

高温水泥浆稠化时间影响因素分析与预测模型研究

湛紫¹ 文禹豪^{2,3} 夏修建³ 徐璞³ 刘慧婷³ 张正荣^{2,3}

1. 巴黎萨克雷大学 2. 中国石油大学(北京) 3. 中国石油集团工程技术研究院有限公司

摘要: **目的** 针对高温(温度大于 120 °C)条件下水泥浆稠化时间难以控制、水泥浆稠化实验周期长和水泥浆稠化时间难以预测等问题,研究了高温水泥浆稠化时间的影响因素。**方法** 采用对稠化时间进行拟合的方法对此进行研究,并且尝试基于灰色理论构建高温下水泥浆稠化时间的预测模型。**结果** 水泥浆稠化时间主要受缓凝剂加量、养护条件和特殊外加剂的影响,且在不同条件下各因素的影响程度不同;按照养护温度范围划分,并根据影响因素首次使用灰色理论建立了水泥浆稠化时间预测模型,该预测模型具有精度高、适用于小样本的特点。**结论** 高温水泥浆稠化时间影响因素敏感性分析与预测模型的建立,大大节约了水泥浆稠化实验的成本,并为高温水泥浆稠化时间的调配提供了理论基础。

关键词: 油井水泥;稠化时间;影响因素敏感性;预测模型;灰色模型

DOI: 10.3969/j.issn.1007-3426.2024.04.014

引用格式: 湛紫,文禹豪,夏修建,等.高温水泥浆稠化时间影响因素分析与预测模型研究[J].石油与天然气化工,2024,53(4):100-105.

CHEN Z, WEN Y H, XIA X J, et al. Influencing factors analysis and prediction model study of high-temperature cement slurry thickening time[J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2024, 53(4): 100-105.

Influencing factors analysis and prediction model study of high-temperature cement slurry thickening time

CHEN Zi¹, WEN Yuhao^{2,3}, XIA Xiujuan³, XU Pu³, LIU Huiting³, ZHANG Zhengrong^{2,3}

1. University of Paris-Saclay, Paris, France; 2. China University of Petroleum (Beijing), Beijing, China;

3. CNPC Engineering Technology R&D Company Limited, Beijing, China

Abstract: **Objective** This study addresses challenges associated with controlling the thickening time of cement slurries at elevated temperatures (exceeding 120 °C), including prolonged experimental periods and difficulties in predicting thickening times. **Methods** This article explores the factors influencing the thickening time of cement slurries at high temperatures through fitting methods and constructs a predictive model develops a predictive model utilizing grey theory. **Results** The findings indicate that the thickening time of cement slurries is primarily influenced by the dosage of retarders, curing conditions, and specific additives, with varying degrees of impact under different conditions. The grey model used to predict the thickening time for the first time exhibits high accuracy and is suitable for small samples. **Conclusion** The sensitivity analysis of the factors affecting the thickening time at high temperatures and the establishment of a predictive model significantly reduce the cost of cement slurry thickening experiments and provide a theoretical basis for the formulation of thickening times in high-temperature cement slurries.

Keywords: Oil well cement; thickening time; sensitivity of influencing factors; prediction model; grey model

随着我国油气资源勘探与开发的不断深入,深井与超深井的安全开发在高温高压环境下面临着严峻挑战^[1]。尤其是固井工作的质量难以保证,使得对超高温固井水泥浆技术提出了更高的要求^[2]。水泥浆的稠化时间是决定固井质量的关键因素,其早期凝固可能会导致“插旗杆”现象,而迟缓凝固则可能严重影响井的生产效率及使用寿命^[3-4]。为了更好地实现对水泥浆稠化时间的调节,目前已开发出了更为高效的抗高温缓凝剂,其主要通过调节

