

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201905024



深浅孔-高低压耦合注浆 加固机理与应用

许昌毓, 韩立军, 杜跃

(中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221116)

摘要: 以王家岭煤矿 20101 工作面胶带巷破碎围岩加固为工程背景, 利用数值仿真软件 COMSOL Multiphysics 建立围岩注浆加固的流固耦合模型, 确定工程中深浅孔-高低压耦合注浆加固的合理注浆压力. 建立平面裂隙岩体模型, 揭示耦合注浆加固的作用机理, 分析深浅孔-高低压耦合注浆加固与普通注浆加固的不同支护效果; 对使用耦合注浆加固的实际工程进行监测分析. 针对 20101 工作面胶带巷开采过程中所面临的超前来压作用下破碎围岩加固的工程问题, 利用 FLAC^{3D} 数值模拟软件对原支护方式与深浅孔-高低压耦合注浆加固方式的支护效果进行对比分析. 结果表明: 耦合注浆加固能够更好地控制围岩变形和维持巷道安全.

关键词: 破碎围岩巷道; 耦合注浆加固; 深浅孔-高低压; 支护方式; 流固耦合模型; 平面裂隙岩体模型

中图分类号: TD 353 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2019)06-0733-08

Reinforcement Mechanism and Application of Deep and Shallow Hole-High and Low Pressure Coupling Grouting

XU Changyu, HAN Lijun, DU Yue

(State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering,
China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: Taking the reinforcement of the broken surrounding rock of the belt roadway in 20101 working face of Wangjialing Coal Mine as engineering background, the fluid-solid coupling model of surrounding rock grouting was established by numerical simulation software COMSOL Multiphysics, and the reasonable grouting pressure of deep and shallow hole-high and low pressure (DSH-HLP) coupling grouting in engineering was determined. A plane fractured rock mass model was built to reveal the mechanism of coupled grouting and to analyze the different supporting effects between DSH-HLP coupling grouting, and the common grouting. The actual engineering using the coupled grouting reinforcement process was monitored and analyzed. In order to discuss the reinforcement of broken surrounding rock in the belt roadway under the action of advancing pressure in the process of mining 20101 working face, the FLAC^{3D} numerical simulation software was used to compare and analyze the support effect between the original support method and DSH-HLP coupling grouting method. The results show that the coupled grouting process can better control the surrounding rock deformation and maintain the safety of the roadway.

Keywords: broken surrounding rock roadway; coupled grouting reinforcement; deep and shallow hole-high and low pressure; support method; fluid-solid coupling model; plane fractured rock mass model

随着开采深度的不断增加,破碎围岩巷道支护问题日益突出,探索破碎软岩巷道的合理支护方式成为亟待解决的重大问题^[1-3]. 常用的砌暄、金属支架等只是依赖于支护体本身强度,很难承受高地应力的作用;而锚杆、锚索对于松散破碎岩体的可锚性较差,很难满足破碎围岩巷道的支护要求. 此外,普通注浆加固采用单一的浅孔注浆或深浅孔间隔注浆,打孔、安装注浆管的数量过多,施工较麻烦^[4]. 韩立军等^[5]将初次锚网喷与锚索和二次锚注组成复合支护结构,并在软岩地层大断面硐室的支护中取得了较好的技术与经济效益. 康红普等^[6]基于复杂困难巷道的支护实践,发现采用高预应力、强力锚杆支护系统配合注浆加固,能够取得较好的支护效果. 郑强等^[7]基于双剪统一强度理论,导出锚喷支护圆形洞室的围岩应力场、位移场和塑性区半径解析解,为锚喷支护工程提供了理论依据. 周波等^[8]针对张集煤矿 17246 工作面回采断层带破碎煤巷支护困难、变形大等工程问题,提出针对巷道弱结构煤岩体的锚杆支护与注浆加固相结合的预强化工程控制技术. 孟庆彬等^[9]分析破裂岩样注浆加固前后的力学特性与微观结构,提出“锚注加固体等效层”概念,采用 FLAC^{3D} 数值模拟研究深部软岩巷道锚注支护机理. 涂鹏^[10]研究各种浆液成分对浆液结石体强度的影响,得出最佳配比方案,并建立浆液结石体使用寿命的评估程序和评估标准. 刘泉声等^[11]针对深部软岩巷道采用普通注浆工艺的不足,提出采用三步注浆工艺进行围岩加固,并取得较好的效果. 杨坪等^[12]阐明了壁后充填加固、裂隙充填与压密、注浆后形成网络骨架等注浆加固巷道围岩的作用机理,为巷道注浆加固提供了理论计算依据. 张连震等^[13]建立考虑浆-岩耦合效应的裂隙注浆扩散理论模型,并结合青岛地铁花岗岩微裂隙注浆工程实例验证该理论模型的正确性. 以上研究大多探讨破碎围岩锚网喷与锚索加固、锚注加固,以及普通注浆加固的机理及应用,而深浅孔-高低压(DSH-HLP)耦合注浆加固工艺的作用机理及工程应用却少有人研究. 本文以王家岭煤矿 20101 工作面胶带巷破碎围岩加固为工程背景,先后建立围岩注浆流固耦合模型和平面裂隙岩体模型,对比分析 20101 工作面胶带巷原支护方式与深浅孔-高低压耦合注浆加固方式的不同支护效果.

