

粉煤灰-煤矸石基地聚合物混凝土力学及耐久性能研究

李 倩

(煤炭工业石家庄设计研究院有限公司, 石家庄 050000)

摘 要: 推动煤矸石基地聚合物混凝土的应用, 可解决煤矸石再利用困难和利用率低的问题。以原状煤矸石为粗骨料, 煤矸石粉、粉煤灰为胶凝材料制备地聚合物混凝土, 分析了不同煤矸石粉掺量时力学强度、抗氯离子渗透性能、抗冻性能的变化规律。结果表明: 随煤矸石粉掺量增加, 抗压、劈裂抗拉强度减小, 氯离子渗透系数增大, 40%掺量时满足 C40 强度和中等抗氯离子渗透等级; 随冻融循环次数增加, 质量损失率增大、相对动弹性模量减小, 增大煤矸石粉掺量, 质量损失率增幅和相对动弹性模量降幅均增大, 40%掺量可抵抗 150 次冻融循环; 煤矸石基地聚合物混凝土中煤矸石粉掺量宜为 40%。研究成果可为煤矸石资源化利用提供理论依据。

关键词: 煤矸石; 地聚合物; 强度; 氯离子渗透; 冻融循环

中图分类号: TU528.59

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2026) 03-0050-06

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.03.009

Study on Mechanical and Durability Properties of Fly Ash and Gangue Base Polymer Concrete

LI Qian

(Shijiazhuang Design and Research Institute of Coal Industry Co., Ltd., Shijiazhuang 050000, China)

Abstract: Promote the application of gangue base polymer concrete, can solve the problem of gangue reuse difficulties and low utilization rate. With the original gangue as coarse aggregate, gangue powder, fly ash as cementitious material preparation of the ground polymer concrete, analyzed the different gangue powder admixture when the mechanical strength, anti-chlorine ion permeability performance, anti-freezing performance of the change rule. The results show that: with the increase of gangue powder mixing, compressive, splitting tensile strength decreases, chloride ion permeability coefficient increases, 40% mixing to meet the C40 strength and medium anti-chlorine ion permeability grade; with the increase in the number of freezing and thawing cycles, the mass loss rate increases, the relative kinetic elasticity modulus decreases, increase the gangue powder mixing, the mass loss rate increase and the relative kinetic elasticity modulus decreases increase, 40% mixing to resist 150 times of freezing and thawing cycles. 150 freeze-thaw cycles; gangue base polymer concrete in the gangue powder mixing appropriate for 40%. The research results can provide theoretical basis for the utilization of gangue resources.

Key words: coal gangue; geopolymer; strength; chloride penetration; freeze-thaw cycle

0 引言

我国煤炭资源开采量位居世界前列，开采过程中产生大量煤矸石固体废弃物，其堆存量逐年增加，不仅占用大量土地资源，还可能引发环境污染和地质灾害问题。如何高效、环保地利用煤矸石资源，已成为当前亟须解决问题。关于煤矸石粗、细骨料对混凝土性能影响研究已基本成熟^[1-2]，采用煤矸石骨料的混凝土强度低，且耐久性显著劣化^[3]，制约了煤矸石资源化利用率。

