

DOI: 10.16285/j.rsm.2019.0294

基于岩梁-块体理论的巷道软弱层直接顶板破坏形式研究

陈 虎¹, 叶义成^{1,2}, 王其虎¹, 胡南燕¹, 刘 冉¹, 江慧敏¹

(1. 武汉科技大学 资源与环境工程学院, 湖北 武汉 430081; 2. 武汉科技大学 湖北省工业安全工程技术研究中心, 湖北 武汉 430081)

摘 要: 巷道软弱层直接顶板具有挠曲破坏、整体冒落和拱形冒落 3 种破坏形式, 顶板厚度变化是影响其破坏形式的主要原因之一。对此, 基于梁理论和块体理论, 构建了顶板岩梁-块体力学模型, 以揭示软弱层直接顶板破坏形式的变化规律。在此基础上, 定义了挠曲破坏安全系数和剪切破坏安全系数, 建立了顶板不同破坏形式的顶板临界厚度计算模型, 以判定不同顶板厚度对应的顶板破坏形式。通过实例演算显示, 随着顶板厚度的增加, 顶板破坏形式由挠曲破坏逐渐变为整体冒落再变为拱形冒落。同时, 当顶板厚度超过一定值时, 冒落拱高度不再显著增加。基于相同的工程条件和力学参数, 通过实例演算和数值模拟对比分析, 计算得到演算工况下从挠曲破坏到整体冒落的顶板临界厚度均为 0.14 m, 从整体冒落到拱形冒落的顶板临界厚度为 0.8 m, 结果具有一致性。表明应用顶板临界厚度计算模型能够有效地判定顶板破坏形式。该研究成果可为矿山巷道在软弱层直接顶板管控及支护方案设计提供理论参考。

关 键 词: 软弱层直接顶板; 顶板厚度; 岩梁-块体理论; 破坏形式; 临界值

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2020) 04-1447-08

Study of direct roof failure form of soft layer in roadway based on rock beam-block theory

CHEN Hu¹, YE Yi-cheng^{1,2}, WANG Qi-hu¹, HU Nan-yan¹, LIU Ran¹, JIANG Hui-min¹

(1. School of Resource & Environmental Engineering, Wuhan University of Science & Technology, Wuhan, Hubei 430081, China;

2. Industrial Safety Engineering Technology Research Center of Hubei Province, Wuhan University of Science & Technology, Wuhan, Hubei 430081, China)

Abstract: The direct roof of weak stratum in roadway has three kinds of failure modes: deflection failure, integral caving and arch caving. The change of roof thickness is one of the main reasons affecting the failure modes. Therefore, based on beam theory and block theory, a mechanical model of roof rock beam-block was constructed to reveal the changing law of the direct roof failure form in weak strata of roadway. On this basis, the safety factors of flexural failure and shear failure were defined, and the calculation models of critical thickness of the roof with different failure modes were established to determine the corresponding failure modes of the roof with different roof thicknesses. The case study shows that with the increase of roof thickness, the failure mode of the roof gradually changes from flexural failure to integral caving and then to arch caving. At the same time, when the thickness of the roof exceeds a certain value, the height of the caving arch no longer increases in a substantial manner. Based on the same engineering conditions and mechanical parameters, a comparative analysis between numerical simulation and a case calculation was carried out. The critical thickness of the roof under the case calculation conditions was 0.14 m from flexural failure to overall collapse, and 0.8 m from overall collapse to arch collapse. The numerical simulation and case calculation results were consistent. It shows that the calculation model of the critical thickness of the roof can effectively determine the failure form of the roof. The research results can provide theoretical reference for direct roof control and support scheme design of mine roadway in weak stratum.

Keywords: soft layer direct roof; roof thickness; rock beam-block theory; failure form; critical value

1 引 言

巷道软弱层直接顶板是一种地下常见的工程

结构, 受顶板厚度等因素的影响会呈现不同的破坏形式^[1-3], 增加支护难度和冒顶风险, 形成地下矿山安全生产的一大隐患。

收稿日期: 2019-01-30

修回日期: 2019-07-23

基金项目: 湖北省 2017 年安全生产专项 (No. HBAJ(2017)-35); 湖北省自然科学基金 (No.2017CFC831)。

This work was supported by the Production Safety Projects of Hubei Province in 2017 (HBAJ(2017)-35) and the Hubei Province Natural Science Fund (2017CFC831).

