

采动煤岩渗透率演化模型及数值模拟

张春会¹, 赵莺菲², 王来贵³, 于永江³

(1.河北科技大学 建筑工程学院, 河北 石家庄 050018; 2.中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410012;

3.辽宁工程技术大学 力学与工程学院, 辽宁 阜新 123000)

摘 要: 为描述采动煤岩渗透率演化过程, 引入强度退化指数, 基于 Hoek-Brown 强度准则, 建立了考虑围压影响的煤岩应变软化力学本构模型。给出了体积应变和渗透率的关系方程, 结合应变软化模型建立了采动煤岩渗透率演化模型, 并在 FLAC 下予以实现。通过数值模拟研究了不同围压下圆柱岩样的峰后应变软化力学行为和某煤矿工作面开采过程中煤岩的渗透率演化过程, 结果表明: (1) 该模型能较好地反映围压对煤岩峰后应变软化行为的影响; (2) 随着工作面推进, 越来越多的煤岩单元破坏, 渗透率也不断增长, 逐渐成为瓦斯等流体运移的主要通道。(3) 模型能再现采动煤岩渗透率演化的动态过程, 从而为煤与瓦斯共采、煤层瓦斯抽放和瓦斯灾害防治提供指导。

关 键 词: 采动煤岩; 强度退化指数; 渗透率演化; 围压; 体积应变; 应变软化模型

中图分类号: TU 451

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2015) 08-2409-10

Permeability evolution model of mined coal rock and its numerical simulation

ZHANG Chun-hui¹, ZHAO Ying-fei², WANG Lai-gui³, YU Yong-jiang³

(1. School of Civil Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang, Hebei 050018, China;

2. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410012, China;

3. School of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, China)

Abstract: To describe the permeability evolution process, the strength degradation index is introduced based on Hoek-Brown strength criterion; a strain softening constitutive model with confining pressure for coal rock is established. The relationship between volumetric strain and permeability is given; and combining the strain softening model, a permeability evolution model is proposed. Then the model is implemented in FLAC. Numerical cases are simulated including the post peak strain softening behaviors of a cylinder rock sample under different confining pressures and the permeability evolution of overburden rock during mining. The results show that: (1) The effects of confining pressure on post peak strain softening mechanical behaviors and permeability evolution can be better reflected by the model proposed. (2) With the advancing of working face, more and more coal rock elements fail and the permeability also increases. Gradually the main channels of gas flow appear. (3) The model is capable of reproducing the permeability evolution process of mining coal rock, providing a reference for the practice of simultaneous extraction of coal and gas, methane recovery and gas disaster prevention.

Keywords: mined coal rock; strength degradation index; permeability evolution; confining pressure; volumetric strain; strain softening model

1 引 言

煤层瓦斯抽采不仅能为我国能源供应提供保障, 而且还能保护环境和防治瓦斯灾害, 目前已受到了国内外广泛关注^[1-2]。我国绝大多数煤储层瓦斯含量高、吸附性强、渗透率低(一般在 $(0.1 \sim 0.001) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间), 必须采取合适的技术措施提高

煤储层渗透性, 才能获得经济的抽采效率, 煤与瓦斯共采技术就是一种重要的人工增透提高煤层瓦斯抽采效率的技术^[3], 其原理是煤层开采打破地层原始的力学平衡状态, 引起工作面周围煤岩应力重新分布、变形及破裂, 并形成复杂的裂隙网络, 从而提高煤岩的渗透性和煤层瓦斯抽放率。但目前还没有合适的理论来定量描述采动影响下煤岩渗透性的

演化规律,这在一定程度上阻碍了煤与瓦斯共采、瓦斯抽放和灾害防治等技术的发展。

煤岩的渗透率是煤层瓦斯抽采分析中的关键参数,国内外已对此开展了大量研究。Wang 等^[4]通过试验发现,在煤岩剪胀过程中渗透率开始增长;Tang 等^[5]建立了非均质煤岩的应力-渗流-损伤耦合数学模型,研究了渗流和损伤演化的发展规律;孙培德等^[6]通过试验研究了含瓦斯煤在三轴压缩过程中渗透率的演化规律;Yuan 等^[7]提出了水-力耦合的局部劣化方法,并研究了煤岩破坏过程中渐进损伤和渗流行为;Jiang 等^[8]提出煤岩的渗透率随着煤岩微裂隙的扩展、成核而快速增长;Perera 等^[9]研究了温度对破裂煤渗透性的影响;于永江等^[10]研究了应力和温度对型煤渗性的影响,发现当型煤破坏后其渗透率显著增长;范俊佳等^[11]研究了微孔结构对煤岩渗透率的影响规律;尹光志等^[12]研究了加、卸载对煤渗透率的影响规律;魏建平^[13]研究了含水率对煤渗透性的影响规律;Badrul 等^[14]通过三轴渗流试验研究了围压对 3 种不同类型煤岩的渗透性的影响规律;Cai 等^[15]使用 AE 方法研究了循环荷载引起的不可逆变形对煤渗透性的影响规律;Chen 等^[16]通过试验研究了北山花岗岩破裂对其渗透率的影响,结果表明,随着轴向应力增加,花岗岩的渗透率呈先下降,然后基本维持不变,而后增长的 3 阶段过程;于永江等^[17]提出了一个承载围岩的渗透率演化模型,但模型中的渗透率依赖于单元尺寸。

总体上,国内外目前研究主要集中在温度、孔压、有效应力、变形、含水率、加卸载、煤岩孔隙和裂隙结构等因素对煤渗透率的影响规律上,并未考虑煤炭资源开采过程中采场围岩应力重分布、水平应力卸载效应导致的煤体变形破裂以及形成的复杂裂隙网络对煤岩渗透性的影响。而实际上开采导致的高密度、高联通度的采动裂隙,使煤层的渗透率发生了根本性改变,目前还没有合适的方法来定量描述这种改变。

本文引入强度退化指数,基于 Hoek-Brown 强度准则,建立了考虑围压影响的岩石应变软化力学模型,结合体积应变和渗透率的关系方程,建立了采动煤岩渗透率演化模型,并在 FLAC 下予以实现。使用该模型研究了煤开采过程中采场煤岩的渗透率演化过程,从而为采煤瓦斯灾害防治和煤与瓦斯共采等技术提供理论指导和定量评价依据。

