

高韧性长寿命水工混凝土的制备及工程应用探索

黄勇¹ 马敬² 斯毅^{1,2} 裴晓丹³ 马旭飞¹

1.新疆大学; 2.新疆兵团勘测设计院集团股份有限公司; 3.山西建筑工程集团有限公司

DOI: 10.32629/jpm.v7i7.8972

[摘要] 针对严寒地区水工建筑物冻融剥蚀、开裂等病害,以塔克拉玛干沙漠风积沙为细骨料,掺入硅灰、减水剂、消泡剂与钢纤维—玄武岩混杂纤维,制备高韧性长寿命水工混凝土,并研究其力学与抗冻性能。结果表明:水胶比 0.23、砂胶比 0.91、硅灰掺量 10%、减水剂掺量 2.0%、消泡剂掺量 0.28%、钢纤维掺量 2.5%、玄武岩纤维掺量 1.5%时混凝土综合性能最优;蒸汽养护 7 d 抗压强度达 121.6 MPa、抗折强度达 22.5 MPa,仅比石英砂混凝土低约 5%;经 500 次冻融循环后质量损失率仅 0.78%、相对动弹模量保持 99.2%,抗冻等级大于 F500。单方造价较河砂方案降低约 500 元,可为严寒地区水工建筑物长寿命设计提供参考。

[关键词] 水工混凝土; 风积沙; 混杂纤维; 配合比优化; 力学性能; 抗冻性能

[中图分类号] TV431

[文献标志码] A

Preparation and Engineering Application Exploration of High-Rigidity Long-Life Hydraulic Concrete

Huang Yong¹ Ma Jing² Si Yi^{1,2} Pei Xiaodan³ Ma Xufei¹

1.Xinjiang University; 2.Xinjiang Production and Construction Corps Survey and Design Institute Group Co., Ltd.;

3.Shanxi Construction Engineering Group Co., Ltd.

[Abstract] To address issues such as freeze-thaw erosion and cracking in hydraulic structures in severe cold regions, this study prepares high-rigidity long-life hydraulic concrete using Taklamakan Desert aeolian sand as fine aggregate, incorporating silica fume, water-reducing agent, defoaming agent, and steel fiber - basalt hybrid fibers, and investigates its mechanical properties and frost resistance. The results indicate that the optimal comprehensive performance of the concrete is achieved at the following parameters: water-to-cement ratio of 0.23, sand-to-cement ratio of 0.91, silica fume dosage of 10%, water-reducing agent dosage of 2.0%, defoaming agent dosage of 0.28%, steel fiber dosage of 2.5%, and basalt fiber dosage of 1.5%; after 7 days of steam curing, the compressive strength reaches 121.6 MPa and the flexural strength reaches 22.5 MPa, which is

only approximately 5% lower than that of quartz sand concrete; after 500 freeze–thaw cycles, the mass loss rate is merely 0.78%, the relative modulus of elasticity remains at 99.2%, and the frost resistance grade exceeds F500. The unit cost is reduced by approximately 500 yuan compared with the river sand–based scheme, providing a reference for the long–life design of hydraulic structures in severe cold regions.

[Key words] hydraulic concrete; aeolian sand; hybrid fibers; mix proportion optimization; mechanical properties; frost resistance

引言

我国西北内陆干旱区水资源时空分布极不均衡，大坝、溢洪道、水闸、渡槽与渠道衬砌等水工建筑物是调控水资源、保障灌溉与供水的工程基础。新疆等西北省区冬季严寒漫长，极端最低气温可达-30℃以下，年冻融循环次数多、昼夜温差大，处于水位变动区与泄流部位的水工混凝土长期遭受冻融循环、盐渍侵蚀与风沙水流冲刷磨损的耦合作用，冻胀开裂、表层剥蚀、钢筋锈蚀等病害十分普遍^[1-2]。冻融破坏已成为制约严寒地区水工混凝土结构服役寿命的首要因素，发展兼具高韧性、高耐久性的长寿命水工混凝土具有重要的工程意义。

普通水工混凝土强度等级偏低、脆性大、抗裂能力不足，在冻融与荷载反复作用下极易开裂，裂缝扩展又加速水分与侵蚀介质侵入，形成“开裂—侵蚀—再开裂”的恶性循环。超高性能混凝土（UHPC）通过最紧密堆积、低水胶比与纤维增韧等技术途径，可获得超过 120 MPa 的抗压强度以及优异的韧性与耐久性，为解决上述问题提供了材料基础^[3-4]。但传统 UHPC 多以石英砂为骨料，价格高，河砂资源又日趋枯竭，西北地区长

