

深部厚顶煤巷道矿震诱发冒顶复合灾害机理及其控制

窦林名¹, 马小涛¹, 边戈², 刘涛², 王洪涛², 宋金波³, 刘彦强², 周坤友⁴

(1. 中国矿业大学矿业工程学院, 江苏 徐州 221116; 2. 山东能源集团西北矿业有限公司, 陕西 西安 710018; 3. 中煤西安设计工程有限责任公司, 陕西 西安 710054; 4. 安徽理工大学矿业工程学院, 安徽 淮南 232001)

摘要 随着煤矿开采深度的增加,厚顶煤巷道在强矿震作用下出现了不同于常规冒顶的灾害,即矿震诱发冒顶复合灾害。以陕西某矿301工作面回风巷为研究对象,采用理论分析、数值模拟和现场调研等方法,结合实际地质条件,探究矿震诱发冒顶复合灾害的破坏特征与主控因素,建立此类灾害的机理,并提出合理的控制对策。研究表明:矿震诱发冒顶复合灾害发生过程伴随强矿震,但巷道无明显动力显现特征;数值模拟表明动载强度显著影响巷道围岩的应力分布;厚顶煤巷道在强动载作用下,相较于薄顶煤、无顶煤巷道顶板下沉量更大,且受动载影响更为显著;锚杆索+钢带主被动组合支护能够有效提高巷道围岩稳定性,显著增强巷道抗动载能力;基于矿震诱发冒顶复合灾害机理提出“深部断顶-浅部卸压-强化支护”的防治对策。研究成果可为深部厚顶煤巷道矿震诱发冒顶复合灾害的防治提供一定的科学依据。

关键词 深部矿井; 厚顶煤巷道; 矿震; 巷道冒顶; 复合灾害

中图分类号 TD 353

文献标志码 A

DOI 10.13545/j.cnki.jmse.2024.0302

Mechanism and control of roof collapse induced by mining tremors in deep thick-top-coal roadway

DOU Linming¹, MA Xiaotao¹, BIAN Ge², LIU Tao², WANG Hongtao²,
SONG Jinbo³, LIU Yanqiang², ZHOU Kunyou⁴

(1. School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 2. Shandong Energy Group Xibei Mining Co Ltd, Xi'an, Shaanxi 710018, China; 3. China Coal Xi'an Design Engineering Co Ltd, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 4. School of Mining Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China)

Abstract With the increase of mining depth, thick-top-coal roadways have undergone roof collapse induced by mining tremors (RCMT), which is a kind of compound disaster different from conventional roof collapse. This study is focused on the return air roadway of the 301 working face in a mine located in Shaanxi Province. By employing theoretical analysis, numerical simulation, and field investigation methods and considering the actual geological conditions, it explored the damage characteristics and main controlling factors of RCMT, expounded the mechanism of such compound disasters, and proposed reasonable control measures. The research results indicate that the occurrence of RCMT compound disasters is accompanied by strong mining tremors, but the roadway shows no obvious dynamic

收稿日期: 2024-07-03

责任编辑: 王江涛

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3004603); 国家自然科学基金项目(52227901, 51934007); 山东能源科技计划重大项目(SNKJ2022A15); 江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX23_2790); 中国矿业大学研究生创新计划项目(2023WLKXJ029)

作者简介: 窦林名(1963—),男,青海省海东市人,博士,教授,从事冲击地压机理及防治方面的研究。

通信作者: 马小涛

E-mail: xtao_ma@cumt.edu.cn

Tel: 15162127871

characteristics. Numerical simulations reveal that the intensity of dynamic loads considerably affects the stress distribution of surrounding rock in the roadway. Compared to thin-top-coal and non-top-coal roadways, the thick-top-coal roadway presents greater roof subsidence and is more significantly impacted by strong dynamic loads. The combined active and passive supports of anchor bolts and steel belts can effectively improve the stability of surrounding rock in the roadway and noticeably enhance the roadway's resistance to dynamic loads. Furthermore, prevention and control measures of "deep roof breakage, shallow pressure relief, support strengthening" were proposed based on the mechanism of RCMT compound disasters. The research findings can provide a scientific basis for the prevention and control of RCMT compound disasters in deep thick-top-coal roadways.

Key words deep mine; thick-top-coal roadway; mining tremors; roof collapse; compound disasters

随着我国煤矿开采技术水平提升和开采强度增加,浅部煤炭资源逐渐枯竭,深部开采已经成为我国矿产资源开采的必然趋势^[1-3]。在深部煤体典型的“三高”赋存环境和“强扰动”的影响下,深部矿井动力灾害频发^[4],且出现了不同于浅部矿井的动力破坏形式,具体表现为矿震诱发顶板冒落。矿震诱发冒顶复合灾害由于不同于典型的巷道冒顶灾害,其发生机理尚不明晰,对井下的安全生产造成极大的困扰。

针对巷道诱发冒顶复合灾害的机理及其控制,许多专家开展了一系列卓有成效的研究^[5-9]。朱建波等^[10]系统阐释了矿震与冲击地压的区别和联系,提出震动性是矿震区别于冲击地压的首要特性。窦林名等^[11]将煤矿矿震分为采动破裂型、巨厚覆岩型和高能矿震型 3 种类型,并根据危险性将其分为正常矿震和危险性矿震。曹安业^[12]、杨耀等^[13]对矿震波能量传播方式、衰减规律和应力降等进行了系统研究,揭示了采动煤岩冲击破裂的震动效应。Cai 等^[14]采用理论分析与数值模拟相结合的方法研究了平行裂缝对岩体震动波衰减的影响,并提出了用位移不连续模型显式考虑各裂缝衰减效应的方法。姜福兴等^[15]认为重复采动下巨厚岩层包括顶板“活化”引发矿震和顶板岩移线外扩引发矿震 2 种发生类型。此外,陈治宇^[16]对动载作用下巷道锚固体破坏特征等进行了研究,将冲击试件破坏特征分为试件冲击端的剪切破坏、自由段的拉张和剪切复合破坏及中部的断裂破坏。史新帅^[17]利用自主研发的大尺度三维巷道冲击地压物理模拟试验系统对动静载作用下深部掘进煤巷冲击失稳机理和破坏模式进行研究,揭示了冲击地压强度与抛出围岩量的关系,并提出了“监测预警+主动防控”的防治策略。潘一山等^[18]总结了多地冲击地压和冒顶的灾害特征,并指出复合灾害机理关键点在于揭示巷道整体系统和破碎区子系统的稳定原理及其相

互影响。温鹏飞^[19]对动载作用下巷道锚固体体系的破坏规律进行了分析,揭示了特厚坚硬顶板破断产生的动载对巷道顶板的破坏规律。曹恒将^[20]基于星村煤矿现场实际数据,分析了不同开挖条件对巷道稳定性的影响以及不同顶板煤层厚度对巷道离层作用的影响。靖洪文等^[21]基于颗粒流软件 PFC^{2D}建立了锚杆索锚固巷道围岩结构的“两介质-四界面”模型,模拟再现高应力和动载扰动耦合作用下煤巷冲击冒顶全程的细观结构演化特征。

上述学者对矿震类型、矿震发生机理和不同开采条件下的矿震活动进行了研究,并采用数值模拟、相似模拟等多种方法从不同角度对动载对巷道围岩的影响规律进行了研究;但现有研究大多关注于冲击载荷对巷道的破坏或矿震诱发冲击地压方面,而鲜有对矿震诱发冒顶复合灾害机理及控制的研究。因此,本文将对对比分析矿震诱发冒顶复合灾害与其他常见动力灾害破坏特征的差异,分析矿震诱发冒顶的主控因素,并提出其发生机理和控制对策,期望为该类型灾害的防控防治提供一定的参考。

