

DOI: 10.11779/CJGE201611023

加载速率和围压对煤能量演化影响试验研究

马振乾^{1, 2}, 姜耀东^{3, 4}, 李彦伟¹, 杨英明¹, 李海涛^{1, 2}

(1. 中国矿业大学(北京)资源与安全工程学院, 北京 100083; 2. 贵州大学矿业学院, 贵州 贵阳 550025; 3. 中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京 100083; 4. 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:借助 TAW-2000 型电液伺服岩石力学试验系统进行了不同加载速率和不同围压下煤样的单轴压缩和三轴压缩试验, 研究了加载速率和围压对煤样能量耗散特征的影响规律, 探讨了煤样耗散应变能转化速率随加载速率和围压的变化规律。研究表明: 单轴压缩试验第 I 阶段试件的弹性应变能随加载速率的增加呈现先增大后减小的特点, 耗散应变能转化速率均处于较低水平, 且与加载速率呈负相关, 第 II 阶段耗散应变能随加载速率的增加也呈先增大后减小的趋势, 各煤样耗散应变能转化速率的最大值均出现在峰值点或峰后轴向应力陡然跌落点。耗散应变能转化速率对围压十分敏感, 围压越大, 耗散应变能的转化速率也越大, 煤样变形损伤越快。

关键词: 加载速率; 围压; 能量耗散; 单轴压缩试验; 三轴压缩试验

中图分类号: TU45

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2016)11-2114-08

作者简介: 马振乾(1987-), 男, 博士, 讲师, 主要从事煤矿巷道围岩控制等方面的研究。E-mail: mzq159@163.com。

Experimental research on influence of loading rate and confining pressure on energy evolution of coal

MA Zhen-qian^{1, 2}, JIANG Yao-dong^{3, 4}, LI Yan-wei¹, YANG Ying-ming¹, LI Hai-tao^{1, 2}

(1. Faculty of Resources and Safety Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 2. College of Guizhou University, Guiyang 550025, China; 3. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China; 4. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: A serial of uniaxial and triaxial compression tests on coal samples under different loading rates and confining pressures are conducted by using the TAW-2000 electro-hydraulic servo system. The characteristics of energy dissipation of coal under different loading rates and confining pressures are studied, and the dissipation strain energy conversion rate is also discussed. The results show that the elastic strain energy increases at first and then decreases at stage I of the uniaxial compression tests, and the dissipation strain energy conversion rate, which has a negative correlation with the loading rate, is relatively low. At stage II, the dissipation strain energy increases at first and then decreases with the increasing loading rate. The maximum strain energy dissipation conversion rate occurs at the peak point or axial stress suddenly falling point after the peak point of stress-strain curve. The dissipation strain energy conversion rate is very sensitive to the confining pressure. That is, the larger the confining pressure, the greater the dissipation strain energy conversion rate, and the faster the damage of the coal.

Key words: loading rate; confining pressure; energy dissipation; uniaxial compression test; triaxial compression test

0 引言

物质破坏过程实质上是能量积聚与耗散的过程, 归根到底是能量驱动下的一种状态失稳现象。谢和平等^[1-2]认为岩石的变形破坏过程实际上就是一个从局部耗散到局部破坏最终到整体灾变的过程。杨圣奇等^[3]分析了围压对大理岩三轴压缩变形破坏与能量的影响规律。喻勇等^[4]研究了花岗岩在不同加载方式下的能耗特征。尤明庆等^[5]研究了岩样在屈服破坏过程中的能量与环向变形、岩样能量变化与围压间的关

系。以上研究主要是针对硬脆岩石, 如大理岩^[3,6-9]、砂岩^[10-13]、花岗岩等, 对煤的研究较少, 如彭瑞东等^[14]通过岩石三轴循环加卸载试验, 分析了不同围压作用下煤岩的损伤演化行为。许江等^[15]通过不同温度条件下的循环荷载试验, 研究了循环荷载作用下煤变形与能量演化规律。康向涛等^[16]应用能量积聚与耗散的方

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目(2010CB226801)

收稿日期: 2015-04-24

法,研究了煤样在压缩过程中的能耗特征和渗流特性。

煤矿井下开采过程中,煤体的变形破坏不仅与其物理化学性能有关,还与其所处的应力环境和开采条件密切相关,外部加载条件如加载速率和围压对煤的力学行为具有十分重要的影响。本文借助 TAW-2000 型电液伺服岩石力学试验系统,进行不同加载速率和不同围压下的压缩试验,深入分析加载速率和围压对煤能量耗散特征的影响规律,研究成果对合理确定煤矿工作面的采掘速度有较大的指导意义。

1 试验方案及试验结果

1.1 试验方案

试验用煤样取自山西省正利煤矿 4¹ 号煤层,埋深约 700 m,工业牌号 1/3 焦煤,发热量 23.766 MJ/kg,水分 1.22%。按照国际岩石力学学会的标准将试样加工成 $\phi 50\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 的圆柱试样。

试验加载设备采用 TAW-2000 型电液伺服岩石力学试验系统,如图 1 所示,试样的轴向和径向应变均采用高精度应变引伸计进行测定。为了考察加载速率和围压对煤能量耗散特征的影响,设计了两组试验,即不同加载速率下的单轴压缩试验和不同围压下的三轴压缩试验,其中单轴压缩试验采用位移控制加载,加载速率分别为 5×10^{-4} , 8.3×10^{-4} , 1.16×10^{-3} , 1.5×10^{-3} , $1.83\times 10^{-3}\text{ mm/s}$ 。三轴压缩试验围压分别取 3.0, 5.0, 7.0 MPa,加载速率均为 $1.16\times 10^{-3}\text{ mm/s}$ 。