距离调运骨料进一步推高造价，限制了其在水利工程中的规模化应用。

我国沙漠总面积约 70 万 km²，南疆塔克拉玛干沙漠风积沙储量巨大、就地可取。已有研究表明，风积沙混凝土存在需水量大、含气量高、施工和易性差等技术难点^[5]，需借助高效减水剂、硅灰与消泡剂等材料加以解决；以风积沙配制超高性能混凝土已初步显示出可行性^[6]，而将其用于严寒地区水工混凝土的系统性研究仍较缺乏^[7]。鉴于此，以 P·O 42.5 水泥、硅灰、塔克拉玛干沙漠风积沙、钢纤维与玄武岩纤维为原料，按照“低水胶比+超细粉体填充+混杂纤维增韧”的技术路线制备高韧性长寿命水工混凝土，系统研究其配合比、力学性能与抗冻性能，并结合工程应用与造价分析探讨其推广前景。

1 试验原材料与试验方案

1.1 试验原材料

（1）水泥。选用新疆青松水泥厂生产的 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥，主要物理性能见表 1，安定性合格；化学成分以 CaO（53.26%）、SiO₂（25.12%）、Al₂O₃（9.72%）为主。

表 1 水泥的主要物理性能

比表面积/（m ² /kg）	初凝/min	终凝/min	3 d 抗折/MPa	28 d 抗折/MPa	3 d 抗压/MPa	28 d 抗压/MPa	安定性
362.2	164	247	5.7	7.2	28.2	43.6	合格

（2）硅灰。选用和田地区天山水泥厂生产的硅粉，平均密度 2.25 g/cm³，比表面积 21 m²/g，SiO₂ 含量 92.2%。硅灰属高活性火山灰质材料，其超细球形颗粒既可填充水泥石孔隙，又能通过火山灰反应生成 C-S-H 凝胶，改善骨料—浆体界面过渡区，提高混凝土密实度与强度。

（3）风积沙。产自塔克拉玛干沙漠南缘和田地区，天然

含水率 0.03%。筛分结果表明，风积沙粒径集中于 0.075~0.3 mm（约占 77%），细度模数 MX=0.9，属特细砂；不均匀系数 Cu=4、曲率系数 Cc=1.44，为级配不良的匀粒砂。矿物组成以石英（49.63%）、钠长石（31.36%）、正长石（8.76%）为主；化学组成见表 2，SiO₂ 含量 74.45%。易溶盐试验表明，其总盐含量仅 0.828 mg/g、Cl⁻ 含量 0.153 mg/g，含盐量低，满足水工

混凝土细骨料要求。

表2 风积沙的主要化学组成 (wt. %)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O
74.45	12.52	3.17	2.32	1.57	2.86	2.44

(4) 纤维。钢纤维选用直径 0.22 mm、长度 12~14 mm、抗拉强度 2 850 MPa 的镀铜钢纤维；玄武岩纤维选用 TLB 型连续玄武岩纤维，拉伸强度 2 500~3 500 MPa、弹性模量 90~110 GPa、伸长率不大于 3.2%、熔点 1 600 ℃，二者按不同尺度协同阻裂。

(5) 外加剂。选用聚羧酸高效减水剂，固含量 30%、减水率 30%；ZW-696 型混凝土消泡剂，非离子型、pH 值 6~8，用于降低拌合物含气量、消除有害大气泡。

(6) 拌合水。采用自来水，各项指标满足混凝土拌合用水标准。

1.2 配合比设计

以最大密度与最低孔隙率为目标，按照低水胶比、超细粉体填充与纤维增韧相结合的原则设计配合比^[3-4]。CHU 等^[6]对风积沙超高性能混凝土的研究结果表明：水胶比在 0.19~0.27 间较为理想，水胶比 0.21 时混凝土 28 d 抗压强度达 113.6 MPa、

