

陈磊,郑志阳,许向前,等. 充填体强度形成速率与工作面推进速度的关系[J]. 矿业科学学报,2018,3(2):156-164. DOI:10.19606/j.cnki.jmst.2018.02.007

Chen Lei,Zheng Zhiyang,Xu Xiangqian,et al. Relationship between the strength formation rate of the filling body and the advancing speed of the working face[J]. Journal of Mining Science and Technology,2018,3(2):156-164. DOI:10.19606/j.cnki.jmst.2018.02.007.

充填体强度形成速率与工作面推进速度的关系

陈磊,郑志阳,许向前,赵健

中国矿业大学(北京)资源与安全工程学院,北京 100083

摘要:针对新阳煤矿采空区高浓度胶结充填开采的地质生产特点,根据胶结充填材料强度形成过程与凝结时间的关系特性,将充填体所在区域沿工作面推进方向分为强度增长区和强度恒定区2个区域,在此基础上建立了“煤壁—支架—充填体”联合支撑的顶板梁结构力学模型。对顶板岩梁各段的受力进行分析,求得顶板岩梁剪力和弯矩的表达式以及岩梁两固支端的支座反力和弯矩。探讨了胶结充填材料强度形成速度与工作面推进速度之间的关系,根据充填开采极限跨距的概念以及充填材料强度形成的时间关系,计算了工作面推进速度与充填体强度形成速度之间的关系。研究表明:岩梁最大剪力处和最大弯矩处均位于岩梁与煤壁的交点处即岩梁煤壁端;工作面支架的工作阻力和充填体的支撑能力对顶板岩梁剪力和弯矩的分布影响较大;新阳煤矿10203工作面合理推进速度为3.2 m/d,每天割煤4刀。

关键词:煤矿;胶结充填开采;充填体强度;力学模型;工作面推进速度

中图分类号:TD 325

文献标志码:A

文章编号:2096-2193(2018)02-0156-09

Relationship between the strength formation rate of the filling body and the advancing speed of the working face

Chen Lei,Zheng Zhiyang,Xu Xiangqian,Zhao Jian

College of Resources and Safety Engineering,China University of Mining and Technology,Beijing 100083,China

Abstract:In view of the geological production characteristics of high concentration cemented backfilling (HCCB) in goaf of Xinyang coal mine, and according to the relationship between the strength of cemented filling materials and condensation time, the area of the filling body is divided into two regions in the direction of advance: the intensity growth region and the intensity constant region. Based on the analysis of strength boundary of the two regions, the mechanical model of roof beam supported by “coal wall-support-filling body” is established. By analyzing the stress of the roof rock beam, the shear forces and bending moments of the roof rock beam were established. Bearing reaction forces and the bending moments for two solid support end of rock beam were figured out. According to the concept of the filling mining limit span and the time relation with HCCB strength formation, the quantity relationship between the advancing velocity of the working face and the strength formation rate of the filling body was calculated. The results show that: The maximum shear force and maximum bending moment of rock beam are located at the intersection of rock beam and coal wall; The working resistance of the working face support

收稿日期:2017-06-22

基金项目:高等学校博士学科点专项科研基金(20120023110023)

作者简介:陈磊(1982—),男,安徽太和人,高级工程师,博士,主要研究方向为煤矿充填开采。Tel:13811281567, E-mail:chenlei@cumt.edu.cn.

and the supporting ability of the filling body have a great effect on the distribution of the shear forces and bending moments of the roof rock beam; the reasonable advancing speed of Xinyang Mine working face No. 10203 is 3.2 m/d, and 4 shear cuts per day.

Key words: coal mine; cemented filling mining; filling-body strength; mechanical model; advancing speed of working face

煤矿充填开采是煤矿绿色开采的关键技术之一,利用煤矸石、粉煤灰等矿山废弃物或砂土、城市垃圾等充填采空区,开采“三下”压煤,既减少了固体废弃物在地面的堆积和排放,又能有效限制开采过程中岩层的移动,减缓开采引起的地表沉陷,提高煤炭资源采出率^[1-3]。现阶段,主要的煤矿充填开采方法有综合机械化固体充填、膏体充填、高水材料充填和高浓度胶结充填等。煤矿高浓度胶结充填开采技术作为一种新型绿色开采技术,将矸石、粉煤灰等固体废弃物加胶凝材料与水混合后,制成质量分数为76%~80%的高浓度料浆,由地面充填站通过管道将料浆送至采煤工作面,填充采空区。充填料浆进入采空区后,能在1~3 d内形成具备一定抗压强度的充填体,在数小时内凝结,及时支撑采空区顶板,限制上覆岩层的移动变形^[4-5]。许多学者针对不同的充填开采方法,研究了充填开采时上覆岩层的移动、变形规律以及充填开采对地表沉陷的控制。张吉雄等^[6-7]针对综合机械化固体充填开采,将弹性地基梁理论应用到对关键层弯曲变形的分析,得到了关键层发生变形的特征和最大挠度;分析了下部岩层岩性和充填材料对弹性地基系数的影响以及相互之间的数量关系。刘建功等^[8]综合物理相似模拟和充填开采工程实践,提出了固体充填开采顶板岩层的连续曲形梁模型,分析了连续曲形梁的力学特征和形成条件。常庆粮等^[9]运用弹性地基梁理论,研究了影响膏体充填开采覆岩移动变形的因素,认为充填前顶底板移近量和充填欠接量是影响顶板岩层移动的主要因素。杨宝贵等^[10]采用相似材料模拟的方法,研究了煤矿胶结充填开采时工作面矿压显现规律,分析了工作面前后方支承压力分布情况。在对充填开采煤层顶板进行受力分析时,通常建立顶板岩层的“梁”模型^[11-14]或“薄板”模型^[15-18]。

