

文章编号:1001-4888(2022)03-0439-08

侧限压缩试验下矽石充填材料的 变形特性及其颗粒分布研究*

刘向峰¹, 郝国亮¹, 李喜林², 王来贵¹

(1. 辽宁工程技术大学 力学与工程学院, 辽宁阜新 123000; 2. 辽宁工程技术大学 建筑工程学院, 辽宁阜新 123000)

摘要: 为研究侧限压缩试验条件下矽石充填材料的变形特性及其颗粒分布关系,以抚顺西露天矿矽石为研究材料,选取矽石颗粒粒径为 0~5mm、0~10mm、0~20mm、5~10mm、5~20mm 和 10~20mm 的 6 组矽石充填材料,采用自制的钢桶,通过侧限压缩试验研究压缩过程中矽石变形特性;对压缩后矽石进行筛分试验,研究其颗粒分布特征;同时,采用分形维数进一步描述破碎矽石的颗粒分布状况。结果表明:不同粒径级矽石充填材料受压过程中,应力应变关系呈现对数分布关系。压缩初期为矽石充填体变形发展阶段,随着载荷的增加,矽石充填材料变形趋于稳定,0~20mm 矽石粒径组合应变值最低;连续级配矽石对比非连续级配矽石表现出更稳定的粒径变化特征;在双对数坐标系下,矽石质量与粒径的夹角为 8°~12°,矽石受压过程中分形维数变化幅度稳定;0~20mm 矽石粒径组合分形维数的极差最小。

关键词: 侧限压缩试验; 矽石充填材料; 变形特性; 颗粒分布; 分形维数

中图分类号: X751 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-21-103

0 引言

在对矿山开采时,矿区下的矿产资源被采出,导致采空区围岩应力重新分布,使上覆岩层下沉,从而带来地面沉降等一系列问题,对地表的建筑物等结构构成威胁^[1-3]。当前研究表明,充填开采可以有效治理上覆岩层的下沉^[4-6],下沉量的控制与充填体的选取密切相关,因此,为实现对矿产资源的安全开采,需要对充填材料相关性质进行研究。

当前充填开采技术分为固体材料充填、水砂充填、膏体材料充填和超高水材料充填等^[7,8]。其中,固体材料充填施工简单,一直被广泛应用^[9]。矽石与粉煤灰为常见的固体充填材料^[10,11],两种材料均为工业生产中的固体废弃物,其堆积量大,易于获取,将两种固体废料填入采空区,不仅可以减小上覆岩层的下沉量,还可以保护生态环境。在进行固体材料充填时,其充填开采的效果由充填体变形特性决定^[12,13]。李振宇^[14]试验研究了不同矽石粒径和不同矽石粉煤灰配比下充填体的压实特性和变形特征,为选择最佳的充填配比及探究采场围岩变形与矿压显现规律提供了依据。李猛^[15]通过自主研制的岩石材料双向加载系统,对充填矽石的瞬时和蠕变过程中的变形特性进行研究,建立了矽石充填材料瞬时压实本构方程和蠕变压实 NMK 本构模型。兰立信等^[16]通过压实试验,得到了矽石和粉煤灰、矽石和黄土以及风积沙和黄土 3 种固体材料的最佳配比。徐俊明等^[17]通过对矽石与粉煤灰混合材料进行压实试验,研究了矽石-粉煤灰充填材料的基本变形规律。吴晓刚^[18]对常用的几种固体充填材料进行电镜扫描,研究了影响充填效果的内部机理。Li 等^[19]对矽石材料进行 CT 扫描,发现矽石内部整体孔隙

* 收稿日期: 2021-04-27; 修回日期: 2021-08-07

通信作者: 刘向峰(1974-),男,博士,教授,主要从事矿山灾害力学方面的研究。Email: liuxiangfeng.lntu@outlook.com

率的变化主要由大空隙引起。赵昕楠等^[20]研究不同比例材料混合掺杂条件下含水量和密度对充填材料压实度、流变时间相关特性曲线的影响,得出了最佳压实度和密度的矸石与粉煤灰的混合比例。

综上所述,现有对于充填材料的研究主要集中在矸石充填材料宏观受压变形特性方面。在矸石受压过程中,由于矸石颗粒的移动、挤压和破碎,导致矸石颗粒分布特征发生改变,从而影响矸石充填材料的力学性质。为了明确矸石充填材料在受压后的颗粒变化特征,本文通过侧限压缩试验,对压缩后矸石充填材料的变形特性和颗粒分布特征进行研究,并进一步采用分形维数对压实后矸石颗粒分布特征进行了描述。

