

基于连续流量法的沿空掘巷合理煤柱宽度研究

苏伟伟, 田世祥*, 马瑞帅, 林华颖, 余婕, 伍小莎

(贵州大学 矿业学院, 贵州 贵阳 550025)

摘要:为确定沿空掘巷窄煤柱合理宽度,基于实际地质条件,运用现场试验、理论计算和数值模拟相结合的方法对薛湖煤矿 2306 运输巷侧帮预留窄煤柱合理宽度进行研究,结果表明:2306 运输巷侧帮卸压带宽度为 9~10 m,封孔深度为 10 m 时可实现瓦斯的连续性抽采。煤柱宽度为 3~5 m 时煤柱被塑性区贯通承压能力差;煤柱宽度为 5~7 m 时煤柱内部出现“弹性核”,煤柱强度足以承载上覆岩层载荷;煤柱宽度为 7~9 m 时煤柱内部“弹性核”开始向采空区侧转移。随着煤柱宽度增加,煤柱向两侧的水平位移也逐渐增加,且对采空区的影响小于对煤巷侧的影响,宽度为 5~7 m 时煤柱位移增幅最小。最终由煤柱宽度与应力场分布、位移场分布、巷道围岩变形量之间的关系及卸压带范围等 4 个方面确定 2306 运输巷侧帮合理窄煤柱宽度为 5 m。

关键词:沿空掘巷;钻孔瓦斯连续流量法;卸压带宽度;数值模拟;窄煤柱宽度

中图分类号:X936

文献标志码:A

文章编号:1672-9102(2021)03-0066-06

Research on Reasonable Coal Pillar Width of Gob-side Entry Driving Based on Continuous Flow Method

SU Weiwei, TIAN Shixiang, MA Ruishuai, LIN Huaying, YU Jie, WU Xiaosha

(College of Mining, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: In order to determine the reasonable width of the narrow coal pillar for gob excavation, based on the actual geological conditions, the reasonable width of the narrow coal pillar reserved on the side of the transport lane 2306 in Xuehu Coal Mine is studied by using the method of field test, theoretical calculation and numerical simulation. Results show that the stress-relief zone on the side of transport lane is 9~10 m wide and the hole sealing depth is 10 m, which can realize continuous gas extraction. When the width of the pillar is 3~5 m, the penetration bearing capacity of the plastic zone is poor; when the width of the pillar is 5~7 m, an “elastic core” appears inside the pillar, which bears the overburden with certain strength; when the width of the pillar is 7~9 m, the “elastic core” inside the pillar begins to transfer to the side of goaf. With the increase of coal pillar width, the horizontal displacement on both sides of coal pillar gradually increases, and the influence on goaf is less than that on the side of coal roadway. When the width is 5~7 m, the increase of coal pillar displacement is minimal. Finally, the reasonable narrow pillar width on the side of 2306 transport roadway is determined to be 5 m from five aspects, including the range of pressure-relief zone, theoretical calculation, the relationship between the width of coal pillar and stress field, displacement field and surrounding rock deformation of roadway.

Keywords: gob-side entry driving; borehole gas continuous flow method; stress-relief zone width; numerical simulation; narrow pillar width

沿空掘巷是一种改善回采巷道受力环境,降低巷道维护成本,提高煤炭资源回采效率的有效方法^[1-4]。目前,沿空掘巷过程中巷道布置方式主要有 2 种,分别是宽煤柱护巷与窄煤柱护巷^[5-6]。预留宽煤柱

护巷时,由于煤柱存在弹性带,这样既提高了煤柱的承载能力,又有利于巷道的维护.但是,预留煤柱过宽又会引起侧向支承压力分布范围变大,可能使煤柱或者煤巷受到峰值应力的作用,从而降低巷道的稳定性.而且,由于煤柱的不可回采性,宽煤柱护巷会造成大量煤炭资源的浪费^[7].预留窄煤柱护巷时,既可以维持巷道的稳定性,又可以最大化回采煤炭资源^[8].但是,预留窄煤柱护巷时煤柱需要隔离上采面的采空区,煤柱宽度不能太小.因此,合理的窄煤柱宽度是保证煤矿安全生产和煤炭高效回采的基础.

