

厚煤层无煤柱切顶成巷碎石帮变形机制 及控制技术研究

高玉兵^{1,2}, 杨军^{1,2}, 何满潮¹, 王亚军^{1,2}, 高庆^{1,2}

(1. 中国矿业大学(北京)深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 北京 100083; 2. 中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京 100083)

摘要:为解决厚煤层切顶卸压自动成巷碎石帮控制难题,采用力学分析、数值模拟和工程试验相结合的研究方法,对厚煤层切顶成巷碎石帮变形机制和控制技术进行深入研究。通过建立动力学模型,探索成巷过程中矸体冲击的采高效应,明确厚煤层碎石帮变形受力机制和控制重点,进而提出动压防冲、缓压让位和恒压稳控的多层次控制思路。研究表明,采高增大后,空区矸体作用在挡矸结构上的冲击力和冲击能均会增加,从而形成了挡矸结构横向弯曲的启动条件,在顶板下压和侧向挤压作用下产生大变形,造成传统挡矸结构失效;工作面架后6 m范围内为主要冲击区,架设自移式动压防冲结构可将挡矸结构的个体受冲转换为集体承压,有助于耗散冲击能;矸体压实阶段为缓压过程,提出采用抗弯性更强的滑移式让位护帮结构。室内承载试验表明,该结构可保持恒载力实现与围岩协同变形,从而降低损坏率;为进一步提高碎石帮整体稳定性,设计制造波式多阻护帮结构,现场拉拔试验表明该结构性能满足支护要求,滞后工作面越远,固帮效果越显著。现场监测结果表明,新技术下围岩变形得到有效控制,碎石帮变形降低了约72%,挡矸结构损坏率降低了约85%,不仅解决了厚煤层切顶成巷碎石帮难控问题,且经济效益显著。

关键词: 采矿工程; 无煤柱开采; 厚煤层; 切顶卸压; 碎石帮变形; 围岩控制

中图分类号: TD 353

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2017)10 - 2492 - 11

Mechanism and control techniques for gangue rib deformations in gob-side entry retaining formed by roof fracturing in thick coal seams

GAO Yubing^{1,2}, YANG Jun^{1,2}, HE Manchao¹, WANG Yajun^{1,2}, GAO Qing^{1,2}

(1. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 2. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: Gangue rib control is one of the biggest challenges for gob-side entry retaining formed by roof fracturing in thick coal seams. In this paper, the mechanism and control techniques for gangue rib deformations were systematically investigated using theoretical analysis, numerical simulation and field experimental methods. First, mechanical and numerical models were developed respectively to explore the dynamic impact behaviors of the gangue body for different mining heights. Based upon the obtained results, a multi-level control approach was

收稿日期: 2017 - 07 - 28; **修回日期:** 2017 - 08 - 10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51674265, 51404248, 51304210)

Supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant Nos. 51674265, 51404248 and 51304210)

作者简介: 高玉兵(1989 -), 男, 2013年毕业于山东科技大学采矿工程专业, 现为博士研究生, 主要从事深部岩石力学理论及工程灾害防治方面的研究工作。E-mail: yubing_gao@163.com。通讯作者: 杨军(1979 -), 男, 博士, 现任副教授, 主要从事软岩工程岩体力学、岩土工程加固技术等方面的教学与研究工作。E-mail: yjlr@163.com

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2017.0949

proposed to address the instability problem of the gangue rib in thick coal seams. The results indicate that as the mining height increased, the impact force acted on the gangue prevention structure increased accordingly. The intense impact of the gangue body initiated the deformation of the conventional gangue prevention structure, and the roof sagging accelerated further its failure process. The severe impact area was within 6 m from the active mining panel, and an impact prevention device was designed to dissipate the impact energy. The variation of the lateral pressure was gentler within the compression area of the gangue rib. An individual support structure of sliding-type characterized by pressure release was designed and tested. Laboratory tests showed that the sliding-type structure coordinated effectively with the roof deformation, and thus improved massively its recycling utilization ratio. The anchor bolt of wave-type with multi-resistances was invented to further improve the monolithic stability of the gangue rib. Field pullout tests proved that the reinforcement effects of the structure were remarkable, especially when the structures were 60 m or far behind the active mining panel. The monitored results showed that the rib deformation decreased by appropriately 72% and the damage rate of the gangue prevention structures reduced by appropriately 85% after adopting the new approach. The proposed approach not only solved the rib control problems, but also brought about remarkable economic benefits.

Key words: mining engineering; non-pillar mining; thick coal seams; roof fracture and pressure release; gangue rib deformation; surrounding rock control

1 引言

切顶卸压自动成巷是一种新型的沿空留巷方式,其技术原理是借助矿山压力,主动控制巷道顶板和空区顶板的运动状态,利用采空区碎胀的矸石实现沿空护巷和无煤柱开采^[1-2]。由于该技术在解决工作面隅角瓦斯积聚、改善巷道应力环境、提高矿井经济效益等方面有一定优势,近几年在薄及中厚煤层中得到大量推广^[3-4]。

碎石帮的维护是影响切顶成巷效果的关键。薄及中厚煤层中,工字钢是常用的护帮结构,且护帮效果良好^[5]。进入厚煤层后,碎石帮出现了明显的帮鼓大变形现象,传统工字钢等挡矸结构损坏率大幅度增加,严重影响了其再次回收利用,增加了留巷成本。碎石帮控制难题能否解决直接影响到无煤柱切顶成巷技术能否于厚煤层中进一步推广应用。

我国学者在回采巷道围岩控制方面取得许多有意义的成果,例如,康红普等^[6-7]对沿空留巷围岩受力特征进行了研究,提出深部沿空留巷支护设计原则和控制技术;单仁亮等^[8]提出强帮护顶的设计概念,详细分析了巷道开挖引发的围岩力学响应,并论证了煤巷强帮护顶的支理论;张农等^[9-10]基于沿空巷道顶板结构传递原理,提出围岩区域应力优化和整体强化的控制思路;华心祝等^[11-12]分析了巷内支护与围岩变形、应力分布的关系,指出沿空留巷是一项系统工程,并揭示了沿空留巷巷内支护机制;黄庆享等^[13]研究了巷帮外错滑移机制,通过

建立自稳平衡拱模型,提出了适用于含软弱夹层厚煤层条件下的巷帮控制技术;何满潮等^[14-17]对软岩巷道大变形控制技术进行了大量研究,取得了良好的治理效果。然而,切顶卸压自动成巷过程中碎石帮受力和承压机制与普通巷帮有本质区别。普通巷帮一般由完整的结构体构成,多属静态控制,而碎石帮则由块状散体组成,散体结构在垮落至稳定过程中呈现出一定的冲压特性,致使碎石帮矿压显现更为剧烈。因此,常规护帮结构和控制方法应用于厚煤层切顶成巷时表现出明显的局限性。

