

# 岩石能量特征与其细观结构的关联性

张志镇<sup>1,2</sup>, 高峰<sup>1,2</sup>, 崔洋<sup>2,3</sup>, 林斌<sup>2</sup>

1. 中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏徐州 221008
2. 中国矿业大学力学与建筑工程学院, 江苏徐州 221116
3. 山东水利职业学院水利工程系, 山东日照 276826

**摘要** 岩石的细观结构影响其受载过程中的能量行为。从岩石基元平均强度、均质度和细观特征尺度等3种细观特征入手,研究了其对特征能量参数和能量特征指数的影响规律。结果表明:(1)基元平均强度越大,相同应力比下的输入能量密度和积聚弹性能密度呈非线性增长;峰后所需耗散能密度变化不大,约为500~2000J/m<sup>3</sup>;弹性能转化率变小;岩样能量特征指数呈指数型增长。(2)随着均质度的升高,峰前输入能量密度和积聚弹性能密度都呈线性增长;峰后破坏所需耗散能降低;越来越多的能量转化为弹性能积聚在岩石内;能量特征指数线性增大。(3)细观特征尺度越大,外界输入能量和积聚弹性能都增大,但幅度不同;峰后破坏所需耗散能越大;弹性能转化比例越低;当细观特征尺度小于1mm时,能量特征指数大幅减小,而当其大于1mm时,变化不大。

**关键词** 岩石力学;能量特征;细观结构;冲击倾向

**中图分类号** TU45

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.08.001

## Association of Energy Characteristics and Meso-structure of Rock

ZHANG Zhizhen<sup>1,2</sup>, GAO Feng<sup>1,2</sup>, CUI Yang<sup>2,3</sup>, LIN Bin<sup>2</sup>

1. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221008, Jiangsu Province, China
2. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu Province, China
3. Department of Hydraulic Engineering, Shandong Water Polytechnics, Rizhao 276826, Shandong Province, China

**Abstract** The meso-structure of rock affects its energy behavior during loading process. From three meso-characteristics, that is, mean strength of rock element, homogeneity, and meso-characteristic scale, their influential rule involving five characteristic energy parameters as well as four energy characteristic indexes is discussed. The results show that (1) with the increasing the mean strength of rock element, the input energy density and elastic energy density go up nonlinearly while stress ratio is same; the dissipated energy after peak strength changes a little, about 500~2000J/m<sup>3</sup>; conversion rate to elastic energy decreases; energy characteristic indexes of rock sample increase exponentially. (2) As the homogeneity raises, the input energy density and elastic energy density before peak strength increase linearly; the dissipated energy after peak strength reduces; more and more input energy translates into elastic energy accumulated in rock; the energy characteristic indexes enlarge linearly. (3) The larger the meso-characteristic scale is, the more the input energy and the elastic energy with different ranges is; the more the dissipated energy after peak strength is, the lower the conversion efficiency into elastic energy is. The energy characteristic indexes decrease by a large margin when meso-characteristic scale is smaller than 1mm and decrease only a little when meso-characteristic scale is larger than 1mm.

**Keywords** rock mechanics; energy characteristics; meso-structure; rockburst proneness

### 0 引言

岩石的变形破坏是能量驱动下的一种状态失稳现象<sup>[1]</sup>,

而岩石的动力破坏则是达到强度极限时积聚弹性能急剧释放的结果<sup>[2,3]</sup>。从能量的角度去观察和研究岩石力学问题,已

收稿日期:2012-11-23;修回日期:2013-01-06

基金项目:《科技导报》博士生创新研究计划项目(kjdb2011010);国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2010CB226804);中央高校基本科研业务费专项资金项目(2012LWB65);国家自然科学基金项目(11202108)

作者简介:张志镇,博士研究生,研究方向为非线性力学与煤岩动力灾害防治,电子信箱:zzcumt@163.com

得到理论界、工程界越来越多的关注及重视<sup>[4]</sup>,亦取得了一些可喜的进展。谢和平<sup>[11,4]</sup>、李夕兵<sup>[5]</sup>、Pietro Cornetti<sup>[6]</sup>、Bratov<sup>[7]</sup>等国内外学者研究了岩石能量耗散及释放与其破裂和本构行为的关系;在实验分析方面,华安增等<sup>[8]</sup>说明卸压破碎与加压破碎在能量变化方面显著不同。尤明庆等<sup>[9]</sup>揭示了岩样破裂时实际吸收的能量与破裂时所处的围压成线性关系;Giuseppe Ferro<sup>[10]</sup>发现能量耗散密度的尺寸效应比单轴抗压强度明显;陈卫忠等<sup>[11]</sup>阐述了不同围压、不同控制方式和不同卸载速率条件下岩石的能量耗散及能量释放特点;黎立云等<sup>[12]</sup>对岩石试件进行了竖向反复加卸载直至破坏的双向压缩实验,得到了破坏时的总吸收能、总耗散能和总可释放应变能;刘建锋等<sup>[13]</sup>探讨了岩石密度对能量耗散的影响;张志镇等<sup>[14]</sup>研究了红砂岩在单轴加载下的能量演化,并揭示了其非线性行为<sup>[15]</sup>。

