

## 人工防汛石材的碱激发制备及其抗冻性研究

宋迎宾, 徐金霞, 许新, 王萍

### Alkali activated preparation and frost resistance of artificial flood control stone

SONG Yingbin, XU Jinxia, XU Xin, WANG Ping

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12170/20220512001>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

##### 新型低温早强剂的制备与性能研究

Preparation and properties of new type low-temperature early strength accelerator

水利水电工程学报. 2020(2): 36 <https://doi.org/10.12170/20190320003>

##### 基于区间型贝叶斯模型的湟水干流水质评价

Water quality evaluation in Huangshui mainstream based on interval type Bayesian model

水利水电工程学报. 2020(2): 15 <https://doi.org/10.12170/20191220002>

##### 宁夏清水河流域水沙变化特点分析

Analysis on the characteristics of flow and sediment variation in Qingshuihe River basin of Ningxia

水利水电工程学报. 2020(4): 57 <https://doi.org/10.12170/20200213002>

##### 黄河流域砒砂岩区地貌-植被-侵蚀耦合研究进展

Research progress of spatial distribution about geomorphology-vegetation-water erosion in Pisha stone area of Yellow River

水利水电工程学报. 2020(4): 64 <https://doi.org/10.12170/20191229002>

##### 黄河无定河流域“2017.7.26”洪水泥沙来源辨析

Identifying sediment sources in Wudinghe River during "7.26" flood in 2017

水利水电工程学报. 2019(6): 31 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.06.004>

##### 燕山水库汛限水位动态控制方案研究

Dynamic control scheme of flood control level for Yanshan reservoir

水利水电工程学报. 2017(1): 43 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2017.01.007>



扫码进入官网，阅读更多精彩内容

关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI:10.12170/20220512001

宋迎宾, 徐金霞, 许新, 等. 人工防汛石材的碱激发制备及其抗冻性研究 [J]. 水利水运工程学报, 2023(5): 149-157. (SONG Yingbin, XU Jinxia, XU Xin, et al. Alkali activated preparation and frost resistance of artificial flood control stone[J]. Hydro-Science and Engineering, 2023(5): 149-157. (in Chinese))

# 人工防汛石材的碱激发制备及其抗冻性研究

宋迎宾<sup>1,2</sup>, 徐金霞<sup>3</sup>, 许新<sup>1,2</sup>, 王萍<sup>1,2</sup>

(1. 黄河水利委员会黄河水利科学研究院, 河南 郑州 450003; 2. 水利部堤防安全与病害防治工程技术研究中心, 河南 郑州 450003; 3. 河海大学 力学与材料学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 大块石稀缺是黄河流域防汛抢险的关键问题, 而黄河泥沙的资源化利用是解决该问题的重要途径。通过碱激发资源化利用黄河泥沙, 采用室内压制成型、现场碾压成型制备人工防汛石材, 并用快速冻融法研究人工防汛石材的抗冻性能。采用扫描电镜(SEM)、X射线衍射(XRD)和压汞(MIP)等微观测试方法, 研究人工防汛石材形貌、组成和结构的变化, 阐明其微观作用机理。研究表明: 随着添加剂掺量的增加, 人工防汛石材抗压强度呈先提高后降低的趋势; 抗压强度、质量、相对动弹性模量随冻融次数的增加而降低, 碱激发水泥基人工防汛石材的抗冻性好于碱激发非水泥基人工防汛石材的抗冻性, 极限冻融循环次数分别为 80 和 40 次; 冻融循环不会引起碱激发防汛石材物相的变化, 但会导致孔隙率增加, 最可几孔径增大。碱激发制备的人工防汛石材具有良好的抗压强度, 满足防汛抢险的使用要求。

**关键词:** 碱激发; 人工防汛石材; 抗压强度; 抗冻性; 泥沙; 黄河

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2023)05-0149-09

黄河是著名的多泥沙河流, “水少沙多、水沙关系不协调”是黄河难治的症结。突出的泥沙问题使黄河流域水资源形势更加严峻, 同时也因水资源的严重短缺使黄河泥沙问题更加突显<sup>[1-2]</sup>。随着国家环保政策的实施, 天然石料供求紧张, 黄河沿岸石料储备难以满足抢险需求, 这成为亟需解决的问题<sup>[3]</sup>。利用黄河泥沙制作人工防汛石材是实现黄河泥沙资源化利用的一种重要途径, 具有重大的经济和社会效益<sup>[4]</sup>。

人工防汛石材形状无法做到像天然石材那样不规则, 强度、密度、耐久性等也难以和天然石料相比。防汛石材在水下的稳定性与其形状、尺寸、密度等密切相关, 其强度、形状、尺寸直接影响抛投性能; 抗冻融能力、抗风化能力等耐久性指标直接影响其功能发挥。因此, 必须对利用黄河泥沙制作的人工防汛石材开展系统研究, 使其既能满足防汛抢险的要求, 又方便生产<sup>[5]</sup>。针对形状、尺寸、密度等需在生产阶段实时控制的指标, 已展开较多研究<sup>[6]</sup>, 针对抗压强度和抗冻融能力的研究较少<sup>[7]</sup>。防汛石材作为黄河防汛抢险的重要材料, 只在防汛抢险时大量抛投使用, 其余时间堆放在大堤适当位置, 黄河中下游地区地处北方, 四季分明, 凌汛情况复杂多变, 考虑人工防汛石材的抗冻融性能十分必要<sup>[8]</sup>。