2 煤岩单元的应变软化模型

煤岩单元的本构模型决定了煤岩的力学响应规

律,因此,准确描述煤岩的力学行为规律对于煤岩单元渗透率演化规律研究具有重要意义。

煤岩视作应变软化材料,忽略煤岩峰前的压缩阶段,全程应力-应变曲线可简化为 3 个阶段:线弹性阶段 OA 、强度退化阶段 AB 和残余塑性流动阶段 BC ,如图 1 所示。

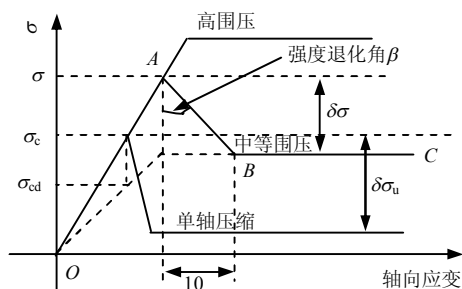


图 1 煤岩单元简化的变形过程^[18]

Fig.1 Simplified deformation process for rock element^[18]

2.1 线弹性阶段

在线弹性阶段,应力与应变的关系可表示为

$$\Delta\sigma_{ij} = 2G\Delta\varepsilon_{ij} + (K - 2G/3)\Delta\varepsilon_{kk}\delta_{ij} \quad (1)$$

式中: K 为体积模量; G 为剪切模量; δ_{ij} 为 Kronecher 符号; $\Delta\sigma_{ij}$ 、 $\Delta\varepsilon_{ij}$ 分别为应力张量增量和应变张量增量。

2.2 强度准则

当煤岩单元应力达到峰值强度时,发生剪切破坏。Hoek-Brown 强度准则可以较好地描述煤岩强度和围压之间的关系^[19]

$$F = (\sigma_1 - \sigma_3) - \sigma_c \left(m_i \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s_i \right)^{0.5} = 0 \quad (2)$$

式中: σ_1 、 σ_3 分别为破坏时煤岩单元的大、小主应力; σ_c 为岩块的单轴抗压强度; m_i 、 s_i 为未破坏煤岩的 Hoek-Brown 材料参数。

2.3 考虑围压影响的残余强度

煤岩破坏后,内部微裂隙的扩展导致其力学特性劣化,强度发生退化(图 1 中 AB 段),并维持在残余强度,变形呈理想塑性行为(图 1 中 BC 段)。试验研究表明,围压对煤岩的残余强度有很大影响,并可使用强度退化指数来描述^[18,20]:

$$\sigma_r = \sigma \left(1 - \frac{r_d \delta\sigma_u}{\sigma_c} \right) \quad (3)$$

式中: $\delta\sigma_u$ 为单轴条件下的强度降; σ 为 σ_3 围压下的峰值强度; r_d 为强度退化指数,可以表示为^[18]

$$r_d = \exp(-n_d \sigma_3) \quad (4)$$

式中： n_d 为拟合系数。

假设煤岩单元的残余强度也服从 Hoek-Brown 强度准则，残余强度的材料参数由破坏前的 s_i 、 m_i 退化而得，分别为 s_d 和 m_d ，并可表示为^[17, 19]

$$s_d = \left(\frac{\sigma_{cd}}{\sigma_c} \right)^2 \quad (5)$$

$$m_d = m_i \left(\frac{\sigma_{cd}}{\sigma_c} \right)^{9/14} \quad (6)$$

$$\sigma_{cd} = \sigma_c - r_d \delta \sigma_u \quad (7)$$

式中： σ_{cd} 为图 1 所示的计算值，该值为围压的函数。由式 (7) 可知，单轴条件下其值为单轴残余强度，高围压下（理想弹塑性）为单轴抗压强度。结合式 (5)， s_d 也是围压的函数，随着围压增加， σ_{cd} 增加， s_d 也增加，在高围压下，岩石变形呈理想塑性状态， $\sigma_{cd} = \sigma_c$ ， $s_d = 1$ ，在单轴条件下 s_d 最小。

于是残余强度的 Hoek-Brown 强度准则可表示为

$$F = (\sigma_1 - \sigma_3) - \sigma_c \left(m_d \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s_d \right)^{0.5} = 0 \quad (8)$$

式 (8) 定义了破坏单元残余强度的屈服面。

2.4 强度退化

围压对应变软化过程中的强度退化也有很大影响。于永江等^[21]定义了一个峰后强度退化角（如图 1 中 β ）来描述围压对强度退化过程的影响，强度退化角随着围压增加而增大。本文为反映围压对强度退化过程的影响，在 FLAC 中将强度参数 s_i 、 m_i 的退化过程定义成与一个软化参数相关的数组（FLAC 中的 Table）。由于小主应力方向塑性应变更好地体现了煤岩的破坏特征^[22]，因此，本文取小主应力方向塑性应变 e_3^p 作为软化参数。

于是，可以定义强度参数 s 、 m 随着 e_3^p 的增长而线性变化的过程，如图 2 所示。

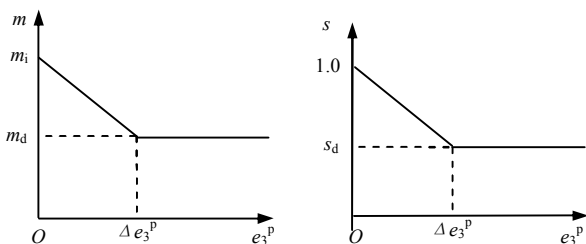


图 2 s 和 m 随着 e_3^p 的退化
Fig.2 Degradations of s and m with e_3^p

根据试验结果，小主应力方向塑性应变 e_3^p 与围压之间的关系可表示为

$$\Delta e_3^p = D \exp(N \sigma_3) \quad (9)$$

式中： D 和 N 为拟合参数。

2.5 剪胀

试验研究结果表明^[23-25]，围压对剪胀也有很大影响，围压越大，剪胀越小^[7]；在峰值应力之前，剪胀不大。因此，本文假设剪胀在应力达到峰值才发生。

若煤岩单元破坏，应变增量可以表示为弹性应变和塑性应变之和，同时在 FLAC 中假设在中主应力方向没有塑性流动，即^[22]

$$\Delta e_1 = \Delta e_1^e + \Delta e_1^p \quad (10)$$

$$\Delta e_2 = \Delta e_2^e \quad (11)$$

$$\Delta e_3 = \Delta e_3^e + \Delta e_3^p \quad (12)$$

于是，流动法则可以表示为

$$\Delta e_1^p = \gamma \Delta e_3^p \quad (13)$$

式中： γ 为塑性因子，它取决于应力状态和应力历史。

如煤岩单元破坏，使用塑性体积应变与塑性轴向应变之间的斜率 k 来描述体积变化趋势^[22]：

$$k = \frac{\Delta \varepsilon_v^p}{\Delta e_1^p} = \frac{1 + \gamma}{\gamma} \quad (14)$$

