

文章编号:1671-6833(2014)03-0090-04

# 非全充填裂隙的动态变形模量实验研究

陈金刚<sup>1,2,3</sup>, 张树勋<sup>1</sup>, 张景飞<sup>1</sup>, 刘雯雯<sup>1</sup>, 陈娜<sup>1</sup>, 王明辉<sup>1</sup>

(1. 郑州大学 力学与工程科学学院, 河南 郑州 450001; 2. 中国矿业大学 煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 江苏 徐州 221116; 3. 河南省瓦斯地质与瓦斯治理重点实验室, 河南 焦作 454003)

**摘要:** 为了探讨非全充填裂隙的变形特性对工程稳定性产生的影响, 采用法向压缩、侧向约束的方式, 研究了非全充填裂隙的动态变形模量. 研究发现: 应力作用下, 充填介质结构逐渐发生变化, 随着应力的增大充填介质发生破坏, 其碎屑、颗粒向裂隙空间移动, 直至完全充满裂隙空间, 并逐渐压实, 导致充填裂隙变形模量呈现动态变化的特征. 实验结果表明: 充填裂隙的变形模量随应力增加呈近直线状增大, 且具有高度的重现性. 充填宽度相同时, 充填裂隙的变形模量随着充填介质泥砂配比的逐渐减小而减小. 相同泥砂配比条件下, 充填裂隙的变形模量随着充填宽度的增大而增大.

**关键词:** 非全充填裂隙; 变形模量; 动态模量; 应力; 应变

**中图分类号:** TU452

**文献标志码:** A

**doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2014.03.022

## 0 引言

非全充填裂隙受压时, 由于充填物没有完全充满裂隙, 导致裂隙在受力时会产生较大的变形量. 对于实际工程而言, 这种突变的变形量极有可能造成严重的工程事故, 因而, 研究非全充填裂隙的变形模量显得更具实际意义. 变形模量是对工程岩体进行数值模拟的必备参数<sup>[1-2]</sup>, 随着应力的增加, 变形模量也会增加<sup>[3]</sup>. 国内外对岩体裂隙变形模量的研究较多, 而对非全充填裂隙的变形模量研究鲜有见及. 杨建平等<sup>[4]</sup>通过分开考虑岩块和裂隙对岩体变形的贡献, 研究了任意裂隙分布岩体等效变形模量的解析计算方法. 张振南等<sup>[5]</sup>通过对松散岩块压实实验研究, 得到了变形模量与轴向应力、轴向应变的相关性规律. 喻勇等<sup>[6]</sup>认为岩体变形模量主要受岩体中的裂隙发育状况控制. 同时, 国内外对软弱夹层带变形模量也进行了研究. 王春山等<sup>[7]</sup>利用弹性力学原理求得软弱夹层在深埋原位状态下的变形模量, 研究表明软弱带在深埋条件下具有较高的变形模量. ZHANG 等<sup>[8]</sup>采用多种方法对原位条件下软弱岩带的变形模量进行研究, 揭示了原位条件下软弱岩带的变形模量比曝光后测试的结果高出几倍.

Li 等<sup>[9]</sup>采用层状岩体承压板法变形实验, 利用分层弹性模量计算的方法测定出软弱层带及其他各个岩层的模量.

因此, 笔者通过采用充填裂隙轴向压缩、侧向约束的实验方法, 探讨不同泥砂配置比例和不同充填宽度对裂隙变形模量的影响, 能为实际工程提供可靠的依据.

## 1 非全充填裂隙变形模量理论分析

在荷载作用下, 材料内部产生的应力、应变响应均为时间的函数, 相应地, 弹性模量在外载作用过程中随着应力的变化而发生动态变化, 材料动态模量定义为应力幅值的比值, 以表征材料在不同的外载作用下不同的响应特性. 在非全充填裂隙变形模量实验中, 随着应力增大, 充填介质逐渐损伤演化, 损伤后的充填介质颗粒进入裂隙中空空间, 应力继续增大, 被破碎的充填介质逐渐充填空隙, 使得裂隙结构越来越密实, 抗压能力也越来越强, 也就是说, 充填裂隙的变形模量不断发生动态变化. 为了有效地反应充填裂隙在变形过程中模量变化状况, 采用动态模量描述, 即非全充填裂隙应力-应变曲线上任一点与坐标原点连线的斜率定义为变形模量.