部分学者开展了将煤矸石规模化用作建筑材料的研究，煤矸石中的无机矿物组分以稳定的硅铝矿物为主，活化煤矸石粉具有潜在胶凝材料特性^[4]；通过碱激发聚合反应制备的地聚合物具有早强快硬、耐腐蚀、低碳排放等优势，具备替代水泥作为胶结充填材料的潜力^[5]。阎杰等^[6-7]研究了活化煤矸石粉掺量对混凝土性能影响，认为适当掺量下煤矸石粉可二次水化产生 C-S-H 凝胶，提升混凝土力学性能；程飞虎等^[8]研究了复合固化剂对煤矸石胶凝材料性能的影响，经碱激发煤矸石胶凝材料可生成钙矾石、水化硅酸钙、水化铝酸钙等产物，可制备性能优异的煤矸石砖块；葛洁雅等^[9]以煤矸石粉、粉煤灰为胶凝材料，研究了煅烧煤矸石骨料和原状煤矸石骨料对地聚合物混凝土性能影响，结果表明采用煅烧煤矸石骨料力学强度提高，但对耐久性影响较小；张卫清等^[10-11]研究了全煤矸石地质聚合物性能，发现未活化煤矸石地质聚合物脆性增大，增大骨料粒径可提升抗压强度，并研究了煤矸石球磨时间、激发剂模数、固含量等参数对煤矸石地聚合物抗压强度及弹性模量的影响规律，认为固含量对影响最显著、球磨时间影响最小；陈彦文等^[12]采用煤矸石粉为胶凝材料，氢氧化钠、硅酸钠为激发剂制备了煤矸石地聚合物，结果表明硅酸钠掺量显著影响煤矸石基地聚合物性能，最佳掺量宜为 25%，全煤矸石地聚合物相比于传统混凝土强度有所降低，制约了其应用范围；黄学满等^[13]采用高炉矿渣粉为前驱体制备煤矸石基地聚合物，结果表明调配激发剂掺量和模数，地聚合物力学强度可超过 50 MPa；陈琦琦等^[14]研究了粉煤灰、煤矸石经碱性干粉激发剂激发制备地聚合物混凝土，获得了 C35 混凝土的最

优配合比；李亚东^[15]以粉煤灰、煤矸石粉、水泥为胶凝材料制备地聚合物混凝土，并研究了煤矸石粉掺量对碎石骨料混凝土力学及抗碳化性能影响，认为 30%煤矸石粉掺量时性能最佳。

综上，关于煤矸石粉、粉煤灰胶凝材料对煤矸石骨料聚合物性能的影响研究仍较缺乏。因此，以原状煤矸石为粗骨料，煅烧活化煤矸石粉和粉煤灰为胶凝材料，采用碱激发剂制备地聚合物混凝土，探究不同煤矸石粉掺量对地聚合物混凝土抗压、劈裂抗拉强度、氯离子渗透系数及冻融循环性能的影响规律，为煤矸石资源化利用提供理论依据和技术支撑。

1 试验

1.1 试验材料

骨料：细骨料为河砂，细度模数为 2.7，最大粒径小于 4.8 mm；粗骨料为原状煤矸石，机械破碎后采用方孔筛筛分，获得 5~20 mm 连续颗粒级配，密度 2.58 g/cm³，吸水率 7.6%，压碎值 15.9%。

胶凝材料：I 级粉煤灰，密度 2.87 g/cm³，比表面积 534 m²/kg；煤矸石粉，经 900 ℃ 恒温煅烧 2 h，冷却后采用行星式球磨仪研磨，获得活化煤矸石粉，中值粒径约为 46 μm；粉煤灰、煤矸石化学成分见表 1，颗粒粒径级配曲线如图 1 所示。

表 1 粉煤灰、煤矸石粉主要化学成分

Table 1 Fly ash, gangue powder main chemical composition / %							
化学成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	K ₂ O
粉煤灰	51.42	33.74	0.91	0.78	4.17	5.42	1.57
煤矸石粉	53.16	41.81	0.24	0.26	1.06	0.34	0.73

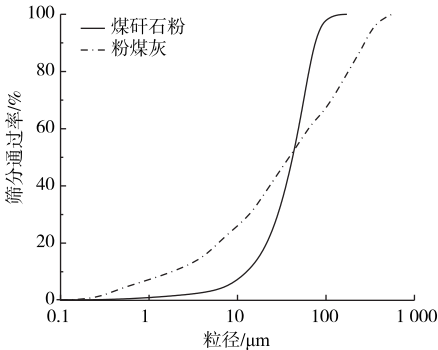


图 1 粉煤灰、煤矸石粉粒径级配曲线
Fig. 1 Fly ash, coal gangue powder grading curve

材料科学

碱性激发剂： Na_2SiO_3 溶液，技术参数见表 2；固体 NaOH ，纯度 99%；采用固体 NaOH 调配 Na_2SiO_3 模数至试验要求。

表 2 水玻璃技术参数
Table 2 Technical parameters of water glass

Na_2O 含量	SiO_2 含量	H_2O 含量	模数
8.5%	26.5%	65.0%	3.22

1.2 材料配合比

制备 5 组粉煤灰、煤矸石基地聚合物混凝土试件，配合比见表 3。煤矸石粉占胶凝材料质量分别为 20%、40%、60%、80%、100%，碱性激发剂掺量为 0.18，水灰比为 0.4，碱激发剂模数为 1.6。

