文章编号:1673 - 0062(2015)02 - 0030 - 07

不同高径比石膏试样破坏特性及其能量耗散

李玉兰[1],梁 伟[2],贺桂成[1*],张志军[1]

(1. 南华大学 核资源工程学院,湖南 衡阳 421001;2. 南华大学 船山学院,湖南 衡阳 421001)

摘 要:采用 RMT-150B 岩石力学试验机,对七种不同高径比的石膏试样进行了单轴压缩试验,分析其力学特性及其破坏特征. 根据单轴压缩力学试验结果,利用能量耗散理论,分析其能量耗散特性. 研究结果表明:随轴压应力的增加,石膏试样内部微裂隙先闭合,而后在其尖端产生了新裂隙;新裂隙随轴压应力的增加而逐渐地扩展、贯通、形成破裂面,最终发生剪切滑移破坏;石膏试样的体积应变随轴压应力的增大,经历了先压缩后增加,最后急剧膨胀,表现出明显的非线性变形;石膏试样的峰值应力、弹性模量随高径比的减小而增大;轴向应变和横向应变随高径比的减小而减小;变形模量与高径比之间的关系不明确,不能用其表征石膏试样的变形特性;高径比越大的石膏试样受压后容易发生剪切破坏,破坏时吸收的能量增量越快,属于脆性破坏,而高径比越小的石膏试样则发生压酥破坏,属于塑性破坏.

关键词:不同高径比石膏试样;单轴压缩试验;力学参数;破坏特性;能量耗散理论
中图分类号:TD862 **文献标识码**:B

Failure Characteristics and Energy Dissipation of the Gypsum Sample in Diffferent Height to Diameter Ratios

LI Yu-lan[1], LIANG Wei[2], HE Gui-cheng[1*], ZHANG Zhi-jun[1]

(1. School of Nuclear Resources Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China;
2. Chuangshan College, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China)

Abstract: The uniaxial compression mechanical test of the gypsum sample with seven different height to diameter ratios were measured by using RMT-150B rock mechanics testing machine, and the mechanical properties and failure characteristics of the gypsum sample were analysed. Based on the test results, the energy dissipation characteristics of the gypsum in different height to diameter ratios were investigated by using the energy dissipation theory.

收稿日期:2014 - 11 - 14
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51374129);南华大学"铀矿山岩土工程灾害预测与控制"校级创新团队计划项目
作者简介:李玉兰(1977 -),女,湖南衡阳人,南华大学核资源工程学院讲师. 主要研究方向:矿山岩土工程灾害预测与控制. * 通讯作者.

The results show that the microcracks within the gypsum sample is closed firstly, and then produces a new fractures at the tip of the microcracks, and the new fractures are gradually expanded, run through crack, forming fructure plane, shear and slip failure with the increase of the uniaxial compressive stress. The volume strain of the gypsum sample is compressed firstly and then increases and rapid expands finally with the increase of the uniaxial compressive stress. The peak stress and elastic modulus increase with the decrease of the height to diameter ratio, and the axial strain and the lateral strain decrease with the decrease of the height to diameter ratio, and the relationship between deformation modulus and height to diameter ratio is not evident, which can not characterize the deformation characteristics of the gypsum sample. The gypsum sample that is easy to have shear and slip failure and is quick to absorb energy with the increase of the height to diameter ratio belongs to brittle failure, and on the contrary that is easy to have crisp failure, belongs to plastic failure.

key words: gypsum sample in different height to diameter ratios; uniaxial compression test; mechanical parameters; failure characteristics; energy dissipation theory

我国石膏矿是一种矿层薄、强度低、近浅埋的矿体,一般采用留设连续矿柱的房柱法开采[1]. 由于石膏矿是一种低价值资源,采用掠夺式采矿,导致留设的矿柱尺寸极不科学,造成矿柱被压坏而诱发采场失稳[2]. 因此,研究不同尺寸的石膏矿柱的破坏特性及能量耗散特征,对确定合理的石膏矿柱跨度及控制采场稳定性具有十分重要的理论意义.

