

高原低温、低湿和低压环境条件对混凝土工作性能的影响

雷东移¹, 栾云杰¹, 王建新¹, 吴天旻¹, 李 莹¹, 张淑娴¹, 管延峰²

(1. 青岛理工大学土木工程学院(海洋环境混凝土技术教育部工程研究中心), 山东 青岛 266520;

2. 山东路桥集团有限公司, 济南 250014)

摘 要:高原地区的低温度、低湿度及低气压“三低”严酷环境条件会显著影响混凝土的工作性能, 导致其浇筑密实度与均匀性下降, 进而诱发初始缺陷, 对混凝土结构的力学性能与长期耐久性造成不利影响。当前针对高原环境对混凝土性能影响的研究多在于分析其力学性能和耐久性能, 早期性能也主要停留在水泥水化过程中的气泡稳定性等方面, 未能全面阐释高原“三低”环境作用下混凝土工作性能的影响机理, 缺乏高原环境单因素及多因素耦合效应对混凝土工作性能影响的系统概述。为深入理解高原“三低”环境对混凝土工作性能的影响概况, 本文从环境影响机理、性能表征方法及调控提升措施 3 个方面综述了高原“三低”环境影响规律及机理: 1) 阐述了高原单一及耦合环境因素可改变胶凝材料水化进程与新拌混凝土内部气泡结构, 进而导致工作性能劣化的内在机理; 2) 归纳了环境影响下混凝土工作性能表征和模拟方法; 3) 总结了外加剂调控、拌合工艺优化与气泡结构改善等工作性能优化提升措施。最后, 本文指出了目前高原“三低”环境下混凝土工作性能研究的不足, 并展望未来研究方向, 以期高原地区混凝土的设计、施工与维护提供理论支撑和实用技术。

关键词:高原环境; 新拌混凝土; 气泡结构; 工作性能; 流变性能; 提升措施; 数值分析

中图分类号: TU528 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2026)10-3750-19

网络出版时间: 2026-07-24



高原环境中的低温度、低湿度及低气压(即“三低”)环境, 是影响新拌混凝土工作性能的关键环境因素。近年高原地区大兴水利, 其严酷服役环境对新拌混凝土的工作性能提出了更高要求, 使得其既要抵抗低气压对新拌混凝土中气泡结构的劣化效应, 又要保持优良的流动特性以保证施工的需求; 既要克服低温度条件对水泥水化速率减缓的影响, 又要保证混凝土稳定的早期性能发展和良好的长期耐久性; 既要抑制低湿度导致的新拌混凝土水分快速蒸发, 维持浆体的流动性与可泵性, 又要防止因失水过快引发的塑性收缩裂缝, 确保混凝土早期微结构密实性。严酷高原环境条件要求混凝土在流动性、保水性及黏聚性等工作性能方面需具备更强的环境适应性。

目前, 针对高原单一环境条件对混凝土工作性能的影响, 学界已开展一些研究, 尤其关于低气压这一高原特有的环境因素研究较多。混凝土工作性能与气泡结构、水泥水化密切相关, 环境因素导致水泥水化过程和混凝土内气泡结构发生改变, 进而影响混凝土工作性能。例如, 气泡结构的大小、分布直接决定了新拌混凝土的滚珠润滑作用和填充能力; 水泥的水化速率能够影响混凝土稠度和凝结时间。在环境影响方面, 低温度会减缓水泥颗粒水化速度及对引气剂的吸附作用, 改变拌合浆体的水化产物和微观孔隙结构, 进而影响混凝土的流动性能^[1-8]; 低湿度会加速水泥基材料的水分蒸发, 降低其黏聚性和保水性, 减少可水化用水量、降低其水化程度、增大混凝土的收缩和开裂风险^[9-10]; 低气压则增加

收稿日期: 2025-09-08。 修订日期: 2025-11-27。

基金项目: 国家自然科学基金(U23A20673, 52478261, 52578294, U22A20244); 山东省自然科学基金(ZR2025MS779); 九江市重大技术攻关项目“揭榜挂帅”(ZD2025_001553); 吉安市 2024 年“百博百企”专项(2024H-100240); 中国博士后科学基金面上项目(2025M70067); 硅酸盐科学与先进建材全国重点实验室(SYSJJ2025-22)。

第一作者: 雷东移(1986), 男, 博士, 教授。

通信作者: 李 莹(1988), 女, 博士, 副教授。

Received date: 2025-09-08. Revised date: 2025-11-27.

First author: LEI Dongyi (1986-), male, Ph.D., Professor.

E-mail: leidongyi@qut.edu.cn

Correspondent author: LI Ying (1988-), female, Ph.D., Associate Professor.

E-mail: liying@qut.edu.cn

了新拌混凝土引气难度, 减少气泡数量, 并增大气泡间距系数, 使得气泡不稳定性增加, 从而导致混凝土工作性能降低^[11-15]; “三低”耦合环境则通过更为复杂的耦合效应进一步加剧了混凝土工作性能的劣化。尽管已有一些关于低温度、低湿度及低气压的研究成果, 但针对高原单因素与多因素耦合作用对混凝土工作性能的影响缺乏系统总结, 致使当前高原环境作用下新拌混凝土的性能模拟、预测及提升等相关机理分析准确度不高, 甚至偏离实际工况。

因此, 本文聚焦于高原中的“低温度、低湿度、低气压”环境, 从单一及耦合环境影响机理、性能测

试分析方法及调控提升措施 3 个层面系统调研了“三低”环境条件对混凝土工作性能的影响规律(图 1), 综述了“三低”环境条件对新拌混凝土气泡夹带、气泡分布、孔隙结构、水化过程、外加剂效用等特性的内在影响机理, 并阐述了耦合环境的复杂劣化效应; 对比了工作性能的不同测试方法及数值模拟分析技术的精度, 并提出了相应的优化措施; 同时分析了外加剂掺入、拌合工艺优化及孔隙结构提升等调控措施对新拌混凝土工作性能的提升机制。最后, 本文总结了目前关于高原环境下混凝土工作性能研究的不足, 并展望未来研究方向。

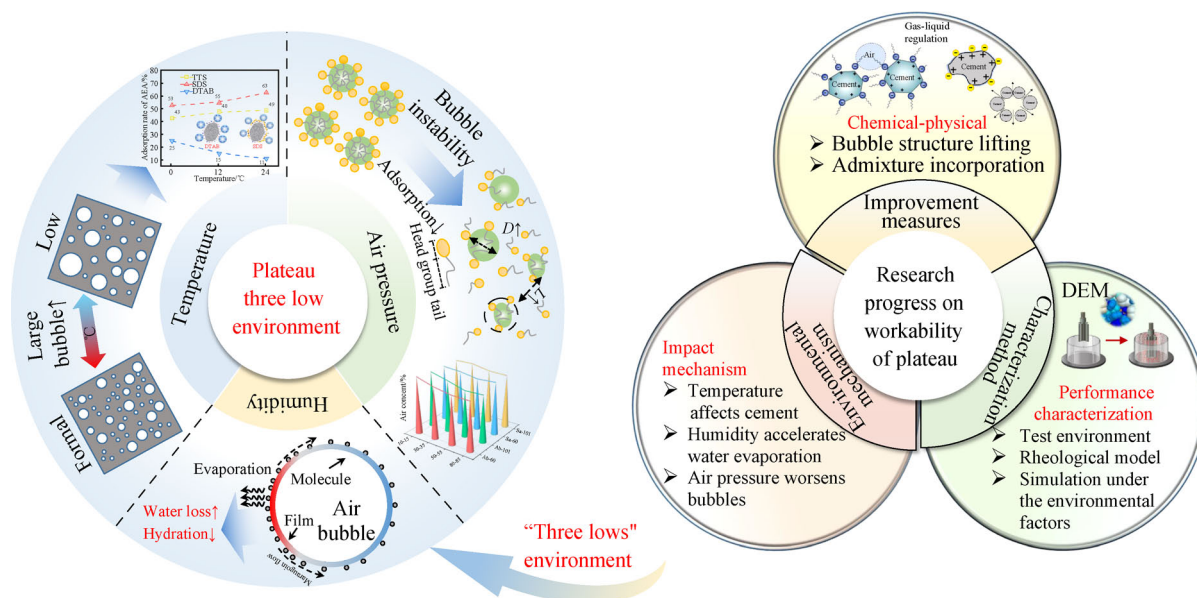


图 1 高原“三低”环境对混凝土工作性能影响的研究概况

Fig. 1 Research overview of the influence mechanism of plateau "three low" environment on concrete workability

1 高原“三低”环境条件对混凝土工作性能的影响研究进展

该部分主要分析了低温度、低湿度及低气压环境条件的单一及耦合效应对新拌混凝土工作性能的影响机理, 为实际高原工程施工所面临的问题提供理论指导。

1.1 低温度环境对混凝土工作性能的影响

低温度环境对新拌混凝土的工作性能的影响主要体现在两个方面。其一是通过改变体系的气泡结构与稳定性, 直接削弱浆体的润滑作用; 其二, 通过调控水泥水化动力学与水分相变行为, 主导浆体流变性能的演化。具体体现在水泥颗粒间润滑作用的降低, 水泥水化反应速率的延缓、内部气泡稳定性的降低以及屈服应力和塑性黏度的增大等方面。

1.1.1 低温度环境对混凝土气泡结构的影响 气泡结构的润滑作用, 有效地降低了混凝土浆体内部的摩擦阻力, 从而影响混凝土的工作性能。低温度环境会显著改变混凝土内部的气泡结构特征, 以致削弱气泡的润滑作用, 成为导致其工作性能劣化的关键原因。研究表明, 温度变化会削弱混凝土中引气剂(air entraining agent, AEA)的引气效果^[5], 且随着温度的降低, 分散介质黏度会升高, 从而改变水泥颗粒对引气剂的吸附行为及气泡膜结构(图 2a)。与常温条件相比, 低温下新拌浆体中的大气泡占比增加, 且气泡总量减少, 导致气泡体系不均质、不稳定(图 2b)。这主要归因于低温下浆体较高的表观黏度有助于维持大气泡的稳定性。但需要注意: 由于骨料粒径对引气效果的影响通常比温度更显著, 在含有较大骨料的混凝土中, 温度降低不会导致新

拌浆体初始含气量显著变化。此外,混凝土工作性能还受骨料温度及其吸水性和摩擦特性的影响,高温致使骨料吸水率增加,低温则使砂子摩擦力增大,这两种情况均会导致混凝土工作性能降低^[6]。正如岑国平等^[7]、Chen 等^[8]研究发现,含气量的降低主要是由于骨料质量差和低温,而不是低气压。

低温导致流动性损失的加剧主要是由于水化程度和气泡结构的影响,现有研究未明确骨料的表面特性(如粗糙度、吸水性)如何与低温交互影响浆体的润滑作用,同时,在如何揭示低温–低压下对混凝土气泡结构劣化的耦合机制上尚缺乏定量分析。

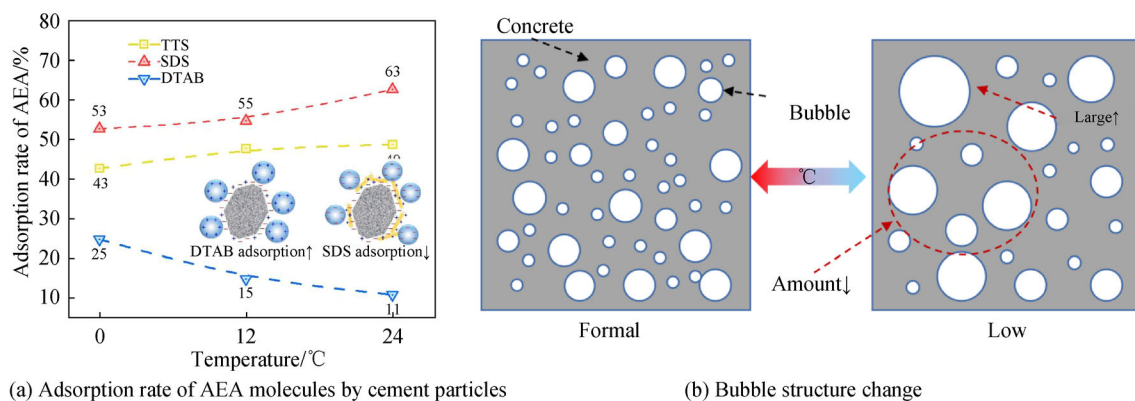


图2 低温度环境下新拌混凝土的浆体特性^[16]

Fig. 2 Characteristics of fresh concrete paste under low temperature^[16]

1.1.2 低温度环境对混凝土流动性能的影响 在低温下,流动性呈现出“先优后劣”的反转性变化。根据阿伦尼乌斯温度依赖性定律,低温($<5\text{ }^{\circ}\text{C}$)会延缓水泥水化进程,导致浆体黏度增长缓慢,流动性仅在短期保持较好^[1]。任崑崙等^[2]、许涛等^[3]、罗祥^[4]进一步证实:随着温度下降,新拌浆体的坍落度和扩展度均会增加,且增加速率随温度的降低而减缓(图 2a)。从流变学角度看,低温初期由于未水化水泥颗粒与水的结合力减弱,浆体表现出显著的剪切稀化效应,其宏观表现为屈服应力(τ_0)降低。正如 Zhang 等^[17]和 Schmidt 等^[9]发现温度从 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 降至 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,混凝土

