

## 抗冲磨混凝土材料性能与表征研究进展

赵明宇<sup>1,2</sup>, 朱宝双<sup>1</sup>, 王 晴<sup>1</sup>, 张高展<sup>3</sup>, 杨 军<sup>3</sup>, 丁庆军<sup>2</sup>

(1. 沈阳建筑大学材料科学与工程学院, 沈阳 110168; 2. 武汉理工大学, 硅酸盐建筑材料国家重点实验室, 武汉 4300702; 3. 安徽建筑大学材料与化学工程学院, 合肥 230601)

**摘 要:** 水工建筑、桥梁墩柱、海岸堤坝等工程结构长期处于高速水流、挟砂浪涌以及山区泥石流等冲击磨损的服役环境之下, 严重威胁着工程的耐久性与安全性。为提升此类结构的服役性能, 归纳整理了国内外抗冲磨混凝土材料的研究进展, 从材料组成角度总结了各类混凝土材料的抗冲磨特性, 并对比分析了水下钢球法、水砂枪法、风砂枪法、圆环法、旋转射流法等表征方法的特点与适用范围, 同时探讨了推移质冲击、悬移质磨损、空蚀效应对混凝土造成的损伤破坏机理。为抗冲磨混凝土材料的设计制备与性能研究提供参考。

**关键词:** 抗冲磨混凝土; 材料组成; 表征手段; 抗冲磨性能; 冲磨机理

中图分类号: TV431; U444 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2025)05-1354-15

网络出版时间: 2025-03-26



冲磨损伤是各类水工建筑、桥梁墩柱、海岸堤坝中混凝土结构材料的主要损伤形式之一。在高速水流、挟砂浪涌、山区泥石流等服役条件下, 上述结构位置存在悬移质磨蚀、推移质冲击以及空蚀等多种形式的损伤, 影响工程的耐久性与安全性。目前, 随着全球基础设施向江河湖海、复杂严酷的环境逐步延伸, 水泥混凝土作为世界上最大宗的结构材料, 其在冲磨条件下的服役耐久性能受到国内外研究人员的持续关注。

为提升混凝土材料的抗冲磨性能, 在各类水利与桥梁工程中, 先后研究了硅粉混凝土、橡胶混凝土、纤维混凝土等抗冲磨混凝土材料, 在不同程度上提升了水泥混凝土的抗冲磨性能, 近年来, 针对更加复杂的服役环境, 相关学者开展了超高性能混凝土材料抗冲磨性能的相关研究, 同时, 也有学者在各角度改进了水下钢球法, 水砂枪法等冲磨实验方法, 并采用现代的表面表征手段, 如 3D 扫描技术等, 准确量化地表征混凝土材料的抗冲磨性能与冲磨破

坏机理。

因此, 结合笔者近年来在该领域的研究与实践经验, 在抗冲磨混凝土材料组成与性能、混凝土抗冲磨实验方法与表征、混凝土冲磨实验损伤机制等方面, 综述了抗冲磨混凝土材料的国内外研究进展与阶段性成果, 并讨论需进一步解决的问题与未来研究方向。

## 1 混凝土抗冲磨性能提升方法

混凝土的冲磨性能与材料组成有直接关系, 笔者总结了目前抗冲磨混凝土材料的组成规律(见表 1), 在掺辅助胶凝材料的混凝土、纤维混凝土、耐磨骨料混凝土、橡胶混凝土、超高性能混凝土等角度对混凝土抗冲磨性能提升方法进行总结。

## 1.1 掺辅助胶凝材料的混凝土

在混凝土中掺入各类辅助胶凝材料可改善混凝土水化产物组成, 消耗了  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , 生成了更多的水化硅酸钙(C-S-H)和其他含铝水化产物, 提高了

收稿日期: 2024-10-30。 修订日期: 2024-12-27。

基金项目: 国家自然科学基金(52278266, 51908378, U21A20149, U24A2048); 沈阳市中青年科技创新人才支持计划项目(RC220313); 辽宁省兴辽英才计划项目(XLYC2403149); 桥梁工程安全与韧性全国重点实验室开放基金(2024SKLBSR-DW009); 硅酸盐建筑材料国家重点实验室开放基金(SYSJJ2020-07)。

第一作者: 赵明宇(1987—), 男, 博士, 教授。

通信作者: 丁庆军(1962—), 男, 博士, 教授。

Received date: 2024-10-30. Revised date: 2024-12-27.

First author: ZHAO Mingyu (1987—), male, Ph.D., Professor.

E-mail: zmyzhaomingyu@sjzu.edu.cn

Correspondent author: DING Qingjun (1962—), male, Ph.D., Professor.