从式 (14) 可见， k 是塑性因子 γ 的函数。

γ 受应力水平的影响，在复杂应力状态下很难确定，因此，体积应变也很难计算。但可以给出 3 种简单应力条件下的 γ ，然后由这 3 种简单应力条件下的计算结果通过插值方法计算复杂应力条件下的 γ ，进而计算相应的体积应变。下面介绍 3 种简单应力条件塑性因子的确定。

(1) 纯拉伸状态。若煤岩各向均匀拉伸，则所有主应力均为拉应力，流动法则可以表示为^[22]

$$\gamma_{\text{tf}} = \frac{\sigma_1}{\sigma_3} \quad (15)$$

(2) 拉压组合状态。若压应力为大主应力 σ_1 ，拉应力为小主应力 σ_3 ，相关联的流动法则可以表示为^[22]

$$\Delta e_i^p = -\gamma_{\text{af}} \frac{\partial F}{\partial \sigma_i} \quad (16)$$

式中: 下标 i 表示主应力方向, 分别为 1,2,3; F 为塑性势函数, 形式见式 (2)。

塑性因子可以表示为^[22]

$$\gamma_{af} = \frac{\Delta e_1^p}{\Delta e_3^p} = \frac{-1}{1 + 0.5\sigma_c(m_1\sigma_3/\sigma_c + s)^{-0.5}(m_1/\sigma_c)} \quad (17)$$

(3) 当围压增加至某一指定值 σ_3^{CV} 时, 煤岩单元破坏后不产生剪胀, 这时可使用恒定体积的流动法则^[22], 即

$$\gamma_{CV} = -1 \quad (18)$$

于是, 对于围压 σ_3 , $0 < \sigma_3 < \sigma_3^{CV}$, γ 可利用线性插值方法确定, 即

$$\gamma = \left(\frac{1}{\gamma_{af}} + \left(\frac{1}{\gamma_{CV}} - \frac{1}{\gamma_{af}} \right) \frac{\sigma_3}{\sigma_3^{CV}} \right)^{-1} \quad (19)$$

于是式 (14) 中 k 可表示为

$$k = 0, \sigma_3 \geq \sigma_3^{CV} \quad (20)$$

$$k = 1 + \frac{1}{\gamma_{af}} + \left(\frac{1}{\gamma_{CV}} - \frac{1}{\gamma_{af}} \right) \frac{\sigma_3}{\sigma_3^{CV}}, \sigma_3 < \sigma_3^{CV} \quad (21)$$

式中: σ_3^{CV} 为指定围压值, 高于这一围压不产生剪胀。关于 σ_3^{CV} 的取值目前尚无好的方法。本文建议取煤岩的脆延转化围压作为 σ_3^{CV} 值。当围压达到脆延转化围压时, 煤岩峰后应变软化力学特征消失, 呈理想塑性流动变形状态, 剪胀已不明显^[26]。岩石的脆延转化围压可通过三轴试验确定^[27-28]。

于是, 破坏后煤岩的体积应变可表示为

$$\varepsilon_V = \varepsilon_{Ve, \max} - (\varepsilon_l - \varepsilon_{le, \text{peak}})k \quad (22)$$

式中: $\varepsilon_{Ve, \max}$ 为单元最大弹性体积应变; $\varepsilon_{le, \text{peak}}$ 为峰值应变。体积应变可写为

$$\varepsilon_V = f(\sigma_3, m_1, s_1, \sigma_c, \sigma_3^{CV}, m_d, s_d) \quad (23)$$

3 采动煤岩渗透率演化

煤岩的渗透率表征了流体通过煤岩的难易程度。从某种程度上来讲, 渗透率是由煤岩连通孔隙和裂隙空间决定的。当煤岩受采动影响发生变形、破坏, 煤岩内的孔隙空间、裂隙空间及其连通状况发生改变, 从而使得煤岩的渗透率也相应发生改变。因此, 采动煤岩的渗透率是一个受采矿过程影响的动态场变量。试验研究已经表明^[4, 10, 14, 17], 体积应变对煤岩的渗透率有很大影响。体积应变与渗透率之间可以表示为

$$\eta = \eta_0 + \frac{d\eta}{d\varepsilon_V} \varepsilon_V \quad (24)$$

式中: η_0 为初始渗透率; $d\eta/d\varepsilon_V$ 为单位体积应变引起的渗透率增量, 可通过实测渗透率与体积应变关系数据通过拟合方法确定。

4 数值实现

本文中采动煤岩的渗透率演化通过式 (22) ~ (24) 计算。在 FLAC 下可以利用 Fish 函数方法实现采动煤岩的渗透率动态演化模拟。煤岩视作 Hoek-Brown 材料, 峰值后的应变软化过程受围压影响, 并通过材料参数 m 和 s 与 e_3^p 之间的关系确定。煤层开采开始后, 计算每次开挖后煤岩的体积应变, 并进而计算采动煤岩渗透率。具体实现过程如图 3 所示。

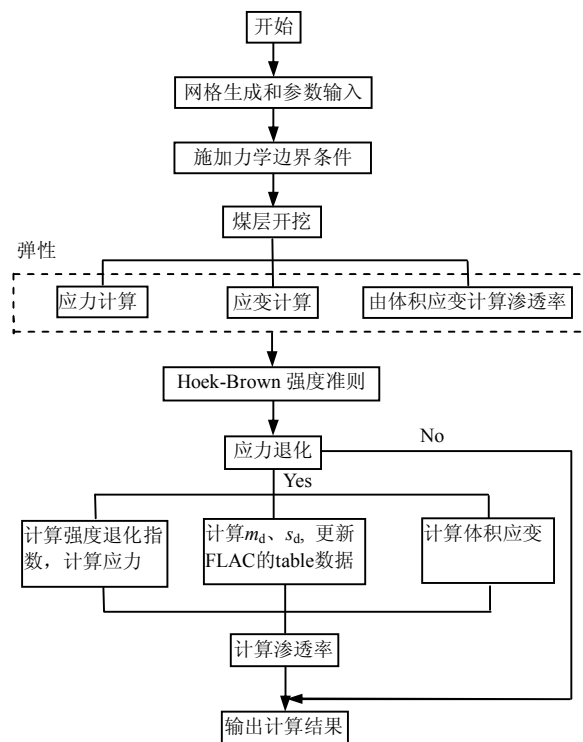


图 3 采动煤岩渗透率演化计算过程
Fig.3 Procedures for implementing evolution of permeability for mined coal rock

