



乳化沥青对超高性能混凝土工程特性及增韧效果的影响

邹桂莲 杨素慷 虞将苗 吴坤宝 张园

Effect of emulsified asphalt on engineering properties and toughening effect of ultra-high performance concrete

ZOU Guilian, YANG Susu, YU Jiangmiao, WU Kunbao, ZHANG Yuan

引用本文:

邹桂莲, 杨素慷, 虞将苗, 吴坤宝, 张园. 乳化沥青对超高性能混凝土工程特性及增韧效果的影响[J]. 北科大: 工程科学学报, 2024, 46(12): 2229–2237. doi: 10.13374/j.issn2095–9389.2024.01.28.002

ZOU Guilian, YANG Susu, YU Jiangmiao, WU Kunbao, ZHANG Yuan. Effect of emulsified asphalt on engineering properties and toughening effect of ultra-high performance concrete[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2024, 46(12): 2229–2237. doi: 10.13374/j.issn2095–9389.2024.01.28.002

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2024.01.28.002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

粗骨料及混杂纤维对UHPC力学性能的影响

Effect of coarse aggregates and hybrid fibers on mechanical properties of ultra high performance concrete

工程科学学报. 2024, 46(3): 536 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2022.12.21.003>

铁尾矿粉混凝土在荷载与硫酸盐干湿循环耦合作用下的性能劣化机理

Mechanism of performance deterioration of iron tailing powder concrete under the coupling effect of load and sulfate drywet cycle

工程科学学报. 2024, 46(8): 1358 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2023.09.13.006>

模拟冻结法施工环境对大体积混凝土的性能影响

Effects of a simulated freezing construction environment on the mass concrete performance

工程科学学报. 2022, 44(5): 857 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2021.07.01.002>

塑管混凝土界面密闭性能改善措施

Improvement of plastic pipeconcrete interface impermeability

工程科学学报. 2021, 43(5): 647 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2020.06.21.002>

侧向冲击荷载下钢筋混凝土墩柱的性能

Performance of reinforced concrete pier columns subjected to lateral impact

工程科学学报. 2019, 41(3): 408 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2019.03.015>

纵筋锈蚀无腹筋混凝土梁抗剪性能细观数值研究

Corrosion effects of longitudinal reinforcement on shear behavior of concrete beams without web reinforcement

工程科学学报. 2023, 45(1): 117 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2021.06.29.008>

乳化沥青对超高性能混凝土工程特性及增韧效果的影响

邹桂莲¹⁾, 杨素悰¹⁾, 虞将苗^{1,2,3)}, 吴坤宝⁴⁾, 张 园¹⁾✉

1) 华南理工大学土木与交通学院, 广州 510641 2) 亚热带建筑与城市科学全国重点实验室, 广州 510640 3) 华运通达科技集团有限公司, 佛山 510630 4) 湛江经济技术开发区交通运输局, 湛江 524000

✉通信作者, E-mail: yuanzhang@scut.edu.cn

摘 要 开裂是目前超高性能混凝土(UHPC)的主要破坏形式, 增加弯曲韧性是解决 UHPC 开裂破坏的主要技术途径. 为探究乳化沥青在水泥基材中的增韧效果, 研究了不同类型及掺量的乳化沥青对 UHPC 工作性能、力学强度和弯曲韧性的影响. 结果表明阴离子乳化沥青和阳离子乳化沥青均会小幅度降低 UHPC 的工作性能与力学强度, 但能有效提升 UHPC 的弯曲韧性. 相较于阳离子乳化沥青, 阴离子乳化沥青 UHPC 的工作性能与力学强度优于阳离子乳化沥青 UHPC, 增韧效果更显著; 综合考虑力学性能及工作性能, 推荐使用阴离子乳化沥青, 且优选掺量为 3%. 通过扫描电子显微镜观察掺入乳化沥青后的 UHPC 微观结构, 发现乳化沥青可有效优化混凝土内部结构、填充微裂缝; 乳化沥青的黏弹特性能够有效抑制微裂缝的形成与发展.

关键词 超高性能混凝土; 开裂; 乳化沥青; 增韧; 作用机理

分类号 TU528

Effect of emulsified asphalt on engineering properties and toughening effect of ultra-high performance concrete

ZOU Guilian¹⁾, YANG Susu¹⁾, YU Jiangmiao^{1,2,3)}, WU Kunbao⁴⁾, ZHANG Yuan¹⁾✉

1) School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China

2) National Key Laboratory of Subtropical Architecture and Urban Science, Guangzhou 510640, China

3) Central Fortune Creation Technology Group Co., Ltd, Foshan 510630, China

4) Transportation Bureau of Zhanjiang Economic and Technological Development Zone, Zhanjiang 524000, China

✉Corresponding author, E-mail: yuanzhang@scut.edu.cn

ABSTRACT At present, cracking is the main form of damage to ultra-high performance concrete (UHPC), and increasing flexural toughness is the primary technical approach to addressing this issue. Currently, fiber, polymer, or nanomaterial modification is commonly used to improve UHPC toughness. Emulsified asphalt has also demonstrated the potential to toughen and resist cracking. To investigate the toughening effect of emulsified asphalt in cementitious materials, this study employed a method in which emulsified asphalt and water are added simultaneously during wet mixing to prepare UHPC specimens. The effects of different types and dosages of emulsified asphalt on the workability, mechanical strength, and flexural toughness of UHPC were investigated through extensibility tests, flexural toughness tests, compressive strength tests, flexural strength tests, and tensile strength tests. The results showed that the workability of UHPC mixes with two types of emulsified asphalt gradually decreased as the emulsified asphalt dosage increased. When the dosage of either type of emulsified asphalt exceeded 3%, the extension did not meet the specification requirements. Furthermore, as the dosage of the two types of emulsified asphalt increased, the mechanical strength of the UHPC slightly decreased. Compared with the

