

* 慈林山煤矿高水材料巷旁充填沿空留巷技术研究

宋江涛

(山西潞安矿业集团 慈林山煤业有限公司 慈林山煤矿,山西 长治 046000)

摘要:为有效缓解慈林山煤矿采掘接续紧张的现状,在9107工作面开展沿空留巷工程实践。采用理论计算的方法得到9107工作面回风顺槽所需的巷旁支护阻力(8.8 MN/m)。通过建立FLAC3D数值计算模型,系统研究了不同充填体宽度、强度和顶板支护条件下的巷道围岩稳定性。研究表明:采用水灰质量比为1.5的高水材料作为充填材料,充填体宽度为1.4 m,高度为1.6 m时,可以保证充填体结构的稳定性;在此基础上,结合慈林山煤矿实际生产地质条件,提出“对拉锚杆+竖向梯子梁组合+支护体顶板支护”的高水材料巷旁充填体结构设计,有效地控制了巷旁充填体的横向变形,并提高了巷旁支护体的纵向承载能力。现场工业性试验表明,高水材料巷旁充填沿空留巷技术在慈林山煤矿取得了良好的效果,具有广泛的应用价值。

关键词:沿空留巷;高水材料;参数设计;加强支护;控制技术

中图分类号:TD353

文献标识码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Gob-Side Entry Retaining Technology with High Water Material Roadside Filling in Cilinshan Coal Mine

SONG Jiangtao

(Cilinshan Coal Industry Co., Ltd., Shanxi Lu'an Mining Group, Changzhi 046000, China)

Abstract: In order to solve the imbalance problems between coal mining and roadway excavation in Cilinshan Mine, gob-side entry retaining engineering practice was carried out in the 9107 working face. By theoretical calculation, the roadside support resistance (8.8 MN/m) for the return air gateway of the 9107 working face was obtained. By establishing FLAC3D numerical calculation model, the stability of surrounding rock under different conditions, in terms of backfill width, strength and roof support, was systematically studied. The results show that, when the high water material with the water-cement mass ratio of 1.5 is used as the filling material and the width and height of the filling body is 1.4 m and 1.6 m respectively, the stability of the filling structure can be guaranteed. Based on the actual geological conditions, a high water material roadside filling structure design, involving pulling anchor, vertical ladder beam combination, and roof support of support body, is proposed, which could effectively control the horizontal deformation of the filling body and improve the vertical bearing capacity of the roadside support. Field industrial tests verifies the feasibility of the gob-side entry retaining technology of high-water material roadside filling in Cilinshan Coal Mine with a wide range of applications.

* 收稿日期:2021-12-09

修回日期:2022-02-14

作者简介:宋江涛(1989—),男,山西长治人,本科,从事煤矿开采与安全生产管理方面的工作,E-mail:375134252@qq.com

引文格式:宋江涛.慈林山煤矿高水材料巷旁充填沿空留巷技术研究[J].山西煤炭,2022,42(1):68-75.

SONG Jiangtao. Gob-side entry retaining technology with high water material roadside filling in Cilinshan Coal Mine[J]. Shanxi Coal,2022,42(1):68-75.

Key words: gob-side entry retaining; high water material; parameter design; strengthening support; control technology

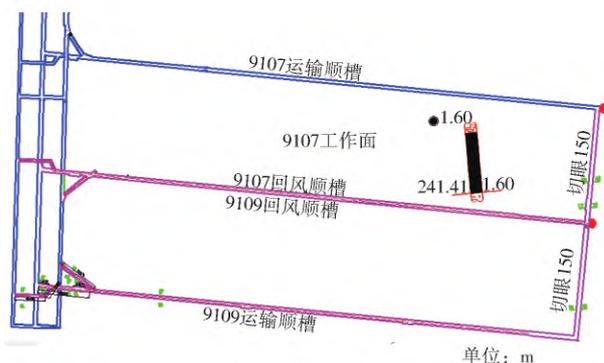
作为一种典型的无煤柱护巷技术,沿空留巷在提高资源回收效率、缓解采掘接续紧张和实现工作面“Y”形通风等方面表现出显著的技术经济优势^[1-4]。国内外专家学者围绕沿空留巷技术的基础理论和工程实践开展了大量的研究工作,并取得了显著的成果^[5-7]。理论研究结果表明:从空间上看,沿空留巷的巷旁充填体通常位于采空区或采空区边缘,可以有效地避开工作面支承压力的影响。然而,不同于传统的煤柱护巷,沿空巷道在时间上不可避免地要经受多个工作面的采动影响。沿空留巷所处的这种特殊的时空关系导致其在整个生命周期内围岩整体变形较大。

作为沿空留巷的重要组成部分,巷旁充填体的发展一直是沿空留巷技术的发展重点和研究热点。过去数十年里,巷旁充填结构先后经历了木垛、单体液压支柱、混凝土、钢管混凝土等^[8-9]阶段,在不同顶板条件下实现了煤炭资源的安全高效开采。与其他的巷旁充填技术相比,采用水灰比高、凝固时间短、早期强度高、纵向变形能力大的高水材料构筑巷旁充填体具有显著的技术经济优势^[10-11]。目前,高水材料巷旁充填沿空留巷技术在我国深部矿井、复合顶板和坚硬顶板矿井先后取得了良好的应用效果^[12-14]。

