环氧树脂改性剂对煤渣砂混凝土性能的影响

谭攀静[1],李智勇[2],陈 璐[3],潘晓蒙[3]

(1.郑州职业技术学院建筑与环境工程学院,河南 郑州 450121;2.华北水利水电大学水利学院,河南 郑州 450046;
3.中国建筑第七工程局有限公司,河南 郑州 450004)

摘 要:将环氧树脂(EP)改性剂加入煤渣砂混凝土中,研究EP对混凝土坍落度、孔隙率、抗压强度和防水性能的影响。结果表明:煤渣砂表面粗糙且含有孔隙,添加煤渣砂不仅能够增加混凝土孔隙率和渗透吸水率,还能够降低坍落度和抗压强度;而EP改性剂不仅能够提高混凝土坍落度、密实性及抗压强度,还能够延缓水泥水化,降低混凝土内部温度、混凝土孔隙率及吸水率。将煤渣砂取代0.15~0.60 mm的机制砂后加入EP改性剂,可使混凝土抗压强度、防水性均达到基准混凝土要求。加入4% EP改性剂的煤渣砂混凝土综合性能最佳,此时混凝土抗压强度最高,流动性和防水性较好,与基准混凝土相比,其抗压强度提高7.7%,防水性能显著提高。

关键词:煤渣砂;坍落度;孔隙率;抗压强度;防水性能

中图分类号:TQ323.5 **文献标志码**:A **文章编号**:1005-3360(2026)09-0107-06

DOI:10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.09.020

Effect of Epoxy Resin Modifier on Properties of Coal Slag Sand Concrete

TAN Panjing[1], LI Zhiyong[2], CHEN Lu[3], PAN Xiaomeng[3]

(1. School of Architecture and Environmental Engineering, Zhengzhou Technical College, Zhengzhou 450121, China; 2. School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China;
3. China Construction Seventh Engineering Division Co. , Ltd. , Zhengzhou 450004, China)

Abstract: Epoxy resin (EP) modifier was added to coal cinder sand concrete, and its effects on the slump, porosity, compressive strength, and waterproof performance of the concrete were investigated. The results showed that the rough surface and porous nature of the coal slag sand not only increased the porosity and water absorption of the concrete but also reduced its slump and compressive strength. The EP modifier, on the other hand, improved the slump, compactness, and compressive strength of the concrete, while retarding the cement hydration, and reducing the internal temperature, porosity, and water absorption of the concrete. When coal slag sand replaced 0.15~0.60 mm manufactured sand, the addition of the EP modifier enabled the concrete to achieve compressive strength and waterproof performance comparable to those of the reference concrete. The coal slag sand concrete with 4% EP modifier exhibited the best overall performance, achieving the highest compressive strength along with good fluidity and waterproof performance. Compared with the reference concrete, its compressive strength was increased by 7.7%, and its waterproof performance was significantly enhanced.

Keywords: Coal slag sand; Slump; Porosity; Compressive strength; Waterproof performance

煤渣来源于燃煤电厂、工业锅炉等燃煤设施,主要成分为SiO_2和Al_2O_3。大量煤渣露天堆放不仅占用土地资源,还会污染生态环境,危害人体健康[1-2]。目前,煤渣常被应用于路基填料、土壤改良及陶粒制备等领域[3-5]。在建筑工程中,煤渣在砂浆、混凝土等水泥基复合材料中的应用相对有限,主要用作路基填充材料[6]。这主要是因为煤渣的多孔结构会在水泥基材料内部引入大量孔隙,破坏基体密实性,降低其防水性能[7]。煤渣与粉煤灰在结构和组

收稿日期Submitted date 2025-10-14;修回日期Revised date 2025-11-15;录用日期Accepted date 2025-12-20

基金项目:河南省重点研发专项项目(241111240400)

联系人,tanpjl1227@126.com

引用本文:谭攀静,李智勇,陈璐,等.环氧树脂改性剂对煤渣砂混凝土性能的影响[J].塑料科技,2026,54(9):107-112.

Citation:TAN P J, LI Z Y, CHEN L, et al. Effect of epoxy resin modifier on properties of coal slag sand concrete[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(9): 107-112.

