

## 不同水灰比水泥基浆液流变特性与扩散机理

李连崇, 王漪藤, 牟文强, 刘洪磊

(东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘要:** 为了研究岩土与采矿工程中注浆材料的扩散机理, 分析了5种水灰比条件下3种水泥基浆液的流变性能. 基于浆液黏度时变特性和裂隙岩体特性, 建立注浆浆液扩散的理论计算模型, 阐明不同水泥基浆液的扩散机理. 结果表明: 纳米硅溶胶复合体系浆液的密度较小(1.25~1.35 g/cm<sup>3</sup>), 流动度较高(260~425 mm); 矿渣-粉煤灰和氧化石墨烯复合体系的析水率较低(< 30%), 稳定性较好; 浆液黏度具有时变特性, 拟合函数为  $\eta(t) = \eta_0 + k_a e^{k_s t}$ , 且随着水灰比增大, 浆液的黏度时变特性减弱; 通过计算程序获得了3种浆液的扩散半径, 揭示了浆液的注浆压力、种类及水灰比的共同影响; 在相同扩散距离下注浆压力与黏度时变特性呈正相关; 氧化石墨烯复合体系在给定距离下所需注浆压力最小, 更易于扩散.

**关键词:** 裂隙岩体; 注浆浆液; 水灰比; 流变特性; 扩散半径

中图分类号: TD 745 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2025)12-0104-12

## Rheological Properties and Diffusion Mechanism of Cement-Based Slurries with Different Water-Cement Ratios

LI Lian-chong, WANG Yi-teng, MU Wen-qiang, LIU Hong-lei

(School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: MU Wen-qiang, E-mail: muwenqiang@mail.neu.edu.cn)

**Abstract:** In order to study the diffusion mechanism of grouting materials in geotechnical and mining engineering, the rheological properties of three types of cement-based slurries under five water-cement ratios were analyzed. Based on the time-dependent viscosity of the slurry and the characteristics of fractured rock masses, a theoretical calculation model for grouting slurry diffusion was established to elucidate the diffusion mechanisms of different cement-based slurries. The results indicate that the slurry of the nano-silica sol composite system has a relatively low density (1.25~1.35 g/cm<sup>3</sup>) and high fluidity (260~425 mm). The slag-fly ash and graphene oxide composite systems exhibit low bleeding rates (< 30%) and good stability. The viscosity of the slurry demonstrates time-dependent characteristics, with a fitting function ( $\eta(t) = \eta_0 + k_a e^{k_s t}$ ). Time-dependent characteristics weakens as the water-cement ratio increases. The diffusion radii of the three slurries are obtained through computational procedures, revealing that grouting pressure, slurry type, and water-cement ratio collectively influence the diffusion. Under the same diffusion distance, grouting pressure is positively correlated with the time-dependent viscosity characteristics. The graphene oxide composite system requires the least grouting pressure at a given distance, making it easier to diffuse.

**Key words:** fractured rock mass; grouting slurry; water-cement ratio; rheological property; diffusion radius

注浆技术作为地下工程中重要的防护手段之一, 广泛涉及矿山巷道的围岩加固以及地下结

收稿日期: 2024-05-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52204089, 52374082, 52174070); 中国博士后科学基金资助项目(2022M720680); 辽宁省自然科学基金资助项目(2024BSBA21).

作者简介: 李连崇(1978—), 男, 辽宁朝阳人, 东北大学教授, 博士生导师; 刘洪磊(1981—), 男, 山东枣庄人, 东北大学教授, 博士生导师.

构防水,对于确保地下空间的稳定性和安全性具有不可替代的作用.注浆材料通常以浆液的形式在压力作用下注入地层裂缝或地下岩体中,随后在固化或硬化后形成坚固的支护层,以增强地质体的稳定性和承载能力<sup>[1]</sup>.目前工程中常用的注浆材料包括:水泥基浆料、聚合物浆料、膨润土浆料、环氧树脂浆料和聚氨酯浆料<sup>[2-3]</sup>.其中水泥基浆料具有硬化迅速、抗压强度高、成本低廉、适用性广等特点,是目前应用最为广泛的注浆材料之一,但普通的水泥基浆料存在稳定性较差、黏度较低、难以注入微小裂缝等缺点<sup>[4]</sup>.因此,在普通水泥基浆料的基础上,寻找新型注浆材料并评价其性能成为当前国内外学者研究的热点.

其中,纳米材料和聚合物是当前最常用的两种添加剂.碱激发胶凝材料能够充分利用工业固废,解决固废堆置造成的土地与水源污染问题,其作为一种新型利废的绿色无机胶凝材料已成为当下的研究热点.李颖等<sup>[5]</sup>为了提高胶凝材料的性能,制备了矿渣-钢渣-石膏聚合物体系,并研究了其早期水化产物的种类、产生时间、相对含量和微观形貌;Zhang等<sup>[6]</sup>研发了掺有超细粉煤灰(MFA)、纳米硅溶胶(NS)和高效减水剂(SP)的超细水泥基浆液,研究了不同外加剂对注浆材料流变特性和力学性能的影响.氧化石墨烯凭借其优异的物理力学性能、超高的比表面积和出色的可分散性,被视为有效增强水泥基复合材料的二维纳米添加剂<sup>[7]</sup>.Gao等<sup>[8]</sup>发现工业级氧化石墨烯掺和一定量的粉煤灰可以替代注浆材料中的部分水泥,降低浆体制造成本,同时进一步增强浆液的流动性能和力学性能;Ling等<sup>[9]</sup>通过在水泥基浆液中掺入氧化石墨烯改善浆液的基本性能和宏观力学强度,结果表明氧化石墨烯的掺入会造成浆液流动性的一定劣化,但浆液的析水率会大幅降低,且氧化石墨烯能增大浆液的塑性黏度.因此,本文结合工程实际及近十年来诸多学者对水泥基复合材料的研究,探究了矿渣-粉煤灰(slag-fly ash, SF)、氧化石墨烯(graphene oxide, GO)以及纳米硅溶胶这3种新型绿色经济材料对水泥基浆液物理和力学性能的增强作用.

水泥基浆液的流变特性对合理设计注浆水灰比、注浆压力及时间有着重要影响,是研究浆液迁移扩散模型的前提条件.Zhao等<sup>[10]</sup>以CS(cement-sodium silicate)浆液为基础,在考虑其时变特性下研究了浆液的扩散机制及其注浆参数的时空变化规律,讨论了水灰比等配比参数在注

浆应用中的适用性;阮文军<sup>[11]</sup>认为浆液流型、流变参数的时变特性、可灌性、塑性强度和可重复注浆性是影响浆液扩散的基本性能,并基于黏度的时变性规律,建立了稳定性浆液注浆扩散模型;Zhang等<sup>[12]</sup>基于黏度测定试验,研究了水泥-水玻璃浆液在不同配比下的黏度特性,并分析了其在裂隙内的流动扩散特征.

