

矿井冲击地压防治技术与工程实践专题



移动扫码阅读

潘一山,高学鹏,王 伟,等.冲击地压矿井综采工作面两巷超前支护液压支架研究[J].煤炭科学技术,2021,49(6):1-12.doi:10.13199/j.cnki.cst.2021.06.001

PAN Yishan, GAO Xuepeng, WANG Wei, *et al.* Research of hydraulic powered supports for entries' advanced support in fully-mechanized working face of rock burst mine[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(6):1-12. doi:10.13199/j.cnki.cst.2021.06.001

冲击地压矿井综采工作面两巷超前支护液压支架研究

潘一山^{1,2,3},高学鹏²,王 伟²,肖永惠¹

(1.辽宁大学 环境学院,辽宁 沈阳 110036;2.东北大学 深部金属矿山安全开采教育部重点实验室,辽宁 沈阳 110819;
3.辽宁工程技术大学 力学与工程学院,辽宁 阜新 123000)

摘 要:针对我国工作面两巷超前支护区域由于应力集中程度增大和支护能力较差而引发的冒顶、冲击地压等愈发严重的问题,采用理论、对比及分类等方法,研究工作面开采特征及与两巷在矿压上的差别,分析支护对巷道稳定性影响以及工作面与两巷超前支护匹配性,研究巷道液压支护设计方法。研究表明:①由于开采深度、开采空间以及开采强度增大,采场矿压显现增强,与工作面相比,两巷应力集中程度更高,受采动影响范围更大,围岩破坏更严重,对支护要求更高;②巷道支护技术及装备发展严重滞后于工作面,单体液压支柱由于支护强度低、护顶效果差、稳定性差,加剧了工作面与两巷支护的不匹配;③巷道支护强度对工作面两巷稳定性具有重要影响,应当采取初撑力较高、刚度较大的液压支架对巷道加强支护;④系统地对巷道超前支护液压支架进行分类,总结每种支架类型特征、优缺点及适用巷道条件,并提出两巷超前液压支护设计方法。

关键词:冲击地压;大变形;巷道支护;液压支架;吸能防冲液压支架

中图分类号:TD324 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-2336(2021)06-0001-12

Research of hydraulic powered supports for entries' advanced support in fully-mechanized working face of rock burst mine

PAN Yishan^{1,2,3}, GAO Xuepeng², WANG Wei², XIAO Yonghui¹

(1. School of Environment, Liaoning University, Shenyang 110031, China; 2. Key Laboratory of Ministry of Education on Safe Mining of Deep Metal Mines, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 3. School of Mechanics & Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: In view of the serious problems concerning roof fall and rock burst caused by the increase of stress concentration and poor support ability, methods consisted of theory, comparison and classification is adopted to study the ground pressure characteristics and the difference of mining pressure between working face and its entries, to analyze the influence of support on the entries' stability and the support matching of working face and its entries, and to research the design method of hydraulic support in entries. The results show that: ① Due to the increase of mining depth, mining space and mining intensity, the ground pressure of stope increases. Compared with the working face, there is higher stress concentration degree, larger mining influence area, more serious surrounding rock damage and higher support requirements in entries; ② The development of roadway support technology and equipment lags behind the working face seriously, and the support mismatch between the working face and its entries is aggravated because of its low support strength, poor roofing effect and poor stability; ③ Support strength has a major impact on the stability of entries and hydraulic powered supports with higher initial support force and greater stiffness should be applied to strengthen the support; ④ The roadway advanced hydraulic powered supports are classified systematically, the characteristics, advantages and disadvantages and applicable conditions of hydraulic powered supports are summarized,

收稿日期:2021-02-20;责任编辑:朱恩光

基金项目:国家自然科学基金联合基金资助项目(U1908222);辽宁省“兴辽英才计划”资助项目(XLYC1801010);国家自然科学基金面上资助项目(51574140)

作者简介:潘一山(1964—),男,辽宁丹东人,研究员,博士生导师,博士。E-mail:panyishan@lnu.edu.cn

and the design method of advanced hydraulic support for enties is proposed.

Key words: rock burst; large deformation; roadway support; hydraulic powered support; energy absorption and anti-impact support

0 引言

随着我国煤炭开采深度增加和开采强度增大,煤矿冲击地压问题愈发严重。冲击地压矿井综采工作面两巷超前支护区域受回采影响,其应力通常能达到原岩应力的2~5倍^[1],围岩变形破坏严重,支护体失效频繁,更是冲击地压等事故频发之地。据不完全统计,2016—2020年我国共发生9起冲击地压事故,均为巷道冲击地压事故,共造成68人死亡,其中5起发生于综采工作面两巷超前支护区域,造成41人死亡,占总死亡人数的60.3%。国内外学者围绕回采巷道围岩变形破坏及控制进行了大量研究。宋振骥等^[2]提出的“传递岩梁理论”和钱鸣高等^[3]提出的“砌体梁理论”表明,综采工作面的回采不可避免地在前方煤岩体产生应力集中,对两巷围岩造成不同程度破坏。谢和平^[4]指出深部开采具有强扰动、强时效特性,加速煤岩体材料力学性能劣化和巷道围岩变形破坏。经多年实践,我国逐渐形成以锚杆(索)支护为主体的巷道围岩控制格局,应用较广的巷道支护理论主要包括:新奥法支护理论、联合支护理论、松动圈支护理论、围岩强度强化理论、锚杆预应力支护理论以及冲击地压巷道三级支护理论等^[5-6]。目前我国工作面两巷超前支护区域多采用“单体液压支柱+金属梁”形式加强支护,但由于支护强度低、稳定性差,易造成安全事故^[7]。液压支架具有较高的支护强度和较好的接顶、护帮性能,与前者相比具有更高的安全性。在巷道超前支护液压支架研究方面,王国法等^[8-9]对液压支架设计与支护技术理论进行了大量研究,并提出支架-围岩耦合支护原理与设计方法。徐亚军等^[10]提出了巷道超前支护液压支架自适应支护理论。潘一山等^[11]对巷道防冲液压支架设计方法及其应用进行了研究。经过几十年的探索与发展,我国在巷道超前支护液压支架设计、制造与应用方面逐渐达到世界一流水平,并不断向适应大采高、大吨位、抗冲击方向发展。国内矿井投入使用的巷道超前支护液压支架支护阻力主要在2 000~10 000 kN,部分西部现代化矿井大采高综采工作面,其端头附近投入使用的巷道液压支架支护阻力超过20 000 kN^[12-13],但目前巷道超前支护液压支架支护范围集中于工作面出口20 m范围内,超前20 m范围外的采动影响区域仍采用单体液压支柱进行加强支护,液压支架支

护范围有待于进一步增大。目前,国家相关部门与国内部分先进大型煤企逐渐加快了巷道超前支护工艺改革步伐。2020年12月,国家矿山安全监察局《关于进一步加强煤矿冲击地压防治工作的通知》^[14]要求:“评价具有中等及以上冲击地压危险的采煤工作面……上下出口和巷道超前支护应当采用液压支架”。2020年6月,中国中煤能源集团有限公司下发了《关于推广应用超前支护液压支架的通知》^[15]并明确提出:“两巷超前支护范围内全面采用液压支架,逐步淘汰单体液压支柱支护,冲击地压矿井和开采深度超600 m的矿井应于2021年6月底前完成推广应用工作,其他矿井应于2021年底完成推广应用工作”。我国综采工作面两巷支护开始进入液压支架全面取代液压单体支柱的关键改革阶段。

基于此,在分析综合机械化采煤方法矿压特征基础上,进行工作面及两巷矿压与支护对比研究,研究工作面与巷道矿压存在的差异,讨论提高巷道支护水平的意义。从支护匹配性角度,研究工作面支护及其两巷超前支护差异,讨论推广应用巷道超前支护液压支架,替换传统单体液压支护支护的必要性。开展两巷超前液压支护设计研究,总结适应我国巷道条件的液压支架类型,并探讨巷道超前支护液压支架选型及支护参数设计方法。

