

文章编号: 1673-193X(2017)-08-0139-06

双介质矿岩轴向加载损伤破坏试验分析研究*

王明旭¹, 许梦国¹, 杜宇翔², 李玉飞¹, 赵文斌¹, 陈郑亮¹

(1. 武汉科技大学 资源与环境工程学院 湖北 武汉 430081;

2. 中国科学院 武汉岩土力学研究所 湖北 武汉 430074)

摘要: 为研究夹石对矿体力学变形特性的影响, 选用全精炼的工业石蜡作为夹石模拟材料, 并与水泥和矿粉进行配比制样。通过表壁裂纹扩展、微观成像、表壁应变值变化、整体加载压缩变形、磁感应强度变化、红外温度测量共同表征夹石试样在加载过程中的力学变形特征, 厘清夹石矿岩的破坏特点。同时提出了一种数值模拟夹石的方法, 进行不同夹石含量矿岩的安全系数、最大主应力及不同监测点处应变值的变化监测。试验结果表明: 存在夹石的试样在加载过程中表壁出现较多裂纹条数, 且以短裂纹为主, 分布区域较广; 表壁纵向应变变化较平稳, 而横向应变存在阶梯型变化; 红外温度测量并无恒定的变化幅度, 存在升降的起伏变化; 磁感应强度值变化存在上升下降型、下降平稳型、下降上升型的变化特点。数值模拟结果表明: 夹石的存在弱化了矿岩的整体强度, 这与相似模拟结果具有一致性。同时不同的夹石强度对矿岩的整体稳定性影响不一样。当试样的整体稳定性与夹石的物理性质有关, 夹石强度是矿石强度50%左右时, 彼此接触严丝合缝, 夹石存在及含量的多少产生的影响不大; 如果夹石强度只是矿石强度的2%时, 相应的测点起伏变化较大; 如果试样完整性不好, 存在较多微观空区, 空区附近的相应测点的应变值变化起伏较大。

关键词: 矿岩; 夹石; 石蜡颗粒; 裂纹扩展; 磁感应强度; 红外温度测量

中图分类号: TD853 文献标识码: A doi: 10.11731/j.issn.1673-193x.2017.08.022

Test and analysis study on axial loading damage and failure of double medium ore rock

WANG Mingxu¹, XU Mengguo¹, DU Yuxiang², LI Yufei¹, ZHAO Wenbin¹, CHEN Zhengliang¹

(1. School of Resource and Environmental Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan Hubei 430081, China;

2. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan Hubei 430074, China)

Abstract: In order to study the influence of dunn bass on the mechanical deformation characteristics of the ore body, the fully refined industrial paraffin was chosen as the simulation material of dunn bass, and made proportioning with cement and mineral powder to prepare the test specimens. The failure characteristics of the ore rock with dunn bass were clarified through the combined representation of mechanical deformation characteristics for dunn bass test specimens during the loading process by the surface wall crack propagation, microscopic imaging, surface wall strain value change, overall loading compression deformation, magnetic induction intensity change and infrared temperature measurement. A numerical simulation method of dunn bass was put forward, and the change of safety coefficient, the maximum principal stress and the strain at different monitoring points for ore rock with different dunn bass contents were monitored. The results showed that more cracks appeared on the surface wall of test specimens with dunn bass during the loading process, with the short cracks as primary, and the distribution region was wide. The change of longitudinal strain on surface wall was more stable, while the transverse strain presented a stepped change. The infrared temperature measurement had no constant change amplitude, with a fluctuant change of ups and downs. The change of magnetic induction intensity had the characteristics of ascending and descending type, descending and steady type, and descending and ascending type. The numerical simulation results showed that the existence of dunn bass weakened the overall strength of ore rock, which was consistent with the similar simulation results. Different dunn bass strength had different influence on the overall stability of ore rock. When the overall stability of test specimen related to the physical properties of dunn bass, and the dunn bass strength was about 50% of the ore strength, they con-

收稿日期: 2017-06-04

作者简介: 王明旭, 博士。

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(51604195)

tacted with each other closely , and the existence of dunn bass and its content had little influence. If the dunn bass strength was only 2% of the ore strength , the corresponding measurement points fluctuated greatly. If the integrity of specimen was bad , there were many microscopic empty space , and the strain value change of the corresponding measurement points around the empty space fluctuated greatly.