近年来,不少学者在确定沿空掘巷窄煤柱宽度方面开展了研究.姜耀东等^[9]通过理论分析和数值模拟的方法对黄岩汇煤矿 15111 工作面褶皱构造应力区轨道巷开展相应研究,得出构造应力区窄煤柱合理宽度为 6.5 m.柏建彪等^[10]通过数值模拟和理论分析的方法发现在合理的锚杆支护条件下,软煤中窄煤柱的合理宽度为 4~5 m,中硬煤中窄煤柱的合理宽度是 3~4 m.孔令海等^[11]通过高精度微地震监测系统监测塔山煤矿 15 m 以上特厚煤层综放工作面岩层运动规律,将所得结果结合岩石力学和岩层运动分析,得出侧向支承压力峰值与巷帮的距离,综合考虑煤柱避开侧向支承压力峰值及其他因素,最终确定煤柱宽度 20~25 m.上述研究成果在煤矿安全生产和煤炭高效回采方面有重大意义,但是结合上采空区侧帮卸压带范围综合判断沿空掘巷窄煤柱合理宽度的研究却鲜有报道.

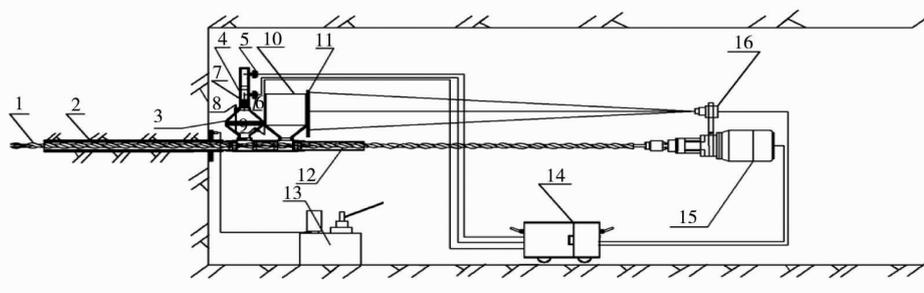
基于以上分析,本文采用连续流量法,以河南薛湖煤矿 2306 运输巷为试验对象,依据连续测定打钻过程中采空区侧方煤体涌出的瓦斯流量来确定卸压带宽度,通过理论计算与数值模拟相结合的方法得出沿空掘巷窄煤柱合理宽度.

1 卸压带宽度确定

沿空掘巷过程中留设窄煤柱时,由于受到临近采区采动的影响,采空区边缘煤层垂直应力分布呈现“三带”划分^[12],依次为卸压带、集中应力带、原始应力带.当沿空掘巷预留巷道位于卸压带时,巷道变形量小,围岩受力情况较为稳定,有利于巷道的掘进与维护^[13].因此判断采空区边缘煤层卸压带范围对确定沿空掘巷窄煤柱宽度意义重大.在集中应力的作用下,集中应力带的煤体骨架被压缩,张开的裂隙闭合,此部分煤体尽管含有大量的瓦斯但是不易释放到外界.卸压带内煤体由于受到采动的影响,煤体渗透率增加,大量瓦斯涌向外界,此部分煤体瓦斯含量急剧减小.因此,当钻机钻到卸压带与集中应力带的过渡段时,钻孔瓦斯流量达到最大值^[14].基于此,本文运用线性突出预测装置连续测定薛湖煤矿 2306 运输巷采空区边缘煤层 15 m 范围内的钻孔瓦斯流量大小,以期判定采空区边缘煤层卸压带范围的大小.

