

改性橡胶透水混凝土老化寿命精准预测模型构建*

Construction of Accurate Prediction Model of Aging Life of Modified Rubber Pervious Concrete

谢 李, 严超群

(杨凌职业技术学院, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: 为了提高改性橡胶透水混凝土老化寿命预测效果, 构建改性橡胶透水混凝土老化寿命精准预测模型, 制备不同改性剂含量的橡胶混凝土试件, 并进行老化温度循环实验。引入威布尔分布, 建立混凝土的密度函数与分布函数, 并构建改性橡胶透水混凝土修正 Coffin-Manson 老化寿命模型, 实现改性橡胶透水混凝土寿命预测。结果表明: 不含改性剂混凝土的质量损失最大, 而改性橡胶透水混凝土可以保持较高的有效孔隙率与相对动弹模量。通过该模型预测可知, 不含改性剂的混凝土老化寿命更短, 而 4% 改性剂的试件在冻融循环 2267.2 次后失效, 即该试件的老化寿命为 2267.2, 其老化寿命最高, 且该预测模型的预测可靠度高于 0.8, 可以精准预测老化寿命。

关键词: 改性橡胶; 透水混凝土; 老化寿命; 精准预测; 威布尔分布; 模型构建

中图分类号: TU528 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2024) 02-0011-06

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.02.003

XIE Li, YAN Chaoqun

(Yangling Vocational & Technical College, Yangling 712100, China)

Abstract: In order to improve the prediction effect of aging life of modified rubber pervious concrete, a precise prediction model of aging life of modified rubber pervious concrete was established. Rubber concrete specimens with different contents of modifiable agents were prepared, Aging temperature cycle experiments were carried out. Weibull distribution was introduced to construct density functions and distribution functions of concrete, and modified Coffin-Manson aging life model of modified rubber pervious concrete was constructed. The life prediction of modified rubber pervious concrete was realized. Experimental results show that the mass loss of concrete without modifier is the largest, while the modified rubber pervious concrete can maintain a higher effective porosity and relative dynamic modulus. It can be predicted by this model that the aging life of concrete without modifier is shorter, while the specimen with 4% modifier content fails after 2267.2 freeze-thaw cycles, that is, the aging life of this specimen is 2267.2, and its aging life is the highest. Moreover, the prediction reliability of this prediction model is higher than 0.8, which can accurately predict the aging life.

Keywords: modified rubber; pervious concrete; aging life; accurate prediction; weibull distribution; model building

0 引言

透水混凝土具有良好的透水性能, 相比传统水泥混凝土它可以有效改善地区生态环境, 把改性橡胶加入透水混凝土中, 制作改性橡胶透水混凝土具备良好的性能和应用前景^[1]。这种材料不仅能够满足透水混凝土透水、透气的使用要求, 而且能够使改性橡胶对水泥混凝土进行改性, 提高材料的韧性,

* 基金项目: 杨凌职业技术学院院内基金项目 (ZK21-32)。

作者简介: 谢李 (1982—), 男, 硕士, 副教授, 主要研究方向: 道路与桥梁工程技术、道路建筑材料等。

收稿日期: 2023-08-12

材料科学

因此是一种更加环境友好型的优秀材料^[2]。然而,受环境风化、恶劣天气等多种因素的影响^[3],改性橡胶透水混凝土寿命会严重劣化,因此,准确预测改性橡胶透水混凝土老化寿命具有重要意义^[4-5]。目前,已有较多学者对不同类型混凝土的老化寿命预测进行了研究,如陈梦成等^[6]研究了混凝土梁疲劳损伤演化和寿命预测模型,通过模拟混凝土材料的疲劳损伤变化,实现材料寿命预测,但该方法无法有效分析高温、低温对材料带来的影响,导致预测结果不够全面;王萧萧等^[7]研究了天然浮石混凝土冻融损伤及寿命预测模型,通过冻融损伤测试预测材料的使用寿命,但该方法并未精准预测出材料在老化过程中的相对动弹模量,且该方法仅适用于单一材料,无法应用至其他改性混凝土材料;路承功等^[8]研究了盐渍土环境中钢筋混凝土寿命预测,设定寿命预测条件为盐渍土环境,在该背景下,引入Wiener随机过程建模,并从宏观和微观角度进行混凝土寿命预测,但是该方法的使用范围较小,并且分析混凝土和钢筋两种寿命曲线,分析不够深入,导致预测可靠度相对较低。

