

再生骨料替代率对绿色混凝土抗冻融性能影响的微观机理分析

李静茹

昌吉职业技术学院，新疆 昌吉 831100

DOI:10.61369/ERA.2025080011

摘 要： 随着建筑行业的可持续发展，再生骨料作为建筑废弃物资源化利用的核心产物，在绿色混凝土制备中发挥着重要作用。本文围绕再生骨料替代率与绿色混凝土抗冻融性能的关系展开研究，运用压汞法、扫描电镜、X射线衍射及能谱分析等技术手段，从微观孔隙结构演变、界面过渡区特征变化以及水化产物稳定性差异三个维度，系统揭示再生骨料替代率影响混凝土抗冻融性能的内在机理。研究发现，随着再生骨料替代率的提高，混凝土内部孔隙结构劣化、界面过渡区缺陷增多、水化产物稳定性降低，三者协同作用导致混凝土抗冻融性能显著下降。本研究成果为优化再生骨料混凝土配合比设计、提升其在寒区工程中的适用性提供了坚实的理论基础。

关 键 词： 再生骨料替代率；绿色混凝土；抗冻融性能；微观机理

Microscopic Mechanism Analysis of the Impact of Recycled Aggregate Replacement Rate on the Freeze-Thaw Resistance of Green Concrete

Li Jingru

Changji Vocational and Technical College, Changji, Xinjiang 831100

Abstract： With the sustainable development of the construction industry, recycled aggregates, as the core product of resource utilization of construction waste, play a significant role in the preparation of green concrete. This paper focuses on the relationship between the replacement rate of recycled aggregates and the freeze-thaw resistance of green concrete. By employing technical methods such as mercury intrusion porosimetry, scanning electron microscopy, X-ray diffraction, and energy dispersive spectroscopy, the study systematically reveals the inherent mechanism of how the recycled aggregate replacement rate affects the freeze-thaw resistance of concrete from three dimensions: the evolution of microscopic pore structure, changes in the characteristics of the interfacial transition zone, and differences in the stability of hydration products. The research finds that with the increase in the replacement rate of recycled aggregates, the internal pore structure of the concrete deteriorates, defects in the interfacial transition zone increase, and the stability of hydration products decreases. The synergistic effect of these three factors leads to a significant decline in the freeze-thaw resistance of concrete. The results of this study provide a solid theoretical foundation for optimizing the mix design of recycled aggregate concrete and enhancing its applicability in cold region engineering.

Keywords： recycled aggregate replacement rate; green concrete; freeze-thaw resistance; microscopic mechanism

引言

随着城市化进程的加速推进，建筑废弃物产生量逐年攀升，传统混凝土生产对天然砂石资源的过度依赖以及大量二氧化碳排放，使得混凝土行业的可持续发展面临严峻挑战。再生骨料作为建筑废弃物经破碎、筛分等处理后的产物，将其应用于混凝土制备，不仅能够实现建筑废弃物的资源化利用，还可有效降低对天然骨料的需求，契合绿色建筑发展理念。冻融破坏本质是混凝土内部孔隙水在冻结过程中体积膨胀产生应力，进而引发微裂纹萌生与扩展的过程。再生骨料的特殊物理化学性质会对混凝土内部孔隙结构、骨料与水泥浆体界面过渡区以及水化产物的形成与稳定性产生重要影响。因此，从微观层面探究再生骨料替代率对混凝土抗冻融性能的影响机理，对于推动再生骨料混凝土在寒区工程中的广泛应用具有重要的现实意义。

作者简介：李静茹（1998.02—），女，新疆昌吉人，本科，助教，研究方向：建筑工程技术，单位：昌吉职业技术学院，邮编：831100。

一、再生骨料特性对混凝土孔隙结构的影响

（一）老旧硬化水泥浆体对孔隙形成的影响

再生骨料表面附着的老旧硬化水泥浆体是影响混凝土孔隙结构的关键因素。老旧浆体中存在大量未完全水化的水泥颗粒，这些颗粒在新拌混凝土的水化过程中，因活性较低，难以与新的水泥水化产物充分融合。从化学反应动力学角度来看，老旧水泥颗粒表面被水化产物包裹，新的水化反应难以突破这层阻碍，导致局部区域水化反应不充分，从而形成更多的孔隙。同时，老旧浆体内部存在丰富的微裂缝与开孔孔隙，其复杂的孔隙网络结构使得再生骨料具有较高的吸水性。相关研究表明，再生骨料的吸水性可达天然骨料的5-10倍，这种高吸水性在混凝土拌合物中会引发一系列连锁反应^[1]。