Key words: ore rock; dunn bass; paraffin particles; crack propagation; magnetic induction intensity; infrared temperature measurement

0 引言

矿山井下地质条件复杂 , 矿岩体强度既受到水作用的弱化 , 也受到节理裂隙和夹石的影响。如柴金飞等^[1]为揭示不同节理方位对岩石破裂机理的影响 , 利用 PFC 软件模拟岩石裂纹孕育、发展和贯通过程中产生的大量声发射数据。通过现场调查 , 充填采区矿岩顶板和片帮夹石较多。这些夹石对矿柱或围岩顶板的稳定性影响有待深入研究。目前对于夹石矿体的相关力学特性及稳定性研究取得了一些成果 , 如霍宗保等^[2]对煤层夹石体中含水及涌水通道进行了相关研究; 阚兴等^[3]从大范围内的夹石层对采煤速度的影响 , 采用采煤机切割和爆破相结合的方式处理夹石; 韩新平等^[4]对含有软弱夹层顺层岩体台阶进行深孔爆破试验; 杨强强等^[5]通过 CT 扫描显示在有机质和重矿物较发育的部位形成孔隙 , 因岩石成分和成岩作用使其孔隙空间降低; 路珍等^[6]对石英中的黑云母软弱层等进行摩擦试验; 杨安国等^[7]研究如何对钨矿中夹石进行剔除。更多的文献只是论述了矿体中夹石的存在 , 并没有就夹石存在对矿体的力学特性进行具体的定量分析。本文为了定量研究矿岩的配比试样在加载过程中的相关力学变形特征 , 选用了应变值、磁感应强度、红外温度测量方式对试样表壁进行相关测试 , 并提出了一种模拟夹石含量的数值模拟方法。同时通过对含有夹石的充填现场矿柱进行锤击试验 , 发现矿岩能够轻易被敲碎脱落 , 而没有夹石且节理不发育矿岩在敲击中不易敲碎破坏。

1 室内加载试验

从现场选取含有较多夹石的矿块(见图 1) , 经过钻孔、切割和打磨成标准试件 , 通过轴向加载 , 含有夹石(主要是石膏)的单轴抗压强度最小的只有 20.02 MPa , 而完整性好的矿石单轴抗压强度平均达到 99.70 MPa。说明夹石含量对矿岩的强度影响较大。矿岩中含有夹石 , 可以通过表壁的夹石分布了解夹石在矿体中大体的空间分布特点。

1.1 模拟材料选择及加载

为了更好研究夹石对矿岩产生的影响 , 便于研究含有夹石的矿柱与充填体的相互作用 , 运用相似原理 , 选

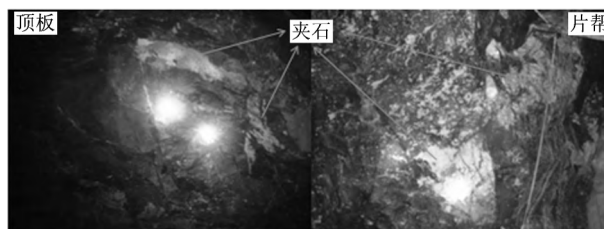


图 1 充填现场顶板和片帮夹石

Fig. 1 roof and wall caving dunn bass of filling the scene

用全精炼的工业石蜡颗粒作为夹石(石膏)模拟与矿粉进行配比混合 , 成型养护后进行加载试验(见图 2)。具体配比为水泥 : 矿粉 : 石蜡颗粒 1 : 6 : 1 , 平均容重为 1 998 kg/m³ , 而水泥 : 矿粉为 1 : 6 的平均容重为 2 756 kg/m³。在 WAW-300 微机控制电液伺服万能试验机上加载 , 加载速率采用先位移控制 , 加载速率为 0.01 mm/s , 待荷载达到 0.5 kN 后 , 再转为试验力控制 , 加载速率为 0.001 kN/s。

