engineering [C]. Oxford: Pergamon Press, 1993: 227 - 241.
- [14] MALAN D F. Simulation of the time - dependent behavior of excavations in hard rock [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2002, 35 (4): 225 - 254.
- [15] MALAN D F, BASSON F R P. Ultra - deep mining: the increase potential for squeezing conditions [J]. J. S. Afr. Inst. Min. Metall., 1998, 98: 353 - 363.
- [16] MALAN D F. Time - dependent behavior of deep level tabular excavations in hard rock [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1999, 32: 123 - 155.
- [17] MALAN D F, SPOTTISWOODE S M. Time - dependent fracture zone behavior and seismicity surrounding deep level stopping operations [A]. Rockburst and Seismicity in Mines [C]. Rotterdam: A. A. Balkema, 1997: 173 - 177.
- [18] WITTKKE W. Rock Mechanics: Theory and Applications with Case Histories [M]. Berlin: Springer - Verlag, 1990.
- [19] HOKE E, BROWN E T. Practical estimates of rock mass strength [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1997, 34 (8): 1165 - 1186.
- [20] HOKE E, BROWN E T. Empirical strength criterion for rockmasses [J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1980, 106 (9): 1013 - 1035.

- [21] MOGI K. Effect of intermediate principal stress on rock failure [J]. *J. Geophys. Res.*, 1967, 72: 5117 - 5131.
- [22] MICHELIS P. Polyaxial yielding of granular rock [J]. *J. Engng. Mech. ASCE*, 1985, 111 (8): 1049 - 1066.
- [23] 俞茂宏. 双剪理论及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [24] 俞茂宏. 线性和非线性的统一强度理论 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26 (4): 662 - 669.
- [25] Yu Maohong, Zan Yuewen, Zhao Jian, et al. A unified strength criterion for rock material [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2002, 39 (8): 975 - 989.
- [26] 周宏伟, 谢和平, 左建平. 深部高地应力下岩石力学行为研究进展 [J]. *力学进展*, 2005, 35 (1): 91 - 99.
- [27] 周小平, 钱七虎, 杨海清. 深部岩体强度准则 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27 (1): 117 - 123.
- [28] 汪斌, 朱杰兵, 邬爱清, 等. 高应力下岩石非线性强度特性的试验验证 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29 (3): 542 - 547.
- [29] SINGH J. Strength of rocks at depth [A]. *Rock at Great Depth* [C]. Rotterdam: A. A. Balkema, 1989: 37 - 44.
- [30] KWASNIEWSKI M A. Laws of brittle failure and of B - D transition in sandstone [A]. *Rock at Great Depth* [C]. Rotterdam: A. A. Balkema, 1989: 45 - 58.
- [31] SHIMADA M. Lithosphere strength inferred from fracture strength of rocks at high confining pressures and temperatures [J]. *Tectonophysics*, 1993, 217: 55 - 64.
- [32] RANALLI G, MURPHY D C. Rheological stratification of the lithosphere [J]. *Tectonophysics*, 1987, 132: 281 - 295.
- [33] BLACIC J D. Importance of creep failure of hard rock joints in the near field of a nuclear waste repository [A]. *Proc. Workshop on Nearfield Phenomenon in Geologic Repositories for Radioactive Waste* [C]. [s. l.]: [s. n.], 1981: 121 - 132.
- [34] PUSCH R. Mechanisms and consequences of creep in crystalline rock [A]. HUDSON J A ed. *Comprehensive Rock Engineering* [C]. Oxford: Pergamon Press, 1993: 227 - 241.
- [35] MALAN D F. Time - dependent behavior of deep level tabular excavations in hard rock [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 1999, 32: 123 - 155.
- [36] MALAN D F. Simulation of the time - dependent behavior of excavations in hard rock [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2002, 35 (4): 225 - 254.
- [37] Tan Yunliang, Sun Chunjian, Wu Zike. Visco - elasto - plastic simulations for coal pillar stability affected by mining [A]. Cai Meifeng, Wang Jin'an ed. *Boundaries of Rock Mechanics* [C]. London: Taylor & Francis, 2008: 383 - 388.