1 深浅孔-高低压耦合注浆压力的确定

1.1 围岩注浆流固耦合模型的建立

假设岩体为理想的多孔弹性体,基于达西定律和岩石力学弹性定律的单相流动耦合方程^[14]为

$$\left. \begin{aligned} \nabla \cdot \left(\frac{k}{\mu} \nabla p \right) &= n c_t \frac{\partial p}{\partial t} + \alpha \frac{\partial e}{\partial t}, \\ (\lambda + 2G) \nabla^2 e &= \alpha \nabla^2 p. \end{aligned} \right\} \tag{1}$$

式(1)中: k 为渗透率, m^2 ; μ 为流体粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; p 为流体压力, Pa ; n 为岩石孔隙度; c_t 为流体压缩系数, Pa^{-1} ; t 为时间, s ; α 为比奥系数; e 为体应变; λ 为拉梅常数; G 为剪切模量, Pa .

采用数值仿真软件 COMSOL Multiphysics,建立宽为 6 m,高为 4 m 的二维多孔弹性岩体注浆流固耦合模型,如图 1 所示. 使用达西定律模块与固体力学模块^[15],并基于式(1)对软件中原有方程式进行修正;同时,结合王家岭煤矿 20101 工作面胶带巷工程概况确定边界条件及初始条件;最后,进行多物理场耦合. 其中,注浆材料采用水泥浆,粘度为 $0.008 \text{ Pa} \cdot \text{s}$,密度为 $1\,400 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$;围岩初始孔隙率为 0.2,初始渗透率为 $1.0 \times 10^{-11} \text{ m}^2$,天然密度为 $1\,412 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,剪切模量为 1.42 GPa ,粘结力为 1.13 MPa ,体积模量为 1.20 GPa ,抗拉强度为 0.59 MPa ,内摩擦角为 25° .

1.2 合理注浆压力的确定

注浆时,浆液在渗流过程中会对注浆范围内的围岩产生压应力作用. 当浆液对围岩作用的压应力超过围岩抗拉强度时,会造成破碎围岩表面的开裂,并产生漏浆现象. 以深孔注浆压力为 4 MPa ,注浆 1 min 内浆液对围岩表面作用的压应力为例,其受力分布曲线,如图 2 所示. 图 2 中: σ_1 为浆液对围岩表面作用的压应力; r 为围岩表面上的点到注浆源的距离. 由图 2 可知:不考虑注浆源(0 m 处)附近的应力集中区域,在一定范围内,距离注浆源越远,围岩表面所受压应力越大,且增长幅度趋于平缓.

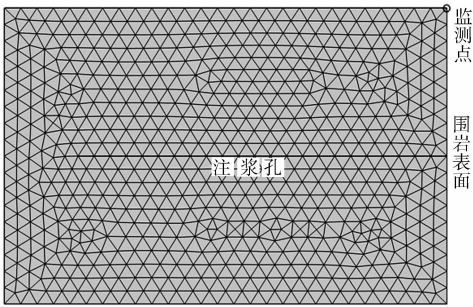


图 1 流固耦合计算模型

Fig. 1 Fluid-solid coupling calculation model

将围岩表面距离注浆源的最远点(2.0 m 处)作为监测对象,可得该监测点处不同注浆压力(P)对围岩表面的压应力(σ_p),如图 3 所示。由图 3 可知:注浆过程中,浆液对于围岩表面的压应力先是急剧增加,然后平缓下降;随着注浆压力的增大,围岩表面受到的压应力也明显增大。

浅孔-低压注浆采用 2 000 mm 注浆孔,分别施加 1~6 MPa 的注浆压力。由图 3(a)可知:当注浆压力超过 3 MPa 时,围岩表面所受压应力超过其抗拉强度 0.59 MPa,围岩表面有破裂的风险,故浅孔-低压注浆压力应控制在 3 MPa 以内。深孔-高压注浆采用 5 000 mm 注浆孔,分别施加 4~9 MPa 的注浆压力,由于是在浅孔-低压注浆的基础上进行注浆,围岩表面抗拉承载力可提升 50%~100%^[9]。又因为围岩较破碎,注浆量较大,注浆加固对围岩抗拉强度的提升比较明显,所以取浅孔-低压注浆后的加固圈抗拉强度提高 100%。由图 3(b)可知:当深孔-高压注浆压力大于 6 MPa 时,围岩表面所受压应力已经超过浅孔-低压注浆加固后的抗拉强度 1.18 MPa,围岩表面有破裂的风险,因此,深孔-高压注浆压力应控制在 6 MPa 以内。

