文章编号:1007-9629(2025)12-1266-08

吸附剂对净水型透水混凝土性能的影响

赵浩杰, 王 阳, 曹瑞林*, 徐玲玲
(南京工业大学 材料科学与工程学院, 江苏 南京 211816)

摘要:通过引入低黏度壳聚糖改性硅藻土和坡缕石吸附剂,制备了具有净水功能的透水混凝土,在明确壳聚糖掺杂比例对改性硅藻土和坡缕石的Cu^{2+}去除率及单位吸附量的影响后,进一步研究了吸附剂掺量对透水混凝土的氨氮(NH_4-N)和Cu^{2+}去除率、透水性以及抗压强度的影响。结果表明:与未改性吸附剂相比,壳聚糖改性硅藻土和坡缕石(质量比为1∶12)的Cu^{2+}单位吸附量分别提高了1.2、2.2倍;将改性吸附剂掺入透水混凝土中不仅改善了孔隙结构,还显著增强了NH_4-N和Cu^{2+}的去除效果;随着改性吸附剂掺量的增加,尽管抗压强度略有下降,但在适宜掺量下仍能满足透水混凝土的最低等级要求,且可有效提升其透水性能。

关键词:透水混凝土;吸附性能;净水性能;力学性能
中图分类号:TU528 **文献标志码**:A **doi**:10.3969/j.issn.1007-9629.2025.12.011

Effects of Adsorbents on Performance of Water Purifying Pervious Concrete

ZHAO Haojie, *WANG Yang*, *CAO Ruilin**, *XU Lingling*
(College of Materials Science and Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China)

Abstract: By incorporating low-viscosity chitosan-modified diatomite and palygorskite adsorbents, pervious concrete with water purification capability was prepared. After clarifying the influence of chitosan doping ratio on the Cu^{2+} removal rate and unit adsorption capacity of the modified diatomite and palygorskite, further studies were conducted on the effects of adsorbent dosage on the removal rates of ammonia nitrogen (NH_4-N) and Cu^{2+}, water permeability and compressive strength of pervious concrete. The results show that compared to unmodified adsorbents, the Cu^{2+} unit adsorption capacities of chitosan-modified diatomite and palygorskite (mass ratio is 1∶12) are increased by 1.2 times and 2.2 times, respectively. The incorporation of modified adsorbents into pervious concrete not only improves the pore structure but also significantly enhances the removal effects of NH_4-N and Cu^{2+}. Although the compressive strength slightly decreases with the increase of modified adsorbent dosage, it can still meet the minimum grade requirements of pervious concrete under the appropriate dosage, and can effectively improve its water permeability.

Key words: pervious concrete; adsorption property; water purification property; mechanical property

当前城市道路多采用不透水沥青和水泥材料,遭遇强降雨时易因排水能力不足引发内涝和拥堵。因此透水、透气和环保的透水混凝土材料日益受到关注[1-3]。此外,透水混凝土因其低蓄热能力和快冷却速率有助于缓解热岛效应[4-6],在“海绵城市”建设中具有环境效益[7]。透水混凝土早期多用于路面铺设,但存在易吸附杂质达到饱和状态、透水性和净化能力下降且难再生的局限,而作为雨水收集与净化领域的可清洗再生透水过滤材料潜力更大。

因组成和多孔结构,透水混凝土可净化下渗水中的重金属、悬浮物及有机营养物[8]。对于透水混凝土,国内外功能化研究侧重点存在显著差异:国

收稿日期:2025-03-18; 修订日期:2025-06-08
第一作者:赵浩杰(2001—),男,江苏南通人,南京工业大学硕士生。E-mail: zhaohaojie@njtech.edu.cn
通讯作者:曹瑞林(1991—),男,江苏南通人,南京工业大学副教授,硕士生导师,博士。E-mail: ruilincao@njtech.edu.cn

外聚焦结构优化及自洁、导电、融雪等环境响应型功能集成，如Tarangini等[9]通过掺杂纳米SiO_2提升其抗冻性能；国内研究侧重固废资源化以增强吸附净水功能，如Li等[10]发现固废石灰石粉可显著提升重金属吸附效率。同时，国内研究多采用无机材料、生物质材料及工业固废改性材料，如生物炭可提升总氮、总磷的去除效率[11-13]，陶粒与再生骨料可有效降低污水浊度及藻类浓度[14-16]，Reddy等[17]证明沸石能有效吸附水中重金属离子，陈守开等[18]发现废玻璃颗粒替代细骨料可使混凝土抗压强度提升66.48%。但是，这些改性材料均存在局限性，如生物炭容易导致孔隙堵塞、沸石成本高且难再生、工业固废成分复杂且不稳定等[19-21]。此外，改性材料以骨料形式掺入时易被胶凝材料包覆[22]，限制改性效果。由于污水径流与透水混凝土浆体层接触面积最大，优化胶凝材料组分与配合比可增强净水效果。

基于此，本文采用壳聚糖(C)改性坡缕石(D)、硅藻土(P)等自制吸附剂制备透水混凝土，重点探讨吸附剂掺量对透水混凝土透水性能、净水性能和力学性能的影响，并通过引入改性吸附剂和优化配合比，力求在保证透水混凝土良好力学性能的基础上显著提升其净水能力。