屈服应力会降低而塑性黏度则会升高。而在极端情况下,当实验温度继续下降至接近冰点时,水分结冰会破坏浆体结构的均匀性,导致水泥颗粒与骨料间可用于润滑的自由水含量显著减少,使得屈服应力与塑性黏度急剧上升(图 3)。此外,融化后形成的孔隙则可能进一步引发流动性突变或分层泌水现象,对混凝土工作性能造成严重影响。

当前对工作性能“先优后劣”的现象虽有一定认识,但在温度接近冰点时,水分相变(冻结–融化)与浆体微结构演化的交互作用机制尚不清晰。同时,多场耦合下的动态流变响应规律、极端温度下的界

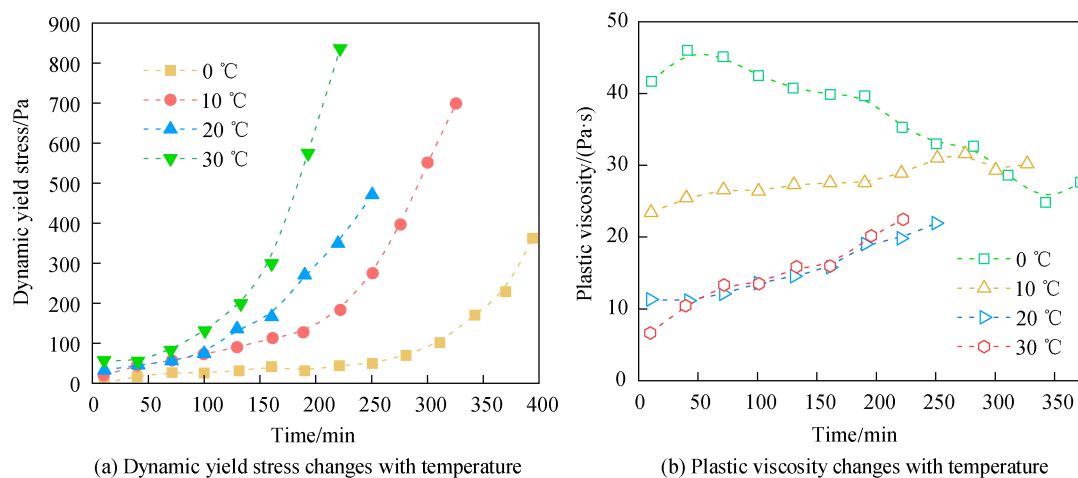


图3 不同温度下含 PCE 水泥砂浆的流变参数时变规律^[17]

Fig. 3 Time varying law of rheological parameters of cement mortar containing PCE at different temperatures^[17]

面化学稳定性及智能调控材料的设计仍有待进一步研究。

1.2 低湿度环境对混凝土工作性能的影响

混凝土自身性能与其所处环境的湿度密切相关, 水泥水化反应过程中会消耗大量水分, 且水化反应速率会随湿度的降低而降低。根据道尔顿蒸发定律, 低湿度环境中的水蒸气分压极低, 致使与混凝土孔隙水饱和蒸气压之间的压差增大, 从而加速水分散失进而抑制水泥颗粒水化反应并对孔隙结构造成影响。

低湿度环境对混凝土工作性能的影响主要体现在 3 个方面:

其一, 低湿度(相对湿度 $RH < 50\%$)显著加速混凝土表层水分的蒸发, 导致浆体中自由水含量迅速下降、削弱颗粒间的滑动能力, 导致流动性降低^[12]。研究表明, 湿度每降低 20%, 混凝土蒸发速率会提高 2~3 倍, 进而导致坍落度损失率增加 30%~50%。湿度的降低还会增加气泡液膜中液体的蒸发, 气泡由于蒸发而失水, 使得界面上局部表面活性剂浓度增加, 局部表面张力降低, 形成不同表面张力梯度, 进而在不同程度上加剧了气泡的不稳定(图 4)^[13]。加之, 高原低气压增加了水泥浆的水分扩散及其内在渗透性, 从而导致水泥浆在低湿度时水分流失更快^[14]; 且自由水的减少致使浆体固相浓度升高, 屈服应力和塑性黏度增大, 流动阻力增加。

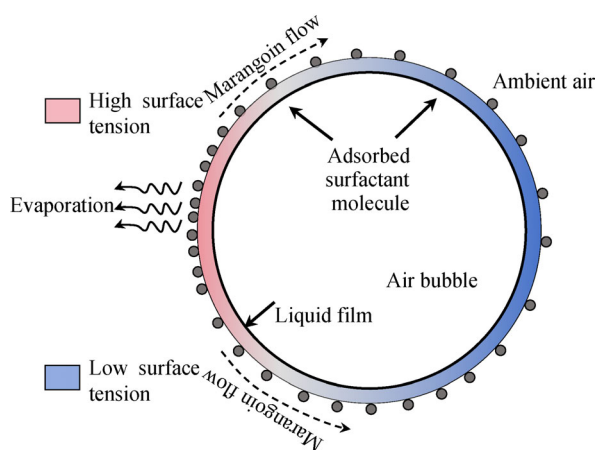


图 4 高原干燥环境引起气泡破裂的机理^[13]

Fig. 4 Mechanism of bubble rupture caused by drying low humidity environment in plateau^[13]

其二, 表层快速失水能够形成干燥区, 致使内部水分向外迁移受阻, 导致浆体水分分布不均及结构松散, 引发局部泌水或离析。快速蒸发也会形成大量连通毛细孔, 破坏浆体连续性, 增大内部摩擦阻力, 降低流变稳定性。同时, 水分蒸发还会减小

浆体的润滑层厚度, 阻碍骨料间的相对滑动, 从而提高塑性黏度。

其三, 低湿度下蒸发速率超过水化耗水速率时, 混凝土内部部分区域会因缺水导致水化反应停滞, 未水化颗粒增多, 早期水化产物(如 C-S-H 凝胶)减少, 浆体内部黏聚力降低, 但未水化颗粒增多可能增加摩擦阻力, 一定程度上缓解黏聚力的降低。低湿度造成的水分散失加剧会进一步影响水化反应, 导致工作性能下降进而增加施工难度。从水泥水化、孔隙结构等影响机理方面进行分析, 开发新型高效减水剂和保水剂以延缓水分蒸发, 并且研究新型养护技术来缓解干燥造成的影响是未来研究的重点。

1.3 低气压环境对混凝土工作性能的影响

低气压环境对新拌混凝土的工作性能的影响主要体现在两个方面: 其一, 低气压会削弱引气剂的作用效应, 影响混凝土内部气泡结构稳定, 削弱气泡的“润滑效应”, 进一步降低浆体润滑能力。其二, 低气压会加速拌合水的蒸发速率, 致使浆体表面水分损失加快, 削弱浆体的流动性能并增大颗粒间摩擦阻力。低气压会通过改变固-液-气三相体系平衡, 导致浆体屈服应力和塑性黏度同步升高, 使其需要更高剪切力来触发流动。

1.3.1 低气压环境对混凝土气泡结构的影响 根据气泡成核理论, 表面张力对气泡的产生及气泡尺寸有直接影响。在低气压环境下, 由于空气密度的降低, 使得溶液表面张力增加, 进而导致气泡形状不再是球形, 而呈现扁平状^[18], 且气泡数量、气泡间距系数及临界半径均会减小(图 5)。研究表明, 当气压下降到 71 kPa 时, 新拌混凝土含气量降低了 13.8%~41.3%^[19], 当气压为 50 kPa 时, 含气量降低约 20%~49%, 在初始空气含量较高时, 这种趋势更明显。

Lan 等^[20]认为, 表面张力并非气泡稳定性的唯一决定因素, 气泡膜的强度和空气通过膜的扩散速率对气泡稳定性均有重要影响。低气压环境加快了气泡间及气泡和浆体中气体的传输过程, 加剧气泡体系中的 Ostwald 熟化, 导致气泡体系的失稳速度加快^[21], 更容易引发气泡合并、破裂^[22]。由于低气压下产生的气泡比常压数量减少, 同时体积增大与介质黏度的降低共同导致气泡的上浮速度提高, 使得气泡消亡速度加快, 全生命期缩短(图 6)。

尽管随着气压的降低, 气泡表面张力和半径会增大, 但由于冷凝效应和马拉高尼效应又会抑制气泡生长, 正负作用交互更易导致气泡破裂。针对

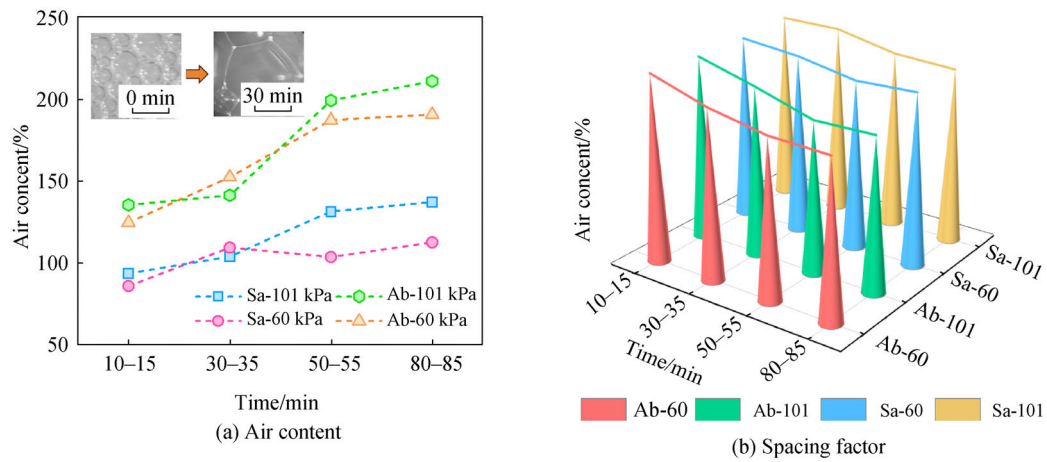
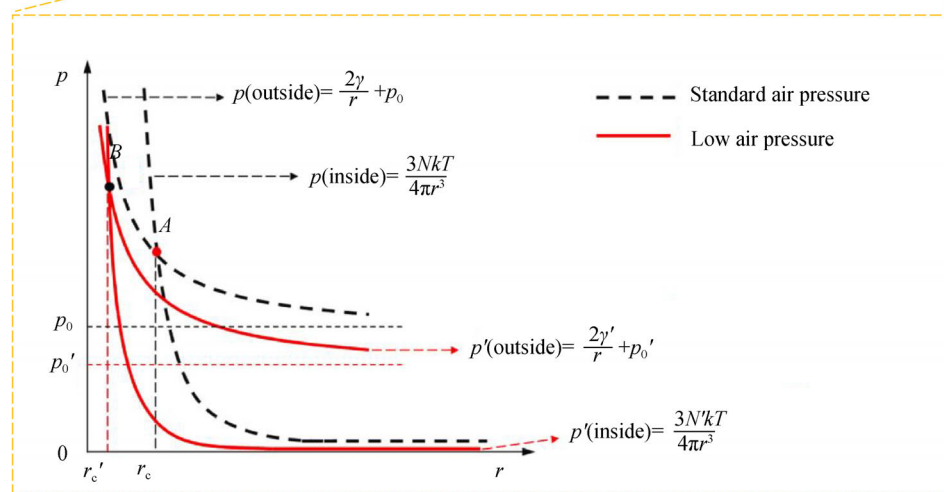
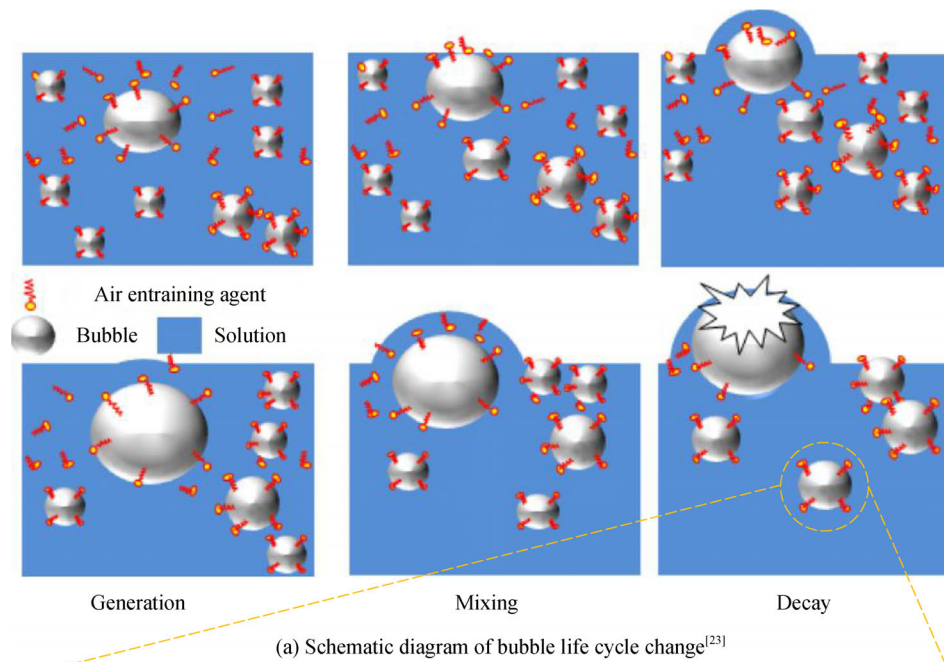
图 5 不同气压下混凝土气泡结构经时损失^[23]Fig. 5 Time loss of concrete bubble structure under different air pressures^[23]