缓凝剂的掺量来控制水泥浆的稠化时间。郭鹏飞等^[5]研究探讨了不同缓凝剂对水泥浆初终凝时间的影响;王燕等^[6]评估了不同添加剂对水泥浆凝结时间的作用,并提出了不同氧化物对水泥浆稠化时间及性能的影响差异;夏修建等^[7]研究了 AMPS 类缓凝剂在不同养护条件下稠化时间的变化,并提出了简单的稠化时间变化规律。以上研究,揭示了影响水泥浆稠化时间的因素,其中不可控制因素包括流体污染、地层失液、不可预的温度变化和泵送过程中

作者简介: 湛紫,2000年生,就读于巴黎萨克雷大学化学专业。E-mail: zi.chen@universite-paris-saclay.fr

通信作者: 文禹豪,2000年生,硕士,主要从事固井水泥浆的研究工作。E-mail: 2022215141@student.cup.edu.cn

的意外停机;可控因素包括缓凝剂的加量、养护条件和外加剂,但尚未提供关于这些因素敏感性的定量分析。此外,由于高温环境下水泥浆稠化时间的不可预测性,目前鲜有对其预测模型的研究。Mofunlewi 等^[8]在其研究中采用多元回归方法,根据压力和温度预测水泥浆的稠化时间,但未将缓凝剂的加量纳入考虑,这可能影响模型的准确性。Umeokafor 等^[9]同样使用多元回归方法,在 14~110℃范围内,以温度、缓凝剂加量和增强剂加量作为变量进行预测,但此模型的局限性在于未考虑有限温度范围对预测结果的潜在影响。Shamsan 等^[10]采用神经网络模型,将循环温度等多个因素作为输入变量,此举虽然提高了预测的精确性,但在数据选择上存在限制,如未考虑外加剂种类的多样性及其影响,且数据量较少,可能会导致模型学习效率不佳。针对以上问题,本研究深入探讨了多种因素对水泥浆高温稠化时间的影响,并进行了影响因素敏感性的定量分析。通过结合已有的灰色模型,提出了一个改进的预测模型,旨在更准确地预测不同条件下的水泥浆稠化时间。这一模型的开发不仅填补了现有研究的空白,也为实际固井操作提供了强有力的理论支持,有助于优化固井工艺,确保油井的安全及高效施工。

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

实验试剂:嘉华 G 级水泥、高温增强材料 DRB-2S、醛酮分散剂 DRS-1S、聚羧酸分散剂 DRS-1S、降失水剂 DRF-1S、降失水剂 DRF-2L、降失水剂 DRF-3L、缓凝剂选用中国石油集团工程技术有限公司提供的高温缓凝剂 R20(R20 为一种新型 AMPS 缓凝剂,具有耐高温、缓凝效果好的优点)、特殊外加剂选择高温稳定剂 DRK-3S 和 L58、北京市饮用自来水等。

实验仪器:OWC-2000D 型瓦楞搅拌机、Chandler 8040D 型高温高压稠化仪、Chandler 7357 型高温高压养护釜、DFC-2015L 型油井水泥石力学试验机、高温高压失水仪等。