表 3 地聚合物混凝土配合比
Table 3 Geopolymer concrete ratio / (kg/m^3)

编号	粉煤灰	煤矸石粉	河砂	煤矸石骨料	碱激发剂	水
CG-00		480	560	1 230	208	70.4
CG-20	96	384	560	1 230	208	70.4
CG-40	192	288	560	1 230	208	70.4
CG-60	288	192	560	1 230	208	70.4
CG-80	384	96	560	1 230	208	70.4

1.3 试件制备

按照激发剂模数 1.6 计算 NaOH 掺量，称取后放入烧杯，称取 Na_2SiO_3 溶液放入烧杯；将固体 NaOH 缓慢加入水玻璃中，加入时不断搅拌溶液加快放热，固体 NaOH 全部溶解后加入拌和水；将碱性激发剂冷却至室温备用。

将粉煤灰、煤矸石粉、河砂、煤矸石粗骨料投入搅拌机，搅拌 1 min，使混合料混合均匀；加入制备好的碱性激发剂，搅拌 5 min；将拌合物入模并振捣密实，抹平表面覆保鲜膜，室温养护 1 d 拆模，放置于标准养护室养护。

1.4 试验方法

(1) 抗压、劈裂抗拉强度试验。试验按照 GBT50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》进行，每组配合比 3 个试块，采用万能压力试验机测定 150 mm 标准立方体地聚合物混凝土 28、90 d 的抗压、劈裂抗拉强度，取试验结果平均值。

(2) 抗氯离子渗透试验、冻融循环试验。试验按照 GBT50082—2024《混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》进行。采用快速氯离子迁移系数法测定养护 28 d 地聚合物混凝土抗氯离子渗透性能，试件尺寸为 $\phi 100\text{ mm}\times 50\text{ mm}$ 圆柱体；采用快速冻融

法进行冻融循环试验，将标准试件养护至 28 d，采用清水进行 200 次冻融循环，每 25 次循环测定地聚合物混凝土试件的质量损失率和相对动弹性模量。

2 结果与分析

2.1 抗压强度

由图 2 (a) 可知，地聚合物混凝土抗压强度随煤矸石粉掺量增加而减小。未掺煤矸石粉的 CG-00 (基准组) 组抗压强度最大，90 d 为 46.7 MPa，达到 C45 强度等级；与基准组相比，煤矸石粉掺量从 20% 增加至 80%，90 d 抗压强度分别降低了 4.8%、10.9%、20.0%、33.7%，表明掺入煤矸石粉显著劣化地聚合物混凝土的抗压强度，煤矸石粉掺量越大，抗压强度损失率越高；CG-20、CG-40 试件 90 d 抗压强度满足 C40 强度等级，而 CG-80 试件勉强达到 C30 强度等级；基准组、CG-20、CG-40、CG-60、CG-80 试件 28~90 d 抗压强度增长率分别为 8.5%、7.0%、5.4%、3.4%、2.6%。可知，随着煤矸石粉掺量增加，增加养护龄期地聚合物混凝土抗压强度增幅不断减小。这表明煤矸石粉地聚合化学反应主要发生在早期，养护 28 d 强度发展基本完成，相反粉煤灰地聚合化学反应随养护龄期增长持续进行，至 90 d 抗压强度仍有一定增幅。

