

王威,邢茂林,刘泽威,等. 饱水松散砂层的注浆固结过程地电响应规律[J]. 西安科技大学学报,2026,46(2):365-374.
WANG Wei, XING Maolin, LIU Zewei, et al. Geoelectric response patterns during the grouting consolidation process in saturated loose sand layer[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2026, 46(2): 365-374.

饱水松散砂层的注浆固结过程地电响应规律

王威^{1,2,3}, 邢茂林^{1,2,3}, 刘泽威^{1,2,3}, 赵少磊^{1,2,3}, 王宇航^{1,2,3}, 史永理^{1,2,3}, 杜博涛^{1,2,3}

(1. 中煤科工西安研究院(集团)有限公司, 陕西 西安 710077;

2. 煤矿灾害防控全国重点实验室, 陕西 西安 710077;

3. 陕西省煤矿水害防治技术重点实验室, 陕西 西安 710077)

摘要:为明确淮北煤田五沟煤矿饱水松散砂层注水-注浆全过程的地电响应规律,评估电性参数对浆液迁移的指示效果,构建以典型砂层-风化带结构为原型的三维分层物理模型,分层铺设隔水黏土层、饱水砂层、风化带和基岩层,模型饱和后开展注浆试验,采用多电极阵列同步监测激励电流、自然电位、一次场电位与视电阻率,对注水-注浆全过程的电性变化进行分析。结果表明:注浆初期激励电流由5~10 mA突跃至90~130 mA,可有效表征浆液进入与前缘推进过程;自然电位在注浆中期出现同步尖峰,是反映浆液扰动地电场较大变化阶段的重要信号;一次场电位在注浆初期迅速升高,随后缓降,反映导电结构的调整过程;视电阻率云图由高阻逐步向低阻演化,低阻区由局部扩展为连通区域,能够直观刻画浆液扩散范围及其时空变化,多电参数组合可有效识别注浆过程中的关键阶段和扰动强度。研究结果为煤矿及类似饱水松散砂层的注浆监测和注浆工艺优化提供参考。

关键词:饱水松散砂层;注浆固砂;地电响应;浆液扩散;三维物理模型

中图分类号:TD 792

文献标志码:A

文章编号:1672-9315(2026)02-0365-10

DOI:10.13800/j.cnki.xakjdxxb.2026.0212

Geoelectric response patterns during the grouting consolidation process in saturated loose sand layer

WANG Wei^{1,2,3}, XING Maolin^{1,2,3}, LIU Zewei^{1,2,3}, ZHAO Shaolei^{1,2,3},

WANG Yuhang^{1,2,3}, SHI Yongli^{1,2,3}, DU Botao^{1,2,3}

(1. CCTEG Xi'an Research Institute (Group) Co., Ltd., Xi'an 710077, China;

2. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Prevention and Control, Xi'an 710077, China;

3. Shaanxi Key Laboratory of Prevention and Control Technology for Coal Mine Water Hazard, Xi'an 710077, China)

Abstract: To clarify the geoelectrical response of the saturated loose sand strata in the Wugou Coal Mine, Huaibei Coalfield, during the full water-injection-grouting process and to evaluate the effectiveness of electrical parameters in indicating slurry migration, a three-dimensional stratified physical model was constructed based on a representative sand-weathered zone structure. The model consists of a clay

收稿日期:2025-10-20

基金项目:国家自然科学基金项目(52474278);天地科技股份有限公司科技创新创业面上项目(2024-TD-MS004);中煤科工西安研究院(集团)有限公司科技创新基金项目(2024XAJ05)

第一作者:王威,男,河南驻马店人,高级工程师, E-mail:214169956@qq.com

通信作者:邢茂林,男,山西忻州人,博士研究生,副研究员, E-mail:xingmaolin@163.com

aquiclude, a saturated sand strata, a weathered zone, and a bedrock strata. After full saturation, grouting tests were conducted while a multi-electrode array synchronously monitored excitation current, natural field potential, primary field potential, and apparent resistivity, and the electrical variations throughout the entire process were analyzed. The results show that the excitation current jumps abruptly from 5 ~ 10 mA to 90 ~ 130 mA at the onset of grouting, effectively indicating the process of slurry entry and slurry-front advancement. The spontaneous field potential exhibits a synchronous peak in the middle stage of grouting, serving as a key signal of the strong-disturbance period. The primary field potential increases rapidly at the early stage and then gradually declines, reflecting adjustment of the conductive structure. The apparent-resistivity cloud map evolves from a high-resistivity pattern to a low-resistivity one, with low-resistivity zones expanding from localized patches to connected regions, thereby directly delineating the spatial extent and spatio-temporal evolution of slurry diffusion. Overall, the combined use of multiple electrical parameters enables effective identification of key stages and disturbance intensity during grouting. These findings provide experimental support for grouting monitoring and process optimization in the Wugou Coal Mine and similar saturated loose sand strata.

Key words: saturated loose sandy layer; grouting for sand stabilization; geoelectric response; slurry diffusion; three-dimensional physical model

0 引言

饱水松散砂层在中国中西部煤田的第四系覆盖层中分布广泛,其沉积结构疏松、孔隙度高、渗透性强、含水率大^[1-4]。在采动扰动、卸荷作用及渗流场变化条件下,颗粒易发生重排,孔隙结构极易改变,使砂层具备明显的敏感性和流变性^[5-7]。松散地层单元常与下伏风化泥岩等软弱层组合出现,后者多表现为胶结弱、裂隙发育、结构破碎的特征,增强了砂层-风化带组合地层在外部扰动下的整体不稳定性^[8-10]。结构不良的饱水松散砂层是矿井水砂运移控制、围岩稳定性评估以及注浆类地层改造技术研究的重要对象^[11-13]。

