

文章编号:1001-4888(2013)03-0340-07

深部煤岩体保护层开采上覆岩层 应力释放与转移特征的实验研究*

吕祥锋^{1,2}, 王振伟^{2,3}, 王爱文⁴

(1. 西南石油大学 土木工程与建筑学院, 四川成都 610500; 2. 中国科学院 力学研究所, 北京 100190;
3. 中国煤炭科工集团 沈阳研究院, 辽宁抚顺 113122; 4. 辽宁工程技术大学 力学与工程学院, 辽宁阜新 123000)

摘要: 煤层群保护层合理开采及了解其上覆岩层应力释放和转移特征是考察保护层开采效果的重要途径。对煤层群保护层开采卸压机制进行了分析, 得出间隔保护层开采卸压方式可使上、下被保护层双向卸压重叠(即保护层开采上、下双向应力释放, 开采影响范围相互叠加), 煤层卸压效果较好。采用相似材料模拟和数值计算相结合的研究方法, 对煤层群保护层开采卸压过程进行研究, 分析保护层开采上覆岩层及被保护层应力释放与转移特征。研究表明, 应力的积聚、释放和转移过程也伴随着岩层的变形, 应力呈现出“增加—减小—再增大—再降低—平稳”过程, 其变形呈现出“增加—急剧减小—再增加—平稳”的过程; 相似模拟实验结果与数值计算结果具有较好的一致性, 说明间隔保护层开采卸压方式可使上、下被保护层双向卸压重叠, 是煤层群开采中较合理的卸压方式。

关键词: 煤层群; 间隔式保护层开采; 被保护层; 应力释放与转移; 实验研究

中图分类号: TD325 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-12-069

0 引言

保护层开采卸压是煤层安全开采的重要手段, 尤其煤层群保护层开采后, 上覆岩层经历了大范围的变形、移动和破坏过程^[1], 复杂的岩层应力进行释放和转移, 掌握保护层上覆岩层应力^[2-7]释放和转移特征, 对于煤层有效卸压具有重要的实际意义。宋振骥^[3,5,6]等开展了煤矿岩层控制的研究, 得到岩梁断裂前后的支承压力显现特征; 谢和平^[1]等对保护层开采支承压力分布规律进行了分析, 得到了保护层开采支承压力参数; 尹光志等开展了边坡和采场围岩变形破裂响应特征的相似模拟^[8,9]试验研究, 为煤层合理开采提供了合理的参数依据。但煤层群保护层开采上覆岩层应力变化是非常复杂的过程, 应力释放和转移特征还不完全清晰, 因此, 开展煤层群保护层开采上覆岩层应力释放与转移特征的研究, 为煤层群保护层合理选择和有效卸压提供合理依据, 是非常必要的。

本文采用相似材料模拟和数值计算相结合的研究方法, 对煤层群保护层开采卸压机制进行分析, 研究煤层群保护层开采卸压过程, 分析保护层开采上覆岩层及被保护层应力释放与转移特征, 提出间隔式保护层开采卸压方式, 可为煤层群安全开采和有效卸压提供指导。

1 煤层群保护层开采卸压机制

煤层群开采过程中, 由于各煤层之间间距较小, 且开采过程中各煤层相互影响较大, 合理地选择保

* 收稿日期: 2012-05-17; 修订日期: 2012-11-30

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973计划)项目(2010CB226803); 国家自然科学基金项目(51174170, 51274122)

通讯作者: 吕祥锋(1982—), 男, 讲师, 主要从事深部岩体动力灾害发生理论与实验研究。E-mail: lvxiangfeng2006@126.com

护层开采,并确定煤层开采后的卸压范围,对煤层群安全开采具有实际意义。图 1 表示保护层开采布置及卸压区分布示意图,由图 1 可知,保护层开采后上覆岩层大范围卸压,上覆岩层垮落产生明显的“三带”分布,岩层垮落过程呈现出“假塑性梁”受力特征,中心下沉位移较大,在两端处产生应力集中,在岩体自重和采动应力的作用下,上覆岩层整体垮落,并在应力集中断裂处形成“梯形”断口,因此,上卸压区整体呈现出近似“梯形”分布。