针对上述方法存在的主要问题,为提高混凝土老化寿命预测效果,构建了一种改性橡胶透水混凝土老化寿命的精准预测模型,模型有效预测不同掺量改性橡胶透水混凝土老化寿命,提高预测可靠度,为建筑发展助力。

1 材料老化寿命预测模型建立

1.1 试验原材料及试验方法

(1) 原材料 与传统混凝土不同,透水混凝土属于骨架空隙结构,不仅需要材料具备较高的承载力,还需要具备较强的透水能力^[9-11],选取单一粒径的粗骨料作为透水混凝土材料,性能指标见表1;水泥选用吉林亚泰水泥公司生产的52.5级硅酸盐水泥,性能指标见表2;减水剂采用山东宏阳化工有限公司生产的萘系减水剂;拌和水为自来水;废橡胶粒径为2.0~3.35 mm,性能指标见表3;改性用外加掺合料选取乙烯/醋酸乙烯酯共聚物产生的可再分散性乳胶粉。

(2) 试件制备 制备水泥浆时需掌握好用量,水泥浆用量过大会导致透水混凝土孔隙率降低^[12],而水泥浆用量过小会导致材料强度下降。通过水泥

表 1 粗骨料性能指标
Table 1 Coarse aggregate performance index

材料粒径 /mm	表观密度 /(kg·m ⁻³)	堆积密度 /(kg·m ⁻³)	堆积孔隙率 /%	压碎值 /%	针片状含量 /%
9.5~13.2	2747	1460	46.9	13.4	5.4

表 2 水泥性能指标
Table 2 Cement performance index

水泥密度 /(g·cm ⁻³)	比表面积 /(m ² ·kg ⁻¹)	凝结时间 /min		抗压强度 /MPa		抗折强度 /MPa	
		初凝	终凝	3 d	28 d	3 d	28 d
3.16	385	91	145	39.2	62.2	7.1	9

表 3 试验用橡胶性能指标
Table 3 Experimental rubber performance index

加热减量 /%	灰分/%	密度 /(g·cm ⁻³)	拉伸强度 /MPa	拉伸伸长率 /%
0.5	7.5	1.14	15.8	500

裹石法制备透水混凝土,制备流程如图1所示,先向搅拌机中添加50%的水与减水剂并放入骨料充分搅拌,再放入水泥与掺合料拌匀,之后再添加剩余的水与减水剂,可有效保障水泥净浆包裹骨料,最终制备得到透水混凝土。将橡胶与乙烯/醋酸乙烯酯共聚物充分融合,制成改性剂,采用外掺方式添加不同掺量的改性剂对混凝土进行改性,改性剂掺量为水泥质量的2%、4%、6%,同时制备未改性的橡胶透水混凝土试件作为对照组。制备规格为100 mm×100 mm×100 mm的立方体试件,采用插捣成型,即分层浇筑、逐层插捣完成试件制备,具体试验分组和配合比见表4。

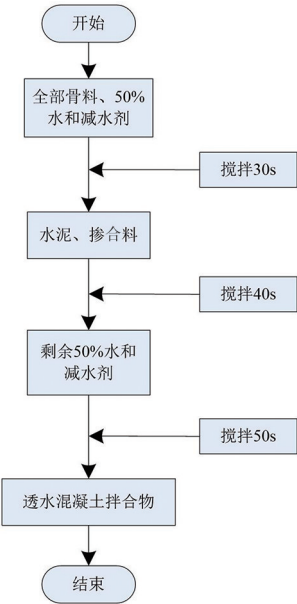


图 1 透水混凝土材料制备过程
Fig. 1 Pervious concrete material preparing process

表 4 改性橡胶透水混凝土配合比
Table 4 Modified rubber pervious concrete mixing ratio

编号	改性橡胶掺量/%	粗骨料/kg	水泥/kg	水/kg	减水剂/kg
A ₁	0	1502	480	145	3.85
A ₂	2	1502	470.4	145	3.85
A ₃	4	1502	460.8	145	3.85
A ₄	6	1502	451.2	145	3.85