岩石作为一种天然非均质材料,包含大量不同的矿物颗粒、孔洞和微小裂隙等,这些复杂的细观结构对试样的损伤演化过程和变形破坏起控制作用,决定了岩石宏观力学性质和破裂特性<sup>[6]</sup>。岩石的细观结构特征一定会影响甚至决定其受载过程中的能量行为,本文从岩石基元平均强度、均质度和细观特征尺度 3 个方面探讨这些细观特征与其能量特征的关联性,以期对相关工程实践提供另一种视角参考。

## 1 岩石能量演化特征指标

岩石破裂前后的能量值和其破裂方式紧密相关,实际上,在岩石冲击地压和岩爆研究中,已提出并广泛采用一系列能量指标(冲击倾向性指标)表征受载岩石能量演化的特征,并用以说明岩石破裂的规模和剧烈程度。冲击倾向性越强,说明岩石积聚的弹性能越多,相应耗散掉的能量越少,并且破裂时能量释放率越大;冲击倾向性越弱,则反之。

这些特征指标主要有弹性能指数、冲击能指数。近年来,一些学者提出新的指标以修正上述指标的不足,主要包括有效冲击能指数、剩余能量指数等,这些指标是岩石能量演化特征的重要表现<sup>[17]</sup>。

弹性能指标  $W_{ET}$  定义为峰前 80%~90% 强度处弹性能与消耗能之比值,如图 1 所示,  $W_{ET}=S_{EAC}/S_{EOA}$ 。其值越大表明岩石的冲击倾向性越大,波兰采矿研究总院确定的标准为:  $W_{ET} \geq$

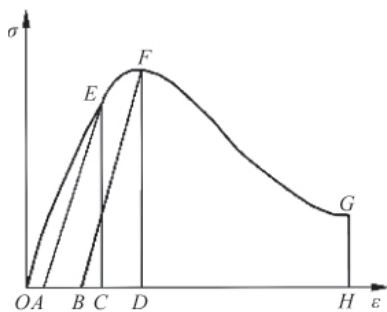


图 1 岩石能量特征指标

Fig. 1 Energy characteristic index of rock

5.0 为强烈冲击倾向性,  $2.0 \leq W_{ET} < 5.0$  为中等冲击倾向性,  $W_{ET} < 2.0$  无冲击倾向性。

冲击能指标  $K_E$  定义为峰值前后应力-应变曲线下的面积之比,即岩石峰值强度前岩石储存的能量与峰值后稳定破坏所需的能量之比,如图 1,  $K_E=S_{OEF}/S_{FDHG}$ 。其值越大表示冲击倾向性越强,一般认为:  $K_E > 2.0$  为强烈冲击倾向性,  $1.0 \leq K_E < 2.0$  为中等冲击倾向性,  $K_E < 1.0$  无冲击倾向性。

有效冲击能指标  $K_{eff}$  是综合弹性能指数  $W_{ET}$  和冲击能指标  $K_E$ , 考虑岩石峰值以前所储存的弹性能与峰值后破坏所需能量的比值,即图 1 中峰值卸载线  $FB$  下面积  $S_{FBD}$  与峰后曲线下面积  $S_{FDHG}$  之比,即  $K_{eff}=S_{FBD}/S_{FDHG}$ 。

剩余能量指数  $W_R$  是指岩石在峰值强度前储存的弹性应变能和峰值强度后稳定破坏所需的能量耗散之差(即剩余能量)与峰值强度后稳定破坏所需的能量耗散之比,如图 1,即为  $W_R=(S_{FBD}-S_{FDHG})/S_{FDHG}$ 。

## 2 岩石能量特征与其细观结构的关联

大部分岩石都是由一种或者几种矿物颗粒胶结而成的孔隙介质,如砂岩由石英、长石、白云母以及胶结物、碎屑杂基组成,石灰岩由方解石组成。很明显,这些矿物颗粒本身的性质、颗粒分布均匀性、颗粒粒径大小等细观性质将决定岩石基元的平均力学性质、均质度、特征尺度等,对岩石受载过程中能量演化特征有着较大的影响。

考查这些细观性质的影响,从试验来讲,较常用的是人工材料,采用不同粒径和性质的颗粒制作相似材料,试验费时费力,所以决定采用数值试验方式探讨。考虑到 RFPA 数值方法被广泛认可及其对非均质的描述,下面将在 RFPA 平台上从 3 方面探讨这些细观性质与岩石能量特征的关联。

### 2.1 基本思路

岩石试样被假定由等尺寸的四边形单元(基元)组成,这些单元的力学性质(包括弹性模量、强度等)按照 Weibull 统计分布赋值,以此近似反映缺陷和晶粒等各微元力学参数的不同,分布函数为

$$\varphi(\alpha) = \frac{m}{\alpha_0} \left( \frac{\alpha}{\alpha_0} \right)^{m-1} \exp \left[ - \left( \frac{\alpha}{\alpha_0} \right)^m \right] \quad (1)$$

