

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.046



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



地质聚合物砂浆凝结过程的超声波监测

龙士国, 陈劲杰, 李日进, 周进毅, 徐继同

(湘潭大学土木工程学院, 湖南湘潭 411105)

摘要:地质聚合物是一种绿色低碳胶凝材料,研究其凝结过程对于工程应用具有重要意义。为了研究地质聚合物凝结的机理和规律,对比不同超声波方法的特点,采用超声透射法、超声反射法和超声导波法,对放置在特制装置中的 5 组不同矿粉比(矿渣:粉煤灰)的地质聚合物砂浆同时进行实时监测。通过分析不同方法得到的声波数据,利用各方法都适用的声波参数——能量接收比 E_n 对地质聚合物砂浆的初、终凝时间进行表征,并用贯入阻力法的结果进行验证。结果表明:地质聚合物砂浆的凝结速度会随着矿粉比的减小而变慢;透射法可以实现对砂浆的全程监测,其判定初凝时间的平均误差为 7.9%,判定终凝时间的平均误差为 6.6%;反射法判定砂浆初凝时间准确度高,其平均误差为 2.8%;导波法可以全程监测凝结过程,其判定初凝时间的平均误差为 3.3%,判定终凝时间的平均误差为 2.5%。3 种方法中,导波法更适用于监测地质聚合物砂浆的凝结过程。

关键词:地质聚合物;凝结时间;超声透射法;超声反射法;超声导波法;能量接收比

中图分类号: TU525.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2025)03-0210-08

Ultrasonic monitoring of coagulation process of geopolymers mortar

LONG Shiguo, CHEN Jinjie, LI Rijin, ZHOU Jinyi, XU Jitong

(College of Civil Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105, Hunan, P. R. China)

Abstract: Geopolymer is a kind of green and low-carbon cementing material, and the study of the cementation process of geopolymer is essential for engineering application. In order to investigate the mechanism of geopolymer cementation, five groups of geopolymer mortars with different mixture proportions (slag: fly ash) were placed in a special device and monitored them in real time by three ultrasonic inspection methods. The initial and final setting times of the geopolymer mortars were characterized by energy reception ratios and verified with the results of the penetration resistance method. The results demonstrated that the setting rate of the geopolymer mortar slows down with the decrease of mixture proportion. The ultrasonic transmission method could realized the whole monitoring of mortar. The mean error of initial setting time and final setting time of ultrasonic transmission method was 7.9% and 6.6% respectively. The reflection method has high accuracy in determining the initial setting time of the mortar, and its mean error was 2.8%. The ultrasonic guided wave method could realise the whole monitoring of the mortar. The mean error of the initial setting time and final setting time of ultrasonic transmission method was 3.3% and 2.5% respectively. Among the three methods, ultrasonic guided wave method is more suitable for monitoring the coagulation process of geopolymer mortar.

收稿日期: 2022-12-06

基金项目: 国家自然科学基金(11172258)

作者简介: 龙士国(1972-),男,教授,博士生导师,主要从事土木工程质量与安全评价技术和装备研究, E-mail: longsg@xtu.edu.cn。

Received: 2022-12-06

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 11172258).

Author brief: LONG Shiguo (1972-), professor, doctoral supervisor, main research interests: civil engineering quality and safety evaluation technology and equipment, E-mail: longsg@xtu.edu.cn.

Keywords: geopolymer; setting time; ultrasonic transmission method; ultrasonic reflection method; ultrasonic guided wave method; energy receiving ratio

地质聚合物是以含有硅铝酸盐活性组分的工业固体废弃物为前驱体,在碱激发剂的作用下制备而成的一种无机胶凝材料^[1]。其中,前驱体主要包括矿渣、粉煤灰和偏高岭土等,碱激发剂主要是NaOH、Na₂SiO₃和KOH等单一激发剂或复合激发剂^[2-3]。与传统硅酸盐水泥相比,地质聚合物不仅节能减排,还能循环利用工业废弃物,因此,是一种极具应用前景的绿色低碳胶凝材料。

目前学者们对地质聚合物的研究主要集中在地质聚合物混凝土GPC的各种性能及其前驱体原料和碱激发剂的配比上。研究表明,前驱体原料的差异可以决定GPC的不同性能,如力学性能、耐高温性能和耐化学侵蚀性等^[4-6]。在前驱体原料的配比上,一些学者的研究表明,粉煤灰-矿渣基GPC比单一基底GPC力学性能更好^[7-8]。在激发剂的配比上,一些学者的研究表明,在碱类激发剂中,Na₂SiO₃和NaOH混合后的溶液激发效果好且质量损失低^[9-10]。研究表明,地质聚合物选用粉煤灰-矿渣基,并用Na₂SiO₃和NaOH作为混合激发剂,是当前较为主流且性能较好的搭配。