高浓度胶结充填开采,采煤工作面由开切眼向前推进,由于充填工序滞后于采煤工序,而且胶结充填材料需要一段时间才能凝结成具备一定抗压强度的充填体,因此按充填体是否起到支撑作用,可将顶板的受力情况分为充填体支撑顶板前和充填体支撑顶板后两个阶段,前一阶段顶板受到煤体、支架的支撑力和上覆岩层载荷的作用;后一阶

段顶板除上述力的作用外,还受到充填体的支撑作用。因此,在对高浓度胶结充填开采煤层顶板进行受力分析时,要考虑胶结充填体强度形成的时间特性。本文将充填体的强度视为凝结时间的线性函数,对煤层顶板进行受力分析,并探讨工作面推进速度与充填体强度形成速度之间的关系。

1 工程背景及充填体单轴抗压凝结时间变化规律

1.1 工程背景

汾西矿业集团有限责任公司新阳煤矿位于山西省孝义市高阳镇,核定生产能力 470×10^4 t/a,主产优质低硫煤。该矿十采区10203工作面为充填开采示范工作面,开采2号煤层,煤层平均厚度2.33 m,平均采高2.2 m,煤层倾角 3° ,为近水平煤层,平均埋深约200 m。直接顶为厚1.65 m的黑色泥岩,基本顶为厚3.11 m的中砂岩,顶板完整性较好,上覆岩层的力学参数见表1。10203工作面为综采长壁工作面,工作面长度100 m,走向长度347 m,全采全充,采空区充填体为以煤矸石、粉煤灰、水泥等按一定比例制成的高浓度胶结充填材料。本文在考虑胶结充填体强度形成的时间效应基础上,通过对顶板岩梁进行受力分析,探讨新阳煤矿10203工作面合理的推进速度。

表1 10203工作面岩层力学参数

Tab. 1 Mechanical parameters of rock stratum in working face No. 10203

煤岩层	容重/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	抗压强度/MPa	厚度/m
表土层	2 180	—	164.35
细砂岩	2 380	25.0	14.57
泥岩	2 360	19.8	6.60
1号煤	1 350	15.5	1.25
泥岩	2 400	21.5	3.27
细砂岩	2 560	27.5	3.11
泥岩	2 400	21.6	1.65
2号煤	1 350	15.5	2.33
充填体	1 950	5.0	2.20
泥岩	2 410	26.8	2.83

1.2 充填体单轴抗压随凝结时间变化规律

充填体抗压强度随时间的推移逐渐变大,一般

认为,凝结时间达 28 d 时,强度趋于稳定。为找出充填体抗压强度随凝结时间的变化规律,制作 3 组圆柱体标准试件,试件尺寸为直径 50 mm、高度 100 mm,分别测试 1 d、3 d、7 d、14 d 和 28 d 的三轴抗压强度,所用的材料中煤矸石含量 50%、粉煤灰含量 20%、水泥含量 10%。采用 NYL-300 型压力试验机测试充填体试样三轴抗压强度,取平均值后进行数据拟合,结果如图 1 所示。

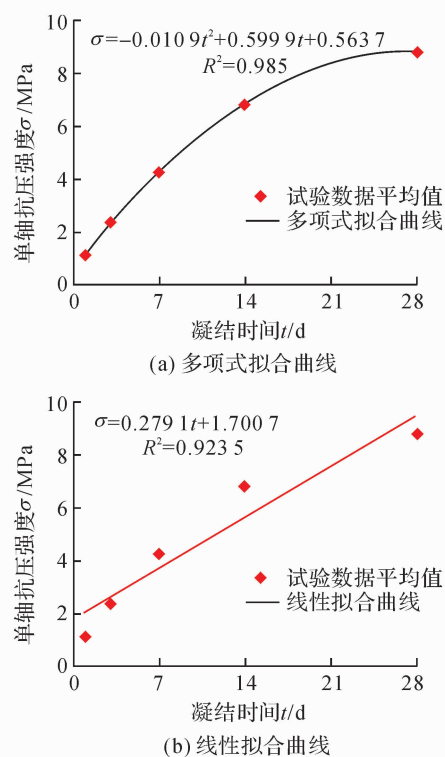


图 1 充填体强度随时间变化规律

Fig. 1 Variation of filling body strength with time

在图 1(a)中,拟合曲线按多项式关系拟合得到,可认为充填体三轴抗压强度与凝结时间的关系为二次函数关系,且在理论上当 $t = 28.5$ d 即凝结时间为 28.5 d 时,高浓度胶结充填体的强度达到最大值,这与一些文献直接取充填体 28 d 的强度值为充填体的最终强度相一致^[19-20]。线性关系因表达式简单、运算量小,在考虑充填体强度随时间变化的规律时而常用线性关系表示^[21-22]。在用线性关系运算时,一般认为至 28 d 时,充填体强度达到最大值。本文涉及充填体强度随时间变化关系的运算均按线性关系处理。

