

陆伟, 路瑶, 廖昌龙, 等. 大粒径自然-饱水状态破碎矽石阶段变形特征研究[J]. 矿业科学学报, 2024, 9(6): 953-963. DOI: 10.19606/j.cnki.jmst.2024903

LU Wei, LU Yao, LIAO Changlong, et al. Stage deformation characteristics of natural and saturated crushed gangue with large particle size[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2024, 9(6): 953-963. DOI: 10.19606/j.cnki.jmst.2024903

大粒径自然-饱水状态破碎矽石阶段变形特征研究

陆伟¹, 路瑶^{1,2}, 廖昌龙¹, 李青海², 李炜煜¹, 江宁², 牟文强³, 王昌祥¹

- 安徽理工大学安全科学与工程学院, 安徽淮南 232001;
- 山东科技大学安全与环境工程学院, 山东青岛 266590;
- 东北大学资源与土木工程学院, 辽宁沈阳 110000

摘要:通过大粒径矽石压缩试验,研究了自然状态与饱水状态破碎矽石加载-恒载阶段的变形特征与能耗规律。结果表明,加载阶段变形量占总变形量超过90%,荷载梯度对前期位移变形影响较大,水对蠕变阶段位移变形影响较大;约1/3的功用于摩擦能耗,约2/3用于破碎能耗;与自然状态相比,饱水状态下全阶段能耗降低,能耗的变化速率也降低。位移曲线呈现出明显的急剧变形、线性变形以及蠕变变形3阶段特征,根据位移曲线的一阶导、二阶导的特征,提出了急剧-线性-蠕变3阶段变形的判断依据,当破碎矽石变形超过15%时,承载效果较好。在饱水状态下破碎矽石表现出更均匀的内部力链分布,裂纹数目、裂纹增长速率和二次破碎率均显著高于自然状态。自然、饱水状态下破碎矽石顶部空隙率超过0.65,二次破碎率最高;底部空隙率小于0.45,二次破碎率最低;中部空隙率稳定在0.5左右,二次破碎流失量和顶部滑动滞留量可相互抵消。该研究结果可以为煤矿矽石充填稳定性监测及预测提供参考数据。

关键词:含水状态;承压变形;能耗特征;二次破碎率;空隙率

中图分类号:TD 35

文献标志码:A

文章编号:2096-2193(2024)06-0953-11

Stage deformation characteristics of natural and saturated crushed gangue with large particle size

LU Wei¹, LU Yao^{1,2}, LIAO Changlong¹, LI Qinghai², LI Weiyu¹,
JIANG Ning², MU Wenqiang³, WANG Changxiang¹

- College of Safety Science and Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China;
- College of Safety and Environmental Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao Shandong 266590, China;
- College of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang Liaoning 110000, China

Abstract: This study investigates the deformation characteristics and energy consumption patterns of natural and saturated crushed gangue with large particle size during loading-constant load stage through compression test. The results show that: 1) The deformation of natural and saturated crushed gangue in the loading stage accounts for more than 90% of the total deformation. The load gradient significantly affects the displacement deformation in the early stage, and the water also exerts major influence on the displacement deformation in the creep stage. 2) Under natural and saturated conditions, about 1/3 of

收稿日期:2024-05-12 修回日期:2024-10-17

基金项目:国家重点研发计划(2023YFC3009100, 2023YFC3009102);国家自然科学基金(52304198)

作者简介:陆伟(1977—),男,四川广安人,博士,教授,主要从事煤矿采空区热动力灾害治理方面的研究工作。E-mail: wei.lu@aust.edu.cn

the work is consumed by friction, while 2/3 by crushing; 3) Compared with the natural state, energy consumption and its variation rate are reduced in the full stage of saturated crushed gangue. The displacement curve shows an explicit three-stage pattern of sharp deformation, linear deformation and creep deformation. According to the first-order and second-order derivatives of the displacement curve, we proposed the judgment basis of the threestages of sharp-linear-creep deformation. When the deformation of crushed gangue exceeds 15%, we observed improved bearing capacity. By observing the gangue compression process, we found that the crushed gangue shows a more uniform internal force chain distribution in the saturated state, with a higher number of cracks, crack growth rate and secondary crushing rate than those in the natural state. Under natural and saturated conditions, when the top void ratio of crushed gangue exceeds 0.65, we observed the maximum secondary crushing rate, with the bottom void ratio of less than 0.45, as well as the minimum secondary crushing rate, with the middle void ratio remaining stable at about 0.5. The secondary crushing loss and the top sliding retention can offset each other. The present study could provide reference for the design, stability monitoring and prediction of coal gangue filling.

Key words: water-bearing state; deformation under compression; energy consumption characteristics; secondary crushing rate; void ratio

为实现矸石的综合利用、科学合理地解决“三下一上”压煤,综合机械化固体充填采煤技术逐渐发展,并大量应用于现场。经过近20年发展,煤矿矸石充填已经取得了关键性的突破,尤其是随着固体充填采煤液压支架的不断升级改造,目前可以直接在井下构建煤炭开采、煤矸分选、矸石充填与“岩层移动主动控制、沿空留巷、瓦斯抽采、灾害防治、保水开采”一体化生产系统,形成了煤炭“采选充+X”(控、留、抽、防、保)协同生产模式^[1-2]。

破碎矸石由于其可压缩性,势必留下空隙,影响地表环境。矸石充填开采地下煤层后,在重力和上覆岩层荷载的作用下,上覆地层仍会发生一系列弯曲、沉陷、破裂和移动破坏^[3-5]。在上覆岩层荷载作用下,破碎矸石会有不同程度的变形,其变形特征直接关系到上覆岩层导水断裂带的发展特征及采空区的地表稳定性^[6-7]。孙希奎等^[8]、张吉雄等^[9]、余伟健等^[10]分析了破碎矸石充填开采后顶板的二次移动和变形特征。郭忠平等^[11]利用矿压理论、岩板理论及数值模拟方法,对某煤矿矸石条带充填工作面的充填参数进行了优化。

大量的室内矸石压缩实验舱直径一般不超过200 mm,试验结果证明,矸石的压实伴随着矸石破碎的过程,可以借助声发射、直接光学观测等技术手段进行相关监测^[12-14]。在矸石的压实过程中,其变形可以被多种外部因素影响,例如上覆岩层的重力及侧向约束条件^[15-18]、建筑荷载等附加应力^[19]、地下水水位反复或者季节性降雨^[20-24]、加

载模式^[25-26]等。另外,破碎矸石的变形还受到自身强度与粒径级配的影响^[27-29],其中泰波理论^[30]在破碎矸石粒径设计方面有着重要的应用。SALAMON^[31]获取的破碎矸石的应力应变关系,可以较好地描述破碎矸石压实硬化现象。有研究通过一系列压实试验,研究了破碎矸石的压实变形和时间依赖性特征^[32-33]。