1　试验

1.1　原材料

胶凝材料采用江南小野田有限公司的P·Ⅱ52.5水泥；粗骨料采用天然碎石，粒径为5～10 mm，表观密度为2 686 kg/m³，堆积密度为1 550 kg/m³；细骨料采用二区中砂，细度模数为2.7，表观密度为2 638 kg/m³，堆积密度为1 532 kg/m³；壳聚糖购自上海麦克林生化科技股份有限公司；盐酸、冰醋酸、五水合硫酸铜、氯化铵和74 μm(200目)硅藻土购自国药集团化学试剂有限公司；74 μm(200目)坡缕石黏土购自河南庄伟新材料有限公司。

1.2　吸附剂改性

采用质量分数为3%的稀盐酸分别对硅藻土和坡缕石进行酸化，按照稀盐酸与硅藻土或坡缕石质量比为5∶1的比例，在65 ℃水浴下，以300 r/min的转速机械搅拌5 h，随后抽滤、洗涤、烘干并研磨至74 μm(200目)备用。将壳聚糖溶解于质量分数为5%的稀醋酸溶液中，制得质量分数为2%的壳聚糖溶液，与酸化完成的硅藻土或坡缕石在70 ℃恒温水浴下以100 r/min的转速机械搅拌2 h，搅拌完成后通过抽滤、干燥、研磨等手段，最终制得粒径小于75 μm的改性吸附剂——壳聚糖改性硅藻土(CD)和壳聚糖改性坡缕石(CP)。通过改变壳聚糖与硅藻土、坡缕石的质量比m_C∶m_D、m_C∶m_P，研究了壳聚糖掺杂比例对改性吸附剂性能的影响。

1.3　试件制备

采用改性吸附剂(CD或CP)部分替代胶凝材料的方法制备透水混凝土，研究了不同改性吸附剂掺量w_A(质量分数，文中涉及的掺量、比例等除特殊说明外均为质量分数或质量比)对透水混凝土性能的影响，以期在保持基本性能的前提下提高其净水性能。当改性吸附剂为CD、CP时，其掺量分别记作w_{CD}、w_{CP}。设定w_A为0%、5%、10%、15%、20%、25%，透水混凝土的配合比见表1。

表1　透水混凝土配合比

Table 1　Mix proportions(by mass) of pervious concretes

Unit：kg/m³

w_A/%	Coarse aggregate	Fine aggregate	Cement	Modified adsorbent	Water
0	1 410.500	139.500	442.860	0	110.720
5	1 410.500	139.500	420.717	22.143	110.720
10	1 410.500	139.500	398.574	44.286	110.720
15	1 410.500	139.500	376.431	66.429	110.720
20	1 410.500	139.500	354.288	88.572	110.720
25	1 410.500	139.500	332.145	110.715	110.720

在搅拌前，将改性吸附剂与胶凝材料充分混合均匀。混凝土拌和料分3次装入试模，参照JC/T 2558—2020《透水混凝土》的相关要求，每层用直径20 mm的插捣棒插捣52次，随后轻轻敲击模具侧壁，以确保拌和料均匀密实堆积，最后置于振动台上低频振动8 s。成型后的试件置于(20±2) ℃、相对湿度RH≥95%的标准养护室中养护24 h，待其初凝成型后脱模，并继续置于标准养护室中养护至设定龄期。

1.4　试验方法

使用FEI Scios 2 HiVac型扫描电子显微镜(SEM)对改性吸附剂CD、CP进行微观形貌分析。参照GB/T 36084—2018《纳米技术　水溶液中铜、

锰、铬离子含量的测定 紫外-可见分光光度法》,用质量浓度100 mg/L的Cu^{2+}模拟溶液测试改性吸附剂的吸附性能。使用原子吸收分光光度法,测定吸附前、吸附后Cu^{2+}的质量浓度ρ_0、ρ_1。Cu^{2+}去除率$\sigma(Cu^{2+})$与单位吸附量$q(Cu^{2+})$的计算式为:

$$\sigma(Cu^{2+})=\frac{\rho_0-\rho_1}{\rho_0}\times 100\% \tag{1}$$

$$q(Cu^{2+})=\frac{(\rho_0-\rho_1)V}{m} \tag{2}$$

式中:V为模拟溶液体积,L;m为投入的吸附剂质量,g。

参照HJ 536—2009《水质 氨氮的测定 水杨酸分光光度法》,用质量浓度为100 mg/L的Cu^{2+}溶液、氨氮(NH_4-N)溶液模拟透水混凝土对水中重金属离子和NH_4-N的吸附。测试过程为:将试件置于自制吸附装置中,加入2 L模拟溶液,通过循环水泵模拟径流冲刷5 min;将吸附后的模拟溶液静置,取上层清液;使用紫外分光光度计,测试对照组与残液中Cu^{2+}、NH_4-N的质量浓度,NH_4-N的去除率$\sigma(NH_4\text{-}N)$的计算方法参照式(1)。