**收稿日期:**2013-10-22; **修订日期:**2013-12-10

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(50709030); 中国矿业大学煤炭资源与安全开采国家重点实验室项目(13KF04); 河南省瓦斯地质与瓦斯治理重点实验室项目(WS2013A04); 河南省自然科学基金项目(2011B410004)

**作者简介:** 陈金刚(1973-), 男, 河南邓州人, 郑州大学教授, 博士, 主要从事充填裂隙水力特性研究, E-mail: chenjk@zzu.edu.cn.

根据广义胡克定律:

$$\varepsilon_x = (1/E)[\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z)]; \tag{1}$$

$$\varepsilon_y = (1/E)[\sigma_y - \mu(\sigma_x + \sigma_z)]; \tag{2}$$

$$\varepsilon_z = (1/E)[\sigma_z - \mu(\sigma_x + \sigma_y)]; \tag{3}$$

实验中充填裂隙为轴向压缩、侧限固定约束状态,所以边界条件: $\varepsilon_x = 0, \varepsilon_y = 0$ ,由式(1)、(2)可得:

$$\sigma_x = \mu(\sigma_y + \sigma_z), \sigma_y = \mu(\sigma_x + \sigma_z); \tag{4}$$

进一步整理得

$$\sigma_x = \frac{\mu}{1-\mu}\sigma_z, \sigma_y = \frac{\mu}{1-\mu}\sigma_z; \tag{5}$$

把式(5)代入式(3)可得轴向压缩、侧限固定约束条件下模型试样的变形模量  $E$ :

$$E = \frac{(1-2\mu)(1+\mu)}{(1-\mu)} \cdot \frac{\sigma_z}{\varepsilon_z}. \tag{6}$$

式中: $\mu$  为泊松比; $\sigma_z$  为法向应力; $\varepsilon_z$  为法向应变.

2 非全充填裂隙变形模量实验及分析

2.1 实验方案

充填裂隙模型采用长方体模型,裂隙壁采用泥砂配比 1:2 的水泥砂浆配置,长宽厚为 100 mm × 50 mm × 20 mm. 充填物为 4 种配比水泥砂浆,泥砂配制比  $R$  分别为 1:2, 1:4, 1:6, 1:8, 充填物厚度  $h_3 = 20$  mm. 充填裂隙模型如图 1 所示.

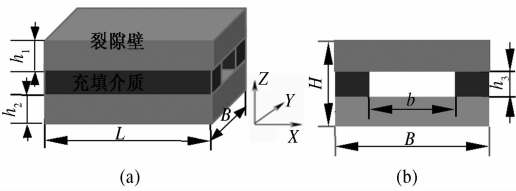


图 1 非全充填裂隙模型  
Fig.1 The model of partly-filled fracture

图中, $L$  为裂隙壁长度; $B$  为裂隙壁宽度; $H$  为裂隙厚度; $b$  为裂隙宽度; $R$  为泥砂配制比. 对充填裂隙侧限约束,以法向加载为主控参数,加载速率统一为 0.2 mm/min,样品放入钢槽内,再把钢槽放到实验台上并调整好,将压头平整压入钢槽,使用微机控制万能材料试验机输入实验设定参数,启动程序进行实验.

2.2 实验结果分析

2.2.1 泥砂配置比对充填裂隙变形模量的影响

充填裂隙宽度  $b$  为 20 mm 时,不同泥砂配制比例下模型试样的应力应变曲线如图 2 所示.

从图 2 可以看出,随着应力的增大,充填裂隙的应变也增大,但是增大的幅度却有所不同. 在相同裂隙宽度条件下,应力大小相等时,4 种泥砂配

制比例中,1:2 的充填裂隙的应变最小,反映出高水泥含量的样品具有较高的抵抗外力的能力.