上述研究成果可以为预测煤矿矸石充填开采引起的覆岩移动、隔水保护层破坏以及地表沉陷变形等提供参考依据。但是,在破碎矸石压缩试验设计中,对破碎矸石与覆岩运动的相互影响考虑较少。同时,受试验设备和条件的限制,试验舱直径较小,造成破碎矸石的粒径较小,并且一般不能直接观测内部的应力传递与二次破碎等情况。另外,由于地下水位反复或者季节性降雨,采空区矸石常处于不同的含水状态。因此,本文依据破碎矸石充填采场的覆岩运动规律,设计自然、饱水2种状态下破碎矸石的压缩变形试验,结合数值模拟的可视化手段,进行大粒径破碎矸石承压变形的综合研究,重点研究承压变形过程的不同阶段特性及判据、应力传递可视化及二次破碎量化。

1 试验方法

1.1 试验方案

破碎矸石的受力状态与其上覆岩层运动状态紧密相关。根据覆岩运动理论,矸石充填开采时,破碎矸石早期的受力状态可以按下式预计^[34]:

$$\sigma_z = \frac{\gamma h}{K - 1} \quad (1)$$

式中, σ_z 为作用在破碎矸石上的早期荷载, MPa; h 为破碎矸石之上的未充满空间, 即覆岩下方可以运动的空间, 根据现场矸石充填以及离层注浆的经验, 结合嵌固梁模型计算, 取 0.5 m; γ 为覆盖层的体积密度, 设为 25 kN/m³; K 为破碎岩石碎胀系数, 取 1.2~1.25。

因此, 破碎矸石早期受力可以通过式(2)计算:

$$\sigma_z = (4 \sim 5)\gamma h \quad (2)$$

通过计算, 作用在破碎矸石上的早期荷载为 0.06 MPa, 后期荷载根据岩性的不同约为早期荷载的 10~30 倍。试验舱直径 400 mm, 所以试验荷载设置为 75~220 kN, 并考虑设置 2 倍的富裕系数, 即试验荷载设置为 150~440 kN。为了提高充填率, 进行了预压实处理, 自然状态下摩擦力较大, 预加载荷载稍大。

同时, 为了验证饱水与更高荷载同时作用相比于自然状态与较低荷载时是否会引起破碎矸石变形的显著增长, 设计了 2 组试验: 一组自然干燥状态下, 首先进行 30 kN 预加载, 然后采用 0.5 kN/s 的加载速率将轴向荷载增加至 200 kN, 进行干燥蠕变试验, 总时间大约 10 h; 另一组饱水状态下, 首先进行 20 kN 预压实加载, 然后采用 0.5 kN/s 的加载速率将轴向荷载增加至 440 kN, 进行饱水蠕变试验, 总时间大约 10 h。

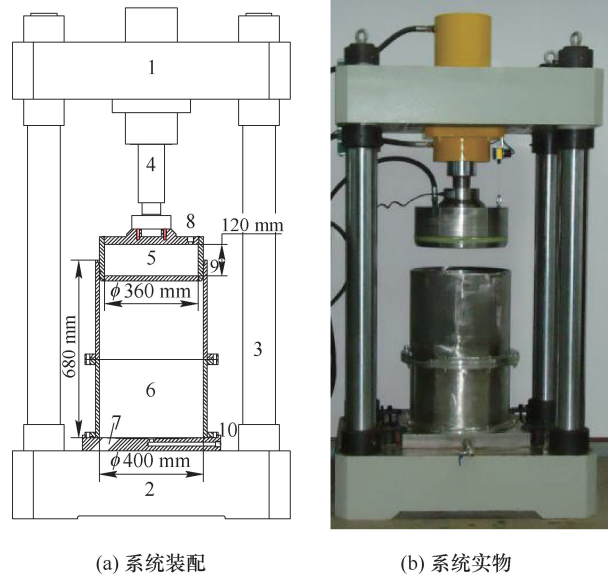
根据国内外学者的研究, 考虑粒径的尺寸效应, 试验舱的直径与破碎岩石的最大粒径比应该大于 5^[35-36], 在该种情况下得到的结果才比较符合实际情况。因为试验舱直径 400 mm, 所以破碎岩石的粒径最大为 80 mm, 试验设置破碎岩石最大粒径为 60 mm。用分级筛将大块岩块粉碎并筛分成 6 种粒径的颗粒, 包括 0~10 mm、10~20 mm、20~30 mm、30~40 mm、40~50 mm 和 50~60 mm。各粒径范围的破碎岩体的比例成正态分布。

1.2 试验系统

破碎岩石变形-渗流试验系统主要由主体承载支架、试验舱、位移应力双控伺服系统组成, 主体结构如图 1 所示。全程通过位移应力双控伺服系统实现计算机自动控制。试验过程中可以实现位移、荷载、水压和水量的实时监测与采集。试验系统轴压不超过 600 kN, 液压缸位移不超过 500 mm, 试验舱直径 400 mm, 试验舱高度 680 mm。

1.3 试验材料

试验选用的岩石为红砂岩。按照国际岩石力



1—试验系统横梁; 2—试验系统底座; 3—立柱; 4—加载油缸; 5—加载压头兼承压水仓; 6—试验舱; 7—试验舱底座; 8—进水口; 9—密封圈; 10—出水(气)口

图 1 破碎岩石变形-渗流试验系统

Fig. 1 Deformation-seepage test system for crushed rock

学试验规程的要求, 将取自煤矿现场的砂岩块加工成 $\phi 50$ mm 的标准试件, 如图 2 所示。对采制的不同含水状态的砂岩试件进行巴西劈裂与单轴压缩试验。自然、饱水状态下砂岩抗拉强度平均值分别为 7.58、6.60 MPa, 饱水状态较自然状态下抗拉强度平均值降低 13%。自然、饱水状态下砂岩试件单轴抗压强度平均值分别为 86.22、73.75 MPa, 饱水状态较自然状态下单轴抗压强度平均值降低约 15%。



图 2 砂岩试件

Fig. 2 Sandstone specimens

2 试验结果及分析

2.1 加载-恒载 2 阶段变形特征分析

自然-饱水状态线性加载过程变形参数统计

见表1。自然状态下加载10 h后,加载-恒载2阶段总应变为0.170 00,总位移为105.06 mm,原破碎矸石高度为618 mm,质量为110 kg,密度 $\rho_{完整}$ 为 $2.556 7 \text{ g/cm}^3$,初始碎胀系数为1.81。加载阶段,应变为0.153 99,位移为95.15 mm,碎胀系数为

1.53,其中预加载阶段应变为0.044 49,位移为27.5 mm,碎胀系数为1.72;恒载阶段,应变为0.016 01,位移为9.91 mm,最终的碎胀系数为1.50。

