

郅磊, 史艳楠, 刘建功. 矽石固体充填散体材料注浆扩散试验研究[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2021, 3(2): 023011.

QIE Lei, SHI Yannan, LIU Jiangong. Experimental study on grouting diffusion of gangue solid filling bulk materials[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2021, 3(2): 023011.

矽石固体充填散体材料注浆扩散试验研究

郅磊^{1,2}, 史艳楠^{1,2}, 刘建功^{1,2}

(1. 河北工程大学 机械与装备工程学院, 河北 邯郸 056038; 2. 河北省煤炭生态保护开采产业技术研究院, 河北 邯郸 056038)

摘要:为得到整体性好、抗压强度高的胶结充填体,对级配矽石散体材料进行注浆扩散研究。基于幂律流体流变方程和渗流运动方程建立了柱形扩散理论公式,并应用COMSOL Multiphysics模拟软件对浆液扩散进行了数值模拟,得到浆液扩散半径与材料孔隙率、水灰比和注浆压力成正相关。通过设计正交试验对级配矽石散体材料进行注浆扩散试验研究。试验结果表明,当压实力为0.8 MPa,矽石粒径级配方案为A₁,水灰比为0.5:1时,胶结体3 d强度能达到3.23 MPa,21 d能达到6.28 MPa,21 d胶结体平均弹性模量为19 425.4 MPa,胶结体抗压强度在养护前期增长明显,充填体整体性和力学性能得到很大改善。通过数值模拟及注浆扩散试验验证了注浆扩散规律,研究结果可为优化矽石散体材料注浆参数设计提供参考。

关键词:矽石散体材料;孔隙率;注浆扩散;胶结充填体;力学性能

中图分类号:TD325

文献标志码:A

文章编号:2096-7187(2021)02-3011-10

Experimental study on grouting diffusion of gangue solid filling bulk materials

QIE Lei^{1,2}, SHI Yannan^{1,2}, LIU Jiangong^{1,2}

(1. School of Mechanical and Equipment Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China; 2. Hebei Coal Ecological Protection Mining Industry Technology Research Institute, Handan 056038, China)

Abstract: Grouting diffusion on graded gangue bulk materials is proposed, aiming to obtain the cementing stowing body with good integrity, and high compressive strength. Based on the exponential fluid flow equation and seepage motion equation, the theoretical equation of cylindrical diffusion is established. The slurry diffusion is numerically simulated by COMSOL Multiphysics. It is found that the slurry diffusion radius is positively correlated with the materials porosity, water-cement ratio and grouting pressure. Orthogonal test is designed to study the grouting diffusion of graded gangue bulk materials. The results show that when the compaction strength is 0.8 MPa, the gangue particle size gradation scheme is A₁, and the water-cement ratio is 0.5:1, the strength of cementing body can reach 3.23 MPa in 3 days, 6.28 MPa in 21 days, and the average elastic modulus is 19 425.4 MPa in 21 days. The compressive strength of the cementing body increases obviously in the early curing stage, and the integrity and mechanical properties of the filling body are greatly improved. The grouting diffusion law is verified through numerical simulation and grouting diffusion experiment. The results provide reference for optimizing the grouting parameters design of gangue bulk materials.

收稿日期:2020-09-03

修回日期:2020-10-15

责任编辑:李青

基金项目:邯郸市科学技术研究与发展计划资助项目(19422021008-6);河北省重点研发计划资助项目(19275507D)

作者简介:郅磊(1994-),男,山西吕梁人,硕士研究生,主要从事矽石固体充填等方面的研究工作。E-mail:614841014@qq.com

通信作者:史艳楠(1988-),男,河南焦作人,讲师,硕士生导师,博士,主要从事煤炭生态保护开采等方面的研究工作。E-mail:shiychn@163.com

Key words: gangue bulk materials; porosity; grouting diffusion; cementing stowing body; mechanics properties

充填开采是一种主动保护生态环境的采煤方法,对废弃物的处理、地面环境的保护及地面沉陷的有效控制发挥着积极作用。以矸石作为充填料进行直接充填时,充填体整体性差、密实度低、抗压能力不足^[1-3],会对井下生产和人身安全形成威胁,因此,如何进一步提高充填质量,改善充填体力学性能,以有效控制岩层沉降和保护地表是一项重要的课题。

近年来矸石一般与粉煤灰、水泥等配合使用,但上述充填材料在外界压力作用下颗粒重新排列,间隙挤压密实、体积收缩,表现出明显的散体特征,且现有的研究多为充填材料和膏体充填材料,对矸石固体充填散体材料进行注浆扩散的研究较少,且缺乏相关浆液扩散理论^[4],存在浆液扩散效率低的问题。为提高浆液扩散效率,改善充填效果,需进一步研究浆液扩散理论,分析注浆参数,得出浆液扩散规律。文献[5]研究了牛顿流体柱-半球面渗透注浆形式扩散参数的理论公式;文献[6-7]基于广义达西定律和球形扩散理论推导了宾汉流体和幂律流体在细砂中的球形扩散半径计算公式;文献[8-9]针对多孔介质进行试验,建立了考虑渗滤效应的多孔介质渗透扩散机理;文献[10]进行了室内试验,结果表明不同的水灰比对注浆效果的影响不同,并给出水灰比选择的工程建议;文献[11]进行了不同级配条件下矸石压缩试验,研究了矸石压缩性能与粒径级配之间的关系;文献[12]研究了矸石注浆体的力学性能,但缺少矸石粒径优化对注浆胶结体的影响研究;文献[13]对7种配合比的黄土-废石胶结充填体进行了抗压强度测试。国内外学者在注浆理论、模拟试验及矸石级配特性方面已经做了很多工作,但关于非牛顿流体在多孔介质中的扩散规律、级配矸石散体特性和浆液特性对浆液扩散的影响及胶结体性能的研究较少。