同时,由于裂隙岩体内注浆浆液的扩散不可见,对于浆液扩散机理的研究,尤其是流动过程中的流速分布特征、黏度在裂隙宽度方向上的分布特征以及压力分布模式等,常规物理与理论方法表现出一定的局限性,数值模拟方法因此成为重要研究手段<sup>[13]</sup>.Hao等<sup>[14]</sup>对聚合物在单一裂隙中的扩散进行了数值模拟,研究认为数值模拟可用于快速确定聚合物注浆质量、扩散形态、流动前沿位置和压力分布;Crandall等<sup>[15]</sup>将宏观粗糙度参数与通过Navier-Stokes数值模型确定的裂隙有效流动联系起来,建立了裂隙几何结构粗糙度特性与流动参数之间的关系.可见,注浆技术以浆液的流动特征为基础,基于理论与数值模拟研究揭示浆液在岩体裂隙内的流动特征及运移规律<sup>[16]</sup>.

本文旨在通过对不同水灰比下SF复合体系、GO复合体系以及NS复合体系3种水泥基浆液的流变参数进行试验测试和分析,研究不同水泥基浆液的流变特性及黏度时变性,建立适用于倾斜粗糙裂隙岩体的注浆浆液扩散理论计算模型,并基于浆液的扩散半径分析其扩散特征及对注浆的影响机理.

## 1 试验方法

根据现场施工经验,选取5种水灰比0.8, 1.0, 1.2, 1.4和1.6的浆液,配置成水泥基的SF复合体系、GO复合体系以及NS复合体系的3种水泥基浆液,测试不同浆液的性能参数.

### 1.1 试验材料及设备

试验主要原材料:PO42.5R硅酸盐水泥、粉煤灰、S95矿渣粉、工业级单层氧化石墨烯、JN-30碱性纳米硅溶胶.试验原材料的主要性能参数如表1所示.添加剂:氯化钠(分析纯)、氢氧化钠(分析纯)、聚羧酸高性能减水剂.

SF复合体系<sup>[17]</sup>:水泥、矿渣与粉煤灰的质量比为10:1:1,外掺NaOH碱性激发剂的质量分数为3%;为进一步提高浆液的性能,添加聚羧酸减

水剂,减水剂占浆液总质量的0.6%.

表 1 试验原材料性能参数  
Table 1 Performance parameters of raw material for experiment

PO42.5R 硅酸盐 水泥	外观形态	烧失量	水泥细度	标准稠度水量/%	氧化硫质量	初凝时间	终凝时间				
		g	mm		分数/%	min	min				
	浅灰色粉末	3.71	0.002 5	26.6	2.44	199	263				
S95 矿渣粉	外观形态	纯度	规格型号	粒度/ $\mu\text{m}$	密度/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	白度/%	抗弯强度				
	浅灰色粉末	90	S95	325	2.3 g	23.8	MPa				
粉煤灰	外观形态	密度/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	导热系数	吸声系数	抗压强度/MPa						
	灰色粉末状	2.65	3	6	9						
氧化石墨	材料名称	外观形态	纯度	层数	厚度	片层直径	碳质量	氧质量	硫质量	可剥离	干燥
	工业级单层 氧化石墨	黑褐色 粉末	>95	1~2	<1	10~50	<48	>42	<2	>96	低温 干燥
纳米硅 溶胶	型号标准	SiO <sub>2</sub> 质量	Na <sub>2</sub> O质量	粒径/nm	密度/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	pH			黏度/ $(\text{mPa}\cdot\text{s})$		
	JN-30	30±1	≤0.3	8~15	(20 °C) 1.15~1.17	9.0~10.0			(20 °C) ≤10		

GO复合体系<sup>[18]</sup>:工业级单层GO占悬浊液总质量的0.08%;为提高水泥浆液的流动性和降低工程成本,用一级粉煤灰代替部分水泥,水泥与粉煤灰的质量比为4:1,聚羧酸减水剂占浆液总质量的0.6%.

NS复合体系<sup>[19]</sup>:在每个水灰比条件下采用外掺法掺入2%的纳米硅溶胶(SiO<sub>2</sub>质量分数为30%~35%),用水量扣除所掺入硅溶胶中的含水量.取2 mol/L NaCl溶液作为硅溶胶的催化剂,该溶液可以使胶粒之间发生脱水缩合,粒径不断生长,有助于反应的进行.硅溶胶与催化剂的体积比为10:1.

考虑到容器可能对浆液产生的污染及化学材料对容器的腐蚀性,密度及析水率的测量采用玻璃量筒;同时为保证测量结果的精度及准确性,试验选用高精度电子天平;流动度的测定采用净浆截锥圆模法,仪器为 $\phi 36\text{ cm}\times 60\text{ cm}$ 水泥净浆流动截锥圆模;为使测试简单快速,实验室采用NDJ-8S型数字式黏度计测试注浆浆液的黏度值,研究浆液的黏度时变特性,如图1所示.

## 1.2 试验方法

浆液的密度是计算注浆量及浆液材料用量的依据之一,密度大小影响浆液在扩散过程中受重力影响的程度<sup>[20]</sup>.析水率是指静止悬浊液随时间推移,浆体达到初凝状态时析出水分体积占浆

体总体积的百分数,是评价浆液稳定性的重要参数.不稳定浆液的水泥颗粒沉淀容易造成注浆管路的堵塞,在注浆口附近造成泥浆聚集,不利于浆液的扩散<sup>[21]</sup>.按配比将称好的材料用搅拌机搅拌10 min,结束后立即将拌好的浆液倒入玻璃量筒中至100 mL,再称量量筒内浆液质量,计算水泥浆液的密度.静置浆液2 h后,读取此时下层浆液的刻度值,计算浆液的析水率.

浆液流动度的大小直接影响浆液在裂隙中的流动速度及扩散难易程度.当用净浆截锥圆模法测量水泥基浆液的流动度时,以浆液在玻璃平面上自由流动的最大直径作为衡量流动性的依据.其测试方法简单、标准化程度高、数据直观,是最常用的水泥浆液流动度测试法<sup>[22]</sup>.将截锥圆模放在光滑洁净的玻璃板中央,将水泥浆液均匀搅拌后立即倒入截锥圆模内,用刮刀刮去表面多余浆液.将截锥圆模垂直向上提起10~15 cm,使浆液自由流下.30 s后用卡尺测量浆液在玻璃板上流动的两个垂直方向的直径,进行两次试验取其平均值作为浆液的流动度.

本试验采用NDJ-8S型数字式黏度计,由电机经变速带动转子作恒速旋转,如图1所示.当转子在液体中旋转时,液体会产生作用在转子上的黏度力矩,该作用在转子上的黏度力矩由传感器检测出来,经计算机处理后得出被测液体的黏度.