学者们虽然对地质聚合物进行了充分的研究,并储备了充足的理论和经验,但对于其凝结过程方面的试验及研究还不够,而早期凝结过程的状态对于后期力学性能发展、施工性能以及结构使用寿命周期等方面具有不可忽视的影响,因此,有必要对地质聚合物的凝结过程展开深入研究。常规的监测方法,如贯入阻力法等通常会对待测物造成损伤,且较为依赖操作人员的熟练度,而超声波监测法具有不损伤结构、测量精度高、覆盖范围广、数据采集便捷等优点^[11],可以通过分析超声波在介质中的参数变化,进而研究待测物质的性能变化^[12]。

目前,大量学者利用超声波对拌和物进行监测,得到了大量有价值的研究成果。一些学者通过使用超声透射法,分析超声波频谱变化随拌和物龄期发展的规律,研究超声波在试样中传播速度的变化,得到了混凝土的凝结时间节点^[13-15]。一些学者通过使用超声反射法监测了水泥的凝结过程,并基于得到的数据对水泥的水化进行了定性描述^[16-17]。崔博等^[18]通过超声透射法和超声反射法,用能量对大坝混凝土的凝结过程进行表征,并通过L-M算法联合了两种方法,使监测方法更为精准。还有一些学者通过超声导波法监测了混凝土的凝结过程,建

立了超声波信号的衰减与混凝土凝结过程之间的关系,研究了砂浆和混凝土凝结过程的声学特性^[19-20]。

学者们证实了多种超声波监测方法对拌和物凝结过程进行实时监测的可行性,但由于原理的差异,不同的方法会导致其监测拌和物凝结过程不同时期的效果各有优劣。若能将多种超声波方法联合起来对拌和物凝结过程进行连续监测,同时用贯入阻力试验结果进行验证,将得到更为合理、准确的结果。贯入阻力试验的对象是砂浆,同样也可将砂浆作为超声波方法的研究对象。鉴于此,笔者使用超声透射法、超声反射法和超声导波法,对不同配合比的地质聚合物砂浆凝结过程进行实时监测,并同时进行了贯入阻力试验,分析不同方法下时域图随地质聚合物砂浆凝结过程的变化规律,并将凝结过程中最为敏感的幅值变化转化为能量变化,更清楚地表征砂浆凝结过程中的状态,分析不同前驱体原料的比例对砂浆凝结过程的影响,对比3种方法对于监测凝结过程的优势与不足。

1 试验方案

1.1 试验材料

试验选用的地质聚合物砂浆前驱体原料为S95级矿渣和Ⅱ级粉煤灰,其化学成分见表1,碱激发剂选用NaOH+NaSiO₃,细骨料选用河砂,其细度模数为2.65,表观密度为2 604 kg/m³,吸水率为5.2%,孔隙率为36.2%。

表1 材料的主要化学成分

Table 1 Main chemical composition of the materials

材料	化学成分/%							
	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O	TiO ₂
矿渣	5.01	16.70	35.40	34.40	1.60	1.14		
粉煤灰	0.76	35.80	52.04	2.22	2.63	0.35	1.66	1.35

1.2 配合比设计

研究表明,当碱激发剂掺量为40%、模数为1.2时,其激发效果最佳^[7,21],因此,试验选用模数为1.2的碱激发剂,其调配方法为每100 g Na₂SiO₃溶液添加14.14 g NaOH,其中Na₂SiO₃的原模数为3.31。试验以前驱体原料矿渣和粉煤灰的比值(矿粉比)作为变量参数,设置5个不同的试验组S1~S5,具体配合比设计见表2。

1.3 试验设备

采用超声波装置和特制拌和物监测装置进行

表 2 配合比
Table 2 mix proportion

试验组	配合比/(kg/m ³)						
	细骨料	水	Na ₂ SiO ₃	NaOH	矿渣	粉煤灰	矿粉比
S1	1 600.0	115.0	134.4	26.6	200.0	200.0	5:5
S2	1 600.0	115.0	134.4	26.6	160.0	240.0	4:6
S3	1 600.0	115.0	134.4	26.6	120.0	280.0	3:7
S4	1 600.0	115.0	134.4	26.6	80.0	320.0	2:8
S5	1 600.0	115.0	134.4	26.6	40.0	360.0	1:9

待测拌和物的实时监测试验。超声波装置包括 TH-204 型多功能声波参数检测仪、两对不同的超声波纵波换能器和一对超声波横波换能器。特制拌和物监测装置由聚苯乙烯制成的模具和钢板组成,内部尺寸为 60 mm×80 mm×100 mm,壁厚为 12 mm。在两侧各有一个直径为 50 mm 的圆孔,可以与透射法的纵波换能器良好嵌合。热熔胶具有封闭性好、粘结性强的特点,嵌合处用热熔胶固定,防止漏浆。聚苯乙烯声抗大,可以有效防止超声波经模具传播。