鉴于此,本文以我国首个厚煤层切顶成巷试验项目为工程背景,综合运用数值模拟、室内试验及现场实测等研究方法对厚煤层切顶成巷碎石帮变形和受力机制进行了系统研究。首先明确了架后不同分区护帮结构的承压特性,进而提出动压防冲、缓压让位和恒压稳控的综合性控制体系,最终碎石帮变形得到有效控制。研究成果对厚煤层无煤柱切顶成巷技术的推广应用有重要的意义。

2 厚煤层切顶成巷碎石帮变形特征

2.1 工程概况

神南柠条塔煤矿属于神府东胜矿区,主采煤层之一为侏罗纪中统延安组2-2煤。试验工作面采用一次采全高、走向长壁后退式、综合机械化采煤,全部垮落法管理顶板。煤层厚度3.95~4.45 m,设计采高4.17 m,倾角小于2°,普氏硬度系数1.5~3.0。根据现场钻孔资料,试验段工作面顶板以砂岩

为主，直接顶为灰色薄层状粉砂岩，基本顶为浅白色细粒石英砂岩，岩层平均强度指数为 23.54 MPa，较为坚硬。

为验证厚煤层切顶成巷的可行性，于 S1201 工作面胶运顺槽进行现场留巷试验。试验巷道宽 6 000 mm，高 3 750 mm，采用锚网索耦合支护。留巷前，超前工作面进行巷道顶板预裂切缝和补强支护。预裂切缝采用钻孔聚能爆破，钻孔直径 46 mm，切顶高度 9 000 mm，切缝线与垂直方向夹角 10°。补强支护采用 35 t 恒阻大变形锚索，排距 1 000 mm，相邻恒阻大变形锚索间以 W 钢带连接。巷道正帮采用玻璃钢锚杆，副帮采用圆钢锚杆，临时支护采用墩式单元支架，单体支柱辅助支护，详细留巷参数见图 1。

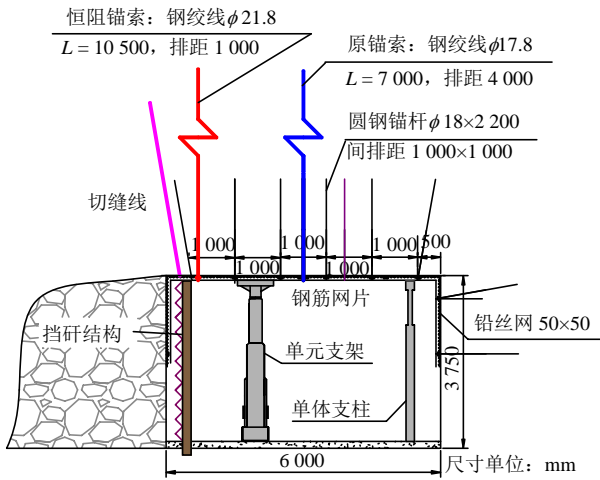
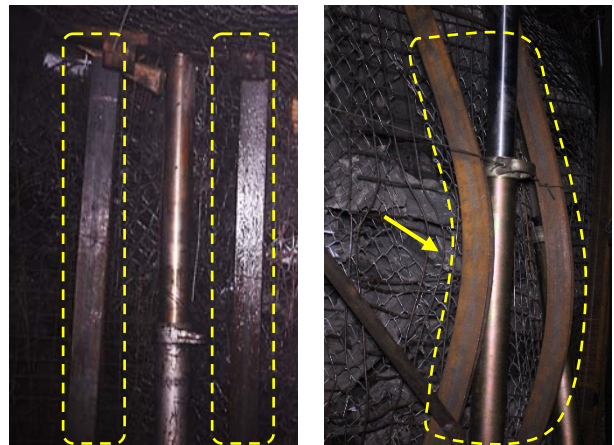


图1 S1201 胶运顺槽切顶成巷支护参数
Fig.1 Designed support parameters for the retained entry

2.2 碎石帮变形特征

随着工作面推采，采空区顶板岩体逐渐垮落，但垮落过程有一定的时效性，整体表现出“垮落→压实→稳定”的动态演变过程。垮落过程中矸体对巷旁挡矸结构有冲击作用，而压实过程中主要表现为横向挤压作用。薄及中厚煤层中，工字钢为常用的护帮结构，护帮效果满足留巷要求。例如，禾草沟煤矿 1105 工作面(平均煤厚 0.8 m)、哈拉沟煤矿 12201 工作面(平均煤厚 1.9 m)等均采用工字钢挡矸，挡矸效果良好。然而，采高增大后，碎石帮表现出明显的帮鼓大变形现象，传统挡矸结构大范围弯曲损坏，严重影响了其回收利用(见图 2)。可见，采高增大后，空区矸体表现出非常规的冲击、挤压特性，有必要探寻厚煤层碎石帮受力变形机制及应对措施。



(a) 哈拉沟煤矿中厚煤层 (b) 柠条塔煤矿厚煤层

图2 不同煤厚条件下传统挡矸结构现场支护图
Fig.2 Support conditions of the conventional joist steels for different mining heights

3 厚煤层碎石帮变形机制分析

3.1 矸体冲击力学模型

现场试验时发现，采空区顶板岩体垮落和堆叠是一个渐进的过程。起始阶段，顶板多为垂直冒落，此时对挡矸结构影响很小。随着工作面逐渐推采，垮落的矸石极易形成空区内部高，挡矸结构处低的斜坡结构。当顶板再次来压时，垮落的矸石就会沿着坡体向下运动，对挡矸结构造成冲击。为揭示矸体冲击的采高效应，基于现场观测到的冲击现象，建立矸体冲击力学模型(见图 3)。

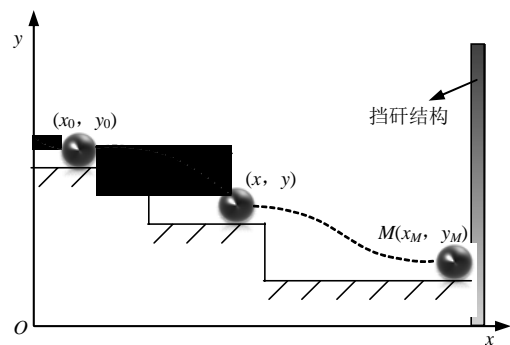


图3 碎石帮矸体垮落冲击模型
Fig.3 Caving and impact model for the gangue body

假设模型中坡面是由已垮落矸石堆叠而成的台阶结构组成。矸体简化为质量均匀分布的刚性球体。矸体于坡面上的运动抽象为腾跃运动，由于坡距很短且坡角较小，因此这里忽略矸体与坡面间的摩擦。现场矸体多为块状，运动过程中的转动能增加很少，矸体冲击挡矸结构前的能量损失主要由坡面塑性变形引起。