E-mail: dingqj@whut.edu.cn

C-S-H 中硅酸盐链的聚合程度, 并通过填充孔隙提升密实程度, 从而提高混凝土抗冲磨性能。

在各种辅助胶凝材料中, 硅灰对混凝土抗冲磨性能提升明显, 5% 质量掺量可使性能提升 4%~15%<sup>[1-2]</sup>。这是因为其具有微集料效应与火山灰效应, 在水化早期生成更多 C-S-H 凝胶, 强化界面过渡区与水泥浆体密实程度, 使集料在冲磨环境下难以从水泥浆体中剥离。Wang 等<sup>[1]</sup>采用 10% 硅灰掺量显著提高高速水流模拟条件下混凝土抗冲磨性能, 本质是优化了 C-S-H 微观组成和密实度, 在分子尺度优化结构使其有序性增强, 在微米尺度使堆积结构更密实、密度增加、胶凝性更强<sup>[3-4]</sup>。

硅灰掺量一般控制在 5%~10%。过量掺入会导致混凝土早期收缩开裂, 如研究表明随着硅灰掺量增加(5%~9%), 抗冲磨性能提高, 但体积干收缩率

也随之增加<sup>[5]</sup>。因此为确保混凝土耐久性能, 需控制收缩开裂, 制备抗冲磨混凝土时多将硅灰掺量控制在 10% 以下, 并采用复掺粉煤灰以及纤维抑制早期收缩开裂。

除硅灰外, 相关学者也通过在混凝土中掺加其他辅助胶凝材料(粉煤灰、矿渣粉等)来研究其对混凝土抗冲磨性能的影响。其中, 粉煤灰对混凝土抗冲磨性能提高有限, 15% 质量掺量时其混凝土抗冲磨性能低于非粉煤灰混凝土<sup>[6-7]</sup>。20% 质量掺量的粉煤灰与 5% 质量掺量的硅灰复掺可在不同龄期不同程度提高抗冲磨性能和力学性能 4%~9%<sup>[8]</sup>。此外, C 级粉煤灰<sup>[9]</sup>和更小细度的粉煤灰<sup>[5]</sup>对保证抗冲磨性能有一定益处。随着高炉矿渣掺量增加(15%~40%), 可形成致密高强度混凝土表面, 在后期龄期有较高抗冲磨性能<sup>[10]</sup>。

表 1 抗冲磨混凝土材料组成

Table 1 Review of the composition of abrasion-resistant concrete materials

| Different types of anti-abrasive concrete | Composition <sup>1</sup>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Water/binder ratio | Reference        |
|-------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|------------------|
| Ordinary anti-abrasive concrete           | Fly ash (10%–50%)<br>Silica fume (3%–10%)<br>Slag power (10%–50%)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 0.24–0.54          | [2, 6, 8, 11–13] |
| Fiber reinforced anti-abrasive concrete   | Steel fiber (0.5%–1.5%)<br>PP fiber (0.1%–2.0%)<br>PVA fiber (0.1%–2.0%)<br>Kevlar fiber (0.2%–0.5%)<br>Basalt fiber (0.10%–0.25%)                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 0.23–0.56          | [4, 14–19]       |
| Special aggregate anti-abrasive concrete  | Basalt<br>Iron sand<br>Iron ore<br>Quartzite<br>Recycle waste glass(0–100%)<br>Rubber particles(5%–25%)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 0.21–0.80          | [20–25]          |
| Ultra-high-performance concrete           | Fly ash (5%), Silica fume (15%), Slag power (15%), Quartz powder(8%), quartz sand, Steel fiber(0.5%–1.5%)<br>Fly ash (13%), Silica fume (17%), manufactured sand, ceramsite(10%–30%), Steel fiber(1%–3%)<br>Fly ash (13%), Silica fume (18%), manufactured sand, rubber particles (5%–20%), Steel fiber(2.5%)<br>Fly ash (13%), Silica fume (17%), quartz sand, PVA fiber(2%), PP fiber(2%), Steel fiber(2%), POM fiber(1%–2%) | 0.15–0.22          | [26–29]          |
| Nano-fillers for anti-abrasive concrete   | Nano-silica (1%–5%)<br>Nano-silicon carbide (1%–3%)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 0.28–0.50          | [30–33]          |

Note 1: In the table, the dosage of Fly ash, Silica fume, and Slag powder is expressed as a percentage of the total mass of cementitious material, the dosage of fiber is represented as a percentage of the concrete volume, and the dosage of aggregate indicates the substitution rate of the original aggregate replaced by an equivalent volume. PVA fiber is polyvinyl alcohol fiber. PP fiber is polypropylene fiber. POM fiber is polyoxymethylene fiber.