图 1 TAW-2000 型电液伺服岩石力学试验系统

Fig. 1 TAW-2000 electro-hydraulic servo rock mechanical experimental system

1.2 试验结果

试验结果见表 1,图 2 为不同加载速率下试件应力 - 应变曲线,与脆硬岩石峰值强度随加载速率的增加不断增大不同,随着加载速率的增大,煤样的峰值强度和残余强度呈现先增高后降低的特点。加载速率为 $5\times 10^{-4}\text{ mm/s}$ 时峰值强度为 16.017 MPa;加载速率增大到 $8.3\times 10^{-4}\text{ mm/s}$ 时峰值强度增大到 25.528 MPa;加载速率为 $1.16\times 10^{-3}\sim 1.83\times 10^{-3}\text{ mm/s}$ 峰值强度由 17.869 MPa 逐步减小至 8.748 MPa。

随着围压的增大,煤样的抗压强度不断增大,围

压为 3 MPa 时平均抗压强度为 32.91 MPa,围压增大至 7 MPa 时平均抗压强度增加到 78.49 MPa,如图 3 所示。

表 1 单轴及三轴压缩试验结果

Table 1 Results of uniaxial and triaxial compression tests					
围压 /MPa	试样尺寸/mm		加载速率 /($10^{-4}\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$)	R_c / MPa	E / MPa
	D	H			
0	49.24	101.28	5.0	16.010	8407
0	49.20	99.54	8.3	25.530	6104
0	49.13	102.68	11.6	17.870	5473
0	49.20	98.70	15.0	15.010	3939
0	49.15	101.06	18.3	8.750	3113
3	49.49	100.02	11.6	33.480	2902
3	49.35	98.63	11.6	32.348	3297
5	49.37	100.15	11.6	52.464	4338
5	49.33	100.10	11.6	55.501	4575
7	49.41	100.11	11.6	77.883	4284
7	49.33	99.58	11.6	79.100	4174

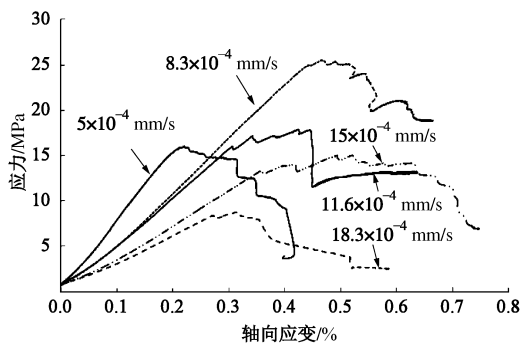
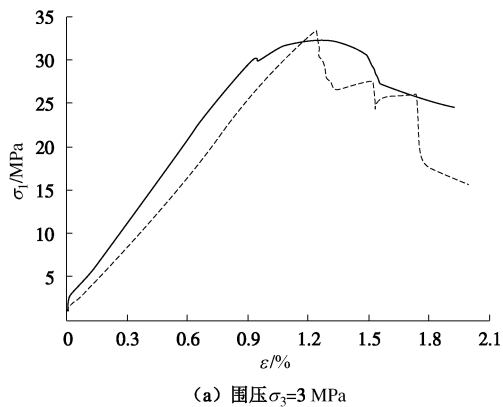
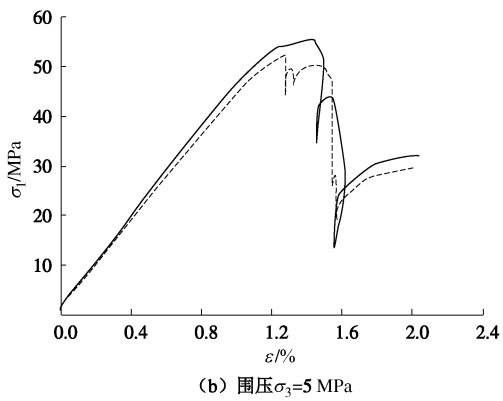


图 2 不同加载速率下试件应力 - 应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curves under different loading rate



(a) 围压 $\sigma_3=3\text{ MPa}$



(b) 围压 $\sigma_3=5\text{ MPa}$

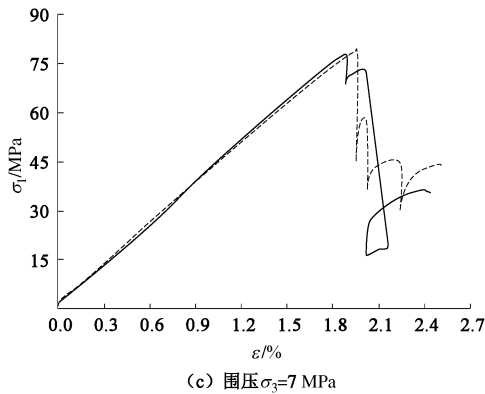


图3 不同围压下试件轴向应力-应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves under different confining pressure

2 能量耗散原理

以一个单位体积煤体单元为例, 假设试验是一个与外界没有热交换的封闭系统, 试验过程中外界对煤样所做的功 W 等于煤样内部能量的变化量 U , 由文献[1]可知

$$U = U^d + U^e, \quad (1)$$

式中, U^d 为耗散应变能, 用以形成单元内部损伤和塑性变形, U^e 为可释放弹性应变能。

单轴压缩试验条件下, 对于单位体积煤样单元来说, 应力状态为单轴受压, 只有轴向的应力和应变, U 的表达式为

$$U = \int \sigma_1 d\varepsilon_1 = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} (\sigma_{1i} + \sigma_{1(i-1)}) (\varepsilon_{1i} - \varepsilon_{1(i-1)}), \quad (2)$$