（二）拌合水吸附与“二次水化”的孔隙效应

在混凝土拌制阶段，再生骨料会大量吸附拌合水，导致实际参与水泥水化反应的自由水减少。水泥水化反应是一个需要充足水分参与的过程，自由水的不足会使得水泥颗粒无法充分水化，大量未水化的水泥颗粒残留于混凝土内部，这些未水化颗粒不仅无法为混凝土提供强度，还会在其周围形成孔隙^[2]。另一方面，在混凝土硬化过程中，前期被再生骨料吸附的水分会缓慢释放，形成“二次水化”现象。虽然“二次水化”在一定程度上能够促进水泥的水化进程，但由于水分释放的不均匀性以及释放时间的滞后性，会在浆体内部形成不规则的毛细孔。这些毛细孔的存在，不仅降低了混凝土的密实度，还为冻融循环过程中孔隙水结冰提供了空间，增大了冻胀应力对混凝土的破坏作用。有研究指出，“二次水化”形成的孔隙尺寸多集中在50-500nm之间，这一孔径范围恰好是冻融破坏中冰晶体生长较为活跃的区域。

（三）孔隙结构劣化与冻融破坏关联

从微观孔隙结构分析，随着再生骨料替代率的增加，混凝土内部孔隙结构呈现明显的劣化趋势。通过压汞法对不同再生骨料替代率下混凝土的孔隙特征进行研究发现，混凝土的总孔隙率随再生骨料替代率的升高而逐渐增大。这是因为再生骨料自身的多孔特性使得混凝土内部孔隙数量增多，同时其对拌合水的吸附作用进一步加剧了孔隙的形成^[3]。此外，在孔隙孔径分布方面，有害孔（孔径>200nm）的占比也随着再生骨料替代率的增加而显著提高。大孔径的有害孔相互连通，形成了孔隙网络，这为冻融过程中冰晶体的生长和膨胀提供了更为有利的条件。当混凝土处于冻融循环环境时，孔隙中的水结冰后体积膨胀，在这些大孔径连通孔隙中，冰晶体能够自由生长，产生的冻胀应力会对孔壁产生巨大的压力，导致孔壁开裂，进而引发混凝土内部微裂纹的萌生与扩展，加速混凝土的冻融破坏^[4]。

二、界面过渡区（ITZ）特征与冻融损伤路径

（一）天然骨料与再生骨料界面过渡区的差异

界面过渡区是骨料与水泥浆体之间的重要连接区域，其结构和性能对混凝土的力学性能和耐久性能起着决定性作用。在天然骨料混凝土中，界面过渡区的形成过程相对较为稳定，水泥水化产物能够在骨料表面有序生长，形成厚度约50-100μm的界面过渡区。在这一区域内，水化产物（如C-S-H凝胶、钙矾石Aft、

氢氧化钙Ca(OH)₂）相互交织，形成较为密实的结构，使得天然骨料与水泥浆体之间具有良好的粘结性能。

然而，再生骨料混凝土的界面过渡区具有更为复杂的结构特征。由于再生骨料表面附着老旧砂浆，其界面过渡区存在两层过渡结构。内侧是新砂浆与老旧砂浆的结合面，外侧是老旧砂浆与天然骨料的原始界面。在混凝土制备过程中，新拌水泥浆体与再生骨料表面的老旧砂浆接触后，水化反应开始进行^[5]。但由于老旧砂浆的存在，其表面的物理化学性质与天然骨料存在较大差异，导致水泥水化产物在老旧砂浆表面的生长受到影响。老旧砂浆的孔隙率高、表面能低，使得水泥水化产物难以在其表面形成紧密的堆积结构，从而影响了界面过渡区的质量。

（二）界面过渡区晶体定向排列的机制

通过扫描电镜对再生骨料混凝土界面过渡区进行观察发现，与天然骨料界面过渡区中Ca(OH)₂晶体呈片状随机分布不同，再生骨料界面过渡区的老旧砂浆表面因预湿处理形成疏松层。在新砂浆水化过程中，Ca²⁺离子会向骨料侧迁移，这种离子迁移现象使得界面区的Ca(OH)₂晶体呈现出定向排列的特征，即出现“晶体择优取向”现象。从晶体生长动力学角度分析，老旧砂浆表面的疏松结构为Ca(OH)₂晶体生长提供了更多的晶核形成位点，同时Ca²⁺离子的定向迁移使得晶体在特定方向上优先生长。这种定向排列的Ca(OH)₂晶体结构较为松散，其层与层之间的结合力较弱，从而降低了界面过渡区的粘结强度。同时，能谱分析结果表明，再生骨料界面过渡区的Ca/Si比高于天然骨料界面过渡区，这反映出再生骨料界面过渡区中C-S-H凝胶的聚合度更低，结构更为疏松，进一步削弱了界面过渡区的性能^[6]。