2 顶板岩梁力学模型

2.1 充填体支撑顶板岩层前岩梁力学模型

根据充填材料进入采空区的时间,将充填体支撑顶板前的阶段分为两个阶段:

(1) 工作面初采充填前阶段。选取工作面基本顶为研究对象,采煤工作面由开切眼向前推进,胶结充填前,工作面推进距离未达到顶板岩梁的极限跨距时,顶板岩梁不发生垮落。此时,可将顶板视为两端固支梁,两端点分别位于顶板与工作面前后方煤壁交点处,上覆岩层载荷通过岩梁传递至工作面两侧煤体和支架上,岩梁受力分析如图 2 所示。

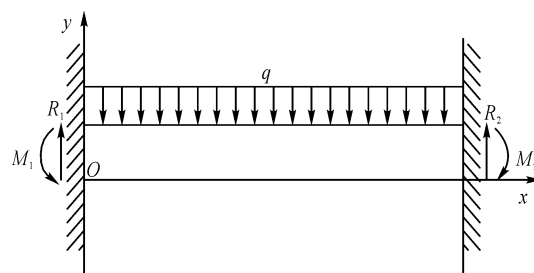


图 2 工作面初采充填前顶板受力分析

Fig. 2 Force analysis of roof beam before filling

顶板岩梁为均布载荷下两端固支超静定结构,上覆岩层均布载荷为 q ,岩梁长度为 L ,岩梁两端煤体支座反力为 R_1 、 R_2 ,两固支端弯矩为 M_1 、 M_2 ,由 $\sum F_y$ 得

$$R_1 = R_2 = \frac{qL}{2} \quad (1)$$

岩梁内任意一点剪力的表达式为

$$Q_x = R_1 - qx = \frac{qL}{2} \left(1 - \frac{2x}{L} \right) \quad (2)$$

应用结构力学法进行求解,建立力法方程:

$$\begin{cases} \delta_{11}M_1 + \delta_{12}M_2 + \Delta_{1p} = 0 \\ \delta_{21}M_1 + \delta_{22}M_2 + \Delta_{2p} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中, δ_{ij} ($i = 1, 2; j = 1, 2$) 为位移影响系数; Δ_{ip} ($i = 1, 2$) 是基本结构在载荷单独作用下沿支座反力方向的位移。

应用结构力学^[23]可得

$$M_1 = M_2 = -\frac{qL^2}{12} \quad (4)$$

岩梁内任意一点弯矩的表达式为

$$M_x = \frac{q}{12}(6Lx - 6x^2 - L^2) \quad (5)$$

(2) 充填开始至顶板与充填体接触阶段。采煤工作面由开切眼向前推进,工作面后方开始充填作业。刚进入采空区的充填材料为料浆状态,该状态下充填体不具有抗压强度。随着工作面推进距离的增加,充填材料逐渐凝结,充填体的抗压强度逐渐增加。但由于开采设计、充填工艺等方面的因素,充填材料不可能 100% 填充采空区,即充填体

距离顶板有一定距离的欠接顶量,所以顶板受到的支撑力仍然为两端煤壁和支架的作用力,但顶板的暴露面积不断增加。定义该种状态下的基本顶为“悬空基本顶”,意即其未受到充填体的支撑作用,则“悬空基本顶”的极限跨距^[24-25]

$$L_l = h \sqrt{\frac{2\sigma_t}{q}} \quad (6)$$

式中, h 为基本顶厚度,m; σ_t 为基本顶抗拉强度,MPa; q 为载荷集度,MPa。

当工作面推进距离达到“悬空基本顶”的极限跨距时,充填体需要对顶板岩梁提供一定的支撑作用力,否则基本顶就会发生破断,影响充填效果。

该阶段由于充填体还没有起到支撑顶板的作用,顶板岩梁的剪力和弯矩可以用式(2)和式(5)表示。

2.2 充填体支撑顶板后岩梁受力分析

随着工作面持续推进,胶结充填材料不断充填采空区,充填体逐渐形成一定的抗压强度并支撑顶板。假设在胶结材料充入采空区前,顶板下沉量非常小,在工程上可忽略不计。胶结充填材料的单轴抗压强度为时间的函数,为简化运算过程,假设充填体强度随时间线性变化,胶结充填材料刚充入采空区时不具备支撑功能,即抗压强度为0,28 d后的抗压强度趋于稳定,为终期强度^[21],则沿工作面推进方向,可将充填区域划分为两个区域:强度增长区和强度恒定区,划分的界限为胶结充填体的强度能够支撑顶板及上覆岩层载荷的位置。当胶结充填材料接顶时,高浓度胶结充填采煤采场力学模型如图3所示。