在上述文献研究和分析的基础上,针对矸石固体充填存在较大孔隙、充填体抗压强度低等问题,对矸石散体材料开展注浆扩散研究,即以级配矸石散体为充填骨料,水泥浆液为胶结料,通过浆液扩散将矸石散体胶结成整体,提高充填质量。通过建立浆液扩散理论公式、数值模拟浆液扩散得出浆液扩散规律,并设计正交试验进行不同参数矸石散体

注浆扩散试验,进一步研究浆液扩散规律和胶结体强度特征,获得整体性好且抗压强度高的充填胶结体,对井下固体充填矸石散体材料注浆扩散具有十分重要的科学和现实意义。

1 散体材料注浆扩散理论

注浆理论针对流体在介质材料中的扩散情况,建立扩散半径、注浆压力、孔隙率、注浆时间等之间的关系。流体分为牛顿流体、宾汉姆流体及幂律流体3类^[14],当水灰比为0.5~0.7时,水泥浆液为幂律流体^[15]。

幂律流体的流变方程^[16]为

$$\tau = c\gamma^n \quad (1)$$

由式(1)推导的幂律流体在介质材料中渗流运动方程^[7]为

$$V = \left(\frac{K_c}{\mu_c} \right)^{\frac{1}{n}} \left(-\frac{d_p}{d_l} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (2)$$

式中, τ 为剪切应力; c 为稠度系数; γ 为剪切速率, $\gamma = -\frac{dv}{dr}$; n 为流变指数; V 为幂律流体在介质材料中的渗流速度; K_c 为有效渗透率; μ_c 为有效黏度; d_p 为流体柱两端压力差; d_l 为流体柱长度。

式(2)中 K_c 和 μ_c 由式(3)、(4)求得:

$$K_c = \frac{\phi r_0^2}{2} \left(\frac{n}{1+3n} \right) \quad (3)$$

$$\mu_c = c \left(\frac{1+3n}{\phi r_0 n} \right)^{n-1} \quad (4)$$

式中, ϕ 为介质材料孔隙率; r_0 为假设的圆管半径。

流体在介质材料中的扩散与扩散形式有关,常见的扩散形式包括球面、柱面及柱-半球面扩散^[17],当流体经过注浆花管扩散到介质材料时,扩散形式为柱面扩散。在推导幂律流体在介质材料中的柱面扩散理论公式时,提出如下计算假定^[18-20]:

- (1) 介质材料满足各向同性与均质。
- (2) 流速较小,流体除在注浆孔周围局部的很小区域流态呈紊流状态外其余皆为层流。
- (3) 在注浆过程中忽略流体的重力影响作用。

柱面扩散理论模型如图1所示,其中, P_1 为注浆压力; P_0 为注浆点处地下水压力; l_t 为 t 时刻幂律流体在柱体部分的扩散半径; l_0 为注浆管半径; h 为 t 时刻

幂律流体在柱体部分的扩散高度。

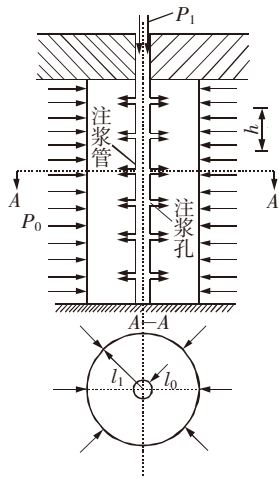


图1 柱面扩散理论模型

Fig. 1 Cylinder diffusion theory model

流体在介质材料扩散过程中时, 注浆量 \$Q\$ 满足

$$Q = VAt \quad (5)$$

式中, \$A\$ 为浆液在介质中渗透过程中的经过面积 (\$A = 2\pi lh\$); \$l\$ 为浆液扩散半径; \$t\$ 为注浆时间。

将式(2)代入式(5)变形得:

$$V = \frac{Q}{At} = \left(\frac{K_c}{\mu_c}\right)^{\frac{1}{n}} \left(-\frac{d_p}{d_i}\right)^{\frac{1}{n}} \quad (6)$$

式(6)进行分离变量法求积分且考虑注浆边界条件: 即 \$P = P_1\$ 时, \$l = l_0\$; \$P = P_0\$ 时, \$l = l_1\$, \$P_1 - P_0\$ 为

$$\Delta P = P_1 - P_0 = \left(\frac{\mu_c}{K_c}\right) \left(\frac{Q}{2\pi ht}\right)^n \left(\frac{l_1^{1-n} - l_0^{1-n}}{1-n}\right) + B \quad (7)$$

又因为注浆量满足

$$Q = \pi l_1^2 h \phi \quad (8)$$

将式(8)代入式(7), 可得幂律流体柱面扩散理论公式为

$$\Delta P = P_1 - P_0 = \left(\frac{\mu_c}{K_c}\right) \left(\frac{l_1^2 \phi}{2t}\right)^n \left(\frac{l_1^{1-n} - l_0^{1-n}}{1-n}\right) \quad (9)$$

2 数值模拟试验

级配矽石散体可以看作一种具有大量孔隙的多孔介质, 浆液在介质中的扩散过程实际是从不饱和到饱和的过程, 因此运用COMSOL Multiphysics软件的Richards非饱和渗流计算模块进行浆液扩散数值模拟。根据实际采煤工作面巷道煤层厚度选择模型尺寸为 \$3 \text{ m} \times 3 \text{ m}\$, 注浆管半径为 \$25 \text{ mm}\$, 注浆管预埋于模型正中心, 四周均匀分布4个注浆孔, 设定注浆时间为 \$5 \text{ min}\$, 以单一钻孔为研究对象, 建立注

