

石门揭煤过程中应力与位移演化特征研究

Study on the Characteristics of Stress and Displacement Changes in the Process of Rock Cross-cut Coal Uncovering

曹建来(山西潞安环保能源开发股份有限公司五阳煤矿, 长治 046299)

摘要:为研究石门揭煤过程中地应力及位移变化,借助FLAC^{3D}软件开展相应数值模拟,从应力分布、位移变化角度研究石门揭煤过程中煤岩力学响应规律,分析地应力、位移量变化对矿井瓦斯突出灾害的影响,指导该矿石门揭煤防突,进而为类似矿井预防突出事故的发生提供参考。研究表明:石门揭煤过程中,工作面应力集中现象与石门掘进距离存在密切联系,即巷道两帮2~8 m易出现应力集中现象,且随距待揭煤层垂距的减小而增大,其中揭煤时应力峰值为23.83 MPa,巷道变形破坏严重;石门揭煤易造成巷道顶底板应力重分布,变形量显著增大,其中距3#煤层垂距为0~5 m时,最大变形量为72.22 cm,易产生顶板垮落及底鼓现象,诱发煤与瓦斯突出事故。

关键词:石门揭煤;数值模拟;位移量;地应力;煤与瓦斯突出

中图分类号: TD713 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2022)04-0069-05

Abstract: In order to study the crustal stress and displacement changes during the rock cross-cut coal uncovering, the corresponding numerical simulation is carried out with FLAC 3D software. From the perspectives of stress distribution and displacement changes, the coal dynamic response in the process of rock cross-cut coal uncovering is studied and the influence of the crustal stress and displacement changes on the mine gas outburst disaster is analyzed, so as to provide references for similar mines to prevent gas outburst accidents occurrence during the rock cross-cut coal uncovering. The research results show that there is a close relationship between the working face stress concentration and the rock cross-cut excavation distance in the process of rock cross-cut coal uncovering. The stress concentration phenomenon is easy to occur in the two sides of the roadway at 2~8 m, and it increases with the decrease of the vertical distance from the coal seam to be uncovered. The stress peak value is 23.83 MPa under coal covering and the roadway is seriously deformed and damaged; The rock cross-cut coal uncovering is likely to cause redistribution of stress on the roadway roof and floor, with significantly increased deformation. When the vertical distance from the 3# coal seam is 0~5 m, the maximum deformation is 72.22 cm, which is easy to cause the roof collapse and bottom bulge, so as to induce coal and gas outburst accidents.

Key words: rock cross-cut coal uncovering; numerical simulation; displacement; crustal stress; coal and gas outburst

1 前言

煤与瓦斯突出是煤矿灾害之一^[1],表现为短时间内喷出大量煤与瓦斯,破坏通风、巷道设施,甚至诱发瓦斯燃烧与爆炸^[2],严重威胁煤矿企业安全生产^[3]。其中,我国80%的重、特大型突出事故集中发生于石门揭煤过程^[4]。因此,石门揭煤防突是煤矿企业安全治理的工作重点^[5]。

目前,国内外学者针对石门揭煤诱发突出开展了多层次、多角度的研究^[6-8],研究成果主要集中于

现场试验、理论计算、数值仿真、室内实验。其中,汪北方等^[9]通过研究石门揭煤过程中围岩力学响应特征,提出瓦斯预抽+改进金属骨架的综合防突措施。李贺等^[10]借助理论分析与数值模拟,研究原岩应力对石门揭煤突出危险性的影响,认为揭煤石门应平行于最大水平主应力掘进。杨威等^[11]提出“强弱强”石门揭煤原理及方法,并借助数值模拟对比验证。韩万东等^[12]运用FLAC^{3D}软件探讨了石门揭煤中地应力的变化,指出地应力是诱发煤与瓦斯突出的绝对因素。综上所述,尽管对石门揭煤中应力特征开展了大量研究,但是对石门工作面掘进期间造成的应力、位移演化等研究较少,且石门揭煤防突技术仍尚待完善。因此,本文以山西省襄垣县某矿为研究对象,借助数值模拟分析82采区石门揭3#煤工作面的应力、位移分布特征,为类似条件下石门揭

[作者简介] 曹建来(1984-),男,工程师,主要从事煤矿技术管理工作。

[引用格式] 曹建来. 石门揭煤过程中应力与位移演化特征研究[J]. 中国矿山工程,2022,51(4):69-73.