第一作者简介: 陈虎, 男, 1995 年生, 硕士研究生, 主要从事矿山安全工程和岩土工程方向的研究。E-mail: yanjiuhu@126.com

通讯作者: 胡南燕, 女, 1991 年生, 博士, 讲师, 主要从事矿山安全技术方面的研究。E-mail: hunanyan@wust.edu.cn

对此,国内外学者针对软弱层直接顶板巷道的破坏形式^[4-6]和规律^[7-9]开展了广泛的研究。研究发现,软弱层直接顶板的破坏形式可分为挠曲破坏、整体冒落和拱形冒落 3 类^[10-11]。在此基础上,贾明魁^[12]通过受力特征分析,将 3 种破坏形式下的顶板受力特征分别对应顶板拉破坏、剪切破坏及其共同作用导致破坏 3 类。贾蓬等^[13]通过数值模拟研究得到影响软弱层直接顶板巷道破坏形式的主要因素是软弱岩层顶板的厚度和跨度。

然而,相比顶板跨度,顶板厚度在矿山生产过程中的变化更大、可控性更低。因此,针对顶板破坏形式与顶板厚度关系的研究更为丰富。其中,孙伟等^[14]基于弹性薄板理论分析了不同顶板厚度软弱层直接顶板破坏时的力学特征。研究显示,顶板破坏时的临界应力随顶板厚度的增加而增大。杨建辉等^[15]对层状顶板的稳定性开展了研究,结果表明岩层厚度增大会改善顶板稳定性,但当厚度超过一定程度后改善幅度减小。黄旭等^[16]通过数值模拟研究了软弱层直接顶板厚度与顶板破坏形式的关系,揭示了顶板破坏形式随顶板厚度增长的变化规律。

以上研究表明,顶板厚度对于软弱层直接顶板巷道的破坏形式具有重要影响。但是,根据不同软弱层直接顶板厚度分析确定巷道顶板破坏形式的理论尚不多见。鉴于此,从力学分析的角度,探索并构建适用于巷道软弱层直接顶板的力学模型,揭示软弱层直接顶板巷道随顶板厚度增加其破坏形式的变化规律。

2 巷道顶板岩梁-块体力学模型

不同的破坏形式下巷道受力特征具有显著差异,其破坏过程也有不同。其中,顶板的挠曲破坏是由直接顶板与上位岩层之间的拉破坏和挠曲破坏耦合造成,破坏过程类似梁的弯曲断裂。因此,可采用梁理论构建力学模型解释顶板的挠曲破坏现象。对于顶板整体冒落和拱形冒落破坏,其实质为冒落区与围岩的剪切破坏。对此,将冒落区集成为一个冒落块体,基于块体理论^[17],对冒落块体与围岩的剪切面进行力学分析,揭示顶板冒落的破坏机制。

综上所述,针对软弱层直接顶板巷道的破坏特征,基于梁理论和块体理论,构建顶板岩梁-块体力学模型,研究软弱层直接顶板挠曲破坏、整体冒落和拱形冒落 3 种破坏形式的变化规律。建立的岩梁-块体力学模型如图 1 所示。

图 1 中, F_A 、 F_B 为巷道两侧岩壁对顶板的支撑力; M_A 、 M_B 为巷道两侧围岩对顶板挠曲变形的约束; N 为岩梁水平方向所受轴向力; q 为上覆岩层均布载荷; q_G 为直接顶板自重对直接顶板与上位岩层连接面产生的均布拉应力; q_j 为单位面积的支护作用力; 图中曲线为岩梁轴线受力弯曲后形成的挠曲线,挠曲线与原轴线之间沿竖直方向的位移量为岩梁轴向上各点的挠度 $\omega(x)$; L 、 h 分别为直接顶板的跨度和厚度。

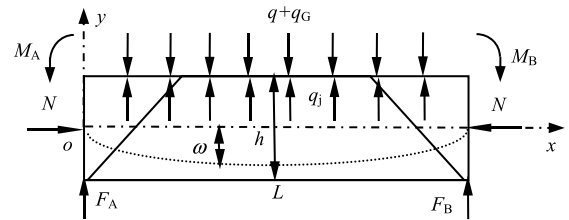


图 1 顶板岩梁-块体力学模型

Fig.1 Mechanical model of roof rock beam-block

图 1 中,由平衡条件可列弯矩方程为

$$M_x = F_A x - M_A - \frac{1}{2}(q + q_G - q_j)x^2 + N\omega(x) \quad (1)$$

由式 (1) 推得挠度方程为

$$\frac{d^2\omega}{dx^2} + a\omega = bx^2 + cx + d \quad (2)$$

其中:

$$a = \frac{N}{EI_z}, b = \frac{q + q_G - q_j}{2EI_z}, c = -\frac{F_A}{EI_z}, d = \frac{M_A}{EI_z} \quad (3)$$

式中: I_z 为模型截面惯性矩; E 为弹性模量。

边界条件为

$$\left. \begin{aligned} \omega|_{x=0} &= 0 \\ \omega|_{x=L} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

显然顶板挠度在中点处取得最大值。因此,将 $x = \frac{L}{2}$ 代入式 (2) 中计算顶板的最大挠度为

$$\omega_{\max}\left(\frac{L}{2}\right) = -\frac{L(q + q_G - q_j) \left[2LN - 2Eh^3 + 2Eh^3 \cos\left(\frac{\sqrt{3}\sqrt{L}\sqrt{N}}{\sqrt{E}h^{\frac{3}{2}}}\right) + LN \cos\left(\frac{\sqrt{3}\sqrt{L}\sqrt{N}}{\sqrt{E}h^{\frac{3}{2}}}\right) \right]}{24N^2 \cos\left(\frac{\sqrt{3}\sqrt{L}\sqrt{N}}{\sqrt{E}h^{\frac{3}{2}}}\right)} \quad (5)$$