收稿日期: 2024-01-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52178426); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2022ZYGXZR066, 2023ZYGXZR001); 佛山市科技创新团队专项资助项目(2120001010776)

same dosage of cationic emulsified asphalt, anionic emulsified asphalt had a smaller impact on the mechanical strength of UHPC because anionic emulsified asphalt and cement hydration products both carried the same charge, causing them to repel each other. This mutual repulsion reduced the influence of emulsified asphalt on the cement hydration reaction process, which was conducive to the generation of cement hydration products. Consequently, the negative impact on the formation of UHPC strength was lessened, and the uniformity of the steel fiber distribution within the UHPC was ensured. In terms of flexural toughness, both types of emulsified asphalt enhanced the flexural toughness of the UHPC, with anionic emulsified asphalt providing better results than cationic emulsified asphalt. Compared with cationic emulsified asphalt, anionic emulsified asphalt resulted in better workability and mechanical strength in the UHPC, and its toughening effect was more significant. Considering both mechanical properties and overall performance, the use of anionic emulsified asphalt in UHPC is recommended, with an optimal dosage of 3%. The microstructure of UHPC specimens without emulsified asphalt and those mixed with 3% anionic emulsified asphalt was observed using a scanning electron microscope. The observations revealed that emulsified asphalt could fill the original microcracks in UHPC, improve the internal structure of the matrix, increase the effective contact area between steel fibers and the matrix to a certain extent, and enhance the toughening effect of steel fibers. Additionally, the viscoelastic properties of emulsified asphalt increased the energy required for crack propagation, effectively reducing the generation and development of microcracks and serving as a buffer for the destabilization damage of hydration products.

KEY WORDS ultra-high performance concrete; crack; emulsified asphalt; toughen; mechanism of action

超高性能混凝土(UHPC)是一种具备优异力学性能与耐久性能的新型水泥基复合材料^[1],在大跨径桥梁、高层建筑和加固工程等领域获得广泛应用. UHPC的特点是强度高、韧性较大,但抗弯拉能力不足导致的开裂仍是UHPC被破坏的主要形式^[2],对UHPC进行进一步的增韧是目前国际学术界和工程界关注的热点问题. 目前,通常采用纤维、聚合物或纳米材料改性的方法提高UHPC的韧性^[3-5].

乳化沥青(EA)价格低廉、施工方便,具有增韧阻裂的潜力,可有效优化混凝土内部结构^[6],目前已被大规模应用于板式无砟轨道结构垫层中^[7]. 研究表明,乳化沥青作为一种柔性材料,可以增加混凝土的韧性,提高其抗弯强度^[8],并被证实能有效提升水泥基材的柔韧性^[9-11]. 因此,将乳化沥青作为外加剂来提升UHPC韧性是一种新思路,研究将重点探究不同类型及掺量的乳化沥青对UHPC弯曲韧性、工作性能、力学强度的影响,确定应用

于UHPC中合适的乳化沥青类型与掺量.

1 试验概况

1.1 试验原材料

研究采用阳离子、阴离子两种慢凝型且为水包油性质的乳化沥青,主要技术指标如表1所示. 水泥采用P·II52.5R硅酸盐水泥. 硅灰的活性指数为125,比表面积为 $20\text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$,化学成分如表2所示. 石英砂主要采用粗石英砂(16目~26目)与细石英砂(40目~70目)两种规格. 钢纤维采用平直形镀铜钢纤维,密度为 $7.8\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 、长度为13 mm、直径为0.2 mm,抗拉强度为2850 MPa. 减水剂采用聚羧酸粉体减水剂,减水率大于30%.

1.2 UHPC试件制备及养护

1.2.1 试件制备

有学者通过试验探究水泥沥青胶凝材料的水化硬化机理,结果表明水化产物与胶凝材料中并未出现新物质,说明水泥与沥青没有发生化学反

表1 乳化沥青蒸发残留物的技术指标表

Table 1 Technical specifications for evaporated residues of emulsified asphalt

Emulsified asphalt types	Evaporated residues content/%	Penetration at 25 °C/mm	Ductility at 15 °C/cm	Softening point/°C
Anionic emulsified asphalt	56.7	4.9	25.3	81.0
Cationic emulsified asphalt	52.7	5.2	26.4	84.0

表2 硅灰的化学成分(质量分数)

Table 2 Chemical composition of silica fume(mass fraction)

%

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO+MgO	K ₂ O+ Na ₂ O	Moisture content	Loss on ignition	45-μm sieve balance
95.8	0.11	0.16	0.3	0.2	0.4	2.8	0.8

应^[12-13]. 乳化沥青在 UHPC 基体中主要发挥的是物理填充优化的作用, 因此按照绝对体积法原理将掺入的乳化沥青对石英砂进行等体积取代. 取代石英砂后的乳化沥青 UHPC(以下简称 EA-UHPC)的试验配合比如表 3 所示, 表中水质量为外掺水质量, 外掺水与乳化沥青的内部水总质量保持恒定, 水胶比不变. 乳化沥青掺量为掺入的液态乳化沥青与胶凝材料的质量比.

1.2.2 试件养护

根据《超高性能混凝土试验方法标准》(T/CECS 864—2021)^[14] 的规定, 进行搅拌与成型工艺的研究, 将乳化沥青与水同时加入进行湿拌, EA-UHPC 试件制备流程如图 1 所示.

1.3 试验方法

按照《超高性能混凝土试验方法标准》(T/CECS 864—2021)^[14], 进行扩展度试验、弯曲韧性试验、抗压强度、抗弯强度和抗拉强度试验. 在 UHPC 抗弯试验结束后, 在距离试件下部受拉边

缘 10~50 mm 范围内进行取样, 采用喷金镀膜仪对试样进行镀膜处理, 利用扫描电子显微镜(SEM)进行观测.

2 结果与分析

2.1 扩展度试验结果

不同类型与掺量的 EA-UHPC 拌合物的扩展度试验结果如图 2 所示.