饱水状态下加载10 h后,加载-恒载2阶段总

表1 自然-饱水状态线性加载过程变形参数统计

Table 1 Deformation parameters of linear loading process under natural and saturated states

加载阶段	变形/mm			应变			碎胀系数		
	开始	结束	变量	开始	结束	变量	开始	结束	变量
自然加载	0	95.15	95.15	0	0.15	0.15	1.81	1.53	0.28
自然恒载	95.15	105.06	9.91	0.15	0.17	0.02	1.53	1.50	0.03
饱水加载	0	103.28	103.28	0	0.17	0.17	1.81	1.51	0.30
饱水恒载	103.28	109.11	5.83	0.17	0.18	0.01	1.51	1.49	0.02

应变为0.175 98,总位移为109.11 mm,原破碎矸石高度为620 mm,初始碎胀系数为1.81。加载阶段应变为0.166 58,位移为103.28 mm,碎胀系数为1.51,其中预加载阶段应变为0.031 42,位移为19.48 mm,碎胀系数为1.753 98;恒载阶段应变为0.009 4,位移为5.83 mm,最终的碎胀系数

为1.49。

试验加载与恒载2阶段位移-荷载曲线如图3所示。可以看出,无论是自然状态还是饱水状态下,加载阶段(去掉预加载阶段)呈现二次多项式增长,恒载阶段呈现对数式增长,且拟合优度极好。

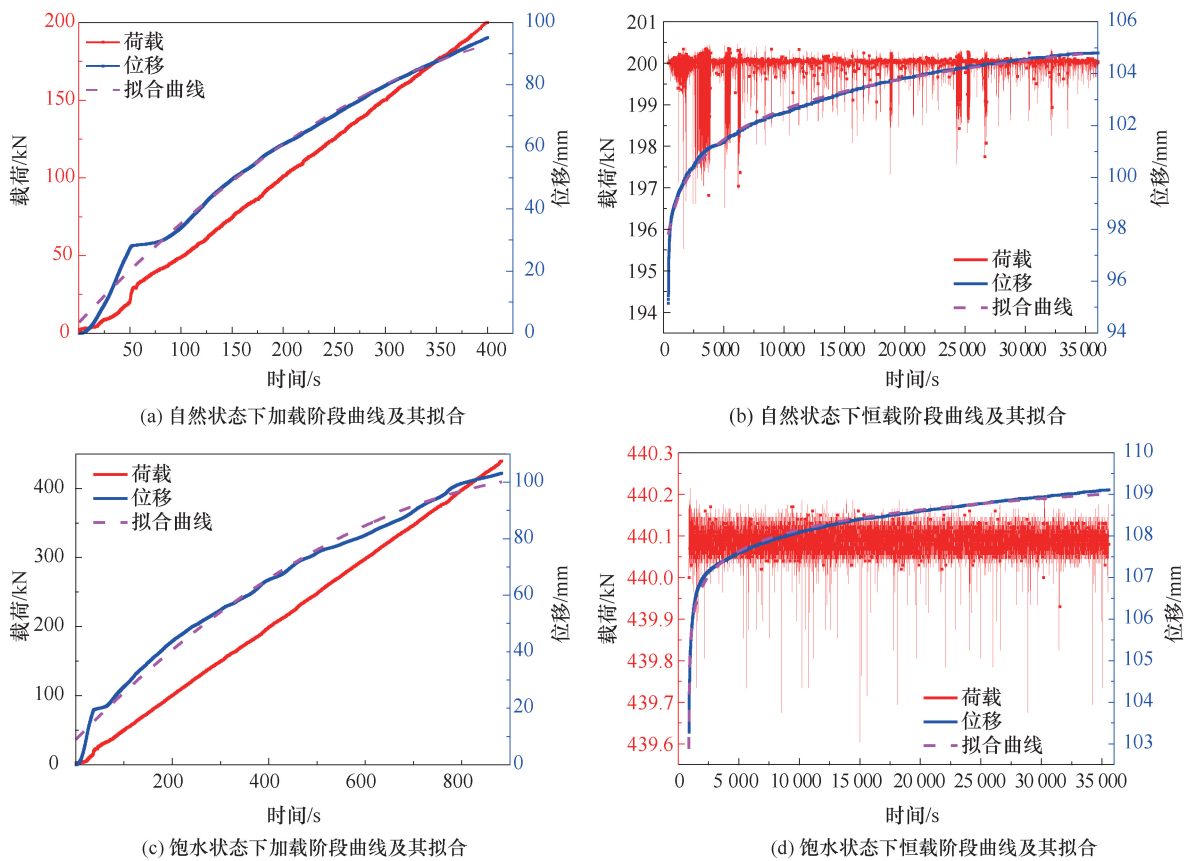


图3 自然-饱水状态下加载与恒载两阶段位移-荷载曲线

Fig. 3 Displacement-load curves under natural and saturated states in the loading and constant load stages

自然加载阶段位移变形量占据全阶段变形量的 90.50%, 饱水加载阶段位移变形量占据全阶段变形量的 94.65%, 恒载阶段的变形量不大。为避免矸石充填前期变形较大, 需对矸石进行合适的预压实处理。矸石充填采空区时, 当顶板与矸石接触时, 矸石处于变形让压的过程, 直到破碎矸石位置调整完毕, 初始压密结束后, 矸石才对顶板起到支撑作用。

通过 2 组数据对比可以得到, 荷载对前期位移变形影响比较大, 对恒载阶段位移变形影响不大; 水对恒载阶段位移变形影响比较大, 对前期位移变形影响不大。这主要是因为前后期破碎矸石变形的形式不同, 故而荷载梯度与水在不同阶段扮演的角色也不同。前期主要发生位置调整滑动变形, 不需要太大的外力即可使破碎岩石滑动变形, 后期主要发生破碎岩石的进一步破碎压缩变形, 荷载梯度已经达到设定最大值的条件下, 在水的润滑、软化双重作用下, 使破碎岩石破碎得更充分, 填充得更密实。2 组试验总变形量近似相等, 说明水对压缩过程主要起加速作用。

2.2 加载-恒载 2 阶段能耗特征分析

在压实的过程中, 破碎岩石空隙闭合、摩擦滑移和挤压破坏都需要耗散能量, 破碎岩石与缸壁之间的摩擦也需要能量耗散。试验机对碎石做的功, 就是碎石所耗散的能量。试验机对单位体积碎石所做的功 W_z 可表述如下:

$$W_z = \int_0^{\varepsilon_a} \sigma d\varepsilon \quad (3)$$

应注意的是, 轴向压实应力由碎石与实验舱之间的摩擦的一部分组成。当轴向压实应力为 σ 时, 侧向应力为 $\sigma_b = \lambda\sigma$ 。根据大量实验结果^[37], 采用侧向压力系数 λ 为 0.43。由此产生的摩擦力是 $\mu\lambda\sigma(\pi DH)$, μ 为破碎岩石与侧壁之间的摩擦系数, 约为 0.25, 在此基础上, 估算碎石与试验舱间摩擦的能量耗散:

$$W_m = \int_0^{\varepsilon_a} \mu\lambda\sigma\pi DH \frac{Hd\varepsilon}{2} = 2\mu\lambda \frac{H}{D} W_z \quad (4)$$