1.1 试验设备与试验步骤

线性突出预测装置由 16 个部分组成(见图 1),该装置可连续测得工作面前方的瓦斯流量,为测定采空区边缘煤层卸压带范围提供了一种新的方法,即连续流量法.薛湖煤矿 2306 运输巷为原始开挖巷道,煤体暴露时间 120 d 以上,该巷道应力变化趋于稳定,符合相应试验条件.试验过程中,首先在预定位置施工一个直径 94 mm 长度 1 m 的钻孔;然后通过手压泵向封孔胶囊中注水,注水压力为 3 MPa,直至胶囊完全展开;再安装流量传感器与位移传感器,同时运行数据接收程序;后续改用直径为 42 mm 的钻杆持续钻进至 2306 运输巷采空区边缘煤层 15 m;再停止数据接收程序,运行数据处理程序.



1. 麻花钻杆;2. 封孔装置;3. 双锥体过滤筒;4. 流量管;5. 高速传感器;6. 低速传感器;7. 导流装置;8. 推杆;9. 料位开关;10. 煤屑漏斗;11. 定位挡板;12. 煤屑排出管;13. 手压泵;14. 主机;15. 煤电钻;16. 位移传感器.

图 1 试验装置

1.2 试验结果分析

运用该试验装置连续测定薛湖煤矿 2306 运输巷 15 m 范围的初始瓦斯流量,结果如图 2 所示.1#钻孔

打钻过程中由于钻进速度过快,瓦斯流量信号不能及时传到信号接收器,导致所测定的卸压带宽度较大,最终测定的卸压带宽度为9.5~10 m,如图2a所示.鉴于1#钻孔由于钻进速度而产生误差,2#钻孔在打钻时放缓钻进速度,最终测定的卸压带宽度为9~10 m,如图2b所示.

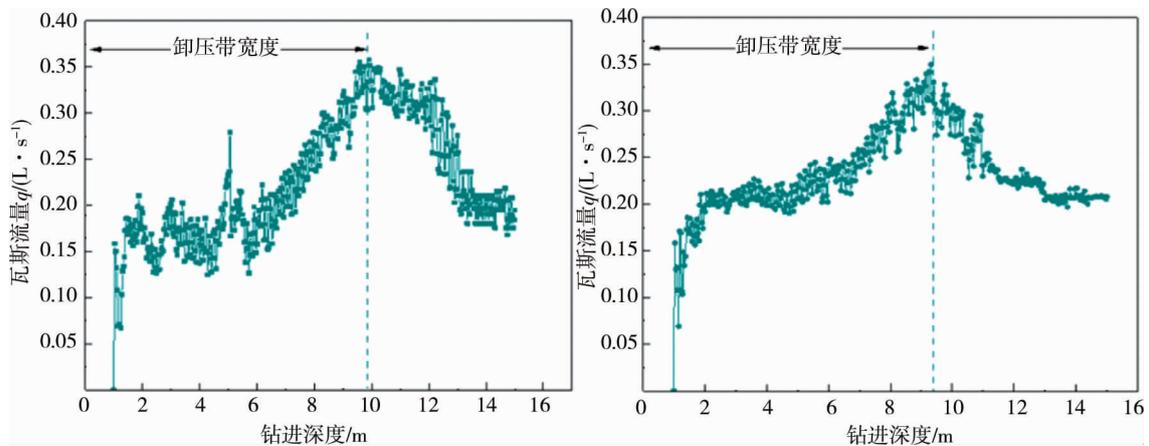


图2 钻孔瓦斯流量随钻进深度变化趋势

为进一步验证所测卸压带宽度的准确性,同时检验不同封孔深度下的瓦斯抽采效果,后续继续施加3个钻孔,其中1#与2#钻孔的封孔深度为10 m,3#、4#以及5#钻孔封孔深度采用国家标准最终确定为8 m.封孔后对各个钻孔50 d内的瓦斯抽采浓度和瓦斯抽采率进行测定,结果如图3所示.

