

刘刚,李英明,肖福坤,等.点载荷作用下岩石能量转化规律[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2019,34(4):1-7. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2019.04.001

Liu G, Li Y M, Xiao F K. Energy Conversion Law of Rock Under Point Load[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2019,34(4):1-7. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2019.04.001

点载荷作用下岩石能量转化规律

刘刚^{1,2*}, 李英明¹, 肖福坤², 秦涛³, 于涵³, 侯志远³

(1.安徽理工大学 煤矿安全高效开采省部共建教育部重点实验室,安徽 淮南 232001;

2.黑龙江科技大学 黑龙江省煤矿深部开采地压控制与瓦斯治理重点实验室,黑龙江 哈尔滨 150022;

3.黑龙江科技大学 矿业工程学院,黑龙江 哈尔滨 150022)

摘要:为了探究不同种类岩石在点载荷作用下的能量转化规律,本文通过室内实验测定了细砂岩、花岗岩、黄砂岩、玄武岩、粉砂岩和红砖在点载荷作用下的位移-载荷曲线,得到6种岩石裂纹扩展过程和破裂形态.对细砂岩、黄砂岩、粉砂岩、红砖和花岗岩的峰前积聚能量、峰后释放能量、盈余能量和破坏经历时间、盈余能量释放速度进行了研究,给出了能量的演化规律,为工程稳定性预测提供理论基础.讨论了峰值载荷与能量转化之间的关系,给出了3个区间峰前积聚的能量、峰后释放的能量和盈余能量变化规律,并对危险性进行了评价.

关键词:点载荷;破裂形态;能量转化;能量释放

中图分类号:TD315 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2019)04-0001-07

Energy Conversion Law of Rock Under Point Load

Liu Gang^{1,2}, Li Yingming¹, Xiao Fukun², Qin Tao³, Yu Han³, Hou Zhiyuan³

(1.Key Laboratory of Safety and High-Efficiency Coal Mining, Ministry of Education,

Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China;

2.Heilongjiang Ground Pressure & Gas Control in Deep Mining Key Lab, Heilongjiang University of Science and Technology, Harbin 150022, China;

3.College of Mining Engineering, Heilongjiang University of Science and Technology, Harbin 150022, China)

Abstract: In order to study the energy transformation law of different kinds of rocks under point load, the displacement-load curves of granite, fine sandstone, yellow sandstone, basalt, siltstone and red brick under point load were measured by laboratory experiments. Six kinds of rock crack propagation processes and fracture patterns were obtained. The accumulated energy before peak, released energy after peak, surplus energy, destroyed time and released rate of surplus energy of fine sandstone, yellow sandstone, siltstone, red brick and granite were studied. The evolution law of surplus energy was given, and the dangerous degree was given in combination with engineering application. The relationship between peak load and energy conversion was discussed. The energy accumulated before peak, released after peak and surplus energy in three intervals were given, and the risk was evaluated.

Keywords: point load; fracture morphology; energy conversion; energy release

收稿日期:2017-11-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51674109);黑龙江省自然科学基金联合引导项目(LH2019E087);哈尔滨市科技局科技创新人才研究专项资金资助项目(2017RAQXJ041)

*通信作者,E-mail:18944630110@163.com

在工程岩体的开挖过程中,围岩的受力状态会发生改变,其中容易产生应力集中并发生破坏的受力状态为局部点载荷,点载荷的接触点位置压强较大.岩体强度是评价岩体稳定性的重要指标,点载荷法是快速、便捷计算岩石强度的重要方法^[1].当岩体的输入能量超过其吸收极限时,围岩将产生能量的转移和转化,能量的变化程度不同引起的灾害程度也不同,瞬时释放的能量达到一定“量”将引起动力灾害,因此,探究煤岩体破坏过程中的能量转化具有重要的意义.点载荷问题是岩体工程设计与施工中的常见问题,不同岩体在点载荷作用下的极限承载能力及破坏方式不尽相同,掌握岩体点载荷下的力学特性对于工程岩体设计与稳定性验算具有重要的意义.

