

DOI: 10.11779/CJGE201709008

煤岩组合体峰前轴向裂纹演化与非线性模型

左建平^{1,2,3}, 陈 岩^{1,2}, 宋洪强¹, 魏 旭¹

(1. 中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京 100083; 2. 河南理工大学河南省矿产资源绿色高效开采与综合利用重点实验室, 河南 焦作 454000; 3. 中国矿业大学(北京)煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 北京 100083)

摘要: 随着中国煤炭开采深度逐渐加深, 煤岩组合体的力学特性与应力-应变关系显得越来越重要。煤岩组合体的原生裂纹和煤岩体之间的界面对其力学性质有较大影响。为了探知裂纹和界面的影响, 主要研究了轴向裂纹应变随应力、应变的演化特征, 并基于工程应变和自然(真实)应变的概念, 建立轴向裂纹闭合模型(axial crack closure model, 简称ACCM)及轴向裂纹扩展模型(axial crack propagation model, 简称ACPM), 最后建立了峰前应力-应变关系模型。分析发现, 轴向裂纹应变与轴向应变关系可分为4个阶段, 即初始阶段、稳定阶段、缓慢增长阶段和快速增长阶段, 轴向裂纹应变与轴向应力关系与之类似。轴向裂纹闭合模型、轴向裂纹扩展模型与峰前应力-应变模型均能够较好地与试验数据吻合, 能够描述应力-应变关系的非线性特点。

关键词: 岩石力学; 煤岩组合体; 裂纹闭合; 裂纹扩展; 非线性

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2017)09-1609-07

作者简介: 左建平(1978-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事裂隙岩体破坏及本构理论等方面的教学与研究工作。
E-mail: zjp@cumt.edu.cn。

Evolution of pre-peak axial crack strain and nonlinear model for coal-rock combined body

ZUO Jian-ping^{1,2,3}, CHEN Yan^{1,2}, SONG Hong-qiang¹, WEI Xu¹

(1. School of Mechanics & Civil Engineering, China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China; 2. Henan Key Laboratory for Green and Efficient Mining & Comprehensive Utilization of Mineral Resources, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;
3. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: With the gradual deepening of coal mining layer in China, fundamental understanding of mechanical characteristics and constitutive relationship of the coal-rock combined body is increasingly significant. The original crack and interlayer between coal and rock have a major influence on the mechanical properties of the coal-rock combined body. In order to investigate the influence of crack and interlayer, the evolution characteristics of axial crack strain along with axial strain and axial stress are studied, and based on the concept of engineering strain and natural(true) strain, the Axial Crack Closure Model (ACCM) and the Axial Crack Propagation Model (ACPM) are established. Finally the constitutive model for pre-peak stress-strain curve is proposed. It is found that on the basis of the axial crack strain changing along with the axial strain, there are 4 stages in the whole process: initial stage, stable stage, slow-growth stage and rapid-growth stage. The characteristics of the axial crack strain evolving with the axial stress are similar to those changing with the axial strain. The ACCM, ACPM and axial stress-strain model are found to fit with the experimental data well, and they can describe the nonlinear characteristic of stress-strain relationship.

Key words: rock mechanics; coal-rock combined body; crack closure; crack propagation; nonlinearity

0 引言

中国煤炭资源丰富, 但是开采条件极其复杂, 开采深度逐年加深, 进而造成冲击地压、煤与瓦斯突出等动力灾害频频发生^[1-2]。地质岩体灾害(如地震、岩爆、冲击地压等)的发生为彼此相互作用的若干地质体组成的力学系统非稳定变形的结果^[3]。此外, 深部

开采高应力状态下, 煤岩体之间的相互作用越来越强。

基金项目: 国家自然科学基金优秀青年基金项目(51622404); 国家自然科学基金项目(51374215, 11572343); “万人计划”青年拔尖人才及河南省矿产资源绿色高效开采与综合利用重点实验室开放基金项目(S201601)联合资助项目

收稿日期: 2016-06-17

因此, 煤岩组合体的力学特性研究显得愈发重要。

岩石的宏观变形及破坏是其裂纹发生闭合、起裂、扩展、贯通的结果。目前, 关于完整试样的常规单轴及三轴压缩试验较多, 并进行了系统性的总结^[4-6]。在微观尺度上, Zuo 等^[7]通过扫描电镜研究了缺口对裂纹起裂及扩展的影响。宏观尺度上, 裂纹对岩体的强度及破坏行为具有重要的影响^[8]。Wong 等^[9]对含预制裂纹的大理岩进行单轴压缩试验, 依据裂纹形态及扩展, 描述了不同的裂纹类型。Moradian 等^[10]根据声发射参数对加载中裂纹演化进行了分类。杨圣奇等^[11]分析了围压对断续预制裂纹大理岩扩容特性的影响规律。梁正召等^[12]基于细观统计损伤数值模型, 建立不同节理分布的断续节理岩体数值试样, 模拟了节理岩体的破坏过程。刘泉声等^[13]对低温裂隙岩体冻融损伤和裂隙扩展进行了深入的研究。为了定量描述裂纹的大小, Martin^[14-15]提出了裂纹应变的定义。Cai 等^[16]依据裂纹应变, 提出了岩体裂纹起裂应力和裂纹损伤应力阈值。王宇等^[17]研究了脆性岩石单轴压缩起裂机制, 讨论了基于裂纹体积应变拐点的起裂应力确定方法。