钢板与拌和物声抗差异大,采用钢板作为反射法中换能器与拌和物之间的缓冲材料,用热熔胶将模具与钢板粘结固定,并在钢板上涂抹凡士林,确保与反射法纵波换能器的良好接触。泡沫声抗大且可塑性强,在反射法的横波换能器下垫一块泡沫板,既可以保证换能器与钢板的平整接触,又能消除底部介质导致的超声波信号接收误差。

将导波法中应用的钢筋做成 U 字型,放置于监测装置的对角线上且不与底部钢板接触的位置,使其对透射法及反射法超声波信号接收的影响可以忽略不计。用泡沫及热熔胶将导波法的纵波换能器与钢筋连接固定,使超声波信号在连接处传播的影响可以忽略不计。连接面涂抹适量凡士林,保证换能器与钢筋间超声波的稳定传播。最后将刚拌制好的拌和物放入监测装置中,同时,保证钢筋埋入其中且位置不变,试验装置如图 1 所示。

1.4 试验步骤

为了排除环境因素引起的误差,确保使用的材料在存储时、制备时和试验过程中都在相同的温度,试验开始时在模具表面封上塑料薄膜,每次贯入阻力试验完毕后加盖放回恒温室中,这样可以避免拌和物水化过程中因水分流失造成的干扰。

在新拌砂浆放入监测装置并振捣压实后,即 3 种方法能首次同时稳定检测出超声波数据时为试验开始,后每隔 10 min 测试数据并记录。超声波试验开始时同步进行贯入阻力试验,测定砂浆凝结时间,保证两种试验使用同一批拌制的砂浆,排除因

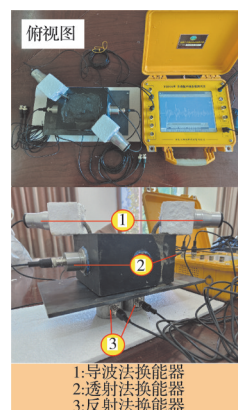


图 1 特制超声波监测设备

Fig. 1 Special ultrasonic monitoring equipment

制备方法导致的误差。当一组砂浆贯入阻力值超过 50 MPa 时,结束同组的超声波试验。

1.5 试验原理

新拌地质聚合物砂浆中的浆体形态会随着地质聚合的反应(地聚反应)而不断改变,这种改变会使新拌砂浆的声抗不断变化,进而使得换能器接收到的声波信号产生变化。纵波可以在固体、液体和气体中传播,因此,透射法采用的纵波可以穿透任一凝结时期的砂浆,实现地质聚合物砂浆全过程变化的直接监测。

超声横波只能在固体中传播,反射法采用的横波难以穿透早期新拌砂浆,发出的大量超声横波会在砂浆和钢板的交界面处被反射,而当浆体内固体结构形成后横波才能穿透,进入砂浆内,可以通过反馈的声学信号立即发现这种变化。

导波法的原理实质是通过监测超声纵波在钢筋中的能量变化实现对拌和物水化过程的监测。随着砂浆的凝结硬化,钢筋与周围浆体间的粘结加强,超声纵波的能量更容易传播到周围砂浆中,导致接收到的监测信号衰减。研究表明^[22],选用 0.1 MHz 的脉冲传输信号能使超声导波法更好地监测拌和物的凝结,因此,本试验选用 0.1 MHz 的脉冲信号。

2 试验结果及分析

2.1 凝结过程时域图分析

拌和物的凝结一般都会先后经历休眠期、凝结期和硬化期 3 个阶段^[18],试验中发现,地质聚合物砂浆的凝结阶段也是如此。其凝结速度会因前驱体原料的不同而有差异,初、终凝时间也会不同,但不同试验组的凝结规律基本相似。以 S3 为例,分别使用 3 种方法得出的时域堆积图如图 2 所示。综合分析不同方法的时域堆积图后,根据不同方法下时域