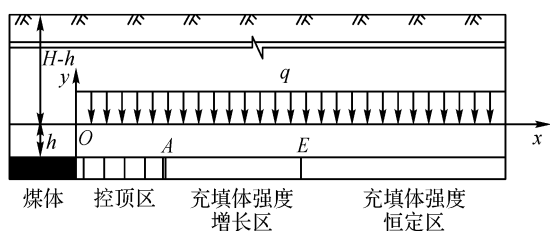


图3 高浓度胶结充填开采岩梁力学模型

Fig.3 Mechanics model of rock beam in high concentration cemented filling mining

充填体刚进入采空区时不具备支撑功能,即图3中A点的抗压强度为0,随着距A点距离的增加,充填体抗压强度逐渐增加,到达其中的某一点E时,其抗压强度恰好能完全抵抗上覆岩层的载荷,则E点的理想位置应该在强度增长区和强度恒定区交界处附近。如果E点位置距离采煤工作面太

远,会导致充填体强度形成过慢,致使充填体无法及时起到支撑作用而使顶板破断;如果E点位置距离采煤工作面太近,就会要求充填体具备较高的早期强度,致使充填材料的成本增加。

取厚度为 h 的OE段岩梁为研究对象,其中O点为顶板与工作面煤壁交点,E点为充填体能完全抵抗上覆岩层载荷位置,则该段岩梁可视为一端由煤壁支撑、另一端由充填体支撑的两端固支梁。OE岩梁受力情况如下:两端固支,同时受到上覆岩层载荷 q 的作用、采场支架的作用力以及充填体的支撑作用。由此可知,胶结充填开采采场顶板岩梁为两端固支梁,可用结构力学的方法进行研究。胶结充填开采时,假设顶板在充填前的下沉量小到在工程上可以忽略的程度。充填体对顶板的支撑力随时间的增长而变大。为简化计算,将这种变化简化为一种线性关系,将模型中的岩梁视为弹性梁,则OE段岩梁的受力情况如图4所示。

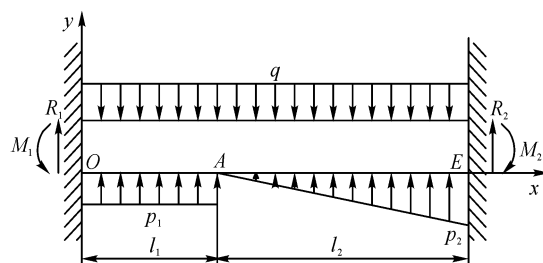


图4 高浓度胶结充填开采顶板岩梁受力分析

Fig.4 Force analysis of roof rock beam in high concentration cemented filling mining

图4中,设充填采煤支架的控顶区长度为 l_1 ,充填体强度增长区起点至充填体能完全抵抗上覆岩层载荷处E点的长度 l_2 。岩梁在煤壁处的支座反力和弯矩分别为 R_1 和 M_1 ,岩梁在E点处的支座反力和弯矩分别为 R_2 和 M_2 ;岩梁受到上覆岩层的均布载荷为 q ,支架对岩梁的支撑力为均布作用力为 p_1 ,充填体强度增长区对岩梁的作用力为线性支撑力。由充填材料强度形成特性及以上假设可知,充填材料刚进入采空区时的强度为0,在强度增长区的某一点E处,充填体强度能够完全抵抗上覆岩层载荷,设此处充填体对岩梁的作用力为 p_2 。

岩梁在竖直方向上的受力分段情况如下:

OA段:上覆岩层均布载荷 q 及支架均布作用力 p_1 。

AE段:上覆岩层均布载荷 q 及由0至 p_2 线性变化的充填体支撑作用力。

均布载荷 q 由厚度为 $H-h$ 上覆岩层自重作

用产生,设岩层共 n 层,第 i 层容重为 γ_i ,则 $q = \sum_{i=1}^{n-1} \gamma_i h_i$ 。 E 处的充填体能完全抵抗上覆岩层的荷载,因此 $p_2 = \sum_{i=1}^n \gamma_i h_i$ 。

OE 段岩梁为多支点非对称结构的超静定梁,可用分段独立一体化积分法求解^[26],两端支座反力 R_1 、 R_2 和两端弯矩 M_1 、 M_2 计算如下:

$$\begin{cases} R_1 = \frac{qL}{2} - p_1 l_1 \left(1 - \frac{l_1^2}{L^2} + \frac{l_1^3}{2L^3}\right) - \frac{p_2 l_2^3}{4L^2} \left(1 - \frac{2l_2}{5L}\right) \\ R_2 = \frac{qL}{2} - \frac{p_1 l_1^3}{L^2} \left(1 - \frac{l_1}{2L}\right) - \frac{p_2 l_2}{2} \left(1 - \frac{l_2^2}{2L^2} + \frac{l_2^3}{5L^3}\right) \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} M_1 = -\frac{qL^2}{12} + \frac{p_1 l_1^2}{12} \left(6 - \frac{8l_1}{L} + \frac{3l_1^2}{L^2}\right) + \frac{p_2 l_2^3}{12L} \left(1 - \frac{3l_2}{5L}\right) \\ M_2 = -\frac{qL^2}{12} + \frac{p_1 l_2^3}{12} \left(4 - \frac{3l_1}{L}\right) + \frac{p_2 l_2^2}{12L} \left(2l_1 + \frac{3l_2^2}{5L}\right) \end{cases} \quad (8)$$

由式(7)和式(8)可知, R_1 、 R_2 、 M_1 、 M_2 的值随 l_2 增大而增大, l_2 的大小取决于充填体强度形成的速度和采煤工作面推进的速度。如果充填体强度形成速度较慢,能够完全支撑采场上覆岩层载荷的位置距离工作面就较远, l_2 的取值会变大;如