本文以山西潞安集团慈林山煤矿 9# 煤层半煤岩巷道为工程背景,以缓解矿井采掘接续紧张为目标,在系统分析试验巷道生产地质条件和煤岩力学性能的基础上,采用理论计算的方法获得了沿空留巷所需的巷旁支护阻力。在此基础上,借助三维数值计算软件,研究巷旁充填体强度、宽度和顶板支护条件对巷道围岩稳定性的影响。

1 试验巷道生产地质条件

山西潞安集团慈林山煤矿位于山西省长治市,平均埋深 200 m。矿井目前主要开采 9# 和 15# 煤层。其中,9# 煤层为条带状结构,平均厚度 1.6 m,平均倾角 3°。如图 1 所示,9# 煤层上方依次为 4.6 m 厚的灰岩,11.4 m 厚的泥岩和 0.2 m 厚的砂质泥岩。煤层底板为 3.0 m 厚的 K4 深灰色石灰岩。受煤层厚度影响,9# 煤层回风顺槽为半煤岩巷道,巷道掘进工程量大,掘进速度慢,严重影响了矿井正常的采掘接续。



(a) 工作面采掘接续图

柱状图 1:50	岩石名称	层厚 /m	岩性描述
	砂质泥岩	0.20	灰黑色,中厚层状,水平互层层理。
	8#煤	0.80	黑色,金刚光泽,参差状-阶梯状断口,煤层充填物多为泥岩,煤质较软
	砂质泥岩	0.20	灰黑色,中厚层状,水平互层层理
	泥岩	11.40	灰黑色,中厚层状,水平互层层理
	灰岩	4.60	灰色,见不规则裂隙,方解石充填
	9#煤	1.60	煤黑色,带状结构
	灰岩	3.00	灰色,见不规则裂隙,方解石充填
	砂质泥岩	8.00	灰黑色,厚层状,均匀层理
	泥岩	1.50	灰黑色,中厚层状,水平互层层理

(b) 工作面钻孔柱状图

图 1 工作面采掘接续及钻孔柱状图

Fig. 1 Mining-excitation and drilling histogram of working face

在充分调研的基础上,计划在 9107 工作面回风顺槽(半煤岩巷道)开展沿空留巷技术。9107 工作面回采长度 970 m,切眼长度 150 m;9107 工作面西側为 9# 煤层南翼皮带大巷、9# 煤层南翼回风大巷,东侧为慈林山煤矿井田边界,北侧为 9105 工作面采空区,南侧为 9109 接替工作面。9107 回风顺槽沿顶卧底掘进,巷道断面为矩形断面(宽度 4.3 m,高度 2.4 m),采用锚网+锚索联合支护,如图 2 所示。

2 巷旁支护阻力的理论计算

巷旁充填支护结构的承载力直接关系到沿空留巷技术的成功实施。采用图 3 所示的理论模型计算 9107 工作面回风顺槽沿空留巷所需的最小巷旁阻力(P_0)。

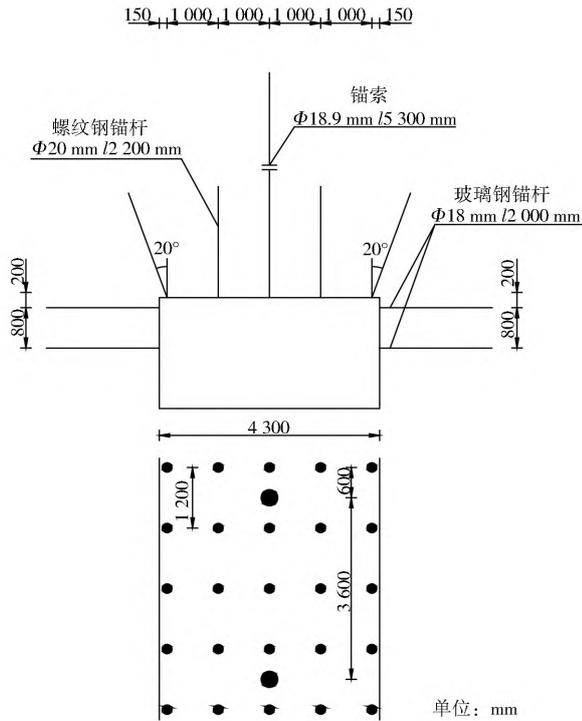


图 2 9107 工作面回风顺槽支护图

Fig. 2 Support of return air gateway of 9107 working face

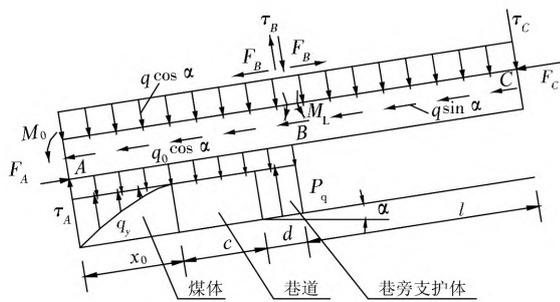


图 3 沿空留巷力学模型^[6]