同样,在保护层开采工作面下方也存在一定范围的卸压区,保护层开采对上覆岩层应力释放和转移较敏感,保护层上方卸压区范围明显大于下方卸压区;另外,保护层工作面开采完毕后,在工作面两端产生应力集中,应力集中范围向下传递至下卸压区,在下卸压区煤层两端形成明显的应力集中危险区(下卸压区边界与上卸压区影响范围重合部分是工作面前方岩层应力分布影响最大的区域,此时应力集中较严重,应力值也较高。同时,此危险区也是工作面前方岩层应力向下梯形传递与上卸压区岩层应力向下梯形传递的重叠区),当开采下卸压区煤层时,危险区段应力较高,易发生冲击破坏或其他煤矿灾害,不易进行直接开采,但随着保护层的不断推进,工作面前方应力分布逐渐向工作面前方移动,相应的开采影响范围也在向前方运动,目前危险区域逐渐向下卸压区移近,危险程度逐渐减小,进一步开采保护层可能转化为较安全区域。在煤层群开采过程中,选择合适的开采顺序,对煤层卸压和安全开采至关重要,通过煤层群保护层开采卸压机制的分析可知,采取间隔保护层开采卸压的方式,使得上、下被保护层双向卸压重叠,会达到更好的煤层卸压效果。

在煤层群开采中,作为首采层的保护层开采后,上覆煤岩体经历了一个大范围变形、移动、破坏过程,保护层上覆岩层得到了有效的卸压,应力充分释放和转移。因此,当开采被保护层尤其是位于保护层上部的被保护层时,被保护层应力明显降低,工作面前方支撑压力峰值也明显减小。保护层上覆岩层应力释放明显,对上保护层卸压效果好,对下卸压相对较差。保护层开采过程中上覆岩层应力释放、转移和变形过程是否与上述卸压机制一致?保护层开采对上部被保护层应力转移影响如何?都需要进行相关的试验和数值计算进行验证。

2 保护层开采上覆岩层应力释放和变形过程相似模拟实验研究

利用相似材料模拟^[8]的试验方法,建立煤层群保护层开采的相似模型,研究煤层群上保护层开采上覆岩层应力释放和变形过程。图 2 表示上保护层工作面推进至 33m 时上覆岩层变形情况,由上覆岩层变形破坏可知,当工作面推进至 33m 处时,上覆岩层发生垮落,说明上覆岩层局部应力得到了充分释放,上覆岩层呈现出“假塑性梁”受力^[5]特征,表现为上覆垮落岩层中心处向下弯曲,中心下沉位移较大,在两端处产生应力集中,随工作面的不断推进,在岩体自重和采动应力的作用下,上覆岩层整体垮落,并在应力集中断裂处形成“梯形”断口。此时,垮落岩层上方也存在应力释放区,岩层垮落也引起上覆岩层发生微小下沉位移。

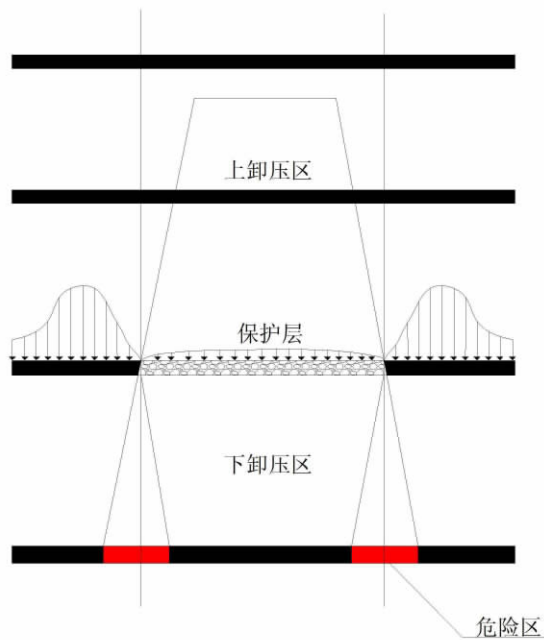


图 1 保护层开采布置及卸压区分布示意图
Fig. 1 The layout of protection layer mining and relief distribution diagram