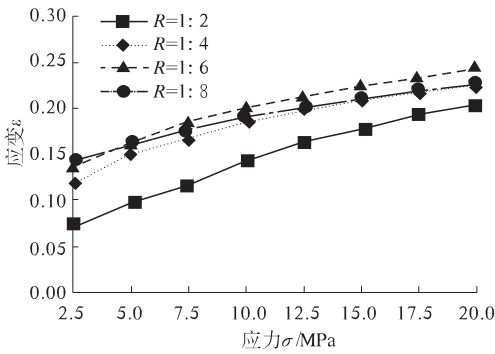


图 2 隙宽为 20 mm 时充填裂隙的应力应变关系曲线  
Fig.2 The stress - strain curve of filled fracture with 20 mm width

为了探讨相同裂隙宽度条件下充填裂隙的变形模量,对充填裂隙应力应变数据进行整理,转化成变形模量 - 应力图如图 3 所示. 由图 3 可以看出,12 组充填裂隙样品的变形模量随应力增加均呈现近直线状增大的特征,具有高度的重现性,反映出该类充填裂隙变形模量具有的规律性. 在法向应力下,裂隙壁逐渐闭合,充填介质被挤压,随着应力增大,充填介质逐渐被压裂破碎,破碎的充填介质进入充填空隙,应力继续增大,破碎的充填介质逐渐充满裂隙中空空间,以实验设定的加压速率对实验模型持续加压,充填裂隙逐渐被充满,裂隙组织结构变密实,抗压能力增大,点应力与点应变的比值逐渐增大,也就是说,变形模量逐渐增大.

图 3(b)、(c) 显示,泥砂配制比例 1:2 的充填裂隙的变形模量相比较,因为水泥砂浆的强度主要取决于水泥凝胶与骨料间的粘结力,当水泥含量增大时,水泥砂浆中形成的水泥凝胶量增多,增大了水泥凝胶与骨料间的接触面积,从而提高了水泥凝胶与骨料间的粘结力,水泥砂浆的抗压强度在一定范围内随水泥用量的增大呈明显增大的趋势. 因而,相同应力条件下,水泥含量越大,充填裂隙产生的应变越小,对应的变形模量也就越大. 图 3(a) 中泥砂配制比例 1:2 的充填裂隙的变形模量出现异常,可能是由于当裂隙宽度  $b$  为 30 mm 时,充填介质较少,模型试样受力后,充填介质未能快速充满裂隙,导致充填介质的物理性能未能完全表现出来,以致出现异常现象.

