

围压对砂岩动态冲击力学性能的影响

吕晓聪¹, 许金余^{1, 2}, 葛洪海³, 赵德辉¹, 白二雷¹

(1. 空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038; 2. 西北工业大学 力学与建筑工程系, 陕西 西安 710072;
3. 空军工程设计研究局, 北京 100068)

摘要: 利用带围压装置的霍普金森压杆设备对砂岩在不同围压等级、不同应变率下的动态力学性能进行试验研究, 分析砂岩单轴动态抗压强度和比能量吸收值的应变率效应, 围压状态下砂岩在冲击荷载循环作用下的力学特性以及累积比能量吸收值与入射能量、围压等参量之间的关系。研究表明, 砂岩的动态杨氏模量与静态杨氏模量相比明显增加, 两者比值达 3.21~3.81; 而当应变率为 50~100 s⁻¹ 时, 动态杨氏模量随应变率有所增加, 但变化不大。砂岩单轴动态压缩试验的比能量吸收值与应变率 $\dot{\epsilon}$ 呈线性关系, 而单轴动态抗压强度增长因子 η (即动态抗压强度) 与 $\dot{\epsilon}^{1/3}$ 成线性关系。在围压状态下, 砂岩具有明显的脆性-延性转化特征, 其应力-应变曲线出现明显的屈服平台, 呈近似的弹塑性特征。围压的加载作用对阻止试件产生剪切失稳的作用相当明显。随着冲击荷载循环作用次数的增加, 试件的杨氏模量变小, 屈服应力降低, 屈服应变增加。砂岩的破坏形态随围压大小不同而发生变化, 砂岩从轴向拉伸破坏形态向压剪破坏形态转变的临界围压值为 10 MPa。在能量相同的入射波作用下, 砂岩试件在低围压时比在高围压时的比能量吸收值大, 且砂岩的比能量吸收值、入射波能量和围压三者具有良好的规律性, 并得到比能量吸收值随入射波能量和围压变化的关系式。

关键词: 岩石力学; 霍普金森压杆; 屈服平台; 塑性变形; 比能量吸收值

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2010)01-0193-09

EFFECTS OF CONFINING PRESSURE ON MECHANICAL BEHAVIORS OF SANDSTONE UNDER DYNAMIC IMPACT LOADS

LU Xiaocong¹, XU Jinyu^{1, 2}, GE Honghai³, ZHAO Dehui¹, BAI Erlei¹

(1. Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710038, China;

2. College of Mechanics and Civil Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China;

3. Air Force Engineering Design and Research Bureau, Beijing 100068, China)

Abstract: Experiments of dynamic behaviors are carried out for sandstone specimens by split Hopkinson pressure bar(SHPB) equipment with confining pressure device at different confining pressures and different strain rates. The effects of strain rate on uniaxial dynamic compression strength and specific energy absorbency, as well as the mechanical characteristics of sandstone at the triaxial state under the circular action of impact loads are analyzed. It is demonstrated that the rates of dynamic and static Young's moduli increase evidently with values of 3.21 - 3.81. Dynamic Young's modulus increases slightly with the changes of strain rates, which ranges from 50 s⁻¹ to 100 s⁻¹. The linear relationships of specific energy absorbency and strain rate $\dot{\epsilon}$, dynamic strength increasing factor η and strain rate $\dot{\epsilon}^{1/3}$ at the uniaxial state are all presented. It has clear brittle-ductile transformation(BDT) property for sandstone; and the stress-strain curve is shown under the yield platform at triaxial state. Along with the increase of circular action times of impact loads, the Young's modulus and the yield stress of specimens decrease, and the yield strain increases. The failure configurations of sandstone change with the confining pressure

收稿日期: 2009-06-24; **修回日期:** 2009-09-22

作者简介: 吕晓聪(1982-), 男, 2004年毕业于空军工程大学工程学院机场建筑工程系, 现为博士研究生, 主要从事结构工程和防护工程方面的研究工作。E-mail: nuc6140@yeah.net

from axial tensile failure to compression-shear failure; and the critical confining pressure is 10 MPa. Specific energy absorbency value against lower confining pressure level is more than the value under higher confining pressure with the same energy of incident wave. The formulas among with the specific energy absorbency, the incident energy and confining pressure are put forward.

Key words: rock mechanics; split Hopkinson pressure bar(SHPB); yield platform; plastic deformation; specific energy absorbency

1 引言

随着我国地下工程的深度不断加大,地质条件趋于复杂,深部岩体力学问题已经成为关系国家财产和人民生命安全的重大课题,也是国内外岩体力学与地下工程领域研究的焦点问题^[1]。在深部资源开采过程中,岩石所处的“三高一扰动”的特殊地质力学环境导致冲击地压、瓦斯爆炸等现象频繁发生,由此引起的冲击动荷载的不断作用又使岩石发生损伤甚至破坏,从而造成重大安全生产事故和生命、财产损失。另外,常规爆炸及核爆对地下防护工程的威胁,也都与冲击荷载或应力脉冲作用下的岩石动态力学性能有关^[2],尤其是高地应力环境下,地下爆炸时岩体运动的能量明显大于爆源的爆炸能,其机制尚有待研究。因此,开展围压状态下岩石动态力学性能的研究对深地下工程的建设和防护都有重要的意义。

张爱辉等^[3~5]分别运用 RMT 伺服试验机和 MTS 试验机对岩石三轴压缩的塑性变形与能量特征以及损伤岩石式样的力学特性与纵波速度关系进行了研究。A. Pouya 等^[6,7]研究了地下水和围压对软岩力学性质的影响。李夕兵等^[8]对岩石在动静组合加载下的力学性能进行了研究。国内外的研究主要是围压对岩石静态力学性能的研究,而有关围压对岩石动态冲击力学性能的影响研究还不多见。本文利用带围压装置的直径为 $\phi 100$ mm 的 SHPB 对砂岩单轴动态压缩试验以及砂岩在围压为 0~20 MPa 情况下的冲击荷载循环加载下的力学性能进行研究,深入分析砂岩单轴抗压强度和比能量吸收值的应变率效应,砂岩在循环冲击荷载作用下的应力-应变曲线和屈服应力、屈服应变的变化特性,砂岩动态杨氏模量与围压和应变率之间的关系以及砂岩在冲击荷载循环作用下累积比能量吸收值与入射能量之间的关系。本文可为研究工程岩体在爆炸冲击荷载下的动力学特性提供一种新的思路,研究结果对地下工程建设和防护有一定的指导意义。