1 现场概况

1.1 工程概况

陕西省彬长矿区某矿主采 4 煤层,煤层埋深为 800~1 000 m,平均厚度约为 12 m。本文研究巷道为该矿三盘区 301 工作面回风巷。301 工作面为三盘区第二个回采工作面,西北方向为 302 工作面采空区,两面之间留设 6 m 小煤柱,东南方向为 200 m 的二、三盘区隔离煤柱。301 工作面采用综采放顶煤工艺。煤层厚度为 8.1~15.6 m,平均约为 12.1 m;煤层倾角为 0°~8°,平均为 4°;煤层埋深近 1 000 m。工作面内赋存有 X3 向斜构造。地应力实测结果表明,301 工作面处于高地应力区域,其中垂直应力约为 24.18 MPa,最大水平主应力约为 38.23 MPa。301 工作面平面位置如图 1 所示。

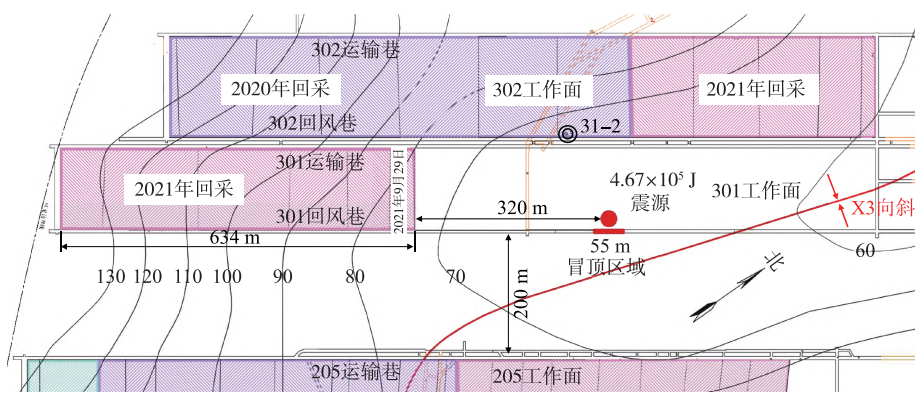


图 1 301 工作面平面分布示意图

Fig. 1 Plan position diagram of 301 working face

301 工作面上覆直接顶和基本顶分别为厚度 1.25 m 的泥岩和厚度 10.79 m 的细粒砂岩,下伏直接底和老底分别为厚度 1.40 m 的炭质泥岩和厚度 8.17 m 的泥岩。301 工作面附近 31-2 钻孔柱状如图 2 所示。

岩柱	层厚/m	岩层名称	岩性描述
	13.30	中粒砂岩	灰-灰白色, 含植物炭化碎屑及黄铁矿结核, 与下层为渐变接触。
	10.79	细粒砂岩	浅灰白-浅灰色, 具均匀层理, 含大量黄铁矿结核及植物炭化碎屑。
	1.25	泥岩	深灰-黑色, 上部含大量植物炭化碎屑及黄铁矿结核, 并有方解石细脉充填。
	13.70	4煤	半暗型煤, 内生裂隙发育, 见有方解石细脉充填, 结构单一。
	1.40	炭质泥岩	深灰-黑色, 含大量植物炭化碎屑及少量镜煤条带。
	8.17	泥岩	深灰色, 斑块状, 团块状, 吸水性强, 易风化, 与下层明显接触。
	5.70	泥岩	紫红色, 垂直裂隙发育, 沿裂隙面见有方解石脉充填。

图 2 31-2 钻孔柱状图

Fig. 2 31-2 drilling column chart

301 工作面回风巷断面为矩形,宽 6 m、高 4 m,沿 4 煤底板掘进。巷道顶板布置 7 根锚杆和 5 根锚索,锚索采用 1×19-Φ21.8 mm 预应力钢绞线,排距为 1 000 mm,锚杆采用 Φ22 mm×2 800 mm 高强预应力让压锚杆,间排距为 950 mm×1 000 mm;两帮各布置 3 根锚索和 6 根锚杆,锚杆间排距为 900 mm×1 100 mm,锚索间排距为 1 200 mm×1 000 mm,两帮锚杆索参数与顶板锚杆索参数一致。如图 3 所示。

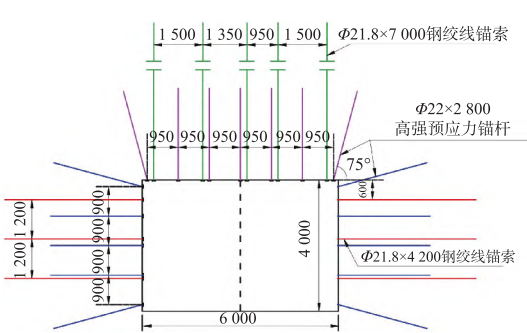


图 3 301 回风巷锚杆索支护示意图 (mm)

Fig. 3 Schematic diagram of anchor bolt and cable support in 301 return air roadway

2021 年 9 月 29 日 20 时 16 分,SOS 微震监测系统在 301 工作面前方约 320 m 处监测到一次 4.67×10^5 J 矿震事件,震源标高+72 m (巷道底板标高+64 m),位于工作面上方顶板煤层中。矿震事件发生后,地面震感明显,301 工作面前方约 320 m 处回风巷发生冒顶,冒顶范围约 55 m,冒顶高度约 2 m。冒顶区域顶板呈漏冒式破坏,冒落煤体较为松散,顶板部分区域锚杆、锚索发生脱落、拉断,巷道无明显底鼓和帮鼓现象。矿震震源及冒顶位置如图 1 所示。现场巷道破坏情况如图 4 所示。

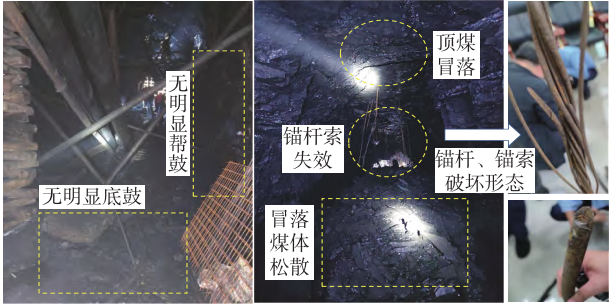


图 4 301 工作面回风巷现场破坏情况

Fig. 4 On-site damage of the return air roadway of the 301 working face

1.2 矿震诱发冒顶巷道破坏特征

由 301 工作面巷道破坏特征可知,矿震诱发冒顶复合灾害与典型的巷道冒顶和巷道冲击地压有着一定的区别和联系,它既有冒顶后明显的分界面、顶板煤体漏冒式垮落的典型冒顶特征,又具有

灾害过程伴随强矿震信号、井下震感强烈的典型冲击地压特征。大量统计冲击地压、巷道冒顶、矿震诱发冒顶和矿震诱发冲击复合灾害案例,总结 4 类灾害在巷道破坏位置、支护破坏特征及煤岩抛掷、强矿震信号的特征,如表 1 所列。