1 冲击地压矿井综采工作面开采矿压特征

1.1 随采深增加采场地应力水平增高

现阶段我国工作面平均开采深度在700 m左右,中东部主要矿井采深均达800~1 000 m^[16],而新疆、内蒙古等西部矿区虽然开发较晚,但部分矿井由于首采煤层回采结束,逐渐向中深部煤层进行开拓。煤层开采深度增加直接导致采场垂直、水平地应力水平增大,冲击地压发生可能性增大。

1.2 随开采空间增大采场应力影响范围增大

随着回采及支护技术提高,为了提高工作面单产效率和减少搬家次数,煤层一次性回采厚度增大。随着采场空间增大,煤层回采将形成更大的采场覆岩结构,造成更大空间范围内的煤岩体应力调整。蒙、陕等西部矿区部分矿井的开采经验表明,回采邻近首采工作面的第2~3个工作面时,采场动力显现显著增强,存在采空区联动诱发矿震与冲击地压现象。

1.3 随开采强度增加矿震增多

西部矿区开采条件较好,矿井建设时间较晚,矿井产能普遍较大,部分冲击地压矿井产能超过 800 万 t/a。随着开采深度增加,开采强度对于冲击地压影响增强,矿震显著增多。以内蒙古某矿为例,该矿 103 工作面由于回采速度较快,回采过程中出现多次大能量矿震事件。回采速度变化对工作面矿震事件有直接影响,如图 1 所示,工作面回采速度在 2018 年 11 月 25 日开始逐渐增大,回风巷超前区域顶板弹性能积聚,大能量微震事件增多;回采速度在 11 月 28 日降至 2.4 m/d,在 11 月 29 日又恢复至 5.6 m/d,这种不稳定的回采导致能量不稳定释放,产生更大能量级的矿震,11 月 30 日,103 工作面回风巷超前工作面 58 m 位置发生 1 起能量为 4.5×10^6 J 的矿震事件。

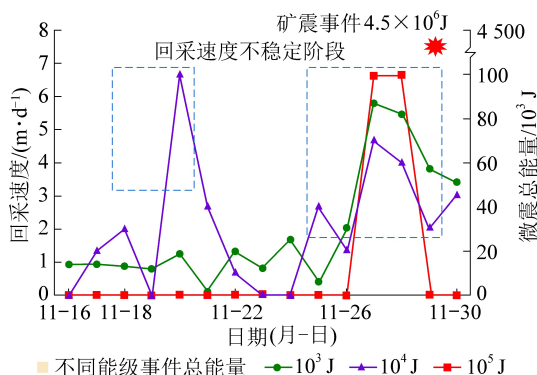


图1 回采速度与微震能量变化关系

Fig.1 Relationship between microseismic monitoring energy and mining speed

1.4 冲击地压及顶板事故主要发生于两巷

据不完全统计,近5年工作面内未发生冲击地压,而区段平巷(两巷)共发生5次冲击地压,总伤亡达53人。其中,3起冲击地压发生于单体液压支柱支护巷道,2起冲击地压发生于单元式液压支架支护巷道,巷道支护强度相对较低。冲击地压发生时,摧毁巷道原有支护体系,并可能伴有冒顶、煤与瓦斯突出等复合灾害^[17]。

从顶板事故统计角度,近5年来我国每年煤矿顶板事故伤亡人数约占煤矿事故总伤亡人数的1/3,其中约41.5%的顶板事故发生于工作面与两巷,伤亡人数整体比例达51.08%。如图2所示,2016—2018年两巷发生顶板事故最多,2017年之后顶板事故发生于两巷的比例逐渐减小,发生于工作面内部的比例增加。两巷由于工作人员较为集中,人员伤亡每年平均为18.2人,占比52.91%,是回采影响区域内人员伤亡最集中位置。此外,工作面端头附近受应力集中影响,顶板事故发生数量接近工作面内

部,也是顶板事故集中区域。

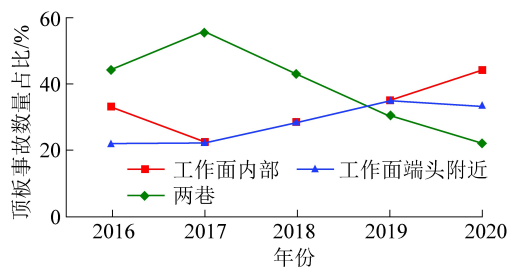


图2 工作面与两巷顶板事故对比

Fig.2 Comparison of roof accidents between working face and two entries

2 工作面及其两巷矿压对比分析

2.1 巷道应力集中程度更高

为比较工作面与两巷应力集中程度,定义 K_g 为工作面中部应力集中系数, K_l 为回风巷应力集中系数, K_h 为运输巷应力集中系数。采场不同位置应力集中程度普遍呈现出 $K_l > K_g > K_h$ 的特征,回风巷由于邻近采空区,应力集中程度最高。定义倾向应力集中偏度 $\zeta = K_l / K_g$,则 ζ 反映了沿空侧巷道与工作面应力集中程度的差异。采用数值模拟获得不同回采参数下的 ζ 变化如图3所示。工作面采深、采高、斜长均对 ζ 具有显著影响。随着工作面采深增加, ζ 呈非线性增大;随着工作面采高增加, ζ 呈非线性增大;随着工作面斜长增加, ζ 先增大后减小。

2.2 巷道受采动影响范围更大,所需支护时间长

工作面与两巷受采动影响对象与范围存在较大差异。工作面内受采动影响的围岩主要是采煤机前方实体煤壁与支架支撑的顶板,工作面围岩所需支护的时间短、范围小,支护难度较小。而两巷服务于工作面回采的布置特征决定了巷道围岩在回采过程中经历整个超前支承压力影响过程。内蒙古某矿402工作面回风巷内实测顶板超前支承压力如图4所示(年份为2019年,时刻均为00:00:00),顶板超前支承压力影响范围83 m,支承压力峰值距工作面21 m,应力集中系数5.6。测点处巷道围岩从开始受到采动影响至工作面回采到该位置时,经历约20 d,巷道在此期间存在不同程度顶板下沉、底鼓等矿压显现。因此,从采动影响时空范围角度,巷道所需加强支护的时间长、范围大,支护难度也更高。

2.3 巷道围岩变形破坏更严重,控制难度高

回采过程中,工作面内部围岩破坏以片帮、漏顶为主,而两巷则面临底鼓、顶板下沉以及两帮鼓出等问题,尤其是沿空侧巷道围岩变形破坏更严重,对安全回采影响较大。除应力集中影响外,重复采动也