应力 - 应变关系一直是研究的热点问题。Liu 等^[18]、Zhao 等^[19]和李连崇等^[20]利用双应变胡克定律提出了在不同应力状态下孔隙岩石的应力 - 应变关系。Chen 等^[21]对含层理的板岩进行研究, 提出了板岩的各向异性模型, 并利用数值模拟了三轴压缩下板岩的应力 - 应变曲线。彭俊等^[22]等研究了岩石内部裂纹的闭合压密效应及其定量评价方法。煤岩组合体是一种特殊的试样, 其内部不仅含有原生裂纹, 还包含煤岩体之间的界面。左建平等^[23-26]研究了煤岩组合体与煤岩单体之间的力学特性差异。但是, 煤岩组合体的裂纹应变及应力 - 应变关系模型研究还较少。本文以煤岩组合体为对象, 研究单轴压缩下裂纹闭合和裂纹扩展演化特征及其模型, 并利用试验数据进行验证。

1 煤岩组合体应力应变关系^[23-26]

煤岩组合体试样取自开滦矿区钱家营矿 2071 工作面下顺槽, 埋深为 850 m。研磨时要求试样两端面不平行度小于 0.01 mm, 上、下端直径的偏差小于 0.02 mm。为了便于试验和记录及根据加载情况, 试样编号为 MR、RM、RMR (M 表示煤样, R 表示岩样, 字母在前表示试样加载时在上部)。由于煤岩体之间存在界面, 导致煤岩组合体的应力 - 应变曲线的压密阶段过长 (见图 1)。通过图 1 及文献[23~26]可知, 岩样的强度最高, 煤样的强度最低, 煤岩组合体处于中间。

由于 R-0-1 试样的单轴抗压强度达到约 133 MPa, 为了使煤岩组合体及煤的应力 - 应变曲线更加清晰,

因此, R-0-1 的应力只取到 60 MPa。从图 1 中可以看出, 岩石几乎没有压密阶段, 而煤岩组合体的压密阶段比单体煤的压密阶段更长。造成这种现象的主要原因是煤岩组合体中存在一个界面。界面作为一种特殊的裂纹, 影响着煤岩组合体的力学特性。

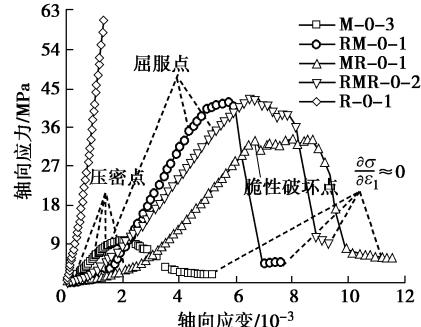


图 1 煤岩单体及组合体应力 - 应变曲线

Fig. 1 Stress-strain curves of coal-rock combined body and single coal and rock

2 轴向裂纹演化特征

为了研究煤岩组合体的界面及裂纹演化规律, 裂纹应变可以用来定量分析煤岩组合体内的裂纹大小。裂纹应变是指在外部荷载作用下, 原生裂纹起裂、扩展、贯通及新裂纹的萌生引起的轴向和环向变形^[14]。单轴压缩状态下, 裂纹应变的计算公式为主应变减去弹性应变:

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_1^c = \varepsilon_1 - \frac{\sigma_1}{E} \\ \varepsilon_3^c = \varepsilon_3 + \frac{\mu\sigma_1}{E} \\ \varepsilon_v^c = \varepsilon_v - \frac{1-2\mu}{E}\sigma_1 \end{array} \right. . \quad (1)$$

式中 ε_1 , ε_3 , ε_v 分别为轴向应变、环向应变、体积应变; σ_1 为轴向应力; E 为弹性模量; ε_1^c , ε_3^c , ε_v^c 分别为轴向裂纹应变、环向裂纹应变、体积裂纹应变;