矸体运动过程可分为两大部分：自由落体和腾越运动。假设矸体与堆叠坡体间的初始高度差为 H ，则矸体与坡面接触时的初速度可表示为

$$v_0 = \sqrt{2gH} \quad (1)$$

矸体腾跃可近似描述为物理学中的斜抛运动^[18]，运动过程中矸石往往会越过若干阶梯坡面。假设矸体运动轨迹方程为

$$f(x, y) = 0 \quad (2)$$

根据几何关系，坐标 (x, y) 处的速度可表示为

$$v = \sqrt{2gH \cos^2 \beta + \left(\sqrt{2gH \sin \beta} + g \frac{x - x_0}{\sqrt{2gH \cos \beta}} \right)^2} \quad (3)$$

式中： x_0 为矸石碰击坡体时的初始横向位置， β 为矸体运动速度方向与水平方向夹角。

运动轨迹方程可表示为

$$\frac{2v_{0x}^2}{g}(y - y_0) + (x - x_0)^2 + \frac{2v_{0x}v_{0y}}{g}(x - x_0) = 0 \quad (4)$$

假设挡矸结构位于 M 位置 (x_M, y_M) ，则矸体撞击至防护上的速度可导出为

$$v_M = \sqrt{2gH \cos^2 \beta + \frac{[gH \sin(2\beta) + x_M - x_0]^2}{2H \cos^2 \beta}} g \quad (5)$$

考虑到碰撞过程中的能量损失，设恢复系数为 R ，则传递至挡矸结构上的冲击能为

$$E_p = mgHR^2 \cos^2 \beta + \frac{[gH \sin(2\beta) + x_M - x_0]^2}{4H \cos^2 \beta} mgR^2 \quad (6)$$

式中： m 为矸体质量。

将式(6)展开可知，冲击能为 H 的增函数。因而，采高增大后，矸体作用在挡矸结构上的冲击能增加，从而形成挡矸结构横向弯曲的启动条件，在顶板下压和侧向挤压作用下产生大变形。

3.2 矸体动压冲击数值模拟

3.2.1 控制方程

矸体冲击模拟采用显式动力学分析软件 LS-DYNA 进行求解，该软件在模拟冲击、侵彻、爆破等明显非线性问题有明显优势，分析过程中采用的基本控制方程^[19-20]如下：

(1) 运动方程

采用 Lagrangian 描述增量算法，取初始时刻的质点坐标为 X_i ，在任意 t 时刻，质点坐标为 x_i ，则质点的运动方程为

$$x_i = x_i(X_j, t) \quad (i, j = 1, 2, 3) \quad (7)$$

(2) 动量方程：

$$\sigma_{ij,j} + \rho f_i = \rho \ddot{x}_i \quad (8)$$

式中： σ_{ij} 为 Cauchy 应力， f_i 为单位质量体积力， \ddot{x}_i 为加速度。

(3) 质量守恒方程：

$$\rho V = \rho_0 \quad (9)$$

式中： ρ 为当前质量密度； ρ_0 为初始质量密度； V 为相对体积， $V = |\partial x_i / \partial x_j|$ 。

(4) 能量方程：

$$\dot{E} = VS_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} - (p + q)\dot{V} \quad (10)$$

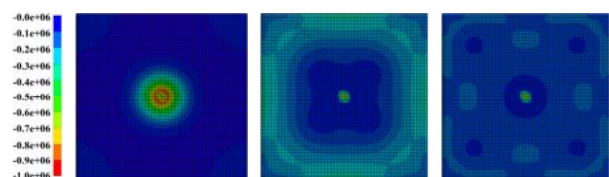
式中： \dot{V} 为现时构形体积， $\dot{\epsilon}_{ij}$ 为应变率张量， p 为压力， q 为体积黏性阻力。该方程主要用于总能量平衡计算。

模拟过程中首先对研究区域有限单元离散化，以上述控制方程为基础，采用沙漏黏性阻尼控制零能模式，并以显式中心差分法进行时间积分和步长控制求解。

3.2.2 模拟结果

根据理论分析可知，其他条件不变时，采高增大后，矸体作用在挡矸结构上的速度和动能均会增加。模拟过程中假设矸体垮落高度即为采高，矸体简化为刚性球体(直径 0.5 m)，以相同斜角作用在防冲板上。以禾草沟煤矿薄煤层(平均煤厚 0.8 m)、哈拉沟煤矿中厚煤层(平均煤厚 1.9 m)和柠条塔煤矿厚煤层(平均煤厚 4.1 m)为背景分别进行矸体冲击模拟。

图 4 为不同采高条件下相同时间步防冲结构压力演化图。可以发现，采高增大后，矸体冲击至挡矸结构上的冲击力峰值会增加。薄煤层条件下，矸体最大冲击力为 0.91 MPa，当采高增加至 1.9 m 时，最大冲击力增加至 2.06 MPa，而厚煤层条件下最大冲击力达到 3.62 MPa。从压力演化过程可知，压力集中区由冲击中心向边角逐渐过渡扩散，防冲板上整体压力随采高增大而增加，且冲击剩余压力亦与采高呈正相关关系。可见，矸体冲击有明显的采高效应，针对厚煤层碎石帮变形受力特征，应提出针对性的控帮措施。



(a) 采高 0.8 m

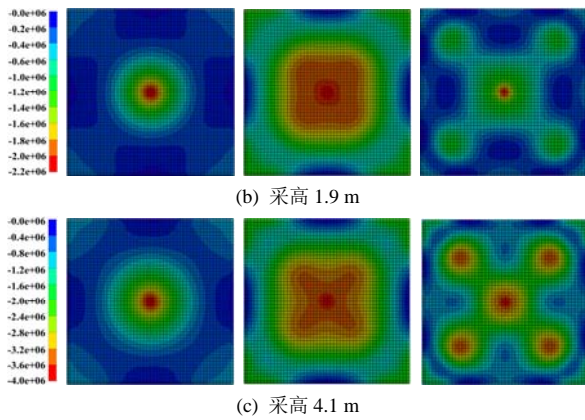


图4 不同采高条件下矸体冲击压力演化(单位: Pa)

Fig.4 Impact pressure evolution for different mining heights(unit: Pa)

4 厚煤层切顶成巷碎石帮控制研究

通过对不同采高条件下矸体垮落冲击分析可知,厚煤层切顶成巷矸体运动有其特殊性:矸体对挡矸结构的冲击性更强,且稳定后的矸石堆对挡矸结构的剩余侧向挤压力较薄及中厚煤层更大。传统挡矸结构应用至厚煤层时,在侧向强冲击作用下,首先形成了挡矸结构横向弯曲的启动条件,而后在顶板下压和侧向挤压作用下,再次增加了其变形量,造成碎石帮整体稳定性降低。

根据不同区域碎石帮受压特征,对柠条塔煤矿S1201胶运顺槽留巷段进行分区控制(见图5)。超前工作面区只进行预裂切缝,工作面未开采,无需考虑挡矸问题;滞后工作面6m范围内为主要冲击区,采空区顶板岩体以垮落为主,该区受动压冲击最严重,为主要防冲控制区;滞后工作面约142m之内为主要压实区,该巷段主要以矸体压实为主,侧压变化较为平缓;之后即为稳定区,碎石帮受力达到平衡。