式中,  $\alpha$  为岩石基元的力学参数(抗压强度、弹性模量、泊松比等);  $\alpha_0$  为岩石基元力学参数的平均值;参数  $m$  为均匀系数,  $m$  越大,表明岩石基元的分布越均匀;  $\varphi(\alpha)$  为岩石基元力学参数  $\alpha$  的统计分布函数。

由此可知,考查  $\alpha_0$ 、 $m$  及单元尺寸的不同,意味着基元平均力学性质、基元分布均匀性和细观特征尺度的不同。值得指出的是,为了计算方便,RFPA 软件对岩石材料进行了上述统计性设定,尤其在细观结构方面做了很多简化,在颗粒间接触、孔隙分布等方面做了较粗略的处理,但即便如此,从统计的角度讲,此方法对了解这些细观结构对岩石宏观力学和能量行为的影响规律仍有很大裨益。

## 2.2 基元平均强度的影响

采用直径 50mm、高 100mm 标准试件,均质度参数  $m=2$ ,弹性模量平均值 25GPa,泊松比 0.25,基元特征尺寸 1mm,内摩擦角  $30^\circ$ ,强度拉压比 10,残余抗压强度系数 0.1,最大拉、压应变系数分别为 1.5 和 200;采用 M-C 强度准则,平面应力模型,按位移加载,0.001mm/step。考查基元平均强度的影响,分为 10,30,50,70,100,150,200MPa 7 种情况。

7 种岩样的应力-应变曲线如图 2 所示。可以看出,随着基元平均强度的增加,岩样单轴抗压强度及其所对应的峰值应变、残余强度等都呈现大幅增加,弹性模量变化不大。基元强度对岩样力学特性的影响规律已有研究,本研究着重于基元强度对其能量特征的影响。

通过对岩样应力-应变曲线的计算,主要考查 80%强度时输入能量密度、80%强度时积聚弹性能密度、峰前输入能量密度、峰前积聚弹性能密度、峰后耗散能密度等 5 种特征能量参数。需要指出的是,岩石的卸载曲线一般与加载曲线直线段斜率相同<sup>[8]</sup>,由此可计算出岩石所储存的弹性能,虽然有一定误差,但对获得相关指标的变化规律影响不大。

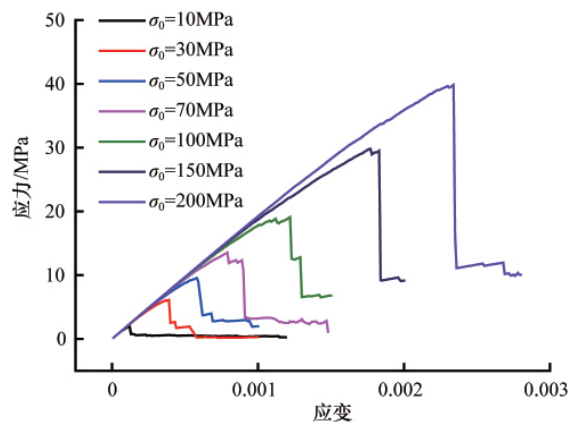


图 2 不同基元平均强度岩样的应力-应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curves of rock samples for the mean strength of different rock elements

计算所得 7 种岩样的 5 种特征能量参数如图 3 所示。可以看出:(1) 基元平均强度越大,相同应力比下的输入能量密度和积聚弹性能密度越大,且呈非线性增长,即基元平均强度越大,此两种能量增长幅度越大,例如对于峰前积聚弹性能密度,基元平均强度为 200MPa 岩样比 10MPa 岩样增加 418 倍,而 20MPa 岩样仅增加 9 倍;(2) 基元平均强度对峰后岩石破坏所需的耗散能密度影响不大,处于较低的水平,约为  $500\sim 2000\text{J}/\text{m}^3$ ;(3) 在岩样的 80%强度以前,外界对岩石所做的功(能量输入)主要转化为弹性能积聚在岩石内,约 90%,而从 80%强度到峰值应力阶段,通常对应岩石弱化阶段,岩石耗散能越来越多,积聚弹性能比例降为 70%~80%;(4) 岩样应力水平处于 80%强度时,输入能量达到峰前总输入能量的 50%~55%,而积聚弹性能达到峰前积聚总弹性能的 63%左右。

根据前述能量特征指数的定义,可以得到不同基元强度岩样 4 种能量特征指数的值(图 4)。可以看出:(1) 冲击能指数、有效冲击能指数、剩余能量指数的变化趋势基本相同,而弹性能指数的变化趋势却与这 3 种指数大相径庭,究其原因,弹性能指数只考虑了屈服强度以前的载荷-变形关系,实际上屈服强度以后塑性变形的大小以及峰值强度以后的应力-应变关系如何与岩石的破坏形态及破坏方式有着极为密切的关系。如,基元平均强度 150 和 200MPa 岩样,峰后破坏所需耗散能很少,以致弹性能指数因为忽视这一点而发生较大偏差。(2) 随着基元平均强度的增大,岩样能量特征指数越来越大,呈指数型增长。(3) 在本试验所选定的其他参数条件下,当基元平均强度小于 20MPa 时,岩样无冲击倾向性或冲击倾向性较弱,而当基元平均强度大于 20MPa 时表现出较强的冲击倾向。当然,诸如非均质度等其他参数也会参与影响这一特征,下面将会阐述。