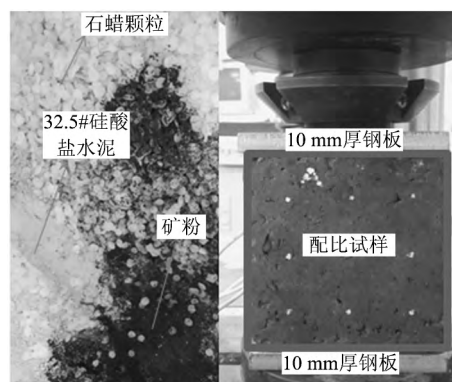


图 2 配比试样加载

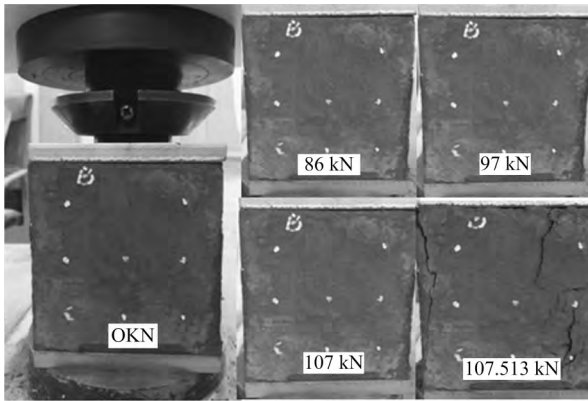
Fig. 2 Proportioning sample loading

1.2 试验结果分析

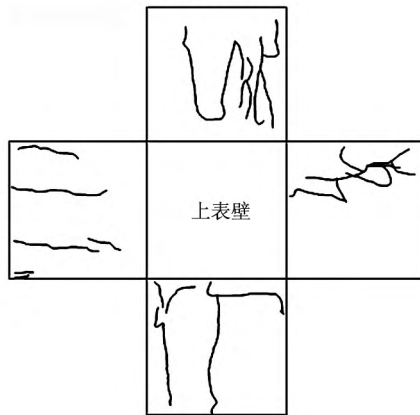
1.2.1 裂纹扩展

通过 10 mm 厚钢板加找平装置进行加载 , 不考虑夹石影响时 , 1 : 6 的水泥矿粉试样在轴向加载过程中 , 载荷在 86 kN 时监测表壁 B 在记号 B 的右上方开始显现浅裂纹 , 当载荷达到 97 kN 时这条裂纹渐趋明显 , 载荷达到 107 MPa 时已经形成 2 条明显的间断裂纹 , 而立方体试样最后破坏时的最大载荷为 107.513 kN。裂纹也

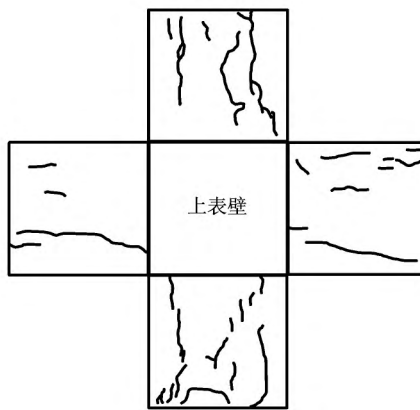
是达到最大载荷后突然失稳破坏,并伴随试样加载破坏时的声音释放(见图 3(a))。无夹石试样在加载前期,处于压密阶段,载荷变化较平缓,当位移达到 0.75 mm 后,随着位移的加大,载荷随之快速增长。当位移达到 0.9 mm 时,随着位移的加大,载荷迅速增长。



(a) 表壁裂纹扩展



(b) 无夹石



(c) 有夹石

图 3 X-091 试样加载过程中的表壁裂纹扩展

Fig.3 surface crack of X-091 specimen under loading

无夹石试样加载破坏后,表壁裂纹主要是竖向破坏裂纹,且各竖向裂纹较长,试样 4 个表壁的最长裂纹的平均值达到 72.25 mm。水平裂纹较少,最长的水平裂纹出现在正立面的底角处,背立面出现了较明显的 2 条