根据式 (1), 可以计算得到轴向裂纹应变。轴向裂纹应变可分为两部分, 即轴向裂纹闭合应变 (屈服点之前) 和轴向裂纹扩展应变 (屈服点之后, 峰值点之前)。应力 - 应变关系曲线可分为两种情况。第一种情况具有明显的屈服阶段, 如图 1 中 RM-0-1、RMR-0-2 和 M-0-3。第二种情况具有极少或不存在屈服阶段, 如图 1 中 MR-0-1。情况 (1) 多为脆性弱、延性强的岩石, 情况 (2) 多为脆性强, 延性弱的岩石。以轴向裂纹为评价标准, 情况 (1) 表明, 轴向裂纹扩展应变达到一定程度后, 岩石试样内部裂纹无法承受荷载, 在达到峰值点时开始发生破坏; 情况 (2) 表明, 轴向裂纹扩展应变极小, 微小的裂纹演化即可导致岩石试样发生失稳破坏, 体现出较强的脆性特点。通过对 9

个煤岩组合体单轴压缩应力 - 应变曲线统计, MR-0-1、MR-0-2、MR-0-3、RMR-0-1 的屈服阶段很小, 轴向裂纹扩展应变很小。可以看出, MR 组合体没有明显的屈服阶段, 多呈现出脆性破坏特点。这主要与试样的组合方式有关, MR 组合体为煤在上部, 岩石在下部, 而煤的强度又很低, 试验机的压头直接作用在煤上, 造成煤的破坏。MR-0-1 试样出现脆性破坏后, 呈现出波浪形的应力 - 应变关系, 主要是由于下部岩石具有一定的承载能力, 起到了一定的作用。

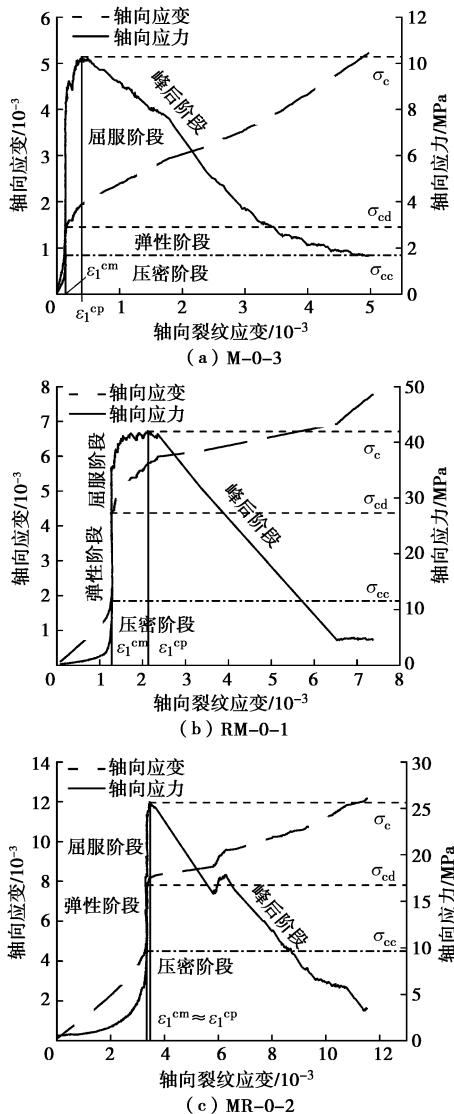


图 2 轴向裂纹应变与轴向应变、轴向应力关系曲线

Fig. 2 Relationship among axial crack strain, axial strain and axial stress

轴向应变和轴向应力随轴向裂纹应变演化关系曲线如图 2 所示。图中, $\varepsilon_1^{\text{cm}}$ 为最大轴向裂纹闭合应变; $\varepsilon_1^{\text{cp}}$ 为峰值裂纹应变; σ_c 为单轴抗压强度; σ_{cc} , σ_{cd} 分别为轴向裂纹闭合应力和损伤应力。以图 2(b) 为例, 随着轴向裂纹应变的增大, 轴向应变与轴向应力同时增大, 而后轴向应变与轴向应力曲线重合。两者重合点为压密阶段结束点, 对应的轴向裂纹应变为最大轴

向裂纹应变 $\varepsilon_1^{\text{cm}}$, 对应的轴向应力为裂纹闭合应力 σ_{cc} 。而后进入弹性阶段, 此时轴向裂纹应变基本保持不变, 试样内部并未产生新的裂纹, 而轴向应变与轴向应力垂直增加。当弹性阶段结束时, 轴向应变曲线与轴向应力曲线开始分离, 此时对应的轴向裂纹应变与最大轴向裂纹应变相等, 对应的轴向应力为损伤应力 σ_{cd} 。而后进入屈服阶段, 由于此阶段原生裂纹的扩展、新裂纹的萌生, 轴向裂纹应变逐渐变大, 而轴向应变与轴向应力增大速率变缓。当轴向应力达到峰值点时, 对应的轴向裂纹应变为峰值裂纹应变 $\varepsilon_1^{\text{cp}}$, 对应的应力为单轴抗压强度 σ_c 。到达峰值点时, 煤岩组合体试样内部裂纹贯通, 裂纹之间的摩擦力不足以承载外部荷载, 进而造成破坏。在峰后阶段, 随着轴向裂纹应变的逐渐增大, 轴向应力逐渐降低, 轴向应变逐渐变大。另外, 从图 2 可以看出, M-0-3、RM-0-1 试样均具有明显的屈服阶段, 且 $\varepsilon_1^{\text{cm}} \neq \varepsilon_1^{\text{cp}}$, 因此满足情况(1)。而 MR-0-2 试样并不具有明显的屈服阶段, 即 $\varepsilon_1^{\text{cm}} \approx \varepsilon_1^{\text{cp}}$, 因此满足情况(2)。