5 验证

5.1 围压、残余强度与小主应力方向塑性应变之间关系的验证

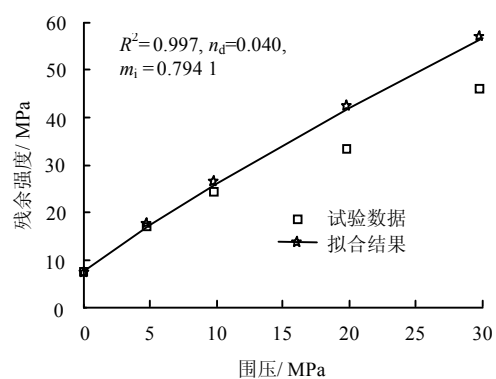
由文献[29-30]的山西软弱泥岩和三峡花岗岩三轴试验数据可以得到: 山西软弱泥岩的弹性模量为 2 040 MPa, 泊松比为 0.3; 三峡花岗岩的弹性模量为 41 000 MPa, 泊松比为 0.21。

岩石屈服后的应变包括弹性应变和塑性应变，从测得径向应变中扣除径向弹性应变，得到径向塑性应变即 e_3^p 。山西软弱泥岩和三峡花岗岩三轴试验数据整理结果分别如表 1 所示。

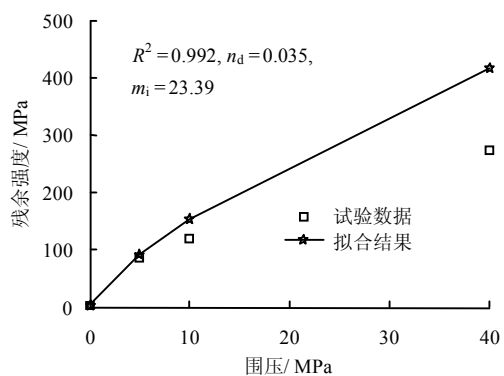
表 1 山西软弱泥岩^[29]、三峡花岗岩^[30]三轴试验数据
Table 1 Triaxial compression test data of Shanxi weak mudstone^[29], Three Gorges granite^[30]

岩性	围压 / MPa	峰值强度 / MPa	残余强度 / MPa	r_d	e_3^p
山西 软弱 泥岩	0	20.5	7.7	1.000 0	0.020 90
	5	32.0	16.5	0.776 0	0.027 60
	10	38.0	23.8	0.598 0	0.028 50
	20	48.0	33.0	0.500 0	0.030 10
	30	57.0	45.5	0.323 0	0.031 30
三峡 花岗岩	0	162.0	5.0	1.000 0	0.004 47
	5	245.0	90.0	0.652 8	0.007 87
	10	335.0	122.0	0.656 1	0.011 04
	40	425.0	275.0	0.364 2	0.015 09

使用式 (5) ~ (7) 拟合残余强度与围压的关系，拟合结果如图 4 所示。从图可以看出，式 (5) ~ (7) 能较好地拟合围压与岩石残余强度之间的关系。



(a) 山西软弱泥岩

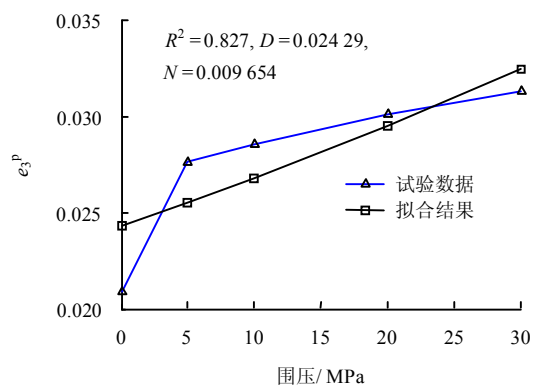


(b) 三峡花岗岩

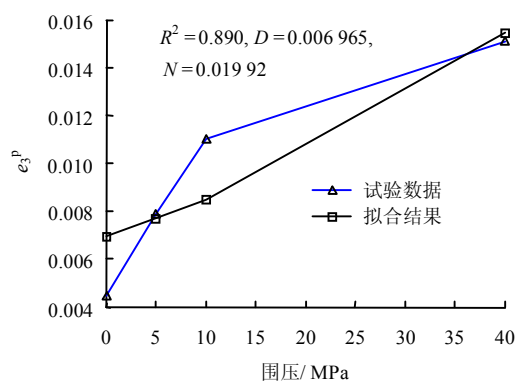
图 4 岩石残余强度拟合结果

Fig.4 Fitting results of residual strength of rocks

使用式 (9) 拟合围压与 e_3^p 之间的关系，拟合结果如图 5 所示。从图可以看出，拟合结果与试验数据之间的相关系数在 0.8~0.9 之间，式 (9) 能较好地拟合围压与岩石小主应力方向塑性应变 e_3^p 之间的关系。



(a) 山西软弱泥岩



(b) 三峡花岗岩

图 5 岩体小主应力方向塑性应变拟合结果

Fig.5 Fitting results of plastic confining strain component e_3^p of rock masses in minor principal stress direction

5.2 数值模型的验证

在室内试验室对巴里坤矿砂岩和煤开展了三轴压缩试验和三轴渗流试验，部分成果已介绍于文献 [31]。这里基于本文模型在 FLAC 下模拟巴里坤砂岩三轴压缩过程。

数值模型为圆柱状，尺寸为 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ ，围压分别为 0、6、14、26、40、50、60 MP。轴向位移加载，加载速度为 $4.0 \times 10^{-8} \text{ m/步}$ 。岩样的弹性模量为 6.9 GPa，泊松比为 0.27。 m_i 和 s_i 分别为 6.276 和 1.0。通过数据拟合，得到拟合参数 n_d 、 D 和 N 分别为 0.035 7、0.003 325 和 0.031 55。岩样的单轴抗压强度为 55.4 MPa，单轴残余强度为 6.1 MPa。

