聚乙烯纤维对煤渣粉混凝土力学性能的影响

孙咏华[1],郭 鸿[2],刘 宁[3]

(1.陕西能源职业技术学院,陕西 咸阳 712000;2.陕西理工大学,陕西 汉中 723001;
3.西安长安大学工程设计研究院有限公司,陕西 西安 710061)

摘 要:以煤渣粉(CSP)取代部分水泥制备混凝土,研究聚乙烯纤维(PEF)对混凝土力学性能的影响。随着CSP取代水泥量和PEF掺量的增加,混凝土坍落度不断降低。当CSP取代水泥量为25%且PEF配合比不超过1.2 kg/m^{3}时,混凝土坍落度降低不显著。随着CSP取代水泥量的增加,混凝土孔隙率呈先降后升的趋势。当CSP取代水泥量为25%时加入PEF,随着PEF掺量的增加,混凝土孔隙率先降后升。随着CSP取代水泥量或PEF掺量的增加,混凝土抗压强度和抗折强度先增大后减小。这表明PEF提高了混凝土的塑性,有效抑制了混凝土在荷载下的裂纹发展和应力集中,尤其是对抗折性能改善效果显著。当CSP取代水泥量不超过20%且不加入PEF时,混凝土力学性能也能满足设计要求。而CSP取代水泥量增至25%时,需要加入适量的PEF方可使力学性能达标。当CSP取代水泥量为25%、PEF配合比为1.2 kg/m^{3}时,可制备出性能优异的CSP混凝土,孔隙率降低11.4%,抗压强度和抗折强度分别比空白样品(PC)提高12.0%和42.2%,而坍落度仅降低13 mm。

关键词:煤渣粉;聚乙烯纤维;混凝土;力学性能

中图分类号:TQ342 **文献标志码**:A **文章编号**:1005-3360(2026)08-0095-06

DOI:10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.08.017

Effect of Polyethylene Fiber on Mechanical Properties of Coal Slag Powder Concrete

SUN Yonghua[1], GUO Hong[2], LIU Ning[3]

(1. Shaanxi Energy Institute, Xianyang 712000, China; 2. Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723001, China;
3. The Engineering Design Academy of Chang'an University Co. , Ltd. , Xi'an, Xi'an 710061, China)

Abstract: Coal slag powder (CSP) was used to replace a portion of cement in concrete preparation, and the effect of polyethylene fiber (PEF) on the mechanical properties of concrete was investigated. As the replacement amount of CSP and the dosage of PEF increased, the slump of concrete decreased continuously. When the CSP replacement amount was 25% and the PEF mix proportion did not exceed 1.2 kg/m^3, the reduction in concrete slump was not significant. With the increase of CSP replacement amount, the porosity of concrete first decreased and then increased. At a CSP replacement amount of 25%, the addition of PEF caused the concrete porosity to first decrease and then increase with the increasing PEF dosage. As the CSP replacement amount or PEF dosage increased, both the compressive strength and flexural strength of concrete first increased and then decreased. This indicated that PEF enhanced the ductility of concrete and effectively inhibited crack development and stress concentration under loading, with a particularly notable improvement in flexural property. When the CSP replacement amount did not exceed 20% and no PEF was added, the mechanical properties of concrete could still meet the design requirements. However, when the CSP replacement amount was increased to 25%, an appropriate amount of PEF was required to achieve the required mechanical property. At a CSP replacement amount of 25% and a PEF mix proportion of 1.2 kg/m^3, CSP concrete with excellent property was prepared, showing an 11.4% reduction in porosity, an increase of 12.0% in compressive strength and an increase of 42.2% in flexural strength, respectively, compared with the blank sample (PC), while the slump decreased by only 13 mm.

Keywords: CSP; PEF; Concrete; Mechanical properties

收稿日期Submitted date 2025-07-26;修回日期Revised date 2025-08-28;录用日期Accepted date 2025-09-19

基金项目:陕西省教育厅服务地方计划项目(23JC019)

联系人,18991150565@163.com

引用本文:孙咏华,郭鸿,刘宁.聚乙烯纤维对煤渣粉混凝土力学性能的影响[J].塑料科技,2026,54(8):95-100.

Citation:SUN Y H, GUO H, LIU N. Effect of polyethylene fiber on mechanical properties of coal slag powder concrete[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(8): 95-100.

