

文章编号:1005-0930(2023)02-0509-013 中图分类号:TU528 文献标识码:A
doi:10.16058/j.issn.1005-0930.2023.02.021

环境温度和化水时间对纳米偏高岭土 水泥浆流变性的影响

李秋超, 范颖芳, 李学良

(大连海事大学交通运输工程学院, 辽宁 大连 116026)

摘要:为研究环境温度和化水时间对纳米偏高岭土(NMK)水泥浆流变性的影响,利用流变性方法测量不同环境温度(8~45℃)和化水时间(10~90min)条件下NMK水泥浆流变性的变化规律.同时采用X-射线衍射仪和激光粒度仪分析新拌NMK水泥浆水化特性及絮凝结构.考虑环境温度、化水时间、NMK掺量和水胶比的影响,基于BP神经网络建立了流变参数预测模型.结果表明:水泥与水接触90min内水泥水化缓慢,NMK颗粒特性和絮凝结构是影响新拌水泥浆流变性的主要因素.NMK水泥浆流变特征符合修正Bingham模型,浆体呈现剪切稀化行为;随环境温度(8~45℃)升高,NMK水泥浆表观黏度降低,触变性先增大后减小,且水泥浆触变性在27℃左右达到最大值;环境温度对屈服应力和塑性黏度无显著影响.掺1%~10%NMK水泥浆表观黏度、屈服应力和塑性黏度随化水时间(10~90min)的变化幅度较普通水泥浆小.考虑环境温度、化水时间、NMK掺量等多因素影响的BP神经网络模型所预测流变参数与试验值吻合较好.

关键词:环境温度;化水时间;纳米偏高岭土;水泥浆;流变特性;触变性;表观黏度

纳米偏高岭土(NMK)凭借其火山灰活性、填充效应及晶核效应可有效提高水泥基材料力学性能和耐久性^[1-2].然而,NMK颗粒粒径小,具有较高的比表面积和表面能,在新拌水泥基材料中容易发生团聚,对其工作性能产生不利影响^[3].已有研究中,采用适量增加拌合水(水胶质量比1:2)提高新拌NMK水泥基材料的流动性,从而获得具备良好力学性能、抵抗氯离子侵蚀的NMK水泥基材料^[2,4-5].新拌水泥基材料流变性能不仅与配合比有关,还受施工环境温度、化水时间等因素影响.低温环境中水泥水化产物生成缓慢^[6],浆体流动时内部阻力小;温度升高加速水泥水化,同时加快浆体中水分蒸发,导致起润滑作用的自由水量降低^[7],浆体流动时颗粒间摩擦阻力增大,流动性变差.另外,水泥与水接触后水化反应不断进行,浆体内部絮凝结构数量和强度不断增大^[8],新拌水泥基材料流动性发生经时损失.为保证混凝土工作性能,《混凝土质量控制标准》(GB 50164—2011)规定,混

收稿日期:2021-03-11;修订日期:2021-12-30

基金项目:国家自然科学基金项目(51578099)

作者简介:李秋超(1995—),男,博士研究生.E-mail:lqc9508@163.com

通信作者:范颖芳(1972—),女,博士,教授,博士生导师.E-mail:fanyf@dlnu.edu.cn

凝土拌制完成至施工现场接收时长不宜大于 90min. 研究环境温度和 水化时间影响下 NMK 水泥基材料流变性对其工程应用有着重要的意义.

国内外学者针对环境温度影响下新拌水泥基材料流变性能开展了大量研究, 并获得大量有益的结论. 研究表明: 新拌水泥浆屈服应力、稠度系数随环境温度 (20~50℃) 升高而增大^[9]; 掺粉煤灰、硅灰水泥砂浆屈服应力随温度 (18~30℃) 升高而降低^[10]; 掺黏土水泥浆黏度随温度 (24~35℃) 增大而减小^[11]. 而《混凝土结构工程施工规范》(GB 5066—2011) 中指出当环境温度低于 5℃ 时采取防护措施仍可进行施工; 当温度低于 20℃ 时, 环境温度对新拌水泥基材料流变性的影响鲜有研究. 水化时间对新拌水泥基材料流变性的影响同样受到较多关注. 研究发现: 新拌水泥浆屈服应力随水化时间 (5~60min) 增加而增大^[9]; 石灰石粉-水泥浆静、动态屈服应力均随水化时间 (10~110min) 增加而增大^[12]; 自密实混凝土屈服应力随水化时间 (10~100min) 增加而增大^[13]. 有关 NMK 水泥基材料流变性研究, 目前多考虑 NMK 掺量、水胶比等单因素的影响^[14-15], 环境温度、水化时间等多因素影响下 NMK 水泥基材料流变性鲜有研究. 尚不能为 NMK 在实际工程中 (冬季、高温施工, 商品混凝土运输) 的应用提供参考, 相关研究亟待开展.

本文采用流变仪研究了不同环境温度 (8~45℃, 当设定温度低于 8℃ 时不稳定) NMK 水泥浆水化过程 (10~90min) 中的流变特性, 并通过 X 射线衍射仪和激光粒度仪分析了新拌水泥浆水化特性和絮凝结构. 建立了考虑环境温度、水化时间、NMK 掺量等多因素影响的 BP 神经网络流变参数预测模型.

1 试验研究

1.1 试验材料

试验中水泥选用小野田 P·O42.5R 普通硅酸盐水泥; 拌制用水为自来水; 纳米偏高岭土为内蒙古超牌偏高岭土有限公司生产, 由高岭石原矿煅烧后研磨而成. 水泥和 NMK 化学成分详见表 1. 纳米偏高岭土和水泥颗粒的中位粒径 (D_{50}) 分别为 1.75 μm 和 14.26 μm , 比表面积分别为 4.09 m^2/g 和 0.58 m^2/g . 纳米偏高岭土 XRD 图谱、粒径分布、TEM 形貌及片层厚度概率统计如图 1 所示, NMK 衍射峰成弥散状, 呈现为结晶态较差的过渡相; 由纳米偏高岭土 TEM 形貌及片层厚度统计可以看出其片层厚度远小于 100nm, 可认为是纳米材料 (《纳米材料术语》(GB/T 19619—2004) 规定, 纳米材料至少在三维空间中有一维处于纳米尺度).

