

文章编号: 1673-3363-(2015)02-0192-07

综采面过陷落柱采动应力与柱体应力 相互影响模拟研究

郝兵元^{1,2}, 张玉江^{1,2}, 戚庭野^{1,2}, 冯国瑞^{1,2}, 白锦文^{1,2}, 章敏^{2,3}, 康立勋^{1,2}

(1. 太原理工大学矿业工程学院, 山西 太原 030024; 2. 山西省绿色矿山工程技术研究中心,
山西 太原 030024; 3. 太原理工大学建筑与土木工程学院, 山西 太原 030024)

摘要 为了确保综采工作面安全通过陷落柱, 采用数值模拟方法研究工作面推进过程中采动应力及陷落柱体应力随工作面推进的变化情况及相互影响。研究表明: 陷落柱体应力和工作面采动应力的相互影响作用可分为弱、中、强3个影响阶段, 3个阶段的范围分别为工作面距离陷落柱150~100 m, 100~50 m和小于50 m。不同阶段关注重点不同: 在弱影响阶段, 采动应力开始对陷落柱体应力产生影响, 在此之前需完成陷落柱加固; 在中影响阶段, 陷落柱对采动应力的影响开始显现; 在强影响阶段, 互相影响强烈, 需加强顶板管理。根据研究结果, 确定了K8403工作面顶板加强支护范围、陷落柱预加固时间及强度, 实践表明加固效果良好, 现已安全通过陷落柱。

关键词 综采工作面; 陷落柱; 采动应力; 数值模拟

中图分类号 TD 323 文献标志码 A DOI 10.13545/j.cnki.jmse.2015.02.004

Simulation of interaction between mine-induced stress and stress of collapse column with fully-mechanized working face advancing

HAO Bingyuan^{1,2}, ZHANG Yujiang^{1,2}, QI Tingye^{1,2}, FENG Guorui^{1,2},
BAI Jinwen^{1,2}, ZHANG Min^{2,3}, KANG Lixun^{1,2}

(1. College of Mining Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China;
2. Shanxi Engineering Research Center for Green Mining, Taiyuan, Shanxi 030024, China;
3. College of Architecture and Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China)

Abstract To ensure the safe passage of the collapse column in the fully-mechanized top-coal caving mining face, the numerical simulation of the interrelation between the mine-induced stress and stress of collapse column was conducted. The results show that the interaction effect between the mine-induced stress and stress of collapse column can be divided into three stages: weak sub-stage, medium sub-stage and fierce sub-stage, the range of whose distance between the working face and the collapse column are 150-100 m, 100-50 m and less than 50 m respectively. Focal points differ in these three stages: in the weak sub-stage, the collapse column should be pre-reinforced, when the mine-induced stress begins to

收稿日期: 2014-04-19

基金项目: 山西省科技重大专项项目(20121101009-03); 国家自然科学基金项目(51422404, 51174142); 教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-11-1036); 霍英东教育基金会项目(132023); 山西省科技成果推广项目(2013071050)

作者简介: 郝兵元(1971—), 男, 山西省昔阳县人, 博士, 副教授, 从事采矿工程方面的研究。

通信作者: 冯国瑞 E-mail: fguorui@163.com

Tel: 13643697785

exert an effect on the stress of the collapse column; in the medium sub-stage, the stress of the collapse column starts to impact the mine-induced stress; and in the fierce sub-stage when the interrelation becomes fierce, the roof management should be strengthened. According the above research, the supporting range of roof in the K8403 working face, and the time and strength of the collapse column pre-reinforcement were identified. Meanwhile, the field practice showed that pre-reinforcement of the collapse column had a positive effect and ensured the safe passage of the collapse column.