果工作面推进速度过快,充填体能够完全支撑上覆岩层载荷的位置就会距离工作面较远, l_2 的取值也会变大。因此,胶结充填开采条件下,一方面要控制充填材料合理的强度形成速度,另一方面要控制工作面推进速度,使充填体能够及时形成合适的强度,实现充填体对顶板的支撑,从而减小顶板岩梁所受的最大剪力,有利于采场顶板控制和巷道维护。

采用垮落法处理采空区时,可将破断前的顶板岩梁视作两端固支的对称梁,两端支座的反力可用式(1)表示。比较式(7)和式(1)可知,胶结充填开采时,顶板岩梁两端的支座反力小于垮落法开采时顶板岩梁两端的支座反力,即在支架和胶结充填体的共同作用下,采煤工作面煤壁处的矿压较垮落法减小,有利于预防和治理煤壁片帮等;采空区后方的矿压也减小,有利于巷道维护和管理。

采用垮落法处理采空区时,岩梁两端支座的弯矩可用式(4)表示。比较式(8)和式(4)可知,胶结充填开采顶板岩梁两端支座弯矩的绝对值,小于垮落法处理采空区时岩梁的弯矩值,有利于顶板的完整性。

根据分段独立一体化积分法求解岩梁剪力、弯矩的表达式,见式(9)和式(10)。

$$\begin{cases} Q_x = R_1 - (q - p_1)x & 0 \leq x \leq l_1 \\ Q_x = R_1 - qx + p_1 l_1 + \frac{p_2}{2l_2} (x - l_1)^2 & l_1 \leq x \leq l_1 + l_2 \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} M_x = M_1 - R_1 x + \frac{1}{2}(q - p_1)x^2 & 0 \leq x \leq l_1 \\ M_x = M_1 - R_1 x + \frac{1}{2}qx^2 - p_1 l_1 \left(x - \frac{l_1}{2}\right) - \frac{p_2}{6l_2} (x - l_1)^3 & l_1 \leq x \leq l_1 + l_2 \end{cases} \quad (10)$$

对式(9)进行分析,找出顶板岩梁剪力最大处。

当 $0 \leq x \leq l_1$ 时,顶板上覆荷载 q 始终大于支架阻力 p_1 ,可知: $Q_{\max} = Q(0) = R_1$,即岩梁最大剪力发生在岩梁与煤壁的交点处,且最大剪力值等于岩梁煤壁端支座反力。

当 $l_1 \leq x \leq l_1 + l_2$ 时, $\frac{dQ_x}{dx} = 0$, Q_x 有极值,设极值点为 x^* 点,则 x^* 为 Q_x 在 $[l_1, l_1 + l_2]$ 区间内的驻点,即

$$x^* = l_1 + \frac{q}{p_2} l_2 \quad (11)$$

$$Q_{x^*} = R_1 - (q - p_1)l_1 - \frac{q^2 l_2}{2p_2} \quad (12)$$

可得 $Q_{x^*} < R_1$,即 $Q_{x^*} < Q(0)$ 。因此,在 $[l_1, L]$ 区间内,顶板岩梁剪力的最大值小于 $Q(0)$ 。

顶板岩梁位于充填体上方的端点 E 处的剪力为

$$Q(L) = Q(l_1 + l_2) = R_1 - qL + p_1 l_1 + \frac{p_2}{2} l_2 \quad (13)$$

整理后可得

$$Q(L) = R_1 - (q - p_1)l_1 - \left(q - \frac{p_2}{2}\right)l_2 \quad (14)$$

由式(14)可知, $Q(L) < R_1$,即 $Q(L) < Q(0)$ 。

综上分析,顶板岩梁在 $[0, L]$ 范围内的最大剪力发生在 O 点,即岩梁与煤壁的交点处,且最大剪力 $Q_{\max} = Q(0) = R_1$ 。

岩梁内任一截面的剪力分布如图5所示。

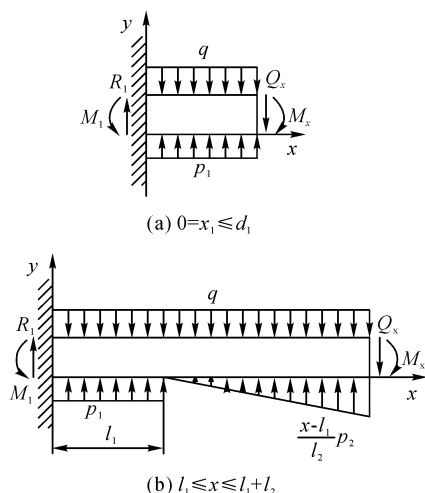


图5 顶板岩梁剪力、弯矩分布
Fig. 5 Shear stress and moment
distribution of rock beam

煤矿充填开采的最终目的是有效控制地表下沉,保护地表建筑物。充填开采时,基本顶一般不会发生断裂,仅发生适度的弯曲下沉。胶结充填开采过程中,如果充填不及时或者充填材料的强度形成速度过慢,即图4中 l_2 长度过长,会导致采空区上覆岩层逐层断裂,当工作面推进速度较快,充填体无法及时形成完全抵抗上覆岩层荷载的强度, l_2 的长度也会变大。因此要研究合理的工作面推进速度,进而控制 l_2 的长度,确保充填开采时基本顶不发生破断。