本文通过碱激发资源化利用黄河泥沙, 采用室内压制成型、现场碾压成型制备人工防汛石材, 并用快速冻融法研究人工防汛石材的抗冻性; 采用扫描电镜(SEM)、X射线衍射(XRD)和压汞(MIP)等微观测试方法, 研究人工防汛石材形貌、组成和结构的变化, 阐明其微观作用机理, 由此为黄河泥沙的资源化利用提供新思路, 并为人工防汛石材在治黄工程中的实际应用提供参考。

收稿日期: 2022-05-12

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51478164, U2243222); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项基金项目(HKY-JBYW-2019-11, HKY-YF-2022-02); 江苏省重点研发计划(社会发展)项目(BE2021704)

作者简介: 宋迎宾(1991—), 男, 河南洛阳人, 工程师, 主要从事新型水工建筑材料与结构性能研究。

E-mail: 2314231473@qq.com

# 1 试验方法

## 1.1 原材料

以往的研究中,黄河下游山东段还未进行过类似泥沙试验,为此,选择山东菏泽段作为典型黄河泥沙取样点,取样点地处黄河右岸,距刘庄险工约 200 m,河道砂石资源丰富。为增加掺合料和激发材料的多样化,尽可能就地取材,选取固废材料矿渣微粉和粉煤灰,不仅对降低成本、固废利用具有重要意义,而且还能一定程度上提高人工防汛石材的强度;部分水泥基试样添加水泥。根据黄河泥沙和掺合料性能特性,考虑碱性化合物的碱性、价格、实际激发效果、实验操作难易程度等因素,选用 NaOH、硅酸钠、六偏磷酸钠等复配为添加剂;生石灰补充钙源,进一步增强碱激发效果。矿渣微粉采用菏泽晶富矿渣粉有限公司的磨细矿渣;水泥为中联水泥有限公司生产的 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥;粉煤灰选用东明陆圈佳瑞建材有限公司的 II 级粉煤灰;生石灰选自东明陆圈佳瑞建材有限公司, CaO 含量 90%。各原料的主要化学成分见表 1。

表 1 各原料的主要化学成分占比(质量分数)  
Tab. 1 Main chemical composition of each raw material (mass fraction)

单位: %

原料	主要化学成分											
	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	MnO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	LOI
黄河泥沙	4.20	71.73	9.97	2.48	1.15		2.13	2.43	0.46			
矿渣微粉	33.34	36.41	21.22	2.92	1.58	0.46	1.36	1.58	0.20	0.11	0.03	0.75
水泥	64.64	21.70	5.09	4.32	0.92	1.08	0.21	0.53	0.14	0.10	0.05	0.87
粉煤灰	2.13	49.12	30.50	5.52	0.63		0.34	1.08				4.48

火山灰活性是黄河泥沙成功制作人工防汛石材的关键。采用《水泥砂浆和混凝土用天然火山灰质材料》(JG/T 315—2011)中活性指数法对黄河泥沙进行了火山灰活性测试,结果为 10.49%。山东菏泽段黄河泥沙的表观密度为 2 680 kg/m<sup>3</sup>,堆积密度为 1 490 kg/m<sup>3</sup>,细度模数为 0.08,含泥量为 0.64%,根据《建设用砂》(GB/T 14684—2022),级配区属 2 区。

## 1.2 配合比及成型方法

本次试验采用的配合比见表 2,人工防汛石材主要分为水泥基(C)、非水泥基(N)两大类,密度均为 2.0 g/cm<sup>3</sup>。

表 2 人工防汛石材配合比设计(质量分数)  
Tab. 2 Design of artificial flood control stone mix ratio (mass fraction)

单位: %

编号	黄河泥沙	矿渣粉	生石灰	粉煤灰	水泥	添加剂	水
C1	67.45	5.0	5.0	7.5	5.0	0.05	10.0
C2	67.40	5.0	5.0	7.5	5.0	0.10	10.0
C3	67.35	5.0	5.0	7.5	5.0	0.15	10.0
C4	67.30	5.0	5.0	7.5	5.0	0.20	10.0
C5	67.25	5.0	5.0	7.5	5.0	0.25	10.0
N1	67.45	10.0	5.0	7.5		0.05	10.0
N2	67.40	10.0	5.0	7.5		0.10	10.0
N3	67.35	10.0	5.0	7.5		0.15	10.0
N4	67.30	10.0	5.0	7.5		0.20	10.0
N5	67.25	10.0	5.0	7.5		0.25	10.0

试验采用压力成型方法,按以下步骤进行:

(1)将试验材料称重后混合均匀,按照干密度所需用水量加水搅拌;(2)将模具涂上机油,把搅拌好的混合料分3层加入底部垫好垫片的模具内,每添加1层,均捣鼓后压实;(3)保持压力5 min后脱模(脱模过程见图1,压力成型后试块尺寸: $\Phi \times h=50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ );(4)脱模后对试块进行编号,放入养护室分类养护。

(1)室内成型。尺寸为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的立方体试件制作完成后,在试件上盖一层薄膜以防水分蒸发,放入温度为 $(20 \pm 5) \text{ }^\circ\text{C}$ 的标准养护室中养护1 d,然后拆模编号。拆除模具后的试件继续置于标准养护室中养护90 d。

同上,冻融循环的试件采用规范规定的标准试件,其尺寸为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ ,制作水泥基和非水泥基人工防汛石材两组试件,以3个试件为一组。

(2)现场成型。现场成型试验采用钻芯法,取出外观质量较好的防汛石芯样,芯样表面无气孔等明显缺陷(图2)。其中, $\phi 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的试件用于抗压性能测试, $\phi 100 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ 的试件用于抗冻性能测试。

### 1.3 性能测试

采用《建筑砂浆基本性能试验方法标准》(JGJ/T 70—2009)中抗冻性能试验方法进行试验。根据防汛石材的强度等级,分别进行20、40、60、80次冻融循环试验,测试抗压强度、质量、动弹性模量等,并对试验结果进行分析。

采用SEM、XRD和MIP等微观测试方法,研究人工防汛石材冻融前后形貌、组成和结构的变化,揭示人工防汛石材的微结构演化规律。先将待测材料试块放入真空烘箱内烘干,随后破型、研磨制成粉末样品并过筛,获取粉末样品进行测试。本文采用X射线衍射仪D8 ADVANCE(Cu靶,  $K\alpha$ 射线( $\lambda=0.1541844 \text{ nm}$ )),加速电压为40 kV,电流为40 mA,扫描范围 $5^\circ \sim 70^\circ$ ,扫描速率为 $10 \text{ (}^\circ\text{)/min}$ ;对冻融前后的试件分别放大1 000倍和5 000倍,观察其形貌特征,并比较冻融前后的微观形貌变化。试验所用扫描电镜型号为Hitachi-3400N,加速电压为15 kV。采用美国麦克公司生产的AutoPore IV 9500高性能全自动压汞仪,将测试样品制成小块,置入 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 烘箱烘干并进行真空脱水后进行试验,压汞法测试的孔径范围为 $215 \mu\text{m} \sim 7 \text{ nm}$ ,接触角为 $140^\circ$ ,表面张力为 $0.485 \text{ N/m}$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 抗压强度

为提高添加剂的利用率,试验研究了添加剂掺量对人工防汛石材的力学影响。根据试验的基础配合比调节添加剂的掺量(分别对应表2中的C1~C5),进而在常温养护条件下,测出水泥基人工防汛石材的抗压



图1 压力模具成型过程及成型的抗压试块

Fig. 1 Pressure mold forming process and formed compression test block



图2 现场成型与取芯

Fig. 2 On-site molding and coring

强度见图3。从图3可见,随着添加剂掺量的增加,水泥基人工防汛石材抗压强度先增大后减小。当添加剂掺量为0.20%时,人工防汛石材各龄期的抗压强度达到最大值,分别是3.18、4.12、7.51、10.54、16.53 MPa;随着添加剂的继续增加,人工防汛石材的抗压强度开始下降,当添加剂含量从0.20%增加到0.25%时,人工防汛石材抗压强度在各龄期(1、3、7、14、28 d)抗压强度分别降低了32%、19%、22%、14%、8%。

非水泥基人工防汛石材的抗压强度见图4。可见,随着添加剂掺量的增加(分别对应表2中的N1~N5),非水泥基人工防汛石材抗压强度先增后减。当添加剂掺量为0.20%时,人工防汛石材各龄期的抗压强度达到最大值,分别是3.06、3.89、5.45、7.14、10.05 MPa;随着添加剂的继续增加,人工防汛石材的强度开始下降,当添加剂含量从0.20%增加到0.25%时,人工防汛石材抗压强度在各龄期(1、3、7、14、28 d)抗压强度分别降低了31%、20%、11%、16%、11%。

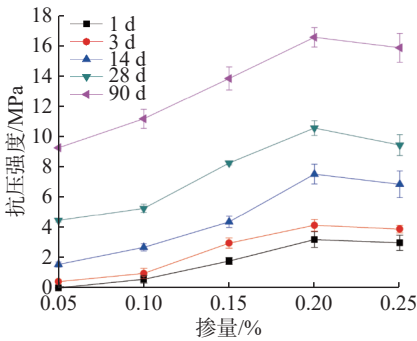


图3 不同添加剂掺量水泥基人工防汛石材的强度变化

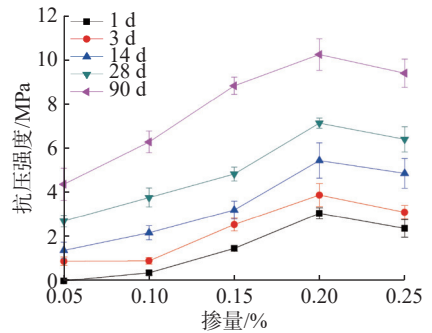


图4 不同添加剂掺量非水泥基人工防汛石材的强度变化

Fig. 3 Strength changes of cement-based artificial flood control stone with different additive dosages