Key words fully-mechanized working face; collapse column; mine-induced stress; numerical simulation

陷落柱对煤矿开采的最大威胁是突水,但是在阳泉矿区陷落柱基本为无水陷落柱^[1-2]。该矿区陷落柱对于煤矿开采的主要威胁是工作面通过陷落柱区域时发生瓦斯、溃顶、陷底等事故。煤矿工作面过陷落柱的方法主要有绕开和直接通过。绕开陷落柱及影响区域除了影响生产、费时费力外还浪费大量煤炭,增加了煤炭损失量^[3-4]。直接通过一般需要辅助破岩,并且存在溃顶、陷底等风险。对于阳煤三矿来说,已经处于服务年限的后期,资源紧缺。因此,在深入研究并制定一定措施保证安全的前提下,直接通过陷落柱,对于提高资源回收率,延长该矿寿命有重要意义。

工作面直接通过陷落柱涉及陷落柱对采动应力的影响和采动应力对陷落柱体应力的影响2个方面。在陷落柱体及周围围岩应力分布研究方面,许多学者做了重要工作。文献[5-6]通过理论计算和数值模拟研究了陷落柱及其周围的应力分布。文献[7]利用数值模拟分析了陷落柱周围围岩的应力分布和陷落柱造成的不连续顶板的失稳机理。在采动对陷落柱影响研究方面,王家臣等^[8-9]利用有限差分法研究了采动对不补充水、充水及底板陷落柱活化导水机理,认为采动应力场和渗流场共同作用是陷落柱活化的重要原因。上述研究对于认识陷落柱及其周边围岩应力分布提供了有益参考,但是并没有对采动应力和陷落柱体应力进行专门研究。在工作面直接通过陷落柱技术研究方面,文献[10]提出了采用盐酸软化过硬陷落柱的方法,文献[11]分析了阳泉某矿综采面过溃泄型陷落柱顶底板加固的合理厚度,文献[12-14]介绍了多个煤矿过陷落柱的生产实践,但是,仍存在工作面过陷落柱时顶板控制理论滞后于实践的问题。因此,研究工作面过陷落柱时,采动应力及陷落柱体应力随工作面推进的变化对于工作面陷落柱及周围区域时工作面顶板控制及陷落柱加固时间和加固强度的确定具有重要意义。

1 基本条件

1.1 工程概况

阳煤三矿是资源紧缺型矿井,扩四区K8403工作面进风巷掘进过程中揭露陷落柱X1,在风巷掘进经过该陷落柱时曾发生过顶板溃泄现象,一度导致无法掘进,后来采用绕巷施工、超前预注浆加固顶板、返头掘进等手段通过陷落柱区域。工作面与陷落柱的位置关系如图1。由于资源短缺,决定采用直接通过的方法过陷落柱,为了保证回采安全,需要对陷落柱及周围围岩提前进行注浆加固。

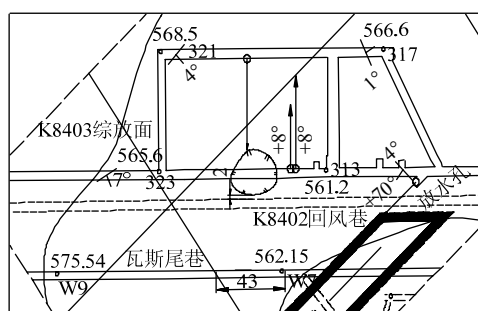


图1 K8403工作面陷落柱X1位置

Fig.1 Location of collapse column named X1 around K8403 working face

1.2 陷落柱特征

阳煤三矿井田内陷落柱体岩性复杂,岩块棱角分明,形状不规则,泥质物充填胶结但是胶结性差。陷落柱探放水作业发现,在煤层上方50 m范围内只有极个别钻孔有细小淋水,这与已有研究结果一致^[2]。柱面与围岩接触面为不规则曲线,含一层0.02~0.05 m厚的泥质填充物。接触面周边围岩破碎,裂隙发育,无牵引现象。

1.3 顶底板围岩物理力学特征

为详细了解陷落柱X1周边围岩的强度及力学特性,在陷落柱附近分别对顶底板进行钻孔取样工作,对取出的77个试样进行加工及力学性能检测。试验依照《水利水电工程岩石试验规程》(行业标准