针对顶板剪切冒落的力学特征，以冒落块体为研究对象，进行受力分析。对此，有研究表明，对于层状围岩巷道，可将顶板冒落块体设为等腰梯形块体^[18]，每个面上受均压应力，如图2所示。

图2中， σ_n 为剪切面上的正应力； τ 为剪切面上的剪应力，方向沿剪切面方向向上； α 为剪切面与水平方向的夹角； F_j 为锚杆提供的抗剪力，当采用锚杆支护时，由于支护过程中多存在锚杆穿过剪切面的现象，对顶板沿剪切面的滑移提供了一定的阻力，因此计算过程中应考虑锚杆抗剪力^[19-21]； G 为岩体的自重； H 为冒落高度。

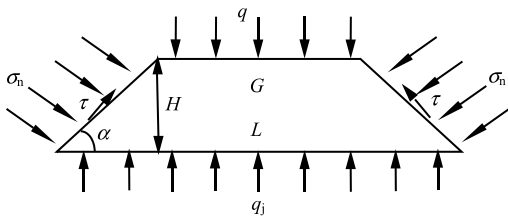


图2 冒落块体力学分析

Fig.2 Mechanics analysis of the caving block

$$\tau = \frac{1}{L} \left\{ \frac{\left(L - \frac{H}{\tan \alpha} \right) H \gamma_0 + q \left(L - \frac{2H}{\tan \alpha} \right)}{2} \sin \alpha - \frac{\sigma_n H}{\tan \alpha} - \frac{q_j L}{2} \sin \alpha - k \left[\left(q_j L - \left(L - \frac{H}{\tan \alpha} \right) H \gamma_0 - q \left(L - \frac{2H}{\tan \alpha} \right) \right) \frac{\cos \alpha}{2} - \sigma_n H \right] \frac{\sin \alpha}{H} - N_j \right\} \quad (9)$$

3 顶板破坏临界厚度计算模型

工程实践表明，当岩梁水平方向轴向力 N 达到 0.8 倍的失稳临界量 N_{cr} 时，顶板会发生挠曲破坏：

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \quad (10)$$

将 $N = 0.8N_{cr}$ 代入到式(4)中计算软弱层直接顶板破坏时的最大挠度临界值 $\omega'_{\max} \left(\frac{L}{2} \right)$ 为

$$\omega'_{\max} \left(\frac{L}{2} \right) = - \left\{ 5L^3 (q + q_G - q_j) \left[30 \cos \left(\frac{\sqrt{3} \sqrt{L} \sqrt{N}}{\sqrt{E} h^{\frac{3}{2}}} \right) + \pi^2 \cos \left(\frac{\sqrt{3} \sqrt{L} \sqrt{N}}{\sqrt{E} h^{\frac{3}{2}}} \right) + 2\pi^2 - 30 \right] \right\} / \left[8Eh^3 \pi^4 \cos \left(\frac{\sqrt{3} \sqrt{L} \sqrt{N}}{\sqrt{E} h^{\frac{3}{2}}} \right) \right] \quad (11)$$

由图2计算梯形块体沿剪切面方向的切应力为

$$\tau = \frac{G + q \left(L - \frac{2H}{\tan \alpha} \right)}{2} \sin \alpha - \frac{\sigma_n h}{\tan \alpha} - \frac{q_j L}{2} \sin \alpha - k \sigma_n - F_j \quad (6)$$

式中： σ_n 为水平方向应力，其值等于顶板轴向受力与顶板厚度的比值； k 为剪切面滑动的摩擦系数。

剪切面上的法向应力为

$$\sigma_n = \left\{ \left[q_j L - G - q \left(L - \frac{2H}{\tan \alpha} \right) \right] \frac{\cos \alpha}{2} - \sigma_n h \right\} \frac{\sin \alpha}{H} \quad (7)$$

梯形块体自重应力为

$$G = \left(L - \frac{H}{\tan \alpha} \right) H \gamma_0 \quad (8)$$

式中： γ_0 为顶板岩层的重度。

将式(7)、(8)代入式(6)得

定义顶板挠曲破坏安全系数 r_1 ，以反映顶板挠曲破坏的可能性，其值等于顶板破坏时最大挠度临界值与顶板最大挠度的比值。

$$r_1 = \frac{\left| \omega'_{\max} \left(\frac{L}{2} \right) \right|}{\left| \omega_{\max} \left(\frac{L}{2} \right) \right|} \quad (12)$$

由式(11)可得，当 $r_1 < 1$ 时，顶板最大挠度大于顶板发生破坏的临界值，因此顶板发生挠曲破坏；当 $r_1 > 1$ ，顶板最大挠度小于顶板发生破坏的临界值，不会发生挠曲破坏。这里，满足 $r_1 = 1$ 时的顶板厚度 h_1 为软弱层直接顶板挠曲破坏到整体冒落的临界厚度。

