

孙利辉,纪洪广,蒋华,等.弱胶结地层条件下垮落带岩层破碎冒落特征与压实变形规律试验研究[J].煤炭学报,2017,42(10):2565-2572. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2017.0051

SUN Lihui,JI Hongguang,JIANG Hua,et al.Experimental study on characteristics of broken caving and regularity of compaction deformation of rocks in caving zone in the weakly cemented strata[J].Journal of China Coal Society,2017,42(10):2565-2572. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2017.0051

弱胶结地层条件下垮落带岩层破碎冒落特征与压实变形规律试验研究

孙利辉^{1,2},纪洪广³,蒋华³,曾鹏⁴,杨本生^{1,2}

(1.河北工程大学矿业与测绘工程学院,河北邯郸 056038;2.河北省煤炭资源综合开发与利用协同创新中心,河北邯郸 056038;3.北京科技大学土木与资源工程学院,北京 100083;4.江西理工大学资源与环境工程学院,江西赣州 341000)

摘要:采空区顶板岩层的破碎、冒落、压实、类固结等性能是影响垮落带高度变化的重要因素。通过破碎岩石压缩实验和岩石崩解实验,研究了不同类型岩石的破碎、崩解性能,分析了岩石膨胀变形—破碎冒落—充填压实—蠕变固结的变形过程及特征,揭示了我国东部和西部矿区岩石变形破坏的差异性。研究表明:弱胶结岩石具有强膨胀、易崩解的特性,西部弱胶结岩石较中东部岩石更易破碎,耐崩解指数较中东部岩石偏小,岩石耐崩解指数随崩解循环次数增加呈线性递减关系;相同采高条件下,西部弱胶结地层工作面初始垮落带高度较中东部岩层工作面小,弱胶结地层工作面垮落带趋于稳定后垮落带高度的变化量大,弱胶结岩石的胶结性越差这种特性越强。相似模拟试验结果证明了理论分析的可靠性。

关键词:弱胶结地层;垮落带;岩层破碎;压实变形;时变规律

中图分类号:TD325 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-9993(2017)10-2565-08

Experimental study on characteristics of broken caving and regularity of compaction deformation of rocks in caving zone in the weakly cemented strata

SUN Lihui^{1,2},JI Hongguang³,JIANG Hua³,ZENG Peng⁴,YANG Bensheng^{1,2}

(1. College of Mining and Geomatics Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China; 2. Collaborative Innovation Center of the Comprehensive Development and Utilization of Coal Resource, Hebei Province, Handan 056038, China; 3. School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 4. School of Resources and Environmental Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China)

Abstract:The rocks properties of broken, caving, compaction, consolidation are important influence factors on the height variation of caving zone. Based on the broken rocks compression experiment and rocks disintegration experiment, the different types of rock broken and disintegration properties were studied, the rock time-deformation characteristics and process of swelling-deformation and broken-caving and filling-compaction and consolidation were analyzed, the differences between rock deformation and failure were revealed in Western and Eastern China. The results show that the weakly cemented rock has the characteristics of strong expansion and easy disintegration, weakly cemented rock is easily broken than the Middle Eastern rock, resistant disintegration index of weak cemented rock is smaller than

收稿日期:2017-01-10 修回日期:2017-06-12 责任编辑:毕永华

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFC0600801);国家自然科学基金重点资助项目(51534002);国家自然科学基金资助项目(51174015)

作者简介:孙利辉(1978—),男,辽宁清原人,讲师,博士。E-mail:slh2002789@sina.com。通讯作者:纪洪广(1963—),男,山东青州人,教授,博士生导师,博士。Tel:010-62333876,E-mail:jihongguang@ces.ustb.edu.cn

Middle Eastern rock, The relationship of the disintegration index of the rock was linear decreasing with the increase of the number of disintegration cycles; under the same mining height condition, the initial height of caving zone of work face in the weakly cemented strata is smaller than in Middle Eastern areas, the variable quantity of caving zone height is larger after caving zone tends to be stable for weakly cemented strata work face, the characteristic is stronger if cementation of cement rock is poorer. The results of similar simulation experiment also proved the reliability of this theoretical analysis.