近年来,国内外的一些学者对岩石的破坏特征及能量耗散特性进行了大量的研究,取得了较好的研究成果. 左建平等[3]研究了不同开采条件下岩石的变形破坏特征,得到了不同围压不同加载速率条件下灰岩的宏观破坏模式. 吕有厂等[4]研究了含瓦斯煤岩卸围压失稳破坏过程中的力学特性及其能量耗散规律. 平琦等[5]利用 Hopkinson 压杆(SHPB)试验装置,对厚径比 0.5 的煤矿砂岩巴西圆盘试件进行对径加载,研究了砂岩试件动态劈裂拉伸破坏过程中的能量构成和耗散特征. LI 等[6]采用 SHPB 压杆试验装置,研究了不同长径的红砂岩试件的破坏特性和能量耗散特征及其影响. ADNAN 等[7]采用 X 射线 CT 扫描的方法研究了砂岩破坏前微观结构孔隙的演化规律及能量耗散特征. HUANG 等[8]采用不同围压和不同卸压率的轴对称三轴压缩加载—卸载方法,对大理岩的破坏模型及应变能转换规律进行了试验研究. SONG 等[9]研究了煤岩损伤过程中的能量转换机理、电磁辐射机理以及能量耗散特征,得到了电磁辐射与能量耗散关系式. 牟宗龙等[10]分析了岩—煤—岩组合体受载过程中各部分的位移、加速度、刚度及能量等物理参量的演化规律,提出了以煤体峰值后刚度和岩石卸载刚度为基本参量的组合体稳定破坏和失稳破坏的判别条件. WASANTHA 等[11]利用声发射技术对层状砂岩力学性能和能量释放特征进行了单轴压缩试验研究.

上述的研究成果,成功地解决了采矿工程的一些技术难题[12-13]. 但对于不同高径比石膏试样破坏特性及其能量耗散特征的研究尚未见报道. 因此,本文采用 RMT-150B 岩石力学试验机,对不同高径比的石膏试样进行了单轴压缩试验,分析其力学特性及其破坏特征;其次,利用能量耗散原理,分析其能量耗散特性.

1　石膏试样力学试验

1.1　石膏试样制备

本试验试样以衡山白果地区石膏矿的泥质石膏为研究对象. 泥质石膏为青灰色,主要由石膏、硬石膏、泥质组成,泥质结构,块状构造,泥膏内常见纤维状、团块状石膏. 在取样过程中,为了减小人为因素对试验结果的影响,提高试验的可对比性和精确性,用于试验的石膏试样,必须取自于同一水平、相同受力状态的相邻岩层. 且用来研究的同一组石膏试样必须取自于同一块石膏. 并严格遵照 ISRM 规定的取样方法进行取样、加工并制作成标准的石膏试样[14].

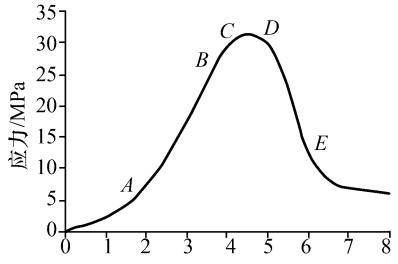
1.2　石膏试样力学试验特性

石膏试样单轴压缩试验是在 RMT-150B 液压伺服岩石力学试验机上进行的,采用位移控制的方法进行加载.

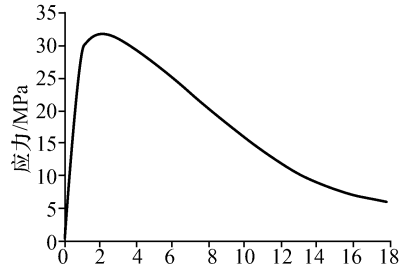
现以高径比为 2∶1 的石膏试样试验结果,分析其力学特性,如图 1 所示.

