

文章编号: 1007-2993(2026)04-0590-08

基于测试频率的裂隙岩体粉煤灰浆液 电阻率响应试验研究

李 闯¹ 刘 辉² 李 培³ 潘爱芳^{1,4} 胡 鑫² 郑鑫超²

(1. 陕西环能新能源有限公司, 陕西西安 710075; 2. 西安科技大学地质与环境学院, 陕西西安 710054;
3. 长安大学建筑工程学院, 陕西西安 710054; 4. 西安建筑科技大学交叉创新研究院, 陕西西安 710055)

【摘要】 裂隙岩体的电阻率特性作为地球物理探测中的核心参数, 其随测试频率的变化特征显著影响着探测数据的解释精度。通过对不同裂隙倾角与粉煤灰掺量交互作用下的裂隙岩石试块开展不同频率(100 Hz, 10 kHz, 100 kHz, 200 kHz)的电阻率测试, 重点分析了裂隙岩石试块电阻率随测试频率变化的响应规律。试验结果表明: 试块电阻率与测试频率整体上呈现负相关性, 高频区(10~200 kHz)变化相对于低频区(100~10000 Hz)更加稳定; 电阻率随测试频率增加而降低, 但降幅呈渐小趋势, 最后电阻率基本趋于稳定; 不同条件下裂隙岩石试块电阻率与测试频率呈强指数函数关系, 且拟合效果较好。研究成果可为岩体注浆工程的动态监测与安全评估提供理论依据。

【关键词】 裂隙岩体; 粉煤灰; 电阻率; 测试频率; 导电特性

【中图分类号】 TU45

【文献标识码】 A

doi: 10.20265/j.cnki.issn.1007-2993.2025-0206

Experimental study on resistivity response of fly ash slurry in fractured rock mass based on test frequency

LI Chuang¹ LIU Hui² LI Pei³ PAN Aifang^{1,4} HU Xin² ZHENG Xinchao²

(1. Shaanxi Huaneng New Energy Co., Ltd., Xi'an 710075, Shaanxi, China; 2. School of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 3. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 4. Cross-innovation Research Institute, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China)

【Abstract】 The resistivity of fractured rock is a key parameter in geophysical exploration, and its frequency-dependent characteristics play a crucial role in determining the accuracy of data interpretation. In this study, resistivity tests were conducted on fractured rock specimens with varying fracture inclinations and fly ash contents under different frequencies (100 Hz, 10 kHz, 100 kHz, and 200 kHz). The objective was to investigate the response of rock resistivity to frequency variations. The experimental results show that resistivity is generally negatively correlated with frequency. In the high-frequency range (10~200 kHz), resistivity changes are more stable compared with those in the low-frequency range (100~10000 Hz). Moreover, the rate of resistivity reduction decreases progressively with increasing frequency until it approaches a stable value. Curve fitting further demonstrates that, under different experimental conditions, the resistivity of fractured rock exhibits a strong exponential relationship with frequency, with a good fitting performance. The research can provide effective theoretical data for dynamic monitoring and safety assessment of rock mass grouting engineering.

【Key words】 fractured rock mass; fly ash; resistivity; test frequency; conductive characteristic

0 引言

注浆加固技术作为岩土工程领域改善裂隙岩体工程性质的重要手段, 被广泛应用于煤矿巷道支护、

隧道围岩加固及地下工程防渗堵漏等方面^[1-6]。传统注浆效果评价主要依赖于钻孔取芯、声波测试及荷载试验等方法, 然而这些手段普遍存在检测周期

基金项目: 陕西省重点研发计划(2023-YBSF-445)

作者简介: 李 闯, 男, 1983年生, 硕士, 工程师, 主要从事岩土工程勘察研究。E-mail: lccmec@126.com

通信作者: 刘 辉, 男, 1999年生, 硕士, 主要从事工程地质灾害治理研究。E-mail: liuhui9221@163.com

长、成本高昂、破坏岩体完整性等问题^[5,7-8]。近年来,基于电阻率法的无损检测技术因其响应灵敏、测试高效等优势,逐渐成为注浆效果动态监测的研究热点^[9-11]。岩体电性探测技术作为地球物理勘查的关键手段,通过测量电流在地层介质中的传导特性,能够精确解译地下结构的电阻率异常分布^[12]。该方法在工程实践中展现出非破坏性检测、快速响应和经济性优势^[13],为地下资源勘查提供了重要的物探依据。