扩展度 292 mm；水胶比过低，拌合物黏稠、难以密实成型，成型面可见细微裂缝；水胶比过高，则浆体富余、孔隙率增大、强度下降，因此最终确定合理范围为 0.21~0.23。参照陈宝春等^[4]提出的掺量确定方法，砂胶比过大或过小均不利于工作性与强度，确定合理范围为 0.9~1.1，减水剂掺量确定为胶凝材料质量的 2.0%。董瑞鑫等^[8]研究表明，含气量与气泡参数对风积沙混凝土强度有显著影响；试验中消泡剂掺量 0.3% 时，拌合物含气量由 4.2% 降至 2.4%、28 d 抗压强度提高 10.5%，确定合理掺量为 0.2%~0.3%。吴俊臣等^[5]指出，风积沙颗粒细小、需水量大，须借助矿物掺合料改善浆体工作性，故硅灰掺量 8%~10% 时可兼顾流动性与强度。钢纤维、玄武岩纤维掺量分别以 2.0%~2.5%、1.0%~1.5% 为宜^[3]。

在此基础上，经正交试验综合确定最优掺量组合为：钢纤维掺量 2.5%、玄武岩纤维掺量 1.5%（均按占混凝土拌合物总质量计）、硅灰掺量 10%、消泡剂掺量 0.28%。确定试验配合比见表 3（水胶比 0.23、砂胶比 0.91），并以 ISO 标准石英砂等质量替代风积沙设置对比组。编号中 F 表示风积沙、S 表示石英砂、B 表示标准养护、Z 表示蒸汽养护。

表3 试验配合比 (kg/m³)

编号	风积沙	石英砂	水泥	硅灰	水	减水剂	消泡剂	钢纤维	玄武岩纤维
F-B	992	—	992	99.2	251	21.8	3.06	60	36
F-Z	992	—	992	99.2	251	21.8	3.06	60	36
S-B	—	992	992	99.2	251	21.8	3.06	60	36
S-Z	—	992	992	99.2	251	21.8	3.06	60	36

1.3 试件制备与试验方法

试件制备时，先将水泥与硅灰预混 15 min，再将减水剂、消泡剂溶于拌合水后缓慢倒入搅拌机搅拌 3~4 min，随后加入风积沙搅拌 3~5 min，最后将纤维均匀撒入搅拌 3 min；拌合物经流动性测试后装模，置于振动台振实 30~60 s 成型。试件采用两种养护制度：标准养护为温度 (20±2) ℃、相对湿度大于 95% 条件下养护至规定龄期；蒸汽养护为标准养护 48 h 拆模后，于 70 ℃ 下蒸养 48 h（升降温速率不大于 15 ℃/h），再转入标准养护至规定龄期。

抗压强度试验采用 100 mm×100 mm×100 mm 立方体试件，

抗折强度试验采用 150 mm×150 mm×550 mm 棱柱体试件，参照《超高性能混凝土试验方法标准》进行。抗冻性能试验参照 GB/T 50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》中的快冻法^[9]进行，试件尺寸 100 mm×100 mm×400 mm，冻融循环 500 次，每 25 次循环测定一次试件质量与横向基频，计算质量损失率与相对动弹模量；当相对动弹模量低于 60% 或质量损失率大于 5% 时，判定试件冻融破坏并终止试验。

2 力学性能试验

2.1 试验结果

各组试件 7 d、28 d、56 d 抗压与抗折强度试验结果见表

4, 强度发展规律如图 1、图 2 所示。

表 4 混凝土力学性能试验结果 (MPa)

编号	抗压强度/MPa			抗折强度/MPa		
	7 d	28 d	56 d	7 d	28 d	56 d
F-B	78.5	101.6	109.2	11.8	14.5	17.2
F-Z	121.6	121.8	120.4	22.5	22.5	22.1
S-B	82.4	109.4	115.8	12.1	15.0	17.8
S-Z	128.4	128.6	127.5	23.7	23.8	23.5