由图 1 可知:在初始阶段(OA 段),石膏试样

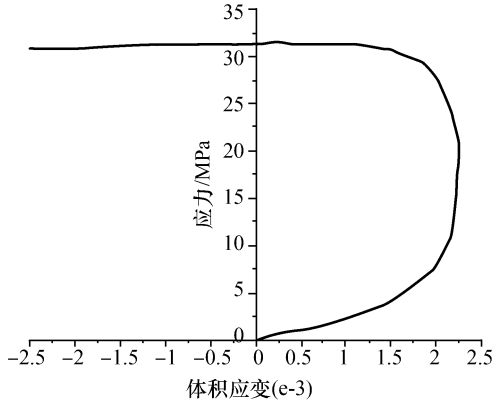
处于原有裂隙压密阶段. 即其内部蕴含的裂隙、孔隙及层间空隙等受压后开始闭合,体积缩小,表现出明显的非线性变形;且微裂隙压密速度开始较快,随后逐渐减慢;而石膏试样的横向应变较小,但其总体积随轴压应力的增大而逐渐减小.



a 应力—轴向应变关系曲线



b 应力—横向应变关系曲线



c 应力—体积应变关系曲线

图 1 石膏试样单轴压缩应力—应变关系曲线

Fig. 1 Failure characteristics of gypsum sample in different height to diameter ratios

随着轴压应力的增加,石膏试样的应力—应变曲线呈现线弹性变形阶段(*AB* 段). 即石膏试样原有的裂隙、孔隙及层间空隙等继续被压密,而横向应变缓慢地增加,但体积应变表现为继续被压缩.

当轴压应力超过 *B* 点后,石膏试样的轴向应变仍近似于直线;经过弹性极限以后,体积应变曲线开始偏离直线,且随荷载增加其偏离直线的程度逐渐增加. 由此可知,此阶段石膏试样内部的原有裂隙已完全闭合,并在原有裂纹的尖端产生了新裂隙,且新裂隙随轴压应力的增加而逐渐地呈现出稳定的扩展状态. 此时,体积压缩速率开始减缓,表现为塑性变形.

当轴压应力超过 *C* 点后,石膏试样的横向应变出现了急剧增大的现象,而体积应变开始出现了反号的现象,且急剧增大. 说明石膏试样内部产生的竖向裂隙开始急剧扩展、贯通形成滑动面,导致石膏试样完全破坏. 此时石膏试样达到最大承载能力,即达到峰值强度或单轴抗压强度. 在此阶段,竖向裂隙的扩展贯通进入了急剧发展状态,不受轴压应力的控制.

当轴压应力超过 *D* 点后,石膏试样已完全破坏,试样表面能见清晰的裂缝,但仍能保持完整的形状,不会出现掉块的现象. 但石膏试样内部裂隙急剧扩展贯通形成破裂面,且在轴压应力持续作用一段时间后,石膏试样将在轴向方向沿破裂面形成剪切滑移失稳. 承载能力随应变增大而急剧降低,但仍有一定的承载能力,即具有一定的残余强度,其值为 5.5 MPa,为峰值强度的 20%.

2 不同高径比石膏试样力学试验结果分析

2.1 不同高径比石膏试样力学试验结果

不同高径比石膏试样的力学试验结果,如表 1 所示.

从表 1 中可知:石膏试样的峰值应力随高径比的减小而逐渐增大,但高径比大于 2∶1 的石膏试样,其峰值应力随高径比的减小而缓慢增大,而高径比小于 2∶1 的石膏试样,其峰值应力随高径比的减小而急剧增大;轴向应变和横向应变随高径比的减小而减小,但变化不明显;弹性模量随高径比的减小而增加,但高径比大于 2∶1 的石膏试样,其弹性模量随高径比的减小而急剧增大,而高径比小于 2∶1 的石膏试样,其弹性模量随高径比的减小而缓慢增加,当高径比为 1.5∶1 及以下时,弹性模量增加效果不明显,基本维持在同一水平,这说明当高径比小于一定值时,弹性模量不发生改变;而石膏试样的变形模量与高径比之间的关系不明确,因而不能用来表征石膏试样的变形特性.

