



基于不同充填接顶率的采空区顶板拱架自稳效应

姜立春^{1,2}, 陈 鹏², 吴爱祥³

(1. 华南理工大学 土木与交通学院, 广州 510640;

2. 华南理工大学 安全科学与工程研究所, 广州 510640;

3. 北京科技大学 土木与环境工程学院, 北京 100083)

摘 要:以金属矿采空区顶板为对象, 构建以顶板跨度(L), 冒落高度(H)为变量的三铰拱力学模型, 推导出不同接顶率(m)下顶板最大拱轴力表达式, 结合岩体临界轴力判别式, 研究充填体不同接顶率下空区顶板的拱架自稳效应。以某金属矿山不同跨度的 3 个采空区为例, 通过顶板最大拱轴力计算, 分析不同接顶率对顶板拱架支撑作用的影响; 利用数值计算及矿山地压监测数据, 对比校验分析结果的合理性。结果表明: 随着充填接顶率的增加, 顶板最大轴力随之降低; 当充填接顶率达到 80% 时, 顶板的轴力值低于临界值, 顶板拱架支撑效果明显。

关键词:三铰拱模型; 临界轴力; 拱架自稳效应; 充填接顶率; 顶板

文章编号: 1004-0609(2019)-01-0187-07

中图分类号: TD325

文献标志码: A

地下开采后形成形状大小不一的采空区, 破坏了原岩既有的应力平衡。当采空区顶板冒落后, 岩体的承载结构随之发生变化, 由梁(或深梁)承载转为拱架结构承载, 作用在顶板上的拉应力转为沿着拱轴方向的压应力^[1-2]。若岩体所受的轴向压应力过大, 会导致岩体完全丧失承载力, 进而导致顶板失稳垮塌。高质量充填采空区可有效保护顶板, 防止由此诱发的大规模地压灾害发生。提高充填体接顶率是发挥采空区顶板自稳作用的重要措施^[3-4], 已经引起业内高度关注。

目前, 部分学者开展了充填体对采空区稳定的控制效果研究^[5-10]。朱鹏瑞等^[5]利用 FLAC3D 数值模拟软件, 定量分析了接顶率与顶板稳定性的关系。吴爱祥等^[6]引入拱架效应理论, 建立不同开采阶段充填体力学模型, 确定了三种应力状态下充填体的目标强度。阚甲广等^[7]发现提高充填部位顶板承载性能可降低充填体受力, 增强充填体稳定性。王明旭^[8]研究充填体与不同厚度顶板组成的复合体在轴向力下的相互作用机理, 确定了充填体具有储能和应力转移的作用。唐亚男等^[9]发现岩石在受压时其抗压强度与周围充填体强度有密切关系。宋卫东等^[10]认为充填体-岩柱的承压过程主要分为 4 个阶段, 分别为岩柱试件承载阶段、岩柱试件破坏阶段、充填体和岩柱共同承载直到

破坏阶段、充填体和岩柱散体承压阶段。总体来说, 国内学者主要通过数值模拟方法进行采空区充填效果评估, 没有从力学角度量化分析不同接顶率的作用, 也没有提出充填接顶率的区间阈值以维系空区自稳。分析结果对实际工程的指导作用有待进一步提高。

本文拟在分析顶板变形破坏的基础上, 构建空区顶板近似三铰拱拱轴曲线结构力学模型, 开展不同充填接顶率下空区顶板轴力分析, 推导出不同接顶率下最不利截面拱轴压应力表达式, 依据临界轴力判别式, 研究充填后采空区顶板自稳性能, 借助工程验证分析结果, 为采空区治理提供理论指导。

1 三铰拱顶板力学模型

采空区形成后, 原来矿体上覆岩层将转入悬空状态。受自重作用、机械扰动、爆破作用和水力侵蚀分化等影响, 岩体内部的裂隙不断发育、扩展、贯通, 部分岩体将不断剥离、脱落^[11-12]。随着破坏加剧, 局部脱落后形成岩拱的拉应力超过岩体极限抗拉强度时, 中心区域将出现大的拱形垮塌, 最终形成“拱状自稳结构”, 岩体将形成新的自稳平衡。此时, 可将

