

水泥基材料流变性能研究进展

卞宇轩¹, 郭可敖¹, 胡世聪¹, 李英杰¹, 王在林¹, 邵建文^{1,*}

1. 鲁东大学, 水利土木学院, 山东 烟台, 264025

摘要: 混凝土作为建筑工程中应用最广泛的建筑材料, 其流变性能直接影响施工可操作性、成型质量及硬化后的力学性能。本文系统综述了水泥基材料流变性能的研究进展, 梳理了流变学理论的发展历程, 重点对比了宾汉姆模型和赫谢尔-巴尔克莱模型等主流流变模型的适用性与局限性; 进一步详细分析了屈服应力、塑性黏度等关键流变参数的影响机制, 从材料组分和测试方法两方面探讨了流变性能的调控策略。研究表明, 通过流变模型的非线性修正和多尺度表征可更准确描述混凝土的流动行为, 矿物掺合料与化学外加剂的协同作用能显著调控流变参数, 而现代测试技术与机器学习方法的结合可有效提升参数预测精度。本文为水泥基材料的流变学理论完善和施工工艺优化提供了重要参考, 并对未来智能调控和极端环境适应性等研究方向提出了建议。

关键词: 混凝土; 流变性能; 影响因素; 测试方法; 流变模型

Research Progress on Rheological Properties of Cement-based Materials

BIAN Yu-xuan¹, GUO Ke-Ao¹, HU Shi-Cong¹, LI Ying-Jie¹, WANG Zai-Lin¹, SHAO Jian-Wen^{1,*}

1. School of Hydraulic and Civil Engineering, Ludong University, Yantai, 264025, China

Abstract: Concrete, as one of the most widely used building materials in construction projects, its rheological properties have a crucial impact on the construction, molding quality and performance after hardening of concrete. This paper comprehensively reviews the research progress on the rheological properties of concrete at home and abroad. Firstly, it introduces the development of rheology and commonly used rheological models of concrete, including the Bingham model, the Herschel-Bulkley model, etc. Then, the rheological parameters of concrete and the factors influencing the rheological properties of concrete were elaborated in detail. Subsequently, the testing methods for the rheological properties of concrete were summarized and compared, such as the rotational viscometer method, slump test, and expansion test, etc. Finally, the existing problems in the current research and the future development directions were discussed, aiming to provide a comprehensive reference for the scientific research and engineering application of concrete materials.

Keywords: Concrete; Rheological properties; Influencing factors; Testing methods; Rheological model

混凝土作为全球用量最大的建筑材料^[1], 其流变性能直接影响施工质量和硬化后的力学性能。研究表明, 新拌混凝土的剪切应力-剪切速率关系不仅决定施工效率^[2], 更通过调控微观结构影响最终强度发展。深入理解这一跨尺度关联机制, 对实现混凝土高性能化至关重要。因此, 从微观到宏观尺度揭示混凝土流变行为的内在机制, 并建立科学的调控方法, 是实现混凝土高性能化的关键。从微观角度看, 水泥基材料的流变特性源于胶凝颗粒间的相互作用力(如范德华力、静电斥力等)与水化产物形成的网络结构。这些微观特征直接表现为宏观的剪切增稠或剪切稀化行为, 而传统 Bingham 模型对此类非线性响应的描述存在局限^[3]。近年来, 改进的 Bingham 模型和 Herschel-Bulkley 模型通过引入二次项或幂律指数, 显著提升了复杂流变行为的预测精度。例如, Herschel-Bulkley 模型中的

流变指数 n 可量化自密实混凝土的剪切增稠效应 ($n>1$)，为配合比设计提供理论依据。然而，流变性能的精准表征仍面临挑战。一方面，现有测试仪器（如旋转流变仪、ICAR 流变仪）的测量原理和数据标准不统一^[4]，导致相同样品的测试结果差异可达 20% 以上；另一方面，不同材料体系（如普通混凝土与超高性能混凝土）的评价标准尚未形成统一体系。例如，掺入粉煤灰可降低屈服应力但可能损害早期强度，而硅灰的加入虽能提高黏度却有利于密实度提升^[5]。这种矛盾凸显了流变性能与力学性能协同调控的重要性。针对上述问题，本文系统综述混凝土流变学的研究进展，重点探讨剪切应力-剪切速率的跨尺度作用机制；流变模型在施工性能调控中的应用；不同测试仪器的适用性与局限性；矿物掺合料与化学外加剂对评价标准的影响。通过整合多尺度分析与智能调控技术，本文旨在为混凝土流变性能的标准化评价和工程应用提供解决方案，为材料设计向科学化提供参考。

1 混凝土的流变学

1.1 流变学的发展

流变学作为研究物质变形与流动规律的科学，其发展历程可追溯至 19 世纪末期。在这一时期，科学家们开始系统性地研究物质在外力作用下的力学响应行为，为流变学的诞生奠定了理论基础。1920 年，美国化学家 Eugene C. Bingham 首次提出流变学（Rheology）这一学科术语^[6]，标志着流变学正式成为一门独立的学科。Bingham 通过研究油漆、黏土等材料的流动特性，建立了著名的 Bingham 塑性流体模型，为后续流变学研究提供了重要范式。流变学研究的核心在于揭示应力、应变速率和时间三者之间的内在关联，其关键参数包括粘度、弹性模量、屈服应力、松弛时间和蠕变柔量等。这些参数共同描述了材料在外力作用下的变形能力和流动特性。在材料科学领域，流变学理论的发展经历了从简单体系到复杂体系的演进过程。早期研究主要集中于牛顿流体等理想体系的流动行为，随着理论体系的完善和测试技术的进步，研究对象逐渐扩展到有复杂流变特性的材料体系。在建筑材料领域，水泥和混凝土流变学的研究始于 20 世纪中期。水泥基材料作为一种典型的多相复合材料，其流变特性表现为粘性、塑性和弹性的复杂耦合。这种特性直接影响混凝土在搅拌、运输、泵送和浇筑等施工环节中的工作性能。早期的混凝土流变学研究主要借鉴了经典流变学理论，将混凝土简化为 Bingham 流体进行处理。然而，随着高性能混凝土、自密实混凝土等新型水泥基材料的出现，研究者们逐渐认识到传统流变模型的局限性，进而发展了改进的 Bingham 模型、Herschel-Bulkley 模型等更符合实际工程需求的流变模型。随着测试技术的不断创新和计算方法的日益完善，混凝土流变学正在从经验性描述向定量化、精准化方向发展，为提升混凝土工程质量、开发新型建筑材料提供了重要的理论支撑和技术指导。

1.2 混凝土流变模型

1.2.1 Bingham 模型

在水泥基材料流变模型研究方面，刘豫等^[7]对现有模型进行了系统性归纳与总结，指出 Bingham 模型、改进 Bingham 模型和 Herschel-Bulkley 模型在水泥净浆和砂浆流变行为表征中具有广泛应用。值得注意的是，Banfill^[8]于 20 世纪 90 年代的研究工作证实，Bingham 模型同样适用于描述混凝土这类复杂多相体系的流变特性。作为最早应用于混凝土流变研究的经典模型，Bingham 模型将混凝土简化为具有屈服应力的理想塑性流体，其核心假设在于剪切应力与剪切应变率之间存在线性关系，这一关系可由式（1）表示。

$$\tau = \tau_0 + \eta \dot{\gamma} \quad (1)$$

式中, τ 表示剪切应力 (Pa), τ_0 为屈服应力 (Pa), η 代表塑性粘度 (Pa·s), $\dot{\gamma}$ 则为剪切速率 (s^{-1})。