Park 等^[14]通过三维电阻率成像成功识别了 DB 大坝核心层的低阻区($<50 \Omega \cdot \text{m}$),揭示了局部流体化黏土核心和渗透路径的存在,为低压力渗透注浆的靶向修复提供了关键依据。王 程等^[15]研究开发了孔间电阻率监测系统,通过数值模拟与井下试验证实浆液扩散范围与电阻率异常区(低阻特征)高度吻合。王 锐等^[16]利用三维电阻率成像技术,满足了水利工程土石结合部渗漏隐患的高聚物注浆效果检测需求。吴基文等^[17]率先将孔巷电阻率 CT 技术应用于煤矿底板注浆检测,通过动态监测捕捉到注浆后底板电阻率异常区缩小 30% 的显著效果,验证了该方法在深部工程中的适用性。姜春露等^[18]通过大型模型试验揭示了化学注浆过程中视电阻率的分区响应特征,证实电阻率变化与浆液扩散状态存在显著相关性。刘鑫明等^[19]基于三维电阻率反演技术,系统研究了网格剖分参数对反演精度的影响,提出了水平方向等比例剖分、纵向剖分不超过 4 倍的最优方案,为工程应用提供了理论支撑。现有研究表明,岩体的电阻率特性不仅取决于介质的基本成分(如矿物组成、孔隙水化学性质等),更受其内部结构特征与电化学环境的显著影响^[20]。特别是裂隙几何特征(包括倾角、开度、连通性等),以及工程中常用作注浆掺料的粉煤灰,会直接改变裂隙岩体内的导电路径分布模式和孔隙结构特征^[21-22]。

然而,现有研究对裂隙倾角、粉煤灰掺量及测试频率三者之间的协同响应规律尚不明确,制约了电阻率法在复杂地质条件下的精确应用。为此,本研究对不同裂隙倾角和粉煤灰掺量的注浆裂隙岩石试块,进行了多频率电阻率测试,重点分析了裂隙岩石试块电阻率随测试频率变化的响应规律,揭示了裂隙倾角与粉煤灰掺量的交互作用影响。该研究成果可为优化注浆材料配比与工艺、提升电阻率法在复杂地质条件下的检测精度提供理论依据。

1 样品制备与试验方法

1.1 样品制备

本试验将规格为 $\phi 50 \times 100 \text{ mm}$ 的灰岩沿中间切

割出不同裂隙倾角($0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$)的预制裂隙,后选取 32.5 号硅酸盐水泥、不同配比粉煤灰(0%, 10%, 20%, 30%)作为注浆材料对岩体裂隙层进行填充,水灰质量比为 0.5,注浆完成后将试样置于模具中,在室温($25 \pm 2^\circ \text{C}$)、相对湿度 $\geq 95\%$ 的环境条件下静置养护 24 h。而后采用 DHG-9145A 电热鼓风干燥箱在 70°C 条件下对制备样品烘干 2 h^[21]。

1.2 试验方法

为测定所制备试样的电阻率,本研究采用宽频 LCR 数字电桥(型号: TH2816A)进行测试,同一样品采集 3 次数据,最终的电阻率取多次测定结果的平均值。试验在恒定的室温环境下进行,选取 100 Hz, 10 kHz, 100 kHz 及 200 kHz 四种不同测试频率条件下的电阻率特性。仪器选用二电极法作为接触方式,其频率覆盖范围为 50 ~ 200 kHz,具备 9 级精细量程切换能力,基本精度达 0.05%,测试速率可达每秒 30 次,并内置恒定可选源内阻(30Ω 或 100Ω)。具体测量方法如下:将标准试样置于仪器配备的双铜板电极之间,沿试样轴线方向施加稳定电流;通过测量两电极间产生的电压降,并依据欧姆定律计算电阻率值。具体流程如图 1 所示,电阻率计算参考式(1)。

$$\rho = R \frac{S}{L} \quad (1)$$

式中: ρ 为裂隙岩石试块电阻率, $\Omega \cdot \text{m}$; R 为使用上述测试仪得到的电阻值, Ω ; S 为裂隙岩石试块横截面积, m^2 ; L 为裂隙岩石试块体长度, m 。

2 试验结果分析

2.1 裂隙倾角条件

在实际地层中,节理和裂隙的产状在空间分布上表现出显著随机性和非均质性^[23-25]。在本文中分别设定了裂隙倾角为 $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ 等 5 个角度来探究该条件下电阻率对测试频率的响应规律。

不同粉煤灰配比试块电阻率随测试频率的变化曲线如图 2 所示。整体上来看,固定粉煤灰含量时不同裂隙倾角试块电阻率随频率增加而减小,且该规律在高频段区间(10 ~ 200 kHz)较为明显,而低频段区间(100 ~ 10000 Hz)电阻率变化较为复杂。在粉煤灰含量为 0% 时,不同裂隙倾角试块电阻率均随着测试频率的增加而呈现下降的趋势;粉煤灰含量升至 10% 时,除 45° 裂隙试块电阻率随频率增加而在低频段区间(100 ~ 10000 Hz)稍有上升,高频段区间(10 ~ 200 kHz)下降,其余倾角裂隙试块电阻率变化规律与前述一致;粉煤灰含量为 20% 时,除 0° 裂隙试块电阻率随频率增加而在 100 ~ 10000 Hz 稍有上