3 工作面推进速度与充填体强度形成速度关系

3.1 充填开采极限跨距

在一定的充填条件下,定义基本顶达到初次断裂时的断裂距为充填开采极限跨距。选取充填开采基本顶为研究对象,通过研究基本顶的极限跨距,确定工作面合理的推进速度。当充填体强度形成速度不同时,采场顶板岩梁的受力有两种情况:一是由于充填体强度形成缓慢或工作面推进速度较快,充填体无法及时形成完全抵抗上覆岩层荷载的强度,顶板岩梁甚至基本顶有可能会发生断裂。二是充填体具有较高的早期强度,即充填体能在较短的时间内形成完全抵抗上覆岩层荷载的强度,顶板岩梁在充填体的支撑作用下不会发生断裂,基本顶也不会发生断裂。需要重点研究第一种情况下基本顶的极限跨距。

由岩石力学可知,岩梁的破断一般为拉破坏,

其抗拉强度极限 R_T 为最大拉应力,以最大拉应力为岩梁断裂依据,当岩梁的正应力达到最大拉应力时,岩梁将发生破断,此时的跨落距离为岩梁的极限跨距,设岩梁极限跨距为 L_T ,则其满足:

$$L_T = l_1 + l_2 \quad (15)$$

L_T 的计算公式^[22]如下:

$$L_T^4 - \frac{3p_2l_1}{2p_2 - 5q}L_T^3 + \frac{30p_1l_1^2 + 10R_T h^2 - 3p_2l_1^2}{2p_2 - 5q}L_T^2 + \frac{7p_2 - 40p_1}{2p_2 - 5q}l_1^3L_T + \frac{3(5p_1 - p_2)l_1^4}{2p_2 - 5q} = 0 \quad (16)$$

式(16)即为胶结充填开采基本顶岩梁极限跨距 L_T 的求解公式。对于某充填采煤工作面,两式中的 h 、 l_1 、 q 、 p_1 、 p_2 和 R_T 均为已知数,因此方程中的 L_T 可求出。

3.2 工作面合理推进速度与充填体强度形成速度

垮落法处理采空区时,在工作面正常推进情况下,采场上部空间的岩层变形为极限弹性变形,工作面前方煤层上存在着弹性极限固定端,即峰值高支撑压力和弹性、弹塑性、塑性变形破坏三个变形区。当工作面推进速度较慢时,采场上部空间的岩层会在同一位置滞留比较长的时间,岩层变形由极限弹性变形向黏弹塑性变形发展,即岩层变形会有流变变形出现,同时还伴随着应力降低的松弛现象发生,使顶板较容易发生弯曲、下沉甚至断裂,顶板的稳定性降低。充填法处理采空区时,采场上部岩层较缓和,但也有类似的规律,因此慢速的工作面推进速度不利于对顶板的控制。

此外,胶结充填开采工作面推进速度还受到充填能力和基本顶极限跨距两个因素的影响。充填材料由地面充填工作站经管道泵送至采煤工作面,一般情况下,工作面割2~4刀煤,壁后充填一次,充填能力是影响工作面推进速度的一个重要因素。另一方面,如果工作面推进速度过快,凝结后的胶结充填材料虽然能够对采空区顶板起到支撑作用,但当控顶距与充填体强度形成区长度之和大于基本顶的极限跨距时,采空区内的充填体因强度不够无法完全支撑上覆岩层载荷,就会发生塑性破坏、削弱甚至失去支撑顶板岩层的作用,最终导致基本顶破断,严重影响充填效果。

随着煤矿充填开采技术的日益发展,充填设备向着综合机械化发展,充填能力也在不断提高。本文重点讨论,在充填能力满足充填要求的前提下,工作面推进速度与充填材料凝结时间之间的关系,找出工作面推进速度的上限 $v_{\max}$ (该状况下假设充填能力能够要求,即不考虑充填能力的限制),确

保充填体形成的强度能够及时完全支撑采空区上覆岩层荷载。对胶结充填开采条件下最大工作面推进速度 $v_{\max}$ 的定义如下:充填开采工作面正常推进状态下,能确保顶板不发生破断的工作面最大推进速度。由图2可知, E 点充填体强度已能够支撑上覆岩层荷载,因此在该临界状态下工作面的推进距离为 l_2 ,可得 $v_{\max}$ 计算公式:

$$v_{\max} = \frac{l_2}{t} = \frac{L_T - l_1}{t} \quad (17)$$

式中, $v_{\max}$ 为工作面最大推进速度, m/d ; L_T 为岩梁极限跨距, m ; l_1 为控顶距, m ; t 为充填体强度能完全支撑采空区上覆岩层荷载所需时间, d 。

由式(17)可知,对于确定的某一充填采煤工作面,工作面最大推进速度仅与充填材料强度形成时间有关,随着时间 t 的缩短,工作面最大推进速度变大,即加快充填材料强度形成的速度,在充填能力允许的条件下可加快工作面推进速度。