图 6 为通过数值模拟得到的不同围压下巴里坤砂岩轴向应力-应变关系曲线与试验结果的对比如。

从图可以看出,数值模拟得到的结果与试验数据基本一致,这表明,本文模型和数值模拟方法是可靠的。本文模型较好反映了围压对煤岩渐进破坏过程中强度退化的影响。

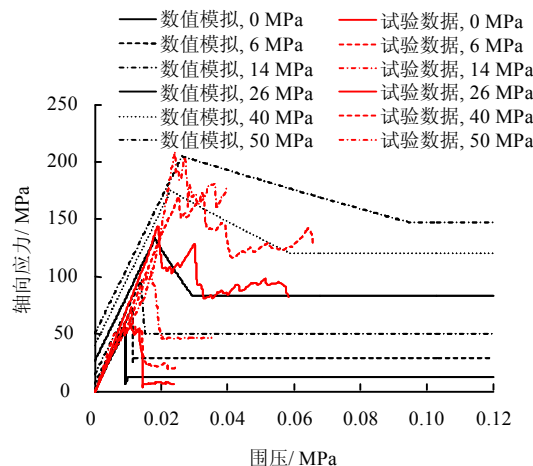


图6 数值模拟得到的巴厘坤砂岩轴向应变与应力关系曲线

Fig.6 Axial stress and strain curves of Balikpapan sandstone obtained from numerical simulation

6 采动煤岩的渗透率演化

6.1 算例概况及数值模型

某煤矿工作面煤层倾向长 210 m (图 7 中垂直纸面方向), 走向长为 900 m, 煤层埋置深度为 420 m, 煤厚为 5.0 m。利用本文模型模拟工作面回采 75 m

围岩的渗透率演化过程。煤层分 3 步开挖, 开挖宽度分别为 30、30、15 m。煤层顶、底板均为巴厘坤砂岩, 由于倾向长度远大于开采宽度, 因此, 采用平面应变模型进行研究。底板岩层厚度取 20 m, 开挖区两侧各取 360 m, 模型长度共计 795 m, 模型的尺寸已足够大, 边界条件对计算结果基本没有影响。

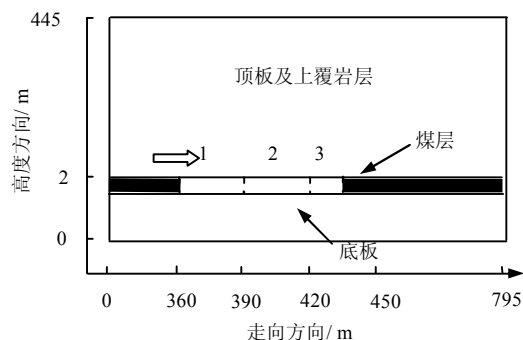


图7 煤层开挖示意图
Fig.7 Sketch of coal excavation

模拟中砂岩和煤的物理力学参数如表 2 所示。

6.2 渗透率演化方程

表 2 中巴厘坤砂岩与煤的渗透率参数是通过三轴渗流试验得到的。试验设备为 YAW2000 电液伺服岩石试验机, 试验机的最大轴向荷载为 2 000 kN。三轴压力渗流室为自制, 最大围压为 30 MPa, 试验装置如图 8 所示。

表 2 煤岩物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of coal rock

岩体	密度 (g/cm ³)	泊松比	弹性 模量 / GPa	单轴 抗压 强度 / MPa	单轴 强度降 $\delta\sigma_u$ / MPa	Hoek-Brown 参数		抗拉 强度 / MPa	拟合系数			σ_3^{CV} / MPa	初始渗透率 η_0 (10^{-16} m^2)	$d\eta/d\varepsilon_v$ / 10^{-14}
						s_i	m_i		n_d	D	N			
砂岩	2.4	0.27	6.9	55.4	49.3	1.0	6.3	4.10	0.035 7	0.003 325	0.031 55	80	1.756	2.361
煤	1.4	0.30	3.6	17.0	16.1	1.0	3.4	0.51	0.051 0	0.003 411	0.031 61	70	1.756	2.361



图8 试验装置和试样

Fig.8 Experimental setup and sample

测试试样分别取自煤层顶板及煤层, 试样为圆柱形, 直径为 50 mm, 高为 100 mm。在轴向和侧向粘贴应变片测试轴向和径向应变。试验中加载速率为 0.5 MPa/min, 测试流体为 N₂, 采用稳定流法进行试验。在试件的上、下端各设置一个压力计, 测试进、出口 N₂ 压力。试验中围压为 10 MPa, N₂ 入口压力为 4.5 MPa, 出口压力为 0.1 MPa。

渗透率 η 由达西定律计算:

$$\eta = \frac{q\mu}{A} \left(\frac{dP}{dx} \right)^{-1} \quad (25)$$

式中: q 为流量 (m^3/s); μ 为流体黏度 ($\text{Pa} \cdot \text{s}$);

A 为试样横截面积(m^2); dP/dx 为压力梯度(Pa/m)。

在整个加载过程中测试岩样的渗透率和体积应变, 结果如图9所示。

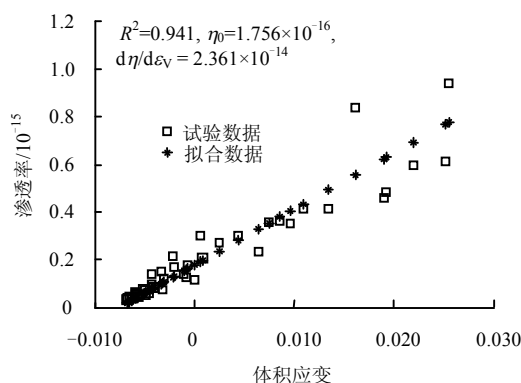


图9 渗透率和体积应变

Fig.9 Relationship between permeability and volumetric strain

从图9可见, 砂岩的渗透率与体积应变之间近似呈线性关系, 于是可写为

$$\eta = \eta_0 + \lambda \varepsilon_v \quad (26)$$

式中: η_0 为初始渗透率; $\lambda = d\eta/d\varepsilon_v$, 由 η 和 ε_v 的试验数据拟合确定。

由试验数据拟合式(26)结果为 $\eta_0 = 1.756 \times 10^{-16}$, $\lambda = 2.361 \times 10^{-14}$, 即

$$\eta = 1.756 \times 10^{-16} + 3.361 \times 10^{-14} \varepsilon_v \quad (27)$$

