

透水混凝土制备工艺研究

梁锡东 曾徽明 吴忠坤（通讯作者）

广东理工学院，广东肇庆，526070；

摘要：在海绵城市建设中作为核心材料的透水混凝土，其制备工艺的关键难题在于平衡透水性能与力学强度，当前相关研究多集中于单一原材料的替换或常规配合比的调整，既缺乏对工艺各环节协同优化的系统探索，也较少结合实际工程场景的服役需求制定差异化制备方案。基于此，本文从原材料特性调控、配合比动态设计、成型工艺创新、养护技术升级等维度，分析制备过程中的关键影响因素，提出基于服役场景需求的定制化策略，包括骨料级配的梯度优化、胶凝材料的复合改性等，为提升透水混凝土的综合性能提供技术支撑，推动其在不同工程场景的广泛应用。

关键词：透水混凝土；制备工艺；透水性能

DOI：10.69979/3029-2727.25.12.007

引言

近年来，我国城镇化发展加快，城市规模、人口不断扩张，城市建设用地急剧增加，商业区、住宅小区、广场以及道路建设规模巨大，导致城市地表硬化程度高、不透水面积比例急剧增大、雨水下渗量减少、地表径流增加，加重了市政排水系统的负荷。透水混凝土凭借良好的透水性能、降温降噪效果，已随着海绵城市建设的推进在人行道、停车场、广场铺装等领域广泛应用，但如何在制备过程中保证较高透水系数的同时满足工程对力学强度的要求，仍是亟待解决的问题。许多工程实践中，因制备工艺缺乏针对性优化，导致透水混凝土性能难以兼顾透水与强度需求，影响工程质量与服役寿命。因此，深入研究并优化透水混凝土制备工艺、探索各环节协同优化策略，成为推动其技术发展的重要课题。

1 透水混凝土制备的原材料特性调控

透水混凝土是基础设施建筑的基本材料，可以增加城市地面透水性，缓解城市“热岛效应”，减轻降雨季节道路排水系统负担，对周围环境的保护作用明显。对各原材料的特性进行精准把控，是原材料特性调控作为优化透水混凝土制备工艺基础环节的核心要求，透水混凝土的原材料主要包括骨料、胶凝材料、外加剂与水，各组分的特性直接影响最终产品的性能。

水的用量控制对透水混凝土的成型质量与性能至关重要，水胶比过高会导致浆体流淌，堵塞混凝土内部孔隙，降低透水性能；水胶比过低则会造成混凝土和易性差，难以成型。根据胶凝材料与外加剂的特性，水胶比通常控制在0.30-0.35之间，同时需要根据骨料表面

的含水率进行动态调整，当骨料含水率高时，需减少加水量，避免浆体过稀；当骨料含水率低时，则需适当增加加水量，保证浆体能够均匀包裹骨料表面，为混凝土性能稳定提供基础。

外加剂的合理选用能显著改善透水混凝土的工作性与耐久性。常用的聚羧酸系减水剂掺量控制在0.8%-1.2%之间，其加入能有效降低水胶比，减少水泥用量，避免过多的水化产物堵塞混凝土内部孔隙，在保证混凝土流动性的同时，提高其强度与透水性能；引气剂的掺量一般控制在0.01%-0.03%，使用时需谨慎，适量的引气剂可改善混凝土的抗冻性，但过量使用会引入过多封闭孔隙，导致透水系数降低；此外，加入0.1%-0.3%的聚丙烯纤维或玄武岩纤维，能让纤维在混凝土内部形成三维网络结构，有效抑制裂缝扩展，提升混凝土的抗折强度与韧性。