1.2 实验方法

1) 缓凝剂配伍性实验。将配制好的水泥浆装

入常压稠化仪中养护 30 min,温度设置为 90℃。养护结束后,用高温高压失水仪进行水泥浆静失水实验,温度设置为 90℃,并记录 7.5 min 时的失液量。

2) 水泥浆稠化实验。将配制好的水泥浆倒入稠化浆杯中进行高温高压稠化实验,并记录水泥浆稠化达到 70 BC 时的稠化时间。

本研究的实验思路按水泥浆稠化时间影响因素分为 3 部分:研究温度变化、缓凝剂加量变化和特殊外加剂含量的变化对水泥浆稠化时间的影响。

3) 灰色模型预测方法。通过比较不同深度学习模型的适用范围,最终选用灰色模型进行水泥浆稠化时间预测分析。

2 结果与讨论

对于深层及超深层油井,水泥浆循环过程中的稠化时间与水泥环的力学性能对井的整体寿命起着关键作用。高温高压环境是深层及超深层井的典型特征,为防止高温高压条件下水泥浆的过早水化,通常需在水泥浆中添加抗高温缓凝剂,以控制其在特定时间内完成终凝^[11]。同时,为减弱高温高压对水泥环的力学性能及密封性能的不良影响,常在水泥浆中加入特殊的高温抗衰退材料^[12]。这些添加剂不仅会对水泥浆的稠化时间产生显著影响,还可能引起水泥浆的异常凝结^[13]。此外,在现场施工中,压力与温度通常呈线性关系,即实验室养护实验中,压力通常设置为温度的一半。为了控制实验变量,消除压力变化对水泥浆稠化时间的影响,本研究选择 80 MPa 作为养护压力。基于以上分析,以温度、缓凝剂的加量及特殊材料的加量为变量,探究其对水泥浆稠化时间的影响。

实验配方有 3 种:配方 1 为嘉华 G 级水泥+35%(w)高温增强材料 DRB-2S(80 μm)+3%(w)高温降失水剂 DRF-1S+1%(w)醛酮分散剂 DRS-2S+0.6%(w)聚羧酸分散剂 DRS-2S+0.6%(w)高温稳定剂 DRK-3S+(0~2%, w)缓凝剂 R20+(54%~56%, w)水;配方 2 为嘉华 G 级水泥+40%(w)高温增强材料 DRB-2S(80 μm)+3.5%(w)高温降失水剂 DRF-1S+1%(w)醛酮分散剂 DRS-1S+0.6%(w)聚羧酸分散剂 DRS-2S+0.8%(w)高温稳定剂 DRK-4S(CD)+3%(w)高温稳定剂 L58+2%(w)高温缓凝剂 R20+(54%~58%,

w)水; 配方 3 为嘉华 G 级水泥+2%(w)缓凝剂 R20+4%(w)降失水剂+38%(w)水。

为了和现场施工保持一致, 通过改变水的加量来调节水泥浆密度为 1.90 g/cm³。

2.1 缓凝剂配伍性校核

降失水剂、分散剂和缓凝剂是工程中常用于调节水泥浆性能的主要外加剂。由于聚合物缓凝剂与降失水剂具有相似的作用机理, 若分子结构设计不合理, 二者之间可能存在竞争吸附, 从而严重影响水泥浆体系的降失水性能^[14]。所以在实验前对 R20 缓凝剂的配伍性, 使用配方 3 进行了实验校核, 结果见表 1。

| 表 1 R20 与常用高温固井降失水剂的配伍性评价结果 | | | | |
|-----------------------------|-------------|-------------|-------------|-----------------------|
| w(R20)/% | w(DRF-1S)/% | w(DRF-2L)/% | w(DRH-3L)/% | FL _{API} /mL |
| 0 | 4 | | | 40 |
| 1 | 4 | | | 42 |
| 2 | 4 | | | 44 |
| 0 | | 4 | | 42 |
| 1 | | 4 | | 包心 |
| 2 | | 4 | | 包心 |
| 0 | | | 4 | 38 |
| 1 | | | 4 | 38 |
| 2 | | | 4 | 36 |

从表 1 可看出, 除 DRF-2L 出现部分包心情况外, 其余配方随着缓凝剂 R20 用量的增加, 水泥浆 API 滤失量基本保持不变(小于 50 mL), 说明缓凝剂 R20 与降失剂(DRH-1S、DRF-2L、DRF-3L)均具有良好的配伍性能。为了排除异常凝固和水泥浆失水等因素对水泥浆稠化时间的影响, 本研究选用 DRF-1S 作为降失水剂。

2.2 影响因素分析

2.2.1 温度

温度主要是通过影响水化反应速度来影响水泥浆的稠化时间。图 1 所示为使用配方 1 在不同养护温度条件下, 缓凝剂加量为 1.5%(w, 下同)的水泥浆的稠化时间曲线, 拟合曲线使用幂函数。