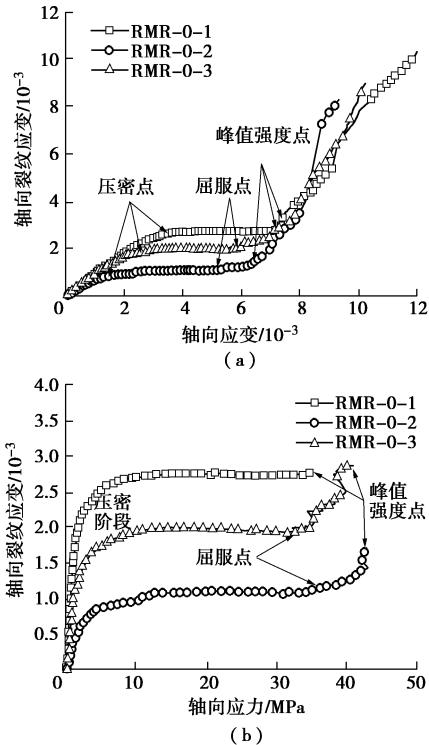


图 3 轴向裂纹应变随轴向应变、轴向应力演化曲线

Fig. 3 Evolution curves of axial crack strain along with axial strain and axial stress

RMR 组轴向裂纹应变随轴向应变的演化曲线如图 3(a) 所示。可以看出, 轴向裂纹应变大致可分为 4 个阶段, 即初始阶段、稳定阶段、缓慢增长阶段和迅速增长阶段。初始阶段, 即在加载初期, 煤岩组合体中的原生裂纹、孔隙及煤 - 岩之间的界面逐渐被压密, 裂纹应变呈现出增长趋势, 但其增长速率逐渐减缓。初始阶段与稳定阶段之间的分界点为压密阶段结

束点。在稳定阶段，轴向应变逐渐增大，而轴向裂纹应变基本维持不变，增长速率基本为 0。也就是说，岩-煤-岩组合体在轴向并未产生裂纹。当轴向应力达到试样的屈服极限时，轴向裂纹开始发育，轴向裂纹应变开始缓慢增大。RMR-0-1 试样并未出现明显的缓慢增长阶段，主要是因为其在加载过程中突然发生破坏，未发生塑性屈服现象。达到峰值点后，轴向裂纹应变迅速增长，增大速率变快。图 3 (b) 为轴向裂纹应变随轴向应力演化规律。从中可以看出，在峰值点前，与图 3 (a) 类似，具有 3 个变化阶段。首先，随着轴向应力的增大，轴向裂纹应变增大，但增大速率变缓；而后，轴向裂纹应变基本保持不变；屈服点之后，轴向裂纹应变迅速增大。

裂纹和界面的存在，对煤岩组合体的弹性有较大影响。统计了煤、煤岩组合体的最大轴向裂纹闭合应变和应力，如图 4 所示。

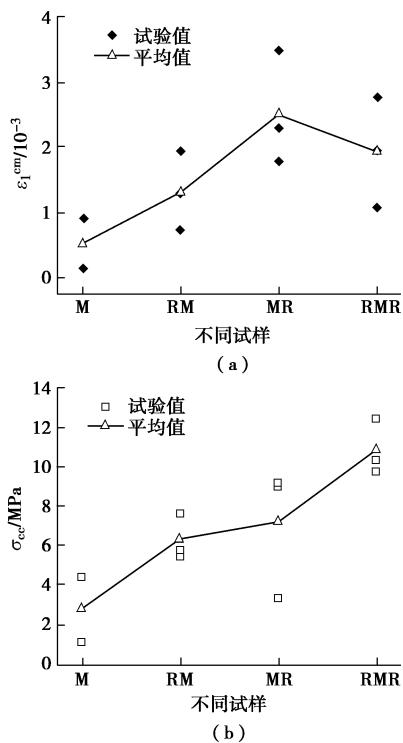


图 4 不同试样的最大轴向裂纹闭合应变与应力

Fig. 4 Axial crack closure strain and stress

从图 4 (a) 可以看出，受到煤岩组合体之间界面的影响，煤的最大轴向裂纹闭合应变平均值最小，其闭合应变主要是由于原生裂纹的压密。煤岩组合体中，MR 组合体的最大轴向裂纹闭合应变平均值最大，RMR 组合体次之、而 RM 组合体最小。RMR 组合体含有两个界面，而 RM 与 MR 均含有一个界面，造成 RM 与 MR 具有差别的原因为加载头对煤和岩石的影响和试验结果的离散性。从图 4 (b) 可以看出，煤的裂纹闭合应力最小，而 RMR 组合体的闭合应力最大。