浆模型如图2所示。

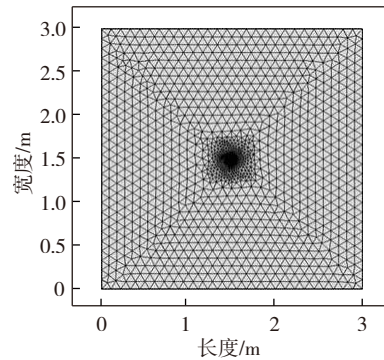


图2 注浆模型

Fig. 2 Grouting model

数值模拟中介质材料主要参数为孔隙率, 介质材料孔隙率由矽石粒径级配和压实力决定, 压实力相当于充填液压支架夯实机构的推压密实力, 即充填液压支架夯实机构在做夯实运动时由液压缸施加的推力^[21], 本文中针对矽石散体轴向压实施加的压力, 浆液主要参数为水灰比。

在实际充填作业中, 必须将大块矽石破碎到一定程度才能进行充填, 本文将矽石粒径控制到 \$40 \text{ mm}\$ 以下, 按粒径由小到大将矽石分为3种级别, 记为 \$L_1, L_2, L_3\$, 分别对应为小粒径、中等粒径和大粒径矽石, 矽石粒径分级见表1。

表1 矽石粒径分级

Table 1 Gangue particle size classification

粒径级别	粒径尺寸/mm	相对大小分类
\$L_1\$	0 ~ 10	小粒径
\$L_2\$	10 ~ 20	中等粒径
\$L_3\$	20 ~ 40	大粒径

当矽石粒径级配不同时, 矽石散体压缩特性也不同^[22], 按小粒径矽石占比提出4个代表性级配方案, 见表2。

表2 矽石粒径级配方案

Table 2 Gangue particle size gradation scheme

级配方案	质量比/%		
	0 ~ 10 mm	10 ~ 20 mm	20 ~ 40 mm
\$A_1\$	10	60	30
\$A_2\$	15	30	55
\$A_3\$	20	50	30
\$A_4\$	30	60	10

为得到浆液扩散规律, 确定注浆参数为矽石粒径级配比、压实力、注浆压力和水灰比。压实力取

值根据充填液压支架的夯实机构的推压密实力确定^[23]。各参数取值见表3。

表3 注浆参数取值
Table 3 Value of grouting parameter

注浆参数	粒径级配X	压实力Y/MPa	注浆压力W/MPa	水灰比Z
K_1	A ₄	0.6	1	0.5:1
K_2	A ₃	0.8	2	0.6:1
K_3	A ₁	1.2	3	
K_4	A ₂	1.6		

孔隙率是材料中孔隙体积与自然状态下总体积的百分比,计算公式为

$$\phi = \frac{V_0 - V_1}{V_0} \times 100\% = \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho_1}\right) \times 100\% \quad (10)$$

式中, ϕ 为孔隙率, %; V_0 为材料在自然状态下的体积, m^3 ; V_1 为材料的绝对密实体积, m^3 ; ρ_1 为材料质量密度, t/m^3 ; ρ_0 为材料体积密度, t/m^3 。

不同粒径级配和压实力的矽石散体孔隙率计算结果见表4。

在压实过程中, 矽石散体处于均匀受力状态, 小粒径矽石填补大粒径矽石孔隙, 矽石颗粒间接触由松散趋于紧密, 孔隙得到填充。当矽石粒径级配相同时, 压实力越大, 孔隙率越小; 而当压实力相同时, 不同粒径级配矽石散体孔隙率也不同, 当中等粒径矽石量最多, 而小粒径矽石量小于大粒径矽石

表4 不同孔隙率
Table 4 Different porosity

粒径级配	孔隙率/%			
	0.6 MPa	0.8 MPa	1.2 MPa	1.6 MPa
1:6:3	46.4	44.1	41.7	39.2
15:30:55	46.2	42.8	40.2	36.4
2:5:3	45.7	43.7	40.7	37.8
3:6:1	46.0	42.9	39.5	35.6