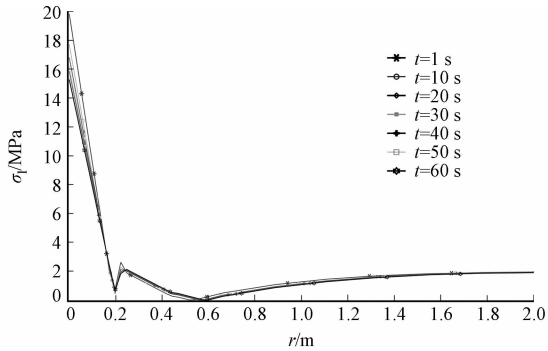
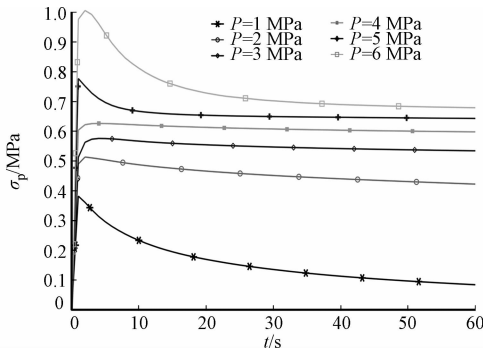


图 2 深孔注浆压力为 4 MPa 时
围岩表面受力分布曲线

Fig. 2 Pressure distribution curve of surrounding rock surface under 4 MPa deep hole grouting pressure

(a) 浅孔-低压注浆

(b) 深孔-高压注浆

图 3 监测点处不同注浆压力下围岩表面所受压应力

Fig. 3 Compressive stress of surrounding rock surface under different grouting pressures at monitoring point

2 深浅孔-高低压耦合注浆加固机理

2.1 基本假设

假设注浆材料为宾汉流体,浆液在裂隙内流动为层流,符合达西定律。在二维平面等厚光滑裂隙中,宾汉流体在压力作用下产生流动时,Wittke 和 Wallner 根据浆液的平衡方程及边界条件,推导出浆液在宽度为 δ 的裂隙中的压力分布(p)^[16],即

$$p = p_0 - \frac{2\tau_0}{\delta}(r - r_0). \tag{2}$$

式(2)中: p_0 为孔内裂隙面处压力,Pa; r_0 为钻孔半径,m; δ 为裂隙宽度,m; τ_0 为浆液的屈服强度,Pa。

采用 COMSOL Multiphysics 的达西定律模块,对普通注浆加固及深浅孔-高低压耦合注浆加固效果进行模拟^[17-18]。由于围岩裂隙的几何形态和展布特征与常用的多孔介质模型中孔隙的情况有很大区别,为了更好地揭示耦合注浆加固的作用机理,采用宽×高为 6 m×4 m 的平面裂隙岩体模型进行分析。根据工程现场地质雷达探测结果,围岩裂隙较为发育,在注浆孔施工过程中会揭露一些裂隙,而这种裂隙渗透率较大,容易被浆液注满,故将孔隙划分为与注浆孔连通的裂缝和封闭裂缝。

在实际工程中,距注浆源的距离越远,注浆效果越差,故简化模拟,将模型中与注浆孔连通的裂缝分为三级,渗透率依照距离注浆孔的远近依次减半;边界均设置为无流动的条件。岩体裂隙注浆数值计算

模型,如图 4 所示. 由式(2)可知,注浆压力在岩体内的大小及分布可以反映注入有效浆液的量和范围,故通过观察注浆 1 min 岩体内注浆压力的分布规律来反映普通注浆加固及深浅孔-高低压耦合注浆加固的效果.

2.2 普通注浆加固

普通注浆加固采用长度为 5 000 mm 的注浆孔,分别施加 2,5 MPa 的初始注浆压力进行模拟. 普通注浆 1 min 后浆液在岩体内的压力分布,如图 5 所示. 由图 5 可知:当采用较大的注浆压力(5 MPa)时,会造成岩体的进一步劈裂破碎,在围岩周边形成裂隙,造成浆液从围岩表面溢出,或直接将连通围岩表面的天然裂隙打开而溢出;而当采用较小的注浆压力(2 MPa)时,向破碎围岩中注入的浆液太少,无法有效地将破碎围岩胶结起来,强度难以得到保障.

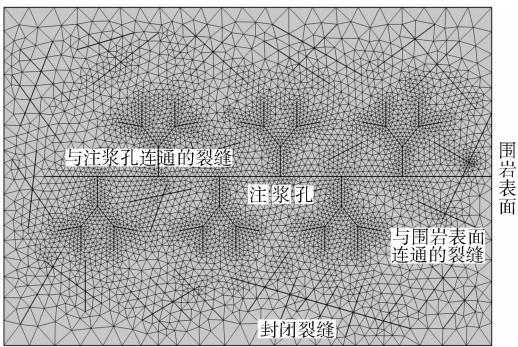
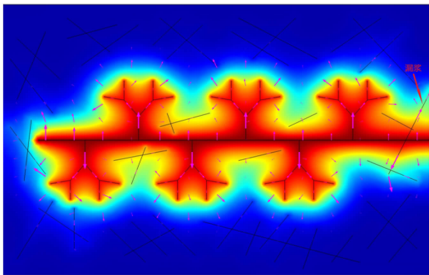
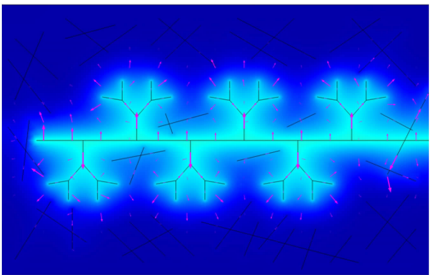


