

# 冻融-风沙吹蚀对渠道衬砌混凝土损伤的加速劣化机制

刘伟<sup>1,2</sup>, 邹春霞<sup>1\*</sup>, 李红云<sup>1</sup>, 黄坤<sup>3</sup>, 郭晓松<sup>1</sup>, 宋育鑫<sup>1</sup>

(1.内蒙古农业大学 水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018;

2.内蒙古鄂尔多斯住房和城乡建设局, 内蒙古 鄂尔多斯 017300

3.西安海棠职业学院, 西安 710038)

**摘要:** 【目的】探究北方水工渠道混凝土衬砌在冻融-风沙吹蚀不利环境的损伤破坏机制。【方法】利用内蒙古地区固体废弃物粉煤灰和硅粉配制满足渠系工程要求的混凝土试样, 研究不同铺设方位渠道混凝土衬砌的抗冻融-风沙吹蚀损伤特征及对其使用寿命的影响。【结果】①风沙吹蚀加速了北方寒区混凝土衬砌的冻融损伤破坏, 渠道混凝土表面浆体剥蚀程度随吹蚀角增大而加剧, 90°吹蚀角风沙吹蚀时混凝土表面损伤最严重, 加速了表面浆体脱落和内部损伤, 对混凝土内部产生的损伤是30°吹蚀角的2倍; ②吹蚀面劣化程度表现出明显的分形特征, 冻融-风沙吹蚀耦合作用使内部小孔隙向大孔隙演变; ③基于物质衰变理论与灰色理论, 建立了相对动弹性模量的GM(1,1)灰色预测模型和不同角度风沙吹蚀下混凝土冻融循环损伤的寿命预测模型。【结论】水工混凝土衬砌服役寿命随吹蚀角增加而减小, 90°吹蚀角作用下服役寿命缩短为25.83 a。

**关键词:** 渠道混凝土; 冻融循环; 风沙吹蚀; 吹蚀角; 分形维数; 服役寿命

中图分类号: TU528

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2023243

OSID:



刘伟, 邹春霞, 李红云, 等. 冻融-风沙吹蚀对渠道衬砌混凝土损伤的加速劣化机制[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(12): 132-139.

LIU Wei, ZOU Chunxia, LI Hongyun, et al. Unveiling the Mechanisms Underlying the Accelerated Channel Lining Concrete Damage Caused by Freeze-Thaw-Wind-Sand Erosion[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(12): 132-139.

## 0 引言

【研究意义】在我国北方水利工程中, 渠道铺设衬砌是提高灌溉水利用率的一种有效途径, 而区域复杂的气候环境对混凝土衬砌破坏极其严重, 不仅造成了渠系水量损失、水资源浪费, 还增加了灌溉成本和农民水费负担, 甚至还危及水利工程的安全运行。为提高渠系水工混凝土的使用寿命, 国内外学者从材料学的角度提出在混凝土材料中掺入粉煤灰和硅粉提高其抗冻、抗冲耐久性能<sup>[1-3]</sup>。

我国北方冬春季受西伯利亚冷空气和蒙古气旋影响, 常伴随有大风降温天气, 同时西北地区分布着大小不一的沙漠和沙地, 大风经过沙漠戈壁裹挟大量沙尘形成沙尘暴, 水工混凝土衬砌在长期风沙气固两相流的作用下, 混凝土衬砌耐久性能与服役寿命大

幅降低<sup>[4-6]</sup>。目前, 大型输水渠道多为梯形、弧底梯形渠道, 小型渠道多为U型、梯形、矩形、抛物线形<sup>[7-8]</sup>, 且渠道分布纵横交错, 风沙吹蚀衬砌表面形成不同吹蚀角, 这使得不同铺设方位的渠道混凝土衬砌的外观形貌损伤程度和内部孔隙结构劣化演变大不相同。而单纯地将冻融叠加风沙吹蚀对渠道各方位混凝土衬砌损伤破坏特征、耐久性能和服役寿命判定<sup>[9]</sup>具有一定的片面性。寻求一种量化的方式描述不同铺设方位的混凝土衬砌的外观形貌损伤特征、内部孔隙结构劣化演化规律, 对揭示水工混凝土渠道衬砌在冻融-风沙吹蚀不利环境的破坏机制具有重要意义。

【研究进展】分形理论作为研究物质随机性和无序性的学科被广泛应用到混凝土材料研究中, 通过引入分形维数定量表征物质表面形貌的复杂程度和不规则性变化, 肖杰等<sup>[10]</sup>利用三维激光扫描了硫酸腐蚀的混凝土表面形貌, 运用分形维数评价混凝土抗硫酸腐蚀程度; 陈志祥等<sup>[11]</sup>通过扫描混凝土表面形貌建立三维模型, 利用分形维数评价其表面粗糙度; 刘艳晨等<sup>[12]</sup>应用分形几何研究风沙环境下混凝土防护涂层的冲刷面, 得出分形维数可有效评价冲刷损伤度。分

收稿日期: 2023-06-01

修回日期: 2023-08-29

项目基金: 内蒙古自治区高等学校科学技术研究自然科学重点项目(NJZZ22518, NJZZ22517); 内蒙古自然科学基金项目(2022MS05043); 内蒙古自治区水利科学研究专项项目(NSK2016-S11)

作者简介: 刘伟(1994), 男, 硕士研究生, 主要从事水工混凝土材料耐久性研究。E-mail: 478220045@qq.com

通信作者: 邹春霞(1975-), 女, 教授, 主要从事工程材料力学行为及耐久性能研究。E-mail: anna-zcx@163.com

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

形理论在混凝土外观形貌评价的应用, 显示出分形维数具有表征混凝土外观混乱程度的能力。

【切入点】现阶段风沙吹蚀对混凝土的破坏多采用冲蚀率和质量损失率宏观表征吹蚀面破坏形态, 未能将直观风沙吹蚀面损伤破坏量化为具体数值。此外, 冻融-风沙吹蚀耦合作用多采用物理或数学模型预测混凝土服役寿命, 将物质衰变理论与灰色系统理论结合预测服役寿命相关研究较少。