参照GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》对透水混凝土的力学性能进行测试,参照JC/T 2558—2020对透水混凝土透水系数进行测试。采用重量法[23-24]对透水混凝土的有效孔隙率进行测试:将尺寸为100 mm×100 mm×100 mm的试件浸泡在清水中,待不再有气泡出现后称量试件在水中的质量m_1,随后取出试件,待试件表面较为干燥且没有水滴落后称量其质量m_2,有效孔隙率p的计算式为:

$$p=\left(1-\frac{m_2-m_1}{V_0\rho_H}\right)\times 100\% \tag{3}$$

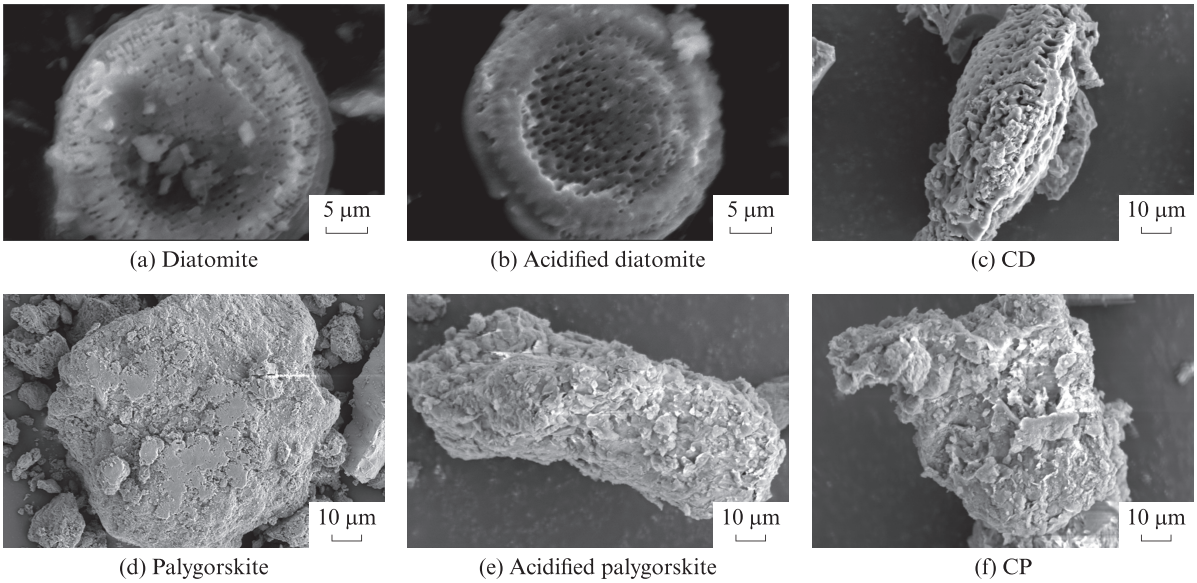
式中:V_0为试件的体积,cm^3;ρ_H为水的密度,g/cm^3。

2 结果与分析

2.1 改性吸附剂的性能

2.1.1 微观形貌

改性前后硅藻土和坡缕石的微观形貌见图1。由图1可见:(1)酸化硅藻土表面杂质大幅减少,表面孔隙增大,提高了比表面积;酸化坡缕石表面褶皱增多,杂质减少,比表面积增大。表面杂质的减少有利于后期壳聚糖的负载,而比表面积的增加有助于负载更多的壳聚糖。(2)对于CD和CP,一方面,壳聚糖胶体覆盖在硅藻土与坡缕石表面,进一步增大了二者的比表面积,从而增大了与外界的接触面积,有利于提高吸附效率[25];另一方面,壳聚糖本身是一种高效吸附剂,负载在硅藻土、坡缕石表面后,能够与载体共同发挥吸附作用。(3)CD呈现显著的多孔性结构,表面布满不规则微孔与介孔,这种三维多孔网络不仅提供了较大的比表面积,还增加了吸附剂与水中污染物物理接触的机会;而CP的低孔隙结构有助于减缓雨水径流速率,延长水流在透水混凝土内部的滞留时间,从而增加了污染物与吸附剂的接触概率,同时也有利于提高透水混凝土的整体抗压性能。



(a) Diatomite (b) Acidified diatomite (c) CD

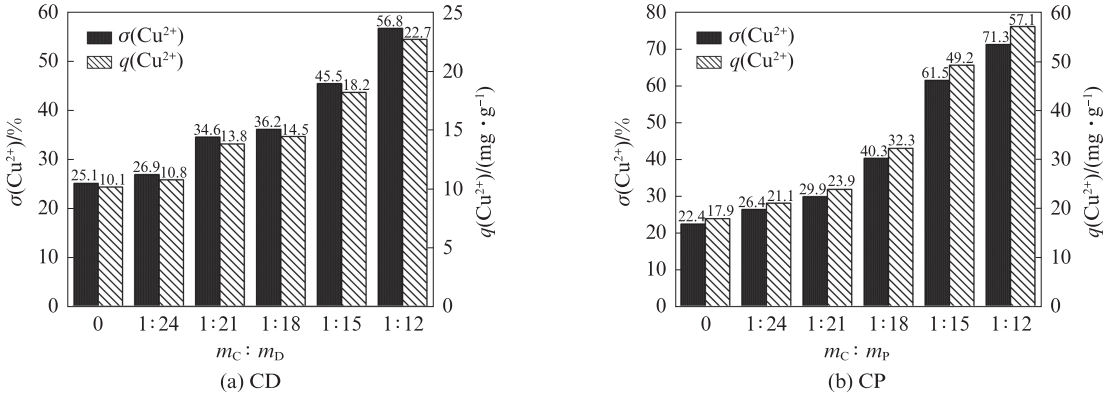
(d) Palygorskite (e) Acidified palygorskite (f) CP