煤渣是煤炭燃烧后产生的废渣，我国每年煤渣产生量达数亿吨，大量堆积的煤渣不仅占用土地资源，还会对土壤和水体造成污染[1-3]。因此，探索煤渣高效利用途径，将其转化为具有实用价值的工程材料，对实现资源循环利用和环境保护具有重要意义[4-6]。目前，煤渣常被用于净化废水[7]、改良土壤[8-9]及制备多孔陶瓷[10]等领域，但这些利用方式的附加值较低或消耗量有限。近年来，将煤渣作为集料或水泥替代材料用于混凝土制备的研究日益得到关注。这不仅能够降低混凝土成本，还能有效解决煤渣的处置问题[11-12]。张立明等[13]研究煤渣粉(CSP)掺量对再生混凝土氯离子扩散系数的影响。结果表明：随着CSP掺量的增加，28 d再生混凝土氯离子扩散系数呈先降低后增加的趋势，二者呈二次多项式关系。该研究建立了氯离子扩散系数与CSP掺量的关系式，可用于预测海洋环境下掺CSP再生混凝土的氯离子扩散系数。现有研究表明，适量的煤渣不会对混凝土性能造成不利影响，但是由于煤渣中的硅酸盐矿物活性较低，当替代比例过高时，CSP无法完全反应，导致混凝土力学性能及耐久性下降[14]。

通常可以通过纤维来提高混凝土的力学性能，其中聚丙烯纤维(PPF)[15-16]、聚乙烯醇纤维(PVAF)[17]和聚乙烯纤维(PEF)[18]等聚合物纤维由于高性价比，在增强水泥基材料中被广泛应用。彭娇等[19]研究PEF对混凝土抗多次冲击性能的影响。结果表明：PEF可提高混凝土的抗折强度，当PEF配合比为1.2 kg/m^3，混凝土承受抗冲击次数提高12次。PEF抗拉强度高于PPF、PVAF等，因此对混凝土力学性能的改善效果更显著[20]。为保证高掺量CSP下混凝土良好的力学性能，本文以PEF为增强材料，制备高掺量CSP混凝土，研究混凝土的坍落度、孔隙率及力学性能，通过动态无损检测数字图像相关技术(DIC)[21-22]采集和分析混凝土加载过程中的图像、应变等变化，揭示纤维增韧与增强混凝土力学性能的机理。

1 实验部分

1.1 主要原料

普通硅酸盐水泥，P·O 42.5，冀东水泥铜川有限公司；CSP，325目，陕西秦龙电力正元环保科技有限公司；机制砂，细度模数2.7，陕西瑞德宝尔矿山工程股份公司；碎石，连续级配5~20 mm，泾阳中昊建材有限责任公司；聚羧酸减水剂，ZY-HPWR-A，湖南中岩建材科技有限公司；高分子量PEF，UHMWPE，上海金孚嘉新材料有限公司。表1为水泥和CSP的化学组成。表2为PEF的物理性能。

表1 水泥和CSP的化学组成

Tab.1 Chemical composition of cement and CSP 单位：%

项目	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(Loss)
水泥	63.85	4.79	21.29	3.38	2.50	1.10	0.31	0.28	1.66
CSP	5.18	23.03	58.26	5.98	1.41	3.27	0.20	0.82	0.85

表2 PEF的物理性能

Tab.2 Physical properties of PEF

项目	数值
密度/(kg·m^{-3})	0.97
长度/mm	12
直径/μm	15~20
抗拉强度/MPa	1 800
断裂伸长率/%	5.2

1.2 仪器与设备

强制式搅拌机，HJW-60型，沧州鸿浩杰科建筑仪器有限公司；全自动压汞仪，Auto Pore IV 9500，美国麦克仪器公司；压力试验机，YAW-200，济南文腾试验仪器有限公司；拉伸试验机，WES-600B，济南普业机电技术有限公司；CCD相机，A3135CU000，浙江华睿科技股份有限公司。

1.3 样品制备

本混凝土配方设计强度等级为C35。表3为混凝土的配合比。依次将碎石、机制砂及胶凝材料(水泥和CSP)加入60 L的混凝土强制式搅拌机中干混30 s，再将拌合用水和减水剂倒入搅拌机中搅拌30 s，然后加入PEF，继续搅拌120 s。将混凝土拌合物装入对应的成型模具中振动成型并覆盖保鲜膜，24 h后拆模，移入标准养护室中养护至28 d。其中CSP占胶凝材料总质量的20%和25%时，试样编号为CSP20和CSP25；在CSP基础上加入1.2 kg/m^{3}和1.5 kg/m^{3}的PEF的试样命名为CSP25/PEF1.2、CSP25/PEF1.5。

表3 混凝土的配合比

Tab.3 Mix proportion of concrete 单位：kg·m^{-3}

样品	配合比						
	水泥	CSP	机制砂	碎石	减水剂	水	PEF
PC	400	0	720	1 110	4	160	0
CSP20	320	80	720	1 110	4	160	0
CSP25	300	100	720	1 110	4	160	0
CSP25/PEF1.2	300	100	720	1 110	4	160	1.2
CSP25/PEF1.5	300	100	720	1 110	4	160	1.5

