

浆液固化过程电阻率变化特征的实验研究

曹志鹏 黄思俊 徐杰 陈伟杰 张世鑫
宿州学院 资源与土木工程学院 安徽宿州

摘 要: 注浆技术在岩土工程、地质灾害治理、地下防渗透加固、煤矿封堵含水层等众多领域中具有广泛应用。本文通过物理实验方法探究浆液固化过程中电阻率随时间的变化规律。实验结果表明:水泥浆液随着时间的推移固化,电阻率呈现增大趋势,但并非线性增加,而是呈现波动。水泥浆液固化过程中电阻率的波动是多重物理化学过程耦合作用的宏观表征。水灰比影响浆液固化早期电阻率变化。水灰比越高,初始自由水越多,初始电阻率越低,且固化过程中电阻率上升速率越慢。电阻率的变化可以直接反映浆液的固化程度。浆液固化过程中的电阻率变化特征,为实时评估浆液的固化程度提供了依据。

关键词: 注浆技术; 浆液固化; 电阻率变化; 动态监测

1 引言

在岩土工程、地质灾害治理、地下防渗透加固、煤矿封堵含水层等众多领域中,注浆技术凭借其显著的加固与改良效果,已成为工程实践中不可或缺的关键技术手段^[1-2]。浆液的固化过程直接决定了注浆工程的质量与长期稳定性,电阻率作为一项重要电学参数,能够灵敏地反映物质内部结构、离子浓度、水化反应进程等微观变化。因此,深入探究浆液固化过程中的电阻率变化规律,对于优化注浆工艺、提升工程可靠性具有重要意义^[3]。

在浆液固化过程中,随着水化反应的进行,浆液中的离子浓度不断变化,固相物质逐渐增多,孔隙结构也发生显著改变,这些变化均会引起浆液电阻率的动态响应。通过监测浆液固化过程中的电阻率变化特征,有望建立起与固化程度、强度发展之间的内在联系,为注浆工程的质量控制与效果评估提供一种非侵入式、实时且高效的监测方法。目前,国内外学者针对浆液固化过程的研究已取得了一定成果。部分研究聚焦于浆液的流变特性、强度发展规律,通过传统的力学试验与微观分析手段揭示其固化机理;也有一些学者尝试利用电阻率法对水泥基材料的水化过程进行监测,但对于不同类型浆液在固化过程中电阻率变化的系统研究仍相对不足,尤其是缺乏对浆液固化过程与电阻率变化特征之间定量关系的深入探讨^[4-5]。传统方法通过钻孔取样或经验公式评估浆液固化状态,存在实时性差、空间分辨率低等问题。电阻率作为反映浆液水化反应和固化程度的敏感参数,其动态

监测为实时评估浆液状态提供了新思路。浆液固化过程中水分迁移与电阻率变化存在强相关性,可为优化注浆工艺提供科学依据。

本文通过物理实验,探究浆液固化过程中电阻率随时间的变化规律。分析浆液在不同固化阶段和不同水灰比条件下的电阻率特征,建立了浆液固化电阻率随时间的定量关系模型,以期注浆工程中浆液固化状态的实时监测与质量控制提供理论依据。

2 材料与方法

实验采用海螺牌 M42.5 水泥,以不同比例的水灰比制备浆液。首先称取所需质量的水泥倒入搅拌容器中,然后根据水灰比称取一定质量的水,将水倒入盛有水泥的容器中,匀速搅拌 3min,将搅拌均匀的浆液注入模具中。将铜片插入水泥浆液模型左右两侧,确保覆盖水泥浆液横截面,继而实现对水泥浆液电阻的有效测量。利用万用表直接测量水泥浆液的电阻变化情况,并利用数据采集软件进行自动记录,进一步转换为浆液的电阻率,对电阻率数据进行成图并分析。固化过程中的水泥浆液作为非标准电阻,通过多次实验,发现万用表直接测量电阻存在局限性,故增加了恒压电源,通过测量不同电压情况下的电流变化,利用欧姆定律计算浆液的电阻变化,继而更加精确地计算出浆液固化过程的电阻率变化情况。

3 结果

3.1 浆液固化过程电阻率变化特征

从图 1 可以看出,水泥浆液随着时间的推移固化,电阻率呈现增大趋势,但并非线性增加,而是中间出现波动。水泥浆液固化过程中电阻率的波动是多重物理化学过程耦合作用的宏观表征,其与水化反应动力学、微观结构演变、离子迁移行为及外界环境干扰等有关,水泥浆液固化过程中电阻率波动的本质是离子浓度变化 - 孔隙结构演化 - 水化产物特性动态耦合的结果。