2.2.2 充填尺寸对充填裂隙变形模量的影响

图 4 是泥砂配制比例为 1:4 时,不同隙宽条件下充填裂隙样品的应力应变曲线. 观察图 4 可

得出,在相同配制比例、相同应力条件下,充填裂隙宽度越大,模型试样的应变就越大。

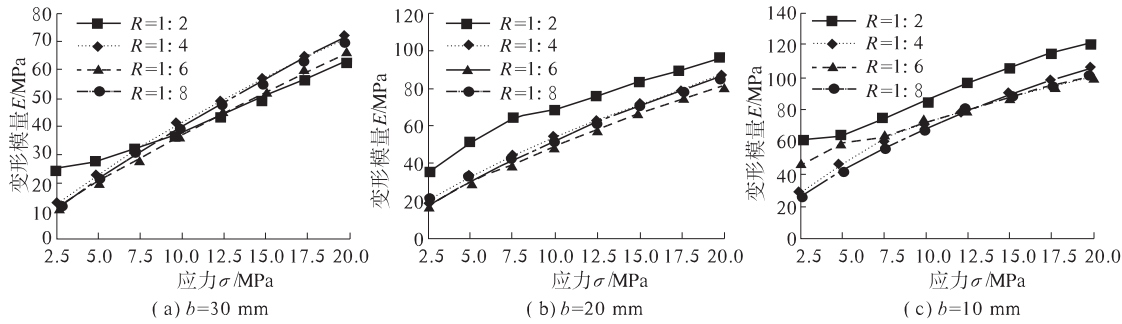


图 3 不同裂隙宽度下充填裂隙的变形模量

Fig.3 The deformation modulus of filled fracture with different width

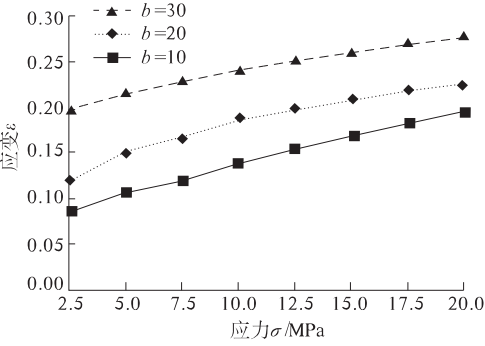


图 4 泥砂配比 1:4 时充填裂隙的应力应变关系曲线

Fig.4 The stress – strain curve of filled fracture with cement – sand configuration ratio of 1:4

为了探讨相同泥砂配制比条件下充填裂隙的变形模量,分别把泥砂配制比 1:2,1:4,1:6,1:8 的充填裂隙应力应变数据进行整理,转化成变形模量 – 应力图如图 5 所示。

法向方向上,充填介质的受力面积为  $A = L \times (B - b)$ ,一定范围内,裂隙中空尺寸  $b$  越小,充填介质受力面积  $A$  越大,在应力作用下,单位面积承受的作用力较小,显示出充填介质抵抗外力的能力有所增强,也就是变形模量增大.由图 5 变形模量 – 应力曲线可以看出,图 5 中的 3 条曲线均呈高度一致的 3 个层次分布,表明裂隙中空空间较小的充填裂隙变形模量较大,反之亦然.如:相同应力条件下,充填隙宽为 10,20,30 mm 的充填裂隙的变形模量依次减小.如图 5(a),充填介质泥砂配制比例为 1:2,在应力为 5 MPa 时充填裂隙隙宽为 30,20,10 mm 的曲线显示的变形模量分别为 28.1,51.0,64.9 MPa,是依次增大的关系.图 5(b ~ d)中,可以发现同样存在这样的规律:相同配制比例、不同充填裂隙宽度下,充填裂隙隙宽  $b$  越大,充填裂隙的变形模量就越小。

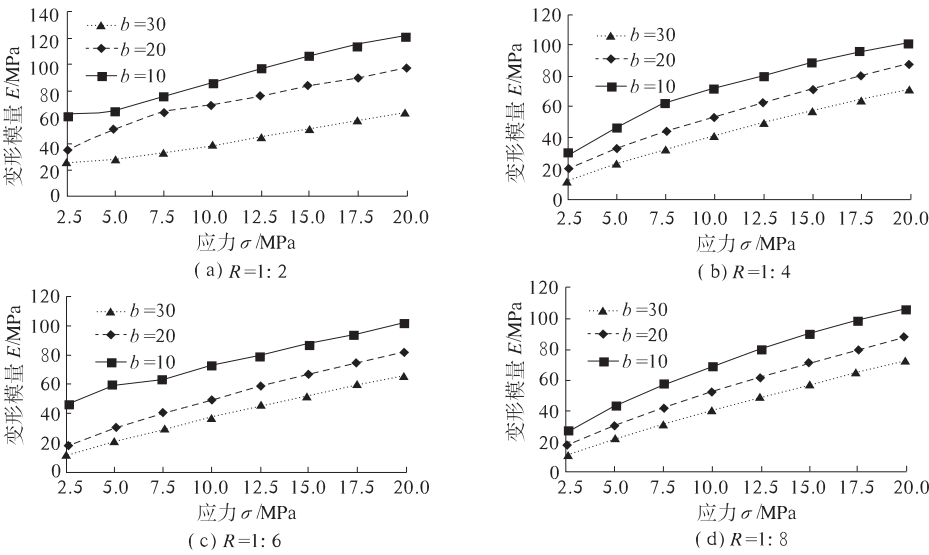


图 5 不同配制比例下充填裂隙的变形模量

Fig.5 The deformation modulus of filled fracture with different configuration proportion