水平裂纹,不过裂纹长度较短(见图 3(b))。对于有夹石的试样,表壁裂纹主要以短裂纹为主,且裂纹在试样表壁分布较均匀(见图 3(c))。

加入了全精炼石蜡颗粒之后的配比试样,加载破坏后的试样表壁裂纹条数相较未加石蜡颗粒的试样要多。未加石蜡的试样各个表壁主要是几条贯通的裂纹线,裂纹条数较少,平均每个面为 3 条左右,而夹石配比模拟的加载破坏的表壁裂纹条数平均为 10 条左右(见表 1)。为了更好地分析含有夹石试样表壁的裂纹扩展损伤破坏规律,借助 PVC 透明塑料薄片进行试样表壁裂纹的描摹,将描摹后的含有表壁裂纹线的 PVC 透明塑料薄片拍照后进行电子版的描摹转换(见图 3(b)和(c))。将 100 mm × 100 mm 的尺寸均分为 100 个 10 mm × 10 mm 的小正方形,再将已经描摹成电子版的等尺寸的裂纹线投射,进行裂纹线占据格子数的计算,同时计算裂纹条数和表壁最长裂纹长度(见表 1)。

表 1 表壁裂纹情况

Table 1 Surface crack

表征项目	表壁位置(无夹石)			
	正立面	背立面	左立面	右立面
表壁分割数/条	100	100	100	100
裂纹占据数/条	31	37	25	22
裂纹条数/条	5	6	6	6
最长裂纹长度/mm	83	76	68	62

表征项目	表壁位置(有夹石)			
	正立面	背立面	左立面	右立面
表壁分割数/条	100	100	100	100
裂纹占据数/条	44	36	18	26
裂纹条数/条	16	10	4	9
最长裂纹长度/mm	63	101	96	80

1.2.2 应变值变化

无夹石试样的单轴抗压强度为 10.751 MPa,而质量占比为 14.3% 的夹石试样单轴抗压强度只有 3.795 MPa。夹石的存在弱化了矿岩的整体强度。含有夹石试样最后的位移为 2.01 mm,而无夹石试样最后的位移为 1.92 mm,说明夹石的加入提高了试样的压缩变形量。为了更好地研究夹石矿岩在荷载作用下的表壁应变变化规律,在试样表壁的几何中心贴置横向和纵向的电阻应变片,通过 BX2011C 电阻应变仪进行应变变化测试。同时通过微机控制电液伺服系统进行试验力加载与试样轴向位移变化的监测。从图 4 可以看出,横向应变是拉应变,纵向应变是压应变。在载荷不断加大的过程中,纵向应变除在 7.0 kN 处发生突变回弹到 121 $\mu\epsilon$ 外,一直处于较平缓的折线式上升。而横向应变突变幅度较大,在载荷不断加大的过程中,10、20、30 kN 处存在应变值的突变,30 kN 之前处于阶段性的线性变化阶段,30 kN 之后,横向应变值急速上升,直至破坏前有一个应

壁的温度,形成加载过程中的试样表壁温度的梯度变化。

变值先回落后上升的阶段,接着发生较大的破坏变形。从 21.5 kN 到最后的 37 kN 的变化过程中,试样纵向位移的变化趋势与纵向应变值的绝对值都存在不断增长的变化趋势。

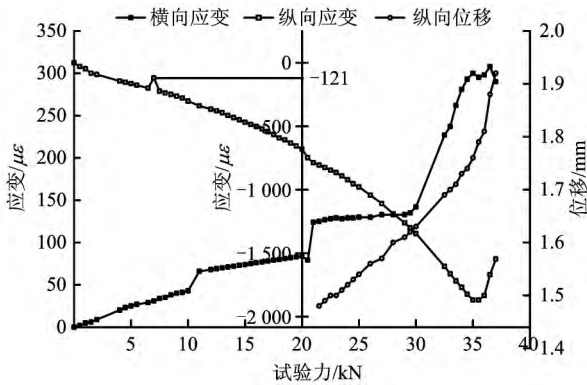


图 4 加载作用下应变和位移变化情况
Fig. 4 The change of strain and displacement under the action of loading