【拟解决的关键问题】为此, 本研究选择掺合固废粉煤灰和硅粉制作混凝土试样, 通过快速冻融和风沙吹蚀试验模拟野外服役环境, 运用超景深三维显微镜观测不同吹蚀角混凝土表面形貌变化, 采用核磁共振技术研究孔隙结构变化趋势, 研究不同铺设方位的混凝土衬砌在冻融-风沙吹蚀不利服役环境的宏观和

微观损伤破坏特性, 探究其劣化机制。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

本试验水泥选用 P.O42.5R 硅酸盐水泥; 粉煤灰取自灌区周边电厂的II级粉煤灰; 硅粉为玉石加工厂的固体废料, SiO<sub>2</sub> 量为 94.53%, 经干燥研磨筛分性能符合试验要求; 粗细骨料取自乌拉特前旗九公里料场, 粗骨料为粒径<20 mm 的碎石, 细骨料为普通河砂(中砂); 拌和用水为普通自来水; 减水剂为萘系高效减水剂; 设计渠道混凝土衬砌强度等级为 C30, 配合比见表 1。冻融试验介质溶液取自河套灌区的黄河水, 其氯离子质量浓度为 142 mg/L, 硫酸根离子质量浓度为 213 mg/L; 沙粒取自乌兰布和沙漠。

表 1 渠道混凝土配合比

Table 1 Mixture ratio of channel concrete

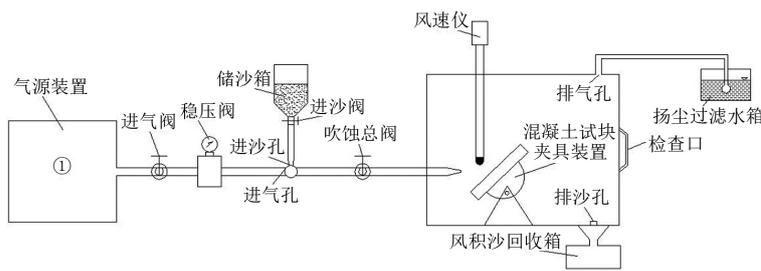
组别	水泥/(kg m <sup>-3</sup> )	粗骨料/(kg m <sup>-3</sup> )	细骨料/(kg m <sup>-3</sup> )	粉煤灰/(kg m <sup>-3</sup> )	硅粉/(kg m <sup>-3</sup> )	水/(kg m <sup>-3</sup> )	减水剂/(kg m <sup>-3</sup> )
F15S4	288.36	942	905	53.4	14.24	185	12.1

### 1.2 试验设计

混凝土冻融-风沙吹蚀循环试验选用 100 mm×100 mm×400 mm 的长方体试件。根据河套灌区气候特点和风沙运动规律, 设计循环周期为冻融循环 25 次后进行 1 次风沙吹蚀, 累计重复 8 次冻融-风沙吹蚀循环, 即冻融循环 200 次, 风沙吹蚀 8 次, 其中冻融循环 1 次在 4 h 内完成, 融化时间不少于整个循环时间的 1/4, 试件中心最低温度和最高温度控制在 (-18±2) °C 和 (5±2) °C 内; 风沙吹蚀时间为 12 min<sup>[13]</sup> (图 1), 风速 19 m/s, 挟沙量 60 g/min<sup>[14-16]</sup>。设计 3 组冻融-不同风沙吹蚀角试验, 3 个试验组风沙吹蚀

角分别为 30°、60°、90°; 试验过程中除吹蚀角外其余冻融与风沙吹蚀因素均相同。

利用电子秤和耐尔得 NELD-DTV 型动弹模量测定仪, 测定每次耦合循环后的质量和动弹性模量。采用全自动压力试验机测得 28 d 抗压强度为 38.1 Mpa。利用 Z16APO 型超景深三维显微镜观测冻融风沙吹蚀循环前后吹蚀面, 选取吹蚀面中心同一位置放大 11.4 倍, 运用 Leica Map 软件创建三维深度云图。分别对 0、2、4、8 次耦合循环结束的试样钻芯取样(尺寸为 Φ47.5 mm×H50 mm), 芯样抽真空饱水 24 h 后, 用核磁共振仪测试混凝土内部孔隙特征参数。



(a) 风沙吹蚀装置示意图



(b) 风沙吹蚀装置

图 1 风沙吹蚀试验装置

Fig.1 Wind-sand erosion test device

### 1.3 寿命预测

渠道混凝土衬砌长期在冻融和风沙吹蚀不利环境中服役, 加速了其性能衰减, 降低了实际服役寿命。若把衰变量看作损伤量, 渠道混凝土耐久性能在冻融风沙吹蚀作用的衰减近似符合牛顿物质冷却定律<sup>[17-18]</sup>。利用灰色系统理论, 以不同冻融风沙吹蚀循环次数下的相对动弹性模量实测数据为基础, 建立一阶灰色预测模型 GM (1,1)<sup>[19-20]</sup>:

$$\frac{dE^1}{dt} + \alpha E^1 = \beta, \quad (1)$$

式中:  $\alpha$  为系统发展系数;  $\beta$  为灰色作用系数。

对式 (1) 求解微分方程得到  $t$  的响应方程:

$$\hat{E}_t^1 = \left( E_1^0 - \frac{\beta}{\alpha} \right) e^{-\alpha t} + \frac{\beta}{\alpha}, \quad (2)$$

式中:  $E_t^1$  为  $t$  时刻的 1 次累加值;  $\hat{E}_t^1$  为  $E_t^1$  的预测值。相对动弹性模量随冻融风沙吹蚀循环次数的预

测模型为:

$$\hat{E}_t^0 = e^{-\alpha t} (E_1^0 - \frac{\beta}{\alpha}) (1 - e^{-\alpha t}) \quad (3)$$

式(3)变换得到式(4)冻融风沙吹蚀环境寿命预测模型:

$$T = t = \frac{1}{\alpha} \left[ \ln(e^{\alpha t} - 1) - \ln \left( \frac{E_t^0}{(\frac{\beta}{\alpha} - E_1^0)} \right) \right] \quad (4)$$