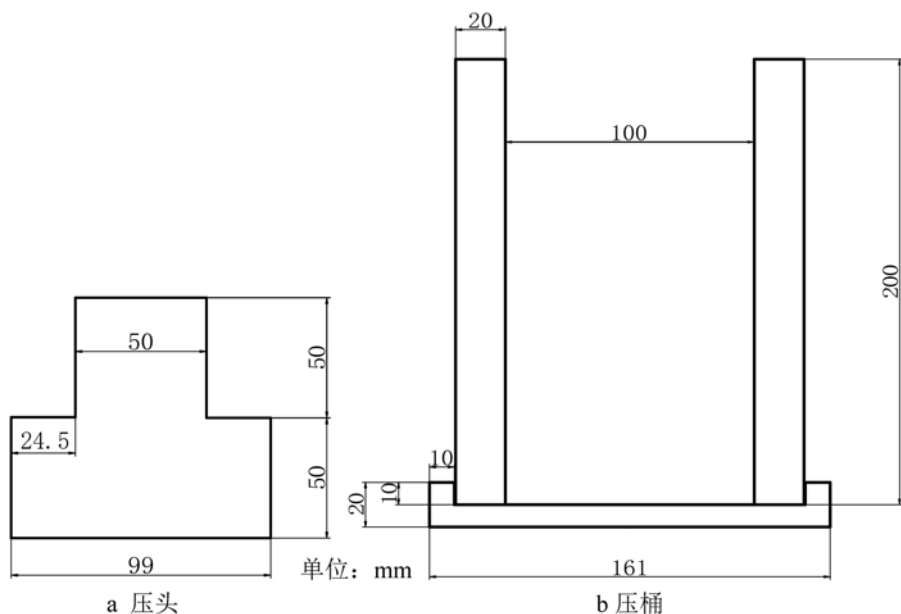


图1 试验模具图

Fig. 1 Test mold diagram

1 研究方法

1.1 试验材料

试验所用矸石取自抚顺西露天矿。矸石以小粒径矸石为主,由于堆放时间较长,略微风化。将矸石筛分,筛分粒径为0~5mm、5~10mm、10~20mm。其中,10~20mm粒径占比为57.25%,5~10mm粒径占比为31.26%,0~5mm占比为11.49%。侧限压缩装置为自制圆柱形钢桶,如图1所示,钢桶的壁厚为20mm,钢桶内部直径为100mm,深度为200mm。试验过程中,通过压力机对圆柱形压盘加载,为了保证试验结果的可靠性,需要对钢桶的强度进行校核,本文试验压力机加载最大轴向应力设置为20MPa,侧向压力系数取0.7,则内压力为14MPa。材料选用45#钢,其屈服强度为355MPa,取安全系数 $n=2$,则钢筒表面应力为177.5MPa。根据弹性力学公式,厚壁圆筒受内压时,筒壁表面拉应力由式(1)计算。

$$\sigma_{\psi} = \frac{a^2 q_1}{b^2 - a^2} \left(1 + \frac{b^2}{\rho^2} \right) \quad (1)$$

式中: q_1 为内压力; a 为圆筒内半径; b 为圆筒外半径; ρ 为圆筒任意位置到圆心的距离; σ_{ψ} 为筒壁表面拉应力(环向应力)。由式(1)可以看出,当 $\rho=a$ 时,拉应力值最大,其值为

$$(\sigma_{\psi})_{\max} = \frac{q_1 (a^2 + b^2)}{b^2 - a^2} \quad (2)$$

为了保证足够的刚度要求,材料抗拉强度不可以超过极限强度,即需要满足 $(\sigma_{\psi})_{\max} \leq 177.5 \text{MPa}$ 。本文试验内径选择100mm,代入式(2)后经计算得 $b \geq 58 \text{mm}$,已知钢桶半径为50mm,则壁厚需要大于8mm,因此选取壁厚20mm满足强度要求。

1.2 试验方案

将筛分后的矽石进行粒径组合,选择 0~5mm、0~10mm、0~20mm、5~10mm、10~20mm、5~20mm 的 6 组矽石粒径组合,按筛分粒径质量均匀分配,采用搅拌棒将每组矽石搅拌均匀。为了降低充填材料与钢桶表面摩擦的影响,每次试验前在钢桶内部涂抹一层黄油,将配比后的矽石粒径组合装入钢桶内,分 5 次装填,每次装填通过人工振捣对矽石材料初步密实,每次试验振捣 10 次,直至矽石材料装满,放上压盘后开始试验。试验所采用的加载装置为 YAW-2000kN 电液伺服压力试验机,通过电脑控制加载条件,自动采集试验过程中的位移、载荷和时间等信息。试验加载速率设定为 0.2kN/s。对每组矽石进行压应力水平为 5MPa、10MPa、15MPa、20MPa 的侧限压缩试验,试验装置如图 2 所示。