表 1 4 类灾动力害破坏特征

Table 1 Destruction characteristics of four types of disaster dynamics

灾害类型	巷道破坏位置	煤岩抛掷特征	巷道支护破坏特征	强矿震特征	力源特征
冲击地压灾害	顶板整体冲击下沉、冲击帮鼓抛出,底鼓冲击破坏	顶部、两帮、底板具有明显抛掷特征	顶部、帮部支护明显破坏,锚杆索拉断,锚杆发生弯曲拉扭破坏	伴有强矿震产生	强动载 + 静载
巷道冒顶灾害	顶板煤岩的漏冒式破坏,冒落后呈散体特征,冒落后有明显的分界面	顶板煤体漏冒式垮落,无水平煤岩抛掷	巷道顶板支护呈现垂向破坏特征(锚杆索拉断/悬吊在顶板)	无强矿震产生	自重应力
矿震诱发冒顶复合灾害	顶板煤岩的漏冒式破坏,冒落后呈散体特征,冒落后有明显的分界面	顶板煤体漏冒式垮落,无水平煤岩抛掷	巷道顶板支护呈现垂向破坏特征(锚杆索拉断/悬吊在顶板)	伴有强矿震产生	强动载 + 自重应力
矿震诱发冲击复合灾害	顶板整体冲击下沉、冲击帮鼓抛出,底鼓冲击破坏	顶部、两帮、底板具有明显抛掷特征	顶部、帮部支护明显破坏,锚杆索拉断,锚杆发生弯曲拉扭破坏	外部强矿震(顶板断裂、断层滑移等)	强动载主导

1.3 矿震诱发冒顶复合灾害主控因素

通过对巷道破坏现场调研和分析,总结矿震诱发冒顶复合灾害主控因素为以下几个方面:

1) 高静载应力

地应力实测结果表明,301 工作面垂直应力为 24.18 MPa,水平应力为 38.13 MPa,原岩应力水平较高。如图 5 所示,301 工作面煤柱侧为二盘区大采空区,另一侧为 302 工作面采空区,上覆巨厚主关键层未发生断裂,仅处于弯曲下沉状态,因此受采空区覆岩应力转移影响,301 工作面在开采期间始终处于较高应力状态。

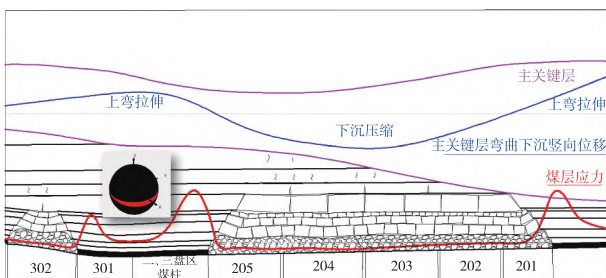


图 5 采场覆岩结构与应力转移

Fig. 5 Overburden structure and stress transfer in stope

2) 强动载作用

301 工作面回风巷冒顶矿震定位结果显示,震源标高+72 m,位于巷道顶板煤层中。统计分析得到该矿震能量衰减规律示意图,如图 6 所示。由图可知,此次冒顶区域位于震源破裂尺度范围内,

巷道顶板受到近场矿震的强动载作用,进而诱发巷道顶板冒落。

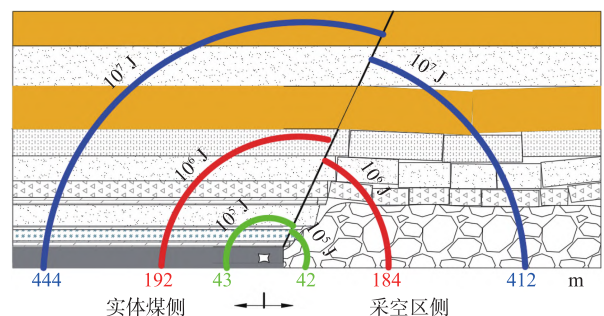


图 6 矿震能量衰减示意图

Fig. 6 Schematic diagram of mine tremors energy attenuation

图 7 为 301 工作面支架阻力数据分析得到的矿压危险系数云图。由图可知,301 工作面在 2021 年 9 月 15 日和 2021 年 9 月 23 日出现来压现象,到 2021 年 9 月 29 日,基本已经度过来压阶段。因此,该矿震与覆岩顶板破断引起的工作面来压无关。

3) 巷道支护

从回风巷顶板冒落区域向撤面道布置 12 个顶板窥视孔,孔深 9 m,利用顶板窥视仪观测巷道上方顶板裂隙发育及离层情况,顶板窥视孔布置及窥视结果如图 8 所示。

根据顶板窥视结果,9 m 孔深均未见岩,表明该区域顶板煤层厚度较大,巷道顶板属于厚顶煤巷道。巷道顶板 0~3 m 处裂隙竖向发育,煤体较为松

散破碎,顶板采用的锚杆长度为 2.8 m,不能形成有效的锚固作用;而顶板 6~9 m 处存在大量横向裂隙,根据悬吊理论,顶板采用的 7 m 长锚索无法将软弱顶板悬吊在上方稳固的岩层中,同时也不能有效地对裂隙和破碎煤体形成挤压。因此,顶板锚杆锚索支护体系不能对顶板形成有效的锚固作用,最终在强动载作用下失效。

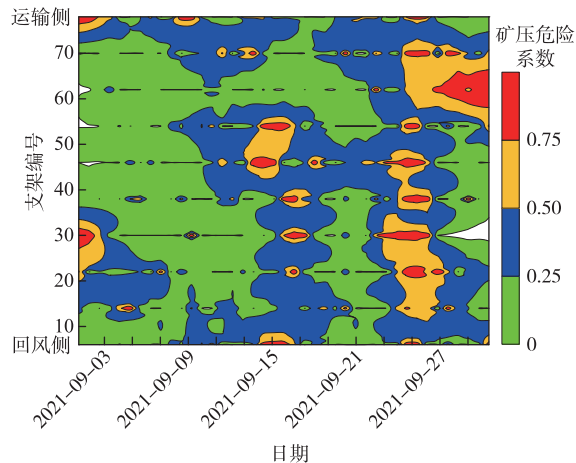


图 7 工作面支架阻力数据分析云图
Fig. 7 Cloud chart for resistance data analysis of working face support

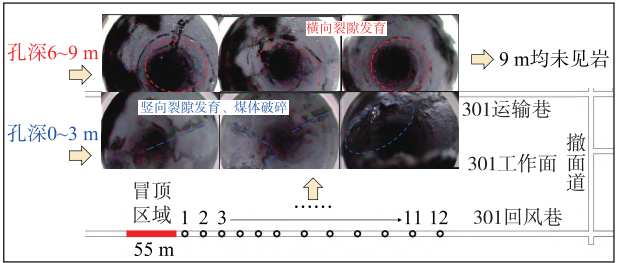


图 8 顶板窥视孔布置及窥视结果
Fig. 8 Roof peephole arrangement and peep results

同时,由图 4 可知,巷道顶板锚杆及锚索表面锈蚀严重,杆径变细,个别表面存在锈蚀坑。锚杆受腐

蚀作用后易出现应力集中,从而提前进入破坏阶段,降低巷道顶板抗动载能力。

综上所述,301 工作面回风巷矿震诱发冒顶复合灾害是高静载、强动载和支护劣化共同作用下的结果。巷道顶板锚杆锚索支护受腐蚀作用,支护质量降低,且由于煤层顶板煤层较厚,锚杆锚索不能锚固到岩层中形成稳定的锚固结构,在高静载应力和强矿震共同作用下最终顶板结构失稳,发生冒顶。