图波形产生明显变化的时间节点,将其凝结过程划分为3个阶段。

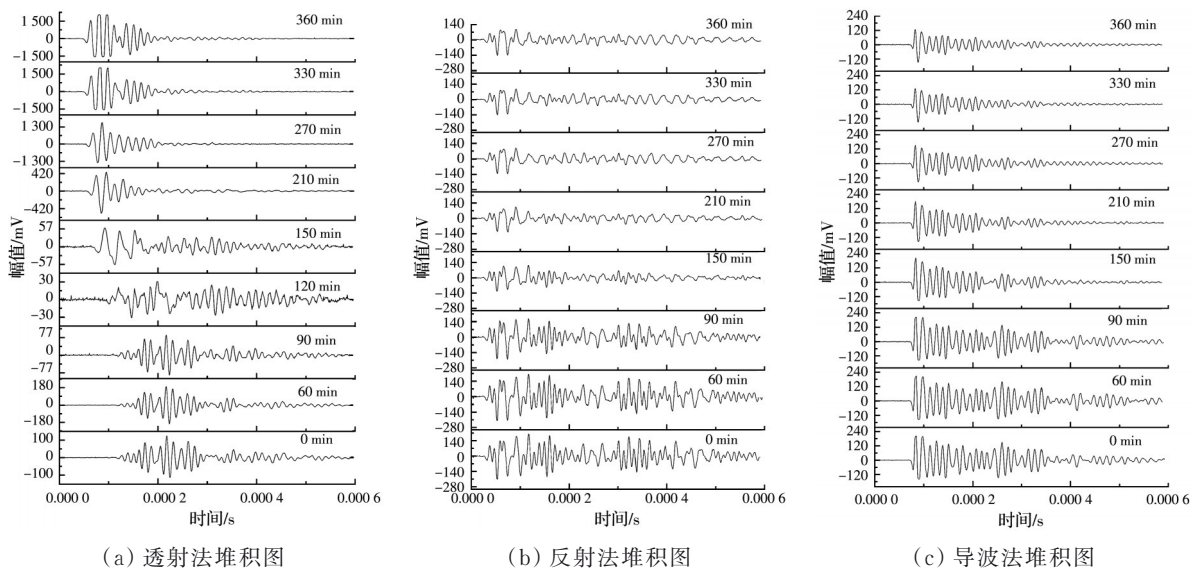


图2 不同方法下S3的时域堆积图

Fig. 2 Time-domain stacking maps of the S3 under different methods

阶段Ⅰ, 0~90 min, 休眠期。由于拌和物刚拌制好, 前驱体原料还未能完全在碱激发剂的作用下完全发生地聚反应, 浆体内固相较少, 且有部分未能在振实过程中分离的气泡附着在颗粒表面。这些气泡会使超声波发生折射和衰减, 从而影响透射法换能器对超声波的接收, 在0 min时透射法的时域图幅值偏小, 而气泡会随着时间逐渐发生失稳破裂^[23], 此阶段透射法时域图的幅值会先缓慢增大。而部分发生地聚反应的物质会使超声波的传播路径变得复杂, 这样的变化会使传播在浆体中的超声波发生折射、反射和衰减, 此阶段透射法时域图的幅值缓慢减小。同时, 反射法的超声横波在钢板与浆体的交界面处被大量反射, 由于钢筋还未与浆体耦合, 导波法的超声纵波很难传播到浆体中, 这两种方法得到的时域图几乎没有变化。

阶段Ⅱ, 90~210 min, 凝结期。此阶段浆体内的粉煤灰和矿渣在碱激发剂的作用下开始发生地聚反应, 分别主要生成水化硅铝酸钠(N-A-S-H)和水化硅铝酸钙(C-A-S-H)两种地质聚合物凝胶, 一部分凝胶凝结硬化, 构成聚合物骨架, 另一部分填满细骨料颗粒间的空隙, 形成团聚体^[24]。此阶段透射法时域图的首波声时值(指接收到首波的时间)和幅值逐渐减小, 波型变得紊乱, 这是由于浆体内部逐渐形成空间网络结构, 超声波传播的路径中液相逐渐减少, 固相逐渐增多, 导致超声波信号衰减、换能器接收超声波的时间变短; 反射法横波时域图的幅值迅速减小, 说明此阶段部分超声横波可以穿透进入浆体内部; 导波法时域图的幅值也迅速减

小, 此时由于钢筋与砂浆开始紧密粘结, 超声纵波可以传播到浆体中。

阶段Ⅲ, 210 min以后, 硬化期。随着地聚反应的进行, 凝胶不断填充骨架间的空隙, 砂浆孔隙率不断下降, 其整体变得更加致密稳定。此阶段透射法时域图的声波幅值随着时间的变化表现为不断增加的趋势, 声时值不再变化; 反射法横波时域图的幅值在此阶段无明显变化, 这是因为砂浆内的固相基本稳定, 反射法换能器接收到的超声横波基本无太大变化; 导波法纵波时域图的幅值在此阶段缓慢减小, 说明超声波透入砂浆的量正在稳定而缓慢地增加, 此阶段砂浆强度正在稳定发展。

2.2 凝结过程能量图变化规律

幅值能用于衡量超声波的能量, 而超声波的能量可以被考虑为监测拌和物凝结状态的特征值^[18]。为进一步体现砂浆的凝结过程, 将幅值的变化转化为能量的变化。随起始时间对幅值的平方值进行数值积分可以确定超声波的能量, 定义单次接收的超声波能量 E 为

