



移动扫码阅读

曹民远,李 康,闫瑞兵,等.倾斜煤层区段煤柱爆破卸压工程应用[J].煤炭科学技术,2021,49(12):104-111. doi:10.13199/j.cnki.cst.2021.12.013

CAO Minyuan, LI Kang, YAN Ruibing, et al. Application of blasting and pressure relief of reserved coal pillars along the inclined coal seam [J]. Coal Science and Technology, 2021, 49 (12): 104 - 111. doi: 10.13199/j.cnki.cst.2021.12.013

倾斜煤层区段煤柱爆破卸压工程应用

曹民远¹,李 康¹,闫瑞兵¹,杜涛涛²

(1.神华新疆能源有限责任公司,新疆 乌鲁木齐 830027;2.煤炭科学研究总院 开采设计研究分院,北京 100013)

摘 要:为解决宽沟煤矿西翼 I010203 工作面进风巷受到下方采空区侧向应力影响造成的应力集中现象,采用现场煤体应力计监测数据对比分析和数据无量纲化处理相结合的手段,分别对进风巷上帮围岩应力和煤柱侧围岩应力分布情况进行了研究,研究表明:进风巷上帮煤体应力分布与巷道下帮侧煤体应力分布不同,巷道下帮侧煤体应力浅部应力高于深部应力且与至工作面距离呈正相关,孔深 4.5 m 煤体应力集中程度最高,采动应力集中分布在超前工作面 50~110.6 m,显著影响范围为超前工作面 50 m 内;巷道下帮侧煤体应力深部高于浅部且与至工作面距离呈正相关,煤体应力集中位于 9 m 以上的深部位置,采动应力集中分布在超前工作面 50~80 m,显著影响范围为超前工作面 60 m 内;确定了进风巷上帮煤体预卸压范围为 50~120 m,巷道下帮煤体的预卸压范围为 60~80 m。参考经验数据以及理论计算,确定了进风巷上帮煤体爆破卸压工程和下帮煤体大直钻孔卸压工程的相关参数,结合 PASAT 探测和围岩应力数据对比分析结果,设计的煤体爆破卸压工程能有效降低区段煤柱围岩应力集中现象,但大直径钻孔应确保一定的工程量,形成连续卸压面才能达到预期卸压效果。

关键词:倾斜煤层;沿空巷道;区段煤柱;煤体爆破;大直径钻孔;围岩控制

中图分类号:TD353

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2021)12-0104-08

Application of blasting and pressure relief of reserved coal pillars along the inclined coal seam

CAO Minyuan¹, LI Kang¹, YAN Ruibing¹, DU Taotao²

(1.Shenhua Xinjiang Energy Co., Ltd., Urumqi 830027, China;2.Coal Mining and Designing Branch, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China)

Abstract: In order to solve the stress concentration caused by the lateral stress of the gob below the air inlet roadway in the West Wing I010203 face of Kuangou Coal Mine, a comparative analysis of on-site coal stress gauge monitoring data and non-dimensional data processing were adopted. The combined methods were used to study the stress distribution of surrounding rock on the side roadway with reserved coal pillars along the gob. Research results show that: The stress distribution of the upper side of the roadway in the air inlet roadway along the gob is different from that of the lower side of the roadway. The stress in the shallow part of the upper side of the roadway is positively correlated with the working face distance, the coal body stress concentration is the highest at the hole depth of 4.5 m. The stress concentration is distributed in the range of 50~110.6 m in the advanced working face, and the significant influence range is within 50 m ahead of the working face; the deep part of the coal body on the lower side of the roadway is higher than the shallow part and is positively correlated with the distance of the working face, and the coal body stress concentration is located at 9 m, and the mining stress concentration is in the range of 50~80 m in the advance working face, and the significant influence range is within 60 m ahead of the working face; the pre-pressure relief range of upper side in the air inlet roadway along the gob is 50~120 m, and that of lower side is 60~80 m. With reference to empirical data and theoretical calculations, the relevant parameters of the upper coal body blasting pressure relief project and the lower coal body large straight borehole pressure relief project of the air inlet side roadway along the goaf are determined, combined with

收稿日期:2021-03-20;责任编辑:黄小雨

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51874231,51504184)

作者简介:曹民远(1981—),男,河南驻马店人,工程师。E-mail:287260471@qq.com

PASAT detection and surrounding rock stress data. Comparative analysis results show the designed coal body blasting pressure relief project can effectively reduce the stress concentration of surrounding rock of the reserved coal pillar, but the large diameter pressure relief borehole should ensure a certain amount of work and form a continuous pressure relief surface to achieve the expected pressure relief effect.