式中, H 、 D 分别为破碎岩石的高度和试验舱的直径; ε 为应变。

在自然状态下, $H=618\text{ mm}$, $H/D=1.545$, 压实荷载作用下, 33% 的功用于碎石与试验舱壁之间的摩擦耗能, 67% 的功用于封闭试验舱壁之间的空隙、摩擦滑移和挤压破坏, 可以称为破碎耗能。在饱水状态下, $H=620\text{ mm}$, $H/D=1.550$, 压实荷载作用下, 33% 的功用于碎石与试验舱壁之间的摩擦耗能, 67% 的功用于封闭试验舱壁之间的空隙、摩擦滑移和挤压破坏。可以看出, 含水状态的不同, 对碎石压缩摩擦和破碎的能量耗散影响不大。

表 2 为不同含水状态不同阶段的能量耗散-应变。其中, S -Ratio 表示不同阶段应变与全阶段应变的比例, E -Ratio 表示不同阶段能耗与全阶段能耗的比例。图 4 为不同含水状态破碎矸石压实过程中能耗。通过图 4 和表 2 可以发现, 在自然状态下, 加载阶段的应变比约为 88%, 能耗比例约为 74%。在饱水状态下, 加载阶段的应变比约为 94%, 能耗比例约为 91%。该试验结果显示, 在加载阶段, 破碎矸石空隙闭合量增长相对较快, 能耗则相对较少, 能量耗散变化相对较慢。虽然破碎矸石在饱水条件下加速变形, 但能量耗散也相应增加。在自然状态下, 恒载阶段的应变比约为 12%, 能耗比例约为 26%。在饱水状态下, 恒载阶段的应变比约为 6%, 能耗比例约为 9%。

综上可以看出, 加载模式决定了同一状态不同阶段能耗的变化率, 饱水状态与自然状态相比, 全阶段能耗降低, 能耗的变化速率也降低。

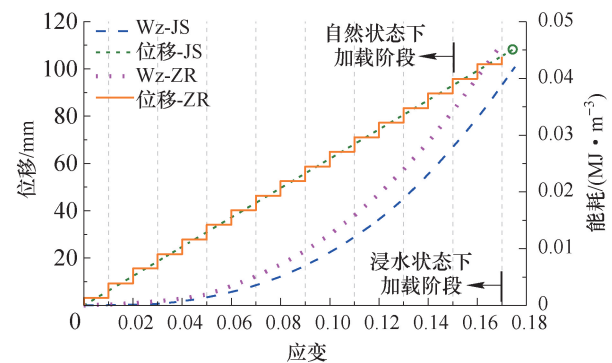


图 4 不同含水状态破碎矸石压实过程中能耗
Fig. 4 Energy dissipation of crushed stones during compaction process

表 2 不同含水状态不同阶段的能量耗散-应变

Table 2 Energy-dissipation-rate-strain under different saturated states in different stages

状态	全阶段		加载阶段			恒载阶段				
	应变	能耗/ (MJ·m ⁻³)	应变	S-Ratio/ %	能耗/ (MJ·m ⁻³)	E-Ratio/ %	应变	S-Ratio/ %	能耗/ (MJ·m ⁻³)	E-Ratio/ %
自然	0.17	0.046 1	0.15	88	0.034 2	74	0.02	12	0.011 9	26
饱水	0.18	0.042 4	0.17	94	0.038 7	91	0.01	6	0.003 7	9

2.3 急剧-线性-蠕变3阶段变形特征分析

图5为自然与饱水状态下的位移及其一阶导、二阶导曲线。表3为不同状态3阶段变形参数。为了方便分析变形的阶段特征,只截取了恒载阶段部分数据。根据位移曲线特征,可以将位移变形曲线划分为急剧变形阶段、线性变形阶段和蠕变阶段。

可以看出,急剧变形阶段,自然、饱水状态下位移曲线增长速度极快,一阶导大于0,波动比较大,二阶导以0为对称急剧波动;线性变形阶段,位移曲线大致为直线,一阶导大于0,波动比较小,大致相等,二阶导自然状态下以0为对称急剧波动,饱水状态下以0为对称轻微波动;蠕变阶段,自然、饱水状态下位移曲线增长极慢,一阶导、二阶导都趋于0。

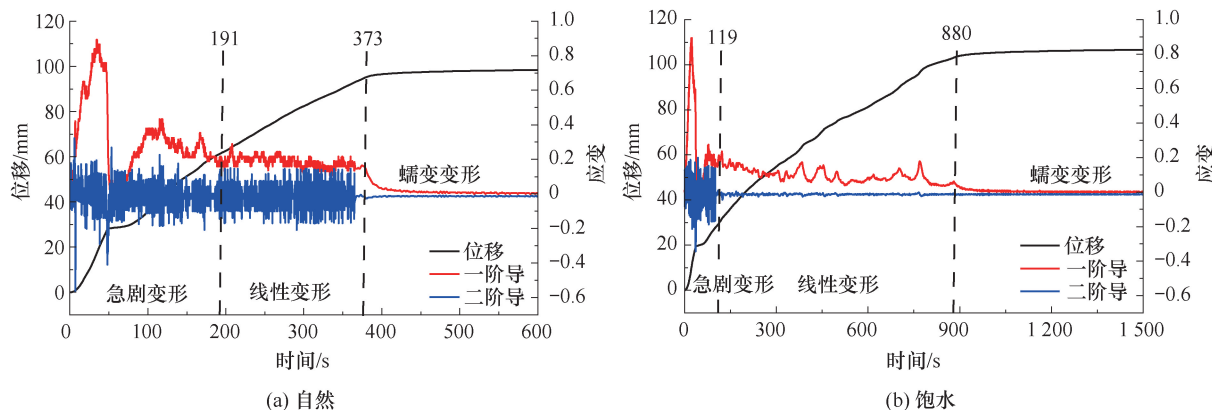


图5 自然与饱水状态下的位移及其一阶导、二阶导曲线

Fig. 5 Displacement and its first-order derivative and second-order derivative under natural and saturated states