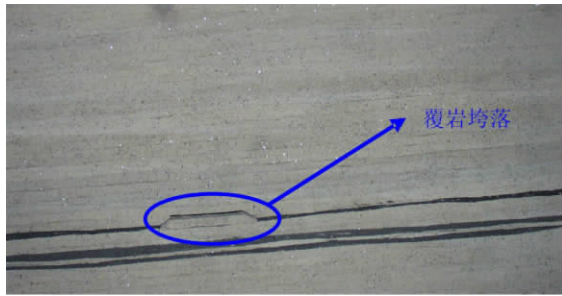


图 2 上保护层工作面上覆岩层垮落状况
Fig. 2 The caving status of overburden rock stratum in upper protective layer face

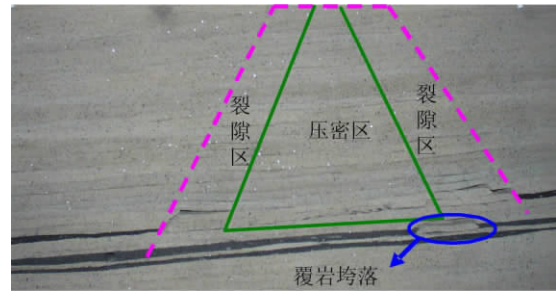


图 3 被保护层工作面上覆岩层垮落状况
Fig. 3 The caving status of overburden rock stratum in protected coal seam face

随着保护层开采工作面的继续向前推进,工作面上覆岩层会不断发生垮落,垮落过程如同第一次垮落状况,不同之处在于,垮落岩层上方岩层应力得到充分释放后,也会伴随上覆岩层发生垮落,即岩层垮落范围逐渐增加,形成明显的“三带”分布,工作面上方岩层应力得到有效的释放,上方岩层下沉位移值也较大。在“三带”逐渐形成过程中,上方岩层对变形岩层^[10-11]产生挤压作用,在变形岩层中形成似“梯形”分布压密区,分析其原因,在于断裂处形成“梯形”断口使得三带分布边界呈“梯形”分布。当上保护层工作面开采完毕后,在压密区两侧存在 35m~40m 宽度的裂隙区。图 3 表示被保护层工作面上覆岩层垮落状况,由图 3 结果可知,被保护层开采工作面推进至 46m 时,上覆岩层发生垮落,与上保护层开采相比,上覆岩层垮落推后发生,说明上保护层开采使得岩层应力得到了释放,并发生了下沉变形,保护层开采时岩层应力得到了一定的释放。

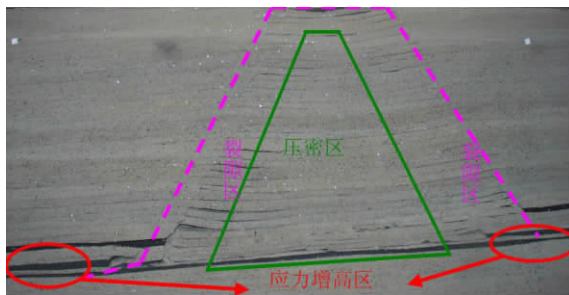


图 4 被保护层工作面推进完毕时上覆岩层垮落状况
Fig. 4 The caving status of overburden rock stratum in the end of protected coal seam face

图 4 为被保护层工作面推进完毕时上覆岩层的垮落状况,与图 2 结果进行对比可知,当被保护层工作面推进完毕时,上覆岩层的变形垮落状况与保护层开采完毕后的结果相似,裂隙区和压密区有所增加,但不是非常明显,分析其原因主要在于上保护层开采有利于上覆岩层的应力释放和变形,使得上覆岩层应力转移较好,上保护层开采对下部卸压效果较差。在工作面两端易造成应力明显增高区,因煤层距离较小,工作面开采后应力均向工作面两端转移。

通过上述分析也可知,上保护层开采后上覆岩层得到有效的应力释放和变形,卸压效果较好,若采用下保护层开采,首先使得上被保护层应力得到释放,然后再进行上被保护层开采,可否达到更好的效果?下面利用保护层开采对上部被保护层应力转移影响的数值研究验证相似模拟结果,另外也解释煤层群保护层开采卸压机制及其有效性。