煤防突提供理论参考。

2 工程概况

2.1 工程背景

该矿 82 采区地质构造较为简单,为瓦斯突出危险区,采区内可采煤层为 5 层,其中 3#煤层厚度 4.2 m(待揭煤层),瓦斯初始压力 3.54 MPa,煤层倾角 60°,平均埋深 580 m。煤质为焦煤,表面呈现为灰黑色,性脆。煤层顶板为砂岩(厚度 5.23 ~ 14.26 m),底板为泥岩为主(厚度 2.33 ~ 15.21 m),层理不明显,整体为块状且性质较软。煤岩主要力学参数见表 1。部分参数计算公式为

$$\sigma_t = \frac{2c \cos \varphi}{1 + \sin \varphi} \quad (1)$$

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)} \quad (2)$$

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (3)$$

式中: K 为体积模量, GPa; G 为剪切模量, GPa; E 为弹性模量, GPa; ν 为泊松比; c 为内聚力, MPa; φ 为内摩擦角。

表 1 煤岩体主要力学参数

岩性	密度/ kg·m ⁻³	体积 模量/ GPa	剪切 模量/ GPa	内聚力/ MPa	内摩擦 角/(°)	抗拉 强度/ MPa
粗砂岩	2 500	6.23	4.19	8.50	40	8.4
细砂岩	1 800	2.01	3.98	3.83	35	3.25
3#煤	1 350	1.3	2.12	1.83	28	1.65
细砂岩	1 800	2.01	3.98	3.83	35	3.25
粗砂岩	2 500	6.23	4.19	8.5	40	8.4

2.2 边界条件

鉴于缺乏 3#煤层现场地应力测试结果,以下结合矿井历史资料^[13],获得该矿地应力与煤层埋藏深度的表达式如下:

(1)水平应力:水平应力与埋藏深度成线性增长关系,其回归方程为

$$\rho_l = -0.067 + 0.014H \quad (4)$$

式中: H 为煤层埋深, m。

(2)垂直应力:垂直应力与埋藏深度成线性增长关系,其回归方程为

$$\rho_H = -0.264 + 0.023H \quad (5)$$

另外,鉴于 3#煤层平均埋深为 580 m,结合式(4)~(5)获得 3#煤层的垂直应力为 13.08 MPa,水平应力为 8.05 MPa。为避免经验公式存在人为误

差,结合矿区地应力情况,数值模拟选取垂直应力 13 MPa,水平应力 8 MPa。

2.3 模型构建

为分析石门揭煤过程中围压力学响应机制,根据 82 采区煤岩层基本概况,建立相应的 FLAC^{3D} 模型,具体如图 1 所示。其中,石门掘进工作面的开挖巷道尺寸为宽 4 m、高 4 m,且模拟煤岩层与现场实际岩层一致,煤层倾角 60°,数值计算模型长度为 90 m、宽度 60 m、高度 60 m,本构关系为摩尔-库伦弹性塑性破坏准则(M-C 准则)。其中,M-C 准则的主应力为

$$\sigma_1 = \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} + \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \sigma_3 \quad (6)$$