表 1　不同高径比石膏试样力学试验结果

Table 1　Mechanical test results of gypsum sample in different height to diameter ratios

高径比	试样编号	峰值应力/MPa	轴向应变/10^{-3}	横向应变/10^{-3}	弹性模量/GPa	变形模量/GPa	泊松比
2.5∶1	GA－1－1	25.751	7.786	4.700	7.258	2.218	0.179
	GA－1－2	25.831	7.536	4.456	7.354	2.315	0.152
	GA－1－3	26.030	7.544	4.629	7.126	2.133	0.164
	平均值	25.870	7.622	4.595	7.246	2.222	0.165
2.25∶1	GA－2－1	26.962	5.833	4.558	9.945	2.455	0.181
	GA－2－2	25.876	5.832	4.503	9.957	2.417	0.203
	GA－2－3	27.835	5.693	4.427	9.768	2.346	0.186
	平均值	26.891	5.786	4.496	9.890	2.406	0.190
2∶1	GA－3－1	23.813	5.335	4.388	9.846	3.927	0.196
	GA－3－2	26.851	4.956	4.183	10.705	4.659	0.181
	GA－3－3	31.138	5.258	4.326	10.895	4.086	0.208
	平均值	27.267	5.183	4.299	10.482	4.224	0.195
1.75∶1	GA－4－1	27.703	4.601	3.634	11.114	4.954	0.194
	GA－4－2	27.375	4.536	3.705	11.237	4.681	0.212
	GA－4－3	27.668	4.738	3.578	10.895	4.936	0.197
	平均值	27.582	4.625	3.639	11.082	4.857	0.201
1.5∶1	GA－5－1	31.269	4.223	1.415	13.839	7.811	0.224
	GA－5－2	31.269	4.189	1.416	13.791	7.625	0.226
	GA－5－3	31.269	3.996	1.438	13.896	7.583	0.207
	平均值	31.269	4.136	1.423	13.842	7.673	0.219
1∶1	GA－6－1	32.091	4.034	1.414	13.846	7.888	0.295
	GA－6－2	32.091	3.906	1.396	13.929	7.898	0.336
	GA－6－3	32.091	3.817	1.387	13.799	7.935	0.329
	平均值	32.091	3.919	1.399	13.858	7.907	0.320
0.75∶1	GA－7－1	42.192	3.672	1.261	13.961	11.738	0.418
	GA－7－2	41.237	3.792	1.209	13.934	11.925	0.436
	GA－7－3	40.576	4.116	1.127	13.769	11.818	0.418
	平均值	41.335	3.860	1.199	13.888	11.827	0.424

2.2　不同高径比石膏试样轴压应力—轴向应变特性

不同高径比石膏试样轴压应力—轴向应变关系曲线试验结果,如图 2 所示.

从图 2 可知:不同高径比石膏试样轴压应力—轴向应变关系曲线的形状基本是一致的,符合 Wawersik 和 Fairhust 等人提出的 I 类岩石应力—应变全过程曲线的基本形式[15]. 但由于石膏试样蕴含大量的裂隙、孔隙、层间空隙以及层间含泥质夹层,同一承载断面其承载能力不等. 随轴压应力的增加,石膏试样首先发生屈服的是位于存在结构面或弱面的区域,但试样不会完全失去承载能力,而原先作用于发生屈服区域的轴压应力,将转移到未屈服的区域,导致未屈服区域的石膏试样承受的压应力增加,从而引起该区域的弹性应变相应的增大,这是造成石膏试样轴压应力—轴向应变关系曲线逐渐偏离直线状态的根本原因.