对于顶板的剪切冒落破坏，根据摩尔-库仑准则，在二维应力状态下剪切面上的抗剪强度 τ_f 为

$$\tau_f = c + \sigma_n \tan \varphi \quad (13)$$

式中： c 为岩体凝聚力； φ 为岩体的内摩擦角。

定义 r_2 为剪切破坏安全系数, 以反映顶板发生剪切破坏的可能性。其值等于剪切面抗剪强度与剪应力的比值。

$$r_2 = \frac{|\tau_f|}{|\tau|} \quad (14)$$

当 $r_2 < 1$ 时, 顶板沿剪切面产生滑移, 顶板冒落。当 r_2 取极小值 $r_{\min}$ 时, 此时为顶板整体冒落厚度的极限值。这里, 满足 $r_2 = r_{\min}$ 时的顶板厚度 h_2 为整体冒落到拱形冒落的临界厚度。

因此, 顶板挠曲破坏到整体冒落的顶板临界厚度 h_1 由顶板挠曲破坏安全系数 r_1 求取得到; 顶板整体冒落到拱形冒落的顶板临界厚度 h_2 由顶板剪切破坏安全系数 r_2 求取得到。这里, 顶板厚度 h 和临界厚度 h_1 、 h_2 的相对关系如图 3 所示。

当 $h < h_1$ 时, 顶板发生挠曲破坏, 如图 3(a)所示。当顶板厚度 $h_1 < h < h_2$, 顶板发生剪切冒落破坏。同时, 由于顶板冒落高度为软弱层巷道直接顶板厚度时, 剪切破坏安全系数达到最小值。因此, 顶板将沿软弱层直接顶板与上位岩层之间的接触面冒落, 冒落形式为整体冒落, 冒落高度 H 等于顶板厚度 h ,

如图 3(b)所示。当顶板厚度 $h > h_2$ 时, 顶板发生剪切冒落破坏。有所不同的是, 此时的冒落形状变为拱形^[11], 如图 3(c)所示。

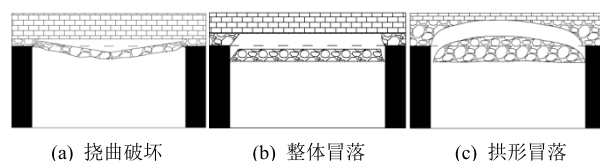


图 3 软弱层直接顶板巷道破坏形式
Fig.3 Failure form of the direct roof roadway
in the weak layer

4 实例演算及数值模拟

4.1 实例演算

某矿山为缓倾斜沉积型矿床, 其主要工业矿层的直接顶板为厚 0~6 m 的层状夹薄层状泥质白云岩和云质泥岩互层, 岩体中相对软弱结构面发育, 顶板不稳固, 井下巷道全程采用了锚杆支护。但是局部地区依然存在冒落情况, 需要采用锚喷或锚网加强支护。

根据该矿山地质资料和岩石力学参数手册^[22-23]确定顶板赋存参数, 见表 1。

表 1 软弱层直接顶板参数
Table 1 Weak layered roof parameters

弹性模量/GPa	上赋岩层荷载/MPa	水平方向应力/MPa	支护作用力/kPa	顶板跨度/m	岩石密度/(kg · m ⁻³)	剪切面角度/(°)
1.2	0.262	0.131	50	2	2 620	85

其他参数保持不变, 软弱层直接顶板厚度逐渐增加, 根据顶板临界厚度计算模型, 利用式 (12) 计算得到顶板挠曲破坏安全系数随顶板厚度的变化曲线如图 4(a)所示; 利用式 (14) 计算得到顶板剪切破坏安全系数随冒落拱高度的变化曲线如图 4(b)所示。

如图 4(a)所示, 当软弱层直接顶板厚度小于 0.14 m 时, $r_1 < 1$, 顶板发生挠曲破坏。当顶板厚度超过 0.14 m, 顶板挠曲破坏安全系数增幅变缓, 进入一个相对稳定的阶段。为验证挠曲破坏安全系数对顶板挠曲破坏的表征效果, 作出顶板最大挠度随顶板厚度变化曲线作为对照, 如图 4(a)所示。从顶板最大挠度变化曲线可以看出, 当顶板厚度小于 0.14 m 时, 随着顶板厚度的增加, 顶板最大挠度显著减少; 当顶板厚度超过 0.14 m 时, 顶板最大挠度减小速率变缓。结果与挠曲破坏安全系数分析结果一致。

由图 4(b)可知, 当顶板厚度大于 0.14 m 小于

0.8 m 时, 顶板发生剪切破坏, 破坏类型为冒落型, 冒落高度为顶板厚度, 冒落形式为整体冒落。当顶板厚度为 0.8 m 时, 剪切破坏安全系数达到极小值, 此时顶板冒落形式由整体冒落变为拱形冒落。需要说明的是, 根据压力拱理论, 当顶板冒落高度达到一定值时, 会形成自稳平衡拱, 拱以上岩体不再冒落。因此, 当顶板厚度超过一定值时, 冒落高度不再显著增加。由图 4(b)可以看出这一点, 当冒落拱高度超过 0.8 m 时, 剪切破坏安全系数开始逐渐回升, 表明顶板沿此高度冒落的可能性越来越小。

