

# 灰岩岩溶含水层开拓巷道预注浆 效果模拟分析

赵恰\*, 苏伟, 王旭, 郭晓强, 彭云

(紫金矿业集团股份有限公司, 福建 厦门 361016)

**摘要:**针对某矿山灰岩岩溶含水层开拓工程突水问题,采用 Phase2 软件建立拟开拓区流固耦合模型,利用有限元模拟分析注浆前后巷道开挖过程中的围岩变形、孔隙水渗流速度和巷道涌水量。结果表明:通过预注浆治理,有效充填封堵了灰岩岩溶含水层的过水通道,提高了围岩的物理力学指标和完整性,增强了围岩的抗变形能力和抗渗性能,可有效避免巷道掘进中的突水事故发生。

**关键词:**灰岩含水层;巷道预注浆;数值模拟;渗流速度

中图分类号:TD745

文献标志码:A

文章编号:1672-9102(2021)03-0029-05

## Simulation Analysis on Pre-grouting Effect of Tunnel Excavating in Limestone Karst Aquifer

ZHAO Qia, SU Wei, WANG Xu, GUO Xiaoqiang, PENG Yun

(Zijin Mining Group Co., Ltd., Xiamen 361016, China)

**Abstract:** Aiming at the water inrush problem of limestone karst aquifer excavating in a mine, the fluid structure coupling model of the proposed excavation area is established by using Phase2 software, and the deformation of surrounding rock, the seepage velocity of pore water and the water inflow of the roadway during the excavation process before and after grouting are analyzed by using finite element simulation. Results show that the water passage of limestone karst aquifer is effectively filled and sealed by pre grouting treatment, and the physical and mechanical indexes and integrity of surrounding rock are improved, so as to improve the quality of the surrounding rock. The ability of resisting deformation and impermeability of surrounding rock greatly reduces water inflow, which can effectively avoid water inrush accidents in tunnel excavation.

**Keywords:** limestone karst aquifer; tunnel pre-grouting; numerical simulation; seepage velocity

我国金属非金属矿山灰岩岩溶含水层富水性较强,矿山在开拓过程中受限于工作面排水能力,往往面临较高的水患风险,因此井巷工程在灰岩岩溶含水层掘进之前,一般采用预注浆技术在拟掘进的巷道周边形成注浆帷幕体,封堵过水通道,减少涌水量<sup>[1-2]</sup>。近年随着计算机数值模拟技术的进步,针对流固耦合条件下的围岩稳定性及渗流特性方面开展了大量研究,如傅鹤林等在充分考虑地下水的影响条件下,提出了流固耦合的数学模型<sup>[3-4]</sup>;路平基于 MIDAS GTS 有限元数值模拟软件对富水软岩隧道预注浆前后围岩变形与应力特性、渗流控制因素进行了模拟分析,评价了预注浆效果<sup>[5]</sup>;程正刚等通过 FLAC<sup>3D</sup>数值模拟软件模拟分析,认为朱村煤矿运输大巷的预注浆工程大幅度减少了巷道涌水量<sup>[6]</sup>;徐波等采用 ABAQUS 软件构建了千米深井工作面注浆三维数值模型,对安居煤矿井筒工作面预注浆效果进行了模拟分析<sup>[7]</sup>。大量研

究成果对评价开拓巷道预注浆工程效果起到了积极作用。

本文以某矿山灰岩岩溶含水层水文地质资料为基础,基于 Phase2 软件分别模拟井巷直接开挖和预注浆后开挖这 2 种条件下的巷道位移、地下水流场和巷道涌水量,评价预注浆工程的堵水率和有效性。

## 1 工程概况

某铅锌矿-160 m 中段运输巷在延伸过程中需穿过灰岩岩溶含水层,根据矿区水文地质资料,灰岩岩溶含水层渗透系数为 0.100~0.736 m/d,钻孔岩溶率为 0.16%~1.96%,富水性中等。根据水文观测孔资料,该区域地下水位在标高 68 m 左右,因此-160 m 中段运输巷开拓期间将面临 2.0 MPa 以上的高压水威胁。为防止-160 m 中段运输巷开拓过程中突水事故发生,参考国内外相关矿山防治水经验,在开拓掘进过程中采区工作面采用预注浆防治水技术。