式中: σ_1 为最大主应力, MPa; σ_3 为最小主应力; φ 为内摩擦角。

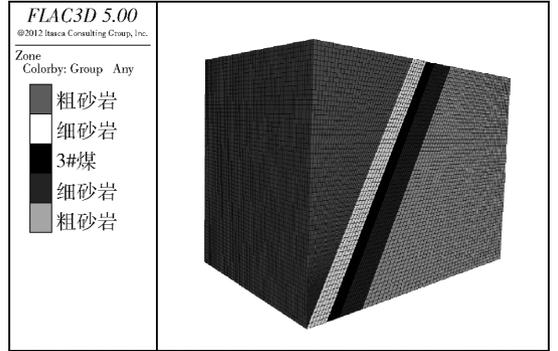


图 1 数值计算模型

为研究巷道位于不同垂距处,巷道围岩应力分布特征及位移变化,绘制揭煤工作面与待揭煤层模型示意图,具体如图 2 所示。

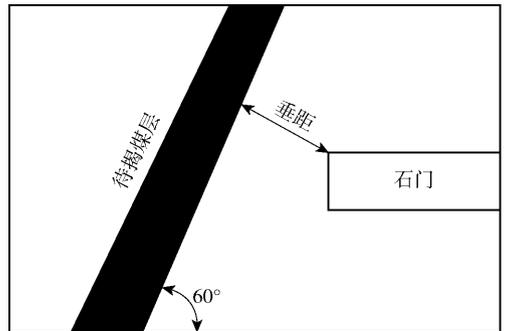


图 2 石门揭煤时的巷道开挖模型

3 数值模拟分析

石门揭煤过程的本质是在非均质岩层中掘进的过程,即人为扰动过程^[14]。其中,煤岩力学性质的改变必然打破原有应力平衡状态,造成应力重分布、

围岩变形及破坏等。因此,了解石门掘进过程中应力、位移分布对于预防突出具有重要意义。

3.1 地应力分布

为探讨石门工作面推进位置对巷道围岩应力分

布的影响,以下借助 FLAC^{3D} 模拟软件,模拟石门揭煤过程的 6 个关键位置(超前探测及局部防突位置),即掘进工作面距离待揭煤层 20 m、17 m、14 m、5 m、2 m、0 m 时的围岩应力分布,具体如图 3 所示。