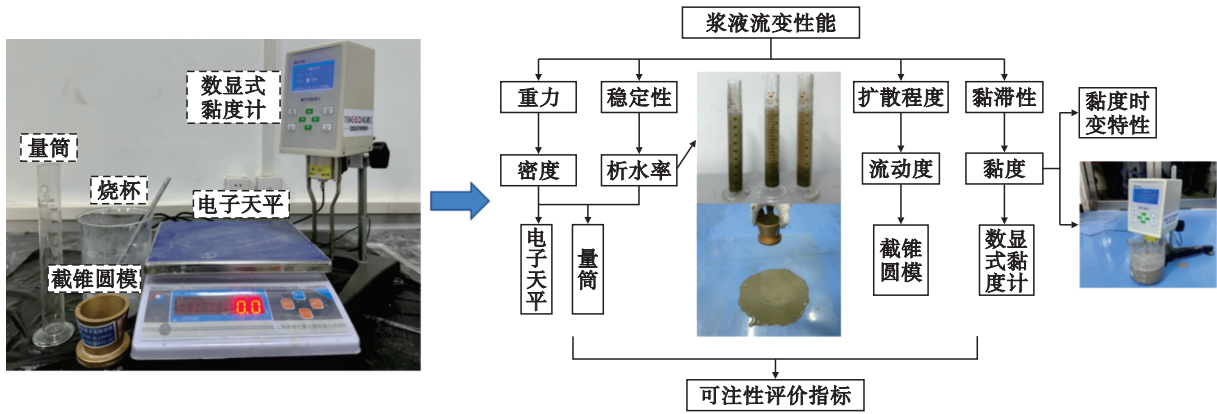


图 1 浆液流动特性试验过程

Fig. 1 Experimental process for slurry flow characteristics

研究表明水泥类浆液为非牛顿流体.因此,本试验采用数字式黏度计测量水泥浆液的黏度.其结果与选择的剪切速度和转子型号有关,不同型号的转子和转速下测量出的结果有较大差异.本试验采用4#转子,转速为60 r/min,测量浆液在60 min内每10 min的黏度值,分析其时变特性.

## 2 不同配比条件下浆液性能参数

### 2.1 浆液的性能参数

基于对现有注浆浆液的认识,对不同材料主导下的浆液密度、流动度和析水率进行了测定.由图2a密度测试结果可知,水泥基浆液的密度主要与其水灰比有关,随着水灰比增大,浆液密度逐渐减小;浆液随材料添加剂的不同,其密度变

化较小,含有低密度纳米材料的NS和GO复合体系的浆液总体密度较小,而含有高密度矿渣及粉煤灰的SF复合体系浆液总体密度较大.固相颗粒黏结导致的固液分层更易造成水泥颗粒沉淀.

由图2b流动度曲线变化可以看出,随着水灰比的增大,3种浆液的流动度总体呈上升趋势,且不同浆液的流动度差距较大:NS复合浆液的流动度较高,且在水灰比为0.8~1.2时上升较快,在水灰比1.2~1.6时增加幅度较小,流动度提高效果不显著;SF复合体系和GO复合体系的流动度都较低,这可能是由于矿渣和粉煤灰颗粒易发生团聚降低了浆液的流动度<sup>[23]</sup>,而亲水性的GO复合体系具有较大比表面积,可以将水分子吸附到其表面,降低润滑所需的游离水含量,导致水泥基浆液的流动性降低<sup>[24]</sup>.

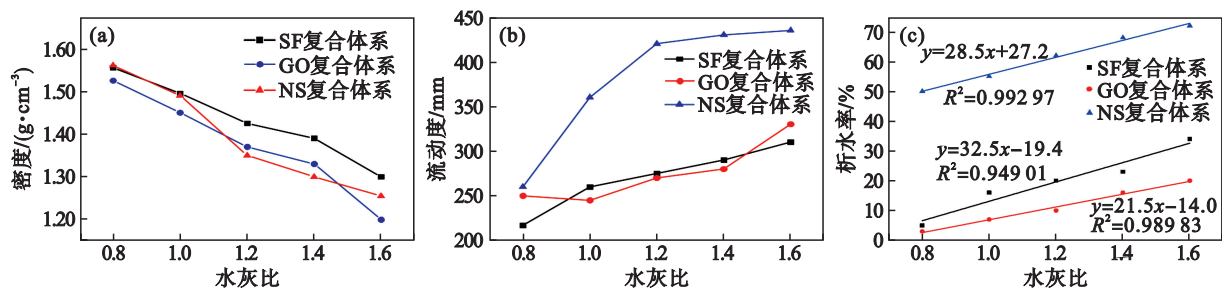


图 2 浆液性能参数

Fig. 2 Slurry performance parameters

(a)一浆液密度;(b)一浆液流动度;(c)一浆液析水率.

由图2c各浆液不同水灰比的析水率可以看出,3种水泥基浆液的析水率都是随着水灰比的增大而增大,即浆液稳定性随水灰比的增大逐渐降低,其数据近似呈线性关系增长,且线性关系式的拟合程度较好;随着浆液添加剂材料的改变,其析水率呈现出较大差距:NS复合体系析水率较高,均在50%以上,稳定性较差;SF复

合体系和GO复合体系的析水率较低,水灰比为0.8时,SF复合体系和GO复合体系析水率均低于5%,属于稳定浆液;此时GO复合体系的析水率为3.8%,比SF复合体系低24%,比NS复合体系低92%,可知GO复合体系稳定性更好,不易造成泥沙沉积、管路堵塞,更有利于浆液的扩散.

2.2 浆液的黏度时变特性分析

为研究水灰比及不同添加剂材料对水泥基体系黏度时变特性的影响,测定各组浆液在 60 min

内每 10 min 的黏度值,并对数据进行拟合,得到浆液黏度随时间变化的拟合曲线如图 3 所示.

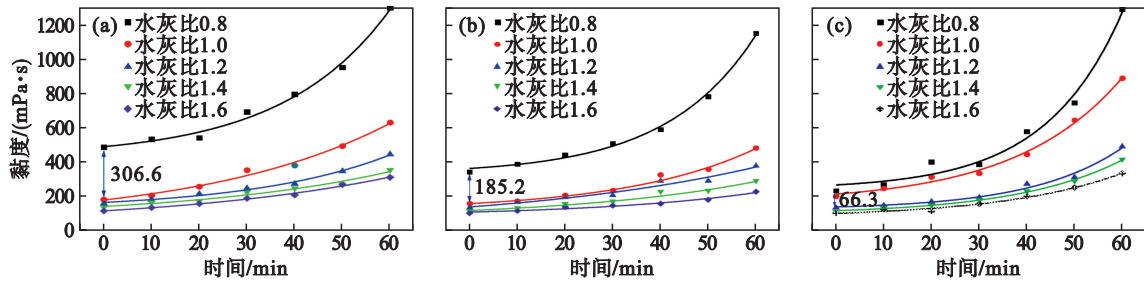


图 3 不同水灰比下水泥基浆液黏度时变曲线

Fig. 3 Time-dependent viscosity curves of cement-based slurries with different water-cement ratios

(a)—SF 复合体系; (b)—GO 复合体系; (c)—NS 复合体系.

由图 3 可知,同一时刻各体系浆液的黏度随水灰比增大而减小.NS 复合体系在水灰比大于 1.0 时初始黏度差异不大,而水灰比小于 1.0 时初始黏度值大幅增大,分别为水灰比 0.8 时黏度值 230.3 mPa·s 和水灰比 1.0 时黏度值 199 mPa·s; GO 复合体系与 SF 复合体系相似,在水灰比大于 0.8 时初始黏度差异不大,而水灰比为 0.8 时,初始黏度值分别达到了 380 和 483.5 mPa·s,与高水灰比浆液有很大差异.