图 4 岩体裂隙注浆数值计算模型

Fig. 4 Numerical calculation model for grouting in fractured rock mass



(a) 普通注浆压力为 5 MPa



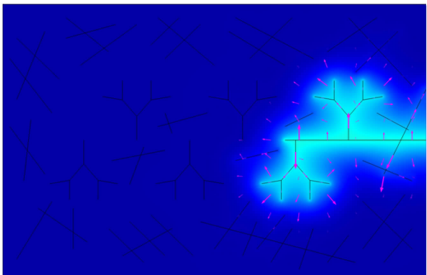
(b) 普通注浆压力为 2 MPa

图 5 普通注浆 1 min 后浆液在岩体内的压力分布

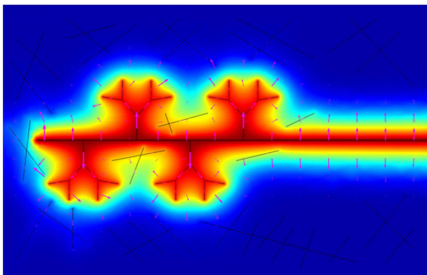
Fig. 5 Pressure distribution of the slurry in rock mass after 1 minute common grouting

2.3 深浅孔-高低压耦合注浆加固

深浅孔-高低压耦合注浆加固 1 min 后,岩体内的压力分布,如图 6 所示. 浅孔-低压注浆采用长度为 2 000 mm 的注浆孔,注浆压力为 2 MPa. 由图 6(a)可知:注浆达到规定强度后,可以将距围岩表面 2 000 mm 左右的松散破碎围岩胶结成整体,从而封堵裂隙,形成防渗帷幕,同时,保护深孔-高压注浆时注浆口处的稳定性. 深孔-高压注浆采用长度为 5 000 mm 的注浆孔,注浆压力为 5 MPa. 由于是在浅孔-低压注浆的基础上进行注浆,所以,浅孔-低压注浆范围内已经没有与注浆孔连通的裂缝,即使注浆压力较大也不易发生漏浆现象. 由图 6(b)可知:较高的注浆压力提高了浆液的渗透能力,改善了注浆加固效果,而不会导致围岩表面的变形破坏,对浅孔-低压注浆加固体也起到复注补强的作用,通过与浅孔注浆浆液的耦合,有效地加固了岩土体.



(a) 浅孔-低压注浆压力为 2 MPa



(b) 深孔-高压注浆压力为 5 MPa

图 6 耦合注浆 1 min 后浆液在岩体内的压力分布

Fig. 6 Pressure distribution of the slurry in rock mass after 1 minute coupling grouting

2.4 深浅孔-高低压耦合注浆加固机理分析

普通注浆加固的注浆压力大小及注浆量不易控制,加固效果难以得到保障. 浅孔-低压注浆使浆液通过挤压或渗透作用,将破裂煤岩体松动圈附近的裂隙及孔隙充填密实. 经过浆液的胶结作用,将围岩

表面胶结成一个具有较高承载力的注浆结石体,使破碎围岩具备承受更高注浆压力的能力.在浅孔-低压注浆的基础上进行深孔-高压注浆,能够进一步提高围岩较深范围内浆液的渗透能力,扩大支护体系的承载范围.

总而言之,深浅孔-高低压耦合注浆的施工方法是先通过浅孔-低压注浆为深孔-高压注浆提供稳定的注浆施工条件,再通过深孔-高压注浆为浅孔-低压注浆实现复注补强,两个步骤相互耦合作用,能有效地控制破碎巷道围岩的变形,保持巷道的长期稳定与安全.

3 实例支护效果对比模拟分析

3.1 数值计算模型

王家岭煤矿 20101 工作面胶带巷地表位于山西省临汾市乡宁县,地面标高+733.0~+966.5 m,工作面井下标高+543~+565 m.煤层直接顶为粉砂岩,老顶为粉砂岩及细砂岩,直接底及老底为粉砂岩.根据地质雷达探测结果,该巷煤岩体的结构复杂,岩石较破碎,完整性较差,顶板松动圈范围一般为 1.7~2.4 m;帮部松动圈范围一般为 1.0~1.5 m,局部达到 4.0~5.0 m.建立长×宽×高为 50 m×50 m×50 m 的模拟区域,限制其侧向及底部位移,在上表面施加荷载边界来模拟上覆岩体的自重条件,采用 Mohr-Coulomb 破坏准则,计算模型中的煤岩体力学参数,如表 1 所示,其数值模拟模型,如图 7 所示.表 1 中: ρ_0 为天然密度; G 为剪切模量; K 为体积模量; c 为粘结力; φ 为内摩擦角; R_m 为抗拉强度.

