

基于黏度时变性的复杂裂隙网络高黏性浆液 注浆扩散规律研究

高中祥¹, 杨静¹, 孟祥喜^{1,2,3}, 孙易达³

(1. 兖矿能源集团股份有限公司 技术质量中心, 山东 济宁 273500;

2. 兖矿能源集团股份有限公司 地质测量部, 山东 济宁 273500;

3. 山东科技大学 安全与环境工程学院, 山东 青岛 266590)

摘要: 抗分散水泥被广泛应用于富水环境下的注浆工程, 为揭示其黏度时变性对注浆扩散的影响规律, 在水泥-水玻璃浆液中引入不同掺量的阴离子型聚丙烯酰胺(anionic polyacrylamide, APAM), 考察了该类抗分散型注浆材料的流变性能。通过测试各组浆液的黏度时变规律, 结合宾汉姆流体流动方程构建了黏度时变型宾汉姆流体流变模型, 基于各组浆液的黏度时变特征分析了 APAM 改性浆液在岩体复杂裂隙网络模型中的注浆扩散规律。结果表明: APAM 能够加速水泥凝结, 随着 APAM 掺量的提升, 浆液黏度的时变曲线呈指数上升趋势, 实验结果与数值模拟结果一致, 验证了浆液黏度时变模型的准确性。浆液在复杂裂隙岩体网络中按照裂隙扩散到孔隙渗流的顺序运移, 运移扩散规律表现出很强的时间依赖性。APAM 的掺入主要影响浆液在裂隙中的扩散进程, 而对浆液在岩体内部的孔隙渗流影响不大。

关键词: 注浆材料; 聚丙烯酰胺; 流变性能; 注浆扩散; 黏度时变性

中图分类号: TD745

文献标志码: A

Study on diffusion law of highly viscous slurry grouting in complex fracture network based on viscosity time variability

GAO Zhongxiang¹, YANG Jing¹, MENG Xiangxi^{1,2,3}, SUN Yida³

(1. Technical Quality Center, Yankuang Energy Group Co., Ltd., Jinan 273500, China;

2. Geological Survey Department, Yankuang Energy Group Co., Ltd., Jinan 273500, China;

3. College of Safety and Environmental Engineering, Shandong University of

Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: Dispersion resistant cement is widely used in grouting engineering in water-rich environment. In order to reveal the effect of viscosity time variability on grouting diffusion, different amounts of anionic polyacrylamide (APAM) were introduced into cement-water glass grout to verify the rheological properties of this anti-dispersing grouting material. The rheological model of Bingham fluid with varying viscosity was established by testing the viscosity time-varying rules of each grout and combining with Bingham fluid flow equation. Based on the viscosity time-varying characteristics of each slurry group, the grouting diffusion law of APAM-modified slurries within the complex fracture network model of rock masses was analyzed. The results indicate that APAM can accelerate the setting of cement. As the dosage of APAM increases, the time-dependent viscosity curve of the slurry exhibits an

收稿日期: 2024-10-24

基金项目: 山东省自然科学基金项目(ZR2024ME196); 青岛市自然科学基金项目(24-4-4-zrjj-181-jch)

作者简介: 高中祥(1971—), 男, 山东齐河人, 高级工程师, 主要从事矿井水害预测与防治研究。

孟祥喜(1990—), 男, 山东济宁人, 教授, 博士, 主要从事地下工程突水预测与防治研究, 本文通信作者。

E-mail: skdmxx1990@sdust.edu.cn

exponential upward trend. The experimental results are consistent with the numerical simulation results, verifying the accuracy of the time-dependent viscosity model of the slurry. The slurry migrates in the complex fractured rock mass network in the order from fracture diffusion to pore seepage, and the migration and diffusion laws show strong time dependence. After the incorporation of APAM, it mainly affects the diffusion of the slurry in fractures, but has little effect on the pore seepage of the slurry inside the rock mass.

Key words: grouting material; polyacrylamide; rheological properties; grouting diffusion; viscosity time variability

随着社会需求的增长与技术的进步,地下工程施工正逐步朝着深部地层拓展。区别于浅部地层,深部地层的水文地质条件更为复杂,隧道或矿井在建设过程中不可避免地要穿过裂隙网络发育的地层。当裂隙网络与含水层或地表水有较好的连通性时,即成为地下水涌入矿井的路径,从而引发突水事故,造成人员伤亡和设备损坏^[1-3]。注浆技术通过压力将凝胶材料驱替扩散至地层指定位置达到阻隔水源的目的,是解决地下工程水害问题的常用技术手段,富水条件下的复杂裂隙网络注浆是目前注浆工程领域的难点。裂隙注浆加固材料有很多种,水泥成本低廉,固结后具有良好的力学性能,是目前用量最大、使用范围最广的注浆材料^[4]。但传统水泥材料的早期黏度较低,容易在富水环境中离散稀释,不适合直接应用于水环境中的修复和施工^[5-7]。由于裂隙网络的复杂性和不规则性,难以准确把握浆液扩散规律,注浆材料很难均匀、充分地填充到所有需要处理的裂隙中。因此,研究复杂裂隙网络中的注浆扩散规律具有重要意义。