注浆固砂是改善砂层结构、降低渗透性、增强整体稳定性的关键技术手段^[14-16]。袁世冲研究煤矿砂层突水灾害,发现水泥浆液以树根状劈裂脉固砂为主,配合以劈裂和渗透堵水为主的化学浆液,可提升封堵残存涌水通道的效率^[17];周军霞通过建立三维裂隙平板模型,揭示了水头压力不变时,注浆速率与浆液扩散半径之间的正比关系^[18];ZHOU 通过不同裂隙形态条件下的化学浆液注浆试验,发现浆液扩散行为受浆液黏度、裂隙几何特征及注浆压力的共同控制^[19];赵德康等基于渗流-应力耦合模型研究断层裂隙岩体,发现应力变化导致裂隙渗透性非均一,影响浆液渗流模式^[20]。

传统监控方法依赖注浆压力和注入量等参

数,难以反映浆液前沿在三维空间的迁移过程,也难以准确评估固结效果^[21-22]。构建能够实时、连续、空间化反映砂层注浆扩散过程的监测试验体系,对于实现注浆过程的精细化调控具有重要意义。地电方法对多孔介质内部水体、浆体分布及电化学变化高度敏感,可快速捕捉导电路径重构、电荷迁移及孔隙状态演化过程。电阻率、激励电流、一次场电位与自然电位等参数能够迅速响应注入流体引起的电性扰动,从而识别浆液扩散前沿、反映注浆影响范围并表征介质变化过程。

电法已广泛应用于土体含水性分析、渗流监测和裂隙注浆识别,但针对饱水松散砂层浆液扩散过程的电性响应研究仍不足,缺乏基于工程实际地层结构的三维模型试验数据支撑。李东红采用并行电法对麻子塔风井区注浆治理过程进行监测,发现注浆后低电阻区随时间扩展并逐步稳定,可用于判识浆液扩散范围及固结区形成过程^[23];WANG 等从水-气界面视角开展非饱和砂层注浆试验,指出水-气界面张力变化直接控制浆液入渗路径及扩散形态^[24];刘强等通过加载裂隙煤样电阻率演化特征分析发现,裂隙连通性与孔隙结构差异改变浆液优先扩散通道^[25]。

现有研究主要关注浆液性质、注浆参数及砂层孔隙结构对浆液扩散形态与固结效果的影响,但多采用注浆压力、注入量等间接指标,难以连续表征浆液前缘迁移、扰动强度及空间影响范围。

饱水松散砂层渗透性高、非均质性强,多电参数地电响应的阶段演化规律及指示能力缺乏系统对比,且缺少基于三维物理模型的试验数据支撑。基于此,以五沟煤矿第四系“四含层”砂层-风化带组合结构为原型,构建分层三维物理模型,开展注水-注浆全过程可控试验。同步监测激励电流、自然电位、一次场电位及视电阻率,揭示电性响应阶段特征,对比不同电性参数指示能力,明确视电阻率对浆液影响范围的表征优势,为现场监测与工艺优化提供可参考的试验依据。

1 地层结构与物理模型设计

1.1 地层结构特征

以五沟煤矿典型四含层地质结构为背景构建物理模型。五沟煤矿 1010 工作面第四系覆盖层厚度大、沉积序列复杂、物性差异显著,其中中段四含层为松散砂砾状沉积物,水敏性强、孔隙发育、渗透性高,是关注的主要砂层单元,平均厚度约 18 m,由砾石、砂砾、中砂及含粘性颗粒的砂层组成,颗粒级配变化大,整体呈自下而上逐渐变细的沉积结构,具备高渗透性含水砂层特征(图 1)。

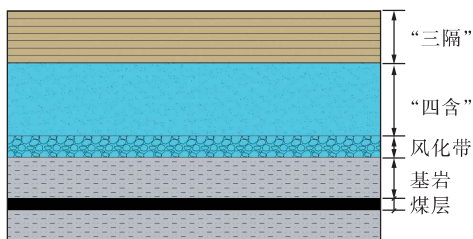


图 1 五沟煤矿 1010 工作面地质结构

Fig. 1 Geological structure of working face 1010 in Wugou Coal Mine

“四含层”下伏为强风化泥岩风化带,厚度约 20 m,结构松散、裂隙发育,整体呈弱胶结、软弱状态,与上覆松散砂层水力联系较强,是注浆施工过程中浆液进入砂层的过渡层,其下伏为砂岩基岩层,完整性较好,在模型中起到底部边界约束作用。

五沟煤矿地质特征为砂层-风化带组合,具有高孔隙度、高渗透性与弱胶结性特征,易受注入流体扰动,是探索饱水松散砂层注浆扩散规律的典型地质条件。为准确反映物理模型中五沟煤矿地质结构特征,需要采用具有不同渗透性与结构强度的材料进行层状构建,实现砂层渗透性、风化带弱胶结性以及基岩承载性的可控模拟。

1.2 三维物理模型构建与相似材料

为研究注浆过程多电参数的动态响应特征,搭建了边长为 82 cm × 82 cm × 82 cm 的立方体有机玻璃物理模型箱,保证砂层-风化带-基岩的层序结构、相对厚度关系及渗透性差异的结构相似性,以突出注水-注浆过程中电性参数的变化规律与阶段性特征。模型箱壁厚 3 cm,侧壁与顶底板材质均为有机玻璃材料,具有良好的绝缘性能,可确保电法测试的稳定性和数据可靠性。

模型采用分层填充方式模拟了五沟煤矿隔水层、饱水砂层、风化带及基岩层结构。由上至下依次为,隔水黏土层 A,采用黏土与膨润土混合填充,模拟实际三隔层低渗透、高含黏性物质特征;饱水砂层 B(四含层),采用河砂填充,颗粒分布均匀、渗透性高,以模拟真实松散含水砂层,为注浆扩散的主要区域;风化带层 C(注浆位置),采用具有一定可塑性及弱结构强度的材料(如砂岩碎屑与石膏混合物)填充,用于模拟实际风化泥岩弱胶结、裂隙发育的力学特征;基岩层 D,采用结构较完整、低渗透材料铺设,提供底部承载与稳定约束条件(表 1)。各层材料的力学性质、渗透性差异及层间坡度与实际地层条件保持一致。