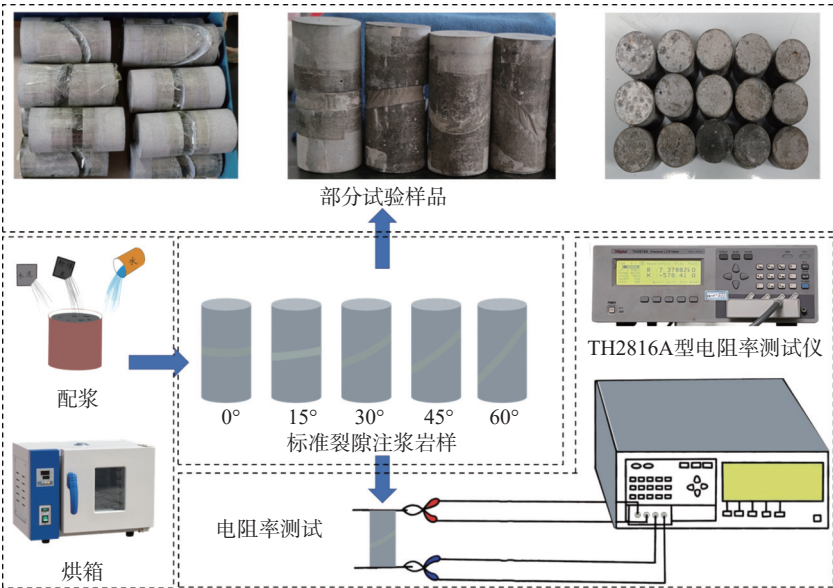


图1 试验流程图

Fig. 1 Test flowchart

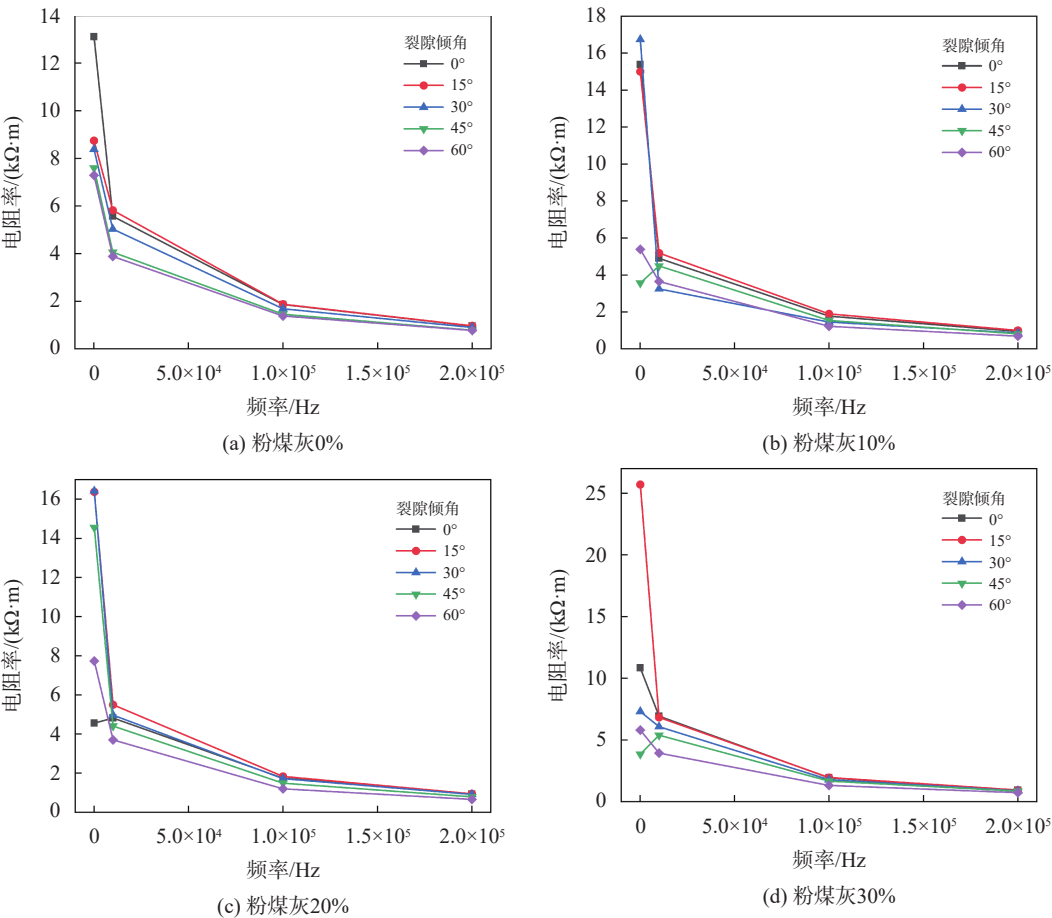


图2 不同配比粉煤灰试块电阻率随频率变化曲线

Fig. 2 Curve of resistivity of specimens with different proportions of fly ash varying with frequency

升, 10 ~ 200 kHz 区间下降, 其余倾角裂隙试块电阻率变化规律与前述一致; 粉煤灰含量为 30% 时, 除 45° 裂隙试块电阻率随频率增加而在 100 ~ 10000 Hz 稍有上升, 10 ~ 200 kHz 下降, 其余倾角裂隙试块电

阻率变化规律与前述一致。

2.2 粉煤灰掺量条件

粉煤灰作为火力发电厂的副产品之一, 其主要成分是硅酸盐和铝酸盐, 通常被作为各类注浆材料的

掺合料使用^[22]。它具有一定的火山灰活性,可改善掺合物的物化性能,比如减少水化热,提高耐久性等。

不同倾角状态试块电阻率随测试频率的变化曲线见图3。整体上来看,固定裂隙倾角时不同粉煤灰掺量试块电阻率随频率的变化规律与前述固定粉煤灰掺量时具有一致性。在试块裂隙倾角为 0° 时,0%、10%和30%掺量粉煤灰的试块电阻率均随着测试频率的增加而下降,20%掺量粉煤灰试块电阻率随测