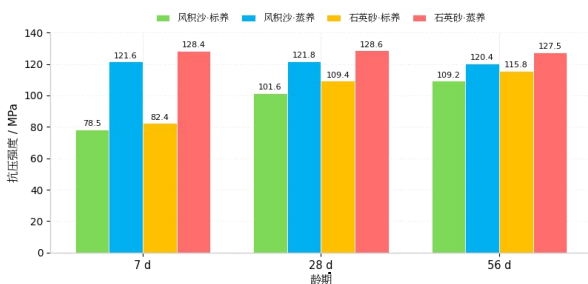


图 1 不同养护制度下混凝土抗压强度

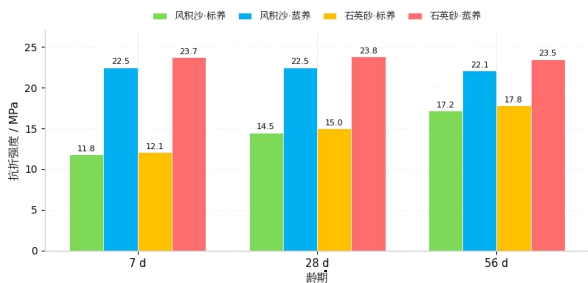


图 2 不同养护制度下混凝土抗折强度

2.2 结果分析

(1) 养护制度的影响。蒸汽养护条件下, 风积沙混凝土 7 d 抗压强度即达 121.6 MPa、抗折强度 22.5 MPa, 28 d、56 d 强度与 7 d 基本持平且略有回落 (56 d 抗压 120.4 MPa、抗折 22.1 MPa)。其原因是蒸汽养护显著加快了胶凝材料水化速率, 7 d 内强度即基本形成, 而在高度致密的内部结构中, 后期新生成的水化产物反而可能诱发微小裂缝, 致使强度略有下降。标准养护条件下混凝土强度增长缓慢, 标养 28 d 抗压强度仅为蒸养 7 d 的 83.6%、抗折强度仅为 64.4%, 至 56 d 分别达到 89.8% 与 76.4%。可见蒸汽养护可使混凝土早期强度快速形成, 尤其适用于预制构件与工期紧张的水利工程; 现场浇筑部位则应加强早期保温保湿养护。

(2) 骨料种类的影响。蒸汽养护 7 d, 风积沙混凝土抗压、抗折强度分别为 121.6 MPa 与 22.5 MPa, 仅比石英砂混凝土 (128.4 MPa、23.7 MPa) 低 5.3% 与 5.1%; 标准养护 56 d, 二者抗压强度分别为 109.2 MPa 与 115.8 MPa, 差距亦仅为 5.7%。风积沙颗粒圆整、粒径偏细且级配不良, 对强度略有不利, 但在低水胶比、硅灰微填充与消泡剂密实的共同作用下得到有效弥补。表明以风积沙完全替代石英砂配制高性能水工混凝土在力学性能上完全可行。

(3) 混杂纤维的增韧作用。最优配合比下蒸养试件折压比达 18.5% (22.5/121.6), 远高于普通水工混凝土 7%~10% 的水平, 呈现典型的高韧性特征。文献研究表明, 单掺钢纤维可显著提高超高性能混凝土的抗压与抗折强度, 单掺玄武岩纤维对基体强度与抗裂性能亦有明显改善, 且钢纤维—玄武岩纤维混杂掺入的增强增韧效果优于同掺量单一纤维^[10-11]。其机理在于: 玄武岩纤维直径细、数量多, 可在细观尺度抑制微裂缝的萌生与扩展; 钢纤维弹性模量与抗拉强度高, 可在宏观尺度桥接裂缝、传递应力, 二者混杂实现了“细观—宏观”多尺度协同阻裂, 使混凝土由脆性材料转变为韧性材料, 可有效抑制水工建筑物在冻融与荷载作用下的裂缝扩展。

(4) 工作性能分析。最优配合比下, 风积沙混凝土拌合物扩展度为 280~300 mm, 呈自流平、自密实状态, 黏聚性与保水性良好, 无分层离析与泌水现象, 可满足水工混凝土泵送浇筑与薄壁构件成型的施工要求。试验表明, 消泡剂掺量对扩展度影响显著: 掺量由 0 增至 0.3%, 扩展度由 282 mm 增大至 367 mm; 钢纤维与玄武岩纤维对扩展度有一定削弱作用, 但混杂掺量控制在 4% 以内时, 拌合物仍可保持良好的自流密实能力。风积沙颗粒圆整、需水量偏大, 需依靠高效减水剂与硅灰的协同作用, 方能在低水胶比下获得满意的工作性能。

3 抗冻性能试验

3.1 试验结果

冻融循环试验结果如图 3 所示。经 500 次冻融循环后, 风积沙混凝土 (F-Z) 质量损失率仅 0.78%、相对动弹模量仍保持 99.2%; 石英砂混凝土 (S-Z) 质量损失率 1.41%、相对动弹模量 97.2%。两组试件的质量损失率与相对动弹模量均远未达到

5%与 60%的冻融破坏临界值，参照《活性粉末混凝土》标准，其抗冻等级大于 F500。

值得注意的是，冻融初期（100 次循环以内）风积沙混凝土质量损失率为负值（50 次循环时为-0.51%），相对动弹模量升至 101.2%，即试件质量与动弹模量不降反升。这是因为混凝土