## 1.2 纤维混凝土

抗冲磨混凝土中的纤维可分为 2 类: 与混凝土相比弹性模量较低的纤维(如纤维素、尼龙和聚丙烯纤维)和弹性模量较高的纤维(如钢纤维、碳纤维和玻璃纤维)。随着钢纤维掺量增加, 混凝土抗冲磨性能随之提升。当钢纤维体积掺量达到 0.75%~1.00% 时, 其抗冲磨性能提高 20% 以上<sup>[34-35]</sup>。当混凝土水胶比较高时, 掺入钢纤维并不能显著提高其抗冲磨性能。对于低水胶比混凝土, 混合掺有

钢纤维和硅灰的抗冲磨性能要优于单掺钢纤维或者单掺硅灰<sup>[17, 36]</sup>。短直纤维和中钩端纤维由于具有较好的分布空间和纤维桥接作用, 具有较好的抗泥石流磨损性能<sup>[18]</sup>。1% 体积掺量的高弹模钢纤维可提高混凝土抗冲磨强度 30%<sup>[37]</sup>, 低弹模钢纤维具备一定的柔软性, 可进一步提高钢纤维混凝土的抗冲磨性能<sup>[38]</sup>。因此, 钢纤维增强混凝土由于其具有较好的抗拉强度、能量吸能能力和残余强度, 可提高混凝土抗推移质冲磨的性能。

由于抗冲磨混凝土服役环境一般比较潮湿或在水下, 钢纤维存在腐蚀风险, 因此有必要用合成纤维代替钢纤维制备纤维混凝土。0.1%~2.0%体积掺量的 PVA(聚乙烯醇)纤维在不同程度提高混凝土抗冲磨性能<sup>[1, 5, 19, 39]</sup>, 掺入纤维的同时, 不仅可以提高混凝土的强度和抗冲磨性能, 而且可以有效抑制混凝土的收缩, 将硅灰与聚乙烯醇纤维结合, 可进一步提高混凝土抗冲磨性能 6%~14%。随着聚酯纤维体积掺量增加(0.2%~0.6%), 混凝土抗冲磨性能可提高 12.7%~25.3%<sup>[40]</sup>。0.5%体积掺量的玄武岩纤维可优化不同水灰比(0.3~0.5)的纤维混凝土内部微观结构, 使其抗冲磨性能平均提高了 20%<sup>[41]</sup>。对于珊瑚礁混凝土, 玄武岩纤维和聚丙烯纤维在 0.1%掺量时, 混凝土抗冲磨性能分别提高 24.8%和 61.4%。然而当纤维掺量达到 0.2%时, 纤维交叉和聚集, 难以在混凝土中均匀分散, 增加了混凝土内部孔隙和缺陷, 降低砂浆和纤维的内聚力, 因此降低了珊瑚礁砂混凝土的抗冲磨性能<sup>[15]</sup>。

### 1.3 耐磨骨料混凝土

混凝土在水流的持续冲刷条件下, 骨料会逐渐暴露出来, 并与冲磨介质直接接触, 不同形状、材质、矿物组成的粗骨料均会影响混凝土的抗冲磨性能, 骨料自身耐磨性能和与水泥浆体的界面粘结程度直接影响混凝土抗冲磨性能。采用强度更高的骨料可制备出性能优异的抗冲磨混凝土, 如铁矿骨料相比于天然骨料, 在不同水胶比下可使混凝土抗冲磨性能提高约 6%~17%<sup>[23]</sup>。当水灰比较低时, 洛杉矶磨耗值较低的骨料制备的混凝土抗冲磨性能更高; 而当水灰比较高时, 不同洛杉矶磨耗值的骨料制备的混凝土抗冲磨性能无明显差别<sup>[10]</sup>。骨料粒径及形状也影响抗冲磨性能, 在相同莫氏硬度下, 10 mm 圆形石英砂骨料制备的混凝土抗冲磨性能优于 20 mm 带棱角的角砾岩制备的混凝土, 高出 32%~57%<sup>[25]</sup>。Dandapat 等<sup>[42]</sup>采用水砂枪法冲磨试验后发现, 随着骨料粒径(10~20 mm)增大, 质量损失率降低 45.2%。

天然骨料的开采往往伴随着对生态环境的严重破坏。因此, 在不降低混凝土抗冲磨性能的同时, 适量掺入耐磨的固废作为骨料更具有环保性。Sabarinathan 等<sup>[43]</sup>用 10%~50%的废弃磨料取代细骨料, 40%取代率时制备的混凝土抗冲磨性能最佳, 抗冲磨强度提高了 83%。Omoding 等<sup>[24]</sup>以再生玻璃作为粗骨料取代石灰岩碎石, 研究发现 25%取代率时不会显著降低混凝土抗冲磨性能。

