

基于 J 积分的颗粒煤岩单轴压缩下裂纹扩展研究*

徐军† 肖晓春 潘一山 丁鑫

(辽宁工程技术大学力学与工程学院, 阜新 123000)

(2014年4月27日收到; 2014年5月20日收到修改稿)

颗粒煤岩是由众多离散的煤岩颗粒组成的固态多层次多结构物质, 具有煤岩与颗粒物质的双重性质, 其裂纹扩展规律可以从煤岩力学特性和颗粒物质多尺度特性进行研究. 首先, 从能量角度对线弹性材料受压破坏, 裂纹扩展产生原因进行了阐述, 指出线弹性阶段裂纹的扩展动力源自应变能的释放. 然后, 通过物理实验和数值试验从宏观和细观两方面对颗粒煤岩受压破裂过程中裂纹扩展做了进一步研究, 结果表明: 颗粒煤岩完全破裂后, 底部会形成一个锥形堆, 裂纹的扩展随着煤岩颗粒粒径的减小而减缓, 部分裂纹扩展会出现突变点, 且裂纹无光滑性; 由于煤岩颗粒粒径等引起介质的非均匀性对裂纹扩展有重要的影响, 均质度系数越大裂纹起裂时间越晚, 声发射能量释放在裂纹扩展的轻度、中度和深度三个不同阶段逐渐变得频繁、剧烈. 研究结果将有利于进一步研究岩土类颗粒材料受压破裂过程的裂纹扩展规律.

关键词: J 积分, 颗粒煤岩, 单轴压缩, 裂纹扩展

PACS: 46.5+a, 46.90.+s, 91.45.Ga, 91.60.Ba

DOI: 10.7498/aps.63.214602

1 引言

20世纪90年代初, 在诺贝尔物理学奖获得者 de Gennes 等物理学家倡导下, 颗粒物质的物理机理和力学特性引起了人们的注意, 20年来, 颗粒物质已经稳固地发展成为物理学和力学的前沿^[1]. 而颗粒问题在岩爆、地震、堤坝建设、泥石流等诸多工程领域也开始受到重视. 促使国内外专家学者投入到对这些细小而关键的颗粒体系研究中. 至目前, 颗粒物质力学的研究已经涉及到非常广泛的领域, 衍生出了很多新的力学研究方向, 如颗粒固体的流体动力学, 岩土颗粒力学, 颗粒物质统计力学等. 这些新的颗粒物质力学研究方向涉及的研究问题也很多, 如颗粒物质的力学本构关系^[2,3], 颗粒固体的 GSH 理论^[4-10], 颗粒堆的凹陷问题^[11-15], 如何用统计力学方法对颗粒物质描述^[16-21], 颗粒物质的转动接触问题^[22-25]等. 然而, 对于岩土类颗

粒材料特别是煤岩颗粒材料的本构方程以及受力后裂纹扩展的研究却很缺乏. 本文从 Eshelby^[26] 及 Rice^[27] 提出的适用于更广义的裂纹扩展方法——路径无关的 J 积分方法出发, 结合物理实验与数值试验, 对颗粒煤岩单轴压缩破坏过程中裂纹的萌生扩展及裂纹形态等进行初步的探索, 研究结果也将有利于进一步研究岩土类颗粒材料受压破裂过程的裂纹扩展规律.

2 J 积分理论及能量释放率

在线弹性断裂力学中, 一般从裂纹尖端应力场与裂纹扩展过程中能量变化两个角度分析裂纹的力学性能. 而在能量角度, 上个世纪20年代 Griffith^[28] 指出物体内部能量释放所产生的裂纹驱动力是导致裂纹增长的原因. Irwin^[29] 提出了一种临界应力强度因子断裂准则, 进一步证明了能量准则和应力强度因子对于弹脆性材料平衡系统是等

* 国家自然科学基金青年基金(批准号: 51004061, 51104083)、国家自然科学基金面上项目(批准号: 51374123)和国家重点基础研究发展计划(973计划)(批准号: 2010CB226803)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: jxu1120@126.com

效的。

在此基础上, 考虑一块理想的均质煤岩样, 内含一条贯穿性裂纹, 裂纹表面无外力作用, 均质煤岩所受外力是裂纹周围产生二维应力应变场. 以裂纹尖端为圆心取半径为 r 的积分回路 $\Gamma = \Gamma_1 + \Gamma_2 + \Gamma_3 + \Gamma_4$, 如图 1, 由裂纹下表面任一点开始, 按逆时针方向 (弧长 s 的正向) 沿 Γ 环绕裂纹尖端行进, 终止于裂纹上表面任意一点, 由断裂力学知识, Rice^[27] 的 J 积分定义为

$$J = \int_{\Gamma} \left(W dy - \mathbf{T} \cdot \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial x} ds \right), \quad (1)$$

式中, W 为煤岩的应变能密度; \mathbf{T} 为作用在积分回路 Γ 弧单元 ds 上的外力矢量; \mathbf{U} 为回路 Γ 上的位移矢量.