从图 2 可以看出, 随着乳化沥青掺量的增加, 不同类型 EA-UHPC 拌合物的扩展度均出现不同程度的降低. 当乳化沥青掺量小于 3% 时, EA-UHPC 拌合物的扩展度大于 650 mm, 满足 T/CECS 10107—2020^[15] 对结构类 UHPC 工作性能的要求; 而当乳化沥青掺量大于 3% 时, EA-UHPC 拌和物的扩展度出现明显下降并小于 650 mm, 不满足技术要求. 减水剂与乳化沥青均与水泥有吸附关系, 两者存在竞争吸附, 在减水剂与乳化沥青同时存在时, 水泥优先吸附减水剂分子^[16]. 待游离减水剂

表 3 EA-UHPC 的试验配合比

Table 3 Mixing ratio of EA-UHPC

Emulsified asphalt types	Emulsified asphalt dosage/%	Mass required per unit volume/(kg·m ⁻³)					
		Cement	Silica fume	Quartz sand	Steel fiber	Water	Water-reducing agent
No emulsified asphalt	0	850	150	1000	156	180.0	25
	1	850	150	990.4	156	175.7	25
	2	850	150	980.8	156	171.3	25
	3	850	150	971.2	156	167.0	25
	4	850	150	961.6	156	162.7	25
Cationic emulsified asphalt	5	850	150	952.0	156	158.4	25
	1	850	150	991.2	156	175.2	25
	2	850	150	982.5	156	170.3	25
	3	850	150	973.7	156	165.5	25
	4	850	150	965.0	156	160.7	25
Anionic emulsified asphalt	5	850	150	956.2	156	155.8	25

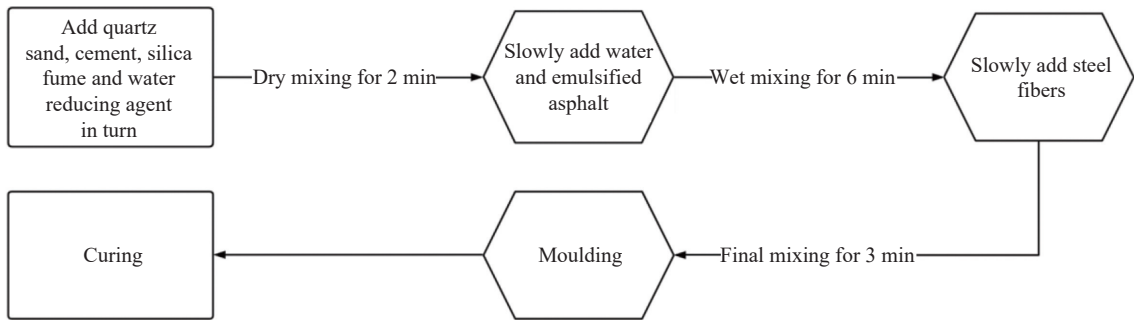


图 1 制备流程图

Fig.1 Preparation flow chart

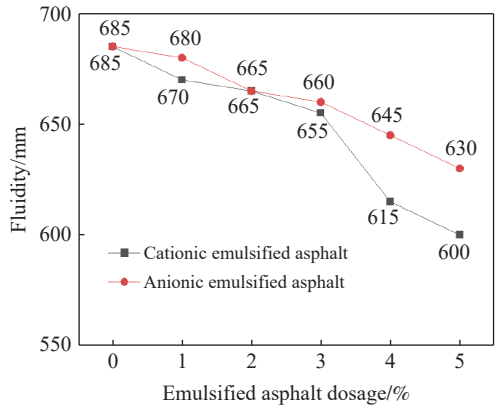


图 2 乳化沥青对 UHPC 扩展度的影响

Fig.2 Effect of emulsified asphalt on the extensibility of UHPC

分子耗尽后水泥吸附乳化沥青颗粒. 随着乳化沥青掺量的增加, 乳化沥青会在水泥、石英砂等颗粒表面聚集形成一定厚度的沥青膜, 进而加强颗粒之间的相互黏结^[13, 17], 影响拌合物的流动性, 从而导致 UHPC 拌合物的扩展度降低.

此外, 相较于阳离子乳化沥青, 阴离子乳化沥

青掺量的增加对 UHPC 拌合物工作性能的伤害更小. 相较于未参加乳化沥青的 UHPC(即基准配合比 UHPC), 掺量为 5% 的阴离子乳化沥青 UHPC、阳离子乳化沥青 UHPC 拌合物的扩展度下降幅度分别为 8.0% 与 12.4%. 水化反应初期, 水泥早期水化产物表面带正电荷, 但聚羧酸高效减水剂为一种阴离子表面活性剂, 二者在电荷引力作用下相互结合^[15, 18]. 聚羧酸高效减水剂的憎水基会吸附于水泥颗粒表面, 而亲水基则进入水中, 减水剂分子均匀分散在水泥水化产物周围使水化产物带负电, 形成如图 3(b) 中的水泥与减水剂的结合物. 由于同性电荷相排斥, 带负电荷的水泥水化产物和阴离子乳化沥青(图 3(c))相互排斥, 在电荷作用下导致 UHPC 拌合物流动度上升, 从而提升 UHPC 的工作性能.