时, 矽石散体孔隙率高。

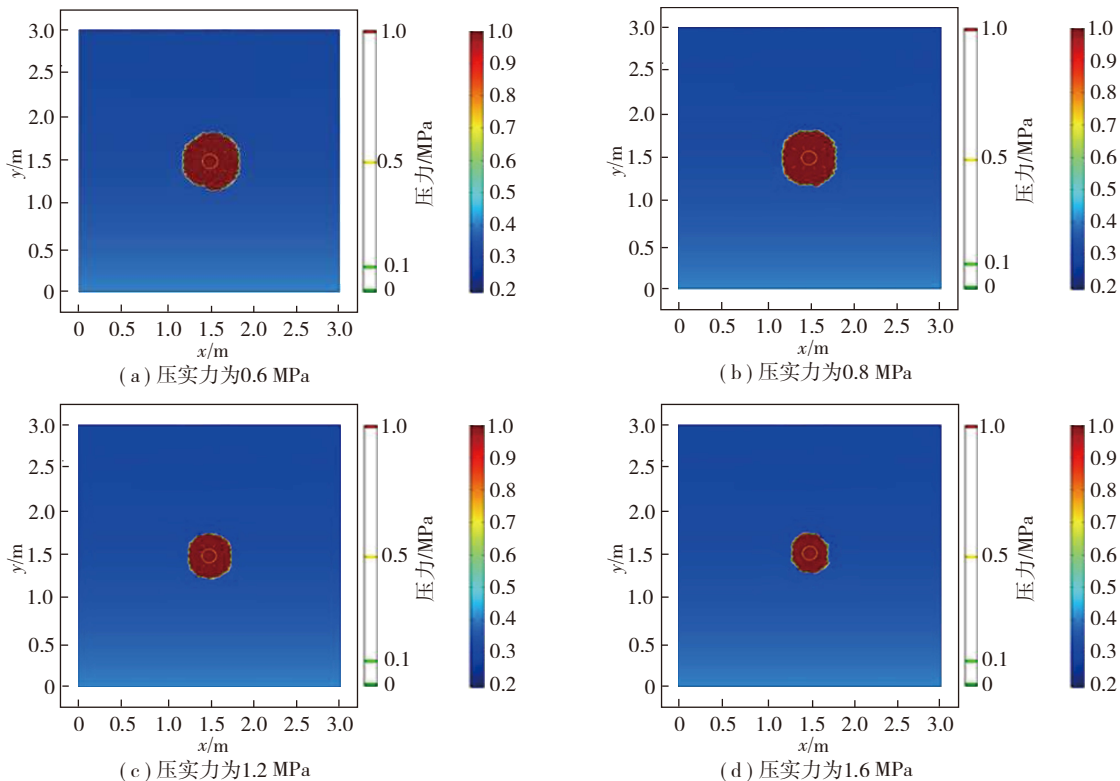
2种水灰比浆液参数值见表5。

表5 流体初始参数值
Table 5 Initial parameter value of fluid

水灰比	流体密度/($kg \cdot m^{-3}$)	流体动力黏度/($Pa \cdot s$)
0.5:1	1 860	0.139
0.6:1	1 810	0.1

对不同的注浆参数组合进行数值模拟, 获得的浆液扩散情况如图3所示。

其中图3(a)~(d)是在矽石粒径级配方案为A₁、注浆压力为1 MPa及浆液水灰比为0.5:1, 不同压实力的注浆参数条件下进行数值模拟得到的浆液扩散情况; 图3(e)和(f)是在矽石粒径级配方案为A₁、压实力为0.8 MPa及浆液水灰比为0.5:1, 不同注浆压力的注浆参数条件下进行数值模拟得到的浆液扩散情况; 图3(g)~(j)是在压实力为0.8 MPa、注浆压力