### 3 结论

通过开展充填裂隙侧向约束,轴向压缩的实验,探讨了不同泥砂配置比例和不同充填宽度对裂隙变形模量的影响,得到如下结论:

(1) 充填裂隙发生形变时,随着应力增大,充填介质被压裂破碎,破碎的充填介质进入中空空隙,应力继续增大,中空空间逐渐充满,并逐步压实,导致充填裂隙变形模量呈现动态变化的特征,充填裂隙的变形模量随应力增加呈近直线状增大,且具有高度的重现性。

(2) 当充填宽度相同时,充填裂隙的变形模量随应力的增大而增大,泥砂配比越大的充填介质因具有较大的胶结性能,使得其抵抗外力的能力增强,表现出变形模量较大,且随着充填介质泥砂配比的逐渐减小,充填裂隙的变形模量也依次减小。

(3) 相同泥砂配比条件下,随着中空宽度  $b$  的逐渐减小,即充填宽度  $(B-b)$  的逐渐增大,充填裂隙的变形模量也逐渐增大。

### 参考文献:

[1] 王刚,李术才,王书刚,等. 节理岩体大型地下洞室群稳定性分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(1): 261

- 268.

- [2] 张巍,肖明,范国邦. 大型地下洞室群围岩应力-损伤-渗流耦合分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(7): 1813 - 1818.
- [3] JAEGER J C, COOK N G W, ZIMMERMAN R W. Fundamentals of rock mechanics[M]. [S.l.]: Blackwell Publishing, 2007.
- [4] 杨建平,陈卫忠,戴永浩. 裂隙岩体变形模量尺寸效应研究Ⅱ:解析法[J]. 岩土力学, 2011, 32: 1607 - 1612.
- [5] 张振南,茅献彪,郭广礼. 松散岩块压实变形模量的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(4): 578 - 581.
- [6] 喻勇,肖国强,王法刚. 岩体变形模量的尺寸效应[J]. 岩土力学, 2003, 24: 47 - 49.
- [7] 王春山,聂德新,李树森. 埋藏条件下软弱夹层变形模量研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(3): 109 - 112.
- [8] ZHANG Yong, HE Jiang-da, WEI Yu-feng. Prediction research of deformation modulus of weak rock zone under insitu conditions[J]. Journal of Mountain Science, 2011(2): 345 - 353.
- [9] LI Di, ZHANG Man, WANG Zhi-wang. Suggested method for deformability test of layered rock masses[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 10: 1156 - 1160.

## Experiment Study on Dynamic Modulus of Deformation of Partly-Filled Fracture

CHEN Jin-gang<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Shu-xun<sup>1</sup>, ZHANG Jing-fei<sup>1</sup>, LIU Wen-wen<sup>1</sup>, CHEN Na<sup>1</sup>, WANG Ming-hui<sup>1</sup>

(1. School of Mechanics and Engineering Science, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. State Key Laboratory of Coal Resources and Mine safety, CUMT, Xuzhou 221116, China; 3. Key Laboratory Cultivation Base of Henan for Gas Geology and Gas Control, Jiaozuo 454003, China)

**Abstract:** In order to investigate the effect of the deformation characteristics of partly-filled fracture on engineering stability, based on the experiment method of normal compression and lateral restraint, dynamic deformation modulus of partly-filled fracture is researched. It suggested that, the structure of filling medium began to change owing to the effect of stress. The filling medium was smashed with the increase of the stress. At the same time, the fracture space was filled with granules of medium till the space was full filled and the medium became dense. The result is that deformation modulus had dynamic characteristics. The experimental results showed that the deformation modulus of filled fracture increases linearly with the increase of stress, at the same time, it has a high degree of reproducibility. When the filled width is same, the deformation modulus of filled fracture decreases with the decrease of the configuration ratio of cement-sand. While the configuration ratio of cement-sand is the same, the deformation modulus of filled fracture increases with the increase of the filled width.

**Key words:** partly-filled fracture; deformation modulus; dynamic modulus; stress; strain