$$E = \sum_{i=1}^n A^2(i) \quad (1)$$

式中: n 是单次测试超声波的采样点数, 为 4 096; $A(i)$ 为每个采样点的幅值。

为了能更简洁地反映3种方法的能量变化, 定义能量接收比 E_n 为

$$E_n = \frac{E}{E_{\max}} \quad (2)$$

式中: E_{\max} 为同一种方法在一次试验中处理计算后得到的最大能量。

图 3 为 S3 在凝结过程中 3 种方法接收到的超声波能量变化,其他组地质聚合物砂浆的凝结规律也与其相似。

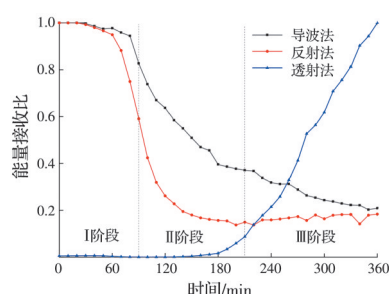


图 3 在不同方法下 S3 的能量接收比图

Fig. 3 Energy reception ratio of S3 under different methods

在 I 阶段,由于气泡和少量地聚反应产生物的影响,透射法的能量接收比呈缓慢地先增加后减小趋势。反射法和导波法能量接收比在此阶段先缓慢减小,然后开始迅速减小,这是由于此阶段砂浆内一直存在缓慢的地聚反应,当地聚反应形成的固相物质附着在铁板或者钢筋上产生部分耦合时,换能器发射的声波能量就会泄漏到浆体内,接收到的能量会降低。

在 II 阶段,由于砂浆内部的复杂反应,透射法能量接收比呈先减小后增加趋势。由于此阶段超声波可以大量透入浆体内部,反射法和导波法的两种能量接收比先迅速下降,而后下降趋势逐渐减小,这是由于此阶段后期砂浆内主要为固相,且固相的生成速率逐渐减小,因此,两种方法接收到的能量值变化逐渐减小,但反射法的横波对这一阶段的变化更加敏感。

在 III 阶段,砂浆内基本由固相组成并稳定发展强度,透射法能量接收比开始稳定而快速地增长。由于砂浆内固相的稳定成形,反射法换能器能够陆续接收到少部分从其内部反射回来的超声横波,因此,反射法能量接收比在此阶段缓慢增长并趋于平稳。由于砂浆致密性的增加,砂浆与钢筋在此阶段的接触也变得紧密,这是一个缓慢的过程,在钢筋中传播的超声纵波透入砂浆的量缓慢增加,导波法能量接收比在此阶段呈现为缓慢减小。

2.3 前驱体原料对凝结过程的影响

2.3.1 贯入阻力试验

根据《水工混凝土试验规程》(SL 352—2020)中的贯入阻力试验方法来研究地质聚合物砂浆的凝结时间。贯入阻力计算如式(3)所示。

$$P = \frac{F}{A} \quad (3)$$

式中: P 为贯入阻力, MPa, 精确至 0.1; F 为贯入深度达 25 mm 时的压力, N; A 为测针面积, mm²。

以贯入阻力为纵坐标、时间为横坐标绘制贯入阻力与时间关系曲线图,当贯入阻力值为 3.5、28 MPa 时,对应的横坐标为初凝时间和终凝时间,如图 4 所示。

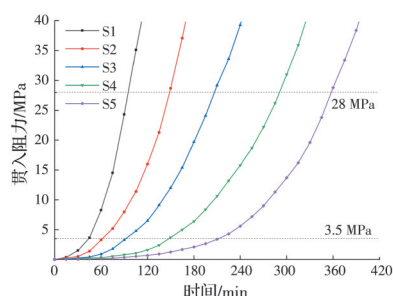


图 4 贯入阻力与时间的关系

Fig. 4 Relation between penetration resistance and time

由图 4 可以看出,随着矿粉比的减小,地质聚合物砂浆初、终凝的时间变长,凝结速率变慢,这是由于地质聚合物的反应产物和凝结硬化特征都与前驱体种类联系紧密。矿渣在碱性溶液中溶解的过程伴随着放热现象,同时,溶解产生的 Ca^{2+} 与碱性溶液中的阴离子反应,产生附加放热现象,使得地质聚合物-砂浆体系温度上升,地聚反应速率增加,促进了地质聚合物砂浆的早强快硬^[21]。而粉煤灰结构表面致密,表面活化能较高,在常温环境下凝结硬化速度缓慢,对地质聚合物砂浆的凝结过程起缓速作用^[25]。表 3 为不同试验组的初、终凝时间。

表 3 各试验组初、终凝时间

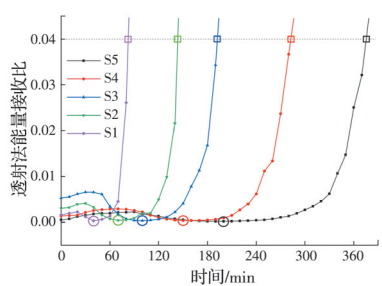
Table 3 Initial and final setting time of each test group