- [38] Zhao Zhigang, Tan Yunliang, Hu Qingting. Mechanism analysis on rheological instability of rock sample [A]. Cai Meifeng, Wang Jin'an ed. *Boundaries of Rock Mechanics* [C]. London: Taylor & Francis, 2008: 263 - 266.
- [39] Zhao Tongbin, Ma Yanhua, Tan Yunliang. Creep characteristics simulation of deep soft rock roadway and long - term mechanical analysis of lining support [J]. *Journal of Coal Science & Engineering*, 2009, 15 (2): 193 - 196.
- [40] 钱七虎, 李树忱. 深部岩体工程围岩分区破裂化现象研究综述 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27 (6): 1278 - 1284.
- [41] ADAMS G R, JAGER A J. Petroscopic observations of rock fracturing ahead of stope faces in deep - level

- gold mine [J]. Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, 1980, 80 (6): 204 - 209.
- [42] 钱七虎. 非线性岩石力学的新进展—深部岩石力学的若干关键问题 [A]. 第八次全国岩石力学与工程学术大会论文集 [C]. 北京: 科学出版社, 2004: 10 - 17.
- [43] 顾金才, 顾雷雨, 陈安敏, 等. 深部开挖洞室围岩分层断裂破坏机制模型实验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27 (3): 433 - 438.
- [44] 周小平, 钱七虎. 深埋巷道分区破裂化机制 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26 (5): 877 - 885.
- [45] 唐春安, 张永彬. 岩体间隔破裂机制及演化规律初探 [J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27 (7): 1362 - 1369.
- [46] 谭云亮, 孙春江, 宁建国, 等. 深部侧空条件下顶板岩层分区破裂探测研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29 (S1): 2623 - 2629.
- [47] 李术才, 王汉鹏, 钱七虎, 等. 深部巷道围岩分区破裂化现象现场监测研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27 (8): 1545 - 1553.
- [48] 王明洋, 宋华, 郑大亮, 等. 深部巷道围岩的分区破裂机制及“深部”界定探讨 [J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25 (9): 1771 - 1776.
- [49] 潘一山, 李忠华, 章梦涛. 我国冲击地压分布类型机理及防治研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22 (11): 1844 - 1851.
- [50] 谭云亮, 李芳成, 周辉. 冲击地压声发射前兆模式初步研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19 (4): 425 - 428.
- [51] 谭云亮, 赵同彬, 颜伟. 顶板活动地震波突变特征的小波识别 [J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22 (11): 1874 - 1877.
- [52] 缪协兴, 孙海, 吴志刚. 徐州东部软岩矿区冲击矿压机理分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18 (4): 428 - 431.
- [53] 姜耀东, 赵毅鑫, 刘文岗, 等. 煤岩冲击失稳的机理和实验研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [54] 姜耀东, 赵毅鑫, 何满潮, 等. 冲击地压机理的细观研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26 (5): 901 - 906.
- [55] 陈波, 郑文涛. 地震活动与煤矿瓦斯涌出事故之间的影响关系 [J]. 煤炭学报, 2005, 30 (4): 447 - 450.
- [56] 邓世坤. 探地雷达在水利设施现状及隐患探测中的应用 [J]. 物探与化探, 2000, 24 (4): 296 - 301.
- [57] 纪洪广, 史明霞. 频繁矿震作用下断层活化机理及其危害评价 [J]. 中国矿业, 2005, 12 (3): 37 - 41.
- [58] 姜福兴, 杨淑华, Luo Xun. 微地震监测揭示的采场围岩空间破裂形态 [J]. 煤炭学报, 2003, 28 (4): 357 - 360.
- [59] 姜福兴, 杨淑华, 成云海, 等. 煤矿冲击地压的微地震监测研究 [J]. 地球物理学报, 2006, 49 (5): 1511 - 1516.
- [60] 李庶林, 尹贤刚, 郑文达, 等. 凡口铅锌矿多通道微震监测系统及其应用研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24 (12): 2048 - 2053.
- [61] 李世愚, 和雪松, 张少泉, 等. 矿山地震监测技术的进展及最新成果 [J]. 地球物理学进展, 2004, 19: 853 - 859.