1.3 矽石颗粒分布特征

侧限压缩试验完成后,取出矽石材料,将受压后的矽石材料分散,采用粒径筛筛分,粒径筛孔径选取为 0.15mm、0.3mm、0.45mm、0.6mm、1mm、2mm、5mm 和 10mm,每次筛分的时间为 5min,筛分后,采用天平(精度±0.01g)对筛分后矽石称重,记录每组矽石材料筛分后的颗粒质量,用于统计矽石颗粒分布特征。

1.4 矽石粒径的分形特征

为了从微观角度研究矽石充填体压实后的粒径分布规律,采用分形方法对粒径分布进行描述。分形维数是用来描述物体局部与整体在某一方面相关性的一个尺度,即对于一个对象,采用非整数的尺度去度量其不规则性与复杂程度,这个非整数就是材料的分形维数。矽石充填体压实与破裂均属于能量耗散过程,具有自相似性,符合分形的基本条件。通过材料颗粒数量与特征尺度的关系,将分形维数定义为

$$N \propto r^{-D} \tag{3}$$

式中: N 为特征尺度(如颗粒的粒径)大于 r 的个数; D 为分形维数。从粒径角度分析压实后矽石的分形维数,粒径大于 r 的颗粒个数为

$$N(x > d) = Cd^{-D} \tag{4}$$

式中: C 为比例系数,从矽石的质量角度出发,粒径小于 d 的矽石质量为

$$M_d(x < d) = \int_{d_m}^d \rho x^3 dN(x) \tag{5}$$

$$dN(x) = CDx^{-D-1} dx \tag{6}$$

式中: s 为形状系数; d_m 为矽石最小粒径; ρ 为矽石密度,经计算可得质量为

$$M_d(x < d) = \frac{CD\rho s}{3-D} (d^{3-D} - d_m^{3-D}) \tag{7}$$

将矽石最大粒径代入式(7),计算得出矽石总质量,记为 M_T ,进而可以计算得到矽石不同粒径质量的累计关系:

$$\frac{M_d(x < d)}{M_T} = \frac{d^{3-D} - d_m^{3-D}}{d_M^{3-D} - d_m^{3-D}} \tag{8}$$

对于压碎后的矽石材料,假设最小粒径 $d_m=0$,得到最终的分形维数计算式:

$$\frac{M_d(x < d)}{M_T} = \left(\frac{d}{d_M} \right)^{3-D} \tag{9}$$

式中: d 为矽石粒径; d_M 为矽石历经组合中最大的矽石粒径; $M_d(x < d)$ 为矽石粒径小于 d 的矽石质量; M_T 为矽石总质量。从式(9)可以看出,双对数曲线 $\lg(M_d/M_T) - \lg(d/d_M)$ 的斜率为 $3-D$ 。对矽石质量与粒径分布在双对数坐标系下的关系进行换算,可以得到压实后矽石的分形维数 D 。