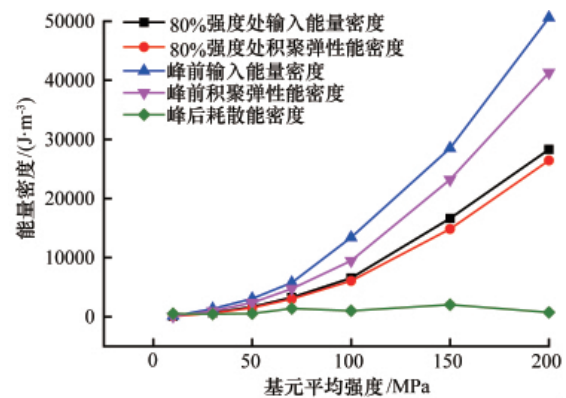


图 3 不同基元平均强度岩样的特征能量参数

Fig. 3 Characteristic energy parameters of rock samples for the mean strength of different rock elements

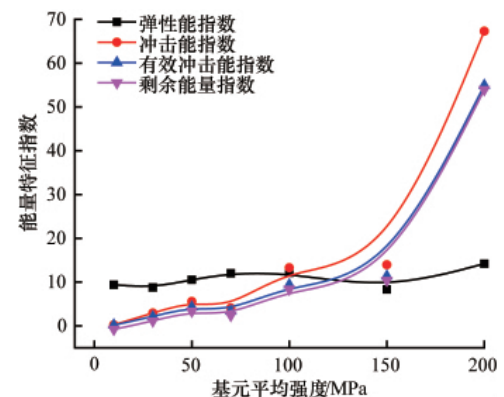


图 4 不同基元平均强度岩样的能量特征指数

Fig. 4 Energy characteristic indexes of rock samples for the mean strength of different rock elements

## 2.3 基元分布均匀性的影响

岩样基元平均强度为 70MPa,其余几何和力学参数同 2.2

节。考查基元分布均匀性的影响,  $m$  分为 1, 2, 5, 10, 20 共 5 种情况。

图 5 为 5 种不同均质度岩样的应力-应变曲线。可见, 对于相同的基元平均强度, 随着均质度的增加, 岩样的单轴抗压强度及其所对应的峰值应变都大幅增加, 残余强度小幅减小, 弹性模量逐渐增大, 但当均质度大于 5 后, 弹性模量变化不大。另外, 均质度越大, 表现出越强的脆性, 峰值应力跌落幅度越大并且越迅速。

通过对应力-应变曲线的计算, 得到不同均质度岩样的 5 种特征能量参数如图 6 所示。由图 6 可知: (1) 随着均质度的升高, 峰前输入能量密度和积聚弹性能密度都呈增大趋势, 大概为直线型增长; (2) 峰后破坏所需耗散能随均质度增大而降低, 均质度为 5 的岩样比均质度为 1 的岩样降低 91%, 均质度大于 5 后变化不大; (3) 峰前外界输入的能量绝大部分转化为弹性能积聚在岩石内, 均质度越大, 转化率越高, 例如, 均质度为 1 岩样转化率为 58.8%, 而均质度为 20 岩样转化率为 99.9%, 如图 7 所示。

通过图 6 数据计算得到的不同均质度岩样的 4 种能量

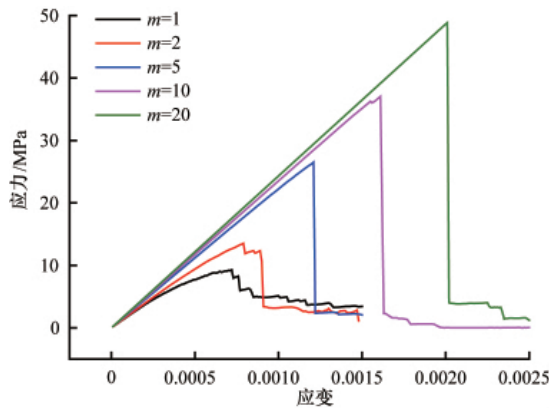


图 5 不同基元均质度岩样的应力-应变曲线  
Fig. 5 Stress-strain curves of rock samples with different homogeneities

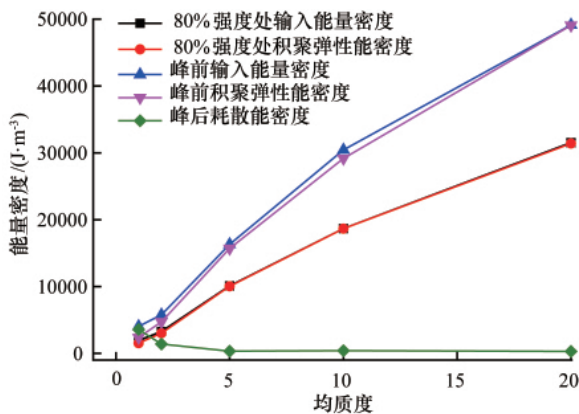


图 6 不同均质度岩样的特征能量参数  
Fig. 6 Characteristic energy parameters of rock samples with different homogeneities

