

注浆支护深度对非等压圆形巷道围岩塑性区半径的影响

王攀¹, 王卫军^{1,2*}, 袁超¹, 范磊¹

(1. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201;

2. 湖南科技大学 南方煤矿瓦斯与顶板灾害预防控制安全生产重点实验室, 湖南 湘潭 411201)

摘要: 随着煤矿开采水平的不断提高, 我国许多矿区陆续进入深部开采阶段, 深部围岩大多处于高应力状态, 并且强度低、易破碎, 因此注浆支护已成为一种常用、有效的支护手段, 研究注浆支护对于巷道周围岩的稳定性有着重要意义。塑性区发育始终伴随巷道围岩的破坏, 为研究注浆支护深度对塑性区半径的影响, 基于 Mohr-Coulomb 强度准则, 推导出巷道围岩塑性区半径关于注浆支护深度的函数, 并对巷道进行注浆支护数值模拟和塑性区半径理论计算。结果表明: 数值模拟得到的塑性区半径与理论计算得到的塑性区半径极为接近; 同时, 在注浆范围与塑性区范围理论值趋于相近时, 塑性区范围无论是模拟值还是理论值, 都已趋于稳定, 此时的注浆支护范围也是最佳注浆支护范围。

关键词: 注浆深度; 塑性区半径; 数值模拟

中图分类号: TD353

文献标志码: A

文章编号: 1672-9102(2023)02-0029-08

Influence of Grouting Support Depth on Plastic Zone Radius of Surrounding Rock of Non-isobaric Circular Roadway

WANG Pan¹, WANG Weijun^{1,2*}, YUAN Chao¹, FAN Lei¹

(1. School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. Work Safety Key Lab on Prevention and Control of Gas and Roof Disasters for Southern Coal Mines,

Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: With the deepening of coal mining level, many mining areas in China have entered the stage of deep mining, deep surrounding rock is mostly in a high stress state, and low strength, easy to break, so slurry support has become a very common and effective means of support. Research on grouting support is of great significance for the stability of surrounding rock around roadway. The development of plastic zone is always accompanied by the destruction of roadway surrounding rock. In order to research on the effect of injection slurry support depth on the radius of plastic area, based on Mohr-Coulomb strength criterion, this paper deduces the function of the radius of the roadway surrounding rock plastic area on the depth of injection slurry support, and makes numerical simulation of injection slurry support and the theoretical calculation of plastic area radius in the roadway. Results show that the radius of the plastic region obtained by numerical simulation is very close to the radius of the plastic area calculated theoretically. At the same time, when the injection range and the theoretical value of the plastic area range tend to be close, the plastic area range, whether analog or theoretical, has stabilized, and the injection slurry support range is also the best injection area.

Keywords: slurry depth; plastic area radius; numerical simulation

收稿日期: 2021-12-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52074115, 51874130); 湖南省自然科学基金资助项目(2021JJ40211)

* 通信作者, E-mail: wjwang@hnust.edu.cn

随着煤矿开采水平的不断提高,我国许多矿区陆续进入深部开采阶段.在高应力下,巷道围岩强度低、易破碎,塑性区范围大、发育快、恶性拓展剧烈等问题对巷道围岩的支护与控制造成巨大的困难,使得巷道的支护问题成为矿山工程领域的一大难题.

针对这一难题,许多学者进行了大量的试验研究,发现注浆支护对于解决这一难题有着重要的作用.王卫军等^[1]研究围岩岩性对塑性区的影响,发现其对塑性区的发育深度起着决定作用,而注浆支护可以有效地改善围岩力学性质,将破碎的围岩体重新构筑成一个整体,充分利用巷道围岩自身承载能力,遏制塑性区的恶性发育拓展;孟庆彬等^[2]提出“锚注加固等效层概念”,研究锚注加固的内聚力、内摩擦角对巷道围岩位移及塑性区的影响规律;潘锐等^[3]研究注浆前后锚固体界面力学特性,对锚注支护主要参数进行现场比选和应用;李树清等^[4]研究底板注浆加固后深部软岩巷道两帮围岩变形量、塑性区范围变化;李文洲等^[5]研究注浆支护参数对围岩控制效果的影响,并针对实际现场改良注浆支护参数;孟庆彬等^[6]研究注浆支护的时机,并提出以应力释放率阈值作为判定注浆时机的指标;王琦等^[7]系统地研究锚注支护参数和部位等因素对围岩变形控制效果的影响机制;袁超等^[8]研究巷道围岩的侧压系数、内聚力及内摩擦角对塑性区分布形态和范围的影响;王琦等^[9]研究锚注浆液的扩散及加固规律;周波等^[10]模拟浆液在弱结构体内的扩散规律,确定合理的注浆钻孔参数.