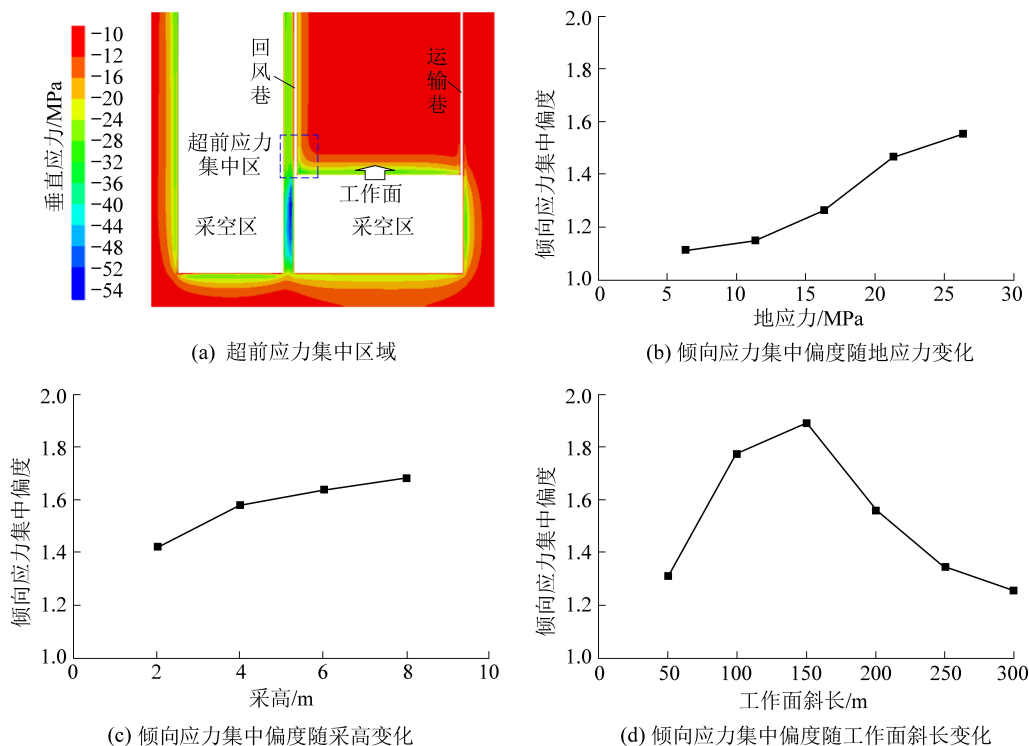


图3 回采参数对工作面倾向应力集中偏度的影响

Fig.3 Influence of mining parameters on inclined stress concentration skewness of working face

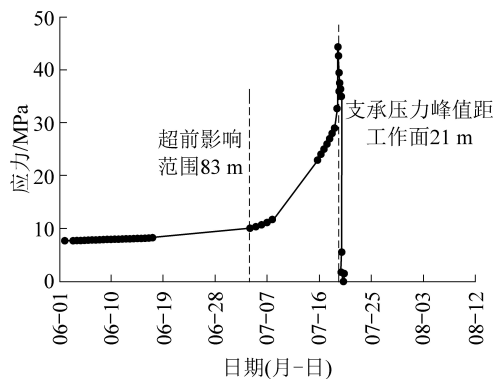


图4 回风巷顶板超前支承压力实测结果

Fig.4 Measured results of advancing abutment pressure in tail entry

是两巷围岩更容易变形破坏的重要原因。工作面煤壁前方为实体煤,回采前处于三向应力状态,回采过程中煤体仅受1次采动影响,煤体损伤程度低,完整性较好,不容易发生破坏。而两巷围岩则在较长时间内受多次采动影响,包括:相邻工作面回采产生的侧向采动影响,巷道掘进产生的采动影响,本工作面回采产生的超前采动影响,围岩由三向应力状态转变为二向应力状态甚至为单向应力状态,围岩损伤程度高,承载能力降低,巷道变形破坏更严重。

因此,两巷应力集中程度更高、采动影响范围更大、围岩变形破坏更严重,两巷是采场强矿压显现和动力灾害事故主要发生位置之一,作为重要

的通风、行人通道,对支护的要求更高,支护难度也更大。

3 工作面支护与两巷超前支护对比

3.1 巷道支护技术及装备发展严重滞后于工作面

根据煤矿支护技术及装备发展情况,我国工作面及两巷支护工艺改革及发展分为4个阶段^[18]。

第1阶段为20世纪70年代之前,工作面与两巷超前支护以木支护为主,支护强度低、稳定性差。第2阶段为20世纪70—80年代,我国煤矿工作面逐渐取消木支护,单体液压支柱逐渐普及,支护强度增加。与此同时,在引进西方国家工作面液压支架基础上,国产液压支架研制与应用也逐渐开始发展。这一阶段内,两巷超前支护工艺改革落后于工作面,巷道逐渐取消木支护,金属支架和单体液压支柱应用增多,而同时期的苏联等国家已开始巷道超前支护液压支架大量应用探索^[19]。

第3阶段为20世纪90年代至2005年,我国液压支架进入快速发展阶段,全国综采工作面数量大幅度增加,液压支架架型增多,支架性能、参数、稳定性及可靠性显著提高。该阶段内,国内工作面两巷超前支护主要为单体液压支柱和金属支架,与此同时,少数生产技术条件较好的矿井开始在工作面两巷超前支护区域进行液压支架应用试验^[20-21],并取

得较好的支护效果。

第4阶段为2005年至今,2004年以来,我国煤矿装备与开采技术逐渐达到国际先进水平,高性能液压支架国产化研制已经成功,并开发了适用于不同顶板条件、煤层厚度及产状的多种综采液压支架。与此同时,适用于不同地质条件、巷道形状及支护方式的巷道超前支护液压支架也逐渐研制成功,使用巷道液压支架进行支护工艺改革的矿井逐渐增多。

各阶段内我国巷道支护技术及装备发展均严重滞后于工作面,造成了两巷支护水平显著低于工作面。目前我国工作面已普及应用液压支架,而两巷支护形式依旧以单体液压支柱支护为主,考虑到工作面与两巷的矿压差异,工作面与两巷支护水平面临明显不匹配问题。

3.2 单体液压支柱加剧了两巷与工作面支护不匹配

为比较工作面与两巷支护差异,分析两者支护匹配情况,以综采工作面液压支架、巷道超前支护液压支架和巷道单体液压支柱等典型支护形式为例,从支护强度、护顶效果以及支护稳定性3个方面进行分析。

1) 支护强度匹配分析。在支护强度方面,如图5所示,综采工作面围岩支护强度显著大于两巷超前支护强度。综采工作面液压支架支护强度一般能达到1.0~1.8 MPa,目前国内顶板支护强度最大的液压支架型号为ZY26000/40/88D,顶板支护强度达到1.71~1.83 MPa。由于巷道超前支护液压支架需要同时考虑通风、行人及设备移动等多个问题,单个液压支架所需支护的巷道顶板范围通常大于工作面支架,这导致两巷超前支护液压支架对顶板的平均支护强度要小于工作面支架对顶板的支护强度,支架支护强度一般小于1 MPa。巷道单体液压支柱支护阻力一般为150~300 kN^[22],间排距为1 m×1 m时的支护强度为0.15~0.3 MPa,支护强度明显弱于巷道液压支架,加剧了工作面与两巷支护强度的不匹配。

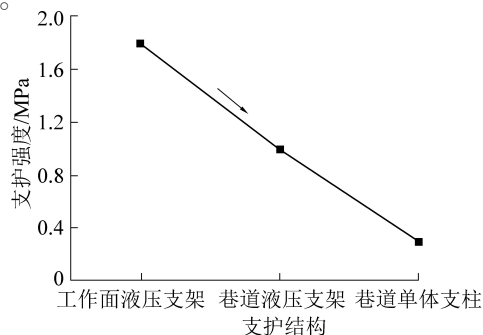
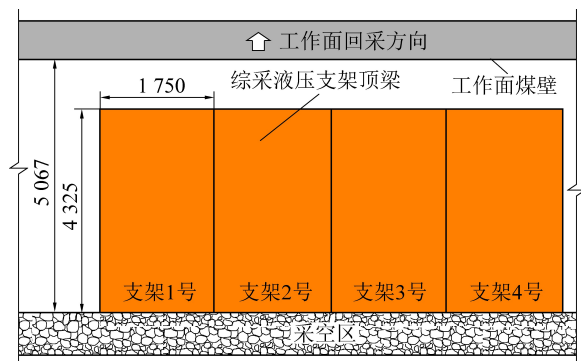