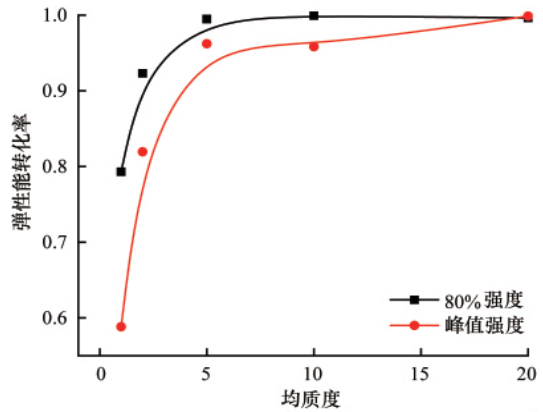


图 7 不同均质度岩样的弹性能转化率  
Fig. 7 Elastic energy conversion efficiency of rock samples with different homogeneities

特征指数如图 8 所示。可以看出: (1) 弹性能指数表现出与其他 3 种指数不同的变化规律, 又体现了其缺陷导致其无法正确表征岩石的能量行为; (2) 岩石均质度越高, 其冲击能指数、有效冲击能指数和剩余能量指数越大, 大致呈直线型增大; (3) 在本试验所选定的其他参数条件下, 均质度小于 1 时, 岩样表现出较弱或者无冲击倾向性, 而当均质度大于 1 时, 其冲击倾向变强。

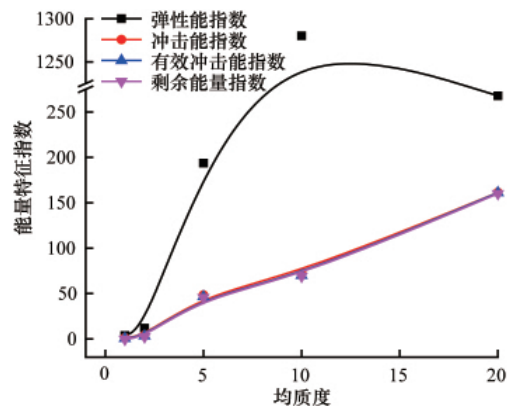


图 8 不同基元均质度岩样的能量特征指数  
Fig. 8 Energy characteristic indexes of rock samples with different homogeneities

#### 2.4 细观特征尺度的影响

岩样基元平均强度为 70MPa, 其余几何和力学参数同 2.2 节。考查岩石细观特征尺度的影响, 岩样细观特征尺度  $l_0$  分为 0.2, 0.5, 1, 2, 5mm 5 种情况。

图 9(a) 为不同细观特征尺度岩样的应力-应变曲线。可知, 岩样细观特征尺度越大, 岩石单轴抗压强度越大, 峰值应变越大, 并且峰前弱化特征越显著; 细观特征尺度足够大时, 应力-应变曲线常会出现锯齿状波动, 表征了岩样内部基元的逐渐弱化及再调整过程, 由于细观尺度大, 这种调整反映在宏观荷载-变形上更为显著。

根据图 9(a) 中各曲线参数, 计算得到了不同细观特征尺

度岩样的 5 种特征能量参数,如图 9(b)所示。可以看出:  
(1) 细观特征尺度越大,外界输入能量和积聚弹性能都增大,但增大幅度不同,例如,特征尺度为 5mm 岩样峰前输入能量密度比特征尺度 0.2mm 岩样增大 2.8 倍,而峰前积聚弹性能仅增加 0.78 倍,意味着细观特征尺度大的岩样把增加的能量输入的大部分耗散掉了。(2) 细观特征尺度越大,峰后破坏所需耗散能越大。(3) 细观特征尺度越大,外界输入能量转化为弹性能的比例越低。例如,特征尺度为 5mm 岩样峰前弹性能占比仅为 40.4%,特征尺度 0.2mm 岩样则为 85.6%,如图 10(a)。

根据图 9(b)中数据可得到不同细观特征尺度岩样的 4 种能量特征指数,如图 10(b)所示。可以得到:(1) 岩石细观特征尺度越大,4 种能量特征指数都减小,考查冲击能指数、有效冲击能指数和剩余能量指数,当细观特征尺度小于 1mm 时,4 种能量特征指数均大幅减小;而当细观特征尺寸大于 1mm 时,4 种能量特征指数则变化不大。(2) 在本试验选定的其他参数条件下,当细观特征尺度大于 5mm 甚至更多时,岩石冲击倾向性才会变弱;而小于 5mm 时,表现出较强的冲击倾向。