## 2 结果与分析

### 2.1 风沙吹蚀下冻融混凝土的质量损失率和相对动弹性模量

混凝土试样在冻融循环与不同风沙吹蚀角作用下的质量损失率、相对动弹性模量变化情况见图 2、图 3。由图 2 可知,不同工况下混凝土都满足 200 次抗冻性要求,但质量损失率随风沙吹蚀角的增加而增大,吹蚀角为 90° 时,试件质量损失率达到 3.53%,比 60°、30° 吹蚀角作用试件质量损失率分别高 9.40%、33.61%。由图 3 可知,试件相对动弹性模量随耦合循环次数增加而减小,30°、60° 吹蚀角作用的试件相对动弹性模量在第 3 循环周期之前平缓下降,第 3 循环周期之后试件相对动弹性模量斜率增大,相对动弹性模量出现加速衰减趋势,90° 吹蚀角作用试件的相对动弹性模量加速衰减提前至第 2 循环周期,8 次循环后,30° 吹蚀角作用试件的相对动弹性模量较 60°、90° 吹蚀角作用试件的相对动弹性模量分别高 7.12%、10.04%,说明吹蚀角增大加速了冻融循环对混凝土的内部损伤。利用损伤理论评判不同风沙吹蚀角对冻融的加速情况<sup>[21]</sup>(图 4),混凝土初始损伤度为 0,冻融循环与 30°、60°、90° 吹蚀角耦合循环后损伤度为 0.26、0.28、0.32,其中冻融循环损伤度占总损伤度的 87.07%、85.73%、73.69%,30°、60°、90° 吹蚀角风沙吹蚀损伤度占总损伤度的 12.93%、14.27%、26.31%,说明 30°、60° 吹蚀角风沙吹蚀对混凝土损伤度影响较小,导致混凝土损伤的主要原因是冻融作用,90° 吹蚀角风沙吹蚀损伤度占比是 30° 吹蚀角风沙吹蚀损伤度占比的 2 倍,对混凝土表面完整性破坏严重,加速冻融作用对混凝土内部的损伤。

当沙粒以 90° 吹蚀角冲击混凝土界面时,高速运动的沙粒垂直碰撞冻融循环后的表面疏松浆体,在其界面易形成坑洞和沟壑,导致黄河水携带盐离子更容易侵入混凝土内部结构中。根据静水压与渗透压理论,内部孔隙受冻结冰导致体积膨胀,结冰区未冻结溶液向外迁移产生静水压与渗透压,内部孔隙演变为裂缝和缝隙,试件浆体脱落质量损失率和损伤度增大。当吹蚀角为 60° 时,混凝土表面吸收沙粒部分垂直冲击动能,另一部分以削磨形式消耗,吹蚀表面形成部分划痕。而吹蚀角为 30° 时,沙粒能量主要以削

磨形式消耗,对吹蚀界面破坏减小,表面形成大量削磨犁沟,界面有效延缓黄河水对内部孔隙结构的入侵。同时,吹蚀作用致使混凝土表面水分加速蒸发,再次冻融循环试件表面须重新吸收黄河水达到饱和状态,缓解冻融破坏应力对孔结构的破坏进程。

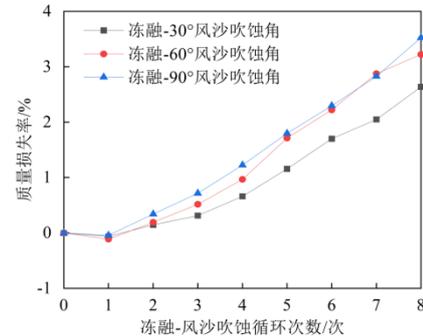


图2 质量损失率

Fig.2 Mass loss rate

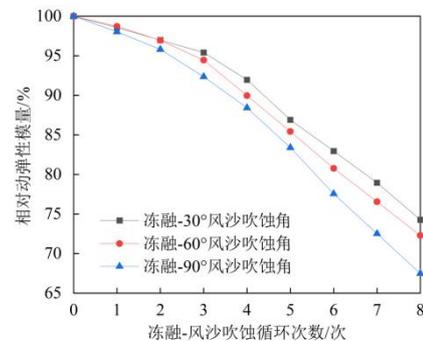


图3 相对动弹性模量

Fig.3 Relative dynamic elastic modulus

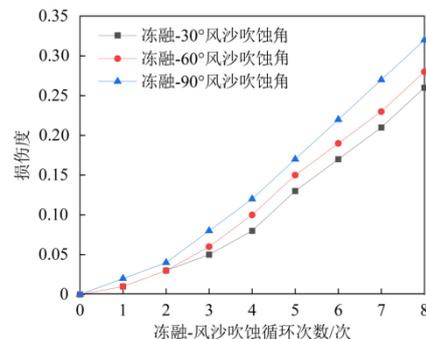


图4 损伤度

Fig.4 Damage degree

### 2.2 冻融风沙吹蚀表面微观形貌分析

#### 2.2.1 冻融风沙吹蚀表面微观形貌特征

图 5 是冻融-风沙吹蚀循环后蚀面放大 11.4 倍观测的微观图像。由图 5 可知,不同风沙吹蚀角对冻融混凝土表面的损伤影响不同。吹蚀角为 30° 时,试件表面浆体较为完整,内部骨料裸露程度较小,试件表面主要受沙粒削磨作用,此时冲蚀表面受平行于界面的切应力和垂直界面的正应力共同作用影响,且切应力大于正应力,导致混凝土表面呈现与风沙吹蚀方向相同的纵向划痕,再经冻融循环后划痕扩张形成微小孔洞。60° 吹蚀角作用下,混凝土内部集料裸露程度

进一步增加，有大颗粒骨料暴露在试件表面，但集料间浆体较为完整。当风沙吹蚀角增大到 90° 时，混凝土表面受正应力冲蚀作用为主，表面损伤加剧，吹蚀坑洞增多，坑洞纵向深度增加，浆体脱落明显，试件表面凹凸不平，与脆性材料受固体颗粒在不同吹蚀角冲蚀磨损规律相吻合。

进一步对冻融风沙吹蚀表面形貌分析，利用超景深显微镜分层拍摄技术，自动提取每幅图像信息，不同景深的图像合成处理的三维深度云图见图 6。图 6 中  $H$  为混凝土表面剥蚀深度。初始试件表面近乎平整，可见部分表面留有水化反应后形成的微小坑