1.2 试件老化寿命预测方法

(1) 试件老化温度循环实验通过老化温度循环试验模拟试件老化, 试验开始前试件需养护 28 d, 之后在水中浸泡 4 d, 再放入冻融机开始老化温度循环试验。冻结最低温度为 $(-20 \pm 2)^\circ\text{C}$, 融化最高温度为 $(4 \pm 2)^\circ\text{C}$, 冻融循环时间为 4 h 一次。根据试件老化情况, 采用老化寿命预测方法, 对试件寿命进行精准预测。

(2) 老化寿命精准预测模型通过两参数威布尔分布^[13-14]实现改性橡胶透水混凝土老化寿命参数预测。计算过程中, 需先验证改性橡胶透水混凝土失效循环次数, 即老化寿命是否服从威布尔分布函数, 同时对混凝土试件的形状参数与特征老化寿命的最佳线性无偏估计值进行计算, 以此构建改性橡胶透水混凝土修正 Coffin-Manson 老化寿命模型, 具体通过以下步骤实现:

威布尔分布验证^[15-16]: 分别通过式 (1)、式 (2) 计算威布尔分布的密度函数与分布函数:

$$f(n) = (m/\alpha) (t/\alpha)^{m-1} \exp[-(t/\alpha)^m] \quad (1)$$

$$F(n) = \int_0^t f(n) \, dn = 1 - \exp[-(t/\alpha)^m] \quad (2)$$

式中: t 为改性橡胶透水混凝土老化失效时的循环次数, 次; α 、 m 为该混凝土试件的特征寿命与形状参数。

修正 Coffin-Manson 模型: 式 (3) 表示改性橡胶透水混凝土在老化温度循环测试下的修正 Coffin-Manson 模型。在老化温度循环测试下, 修正 Coffin-Manson 模型^[17-18]可有效实现材料老化寿命精准预测, 通过式 (4) 可计算得到改性橡胶透水混凝土材料循环加速因子:

$$t = A f^{-\beta} \Delta T^{-\gamma} \exp[E/KT_{\max}] \quad (3)$$

$$A_{n-m} = t_n/t_m = (f_n/f_m)^{-\beta} (\Delta T_n/\Delta T_m)^{-\gamma} \exp[(E/K)(1/T_{\text{Hn}} - 1/T_{\text{Hm}})] \quad (4)$$

式中: f 为老化温度循环频率, 次; A 、 β 、 γ 为模型参数; ΔT 为温度变化区间; K 为玻尔兹曼常数; E 为材料激活能; A_{n-m} 为加速因子; t_n 、 t_m 为老化温度循

环测试的失效循环数, 次; T_n 、 T_m 为温度变化区间; f_n 、 f_m 为温度循环频率, 次; T_{Hn} 、 T_{Hm} 为老化温度循环过程中的最高温度。

由于式 (4) 中存在 β 、 γ 、 E 三个未知参数, 因此老化温度循环测试的加速因子则为确定三个参数值。

根据上述计算可知每组混凝土试件失效循环次数均服从威布尔分布函数。因此, 按照最佳线性无偏估计, 可计算得出混凝土试件的形状参数 m_i 与特征寿命 α_i , 具体为:

$$\begin{cases} \hat{h} = \sum_{k=1}^r D(r, r, k) \ln t_k \\ \hat{g} = \sum_{k=1}^r C(r, r, k) \ln t_k \\ \hat{\alpha}_i = e^{\hat{h}} \\ \hat{m}_i = 1/\hat{g} \end{cases} \quad (5)$$

此时, 可通过式 (6) 表示老化温度循环加速因子:

$$A_{n-m} = \hat{m}_i / \hat{\alpha}_i \quad (6)$$

式中: r 为样本数, 个, $k \leq r$; D 、 C 为无偏估计系数; $e^{\hat{h}}$ 、 $\hat{g}$ 为 h 、 g 的无偏估计值; t_k 为失效循环次数, 次; $\hat{\alpha}_i$ 、 $\hat{m}_i$ 为特征寿命与形状参数的无偏估计值。