2 砂岩试件的制备及基本力学性能

砂岩试件经国土资源部西安矿产资源监督监测中心检验,含石英 41%,方解石 26%,斜长石 17%,钾长石 9%,滑石 1%,绿泥石 2%,伊利石 2%,赤铁矿 1%。岩石试件采用 ZS-100 型立式取芯机、DQ-1 型岩石切割机、SHM-200 型双端面磨石机进行钻取切割打磨成圆柱形试件,试件两端面研磨抛光,以保证其平行度、平整度和光洁度。

根据《公路工程岩石试验规程》(JTJ E41-2005),采用电液伺服压力机对砂岩的基本力学性能进行单轴抗压强度试验、劈裂抗拉强度试验及岩石软化系数的测定。图 1 为静态单轴抗压试验和劈裂抗拉试验中岩石试件的破坏形态。经试验确定,该岩石密度为 2 578 kg/m³,单轴抗压强度为 61.4 MPa,劈裂抗拉强度为 8.1 MPa,软化系数为 0.86,杨氏模量为 5.4 GPa。



(a) 静态单轴抗压

(b) 劈裂抗拉

图 1 岩石试件的破坏形态

Fig.1 Failure modes of rock samples

3 围压条件下砂岩动态冲击压缩试验

3.1 带围压装置的 SHPB 系统

与洛阳立特公司合作,对空军工程大学的 $\phi 100$ mm 的 SHPB 设备进行围压装置改造,带围压装置的 SHPB 系统示意图如图 2 所示。系统压杆直径为 $\phi 100$ mm,入射杆长为 4 500 mm,透射杆长为 2 500 mm,打击杆长为 500 mm,杨氏模量为 210 GPa,密度为 7 850 kg/m³,理论波速为 5 172 m/s,实测波速为 5 200 m/s。利用空气加压给打击杆加速并使用

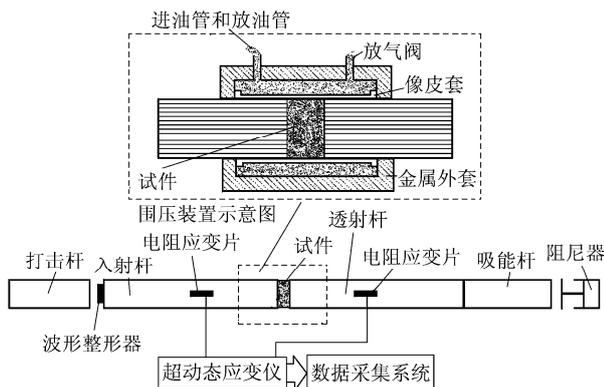


图 2 带围压装置的 SHPB 系统示意图

Fig.2 Sketch of device of SHPB system with confining pressure

灯距为 100 mm 激光测速仪测量打击杆撞击的速度。围压装置采用液压加载。

3.2 试验技术

为减少压杆与试件的接触面之间的摩擦效应，在试件的两端面上均匀涂抹了用润滑油和石墨配置的润滑剂。试验中通过测量入射杆和透射杆上应变片的电压，可以间接的计算出试件的应力、应变率和应变等动态力学参数^[9]。

综合分析国内外已有的关于波形整形器的研究成果^[10-12]，试验选用屈服强度较低的 T2 紫铜作为波形整形器。用真空脂将波形整形器黏贴于入射杆受打击杆冲击端面的中心位置，以便当受到打击杆强烈冲击时，紫铜发生较大变形，吸收一部分能量，将原来陡峭上升的脉冲方形波修正成上升过程较为平缓的波形，增加入射波的上升时间，保证试件内部在破坏之前有足够长的时间达到应力平衡；同时减少了入射波的高频振荡，使得应变率的波动性明显减小，这对于应变率敏感材料的动态特性研究^[13]是十分必要的。

3.3 试件最佳尺寸的确定

陶俊林等^[14]对 SHPB 系统圆柱形试件的惯性效应进行了研究，提出了试件最佳原始尺寸比的计算公式：

$$n_B = h_0 / a_0 = 0.875 + 0.540\varepsilon_{end} \quad (1)$$

式中： ε_{end} 为试件最终应变， n_B 为最佳原始尺寸比， h_0 为圆柱形试件厚度， a_0 为试件半径。

为了减少试件惯性效应与界面摩擦效应对试验结果的影响，在综合分析国内外关于试件最佳尺寸研究成果以及式(1)的基础上，选定 4 种尺寸的岩石试件进行尺寸效应的试验研究。试件尺寸为 $\phi 97$ mm，厚度分别为 40，43，47 以及 50 mm。

如果试件两端的受力相等，即试件内部各处的

应力应变处于均匀状态，则有

$$\varepsilon_I + \varepsilon_R = \varepsilon_T \quad (2)$$

式中： ε_I ， ε_R 和 ε_T 分别为入射杆测得的入射应变和透射杆上测得的反射和透射应变。

为了研究岩石试件在冲击荷载作用下的应力均匀性，定义量纲一的应力均匀性因子 $\delta_i(t)$ 和应力均匀性指数 ξ ，即

$$\delta_i(t) = \frac{\sigma_{li}(t) - \sigma_{2i}(t)}{(\sigma_{li}(t) + \sigma_{2i}(t)) / 2} \quad (3)$$

$$\xi = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i^2(t) \quad (4)$$

式中： $\sigma_{li}(t)$ 和 $\sigma_{2i}(t)$ 分别为试件前后端面的应力， n 为数据采集点数。

图 3 为典型的入射波，反射波及透射波形；图 4 为应力均匀性指数与试件厚度的关系曲线。由图 4 可知，试件的厚度对试验过程中试件的应力均匀性影响较大，厚度太大会导致惯性效应的增加，厚度太小导致端面摩擦效应的增加，从而使得试件不能很好的满足应力均匀性的要求，不能得到真实可靠的岩石材料的动态力学性能。当试件厚度为 43 mm 时，试件的应力均匀性指数最小，表明试件内部的应力能更好地满足均匀性的要求。因此，最终确定岩石试件的最佳尺寸为 $\phi 97$ mm×43 mm。