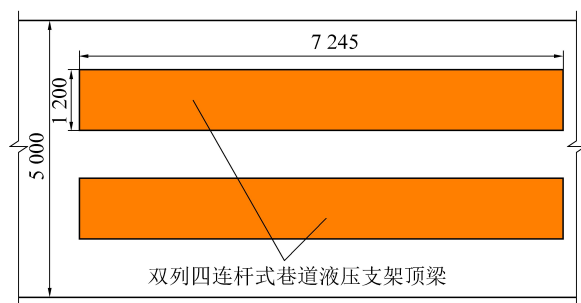
图5 不同支护结构的支护强度对比

Fig.5 Support strength comparison of different supporting structures

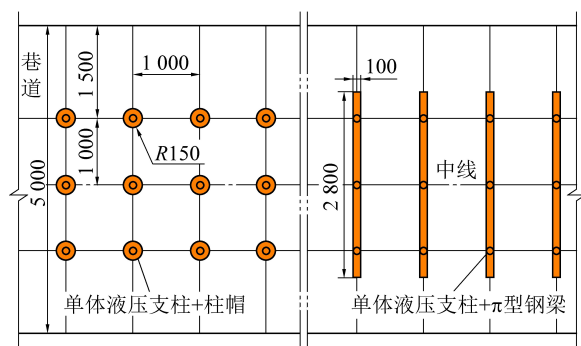
2) 护顶效果匹配分析。在护顶效果方面,当支护强度一定时,支护结构与顶板接触面积增大,能提高顶板主动支护荷载分布均匀性,避免局部应力集中或支护力不足。如图6所示,以内蒙古某矿井下工作面及两巷支护材料参数为例进行对比。综采工作面液压支架顶梁尺寸为4 325 mm×1 750 mm,单架顶梁接顶面积占平均控顶区域面积的83.58%;巷道超前支护液压支架顶梁尺寸为7 245 mm×1 200 mm,单架双顶梁接顶面积占支护巷道顶板面积的



(a) 综采工作面液压支架接顶面积



(b) 巷道超前支护液压支架接顶面积



(c) 单体液压支柱接顶面积

图6 不同支护结构接顶面积对比

Fig.6 Comparison of contact area between different supporting structures and roof

48%;巷道单体液压支柱配合柱帽或金属梁使用,柱帽直径为 $\phi 300$ mm,金属梁长宽为2 800 mm×100 mm,与顶板接触面积分别占支护巷道顶板面积的4.24%、5.6%。因此,从支护结构接顶面积这一角度,单体液压支柱接顶效果最差,加剧了工作面与两

巷支护护顶效果的不匹配。

3) 支护稳定性匹配分析。在支护稳定性方面,综采工作面液压支架稳定性也要显著高于巷道超前支护液压支架与巷道单体液压支柱。综采工作面液压支架重心低,接顶面积大,相邻液压支架连接紧密,支架在支护和移动过程中具有很高的稳定性,不容易发生侧翻、倾倒。巷道超前支护液压支架重心低,有较大接顶面积,相邻支架为前后连接,具有较高的稳定性,但在一些底鼓、顶板不平整围岩条件较差的巷道中,支架稳定性有待优化。巷道单体液压支柱重心高,接顶面积小,整体结构强度低,稳定性较差。国内矿井曾发生过多起单体液压支柱伤人安全责任事故,柱体搬运、升降、补液及架金属梁等环节均存在较大安全风险。采用安全绳等措施能有效防止单体液压支柱倾倒伤人,但不能从根本上解决单体液压支柱支护强度低、稳定性差及需要多人协作安装的缺点,且其由于支护能力不足易引发冒顶、冲击地压等事故。

因此,从支护强度、护顶效果以及支护稳定性等方面,工作面支护均优于两巷支护,与巷道超前支护液压支架相比,单体液压支柱支护强度低、护顶效果与稳定性差,加剧了工作面与两巷支护的不匹配。

4 支护对巷道冲击地压影响分析

4.1 巷道围岩力学模型

随着工作面支护质量的提高,两巷成为采场冲击地压发生的主要区域。不同矿井工程地质条件差异导致巷道应力环境及断面形状存在较大差异,为了抓住巷道冲击地压发生的本质,将巷道简化为半径为 $r=a$ 的圆形硐室,巷道在无限远处受静水压力 P 作用,巷内支护阻力为 p_s ,建立如图7所示的平面应变模型。

平衡方程为

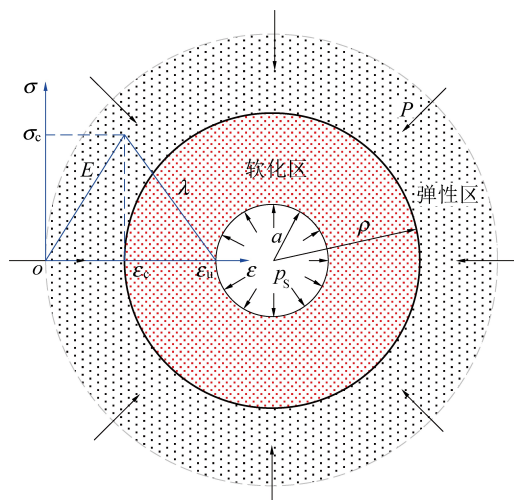
$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (1)$$

几何方程为

$$\varepsilon_r = \frac{du}{dr}, \quad \varepsilon_\theta = \frac{u}{r} \quad (2)$$

式中: σ_r 和 σ_θ 分别为径向应力和切向应力; u 为径向位移; ε_r 和 ε_θ 分别为径向应变和切向应变。

由煤矿井下围岩变形规律,巷道围岩分区可分为塑性软化区和弹性区,因此煤岩体本构采用双线性本构模型。假设软化区内煤岩体发生损伤演化,损伤变量 D 和等效应变 ε 呈线性关系,由图7中煤岩体应力-应变关系可知,煤岩体损伤演化方程可



σ_c, ε_c —煤岩体峰值强度及对应应变; E —弹性模量;
 λ —峰后阶段煤岩体塑性软化模量; ρ —塑性软化区半径;
 ε_u —煤岩体塑性软化区内最大应变

图7 巷道围岩力学模型

Fig.7 Mechanical model of entry surrounding rock

表示为

$$D = \begin{cases} 0, & \varepsilon \leq \varepsilon_c \\ \frac{\lambda}{\sigma_c}(\varepsilon - \varepsilon_c), & \varepsilon_c < \varepsilon < \varepsilon_u \\ 1, & \varepsilon \geq \varepsilon_u \end{cases} \quad (3)$$

将单轴应变推广至三轴应变情况,煤岩体损伤演化方程变为

$$D = \frac{\lambda}{\sigma_c}(\bar{\varepsilon} - \varepsilon_c) \quad (4)$$

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2} \quad (5)$$

式中: $\bar{\varepsilon}$ 为三轴等效应变; $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 和 ε_3 分别为3个主应力方向上的主应变。

在软化区内,由几何方程和体积不可压缩假设可得软化区内等效应变 $\bar{\varepsilon}$ 为

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\rho^2}{r^2} \varepsilon_c \quad (6)$$

代入式(4),进一步得到软化区内损伤演化方程:

$$D = \frac{\lambda}{E} \left(\frac{\rho^2}{r^2} - 1 \right) \quad (7)$$

4.2 巷道冲击地压发生理论解

对建立的巷道围岩力学模型进行求解,文献[23]给出了冲击地压发生理论的具体求解过程。

假设弹性与软化区交界处满足摩尔-库伦屈服准则:

$$\sigma_{\theta} = m\sigma_r + \sigma_c \quad (8)$$

式中: $m = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}$, φ 为煤岩体内摩擦角。

弹性区径向应力 σ_r 和切向应力 σ_{θ} 为

$$\begin{cases} \sigma_r = P - \left(P - \frac{2P - \sigma_c}{m + 1} \right) \frac{\rho^2}{r^2} \\ \sigma_{\theta} = P + \left(P - \frac{2P - \sigma_c}{m + 1} \right) \frac{\rho^2}{r^2} \end{cases} \quad (9)$$