由图 2 (b) 可知，地聚合物混凝土的劈裂抗拉强度同样随煤矸石粉掺量增加而减小。基准组试件劈裂抗拉强度最大，90 d 为 6.87 MPa；与基准组相比，煤矸石粉掺量从 20% 增加至 80%，90 d 劈裂抗拉强度分别降低了 8.4%、16.9%、27.1%、39.6%，CG-80 试件 90 d 劈裂抗拉强度仅为 4.15 MPa，可见相同掺量煤矸石粉的混凝土劈裂抗拉强度损失率大于抗压强度损失率，且随掺量增加劈裂抗拉强度降幅更大，增加煤矸石粉掺量将提高地聚合物的脆性，降低胶凝材料与骨料之间的黏结强度。CG-00、基准组、CG-40、CG-60、CG-80 试件 28~90 d 劈裂抗拉强度增长率分别为 6.4%、5.5%、4.4%、3.5%、2.2%，延长养护龄期 CG-00 劈裂抗拉强度增长率略小于抗压强度，随煤矸石粉掺量增加，28~90 d 劈裂抗拉强度增长率与抗压强度增长规律基本接近，均表现为轻微增长。

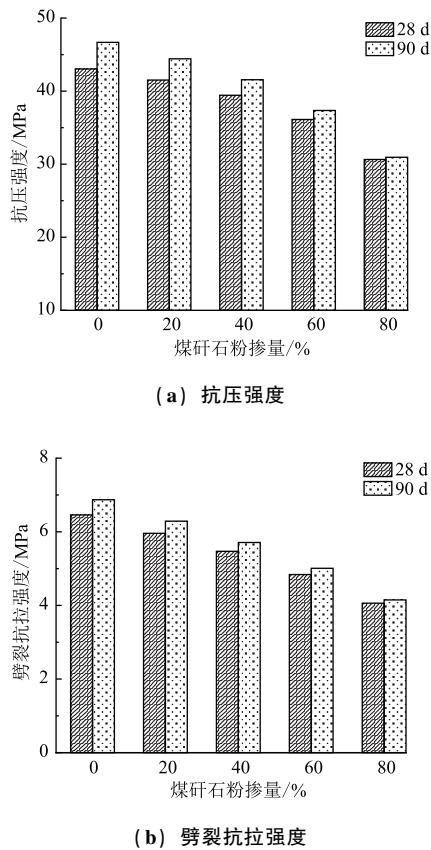


图2 地聚合物混凝土28、90 d力学强度

Fig. 2 Mechanical strength of geopolymer concrete at 28 and 90 d

2.2 抗氯离子渗透性能

由图3可知,随煤矸石粉掺量增加氯离子渗透系数不断增大,掺煤矸石粉劣化了地聚合物混凝土的抗氯离子渗透性能;基准组的氯离子渗透系数为 4.86×10^{-12} m/s,抗渗等级满足低渗透性,CG-20、CG-40、CG-60、CG-80的氯离子渗透系数分别为

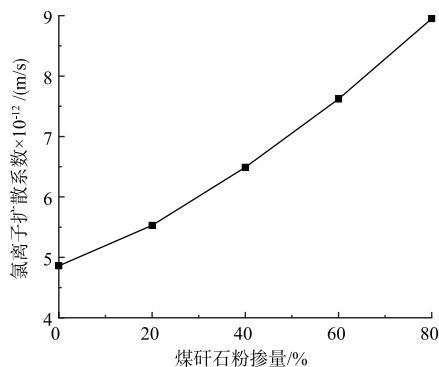


图3 不同煤矸石粉掺量地聚合物混凝土氯离子渗透系数

Fig. 3 Chloride permeability coefficient of geopolymer concrete with different gangue powder admixtures

5.53×10^{-12} 、 6.49×10^{-12} 、 7.62×10^{-12} 、 8.95×10^{-12} m/s,均在中等渗透性范围,相比基准组分别增长了13.8%、33.5%、56.8%、84.2%;可以看出,随着煤矸石掺量增加,氯离子渗透性系数增长幅度不断增大,表明过大煤矸石粉掺量不利于混凝土抵抗氯离子渗透性。一方面,由于煤矸石粉中CaO含量低,主要形成的C-A-S-H凝胶,C-S-H凝胶产量较少,导致凝胶结构疏松;另一方面,煤矸石粉火山灰活性低于粉煤灰,碱性激发剂难以激活部分颗粒活性参与地聚合反应,未反应颗粒成为缺陷点,导致基体密实程度较差。上述两个因素给外界氯离子入侵内部提供了大量通道,引起抗氯离子渗透性能大幅下降。