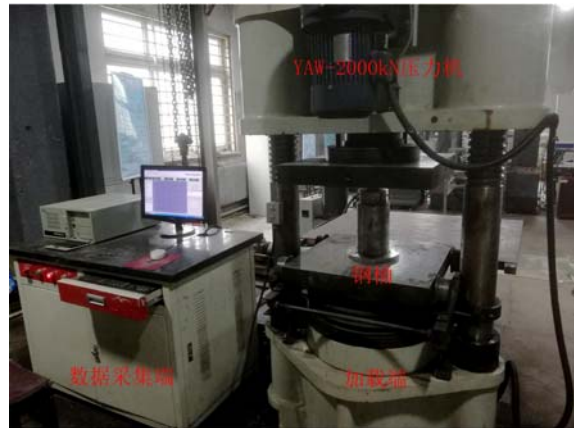


图 2 侧限压缩试验装置
Fig. 2 Confined compression test

2 结果与讨论

2.1 矽石压实变形特征分析

图3给出了不同最大载荷下各个粒径组合矽石应力应变($\sigma-\epsilon$)关系。由图3可知,在不同应力水平下,矽石应力-应变曲线均呈现对数分布关系。在应力水平达到18MPa后,各粒径组合矽石的后续应变仅占总应变的2%左右,应力应变曲线近似水平,说明变形趋于稳定。这是因为在试验前期,颗粒间存在大量孔隙,在加载初期由于矽石受压应力的作用,矽石颗粒间移动,内部孔隙快速缩小。随着压应力水平的提高,内部矽石开始出现部分破碎,碎小矽石填入孔隙中,矽石颗粒间接触点逐渐增多,颗粒与颗粒之间的平均应力减小,随着加载的持续进行,充填材料由散体介质向连续介质转变,在这过程中矽石被逐渐压实,变形趋势逐渐减缓,并最终到达稳定。观察曲线分布关系可以发现,各组应力应变曲线在图3中存在交叉,尤其是10~20mm矽石粒径组合和0~20mm矽石粒径组合,在试验前期,10~20mm矽石粒径组合的应变小于0~20mm矽石粒径组合,随着试验的持续进行,10~20mm矽石粒径组合应变大于0~20mm矽石粒径组合,且在4种压应力水平下均出现交叉。这主要是由于10~20mm矽石粒径大,矽石与矽石之间的摩擦力较大,试验前期不容易造成矽石颗粒间的移动,但最终10~20mm矽石粒径组合中孔隙多于0~20mm矽石粒径组合,因此随着压应力水平的提高,10~20mm矽石粒径组合的应变增幅较大,10~20mm矽石粒径组合的应变大于0~20mm矽石粒径组合。由应力应变曲线可知,随着载荷的增加,在4种应力水平下,0~20mm矽石粒径组合的应变最小,且后期增长趋势最缓慢。矽石粒径的不同会改变矽石材料的变形特性。当加载至20MPa时,0~20mm矽石粒径组合的应变值最小,仅为32.6%,说明其抵抗变形能力最强,为本次研究的最佳充填材料。

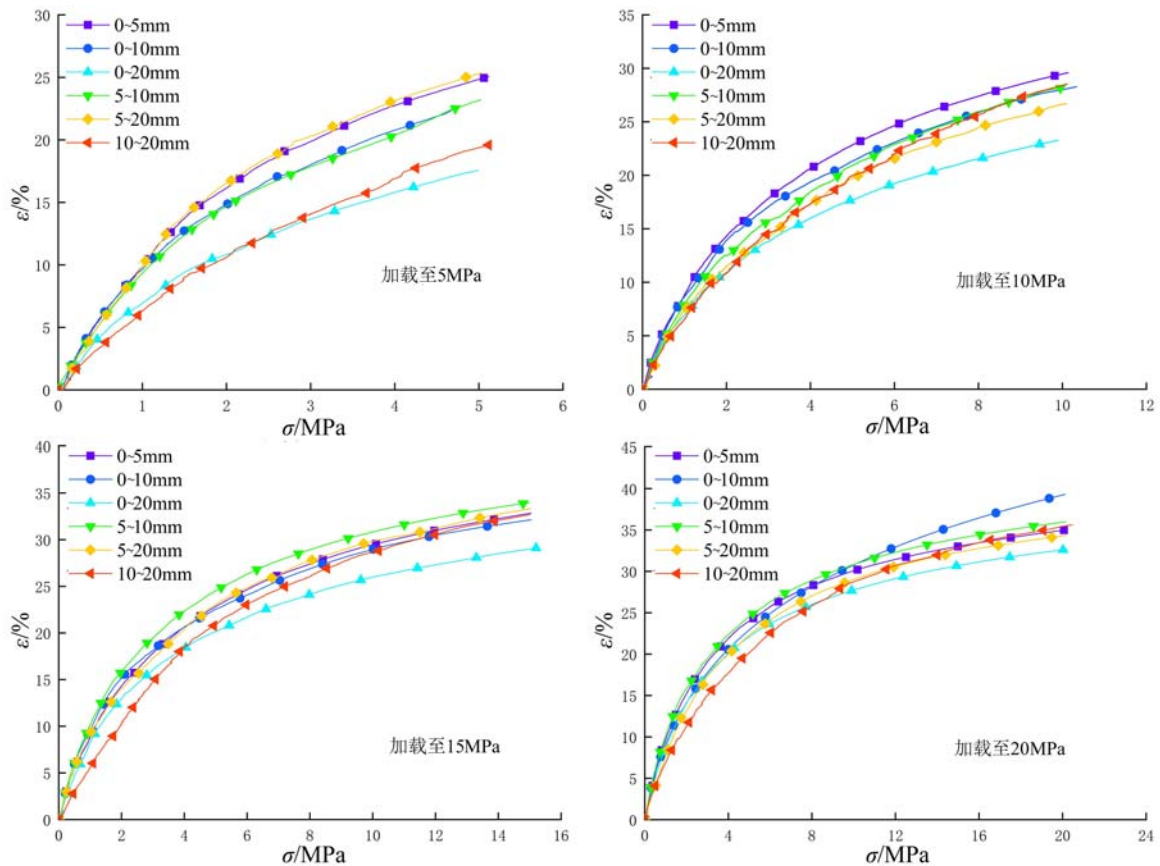


图3 充填矽石不同应力水平下的应力-应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curve at different stress levels of filled vermiculite