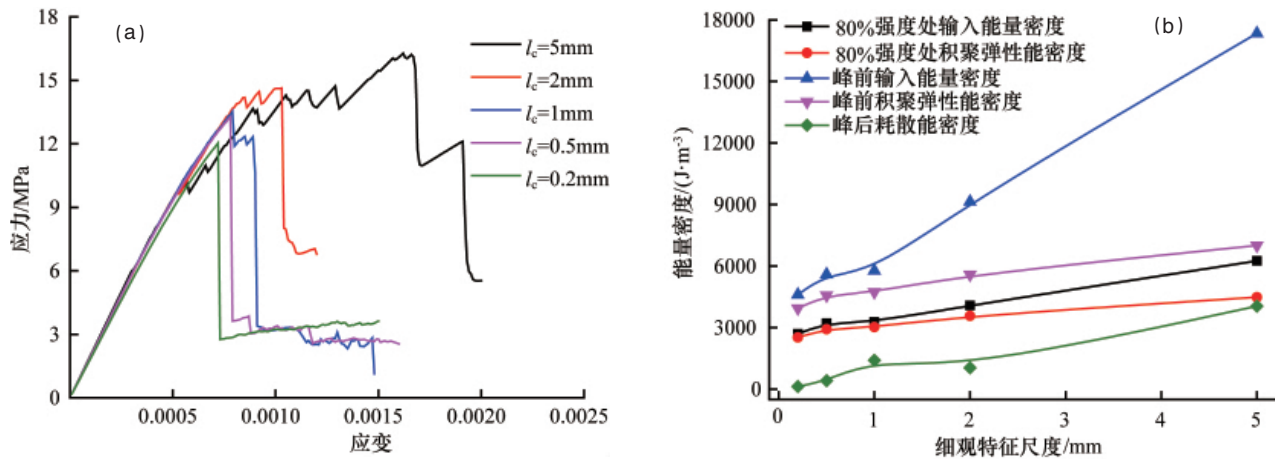


图 9 不同细观特征尺度岩样的应力-应变曲线 (a) 和特征能量参数 (b)  
Fig. 9 Stress-strain curves (a) and characteristic energy parameters (b) of rock samples with different meso-characteristic scales

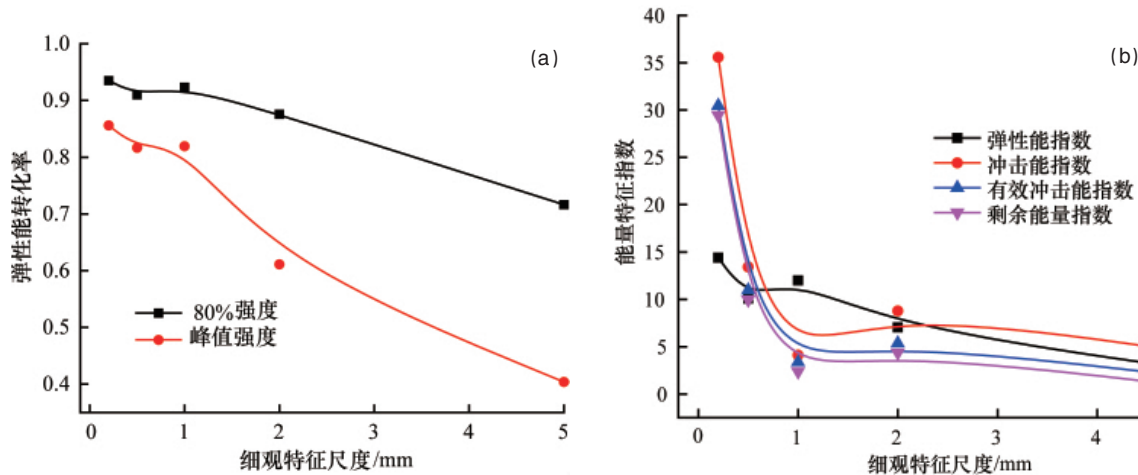


图 10 不同细观特征尺度岩样的弹性能转化率 (a) 和能量特征指数 (b)  
Fig. 10 Elastic energy conversion efficiency (a) and energy characteristic indexes of rock samples with different meso-characteristic scales

### 3 讨论

在岩石工程实践中,尤其是在广为关注的煤矿开采过程中,处处存在着岩体的能量输入、耗散、积聚和释放,而这些能量行为的发生对煤岩体的各种物理力学性质产生很大的影

响,许多动力灾害是由大量的突然的能量释放导致的,例如常见的冲击矿压、矿震<sup>[3]</sup>等,而许多开采工艺也是通过诱导其能量耗散达成的,例如煤层割缝卸压透抽采瓦斯是让煤层能量转化为更多的裂隙表面能等。

由上述试验的结论可知,通过改变岩体的细观结构和强度特征,可以达到改变采动影响下岩体能量演化特征的目的,从而可用于治理相关能量释放型灾害及改造煤层物理力学性质。受载岩体能量特征的可控改变和定量把握将为相关实践带来积极意义。

可以从以下途径出发改变岩体的能量演化特征。

(1) 改变煤岩体的基元平均强度。由图 2 可知,岩石基元

平均强度可宏观体现为其单轴抗压强度,改变岩石基元平均强度即改变岩石组分的力学性质,主要通过煤层注水或注热的手段改变其热湿环境来达到。如图 11<sup>[19,20]}</sup>所示,含水率和温度都能起到降低岩石抗压强度的作用,岩石单轴抗压强度随着含水率的增加线性减小,随着温度的升高减速减小。在 2.2 节的试验条件下,基元平均强度需降至 20MPa 以下,才会消除冲击危险。