2.3 质量损失率

由图4可知,基准组、CG-20在0~100次冻融循环时质量损失率增长趋势较为平缓,100次冻融循环时质量损失率分别为0.89%、1.29%,而后随循环次数增加质量损失率快速增长,175次循环时质量损失率分别4.11%、4.97%,均小于5%;CG-40、CG-60、CG-80质量损失率增长平缓段循环次数分别为0~75、0~50、0~25,说明前期冻融循环对地聚合物混凝土损失较小,经一定冻融循环次数后,混凝土冻融损伤加快,质量损失逐渐增大,随煤矸石粉掺量增加,地聚合物混凝土平稳损伤段的冻融循环次数减少;基准组、CG-20、CG-40、CG-60、CG-80分别在200、200、175、150、125次冻融循环时达到破坏条件,质量损失率分别为5.63%、6.74%、6.44%、6.31%、6.64%,从质量损失率变

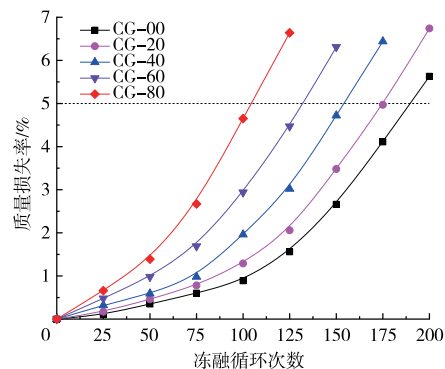


图4 不同冻融循环地聚合物混凝土质量损失率

Fig. 4 Mass loss rates of polymer concrete with different freeze-thaw cycles

材料科学

化曲线斜率来看,煤矸石粉掺量越大,曲线斜率增长越显著。可见,掺入煤矸石粉显著降低了地聚合物混凝土的抗冻性能,煤矸石粉掺量越大将更快达到冻融破坏条件,试件的质量损失速率也更为明显。这主要由于掺入煤矸石粉降低了混凝土基体的密实程度,外部水分沿孔隙通道更易侵入基体内部,在冻胀力循环作用下,砂浆与骨料之间的黏结遭到破坏而解体,而增加煤矸石粉掺量使水化凝胶产量降低,由此削弱了基体结构强度和密实程度,导致更多水分侵入内部,进而形成更大冻胀力。综上,煤矸石粉掺量越大抗冻性能越差,40%煤矸石粉掺量是适中掺量,且具有较好的抗冻能力,可抵抗150次冻融循环作用。

2.4 相对动弹性模量

由图5可知,随冻融循环次数增加,地聚合物混凝土相对动弹性模量减小,随煤矸石粉掺量增加,相对动弹性模量减小速率不断增大。冻融循环前期,各组试件的相对动弹性模量减小较为平稳,CG-00在100次循环时相对动弹性模量接近90%,CG-20、CG-40在75次循环时相对动弹性模量接近90%,CG-60、CG-80分别在50、25次循环时相对动弹性模量接近90%,可以看出地聚合物混凝土相对动弹性模量加速降低的循环次数随煤矸石粉掺量增加不断减小。未掺煤矸石粉的基准组在200次冻融循环时相对动弹性模量为62.5%,未达到破坏限值,这与质量损失率有所不同。CG-20、CG-40、CG-60、CG-80分别在200、175、175、150次冻融循环时达到破坏条件,相对动弹性模量分别为57.5%、58.9%、47.6%、51.3%。从相对动弹性模量变化曲线斜率来看,CG-60、CG-80的曲线斜率更为陡峭,75~150冻融循环范围内CG-80的相对动弹性模量降幅达32.3%,说明冻融循环作用对大掺量煤矸石粉的地聚合物混凝土试件损伤更为严重。CG-40在150次循环时相对动弹性模量为70.2%,与基准组仅相差10.4%,具有较好的抗冻性能。

地聚合物混凝土采用煤矸石作为粗骨料,因煤矸石本身为疏松多孔材料,相比天然碎石骨料具有较高的吸水性能。全部采用粉煤灰胶凝材料,地聚合反应较为充分,可生产大量的C-A-S-H、C-S-H凝胶,充分包裹煤矸石骨料,混凝土基体密实程度