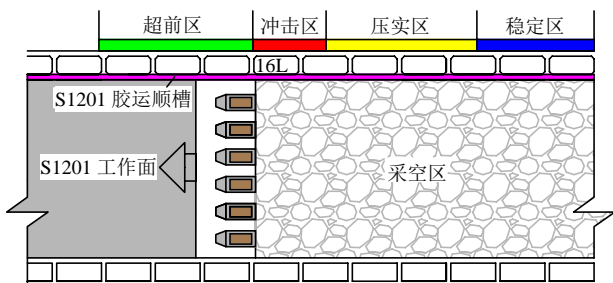


图5 碎石帮控制分区

Fig.5 Partitions of the gangue rib control

针对以上分区特征,本文提出了厚煤层切顶成巷碎石帮针对性的控制结构和措施,并通过室内试

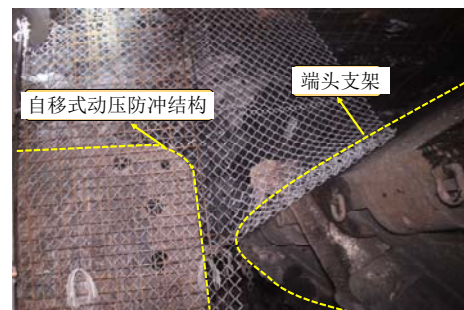
验和现场试验进行了结构性能评价和参数优化。

4.1 动压防冲控制

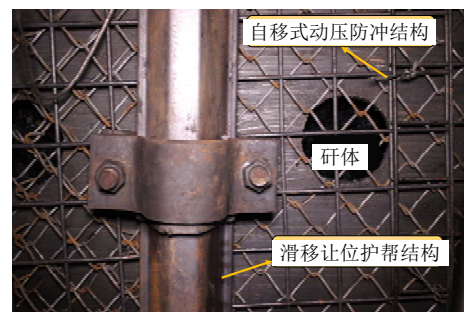
动压冲击是厚煤层切顶成巷挡矸结构失效的诱发条件。现场可从两方面进行动压控制:一是从源头上减少矸体单次冲击动能,二是优化护巷措施,耗散冲击能。

通过式(6)可知,在采高确定的情况下,减少矸体质量(尺寸)可一定程度上减少单次冲击能。矸体尺寸不仅与顶板岩性有关,与预裂切顶效果关系很大,合理的切顶参数有助于降低冲击动载。通过修改切顶参数,可一定程度上控制顶板垮落速度和矸块尺寸。切顶参数优化主要通过现场试验,对爆破能、孔间距、爆破模式等进行优化,通过钻孔窥视和矸块尺寸统计,最终确定合理参数。柠条塔煤矿S1201胶运顺槽采用单孔“3卷+3卷+3卷+3卷+2卷”的装药结构,孔距600mm,联孔连续爆破,垮落效果较好。

优化护巷措施方面,设计制造了冲击区自移式动压防冲结构(见图6)。该结构采用可变形钢,可有效吸收冲击能。该结构长6000mm,高2500mm,随端头架自移,与端头架尾柔性连接,可实现纵向调节,有效减缓作用在个体挡矸结构上的集中冲击荷载。



(a)



(b)

图6 自移式动压防冲结构现场挡矸

Fig.6 Gangue prevention using the impact pressure control structure in the field

图7为矸体冲击模拟过程中防冲结构整体能量

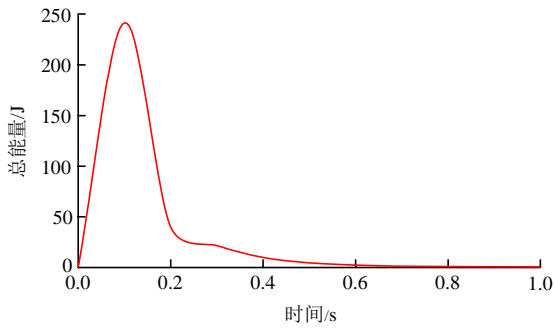


图 7 矸体冲击过程防冲结构能量变化

Fig.7 Energy variation in the impact pressure control structure during the impact process

变化曲线，可见，矸体冲击至防冲板上后，冲击能逐渐转化为防冲结构的内能并逐渐消散，防冲结构起到很好的缓冲耗能作用。

4.2 缓压让位控制

4.2.1 滑移式让位护帮结构

厚煤层切顶成巷矸石压实过程中侧帮压力较薄及中厚煤层更大。此外，由于采高增大，采空区矸石垮满开采空间所需的时间更长，导致切缝侧不可避免得存在少量回转变形。因此，厚煤层切顶成巷挡矸结构不仅应有较强的抗横向变形能力，且需实现一定程度的纵向让位，方可适应围岩变形。

根据以上围岩变形特征提出采用滑移式让位护帮挡矸结构(见图 8)。该挡矸结构由两节 U 型钢叠加而成，两节 U 型钢用卡揽衔接，纵向方向可实现相对滑移，滑移力大小通过调节卡揽预紧实现。U 型钢结构本身较工字钢结构具有更强的抗横向变形能力，两节 U 型钢叠加后更加增强了其整体抗弯性能，从而保证巷道顶板作用力始终沿轴向。

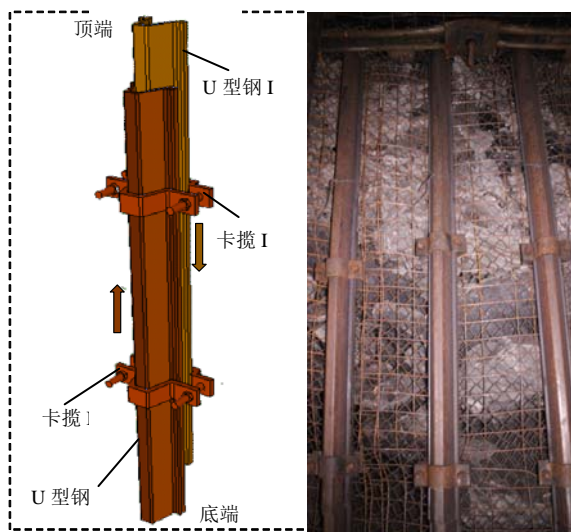


图 8 滑移式让位护帮挡矸结构

Fig.8 Sliding type of gangue prevention structure

现场挡矸过程中，为减少该结构的横向偏移，顶端采用单体支柱主动控制，底端在底板刨坑固定。当顶板有大的来压时，让位滑移可避免弯曲条件启动，从而大幅度降低损坏率。可见，滑移式让位护帮结构不仅具有良好的抗弯性能，有效阻止碎石外鼓，且具备让位让压功能，实现与顶板协同变形。