Key words: weakly cemented strata; caving zone; strata broken; compaction deformation; regularity of time and deformation

工作面开采扰动及其后方形成的采空区,为顶板岩层提供了变形破坏的力源和冒落空间,自下而上形成“三带”,垮落带的变化是其上覆两带发生变化的基础,而垮落带的属性则由顶板破碎岩层物理力学性质和工作面采高决定的。近年我国陆续建成投产了大批开采弱胶结地层煤炭资源的矿山,西部弱胶结地层岩石物理力学性能与中东部岩石有一定的差别,主要表现为强度低、易崩解、遇水泥化、胶结性差等特点,在这种地层条件下进行开采,工作面垮落带的变化受弱胶结岩层物理力学性质的差异影响将会与中东部垮落带有所不同,认识不清则易引起工作面发生大面积冒顶、支架压死、溃沙、溃水等事故^[1-3],以及对“三带”的错误判断。

岩石胶结是指将岩石颗粒黏结在一起并具有一定强度的物质,按胶结类型岩石强度由大到小依次为硅质、铁质、钙质、泥质胶结岩石^[4]。很多学者实验研究发现^[5-13],西部矿区很多岩石即使为铁质、硅质、钙质胶结,但岩石强度也较中东部同类型岩石强度低,由此一些学者将这类特殊成岩条件下形成的胶结程度低的岩石称之为弱胶结岩石。近年来,国内外学者对弱胶结岩石的物理力学性质开展了卓有成效的研究。汪泓等^[5]认为围压对弱胶结砂岩的变形影响较大,围压越大岩石由弹性向塑性转变的能力越强。赵永川等^[6]对比了不同粒径弱胶结岩石蓄能能力,结果表明:岩石颗粒越细随加载其储存应变能能力越弱,岩石初始压密和屈服阶段储存应变能较多,而卸载阶段储存应变能较少。王渭明^[7]通过定义刚度劣化系数和强度劣化系数,建立了弱胶结软岩巷道围岩弹塑性流动损伤模型,推导了弹性、塑性及塑性流动损伤区的应力、位移解析解。王渭明^[8]基于幂律蠕变本构模型建立了弱胶结软岩冻结井壁分层计算有限差分模型。ZHAO Zenghui等^[9]采用3种本构模型分析了弱胶结岩石的变形特征,利用数值模拟技术研究了煤岩组合条件下变形破坏规律。孟庆彬^[10-11]分析了极弱胶结岩石应变软化与扩容变形特性,构建了极弱胶结岩体扩容大变形本构模型,揭示了弱胶结巷

道围岩位移、塑性区与应力分布的演化规律,提出了工字钢、钢筋网+混凝土衬砌的联合支护技术。乔卫国^[12]认为围岩遇水软化、膨胀性强、支护形式不合理等是弱胶结岩石变形破坏的主要原因。李廷春等^[14]研究了弱胶结泥岩地层中矩形巷道围岩变形破坏特征,研究表明,受岩石软弱特性的影响巷道围岩进入塑性区时间短、范围大,建议该类地层巷道采用拱形断面。LI Huigui等^[15]研究了神东矿区弱胶结砂岩微观结构、成分、力学性能与声发射之间的关系。综上所述,以往成果研究的焦点是弱胶结岩石受外力后的变形破坏机理及巷道支护工程的稳定性,而对弱胶结岩石破坏后在工作面采空区冒落、压实、固结等关注较少,破碎岩石的后期变形特征对认识垮落带变化、支架支护阻力计算、预防水害、三带分布规律等具有重要的指导意义。

因此,本文根据工作面开采特点和顶板岩层受开采扰动后发生的变形破坏、冒落、压实等力学行为,对比分析西部弱胶结岩石与中东部岩石破碎、崩解的差异,研究弱胶结岩层破碎冒落特征及压实变形规律,揭示弱胶结地层工作面垮落带动态分布规律。

1 岩石变形-冒落-压实-类固结时变规律

研究表明,岩石在受外载荷作用下其体积应变会随着载荷的增加而增大,当岩石受破坏时其体积应变达到最大。受工作面采动影响,顶板岩层变形首先始于体积应变,后逐渐变形直至破坏,垮落后受自重和上方岩层运动载荷作用逐渐压实,如果有地下水作用还会发生崩解和固结,一定时间后达到稳定。根据这一工程过程,并结合前期研究成果^[16-17],得到岩石受力发生膨胀变形—破碎冒落—充填压实—类固结等变形过程和变形规律,这里将岩石的变形采用碎胀系数 K_p 作为指标表示,如图1所示。由图1可知,按开采时序,受工作面开采扰动影响,工作面垮落带内岩层先后经历4个阶段,即:

