

· 采选工程 ·

下向进路人工假顶失稳机理研究

杨红伟 赵彬 蒲成志 衣永亮
(中南大学资源与安全工程学院)

摘要:基于薄“板”和简支“梁”理论对下向进路人工假顶失稳机理进行了研究,综合考虑了进路布置方式、底筋作用、微裂隙发展等因素。分析了薄“板”模型适用于上下进路平行相错布置情况,易发生贯穿整个进路顶板的失稳冒落,甚至发生悬臂“梁”状态的折断;简支“梁”模型适用于上下进路斜交(或垂直)情况,人工假顶不会发生连环破坏,但采用吊筋对人工假顶稳定性影响不大,真正起作用的是底筋网。对下向进路胶结充填采矿法生产的矿山具有很好的指导作用。

关键词:下向进路;人工假顶;薄“板”理论;简支“梁”理论;失稳机理

中图分类号:TD853.35⁺3 **文献标识码:**A **文章编号:**1674-6082(2009)12-0013-03

Research on Instability Mechanism of Artificial Roof of Underhand Drift

Yang Hongwei Cao Ping Pu Chengzhi Yi Yongliang

(School of Resources and Safety Engineering, Central South University)

Abstract: Instability mechanism of artificial roof of underhand drift has been studied on the basis of the theories of thin “plate” and simply supported “beam”, which has considered the approach drift layout, bottom tendons role, development of micro-cracks and other factors synthetically. The study shows that the thin “plate” model is applicable to the situation that upward drift and underhand drift are parallel crisscross. But it easily causes unstable caving throughout the roof into the path, even worse is that the cantilever “beam” fractures. The simply supported “beam” model is applicable to the situation that upward drift and underhand drift are oblique (or vertical) crisscross, and a chain of damages will not occur in the artificial roof. But using of suspended tendons has little effect on stability of the artificial roof and the tendon network really works. It gives a reference to the mines that apply the cemented filling mining method for the underhand drift.

Keywords: Underhand drift; Artificial roof; Thin “plate” theory; Simply supported “beam” theory; Instability mechanism

1 引言

下向进路胶结充填采矿法是回采高品位、贵重及稀有金属、矿岩极破碎矿床的主要方法。目前,国内使用下向进路胶结充填采矿法的矿山有山东焦家金矿、灵山金矿、界河金矿、甘肃金川铜镍矿、江西武山铜矿、新疆喀拉通克铜镍矿等。下向进路采场是在上一分层进路人工假顶的保护下进行作业的,人工假顶的稳定性十分重要。国内矿山构筑人工假顶

时,采用高配比胶结充填料进行打底充填,再用低配比的料浆进行部分充填,且多布置钢筋网进行加固。打底层即为人工假顶的承载层,是承受上覆岩层压力的主要部分。长期的生产实践表明,国内下向进路人工假顶的稳定性并不理想,曾在多个矿山发生过人工假顶失稳的事故,导致了巨大的经济损失,威胁到员工的人身安全。因此,对人工假顶的失稳机理进行研究,具有重要的理论和现实意义。

文献^[1-4]采用薄“板”理论模型对下向进路人工假顶进行分析,文献^[5,6]采用简支“梁”理论模型进行分析,但并没有对假顶的失稳机理作深入剖析,

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50774093)。

杨红伟(1984-),男,硕士研究生,主要从事岩土、采矿技术研究,410083 湖南省长沙市。

忽略了上下进路平行或交错布置、底筋作用、微裂隙发展等的影响。笔者在总结上述薄“板”和筒支“梁”理论模型的基础上,全面分析了人工假顶的失稳机理,对下向进路胶结充填采矿法生产的矿山具有很好的指导作用。