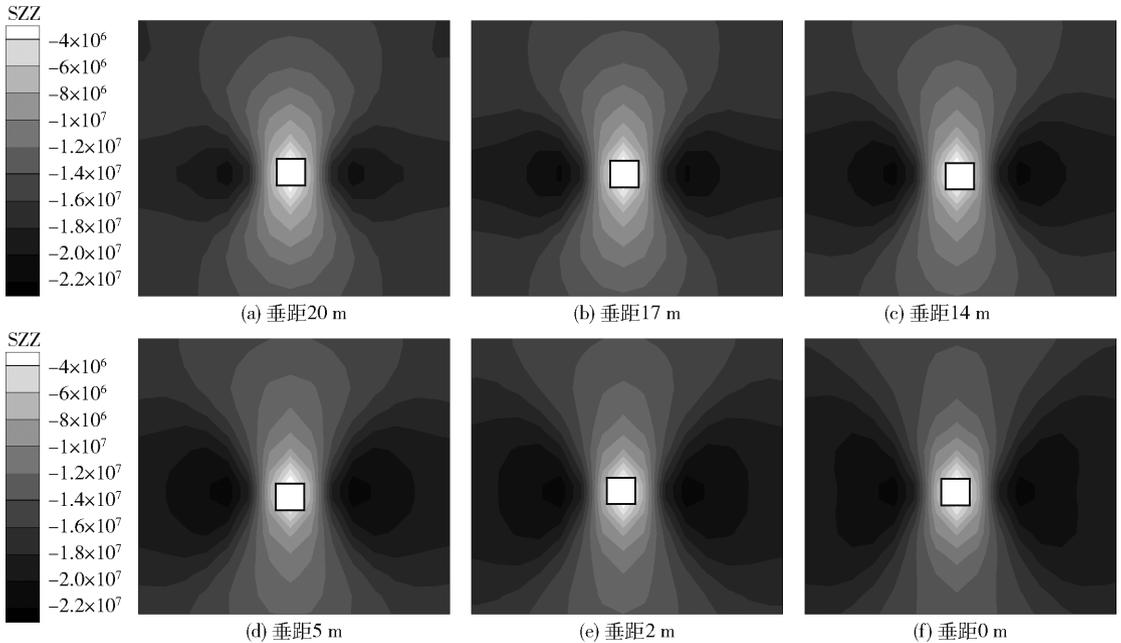


图 3 巷道剖面方向的垂直应力分布云图

由图 3 可以看出,受石门揭煤工作面推进位置影响,工作面超前支承压力随位置变化而动态移动,即揭煤工作面围岩始终处于高应力状态,且部分集中应力区域呈现“双耳”状形态^[15-16],即应力集中效应显著。当掘进至距 3[#]煤垂距 20 m 时,受石门掘进造成应力重分布,即巷道围岩受到石门揭煤扰动影响;当掘进至距 3[#]煤垂距 0 m 时,受煤岩体破碎机超前支承压力的影响,巷道围岩应力分布状态发生显著变化,出现大范围应力扰动区域。究其原因,随着工作面的持续推进,巷道与待揭煤层垂距减小,承载煤层厚度减小,承载能力降低,导致应力集中区域扩展,且由于煤体强度相对岩层较弱,扰动应力分布区域较广泛。另外,考虑到地应力对煤层渗透性影响可知,工作面前方超前支承应力造成煤岩层裂隙闭合,渗透性降低,透气性减弱。因此,可采用区域预抽、瓦斯排放钻孔等措施,降低前方煤体瓦斯潜能,增强煤体强度,降低煤与瓦斯突出的危险性。根据石门掘进不同位置下的垂直应力分布云图绘制相应的应力变化趋势,具体如图 4 所示。

对图 4 中垂直应力曲线分析可知,揭煤巷道与煤体的法向距离,对巷道围岩应力分布影响较大,二

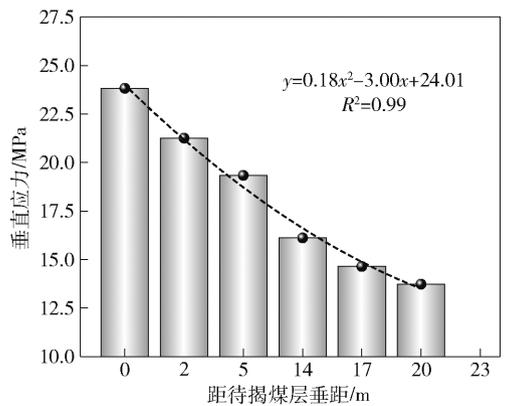


图 4 巷道围岩垂直应力特征曲线

者呈二次函数关系。当距离待揭煤层法向距离 0 m 时垂直应力最大值为 23.83 MPa,为垂距 20 m 条件下煤样应力的 1.74 倍,易造成前方煤岩破坏,降低煤岩承压能力;当距离待揭煤层垂距为 2 m 时,垂直应力为 21.26 MPa,为应力峰值的 89.22%;当垂距为 5 m 时垂直应力最小,为 19.34 MPa。当垂距为 14 m 时垂直应力最小,为 16.11 MPa。随着掘进工作面与煤层距离的减少,垂直应力呈现迅速增长的趋势。因此,实际揭煤过程中应实时监测地应力变