表 1 水泥和纳米偏高岭土化学成分

Table 1 Chemical composition of cement and nano-metakaolin

类别	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	LOI
水泥	21.91	6.27	3.78	59.30	1.64	2.41	—	—	4.69
NMK	49.40	43.88	0.51	0.27	2.66	0.14	0.23	1.52	0.59

1.2 试件制作

该试验水胶质量比为 1:2, 与已有研究一致^[2,4,5]; 考虑 4 种掺量 NMK 等质量替代水泥 (分别为胶凝材料总质量的 1%、3%、5%、10%), 试样编号见表 2. NMK 颗粒粒径小, 在

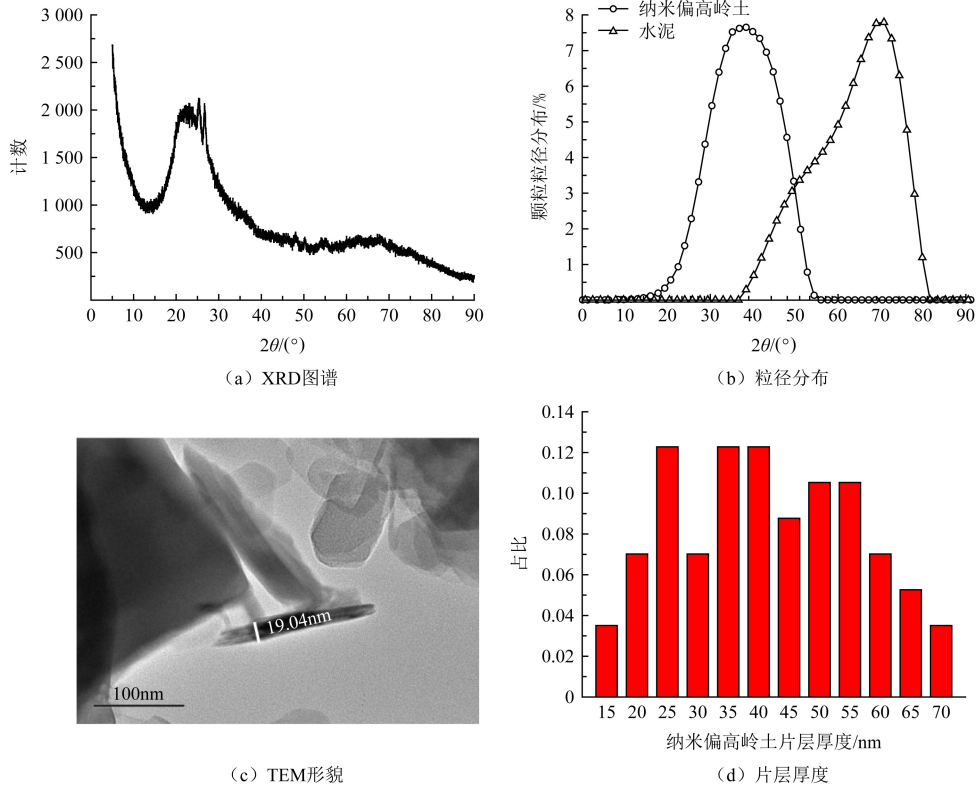


图1 NMK 材料性能

Fig.1 The properties of NMK

水泥浆中容易发生团聚,为使 NMK 均匀分散于水泥浆,浆体制备时首先将 NMK 在水中超声分散 15min,然后在分散液中加入水泥进行拌制^[2],浆体制备依据《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》(JTG E30-2005)。

表2 不同掺量 NMK 水泥浆试件编号

Table 2 Cement samples with different NMK content

NMK 掺量/%	0	1	3	5	10
试样编号	NP0	NP1	NP3	NP5	NP10

1.3 试验方法及过程

1.3.1 NMK 水泥浆物相分析试验 采用德国 D8 Advance 型 X 射线衍射仪对新拌水泥浆进行物相分析,扫描范围 $15^{\circ} \sim 65^{\circ}$,扫描速率为 $12^{\circ}/\text{min}$ 。将 NP0 和 NP5 水泥浆水化 10min、30min、60min 和 90min 时浸入无水乙醇中终止水化并研磨,研磨完成后置于 45°C 烘箱中干燥 48h 后进行试验。

1.3.2 NMK 水泥浆絮凝结构分析 制备水胶比 1:1 不同掺量 (0、1%、3%、5%、10%) NMK 水泥浆,稀释 10 倍后至水泥与水接触 10min 时,采用美国 Microtrac Bluewave S3500 激光粒度分析仪测量水泥浆中絮凝体粒径。

1.3.3 不同环境温度水泥浆流变性能试验 流变试验采用 Anton Paar MCR 301 流变仪,选用 CC27 测量系统.测试分为预剪切阶段和数据采集阶段,测试流程见图 2(a).预剪切阶段:0~120s 内在恒定剪切速率 100s^{-1} 下剪切 120s,使各组水泥浆在流变测试前具有相同的剪切历史;然后静置 100s 进入数据采集阶段:在第 1 个 150s 内剪切速率从 0s^{-1} 增至 150s^{-1} ,在第 2 个 150s 内剪切速率从 150s^{-1} 降至 0s^{-1} .

该试验中环境温度定义为浆体制备完成至试验结束前的试验环境温度,浆体制备完成后即刻转移至流变仪温控杯内,当水泥浆达到设定温度,并至水泥与水接触 10min 时(该时间远大于水泥浆到达设定温度的时间)进行流变试验.已有研究表明,掺 5%NMK 对水泥基材料强度和氯离子渗透性改善最为显著^[2-3],因此,本文针对普通水泥浆和掺 5%NMK 水泥浆流变性能开展温度影响试验.由于连续升温存在滞后性,将试验开始、结束时温控杯温度的平均值作为连续温度试验的环境温度,试验中同组试验始、末温度极差均小于 0.5°C .