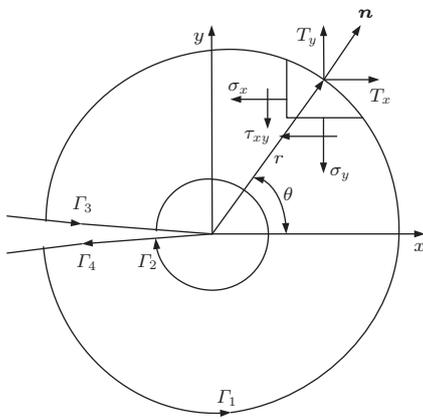


图1 J 积分回路

将 J 积分改为极坐标形式, 令 $ds = r d\theta$, $dy = r \cos \theta d\theta$, 有

$$J = \int_{-\pi}^{\pi} \left(W \cos \theta - \mathbf{T} \cdot \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial x} \right) \cdot r d\theta. \quad (2)$$

在平面应变情况下, 弹性应变能密度为

$$W = \frac{1+v}{2E} [(1-v)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2) - 2v\sigma_x\sigma_y + 2\tau_{xy}^2]. \quad (3)$$

对于张拉型裂纹即 I 型裂纹有

$$\begin{aligned} & \int_{-\pi}^{\pi} W \cdot r \cos \theta d\theta \\ &= \frac{(1+v)(1-2v)}{E} \cdot K_I^2. \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} T_x &= \sigma_x \cos \theta + \tau_{xy} \sin \theta \\ &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \left(\frac{3}{2} \cos \theta - \frac{1}{2} \right) \cdot \cos \frac{\theta}{2}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_y &= \tau_{xy} \cos \theta + \sigma_y \sin \theta \\ &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \left(\frac{3}{2} \sin \theta \right) \cdot \cos \frac{\theta}{2}. \end{aligned} \quad (5)$$

式中, E 为理想煤岩的弹性模量; ν 为泊松比; K_I 为 I 型裂纹断裂韧度.

(2) 式第二项中, 裂纹尖端位移分量为

$$\begin{aligned} u &= \frac{2(1+\nu)K_I}{E} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \left(1 - 2\nu + \sin^2 \frac{\theta}{2} \right) \\ &\quad \times \cos \frac{\theta}{2}, \\ v &= \frac{2(1+\nu)K_I}{E} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \left(2 - 2\nu - \cos^2 \frac{\theta}{2} \right) \\ &\quad \times \sin \frac{\theta}{2}. \end{aligned} \quad (6)$$

将 (4) 式, (5) 式, (6) 式代入 (2) 式可得

$$\begin{aligned} J &= \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{4E} K_I^2 \\ &\quad + \frac{(1+\nu)(3-2\nu)}{4E} K_I^2 \\ &= \frac{1-\nu^2}{E} K_I^2. \end{aligned} \quad (7)$$

在平面应力情况下, J 积分表示为

$$J = \frac{K_I^2}{E}. \quad (8)$$

而在理想条件下, 平面应变和平面应力情况的能量释放率为

$$\begin{aligned} G_I &= \pm \frac{1}{B} \frac{\partial V}{\partial a} = \frac{K_I^2}{E} (1-\nu^2), \\ G_I &= \pm \frac{1}{B} \frac{\partial V}{\partial a} = \frac{K_I^2}{E}, \end{aligned} \quad (9)$$

式中, V 为选取的理想试件的应变能; B 为试件的厚度; a 为裂纹长度.

由此可知, 对煤岩样受到固定外力时, 能量释放率等于裂纹扩展单位面积时增加或者释放的应变能, 即

$$J = \pm \frac{1}{B} \frac{\partial V}{\partial a}. \quad (10)$$

从全量理论角度, J 积分就是总势能随裂纹表面积改变的变化率.

3 颗粒煤岩的单轴压缩试验研究

在上述理论分析基础上, 选取不同粒径范围内的煤岩颗粒压制成颗粒煤岩试样 (50 mm × 100 mm), 如图 2 所示, 进行单轴压缩物理实验.