表3 不同状态3阶段变形参数

Table 3 Three-stage deformation parameters for different states

状态	原高度/ mm	总位移/ mm	总应变	急剧变形阶段			近线性变形阶段			蠕变变形阶段		
				位移/mm	应变	变形比/%	位移/mm	应变	变形比/%	位移/mm	应变	变形比/%
自然	618	105.06	0.17	61.36	0.10	58	33.54	0.05	32	10.16	0.02	10
饱水	620	109.11	0.18	29.89	0.05	27	73.88	0.12	68	5.34	0.01	5

第1阶段:急剧变形阶段,主要特点是随着荷载逐渐增大,破碎矸石变形急剧增加。自然状态压缩时,位移为61.36 mm,变形比(不同阶段位移与总位移的百分比)为58%,应变为0.10。饱水状态时,位移为29.89 mm,变形比为27%,应变为0.05。与饱水状态相比,自然状态变形量大,说明预压实处理对急剧变形阶段有着重要影响,间接说明饱水有利于变形的稳定进行。

第2阶段:线性变形阶段,主要特点是位移曲线近似为倾斜直线。自然状态压缩时,位移为33.54 mm,变形比为32%,应变为0.05。饱水状态压缩时,变形值为73.88 mm,变形比为68%,应变为0.12。与自然状态相比,饱水状态变形量大,并且近线性阶段持续时间长。这说明水对近线性变形阶段有着重要性影响。

第3阶段:蠕变变形阶段,主要特点是位移曲线近似为水平直线。自然状态压缩时,变形值为10.16 mm,变形比为10%,应变为0.02。饱水状态

压缩时,变形值为5.34 mm,变形比为5%,应变为0.01。与饱水状态相比,自然状态变形量大,说明饱水状态下前期压缩比较充分,蠕变阶段变形相对较小。此时,破碎矸石抵抗变形的能力明显增强。

破碎矸石在受力初期处于急剧变形阶段,基本不对顶板产生抵抗能力,当进入线性变形阶段,破碎矸石对采场围岩或矿柱的支护力学作用才会显现出来,即破碎矸石体积压缩5%~10%以上才有一定的承压能力。当进入蠕变阶段,体积压缩15%~17%以上,破碎矸石可承受较大的压力,抵抗采场围岩变形的能力较大。矸石充填现场操作时,应设置矸石预压实环节,并且保证压实效果,至少进入矸石压缩的线性变形阶段,最好进入蠕变变形阶段。

3 矸石加载可视化研究

3.1 建立模型

图6为矸石样本的数字化三维模型。随机选

取 4 种典型形状矽石作为模型样本并对其进行 CT 扫描和三维重构,得到包含矽石样本数字化三维模型信息的 STL 文件。图 7 为 PFC^{3D} 中建立的矽石模板。将 STL 文件导入 PFC^{3D} (颗粒流程序)中,通过编写命令流来生成矽石样本的 clump 模板文件 (p3clp 文件),以便后续的模拟使用。

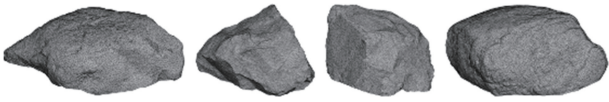


图 6 矽石样本的数字化三维模型

Fig. 6 Three-dimensional digital model of gangue sample

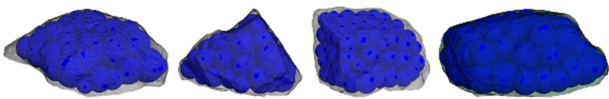


图 7 PFC^{3D} 中建立的矽石模板

Fig. 7 Gangue template built in PFC^{3D}

利用初始时不同粒径矽石空隙率不同的特点以及控制混合后的初始空隙率,实现级配的混合。表 4 为矽石装填后不同粒径分组的初始空隙率

表 4 矽石装填后不同粒径分组的初始空隙率
Table 4 Initial void ratio of different particle size groups after gangue filling

粒径范围/mm	0~10	10~20	20~30	30~40	40~50	50~60
初始空隙率/%	0.565	0.532	0.525	0.522	0.498	0.476

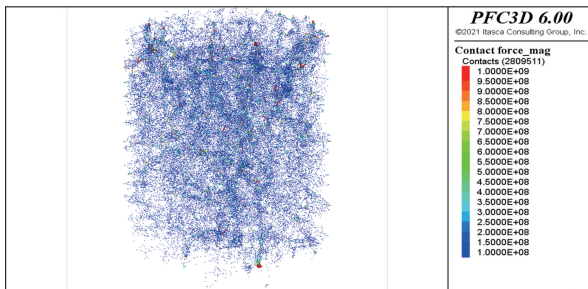
率。混合后的破碎矽石,自然状态下初始空隙率 42.0%,饱水状态下初始空隙率 44.8%。

在进行矽石的 clump 模板替换时发现,粒径小于 5 mm 的矽石颗粒生成数量太多导致计算量非常庞大,又因为实际中对该粒径范围进行分析的必要性不高,所以 0.6~5 mm 的矽石颗粒仍然用 ball 来进行,而其余粒径范围的矽石则使用模板进行替换。岩石内部的接触模型选择平行黏结模型,而岩石之间的模型则选择普通的线性模型。

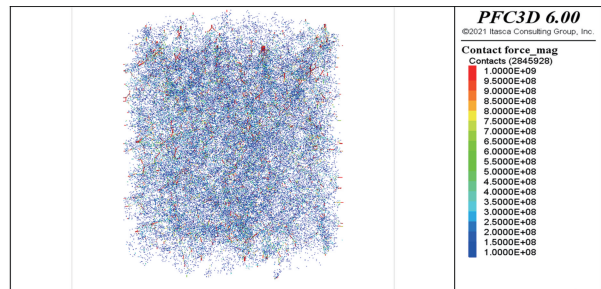
数值模拟的终止触发条件为达到破碎矽石压缩试验的变形量。通过大量模拟试验验证,每隔 80 000 的计算步数保存一次文件比较合理。通过对监测后的文件进行整理,得到自然与饱水状态下的每隔 80 000 计算步数的力链分布、裂纹数以及破碎率的直观统计。

3.2 力链分布

图 8、图 9 为自然状态、饱水状态下不同加载步数破碎矽石加载力链分布。可以看出,受载的破碎矽石之间通过接触模型形成力的网状结构,随着轴向荷载的逐渐增大,应力从矽石试样顶部开始自上而下、自中心向外围传递。在力的传递过程中,力链传递面积逐渐减小。相对于自然状态,饱水状态受载的破碎矽石接触数目多,说明饱水状态破碎矽石内部的应力分布更加均匀。