试频率增加而在100~10000 Hz区间稍有上升,10~200 kHz区间下降;试块裂隙倾角为 15° 、 30° 和 60° 时,不同掺量粉煤灰的试块电阻率均随着测试频率的增加而下降;试块裂隙倾角为 45° 时电阻率变化规律与裂隙倾角为 0° 时相似,0%~20%掺量粉煤灰的试块电阻率均随着测试频率的增加而下降,而30%掺量粉煤灰试块电阻率随频率增加而在100~10000 Hz区间上升,10~200 kHz区间下降。

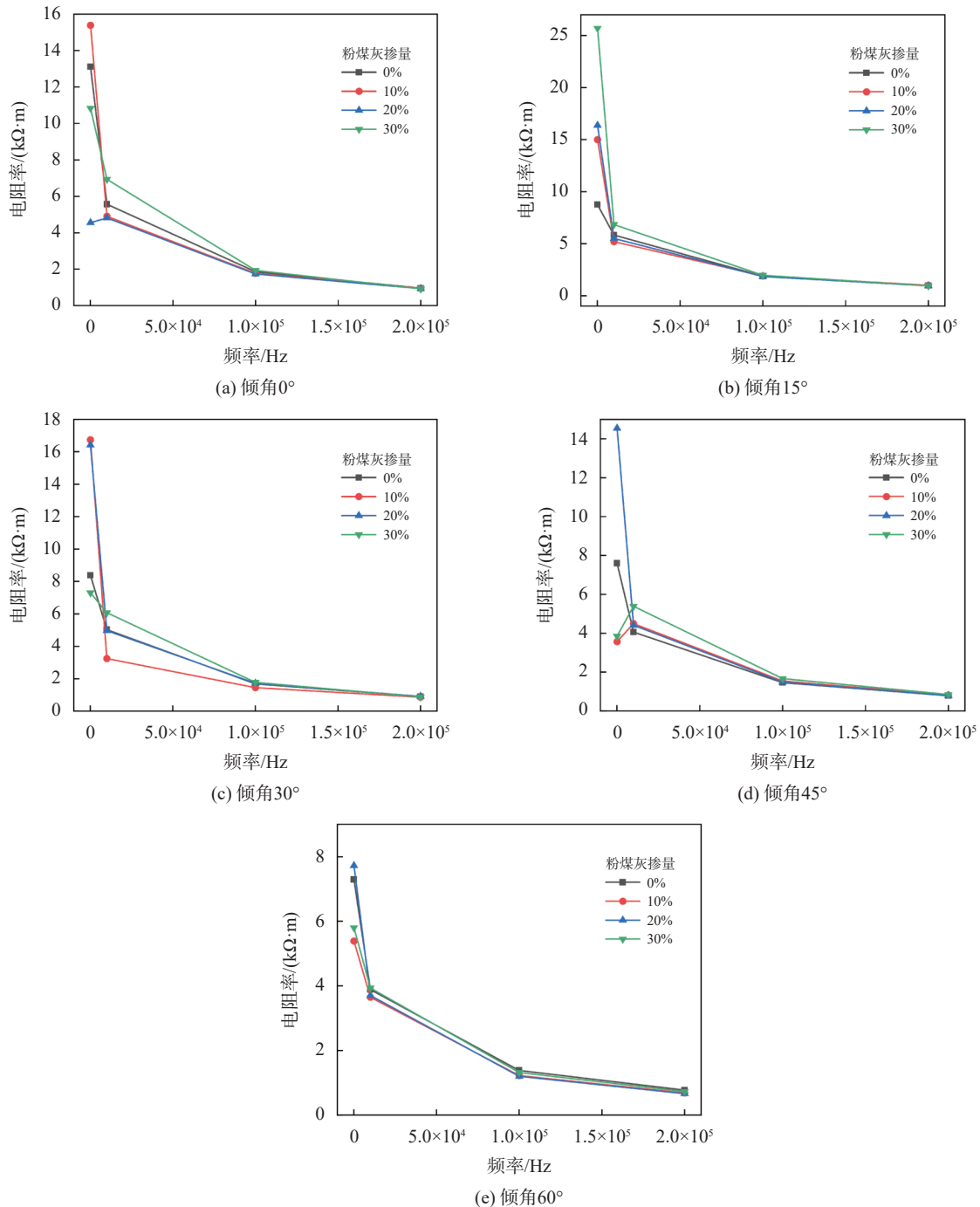


图3 不同倾角试样电阻率随频率变化曲线

Fig. 3 Curve of resistivity of samples with different inclinations varying with frequency