图1 改性前后硅藻土和坡缕石的微观形貌

Fig. 1 Morphologies of diatomite and palygorskite before and after modification

2.1.2　Cu^{2+}吸附性能

在100 mL质量浓度为100 mg/L的Cu^{2+}模拟溶液中，测试了0.25 g吸附剂在40 min内对Cu^{2+}的去除率和单位吸附量，结果见图2。由图2可见：随着壳聚糖与吸附剂质量比的提升，CD和CP对Cu^{2+}的去除率和单位吸附量均有显著提升；当$m_C:m_D$=1:12时，与未改性硅藻土相比，Cu^{2+}去除率和单位吸附量分别提高了1.3、1.2倍；当$m_C:m_P$=1:12时，与未改性坡缕石相比，Cu^{2+}的去除率和单位吸附量均提升了2.2倍；对比CD与CP对Cu^{2+}的去除率与单位吸附量，CP的吸附性能高于CD。由此可见，壳聚糖改性显著增强了硅藻土和坡缕石对Cu^{2+}的吸附性能。这与SEM观察结果一致，壳聚糖的引入提高了硅藻土和坡缕石的表面粗糙度，增大了比表面积，同时壳聚糖自身也具备优良的吸附性能。在这些因素的协同作用下，随着壳聚糖掺杂比例的增加，改性吸附剂对Cu^{2+}的吸附效果进一步提升。



(a) CD　　(b) CP

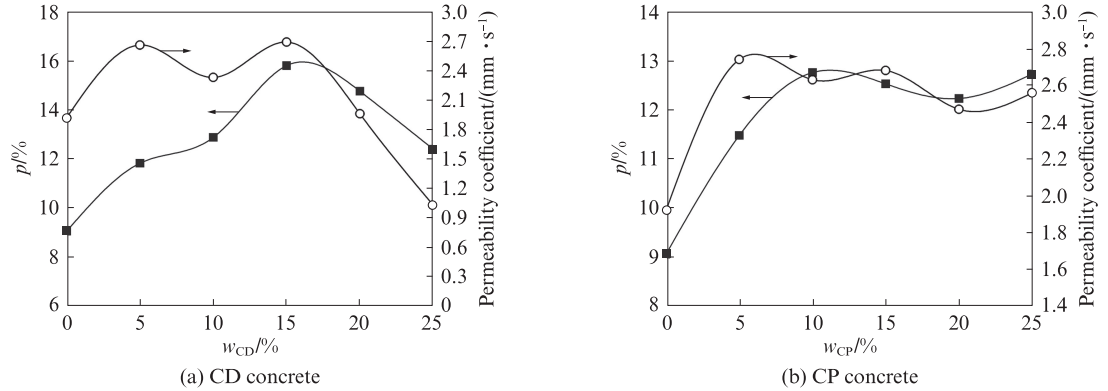
图2　不同壳聚糖改性吸附剂对Cu^{2+}去除率和单位吸附量的影响

Fig. 2　Influence of different chitosan-modified adsorbents on Cu^{2+} removal rate and unit adsorption capability

2.2　净水型透水混凝土的性能

2.2.1　透水性能

透水混凝土的透水系数和有效孔隙率见图3。由图3可见：(1)随着CD掺量由0%增加至15%，有效孔隙率和透水系数均呈上升趋势；当掺量进一步增加至25%时，两者均出现下降；当CD掺量为15%时，有效孔隙率和透水系数均达到最大值，分别为15.8%和2.69 mm/s。透水性下降是因为CD具有较强的吸水性，当其掺量过高时，CD会优先吸附部分拌和水，导致水泥可吸收的水分减少，进而出现部分未充分润湿的水泥颗粒。这些未完全水化的颗粒在成型过程中可能进入透水混凝土的表面和内部孔隙，占据原有的孔隙空间，最终导致透水性能下降[26-27]。(2)掺入CP后，透水混凝土的透水系数和有效孔隙率均有不同程度的提高；随着CP掺量的增大，透水系数和有效孔隙率均呈现先上升后平缓的趋势；当CP掺量为10%时，透水混凝土的有效孔隙率达到最大值12.76%；而当掺量为5%时，透水系数达到最高，为2.74 mm/s。由于坡缕石的吸水性相较于硅藻土较低，将其掺入透水混凝土后，不会因CP过量吸附拌和水而导致水泥浆体润湿不足。相反，适量CP可增稠水泥浆体，减少插捣时浆体流入骨料孔隙，避免孔隙堵塞，从而提升透水混凝土结构稳定性和透水性。