## 2 数值模型的建立

根据矿山的水文地质模型采用 Phase2 弹塑性有限元分析软件,构建流固耦合模型,模拟分析不同工况条件下的围岩变形和地下水渗流,对比分析巷道预注浆工程的效果。

### 2.1 地质模型建立

数值模拟是构建在地质体物理模型、本构模型和力学形态基础上,采用有限元等数值分析方法,计算其应变和破坏状态的变化过程。所以,首先应根据模拟对象(地质体)的地质特征进行分析,构建符合研究对象的地质模型<sup>[8-9]</sup>。根据矿山采区设计-160 m 中段开拓工程中约 560 m 主巷位于灰岩岩溶含水层中,巷道断面设计尺寸为 3.200 m×3.067 m,浆液有效扩散范围为 3 m,如图 1 所示。

依据圣维南原理,模型尺寸须大于巷道开挖尺寸的 5 倍<sup>[10]</sup>,所以建立模型尺寸为 40 m×40 m,模型采用三角形网格剖分,如图 2 所示。

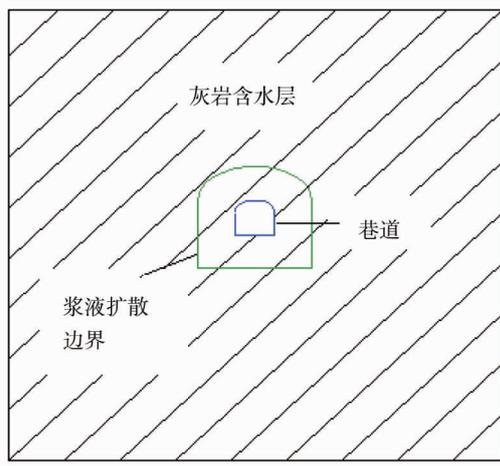


图1 灰岩含水层开拓巷道地质模型

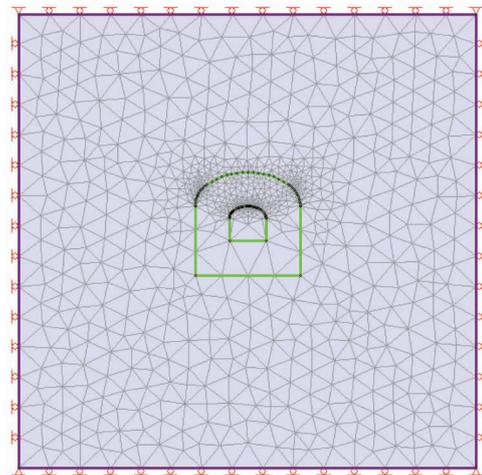


图2 模型概化与网格剖分

### 2.2 边界条件及自重应力场

模型位移边界:采用水平和垂直方向约束,取  $x$  和  $y$  方向位移为 0<sup>[11]</sup>。

自重应力场:上覆岩体自重  $q$  可按式(1)计算。

$$q = -\sum \gamma_i h_i \quad (1)$$

式中: $\gamma_i$  为岩体容重,其中第四系取 22.6 kN/m<sup>3</sup>,灰岩取 27.2 kN/m<sup>3</sup>;  $h_i$  为地层厚度,模型上部第四系地层厚 20 m,灰岩地层厚 240 m。

经式(1)计算,整个模型施加的上覆压力的等效荷载为-6.98 MPa(模型中负号代表压应力)。

### 2.3 水力边界条件

拟开拓区域实测地下水位标高为 68 m,-160 m 开拓中段位于地下水位线以下,故模型取定水头边

界,四周水头边界均为 68 m.巷道开挖后,巷道四周为排水泄压状态,故开挖后巷道四周水头边界取 0 m.

## 2.4 本构模型

将模型中的灰岩地质体概化为弹塑性材料,本次模拟计算选用摩尔-库伦理想弹塑性模型:

$$f_s = (\sigma_1 - \sigma_3) - 2cc \cos \varphi - (\sigma_1 + \sigma_3) \sin \varphi. \quad (2)$$

式中: $f_s$  为剪应力; $\sigma_1$  为最大主应力; $\sigma_3$  为最小主应力; $c$  为内聚力; $\varphi$  为内摩擦角.