在点载荷力学特性及岩石能量转化方面,学者们展开了大量的研究,取得了丰硕的成果.研究的侧重点均在点载荷与单轴抗压强度之间的关系,包括试样的形状、尺寸、含水率和受力点,由于其便捷性和结果的可靠性,尤其针对易碎、容易风化和强度底的岩石,点载荷是在压力和拉力复合作用下引起岩石的破坏,故点载荷和单轴抗压强度、抗拉强度之间存在某种联系.由于单轴抗压强度要求标准试样($\phi 50\text{ mm} \times 100\text{ mm}$),给现场实验带来困难,据此,学者们开展了规则试样单轴抗压强度(干燥和饱水)、抗拉强度和不规则试样点载荷的力学实验^[2-8].岩石破裂过程是一种非线性现象,在破坏过程中伴随着岩石能量的转移和转化,学者们针对岩石能量积聚、耗散和释放过程进行了分析^[9-11],采用不同的实验方法及手段探索岩石在点载荷作用下的强度特性,而在探索多种岩石破裂过程、破裂形式及能量转化方面研究较少.据此,本文从不同岩性岩石的点载荷实验入手,重点分析岩石在点载荷作用下的破坏特征及能量转化规律,为工程中点载荷受力状态下岩体的稳定性评价提供依据.

1 实验方法

1.1 实验设备

实验采用的压力机为吉林金力生产的TYJ-500微机控制电液伺服岩石剪切蠕变系统,该系统主要包括加载系统及数据采集系统,能够实时采集应力和应变,压力机载荷传感器精度为0.001 kN,最大量程为500 kN,位移传感器精度为0.001 mm,最大量程为100 mm,均能满足实验要求.实验系统如图1所示.

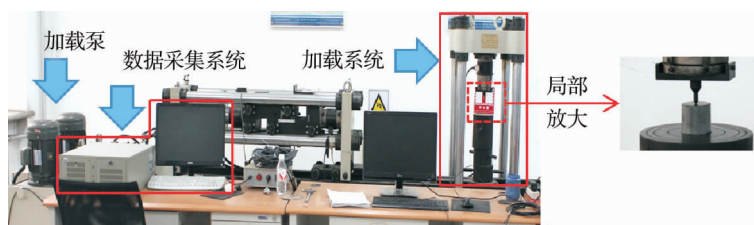


图1 实验系统

1.2 岩石能量转化计算原理

从能量的角度分析岩石的破坏分为2个阶段,峰值之前为能量的积聚阶段,达到峰值后,积聚的能量不断释放,积聚的能量一般大于释放的能量,存在一部分盈余能量,它将为岩石弹射提供动能.岩石的破坏是一个过程,其中势必包含了时间因素,将岩石载荷下落的时间与释放能量相结合,可以分析峰后能量的释放速度.点载荷作用下,依据岩石的分类,得到岩石的能量转化规律和能量释放特点,为分析点载荷作用下岩石破坏提供基础数据.

岩石受力加载过程即是能量转化的过程,如图2所示.实验过程中将给出载荷位移曲线,通过做功的原理可知,在力的方向上通过的位移即为做功,实质做功的过程即能量演化的过程,若功为正,能量不断增加,功为负,能量在减少.由于两者数字和单位均相同,所以无需转换.如图2a所示, OAB 所包围的面积为峰前所积聚的弹性能, $BACD$ 所包围的面积为峰后所释放的能量,而在所对应的图2b中给出了破坏所经历的时间,本文可探索在载荷作用下,岩石的能量转化及释放情况.