2.2 矽石颗粒分布特征

对压实后每组矽石进行筛分,以矽石粒径为横坐标,通过率(过筛矽石质量/矽石总质量)为纵坐标,画出矽石粒径分布关系如图4所示。

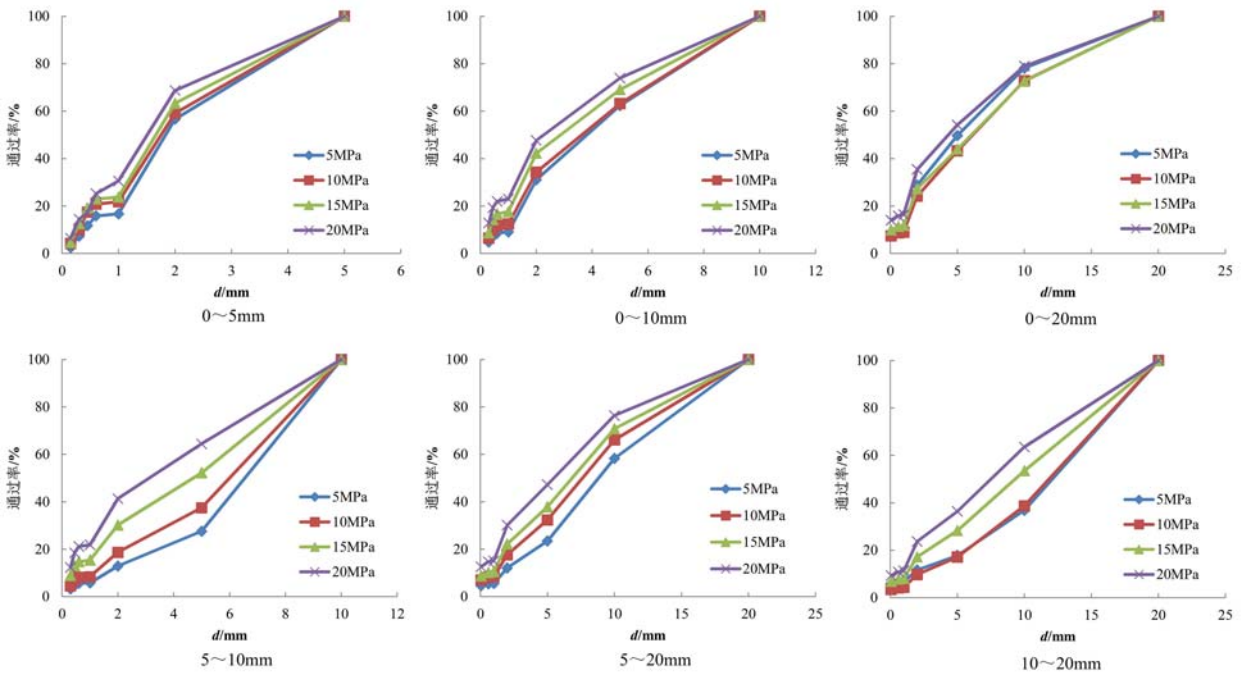


图4 矽石粒径分布图

Fig. 4 Vermiculite particle size distribution map

从图4中可以看出,当矽石颗粒组合为连续级配分布时,通过率曲线分布密集,换言之,曲线形态保持相似性,破碎较为稳定。当矽石颗粒组合非连续时,通过率曲线分布稀疏,尤其是5~10mm矽石粒径组合,说明内部破碎更加复杂,破碎程度高。随着应力水平的提高,6组矽石粒径组合在相同粒径通过率均提高,对比1mm以下细小矽石颗粒可知,细小颗粒的含量随载荷的增加而增加,矽石由于受力,均出现破碎现象,且破碎现象因矽石粒级组合的不同而发生变化。从6组矽石粒径组合矽石的粒径变化规律可以看出,连续级配矽石对比非连续级配矽石表现出更稳定的粒径变化特征。