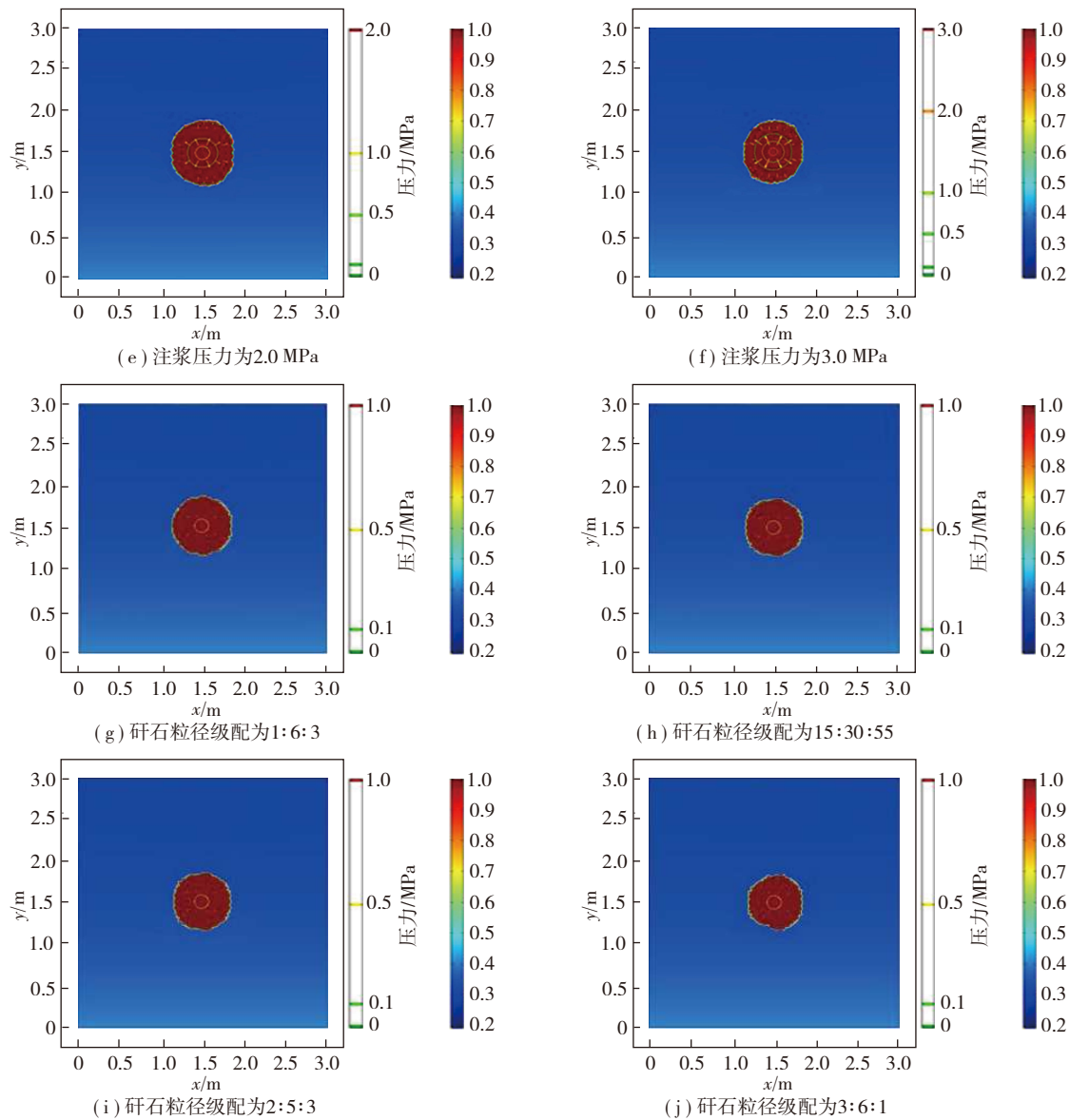


图3 不同注浆参数下浆液扩散

Fig. 3 Grouting diffusion under different grouting parameters

为1 MPa及浆液水灰比为0.6:1,不同砾石粒径级配的注浆参数条件下进行数值模拟得到的浆液扩散情况。

由图3(a)~(d)可知,当砾石粒径级配为A₁,水灰比为0.5:1,注浆压力为1 MPa时,随着压实力增大,浆液扩散半径减小,由于在压实过程中,压实力使砾石之间接触趋于紧密,介质材料孔隙率减小,浆液扩散所受阻力增大。观察图3(b),(e)和(f)可知,注浆压力的增加,加速了浆液在介质材料中的扩散,且注浆压力越大,浆液扩散半径增长幅度越大。对比图3(b)和(g),当砾石粒径级配为A₁,压实力为0.8 MPa,注浆压力为1 MPa时,浆液水灰比越大,浆液越稀,黏度越小,在扩散过程中与材料的摩擦阻

力越小,扩散性越强,扩散半径越大。砾石粒径级配对浆液扩散半径的影响如图3(g)~(j)所示,0.8 MPa压实力下,砾石粒径级配造成介质材料孔隙率不同,根据计算的孔隙率,4个粒径级配比中A₁最大,其对应扩散半径也大,浆液扩散半径与介质材料孔隙率成正比。即当介质材料孔隙率高,浆液水灰比大,注浆压力高时,浆液在介质材料中扩散情况较好,扩散半径大。

为了验证数值模拟结果的准确性,对不同注浆参数下理论扩散半径进行计算,得出理论计算值与对应的数值模拟值及差值分析,见表6。

分析表6可得,扩散半径理论计算值均高于数值模拟值,由于数值模拟中介质材料会阻碍浆液扩

散, 2者间有18%左右的差异, 数值模拟结果与理论 计算结果变化趋势一致, 验证了注浆扩散规律。

表 6 理论计算值、数值模拟值及差值分析

Table 6 Theoretical calculation value, numerical simulation value and difference analysis

扩散半径	数值模拟方案									
	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j
理论计算值/cm	34.85	33.5	30.2	26.1	40.3	50.5	38.75	37.7	38.25	37.6
数值模拟值/cm	29.20	27.6	24.3	21.0	33.0	41.2	32.55	30.7	30.90	30.0
差值分析/%	16.21	17.6	19.5	19.5	18.1	18.4	16.00	18.6	19.20	20.2

3 注浆扩散试验

在得到不同注浆参数下的浆液扩散规律后, 为进一步研究矽石粒径级配和压实力对浆液扩散的影响及胶结体试块的强度特征, 进行了注浆扩散试验及胶结体试块单轴压缩试验。整个试验在CMT4304微机控制电子万能试验机上进行, 该试验机对载荷、变形、位移的测量和控制有较高的精度和灵敏度, 可以精准测试胶结体破坏全过程, 并生成试验过程应力-应变曲线等。加工钢制注浆管长度为200 mm, 外径为10 mm, 内径为7.5 mm, 管壁对称分布4个注浆孔, 孔径为1 mm, 轴向孔间距为20 mm, 并对注浆管底部进行焊接密封; 盛装矽石容器为PVC-U管, 直径为150 mm, 高200 mm, 管壁厚度为4 mm, 能承受4 MPa的径向压力, 并在圆柱管底部加一管帽。

3.1 试验方案设计

为便于选择最优因素, 采用正交试验法来设计试验, 即在全部水平组合中挑选部分代表性水平组合来试验, 通过分析部分试验结果以掌握全部试验的情况, 并确定出最优的水平组合^[24]。选取数值模拟确定的注浆参数为因素, 参数取值为水平, 本试验采用混合水平正交试验法, 试验指标为胶结体单轴抗压强度, 具体正交试验方案见表7, 选用手动注浆泵注浆, 注浆压力为1 MPa, 每种方案的试样分别养护3, 7, 21 d。

首先按照粒径级配方案对预先分级好的矽石称量并混合均匀, 在圆柱管内壁涂抹润滑油, 并将注浆管置于容器中心位置; 其次将级配矽石自然倒入圆柱容器中, 并在上方加盖1块中间有孔的圆形钢板, 以保证压实时矽石均匀受力, 并置于试验机承压台上进行压实; 然后配置水泥浆液, 连接注浆管路进行注浆, 当看到浆液从圆形钢板的中间孔溢出时, 即停止注浆, 取出注浆管, 对注浆体进行静置

养护, 24 h后进行脱模, 并测试胶结体强度。

表 7 正交试验方案

Table 7 Orthogonal test scheme

方案编号	粒径配比方案	压实力/MPa	水灰比
N ₁	A ₄	1.2	0.5:1
N ₂	A ₄	0.6	0.6:1
N ₃	A ₄	0.8	0.5:1
N ₄	A ₄	1.6	0.6:1
N ₅	A ₃	0.6	0.6:1
N ₆	A ₃	0.8	0.5:1
N ₇	A ₃	1.2	0.5:1
N ₈	A ₃	1.6	0.6:1
N ₉	A ₁	0.8	0.5:1
N ₁₀	A ₁	0.6	0.6:1
N ₁₁	A ₁	1.2	0.5:1
N ₁₂	A ₁	1.6	0.6:1
N ₁₃	A ₂	1.6	0.5:1
N ₁₄	A ₂	0.8	0.6:1
N ₁₅	A ₂	0.6	0.5:1
N ₁₆	A ₂	1.2	0.6:1