表 1 相似材料配比参数

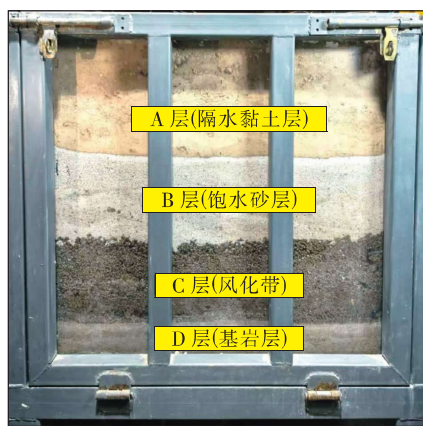
Table 1 Ratio parameters of similar materials

目标岩层	质量配比	层厚/cm (相似比 1:500)
隔水黏土层(A)	5:3:2 (膨润土:水泥:黏土)	34
饱水砂层(B)	石英砂颗粒	19
风化带(C)	6:3:1(砂:黏土:石膏)	23
基岩层(D)	7:2:1(砂:水泥:石膏)	4

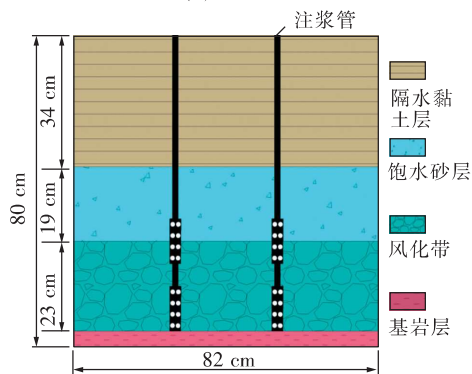
1.3 电极布设与试验流程

注浆管预埋于 C 层与 B 层的接触位置,使浆液可自下而上扩散并进入高渗透砂层。注浆系统包含压力控制、流量控制及浆液制备单元,能够保证注入过程稳定可控(图 2)。

模型 A ~ D 各层按 4 × 4 阵列布设电极。对称阵列布设方式可在有限电极数量条件下获取分层、多点电性信息,用于表征注浆过程中浆液扩散、孔隙充填及加固效应引起的电性空间差异,同时减弱边界效应对测试结果的影响^[26]。电极采用纯铜材料,电极端部与介质紧密接触,以降低接触电阻对测值的影响。各层位等间距布设,并与箱



(a)地层分布



(b)注浆管铺设

图2 物理模型地层结构布局

Fig. 2 Stratigraphic structure layout of the physical model

体边界保持一致距离,以减少边界效应对不同测点对比的影响。电极编号以D层为例,自上而下分别为E1~E16;C层对应E17~E32;B层对应E33~E48;A层对应E49~E64(图3)。试验过程中同步记录激励电流、一次场电位、自然电位及视电阻率,采集频率保持一致,以保证不同阶段变化特征的可比性。

模型分层铺设、压实并完成注浆管与电极安装后,向模型注水至模型饱和,建立稳定渗流场。随后向注浆管持续注入浆液,并按预定时间节点停注与再注。在注水和注浆期间全程记录激励电流、一次场电位、自然电位及视电阻率。浆液固结后开箱取出固结体,验证后续结果。上述试验可以实现对注浆扩散过程的高时间分辨率与多空间点的电性监测,为分析砂层中浆液扩散特征与固结效果提供可靠试验基础。

2 注浆过程的地电响应特征

2.1 激励电流变化特征

激励电流能够反映模型内部导电路径的整体

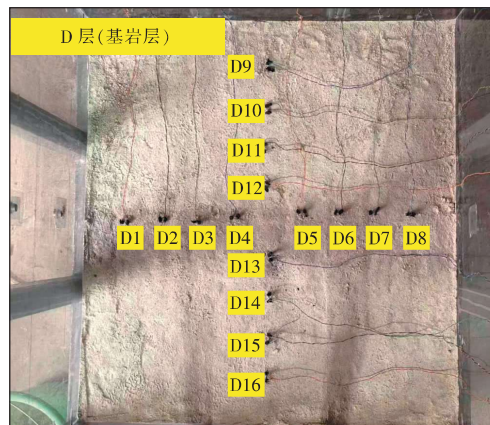
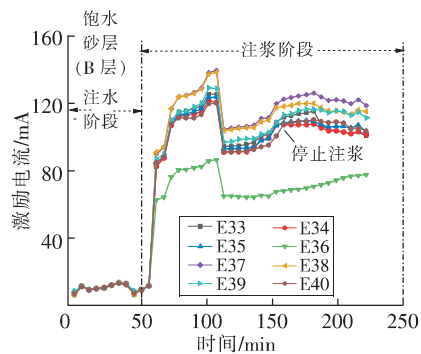


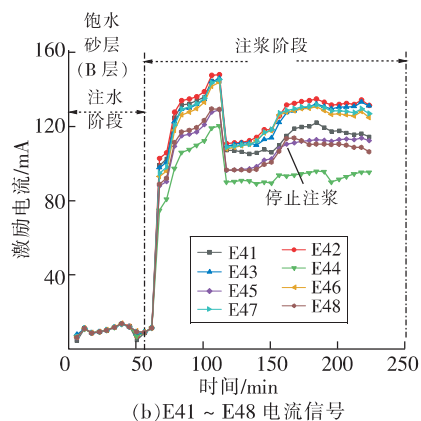
图3 D层内部电极编号

Fig. 3 Electrode number in strata D

变化,是响应最灵敏的电性参数之一。在试验过程中,激励电流在2个阶段表现出显著不同的变化规律,具有清晰的时序分段特征(图4)。



(a)E33~E40 电流信号



(b)E41~E48 电流信号

图4 激励电流时序变化

Fig. 4 Temporal variation of excitation current

试验过程可按关键工况节点划分为注水阶段与注浆阶段。0~50 min为注水阶段,各监测点电流整体处于约5~10 mA的低值区间,并呈“缓慢爬升-趋于稳定”的变化特征,其中约45~50 min电流进入平台段,表明砂层导电背景基本稳定,可