图2 颗粒煤岩试样

3.1 颗粒煤岩单轴压缩实验方案

实验方案围绕三种不同粒径范围内的煤岩颗粒压制而成的煤样单轴压缩破裂展开. 有跨度的选择煤岩颗粒, 这样使得在压制过程中小颗粒能够嵌入大颗粒间的缝隙中填补存在的孔隙缺陷, 从而使得颗粒煤岩试样细观上的连续性更好, 便于后续研究工作开展. 实验过程中观测边侧裂纹的扩展情况, 结束后, 测量出锥形堆的高度, 表1为具体的实验方案.

表1 颗粒煤岩单轴压缩实验方案

煤柱试样	粒径范围/mm	加载速率/(mm/s)
1#	0.25—0.5	0.01
2#	0.075—0.25	0.01
3#	< 0.075	0.01

3.2 颗粒煤岩单轴压缩实验结果分析

图3和表2分别为颗粒煤岩试样1#, 2#, 3#单轴压缩实验结果及实验过程中裂纹观测记录. 由于实验条件有限, 不能完全记录下颗粒煤岩试样变形破裂全过程. 所以, 从结果中选取了易于测量的一组, 做为样本进行记录. 图4为颗粒煤岩试样单轴压缩破坏过程的应力-应变曲线, 并通过裂纹扩展情况对整个曲线进行了扩展区段划分.

表2 实验观测记录表

煤样	锥形堆高度/mm	边侧裂纹条数/条
1#	23.2	7
2#	37.7	6
3#	53.4	4

为了从细观角度, 深入分析物理实验结果, 在此, 建立简单的物理实验相似平面唯象模型, 并对模型进行了初粗略的网格划分, 如图5, 再现物理

实验中裂纹扩展情况. 同时, 也为后续数值试验提供了试验模型. 假设每个网格内被粒径大小不一的



图3 颗粒煤岩试样1#, 2#, 3# 破裂结果及破裂形成的锥形堆

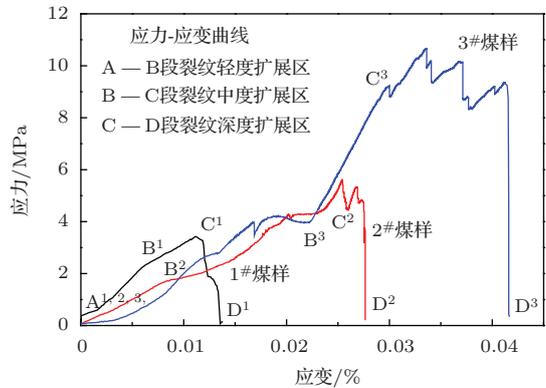


图4 (网刊彩色) 不同粒径煤柱的应力-应变曲线

煤岩颗粒所填满. 由于试样是由强度不同的煤岩颗粒压制而成, 所在每个小网格内显示的颗粒在形状上有所差异, 有的被压缩, 有的保持原形, 如图 5 和图 6 所示; 可以认为, 宏观的裂纹就是由这些网内