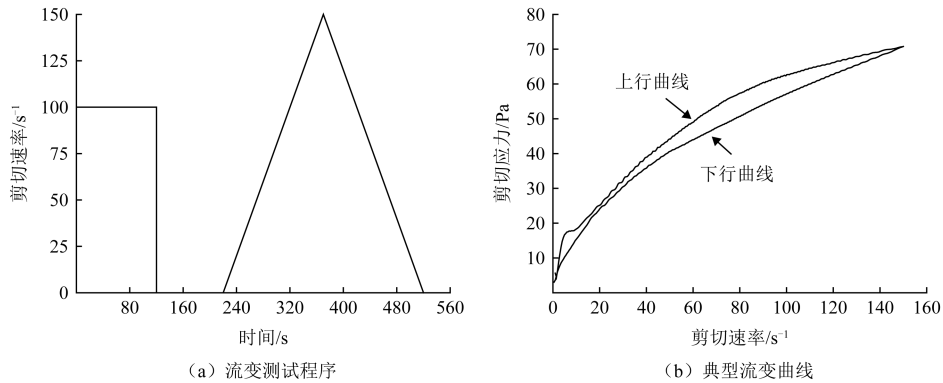


图 2 新拌水泥浆流变性测量

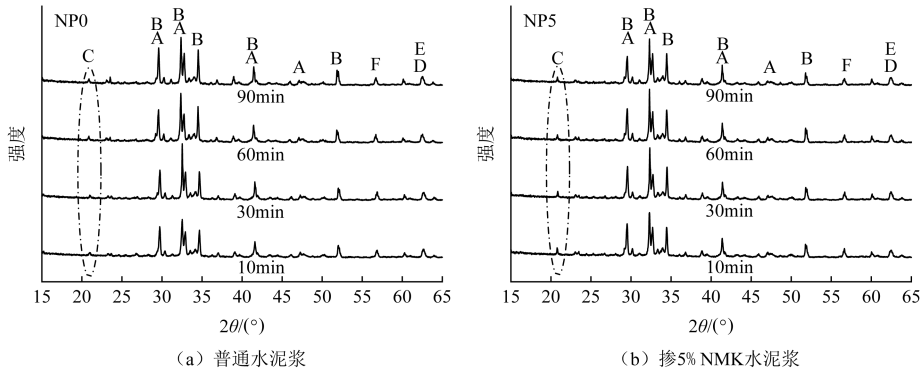
Fig.2 Rheological measurement of fresh cement pastes

1.3.4 不同水化时间水泥浆流变性能试验 水化时间自水泥与水接触开始计时,于水泥与水接触 10min、30min、60min 和 90min 时开始试验,该试验环境温度设定为 20°C .为模拟混凝土运输过程中持续搅拌,浆体制备完成至试验开始前用电动搅拌器在转速 300rpm 下持续搅拌;试验前 2min 取出浆体移至盛样筒,剩余浆体继续搅拌至规定时间,重复上述流程完成不同水化时间条件下的流变试验.

2 试验结果分析与讨论

2.1 水化早期 NMK 水泥浆物相分析

普通水泥浆和掺 5%NMK 水泥浆在不同水化时间的 XRD 图谱如图 3 所示.可以看出,在 10~90min 内浆体中主要成分为 C_2S 、 C_3S 、 C_3A 等水泥熟料矿物,水泥水化缓慢,并未发现 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 等水化产物衍射峰;掺 NMK 水泥浆 SiO_2 衍射峰较普通水泥浆略有增大.因此,NMK 水泥浆水化 10~90min 内水化产物生成较少,NMK 火山灰活性对水泥浆影响甚微,NMK 颗粒特性(比表面积大、颗粒粒径小等)是影响新拌水泥浆流变性能的主要



A. C_2S ; B. C_3S ; C. SiO_2 ; D. Al_2O_3 ; E. MgO ; F. C_3A

图3 不同水化时间 NMK 水泥浆 XRD 图谱

Fig.3 XRD spectra of NMK cement pastes with various hydration time

因素.

2.2 新拌 NMK 水泥浆絮凝结构分析

水泥与水接触后,胶凝颗粒和水化物在范德华力、静电引力作用下容易形成絮凝体,包裹拌合水,导致浆体流动时固体颗粒或絮凝体间摩阻力增加,新拌水泥基材料流动性降低.纳米材料颗粒粒径小、具有较高的表面能,极易吸附水化产物,影响新拌水泥浆中絮凝结构的形成^[1,5,16].由激光粒度仪测得絮凝体粒径大于 $150\mu m$ 的累积分布及最大絮凝尺寸如图 4 所示.可以看出,浆体中粒径大于 $150\mu m$ 絮凝体和最大絮凝尺寸均随 NMK 掺量增加而增大,NMK 掺量越大浆体中絮凝结构团聚越显著,与文献[5]研究结论一致.

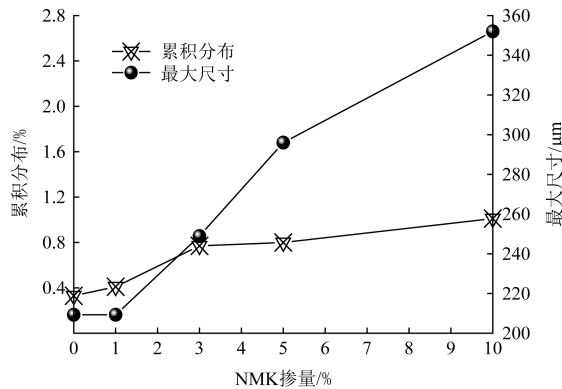


图4 NMK 水泥浆絮凝体粒径分布

Fig.4 The particle size distribution of flocculation structures of NMK cement pastes

2.3 NMK 水泥浆流变模型

纳米偏高岭土水泥浆典型流变曲线如图 2(b) 所示.选取可重复性强、更具有一定一致性的下行段数据进行流变分析^[17].应力与应变速率的定量关系一般采用流变模型进行描述;现有流变模型主要包括 Bingham 模型、Herchel-Bulkley 模型等^[18].研究发现,新拌

NMK 水泥浆流变特征均符合修正 Bingham 模型(式(1)),式中 c/μ 均小于 0,浆体呈现剪切稀化行为;部分水泥浆流变参数如表 3 所示.

$$\tau = \tau_0 + \mu\dot{\gamma} + c\dot{\gamma}^2 \quad (1)$$

式中: τ 为剪切应力,Pa; τ_0 为屈服应力,Pa; $\dot{\gamma}$ 为剪切速率, s^{-1} ; μ 为塑性黏度,Pa·s; c 为二阶参数,Pa·s²; $c/\mu > 0$ 时浆体剪切增稠, $c/\mu < 0$ 时浆体剪切稀化.