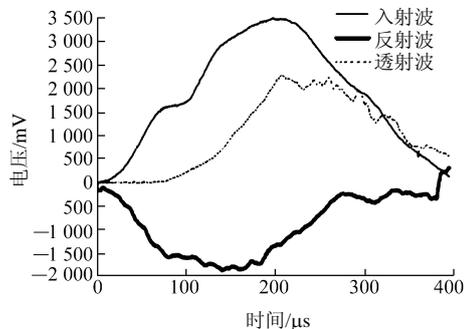


图 3 典型的入射波、反射波及透射波形

Fig.3 Typical forms of incident wave, reflected wave, and transmitted wave

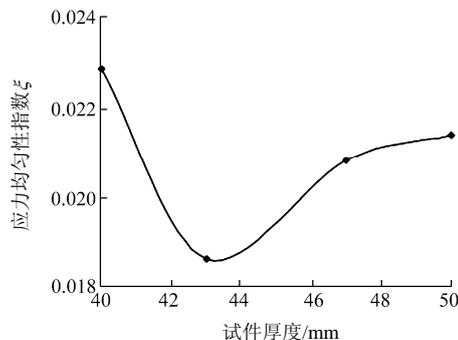


图 4 应力均匀性指数与试件厚度的关系

Fig.4 Relationship of stress uniformity index and specimen thickness

3.4 试验方法和步骤

为了充分研究围压对砂岩试件动态力学性能的影响，以及围压条件下砂岩累积损伤的变化规律，选择 0, 2, 4, 6, 10, 20 MPa 六个围压等级和不同应变率情况组合，进行砂岩的单次和多次冲击动力试验。

4 砂岩单轴动态压缩试验结果及分析

图 5 为砂岩在不同应变下的单轴应力 - 应变曲线，图 6 为砂岩在不同应变率下的破坏形态。

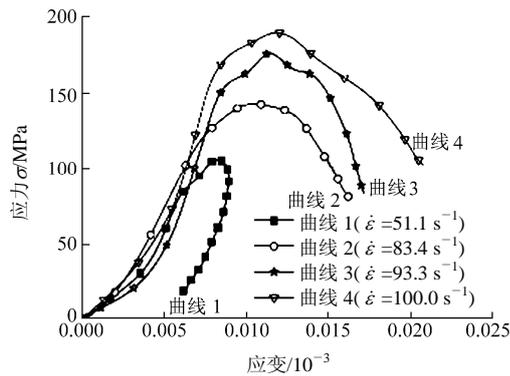
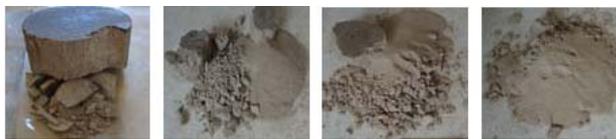


图 5 不同应变下的应力 - 应变曲线

Fig.5 Stress-strain curves with different strains



(a) $\dot{\epsilon} = 51.1 \text{ s}^{-1}$ (b) $\dot{\epsilon} = 83.4 \text{ s}^{-1}$ (c) $\dot{\epsilon} = 93.4 \text{ s}^{-1}$ (d) $\dot{\epsilon} = 100.0 \text{ s}^{-1}$

图 6 砂岩在不同应变率下的破坏形态

Fig.6 Failure modes of sandstone with different strain rates

4.1 应力 - 应变曲线的力学分析

由表 1 中可知，砂岩的动态杨氏模量与静态杨氏模量相比明显增加，两者比值达到 3.21~3.81，这与邵鹏和张勇^[15]的研究结论相一致；当应变率为 $50 \text{ s}^{-1} \sim 100 \text{ s}^{-1}$ 时，动态杨氏模量随应变率有所增加，但变化不大，两者的关系见图 7。

从材料的微结构特征，对砂岩试件的应力 - 应变曲线和破坏形态进行对比分析可知，试件起初由于岩石中的原有裂隙受压闭合，使得应力 - 应变曲线是上弯的。随后曲线基本上为直线，继续上升到峰值应力的 85% 左右时，曲线开始下弯，即曲线的斜率随着应力的增大逐渐减小，试件内部的局部破坏逐渐发展，直至峰值点。在峰值点后，应力 - 应变曲线将与应变率(冲击速度)及试件的破坏程度密

表 1 砂岩试验参数和动力性能参数

试件编号	应变率 $\dot{\epsilon} / \text{s}^{-1}$	峰值应力 σ_p / MPa	峰值应变 $\epsilon_p / \%$	杨氏模量 E / GPa	η	SEA $/(\text{J} \cdot \text{cm}^{-3})$
1	0.0*	61.4	1.13	5.40	-	-
2	51.1	105.5	0.85	17.32	1.718	0.395 1
3	83.4	142.9	1.07	18.99	2.327	1.634 4
4	93.3	176.3	1.13	20.14	2.871	1.663 8
5	100.0	189.8	1.17	20.56	3.091	2.591 7

注：“*”表示准静态； η 为动态抗压强度增长因子，是动态抗压强度与静态抗压强度的比值；SEA为比能量吸收值，是单位体积的试件所吸收的能量。

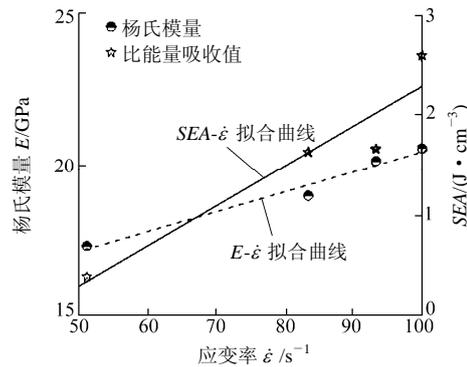


图 7 比能量吸收值和杨氏模量与应变率的关系

Fig.7 Relationship of specific energy absorptency, Young's modulus and strain rate