式中, σ_1 , ε_1 为轴向应力、应变, σ_{1i} , ε_{1i} 轴向应力-轴向应变曲线上每一点的应力、应变值。

对于单位煤体可释放弹性应变能 U^e 的计算, 卸载弹性模量 E_u 可采用峰值前弹性段的弹性模量 E 代替^[1], 应力-应变曲线上任意一点的可释放弹性应变能, 计算式为

$$U^e = \sigma_{1i}^2 / 2E. \quad (3)$$

三轴压缩条件下, 同时存在轴向应力 σ_1 和环向应力 $\sigma_2 = \sigma_3$, 煤体实际吸收的能力 U 为

$$U = \int \sigma_1 d\varepsilon_1 + 2 \int \sigma_3 d\varepsilon_3 = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} (\sigma_{1i} + \sigma_{1(i-1)}) (\varepsilon_{1i} - \varepsilon_{1(i-1)}) - 2 \sum_{i=1}^n \sigma_3 (\varepsilon_{3i} - \varepsilon_{3(i-1)}). \quad (4)$$

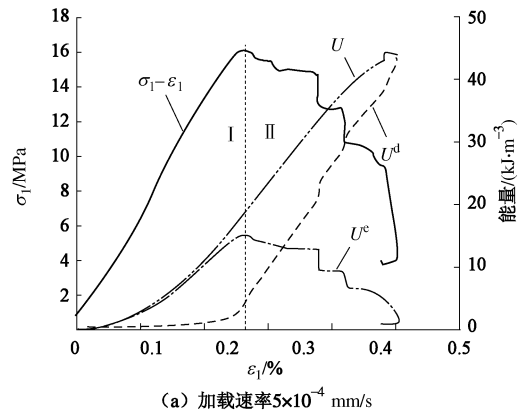
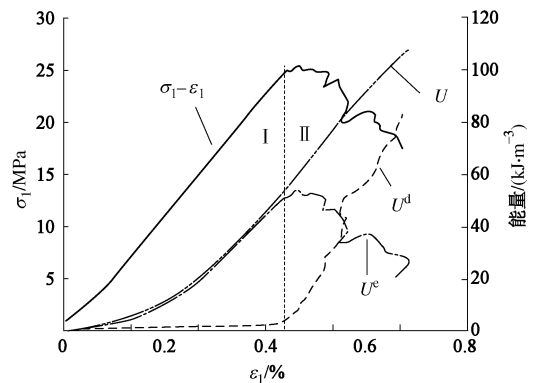
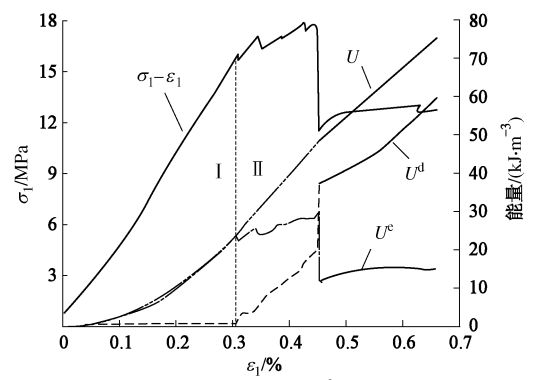
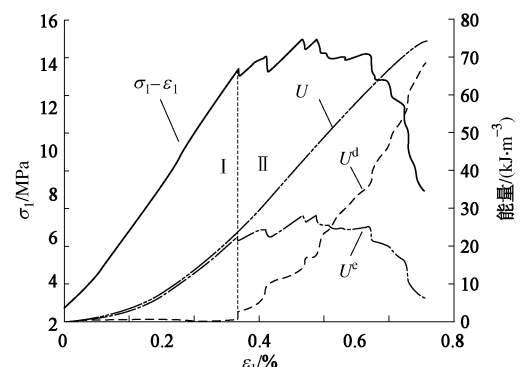
对于可释放弹性应变能 U^e , 假设煤样为各向同性体, 包括轴向和环向两部分, 文献[17]研究表明, 环向可释放弹性应变能相对轴向来说很小, 可忽略不计, 可释放弹性应变能 U^e 仍按式(3)计算。

3 不同加载速率下煤的能量耗散特征

3.1 不同加载速率下煤的能量耗散特征

图4为单轴压缩试验过程中不同加载速率下煤样

的能量演化曲线, 从图4中可以看出各能量特征曲线存在相似的特征, 与三轴压缩相比, 单轴压缩过程中煤样体积压缩过程很短, 不存在明显的损伤应力, 因此, 可将单轴压缩试验煤样的能量演化过程分为2个阶段, 两者以应力-应变曲线中第一次出现轴向应力降低的点为界。

(a) 加载速率 5×10^{-4} mm/s(b) 加载速率 8.3×10^{-4} mm/s(c) 加载速率 1.16×10^{-3} mm/s(d) 加载速率 1.5×10^{-3} mm/s