(a) CD concrete　　(b) CP concrete

图3　透水混凝土的透水系数和有效孔隙率

Fig. 3　Permeability coefficient and effective porosity of pervious concretes

由于CD比CP具有更多的孔隙结构，因此将其作为吸附剂加入后，能使透水混凝土具有较大的孔隙率。不过，与Teymouriey等[28]采用铁渣、沸石以替代粗骨料的方式作为吸附剂改性透水混凝土相比，本文制备的透水混凝土有效孔隙率更低，且均小于20%，这也使其具有较为优异的抗压强度。总体而言，在适宜掺量下，吸附剂的掺入有助于提高透水混凝土的透水系数和有效孔隙率。

2.2.2 净水性能

吸附剂掺量对Cu^{2+}和NH_4-N去除率的影响见图4。由图4可见：(1)随着CD掺量由0%增加至15%，透水混凝土对Cu^{2+}和NH_4-N的去除率呈现上升趋势；当CD掺量为15%时，Cu^{2+}和NH_4-N的去除率达到最高，分别为67.83%和24.18%，较未掺CD的对照组分别提升了1.5、1.4倍；当CD掺量超过15%时，透水系数显著降低，减少了污水与浆体接触面积，削弱了污染物吸附能力，导致净水性能下降[29]。当CD掺量过高时，胶凝材料的黏度降低，导致部分胶凝颗粒从骨料表面脱落并堵塞孔隙结构，从而阻碍吸附剂进入混凝土孔隙，限制吸附效果发挥。另外，过量吸附剂CD的掺入可能会导致**2.2.1**所提到的拌和水优先吸附现象，从而使得水泥颗粒水化不充分。未水化水泥颗粒会堵塞孔隙，降低透水混凝土的透水系数，进而导致净水能力的降低。(2)随着CP掺量的增大，透水混凝土对Cu^{2+}和NH_4-N的去除率持续提升；当CP掺量达到25%时，Cu^{2+}和NH_4-N的去除率均达到最大值，分别为82.83%和28.14%，较未掺CP的对照组分别提高了2.1、1.8倍。CP能显著提升透水混凝土的净水性能，这得益于其自身优异的吸附性，同时CP还可增大混凝土的孔隙率和透水系数，延长污水与浆体接触时间，从而增强净化效果[30-31]。此外，在透水混凝土基体提供的碱性环境中，重金属离子会以OH^-为中心不断堆积，最终以悬浮固体的形式沉淀[32]，并随雨水在透水混凝土内部流动过程中被吸附剂吸附。而对于NH_4-N污染，由透水混凝土的高孔隙率形成好氧-厌氧交错的微生态环境，在该环境中NH_4-N经过硝化-反硝化反应[33]，最终转化为N_2被去除。

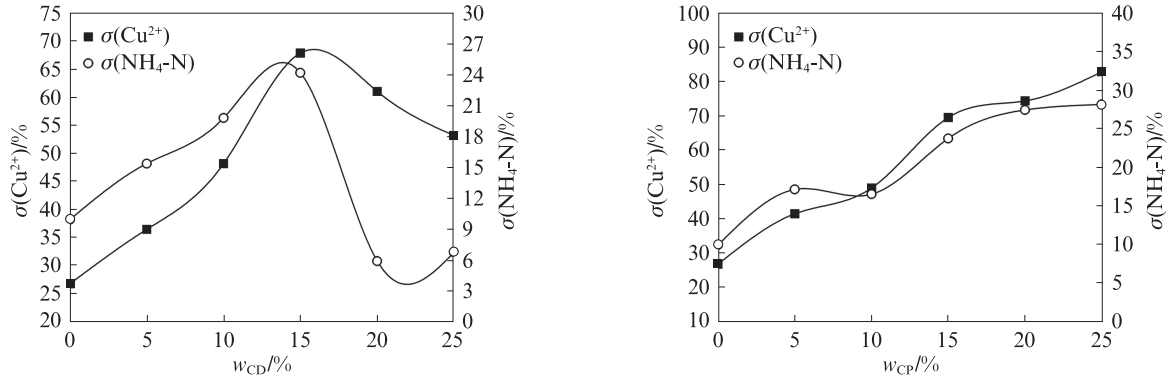


图4 吸附剂掺量对Cu^{2+}和NH_4-N去除率的影响

Fig. 4 Effect of adsorbent dosages on Cu^{2+} and NH_4-N removal rates

由此可见，改性吸附剂CD与CP均能显著改善透水混凝土的净水性能，其中掺量为25%的CP对透水混凝土净水性能的提升效果最佳。需要注意的是，当透水混凝土作为过滤材料时，污染物的富集清除与再生问题仍需解决。