切相关，其形态会发生很大差异。当应变率(冲击速度)很高时，应力 - 应变曲线在峰后随着变形的持续增加，应力(岩石试件抵抗峰后荷载的能力)不断降低，如图 5 中的曲线 2~4 所示；当应变率(冲击速度)中等，试件虽然已经破坏但并没有被严重破碎时，峰后应变一般是先增加后减小，说明试件在变形后期仍然具有一定的反弹，如图 5 中的曲线 1 所示。

4.2 动态断裂破坏形态分析

从断裂破坏形态来看，随着应变率的增加，试件破坏的碎块尺度显著减小而碎块数量明显增加，表现出较强的应变率相关性。当试件受到单向压缩荷载作用时，其产生的裂纹都是从已有缺陷尖端起裂，并沿着平行于压应力的方向扩展，具有明显的方向性，最终相互贯通与兼并，导致轴向劈裂破坏，如图 6(a)所示，在较低应变率下砂岩试件的动态压缩破坏呈轴向劈裂破坏模式；但是随着应变率的提高，在砂岩内部细观裂纹贯通之前，有更多的细观裂纹能够扩展进而参加破碎过程，导致材料的破碎块度变小，破碎程度严重，呈现压碎破坏形式，如图 6(d)所示。

4.3 能量吸收及动态抗压强度分析

为了建立岩石破坏损伤过程的能量耗散与应变率之间的关系, 对冲击压缩过程进行能量分析, 此时有

$$W_L = W_I - (W_R + W_T) = (A_0 C_0 / E_0) \int (\sigma_I^2 - \sigma_R^2 - \sigma_T^2) dt \quad (5)$$

式中: W_L 为试件吸收的能量; W_I , W_R 和 W_T 分别是入射应力波、反射波和透射波的应力波能量; A_0 , C_0 和 E_0 分别为输入杆的横截面积, 杆中的声波传播速度以及输入杆的杨氏模量; σ_I , σ_R 和 σ_T 分别为入射、反射和透射应力波应力。

假设试件与输入杆和透射杆截面处的能量损耗忽略不计, 可以得到岩石以及比能量吸收值 SEA 为

$$SEA = W_L / V_s \quad (6)$$

式中: V_s 为岩石试件的体积。

图 7 的比能量吸收值与应变率的关系近似呈线性关系, 对数据点拟合可得

$$SEA = 0.039 65 \dot{\epsilon} - 1.678 09 \quad (R = 0.908 53, \dot{\epsilon} = 51.1 \sim 100.0 \text{ s}^{-1}) \quad (7)$$

结合试件破坏形态和图 7 分析, 应变率越高, 试件的比能量吸收值越大, 试件的破碎越严重。从材料的细观裂纹和能量吸收的角度分析, 岩石中的细观裂纹是由于原始微裂纹处应力集中而起裂的, 但起裂后因能量转化而使相应部位原有的集中应力消失, 结构调整, 并使裂纹止裂。在变形早期和中期主要形成分布细观裂纹, 每条裂纹也不会过多发展生长。但当岩石变形达到临界状态时, 细观裂纹网络会发生根本变化而形成细观主裂纹, 并可能发展为宏观主裂纹, 最终引起断裂破坏^[16]。

当应变率(冲击速度)较低时, 只有那些扩展时消耗能量较小的细观裂纹对材料的破碎有实际作用, 因为在吸收能量增加到能使其他细观裂纹开裂并形成主裂纹之前, 这些细观裂纹的扩展与贯通就已经使材料劈裂破坏了, 此时起作用的细观裂纹数目较少, 破碎块度比较大, 达到破碎的临界应力值较低, 也就是抗压强度较低。随着应变率的增加, 在细观裂纹贯通之前, 材料吸收的能量达到较高水平, 使得更多的细观裂纹能够扩展进而参加破碎过程, 导致材料的破碎块度更小, 材料达到破碎的临界应力值更高, 因此高应变率下材料的强度也随之增大, 由图 6 可说明此断裂破坏机制。图 8 为动态抗压强度增长因子 η 与应变率的关系。

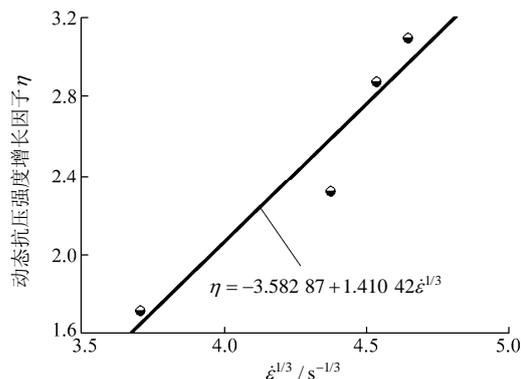


图 8 动态抗压强度增长因子 η 与应变率的关系

Fig.8 Relationship of dynamic strength increase ratio η and strain rate

由图 8 可以看出, 动态抗压强度增长因子 η (即动态抗压强度) 与 $\dot{\epsilon}^{1/3}$ 成线性关系, 这与戴俊^[17]中 $\sigma_{\text{dynamic}} \propto \dot{\epsilon}^{1/3}$ 的结论相一致。两者的关系为

$$\eta = 1.410 42 \dot{\epsilon}^{1/3} - 3.582 87 \quad (R = 0.972 75, \dot{\epsilon} = 51.1 \sim 100.0 \text{ s}^{-1}) \quad (8)$$

5 围压条件下砂岩动力性能试验分析

由于砂岩试件在无围压条件下, 当试验入射应力波的峰值强度仅为 150 MPa(对应的打击杆速度为 7.39 m/s)时, 试件已经开裂, 因此, 为了研究砂岩在循环冲击荷载下的力学性能变化规律, 当围压为 0 MPa 时, 确定试验入射应力波的峰值强度为 120 MPa 左右, 其他围压情况下, 试验入射应力波的峰值强度均为 345 MPa 左右; 对于每一个砂岩试件, 循环冲击荷载作用到使试件破坏为止。图 9 分别是不同围压和冲击荷载循环作用下砂岩试件三轴压缩轴向应力 - 应变曲线(SSDC 0 - 1 为试件编号, 圆括弧中的数字代表冲击荷载循环作用的次数, 下同)。