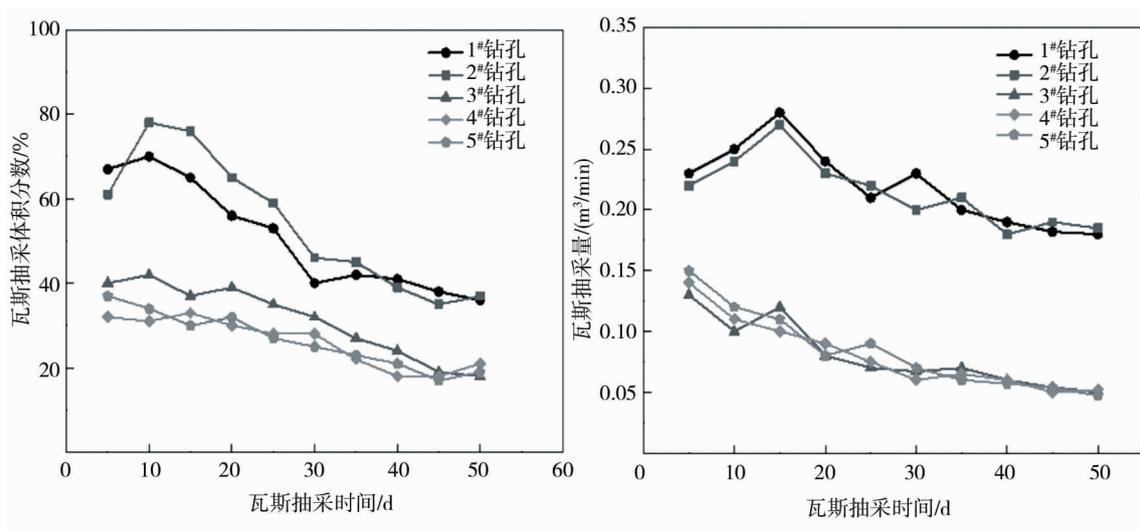


图3 瓦斯抽采效果

由图3可知:当封孔深度为8 m时,平均瓦斯抽采体积分数为25.13%,50 d以后瓦斯抽采体积分数小于20%;当封孔深度为10 m时,平均瓦斯抽采体积分数为53.68%,是封孔深度为8 m时的2倍多,且50 d后瓦斯抽采体积分数依旧大于30%,这说明封孔深度为10 m时可实现瓦斯的持续性抽采.当封孔深度为8 m时,平均瓦斯抽采量为 $0.081 \text{ m}^3/\text{min}$,50 d后瓦斯抽采量保持在 $0.049 \text{ m}^3/\text{min}$ 左右;封孔深度为10 m时,平均瓦斯抽采量为 $0.233 \text{ m}^3/\text{min}$,50 d后瓦斯抽采量保持在 $0.182 \text{ m}^3/\text{min}$ 附近.分析得知连续流量法测定的卸压带宽度是准确可靠的,即沿空掘巷应布置在距上区段采空区0~10 m.

2 窄煤柱宽度

2.1 理论计算

沿空掘巷掘进过程中留设的煤柱宽度,不仅要起到隔离采空区的作用,同时也应该保有一定的强度,能承担上覆岩层载荷.从提高资源利用率的角度考虑,沿空掘巷时通常留设一定宽度的窄煤柱,为保证所留设窄煤柱的支撑强度需对沿空巷道加以锚杆支护.根据极限平衡理论,沿空掘巷窄煤柱宽度的计算公式为

$$B = X_1 + X_2 + X_3, \quad (1)$$

式中: B 为煤柱宽度, m; X_1 为上区段开采后于采空侧煤体中产生的塑性区宽度, m; X_2 为锚杆长度, 取 1.5 m; X_3 为考虑到煤层较厚而增加的煤柱稳定性系数, 按 X_1 与 X_2 的和的 30%~50% 计算. 其中

$$X_1 = \frac{MA}{2 \tan \varphi} \ln \left(\frac{K\gamma H + \frac{C}{\tan \varphi}}{\frac{C}{\tan \varphi} + \frac{P}{A}} \right). \quad (2)$$

式中: M 为煤层厚度, 取 3 m; A 为侧压系数, 取 0.33; φ 为煤层界面的内摩擦角, 取 20° ; K 为应力集中系数, 取 1.7; γ 为岩层的平均容重, 取 25 kN/m^3 ; H 为煤巷埋藏深度, 取 700 m; C 为煤层界面黏结力, 取 1.2 MPa; P 为锚杆所提供的支护阻力, 取 0.25 MPa.