表 3 NMK 水泥浆流变模型分析

Table 3 Rheological model of cement pastes with different NMK content

环境温度/℃	水化时间/min	NMK 掺量/%	回归方程	相关系数
9.27	10	0	$\tau = 4.72 + 0.20\dot{\gamma} - 0.0004\dot{\gamma}^2$	0.991
20.00	60	1	$\tau = 5.42 + 0.35\dot{\gamma} - 0.0009\dot{\gamma}^2$	0.993
20.00	30	3	$\tau = 5.15 + 0.25\dot{\gamma} - 0.0007\dot{\gamma}^2$	0.987
44.15	10	5	$\tau = 8.74 + 0.55\dot{\gamma} - 0.002\dot{\gamma}^2$	0.997
20.00	90	10	$\tau = 12.89 + 1.33\dot{\gamma} - 0.004\dot{\gamma}^2$	0.991

2.4 NMK 水泥浆表观黏度

2.4.1 环境温度影响 表观黏度反映浆体内部结构阻碍浆体流动的性能.NP5 水泥浆在 8~45℃ 表观黏度如图 5(a) 所示,表观黏度随剪切速率增大而减小,呈现剪切稀化行为.表观黏度-剪切速率曲线随温度变化呈“带状”分布,剪切速率为 20s⁻¹ 时表观黏度变化最为显著.选取 NP0 和 NP5 水泥浆在 8~45℃、剪切速率为 20s⁻¹ 时表观黏度,如图 5(b) 所示,表观黏度随环境温度升高呈下降趋势.这是因为环境温度升高,水泥浆体内能增大,加速分子、颗粒热运动,分子、颗粒间黏附效应降低^[19],当剪切速率一定时浆体对转子阻滞力降低,表观黏度减小.

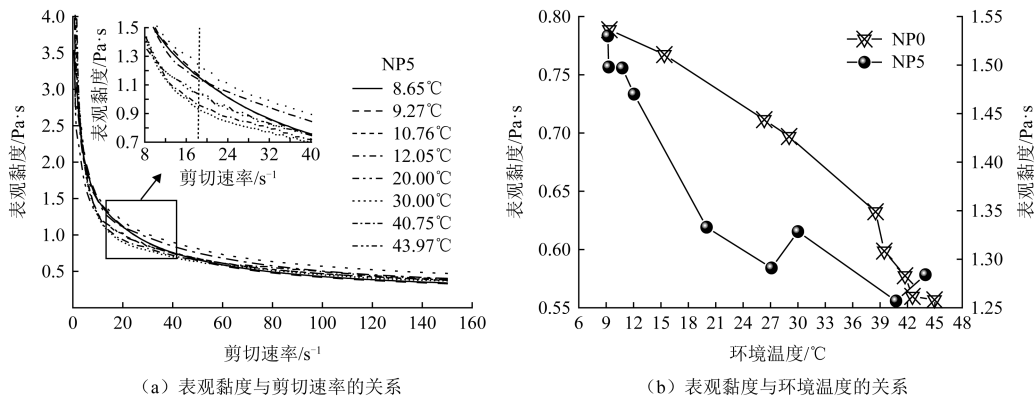


图 5 环境温度 8~45℃ 水泥浆表观黏度

Fig.5 The apparent viscosity of cement pastes at 8~45℃

2.4.2 水化时间影响 NMK 水泥浆表观黏度与剪切速率的关系如图 6(a) 所示,表观黏度随剪切速率增大而减小.由图 6(b) 可以看出,表观黏度(剪切速率为 20s⁻¹) 随 NMK 掺量增加而增大.当 NMK 掺量一定时,表观黏度随水化时间增加呈增大趋势.随水泥水化不断进行,浆体中絮凝结构数量、强度均增大^[8],导致内部颗粒及絮凝结构间摩阻力增

加,表观黏度增大.NP0 和 NP10 水泥浆水化 90min 表观黏度较水化 10min 分别增大 102.96%、12.66%,掺 1%~10% NMK 水泥浆水化 10~90min 表观黏度变化较普通水泥浆小.