图 6 高原低气压对气泡结构的影响

Fig. 6 Effect of plateau low pressure on bubble structure

低气压环境影响下气泡数量减少、尺寸增大、气泡不稳定等劣化效应,需通过引气剂分子设计与工艺优化,精准调控气泡结构,以实现环境影响与工作性能的协同提升。

1.3.2 低气压环境对混凝土流动性能的影响 低气压下流动性能的变化可以通过新拌混凝土中气泡直径的增加来解释^[24],大而不稳定的气泡会破坏水泥浆基质的连续性,导致流动性降低。研究表明,在最优区间内含气量每增加 1%,坍落度就增加约

10 mm^[25],这主要是由于气泡的润滑效应有效地降低了混凝土内部的摩擦力,从而提升了其流动性。而在低气压环境下随着含气量的降低及气泡尺寸的增大,使得混凝土的滚珠润滑作用减弱,黏滞阻力增大,工作性能随之降低^[26-27](图 7a 和图 7b)。此外,李扬^[28]发现,低气压对新拌混凝土初始坍落度的影响较大,对 1 h 的坍落度经时损失影响较小。随着含气量的降低,不同组分混凝土的平均泵压大幅增加,导致坍落度降低,工作性能下降(图 7c)。

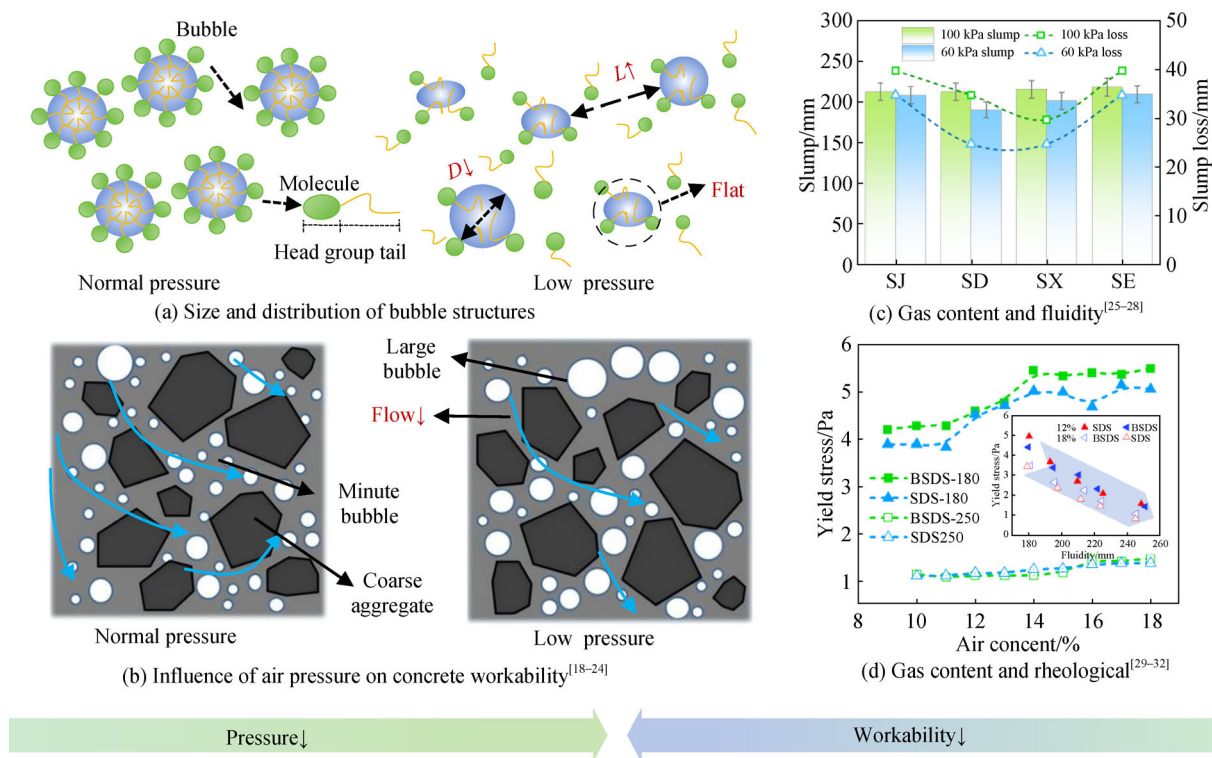


图 7 低气压环境下新拌混凝土工作性能的影响机理

Fig. 7 Influence mechanism of working performance of fresh concrete under low pressure environment

针对低气压对流变性能的影响,众多学者的观点并未统一,Szwabowski 等^[29]发现,含气量增加会导致混凝土屈服应力和塑性黏度持续降低,但这种降低存在一定限度。Struble 等^[30]发现屈服应力随含气量的增加而增加,但塑性黏度会降低,认为这可能源于水泥颗粒和 AEA 之间的吸引力形成的气泡桥增加了水泥颗粒之间的黏合,其一旦断裂,气泡将开始充当润滑剂,致使塑性黏度降低。而 Banfill^[31]则认为含气量增加对屈服应力没有显著影响,却降低了塑性黏度,主要是由于气泡对水泥颗粒有明显的吸附-桥接作用。此外,较小的气泡(10~600 μm)更有助于降低砂浆的屈服应力和塑性黏度,增加粗骨料表面砂浆层厚度,进而显著提高新混凝土的流

变性^[32]。

从流变学的角度,气泡的形成和稳定与混凝土的流变特性相互影响,浆体与气泡之间的相互吸引使得水泥颗粒间形成气泡桥,增加屈服应力,同时,浆体流动时气泡又充分变形作为流体的一部分,从而降低塑性黏度(图 7d)^[33]。Zuo 等^[34]证实了新拌混凝土流变性能受气压影响的程度主要与含气量有关,低气压削弱了引气混凝土的润滑效应,导致其塑性黏度显著升高。而黏度越大,气泡溢出遇到的阻力就会越大,这会降低混凝土含气量的减少范围^[35]。同时,气泡增加了水泥颗粒间的吸引力,使得含气量升高,屈服应力增加^[36]。

含气量损失加剧和气泡结构劣化是低气压对新

拌混凝土工作性能造成影响的主要原因。目前针对低气压环境对混凝土工作性能的影响已有较为成熟的理论体系,未来研究更多应聚焦于气泡稳定技术、新型外加剂以及多尺度模拟方法,为应对高原基础设施建设提供理论技术。

1.4 耦合环境条件对混凝土工作性能的影响

低温度、低湿度和低气压等环境因素不仅单独作用会影响新拌混凝土性能,而且通过复杂的耦合效应进一步加剧了混凝土工作性能的劣化,具体交互作用如表 1 所示。这些因素在高原、高海拔等严苛环境中往往同时出现,其耦合效应显著放大了对新拌混凝土工作性能的不利影响。

在温度–湿度耦合方面,Zhao 等^[37]和 Sekki 等^[38]将早期混凝土的温度–湿度耦合效应分为 3 个阶段:第一阶段,温度升高,相对湿度降低;第二阶段,温度降低,相对湿度增加;第三阶段,相对湿度随着温度的稳定而缓慢下降。该三阶段划分揭示了温度–湿度动态变化对水化进程的阶段性调控规律。温度降低会延缓水泥的初凝时间及水化放热速率,而低湿度则通过减少水分的供应进一步延缓水化反应,这种耦合效应会在混凝土内部形成非均匀水化结构,使得混凝土的工作性能保持能力迅速降低。此外,温度–湿度的协同作用还会加剧浆体内部毛细管压力变化,促进微裂缝的早期萌生。

表 1 高原“三低”耦合环境条件对混凝土工作性能的影响

Table 1 Influence of plateau “three low” coupling environmental conditions on concrete workability

Coupling forms	Authors	Coupling effects	Conclusions
Temperature–humidity	Zhao ^[37]	The increase in humidity with both decreasing temperature and its rate of decline intensifies the environmental gradient between the interior and exterior of concrete	Formation of a non-uniform hydration structure Workability retention↓
	Sekki ^[38]		
Humidity–pressure	Sun ^[12]	Low humidity induces a humidity gradient within concrete, while low atmospheric pressure reduces the air impedance to moisture evaporation	Amount and rate of moisture evaporation↑ Free water available for lubricating Cement particles↓
	Zuo ^[14]		
	Patel ^[39]		
Temperature–pressure	Wang ^[40]	Low temperature retards the hydration reaction rate and extent of cement particles, while low atmospheric pressure exacerbates moisture evaporation	Hydration products↓ Number of micropores and total Porosity↑
	Chu ^[41]		
	Kjellsen ^[42]		
Temperature–humidity–pressure	Chen ^[8]	Low temperature retards the hydration reaction rate, while low atmospheric pressure reduces the free water available for sustained hydration by accelerating moisture evaporation, particularly under synergistic low-humidity conditions	Moisture evaporation↑ Hydration products↓ Coarsening of the capillary pore network Pore connectivity↑
	Chu ^[41]		

在湿度–气压耦合方面,Patel 等^[39]、孙佳佳^[12]和 Zuo 等^[14]等一致认为,两者耦合会导致混凝土的水分散失速率上升,蒸发量显著增加,从而使得混凝土内部的自由水含量减少,浆体固相浓度升高,降低浆体的润滑层厚度,阻碍骨料间的相对滑动,使得屈服应力和塑性黏度增大,流动阻力显著增加^[43]。同时,混凝土表层的快速失水能够形成干燥区,使内部水分向外迁移受阻,导致其水分分布不均及结构松散,引发局部泌水或离析。湿度–气压耦合的核心在于低气压环境下水的沸点降低、蒸发潜热减小,从而加速了水分由内向外的迁移速率。

在温度–气压耦合方面,低气压会使得气泡成核困难、临界半径增大,而低温度虽然能提高浆体黏度,但同时也增加了气泡液膜的刚性,使得气泡更容易破裂,两者的耦合效应会使得含气量损失更为严重。Wang 等^[40]研究还发现:低温度–低气压耦合效应会降低胶凝材料的水化程度,使得混凝土

水化产物减少,微孔数(0.1~1.0 μm)和总孔隙率增加,固体颗粒之间形成更松散的微观结构。此外,Chu 等^[41]还发现由于温度波动而引起的热胀冷缩,在高原环境下会更为明显,进而加剧混凝土的坍落度损失,造成泌水离析现象。这种结构松散化进一步削弱了混凝土的强度和耐久性。因此,在高原低温低压环境下,应重视引气剂的选择,并加强早期保湿养护,以减少气泡失稳和微观结构劣化所带来的性能损失。

与此同时,“三低”协同作用对新拌混凝土工作性能的影响远大于单一因素效应,新拌混凝土同时面临水化速率延缓、水分蒸发加速和气泡结构不稳定等多重危害,表现为初始工作性降低、工作性保持时间缩短和流变行为异常等现象^[41]。因此,建立考虑“三低”耦合效应的性能预测模型,对高原施工配合比设计具有重要工程价值。未来需要进一步探索“三低”耦合环境下水泥水化动力学、颗粒间相互作用力、界面结构演变等多重问题,为材料设计提供理论指导。

2 高原“三低”环境下混凝土工作性能表征分析方法研究进展

准确表征高原环境作用下混凝土工作性能的演化规律,是揭示其影响机理和实现性能调控的基础。当前研究主要通过环境模拟实验、理论模型构建和数值模拟 3 种途径,从不同维度揭示“三低”环境对混凝土流变特性、凝结过程和微观结构形成的影响。

2.1 工作性能测试方法

高原“三低”环境对混凝土工作性能(流动性和流变性)的测试提出了特殊挑战。混凝土的流变特性受温度和低气压波动影响显著,需要通过可控的温度、湿度、气压调控实验装置精确量化及分析其影响机制。

随着温度降低,水泥的水化过程受阻,凝结时

间会延长,这使得自由水黏度增大,浆体内部摩擦阻力升高。温度若继续降低,混凝土中自由水逐渐相变,会引发微观结构重组。此时坍落度测试已不适用,需要采用低温流变仪来测定屈服应力与塑性黏度,同时结合温度设备来控制精度。Zhang 等^[17]研发了温控设备,并使用四叶片旋转流变仪实现对水泥砂浆在不同温度下的流变性测试,并利用修正宾汉姆(Bingham)模型来表征其流变特性(图 8a)。Ghafoori 等^[44]在特制的温度模拟环境室中进行实验,通过温控设备进一步研究了温度对新拌混凝土性能的影响。对于屈服应力测试的结果,坍落度试验可在特定条件下与之定量关联。Kaleta-Jurowsha 等^[45]使用了混凝土坍落度试验和维勃稠度试验,在不同温度下对不同稠度状态的混凝土工作性能进行测试,最终发现温度升高对混凝土工作性能有着显著影响。