依据条件计算可得, $X_1 = 2.158 \text{ m}$, 从而 X_3 为 1.097~2.195 m, 由此可得 B 为 4.751~5.853 m. 为使锚杆段处于稳定的煤层中, 最终确定的煤柱宽度为 5 m.

2.2 数值模拟

FLAC^{3D} 数值模拟被广泛应用于各种弹塑性破坏与塑性流动的研究中^[15-16]. 为进一步验证上述窄煤柱宽度的合理性, 根据薛湖煤矿实际地质概况, 设计了煤柱宽度分别为 3, 5, 7, 9 m 的 4 个方案, 运用 FLAC^{3D} 建立相应数值模型, 对其沿空掘巷窄煤柱的合理宽度进行分析.

2.2.1 煤柱宽度与应力场关系

4 种不同煤柱宽度与应力场的关系如图 4 所示.

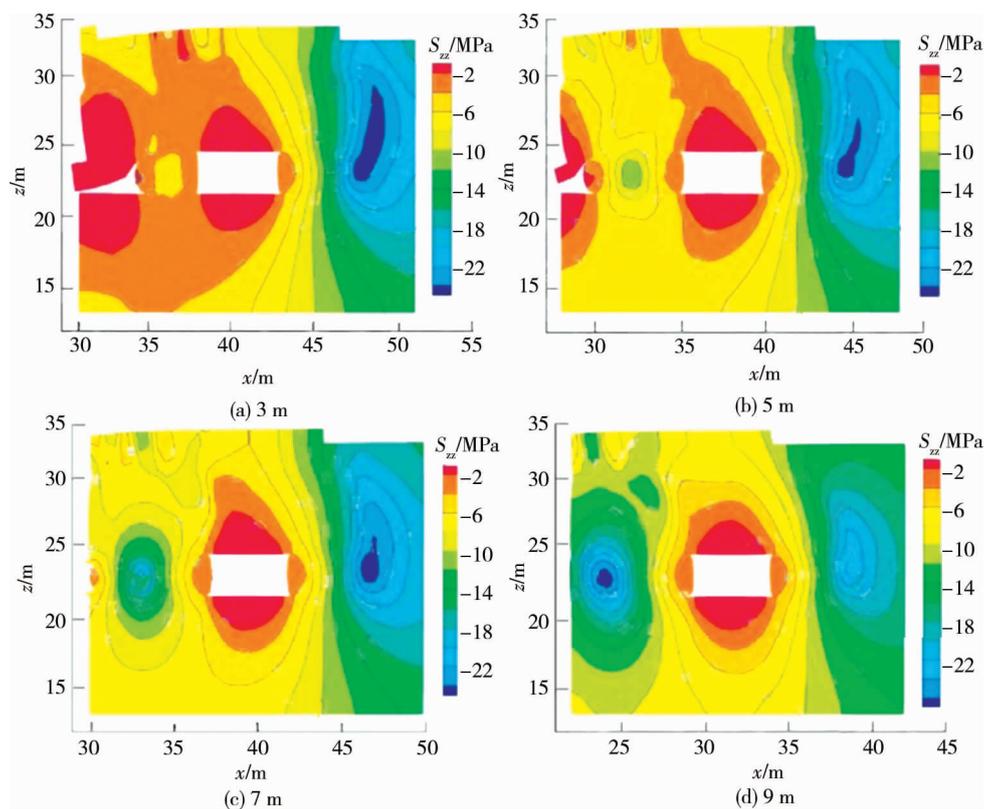


图 4 不同煤柱宽度与垂直应力关系

由图 4 可知: 由于开挖煤巷处于卸压带范围, 煤巷围岩所受应力较小, 未受到集中应力的作用, 有利于巷道的掘进与维护. 在煤巷掘进过程中, 上覆岩层载荷并不会对处于卸压带内的煤柱造成很大影响, 上覆岩层载荷会逐渐转移到实体煤帮侧, 此时实体煤帮侧均出现应力集中区域, 但是实体煤帮侧所受集中应力的大小与应力集中区域的范围并无明显差异. 煤柱宽度为 3 m 时, 煤柱受到上采区及煤巷掘进时的采动影响, 煤柱两侧发生塑性破坏, 此时煤柱宽度较小, 煤柱所受应力分布均匀, 煤柱被塑性区贯通不能起到很好的承压效果. 随着煤柱宽度的增加, 煤柱内部开始出现“弹性核”, 此时煤柱的承载能力大大加强. 煤柱宽度为 5~7 m 时“弹性核”出现在煤柱的中央区域, 煤柱内部应力呈现“马鞍形”分布, 加大了煤柱对上覆载荷