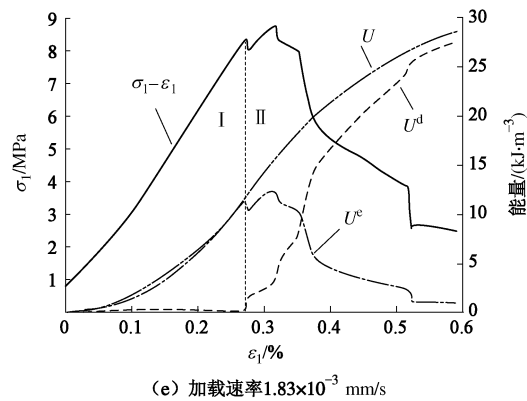


图 4 不同加载速率下煤样应变能曲线

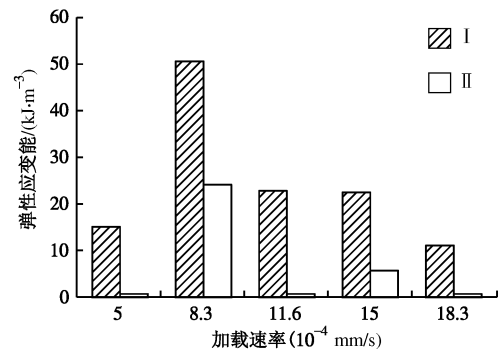
Fig. 4 Curves of strain energy under different loading rates

在第 I 阶段煤样的轴向应力持续上升, 试件吸收的能量绝大部分都转化为弹性应变能, 耗散应变能只占 4.71%~26.06%, 并且耗散应变能与加载速率呈负相关, 加载速率越小, 试件内部裂隙越有充足的时间发育, 相应的耗散应变能越大, 加载速率为 5×10^{-4} mm/s 时, 耗散应变能为 3.95 kJ/m^3 , 加载速率增大至 1.83×10^{-3} mm/s 时, 耗散应变能减小为 0.53 kJ/m^3 。与煤样峰值强度和加载速率的关系类似, 试件的弹性应变能随加载速率的增加呈现先增大后减小的特点, 存在临界加载速率 8.3×10^{-4} mm/s, 如图 5 (a) 所示。

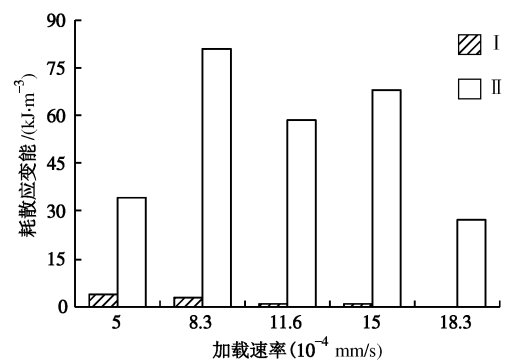
在第 II 阶段, 试件一般经过一段时间的应力调整达到峰值, 在这一时期试件的损伤逐步累积, 耗散应变能不断增大, 达到峰值强度后积累的弹性应变能大量释放, 转化为耗散应变能。第 II 阶段煤样的耗散应变能随加载速率的增加大致呈先增大后减小的趋势, 如图 5 (b) 所示, 加载速率为 8.3×10^{-4} mm/s 时试件的耗散应变能最大, 达到 81.11 kJ/m^3 。与三轴试验相比, 由于不存在围压的限制, 因此, 在残余变形阶段试件内部的弹性应变能微乎其微。

煤是一种包含各种缺陷的结构性介质, 加载速率较低时, 试件内部的初始损伤和微裂纹有充足的时间演化和发展, 因而强度较低, 随着加载速率的增加, 裂隙发育的时间减少, 试件的损伤程度降低, 强度不断提高, 要使材料屈服破坏就需要提供更多的能量。这一阶段, 加载速率越大, 试件积聚的弹性能越大, 相应的破坏后释放的能量也越大, 试件倾向于发生剪切破坏, 能量主要耗散于剪切面的摩擦及剪胀效应^[18]。当加载速率大于临界加载速率时, 试件内部有更多较小尺寸的缺陷被激活, 由于缺陷处的应力集中水平与加载速率呈正相关^[19], 加载速率越大, 裂隙更容易扩展和贯通, 因而随着加载速率的增加, 试件强度不断降低, 要使试件破坏需要提供的能量不断减少。这一阶段, 加载速率越大, 试件积聚的弹性能越少, 破坏后

释放的能量也越少, 试件倾向于发生拉裂破坏, 能量耗散主要用于克服材料的黏聚力, 并转化为张裂面的表面能。



(a) 可释放弹性应变能与加载速率的关系



(b) 耗散应变能与加载速率的关系

图 5 不同加载速率下煤样应变能变化规律

Fig. 5 Variation of strain energy under different loading rates

3.2 不同加载速率下煤的耗散应变能转化速率

单位时间应变能增量即加载过程中应变能转化速率, 煤的 U^d 耗散速率的大小反映了煤变形损伤速率的快慢。

由图 6 可知, 各试件第 I 阶段耗散应变能转化速率均处于较低水平, 煤样以弹性变形为主, 变形损伤速率很慢, 在这一阶段加载速率对应变能转化速率没有明显影响。进入第 II 阶段, 耗散应变能转化速率逐步加快, 煤样变形损伤加剧, 各试件耗散应变能转化速率的最大值均出现在峰值或峰后轴向应力陡然跌落时刻。加载速率为 5×10^{-4} , 1.83×10^{-3} mm/s 时耗散应变能转化速率最小, 其最大值分别为 5.54 , $6.83 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$, 平均值分别为 0.37 , $0.56 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$ 。加载速率为 8.3×10^{-4} , 1.5×10^{-3} mm/s 时平均应变能转化速率大致相等, 分别为 0.99 , $0.95 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$, 加载速率为 1.16×10^{-3} mm/s 时应变能转化速率平均值为 $0.67 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