Fig. 4 Strength changes of non-cement-based artificial flood control stone with different additive dosages

由此可见,当添加剂含量较低时,随着添加剂含量的增加,人工防汛石材的强度也不断增大,但当添加剂掺量达到0.20%时,试件抗压强度达到最大值。

## 2.2 抗冻性能

2.2.1 表观状态 试件(芯样)经过不同次数冻融循环试验过程后,试件(芯样)均出现不同程度的冻融破坏现象,试验现象见表3与图5~7。

表3 不同冻融循环次数下人工防汛石材的表观状态

Tab. 3 Apparent state of artificial flood control stone under different freeze-thaw cycles

编号	循环数/次	试验现象描述
C4	20	试件表面出现轻微剥落
	40	试件自浇筑顶面向下长约50 mm范围的表面少许剥落
	60	试件自浇筑顶面向下长约35 mm范围被冻成粉状并脱落
	80	试件自浇筑顶面向下长约75 mm范围的防汛石材被冻成粉状并脱落,损伤主要发生在靠近浇筑面一端
C4(芯样)	20	试件表面出现轻微剥落
	40	试件表面出现少许剥落
	60	试件自浇筑顶面出现15 mm裂纹,向下长约95 mm范围被冻成粉状并脱落
N4	20	试件被冻成粉状并脱落
	40	试件表面出现较多剥落,试件长度由400 mm减少到375 mm
	60	试件自浇筑顶面向下长约75 mm范围的防汛石材被冻成长约45和340 mm两段,断裂处剥落

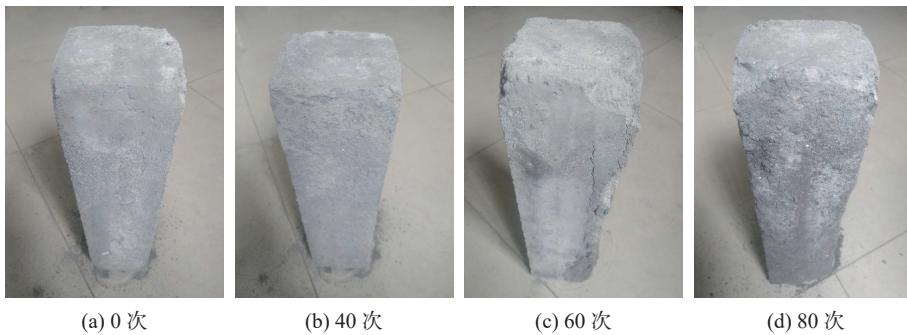


图 5 水泥基人工防汛石材(C4)在不同冻融次数下表面状况

Fig. 5 Surface conditions of cement-based artificial flood control stone (C4) with different freeze-thaw times

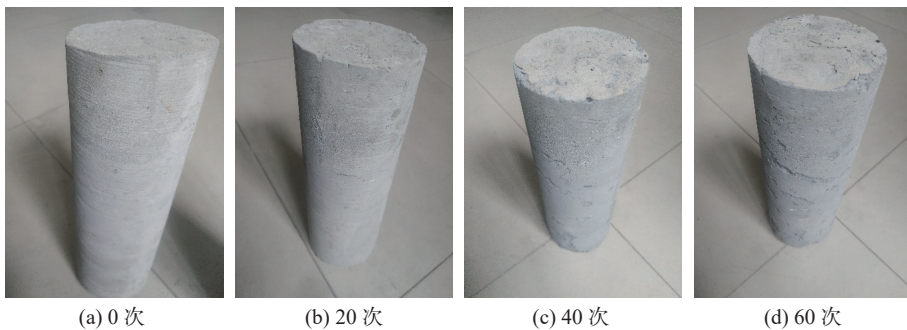


图 6 水泥基(芯样)人工防汛石材(C4)在不同冻融次数下表面状况

Fig. 6 Surface conditions of cement-based (core) artificial flood control stone (C4) with different freeze-thaw times

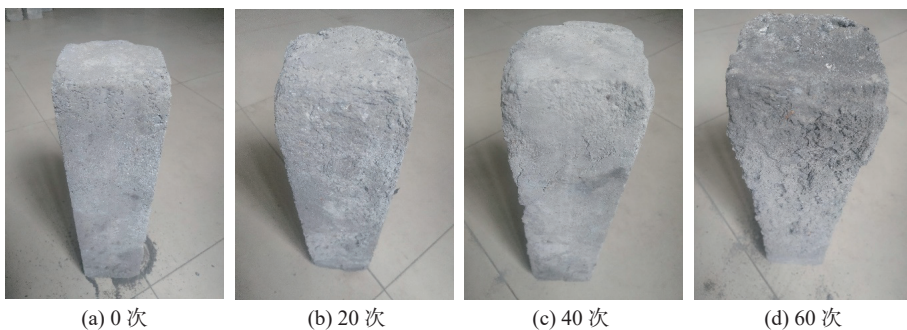


图 7 非水泥基人工防汛石材(N4)在不同冻融次数下表面状况

Fig. 7 Surface conditions of non-cement-based artificial flood control stone (N4) with different freeze-thaw times