抗分散水泥在工程上可通过掺加黏度改性外加剂(viscosity-modified admixtures, VMA)的方式来实现堵水,目前常用的 VMA 有韦兰胶、纤维素醚衍生物、改性淀粉和聚乙烯醇等。文献[8]研究了多种抗分散剂对水泥浆性能的影响,发现韦兰胶与羟丙基甲基纤维素均在不同程度上提高了水泥浆的抗冲刷性能。聚丙烯酰胺(polyacrylamide, PAM)是一种线状有机高分子聚合物,其碳链上的活性官能团能够吸附分散相中细小均匀的颗粒和黏土颗粒形成絮体,已应用于凝胶材料与污水处理等领域。针对聚丙烯酰胺在水泥基注浆材料中的应用,国内外学者进行了相关研究。孟祥喜等^[9]通过构建聚丙烯酰胺-水玻璃和水泥水化产物的凝胶体系模拟富水环境对聚丙烯酰胺改性水泥微观性能的影响,测试不同凝胶模型的界面结合强度,证明了聚丙烯酰胺有利于提高水泥材料在富水环境中的抗分散性。林荣峰等^[10]验证了掺有聚丙烯酰胺的新型注浆材料在岩溶管道注浆过程中的运移扩散规律和动水封堵机理。齐延海等^[11]开展了抗分散注浆材料的动水封堵研究,提出了考虑动水流速、构造尺寸以及抗侵蚀性的注浆设计参数和控制方法。相关研究在聚丙烯酰胺的絮凝机理和对水泥浆液水化作用的影响方面已形成较为完整的理论体系,并针对部分注浆工程环境开展了浆液扩散规律分析。但目前浆液注浆扩散规律的研究大多集中在单一裂隙或相对理想条件,对于复杂裂隙网络环境下的浆液扩散规律,尤其是考虑黏度时变性这一重要特性的研究相对匮乏。传统的注浆理论在解释和预测高黏性浆液在复杂裂隙网络中的实际扩散行为方面存在局限性。

为精确描绘高黏性浆液在复杂裂隙网络环境下的扩散过程,包括浆液扩散方向、范围等,清晰掌握其不同裂隙形态、尺寸及连通性条件下的流动、扩展及填充裂隙过程,通过探究不同掺量聚丙烯酰胺改性水泥基注浆材料的流变性能,分析浆液黏度时变规律,得到聚丙烯酰胺改性水泥基注浆材料黏度时变方程;利用 COMSOL 多场物理模拟软件构建复杂离散裂隙网络模型,探究注浆过程的浆液扩散封堵规律,以期指导现场注浆过程中的浆液配比调控,完善浆液离散裂隙网络注浆理论与裂隙-孔隙双重介质注浆理论。

1 实验材料及方法

1.1 原材料

试验选用 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥作为基料,其平均粒径为 $20.37\ \mu\text{m}$,比表面积为 $350\ \text{m}^2/\text{kg}$,密度为 $3.14\ \text{g}/\text{cm}^3$,性能符合 GB 175—2023《通用硅酸盐水泥》规定,具体化学与矿物组成见表 1。

表 1 P·O 42.5 水泥的化学及矿物组成

Table 1 Chemical and mineralogical composition of P·O 42.5 cement

%

化学成分										矿物成分			
SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	烧失量	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
23.15	3.89	7.41	56.78	1.98	2.45	1.98	0.26	0.25	3.78	59.78	17.59	6.12	10.65

注: C₂S—硅酸二钙 (2CaO · SiO₂); C₃S—硅酸三钙 (3CaO · SiO₂); C₃A—铝酸三钙 (3CaO · Al₂O₃); C₄AF—铁铝酸四钙 (4CaO · Al₂O₃ · Fe₂O₃)。

选用相对分子质量为 1 200 万的阴离子型聚丙烯酰胺 (anionic polyacrylamide, APAM) 作为浆液絮凝剂。选用水玻璃作为复合浆液速凝剂, 聚丙烯酰胺和水玻璃具体性能指标见表 2。聚羧酸 (polycarboxylate ether, PCE) 高效减水剂减水率为 40%。

1.2 实验方法

浆液水灰比 (质量比) 固定为 0.5, 为保证浆液中改性剂组分的均匀分散, 首先将质量分数 1% 的减水剂 (相对于水泥, 下同)、质量分数 5% 的水玻璃和不同质量分数的 APAM 预先溶解在水中, 再加入定量水泥, 在水泥搅拌机中低速搅拌 2 min。将掺有不同质量分数 (0、0.01%、0.03%、0.05%) APAM 的浆液依次编号为 CPW1、CPW2、CPW3 和 CPW4。

各组浆液搅拌完成后, 按照 GB/T 8077—2023《混凝土外加剂匀质性试验方法》^[12] 测定浆液的流动度。将搅拌好的浆液迅速倒入圆锥试模中, 垂直提起试模, 使浆液自由流动。30 s 后测量浆液横向与纵向的扩散距离, 计算平均值作为流动度测试结果。

进行浆液黏度测试之前, 按照 GB/T 1346—2011《水泥材料标准稠度用水量、凝结时间、安定性检测方法》^[13] 使用维卡仪对各组浆液进行初、终凝时间测试。根据凝结时间测试结果, 在各组浆液的初凝时间内选取 10 个等间隔时间点, 使用数字旋转黏度仪测试浆液黏度, 选择 1 号转子, 满量程为 4 000 mPa · s, 固定转子转速 1.5 r/min。

2 模拟方法

2.1 物理模型

COMSOL 物理模拟软件提供了多种函数库, 但由于内置功能有限, 本研究通过 COMSOL 与 MATLAB 插件的交互, 定义随机函数以实现岩体中随机离散裂隙的分布和建模。首先, 构建了 10 m × 10 m × 5 m 三维长方体区域, 利用蒙特卡罗随机方法的正态分布函数生成裂缝倾角、长度、开放度等随机变量如式 (1) 所示, 随机裂隙网络生成结果如图 1(a) 所示。随后, 将随机裂隙模型导入 COMSOL, 对裂隙岩体进行建模, 并在三维区域中心构建一个半径为 0.3 m、高为 4 m 的圆柱形注浆钻孔, 模型构建结果如图 1(b) 所示。最后对模型进行网格划分, 模型包含 166 511 个域单元、35 149 个边界单元、3 203 个边缘单元及 247 个顶点单元, 网格划分结果如图 1(c) 所示。