3 保护层开采对上部被保护层应力转移影响的数值实验分析

3.1 计算模型及测点布置

选取计算模型尺寸为 700m×200m×310m,模拟^[12-14]模型距离地面为 1000m。上部煤层为上保护层,分为老顶、直接顶、煤层、老底和直接底,下部煤层为保护层,分为直接顶、煤层和直接底。采用 FLAC3D 分析软件,计算模型采用弹塑性模型,模型底全约束,四周水平约束,顶面为自由面;模型底全约束,四周水平约束,顶面为自由面;考虑自重作用,模拟初始地应力状态,最大水平地应力为 30MPa,最小水平地应力为 28MPa,垂直地应力为 26MPa。几何模型及测点布置见图 5,模型计算参数见表 1。

表 1 计算模型参数

Tab.1 Calculation parameters

材料名称	弹性模量 E (GPa)	泊松比 μ	密度 ρ (kg/m^3)	屈服强度 (MPa)
砾岩	85	0.22	2350	45
顶板(6m)	100	0.20	2460	62
上部被保护煤层(6m)	3.2	0.27	1800	22
底板(10m)	93	0.20	2230	59
顶板(3m)	105	0.21	2460	58
保护煤层(3m)	3.2	0.29	1780	22
底板(8m)	93	0.23	2240	60

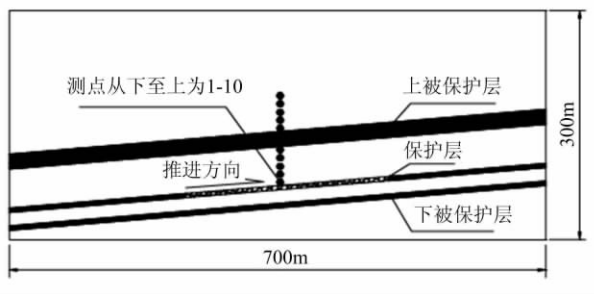


图 5 几何模型及测点布置示意图

Fig.5 Geometric model and test point arrangement schematic

3.2 保护层开采卸压效果分析

(1) 上覆岩层应力释放和转移特征

图 6 为保护层开采过程中上覆岩层垂直应力监测结果。根据监测结果可知,保护层开采过程中,监测点应力呈现先增加后减小的过程,说明工作面的推进使得上覆岩层应力不断的积聚、释放和转移。当工作面推进至监测点岩层时应力值最大,工作面推进过后,监测点岩层应力逐渐得到释放和转移,应力值减小。通过竖直方向布置的监测点数据对比可知,距离工作面煤层越近,岩层应力值越大,且工作面推进后应力降低也最大。当工作面继续推进时,距离煤层越近,应力值增加越明显,当应力值增大到一定值时,应力值突然降低,说明岩层可能发生垮落破坏。监测点应力分布呈现出“增加—减小—再增大—再降低—平稳”过程,也说明了岩层应力随着工作面的推进不断发生着积聚、释放和转移的过程。

(2) 上覆岩层变形规律分析

图 7 表示保护层开采过程中上覆岩层 Z 向位移监测结果。由位移监测结果可知,随着保护层工作面的推进,上覆岩层不断发生下沉变形,监测点位移数值在不断的增加,当工作面推进超过监测点岩层位置后,岩层位移数值增加较快,上覆岩层在无支撑煤层条件下发生较快的下沉变形。工作面继续推进,从位移监测结果中可以看出,位移监测值达到一个峰值后逐渐平稳,说明上覆岩层可能发生断裂破坏而使得下沉位移达到峰值后平稳。从竖向监测点位移结果也可看出,距离煤层越近的监测点,位移数值越大,距离越远位移数值越小,也即上覆岩层变形是煤层开采引起的卸荷产生的,伴随着应力的释放和转移,应力释放越多的岩层,位移变化也越大。

3.3 上部被保护层应力转移和变形规律分析

图 8 和图 9 分别给出了被保护层上部岩层应力转移和变形规律。通过被保护层上覆岩层应力监测结果可知,监测点应力也呈现先增加后减小的过程,随着保护层工作面的推进,应力值再增加后逐渐降低,且监测点越远离被保护层,其应力数值也越较小,监测点应力变化规律与保护层上覆岩层^[15-17]具有一致性,但应力数值相对小一些。从位移数据监测结果可知,随着保护层开采的不断推进,被保护层上覆岩层发生了一定的变形^[18,19],同样表现为距离被保护煤层越近,其位移数值也越大,且也存在位移