试验表观状态显示,非水泥基试件在 20 次冻融循环后出现棱角缺失、表面砂浆脱落和质地变脆等现象;水泥基试件在相同次数冻融循环后试件完整,表面只有明显粗糙,平滑度优于非水泥基。40 次冻融循环后,非水泥基试件出现棱角缺失,表面粗糙程度加重,细骨料明显附着于表面,脱浆严重,质地变脆;水泥基试件形状完整,表面粗糙但平滑度仍优于非水泥基,试件完整未出现明显棱角缺失。

**2.2.2 性能变化** 经养护 90 d 后,检测各试件冻融前后的抗压强度、质量损失、相对动弹性模量随冻融循环的变化情况见图 8。

由图 8 可见,随冻融循环次数的增加,人工防汛石材的抗压强度、相对动弹性模量呈下降趋势,质量损失率增大。但在相同冻融循环次数下,水泥基试件的抗压强度、相对动弹性模量要大于非水泥基,并且冻融循环次数越多,效果越明显。同样水泥基配合比的水泥基标准试件和水泥基芯样,因成型方式的差异,结果也有较大不同,芯样整体结果差于室内成型的标准试件。芯样试件与室内成型试件的差异主要表现在尺

寸、试样表面外观状况和成型养护方式,芯样试件的侧面和端面由机械切割形成,导致浆石界面遭破坏,而室内成型的试件不仅没有受损伤,还因表面密实浆体形成坚固“防线”避免水分渗入,大大减缓了损伤速率,因此两者的抗冻试验结果出现较大差异。这与文献<sup>[9-11]</sup>研究结论相似。

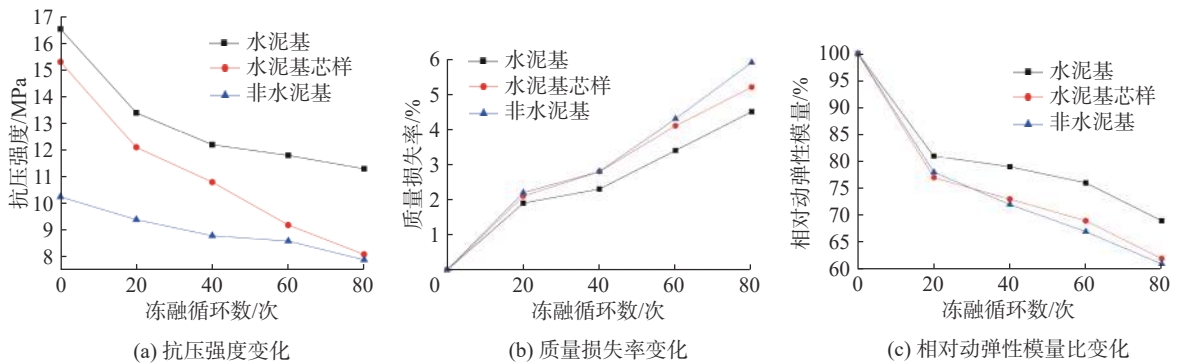


图 8 不同配合比人工防汛石材随冻融循环次数的抗压强度、质量损失率和相对动弹性模量变化

Fig. 8 Changes in compressive strength, mass loss rate and relative dynamic elastic modulus of artificial flood control stone with different mixing ratios with the number of freeze-thaw cycles

## 2.3 微观结构分析

**2.3.1 SEM 分析** 图 9 为水泥基人工防汛石材冻融前后 SEM 图。从图 9 (a) 可以看出,经过碱激发改性后水泥基防汛石材中生成了较多的凝胶状物质,并伴有各种规则形状晶体,试件内部比较密实,微裂缝较少,孔隙减少,原本松散的黄河泥沙已成为胶结整体。这表明黄河泥沙、水泥与掺合料中的活性  $\text{SiO}_2$  经过碱激发生成了 C-S-H 凝胶;在此同时,碱激发过程后伴随有方解石、钠长石、微斜长石等晶体的生成,这些晶体与凝胶交织在一起,并且填充于孔隙中,使试件更加密实,降低了试件的孔隙率,这对早期强度提高有很好的作用<sup>[12]</sup>。但是由于各种晶体的生成消耗了内部大量水分,使后期化学反应进程减缓,导致后期强度增长较慢。相对于水泥基防汛石材中的凝胶状物质将砂浆内部交织成连续整体的网体结构,非水泥基防汛石材中的凝胶状产物明显减少,C-S-H 凝胶形态似乎有变化,各种形态规则的结晶体明显增多(见图 9(b))。