### 1.4 橡胶骨料混凝土

橡胶颗粒具有优异的弹性, 在混凝土中可起到吸能作用, 降低混凝土的冲磨损伤程度。Bai 等<sup>[20]</sup>、Feng 等<sup>[21]</sup>、Kang 等<sup>[22]</sup>研究了不同橡胶颗粒粒径(0.38~5.00 mm)、不同体积掺量(从 5%~24%)下橡胶混凝土的抗冲磨性能。结果表明, 不同粒径以及不同体积的橡胶颗粒, 可在不同程度提高水工混凝土的抗冲磨强度。

不同的冲磨实验条件, 橡胶混凝土的抗冲磨能力提升程度有所不同。Bai 等<sup>[20]</sup>使用旋转射流法, 测得 28 目和 40 目, 16%~24%掺量的橡胶混凝土抗冲磨强度提高 8%~54%; 采用水下钢球法, 测得 16%和 24%掺量的橡胶混凝土抗冲磨强度分别提高 10%~23%、降低 19%; 而采用高速水下钢球法, 测得 16%和 24%掺量的橡胶混凝土抗冲磨强度分别提高 18%、降低 12%; Kang 等<sup>[22]</sup>使用圆环法测得 8~16 目不同橡胶体积掺量 5%~15%的橡胶混凝土抗冲磨强度分别提高 35%~116%。采用水下钢球法测得 8 目和 16 目的橡胶抗冲磨强度提高 160%~371%; Omoding 等<sup>[25]</sup>采用 25%的橡胶颗粒取代石灰岩粗骨料, 根据水下钢球法测试时间不同, 抗冲磨性能可提高 42%~64%(24~72 h)。总体结果表明, 掺入适量的橡胶颗粒可以提高混凝土的抗冲磨性能, 但是过量的掺入橡胶颗粒反而会降低混凝土的抗冲磨性能。

然而, 橡胶颗粒的掺入会降低水泥混凝土的强度, Feng 等<sup>[21]</sup>对 15%体积掺量的不同粒径的橡胶颗粒进行改性处理(水洗、NaOH 处理、NaOH+KH570 处理)以降低橡胶颗粒对混凝土强度的影响, 制备得到的不同强度等级的橡胶混凝土抗冲磨性能提高了 30%~120%(1~3 mm)、10%~18%(3~5 mm)。

### 1.5 超高性能混凝土

超高性能混凝土(UHPC)因其具有高强度、高耐久性, 相比普通混凝土本身即具有更高的抗冲磨性能。涂天驰<sup>[44]</sup>在水砂枪法试验在 8~20 MPa 水压变化时, UHPC 抗冲磨性能约为 C50 混凝土的 3.0~4.5 倍。细集料的形状及掺量对 UHPC 的抗冲磨性能也有一定的影响。当机制砂所含针状骨料增加(0~30%)时, UHPC 抗冲磨性能先升高后降低, 当机制砂针状含量为 20%, 钢纤维体积掺量 3%时, UHPC 抗冲磨性能逐渐降低<sup>[27]</sup>。有机纤维对 UHPC 有增韧作用, 随着 POM 纤维掺量增加, UHPC 抗冲磨性能逐渐提高, 最佳体积掺量 2%, 相比同等掺量的 PP 纤维、PVA 纤维, POM 纤维所制备的 UHPC 抗冲磨性能更高<sup>[26]</sup>。适量橡胶颗粒可提高 UHPC 抗冲磨

性能。不同粒径橡胶颗粒影响不同, 1~3 mm 橡胶颗粒掺入可提高 12%, 适宜体积掺量 10%~15%; 采用 1~3 mm 橡胶颗粒, 10% 体积掺量, NaOH+KH570 改性处理效果最佳, 可提高抗冲磨强度 26%<sup>[28]</sup>。当 PVA 纤维体积掺量 0.5%、钢纤维体积掺量 2%、1~3 mm 橡胶颗粒掺量 10% 时制备的 UHPC 28 d 抗冲磨强度可达到  $169.4 \text{ h}(\text{kg}\cdot\text{m}^{-2})$ <sup>[45]</sup>。Li 等<sup>[46]</sup>研究了不同养护方式对 UHPC 抗冲磨性能有影响。在饱和预湿高钛重渣砂 UHPC 中加入橡胶颗粒, 对比了 4 种养方式下(20 °C 标准养护(28 d)、90 °C 蒸汽养护(4 d)、90 °C 干养护(4 d)、210 °C, 2 MPa 压力蒸汽养护(2 d))的 UHPC 抗冲磨性能, 水下钢球法测试结果表明, 4 种养护方式下的抗冲磨强度分别为 167、169、152、171  $\text{h}(\text{kg}\cdot\text{m}^{-2})$ 。