第I阶段(AB):岩石受力变形膨胀阶段。煤岩体受开采扰动影响,围岩内应力重新分布使岩石受压

破碎岩石受外载荷时岩石碎胀系数随载荷的变化规律,图3所示分别为二叠系粗砂岩和侏罗系粗砂岩碎胀系数随载荷的变化曲线,可以看出,加载初期破碎岩石碎胀系数减小较快,当载荷大于20 MPa后碎胀系数减小缓慢并趋于稳定;二叠系破碎岩石残余碎胀系数在1.1~1.2之间,侏罗系破碎岩石残余碎胀系数在1.06~1.15之间,相同级配弱胶结破碎岩石的残余碎胀系数略小于二叠系相应破碎岩石。

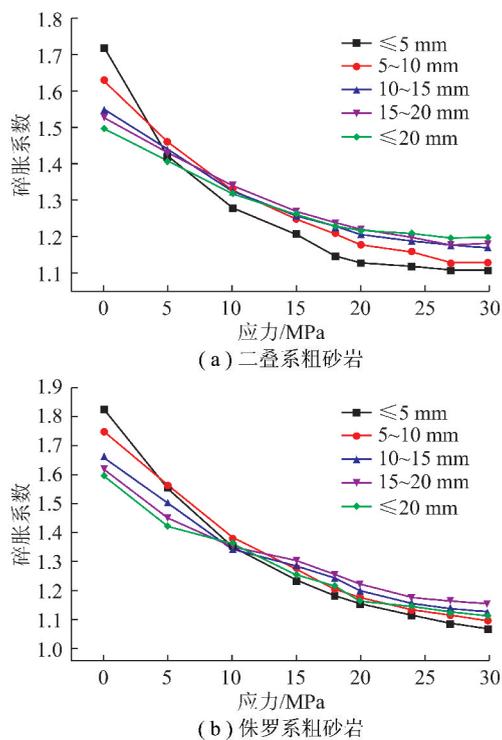


图3 不同级配岩石碎胀系数随载荷变化曲线

Fig. 3 Variation curves of rock broken expand coefficient with loading for different particle size distribution

2.2 弱胶结岩石崩解性实验与分析

岩石耐崩解指数是评价岩石耐软化、崩解的重要指标,岩石耐崩解指数按下式计算:

$$I_{dn} = \frac{m_n}{m_d} \times 100\% \quad (1)$$

式中, I_{dn} 为岩石第 n 次循环的耐崩解指数,%; m_n 为第 n 次循环后干燥岩石质量,g; m_d 为第 n 次循环前干燥岩石质量,g。

为研究弱胶结岩石的崩解性,采用TBJ-2型岩石耐崩解性指数测定仪,分别选择了白垩系粗砂岩、侏罗系粗砂岩、侏罗系中砂岩、侏罗系泥岩、二叠系粗砂岩、二叠系泥岩等6种岩石进行了崩解实验,设计每种岩石进行8次循环崩解,实验中侏罗系粗砂岩4次循环后完全崩解。图4所示为岩石耐崩解指数随实验循环次数的变化曲线,可以看出,6种岩石的耐崩解指数随着循环次数的递增而减小,6种岩石耐崩

解指数由大到小为二叠系粗砂岩>二叠系泥岩>侏罗系泥岩>侏罗系中砂岩>白垩系粗砂岩>侏罗系粗砂岩。二叠系岩石耐崩解指数大于侏罗系岩石耐崩解指数,这与岩石内部结构、完整性、矿物成分等有关^[18],岩石越完整、强度越高其耐崩解指数越高,反之越小。

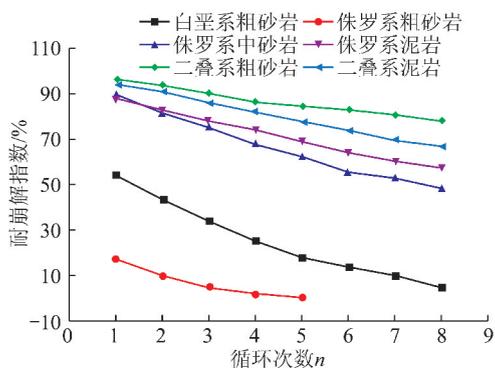


图4 岩石耐崩解指数与循环次数关系

Fig. 4 Relationship between slake durability index of rock and cycle times

2.3 破碎岩石压缩及类固结分析

(1) 破碎岩石受压变形分析

根据实验结果,破碎岩石在外载荷作用下的压密过程可以分为3个阶段,如图5所示。图5(a)为破碎岩石受压起始阶段,破碎岩石为松散状,大块岩石和小颗粒岩石之间均有很大的空隙;随着载荷增加,破碎岩石间的空隙逐渐被压密,破碎岩石受力均匀,直至大破碎岩块间形成接触,为破碎受载后的第一阶段,即压密阶段,如图5(b)所示;大破碎岩块间形成接触后,岩块形成了具有一定承载能力的骨架结构,抵抗外载荷的压缩,这个阶段随着外载荷的增加,破碎岩石的压缩变形与外载荷具有近似线性关系,如图5(c)所示;一旦外载荷超过骨架结构强度或研石强度,骨架结构失稳或破碎研石再次破碎,进入第3阶段,即骨架失稳一再压密阶段,如图5(d)所示,进入该阶段需要的外载荷较大,故该阶段的压缩变形较小,甚至因载荷不足而使破碎岩石处于稳定状态。