为更好地定量分析浆液黏度随时间的变化规律,根据黏度变化曲线可以看出,在 0.8~1.6 的

水灰比范围内,3 种浆液的流变模式较为复杂.采用 Herschel-Bulkley 流体的本构方程<sup>[25]</sup>,其变化趋势可用式(1)进行函数拟合:

$$\eta(t) = \eta_0 + k_a e^{k_b t} \quad (1)$$

式中: $\eta(t)$ 为浆液的黏度时变特性函数; $t$ 为浆液黏度的变化时间, min; $k_a, k_b$ 为浆液黏度的时变参数; $\eta_0$ 为浆液的初始黏度, mPa·s.

根据试验结果,将各类型不同水灰比下所测量得到的浆液黏度值代入式(1)进行非线性曲线拟合,得到的拟合参数值见表 2;不同水灰比下各浆液的黏度函数表达式见表 3.

表 2 黏度时变函数拟合结果  
Table 2 Function fitting results for time-dependent viscosity

复合体系	水灰比	$\eta_0$ /(mPa·s)	$k_a$	$k_b$	拟合优度 $R^2$
SF	0.8	427.296 72	59.508 70	0.044 58	0.992 75
	1.0	126.453 17	48.292 98	0.025 26	0.990 24
	1.2	119.024 67	41.574 14	0.034 01	0.994 11
	1.4	108.891 45	39.289 15	0.023 63	0.975 05
	1.6	98.880 28	32.258 44	0.020 93	0.993 15
GO	0.8	307.336 46	42.987 24	0.048 42	0.996 73
	1.0	114.169 16	40.866 73	0.036 40	0.996 92
	1.2	113.485 38	21.885 44	0.028 63	0.962 95
	1.4	95.473 79	19.289 15	0.024 86	0.994 98
	1.6	80.081 87	25.264 75	0.018 47	0.974 69
NS	0.8	239.998 83	55.031 83	0.061 91	0.985 94
	1.0	162.512 73	49.072 06	0.044 89	0.995 04
	1.2	121.936 01	35.158 25	0.052 74	0.987 20
	1.4	93.861 27	23.713 38	0.044 63	0.997 48
	1.6	76.625 62	21.679 18	0.039 72	0.988 41

表 3 黏度函数表达式  
Table 3 Viscosity function expressions

复合体系	水灰比	黏度时变函数
SF	0.8	$\eta(t) = 427.29672 + 59.5087e^{0.04458t}$
	1.0	$\eta(t) = 126.45317 + 48.29298e^{0.02526t}$
	1.2	$\eta(t) = 119.02467 + 41.57414e^{0.03401t}$
	1.4	$\eta(t) = 108.89145 + 39.28915e^{0.02363t}$
	1.6	$\eta(t) = 98.88028 + 32.25844e^{0.02093t}$
GO	0.8	$\eta(t) = 307.33646 + 42.98724e^{0.04842t}$
	1.0	$\eta(t) = 114.16916 + 40.86673e^{0.03640t}$
	1.2	$\eta(t) = 113.48538 + 21.88544e^{0.02863t}$
	1.4	$\eta(t) = 95.47379 + 19.28915e^{0.02486t}$
	1.6	$\eta(t) = 80.08187 + 25.26475e^{0.01847t}$
NS	0.8	$\eta(t) = 239.99883 + 55.03183e^{0.06191t}$
	1.0	$\eta(t) = 162.51273 + 49.07206e^{0.04489t}$
	1.2	$\eta(t) = 121.93601 + 35.15825e^{0.05274t}$
	1.4	$\eta(t) = 93.86127 + 23.71338e^{0.04463t}$
	1.6	$\eta(t) = 76.62562 + 21.67918e^{0.39725t}$

浆液在达到凝结状态前,其黏度具有时变性,且随时间增加呈指数增长,在浆液凝结初期,曲线的斜率较小,浆液黏度的增长较缓慢;随着时间的推移,浆液黏度开始出现大幅增长,曲线斜率增大.不同水灰比的浆液黏度曲线随时间变化有较大差异,在低水灰比时浆液黏度的曲线增长速率变化尤为显著.不同材料的浆液黏度随时

间的变化也有较大差异.在水灰比为 0.8 时,NS 体系  $k_b$  值为 0.061 91,大于 SF 体系  $k_b$  值的 0.044 58 和 GO 复合体系  $k_b$  值的 0.048 42,即 NS 复合体系的曲线斜率变化较大,黏度随时间的增长速度最快.

为进一步分析不同浆液在不同水灰比下的黏度时变函数拟合结果,绘制了  $k_a, k_b, \eta_0$  的变化曲线如图 4 所示.

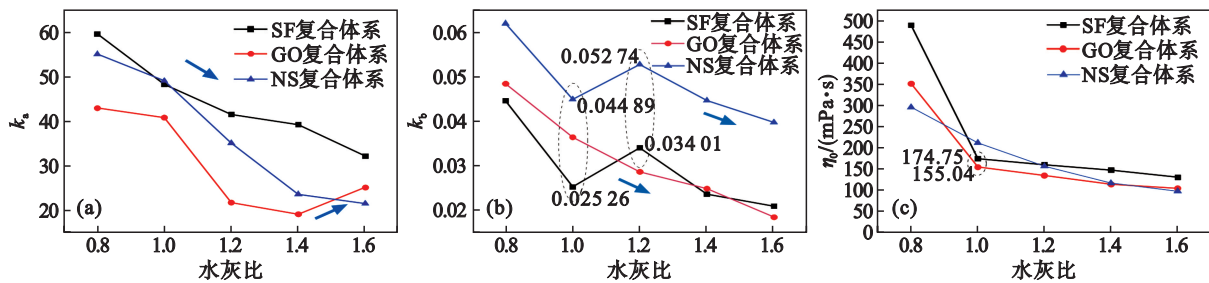


图 4 黏度时变参数变化曲线  
Fig. 4 Variation curves of viscosity time-dependent parameters  
(a)一时变参数  $k_a$ ; (b)一时变参数  $k_b$ ; (c)一初始黏度  $\eta_0$ .

由图 4 曲线变化可知,随着水灰比的增加,  $k_a, k_b, \eta_0$  总体呈下降趋势.但 GO 复合体系水灰比为 1.6 时,  $k_a$  值陡然升至 25.26,说明低水灰比时 (0.8~1.0) 浆液黏度变化较为平缓,但在水灰比升高时 GO 复合体系的黏度随时间相对低水灰比升高较快;GO 复合体系的  $k_b$  值随着水灰比升高始终下降,而 SF 复合体系和 NS 复合体系则在水灰比为 1.0 和 1.2 时,其  $k_b$  值均出现拐点,曲线的斜

率出现较大变化;3 种浆液拟合曲线的初始黏度均随着水灰比的升高而下降,但在低水灰比时 SF 复合体系和 GO 复合体系的初始黏度都有较大的下降幅度,而在水灰比大于 1.0 时,其初始黏度递减幅度变小,趋于平缓.

结合以上分析及拟合曲线函数值对不同注浆浆液下水灰比的黏度影响规律可知,水灰比越大,黏度系数越小,即水化时间对浆液黏度值的

影响越小,也就是说水灰比越大,浆液黏度的时变特性越弱.

