



移动扫码阅读

王海龙,王琦,赵振华,等.采空区冒落矸石承压变形特征及侧向压力分布规律研究[J].煤炭科学技术,2023,51(6):20-29.

WANG Hailong, WANG Qi, ZHAO Zhenhua, et al. Study on bearing deformation characteristics and lateral pressure distribution law of caved gangue in gob[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(6): 20-29.

采空区冒落矸石承压变形特征及侧向压力分布规律研究

王海龙^{1,2,3,4},王琦²,赵振华^{3,4},冯泉霖^{3,4}

(1. 临沂大学 土木工程与建筑学院, 山东 临沂 276000; 2. 中国矿业大学(北京) 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 北京 100083; 3. 山东省地质矿产勘查开发局八〇一水文地质工程地质大队, 山东 济南 250014; 4. 山东省地矿工程勘察院, 山东 济南 250014)

摘要:在覆岩载荷作用下,采空区冒落矸石会产生施加于巷旁支护体或煤柱上的侧向压力,在时间效应影响下,侧向压力可能引发巷旁支护体或煤柱失稳,进而诱发地表塌陷。为研究采空区冒落矸石承压变形特征及侧向压力分布规律,研制了可测量侧向压力的组合式冒落矸石承压变形试验装置。以满足均匀粒径分布的 5-30 mm 的冒落矸石为例,通过设置相同加载总时长(16 h)、相同目标载荷(10 MPa)、不同数量加载水平(水平 1、2、4),研究冒落矸石承压变形特征、侧向压力分布规律及试验前后粒径变化情况。结果表明:随载荷增加,冒落矸石变形逐渐增大,残余碎胀系数和空隙率逐渐减小,加载较恒载阶段尤为明显;恒载初期,轴向应变增长较快,而后逐渐变缓并趋于平稳,若不发生应变突变,时间-应变呈现对数关系;目标载荷相同,加载总时长一致,随加载水平数量增加,恒载阶段产生的总应变显著增加,分别为 3.02%、9.07% 和 17.72%,表明随加载水平数量增加,虽然载荷对冒落矸石输入的总能量减少,但却对冒落矸石的滑移填充和结构调整起到了明显的促进作用;冒落矸石侧压力系数随着载荷增加明显变大;冒落矸石体展现出较强的载荷传递折减效应,自冒落矸石体顶界面垂直向下呈现递减变化;承压变形过程中,粒径为 5~10 mm 的冒落矸石含量处于动态平衡状态,为稳定粒径。

关键词:冒落矸石;承压变形;侧向压力;载荷传递折减;粒径

中图分类号:TD327 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2023)06-0020-10

Study on bearing deformation characteristics and lateral pressure distribution law of caved gangue in gob

WANG Hailong^{1,2,3,4}, WANG Qi², ZHAO Zhenhua^{3,4}, FENG Quanlin^{3,4}

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Linyi University, Linyi 276000, China; 2. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China; 3. No.801 Hydrogeology and Engineering Geological Brigade of Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources, Jinan 250014, China; 4. Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources, Jinan 250014, China)

Abstract: Under the load of overlying strata, lateral pressure from the caved gangue in gob will be exerted on the support body of gob-side entry retaining or coal pillar. As time goes on, lateral pressure may lead to instability of support body of gob-side entry retaining or coal pillar, and then induce surface collapse. In order to study the bearing deformation characteristics and lateral pressure distribution law of caved gangue in gob, a combined test device for bearing deformation of caving gangue that can measure lateral pressure is developed. The caved gangue with uniform particle size distribution of 5 - 30 mm is taken as an example. By setting the same total loading time (16 h), the same target load (10 MPa) and the different number of loading levels (1, 2, 4), the bearing deformation characteristics, lateral pressure distribution law and particle size change of caving gangue before and after test are studied. The test results indicated that: Along with the increase of axial load, the axial deformation of caved gangue increases gradually, the residual bulking coefficient and porosity decrease gradually, which are more obvious in loading stage than in constant loading stage. In the early constant loading stage, the axial deforma-

收稿日期:2022-02-23 责任编辑:朱恩光 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2022-0223

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52074164);山东省自然科学基金资助项目(ZR2020JQ23);山东省高等学校“青创团队计划”资助项目(2022KJ112)

作者简介:王海龙(1987—),男,山东威海人,教授,硕士生导师,博士。E-mail: whlmlp@163.com

tion of caved gangue grows rapidly, and then tends to be slow and steady gradually, if no strain surge occurs, the relationship between strain and time meets the logarithmic relationship. With the same target load and total loading time, as the number of loading levels increases, the total strain generated in constant loading stage increases significantly, and is 3.02%, 9.07%, 17.72% respectively, which indicates that the total energy input of caved gangue decreases with the increase of loading level number, but it plays a significant role in promoting the sliding filling and structural adjustment of caved gangue. The lateral pressure coefficient of caved gangue increases obviously with the increase of load. Caved gangue body shows strong reduction effect of load transfer and the value of load acting on caved gangue body decreases progressively from top to bottom. In the process of bearing deformation of caved gangue, the total amount of caved gangue with 5 ~ 10 mm particle size is in dynamic equilibrium. The research results have certain guiding significance for mining subsidence control.

Key words: caved gangue; bearing deformation; lateral pressure; reduction effect of load transfer; particle size

0 引言

沿空留巷技术作为一种有效的无煤柱开采技术得到广泛应用^[1-4],不仅减少了巷道掘进量,而且提高了煤炭资源采出率,还能消除集中矿压带来的安全隐患。随着采煤工作面向前推进,垮落后的煤层顶板会填充采空区,与巷旁支护体或煤柱一起,对上覆岩层起到协同支撑作用,随着时间推移,冒落矸石会因承压变形而减弱对覆岩的支撑,极易加剧围岩结构失稳。同时,冒落矸石作为散体介质,在上覆岩层的载荷作用下,容易产生流动性,从而产生施加于巷旁支护体或煤柱上的侧向压力,如果侧向压力超过一定值,在时间效应的影响下,也可能会导致巷旁支护体或煤柱失稳,甚至引发矿井突水和地表塌陷等动力灾害。对此,我国学者开展了针对冒落矸石承压变形特征及侧向压力分布的系列研究。