3 轴向裂纹应变模型

3.1 模型的建立

通常来说，对于单体岩石试样的压缩试验，所求得的应变称为工程应变，即试样的绝对变形量与原尺寸之比。工程应变通常用于解决试样的小变形问题。与工程应变相对应的是真实应变，即试样的绝对变形量与现在尺寸之比。在诸多岩石力学研究中，通常认为弹性阶段的应变是很小的，可用工程应变来表达。Liu 等^[18]认为岩石中较软部分的变形可以用自然应变（真实应变）来求得，而较硬部分可以用工程应变来求得。则根据自然应变的定义，原生裂纹和界面在压密过程中的应变为

$$d\epsilon_1^{cc} = -\frac{dh^{cc}}{h^{cc}} \quad , \quad (2)$$

式中， ϵ_1^{cc} 为轴向裂纹闭合应变， h^{cc} 为压密过程中裂纹及界面的等效高度。

试验机对试样施加外部荷载均匀地作用在试样上，因此，原生裂纹及界面所受到的应力为 σ_1 ：

$$d\sigma_1 = E^{cc} d\epsilon_1^{cc} \quad , \quad (3)$$

式中， E^{cc} 为裂纹和界面的等效弹性模量。

联合式 (2)、(3) 并积分，得出

$$\sigma_1 = -E^{cc} \ln h^{cc} + C \quad , \quad (4)$$

式中， C 为积分常数。

假设煤岩组合体中的原生裂纹和界面压缩前的等效高度为 H^{cc} 。在起始阶段，试验机并未施加外部荷载时， $\sigma_1 = 0$ ，且 $H^{cc} = h^{cc}$ ，可以得到

$$C = E^{cc} \ln H^{cc} \quad . \quad (5)$$

把式 (5) 代入式 (4) 可以得到

$$\ln\left(\frac{h^{cc}}{H^{cc}}\right) = -\frac{\sigma_1}{E^{cc}} \quad . \quad (6)$$

而后对式 (6) 进行变形，得到

$$\frac{h^{cc} - H^{cc}}{H^{cc}} = \exp\left(-\frac{\sigma_1}{E^{cc}}\right) - 1 \quad . \quad (7)$$

根据式 (7)，加载过程中裂纹和界面的等效位移可以得到

$$-\Delta = h^{cc} - H^{cc} = H^{cc} \left[\exp\left(-\frac{\sigma_1}{E^{cc}}\right) - 1 \right] \quad . \quad (8)$$

式中， Δ 为裂纹和界面的等效位移。根据式 (8)，可以得到轴向裂纹闭合应变 ϵ_1^{cc} 和轴向应力 σ_1 的关系：

$$\epsilon_1^{cc} = \frac{H^{cc}}{H} \left[1 - \exp\left(-\frac{\sigma_1}{E^{cc}}\right) \right] \quad . \quad (9)$$

上文已经说过， ϵ_1^{cm} 为裂纹及界面完全闭合时的应变，因此其值可以表示为

$$\epsilon_1^{cm} = \frac{H^{cc}}{H} \quad . \quad (10)$$

式中, H 为试样的高度。根据式(9)和式(10), 可以得到加载过程中的轴向裂纹闭合模型(ACCM):

$$\varepsilon_1^{cc} = \varepsilon_1^{cm} \left[1 - \exp \left(-\frac{\sigma_1}{E^{cc}} \right) \right] \quad (11)$$

屈服点之后, 试样中的原生裂纹开始起裂, 新裂纹开始萌生, 此时由于裂纹的扩展, 轴向裂纹应变主要为轴向裂纹扩展应变。在裂纹萌生扩展的过程中, 试样的弹性模量及裂纹的等效弹性模量均是变化的。图3显示, 随着轴向应力的增大, 轴向裂纹应变缓慢增大, 其变化规律基本符合指数模型, 则可以表示为

$$\varepsilon_1^{ce} = m \exp \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_{cd}}{E^{ce}} \right) + \varepsilon_1^{cm} \quad (12)$$