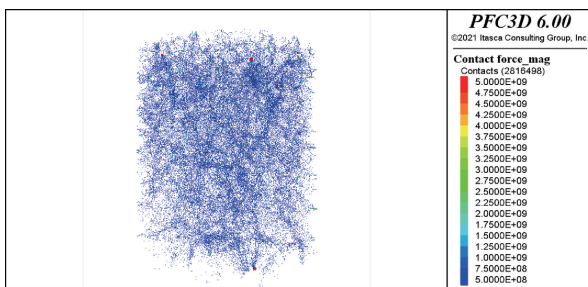
(a) 80 000 步数



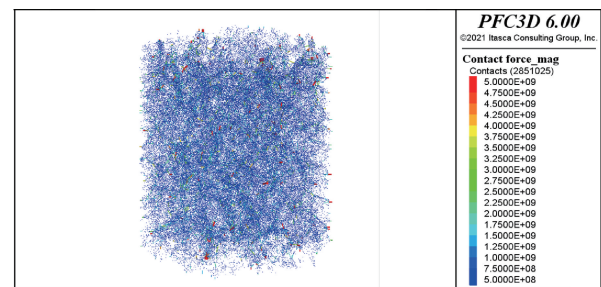
(b) 960 000 步数

图 8 自然状态下不同加载步数破碎矽石加载力链分布

Fig. 8 Distribution of loading force chain at different loading steps under the natural state



(a) 80 000 步数



(b) 960 000 步数

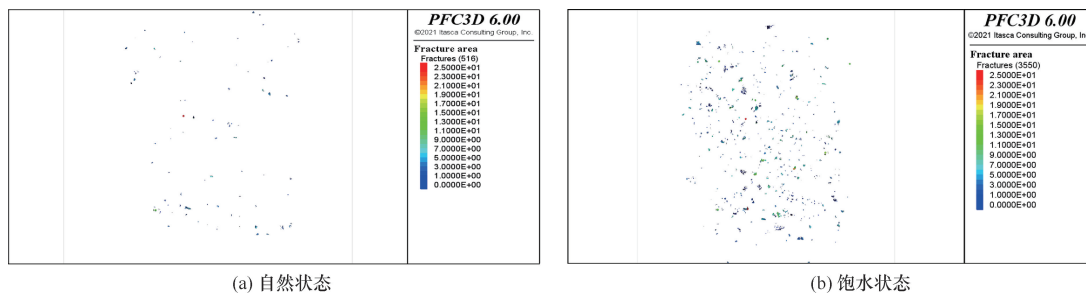
图 9 饱水状态下不同加载步数破碎矽石加载力链分布

Fig. 9 Distribution of loading force chain at different loading steps under the saturated state

3.3 破碎分析

图 10 为计算步数 960 000 时破碎矽石的裂纹

数。相比自然状态,饱水状态下破碎矽石受载过程中的裂纹数几乎高出 1 个数量级。



(a) 自然状态 (b) 饱水状态

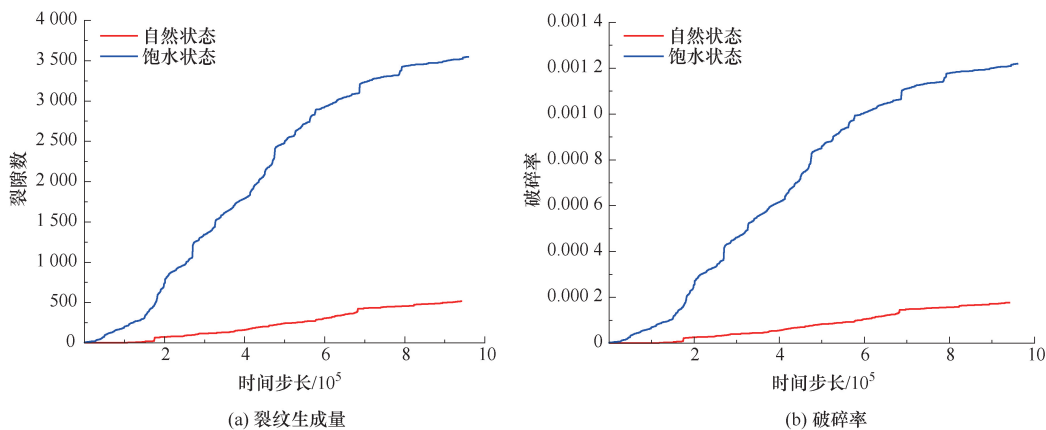
图 10 计算步数 960 000 时破碎矽石的裂纹数

Fig. 10 Number of cracks in crushed gangue at calculation step 960 000

图 11 为不同含水状态破碎矽石的破坏变化。饱水状态下破碎矽石受载过程中的裂纹增长速率远高于自然状态,如图 11(a)所示。不同含水状态下破碎矽石的受载裂纹增长呈现分段特征,饱水状态裂纹增长速率,率先进入减慢的阶段。根据砂岩基础力学试验可知,饱水弱化了破碎矽石的强度,促进了破碎矽石的变形,缩短了达到稳定状态的时间。本次模拟研究以裂纹的生成量与加载前接触

总量的比值为破碎矽石的二次破碎率,分析矽石在施加荷载过程中的破坏情况。不同含水状态下,破碎矽石受载过程中二次破碎率发展趋势与裂纹的生成量一致,同样存在阶段特性,如图 11(b)所示。计算到 960 000 步数时,饱水状态下破碎矽石受载过程中的二次破碎率约为 0.001 3,自然状态下的二次破碎率约为 0.000 2。

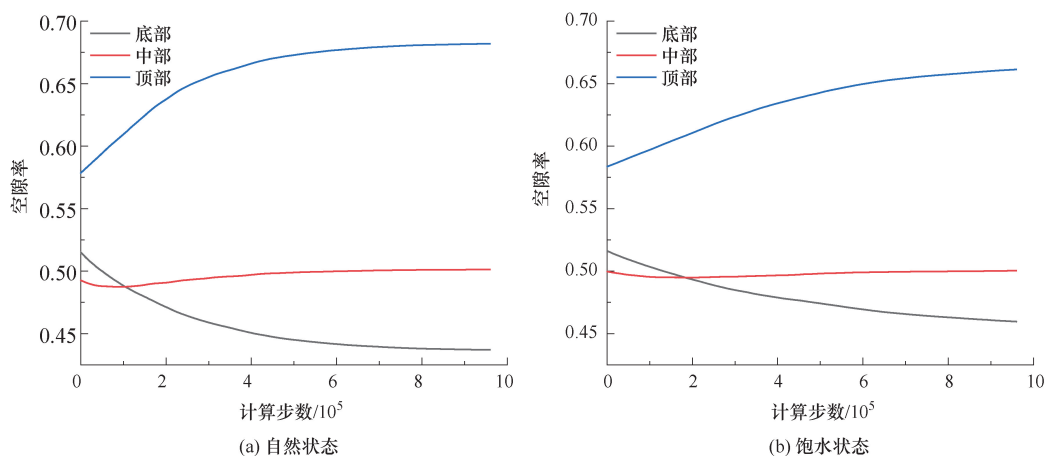
图 12 为破碎矽石加载过程不同层位空隙率。



(a) 裂纹生成量 (b) 破碎率

图 11 不同含水状态破碎矽石的破坏变化

Fig. 11 Failure variation of gangue under different saturated states with different gradation coefficients