空区顶板岩层划分为亚稳定易冒落区、自稳极限平衡区和稳定区^[13](见图1)。

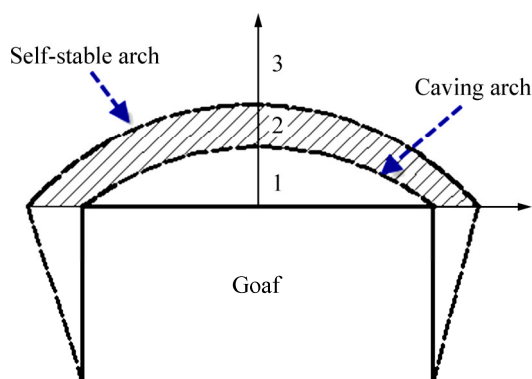


图1 空区顶板的稳定状态分区

Fig. 1 Steady state partition of roof: 1—Sub-stable caving area; 2—Ultimate self-stable area; 3—Stable area

亚稳定易冒落区对顶板的自稳无支撑作用,在顶板稳定分析时可忽略其作用的影响,此时,采空区顶板的受力分析可转化为对自稳极限平衡区的受力分析。

采空区充填后,充填体与拱形顶板直接接触而产生支护作用,顶板受力状态随之发生改变。将顶板、充填体与围岩看作一个系统进行考虑,为了简化分析,假设如下:

1) 亚稳定易冒落区已完全冒落,采空区拱形顶板类似为隧道拱圈,上覆岩层压应力均匀施加在空区顶板上;

2) 冒落后的拱形顶板视为连续等截面曲梁且岩体性质一致,截面厚度为自稳极限平衡区内岩体厚度,即冒落拱高度与稳定平衡拱高度的差值,即图1中2所代表区域的厚度;

3) 充填体与顶板接触部位无转动约束,简化为铰支承;顶板中部岩体裂隙发育,简化为铰接。

模型中岩体垂直方向上受自重作用,水平方向构造应力作用。由于浅地表开采,水平方向的构造应力作用远小于垂直方向自重应力作用,可忽略水平方向构造应力的影响^[14]。因此,充填后空区的顶板可简化为垂直方向上受均布荷载作用的三铰拱结构体(见图2)。

空区顶板简化为三铰拱结构后,以压力拱形式维持静力平衡。顶板三铰拱结构沿着拱轴线切线方向仅受轴向压力作用。若轴向压力过大将导致等效拱发生挤压破坏,顶板岩体将发生失稳破坏。