2 力学模型

根据弹性薄“板”理论,有以下两种情况。

(1) $0 \leq x \leq l$ 时,承载层所受的最大拉应力发生在承载层下表面 O' 处 ($x=0$), 其值为:

$$\sigma_{tmax}(0) = \frac{6M(0)}{h^2}, \quad (1)$$

式中: $M(0) = -\frac{ql(\alpha^2 l^2 + 3\alpha l + 3)}{6\alpha(\alpha l + 1)}$,

$$\alpha = \left[\frac{3(1-\mu^2)E_j}{E_l h^3 M} \right]^{\frac{1}{4}}.$$

(2) $x \geq l$ 时 ($x \leq -l$ 情况与其对称), 在 $x = x_A = l + \frac{1}{\alpha} \arctg \frac{3(\alpha l + 1)}{2\alpha^2 l^2 + 3\alpha l}$ 处, 发生最大拉应力:

$$\sigma_{tmax}(x_A) = \frac{6M(x_A)}{h^2}, \quad (2)$$

式中: $M(x_A) = -\frac{ql}{6\alpha(\alpha l + 1)} e^{-\arctg \frac{3(\alpha l + 1)}{2\alpha^2 l^2 + 3\alpha l}} \times \left\{ \begin{aligned} & (2\alpha^2 l^2 + 6\alpha l + 3) \sin \left[\arctg \frac{3(\alpha l + 1)}{2\alpha^2 l^2 + 3\alpha l} \right] + \\ & (2\alpha^2 l^2 - 3) \cos \left[\arctg \frac{3(\alpha l + 1)}{2\alpha^2 l^2 + 3\alpha l} \right] \end{aligned} \right\}.$

即 $\alpha l > 3.34$ 时, $|M(0)| < |M(x_A)|$, 在 A-A' 截面 ($x = x_A$ 处) 产生最大弯矩; $\alpha l < 3.34$ 时, 在 O-O' 截面产生最大弯矩。

根据筒支“梁”模型, 承载层的应力为:

$$\begin{cases} \sigma_x = \frac{6(q+ph)}{h^3}(l^2-x^2)y + \frac{(q+ph)y}{h} \left(\frac{4y^2}{h^2} - \frac{3}{5} \right) \\ \sigma_y = -\frac{py}{2} \left(1 - \frac{4y^2}{h^2} \right) - \frac{q}{2} \left(1 + \frac{y}{h} \right) \left(1 - \frac{2y}{h} \right)^2 \\ \tau_{xy} = -\frac{6(q+ph)}{h^3} \left(\frac{h^2}{4} - y^2 \right) x \end{cases} \quad (3)$$

式中, M 为进路假顶某处的弯矩; h 为假顶厚度; q 为假顶上部矿岩体产生的均布荷载; $2l$ 为进路假顶水平方向上的最小尺寸; μ 为假顶材料的泊松比; E_j 为进路侧帮基础的弹性模量; E_l 为人工假顶的弹性模量, 即胶结充填假顶的弹性模量; p 为梁的容重。

3 失稳机理分析

3.1 薄“板”模型失稳机理

下向进路回采多为隔一采一方式, 一步回采进路两侧为矿体, 而二步回采进路两侧为充填体, 故进

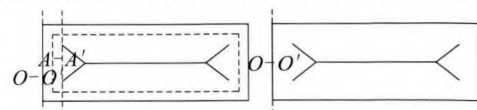
路侧帮支座的物理力学参数不同, 会引起 αl 值的大小变化, 导致危险截面和危险点的位置发生改变, 从而造成不同的破坏形式, 必须分别进行研究^[7]。本研究将 $\alpha l > 3.34$ 情况称之为“硬支弱板”结构, $\alpha l < 3.34$ 情况称之为“软支弱板”结构。

3.1.1 “硬支弱板”结构

此种结构多发生于一步回采进路, 顶板为充填体, 支座为矿石, 在 A-A' 截面 (危险截面) 发生拉伸破坏。破坏时最先在 A 点 (危险点) 产生沿进路长度方向的裂纹, 裂纹进一步发展将产生应力集中现象, 再加上采矿本身是一个动态的应力卸载和加载过程, 最终将使 A 处的裂纹继续扩展, 直至贯穿整个 A-A' 横截面。由于上、下进路平行布置时, 某进路顶板的一侧是由固定的一条充填体顶板组成的, 因此, 任一个 A-A' 断面处出现裂纹时, 产生的应力都集中在此充填体顶板走向方向, 从而使顶板沿长度方向断裂成两部分。同时, 由于对称结构, 在进路的另半侧也有相同的情况。而且, 由于在两侧支座处产生了断裂, 导致进路顶板沿进路走向中央位置出现较大变形, 而此处结构弱面沿进路长轴暴露, 粘结力较弱, 产生拉应力集中, 并逐渐沿进路长轴方向延伸, 最终产生拉伸破坏, 严重时会造成充填假顶整体冒落。破坏形式如图 1(a), 图中虚线表示周边裂纹。