2.2 乳化沥青对 UHPC 力学强度的影响

加入掺量为 0% ~ 5% 的乳化沥青后, EA-UHPC 力学强度的变化如图 4 所示. 随着乳化沥青掺量

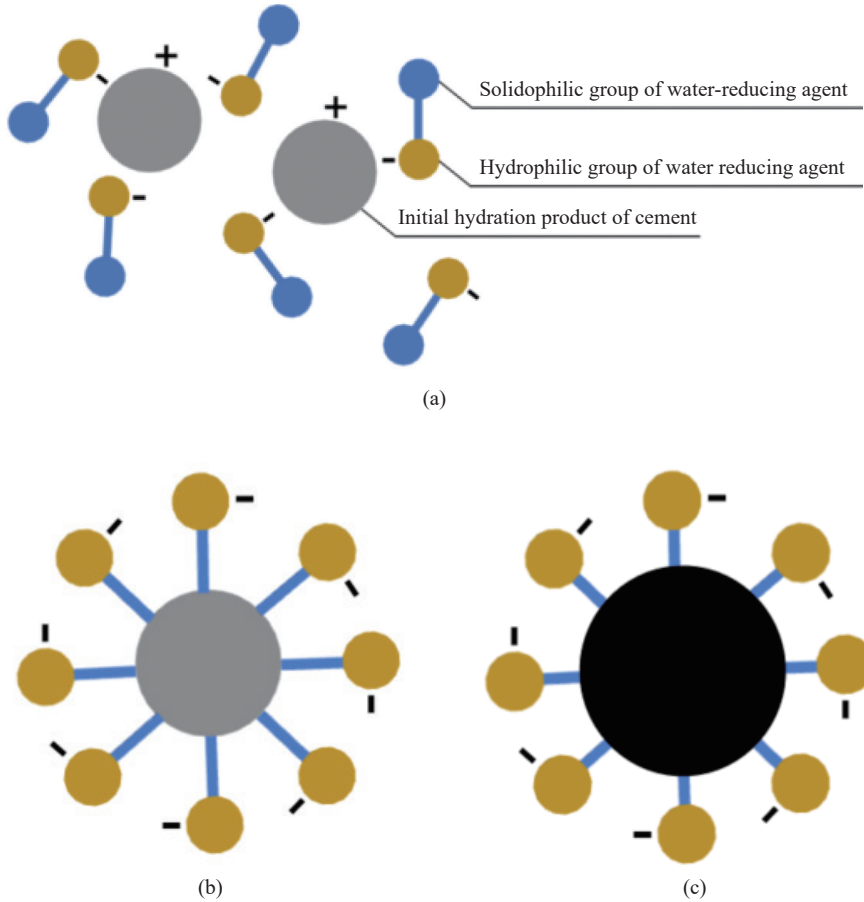


图 3 水泥水化产物与减水剂及乳化沥青的微观作用示意图. (a) 减水剂与水化产物作用; (b) 减水剂与水化产物结合; (c) 阴离子乳化沥青微观示意图

Fig.3 Schematic representation of the microscopic interaction of cement hydration products with water-reducing agents and emulsified asphalt: (a) water reducing agents and hydration products; (b) combination of water reducing agent and hydration products; (c) microscopic schematic of anionic emulsified asphalt

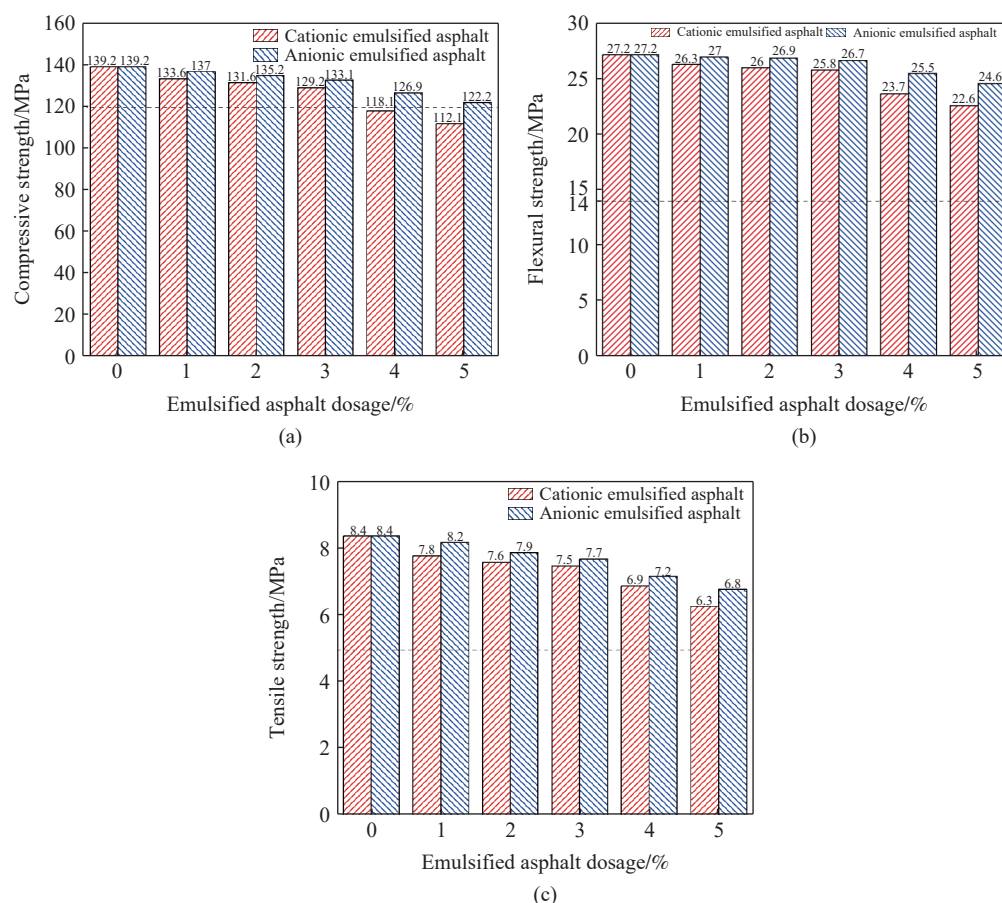


图4 乳化沥青加入后 UHPC 力学强度变化。(a) 乳化沥青对 UHPC 抗压强度的影响; (b) 乳化沥青对 UHPC 抗弯强度的影响; (c) 乳化沥青对 UHPC 抗拉强度的影响