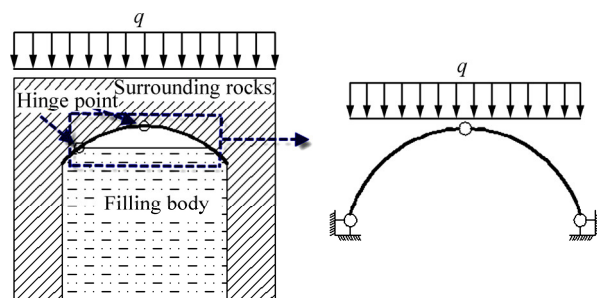


图2 顶板等效拱结构模型

Fig. 2 Equivalent model of arch structure of roof

2 接顶率与顶板稳定性关系

2.1 顶板拱轴压力计算

考虑岩拱的对称性,取三铰拱的一侧进行分析,可得顶板力学计算简图(见图3)。

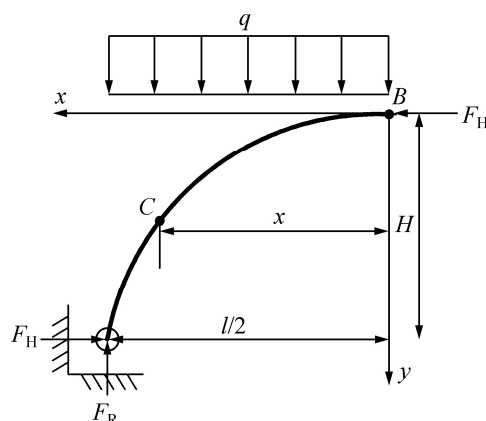


图3 拱轴线受力分析图

Fig. 3 Force analysis diagram of arch axis

冒落后的拱形顶板岩体发挥承载作用,所受力由抵抗拉应力转换为抵抗压应力^[15],最大主应力方向的轨迹线即为合理拱轴线,根据结构力学理论求得合理拱轴线方程为

$$y = \frac{4Hx^2}{l} \quad (1)$$

图3中, F_H 和 F_R 为铰接点支座反力, l 是空区跨度, q 为上覆围岩自重。冒落拱高度 H ^[16] 可表示为

$$H = l/(2\alpha) \quad (2)$$

式中: α 岩石坚固性系数,大小为岩石极限单轴抗压强度的 1/10。

由静力平衡分析可知,当上覆荷载 q 一定时,根据 B 点弯矩 M_B (大小为 $ql^2/8$),可求得支座反力 F_H 为

$$F_H = \frac{M_B}{H} = \frac{lq\alpha}{4} \quad (3)$$

由图(3)分析可知,拱轴线上任意点 C 处水平方向支座反力均为 $lq\alpha/4$, 支撑力为 F_R (大小为 qx), 合力 F_N 可表示为

$$F_N = \frac{q\sqrt{\alpha^2 l^2 + 16x^2}}{4} \quad (4)$$

因 F_N 的受力方向为拱轴线切线方向, 合力 F_N 即为拱轴线的轴向压应力。

由式(4)知, 轴向压力 F_N 的大小与 x 成正相关。因此, 位于拱脚处轴向压力最大, 该位置为顶板的最不利截面。

2.2 拱轴压力与接顶率关系

影响充填体接顶率的物理因素有顶板形状、空区跨度、接顶宽度等。取充填后空区的一侧进行分析(见图4)。图中 L 表示为接顶宽度。

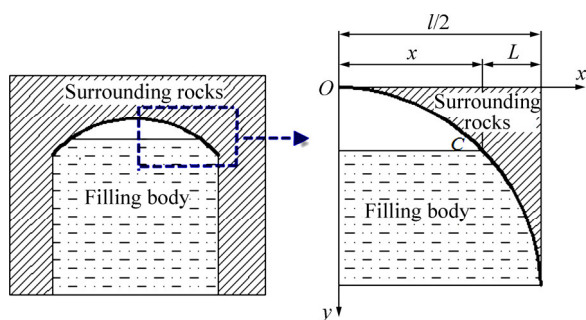


图4 接顶过程中各参数关系示意图

Fig. 4 Diagram of relationships among parameters during roof-contacted filling process

接顶率 m 可用接顶宽度 L 与跨度 l 的比值表示, 即

$$m = 2L/l \quad (5)$$

拱脚任意 C 点的横坐标 x 与接顶率 m 的关系式为

$$x = \frac{l - lm}{2} \quad (6)$$

由图4可知, 拱脚位置取决于充填体与顶板的接触部位。随着充填接顶率不同, 拱脚位置发生变化, 最不利截面的位置也将发生改变, 此时, 该拱脚处轴力为顶板最大轴力。将式(6)代入到式(4)中, 可得拱形顶板最大轴力($F_{\max}$)与接顶率(m)关系表达式为

$$F_{\max} = \frac{ql\sqrt{\alpha^2 + 4(1-m)^2}}{4} \quad (7)$$

2.3 顶板稳定性判别

顶板最不利截面能承受的临界轴力 F 可以用抗压强度 σ_1 及截面宽度 s 的乘积表示^[17], 即

$$F = \sigma_1 \cdot s \quad (8)$$

式中: F 为保证拱形顶板不发生失稳破坏的临界轴力; σ_1 为等效岩体抗压强度; s 为结构件断面面积, 平面问题时 s 即为结构件的宽度。根据普氏拱理论, 稳定平衡拱的高度为冒落拱高度的2倍, 由图1可知, 自稳极限平衡区岩体的厚度为冒落拱高度^[18]。