2.2.3 力学性能

透水混凝土的28 d抗压强度见图5。由图5可见：(1)CD的掺入使透水混凝土抗压强度降低；当CD掺量不超过20%时，透水混凝土的强度可超过16.00 MPa，符合透水混凝土TC15强度等级要求；当CD掺量增加至25%时，透水混凝土的强度最低，为12.45 MPa，较未掺CD的对照组降低了60.79%。这主要由于硅藻土不参与水化反应，其掺量增加会降低胶凝材料总量，减少水化产物。此外，硅藻土多孔疏松的特性导致其需水量较大，既影响水泥早期水化，又降低了浆体密实度。因此，在多种因素的共同影响下，CD的掺量越大，透水混凝土的抗压强度越低。(2)随着CP掺量的增大，透水混凝土的抗压强度总体呈现先略微增大、后显著降低的变化趋势。当CP掺量由0%提高至15%时，透水混凝土的抗压强度逐渐增大，而随着CP掺量的进一步增大，抗压强度大幅度降低；当CP掺量为10%时，抗压强度达到最大值，为33.2 MPa，较未掺入CP的对照组提高了约4.56%；当CP掺量为25%时，抗压强度最低，为23.55 MPa，较对照组降低了25.83%。与Yahyaee等[34]报道的采用多壁碳纳米管改性多孔混凝土(28 d

抗压强度仅为22.62 MPa)相比，CP改性透水混凝土的抗压强度最高提升了约46.77%。这主要归因于坡缕石自身独特的棒晶结构，使其具有优秀的吸附性能与胶体性能，适量掺入改性坡缕石能起到增稠效果，提高浆体与骨料之间的黏结性能，进而提高透水混凝土的强度[35-36]。此外，微小的坡缕石颗粒进入水泥浆体后，还可改善浆体内部孔结构，使内部孔隙微细化，降低有害孔比例，增大浆体硬度，进而提高透水混凝土的力学性能。但当其掺量过大时，同样会不可避免地造成水泥用量过小，水化产物减少，透水混凝土的强度降低[37]。

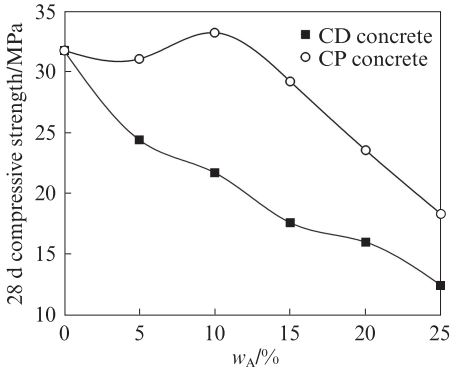


图5　透水混凝土的28 d抗压强度

Fig. 5　28 d compressive strength of pervious concretes

结合有效孔隙率分析可知，由于透水混凝土的有效孔隙率处于不超过20%的较低范围，因此其抗压强度较一般透水混凝土[38]更高。同时，对比CP与CD的微观形貌可以明显观察到，CD具有更高的孔隙结构。这也解释了在改性吸附剂掺量相同的情况下，以CD为吸附剂的透水混凝土抗压性能始终低于以CP为吸附剂的透水混凝土。

3　结论

(1)壳聚糖改性显著提升了硅藻土和坡缕石对Cu^{2+}的吸附性能，当壳聚糖与硅藻土、坡缕石的质量比为1∶12时，其对Cu^{2+}的单位吸附量比未改性时分别提高了1.2、2.2倍。改性吸附剂掺入透水混凝土后，可显著增强透水混凝土的净水能力。当改性硅藻土(CD)掺量为15%时，对氨氮(NH_4-N)和Cu^{2+}的去除率分别为24.18%和67.83%；当改性坡缕石(CP)掺量为25%时，对NH_4-N和Cu^{2+}的去除率分别为28.14%和82.83%。

(2)适量掺入改性吸附剂可显著提升透水混凝土的透水性能。当CD掺量为15%时，有效孔隙率和透水系数分别为15.8%和2.69 mm/s；当CP掺量为5%时，透水系数达到最大值2.74 mm/s；当CP掺量为10%时，有效孔隙率达到最大值12.76%。

(3)改性吸附剂掺量增加会导致透水混凝土28 d抗压强度下降。当CD掺量不超过20%时，抗压强度值均高于16.00 MPa；当CP掺量为25%时，抗压强度仍达到23.55 MPa，均达到透水混凝土最低等级要求。

参考文献：

[1] 周文嘉，朱亮亮，刘立熙，等. CO_2流通法养护透水混凝土的性能与作用机理[J]. 建筑材料学报，2025，28(2)：127-134.
ZHOU Wenjia，ZHU Liangliang，LIU Lixi，et al. Properties and mechanism of pervious concrete cured by CO_2 flow method[J]. Journal of Building Materials，2025，28(2)：127-134.(in Chinese)

[2] KIA A，WONG H S，CHEESEMAN C R. High-strength clogging resistant permeable pavement[J]. International Journal of Pavement Engineering，2021，22(3)：271-282.

[3] 吴仪，党发宁，NIMBALKAR Sanjay，等. 不同循环模式下透水混凝土性能演变规律及损伤机制[J]. 建筑材料学报，2025，28(1)：9-18.
WU Yi，DANG Faning，NIMBALKAR Sanjay，et al. Property evolution law and damage mechanism of pervious concrete under different cycle modes[J]. Journal of Building Materials，2025，28(1)：9-18.(in Chinese)

[4] TABATABAEIAN M，KHALOO A，KHALOO H. An innovative high performance pervious concrete with polyester and epoxy resins[J]. Construction and Building Materials，2019，228：116820.