将式 (6) 带入到式 (4) 中, 即可获取 β 、 γ 、 E 的估计值, 由此可计算得到不同改性橡胶透水混凝土在老化温度循环测试下的加速因子, 并按照加速因子推算混凝土的老化寿命。在老化温度循环过程中, 混凝土寿命服从威布尔分布函数, 其特征寿命 α_0 可通过无偏估计获取, 而试件的形状参数 m_0 的估计值则可通过 m_i 获取。此时, 在老化温度循环测试下, 寿命预测的可靠度函数如式 (7) 所示:

$$R(t) = \exp[-(t/\alpha_0)^{m_0}] \quad (7)$$

2 试验结果与分析

2.1 混凝土老化情况分析

分析不同改性橡胶透水混凝土试件在老化温度循环时的老化情况, 以获取试件的详细变化情况。

2.1.1 质量损失

老化温度循环过程中混凝土的质量损失, 如图 2 所示。随着老化温度循环次数的增加, 混凝土的质量损失率均逐渐增大, 当循环次数达 40 次左右时,

材料科学

混凝土的质量损失均逐渐趋于平稳状态，损失幅度不再出现大幅增高。对照组试件质量损失最高，最终质量损失率均达到 9% 以上。

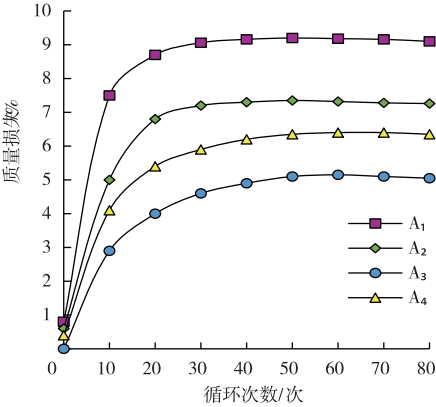


图 2 老化质量损失预测
Fig. 2 Prediction of aging quality loss

2.1.2 相对动弹模量

分析该组混凝土在老化温度循环中的相对动弹模量，如图 3 所示。相对动弹模量越低，说明试件的老化速度越快，随着老化温度循环次数的增加，混凝土的相对动弹模量逐渐下降。对照组混凝土的相对动弹模量下降幅度最大，由最初的 100% 下降至 20% 左右，而经改性后的混凝土相对动弹模量最低为 40% 左右，可以看出改性后混凝土可以有效维持较高的相对动弹模量。同时，对比不同改性剂掺量的混凝土，可以看出改性剂添加量为 4% 的混凝土相对动弹模量始终最高。

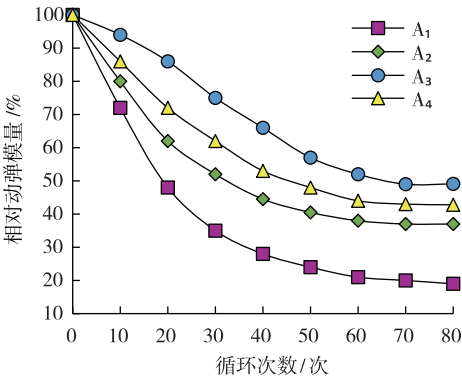


图 3 相对动弹模量分析
Fig. 3 Analysis of relative dynamic modulus

2.1.3 有效孔隙率

混凝土在老化温度循环环境中的有效孔隙率，如图 4 所示。随着老化温度循环次数增加，混凝土有

效孔隙率有所下降，这是由于经过长时间的老化温度循环会使得试件密度发生变化，导致有效孔隙率下降，混凝土逐渐老化。而不同试件的有效孔隙率下降幅度不同，对照组混凝土在老化温度循环测试开始前的有效孔隙率仅保持在 11.2% 以下，随着老化温度循环的进行该试件有效孔隙率大幅度下降至 10.2% 左右，在四种试件中处于最低水平。而经改性剂改性后的试件有效孔隙率始终较高，尤其是改性剂掺量为 4% 的混凝土的有效孔隙率未发生大幅度下降，因此该混凝土能保持较好的透水效果。