表 1 计算模型中的煤岩体力学参数

Tab. 1 Mechanical parameters of coal and rock mass in calculation model

岩层种类	$\rho_0/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	G/GPa	K/GPa	c/MPa	$\varphi/(\text{^\circ})$	R_m/MPa
细砂岩	2 700	9.23	2.43	1.83	30	1.57
粉砂岩	2 750	9.24	2.45	1.73	32	1.57
2 [#] 煤	1 412	1.42	1.20	1.13	25	0.59
泥岩	2 468	5.23	1.32	1.42	28	1.23
下部岩层	2 700	9.13	2.50	1.83	30	1.57

为了比较原有支护方式与深浅孔-高低压耦合注浆加固方式在开采过程中所面临的超前来压作用下的支护效果,将模型进行支护模拟后,选取较大的超前支承压力集中系数来模拟由于工作面推进所产生的最不利的来压作用影响.

3.2 原支护方式的数值模拟分析

20101 工作面胶带巷沿 2[#] 煤底板掘进,巷道断面为 5.60 m×3.55 m 的矩形.顶部锚杆采用 $\phi 22\text{ mm}\times 2\,200\text{ mm}$ 的左旋无纵筋螺纹钢锚杆,间排距为 1 000 mm×900 mm,每排 6 根顶锚杆;顶部锚索采用 $\phi 17.8\text{ mm}\times 8\,250\text{ mm}$ 的锚索,间排距为 2 000 mm×1 800 mm;帮部锚杆选用 $\phi 20\text{ mm}\times 2\,000\text{ mm}$ 的左旋无纵筋高强螺纹钢锚杆,间排距为 1 000 mm×900 mm,每排 4 根锚杆.20101 工作面胶带巷原支护方式,如图 8 所示.

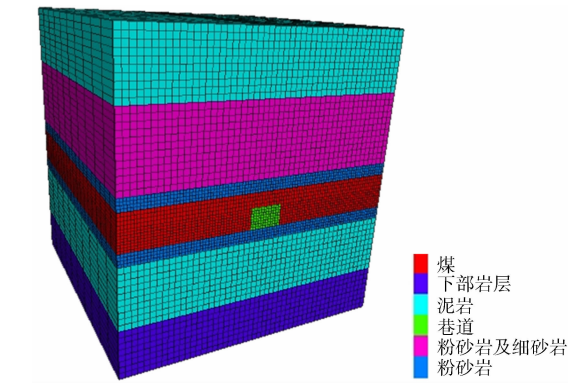


图 7 数值模拟模型

Fig. 7 Numerical simulation model

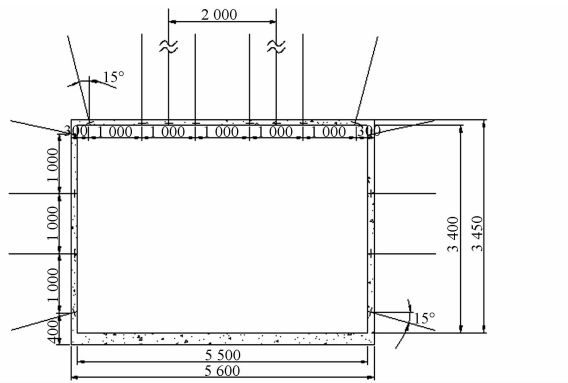
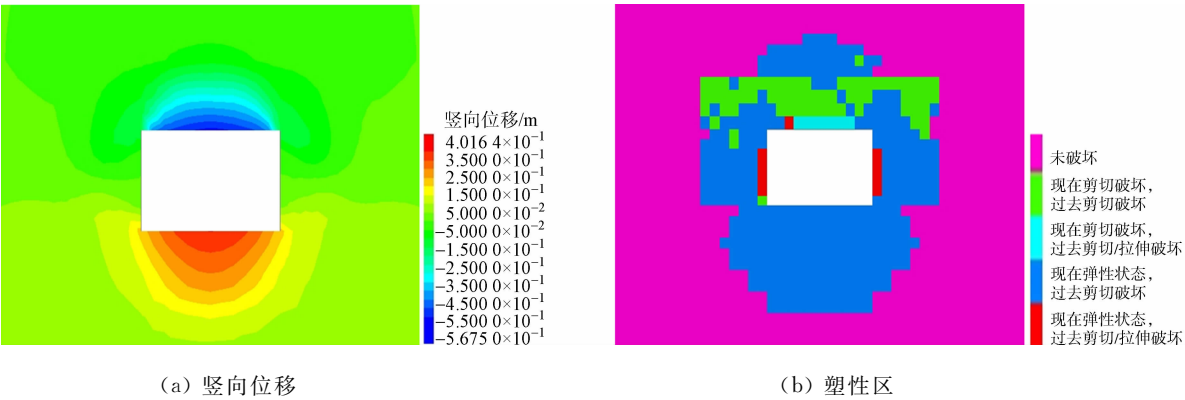