Fig.4 Changes in mechanical strength of UHPC after incorporation of emulsified asphalt: (a) effect of emulsified asphalt on compressive strength of UHPC; (b) effect of emulsified asphalt on the flexural strength of UHPC; (c) effect of emulsified asphalt on tensile strength of UHPC

的增加, EA-UHPC 的抗压强度、抗弯强度和抗拉强度均出现不同程度的下降。T/CECS 10107—2020^[15] 对结构类 UHPC 力学性能的要求为抗压强度不小于 120 MPa、抗弯强度不小于 14 MPa、抗拉强度不小于 5 MPa, EA-UHPC 的力学性能在阴离子乳化沥青掺量为 0%~5% 内均满足要求; 而阳离子乳化沥青的掺量在 $\geq 4\%$ 时 EA-UHPC 的抗压强度不满足要求。

一方面, 减水剂和乳化沥青与水泥的竞争吸附行为延长了水泥水化诱导期^[19], 降低了 UHPC 的水化程度, 导致 UHPC 的力学强度衰减。另一方面, 随着乳化沥青掺量的增加, 乳化沥青微滴数量增多, 部分乳化沥青裹覆在水泥颗粒表面, 影响水化反应的进行, 减少 C-S-H 凝胶及其他水泥水化产物的产生。C-S-H 凝胶作为主要胶凝物质黏结其他水化产物, 帮助硬化水泥浆体构成结晶网络结构^[20-21], 这种网络结构的形成与发展是支撑硬化水泥浆体强度发展的重要基础, 故 C-S-H 凝胶的减少会影响 UHPC 的力学强度。同时, 随着乳化

沥青掺量的增加, EA-UHPC 拌合物的和易性下降, 影响了钢纤维在 UHPC 内部分布的均匀程度^[22], 从而影响钢纤维对裂缝抑制作用的发挥。当阳离子乳化沥青掺量大于 3%、阴离子乳化沥青掺量大于 4% 时, UHPC 的抗弯、抗拉强度受到明显影响。

对于同一掺量的乳化沥青, 相较于基准配合比 UHPC, 阴离子乳化沥青对 UHPC 力学强度的影响程度更小。由于阴离子乳化沥青与水泥水化产物带同性电荷, 二者相互排斥, 降低了乳化沥青对水泥水化反应进程的影响^[23-24], 有利于水泥水化产物的生成, 对 UHPC 强度形成的负面影响减弱, 也保证了钢纤维在 UHPC 内部分布的均匀程度。

2.3 乳化沥青对 UHPC 弯曲韧性的影响

美国的 ASTM C1018 标准^[25] 采用弯曲韧性指数 I_5 , I_{10} , I_{20} 来表征纤维混凝土的弯曲韧性, 弯曲韧性指数表示纤维混凝土试件在特定挠度下耗散能量的比值, 主要用来表征基体内部开裂后的耗能强弱, 弯曲韧性指数越大说明试件的韧性越好。日本的 JSCE-SF4 标准^[26] 则采用等效弯曲强度 f_c

来表征纤维混凝土的弯曲韧性. 而我国的 T/CECS 864—2021 标准^[14]借鉴了 ASTM C1018^[25]和 JSCE-SF4^[26]的优势, 并结合我国的材料特点和结构状况, 采用弯曲韧性指数 I_5 , I_{10} , I_{20} 及弯曲韧性比 R_e 表征 UHPC 的弯曲韧性. EA-UHPC 试件弯曲韧性试验结果如图 5 和图 6 所示.

由图 5 可知, 随着乳化沥青掺量增加, UHPC 荷载—挠度曲线均先上升后下降, 且均表现出应变硬化特征. 相较于基准配合比 UHPC, EA-UHPC 荷载—挠度曲线的应变软化阶段中曲线下降段更加平缓, 试件的变形能力更大, 可在弯曲破坏过程中吸收更多能量^[27], 说明乳化沥青能在一定程度上提升 UHPC 的弯曲韧性.

图 6 为乳化沥青对 UHPC 弯曲韧性指数与弯曲韧性比的影响. 当乳化沥青掺量 $\leq 3\%$ 时, EA-UHPC 的弯曲韧性指数 I_5 , I_{10} , I_{20} 及弯曲韧性比 R_e 随着乳化沥青掺量的增加而逐渐增大, 表明乳化沥青掺量的增加能提升 UHPC 的弯曲韧性. 而当乳化沥青掺量 $> 3\%$ 时, EA-UHPC 试件的弯曲韧性指数

I_5 , I_{10} , I_{20} 及弯曲韧性比 R_e 均出现明显下降. 在乳化沥青掺量为 $0\% \sim 3\%$ 时, 乳化沥青的加入能很好地填充 UHPC 基体内部缝隙, 优化基体内部结构. 同时, EA-UHPC 在弯曲过程中, 乳化沥青能借助自身黏弹性吸收部分能量, 减少微裂缝的产生、延缓微裂缝的发展, 并降低抗弯刚度, 提高试件整体变形能力, 进而提升 UHPC 弯曲韧性. 随着乳化沥青掺量进一步增加, 乳化沥青裹覆了部分未水化的水泥颗粒, 抑制水泥水化进程, 减少 C-S-H 凝胶及其他水泥水化产物的产生. 从而降低了 UHPC 基体自身的强度. 同时, 钢纤维在 UHPC 内部分布的均匀程度也受到不良影响, 两者共同作用使得 UHPC 更易发生弯曲破坏.