为了保证矽石混合比较均匀, 切割一段长度为300 mm的PVC-U管, 并在两端加盖管帽, 将称量好的矽石倒入, 然后在地面进行滚动混合, 最后自然倒入容器中。

3.2 试验结果分析与讨论

图4分别为注浆完整试块和破碎试块。



(a) 完整试块 (b) 破碎试块

图4 注浆完整试块和破碎试块

Fig. 4 Grouting complete test block and broken test block

观察2者浆液扩散情况,发现浆液随孔隙路径扩散充分,主要以浆脉及浆液-矽石凝结体的形式留存分布,矽石散体孔隙得到密实,整体性得到提高,表明矽石散体孔隙特征和浆液特性是影响浆液

扩散及胶结体整体形成的关键因素。

胶结体的长期支撑效果取决于在压力下的抗压性能,获得胶结体试块抗压强度和压缩率结果见表8。

表 8 正交试验结果

Table 8 Orthogonal test results

试验编号	单轴抗压强度/MPa			压缩率/%		
	3 d	7 d	21 d	3 d	7 d	21 d
N ₁	1.78	2.67	3.40	5.2	4.5	4.1
N ₂	1.30	2.34	3.30	5.6	5.2	4.5
N ₃	1.92	3.55	5.05	4.7	4.2	3.9
N ₄	1.56	2.59	3.45	5.5	5.0	4.4
N ₅	1.26	2.55	3.50	6.5	5.8	5.6
N ₆	2.40	3.94	5.40	4.9	4.4	4.0
N ₇	2.10	3.30	4.81	5.9	5.5	5.0
N ₈	1.40	2.72	3.88	6.3	5.7	5.4
N ₉	3.23	4.90	6.28	3.2	2.8	2.5
N ₁₀	1.47	2.47	3.18	4.4	3.8	3.1
N ₁₁	2.82	4.37	5.48	3.8	3.1	2.8
N ₁₂	1.78	2.97	3.79	4.1	3.8	3.3
N ₁₃	1.14	1.77	2.60	5.3	4.8	4.4
N ₁₄	2.10	3.00	3.75	4.9	4.4	3.4
N ₁₅	1.50	3.00	3.50	5.5	4.9	4.7
N ₁₆	1.27	2.03	2.73	5.0	4.6	4.0

对表8抗压强度进行极差分析计算,计算结果 见表9。

表 9 极差计算结果

Table 9 Range calculation results

项目	试件3 d抗压强度/MPa			试件7 d抗压强度/MPa			试件21 d抗压强度/MPa			
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	
水平	K ₁	6.56	5.53	16.89	11.15	10.36	27.50	15.20	13.48	36.52
	K ₂	7.16	9.65	12.14	12.51	15.39	20.67	17.59	20.48	27.58
	K ₃	9.30	7.97		14.71	12.37		18.73	16.42	
	K ₄	6.01	5.88		9.80	10.05		12.58	13.72	
极差	R	3.29	4.12	4.75	4.91	5.34	6.83	6.15	7	8.94

根据各龄期胶结体抗压强度极差计算结果及试块破碎压缩率,选择矽石散体注浆扩散的最优组合为X₃(X₂)Y₂Z₁。

水灰比大,浆液扩散范围广,能渗入到更微小孔隙,但会影响浆液胶结能力及胶结体力学性能。因此,综合浆液扩散情况及胶结体性能,选择水灰比为0.5:1的浆液进行注浆。

扩散半径的理论计算值和数值模拟值都是直接根据介质材料孔隙率得出的,当不同粒径级配矽石散体孔隙率相近时,在注浆扩散试验中,小粒径

矽石量越多,对浆液扩散造成的阻力也越大,注浆效果较差,胶结体试块抗压强度小,因此在兼顾浆液扩散的前提下优先选择小粒径矽石量少的矽石散体粒径级配。

结合理论计算、数值模拟及胶结体试块抗压强度实验数据极差计算,得出最优注浆参数组合,即矽石粒径级配比为A₁,压力为0.8 MPa,水灰比为0.5:1。

3.3 单轴压缩试验结果分析

对最优参数组合下不同养护龄期的胶结试块

进行单轴压缩试验, 获得应力-应变曲线如图5所示。

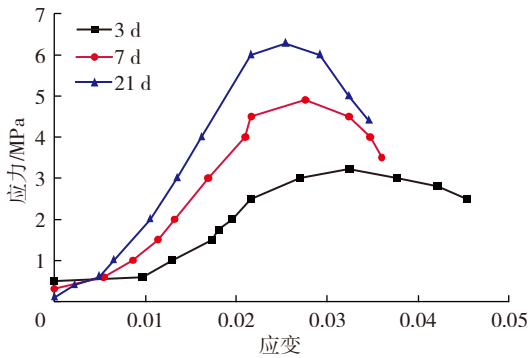
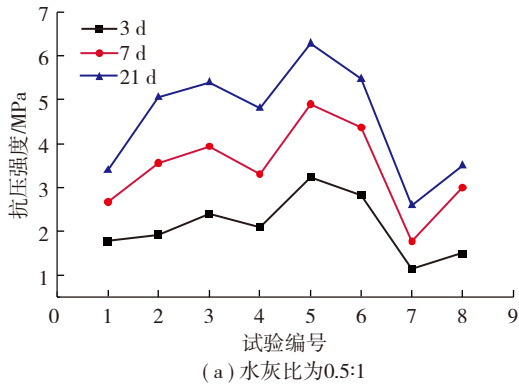
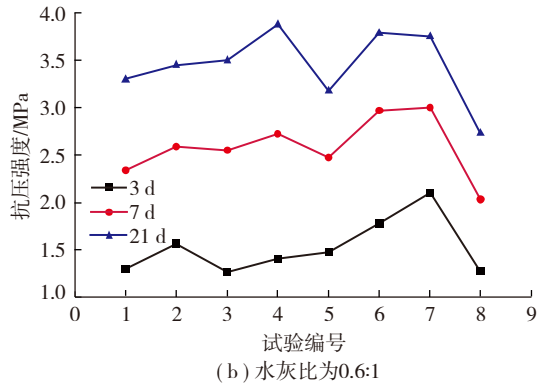