1.4 性能测试与表征

坍落度：按照GB/T 50080—2016对新拌混凝土坍落度进行测试。

孔隙率：按照GB/T 21650.1—2008，采用全自动压汞仪对混凝土孔隙率进行测试。

力学性能：按照GB/T 50081—2019，采用压力试验机进行测试，试件尺寸为150 mm×150 mm×150 mm，加荷速度0.5 MPa/s。采用拉伸试验机测试抗折强度，试件尺寸为100 mm×100 mm×400 mm，加荷速度0.05 MPa/s。

DIC图像分析：将混凝土抗压和抗折受力面垂直的一面用砂纸打磨平整，随后在表面上喷涂白色底漆，最后喷涂一层黑色哑光漆，以形成散斑图案。在混凝土力学性能测试过程中，用CCD相机采集散斑的位移变化，通过专用软件分析，获得混凝土的应变和裂纹发展图像。

2 结果与讨论

2.1 混凝土的坍落度

图1为混凝土的坍落度。从图1可以看出，空白样品(PC)的坍落度为186 mm，CSP20、CSP25、CSP25/PEF1.2、CSP20/PEF1.5的坍落度分别降低至182、177、173、154 mm。当CSP取代水泥量小于25%时，CSP20、CSP25混凝土坍落度降低较小。当PEF配合比为1.2 kg/m^{3}时，CSP25/PEF1.2坍落度降低7.0%；而PEF配合比为1.5 kg/m^{3}时，CSP20/PEF1.5坍落度降低17.2%。这说明CSP和PEF的加入均会降低混凝土的流动性。但适量的CSP和少量的PEF对流动性影响不大，而过量PEF会显著降低混凝土的流动性。这主要是由于煤渣磨细得到的CSP细度降低，原有的多孔结构被破坏，与水泥颗粒的吸水率差异缩小，因此适量的CSP取代水泥对混凝土流动性影响较小。PEF在浆体中呈异向分布，会增加浆体流动的阻力，但是少量PEF能够均匀分散，对流动性的影响有限。当PEF掺量达到一定程度后，PEF颗粒之间易形成三维网络甚至团聚，从而导致流动性显著降低。

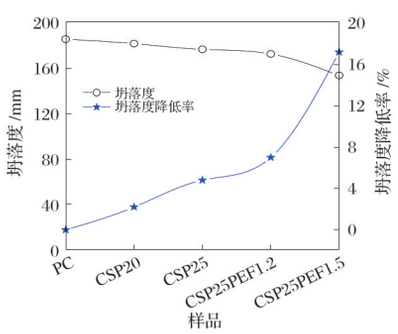


图1 混凝土的坍落度

Fig.1 Slump of concrete

2.2 混凝土的孔隙特征

混凝土中孔隙越少，则混凝土密实性越好，其力学性能也越好。图2为混凝土的孔隙率。从图2可以看出，与PC相比，混凝土CSP20内部孔隙率略有减小，降低9.4%；CSP25孔隙率比PC增大1.5%。这是因为：一方面，煤渣具有多孔结构，虽然磨细的CSP孔隙率大大降低，但是CSP的加入还是略微增加混凝土的孔隙率；另一方面，CSP有与粉煤灰相似的火山灰活性，在氢氧化钙[Ca(OH)$_2$]环境中能够水化生成钙矾石(AFt)、水化硅酸钙凝胶(C-S-H)和水化铝酸钙(C-A-H)。当CSP提高混凝土密实性作用占主导时，混凝土孔隙率降低；当CSP增加孔隙率占主导时，混凝土孔隙率增大[23]。当CSP占胶凝材料总质量的20%时，提高混凝土密实性占主导；但是，当CSP占胶凝材料总质量的25%时，CSP过量，部分CSP无法完全反应，其表面未完全被水化产物包裹，导致CSP增加孔隙率占主导，而且过量CSP更明显地降低了混凝土流动性，导致混凝土内部更容易形成缺陷、孔洞和裂纹。因此CSP20孔隙率低于PC，而CSP25孔隙率略高于PC。从图2还可以看出，CSP25/PEF1.2的孔隙率最低，比PC降低11.4%，CSP25/PEF1.5的孔隙率仅比PC降低0.2%。这是因为PEF促进了水泥和CSP的水化，同时适量的PEF在混凝土中分布减少了微观缺陷的形成；继续增加PEF至过量，PEF会显著降低混凝土的流动性，这会造成混凝土成型过程中的内部缺陷显著增加，孔隙率也增大。