该模型物理意义明确: 当施加应力低于 τ_0 时, 材料表现为弹性固体; 一旦应力超过 τ_0 , 材料即开始流动, 且流动过程中的应力-应变率关系呈现线性特征。这种简化处理为早期混凝土流变学研究提供了重要的理论基础, 尤其适用于普通混凝土在低剪切速率下的流变行为描述。

1.2.2 改进的 Bingham 模型

传统 Bingham 模型基于剪切应力与剪切速率呈线性关系的基本假设, 然而大量试验研究表明, 这一假设在描述复杂材料的流变行为时存在明显局限性。事实上, 许多工程材料(包括岩石、混凝土和高分子复合材料等)在不同应力状态下往往表现出显著的非线性流变特性。以新拌自密实混凝土为例, 在高剪切速率工况下 ($\dot{\gamma} > 50 s^{-1}$), 由于颗粒间相互作用增强和微结构重组, 材料会出现明显的剪切增稠现象 (Dilatant behavior), 导致表观粘度随剪切速率增大而升高, 应力-应变率曲线呈现上凸的非线性特征。针对这一现象, Feys 等^[9-10]通过引入二次修正项, 提出了改进的 Bingham 模型如式 (2) 所示。

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

1.2.3 Herschel-Bulkley 模型

1926 年, 美国工程师 Herschel^[9]和 Bulkley 在研究油漆、黏土等复杂流体时提出。用于描述具有屈服应力的非牛顿流体行为, 模型如式 (3) 所示。

$$\tau = \tau_0 + K\dot{\gamma}^n \quad (3)$$

式中, K 为稠度系数, n 为流变指数。

Papanastasiou^[11]提出正则化方法, 通过引入应力增长指数, 有效克服了屈服面处数值计算的奇异性问题, 这一突破使 Herschel-Bulkley 模型在 CFD 模拟中获得实际应用。Balmforth^[12]系统研究了黏塑性流体的地质流动特性, 将 Herschel-Bulkley 模型成功应用于泥石流和岩浆流动模拟。Barnes^[13]通过系统的试验研究明确了屈服应力的物理意义及其测量方法, 为 Herschel-Bulkley 模型的工程应用确立了试验标准。

1.2.4 混凝土流变模型的比较

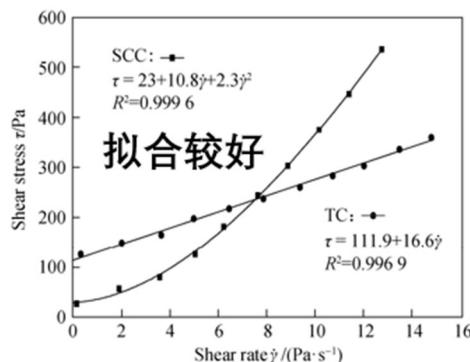


图 1.Bingham 和 改进的 Bingham 模型对比^[9]

Fig.1. Comparison between Bingham and Modified Bingham models.

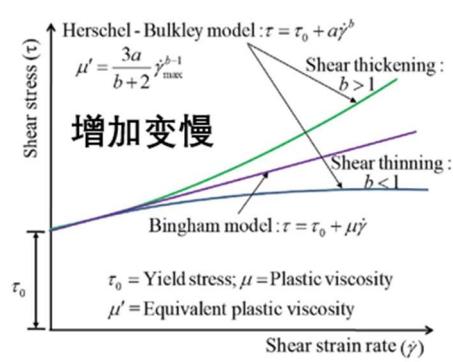


图 2.Bingham 模型 Herschel-Bulkley 模型对比^[14]

Fig.2. Comparison of Bingham model with Herschel-Bulkley models.

近年来, 关于水泥基材料流变模型的比较研究取得了重要进展。Feys 等学者^[9-10]通过系统试验对 Bingham 模型、改进 Bingham 模型和 Herschel-Bulkley 模型进行了全面对比, 研究发现传统 Bingham 模型在描述掺高效减水剂的水泥基材料时存在明显不足, 尤其在高剪切速率 ($\dot{\gamma} > 30 s^{-1}$) 下显著偏离

实际测量数据，而改进 Bingham 模型通过引入二次项将预测精度提高了 40%以上如图 1 所示^[9]，特别适用于自密实混凝土的流变表征。Romio Mandal^[14]的研究进一步表明（见图 2），Herschel-Bulkley 模型展现出最广的适用范围，其流变指数 n 能有效量化 Bingham 模型无法表征的剪切增稠现象($n>1$)，对于水胶比 0.25-0.35 的高性能混凝土，该模型的拟合优度 R^2 可达 0.95-0.99。

除上述模型外，Casson 模型作为非线性流变模型的重要补充^[15]，在高浓度颗粒悬浮体系中表现出独特优势，Damineli 团队^[16]的研究证实，对于含 20%以上惰性掺合料的水泥浆体，Casson 模型的预测误差比 Bingham 模型降低 25%。这些研究为工程实践中模型的选择提供了重要依据：普通混凝土（坍落度 150-200mm）可选用 Bingham 模型；自密实混凝土推荐改进 Bingham 或 Herschel-Bulkley 模型；超高强混凝土 ($f_c>100\text{ MPa}$) 宜采用 Herschel-Bulkley 模型；而高掺量矿物掺合料体系 (>30%) 则可考虑 Casson 模型。图 1 和图 2 分别展示了 Bingham 与进前后 Bingham 模型的应力-应变率曲线对比以及 Herschel-Bulkley 模型的预测效果差异，直观呈现了各模型的特性差异。表 1 汇总了 Bingham、Herschel-Bulkley、改进的 Bingham 和 Casson 流变模型的计算方程式及其适用性特征。

表 1 常见的流变模型

Table 1 Common Rheological Models

模型名称	模型方程	特点与应用
Bingham 模型	$\tau = \tau_0 + \eta \gamma$	用于描述水泥、砂浆和混凝土
Modified Bingham 模型	$\tau = \tau_0 + \mu \gamma + \gamma^2$	更好地拟合非线性行为
Herschel-Bulkley 模型	$\tau = \tau_0 + K \gamma^n$	适用于高性能混凝土等材料
Casson 模型	$\sqrt{\tau} = \sqrt{\tau_0} + \sqrt{K} \gamma$	静置或缓慢流动状态下的性能

注： τ =剪切应力； τ_0 =屈服应力； η =塑性黏度； γ =剪切速率； K =稠度系数； n =流变指数

1.3 混凝土常见的流变参数

1.3.1 粘度

混凝土的粘度是表征其流动阻力的关键参数，本质上反映了浆体中固体颗粒间的摩擦作用与微观相互作用。这一参数受多重因素协同影响，其中水泥浆体浓度起着决定性作用——随着浆体浓度的增加，水泥颗粒间距减小，范德华力和表面静电作用显著增强，从而导致体系粘度呈指数级增长。在建筑工业智能化转型和绿色高性能混凝土快速发展的背景下，粘度调控研究的重要性日益凸显。