洞，试件平均最大深度为 14.53  $\mu\text{m}$ 。8 次耦合循环结束后，在 30° 吹蚀角风沙吹蚀作用下，试件表面形成坑洞和纵向沟壑，最大侵蚀深度为 777  $\mu\text{m}$ ，是冻融-风沙吹蚀初始值的 56 倍。在 60° 吹蚀角风沙吹蚀作用下，表面坑洞加深，相邻沟壑间浆体脱落，测定最大深度为 1 056  $\mu\text{m}$ ，是初始值的 62 倍。在 90° 吹蚀角风沙吹蚀作用下，表面浆体大量脱落，吹蚀坑洞最深达 1 760  $\mu\text{m}$ ，是冻融风沙吹蚀初始值的 136 倍。可见，低角度的反复削磨加深纵向沟壑形成，而 90° 吹蚀角反复风沙吹蚀作用加剧坑洞深度。

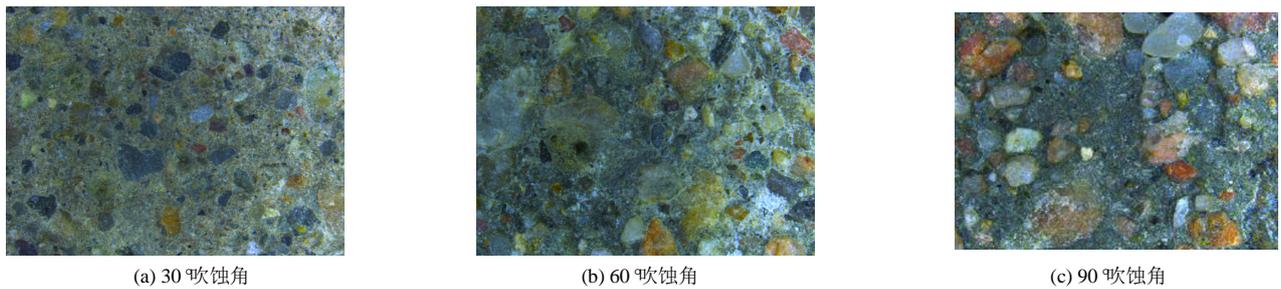


图 5 渠道混凝土表面微观形貌

Fig.5 Microstructure of channel concrete surface

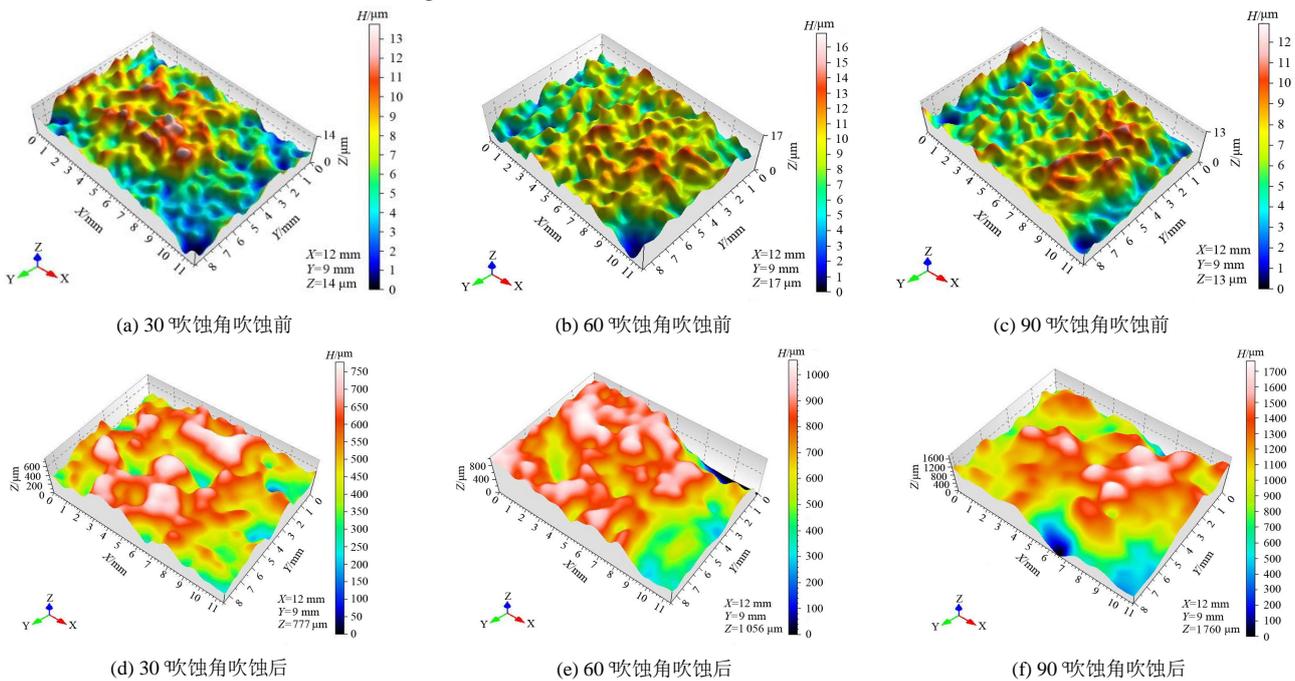


图 6 渠道混凝土表面三维形貌

Fig.6 Three-dimensional morphology of channel concrete surface

### 2.2.2 冻融风沙吹蚀表面微观形貌的分形特征

传统风沙吹蚀研究多采用冲蚀率和质量损失率评价损伤度<sup>[22]</sup>，而超景深显微镜观测的混凝土吹蚀表面形貌，一方面可从微观观测其表现吹蚀形态特征，另一方面创建三维深度云图定量测定剥蚀深度。受冻融循环和风沙吹蚀作用混凝土表面逐渐呈现出不同深度的坑洞和裂缝，为进一步对冻融风沙吹蚀微观图像中反映的冲蚀损伤特征定量化分析，首先对图像进

行灰度处理，基于差分盒维数法<sup>[23]</sup> (Differential Box Counting method, DBC)，将灰度图像网格化处理，统计每个网格中的像素点信息，利用最小二乘法拟合不同网格尺寸下的图像像素信息，即可得到差分盒维数  $D$ ，计算式为：

$$D = \lim_{\lg(1/r)} \frac{\lg(N_r)}{\lg(1/r)} \quad (5)$$

图 7 为冻融与不同风沙吹蚀角冻融循环前后图

像用 DBC 法拟合得到的直线, 直线斜率即分形维数, 各微观形貌图像拟合度较高, 相关系数均 > 0.99。不同吹蚀角风沙吹蚀表面的分形维数见表 2, 同等养护条件的试件, 初始表面分形维数差别不大, 平均值为 2.399。200 次冻融-8 次风沙吹蚀后, 分形维数随吹蚀角的增加而规律性增大, 30°、60°、90° 吹蚀角试件的