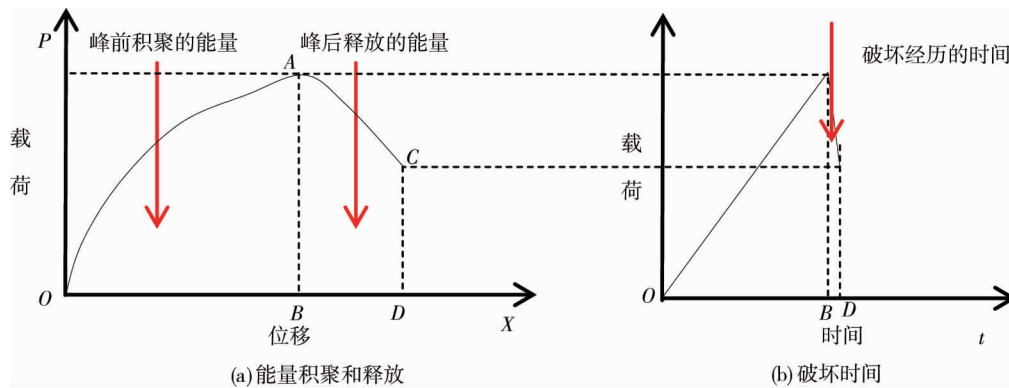


图2 能量转化时间特征

据上述分析,给出式(1)~式(5),其中式(1)用积分方法得到峰前积聚的弹性能,式(2)用积分方法得到峰后释放的能量,式(3)基于峰前积聚的弹性能与峰后释放的能量差值得到盈余能量,式(4)给出岩石破坏过程所经历的时间,式(5)为盈余能量所释放的时间.

$$W_1 = \int_0^B P dx; \quad (1)$$

$$W_2 = \int_B^D P dx; \quad (2)$$

$$W_3 = W_1 - W_2; \quad (3)$$

$$T = t_D - t_B; \quad (4)$$

$$V = \frac{W_3}{T}. \quad (5)$$

式中: W_1 为峰前积聚的弹性能, $N \cdot m$; P 为载荷, N ; x 为位移, m ; W_2 为峰后释放的能量, $N \cdot m$; W_3 为盈余能量, $N \cdot m$; T 为破坏过程经历的时间, ms ; V 为盈余能量释放速度, $(N \cdot m)/ms$.

1.3 实验步骤

1.3.1 岩样制备

根据《煤和岩石物理力学性质测定方法第13部分:煤和岩石点载荷强度测定方法》(GB/T 23561.13—2009),利用SC-200型取芯机和SCQ-4A型切割机,按照国标要求制备直径为 $\varphi 50$ mm和高度为50 mm的岩样;利用SHM-200型双端面磨石机控制端面平整度;利用AHS-250型烘箱对岩样在130℃的条件下烘干24 h;利用电子称及游标卡尺测量试样的重量和尺寸,采取量积法计算岩样的块体密度.

1.3.2 实验步骤

打开TYJ-500微机控制电液伺服岩石剪切蠕变系统,调整压头与加载体之间的距离,直至点载荷模具接触试样的中心部位为止.实验前将试样的尺寸输入到系统软件中,并设置控制方式及加载速度.开始实验后,观测模具尖端进入岩样内部的距离及试样的裂纹扩展过程,当主控裂纹形成且压力机载荷突然下掉后,实验结束.

1.3.3 数据分析及能量计算

将压力机数据放入Origin中,根据式(1)~式(5)计算不同种类岩石破裂过程中的能量转化值.

2 实验结果分析

2.1 岩石破裂特征分析

不同种类的岩石,其物质组成不尽相同,所表现出来的力学性质也不一致,不同的力学性质与岩石破裂形态存在一致性,岩石破坏形态可以为工程中稳定性控制提供参考.点载荷属于拉力和压力共同作用的

效果,破裂形态一般为拉伸破坏。

图3给出了6种岩石的破裂形态.图3a为细砂岩的破裂形态,从图3a中可以看出:上表面从圆心中部向两侧贯通,纵向上是从上部开始扩展延伸至下部,纵向上有较小角度的偏移,说明岩石均质性较好.图3b为黄砂岩的破裂形态,前期裂纹扩展规律与细砂岩一致,纵向上在一定区间内有一定角度的偏移,纵向下部局部竖直下落,说明局部区域存在缺陷或均质性较差.图3c为粉砂岩的破裂形态,前期裂纹扩展规律与细砂岩一致,纵向上在一定区间内有较小角度的偏移,纵向下部局部角度变化较大,说明岩石局部区域存在缺陷或均质性较差.3种砂岩工程中应关注整体稳定性,局部缺陷区域次之.图3d为花岗岩的破裂形态,从图3d中可以看出:

从圆心中部向两侧贯通,从上部以一定的角度开始扩展延伸至中部,以斜切的方式将花岗岩斜三角的剥落,说明花岗岩均质性较差,破裂时响声明显,说明强度较大.这种花岗岩失稳较困难,稳定性较好,载荷作用下仅在局部软弱或缺陷区域出现裂纹扩展.工程中主要关注其薄弱区域即可.图3e为红砖的破裂形态,前期裂纹扩展规律与细砂岩一致,但在扩展过程上横纵向均出现多方向同时扩展,且在纵向向角度变化随机性较大,说明红砖均质性较差.图3f为玄武岩的破裂形态,由于材料多孔、孔隙较大和孔隙随机分布的特点,点载荷作用下,未出现裂纹扩展,点载荷端头插入到玄武岩中,并伴随着嘎吱嘎吱的响声,说明在点载荷作用下产生的力在一定范围内被消耗掉了,未对较远区域造成危害.玄武岩在工程中应注意加载位置处防护,以保证安全稳定.

2.2 不同种类岩石能量转化规律分析

探索点载荷作用下岩石能量的转化释放规律,分析岩石在破裂前后的特征,获取能量释放速度对破裂产生的影响,为岩石破裂过程强度和形态提供理论基础.根据图2的划分方法,将细砂岩、黄砂岩、粉砂岩、红砖和花岗岩进行能量时间特征的划分,划分结果如图4所示.其中未对玄武岩进行能量分析,主要由于玄武岩塑性过于明显,峰后阶段无法划分,其破坏过程较缓慢,在能量转化和能量释放上研究问题特点不够突出.依据式(1)~式(5)对图中载荷位移曲线进行积分,对载荷时间曲线破坏时刻进行放大,获取峰值点到下落到一定载荷点所耗费的时间.

对细砂岩、黄砂岩、粉砂岩、花岗岩和红砖峰前积聚能量、峰后释放能量、盈余能量和破坏经历的时间、盈余能量的释放速度进行统计,其结果如表1所示.试样基本物理力学参数如表2所示.初步对能量的转化过程进行分析:峰前积聚能量的大小关系为细砂岩>黄砂岩=花岗岩>红砖>粉砂岩,峰前能够积聚较多的能量,释放过程才可能剧烈,才可能发生较剧烈的灾害,工程中针对细砂岩、黄砂岩和花岗岩保证能量积聚较少;峰后释放能量的大小关系为花岗岩>黄砂岩>红砖>粉砂岩>细砂岩,峰后释放的能量越多,岩石破裂内耗的能量越多,岩石破裂所需要的能量越多,工程中对红砖、粉砂岩和细砂岩应予以关注,这些材料需要消耗较少的能量就能破坏;盈余能量的大小关系为细砂岩>红砖>黄砂岩>花岗岩>粉砂岩,岩石盈余的能量越多,转化为动能的比例越大,造成的危险也就越大,工程中应关注细砂岩、红砖和黄砂岩,防止冲击灾害的发生.综上所述,3种能量变化中,黄砂岩最危险,所造成的危害可能性较大,细砂岩、花岗岩、红砖次之,粉砂岩的可能性最小.