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-u)^2}{2\sigma^2}}。$$

(1)

式中: x 表示服从正态分布的随机变量, 记为 $x \sim N(u, \sigma^2)$; u 为均值, 也称为期望值; σ^2 为方差, σ 为标准差。

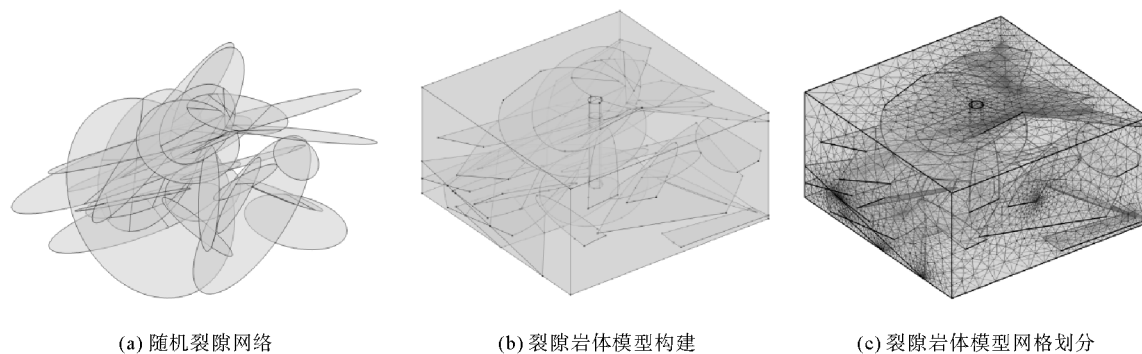


图 1 复杂裂隙网络岩体模型

Fig. 1 Complex fracture network rock model

2.2 计算流体力学(computational fluid dynamics,CFD)数值模拟

裂隙和岩石在注浆过程中的变形都很小,即裂隙是理想的弹性体,将裂隙岩体周围外壁设为不透水零压边界,裂隙岩体初始设为储水模型,裂隙内部浆液流动设为裂隙流动。参照砂岩材料属性,将裂隙孔隙度设为 0.8,渗透率为 $1 \times 10^{-12} \text{ m}^2$,裂隙孔径为离散插值,裂缝内部流体扩散系数模型选择 COMSOL 嵌入式 Millington Quirk 模型,流体扩散系数设为 $1 \times 10^{-25} \text{ m}^2/\text{s}$,底板设为不渗透边界。边界压力与裂隙和注浆孔边界压力一致,注浆压力设为 4 MPa。APAM 的絮凝作用使得浆液水分析出,在 0.5 的固定水灰比下,浆液密度随着 APAM 掺量的增加逐渐提高。CPW1、CPW2、CPW3 和 CPW4 的浆液密度依次为 1 450、1 517、1 593 和 1 710 kg/m^3 。

得到复杂裂隙岩体注浆渗透扩散基本控制方程的解析解,并由此推导出浆液在裂隙岩体内渗透扩散的规律,是一项极具挑战性的工作。利用 COMSOL 多场物理模拟软件中的达西定律模块,求解注浆过程中浆液与裂隙水之间的排斥作用。结合多孔介质中稀物质传递模块模拟浆液在裂隙岩体中的输移扩散过程,该模块基于菲克扩散定律^[14]的物质扩散微分方程如式(2)所示。

$$\frac{\partial^2(DH)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2(DH)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2(DH)}{\partial z^2} + r_i = \frac{\partial H}{\partial t} \quad (2)$$

式中: D 为物质的扩散系数; H 为物质的密度, kg/m^3 ; x 、 y 、 z 分别为三维空间中沿 X 、 Y 、 Z 方向的扩散距离, m ; t 为扩散时间, s ; r_i 为物质的反应速率,假设浆液在扩散过程中以不可压缩流体的形式存在,不发生化学反应,即式中 $r_i = 0$ 。

3 实验及模拟结果

3.1 浆液流变度测试结果

图 2 为不同 APAM 掺量下各组浆液的流动度测试结果,流动 30 s 时,CPW1、CPW2、CPW3、CPW4 的平均扩散距离分别为 13.0、11.8、7.9 和 6.6 cm。随着 APAM 掺量的上升,浆液流动度呈现递减趋势,APAM 掺量为 0.03% 时对浆液的流动度影响最大。这是由于水泥熟料颗粒与水泥水化产物颗粒在浆液分散过程中被 APAM 碳链上的活性官能团吸附,形成絮体并相互连接成为粗絮体。这种絮体强度较高,孔隙水较少,絮体结构致密,浆液中的自由水被锁在水化产物絮凝结构中,因此具有很强的吸水能力。浆液体系中结合水的质量变大,增加了浆液黏性,因此随着 APAM 在水泥-水玻璃浆液中含量的提升,浆液流动度逐渐降低。APAM 掺量为 0.03% 时浆液中的絮体生成逐渐趋于饱和。

3.2 浆液黏性时变特征分析

图 3(a)为各组浆液的凝结时间测试结果,可以看出 APAM 可以缩短浆液的初、终凝时间,证明 APAM 在浆液中的掺入可以加快水泥浆液的水化反应速率,提高对突水源的封堵效率,起到减少漏失、增强封堵及加固的目的。

