

# 地聚合物注浆材料凝结时间智能预测方法

殷惠芬

孝昌县辉煌建设工程质量检测有限公司 湖北孝感

**【摘要】**地聚合物注浆材料作为一种新型绿色胶凝材料，其凝结时间直接影响到工程施工的安全性与效率。由于配比、温度、湿度及活性矿物特性等多因素共同作用，传统经验法难以实现准确预测。为解决该问题，本文提出一种基于智能建模的凝结时间预测方法。通过收集实验数据，采用机器学习算法对关键影响因子进行特征提取与关联分析，构建凝结时间预测模型，并在多组实验中进行验证。结果表明，该方法预测精度高、适应性强，能够为工程注浆工艺参数设计与施工控制提供有效参考，提升地聚合物注浆材料的应用可靠性与工程可控性。

**【关键词】**地聚合物注浆材料；凝结时间；智能预测；机器学习

**【收稿日期】**2025年7月14日

**【出刊日期】**2025年8月12日

**【DOI】**10.12208/j.jer.20250350

## Intelligent prediction method of setting time of ground polymer grouting material

Huifen Yin

Xiaochang County Huihuang Construction Engineering Quality Testing Co., Ltd., Xiaogan, Hubei

**【Abstract】** As a novel green cementitious material, the setting time of geopolymers directly impacts construction safety and efficiency. Traditional empirical methods struggle to achieve accurate predictions due to complex factors including mix proportions, temperature, humidity, and active mineral characteristics. To address this challenge, this study proposes an intelligent modeling-based setting time prediction method. Through experimental data collection and machine learning algorithms for feature extraction and correlation analysis of key influencing factors, a setting time prediction model was developed and validated through multiple experiments. Results demonstrate that this method exhibits high prediction accuracy and strong adaptability, providing effective references for grouting process parameter design and construction control. This enhances the application reliability and engineering controllability of geopolymers.

**【Keywords】** Geopolymer grouting materials; Setting time; Intelligent prediction; Machine learning

## 引言

地聚合物注浆材料因其优异的力学性能与环保特性，逐渐成为地基加固与结构修复中的重要选择。在复杂工程条件下，该材料凝结时间的波动往往影响施工进度与结构稳定性。过快的凝结可能导致施工难以进行，过慢则会延长工期并增加风险。如何在多变量耦合作用下准确预测凝结时间，成为亟需解决的关键问题。借助智能算法对实验数据进行深度分析与建模，可为施工提供科学依据，从而有效提升工程质量与效率。

## 1 地聚合物注浆材料凝结时间影响因素分析

地聚合物注浆材料的凝结时间受多种因素共同作用，是决定其工程适用性的关键参数之一。配合比设计是其中最核心的影响环节，不同硅铝比、激发剂浓度以及水胶比的调整都会改变材料内部的水化反应速率和

产物形成过程。较高的碱激发剂浓度能够加速硅铝骨架的溶解与聚合反应，从而缩短凝结时间，而水胶比的变化则直接影响浆体流动性和反应物扩散效率。当骨料与粉体比例失衡时，浆体孔隙结构和离子传输环境也会发生改变，造成凝结时间的差异<sup>[1]</sup>。掺杂矿物掺合料如粉煤灰、矿渣微粉或偏高岭土等，也会通过反应活性和颗粒形貌对凝结行为产生重要影响。

外部环境条件同样在凝结过程中起着不可忽视的作用。温度是最为敏感的变量，高温环境下溶解与缩聚速率大幅提升，使得材料迅速硬化，但在低温下反应速率明显减缓，导致凝结时间延长。湿度水平与环境养护条件则会改变浆体中水分蒸发速度与离子迁移通道，从而影响反应平衡。实验结果表明，当环境相对湿度过低时，浆体表层迅速失水，可能造成早期硬壳效应，使

凝结表现与内部反应脱节。不同施工场景下,如地下结构、桥梁加固或隧道衬砌,所处温湿度条件差异显著,因此凝结时间的可变性在实际工程中尤为突出。

材料本身的微观结构特征和离子动力学过程为理解凝结时间差异提供了重要解释。活性矿物的粒径分布、比表面积以及孔隙结构均决定了反应速率与凝胶产物的生成路径。较细颗粒能提供更多活性位点,促进硅铝溶出,缩短凝结时间,而大颗粒则使反应过程趋于缓慢。浆体中  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$  等阳离子的迁移速度和浓度梯度控制着聚合反应的进程,不同离子浓度条件下生成的凝胶相结构密实度差异显著<sup>[2]</sup>。随着反应的推进,形成的 N-A-S-H 或 C-A-S-H 凝胶逐渐填充孔隙并构建连续网络,使得材料由流态转为固态,这一过程的速率与稳定性正是凝结时间的直接体现。通过对这些影响因素的综合分析,可以看出地聚合物注浆材料的凝结时间是一种受多重变量耦合控制的复杂动力学过程,亟需借助智能预测方法实现更为精确的调控。