4.2 数值模拟对比分析

采用 FLAC^{3D} 软件对该工程条件下不同顶板厚度的软弱层直接顶板巷道进行数值分析, 与理论计算结果进行对比。为消除边界效应, 根据圣维南原理, 确定模型的尺寸为 20 m×20 m×20 m, 四周施加水平约束, 底部施加垂直约束, 上部施加上覆岩体自重应力。巷道为整体结构, 宽 5 m, 高 2.8 m, 两帮与底板夹角为 75°。由于实际情况中剪切面的位

置、角度受顶板中弱结构面的赋存情况等影响，为保证数值模拟条件与理论计算中的一致，在巷道顶板两帮位置设置两个接触面，作为顶板变形破坏的剪切面，剪切面的参量与表1一致，数值模拟模型如图5所示。

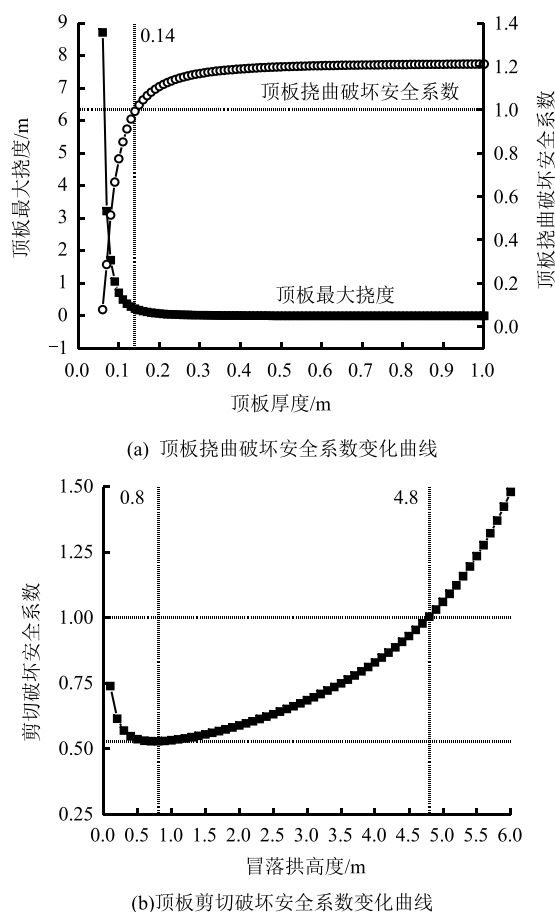


图4 模型计算结果
Fig.4 Calculated results of the model

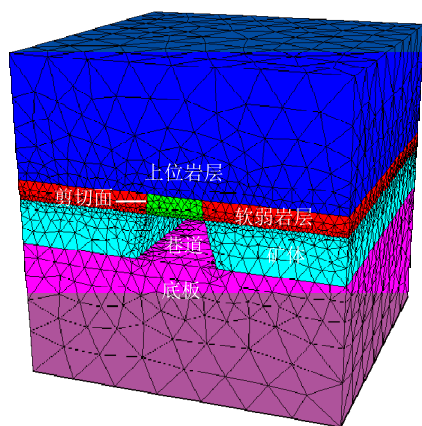


图5 数值模拟模型
Fig.5 Numerical simulation model

根据理论计算的结果，该工程条件下，顶板挠曲破坏到整体冒落破坏临界厚度为0.14 m，整体冒

落到拱形冒落的顶板临界厚度为0.80 m。基于这两个顶板厚度值，设置0.08、0.11、0.14、0.17、0.20、0.40、0.60、0.80、1.00、1.20、2.40、3.60、4.80、6.00 m 3组共14个不同软弱层直接顶板厚度的数值模拟模型。通过数值计算结果和理论计算结果进行对比分析，检验理论计算结果的有效性。

对不同顶板厚度下的顶板最大沉降量进行分析，如图6所示。需要说明的是，无论顶板厚度如何变化，模拟结果中这里的顶板最大沉降量均集中在顶板中部。从理论角度看，顶板中部的变形量等于顶板整体沉降值加上顶板中部的挠度，因此，顶板中部的变形量始终为最大沉降量，这与模拟结果是一致的。

图6中显示，当顶板厚度小于0.14 m时，顶板最大沉降量随着顶板厚度增加而减小，顶板中部发生挠曲断裂破坏的可能性随之减小。当顶板厚度在0.14~0.80 m内，顶板最大沉降量与顶板厚度近似呈现对数型增长。当顶板厚度超过0.80 m后，顶板最大沉降量与顶板厚度呈线性增长。这里，0.14 m和0.80 m为顶板最大沉降量随顶板厚度的变化曲线中的临界点和转折点。

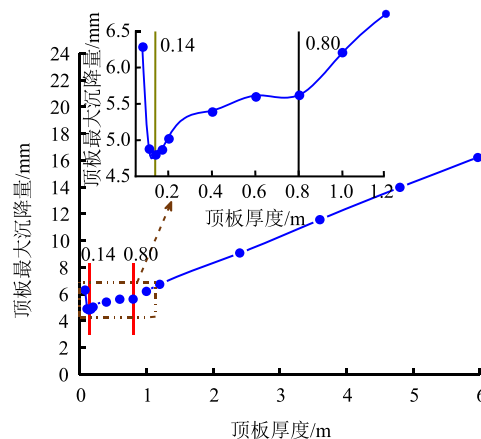


图6 不同软弱层状顶板厚度下的顶板最大沉降量
Fig.6 Maximum settlement of the roof under different thicknesses of the soft layered roof