在冒落矸石承压变形特征方面。针对瞬时压缩变形,马占国等^[5]采用破碎岩石压实渗透试验装置,试验分析了粒径、强度对饱和破碎岩石应力-应变特性的影响;张振南等^[6]进行了松散岩块压实破碎的试验研究,得出了松散岩块的压实破碎规律;苏承东等^[7]和陈晓祥等^[8]采用压实试验装置配以 RMT-150B 型试验系统,试验研究了压实过程含水和不含水状态下破碎岩石强度、块径、压实力与碎胀性、压实度、密度以及能耗的关系;冯梅梅等^[9]采用自制破碎岩石压实装置,试验研究了满足连续级配的饱和破碎岩石压实特性及压实前后岩石粒径的分布规律;张季如等^[10-11]采用自制的侧限压缩试验装置进行压缩试验,建立描述粒状岩土材料的应力水平与孔隙比、体应变、相对破碎率等相关关系的数学模型;郁邦永等^[12]建立轴向位移、压缩模量和粒度分布分形维数与轴向应力之间的关系式,讨论 Talbol 幂指数对压实变形和粒度分布的影响规律。针对蠕变压缩变形,陈占清等^[13]和马占国等^[14]采用破碎岩体多相耦合蠕变试验装置,试验研究了饱和破碎岩石蠕变

过程中孔隙率的变化规律;文献 [15-17] 采用自制的破碎岩石承压变形试验系统对粒径级配满足正态分布的破碎岩石进行分级加载试验,试验研究了碎胀和变形特性,探讨了破碎岩石承压变形机制;樊秀娟等^[18]采用破碎岩石承压变形仪配以普通摆锤机械式压力机,试验研究了破碎砂岩蠕变变形与轴向载荷、破碎块径的关系。在侧向压力分布规律方面。文献 [19-21] 采用电阻应变片测量破碎煤(岩)体压实过程中圆筒外壁变形的反推出侧向压力;李猛^[22-23]采用自制的散体充填料双向加载试验系统对矸石充填材料在压实过程中的侧向压力进行测量。肖猛等^[24]采用颗粒流数值模拟软件对破碎矸石承压变形过程中的侧向压力进行了模拟,研究了不同岩性、粒径级配和加载速率情况下侧向压力分布。

通过总结分析发现,现有的试验装置不能实现对冒落矸石承压变形过程中侧向压力的直接测量,存在试验后冒落矸石试样不易提取这一缺陷,且现有成果中大多进行的是单一级配或 Talbol 连续级配冒落矸石的相关研究。基于此,研制了组合式冒落矸石承压变形试验装置,利用其对初始粒径满足均匀分布的冒落矸石进行承压变形试验,对比分析了在加载总时长相同、目标载荷相同、加载水平数量不同条件下冒落矸石的承压变形特征、侧向压力分布规律及试验前后粒径变化情况,为沿空留巷巷旁支护体或煤柱设计提供依据。

1 试验装置及试验方案

1.1 试验装置

组合式冒落矸石承压变形试验装置由底板、反力板、调质轴、压力传感器、反力压头、压板、约束板、拉杆、定位销、加载压头组成。单个试验盒有效边长为 150 mm,有效高度为 100 mm,试验装置高度可通过增减试验盒数量来满足不同试验需求,典型的 4 组式冒落矸石承压变形试验装置主体结构如图 1 所示。

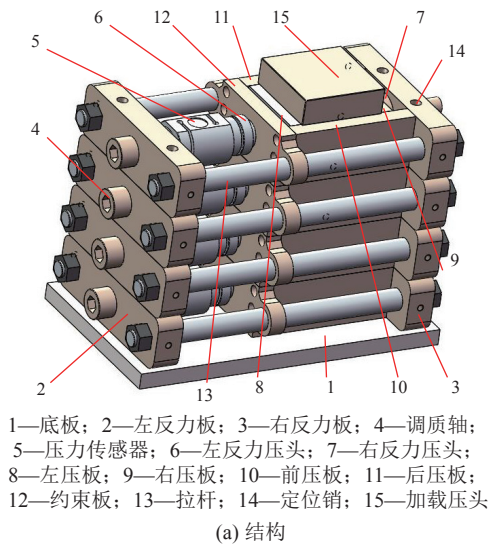


图1 组合式冒落矸石承压变形试验装置

Fig.1 Combined type test device for caved gangue bearing deformation

底板左侧等距设置有左反力板，右侧等距设置有右反力板，并且左反力板中贯穿设置有调质轴，调质轴另一端连接压力传感器，压力传感器通过贯穿约束板的左反力压头与左压板呈面接触；通过调整调质轴在左反力板中的旋进深度，调节左反力压头在约束板右侧伸出长度，以此控制左压板与约束板间空隙，进而可改变试验盒有效尺寸；右反力压头贯穿右反力板，与右压板呈面接触；前压板左侧与约束板连接，右侧与右反力板连接，后压板和前压板关于左压板对称设置；拉杆的一端贯穿设置在左反力板中，另一端贯穿设置在右反力板中，并且导向杆贯穿在套环中，套环对称设置在约束板的两侧；试验装置可以根据需要进行组合，定位销在左、右反力板上各设置2个，用于试验装置组合定位。

试验时，将装满冒落矸石的试验装置放置在压力试验机试验台上，按照指定的载荷加载模式，对试验装置中的冒落矸石进行垂直加载，冒落矸石在垂直载荷的作用下，会产生侧向膨胀，进而对压板产生

压力，其中，左压板受到的压力会通过左反力压头传递至压力传感器，无纸记录仪可以将压力传感器示数实时保存下来，即为冒落矸石侧压力，上述过程与沿空留巷条件下，采空区冒落矸石在上覆岩层载荷作用下，因流动而产生施加于巷旁支护体或煤柱上的侧压力作用具有极高相似性。冒落矸石承压变形试验系统如图2所示。



图2 冒落矸石承压变形试验系统

Fig.2 Test system for caved gangue bearing deformation

1.2 试验方案

根据国内外学者的研究，考虑到尺寸效应的影响，要求试样直径与岩石最大粒径比值 $D/d_{\max} \geq 5$ ，由于试验盒有效边长为150 mm，选用的是4组式破碎岩石承压变形试验装置，即有效高度为400 mm，因此可试验的冒落矸石最大粒径为30 mm。选取典型的煤矿顶板砂岩作为研究对象，单轴抗压强度为96.8 MPa，拉伸强度为7.5 MPa，弹性模量为16.1 GPa，泊松比为0.199，密度为2565.6 kg/m³。将大块冒落矸石人工破碎后，按照粒径大小分成5~10、10~15、15~20、20~25、25~30 mm五种级别。选定均匀粒径作为试样的粒径级配，试验前后冒落矸石试样表面形态如图3所示。