图5 不同养护龄期胶结体应力-应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curves of test blocks at different stages



(a) 水灰比为0.5:1



(b) 水灰比为0.6:1

图6 不同水灰比和养护龄期试块的抗压强度曲线

Fig. 6 Compressive strength curves of test blocks with different water-cement ratios and curing stages

是7 d试块的1.17 ~ 1.47倍, 试块强度在前期增长幅度明显, 随着时间推移, 抗压强度增长放缓, 逐渐达到峰值。水泥浆液固结分为凝结和硬化过程, 凝结后水泥浆液仍处于软塑状态, 未完全硬化, 随着时间增长, 浆液与矽石固结程度加强, 胶结体强度进一步提高。

3.5 浆液扩散半径分析

根据对胶结体试块扩散半径的测量, 绘制曲线如图7所示。

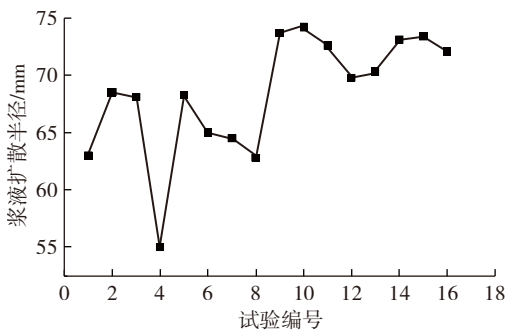


图7 浆液扩散半径

Fig. 7 Diffusion radius of slurry

由图5曲线可知, 不同养护龄期的胶结体, 在抗压过程中大致经历了内部孔隙压实、弹性变形和塑性变形3个阶段, 应力-应变曲线形状基本一致, 大致呈扁平状“S”形, 具有相同变形规律。由曲线斜率可知, 养护龄期长的胶结体弹性模量高, 胶结体3 d强度达到3.23 MPa, 21 d抗压强度能达到6.28 MPa, 极限强度对应应变为 2.54×10^{-2} 。

3.4 养护龄期分析

2种水灰比下不同养护龄期的试块抗压强度曲线如图6所示。

由图6可知, 7 d龄期的试块抗压强度较3 d试块强度增加了0.5 ~ 1倍, 而养护21 d的试块抗压强度

从图7和表7可知, 在一定注浆压力下, 浆液扩散半径受矽石粒径级配和压实力影响较大, 而浆液水灰比对浆液扩散半径影响较小, 矽石粒径级配决定了整个介质材料的孔隙分布, 而压实力决定了孔隙的大小, 2者都对浆液在材料中的渗透扩散有重要影响。当矽石粒径级配一样时, 压实力越高, 浆液扩散半径越小; 而当压实力相同时, 小粒径矽石占据比例小的粒径级配矽石浆液扩散半径大。

胶结体抗压强度增长来源主要是胶结材料的填缝和固结作用, 浆液在填充矽石散体孔隙的同时将松散材料胶结为整体。从以上理论公式和数值模拟分析得出幂律流体在多孔介质中的浆液扩散规律, 而在实际级配矽石注浆扩散试验中, 矽石混合不均等因素会使浆液扩散与模拟有所差别, 但数值模拟对各注浆参数的描述仍具有现实参考意义, 值得进一步研究分析。

4 结论

(1) 通过建立浆液扩散理论公式和数值模拟浆

液扩散, 得到多孔介质浆液扩散规律, 为实际矽石散体注浆扩散参数选择提供理论参考, 但要考虑具体粒径级配实际注浆浆液扩散及胶结体性能的影响。

(2) 矽石粒径级配和压实力对材料孔隙率有影响, 同一级配矽石散体随压实力的增大, 材料孔隙率减小; 而在相同压实力下, 当中等粒径矽石占据多数且小粒径矽石量较少时, 材料孔隙率大。

(3) 结合理论、数值模拟和试验结果, 压实力为 0.8 MPa、水灰比为 0.5:1、矽石粒径级配方案为 A₁ 的组合是最优组合, 胶结体试块 3 d 强度能达到 3.23 MPa, 21 d 强度能达到 6.28 MPa, 21 d 试块平均弹性模量为 19 425.4 MPa, 试块承载性能良好。试块抗压强度在养护前期增长明显, 随养护龄期增长逐渐达到极限强度。

参考文献(References):

[1] 吴晓刚, 刘康, 葛帅帅, 等. 固体充填材料压实特性及应用[J]. 煤矿安全, 2016, 47(8): 41-44.
WU Xiaogang, LIU Kang, GE Shuaishuai, et al. Compaction characteristics and application of solid filling materials[J]. Safety in Coal Mines, 2016, 47(8): 41-44.

[2] 刘建功, 陈勇. 膏体注浆补强固体充填技术研究与应[J]. 中国矿业, 2019, 28(S1): 146-149.
LIU Jianguo, CHEN Yong. Research and application of paste grouting reinforcement solid filling technology[J]. China Mining Magazine, 2019, 28(S1): 146-149.

[3] 刘建功, 赵庆彪. 综合机械化充填采煤[J]. 煤炭学报, 2010, 35(9): 1413-1418.
LIU Jianguo, ZHAO Qingbiao. Comprehensive mechanized filling coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(9): 1413-1418.

[4] 杨米加, 陈明雄, 贺永年, 等. 注浆理论的研究现状及发展方向[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(6): 839-841.
YANG Mijia, CHEN Mingxiong, HE Yongnian, et al. Research status and development direction of grouting theory[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(6): 839-841.