Fig. 3 Mechanical model of gob-side entry retaining

$$P_q = [M_L + (\tau_c + ql \cos \alpha)(x_0 + c + d) + \frac{1}{2}(q + q_0)(x_0 + c + d)^2 \cos \alpha - \int_0^{x_0} q_y(x_0 - x) dx - (F_C + ql \sin \alpha)(h - \Delta S_B) - M_0 - q \sin \alpha(x_0 + c + d)(\frac{h}{2} - \Delta S_B)] / (x_0 + c + \frac{d}{2}) \quad (1)$$

式中： P_q 为沿空留巷巷旁支护体切断弧形三角块时的工作阻力， N ； M_L 为采空区侧上覆基本顶岩层发

生断裂前的最大弯矩， $N \cdot m$ ； τ_c 为采空区侧受到的剪切力， N ； q 为单位长度上覆岩层自重力对直接顶的作用， N/m ； α 为工作面煤层倾角， $(^\circ)$ ； l 为 BC 岩块长度， m ； x_0 为应力极限平衡区宽度， m ； c 为沿空留巷实际宽度， m ； d 为设计支护体宽度， m ； q_0 为单位长度的直接顶自身质量， kg/m ； q_y 为沿空留巷下侧媒体支撑压力， N/m ； x 为直接顶断裂位置距实体煤帮的距离， m ； F_C 为沿岩层方向的推力， N ； h 为工作面与基本顶之间的距离， m ； ΔS_B 为上覆基本顶岩层第二次断裂时， B 端的下沉量， m ； M_0 为基本顶三角块结构断裂后的残余弯矩， $N \cdot m$ 。

结合 9107 工作面回风顺槽实际生产地质条件和煤岩体力学参数，采用上述计算公式，得到所需的最小巷旁支护阻力为 8.8 MN/m 。

3 巷旁支护体关键参数研究

3.1 数值计算模型的建立

根据慈林山煤矿采掘接续关系和矿井综合柱状图，采用 FLAC3D 数值计算软件，建立图 4 所示的三维计算模型。其中，模型长度为 150 m，沿空巷道（宽 \times 高 = 4.3 m \times 2.4 m）两侧工作面倾斜长度各取 75 m，模型高度 73.4 m。该数值计算模型共划分为 8 层，每层由宽度 0.50 m 和高度 0.25 m 的网格组成。根据实际开采条件，模型上部采用应力边界进行控制。按照平均埋深 200 m 计算并施加垂直于模型顶板的应力。模型四周和下部边界采用位移边界进行固定。

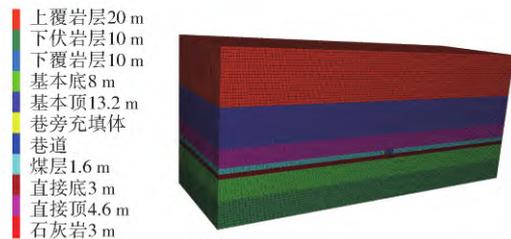


图 4 9107 工作面数值模拟模型

Fig. 4 Numerical simulation model of 9107 working face

通过开展慈林山煤矿煤岩力学性能测试，得到表 1 所示的包括弹性模量和抗拉强度在内的数值模拟物理力学参数，以用于数值计算。

表 1 数值模拟力学参数

Table 1 Mechanical parameters of numerical simulation

岩性	厚度/m	弹性模量/GPa	泊松比	内聚力/MPa	内摩擦角/ $(^\circ)$	抗拉强度/MPa
上覆地层	20.0	10.00	0.20	3.00	30.00	0.80
中砂岩	0.8	26.21	0.26	8.29	35.01	4.43
8# 煤层	0.8	5.30	0.24	2.14	37.39	0.45
砂质泥岩	0.2	17.46	0.25	7.84	36.80	2.12

续表 1

岩性	厚度/m	弹性模量/GPa	泊松比	内聚力/MPa	内摩擦角/(°)	抗拉强度/MPa
泥岩	11.4	13.15	0.25	4.06	35.29	1.79
石灰岩	4.6	34.62	0.27	13.64	32.91	5.39
9# 煤层	1.6	5.30	0.24	2.14	37.39	0.45
石灰岩	3.0	34.62	0.27	13.64	32.91	5.39
砂质泥岩	8.0	17.46	0.25	7.84	36.80	2.12
下伏岩层	10.0	10.00	0.20	3.00	30.00	0.80

3.2 充填体关键参数的确定

为保证 9107 工作面回风顺槽巷旁支护阻力不低于 8.8 MN/m,当巷旁充填材料强度取 8 MPa 时,充填体的理论宽度为 1.2 m。取安全系数为 1.2,可知 9107 工作面沿空留巷充填体宽度为 1.4 m。为进一步优化并确定科学合理的巷旁支护参数并降低支护成本,采用数值计算的方法研究充填体强度、宽度和顶板支护条件对巷道围岩稳定性控制的影响。