5.1 冲击荷载循环作用下应力 - 应变曲线分析

结合图 5, 9 分析可知:

(1) 在无围压条件下, 砂岩试件的破坏属于脆性破坏; 而在围压作用下, 应力 - 应变曲线呈现典型的弹塑性特征, 在达到屈服应力后, 应力增长不多, 而应变持续增加, 即塑性应变增大, 出现较明显的屈服平台, 砂岩试件的破坏属于延性破坏; 砂岩具有明显的脆性 - 延性转化特征。塑性变形的本质是材料整体发生相对滑移或剪切。因而不发生剪切失稳是塑性变形的前提^[18]。围压的加载作用对阻止试件产生剪切失稳的作用相当明显。

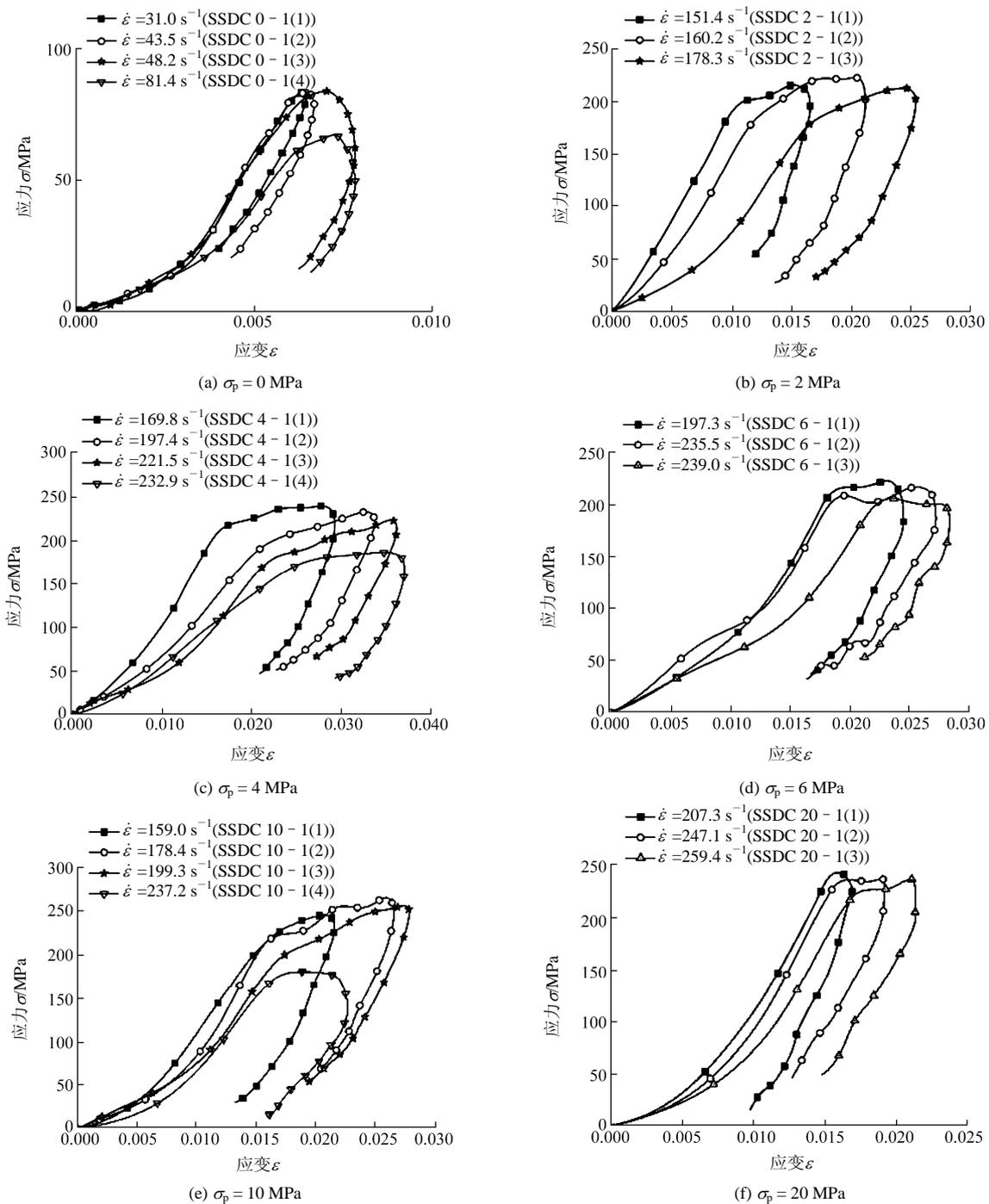


图9 不同围压和冲击荷载循环作用下砂岩试件三轴压缩轴向应力 - 应变曲线

Fig.9 Axial stress-strain curves of sandstone samples under uniaxial compression with different confining pressures and impact loads

(2) 随着冲击荷载循环作用次数增加，应力 - 应变曲线的上升段斜率减小，即杨氏模量变小。从材料的细观裂纹和能量吸收的角度分析，在冲击荷载作用下，岩石中的细观裂纹由原始微裂纹处应力集中而起裂，细观裂纹的发展降低了岩石组构传递荷载的能力和比例，使得材料性能下降，导致杨氏模量变小。

(3) 随着冲击荷载循环作用次数的增加，试件的屈服应力降低，屈服应变增加。冲击荷载循环作

用次数与屈服应力和屈服应变关系如图 10 所示(虚线表示屈服应力，实线表示屈服应变)。在冲击荷载作用下，砂岩试件进入延性变形阶段的屈服平台后，尽管承载能力增加不大，但内部不断产生塑性变形，从而导致材料性能的劣化，宏观上表现为在后续循环加载时试件的屈服应力降低。