对某一充填的采空区而言, 将 $F_{\max}$ 与临界轴力 F 进行比较, 若最大轴力 $F_{\max}$ 大于 F , 则该充填接顶位置不安全, 拱形顶板有失稳风险, 反之则可认为顶板安全稳定。

3 实例分析

某矿山为大型钨锡多金属矿床, 属于岩体外接触带成矿构造, 矿体主要受EW向石英脉控制, 形成地层、构造、岩浆岩相互影响的成矿体系。该矿山采用浅孔留矿法开采, 矿体呈五层楼产状分布, 分支交叉。经过多年开采, 目前已经形成了大小不一的采空区群, 地压活动频繁。目前, 矿山主要采用全尾砂胶结充填法治理采空区, 防止地表塌陷。

为了研究不同充填接顶率下充填体对空区顶板的充填效果, 选取该矿山V320矿体330~380 m中段空区进行分析。采空区跨度分别设为 $L_1=60$ m、 $L_2=70$ m、 $L_3=80$ m, 分别编号为 k_1 、 k_2 、 k_3 。采空区高度 h 为40 m。依据矿山实际测量数据, 矿岩、充填体的物理力学参数如表1所示。

表1 矿岩及充填体物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of ore rock and filling body

Type	$E/$ GPa	$T/$ MPa	$\varphi/(^\circ)$	$C/$ MPa	$W/$ ($N \cdot m^3$)	μ
Ore body	28	6.5	40	14	27.3	0.26
Surrounding rock	35	8.8	45	18	25.5	0.24
Filling body	0.8	0.67	36	0.66	19.8	0.18

3.1 结果分析

由空区跨度与冒落高度关系式(2)及临界轴力表达式(8), 可以求得不同跨度下顶板的冒落高度 h 及临

界轴力 F 值, 计算结果如表 2 所示。由表 2 可知, 随着空区跨度不断增加, 顶板冒落高度将不断增大, 顶板的极限轴力值也随之增大。

表 2 空区冒落高度与极限轴力

Table 2 Falling height of goaf and maximum axial force

Goaf No.	l/m	h/m	$F/10^8 N$
k1	60	4.1	2.992
k2	70	4.78	3.493
k3	80	5.47	3.998

由拱形顶板的力学分析模型关系式(7), 可求得不同接顶率下拱形顶板最大轴力值 $F_{\max}$, 如图 5 所示。图 5(a)~(c)所示分别为空区 k_1 、 k_2 、 k_3 接顶率与顶板最大拱轴压力关系图。

综合分析图 5 可知, 对空区 k_1 、 k_2 、 k_3 而言, 当空区充填接顶率为 0 时, 拱脚极限轴力较大, 顶板处于不稳定状态, 有失稳风险。究其原因, 充填体未接触顶板时, 充填体尚未起到支撑作用, 承载为 0, 顶板有垮塌风险。

随着充填接顶率不断增大, 拱脚处所受的极限轴力不断降低。表明充填体对顶板的支撑作用越来越强, 顶板稳定性不断提高。随着拱脚轴力的降低幅值变小, 表明充填接顶率越高, 充填体对顶板稳定支撑作用越来越大。

经计算, 空区 k_1 中, 顶板能承受的临界轴力 F 为 $2.99 \times 10^8 N$, 当充填接顶率小于 80% 时, 顶板最大轴力大于临界轴力 F , 顶板有失稳风险; k_2 空区中, 顶板的临界轴力 F 为 $3.4941 \times 10^8 N$, 当充填接顶率达到 80%, 顶板最大轴力小于 F , 顶板趋于稳定。同理, k_3 空区中, 顶板可的临界轴力 F 为 $3.9474 \times 10^8 N$, 当充填接顶率达到 80% 时, 顶板趋于稳定。

综上所述, 当充填体的充填接顶率不足 80% 时, 顶板稳定性较差, 有失稳风险; 当充填接顶率大于 80% 时, 可以满足安全要求。

3.2 数值分析

为了对比理论分析结果, 利用 FLAC^{3D} 软件进行不同充填体接顶率条件下, 采空区顶板位移变化模拟分析(见图 6)。记录点设在采空区拱形顶板中心区域。数值分析条件方法参照文献[19], 岩石物理力学参数选择同表 1, 受篇幅限制, 模拟分析过程略。