图 8 20101 工作面胶带巷原支护方式(单位:mm)

Fig. 8 Original support of belt roadway in 20101 working face (unit: mm)

利用 FLAC^{3D} 中的 Cable, Shell 结构单元分别模拟锚杆和混凝土喷层, 则原支护方式在超前来压作用下的数值模拟结果, 如图 9 所示. 由图 9 可知: 在工作面超前来压的作用下, 胶带巷顶、底板和帮部破碎程度较大, 最大竖向位移分别达 568, 402, 200 mm, 塑性区最大深度分别达 4.5, 5.0, 3.5 m, 均超过了现有支护锚杆的长度, 使支护效果大大减弱, 无法充分发挥锚索及锚杆的性能, 不能保障胶带巷在工作面推进过程中的安全稳定.



(a) 竖向位移

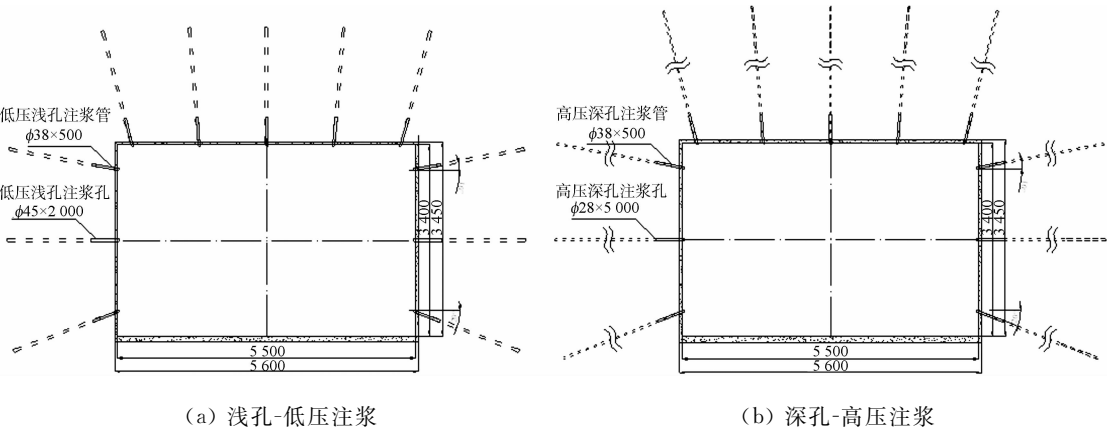
(b) 塑性区

图 9 原支护方式在超前来压作用下的数值模拟

Fig. 9 Numerical simulation of original supporting method under advancing pressure

3.3 深浅孔-高低压耦合注浆加固方式的数值模拟分析

20101 工作面胶带巷沿 2[#] 煤底板掘进, 巷道断面为 5.60 m×3.55 m 的矩形. 首先进行浅孔-低压注浆, 注浆管的规格为 $\phi 38\text{ mm}\times 500\text{ mm}$, 采用风钻打眼, 孔径(ϕ)为 45 mm, 孔深为 2 000 mm, 间排距为 1 200 mm×900 mm; 注浆采用单液水泥-水玻璃浆液, 水泥使用 42.5 级普通硅酸盐水泥, 水灰比控制在 0.8~1.0, 水玻璃的掺量为水泥用量的 3%~5%, 注浆压力控制在 2 MPa 左右. 深孔-高压注浆在浅孔-低压注浆加固形成的加固圈基础上, 采用同一注浆管, 注浆前采用钻机进行扫孔, 孔径为 28 mm, 孔深为 5 000 mm; 注浆采用水泥浆液, 注浆压力控制在 5 MPa 左右. 深浅孔-高低压耦合注浆管的布置, 如图 10 所示.



(a) 浅孔-低压注浆

(b) 深孔-高压注浆

图 10 深浅孔-高低压耦合注浆管的布置(单位:mm)

Fig. 10 Layout of DSH-HLP coupling grouting pipe (unit: mm)

注浆加固是利用浆液充填围岩裂隙改善巷道围岩破裂体的内聚力、内摩擦角等物理力学参数, 从而提高破裂岩体的承载力. 参考节 1.1 多孔弹性岩体注浆流固耦合模型中的压力扩散范围, 将深孔-高压注浆范围及深浅孔耦合范围内破碎岩体参照注浆结石体的物理力学参数进行适当地调整, 从而模拟注浆加固后的支护效果^[17-19]. 在胶带巷顶板和帮部 5 000 mm 范围内进行深浅孔-高低压耦合注浆的数值模拟, 结果如图 11 所示.