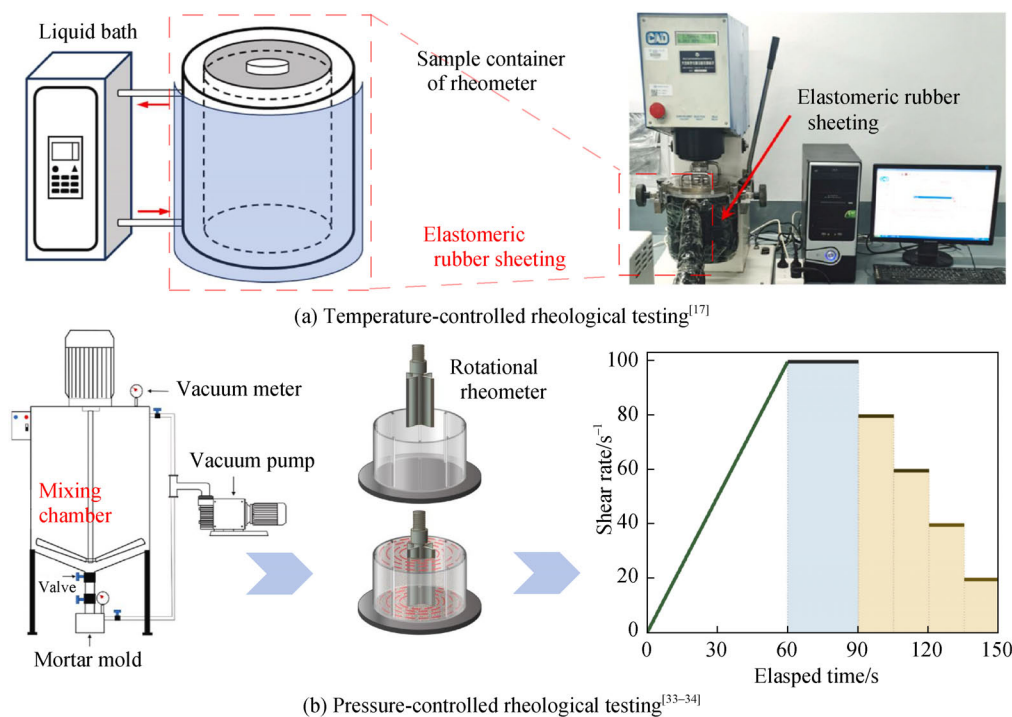


图 8 高原环境下混凝土的流变性测试模拟

Fig. 8 Test and simulation of rheological properties of concrete in plateau environment

低气压削弱了气泡稳定性,导致流变性测试中屈服应力虚高、坍落度测试时气泡迁移异常,含气量测定仪因常压校准产生正偏差(需气压补偿修正)。针对模拟气压环境影响下的混凝土工作性能测试,Zuo 等^[34]采用叶片状旋转流变仪进行动态和静态剪切实验,并利用真空泵以达到指定的气压,实现了低气压环境下流变性能的准确测量,同时分析了不同气压条件下新拌混凝土含气量的变化规律,建立了计算流变参数的数学模型(图 8b)。Du 等^[33]

设计了低气压搅拌机,同样通过真空泵调节到目标气压,使用旋转流变仪也实现了低气压下新拌砂浆流变性能的测量。

目前研究多是通过环境控制设备和传统测试手段的结合来分析工作性能,缺乏具有环境适应性以及针对性的测试手段,许多基于人工智能机器学习技术及智能监测设备已被广泛应用在混凝土工作性能的预测和分析上^[46],未来土木与人工智能的结合无疑会解决恶劣环境下混凝土性能测试存在困难及

测试误差等问题。

2.2 工作性能表征模型

流变学通过构建应力–应变本构关系,为新拌混凝土工作性能的量化表征与预测提供理论支撑。由于混凝土剪切应力与速率无法直接测量,需基于流变模型拟合试验数据间接求解参数。然而,高原环境会显著改变混凝土流变行为,导致通过传统试验方法在标准环境下确定的模型参数(如 Bingham 模型的屈服应力与塑性黏度)在高原环境下直接应用时,会与实测值产生显著偏差。这种偏差源于水化延迟、水分蒸发加速及气泡结构劣化等一系列与环境相关的物理化学变化。

已有研究表明,尽管经典流变模型(如 Bingham 模型、Newton 模型等)本身不显式包含环境变量,但可通过引入环境修正系数或耦合附加方程,实现对多场耦合条件下混凝土流变性能的合理表征。例如,传统的 Bingham 模型可以实现低压条件下的流变性能拟合,且引入温度系数修正后的 Bingham 模型可以用以表征不同温度下的流动特性。在评估流变模型适应性时,常通过计算标准误差来比较不同模型的拟合效果,而这一指标受到所选模型的类型和包括温度在内的多种因素的影响^[47],通过考虑多场物理耦合作用,可更准确地评估不同温度条件下流变参数的标准差,提升模型预测的准确性。像 Wang 等^[48]等就采用 Newton 模型、Bingham 模型和幂律模型对流变试验数据进行拟合,建立了考虑温度和水化时间影响的泥浆本构方程,并对拟合曲线提出了数学解析表达式。

由于高原环境下气压与温度、湿度存在复杂的协同作用,使得单一模型难以适用,而当前多场耦合研究则多以温度–湿度耦合为主,温度–气压和温度–湿度–气压全耦合模型仍在探索中。未来研究可从三方面推进:一是精准揭示气压对气泡–浆体界面作用的微观机理,进而建立有效的气压耦合模型;二是整合多场参数(如将湿度引发的水分迁移速率纳入温度场方程),提升模型的机理可靠度;三是建立兼顾精度与效率的混合模型(如机理模型结合数据校正),以适应复杂工程场景。

2.3 工作性能数值模拟

目前鲜有关于同时考虑低温度、低湿度、低气压条件耦合作用下混凝土工作性能模拟研究的报道,但针对单一高原环境作用下的混凝土流变性模拟有一定研究。

高原大温差环境下,混凝土工作性能显著变化。

进行数值模拟时,关键在于构建一个能够准确描述温度条件作用下的混凝土流变模型,这要求综合考虑拌合浆体的微观结构和温度场的相互影响,及内应力与应变间的复杂作用。相关学者利用有限元法(finite element method, FEM)或光滑粒子流体动力学法(smoothed particle hydrodynamics, SPH)分析大温差下新拌混凝土的离析与分层现象,并建立温度依赖的流变方程,将其用于模拟混凝土大变形流动问题,进一步结合离散元法(discrete element method, DEM)模拟骨料与浆体的相互作用^[49],分析温度变化对界面过渡区力学行为的影响。张俊逸^[16]基于一种新型的离散单元方法建立表征新拌混凝土流变行为的固–液二相模型,该模型考虑了骨料粒径、砂浆基体的流变特性以及包裹骨料的富余砂浆层厚度等参数。然后基于不同温度下砂浆基体的流变参数,采用 DEM 模拟研究了温度对骨料间作用力以及砂浆工作性能的影响。进一步应用流体力学理论计算了低湿度环境对混凝土振捣状态下离析(泌水、保水特性)性能的影响(图 9)。

低湿度环境加速了混凝土中水分的蒸发,这直接影响其硬化过程和孔隙结构的发展。目前,相关数值模拟研究主要围绕多尺度水分迁移机制及湿度–流变耦合模型等方面展开,如将混凝土视为多孔材料,通过达西定律与菲克扩散定律耦合模拟水分迁移。基于有限元法或有限体积法,可将湿度场与流变参数动态关联。通过引入湿度依赖的黏度修正系数,模拟低湿度下混凝土的坍落度损失规律。并结合 DEM 模拟骨料与浆体的相互作用,分析低湿度下水分蒸发对颗粒间摩擦力的影响。此外,还可通过相场法模拟水泥浆体在低湿度下的孔隙演化,可以从微观尺度揭示水分流失对水化产物形貌的影响。

在低气压环境中,混凝土中的含气量和气泡稳定性可能会受到影响,这直接关系到其工作性能。离散元模拟表明,低气压环境中骨料间摩擦阻力会增大,流动阻力显著升高。模拟低气压环境下的工作性能变化,可将屈服应力和塑性黏度与气压参数关联,结合气–液两相流理论,来模拟低气压下气泡动力学与浆体流动的相互作用。例如,采用流体体积(volume of fluid, VOF)法追踪气泡界面演化,分析含气量分布对坍落度的影响。进一步通过 DEM 模拟低气压下骨料运动轨迹及接触力链演变,从而揭示离析与分层机制。

基于以上概述可知,中国内外学者采用数值模拟技术对新拌混凝土工作性能的研究主要从 3 个层

面进行: 1) 宏观层面, 忽略新拌混凝土内部材料组分的差异性, 将其视为均匀连续流体, 使用计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)法进行数值仿真^[50], 其中, 以单相流模拟为代表; 2) 介观层面, 将新拌混凝土作为粗骨料悬浮于砂浆中的两相复合材料, 通过流固耦合计算实现悬浮流模拟分析; 3) 细观层面, 将新拌混凝土作为组分差异较大的不连续介质, 考虑骨料之间、骨料-砂浆之间、骨料-边界之间的相互作用, 使用 DEM 进行数值模拟。

未来研究需着力构建低温度、低湿度与低气压多场耦合作用下的混凝土流变模型, 突破单一环境因素模拟的局限。发展跨尺度联合仿真方法, 整合宏观连续介质模型与细观离散元模型, 实现从水分迁移、气泡演化到骨料相互作用的系统模拟。同时, 必须引入非平衡态热力学理论, 建立湿度-温度-气压耦合的本构方程, 并通过高原原位试验数据强化模型验证。最终形成可精准预测高原特殊环境下混凝土工作性能演变的数值模拟体系, 为工程设计提供理论支撑。

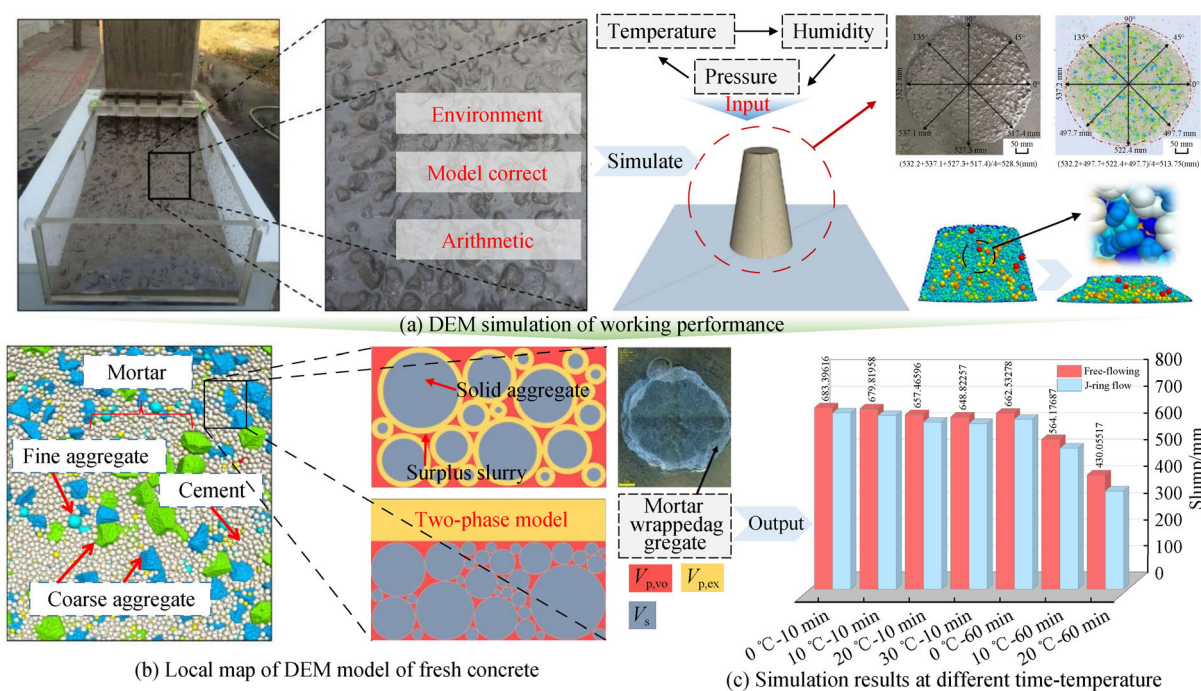


图 9 新拌混凝土离散元 DEM 模拟示意图^[16, 49-50]
Fig. 9 DEM simulation diagram of fresh concrete^[16, 49-50]

3 高原“三低”环境下混凝土工作性能的调控措施

高原环境下新拌混凝土工作性能的优化措施主要包括外加剂掺入, 拌合工艺改进及气泡结构优化 3 个方面^[51]。针对“三低”环境的影响特性, 如水化延迟、含气量损失及起泡稳定性降低等, 设计与之对应的优化措施是降低环境影响的关键。

3.1 外加剂对混凝土工作性能的影响

外加剂是改善新拌混凝土工作性能的关键组分, 其通过物理化学作用调节浆体流变特性、气泡结构及水化进程; 以下分别针对引气剂、聚合物、防冻剂、减水剂和纳米材料的作用效应进行概述。

3.1.1 引气剂 引气剂通过调控气-液界面行为

来提高混凝土的工作性能^[52](图 10a)。按其工作原理分为两大类, 一类可与混凝土孔隙溶液中的氢氧化钙反应, 沉淀出不溶性钙盐, 在固-液-气界面上积累, 从而影响含气量及气泡稳定性。另一类能够有效降低气-液界面自由能, 有利于气泡的形成和稳定。