3.1.2 “软支弱板”结构

此种结构多发生于二步回采进路, 承载层为充填打底部分, 各项物理力学指标较优, 支座为普通充填部分, 此时直接在 O-O' 截面 (危险截面) 产生拉伸破坏。由于上覆均布载荷作用, O-O' 截面产生沿走向的裂纹, 而此处为人工假顶两部分充填体的粘结处, 粘结力较弱, 裂纹必定沿进路长轴方向扩展, 从而造成拉伸破坏, 如图 1(b) 所示。值得注意的是, 上下进路平行交错布置时, 由于上部相邻两进路充填体间的粘结力相对较弱, 而顶板中央位置拉伸破坏会导致整个顶板处于拉应力状态, 当此拉应力超过两进路充填体粘结力时, 会在相邻两顶板充填体处发生拉伸破坏, 亦产生图 1(a) 虚线所示的裂纹。



(a) “硬支弱板”结构 (b) “软支弱板”结构

图 1 人工假顶薄“板”的破坏形式

以上分析充分解释了某些进路沿长轴方向, 在中心线位置出现长裂纹, 甚至贯穿整个进路顶板长

度方向,导致整个顶板的失稳机理。但观察也表明,裂纹不一定出现在进路中心线上,这是因为不同进路(比如一、二步回采进路)两侧的支撑方式和接顶程度不同,作用于承载层两个支撑力间的中心位置不一定在进路几何中心线上,因此承载层下表面最大拉应力的位置就不一定都在进路的几何中心线上。然而,上下进路平行相错布置时,偶尔会发生上下进路错开距离太小,甚至没有错开的情形,此时下部进路回采时,上部人工假顶处于悬臂“梁”状态,如图2所示。此时,在回采工作面顶板上产生很大的拉应力集中。经计算,假设进路长度为50m,宽3m,则此拉应力为简支“梁”最大拉应力的33倍,必然导致人工假顶折断、塌陷。因此,在进路布置时,应使上下层进路斜交(或垂直),即使平行布置,也要保证上下进路错开一定距离。

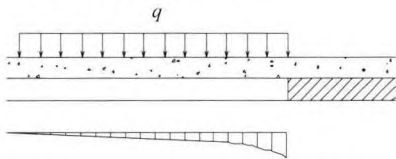


图2 人工假顶悬臂“梁”的破坏形式

3.2 简支“梁”模型失稳机理

σ_x 绝对值随 y 的增大而增大,随 x 的增大而减小,因此 σ_x 的最大值发生在“梁”的上下表面中心位置,且下表面为拉应力,上表面为压应力。

σ_y 不随 x 的变化而变化,与 y 呈非线性关系,并随 y 坐标的减小而增大,可见 σ_y 的最大值发生在“梁”的上表面。由 σ_y 的应力分布图可知, σ_y 均为压应力,一般而言,该应力不会致使“梁”发生破坏。

τ_{xy} 的绝对值随着 y 的增大而减小,与 x 成正比,因此 τ_{xy} 的最大值发生在“梁”两端的中心位置。

由于充填体的抗拉强度明显小于其抗压强度,承载层的危险截面为“梁”的中截面,危险点在此截面最下端^[8]。换言之,承载层B在上覆载荷 q_1 的作用下,在A点(危险点)产生最大拉应力 σ_b ,当其大于承载层的抗拉强度 $[\sigma_b]$ 时,即在A点形成垂直于“梁”的裂纹,该裂纹迅速发展并贯穿B层,造成承载层的破坏,如图3(a)所示。此时B层形成一类似悬臂“梁”的结构,如图3(b),它不但受到来自D层的压应力 q_2 作用,也承受自重力 G 的作用,在B层上表面产生较大的拉应力,最大拉应力出现在悬臂“梁”上表面固定端O点(危险点)。当该点所受最大拉应力超过其抗拉强度时,形成拉裂纹并迅速发展,最终造成承载层B的冒落。同理,当承载层B破坏冒落后,上覆载荷 q_1 即由普通充填体D层承