从图 1 可看出: 在 150 ℃ 以下时, 温度越高, 稠化时间越短, 这与前人的结果相同; 且温度越高, 稠化时间的变化趋势会趋于平缓。这是因为, 在缓凝

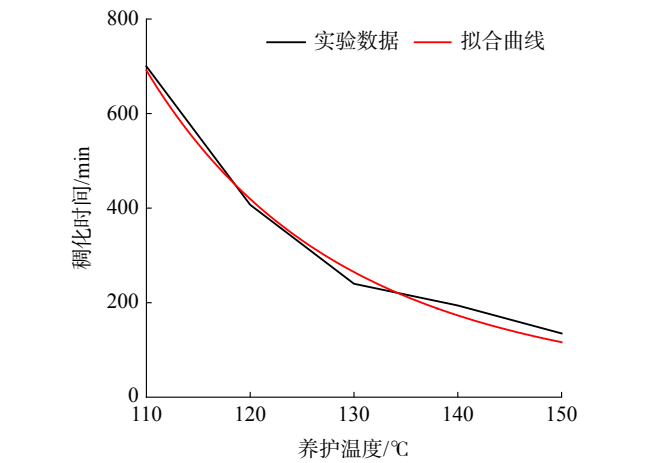


图 1 1.5% 的缓凝剂水泥浆稠化时间(配方 1)

剂加量为 1.5% 且温度趋近于 150 ℃ 时, 水泥浆中的水化反应与火山灰反应更加剧烈, 而该配方中的促水化离子(Al³⁺)的加量显然无法支撑该温度下的快速水化反应和火山灰反应。所以, 随着温度的升高, 水泥浆稠化曲线的变化速度会逐渐下降, 也就是稠化时间对温度变化的敏感性逐渐下降。

图 2 所示为使用配方 1 在不同养护温度条件下, 缓凝剂加量为 2% 的水泥浆的稠化时间曲线, 拟合曲线使用 Lorentz 函数。

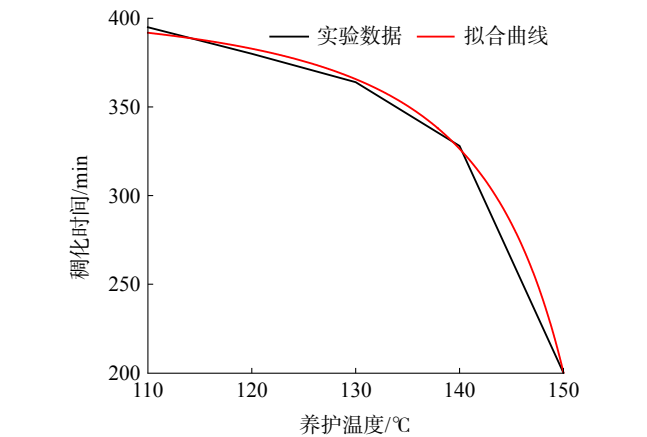


图 2 2% 的缓凝剂水泥浆稠化时间(配方 1)

从图 2 可看出, 随着缓凝剂加量的增加, 水泥浆的稠化时间呈下降趋势, 其下降程度与图 1 所示的完全相反, 即温度小于 150 ℃ 时, 随着温度的升高, 稠化时间变化趋势变快。这可能是因为更多的缓凝剂 R20 在水泥熟料表面生成了更多的螯合物, 有了更强的“缓凝剂阻碍”作用, 温度则变成了主要的影响因素。

由图 1 和图 2 可知, 不同的缓凝剂加量变化趋

势完全相反。这可能是因为在 1.5%~2.0% 之间存在一个最佳敏感度的加量值(见 图 3)。在此加量之下时,温度的升高会提升缓凝剂加量对稠化时间的敏感度;在此加量之上时,缓凝剂加量已经超过了该最佳敏感度加量,所以温度的敏感性慢慢增强。当需要调节水泥浆稠化时间时,可以利用该最佳敏感度加量值结合养护调节,实现对稠化时间的精确调节,从而大大缩短稠化时间。