### 1.6 其他混凝土抗冲磨性能提升方法

纳米填料可改善混凝土的密实性。He 等<sup>[30]</sup>、Rajput 等<sup>[31]</sup>、Rahmanzadeh 等<sup>[32]</sup>采用 1%~5% 的纳米二氧化硅, 利用纳米二氧化硅增强微观结构, 促进火山灰反应, 提高混凝土抗冲磨性能 3.17%~73.00%。韩俊强等<sup>[33]</sup>研究发现混掺质量分数 2% 纳米二氧化硅和质量分数 2% 纳米碳化硅的水工混凝土抗冲磨性能相对较优, 磨损量较普通混凝土降低 75%, 仅  $0.64 \text{ kg}/\text{m}^2$ 。

地聚物混凝土早期可形成密实结构, 也具备抗冲磨能力。Zahraa 等<sup>[47]</sup>、Shams 等<sup>[48]</sup>、Kolli 等<sup>[49]</sup>研究了粉煤灰矿渣基地聚物混凝土的抗冲磨性能, 结果表明其抗冲磨性能优于相同强度等级的水泥基混凝土。Witzke 等<sup>[50]</sup>研究偏高岭土基地聚物混凝土以及 10% 稻壳灰取代偏高岭土制备的地聚物混凝土, 抗冲磨试验中质量损失分别为 3.23% 和 3.54%。Abdulhassan

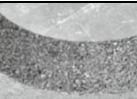
等<sup>[51]</sup>研究粉煤灰基地聚物混凝土, 水下钢球法不同试验时间结果显示, 相同设计强度的地聚物混凝土和普通混凝土相比, 在不同龄期抗冲磨性能均有提高, 如龄期 3 d 时提高 54.62%~72.06%, 但 7 d 和 28 d 提升幅度仅为 39.57%~69.27%, 这是由于地聚物混凝土在早期强度高的原因导致。Mohebi 等<sup>[52]</sup>研究碱矿渣混凝土的抗冲磨性能, 采用田口设计试验法考虑多种因素影响。结果表明: 25 °C 养护, 碱渣质量比 0.4、氢氧化钠浓度为 6 mol/L、氢氧化钠与水玻璃质量比为 3 的碱矿渣混凝土抗冲磨性能最高。

## 2 混凝土抗冲磨性能表征方法

混凝土在冲磨服役环境下的破坏主要有以下几种方式: 1) 水流中的推移质(石块等较大体积的坚硬物)从各个角度高速冲击被磨蚀的刚性混凝土表面, 使混凝土发生脆性破坏, 进而出现严重剥落; 2) 高速挟沙水流对材料的冲刷与冲击效应, 流体中的悬移质(泥沙等小颗粒坚硬物)对混凝土表层水泥石产生不断的冲刷效应, 使混凝土表面薄弱的水泥石逐层磨蚀, 骨料暴露; 3) 水流冲击在混凝土表面上之后, 水流中的气泡产生的空蚀效应, 即气泡撞击混凝土表面之后, 破裂的气体对混凝土表面产生冲击作用, 在混凝土表明形成较大的侵蚀孔, 在水流中的气泡持续撞击下, 侵蚀孔表面向四周扩展, 内部向内纵深扩展。

由于冲磨服役环境的复杂性, 目前为了在实验室的条件下更全面的反应混凝土的抗冲磨能力, 国内外学者模拟参考实际的冲磨条件与破坏过程, 设计并不断改进了不同的测试方法, 目前主要的冲磨表征方法及其特征对比如表 2 所示。

表 2 不同类型的混凝土冲磨试验方法  
Table 2 Different types of concrete abrasion testing methods

| Test methods           | Underwater method                                                                   |                                                                                     | Sandblasting method                                                                 | Ring method                                                                          | Rotating jet method                                                                   | Water-borne sand jet method                                                           |
|------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|                        | Standard                                                                            | High-speed                                                                          |                                                                                     |                                                                                      |                                                                                       |                                                                                       |
| Abraded surface        |  |  |  |  |  |  |
| Abrasive media         | Bed load                                                                            |                                                                                     | Low-velocity sandy aqueous flow                                                     | Suspended load                                                                       |                                                                                       |                                                                                       |
| Simulation environment | Subaqueous flow                                                                     | High-velocity subaqueous flow                                                       |                                                                                     | High-velocity sandy aqueous flow                                                     |                                                                                       |                                                                                       |
| Applicable concrete    | C20-C60 concrete                                                                    | C50-C80 concrete<br>UHPC & ECC                                                      | C30-C60 concrete                                                                    | C20-C60 concrete                                                                     | C30-C80 concrete                                                                      | C30-C70 concrete                                                                      |
| Reference              | [8, 22-23, 53]                                                                      |                                                                                     | [32, 34]                                                                            | [5, 22, 54]                                                                          | [2, 20]                                                                               | [16, 40, 55]                                                                          |