根据文献[20]中容许极限位移量破坏判据, 单元空区顶(底)板最大竖向位移 $\omega_{\max}$ 应满足 $\omega_{\max} \leq$

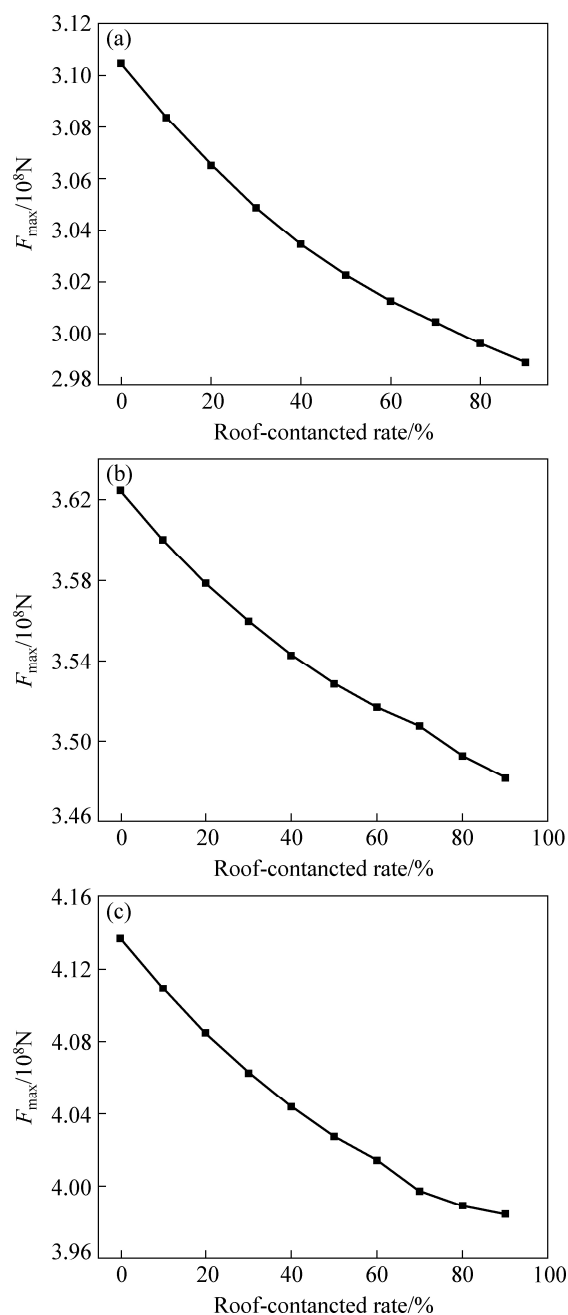


图 5 空区接顶率与顶板最大拱轴压力关系

Fig. 5 Relationship between roof-contacted filling rate and maximum arch pressure of roof: (a) Goaf k_1 ; (b) Goaf k_2 ; (c) Goaf k_3

$12l/\omega^{1.5}$, 其中 ω 为普氏系数取值为 7。经计算, 空区 k_1 、 k_2 和 k_3 顶板极限位移值分别为 38.88、45.36 和 51.84 mm。充填体接顶率为 10%、20%、30%、40%、50%、60%、70%、80% 和 90% 时, 采空区顶板最大位移值如图 7 所示。