弯曲韧性指数 I_5 , I_{10} , I_{20} 及弯曲韧性比 R_e 均在乳化沥青掺量为 3% 时达到峰值, 表明乳化沥青掺量为 3% 时的 EA-UHPC 试件的弯曲韧性最佳. 同时, 乳化沥青掺量为 3% 时的阴离子乳化沥青 UHPC 的弯曲韧性比 R_e 大于同等掺量的阳离子乳化沥青 UHPC, 表明在相同掺量下阴离子乳化沥青的增

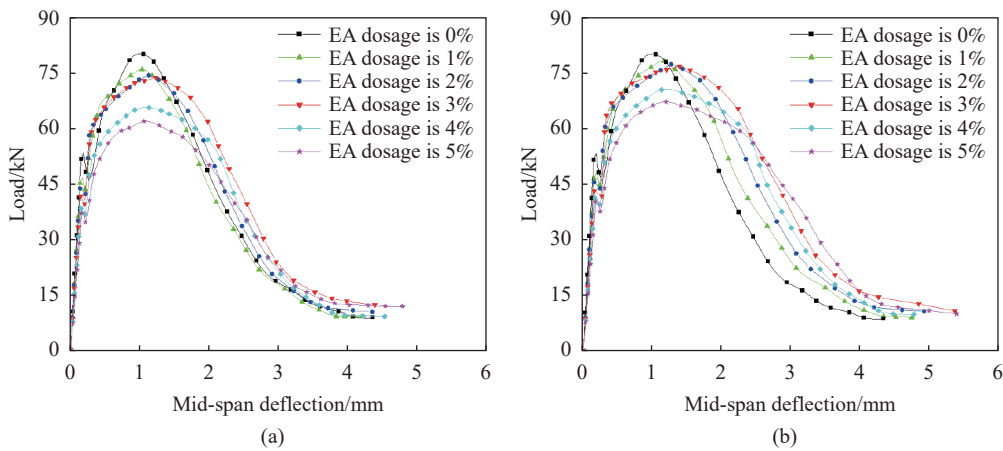


图 5 EA-UHPC 的荷载-挠度曲线. (a) 掺入阳离子乳化沥青的 UHPC; (b) 掺入阴离子乳化沥青的 UHPC

Fig.5 Load-deflection curve of EA-UHPC: (a) UHPC blended with cationic emulsified asphalt; (b) UHPC blended with anionic emulsified asphalt

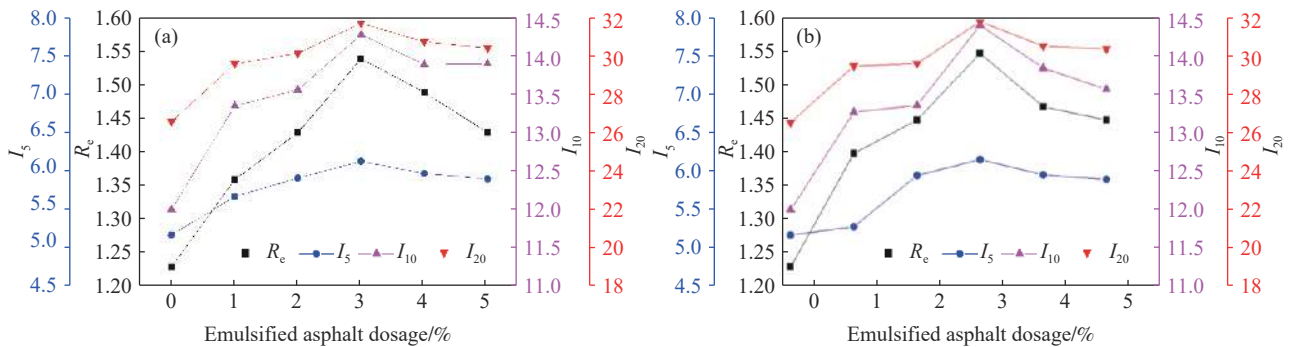


图 6 乳化沥青对 UHPC 弯曲韧性指数与弯曲韧性比的影响. (a) 掺入阳离子乳化沥青的 UHPC; (b) 掺入阴离子乳化沥青的 UHPC

Fig.6 Effect of emulsified asphalt on the flexural toughness index and flexural toughness ratio of UHPC: (a) UHPC blended with cationic emulsified asphalt; (b) UHPC blended with anionic emulsified asphalt

韧效果优于阳离子乳化沥青。

2.4 SEM 试验结果

基于上述试验结果, 阴离子乳化沥青掺量为 3% 时的 UHPC 综合性能最佳, 因此, 对比了基准配合比 UHPC 和阴离子乳化沥青掺量为 3% 的 UHPC 试样的微观形貌, 分别如图 7 和图 8 所示。

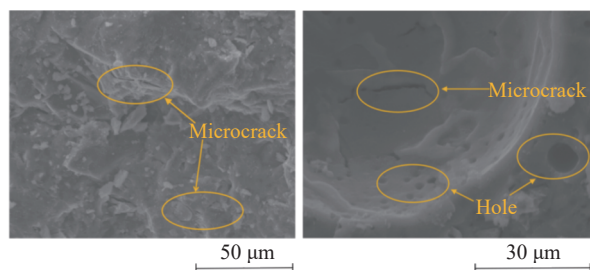


图 7 基准配合比 UHPC 的微观形貌

Fig.7 Microscopic morphology of the standard UHPC

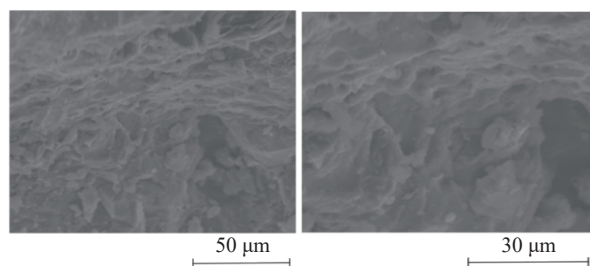


图 8 阴离子乳化沥青掺量为 3% 的 UHPC 的微观形貌

Fig.8 Microscopic morphology of UHPC with 3% anionic emulsified asphalt dosing

由图 7 可知, UHPC 试样表面存在少量且明显的微裂缝。这是因为在集料与水泥水化产物的界面过渡区富集了一定量的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 等物质, 形成了相对薄弱的区域^[28]。伴随着水泥水化及之后的干燥过程, 水泥浆体产生收缩, 而 UHPC 中的集料可认为不产生收缩, 两者收缩不同步导致缩裂的发生和原始微裂缝的生成。随着荷载的增加, 这些微裂缝易扩展成为宏观裂纹^[29-30], 进而导致 UHPC 试件易发生破坏。另一方面, UHPC 内部的孔隙在一定程度上降低了其与钢纤维接触的有效面积^[31], 钢纤维的增韧作用未充分发挥, 导致基准配合比 UHPC 试件的弯曲韧性表现相对较差, 更早发生弯曲破坏。