国内外学者在混凝土粘度研究领域取得了突破性进展。王俊鹏等^[17]创新性地将分形理论引入 Maxwell 模型，建立了时变粘度分形导数模型 (TVFM)，该模型成功描述了高强自密实混凝土和地聚合物混凝土在早期硬化阶段的非线性蠕变行为。Zhu^[18]则从颗粒级配角度出发，系统研究了凝灰岩与石灰石微细颗粒对机制砂混凝土流变特性的影响，提出了基于体积分数比的伪牛顿粘度预测方法。如图 3 所示，其研究揭示了剪切速率对屈服应力和表观粘度的差异化影响：随着剪切速率增大，屈服应力因颗粒间结构破坏而上升，而表观粘度则因剪切稀化效应呈现下降趋势。这些发现为混凝土流变性能的精准调控提供了新的理论依据。Yang 等^[19]通过系统的对比试验研究了液体和粉末两种形态的聚羧酸减水剂对超高性能混凝土 (UHPC) 流变性能的影响。研究结果表明，粉末状聚羧酸减水剂在改善新拌 UHPC 浆体流动性方面具有显著优势，其分散效果和减水效率明显优于液态产品。这一发现为超高性能混凝土材料体系的优化设计提供了重要依据，表明粉末状减水剂更适合应用于 UHPC 的配制。

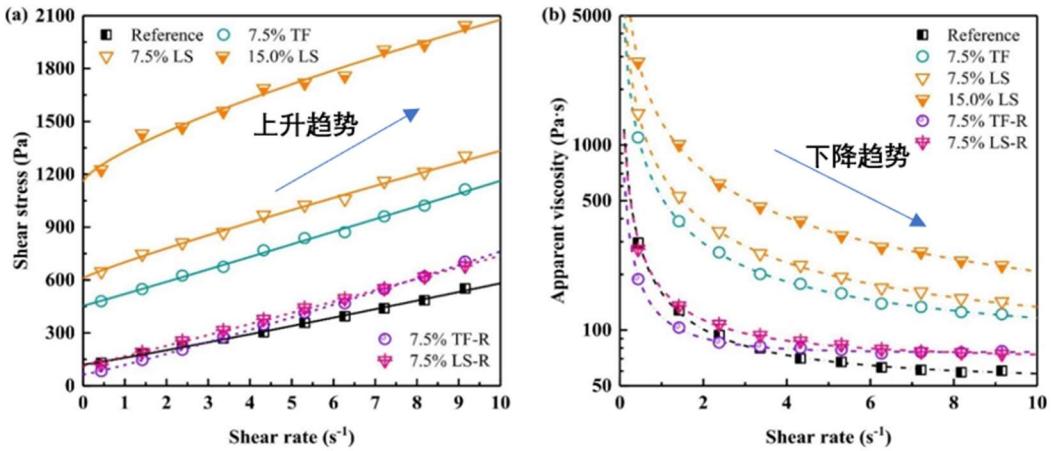


图 3. 混凝土混合物的流动曲线^[18]: (a) 剪切应力和 (b) 表观粘度。

Fig. 3. Flow curves of concrete mixtures: (a) shear stress; (b) apparent viscosity.

Wu 等^[20]创新性地探讨了赤泥作为自密实混凝土粘度调节剂的可行性。试验数据显示, 赤泥浆体展现出优异的保水性能, 其水化特性明显区别于传统水泥浆体。在保持相同流动度的条件下, 随着赤泥掺量的增加, 混合浆体的泌水率显著降低, 同时屈服应力和塑性粘度呈现规律性增长。这一研究成果不仅为工业副产品赤泥的高值化利用开辟了新途径, 也为自密实混凝土的粘度调控提供了新的技术方案。

1.3.2 屈服应力

屈服应力是表征混凝土流动性能的关键参数, 它反映了混凝土从弹性状态转变为流动状态所需克服的最小剪切应力。这一参数不仅取决于原材料的物理化学特性, 更与混凝土的施工性能和硬化后的力学性能密切相关。作为混凝土流变行为的重要指标, 屈服应力直接影响泵送压力、浇筑质量和振捣效果, 进而决定了工程建设的效率和质量。近年来, 国内外学者在屈服应力研究领域取得了显著进展。Anjneya 等^[21]创新性地建立了基于介观结构的离散元计算模型, 该模型通过考虑不同几何形状颗粒的相互作用, 实现了多流态条件下屈服应力的精确预测。White 等^[22]则开发了一种结合 3D 扫描技术的坍落度测试新方法, 通过 Artec Leo 扫描仪获取坍落体三维形貌, 并利用 CloudCompare 软件定量分析未屈服区高度 (h_0), 如图 4 所示。从图 (a)、(b) 和 (c) 三组不同形态的坍落体示意图来看, 坍落体形态越“矮胖” (c 组), 计算出的未屈服区高度 h_0 的平均值越小; 坍落体形态相对“高瘦” (a 组), 未屈服区高度 h_0 的平均值越大。这反映出坍落体的形态变化与未屈服区高度存在关联, 可用于评估混凝土流变性能。这种方法通过多次测量取平均值, 显著提高了屈服应力预测的准确性。对比试验表明, 该方法的测试结果与便携式流变仪的应力增长测试具有良好的一致性, 为现场快速评估混凝土流变性能提供了可靠手段。

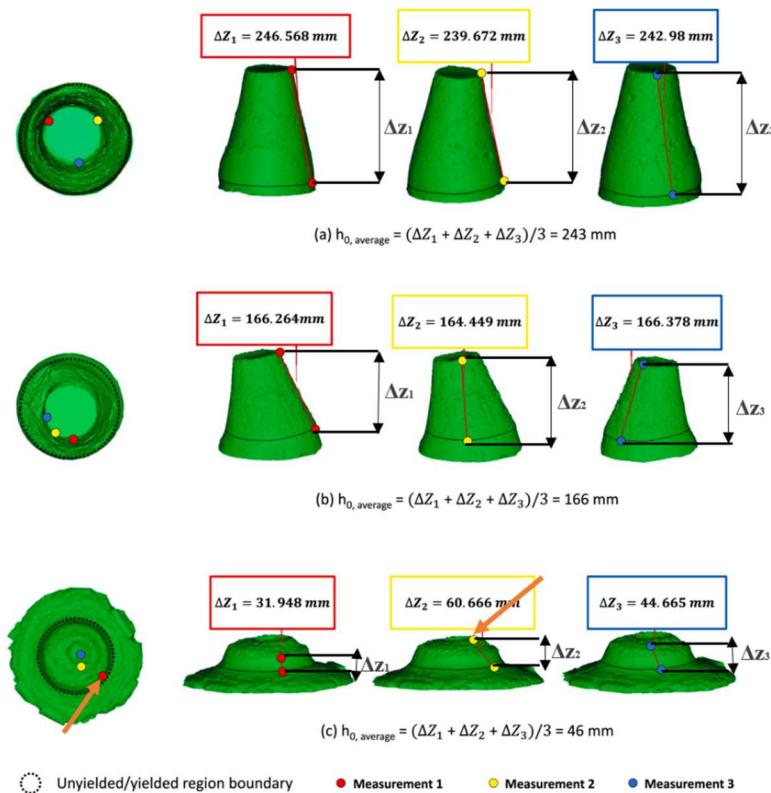
图4. 坍落度剖面^[22]