为进一步表征不同顶板厚度的顶板破坏形式变化规律，对不同顶板厚度下的巷道位移等值线图进行分析，如图7所示。

由图7可以看出，当软弱层直接顶板厚度为0.08 m时，直接顶板中部存在一个位移等值线集中且密集的区域。与其他位置相比，位移等值线越密集的区域内的变形梯度更大，因此，更易最先受到破坏^[24-26]，这里称之为变形集中区。其破坏形式表现为顶板在该区域的断裂破坏。

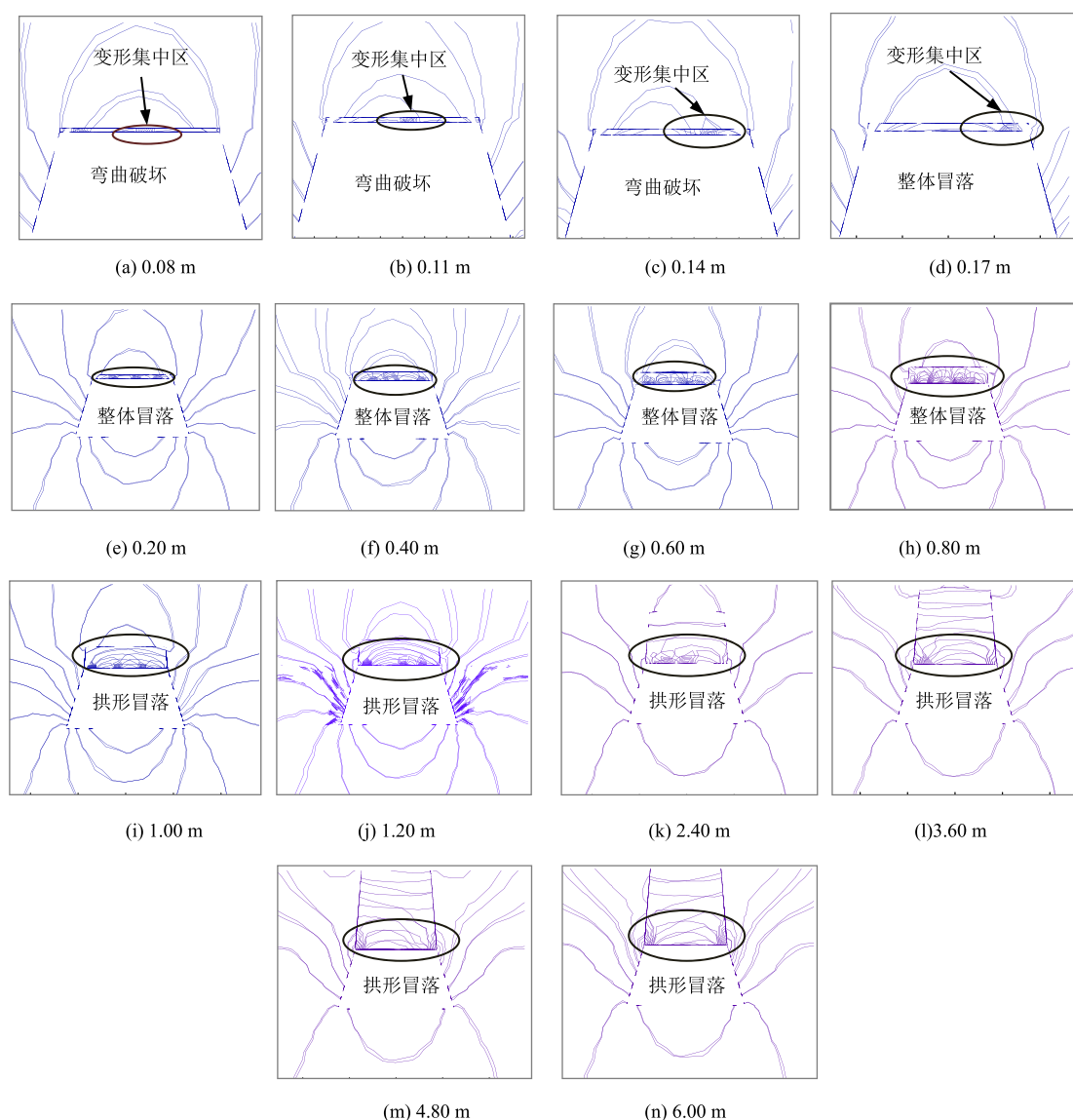


图7 不同软弱层状顶板厚度下的巷道位移等值线

Fig.7 Roadway displacement contours under different thicknesses of the weak layered roof

随着顶板厚度增加,变形集中区逐渐向顶板两侧转移。当顶板厚度超过 0.14 m 时,变形集中区转移到直接顶板与右侧帮顶的剪切面处。此时,顶板由中部破坏变为沿剪切面滑落冒落。其破坏形式表现为直接顶板的整体冒落。冒落区域为直接顶板与上位岩层的连接面、两侧的剪切面和下部的临空面所围成的区域。