(4) 由图 10 可知，围压的增加可以极大的提高岩石试件的抗压强度及变形性能。这是由于岩石内存在各种方向的裂隙，无围压时所有倾角大于内

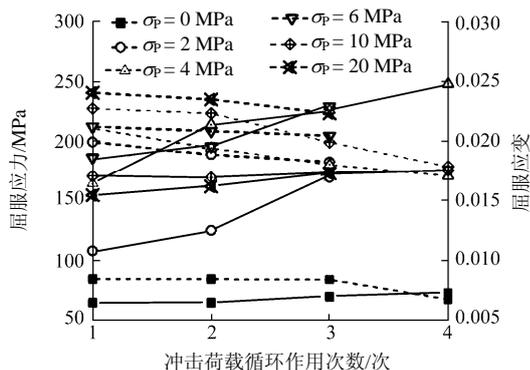


图 10 冲击荷载循环作用次数与屈服应力和屈服应变关系
Fig.10 Relationship between the circular action times and yield stress, yield strain

摩擦角的裂隙承载能力为 0; 而围压稍有增大时, 陡倾角裂隙的承载能力迅速增大, 不会产生滑移破坏。另外, 据尤明庆^[19]的研究, 在围压达到较高数值之后, 由于岩石内部材料不能同时具有黏结和摩擦特性, 因此, 三轴抗压强度的增加随围压的增大而变缓, 这在图 10 中试件的屈服应力的变化上也有体现。

5.2 破坏形态分析

图 11 为不同围压、循环荷载作用下砂岩试件破坏形态。其中, 围压为 $\sigma_p = 10$ MPa 时, 出现了 2 种破坏形态, 见图 11(e)。

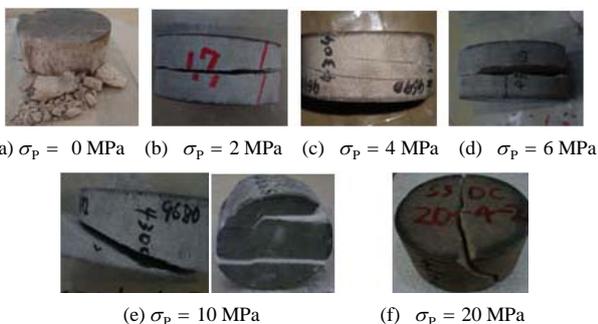


图 11 不同围压、循环荷载作用下砂岩试件破坏形态
Fig.11 Failure modes of sandstone samples with different confining pressures and impact loads

由图 11 可发现, 无围压情况下砂岩的破坏属于径向拉伸破坏; 低围压情况($\sigma_p = 2 \sim 6$ MPa)下, 属于轴向拉伸破坏; 高围压情况($\sigma_p = 20$ MPa)下, 属于压剪破坏; 在围压为 $\sigma_p = 10$ MPa 时, 同时出现了近似的轴向拉伸破坏和压剪破坏 2 种形态。由此可知, 砂岩的破坏形态随围压大小不同而发生变化, 在三轴应力状态下, 砂岩从轴向拉伸破坏形态向压剪破坏形态转变的临界围压为 $\sigma_p = 10$ MPa。

5.3 杨氏模量随围压、应变率的变化

图 12 为不同围压下砂岩试件杨氏模量随应变率的变化。为了避免由冲击荷载循环作用导致试件损伤而引起的杨氏模量变化对分析结果产生影响, 图 12 仅给出砂岩试件第一次受冲击荷载作用的杨氏模量数据统计。

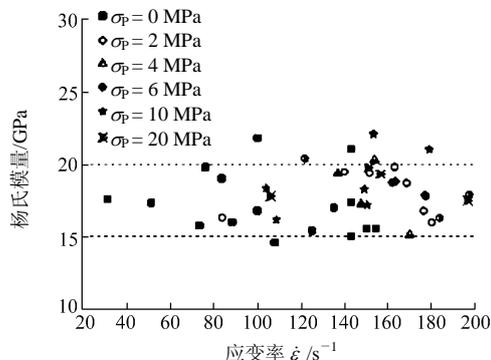


图 12 不同围压下砂岩试件杨氏模量随应变率的变化
Fig.12 Variation of Young's modulus and strain rate of sandstone samples with different confining pressures

由图 12 可以看出, 杨氏模量与围压和应变率之间没有稳定的变化规律, 作为材料力学性能指标的杨氏模量是应变率不敏感参数, 基本上集中于 15~20 GPa 的区间。尽管在试验研究之前, 通过砂岩试件的干燥密度对其进行筛分, 选用密度偏差在 5% 以内的试件进行试验, 以尽量排除砂岩试件非均质特性对试验结果的影响, 但试验得到的岩石在不同围压下杨氏模量随应变率变化的变异性仍然较大, 这主要是因为岩石作为一种特殊的天然材料, 受成因和地质构造的影响, 岩石的组织结构极为不均匀, 内部存在各种大量的天然缺陷, 而且这些缺陷的分布完全是随机的, 是一种非均质的多相复合结构。

尽管不同围压下岩石杨氏模量随应变率变化的变异性较大, 但仍然可以定性的看出, 在 15~20 GPa 的区间内, 随着围压的升高, 杨氏模量逐渐的由偏下方的位置向上移动。

5.4 围压对试件比能量吸收的影响

图 13 为不同围压下砂岩试件的比能量吸收值与入射波能量关系。

在能量相同的入射波作用下, 砂岩试件在低围压时比在高围压时的比能量吸收值大, 这是因为围压越高, 岩石试件在冲击荷载作用下侧向变形时受到的反作用力越大, 裂纹的开展受到限制作用越大, 裂纹开展越困难, 所耗散的能量越小, 宏观上表现为试件的比能量吸收值变小, 这也正是在高围压条件下, 岩石试件破坏需要更高能量的入射冲击波作