视为模型达到近似均匀饱和状态。50 min 后开始注浆,激励电流在极短时间内由约 10 mA 突跃至 90 ~ 130 mA。约 100 min 进入停注阶段,电流由峰值回落并形成平台段,反映浆液流动减弱与导电通道变化趋缓。

注浆开始后,激励电流出现明显跳变,各电极电流均在极短时间内由原来的 10 mA 左右快速上升至 90 ~ 130 mA 区间(各电极略有差异),形成一个陡直的急剧上升段。这是由于浆液进入饱水砂层后短时间改变局部导电路径、含水量增加及离子迁移加快导致整体电导率提高,以及注浆初期快速流动阶段对电流的强烈扰动^[27]。

在初始突升之后,电流进入缓慢上升阶段,曲线整体趋于平稳,但仍存在轻微增长。以 E33 ~ E40、E41 ~ E48 等电极为例,其电流在 80 ~ 120 min 之间呈现 5 ~ 15 mA 的缓慢抬升。反映了浆液的扩散行为:注浆前沿在砂层内部逐渐展开;浆液在局部区域的聚集导致电导率持续增加;不同电极位置受浆液影响时间不同,导致曲线之间产生一定空间差异。图中 E36、E44 电极电流显著低于其它测点(仅约 60 ~ 80 mA),表明该位置受浆液影响相对较弱,显示砂层内部存在非均质性。

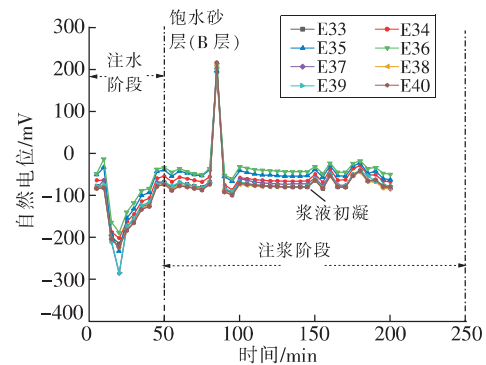
100 min 进入停注阶段,激励电流出现显著下降。多数监测点的电流由峰值 110 ~ 130 mA 快速降至 85 ~ 100 mA,趋于平稳。这表明浆液流动速率降低,导电通道的动态变化减少,局部区域的电性恢复至相对稳定状态,电流下降幅度较为一致,表明停注影响具有整体性。

2.2 自然场电位变化特征

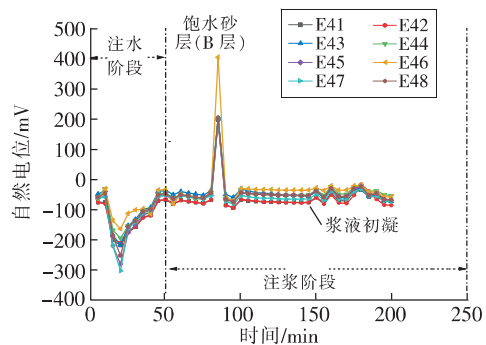
注水和注浆全过程中的自然电位变化规律整体演化特征可分为 3 个阶段,注水扰动阶段、注浆初期稳定阶段及注浆中期尖峰响应阶段(图 5)。

在 0 ~ 50 min 的注水阶段中,各监测点自然电位均出现显著下降,由初始值(约 -50 ~ 0 mV 附近)快速下滑至 -200 ~ -300 mV。其中,第 20 ~ 30 min 为自然电位变化最剧烈的阶段。原因在于注水导致孔隙水化学环境迅速变化、离子迁移加剧,电化学界面条件被重置及饱水状态逐渐趋于稳定,使自然电位向负方向快速跳变。

进入注浆阶段后,自然电位整体呈缓慢上升趋势,表明浆液进入饱水砂层后使局部电化学环境逐步发生改变^[28]。与激励电流等参数的剧烈响应不同,自然电位在注浆初期变化温和,各曲线之



(a) E33 ~ E40 自然电位信号



(b) E41 ~ E48 自然电位信号

图 5 自然电位时序变化

Fig. 5 Temporal variation of spontaneous potential

间差异较小,仅表现出轻微的电位抬升。随着注浆时间的推进,自然电位变化的核心特征在注浆中段集中体现。70 ~ 90 min,多数电极同步出现陡升尖峰,峰值超过 +200 mV,个别测点达到 +350 mV,突发、同步且持续时间短,反映该时间段砂层内部电化学条件、孔隙水状态及流体界面受到了强烈扰动。从机理上看,该同步尖峰对应注浆中期的强扰动瞬态事件:浆液快速迁移使孔隙水—浆液界面的电化学条件发生突变,并诱发更强的流动电位响应与离子迁移通量增加;多种效应在短时间内叠加,使自然电位表现为幅值大、时间集中且多测点同步的尖峰信号^[29-30]。尖峰出现后,自然电位迅速下降并恢复至 -80 ~ -120 mV,随后进入稳定波动阶段,各监测点电位重新趋于一致,仅呈现小幅的周期性起伏。在注浆后期约 140 ~ 160 min,曲线出现轻微波动变化,与浆液在局部区域开始初凝、自由水减少及离子重新分布有关。整个注浆过程中,自然电位的演化可归纳为“注水急降-饱和回升-注浆缓升-中期尖峰-后期趋稳”5 阶段特征。其中,中期尖峰的同时性及幅值突变为关键电信号,可作为注浆过程的关键时间节点标识。