[5] 杨志全, 侯克鹏, 梁维, 等. 牛顿流体柱-半球面渗透注浆形式扩散参数的研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(S2): 17-24.
YANG Zhiquan, HOU Kepeng, LIANG Wei, et al. Research on diffusion parameters of newtonian fluid column-hemispheric permeation grouting[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(S2): 17-24.

[6] 杨秀竹, 王星华, 雷金山. 宾汉体浆液扩散半径的研究与应用[J]. 水利学报, 2004, 35(6): 75-79.
YANG Xiuzhu, WANG Xinghua, LEI Jinshan. Research and application of Bingham slurry diffusion radius[J]. Journal of Hydraulic

Engineering, 2004, 35(6): 75-79.

[7] 杨秀竹, 雷金山, 夏立农, 等. 幂律型浆液扩散半径研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(11): 1803-1806.
YANG Xiuzhu, LEI Jinshan, XIA Linong, et al. Study on grouting diffusion radius of exponential fluids[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(11): 1803-1806.

[8] CHUPIN O, SAIYOURI N, HICHER P Y. The effects of filtration on the injection of cement-based grouts in sand columns[J]. Transport in Porous Media, 2008, 72(2): 227-240.

[9] SAADA Z, CANOU J, DORMIEUX L, et al. Modeling of cement suspension flow in granular porous media[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2005, 29(7): 691-711.

[10] PAN R, WANG Q, JIANG B, et al. Failure of bolt support and experimental study on the parameters of bolt-grouting for supporting the roadways in deep coal seam[J]. Engineering Failure Analysis, 2017(6): 218-233.

[11] 王文, 李化敏, 熊祖强, 等. 粒径级配对矽石压实变形特性影响研究[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(6): 1553-1558, 1694.
WANG Wen, LI Huamin, XIONG Zuqiang, et al. Study on the influence of particle size gradation on the characteristics of gangue compaction deformation[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(6): 1553-1558, 1694.

[12] 陈志维, 邵阳, 王涵, 等. 深部固体充填矽石带与注浆联合留巷理论论研究[J]. 矿业研究与开发, 2016, 36(1): 27-32.
CHEN Zhiwei, TAI Yang, WANG Han, et al. Theoretical research on deep solid filling gangue belt and grouting combined roadway retention[J]. Mining Research and Development, 2016, 36(1): 27-32.

[13] 刘永, 贺桂成, 袁梅芳, 等. 黄土-废石胶结充填体抗压强度试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(1): 113-118.
LIU Yong, HE Guicheng, YUAN Meifang, et al. Experimental study on the compressive strength of loess-waste stone cemented backfill[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(1): 113-118.

[14] FRANSSON A, TSANG C F, RUTQVIST J, et al. G. A new parameter to assess hydromechanical effects in single-hole hydraulic testing and grouting[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2007, 44(7): 1011-1021.

[15] 阮文军. 注浆扩散与浆液若干基本性能研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(1): 69-73.
RUAN Wenjun. Research on grouting diffusion and some basic properties of grout[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(1): 69-73.

[16] 沈崇棠, 刘鹤年. 非牛顿流体力学及其应[M]. 北京: 高等教育出版社, 1989.
SHEN Chongtang, LIU Henian. Non-Newtonian fluid mechanics and its applications[M]. Beijing: Higher Education Press, 1989.

[17] 王国际. 注浆技术理论与实践[M]. 北京: 中国矿业大学出版社, 2000.
WANG Guoji. Theory and practice of grouting technology[M].

- Beijing: China University of Mining and Technology Press, 2000.
- [18] 孔祥言. 高等渗流力学[M]. 北京: 中国科学技术大学出版社, 1999.
- KONG Xiangyan. Advanced seepage mechanics[M]. Beijing: University of Science and Technology of China Press, 1999.
- [19] 地基处理委员会. 地基处理手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1993.
- FOUNDATION TREATMENT COMMITTEE. Ground treatment manual[M]. Beijing: China Construction Industry Press, 1993.
- [20] 岩土注浆理论与工程实例协作组. 岩土注浆理论与工程实例[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- COLLABORATION GROUP OF GEOTECHNICAL GROUTING THEORY AND ENGINEERING EXAMPLES. Geotechnical grouting theory and engineering examples[M]. Beijing: Science Press, 2001.
- [21] 张学东, 王传齐, 许伟. 固体充填采煤液压支架压实机构的演变[J]. 机械工程师, 2014(12): 302-304.
- ZHANG Xuedong, WANG Chuanqi, XU Wei. Evolution of compaction mechanism of hydraulic support in solid filling mining[J]. Mechanical Engineer, 2014(12): 302-304.
- [22] 张进红, 郁钟铭. 充填矸石粒径级配方案确定试验研究[J]. 煤矿安全, 2014, 45(1): 51-53.
- ZHANG Jinhong, YU Zhongming. Experimental study on determination of particle size gradation scheme for filling gangue[J]. Safety in Coal Mines, 2014, 45(1): 51-53.
- [23] 路兰勇. ZC6000/18/38型综采充填液压支架关键技术研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2013.
- LU Lanyong. Research on key technology of ZC6000/18/38 hydraulic support for fully mechanized mining[D]. Beijing: China University of Mining and Technology(Beijing), 2013.
- [24] 樊海燕, 郭忠平, 黄万朋, 等. 矸石胶结充填体力学性能实验研究[J]. 煤矿开采, 2015, 20(6): 83-86, 66.
- FAN Haiyan, GUO Zhongping, HUANG Wanpeng, et al. Experimental study on mechanical properties of gangue cemented backfill[J]. Coal Mining, 2015, 20(6): 83-86, 66.