Fig.4. Slump profile

近几十年来，机器学习技术已成为一种极具吸引力的建模方法，适用于包括材料科学在内的各种科学领域。Yousef^[23]使用了四种不同的机器学习算法来研究它们预测自密实混凝土屈服应力和粘度的能力，例如线性回归（LR）、随机森林（RF）、决策树（DT）和支持向量机（SVM）。此后，根据统计系数（回归系数 R^2 、平均绝对误差和均方误差）之间的预测输出和试验输出之间，确定用于预测流变行为（塑性粘度和屈服应力）最佳模型，作为流变参数（坍落度流直径、V漏斗流时间）的函数。表明使用机器学习技术为流变行为的预测提供了一种智能化的技术。

1.3.3 弹性模量

弹性模量反映了混凝土在弹性变形阶段应力与应变的比例关系，它是评估混凝土在承受荷载初期变形能力的重要指标。混凝土的弹性模量主要取决于骨料的弹性模量、水泥石的强度以及两者之间的界面粘结强度。通常情况下，骨料的弹性模量越高，在混凝土中所占的比例越大，混凝土的弹性模量也就越高。随着新型混凝土材料的不断涌现以及建筑结构向大型化、复杂化发展，准确掌握混凝土弹性模量的变化规律和影响因素变得尤为重要。基于此，国内外学者从不同角度对混凝土弹性模量展开了大量研究，力求为工程实践提供更科学、更精准的理论支撑与技术指导，以下将对这些研究进行详细阐述。混凝土作为一种典型的复合材料，具有复杂的性能，每个组分的弹性模量和内部结构都会影响混凝土的弹性模量。通过砂浆和骨料元素的不同组合^[24]，学者们提出了不同的预测模型来精准预测弹性模量，这些模型包括并联相模型、串联相模型、Maxwell 模型、Counto 模型。

表2 汇总了这些预测模型的基本原理与模型特点。

表2 常见的弹性模量预测模型
Table 2 Common elastic modulus prediction models.

模型名称	基本原理	特点
并联相模型 ^[25]	将复合材料视为由不同相材料并联组成，各相材料在受力时同时承担载荷，总应变等于各相应变之和	能较好地描述各相材料性能差异较大，且界面结合良好的复合材料的宏观性能；计算相对简单
串联相模型 ^[25]	把复合材料看作各相材料串联而成，总应力等于各相应力之和，各相材料的应变相同	对于分析一些层状结构或各相材料在受力方向上依次承载的复合材料较为适用；可以直观地考虑各相材料在力传递过程中的作用
Maxwell 模型 ^[26]	由理想弹性元件（弹簧）和理想黏性元件（阻尼器）串联组成，用于描述黏弹性材料的力学行为	能反映材料在加载初期的弹性响应和随时间的黏性流动特性；可以解释材料的应力松弛现象。
Counuo 模型 ^[27]	一种基于细观力学的复合材料模型，考虑了纤维的分布、取向以及基体和纤维之间的相互作用等因素	能更准确地描述复合材料的细观结构与宏观性能之间的关系；可以考虑纤维的随机分布和不同取向对材料性能的影响

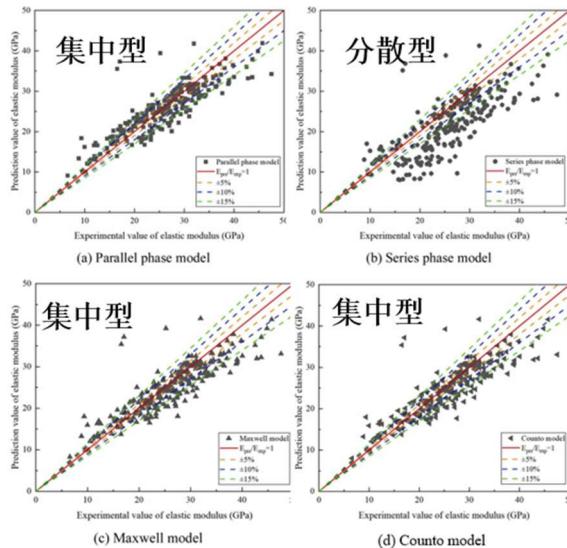


图5.模型预测结果与文献统计试验结果的比较^[28]

Fig .5.Comparison between model prediction results and literature statistical experimental results.

Gao^[28]通过将各模型的预测结果与文献中的统计检验数据进行比较，计算出各模型的预测结果与试验实测结果之比的均值、方差和标准差如图5所示，验证了各两相复合模型的预测精度，确定了 Maxwell 模型和 Counuo 模型较好地描述了轻骨料与砂浆弹性特性和轻骨料混凝土弹性模量之间的关系。刘旭等^[29]通过系统梳理现有文献，构建了一个涵盖含与不含辅助胶凝材料的粗骨料混凝土的粗骨料性能、抗压强度及弹性模量的大型数据库。基于因子设计方法，研究量化了各参数对弹性

模量影响的统计显著性，结果表明：弹性模量随水胶比和粗骨料替代率的增加呈显著下降趋势。

1.4 混凝土成分对流变性的影响

混凝土是一种含有水泥、矿物外添加剂、水、骨料和化学外添加剂的复合材料。其流变特性取决于混凝土混合物中使用的每种成分的质量及其相互作用。目前国内外已经报道了几项关于使用不同水泥、骨料、外添加剂（矿物和化学品）和纤维的混凝土流变行为的研究工作。

粉煤灰是煤粉燃烧后的主要固体残留物，其化学组成以 SiO_2 、 Al_2O_3 、 FeO 、 Fe_2O_3 和 CaO 等氧化物为主。微观形貌上，粉煤灰颗粒多呈球形，表面光滑或呈现多孔结构。在混凝土中掺入适量粉煤灰（0%~40%）时，其微球效应可释放被包裹的游离水，从而降低拌合需水量，改善新拌混凝土的流动性，同时显著降低屈服应力和塑性黏度，优化体系的触变性能。然而，当掺量过高（如 60%）时，由于粉煤灰的高比表面积及吸附效应，需水量急剧增加，导致浆体黏稠化，流动性劣化，屈服应力和塑性黏度随之上升。Heirman^[30]等系统研究了矿物掺合料（石灰石粉、石英粉和粉煤灰）、胶凝材料类型（含高炉矿渣水泥）以及化学外加剂（PCE 高效减水剂）掺量对自密实混凝土流变行为的影响规律。

高炉炉渣是冶炼生铁时从高炉排出的熔融硅酸盐类物质，由脉石、灰分、熔剂和不能进入生铁的杂质组成，是易熔混合物。高炉冶炼时，炉内温度达 1400 - 1500°C，物料成液相，浮在铁水上的熔渣经铁口或渣口排出。Jiao 等^[31]对粉煤灰的添加对混凝土的流变特性和高炉矿渣对水泥基材料流变性能的影响如图 6 所示。得到了屈服应力与成分之间没有显著的规律，这种不同的规律可能与原材料的来源广有关。