（三）冻融损伤在界面过渡区的扩展路径

在冻融循环作用下，再生骨料混凝土的冻融损伤路径与界面过渡区的特征密切相关。冻融循环初期，由于再生骨料界面过渡区存在微孔隙、晶体缺陷等薄弱环节，冻胀应力会首先在这些区域集中，导致裂纹在界面过渡区的微孔隙与晶体缺陷处萌生。随着冻融循环次数的增加，裂纹会沿着老旧砂浆内部的裂缝逐渐扩展，并贯通新老界面。当再生骨料替代率较高时，多个再生骨料颗粒相邻分布，会形成连续的薄弱界面网络。在冻应力的作用下，应力能够通过这些连续的薄弱界面快速传递，使得混凝土内部的应力分布更加不均匀，加速了混凝土内部微裂纹的扩展和连通，最终导致混凝土整体性失效^[7]。研究人员通过数字图像相关技术（DIC）对冻融过程中混凝土内部裂纹扩展进行实时监测，发现裂纹在再生骨料界面过渡区的扩展速度明显快于天然骨料界面过渡区，且高替代率下裂纹形成网络的时间大幅缩短。

三、水化产物组成与冻融稳定性关联

（一）再生骨料对Ca(OH)₂晶体生成的影响

再生骨料混凝土的水化产物组成与天然骨料混凝土存在明显差异，这种差异对混凝土在冻融循环环境下的稳定性有着重要影响。通过X射线衍射分析可以发现，随着再生骨料替代率的增加，混凝土中水化产物Ca(OH)₂的衍射峰强度逐渐增强，且在界面过渡区富集现象更为明显。再生骨料表面附着的老旧砂浆中含有大量的惰性成分，如未水化的石英颗粒等，这些惰性成分会抑制水泥的水化反应进程，使得水泥水化反应不完全^[8]。同时，再

生骨料在混凝土中还会释放出 Na^+ 、 K^+ 等离子，这些离子会加速 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体的结晶过程，导致 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体在混凝土中大量生成并富集。从化学平衡角度来看， Na^+ 、 K^+ 等离子存在改变了水泥水化体系的离子浓度，促进了 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体的析出。

（二）膨胀性产物生成与微结构劣化

$\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体本身硬度较低、韧性较差，其定向排列形成的层状结构在冻胀应力作用下极易产生解理破坏。在冻融循环过程中，孔隙水结冰产生的冻胀应力会作用于 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体层，由于层间结合力较弱，晶体层会沿着解理面发生开裂，从而破坏混凝土内部的结构完整性。此外，再生骨料中还可能含有少量杂质，如附着的石膏、碳酸盐等。在长期冻融循环作用下，这些杂质会与水泥水化产物发生二次反应，生成膨胀性产物，如碳硫硅钙石。碳硫硅钙石的生成会导致混凝土内部产生膨胀应力，进一步加剧混凝土微结构的劣化。研究表明，碳硫硅钙石在生成过程中会产生约 1.5–2 倍的体积膨胀，这种膨胀作用会在混凝土内部产生微裂纹，降低混凝土的耐久性^[9]。

（三）AFt 晶体分解与胶凝体系弱化

能谱分析结果显示，在冻融循环后，再生骨料界面过渡区的 Al、S 元素含量升高。这表明在冻融循环过程中，钙矾石 AFt 晶体发生分解，转化为 Friedel 盐。AFt 晶体是混凝土中重要的胶凝物质，其分解会导致胶凝体系的粘结力下降，使得混凝土内部各组成部分之间的连接变得松散，从而降低了混凝土的抗冻融性能。AFt 晶体的分解与冻融循环过程中的离子迁移和化学反应密切相关，在冻融循环过程中，孔隙溶液中的离子浓度发生变化，使得 AFt 晶体的稳定性降低，进而发生分解反应。

四、替代率阈值与微观损伤模型

（一）低替代率下的抗冻融性能特征

通过大量试验研究发现，再生骨料替代率对混凝土抗冻融性能的影响存在一定的阈值。当再生骨料替代率较低，如 $\leq 30\%$ 时，混凝土的抗冻融性能与天然骨料混凝土差异较小，能够承受的冻融循环次数较多（通常 ≥ 300 次）。在这一替代率范围内，虽然再生骨料的加入会使混凝土内部孔隙率有所增加，但增幅相对有限（ $<15\%$ ），且界面过渡区的缺陷尚未形成连通路径，混凝土内部结构仍具有较好的完整性，能够有效抵抗冻融循环产生的破坏作用。此时，再生骨料的负面影响在混凝土整体结构的稳定性下得到一定程度的缓冲，混凝土中的孔隙结构和界面过渡区仍能