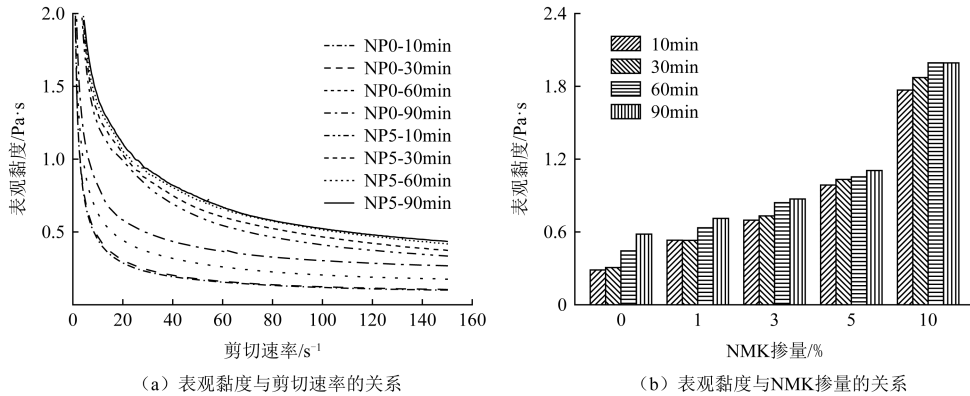


图 6 不同水化时间 NMK 水泥浆表观黏度

Fig.6 Apparent viscosity of NMK cement pastes at various hydration time

2.5 NMK 水泥浆屈服应力

2.5.1 环境温度影响 屈服应力是阻碍浆体发生塑性变形的最大应力,当浆体受到的剪切应力大于屈服应力时浆体开始流动.NP0 和 NP5 水泥浆在环境温度 8~45℃ 屈服应力如图 7 所示,可以看出,NP0 和 NP5 水泥浆屈服应力分别稳定在 5.0Pa 和 9.0Pa.结合图 4(a)水泥浆体中絮凝体形貌可知,絮凝体的结合、分布随机性较大,从而导致水泥浆流变参数在小范围内波动;总体而言,环境温度对水泥浆屈服应力影响较小.不同环境温度下 NP5 水泥浆屈服应力约为普通水泥浆屈服应力的 2 倍,这是由于 NMK 颗粒具有较高的比表面积和表面能,在水泥浆体中更易形成絮凝结构包裹拌合水,导致浆体中起润滑作用的自由水量减少,颗粒间摩阻力增加,屈服应力增大.

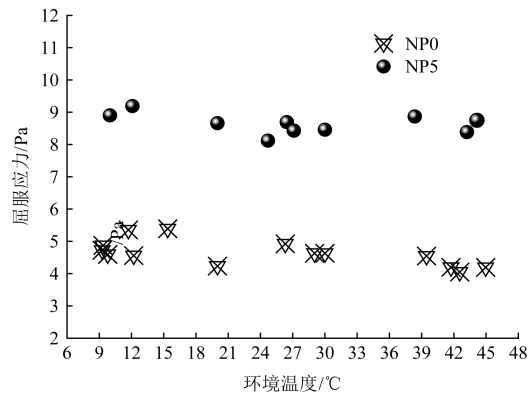


图 7 不同掺量 NMK 水泥浆屈服应力与温度的关系

Fig.7 The relationship between yield stress and temperature of NMK cement pastes

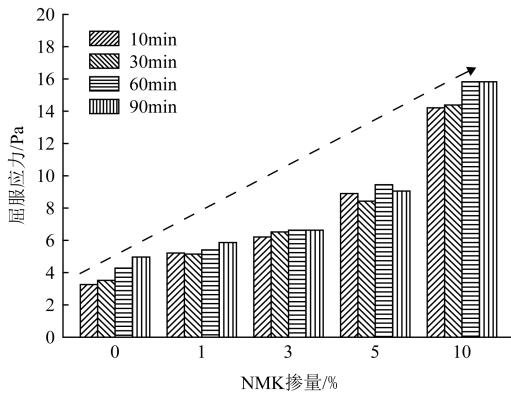


图8 NMK 水泥浆屈服应力与水化时间的关系

Fig.8 The relationship between yield stress and hydration time of NMK cement pastes

内增长幅度较普通水泥浆低.

2.6 NMK 水泥浆塑性黏度

2.6.1 环境温度影响 塑性黏度反映浆体流动后的性能,与浆体变形速度有关.NMK 水泥浆塑性黏度与温度的关系如图 9 所示.在 8~45℃ 范围内 NP0 和 NP5 水泥浆塑性黏度分别稳定在 0.25Pa·s 和 0.60Pa·s,环境温度对水泥浆塑性黏度影响较小.不同环境温度水泥浆塑性黏度随 NMK 掺量增加而增大,归因于浆体内部絮凝体包裹自由水所致,浆体内部颗粒间摩阻力增加,当剪切速率一定时,浆体变形速度减小;NP5 水泥浆塑性黏度约为普通水泥浆塑性黏度的 3 倍.

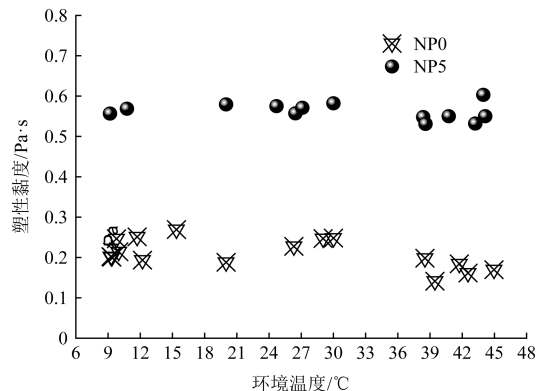


图9 不同掺量 NMK 水泥浆塑性黏度与温度的关系

Fig.9 The relationship between plastic viscosity and temperature of NMK cement pastes

2.6.2 水化时间影响 NMK 水泥浆在不同水化时间塑性黏度如图 10 所示.由图 10(a) 可知,NMK 水泥浆塑性黏度在不同水化时间均随 NMK 掺量增加而增大.不同掺量 NMK 水泥浆塑性黏度均随水化时间延长呈增大趋势,这是由于在水泥水化过程中,水泥浆体中水化产物不断增多;导致浆体内部水化产物或固体颗粒间摩阻力增大,塑性黏度增加.由

2.5.2 水化时间影响 不同掺量 NMK 水泥浆在水化过程中屈服应力如图 8 所示.可以看出,当水化时间一定时,水泥浆屈服应力均随 NMK 掺量增加而增大.NP0 水泥浆屈服应力随水化时间增加而增大,水化 90min 屈服应力较 10min 增大 52.28%.NP1 和 NP3 水泥浆水化 90min 屈服应力较 10min 分别增大 12.51% 和 6.72%.NP5 水泥浆屈服应力在 10~90min 内略有波动(波动范围小于 5%),整体呈增大趋势;NP10 水泥浆水化 90min 屈服应力仅较水化 10min 增大 11.40%.掺 1%~10%NMK 水泥浆屈服应力在 10~90min

水泥浆水化 90min 塑性黏度较水化 10min 增长率与 NMK 掺量关系可知,水泥浆塑性黏度增长率随 NMK 掺量增加而降低(图 10(b)),NMK 水泥浆塑性黏度随水化时间(10~90min)变化较小。