式中 ε_1^{ce} 为轴向裂纹扩展应变; m 为参数; E^{ce} 为裂纹扩展等效弹性模量。式(12)即为轴向裂纹扩展模型(ACPM)。

3.2 模型验证

通过试验数据对 ACCM 和 ACPM 模型进行验证, 试验数据和理论曲线如图 5 所示。

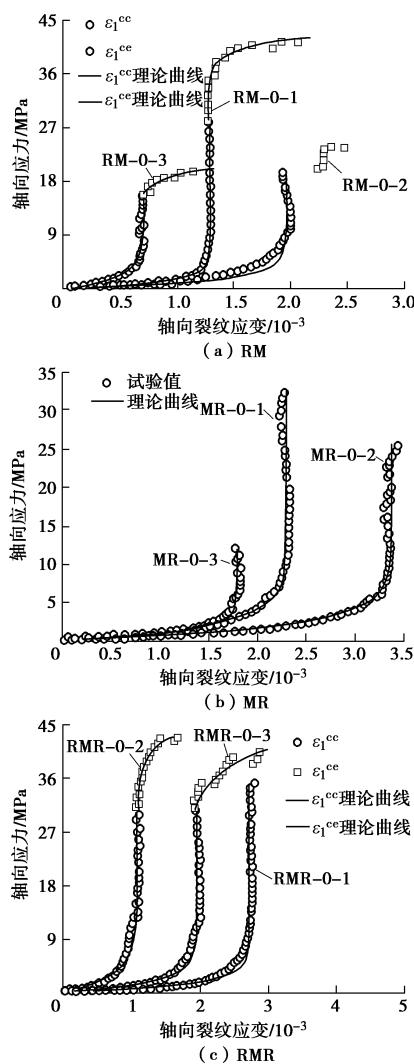


图 5 轴向裂纹应变试验值及理论曲线

Fig. 5 Experimental data and theoretical curves of axial crack strain

表 1 轴向裂纹应变与轴向应力关系模型试验和理论参数

Table 1 Experimental and theoretical parameters of relation model for axial crack strain-axial stress

NO.	$\varepsilon_1^{cm} / 10^{-3}$		E^{cc}/MPa	R^2
	试验值	理论值		
RM-0-1	1.276	1.286	1.175	0.990
RM-0-2	1.926	1.962	1.925	0.993
RM-0-3	0.726	0.705	1.965	0.976
MR-0-1	2.284	2.289	1.999	0.994
MR-0-2	3.351	3.371	1.923	0.961
MR-0-3	1.776	1.784	1.103	0.984
RMR-0-1	2.778	2.717	1.377	0.982
RMR-0-2	1.063	1.074	2.827	0.977
RMR-0-3	1.940	1.951	1.762	0.987

NO.	$m / 10^{-3}$	$\varepsilon_1^{cm} / 10^{-3}$		E^{ce}/MPa	R^2
		试验值	理论值		
RM-0-1	0.179	1.276	1.276	27.56	1.700
RM-0-2	0.851	1.926	2.262	19.24	0.891
RM-0-3	42.41	0.726	0.659	15.76	1.627
RMR-0-2	5.31	1.063	1.089	30.56	2.723
RMR-0-3	53.4	1.940	1.823	27.61	4.277

由于 MR 组试样和 RMR-0-1 试样的应力 - 应变曲线满足情况(2), 即具有极小或不存在屈服阶段, 故并未进行 ACPM 模型验证。图 5 显示, 试验数据与 ACCM 和 ACPM 模型吻合度较高, 能够很好地描述峰前应力 - 应变曲线的非线性特征。相关拟合参数见表 1。ACCM 模型相关系数 R^2 值均达到了 0.96 以上。由于裂纹扩展的离散性及不可预测性, 裂纹的发育及扩展演化更加复杂, ACPM 模型的相关系数 R^2 值最小为 0.78。但是整体拟合效果较好。另外, 从最大轴向裂纹闭合应变 ε_1^{cm} 的试验值和理论值可以看出, 试验值与理论值基本上差别不大。如 RMR-0-1 试样, 其最大轴向裂纹闭合应变比理论值仅仅大了 2.19%。以 RMR 组合体为例, 计算得到的裂纹闭合等效弹性模量最大为 2.827 MPa, 最小为 1.377 MPa, 平均值为 1.989 MPa。轴向裂纹扩展时等效弹性模量平均值为 3.5 MPa, 与闭合等效弹性模量相差 1.511 MPa。由于参数 m 值差别较大, 因此还需要进一步研究。

3.3 峰前应力 - 应变关系模型

由式(1)、(10)、(11) 联立可得单轴压缩下岩 - 煤 - 岩组合体的峰前应力 - 应变关系模型:

$$\begin{cases} \varepsilon_1 = \varepsilon_1^{cm} \left[1 - \exp \left(-\frac{\sigma_1}{E^{cc}} \right) \right] + \frac{\sigma_1}{E}, & \varepsilon_1 < \varepsilon_1^{cd} \\ \varepsilon_1 = m \exp \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_{cd}}{E^{ce}} \right) + \varepsilon_1^{cd}, & \varepsilon_1^{cd} < \varepsilon_1 < \varepsilon_1^p \end{cases} \quad (13)$$