成上具有相似性，均含有较高含量的活性SiO_2和Al_2O_3，这些组分具备潜在火山灰活性，可在水泥提供的碱性环境中反应生成水化硅酸钙(C-S-H)凝胶[8-9]。潘攀等[10]研究煤渣粉对C50混凝土性能的影响。结果表明：煤渣粉替代部分水泥可提高混凝土的抗压强度和抗氯离子渗透性能，其效果优于II级粉煤灰，显示出煤渣在细骨料混凝土中的应用潜力。

环氧树脂(EP)是一种热固性树脂，因其黏结性好、强度高和耐腐蚀性强等优点，被广泛应用于水泥基复合材料(如砂浆和混凝土)的制备[11-13]。EP改性水泥基复合材料具有优异的黏结性、抗渗性、抗冻融性和耐磨性[14-16]。ZHENG等[17]研究表明，在水泥中添加EP有助于改善水泥基砂浆的孔隙结构，减少小于25 nm的小孔数量，形成的聚合物膜可阻止有害离子向水化产物内部迁移，从而提高砂浆的耐久性。MOODI等[18]研究表明，在混凝土中掺入适量EP可显著降低其收缩率和渗透性。

本文采用煤渣砂替代部分细骨料制备混凝土，并掺入EP改性剂以提升混凝土的防水性能，旨在探索煤渣砂混凝土的工程应用可行性，为煤渣砂在水泥基复合材料领域的推广提供参考。

1 实验部分

1.1 主要原料

普通硅酸盐水泥，P·O 42.5，天瑞水泥集团有限公司；碎石，公称粒径5~25 mm，表观密度2 760 kg/m³，河南荥阳长九石料有限公司；煤渣砂，粒径0.15~0.60 mm，国能驻马店热电有限公司；机制砂，连续级配，细度模数2.8，表观密度2 650 kg/m³，河南荥阳长九石料有限公司；聚羧酸减水剂，PC-A，固含量20%，山东博菲水泥技术服务有限公司；EP乳液，BH-122A，固含量50%，固体环氧当量220~280，密度1.06 g/cm³，北京中德新亚建筑技术有限公司；固化剂，H203B，固含量50%，固体胺氢当量280~290，密度1.08 g/cm³，北京中德新亚建筑技术有限公司；有机硅消泡剂，固含量50%，巩义市宏源环保科技有限公司。表1为水泥的物理性能。表2为煤渣砂的化学组成。

表1 水泥的物理性能

Tab.1 Physical properties of cement

80 μm方孔筛筛余/%	凝结时间/min	28 d抗折强度/MPa	28 d抗压强度/MPa
5.0	初凝150、终凝235	7.5	46.8

表2 煤渣砂的化学组成

Tab.2 Chemical composition of coal slag sand 单位：%

w_{CaO}	$w_{Al_2O_3}$	w_{SiO_2}	$w_{Fe_2O_3}$	w_{MgO}	w_{Na_2O}	w_{K_2O}	w_{SO_3}	$w_{烧失量}$
5.30	24.03	58.75	5.21	1.38	3.01	0.16	0.80	0.92

1.2 仪器与设备

混凝土强制式搅拌机，HJW-60，沧州梦源试验仪器有限公司；扫描电子显微镜(SEM)，Q-20，美国TA仪器公司；多通道温度采集系统，DL1416，苏州罗德仪器技术有限公司；全自动压汞仪，Auto Pore IV 9500，美国麦克仪器公司；压力试验机，DYE-2000，沧州华恒试验仪器有限公司；烘箱，DHG-9053A，上海捷呈实验仪器有限公司。

1.3 样品制备

表3为混凝土的配合比。将水泥、煤渣砂、机制砂及碎石按照表3的配合比加入混凝土强制式搅拌机中，干拌120 s。将称量好的水和减水剂倒入搅拌机中继续搅拌120 s。加入EP改性剂(EP乳液、固化剂和消泡剂质量比为1.00∶1.00∶0.24)，搅拌120 s，测试混凝土的坍落度。最后将混凝土拌合物装入模具中成型，24 h后拆模，在标准养护条件下养护至28 d后取出。其中，PC组中煤渣砂不替代机制砂；E/P-0%、E/P-2%、E/P-4%和E/P-6%中0.15~0.60 mm的砂全部被煤渣砂替代。EP改性剂的固含量为50%，按其有效固含与水泥的质量比(0、2%、4%、6%)将对应试样分别命名为E/P-0%、E/P-2%、E/P-4%和E/P-6%。

表3 混凝土的配合比

Tab.3 Mix proportion of concretes 单位：(kg·m⁻³)