以上诸多学者从注浆支护的时机、参数、支护的部位和注浆支护力学机理等方面出发,揭示了注浆支护对巷道支护的作用和巷道围岩塑性区大小、形状以及发育拓展等方面的影响,形成了较为系统的注浆支护理论,但是针对注浆支护范围的大小对巷道支护效果的影响以及支护的经济效益等方面的研究较为缺乏.因此,本文基于各位学者的研究,利用数值模拟和理论分析计算这2种分析手段,对比验证,研究注浆支护范围大小对巷道围岩控制以及塑性区范围的影响.

1 注浆影响下的围岩塑性区边界方程

1.1 基本假设

- 1) 巷道为圆形深埋平巷,巷道无限长.
- 2) 巷道围岩为连续、均匀、各向同性的理想弹塑性材料,且满足 Mohr-Coulomb 强度准则.
- 3) 注浆对巷道围岩的影响限定为仅改变巷道的粘聚力(C)与内摩擦角(φ).

1.2 巷道力学模型

1.2.1 巷道围岩分区划分

依据董方庭等^[11]的松动圈理论,可以将巷道周边围岩划分为4个区,即破碎区、塑性区、弹性区和原岩应力区.本文应用注浆支护手段,探究注浆深度对巷道围岩位移以及塑性区范围的影响,把注浆后的围岩划分为3个区,分别为注浆区、塑性区和弹性区,如图1所示. P_1 、 P_2 分别为竖向压力与侧向压力, R_p 为塑性区半径, l 为注浆半径, R 为巷道半径.同时,简化模型,将实际中的半圆拱形巷道简化为圆形巷道,以下计算都基于圆形巷道进行,但在进行数值模拟验算过程中,仍应用实际的半圆拱形巷道进行模拟.

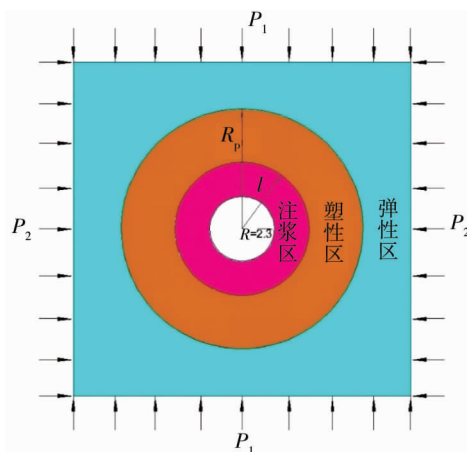


图1 巷道力学模型

1.2.2 注浆深度对于围岩塑性区大小影响分析

依据王宏伟等^[12]文中巷道围岩应力计算公式以及蔡美峰等^[13]的弹塑性理论,由岩体平衡微分方程与 Mohr-Coulomb 强度准则:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0; \quad (1)$$

$$\frac{\sigma_r + C \cot \varphi}{\sigma_\theta + C \cot \varphi} = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}. \quad (2)$$

可得

$$\sigma_r = \frac{r^{N-1} e^{A_1(N-1)} - S}{N-1}; \quad (3)$$

$$\sigma_\theta = \frac{N}{N-1} [r^{N-1} e^{A_1(N-1)} - S] + S. \quad (4)$$

式中: σ_r 与 σ_θ 分别为围岩径向应力与围岩环向应力; r 为巷道围岩某点到巷道中心点的距离; A 为注浆深度与围岩塑性区半径相关系数,未注浆时 $A=A_1$.未注浆时:

$$N = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}; \quad (5)$$

$$S = \frac{2C \cos \varphi}{1 - \sin \varphi}; \quad (6)$$

$$A_1 = \frac{\ln(R^{N-1} + S)}{N-1}. \quad (7)$$

当注浆后,在注浆区有 $N \rightarrow N_1, S \rightarrow S_1$.