从图 2 还可知:不同高径比石膏试样轴压应力—轴向应变关系曲线在初始受力阶段基本上呈现出上凹形状,但随高径比的增加其上凹形状越不明显. 说明石膏试样初始受力阶段轴向应变随高径比的增加而增大;石膏试样峰值应力所对应的轴向应变随高径比的减小而减小,且高径比小于 1.5∶1 时,轴向应变保持在 0.004 左右,也即高径比小于某一临界值时,轴向应变将保持不变;而石膏试样峰值应力后的轴向应变随高径比的减小而急剧减小,即其轴向斜率随高径比的减小而增大,试样越容易产生轴压破坏;而对于高径比较大的石膏试样,峰值应力后的轴向应变较缓慢,说明高径比较大的石膏试样,峰值应力后的轴向应变呈现出良好的软岩延性破坏特性;石膏试样破坏后的残余强度随高径比的减小而增加. 因此,高径

比越小的石膏矿柱越有利于发挥其支承上覆岩层围岩压力的能力.

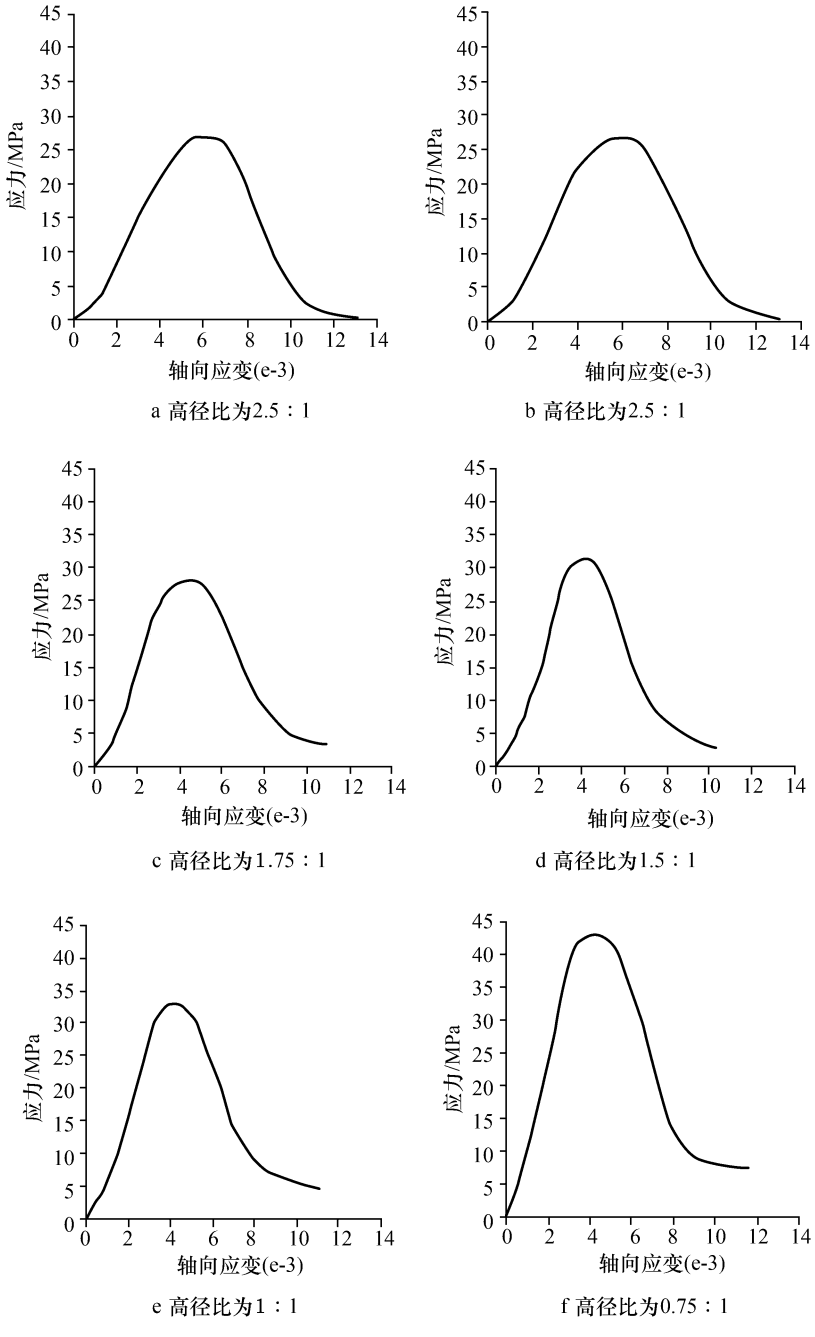


图 2 不同高径比石膏试样应力—轴向应变关系曲线

Fig. 2 Axial stress-axial strain relationship curve of gypsum sample in different height to diameter ratios