分形维数分别增加了 3.46%、3.61%、4.98%, 表明分形维数的变化与表观形貌的损伤相关, 分形维数定量表征了渠道混凝土表面坑洞和沟壑等受风沙吹蚀作用趋于复杂化, 吹蚀损伤程度加重, 故 90° 吹蚀角其表面劣化损伤最严重。

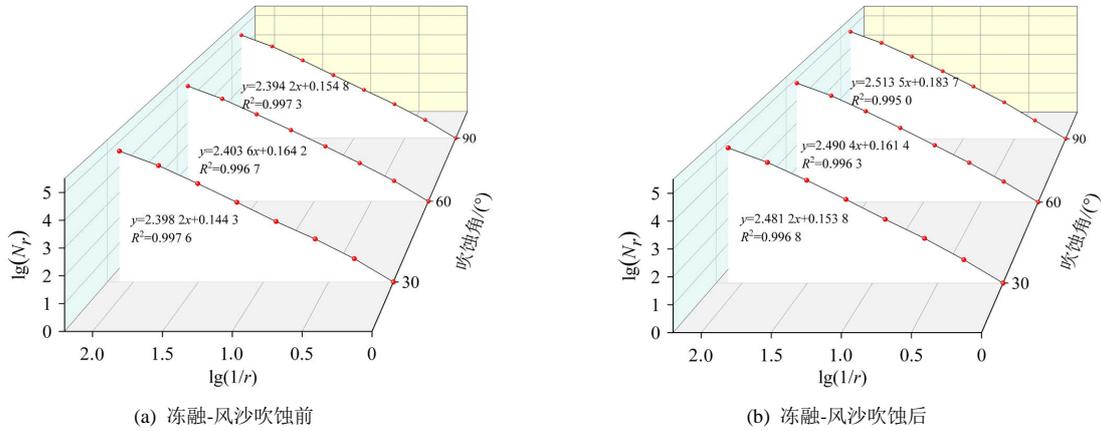


图 7 DBC 拟合结果

Fig.7 DBC fitting results

表 2 不同风沙吹蚀角吹蚀表面分形维数

Table 2 Fractal dimension of blown surface at different wind-sand erosion angles

循环次数/次	吹蚀角/(°)		
	30	60	90
0	2.398	2.404	2.394
8	2.481	2.490	2.514

### 2.3 基于核磁共振的孔隙结构分析

图 8 为核磁共振试验得到冻融循环与不同吹蚀角风沙吹蚀作用渠道混凝土的孔隙变化。 $T_2$  谱的弛豫时间分布与渠道混凝土孔径分布正相关,  $T_2$  谱图中弛豫时间越长, 对应孔隙半径越大, 而峰面积对应孔隙数量, 峰值越大, 对应孔隙占比越大<sup>[24-25]</sup>。渠道混凝土冻融风沙吹蚀循环  $T_2$  谱呈“主次”峰结构, 左峰占比高、弛豫时间短, 表明小孔隙数量多; 右峰弛豫

时间长、孔隙半径大。掺入 4% 的硅粉和粉煤灰中的活性  $SiO_2$  能够消耗水化产物  $CH$ , 生成 C-S-H 凝胶有效填充硬化水泥浆体中的有害孔, 从微观结构上增加了渠道混凝土内部密实度。受吹蚀角影响,  $T_2$  谱面积明显增大。8 次耦合循环后, 30°、60°、90° 吹蚀角对应谱面积较初始  $T_2$  谱面积分别增加了 1.64、1.75、1.83 倍。低角度吹蚀对混凝土表面破坏有限, 混凝土面层结构尚能有效抑制黄河水对内部孔隙的破坏, 90° 吹蚀角对混凝土冲蚀磨损最严重, 表观损伤破坏为黄河水及盐离子进入内部结构提供通道, 经冻融作用加速微小孔隙和小孔隙向大孔隙演变, 说明风沙吹蚀会加速冻融作用对混凝土内部结构的破坏, 30°~90° 吹蚀角范围内, 随着吹蚀角增加, 试件表面破坏程度依次增大。

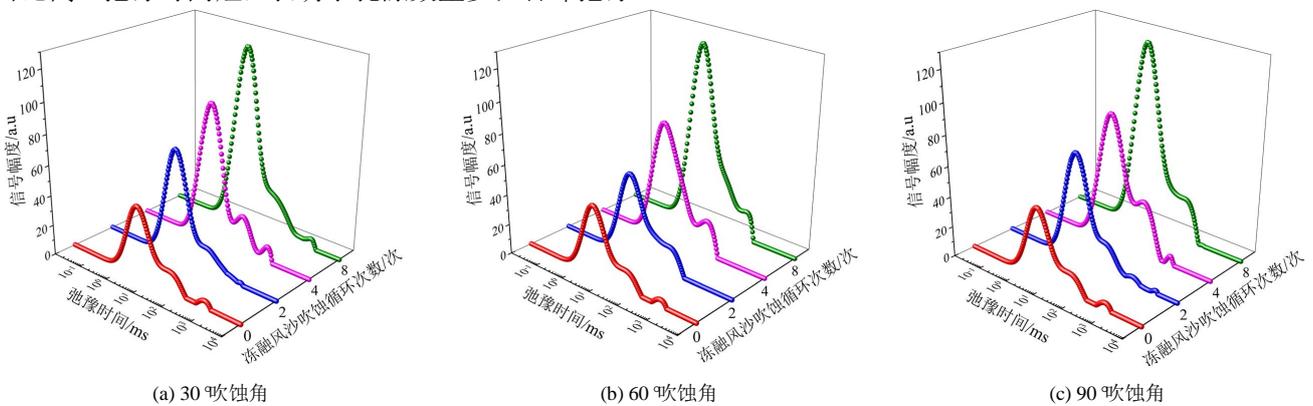


图 8 冻融-风沙吹蚀循环下  $T_2$  谱分布曲线

Fig.8  $T_2$  spectrum distribution curve under freeze-thaw-wind erosion cycle

### 3 基于物质衰变与灰色系统的寿命预测模型

图 9 为基于 GM (1,1) 在不同循环次数时的相对

动弹性模量预测值及相对误差。由 GM (1,1) 预测模型得到冻融-风沙吹蚀过程预测值与实测值相对误差均 < 3.5%<sup>[26]</sup>, 说明预测结果接近真实数据, 证实了预