### 3 裂隙浆液扩散计算模型及参数分析

#### 3.1 黏变浆液注浆扩散计算方法

浆液在裂隙内流动的压力变化受裂隙连通度、粗糙度等因素影响,同时具有时间效应的黏度也是重要因素之一,其扩散程度在现场监测难度较大、注浆参数变量难以控制.因此,根据流变参数及表3拟合的黏度时变公式,建立裂隙浆液扩散理论模型,分析注浆过程的计算方法,讨论

给定条件下浆液的扩散特征.

注浆流量、注浆压力和黏度随时间和空间的变化而变化,使得注浆过程难以用单一的解析解来描述.为此,基于空间半径逐步法<sup>[26]</sup>建立了定流量注浆边界的多向扇形分步计算方法的计算模型.假设注入裂隙中的浆液形状为圆形模式流动扩散,则可将理论扩散的圆形注浆区分为多个方向,每个方向包含无限小的环形单元.半径为 $r_0$ 的注浆孔与裂隙壁面垂直相交,以注浆孔与裂隙壁面的交点为原点,确定向上 $0^\circ$ 方向角为基准. $y$ 轴从交点垂直向上, $z$ 轴沿注浆孔向外垂直于裂隙壁面,计算模型如图5所示.

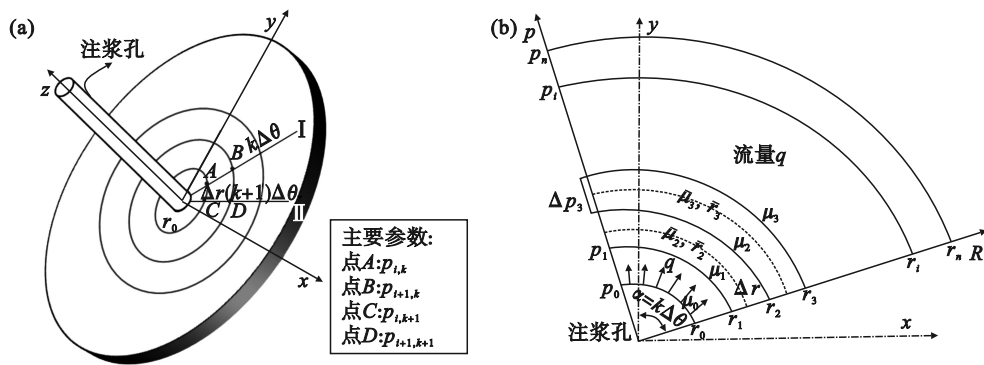


图5 浆液扩散运算算法

Fig. 5 Slurry diffusion algorithm

(a)—浆液扩散过程; (b)—浆液扩散参数分布.

基于多向条件下的注浆区的等距扩散半径,可以对裂隙中注浆压力和变黏度浆液扩散的机理进行分析.如图5所示,对于圆形裂隙,注浆孔的扩散半径 $R$ 分为 $n$ 个计算段,则每个环形单元计算段的长度可表示为 $\Delta r=R/n$ ;圆形扩散方向的角度 $2\pi$ 可分为 $m$ 个计算段,则每个环形单元计算的角度可表示为 $\Delta\theta=2\pi/m$ .那么在扩散方向的边界条件满足 $\Delta\theta, 2\Delta\theta, \dots, k\Delta\theta, m\Delta\theta$ 的逐一增加模式,而在扩散距离的边界条件满足 $\Delta r, 2\Delta r, \dots, (i-1)\Delta r, i\Delta r, \dots, (n-1)\Delta r, n\Delta r$ 的逐一增加模式.例如,图5中的I线是 $k\Delta\theta$ 的角度分析边界,它与环形扩散边界共享某些节点,如点A(注浆压力为 $p_{i,k}$ )和点B(注浆压力为 $p_{i+1,k}$ );图5中的II线是 $(k+1)\Delta\theta$ 的另一个角度分析边界,它与环形扩散边界共享某些节点,如点C(注浆压力为 $p_{i,k+1}$ )和点D(注浆压力为 $p_{i+1,k+1}$ ).

在整个注浆浆液扩散过程中,浆液扩散区内不同时间、不同方向的浆液黏度和裂隙宽度分布是计算的前提.对于给定的角度 $\alpha$ 方向,在初始注浆条件下(注浆时间 $t=0$ ),扩散半径为 $r_0$ (注浆孔半径).由于压力 $p$ 在每个跨距间隔 $\Delta r$ 中分布,形

成扇形环形元件(见图5b).根据质量守恒定律,得出浆液的平均流速与注浆流量 $q$ 的关系式,浆液的平均流速可表示为

$$\bar{v}_{i,k} = \frac{q}{2\pi \bar{r}_{i,k} b(r_{i,k})}. \quad (2)$$

模型中的扇形区环形单元的平均扩散半径也可以进一步利用单元空间跨距 $\Delta r$ 表示,平均半径和裂隙宽度可以表示为

$$\left. \begin{aligned} \bar{r}_{i,k} &= r_{i,k} - \frac{\Delta r}{2}, \\ \bar{b}_{i,k} &= \frac{b_{i,k} + b_{i-1,k}}{2}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

然后,根据每个跨距间隔 $\Delta r$ 的扩散时间为 $\Delta t_{i,k}$ ,注浆完成后的总注入时间计算式为

$$t(i,k) = \sum_{i=1}^j \Delta t_{i,k} = \sum_{i=1}^j \left( \frac{\Delta r}{\bar{v}_{i,k}} \right). \quad (4)$$

注浆过程中浆液在达到扩散半径 $r_{i,k}$ 时的浆液黏度随注入时间而发生改变至 $\mu_{i,k}$ ,此时浆液的黏度可表示为

$$\mu_{i,k} = \mu_0 + \eta t^f(i,k). \quad (5)$$

式中: $\eta$ 为浆液黏度参数; $f$ 表示黏度随时间相关的系数.

则扇形区环形单元的平均黏度可表示为

$$\bar{\mu}_{i,k} = \frac{\mu_{i,k} + \mu_{i-1,k}}{2} \quad (6)$$

式中,  $\mu_{i,k}$  和  $\mu_{i-1,k}$  分别为扇形区环形单元外部和内部边界处的浆液黏度. 一般情况下, 注浆孔处的浆液黏度应为平均初始黏度  $\mu_0$ , 根据式(2)~式(6)可以得到不同时间、不同方向、不同半径下的浆液黏度分布. 结合式(3)和式(6), 扇形环形单元在  $\alpha=k\Delta\theta$  方向上的压力段可表示为

$$\Delta p_{i,k} = -\frac{6q\bar{\mu}_{i,k}}{\pi\bar{r}_{i,k}\bar{b}^3(r_{i,k})} \cdot \Delta r \quad (7)$$

扇形区环形单元外半径  $r_i$  的压力和内半径

$r_{i-1}$  的压力之间的关系可以表示为

$$p_{i,k} = p_{i-1,k} - \Delta p_{i,k} \quad (8)$$

将扩散范围划分为多个角度, 在分析了方向边界  $\alpha=k\Delta\theta$  的初始角度后, 将按照类似步骤开始分析下一个角度, 则可以得到注浆时的半径扩散过程.

### 3.2 运算程序

注浆过程中以恒定流量为边界条件的计算流程如图 6 所示. 可以得到在不同半径、不同浆液类型、不同水灰比下的注浆压力, 可以进一步构建注浆扩散过程中注浆压力、扩散半径等与注浆时间  $t$ 、浆液黏度  $\mu$  等参数之间的关系.