当充填材料配比和强度形成时间确定后,可根据式(17)计算出工作面最大推进速度,以确保基本顶不发生破断;也可根据充填能力确定工作面最大推进速度,运用式(17)求出满足该速度条件下充填材料的强度形成时间,以使充填体的强度及时满足要求。

3.3 工程实例分析

以汾西矿业集团有限责任公司新阳煤矿十采区10203工作面为充填开采示范工作面,该工作面长度 100 m,平均采高 2.2 m,走向长度 347 m,全采全充,四柱支撑式液压支架支护强度为 1.05 MPa,控顶距 5.0 m,充填体为高浓度胶结充填材料。

根据以上条件及表1中数据可知: $l_1 = 5.0 \text{ m}$, $p_1 = 1.05 \text{ MPa}$; $q = \sum_{i=1}^6 \gamma_i h_i = 4.39 \text{ MPa}$; $p_2 = \sum_{i=1}^8 \gamma_i h_i = 4.51 \text{ MPa}$ 。

10203工作面基本顶的抗拉强度为 9.8 MPa,按式(16)计算充填开采基本顶岩层极限跨距,得到: $L_T = 47.5 \text{ m}$, $l_2 = L_T - l_1 = 42.5 \text{ m}$ 。为保证采场顶板不发生破断,在支架后方 42.5 m 处,胶结充填体的三轴抗压强度与 p_2 数值相等。

根据图1(b)中充填体强度与凝结时间的线性关系,当充填体强度达到 4.51 MPa 时, $t = 12.85 \text{ d}$ 。代入式(17)计算得

$$v_{\max} = \frac{l_2}{t} = 3.33 \text{ m/d}$$

新阳矿 10203 工作面采煤机截深 0.8 m,由以上

计算结果可知,采煤机每天割煤数不能多于 4 刀,即合理的工作面推进速度为 $v = 0.8 \times 4 = 3.2 \text{ m/d}$ 。

4 结论

(1) 煤矿胶结充填开采,胶结充填体的强度随时间的推移逐渐增强,基于充填体强度的时间效应,建立了基本顶力学模型。通过分析基本顶的剪力和弯矩分布,得出顶板岩梁的最大剪力发生在岩梁与煤壁的交点处,且最大剪力在数值上等于该点的支座反力。

(2) 推导了充填开采顶板岩梁极限跨距的计算公式,基于此推导了工作面推进速度、充填体凝结时间之间的关系。当充填材料配比和强度形成时间确定后,可计算出工作面最大推进速度,以确保基本顶不发生破断。新阳煤矿 10203 工作面采煤机每天割煤数不能多于 4 刀,工作面合理推进速度为 3.2 m/d。

(3) 现阶段限制充填开采工作面推进速度的最大因素是充填能力,可根据充填能力确定工作面最大推进速度,运用式(17)求出满足该速度条件下充填材料的强度形成时间,以使充填体的强度及时满足要求。

参考文献

- [1] 钱鸣高,缪协兴,许家林,等. 论科学采矿[J]. 采矿与安全工程学报,2008,25(1):1-10.
Qian Minggao, Miao Xiexing, Xu jialin, et al. On scientized mining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2008, 25(1):1-10.
- [2] 钱鸣高. 绿色开采的概念与技术体系[J]. 煤炭科技, 2003(4):1-3.
Qian Minggao. Technological system and green mining concept[J]. Coal Science and Technology Magazine, 2003(4):1-3.
- [3] 钱鸣高,缪协兴,许家林. 资源与环境协调(绿色)开采[J]. 煤炭学报, 2007, 32(1):1-7.
Qian Minggao, Miao Xiexing, Xu jialin. Green mining of coal resources harmonizing with environment[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(1):1-7.
- [4] 杨宝贵,王俊涛,李永亮,等. 煤矿井下高浓度胶结充填开采技术[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(8):28-32.
Yang Baogui, Wang Juntao, Li Yongliang, et al. Backfill coal mining technology with high concentrated cementing material in underground mine[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(8):28-32.