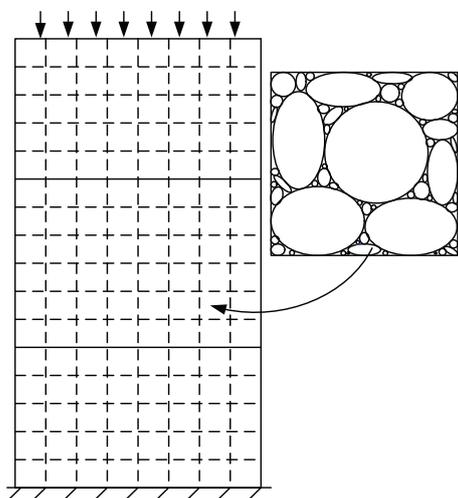


图 5 物理实验平面模型

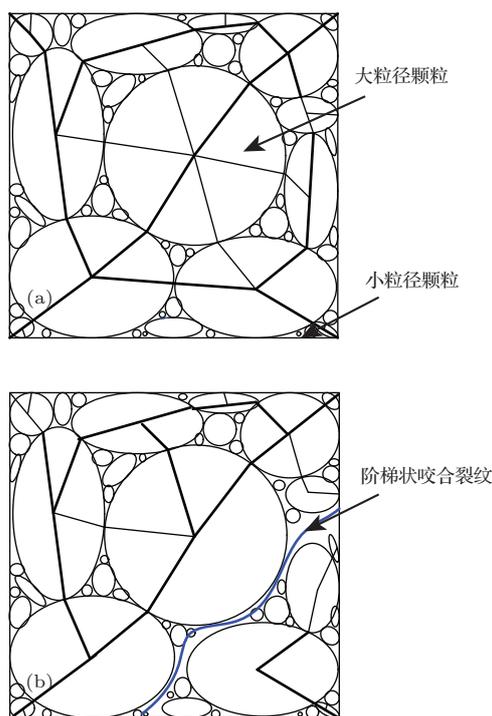


图 6 单个网格单元破坏形式 (a) 裂纹产生前; (b) 裂纹产生后

由图 4 可以看出, 在连续加载条件下, 由不同粒径颗粒煤组成的煤岩试样所能承受的应力在整体上呈现出随着煤岩颗粒粒径减小, 抗压强度和失稳破坏所需时间增大的现象. 颗粒煤岩试样破坏的效果与理想弹塑性材料的破坏差别较大, 理想弹

塑性材料单轴压缩的破坏往往具有连续性, 即从裂纹的开裂到失稳会持续一定的时间, 而颗粒煤岩试样的破坏则具有一定的突发性, 并且从裂纹的开裂到失稳持续的时间很短, 可以说是瞬间的发生失稳破坏, 这与准脆性材料及脆性材料的失稳破坏相似. 理想的弹塑性材料受单轴压缩失稳所产生的裂纹相对光滑, 而颗粒煤岩试样受压失稳则无光滑裂纹产生, 而且随着裂纹的开裂导致大量的煤岩颗粒发生散落, 图 3 中形成的锥形堆周围大量的煤岩颗粒散落可以说明这一现象. 物理实验颗粒煤岩的破坏现象与 Rowe^[30] 提出的应力剪胀关系 (stress-dilatancy relation) 和剪切滑移破坏分析模型的破坏机理相符合. 从细观颗粒物质力学角度分析知, 被压缩的颗粒间会形成一定的黏聚力, 称为力链^[31-33]. 连续加载条件下, 能量释放增多, 使得力链上的煤岩颗粒发生失稳偏离, 部分强度弱的煤岩颗粒被继续压缩, 部分偏离的则恢复自由, 散落下来, 致使力链受破坏, 从而颗粒产生微观上移动产生损伤形成微裂纹, 聚少成多, 形成了宏观的阶梯状咬合裂纹. 产生这种现象的主要原因是煤岩颗粒的大小, 强度存在差别, 使得裂纹沿着黏聚力较弱的区域发生扩展, 从而导致裂纹扩展的随机性和突发性.

颗粒煤岩试样制备过程中, 试样直径与高度比值由 0.45 变化到 0.5, 由于颗粒间的相互作用, 重力方向的力被分解到水平方向, 模具边壁支撑了颗粒的部分重量, 使得模具底部压强趋于饱和, 产生粮仓效应, 使得颗粒煤岩试样在整体强度上显示出上高下低的状态. 故在单轴压缩下试样通常从底部先出现裂纹的萌生, 这种裂纹萌生、扩展现象可由数值试验进一步获得.

4 颗粒煤岩单轴压缩的数值试验研究

物理实验中, 颗粒煤岩试样由粒径较小的煤岩颗粒制备而成, 在细观上连续性较好, 可视其为非均匀连续介质, 而 J 积分理论定义又限于二维条件下. 所以, 数值试验软件可采用岩石真实破裂过程分析软件 RFPA^{2D} 进行.

4.1 颗粒煤岩材料的非均匀性描述

为了从数值试验重现并验证上述裂纹扩展现象, 进行数值试验时, 材料的关键参数, 如材料的均

匀性、抗压强度的设定,在整体上由上到下要与实验煤岩试样尽量保持一致.考虑到煤岩颗粒的强度、粒径,颗粒煤岩试样内部存在的微裂纹、气泡,以及颗粒煤岩宏观上的一些缺陷导致材料体现出较高的非均匀性,通过Weibull统计分布对煤岩颗粒材料的非均匀性进行描述,假定煤岩颗粒材料细观单元的力学性质满足Weibull分布^[34]:

$$f(u) = \frac{m}{u_0} \left(\frac{u}{u_0}\right)^{m-1} \exp\left[-\left(\frac{u}{u_0}\right)^m\right], \quad (11)$$

式中, u 表示满足Weibull分布参数,如弹性模量、泊松比等值; u_0 是一个与所有单元参数平均值有关的参数; m 为Weibull分布密度函数的形状参数.当 u_0 取不同的值时,Weibull分布密度函数曲线图如图7所示,形状参数 m 反映了离散程度,即材料的非均匀分布情况如图7所示.