考虑软化区内煤岩体损伤的条件下,有效应力

分量为 $\tilde{\sigma}_r = \frac{\sigma_r}{1 - D}$, $\tilde{\sigma}_{\theta} = \frac{\sigma_{\theta}}{1 - D}$ 。将摩尔-库伦屈服

准则中的应力用有效应力代替,得到

$$\sigma_{\theta} = m\sigma_r + (1 - D)\sigma_c \quad (10)$$

定义冲击倾向性指数 $K = \lambda/E$, 则 K 在线性条件下相当于煤岩体冲击倾向性指标中的冲击能量指数。

在巷道围岩表面 $r = a$ 处,满足边界条件 $\sigma_r|_{r=a} = p_s$,得软化区内径向应力分量为

$$\sigma_r = \left[p_s - \frac{K\sigma_c}{m + 1} \frac{\rho^2}{a^2} + (1 + K) \frac{\sigma_c}{m - 1} \right] \left(\frac{r}{a} \right)^{m-1} + \frac{K\sigma_c}{m + 1} \frac{\rho^2}{a^2} - (1 + K) \frac{\sigma_c}{m - 1} \quad (11)$$

由 $r = \rho$ 处径向应力连续条件,可得

$$\frac{P}{\sigma_c} = \frac{m + 1}{2} \left[\frac{p_s}{\sigma_c} + \frac{(1 + K)}{m - 1} \right] \left(\frac{\rho}{a} \right)^{m-1} - \frac{K}{2} \left(\frac{\rho}{a} \right)^{m-1} - \frac{(1 + K)}{m - 1} \quad (12)$$

考虑远场应力扰动,根据冲击地压发生的扰动响应判别准则 $dP/d\rho = 0$,可得发生冲击地压时的临界软化区半径 ρ_{cr}

$$\frac{\rho_{cr}}{a} = \sqrt{1 + \frac{1}{K} + \frac{1}{K}(m - 1) \frac{p_s}{\sigma_c}} \quad (13)$$

将式(13)代入式(12)可得,发生冲击地压时的临界载荷 P_{cr}

$$\frac{P_{cr}}{\sigma_c} = \frac{1}{m-1} \left\{ K \left[1 + K + \frac{1}{K}(m-1) \frac{p_s}{\sigma_c} \right]^{\frac{m+1}{2}} - K - 1 \right\} \quad (14)$$

4.3 支护对巷道冲击地压的影响

由式(13)可知,一般情况下支护阻力 p_s 与软化模量 λ 相差两个以上数量级,因此支护阻力对临界软化区深度的影响很小,可以忽略不计。

由式(14)可知,支护阻力对冲击地压发生临界载荷有较大影响。对于 $\varphi = 30^\circ$ ($m = 3$) 的情况,有

$$\frac{P_{cr}}{\sigma_c} = \left(1 + \frac{1}{K} \right) \left(\frac{1}{2} + 2 \frac{p_s}{\sigma_c} \right) + 2 \frac{1}{K} \left(\frac{p_s}{\sigma_c} \right)^2 \quad (15)$$

由上述公式可见,随着支护阻力提高,冲击地压发生临界载荷增加。因此,采煤工作面两巷进行超前加强支护,增大巷道支护强度,对于预防冲击地压发生,维持巷道稳定性至关重要。采用支护强度与支护刚度更高的巷道超前支护液压支架替换传统的“单体液压支柱+顶梁”支护形式能有效提高两巷超前支护效果,缩小工作面与两巷超前支护不匹配程度,是减少工作面两巷灾害事故和实现无人化作业的必要途径。

5 两巷超前支护设计

5.1 适应我国巷道条件的液压支架类型

我国巷道条件多样、复杂,参照工作面液压支架分类方法,对巷道超前支护液压支架进行分类(表1),讨论适应我国巷道条件的支架特征、优缺点及适用条件。

1)按支架与围岩作用关系分类。巷道超前支护液压支架按照与围岩作用关系可分为支撑式支架、支撑掩护式支架,前者又名垛式支架,二者的区别在于是否有掩护梁结构。支撑掩护式支架具有支撑式支架支护强度高的特点,同时,掩护梁结构增加了支架的稳定性,在现场应用更为广泛,常作为大采高综采工作面两巷超前支护液压支架的基本架型。

2)按支架稳定机构分类。巷道超前支护液压支架按照稳定机构可分为无稳定机构支架、四连杆/反四连杆式支架、伸缩杆(箱)式支架以及其他稳定机构式支架。其中,四连杆式支架由于稳定性高,现场应用最广泛,其次为伸缩杆(箱)式支架和无稳定机构支架。其他类的支架稳定机构多配合四连杆机构使用,以增强支架稳定性。

3)按支架移动方式分类。巷道超前支护液压支架按照移动方式可分为自移式支架和循环式支架2类。自移式支架目前主要为迈步式移动,推移千斤顶控制支架每次向前移动一个步距,其余支架也要向前移动1次,对顶板形成反复支撑。虽然降低支架初撑力可减弱对顶板的破坏,但无法彻底解决反复支撑问题^[24]。循环式支架采用大循环移动方式对工作面两巷超前区域进行支护,即随着工作面向前回采,最靠近工作面煤壁处的支架移动至支护区域最外侧并进行重新支护,相邻支架按此方式依次向前循环,整个过程支架只对顶板支撑1次。

表 1 巷道超前支护液压支架分类

Table 1 Classification of hydraulic support for advance support of roadway

分类方式	支架类型	架型特征	优点	缺点	适用条件
与围岩作用关系	支撑式支架	立柱支撑顶梁,无掩护梁	支护刚度和强度高	质量大,抗水平力较弱	顶底板较平整的巷道
	支撑掩护式支架	立柱支撑顶梁,有掩护梁	支护强度高,稳定性好	质量大,体积较大	顶板较完整的巷道
	四连杆/反四连杆式支架	以连杆、后连杆、掩护梁和底座作为稳定结构	伸缩比大,承载能力高,稳定性较好	受力杆件多,支架质量较大、占空间较大	顶底板较完整的巷道
稳定机构	伸缩杆(箱)式支架	由伸缩杆(箱)的伸缩作为支架的稳定结构	体积小,支架质量较小,移架方便	行程有限,支架抗弯、抗扭能力较差	顶底板平整的矩形小断面巷道
	其他稳定机构式支架	利用单摆杆、限位钢板、限位千斤顶等机构调整支架运动	多配合四连杆机构使用,增加其稳定性	单独使用时稳定性较差	—
	无稳定机构支架	支架由顶梁、立柱和底座组成,无四连杆等稳定机构	质量轻,体积小,移架方便,支护强度较大	稳定性较差,支架易倾倒	围岩较好的小断面巷道或局部支护使用
移动方式	自移式支架	主要为迈步移动,支架可自移,每次向前移动一个步距	可电液控制,移动方便,支护强度一般较高	对顶板反复支撑	顶底板较完整的巷道
	搬运式循环式支架	利用起吊装置、轨道、绞车等设备进行支架移动	质量轻、体积较小,对顶板无反复支撑	一般支护强度较小	顶煤较软、容易破碎的巷道
		为门式结构,一般有底梁结构,需拆卸移动	支架整体性较好,承载能力强,对顶板无反复支撑	支架移动、拆装不方便,影响回采速度	压力及变形较大的拱形、圆形、矩形巷道
	普通液压支架	支架不具有吸能装置	—	防冲性能较弱	—
防冲性能	吸能防冲液压支架	支架具有吸能装置	冲击地压发生时可快速吸能让位,防冲性能高	造价较高	具有冲击危险性的巷道