样品	配合比					
	水泥	砂	碎石	减水剂	水	EP改性剂
PC	420	655	1 140	4.2	155	0
E/P-0%	420	655	1 140	4.2	155	0
E/P-2%	420	655	1 140	4.2	155	16.8
E/P-4%	420	655	1 140	4.2	155	33.6
E/P-6%	420	655	1 140	4.2	155	50.4

1.4 性能测试与表征

SEM分析：将煤渣砂均匀洒在导电胶表面后喷金，混凝土取小块断面喷金，观察煤渣砂和混凝土微观形貌。由于EP形成的薄膜与水泥水化产物相互交联，两者难以分辨。盐酸(HCl)能溶解大部分水泥水化产物，而EP不受HCl侵蚀，因此先将质量分数为1%的HCl喷洒在混凝土断面表面放置1 min后，再用无水乙醇冲洗并烘干，进行SEM检测[19]。

坍落度测试：按照GB/T 50080—2016对混凝土坍落度进行测试。

混凝土内部温度测试：将混凝土装入150 mm×150 mm×150 mm模具中，在模具中部位置放置温度传感器，精度0.1 ℃。采用多通道温度采集系统，将混凝土带模一起放入标准养护室内，以温度传感器放入混凝土内部时刻记为0点，实时采集混凝土内部温度，绘制温度变化曲线。

孔隙特征测试：采用压汞仪测试混凝土孔隙特征。

抗压强度测试：按照GB/T 50081—2019进行测试，试件尺寸150 mm×150 mm×150 mm。

防水性能测试：防水性能通过吸水率表征进行测试，

试件尺寸150 mm×150 mm×150 mm。将养护28 d的试件放入105 ℃的烘箱中干燥24 h后取出，称量干燥试件的初始质量(m_0)。再将试件放入水中浸泡，水面没过试件上表面25 mm，浸泡一定时间后取出试件，用湿抹布擦干表面水分，称量试件总质量(m_1)，吸水率(ΔW)的计算公式为：

$$\Delta W=\frac{(m_1-m_0)}{m_0}\times 100\% \quad (1)$$

2 结果与讨论

2.1 混凝土的坍落度分析

图1为混凝土的坍落度。从图1可以看出，基准样PC(未加煤渣砂)坍落度为200 mm。0.15~0.60 mm煤渣砂取代机制砂后，E/P-0%的坍落度降低至185 mm，这主要与煤渣的多孔性结构有关。

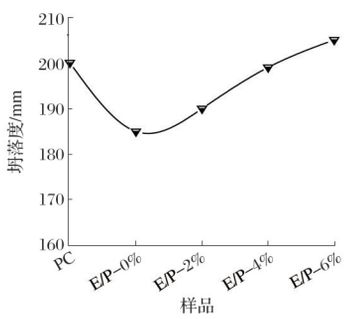


图1 混凝土的坍落度

Fig.1 Slump of concrete

图2为煤渣砂的SEM照片。从图2可以看出，掺入煤渣砂后，混凝土的流动性降低主要有两方面原因：一方面，煤渣砂的表面为棱角状，表面粗糙且形态不规则，能够增加浆体的摩擦力。另一方面，煤渣砂颗粒是多孔结构，能够吸收部分水分，二者共同作用导致混凝土流动性下降[10]。加入EP改性剂后，混凝土的坍落度不断升高，E/P-2%、E/P-4%和E/P-6%的坍落度分别提升至190、199、205 mm。原因是水泥颗粒会吸附EP，同时EP分子链上带有极性基团，EP发挥类似聚羧酸减水剂的空间位阻和静电排斥作用，提高水泥颗粒的分散性。此外，EP会包裹煤渣砂，堵塞煤渣砂的孔隙，这均会增加游离水的量，改善混凝土宏观流动性。

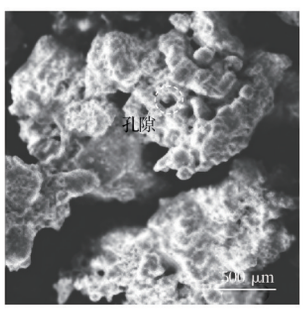


图2 煤渣砂的SEM照片(100×)

Fig.2 SEM image of coal slag sand (100×)