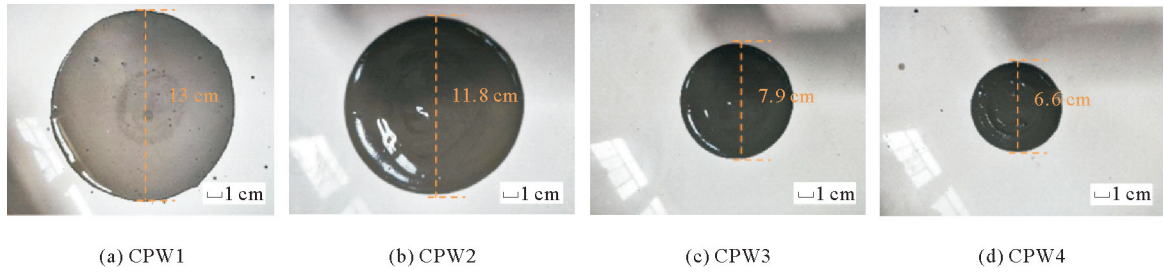


图 2 各组浆液流动度

Fig. 2 Fluidity of each slurry group

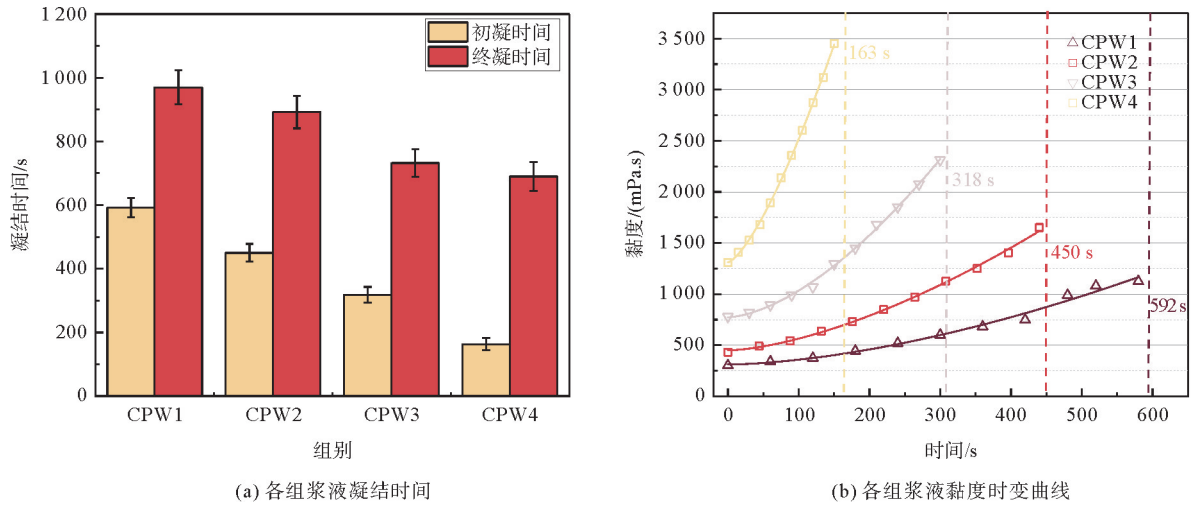


图 3 各组浆液的黏性时变特征

Fig. 3 Time-varying characteristics of viscosity of each slurry group

图 3(b)展示了各组浆液黏度随时间的变化特征,APAM 在浆液中掺量的提高增加了拌合后浆液的初始黏度,且浆液黏性随时间的上升速率逐渐加快。原因在于 APAM 外掺剂的加入使体系中水泥颗粒的胶结强度增强,结构完整性随着时间的延长而增加。与 CPW1 相比,掺入 APAM 的浆液黏度的时间依赖性较强,即浆液的剪应力可在相对较短的时间内发生改变。对固定剪切速率下不同时刻的浆液黏度测试结果进行曲线拟合,各组浆液黏度呈指数分布,四个配比下的黏度-时间拟合方程分别为:

$$\mu(t) = 312 + 0.023t^{1.65}, \quad (3)$$

$$\mu(t) = 450.3 + 0.084t^{1.57}, \quad (4)$$

$$\mu(t) = 774.3 + 0.148t^{1.62}, \quad (5)$$

$$\mu(t) = 1311.7 + 1.857t^{1.4}. \quad (6)$$

式中, $\mu(t)$ 为 t 时刻的黏度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$ 。

根据拟合结果,可将聚丙烯酰胺改性水泥基注浆材料浆液的黏度-时间关系归纳为:

$$\mu = \mu_0 + at^b. \quad (7)$$

式中: μ_0 为拌合完成后浆液的初始黏度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; a 、 b 分别为受浆液组份和配比影响的系数。

水灰比小于 1.0 的水泥浆液通常被视为宾汉姆流体^[15],刘人太等^[16]测试了水泥-水玻璃与 GT-1 型抗分散注浆材料的黏度时变规律,并在此基础上进行了平板动水裂隙注浆模拟,本研究考虑浆液拌合后的初始黏度对流变模型进行了改进。宾汉姆流变方程如式(8)所示,将式(7)代入式(8)得到含有时间参数的黏度时变型宾汉姆流体流变非线性方程:

$$\tau = \tau_0 + \mu\gamma, \quad (8)$$

$$\tau = \tau_0 + \mu(t)\gamma. \quad (9)$$

式中: τ 为浆液剪应力, Pa; τ_0 为浆液初始剪应力, Pa; μ 为浆液黏度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; γ 为剪切速率, s^{-1} 。

为验证黏度时变型宾汉姆流体流变方程的准确性,选取 CPW3 改性浆液进行了定时间和定剪切速率下的浆液剪应力测试,测试结果如图 4 所示。从图 4(a)中可以看出,在 60 s 的固定剪切时间下,改变剪切速率,浆液剪应力的变化特征符合宾汉姆流变方程,说明 APAM 改性水泥-水玻璃浆符合宾汉姆流体的流变特征。从图 4(b)的结果来看,固定剪切速率为 50 s^{-1} ,不同剪切时间下浆液剪应力变化拟合曲线符合式(8)的理论计算值,说明该模型反映 APAM 改性水泥浆液的流变性变化有较好的准确性。