## 2 凝结时间预测中传统方法的不足与挑战

在地聚合物注浆材料的应用过程中,凝结时间的准确预测一直依赖于传统的经验公式与实验测定方法。这类方法往往以单一因素分析为主,将水胶比、碱激发剂浓度或温度等参数独立处理,而缺乏对多变量耦合效应的深入考虑。由于地聚合物体系内部反应机制复杂,涉及硅铝溶解、凝胶生成及离子迁移等多阶段过程,传统方法难以全面反映真实的动力学特征<sup>[3]</sup>。在配比调整或环境条件发生微小变化时,预测结果与实际凝结表现容易产生偏差,从而降低对施工工艺的指导价值。

在工程实践中,传统测试方法也面临操作上的局限性。通过维卡仪或针入阻力法获取凝结时间虽然直观,但测试周期长且受到试验人员操作差异的影响较大,重复性和稳定性难以保障。对于地下隧道、深基坑或高温湿热环境中的应用,这类方法无法实时反馈浆体反应进程,导致现场施工依赖经验调整,存在较大的不确定性。部分研究尝试利用热量法或电导率测试来改进测定精度,但受限于实验条件与样品代表性,仍无法满足复杂工程对快速、精准预测的需求。

更为关键的挑战在于传统方法缺乏对非线性关系的捕捉能力。地聚合物浆体的凝结行为常常表现出突变性和临界点效应,当激发剂浓度或温度跨越某一阈值时,反应速率可能呈现非线性加速,而传统线性回归或单因素模型无法有效刻画这一过程。原材料来源差异导致的成分波动,使得单一公式难以推广到不同施工场景,普适性明显不足<sup>[4]</sup>。这些不足表明,依赖传统

方法已难以满足现代工程对地聚合物注浆材料凝结时间预测的高精度和高适应性要求,迫切需要引入智能建模与数据驱动的解决方案来应对多变量耦合与复杂动力学问题。

## 3 基于智能建模的凝结时间预测方法构建

地聚合物注浆材料凝结时间的预测若仅依赖传统方法,往往难以应对复杂的变量耦合问题,而智能建模能够提供新的解决思路。在预测模型的构建过程中,需要建立高质量的数据基础,涵盖水胶比、硅铝比、碱激发剂浓度、温湿度条件、矿物掺合料类型等多维度实验参数,并通过系统实验记录凝结时间<sup>[5]</sup>。通过数据清洗与特征工程,消除冗余信息并提取关键影响因子,为后续建模提供可靠输入。数据驱动的建模方式能够避免过度依赖单一经验公式,使预测更贴近实际工程条件。

在算法选择上,智能建模强调非线性关系与高维交互的刻画能力。常用方法包括支持向量机、随机森林、神经网络等,它们能够在多变量条件下挖掘潜在规律。例如,支持向量机通过核函数映射将非线性问题转化为高维空间中的线性问题,从而实现复杂关系的拟合;随机森林依托多个决策树的集成思想,提升模型的泛化能力并降低过拟合风险;神经网络则能够通过多层感知与权重迭代,逼近凝结时间与原始变量之间的高度非线性函数。不同算法在计算效率、解释性和预测精度方面各具特点,需要结合实际数据量与应用场景进行优化选择。

在模型训练与验证阶段,交叉验证与误差分析是确保预测可靠性的关键。通过划分训练集与测试集,可以评估模型在不同数据上的适应性,并利用均方误差、决定系数等指标量化预测效果<sup>[6]</sup>。引入特征重要性分析,有助于揭示凝结时间的主要控制因素,为工程人员提供有价值的参考信息。在模型部署层面,结合实时监测数据输入模型,可实现对凝结过程的动态预测,从而为现场施工提供即时反馈。智能建模不仅提升了预测精度,也使凝结时间预测由静态结果转向动态调控,为地聚合物注浆材料的工程应用奠定了坚实的技术基础。