$$N_1 = \frac{1 + \sin \varphi_1}{1 - \sin \varphi_1};$$

$$S_1 = \frac{2C_1 \cos \varphi_1}{1 - \sin \varphi_1}.$$

式中: C_1 为注浆后的粘聚力; φ_1 为注浆后的内摩擦角.

1) 注浆深度对塑性区大小影响方程求解

依据弹塑性理论^[13],在弹性区有

$$\sigma_r = \left(\frac{1 + \lambda}{2} \right) q \left(1 - \frac{R^2}{R_p^2} \right); \quad (8)$$

$$\sigma_\theta = \left(\frac{1 + \lambda}{2} \right) q \left(1 + \frac{R^2}{r^2} \right). \quad (9)$$

因此,在弹性区内边界代入边界条件 $r = R_p$ 有

$$\sigma_r^e = \left(\frac{1 + \lambda}{2} \right) q \left(1 - \frac{R^2}{R_p^2} \right). \quad (10)$$

式中: σ_r^e 为弹性区内边界径向应力; q 为原岩应力.

同理,在塑性区的外边界上,由式(3)代入边界条件 $r = R_p$ 有

$$\sigma_r^p = \frac{R_p^{N-1} e^{A(N-1)} - S}{N-1}. \quad (11)$$

式中: σ_r^p 为塑性区外边界径向应力.

由边界条件与巷道力学模型图(图1)可知,围岩的弹性区内边界与塑性区外边界相邻,处于同一个界面,因此,二者在此处的径向应力相等,即 $\sigma_r^p = \sigma_r^e$.

由此联立式(10)与式(11)可得 R_p 的隐函数:

$$\frac{R_p^{N-1} e^{A(N-1)} - S}{N-1} = \left(\frac{1+\lambda}{2}\right) q \left(1 - \frac{R^2}{R_p^2}\right). \quad (12)$$

2) 相关系数 A 求解

由于注浆区分布在塑性区内,因此,注浆后,在注浆区有

$$\sigma_r = \frac{r^{N_1-1} e^{A(N_1-1)} - S_1}{N_1-1}. \quad (13)$$

代入注浆区边界条件 $r=l$ 有

$$\sigma_r^l = \frac{l^{N_1-1} e^{A(N_1-1)} - S_1}{N_1-1}. \quad (14)$$

式中: l 为注浆半径; σ_r^l 为注浆区边界径向应力,并且,该位置也处于塑性区中,因此有

$$\sigma_r^l = \frac{l^{N-1} e^{A(N-1)} - S}{N-1}. \quad (15)$$

同时,当巷道没有支护反力, $r=R$ 时, $\sigma_r=0$,由此联立式(14)与式(15)可得相关系数 A 关于 l 的函数关系式:

$$A = \frac{\ln \left[\left(\frac{S_1 l^{N_1-1} - S_1}{R^{N_1-1} - S_1} \right)^{(N-1) + S} \right]}{N-1} - \ln l. \quad (16)$$

将式(16)代入式(12)即可得出巷道围岩塑性区半径 R_p 与注浆半径 l 的函数关系:

$$\frac{R_p^{N-1} e^{\left(\frac{\ln \left[\left(\frac{l^{N_1-1} S_1 - S_1}{R^{N_1-1} - S_1} \right)^{(N-1) + S} \right]}{N-1} - \ln l \right) (N-1)} - S}{N-1} = \left(\frac{1+\lambda}{2}\right) q \left(1 - \frac{R^2}{R_p^2}\right). \quad (17)$$