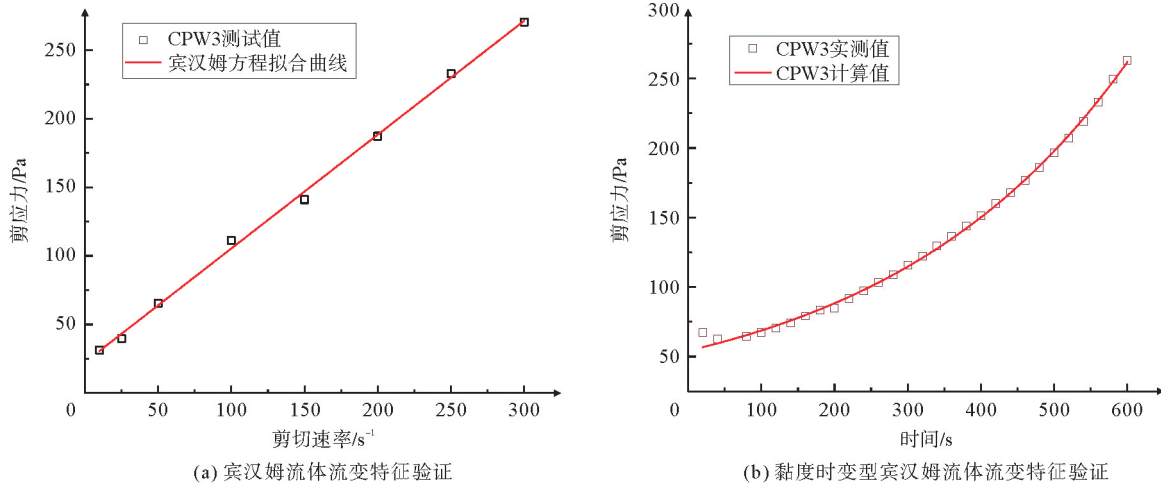


图 4 浆液流变特征验证与对比计算结果

Fig. 4 Verification of slurry rheology and comparison of calculation results

3.3 复杂裂隙浆液扩散模拟结果

通过在全局定义参数中引入各组浆液的黏度时变方程,并关联至物理场的材料属性中实现浆液扩散过程中的黏度变化。基于各组浆液黏度时变规律的复杂裂隙网络注浆扩散过程如图 5 所示,以浆液在岩体裂隙中的体积占比(0~1)表示其浓度。可以看出,在恒定压力下,注浆过程中浆液主要沿岩体裂隙通道进行

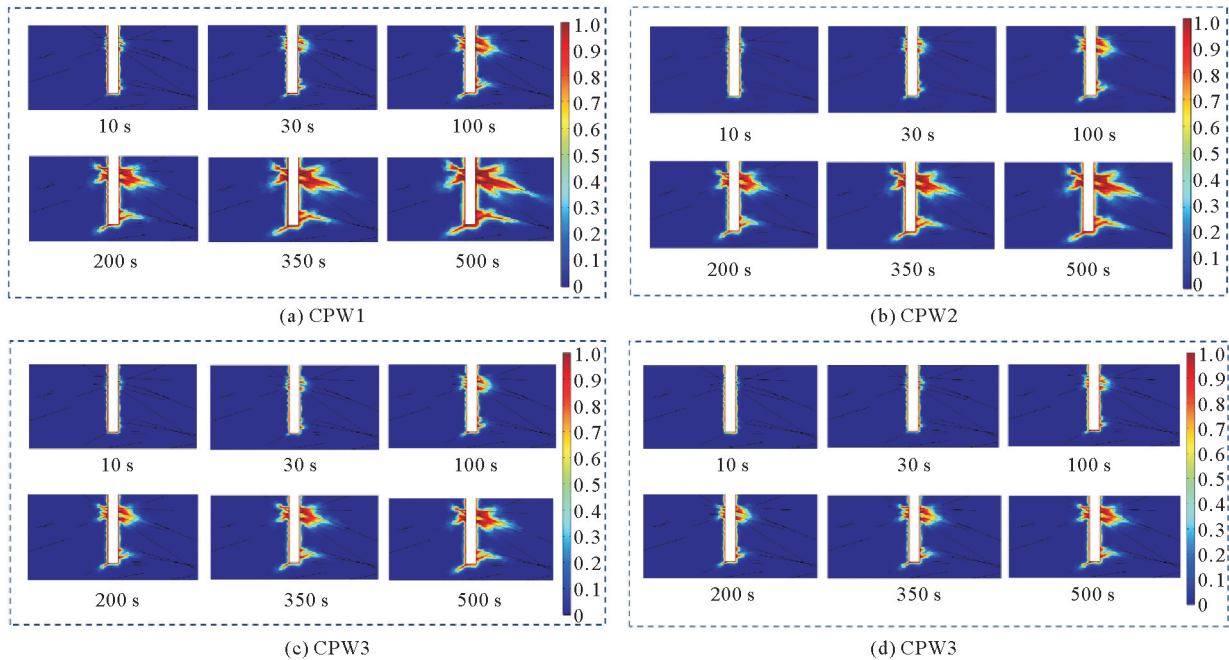


图 5 浆液在裂隙岩体中的扩散过程

Fig. 5 Diffusion process of slurry in fractured rock mass

扩散,随着注浆量的增加,浆液沿裂缝表面向岩体内部呈椭圆形扩散。这证明浆液会首先沿着优势通道进行扩散,浆液逐步驱替裂隙中的地下水;而随着注浆时间的延长,浆液黏度逐渐提升,浆液的驱替扩散过程逐步放缓。新输送浆液导致裂隙内部流体的渗透压力逐渐升高,浆液开始沿裂隙壁及裂隙尖端向岩体内部渗透扩散。而当注浆时间不足时,浆液仅沿着裂隙面弥散,不能渗透裂隙内岩体。对比各组浆液的扩散过程发现,当聚丙烯酰胺为 0.03% 和 0.05% 时浆液的扩散速率明显放缓,500 s 时浆液的扩散距离明显降低。