2.3 讨论

通过上述结果分析,不难发现在不同裂隙倾角或不同粉煤灰条件下,裂隙岩石试块电阻率随测试频率增加而呈现下降的变化趋势,且在 100 ~ 10000 Hz 区间快速下降,10 ~ 100 kHz 区间降幅减缓,100 ~ 200 kHz 区间电阻率基本趋于稳定。其内在本质可系统归结为粉煤灰裂隙注浆岩石试块的介电色散与多重弛豫耦合^[26]。在低频域(100 ~ 10000 Hz),Maxwell-Wagner 极化效应引发空间电荷于裂隙和粉煤灰界面累积,形成阻碍载流子迁移的能垒,显著提升电阻率;随频率升至中高频域(>10 kHz),界面极化弛豫时间无法匹配电场变化速率,电荷积累效应减弱,离子迁移电导逐渐主导传导过程,致电阻率骤降^[27-28]。裂隙倾角增大(0°→60°)通过延长载流子迁移路径和增强电场畸变,强化了界面极化强度,使电阻率频散效应更显著;粉煤灰掺量(10% ~ 30%)则通过火山灰反应生成的纳米 C-S-H 界面提供额外极化位点,但掺量>20% 后的致密化结构会压缩极化空间,抑制弛豫强度,导致高频区电阻率下降速率趋缓^[28]。频率>100 kHz 后电阻率趋稳则源于原子极化瞬时响应及介电损耗机制向电导损耗的转变,符合非均质体系介电响应的 Jonscher 幂律特征^[29]。

电阻率变化趋势在高频段区间(10 ~ 200 kHz)较为明显,而低频段区间(100 ~ 10000 Hz)较为复杂。通常而言,裂隙倾角主要通过改变电流传导路径的迂曲度来影响宏观电阻,高角度裂隙导致路径更迂回,电阻增大;材料组成(如粉煤灰掺量)则通过改变浆体的孔隙结构、离子浓度及未水化颗粒提供的界面数量,影响离子导电能力和界面极化强度;而固液相态分布(孔隙溶液导电性与固体骨架绝缘性)则是产生频散效应的物理本质。在条件(裂隙倾角,粉煤灰掺量)为(0°, 20%)和(45°, 30%)时试块电阻率在低频区(100 ~ 10000 Hz)出现上升的现象。这是因为当裂隙倾角为 0°时,试块预制裂缝更容易被浆液充分填充,水平裂隙层更易形成层状导电结构。同时在粉煤灰含量 20% 之前,粉煤灰的反应并不充分从而导致电阻率下降,而其含量在到达 20% 时,粉煤灰的活性成分(SiO_2 , Al_2O_3)与水泥水化的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生硬凝效应生成硅酸钙和铝酸钙,形成整体性较好的网状结构^[30],该种结构形式会减少离子迁移的路径,同时 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 被消耗减少从而降低孔隙液中导电离子的浓度,从另一方面抑制了离子的导电性,导致试块电阻率的上升^[27]。而高频下偶极子极化占据主导,电阻率恢复下降趋势^[29]。含量超过 20% 后, SiO_2 和

Al_2O_3 能够与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 充分反应生成水化硅酸钙凝胶,凝胶物质填充试块中的微孔和裂隙,使得整体密实度显著提高,导电性增强,从而电阻率在低频区间也发生下降。在倾角裂隙为 45°时对于电荷积聚空间构型是一种正向优化,但当粉煤灰掺量达临界阈值时,其富含的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 活性组分在裂隙面处与孔隙液反应形成非均匀电荷屏障,诱发界面极化效应^[26]。低频交变电场作用下,带电界面处的反离子重分布产生相位滞后极化,会显著抑制离子迁移效率,因此电阻率呈现逆势上升。

如图 4 所示,在粉煤灰掺量一定的条件下,各裂隙倾角岩石试块电阻率均随着测试频率的增加而呈现指数式的下降趋势。研究揭示了该种试块(不同裂隙倾角与不同粉煤灰掺量条件下)电阻率和测试频率之间存在较强的指数函数关系,整体上拟合程度较为良好,其关系式可描述如式(2)。在此处参数 a 在物理层面上代表相对高频极限电阻率,当频率足够高时(远超过材料主要的弛豫特征频率),各类极化效应已无法响应电场变化而被“冻结”,此时电阻率主要受试块养护后形成的更为均匀的导电网络决定的欧姆损耗主导;参数 b 在物理层面表征由可被激发的极化过程(尤其界面极化)贡献的最大附加电阻率分量,其数值主要取决于低频极化强度和弛豫时间分布。

$$R_c = a + b \times 0.99^{\text{Fr}} \quad (2)$$

式中: R_c 为试块电阻率; Fr 为测试频率; a , b 为拟合参数。

本研究试验数据为注浆工程中的电法监测结果提供了关键解析依据。研究结果表明,以裂隙倾角和粉煤灰掺量为变量,根据电阻率-频率曲线的斜率特征可有效区分裂隙充填状态:大倾角裂隙在高频段表现出更显著的电阻率衰减现象,而粉煤灰掺量的增加则会延缓衰减速率。通过建立电阻率-频率经验模型,可实现不同工况下电性响应偏差的定量校正。在注浆工程监测中,追踪特定频段内电阻率的突变行为,不仅可用于评估充填材料的渗透效果,还可结合频率敏感性参数,对因裂隙含水率变化所引起的潜在突涌水风险进行预警。该研究为岩体注浆工程的动态监测与安全评估提供了一条新的技术路径。