维持较好的性能^[10]。

（二）高替代率下的协同劣化效应

然而，当再生骨料替代率超过 50% 时，混凝土的抗冻融性能显著下降，能够承受的冻融循环次数大幅减少（ <200 次）。这主要是由于高替代率下，再生骨料的多孔结构与界面缺陷产生协同劣化效应。一方面，大量再生骨料的加入使得混凝土内部孔隙率显著升高，孔隙结构进一步恶化，为冻胀应力的产生和传递提供了条件；另一方面，再生骨料界面过渡区的缺陷增多，形成了连续的薄弱界面网络，使得冻融应力能够迅速在混凝土内部传递，加速了微裂纹的扩展和连通，导致混凝土结构快速破坏。高替代率下，再生骨料的各不利因素相互作用，形成恶性循环，极大地降低了混凝土的抗冻融性能。

（三）“孔隙–界面耦合损伤模型”构建

基于上述研究结果，建立“孔隙–界面耦合损伤模型”。在冻融循环过程中，冻融应力首先作用于具有高孔隙率的再生骨料砂浆基体。由于孔隙率高，孔隙中的水结冰后产生的冻胀应力较大，会在砂浆基体中引发微裂纹。这些微裂纹会通过疏松的再生骨料界面过渡区向相邻骨料传递应力，导致相邻骨料界面区也产生微裂纹。随着冻融循环次数的增加，微裂纹不断扩展并相互连通，形成裂纹网络。最终，裂纹网络贯穿整个混凝土结构，导致水泥石与骨料剥离，混凝土发生破碎，丧失抗冻融性能。该模型从微观层面揭示了再生骨料替代率影响混凝土抗冻融性能的内在机制，为深入理解混凝土冻融破坏过程提供了理论依据。

五、结束语

再生骨料替代率对绿色混凝土抗冻融性能的影响是一个复杂的多因素协同作用过程。从微观层面来看，再生骨料的特殊物理化学性质通过影响混凝土的孔隙结构、界面过渡区特征以及水化产物组成，显著改变了混凝土的抗冻融性能。高再生骨料替代率会导致混凝土内部孔隙率升高、界面过渡区缺陷加剧以及水化产物稳定性降低，这些因素相互作用，使得混凝土在冻融循环环境下更容易发生破坏。为了提高再生骨料混凝土在寒区工程中的适用性，未来研究可从再生骨料表面改性和混凝土配合比优化两方面入手。通过这些研究和技术创新，有望进一步提升再生骨料混凝土的抗冻融性能，推动其在寒区工程中的广泛应用，促进建筑行业的绿色可持续发展。

参考文献

- [1] 丁铸，李秋实，王新友. 再生骨料混凝土冻融损伤机理及性能提升研究进展 [J]. 混凝土, 2023(11): 125–130.
- [2] 刘峰，陈志强，周明. 再生骨料混凝土界面过渡区微观结构与性能研究 [J]. 建筑材料学报, 2022, 25(04): 895–902.
- [3] 张立，赵磊，孙宇. 再生骨料对混凝土孔隙结构及耐久性能影响的研究 [J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(09): 3048–3054.
- [4] 吴昊，徐强，杨波. 再生骨料混凝土水化产物特性及其对耐久性的影响 [J]. 材料导报, 2020, 34(16): 16148–16153.
- [5] 宋福涛. 再生骨料复合强化对水工混凝土强度和抗冻性的影响 [J]. 东北水利水电, 2023, 41(09): 38–40.
- [6] 刘恩铭，林明强，谢群. 再生粗骨料混凝土抗冻性能研究进展 [J]. 硅酸盐通报, 2022, 41(09): 2963–2978.
- [7] 郭丹，郑易，柳蕴，等. 再生混凝土抗冻性能研究现状 [J]. 中小企业管理与科技（上旬刊）, 2021, (07): 181–182.
- [8] 鲍政文，于子浩，张鹏，等. 再生粗骨料混凝土及其构件抗冻性能研究进展 [J]. 建筑结构学报, 2022, 43(04): 142–157.
- [9] 王欣，汤玉娟，仝小芳，等. 再生混凝土抗冻性的试验研究 [J]. 绿色环保建材, 2020, (08): 1–4.
- [10] 李雪梅，齐莉莉，江守恒. 再生粗骨料对混凝土抗冻性的影响 [J]. 低温建筑技术, 2018, 40(08): 7–8+20.