从式(2)可以看出,剪应力取决于最大主应力  $\sigma_1$  和最小主应力  $\sigma_3$ , 而第二主应力  $\sigma_2$  对材料屈服不产生影响.在材料达到屈服后,其应力不再随应变而变化,塑性阶段的应变只有塑性应变<sup>[12-14]</sup>.

## 2.5 材料参数

### 2.5.1 渗透系数

利用拟开拓区域 215/SK2 水文孔,对灰岩岩溶含水层开展压(注)水试验,压(注)水试验数据:压水流量 155 m<sup>3</sup>/d,试验水头 40 m,试段长度 30 m,钻孔半径 0.045 m.依据《水利水电工程钻孔压水试验规程》(SL 31—2003)地层渗透系数计算公式为

$$K = \frac{Q}{2\pi HL} \ln \frac{L}{r}. \quad (3)$$

式中: $K$  为岩体渗透系数,m/d; $Q$  为压水流量,m<sup>3</sup>/d; $H$  为试验水头,m; $L$  为试段长度,m; $r$  为钻孔半径,m.

将压(注)水试验数据代入式(3),可得拟开拓区域灰岩岩溶含水层渗透系数  $K=0.134$  m/d.围岩注浆后的渗透系数参照矿山注浆工程结石体渗透性检测报告,取渗透系数  $K=2.6 \times 10^{-4}$  m/d.

### 2.5.2 物理力学参数

根据矿山工程地质条件,岩组为灰岩和注浆体.根据矿山岩石力学试验选取岩石物理力学参数,如表 1 所示.

表 1 岩石物理力学参数

介质	容重/(kN/m <sup>3</sup> )	弹性模量/GPa	抗拉强度/MPa	内摩擦角/(°)	泊松比	渗透系数/(m/d)
灰岩	27.2	5.15	1.6	40	0.25	0.134 00
注浆体	27.2	10.00	2.4	55	0.45	0.000 26

## 3 模拟结果与分析

### 3.1 巷道直接开挖与预注浆后开挖位移对比分析

模拟巷道直接开挖与预注浆后开挖,得到位移云图如图 3 所示.从图 3 可知:灰岩岩溶地层直接开挖时,岩体变形影响范围较大,巷道顶板的最大位移为 3 mm;预注浆治理后,岩体的抗拉强度、黏聚力、内摩擦角及弹性模量均得到了提升,提高了岩体的抗变形能力,巷道开挖后岩体的变形影响范围大幅减小,且开挖后巷道顶板的最大位移减小至 1.6 mm,仅为直接开挖时最大位移的 53.3%,说明预注浆对围岩的加固效果明显,提高了围岩的抗变形能力,有效减小了开挖过程中围岩的破坏强度和影响范围,达到减小巷道周边过水通道尺寸和范围的目的.

### 3.2 巷道直接开挖与预注浆后开挖周边渗流场对比分析

图 4 为直接开挖与预注浆后开挖巷道周边流场图,图 4 中的箭头代表流线,箭头方向代表水流方向,流线越密集则水流越集中.从图 4 的流线分布上可以看出:在地下水水位 68 m 条件下,巷道开挖后主要从顶板涌水,直接开挖后巷道顶板的地下水最大流速达到  $4 \times 10^{-5}$  m/s,平均流速达到  $2 \times 10^{-5}$  m/s;预注浆后开挖巷道顶板的最大流速为  $3.3 \times 10^{-7}$  m/s,平均流速为  $3 \times 10^{-7}$  m/s.预注浆后开挖相比直接开挖,地下水向巷道渗流速度大幅减小.