采空区冒落矸石承受的压力主要来自上覆岩层的压力，力的大小与断裂岩层的高度直接相关，随着

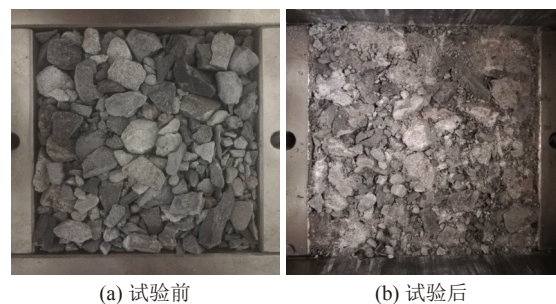


图3 试验前后冒落矸石试样表面形态

Fig.3 Surface form of caved gangue before and after test

断裂岩层高度的增大而增大。在顶板2次来压之间的时间段内,作用在冒落岩石上的压力可近似为不变,与上覆断裂岩层的自重基本相同;在顶板来压时,作用在冒落岩石上的压力会出现突增,增量约等于此次来压过程中覆岩新断裂岩层的自重。因而冒落岩石在采空区内的受力状态不是线性增加的,而是呈现出一种阶梯状增大的趋势,因此在承压变形试验中,设计采用分级加载方式。

为对比分析,设计3种类型的加载水平,即1个加载水平(载荷10 MPa,持续16 h)、2个加载水平(载荷分别为5 MPa和10 MPa,分别持续8 h)、4个加载水平(压力分别为2.5、5、7.5、10 MPa,分别持续4 h)。需要指出的是,在实际工作面开采过程中,考虑周期来压步距和工作面推进速度的关系,采空区冒落矸石的变形在未达到所受维持恒力的稳定状态前,便会因为顶板的来压导致作用在冒落矸石上的压力增加,因此,在进行每级加载维持恒力时间设计时,并未刻意追求待冒落矸石变形状态稳定后再进行下一级加载。

冒落矸石试样初始碎胀系数为

$$K = \frac{V_1}{V_0} \quad (1)$$

式中: V_0 为大块冒落矸石的体积; V_1 为大块冒落矸石破碎后自然堆积状态下的体积。

冒落矸石试样初始空隙率为

$$P = \frac{V_1 - V_0}{V_0} = K - 1 \quad (2)$$

冒落矸石试样承压变形后的残余高度为

$$h_1 = h_0 - u \quad (3)$$

式中: h_0 为冒落矸石试样初始高度, mm; u 为冒落矸石试样承压后变形量, 等于加载压头位移, mm。

冒落矸石试样承压变形后的残余碎胀系数为

$$K_1 = \frac{h_1 S}{V_0} \quad (4)$$

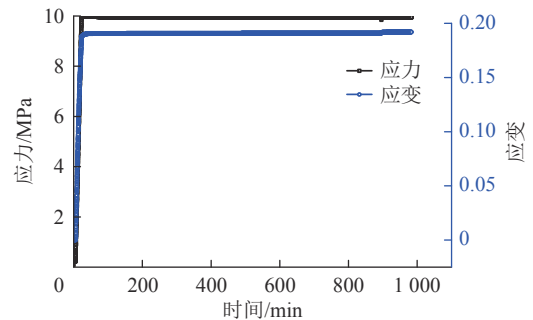
式中: S 为试验盒有效底面积, $S = a^2$, 其中 $a = 150$ mm。

2 试验结果及分析

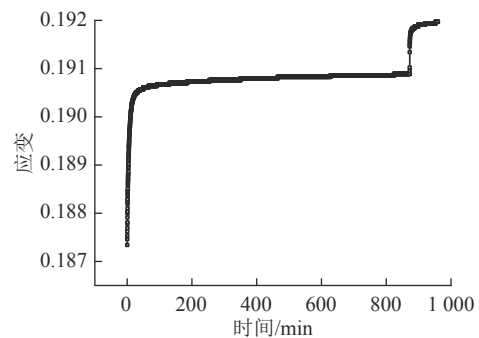
2.1 应力-应变及碎胀特征

1) 1个加载水平。在1个加载水平条件下,冒落矸石试样应力和应变曲线如图4所示。随着轴向载荷的增加,轴向变形呈现逐渐增大趋势,10 MPa恒载结束时轴向应变最终值为 192.0×10^{-3} ;残余碎胀系数呈现逐渐减小趋势,由1.676降为1.354;试验过程中,加载阶段较恒载阶段轴向变形更为明显,占全部变

形的96.98%。恒载初期轴向应变增长较快,而后增长趋势逐渐变缓,期间出现1次应变突增,1 min时间内轴向应变增加了 7.3×10^{-4} ,且试验盒中有明显岩石破裂的声音,表明在该恒载阶段冒落矸石出现明显破裂。



(a) 应力和应变、时间历程曲线



(b) 恒载阶段(10 MPa)应变曲线

图4 1个加载水平应力和应变曲线

Fig.4 Stress and strain curve under one load level

2) 2个加载水平。在2个加载水平条件下,冒落矸石试样应力和应变曲线如图5所示。随着轴向载荷的增加,轴向变形呈现逐渐增大趋势,5.0 MPa和10.0 MPa恒载结束时轴向应变最终值分别为 145.1×10^{-3} 和 225.9×10^{-3} ;残余碎胀系数呈现逐渐减小趋势,由1.708降为1.322;试验过程中,加载阶段较恒载阶段轴向变形更为明显,占全部变形的90.93%。2个恒载阶段,初期轴向应变增长都较快,而后增长趋势皆逐渐变缓,且恒载末期轴向应变趋于平稳。

3) 4个加载水平。在4个加载水平条件下,冒落矸石试样应力和应变曲线如图6所示。随着轴向载荷的增加,轴向变形呈现逐渐增大的趋势,2.5、5.0、7.5、10.0 MPa恒载结束时轴向应变最终值分别为 63.5×10^{-3} 、 120.2×10^{-3} 、 163.7×10^{-3} 和 196.9×10^{-3} ;残余碎胀系数呈现逐渐减小的趋势,由1.679降为1.348;试验过程中,加载阶段较恒载阶段轴向变形更为明显,占全部变形的82.28%。4个恒载阶段,初期轴向应变增长都较快,而后增长趋势皆逐渐变缓,且恒载末期轴向应变趋于平稳。恒载2.5 MPa阶段,冒