式中 ε_1^{cd} 为屈服点时的轴向应变; ε_1^p 为峰值应变。

利用式(13) 分别对 RM、MR、RMR 组合体的单轴压缩应力 - 应变曲线进行计算, 得出的试验值及

拟合曲线分别如图 6(a)、(b)、(c) 所示。可以看出, 该模型可以很好地模拟出峰前应力 - 应变的 3 个阶段, 即压密阶段、弹性阶段、屈服阶段。

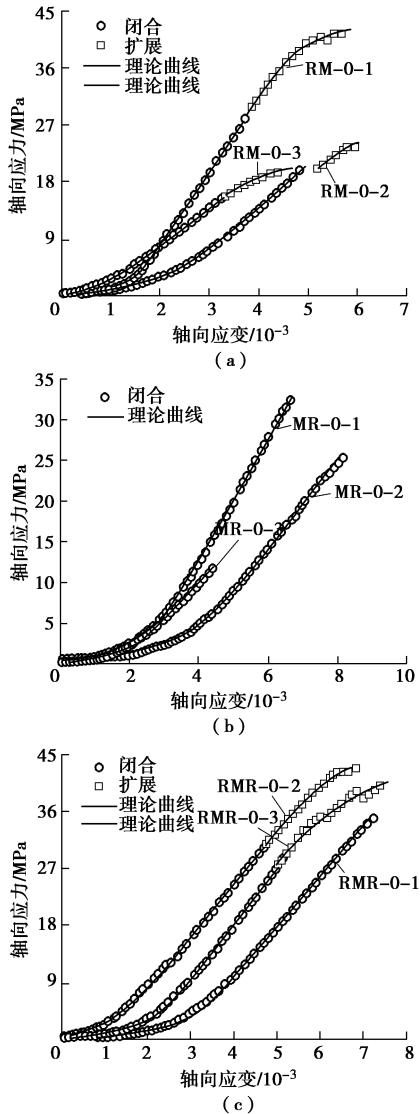


图 6 峰前应力 - 应变试验值及理论曲线

Fig. 6 Experimental data and theoretical curves of pre-peak stress-strain

4 结 论

本文主要讨论了煤岩组合体之间裂纹演化特征, 并建立了轴向裂纹闭合和扩展模型, 对于评价采矿工程中煤岩体相互作用具有一定的指导意义。

(1) 轴向裂纹应变随轴向应力的演化特征可以分为 4 个阶段, 即初始阶段、稳定阶段、缓慢增长阶段和快速增长阶段。讨论了不同煤岩组合体和单体煤的最大轴向裂纹闭合应变和应力。

(2) 基于自然应变, 把裂隙和界面看作软体, 建立了轴向裂纹闭合模型和轴向裂纹扩展模型, 且两个模型与试验数据吻合度较高。在此基础上, 提出了峰

前应力 - 应变关系模型, 可以很好地描述应力 - 应变曲线的非线性特点。

参 考 文 献:

- [1] 钱鸣高. 煤炭的科学开采[J]. 煤炭学报, 2010, 35(4): 529 - 534. (QIAN Ming-gao. On sustainable coal mining in China[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(4): 529 - 534. (in Chinese))
- [2] 谢和平, 高 峰, 鞠 杨. 深部岩体力学研究与探索[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(11): 2161 - 2178. (XIE He-ping, GAO Feng, JU Yang. Research and development of rock mechanics in deep ground engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(11): 2161 - 2178. (in Chinese))
- [3] 陈忠辉, 傅宇方, 唐春安. 单轴压缩下双试样相互作用的实验研究[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 1997, 18(4): 382 - 385. (CHEN Zhong-hui, FU Yu-fang, TANG Chun-an. Experimental study of interaction of two rock specimen under uniaxial compression[J]. Journal of Northeast University (Natural Science), 1997, 18(4): 382 - 385 (in Chinese))
- [4] PATERSON M S, WONG T F. Experimental rock deformation —the brittle field[M]. 2nd ed. New York: Springer-Verlag, 2005.
- [5] MOGI K. Experimental rock mechanics[M]. Florida: CRC Press, 2007.
- [6] JAEGER J C, COOK N G W, ZIMMERMAN R W. Fundamentals of rock mechanics[M]. 4th ed. Oxford: Blackwell Publishing, 2007.
- [7] ZUO J P, WANG X S, MAO D Q. SEM in-situ study on the effect of offset-notch on basalt cracking behavior under three-point bending load[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2014, 131: 504 - 513.
- [8] LI Y P, CHEN L Z, WANG Y H. Experimental research on pre-cracked marble under compression[J]. International Journal of Solids and Structures, 2005, 42(9): 2505 - 2516.
- [9] WONG L N Y, EINSTEIN H H. Systematic evaluation of cracking behavior in specimens containing single flaws under uniaxial compression[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2009, 46(2): 239 - 249.
- [10] MORADIAN Z, EINSTEIN H H, BALLIVY G. Detection of cracking levels in brittle rocks by parametric analysis of the acoustic emission signals[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2015, 49(3): 785 - 800.
- [11] 杨圣奇, 刘相如. 不同围压下断续预制裂隙大理岩扩容特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(12): 2188 - 2197.