各组浆液在岩体裂隙网络中的扩散范围如图 6 所示(扩散距离单位为 m),以注浆钻孔为中心沿 X 轴方向等距构建 5 个切面,横截面中的颜色变化指示浆料颗粒的区域聚集。图 6 分别为 CPW1、CPW2、CPW3、CPW4 在注浆时间为 500 s 时的浆液扩散范围。可以看出,扩散距离在 10 m 以内,随着浆液中 APAM 含量的增加,浆液在裂隙岩体中的扩散范围逐渐降低。CPW1 与 CPW2 浆液的最远扩散距离分别为 9.96 和 9.81 m;CPW3 浆液的最远扩散距离为 8.74 m,浆液扩散距离明显降低,这与浆液流动性测试结果中 CPW3 流动度的明显降低一致,进一步说明了黏度时变型宾汉姆流体流变方程描述 APAM 改性水泥浆液流变特征的有效性。另外可以看出,APAM 掺入量提高导致的浆液初始黏度和浆液黏度时变速率的提高主要影响的是浆液在岩体裂隙中的扩散距离,而对裂隙壁附近浆液在岩体孔隙介质中的渗透扩散影响较小。APAM 的掺入能够加快浆液的凝结,结合模拟结果所得规律,说明在注浆工程中,若把注浆钻孔设置在导水裂隙通道附近能够实现快速封堵。

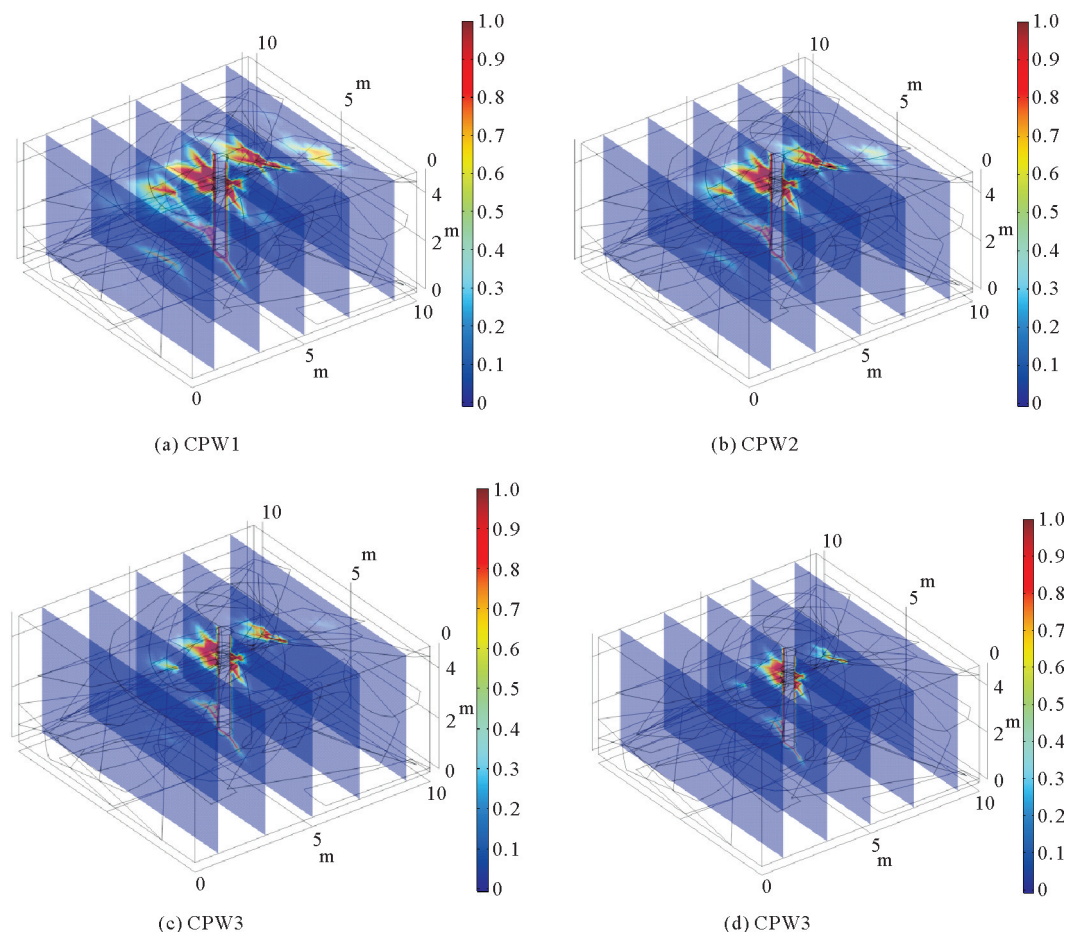


图 6 各组浆液在裂隙岩体中的扩散范围

Fig. 6 Extent of diffusion of each slurry group in the fractured rock mass

为进一步分析不同时刻浆液在裂隙岩体中的扩散情况,以裂隙岩体内部剖面为基准,以注浆管为中心设置了 1 条测线。图 7 展示了不同注浆时间下各组浆液在测线不同位置的浆液浓度。结果表明,浆液在较短的时间内注入裂隙。500 s 的注浆时间内 CPW1 在距注浆管 2 m 范围内的浆液在裂隙中的体积占比均达到 1,说明该区域的岩体裂隙得到充分填充。CPW2、CPW3、CPW4 在距注浆管 1 m 范围的位置浆液体积占比也达到了 1,注浆管附近岩体裂隙得到了有效封堵,这表明注浆管的位置对裂隙岩体注浆效果有影响。当注浆管位于裂隙发育点时,浆液在裂隙内的分散性增加。但随着 APAM 掺量的增加,在距注浆管 1~2 m 范围的浆液体积占比不断下降,CPW4 在此处的浆液体积占比下降至 0.07。此外,注浆时间超过 100 s 时,浆液浓度的变化明显减速。这表明随着注浆时间的延长,浆液扩散距离增大的能力降低,浆液已成功填充并加固了岩层内的裂隙。同时可以看出,APAM 在浆液中掺量的增加对注浆钻孔附近的浆液体积占比影响较小,APAM 对浆液流变性能的影响主要反映在扩散距离上。