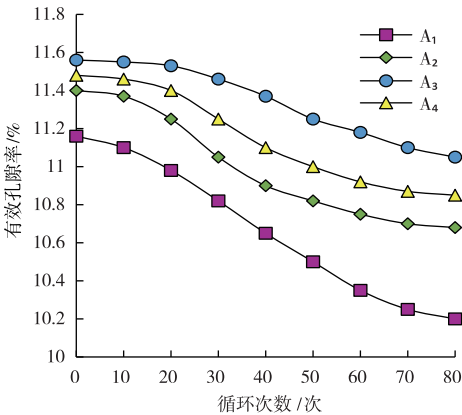


图 4 有效孔隙率分析
Fig. 4 Analysis of effective porosity

2.2 老化寿命预测

2.2.1 寿命预测

应用构建的预测模型，对混凝土试件在温度循环试验下的老化寿命进行预测，预测结果见表 5。对照组混凝土的加速因子与老化寿命相对较小，说明混凝土在老化温度循环次数较少时即完成了使用寿命；而改性后的混凝土均保持较大的加速因子与老化寿命，说明经改性后混凝土可以进行更多次的老化温度循环实验，使用寿命延长。改性剂掺量为 4% 的混凝土寿命最长。采用本文模型，精准获取混凝土的老化寿命。

表 5 老化寿命预测
Table 5 Prediction of aging life

编号	加速因子	老化寿命/次
A ₁	28.5	2065.5
A ₂	31.8	2143.4
A ₃	34.7	2267.2
A ₄	31.6	2175.9

2.2.2 预测可靠度

分析本文模型在老化温度循环下预测改性橡胶透水混凝土试件老化寿命的可靠度，结果如图 5 所

示。随着老化温度循环次数的增加, 本文模型预测得到的混凝土老化寿命结果可靠度出现小幅下降, 但混凝土的老化寿命预测可靠度均未低于 0.8, 说明本文模型在预测过程中可以保持较高的可靠度, 对混凝土结构可以实现高水平老化寿命预测。

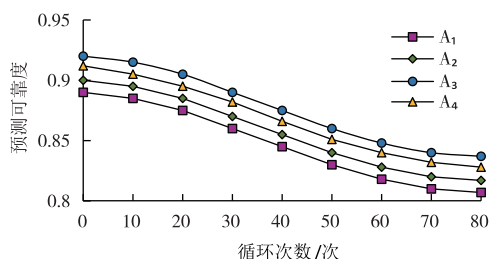


图 5 改性橡胶透水混凝土老化寿命的预测可靠度分析
Fig. 5 Analysis of modified rubber permeable concrete prediction reliability

3 讨论

混凝土材料在土木工程中起到重要作用, 因此, 针对混凝土的研究越来越多, 但目前更多的研究是如何改进混凝土材料, 关于混凝土老化寿命的分析相对较少, 导致其应用效果的评估不准确。基于此, 本文研究了改性橡胶透水混凝土老化寿命精准预测模型。该方法更为便捷, 且对混凝土寿命预测更为准确, 主要是设计了更准确的试件老化温度循环试验, 并且将威布尔分布和修正 Coffin-Manson 模型相结合, 构建了优化后的混凝土老化寿命预测方法, 可准确分析混凝土的有效孔隙率、老化质量损失和相对动弹模量, 且以可靠度为指标分析了改性橡胶透水混凝土老化寿命精准预测的可靠性, 可靠度在 0.8 以上, 具备了更高的预测可靠性, 即可为土木工程混凝土分析提供有效参考依据。

4 结论

研究得到以下主要结论:

(1) 随着老化温度循环次数的增加, 改性橡胶透水混凝土试件的质量损失率逐渐增大。当循环次数达 40 次左右, 混凝土的质量损失率趋于平稳, 损失幅度不再出现大幅增高。

(2) 随着老化温度循环次数的增加, 改性橡胶透水混凝土试件的相对动弹模量逐渐减小, 相对动弹模量较对照组下降至 40% 左右, 改性后混凝土可以维持较高的相对动弹模量, 其中改性剂添加量为