3.2.1 数值模拟方案

方案 1:固定充填体的宽度为 1.4 m,研究不同充填材料强度(10 MPa、8 MPa 和 6 MPa)条件下巷旁充填体的受力特征和巷道围岩变形规律。

方案 2:固定充填材料强度(8 MPa),改变充填体宽度(1.8 m、1.4 m 和 1.0 m),研究不同充填体宽度条件下巷旁充填体的受力特征和巷道围岩变形规律。

方案 3:固定充填材料强度(8 MPa)和充填体宽度(1.4 m),研究不同顶板支护条件下巷旁充填体的受力特征和巷道围岩变形规律。

具体的数值模拟方案如表 2 所示。

表 2 数值模拟方案

Table 2 Numerical simulation plans

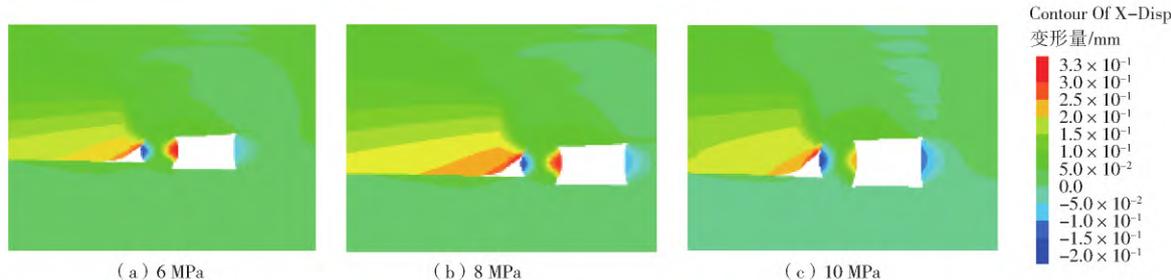
模拟方案	强度/MPa	宽度/m	高度/m	充填体顶板支护
方案 1	10	1.4	1.6	无
	8			
	6			
方案 2	8	1.8		
		1.4		
		1.0		
方案 3	8	1.4		有

3.2.2 充填体强度参数

1)不同巷旁充填体强度条件下巷道围岩变形情况。如图 5 所示,当充填体强度发生变化时,巷道围

岩变形情况出现显著区别。当巷旁充填体强度较小时(6 MPa),充填体由于无法承受工作面上覆岩层在旋转下沉和切断过程中的压力,而出现显著的侧向变形和纵向压缩;巷道顶板出现不规则下沉,靠近采空区侧顶板下沉明显,巷道维护相对困难。当巷旁支护体强度大于或等于理论计算所需的最小充填体强度(8 MPa)时,充填体的变形情况有所改善。当巷旁充填体提供的承载力足以抵抗工作面顶板的旋转变形时,充填体两侧的非对称变形的差异性将有所减小。尽管随着充填体强度的增加,巷道围岩变形情况有所改善,但当充填体强度增加到一定程度后,巷道整体变形量的减小程度不够明显。考虑到使用较高强度的充填体将直接导致充填成本的增加,因此单纯通过提高巷旁充填体的强度实现巷道围岩稳定性控制的经济性较低。

2)不同巷旁充填体强度条件下巷道围岩应力分布特征。图 6 为采用不同充填体强度条件下巷道围岩垂直应力的分布特征。可以看出,巷旁充填体在空间位置上始终处于应力降低区。此外,作用在实体煤侧的垂直应力大于作用在巷旁充填支护体上的应力。由于部分荷载通过顶板岩层传递到实体煤侧,导致工作面实体煤侧出现了较大程度的应力集中现象,因此需要对实体煤侧采取相应的加强支护措施。进一步比较巷旁充填体上方垂直应力的大小可以看出:随着充填体强度增加,作用在充填体上方的垂直应力呈现出增大的趋势。从切断工作面上覆岩层顶板角度而言,有必要进一步提高充填体的强度。然而,充填体强度的增加将直接导致沿空留巷成本的增加。通过比较不同充填体强度条件下充填体的变形特征和巷道围岩应力分布规律,从技术经济角度出发,初步确定巷旁充填体的强度为 8 MPa。



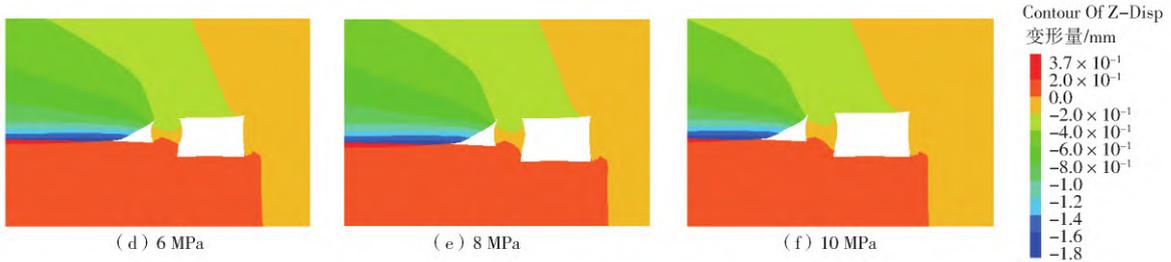


图 5 不同巷旁支护体强度下留巷稳定时围岩变形图

Fig. 5 Surrounding rock deformation of stable gob-side entry retaining under different roadway support strengths