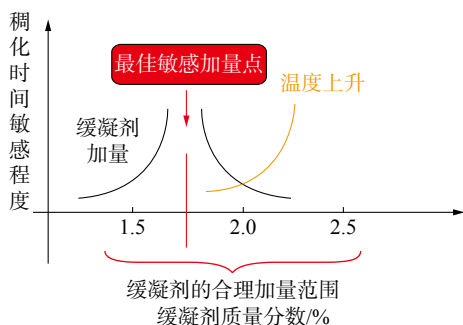


图 3 R20 最佳敏感度加量示意图

图 4 所示为不同养护温度条件下,使用配方 2、缓凝剂加量为 2% 时水泥浆的稠化时间曲线,拟合曲线使用 Boltzmann 函数。

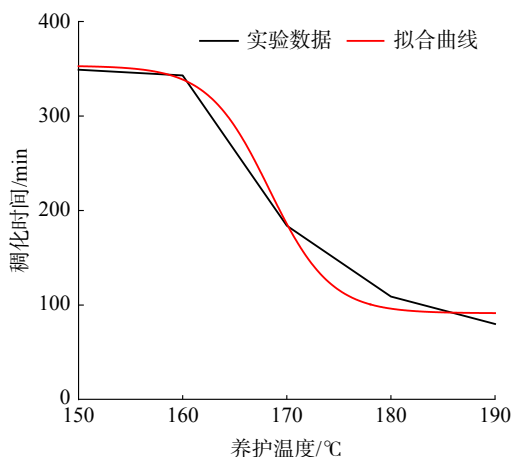


图 4 2% 的缓凝剂水泥浆稠化时间(配方 2)

从图 4 可看出,养护温度大于 150℃ 且有足够的火山灰材料加入时,水泥浆稠化曲线呈现 S 形。稠化曲线的变化经历了 2 个过程,即:在 150~170℃ 时,随着温度升高,稠化时间曲线急速下降;在 170~190℃ 时,稠化时间变化平稳。这说明该配方在 150℃ 以上时,影响稠化时间的主要因素不同;在 150~170℃ 时,温度为主要影响因素;在 170~190℃ 时,缓凝剂加量为主要影响因素。出现此现象,可

能是因为温度在 150~170℃ 时,2% 的缓凝剂加量提供了足够多的螯合物附着,使温度成为主要影响因素;随着温度的升高,在温度大于 170℃ 时,水泥浆的水化反应进入下一个阶段,此时需要消耗更多的 Al^{3+} ,但配方 2 并没有提供足够的 Al^{3+} 占比(质量分数比),所以,此时温度的敏感性逐渐降低。

2.2.2 缓凝剂加量

缓凝剂主要是通过增加熟料表面的螯合物来延缓水化反应,从而影响水泥浆的稠化时间。图 5 所示为在温度为 130℃、压力为 80 MPa 的养护条件下,使用配方 1 通过改变缓凝剂加量来改变水泥浆稠化时间的变化曲线,拟合函数为线性函数。

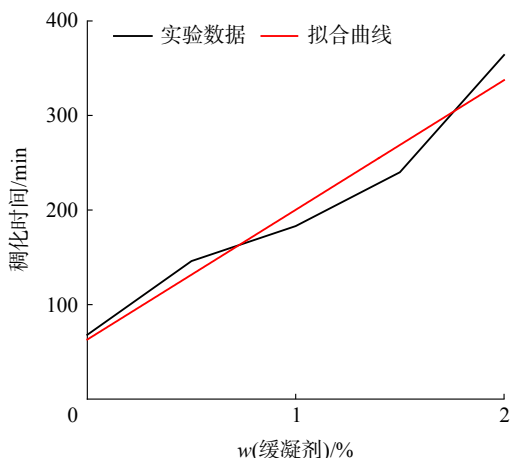


图 5 不同缓凝剂加量下稠化曲线的变化

从图 5 可看出,随着缓凝剂加量的增加,水泥浆稠化时间逐步增加,且基本呈现线性变化趋势,浆体也没有出现包心的情况。该近似线性的变化趋势说明了在 130℃、80 MPa 的条件下,缓凝剂 DRH-3L 的质量分数在 0~2% 的范围内都是合理可行的,并且不会出现异常凝结的现象。如果需要获得更长的稠化时间,可以适当增加缓凝剂加量。在该温度下,DRH-3L 有着优良的施工性能,还可以通过稠化曲线的规律实现对水泥浆稠化时间的精确调节。