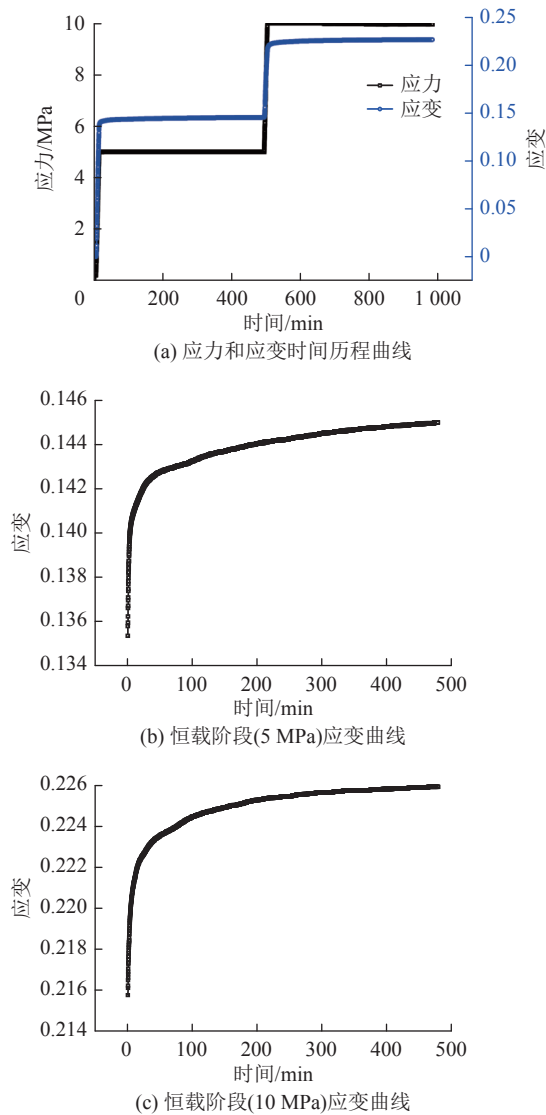


图5 2个加载水平应力和应变曲线

Fig.5 Stress and strain curve under two load levels

落矸石试样变形快速达到稳定状态,从进入稳定状态直至该阶段完成,仅增加了 6×10^{-5} ;恒载5.0 MPa阶段,出现一次应变加速,表明在该载荷恒载阶段冒落矸石出现一定程度的加速变形。

不同试验类型下冒落矸石承压变形过程中,应变和碎胀变化见表1。随载荷增加,冒落矸石变形逐渐增大,残余碎胀系数逐渐减小,加载较恒载阶段尤为明显;恒载初期,轴向应变增长较快,而后逐渐变缓并趋于平稳,若不发生应变突增,应变—时间呈现对数关系;目标载荷相同,虽然加载时间长度一致,但是随着加载水平数量的增加,恒载阶段所产生的应变呈现显著增加,在恒载阶段,1个加载水平所产生的应变占到总应变的3.02%,2个加载水平所产生的应变占到总应变的9.07%,4个加载水平所产生的应变占到总应变的17.72%,表明分级加载虽然减少了对冒落矸石的能量输入,但却对冒落矸石的滑移

填充和结构调整起到了显著的促进作用,这对利用采空区冒落矸石控制地表沉陷具有一定的指导意义。

2.2 试验前后粒径变化特征

不同试验类型下冒落矸石承压变形试验前后粒径变化如图7所示。

1)1个加载水平。一个加载水平试验后,粒径0~5 mm的冒落矸石含量增加了13.94%;粒径5~10 mm的冒落矸石含量基本不变;粒径10~15 mm的冒落矸石含量增加了21.5%;粒径15~20 mm、20~25 mm和25~30 mm的冒落矸石含量则均有不同程度的减小,分别为12.82%、18.35%和12.81%。

2)2个加载水平。2个加载水平试验后,粒径0~5 mm的冒落矸石含量增加了15.72%;粒径5~10 mm的冒落矸石含量基本不变;粒径10~15 mm的冒落矸石含量增加了20.99%;粒径15~20、20~25、25~30 mm的冒落矸石含量则均有不同程度的减小,分别为10.05%、17.18%和15.73%。

3)4个加载水平。4个加载水平试验后,粒径0~5 mm的冒落矸石含量增加了14.21%;粒径5~10 mm的冒落矸石含量基本不变;粒径10~15 mm的冒落矸石含量增加了21.69%;粒径15~20 mm、20~25 mm和25~30 mm的冒落矸石含量则均有不同程度的减小,分别为12.00%、19.25%和12.88%。

不同试验类型下冒落矸石承压变形试验前后粒径变化具体见表2。通过对比可以发现,粒径0~5 mm的冒落矸石含量均明显增加;粒径5~10 mm的冒落矸石含量基本不变,可作为冒落矸石试样承压变形过程中的稳定粒径,但是试验前后此粒径范围内的冒落矸石不是绝对不发生变化的,而是一个动态平衡的过程,即破碎的部分与新形成的部分基本相等,重新筛分后该粒径范围内的冒落矸石具有明显的新的断裂摩擦痕迹即是很好的证明;粒径10~15 mm的冒落矸石含量也有所增加;粒径15~20、20~25、25~30 mm的冒落矸石含量则均有不同程度的减小。

2.3 侧向压力分布规律

4组式冒落矸石承压变形试验装置中用于测量侧向压力的压力传感器编号自上而下分别为1、2、3、4号。随着轴向载荷的增加,冒落矸石轴向变形逐渐增大,压力传感器监测到的压力也呈现增大趋势,当轴向变形越过1号压力传感器的中心轴线,1号压力传感器所承受来自冒落矸石试样的侧向压力就会变小。因此,将中心轴线位于加载压头之下的侧压力传感器定义为有效压力传感器,并将距离加载压头最近的有效压力传感器中心轴线所在水平面上的压力等效为加载压头施加的载荷。另外,在冒落矸石