测模型能准确地预测冻融-风沙吹蚀工况下混凝土相对弹性模量变化趋势。

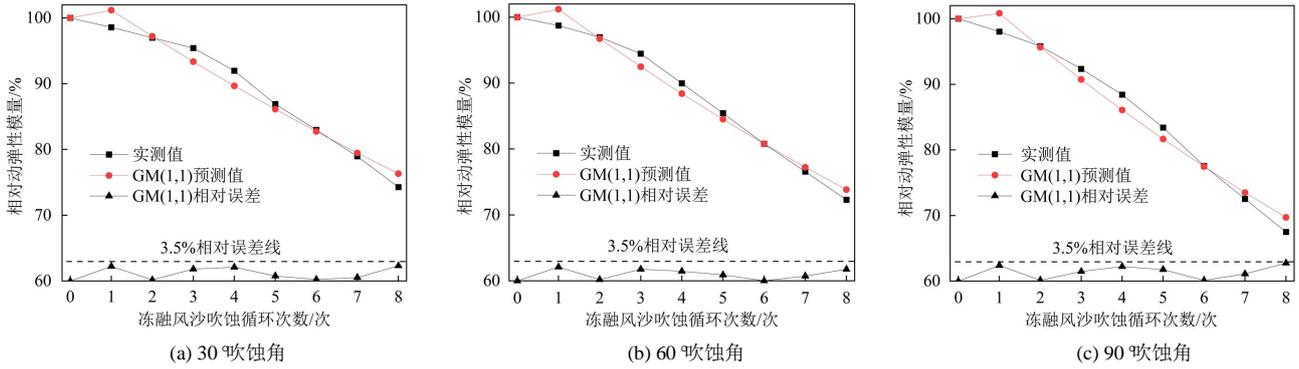


图9 拟合效果比较

Fig.9 Comparison of fitting effect

以渠道混凝土相对动弹性模量 $<60\%$ 作为抗冻融风沙吹蚀性能失效标准,内蒙古河套地区的年均等效室内冻融循环次数 10.5 次<sup>[27]</sup>,不同风沙吹蚀角对冻融循环损伤的寿命预测模型及预测结果见表 3。随着吹蚀角增加,混凝土服役寿命依次较小,30°、60°吹蚀角作用下试件实际服役寿命均 $>30$  a,但 90°吹蚀角作用下服役寿命缩短为 25.83 a。

表 3 渠道混凝土寿命预测模型及服役寿命

Table 3 Channel concrete life prediction model and service life

吹蚀角/(°)	寿命预测模型	服役寿命/a
30	$T=-59.11 \ln(E/2\ 563.26)-188.68$	33.28
60	$T=-52.85 \ln(E/2\ 297.25)-162.62$	30.01
90	$T=-45.16 \ln(E/1\ 963.57)-131.71$	25.83

#### 4 讨论

本研究利用室内快速冻融机和风沙吹蚀装置模拟野外渠道衬砌混凝土服役环境,探究不同铺设方位渠道衬砌混凝土的抗冻融-风沙吹蚀损伤特性,通过改变风沙吹蚀变量中的吹蚀角,得出 90°吹蚀角产生的损伤破坏是 30°吹蚀角的 2 倍,通过超景深显微镜观测,低角度风沙吹蚀沙粒以消磨形式破坏形成纵向犁沟,90°吹蚀角风沙吹蚀沙粒以冲蚀形式破坏形成坑洞,这与何真等<sup>[9]</sup>、薛慧军等<sup>[13]</sup>风沙吹蚀研究结论一致。

本研究表明,风沙吹蚀后混凝土表面呈现出不同深度的坑洞和沟壑,基于差分盒维数法可定量表征微观图像所反映的损伤特性,渠道混凝土表面损伤程度增加分形维数增大,这与刘艳晨等<sup>[12]</sup>研究结论一致。风沙吹蚀研究多采用吹蚀率和质量损失率宏观表征吹蚀面破坏形态,未能将直观的吹蚀面量化为具体数值,运用分形维数定量表征混凝土表面风沙吹蚀特性,为研究风沙吹蚀损伤提供参考。

经核磁共振试验得到吹蚀角增加  $T_2$  谱面积增大,说明 90°吹蚀角风沙吹蚀加剧混凝土表面冲蚀破坏,

经冻融作用加速黄河水对混凝土内部孔隙的损伤破坏,这与王仁远等<sup>[6]</sup>研究结果一致。基于物质衰变与灰色系统理论建立冻融风沙吹蚀寿命预测模型,随吹蚀角增加混凝土服役寿命依次减小,30°、60°吹蚀角预测服役寿命均大于 30 a,所以设计渠道衬砌混凝土铺设方位时,应注意结合当地风向资料,避免 90°角迎风吹蚀。

#### 5 结论

1) 冻融循环与风沙吹蚀耦合作用下,渠道混凝土表面浆体剥蚀程度随吹蚀角增大而加剧,风沙吹蚀对渠道混凝土内部产生的损伤为 12.93%~26.31%,90°吹蚀角风沙吹蚀对内部产生的损伤是 30°吹蚀角的 2 倍,90°吹蚀角吹蚀作用对相对动弹性模量产生加速衰减。

2) 冻融-风沙吹蚀耦合作用下渠道混凝土表面劣化程度表现出明显的分形特征,分形维数随吹蚀角增加而增大,渠道混凝土的表观损伤度表现为分形维数增大。结合表面三维形貌,发现低角度沙粒反复消磨加深纵向沟壑形成,高角度反复冲蚀加剧坑洞深度。

3) 核磁共振  $T_2$  谱面积随冻融风沙吹蚀循环次数增加而增大,耦合循环后 30°、60°、90°吹蚀角  $T_2$  谱面积较初始值分别增加了 1.64、1.75、1.83 倍,表观损伤破坏为黄河水及盐离子进入内部孔隙结构提供通道,经冻融作用加速微小孔隙和小孔隙向大孔隙演变。