试验组	初凝时间/min	终凝时间/min
S1	38	94
S2	60	148
S3	91	206
S4	146	289
S5	210	357

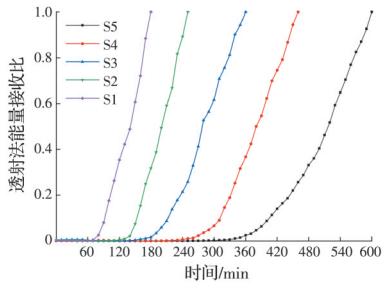
2.3.2 能量图对比分析

图 5 为各组砂浆在不同方法下的能量接收比图。由贯入阻力试验得到的各组砂浆凝结时间可以发现,不论哪种方法都可以清楚地表征前驱体不同原料对砂浆凝结过程的影响。

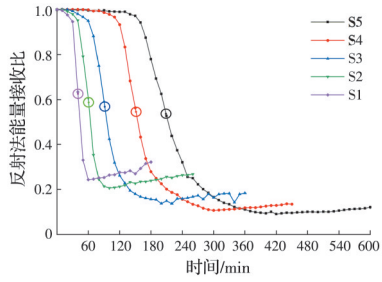
图 5(a)、(b)为局部放大图。分析发现,每组砂浆能量接收比曲线的最小值点对应的时间约为其初凝时间,当能量接收比为 0.04 时,对应的时间节点约为终凝时间,定义这两特征点分别为 T_{\min} 和 $T_{0.04}$ 。此外,矿粉比越小,砂浆初、终凝时间越长,其透射法能量接收比曲线特征点出现的时间越晚。由图 5(b)可知,矿粉比越小,能量接收比曲线斜率开始突然变化的点(下文称突变点)出现得越晚,曲



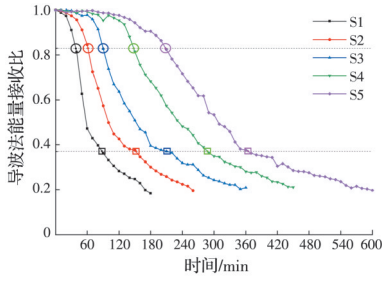
(a) 透射法能量接受比局部放大图



(b) 透射法能量接受比图



(c) 反射法能量接受比图



(d) 导波法能量接受比图

图 5 不同方法下各试验组的能量接受比图

Fig. 5 Energy acceptance ratio of each test group under different methods

线上升的趋势有轻微减缓。

由图 5(c)可以看出,矿粉比越小,反射法能量接收比曲线突变点出现的时间越晚,这意味着初凝时间也随之推迟。最小能量接收比随着矿粉比的减小而变小,这是由于粉煤灰对早期强度的贡献不大,砂浆的强度越高,超声波传播的效果越好,因此,粉煤灰掺量越多,凝结后换能器接收到的能量越低。此外,分析发现,在各组反射法能量接收比曲线中,当能量接收比为最大能量接收比与最小能量接收比之和的 1/2 时,其对应的时间点约为初凝时间,定义此特征点为 T_s 。

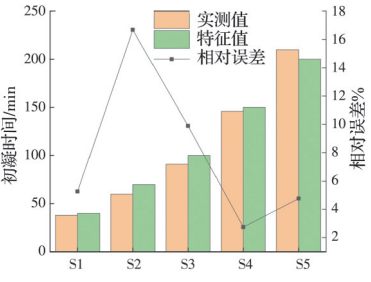
由图 5(d)可以看出,随着矿粉比的减小,导波法能量接收比曲线下降的趋势减缓,这可以反映砂浆凝结速度随着矿粉比的减小而减缓。此外,分析发现,当导波法能量接收比为 0.83 和 0.37 时,对应的时间分别约为砂浆的初凝时间节点和终凝时间节点,定义这两特征点为 $T_{0.83}$ 和 $T_{0.37}$ 。表 4 为不同试验组在不同方法下特征点对应的特征时间。

表 4 各试验组特征时间

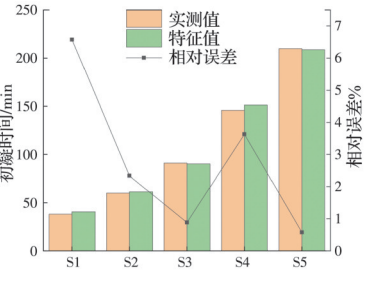
试验组	超声透射法		超声反射法	超声导波法	
	T_{min}/min	$T_{0.04}/\text{min}$	T_s/min	$T_{0.83}/\text{min}$	$T_{0.37}/\text{min}$
S1	40.0	82.4	40.5	40.8	98.3
S2	70.0	163.4	61.4	63.1	143.2
S3	100.0	212.4	90.2	92.6	210.7
S4	150.0	283.0	151.3	149.3	291.4
S5	200.0	375.1	208.8	209.6	362.7

2.4 特征点表征初终凝时间结果分析

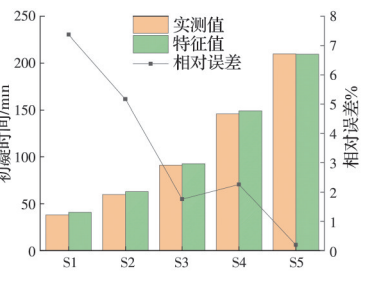
图 6 和图 7 分别为贯入阻力试验得到的各试验组地质聚合物砂浆初、终凝时间与不同特征时间的对比。图 6(a)为透射法的初凝特征时间与实测初凝时间的对比图,其最大误差为 16.7%,最小误差为 2.7%,平均误差为 7.9%;图 6(b)为反射法的初凝特征时间与实测初凝时间的对比图,其最大误差为 6.6%,最小误差为 0.6%,平均误差为 2.8%;图 6(c)为导波法的初凝特征时间与实测初凝时间的对