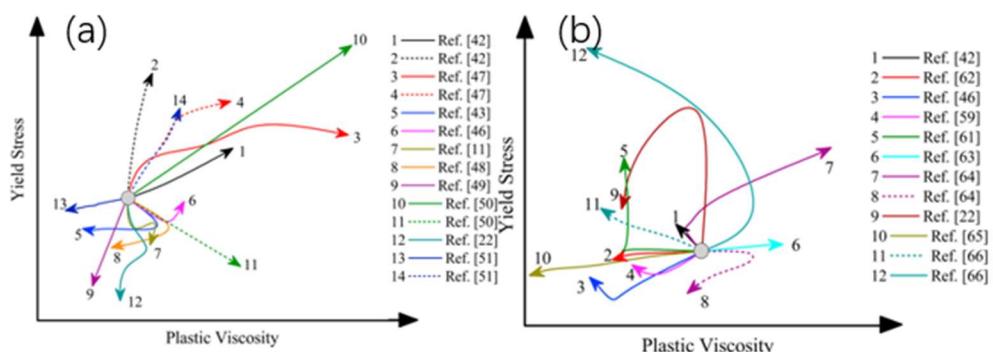


图 6. 粉煤灰及炉渣对流变性的影响^[31]: (a) 粉煤灰 (b) 炉渣

Fig.6. The influence of fly ash and slag on rheological properties: (a) Fly ash; (b) Slag.

Boukendakdjji 等^[32]研究了高炉炉渣对自密实混凝土流变性的影响。由于用炉渣代替水泥可以提高混合物的可加工性并减少 CO_2 排放物，粒化高炉矿渣（ground granulated blastfurnace slag, GGBS）已广泛用于水泥浆、砂浆和混凝土。大多数研究发现 GGBS 的添加降低了塑性粘度，而 GGBS 对屈服应力的影响是不确定的。Park 等^[33]指出，屈服应力先减小后增加，但塑性黏度随着 GGBS 含量的增加而降低。Tang 等^[34]通过改变高效减水剂的用量，研究了不同坍落度流下含大量 GGBS 的水泥浆的流变特性。他们发现，在相同的坍落度流下，与普通水泥浆相比，含有 GGBS 的浆料具有明显的更高塑性粘度、更差的稳定性和更低的流速。在相同的坍落度流下，与普通水泥浆相比，含有 GGBS 的浆料具有明显的更高塑性粘度、更差的稳定性和更低的流速。

硅粉是电弧炉冶炼硅金属及硅铁合金过程中产生的副产品，其颗粒呈极细粉末状，粒径分布主

要集中在 $0.1\text{-}0.3\mu\text{m}$ 范围内，其中亚微米级颗粒 ($<0.1\mu\text{m}$) 占比超过 80%。大量研究表明，硅粉的掺入会显著影响水泥基材料的流变性能：一方面增加体系的屈服应力和塑性粘度，另一方面降低其工作性能。然而，Zhang 等^[35]的研究得出了不同的结论，他们发现特定条件下硅粉反而能够降低水泥浆体的粘度和屈服应力。Laskar 团队^[36]进一步揭示了这一现象的机理：当采用聚羧酸减水剂时，硅粉会提高新拌混凝土的初始屈服应力；而使用磺化萘系减水剂时，则表现出相反的效应。这种差异主要源于不同减水剂分子与硅粉表面羟基的相互作用机制不同。

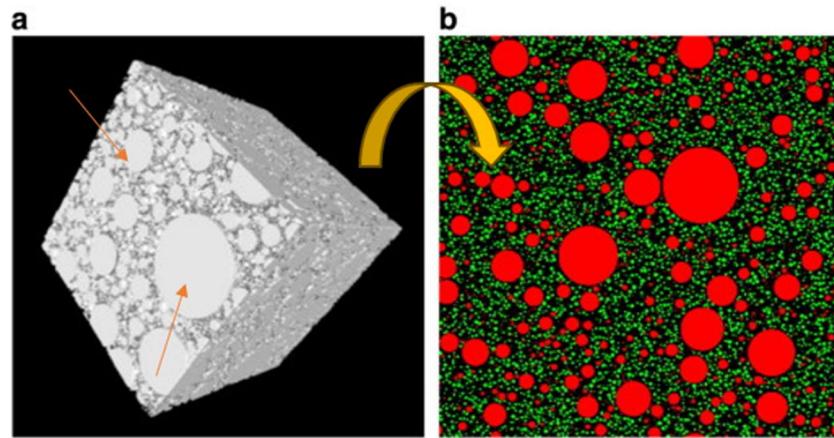


图 7. 模拟 3D 微观结构和 3D-REV 捕获的 2D 切片[39]
Fig. 7. Simulation of 3D microstructure and 2D slices captured by 3D-REV

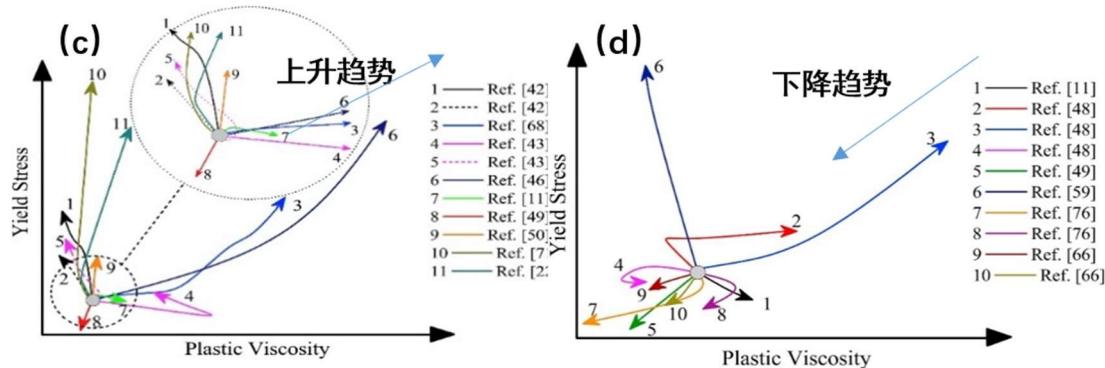


图 8. 硅灰及石灰石粉对流变性的影响：(a) 硅灰 (b) 石灰石粉^[31]
Fig. 8. The influence of silica fume (a) and limestone powder (b) on rheological properties

石灰石粉是由石灰石经破碎、粉磨等工艺加工而成的粉末状材料。其主要成分是碳酸钙 (CaCO_3)，还可能含有少量的氧化镁 (MgO)、二氧化硅 (SiO_2)、三氧化二铁 (Fe_2O_3) 等杂质。Rahman 等^[37]指出，石灰石粉用量的增加导致絮凝速率显著增加。此外，较大的石灰石颗粒对水的需求减少。Vance 等^[38]使用保压算法生成的模拟 3D 微观结构，并从 3D-REV 捕获的 2D 切片将浆料的流变特性与悬浮液中的水膜厚度和颗粒数密度相关联，见图 7。发现，随着石灰石粉的粒径从 $0.7\mu\text{m}$ 增加到 $15\mu\text{m}$ ，屈服应力和塑性粘度都降低了。最后 Jiao 等^[31]总结了硅灰和石灰石粉对流变性能的影响如图 8 所示。说明硅灰在一定程度上，会使混凝土在塑性粘度增大时，屈服应力也增大，意味