1. 2. 3 磁感应强度和红外温度测量

金属矿粉本身没有磁性,通过高强度的钕铁硼磁铁进行 3 d 的磁化处理,使其表壁产生磁化强度^[8]。试验之前,在含有夹石试样表壁设置三纵三横的 9 个监测点,分别在未加载,加载至 10、20、30 kN 和破坏时通过特斯拉计监测试样表壁的磁场变化情况。通过监测得知,由于夹石的存在,不同点的磁场变化情况不一。除了试样在最后破坏形成较多表壁裂纹造成各点的磁感应强度普遍降低外,在加载过程中,9 个监测点的磁感应强度并没有统一的变化规律。对于红外温度^[9]测量,依据斯蒂芬-玻尔兹曼定律,物体的温度与辐射射度存在对应关系,即:

$$W_b = \varepsilon \sigma T^4 \quad (1)$$

式中: W_b 为物体辐射出的射度, W/cm^3 ; σ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数, $5.6697 \times 10^{-12} W/(cm^2 \cdot K^{-4})$; T 为物体的绝对温度, K; ε 为物体发射率。

含有夹石试样在加载过程中,伴随着能量的积聚与释放,产生温度的微弱变化,这一过程中存在红外的释放。通过希码红外温度测量,表征含有夹石试样在加载过程中的能量释放规律。为此,在试样表壁从上到下,从左至右,依次设置 9 个监测点。分别在 3.8、10、20、30 kN 通过希码红外温度测量,得到了夹石试样表壁的温度变化曲线图(见图 5)。从图 5 可以看出,除了极个别点发生的温度变化突变外,9 个监测点的能量释放存在统一的变化规律,这与徐文彬等^[17]研究的充填体在压缩破坏过程中,温度表现出明显的降低-上升-降低现象是一致的。试样上表壁的温度普遍高于试样中间表壁,中间表壁普遍高于试样下表

壁的温度,形成加载过程中的试样表壁温度的梯度变化。

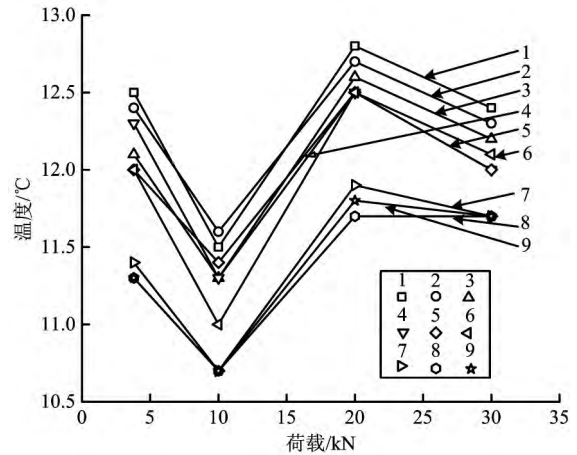


图 5 X-12091 A 面不同荷载作用下的温度变化值
Fig. 5 Temperature variation of X-12091 a face under different loads

2 数值模拟

对于夹石对矿岩体产生的影响,定性分析较多。在定量分析方面,很多做法是将夹石考虑为宏观大块进行相关的数值模拟。这种模拟方式为研究夹石的影响提供了一种研究手段,可对于夹石小范围的分散分布情况,暂时没有很好的模拟方式。为了更好厘清不同夹石含量对矿岩体力学变形特征的影响,形成数值模拟的定量分析,提出了微元体的建模并借助随机分布函数进行赋值的数值模拟方式,具体使用 ANSYS workbench 模拟软件进行数值模拟研究。