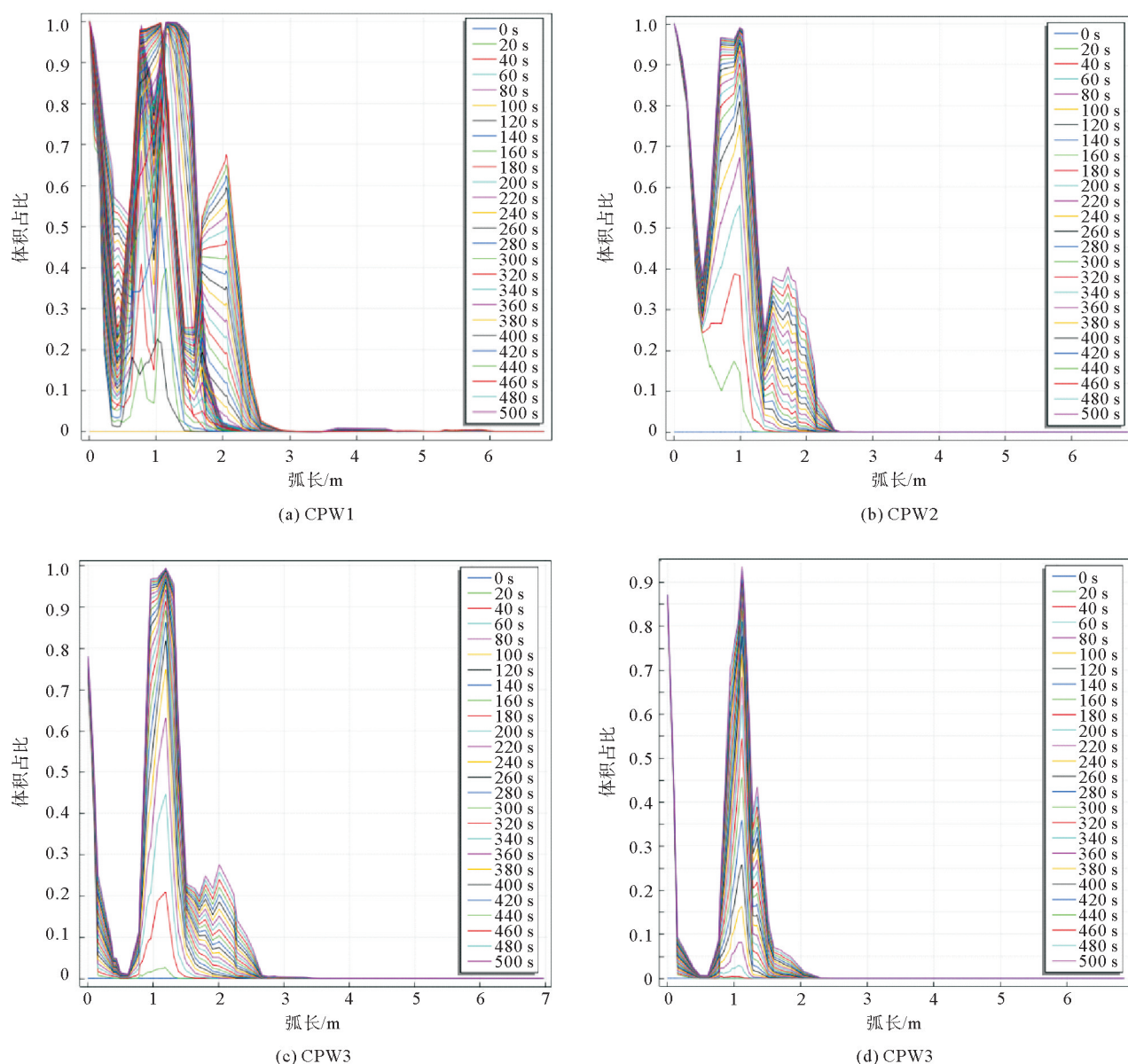


图 7 各组浆液在裂隙岩体不同位置的浓度变化

Fig. 7 Variation of concentration of each slurry group at different locations in the fractured rock body

4 结论

为明晰聚丙烯酰胺改性水泥-水玻璃浆液黏度时变特征,理解高黏性浆液在复杂裂隙网络中的扩散行为,本研究通过不同掺量该注浆材料的流变性能实验得出黏度时变方程,并利用 COMSOL 软件构建模型,探究注浆过程浆液扩散封堵规律,得到如下主要结论:

1) APAM 在水泥-水玻璃浆液中的掺入缩短了浆液的初、终凝时间,随着 APAM 在浆液中含量的升高,絮凝作用导致浆液黏度提升、浆液流动度逐渐降低,在 APAM 掺量为 0.03% 时最为明显。

2) 不同 APAM 掺量浆液的黏度随时间呈指数分布,其流变特征符合宾汉姆流体流变方程,在宾汉姆流变方程中引入浆液黏度时变规律构建了黏度时变型宾汉姆流体流变方程,通过实测值与计算值的对比分析验证了模型的准确性。

3) 基于浆液黏度时变方程,使用 COMSOL 多场物理模拟软件进行复杂裂隙网络岩体注浆模拟,各组浆液首先在裂隙通道中扩散运移,随着注浆时间的延长,浆液沿裂隙边缘呈椭圆形向岩体内部渗透扩散。当聚丙烯酰胺掺量为 0.03% 和 0.05% 时浆液扩散速率明显放缓。