[5] WIJEYAWARDANA P，NANAYAKKARA N，GUNASEKARA C，et al. Improvement of heavy metal removal from urban runoff using modified pervious concrete[J]. Science of the Total Environment，2022，815：152936.

[6] GUAN X，WANG J Y，XIAO F P. Sponge city strategy and application of pavement materials in sponge city[J]. Journal of Cleaner Production，2021，303：127022.

[7] WU R D，SHI S N，SHEN Y，et al. Effects of different factors on the performance of recycled aggregate permeable pavement concrete[J]. Materials，2022，15(13)：4566.

[8] 秦新. 基于海绵城市的透水混凝土面层及水泥稳定碎石基层的路用性能和净水特性研究[D]. 重庆：重庆交通大学，2018.
QIN Xin. Study on pavement performance and water purification characteristics of pervious concrete surface layer and cement stabilized macadam base layer based on sponge cities[D]. Chongqing：Chongqing Jiaotong University，2018.(in Chinese)

[9] TARANGINI D，SRAVANA P，RAO P S. Effect of nano silica on frost resistance of pervious concrete[J]. Materials Today：Proceedings，2022，51：2185-2189.

[10] LI T Z，TANG X N，XIA J. Multi-functional properties of low-carbon travertine aggregate pervious concrete modified by waste limestone powder[J]. Developments in the Built Environment，2025，21：100590.

[11] XIE C, YUAN L J, TAN H, et al. Experimental study on the water purification performance of biochar-modified pervious concrete[J]. Construction and Building Materials, 2021, 285: 122767.

[12] 丁华柱, 杨翔, 都增延, 等. 生物碳制备净水型透水混凝土研究[J]. 重庆建筑, 2023, 22(7):38-41.
DING Huazhu, YANG Xiang, DU Zengyan, et al. Study on preparation of water-purifying permeable concrete with biochar [J]. Chongqing Architecture, 2023, 22(7):38-41. (in Chinese)

[13] 张聪, 余志辉. 碳纳米管透水混凝土的重金属离子吸附性能[J]. 功能材料, 2019, 50(7):7111-7114.
ZHANG Cong, YU Zhihui. Adsorption properties of heavy metal ions for carbon nanotube reinforced porous concrete[J]. Journal of Functional Materials, 2019, 50(7):7111-7114. (in Chinese)

[14] PARK S B, LEE B J, LEE J, et al. A study on the seawater purification characteristics of water-permeable concrete using recycled aggregate[J]. Resources Conservation and Recycling, 2010, 54(10):658-665.

[15] HOLMES R R, HART M L, KEVERN J T. Heavy metal removal capacity of individual components of permeable reactive concrete[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2017, 196: 52-61.

[16] ARIYACHANDRA E, PEETHAMPARAN S, PATEL S, et al. Effect of NO_2 sequestered recycled concrete aggregate (NRCA) on mechanical and durability performance of concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2020, 137:106210.

[17] REDDY K R, XIE T, DASTGHEIBI S. Adsorption of mixtures of nutrients and heavy metals in simulated urban stormwater by different filter materials[J]. Journal of Environmental Science and Health Part A—Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering, 2014, 49(5):524-539.

[18] 陈守开, 刘洋, 赵云鹏, 等. 废玻璃颗粒对再生骨料透水混凝土的改性作用[J]. 建筑材料学报, 2023, 26(1):37-44.
CHEN Shoukai, LIU Yang, ZHAO Yunpeng, et al. Modification of recycled aggregate pervious concrete by waste glass particles[J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(1): 37-44. (in Chinese)

[19] SINYOUN S, JEERAR A, UDOMKU P, et al. Transformative innovations in nano-biochar-enhanced porous concrete: Elevating engineering performance and pollutant removal[J]. Developments in the Built Environment, 2024, 18:100469.

[20] SHEJARCH M, AHHMADI B, AZARHOMAYU F, et al. Natural zeolite as a supplementary cementitious material—A holistic review of main properties and applications [J]. Construction and Building Materials, 2023, 409:133766.

[21] YANG Y K, LU P Y, SHAO R Z, et al. A comprehensive review of multisource solid wastes in sustainable concrete: From material properties to engineering application[J]. Construction and Building Materials, 2024, 435:136775.

[22] 汪超, 张同生, 谢晓庚, 等. 基于骨料球形度的透水混凝土配合比设计方法[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(3):235-241.
WANG Chao, ZHANG Tongsheng, XIE Xiaogeng, et al. Mix proportion design method of pervious concrete based on aggregate sphericity[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(3): 235-241. (in Chinese)

[23] GAEDICKE C, MARINES A, MIANKODILA F. A method for comparing cores and cast cylinders in virgin and recycled aggregate pervious concrete [J]. Construction and Building Materials, 2014, 52:494-503.

[24] YAHIA A, KABAGIRE K D. New approach to proportion pervious concrete[J]. Construction and Building Materials, 2014, 62:38-46.