当顶板厚度进一步增加,冒落区域也随之增加。在顶板厚度超过 0.8 m 时,直接顶板内分散无序的位移等值线变为拱形位移等值线,顶板由整体冒落变为拱形冒落,冒落拱的拱顶和直接顶板与上位岩层的连接面相切。需要注意的是,随着顶板厚度的增加,冒落拱的高度不再继续增加,而是维持在 0.8~1.2 m 范围内。

综上所述,通过数值模拟对比分析的结果与理

论计算结果具有较好的一致性。

5 结 论

(1) 构建了软弱层直接顶板巷道岩梁-块体力学模型,揭示了随顶板厚度增加顶板从挠曲断裂到整体冒落再到拱形冒落破坏形式的变化规律。

(2) 定义了挠曲破坏安全系数 r_1 、剪切破坏安全系数 r_2 ,建立了软弱层顶板不同破坏形式下的顶板临界厚度计算模型。通过实例验算和数值模拟对比分析,得到的结果具有一致性,表明该模型能够有效地判定顶板破坏形式。

(3) 建立了不同顶板厚度下顶板破坏形式判据,据此可为巷道顶板的支护方案优化提供参考。当顶板为挠曲破坏,可通过加密顶板中部锚杆间排距减少顶板最大挠度;当顶板为整体冒落,可通过施加

预紧力、增加锚杆长度等措施将顶板挤压悬挂于上部坚硬岩层;当顶板为拱形冒落,可调整锚杆锚入角度,增大剪切面抗剪强度防止顶板冒落。

参 考 文 献

- [1] 王启耀, 蒋臻蔚, 杨林德. 层状岩体巷道弯曲变形的有限元模拟[J]. 岩土力学, 2006, 27(7): 1101-1104.
WANG Qi-yao, JIANG Zhen-wei, YANG Lin-de. Numerical modeling of flexural deformation of laneway in layered rock mass[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(7): 1101-1104.
- [2] 蒋力帅, 马念杰, 白浪, 等. 巷道复合顶板变形破坏特征与冒顶隐患分级[J]. 煤炭学报, 2014, 39(7): 1205-1211.
JIANG Li-shuai, MA Nian-jie, BAI Lang, et al. Deformation and failure characteristics and roof caving hidden danger classification of roadways compound roof[J]. **Journal of China Coal Society**, 2014, 39(7): 1205-1211.
- [3] 来兴平, 蔡美峰, 肖江, 等. 软弱层状岩石巷道顶板破坏过程模拟研究[J]. 中国矿业, 2000(6): 27-29.
LAI Xing-ping, CAI Mei-feng, XIAO Jiang, et al. Simulation research on failure of weak laminated roof of underground workings[J]. **China Mine Magazine**, 2000(6): 27-29.
- [4] KHALYMENDYK I, BARYSHNIKOV I A. The mechanism of roadway deformation in conditions of laminated rocks[J]. **Journal of Sustainable Mining**, 2018, 17(2): 41-47.
- [5] YIOUTA-MITRA P, SOFIANOS A I. Multi-jointed stratified hard rock roof analysis and design[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2018, 106: 96-108.
- [6] 姚团, 叶义成, 王其虎, 等. 基于量纲分析的缓倾斜空区顶板稳定性的影响规律研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(11): 4232-4241.
YAO Nan, YE Yi-cheng, WANG Qi-hu, et al. Study on influence of stability of gently inclined stope roof based on dimensional analysis[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(11): 4232-4241.
- [7] 张华磊, 涂敏, 程桦, 等. 薄基岩煤层大采高综采工作面漏顶机制及控制技术研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(6): 1697-1704.
ZHANG Hua-lei, TU Min, CHENG Hua, et al. Roof leakage mechanism and control technology study of fully mechanized large mining height mining face of thin bedrock seams[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(6): 1697-1704.
- [8] XIE Sheng-rong, GAO Ming, CHEN Dong-dong, et al. Stability influence factors analysis and construction of a deep beam anchorage structure in roadway roof[J]. **International Journal of Mining Science and Technology**, 2018, 28(3): 445-451.
- [9] 王志刚, 郭晓菲. 双河煤矿采动巷道顶板裂隙的分形研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(8): 2377-2384.
WANG Zhi-gang, GUO Xiao-fei. Study of roof fissures of mining induced roadway in Shuanghe Coal Mine based on fractal theory[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(8): 2377-2384.
- [10] 林崇德. 层状岩石顶板破坏机理数值模拟过程分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(4): 24-28.
LIN Chong-de. Procedure analysis of numerical simulation for the failure mechanism of laminate roof[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1999, 18(4): 24-28.
- [11] 李长权, 戚文革. 层状顶板破断机理数值研究[J]. 武汉理工大学学报, 2008(3): 95-98.
LI Chang-quan, QI Wen-ge. Numerical research on mechanism of roof falling of stratified roof[J]. **Journal of Wuhan University of Technology**, 2008(3): 95-98.
- [12] 贾明魁. 岩层组合劣化型冒顶机制研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(7): 1343-1347.
JIA Ming-kui. Research on roof falling mechanism of deteriorative strata combination supported by bolts[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(7): 1343-1347.
- [13] 贾蓬, 唐春安, 王述红. 巷道层状岩层顶板破坏机理[J]. 煤炭学报, 2006, 31(1): 11-15.
JIA Peng, TANG Chun-an, WANG Shu-hong. Destroy mechanism of tunnel with stratified roof[J]. **Journal of China Coal Society**, 2006, 31(1): 11-15.
- [14] 孙伟, 谢飞鸿, 郭磊. 基于弹性薄板理论的巷道层状顶板破坏的能量法分析[J]. 石家庄铁道学院学报(自然科学版), 2009, 22(2): 50-53.
SUN Wei, XIE Fei-hong, GUO Lei. The destroy mechanical analysis of tunnel with stratified roof[J]. **Journal of Shijiazhuang Railway Institute (Natural**