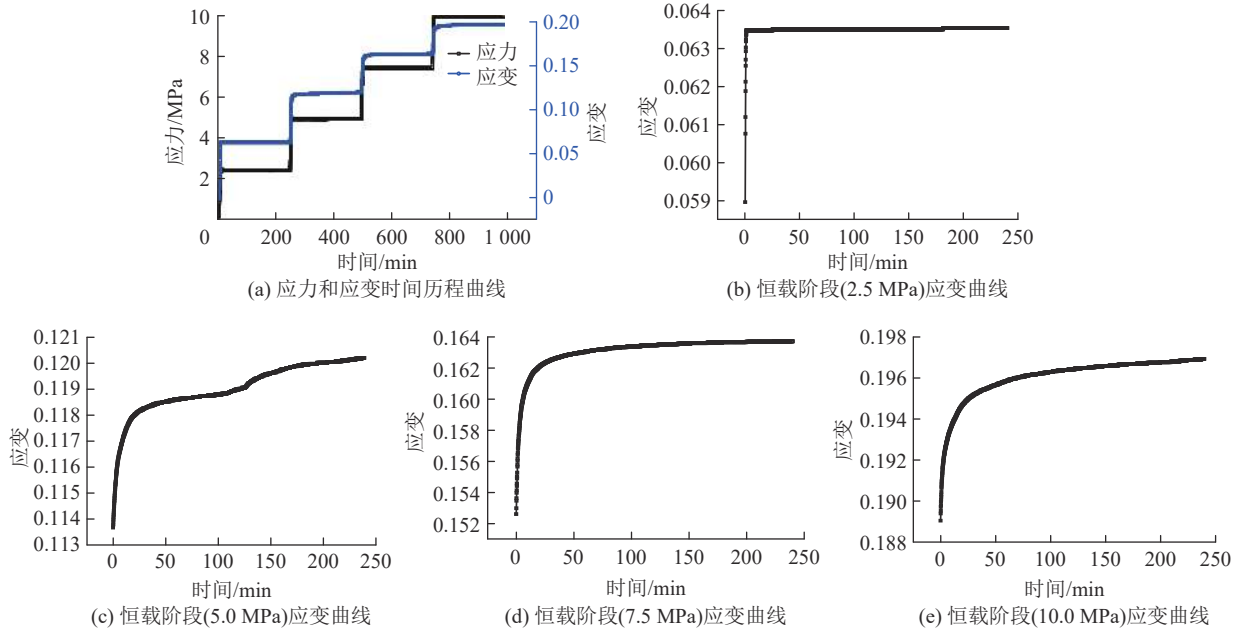


图 6 4 个加载水平应力和应变曲线

Fig.6 Stress and strain curve under four load levels

表 1 不同试验类型下冒落矸石承压变形参数变化统计

Table 1 Parameter variation of caved gangue bearing deformation with different experimental types

试验类型	试验阶段	应变				应变-时间拟合曲线	残余膨胀系数	
		起始/ 10^{-3}	终止/ 10^{-3}	差值/ 10^{-3}	累积/ 10^{-3}		起始	终止
1个加载水平 (载荷10 MPa, 持续16 h)	0 ~ 10 MPa加载,	0	186.2	186.2	186.2	—	1.676	1.364
	10 MPa恒载	186.2	192.0	5.8	192.0	—	1.364	1.354
2个加载水平 (载荷分别为5、10 MPa, 分别持续8 h)	0 ~ 5 MPa加载,	0	135.0	135	135.0	—	1.708	1.478
	5 MPa恒载	135.0	145.1	10.1	145.1	$\varepsilon = 0.001 \ln t + 0.1387, R^2=0.989$	1.478	1.461
	5 ~ 10 MPa加载,	145.1	215.5	70.4	215.5	—	1.461	1.340
	10 MPa恒载	215.5	225.9	10.4	225.9	$\varepsilon = 0.0012 \ln t + 0.219, R^2=0.971$	1.340	1.322
4个加载水平 (压力分别为2.5、5、7.5、 10 MPa, 分别持续4 h)	0 ~ 2.5 MPa加载,	0	56.2	56.2	56.2	—	1.679	1.585
	2.5 MPa恒载	56.2	63.5	7.3	63.5	—	1.585	1.572
	2.5 ~ 5 MPa加载,	63.5	111.8	48.3	111.8	—	1.572	1.491
	5 MPa恒载	111.8	120.2	8.4	120.2	$\varepsilon = 0.0009 \ln t + 0.115, R^2=0.917$	1.491	1.477
	5 ~ 7.5 MPa加载,	120.2	152.6	32.4	152.6	—	1.477	1.423
	7.5 MPa恒载	152.6	163.7	11.1	163.7	$\varepsilon = 0.001 \ln t + 0.1586, R^2=0.862$	1.423	1.404
	7.5 ~ 10 MPa加载,	163.7	188.8	25.1	188.8	—	1.404	1.362
	10 MPa恒载	188.8	196.9	8.1	196.9	$\varepsilon = 0.001 \ln t + 0.1917, R^2=0.854$	1.362	1.348

承压变形试验过程中,沿试验盒内壁将产生向上的较大摩擦力,同时在冒落矸石传递力的过程中会消耗减弱,这使得试验盒中底部冒落矸石承受的压力比施加在冒落矸石体上表面的载荷要小,因此,从上至下,有效压力传感器监测到的侧压应力呈现减小的趋势。

侧压系数为

$$k = \frac{\sigma_x}{\sigma_z} \quad (5)$$

式中: σ_z 为垂直有效压力, MPa; σ_x 为侧向有效压力, MPa; k 为侧压系数。

1) 在 1 个加载水平条件下,侧向压力变化曲线如图 8a 所示,2 号侧压力传感器作为与加载压头最近的有效压力传感器,对应的侧压系数变化如图 8b 所示,恒载阶段侧压系数未发现明显波动,为 0.227。根据侧压系数值,以及 3 号和 4 号压力传感器测出的侧压应力,分别为 1.876 MPa 和 0.590 MPa,求得 3 和 4 号压力传感器中心轴线所在水平面上冒

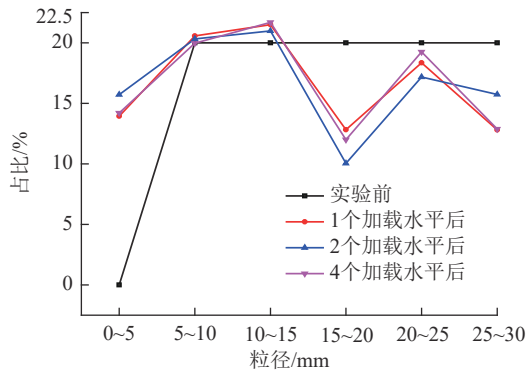


图7 试验前后冒落矸石粒径变化

Fig.7 Particle size change of caved gangue before and after test
落矸石所承受的垂直压力分别为 8.264 MPa 和 2.599 MPa。

2)在 2 个加载水平条件下,侧向压力变化曲线如图 9a 所示,2 号侧压力传感器作为与加载压头最近的有效压力传感器,对应的侧压系数变化如图 9b 所示,恒载阶段侧压系数未发现明显波动,5 MPa 和 10 MPa 恒载下分别为 0.216 和 0.258。根据侧压系数值,以及 3 号和 4 号压力传感器测出的侧向压力,5 MPa 恒载下分别为 0.810 MPa 和 0.182 MPa,10 MPa 恒载下分别为 2.072 MPa 和 0.623 MPa,求得 3 号和 4 号压力传感器中心轴线所在水平面上冒落矸石所承受的压力,5 MPa 恒载下分别为 3.75 MPa 和 0.843 MPa,10 MPa 恒载下分别为 8.000 MPa 和 2.405 MPa。