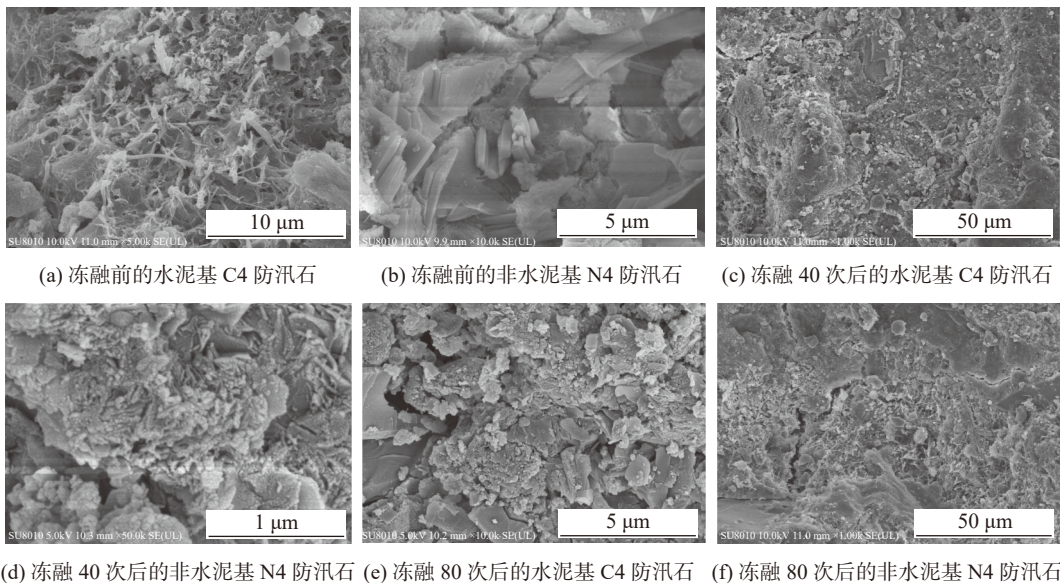


图 9 人工防汛石材冻融前后 SEM 图

Fig. 9 SEM diagram before and after freeze-thawing of artificial flood control stone



相对于冻融前的防汛石材, 冻融后的水泥基、非水泥基防汛石材的微结构变得疏松, 孔隙率明显增多, 孔隙变大, 并有一些微裂缝形成(见图 9(c)、(d)), 显示冻融循环对碱激发防汛石材有显著破坏作用。其中, 80 次冻融后的水泥基、非水泥基防汛石材(图 9(e)、(f))相较于冻融 40 次的防汛石材(图 9(c)、(d))的微结构更加疏松, 孔隙更加明显, 尺寸较大, 并有一些相对较大的裂纹形成。

**2.3.2 物相分析** 冻融过程会引起物理损伤, 一般不会造成明显矿相变化, 为此研究了不同胶凝材料体系物相组成差异。由图 10 可知, 碱激发黄河泥沙水泥基人工防汛石材的主要矿物是石英、方解石、钠长石、微斜长石和 C-S-H, 而碱激发黄河泥沙非水泥基人工防汛石材的主要矿物是石英、方解石、钠长石与微斜长石; 相对于非水泥基人工防汛石材, 水泥基人工防汛石材在水化过程中会产生 C-S-H 凝胶, 这与 SEM 分析结果相一致。

**2.3.3 孔结构分析** 采用压汞法测试了 80 次冻融后试件的孔径分布, 其内部孔径分布见图 11, 总孔隙率和最可几孔径见表 4。

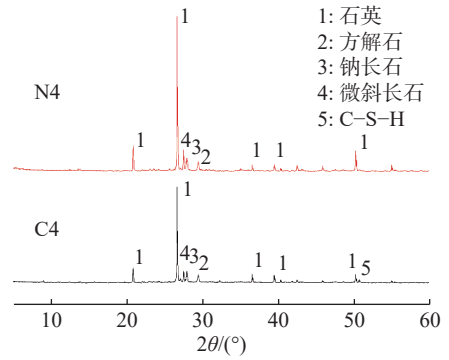


图 10 水泥基 C4 与非水泥基 N4 人工防汛石材的 XRD 图  
Fig. 10 XRD diagram of cement-based C4 and non-cementitious N4 artificial flood control stone