受,并在其下表面产生最大拉应力 σ_d ,一般 σ_d 小于B层的抗拉强度 $[\sigma_d]$,裂纹不再扩展,否则普通充填体D层亦破坏,从而造成重大安全问题,影响正常生产。

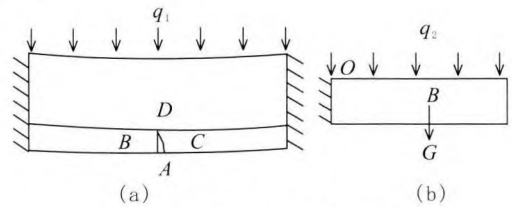


图3 人工假顶“梁”的破坏形式

无论是在A点或O点的裂纹基本上都是在较小的范围内产生的,由于各“梁”之间的粘结力较弱,此裂纹无法将应力集中沿进路长轴方向传递相邻“梁”上,即此裂纹没有起到控制作用^[9]。因此,某个“梁”拉断破坏后,不会迅速引起相邻“梁”的连环破坏,对整个进路的稳定性破坏较小。这一特点可充分解释进路人工假顶在局部区段顶板发生断裂,而其他地区段完好的情况。值得注意的是,如果充填料浆在进路内的流动产生离析,会形成结构面,恶化打底承载层的承载性能,加速裂纹的进一步发展,甚至导致整个承载层冒落。

目前,多数矿山在打底形成人工假顶承载层时,采用吊筋加底筋网的构筑方式。根据上述分析,最大拉应力的方向与吊筋的方向垂直,吊筋方向的 σ_y 表现为压应力状态,因此,吊筋只是充当锚杆,起锚杆支护的悬吊作用,而当进路斜交(或垂直)布置或平行相错布置但进路长度不超过40~50m时,承载层强度足以抗衡其自重产生的竖向拉应力和剪应力,人工假顶不会出现破坏,故吊筋也就失去了悬吊的作用。相反,底筋可增加人工假顶的抗拉强度,因此,真正起到加固作用的是底筋网。

4 结论

(1)薄“板”力学模型适用于上下分层进路平行相错布置的情况,易于沿相邻充填体假顶间的结构弱面发生拉伸破坏,甚至贯穿整个进路顶板长度方向,导致整个顶板的失稳冒落,且上下进路平行相错布置时,易发生上部人工假顶处于悬臂“梁”状态,在回采工作面顶板上产生很大的拉应力集中,回采作业安全性差,应尽量避免这种情况。

(2)简支“梁”力学模型适用于上下分层进路斜交(或垂直)的情况,主要破坏形式为中截面上的拉伸破坏,但由于各“梁”之间的粘结力较弱,此破坏不会迅速引起相邻“梁”的连环破坏,对整个进路顶板稳定性破坏较小。(下转第40页)

在刚体系统动力学中,接触力^[5]为:

$$F_{c ij} = -k\delta_{ij}^n + c\dot{\delta}_{ij}, \quad (6)$$

式中, k 、 c 分别为刚度和阻尼系数; δ_{ij} 为穿透度, 即 $\delta_{ij} = R_{yi} - R_{yj} - r$; R_{yi} 、 R_{yj} 为相对位移矢量。

掘进机履带行走装置是一个典型的多接触碰撞系统, 履带与地面、履带与支重轮之间均存在碰撞力和摩擦力, 其碰撞参数见表 1。

表 1 碰撞参数

最大阻尼时 贯入深度 /mm	力线性 指数	构件刚 度系数/ (N/mm)	最大阻尼 系数/(N -sec/mm)	静摩擦 系数	动摩擦 系数	回归 系数
0.1	1.5	100000	50	0.1	0.1	0.00778