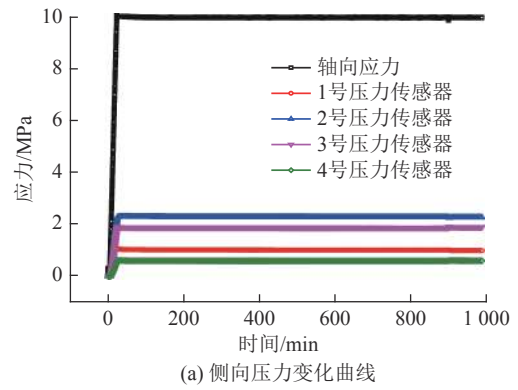
表 2 不同实验类型冒落矸石实验前后粒径变化

Table 2 Particle size change of caved gangue before and after test with different experimental types

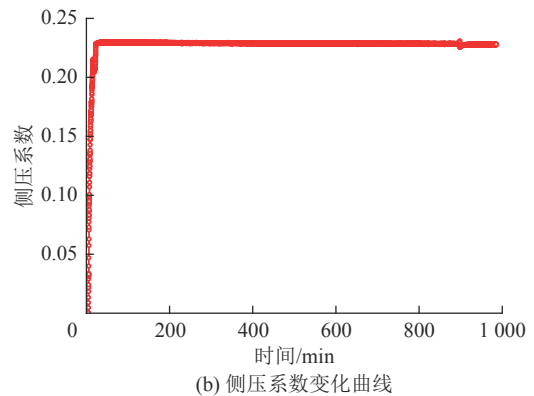
粒径区间/mm	不同加载水平数量实验前/后粒径比例/%		
	1	2	4
0~5	0/13.94	0/15.72	0/14.21
5~10	20/20.58	20/20.33	20/19.97
10~15	20/21.50	20/20.99	20/21.69
15~20	20/12.82	20/10.05	20/12.00
20~25	20/18.35	20/17.18	20/19.25
25~30	20/18.35	20/15.73	20/12.88
合计	100/100	100/100	100/100

3)在 4 个加载水平条件下,侧向压力监测曲线如图 10a 所示。

在第一个加载水平条件下,1 号压力传感器作为与加载压头最近的有效压力传感器,对应的侧压系数变化如图 10b 所示,恒载阶段侧压系数未发现明显波动,为 0.169。根据侧压系数值,以及 2、3、4 号

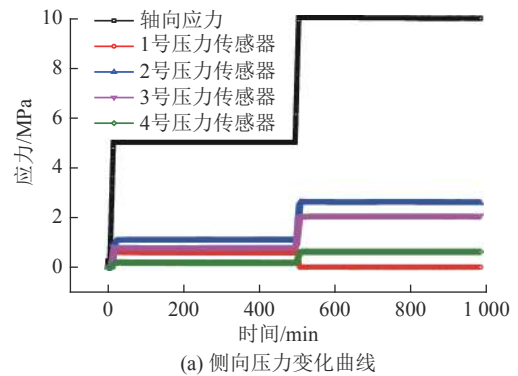


(a) 侧向压力变化曲线

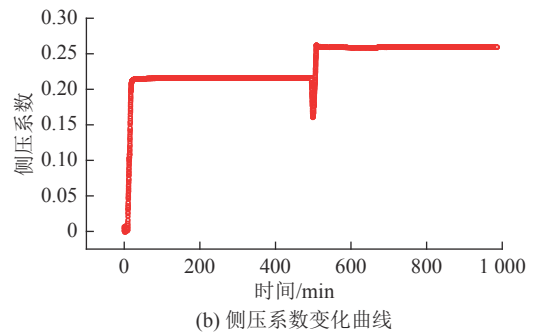


(b) 侧压系数变化曲线

图 8 1 个加载水平下侧向压力和侧压系数变化曲线
Fig.8 Change of lateral pressure and lateral pressure coefficient under one load level



(a) 侧向压力变化曲线



(b) 侧压系数变化曲线

图 9 两个加载水平下侧向压力和侧压系数变化曲线
Fig.9 Change of lateral pressure and lateral pressure coefficient under two load levels

压力传感器测出的侧向压力,2.5 MPa 恒载下分别为 0.352、0.338、0.032 MPa,求得 2、3、4 号压力传感器

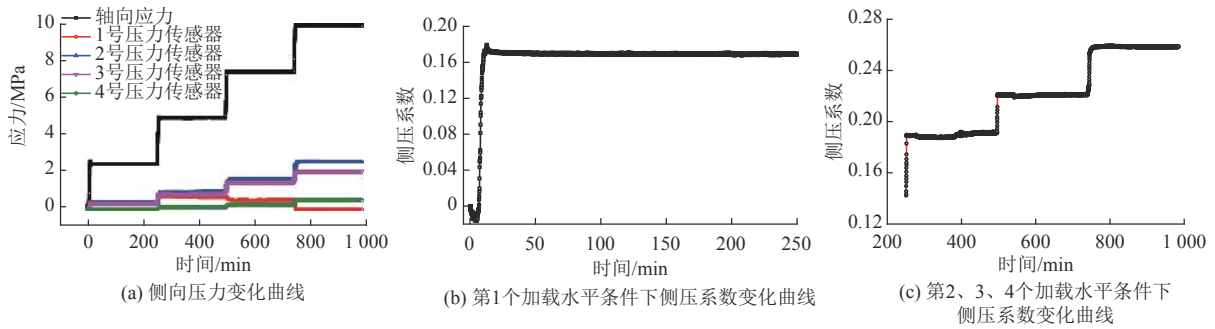


图 10 4 个加载水平下侧向压力和侧压系数变化曲线

Fig.10 Change of lateral pressure and lateral pressure coefficient under four load levels