3.3 现场参考意义

实验室所研究的加载速率在现场条件下反映为工作面推进速度和巷道掘进速度等, 试验研究发现, 随

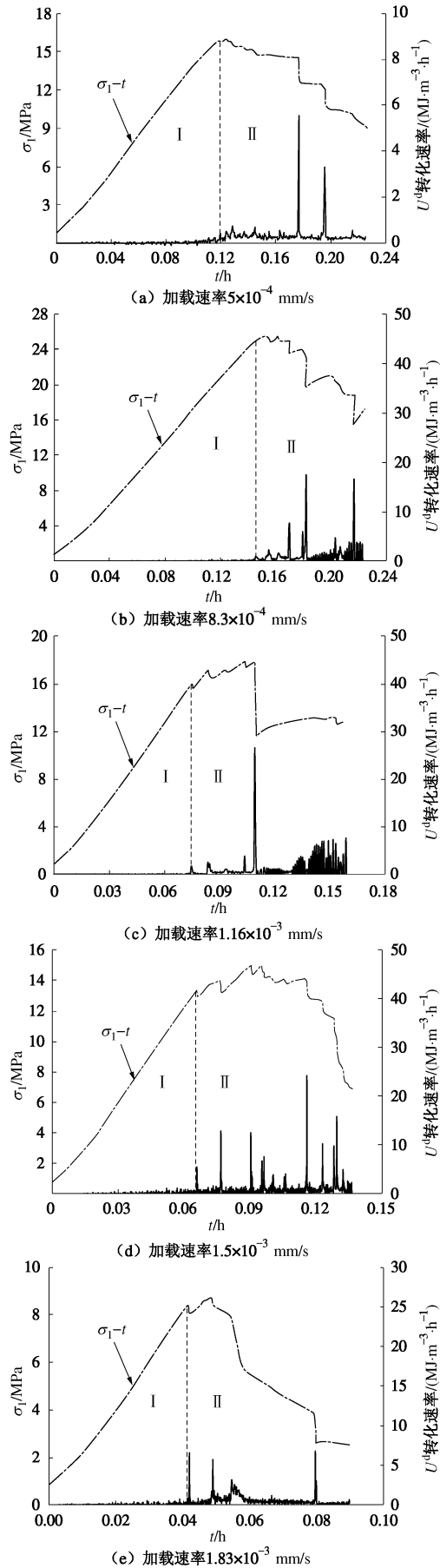


图 6 不同加载速率下煤样耗散应变能转化速率

Fig. 6 Dissipation strain energy conversion rates under different loading rates

随着加载速率的增大,煤样积聚的弹性能应变能先增大后减小,弹性能越大,煤体的冲击危险性越高。进一步将该试验室尺度下的加载速率转化为工程尺度下的工作面推进速度和巷道掘进速度,得到工作面推进速度和巷道掘进速度的临界值,从而指导现场有意识地回避该临界值,减轻煤岩冲击危险性。

4 不同围压下煤的能量耗散特征

4.1 不同围压下煤的能量耗散特征

图 7 为三轴压缩试验过程中煤样的能量演化曲线,从图 7 中可以看出各能量特征曲线存在相似的特征,能量演化过程可分为 3 个阶段。

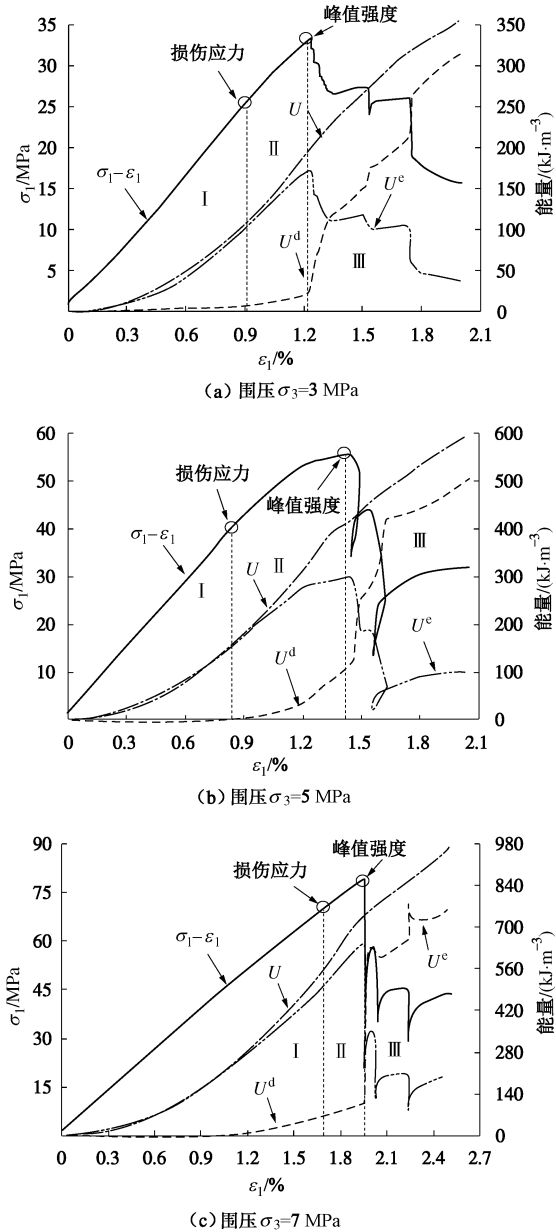
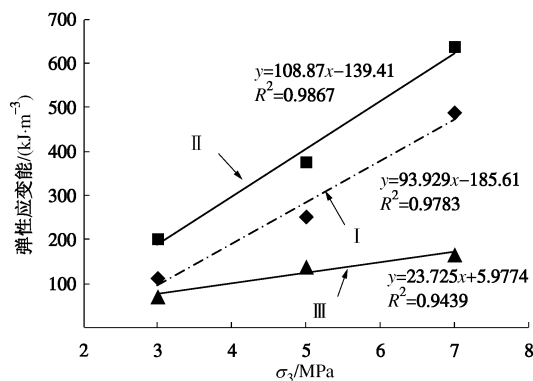