(2) 岩石类固结分析

研究表明,土固结是土体在外荷载的作用下其内部孔隙减小的过程,土体较大孔隙较易被压缩而湮灭或被分裂成微小孔隙,固结初期,土体中大、中孔隙较多则具有较大的压缩空间;随着固结时间的增加,土体中大、中孔隙被逐渐压缩,这时土体的可压缩空间较小。前述破碎岩石受外载荷后,内部空隙被压缩,其碎胀系数逐渐减小,说明土与破碎岩石在这一力学过程具有类似的性能。如图6所示为周晖等^[20]软土固结实验结果与红庆河弱胶结粗砂岩(粒径 \leq

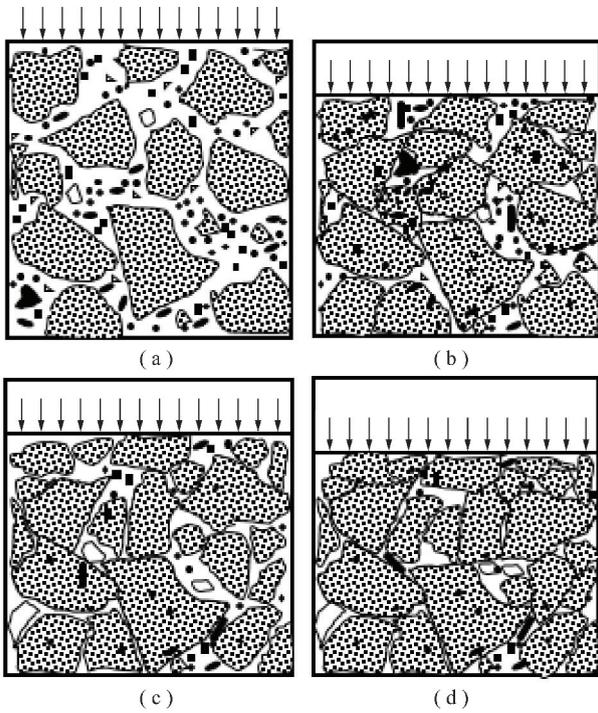


图 5 岩石破碎压密过程^[19]

Fig. 5 Compression process of broken rock^[19]

20 mm)、弱胶结泥岩(粒径 ≤ 20 mm)受压后的土孔隙比和碎石碎胀系数的对比曲线,可以看出,软土的孔隙比-压力曲线与碎石碎胀系数-压力曲线具有基本相同的趋势,曲线拟合后的一般公式为 $y = a + be^{-\eta x}$ 的形式,其中 a, b, η 为常数。由此可近似认为碎石受压后具有类似土的固结现象,特别是碎石经过一定的压缩后,其在荷载-水的共同作用下碎石孔隙进一步缩小,同时碎石还可进行胶结再生为类似岩石材料即采矿领域报道的“再生顶板”,因此,将冒落碎石这一过程定义为“类固结”现象。

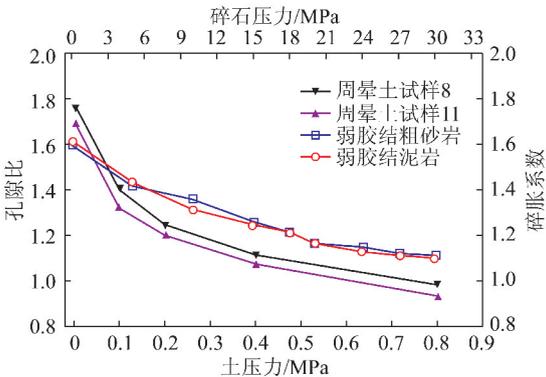


图 6 破碎岩石-土固结过程对比

Fig. 6 Comparison of consolidation process of broken rock & soil

3 不同地层条件垮落带岩层变形差异

通过对白垩系、侏罗系、二叠系岩石的碎胀性、崩

解性实验可知,不同类型岩石的碎胀性、崩解性不同,按碎胀、崩解难易程度,可将弱胶结岩石进一步的划分为极弱胶结岩石、中等弱胶结岩石、弱胶结岩石,二叠系强度较高的岩石为中硬岩石和坚硬岩石。结合前述实验结果,本部分重点分析上述 5 类岩石变形的差异。