- [5] 杨宝贵,韩玉明,杨鹏飞,等. 煤矿高浓度胶结充填材料配比研究[J]. 煤炭科学技术,2014,42(1): 30-33.
Yang Baogui, Han Yuming, Yang Pengfei, et al. Research on ratio of high concentration cementation stowing materials in coal mine[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(1): 30-33.
- [6] 张吉雄,吴强,黄艳利,等. 矸石充填综采工作面矿压显现规律[J]. 煤炭学报,2010,35(S1):1-4.
Zhang Jixiong, Wu Qiang, Huang Yanli, et al. Strata pressure behavior by raw waste backfilling with fully-mechanized coal mining technology[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(S1): 1-4.
- [7] 张吉雄,李剑,安泰龙,等. 矸石充填综采覆岩关键层变形特征研究[J]. 煤炭学报,2010,35(3): 357-362.
Zhang Jixiong, Li Jian, An Tailong, et al. Deformation characteristic of key stratum overburden by raw waste backfilling with fully-mechanized coal mining technology[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(3): 357-362.
- [8] 刘建功,赵家巍,李蒙蒙,等. 煤矿充填开采连续曲形梁形成与岩层控制理论[J]. 煤炭学报,2016,41(2):393-391.
Liu Jianguo, Zhao Jiawei, Li Mengmeng, et al. Continuous curved beam formation and strata control theory in coal backfill mining[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(2): 393-391.
- [9] 常庆粮,周华强,柏建彪,等. 膏体充填开采覆岩稳定性研究与实践[J]. 采矿与安全工程学报,2011,28(2):279-282.
Chang Qingliang, Zhou Huaqiang, Bai Jianbiao, et al. Stability study and practice of overlying strata with paste backfilling[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2011, 28(2): 279-282.
- [10] 杨宝贵,李永亮,宋晓波,等. 充填开采工作面矿压显现规律数值模拟分析[J]. 煤炭工程,2013,45(4):69-70,73.
Yang Baogui, Li Yongliang, Song Xiaobo, et al. Analysis on numerical simulation on mine strata pressure behavior law of backfill coal mining face[J]. Coal Engineering, 2013, 45(4): 69-70, 73.
- [11] 杨鹏飞. 煤矿胶结充填开采覆岩移动及矿压显现规律研究[D]. 北京:中国矿业大学(北京),2016.
- [12] 冯锐敏. 充填开采覆岩移动变形及矿压显现规律研究[D]. 北京:中国矿业大学(北京),2013.
- [13] 陈杰,杜计平,张卫松,等. 矸石充填采煤覆岩移动的弹性地基梁模型分析[J]. 中国矿业大学学报, 2012, 41(1): 14-19.
Chen Jie, Du Jiping, Zhang Weisong, et al. An elastic base beam model of overlying strata movement during coal mining with gangue back-filling[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2012, 41(1): 14-19.
- [14] 邓雪杰,张吉雄,黄鹏,等. 特厚煤层上向分层充填开采顶板移动特征分析[J]. 煤炭学报,2015,40(5):994-1000.
Deng Xuejie, Zhang Jixiong, Huang Peng, et al. Roof movement characteristics in extra thick coal seam mining with the upward slicing filling technology[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(5): 994-1000.
- [15] 郭忠平,黄万朋. 矸石倾斜条带充填体参数优化及其稳定性分析[J]. 煤炭学报,2011,36(2): 234-238.
Guo Zhongping, Huang Wanpeng. Parameter optimization and stability analysis of inclined gangue strip-fillings[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(2): 234-238.
- [16] 黄艳利. 固体密实充填采煤的矿压控制理论与应用研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2012.
- [17] 王磊,张鲜妮,郭广礼,等. 固体密实充填开采地表沉陷预计模型研究[J]. 岩土力学,2014,35(7): 1973-1978.
Wang Lei, Zhang Xianni, Guo Guangli, et al. Research on surface subsidence prediction model of coal mining with solid compacted backfilling[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(7): 1973-1978.
- [18] 顾伟,张立亚,谭志祥,等. 基于弹性薄板模型的开放式充填顶板稳定性研究[J]. 采矿与安全工程学报,2013,30(11):886-891.
Gu Wei, Zhang Liya, Tan Zhixiang, et al. Study on roof stability of open backfilling based on elastic plate model[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013, 30(11): 886-891.
- [19] 赵有生. 新阳煤矿高浓度胶结充填料浆输送特性研究[D]. 北京:中国矿业大学(北京),2014.
- [20] 李茂辉,杨志强,王有团,等. 粉煤灰复合胶凝材料充填体强度与水化机理研究[J]. 中国矿业大学学报,2015,44(4):650-655.
Li Maohui, Yang Zhiqiang, Wang Youtuan, et al. Experiment study of compressive strength and mechanical property of filling body for fly ash composite cementitious materials[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2015, 44(4): 650-655.
- [21] 李石林,冯涛,朱卓慧. “煤体一支柱(架)一胶结体”联合作用下顶板超静定梁模型[J]. 煤炭学报, 2013, 38(10): 1736-1740.
Li Shilin, Feng Tao, Zhu Zhuohui. Mechanical model of

- statically indeterminate beam of roof under the combined action of coal body, pillar (support) and cemented fill [J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38 (10): 1736 - 1740.
- [22] 李石林, 冯涛, 朱卓慧. 胶结充填开采两端固定岩梁模型及梁式断裂分析[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2014, 45(8): 2793 - 2797.
- Li Shilin, Feng Tao, Zhu Zhuohui. Mechanical model of rock beam with both ends fixed and force analysis of roof fracture in cemented filling mining[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2014, 45(8): 2793 - 2797.
- [23] 龙驭球, 包世华. 结构力学 I [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [24] 陈磊. 中厚煤层综采工作面支架实时工作阻力确定[J]. 工矿自动化, 2016, 42(12): 36 - 41.
- Chen Lei. Determination of real-time working resistance of support in fully-mechanized working face of medium-thickness coal seam[J]. Industry and Mine Automation, 2016, 42(12): 36 - 41.
- [25] 程占博, 孔德中, 杨敬虎. 综放工作面厚硬顶板破坏特征与支架工作阻力确定[J]. 矿业科学学报, 2016, 1(2): 172 - 180.
- Cheng Zhanbo, Kong Dezhong, Yang Jinghu. The breaking characteristics of thick-hard roof and determination of support capacity in fully mechanized caving face [J]. Journal of Mining Science and Technology, 2016, 1(2): 172 - 180.
- [26] 李银山. Maple 材料力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009: 123 - 138.
- (责任编辑: 王晓玲)