SL 264—2001)相关规定进行。试验结果见表 1。

表 1 岩石力学试验结果
Table 1 Rock mechanics tests results

编号	取样位置	天然块体密度/ (g·cm ⁻³)	天然抗压强度 R_c / MPa	泊松比 μ	天然弹性模量 E / 10 ⁴ MPa	天然抗拉强度 σ_t / MPa	天然剪断强度	
							C /MPa	ϕ /(°)
1	直接底泥岩	2.67	25.1	—	—	—	—	—
2	15#煤	1.38	0.784	—	—	0.129	0.535	39.1
3	直接顶泥岩	2.62	22.9	0.22	1.85	0.805	2.49	38.9
4	第 1 层石灰岩	2.68	51.0	0.20	3.63	2.93	4.79	44.7
5	2#泥岩	2.66	21.4	—	—	1.67	—	—
6	第 2 层石灰岩	2.69	27.2	0.36	2.72	1.36	4.66	37.4

2 采动应力数值模拟研究

2.1 模型的建立

模型以取样测试的实际地质力学参数为基础，以进风巷揭露陷落柱长度方向为基准取一平面(该平面平行于工作面推进方向)建立一个陷落柱未加固的模型。模型尺寸为 450 m×250 m，巷道通过陷落柱部分的中心坐标为(335, -50)，半径为 20 m，高度为 160 m。按照一定推进速度，模拟工作面推进过程中采动应力及陷落柱内应力的变化情况。

2.2 计算结果及分析

分别提取工作面距离陷落柱 200, 150, 100, 50, 20, 10, 5 以及-5 m 时，工作面前方 20 m 和陷落柱体的水平应力、垂直应力、剪应力的应力曲线。

2.2.1 陷落柱对采动应力的影响

将工作面推进过程中，到陷落柱不同距离时，工作面前方最大水平应力、最大垂直应力、最大剪应力及与工作面的关系等数据提取出来，置于表 2。

表 2 最大采动应力随工作面到陷落柱距离的变化
Table 2 The change of maximum mine-induced stress with distance between working face and collapse column

与陷落柱的距离/m	最大水平应力/MPa	煤壁水平应力/MPa	最大水平应力与煤壁间距/m	最大垂直应力/MPa	最大剪应力/MPa	最大剪应力与煤壁间距/m
200	5.04	3.99	5.0	18.72	1.07	7.8
150	6.65	5.69	5.0	24.22	1.60	8.0
100	8.30	7.60	5.0	29.99	2.16	8.0
50	10.49	8.05	5.0	38.70	3.09	7.5
20	11.40	9.15	5.0	45.19	4.90	5.0
10	9.32	9.32	0.0	52.50	4.00	5.0
5	7.64	7.32	4.8	58.19	4.60	5.0
-5	3.16	3.09	3.0	11.40	0.89	18.0

为便于分析，以 200 m 处的未受影响的应力值

作为基数，将距陷落柱不同距离时的最大应力换算成该基数的倍数，作为影响系数，并绘制成图 2~4。各图中横坐标表示到陷落柱的距离， $X=0$ 的点为陷落柱与围岩的接触面。

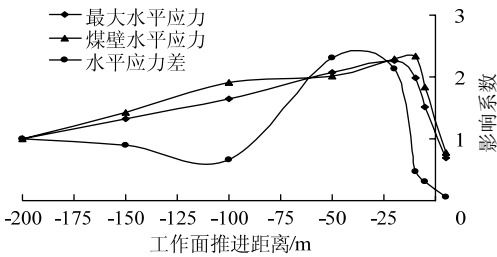


图 2 最大水平应力倍数随工作面位置的变化曲线
Fig.2 Curve of maximum horizontal stress ratio with location of working face

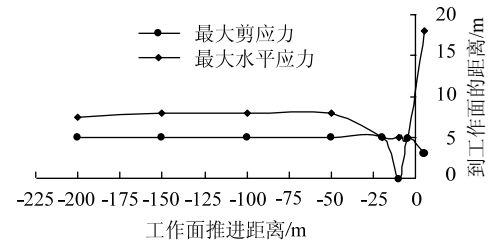


图 3 最大水平应力、剪应力与工作面的关系
Fig.3 The relation between maximum horizontal and shear stress and location of working face

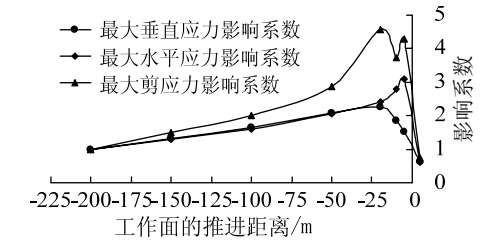


图 4 最大采动应力倍数随工作面到陷落柱距离的变化曲线
Fig.4 Curve of maximum mine-induced stress ratio with distance between working face and collapse column