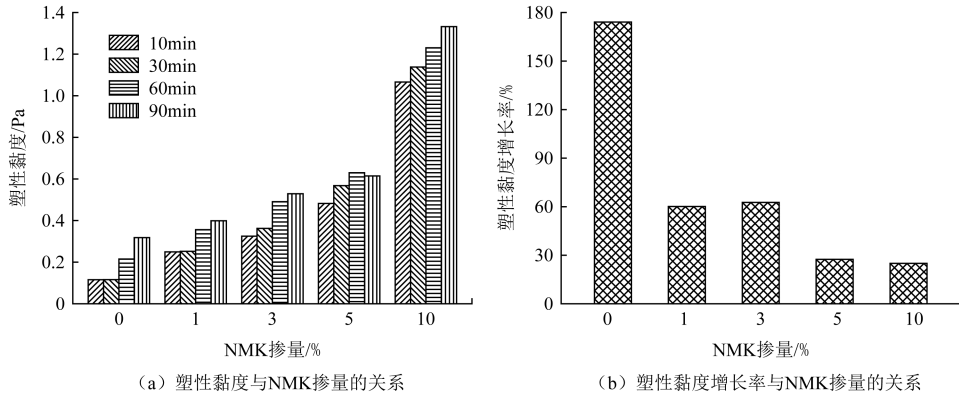


图 10 不同掺量 NMK 水泥浆塑性黏度与水化时间的关系

Fig.10 The relationship between plastic viscosity and hydration time of NMK cement pastes

2.7 NMK 水泥浆触变性

2.7.1 环境温度影响 触变性表征水泥浆内部絮凝结构数量或受到破坏后内部结构的恢复能力,反映浆体内部絮凝结构破坏或恢复时的能量变化,一般采用滞回面积进行表征.由水泥浆滞回面积随环境温度的变化规律(图 11)可以看出,当温度低于 27℃,滞回面积随温度升高而增大;当温度高于 27℃时触变性降低.究其原因,当环境温度较低时,水化物生成缓慢,浆体内部絮凝结构少,触变性低;当温度升高时,水泥水化加速^[6],浆体内部絮凝结构增多;且温度升高加剧浆体中分子、颗粒热运动,分子或颗粒间距离增大^[19-20],部分絮凝结构解体,絮凝结构被破坏时所需能量降低.

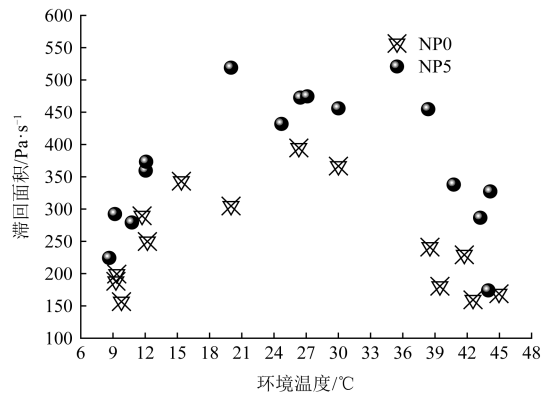


图 11 不同掺量 NMK 水泥浆滞回面积与温度的关系

Fig.11 The relationship between hysteresis area and temperature of NMK cement pastes

2.7.2 水化时间影响 NMK 水泥浆滞回面积与水化时间的关系如图 12(a)所示,普通水泥浆滞回面积在水化过程中呈增大趋势;掺 1%~10%NMK 水泥浆滞回面积随水化时

间先减小后增大.这是由于掺 NMK 水泥浆更易形成絮凝体,在早期(<30min)水化反应进行缓慢,搅拌器剪切作用下浆体内部絮凝破坏数量大于生成数量,开始流变试验絮凝结构被再次破坏时所需能量降低.当水泥水化继续进行,纳米颗粒提供更多成核位置,加速早期水泥水化^[21],浆体中水化产物不断增加,絮凝结构不断增多,触变性增大.由图 12(b)可知,当 NMK 掺量较小(<3%)时,滞回面积变化较小;当 NMK 掺量较大(>3%)时,水泥浆触变性随 NMK 掺量增加而增大;对散点数据进行分析发现,滞回面积与 NMK 掺量存在较好的非线性关系.

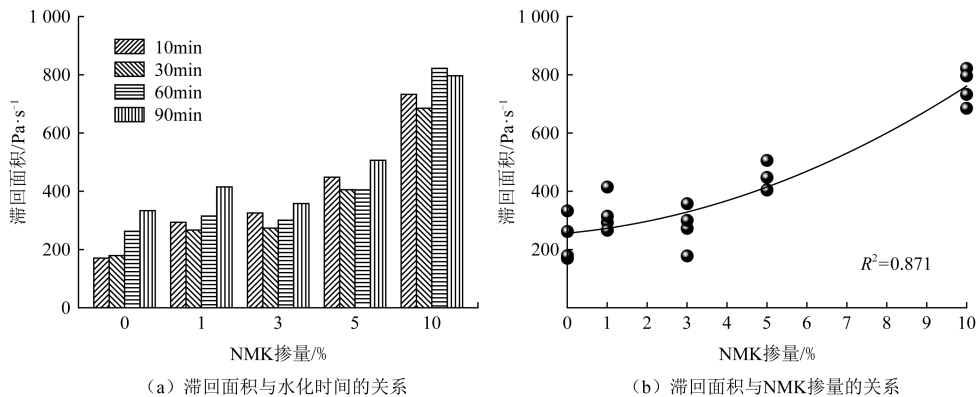


图 12 不同水化时间水泥浆滞回面积与 NMK 掺量的关系

Fig.12 The relationship between hysteretic area and hydration time of NMK cement pastes

2.8 考虑多因素影响的流变参数预测模型

流变设备自动实时采集数据,有效避免人为因素造成的影响,所得流变参数可以定量评价新拌水泥基材料的流变性.然而,流变设备价格昂贵,多局限于实验室使用,实际工程中水泥基材料流变参数的获取受到限制.由上述试验可知,新拌 NMK 水泥浆流变性受环境