岩石内部微观实验结果表明,西部弱胶结岩石较中东部同类岩石具有裂隙多、孔隙多、颗粒与胶结物之间黏结力小、易崩解等特点,岩体在受荷载后发生破坏前(第 I 阶段、AB 段)产生的碎胀程度由大到小为极弱胶结岩石、中等弱胶结岩石、弱胶结岩石、中硬岩石、坚硬岩石。

岩石受荷载破坏后(第 II 阶段、BC 段),结合前述破碎岩石碎胀实验结果,西部弱胶结岩石破碎后的初始碎胀系数较中东部岩石大,同时根据以往研究结果,综合得出该阶段破碎岩石在冒落时所作自由落体冲击作用下发生大幅度的碎胀,碎胀程度由大到小为极弱胶结岩石、中等弱胶结岩石、弱胶结岩石、中硬岩石、坚硬岩石。

采空区矸石冒落初期(第 III 阶段、CD 段),岩石在受自重和上覆岩层向下运动的荷载共同作用下发生压缩,相同时间相同荷载作用下,内部空隙大、岩石强度低、松散性大的矸石堆受压碎胀系数减小幅度大,且完成充填压实的时间也较长。因此,可根据不同的岩石特性,得出坚硬岩石的碎胀系数变化为 CD_1 段,中硬岩石的碎胀系数变化为 CD_2 段,弱胶结岩石的碎胀系数变化为 CD_3 段,中等弱胶结岩石的碎胀系数变化为 CD_4 段,极弱胶结岩石的碎胀系数变化为 CD_5 段。可以看出在充填压实阶段,碎胀系数变化量和所用时间由大到小为极弱胶结岩石、中等弱胶结岩石、弱胶结岩石、中硬岩石、坚硬岩石。进一步说明极弱胶结岩石在充填压实阶段的变形量最大,并且持续的时间也最长。

冒落矸石类固结阶段(第 IV 阶段、DE 段),该阶段破碎岩石在荷载和水的共同作用下出现类固结现象,岩石破碎的颗粒粒径越小、颗粒级配越合理、含黏土矿物成分越高、强度越低的岩石固结后产生的变形越大。由此可知,冒落矸石最终的残余碎胀系数由小到大为极弱胶结岩石、中等弱胶结岩石、弱胶结岩石、中硬岩石、坚硬岩石。不同岩石类固结阶段所用时间也不尽相同,由小到大分别为坚硬岩石(D_1E_1)、中硬岩石(D_2E_2)、弱胶结岩石(D_3E_3)、中等弱胶结岩石(D_4E_4)、极弱胶结岩石(D_5E_5)。如图 7 所示。

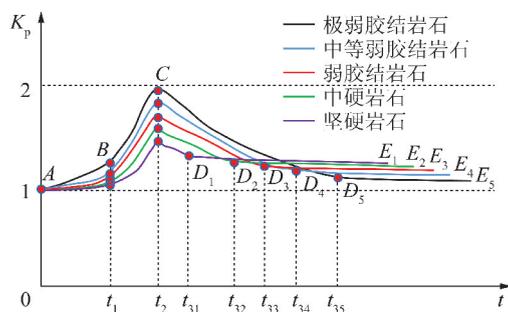


图 7 不同类型岩石时变差异

Fig. 7 Time-deformation difference of different types of rock

4 弱胶结地层垮落带动态分布模拟试验

4.1 试验背景及模型

红庆河煤矿 3-1 煤首采工作面煤层平均厚度 6.5 m, 工作面走向长度 4 100 m, 倾向长度 245 m, 工作面设计采用大采高综采工艺回采, 煤层倾角 1° 左右, 埋深 665 ~ 675 m, 属于深部开采。煤层顶板由砂质泥岩、细砂岩、中粒砂岩、粗砂岩、粉砂岩组成, 底板多为砂质泥岩及泥岩。岩石均为弱胶结类岩石, 单轴抗压强度在 15 ~ 35 MPa。根据首采工作面煤岩结构, 应用 CM250/18 平面应力试验台建立了相似模拟模型, 如图 8 所示。模型长 250 cm, 高 180 cm。几何相似比 100, 容重相似比 1.5, 强度相似比 150, 时间相似比 10。