2.3 一次场电位变化特征

一次场电位在注浆过程中呈现显著阶段性变化,并与浆液扩散时序良好对应(图6)。注浆初期,各测点电位由 $-120 \sim -140$ mV迅速跃升至接近0 mV,部分电极短暂转为正值,表明浆液进入后改变局部导电结构并引起电场重分布,形成瞬时增强的电势差;随后数分钟内各电极达到峰值,峰值差异反映注浆前沿推进的不均匀性。

在注浆进入中段后,一次场电位由峰值回落并进入“平台-缓降”的过渡形态,表明注浆初期形成的高导电通道逐步稳定,电流路径完成重构后电场分布开始向相对均匀状态调整。此阶段各曲线之间逐步保持相对稳定的电位差,反映不同位置受浆液影响程度与导电结构差异趋于定型。值得注意的是,个别电极(如E38、E46)在平台期表现出略高电位,说明其更接近浆液主要迁移通道或局部富集区,具有更强的电场响应。

固结阶段(约80~90 min后)一次场电位持续负向下降,由 $-20 \sim -40$ mV降至 $-60 \sim -120$ mV,停注后进入平稳波动,反映砂层内流体活动减弱、电场逐步回归背景。约140 min出现的小幅起伏可能与浆液初凝引起的孔隙结构微调、电解质浓度变化及电场微扰有关,表明一次场电位对固结过程仍具有一定响应能力^[31]。

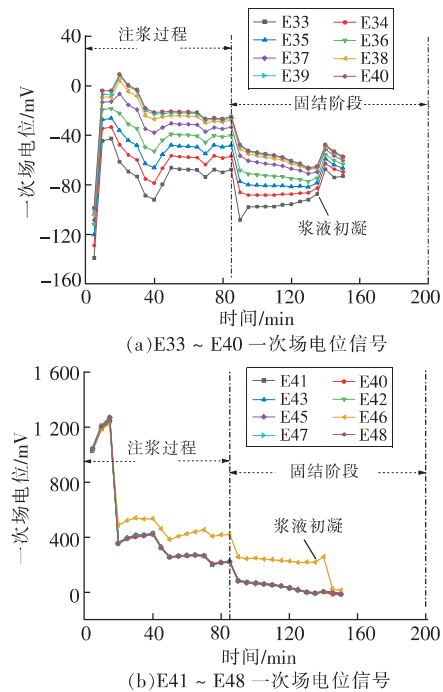


图6 注浆过程中一次场电位时序变化

Fig. 6 Temporal variation of primary field potential during the grouting process

2.4 视电阻率变化特征

视电阻率云图能够直观反映模型内介质导电性的空间分布变化,是刻画砂层注水-注浆过程的重要手段(图7)。未注水时整体呈现高阻背景,云

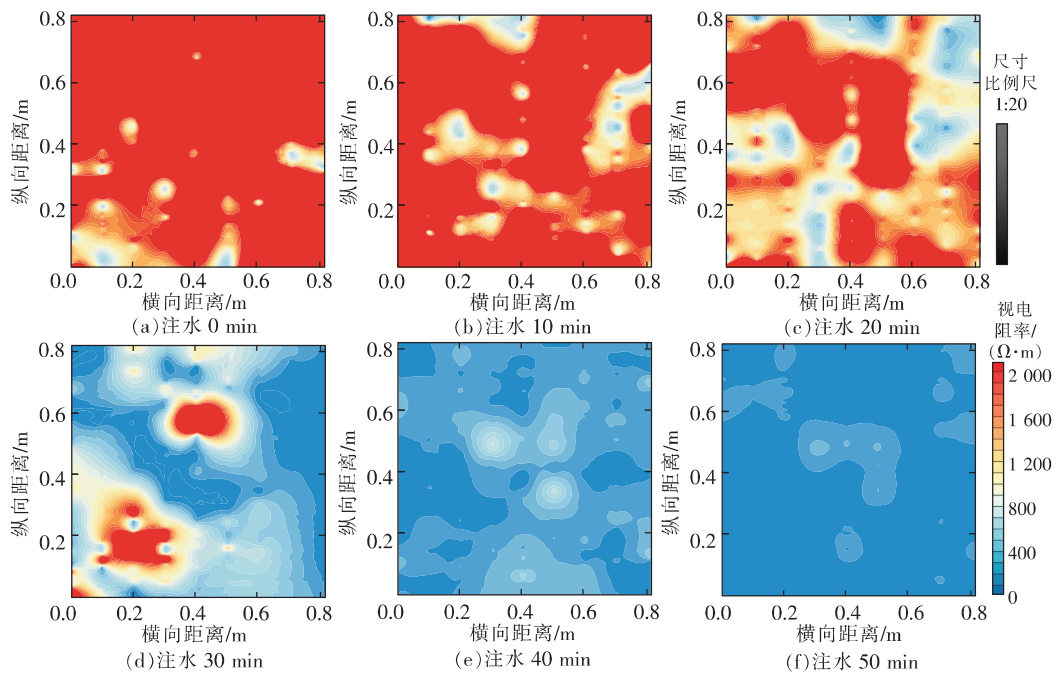


图7 注水阶段视电阻率变化

Fig. 7 Variations of apparent resistivity during the water injection phase

图以 $1\ 600 \sim 2\ 000\ \Omega \cdot \text{m}$ 的红色区占主导,说明砂层孔隙中空气含量较高、导电能力较弱。随着注水开始,局部出现小范围的低阻斑点,表现出 $10 \sim 20\ \text{min}$ 内局部饱水区域的零散发展。至 $30\ \text{min}$ 时,低阻区域显著扩大,形成成片的蓝色与浅蓝色分布,表明砂层大量孔隙被水体填充,整体导电性明显增强。继续注水至 $40 \sim 50\ \text{min}$,视电阻率整体趋于均匀,基本处于 $0 \sim 400\ \Omega \cdot \text{m}$ 的低阻范围,说明砂层已基本达到稳定饱和状态。