3 结论

本文以裂隙岩石试块作为研究对象,针对不同裂隙倾角状态和粉煤灰掺量的灰岩岩体开展了不同频率的电阻率测试研究,探究其在不同测试频率段条件下的响应规律。研究结果可为掺入粉煤灰浆液裂

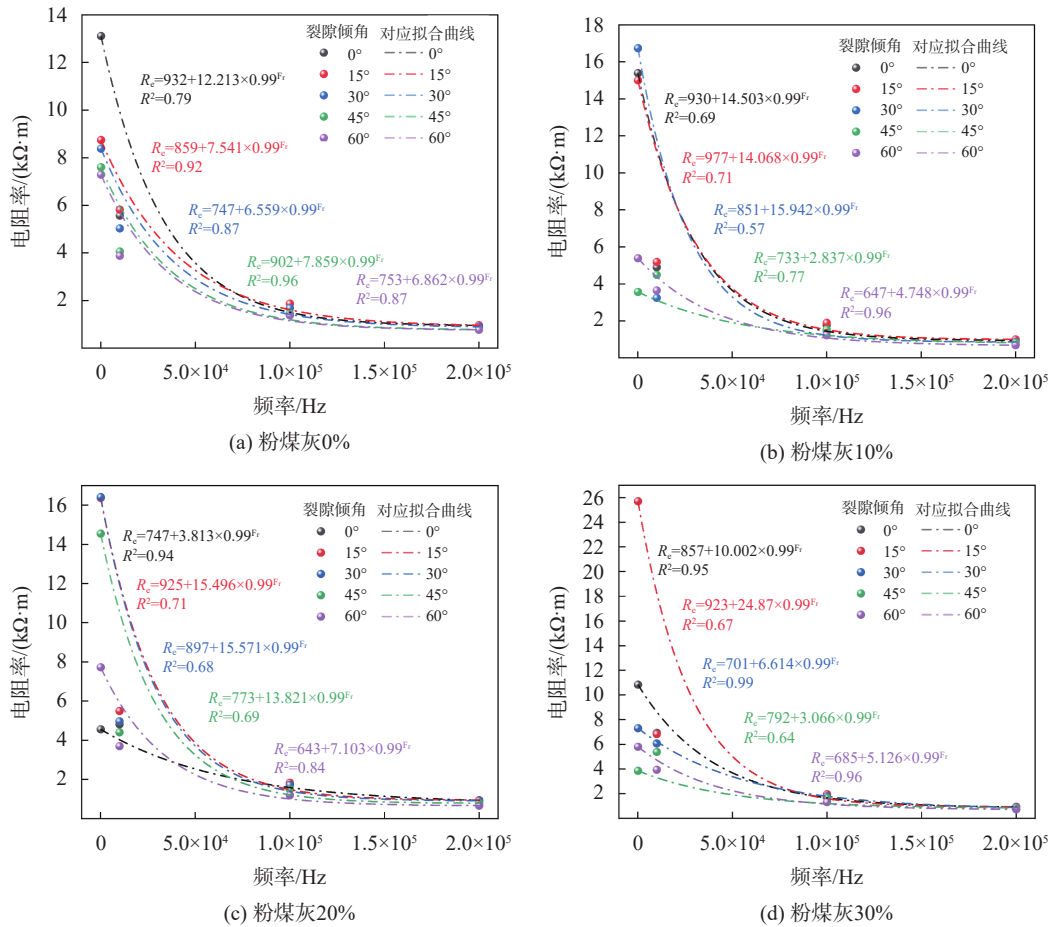


图4 试块电阻率随频率的变化趋势

Fig. 4 Trend of the resistivity of the test block with respect to frequency

隙岩体的基础物理特性研究以及实际工程中电阻率的应用提供有价值的参考。具体结论如下:

(1)在不同裂隙倾角状态和不同粉煤灰掺量交互作用下的裂隙岩石试块电阻率整体上均随着测试频率的增加而呈现下降的趋势,且变化趋势在高频区(10~200 kHz)相对于低频区(100~10000 Hz)更加稳定。

(2)试块电阻率随测试频率增加的过程中,在100~10000 Hz区间电阻率降幅最快,在10~100 kHz区间电阻率降幅次之,在100~200 kHz区间电阻率下降幅度最小,电阻率基本趋于稳定状态。

(3)大倾角裂隙试块在高频段呈现出更显著的电阻率衰减特征,而其中粉煤灰掺量的增加则会通过胶凝效应延缓衰减速率。

参考文献

[1] 朱亚林, 张鑫, 侯淑鹏, 等. 陕北某煤矿采空区注浆效果检测[J]. 勘察科学技术, 2023(3): 49-52, 56. (ZHU Y L, ZHANG X, HOU S P, et al. Grouting effect detection in goaf of a coal mine in the North of Shaanxi[J]. Site

Investigation Science and Technology, 2023(3): 49-52, 56. (in Chinese))