4) APAM 的掺入减弱了浆液在裂隙通道中的扩散范围,而对浆液在岩体孔隙中的渗流扩散影响较小,浆液的黏度时变特征是影响浆液在岩体裂隙-孔隙结构中扩散进程的主控因素。

参考文献:

- [1] 李永明,刘长友,乔元栋,等.急倾斜煤层不同覆岩结构导水裂隙演化规律[J].山东科技大学学报(自然科学版),2012,31(5):1-8.
LI Yongming,LIU Changyou,QIAO Yuandong,et al. Evolution law of water flowing fractures with different structures of overlying strata in steep seam[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science),2012,31(5):1-8.
- [2] 李术才,许振浩,黄鑫,等.隧道突水突泥致灾构造分类、地质判识、孕灾模式与典型案例分析[J].岩石力学与工程学报,2018,37(5):1041-1069.
LI Shucan,XU Zhenhao,HUANG Xin,et al. Classification,geological identification,hazard mode and typical case studies of hazard-causing structures for water and mud inrush in tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2018,37(5):1041-1069.
- [3] 钱七虎,戎晓力.中国地下工程安全风险管理的现状、问题及相关建议[J].岩石力学与工程学报,2008,27(4):649-655
QIAN Qihu,RONG Xiaoli. State,issues and relevant recommendations for security risk management of China's underground engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2008,27(4):649-655.
- [4] LIU G J,ZHANG Y S,NI Z W,et al. Corrosion behavior of steel submitted to chloride and sulphate ions in simulated concrete pore solution[J/OL]. Construction and Building Materials,2016,115. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2016.03.213.
- [5] 洪侨亨,贺雄飞,张明朗,等.固废基盾构惰性同步注浆材料力学性能及抗水分散性研究[J].硅酸盐通报,2024,43(2):617-626.
HONG Qiaoheng,HE Xiongfei,ZHANG Minglang,et al. Mechanical property and resistance to water dispersion of solid waste shield inert synchronous grouting materials[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society,2024,43(2):617-626.
- [6] BESSAIES-BEY H,KHAYAT K H,PALACIOS M,et al. Viscosity modifying agents:Key components of advanced cement-based materials with adapted rheology[J/OL]. Cement and Concrete Research,2022,152. DOI:10.1016/j.cemconres.2021.106646.
- [7] YU Z,WANG B M,LI T R,et al. The anti-dispersion mechanism of polyacrylamide on alkali-activated cementitious materials poured underwater[J/OL]. Construction and Building Materials,2024,414. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2024.134958.
- [8] KHAYAT K H. Viscosity-enhancing admixtures for cement-based materials:An overview[J]. Cement and Concrete Composites,1998,20(2/3):171-188.
- [9] 孟祥喜,岳兵,卢润时,等.富水环境对水泥基抗分散注浆材料水化产物粘附体系的影响研究[J].煤炭学报,2024,49(11):4456-4472.

- MENG Xiangxi, YUE Bing, LU Runshi, et al. Influence of water-rich environment on the adhesion system of hydration products of cement-based anti-dispersion grouting materials[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(11): 4456-4472.
- [10] 林荣峰. 微膨胀水泥基动水抗分散注浆材料及其岩溶管道封堵机理研究[D]. 济南: 山东大学, 2023.
- LIN Rongfeng. Research on micro-expansive cement-based water anti-dispersion grouting material for flowing water and its plugging mechanism of karst pipeline[D]. Jinan: Shandong University, 2023.
- [11] 齐延海. 水泥基抗分散膨胀性注浆材料研发与应用研究[D]. 济南: 山东大学, 2023.
- QI Yanhai. Research and application of cement-based anti-dispersion swelling grouting materials[D]. Jinan: Shandong University, 2023.
- [12] 全国水泥制品标准化技术委员会. 混凝土外加剂匀质性试验方法: GB/T 8077—2023[S]. 北京: 国家市场监督管理总局, 2023.
- National Cement Product Standardization Technical Committee. Methods for testing uniformity of concrete admixtures: GB/T 1346-2011[S]. Beijing: State Administration for Market Regulation, 2023.
- [13] 全国水泥标准化技术委员会. 水泥材料标准稠度用水量、凝结时间、安定性检测方法: GB/T 1346—2011[S]. 北京: 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2011.
- National Cement Product Standardization Technical Committee. Test methods for water requirement of normal consistency, setting time and soundness of the portland cement: GB/T 1346—2011[S]. Beijing: General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, 2011.
- [14] 黄耀光, 王连国, 陆银龙. 巷道围岩全断面锚注浆液渗透扩散规律研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2015, 32(2): 240-246.
- HUANG Yaoguang, WANG Lianguo, LU Yinlong. Study on the law of slurry diffusion within roadway surrounding rock during the whole section bolt-grouting process[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2015, 32(2): 240-246.
- [15] 王庆磊, 朱永全, 李文江, 等. 考虑黏度空间衰减的宾汉姆流体柱形渗透注浆机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(8): 1647-1658.
- WANG Qinglei, ZHU Yongquan, LI Wenjiang, et al. Study on the mechanism of column permeation grouting of Bingham fluid considering the spatial attenuation of viscosity[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(8): 1647-1658.
- [16] 刘人太, 张连震, 张庆松, 等. 速凝浆液裂隙动水注浆扩散数值模拟与试验验证[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(增1): 3297-3306.
- LIU Rentai, ZHANG Lianzhen, ZHANG Qingsong, et al. Numerical simulation of crack grouting process of quick setting slurry with running water and its experimental verification[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(S1): 3297-3306.

(责任编辑: 吕海亮)