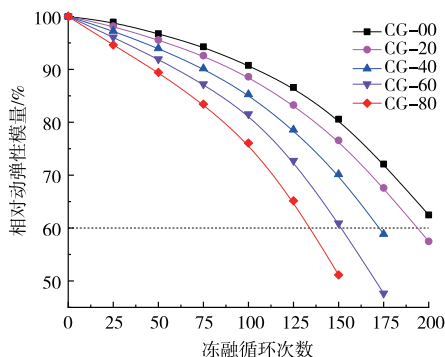


图5 不同冻融循环地聚合物混凝土相对动弹性模量
Fig.5 Relative dynamic elastic modulus of geopolymer concrete under different freeze-thaw cycles

较高,故而具有较好的抗冻能力;大掺量煤矸石粉时,因C-A-S-H、C-S-H凝胶产量减少而无法充分包裹煤矸石骨料,提高了基体吸水能力,增强了冻胀破坏作用,冻胀不仅破坏砂浆与骨料间的黏结,还将使煤矸石骨料自身孔隙进一步扩大。因此,增大煤矸石粉掺量时,地聚合物混凝土相对动弹性模量受冻融循环作用降幅更为显著。

3 结论

为解决煤矸石再利用困难和利用率低的问题,采用原状煤矸石作为粗骨料,以煅烧煤矸石粉、粉煤灰为胶凝材制备地聚合物混凝土,研究了煤矸石粉掺量对地聚合物混凝土力学强度、抗氯离子渗透性能、抗冻性能的影响规律,得出以下结论:

(1) 地聚合物混凝土抗压、劈裂抗拉强度随煤矸石粉掺量增加而减小,强度损失率随煤矸石粉掺量增加而增大。28~90 d抗压、劈裂抗拉强度增幅随煤矸石粉掺量增加而减小,煤矸石粉地聚合反应在28 d基本完成。40%煤矸石粉掺量时,抗压、劈裂抗拉强度分别降低10.9%、16.9%,满足C40抗压强度等级。

(2) 随煤矸石粉掺量增加,地聚合物混凝土氯离子渗透系数不断增大,且增长幅度随掺量增加而增大。20%~80%煤矸石粉掺量时,地聚合物抗氯离子渗透等级均为中等。

(3) 随冻融循环次数增加,地聚合物混凝土质量损失率不断增大、相对动弹性模量不断减小。随着煤矸石粉掺量的增加,质量损失率增长速率和相对动弹性模量减小速率不断增大。40%煤矸石粉掺量