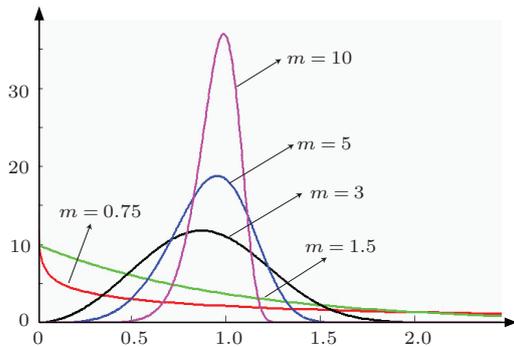


图7 (网刊彩色) 不同均质度系数的材料细观单元强度的Weibull分布

从图7可以看出,当 m 值逐渐变小时,材料的力学性质分布变宽,表明材料非均匀性变大;当 m 变大时,材料的力学性质分布变窄,表明材料的非均匀性变小,材料逐渐趋于均匀.

4.2 颗粒煤岩的数值试验方案及相关参数

根据物理实验中的相关数据进行数值试验参数设定:模型尺寸为 $50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$,如图5,此时,需将网格数细化为 150×300 个,并设定了如表3试验方案和表4相关控制参数.

表3 数值试验方案

序号	均质度系数	均质度系数平均值及方差
1	$m_1 = 5; m_2 = 3; m_3 = 1$	3; 2.66
2	$m_1 = 6; m_2 = 4; m_3 = 2$	4; 2.66
3	$m_1 = 7; m_2 = 5; m_3 = 3$	5; 2.66

表4 数值试验控制参数

参数	数值
弹性模量/GPa	3.5
泊松比	0.25
内摩擦角/(°)	37
位移加载速率/(m/步)	5×10^{-6}

4.3 颗粒煤岩单轴压缩数值试验结果分析

数值试验通过考虑颗粒煤岩体系的非均匀性将颗粒体系的非连续问题转化连续介质力学问题来研究.基于 J 积分,对于数值试验结果主要从材料的非均匀性和声发射能量两个方面对裂纹扩展的影响进行分析.模型均值度系数,单元强度变化由图7中分布规律进行选定,利用表3中确定的方差,当 m 均值增大时,选取相对适当的 m 值.

4.3.1 颗粒煤岩的非均匀性对裂纹扩展的影响

图8为不同均质度系数下数值试验得到的加载步-位移曲线,图9为相对应的剪应力渐变图及裂纹扩展图.

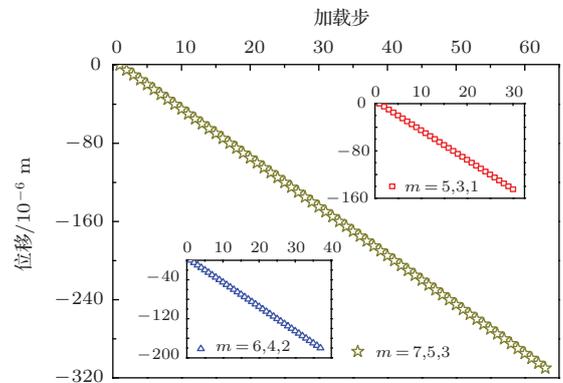


图8 (网刊彩色) 不同均质度系数模型的加载步-位移图

从图8和图9可以看出,随着加载步的增加,相对应轴向位移增加,裂纹逐渐扩展.图8中,随着均质度系数的增加(与之对应的组成颗粒煤岩试样的煤岩颗粒粒径减小)发生裂纹扩展需要更大的轴向位移.在部分裂纹贯穿后,模型所能承受的剪应力在逐渐变小.图9中,随着均质度系数的增大,裂纹产生推迟,并且裂纹萌生后从模型底部开始逐步扩展;裂纹的条数也逐渐变少,但裂纹的宽度却呈变大趋势,孕育范围也偏于集中,锥形区高度变大.

当均质度系数为5, 3, 1 时, 即煤岩颗粒粒径位于 0.25—0.5 mm 区间时, 主裂纹为4条, 锥形区高度为22.7 mm; 均质度系数为6, 4, 2, 即颗粒煤岩粒径位于 0.075—0.25 区间时, 主裂纹为3条, 锥形区高度为28.6 mm; 均质度系数为7, 5, 3, 即颗粒粒径位于 0.075 以下区间时, 主裂纹为1条, 锥形区高度为58.8 mm. 由此可见, 均质度系数对于裂纹的孕育、扩展和走向有着重要的影响.