“增加—急剧减小—再增加—平稳”的过程。

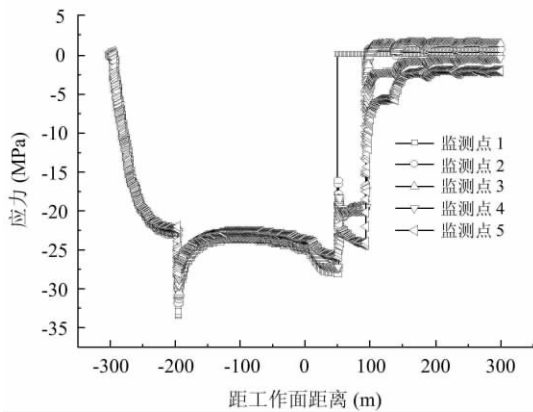


图6 保护层开采过程中上覆岩层垂直应力监测结果
Fig. 6 Vertical stress monitoring results of overburden rock stratum in the protection layer mining

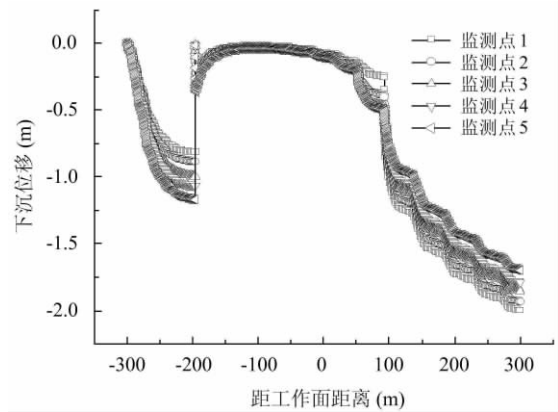


图7 保护层开采过程中上覆岩层Z向位移监测结果
Fig. 7 Z displacement monitoring results of overburden rock stratum in the protection layer mining

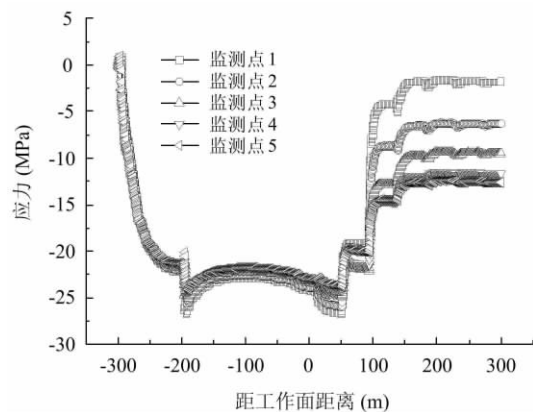


图8 被保护层上部岩层垂直应力监测结果
Fig. 8 Vertical stress monitoring results of overburden rock stratum of protected coal seam

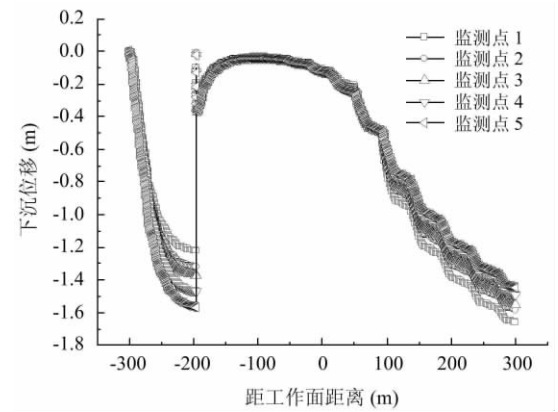


图9 被保护层上部岩层Z向位移监测结果
Fig. 9 Z displacement monitoring results of overburden rock stratum of protected coal seam

通过对保护层和被保护层上覆岩层应力和位移监测数据的分析可知:(1)保护层开采使得上覆岩层得到了有效的卸压和应力释放,应力不断向工作面前方转移,应力的积聚、释放和转移过程也伴随着岩层的变形,应力呈现出“增加—减小—再增大—再降低—平稳”过程,其变形呈现出了“增加—急剧减小—再增加—平稳”的过程;(2)保护层开采后上覆岩层得到了有效的卸压,卸压区域达到了被保护层上部岩层,若保护层选择合理,保护层开采可对上部被保护煤层有较好的卸压效果;(3)保护层和被保护层上覆岩层变形相似模拟试验结果与数值计算结果具有较好的一致性,说明煤层群开采选择合适的保护层是非常重要的,且采取间隔保护层开采卸压的方式,致使上、下被保护层双向卸压重叠,是煤层群开采中较合理的卸压方式,同时也解释了煤层群保护层开采的卸压机制。