- (YANG Sheng-qi, LIU Xiang-ru. Experimental investigation on dilatancy behavior of marble with pre-existing fissures under different confining pressures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(12): 2188 - 2197. (in Chinese))
- [12] 梁正召, 肖东坤, 李聪聪, 等. 断续节理岩体强度与破坏特征的数值模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(11): 2086 - 2095. (LIANG Zheng-zhao, XIAO Dong-kun, LI Cong-cong, et al. Numerical study on strength and failure modes of rock mass with discontinuous joints[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(11): 2086 - 2095. (in Chinese))
- [13] 刘泉声, 黄诗冰, 康永水, 等. 低温冻结岩体单裂隙冻胀力与数值计算研究[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(9): 1572 - 1580. (LIU Quan-sheng, HUANG Shi-bing, KANG Yong-shui, et al. Numerical and theoretical studies on frost heaving pressure in a single fracture of frozen rock mass under low temperature[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(9): 1527 - 1580. (in Chinese))
- [14] MARTIN C D. The strength of massive Lac du Bonnet granite around underground openings[D]. Manitoba: University of Manitoba, 1993.
- [15] MARTIN C D. Seventeenth Canadian geotechnical colloquium: the effect of cohesion loss and stress path on brittle rock strength[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1997, **34**(5): 698 - 725.
- [16] CAI M, KAISER P K, TASAKA Y, et al. Generalized crack initiation and crack damage stress thresholds of brittle rock masses near underground excavations[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, **41**(5): 833 - 847.
- [17] 王宇, 李晓, 武艳芳, 等. 脆性岩石起裂应力水平与脆性指标关系探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, **33**(2): 264 - 275. (WANG Yu, LI Xiao, WU Yan-fang, et al. Research on relationship between crack initiation stress level and brittleness indices for brittle rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, **33**(2): 264 - 275. (in Chinese))
- [18] LIU H H, RUTQVIST J, BERRYMAN J G. On the relationship between stress and elastic strain for porous and fractured rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2009, **46**(2): 289 - 296.
- [19] ZHAO Y, LIU H H. An elastic strain-stress relationship for porous rock under anisotropic stress conditions[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2012, **45**(3): 389 - 399.
- [20] 李连崇, LIU Hui-hai, 赵瑜. 基于双应变胡克模型的岩石非线性弹性行为分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **31**(10): 2119 - 2126. (LI Lian-chong, LIU Hui-hai, ZHAO Yu. Investigation on nonlinear elastic behavior of rocks based on a two-part hooke's model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(10): 2119 - 2126. (in Chinese))
- [21] CHEN Y F, WEI K, LIU W, ET AL. Experimental characterization and micromechanical modelling of anisotropic slates[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, in Press.
- [22] 彭俊, 荣冠, 周创兵, 等. 岩石裂纹闭合效应及其定量模型研究[J]. 岩土力学, 2016, **37**(1): 126 - 132. (PENG Jun, RONG Guan, ZHOU Chuang-bing, et al. A study of crack closure effect of rocks and its quantitative model[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, **37**(1): 126 - 132. (in Chinese))
- [23] ZUO J P, WANG Z F, ZHOU H W, ET AL. Failure behavior of a rock-coal-rock combined body with a weak coal interlayer[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2013, **23**(6): 907 - 912.
- [24] 左建平, 谢和平, 孟冰冰, 等. 煤岩组合体分级加卸载特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2011, **32**(5): 1287 - 1296. (ZUO Jian-ping, XIE He-ping, MENG Bing-bing, et al. Experimental research on loading-unloading behavior of coal-rock combination bodies at different stress levels[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(5): 1287 - 1296. (in Chinese))
- [25] 左建平, 裴建良, 刘建锋, 等. 煤岩样破裂过程中声发射行为及时空演化机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, **30**(8): 1564 - 1570. (ZUO Jian-ping, PEI Jian-liang, LIU Jian-feng, et al. Investigation on acoustic emission behavior and its time-space evolution mechanism in failure process of coal-rock combined body[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, **30**(8): 1564 - 1570. (in Chinese))
- [26] 左建平, 谢和平, 吴爱民, 等. 深部煤岩单体及组合体的破坏机制与力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, **30**(1): 84 - 92. (ZUO Jian-ping, XIE He-ping, WU Ai-min, et al. Investigation on failure mechanisms and mechanical behaviors of deep coal-rock single body and combined body[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, **30**(1): 84 - 92. (in Chinese))