胶凝材料的选择与改性是平衡透水混凝土透水性能与力学强度的关键环节。传统胶凝材料普通硅酸盐水泥存在早期强度低、收缩大的问题，需通过复合改性提升性能，将其与矿渣粉、粉煤灰按7:2:1的比例复配，利用工业废渣的活性效应，可提高胶凝材料的水化程度，增强界面粘结强度；同时加入适量硅灰，硅灰的超细颗粒能填充水泥水化产物的微孔，改善混凝土的微观结构，进一步提升抗压强度。另外，胶凝材料的用量需根据骨料级配动态调整，骨料粒径较大时，用量可适当减少以保证混凝土的孔隙率；骨料粒径较小时，则需增加用量，避免因粘结不足导致混凝土强度下降。

骨料作为透水混凝土的骨架结构，其粒径、级配、表面特性对孔隙率与力学强度起决定性作用。传统工艺

多采用 5~10mm 或 10~16mm 的单一粒径碎石，单一粒径的骨料虽能形成较大孔隙，却容易导致颗粒间咬合度不足，进而影响混凝土的整体强度。通过骨料级配的梯度优化，采用两级或三级粒径搭配，如将 5~10mm、10~16mm、16~20mm 的骨料按 3:5:2 的比例混合，能保证混凝土的孔隙率，增强颗粒间的镶嵌作用，有效提升抗压强度。骨料表面的清洁度与粗糙度需严格控制，表面附着的粉尘会降低其与胶凝材料的粘结力，必须通过水洗或筛分去除；适当提高表面粗糙度，如选用破碎后的玄武岩骨料，可增加骨料与胶凝材料的接触面积，改善界面粘结性能，进一步提升混凝土的力学性能^[1]。

2 透水混凝土配合比的动态设计

根据不同工程场景的性能需求，灵活调整各组分的比例，以满足工程实际应用，这是透水混凝土配合比设计突破传统混凝土“强度优先”理念，建立“透水-强度-耐久性”协同动态设计方法的核心目标。

配合比的动态设计需考虑原材料的地域差异，不同地区的骨料密度、水泥强度等级可能存在差异，需通过试配调整参数。例如，在骨料密度较低的地区，如使用石灰岩骨料，需适当增加骨料用量以保证混凝土骨架的稳定性；当水泥强度等级高于 42.5 级时，可减少胶凝材料用量，避免混凝土强度过高导致脆性增加，影响使用性能，确保配合比设计适配不同地域的原材料特性。

广场铺装场景需兼顾透水性能、力学强度与美观性，配合比设计可在人行道配方基础上调整：选用红色或灰色的花岗岩骨料，粒径控制在 5~10mm 以提升视觉效果；在胶凝材料中加入适量颜料，颜料颜色与骨料颜色相匹配，保证混凝土外观的一致性；适当降低水胶比至 0.31，提高混凝土表面的密实度，增强耐磨性，以适应人流密集的使用环境，满足广场铺装的多维度需求。

停车场场景对透水混凝土的承载强度要求更高，需满足抗压强度 $\geq C35$ 、透水系数 $\geq 1.0 \text{ mm/s}$ 的要求，配合比需针对性调整：骨料选用 10~16mm 与 16~20mm 的两级配碎石，比例为 6:4，较大粒径的骨料能形成更稳定的骨架结构，提升承载能力；胶凝材料用量提高至 350 kg/m^3 ，复配比例保持不变，增加用量以提升颗粒间的粘结强度；水胶比降至 0.30，减少水化产物对孔隙的堵塞，保证透水性能；减水剂掺量提高至 1.2%，确保混凝土具有良好的工作性；加入 0.3% 的玄武岩纤维，增强混凝土的抗冲击性能，以适应车辆行驶带来的荷载冲击。

针对市政人行道场景，透水混凝土需满足透水系数 $\geq 1.5 \text{ mm/s}$ 、抗压强度 $\geq C30$ 的要求，配合比设计可采用以下参数：骨料选用 5~10mm 与 10~16mm 的两级配碎石，