1.2.3 注浆影响下的巷道周边围岩位移计算

依据弹塑性理论^[13],将注浆后的力学参数代入位移求解公式得

$$u = \varepsilon_0 r = \frac{1-v^2}{E} \left[\left(\sigma_{\theta_1} - \frac{1+\lambda}{2} q \right) - \frac{v}{1-v^2} \left(\sigma_{r_1} - \frac{1+\lambda}{2} q \right) \right] r. \quad (18)$$

式中: u 为巷道注浆区位移; ε_0 为巷道切向位移; v 为围岩泊松比; E 为围岩弹性模量; σ_{r_1} 为注浆后的巷道周边围岩径向应力; σ_{θ_1} 为注浆后的巷道周边围岩环向应力。

2 数值模拟验算

以云南湾田集团兴路煤业一采区南翼轨道巷注浆支护工程为工程背景,该巷道理深 400 m。根据理论计算中的数学模型,建立长 50 m,宽 50 m,厚 20 m 的 FLAC^{3D} 数值模型,采用 Mohr-Coulomb 强度准则作为围岩的破坏准则,模拟注浆支护对于巷道塑性区半径和巷道周边应力分布的影响,模拟初始参数如表 1 所示。

表 1 初始参数

力学参数	密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	弹性模量 E / MPa	泊松比 ν	粘聚力 C / MPa	内摩擦角 $\varphi / (^\circ)$	侧压系数 λ
数值	2 400	9 600	0.25	3.2	24	1.5

2.1 模拟注浆方案

模拟注浆方式为先以原定参数开挖运行 2 000 步,待塑性区初步发育形成,再以改变粘聚力和内摩擦角的方式模拟注浆加固,最终对比分析注浆后塑性区的发育改善情况。

在模拟中,当塑性区初步发育形成后,以注浆深度为自变量,探究注浆支护范围对于巷道塑性区分布的影响。将注浆深度划分为 5 个梯度,即以巷道中心点为基准,向外分别注半径为 3.8, 4.3, 4.8, 5.3, 5.8 m

的圆形区域.巷道为宽 4.6 m,拱高 2.3 m 的半圆拱形巷道,模拟参数如表 2 所示.

表 2 注浆参数

模拟组数	注浆后粘聚力 C_1/MPa	注浆后内摩擦角 $\varphi_1/(\text{°})$
1	3.4	30
2	3.6	32
3	3.8	34

2.2 模拟注浆深度对巷道塑性区半径的影响

2.2.1 巷道注浆与未注浆时塑性区对比

1) 未注浆时塑性区初步发育分布

按照模拟方案进行模拟,以初始参数模拟运行 2 000 步,得到图 2 所示的塑性区初始发育分布图.

由袁超等^[8]的研究可知,当侧压系数分别为 1.0,1.4,1.8,2.2,2.6 时,随着侧压系数逐渐增大,塑性区分布形态由圆形→椭圆→圆角矩形→蝶形转变.从图 2 中可以看出,未注浆时,塑性区分布形状约为一椭圆形,椭圆长轴位于巷道顶底板方向,短轴位于巷道两帮方向,塑性区范围距巷道中心点最远为 8.47 m,最近为 5.23 m.

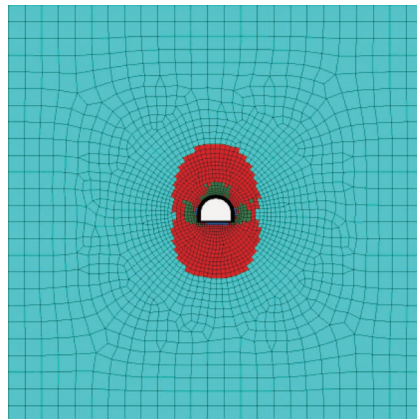


图 2 未注浆时塑性区范围

2) 注浆后塑性区分布

依据模拟方案进行模拟,以初始参数模拟运行 2 000 步至塑性区发育形成后,再进行注浆加固模拟,得到注浆影响下塑性区变化情况如图 3~图 5 所示.