2 矿震诱发冒顶复合灾害数值模拟

2.1 数值模型

考虑应力边界及计算能力影响,使用 UDEC 数值模拟软件建立长度为 80 m、宽度为 100 m 的二维离散元模型,巷道断面按照 6 m×4 m 的实际尺寸建立,模拟岩层厚度按照实际钻孔柱状进行划分。建立的巷道模型示意图如图 9 所示。

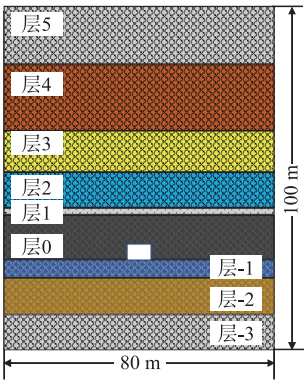


图 9 数值模拟巷道模型示意图
Fig. 9 Schematic diagram of numerical simulation roadway model

为保证模拟结果的可靠性,模拟计算中的岩体力学参数由矿井钻孔取样,并按照实验要求对相关物理力学参数进行测试获得。本次数值模拟的力学参数如表 2 所列。

表 2 煤岩层赋存及其力学参数

Table 2 Coal and rock strata occurrence and their mechanical parameters

序号	岩性	层厚/ m	累计厚度/ m	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	体积模量/ GPa	剪切模量/ GPa	黏聚力/ MPa	内摩擦角/ ($^{\circ}$)	抗拉强度/ MPa
5	砂质泥岩	14.85	100.00	2 400	3.46	1.84	1.60	29	1.30
4	粗粒砂岩	20.08	85.15	2 557	6.75	4.25	4.48	26	4.62
3	中粒砂岩	13.03	65.07	2 700	10.35	7.74	3.20	36	4.62
2	细粒砂岩	10.79	52.04	2 600	5.56	4.17	2.00	35	2.50
1	泥岩	1.25	41.25	2 700	10.35	7.74	3.20	36	4.62
0	煤	13.70	40.00	1 400	1.19	0.37	0.80	23	0.50
-1	炭质泥岩	9.25	26.30	2 200	3.03	1.56	1.20	27	1.00
-2	铝质泥岩	8.17	17.05	2 200	3.03	1.56	1.20	27	1.00
-3	泥岩	8.88	8.88	2 700	10.35	7.74	3.20	36	4.62

岩体采用 Mohr-Coulomb 本构模型,节理采用库仑滑移(完全弹塑性)本构模型,采用 UDEC 内置沃森多边形建模命令完成模型建立。图 10 为模型初始应力及边界条件示意图。

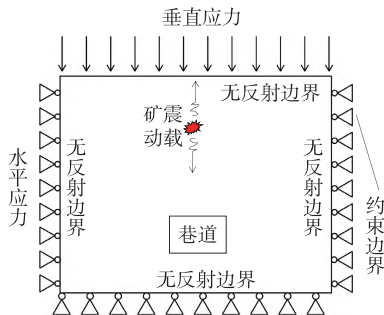


图 10 数值模初始应力及边界条件示意图

Fig. 10 Schematic diagram of initial stress and boundary conditions of numerical model

模型按照地应力测试结果设置初始应力条件,即垂直应力为 24.18 MPa,水平应力为 38.13 MPa,模型上边界施加等效垂直应力以模拟上覆岩层重力,其余边界施加位移边界条件进行固定约束。为避免模型施加动载之后在平衡位置发生震荡,需要采取施加阻尼的方式来耗散系统中震荡的动能,设置模型的临界阻力比为 0.05。同时为避免施加动载时震动波传播至边界后返回模型内部影响计算结果,在施加动载时应采取动力边界条件,设置模型的动力边界为无反射边界。

2.2 动载强度对矿震诱发冒顶复合灾害的影响

模型采用 fish 函数定义正弦波作为动载输入方式,由上文可知矿震诱发冒顶时矿震事件能量范围为 $10^5 \sim 10^6$ J,而分析震源波形频谱特征可知震动波频率分布范围为 3~30 Hz,因此设置动载频率为 10 Hz,作用周期为 1 s。为研究不同矿震强度下巷道破坏特征,在巷道顶板 40 m 位置施加不同能级的动载,矿震能量与动载荷峰值对应关系如表 3^[22] 所列。

表 3 矿震能量与动载荷峰值对应关系

Table 3 Corresponding relationship between mine tremors energy and dynamic load peak value

序号	能量级别/ J	频率/ Hz	峰值震动速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	动载荷峰值 应力/MPa
1	$10^3 \sim 10^4$	10	1.0	10
2	$10^4 \sim 10^5$	10	2.9	30
3	$10^5 \sim 10^6$	10	5.6	60
4	$10^6 \sim 10^7$	10	9.4	100

图 11 为不同动载强度下巷道围岩应力分布云图。由图可知:在无动载作用下,巷道两帮有小范围的应力集中;受巷道开挖影响,顶底板垂直应力有所降低。随着动载强度的增加,巷道两帮水平应力和垂直应力集中影响范围明显增加,此时顶底板水平应力集中区域随动载的增加而逐渐减小,动载强度显著影响巷道围岩的应力分布。

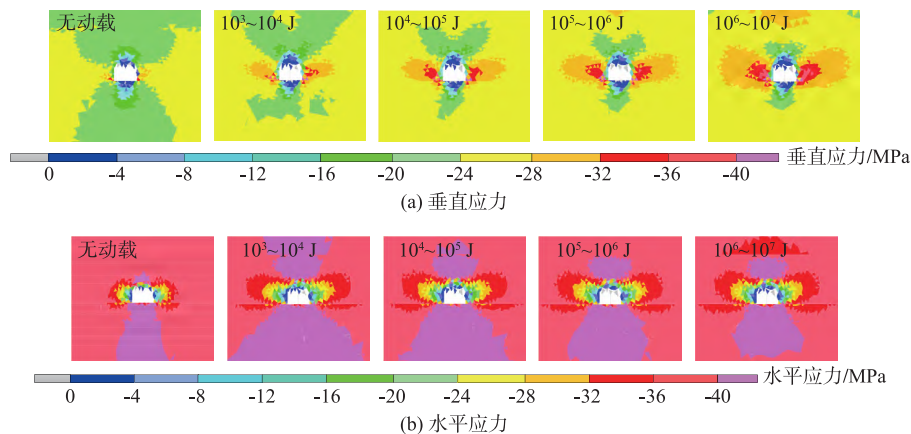


图 11 不同动载强度下巷道围岩应力分布云图

Fig. 11 Stress distribution cloud diagram of roadway surrounding rock under different dynamic load intensities

以 $10^5 \sim 10^6$ J 动载强度为例,动载作用下巷道顶板上方不同位置应力变化如图 12 所示。巷道上方 2 m 位置在动载来临时,水平应力降低,垂直应力保持较低水平,说明巷道上方 2 m 区域内顶板发生下沉和破坏,这与 1.3 节中钻孔窥视结果相对应。巷道顶板 4 m 位置在动载作用下水平应力最大增

加 64.39%,平稳后为 31.72%。在巷道顶板 6 m 和 8 m 位置处,动载传播过程中水平应力最大分别增加 27.2% 和 13.55%,平稳后分别为 24.49% 和 9.29%,表明巷道顶板 4 m 位置在动载作用下水平应力集中,容易发生剪切破坏。巷道顶板 6 m 以上区域受动载作用后应力变化较小,相对不易发生破坏。