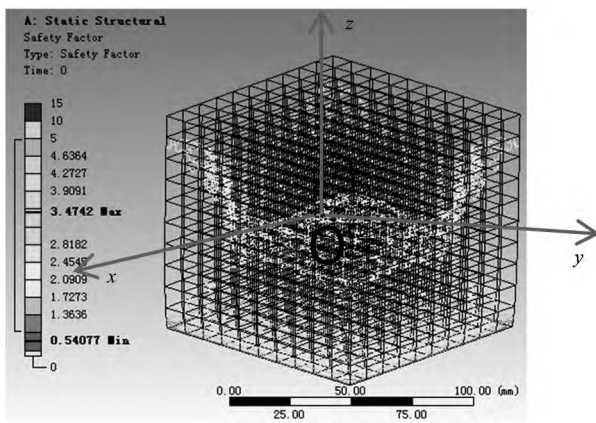
以正方体的几何中心为原点(0, 0, 0),建立空间直角坐标系。从(0, -30, -49.5)到(0, -30, 49.5)之间建立 49 个等距离的系列监测点 A1 ~ A49。从(0, 0, -49.5)到(0, 0, 49.5)之间建立 49 个等距离的系列监测点 B1 ~ B49。现场夹石成分丰富,有砂卡岩、大理岩、闪长岩、石膏、石英等夹石,为了研究的方便,以综合折减参数进行夹石赋值的数值模拟(见表 2)。建立 100 mm × 100 mm × 100 mm 的正方体模型,将其等分为 1 000 个小正方体。对这 1 000 个正方体进行编号。考虑到实际当中,夹石并非均匀分布,为此将连续的 5 个正方体作为 1 组,1 000 个小正方体共编为 200 组,将这 200 组通过 excel 表中的随机函数(= rand()) 赋予随机值,然后进行降序排序之后,按照夹石含量体积占比不同分别取不同量的组数。以夹石含量 10% 来算,取前 20 组赋予夹石的参量。网格最后划分成 270 641 个节点,64 000 个单元。

表 2 典型矿岩物理力学参数

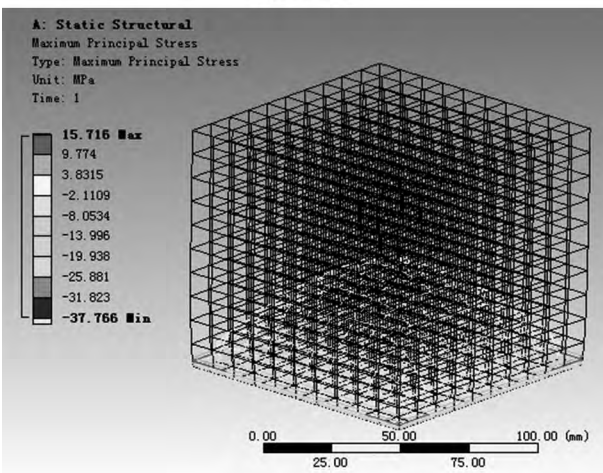
Table 2 Physical and mechanical parameters of typical ore

岩性	弹性模量 E/GPa	泊松比 μ	容重 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	抗压强度 σ_c/MPa	抗拉强度 σ_t/MPa	黏聚力 c/MPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$
矿石	42.4	0.30	41.2	118.5	8.2	8.32	33.6
夹石	43.6	0.23	30.9	62.6	35.0	—	—
弱化夹石	0.6	0.29	22.4	2.4	0.62	28	0.6

如果全部为矿石,立方体矿体内部在 50 MPa 荷载作用下的安全系数等值线图呈现为皇冠状(见图 6)。当夹石为 10% 时,由于夹石随机分布,矿体内部等值线图依然可以显现安全系数等值线图的皇冠状,但局部区域已经发生了等值线图的变化,安全系数为 1.727 3 ~ 2.090 9 区域的等值线向矿体上部延伸。也因为夹石的存在,矿体内上部区域出现应力集中显现,最大处达到 9.710 6 MPa。不同夹石含量对系列监测点的安全系数、表壁应变值的影响较大。