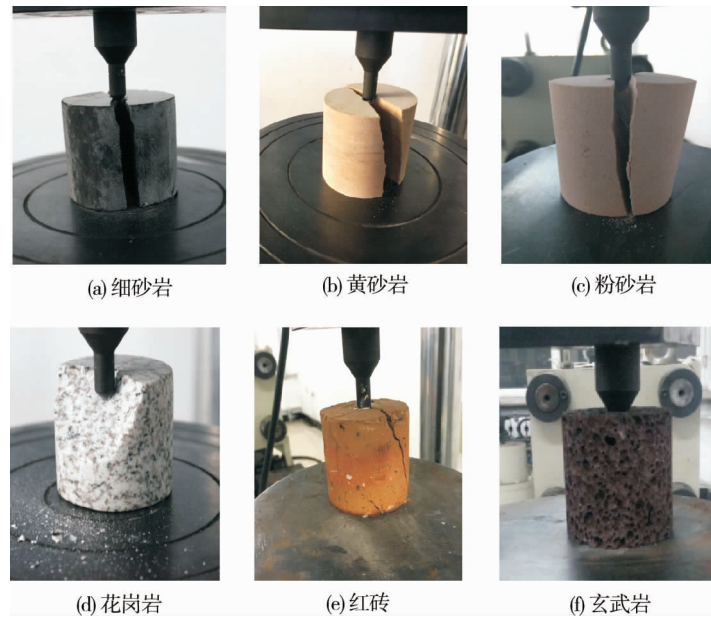


图3 岩石破坏形态

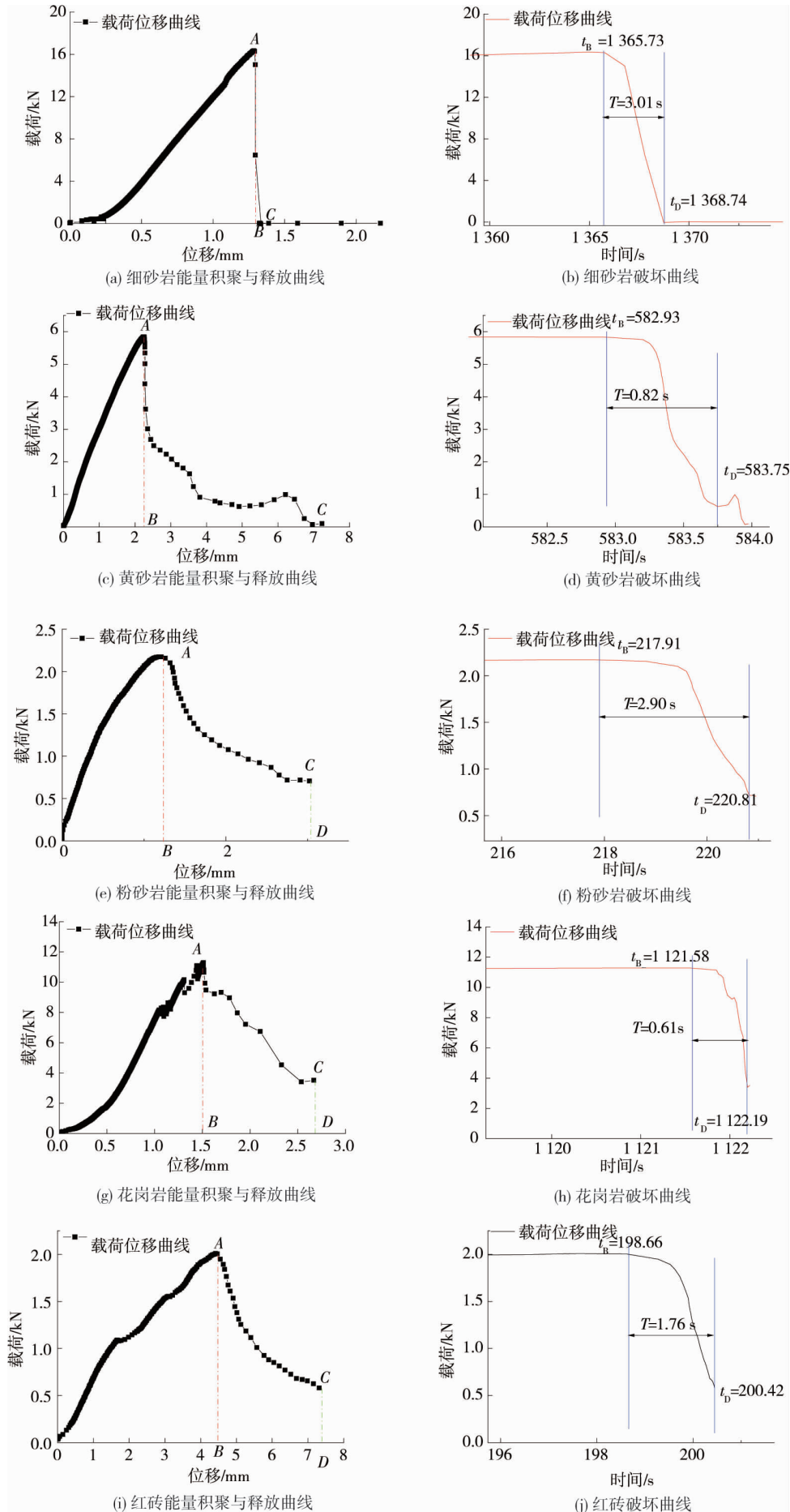


图 4 岩石能量积聚与释放和破坏曲线

破裂所经历的时间与破坏程度存在正比例关系,释放相同的能量,缓慢破坏和瞬时破坏造成的结果有较大区别;对破坏所经历的时间进行统计,破裂时间由小到大的顺序为红砖<黄砂岩<花岗岩<细砂岩<粉砂岩,破坏所经历的时间越短,造成的危害可能越大,此时应关注红砖、黄砂岩和花岗岩;能量的释放速度体现破裂过程的冲击程度,能量释放由大到小的顺序为红砖>细砂岩>黄砂岩>花岗岩>粉砂岩,工程中应关注红砖、细砂岩和黄砂岩。

表1 能量时间参数统计

岩样	峰前积聚能量 W_1/J	峰后释放能量 W_2/J	盈余能量 W_3/J	破坏经历的时间 T/s	能量的释放速度 $V/(\text{J}/\text{s})$	峰值载荷 P/kN
细砂岩	8.64	0.47	8.17	3.01	2.71	16.34
黄砂岩	7.34	5.20	2.14	0.82	2.61	5.84
粉砂岩	2.04	1.72	0.32	2.90	0.11	2.17
花岗岩	7.34	7.01	0.33	1.76	0.19	11.29
红砖	5.12	2.96	2.16	0.61	3.54	2.11

表2 试样基本物理力学参数

岩样	密度/ (g/cm^3)	单轴抗压强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	泊松比	弹性模量/ GPa