Key words: inclined coal seam; gob-side entry; reserved coal pillar; coal blasting; large diameter pressure relief hole; surrounding rock control

0 引言

宽沟煤矿自 2012 年在 B_4 煤层综采工作面首次发生冲击地压显现事故以后,随着采深增加,综采工作面附近围岩应力集中程度逐步增强,尤其在沿空煤柱留设(简称区段煤柱)区域显现最为明显,形成高应力煤柱区。为了解决区段煤柱产生的应力集中现象,目前较为有效的方法是煤柱卸压,通过爆破、水力压裂等手段切断煤柱内部或外部的应力传播途径,阻碍上覆岩层的应力传递并提前释放煤柱内部的集聚能量,从而达到卸除煤柱集聚载荷的目的^[1]。国内外学者对煤柱留设及卸荷开展了较为深入的研究。祁和刚等^[1]通过研究发现葫芦素 2-1 煤留设的 30 m 区段煤柱在侧向支承压力作用下对底板岩层的影响较大,其承压破坏带覆盖整个巷道底板范围,并提出了高位“钻、切、压”一体化技术切断覆岩应力传递,低位煤层小孔径爆破技术释放煤柱内的集聚载荷的高应力区段煤柱综合卸荷技术;王志强等^[2]针对华丰煤矿冲击地压发生的影响因素研究,提出了负煤柱开采保护层的防冲新方法;尉瑞等^[3]通过现场原位测试方法得出了浅埋综放沿空小煤柱巷道矿压显现规律;张明等^[4]揭示了厚硬岩层运动和煤柱应力演化之间的关系及其组成系统失稳规律,提出了采场“厚硬岩层-煤柱”结构模型;张震等^[5]利用高频电磁波 CT 技术建立了基于电磁波衰减特征参数指标的煤柱稳定性评价方法;孙福玉^[6]、王福军^[7]、李慎锋等^[8]通过对区段煤柱应力分布情况进行分析研究,并提出了综合防治技术,进一步丰富了区段煤柱应力防治技术体系。但目前针对区段煤柱的冲击地压防治研究主要针对煤柱留设和单项卸压工程的参数设定等方面,针对性开展倾斜煤层上行开采条件下的区段煤柱侧的应力分布研究较少,特别是区段煤柱附近综合解压工程研究仍缺乏,因此,笔者通过对宽沟煤矿区段煤柱应力分布规律进行研究,结合研究结果开展煤柱侧煤体爆破与大直径钻孔卸压相结合的工程措施,来解决区段煤柱侧应力集中问题,同时对同类型矿井煤柱侧卸压解危具有一定的参考意义。

1 工程概况

1.1 矿井概况

神华新疆能源有限责任公司宽沟煤矿位于呼图壁县城西南 70 km 处,行政区划隶属新疆维吾尔自治区昌吉回族自治州呼图壁县雀尔沟镇管辖。矿区主要可采煤层自下而上分别为 B_0 、 B_1 、 B_2 、 B_3 、 B_{4-1} 、 $B_{4-1下}$ 、 B_{4-2} 煤层,现开采煤层为 B_2 煤层, B_2 煤层平均厚度为 9.5 m,倾角平均为 14° ,属于倾斜特厚煤层。 B_2 煤层采用东西双翼开采方式,单翼各布置 2 个综采放顶煤工作面,目前生产工作面为西翼 I010203 工作面,西翼 I010203 工作面与下部已回采完毕的西翼 I010201 工作面由宽 15 m 区段煤柱隔开。西翼 I010203 工作面采用走向长壁综采放顶煤工艺,后退式回采,倾斜长度 192 m,可采走向长度 1 470 m,采高 3.2 m,放煤厚度 6.3 m,具体如图 1 所示。

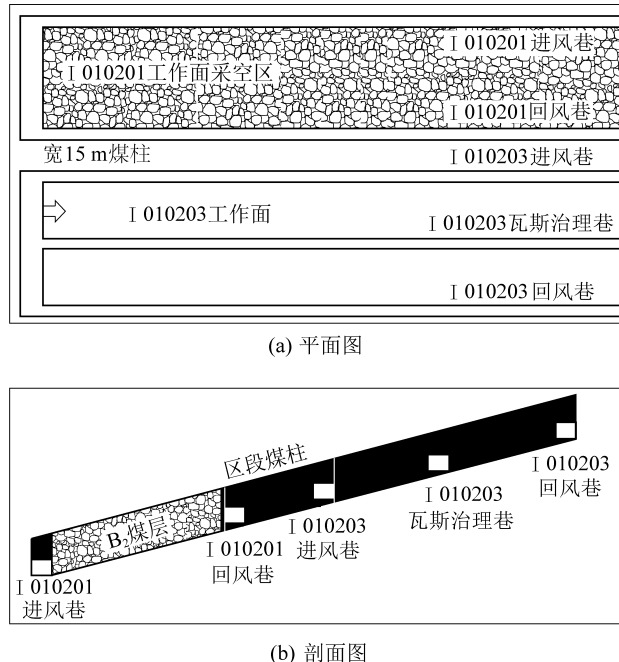


图 1 I010203 工作面分布

Fig.1 Distribution of I010203 working face

1.2 煤岩层冲击倾向性

宽沟煤矿 B_2 煤层试样的动态破坏时间 (D_T) 测试平均值为 254 ms, 大于 50 ms, 小于 500 ms, 按 GB/T 25217.2—2010 规定应为弱冲击倾向性; 冲击能量指数 (K_E) 的测试平均值为 3.20, 按 GB/T

25217.2—2010 规定应为弱冲击倾向性;弹性能量指数(W_{ET})的测试平均值为 4.09,按 GB/T 25217.2—2010 规定应为弱冲击倾向性。单轴抗压强度(R_c)的测试平均值为 24.14,按 GB/T 25217.2—2010 规定应为强冲击倾向性。通过对煤层 4 个冲击倾向性指数进行模糊计算,得出 D_T 和 R_c 的隶属度为 0.3, W_{ET} 和 K_E 的隶属度各为 0.2,综合判定 B_2 煤层属于 II 类,为具有弱冲击倾向性的煤层。