- [2] 柴敬, 兰浩, 马晨阳, 等. 保护层开采下伏煤层应力释放与卸压程度识别[J]. 煤炭学报, 2024, 49(S2): 553-564. (CHAI J, LAN H, MA C Y, et al. Identification of the degree of stress release and unloading in the underlying coal rock of protected seam mining[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(S2): 553-564. (in Chinese))
- [3] 党保全, 郭立全, 陈国军, 等. 断层破碎带注浆加固稳定性综合测试[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(15): 6033-6040. (DANG B Q, GUO L Q, CHEN G J, et al. Stability comprehensive test of grouting reinforcement in fault fracture zone[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(15): 6033-6040. (in Chinese))
- [4] 乔龙全, 常聚才, 严良欢, 等. 类软岩真三轴劈裂注浆裂隙扩展特征研究[J]. 岩土力学, 2025, 46(3): 833-850. (QIAO L Q, CHANG J C, YAN L H, et al. Fracture propagation characteristics of true triaxial splitting grouting in soft rock-like materials[J]. Rock and Soil Mechanics, 2025, 46(3): 833-850. (in Chinese))
- [5] 陈军涛, 喻军健, 李果, 等. 含不同裂隙数量砂岩注浆

- 前后力学特性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2025, 44(7): 1767-1781. (CHEN J T, YU J J, LI G, et al. Experimental investigation on the mechanical properties of sandstone with different numbers of fractures before and after grouting[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2025, 44(7): 1767-1781. (in Chinese))
- [6] 严良欢, 常聚才, 乔龙全, 等. 基于浆液扩散辐射角的倾斜裂隙注浆扩散规律研究[J]. *煤炭科学技术*, 2025, 53(6): 418-431. (YAN L H, CHANG J C, QIAO L Q, et al. Study on diffusion law of inclined fracture grouting based on slurry diffusion radiation angle[J]. *Coal Science and Technology*, 2025, 53(6): 418-431. (in Chinese))
- [7] 王家乐, 周 玥, 冯 博, 等. 华北煤田煤岩裂隙分布特征及注浆扩散研究[J]. *煤炭技术*, 2025, 44(8): 172-177. (WANG J L, ZHOU Y, FENG B, et al. Research on distribution characteristics of coal rock fractures and grouting diffusion in North China coalfields[J]. *Coal Technology*, 2025, 44(8): 172-177. (in Chinese))
- [8] 杨文轩, 王 磊, 马飞飞, 等. 裂隙注浆砂岩冲击破坏及能量耗散机制[J]. *工程爆破*, 2025, 31(1): 34-41. (YANG W X, WANG L, MA F F, et al. The impact failure and energy dissipation mechanism of grouted sandstone in fractures[J]. *Engineering Blasting*, 2025, 31(1): 34-41. (in Chinese))
- [9] 王忠伟, 杨小勇, 李潇然, 等. 烘干处理对粉煤灰复合黄土的性能影响研究[J]. *煤化工*, 2025, 53(3): 46-48, 52. (WANG Z W, YANG X Y, LI X R, et al. Study on effect of drying treatment on property of fly ash composite loess[J]. *Coal Chemical Industry*, 2025, 53(3): 46-48, 52. (in Chinese))
- [10] 王 冉, 胥子卉. 钻孔取芯与高密度电法的溶洞注浆检测方法研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2024, 20(6): 2054-2063. (WANG R, ZAN Z H. Research on testing method for grouting effect in karst caves based on drilling coring and high-density electrical method[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2024, 20(6): 2054-2063. (in Chinese))
- [11] 吴冠仲, 王文松, 范宣梅, 等. 基于高密度电阻率法的弱胶结土注浆加固试验研究[J/OL]. *中国矿业*, 1-8(2024-11-06)[2025-08-21]. <https://link.cnki.net/urlid/11.3033.TD.20241105.1716.002>. (WU G Z, WANG W S, FAN X M, et al. Experimental study on the grouting reinforcement of weakly cemented soils based on the electrical resistivity tomography[J/OL]. *China Mining Magazine*, 1-8(2024-11-06)[2025-08-21]. <https://link.cnki.net/urlid/11.3033.TD.20241105.1716.002>. (in Chinese))
- [12] GEMAIL K S, SHEBL S, ATTWA M, et al. Geotechnical assessment of fractured limestone bedrock using DC resistivity method: a case study at New Minia City, Egypt[J]. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, 2020, 9(1): 272-279.
- [13] 解 滔, 卢 军. 含裂隙介质中的视电阻率各向异性变化[J]. *地球物理学报*, 2020, 63(4): 1675-1694. (XIE T, LU J. Apparent resistivity anisotropic variations in cracked medium[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2020, 63(4): 1675-1694. (in Chinese))
- [14] PARK D, OH J. Permeation grouting for remediation of dam cores[J]. *Engineering Geology*, 2018, 233: 63-75.
- [15] 王 程, 李博凡, 吴 璋, 等. 孔间电阻率监测在注浆效果检测的应用研究[J]. *工矿自动化*, 2023, 49(10): 127-132, 159. (WANG C, LI B F, WU Z, et al. Research on the application of inter hole resistivity monitoring in grouting effect detection[J]. *Journal of Mine Automation*, 2023, 49(10): 127-132, 159. (in Chinese))
- [16] 王 锐, 李长征, 颜小飞. 三维电阻率成像在土石结合部注浆加固检测中的应用[C]//中国水利学会. 中国水利学会 2018 学术年会论文集第四分册. 南昌: 中国水利学会, 2018: 77-81. (WANG R, LI C Z, YAN X F. Application of 3D resistivity imaging in the detection of grouting reinforcement at the soil-soilstone interface[C]//Chinese Hydraulic Engineering Society. Proceedings of the 2018 Annual Conference of China Water Resources Association. Nanchang: Chinese Hydraulic Engineering Society, 2018: 77-81. (in Chinese))
- [17] 吴基文, 翟晓荣, 张海潮, 等. 注浆加固与含水层改造底板采动效应孔巷电阻率 CT 探测研究[J]. *地球物理学进展*, 2015, 30(2): 920-927. (WU J W, ZHAI X R, ZHANG H C, et al. The electronic resistivity CT detection and research of holes and roadways on the mining effect of floors after grouting reinforcement and reconstruction of aquifers[J]. *Progress in Geophysics*, 2015, 30(2): 920-927. (in Chinese))
- [18] 姜春露, 姜振泉, 刘盛东, 等. 多孔岩石化学注浆过程中视电阻率变化试验[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2013, 44(10): 4202-4207. (JIANG C L, JIANG Z Q, LIU S D, et al. Experiment on apparent resistivity changes in porous rock chemical grouting process[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2013, 44(10): 4202-4207. (in Chinese))
- [19] 刘鑫明, 刘树才, 姜志海, 等. 电阻率三维反演中加权光滑因子的影响及注浆检测应用[J]. *中国矿业大学学报*, 2013, 42(1): 88-92. (LIU X M, LIU S C, JIANG Z H, et al. Weighted smooth factor impact on 3D DC resistivity inversion and application in grouting effect detection[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*,