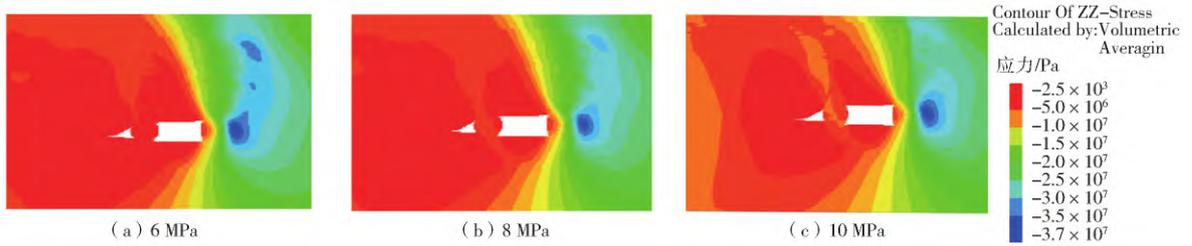


图 6 不同巷旁支护体强度下留巷稳定时垂直应力分布图

Fig. 6 Vertical stress distribution of stable gob-side entry retaining under different roadway support strengths

3. 2. 3 充填体宽度参数

1)不同巷旁充填体宽度条件下巷道围岩变形特征。图 7 为充填体强度为 8 MPa 时,不同巷旁充填体宽度条件下的巷道围岩变形情况。当巷旁充填体的宽度较小时(小于 1.0 m),巷旁充填体承载能力相对较小(与理论计算结果一致);当巷旁充填体承载能力较小时,巷旁充填体提供的切顶阻力无法有效地切断巷道顶板,巷道顶板的旋转变形将直接作用在巷旁充填体上方,导致巷旁充填体的侧向变形

显著,巷道围岩变形量较大。随着充填体宽度从 1.4 m 增加到 1.8 m,巷旁充填体提供的支护阻力大于巷道顶板切断所需的工作阻力,充填体侧向变形呈现出相对均匀的情况,巷道围岩的整体变形有所降低。当巷旁充填体的宽度超过 1.4 m 时(即充填体提供的支护阻力大于巷道顶板切断所需的最小支护阻力),巷道围岩整体变形量的减小程度将不再显著。此时,从控制巷道围岩变形角度而言,单纯的增加充填体的宽度将不再具有经济优势。

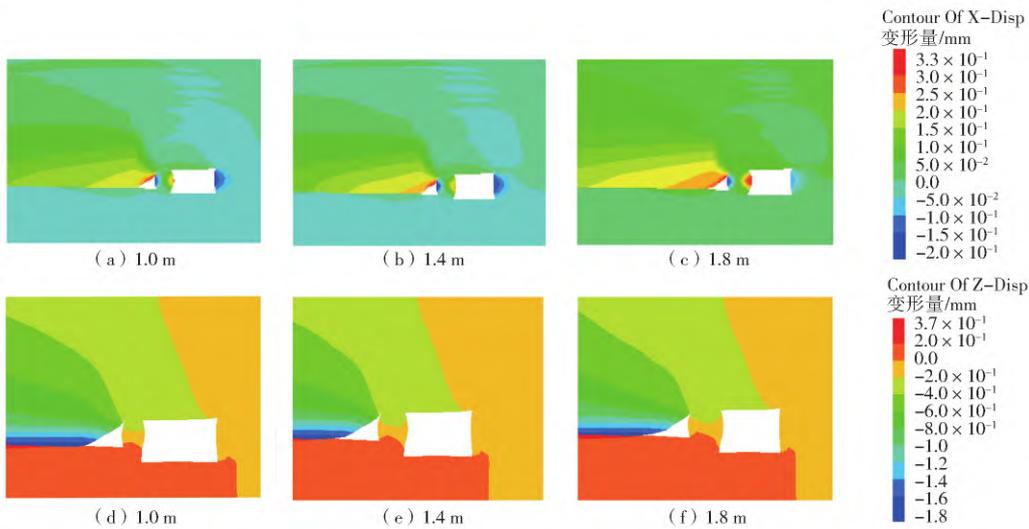


图 7 不同巷旁支护体宽度下留巷稳定时围岩变形图

Fig. 7 Surrounding rock deformation of stable gob-side entry retaining under different roadway support widths