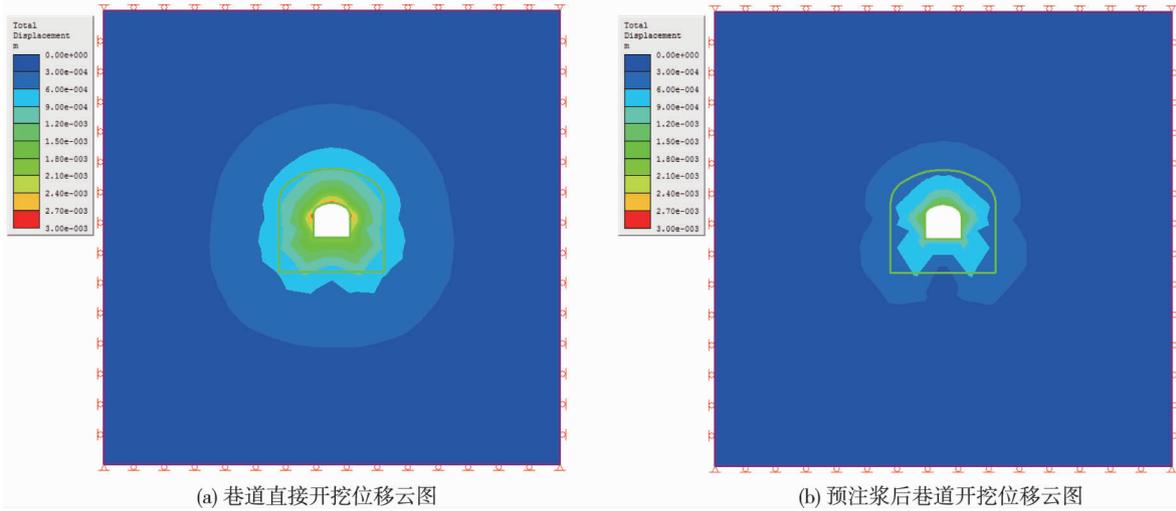


图 3 直接开挖与预注浆后开挖位移对比

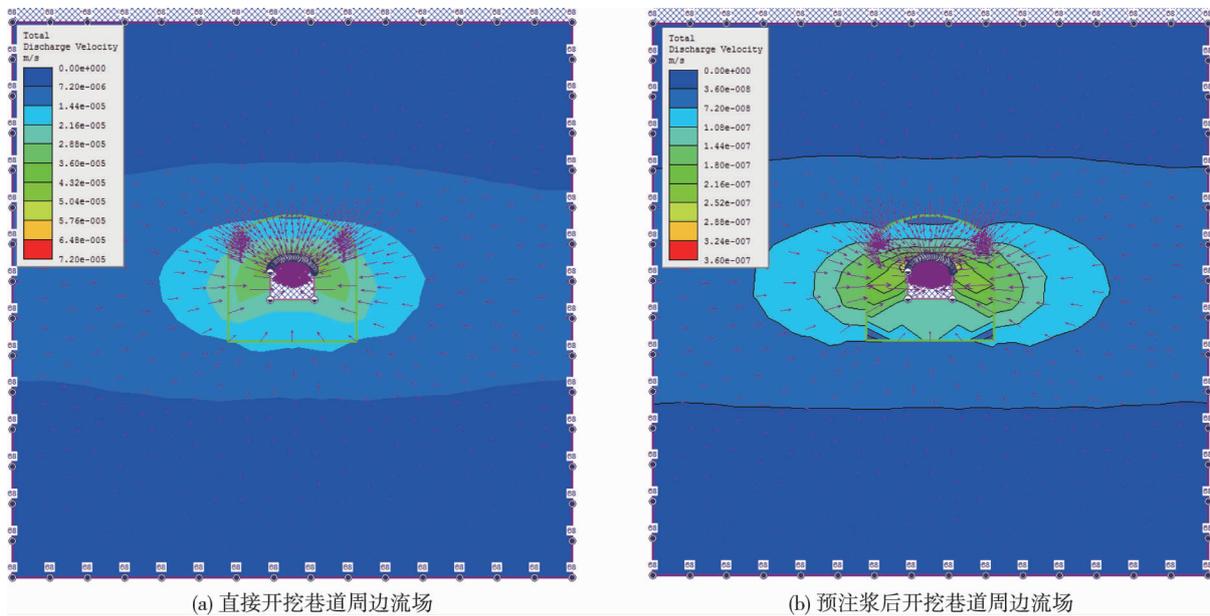


图 4 直接开挖与预注浆后开挖巷道周边流场对比

### 3.3 巷道直接开挖与预注浆后开挖巷道涌水量对比分析

巷道单位涌水量等于流速乘以过流断面面积.分别将模型计算的直接开挖和预注浆后巷道开挖时的地下水流速与设计巷道断面面积相乘就可以得到直接开挖和预注浆后开挖时的巷道涌水量,计算结果如表 3 所示.