通过测定, B_2 煤层顶板弯曲能量指数为 177.67 kJ,按 GB/T 25217—2010 规定应属 III 类,为具有强冲击倾向性的顶板岩层;煤层底板弯曲能量指数为

26.82 kJ,按 GB/T 25217.1—2010 规定应属 II 类,为具有弱冲击倾向性的底板岩层。

2 应力分布范围

2.1 回风巷上帮应力分布

通过对安装在西翼 I010203 工作面进风巷上帮 KJ21 煤体应力监测数据分析,来研究工作面超前支承压力影响范围,具体如图 2 所示,认为西翼 I010203 工作面采动影响范围为超前工作面 80.6~110.6 m,显著影响范围为超前工作面 50 m 范围内,为此确定预卸压范围为超前工作面 50~120 m。

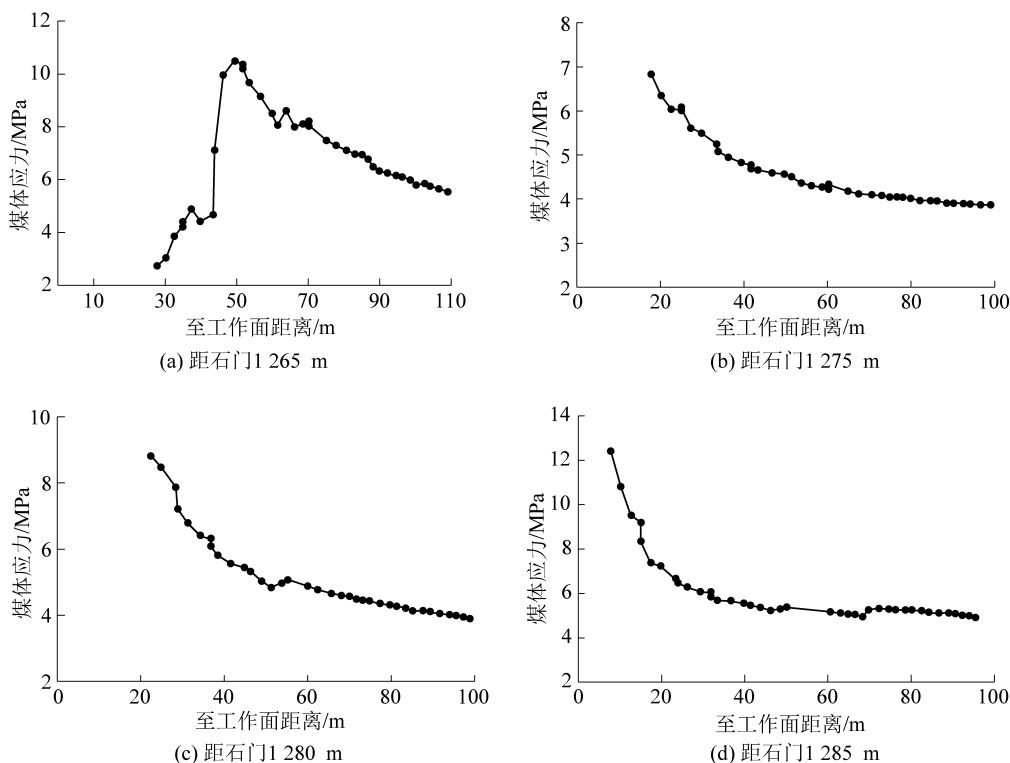


图 2 进风巷上帮侧煤体应力监测结果

Fig.2 Stress monitoring results of upper side in air inlet roadway

按不同安装深度的煤体应力计进行无量纲处理,即把实际的应力值除安装初始应力值,得到不同煤柱深度应力曲线如图 3 所示。通过对不同深度应力曲线分析,认为煤层侧浅部应力高于深部应力,距离工作面越远,浅部容易产生应力集中,靠近工作面的过程,浅部应力集中程度升高,实测在 4.5 m 位置的煤体应力集中程度最高。

2.2 区段煤柱应力分布

煤柱侧煤体应力演化过程,根据安装在进风巷下帮 KJ21 煤体应力监测子系统监测数据分析结果进行分析,如图 4 所示,认为西翼 I010203 工作面区段煤柱受采动影响范围为超前工作面 80 m 内,显著影响范围为超前工作面 60 m 内,因此,确定预卸压

范围为超前工作面 60~80 m。

按不同安装深度的煤体应力计进行无量纲处理,把实际的应力除安装初始应力,得到不同煤柱深度应力曲线如图 5 所示。通过对不同深度应力曲线分析,认为随工作面推进,煤柱侧深部应力集中程度增加,且应力集中区不低于 9 m,可能应力峰值处于更深的位置。

3 区段煤柱卸压工程

通过对西翼 I010203 工作面矿震引起变形显现的区域进行统计,工作面进风巷显现占比 90.9%,工作面回风巷及中巷显现占比 9.1%,同时进风巷巷道的下帮(区段煤柱侧)显现严重程度明显强于上帮,