2.3 矽石粒径分形特性

将压实后的矽石质量与粒径的关系绘制在双对数坐标系中,其数据点如图5所示,由图可以看出数据点分布比较集中。图中横坐标表示矽石粒径在对数坐标系中的分布,纵坐标表示某一粒径矽石的质量在对数坐标系下的分布,在双对数坐标系下,对于同一粒径,其质量分布越大,则矽石内部小粒径矽石所占比重越高,矽石总体粒径就越小。对数据点进行线性拟合,在双对数坐标系下,可以发现矽石质量与粒径的夹角为 $8^{\circ}\sim 12^{\circ}$,各组矽石粒径组合受压后的分形特征呈现出较稳定的变化规律。在相同的粒径组合下,随着应力水平的提高,拟合直线的斜率逐渐减小,说明随着应力的增加,矽石充填体内部的分形维数逐渐增大。

为了更直观地反映各组矽石分形维数的关系,绘制出不同压应力水平下分形维数的变化趋势如图6所示。随着压应力水平的提高,矽石的分形维数呈现逐渐增加的现象,说明随着应力水平的提高,矽石内部出现破碎现象。在最大粒径分别为20mm、10mm、5mm时,分形维数分别为2.5、2.1和2.0,说明随着应力的增加,矽石逐渐被压实,矽石内部不再发生大量的颗粒破碎现象;同时,由于颗粒之间的紧密接触,使得颗粒间重新排列变得困难。结合图4与图6可以发现,分形维数较大的矽石粒径组合体,其碎块多,体积小,破碎程度高。根据矽石分形维数变化特征,统计得到矽石充填体分形维数的数值见表1。根据表中数据可知,分形维数极差最小的为0~20mm矽石粒径组合。说明在该组粒径组合下,载荷对矽石充填体的粒径分布特征影响最小,矽石破碎程度最小。

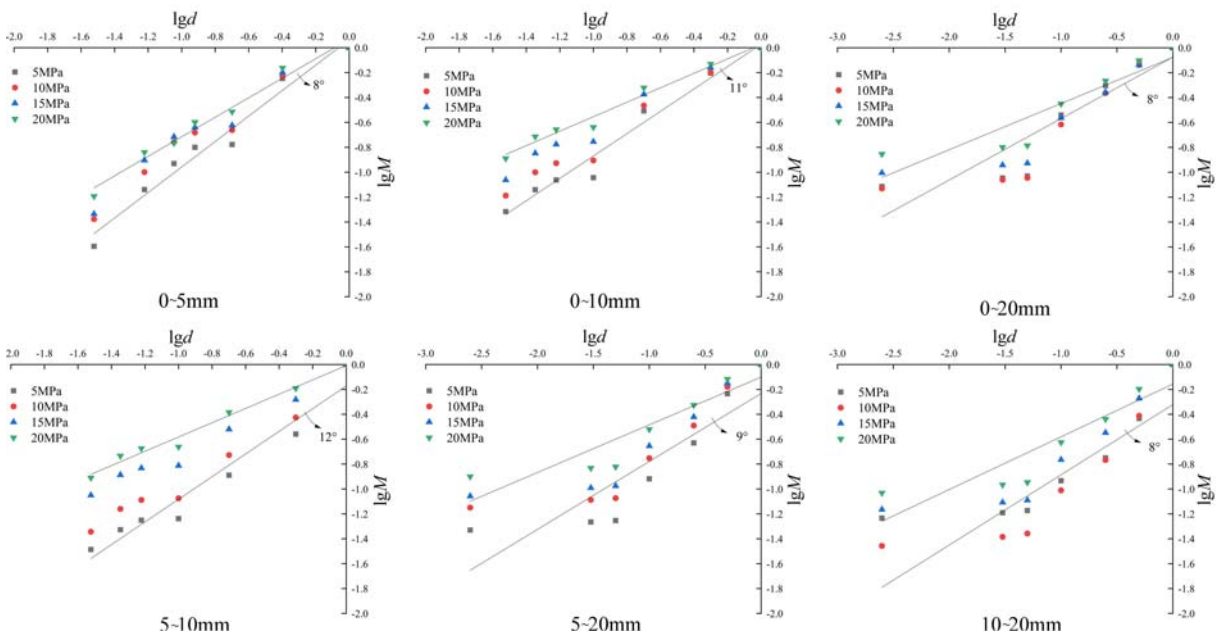


图5 lgM与lgd双对数分布图

Fig. 5 lgM and lgd double logarithmic distribution

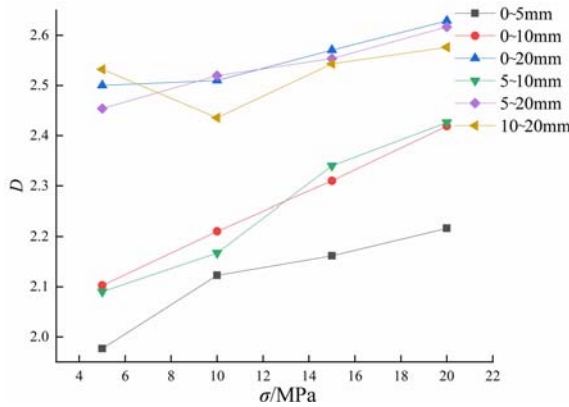


图6 矽石粒径分形维数与压应力的关系曲线

Fig. 6 Relationship between fractal dimension of vermiculite particle size and stress