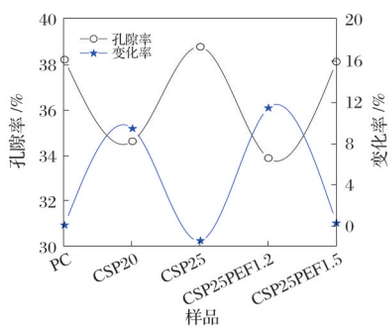


图2 混凝土的孔隙率

Fig.2 Porosity of concrete

2.3 混凝土的抗压强度

图3为混凝土的抗压强度。从图3可以看出，与PC相比，CSP20的抗压强度提高7.2%；CSP25的抗压强度降低11.0%，其抗压强度为34.8 MPa，已无法满足设计要求。混凝土CSP20抗压强度提高的主要原因是：首先，CSP有大量的活性SiO_2、Al_2O_3等，这些物质具有潜在的火山灰活性，可在水泥水化后提供的Ca(OH)$_2$碱性环境中反应，生成更多的水化产物，尤其是生成的C-S-H使二者界面胶结强度增大，界面区域得到强化[24]；其次，CSP表面为凹凸不平的粗糙结构，在混凝土硬化后，CSP与水泥浆通过咬合嵌锁作用提高混凝土结构变形的阻力，进而提高力学性能[25]。因此，加入适量的CSP，力学性能得到提高。CSP25抗压强度下降的主要原因是CSP掺量过高。第一，磨细的CSP表面仍然存在少量的开口孔，吸水量会稍高于水泥颗粒，导致混凝土流动性有所下降，同时这些开口孔会在混凝土内部产生部分缺陷，尤其是CSP取代量较高时，这些不利影响更明显。第二，加入过量CSP会导致水泥占比降低，没有足够水化产物与CSP二次水化包裹并填充CSP孔隙，致使混凝土内部结构密实度降低，而密实度直接影响混凝土力学性能。加入PEF后，CSP25/PEF1.2和CSP25/PEF1.5的抗压强度比PC提高12.0%和9.2%，相比CSP20略有提升，说明PEF显著提高了混凝土的力学性能，弥补了高掺量CSP给混凝土内部微观结构和力学性能带来的不利影响。这是因为：一方面，在CSP混凝土中，由于CSP自身特性及混凝土硬化过程中的收缩等因素，容易产生裂缝。而PEF具有较高的抗拉强度和良好的柔韧性，掺入PEF能够在混凝土内部形成三

维乱向分布的支撑体系，当混凝土内部出现荷载时，PEF能够承担部分应力，阻止裂缝的产生和扩展[26]。另一方面，PEF在混凝土中可以促进水泥和CSP水化，形成的更多的水化产物能够填充混凝土内部孔隙。这两方面因素均对提高混凝土的抗压强度有利。

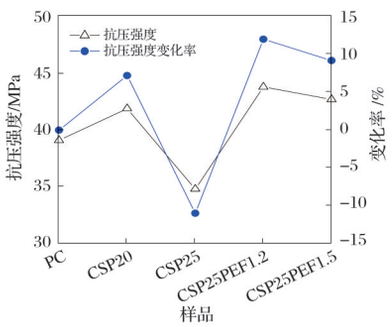


图3 混凝土的抗压强度

Fig.3 Compressive strength of concrete

图4为混凝土抗压破坏后的状态。从图4可以看出，PC、CSP20、CSP25均为脆性破坏，破坏均产生一条显著的裂纹。这也是素混凝土制品的特点[27]。而加入PEF后，CSP25/PEF1.2和CSP25/PEF1.5表面分别出现3条和4条裂纹。这说明此时混凝土的塑性增强，应力向多方向发散，这验证了PEF在混凝土内部发挥了搭接和增韧作用。

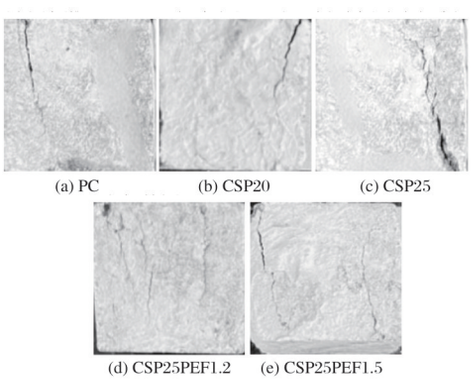
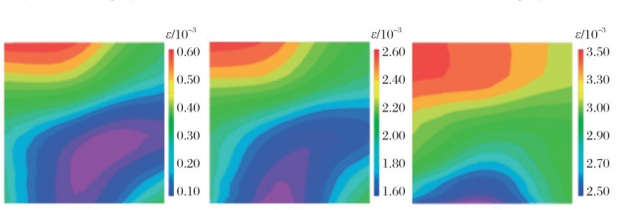