土水胶比低、水泥颗粒水化速率缓慢，养护结束后仍有部分未水化颗粒在冻融循环初期的饱水环境中继续水化，生成的水化产物进一步填充孔隙，使结构更趋密实。100 次循环后，质量损失率随冻融次数缓慢增加，但增长速率明显低于石英砂混凝土，表现出更优的抗冻稳定性^[12-13]。

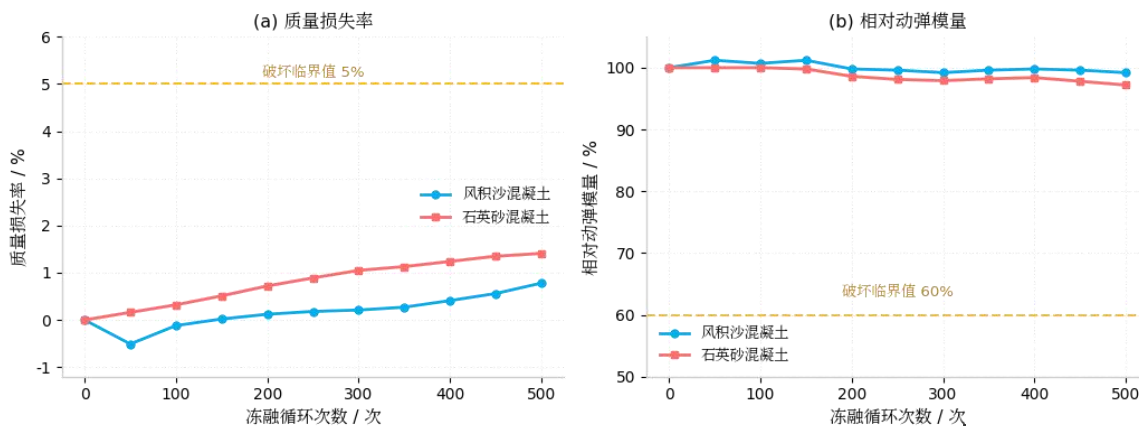


图3 冻融循环试验结果

3.2 抗冻机理分析

混凝土冻融破坏的本质是孔隙水结冰产生约 9%的体积膨胀，并由此产生冻结膨胀压、渗透压与结晶压力，当内应力超过基体抗拉强度时即引发开裂与表层剥蚀^[14-15]。本混凝土优异的抗冻性能来源于以下几方面的协同作用：其一，水胶比仅 0.23，拌合水几乎全部参与胶凝材料水化，可冻结的自由水极少；其二，硅灰等超细颗粒按最紧密堆积原理填充内部微孔隙，混凝土结构高度密实，水分难以侵入与迁移；其三，消泡剂将含气量降至 2.4%左右并消除大气泡，减少了自由水储存空间与受力薄弱区；其四，混杂纤维显著提高了基体抗拉强度与变形能力，少量自由水结冰产生的拉应力不足以使基体开裂^[16]。

新疆严寒地区水工建筑物水位变动区混凝土的抗冻等级要求一般为 F200~F300，普通水工混凝土往往难以长期满足，而本混凝土抗冻等级大于 F500，且经历 500 次冻融循环后性能几乎无衰减。按冻融损伤速率推算，其抗冻安全储备远高于普通水工混凝土，可显著延长水工建筑物的服役寿命，体现出“长寿命”的技术特征。

从工程适用性看，严寒地区水位变动区的闸墩、护坡、渡槽与渠道衬砌，设计抗冻等级一般为 F200~F300，普通水工混

凝土在强冻融环境下运行十余年即可能出现明显剥蚀；本混凝土经 500 次冻融循环后相对动弹模量仍达 99.2%、质量损失率不足 1%，抗冻安全储备充足，可满足水工建筑物设计使用年限内长期服役的要求，为建设“百年工程”提供了可靠的材料保障。

4 主要结论

(1) 以塔克拉玛干沙漠风积沙为细骨料，采用“低水胶比+硅灰填充+消泡密实+混杂纤维增韧”的技术路线，可制备出高韧性长寿命水工混凝土。最优配合比为：水胶比 0.23、砂胶比 0.91、硅灰掺量 10%、减水剂掺量 2.0%、消泡剂掺量 0.28%、钢纤维掺量 2.5%、玄武岩纤维掺量 1.5%。