4.2.2 滑移式让位护帮结构室内承载试验

现场应用滑移式让位护帮挡矸结构时发现，卡揽螺栓扭矩大小对护帮效果影响明显。若螺栓扭矩过小，挡矸效果差，容易出现斜偏现象；若扭矩过大，护帮结构让位功能受到限制，容易出现横向弯曲，因此，螺栓扭矩的确定至关重要。为模拟顶板来压过程中滑移式让位护帮结构的力学滑移行为，取现场挡矸结构进行室内承载试验。

(1) 试验方案及过程

滑移式让位护帮结构通过吊车安装。试件一端固定，另一端通过油泵施加荷载。施加荷载端安装有压力和位移传感器，通过控制器及电缆传输至电脑，实时记录荷载和滑移量变化过程(见图 9)。

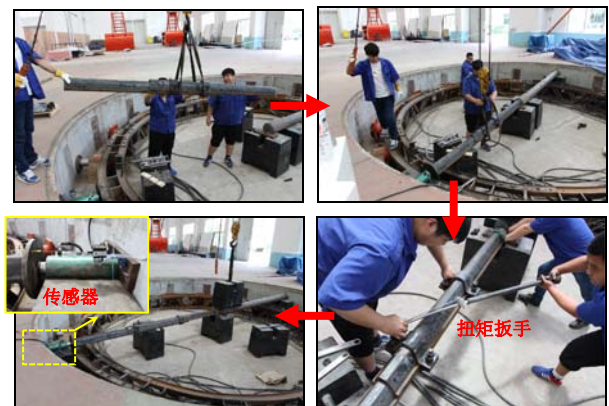


图 9 滑移式让位护帮挡矸结构室内承载试验过程

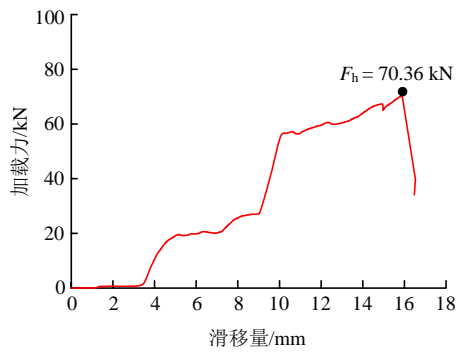
Fig.9 Bearing test of the sliding type of gangue prevention structure in the laboratory

根据现场实施情况，试验中扭矩大小分别取 100, 200, 300, 400, 450 和 500 N·m。试验过程中用扭矩扳手控制扭矩，卡揽上 4 个螺母施加的扭矩大小相等，然后进行轴向恒速加载，记录不同扭矩条件下滑移量与轴向荷载间的作用关系。

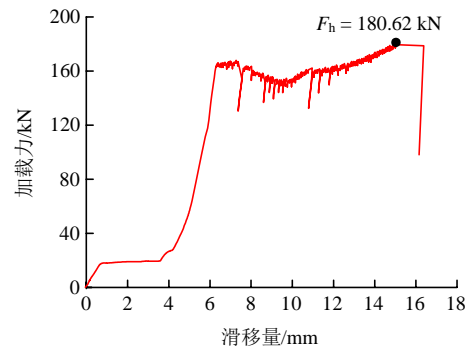
(2) 试验结果

图 10 为不同扭矩条件下轴向荷载与滑移量关系曲线。通过分析试验结果，可得出以下结论：

① 不同扭矩条件下，每个循环加载曲线变化过程相似。根据变化特征，可将加载曲线划分为 5 个阶段：压力缓增段、压力不变段、压力快增段、压力恒阻段和压力卸载段。以扭矩为 500 N·m 时为例



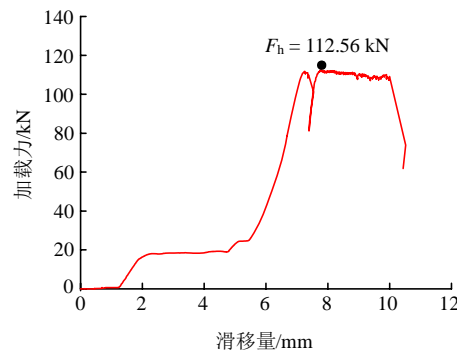
(a) 扭矩 = 100 N · m



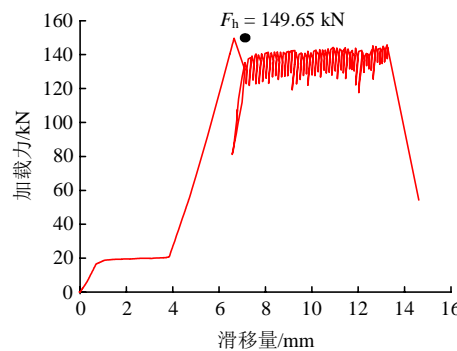
(f) 扭矩 = 500 N · m

图 10 不同扭矩条件下护帮结构承载滑移曲线

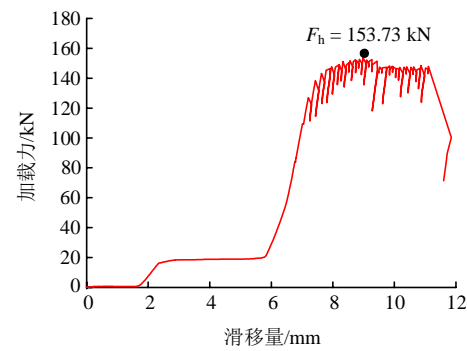
Fig.10 Bearing and yielding behaviors of the sliding type of gangue prevention structure



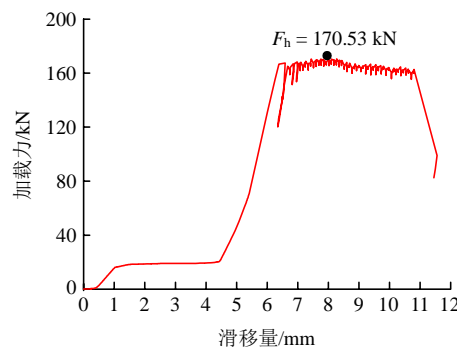
(b) 扭矩 = 200 N · m



(c) 扭矩 = 300 N · m



(d) 扭矩 = 400 N · m



(e) 扭矩 = 450 N · m

分析，起始加载阶段相对滑移量在 0~1 mm 范围，加载力增加缓慢。增加至 19 kN 时，进入第二阶段，保持 19 kN 几乎不变。而后轴向荷载与滑移量近乎成直线关系增加，此时两节 U 钢间的静滑移力逐渐增加。增加至 166 kN 左右进入恒阻阶段，滑移量增加但轴向荷载在很小范围内波动，此段最为关键，保证护帮结构与顶板协同变形；随着滑移量继续增加，轴向荷载出现骤降，说明两节 U 型钢出现了瞬间滑移，继续加载会重复以上变化过程。