1) 水平应力

如图2所示,最大水平应力和煤壁水平应力整体呈现增加再减小的规律,最大水平应力与煤壁水平应力的差值整体变化趋势为维持恒定后先增加再减小。据此可以将陷落柱对水平应力的影响大体分为3个阶段:第1阶段为-200~-100 m,第2阶段为-100~-10 m,第3阶段为-10 m以内。

在第1阶段范围内,最大水平应力与煤壁水平应力曲线的斜率近似相等,其应力差在1 MPa上下浮动,基本为定值。说明这一阶段的开采未受到陷落柱的影响。在第2阶段范围内,最大水平应力以上一阶段的斜率增长并在距离陷落柱约20 m处达到最大值,但是煤壁水平应力近似为一恒定值后以与最大水平应力相近的斜率增长,在距离陷落柱-20~-10 m范围内达到最大值,而最大水平应力与煤壁水平应力的差值在该阶段波动明显,且大于1 MPa。这是因为陷落柱周围径向的水平应力要低于降低原岩应力^[4]。图3中显示,在距离陷落柱边缘10 m时,最大水平应力出现在了煤壁位置,说明此处为陷落柱的塑性破坏与应力降低区的交界区域。第3阶段,最大水平应力与煤壁水平应力以近似相同的速率同步下降,且下降速率大于增长速率,而水平应力差有所恢复,但是小于原岩应力。这是由于工作面距离小于10 m后,进入塑性破坏区,该区域围岩和应力分布的均匀性均高于第2阶段。值得注意的是:如图3所示,在进入到陷落柱塑性破坏区后,最大水平应力所出现的位置到煤壁之间的距离有所减小,由原来的5 m减小为3 m左右。

2) 垂直应力

图4显示,最大垂直应力呈现先缓慢增长再快速增长到最大值最后迅速下落的变化趋势。可以将陷落柱对垂直应力的影响大体分为3个阶段:第1阶段为-200~-20 m,第2阶段为-20~-5 m,第3阶段为-5 m以内。

在第1阶段最大垂直应力的变化速率与最大水平应力第1,2阶段的变化速率近似相同,但是从-20 m开始,最大水平应力开始降低,而此时,最大垂直应力开始以指数形式迅速增大,最大垂直应力变化进入第2阶段。该阶段内,工作面超前支承压力和陷落柱周围垂直应力增高区叠加是造成最大垂直压力迅速增加的重要原因。另外由于陷落柱切断了工作面顶板,造成采动应力无法向深处转移也是此阶段最大垂直应力激增的原因。在第3阶段,最大垂直应力迅速减小是工作面前方岩层被陷落柱

切断,无法转移的应力作用在工作面与陷落柱之间的煤体上,使煤体进一步产生塑性破坏,产生相当于“内应力区”的卸压效果。

3) 剪应力

根据最大剪应力增大速率的不同,将其分为3个阶段:第1阶段为距离陷落柱-200~-50 m范围,第2阶段为距离陷落柱-50~-5 m范围,第3阶段为-5 m以内。

如图3所示,在第1阶段,虽然最大剪应力以快于最大垂直应力和水平应力的增长速度线性增大,但是最大剪应力一直处于工作面前方的8 m左右位置,并且剪应力以双峰形式存在,与正常地层情况下的分布形式基本一致。显然,在此阶段,陷落柱对采动引起的剪应力影响较小。第2阶段,最大剪应力迅速增大并在最大值附近波动,此时剪应力以单峰形式存在,并且该阶段开始,最大水平应力的位置开始移动,并且在距离陷落柱20 m的时候出现在工作面前方5 m处。该阶段,工作面前方岩层断裂造成剪应力的转移受阻,峰值点向工作面侧移动,同时陷落柱周围围岩增大径向的剪应力对采动引起的剪应力产生叠加影响。第3阶段,进入到陷落柱边缘破碎区,剪应力因围岩破碎得到释放而迅速降低,并且当工作面进入陷落柱后,由于陷落柱的破碎且宏观上均质性好,所以最大水平应力转移到了工作面前方18 m左右的位置。