表 3 巷道涌水量计算结果

工况	部位	断面面积/m <sup>2</sup>	平均流速/(m/s)	涌水量/(m <sup>3</sup> /d)	总涌水量/(m <sup>3</sup> /d)
注浆前	顶板	4.24	0.000 040 00	14.65	22.11
	侧帮	4.00	0.000 020 00	6.91	
	底板	3.20	0.000 002 00	0.55	
注浆后	顶板	4.24	0.000 000 30	0.11	0.21
	侧帮	4.00	0.000 000 18	0.06	
	底板	3.20	0.000 000 13	0.04	

从表 3 可以看出:在灰岩岩溶含水层地下水位 68 m 条件下,直接开挖时巷道的涌水量将达到 22.11 m<sup>3</sup>/d,而预注浆后开挖单位巷道涌水量仅为 0.21 m<sup>3</sup>/d,巷道超前帷幕预注浆的堵水率达到 99%以

上.采用预注浆治理后巷道可在少水或无水的条件下掘进,有效避免巷道掘进中的突水事故发生.

## 4 结论

1)在流固耦合的相关理论基础上,利用 phase2 软件开展巷道掘进渗流模拟研究,能预测巷道掘进时的涌水量,可作为巷道防治水治理效果评价的依据.

2)预注浆治理,在巷道周边形成注浆固体,封堵过水通道,有效减少拟开挖区域与灰岩岩溶含水层之间的水力联系,大幅减小巷道涌水量,使巷道在少水或无水的条件下掘进,避免巷道掘进中的突水事故发生.

### 参考文献:

- [1] 虎维岳.矿山水害防治理论与方法[M].北京:煤炭工业出版社,2005.
- [2] 周兴旺,高岗荣,薄志丰,等.注浆施工手册[M].北京:煤炭工业出版社,2014.
- [3] 韩国锋,王恩志,刘晓丽.岩石损伤过程中的渗流特性[J].土木建筑与环境工程,2011,33(5):41-50.
- [4] 傅鹤林,刘宝琛,Buhrow C.饱和岩层中地下水渗流与岩体变形的耦合数学模型及数值解法[J].湘潭矿业学院学报,2002,17(2):74-78.
- [5] 路平.考虑流固耦合的富水软岩隧道力学特性及合理注浆参数研究[D].长沙:中南大学,2012.
- [6] 程正刚,武忠进,姜海军.掘进工作面预注浆堵水技术的数值模拟[J].煤炭科技,2013(1):49-51.
- [7] 徐波,王世华,孔德森.千米凿井工作面注浆堵水三维数值模拟研究[J].中国煤炭,2011,37(1):88-91.
- [8] 李飘.丰盛场地下工程开挖引起地质环境变形与应力效应数值模拟[D].重庆:重庆交通大学,2014.
- [9] 张培森.采动条件下底板应力场及变形破坏特征的研究[D].青岛:山东科技大学,2005.
- [10] 张伟.长距离超浅埋隧道围岩稳定性分析与工程应用[D].济南:山东大学,2017.
- [11] 文排科,左宇军,李进猛,等.基于 Phase2 有限元分析的巷道围岩稳定性研究[J].煤炭技术,2015,34(1):35-37.
- [12] 康志强,贾玉波,张艳博.基于 FLAC<sup>3D</sup> 的节理岩体巷道锚注加固数值模拟[J].金属矿山,2013(4):61-64.
- [13] 姜衍祥.地下工程围岩变形和破坏的力学机理研究[J].工程地质学报,2000,8(s1):337-339.
- [14] 聂韬译.渗流—应力耦合下裂隙岩体损伤本构模型研究[D].徐州:中国矿业大学,2015.