② 不同扭矩条件下，轴向荷载峰值(近似等于恒载值)差别较大，整体趋势是随着扭矩增大，荷载峰值随之增大(见图 11)。拟合过程中发现，最大轴向荷载与施加的扭矩呈明显的线性关系，拟合方程为

$$F_h = 0.259M + 55.583 \quad (R^2 = 94.33\%) \quad (11)$$

式中： F_h 为最大轴向荷载， M 为螺栓扭矩。

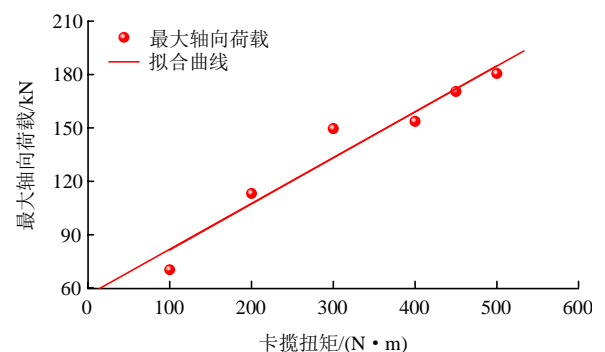


图 11 最大轴向荷载与卡揽扭矩拟合关系

Fig.11 The relation of the maximum sliding force and torque

架后冲击区和压实区需进行巷内临时支护，S1201 胶运顺槽临时支护采用墩式单元支架，支架上安装有压力传感器，可实时了解切缝侧顶板压力变化。根据现场测得的巷道顶板压力，通过式(11)可反演出所需施加的合理扭矩，进而进一步优化挡

研参数。

4.3 恒压稳定控制

自移式动压防冲结构和滑移式让位护帮结构主要应对矸体垮落和压实两个动态变化过程。根据挡土墙理论，若墙体高度增加后(采高增大)，其稳定性和抗倾覆性会有所降低。为进一步增强碎石帮整体稳定性，设计制造厚煤层切顶成巷波式多阻护帮结构，提高碎石帮整体稳定和承载性能。

4.3.1 波式多阻护帮结构

波式多阻护帮结构基于锚杆支护原理，专门应对大变形碎石帮。该结构由钢杆体、尖头及若干阻结组成。其中，杆体设计成螺纹状，目的是增大与采空区矸石间的摩擦。为增强护帮效果，该护帮结构前端设计成尖型，杆体焊接多个阻结，阻结为漏斗状，直径由尖端向尾部依次增大，具体参数见图 12。

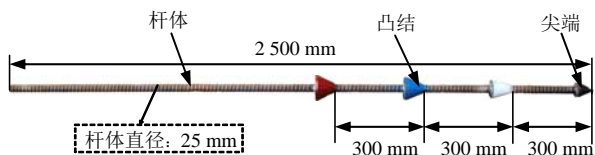


图 12 波式多阻护帮结构

Fig.12 Wave type of gangue prevention structure

4.3.2 加固原理

波式多阻护帮结构紧随工作面施工，此时垮落的矸体比较松散且易于施工。随着工作面回采，基本顶上位岩层发生周期性断裂，碎石帮会越压越实。由于杆体为螺纹多波式，因此该结构可近似看作全长锚固锚杆，杆体及阻结通过黏结摩擦稳固碎石帮。

采空区垮落的矸石可近似看作重力式挡土墙，波式多阻结构用来平衡一部分侧压力。根据挡土墙理论^[21]，作用于加固后的碎石帮侧压力主要由两部分构成，即垮落堆叠矸石作用于墙背上产生的压力和顶部基本顶下压产生的压力。主动堆叠压力的水平分量^[22]可表示为

$$P_{i1} = \frac{1}{2} \gamma H^2 K_a \cos(\alpha + \delta) \quad (12)$$

式中： α 为碎石帮倾角， δ 为矸体与挡研结构的摩擦角， H 为矸体堆叠高度， γ 为矸体平均容重， K_a 为主动压力系数。

基本顶岩层下压荷载作用下，按应力扩散角法计算竖向压力，得出附加水平压力为

$$P_{i2} = K_0 \frac{\gamma h_0 L_0}{L'_i} \quad (13)$$

式中： K_0 为静止压力系数， h_0 为基本顶下压荷载换算矸体高度， L_0 为基本顶下压荷载换算矸体宽

度， L'_i 为多阻护帮结构的支护扩散宽度。

根据静力平衡原理，考虑到滑移式让位护帮结构的侧向挡研作用，则多阻护帮结构的稳定性判据条件可表示为

$$P_{i1} + P_{i2} - F_1 K_c \leq [T] \quad (14)$$

式中： K_c 为滑移式让位护帮结构与巷道顶底板的摩擦因数； F_1 为巷道顶板作用于挡研结构上的轴向荷载； $[T]$ 为多阻护帮结构与矸石间的极限抗滑力，可近似为拉拔值。

4.3.3 波式多阻护帮结构现场拉拔试验

(1) 安装过程

为检验波式多阻护帮结构作用效果，进行现场拉拔试验(见图 13)。施工位置为滞后工作面 10 m 范围之内，采用专制甩锤施工。施工时将甩锤端头与结构尾部连接，前后快速移动锤体，依靠瞬时冲击力完成安装，施工过程见图 13(b)。

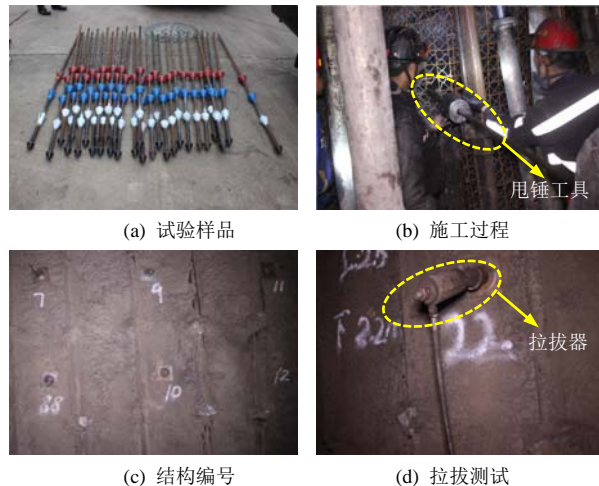


图 13 波式多阻护帮结构施工和拉拔过程

Fig.13 Installation and pullout test of the wave type of gangue prevention structure

(2) 拉拔效果

对滞后工作面不同距离波式多阻护帮结构编号并进行拉拔测试。试验时首先将特制拉拔器与杆尾连接，后将油管与油泵连接。拉拔前检查油管是否有漏油现象，数显表是否正常，待准备充分后进行加压拉拔，试验过程中记录拉拔位置及拉拔力峰值。

图 14 为滞后工作面不同位置拉拔值统计结果。拉拔过程中发现，拉拔值出现明显的波动现象，但滞后工作面越远，最终拉拔值越大。拉拔位置距工作面 10 m 时，拉拔值开始快速增加，60 m 时拉拔力增长变缓，80 m 左右拉拔值趋于稳定。对拉拔结果进行非线性拟合，可决系数达到 97.92%，拟合优