2.2 混凝土的内部温度分析

图3为混凝土内部温度。从图3可以看出，混凝土成型后，内部温度会快速升高，随后逐渐下降，最终趋于稳定。原因是混凝土中胶凝材料与水接触后，不断发生水化而发热。初期胶凝材料较多，水化反应强烈，因此混凝土内部温度快速上升。但不同试样的温度曲线峰值出现的时间有所不同。PC样品在24 h时内部温度最高，为59.0 ℃，随后混凝土内部温度逐渐降低。添加煤渣砂后，E/P-0%样品的内部温度变化规律与PC类似，只是对应时刻的温度略高，其峰值温度升高1.1 ℃。原因是掺入煤渣砂后，水泥水化后的$Ca(OH)_2$会与煤渣砂表面的SiO_2以及Al_2O_3等活性物质发生二次水化，生成水化产物的过程放热。因此，总放热量高于基准样PC。添加EP改性剂后，混凝土内部温度的峰值出现时间有所推迟，对应峰值温度有所降低，EP掺量越高温度峰值越低，E/P-2%、E/P-4%和E/P-6%的峰值温度分别比PC低1.8、2.6、6.9 ℃。原因是EP包裹了水泥和煤渣砂，抑制水泥颗粒中C_3S和C_2S等水化矿物的析出，降低水化速率，抑制煤渣砂表面活性矿物与水泥水化产物的二次反应[20]。另外，EP与混凝土浆体中Ca^{2+}络合，降低浆体中Ca^{2+}浓度，延长水化产物结晶沉淀的时间[21]，导致混凝土释放热量降低。因此，添加EP会延缓混凝土放热峰并降低最大放热温度，EP含量越高，这种抑制效果越明显，这也说明EP对水泥水化有一定的延缓作用[22]。

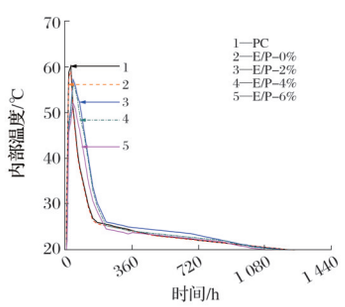


图3 混凝土内部温度

Fig.3 Internal temperature of concrete

2.3 混凝土的孔隙率分析

根据不同孔径尺寸可以将孔隙分为凝胶孔(<10 nm)、过渡孔(10~100 nm)、毛细孔(100~1 000 nm)及大孔(>1 000 nm)。混凝土中孔隙越少且小孔比例越大，则混凝土密实性越好，其力学性能和耐久性能也越好。

图4为混凝土的孔隙率。从图4可以看出，PC的孔隙率为11.59%。单独用煤渣砂取代部分机制砂后，E/P-0%的孔隙率升至12.61%，这是因为煤渣砂中含有部分孔隙，能够增加混凝土的总孔隙率。添加EP改性剂后，混凝土的孔隙率不断降低且小孔比例增加，E/P-2%、E/P-4%、E/P-6%的孔隙率分别降至8.92%、7.63%和7.54%。原因主要包括：(1) EP在水泥水化过程中发生固化反应，使EP更密实，优化孔隙结构；(2) EP不仅能够提高胶凝材料与骨料之间的黏结性和韧性，还会降低水泥水化速率和水化放热量，减少混凝土内部裂纹和空洞等缺陷；(3) EP能够吸附在

煤渣砂表面，填充煤渣砂的孔隙。

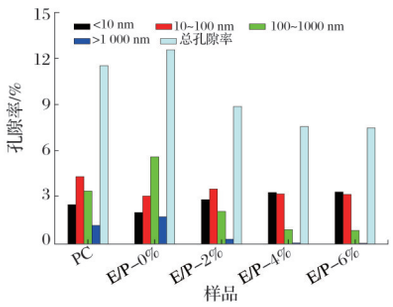


图4 混凝土的孔隙率

Fig.4 Porosity of concrete

为了观察EP形成的聚合物薄膜对混凝土孔隙率的影响，对混凝土断面进行SEM观察。图5为HCl处理后混凝土的SEM照片。从图5可以看出，经HCl处理的PC表面比较粗糙，有明显的腐蚀痕迹，表面存在少量孔隙；E/P-0%的表面更粗糙且孔隙更多。原因是煤渣砂的加入能够增加混凝土内部孔隙，而HCl侵蚀可能扩大原有孔隙尺寸。添加EP改性剂后，混凝土的断面更加平整，基体受侵蚀深度变浅，结构越来越致密，孔隙变少，表面有明显的聚合物膜层。该层膜隔绝了HCl对混凝土中水泥等无机材料的侵蚀，保证混凝土断面的完整性，EP越多，混凝土断面结构完整性越好。