的承载能力.当煤柱宽度为9 m时,煤柱内部的“弹性核”向上采区采空侧转移,由于煤柱采空区侧此前已受到塑性破坏,加大了煤柱失稳破坏的可能性.综上所述,煤柱合理宽度应留设在5~7 m.

2.2.2 煤柱宽度与位移场关系

为进一步研究煤柱宽度与位移场之间的关系,在4种设计方案下对煤柱向上采面采空区以及煤巷内的位移情况进行模拟,模拟结果如图5所示.

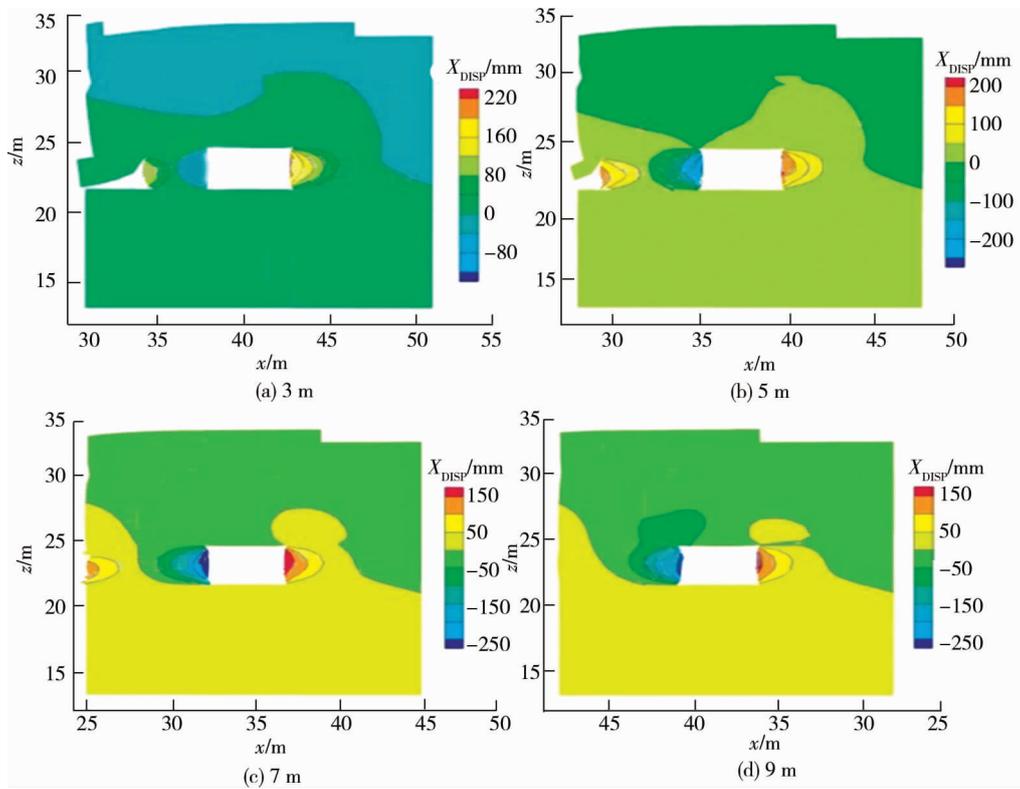


图5 不同煤柱宽度与煤巷水平位移关系

由图5可知:煤柱内部的煤体在煤巷掘进及上覆岩层载荷的作用下均会向煤柱两侧产生一定距离的位移,且向煤巷侧的位移较向采空区侧的位移大.当煤柱宽度为3 m时,煤柱向煤巷侧位移的峰值为120 mm.煤柱宽度由3 m增加到5 m时,煤柱向煤巷侧的位移峰值增加到200 mm,增加幅度高达66.66%.煤柱宽度为7 m时,煤柱向煤巷侧位移峰值为250 mm,此时峰值位移的增加幅度为25%.煤柱宽度增加至9 m,煤柱向煤巷侧的位移峰值基本保持稳定.由此发现,随着煤柱宽度的增加,煤柱向煤巷侧位移峰值增幅呈现由高到低的变化规律.同样分析可得到煤柱向采空区侧的位移峰值也呈现相似的变化规律.因此选取位移峰值增幅趋于稳定时的煤柱宽度作为合理煤柱宽度,即沿空掘巷合理窄煤柱宽度为5~7 m.