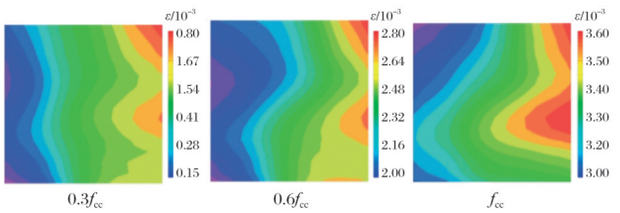
图4 混凝土抗压破坏后的状态

Fig.4 State of concrete after compressive failure

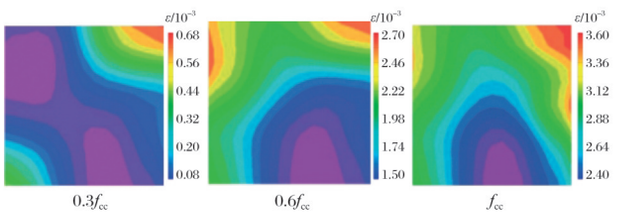
混凝土受压损伤过程一般可分为初始阶段(OA段)、裂缝稳定发展阶段(AB段)和裂缝快速扩展阶段(BC段)3个阶段。其中：OA段应力为极限应力，此时对应混凝土的抗压强度(f_{cc})的0~30%；AB段应力为极限应力的30%~60%，BC段应力为极限应力的60%~100%[28]。为了分析试样受压过程中的内部应力变化，采集试样受压$0.3f_{cc}$、$0.6f_{cc}$、f_{cc}对应时刻的应变云图。图5为试样抗压荷载下的应变云图。



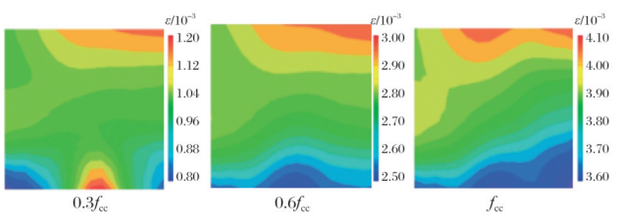
(a) PC



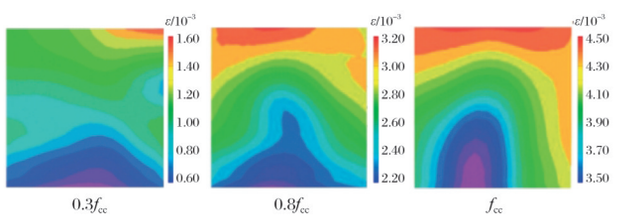
(b) CSP20



(c) CSP25



(d) CSP25/PEF1.2



(e) CSP25/PEF1.5

图5 混凝土抗压荷载下的应变云图

Fig.5 Strain contour maps of concrete under compressive load

从图5可以看出，当加载$0.3f_{cc}$时，PC的混凝土应变云图出现不同应变分布区域，这说明应力分布不均匀。其原因是混凝土在成型和养护过程中会存在一些孔隙、初始微裂纹和部分缺陷，这些区域容易产生应变集中。混凝土内部微观结构被压缩，出现轻微变形和损伤。当荷载增加至$0.6f_{cc}$时，应变仍然不均匀，高应变区域增加。荷载增加使混凝土变形变大，微裂缝和损伤不断扩大，裂纹长度和宽度增长，逐渐出现宏观裂纹。当荷载达到f_{cc}时，应力达到峰值，应变集中区域的面积达到最大。此时宏观裂缝迅速发展，甚至贯通整个混凝土基体，内部严重变形和损伤部分出现失稳状况，直至破坏。这就是混凝土整个受压过程的应变和结构变化规律。CSP20、CSP25、CSP25/PEF1.2和CSP25/PEF1.5的应变变化规律与PC基本一致，但是应变区域范围有所不同。当CSP取代水泥量为20%时，CSP20受压$0.3f_{cc}$、$0.6f_{cc}$、f_{cc}时刻的应变云分布较PC更均匀，说明其受力更均匀，应力集中区域减少。这是因为CSP与水泥水化产生的$Ca(OH)_2$发生二次水化，生成更多的水化产物AFt、C-S-H、C-A-H，降低了混凝土的孔隙率和微裂纹等缺陷，抑制了应力集中。当CSP取代水泥量为25%时，