图 7 三轴压缩试验煤样破坏过程能量演化曲线

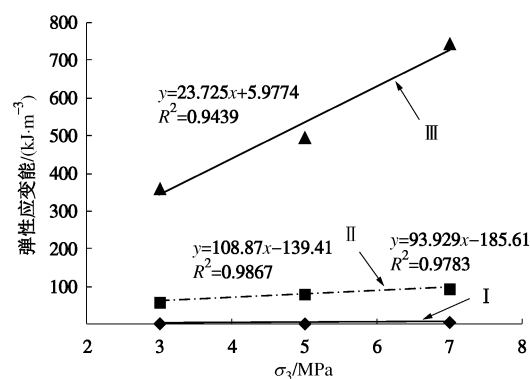
Fig. 7 Evolution curves of coal energy of triaxial compression tests

第 I 阶段对应煤样应力 - 应变曲线中损伤应力出现之前的部分, 即裂隙压密和微裂隙稳定发展阶段, 在此阶段煤样吸收的能量绝大部分都转化为弹性应变能, 占总吸收能量的 89.4%~96.5%。围压越大, 积累的弹性应变能越大, 试件的平均弹性应变能与围压呈线性关系, 如图 8 (a) 所示。弹性应变能储存于煤样骨架的变形中, 而耗散应变能则耗散于闭合裂隙的摩擦及微裂纹的起裂和扩展中。

第 II 阶段对应应力 - 应变曲线中非稳定破裂发展阶段, 在此阶段弹性应变能仍在增加, 但在总吸收能量中所占的比值却在逐步降低, 峰值处弹性应变能所占的比值降低到 60.8%~91.8%, 耗散应变能所占的比重在不断增加, 能量主要耗散于煤样的塑性变形与内部微裂纹的形成与扩展。弹性应变能和耗散应变能均与围压呈线性关系, 如图 8 所示。由于围压的增大, 试件的强度和弹性模量会相应增大, 要造成同样的损伤需要吸收和耗散更多的能量。



(a) 弹性应变能与围压的关系



(b) 耗散应变能与围压的关系

图 8 应变能随围压的变化规律

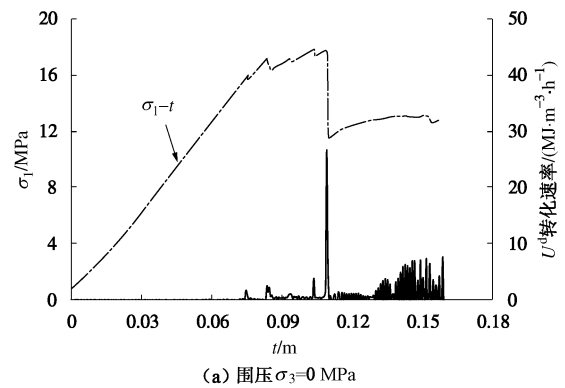
Fig. 8 Change of strain energy with confining pressure

第 III 阶段对应应力 - 应变曲线峰后阶段, 在此阶段耗散能居于主导地位。达到峰值强度后煤样内部储存的弹性应变能大量释放, 转化为耗散应变能, 耗散于试件的宏观裂隙的剪切滑移中, 由于围压的限制, 在残余变形阶段煤样内部依然储存有一定的弹性应变

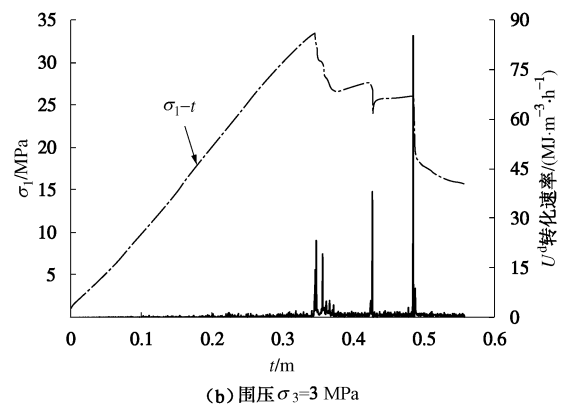
能, 但其所占的比重较小, 只有 10.46%~20.45%, 并且围压越大, 试件破坏后储存的弹性能越大。