表1 矽石分形维数极差统计

Tab. 1 Statistics of meteorite fractal dimension

分形维数	0~5mm	0~10mm	0~20mm	5~10mm	5~20mm	10~20mm
D_{min}	1.98	2.10	2.51	2.09	2.45	2.44
D_{max}	2.22	2.42	2.63	2.43	2.62	2.57
极差	0.24	0.32	0.12	0.34	0.17	0.13

3 结论

通过对碎小矽石进行侧限压缩试验,研究了不同载荷矽石的变形特征及颗粒分布特征,得出如下结论:

- (1) 随着压应力的提高,矽石粒径组应力应变曲线由线性分布逐渐转变为对数分布。对比各粒径组应变值得出,0~20mm 粒径组应变值最小。
- (2) 压缩初期为矽石充填体变形发展阶段,随着压缩试验的进行,矽石充填材料变形趋于稳定。
- (3) 在6组矽石的侧限压缩试验中,细小颗粒含量随应力水平的提高逐渐增加,质量与粒径的数据

点在双对数坐标系中数据点分布集中,分形维数变化幅度稳定。

(4) 6组矽石分形维数均随着压应力水平的增加而增大,由于矽石压实使得分形维数最终趋近于一个定值。0~20mm矽石粒径组合分形维数的极差最小。

参考文献:

- [1] 梁冰,刘晓东,金佳旭,等. 三向加载下粒径级配对接石压缩特性的影响[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2020, 39(2):99-106 (LIANG Bing, LIU Xiaodong, JIN Jiaxu, et al. The influence of particle size gradation on the compression characteristics of gangue under three-way loading[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science Edition), 2020, 39(2):99-106 (in Chinese))
- [2] Meng Li, Jixiong Zhang, Zhongya Wu, et al. Calculation and monitoring analysis of stress distribution in a coal mine gob filled with waste rock backfill materials[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2019, 12(14):418.
- [3] 赵海军,马凤山,徐嘉谟,等. 金属矿充填开采岩体移动对竖井围岩的变形破坏[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(2):340-348 (ZHAO Haijun, MA Fengshan, XU Jiamo, et al. Deformation and failure of shaft surrounding rock caused by rock mass movement in metal mine filling mining[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(2):340-348 (in Chinese))
- [4] Wu D, Luo F, Li M, et al. Macroscopic and microscopic study on the compression bearing characteristics and deformation failure mechanism of gangue with different particle sizes[J]. Powder Technology, 2021, 383:198-211.
- [5] Chen S, Du Z, Zhang Z, et al. Effects of red mud additions on gangue-cemented paste backfill properties[J]. Powder Technology, 2020, 367:833-840.
- [6] Chen S, Du Z, Zhang Z, et al. Effects of chloride on the early mechanical properties and microstructure of gangue-cemented paste backfill[J]. Construction and Building Materials, 2020, 235:117504.
- [7] 徐晓冬,孙光华,刘祥鑫,等. 充填体损伤演化量化研究[J]. 实验力学, 2019, 34(5):864-872 (XU Xiaodong, SUN Guanghua, LIU Xiangxin, et al. Quantitative study on the damage evolution of backfill [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2019, 34(5):864-872 (in Chinese))
- [8] 李杨,孙光华,刘祥鑫,等. 充填体声发射分形特征及损伤演化试验研究[J]. 实验力学, 2019, 34(6):1053-1060 (LI Yang, SUN Guanghua, LIU Xiangxin, et al. Experimental study on the fractal characteristics of acoustic emission and damage evolution of backfills[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2019, 34(6):1053-1060 (in Chinese))
- [9] 刘建功,王翰秋,赵家巍. 煤矿固体充填采煤技术发展回顾与展望[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(9):27-38 (LIU Jianguo, WANG Hanqiu, ZHAO Jiawei. Review and prospect of solid filling mining technology development in coal mines[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(9):27-38 (in Chinese))
- [10] 江飞飞,周辉,盛佳,等. 完全充填开采下地表变形特征分析及现状评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(10):2344-2358 (JIANG Feifei, ZHOU Hui, SHENG Jia, et al. Analysis and evaluation of surface deformation characteristics under the condition of completely backfill mining [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(10):2344-2358 (in Chinese))
- [11] Li J, Wang J. Comprehensive utilization and environmental risks of coal gangue: a review[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 239:117946.
- [12] 余伟健,冯涛,王卫军,等. 充填开采的协作支撑系统及其力学特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(S1):2803-2813 (YU Weijian, FENG Tao, WANG Weijun, et al. Coordination support systems in mining with filling and mechanical behavior[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(S1):2803-2813 (in Chinese))
- [13] 黄志敏. 矽石充填体宏观力学特性及充填综采支架围岩关系研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2016 (HUANG Zhimin. Study on the Macro-Micro mechanical properties of gangue backfilling body and relationship between support and surrounding rock in comprehensive mechanized filling mining[D]. China University of Mining, 2016 (in Chinese))
- [14] 李振宇. 矽石粉煤灰充填开采技术实验探究[D]. 邯郸:河北工程大学, 2016 (LI Zhenyu. Experimental research on mining technology of gangue and fly ash filling[D]. Hebei University of Engineering, 2016 (in Chinese))