CSP25 受压 0.3f_{cc}、0.6f_{cc}、f_{cc} 时刻的应变云图分布出现明显的集中区域。这是因为水泥水化产生的 $Ca(OH)_2$ 无法与过量的 CSP 反应，造成混凝土孔隙、微裂纹等缺陷增加，受力时出现应力集中现象。当 CSP 取代水泥量为 25% 且加入 1.2 kg/m^3 的 PEF 时，CSP25/PEF1.2 受压 0.3f_{cc}、0.6f_{cc} f_{cc} 时刻的应变云图分布最均匀，混凝土的应变最大，说明此时混凝土应力分散均匀且能够承受更大应力和变形。这是因为 PEF 促进了水泥和 CSP 水化，并且 PEF 形成三维网络，起到搭接作用，抑制了孔隙、微裂纹等缺陷产生，弥补 CSP 掺量较高带来的不利影响，因此提高了混凝土承受的荷载极限。而当 CSP 取代水泥量为 25% 且加入 1.5 kg/m^3 的 PEF 时，CSP25/PEF1.5 受压 0.3f_{cc}、0.6f_{cc} f_{cc} 时刻的应变云图分布明显不均匀，表明混凝土出现了应力集中。这是因为过量的 PEF 造成混凝土流动性显著降低，导致混凝土成型过程中缺陷增多，PEF 促进水泥和 CSP 水化及 PEF 增强作用无法弥补过量 PEF 带来的不利影响。应变变化规律与混凝土的抗压强度变化规律及破坏状态具有较好的一致性。

2.4 混凝土的抗折强度

图 6 为混凝土的抗折强度。从图 6 可以看出，混凝土抗折强度的变化规律与抗压强度基本一致，随着 CSP 添加量的增加，混凝土的抗折强度先增大后减小。添加 1.2 kg/m^3 的 PEF 后，CSP25/PEF1.2 的混凝土抗折强度达到最大，比 PC 提高 42.2%。继续增加 PEF 配合比至 1.5 kg/m^3，CSP25/PEF1.5 的混凝土抗折强度开始下降。适量加入 CSP 能够提高混凝土抗折强度。PEF 能够弥补过量 CSP 对抗折强度带来的不利影响，保证混凝土更高的抗折强度。但是过量的 PEF 也会造成混凝土结构缺陷，降低抗折强度。这说明混凝土抗折强度的变化原因与抗压强度变化原因基本一致。结合抗压强度和抗折强度，抗折强度的增长率高于抗压强度，这是因为纤维的径向搭接锚固作用在受到弯曲荷载时更显著。

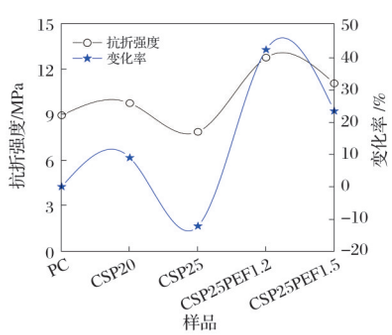


图 6 混凝土的抗折强度

Fig.6 Flexural strength of concrete

图 7 为混凝土抗折破坏后的状态。从图 7 可以看出，PC、CSP20 和 CSP25 直接断成两截；加入 PEF 后，CSP25/PEF1.2 和 CSP25/PEF1.5 主体形态保留较为完整，裂而不碎，这说明 PEF 显著提高了混凝土的韧性。