3 虚拟样机建模

利用接口软件 Mechanism/pro, 在 Pro/e 中对掘进机整机模型装配体刚体定义。对需要研究的部件逐一添加约束后, 将模型导入 Adams/view 中添加驱动, 再对其模型进行验证 (Model, Verify), 确保映射到运动模型中的约束及驱动满足运动要求。然后, 在 Adams/view 环境下对模型添加驱动, 定义各零部件的材料属性等, 软件会自动计算质心、转动惯量等质量信息, 完成 Adams/view 软件操作环境和虚拟样机分析的前处理阶段。

通过上述过程, 建立的纵轴式掘进机虚拟样机模型如图 7 所示。

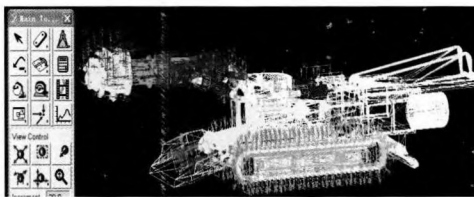


图 7 掘进机虚拟样机

(上接第 15 页)

(3) 上下进路平行相错布置时, 应注意避免上部人工假顶处于悬臂“梁”状态; 矿山采用的吊筋对人工假顶承载层的稳定性影响不大, 真正起作用的是底筋网。

参 考 文 献:

[1] 江文武, 徐国元, 中国生. 下向分层进路式胶结充填体顶板稳定性分析[J]. 江西有色金属, 2007, 21(4): 12~15.
 [2] 赵伏军, 李夕兵, 赵国彦等. 进路法回采顶柱人工假顶的稳定性分析[J]. 金属矿山, 2002(4): 27~29.
 [3] 黄玉诚, 孙恒虎. 高水固结充填下向进路假顶参数设计方法[J]. 有色金属, 2001, 53(2): 15~17
 [4] 黄玉诚, 孙恒虎, 刘文永. 下向进路充填采矿学模型的探讨

4 结 论

(1) 基于 Pro/e 的变量化设计和实体造型技术, 完成了纵轴式掘进机各组成部分的建模与装配, 得到了整机的三维实体模型。

(2) 分析截割头空间载荷、履带与支重轮、履带与地面间接触力的性质, 确定了其计算方法。

(3) 完成对整机装配体模型刚体定义、部件约束添加, 将建立的纵轴式掘进机三维模型传递到机械系统动力学仿真分析软件中, 定义零部件材料属性以及驱动, 解决了行走机构各零部件接触力及载荷施加问题。对模型进行验证, 完成其前处理过程, 确保映射到运动模型中的约束及驱动满足运动要求。

(4) 利用 Proe/Adams 联合仿真方法, 建立纵轴式掘进机整机的虚拟样机的模型, 增加了模型的仿真精度, 比较直观地再现了纵轴式掘进机的工作原理, 为研究不同工况下掘进机振动特征创造了条件。

参 考 文 献:

[1] 李晓谔著. 掘进机截割的关键技术研究[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
 [2] 李晓谔著. 掘进机截割头设计与研究[M]. 北京: 中国华侨出版社, 1997.
 [3] 李晓谔, 沙水东. 纵轴式掘进机截割不同对象的载荷模拟及优化设计[J]. 黑龙江科技学院学报, 2006, 25(11): 17~19.
 [4] 丁法乾. 履带式装甲车辆悬挂系统动力学[M]. 国防工业出版社, 2004
 [5] 聂崇训. ADAMS 分析软件在履带式车辆性能预测中的应用[J]. 工程机械, 2003, 11(11): 3~4.

(收稿日期 2009-10-20)

[J]. 有色金属, 1999, 51(4): 1~7.

[5] 韩 斌, 张升学, 邓 建等. 基于可靠度理论的下向进路充填体强度确定方法[J]. 中国矿业大学学报, 2006, 35(3): 372~376.
 [6] 王新民, 徐东升. 下向进路采矿法充填体质量的综合评价[J]. 中国矿业, 2006, 15(11): 62~65.
 [7] 徐芝纶. 弹性力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1988.
 [8] 徐秉业, 刘信声. 应用弹塑性力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1995.
 [9] JOHN T C, CHARIES C I. Reliability applied to slope stability analysis [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 120(8): 2180~2207.

(收稿日期 2009-08-13)