4 结论

(1) 保护层开采使得上覆岩层应力释放明显,对上保护层卸压效果较好,间隔保护层开采卸压方式可致使上、下被保护层双向卸压重叠,会改善煤层卸压效果。

(2) 相似试验结果表明,在“三带”逐渐形成过程中,上方岩层对变形岩层产生挤压作用,在变形岩层中形成似“梯形”分布压密区,保护层开采上覆岩层得到了有效的卸压,下部煤层局部卸压,存在应力增高区。

(3) 保护层开采使得上覆岩层得到了有效的卸压和应力释放,应力不断向工作面前方转移,应力的积聚、释放和转移过程也伴随着岩层的变形,应力呈现出“增加—减小—再增大—再降低—平稳”过程,其变形呈现出了“增加—急剧减小—再增加—平稳”的过程。

(4) 保护层和被保护层上覆岩层变形相似模拟试验结果与数值计算结果具有较好的一致性,采取间隔保护层开采卸压的方式,致使上、下被保护层双向卸压重叠,是煤层群开采中较合理的卸压方式。

参考文献:

- [1] 谢和平,周宏伟,刘建锋等.不同开采条件下采动力学行为研究[J].煤炭学报,2011,36(7):1067—1074 (XIE Heping, ZHOU Hongwei, LIU Jianfeng, et al. Mining-induced mechanical behavior in coal seams under different mining layouts[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(7):1067—1074 (in Chinese))
- [2] 钱鸣高,石平五.矿山压力与岩层控制[M].徐州:中国矿业大学出版社,2003 (QIAN Minggao, SHI Pingwu. Mining Pressure and Ground Control[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2003 (in Chinese))
- [3] 宋振骥.实用矿山压力理论[M].徐州:中国矿业大学出版社,1988 (SONG Zhenqi. Theory of Practical Rock Pressure[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1988 (in Chinese))
- [4] 钱鸣高,缪协兴,许家林.岩层控制中的关键层理论研究[J].煤炭学报,1996,21(3):225—230 (QIAN Minggao, MIAO Xiexing, XU Jialin. Theoretical study of key stratum in ground control[J]. Journal of China Coal Society, 1996, 21(3):225—230 (in Chinese))
- [5] 宋振骥,刘义学,陈孟伯等.岩梁断裂前后的支承压力显现及其应用的探讨[J].山东矿业学院学报,1984(1):27—39 (SONG Zhenqi, LIU Yixue, CHEN Mengbo, et al. Discussion on the manifestation of abutment pressure before and after rock beam fracture and its application[J]. Shandong Mining Institute Journal, 1984(1):27—39 (in Chinese))
- [6] 宋振骥,蒋金泉.煤矿岩层控制的研究重点与方向[J].岩石力学与工程学报,1996,15(2):128—134 (SONG Zhenqi, JIANG Jinquan. The current research situation and developing orientation of strata control in coal mine [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1996, 15(2):128—134 (in Chinese))
- [7] 何满潮,谢和平,彭苏萍等.深部开采岩体力学研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(16):2803—2813 (HE Manchao, XIE Heping, PENG Suping, et al. Study on rock mechanics in deep mining engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16):2803—2813 (in Chinese))
- [8] 李鸿昌.矿山压力的相似模拟试验[M].徐州:中国矿业大学出版社,1988 (LI Hongchang. Similar simulation experiment on mine ground pressure[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1988 (in Chinese))
- [9] 尹光志,李小双,魏作安等.边坡和采场围岩变形破裂响应特征的相似模拟试验研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(Supp1):2913—2923 (YIN Guangzhi, LI Xiaoshuang, WEI Zuonan, et al. Similar simulation study of deformation and failure response features of slope and stope rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(Supp1):2913—2923 (in Chinese))
- [10] 王志国,周宏伟,谢和平等.深部开采对覆岩破坏移动规律的实验研究[J].实验力学,2008,23(6):503—510 (WANG Zhiguo, ZHOU Hongwei, XIE Heping, et al. Experimental study of the rule of overlying strata movement and breakage in deep mining [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2008, 23(6):503—510 (in Chinese))
- [11] 崔希民,许家林,缪协兴等.潞安矿区综放与分层开采岩层移动的相似材料模拟试验研究[J].实验力学,1999,14(3):402—406 (CUI Ximin, XU Jialin, MIAO Xiexing, et al. Modeling experiment for the rock movement in fully mechanized sub-level caving and slice mining at Lu an coal field [J]. Journal of Experimental Mechanics, 1999, 14(3):402—406 (in Chinese))
- [12] Lemon A M, Jones N L. Building solid models from boreholes and user-defined cross-sections [J]. Computers & Geosciences, 2003, 29(5):547—555.
- [13] John G H, Hani S M. Numerical modeling of ore dilution in blasthole stoping [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2007, 44(5):692—703.
- [14] 吕长国,窦林名,徐长厚等.上解放层开采解放作用机理数值模拟研究[J].煤矿开采,2011,16(2):12—15