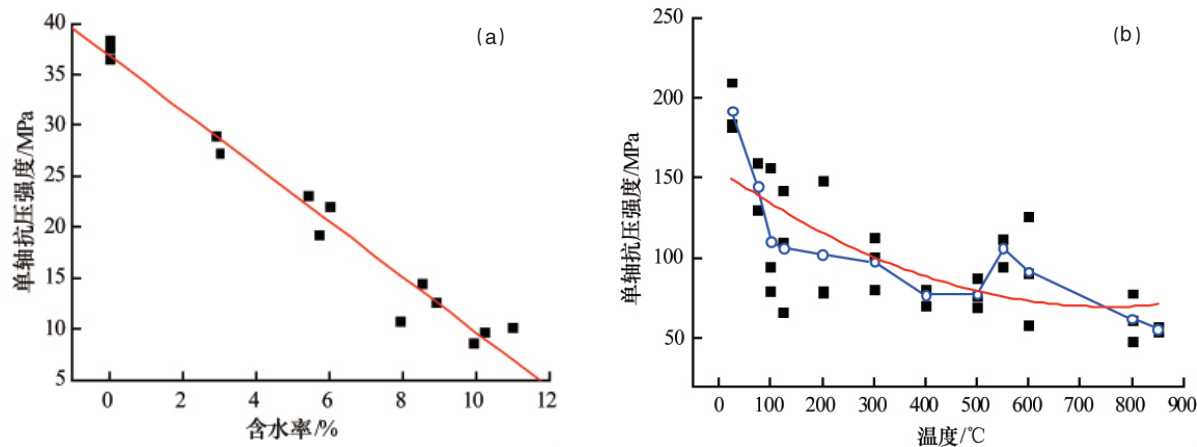


图 11 含水率(a)和温度(b)对岩石单轴抗压强度的影响

Fig. 11 Effect of moisture content (a) and temperature (b) on uniaxial compressive strength

煤层注水已广泛应用于冲击灾害治理,它能大幅减小破坏前的机械能输入和弹性能积聚,并可显著改善能量释放过程在时间上的稳定性和空间上的均匀性。但煤层注热防治冲击尚未见报道,可能是复杂工艺和成本的阻碍,但是否更加有效需要研究,况且,煤层气注热增透开采已有很多研究,可与其一起进行协同设计。

(2) 改变煤岩体的均质度。人为制造缺陷(主要有孔洞型缺陷、裂隙型缺陷),缺陷体本身及其周围介质的基元力学性质发生跳跃性变化,与原始煤岩体具有高度差异性。这种局部区域介质力学性质的突变,降低了该区域煤岩体的均质度,从而减少了能量输入和弹性能积聚,降低了弹性能转化率。在 2.3 节的试验条件下,均质度小于 1 才会使得冲击倾向减弱。

(3) 改变煤岩体的细观特征尺度。岩石的细观特征尺度与其内部组分、晶粒大小和分布有关,煤岩体的振动可使其内部普遍产生沿晶和穿晶断裂,改变了晶粒大小和分布,从而改变了其细观特征尺度。1977 年明尼夫等首先提出了用振动方法降低煤与瓦斯突出发生的危险;1988 年普列托夫、1993 年里普曼也提出了用振动降低围岩应力控制冲击矿压的观点<sup>[21]</sup>;1999 年潘一山进行了实验室振动试验<sup>[21]</sup>,并研究了其机制。

实际上,一种工程措施的采用,都不止改变了一种细观特征,而是对几乎所有细观特征都有所影响,这种工程措施

的效果即是所有改变的综合反映。例如,对煤岩体进行加热加湿不仅降低了其基元平均强度,也会增加其细观特征尺度,此外还会对基元的弹性模量等有所影响。只要这种综合效应趋向于减弱其能量存储及释放,那么这一工程措施便是有效而科学的。

#### 4 结论

本文通过数值试验分析了基元平均强度、均质度和细观特征尺度等 3 种岩石细观特征对其变形破坏过程中能量演化的影响规律,主要结论如下:

(1) 随着基元平均强度的增大,相同应力比下的输入能量密度和积聚弹性能密度变大,呈非线性增长;峰后所需耗散能密度变化不大,为 500~2000J/m<sup>3</sup>;弹性能转化率变小,80%强度时约 90%,而峰值应力阶段降为 70%~80%;岩样能量特征指数呈指数型增长。

(2) 随着均质度升高,峰前输入能量密度和积聚弹性能密度都呈线性增长;峰后破坏所需耗散能降低;越来越多的能量转化为弹性能积聚在岩石内;能量特征指数线性增大。

(3) 细观特征尺度越大,外界输入能量和积聚弹性能都增大,增大幅度不同;峰后破坏所需耗散能越大;外界输入能量转化为弹性能的比例越低;当细观特征尺度小于 1mm 时,能量特征指数大幅减小,而当其大于 1mm 时,变化不大。