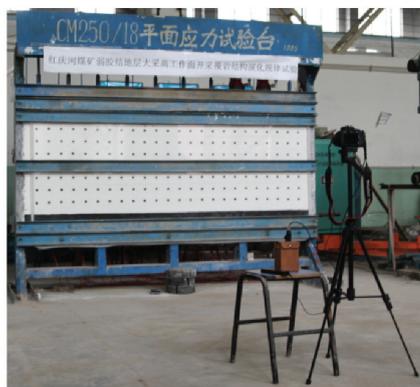


图 8 试验模型

Fig. 8 Experiment model

4.2 试验方案

试验流程: 试验材料相似比配比、模型铺装及风干、模型应力初始化、实施开采及数据监测。模型铺装完成后在工作面开切眼前方水平距离 20 cm (实际为 20 m) 煤层顶板以上 4, 10, 20 cm (实际为 4, 10, 20 m) 分别设置 3 个测点 (1, 2, 3), 工作面按一次开采 6 cm (实际为 6 m/d), 2.4 h 开采一次。通过每次开采后对模型拍照, 使用 MATLAB 自编写程序拾取测点每次开采后的坐标值, 获得测点的变形值。试验开

采结束后按每 72 h (实际为每月) 对模型采集一次变形数据, 累积采集了 13 次。将试验数据代入式 (2) 可以求出开采的各个阶段测点的碎胀系数变化。图 9 所示为模型试验测点布置及开采方案示意图。

$$K_p = \frac{V_h}{V_c} = \frac{M + X - \Delta X}{X} \quad (2)$$

式中, K_p 为岩石碎胀系数; V_c, V_h 为岩石破碎前后的体积, m^3 ; M 为采高, m ; X 为顶板测点距离煤层顶板的距离, m ; ΔX 为测点的下沉值, m 。

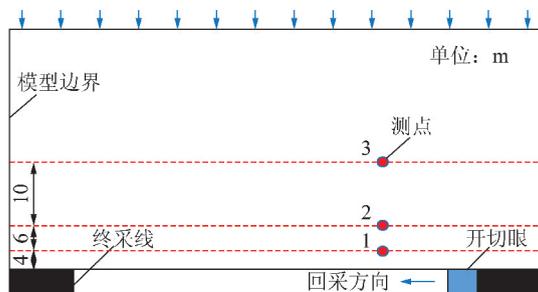


图 9 模型测点布置及测试方案

Fig. 9 Arrangement of measuring points and test project in model

4.3 试验结果分析

图 10 所示为测点碎胀系数随工作面开采变化曲线, 由图可知, $A \sim D$ 阶段是在工作面开采的短时间内完成的, 而 DE 阶段则是长期的变化过程。采空区岩石变形随着工作面开采逐渐增大, 变形初期主要是裂隙发育—贯通—膨胀的过程 (图中 AB 段), 一旦岩石发生破断即会发生冒落 (图中 BC 段), 表现为碎胀系数变化曲线大幅度增大; 当冒落矸石碎胀填满采空区后在自重和覆岩向下运动的共同作用下, 冒落矸石受压其碎胀系数相应减小 (图中 CD 段), 该过程与岩石受压变形破坏的过程十分相似。另外, 对比顶板中不同位置测点碎胀系数发现, 测点由下向上冒落岩石的碎胀系数逐渐减小, 主要原因有两个方面: 一是因为岩石破碎前, 浅部围岩受开采扰动影响先发生变形破坏, 深部围岩受浅部围岩的一定约束下其变形较浅部围岩小; 二是下部围岩冒落时采空区空间较大, 为其提供了足够的膨胀、破碎的空间, 而上部围岩冒落时其空间相对较小, 限制了围岩的破碎。工作面开采结束后, 继续对 3 个测点进行了 13 个月的监测, 换算后得到采空区冒落矸石受自重压缩和上覆岩层荷载后的残余碎胀系数随时间的变化规律。垮落带内的矸石随着时间的推移其碎胀系数逐渐减小, 并在一定的时间后趋于稳定。