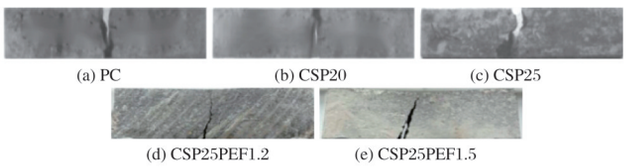


图 7 混凝土抗折破坏后的状态

Fig.7 State of concrete after flexural failure

为了深入了解 PEF 对混凝土增韧、增强的机理，对抗折过程中的裂纹发展过程数据进行测试。图 8 为抗折荷载下的裂纹发展。

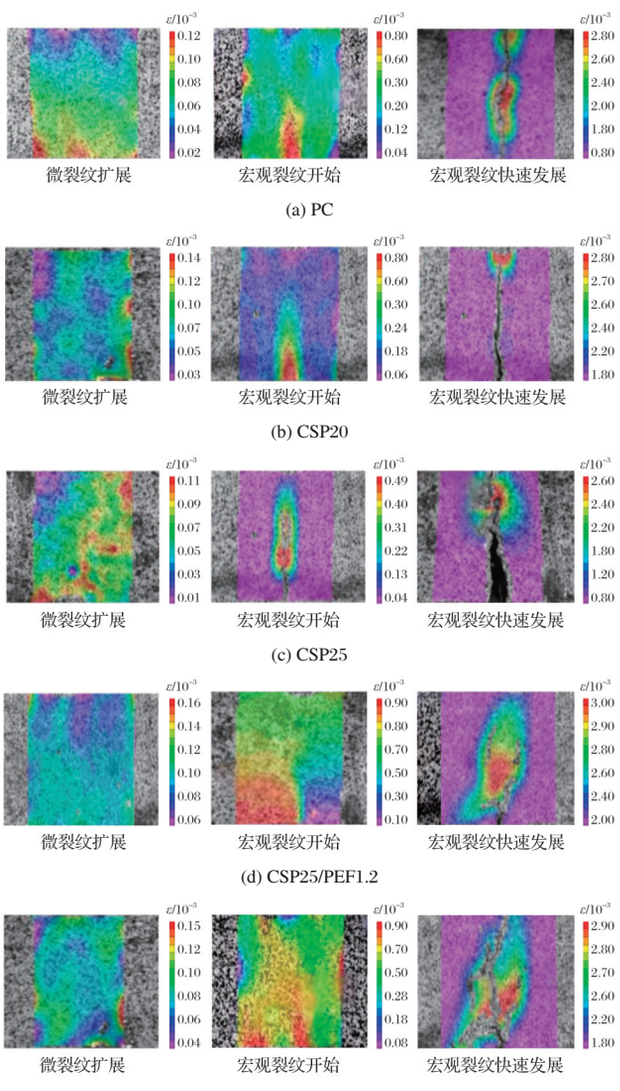


图 8 混凝土抗折荷载下的裂纹发展

Fig.8 Crack development of concrete under flexural load

从图 8 可以看出，加载初期，PC 混凝土应变云图中出现不同应变分布区域，这说明应力分布不均匀。在荷载初期，混凝土内部的孔隙、初始微裂纹等缺陷造成应变集中。随着孔隙、微裂纹的延伸破损，应力集中现象又会得到缓解，混凝土不同区域的孔洞及微裂纹经历“应力集中-孔隙、微裂纹延伸破损-应力缓解”过程，因此不同区域也出现不同的应变分布。随着荷载的增大，孔隙及微裂纹延伸和破坏汇集，不同区域的应变逐渐增大，宏观裂纹开始出

现。继续逐渐增大荷载，宏观裂纹快速发展，直至贯通混凝土抗折截面，使混凝土破坏。PC在混凝土破坏前，出现一条明显的宏观裂纹，测试混凝土接近完全破坏。CSP20和CSP25的裂纹发展趋势与PC基本一致。不同之处在于，CSP20中裂纹发展过程中应变云图分布更均匀，最终的宏观裂纹宽度比PC小，这是因为适量CSP(20%)提高了混凝土的结构完整性和强度。CSP25的应变云图中出现不均匀现象，说明混凝土内部应力集中，宏观裂纹宽度比PC还大，这是因为过量的CSP对混凝土结构不利，这也验证了CSP25抗折强度比PC低的结论。CSP25/PEF1.2和CSP25/PEF1.5的应变云图分布变得均匀，开始出现裂纹附近的应变与周围差别更小。另外，在不同时刻，CSP25/PEF1.2和CSP25/PEF1.5的应变明显高于其他混凝土，说明此时混凝土的变形更大，至混凝土宏观裂纹发展时，CSP25/PEF1.2和CSP25/PEF1.5的裂纹均出现分支，这有助于应力的释放。上述结果说明PEF提高了混凝土的韧性，抑制了裂纹发展，阻止裂纹贯通，这与前面混凝土的抗折强度检测结果一致。

3 结论

随着CSP添加量的增加，混凝土的坍落度不断降低；继续增加PEF掺量，混凝土坍落度继续降低。当CSP取代水泥量小于25%且PEF配合比小于1.2 kg/m^{3}时，混凝土坍落度降低不显著。但是，掺入1.5 kg/m^{3}的PEF时，混凝土坍落度降低17.2%。这说明加入适量的CSP(20%)和PEF(1.2 kg/m^3)对混凝土的流动性影响不大。当CSP取代水泥量为20%时，混凝土孔隙率降低；当CSP取代水泥量增加至25%时，混凝土孔隙率增大。当CSP取代水泥量为25%时，随着PEF掺量的增加，混凝土孔隙率先降低后升高。这说明适量加入CSP和PEF，可以提高混凝土的微观结构密实性，降低孔隙率。随着CSP添加量的增加，混凝土的抗压强度和抗折强度均是先增大后减小。当CSP取代水泥量25%时，随着PEF掺量的增加，混凝土的抗压强度和抗折强度均先增大后减小，且在掺入1.2 kg/m^{3}的PEF时，混凝土的抗压和抗折强度达到最大值。这说明PEF的加入提高了混凝土的塑性，抑制了混凝土在荷载下的裂纹发展和应力集中，尤其是对抗折性能改善效果显著，使混凝土能够承受更大的抗折荷载，混凝土裂而不断。当CSP取代水泥量小于20%且不加入PEF时，混凝土力学性能也能满足设计要求，且略高于PC。提高CSP取代水泥量至25%，需要加入适量的PEF，力学性能才能满足要求。当CSP取代水泥量为25%且加入1.2 kg/m^{3}的PEF时，能够制备性能优异的CSP混凝土，其孔隙率比PC降低11.4%，抗压强度和抗折强度分别比PC提高12.0%和42.2%，而坍落度仅降低13 mm。