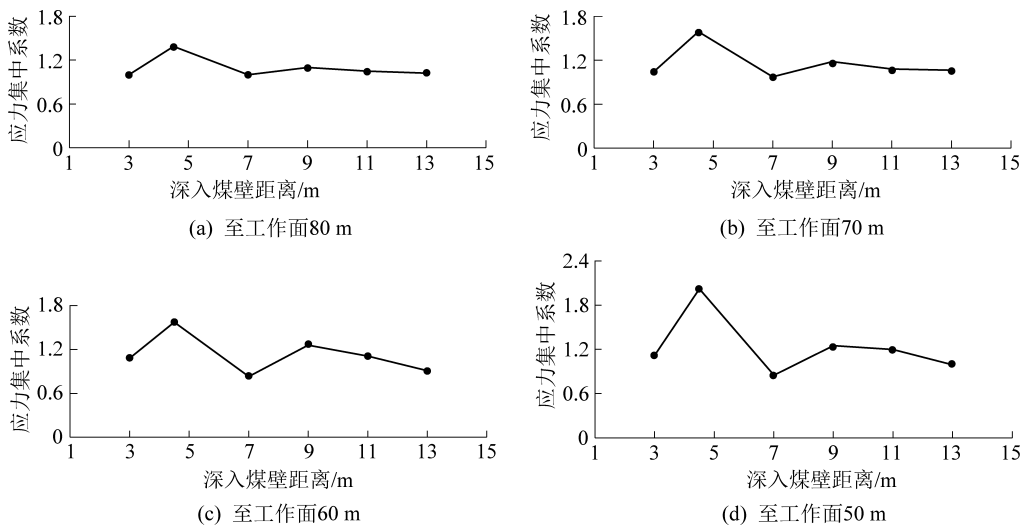


图3 进风巷上帮煤体不同深度应力监测结果

Fig.3 Stress monitoring results of different depths of upper side in air inlet roadway

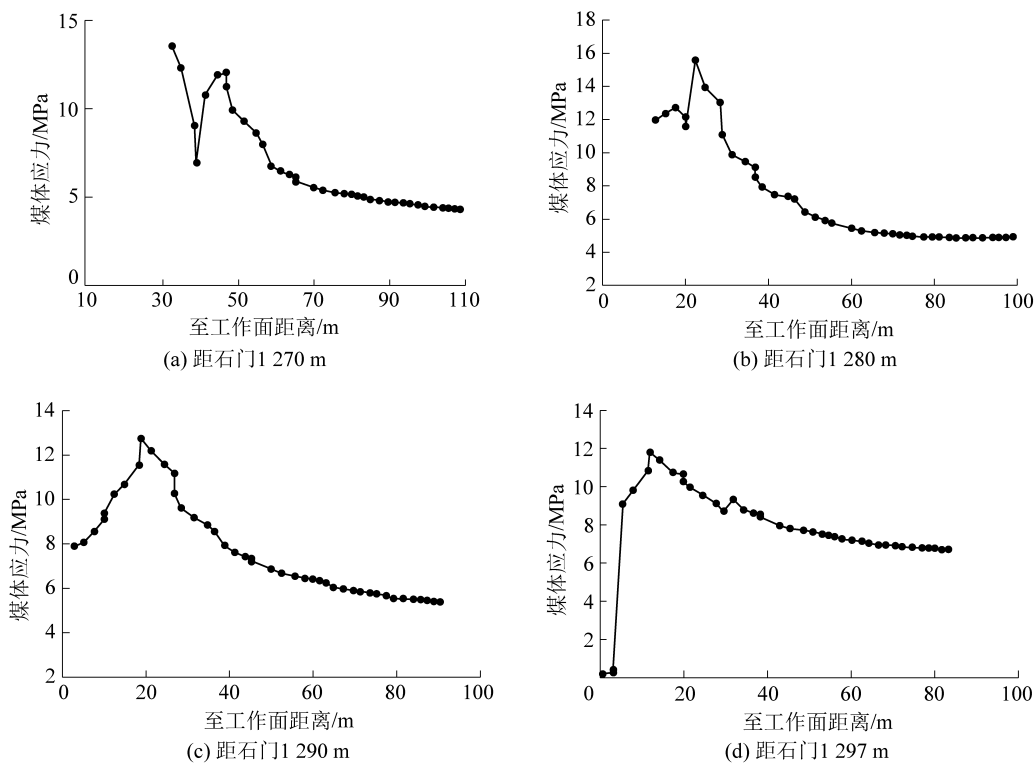


图4 进风巷下帮侧应力监测结果

Fig.4 Stress monitoring results of lower side of section air inlet roadway

呈现出明显的区段煤柱为中心的应力集中区。为消除区段煤柱区集聚的应力,分别在西翼 I010203 工作面施工大直径钻孔及煤体爆破孔进行超前爆破卸压。

3.1 煤体爆破卸压工程

冲击地压的致灾机理能量论认为造成冲击地压灾害显现的主要根源在于煤岩体本身中积聚的弹性能,受到采动扰动等因素的影响下造成弹性能的集中释放,产生破坏。煤层爆破卸压是用爆破的方法

减缓其应力集中和能量积聚程度,达到卸压解危的目的。煤体爆破卸压能有效消除冲击地压发生的强度条件和能量条件,煤岩体强度和能量弱化后,围岩的应力峰区发生扩散或者向煤岩体深部转移,降低了工作面或者巷道附近应力集中程度,根据现场实测,煤体爆破中加大装药加量能释放更大的的爆能,人为地超前诱发冲击地压发生,使冲击地压发生在适合的时间和地点发生,避免更大的冲击危险^[9]。