- 2013, 42(1): 88-92. (in Chinese))
- [20] 覃玉龙, 江 元, 闫 江, 等. 岩土介质电性参数与物性参数关联性研究 [J]. *中国矿业*, 2024, 33(S2): 345-350. (QIN Y L, JIANG Y, YAN J, et al. Research on the correlation between electrical and physical properties parameters of rock and soil media[J]. *China Mining Magazine*, 2024, 33(S2): 345-350. (in Chinese))
- [21] 孙庆华, 姜 杰, 胡 鑫, 等. 基于电阻率响应的裂隙岩体粉煤灰注浆效果研究 [J]. *中国煤炭*, 2024, 50(10): 33-39. (SUN Q H, LOU J, HU X, et al. Study on the fly ash grouting effect in fractured rock mass based on resistivity response[J]. *China Coal*, 2024, 50(10): 33-39. (in Chinese))
- [22] 贾东秀, 唐道增, 窦江海, 等. 矿渣-粉煤灰注浆材料的性能与微观结构研究及优化 [J]. *矿业研究与开发*, 2023, 43(10): 43-50. (JIA D X, TANG D Z, DOU J H, et al. Research and optimization on properties and microstructure of slag-fly ash grouting material[J]. *Mining Research and Development*, 2023, 43(10): 43-50. (in Chinese))
- [23] ZHU H X, HAN L J. Experimental study on grouting seepage characteristics of single-fracture specimen under three-dimensional stress[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2022, 15(9): 840.
- [24] 唐 军, 信 毅, 申 威, 等. 倾斜砂岩地层电阻率各向异性实验及校正方法 [J]. *大庆石油地质与开发*, 2023, 42(1): 142-149. (TANG J, XIN Y, SHEN W, et al. Experiment and correction method for anisotropic resistivity in inclined sandstone formation[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2023, 42(1): 142-149. (in Chinese))
- [25] 何家欢, 唐志娟, 邹梦文. 岩心径向电阻率测试新技术 [J]. *天然气工业*, 2022, 42(9): 75. (HE J H, TANG Z J, ZOU M W. New technology for radial resistivity testing of core samples[J]. *Natural Gas Industry*, 2022, 42(9): 75. (in Chinese))
- [26] RIBEIRO D V, ABRANTES J C C. Application of electrochemical impedance spectroscopy (EIS) to monitor the corrosion of reinforced concrete: a new approach[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 111: 98-104.
- [27] CABEZA M, MERINO P, NÓVOA X R, et al. Electrical effects generated by mechanical loading of hardened Portland cement paste[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2003, 25(3): 351-356.
- [28] KIM M K, LE H V, KIM D J. Electromechanical response of smart ultra-high performance concrete under external loads corresponding to different electrical measurements[J]. *Sensors*, 2021, 21(4): 1281.
- [29] MCCARTER W J, STARRS G, CHRISP T M. Immittance spectra for Portland cement/fly ash-based binders during early hydration[J]. *Cement and Concrete Research*, 1999, 29(3): 377-387.
- [30] 蒋 超, 晏长根, 辛 远, 等. 水泥土电阻率对测试频率与含水率的响应特征试验研究 [J]. *公路交通科技*, 2023, 40(7): 52-59. (JIANG C, YAN C G, XIN Y, et al. Experimental study on response characteristics of cement-soil resistivity to test frequency and water content[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2023, 40(7): 52-59. (in Chinese))

收稿日期: 2025-05-06