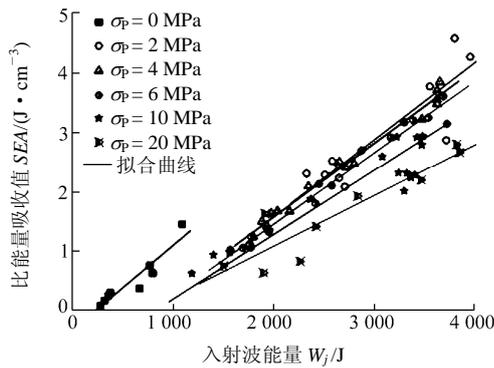


图 13 不同围压下砂岩试件能量吸收值与入射波能量关系
Fig.13 Relationship of SEA and the energy of incident wave of sandstone samples with different confining pressures

用或需要更多次的冲击作用的原因。

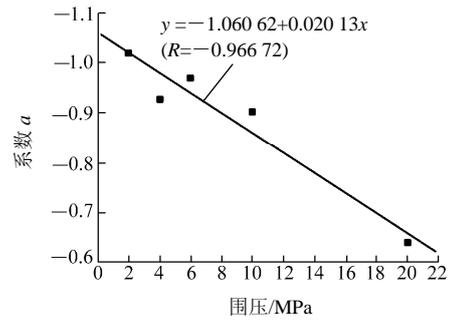
与低围压情况相比，岩石试件在高围压条件下累积损伤到破坏，所耗散的总能量较大，这不是因为相同的裂纹开展所需的能量变大，而是由于低围压时主要以产生相对集中的主裂纹导致试件破坏，而在高围压时，每次打击均产生均匀分布的损伤裂纹，试件破坏时产生的微裂纹数目比低围压时多，因而耗散的总能量更大。通过对图 13 进行线性拟合(以 $SEA = bE_1 + a$ 形式给出)，可得到不同围压下砂岩试件比能量吸收值与入射波能量的关系表达式：

$$\left. \begin{aligned}
 SEA &= 0.001\ 42E_1 - 0.336\ 57 \\
 &\quad (R = 0.939\ 42, \sigma_p = 0\ \text{MPa}) \\
 SEA &= 0.001\ 30E_1 - 1.020\ 7 \\
 &\quad (R = 0.881\ 1, \sigma_p = 2\ \text{MPa}) \\
 SEA &= 0.001\ 25E_1 - 0.927\ 84 \\
 &\quad (R = 0.917\ 84, \sigma_p = 4\ \text{MPa}) \\
 SEA &= 0.001\ 20E_1 - 0.968\ 47 \\
 &\quad (R = 0.988\ 65, \sigma_p = 6\ \text{MPa}) \\
 SEA &= 0.001\ 084E_1 - 0.902\ 11 \\
 &\quad (R = 0.934\ 77, \sigma_p = 10\ \text{MPa}) \\
 SEA &= 0.000\ 855E_1 - 0.638\ 3 \\
 &\quad (R = 0.919\ 39, \sigma_p = 20\ \text{MPa})
 \end{aligned} \right\} (9)$$

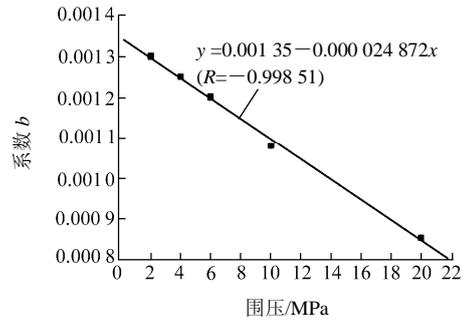
图 14 为系数 a, b 与围压的关系。其中系数 a, b 可以通过以下方程进行拟合：

$$\left. \begin{aligned}
 a &= -1.060\ 620 + 0.020\ 130\sigma_p \quad (R = -0.966\ 72) \\
 b &= 0.001\ 35 - 0.000\ 025\sigma_p \quad (R = -0.998\ 51)
 \end{aligned} \right\} (10)$$

通过将围压参数内化，围压条件下砂岩试件的比能量吸收值与入射波能量的关系可以统一为



(a) 系数 a 与围压的关系



(b) 系数 b 与围压的关系

图 14 系数 a, b 与围压的关系

Fig.14 Relationship of coefficients a, b and confining pressures

$$SEA = \begin{cases} 0.001\ 42E_1 - 0.336\ 57 & (\sigma_p = 0\ \text{MPa}) \\ 1 \times 10^{-5} (135 - 2.487\ 2\sigma_p) E_1 + \\ (0.020\ 13\sigma_p - 1.060\ 62) & (\sigma_p = 2 \sim 20\ \text{MPa}) \end{cases} (11)$$

6 结 论

(1) 砂岩的动态杨氏模量与静态杨氏模量相比明显增加，两者比值达到 3.21~3.81。当应变率为 $50 \sim 100\ \text{s}^{-1}$ 时，动态杨氏模量随应变率有所增加，但变化不大。

(2) 单轴动态压缩条件下，在较低应变率下砂岩试件的动态压缩破坏呈轴向劈裂破坏模式；但在较高应变率下，由于破碎程度严重，呈现压碎破坏形式。

(3) 砂岩单轴动态压缩试验的比能量吸收值与应变率呈线性关系，单轴动态抗压强度增长因子 η (即动态抗压强度)与 $\dot{\epsilon}^{1/3}$ 成线性关系。

(4) 在围压作用下，砂岩具有明显的脆性 - 延性转化特征，其应力 - 应变曲线出现明显的屈服平台，呈近似的理想弹塑性特征。围压的加载作用对阻止试件产生剪切失稳的作用相当明显。

(5) 随着冲击荷载循环作用次数的增加，试件的杨氏模量变小，屈服应力降低，屈服应变增加。

(6) 围压的增加使试件内陡倾角裂隙的承载能

力迅速增大, 不会产生滑移破坏, 从而极大地提高了岩石试件的抗压强度及变形性能。

(7) 砂岩的破坏形态随围压的大小不同而发生变化, 在三轴应力状态下, 砂岩从轴向拉伸破坏形态向压剪破坏形态转变的临界围压值为 $\sigma_p = 10 \text{ MPa}$ 。

(8) 砂岩的动态杨氏模量与围压和应变率之间没有稳定的变化规律, 作为材料力学性能指标的动态杨氏模量是应变率不敏感参数, 大部分基本上集中于 $15 \sim 20 \text{ GPa}$ 的区间。