由图 7 可知, 当接顶率达到 80% 时, 空区 k_1 、 k_2 和 k_3 顶板位移分别为 37.1、43.4 和 48.96 mm, 均小于

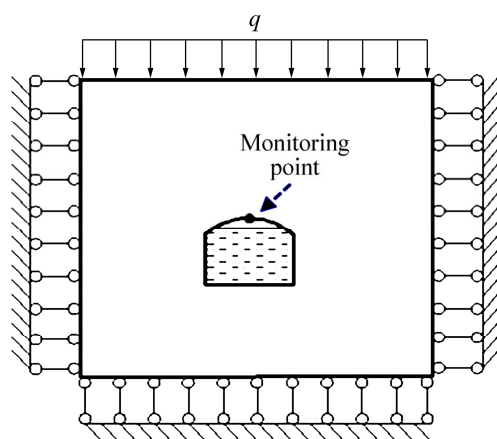


图6 空区充填数值模型

Fig. 6 Numerical model of goaf filling

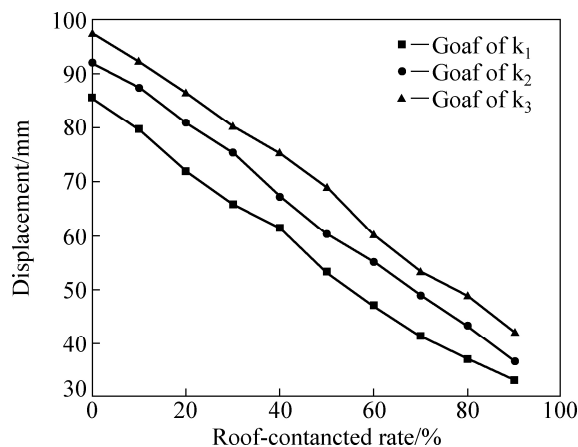


图7 顶板记录点最大竖向位移

Fig. 7 Maximum vertical displacement of roof record point

顶板极限位移值, 空区顶板处于稳定状态; 当充填接顶率小于80%时, 顶板最大位移值大于其极限位移值, 此时顶板有失稳风险。

3.3 应力监测

为了跟踪充填后采空区顶板的位移变化情况, 矿山在380 m中段空区顶板中央埋设ZLGH-20型钻孔应力计, 监测空区应力变化情况。4个月的应力监测表明(见图8), 监测点附近应力最大值为0.76 MPa, 远小于岩体抗拉强度, 充填体的支撑作用明显, 空区拱架效应显著(见图9), 验证了理论分析结果的合理性。

4 结论

1) 在分析采空区顶板垮塌过程的基础上, 构建以

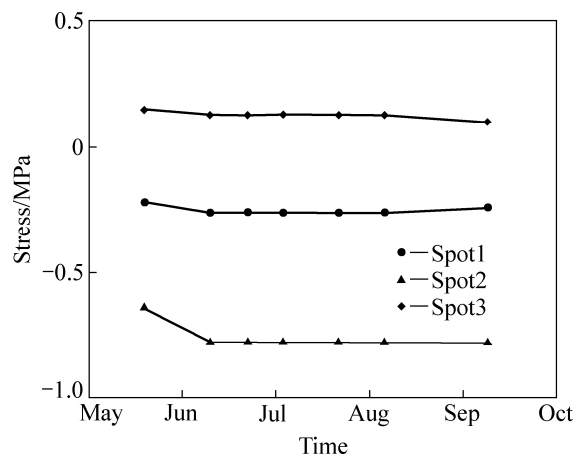


图8 380 m中段地压—时间监测数据

Fig. 8 Monitoring data of underground pressure-time in 380 m level



图9 采空区充填实景图

Fig. 9 Virtual map of goaf filling

拱形顶板跨度(L), 冒落高度(H)为变量的三铰拱力学模型, 推导出不同接顶率下顶板最不利截面轴力表达式, 基于顶板岩体极限轴力的失稳判据, 研究不同接顶率条件下顶板拱架自稳效应。

2) 从力学角度量化分析不同充填接顶率的作用, 提出维系空区自稳的接顶率阈值, 其分析结果对矿山充填工程具有一定的指导作用。

3) 充填体对顶板的影响随着充填接顶率的增加而减小。当充填接顶率达到80%时, 顶板轴力小于岩体极限轴力, 顶板拱架自稳效应显著。

REFERENCES

- [1] 钮新强, 丁秀丽. 地下洞室围岩顶拱承载力学机制及稳定拱建设方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(4): 775-786.
NIU Xin-qiang, DING Xiu-li. Bearing mechanism of top arch