(a) 透射法表征初凝时间相对误差



(b) 反射法表征初凝时间相对误差



(c) 导波法表征初凝时间相对误差

图 6 初凝特征时间与实测时间对比图

Fig. 6 Comparison of initial setting characteristic time and measured time

比图,其最大误差为7.4%,最小误差为0.2%,平均误差为3.3%;图7(a)为透射法的终凝特征时间与实测终凝时间的对比图,其最大误差为12.3%,最小误差为2.1%,平均误差为6.6%;图7(b)为导波法的终凝特征时间与实测终凝时间的对比图,其最大误差为4.6%,最小误差为0.8%,平均误差为2.5%。

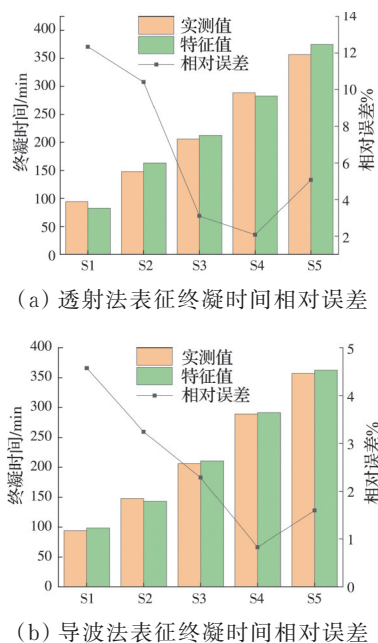


图7 终凝特征时间与实测时间对比图

Fig. 7 Comparison of final setting characteristic time and measured time

从试验结果来看,透射法可以实现对于地质聚合物砂浆凝结过程的全程监测,也有比较明显的特征点,但由于气泡的影响,对初凝时间的表征比其他方法误差大;反射法对监测砂浆的初凝效果最好,但对砂浆的终凝却没有很好的监测效果;导波法可以实现对砂浆凝结过程的全程监测,其曲线变化稳定,对于初、终凝时间的识别准确、方便且误差小。

3 结论

通过特制的拌和物超声波监测装置,用3种方法对前驱体原料不同的5组地质聚合物砂浆进行凝结过程的连续监测,得到以下主要结论:

1)通过对时域堆积图的分析,将地质聚合物砂浆的凝结划分为3个阶段,发现幅值在3种方法中都是较敏感的参数,由此推演出3种方法都可以用能量表征砂浆的凝结过程,并分别揭示不同方法得到的能量曲线随砂浆凝结过程的发展规律。

2)随着前驱体原料矿粉比的减小,地质聚合物砂浆的凝结速度变慢,初、终凝时间延后。在不同

的能量-时间曲线图中,不同试验组砂浆的变化规律一致,但曲线的变化率会随着矿粉比的减小明显降低。

3)超声透射法可以实现对拌和物全过程的监测,但由于气泡的存在,用于确定初凝时间节点存在的误差比其他方法要大;超声反射法用于确定拌和物的初凝时间精准度高,效果好,但在试验中对终凝时间的识别较模糊。

4)超声导波法可以实现对拌和物全过程的监测,相较于其他方法,其能量图的变化趋势稳定。在试验中用导波能量接收比为0.83和0.37对应的时间确定砂浆的初凝和终凝时间准确度高、识别方便,其测得初、终凝时间的平均误差分别为3.3%和2.5%。

5)对3种超声监测方法进行对比发现,不同的方法有不同的适用领域。

参考文献

- [1] 赵人达, 成正清, 文甜, 等. 早龄期低钙粉煤灰基地聚物混凝土拉伸徐变特性[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2019, 41(6):111-117
- ZHAO R D, CHENG Z Q, WEN T, et al. Tensile creep characteristics of early-age low-calcium fly ash-based geopolymer concrete [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2019, 41(6):111-117 (in Chinese)
- [2] VAN DEVENTER J S J, PROVIS J L, DUXSON P, et al. Reaction mechanisms in the geopolymeric conversion of inorganic waste to useful products [J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 139(3): 506-513.
- [3] SUWAN T, MAICHIN P, FAN M Z, et al. Influence of alkalinity on self-treatment process of natural fiber and properties of its geopolymeric composites [J]. Construction and Building Materials, 2022, 316: 125817.
- [4] BAKHAREV T. Thermal behaviour of geopolymers prepared using class F fly ash and elevated temperature curing [J]. Cement and Concrete Research, 2006, 36(6): 1134-1147.
- [5] SUN Z Q, VOLLPRACHT A. Isothermal calorimetry and in situ XRD study of the NaOH activated fly ash, metakaolin and slag [J]. Cement and Concrete Research, 2018, 103: 110-122.
- [6] THOMAS R J, LEZAMA D, PEETHAMPARAN S. On drying shrinkage in alkali-activated concrete: Improving dimensional stability by aging or heat-curing [J]. Cement and Concrete Research, 2017, 91: 13-23.
- [7] SINGH B, GUPTA G, BHATTACHARYYA S K. Geopolymer concrete: A review of some recent developments [J]. Construction and Building Materials, 2015, 85: 78-90.