参考文献

[1] 王灿. 硫酸盐-氯盐作用下带裂缝粉煤灰渣混凝土耐久性能研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2023.
[2] 郑文书, 贾斌, 王泽有, 等. 通钢煤渣循环利用的措施[J]. 山东冶金, 2022, 44(4): 81-82.
[3] 黄绪泉, 赵小蓉, 高婷, 等. 基于专业背景的固体废物处理与处置实验项目设置与实践研究[J]. 广东化工, 2022, 49(23): 256-258.
[4] 李红亚, 刘侠, 白妮, 等. 改性煤渣球的制备及在废水处理中的应用[J]. 榆林学院学报, 2023, 33(2): 10-13.
[5] 张辉. 锰渣协同煤渣制备新型注浆材料及其性能研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2024.
[6] 何靖, 卢曦. 煤渣填土对土壤砷含量的影响及治理技术[J]. 中国资源综合利用, 2025, 43(5): 47-49,107.
[7] 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.
[8] 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.
[9] 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.
[10] 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.
[11] 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.
[12] ZHANG W, HAO X S, WEI C, et al. Activation of low-activity calcium silicate in converter steelmaking slag based on synergy of multiple solid wastes in cementitious material[J]. Construction and Building Materials, 2022, 351: 128925.
[13] 张立明, 余红发. 煤渣粉掺量对再生混凝土氯离子扩散系数的影响[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(7): 2332-2336, 2342.
[14] 杨世东. 石灰石粉-煤渣粉掺合料对混凝土性能影响研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2020(1): 6-9.
[15] 刘胜兵, 雷世杰. 纤维增强再生混凝土高温后力学性能研究进展[J]. 复合材料科学与工程, 2024(11): 133-142.
[16] 孟海瑞, 吴岱铸, 王璠, 等. 聚丙烯纤维对沙漠砂自密实混凝土性能影响的研究[J]. 塑料科技, 2024, 52(2): 72-74.
[17] 吴浩, 薛维培, 王中建. 盐侵冻融循环下聚乙烯醇纤维混凝土孔结构分形特征[J]. 硅酸盐通报, 2024, 43(5): 1859-1866.
[18] 李竞克. 聚乙烯纤维在混凝土中的应用研究进展[J]. 合成树脂及塑料, 2024, 41(3): 74-78.
[19] 彭娇, 鲜洪雨, 赵鹏, 等. 超高分子量聚乙烯纤维混凝土的抗多次冲击性能[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2024, 52(3): 329-336.
[20] 黄伟, 丁金友, 陈功林, 等. 超高分子量聚乙烯纤维制备技术研究进展[J]. 塑料科技, 2025, 53(3): 161 -167.
[21] 代薇, 杨洵, 蒲中意, 等. 基于DIC技术的修复后混凝土剪切特性试验[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2025, 23(2): 444-456.
[22] 王漯淀, 孙新建. 基于DIC技术的混凝土剪切力学性能研究[J]. 混凝土, 2025(3): 6-11.
[23] 张卉, 潘慧敏, 石雨轩, 等. 粉煤灰渣替代细骨料对砂浆混凝土强度及抗冻性影响[J]. 硅酸盐通报, 2022, 41(2): 433-440.
[24] 冯娜, 崔自治, 李永琴, 等. 活化煤废料替代水泥制备混凝土的基本特性[J]. 矿产综合利用, 2024, 45(2): 81-88.
[25] 张坚, 刘清风. 基于非球形颗粒水化堆积的水泥浆氯离子扩散系数预测[J]. 建筑材料学报, 2023, 26(9): 955-962.
[26] 杨秀涛. 基于聚乙烯纤维的再生混凝土力学性能研究[J]. 合成纤维, 2024, 53(7): 79-82.
[27] 李林香, 谭盐宾, 杨鲁, 等. 高强混凝土的高脆性及其在冲击作用下的破坏机理[J]. 铁道建筑, 2024, 64(3): 132-135.
[28] 虞爱平, 李秀鑫, 程梓宸, 等. 基于声发射和数字图像相关技术的不同粗骨料粒径混凝土损伤特性[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2024, 45(5): 57-67.