初期浆液中的水泥颗粒均匀分散在水中,离子(如 Ca^{2+} 、 OH^- 、 SO_4^{2-} 等)充分溶解,导电离子浓度较高,电阻率较低且基本稳定。此时浆液未开始水化反应,导电能力主要由自由水和溶解离子决定。随着水泥开始水化反应,生成少量水化产物(如 C-S-H 凝胶、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体),部分自由水被吸附或结合,导电离子迁移受阻,电阻率逐渐升高,曲线呈缓慢上升趋势。水化产物开始包裹水泥颗粒,形成局部网状结构,自由水减少,离子传导路径变窄。随着水化反应加速,大量水化产物形成连续网络,浆液从塑性状态转为固体状态,电阻率快速上升,曲线呈陡峭增长趋势,直至终凝后趋于稳定。终凝时固化结构形成,自由水几乎完全被消耗,离子传导路径大幅减少,固体骨架的绝缘性主导电阻率。

通过对水泥浆液早期固化阶段电阻变化情况的观察,早期龄期水泥浆体可看作为液相和固相结合产物,液相是由不同离子组成的导电相,相较于液相而言,固相可以看作是非导电向,从图中看出早期电阻有一个下降的趋势,推测为固相和液相有一个相结合的反应,此时空隙度还较大,故而可以通过液相导电,而随着时间的推移,水化反应的不断进行,水泥基材料不断致密,孔隙率越来越小,充满液相的导电空间越来越少,所以导电能力随着时间而下降,即电阻率曲线随时间而上升。初始溶解期,电阻率快速下降。水泥与水混合后, C_3A 、 C_3S 等矿物迅速溶解,释放大量的 Ca^{2+} 、 Al^{3+} 、 SO_4^{2-} 等离子,溶液离子浓度急剧升高,电阻率快速降低。离子导电是水泥浆体导电的主要方式,离子浓度升高直接提升导电性,降低电阻率。诱导形成期至诱导期,电阻率先稳后升,可能出现小幅波动。初始阶段离子浓度接近饱和,水化产物(如钙矾石、C-S-H 凝胶)开始在水泥颗粒表面形成多孔保护膜,离子迁移受阻,电阻率趋稳或小幅上升。中后期若溶液中存在未完全反应的石膏或缓凝剂,可能缓慢释放 SO_4^{2-} 等离子,短暂提升离子浓度,导致电阻率小幅回落。保护膜的形与缓凝成分的滞后作用形成“离子

释放 - 阻滞”的动态平衡,导致电阻率波动。加速期至硬化期电阻率持续上升,波动减少。保护膜破裂后,水化反应加速,大量生成 C-S-H 凝胶、氢氧化钙晶体和钙矾石,这些产物相互交织形成连续网络结构,孔隙率降低,离子迁移路径被“物理阻断”,电阻率持续快速上升。微观结构的致密化显著抑制离子传导,成为电阻率上升的主导因素。

水泥浆体的电阻率与其孔隙率、孔隙连通性、水化产物形貌密切相关,结构演变的非连续性导致电阻率波动。水泥浆体的电阻率与其孔隙率、孔隙连通性、水化产物形貌密切相关,结构演变的非连续性导致电阻率波动。早期水化产物少量生成,水泥颗粒间孔隙以“宏观连通孔”为主,离子可通过孔隙自由迁移,电阻率较低。随着保护膜形成,部分孔隙被填充,孔隙率小幅下降,电阻率上升。中期大量水化产物快速生长,填充颗粒间孔隙,孔隙率急剧下降,连通孔转为“孤立微孔”,离子迁移路径锐减,电阻率非线性跃升。后期孔隙率趋于稳定,电阻率增速放缓,接近稳定值。诱导期水化产物以薄片状或针状晶体(如钙矾石)为主,附着在水泥颗粒表面形成不连续膜层,离子仍可通过膜层孔隙传导,电阻率波动受膜层致密性影响。加速期物生长为树枝状或网状结构(如 C-S-H 凝胶相互搭接),形成三维导电屏障,离子传导需绕过固相骨架,路径显著延长,电阻率非线性增加。电阻率波动本质上是离子生成速率与离子固化、吸附速率竞争的结果。离子生成与消耗的阶段性失衡。溶解期,离子生成速率大于消耗速率,电阻率下降。诱导期钙矾石生成消耗 Ca^{2+} 、 Al^{3+} 、 SO_4^{2-} ,若石膏溶解滞后,可能导致局部离子浓度短暂不足,电阻率上升。加速期离子消耗速率大于生成速率(被水化产物固定),电阻率持续上升。