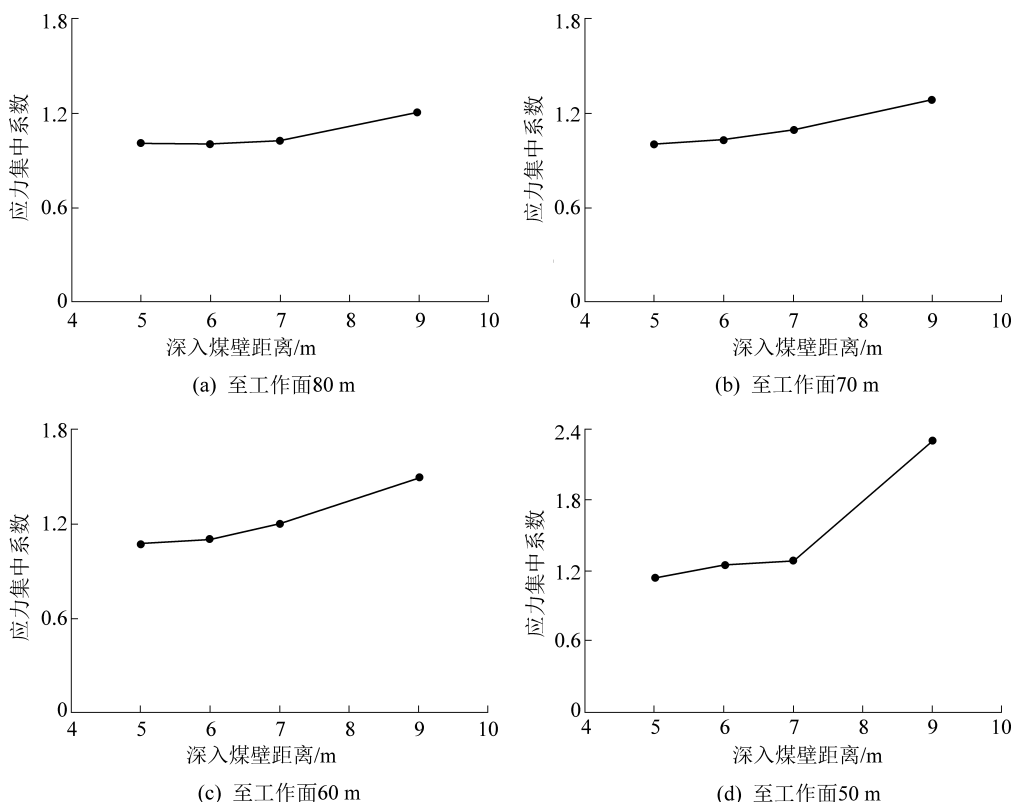


图5 区段煤柱侧向应力监测结果

Fig.5 Monitoring results of lateral stress of reserved coal pillars

根据相关研究^[10-11],西翼 I010203 工作面回风巷上帮采取煤体爆破方法对 I010201 工作面侧向应力进行超前卸压,钻孔参数为:孔径 42 mm,孔长 10 m,装药长度 5 m,孔间距为 5 m,垂直煤壁施工,钻孔仰角 14°,正向不耦合装药,单孔单次爆破,炸药采用矿用三级许可乳胶基质炸药,黄土封泥封孔,超前工作面 50 m 爆破,提前释放工作面浅部集中区集聚的应力,具体如图 6 所示。

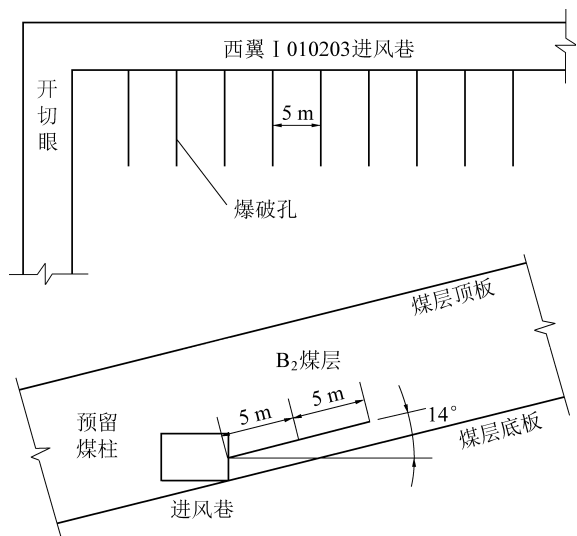


图6 煤体爆破孔施工图

Fig.6 Working drawing of coal blasting hole

3.2 煤柱侧大直径钻孔卸压工程

结合相关研究结论^[12],卸压钻孔由外向内可分为弹性区、塑性区及破裂区 3 类,钻孔卸压通过改变钻孔附近的围岩体属性来降低围岩应力集中程度,卸压钻孔施工后,钻孔周围形成塑性区,降低围岩应力。当卸压钻孔的孔间距位于钻孔应力叠加区时,存在轻度应力集中,当应力叠加值超过煤体极限强度时,卸压钻孔间煤体发生破坏,释放煤体内部积聚的应力及能量,以达到防治冲击地压的目的^[13]。李云鹏等^[14]根据钻孔坍塌前后煤体体积不变原则,得出了卸压钻孔塑性区半径的计算公式为

$$R_{p1} = mnR_0 \left\{ \frac{[\sigma_y(1+\lambda) + 2ccot\varphi](1 - \sin\varphi)}{2ccot\varphi} \right\}^{\frac{1-\sin\varphi}{2\sin\varphi}} \times \left\{ 1 + \frac{\sigma_y(1-\lambda)(1 - \sin\theta\cos 2\theta)}{[\sigma_y(1+\lambda) + 2ccot\varphi]\sin\varphi} \right\} \quad (1)$$