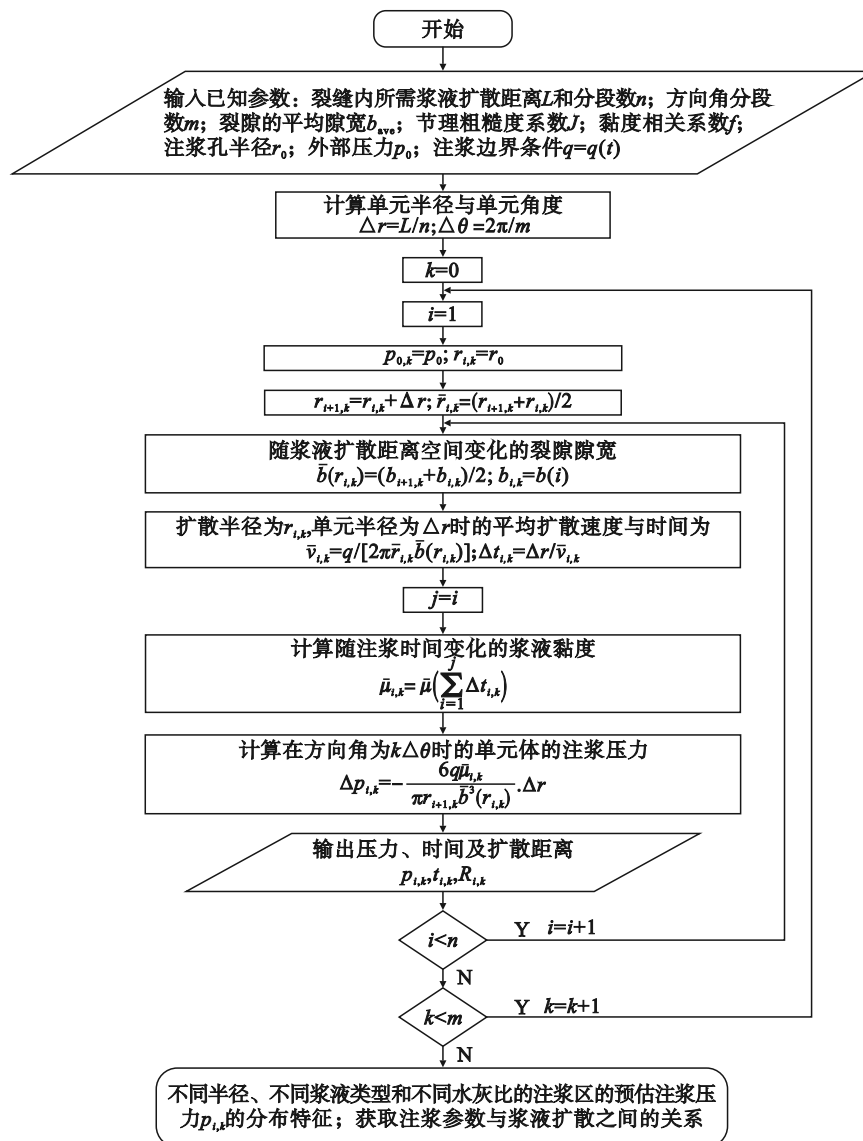


图 6 注浆扩散计算图

Fig. 6 Grouting diffusion calculation diagram

该过程简单描述如下: 首先输入指定参数, 如所需的扩散距离  $L$  及其距离等分数量  $n$ 、方向

角等分数量  $m$ 、平均隙宽  $b_{ave}$ 、节理粗糙度系数  $J$ 、黏度相关系数  $f$ 、注浆孔半径  $r_0$ 、外部压力  $p_0$ 、流量

$q$ ; 然后计算单元半径  $\Delta r$  及单元方向角  $\Delta\theta$ , 自  $k=0, i=1$  开始将参数代入式(8)计算对应的  $p_{i,k}$ , 直至  $i \geq n, k \geq m$  完成不断循环累计算. 通过 C++ 编程语言实现运算, 可得到不同条件下注浆区内的注入压力  $p_{i,k}$  的特征分布, 进而研究浆液扩散特性与黏度变化的关系.

模型计算参数如表 4 所示. 为简便计算, 节理粗糙度系数忽略不计. 计算选用的为不同水灰比的 3 种浆液的黏度时变系数, 见表 3. 据此, 在恒定注浆流量边界条件下进行裂隙的不同黏度特征的浆液流动扩散模拟.

表 4 主要计算参数  
Table 4 Main calculation parameters

扩散距离/cm	距离等分数量 $n$	方向角等分数量 $m$	注浆孔径/cm	$q/(L \cdot s^{-1})$	平均隙宽 $b_{av}/cm$	$p_0/kPa$
100	1 000	4	2	0.2	0.2	0

3.3 不同类型浆液的扩散半径特征

根据表 4 中给出的主要计算参数, 结合表 3 中各个浆液的黏度函数表达式, 利用计算程序分

析了 3 种浆液类型 5 种水灰比的扩散模式, 绘制了固定扩散半径为 15, 35, 55, 75, 95 cm 时的注浆压力图, 如图 7 所示.