陷落柱的存在对各个应力的影响范围和程度不同,其中以垂直应力对顶板控制影响最大,在综合考虑水平应力和剪应力影响的基础上,确定工作面到陷落柱距离50 m时开始加强顶板控制,距离小于20 m时重点管控。

2.2.2 采动对陷落柱体应力的影响

采用同样的方法得到陷落柱体最大应力的影响系数,绘制成图5。工作面距陷落柱距离不同时陷落柱体最大应力见表3。

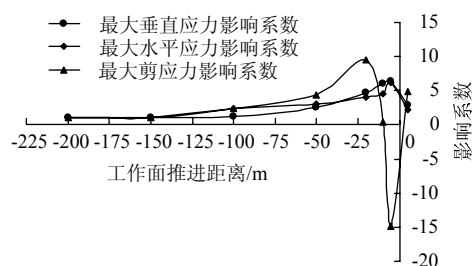


图5 陷落柱内最大应力倍数与到工作面距离的关系曲线
Fig.5 Curve of relation between maximum stress ratio and distance from collapse column to working face

表 3 陷落柱体最大应力与到工作面的距离关系
Table 3 Relation of maximum stress of collapse column with distance between working face and collapse column

距陷落柱的距离/m	水平应力/ MPa	垂直应力/ MPa	剪应力/ MPa
200	1.37	3.88	0.27
150	1.37	3.88	0.27
100	3.18	4.70	0.64
50	4.10	10.07	1.20
20	5.50	18.48	2.57
10	6.23	23.59	0.13
5	8.56	25.00	-4.00
-5	3.16	11.40	1.30

最大水平应力和最大垂直应力整体呈现先增后减的趋势,而最大剪应力的趋势为由先增后减再反向增减。根据陷落柱体的应力变化可以将工作面开采对陷落柱的影响分为 3 个阶段:第 1 阶段,工作面距离陷落柱距离 150~100 m 时,开采对陷落柱体应力产生微弱影响;第 2 阶段,工作面距离陷落柱 100~50 m 时,柱体内应力变化较为缓慢,可以判断此时采动对柱体内岩体的影响依然较弱;第 3 阶段,距离小于 50 m 时,柱体内应力均迅速增大,工作面回采活动对陷落柱内岩体的影响开始变得强烈。另外,当采煤工作面推入柱体内时,柱体内的应力迅速下降。

垂直应力、水平应力及剪应力在工作面与陷落柱-200~-150 m 时为一恒定值,说明陷落柱内的应力未被扰动。在第 1 阶段,柱体内水平应力和剪应力开始发生变化,但是垂直应力的变化幅度很小,说明采动开始影响陷落柱体应力分布。在第 2 阶段,应力发生明显变化,在此阶段,最大水平应力和最大剪应力的影响系数最大,平均在 3 左右,垂直应力影响系数最小,平均在 2 左右。说明在岩层中水平应力和剪应力的影响范围要大于垂直应力。在第 3 阶段,柱体内应力发生剧烈变化,从峰值出现时间看,最大剪应力达到最大值的时间要早于最大垂直应力和最大水平应力。从变化幅度看,虽然最大垂直应力数值上远大于最大水平应力,但是变化幅度及同步率都非常高,且影响系数都在-5 m 处达到最大值,最大值约为初始应力的 6 倍。而对于剪应力来说,在-50~-10 m 范围内呈现先增后减的趋势,说明采动应力在一定程度上向陷落柱发生了转移,在-10 m 处数值为零,说明工作面经过-10 m 处的塑性破坏与应力降低区交界区域;在-5 m 以内则呈现

反方向的先增后减趋势,说明在工作面通过围岩和陷落柱的接触面。

可以看出工作面距离陷落柱 150 m 时,开始对陷落柱体应力产生影响,在小于 50 m 时剧烈影响。因此,对陷落柱及周围围岩的加固要在第 2 阶段开始之前完成并达到长时强度,加固强度按照第 3 阶段陷落柱体应力的影响系数进行综合确定。