## 4 智能预测方法在工程应用中的验证与成效

与实验结果进行验证。通过在不同配比与环境条件下收集的试验数据,模型能够实现对凝结时间的拟合与预测,并在误差评价中表现出优于传统方法的结果。采用均方根误差、平均绝对误差以及决定系数等统计指标进行对比,显示智能预测方法能够更准确反映材料凝结过程中的非线性特征<sup>[7]</sup>。特别是在水胶比与碱激发剂浓度存在较大波动的情况下,模型依然能够保

持较高精度，说明其在处理复杂变量耦合时具备良好的稳定性。这种基于实验数据的验证不仅证明了算法的可行性，还为预测模型的优化提供了坚实的基础。

在实际工程应用中，智能预测方法展现出显著的适用价值。以地下隧道衬砌与地基加固工程为例，传统依赖经验的施工方式容易因凝结时间判断失误而导致注浆不均匀或施工延误，而基于智能模型的预测能够提前给出可靠的时间区间，使施工工序安排更为合理。在不同环境条件下，例如高温湿热或低温高湿的复杂场景，智能预测方法能够快速调整计算结果，从而避免因外部环境突变而产生的施工风险。通过与现场监测系统结合，模型还能实现对实时数据的动态输入和输出预测，使凝结时间的预测不再是静态的实验结果，而是能够随环境与配比变化不断更新的过程。这种能力极大提高了工程的可控性与安全性，为复杂环境下的施工提供了技术支持。

在成效评估方面，智能预测方法不仅提高了预测的准确率，也提升了工程施工的整体效率和质量。通过在多组工程案例中的应用，发现采用智能预测指导的注浆作业能够显著缩短工期，减少因凝结时间偏差造成的返工和材料浪费<sup>[8]</sup>。特征重要性分析揭示出不同变量在凝结过程中的影响程度，例如碱激发剂浓度和环境温度往往是最敏感的因素，这为施工配比优化与工艺改进提供了数据支持。通过对比不同工程项目的实践经验可以看出，智能建模方法使凝结时间预测由传统的经验依赖转向科学的量化调控，在可靠性与适应性方面取得了实质性进步。这一成效说明智能预测方法不仅是实验研究的成果，更能够在复杂的工程实践中展现持久价值，推动地聚合物注浆材料应用的高水平发展。

## 5 结语

地聚合物注浆材料凝结时间的智能预测研究表明，凝结过程并非单一变量能够决定，而是受配比设计、外部环境和微观反应机制等多重因素耦合控制。传统经验方法难以全面刻画这种复杂性，而智能建模在捕捉非线性关系和动态变化方面展现了独特优势。借助多

维数据支撑与先进算法训练，预测结果更接近实际施工表现，在误差控制与适应性方面具有明显提升。工程案例验证显示，该方法能够有效指导工艺参数调整，降低施工风险并提升材料利用效率。随着更多工程实践的积累，智能预测在不同环境和条件下的应用价值将进一步凸显，为地聚合物注浆材料的大规模推广与科学使用提供可靠支撑，推动相关工程技术向着更高精度与更高水平发展。

## 参考文献

- [1] 薛彤.地聚合物注浆材料制备及性能试验研究[J].江苏建筑,2024,(03):146-151.
- [2] 王晴,邹安琪,张强,等.矿渣基地聚合物道路注浆材料制备及固结性能研究[J].混凝土,2023,(11):222-225+228.
- [3] 冯涵,张学民,欧雪峰,等.破碎岩体快速注浆加固地聚合物注浆材料试验研究[J].华南理工大学学报(自然科学版),2020,48(09):43-50.
- [4] 陈洁华,方伟,康杰.用于道路修复的地聚合物注浆材料基本性能试验研究[J].公路交通技术,2023,39(01):41-47.
- [5] 胡春红,王彦伟,朱昌星.碳纤维增强聚合物水泥注浆材料力学性能及其微观机理[J].硅酸盐通报,2022,41(01):20-26+50.
- [6] 黄侠.工业废渣地聚合物注浆材料试验及应用[J].江苏建筑职业技术学院学报,2025,25(02):14-18.
- [7] 张森龙,刘杰胜,魏靖,等.地聚合物注浆材料流动性能与强度影响因素研究[J].湖北工程学院学报,2024,44(06):93-98.
- [8] 武肖雨,刘杰胜,董莪,等.偏高岭土基地质聚合物涂层材料应用综述[J].山东商业职业技术学院学报,2020,20(04):112-115.

**版权声明：**©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