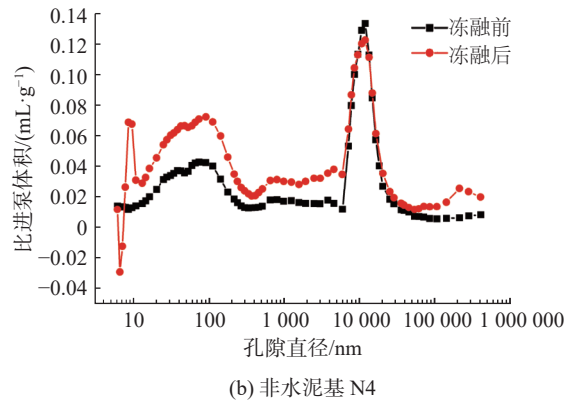
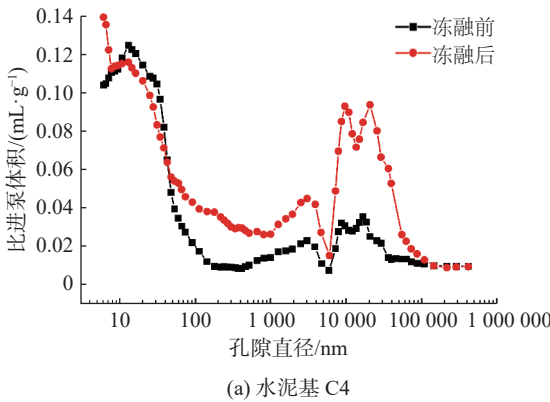


图 11 水泥基 C4 与非水泥基 N4 防汛石材冻融前后孔径分布

Fig. 11 Pore size distribution of cement-based C4 and non-cementitious N4 flood-proof stone before and after freeze-thaw

由图 11 与表 4 可知, 冻融后试件内部的总孔隙率和最可几孔径变大。80 次冻融后水泥基石材 74 nm 的气孔较多, 非水泥基石材 92 nm 的气孔较多。人工防汛石材冻融破坏原因与混凝土类似, 由冰晶压力的反复作用导致, 而孔隙中水分经过冻胀使得原孔隙增大, 进而可以吸收更多的水分。切割冻融破坏后的试块发现断面周边部分范围有水分, 而中心部分呈干燥状态。由此可见冻融破坏的过程

表 4 冻融前后试件的孔隙结构参数

Tab. 4 Pore structure parameters of test pieces before and after freeze-thaw

编号	总孔隙率/%	最可几孔径/ $\mu\text{m}$
C4(冻融前)	24.630 6	0.013 19
C4(冻融80次后)	37.058 9	0.074 53
N4(冻融前)	22.058 8	0.006 16
N4(冻融80次后)	33.632 0	0.092 01

为: 表面吸水-冻胀-表面损伤-水进入内层-表面破坏剥离-内层逐步破坏。孔径指标与抗压强度值的趋势吻合, 与前文 SEM 分析的微观结构结果一致, 进一步表明抗冻性与其内部孔结构有关。

为: 表面吸水-冻胀-表面损伤-水进入内层-表面破坏剥离-内层逐步破坏。孔径指标与抗压强度值的趋势吻合, 与前文 SEM 分析的微观结构结果一致, 进一步表明抗冻性与其内部孔结构有关。

### 3 结 语

成功制备了碱激发人工防汛石材,所制防汛石材具有良好的抗压强度,满足防汛抢险使用的力学性能要求;适量掺入添加剂有助于人工防汛石材的力学性能增强,且随着掺入量的增加,抗压强度呈先提高后降低的趋势,当掺量为 0.20% 时,抗压强度最高。碱激发水泥基人工防汛石材具有比碱激发非水泥基人工防汛石材更好的力学性能。

水泥基人工防汛石材具有比非水泥基人工防汛石材更好的抗冻性能,抗压强度、质量、相对动弹性模量随冻融次数的增加而降低。掺加 0.20% 的水泥基人工防汛石材,冻融循环 80 次后强度损失达 31.6%,质量损失达 4.5%,相对动弹性模量损失达 31%;掺加 2% 的水泥基极限冻融循环次数为 40 次。

碱激发黄河泥沙水泥基人工防汛石材的主要矿物是石英、方解石、钠长石、微斜长石和 C-S-H,而碱激发黄河泥沙非水泥基人工防汛石材的主要矿物是石英、方解石、钠长石与微斜长石;冻融循环不会引起碱激发防汛石材物相的变化,但会导致孔隙率增加,最可几孔径变化。