中心轴线所在水平面上冒落矸石所承受的压力分别为 2.083、2.000、0.189 MPa。

从第二个加载水平开始, 2 号压力传感器变为与加载压头最近的有效压力传感器, 对应的侧压系数变化如图 11 所示, 5 MPa、7.5 MPa 和 10 MPa 恒载下分别为 0.188、0.220 和 0.258。根据侧压系数, 以及 3 号和 4 号压力传感器测出的侧向压力, 5.0 MPa 恒载下分别为 0.872、0.128 MPa, 7.5 MPa 恒载下分别为 1.479、0.289 MPa, 10 MPa 恒载下分别为 2.075 MPa 和 0.515 MPa, 则 3 号和 4 号压力传感器中心轴线所在水平面上破碎岩石所承受的压力, 5.0 MPa 恒载下分别为 4.638、0.681 MPa, 7.5 MPa 恒载下分别为 6.723、1.314 MPa, 10 MPa 恒载下分别为 8.043、1.996 MPa。

假定试验盒顶部为 0 水平面, 则按照各个有效传感器中心轴所在水平面与 0 水平面的位置关系, 1~4 号压力传感器与 0 水平面的垂直距离分别为 50、150、250、350 mm。不同试验类型下, 冒落矸石在不同试验阶段的位置-垂直压力关系曲线如图 11 所示。拟合出的位置-垂直压力关系式见表 3。

表 3 不同试验阶段位置-垂直压力拟合公式统计

Table 3 Fitted formulas of position-vertical pressure relationship during different experimental stage

试验类型	试验阶段	传感器编号	侧向压力/MPa	竖向压力/MPa	侧压系数	位置-竖向压力拟合曲线
1个加载水平 (载荷 10 MPa, 持续 16 h)	10 MPa恒载	1	—	—	0.227	$\sigma = -0.000 2x^2 + 0.061 1x + 5.256 6$ $R^2=1.00$
		2	2.267	10.000		
		3	1.876	8.246		
		4	0.590	2.599		
2个加载水平 (载荷分别为 5、10 MPa, 分别持续 8 h)	5 MPa恒载	1	—	—	0.216	$\sigma = -8 \times 10^{-5} x^2 + 0.020 6x + 3.768 1$ $R^2=1.00$
		2	1.078	5.000		
		3	0.810	3.750		
	4	0.182	0.843			
10 MPa恒载	10 MPa恒载	1	—	—	0.259	$\sigma = -0.000 2x^2 + 0.051 9x + 6.259 4$ $R^2=1.00$
		2	2.586	10.000		
		3	2.072	8.000		
		4	0.623	2.405		

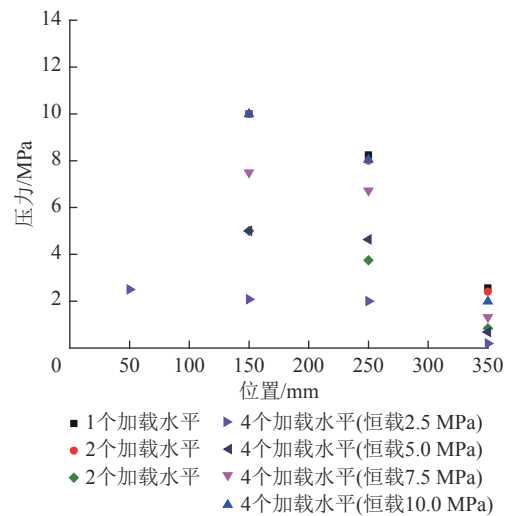


图 11 不同试验阶段位置-垂直压力关系曲线

Fig.11 Position-vertical pressure relationship during different experimental stage

冒落矸石体展现出较强的载荷传递折减效应, 自冒落矸石体顶界面垂直向下呈现递减变化。考虑到侧向压力和竖向压力呈线性正相关, 位置-侧向压力关系曲线趋势完全一致, 不再赘述。

续表

试验类型	试验阶段	传感器编号	侧向压力/MPa	竖向压力/MPa	侧压系数	位置-竖向压力拟合曲线
4个加载水平 (压力分别为2.5、5、7.5、 10 MPa, 分别持续4 h)	2.5 MPa恒载	1	0.422	2.500	0.169	$\sigma = -3 \times 10^{-5} x^2 + 0.006 9x + 2.137 8$ $R^2=0.93$
		2	0.352	2.083		
		3	0.338	2.000		
		4	0.032	0.189		
	5 MPa恒载	1	—	—	0.188	$\sigma = -0.000 2x^2 + 0.068 3x - 1.197 6$ $R^2=1.00$
		2	0.950	5.000		
		3	0.872	4.638		
		4	0.128	0.681		
	7.5 MPa恒载	1	—	—	0.220	$\sigma = -0.000 2x^2 + 0.084 9x - 0.019 5$ $R^2=1.00$
		2	1.645	7.500		
		3	1.479	6.723		
		4	0.289	1.314		
	10 MPa恒载	1	—	—	0.258	$\sigma = -0.000 2x^2 + 0.062 2x + 5.266 8$ $R^2=1.00$
		2	2.578	10.000		
		3	2.075	8.043		
		4	0.515	1.996		

3 结 论

1)研制的组合式冒落矸石承压变形试验装置由底板、反力板、调质轴、压力传感器、反力压头、压板、约束板、拉杆、定位销、加载压头组成,具有试验高度可调、侧向压力直观的特点。利用其对满足均匀粒径分布的5~30 mm的冒落矸石,在加载总时长相同(16 h)、目标载荷相同(10 MPa)、加载水平数量不同(1、2、4)条件下的承压变形特征及侧向压力分布规律进行试验研究。

2)随载荷增加,冒落矸石变形逐渐增大,残余膨胀系数和空隙率逐渐减小,加载较恒载阶段尤为明显;恒载初期,轴向应变增长较快,而后逐渐变缓并趋于平稳,若不发生应变突增,时间-应变呈现对数关系。

3)目标载荷相同,加载总时长一致,随加载水平数量增加,恒载阶段产生的总应变显著增加,分别为3.02%、9.07%和17.72%,表明随加载水平数量增加,虽然载荷对冒落矸石输入的总能量减少,但却对冒落矸石的滑移填充和结构调整起到了明显的促进作用。

4)冒落矸石侧压系数随着载荷增加明显变大;冒落矸石体展现出较强的载荷传递折减效应,自冒落矸石体顶界面垂直向下呈现递减变化;承压变形过程中,粒径为5~10 mm的冒落矸石含量处于动态平衡状态,为稳定粒径。

参考文献(References):

[1] 康红普,张 晓,王东攀,等.无煤柱开采围岩控制技术及应用[J].

煤炭学报,2022,47(1):16-44.

KANG Hongpu, ZHANG Xiao, WANG Dongpan, *et al.* Strata control technology and applications of non-pillar coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 16-44.

[2] 王 琦,江 贝,辛忠欣,等.无煤柱自成巷三维地质力学模型试验系统研制与工程应用[J].岩石力学与工程学报,2020,39(8):1582-1594.