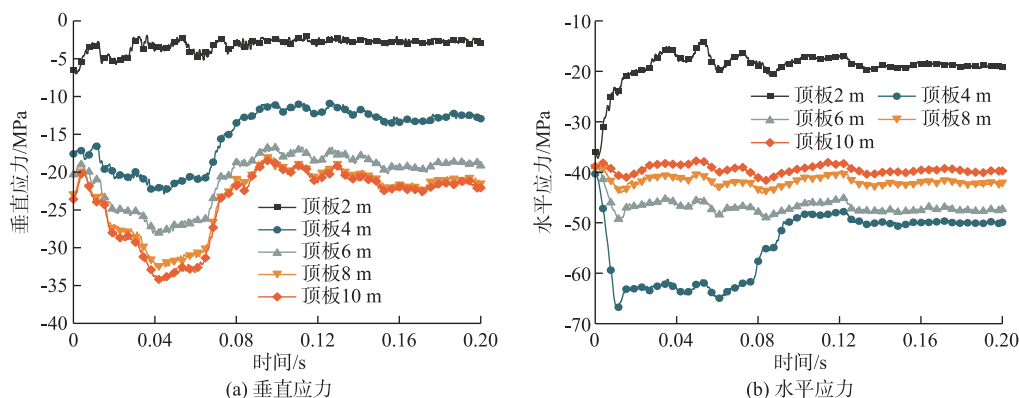


图12 动载作用下不同顶板位置应力变化

Fig. 12 Stress changes at different roof positions under dynamic load

2.3 顶煤厚度对矿震诱发冒顶复合灾害的影响

巷道发生矿震诱发冒顶复合灾害不仅与矿震强度有关,还与巷道顶板煤层厚度相关。分别选取半煤岩巷道、无顶煤巷道、薄顶煤巷道(1 m 厚度顶煤)及厚顶煤巷道(10 m 厚度顶煤)进行模拟。其余支护参数和动载参数一致,其中,模拟动载强度为 $10^5 \sim 10^6$ J,频率为 10 Hz,作用时间为 1 s,系统分析不同顶煤厚度下巷道围岩变化特征。

图13为不同顶煤厚度下巷道围岩位移变化。由图可知,在相同动载和支护条件下,半煤岩巷道围岩受动载影响更小,而无顶煤巷道和薄顶煤巷道围岩变形量相近,厚顶煤巷道帮部和底板受动载影响与无顶煤、薄顶煤巷道相似,但厚顶煤巷道顶板在强动载作用下,下沉量显著高于其他条件顶板下沉量。这说明在强动载作用下,巷道顶板岩性及厚度对巷道顶板稳定性的影响较大。

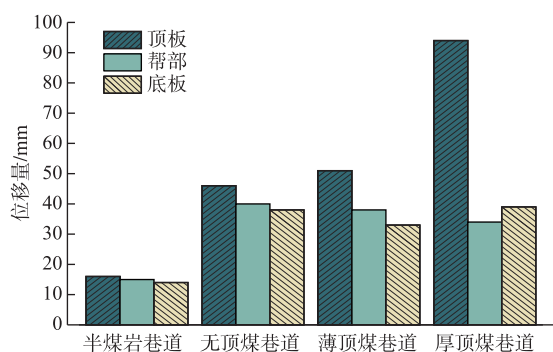


图13 不同顶煤厚度下巷道围岩垂直位移云图

Fig. 13 Vertical displacement cloud diagram of roadway surrounding rock under different roof coal thickness

图14为不同顶煤厚度下巷道顶板峰值震动速度。由图可知,在各种顶煤厚度条件下,巷道顶板受动载作用影响最大,其次是两帮,底板受影响最小。4种顶板条件下巷道顶板峰值震动速度分别为

0.63, 1.44, 1.68, 7.28 m/s。因此,随着顶煤厚度的增加,巷道顶板受动载影响逐渐增加。

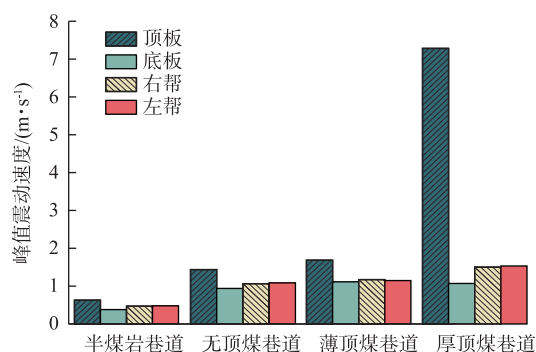


图14 不同顶煤厚度下巷道顶板峰值震动速度

Fig. 14 Peak vibration velocity of roadway surrounding rock under different roof coal thickness

综合考虑巷道围岩垂直位移与顶板峰值震动速度结果可知,当巷道为厚顶煤巷道时,巷道顶板相较于两帮和底板受强动载影响更大,更容易发生动力显现。

2.4 巷道支护对矿震诱发冒顶复合灾害的影响

为研究深部厚顶煤巷道在不同支护方式下动力响应特征,分别对无支护、锚杆支护、锚杆和锚索组合支护及锚杆索和钢带金属网组合支护4种条件下的巷道进行模拟。除支护方式外,其余支护参数及动载参数设定保持一致,其中设置模拟的动载强度为 60 MPa,频率为 10 Hz,作用时间为 1 s。

图15为不同支护方式下巷道围岩垂直位移云图。由图可知,锚杆索和钢带主被动共同支护方式对强动载作用下巷道顶板的稳定性有着显著的控制作用,而无支护巷道顶板发生冒落,且顶板破坏程度较高。仅锚杆支护和锚杆索支护条件下巷道顶板在动载作用下发生拱形变形,具备发生局部冒落的风险。

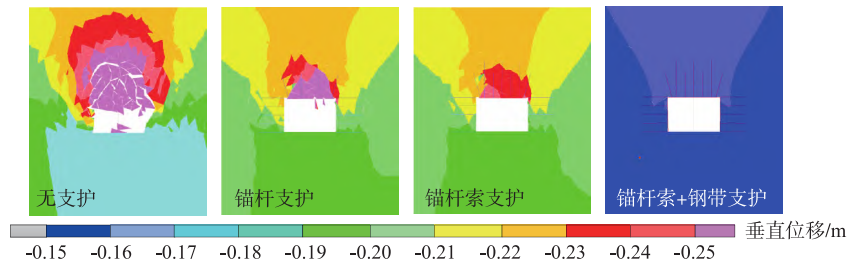


图 15 不同支护条件下巷道围岩垂直位移云图

Fig. 15 Vertical displacement cloud diagram of roadway surrounding rock under different support conditions

图 16 为不同支护方式下巷道围岩位移量。由图可知,强动载作用下无支护巷道顶板下沉量最大,随着支护强度的增加,巷道顶板下沉量减小。且相较于锚杆支护和锚杆索支护,锚杆索和钢带