- and stable arch design method for surrounding rock of underground caverns[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(4): 775–786.
- [2] WANG Yun-sen, XU Shuai, ZHANG Yue-xia. Preparation and properties of a novel expansion filling material using hydrogen peroxide for mining applications[J]. Journal of the Balkan Tribological Association, 2015, 21(4): 1224–1241.
- [3] KOUAME JOSEPH ARTHUR KOUAME, YU Feng, JIANG Fu-xing, ZHU Si-tao. A study of technical measures for increasing the roof-contacted ratio in store and cavity filling[J]. Journal of Materials Science Research, 2016, 5(1): 54–60.
- [4] 姜立春, 曾俊佳, 王国伟. 水平采空区群离散多自由度动力响应模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(1): 59–67.
JIANG Li-chun, ZENG Jun-jia, WANG Guo-wei. A discrete dynamic response model with multiple degrees of freedom for horizontal goaf group [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(1): 59–67.
- [5] 朱鹏瑞, 王东旭, 宋卫东, 张兴才, 周家祥. 充填接顶率对采场顶板稳定性影响的数值模拟研究[J]. 矿业研究与开发, 2015, 35(5): 39–42.
ZHU Peng-rui, WANG Dong-xu, SONG Wei-dong, ZHANG Xing-cai, ZHOU Jia-xiang. Numerical simulation research for the influence of roof-contacted filling rate on the stability of stope roof[J]. Mining Research and Development, 2015, 35(5): 39–42.
- [6] 吴爱祥, 沈慧明, 姜立春, 焦华喆, 王贻明. 窄长型充填体的拱架效应及其对目标强度的影响[J]. 中国有色金属学报, 2016, 26(3): 648–654.
WU Ai-xiang, SHEN Hui-ming, JIANG Li-chun, JIAO Hua-zhe, WANG Yi-ming. The Chinese Journal of Nonferrous Metals[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2016, 26(3): 648–654.
- [7] 阚甲广, 袁亮, 张农, 司光耀. 留巷充填区域顶板承载性能研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(9): 1429–1434.
KAN Jia-guang, YUAN Liang, ZHANG Nong, SI Guang-yao. Bearing capacity of backfilling area roof in gob-side entry retaining[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(9): 1429–1434.
- [8] 王明旭. 考虑充填体支撑效应的矿岩-充填体相互作用机理分析[J]. 金属矿山, 2017(7): 60–64.
WANG Ming-xu. Interaction mechanism of ore-bearing rock and filling body based on considering the supporting effects of filling body[J]. Metal Mine, 2017(7): 60–64.
- [9] 唐亚男, 宋卫东, 曹帅. 基于边界约束的充填体与围岩作用机理研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2015, 36(S1): 127–130.
TANG Ya-nan, SONG Wei-dong, CAO Shuai. Research on mechanism between backfill and surrounding rock based on boundary constraints[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2015, 36(S1): 127–130.
- [10] 宋卫东, 任海锋, 曹帅. 侧限压缩条件下充填体与岩柱相互作用机理[J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(1): 49–55.
SONG Wei-dong, REN Hai-feng, CAO Shuai. Interaction mechanism between backfill and rock pillar under confined compression condition[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2016, 45(1): 49–55.
- [11] MANGAL A, PAUL P S. Rock mechanical investigation of strata loading characteristics to assess caving and requirement of support resistance in a mechanized powered support longwall face[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2016, 26(6): 1081–1087.
- [12] 徐奴文, 李彪, 戴峰, 樊义林, 徐剑. 基于微震监测的顺层岩质边坡开挖稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(10): 2089–2097.
XU Nu-wen, LI Biao, DAI Feng, FAN Yi-lin, XU Jian. Stability analysis of bedding rock slopes during excavation based on microseismic monitoring[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(10): 2089–2097.
- [13] 黄庆享, 刘玉卫. 巷道围岩支护的极限自稳平衡拱理论[J]. 采矿与安全工程学报, 2014, 31(3): 354–358.
HUANG Qing-xiang, LIU Yu-wei. Ultimate self-stable arch theory in roadway support[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2014, 31(3): 354–358.
- [14] 谭成轩, 石玲, 孙炜锋, 雷伟志, 孙叶, 王瑞江, 吴树仁. 构造应力面研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(23): 3970–3978.
TAN Cheng-xuan, SHI Ling, SUN Wei-feng, LEI Wei-zhi, SUN Ye, WANG Rui-jiang, WU Shu-ren. Research on tectonic stress plane[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(23): 3970–3978.
- [15] 张骞, 李树才, 张乾青, 李利平, 徐飞, 杨尚阳. 抗滑桩岩拱效应与合理桩间距分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 36(增刊2): 180–185.
ZHANG Qian, LI Shu-cai, ZHANG Qian-qing, LI Li-ping, XU Fei, YANG Shang-yang. Analysis on rock-arch effect of anti-slide piles and rational pile spacing in engineering project[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(S2): 180–185.
- [16] 邹洋, 李夕兵, 赵国彦, 周子龙, 刘希灵, 杨金林, 刘强. 石膏矿采空区上覆岩层冒落规律危险性评价[J]. 中国安全科学学报, 2011, 21(2): 101–108.
ZOU Yan, LI Xi-bing, ZHAO Guo-yan, ZHOU Zi-long, LIU Xi-lin, YANG Jin-lin, LIU Qiang. Study on the caving laws of overlying strata in gypsum mine goaf and its risk assessment[J]. China Safety Science Journal, 2011, 21(2): 101–108.
- [17] 翟会超, 任凤玉, 南世卿. 倾斜空区顶板三铰拱轴曲线结构自稳分析[J]. 东北大学学报, 2015, 36(11): 1629–1642.
ZHAI Hui-chao, REN Feng-yu, NAN Shi-qing. Analysis of the stability of three-hinged arch axis curve structure of tilted roofs[J]. Journal of Northeastern University, 2015, 36(11): 1629–1642.