2.3 不同高径比石膏试样破坏特性

不同高径比石膏试样破坏特性试验结果,如图 3 所示.

从图 3 中可知:高径比为 2.5∶1 的石膏试样,受压后呈现出垂直劈裂现象;高径比为 2.25∶1 的石膏试样,受压后呈现出剪切滑移破坏现象;高径比为 1.75∶1 的石膏试样,受压后呈现出剪切滑移破坏现象;高径比为 1.5∶1 的石膏试样,受压后呈现出试样中部掉块的破坏现象;此后石膏试样高径比越小,试样受压后越容易呈现出压酥破坏的现象.

通过上述不同高径比石膏试样的破坏特性可知,高径比越小的石膏试样其承载能力越大,且破坏具有明显的塑性特征.

图 3　不同高径比石膏试样破坏特性

Fig. 3　Failure characteristics of gypsum sample in different height to diameter ratios

3　不同高径比石膏试样能量耗散特征

3.1　能量耗散原理

由热力学定律可知[16],岩石损伤、屈服、断裂和失稳破坏过程实质上都是能量耗散的结果. 因此从能量耗散的角度研究石膏材料的破坏特性具有重要的意义.

假定石膏试样与外力作用(这里指的是试验机压缩应力)是一封闭个系统,且假定石膏试样在压缩应力作用下始终处于平衡状态,由热力学能量守恒定律可知,试验机压缩应力所做功的增量等于石膏试样可恢复的弹性应变能增量以及不可恢复的耗散能增量之和[17]. 即

$$U = U^d + U^e \tag{1}$$

式(1)中: U^d —石膏试样耗散能, U^e —石膏试样可释放的弹性应变能.

对于三维空间应力状态下,石膏试样单元各部分能量的表达式为[17]:

$$U = \int_0^{\varepsilon_1} \sigma_1 \mathrm{d}\varepsilon_1 + \int_0^{\varepsilon_2} \sigma_2 \mathrm{d}\varepsilon_2 + \int_0^{\varepsilon_3} \sigma_3 \mathrm{d}\varepsilon_3 \tag{2}$$

$$U^e = \frac{1}{2}\sigma_1 \mathrm{d}\varepsilon_1^e + \frac{1}{2}\sigma_2 \mathrm{d}\varepsilon_2^e + \frac{1}{2}\sigma_3 \mathrm{d}\varepsilon_3^e \tag{3}$$

$$\varepsilon_i^e = \frac{1}{E_i}[\sigma_i - \mu_i(\sigma_j + \sigma_k)] \tag{4}$$

式(1)~式(4)中: U —主应力所做的总功, ε_i^e —弹性总应变, μ_i —泊松比.

对于单轴压缩下的石膏试样,由能量耗散原理可知:石膏试样压缩加载过程中,刚性试验机对石膏试样轴压所做的功,就是石膏试样破坏所耗散的能量. 因此,可得到

$$W = \int F \mathrm{d}u = AH \int \sigma \mathrm{d}\varepsilon_y = \frac{1}{4}\pi D^2 HK \tag{5}$$

式(5)中: D, H 分别为石膏试样的直径和高度; K 为单位体积石膏试样破坏所耗散的能量,相当于应力—轴向应变关系曲线下方的面积,单位为 $\mathrm{MJ/m^3}$,与应力的单位 MPa 等同.