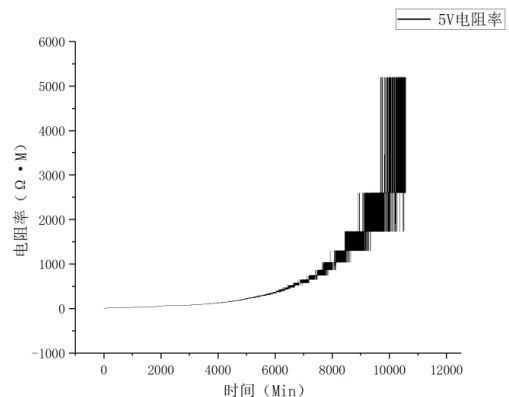


图 1 不同电压条件下水泥浆液电阻率变化情况

3.2 不同水灰比对浆液固化的电阻率特征

从图 2 不同水灰比条件下电阻率变化情况可以看出,水灰比影响浆液固化早期电阻率变化。水灰比越高,初始自由水越多,初始电阻率越低,且固化过程中电阻率上升速率越慢,因离子稀释效应显著。浆液固化越充分、结构越密实,自由水和孔隙率越低,电阻率越高。不均匀固化(如局部离析)可能导致电阻率空间分布异常,出现局部高值或低值区域。水灰比是指浆液中水与水泥的质量比,它是影响浆液固化后性能的关键参数之一。浆液固化过程本质是水泥的水化反应,形成以水泥石为骨架的结构体。水灰比通过调控浆液固化体的孔隙率、离子浓度、结构完整性,显著影响其电阻率。

浆液固化过程本质是水泥的水化反应,形成以水泥石为骨架的结构体。水灰比低,水泥颗粒相对较多,水化反应后形成的水泥石结构致密,孔隙率低,连通孔隙少。水灰比高,多余水分蒸发后留下大量孔隙,形成连通孔隙网络,可能填充离子型溶液(如含电解质的水),增加导电性。水泥水化产物(如 $\text{Ca}(\text{OH})_2$) 溶解产生 Ca^{2+} 、 OH^- 等导电离子。浆液中自由水多,离子浓度相对稀释,但孔隙连通性好,离子迁移路径更畅通,电阻率可能降低。水灰比低,离子浓度高,但孔隙率低,离子迁移受阻,电阻率可能升高。水灰比过低时,水泥无法充分水化,未水化颗粒堆积形成“干缩裂缝”,可能增加电阻率。水灰比过高时,水泥石强度不足,孔隙结构松散,可能通过连通孔隙降低电阻率。随水灰比增大,孔隙率逐渐增加,连通孔隙增多,电阻率逐渐降低。自由水过多导致水泥石结构疏松,孔隙率接近临界值,电阻率快速下降,甚至可能出现孔隙连通性突变,电阻率骤降。

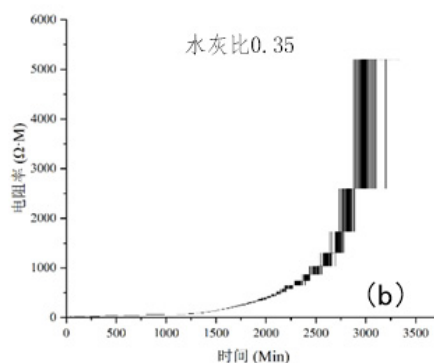
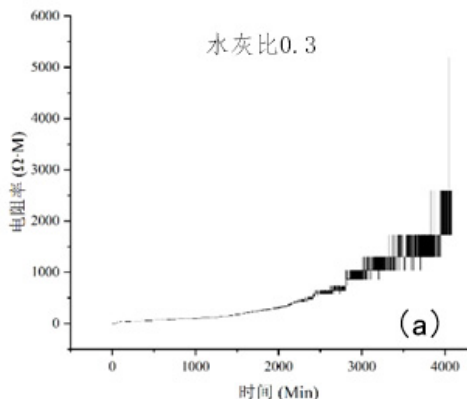


图 2 不同水灰比电阻率变化情况

结论

本研究通过动态监测水泥浆液固化过程中的电阻率变化,深入分析了浆液固化电阻率随时间的变化规律。结果表明,水泥浆液随着时间的推移固化,电阻率呈现增大趋势,但并非线性增加,而是呈现波动。水泥浆液固化过程中电阻率的波动是多重物理化学过程耦合作用的宏观表征。水灰比影响浆液固化早期电阻率变化。水灰比越高,初始自由水越多,初始电阻率越低,且固化过程中电阻率上升速率越慢。电阻率的变化可以直接反映浆液的固化程度。

参考文献:

- [1]陈娟,赵耀江.近十年来我国煤矿事故统计分析及其启示[J].煤炭工程,2012(03):137-139.
- [2]康红普,冯志强.煤矿巷道围岩注浆加固技术的现状与发展趋势[J].煤矿开采,2013,18(03):1-7.
- [3]陈永霞.混凝土中水泥的水化过程及主要水化产物特性[J].青海交通科技,2013(03):5-6+11.
- [4]李林香,谢永江,冯仲伟,朱长华.水泥水化机理及其研究方法[J].混凝土,2011(6):76-80.
- [5]伍建平,姚武,刘小艳.导电水泥基材料的制备及其电阻率测试方法研究[J].材料导报,2004,18(12):85-87.