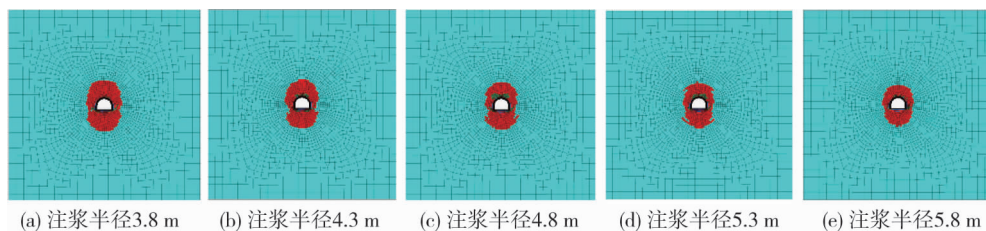


图 3 第 1 组模拟塑性区变化

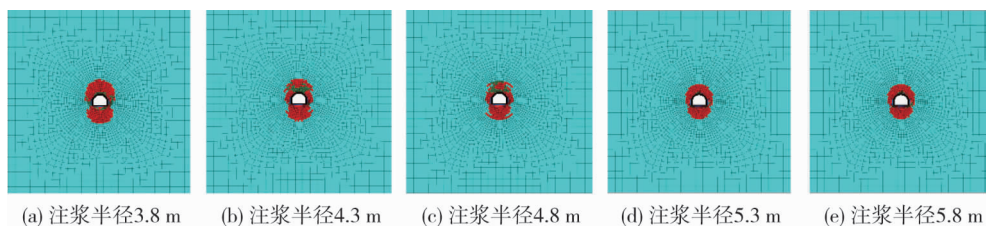


图 4 第 2 组模拟塑性区变化

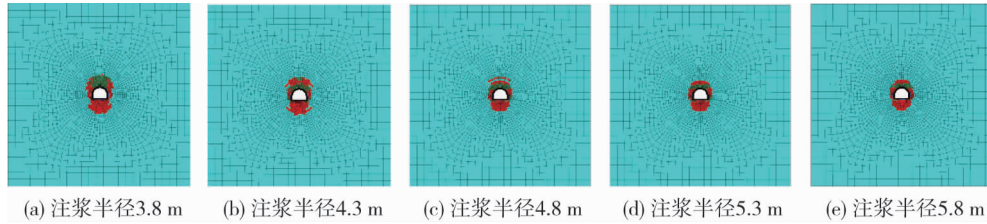


图5 第3组模拟塑性区变化

图2与图3~图5对比可以看出:注浆后,巷道塑性区分布有较大的改善,塑性区范围大大缩小,塑性区形状也发生一定的变化,巷道顶部的塑性区范围急剧缩小,底部和两帮的塑性区也有一定程度的缩小,整体形状由较为规则的椭圆形变为“8”字形。

结合实际工程案例可知,通过注浆改善巷道围岩的内聚力与内摩擦角,可以有效地改善巷道围岩的应力状态和减少应力集中,改善塑性区发育恶化,缩小塑性区范围,从而有效地支护巷道,减少灾害事故的发生。