2.2.3 高温防衰退材料

特殊材料的加入主要依靠改变 Al^{3+} 占比来影响稠化时间,表 2 所列为在温度为 130℃、压力为 80 MPa 的养护条件下,改变防高温衰退材料加量后水泥浆的稠化时间。

从表 2 可看出,高温稳定剂的加入显著提高了水泥浆的稠化时间。高温稳定剂 DRK-4S 中含有

表 2 不同水泥浆配方的稠化时间对比

| 配方 | 特殊材料 | 稠化时间/min |
|-----|--|----------|
| 配方1 | 35%(w)高温增强材料DRB-2S+ | 200 |
| | 0.6%(w)高温稳定剂DRK-3S | |
| 配方2 | 40%(w)高温增强材料DRB-2S+ | 349 |
| | 0.8%(w)高温稳定剂DRK-4S(CD)+ 3%(w)高温稳定剂L58 | |

Al³⁺, 可以明显缩短水泥浆的稠化时间。该配方中 Al³⁺ 的含量虽然提升了, 但由于高温稳定剂 L58 的加入(有机材料), Al³⁺ 的含量降低, 所以, 少量 (3.8%, w) 的有机材料外掺料延长了 75% 的稠化时间。因此, 在现场工程施工过程中, 不能忽略微量外掺料对水泥浆稠化性能的影响。

2.3 水泥浆稠化时间预测模型

由于水泥浆在高温条件下的稠化时间预测既耗时又成本高昂, 且变化规律复杂。因此, 迫切需要一种预测方法来精确预测水泥浆在特定条件下的稠化时间。目前, 已有多种深度学习模型被应用于水泥混凝土行业, 用于预测水泥石的性能^[15-16]。其中, 多元回归和神经网络是当前预测水泥浆稠化时间的主流方法。这些模型通常具有较高的预测精度, 但仍存在一些不足。例如, 在多元回归算法中, 需要同时处理多个变量, 这可能导致模型复杂度增加和计算成本提高。而神经网络模型在处理非线性关系方面表现出色, 但其对数据的要求较高, 且模型训练和调优过程较为复杂。基于此, 开发一种既准确又经济的水泥浆稠化时间预测方法, 对于优化水泥浆的使用和提高施工效率具有重要意义。

灰色模型为深度学习模型中的一个主要模型^[17]。灰色系统理论的创立源于 20 世纪 80 年代。灰色数列预测是指利用动态 GM 模型, 对系统的时间数列进行数量大小的预测, 即对系统的主行为特征或某项指标, 发展变化到未来特定时刻出现的数值进行预测。可以用来解决“小样本、贫信息”数据的数理统计方法, 具有少数据建模的优点^[18]。

本研究使用 GM(1,1)模型, 具体建模步骤如下:

1) 对数据进行无量纲处理。

2) 确定系统的特征序列和原始序列。

以水泥浆稠化时间为特征数据序列: $X_1^{(0)} = (x_1^{(0)}(1), x_1^{(0)}(2), \cdots, x_1^{(0)}(n))$ 。

由于水泥浆稠化时间影响因素的特殊性, 所以在建模时给定控制变量, 因此不设置系统相关因素序列。

3) 计算 1 阶累加序列。令 $X_1^{(0)}$ 的 1-AGO 序列为 $X_1^{(1)}$, 其中 $X_1^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k x_1^{(0)}(i), (i = 1, 2, \cdots, n)$ 。

4) 计算紧邻均值序列。生成 $X_1^{(1)}$ 的紧邻均值序列 $Z_1^{(1)}$, 其中 $Z_1^{(1)}(k) = \frac{1}{2}[X_1^{(1)}(k) + X_1^{(1)}(k-1)], k = 2, 3, \cdots, n$, 称 $x_1^{(0)}(k) + aZ_1^{(1)}(k) = b$ 为 GM(1, 1) 模型。