- Science), 2009, 22(2): 50-53.
- [15] 杨建辉, 王伟堂, 夏建中. 煤巷层状顶板锚杆组合铰接拱支护机理数值模拟研究[J]. 煤炭科学技术, 2004, 32(6): 65-67.
- YANG Jian-hui, WANG Wei-tang, XIA Jian-zhong. Simulation research on support mechanism of bolt combined jointed arch in bedded roof of seam gateway[J]. **Coal Science and Technology**, 2004, 32(6): 65-67.
- [16] 黄旭, 马念杰, 贾安立, 等. 软岩厚度对层状顶板破坏特征影响分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(2): 343-346.
- HUANG Xu, MA Nian-jie, JIA An-li, et al. Analysis of influence of weak weak terrain thicknesses on feature of strata roof[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(2): 343-346.
- [17] 陈庆发, 秦世康, 尹庭昌. 裂隙岩体巷道围岩最大可动区域解算研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2019, 36(2): 240-247.
- CHEN Qing-fa, QIN Shi-kang, YIN Ting-chang. Study on solution to the maximum movable region of the surrounding rock in fractured rock mass roadways[J]. **Journal of Mining & Safety Engineering**, 2019, 36(2): 240-247.
- [18] 王超, 伍永平. 煤矿层状围岩巷道顶底板稳定性研究[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2015: 90-100.
- WANG Chao, WU Yong-ping. Study on roof and floor stability of layered surrounding rock roadway in coal mine[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2015: 90-100.
- [19] 郝登云, 崔千里, 何杰, 等. 锚杆锚索支护巷道层状顶板变形特征及离层监测研究[J]. 煤炭学报, 2017, 42(增刊 1): 43-50.
- HAO Deng-yun, CUI Qian-li, HE Jie, et al. Deformation characteristics and separation monitoring of layered roof roadway supported with bolts and cables[J]. **Journal of China Coal Society**, 2017, 42(Suppl.1): 43-50.
- [20] 种照辉, 李学华, 姚强岭, 等. 基于正交试验煤岩互层顶板巷道失稳因素研究[J]. 中国矿业大学学报, 2015, 44(2): 220-226.
- CHONG Zhao-hui, LI Xue-hua, YAO Qiang-ling, et al. Orthogonal experimental research on instability factor of roadway with coal-rock interbedded roof[J]. **Journal of China University of Mining & Technology**, 2015, 44(2): 220-226.
- [21] 陈虎, 叶义成, 王其虎, 等. 尖林山采区临近巷道开挖对既有巷道锚杆支护的影响[J]. 金属矿山, 2018(9): 57-62.
- CHEN Hu, YE Yi-cheng, WANG Qi-hu, et al. Influence of adjacent tunnel excavation on the bolt support of existing tunnel in Jianlinshan mining area[J]. **Metal Mine**, 2018(9): 57-62.
- [22] 刘佑荣. 岩体力学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2002.
- LIU You-rong. Rock mechanics[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2002.
- [23] 叶金汉. 岩石力学参数手册[M]. 北京: 中国水利电力出版社, 1991.
- YE Jin-han. Manual of rock mechanics parameters[M]. Beijing: China Hydraulic and Electric Engineering Press, 1991.
- [24] 于国功. 高速公路桥梁永久桥面高程观测点优化布设[J]. 工程建设与设计, 2016(6): 123-125, 128.
- YU Guo-gong. Optimal placement of permanent measuring points on bridge height observation[J]. **Construction & Design for Project**, 2016(6): 123-125, 128.
- [25] 李常文. 近水平层状顶板冒落过程数值分析[J]. 煤矿安全, 2011, 42(5): 144-146.
- LI Chang-wen. Numerical analyzing falling process of horizontal strata roof[J]. **Safety in Coal Mines**, 2011, 42(5): 144-146.
- [26] 张国联, 赵显涛. 岩体诱导冒落的数值模拟[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2012, 33(8): 1190-1193.
- ZHANG Guo-lian, ZHAO Xian-tao. Numerical simulation on induced caving of rock mass[J]. **Journal of Northeastern University (Natural Science)**, 2012, 33(8): 1190-1193.