化,加强巷道支护强度。

3.2 垂直位移分布

为准确反映受采动影响巷道应力重分布,导致

的石门掘进工作面巷道顶底板及两帮围岩变形状态,绘制不同巷道位置下的垂直位移分布云图如图5所示。

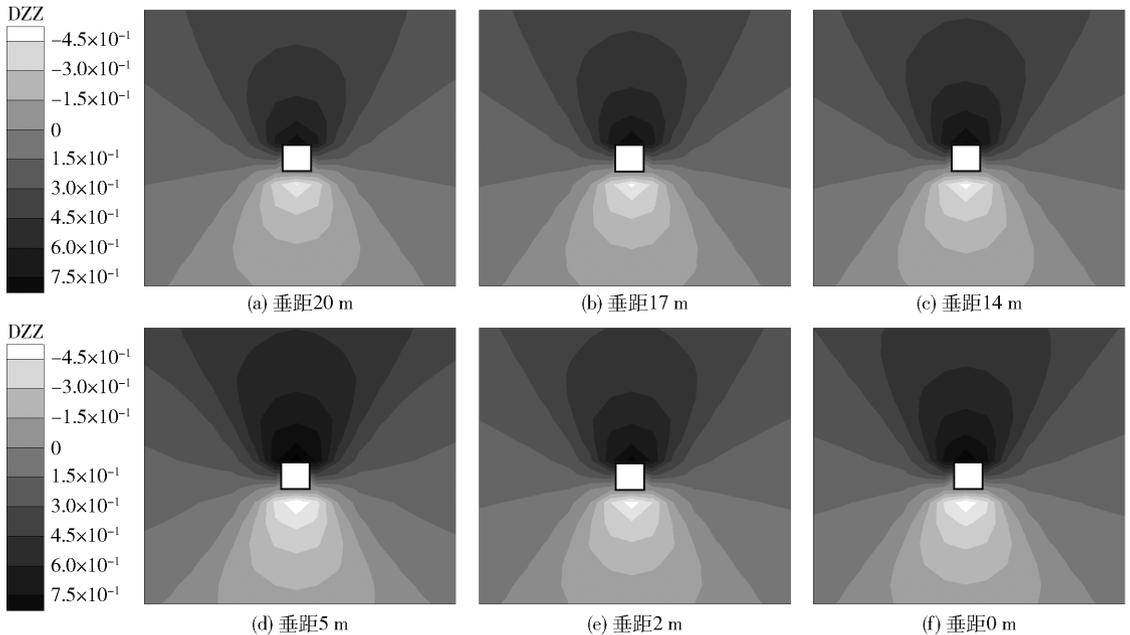


图5 巷道剖面方向的垂直位移分布云图

鉴于石门掘进期间巷道顶底板变形量相对较大、两帮变形量较小,以下对不同掘进位置下巷道变形量峰值展开分析。同时,根据巷道围岩垂直位移分布云图绘制相应的巷道变形量变化趋势,具体如图6所示。

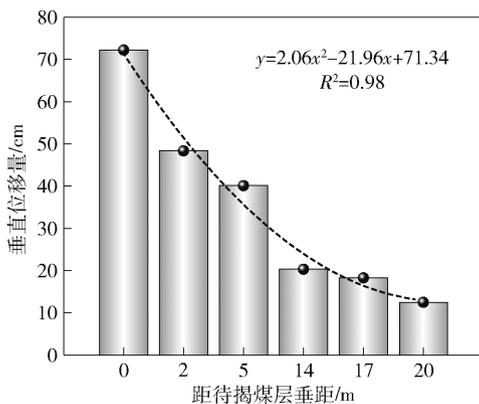


图6 巷道围岩垂直位移特征曲线

综合分析图5、6可知,随着掘进工作面与待揭煤层距离减小,巷道围压变形量显著增加,宏观表现为位移影响范围增大,且二者呈二次函数关系。结合应力分析可知,与3#煤间距为20 m时,石门工作面超前支承压力未显著影响巷道围岩变形,此时顶底板峰值下沉量仅为12.49 cm;当距3#煤距离17 m

时,石门工作面最大下沉量为18.27 cm,此时变形量未显著变化;当距3#煤距离14 m时,石门工作面最大下沉量为20.32 cm;当距离3#煤5 m时,应力集中区域前移,造成煤体内弹性变性能量激增,表现为下沉量显著增加,为前述垂距20 m的3.2倍;当距3#煤2 m时,石门工作面变形量进一步扩大至48.34 cm,且煤体集中应力影响区显著增加;当距3#煤距离0 m时,石门工作面最大下沉量为72.22 cm,此时若不进行人为加固处理,将导致工作面顶板垮落,巷道大面积变形、破坏,严重威胁矿井安全生产。同时,由于煤体强度较低,易造成煤体积聚的弹性能瞬间释放,诱发瓦斯、煤岩突出。

4 石门揭煤防突措施

上述研究表明,石门揭煤工作面掘进过程中超前支承压力会随掘进位置向前移动,巷道围岩应力集中程度显著升高,易造成顶板下沉、底板鼓起等现象,极易诱发煤与瓦斯突出等煤岩动力学灾害。

因此,结合本矿井实际情况,可首先采用预抽煤层瓦斯进行瓦斯综合治理,其中,排放瓦斯钻孔布置于石门外3~5 m,直径75 mm;其次,在石门掘进接近煤层垂距5 m时,可采用水力化措施(水力冲孔、水力割缝、水力扩孔、冲煤扫孔等)对前方煤岩体增