金属网组合支护条件下,巷道四周位移变化量相近,表明主被动组合支护能够有效提高巷道围岩的稳定性,尤其是对巷道顶板稳定性的控制作用更强。

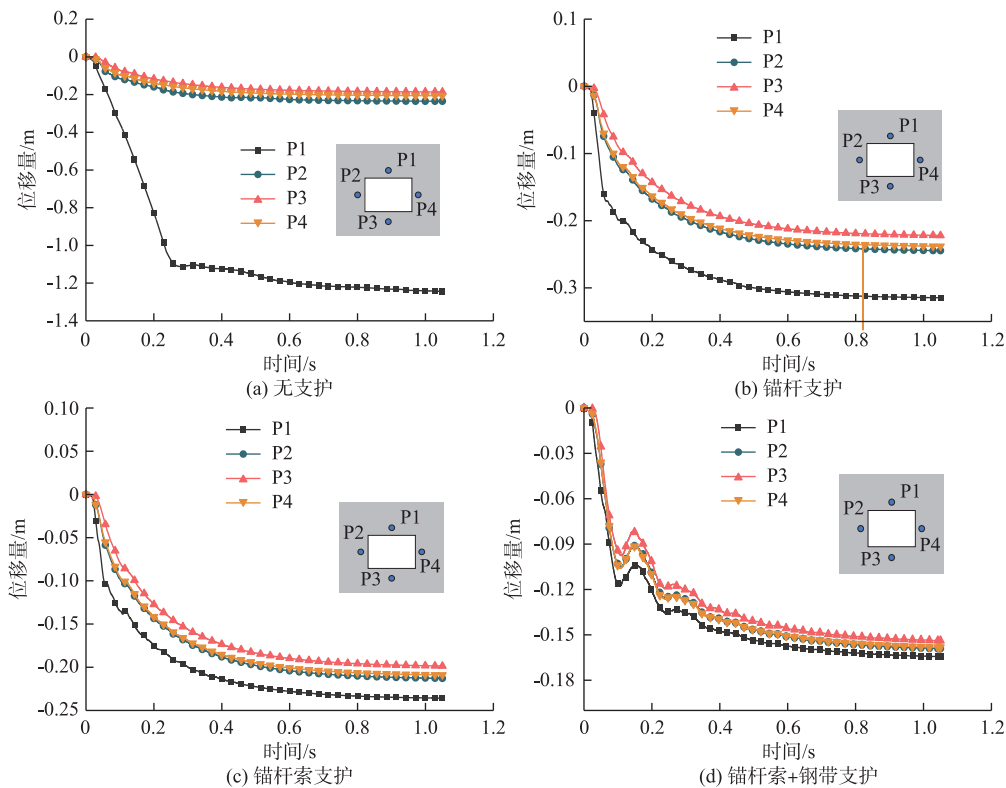


图 16 不同支护条件下巷道围岩位移变化

Fig. 16 Displacement changes of roadway surrounding rock under different support conditions

图 17 为不同支护方式下巷道围岩震动速度峰值。在相同支护条件下,强动载对顶板的影响较大,其次是巷道两帮。在不同支护强度下,锚杆索和钢带金属网主被动组合支护方式下,巷道顶板最大峰值速度为 2.20 m/s,远小于无支护条件下的 6.18 m/s,仅锚杆支护下的 5.19 m/s 和锚杆索组合支护下的 3.84 m/s。因此,锚杆索的主动支护和钢带等被动支护方式相互作用,可以显著增强巷道顶板抵抗强动载的能力。

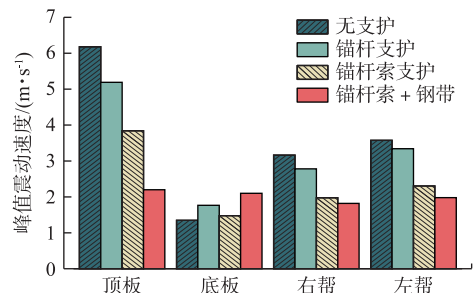


图 17 不同支护条件下巷道围岩峰值震动速度

Fig. 17 Peak vibration velocity of roadway surrounding rock under different support conditions

3 矿震诱发冒顶复合灾害机理

现场顶板窥视和数值模拟研究表明,深部厚顶煤巷道在较大水平应力和动载扰动的作用下,锚固界面横向裂隙发育,受垂直应力影响,巷道顶板煤层内形成弱面并发生离层,从而形成固支梁结构。图18为固支梁结构简化示意图。图中, q 为顶板所受静载和动载应力, q_i 为锚固作用力, G 为锚杆结构自重应力。

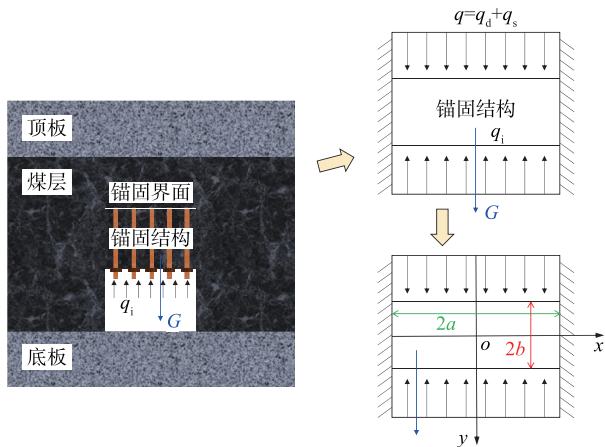


图18 锚固结构简化示意图

Fig. 18 Simplified diagram of anchor structure

对于如图18所示的深梁问题,可利用位移变分法进行求解^[17],已知巷道两帮为固支端,且沿 x 轴和 y 轴巷道两端对称,则边界满足如下条件:

$$(u, v)_{x=\pm a} = 0 \quad (1)$$

对此问题的求解可以采用瑞利-里茨法,设位移函数为:

$$u = \left(1 - \frac{x^2}{a^2}\right) \frac{xy}{ab} (A_1 + A_2 x^2 + A_3 y^2 + \dots) \quad (2)$$

$$v = \left(1 - \frac{x^2}{a^2}\right) \frac{xy}{ab} (B_1 + B_2 x^2 + B_3 y^2 + \dots)$$

对于平面应力问题,应变能的密度 U_1 为

$$U_1 = \frac{(1-\mu)^2 E}{2(1-\mu^2)(1-2\mu)} \times \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2 + 2 \frac{\mu}{1-\mu} \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial y} \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}\right)^2 \right] \quad (3)$$

对上式进行积分,可求得锚固结构的应变能 U 表达式如下:

$$U = J \left[\frac{4}{15} \frac{b}{a} A^2 + K \left(\frac{4}{3} \frac{b}{a} B^2 - \frac{8}{15} AB + \frac{8}{105} \frac{b}{a} A^2 \right) \right] \quad (4)$$

$$\text{式中 } J \text{ 和 } K \text{ 分别为 } J = \frac{2(1-\mu)^2 E}{(1-\mu^2)(1-2\mu)}, K = \frac{1-2\mu}{2(1-\mu)}.$$

根据瑞利-里茨方程,系数 A 和 B 可由下式求得:

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial A} &= \iint_S f_x u_1 dx dy + \int_l \bar{f}_x u_1 dl \\ \frac{\partial U}{\partial B} &= \iint_S f_y v_1 dx dy + \int_l \bar{f}_y v_1 dl \end{aligned} \quad (5)$$

式中: f_x, f_y 分别为锚固结构水平和垂直方向的体力, $f_x = 0, f_y = mg, m$ 为锚固结构内单位体积的质量, g 为重力加速度; $\bar{f}_y$ 和 $\bar{f}_x$ 为锚固结构的面力; S 为锚固结构的截面; l 为锚固结构的外边界。其中: $u_1 = \left(1 - \frac{x^2}{a^2}\right) \frac{xy}{ab}, v_1 = 1 - \frac{x^2}{a^2}.$