另外, 笔者应用文献 [16] 研究得出的工作面不同开采阶段垮落带动态分布表达式, 对比分析了采高

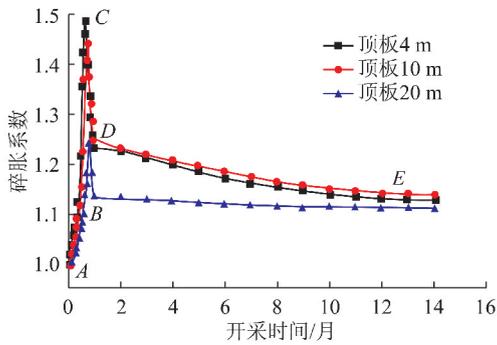


图 10 岩石碎胀系数与开采时间关系

Fig. 10 Relationship between the broken expand coefficient and mining time

为 6.5 m、顶板分别为东部较坚硬岩层和西部弱胶结岩层工作面垮落带理论分布规律,并与上述相似模拟试验结果进行对比,如图 11 所示。可以看出,垮落带变化曲线与顶板岩层破碎冒落压实固结时变曲线(图 1)具有基本一致的形式,进一步说明了垮落带内破碎岩石经历了膨胀变形—破碎冒落—充填压实—类固结等时变过程。同时,前述实验表明不同岩性岩石破碎及受压后的碎胀系数是不同的,由此可知,相同采高下不同覆岩岩层类型的工作面垮落带也会是不同的,试验及理论结果均得出较坚硬岩层较弱胶结地层工作面垮落带大。

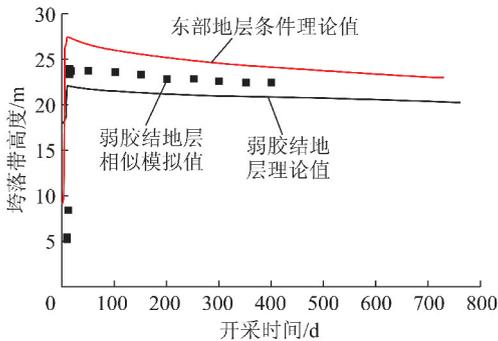


图 11 弱胶结地层大采高工作面垮落带动态分布

Fig. 11 Distribution curves of caving zone of the large mining height work face in weakly cemented strata

5 结 论

(1) 弱胶结岩石具有强碎胀、易崩解的特性,西部弱胶结岩石较中东部岩石易破碎,耐崩解指数较中东部岩石偏大,耐崩解指数随崩解循环次数增加而线性递减。

(2) 根据开采扰动作用下岩石的变形破坏特征及时间效应,分析了受开采扰动垮落带内岩层变形膨胀—破碎冒落—充填压实—类固结的时变规律,不同类型岩石、不同胶结程度的弱胶结地层,其时变曲线趋势基本一致,但变形范围及经历时间有所不同。

(3) 相同采高条件下,对比中东部中硬或坚硬顶板岩层工作面和西部弱胶结地层工作面垮落带,发现前者垮落带高度大于后者,两类地层条件下垮落带动态分布趋势基本一致,经过一定时间后垮落带变化趋于稳定。垮落带高度的差异是由岩石的碎胀性决定的。

参考文献 (References):

- [1] 鞠金峰,许家林,朱卫兵. 关键层结构提前滑落失稳对浅埋近距离煤层出煤柱压架灾害的影响[J]. 煤炭学报, 2015, 40(9): 2033-2039.
JU Jinfeng, XU Jialin, ZHU Weibing. Influence of overlying key strata structure pre-sliding on support failure disaster while mining in the lower coal seam cut across below the upper adjacent coal pillar under shallow cover [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(9): 2033-2039.
- [2] 许家林,朱卫兵,鞠金峰. 浅埋煤层开采压架类型[J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1625-1634.
XU Jialin, ZHU Weibing, JU Jinfeng. Support crushing types in the longwall mining of shallow seam [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1625-1634.
- [3] 范立民,马雄德. 浅埋煤层矿井突水溃沙灾害研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(1): 8-12.
FAN Limin, MA Xiongde. Research progress of water inrush hazard in shallow buried coal seam mine [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(1): 8-12.
- [4] 蔡美峰,何满潮,刘东燕. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 15-16.
- [5] 汪泓,杨天鸿,于庆磊,等. 不同围压条件下榆横矿区砂岩力学特性和本构关系[J]. 煤炭学报, 2015, 40(S2): 320-327.
WANG Hong, YANG Tianhong, YU Qinglei, et al. Constitutive relationship of the sandstone from Yuheng mining area under different confining pressures [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(S2): 320-327.
- [6] 赵永川,杨天鸿,肖福坤,等. 西部弱胶结砂岩循环载荷作用下塑性应变能变化规律[J]. 煤炭学报, 2015, 40(8): 1813-1819.
ZHAO Yongchuan, YANG Tianhong, XIAO Fukun, et al. The variation law of plastic strain energy of western weak cemented sandstone during cyclic loading experiment [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(8): 1813-1819.
- [7] 王渭明,王磊,代春泉. 基于强度分层计算的弱胶结软岩冻结壁变形分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(S2): 4110-4116.
WANG Weiming, WANG Lei, DAI Chunquan. Frozen wall deformation analysis in weakly cemented soft rock based on layered calculation of strength [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(S2): 4110-4116.
- [8] 王渭明,赵增辉,王磊. 考虑刚度和强度劣化时弱胶结软岩巷道围岩的弹塑性损伤分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(5): 679-689.
WANG Weiming, ZHAO Zenghui, WANG Lei. Elastic-plastic damage analysis for weakly consolidated surrounding rock regarding stiffness and strength cracking [J]. Journal of Mining & Safety Engineer-