从式(27)及图9可见, 渗透率与体积应变之间可以近似使用线性关系拟合, 在一些研究中^[32], 提出采用分段函数拟合这两者之间的关系, 但实际上采用线性关系也可以较好地拟合许多已有的试验数据。

煤的渗透率结果与顶板砂岩渗透率相差不多, 为了便于观察渗透率演化规律取相同值进行计算。

6.3 数值模拟结果及分析

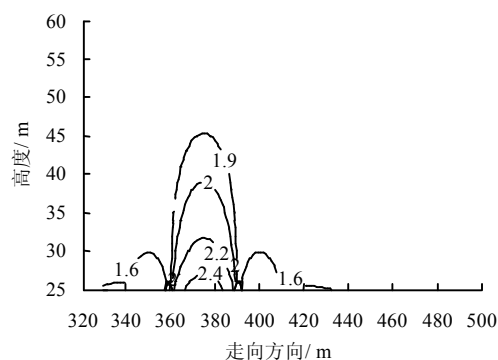
本文数值模拟的目的是观察采动条件下煤岩的渗透率演化, 因此, 在计算中不考虑煤层瓦斯孔压的影响, 采取非耦合算法进行分析^[17]。顶板岩层厚度取80 m, 底板岩层厚度取20 m, 最终开挖区两侧各取360 m, 模型长度共计795 m, 模型尺寸已足够大, 边界条件对计算结果基本没有影响。

砂岩和煤均采用本文应变软化模型, 材料参数见表2。在FLAC下建立计算模型, 获得不同开采步的渗透率计算结果如图10、11所示。

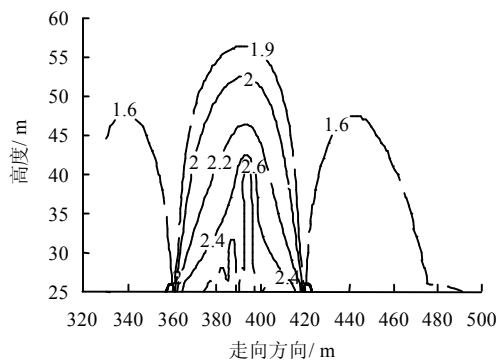
图10、11为不同推进宽度工作面上方和前方煤岩的渗透率演化情况。采动前煤岩的渗透率为

$1.756 \times 10^{-16} \text{ m}^2$, 随着工作面不断向前推进, 一方面采动过程中一些煤岩单元破坏, 渗透率增长, 并逐渐成为瓦斯运移的主要通道; 另一方面, 受采动应力影响而压缩的煤岩单元的渗透率将降低。

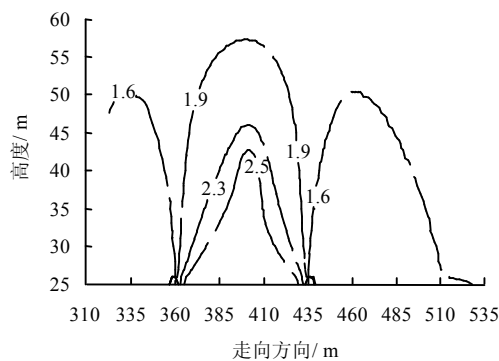
从图10可以发现, 推进宽度为30 m时, 在工作面上方5 m范围内的平均渗透率约为 $2.3 \times 10^{-16} \text{ m}^2$, 相较于原岩, 渗透率提高约31%。采动使得垂直方向煤岩渗透率增加, 影响高度约为20 m。随着工作面推进, 上覆煤岩增透率增加, 影响范围也增大。当推进宽度为60 m时, 在工作面上方5 m范围内平均渗透率为 $2.6 \times 10^{-16} \text{ m}^2$, 影响高度则增加至30 m。当推进宽度为75 m时, 在工作面上方5 m



(a) 工作面推进 30 m



(b) 工作面推进 60 m



(c) 工作面推进 75 m

图10 工作面上方煤岩渗透率演化(单位: 10^{-16} m^2)

Fig.10 Permeability evolution of overburden rock above workplace (unit: 10^{-16} m^2)

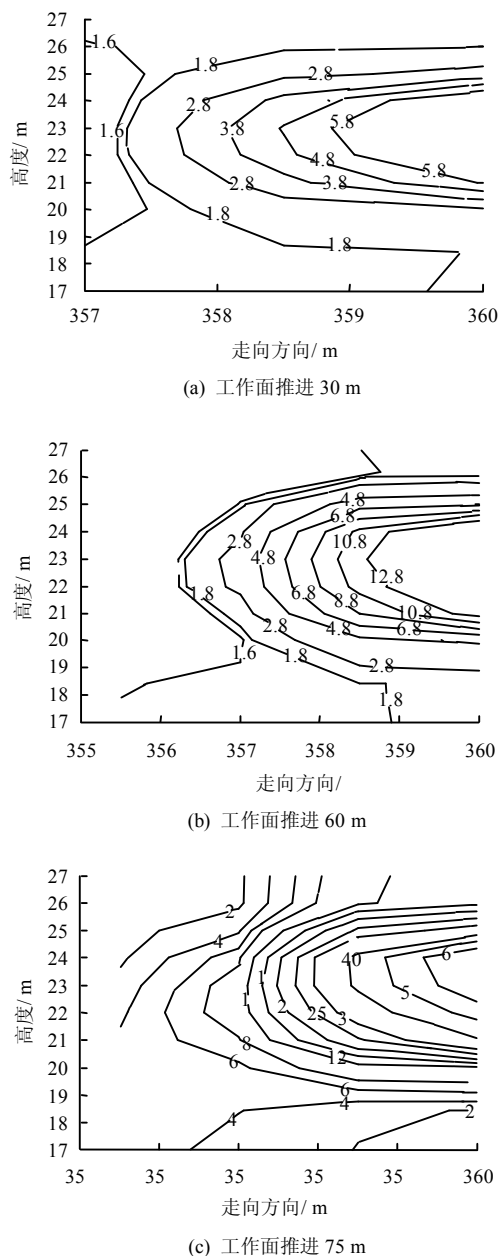


图 11 工作面前方煤岩渗透率演化(单位: 10^{-16} m^2)
Fig.11 Permeability evolution of overburden rock
in front of workface (unit: 10^{-16} m^2)