着混凝土更难发生流动变形，表现出更明显的“粘性”特性。随着塑性粘度增加，屈服应力呈现下降趋势。表明石灰石粉的作用下，混凝土塑性粘度增大时，屈服应力反而减小，即石灰石粉可能会让混凝土在高塑性粘度状态下，相对更容易发生流动变形。

2 混凝土流变性的测试方法

2.1 流变仪测试方法

旋转流变仪是一种常用的流变仪测试设备，它的结构主要包含外筒、内筒，并具备指定转速控制和扭矩测量功能如图 9 所示。其工作原理是通过电机带动转子在混凝土中旋转，在旋转过程中，转子会受到混凝土的阻力，产生扭矩。通过测量扭矩的大小，并结合转子的几何参数和旋转速度，就可以计算出混凝土的粘度和屈服应力等流变参数。BTRHEOM 流变仪^[39]和 ICAR 流变仪^[40]等采用叶片直接测量某些浓缩悬浮液的屈服应力，此后，诸多研究人员进一步在速率控制模式下采用改进叶片法，成功实现了对复杂悬浮液体系屈服应力的直接测量^[41]。Martínez-Padilla^[42]使用受控应力流变仪对大杯中的四叶片测量系统进行了牛顿流体测试，并总结了所用叶片杯系统的一些特性。尺寸主要与叶片直径或叶片高度有关。Hočevan 等^[43]使用两种类型的同轴旋转流变仪（ICAR 流变仪和 ConTec Viscometer 5）比较了 22 种混凝土混合物的 Bingham 流变参数测量结果后两种流变仪的屈服应力和塑性粘度的数值结果差异很大。尽管存在这些差异，但各种混凝土类型的流变参数变化趋势表现出显著的相似性。

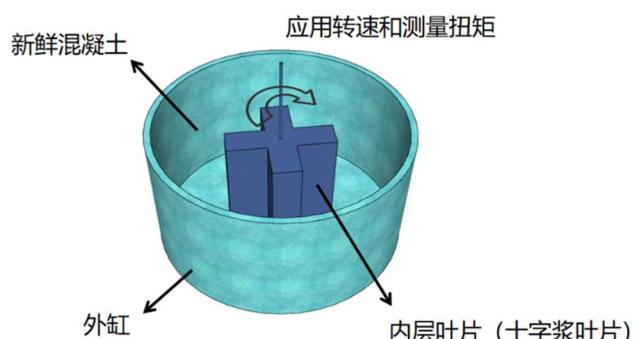


图 9.叶片旋转流变仪示意图
Fig.9. Schematic diagram of the blade rotation rheometer

旋转黏度计的优点是测试精度较高，能够在不同的剪切速率下测量混凝土的流变性能，从而获取较为全面的流变数据。通过改变转子的转速，可以模拟混凝土在不同施工条件下的剪切流动状态，例如在混凝土泵送、搅拌过程中的剪切速率变化。为了评估这些仪器的计量性能 Cardoso de Castro 等^[44]采用 Brookfield 型旋转粘度计和流变仪对牛顿参考材料进行了粘度测量结果表明，对于低动态粘度，流变仪产生的粘度值比 Brookfield 型旋转粘度计更精确。在较高粘度下，两种粘度计表现出相似的计量行为。Nguyen^[45]运用了一种通过增加垂度靴（MRV）改进的旋转粘度计，在流动回路中研究了几种评估油基钻井液中动态重晶石垂度的方法。Kawatra^[46]利用旋转式粘度计和振动球式粘度计分别测量了在低剪切速率下和高剪切速率下的表现粘度。

2.2 非流变仪测试方法

流变仪法是一种广泛且常见的测试方法，但在实际测试过程中，仍有许多因素会导致结果的显

著变化。非流变仪测试方法被认为是一种关键的流变学评估方法，旨在解决与旋转流变仪相关的缺陷，例如活塞流、复杂性、便携性有限和高成本。

坍落度试验是最常用的混凝土工作性测试方法之一。将混凝土拌合物按规定方法装入坍落度筒，然后垂直提起坍落度筒，测量混凝土拌合物因自重产生的坍落高度。坍落度越大，表明混凝土的流动性越好。该方法操作简单、快速，适用于现场测试，但它只能定性地反映混凝土的流动性，无法准确测量流变参数，且受操作人员的影响较大。坍落度的测试方法见图 10^[47]。所示由于在高精度和全场测量方面的显著进步，3D-DIC（三维数字图像相关）方法能够根据时空变化（即时间演变和空间变化）对自由坍落进行新的监测和可视化。Zhang 等^[48]研究开发了一种三维数字图像相关（3D-DIC）方法，以仔细识别干混凝土混合物中的自由坍落度。Zheng^[49]设计了高精度速度控制坍落度试验系统，研究了尾矿加厚温度、提升速度、坍落度圆柱形状和尾矿浆质量浓度对坍落度值的影响。试验结果表明，坍落度值随尾矿加厚温度的升高而降低，导致屈服应力升高。提升速度会显著影响屈服应力，更快的提升速度会产生较大的坍落度值，进而导致计算出的屈服应力较小。

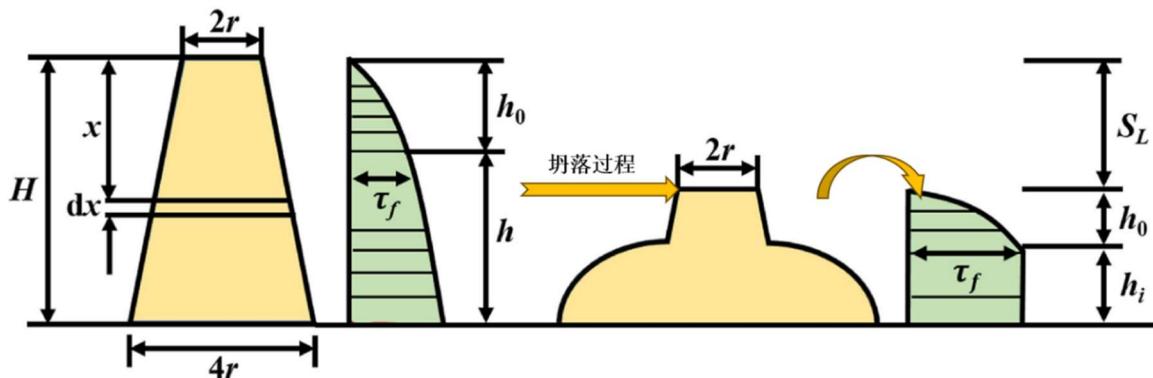


图 10. 坍落度和坍落度流测试^[47]

Fig. 10. Slump and slump flow test

3 结论

混凝土作为现代建筑工程中应用最广泛的建筑材料，其流变性能对施工工艺和工程质量具有决定性影响。本文系统梳理了混凝土流变学的研究进展，从理论模型、关键参数、影响因素到测试方法进行了全面阐述，为混凝土材料的科学的研究和工程应用提供了参考。