进入注浆阶段后,视电阻率空间分布呈现明

显的低阻扰动特征。注浆前的初始视电阻率云图主要表现为均匀的低阻背景(约 $200 \sim 500\ \Omega \cdot \text{m}$),表明砂层已处于充分饱水状态。随着浆液注入, $20\ \text{min}$ 时在模型中心及喷口附近首先出现多个较低阻值的团块,说明浆液初步进入砂层并改变局部导电性。至 $40 \sim 60\ \text{min}$,低阻区在空间上迅速扩展,呈现更为连贯的分布形态,同时在中部区域出现数个明显的极低阻($< 200\ \Omega \cdot \text{m}$)团块,反映浆液持续进入并增大局部饱和度,使导电路径进一步增强(图8)。

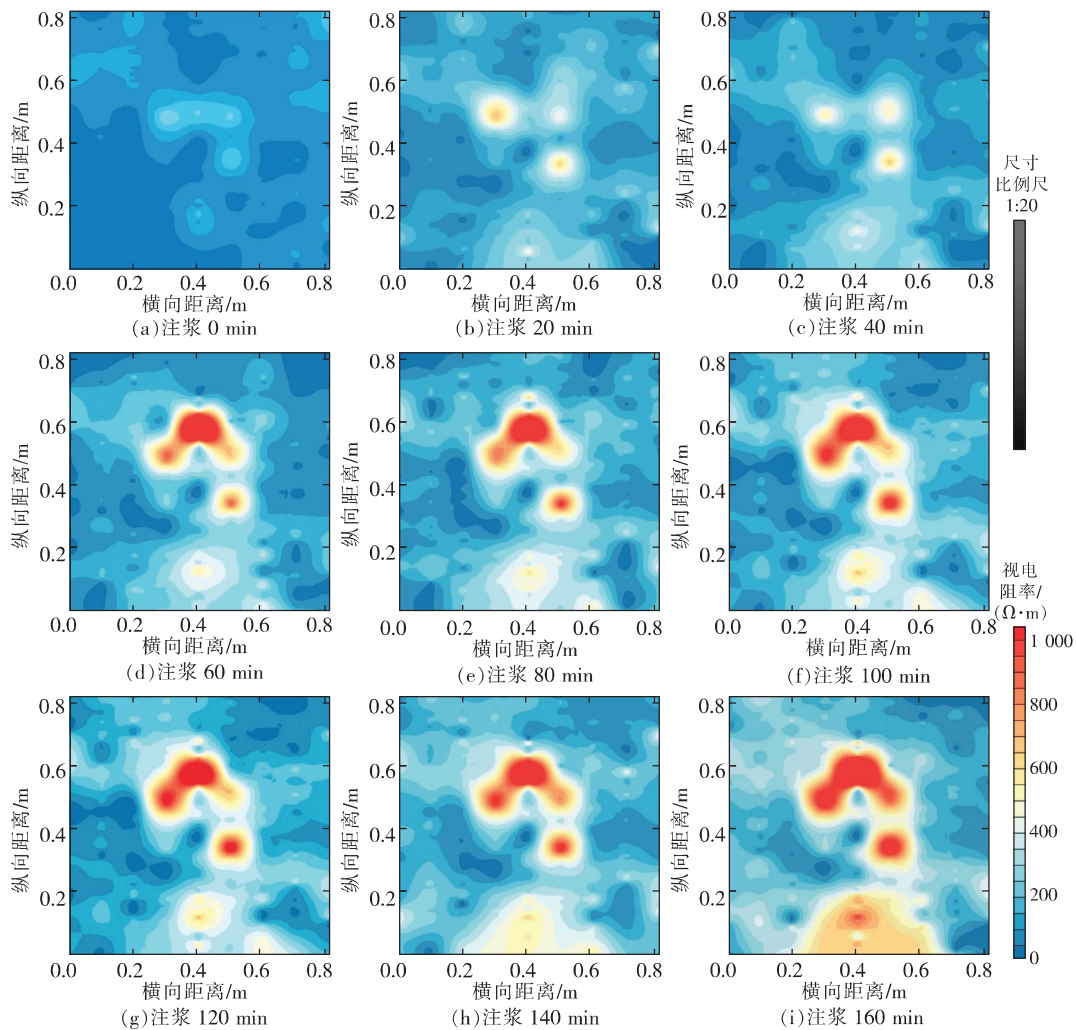


图8 注浆阶段视电阻率变化

Fig. 8 Variation of apparent resistivity during the grouting phase

当注浆推进至 $80 \sim 100\ \text{min}$,各低阻团块逐渐互相连通,形成较大的低阻连通域,空间分布趋于稳定。这一阶段视电阻率云图变化明显减缓,表明砂层内部的浆液迁移边界逐渐固定。随后在 $120 \sim 160\ \text{min}$ 的后期阶段,低阻分布主要保持在中上部区域,但在靠近注浆管附近的底部区域出

现了新一轮极低阻扩展,与浆液在后期更多向下或局部区域渗入有关。与前期的快速变化相比,该阶段视电阻率呈现缓变特征,表明砂层内部的液体活动逐渐减弱,系统逐渐进入稳定状态^[32]。

视电阻率在注水与注浆全过程中均表现出由高阻至低阻随后稳定低阻,局部极低阻增强的典

型演化规律。注水阶段的变化体现了砂层饱水过程,具有明显的整体低阻化趋势。而注浆阶段的变化更具空间聚集性和阶段性,其低阻团块的形成、扩展与连通对应了浆液在砂层中的逐步渗入、扩散与影响范围扩大。视电阻率云图的时空演化特征能够有效揭示注浆活动对砂层导电性的扰动范围,是刻画浆液扩散形态与注浆过程阶段性的关键电性指标。综合4类电性参数可见,注浆初期不同参数对导电通道形成的响应具有一致性,激励电流突升反映整体导电性迅速增强;一次场电位迅速升高反映电场与电流路径的重分布;视电阻率云图在喷口附近出现局部极低阻团块并向外扩展,刻画了浆液影响范围的启动与增长。自然电位对中期强扰动事件更敏感,以同步尖峰形式标记关键时段。多参数联合分析能够分别从时序阶段识别和空间范围刻画两方面互补,提高对注浆过程的判读可靠性。