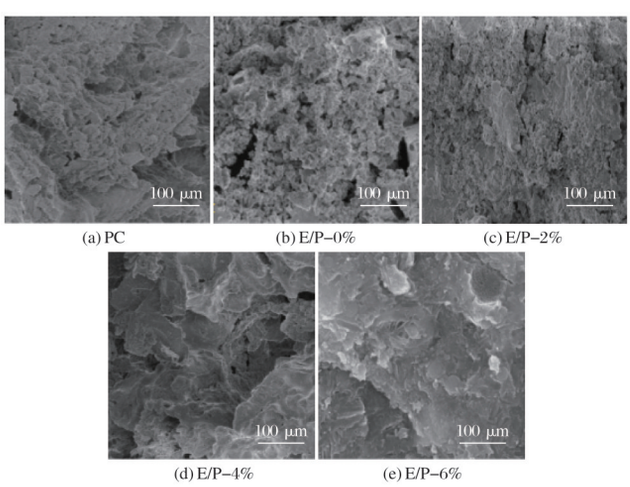


图5 HCl处理后混凝土的SEM照片(500×)

Fig.5 SEM images of concrete treated with HCl (500×)

2.4 混凝土的抗压强度分析

图6为混凝土的抗压强度。从图6可以看出，PC的抗压强度为37.8 MPa；添加煤渣砂后，E/P-0%的抗压强度为33.1 MPa。煤渣砂表面的SiO_2和Al_2O_3等活性物质对水泥水化有促进作用，然而加入煤渣砂后仍然使混凝土抗压强度降低。原因是煤渣砂虽然促进水泥水化，但是煤渣砂含有一定的孔隙，能够增加混凝土孔隙率，对力学性能产生不利影响。同时，煤渣砂自身抗压强度低于机制砂，煤渣砂取代机制砂后降低整体细骨料的强度，最终导致混凝土力学性能降低。随着EP改性剂含量的增加，混凝土抗压强度先升高后降低。E/P-2%、E/P-4%、E/P-6%的抗压强度均高于PC，分别较PC提高1.9%、7.7%和4.5%。原因是EP加入后形成的聚合物膜与水化产物、骨料相互交联，能够改善水化产物的结构形貌以及胶凝材料与骨料之间的界面黏结性。同时，混凝土内部孔隙降低，内部缺陷减少，混凝土密实性提高，从而混凝土的抗压强度提高[23]。E/P-4%的抗压强度最高，说明EP并不是掺量越高抗压强度越高。原因是EP在提高煤渣砂混凝土密实性、增强混凝土力学性能的同时，也会抑制水泥水化。当添加适量EP时，EP对混凝土力学性能的增强占主导作用，混凝土的抗压强度显著提高；当添加过量EP时，抑制水泥水化占主导作用，EP增强煤渣砂混凝土的作用被弱化，使混凝土最终抗压强度增长效果减弱。

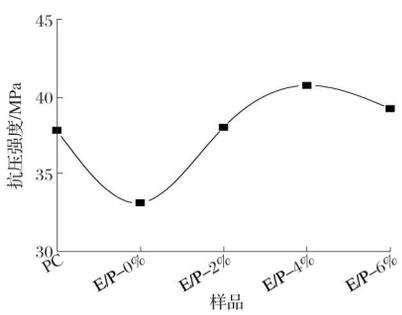


图6 混凝土的抗压强度

Fig.6 Compressive strength of concrete

为了深入了解EP对混凝土水化和内部结构的影响，对水化28 d的混凝土断面进行SEM检测。图7为混凝土水化产物的SEM照片(2 500×)。从图7可以看出，混凝土中均存在典型的水化产物针棒状钙矾石(AFt)，团簇状水化硅酸钙凝胶(C-S-H)和水化铝酸钙凝胶(C-A-H)以及板状$Ca(OH)_2$等。PC中存在大量非晶态C-S-H和C-A-H，其结构较疏松；E/P-0%基本形貌与PC类似。添加EP改性剂后，混凝土内部逐渐出现明显的聚合物膜层，这主要是EP硬化形成的。同时，膜层与水泥水化产物相互交联在一起，膜层在$Ca(OH)_2$和AFt间穿插生长，这种交联不仅能够强化晶体结构，还可以成为长径状(针棒等形状)水化物的搭接点，提高混凝土内部结构的整体性。此外，随着EP改性剂含量的增加，微观结构致密性增加，验证了EP对混凝土的增韧增强作用。