- [15] 李猛. 矸石充填材料力学行为及控制岩层移动机理研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2018 (LI Meng. Mechanical behaviour of gangue backfill material and control mechanism of strata movement[D]. China University of Mining, 2018 (in Chinese))
- [16] 兰立信, 李猛, 张强, 等. 典型矿区固体混合充填材料力学特性试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2019, 36(3):593—600, 608 (LAN Lixin, LI Meng, ZHANG Qiang, et al. Experimental study on mechanical properties of solid mixed filling materials in typical mining areas[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2019, 36(3): 593—600, 608 (in Chinese))
- [17] 徐俊明, 张吉雄, 黄艳利, 等. 充填综采矸石-粉煤灰压实变形特性试验研究及应用[J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(1):158—162 (XU Junming, ZHANG Jixiong, HUANG Yanli, et al. Experimental research on the compress deformation characteristic of waste-flyash and its application [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2011, 28(1):158—162 (in Chinese))
- [18] 吴晓刚. 固体充填材料力学特性研究及应用[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014 (WU Xiaogang. Research and application of mechanical properties of solid filling materials[D]. China University of Mining, 2014 (in Chinese))
- [19] Li J, Huang Y, Gao H, et al. Transparent characterization of spatial-temporal evolution of gangue solid wastes' void structures during compression based on CT scanning[J]. Powder Technology, 2020, 376:477—485.
- [20] 赵昕楠, 节茂科, 张吉雄. 采后充填固体充填材料力学特性测试研究[J]. 煤矿开采, 2010, 15(5):18—20, 72 (ZHAO Xinnan, JIE Maoke, ZHANG Jixiong. Test research on mechanical characteristics of post-mining filling solid filling materials[J]. Coal Mining, 2010, 15(5):18—20, 72 (in Chinese))

Research on deformation characteristics and particle distribution of gangue filling material under confined compression test

LIU Xiangfeng¹, HAO Guoliang¹, LI Xilin², WANG Laigui¹

(1. College of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, China;

2. College of Architecture and Mechanics, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, China)

Abstract: To study the deformation characteristics and particle distribution relationship of the gangue filling material under the condition of confined compression test, the gangue of Fushun West Open-pit Mine was used as the research material, selects 6 groups of gangue filling materials of 0~5mm, 0~10mm, 0~20mm, 5~10mm, 5~20mm and 10~20mm. A self-made steel drum was used to carry out a confined compression test to study the deformation characteristics of the gangue during compression, and a screening test was carried out on the gangue after compression to study its particle distribution characteristics. At the same time, the fractal dimension was used to further describe the particle distribution of the broken gangue. The results show that the stress-strain relationship of the gangue filling materials of different particle sizes is in a logarithmic distribution during the compression process. The initial stage of compression is the development stage of the deformation of the gangue filling body. With the progress of the compression test, the deformation of the gangue filling material tends to be stable, and the combined strain value of the 0~20mm gangue particle size is the lowest; compared with discontinuously graded gangue, the continuous graded gangue exhibits more stable particle size change characteristics. Furthermore, in the double logarithmic coordinate system, the angle between the mass of the gangue and the particle size is $8^{\circ}\sim 12^{\circ}$, and the fractal dimension of the gangue is stable during the compression process. Moreover, the range of the combined fractal dimension of the particle size of the gangue from 0mm to 20mm is the smallest.

Keywords: confined compression test; gangue filling material; deformation characteristics; particle distribution; fractal dimension