2.2.2 不同注浆深度下塑性区对比

根据模拟,统计不同注浆深度下塑性区范围变化数据,如图6所示。

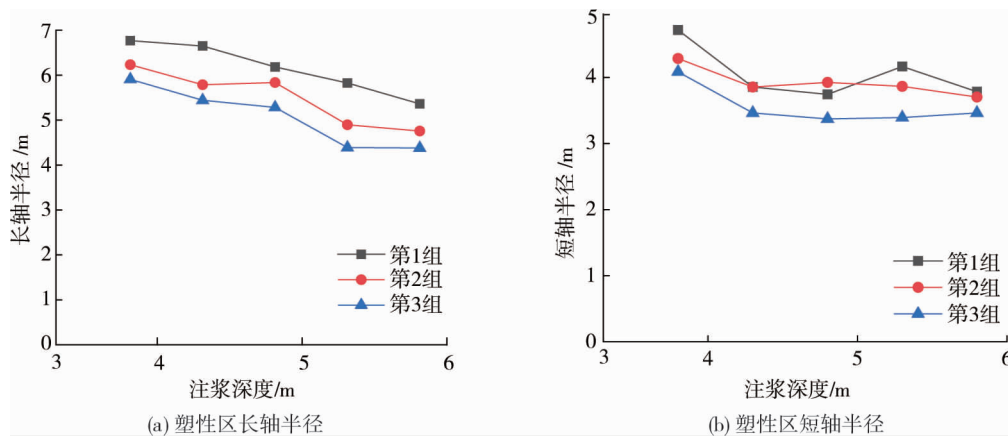


图6 模拟塑性区范围变化

结合图6a与图6b可以看出:随着注浆深度的加大,塑性区范围逐渐缩小,但是当注浆深度达到一定程度后,再增大注浆范围,塑性区大小几乎不变.这也与实际工程相对应,当注浆深度达到最佳深度后,再增大注浆深度,塑性区大小变化缓慢,幅度较小,直至几乎不变.因此,注浆支护深度并非越大越好,需根据地质条件,合理地设计支护方式和参数,达到预期支护效果的同时,控制好经济成本。

2.3 注浆深度对于塑性区半径影响的理论计算

本文推导注浆支护深度对巷道塑性区范围影响的公式,以达到做好巷道支护与控制经济成本的双重目的.为验证公式计算的准确性与合理性,利用所推导的公式计算3组注浆参数下的塑性区范围变化,将注浆深度与表2参数分组代入式(17)计算塑性区 R_p 大小,得模拟塑性区范围与理论计算塑性区范围表,如表3~表5所示.塑性区范围理论值与模拟值对比如图7所示。

表3 塑性区长轴半径 单位:m

注浆半径	注浆参数 ($C/MPa, \varphi/(\circ)$)		
	第1组(3.4,30)	第2组(3.6,32)	第3组(3.8,34)
3.8	6.80	6.26	5.93
4.3	6.68	5.81	5.46
4.8	6.21	5.86	5.30
5.3	5.85	4.91	4.40
5.8	5.38	4.77	4.39

表4 塑性区短轴半径

单位:m

注浆半径	注浆参数(C/MPa , $\varphi/(\text{°})$)		
	第1组(3.4,30)	第2组(3.6,32)	第3组(3.8,34)
3.8	4.70	4.27	4.07
4.3	3.84	3.84	3.45
4.8	3.73	3.91	3.36
5.3	4.15	3.85	3.38
5.8	3.77	3.69	3.45

表5 塑性区范围 R_p 理论值

单位:m

注浆半径	注浆参数(C/MPa , $\varphi/(\text{°})$)		
	第1组(3.4,30)	第2组(3.6,32)	第3组(3.8,34)
3.8	7.36	6.65	6.38
4.3	6.76	6.09	5.82
4.8	6.58	5.98	5.79
5.3	5.42	4.96	4.62
5.8	5.38	4.85	4.50

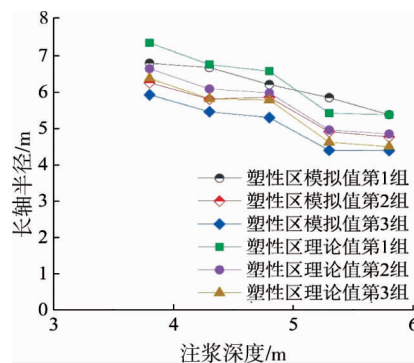


图7 塑性区范围理论值与模拟值对比

对比表3~表5数据和分析图7可以看出:由理论计算所得的塑性区范围大小与模拟所得的塑性区范围大小较为吻合,随着注浆深度的加大,二者的差距越来越小,甚至相等.由此可见,本文所推导出的塑性区范围关于注浆深度的函数具有一定的科学性和理论指导性.

由表3~表5数据可以看出:在不同的注浆参数下,无论是模拟结果还是理论计算,在注浆深度达到最佳注浆深度临界值前,随着注浆深度的加大,塑性区范围都大幅度缩小,在数值变化幅度上表现为以米为级数下降;当注浆深度超过临界值后,再往后加大注浆半径,塑性区范围大小几乎不变,在数值变化幅度上表现为以厘米为级数波动.从图7上可以看出:随着注浆深度的增大,塑性区范围先大幅下降,后趋于稳定.由此可见,注浆支护深度对巷道塑性区的影响较为显著,但是当注浆深度达到临界值后,再加大注浆深度对巷道支护效果并不明显.