细砂岩	2.6	105	8.54	0.31	22.10
黄砂岩	2.2	94	5.32	0.28	18.60
粉砂岩	2.1	75	4.90	0.22	16.70
花岗岩	2.8	137	10.10	3.12	28.40
红砖	1.4	29	2.28	0.11	4.25

不同种类岩石能量转化和释放的特点不一致,为深入分析破坏过程中能量转化的特点,引入峰值载荷讨论其与能量之间的关系.一般的观点认为强度和能量存在正比例关系,通过对实验数据进行统计,能量转化与峰值载荷的关系如图5所示,从图5中可以得到峰值载荷与峰前积聚的能量、峰后释放的能量和盈余能量之间的关系.由于粉砂岩与红砖峰值载荷相近,统计中取4个参数(峰值载荷、峰前积聚的能量、峰后释放的能量和盈余能量)的平均值进行分析.依据载荷将图5划分成3个区间,峰值载荷在2~6 kN区间内(区间I),峰前积聚的能量、峰后释放的能量和盈余能量均存在上升趋势,从斜率来看,峰前积聚的能量涨幅最大,峰后释放的能量次之,盈余能量最小,峰前积聚能量的增长速度要大于峰后释放的能量,导致剩余能量也在增长,危险在逐步上升.峰值载荷在6~11 kN区间内(区间II),峰前积聚的能量变化不大,峰后释放的能量逐渐增长,盈余能量在减小,此区间能量变化较凌乱,危险在逐步减弱.峰值载荷在11~16 kN区间内(区间III),峰前积聚的能量逐步增长,峰后释放的能量瞬时下掉,盈余能量突然增长,此区间内峰前积聚能量越来越多,峰后释放的能量较少,剩余能量较多,危险性较大.