对上式进行求解,可得 A 和 B 的表达式:

$$\begin{aligned} A &= \frac{1}{8J} \left[\frac{8ab}{3} mg + \frac{4a}{3} (q - q_i) \right] \times \left[\frac{1}{21} \frac{b^2}{a^2} (7 + 2K) - \frac{1}{15} K \right]^{-1} \\ B &= \frac{b}{8aJ} \left[\frac{8ab}{3} mg + \frac{4a}{3} (q - q_i) \right] \left(\frac{1}{K} + \frac{2}{7} \right) \times \left[\frac{1}{21} \frac{b^2}{a^2} (7 + 2K) - \frac{1}{15} K \right]^{-1} \end{aligned} \quad (6)$$

代入上式得:

$$\begin{aligned} u &= \frac{1}{8J} \left[\frac{8ab}{3} mg + \frac{4a}{3} (q - q_i) \right] \times \left[\frac{1}{21} \frac{b^2}{a^2} (7 + 2K) - \frac{1}{15} K \right]^{-1} \left(1 - \frac{x^2}{a^2}\right) \frac{xy}{ab} \\ v &= \frac{b}{8aJ} \left[\frac{8ab}{3} mg + \frac{4a}{3} (q - q_i) \right] \left(\frac{1}{K} + \frac{2}{7} \right) \times \left[\frac{1}{21} \frac{b^2}{a^2} (7 + 2K) - \frac{1}{15} K \right]^{-1} \left(1 - \frac{x^2}{a^2}\right) \end{aligned} \quad (7)$$

在平面应变问题中,应力和位移之间的关系^[23]如下所示:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \frac{(1-\mu)^2 E}{(1-\mu^2)(1-2\mu)} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\mu}{1-\mu} \frac{\partial v}{\partial y} \right) \\ \sigma_y &= \frac{(1-\mu)^2 E}{(1-\mu^2)(1-2\mu)} \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\mu}{1-\mu} \frac{\partial u}{\partial y} \right) \\ \tau_{xy} &= \frac{E}{2(1+\mu)} \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

对上式进行求解可得:

$$\begin{aligned}
\sigma_x &= \frac{J}{16} \left[\frac{8ab}{3} mg + \frac{4a}{3} (q - q_i) \right] \times \\
&\quad \left[\frac{1}{21} \frac{b^2}{a^2} (7 + 2K) - \frac{1}{15} K \right]^{-1} \left(\frac{a^2 y - 3x^2 y}{a^3 b} \right) \\
\sigma_y &= JK \frac{\mu}{16E} \left[\frac{8ab}{3} mg + \frac{4a}{3} (q - q_i) \right] \times \\
&\quad \left[\frac{1}{21} \frac{b^2}{a^2} (7 + 2K) - \frac{1}{15} K \right]^{-1} \left(\frac{a^2 y - 3x^2 y}{a^3 b} \right) \quad (9) \\
\tau_{xy} &= \frac{1}{8J} \frac{E}{2(1 + \mu)} \left[\frac{1}{21} \frac{b^2}{a^2} (7 + 2K) - \frac{1}{15} K \right]^{-1} \times \\
&\quad \left[\frac{8ab}{3} mg + \frac{4a}{3} (q - q_i) \right] \times \\
&\quad \left[\left(1 - \frac{x^2}{a^2} \right) \frac{x}{ab} + \frac{b^2}{a} \left(\frac{1}{K} + \frac{2}{7} \right) \left(-\frac{2x}{a^2} \right) \right]
\end{aligned}$$

通过分析可知,锚固系统的失稳是从巷道围岩表面的破裂开始的,即当 $\sigma_x = \sigma_l$ 时,巷道围岩发生破坏,则推出此时锚固结构所受的合力为

$$q_d + q_s + 2bmg - q_i = \frac{12\sigma_l}{J} \left[\frac{1}{21} \frac{b^2}{a^2} (7 + 2K) - \frac{1}{15} K \right] \quad (10)$$

式中 σ_l 为锚固体抗拉强度。由此可知,当 $q_d + q_s \geq F$ 时巷道顶板发生破断。根据大量学者研究^[24-26],矿震动载产生的应力波在煤岩体中的衰减规律为

$$q_d = \frac{\sigma_0}{l} e^{-\lambda l} \quad (11)$$

式中: q_d 为震源应力波传递至下煤层采掘空间时的剩余强度; σ_0 为震源处的初始强度; λ 为应力波衰减系数; l 为震源位置距采掘位置的距离。由此可得锚固结构的破坏判据为

$$\begin{aligned}
&\frac{\sigma_0}{l} e^{-\lambda l} + q_s + 2bmg - q_i \\
&= \frac{12\sigma_l}{J} \left[\frac{1}{21} \frac{b^2}{a^2} (7 + 2K) - \frac{1}{15} K \right] \quad (12)
\end{aligned}$$

4 矿震诱发冒顶复合灾害控制对策

相较于常规仅静载作用下巷道冒顶灾害,矿震诱发冒顶复合灾害具有瞬时性和破坏性更大的特点,因此,针对矿震诱发冒顶复合灾害的控制对策也应该从常规冒顶的单一控制顶板下沉转变为对强动载、高静载和支护系统的综合控制。锚固结构的稳定系数为

$$\zeta = \frac{24\sigma_l l \left[\frac{1}{21} \frac{b^2}{a^2} (7 + 2K) - \frac{1}{15} K \right]}{J(\sigma_0 e^{-\lambda l} + lq_s + 2blmg - lq_i)} \quad (13)$$

根据式(13),当锚固系数稳定系数等于 1,巷道顶板处于临界失稳状态,稳定系数越大,巷道顶板稳定性越强。因此,提高锚固结构的稳定性可以从以下 3 个方面进行:1) 降低巷道围岩的应力水平;2) 减弱强矿震产生的动载应力;3) 增强巷道顶板支护强度。其中,降低巷道围岩的应力水平可以通过大直径钻孔等卸压方法实现;减弱强矿震产生的动载应力可以通过对低位厚硬顶板的爆破预裂来降低矿震动载源强度 σ_0 ,也可以通过在动载源和巷道顶板之间制造软弱缓冲带来增加矿震衰减系数 λ ,从而增加矿震的能量衰减,降低其对巷道的扰动作用;增强巷道支护强度可以通过提高支护强度 q_i 来实现。

由上述分析可知,单一的支护手段不能有效防止矿震诱发冒顶复合灾害的发生,必须配合其他防治措施来进行控制;因此,本文提出“深部断顶-浅部卸压-强化支护”多维度顶板控制技术,即对巷道顶板进行断顶卸压、对围岩应力进行降载卸压、对巷道进行强支护。如图 19 所示,“深部断顶”的对象是巷道上方的厚硬顶板,目的是减弱顶板周期破断产生的矿震强度,目前主要采取的方法为顶板深孔爆破、水压致裂技术等。“浅部卸压”的对象是巷道围岩浅部应力集中区域,目的是降低浅部区域应力集中并形成弱化带来减弱矿震动载作用,目前采取的方法主要为大直径钻孔卸压、煤体爆破卸压技术等。“强化支护”可以分为“强支”和“护表”2 个方面,其对象是巷道顶板锚固组合结构及巷道表面区。其中,“强支”目的是通过锚杆索等主动支护围岩,提高浅部围岩的抗动载能力;“护表”目的是通过钢带、金属网等被动支护方式或巷道围岩注浆加固技术来保障巷道围岩锚固体系的支护阻力,提高巷道围岩稳定性。