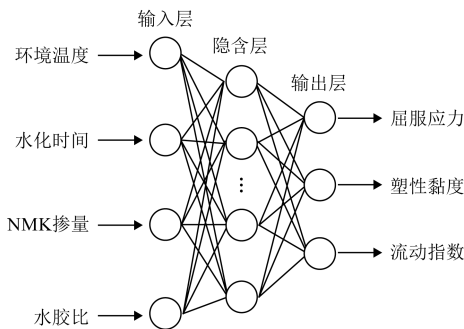


图 13 BP 神经网络拓扑结构

Fig.13 Topology of BP neural network

环境温度、水化时间、NMK 掺量等多因素影响,若建立多因素影响的流变参数预测模型必然为流变参数的获取提供一种快速、便捷、可靠的方法.由于 NMK 水泥基材料流变性的影响因素众多,通过显式方程难以建立众多因素与流变参数间的关系.BP 神经网络适合解决多因素影响的非线性、复杂因果规律问题,本文借助 BP 神经网络建立多因素影响的流变参数预测模型.BP 神经网络结构包括输入层、隐含层和输出层(图 13).网络输入层包括温度、水化时间、NMK 掺量和水胶比 4 个变

量;输出层包括屈服应力、塑性黏度和流动指数;隐含层单元数为 50,神经元转移函数选用单极性 Sigmoid 函数;隐含层神经元激励函数选择 S 型正切函数 Tansig,输出层神经元激励函数选择 S 型对数函数 Logsig.通过 MATLAB 软件实现网络训练及数据预测,共选取

80 组流变数据(本文试验数据及已有研究中不同水胶比 NMK 水泥浆流变数据^[5])进行网格训练及数据预测,其中训练样本 64 组,测试样本 16 组;精度设为 0.001.

采用 BP 神经网络预测模型所预测流变参数与试验值的关系如图 14 所示.可以看出,采用 BP 神经网络预测的流变参数可以达到与试验值相近的结果,说明在此过程中该流变模型预测精度较高.屈服应力、塑性黏度和流动指数预测值与试验值除个别误差较大(>25%)外,其余误差均小于 12%.

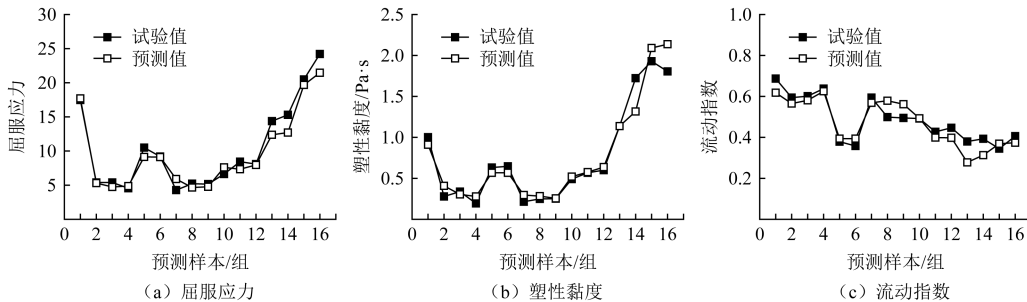


图 14 流变参数预测值与试验值

Fig.14 Predictive and experimental results of rheological parameters

3 结论

(1) 水泥与水接触 90min 内水化反应缓慢, NMK 颗粒特性和水泥浆内部絮凝结构是影响其流变性能的主要因素.当环境温度为 8~45℃, NMK 水泥浆水化 10~90min 时,其流变特征均符合修正 Bingham 模型,浆体呈现剪切稀化行为;

(2) NMK 水泥浆表观黏度和触变性受环境温度(8~45℃)影响显著,屈服应力和塑性黏度随环境温度变化较小.表观黏度随环境温度升高而降低, NP0 和 NP5 水泥浆在 40℃ 时其表观黏度较 9℃ 时分别降低 29.02% 和 17.84%; NMK 水泥浆触变性随温度升高先增大后减小,在 27℃ 左右触变性达到峰值;

(3) 掺 1%~10% NMK 水泥浆表观黏度、屈服应力和塑性黏度随水化时间的增长率较 NP0 水泥浆低. NP0 水泥浆触变性随水化时间增加而增大;由于 NMK 颗粒特性及水化反应对絮凝结构的影响,掺 1%~10% NMK 水泥浆触变性在水化过程中(10~90min)先减小后增大;

(4) 屈服应力、塑性黏度和较大掺量(>3%) NMK 水泥浆触变性均随 NMK 掺量增加而增大;掺 1%~3% NMK 对水泥浆触变性影响较小.基于 BP 神经网络建立的流变参数预测模型,预测值与试验值吻合良好.

参考文献

- [1] Morsy M S, Shoukry H, Mokhtar M M, et al. Facile production of nano-scale metakaolin: An investigation into its effect on compressive strength, pore structure and microstructural characteristics of mortar [J]. Construction and Building Materials, 2018, 172: 243-250
- [2] 李秋超, 范颖芳. 几种纳米水泥砂浆氯离子渗透性对比试验研究 [J]. 混凝土, 2021, (2): 96-100