比例为 4:6；胶凝材料采用普通硅酸盐水泥+矿渣粉+硅灰 (7:2:1) 的复配方案，用量为 320 kg/m^3 ；水胶比控制在 0.32；聚羧酸系减水剂掺量为 1.0%；聚丙烯纤维掺量为 0.2%。该配合比通过合理的骨料级配与胶凝材料改性，在保证高透水性能的同时，满足人行道的承载需求，且纤维的加入能有效提升混凝土的抗折强度，减少铺装过程中裂缝的产生^[2]。

3 透水混凝土成型工艺的创新

为满足高质量透水混凝土的制备需求，需通过工艺创新提升成型质量，因为传统的振动成型或静压成型工艺存在孔隙分布不均、强度波动大的问题，直接影响透水混凝土的孔隙结构与力学性能。

成型模具的改进对透水混凝土性能提升有积极作用，传统钢模易导致混凝土边角密度过高，影响透水性能，采用弹性模具如带有橡胶边框的钢模，在成型过程中能产生轻微形变，避免边角过度挤压，保证孔隙分布均匀。同时，模具尺寸需根据施工场景调整，人行道铺装采用 $600 \text{ mm} \times 600 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$ 的模具，停车场采用 $600 \text{ mm} \times 600 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$ 的模具，保证产品尺寸与工程需求相匹配，减少现场切割带来的性能损失，确保工程质量^[3]。

振动-静压复合成型工艺适用于厚度超过 150mm 的基层等大厚度透水混凝土铺装。该工艺先采用低频振动（频率 20~30Hz，振幅 0.5~1mm），持续 30s，通过振动使浆体均匀包裹骨料表面，同时排出颗粒间的空气，确保浆体分布均匀；随后进行静压成型，压力控制在 1.8~2.2 MPa，持续 25s，进一步优化孔隙结构。这种工艺结合振动的匀浆作用与静压的密实作用，避免单纯振动导致的骨料分层，或单纯静压导致的浆体分布不均，适用于对强度与透水性能要求较高的工程场景。

分段式静压成型工艺是对传统静压工艺的优化升级，将成型压力分为预压、主压、保压三个阶段。预压阶段采用 0.5 MPa 的压力，持续 10s，使骨料初步排列形成稳定的骨架结构；主压阶段压力提升至 2.0~2.5 MPa，持续 20s，压力大小可根据配合比调整，骨料粒径大时压力适当降低，骨料粒径小时压力提高，以保证颗粒间充分粘结；保压阶段压力保持 1.5 MPa，持续 15s，消除混凝土内部的应力，避免成型后出现裂缝。通过这种梯度压力控制，能形成均匀的孔隙结构，减少局部密实度过高或过低的情况，有效提升透水性能与力学强度的均匀性。

4 透水混凝土养护技术的升级

传统自然养护方式存在水化不充分、强度增长慢的问题，无法满足透水混凝土快速成型与高质量应用的需求，因此需通过养护技术升级提升产品质量，而养护技术对透水混凝土的水化进程与性能发展至关重要^[4]。

养护周期需根据工程需求灵活调整，常规工程的养护周期为28天，若工程需提前通车或投入使用，可通过养护技术优化缩短周期。例如，在胶凝材料中加入早强型减水剂，配合蒸汽养护的方式，可将养护周期缩短至14天，同时保证混凝土抗压强度达到设计要求的85%以上，在满足工程进度需求的同时，确保混凝土性能符合标准。

透水混凝土的养护需注重表面保护，成型后24小时内避免任何扰动，采用塑料薄膜覆盖表面，防止表面水分过快蒸发导致干缩裂缝；成型后7天内禁止车辆或重物碾压，保证混凝土强度充分发展。对于冬季施工，需采取有效保温措施，如覆盖保温棉或进行加热养护，避免环境温度低于5℃影响水泥水化反应，必要时在胶凝材料中加入早强剂，加速混凝土早期强度增长，确保施工质量与工程进度。