(a) 自然状态 (b) 饱水状态

图 12 破碎矽石加载过程不同层位空隙率

Fig. 12 Void ratio of different layers in crushed gangue under loading

不同含水状态相同层位破碎矸石空隙率变化趋势一致,相同含水状态不同层位破碎矸石空隙率变化趋势各异。随着计算步数的增加,破碎矸石顶部层位的空隙率呈现增长的趋势,中部层位的空隙率几乎不变,底部层位的空隙率呈现降低的趋势。根据破碎矸石加载力链分布及空隙率分层规律,可以合理推断:矸石顶部的二次破碎率最高,空隙率最大;顶部的大颗粒被压碎滑动填充底部空隙,底部破碎矸石二次破碎率最低,空隙率最低;中部的破碎矸石二次破碎造成的小颗粒流失量,与顶部破碎矸石二次破碎滑动滞留量可以相互抵消。

4 结 论

(1) 自然、饱水状态下加载阶段位移变形量占据全阶段变形量均超过 90%。加载前期主要发生位置调整滑动变形,荷载梯度影响占主导地位,加载后期主要发生破碎岩石的进一步破碎压缩变形,水的影响占主导地位。饱水与更高荷载加速了变形过程,降低了后期发生突然变形的概率。

(2) 含水状态对碎石压缩摩擦和破碎的能量耗散影响不大,摩擦耗能占比约 33%,破碎耗能占比约 67%。在自然状态下,加载阶段的应变比约为 88%,能耗比例约为 74%。在饱水状态下,加载阶段的应变比约为 94%,能耗比例约为 91%。

(3) 位移曲线一阶导、二阶导的波动性可以作为不同变形阶段的分段指标,间接反映了水对变形的影响。急剧变形阶段,自然状态变形量比饱水状态变形量大。线性变形阶段,饱水状态变形量比自然状态变形量大。蠕变阶段,自然状态变形量比饱水状态变形量大。

(4) 饱水状态下的破碎矸石内部的力链分布更加均匀,裂纹数目、裂纹增长速率和二次破碎率显著高于自然状态。破碎矸石顶部的二次破碎率最高,空隙率最大,而底部的二次破碎率最低,空隙率最低,中部粒流失量与滞留量可以相互抵消。

参考文献

- [1] 张吉雄,巨峰,李猛,等. 煤矿矸石井下分选协同原位充填开采方法[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 131-140.
ZHANG Jixiong, JU Feng, LI Meng, et al. Method of coal gangue separation and coordinated in situ backfill mining[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 131-140.
- [2] 张吉雄,张强,周楠,等. 煤基固废充填开采技术研究进展与展望[J]. 煤炭学报, 2022, 47(12): 4167-4181.
ZHANG Jixiong, ZHANG Qiang, ZHOU Nan, et al. Research progress and prospect of coal based solid waste backfilling mining technology[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(12): 4167-4181.
- [3] 王树帅,岳中文,康一强,等. 风积沙充填开采应用现状及材料性能研究[J]. 矿业科学学报, 2024, 9(2): 217-232.
WANG Shushuai, YUE Zhongwen, KANG Yiqiang, et al. Research on the application status and material properties of aeolian sand filling mining[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2024, 9(2): 217-232.
- [4] 杨宝贵,杨捷,于跃,等. 煤矿新型胶凝充填材料配比试验及水化机理研究[J]. 矿业科学学报, 2017, 2(5): 475-481.
YANG Baogui, YANG Jie, YU Yue, et al. Study on proportioning test of a new cementing filling material and hydration mechanism[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2017, 2(5): 475-481.
- [5] 徐斌,李永亮,路彬,等. 胶结充填采场顶板承载特性及煤柱稳定性分析[J]. 矿业科学学报, 2022, 7(2): 200-209.
XU Bin, LI Yongliang, LU Bin, et al. Analysis of roof bearing characteristics and coal pillar stability of cemented backfill field[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2022, 7(2): 200-209.
- [6] 古文哲,杨宝贵,朱磊,等. 矸石浆体充填空间特征研究与工程实践[J]. 矿业科学学报, 2023, 8(3): 409-418.
GU Wenzhe, YANG Baogui, ZHU Lei, et al. Study on spatial characteristics of gangue slurry filling mining and engineering practice[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2023, 8(3): 409-418.
- [7] 杜金龙,潘树仁,刘长友,等. 面向绿色矿山的注浆关键技术与工程示范[J]. 矿业科学学报, 2023, 8(3): 293-307.
DU Jinlong, PAN Shuren, LIU Changyou, et al. Key grouting technology and engineering demonstration for green mines[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2023, 8(3): 293-307.
- [8] 孙希奎,李学华. 利用矸石充填置换开采条带煤柱的新技术[J]. 煤炭学报, 2008, 33(3): 259-263.
SUN Xikui, LI Xuehua. The new technology of waste-filling replacement mining on strip coal pillar[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(3): 259-263.
- [9] 张吉雄,缪协兴,茅献彪,等. 建筑物下条带开采煤柱矸石置换开采的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(S1): 2687-2693.