3 工程实践

3.1 陷落柱的基本情况

K8403 工作面为综采工作面,平均煤厚为 6.4 m,采高 2.8 m。如图 1 所示,陷落柱 X1 长轴 26.0 m,短轴 23.0 m,面积 441 m²,走向长度约为 26 m,沿工作面倾向影响长度约为 10 m。陷落柱在揭露过程中曾经发生过溃泄,柱体强度很低。

3.2 注浆加固参数确定

1) 加固范围

应用普氏地压拱理论计算加固范围。当工作面回采至陷落柱段时,进风巷工作面一侧的陷落柱将被强制采空,这时陷落柱采空宽度可视为一个断面更大的巷道空间,可将其视为一个普氏免压拱模型来进行分析计算。根据普氏地压理论,要想保证工作面通过陷落柱段时支架及巷道支护的安全性,必须对超前段支护强度进行计算。采用下式计算:

$$q = \gamma a / f$$

式中: q 为免压拱内的均布顶压, kN/m²; γ 为岩石平均容重, kN/m³, 取 15~18; a 为拱半径, m, 取 6.93 m; f 为普氏岩石坚固性系数 $f = \tan \varphi' = \frac{1}{10} \times \frac{2 \cos \varphi}{1 - \sin \varphi}$, φ 为岩石内摩擦角, 加固前取 22°15', φ' 为岩石的似内摩擦角, 加固后取 55°。

加固前, 免压拱内的均布顶压 $q = \gamma a / f = (253.5 \sim 204.2)$ kN/m², 拱高 $b = a / f = 16.9$ m。

上述计算结果为静态压力,而采动引起的支承压力要大于静态压力。如果不采取措施,液压支架 504 kN/m² 的额定工作阻力将难以满足工作面过陷落柱时的要求。因此,需要采取注浆方式加固陷落柱。

加固后,陷落柱体的岩石似内摩擦因数 $\tan \varphi'$ 取 $\tan 55^\circ$, 据此可以计算出:免压拱内的均布顶压 $q = \gamma a / f = (87.4 \sim 116.5)$ kN/m², 拱高 $b = a / f = 9.9$ m。

因此,需要对拱高范围内的陷落柱体进行加固,取加固高度为 10 m。

2) 加固时间

数值模拟结果表明,从工作面距离陷落柱 150 m 时,陷落柱体内应力开始受到影响,小于 50 m 影响剧烈。为防止采动破坏未达到长时强度的加固体,从距离工作面 150 m 时开始对陷落柱进行注浆加固,在受到剧烈影响前须达到长时强度。

3) 注浆孔设计

为了不影响正常生产,在相邻的 K8402 回风巷对陷落柱进行注浆加固。注浆加固高度为工作面支架以上 10 m,钻孔直径为 75 mm。注浆孔的布置方式如图 6 所示,沿巷道走向方向的排距为 2 m,如遇特殊情况可适当加密,注浆作业时按钻孔排列顺序自下而上间隔进行。其中,为方便工作面推进,陷落柱侵入工作面部分 I 不注浆。

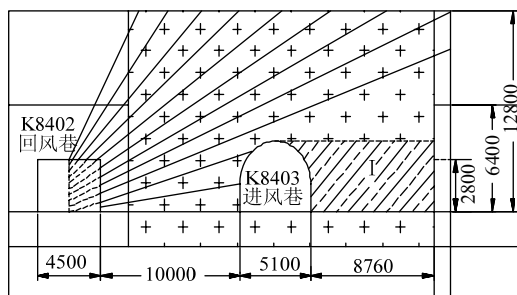


图6 注浆孔布置示意图 (mm)