式中: σ_y 为垂直应力,MPa; R_0 为卸压钻孔半径,m; R_{p1} 为最终破裂区半径,m; λ 为侧压系数; c 为煤体黏聚力,MPa; φ 为煤体内摩擦角,(°); θ 为环向角度,(°); m 为最终破裂区半径与卸压钻孔关联参数,通常取值 1.73~2.44; n 为修正系数,通常取 1.5~2.5^[15]。

按照公式(1)对孔径 133 mm 卸压钻孔的塑性区半径进行了计算,相关参数通过煤层地质报告以及力学参数测定报告得出,具体详见表 1。

表 1 西翼 I010203 工作面地质力学参数

Table 1 Mechanical parameters of I010203 working face

抗压强度/MPa	修正系数	弹性模量/GPa	垂直应力/MPa	内摩擦角/(°)	黏聚力/MPa	环向角度/(°)	侧压系数	碎胀系数
2.21	1.5~2.5	4.93	8.67	28.86	4.4	45	0.32	1.4

通过计算,钻孔直径 133 mm 卸压钻孔的塑形区半径为0.22~0.52 m。由于计算过程中卸压钻孔中塌孔仅增加煤体中的裂隙,而原裂隙区的半径不再增大,导致卸压钻孔塑性区半径数值相对保守。同时参考相关研究^[16-18],将区段煤柱侧大直径钻孔塑性区半径选定为 0.5 m,钻孔的参数为:钻孔间距 1 m,孔径 133 mm,孔长 9 m,卸压孔施工位置超前工作面 120 m,具体如图 7 所示。

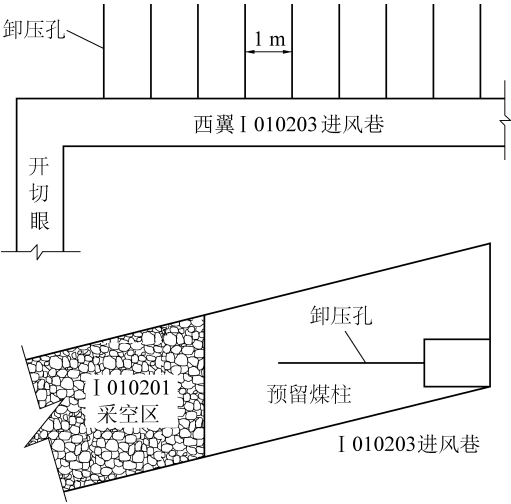


图 7 煤体卸压孔施工图

Fig.7 Working drawing of large diameter boreholes

4 区段煤柱工程效果验证

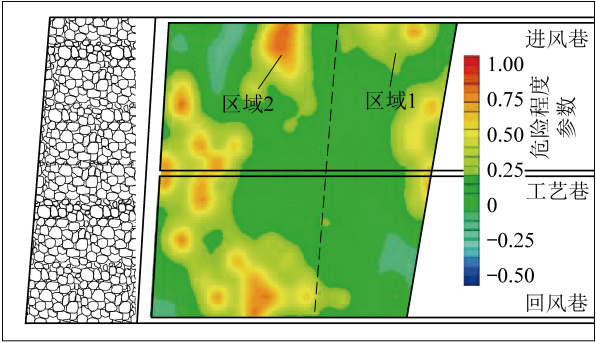
4.1 煤体爆破工程效果验证

根据研究^[19-20],PASAT-M 探测技术能实现煤岩体工程效果的有效验证。I010203 工作面 1 398~1 200 m 区域回采采用 PASAT 探测划定了 6 个冲击危险区域,其中位于进风巷存在 2 处危险区域,分别为:位于进风巷 1 270~1 220 m(区域 1)和进风巷 1 336~1 300 m(区域 2),具体如图 8a 所示。PASAT 去图危险程度见表 2。针对进风巷存在的两处冲击危险区域,采用了 42 mm 孔径的煤体爆破卸压,钻孔参数按照本研究确定的参数执行,爆破后对进风巷冲击危险区域进行了 PASAT 探测验证,具体如图 8b 所示。通过卸压前后 PASAT 探测结果对比,认为煤体爆破孔卸压效果较为明显,能起到降低煤体应力的效果,设计的爆破参数能够满足进风巷浅部应力卸压要求。