4) 随吹蚀角增加渠道衬砌混凝土服役寿命依次减小,90°吹蚀角风沙吹蚀作用下服役寿命缩短为 25.83 a。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

#### 参考文献:

[1] LILKOV V, DIMITROVA E, PETROV O E. Hydration process of cement containing fly ash and silica fume: The first 24 hours[J]. Cement and Concrete Research, 1997, 27(4): 577-588.  
 [2] WANG L, JIN M M, GUO F X, et al. Pore structural and fractal analysis

- of the influence of fly ash and silica fume on the mechanical property and abrasion resistance of concrete[J]. *Fractals*, 2021, 29(2): 2 140 003.
- [3] 汪菲, 唐少容, 王红雨. 基于 AKIMA 插值法的整体式 U 形渠道温度场数值模拟[J]. *灌溉排水学报*, 2021, 40(8): 81-87.  
WANG Fei, TANG Shaorong, WANG Hongyu. Simulating temperature distribution in soil around the U-shaped channels in the yellow river irrigation areas in Ningxia of China[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2021, 40(8): 81-87.
- [4] 薛慧君. 风蚀区冻融盐蚀环境下风积沙混凝土耐久性损伤劣化机理研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2018.  
XUE Huijun. Research on durability damage and deterioration mechanism of aeolian sand concrete in freeze-thaw and salt corrosion environment of wind erosion area[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural, 2018.
- [5] 薛慧君, 申向东, 王仁远, 等. 风沙吹蚀与干湿循环作用下风积沙混凝土抗氯盐侵蚀机理[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(18): 118-126.  
XUE Huijun, SHEN Xiangdong, WANG Renyuan, et al. Mechanism analysis of chloride-resistant erosion of aeolian sand concrete under wind-sand erosion and dry-wet circulation[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(18): 118-126.
- [6] 王仁远, 申向东, 薛慧君, 等. 浮石混凝土风沙吹蚀与冻融耦合的破坏机理研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2019, 27(2): 418-429.  
WANG Renyuan, SHEN Xiangdong, XUE Huijun, et al. Mechanism research on wind-sand erosion and freeze-thaw coupling damage of pumice concrete[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2019, 27(2): 418-429.
- [7] 马小涵, 薛珂, 郑涛, 等. 季冻区灌渠-衬砌接触面冻胀破坏现状分析[J]. *灌溉排水学报*, 2020, 39(S2): 60-65.  
MA Xiaohan, XUE Ke, ZHENG Tao, et al. Analysis of frost heaving damage of irrigation ditch-lining contact surface in seasonal freezing zone[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2020, 39(S2): 60-65.
- [8] 娄宗科, 莫腾飞, 张晓红, 等. 模袋混凝土衬砌梯形渠道冻胀适应性研究[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(24): 74-80.  
LOU Zongke, MO Tengfei, ZHANG Xiaohong, et al. Research on adaptability of using molded bagged concrete to ameliorate heave in trapezoidal concrete channel[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(24): 74-80.
- [9] 何真. 混凝土磨蚀冲蚀与其它环境因素的耦合作用[J]. *水利学报*, 2015, 46(2): 138-145.  
HE Zhen. Interactions between severe environment and concrete resistance to abrasion and erosion[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2015, 46(2): 138-145.
- [10] 肖杰, 屈文俊, 朱鹏. 混凝土硫酸腐蚀表面形貌的分形维数表征[J]. *材料导报*, 2016, 30(2): 130-134, 154.  
XIAO Jie, QU Wenjun, ZHU Peng. Surface topography of concrete after sulfuric acid corrosion characterized by fractal dimension[J]. *Materials Reports*, 2016, 30(2): 130-134, 154.
- [11] 陈志祥, 李富民, 方渝钰, 等. 混凝土表面粗糙度评价指标的相关性研究[J]. *建筑结构学报*, 2021, 42(12): 193-199.  
CHEN Zhixiang, LI Fumin, FANG Yuyu, et al. Study on dependencies among evaluation indexes for concrete surface roughness[J]. *Journal of Building Structures*, 2021, 42(12): 193-199.
- [12] 刘艳晨, 郝贞洪, 高峰, 等. 模拟风沙环境下混凝土防护涂层抗冲蚀性能的研究[J]. *表面技术*, 2021, 50(8): 273-281, 294.  
LIU Yanchen, HAO Yunhong, GAO Feng, et al. Study on erosion resistance of concrete protective coating under simulated desert environment[J]. *Surface Technology*, 2021, 50(8): 273-281, 294.
- [13] 薛慧君, 申向东, 刘倩, 等. 高寒灌区风沙吹蚀对农业水利工程混凝土抗冻耐久性的影响[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(15): 133-140.  
XUE Huijun, SHEN Xiangdong, LIU Qian, et al. Effect of wind-sand erosion on frost resistance durability of hydraulic engineering concrete in cold irrigation area[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(15): 133-140.
- [14] 杜鹤强, 薛娴, 王涛. 黄河上游宁夏-内蒙古段跃移沙粒起动风速的空间分布[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(14): 210-219.  
DU Heqiang, XUE Xian, WANG Tao, et al. Spatial distribution of threshold wind velocity for sand saltation in Ningxia-Inner Mongolia reach of upstream of Yellow River[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(14): 210-219.
- [15] 郝贞洪, 刘艳晨, 郭健, 等. 风沙环境变量相似理论及其应用研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2018, 26(3): 640-649.  
HAO Yunhong, LIU Yanchen, GUO Jian, et al. Sand environment multivariate similarity theory and its application[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2018, 26(3): 640-649.
- [16] 邢丽珠, 张方敏, 黄进, 等. 1961—2018 年内蒙古风速变化及影响因素分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2020, 34(11): 162-168.  
XING Lizhu, ZHANG Fangmin, HUANG Jin, et al. Analysis of spatial and temporal change of wind velocity and its affecting factors in Inner Mongolia[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2020, 34(11): 162-168.
- [17] 刘崇熙, 汪在芹. 坝工混凝土耐久寿命的衰变规律[J]. *长江科学院院报*, 2000, 17(2): 18-21.  
LIU Chongxi, WANG Zaiqin. On decay rules of durable life of dam concrete[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2000, 17(2): 18-21.
- [18] 关宇刚, 孙伟, 缪昌文. 基于可靠度与损伤理论的混凝土寿命预测模型 I: 模型阐述与建立[J]. *硅酸盐学报*, 2001, 29(6): 530-534.  
GUAN Yugang, SUN Wei, MIAO Changwen. One service-life prediction model for the concrete based on the reliability and damage theories I: Narration and establishment of the model[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2001, 29(6): 530-534.
- [19] 王宗熙, 姚占全, 何梁, 等. 纳米 SiO<sub>2</sub> 对混凝土耐蚀性能和溶蚀寿命的影响[J]. *建筑材料学报*, 2021, 24(4): 766-773.  
WANG Zongxi, YAO Zhanquan, HE Liang, et al. Effect of nano-SiO<sub>2</sub> on corrosion resistance and corrosion life of concrete[J]. *Journal of Building Materials*, 2021, 24(4): 766-773.
- [20] 高鑫, 孔祥振, 申向东. 基于 GM(1,1) 的应力损伤轻骨料混凝土抗冻性评估[J]. *工程科学与技术*, 2021, 53(4): 184-190.  
GAO Chu, KONG Xiangzhen, SHEN Xiangdong. Freeze-thaw resistance evaluation of lightweight aggregate concrete with stress damage based on GM(1, 1)[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2021, 53(4): 184-190.
- [21] 董伟, 申向东, 赵占彪, 等. 风积沙轻骨料混凝土冻融损伤及寿命预测研究[J]. *冰川冻土*, 2015, 37(4): 1 009-1 015.  
DONG Wei, SHEN Xiangdong, ZHAO Zhanbiao, et al. Study of the freezing-thawing damage and life prediction of aeolian lightweight aggregate concrete[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2015, 37(4): 1 009-1 015.
- [22] 董瑞鑫, 申向东, 薛慧君, 等. 干湿循环与风沙吹蚀作用下风积沙混凝土的抗硫酸盐耐久性[J]. *材料导报*, 2020, 34(20): 20 053-20 060.  
DONG Ruixin, SHEN Xiangdong, XUE Huijun, et al. Sulfate durability of aeolian sand concrete under dry-wet cycles and sand blowing[J]. *Materials Reports*, 2020, 34(20): 20 053-20 060.
- [23] 张乐, 党发宁, 丁卫华, 等. 基于改进差分盒维数法的混凝土微观损伤定量研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2021, 29(4): 973-985.  
ZHANG Le, DANG Faning, DING Weihua, et al. Quantitative study of concrete mesoscopic damage based on the improved differential box counting method[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2021, 29(4): 973-985.
- [24] 薛慧君, 申向东, 邹春霞, 等. 基于 NMR 的风积沙混凝土冻融孔隙演变研究[J]. *建筑材料学报*, 2019, 22(2): 199-205.  
XUE Huijun, SHEN Xiangdong, ZOU Chunxia, et al. Freeze-thaw pore