- [62] 陆莱平, 窦林名, 吴兴荣, 等. 岩体微震监测的频谱分析与信号识别 [J]. 岩土工程学报, 2005,

- 27 (7): 772 - 775.
- [63] 聂百胜, 何学秋, 王恩元, 等. 电磁辐射法预测煤矿冲击地压 [J]. 太原理工大学学报, 2000, 31 (6): 609 - 624.
- [64] 何学秋, 聂百胜, 王恩元, 等. 矿井煤岩动力灾害电磁辐射预警技术 [J]. 煤体学报, 2007, 32 (1): 56 - 59.
- [65] 窦林名, 何学秋. 煤岩冲击破坏模型及声电前兆判据研究 [J]. 中国矿业大学学报, 2004, 33 (5): 504 - 508.
- [66] 窦林名, 何学秋. 冲击矿压危险预测的电磁辐射原理 [J]. 地球物理学进展, 2005, 20 (2): 427 - 431.
- [67] 姜耀东, 赵毅鑫, 刘文岗, 等. 深部开采中巷道底鼓问题的研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23 (7): 2396 - 2401.
- [68] 余伟健, 高谦, 张周平, 等. 深埋大跨度软岩硐室让压支护设计研究 [J]. 岩土工程学报, 2009, 31 (1): 40 - 48.
- [69] 何满潮, 李乾, 蔡健, 等. 兴安煤矿深部返修巷道锚网索耦合支护技术 [J]. 煤炭科学技术, 2006, 34 (12): 1 - 4.
- [70] 刘文涛, 何满潮, 齐干, 等. 深部全煤巷道锚网耦合支护技术应用研究 [J]. 采矿与安全工程学报, 2006, 23 (3): 272 - 276.
- [71] 何满潮, 胡永光, 郭志, 等. 大断面软岩巷道耦合支护技术研究 [J]. 矿山压力与顶板管理, 2005, 22 (4): 1 - 4.
- [72] 孙晓明, 何满潮, 冯增强. 深部松软破碎煤层巷道锚网索支护技术研究 [J]. 煤炭科学技术, 2005, 33 (3): 47 - 50.
- [73] 谭云亮, 尹华, 王同旭. 加锚围岩复合介质等效弹模 F - BEM 耦合反演识别方法 [J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 21 (S2): 1535 - 1537.
- [74] 谭云亮, 刘传孝. 巷道围岩稳定性预测与控制 [M], 徐州: 中国矿业大学出版社, 1999: 1 - 263.
- [75] 谭云亮, 王春秋, 顾士坦. 锚杆加固巷道顶板稳定性潜力机理分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22 (S1): 2210 - 2213.
- [76] 谭云亮, 王春秋, 顾士坦. 巷道锚杆加固岩体的复合增强力学分析 [J]. 工程力学, 2003, 20 (增2): 195 - 198.
- [77] Tan Yunliang, Zhang Lijun, Xiao Yaxun. Controllable theory and applications for the wall bolting reinforcement in the road way of seam [J]. Journal of Coal Science & Engineering, 2007, 13 (3): 328 - 331.
- [78] Tan Yunliang, Sun Chunjian, Gu Shitan, et al. Anchor safety potential reinforcing theory and applications in roadway affected by mining [J]. Procedia Earth and Planetary Science 1, 2009: 438 - 443.
- [79] Tan Yunliang, Zhang Lijun, Yang Huiming. On the stress distribution at the bonding interface between rock and bolt [J]. Geomechanics and Geoengineering: an international journal, 2008, 3 (1): 71 - 77.
- [80] FRID V. Electromagnetic radiation method water - infusion control in rockburst - prone strata [J]. Journal of Applied Geophysics, 2000, 43 (1): 5 - 13.
- [81] Yi X P, KAISER P K. Mechanisms of rockmass failure and prevention strategies in rockburst conditions [A]. YONG R P ed. Rockbursts and Seismicity in Mines. Rotterdam [C]. Rotterdam: A. A. Balkema, 1993: 141 - 148.
- [82] 窦林名, 何学秋. 冲击矿压防治理论与技术 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2001.