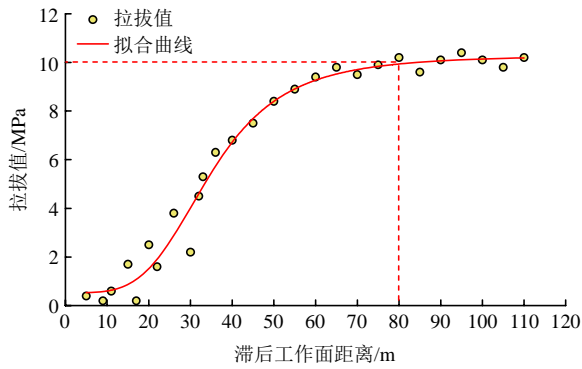


图 14 多阻护帮结构现场拉拔试验结果

Fig.14 Field pullout test results of the wave type of gangue prevention structure

度良好，拟合方程为

$$T_i = 10.29 - \frac{10.29 - 0.53}{(1 + l/34.80)^{3.94}} \quad (15)$$

式中： T_i 为最大拉拔值， l 为滞后工作面距离。

采空区矸石垮落和压实是一个渐进过程，滞后工作面越远压得越实，阻结与矸石间阻力越大，因此拉拔力越大。所设计的固帮结构最大拉拔值达到 10.3 MPa，与普通锚杆相比，完全满足固帮要求。值得注意的是，由于顶板岩性会影响矸体垮落状态，切顶参数改变也会一定程度上影响矸体形态，因此不同矿区固帮结构的极限抗滑力会有所差别。

5 碎石帮控制效果分析

为验证厚煤层切顶成巷碎石帮控制效果，对 S1201 胶运顺槽碎石帮进行现场变形监测。在传统挡矸结构支护段和新提控帮方案支护段分别布置两组测站，进行为期 60 d 的持续性监测。其中，测点 1 和 2 位于常规挡矸支护段，测点 3 和 4 位于新技术支护段，监测位置均为巷中。

图 15 为不同护帮方案下碎石帮变形量及变形速率统计结果。可见，常规工字钢支护条件下，碎石帮最大变形量平均为 517 mm，挡矸初期即有较大冲击变形；采取新方案后，最大变形量平均为 145 mm，较常规支护变形降低了约 72%。图 16 为 2 种支护条件下现场巷帮变形图，常规挡矸结构处出现了明显的侧向大变形，尤其巷帮中下部，侧偏外鼓严重；采取新方案后，巷帮平整竖直。可见，新型支护体系可有效降低碎石帮变形幅度，减缓变形速率，保证巷道稳定性。据统计，新方案下护帮结构损坏率降低了约 85%，不仅控制效果良好，且经济效益显著。

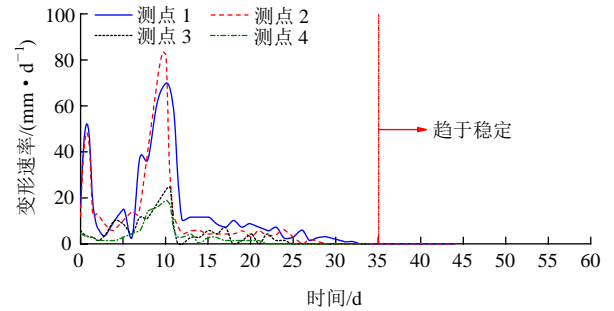
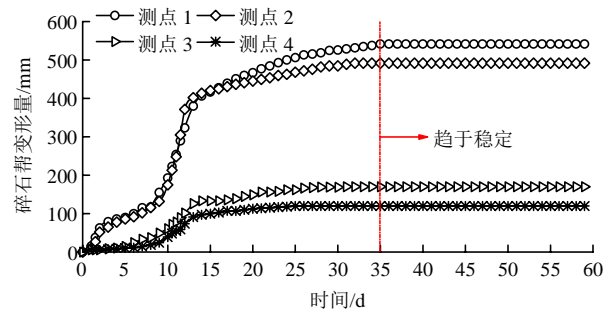


图 15 不同护帮方案碎石帮变形监测结果

Fig.15 Monitored results of the gangue rib deformations using conventional and newly proposed approaches



(a) 常规护帮方案



(b) 新型支护体系

图 16 不同护帮方案碎石帮变形现场写照

Fig.16 Photos of the gangue rib deformations using conventional and newly proposed approaches

6 结 论

(1) 传统挡矸结构应用至厚煤层切顶成巷碎石帮防控时出现了明显的帮鼓大变形现象。通过动力学理论分析和冲击数值模拟分析发现，采高增大后，空区矸体作用在挡矸结构上的冲击速度、冲击能、冲击力和侧向稳定挤压力均会增大。动压冲击形成了常规挡矸结构横向弯曲的启动条件，而后在矸体侧向挤压和顶板下压作用下，造成传统挡矸结构失效和碎石帮大变形。

(2) 基于碎石帮变形机制, 提出了厚煤层切顶成巷动压防冲、缓压承载和恒压稳控的综合性控帮体系。其中, 动压冲击区内设计采用自移式动压防冲结构, 该结构可将矸体冲击动能转化为板体内能, 并逐渐耗散, 减少个体受力集中; 缓压区内提出采用滑移式让位护帮结构, 该结构不仅抗横向变形能力强, 且能实现纵向让位, 协同顶板变形, 有效减少结构失效率; 为进一步提高碎石帮整体稳定性, 设计制造了波式多阻护帮结构。室内试验和现场试验表明, 以上护帮结构力学性能 and 支护效果均满足支护要求, 控帮效果良好。

(3) 现场监测表明, 新支护体系有效解决了厚煤层切顶成巷碎石帮大变形问题。巷帮平均变形幅度降低了约 72%, 变形速率明显减缓。挡矸结构损坏率降低了约 85%, 具有显著的经济效益。现场工业性试验验证了新支护体系应用至厚煤层切顶成巷碎石帮防治中的优越性和可靠性。

参考文献(References):