4% 的混凝土表现最佳。

(3) 随着老化温度循环次数的增加, 改性橡胶透水混凝土有效孔隙率逐渐下降。改性后混凝土有效孔隙率始终较高, 尤其是改性剂掺量为 4% 的混凝土有效孔隙率未发生大幅度下降。

(4) 随着老化温度循环次数的增加, 本文模型预测得到的混凝土老化寿命结果可靠度略微下降, 但混凝土的老化寿命预测可靠度均未低于 0.8, 说明本文模型在预测过程中可以保持较高的可靠度。未来可以此为基础, 继续优化预测模型, 从而预测更多材料的使用寿命, 扩大适用范围。

参考文献

- [1] 文江, 苏有文. 聚丙烯纤维橡胶混凝土的抗冻性能及损伤劣化模型 [J]. 新型建筑材料, 2022, 49 (3): 54-59.
- [2] 陈永锋, 袁松年, 任隽丰, 等. 橡胶颗粒对透水混凝土强度和透水性影响研究 [J]. 山西建筑, 2020, 46 (15): 3-5.
- [3] 杨冬鹏, 郭卫民, 王宝民. 基于 Weibull 模型的混凝土冻融损伤寿命预测及应用 [J]. 水利学报, 2022, 53 (8): 977-983.
- [4] 匡亚川, 陶莉, 贺宇豪. 锈蚀栓钉钢-混凝土组合梁的疲劳寿命预测模型 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2021, 52 (3): 770-778.
- [5] 薛刚, 孙立所, 刘佳香, 等. 橡胶混凝土弯曲疲劳性能研究 [J]. 长江科学院院报, 2021, 38 (11): 149-156.
- [6] 陈梦成, 温清清, 罗睿, 等. 地铁工程钢筋混凝土梁疲劳损伤演化及寿命预测模型研究 [J]. 铁道学报, 2021, 43 (1): 160-168.
- [7] 王萧萧, 刘畅, 尹立强, 等. 天然浮石混凝土冻融损伤及寿命预测模型 [J]. 硅酸盐通报, 2021, 40 (1): 98-105.
- [8] 路承功, 魏智强, 乔宏霞, 等. 盐渍土环境中钢筋混凝土基于 Wiener 随机过程寿命预测 [J]. 工程科学与技术, 2021, 53 (1): 113-121.
- [9] 王小莉, 彭肖阳, 刘湘楠, 等. 防振橡胶材料疲劳寿命可靠性分布模型研究 [J]. 机械强度, 2022, 44 (6): 1335-1342.
- [10] 张远庆, 凡艳丽, 卢军辉. 胶种对高速铁路橡胶垫板老化寿命的影响分析 [J]. 铁道建筑, 2021, 61 (11): 143-146.
- [11] 徐金花, 陈四利, 董冠男, 等. 基于神经网络的橡胶混凝土抗冻性预测 [J]. 沈阳工业大学学报, 2022, 44 (5): 590-594.
- [12] 申明昊, 张粉芹, 许浩然, 等. 基于体积法的不同目标孔隙率下透水混凝土试验研究 [J]. 混凝土, 2021, 17