- evolution of aeolian sand concrete based on nuclear magnetic resonance[J]. *Journal of Building Materials*, 2019, 22(2): 199-205.
- [25] 康春涛, 贡力, 王忠慧, 等. 利用灰色残差 GM(1,1)-Markov 模型预测水工混凝土的劣化[J]. *水利水运工程学报*, 2021(1): 95-103.  
KANG Chuntao, GONG Li, WANG Zhonghui, et al. Prediction of hydraulic concrete degradation based on gray residual GM (1,1)-Markov model[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2021(1): 95-103.
- [26] 武海荣, 金伟良, 延永东, 等. 混凝土冻融环境区划与抗冻性寿命预测[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2012, 46(4): 650-657.  
WU Hairong, JIN Weiliang, YAN Yongdong, et al. Environmental zonation and life prediction of concrete in frost environments[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2012, 46(4): 650-657.
- [27] 王彦平, 龚卓, 王起才. 风沙环境下不同强度等级砂浆冲蚀磨损试验研究[J]. *兰州交通大学学报*, 2015, 34(1): 44-48.  
WANG Yanping, GONG Zhuo, WANG Qicai. Experimental study on erosion wear of different strength mortars under blown sand environment[J]. *Journal of Lanzhou Jiaotong University*, 2015, 34(1): 44-48.

## Unveiling the Mechanisms Underlying the Accelerated Channel Lining Concrete Damage Caused by Freeze-Thaw-Wind-Sand Erosion

LIU Wei<sup>1,2</sup>, ZOU Chunxia<sup>1\*</sup>, LI Hongyun<sup>1</sup>, HUANG Kun<sup>3</sup>, GUO Xiaosong<sup>1</sup>, SONG Yuxin<sup>1</sup>

(1. Water Conservancy and Civil Engineering College, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China;

2. Ordos Housing and Urban Rural Development Bureau of Dalad Banner, Ordos 017300, China;

3. Xi'an HaiTang Vocational College, Xi'an 710038, China)

**Abstract:** 【Objective】This study delves into the mechanisms underlying the damage and failure of concrete linings in hydraulic channels in cold regions in Northern China that are prone to freeze-thaw, wind and sand erosion.

【Method】We prepared concrete samples, in line with canal system engineering standards, using solid waste fly ash and silicon powder sourced from Inner Mongolia. Our investigation focused on the freeze-thaw-wind-sand erosion of the concrete lining when it is laid in different directions and the consequential impact on its service life. 【Result】

① Wind-sand erosion exacerbates freeze-thaw damage in the concrete lining within. The extent of slurry erosion on the channel concrete surface intensifies with the increase in erosion angle. The most severe surface damage occurs when the wind-sand erosion angle was 90°, accelerating surface slurry shedding and internal damage, which is twice as severe as when the angle was 30°. ② The degradation of the eroded surface showed a distinctive fractal pattern. The combined effects of freeze-thaw-wind-sand erosion initiated small pores which then propagated to larger pores. ③ Based on material decay and grey theory, we proposed an GM (1,1) grey model to predict the relative dynamic elastic modulus and a model to predict of serve life of the concrete under cycled freeze-thaw erosion under various wind-sand erosion angles. 【Conclusion】The service life of the hydraulic concrete lining diminishes as the wind-sand erosion angle increases, with a substantial reduction to 25.83 years when exposed to 90° wind-sand erosion.

**Key words:** channel concrete; freezing-thawing; wind erosion; blowing angle; fractal dimension; service life

责任编辑：白芳芳