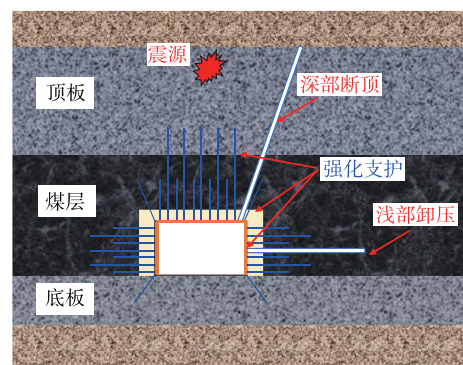


图 19 深部厚顶煤巷道顶板稳定性控制技术示意图

Fig. 19 Schematic diagram of roof stability control technology for deep and thick roof coal roadway

5 结 论

1) 矿震诱发冒顶复合灾害具有明显不同于传统巷道冒顶和冲击地压的动力破坏特征,高静载应力、强动载扰动和巷道支护强度是此类灾害的主控因素。

2) 数值模拟结果表明:动载强度显著影响巷道围岩的应力分布;厚顶煤巷道在强动载作用下,相较于薄顶煤、无顶煤巷道顶板下沉量更大,且受动载影响更为显著;锚杆索+钢带主被动组合支护能够有效提高巷道围岩稳定性,显著增强巷道抗动载能力。

3) 考虑矿震的震动波传播规律,建立强矿震作用下巷道顶板失稳力学模型,推导锚固结构破坏判据,并提出锚固结构稳定性系数。当锚固结构稳定性系数等于1时,巷道顶板处于临界失稳状态。

4) 基于矿震诱发冒顶复合灾害的机理和主控因素分析,提出对巷道顶板进行断顶卸压、对围岩应力进行降载卸压、对巷道表面进行强支护的“深部断顶-浅部卸压-强化支护”控制对策。

参考文献:

- [1] 窦林名,田鑫元,曹安业,等.我国煤矿冲击地压防治现状与难题[J].煤炭学报,2022,47(1):152-171.
DOU Linming, TIAN Xinyuan, CAO Anye, et al. Present situation and problems of coal mine rock burst prevention and control in China[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 152-171.
- [2] 何满潮.深部建井力学研究进展[J].煤炭学报,2021,46(3):726-746.
HE Manchao. Research progress of deep shaft construction mechanics[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(3): 726-746.
- [3] 张家林,杨帆,张望,等.深部资源开采创新成效分析与思考[J].采矿与安全工程学报,2024,41(3):450-461.
ZHANG Jialin, YANG Fan, ZHANG Wang, et al. Innovation effectiveness analysis and technology management reflection of deep resource exploitation[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2024, 41(3): 450-461.
- [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] 刘学生,范德源,谭云亮,等.深部动载作用下超大断面硐室群锚固围岩破坏失稳机制研究[J].岩土力学,2021,42(12):3407-3418.
LIU Xuesheng, FAN Deyuan, TAN Yunliang, et al. Failure and instability mechanism of anchored surrounding rock for deep chamber group with super-large section under dynamic disturbances[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(12): 3407-3418.
- [6] 王官宝.石膏矿冒顶引发冲击地压机理及防治措施研究[D].武汉:武汉理工大学,2006.
- [7] 陆菜平,窦林名,吴兴荣,等.煤岩冲击前兆微震频谱演变规律的试验与实证研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(3):519-525.
LU Caiping, DOU Linming, WU Xingrong, et al. Experimental and empirical research on frequency-spectrum evolution rule of rockburst precursory microseismic signals of coal-rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(3): 519-525.
- [8] 张明.厚硬岩层矿井矿震与冲击复合动力灾害防控研究[D].北京:北京科技大学,2017.
- [9] 刘金铭.巷道冲击地压与巷道冒顶复合灾害研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2019.
- [10] 朱建波,马斌文,谢和平,等.煤矿矿震与冲击地压的区别与联系及矿震扰动诱冲初探[J].煤炭学报,2022,47(9):3396-3409.
ZHU Jianbo, MA Binwen, XIE Heping, et al. Differences and connections between mining seismicity and coal bursts in coal mines and preliminary study on coal bursts induced by mining seismicity[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(9): 3396-3409.
- [11] 窦林名,曹晋荣,曹安业,等.煤矿矿震类型及震动波传播规律研究[J].煤炭科学技术,2021,49(6):23-31.
DOU Linming, CAO Jinrong, CAO Anye, et al. Research on types of coal mine tremor and propagation law of shock waves[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(6): 23-31.
- [12] 曹安业.采动煤岩冲击破裂的震动效应及其应用研究[J].煤炭学报,2011,36(1):177-178.
CAO Anye. Research on seismic effort of burst and failure of coal-rock mass associated with mining and its application[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(1): 177-178.
- [13] 杨耀,曹安业,白贤栖,等.深井巨厚覆岩邻空采动强矿震孕育发生机理[J].煤炭科学技术,2023,51(12):220-231.
YANG Yao, CAO Anye, BAI Xianxi, et al. Occurrence mechanism of strong mining tremors under mining near goaf in deep mine with extremely thick strata[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(12): 220-231.
- [14] CAI J G, ZHAO J. Effects of multiple parallel fractures on apparent attenuation of stress waves in rock masses[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2000, 37(4): 661-682.

- [15] 姜福兴, 姚顺利, 魏全德, 等. 重复采动引发矿震的机理探讨及灾害控制[J]. 采矿与安全工程学报, 2015, 32(3): 349-355.
JIANG Fuxing, YAO Shunli, WEI Quande, et al. Tremor mechanism and disaster control during repeated mining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2015, 32(3): 349-355.
- [16] 陈治宇. 动载作用下锚固体应力波传递规律及其力学响应特性研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2021.
- [17] 史新帅. 基于多源信息的深部掘进煤巷冲击冒顶机理试验研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.
- [18] 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.
- [19] 温鹏飞. 顶板破断动载作用下巷道锚固系统的损伤规律研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
- [20] 曹恒将. 考虑动载的巷道顶板离层及控制的 FLAC^{3D}模拟研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2010.
- [21] 靖洪文, 吴疆宇, 尹乾, 等. 动载扰动下深部煤巷冲击冒顶的颗粒流数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(增刊 2): 3475-3487.
JING Hongwen, WU Jiangyu, YIN Qian, et al. Particle flow simulation of rock burst and roof fall of deep coal roadway under dynamic disturbance[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(Sup 2): 3475-3487.
- [22] 朱广安, 蒋启鹏, 伍永平, 等. 应力波扰动作用下断层滑移失稳的数值反演[J]. 采矿与安全工程学报, 2021, 38(2): 370-379.
ZHU Guang'an, JIANG Qipeng, WU Yongping, et al. Numerical inversion of dynamic behavior of fault slip instability induced by stress waves[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2021, 38(2): 370-379.
- [23] 徐芝纶. 弹性力学简明教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2018: 29-32.
- [24] 刘耀琪, 曹安业, 王崧玮, 等. 基于微震群震动波能量衰减特性的冲击地压危险预测方法[J]. 煤炭学报, 2022, 47(4): 1523-1533.
LIU Yaoqi, CAO Anye, WANG Songwei, et al. Prediction method of coal burst based on attenuation characteristics of seismic cluster energy[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(4): 1523-1533.
- [25] 曹安业, 范军, 牟宗龙, 等. 矿震动载对围岩的冲击破坏效应[J]. 煤炭学报, 2010, 35(12): 2006-2010.
CAO Anye, FAN Jun, MU Zonglong, et al. Burst failure effect of mining-induced tremor on roadway surrounding rock[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(12): 2006-2010.
- [26] WANG C B, CAO A Y, ZHANG C G, et al. A new method to assess coal burst risks using dynamic and static loading analysis[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020, 53(3): 1113-1128.