(9) 在能量相同的入射波作用下, 砂岩试件在低围压时比在高围压时的比能量吸收值大, 且砂岩的比能量吸收值、入射波能量和围压三者具有良好的规律性。

参考文献(References):

- [1] 何满潮, 钱七虎. 深部岩体力学研究进展[C]// 中国岩石力学与工程学会编. 第九届全国岩石力学与工程学术大会论文集. 北京: 科学出版社, 2006: 49 - 62.(HE Manchao, QIAN Qihu. Review of basic research on rock mechanics at great depth[C]// Chinese Society for Rock Mechanics and Engineering ed. Proceedings of the 9th Symposium on Rock Mechanics and Engineering. Beijing: Science Press, 2006: 49 - 62.(in Chinese))
- [2] 胡柳青. 冲击载荷作用下岩石动态断裂过程机制研究[博士学位论文][D]. 长沙: 中南大学, 2005.(HU Liuqing. On the mechanism of dynamic fracture processes of rock under impulse loading[Ph. D. Thesis][D]. Changsha: Central South University, 2005.(in Chinese))
- [3] 张爱辉, 徐进, 庞希斌, 等. 围压对大理岩力学特性影响的试验研究[J]. 西南民族大学学报(自然科学版), 2008, 34(6): 1 257 - 1 260.(ZHANG Aihui, XU Jin, PANG Xibin, et al. Experimental study of mechanical performance of marble under confining pressure[J]. Journal of Southwest University for Nationalities(Natural Science), 2008, 34(6): 1 257 - 1 260.(in Chinese))
- [4] 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 Chengdong, ZHANG Zhenhua. 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))
- [5] 尤明庆, 苏承东, 李小双. 损伤岩石试件的力学特性与纵波速度关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(3): 458 - 467.(YOU Mingqing, SU Chengdong, LI Xiaoshuang. Study of relation between mechanical properties and longitudinal wave velocities for damaged rock samples[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(3): 458 - 467.(in Chinese))
- [6] POUYA A, GHOREYCHI M. Determination of rock mass strength properties by homogenization[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2001, 25(13): 1 285 - 1 303.
- [7] 郭富利, 张顶立, 苏洁, 等. 地下水和围压对软岩力学性质影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(11): 2 324 - 2 332.(GUO Fuli, ZHANG Dingli, SU Jie, et al. Experimental study of influences of groundwater and confining pressure on mechanical behaviors of soft rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(11): 2 324 - 2 332.(in Chinese))
- [8] 李夕兵, 周子龙, 叶州元, 等. 岩石动静组合加载力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(7): 1 387 - 1 395.(LI Xibing, ZHOU Zilong, YE Zhouyuan, et al. Study of rock mechanical characteristics under coupled static and dynamic loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(7): 1 387 - 1 395.(in Chinese))
- [9] 王礼立. 应力波基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.(WANG Lili. Foundation of stress waves[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2005.(in Chinese))
- [10] FREW D J, FORRESTAL M J, CHEN W. Pulse shaping techniques for testing brittle materials with a split Hopkinson pressure bar[J]. Experimental Mechanics, 2002, 42(1): 93 - 106.
- [11] CHEN W, LU F, FREW D J, et al. Dynamic compression testing of soft materials[J]. Journal of Applied Mechanics, 2002, 69(3): 214 - 223.
- [12] 李为民, 许金余, 沈刘军, 等. $\phi 100 \text{ mm}$ SHPB 应力均匀及恒应变率加载试验技术研究[J]. 振动与冲击, 2008, 27(2): 129 - 132.(LI Weimin, XU Jinyu, SHEN Liujun, et al. Study on $\phi 100 \text{ mm}$ SHPB techniques of dynamic stress equilibrium and nearly constant strain rate loading[J]. Journal of Vibration and Shock, 2008, 27(2): 129 - 132.(in Chinese))
- [13] LEE S, KIM S H, HAN Y H. Thickness effect of pulse shaper on dynamic stress equilibrium and dynamic deformation behavior in the polycarbonate using SHPB technique[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2006, 21(1): 51 - 60.
- [14] 陶俊林, 陈裕泽, 田常津, 等. SHPB 系统圆柱形试件的惯性效应分析[J]. 固体力学学报, 2005, 26(1): 107 - 110.(TAO Junlin, CHEN Yuze, TIAN Changjin, et al. Analysis of inertial effect of cylindrical specimen in SHPB system[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2005, 26(1): 107 - 110.(in Chinese))
- [15] 邵鹏, 张勇. 高应变率下砂岩动态特性的研究[J]. 建井技术, 1997, 18(增): 83 - 84.(SHAO Peng, ZHANG Yong. Study of the dynamic characteristics of sandstone under high strain-rate[J]. Mine Construction Technology, 1997, 18(Supp.): 83 - 84.(in Chinese))
- [16] 凌建明, 孙钧. 脆性岩石的细观裂纹损伤及其时效特征[J]. 岩石力学与工程学报, 1993, 12(4): 304 - 312.(LING Jianming, SUN Jun. On mesocrack damage of brittle rocks and its time-dependent characteristics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1993, 12(4): 304 - 312.(in Chinese))
- [17] 戴俊. 岩石动力学特性与爆破理论[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002: 23 - 24.(DAI Jun. Dynamic behaviors and blasting theory of rock mass[M]. Beijing: China Metallurgical Industry Press, 2002: 23 - 24.(in Chinese))
- [18] 薛志刚, 胡时胜. 水泥砂浆在围压下的动态力学性能[J]. 工程力学, 2008, 25(12): 184 - 188.(XUE Zhigang, HU Shisheng. Dynamic behavior of cement mortar under confining pressure[J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(12): 184 - 188.(in Chinese))
- [19] 尤明庆. 基于黏结和摩擦特性的岩石变形与破坏的研究[J]. 地质力学学报, 2005, 11(3): 286 - 292.(YOU Mingqing. Study of deformation and failure of rock based on properties of cohesion and friction[J]. Journal of Geomechanics, 2005, 11(3): 286 - 292.(in Chinese))