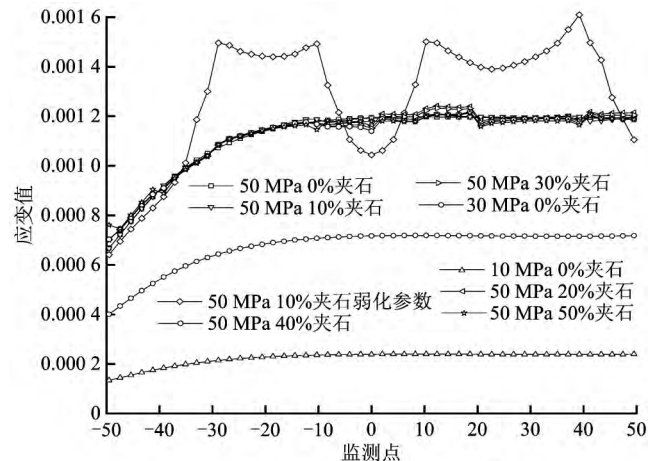
(a) 安全系数



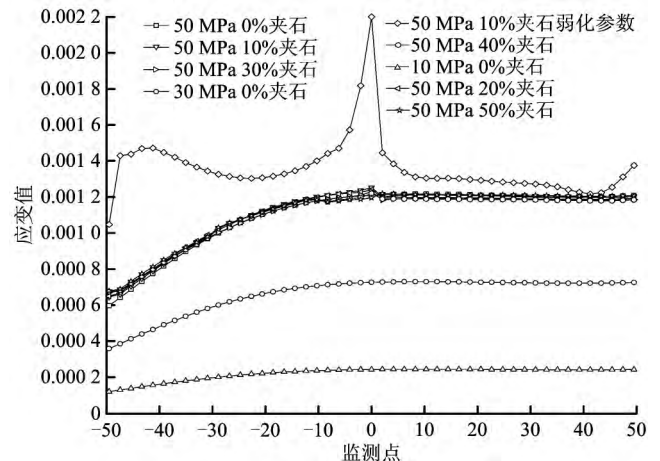
(b) 最大主应力

图 6 全矿石的安全系数和最大主应力分布

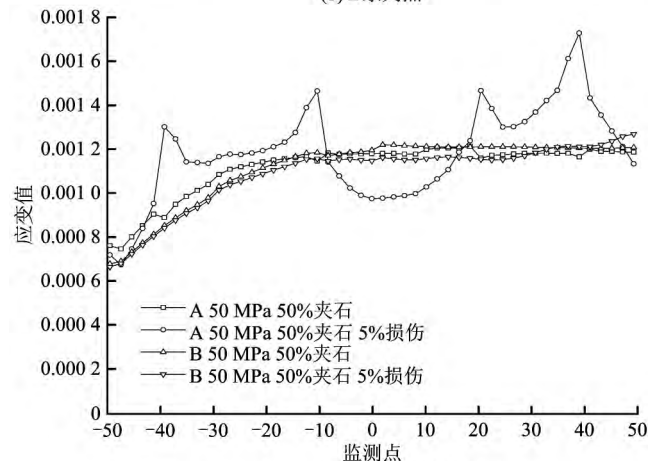
Fig. 6 The safety factor and the maximum principal stress distribution of the whole ore



(a) A 系列点



(b) B 系列点



(c) 系列点(强度差异较大)

图 7 监测点应变值

Fig. 7 Strain value of monitoring point

当夹石单轴抗压强度为矿体单轴抗压强度一半左右时,在没有空区节理情况下,夹石含量对矿岩整体强度及变形影响不大。可如果夹石单轴抗压强度只是矿体单轴抗压强度的 2% 时,不同区域的应变值差异较大(见图 7(c))。

3 结论

1) 没有夹石的矿岩试样在轴向加载作用下,表壁主要以少量的竖向长裂纹为主,夹石的存在使加载过程中的试样表壁出现较多裂纹条数,以短裂纹为主,其分布区域较广。

2) 表壁纵向应变变化较平稳,而横向应变存在阶梯型变化且变化幅度较大。红外温度测量显示夹石试样加载过程中存在能量的积聚与释放的阶段变化,并无恒定的变化幅度,存在起伏变化规律。磁感应强度值变化受夹石影响较大,特别是表壁加载破坏前各处磁感应强度值的一致减小,说明磁感应强度测量能够作为裂纹扩展变化的表征指标。