- 1629–1642.
- [18] 黄庆享, 郑超. 巷道支护的自稳平衡圈理论[J]. 岩土力学, 2016, 37(5): 1231–1236.
- HUANG Qing-xiang, ZHENG Chao. Theory of self-stable ring in roadway support[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(5): 1231–1236.
- [19] 姜立春, 曾俊佳, 吴爱祥. 基于结构离散的复杂水平采空区群残采激励动力响应[J]. 中国有色金属学报, 2017, 27(5): 1023–1030.
- JIANG Li-chun, ZENG Jun-jia, WU Ai-xiang. Dynamic response of complicated horizontal goaf group under residual mining excitation based on structural discrete[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2017, 27(5): 1023–1030.
- [20] 郝哲, 刘庆恩, 刘斌. 公路隧道开挖围岩位移预测及稳定性预报[J]. 公路, 2004(8): 197–203.
- HAO Zhe, LIU Qing-en, LIU Bin. Displacement prediction and stabilization forecast of surrounding rock of highway tunnel excavation[J]. Highway, 2004(8): 197–203.

Roof self-stabilizing arching effect of goaf based on different roof-contacted filling rate

JIANG Li-chun^{1,2}, CHEN Peng², WU Ai-xiang³

(1. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. Institute of Safety Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

3. School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Taking the roof of goaf as the research object, a three-hinged arch mechanical model with variable roof span (L) and falling height (H) was constructed, and expression of maximum arch force under different roof-contacted filling rates(m) was derived. Based on the discriminant for the critical axial force of the roof rock mass, the arching effect of the roof was studied under different roof-contacted filling rates. Taking three goafs with different spans in a mine as examples, the impact on the arching support was analysed by calculating the maximum arching force under different roof-contacted filling rates. The research results were compared and validated by the numerical simulation and mine ground pressure monitoring data. The results show that the maximum axial force of roof decreases with the increase of roof-contacted filling rate. When the roof-contacted filling rate reaches 80%, the maximum axial force of the roof is lower than the critical axial force, and the arching support of roof is obvious.

Key words: three-hinged arch model; critical axial force; arching effect; roof-contacted filling rate; roof

Foundation item: Project(2016YFC0600802) supported by the National Key Research and Development Program of China; Project(51574013) supported by the National Natural Science Foundation of China

Received date: 2017-12-18; **Accepted date:** 2018-03-29

Corresponding author: JIANG Li-chun; Tel: +86-20-87111039; E-mail: ginger@scut.edu.cn

(编辑 何学锋)