(4) 冲击能指数、有效冲击能指数、剩余能量指数的变化

趋势基本相同,而弹性指数仅考虑屈服强度以前的能量演化关系,具有较大的局限性。

### 参考文献 (References)

- [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 Heping, Ju Yang, Li Liyun. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(17): 3003-3010.
- [2] 何满潮, 苗金丽, 李德建, 等. 深部花岗岩试样岩爆过程实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(5): 865-875.  
He Manchao, Miao Jinli, Li Dejian, et al. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(5): 865-875.
- [3] 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.  
Dou Linming, He Xueqiu. Prevention theory and technology of rockburst [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2001.
- [4] 谢和平, 鞠杨, 黎立云, 等. 岩体变形破坏过程的能量机制 [J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(9): 1729-1739.  
Xie Heping, Ju Yang, Li Liyun, et al. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(9): 1729-1739.
- [5] 李夕兵, 左宇军, 马春德. 动静组合加载下岩石破坏的应变能密度准则及突变理论分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2814-2825.  
Li Xibing, Zuo Yujun, Ma Chunde. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2814-2825.
- [6] Cornetti P, Pugno N, Carpinteri A, et al. Finite fracture mechanics: A coupled stress and energy failure criterion [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2006, 73(14): 2021-2033.
- [7] Bratov V, Petrov Y. Optimizing energy input for fracture by analysis of the energy required to initiate dynamic mode I crack growth[J]. International Journal of Solids and Structures, 2007, 44(7-8): 2371-2380.
- [8] 华安增, 孔园波, 李世平, 等. 岩块降压破碎的能量分析[J]. 煤炭学报, 1995, 20(4): 389-392.  
Hua Anzeng, Kong Yuanbo, Li Shiping, et al. Journal of China Coal Society, 1995, 20(4): 389-392.
- [9] 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 Mingqing, Hua Anzeng. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(6): 778-781.
- [10] Ferro G. On dissipated energy density in compression for concrete [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2006, 73(11): 1510-1530.
- [11] 陈卫忠, 吕森鹏, 郭小红, 等. 基于能量原理的卸围压试验与岩爆判据研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(8): 1530-1540.  
Chen Weizhong, Lv Senpeng, Guo Xiaohong, et al. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(8): 1530-1540.
- [12] 黎立云, 王荣新, 马旭, 等. 双向加压下岩石能量规律的实验研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(12): 2033-2038.  
Li Liyun, Wang Rongxin, Ma Xu, et al. Journal of China Coal Society, 2010, 35(12): 2033-2038.
- [13] 刘建锋, 徐进, 李青松. 循环荷载下岩石阻尼参数测试的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(5): 1036-1041.  
Liu Jianfeng, Xu Jin, Li Qingsong. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(5): 1036-1041.
- [14] 张志镇, 高峰. 单轴压缩下红砂岩能量演化试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(5): 953-962.  
Zhang Zhizhen, Gao Feng. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(5): 953-962.
- [15] 张志镇, 高峰. 单轴压缩下岩石能量演化的非线性特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(6): 1198-1207.  
Zhang Zhizhen, Gao Feng. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(6): 1198-1207.
- [16] 于庆磊, 杨天鸿, 郑超, 等. 岩石微观结构对其变形强度影响的数值分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(11): 3468-3472.  
Yu Qinglei, Yang Tianhong, Zheng Chao, et al. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(11): 3468-3472.
- [17] 张志镇, 高峰, 刘治军. 温度影响下花岗岩冲击倾向及其微观机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(8): 1591-1602.  
Zhang Zhizhen, Gao Feng, Liu Zhijun. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(8): 1591-1602.
- [18] 雷化南. 矿山岩体力学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1983.  
Lei Huanan. Rock mechanism for mining [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1983.
- [19] 季明. 湿度场下灰质泥岩的力学性质演化与蠕变特征研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2009.  
Ji Ming. Research on the mechanical characteristics and creep properties of calcareous mudstone in the humidity field [D]. Xuzhou: China University of Mining Science and Technology, 2009.
- [20] 徐小丽. 温度荷载作用下花岗岩力学性质演化及其微观机制研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2008.  
Xu Xiaoli. Research on the mechanical characteristics and micromechanism of granite under temperature loads [D]. Xuzhou: China University of Mining Science and Technology, 2008.
- [21] 潘一山, 杜广林, 张永利, 等. 煤体振动方法防治冲击地压的机理研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(4): 432-436.  
Pan Yishan, Du Guanglin, Zhang Yongli, et al. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(4): 432-436.

(责任编辑 马宇红, 朱宇)

### 《科技导报》“卷首语”栏目征稿

“卷首语”栏目每期邀请一位中国科学院院士和中国工程院院士就重大科技现象、事件,以及学科发展趋势、科学研究热点和前沿问题等,撰文发表个人的见解、意见和评论。本栏目欢迎院士投稿,每篇文章约2000字,同时请提供作者学术简历、工作照和签名电子文档。投稿邮箱:kjdbbjb@cast.org.cn。