5) 确定矩阵 B 和 Y , 计算参数 a 和 u , 计算模拟值。

令 $B = \begin{bmatrix} -Z_1^{(1)}(2) \\ -Z_1^{(1)}(3) \\ \vdots \\ -Z_1^{(1)}(4) \end{bmatrix}$ 和 $Y = \begin{bmatrix} x_1^{(0)}(2) \\ x_1^{(0)}(3) \\ \vdots \\ x_1^{(0)}(n) \end{bmatrix}$

则该模型可以表示为: $Y = B\alpha$
求解微分方程: $\alpha = (B^T B)^{-1} B^T Y$

6) 还原到原始数据。累减还原式为 $\hat{x}_1^{(0)}(k+1) = \hat{x}_1^{(1)}(k+1) - \hat{x}_1^{(1)}(k)$ 。

对相同缓凝剂加量下的水泥浆稠化时间做出预测分析, 以稠化时间作为特征序列, 养护温度作为时间序列, 预测结果如表 3 所列; 对不同缓凝剂加量下的水泥浆稠化时间做出预测分析, 以稠化时间作为特征序列, 缓凝剂加量作为时间序列, 预测

表 3 3 组相同缓凝剂加量下水泥浆稠化时间预测

| 配方 | w(缓凝剂) /% | 温度/ ℃ | 稠化时 间/min | 预测稠化 时间/min | 相对 误差/% |
|-----|--------------|----------|--------------|----------------|------------|
| 配方1 | 1.5 | 110 | 702 | 702 | 0 |
| | | 120 | 407 | 400 | 1.7 |
| | | 130 | 240 | 244 | 0.8 |
| | | 140 | 194 | 195 | 0.5 |
| | | 150 | 135 | 143 | 5.0 |
| | 2.0 | 110 | 395 | 395 | 0 |
| | | 120 | 380 | 371 | 2.3 |
| | | 130 | 364 | 373 | 2.4 |
| | | 140 | 328 | 312 | 5.0 |
| | | 150 | 200 | 214 | 7.0 |
| 配方2 | 2.0 | 150 | 349 | 349 | 0 |
| | | 160 | 343 | 332 | 3.0 |
| | | 170 | 184 | 202 | 9.0 |
| | | 180 | 109 | 120 | 10.0 |
| | | 190 | 81 | 85 | 5.0 |

结果如表 4 所列; 表 5 所列为灰色模型精度判断标准。

表 4 不同缓凝剂加量下水泥浆稠化时间的预测

| 配方 | w(缓凝剂)/% | 温度/ ℃ | 稠化时间/ min | 预测稠化 时间/min | 相对 误差/% |
|-----|----------|----------|--------------|----------------|------------|
| 配方1 | 0 | 130 | 68 | 68 | 0 |
| | 0.5 | 130 | 146 | 131 | 10 |
| | 1.0 | 130 | 183 | 181 | 1 |
| | 1.5 | 130 | 240 | 250 | 4 |
| | 2.0 | 130 | 364 | 346 | 5 |

表 5 灰色模型精度判断标准

| 级别 | 相对误差 | 关联度 |
|----|------|-----|
| 一级 | 0.01 | 0.9 |
| 二级 | 0.05 | 0.8 |
| 三级 | 0.10 | 0.7 |
| 四级 | 0.20 | 0.6 |

从表 3、表 4 和表 5 可看出, 每个数据使用灰色模型的拟合结果相对误差均在 10% 以内, 均处于三级标准, 说明预测结果精准。且灰色模型适用于水泥浆稠化时间的预测, 为水泥浆稠化时间的调节节省了时间, 并为现场施工提供了理论指导。由于在使用灰色模型对水泥浆稠化时间进行预测时, 要考虑温度对水化反应和火山灰反应的特殊影响, 所以一般选取 110~150 ℃、150~180 ℃ 和 180~240 ℃ 为 3 个预测温度区间, 以避免跨温度区间预测拟合。