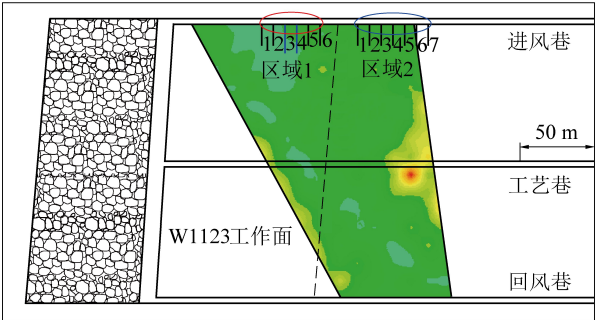
4.2 大直径钻孔卸压工程验证

煤体大直径钻孔卸压工程验证采用对卸压孔施

工前后围岩应力变化程度来进行验证,通过安装在进风巷下帮(区段煤柱侧)1 265 m 的应力监测系统监测数据分析,具体如图 9 所示。随着工作面的推进,区段煤柱侧应力逐渐增加,当工作面回采至 4 月 11 日,至石门 1 300 m 处开始施工大直径钻孔,但日推进度由之前的 1.6 m 提高至 2.4 m,期间由于卸压孔的施工对区段煤柱侧的应力产生的一定程度的影



(a) 卸压前平面云图



(b) 卸压后平面云图

图 8 爆破卸压前后 PASAT 探测分布

Fig.8 Cloud map of PASAT detection before and after blasting

表 2 PASAT 云图危险程度参数

Table 2 Hazard level parameter table of PASAT

危险程度参数	冲击危险程度
<0.25	无
0.25~0.5	弱
0.5~0.75	中等
≥0.75	强

响,但由于开采强度增加造成采动扰动加剧,造成区段煤柱侧应力仍然呈现一定程度的增长态势。当卸压孔施工至 4 月 22 日(走向 1 277 m)时,区段煤柱侧应力呈现急剧下降态势,充分表明大直径钻孔卸压孔能有效降低围岩应力,但卸压孔施工至一定数

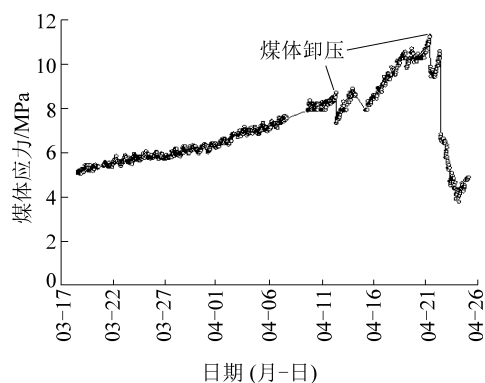


图9 煤体卸压与应力变化关系

Fig.9 Relation between pressure relief and stress variation

量、形成一定的卸压面才能达到降低围岩应力的作用。

5 结 论

1)通过对进风巷上帮安装的煤体应力监测数据统计分析,认为西翼 I010203 工作面采动影响范围为超前工作面 80.6~110.6 m,显著影响范围为超前工作面 50 m 内,为此确定预卸压范围为超前工作面 50~120 m。煤层侧浅部应力高于深部应力,4.5 m 位置的煤体应力集中程度最高;距离工作面越远,浅部容易产生应力集中,靠近工作面的过程,浅部应力集中程度升高。

2)区段煤柱侧的应力呈现如下变化:西翼 I010203 工作面区段煤柱受采动影响范围为超前工作面 80 m 范围内,显著影响范围为超前工作面 60 m 内,为此确定预卸压范围为超前工作面 60~80 m。煤柱侧深部应力集中程度随工作面推进而增加,且应力集中区位于 9 m 以上的深部位置。

3)煤体爆破卸压前后 PASAT 探测能量分布云图对比结果验证了煤体爆破能实现预期卸压目的。卸压孔施工前后应力监测结果充分表明大直径钻孔能有效降低围岩应力,但卸压孔施工至一定数量、形成一定的卸压面才能达到降低围岩应力的作用。

参考文献(References):

[1] 祁和刚,于健浩.深部高应力区段煤柱留设合理性及综合卸荷技术[J].煤炭学报,2018,43(12):3258-3263.
QI Hegang, YU Jianhao. Rationality and comprehensive unloading technology of deep high stress section coal pillars[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(12): 3258-3263.
[2] 王志强,乔建永,武超,等.基于负煤柱巷道布置的煤矿冲击地压防治技术研究[J].煤炭科学技术,2019,47(1):69-77.
WANG Zhiqiang, QIAO Jianyong, WU Chao, et al. Study on minor rock burst prevention and control technology based on gateway layout with negative coal pillars[J]. Coal Science and Technology,

2019,47(1):69-77.