- ZHANG Jixiong, MIAO Xiexing, MAO Xianbiao, et al. Research on waste substitution extraction of strip extraction coal-pillar mining [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26 (S1): 2687-2693.
- [10] 余伟健,王卫军. 矽石充填整体置换“三下”煤柱引起的岩层移动与二次稳定理论[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(1): 105-112.
- YU Weijian, WANG Weijun. Strata movement induced by coal-pillar under three circumstances exchanged by gangue backfill and quadratic stability law [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(1): 105-112.
- [11] 郭忠平,黄万朋. 矽石倾斜条带充填体参数优化及其稳定性分析[J]. 煤炭学报, 2011, 36(2): 234-238.
- GUO Zhongping, HUANG Wanpeng. Parameter optimization and stability analysis of inclined gangue strip-fillings [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(2): 234-238.
- [12] FRIEDEMANN J, WAGNER A, HEINZE A, et al. Direct optical observation of coal particle fragmentation behavior in a drop-tube reactor [J]. Fuel, 2016, 166: 382-391.
- [13] LI Junmeng, HUANG Yanli, QI Wenyue, et al. Loose gangues backfill body's acoustic emissions rules during compaction test; based on solid backfill mining [J]. Computer Modeling in Engineering and Sciences, 2018, 115(1): 85-103.
- [14] 张鹏飞,赵同彬,马兴印,等. 矽石充填开采顶板裂隙分布及演化特征分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(5): 969-978.
- ZHANG Pengfei, ZHAO Tongbin, MA Xingyin, et al. Analysis on crack distribution and evolution characteristics of gangue backfilled working face roof [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(5): 969-978.
- [15] 梁冰,汪北方,姜利国,等. 浅埋采空区垮落岩体膨胀特性研究[J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(3): 475-482.
- LIANG Bing, WANG Beifang, JIANG Liguang, et al. Broken expand properties of caving rock in shallow buried goaf [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2016, 45(3): 475-482.
- [16] 张俊文,王海龙,陈绍杰,等. 大粒径破碎岩石承压变形特性[J]. 煤炭学报, 2018, 43(4): 1000-1007.
- ZHANG Junwen, WANG Hailong, CHEN Shaojie, et al. Bearing deformation characteristics of large-size broken rock [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(4): 1000-1007.
- [17] 张振南,缪协兴,葛修润. 松散岩块压实破碎规律的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(3): 451-455.
- ZHANG Zhenan, MIAO Xiexing, GE Xiurun. Testing study on compaction breakage of loose rock blocks [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(3): 451-455.
- [18] 李猛,张吉雄,黄鹏,等. 深部矽石充填采场顶板下沉控制因素及影响规律研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2022, 39(2): 227-238.
- LI Meng, ZHANG Jixiong, HUANG Peng, et al. Control factors of stope roof subsidence in deep gangue backfill mining and its influence law [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2022, 39(2): 227-238.
- [19] WANG C X, LU Y, HAO G, et al. Simulated test on compression deformation characteristics and mechanism of fractured rock in mined out area [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2018, 36(5): 2809-2821.
- [20] WANG C X, LU Y, CUI B Q, et al. Stability evaluation of old goaf treated with grouting under building load [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2018, 36(4): 2553-2564.
- [21] 蔡毅,严家平,徐良骥,等. 不同含水状态采空区冒落岩体压缩变形特征研究[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(11): 17-20, 128.
- CAI Yi, YAN Jiaping, XU Liangji, et al. Study on compaction deformation characteristics of collapsed rock mass of goaf under different water content conditions [J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(11): 17-20, 128.
- [22] 陈晓祥,苏承东,唐旭,等. 饱水对煤层顶板碎石压实特征影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(S1): 3318-3326.
- CHEN Xiaoxiang, SU Chengdong, TANG Xu, et al. Experimental study of effect of water-saturated state on compaction property of crushed stone from coal seam roof [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(S1): 3318-3326.
- [23] 郁邦永,陈占清,吴疆宇. 级配饱和破碎岩石压缩变形与分形特性试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2016, 33(2): 342-347.
- YU Bangyong, CHEN Zhanqing, WU Jiangyu. Experimental study on compaction and fractal characteristics of saturated broken rocks with different initial gradations [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2016, 33(2): 342-347.
- [24] 辛恒奇,张鹏,曹国磊,等. 浸水高度对破碎矽石充

- 填材料承载力学行为影响研究[J]. 煤炭科学技术,2020,48(S2): 223-227.
- XIN Hengqi, ZHANG Peng, CAO Guolei, et al. Study on influence of water immersion height on bearing mechanical behavior of broken gangue filling materials [J]. Coal Science and Technology, 2020, 48 (S2): 223-227.
- [25] 欧阳振华,李世海,刘晓宇. 柔性加载条件下碎石材料变形特征研究[J]. 中外公路,2009,29(4): 178-181.
- OUYANG Zhenhua, LI Shihai, LIU Xiaoyu. Study on deformation characteristics of crushed stone materials under flexible loading[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2009, 29(4): 178-181.
- [26] 何泽全,巨峰,肖猛,等. 煤矸石充填材料在循环荷载作用下的细观变形特征分析[J]. 采矿与安全工程学报,2022,39(5): 1002-1010.
- HE Zequan, JU Feng, XIAO Meng, et al. Characterization of meso-deformation of gangue backfilling materials under cyclic loading[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2022, 39(5): 1002-1010.
- [27] 苏承东,顾明,唐旭,等. 煤层顶板破碎岩石压实特征的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2012,31(1): 18-26.
- SU Chengdong, GU Ming, TANG Xu, et al. Experiment study of compaction characteristics of crushed stones from coal seam roof[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(1): 18-26.
- [28] LI M, ZHANG J X, HUANG Y L, et al. Effects of particle size of crushed gangue backfill materials on surface subsidence and its application under buildings [J]. Environmental Earth Sciences, 2017, 76 (17): 603.
- [29] 王树帅,李永亮,李清,等. 基于泰波理论的矸石级配系数对充填材料性能的影响[J]. 采矿与安全工程学报,2022,39(4): 683-692.
- WANG Shushuai, LI Yongliang, LI Qing, et al. Influence of gangue gradation coefficient on the performance of filling material based on talbol theory[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2022, 39(4): 683-692.
- [30] 张爱勤. 泰波理论在矿料级配设计中的应用[J]. 山东建材学院学报,2000,14(2): 141-142, 145.
- ZHANG Aiqin. Application of talbol's theory in grading design of sand and crushed rock mixture[J]. Journal of Shandong Institute of Building Materials, 2000, 14 (2): 141-142, 145.
- [31] SALAMON M D G. Mechanism of caving in longwall coal mining [C]. Balkema A A, Golden, CRC Press, 1990.
- [32] ZHOU N, HAN X L, ZHANG J X, et al. Compressive deformation and energy dissipation of crushed coal gangue[J]. Powder Technology, 2016, 297: 220-228.
- [33] 黄鹏,张吉雄,郭宇鸣,等. 深部矸石充填体黏弹性效应及顶板时效变形特征[J]. 中国矿业大学学报,2021,50(3): 489-497.
- HUANG Peng, ZHANG Jixiong, GUO Yuming, et al. Viscoelastic effect of deep gangue backfill body and time-dependent deformation characteristics of roof in deep mining[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2021, 50(3): 489-497.
- [34] WANG C, LU Y, LI Y, et al. Deformation process and prediction of filling gangue: A case study in China [J]. Geomechanics and Engineering, 2019, 18 (4): 417-426.
- [35] MARSCHI N D, CHAN C K, SEED H B. Evaluation of properties of rockfill materials[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1972, 98 (1): 95-114.
- [36] ZHU F Y, ZHANG W C. Scale effect on bearing capacity of shallow foundations on strain-softening clays [J]. Computers and Geotechnics, 2021, 135: 104182.
- [37] 缪协兴,张振南. 松散岩块侧压系数的试验研究[J]. 徐州建筑职业技术学院学报,2001,1(4): 15-17.
- MIAO Xiexing, ZHANG Zhennan. Experimental study on the lateral pressure coefficient of friable rock during compacting[J]. Journal of Xuzhou Institute of Architectural Technology, 2001, 1(4): 15-17.

(责任编辑:陈骏)