3.2　石膏试样能量耗散特征

由上述石膏试样单轴压缩试验结果,得到了石膏试样单轴压缩应力—轴向应变以及耗散的能量—轴向应变的关系曲线,如图 4 所示.

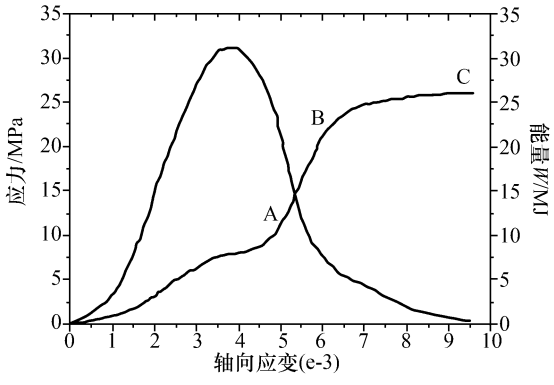


图 4　石膏试样应力、能量—应变关系曲线

Fig. 4　Axial stress and energy-axial strain relationship curve of gypsum sample

由图 4 可知:石膏试样在轴压过程中,其能量耗散的规律经历了如下三个阶段.

1)OA 段是石膏试样在初始受力阶段. 其内部的微裂隙处于压密闭合阶段,其轴压应变较小,导致其能量耗散较小,曲线呈上凹型. 随轴压应力的不断增加,轴向应变也相应的随之增加,因此,石膏试样的能量耗散增量 $\mathrm{d}W$ 也相应地增加. 且轴向应变—能量耗散的曲线呈现出类似于抛物线的形状,且随着轴向应变增量 $\mathrm{d}\varepsilon$ 的的不断增加,其抛物线的形式逐渐上升,曲线斜率逐渐增大.

2)AB 段是石膏试样处于峰值强度后的阶段. 此阶段石膏试样已完全屈服,其轴向应变处于急剧的扩容膨胀阶段. 因此,石膏试样急剧地吸收试验机的压缩能量,导致其轴向应变—能量耗散关系曲线呈线性关系急剧上升,但石膏试样的 $\mathrm{d}W/\mathrm{d}\varepsilon$ 的斜率几乎为常数.

3)BC 段是石膏试样处于残余强度阶段. 此阶段石膏试样几乎不再吸收试验机的压缩能量,其轴向应变—能量耗散关系曲线呈现出下凹型,也即石膏试样的 $\mathrm{d}W/\mathrm{d}\varepsilon$ 的斜率呈现出衰减趋势.

3.3　不同高径比石膏试样能量耗散特征

不同高径比石膏试样轴向应变—能量耗散特性曲线,如图 5 所示.

由图 5 可知:不同高径比石膏试样轴向应变—能量耗散特性曲线的变化趋势是一致的,均随轴向应变的增加而增大. 当石膏试样的直径一

定时,能量耗散速率随其高度的增加而逐渐增大;但不同高径比石膏试样的能量耗散速率不尽相同,如当高径比大于 1.75∶1 时,其能量耗散速率随轴向应变的增加而不再发生变化,几乎为一条直线. 由此可知,石膏试样的高径比越大,其破坏过程中吸收的能量增量也越快,峰值应力后的破坏越呈现出现脆性破坏. 当不同高径比的石膏试样吸收相同的能量时,高径比小的石膏试样要发生较大的轴向变形,呈现出很好的塑性破坏.

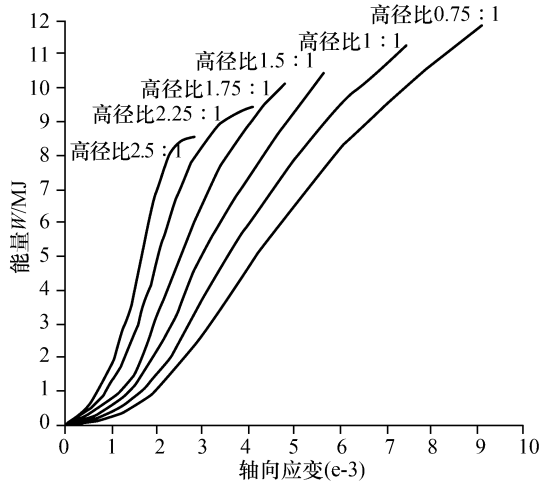


图 5 不同高径比石膏试样能量耗散特性曲线

Fig. 5 Energy dissipation curve of gypsum sample in different height to diameter ratios