2)不同巷旁充填体宽度条件下巷道围岩应力分布特征。如图 8 所示,不同巷旁充填体宽度条件下,巷道围岩应力分布特征有所不同。随着充填体宽度

的增加,巷道顶板旋转下沉可以有效地分散在巷旁充填体上方,有助于充填体的结构在留巷过程中保持相对稳定。然而,当充填体宽度增加到可以满足

切顶需要时,过大的支承压力的并不能有效改善巷道的围岩应力环境。与之相反,充填体宽度的增加不可避免地增加了充填成本。通过对方案 1 和方案 2

的系统分析可知,巷旁充填体强度为 8 MPa,宽度为 1.4 m 时,不仅能够保证支护结构稳定,而且能使巷道整体围岩变形处在可控范围内。

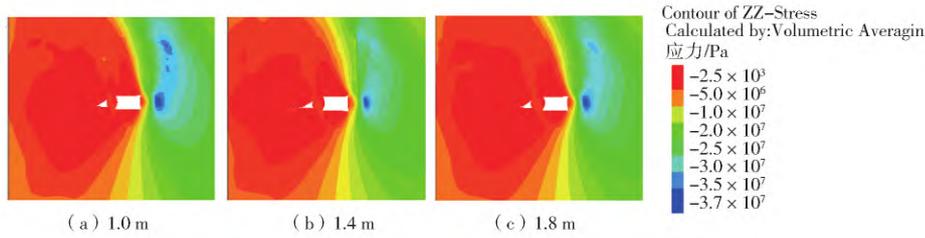


图 8 不同巷旁支护体宽度下留巷稳定时垂直应力分布图

Fig. 8 Vertical stress distribution of stable gob-side entry retaining under different roadway support widths

3.2.4 充填体上方顶板支护方式

1)不同顶板支护条件下的巷道变形情况。如图 9 所示,当充填体顶板上方未采取加强支护措施时,巷旁充填体提供给顶板的支护阻力足以切断上覆岩层,保证了充填体两侧的均匀变形。当在充填体上方采取加强支护措施后(补打 2 根直径为 21.6 mm,长度为 6 300 mm 的锚索,排距 800 mm),充填体两侧的变形有所减小。造成上述现象的主要原因在于加强支护措施有效地减少了直接作用在巷旁支护结构上的垂直应力并增加了切顶阻力,有助于充填体的变形控制。