Fig.6 Layout of grouting hole

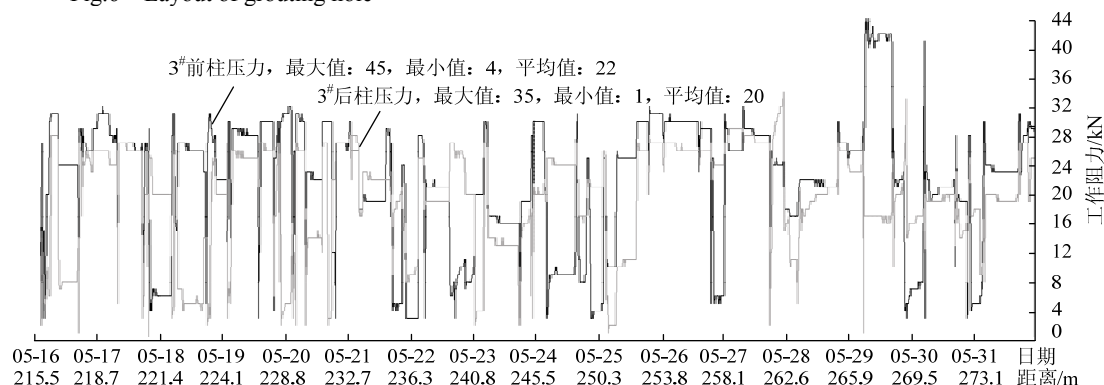


图7 通过陷落柱前后液压支架工作阻力

Fig.7 Working resistance of hydraulic support before and after Crossing collapse column

结合现场情况分析,造成液压支架工作阻力变化不明显主要有 2 个方面的原因:

1) 陷落柱位于工作面端头位置且深入工作面距离较短,影响较小;

2) 停止放煤和陷落柱应力异常共同作用减小了对液压支架支护阻力的影响^[15]。

4 结 论

1) 根据影响距离和程度可以将采动应力和陷

4) 注浆材料及压力

采用 TWK 纳米级水泥基复合剂、TWK 高分子高强固化剂和普通硅酸盐 R52.5 水泥对陷落柱进行注浆加固。其中,(水泥+TWK 复合剂):水:TWK 固化剂=1:0.5:1。根据陷落柱体裂隙发育情况,确定注浆压力为 0.5~2.0 MPa。

3.3 工作面顶底板控制措施

根据数值模拟研究结果,在工作面距陷落柱 50 m 时,陷落柱开始对工作面采动应力产生较大影响,因此,从工作面接近陷落柱 50 m 开始加强液压支架的管理,保证初撑力和额定工作阻力。从工作面接近陷落柱 20 m 开始附近的 1~15 架液压支架逐渐减少顶煤的放煤量,在 10 m 处时停止放煤,以减缓顶板活动的剧烈程度,降低对陷落柱的影响。同时,如出现支架钻底趋向,需及时在支架下方充填矸石。

3.4 过陷落柱前后工作面矿压显现规律

K8403 工作面 1~15 号支架在距离陷落柱 20 m 时开始减少放煤,距离陷落柱 10 m 时开始停止放煤,5 月 23 日进入陷落柱体。理论上,陷落柱周围应力有明显异常,停止放煤后液压支架周期性受力应该更明显,如图 7 所示,在停止放煤后及进入陷落柱体后液压支架工作阻力没有明显异常变化。

落柱体应力的相互影响分为 3 个主要阶段:弱影响阶段、中影响阶段、强影响阶段。在弱影响阶段,主要是采动应力开始对陷落柱体应力产生影响;中影响阶段,陷落柱对采动应力的影响开始显现;强影响阶段,两者互相影响强烈。

2) 根据采动应力和陷落柱体应力 3 个影响阶段的不同,在弱影响阶段到来前加固了陷落柱体,在强影响阶段加强了工作面的顶板管理。工程实践表明,对陷落柱加固后,液压支架的工作阻力未发

生异常变化,工作面顺利地通过了陷落柱,取得了良好的效果。

参考文献:

- [1] 彭纪超, 刘海荣, 孙丽华, 等. 山西省煤矿区陷落柱分布规律与突水预测研究[J]. 中国煤炭地质, 2010, 22(7): 26-30.
PENG Jichao, LIU Hairong, SUN Lihua, et al. A study on subsided column distribution pattern and water bursting prediction in Shanxi coalmines[J]. Coal Geology of China, 2010, 22(7): 26-30.
- [2] 尹尚先, 武强, 王尚旭. 北方岩溶陷落柱的充水特征及水文地质模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 24(1): 77-82.
YIN Shangxian, WU Qiang, WANG Shangxu. Water-bearing characteristics and hydro-geological models of Karstic columns in North China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 24(1): 77-82.
- [3] 冯国瑞. 残采区上行开采基础理论及应用研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2009.
- [4] 冯国瑞, 闫永敢, 杨双锁, 等. 长壁开采上覆岩层损伤范围及上行开采的层间距分析[J]. 煤炭学报, 2009, 34(8): 1032-1036.
FENG Guorui, YAN Yonggan, YANG Shuangshuo, et al. Analysis on the damage zone of overlying strata and safety layer distance on the upward mining above the longwall goaf[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(8): 1032-1036.
- [5] 张村, 屠世浩, 白庆升, 等. 陷落柱周边应力变化及推采控制研究[J]. 中国矿业大学学报, 2014, 43(6): 974-980.
ZHANG Cun, TU Shihao, BAI Qingsheng, et al. Stress changes around collapse column and the control technology by directly pass in operation in longwall working face[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2014, 43(6): 974-980.
- [6] 许进鹏, 宋扬, 成云海, 等. 陷落柱及其周边地应力分布研究[J]. 矿山压力与顶板管理, 2005, 22(4): 118-120.
XU Jinpeng, SONG Yang, CHENG Yunhai, et al. Study on stress distribution of collapse column and its surrounding[J]. Ground Pressure and Strata Control, 2005, 22(4): 118-120.
- [7] 韩传廷. 回采工作面过不连续顶板的矿压理论与生产技术研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2012.
- [8] 王家臣, 杨胜利. 采动影响对陷落柱活化导水机理数值模拟研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2009, 26(2): 140-144.
WANG Jiachen, YANG Shengli. Numerical simulation of mining effect on collapse column activated water conducting mechanism[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2009, 26(2): 140-144.
- [9] 尹尚先, 武强. 煤层底板陷落柱突水模拟及机理分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(15): 2551-2556.
YIN Shangxian, WU Qiang. Simulation and mechanism analysis of water inrush from Karstic collapse columns in coal floor[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(15): 2551-2556.
- [10] 赵国飞, 康天合, 杨永康, 等. 工作面直接过陷落柱的盐酸软化法及其试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2014, 31(1): 97-101.
ZHAO Guofei, KANG Tianhe, YANG Yongkang, et al. Experimental study on coal face direct passing collapse column by hydrochloric acid softening method[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2014, 31(1): 97-101.
- [11] 王凯, 乔永凤. 综采面过溃泄型陷落柱顶底板加固合理厚度的确定[J]. 中州煤炭, 2011(10): 20-22.
WANG Kai, QIAO Yongfeng. Determination of proper reinforced thickness of roof and floor while fully-mechanized working face passing through Karstic collapse columns of breach and effusion[J]. Zhongzhou Coal, 2011(10): 20-22.
- [12] 孟辉, 马守君, 樊海艳, 等. 陷落柱影响采场围岩破坏的数值模拟分析[J]. 山东科技大学学报, 2011, 30(5): 26-29, 35.
MENG Hui, MA Shoujun, FAN Haiyan, et al. Numerical simulation analysis for influence of subsided columns on failure of face surrounding rocks[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology, 2011, 30(5): 26-29, 35.
- [13] 张育恒. 综放工作面过陷落柱开采技术探讨[J]. 煤矿开采, 2012, 17(4): 24-26, 29.
ZHANG Yuheng. Discussion of full-mechanized mining face collapse column[J]. Coal Mining Technology, 2012, 17(4): 24-26, 29.
- [14] 王中亮, 秦帅, 何青源, 等. 综放工作面快速过上松下硬陷落柱开采技术[J]. 煤矿安全, 2013(3): 81-84.
WANG Zhongliang, QIN Shuai, HE Qingyuan, et al. Mining technology of quick passing upper loose and lower hard collapse column at fully-mechanized caving face[J]. Safety in Coal Mines, 2013(3): 81-84.
- [15] 徐青云, 黄庆国, 李永明. 不连沟煤矿综放工作面末采期矿压显现规律[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(6): 33-36, 49.
XU Qingyun, HUANG Qingguo, LI Yongming. Mine strata pressure behavior law of fully mechanized top coal caving mining face during terminal mining period in Buliangou mine[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(6): 33-36, 49.