### 2.1 水下钢球法

水下钢球法被我国 DL/T 5150—2017《水工混凝土试验规程》<sup>[56]</sup>、SL/T 352—2020《水工混凝土

试验规程》<sup>[57]</sup>和美国材料与实验协会颁布的 ASTM C1138<sup>[58]</sup>所采用。水下钢球法采用钢球作为主要冲磨介质, 主要用于测定混凝土抵抗推移质磨损的性

能, 通过 1200 r/min 转速的搅拌桨带动 70 个钢球对试件冲磨 72 h, 并计算抗冲磨强度  $f_a$  与质量损失率  $L$ 。

$$f_a = \frac{tA}{\Delta m} = \frac{5.087}{\Delta m}, \text{ h/(kg} \cdot \text{m}^{-2}) \quad (1)$$

$$L = \frac{\Delta m}{m_0}, \% \quad (2)$$

其中:  $A = \pi D^2 / 4$ ,  $\text{m}^2$ ;  $D$  为试件直径(可按 0.3 m 计算),  $\text{m}$ ;  $\Delta m$  为经  $t$  时间累积冲磨量,  $\text{kg}$ ;  $t$  为试件累积冲磨时间,  $\text{h}$ ;  $A$  为试件受冲磨面积,  $\text{m}^2$ ;  $L$  为试件磨损率, %;  $m_0$  为试件磨损前质量,  $\text{kg}$ 。

抗冲磨强度指单位面积中被冲磨损失单位质量所需要的时间, 是目前表征混凝土抗冲磨性能的最常用指标。Gong 等<sup>[23]</sup>采用标准水下钢球法对铁矿石、铁钢砂混凝土进行冲磨试验, 并采用抗冲磨强度量化混凝土的抗冲磨性能。结果表明: 混凝土的抗冲磨强度会随着水胶比的降低而提高, 会随着粗骨料的强度和硬度的提高而提高; 铁矿石和铁钢砂混凝土相比于其他自然砂石骨料制备得到的混凝土, 抗冲磨强度可提高 17%; 普通骨料混凝土水胶比从 0.45 降低到 0.31 时, 抗冲磨强度提高约 78.4%。Wang 等<sup>[8]</sup>同样发现, 随着水灰比从 0.45 降低到 0.28, 抗冲磨强度提高 13%~18%。Kang 等<sup>[22]</sup>采用 9%~18% 橡胶颗粒制备抗冲磨混凝土, 尽管橡胶颗粒会降低混凝土的抗压强度, 但其对混凝土的抗冲磨强度有显著提高, 在水下钢球法冲磨试验后, 其冲磨质量损失率分别在 0.94%~3.65% 范围。具备更高强度的超高性能混凝土表现出更高的抗冲磨强度, Li 等<sup>[27]</sup>发现随着 UHPC 钢纤维体积掺量的提高 (0~3%), 其抗冲磨强度从 131.50  $\text{h/(kg} \cdot \text{m}^{-2})$  提高到 146.02  $\text{h/(kg} \cdot \text{m}^{-2})$ 。

笔者总结了近年来混凝土抗压强度与抗冲磨强度的研究数据(见图 1), 总体趋势为高强度混凝土同

时也具备较高的抗冲磨强度。其中: 橡胶混凝土由于橡胶颗粒在冲磨过程中的能量吸收作用, 表现出相对较低的混凝土强度即具备较高的抗冲磨强度; 超高性能混凝土的抗冲磨强度约为普通混凝土的 10 倍以上, 且符合抗冲磨强度随着抗压强度的提高而提升的规律。