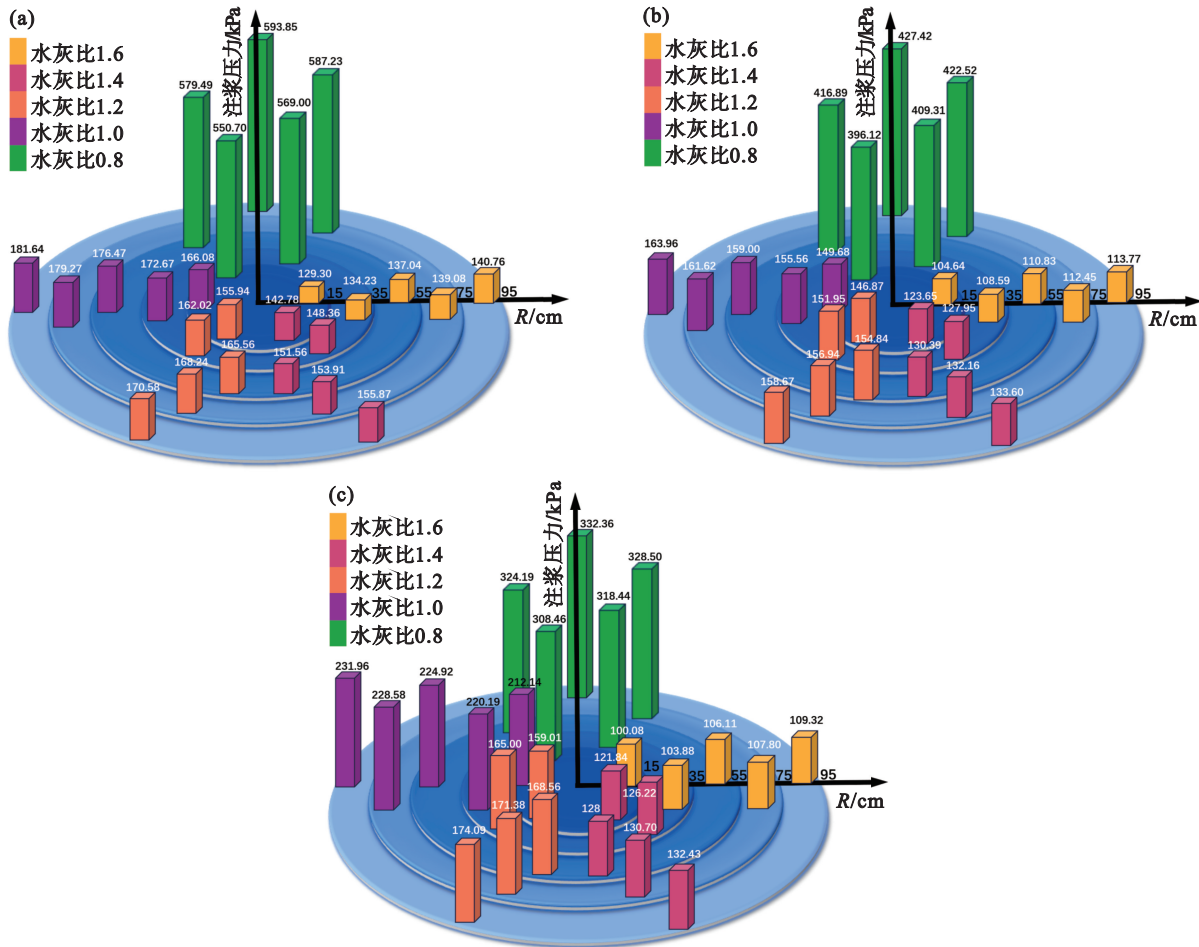


图 7 指定扩散半径下的注浆压力

Fig. 7 Grouting pressure at specified diffusion radius

(a)—SF 复合体系浆液扩散; (b)—GO 复合体系浆液扩散; (c)—NS 复合体系浆液扩散.

由结果可知, 不同水灰比的浆液在相同边界条件下, 由于黏度随时间变化, 其在裂隙中的扩散情况存在较大差异. 扩散距离与注浆压力成正比: 浆液在岩体内距注浆中心的扩散半径越大, 所需注浆压力越高; 当浆液扩散距离一定时, 水

灰比越大, 浆液流动性越好、黏度越小、流动过程中受到的阻力越小, 更易于扩散, 所需注浆压力较低.

当水灰比为 0.8 时, SF 复合体系的注浆压力值随扩散距离的增加分别为 550.70, 569.00,

579.49, 587.23, 593.85 kPa, 而高水灰比时其相同扩散距离的注浆压力显著降低;GO 复合体系与 SF 复合体系类似,在水灰比为 0.8 时注浆压力较高,在扩散距离为 15, 35, 55, 75, 95 cm 时其对应的注浆压力为 396.12, 409.31, 416.89, 422.52, 427.42 kPa,但随着水灰比的升高,相同扩散距离下的注浆压力下降幅度小于 SF 复合体系;而 NS 复合体系各水灰比之间的注浆压力差距较小,其

随着水灰比增高的压力下降幅度基本相同.3 种浆液指定扩散距离下注浆压力与上文所述 3 种浆液的黏度时变曲线规律表现出一致性.

### 3.4 不同水灰比浆液扩散半径特征

根据表 4 中给出的主要计算参数,筛选计算得到了在不同扩散半径下水灰比分别为 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6 时 3 种浆液的注浆压力特征,如图 8 所示.

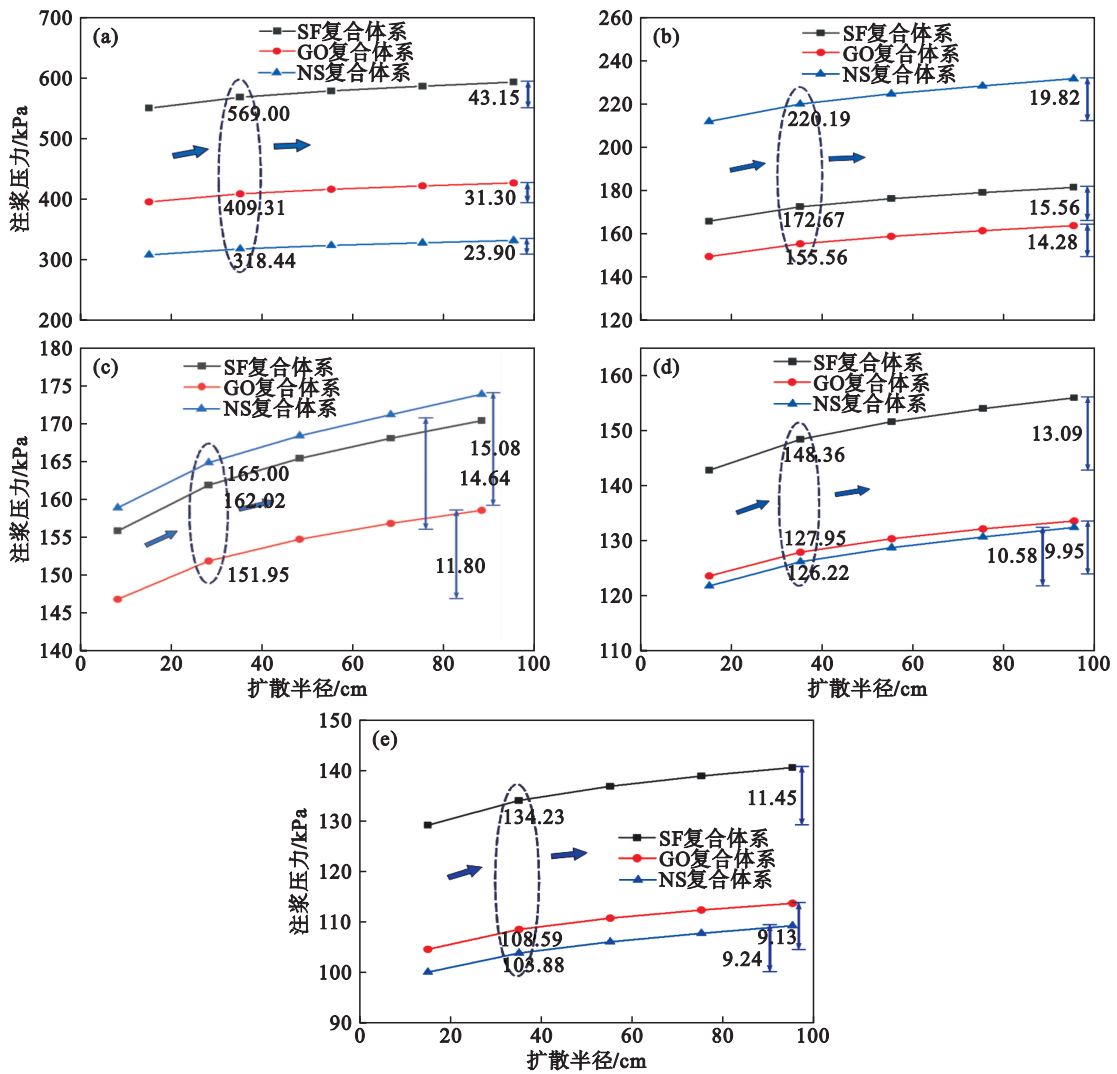


图 8 不同水灰比下浆液的注浆压力

Fig. 8 Grouting pressure of slurries with different water-cement ratios

(a) — 水灰比 0.8; (b) — 水灰比 1.0; (c) — 水灰比 1.2; (d) — 水灰比 1.4; (e) — 水灰比 1.6.