4) 按支架防冲性能分类。巷道超前支护液压支架按支架防冲性能可分为普通液压支架和吸能防冲液压支架。虽然提高巷道液压支架支护阻力有利于提高巷道发生冲击地压的临界应力,减少冲击地压发生次数。但当冲击能量较大时,常规液压支架通常由于泄压阀来不及打开而导致支架过载破坏,产生更严重的巷道破坏^[11]。针对这一问题,潘一山等^[25-27]提出提高支护刚度和快速吸能让位支护的冲击地压巷道支护设计思路,并研发了系列吸能防冲液压支架。

吸能防冲液压支架安装有吸能装置,与普通巷道液压支架的形状、尺寸及使用方法基本相同。吸能装置是吸能防冲液压支架的最核心部件,在正常支护荷载下几乎不发生变形,使支架与普通支架正常工作状态无异,而在较大冲击地压发生时能够快速恒阻吸能让位,保证支架液压立柱等关键支撑部位不发生破坏,对巷道支护系统形成保护,并且支架在冲击发生后能够继续发挥正常支护作用。几种常见类型的吸能防冲液压支架如图 8 所示,在冲击地压动载作用下,支架吸能让位启动值一般为 1.25~1.50 倍的工作阻力,让压速率为 1~5 m/s,最大纵向冲击让位吸收能量为 550~1 698 kJ。

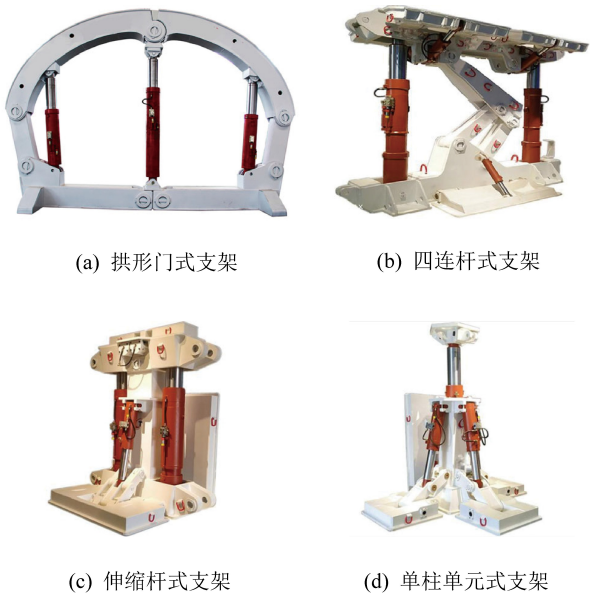


图 8 4 种常见类型的吸能防冲液压支架^[11]

Fig.8 Four common types energy-absorption anti-impact hydraulic supports^[11]

5.2 巷道液压支护设计方法

第 1 步,冲击地压类型确定。冲击地压类型确定是进行巷道防冲支护设计的前提,根据发生机制和特点不同,冲击地压可分为煤体压缩型、顶板断裂型和断层错动型 3 种类型^[18]。若巷道具有冲击危

险性,应结合周边矿区冲击地压发生历史,根据煤层冲击倾向性、岩体应力、开采深度、地应力、覆岩空间结构、开采布局以及开采扰动等因素,综合确定巷道冲击地压类型。

第2步,矿井发生冲击地压最大释放能量计算。冲击地压释放能量可根据微震监测历史最大能量进行确定,或采用理论计算进行确定。不同类型冲击地压能量释放主体与能量释放大小均有所差异,文献[28]分别给出了3种类型冲击地压释放能量计算方法。以顶板型冲击地压为例,采空区坚硬基本顶在临界跨度下贮存能量为

$$\Pi = \frac{P_d^2(3L_{cr}^3 + 10BL_{cr}^3 + 120B^2L_{cr})}{160E_t H^3} \quad (16)$$

$$\text{其中, } B = \frac{L_{cr}(\beta^2 L_{cr}^2 + 6\beta L_{cr} + 12)}{3\beta(\beta L_{cr} + 2)}, \quad \beta =$$

$\sqrt[4]{\frac{3m_s}{E_t H^3}}$ 。临界采空区跨度 L_{cr} 可根据实测或由下式计算得到:

$$\frac{P_d \beta^2 L_{cr}^3}{8} + \frac{3P_d \beta L_{cr}^2}{4} + \frac{(3P_d - \sigma_t H^2 \beta^2) L_{cr}}{2} = \sigma_t H^2 \beta \quad (17)$$

式中: P_d 为基本顶自重和上覆岩层荷载, MPa; H 为基本顶厚度, m; E_t 为岩层拉伸弹性模量, GPa; σ_t 为岩石拉伸强度, MPa; m_s 为弹性地基刚度系数。

假设能量全部释放,根据球面波传播规律,并考虑衰减情况,巷道超前支护范围内接收到的冲击能量为

$$E_{x_1-x_2} = \alpha_2 \int_{x_1}^{x_2} \frac{5.2\Pi}{2\pi R} dR \quad (18)$$

式中: α_2 为折减系数; x_1 为震源点距巷道端头距离, m; x_2 为震源点距巷道超前支护区域末端距离, m; R 为震源点距巷道超前支护区域某点距离, m。

假设巷道接收的冲击能量全部由液压支架吸收,则液压支架吸能能力应满足:

$$E_s = \sum_{i=0}^n E_i \geq E_{x_1-x_2} \quad (19)$$

式中: E_s 为支架总的吸收能量, kJ; E_i 为单个支架的吸收能量, kJ; n 为超前支护区域内液压支架数量, 个。

第3步,支护强度和支护长度确定。综合考虑巷道现有支护技术条件、围岩变形破坏、应力分布及工作面回采等多个因素,确定工作面超前支护区域内巷道所需支护强度、支护范围等参数。

1)超前支护强度确定。支护强度可根据自然平衡拱理论、直接顶重力以及现场经验等进行确定。

以按直接顶重力确定支护强度为例,巷道超前支护液压支架支护强度 p_z 为

$$p_z = q - F_g - F_s = K_d h b \gamma \cos \alpha_1 - \eta_g n_g N_g - \eta_s n_s N_s \quad (20)$$

式中: q 为巷道承受直接顶重力, kN; F_g 为顶板锚杆提供的支护阻力, kN; F_s 为顶板锚索提供的支护阻力, kN; K_d 为巷道动载系数; h 为顶板破坏高度, m; b 为巷道宽度, m; γ 为顶板破坏高度范围内煤岩体容重, kN/m³; α_1 为煤层倾角, (°); η_g 、 η_s 为锚杆、锚索支护效率, %; n_g 、 n_s 为单位长度巷道顶板的锚杆、锚索数量; N_g 、 N_s 为锚杆、锚索支护破断力, kN。

2)超前支护范围确定。随着开采深度增大,工作面超前支承压力影响范围增加,两巷所需加强支护范围从几十米逐渐增大至上百米。《煤矿安全规程》^[29]规定:“采煤工作面与巷道连接处超前压力影响范围内必须加强支护,且加强支护的巷道范围不小于 20 m”。2019 年 5 月,《国家煤矿安监局关于加强煤矿冲击地压防治工作的通知》^[30]对冲击地压工作面超前支护范围提出了进一步要求:“具有冲击危险的采煤工作面安全出口与巷道连接处超前支护范围不得小于 70 m,综采放顶煤工作面或具有中等及以上冲击危险区域的采煤工作面安全出口与巷道连接处超前支护范围不得小于 120 m。”合理的超前支护范围应当在此基础上,结合工作面回采过程中的实测矿压规律进行确定,超前支护范围应超过采动超前影响范围或显著影响范围。