3) 通过数值模拟得出:试样的整体稳定性与夹石的物理力学性质有关,夹石的存在弱化了矿岩的整体强度。同时不同的夹石强度对矿岩的整体稳定性影响不一样。当夹石是矿石强度的 50% 左右时,夹石存在及含量的多少所产生的影响不大。如果夹石强度只是矿石强度的 2% 时,相应的测点起伏变化较大。如果试样完整性不好,存在较多微观空区,空区附近的相应测点的应变值的变化起伏较大。

参考文献

[1] 柴金飞,高永涛,吴顺川,等. 基于细观特征分析的单节理岩石破裂机理研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2016, 33(3): 528-534.
CHAI Jinfei, GAO Yongtao, WU Shunchuan, et al. Research on single jointed rock failure mechanism based on microscopic characteristics analysis[J]. Journal of Mining & Safety Engineer, 2016, 33(3): 528-534.

[2] 霍宗保,丁小敏. 煤层中夹石体含水及导水性分析研究[J]. 价值工程, 2010(19): 101.
HUO Zongbao, DING Xiaomin. Research on aquosity and hydraulic conductivity of the clip stone in coal layer[J]. Value Engineering, 2010(19): 101.

[3] 阚兴,程孝海. 综采工作面坚硬厚层夹石处理研究[J]. 煤矿开采, 2008, 13(2): 43-44, 12.
KAN Xing, CHENG Xiaohai. Research on disposition of horse stone in hard roof of full-mechanized mining face[J]. Coal Mining Technology, 2008, 13(2): 43-44, 12.

[4] 韩新平,李世丰,苏荣华,等. 含软弱夹层的顺层岩体台阶深孔爆破试验研究[J]. 爆破, 2016, 33(2): 49-54, 82.
HAN Xinping, LI Shifeng, SU Ronghua, et al. Deep hole bench blasting test in bedding rock stairs with weak interlayer[J]. Blasting, 2016, 33(2): 49-54, 82.

[5] 杨强强,李琦,黄静,等. 川西坳陷须五段致密气泥岩储层空间及主控因素[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 2015, 38(3): 308-313.
YANG Qiangqiang, LI Qi, HUANG Jing, et al. Reservoir space and controlling factors of tight gas mud stones in the 5th member of Xujiahe formation of the western Sichuan depression[J]. Journal of East China Institute of Technology (Natural Science), 2015, 38(3): 308-313.

[6] 路珍,何昌荣. 软弱成分层对断层泥强度的影响[J]. 地震地质, 2015, 37(1): 68-80.
LU Zhen, HE Changrong. Quantitative influence of weak phase layer on strength of fault gouge[J]. Seismology and Geology, 2015, 37(1): 68-80.

[7] 杨安国,周宗红,章雅琦. 某钨矿夹石剔除方式的探讨[J]. 中国钨业, 2014, 29(5): 8-11, 20.
YANG Anguo, ZHOU Zonghong, ZHANG Yaqi. Gauge removal method in a molybdenum-tungsten mine[J]. China Tungsten Industry, 2014, 29(5): 8-11, 20.

[8] 王明旭,许梦国,赵文斌,等. 基于磁场理论的矿岩加载损伤破坏表征研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2017, 13(2): 85-90.
WANG Mingxu, XU Mengguo, ZHAO Wenbin, et al. Study on damage characterization of ore rock loaded by magnetic field theory[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2017, 13(2): 85-90.

[9] DU Kun, LI Xibing, LI Diyuan, et al. Failure properties of rocks in true triaxial unloading compressive test[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015(25): 571-581.

[10] 徐文彬,王运敏,党鹏,等. 胶结充填体压缩破坏前兆多参数表征[J]. 岩土力学, 2016, 37(2): 399-406.
XU Wenbin, WANG Yunmin, DANG Peng, et al. Precursors to compression failure of cemented backfill mass based on the multiparameter method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(2): 399-406.

(责任编辑:郭利)