2.2.3 煤柱宽度与巷道围岩变形量关系

煤柱宽度变化时,煤巷围岩变形量也会产生相应的变化.4种不同煤柱宽度下煤巷围岩变形量的模拟结果如图6所示.

由图6可知:煤柱宽度与巷道围岩变形量呈正相关,且底板变形量受煤柱宽度影响很小.当煤柱宽度为3~5 m时,顶板变形量的增量为24 mm;煤柱宽度由5 m增加到7 m时,顶板变形量增加迅速,增量为44 mm;后续随着煤柱宽度的增加,顶板变形量的增量开始缓慢减小,煤柱宽度为9 m时顶板变形基本稳定.煤柱宽度为3~5 m时,实体煤帮变形量增加缓慢,只从151 mm增加到170 mm;后续随着煤柱宽度的增加,实体煤帮变形量快速增加最后趋于稳定.煤柱宽度由3 m增加至5 m时,窄煤柱变形量呈线性增加,从107 mm增加到146 mm;当煤柱宽度继续增至7 m,窄煤柱变形量增加到176 mm;煤柱宽度为7~9 m时窄煤柱变形量基本趋于稳定.根据煤巷围岩变形量与煤柱宽度的关系,综合考虑煤柱宽度应位于5~7 m.

根据上述分析,当窄煤柱宽度为5~7 m时,窄煤柱不仅落在卸压带内,而且存在“弹性核”,具有承载上覆岩层载荷的强度,围岩变形量较小,同时零位移区域相对较大.从煤炭资源利用率的角度出发,最终确定沿空掘巷窄煤柱合理宽度为5 m.