空巷道围岩变形和应力特征的比较表明:在充填体上方顶板采取加强支护措施有助于沿空留巷围岩稳定性控制。

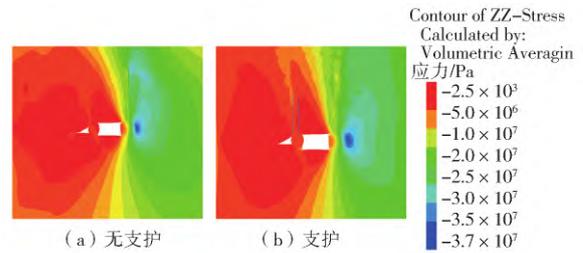


图 10 不同充填体顶板支护条件下垂直应力分布图

Fig. 10 Vertical stress distribution under roof support with different fillings

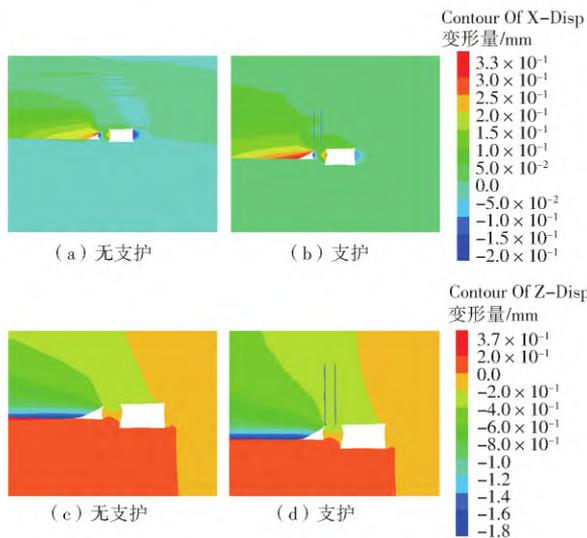


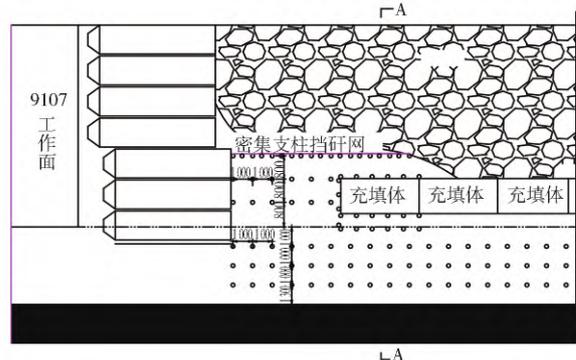
图 9 不同充填体顶板支护条件下围岩变形图

Fig. 9 Surrounding rock deformation under roof support with different fillings

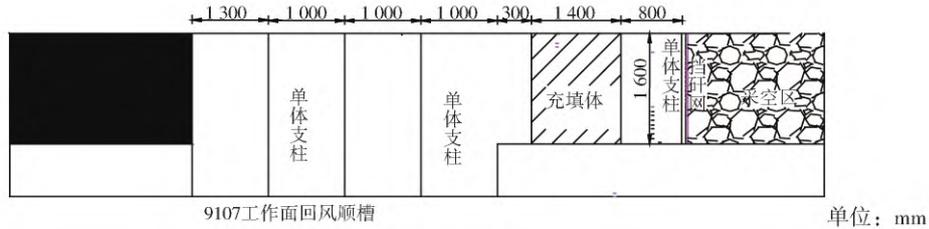
2)不同顶板支护条件下的巷道应力分布特征。从图 10 可以看出,当充填体上方采取加强支护措施后,在巷旁充填体和顶板加强支护共同作用下,位于充填体上方靠近采空区侧的顶板更容易被切断。因此,直接作用在巷旁充填体上的支承压力的相对较小,有助于巷道围岩稳定控制。不同顶板支护条件下沿

4 工程实践

为保证充填体具有足够的切顶阻力,高水材料充填体的强度需要达到 8 MPa。通过查阅不同水灰质量比条件下高水材料的单轴抗压强度和流动特性,参照其他相邻矿井的成功经验,最终确定采用 1.5 的水灰质量比进行充填。为进一步提高沿空留巷的效果,在构筑高水材料巷旁充填时,采用图 11 所示的辅助加强支护技术措施。在 9107 工作面后方 180 m 范围内布设 3 排单体液压支柱,按照排距 1 000 mm 的方式进行加强支护。



(a) 充填体上方顶板加强支护



(b) 超前支护段加强支护

图 11 沿空留巷段辅助加强支护

Fig. 11 Auxiliary reinforcement support for gob-side entry retaining

在充填工作开始之前,通过在端头支架后方补打 2 根直径 21.6 mm、长度为 6 300 mm 的锚索进行补强支护。要求锚索垂直巷道顶板布置,排距为 800 mm。如图 12 所示,为进一步提高充填体的结

构稳定性,采用钢筋网和钢筋梯子梁形制作的加强模板进行加固。此外,按照间排距 500 mm × 750 mm 的方式在充填体内部设置对拉锚杆。

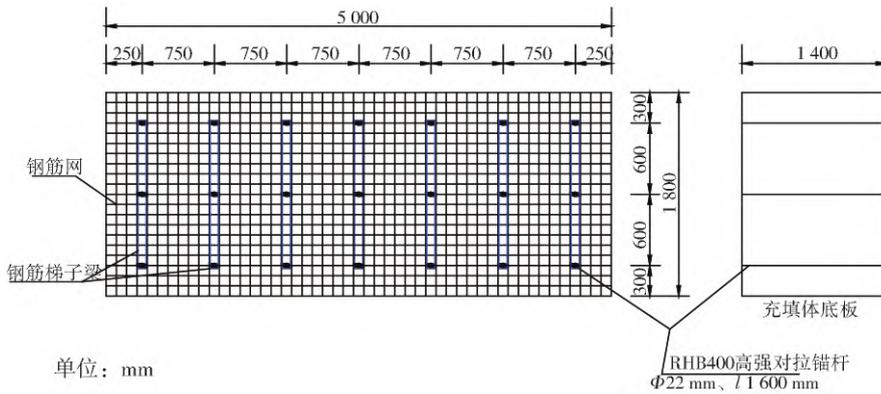


图 12 充填体加强支护结构示意图

Fig. 12 Structure of backfill reinforcement support

沿空留巷的班组成员共计 8 人(其中 3 人负责泵、搅拌桶的操作及维护工作,其他 5 人负责充填点工作),每个沿空留巷班施工 7 m。与传统的留煤柱护巷相比,沿空留巷节约成本 2 000 元/m。

图 14 为距离工作面不同位置处巷道围岩变形和充填体变形监测曲线。从图 14 可以看出,从工作面后方 90 m 位置开始,巷道围岩和巷旁充填体的整体变形趋于稳定。其中实体煤侧最大水平变形为 100 mm,顶底板最大移近量为 270 mm。9107 工作面高水材料沿空留巷的成功实践为 9109 工作面的重复使用提供了保障,取得了良好的技术经济效益和社会效益,具有一定的推广应用价值。

现场工程实践结果表明,采用本研究确定充填体参数并采取加强支护措施后,巷旁充填体和巷道围岩整体变形相对较小,如图 13 所示。高水材料充填体通过钢筋网的间隔向外鼓出,监测得到的水平方向最大变形为 85 mm。