混凝土冲磨前后的质量变化可直观地表征混凝土抗冲磨能力, 在质量损失量的基础上, 也可计算出质量损失率、体积损失量和体积损失率。对于水下钢球法, 不同类型的普通混凝土磨损 72 h 后, 质量损失量在 265~381  $\text{g}$ <sup>[38, 53]</sup>, 质量损失率在 1.06%~7.60%<sup>[15, 24, 39, 53]</sup>, 体积损失量在 102~610  $\text{dm}^3$ <sup>[10, 14]</sup>, 体积损失率在 0.90%~4.92%<sup>[25, 59]</sup>。Abdulhassan 等<sup>[51]</sup>提出利用与普通混凝土冲磨质量损失差值的百分比来表征地聚物混凝土抗冲磨性能, 在相同设计强度时, 该值在 39.57% 以上。AlAnsari 等<sup>[60]</sup>、Ayoob 等<sup>[61]</sup>在水下钢球法试验中, 则采用冲磨速率( $\text{mm/h}$ )量化混凝土的抗冲磨性能, 冲磨速率( $\text{mm/h}$ )随着水灰比提高(0.3~0.6)而提高, 数值在 0.007~0.615  $\text{mm/h}$ 。

此外, 以标准的水下钢球法为基础, 近年来研究人员针对不同的测试要求, 对测试方法进行了改进。Horszczaruk 等<sup>[37]</sup>认为 72 h 试验时间不能很好地区分表征抗压强度在 80~120 MPa 的混凝土的抗冲磨性能, 试验时间至少达到 96 h 以上, 不同试件的抗冲磨性能才会存在明显差异。因此, 在研究高强混凝土时, 建议延长水下钢球法实验时间至 120 h<sup>[38]</sup>。

改变水下钢球法的搅拌速度也可控制冲磨效果。Abid 等<sup>[62]</sup>将冲磨时间由缩短至 15 h, 同时将转轴转速由 1200 r/min 增加到 1600 r/min, 可使磨损率平均提高 45% 左右。Tan 等<sup>[26]</sup>则采用转轴转速 2400 r/min、冲磨时间 72 h 的实验条件, 对超高性能混凝土(试件直径 100 mm, 高 50 mm)进行抗冲磨试验。

SL/T 352—2020《水工混凝土试验规程》<sup>[57]</sup>在水下钢球法原有的基础之上, 提出采用增加一种棱面球体作为研磨料。吐尔洪等<sup>[63]</sup>采用此种棱面球体对高强混凝土进行冲磨试验, 与普通钢球相比, 采用改进后的方法对于高强混凝土平均磨损深度从 2~4 mm 增加到 10~35 mm, 更能够反映混凝土本体而非表层砂浆的抗冲磨性能。

此外, 标准水下钢球法中所用钢球最大粒径为 25.4 mm, 然而实际服役条件下推移质平均粒径更大、速度更快, 因此, 针对高速水流冲磨环境, DL/T

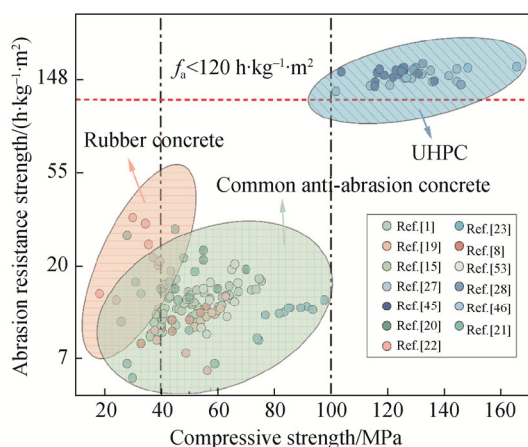


图 1 混凝土抗冲磨强度与抗压强度关系

Fig. 1 Relationship of concrete abrasion resistance in relation to compressive strength

5150—2017《水工混凝土试验规程》<sup>[56]</sup>提出更符合实际冲磨特征的高速水下钢球法,增加了钢球粒径和数量以及电机转速,缩短了试验周期,其与标准水下钢球法的参数对比见表3。Li等<sup>[53]</sup>对2种水下钢球法的测试效果进行了对比,高速水下钢球法的磨蚀效率约为水下钢球法的2倍,在对粉煤灰混凝土进行冲磨测试后,其冲磨质量损失为2438.8~2544.5 g;质量损失率13.44%~14.29%。高

速水下钢球法能使混凝土快速进入骨料裸露的稳定磨损阶段,在评价高强高性能混凝土或特种骨料混凝土的抗冲磨性能时,具有更好的适用性。对于推移质冲磨,DL/T 5207—2021《水工建筑物抗冲磨防空蚀混凝土技术规范》<sup>[64]</sup>提出了适用于不同抗冲磨工况的试验方法,当水流速度小于10 m/s时采用水下钢球法;当水流速度不小于10 m/s时采用高速水下钢球法。