的地聚合物混凝土可抵抗 150 次冻融循环, 具有较好的抗冻能力。

参 考 文 献

- [1] 景宏君, 郭美蓉, 单俊伟, 等. 硅灰改性全煤矸石粗骨料混凝土力学性能和微观结构研究 [J]. 功能材料, 2025, 56 (2): 2018-2027.
- [2] 伊倩, 古军, 陈卫杰, 等. 煤矸石细骨料改性处理对砂浆性能的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2025, 44 (6): 2193-2200.
- [3] 张亚鹏, 张凤娇, 曹佳伟, 等. 洗选煤矸石透水混凝土的制备及其性能研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2024, 38 (6): 1-5.
- [4] 方屹, 杨浪, 饶峰, 等. 煤矸石的地质聚合反应资源化利用研究进展 [J]. 矿业研究与开发, 2023, 43 (12): 206-213.
- [5] 王建华, 赖益梁, 刘刚, 等. 煤矸石粉制备混凝土用复合掺合料的性能研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2024, 38 (1): 18-21, 51.
- [6] 阎杰, 单豆豆, 邢国斌, 等. 活化煤矸石粉作为矿物掺合料对煤矸石混凝土性能的影响 [J]. 辽宁工程技术大学学报 (自然科学版), 2023, 42 (3): 266-273.
- [7] 阎杰, 邢国斌, 左军鹏, 等. 活化煤矸石粉对煤矸石混凝土性能的影响 [J]. 森林工程, 2023, 39 (5): 190-196.
- [8] 程飞虎, 夏举佩. 复合激发剂对煤矸石胶凝材料性能的影响 [J]. 化工新型材料, 2024, 52 (11): 186-191.
- [9] 葛洁雅, 朱红光, 李宗徽, 等. 煤矸石粗骨料-地聚合物混凝土的力学与耐久性能研究 [J]. 材料导报, 2021, 35 (增刊 2): 218-223.
- [10] 张卫清, 梅璟昕, 柴军, 等. 全煤矸石基地质聚合物固体制备及力学性能 [J]. 采矿与安全工程学报, 2025, 42 (3): 673-683.
- [11] 张卫清, 柴军, 冯秀娟, 等. 煤矸石基地质聚合物的制备及微观结构 [J]. 中国矿业大学学报, 2021, 50 (3): 539-547.
- [12] 陈彦文, 范博雯, 赵明宇, 等. 煤矸石基地聚合物的制备与性能研究 [J]. 沈阳建筑大学学报 (自然科学版), 2023, 39 (3): 538-544.
- [13] 黄学满, 饶吉来, 杜凯. 煤矸石基地质聚合物的制备与性能优化研究 [J]. 矿业安全与环保, 2023, 50 (6): 92-97, 103.
- [14] 陈琦琦, 张大明, 任凤玉. 干粉激发煤矸石基地聚合物混凝土配合比优化研究 [J]. 矿业研究与开发, 2022, 42 (8): 125-129.
- [15] 李亚东. 碱激发煤矸石-粉煤灰地聚合物混凝土力学性能和抗碳化性能研究 [D]. 郑州: 中原工学院, 2024.
- (上接第 49 页)
- [2] 刘超群, 朱泽文, 代力, 等. 粉煤灰基超高性能混凝土配合比优化研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2024, 38 (3): 11-15.
- [3] 郑宇炜. 粉煤灰-钢纤维增强全再生粗骨料混凝土性能研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2025, 39 (5): 49-54.
- [4] 范小春, 郭浩宇, 张澳, 等. BFRP 筋与混杂钢纤维超高性能混凝土黏结性能分析 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2025, 53 (5): 154-161.
- [5] 周志威, 王杰, 余中华, 等. 不同长度钢纤维混掺对 UHPC 性能影响试验研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2024, 38 (3): 30-34.
- [6] 唐亮, 甘迈, 乔浩玥, 等. UHPC/ECC 加固普通混凝土结构界面抗剪承载力试验研究 [J]. 桥梁建设, 2025, 55 (6): 58-65.
- [7] 张阳玺, 张帅, 李彤, 等. 碳纤维织物与 UHPC 黏结性能试验及理论研究 [J]. 建筑结构学报, 2025, 46 (11): 262-274.
- [8] 崔祎菲, 艾威侠, 张益聪, 等. 超高性能碱激发混凝土基体与钢纤维的界面黏结性能研究 [J]. 硅酸盐通报, 2025, 44 (10): 3573-3586.
- [9] 邹花, 李水长, 劳家坤, 等. 纤维定向分布对 UHPC 弯曲性能的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2025, 44 (12): 4359-4367.
- [10] 韩宇晴, 秦拥军, 梁芮, 等. 钢纤维特征对 UHPC 力学性能影响及其机理研究 [J]. 混凝土, 2025 (7): 81-86, 94.
- [11] 朱永盛. 胶凝材料组成对 UHPC 工作性与力学性能影响研究 [J]. 材料导报, 2025, 39 (增刊 2): 219-222.
- [12] 黄远, 吴仁迪. 含粗骨料超高性能混凝土与钢筋黏结性能研究 [J]. 湖南大学学报 (自然科学版), 2025, 52 (3): 170-179.
- [13] 任亮, 王家毫, 赵丁正, 等. 高强钢丝网增强 UHPC 加固混凝土桥墩抗震性能研究 [J]. 建筑结构学报, 2025, 46 (12): 201-212.
- [14] 王雄锋, 陈波, 张晓闯, 等. 纤维混掺超高性能混凝土弯曲性能研究 [J]. 混凝土, 2025 (11): 64-69.
- [15] 袁龙泉, 胡泽育, 丁溢骏, 等. 钢筋参数对 UHPC-NSC 界面黏结性能影响研究 [J]. 混凝土, 2025 (2): 58-63.