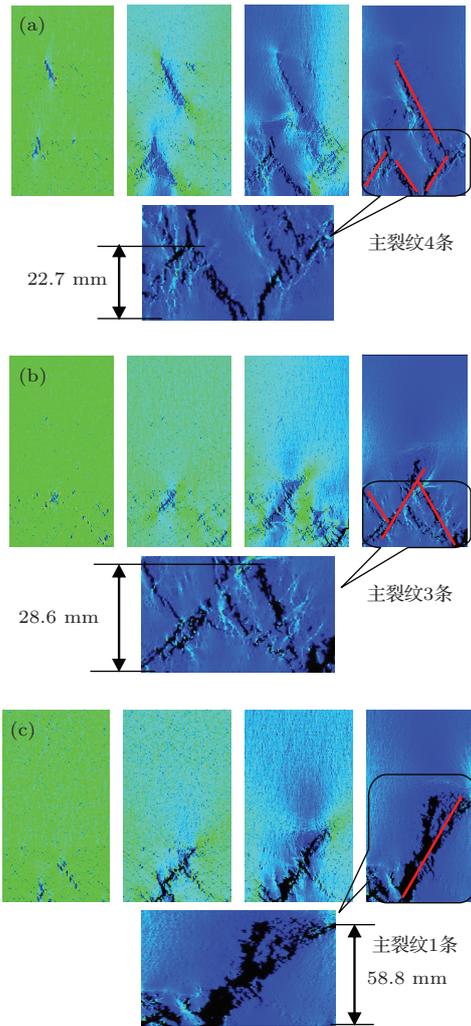


图9 (网刊彩色) 不同均质度系数模型的剪应力渐变图 (a) $m = 5, 3, 1$ 的剪应力渐变图; (b) $m = 6, 4, 2$ 的剪应力渐变图; (c) $m = 7, 5, 3$ 的剪应力渐变图

4.3.2 声发射能量对裂纹扩展的影响

颗粒煤岩试样在单轴压缩过程中, 由于颗粒间的相互挤压会形成强弱不一的力链和部分煤岩颗粒损伤变形(之后慢慢进入平衡态). 当进行压缩实验时, 平衡被打破, 从而会有新的能量的吸收与释放, 部分未被吸收的能量则会成为裂纹扩展的驱动力^[30,31]. 从细观来说, 被打破的平衡是煤岩颗粒间

的力链及颗粒的损伤变形, 而微观的分子间平衡则没有被打破, 所以, 此时的能量释放原因是力链的断裂、重组及煤岩颗粒变形. 而力链断裂、煤岩颗粒损伤变形在数值试验中表现为单元的破坏, 声发射能量源于单元破坏过程中释放的能量, 并且与单元破坏数呈现正比关系. 图10为数值试验后不同均质度系数模型的应力-声发射能量图.

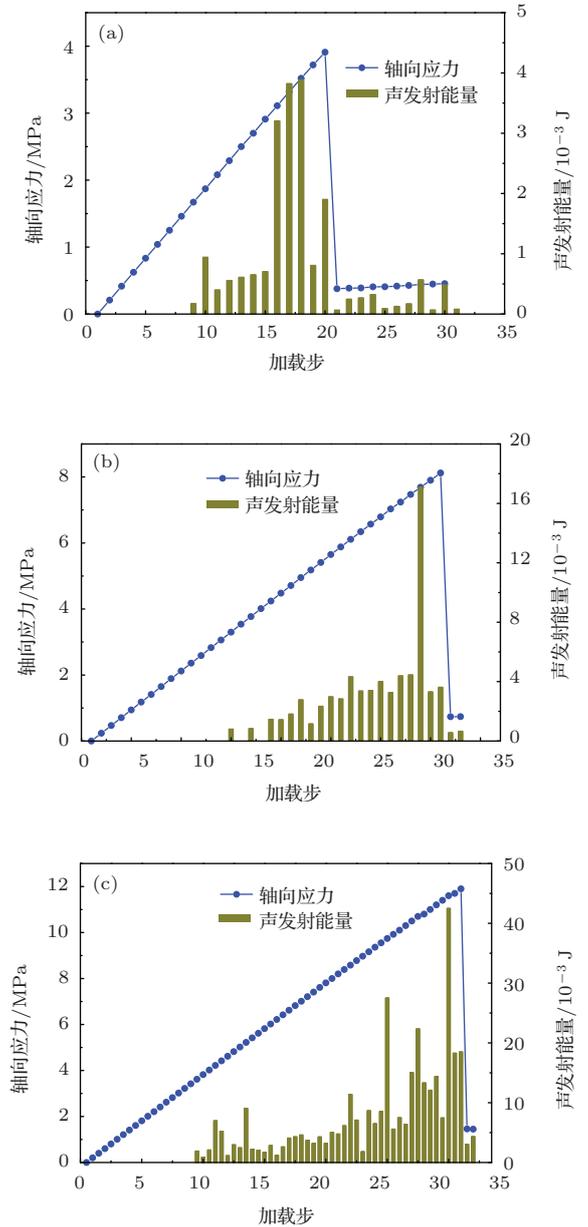


图10 不同均质度系数模型的应力-声发射能量图 (a) $m = 5, 3, 1$ 的应力-声发射能量图; (b) $m = 6, 4, 2$ 的应力-声发射能量图; (c) $m = 7, 5, 3$ 的应力-声发射能量图