水泥与集料之间的界面过渡区是不同材料的交界区域，此区域易出现黏结薄弱现象，易产生孔隙、孔洞和裂纹等缺陷，是混凝土主要的薄弱区域。因此，此区域的黏结强弱是微观层面评价水泥基材料力学性能的重要指标[23-24]。图8为混凝土界面的SEM照片。从图8可以看出，PC和E/P-0%的界面过渡区均有明显的微观孔隙或裂纹缺陷，说明黏结部分不够紧密。添加EP改性剂后，混凝土界面过渡区黏结性明显增强，集料表面光滑，表面覆盖一层EP膜。E/P-2%的界面过渡区存在较浅的微裂纹，其

宽度和深度均远小于PC与E/P-0%。而E/P-4%与E/P-6%界面过渡区黏结紧密，看不到微裂纹。这说明EP能够提高界面过渡区的致密程度，即使EP过量，其黏结性依然较强，能够增强过渡区的抗压强度。

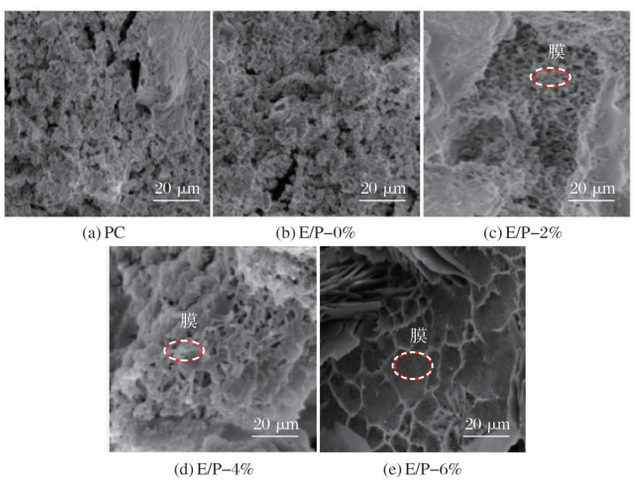


图7 混凝土水化产物的SEM照片(2 500×)

Fig.7 SEM images of hydration products of concrete (2 500×)

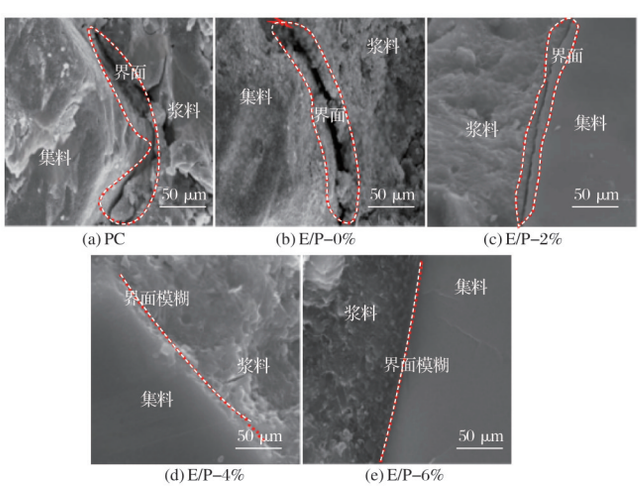


图8 混凝土界面的SEM照片(1 000×)

Fig.8 Interface SEM images of concrete (1 000×)