范围内平均渗透率为 $2.8 \times 10^{-16} \text{ m}^2$, 影响高度则增加至 33 m。

从图 11 可以发现, 推进宽度为 30 m 时, 在工作面前方 2 m 范围内的平均渗透率约为 $5.8 \times 10^{-16} \text{ m}^2$, 相较于原岩, 渗透率提高约 2.3 倍。采动使得工作面前方煤岩渗透率提高, 影响范围约为 2.5 m。随着工作面推进, 工作面前方煤岩增透率也增加, 影响范围也增大。当推进至 60 m 时, 在工作面前方 2 m 范围内平均渗透率为 $13.3 \times 10^{-16} \text{ m}^2$, 影响范围约为 3.8 m。当开采 75 m 宽度时, 在工作面前方 2 m 范围内平均渗透率为 $51.8 \times 10^{-16} \text{ m}^2$, 影响范围约为 5.2 m。

无论是工作面上方还是前方, 渗透率等值线分布都呈拱形分布, 从拱中心向外渗透率逐渐减小。在煤与瓦斯抽放共采中, 抽放孔宜布置在渗透率显著增加的拱形圈内。

7 结 论

(1) 本文模型能较好地反映围压对煤岩峰后应变软化力学行为的影响。

(2) 煤岩的渗透率与体积应变近似呈线性关系。

(3) 随着工作面推进, 采动煤岩单元破坏, 渗透率不断增长, 并逐渐成为瓦斯运移的主要通道。

(4) 无论是工作面上方还是前方, 渗透率等值线分布都呈拱形分布, 从拱中心向外渗透率逐渐减小。在煤与瓦斯抽放共采中, 抽放孔宜布置在渗透率显著增加的拱形圈内。

(5) 本文模型能再现采动煤岩渗透率演化的动态过程, 从而为煤层瓦斯抽放、瓦斯灾害防治提供指导。

参 考 文 献

- [1] 据宜文, 李清光, 谭锋奇. 煤矿瓦斯防治与利用及碳排放关键问题研究[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(6): 8—14.
JU Yi-wen, LI Qing-guang, TAN Feng-qi. Research on key issues of mine gas prevention and control and utilization as well as carbon emission[J]. *Coal Science and Technology*, 2014, 42(6): 8—14.
- [2] CHEN HAIDONG, CHENG YUANPING, REN TING-XIANG, et al. Permeability distribution characteristics of protected coal seams during unloading of the coal body[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2014, 71: 105—116.
- [3] 涂敏, 付宝杰. 低渗透性煤层卸压瓦斯抽采机理研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2009, 26(4): 433—436.
TU Min, FU Bao-jie. Extraction mechanism of relieved gas from low permeability seam[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2009, 26(4): 433—436.
- [4] WANG J, PARK H D. Fluid permeability of sedimentary rocks in a complete stress-strain process[J]. *Engineering Geology*, 2002, 63(3—4): 291—300.
- [5] TANG C, THAM L G, LEE P K K, et al. Coupled analysis of flow, stress and damage (FSD) in rock failure[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2002, 39: 477—89.
- [6] 孙培德, 万华根. 煤层气越流固气耦合模型及可视化模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(7): 1179—

- 1185.
- SUN Pei-de, WAN Hua-gen. Visual simulation on coupling model of sol-id deformation and gas leak flow[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(7): 1179—1185.
- [7] YUAN S C, HARRISON J P. Development of a hydro-mechanical local degradation approach and its application to modeling fluid flow during progressive fracturing of heterogeneous rocks[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 2005, 42 : 961—984.
- [8] JIANG T, SHAO J F, XU W Y, et al. Experimental investigation and micro- mechanical analysis of damage and permeability variation in brittle rocks[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 2010, 47(5): 703—13.
- [9] PERERA M S A, RANJITH P G, CHOI S K, et al. Investigation of temperature effect on permeability of naturally fractured black coal for carbon dioxide movement: An experimental and numerical study[J]. **Fuel**, 2012, 94: 596—605.
- [10] 于永江, 张华, 张春会, 等. 温度及应力对成型煤样渗透性的影响[J]. 煤炭学报, 2013, 38(6): 936—941.
- YU Yong-jiang, ZHANG Hua, ZHANG Chun-hui, et al. Effects of temperature and stress on permeability of standard coal briquette specimen[J]. **Journal of China Coal Society**, 2013, 38(6): 936—941.
- [11] 范俊佳, 据宜文, 柳少波, 等. 不同煤储层条件下煤岩微孔结构及其对煤层气开发的启示[J]. 煤炭学报, 2013, 38(3): 441—447.
- FAN Jun-jia, JU Yi-wen, LIU Shao-bo, et al. Micropore structure of coals under different reservoir conditions and its implication for coalbed methane development[J]. **Journal of China Coal Society**, 2013, 38(3): 441—447.
- [12] 尹光志, 李文璞, 李铭辉, 等. 加卸载条件下原煤渗透率与有效应力的规律[J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1497—1503.
- YIN Guang-zhi, LI Wen-pu, LI Ming-hui, et al. Permeability properties and effective stress of raw coal under loading-unloading conditions[J]. **Journal of China Coal Society**, 2014, 39(8): 149—1503.
- [13] 魏建平, 位乐, 王登科. 含水率对含瓦斯煤的渗流特性影响试验研究[J]. 煤炭学报, 2014, 39(1): 97—103.
- WEI Jian-ping, WEI Le, WANG Deng-ke. Experimental study of moisture content influences on permeability of coal containing gas[J]. **Journal of China Coal Society**, 2014, 39(1): 97—103.
- [14] BADRUL ALAM A K M, MASAKI NIIOKA, YOSHIAKI FUJII, et al. Effects of confining pressure on the permeability of three rock types under compression[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 2014, 65: 49—61.
- [15] CAI Y D, LIU D M, MATHEWS JONATHAN P, et al. Permeability evolution in fractured coal combining triaxial confinement with X-ray computed tomography, acoustic emission and ultrasonic techniques[J]. **International Journal of Coal Geology**, 2014, 122: 91—104.
- [16] CHEN Y F, HU S H, WEI K, et al. Experimental characterization and micromechanical modeling of damage-induced permeability variation in Beishan granite[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 2014, 71: 64—76.
- [17] 于永江, 张春会, 赵全胜, 等. 承载围岩渗透率演化模型及数值分析[J]. 煤炭学报, 2014, 39(5): 841—848.
- YU Yong-jiang, ZHANG Chun-hui, ZHAO Quan-sheng, et al. Permeability model for loaded rock and numerical analysis[J]. **Journal of China Coal Society**, 2014, 39(5): 841—848.
- [18] FANG Z, HARRISON J P. A mechanical degradation index for rock[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 2001, 38: 1193—1199.
- [19] HOEK E, BROWN E T. Practical estimates of rock mass strength[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 1997, 34: 1165—1186.
- [20] FANG Z, HARRISON J P. Development of a local degradation approach to the modelling of brittle fracture in heterogeneous rocks[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 2002, 39: 443—457.
- [21] 于永江, 张春会, 王来贵. 基于退化角的岩石峰后应变软化模型[J]. 煤炭学报, 2012, 37(3): 402—406.
- YU Yong-jiang, ZHANG Chun-hui, WANG Lai-gui. Post-peak strain softening model of rock based on degradation angle[J]. **Journal of China Coal Society**, 2012, 37(3): 402—406.
- [22] ITASCA. Fast Lagrangian Analysis of Continua, Version 5.0[M]. Minnesota: ITASCA, 2012.
- [23] ZOBACK M D, BYERLEE J D. The effect of cyclic differential stress on dilatancy in Westerly granite under uniaxial and triaxial conditions[J]. **Journal of**