4.2 不同围压下煤的耗散应变能转化速率

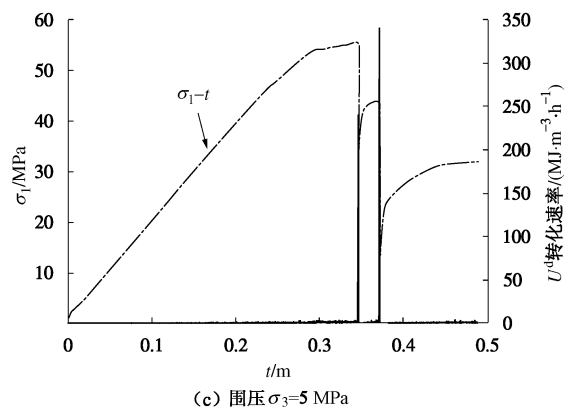
加载速率为 $1.16 \times 10^{-3} \text{ mm/s}$ 时不同围压下煤样耗散应变能转化速率如图 9 所示, 从图 9 中可知, 随着围压的增大, 煤样耗散应变能转化速率逐步增加, 特别是最大应变能转化速率表现最为明显。围压 $\sigma_3=0 \text{ MPa}$ 时最大应变能转化速率为 $26.55 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$, 围压 σ_3 增大到 3 MPa 最大应变能转化速率增大到 $85.10 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$, 围压 σ_3 继续增加至 $5, 7 \text{ MPa}$, 最大应变能转化速率分别增大到 $339.95, 573.69 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$ 。可见, 耗散应变能转化速率对围压十分敏感, 围压越大, 煤样峰前积聚的弹性应变能越大, 峰后阶段试件破坏耗散的应变能越多, 应变能的转化速率也越大, 煤样变形损伤的速率越快。



(a) 围压 $\sigma_3=0 \text{ MPa}$



(b) 围压 $\sigma_3=3 \text{ MPa}$



(c) 围压 $\sigma_3=5 \text{ MPa}$

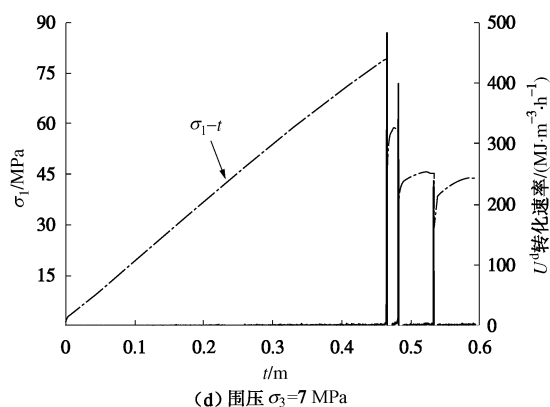


图9 不同围压下煤样耗散应变能转化速率曲线

Fig. 9 Curves of dissipation strain energy conversion rates under different confining pressures

4.3 现场参考意义

试验发现,围压越大,煤体积聚的弹性能越大,峰后变形损伤的速率也越快,煤体的冲击危险性越高。因此,可以采取钻孔卸压、注水等弱化措施降低巷道周边围岩的应力水平,减小其围压,降低其冲击危险性。同时,将原来作用于巷道周边的集中应力转移到围岩深部,深部围岩处于三向应力状态,承载能力大,在它的支承和保护下,巷道周边围岩得以保持稳定。

5 结 论

(1) 单轴压缩试验中,以应力-应变曲线中第1次出现轴向应力降低点为界将煤样的能量演化过程分为2个阶段。在第I阶段试件吸收的能量绝大部分都转化为弹性应变能,耗散应变能与加载速率呈负相关,弹性应变能随加载速率的增加呈现先增大后减小的特点。第II阶段试件的耗散应变能不断增大,在此阶段煤样的耗散应变能随加载速率的增加大致呈先增大后减小的趋势。

(2) 单轴压缩试验中,各试件第I阶段耗散应变能转化速率均处于较低水平,第II阶段耗散应变能转化速率逐步加快,煤样变形损伤加剧,各试件耗散应变能转化速的最大值均出现在峰值或峰后轴向应力陡然跌落时刻。

(3) 三轴压缩试验中,煤样的能量演化过程可分为3个阶段。第I阶段对应煤样应力-应变曲线中裂隙压密和微裂隙稳定发展阶段,在此阶段可释放弹性应变能占总吸收能量的89.4%~96.5%。第II阶段对应应力-应变曲线中非稳定破裂发展阶段,在此阶段弹性应变能仍在增加,峰值处弹性应变能所占的比值降低到60.8%~91.8%,弹性应变能和耗散应变能均与围压呈线性关系。第III阶段对应应力-应变曲线的峰后阶段,在此阶段耗散能居于主导地位。达到峰值强度

时煤样内部储存的弹性应变能大量释放,转化为耗散应变能,耗散于试件的宏观裂隙的剪切滑移中。

(4) 三轴压缩试验中,耗散应变能转化速率对围压十分敏感,围压越大,耗散应变能的转化速率也越大,煤样变形损伤的速率越快。

参考文献:

- [1] 谢和平,鞠 杨,黎立云. 基于能量耗散与释放原理的岩石强度与整体破坏准则[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17): 3003 - 3010. (XIE He-ping, JU Yang, LI Li-yun, et al. Criteria for strength and structural failure of rocks Based on energy dissipation and energy release principles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(17): 3003 - 3010. (in Chinese))
- [2] 谢和平,彭瑞东,鞠 杨,等. 岩石破坏的能量分析初探[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(15): 2604 - 2608. (XIE He-ping, PENG Rui-dong, JU Yang, et al. On energy analysis of rock failure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(15): 2604 - 2608. (in Chinese))
- [3] 杨圣奇,徐卫亚,苏承东. 大理岩三轴压缩变形破坏与能量特征研究[J]. 工程力学, 2007, 24(1): 136 - 141. (YANG Sheng-qi, XU Wei-ya, SU Cheng-dong. Study on deformation failure and energy properties of marble specimen under triaxial compression[J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(1): 136 - 141. (in Chinese))
- [4] 喻 勇,尹健民. 三峡花岗岩在不同加载方式下的能耗特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(2): 205 - 208. (YU Yong, YIN Jian-min. Energy dissipation properties of the Three Gorges granite under different loading modes[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(2): 205 - 208. (in Chinese))
- [5] 尤明庆,华安增. 岩石试样破坏过程的能量分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(6): 778 - 781. (YOU Ming-qing, HUA An-zeng. Energy analysis of failure process of rock specimen[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(6): 778 - 781. (in Chinese))
- [6] 刘天为,何江达,徐文杰. 大理岩三轴压缩破坏的能量特征分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(2): 395 - 400. (LIU Tian-wei, HE Jiang-da, XU Wen-jie. Energy properties of failure of marble samples under triaxial compression[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(2): 395 - 400. (in Chinese))
- [7] 陈学章,何江达,肖明砾,等. 三轴卸荷条件下大理岩扩容与能量特征分析[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(6): 1106 -