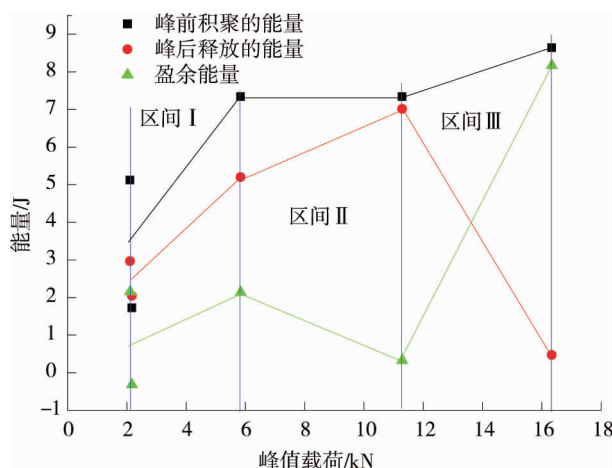


图5 能量转化与峰值载荷关系

3 结论

1) 细砂岩破裂为横向表面中部向两侧,纵向从上部至下部,均质性较好;黄砂岩破裂纵向垂直下落,存在局部缺陷;粉砂岩破裂纵向下部局部角度变化较大,均质性较差;花岗岩斜切剥落,整体稳定,局部破坏;红砖破裂横纵向多方向扩展,均质性差;玄武岩未出现裂纹扩展,整体稳定.

2) 通过能量的演化规律给出了6种岩石的危险等级,通过能量的释放速度得到岩石破坏程度顺序为红砖>细砂岩>黄砂岩>花岗岩>粉砂岩,工程中应关注红砖、细砂岩和黄砂岩.

3) 依据能量的转化规律将其划分为3个区间,区间Ⅰ峰前积聚的能量涨幅最大,峰后释放的能量次之,盈余能量最小,危险在逐步上升;区间Ⅱ峰前积聚的能量变化不大,峰后释放的能量逐渐增长,盈余能量在减小,危险在逐步减弱;区间Ⅲ,峰前积聚的能量逐步增长,峰后释放的能量瞬时下掉,盈余能量突然增长,危险性较大.

参考文献:

- [1] 张春玲,张传鹏,徐静.岩石点荷载强度与单轴抗压强度的对比试验[J].地下空间与工程学报,2015,11(s2):447-451.
- [2] 和卢斌,付志亮,王强,等.岩石点荷载强度与单轴抗压强度线性关系试验[J].煤田地质与勘探,2014,42(3):68-73.
- [3] 李安平,刘洋树,周明,等.岩石点荷载强度与单轴抗压强度关系研究[J].有色金属(矿山部分),2014,66(3):53-58.
- [4] 杭荣胜,范健,范宽鹏.岩石单轴抗压强度试验结果不确定度的评定[J].江苏科技信息,2014,5(9):47-48.
- [5] 杨帆,谢永利.点荷载试验确定岩石强度指标的效果分析[J].广西大学学报(自然科学版),2013,38(1):138-143.
- [6] 付志亮,王亮.煤层顶底板岩石点荷载强度与拉压强度对比试验研究[J].岩石力学与工程学报,2013,32(1):88-96.
- [7] 赵奎,金解放,赵康,等.用岩石点荷载指标确定其单轴抗压强度的试验研究[J].矿业研究与开发,2005,25(6):32-33.
- [8] 曾伟雄,林国赞.岩石单轴饱和抗压强度的点荷载试验方法设计与探讨[J].岩石力学与工程学报,2003,22(4):566-568.
- [9] 何满潮,谢和平,彭苏萍,等.深部开采岩体力学研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(16):2803-2813.
- [10] 肖福坤,刘刚,申志亮,等.循环载荷作用下煤样能量转化规律和声发射变化特征[J].岩石力学与工程学报,2016,35(10):1954-1964.
- [11] 刘刚,李连崇,肖福坤,等.“三硬”煤岩组合体冲击倾向性数值分析[J].煤矿安全,2016,47(8):198-200.