- Li Qiuchao, Fan Yingfang. Experimental study on the effect of nanomaterials on the chloride diffusion behavior of mortar [J]. Concrete, 2021, (2): 96-100
- [3] Wang Q, Cui X Y, Wang J, et al. Effect of fly ash on rheological properties of graphene oxide cement paste [J]. Construction and Building Materials, 2017, 138: 35-44
- [4] 张世义, 范颖芳, 栾海洋, 等. 纳米黏土分散性对水泥性能的影响 [J]. 建筑材料学报, 2013, 16(2): 197-202
Zhang Shiyi, Fan Yingfang, Luan Haiyang, et al. Effect of disperse condition of nano-clay on behavior of cement paste [J]. Journal of Building Materials, 2013, 16(2): 197-202
- [5] 李秋超, 范颖芳, 陈昊. 新拌纳米偏高岭土水泥浆流变性 [J]. 东南大学学报(自然科学版), 2021, 51(3): 480-488
Li Qiuchao, Fan Yingfang, Chen Hao. Rheological performance of fresh nano metakaolin cement pastes [J]. Journal of Southeast University (Nature Science Edition), 2021, 51(3): 480-488
- [6] Liu J, Li Y, Ouyang P, et al. Hydration of the silica fume-Portland cement binary system at lower temperature [J]. Construction and Building Materials, 2015, 93: 919-925
- [7] 张子明, 周红军, 赵吉坤. 温度对混凝土强度的影响 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2004, (6): 674-679
Zhang Ziming, Zhou Hongjun, Zhao Jikun. Influence of temperature on strength of concrete [J]. Journal of Hohai University (Nature Sciences), 2004, (6): 674-679
- [8] 何燕, 张雄, 张永娟. 硫酸盐对掺聚羧酸减水剂水泥浆体流变性的影响 [J]. 建筑材料学报, 2015, 18(6): 930-934
He Yan, Zhang Xiong, Zhang Yongjuan. Effect of sulfate on rheological properties of cement paste with polycarboxylate-type superplasticizer [J]. Journal of Building Materials, 2015, 18(6): 930-934
- [9] 刘泉声, 卢超波, 刘滨, 等. 考虑温度及水化时间效应的水泥浆液流变特性研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(增2): 3730-3740
Liu Quansheng, Lu Chaobo, Liu Bin, et al. Research on rheological behavior for cement grout considering temperatures and hydration time effects [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(S2): 3730-3740
- [10] Petit J Y, Wirquin E, Khayat K H. Effect of temperature on the rheology of flowable mortars [J]. Cement and Concrete composites, 2010, 32(1): 43-53
- [11] 刘杰. 水泥基系列浆材流变性能研究 [D]. 长沙: 长沙理工大学, 2017
Liu Jie. The rheological properties of a series of cement grouting material [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2017
- [12] 肖佳, 王大富, 张青, 等. 水泥-石灰石粉浆体流变和结构建立相关性研究 [J]. 建筑材料学报, 2019, 22(2): 167-172
Xiao Jia, Wang Dafu, Zhang Qing, et al. Study on correlation between rheology and structural buildup of cement-ground limestone paste [J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(2): 167-172
- [13] Carro L D, Gonzalez F B, Brito J, et al. Study of the rheology of self-compacting concrete with fine recycled concrete aggregates [J]. Construction and Building Materials, 2015, 96: 491-501
- [14] Santos F N, de Sousa S R G, Bombard A J F, et al. Rheological study of cement paste with metakaolin and/or limestone filler using Mixture Design of Experiments [J]. Construction and Building Materials, 2017, 143: 92-103
- [15] Muhd N M S, Hamidah M S, Mohd F A, et al. Inclusion of nano metakaolin as additive in ultra high performance concrete (UHPC) [J]. Construction and Building Materials, 2016, 127: 167-175
- [16] 王健. 锂盐和纳米成核剂对水泥水化和早期强度的影响及机理 [D]. 南京: 东南大学, 2018
Wang Jian. Effect and mechanism of lithium salt and nano nucleating agent on hydration and early strength of cement [D]. Nanjing: Southeast University, 2018
- [17] 王栋民, 张力冉, 张伟利, 等. 超塑化剂对新拌水泥浆体多级絮凝结构的影响 [J]. 建筑材料学报, 2012, 15(6): 755-759
Wang Dongmin, Zhang Liran, Zhang Weili, et al. Effects of superplasticizers on multi-level flocculation structure of fresh cement paste [J]. Journal of Building Materials, 2012, 15(6): 755-759
- [18] 张大旺, 王栋民, 朴春爱, 等. 钢渣掺量对 3D 打印地质聚合物材料新拌浆体流变性的影响 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2018, 26(3): 596-604
Zhang Dawang, Wang Dongmin, Piao Chunai, et al. Effect of steel slag content on the rheology of 3D printing geopolymer pastes [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2018, 26(3): 596-604

- [19] 刘鹤年.流体力学[M].北京:中国建筑工业出版社,2007
Liu Henian.Hydromechanics[M].Beijing:China Architecture& Building Press,2007
- [20] 吴其晔,巫静安.高分子材料流变学[M].北京:高等教育出版社,2014
Wu Qiye,Wu Jingan.Polymer rheology[M].Beijing:Higher Education Press,2014
- [21] Qian Y,Schutter D Y.Enhancing thixotropy of fresh cement pastes with nanoclay in presence of polycarboxylate ether superplasticizer (PCE)[J].Cement and Concrete Research,2018,111:15-22

Effect of Ambient Temperature and Hydration Time on the Rheological Properties of Nano-Metakaolin Cement Pastes

LI Qiuchao, FAN Yingfang, LI Xueliang

(College of Transportation Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract

To investigate the effect of ambient temperature and hydration time on rheology of nano-metakaolin (NMK) cement pastes, the rheology variation of NMK cement pastes with different ambient temperatures ($8 \sim 45^{\circ}\text{C}$) and hydration time ($10 \sim 90\text{min}$) was studied by rheological method. Meanwhile, X-ray diffractometer and particle size analyzer were used to analyze the early age hydration properties and flocculation structures of fresh NMK cement pastes. The effects of ambient temperature, hydration time, NMK content and water-to-binder ratio were taken into consideration, a rheological parameter prediction model was established based on BP neural network. The results demonstrate that the cement hydration is slowly at 90 min after contact between cement and water, the NMK particle properties and flocculation structures are the main influential factors of rheological properties. The rheological characteristic of NMK cement pastes conforms to modified Bingham model, and the pastes show shear thinning behavior. With the increase of temperature ($8 \sim 45^{\circ}\text{C}$), the apparent viscosity decreases, thixotropy first increases and then decreases, and the thixotropy reaches the peak at about 27°C ; the yield stress and plastic viscosity have not much changed with ambient temperature. The effects of hydration time ($10 \sim 90\text{min}$) on the apparent viscosity, yield stress and plastic viscosity of cement paste were weakened by 1% ~ 10% NMK addition. The predictive results of BP neural network model are in good agreement with the experimental results.

Keywords: ambient temperature; hydration time; nano-metakaolin; cement pastes; rheological properties; thixotropic properties; apparent viscosity