由图 8 可知,随着时间的推移,浆液扩散范围增大,黏度增加,其注浆压力逐渐增大,且在相同水灰比下增长幅度相似;不同水灰比的注浆压力在扩散半径为 35 cm 时均出现转折点.当扩散半径小于 35 cm 时,注浆压力增速较快;而在扩散半径大于 35 cm 时,注浆压力增速变慢,趋于平缓.

随着水灰比的增加,浆液黏度降低,各浆液扩散到相同距离所需注浆压力的增值逐渐减小.

SF 复合体系注浆压力的增值由水灰比为 0.8 时的 43.15 kPa 降低到水灰比为 1.6 时的 11.45 kPa;GO 复合体系压力的增值由水灰比为 0.8 时的 31.3 kPa 降低到水灰比为 1.6 时的 9.13 kPa;NS 复合体系压力的增值由水灰比为 0.8 时的 23.9 kPa 降低到水灰比为 1.6 时的 9.24 kPa.GO 复合体系在指定扩散距离下所需的注浆压力总体较小,在注浆工程条件下更易于在裂隙中扩散.

## 4 结 论

1) 水灰比增大时,浆液密度下降,NS复合体系浆液密度较小,SF复合体系水泥颗粒易沉淀,同时各类型浆液的流动度提高;NS复合体系流动性更佳,但析水率上升,稳定性减弱.SF与GO复合体系析水率总体较低,较稳定.在水灰比为1.2时,各浆液的总体性能较好.

2) 随着水灰比的增大,浆液黏度降低,60 min内黏度随时间变化拟合为 $\eta(t) = \eta_0 + k_a e^{k_s t}$ ,可知浆液黏度具有时变性,且随时间的增加呈指数增长,而时变参数随水灰比增加而下降.因此,高水灰比减弱了水化时间对黏度的影响,使浆液黏度时变性减弱.SF复合体系及GO复合体系在水灰比大于1.0时浆液黏度较低,而NS复合体系在水灰比大于1.2时浆液黏度较低,性能更好.

3) 建立了裂隙浆液扩散模型,得到注浆压力随半径、浆液种类及水灰比的变化规律.扩散距离与注浆压力呈正相关关系,水灰比增大则所需注浆压力减小.在指定扩散距离下,浆液的注浆压力与其黏度特性一致:SF与GO复合体系在水灰比>1.0时所需注浆压力较低,NS复合体系则在水灰比>1.2时表现更优.且扩散范围随时间、黏度及注浆压力的增加而扩大,相同水灰比条件下增幅相近.随着水灰比增大,各浆液达到相同扩散距离所需的注浆压力增值呈递减趋势.

### 参考文献:

- [1] 刘红彬,唐伟奇,肖凯璐,等.水泥基注浆材料的研究进展[J].混凝土,2016(3):71-75.  
(Liu Hong-bin, Tang Wei-qi, Xiao Kai-lu, et al. Research progress of cement-based grouting materials[J]. *Concrete*, 2016(3): 71-75.)
- [2] da Rocha G S, Ferrara L, Sánchez L, et al. A comprehensive review of cementitious grouts: composition, properties, requirements and advanced performance [J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 375: 130991.
- [3] Sajwan K S, Twardowska I, Punshon T, et al. Coal combustion by-products and environmental issues [M]. New York: Springer, 2006.
- [4] 胡少银,刘泉声,李世辉,等.裂隙岩体注浆理论研究进展及展望[J].煤炭科学技术,2022,50(1):112-126.  
(Hu Shao-yin, Liu Quan-sheng, Li Shi-hui, et al. Advance and review on grouting critical problems in fractured rock mass[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(1): 112-126.)
- [5] 李颖,吴保华,倪文,等.矿渣-钢渣-石膏体系早期水化反应中的协同作用[J].东北大学学报(自然科学版),2020,41(4):581-586.  
(Li Ying, Wu Bao-hua, Ni Wen, et al. Synergies in early hydration reaction of slag-steel slag-gypsum system [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2020, 41(4): 581-586.)
- [6] Zhang S, Qiao W G, Chen P C, et al. Rheological and mechanical properties of microfine-cement-based grouts mixed with microfine fly ash, colloidal nanosilica and superplasticizer [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 212: 10-18.
- [7] Lu C, Lu Z Y, Li Z J, et al. Effect of graphene oxide on the mechanical behavior of strain hardening cementitious composites [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 120: 457-464.
- [8] Gao Y, Jing H W, Fu G P, et al. Studies on combined effects of graphene oxide-fly ash hybrid on the workability, mechanical performance and pore structures of cementitious grouting under high W/C ratio [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 281: 122578.
- [9] Ling X Z, Guo X Y, Zhong J, et al. Investigation of the effect of graphene oxide on the properties and microstructure of clay-cement composite grouting materials [J]. *Materials*, 2022, 15(5): 1623.
- [10] Zhao X G, Yang Z Q, Meng X R, et al. Study on mechanism and verification of columnar penetration grouting of time-varying Newtonian fluids [J]. *Processes*, 2023, 11(4): 1151.
- [11] 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 Wen-jun. Research on diffusion of grouting and basic properties of grouts [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2005, 27(1): 69-73.)
- [12] Zhang Q S, Zhang L Z, Liu R T, et al. Grouting mechanism of quick setting slurry in rock fissure with consideration of viscosity variation with space [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2017, 70: 262-273.
- [13] Xie L Z, Gao C, Ren L, et al. Numerical investigation of geometrical and hydraulic properties in a single rock fracture during shear displacement with the Navier-Stokes equations [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 73(11): 7061-7074.
- [14] Hao M M, Wang F M, Li X L, et al. Numerical and experimental studies of diffusion law of grouting with expansible polymer [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2018, 30(2): 04017290.
- [15] Crandall D, Bromhal G, Karpyn Z T. Numerical simulations examining the relationship between wall-roughness and fluid flow in rock fractures [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2010, 47(5): 784-796.
- [16] Mu W Q, Li L C, Yang T H, et al. Numerical calculation and multi-factor analysis of slurry diffusion in an inclined geological fracture [J]. *Hydrogeology Journal*, 2020, 28(3): 1107-1124.
- [17] Chi M C, Liu Y C. Effects of fly ash/slag ratio and liquid/binder ratio on strength of alkali-activated fly ash/slag mortars [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 377: 50-54.
- [18] 高远,靖洪文,喻梓轩,等.氧化石墨烯和水泥基复合注浆材料胶结碎石的力学性能试验研究[J].岩石力学与工程学报,2022,41(9):1898-1909.  
(Gao Yuan, Jing Hong-wen, Yu Zi-xuan, et al. Experimental study on the mechanical properties of crushed stone cemented by graphene oxide and cement-based composite grouting materials [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2022, 41(9): 1898-1909.)