图 13 巷旁充填体留巷期间变形示意图

Fig. 13 Deformation of roadside backfill during gob-side entry retaining

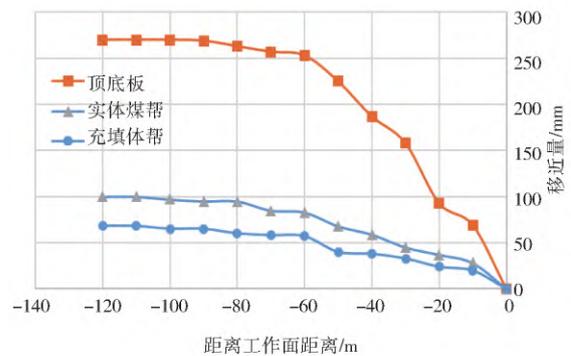


图 14 距离工作面不同位置处巷道围岩和充填体变形规律

Fig. 14 Deformation law of surrounding rock and backfill at different positions from the working face

5 结论

1)采用理论分析的方法,结合慈林山煤矿实际开采条件和地质条件,计算得到9107工作面回风顺槽最小切顶阻力为8.8 MN/m。

2)借助三维数值计算分析软件和理论分析结

果,参照高水材料力学特性,确定高水材料水灰质量比为1.5,充填体宽 \times 高=1.4 m \times 1.6 m时可以保证充填结构在使用期内的相对稳定。

3)采用“对拉锚杆+竖向梯子梁组合+充填体顶板支护”的组合形式有效增加了充填体的纵向承载能力,取得了良好的工程实践效果。

参考文献:

- [1] 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):1977-1987.
KANG H P, NIU D L, ZHANG Z, 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): 1977-1987.
- [2] 柏建彪,周华强,侯朝炯,等.沿空留巷巷旁支护技术的发展[J].中国矿业大学学报,2004,33(2):183-186.
BAI J B, ZHOU H Q, HOU C J, et al. Development of support technology beside roadway in goaf-side entry retaining for next sublevel[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2004, 33(2): 183-186.
- [3] 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 Y, BAI J B, WANG X Y, 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.
- [4] 赵红超,陈勇.沿空留巷整体浇注护巷带围岩控制技术[J].煤矿开采,2011,16(3):95-97,131.
ZHAO H C, CHEN Y. Technology of surrounding rock control by whole-pouring in roadway retained along gob[J]. Coal Mining Technology, 2011, 16(3): 95-97, 131.
- [5] 郭子程.厚煤层沿空留巷巷道实体侧煤柱补强支护技术研究[J].山西煤炭,2021,41(4):12-17.
GUO Z C. Reinforcement and support technology of solid side coal pillars of gob side entry retaining in thick coal seam[J]. Shanxi Coal, 2021, 41(4): 12-17.
- [6] 陈勇.沿空留巷围岩结构运动稳定机理与控制研究[D].徐州:中国矿业大学,2012.
- [7] 刘洪林,赵红超.沿空留巷围岩应力演化规律及大变形机理分析[J].中国矿业,2017,26(2):122-128,138.
LIU H L, ZHAO H C. Analysis of stress evolution law and large deformation mechanism in surrounding rock of gob-side entry retaining[J]. China Mining Magazine, 2017, 26(2): 122-128, 138.
- [8] 匡中文.薄基岩地质条件下中厚煤层柔模混凝土沿空留巷矿压显现规律分析与应用[J].煤炭技术,2021,40(11):66-69.
KUANG Z W. Analysis and application of strata behavior law of flexible concrete gob side entry retaining in medium thick coal seam under thin bedrock geological conditions[J]. Coal Technology, 2021, 40(11): 66-69.
- [9] 杨计先.沿空留巷空间“小”结构稳定性控制研究及应用[J].煤炭工程,2021,53(9):36-41.
YANG J X. Stability control of “small” structure in gob-side entry retaining[J]. Coal Engineering, 2021, 53(9): 36-41.
- [10] 卞卡,柏建彪,赵涛,等.综采工作面高水材料空巷充填技术与应用[J].煤炭技术,2021,40(5):37-40.
BIAN K, BAI J B, ZHAO T, et al. Technology and application of filling abandoned roadway with high water material in fully-mechanized working face[J]. Coal Technology, 2021, 40(5): 37-40.
- [11] 张自政,柏建彪,陈勇,等.沿空留巷不平衡承载特征探讨与应用分析[J].岩土力学,2015,36(9):2665-2673.
ZHANG Z Z, BAI J B, CHEN Y, et al. Investigation and application analysis of unbalanced bearing characteristics of gob-side entry retaining[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(9): 2665-2673.
- [12] 杨朋,华心祝,杨科,等.深井复合顶板条件下沿空留巷顶板变形特征试验及控制对策[J].采矿与安全工程学报,2017,34(6):1067-1074.
YANG P, HUA X Z, YANG K, et al. Experiment of compound roof deformation characteristics of gob-side retaining entry in deep mine and support measures[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2017, 34(6): 1067-1074.
- [13] 王茂盛,王萌,都海龙.厚层坚硬顶板工作面沿空留巷技术[J].煤炭科学技术,2013,41(6):42-45.
WANG M S, WANG M, DU H L. Gateway retained technology along goaf of coalmining face with thick and hard roof[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(6): 42-45.
- [14] 孙广京.深井矸石充填工作面沿空留巷原理及围岩稳定性研究[D].湘潭:湖南科技大学,2020.

(编辑:安娜)