2.5 混凝土的防水性能分析

水为侵蚀性介质(如氯离子、硫酸盐等)，是混凝土中传输的主要载体，因此混凝土的耐久性与其抗水渗透性能直接相关，防水性能是评价混凝土耐久性的关键指标[25-27]。图9为混凝土的ΔW。随着浸泡时间的延长，混凝土的ΔW呈三阶段变化：初期快速上升；中期增速减缓；后期逐渐趋于饱和。将ΔW与时间(t)的关系拟合成方程，表4为ΔW的拟合结果。从图9和表4可以看出，ΔW与t具有良好的指数相关性，其渗透过程基本接近菲克第二定律。原因为在浸泡过程中，水分主要通过混凝土内部的开口孔或裂纹等通道向内扩散。在浸泡初期，这些渗透通道内没有被水填充，水易向内扩散，因此开始阶段水渗透速率较快。随着渗透通道被水占据，其内部产生压力，外部的水分进入的渗透压力增大，水渗透速率降低，ΔW增长变缓。当渗透通道吸水饱和后，外部水分无法进入混凝土内部，此时ΔW最大。随着时间继续延长，ΔW保持不变。与PC相比，E/P-0%的ΔW曲线略高，说明掺入煤渣砂后混凝土更易吸水。原因为E/P-0%的孔隙率更大且大孔较多，水易沿着大孔和裂纹迁移，也更易促进这些通道扩张[28-29]。而添加EP改性剂后，混凝土的ΔW曲线显著下降且均远低于PC的ΔW。原因为EP提高了混凝土的密实性，减少了水向内的渗透通道。EP的含量越高，ΔW越低，对混凝土密实性的提高效果越显著。E/P-4%和E/P-6%的ΔW曲线基本重合，说明两者的防水性能相近。原因为当EP达到一定含量后，EP对混凝土内部的孔隙或缺陷的抑制作用基本达到峰值。因此，水渗透的通道相近，ΔW基本一致，ΔW曲线拟合方程对应系数相近。

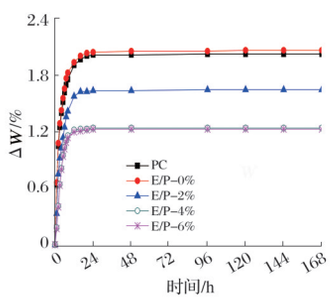


图9 混凝土的ΔW

Fig.9 ΔW of concrete

表4 ΔW的拟合结果

Tab.4 Fitting results of ΔW

样品	拟合方程	相关性
PC	ΔW=-1.912 5·e$^{-0.291\ 9t}$+2.004 5	R^2=0.992
E/P-0%	ΔW=-2.017 3·e$^{-0.311\ 0t}$+2.056 1	R^2=0.994
E/P-2%	ΔW=-1.618 1·e$^{-0.264\ 2t}$+1.652 2	R^2=0.995
E/P-4%	ΔW=-1.222 7·e$^{-0.387\ 6t}$+1.236 4	R^2=0.995
E/P-6%	ΔW=-1.215 5·e$^{-0.389\ 8t}$+1.229 6	R^2=0.995

3 结论

煤渣砂表面粗糙且含有孔隙，煤渣砂取代部分机制砂后，混凝土坍落度降低，孔隙率增加。煤渣砂对水泥水化有一定促进作用，混凝土内部温度略有升高。EP改性剂能够提高混凝土坍落度，延缓水泥水化，使混凝土小孔隙比例增加，孔隙率不断降低。EP能够增强水泥与骨料间的界面黏结性能，使混凝土抗压强度总体上高于基准混凝土。然而，EP过量会严重抑制水泥水化，导致混凝土抗压强度降低。随着浸泡时间的延长，混凝土的ΔW呈三阶段变化：初期快速上升；中期增速减缓；后期逐渐趋于饱和。拟合结果显示ΔW与t具有良好的指数相关性。煤渣砂略微增加了混凝土的ΔW，而EP改性剂使混凝土的ΔW显著下降。煤渣砂取代0.15~0.60 mm的机制砂后，再加入EP改性剂，可使混凝土抗压强度和防水性能均不低于基准混凝土要求。加入4% EP改性剂的煤渣砂混凝土综合