由图 11 可知: 在工作面超前来压作用下, 注浆加固后的 20101 胶带巷顶、底板及帮部的最大竖向位移分别为 104, 239, 49 mm, 相比原支护方式分别减少了 82%, 41%, 76%, 最大竖向位移得到有效地控制; 塑性区最大深度分别为 4.5, 5.0, 3.5 m, 与原支护方式相比改变量不大, 但塑性区总面积较少. 由数

值模拟结果可见,深浅孔-高低压耦合注浆加固方式与原支护方式相比,能够更好地控制破碎围岩体在开采过程中超前来压作用下的变形与破坏,保证了工作面回采期间的安全稳定。

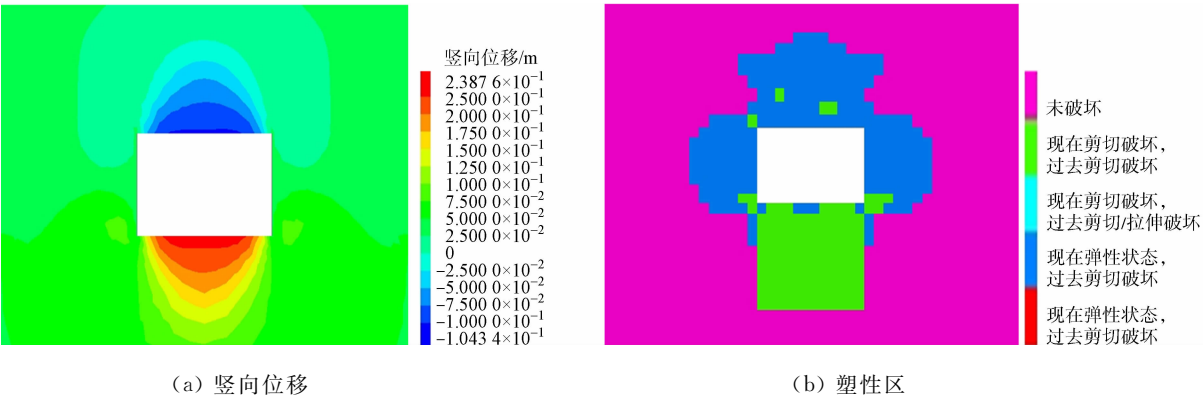


图 11 耦合注浆加固方式在超前来压作用下的数值模拟

Fig. 11 Numerical simulation of coupled grouting support under advancing pressure

4 实际工程应用

将深浅孔-高低压耦合注浆加固在王家岭煤矿 12101 工作面部分胶带巷进行实际应用. 分别在 310, 285, 270, 250, 235, 220 m 处共布设 6 个断面(1#~6#), 进行监测分析; 分别在深浅孔-高低压耦合注浆加固段(2#~4# 断面)和未注浆段(1#, 5#, 6# 断面)巷道布置表面位移测站进行表面位移监测. 各监测断面的顶板累计下沉量(d_t)及帮部累计收敛量(d_s), 如图 12 所示。

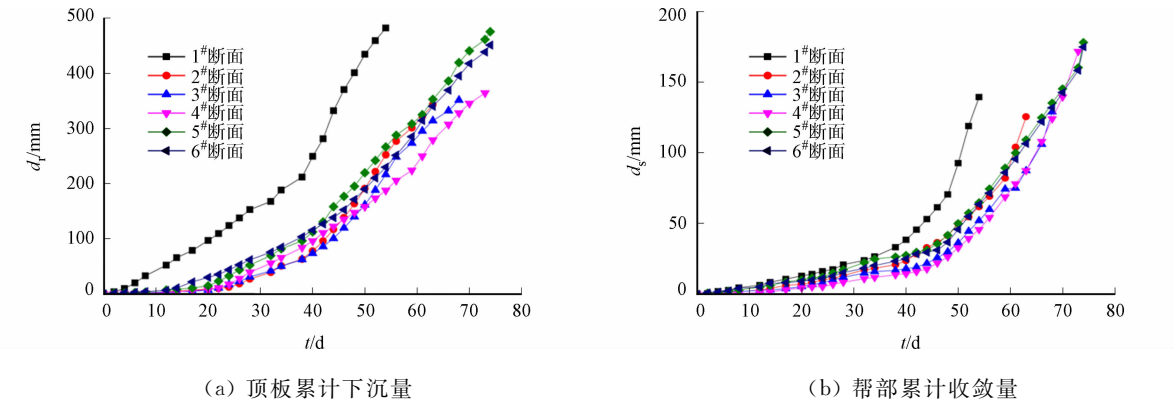


图 12 各监测断面的顶板累计下沉量及帮部累计收敛量

Fig. 12 Roof subsidence and sides convergence of monitoring sections

由图 12 可知:未注浆段顶板下沉量最大的是 1# 断面,其最大累计下沉量达 482.21 mm;耦合注浆段顶板下沉量最大的是 4# 断面,其最大累计下沉量达 364.48 mm;未注浆段帮部收敛量最大的是 5# 断面,其最大累计收敛量达 178.02 mm;耦合注浆段帮部收敛量最大的是 4# 断面,其最大累计收敛量达 171.70 mm. 对比同时间段内监测的帮部和顶板的位移可知,在监测断面中,耦合注浆段的位移量总体上明显小于未注浆段的位移量,深浅孔-高低压耦合注浆加固得到有效的应用。