3 结论与建议

针对不同影响因素下的水泥浆高温稠化时间的变化研究, 主要得到以下结论与建议。

- 1) 在 110~150 ℃、缓凝剂 R20 的质量分数为 1.5%~2.0% 时, 存在一个缓凝剂加量的最佳敏感点, 加量在大于或者小于该值时, 温度的影响程度不同。
- 2) 相同温度条件下, 在缓凝剂加量的合理范围内, 随着缓凝剂加量的增加, 水泥浆稠化时间呈线性上升趋势。
- 3) 特殊外加剂的加入会对浆体状态和稠化时间造成影响, 且有机材料的摄入量会增加水泥浆的稠化, 对于 Al^{3+} 来说, 摄入量占比远比摄入量对稠化时间有更大的影响。
- 4) 灰色预测模型对小范围内的水泥浆稠化时

间有着较高的适配性, 预测数据的相对误差均小于 10%; 但是由于水泥水化的特殊性, 在预测时需要划分温度范围。

5) 由于水泥浆高温稠化实验的特殊性, 难以获得大量的实验数据量。因此, 只能用灰色模型对局部范围的稠化时间预测进行建模, 如果想得到更多的大范围精确建模, 不仅需对实验的较大数据量提出要求, 也需对外加剂的适配温度和性能提出更高的要求; 当外加材料的火山灰活性给出定量分析时, 可以用参数表示不同火山灰活性的组分对水泥浆稠化时间的影响, 此时矿物外掺料便成了无关变量, 那么不同因素对水泥浆稠化时间的影响因素敏感性定量分析将会得到更精确的结果。

参 考 文 献

- [1] 苏义脑, 路保平, 刘岩生, 等. 中国陆上深井超深井钻井技术现状及攻关建议[J]. 石油钻采工艺, 2020, 42(5): 527-542.
- [2] 刘硕琼, 齐奉忠. 中国石油固井面临的挑战及攻关方向[J]. 石油钻探技术, 2013, 41(6): 6-11.
- [3] 于永金, 靳建洲, 齐奉忠. 功能性固井工作液研究进展[J]. 钻井液与完井液, 2016, 33(4): 1-7.
- [4] 于永金, 丁志伟, 张弛, 等. 抗循环温度 210℃ 超高温固井水泥浆[J]. 钻井液与完井液, 2019, 36(3): 349-354.
- [5] 郭鹏飞, 余燕华, 黄永毅. 不同缓凝剂的缓凝效果及其对水泥水化的影响[J]. 新型建筑材料, 2022, 49(4): 22-25.
- [6] 王燕, 赵勇康. 影响水泥凝结时间的因素分析[J]. 水泥, 2023(8): 17-18.
- [7] 夏修建, 于永金, 陈洲洋, 等. 一种新型超高温固井水泥浆缓凝剂[J]. 天然气工业, 2021, 41(9): 98-104.
- [8] MOFUNLEWI S S, JOEL O, APPAH D, et al. Synergistic effect of temperature and pressure on cement thickening time[J]. International Journal of Engineering Trends and Technology, 2019, 67(4): 59-63.
- [9] UMEOKAFOR C V, JOEL O F. Modeling of cement thickening time at high temperatures with different retarder concentrations[C]//SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition. SPE, 2010: SPE-136973-MS. <https://doi.org/10.2118/136973-MS>.
- [10] SHAMSAN A, JIMENEZ W C, JANDHYALA S R K. Application of Artificial Intelligence in Predicting Cement Thickening Time[C]//Offshore Technology Conference. OTC, 2024: D021S024R001. <https://doi.org/10.4043/35425-MS>.
- [11] 于永金, 薛毓铖, 夏修建, 等. 一种抗 240 ℃ 超高温固井缓凝剂的研发与评价[J]. 天然气工业, 2023, 43(3): 107-112.

(下转第 110 页)