- (LV Changguo, DOU Linming, XU Changhou, et al. Numerical simulation of Protective mechanism of upper protective seam mining[J]. Coal Mining Technology, 2011, 16(2):12-15 (in Chinese))
- [15] 刘明举, 王冕, 李波 等. 开采保护层的效果评价研究[J]. 煤炭科学技术, 2011, 39(1):61-64 (LIU Mingju, WANG Mian, LI Bo, et al. Study on effect evaluation of protective seam mining [J]. Coal Science and Technology, 2011, 39(1):61-64 (in Chinese))
- [16] 潘俊锋, 齐庆新, 毛德兵 等. 冲击性顶板运动及其应力演化特征的 3DEC 模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增 1):3546-3552 (PAN Junfeng, QI Qingxin, MAO Debing, et al. Study on movement and stress evolutionary process of impacted roof with 3DEC[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(Sup1):3546-3552 (in Chinese))
- [17] 史红, 姜福兴. 采场上覆大厚度坚硬岩层破断规律的力学分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(18):3066-3069 (SHI Hong, JIANG Fuxing. Mechanics analysis of rupture regularity of hard and massive overlying strata of long wall face[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(18):3066-3069 (in Chinese))
- [18] 张拥军, 于广明, 路世豹 等. 近距离上保护层开采瓦斯运移规律数值分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(增刊 1):398-404 (ZHANG Yongjun, YU Guangming, LU Shibao, et al. Numerical analysis of gas flow law with short distance upper protective layer gas extraction[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(Sup1):398-404 (in Chinese))
- [19] IWASHITA K, ODA M. Micro-deformation mechanism of shear banding process based on modified distinct element method[J]. Powder Technology, 2000, 109(1):192-205.

Experimental Study of Stress Release and Transfer Characteristics of Overburden Rock Stratum in Coal Seam Group Protective Layer Mining

LV Xiang-feng^{1,2}, WANG Zhen-wei^{2,3}, WANG Ai-wen⁴

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China; 2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 3. Shenyang Branch of China Coal Technology and Engineering Group, Fushun 113122, China; 4. School of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: It is an important way for investigation of protective mining results that to rationally exploit the protective layer of coal seam group and to understand the stress release and transfer characteristics of its overburden rock stratum. Pressure relief mechanism in protective layer mining of coal seam group was analyzed. Interval-type protective layer mining relief method may result in bi-directional pressure relief overlap at both upper and lower protective layer (namely, exploitation of protective layer makes the upper and lower biaxial stress release, and the mining scope superposition each other) and good pressure relief effect. Combining both similar material simulation and numerical calculation, relief process of protective layer mining of coal seam group was studied. Results show that the process of stress accumulation, release and transfer is also accompanied by rock deformation. The stress of overburden rock stratum presents features of “increase-decrease-and then increase-further reduce-smooth”, at the same time, the deformation shows features of “increase-reduce rapidly-and then increase-stable”. Similar simulation results and numerical results present good consistency. Results suggest that interval-type protective layer mining relief method, which may result in bi-directional pressure relief overlap at both upper and lower protective layer, is a reasonable pressure relief way in coal seam group exploitation.

Keywords: coal seam group; interval-type protective layer mining; protected coal seam; stress release and transfer; experimental study