[25] 郭远臣, 叶青, 向凯, 等. 净水功能型粉煤灰透水混凝土性能研究[J]. 建筑材料学报, 2023, 26(9):988-995.
GUO Yuancheng, YE Qing, XIANG Kai, et al. Performance of fly ash pervious concrete with water purification function[J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(9):988-995.(in Chinese)

[26] KIA A, WONG H S, CHEESEMAN C R. Clogging in permeable concrete: A review[J]. Journal of Environmental Management, 2017, 193:221-33.

[27] 朱平华, 史志浩, 严先萃, 等. 暴雨作用下新型再生透水混凝土的抗堵塞性能[J]. 建筑材料学报, 2023, 26(10):1088-1095.
ZHU Pinghua, SHI Zhihao, YAN Xiancui, et al. Clogging resistance of novel recycled pervious concrete under rainstorm[J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(10): 1088-1095.(in Chinese)

[28] TEYMOURIEY E, WONG K S, TAN Y Y, et al. Mechanical behaviour of adsorbent pervious concrete using iron slag and zeolite as coarse aggregates [J]. Construction and Building Materials, 2023, 388:131720.

[29] LIU J, LI Y P. Runoff purification effects of permeable concrete modified by diatomite and zeolite powder [J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2020, 2020:1081346.

[30] 李营. 砌筑工程中透水混凝土生态膜的净水机理分析研究[J]. 环境科学与管理, 2018, 43(4):79-82.
LI Ying. Water purification mechanism analysis of pervious concrete ecology membrane in masonry building project [J]. Environmental Science and Management, 2018, 43(4):79-82.(in Chinese)

[31] 丁崧, 陈潇, 夏飞跃, 等. 净水型赤泥-矿渣基地聚合物透水混凝土的研究[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(1):48-55.
DING Song, CHEN Xiao, XIA Feiyue, et al. Study on red mud-slag based geopolymer pervious concrete with function of water purification[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(1): 48-55.(in Chinese)

[32] AZAD A, SHEIKH M N, HAI F I. A critical review of the mechanisms, factors, and performance of pervious concrete to remove contaminants from stormwater runoff [J]. Water Research, 2024, 251:121101.

[33] 刘婉婉, 马昆林, 张传芹, 等. 透水混凝土对城市雨水径流中污染物净化原理的研究进展[J]. 材料导报, 2019, 33(增刊2): 293-299.
LIU Wanwan, MA Kunlin, ZHANG Chuanqin, et al. Research progress on purification mechanism of pollutants in urban stormwater runoff by pervious concrete[J]. Materials Review, 2019, 33(Suppl 2):293-299.(in Chinese)

[34] YAHYAEE T, MOFIDI S R. The impact of multi-walled carbon nanotubes on the mechanical and environmental properties of porous concrete in removing pollutants for use in surface runoffs [J]. Case Studies in Construction Materials, 2024, 20: e02697.

[35] LI J F, JIN M M, CHEN J B, et al. Performance simulation of permeable concrete materials combined with nanotechnology in rainwater management[J]. Processes, 2023, 11(3): 768.

[36] 张国辉，魏雄，杨振东，等. 细观初始孔隙缺陷对混凝土力学性能的影响[J]. 建筑材料学报，2024，27(5)：425-431.
ZHANG Guohui, WEI Xiong, YANG Zhendong, et al. Influence of mesoscopic initial pore defects on mechanical properties of concrete[J]. Journal of Building Materials, 2024, 27(5): 425-431.(in Chinese)

[37] KAHRIZI E, SEDIGHI M, RAJAEE T. The effect of adsorbent-containing nanoparticles on the efficiency of porous concrete[J]. Construction and Building Materials, 2023, 408: 133696.

[38] SHA F, ZHANG S M, SUN X C, et al. Mechanical performance and pore characteristics of pervious concrete[J]. Case Studies in Construction Materials, 2024, 21: e03674.

（上接第1206页）

[30] FARNAM Y, ESMAEELI H S, LISTON L L, et al. Investigating the potential to use phase change materials to store heat in concrete pavement to reduce the need for anti-icing[R]. West Lafayette: Purdue University, 2024.

[31] WANG H, SUN X, WANG J, et al. Permeability of concrete with recycled concrete aggregate and pozzolanic materials under stress[J]. Materials, 2016, 9(4): 252.

[32] 高礼雄，孙国文，张云升，等. 水泥基复合材料氯离子扩散系数与孔隙率之间的关系[J]. 重庆大学学报，2012，35(11)：53-61.
GAO Lixiong, SUN Guowen, ZHANG Yunsheng, et al. Relationship between porosity and chloride diffusivity in cement-based composites[J]. Journal of Chongqing University, 2012, 35(11): 53-61. (in Chinese)

[33] 张庆章，方宋，徐康. 混凝土孔结构及其分形维数与氯离子扩散性能的关系[J]. 硅酸盐通报，2022，41(8)：2716-2727.
ZHANG Qingzhang, FANG Yan, SONG Li, et al. Relationship between pore structure, fractal dimension and chloride diffusion performance of concrete[J]. Silicate Bulletin, 2022, 41(8): 2716-2727. (in Chinese)