[3] 尉瑞,杨文帅,郭彦军,等.浅埋综放沿空小煤柱巷道矿压显现规律研究[J].煤炭科学技术,2018,46(S2):57-59.
YU Rui, YANG Wenshuai, GUO Yanjun, et al. Study on strata behavior regularity of gob-side entry with small coal pillar in fully-mechanized caving face with shallow depth[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(S2):57-59.
[4] 张明,成云海,王磊,等.浅埋复采工作面厚硬岩层-煤柱结构模型及其稳定性研究[J].岩石力学与工程学报,2019,38(1):88-99.
ZHANG Ming, CHENG Yunhai, WANG Lei, et al. Structure model and stability research of thick hard strata-coal pillar in shallow-buried re-mined panels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(1):88-99.
[5] 张震,徐刚,黄志增,等.煤柱稳定性分析评价的高频电磁波CT技术研究[J].采矿与安全工程学报,2018,35(6):1151-1157.
ZHANG Zhen, XU Gang, HUANG Zhizeng, et al. Study on high frequency electromagnetic wave CT technology for stability analysis and evaluation of coal pillar[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2018, 35(6):1151-1157.
[6] 孙福玉.综放开采窄煤柱沿空掘巷围岩失稳机理与控制技术[J].煤炭科学技术,2018,46(10):149-153.
SUN Fuyu. Instability mechanism and control technology of surrounding rock of gob-side entry with narrow pillar by fully-mechanized caving mining[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(10):149-153.
[7] 王福军,李先志.老虎台矿高应力煤柱区巷道掘进冲击地压防治技术[J].煤矿安全,2018,49(9):122-127.
WANG Fujun, LI Xianzhi. Prevention and control of rock burst for roadway tunneling in high stress coal pillar area of laohutai Mine[J]. Safety in Coal Mines, 2018, 49(9):122-127.
[8] 李慎锋,刘兴邦,郭运刚,等.急倾斜煤层区段煤柱变形规律及应力变化特征[J].煤炭技术,2019,38(1):27-29.
LI Shenfeng, LIU Xingbang, GUO Yungang, et al. Deformation Law and Stress Change Characteristics of Coal Pillar in Section of Steep Seam[J]. Coal Technology, 2019, 38(1):27-29.
[9] 宋焕虎,魏辉.爆破卸压技术在深部煤层防治冲击地压中的应用[J].煤炭科技,2015,41(12):53-56.
SONG Huanhu, WEI Hui. Application of blasting destressing technology in preventing and controlling rock burst in deep coal seam[J]. Coal Science & Technology Magazine, 2015, 41(12):53-56.
[10] 刘少虹,潘俊锋,刘金亮,等.基于卸支耦合的冲击地压煤层卸压爆破参数优化[J].煤炭科学技术,2018,46(11):21-29.
LIU Shaohong, PAN Junfeng, LIU Jinliang, et al. Optimization of blasting parameters for rock burst coal seam based on pressure release and support coupling[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(11):21-29.
[11] 李鹏,刘志刚.煤柱高应力区煤体爆破卸压效果研究[J].煤炭工程,2017,49(12):66-68.
LI Peng, LIU Zhigang. Study on stress relief effect of coal body blasting in high stress zone of coal pillar[J]. Coal Engineering,

- 2017,49(12):66-68.
- [12] 张寅.强冲击危险矿井冲击地压灾害防治[M].北京:煤炭工业出版社,2010:107-110.
- [13] 姜耀东,潘一山,姜福兴,等.我国煤炭开采中的冲击地压机理和防治[J].煤炭学报,2014,39(2):205-213.
- JIANG Yaodong, PAN Yishan, JIANG Fuxing, *et al.* State of the art review on mechanism and prevention of coal bumps in China [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(2): 205-213.
- [14] 李云鹏,张宏伟,朱志洁,等.冲击危险煤层卸压钻孔安全参数研究[J].中国安全科学学报,2018,28(11):122-127.
- LI Yunpeng, ZHANG Hongwei, ZHU Zhijie, *et al.* Study on safety parameters of pressure relief borehole in rockburst coal seam [J]. China Safety Science Journal, 2018, 28(11): 122-127.
- [15] 刘少虹.动载冲击地压机理分析与防治实践[D].北京:煤炭科学研究总院,2013:1-131.
- LIU Shaohong. The study on the mechanism and prevention of dynamic-loading rockburst [D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2013: 1-131.
- [16] 贾传洋,韩宇超,王海龙.钻孔卸压参数研究及应用[J].煤矿开采,2018,23(1):65-68.
- JIA Chuanyang, HAN Yuchao, WANG Hailong, *et al.* Studying and Application of Drilling Hole Loading Relief Parameters [J]. Coal Mining Technology, 2018, 23(1): 65-68.
- [17] 史庆稳,崔宏科,吕大钊,等.冲击地压煤层巷帮卸压钻孔施工参数研究[J].煤矿开采,2017,22(6):74-77.
- SHI Qingwen, CUI Hongke, LÜ Dazhao, *et al.* Study on Pressure Relief Drilling Holes Layout Parameters of Roadside in Rockburst Coal Seam [J]. Coal Mining Technology, 2017, 22(6): 74-77.
- [18] 杜涛涛,杨永,杨磊,等.掘进巷道冲击危险区探测及卸压工程实践[J].煤矿开采,2017,22(4):77-82.
- DU Taotao, YANG Yong, YANG Lei, *et al.* Practice of Unloading Engineering and Rockburst Hazard Zone Exploration of Tunneling Roadway [J]. Coal Mining Technology, 2017, 22(4): 77-82.
- [19] 李红平. PASAT 探测系统在应力场中的应用[J].煤炭科技, 2017(2):85-88.
- LI Hong-ping. Application of PASAT detection system in stress field [J]. Coal Science & Technology Magazine, 2017(2): 85-88.
- [20] 徐文全,王恩元,刘贞堂,等.基于钻孔电磁辐射法的爆破卸压效果检验方法[J].煤炭学报,2012,37(2):279-283.
- XU Wenquan, WANG Enyuan, LIU Zhentang, *et al.* A study on testing the effect of blasting releasing pressure based on drilling electromagnetic radiation [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(2): 279-283.