(1) 混凝土流变模型的发展经历了从线性到非线性的演进过程。Bingham 模型适用于普通混凝土的低剪切流动分析，改进 Bingham 模型通过引入二次项显著提升了自密实混凝土高剪切区的预测精度，而 Herschel-Bulkley 模型则凭借幂律指数实现了超高性能混凝土非线性行为的精准表征。研究表明，Herschel-Bulkley 模型参数敏感性最高，是实验室研究的理想工具；改进 Bingham 模型平衡了精度与实用性，适合工程现场；传统 Bingham 模型仍具有基础评估价值。基于各模型特性，建议根据混凝土类型选择合适的流变模型：常规工程用 Bingham 模型，自密实混凝土用改进 Bingham 模型，超高性能和 3D 打印混凝土选用 Herschel-Bulkley 模型，高掺固废体系可辅以 Casson 模型验证。这一多模型协同策略为混凝土流变性能调控提供了一种解决方案。

(2) 混凝土流变性能的调控本质上是通过材料组成与工艺参数的协同优化实现的。大量研究表明，不同组分对混凝土流变特性具有差异化影响：水泥细度和矿物组成直接影响初始屈服应力；骨料级配和形态显著改变塑性粘度；而化学外加剂与矿物掺合料的协同效应则可精准调控流变参数的

时间依赖性。本研究系统揭示了各组分含量、粒径分布和表面特性与流变参数的定量关系，建立了基于组分特性的流变性能预测模型，为高性能混凝土的设计提供了理论依据。同时，现代测试技术与机器学习方法的结合，为混凝土质量控制和性能优化提供了新思路。

(3) 在测试方法方面，本研究建议采用多尺度流变表征体系开展研究：宏观尺度方面采用改进的旋转流变仪测试，解决传统方法在高剪切速率下的测量偏差，可实现对流变性能的快速评估；介观尺度方面开发基于数字图像处理的坍落度分析技术，实现屈服应力的现场快速评估；微观尺度结合超声波和电化学阻抗谱，揭示流变参数与水化过程的关联机制。通过建立旋转流变仪与坍落度测试的流变参数映射关系，实现了实验室精确测量与工程现场快速评估的数据互通，为混凝土施工质量控制提供了标准化技术支撑。

4. 未来的研究方向

本文系统梳理既有流变学研究的发展现状，建议从以下几个方面进一步开展深入研究：

(1) 在基于多尺度分析的流变性研究方面，目前对混凝土流变性的研究多集中于宏观尺度，未来可深入开展多尺度分析。从微观层面，借助先进表征技术（如原子力显微镜、纳米压痕等）探究水泥水化产物、胶体粒子等微观结构对流动性的影响机制；在介观尺度，研究骨料 - 浆体界面过渡区特性对流变参数的作用；宏观尺度结合工程实际，综合考虑结构尺寸、施工工艺等因素。通过多尺度关联分析，构建更精准的混凝土流变性理论体系，为高性能混凝土设计提供坚实理论支撑。

(2) 在智能混凝土流变性动态调控研究方面，随着智能材料和传感器技术发展，智能混凝土成为趋势。未来研究可聚焦于开发能实时感知并动态调控流变性的智能混凝土体系。例如，内置智能传感器实时监测混凝土在搅拌、运输、浇筑过程中的流变参数，结合人工智能算法，自动反馈并调控外加剂释放或材料组分反应，使混凝土流变性始终满足施工要求，提升施工质量和效率，减少人工干预和质量隐患。

(3) 在深海、极地、高温等极端环境中，混凝土面临特殊挑战，其流变性研究尚显不足。未来需针对这些环境，研究温度、压力、介质腐蚀等多因素耦合作用下混凝土流变性变化规律。如深海工程中，高水压和海水侵蚀会改变混凝土内部孔隙结构和化学组成，影响流变性；极地低温使混凝土浆体黏度增大、流动性变差。基于流变学原理合理设计和调控适用于极端环境的混凝土配合比，同时精准控制施工工艺，有望突破混凝土在极端环境下的服役性能。

总之，混凝土流变学研究已经取得了丰硕成果，但仍有许多问题有待深入探索。随着新材料、新技术的不断发展，混凝土流变学必将迎来新的突破，为建筑行业的可持续发展做出更大贡献。未来的研究应继续加强理论创新与实践应用的结合，推动混凝土材料向更高性能、智能化方向发展。

参考文献

- [1] Robalo K, Soldado E, Costa H, et al. Efficiency of cement content and of compactness on mechanical performance of low cement concrete designed with packing optimization[J]. Construction and Building Materials, 2021, 266: 121077.
- [2] Ferraris C F. Measurement of the rheological properties of high performance concrete: state of the art report[J]. Journal of research of the national institute of standards and technology, 1999, 104(5): 461.
- [3] Roussel N, Coussot P. "Fifty-cent rheometer" for yield stress measurements: from slump to spreading flow[J]. Journal of rheology, 2005, 49(3): 705-718.
- [4] Feys D, Cepuritis R, Jacobsen S, et al. Measuring rheological properties of cement pastes: most common techniques, procedures and challenges[J]. RILEM technical letters, 2017, 2: 129-135.