阴离子乳化沥青掺量为 3% 的 UHPC 试样表面的微观形貌并无明显的裂缝与孔洞。乳化沥青能填充原始微裂缝, 改善基体内部结构, 在一定程度上增加钢纤维与基体有效接触面积, 充分发挥钢纤维的增韧作用。另一方面, 乳化沥青的黏弹特性使得裂缝需要消耗更多能量才能扩展, 从而有

效减少微裂缝的产生与发展, 起到为水化产物失稳破坏提供缓冲的作用。

3 结论

通过研究掺量为 0% ~ 5% 范围内的阳离子乳化沥青与阴离子乳化沥青对 UHPC 的工作性能、力学强度及弯曲韧性的影响, 得到以下结论:

(1) EA-UHPC 拌合物的扩展度均随乳化沥青掺量的增加而逐渐降低, 当乳化沥青掺量大于 3% 时, 扩展度不满足规范要求。对于同一掺量的乳化沥青, 阴离子乳化沥青 UHPC 的工作性能优于阳离子乳化沥青 UHPC。

(2) 随着乳化沥青掺量的增加, 不同类型 EA-UHPC 的力学强度均出现一定程度的降低。其中阴离子乳化沥青 UHPC 的力学强度降幅更小, 因为阴离子乳化沥青对水泥水化反应的影响程度更小, 有利于 EA-UHPC 更快形成强度。

(3) 阴离子乳化沥青 UHPC 的弯曲韧性优于阳离子乳化沥青 UHPC, 在乳化沥青掺量为 3% 时 EA-UHPC 的弯曲韧性最佳。综合考虑力学性能及工作性能, UHPC 中推荐使用阴离子乳化沥青, 且最佳掺量为 3%。

(4) 乳化沥青能填充于集料与水泥水化产物间的界面过渡区, 减少缩裂的发生和原始微裂缝的生成。同时, 乳化沥青的黏弹特性在 UHPC 中起到延缓微裂缝产生与发展的作用。

参 考 文 献

- [1] Cao J H, Fan W, Li L F, et al. Research and application of UHPC-based high performance bridge structures. *J Hunan Univ Nat Sci*, 2022, 49(11): 1
(曹君辉, 樊伟, 李立峰等. 基于 UHPC 的高性能桥梁结构研究与应用. 湖南大学学报(自然科学版), 2022, 49(11): 1)
- [2] Li Y, Zhang G Z, Yang J, et al. A review on damage mechanism of ultra-high performance concrete under loading and erosion. *Mater Today Commun*, 2023, 35 106258
- [3] Chen C C, Wu Z M, Hu X, et al. Influence of steel fiber shape and curing system on strength and toughness of UHPC. *Mater Rep*, 2024, 38(15): 23030088
(陈聪聪, 吴泽媚, 胡翔, 等. 钢纤维形状和养护制度对超高性能混凝土强度及韧性的影响. 材料导报, 2024, 38(15): 23030088)
- [4] Yu Z H, Wu L S, Zhang C, et al. Effect of crushed granite, superabsorbent polymer, and expansive agent on the workability, compressive properties, and autogenous shrinkage of ultrahigh-performance concrete. *J Mater Civ Eng*, 2023, 35(4): 08223002
- [5] Chu H Y, Tang J H, Wang Q, et al. Feasibility of producing ultra-