- ing, 2013, 30(5):679-689.
- [9] ZHAO Zenghui, LÜ Xianzhou, WANG Weiming, et al. Damage evolution of bi-body model composed of weakly cemented soft rock and coal considering different interface effect [J]. Springer Plus, 2016, 5(8):1-19.
- [10] 孟庆彬, 韩立军, 浦海, 等. 极弱胶结地层煤巷支护体系与监控分析[J]. 煤炭学报, 2016, 41(1):234-245.
MENG Qingbin, HAN Lijun, PU Hai, et al. Research and monitoring analysis of coal roadway bolting system in very weakly cemented stratum [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(1):234-245.
- [11] 孟庆彬, 韩立军, 乔卫国, 等. 泥质弱胶结地层开拓巷道围岩演化规律与监测分析[J]. 煤炭学报, 2013, 38(4):572-579.
MENG Qingbin, HAN Lijun, QIAO Weiguo, et al. Evolution of surrounding rock in pioneering roadway with muddy weakly cemented strata through monitoring and analyzing [J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(4):572-579.
- [12] 乔卫国, 韦九洲, 林登阁, 等. 侏罗白垩纪极弱胶结软岩巷道变形破坏机理分析[J]. 山东科技大学学报, 2013, 32(4):1-6.
QIAO Weiguo, WEI Jiuzhou, LIN Dengge, et al. The deformation failure mechanism of very weakly cemented soft rock formed during Jurassic-cretaceous period roadway [J]. Journal of Shandong University of Science and Technology, 2013, 32(4):1-6.
- [13] 赵永川, 刘洪磊, 杨天鸿, 等. 中生代砂岩微观结构对强度和能量耗散的影响[J]. 煤炭学报, 2017, 42(2):452-459.
ZHAO Yongchuan, LIU Honglei, YANG Tianhong, et al. Effect of mesozoic sandstone meso structure on strength and energy dissipation characteristic [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(2):452-459.
- [14] 李廷春, 卢振, 刘建章, 等. 泥化弱胶结软岩地层中矩形巷道的变形破坏过程分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(4):1077-1083.
LI Tingchun, LU Zhen, LIU Jianzhang, et al. Deformation and failure process analysis of rectangular roadway in muddy weakly cemented soft rock strata [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(4):1077-1083.
- [15] LI Huigui, LI Huamin. Mechanical properties and acoustic emission characteristics of thick hard roof sandstone in Shendong coal field [J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2017, 4(2):147-158.
- [16] 向鹏, 孙利辉, 纪洪广, 等. 大采高工作面冒落带动态分布特征及确定方法[J]. 采矿与安全工程学报, 2017, 34(5):861-867.
XIANG Peng, SUN Lihui, JI Hongguang, et al. Dynamic distribution characteristics and determination method of caving zone overburden strata in large mining height workplace [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2017, 34(5):861-867.
- [17] 闫浩, 张吉雄, 张升, 等. 散体充填材料压实力学特性的宏观研究[J]. 煤炭学报, 2017, 42(2):413-420.
YAN Hao, ZHANG Jixiong, ZHANG Sheng, et al. Macro-micro research on compaction properties of granular backfilling materials [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(2):413-420.
- [18] 柴肇云, 张亚涛, 张学尧. 泥岩耐崩解性与矿物组成相关性的试验研究[J]. 煤炭学报, 2015, 40(5):1188-1193.
CHAI Zhaoyun, ZHANG Yatao, ZHANG Xueyao. Experimental investigations on correlation with slake durability and mineral composition of mudstone [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(5):1188-1193.
- [19] 姜振泉, 季梁军, 左如松. 煤矸石的破碎压密作用机制研究[J]. 中国矿业大学学报, 2001, 30(2):139-142.
JIANG Zhenquan, JI Liangjun, ZUO Rusong. Research on mechanism of crushing-compression of coal waste [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2001, 30(2):139-142.
- [20] 周晖, 房莹光, 曾铖. 广州饱和软土固结过程微孔隙变化的试验分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(S1):138-144.
ZHOU Hui, FANG Yingguang, ZENG Cheng. Experimental analysis of micropore change of Guangzhou saturated soft soil in consolidation process [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(S1):138-144.