不同 AEA 的引气效果不同(图 11a), 这取决于其降低溶液表面张力的能力。引气剂分子吸附于气-液界面, 降低体系表面张力, 促进微小气泡均匀成核。同时, 其分子结构中的疏水基团锚定气泡表面, 亲水端与水泥浆体结合, 形成稳定吸附层, 有效抑制气泡聚并和上浮逸出。李雪峰等^[53-54]发现低气压环境下气-液界面表面张力会增加, 进而导致引气剂的引气能力削弱, 且泡沫的稳定性变差。表面张力

的增加不仅会降低流体的起泡能力和稳定性, 气泡尺寸和间距因子也会随之增加。此外, 引气剂亦可降低混凝土泌水和离析(保水性)的风险。正 Kim 等^[55]发现 AEA 分子能吸附在骨料和水泥粒子上帮助分散气泡, 防止它们上升到表面, 这些气泡通过浮力减缓了水泥粒子下沉, 从而减少水分渗出和粒子分离的风险。

为应对高原环境下引气剂的吸附性能差, 气泡结构不稳定等问题^[56–57], 中国内外学者研制了各种新型引气剂, 其中有对低气压含气量降低率及气泡

间距系数增加率抑制明显的马来松香基双子引气剂、DZ-1 系列复合型外加剂, 以及用 SJ-2 型引气剂作为复合型外加剂中的引气组分^[58]。此外, 除新型引气剂外, 适当增加引气剂的剂量可以增加液体中表面活性剂的浓度, 以此降低混凝土中的含气量损失(图 11b), 但需结合实际环境因素、配合比与引气剂类型来确定最优掺量范围: 如过低($<0.002\%$)难以有效改善工作性能, 且后期抗冻性能会受到影响^[59]、过高($>0.06\%$)会导致硬化后的孔结构发生变化^[60], 且随着掺量增加, 强度会有所降低。

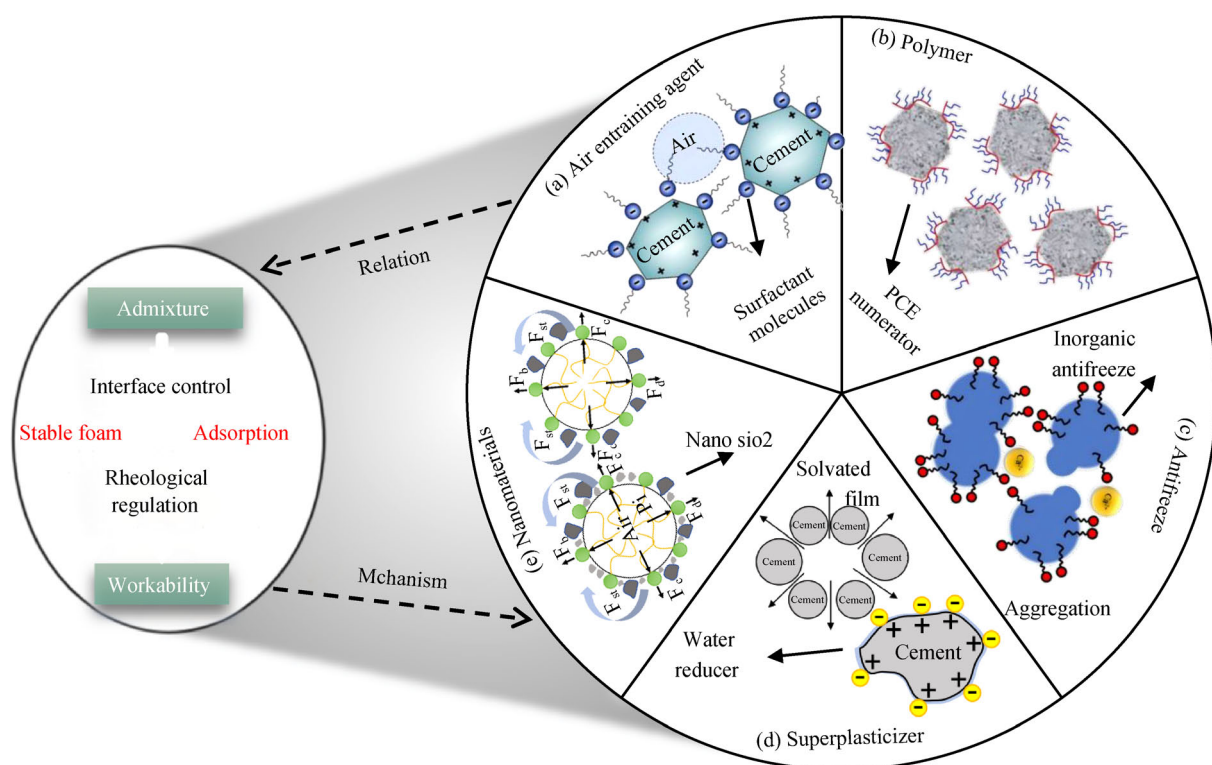
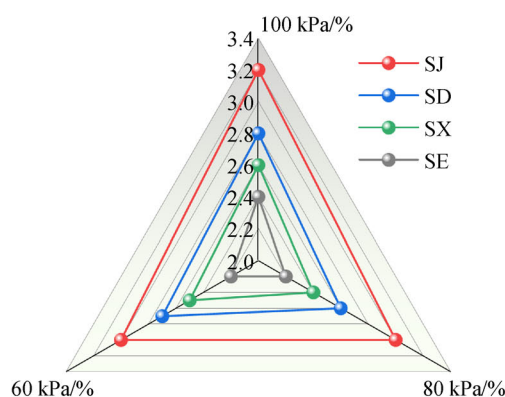
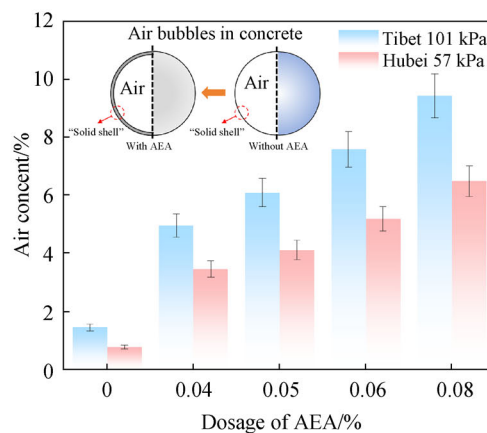


图 10 不同外加剂对混凝土工作性能影响机理^[16, 56–58]

Fig. 10 Influence mechanism of different admixtures on concrete workability^[16, 56–58]



(a) Different types of air entraining agent



(b) Influence of air entraining agent dosage under different air pressures

图 11 引气剂对混凝土含气量的影响^[53]

Fig. 11 Effect of air entraining agent (AEA) on air content of concrete^[53]

3.1.2 聚合物 传统外加剂常面临环境适用性差,与 AEA 和高效减水剂不相容性等问题。高吸水性聚合物(super absorbent polymer, SAP)不仅可以增强新拌混凝土引气能力^[61],而且可以缓解环境因素造成的影响,有望在高原地区使用^[62]。

聚合物可在混凝土中产生与传统 AEA 相当的作用,按目前常用种类主要可分为磺酸系、聚羧酸系及功能改性聚合物。聚萘磺酸酯(polynaphthalene sulfonate, PNS)和聚三聚氰胺磺酸盐(polymelamine sulfonate, PMS)等水溶性有机聚合物可将水泥颗粒分散到间隙溶液中以增强水泥浆的流动性,从而减少水泥颗粒之间的摩擦,降低絮凝颗粒之间的水分截留程度。聚羧酸(polycarboxylate ether, PCE)因其高电荷和强吸附性能对新拌混凝土流变性和流动性均有显著影响,尤其在低温环境下效果更为明显(图 10b)。相较于常规 PCE,长侧链改性后的 PCE 具有更高效的作用效用,这归功于其支化结构和高表面活性^[63]。与长侧链改性后的 PCE 相比,最近开发磷酸盐接枝的新型长链聚合物以高效的空间分散机制进一步提高减水率和保水率。Ma 等^[64]还开发的新型磷酸盐改性聚合物,通过疏水基团与气-液界面定向排列,显著提升 AEA 发泡效率,同时增强对水泥颗粒的包裹性,减少水分蒸发敏感性。此外,随着 SAP 粒径的增加, SAP 的吸水率会增加,对流变性能的影响效应会更大^[65]。

聚合物通过静电分散、空间位阻及界面调控等机制,显著提升了新拌混凝土的环境适应性、流变性及气泡稳定性,尤其是功能化改性的品种实现了减水、保坍、稳泡等多功能协同,但如何确定最佳掺量问题受到水胶比、环境因素及外加剂类型等多重制约^[66],如低水胶比时掺量需更高来满足其后期性能的发展。如何改善 SAP 与其他外加剂的相容性问题,并有效降低成本以达到广泛推广,仍有待进行针对性研究。

3.1.3 防冻剂 防冻剂(anti-freeze admixture, AFA)中的纤维素醚因引入不规则气泡,使得混凝土含气量提高,坍落度增大。AFA 在水泥基悬浮液中会与其他成分发生复杂的相互作用,其与水泥组分的复杂相互作用会显著影响新拌混凝土工作性能(图 10c)。防冻剂按其作用机制和成分主要分为氯盐类、钙盐类及其他有机类防冻剂。

氯盐类防冻剂如无机氯化物会立即与水泥反应,生成不溶性氯铝酸盐水合物,显著降低混凝土的坍落度,并且随着剂量的增加,这种负面影响会

更加显著^[67]。钙盐类防冻剂如硝酸钙可以显著提升新拌混凝土的初始坍落度,但其促凝特性会加速水泥水化,从而加剧流动性损失^[68]。单掺亚硝酸钙(calcium nitrite, CN)防冻剂可降低初始屈服应力和塑性黏度,随着时间的推移这种降低程度会加剧;而对于阴离子表面活性剂引气的砂浆,掺入 CN 会使其表面张力大幅提高,从而使得含气量降低,浆体的屈服应力增加;此外,像乙二醇(ethylene glycol, EG)等有机类防冻剂会轻微降低新拌浆体初始屈服应力,但随着小气泡数量的逐渐增加,最终屈服应力会趋于上升。由于促进剂的增溶作用, AFA 中乙二醇或甲醇的使用量越高,水泥浆的流动性损失也会越大^[69]。

防冻剂通过降低液相冰点、调控水化动力学等机制提升了混凝土的抗冻性能,但因其组分不同对工作性能产生了不同程度的影响。随着掺量的增大(<0.5%),像乙二醇的逐渐加大使得混凝土的凝结时间呈现先增高后降低的趋势,坍落度逐渐降低,而掺量继续加大(>0.5%)时会对混凝土水化造成影响,使得早期强度有所降低^[70]。现阶段应用最广泛的仍为无机盐类防冻剂(氯盐、钙盐类),此类一般掺量较高(2%~5%),极易造成后期耐久性能的损失。深化研究低掺量(<0.5%)的有机类防冻剂或复合低掺量防冻剂,仍是未来研究的重点内容。

3.1.4 减水剂 减水剂对混凝土工作性能的调控效应与其分子结构及作用机制密切相关,主要体现为吸附行为优化^[71]、界面性能调节及多组分协同效应(图 10d)。

不同类型减水剂具有不同的作用效应,聚羧酸高效减水剂可降低表面张力,有助于气泡的产生,且随着温度升高,其对水泥颗粒的吸附增加,降低了水泥颗粒的絮凝动力学和反应性,使得温度对屈服应力和黏度的影响减弱^[10]。相较于普通 PCE,含酯基的减水剂可以显著提高吸附动力学特性并赋予更强的表面活性,降低表面张力以提高引气能力^[72]。而聚羧酸酯(polycarboxylate polymer, PCP)高效减水剂则因其较高的吸附速率来减缓水泥颗粒表面水化层的生长,这些水化层可降低高效减水剂对温度的依赖性,并提高混凝土浆体初始屈服应力^[73]。此外,温度对流变性能的影响也取决于外加剂的类型,像聚萘和聚羧酸盐高效减水剂制备砂浆因其吸附效率更高,流变性能受温度的影响会更大^[74]。

减水剂通过负电荷分散水泥颗粒来提升混凝土的工作性能,随着减水剂的剂量的增加混凝土的工

作性能也会增强,但掺量过高(>2.5%)会使得混凝土的抗压和抗折强度随之降低,此外超高性能混凝土还应考虑掺量对纤维分布和微观结构的影响^[75–76]。如何改善其相容性问题,如与引气剂、防冻剂产生的竞争吸附机制,进一步提升其适配性和功能性是未来研究减水剂的重点。

3.1.5 纳米材料 纳米材料(nanomaterials, NS)因其吸水性和高表面积,对新拌混凝土工作性能产生影响^[77–78]。纳米颗粒能够稳定气泡并使其吸附在气泡表面从而增加气泡壳的黏度^[79],抑制气泡聚结,进一步增加气泡形成和稳定性、减少气泡崩塌(图 10e)。