4 结 论

1)石膏试样单轴压缩应力—应变关系曲线全过程,经历了裂隙压密、线弹性变形、裂隙产生和扩展、裂隙不稳定发展直到破裂、破裂后等五个阶段.

2)石膏试样的峰值应力、弹性模量随高径比的减小而逐渐增大;轴向应变和横向应变随高径比的减小而减小;石膏试样的变形模量与高径比之间的关系不明确,因而不能用其表征石膏试样的变形特性.

3)高径比越大的石膏试样受压后呈现出剪切破坏;高径比越小的石膏试样受压后呈现出压酥破坏的现象.

4)根据能量耗散原理,高径比越大的石膏试样破坏吸收的能量增量也越快,峰值应力后的破坏越呈现出脆性破坏.

参考文献:

[1] Wang J A, Shang X C, Ma H T. Investigation of catastrophic ground collapse in Xingtai gypsum mines in China[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2008, 45(8): 1480-1499.

[2] 贺桂成,丁德馨,刘永,等. 衡山石膏矿老采空区地表沉陷的 ANFIS 预测[J]. 采矿与安全工程学报, 2012, 29(6): 876-881.

[3] 左建平,刘连峰,周宏伟,等. 不同开采条件下岩石的变形破坏特征及对比分析[J]. 煤炭学报, 2013, 38(8): 1319-1324.

[4] 吕有厂,秦虎. 含瓦斯煤岩卸围压力学特性及能量耗散分析[J]. 煤炭学报, 2012, 37(9): 1505-1510.

[5] 平琦,马芹永,袁璞. 岩石试件 SHPB 劈裂拉伸试验中能量耗散分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(3): 401-407.

[6] Li M, Mao X B, Lu A H, et al. Effect of specimen size on energy dissipation characteristics of red sandstone under high strain rate[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2014, 24(2): 151-156.

[7] Sufian A, Russell A R. Microstructural pore changes and energy dissipation in Gosford sandstone during pre-failure loading using X-ray CT[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2013, 57(1): 119-131.

[8] Huang D, Li Y R. Conversion of strain energy in triaxial unloading tests on marble[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2014, 66(2): 160-168.

[9] Song D Z, Wang E Y, Liu J. Relationship between EMR and dissipated energy of coal rock mass during cyclic loading process[J]. Safety Science, 2012, 50 (4): 751-760.

[10] 牟宗龙,王浩,彭蓬,等. 岩—煤—岩组合体破坏特征及冲击倾向性试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(6): 841-847.

[11] Wasantha P L P, Ranjith P G, Shao S S. Energy monitoring and analysis during deformation of bedded-sandstone: Use of acoustic emission[J]. Ultrasonics, 2014, 54(1): 217-226.

[12] 洪亮,李夕兵,马春德,等. 岩石动态强度及其应变率灵敏性的尺寸效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(3): 526-632.

[13] 张明,卢裕杰,杨强. 准脆性材料的破坏概率与强度尺寸效应[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(9): 1782-1789.

[14] Xiao J Q, Ding D X, Jiang F L, et al. Fatigue damage variable and evolution of rock subjected to cyclic loading[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2010, 47(3): 461-468.

[15] 徐卫亚,杨圣奇,杨松林,等. 绿片岩三轴流变力学特性的研究(I):试验结果[J]. 岩土力学, 2005, 26(4): 531-537.

[16] 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.

[17] 刘新荣,郭建强,王军保,等. 基于能量原理盐岩的强度与破坏准则[J]. 岩土力学, 2013, 34(2): 305-310.