以第2组为例,从模拟所得数据与理论计算所得数据来看,当注浆深度达到5.3 m时,塑性区半径理论值为4.96 m,模拟所得塑性区半径为4.91 m;再加大注浆深度到5.8 m时,塑性区半径理论值下降到4.85 m,此时模拟值为4.77 m.在该种情况下,注浆深度远大于塑性区半径,进入弹性区,结合实际情况考虑,注浆支护难以注到弹性区,不符合实际要求.在其他2组数据中,也有着同样的规律.因此,在注浆半径与塑性区半径理论值相近,已达到最大注浆深度时,塑性区半径无论是模拟值还是理论值,都已趋于稳定,此时的注浆支护深度也是最有效的注浆支护深度,在本工程实例中,最佳的注浆支护深度为4.8~5.3 m.

因此,综合利用注浆支护深度对巷道塑性区范围影响的公式与注浆支护模拟,可以为实际工程中应用注浆支护的支护方案设计提供一定的参考作用.

3 结论

1)当注浆深度达到一定程度后,加大注浆深度对巷道支护效果并不明显,注浆支护深度并非越大越好,需根据地质条件,合理地设计支护方式和参数.

2)在注浆范围与塑性区范围理论值趋于相近时,塑性区范围无论是模拟值还是理论值,都已趋于稳定,此时的注浆支护范围也是最有效的注浆支护范围.在本工程实例中,最佳的注浆支护范围为4.8~5.3 m.

参考文献:

- [1] 王卫军,董恩远,袁超.非等压圆形巷道围岩塑性区边界方程及应用[J].煤炭学报,2019,44(1):105-114.
- [2] 孟庆彬,韩立军,乔卫国,等.深部软岩巷道锚注支护机理数值模拟研究[J].采矿与安全工程学报,2016,33(1):27-34.
- [3] 潘锐,王琦,王雷,等.深井巷道锚注补强力学效应及支护参数研究[J].采矿与安全工程学报,2018,35(2):267-275.
- [4] 李树清,王卫军,潘长良,等.加固底板对深部软岩巷道两帮稳定性影响的数值分析[J].煤炭学报,2007,22(2):123-126.
- [5] 李文洲,康红普,姜志云,等.深部裂隙煤岩体变形破坏机理及高压注浆改性强化试验研究[J].煤炭学报,2021,46(3):912-923.
- [6] 孟庆彬,韩立军,王琦,等.深部高应力软岩巷道注浆时机优化分析[J].中南大学学报(自然科学版),2017,48(10):2765-2776.
- [7] 王琦,张皓杰,江贝,等.深部大断面硐室破坏机制与锚注控制方法研究[J].采矿与安全工程学报,2020,37(6):1094-1103.
- [8] 袁超,张建国,王卫军,等.基于塑性区分布形态的软弱破碎巷道围岩控制原理研究[J].采矿与安全工程学报,2020,37(3):451-460.
- [9] 王琦,许英东,许硕,等.破碎围岩锚注扩散加固机制研究与应用[J].采矿与安全工程学报,2019,36(5):916-923.
- [10] 周波,袁亮,薛生,等.断层带破碎煤巷围岩锚注预强化技术[J].采矿与安全工程学报,2018,35(3):509-516.
- [11] 董方庭,郭志宏.巷道围岩松动圈支护理论[C]//中国岩石力学与工程学会软岩工程专业委员会,煤矿软岩工程技术研究推广中心.世纪之交软岩工程技术现状与展望.煤炭工业出版社,1999:9.
- [12] 王宏伟,张登强,邓代新,等.非静水压力条件下巷道围岩破碎区应力分布特征[J].煤炭学报,2020,45(11):3717-3725.
- [13] 蔡美峰,何满潮,刘东燕.岩石力学与工程[M].北京:科学出版社,2013.