### 参 考 文 献:

- [1] 胡春宏,张晓明,赵阳.黄河泥沙百年演变特征与近期波动变化成因解析[J].*水科学进展*,2020,31(5):725-733.(HU Chunhong,ZHANG Xiaoming,ZHAO Yang.Cause analysis of the centennial trend and recent fluctuation of the Yellow River sediment load[J].*Advances in Water Science*,2020,31(5):725-733.(in Chinese))
- [2] 江恩慧.黄河泥沙研究重大科技进展及趋势[J].*水利与建筑工程学报*,2020,18(1):1-9.(JIANG Enhui.Significant scientific and technological progress and trend of sediment research in the Yellow River[J].*Journal of Water Resources and Architectural Engineering*,2020,18(1):1-9.(in Chinese))
- [3] 宋万增,张凯,刘慧,等.黄河泥沙人工防汛石材生产工艺及成型设备研究[J].*建材技术与应用*,2018(5):13-16.(SONG Wanzeng,ZHANG Kai,LIU Hui,et al.Production technology and molding equipment of artificial flood control stones for Yellow River sediment[J].*Research & Application of Building Materials*,2018(5):13-16.(in Chinese))
- [4] 江恩慧,曹永涛,董其华,等.黄河泥沙资源利用的长远效应[J].*人民黄河*,2015,37(2):1-5,12.(JIANG Enhui,CAO Yongtao,DONG Qihua,et al.Long-term effects of the Yellow River sediment resources utilization[J].*Yellow River*,2015,37(2):1-5,12.(in Chinese))
- [5] 郑乐.利用黄河泥沙制作防汛石材固结胶凝技术研究[D].大连:大连理工大学,2016.(ZHENG Le.Study on the technology of making artificial reserved bricks by using the Yellow River sediment[D].Dalian:Dalian University of Technology,2016.(in Chinese))
- [6] 张凯,刘忠,王卫军.人工防汛备防石振动挤压耦合成型设备设计研究[J].*水利技术监督*,2021,29(1):74-77.(ZHANG Kai,LIU Zhong,WANG Weijun.Design and research on vibration extrusion coupling forming equipment for artificial flood control prepare rock[J].*Technical Supervision in Water Resources*,2021,29(1):74-77.(in Chinese))
- [7] 陈伟,张金升,曲志远.黄河沙芯复合结构备防石生产工艺和效益分析[J].*中国防汛抗旱*,2017,27(增刊1):29-31.(CHEN Wei,ZHANG Jinsheng,QU Zhiyuan.Production technology and benefit analysis of stone prevention with composite structure of sand core in Yellow River[J].*China Flood & Drought Management*,2017,27(Suppl1):29-31.(in Chinese))
- [8] 张秀侠.渭河中下游河道工程备防石存在的问题及建议[J].*陕西水利*,2021(4):68-69.(ZHANG Xiuxia.Problems and suggestions of stone prevention in middle and lower reaches of Weihe River[J].*Shaanxi Water Resources*,2021(4):68-69.(in Chinese))
- [9] 胡玉庆,郭保林,张敦福,等.不同养护条件下内养护补偿收缩砂浆性能研究[J].*硅酸盐通报*,2018,37(2):377-382.(HU Yuqing,GUO Baolin,ZHANG Dunfu,et al.Performance of internal curing and shrinkage compensating mortar under different drying conditions[J].*Bulletin of the Chinese Ceramic Society*,2018,37(2):377-382.(in Chinese))
- [10] 张磊.钻芯法在工程质量检测中的应用与思考[J].*中国建材科技*,2018,27(1):9-10,55.(ZHANG Lei.Core method application in the engineering quality detection and thinking[J].*China Building Materials Science & Technology*,2018,27(1):

9-10, 55. (in Chinese))

- [11] 覃维祖. 混凝土耐久性评估: 用试件还是用芯样[J]. *混凝土世界*, 2010(10): 25-28. (QIN Weizu. Durability evaluation of concrete: test piece or core sample[J]. *China Concrete*, 2010(10): 25-28. (in Chinese))
- [12] 朱健健, 高建明, 陈菲, 等. 砂浆半浸泡在硫酸钠溶液中不同表面处理材料防护效果比较[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2019, 49(6): 1162-1170. (ZHU Jianjian, GAO Jianming, CHEN Fei, et al. Comparison of protective effects on different surface treated concretes partially immersed in sodium sulfate solution[J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2019, 49(6): 1162-1170. (in Chinese))

## Alkali activated preparation and frost resistance of artificial flood control stone

SONG Yingbin<sup>1,2</sup>, XU Jinxia<sup>3</sup>, XU Xin<sup>1,2</sup>, WANG Ping<sup>1,2</sup>

(1. *Yellow River Institute of Hydraulic Research, YRCC, Zhengzhou 450003, China*; 2. *Research Center on Levee Safety & Disaster Prevention, Ministry of Water Resources, Zhengzhou 450003, China*; 3. *College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 210098, China*)

**Abstract:** The resource utilization of the Yellow River sediment and the scarcity of boulders in the process of flood control are two important problems to be solved. In this study, artificial flood control stone was prepared by using alkali activated resource utilization of Yellow River silt, indoor compaction and on-site compaction, and the frost resistance of artificial flood control stone was studied by rapid freeze-thaw method. In addition, scanning electron microscope (SEM), X-ray diffraction (XRD) and mercury intrusion (MIP) were used to study the changes of morphology, composition and structure of artificial flood control stone, and clarify its micro mechanism. The results show that the artificial flood control stone prepared by alkali excitation has good compressive strength, which meets the requirements of flood control and emergency use; with the increase of alkali activator content, the compressive strength of artificial flood control stone firstly increases and then decreases; with the increase of freeze-thaw times, the compressive strength, mass and relative dynamic modulus of elasticity of artificial flood control stone decrease gradually; the frost resistance of alkali activated cement-based artificial flood control stone is better than that of alkali activated non cement-based artificial flood control stone, and the limit freeze-thaw cycles are 80 and 40 respectively; and the freeze-thaw cycle will not change the phase of alkali activated flood control stone, but will increase the porosity and the most probable pore size.

**Key words:** alkali excitation; artificial flood control stone; compressive strength; frost resistance; sediment; Yellow River