(2) 蒸汽养护 7 d 混凝土强度即基本形成，抗压强度 121.6 MPa、抗折强度 22.5 MPa，仅比同配比石英砂混凝土低约 5%；混杂纤维使混凝土折压比达 18.5%，实现了由脆性向韧性的转变。风积沙完全可替代石英砂配制高性能水工混凝土。

(3) 经 500 次冻融循环后，风积沙混凝土质量损失率仅 0.78%、相对动弹模量保持 99.2%，抗冻等级大于 F500，远优于普通水工混凝土，可满足严寒地区水位变动区抗冰冻设计要求，具备长寿命服役能力。

(4) 经济与工程分析表明, 风积沙可就地取材、骨料成本几乎为零, 单方混凝土造价约 1 407 元/ m^3 , 较河砂 (1 934 元/ m^3)、碎石砂 (1 967 元/ m^3) 方案降低约 500 元/ m^3 , 在严寒地区渠道防渗衬砌、水闸与渡槽修补、坝面防护、泄洪消能及国防应急抢修等水工场景中具有广阔的应用前景, 同时可消纳风积沙资源、缓解河砂供需矛盾, 环境与经济效益显著。

(5) 后续研究建议补充抗渗、抗冲磨、干燥收缩及野外长期暴露试验, 进一步验证其在复杂水工环境下的长期服役性能, 推动其在严寒地区水利工程中的规模化应用。

[参考文献]

- [1] 苏怀智, 谢威. 寒区水工混凝土冻融损伤及其防控研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(4): 1053–1071.
- [2] WU Q, ZHANG K, YU Y, et al. Exploring the abrasion resistance and mechanisms of aeolian sand concrete subjected to wind-driven gravel in Gobi high-energy area[J]. Construction and Building Materials, 2025, 486: 141924.
- [3] RICHARD P, CHEYREZY M. Composition of reactive powder concretes[J]. Cement and Concrete Research, 1995, 25(7): 1501–1511.
- [4] 陈宝春, 季韬, 黄卿维, 等. 超高性能混凝土研究综述[J]. 建筑科学与工程学报, 2014, 31(3): 1–24.
- [5] 吴俊臣, 申向东, 董伟, 等. 风积沙水泥基混凝土的工程应用与耐久性能研究现状[J]. 硅酸盐通报, 2015, 34(10): 2845–2850.
- [6] CHU H, WANG F, WANG L, et al. Mechanical properties and environmental evaluation of ultra-high-performance concrete with aeolian sand[J]. Materials, 2020, 13(14): 3148.
- [7] LI Y, ZHANG H, CHEN S, et al. Multi-scale study on the durability degradation mechanism of aeolian sand concrete under freeze-thaw conditions[J]. Construction and Building Materials, 2022, 340: 127433.
- [8] 董瑞鑫, 申向东, 薛慧君, 等. 风积沙混凝土的气泡参数对其强度的影响[J]. 材料导报, 2022, 36(12): 105–109.
- [9] GB/T 50082—2009, 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [10] KHAN M, LAO J, AHMAD M R, et al. Influence of high temperatures on the mechanical and microstructural properties of hybrid steel-basalt fibers based ultra-high-performance concrete (UHPC)[J]. Construction and Building Materials, 2024, 411: 134387.
- [11] GONG Y, HUA Q, WU Z, et al. Effect of basalt/steel individual and hybrid fiber on mechanical properties and microstructure of UHPC[J]. Materials, 2024, 17(13): 3299.
- [12] DONG W, SHEN X D, XUE H J, et al. Research on the freeze-thaw cyclic test and damage model of aeolian sand lightweight aggregate concrete[J]. Construction and Building Materials, 2016, 123: 792–799.
- [13] BAI J, ZHAO Y, SHI J, et al. Damage degradation model of aeolian sand concrete under freeze-thaw cycles based on macro-microscopic perspective[J]. Construction and Building Materials, 2022, 327: 126885.
- [14] DONG W, WANG J. Deterioration law and life prediction of aeolian sand concrete under sulfate freeze-thaw cycles[J]. Construction and Building Materials, 2024, 411: 134593.
- [15] 李玉根, 张慧梅, 陈少杰, 等. 风积沙混凝土盐冻多尺度劣化机制[J]. 复合材料学报, 2023, 40(4): 2331–2342.
- [16] YE Y, XIE T, GUO T, et al. Durability of basalt fiber-reinforced aeolian sand concrete in extreme environments: Resistance to wind-sand erosion and salt freeze-thaw cycles[J]. Construction and Building Materials, 2024, 457: 139264.