- [83] 窦林名, 何焯, 张卫东. 孤岛工作面冲击矿压危险及其控制 [J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22 (11): 1866 - 1869.
- [84] 毛仲玉, 张修峰. 深部开采冲击地压治理的研究 [J]. 煤矿开采, 1996, 6 (3): 39 - 43.
- [85] 齐庆新, 雷毅, 李宏艳, 等. 深孔断顶爆破防治冲击地压的理论与实践 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26 (S1): 3522 - 3527.
- [86] 苏承东, 李化敏. 深埋高应力区巷道冲击地压预测与防治方法研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27 (S2): 3840 - 3846.
- [87] 赵本均, 腾学军. 冲击地压及其防治 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1995.
- [88] 缪协兴, 孙海, 吴志刚. 徐州东部软岩矿区冲击矿压机理分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18 (4): 428 - 431.
- [89] 谭云亮, 宋扬, 姜福兴, 等. 深部巷道围岩稳定性的 FEM 与 BEM 耦合数值模拟分析 [J], 岩石力学与工程学报, 1998, 17 (S): 854 - 857.
- [90] 宋扬, 谭云亮, 杨永杰. 巷道两帮破坏范围的 EKKO 雷达探测研究 [J]. 实验力学, 1998, 13 (4): 477 - 484.
- [91] 谭云亮, 刘传孝, 韩宪军. 巷道围岩破坏发育规律结构诊断方法 [J]. 煤炭学报, 2000, 25 (Sup): 62 - 66.
- [92] 张晓君, 靖洪文, 郑怀昌. 深部高应力巷道围岩破裂演化过程数值模拟 [J]. 金属矿山, 2009, 391: 33 - 37.
- [93] 马念杰, 贾安立, 马利, 等. 深井煤巷煤帮支护技术研究 [J]. 建井技术, 2007, 27 (1): 15 - 18.
- [94] 贾明魁. 锚杆支护煤巷冒顶事故研究及其隐患预测 [D]. 北京: 中国矿业大学 (北京), 2004.
- [95] 康红普. 软岩巷道底鼓的机理及防治 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1993.
- [96] 姜耀东, 陆士良. 巷道底鼓机理分析 [J]. 煤炭学报, 1994, 19 (4): 343 - 351.
- [97] 姜耀东, 赵毅鑫, 刘文岗, 等. 深部开采中巷道底鼓问题的研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 23 (14): 2396 - 2401.
- [98] 王卫军, 冯涛. 加固两帮控制深井巷道底鼓的机理研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24 (5): 808 - 811.
- [99] 李兴华, 王卫军, 侯朝炯. 加固顶板控制巷道底鼓的数值分析 [J]. 中国矿业大学学报, 2003, 32 (4): 436 - 439.
- [100] 柏建彪, 侯朝炯. 深部巷道围岩控制原理与应用研究 [J]. 中国矿业大学学报, 2006, 35 (2): 145 - 148.
- [101] 王卫军, 侯朝炯. 回采巷道底鼓力学原理及控制研究新进展 [J]. 湘潭矿业学院学报, 2003, 18 (1): 1 - 6.
- [102] 谢和平, 陈忠辉. 岩石力学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [103] SHEMYAKIN E I, FISENKO G L, KURLENYA M V, et al. Zonal disintegration of rocks around underground workings, part I: data of in - situ observations [J]. Journal of Mining Science, 1986, 22 (3): 157 - 168.
- [104] КУРЛЕНЯ М В, ОПАРИН В Н. Проблемы нелинейной геомеханики Ч [J]. 1999, (3): 12 - 23.
- [105] 方祖烈. 软岩巷道维护原理与控制措施 [C]//何满潮. 中国煤矿软岩巷道支护理论与实践. 北京: 煤炭工业出版社, 1996: 64 - 70.
- [106] SHEMYAKIN E I, FISENKO G L, KURLENYA M V, et al. Zonal disintegration of rocks around underground workings, part II: rock fracture simulated in equivalent materials [J]. Journal of Mining Science, 1986, 22 (4): 223 - 232.