2.3 现场验证

为验证窄煤柱宽度为5 m时的合理性,在薛湖煤矿2306运输巷掘巷期间,在巷道顶底板及两帮安置位移传感器,分别观察30 d内煤柱两帮与顶底板位移情况,如图7所示。

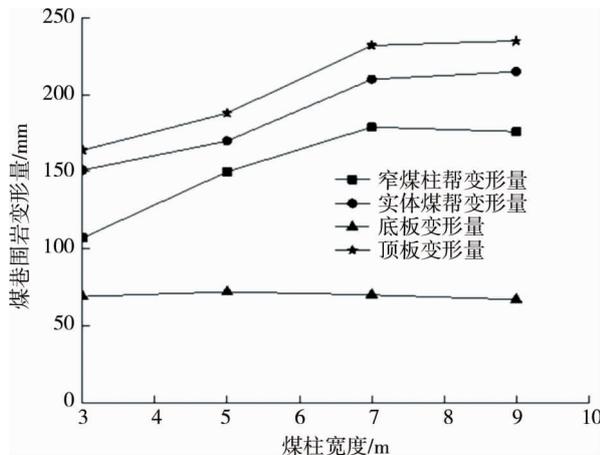


图6 不同煤柱宽度与煤巷围岩变形量关系

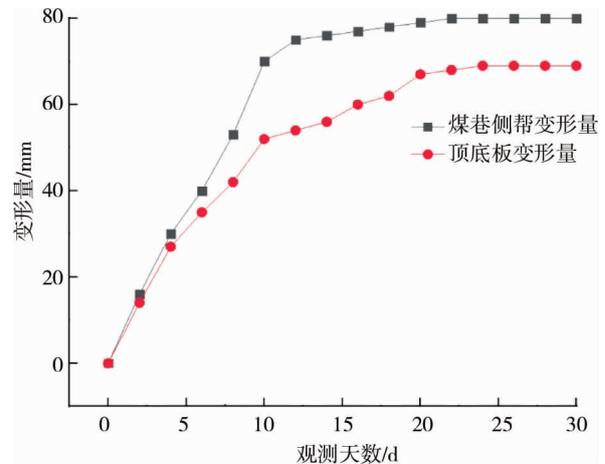


图7 巷道变形曲线

由图7可知:20 d后巷道变形趋于稳定,且顶底板与煤柱两帮最大变形量分别是69,78 mm,说明上述确定的窄煤柱宽度是合理的。

3 结论

- 1) 采用连续流量法测得的卸压带宽度为9~10 m,且封孔深度为10 m时可实现瓦斯的连续线性抽采。
- 2) 由煤柱宽度与应力场分布、位移场分布、巷道围岩变形间的关系以及卸压带范围,最终确定沿空掘巷合理窄煤柱宽度为5 m。
- 3) 采用连续流量法测定煤巷侧帮卸压带宽度时,所选试验区域未在构造影响范围内。因此,此方法是否适用于构造影响范围内有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 杨俊哲,宋桂军,付强,等.综放工作面多巷布置双煤柱合理留设宽度研究[J].矿业安全与环保,2019,46(6):25-29.
- [2] 高峰,石蒙,汪占领,等.浅埋深特厚煤层小煤柱沿空掘巷强力支护技术研究[J].矿业安全与环保,2019,46(6):72-76.
- [3] 王志强,仲启尧,王鹏.高应力软岩缓斜煤层沿空掘巷窄煤柱宽度研究[J].煤矿安全,2020,51(1):216-221.
- [4] 王俊峰.中厚煤层留窄煤柱沿空掘巷支护技术研究[J].煤炭科学技术,2020,48(5):50-56.
- [5] 杜朋,涂敏.特厚煤层孤岛综放工作面沿空护巷煤柱宽度及控制技术研究[J].矿业安全与环保,2019,46(5):16-20.
- [6] 姜培杰.厚煤层开采合理煤柱留设探讨[J].煤炭工程,2014,46(1):14-17.
- [7] 马耀荣.特厚煤层开采中沿空掘巷煤柱宽度及稳定性研究[D].太原:太原理工大学,2018.
- [8] 李学华,鞠明和,贾尚昆,等.沿空掘巷窄煤柱稳定性影响因素及工程应用研究[J].采矿与安全工程学报,2016,33(5):761-769.
- [9] 姜耀东,宋红华,马振乾,等.基于地应力反演的构造应力区沿空巷道窄煤柱宽度优化研究[J].煤炭学报,2018,43(2):319-326.
- [10] 柏建彪,侯朝炯,黄汉富.沿空掘巷窄煤柱稳定性数值模拟研究[J].岩石力学与工程学报,2004(20):3475-3479.
- [11] 孔令海,姜福兴,刘杰,等.特厚煤层综放工作面区段煤柱合理宽度的微地震监测[J].煤炭学报,2009,34(7):871-874.
- [12] 张凯.沿空掘巷窄煤柱合理宽度设计研究[J].能源与环保,2019,41(1):159-162.
- [13] 张科学,张永杰,马振乾,等.沿空掘巷窄煤柱宽度确定[J].采矿与安全工程学报,2015,32(3):446-452.
- [14] 陈亮.工作面前方煤体变形破坏和渗透率演化及其应用研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2016.
- [15] Fedorov A V, Fedorchenko I A. Numerical modeling of the coal-and-gas outburst gasdynamics[J]. Journal of Mining Science, 2010, 46(5):473-484.
- [16] Xue S, Yuan L, Wang Y C, et al. Numerical Analyses of the Major Parameters Affecting the Initiation of Outbursts of Coal and Gas[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2014,47(4):1505-1510.