- [1] 何满潮, 高玉兵, 杨 军, 等. 无煤柱自成巷聚能切缝技术及其对围岩应力演化的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(6): 1 314 - 1 325.(HE Manchao, GAO Yubing, YANG Jun, et al. The energy-gathered roof cutting technique in non-pillar mining and its impact on stress evolution of surrounding rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(6): 1 314 - 1 325.(in Chinese))
- [2] 张国锋, 何满潮, 俞学平, 等. 白皎矿保护层沿空切顶成巷无煤柱开采技术研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(4): 511 - 516.(ZHANG Guofeng, HE Manchao, YU Xueping, et al. Research on the technique of no-pillar mining with gob-side entry formed by advanced roof caving in the protective seam in Baijiao coal mine[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2011, 28(4): 511 - 516.(in Chinese))
- [3] 孙晓明, 刘 鑫, 梁广峰, 等. 薄煤层切顶卸压沿空留巷关键参数研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(7): 1 449 - 1 456.(SUN Xiaoming, LIU Xin, LIANG Guangfeng, et al. Key parameters of gob-side entry retaining formed by roof cut and pressure releasing in thin coal seams[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(7): 1 449 - 1 456.(in Chinese))
- [4] 宋立兵. 神东矿区切顶卸压成巷技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(8): 80 - 85.(SONG Libing. Study on roof cutting, pressure released and gateway driving technology in Shendong mining area[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(8): 80 - 85.(in Chinese))
- [5] 郭志飏, 王 将, 曹天培, 等. 薄煤层切顶卸压自动成巷关键参数研究[J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(5): 879 - 885.(GUO Zhibiao, WANG Jiang, CAO Tianpei, et al. Research on key parameters of gob-side entry retaining automatically formed by roof cutting and pressure release in thin coal seam mining[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2016, 45(5): 879 - 885.(in Chinese))
- [6] 康红普, 牛多龙, 张 镇, 等. 深部沿空留巷围岩变形特征与支护技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(10): 1 977 - 1 987.(KANG Hongpu, NIU Duolong, ZHANG Zhen, et al. Deformation characteristics of surrounding rock and supporting technology of gob-side entry retaining in deep coal mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(10): 1 977 - 1 987.(in Chinese))
- [7] 康红普, 范明建, 高富强, 等. 超千米深井巷道围岩变形特征与支护技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(11): 2 227 - 2 241.(KANG Hongpu, FAN Mingjian, GAO Fuqiang, et al. Deformation and support of rock roadway at depth more than 1 000 meters[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(11): 2 227 - 2 241.(in Chinese))
- [8] 单仁亮, 孔祥松, 蔚振廷, 等. 煤巷强帮支护理论与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(7): 1 304 - 1 314.(SHAN Renliang, KONG Xiangsong, WEI Zhenting, et al. Theory and application of strong support for coal roadway sidewall[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(7): 1 304 - 1 314.(in Chinese))
- [9] 张 农, 韩昌良, 阚甲广, 等. 沿空留巷围岩控制理论与实践[J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1 635 - 1 641.(ZHANG Nong, HAN Changliang, KAN Jiaguang, et al. Theory and practice of surrounding rock control for pillarless god-side entry retaining[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1 635 - 1 641.(in Chinese))
- [10] 赵一鸣, 张 农, 郑西贵, 等. 千米深井厚硬顶板直覆沿空留巷围岩结构优化[J]. 采矿与安全工程学报, 2015, 32(5): 714 - 720.(ZHAO Yiming, ZHANG Nong, ZHENG Xigui, et al. Structural optimization of overlying strata for gob-side entry retaining in 1 000 m deep mine with direct thick and hard roof[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2015, 32(5): 714 - 720.(in Chinese))
- [11] 华心祝, 赵少华, 朱 昊, 等. 沿空留巷综合支护技术研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(12): 2 225 - 2 228.(HUA Xinzhu, ZHAO Shaohua, ZHU Hao, et al. Research on combined support technique of gob-side entry retaining[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(12): 2 225 - 2 228.(in Chinese))
- [12] 陈 勇, 柏建彪, 王襄禹, 等. 沿空留巷巷内支护技术研究与应用[J]. 煤炭学报, 2012, 37(6): 903 - 910.(CHEN Yong, BAI Jianbiao, WANG Xiangyu, et al. Support technology research and application inside roadway of gob-side entry retaining[J]. Journal of

- China Coal Society, 2012, 37(6): 903 - 910.(in Chinese))
- [13] 黄庆享, 赵萌焯, 张强峰, 等. 含软弱夹层厚煤层巷帮外错滑移机制与支护研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(8): 2 353 - 2 358.(HUANG Qingxiang, ZHAO Mengye, ZHANG Qiangfeng, et al. Mechanisms of outward dislocation sliding of roadway sides and its support in a thick coal seam with a soft mudstone interlayer[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(8): 2 353 - 2 358.(in Chinese))
- [14] 何满潮. 深部软岩工程的研究进展与挑战[J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1 409 - 1 417.(HE Manchao. Progress and challenges of soft rock engineering in depth[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1 409 - 1 417.(in Chinese))
- [15] 何满潮, 袁越, 王晓雷, 等. 新疆中生代复合型软岩大变形控制技术及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(3): 433 - 441.(HE Manchao, YUAN Yue, WANG Xiaolei, et al. Control technology for large deformation of mesozoic compound soft rock in Xinjiang and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(3): 433 - 441.(in Chinese))
- [16] 何满潮, 张国锋, 王桂莲, 等. 深部煤巷底臌控制机制及应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增 1): 2 593 - 2 598.(HE Manchao, ZHANG Guofeng, WANG Guilian, et al. Research on mechanism and application to floor heave control of deep gateway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(Supp.1): 2 593 - 2 598.(in Chinese))
- [17] 孙晓明, 何满潮, 杨晓杰. 深部软岩巷道锚网索耦合支护非线性设计方法研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(7): 1 061 - 1 065.(SUN Xiaoming, HE Manchao, YANG Xiaojie. Research on nonlinear mechanics design method of bolt-net-anchor coupling support for deep soft rock tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(7): 1 061 - 1 065.(in Chinese))
- [18] 赵旭, 刘汉东. 水电站高边坡滚石防护计算研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(20): 144 - 150.(ZHAO Xu, LIU Handong. Research on protective structures for high slopes rockfall around a hydropower station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(20): 144 - 150.(in Chinese))
- [19] Livermore Software Technology Corporation. LS-DYNA Keyword User's Manual[R]. Livermore: Livermore Software Technology Corporation, 2006: 5 - 16.
- [20] 石少卿, 康建功, 汪敏, 等. ANSYS/LS-DYNA 在爆炸与冲击领域中的工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011: 5 - 8.(SHI Shaoqing, KANG Jianguo, WANG Min, et al. Engineering application of ANSYS/LS-DYNA in explosion and impact fields[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2011: 5 - 8.(in Chinese))
- [21] 朱彦鹏, 罗晓辉, 周勇. 支挡结构设计[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008: 1 - 6.(ZHU Yanpeng, LUO Xiaohui, ZHOU Yong. Retaining structure design[M]. Beijing: Higher Education Press, 2008: 1 - 6.(in Chinese))
- [22] 朱彦鹏, 杨校辉, 马孝瑞, 等. 柔性加固失稳重力式挡土墙的动静力稳定性分析[J]. 工程力学, 2005, 32(11): 1 - 8.(ZHU Yanpeng, YANG Xiaohui, MA Xiaorui, et al. Statics and dynamic stability of unstability gravity retaining wall reinforced with frame-anchors[J]. Engineering Mechanics, 2005, 32(11): 1 - 8.(in Chinese))