第4步,结合巷道形状、尺寸及顶板条件确定支架类型。

1)分析巷道断面大小及形状对支护的要求,大断面矩形巷道高度多在 3.2 m 以上,对多种类型支架适应性较强,小断面、非矩形巷道则对支架尺寸与支护结构有特殊要求。考虑到局部区域顶板不平等因素对巷道高度的影响,液压支架支撑顶板时应留有一定的立柱伸缩余量,避免支架因顶板下沉而被压死或因巷道高度变大而无法接顶,以液压立柱在最大行程的 2/3 时恰好能支撑顶板最为适宜。

$$\text{即} \quad \frac{1}{3}S_1 + \frac{2}{3}S_2 \approx H_1 \quad (21)$$

式中: S_1 为支架最小支撑高度, m; S_2 为支架最大支撑高度, m; H_1 为巷道平均高度, m。

2)分析巷道支护顶板条件,若顶煤较硬且完整性较好,优先选用自移式支架,如自移式的垛式和四连杆式支架。若顶煤较弱,反复支撑易破碎,则优先采用循环式支架。

第5步,确定支架型号与具体支护参数。根据

支架类型筛选结果,结合巷道超前支护强度、支护距离要求,确定最终的支架型号与支架数量、初撑力、支护高度、移架方式等多个具体支护参数。

5.3 巷道液压支护设计算例

鄂尔多斯某矿403工作面开采3-1煤层,3-1煤层厚度约6 m,煤层附近上方岩层依次为砂质泥岩(厚19.7 m)、粉砂岩(厚6.2 m)、粗粒砂岩(厚16.8 m)、中粒砂岩(厚22 m)、砂质泥岩(厚14 m)、粉砂岩(厚8 m)以及砂质泥岩(厚6 m)。其中,中粒砂岩层为顶板运动主控岩层。403工作面回风巷经评价整体具有中等冲击危险性,工作面超前区域需要采用巷道超前支护液压支架进行加强支护。巷道超前液压支护设计及支架选型过程如下:第1步,冲击地压类型确定。根据矿井煤岩冲击倾向性鉴定、矿井冲击危险性评价以及历史动力显现等资料,判断煤层上方厚层基本顶破断运动是工作面开采过程中动力显现的主要原因,工作面冲击地压类型为顶板断裂型。第2步,冲击地压能量计算。邻近工作面基本顶实测初次来压步距为40~60 m,考虑到不同工作面顶板破断可能存在差异,临界采空区跨度取80 m,基本顶厚度取22 m,弹性地基刚度系数取1.0 GPa,岩层拉伸弹性模量取1.5 GPa,岩层承受均布荷载按基本顶岩层及上方随动岩层自重荷载取2 MPa。根据式(16)计算得到基本顶岩层在临界采空区跨度条件下断裂释放的能量 $II=1.871\times10^8$ J。

假设顶板断裂震源位置在基本顶岩层中部,位于工作面出口正上方53.7 m,根据几何关系,震源点距巷道端头距离 x_1 为53.7 m,震源距巷道0~120 m超前支护区域末端距离 x_2 为131.5 m。根据球面波传播规律,并考虑衰减情况,折减系数 α_2 取0.3,巷道超前支护范围内接收到的冲击能量为

$$E_{x_1-x_2} = 0.3 \times \int_{53.7}^{131.5} \frac{5.2 \times 1.871 \times 10^8}{2\pi R} dR \approx 4.18 \times 10^7 \text{ J}$$

假设巷道接收的冲击能量全部由液压支架吸收,则超前支护范围内液压支架总吸收能量应满足:

$$E_s = \sum_{i=0}^n E_i \geq 4.18 \times 10^7 \text{ J}$$

第3步,支护强度和支护范围确定。①超前支护强度确定。根据相邻工作面开采矿压显现,巷道动载系数 K_d 取3,巷道宽度 b 取5 m,顶板破坏高度 h 取顶板锚索长度6.3 m,包括厚2.4 m的顶煤和厚3.9 m砂质泥岩,顶煤和砂质泥岩的容重 γ 分别取14、26 kN/m³,煤层倾角 α_1 取0°,锚杆、锚索支护效率 η_g 和 η_s 分别取40%和60%,每排锚杆、锚索数量

分别为6根和3根,锚杆破断力取150 kN,锚索破断力取320 kN。根据式(19),单排巷道长度上的液压支架支护强度 p_z 至少应为886.5 kN。换算成对巷道顶板平均支护强度为0.2 MPa。②超前支护范围确定。相邻工作面沿空侧巷道实测矿压显现影响范围约为112 m,因此超前支护范围取为120 m。

第4步,结合巷道形状、尺寸及顶板条件确定支架类型。巷道为大断面矩形巷道,巷道净宽5 m,净高3.6 m,考虑到巷道顶底板不平导致的巷道高度差异,结合式(20)对液压支架高度的要求,支架支撑高度选为2 800~4 500 mm。为了增大支架与顶板接触面积,支架伸展宽度应尽量大于巷道宽度的1/2,支架支撑宽度选为3 000 mm。巷道顶煤单轴抗压强度为29 MPa,较为坚硬且完整性较好,巷道顶板平整,支架选择自移式的垛式支架。

第5步,确定支架型号与具体支护参数。根据前4步对支架类型筛选结果以及现场实际工程条件,最终选取ZZ14000/28/45型防冲吸能液压支架,数量14架,布置于工作面超前0~120 m。主要技术参数如下:支架类型:四柱支撑掩护式吸能防冲液压支架;运输尺寸5 050 mm×1 600 mm×2 200 mm;支护高度2 800~4 500 mm;支架宽度1 600 mm;初撑力7 754 kN;工作阻力14 000 kN;支护强度0.33 MPa;底板平均比压1.96 MPa;纵向冲击让位吸收能量3 762 kJ;纵向冲击让位平均阻力16 800 kN;经验算,单个巷道液压支架支护顶板面积为42.85 m²,则支架平均支护强度 $p'=0.33$ MPa>0.2 MPa。单架吸收能量3 762 kJ,超前支护范围内支架总吸收能量 $E_s=5.27\times10^7$ J>4.18×10⁷ J。因此,支护强度与吸收能量均满足要求。

6 结 论

1)相比于工作面矿压,两巷应力集中程度更高、采动影响范围更大、围岩变形破坏更严重。巷道对支护的要求更高,支护难度也更大。理论分析结果表明,增大支护强度可提高巷道发生冲击地压临界荷载,增加巷道安全性。

2)目前工作面支护水平显著高于两巷支护水平,两巷超前区域普遍采用的单体液压支柱支护强度低、护顶效果与稳定性较差。巷道超前支护液压支架替换单体液压支柱是提高两巷超前支护效果,减少工作面两巷冲击地压事故必然选择。

3)采用分类研究方法,讨论了适应我国巷道条件的液压支架类型、优缺点及适用条件。基于冲击地压类型、巷道释放能量计算、巷道形状尺寸以及顶

板条件等因素,提出两巷超前液压支护设计方法。

参考文献(References):