透致裂^[17-18],消除地应力的集中,提高煤层透气性,降低瓦斯潜能。最后,揭煤时应加强过煤段的支护,可采用注浆固化煤岩体,加强巷道支护,避免围岩变形,达到巷道稳定的目的。

5 结论

(1)基于FLAC^{3D}数值模拟可知,在巷道两帮2~8 m出现应力集中现象,且随距待揭煤层垂距的减小而增大,揭煤时应力峰值为23.83 MPa,造成巷道变形破坏严重。

(2)石门揭穿煤层过程易造成巷道顶底板应力重分布,导致变形量显著增大,其中距3#煤层0 m范围内,最大变形量为72.22 cm,极易产生顶板垮落及底鼓现象,诱发煤与瓦斯突出事故。

(3)通过数值模拟对比研究应力、位移分布,可掌握揭煤过程中围岩力学响应情况及位移分布,指导该矿揭煤过程采用局部预抽、煤体固化、金属骨架等措施,进而为类似矿井揭煤措施的应用提供理论指导。

[参考文献]

- [1] 胡杰. 声发射预测技术在石门揭煤过程中的应用与效果分析[J]. 矿业安全与环保, 2018, 45(6): 37-42.
- [2] 赵云德. 近距离多煤层石门快速揭煤技术试验研究[J]. 煤炭技术, 2020, 39(7): 32-35.
- [3] 刘健, 刘泽功, 高魁, 等. 构造带石门揭煤诱导突出的力学特性模拟及声发射响应[J]. 煤炭学报, 2014, 39(10): 2022-2028.
- [4] 卢义玉, 葛兆龙, 李晓红, 等. 脉冲射流割缝技术在石门揭煤中的应用研究[J]. 中国矿业大学学报, 2010, 39(1): 55-58+69.
- [5] 王恩元, 王亮, 徐剑坤, 等. 高瓦斯突出煤层石门安全揭煤虚拟仿真实验建设[J]. 实验室研究与探索, 2022, 41(2): 176-180.
- [6] 郝建国. “压裂-固化-预抽”一体化揭煤技术研究[J]. 煤炭工程, 2021, 53(6): 12-16.
- [7] 胡红印. 高压水力压裂增透技术在石门揭煤中的应用研究[J]. 中国矿山工程, 2020, 49(6): 35-37.
- [8] 谢全敏, 晏理想, 周圣国, 等. 圭嘎拉隧道石门揭煤岩柱安全厚度及动力特性[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(7): 56-62.
- [9] 汪北方, 梁冰, 张晶, 等. 红山煤矿石门揭突出煤层综合防突技术[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(5): 86-93.
- [10] 李贺, 林柏泉, 黄展博, 等. 不同原岩应力方向下石门揭煤时应力与位移演化特征[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(10): 88-95.
- [11] 杨威, 林柏泉, 吴海进, 等. “强弱强”结构石门揭煤消突机理研究[J]. 中国矿业大学学报, 2011, 40(4): 517-522.
- [12] 韩万东, 石健. 涌山矿石门揭煤地应力数值模拟[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2016, 35(5): 464-468.
- [13] 蒋承林, 俞启香. 煤与瓦斯突出的球壳失稳机理及防治技术[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1998.
- [14] 解北京, 钟诗晴, 苏筱. 石门揭煤瓦斯抽采钻孔参数自动优化设计及应用[J]. 矿业科学学报, 2021, 6(6): 678-687.
- [15] 张春, 题正义, 李宗翔. 综放支承压力峰值位置的理论与回归分析[J]. 中国安全科学学报, 2011, 21(9): 88-93.
- [16] 赵志强, 靳俊晓, 申金超. 石门揭煤中煤体塑性区跃迁特征与诱突机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(2): 343-352.
- [17] 胡红印. 高压水力压裂增透技术在石门揭煤中的应用研究[J]. 中国矿山工程, 2020, 49(6): 35-37.
- [18] 曹佐勇, 王恩元, 田世祥, 等. 石门揭煤多方位立体式预抽瓦斯区域防突技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(1): 219-223.