智能温控养护技术通过精准调控养护环境的温度与湿度，加速水泥水化反应，提升混凝土早期强度。养护初期（1-3天），将环境温度控制在20-25℃，相对湿度≥90%，可采用蒸汽养护或覆膜养护，若采用蒸汽养护，温度升温速率控制在5℃/h，避免温度骤升导致混凝土出现裂缝；3天后，适当降低环境湿度至80%-85%，温度保持在20℃左右，促进混凝土强度稳定增长。通过智能温控系统实时监测养护环境的温湿度变化，自动调整养护参数，保证水化过程均匀，减少混凝土性能波动，提升产品质量稳定性^[5]。

5 透水混凝土制备工艺的质量控制与优化策略

建立从原材料检验到成品检测的全流程控制体系，通过严格质量把控保证透水混凝土的制备质量，是质量控制作为确保透水混凝土性能稳定关键环节的核心要求。

工艺优化策略需结合实际施工反馈，建立完善的参数调整机制。若成品检测中发现透水系数偏低，需及时检查骨料级配是否合理、胶凝材料用量是否过多或成型压力是否过大，并进行针对性调整；若发现抗压强度不足，需优化胶凝材料配合比，适当增加胶凝材料用量或调整外加剂掺量，同时检查养护条件是否满足要求，及时改进养护措施。通过持续的质量监测与工艺调整，实现透水混凝土制备工艺的动态优化，不断提升产品质量

稳定性，推动透水混凝土在工程领域的广泛应用。

成品检测阶段需重点关注透水系数与抗压强度两个核心指标。采用透水仪检测透水系数，每1000m²至少检测3个点，确保合格率≥95%；抗压强度检测采用标准试件，每组制作3个试件，检测结果取平均值，偏差应≤10%，保证混凝土强度满足工程要求。同时，需检测混凝土的孔隙率，通过体积法计算，将其控制在1.5%-25%之间，并根据工程场景需求调整，透水要求高的场景孔隙率取上限，强度要求高的场景孔隙率取下限。

原材料进场时，必须对各原材料的关键指标进行检测。对于骨料，检测其粒径、级配、含泥量，含泥量应≤1%，粒径偏差控制在±5%以内，确保骨料性能符合制备要求；对于胶凝材料，检验其强度等级、细度与活性指数，确保胶凝材料质量达标，能满足混凝土强度与耐久性需求；对于外加剂，检测其减水率、引气性等指标，避免使用不合格外加剂影响混凝土性能。施工过程中，实时监测拌合物的和易性，通过坍落度测试调整水胶比，将坍落度控制在50-80mm之间，保证拌合物均匀无离析现象，确保混凝土成型质量^[6]。

6 结束语

综上所述，要让透水混凝土在海绵城市建设中发挥更大作用、为改善城市生态环境提供技术支撑，需依托制备工艺的不断创新与优化。透水混凝土制备工艺需围绕“性能协同、场景适配”的核心目标，通过原材料特性调控、配合比动态设计、成型工艺创新与养护技术升级，实现透水性能、力学强度与耐久性的平衡。

参考文献

- [1] 邱新悦, 黄冬辉, 宋宇桐, 等. 透水混凝土性能的影响因素研究[J]. 山西建筑, 2024, 50 (3) : 9-13.
- [2] 田福婵. “海绵城市”理念在市政道路设计中的应用[J]. 四川水泥, 2023 (2) : 103-105.
- [3] 王永华. 管网优化在北城核心区雨水工程设计中的应用[J]. 安徽建筑, 2021, 28 (8) : 117-119.
- [4] 孙忠, 运迎霞, 耿红生. 智慧技术导向下的大城市内涝减缓方法研究[J]. 天津大学学报(社会科学版), 2021, 23 (6) : 525-530.
- [5] 严超群, 呼加瑞, 谢李. 一种改性废旧橡胶透水混凝土制备及性能试验[J]. 粘接, 2023, 50 (2) : 13-17.
- [6] 林洲, 牛茂威. 石灰石粉对透水混凝土性能的影响研究[J]. 混凝土世界, 2023 (12) : 46-49.