- [1] 康红普. 煤矿井下应力场类型及相互作用分析[J]. 煤炭学报, 2008,33(12):1329-1335.
KANG Hongpu. Analysis on types and interaction of stress fields in underground coalmines[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(12):1329-1335.
- [2] 宋振骥, 郝建, 石永奎, 等. 实用矿山压力控制理论的内涵及发展综述[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2019,38(1):1-15.
SONG Zhenqi, HAO Jian, SHI Yongkui, *et al.* An overview of connotation and development of practical groundpressure control theory[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2019,38(1):1-15.
- [3] 钱鸣高, 许家林. 煤炭开采与岩层运动[J]. 煤炭学报, 2019, 44(4):973-984.
QIAN Minggao, XU Jialin. Behaviors of strata movement in coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2019,44(4):973-984.
- [4] 谢和平. 深部岩体力学与开采理论研究进展[J]. 煤炭学报, 2019,44(5):1283-1305.
XIE Heping. Research review of the state key research development program of China:Deep rock mechanics and mining theory[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(5):1283-1305.
- [5] 康红普, 林健. 煤矿巷道支护技术的研究与应用[J]. 煤炭学报, 2010,35(11):1809-1814.
KANG Hongpu, LIN Jian. Study and applications of roadway support techniques for coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2010,35(11):1809-1814.
- [6] 潘一山, 齐庆新, 王爱文, 等. 煤矿冲击地压巷道三级支护理论与技术[J]. 煤炭学报, 2020,45(5):1585-1594.
PAN Yishan, QI Qingxin, WANG Aiwen, *et al.* Theory and technology of three levels support in bump-prone roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2020,45(5):1585-1594.
- [7] 韦建龙. 工作面顺槽(回风)巷道超前支护工艺的现状与展望[J]. 煤矿机电, 2020,41(5):60-63.
WEI Jianlong. Current situation and prospect of advanced support technology for the crossheading(return air) roadway in working face[J]. Colliery Mechanical & Electrical Technology, 2020,41(5):60-63.
- [8] 王国法, 牛艳奇. 超前液压支架与围岩耦合支护系统及其适应性研究[J]. 煤炭科学技术, 2016,44(9):19-25.
WANG Guofa, NIU Yanqi. Study on advance hydraulic powered support and surrounding rock coupling support system and suitability[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(9):19-25.
- [9] 王国法, 庞义辉. 液压支架与围岩耦合关系及应用[J]. 煤炭学报, 2015,40(1):30-34.
WANG Guofa, PANG Yihui. Relationship between hydraulic support and surrounding rock coupling and its application[J]. Journal of China Coal Society, 2015,40(1):30-34.
- [10] 徐亚军, 张坤, 李丁一, 等. 超前支架自适应支护理论与应用[J]. 煤炭学报, 2020,45(10):3615-3624.
XU Yajun, ZHANG Kun, LI Dingyi, *et al.* Theory and application of self-adaptive support for advanced powered support[J]. Journal of China Coal Society, 2020,45(10):3615-3624.
- [11] 潘一山, 肖永惠, 李国臻. 巷道防冲液压支架研究及应用[J]. 煤炭学报, 2020,45(1):90-99.
PAN Yishan, XIAO Yonghui, LI Guozhen. Roadway hydraulic support for rockburst prevention in coal mine and its application[J]. Journal of China Coal Society, 2020,45(1):90-99.
- [12] 董华东, 李男男. 8 m 大采高临空巷超前支架应用与研究[J]. 煤矿机械, 2021,42(4):152-155.
DONG Huadong, LI Nannan. Application and research on advance support of 8 m large mining height empty roadway[J]. Coal Mine Machinery, 2021,42(4):152-155.
- [13] 王莹. 综采工作面垛式超前液压支架设计与应用[J]. 煤矿机械, 2021,42(3):160-163.
WANG Ying. Design and application of stack advanced hydraulic support in fully mechanized working face[J]. Coal Mine Machinery, 2021,42(3):160-163.
- [14] 国家矿山安全监察局. 国家矿山安全监察局关于进一步加强煤矿冲击地压防治工作的通知[Z]. 2020.
- [15] 中国中煤能源集团有限公司. 关于推广应用超前支护液压支架的通知[Z]. 2020.
- [16] 谢和平, 高峰, 鞠杨. 深部岩体力学研究探索[J]. 岩石力学与工程学报, 2015,34(11):2161-2178.
XIE Heping, GAO Feng, JU Yang. Research and development of rock mechanics in deep ground engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015,34(11):2161-2178.
- [17] 潘一山, 代连朋, 李国臻, 等. 煤矿冲击地压与冒顶复合灾害研究[J]. 煤炭学报, 2021,46(1):112-122.
PAN Yishan, DAI Lianpeng, LI Guozhen, *et al.* Study on compound disaster of rock burst and roof falling in coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2021,46(1):112-122.
- [18] 潘一山. 煤矿冲击地压[M]. 北京:科学出版社, 2018.
- [19] 波塔宾克 B A, 褚式禹. 用液压支架维护巷道的工艺[J]. 煤炭技术, 1991(3):14-16.
Потабинк В А, CHU Shiyu. Technology of maintaining roadway with hydraulic support[J]. Coal Technology, 1991(3):14-16.
- [20] 孙守山, 范韶刚, 张国华, 等. ZTQ 型超前巷道气垫液压自移支架的研究[J]. 煤炭科学技术, 1996,24(12):17-22.
SUN Shoushan, FAN Shaogang, ZHANG Guohua, *et al.* Study of ZTQ gateway air bag hydraulic powered self advancing pilot support[J]. Coal Science and Technology, 1996,24(12):17-22.
- [21] 王永斌. 履带压顶端头、超前支护支架[J]. 煤炭科学技术, 1992,20(1):46-47.
WANG Yongbin. Top pressing crawler end and advance support[J]. Coal Science and Technology, 1992,20(1):46-47.
- [22] 王秀娟, 刘立民, 张梦瑶, 等. DWZ 型组合式单体液压支柱研究与应用[J]. 煤矿机械, 2019,40(8):135-137.
WANG Xiujian, LIU Limin, ZHANG Mengyao, *et al.* Research and application of DWZ type combined single hydraulic prop[J].

- Coal Mine Machinery, 2019,40(8):135-137.
- [23] 潘一山,代连朋. 煤矿冲击地压发生理论公式[J]. 煤炭学报, 2021,46(3):789-799.
- PAN Yishan, DAI Lianpeng. Theoretical formula of rock burst in coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2021,46(3):789-799.
- [24] 郭继圣. 综采工作面巷道超前液压支架选型设计及展望[J]. 煤炭科学技术, 2016,44(11):30-35.
- GUO Jisheng. Selection design and outlook on advanced hydraulic powered support of gateway in fully-mechanized coal mining face[J]. Coal Science and Technology, 2016,44(11):30-35.
- [25] 潘一山,肖永惠,李忠华,等. 冲击地压矿井巷道支护理论研究及应用[J]. 煤炭学报, 2014,39(2):222-228.
- PAN Yishan, XIAO Yonghui, LI Zhonghua, *et al.* Study of tunnel support theory of rockburst in coal mine and its application[J]. Journal of China Coal Society, 2014,39(2):222-228.
- [26] 马 箫,潘一山,张建卓,等. 防冲支架的核心吸能构件设计与吸能性能研究[J]. 煤炭学报, 2018,43(4):1171-1178.
- MA Xiao, PAN Yishan, ZHANG Jianzhuo, *et al.* Design and performance research on core energy absorption component of anti-impact support[J]. Journal of China Coal Society, 2018,43(4):1171-1178.
- [27] 唐 治,潘一山,朱小景,等. 自移式吸能防冲巷道超前支架设计与研究[J]. 煤炭学报, 2016,41(4):1032-1037.
- TANG Zhi, PAN Yishan, ZHU Xiaojing, *et al.* Design and study of self-moving energy absorption and antiimpact roadway advanced support[J]. Journal of China Coal Society, 2016,41(4):1032-1037.
- [28] 施天威,潘一山,王爱文,等. 基于能量贮存及释放主体的煤矿冲击地压分类[J]. 煤炭学报, 2020,45(2):524-532.
- SHI Tianwei, PAN Yishan, WANG Aiwen, *et al.* Classification of rock burst in coal mine based on energy storage and release bodies[J]. Journal of China Coal Society, 2020,45(2):524-532.
- [29] 国家安全生产监督管理总局,国家煤矿安全监察局. 煤矿安全规程[M]. 北京:煤炭工业出版社, 2016.
- [30] 国家煤矿安全监察局.国家煤矿安全监察局关于加强煤矿冲击地压防治工作的通知[Z]. 2019.