- Geophysical Research**, 1975, 80: 1526—1530.
- [24] BESUELLE P, DESRUES J, RAYNAUD S. Experimental characterization of the localization phenomenon inside a Vosges sandstone in a triaxial cell[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 2000, 37: 1223—1237.
- [25] ARZÚA J, ALEJANO L R. Dilation in granite during servo-controlled triaxial strength tests[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 2013, 61(1): 43—56.
- [26] YUAN SHIH-CHE, HARRISON J P. An empirical dilatancy index for the dilatant deformation of rock[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 2004, 41: 679—686.
- [27] 汪斌, 朱杰兵, 邬爱清, 等. 锦屏大理岩加、卸载应力路径下力学性质试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(10): 2138—2144.
- WANG Bin, ZHU Jie-bing, WU Ai-qing. Experimental study on mechanical properties of Jinping Marble under loading and unloading stress paths[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(10): 2138—2144.
- [28] 朱珍德, 张勇, 王春娟. 大理岩脆-延性转换的微观机理研究[J]. 煤炭学报, 2005, 30(1): 31—35.
- ZHU Zhen-de, ZHANG Yong, WANG Chun-juan. Study on microcosmic mechanics for brittle-ductile transition of marble[J]. **Journal of China Coal Society**, 2005, 30(1): 31—35.
- [29] 陆银龙, 王连国, 杨峰, 等. 软弱岩石峰后应变软化力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(3): 640—648.
- LU Yin-long, WANG Lian-guo, YANG Feng, et al. Post-peak strain softening mechanical properties of weak rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(3): 640—648.
- [30] 张帆, 盛谦, 朱泽奇, 等. 三峡花岗岩峰后力学特性及应变软化模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增刊 1): 2651—2655.
- ZHANG Fan, SHENG Qian, ZHU Ze-qi, et al. Study on post-peak mechanical behaviour and strain-softening model of three GERGES granite[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(Supp.1): 2651—2655.
- [31] 张春会, 赵全胜. 饱水度对砂岩强度和模量影响的三轴试验[J]. 岩土力学, 2014, 35(4): 951—958.
- ZHANG Chun-hui, ZHAO Quan-sheng. Triaxial tests of effects of varied saturations on strength and modulus for sandstone[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(4): 951—958.
- [32] 薛东杰, 周宏伟, 唐威力, 等. 采动煤岩体瓦斯渗透率分布规律与演化过程[J]. 煤炭学报, 2013, 38(6): 930—935.
- XUE Dong-jie, ZHOU Hong-wei, TANG Xian-li, et al. Evolution of mining-induced enhancement and distribution of gas permeability in coal seam and surrounding rock[J]. **Journal of China Coal Society**, 2013, 38(6): 930—935.

(接第 2376 页)

《岩土力学》2015 年第 4 期被 EI 收录论文 (40 篇, 收录率 100 %) (2)

序号	论文题名	作者	页码
25	饱和正冻土水分迁移及冻胀模型研究	曾桂军, 张明义, 李振萍, 等	1085—1092
26	堆石料缩尺方法的分形特性及缩尺效应研究	赵婷婷, 周伟, 常晓林, 等	1093—1101
27	1989~2011 期间 8 次强地震中抗液化地基处理成功案例的回顾与启示	陈国兴, 顾小锋, 常向东, 等	1102—1118
28	软岩巷道可缓冲渐变式双强壳体支护原理及实践	贾宏俊, 王辉	1119—1126
29	深埋隧洞即时型岩爆孕育过程的频谱演化特征	肖亚勋, 冯夏庭, 陈炳瑞, 等	1127—1134
30	煤岩体采动裂隙网络的逾渗与分形特征关系研究	栗东平, 周宏伟, 薛东杰, 等	1135—1140
31	连续压实路基质量检验与控制研究	张家玲, 徐光辉, 蔡英	1141—1146
32	岩石弹塑性损伤本构模型建立及在隧道工程中的应用	王军祥, 姜谏男	1147—1158
33	地铁暗挖施工引起的管线与地层沉降关系研究	赵智涛, 刘军, 王霆, 等	1159—1166
34	移动荷载作用下土岩组合基坑吊脚桩变形分析	白晓宇, 张明义, 袁海洋	1167—1173
35	煤层定点水力压裂防冲的机制研究	冯宇, 姜福兴, 翟明华, 等	1174—1181
36	一种新的动态回弹模量有限元实现方法	宁夏元, 董城, 李志勇, 等	1182—1188
37	基于正态云模型的深埋地下工程岩爆烈度分级预测研究	王迎超, 靖洪文, 张强, 等	1189—1194
38	砂浆锚杆加固效果的等效数值模拟方法研究	陈东方, 冯夏庭, 徐鼎平, 等	1195—1204
39	二维随机场下边坡稳定性的径向基函数神经网络分析法	舒苏荀, 龚文惠	1205—1210
40	复杂矿山地质形体的三维数值网格划分自动化平台	向鹏, 纪洪广, 邹静, 等	1211—1216