1112. (CHEN Xue-zhang, HE Jiang-da, XIAO Ming-li, et al. Dilatancy and energy properties of marble under triaxial unloading condition[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(6): 1106 - 1112. (in Chinese))
- [8] 黄 达, 谭 清, 黄润秋. 高围压卸荷条件下大理岩破碎块度分形特征及其与能量相关性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **31**(7): 1379 - 1389. (HUANG Da, TAN Qing, HUANG Run-qiu. Failure characteristics of fragmentation and correlation with energy of marble under unloading with high confining pressure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(7): 1379 - 1389. (in Chinese))
- [9] 苏承东, 张振华. 大理岩三轴压缩的塑性变形与能量特征分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(2): 273 - 280. (SU Cheng-dong, ZHANG Zhen-hua. Analysis of plastic deformation and energy property of marble under pseudo-triaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(2): 273 - 280. (in Chinese))
- [10] 许国安, 牛双建, 靖洪文, 等. 砂岩加卸载条件下能耗特征试验研究[J]. 岩土力学, 2011, **32**(12): 3611 - 3617. (XU Guo-an, NIU Shuang-jian, JING Hong-wen, et al. Experimental study of energy features of sandstone under loading and unloading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(12): 3611 - 3617. (in Chinese))
- [11] 宋义敏, 姜耀东, 马少鹏, 等. 岩石变形破坏全过程的变形场和能量演化研究[J]. 岩土力学, 2012, **33**(5): 1352 - 1356. (SONG Yi-min, JIANG Yao-dong, MA Shao-peng, et al. Evolution of deformation fields and energy in whole process of rock failure[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(5): 1352 - 1356. (in Chinese))
- [12] 黎立云, 徐志强, 谢和平, 等. 不同冲击速度下岩石破坏能量规律的实验研究[J]. 煤炭学报, 2011, **36**(12): 2007 - 2011. (LI Li-yun, XU Zhi-qiang, XIE He-ping, et al. Failure experimental study on energy laws of rock under differential dynamic impact velocities[J]. Journal of China Coal Society, 2011, **36**(12): 2007 - 2011. (in Chinese))
- [13] 张志镇, 高 峰. 受载岩石能量演化的围压效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, **34**(1): 1 - 11. (ZHANG Zhi-zhen, GAO Feng. Confining pressure effect on rock energy[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, **34**(1): 1 - 11. (in Chinese))
- [14] 彭瑞东, 鞠 杨, 高 峰, 等. 三轴循环加卸载下煤岩损伤的能量机制分析[J]. 煤炭学报, 2014, **39**(2): 245 - 252. (PENG Rui-dong, JU Yang, GAO Feng, et al. Energy analysis on damage of coal under cyclical triaxial loading and unloading conditions[J]. Journal of China Coal Society, 2014, **39**(2): 245 - 252. (in Chinese))
- [15] 许 江, 李波波, 周 婷, 等. 循环荷载作用下煤变形与能量演化规律试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, **33**(增刊 2): 3564 - 3572. (XU Jiang, LI Bo-bo, ZHOU Ting, et al. Experimental study of deformation and energy evolution law of coal under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, **33**(S2): 3564 - 3572. (in Chinese))
- [16] 康向涛, 黄 滚, 宋真龙, 等. 三轴压缩下含瓦斯煤的能耗与渗流特性研究[J]. 岩土力学, 2015, **36**(3): 762 - 768. (KANG Xiang-tao, HUANG Gun, SONG Zhen-long, et al. Research on characteristics of energy dissipation and seepage of coal containing gas under triaxial compression[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, **36**(3): 762 - 768. (in Chinese))
- [17] 韩立军. 岩石破坏后的结构效应及锚注加固特性研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2004. (HAN Li-jun. Research on structural effect of post failure rock and consolidation character of anchoring grouting[D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2004. (in Chinese))
- [18] 黄 达, 黄润秋, 张永兴. 粗晶大理岩单轴压缩力学特性的静态加载速率效应及能量机制试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **31**(2): 245 - 255. (HUANG Da, HUANG Rui-qiu, ZHANG Yong-xing. Experimental investigation on static loading rate effects on mechanical properties and energy mechanism of coarse crystal grain marble under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(2): 245 - 255. (in Chinese))
- [19] 范鹏贤, 王明洋, 钱七虎. 深部非均匀岩体卸载拉裂的时间效应和主要影响因素[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(7): 1389 - 1396. (FAN Peng-xian, WANG Ming-yang, QIAN Qi-hu. The time effect and main influence factors of the splitting of deep-seated rock with nonuniformities[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(7): 1389 - 1396. (in Chinese))