- [8] PHOO-NGERNKHAM T, MAEGAWA A, MISHIMA N, et al. Effects of sodium hydroxide and sodium silicate solutions on compressive and shear bond strengths of FA-GBFS geopolymer [J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 91: 1-8.
- [9] VALENCIA-SAAVEDRA W G, MEJÍA DE GUTIÉRREZ R, PUERTAS F. Performance of FA-based geopolymer concretes exposed to acetic and sulfuric acids [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 257: 119503.
- [10] FAHIM HUSEIEN G, MIRZA J, ISMAIL M, et al. Geopolymer mortars as sustainable repair material: A comprehensive review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 80: 54-74.
- [11] SATO M, OKANO H, ISHIKAWA M. Development of ultrasonic testing equipment incorporating electromagnetic acoustic transducer [J]. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 1992, 29(4): 400-407.
- [12] PUNURAI W, JARZYNSKI J, QU J M, et al. Characterization of multi-scale porosity in cement paste by advanced ultrasonic techniques [J]. *Cement and Concrete Research*, 2007, 37(1): 38-46.
- [13] TRTNIK G, VALIČ M I, KAVČIČ F, et al. Comparison between two ultrasonic methods in their ability to monitor the setting process of cement pastes [J]. *Cement and Concrete Research*, 2009, 39(10): 876-882.
- [14] TRTNIK G, TURK G, KAVČIČ F, et al. Possibilities of using the ultrasonic wave transmission method to estimate initial setting time of cement paste [J]. *Cement and Concrete Research*, 2008, 38(11): 1336-1342.
- [15] GARNIER V, CORNELOUP G, SPRAUEL J M, et al. Setting time study of roller compacted concrete by spectral analysis of transmitted ultrasonic signals [J]. *NDT & E International*, 1995, 28(1): 15-22.
- [16] TRTNIK G, VALIČ M I, TURK G. Measurement of setting process of cement pastes using non-destructive ultrasonic shear wave reflection technique [J]. *NDT & E International*, 2013, 56: 65-75.
- [17] CHOTARD T, GIMET-BREART N, SMITH A, et al. Application of ultrasonic testing to describe the hydration of calcium aluminate cement at the early age [J]. *Cement and Concrete Research*, 2001, 31(3): 405-412.
- [18] 崔博, 王梓钧, 刘长欣, 等. 大坝混凝土凝结过程的超声波联合测定方法[J]. *水力发电学报*, 2022, 41(8): 121-133.
- CUI B, WANG Z J, LIU C X, et al. Ultrasonic combined determination method for setting process of dam concrete [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2022, 41(8): 121-133. (in Chinese)
- [19] SHARMA S, MUKHERJEE A. Ultrasonic guided waves for monitoring the setting process of concretes with varying workabilities [J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 72: 358-366.
- [20] WANG D Q, YU G Y, LIU S K, et al. Monitoring the setting process of cementitious materials using guided waves in thin rods [J]. *Materials*, 2021, 14(3): 566.
- [21] WANG S D, SCRIVENER K L. Hydration products of alkali activated slag cement [J]. *Cement and Concrete Research*, 1995, 25(3): 561-571.
- [22] SHARMA S, MUKHERJEE A. Monitoring freshly poured concrete using ultrasonic waves guided through reinforcing bars [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2015, 55: 337-347.
- [23] 罗祥, 王玲, 王振地. 混凝土中气泡的产生与发展: 机理和影响因素[J]. *材料导报*, 2021, 35(Sup 2): 213-217.
- LUO X, WANG L, WANG Z D. Mechanism and influencing factors of bubble generation and evolution in concrete [J]. *Materials Review*, 2021, 35(Sup 2): 213-217 (in Chinese)
- [24] 罗正东, 章本本, 苏永华, 等. 地质聚合物固化土研究现状及展望[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2024, 46(6): 31-43.
- LUO Z D, ZHANG B B, SU Y H, et al. Research status and prospect of geological polymer curing soil [J]. *Journal of Civil Engineering and Environmental Engineering*, 2024, 46(6): 31-43.
- [25] PROVIS J L, YONG C Z, DUXSON P, et al. Correlating mechanical and thermal properties of sodium silicate-fly ash geopolymers [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2009, 336: 57-63.

(编辑 王秀玲)