图10和图4中, 在三个裂纹不同扩展区, 加载初始阶段由于声发射能量的释放和吸收处于动态平衡中, 所以并没有出现能量数值. 随着加载步的增加动态平衡被打破, 声发射能量释放量高于吸

收量, 能量数值开始出现, 随着加载步的增加声发射能量释放逐渐变得频繁, 直至声发射能量出现峰值, 之后又迅速减少. 在此过程中裂纹经历了从萌生到轻度扩展, 到中度扩展, 再到深度扩展阶段. 而轴向应力呈线性增长方式增长时, 说明裂纹扩展处于稳定阶段, 但此时有局部的卸载情况发生, 局部 J 积分就不再适用, 而是体现为裂纹扩展单位面积时释放出的声发射能量, 能量释放越多, 裂纹扩展的长度和速度就越快. 随着均质度系数的增大, 声发射能量释放出现滞后现象, 而能量释放的滞后意味着裂纹产生及扩展的推迟. 从这里可以看出均质度系数对于声发射能量的释放有一定的影响. 而声发射能量峰值提前于应力峰值的出现可以作为裂纹深度扩展至失稳的前兆预警信息加以利用.

5 结 论

文章基于 J 积分, 通过考虑颗粒体系的非均匀性, 将颗粒体系的非连续问题转化为连续介质力学问题, 并从能量角度对颗粒煤岩单轴压缩下裂纹扩展情况做了初步研究, 结论有:

1) 颗粒煤岩在受单轴压缩过程中, 裂纹从试样的底部产生, 并在底部形成一个有一定高度的锥形堆, 在裂纹扩展的同时伴有大量的煤岩颗粒脱落下来; 随着煤岩颗粒粒径的减小, 产生裂纹所需的时间延长.

2) 从数值试验结果来看, 材料的非均匀性对裂纹的扩展有着重要的作用, 均质度系数越大裂纹起裂时间越晚, 并且裂纹孕育越趋于集中, 形成裂纹的条数减少, 宽度越大, 锥形区的高度变大.

3) 在能量释放过程中, 裂纹分别处于不同的扩展区. 当能量的吸收和释放处于动态平衡中时, 裂纹处于轻度扩展区; 当能量的释放趋于频繁时, 裂纹处于中度扩展区; 当能量释放剧烈时, 裂纹扩展处于深度扩展区, 模型会很快进入失稳状态.

4) 用适用于二维的 J 积分理论及二维的数值试验对三维的物理实验进行解释与验证略有不妥. 另外, 对复杂加载条件下颗粒煤岩裂纹扩展问题需做深入研究.