在调控混凝土工作性能方面常用的纳米材料有纳米二氧化硅、纳米黏土和纳米气泡水^[80]等。纳米二氧化硅的应用不仅可以提高气泡膜的强度,在改善气泡稳定性方面也起着关键作用^[81]。She 等^[82]发现纳米二氧化硅和羟丙基甲基纤维素可共同吸附在气泡表面,增加气泡界面的黏度,从而减缓气泡的聚并和歧化。与普通 NS 相比,疏水性纳米二氧化硅颗粒的引入进一步提高了气泡的稳定性,这归因于其在气–液界面的强烈吸附,从而在气泡周围形成吸附层,降低了气泡膜的透气性。针对高原等实际应用环境中引气混凝土气泡稳定性差的问题,张俊逸^[16]建议通过添加纳米黏土(nanoclay, NC)作为触变剂来调控流变行为,有效促进了低温浆体中絮凝结构的快速形成,并显著提升了气泡的稳定性。此外,学者还发现具有高表面活性、高溶解度和低表面张力的纳米气泡水(nanobubble water, NBW),也可以减小初始气泡尺寸,提高水泥基材料中的气泡稳定性^[83]。

纳米材料通过吸附作用与界面调控在增强气泡膜强度、促进絮凝结构形成和优化气泡成核机制中发挥了重要作用。适量的纳米材料掺入($\leq 3\%$),不仅会提升工作性能,还会改善强度和耐久性^[84–85]。但 NS 掺量过高(>3%),反而会削弱混凝土的耐久性能,但受到环境因素及复合效应的影响,具体产量要根据具体情况来确定,有关学者给出的合理建议为 1%~3% 范围内。未来针对纳米材料存在极易团聚、分散不均等问题,还需进一步优化性能合理设计配比。

3.2 混凝土拌合工艺改进

高原低气压环境下空气稀薄,电机散热能力变差,从而降低搅拌机有效功率使得混凝土的搅拌质量变差。在低气压环境下配制引气混凝土时,可通

过延长搅拌时间、增加搅拌速率及控制搅拌频率来保证稳定的工作性能。

气泡往往需借助物理搅拌产生,而物理搅拌产生的气泡稳定性差,大量微气泡夹带到混凝土中增加了固–液–气界面的自由能,致使气泡易塌陷、溢出和聚结,且在低气压作用下,气泡稳定性更差。振捣的过程主要破坏的是大而不稳定的气泡,对于微小的稳定气泡影响较小。而低气压环境下引气剂引入的气泡体积更大,稳定性更差,振捣会导致更多的气泡损失。随着搅拌速度的加快,围绕水泥颗粒减水剂分子的扩散双电层减小,造成水泥颗粒团聚^[86],使得含气量随搅拌速度先增加后减小,且新拌浆体的气泡间距系数和平均直径随搅拌速度的增加而增大(图 12a)。随着搅拌时间的延长,新拌混凝土的含气量呈现先增加后减少的趋势。在低压下振动时间的延长也会导致更多的气泡损失,导致含气量降低,气泡间距系数增加(图 12b)。

此外,与延长振捣时间相同,高频振动也会导致含气量的降低,而适当时间的高频振捣则有利于改善混凝土的气孔结构^[87]。除外加剂调控外,合理控制搅拌工艺,两者协同提升会更有效地改善高原环境下新拌混凝土的工作性能。

3.3 气泡结构优化

气泡数量、尺寸、分布及其稳定性是影响新拌混凝土的工作性能的关键因素,从气泡结构出发进行优化,可以补偿环境因素的影响,进一步提升工作性能。

3.3.1 气泡结构优化 新拌混凝土中气泡的形成将产生更多的气–液界面,从而增加表面自由能。表面张力与其混凝土气泡结构密切相关,降低表面张力可直接降低产生气泡所需的自由能,有利于气泡的形成和稳定^[81]。随着气泡液膜表面张力的降低,小直径气泡(10~600 μm)会逐渐减少;相较于大气泡,小气泡具有更大比表面积和更优异的润滑效应^[46],可显著提高混凝土工作性能。同时气泡均匀性的提高能够减少骨料间的摩擦阻力,增强浆体对骨料的包裹性。除表面张力调控外,液膜强度和分离压力(液膜两侧的静电排斥力)也是影响气泡稳定性的重要因素^[88–89]。气–液界面处的单分子膜强度越高,混凝土内气泡越稳定,混凝土中气体含量随时间推移的损失越小。当液膜变得非常稀薄时,气泡的稳定性依赖于液膜两侧离子吸附层之间的静电排斥。

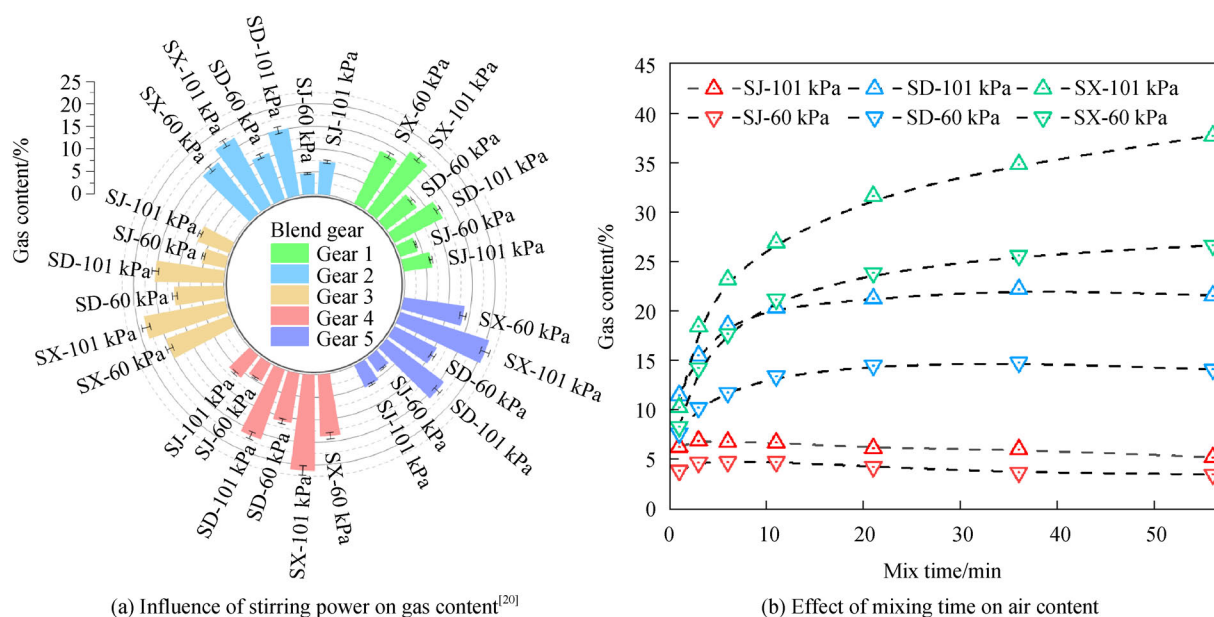


图 12 搅拌工艺对气泡的影响机理
Fig. 12 Influence mechanism of stirring process on bubbles

随着材料科学与界面化学的融合发展, 气泡结构优化有望成为高原环境下混凝土性能提升的核心, 通过精准调控表面张力与液膜特性, 实现气泡结构的定向优化, 进一步提升混凝土工作性能的稳定性与可靠性。

3.3.2 气-液界面特性 由于混凝土引气剂具有两亲分子结构的特点, 使其分子在气-液界面上富集, 气泡壳表现出了一定的抗破坏能力。因此新拌混凝土内部气泡壳表面的物理、化学性质是决定硬化混凝土最终气孔结构特性的关键因素。改性疏水度纳米颗粒的吸附, 降低了液膜的气体扩散性, 从而抑制了气体从压力较大的小气泡向压力较小的大气泡以及向浆体中扩散的过程, 进而抑制了气泡的

Ostwald 熟化, 提高了低气压环境下气泡体系的稳定性(图 13)。Du 等^[33]研究了改性纳米二氧化硅对不同气压下液体泡沫、新拌砂浆气泡稳定性的影响, 发现改性纳米二氧化硅的掺入有效抑制了气泡直径的增加。Kovlen 等^[90]通过改性二氧化硅纳米颗粒表面酸性和极性来稳定表面活性剂所产生的气泡, 吸附的纳米颗粒可在气泡表面形成空间位阻层, 阻碍气泡收缩或膨胀, 从而使由引气剂稳定的泡沫更稳定。

尽管在普通混凝土中, 基于气-液界面改性的气孔控制方法还不普遍, 但相较于其他方法, 这种方法的机理更为清晰, 可控性和经济性也更显著。因此, 在考虑气泡结构调控时, 可优先采用基于气-液界面改性的方法。

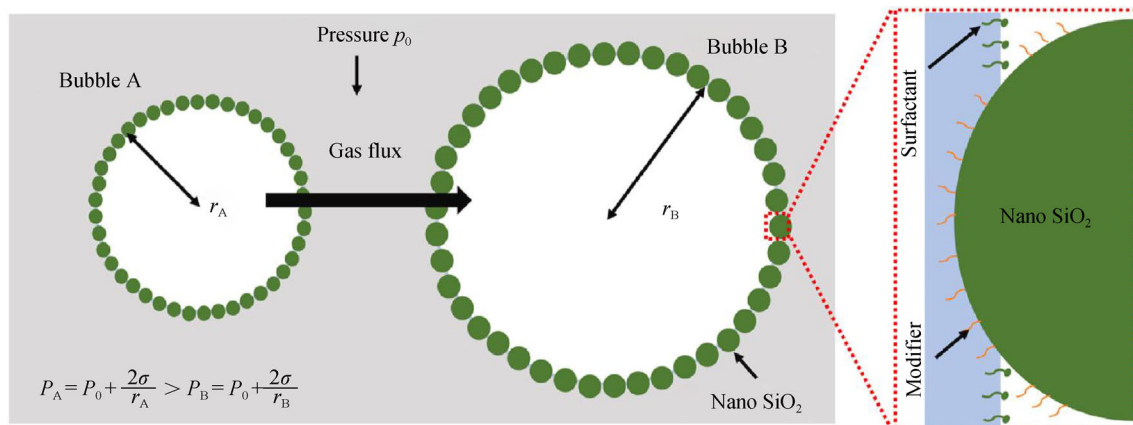


图 13 气泡间气体的扩散与改性 NS 气泡间扩散及稳定性机理示意图^[33]

Fig. 13 Schematic diagram of gas diffusion between bubbles and diffusion and stability mechanism between modified NS bubbles^[33]

4 结论与展望

工作性能是决定混凝土服役性能的重要因素之一,在高原地区施工,会显著受到环境参数的影响。基于高原低温度、低湿度及低气压的环境影响特性,本文阐释了环境因素对混凝土工作性能的影响机理,并总结了混凝土工作性能测试、表征及模拟方法,最后,梳理了混凝土工作性能的优化提升技术的应用和研究现状。

1) 高原“三低”环境对混凝土工作性能影响机理:低温度会减缓水泥水化速率及外加剂吸附速率,增加气泡结构和稳定性,致使新拌混凝土黏度增大且润滑作用降低;低湿度会加速水分蒸发,进一步影响水化反应,导致孔隙结构劣化,浆体保水性降低;低气压则增加了引气难度,降低了气泡稳定性,导致含气量损失加剧,气泡的润滑效应减弱,最终降低浆体润滑能力。环境耦合效应则表现出更复杂的非线性特征,低温度、低湿度与低气压之间的耦合作用进一步引发了水化速率延缓、水分蒸发加速和气泡结构不稳定三重危害,使得混凝土工作性能进一步劣化。

未来研究应进一步定量探究“三低”环境耦合作用下,工作性能与水泥水化程度、气泡结构等特性间的关联机制,并综合考虑高原环境可能面临的大温差、强辐射及强风的其他环境的综合作用,结合先进分析手段从微-宏观角度共同揭示高原“多环境因素综合影响机理,为高原环境中混凝土材料的安全、高效应用提供保障。

2) 高原“三低”环境作用下混凝土工作性能表征方法:其测试方法主要依赖于环境模拟设备与传统流变仪、坍落度试验等手段相结合,尽管当前已明确了温度、气压等单一环境因素的影响规律,但尚缺乏针对高原多重复杂条件的专用测试技术。在表征模型方面,通过引入环境修正参数或构建初步的多场耦合模型,提升了流变行为的描述精度,然而未充分考虑多场耦合的传统模型仍存在预测值与实测值偏差显著的问题。在数值模拟层面,研究已能利用有限元、离散元等方法从多尺度分析环境中各因素的影响机制,但现有模拟多针对单一因素展开,未能实现环境的耦合数值仿真。

为实现高原环境下混凝土工作性能的高效、精准测试与模拟,未来的研究应着力于两大方向。一是测试技术的智能化,需开发和应用新型智能测试技术,以突破传统方法在极端条件下的适用性局限。

二是表征模型的精细化,亟须发展能够综合反映温度、湿度、气压耦合作用的下一代多场耦合流变模型,以提升预测准确性。

3) 高原“三低”环境作用下混凝土工作性能提升措施:在外加剂方面,减水剂、引气剂、防冻剂、聚合物及纳米材料的提升机理均得到有效验证,且在此基础上新型引气剂、减水剂等的不断改进为混凝土工作性能高效提升奠定基础。此外,气泡结构调控以及搅拌工艺优化也能够通过补偿含气量损失、提高气泡稳定性、调节流变性能及水化进程等方面对混凝土工作性能也有显著提升。

然而,若要对混凝土工作性能的精准调控,还应深入研究不同外加剂在环境影响下的协同作用机制,并综合考虑配合比、外加剂类型等多因素确定其最优掺量;结合高原环境特性优化搅拌工艺参数,增强浆体均匀性与气泡稳定性的协同控制效果;深入研究气泡结构调控与多环境因素的耦合规律,构建适应极端环境的气泡结构优化体系。