性能最佳，与基准混凝土相比，其坍落度持平，抗压强度提高7.7%，防水性能显著提高。

参考文献

[1] 任昆, 于泽宁, 石孟奇. 冻融条件下水泥煤渣改良土非均匀损伤特性[J]. 铁道工程学报, 2023, 40(7): 15-19.
[2] 周良芹, 张奥, 王蓉, 等. 改性煤渣用于吸附去除废水中磺胺抗生素[J]. 应用化工, 2024, 53(6): 1305-1309.
[3] 彭成, 莫彪, 傅中志, 等. 煤渣改良路基填料冻融力学行为的机理分析[J]. 南华大学学报(自然科学版), 2022, 36(6): 15-21.
[4] 唐少容, 杜鹏, 李昊天, 等. 由石蜡基相变材料和煤渣改良的粉砂土的冻融性能[J]. 中国粉体技术, 2024, 30(1): 123-131.
[5] 王丽, 陈玮, 李雪莲, 等. 升温速率对石煤渣陶粒膨胀性能的影响[J]. 非金属矿, 2023, 46(4): 22-26.
[6] 马保亮, 王安. 基于孔隙率和酸碱度的改性再生混凝土力学性能研究[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(4): 47-52.
[7] 闫普选, 谢佳男, 邹华红, 等. Co_3O_4@海泡石-煤渣多孔陶瓷催化$NaBH_4$产氢性能研究[J]. 化工新型材料, 2024, 52(7): 190-193.
[8] 李琴飞, 顾彬彬, 侯鹏坤, 等. 超细矿物掺合料在水泥混凝土中的应用现状[J]. 硅酸盐学报, 2025, 53(8): 2374-2387.
[9] YANG I H, PARK J, DINH LE N, et al. Strength properties of high-strength concrete containing coal bottom ash as a replacement of aggregates[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2020, DOI: 10.1155/2020/4246396.
[10] 潘攀, 欧阳东, 易承波, 等. 煤渣粉对高性能混凝土性能的影响[J]. 混凝土与水泥制品, 2011(6): 19-22.
[11] 张扬, 于心然, 孙赋成, 等. 硅烷修饰功能性骨料增韧改性环氧树脂砂浆材料研究与应用[J]. 江苏建材, 2024(6): 20-23.
[12] 孔令寰, 孔令辉, 吴伟, 等. 玻璃纤维改性环氧树脂基混凝土的制备与性能[J]. 合成纤维, 2025, 54(7): 75-78.
[13] 林森. 原材料配比对环氧树脂砂浆性能的影响[J]. 广东土木与建筑, 2024, 31(7): 103-106.
[14] 高鑫. 湿热环境下水性环氧树脂改性桥梁混凝土耐久性研究[J]. 江西建材, 2025(5): 20-22.
[15] 吕炎, 白二雷, 王志航, 等. 低温养护对环氧树脂基砂浆早期性能的影响及机理[J]. 材料导报, 2024, 38(5): 98-103.
[16] 赵怀轩, 张启志. 湿热-碳化下环氧树脂混凝土的抗碳化性能试验研究[J]. 粉煤灰综合利用, 2024, 38(1): 28-31.
[17] ZHENG Z, LI Y X, HE S A, et al. High density and high strength cement-based mortar by modification with epoxy resin emulsion[J]. Construction and Building Materials, 2019, 197: 319-330.
[18] MOODI F, KASHI A, RAMEZANIANPOUR A A, et al. Investigation on mechanical and durability properties of polymer and latex-modified concretes[J]. Construction and Building Materials, 2018, 191: 145-154.
[19] 林东, 詹国良, 沈云泽, 等. 活性粉末混凝土的聚合物改性及其机理分析[J]. 新型建筑材料, 2016, 43(11): 20-22.
[20] 方圣恩, 张培辉, 洪华山. 纤维混凝土梁受弯试验及开裂弯矩计算公式[J]. 建筑材料学报, 2019, 22(4): 567-574.
[21] SCRIVENER K L, JUILLAND P, MONTEIRO P J M. Advances in understanding hydration of Portland cement[J]. Cement and Concrete Research, 2015, 78: 38-56.
[22] 陈学良. 铜渣改性环氧树脂修补砂浆的制备及性能[D]. 福州: 福建农林大学, 2023.
[23] 田耀刚, 蒋静, 赵成, 等. 水性环氧树脂改性高早强砂浆的耐温机制[J]. 吉林大学学报(工学版), 2025, 55(7): 2203-2211.
[24] 贾世旭. 基于离散元方法的混凝土界面过渡区研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2023.
[25] DEMIE S, NURUDDIN M F, SHAFIQ N. Effects of micro-structure characteristics of interfacial transition zone on the compressive strength of self-compacting geopolymer concrete[J]. Construction and Building Materials, 2013, 41: 91-98.
[26] XIONG Q X, TONG L Y, ZHANG Z D, et al. A new analytical method to predict permeability properties of cementitious mortars: The impacts of pore structure evolutions and relative humidity variations[J]. Cement and Concrete Composites, 2023, 137: 104912.
[27] 王彤. 水泥基复合材料对混凝土抗渗性能的影响[J]. 佛山陶瓷, 2025, 35(3): 12-14.
[28] 李凯, 杨璐璐, 史才军. 基于不规则骨料堆积结构的混凝土水渗透性的研究[J]. 材料导报, 2024, 38(12): 99-106.
[29] XU L, JIANG L, HUANG Y F, et al. An efficient approach for mesoscale fracture modeling of fully-graded hydraulic concrete[J]. Water Science and Engineering, 2022, 15(4): 337-347.