参考文献

- [1] Sun Q C, Hou M Y, Jin F 2011 *Granular materials physics and mechanics* (Beijing: Science Press) preface (in Chinese) [孙其诚, 厚美瑛, 金峰 2011 颗粒物质物理与力学 (北京: 科学出版社) 前言]
- [2] Bagi K 1996 *Mech. Mater* **22** 165
- [3] Li X, Li X S 2009 *J. Eng. Mech.* **135** 641
- [4] Jiang Y M, Liu 2003 *MPhys. Rev. Lett.* **91** 144301
- [5] Sun Q C, Jin F, Wang G Q, Zhang G H 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 30 (in Chinese) [孙其诚, 金峰, 王光谦, 张国华 2010 物理学报 **59** 30]
- [6] Wang H Y, Cao X P, Jiang Y M, Liu Y 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 2784 (in Chinese) [王焕友, 曹晓平, 蒋亦民, 刘佑 2005 物理学报 **54** 2784]
- [7] Krimer D O, Pfizner M, Brauer K 2006 *Phys. Rev. E* **74** 061310
- [8] Jiang Y M, Liu M 2007 *Eur. Phys. J. E* **22** 255
- [9] Peng Z, Li X Q, Jiang L, Fu L P, Jiang Y M 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 2090 (in Chinese) [彭政, 李湘群, 蒋礼, 符力平, 蒋亦民 2009 物理学报 **58** 2090]
- [10] Gudehus G, Jiang Y M, Liu M 2011 *Granular Matter* **13** 319
- [11] de Gennes P G 1999 *Rev. Mod. Phys.* **71** S374
- [12] Zheng H P 2014 *Chin. Phys. B* **23** 054503
- [13] Zheng H P, Jiang Y M, Peng Z 2013 *Chin. Phys. B* **22** 040511
- [14] Wittmer J P, Claudin P, Cates M E 1996 *Nature* **382** 336
- [15] Watson A 1996 *Science* **273** 579
- [16] Cates M E, Wittmer J P, Bouchaud J P, Claudin P 1999 *Chaos* **9** 511
- [17] Edwards S F, Oakeshott R B S 1989 *Physica A* **157** 1080
- [18] Edwards S F, Grinev D V, Brujić J 2003 *Physica A* **330** 61
- [19] Chen Q, Yang X Q, Zhao X Y, Wang Z H, Zhao Y M 2013 *Chin. Phys. B* **22** 014501
- [20] Hartley R R, Behringer R P 2003 *Nature* **421** 928
- [21] Coniglio A, de Candia A, Fierro A, Nicodemi M, Pica Ciamarra M, Tarzia M 2004 *Physica A* **339** 1
- [22] Chang C S, Gao 1995 *Int. J. Solid Struct* **32** 2279
- [23] Iwashita K, Oda M 1998 *ASCE J Eng Mech ASCE* **124** 285
- [24] Abdul Q, Madad A S, Saeed A K 2013 *Chin. Phys. B* **22** 058301
- [25] Jiang M J, Konrad J M, Leroueil S 2003 *Comput. Geotech.* **30** 579
- [26] Esheby J D 1956 *New York: Academic* **3** 79
- [27] Rice J R 1968 *Fracture New York: Academic* **2** 191
- [28] Griffith A A 1921 *Phil. Trans. Royal Soc. London Ser. A* **221**
- [29] Irwin G R 1957 *Journal of Applied Mechanics* **24** 361
- [30] Rowe P W 1962 *Proc. Roy. Soc. A* **269** 500
- [31] Liu A J, Nagel S R 1998 *Nature* **396** 21
- [32] Trappe V, Prasad V, Cipelletti L, Segre P N, Weitz D A 2002 *Nature* **411** 772
- [33] Peters J F, Muthuswamy M, Wibowo J, Tordesillas A 2005 *Phys. Rev. E* **72** 041307
- [34] Zhang J X, Tang C A 2008 *Reinforced concrete failure mechanism-Numericaltest* (Shenyang: Northeastern University press) pp23-24 (in Chinese) [张娟霞, 唐春安 2008 钢筋混凝土破坏机理—数值试验 (沈阳: 东北大学出版社) 23—24]

Granular coal crack propagation study under uniaxial compression based on J integral*

Xu Jun[†] Xiao Xiao-Chun Pan Yi-Shan Ding Xin

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

(Received 27 April 2014; revised manuscript received 20 May 2014)

Abstract

Granular coal is a kind of multilayer and structured solid matter, which consists of a large assemblage of individual granular solids and has dual characters of coal and granular materials. Its crack propagation law can be studied using the coal mechanics and multi-scale characteristics. First of all, the linear elastic material may be damaged under compression; and the cause of crack propagation is explained from the viewpoint of energy that the dynamics of crack propagation is due to the release of strain energy. And then, further study on the granular coal crack propagation under uniaxial compression from macroscopic and microscopic raspects is carried out by physical experiment and numerical simulation. Results show that a cone is formed at the bottom of the heap, the crack propagation is slowed down with the decrease of coal particle size, mutation points in crack propagation will appear, and the crack will not be smooth after the granular coal is damaged completely. Besides, due to the influence of granular coal particle size, uniformity has an important effect on crack propagation. The greater the homogeneity coefficient, the later the fractures occur. The acoustic emission energy release becomes frequent and severe in the mild, moderate and deep stages of crack propagation. These results will be conducive to further study on the law of geotechnical granular materials crack propagation under compression.

Keywords: J integral circuit, granular coal, uniaxial compression, crack propagation

PACS: 46.5+a, 46.90.+s, 91.45.Ga, 91.60.Ba

DOI: [10.7498/aps.63.214602](https://doi.org/10.7498/aps.63.214602)

* Project supported by the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 51004061, 51104083), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51374123), and the National Basic Research Program of China (Grant No. 2010CB226803).

[†] Corresponding author. E-mail: jxu1120@126.com