- high performance concrete with high elastic modulus by nano alumina. *Mater Rep*, 2024, 38(5): 176
- (褚洪岩, 汤金辉, 王群, 等. 采用纳米氧化铝制备高弹性模量超高性能混凝土的可行性研究. 材料导报, 2024, 38(5): 176)
- [6] Wang Z J, Gao J, Wei Y F, et al. Mechanism and influence of asphalt emulsion on mechanical performance of cement mortar. *J Zhengzhou Univ Eng Sci*, 2013, 34(3): 81.
- (王振军, 高杰, 魏永峰, 等. 阳离子乳化沥青对硅酸盐水泥砂浆力学性能影响分析. 郑州大学学报(工学版), 2013, 34(3): 81)
- [7] Song H, Xie Y J, Long G C. Advances in cement emulsified asphalt mortar. *Mater Rev*, 2018, 32(5): 836
- (宋昊, 谢友均, 龙广成. 水泥乳化沥青砂浆研究进展. 材料导报, 2018, 32(5): 836)
- [8] Zhang M L, Jing Y F, Yang Y, et al. The influence of emulsified asphalt on mechanical properties of self-compacting concrete. *Constr Build Mater*, 2021, 297: 123842
- [9] Xie Y J, Zeng X H, Deng D H, et al. Mechanical characteristics of China railway track system (CRTS) I type slab tracks CA mortar under different strain rates. *J Build Mater*, 2010, 13(4): 483.
- (谢友均, 曾晓辉, 邓德华, 等. 铁路无砟轨道水泥乳化沥青砂浆力学性能. 建筑材料学报, 2010, 13(4): 483)
- [10] Zheng Y, Luo X D, Hou W J, et al. The study on performance of emulsified asphalt modified high strength mortar. *New Build Mater*, 2017, 44(5): 53
- (郑洋, 罗旭东, 侯伟建, 等. 乳化沥青改性高强砂浆性能研究. 新型建筑材料, 2017, 44(5): 53)
- [11] Liu J, Zheng X, Li T, et al. Mechanical properties and micromorphology of redispersible emulsified asphalt powder modified cement mortar. *Chem Ind Eng Prog*, 2022, 41(4): 2015
- (刘竞, 郑新国, 李铁军, 等. 可再分散乳化沥青粉末改性水泥砂浆的力学性能和微观形貌. 化工进展, 2022, 41(4): 2015)
- [12] Yang J B, Yan P Y, Kong X M, et al. Study on hardening mechanism of cement asphalt cementitious materials. *Sci Sin Technol*, 2010, 40(8): 959
- (杨进波, 阎培渝, 孔祥明, 等. 水泥沥青胶凝材料的硬化机理研究. 中国科学: 技术科学, 2010, 40(8): 959)
- [13] Hu G H, Yang Q, Qiu X, et al. Assessment of interaction behaviors of cement-emulsified asphalt based on micro-morphological and macro-rheological approaches. *Materials*, 2022, 15(3): 1070
- [14] Ministry of Housing and Urban-Rural Development, People's Republic of China. T/CECS 864—2021 *Standard for Test Method of Ultra-High Performance Concrete*. Beijing: China Architecture & Building Press, 2021
- (中国工程建设标准化协会标准. T/CECS 864—2021 超高性能混凝土试验方法标准. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021)
- [15] China Association for Engineering Construction Standardization, People's Republic of China. T/CECS 10107—2020 *Technical Requirements for Ultra High Performance Concrete*. Beijing: China Quality Inspection Press, 2020
- (中国工程建设标准化协会. T/CECS 10107—2020 超高性能混凝土(UHPC)技术要求. 北京: 中国质检出版社, 2020)
- [16] Zhu X B, Hong J X, Li W. Adsorption behaviors of superplasticizer and emulsified asphalt in cement-asphalt mortar. *J Harbin Inst Technol*, 2018, 50(9): 55
- (朱晓斌, 洪锦祥, 李炜. 水泥沥青浆体中减水剂与乳化沥青的竞争吸附行为. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50(9): 55)
- [17] Li Y L, Ouyang J, Wang S S, et al. Research on the demulsification process of cement asphalt mortar mixture-emulsified asphalt. *J Harbin Eng Univ*, 2015, 36(7): 997
- (李云良, 欧阳剑, 王山山, 等. 水泥沥青复合砂浆拌合物乳化沥青破乳过程研究. 哈尔滨工程大学学报, 2015, 36(7): 997)
- [18] Huang C L, Cheng Z R, Zhao J H, et al. The Influence of Water Reducing Agents on Early Hydration Property of Ferrite Aluminate Cement Paste. *Crystals*, 2021, 11(7): 731
- [19] Li W. *Investigation of the Interaction between Cement and Asphalt Emulsion and Its Mechanism* [Dissertation]. Nanjing: Southeast University, 2018
- (李炜. 水泥-乳化沥青交互作用及其机理研究[学位论文]. 南京: 东南大学, 2018)
- [20] Zhu W Z, Zhao H Y, Li G, et al. Influence of SBR on viscosity of cement emulsified asphalt mortar and mechanical properties of mortar. *J Highw Transp Res Dev*, 2023, 40(8): 29
- (朱文正, 赵红艳, 李刚, 等. 丁苯橡胶对水泥乳化沥青胶浆黏度及砂浆力学性能影响. 公路交通科技, 2023, 40(8): 29)
- [21] Feng Q, Mao Y H, Peng Z G, et al. Preparation and properties of low-temperature early strength material for nano-C-S-H gel seed. *Arab J Sci Eng*, 2022, 47(5): 5567
- [22] Li Z G, Zhang H, Wang R. Influence of steel fiber distribution on splitting damage and transport properties of ultra-high performance concrete. *Cem Concr Compos*, 2022, 126: 104373
- [23] Zhang P P, Hou Y T, Niu K M, et al. Effects of anionic emulsifiers and emulsified asphalt on hydration and microstructure of cement. *Materials*, 2023, 17(1): 36
- [24] Sun H D, Ding Y L, Jiang P, et al. Study on the interaction mechanism in the hardening process of cement-asphalt mortar. *Constr Build Mater*, 2019, 227: 116663
- [25] American Society for Testing and Materials. ASTM C1018 *Standard Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading)*. West Conshohocken: ASTM Committee C-9 on Concrete and Concrete Aggregates, 1997
- [26] Japan Society of Civil Engineers. JSCE-SF4 *Method of Test for Flexural Strength and Flexural Toughness of Fiber Reinforced Concrete*. Tokyo: Civil Engineering and Informatics Committee, 1984
- [27] Lin Y Q. *Influence of Hybrid Fibers on Mechanical Properties and*

- Strengthening and Toughening of UHPC* [Dissertation]. Mianyang : Southwest University of Science and Technology, 2022
(林亚强. 混杂纤维对 UHPC 力学性能影响及增强增韧研究[学位论文]. 绵阳: 西南科技大学, 2022)
- [28] Wang A Q, Zhang C Z. Formation mechanism and improvement way of interface zone between cement stone and aggregate. *China Concr Cem Prod*, 1994(5): 18
(王爱勤, 张承志. 水泥石-集料界面过渡区的形成机理及改善途径. 混凝土与水泥制品, 1994(5): 18)
- [29] Lim I, Sawab J, Wang J J, et al. Characterization of ultrahigh-performance concrete materials for application in modular construction. *J Mater Civ Eng*, 2021, 33(5): 04021087
- [30] Zhang D X, Jiang X M. Study on constrained shrinkage and crack resistance of high workability and high strength lightweight aggregate concrete. *J China Railw Soc*, 2021, 43(5): 190
(张登祥, 蒋晓明. 大流动性高强轻集料混凝土约束收缩及抗裂性能研究. 铁道学报, 2021, 43(5): 190)
- [31] Su Y H, Luo B, Luo Z D, et al. Effect of accelerators on the workability, strength, and microstructure of ultra-high-performance concrete. *Materials*, 2021, 15(1): 159