- [107] SHEMYAKIN E I, FISENKO G L, KURLENYA M V, et al. Zonal disintegration of rocks around underground workings, part III: theoretical concepts [J]. *Journal of Mining Science*, 1987, 23 (1): 1 - 6.
- [108] SHEMYAKIN E I, KURLENYA M V, OPARIN V N, et al. Zonal disintegration of rocks around underground workings, part IV: practical applications [J]. *Journal of Mining Science*, 1989, 25 (4): 297 - 302.
- [109] MALAN D F, SPOTTISWOODE S M. Time - dependent fracture zone behavior and seismicity surrounding deep level stopping operations [A]. GIBOWICZ S J, LASOCKI S ed. *Rockbursts and Seismicity in Mines* [C]. Rotterdam: A. A. Balkema, 1997: 173 - 177.
- [110] КУРЛЕНЯ М В, ОПАРИН В Н. К вопросу о факторе времени при разрушении горных пород [J]. *ФТПРПИ*, 1993, 2: 6 - 33.
- [111] 钱七虎. 非线性岩石力学的新进展—深部岩体力学的若干问题 [A]. *中国岩石力学与工程学会编. 第八次全国岩石力学与工程学术大会论文集* [C]. 北京: 科学出版社, 2004: 10 - 17.
- [112] 贺永年, 韩立军, 邵鹏, 等. 深部巷道稳定的若干岩石力学问题 [J]. *中国矿业大学学报*, 2006, 35 (3): 288 - 296.
- [113] 潘一山, 李英杰, 唐鑫, 等. 岩石分区破裂化现象研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26 (S1): 3335 - 3341.
- [114] Tan Yunliang, Zhao Tongbin, XiaoYaxun. In situ investigations of failure zone of floor strata in mining close distance coal seams [J]. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2010, 47 (7): 865 - 870.
- [115] Sun Chunjiang, Ning Jianguo, Tan Yunliang. The study on zonal disintegration of surrounding rock in deep mudstone roadway under high stress [A]. 2009 International Symposium on Risk Control and Management of Design, Construction and Operation in Underground Engineering [C], Berlin: Springer, 2009: 1 - 4.
- [116] Sun Chunjian, Ning Jianguo, Tan Yunliang. Study on zonal disintegration of surrounding rock in deep cross roadway [A]. Tang Chunan ed. *Controlling Seismic Hazard Sustainable Development of Deep Mines* [C]. New York: Rinton Press, Volume 2, 2009: 1497 - 1504.
- [117] Sun Chunjiang, Ning Jianguo, Tan Yunliang. Study of deformation - failures zone of rock surrounding roadway driven along goaf under different stress conditions [A]. *Prevention and Control Technology of Gas Disaster in Coal Mine*. Beijing/New York: Science Press, 2009: 177 - 183.
- [118] 孙春江. 深部巷道围岩分区破裂化形成机理研究 [J]. *中国矿业*, 2009, 18 (9): 46 - 47.
- [119] 谭云亮, 王学水. 煤矿坚硬顶板运动过程中声发射特征的初步研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 1992, 11 (3): 275 - 283.
- [120] 谭云亮, 李芳成, 周辉. 冲击地压声发射前兆模式初步研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2000, 19 (4): 425 - 428.
- [121] 谭云亮, 孙伟芳. 冲击地压 AE 时间序列小波神经网络预测模型 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2000, 19 (S): 1034 - 1036.
- [122] Tan Yunliang, Zhou Hui, Han Xianjun. A new wavelet neural network predicting model for AE time series of rock burst [A]. *Computer Methods and Advances in Geomechanics* [C]. Rotterdam: A. A. BALKEMA, 2001: 223 - 225.
- [123] 程建远, 李浙龙, 张广忠, 等. 煤矿井下地震勘探技术应用现状与发展展望 [J]. *勘探地球物理进展*, 2009, 32 (2): 96 - 111.
- [124] Luo X, HATHERLY P, DUNCAN F M, et al. Micro - seismic monitoring of roof reaction to high - wall mining [A]. AZIZ N, INDRARATNA B ed. *Proceedings International Conference On Geo - mechanics /*