WANG Qi, JIANG Bei, XIN Zhongxin, *et al.* Development of a 3D geomechanical model test system for non-pillar mining with automatically formed roadway and its engineering application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(8): 1582-1594.

[3] 王 琦,张 朋,蒋振华,等.深部高强锚注切顶自成巷方法与验证[J].煤炭学报,2021,46(2):382-397.

WANG Qi, ZHANG Peng, JIANG Zhenhua, *et al.* Automatic roadway formation method by roof cutting with high strength bolt-grouting in deep coal mine and its validation[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(2): 382-397.

[4] 谭云亮,于凤海,宁建国,等.沿空巷旁支护适应性原理与支护方法[J].煤炭学报,2016,41(2):376-382.

TAN Yunliang, YU Fenghai, NING Jianguo, *et al.* Adaptability theory of roadside support in gob-side entry retaining and its supporting design[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(2): 376-382.

[5] 马占国,郭广礼,陈荣华,等.饱和破碎岩石压实变形特性的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(7):1139-1144.

MA Zhanguo, GUO Guangli, CHEN Ronghua, *et al.* An experimental study on the compaction of water-saturated over-broken rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(7): 1139-1144.

[6] 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 Zhennan, 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.
- [7] 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.* Experimental study of compaction characteristics of crushed stones from coal seam roof[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(1): 18-26.
- [8] 陈晓祥, 苏承东, 唐旭, 等. 饱水对煤层顶板破碎岩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.
- [9] 冯梅梅, 吴疆宇, 陈占清, 等. 连续级配饱和破碎岩石压实特性试验研究[J]. *煤炭学报*, 2016, 41(9): 2195-2202.
FENG Meimei, WU Jiangyu, CHEN Zhanqing, *et al.* Experimental study on the compaction of saturated broken rock of continuous gradation[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(9): 2195-2202.
- [10] 张季如, 祝杰, 黄文竞. 侧限压缩下石英砂砾的颗粒破碎特性及其分形描述[J]. *岩土工程学报*, 2008, 30(6): 783-789.
ZHANG Jiru, ZHU Jie, HUANG Wenjing. Crushing and fractal behaviors of quartz sand-gravel particles under confined compression[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, 30(6): 783-789.
- [11] 张季如, 张弼文, 胡泳, 等. 粒状岩土材料颗粒破碎演化规律的模型预测研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(9): 1898-1905.
ZHANG Jiru, ZHANG Biwen, HU Yong, *et al.* Predicting the particle breakage of granular geomaterials[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(9): 1898-1905.
- [12] 郁邦永, 陈占清, 吴疆宇, 等. 饱和级配破碎泥岩压实与粒度分布分形特征试验研究[J]. *岩土力学*, 2016, 37(7): 1887-1894.
YU Bangyong, CHEN Zhanqing, WU Jiangyu, *et al.* Experimental study of compaction and fractal properties of grain size distribution of saturated crushed mudstone with different gradations[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(7): 1887-1894.
- [13] 陈占清, 李顺才, 茅献彪, 等. 饱和含水石灰岩散体蠕变过程中孔隙度变化规律的试验研究[J]. *煤炭学报*, 2006, 31(1): 26-30.
CHEN Zhanqing, LI Shuncai, MAO Xianbiao, *et al.* Experimental on the porosity changing of water-saturated granular limestone during its creep[J]. *Journal of China Coal Society*, 2006, 31(1): 26-30.
- [14] 马占国, 兰天, 潘银光, 等. 饱和破碎泥岩蠕变过程中孔隙变化规律的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(7): 1447-1454.
MA Zhanguo, LAN Tian, PAN Yinguang, *et al.* Experimental study of variation law of saturated broken mudstone porosity during creep process[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(7): 1447-1454.
- [15] 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 characteristic of large-size broken rock[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(4): 1000-1007.
- [16] 王海龙, 郭惟嘉, 孙熙震, 等. 矿井采动覆岩涌水溃砂致灾机理及防治[M]. 北京: 科学出版社, 2020: 35-56.
- [17] 王海龙. 厚松散层薄基岩采动涌水溃砂致灾基础试验研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2016: 34-51.
WANG Hailong. Experimental study on water and sand inrush caused by mining under thin bedrock and thick unconsolidated formations[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2016: 34-51.
- [18] 樊秀娟, 茅献彪. 破碎砂岩承压变形时间相关性试验[J]. *采矿与安全工程学报*, 2007, 24(4): 486-489.
FAN Xiujuan, MAO Xianbiao. Experimental study of time-dependent deformation of broken sandstones under pressure[J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2007, 24(4): 486-489.
- [19] 缪协兴, 茅献彪, 胡光伟, 等. 岩石(煤)的碎胀与压实特性研究[J]. *试验力学*, 1997, 12(3): 394-400.
MIAO Xiexing, MAO Xianbiao, HU Guangwei, *et al.* Research on broken expand and press solid characteristics of rocks and coals[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 1997, 12(3): 394-400.
- [20] 罗怀廷, 李俊孟, 黄艳利, 等. 露天矿排放矸石三轴压缩宏-细观力学特性研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2018, 35(1): 170-178.
LUO Huaiting, LI Junmeng, HUANG Yanli, *et al.* Study on macro and microcosmic mechanical properties of crushed gangue from pit mine under tri-axial compression[J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2018, 35(1): 170-178.
- [21] 张德辉, 李辉. 连续级配矸石压缩性能的试验研究[J]. *辽宁工程技术大学学报(自然科学版)*, 2011, 30(3): 337-340.
ZHANG Dehui, LI Hui. Experimental study on compression performance of continuous grading gangue[J]. *Journal of Liaoning Technical University (Natural Science)*, 2011, 30(3): 337-340.
- [22] LI Meng, MENG Guohao, ZHANG Jixiong, *et al.* Sensitivity analysis of key factors influencing compression-induced deformation of waste rocks for backfilling to reduce environmental pollution[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27(14): 16707-16717.
- [23] LI Meng, ZHANG Jixiong, MENG Guohao, *et al.* Testing and modelling creep compression of waste rocks for backfill with different lithologies[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2020, 125(14): 104170-104179.
- [24] 肖猛, 巨峰, 何泽全, 等. 矸石充填材料侧压系数影响因素试验研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2020, 37(1): 73-80.
XIAO Meng, JU Feng, HE Zequan, *et al.* Experimental study on influence factors of the lateral pressure coefficient of gangue backfilling materials[J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2020, 37(1): 73-80.