3 结 论

1) 激励电流、自然电位与一次场电位均对砂层注水—注浆扰动表现出清晰阶段性。激励电流在注浆初期快速升高,自然电位在注浆中期出现同步尖峰并提升,一次场电位由突升转为缓降,反映导电结构的逐步重构。

2) 不同监测点电性参数的幅值差异反映了砂层内部的空间非均一性和浆液扩散路径差异。固结阶段电性响应整体趋于稳定,波动幅度较小,与浆液初凝过程具有一定对应关系。

3) 视电阻率云图能够直观揭示注水饱和与注浆扩散的空间演化,注水使整体电阻率由高阻背景快速转为低阻范围;注浆阶段低阻区由局部团块扩展并逐步连通形成稳定影响区,可用于识别浆液扩散范围并辅助评估固结效果。

4) 研究可为实时反映浆液注入与固结状态、识别低阻区扩展并判断浆液扩散范围及加固效果提供理论依据。但受模型规模有限、砂层均质以及可控边界条件的限制,现场地层通常非均质、孔隙复杂,施工及地下水因素可能影响电性响应。实际试验中需要结合实际地层边界条件进行校正。

参考文献(References):

[1] 王双明,孙强,李识博,等.论煤炭开采多圈层响应与减损保障[J].煤田地质与勘探,2025,53(10):1-11.
WANG Shuangming, SUN Qiang, LI Shibo, et al. Discussion on multi-sphere responses and damage reduction-oriented geological guarantees in coal mining[J]. Coal

Geology & Exploration, 2025, 53(10): 1-11.

[2] 沙飞,李术才,刘人太,等.富水砂层高效注浆材料试验与应用研究[J].岩石力学与工程学报,2019,38(7):1420-1433.

SHA Fei, LI Shucui, LIU Rentai, et al. Performance and engineering application of effective microfine cement-based grout (EMCG) for water-rich sand strata[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(7): 1420-1433.

[3] 吕兆海,张艺耘,赵长红,等.富水砂层巷道溃水溃沙因素分析及防治对策[J].煤炭工程,2015,47(6):73-75.

LYU Zhaohai, ZHANG Yiyun, ZHAO Changhong, et al. Factor analysis and control strategy for roadway water inrush and sand inrush in water-rich sand stratum[J]. Coal Engineering, 2015, 47(6): 73-75.

[4] 吉小明,吕纬.含水砂层隧道围岩失稳破坏机制及控制研究现状综述[J].岩土力学,2009,30(S2):291-296.

Ji Xiaoming, LYU Wei. Review of research on instability failure mechanism and stability control of tunnel surrounding rock in water-bearing sandy ground[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(S2): 291-296.

[5] 袁克阔,李雄伟,徐拴海,等.巨厚富水松散砂层溃砂灾害现状与注浆固沙技术研究及应用[J].水利与建筑工程学报,2017,15(4):32-38.

YUAN Kekuo, LI Xiongwei, XU Shuanhai, et al. Underground grouting-reconstruction technology for thick water-rich sand layer and its engineering practice[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2017, 15(4): 32-38.

[6] 张庆松,张连震,李鹏,等.地下工程富水软弱地层注浆加固理论研究新进展[J].隧道与地下工程灾害防治,2019,1(1):47-57.

ZHANG Qingsong, ZHANG Lianzhen, LI Peng, et al. New progress in grouting reinforcement theory of water-rich soft stratum in underground engineering[J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2019, 1(1): 47-57.

[7] SHA F, ZHANG L, ZHANG M, et al. Penetration grouting diffusion and strengthening mechanism of sand layer with crucial grout[J]. Journal of Building Engineering, 2024, 91: 109585.

[8] 柴敬,雷武林,李昊,等.三维物理模型模拟深部巨厚砾岩下综放开采地表移动[J].西安科技大学学报,2020,40(2):204-211.