材料科学

- (9): 140-144, 148.
- [13] 韩庆华, 王鑫, 芦燕, 等. 基于三参数威布尔分布模型的铸钢及对接焊缝腐蚀疲劳寿命评估方法 [J]. 建筑结构学报, 2021, 42 (2): 213-220+230.
- [14] 张愉, 何和平, 田叶. 基于同伦分析法的威布尔分布极大似然估计 [J]. 数学的实践与认识, 2022, 52 (11): 150-158.
- [15] BARBOSA L, GERKE K M, MUNKHOLM L J, et al. Discrete element modeling of aggregate shape and internal structure effects on Weibull distribution of tensile strength [J]. Soil and Tillage Research, 2022, 219 (14): 105341-105356.
- [16] SHAN J, YANG Z, KUANG X, et al. Comparison of seven Weibull distribution models for predicting relative hydraulic conductivity [J]. Water Resources Research, 2022, 58 (5): 1-19.
- [17] 陈克凡, 乔宏霞, 王鹏辉, 等. 温度循环退化模型的橡胶混凝土可靠寿命预估 [J]. 华中科技大学学报 (自然科学版), 2020, 48 (2): 42-46.
- [18] 肖来荣, 谭威, 刘黎明, 等. 激光增材制造 GH3536 合金的低周疲劳行为 [J]. 中国激光, 2021, 48 (22): 81-91.
- (上接第 5 页)
- Concrete Research, 2004, 34 (9): 1683-1696.
- [5] STANTON T E. Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate [J]. Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 1940, 66 (10): 1781-1811.
- [6] 郝挺宇, 冯乃谦. 快速检测骨料碱活性的研究 [J]. 混凝土与水泥制品, 2000, 1 (4): 11-14.
- [7] WIGUM B J, PEDERSEN L T, GRELL B. State-of-the art report: key parameters influencing the alkali aggregate reaction [R]. Sintef Building and Infrastructure, 2006.
- [8] KURODA T, INOUE S, YOSHINO A, et al. Effects of particle size, grading and content of reactive aggregate on ASR expansion of mortars subjected to autoclave method [C]// International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete. Beijing, 2004: 736-743.
- [9] FIGUEIRA R B, SOUSA R, COELHO L, et al. Alkali-Silica Reaction in concrete: mechanisms, mitigation and test methods [J]. Construction and Building Materials, 2019, 222 (20): 903-931.
- [10] THOMAS M. The effect of supplementary cementing materials on Alkali-Silica Reaction: A review [J]. Cement and Concrete Research, 2011, 41 (12): 1224-1231.
- [11] SHAFATIAN S, AKHAVAN A, MARAGHECHI H, et al. How does fly ash mitigate Alkali-Silica Reaction (ASR) in accelerated mortar bar test (ASTM C1567) [J]. Cement and Concrete Composites, 2013, 37 (1): 143-153.
- [12] RAJABIPOUR F, GIANNINI E, DUNANT C, et al. Alkali-Silica Reaction: Current understanding of the reaction mechanisms and the knowledge gaps [J]. Cement and Concrete Research, 2015, 76: 130-146.
- [13] 苗喆. 世界第一高混凝土面板坝—新疆大石峡水利枢纽工程正式开工建设 [J]. 水力发电, 2018, 44 (2): 36.
- [14] 李光伟. 粉煤灰抑制水工混凝土 ASR 长期暴露试验研究 [J]. 水力发电, 2023, 49 (2): 112-117.
- [15] 孙延飞, 李双喜, 陆瑶, 等. 骨料碱活性检验及抑制碱骨料反应的试验研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2020, 34 (3): 72-74, 84.
- [16] 王阳, 蒋玉川, 高永刚. 硅灰对高性能混凝土长期耐久性能的影响 [J]. 中国建材科技, 2010, 19 (增刊 2): 121-124.
- [17] 周晓青, 易阳, 汪峻峰, 等. 新疆大石峡水利枢纽混凝土碱-硅酸反应抑制研究 [J]. 硅酸盐通报, 2023, 42 (2): 448-453.
- [18] 张桂华, 张丰. 卵石和砂岩骨料碱活性分析及混凝土综合性能 [J]. 中国农村水利水电, 2022 (5): 201-208.
- [19] MULTON S, CYR M, SELLIER A, et al. Coupled effects of aggregate size and alkali content on ASR expansion [J]. Cement and Concrete Research, 2010, 38 (4): 350-359.
- [20] 孙景卫. 铝盐对 ASR 的阻止作用及机理研究 [D]. 唐山: 河北理工大学, 2008.
- [21] 杨立荣, 封孝信, 刘刚, 等. 铝离子对碱-硅酸反应膨胀的阻止作用研究 [J]. 混凝土, 2016 (5): 31-34.
- [22] 高鹏, 余红发, 文静, 等. 引气剂对延缓高海拔强碱环境下碱-硅酸反应的影响 [J]. 硅酸盐学报, 2019, 47 (5): 625-631.