参考文献:

- [1] 张艳荣,孔祥明,曹恩祥,等.温度对新拌水泥沥青浆体流动性和水化速率的影响[J].硅酸盐学报,2010,38(11):2172–2177.
ZHANG Yanrong, KONG Xiangming, CAO Enxiang, et al. J Chin Ceram Soc, 2010, 38(11): 2172–2177.
- [2] 任巍晓,柯国炬,何晓雁,等.基于表面张力和温度的引气剂和引气水泥砂浆性能研究[J].硅酸盐通报,2015,34(2):331–334.
REN Weiyao, KE Guojia, HE Xiaoyan, et al. Bull Chin Ceram Soc, 2015, 34(2): 331–334.
- [3] 许涛,朱兆辉,陈诚,等.低温环境对输电工程混凝土工作性能和强度的影响[J].江苏建材,2021(2):29–32.
XU Tao, ZHU Zhaohui, CHEN Cheng, et al. Jiangsu Build Mater, 2021(2): 29–32.
- [4] 罗祥.引气剂低温作用效果及其温度敏感性机理[D].北京:中国建筑材料科学研究总院,2022.
LUO Xiang. Performance of air-entraining agents at low temperature and its temperature sensitivity mechanism[D]. Beijing: China Building Materials Research Institute, 2022.
- [5] 孙杰.引气剂对水工混凝土性能影响的温度效应研究[J].水利科学与寒区工程,2023,6(10):65–68.
SUN Jie. Hydro Sci Cold Zone Eng, 2023, 6(10): 65–68.
- [6] ORTIZ J, AGUADO A, AGULLÓ L, et al. Influence of environmental temperature and moisture content of aggregates on the workability of cement mortar[J]. Constr Build Mater, 2009, 23(5): 1808–1814.
- [7] 岑国平,洪刚,王金华,等.高原机场道面混凝土含气量的影响因素及控制措施[J].施工技术,2012,41(22):33–35.
CEN Guoping, HONG Gang, WANG Jinhua, et al. Constr Technol, 2012, 41(22): 33–35.
- [8] CHEN X, LIU X, TIAN B, et al. Effect of low atmospheric pressure on air entrainment in cement-based materials: An on-site experimental study at different elevations[J]. Materials, 2020, 13(18): 3975.
- [9] SCHMIDT W, BROUWERS H J H, KÜHNE H C, et al. Influences of

- superplasticizer modification and mixture composition on the performance of self-compacting concrete at varied ambient temperatures[J]. *Cem Concr Compos*, 2014, 49: 111–126.
- [10] ZHANG Y R, KONG X M, GAO L, et al. Rheological behaviors of fresh cement pastes with polycarboxylate superplasticizer[J]. *J Wuhan Univ Technol-Mat Sci Edit*, 2016, 31(2): 286–299.
- [11] HUANG H, HUANG T J, YUAN Q, et al. Temperature dependence of structural build-up and its relation with hydration kinetics of cement paste[J]. *Constr Build Mater*, 2019, 201: 553–562.
- [12] 孙佳佳. 养护方式对高原环境下水泥基材料性能影响研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2023.
- SUN Jiajia. Study on the effect of curing methods on the properties of cement-based materials under plateau environment[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiatong University, 2023.
- [13] LI X L, KARAKASHEV S I, EVANS G M, et al. Effect of environmental humidity on static foam stability[J]. *Langmuir*, 2012, 28(9): 4060–4068.
- [14] ZUO S H, YUAN Q, HUANG T J, et al. Microstructural changes of young cement paste due to moisture transfer at low air pressures[J]. *Cem Concr Res*, 2023, 164: 107061.
- [15] CONCHA N C. Effects of mineral and chemical admixtures on the rheological properties of self compacting concrete[J]. *Int J GEOMATE*, 2020, 18(66): 24–29.
- [16] 张俊逸. 低温环境与外加剂对水泥基材料流变行为的影响研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
- ZHANG Junyi. Effects of low temperature and admixtures on rheological behavior of cement-based materials[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022.
- [17] ZHANG J Y, CHEN T F, GAO X J, et al. Rheological concerns arising from the use of anti-freezing additives in cement mortar with/without SP and AEA for low-temperature construction[J]. *Cem Concr Compos*, 2023, 142: 105220.
- [18] GAO W Z, QI J Y, YANG X, et al. Experimental investigation on bubble departure diameter in pool boiling under sub-atmospheric pressure[J]. *Int J Heat Mass Transf*, 2019, 134: 933–947.
- [19] LAN X L, ZENG X H, ZHU H S, et al. Experimental investigation on fractal characteristics of pores in air-entrained concrete at low atmospheric pressure[J]. *Cem Concr Compos*, 2022, 130: 104509.
- [20] LAN X L, ZENG X H, ZHU H S, et al. Surface tension of cementitious pore solutions at low atmospheric pressure: An experimental exploration[J]. *Cem Concr Compos*, 2024, 145: 105309.
- [21] 杜振兴, 余伟, 左文强, 等. 高原低气压环境对引气砂浆孔结构的影响机理[J]. *硅酸盐学报*, 2023, 51(5): 1174–1180.
- DU Zhenxing, SHE Wei, ZUO Wenqiang, et al. *J Chin Ceram Soc*, 2023, 51(5): 1174–1180.
- [22] SHI Y, YANG H Q, ZHOU S H, et al. Effect of atmospheric pressure on performance of AEA and air entraining concrete[J]. *Adv Mater Sci Eng*, 2018, 2018: 6528412.
- [23] 冉宇舟. 低气压环境下水泥基材料搅拌分散与引气特性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
- RAN Yuzhou. Research on mixing and air entraining characteristics of cement-based materials in low air pressure environment[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.
- [24] LI Y, WANG Z D, WANG L. Influence of low atmospheric pressure on fluidity and pore size of cement paste[J]. *Rev Row Mater*, 2019, 49(1): 88–94.
- [25] LI Y, WANG Z D, WANG L. The influence of atmospheric pressure on air content and pore structure of air-entrained concrete[J]. *J Wuhan Univ Technol-Mat Sci Edit*, 2019, 34(6): 1365–1370.
- [26] HAMAD B S, RTEIL A A, EL-FADEL M. Effect of used engine oil on properties of fresh and hardened concrete[J]. *Constr Build Mater*, 2003, 17(5): 311–318.
- [27] 周美茹, 陈国强, 朱洪波. 含气量对混凝土流动性、强度和氯离子渗透性的影响[J]. *混凝土*, 2015(6): 63–65.
- ZHOU Meiru, CHEN Guoqiang, ZHU Hongbo. *Concrete*, 2015(6): 63–65.
- [28] 李扬. 低气压下气泡全生命周期特征及引气混凝土性能提升[D]. 北京: 中国建筑材料科学研究总院, 2020.
- LI Yang. Characteristics of air bubbles over the life cycle under low air pressure and improvement of the performance of air entrained concrete [D]. Beijing: China Building Materials Research Institute, 2020.
- [29] SZWABOWSKI J, LAZNIEWSKA-PIEKARCZYK B. The increase of air content in SCC mixes under the influence of carboxylate superplasticizer[J]. *Cem Wapno Beton*, 2008, 13(4): 205–215.
- [30] STRUBLE L J, JIANG Q. Effects of air entrainment on rheology[J]. *ACI Mater J*, 2004, 101(6): 448–456.
- [31] BANFILL P F G. *Rheology of Fresh Cement and Concrete*[M]. Boca Raton: CRC Press, 1990: 373.
- [32] ZHANG X, ZHANG H, GAO H, et al. Effect of bubble feature parameters on rheological properties of fresh concrete[J]. *Constr Build Mater*, 2019, 196: 245–255.
- [33] DU Z X, XIONG J B, ZUO W Q, et al. Using modified nano-silica to prevent bubble Ostwald ripening under low atmospheric pressure: From liquid foam to air-entrained cement mortar[J]. *Cem Concr Compos*, 2022, 132: 104627.
- [34] ZUO S H, YUAN Q, HUANG T J, et al. Rheology and air entrainment of fresh Portland cement mortars in simulated low air pressure environments[J]. *Cem Concr Compos*, 2023, 135: 104848.
- [35] LI X F, YANG P Y. Effect of low atmospheric pressure on bubble stability of air-entrained concrete[J]. *Adv Civ Eng*, 2021, 2021: 5533437.
- [36] GUO T F, QIAO M, SHU X, et al. Characteristic analysis of air bubbles on the rheological properties of cement mortar[J]. *Constr Build Mater*, 2022, 316: 125812.
- [37] ZHAO H T, JIANG K D, YANG R, et al. Experimental and theoretical analysis on coupled effect of hydration, temperature and humidity in early-age cement-based materials[J]. *Int J Heat Mass Transf*, 2020, 146: 118784.
- [38] SEKKI P, HUTTUNEN P, KARVINEN T, et al. Temperature dependence of concrete drying and a method for estimating the effect of temperature on the relative humidity in concrete pores[J]. *J Build Eng*, 2024, 89: 109266.
- [39] PATEL R G, KILLOH D C, PARROTT L J, et al. Influence of curing at different relative humidities upon compound reactions and porosity in Portland cement paste[J]. *Mater Struct*, 1988, 21(3): 192–197.
- [40] WANG B W, LI Q L, DONG P B, et al. Performance investigation of blast furnace slag based cemented paste backfill under low temperature and low atmospheric pressure[J]. *Constr Build Mater*, 2023, 363: 129744.
- [41] CHU Y J, GUO L P, DAI G Z, et al. Effects of the early curing regime on the properties and pore structure of concrete in an environment with high altitudes and low atmospheric pressures[J]. *J Build Eng*, 2024, 82: 108195.