- CHAI Jing, LEI Wulin, LI Hao, et al. Simulation of surface movement of fully mechanized caving mining under deep thick conglomerate using a 3D physical model[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2020, 40(2): 204-211.
- [9] 李志鹏,张连震,张庆松,等.砂层渗透注浆加固效果模型试验研究[J].煤炭学报,2018,43(12):3488-3497.
- LI Zhipeng, ZHANG Lianzhen, ZHANG Qingsong, et al. Simulation test for permeation grouting reinforcement effect of sand layer[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(12): 3488-3497.
- [10] 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.
- [11] 谢鲍,程桦,王雪松,等.富水砂层幂律型浆液渗透注浆扩散机理[J].煤田地质与勘探,2025,53(5):150-162.
- XIE Bao, CHENG Hua, WANG Xuesong, et al. Diffusion mechanisms of power-law grouts in water-rich sand layers during permeation grouting[J]. Coal Geology & Exploration, 2025, 53(5): 150-162.
- [12] HAN C, WEI J, ZHANG W, et al. Quantitative permeation grouting in sand layer with consideration of grout properties and medium characteristics[J]. Construction and Building Materials, 2022, 327: 126947.
- [13] 张一驰,卜泽华,潘东东,等.富水充填裂隙网络注浆数值模拟方法及扩散封堵机理[J].应用基础与工程科学学报,2025,33(4):1209-1221.
- ZHANG Yichi, BU Zehua, PAN Dongdong, et al. Numerical simulation method and grouting mechanism study for water-rich fracture network with fillings[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2025, 33(4): 1209-1221.
- [14] 许延春,李昆奇,谢小锋,等.裂隙岩体损伤的注浆加固效果试验[J].西安科技大学学报,2017,37(1):26-31.
- XU Yanchun, LI Kunqi, XIE Xiaofeng, et al. Grouting reinforcement of fractured rock mass based on damage mechanics[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2017, 37(1): 26-31.
- [15] 杨晓桐,孙文景,刘涛,等.动水条件下富水砂层注浆规律的电法检测模型试验研究[J].现代隧道技术, 2018, 55(5): 216-222, 228.
- YANG Xiaotong, SUN Wenjing, LIU Tao, et al. Model test on grouting law in dynamic water-rich sand layers by the electric resistance method[J]. Modern Tunnelling Technology, 2018, 55(5): 216-222, 228.
- [16] 窦金熙,张贵金,蒋焯斌,等.考虑渗滤效应的全风化花岗岩体脉动注浆扩散规律[J].工程地质学报, 2023, 31(6): 2060-2070.
- DOU Jinxi, ZHANG Guijin, JIANG Huangbin, et al. Diffusion mechanism of pulsating grouting in completely weathered altered granite considering infiltration effect[J]. Journal of Engineering Geology, 2023, 31(6): 2060-2070.
- [17] 袁世冲,张改玲,郑国胜,等.斜井穿越风积砂层水砂突涌注浆治理研究[J].煤炭学报,2018,43(4):1104-1110.
- YUAN Shichong, ZHANG Gailing, ZHENG Guosheng, et al. Grouting treatment of water and sand inrush in an inclined shaft in aeolian sand layer[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(4): 1104-1110.
- [18] 周军霞,张学奇,牛佳斌,等.改性超细水泥基注浆材料裂隙注浆扩散规律研究[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2024,43(6):671-681.
- ZHOU Junxia, ZHANG Xueqi, NIU Jiabin, et al. Study on crack grouting diffusion law of modified ultrafine cement-based grouting material[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2024, 43(6): 671-681.
- [19] ZHOU Y, LIU B, WU Z, et al. Experimental investigation on the grouting diffusion characteristics and relative filling degree of chemical slurry in fractured porous sandstone[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2023, 56(11): 7819-7837.
- [20] 赵德康,韩冰,曾一凡,等.渗流-应力耦合下断层带裂隙岩体渗透演化规律[J].煤田地质与勘探,2025, 53(7): 154-165.
- ZHAO Dekang, HAN Bing, ZENG Yifan, et al. Permeability evolutionary patterns of fractured rock masses in fault zones under seepage-stress coupling[J]. Coal Geology & Exploration, 2025, 53(7): 154-165.
- [21] 王红梅,董书宁,王鹏翔,等.复杂地质条件下煤矿地下水监测预警技术[J].西安科技大学学报,2022,42(3):501-511.
- WANG Hongmei, DONG Shuning, WANG Pengxiang, et al. Monitoring and early-warning of water disaster in coal mine with complex geological conditions[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2022, 42(3): 501-511.

- [22] LIANG J, DU X, FANG H, et al. Numerical and experimental study of diffusion law of foamed polymer grout in fracture considering viscosity variation of slurry [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2022, 128:104674.
- [23] 李东红, 马丽. 并行电法在麻子塔风井区注浆治理后的效果验证分析[J]. *煤炭技术*, 2025, 44(3):146-150.
LI Donghong, MA Li. Verification and analysis of parallel electrical method in mazita air shaft after grouting treatment [J]. *Coal Technology*, 2025, 44(3):146-150.
- [24] WANG Q, WANG S, SU W, et al. Interpretation of grouting characteristics in unsaturated sand from the perspective of water - air interface [J]. *Acta Geotechnica*, 2022, 17(7):2943-2954.
- [25] 刘强, 邱黎明, 祖自银, 等. 含裂隙煤样受载破坏过程视电阻分布特征 [J]. *西安科技大学学报*, 2021, 41(4):731-738.
LIU Qiang, QIU Liming, ZU Ziyin, et al. Variation characteristics of apparent resistivity of fractured coal sample in loading process [J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2021, 41(4):731-738.
- [26] 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 Cheng, LI Bofan, WU Zhang, 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.
- [27] 宋洋, 王宏帅, 李昂, 等. 富水粉细砂层盾尾同步注浆浆液渗透-压密扩散机制研究 [J]. *岩土力学*, 2023, 44(5):1319-1329.
SONG Yang, WANG Hongshuai, LI Ang, et al. Penetration - compaction diffusion mechanism of shield tail synchronous grouting slurry in water-rich fine sand layer [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2023, 44(5):1319-1329.
- [28] 古文博, 童立元, 闫鑫, 等. 电化学注浆-碳化联合加固软土地基试验研究 [J]. *岩土工程学报*, 2025, 47(7):1464-1473.
GU Wenbo, TONG Liyuan, YAN Xin, et al. Experimental study on combined stabilization technology of electrochemical grouting-carbonation for soft soil ground [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2025, 47(7):1464-1473.
- [29] 解滔, 卢军. 地电阻率观测常见变化形态及其可能原因分析 [J]. *中国地震*, 2023, 39(1):128-142.
XIE Tao, LU Jun. Variations of apparent resistivity and its possible causes [J]. *Earthquake Research in China*, 2023, 39(1):128-142.
- [30] 孙庆华, 娄杰, 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 Qinghua, LOU Jie, HU Xin, 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.
- [31] 苏天明, 孙强, 刘盛东, 等. 基于地电测试的浆液扩散效应三维可视化分析 [J]. *公路交通科技*, 2015, 32(4):108-112.
SU Tianming, SUN Qiang, LIU Shengdong, et al. 3D Visualization analysis of grout diffusion effect based on geo-electric test [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2015, 32(4):108-112.
- [32] 张华磊, 徐保杰, 王开伟, 等. 不同粒径分布多孔介质的幂律流体渗透注浆机制 [J]. *采矿与安全工程学报*, 2024, 41(5):1025-1035.
ZHANG Hualei, XU Baojie, WANG Kaiwei, et al. Power-law fluid infiltration grouting mechanisms considering different particle size distributions [J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2024, 41(5):1025-1035.

(责任编辑:李克永)