- [5] Khayat K H. Viscosity-enhancing admixtures for cement-based materials—An overview[J]. *Cement and Concrete Composites*, 1998, 20(2-3): 171-188.
- [6] Banfill P, Beaupré D, Chapdelaine F, et al. Comparison of concrete rheometers[J]. International tests at LCPC, Paris, 2000
- [7] 刘豫, 史才军, 焦登武, 等. 新拌水泥基材料的流变特性, 模型和测试研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2017, 45(5): 708-716.
- [8] Banfill P F G. The rheology of fresh mortar[J]. *Magazine of concrete research*, 1991, 43(154): 13-21.
- [9] Herschel W H, Bulkley R. Konsistenzmessungen von gummi-benzollösungen[J]. *Kolloid-Zeitschrift*, 1926, 39: 291-300.
- [10] Wallevik O H, Feys D, Wallevik J E, et al. Avoiding inaccurate interpretations of rheological measurements for cement-based materials[J]. *Cement and Concrete Research*, 2015, 78: 100-109.
- [11] Papanastasiou T C. Flows of materials with yield[J]. *Journal of rheology*, 1987, 31(5): 385-404.
- [12] Balmforth N J, Frigaard I A, Ovarlez G. Yielding to stress: recent developments in viscoplastic fluid mechanics[J]. *Annual review of fluid mechanics*, 2014, 46(1): 121-146.
- [13] Barnes H A. The yield stress—a review or ‘παντα πει’—everything flows?[J]. *Journal of non-newtonian fluid mechanics*, 1999, 81(1-2): 133-178.
- [14] Mandal R, Panda S K, Nayak S. Rheology of Concrete: Critical Review, recent Advancements, and future prospectives[J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 392: 132007.
- [15] Casson N. Rheology of disperse systems[J]. *Flow Equation for Pigment Oil Suspensions of the Printing Ink Type. Rheology of Disperse Systems*, 1959: 84-102.
- [16] Damineli B L, John V M, Lagerblad B, et al. Viscosity prediction of cement-filler suspensions using interference model: A route for binder efficiency enhancement[J]. *Cement and Concrete Research*, 2016, 84: 8-19.
- [17] Wang J, Yan S, Wen H, et al. Time-varying viscosity fractal derivative model for ultraslow creep of concrete[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2025: 110868.
- [18] Zhu J, Zhou Y, Li C, et al. A qualitative approach to describe the viscosity of flowable concrete made with manufactured sand containing different microfines[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 451: 138858.
- [19] Yang J, Zhao H, Zeng J, et al. The Influence of Chemical Admixtures on the Fluidity, Viscosity and Rheological Properties of Ultra-High Performance Concrete[J]. *Fluid Dynamics & Materials Processing*, 2024, 20(10).
- [20] Wu C R, Tang W, Zhan B J, et al. Feasibility study on using red mud as a viscosity-modifying agent for self-compacting concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 445: 137871.
- [21] Anjneya K, Deb A. A review of the discrete element method for modelling the rheology of fresh concrete[J]. *Recent Advances in Computational and Experimental Mechanics, Vol—I: Select Proceedings of ICRACEM 2020*, 2022: 81-95.
- [22] White C, Lees J M. Yield stress prediction from 3D reconstruction of fresh concrete slump[J]. *Cement and Concrete Research*, 2023, 174: 107331.
- [23] Asri Y E L, Benaicha M, Zaher M, et al. Prediction of plastic viscosity and yield stress of self-compacting concrete using machine learning technics[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2022, 59: A7-A13.
- [24] Zhou F P, Lydon F D, Barr B I G. Effect of coarse aggregate on elastic modulus and compressive strength of high performance concrete[J]. *Cement and concrete research*, 1995, 25(1): 177-186.
- [25] Hansen T C. Strength, elasticity and creep as related to the internal structure of concrete[C]//Chemistry of cement, Proceedings of fourth international symposium, Monograph. 1960, 2: 709-723.
- [26] Zhong S, Chen Z. Properties of latex blends and its modified cement mortars[J]. *Cement and Concrete Research*, 2002, 32(10): 1515-1524.
- [27] Counto U J. The effect of the elastic modulus of the aggregate on the elastic modulus, creep and creep recovery of concrete[J]. *Magazine of concrete research*, 1964, 16(48): 129-138.
- [28] Gao Y, Han X, Su X. Analysis of applicability and influencing factors of elastic modulus prediction model of lightweight aggregate concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2025, 462: 140022.
- [29] Liu X, Zhang X, Yan P. Prediction model for elastic modulus of recycled concrete based on properties of recycled coarse aggregate and cementitious materials[J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2024, 21: e04058.
- [30] Heirman G, Vandewalle L, Van Gemert D, et al. Influence of mineral additions and chemical admixtures on the rheological

- behaviour of powder-type self-compacting concrete[C]//Proc. of the 5th Int. RILEM Symp. on Self-Compacting Concrete (SCC2007). RILEM Publications SARL; Bagnoux, 2007: 329-334.
- [31] Jiao D, Shi C, Yuan Q, et al. Effect of constituents on rheological properties of fresh concrete-A review[J]. Cement and concrete composites, 2017, 83: 146-159.
- [32] Boukendakdj O, Kenai S, Kadri E H, et al. Effect of slag on the rheology of fresh self-compacted concrete[J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(7): 2593-2598.
- [33] Park C K, Noh M H, Park T H. Rheological properties of cementitious materials containing mineral admixtures[J]. Cement and concrete research, 2005, 35(5): 842-849.
- [34] TANG X, CAI Y, WEN J, et al. Correlation between slump flow and rheological parameters of compound pastes with high volume of ground slag[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2014, 42(5): 648-652.
- [35] Zhang X, Han J. The effect of ultra-fine admixture on the rheological property of cement paste[J]. Cement and concrete research, 2000, 30(5): 827-830.
- [36] Laskar A I, Talukdar S. Rheological behavior of high performance concrete with mineral admixtures and their blending[J]. Construction and Building materials, 2008, 22(12): 2345-2354.
- [37] Rahman M K, Baluch M H, Malik M A. Thixotropic behavior of self compacting concrete with different mineral admixtures[J]. Construction and building materials, 2014, 50: 710-717.
- [38] Vance K, Kumar A, Sant G, et al. The rheological properties of ternary binders containing Portland cement, limestone, and metakaolin or fly ash[J]. Cement and Concrete Research, 2013, 52: 196-207.
- [39] De Larrard F, Sedran T, Hu C, et al. Evolution of the workability of superplasticised concretes: assessment with the BTRHEOM rheometer[M]//Production methods and workability of concrete. CRC Press, 2004: 389-400.
- [40] De Larrard F, Sedran T, Hu C, et al. Evolution of the workability of superplasticised concretes: assessment with the BTRHEOM rheometer[M]//Production methods and workability of concrete. CRC Press, 2004: 389-400.
- [41] Keating J, Hannant D J. The effect of rotation rate on gel strength and dynamic yield strength of thixotropic oil well cements measured using a shear vane[J]. Journal of Rheology, 1989, 33(7): 1011-1020.
- [42] Martínez-Padilla L P, Quemada D. Baffled cup and end-effects of a vane-in-a-large cup rheometer for Newtonian fluids[J]. Journal of food engineering, 2007, 80(1): 24-32.
- [43] Hočevá A, Kavčič F, Bokan-Bosiljkov V. Rheological parameters of fresh concrete-Comparison of rheometers[J]. Gradjevinar, 2013, 65(2): 99-109.
- [44] Cardoso de Castro C S, Santo Filho D M E, Siqueira J R R, et al. Evaluation of the metrological performance of two kinds of rotational viscometers by means of viscosity reference materials[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2016, 138: 292-297.
- [45] Nguyen T, Miska S, Yu M, et al. Experimental study of dynamic barite sag in oil-based drilling fluids using a modified rotational viscometer and a flow loop[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2011, 78(1): 160-165.
- [46] Kawatra S K, Bakshi A K, Miller Jr T E. Rheological characterization of mineral suspensions using a vibrating sphere and a rotational viscometer[J]. International Journal of Mineral Processing, 1996, 44: 155-165.
- [47] Liang X, Li J, Li Z, et al. A Critical Review of Rheological Testing Methods for Fresh Concrete[J]. Journal of Building Engineering, 2025: 112096.
- [48] Zhang Y, Liu X, Wang J, et al. Recognition of the free slump in dry concrete mix: A 3D-digital image correlation test and the spatiotemporal variability[J]. Cement and Concrete Composites, 2025, 160: 106012.
- [49] Zheng B, Zhao X, Wang J, et al. Analysis of the slump test for on-site yield stress measurement of thickened tailings[J]. Case Studies in Construction Materials, 2024, 21: e03885.

¹ 第1作者简介：卞宇轩（2006-），男，本科生，研究方向：纳米改性水泥基材料。E-mail: 3371463140@qq.com。

*通讯作者简介：邵建文（1992-），男，博士，讲师，研究方向：固废资源化利用；新型高性能混凝土材料与结构。E-mail: jwshao@lDU.edu.cn。