- [42] KJELSEN K O, DETWILER R J, GJØRV O E. Pore structure of plain cement pastes hydrated at different temperatures[J]. *Cem Concr Res*, 1990, 20(6): 927–933.
- [43] 杨哲. 高原低气压环境下混凝土气孔结构调控及耐久性研究[D]. 西安: 长安大学, 2022.
YANG Zhe. Air pore structure regulation and durability of concrete under low air pressure on plateau[D]. Xi'an: Changan University, 2022.
- [44] GHAFOORI N, DIAWARA H. Influence of temperature on fresh performance of self-consolidating concrete[J]. *Constr Build Mater*, 2010, 24(6): 946–955.
- [45] KALETA-JUROWSKA A, JUROWSKI K. The influence of ambient temperature on high performance concrete properties[J]. *Materials*, 2020, 13(20): 4646.
- [46] NAZAR S, YANG J, AHMAD A, et al. Comparative study of evolutionary artificial intelligence approaches to predict the rheological properties of fresh concrete[J]. *Mater Today Commun*, 2022, 32: 103964.
- [47] AL MARTINI S, KHARTABIL A, NEHDI M L. Estimating rheological properties of superplasticized cement paste at high temperature and prolonged mixing using various rheological models and oscillatory rheology[J]. *ACI Mater J*, 2021, 118(6): 359–370.
- [48] WANG M, ZHANG C Y, JIANG P, et al. Effects of temperature and bleeding on rheology of cement paste[J]. *Constr Build Mater*, 2023, 403: 133085.
- [49] 闫玮烁. 新拌混凝土工作性能及离析机制的细观模拟研究[D]. 天津: 天津大学, 2022.
YAN Weishuo. Mesoscopic simulation on working behavior and segregation mechanism of fresh concrete[D]. Tianjin: Tianjin University, 2022.
- [50] CAI Y X, LIU Q F, CHEN M Z, et al. A CFD-based numerical model for predicting the slump and slump flow of fresh concrete from a rheological perspective[J]. *Constr Build Mater*, 2025, 458: 138501.
- [51] LI L L, DANG L P, WANG C B, et al. Effects of plateau environment on cement concrete properties: A review[J]. *J Road Eng*, 2025, 5(3): 467–479.
- [52] AİTCIN P C. Entrained air in concrete[M]//*Science and Technology of Concrete Admixtures*. Amsterdam: Elsevier, 2016: 87–95.
- [53] 李雪峰, 付智. 低气压环境对混凝土含气量及气泡稳定性的影响[J]. *硅酸盐学报*, 2015, 43(8): 1076–1082.
LI Xuefeng, FU Zhi. J Chin Ceram Soc, 2015, 43(8): 1076–1082.
- [54] 李雪峰, 付智, 罗翥, 等. 高原低气压环境对新拌混凝土含气量的影响[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2014, 44(5): 1046–1051.
LI Xuefeng, FU Zhi, LUO Zhu, et al. J Southeast Univ Nat Sci Ed, 2014, 44(5): 1046–1051.
- [55] KIM H K, JEON J H, LEE H K. Workability, and mechanical, acoustic and thermal properties of lightweight aggregate concrete with a high volume of entrained air[J]. *Constr Build Mater*, 2012, 29: 193–200.
- [56] 任骏, 李豪, 毛江鸿, 等. 引气剂在高原低气压环境下的研究现状[J]. *混凝土*, 2024(8): 172–178.
REN Jun, LI Hao, MAO Jianghong, et al. *Concrete*, 2024(8): 172–178.
- [57] 谢永江, 仲新华, 朱长华, 等. 青藏铁路桥隧结构用高性能混凝土的耐久性研究[J]. *中国铁道科学*, 2003, 24(1): 108–112.
XIE Yongjiang, ZHONG Xinhua, ZHU Changhua, et al. *China Railw Sci*, 2003, 24(1): 108–112.
- [58] 朱长华. 青藏高原多年冻土区高性能混凝土的试验研究[D]. 北京: 铁道部科学研究院, 2004.
ZHU Changhua. Research on high performance concrete in Qinghai-Tibet Plateau permafrost region(QT-HPC)[D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2004.
- [59] 袁晓峰. 抗冻混凝土的制备及性能研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
YUAN Xiaofeng. Research on preparation and performance of frost-resistance concrete[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.
- [60] LI X F, FU Z, LUO Z. Effect of atmospheric pressure on air content and air void parameters of concrete[J]. *Mag Concr Res*, 2015, 67(8): 391–400.
- [61] SHAH H A, YUAN Q, ZUO S H. air entrainment in fresh concrete and its effects on hardened concrete—A review[J]. *Constr Build Mater*, 2021, 274: 121835.
- [62] DONG X B, WANG H, MIAO Y C, et al. Potential utilization of superabsorbent polymer to develop sustainable concrete in plateau regions[J]. *Case Stud Constr Mater*, 2023, 18: e02062.
- [63] ZHENG T, ZHENG D F, QIU X Q, et al. A novel branched claw-shape lignin-based polycarboxylate superplasticizer: Preparation, performance and mechanism[J]. *Cem Concr Res*, 2019, 119: 89–101.
- [64] MA J F, SHANG Y Z, PENG C J, et al. Synthesis, characterization, and performance of novel phosphate-modified polymers as air-entraining agents[J]. *Constr Build Mater*, 2020, 232: 117231.
- [65] LIU J H, KHAYAT K H, SHI C J. Effect of superabsorbent polymer characteristics on rheology of ultra-high performance concrete[J]. *Cem Concr Compos*, 2020, 112: 103636.
- [66] 赵圣婴. 高吸水聚合物改性水泥基材料气孔结构与力学性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
ZHAO Shengying. Air void structure and mechanical properties of cement-based materials modified by superabsorbent polymers[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022.
- [67] 王振, 李化建, 黄法礼, 等. 铁路工程混凝土防冻剂研究现状与问题探讨[J]. *铁道建筑*, 2018, 58(8): 142–146.
WANG Zhen, LI Huajian, HUANG Fali, et al. *Railw Eng*, 2018, 58(8): 142–146.
- [68] GE X, GE Y, LI Q F, et al. Effect of low air pressure on the durability of concrete[J]. *Constr Build Mater*, 2018, 187: 830–838.
- [69] 周华新, 何廷树. 钠盐类防冻组分对混凝土液体防冻泵送剂性能的影响[J]. *混凝土*, 2007(12): 52–54.
ZHOU Huaxin, HE Tingshu. *Concrete*, 2007(12): 52–54.
- [70] 王梦雪. 低掺量防冻剂作用机理及其对混凝土性能的影响[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
WANG Mengxue. The mechanism of low doped anti-freezing admixtures and its effect on concrete performance[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [71] SZWABOWSKI J, ŁĄŻNIEWSKA-PIEKARCYK B. Air-entrainment problem in self-compacting concrete[J]. *J Civ Eng Manag*, 2009, 15(2): 137–147.
- [72] HE Y, ZHANG X, HONG W L, et al. Effects of polycarboxylate superplasticisers with various functional groups on the pore structure of cement mortar[J]. *Adv Cem Res*, 2020, 32(11): 510–518.
- [73] PETIT J Y, WIRQUIN E, KHAYAT K H. Effect of temperature on the rheology of flowable mortars[J]. *Cem Concr Compos*, 2010, 32(1): 43–53.
- [74] GOŁASZEWSKI J, SZWABOWSKI J. Influence of superplasticizers on rheological behaviour of fresh cement mortars[J]. *Cem Concr Res*, 2004, 34(2): 235–248.
- [75] JHATIAL A A, SOHU S, LAKHIAR M T, et al. Effectiveness of locally available superplasticizers on the workability and strength of concrete[J]. *Civ Eng J*, 2018, 4(12): 2919–2925.
- [76] WANG X H, FANG Z C, ZHENG L. Effect of dose and types of the

- water reducing admixtures and superplasticizers on concrete strength and durability behaviour: A review[J]. *J Civ Eng Manag*, 2024, 30(1): 33–48.
- [77] SUPIT S W M, SHAIKH F U A. Durability properties of high volume fly ash concrete containing nano-silica[J]. *Mater Struct*, 2015, 48(8): 2431–2445.
- [78] NAJI GIVI A, ABDUL RASHID S, AZIZ F N A, et al. The effects of lime solution on the properties of SiO₂ nanoparticles binary blended concrete[J]. *Compos Part B Eng*, 2011, 42(3): 562–569.
- [79] HE R, YANG Z, GAN V J L, et al. Mechanism of nano-silica to enhance the robustness and durability of concrete in low air pressure for sustainable civil infrastructures[J]. *J Clean Prod*, 2021, 321: 128783.
- [80] GOEL G, SACHDEVA P, CHAUDHARY A K, et al. The use of nanomaterials in concrete: A review[J]. *Mater Today Proc*, 2022, 69: 365–371.
- [81] ZENG X H, LAN X L, ZHU H S, et al. A review on bubble stability in fresh concrete: Mechanisms and main factors[J]. *Materials*, 2020, 13(8): 1820.
- [82] SHE W, DU Y, MIAO C W, et al. Application of organic- and nanoparticle-modified foams in foamed concrete: Reinforcement and stabilization mechanisms[J]. *Cem Concr Res*, 2018, 106: 12–22.
- [83] LAN X L, ZENG X H, ZHU H S, et al. Evolution and stability of bubbles in cement-based materials under low air pressure: A Theoretical and experimental Study[J]. *J Build Eng*, 2024, 93: 109761.
- [84] 张金虎. 低温低压环境下纳米 SiO₂ 改性混凝土微观结构及抗冻耐久性研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2024.
- ZHANG Jinhu. Study on microstructure and frost resistance durability of SiO₂ modified concrete under low temperature and low pressure environment[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiatong University, 2024.
- [85] NILI M, EHSANI A. Investigating the effect of the cement paste and transition zone on strength development of concrete containing nanosilica and silica fume[J]. *Mater Des*, 2015, 75: 174–183.
- [86] 许晨阳, 简险峰, 王栋民, 等. 钙盐调凝剂对硅酸盐水泥水化性能的影响[J]. *硅酸盐通报*, 2014, 33(12): 3277–3281.
- XU Chenyang, JIAN Xianfeng, WANG Dongmin, et al. *Bull Chin Ceram Soc*, 2014, 33(12): 3277–3281.
- [87] 杨钱荣, 朱蓓蓉, 杨全兵, 等. 高频振荡对引气混凝土气泡特征参数的影响[J]. *建筑材料学报*, 2007, 10(3): 331–336.
- YANG Qianrong, ZHU Beirong, YANG Quanbing, et al. *J Build Mater*, 2007, 10(3): 331–336.
- [88] CAREY E, STUBENRAUCH C. A disjoining pressure study of foam films stabilized by mixtures of a nonionic (C12DMPO) and an ionic surfactant (C12TAB)[J]. *J Colloid Interface Sci*, 2010, 343(1): 314–323.
- [89] 丁蓓, 刘加平, 刘建忠. 引气剂稳泡机理及其改善混凝土冻融耐久性能的研究[J]. *混凝土*, 2006(11): 34–35.
- DING Bei, LIU Jiaping, LIU Jianzhong. *Concrete*, 2006(11): 34–35.
- [90] KOVLER K, ROUSSEL N. Properties of fresh and hardened concrete[J]. *Cem Concr Res*, 2011, 41(7): 775–792.

作者贡献声明:

雷东移: 论文构思、设计研究方法、审阅与修订
 栾云杰: 撰写初稿、绘制图表、分析/综合数据并推导结论
 王建新: 数据管理、调查研究
 吴天旻: 软件使用、绘制图表
 李莹: 提供资源、监督指导、审阅与修订
 张淑娴: 调查研究、绘制图表
 管延峰: 提供资源、监督指导

Overview of Research on Effects of Low Temperature, Low Humidity, and Low Pressure Environmental Conditions in Plateau on Workability of Concrete

LEI Dongyi¹, LUAN Yunjie¹, WANG Jianxin¹, WU Tianmin¹, LI Ying¹, ZHANG Shuxian¹, GUAN Yanfeng²

(1. Department of Civil Engineering (Engineering Research Center of Concrete Technology under Marine Environment, Ministry of Education), Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, Shandong, China; 2. Shandong Luqiao Group Co, Ltd, Jinan 250014, China)

Extended Abstract

The harsh plateau environment characterized by low temperature, low humidity, and low air pressure (referred to as "triple-low" conditions) in plateau areas significantly affects the concrete workability, leading to reduced compactness and uniformity during concrete placement, which in turn induces initial defects such as pores and micro-cracks. These defects not only directly weaken the mechanical properties of concrete structures but also create channels for the ingress of moisture and corrosive media over time, seriously threatening their long-term durability. Currently, research on concrete performance affected by the "triple-low" environment has mainly focused on hardened mechanical properties and durability, whereas research on early-age properties has tended to focus on individual indicators such as bubble stability during cement hydration. Although relevant data have been accumulated, a comprehensive explanation of the mechanisms of plateau "triple-low" environmental conditions on concrete workability remains lacking, along with a systematic overview of the effects of single environmental factors and multifactor environmental coupling on concrete workability. Furthermore, existing research on characterization and analysis methods for concrete workability remains insufficient, and systematic summaries of performance regulation and enhancement measures tailored to plateau environments remain limited. To gain an in-depth understanding of the effects of plateau "triple-low" environments on concrete workability, this paper reviews the influence patterns and mechanisms from three aspects: environmental impact mechanisms, performance characterization methods, and regulation and enhancement measures.

Environmental impact mechanisms: The workability of concrete is closely related to bubble structure and cement hydration, whereas the "triple-low" environmental factors alter the cement hydration process and bubble structure in concrete. Low temperatures

can slow cement hydration and admixture adsorption, thereby increasing the viscosity of fresh concrete; low humidity accelerates water evaporation, affecting cement hydration and reducing water retention; low pressure hinders bubble entrainment and stabilization, leading to greater air-content loss and weaker bubble lubrication. When these three factors act jointly, more complex coupling effects occur, thereby further exacerbating the deterioration of concrete workability.

Characterization and analysis methods: To accurately evaluate the performance of concrete in plateau environments, more advanced testing and simulation methods are needed. For testing methods, current approaches mainly rely on environmental simulation equipment combined with traditional experimental techniques, yet there is still a lack of specialized testing technologies suitable for coupled environmental factors. For characterization models, although environmental parameters or preliminary coupled models have been introduced to improve accuracy, they do not adequately capture the actual influence of multifield coupling, resulting in substantial deviations between predicted and measured values. In numerical simulations, while methods such as finite-element and discrete-element analyses can provide multi-scale insights into single-factor mechanisms, they have not yet achieved systematic simulation of coupling among multiple environmental factors.

Regulation and enhancement measures: Current research primarily improves workability from the following three aspects. In terms of admixtures, air-entraining agents, polymers, antifreeze agents, water reducers, and nanomaterials have been shown to be effective in improving workability, and the ongoing development of new admixtures provides a basis for further enhancement. Additionally, regulating bubble structure and optimizing mixing processes can compensate for air-content loss, enhance bubble stability, and adjust rheological properties, thereby improving the workability of concrete.

Summary and prospects As a key factor determining the long-term performance of concrete, is significantly affected by the plateau "triple-low" environment. This paper reviews the influence patterns and underlying mechanisms of the plateau "triple-low" environment from three aspects: environmental impact mechanisms, performance characterization methods, and regulation and enhancement measures. In terms of environmental impacts, studies have confirmed that individual environmental factors can cause retarded hydration, accelerated water evaporation, and unstable bubble structures, while multifactor environments exhibit more complex nonlinear characteristics, further reducing the workability of concrete. However, future research still needs to quantify the interactions among workability, hydration degree, and bubble structure under the coupled "triple-low" effects, and systematically elucidate their comprehensive mechanisms of action by incorporating factors such as temperature variations, radiation, and strong winds, to support the safe and efficient application of concrete in plateau regions. In terms of performance characterization, current studies mainly rely on combining environmental simulation with traditional rheological testing methods, yet there is a lack of specialized testing techniques for coupled environmental factors in plateau regions; although characterization models have been improved by incorporating environmental parameters, they still struggle to accurately predict rheological behavior under multifield coupling; although numerical simulations can analyze single-factor effects across multiple scales, they remain insufficient for simulating environmental coupling. For performance enhancement measures, the development and application of admixtures such as air-entraining agents, polymers, antifreeze agents, water reducers, and nanomaterials have been shown to be effective in improving concrete workability. Additionally, regulating bubble structures and optimizing mixing processes can compensate for air content loss and improve rheological properties. However, to achieve precise regulation of concrete workability in plateau environments, systematic methods for multifactor synergistic regulation need to be established, covering admixture formulation, process-parameter optimization, and bubble-structure system design.

Keywords plateau environment; fresh concrete; bubble structure; workability; rheological properties; enhancement measures; numerical analysis