5 结论

以王家岭煤矿 20101 工作面胶带巷为工程背景,运用数值分析及实际工程监测,研究深浅孔-高低压耦合注浆的加固机理及效果,得到如下 3 点结论。

1) 运用破碎围岩注浆加固流固耦合模型,确定了王家岭煤矿 20101 工作面胶带巷深浅孔-高低压耦合注浆加固工艺的合理注浆压力范围,即浅孔-低压注浆压力应不超过 3 MPa,深孔-高压注浆压力应不超过 6 MPa,所得结论可为类似的实际工程注浆压力定量设计提供理论指导和参考。

2) 运用平面裂隙岩体模型对比分析了普通注浆加固和深浅孔-高低压耦合注浆加固的不同支护效

果,普通注浆加固注浆压力及注浆量不易控制,注浆效果较差;耦合注浆先通过浅孔-低压注浆为深孔-高压注浆提供稳定的注浆施工条件,再通过深孔-高压注浆为浅孔-低压注浆实现复注补强,两个步骤相互耦合,有效地实现了围岩的安全稳定.

3) 由数值分析可知,在开采面推进过程中的超前来压作用下,王家岭煤矿 20101 工作面胶带巷深浅孔-高低压耦合注浆加固与原支护方案相比,其支护效果更加理想.实际工程监测也表明,耦合注浆加固能够有效控制破碎围岩巷道的变形,保持巷道的长期稳定与安全.

参考文献:

[1] 贺永年,韩立军,邵鹏.深部巷道稳定的若干岩石力学问题[J].中国矿业大学学报,2006,35(3):288-295. DOI:10.3321/j.issn:1000-1964.2006.03.002.

[2] 杨仁树,薛华俊,郭东明,等.大断面软弱煤帮巷道注浆加固支护技术[J].煤炭科学技术,2014,42(12):1-4. DOI:10.13199/j.cnki.cst.2014.12.001.

[3] DUN Zhilin,REN Dashuai,REN Lianwei. Study on the application of bolt-grout reinforcement in the deep soft rock roadway[J]. Applied Mechanics and Materials,2011,90/91/92/93:1956-1959. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMM.90-93.1956.

[4] 韩立军,孟庆彬,宗义江,等.深浅孔与高低压耦合注浆工艺:103089276A[P].2013-05-08.

[5] 韩立军,王延宁,周胜利,等.软弱岩层中大断面硐室施工与支护技术研究[J].金属矿山,2006(11):23-26. DOI:10.3321/j.issn:1001-1250.2006.11.007.

[6] 康红普,王金华,林健.煤矿巷道锚杆支护应用实例分析[J].岩石力学与工程学报,2010,29(4):649-664.

[7] 郑强,林从谋,孟凡兵.采用统一强度理论的锚喷支护围岩弹塑性统一解[J].华侨大学学报(自然科学版),2011,32(3):326-331. DOI:10.11830/issn.1000-5013.2011.03.0326.

[8] 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. DOI:10.13545/j.cnki.jmse.2018.03.009.

[9] 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. DOI:10.13545/j.cnki.jmse.2016.01.005.

[10] 涂鹏.注浆结石体耐久性试验及评估理论研究[D].长沙:中南大学,2012.

[11] 刘泉声,卢超波,刘滨,等.深部巷道注浆加固浆液扩散机理与应用研究[J].采矿与安全工程学报,2014,31(3):333-339. DOI:10.13545/j.issn1673-3363.2014.03.001.

[12] 杨坪,彭振斌,李奋强.巷道注浆加固作用机理及计算模型研究[J].矿冶工程,2005,25(1):3-5. DOI:10.3969/j.issn.0253-6099.2005.01.002.

[13] 张连震,张庆松,刘人太,等.基于浆液-岩体耦合效应的微裂隙岩体注浆理论研究[J].岩土工程学报,2018,40(11):2003-2011. DOI:10.11779/CJGE201811006.

[14] 熊伟,田根林,黄立信,等.变形介质多相流动流固耦合数学模型[J].水动力学研究与进展(A辑),2002,17(6):770-776. DOI:10.3969/j.issn.1000-4874.2002.06.015.

[15] 王瑞,沈振中,陈孝兵.基于 COMSOL Multiphysics 的高拱坝渗流-应力全耦合分析[J].岩石力学与工程学报,2013,32(增刊2):3197-3204. DOI:10.3969/j.issn.1000-6915.2013.z2.028.

[16] 邝健政.岩土注浆理论与工程实例[M].北京:科学出版社,2001.

[17] 徐轶,徐青.基于 COMSOL Multiphysics 的渗流有限元分析[J].武汉大学学报(工学版),2014,47(2):165-170.

[18] LE Huilin,SUN Shaorui,KULATILAKE P H S W,*et al.* Effect of grout on mechanical properties and cracking behavior of rock-like specimens containing a single flaw under uniaxial compression[J]. International Journal of Geomechanics,2018,18(10):04018129. DOI:10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001225.

[19] SEO H J,CHOI H,LEE I M. Numerical and experimental investigation of pillar reinforcement with pressurized grouting and pre-stress[J]. Tunnelling and Underground Space Technology,2016,54:135-144.

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:方德平)