表3 水下钢球法与高速水下钢球法主要条件参数对比

Table 3 Parameters comparison of normal underwater method and high speed underwater method

| Method                       | Number of steel balls  |                        |                        |                        | Rotation/(r·min <sup>-1</sup> ) | Time/h |
|------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|---------------------------------|--------|
|                              | $\Phi=(30.0\pm0.1)$ mm | $\Phi=(25.4\pm0.1)$ mm | $\Phi=(19.1\pm0.1)$ mm | $\Phi=(12.7\pm0.1)$ mm |                                 |        |
| Normal underwater method     |                        | 10                     | 35                     | 25                     | 1200                            | 72     |
| High speed underwater method | 8                      | 17                     | 33                     | 62                     | 4000                            | 48     |

## 2.2 风砂枪法

风砂枪法是DL/T 5150—2017《水工混凝土试验规程》<sup>[56]</sup>和ASTM-C418—2012<sup>[65]</sup>规定的标准测试方法,采用0.16~2.5 mm天然河砂作为冲磨介质,经喷嘴形成喷砂射流,以一定角度切削冲磨混凝土试件表面,最终通过试件质量损失率 $L(\alpha)$ 或抗冲磨强度 $f_a$ (h/cm)评价混凝土材料抗冲磨性能。

$$L(\alpha) = \left( \frac{\text{试件达到稳定磨损阶段的磨蚀量}}{\text{试件达到稳定磨损阶段的冲磨砂量}} \right) \quad (3)$$

$$f_a = \frac{T\rho_c A}{L(\alpha)\bar{m}} = \frac{T\rho_c A}{\Delta m} \quad (4)$$

其中:抗冲磨强度 $f_a$ ,即磨损1 cm深所需小时数,h/cm; $T$ 为试验累积冲磨时间,h; $\bar{m}$ 为平均冲磨砂量,kg; $A$ 为试件受冲磨面积, $\text{m}^2$ ; $\rho_c$ 为混凝土密度, $\text{g}/\text{cm}^3$ ; $\Delta m$ 为试件冲磨前后质量损失,kg; $L(\alpha)$ 为冲磨磨损率,g/kg。

风砂枪法适用于研究和评定悬移质对混凝土的冲刷磨损,研究人员通过改变风沙枪磨料流速、冲击角度、冲磨介质等参数形成不同冲磨条件。He等<sup>[32]</sup>采用风砂枪法对不同类型辅助胶凝的混凝土类型试件进行冲磨测试,磨料流速为117 g/s,冲磨角度 $90^\circ$ ,喷嘴距离试件表面30 cm,冲磨质量损失为34~44 g。Cai等<sup>[9]</sup>通过变化风砂枪法的气流流速(47.8~66.8 m/s)和冲击角度( $15^\circ\sim90^\circ$ )对试件进行冲磨测试,基于质量损失指标,计算提出使用混凝土损失量(g)/磨料砂损失量(kg)的数值更深入表征来更深入表征混凝土的抗冲磨能力,该值随冲磨角度( $15^\circ\sim90^\circ$ )及冲磨速度(47.8~66.8 m/s)的增大而增大,数值在0.066~1.366范围内变化;Sabarinathan等<sup>[43]</sup>

选用60目棕刚玉作为冲磨介质,磨料流速为117 g/s,冲击角度 $90^\circ$ 。Mansouri等<sup>[34]</sup>通过变化冲击角度( $5^\circ$ 和 $20^\circ$ ),喷嘴距离试件表面75 cm,对钢纤维混凝土进行抗冲磨测试,冲磨后的质量损失为3.0~13.4 g。结果表明, $20^\circ$ 的冲磨角度相比于 $5^\circ$ 的冲击角,其冲击荷载会产生更高的能量,因此会造成更多的质量损失。

相比于其他冲磨试验方法,风砂枪法可以用来模拟悬移质在不同冲磨角度、喷砂速度等条件下的混凝土磨损率,能有效模拟实际服役条件下的磨损情况。

## 2.3 圆环法

圆环法与高速圆环法分别是SL/T 352—2020《水工混凝土试验规程》<sup>[57]</sup>是DL/T 5150—2017《水工混凝土试验规程》<sup>[56]</sup>用于测定混凝土或其他材料在含砂水流(悬移质)冲刷下抗冲磨强度的方法。两种方法的冲磨介质采用级配刚玉(圆环法12目、20目、44目各1/3,高速圆环法粒径0.4~2.0 mm),累计冲磨时间1 h(圆环法1200 s冲磨3次,高速圆环法900 s冲磨4次),采用抗冲磨强度 $h$ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ )表征混凝土的抗冲磨性能:

$$f_a = \frac{tA}{\Delta m} = \frac{0.0942}{\Delta m} \quad (5)$$

其中: $\Delta m$ 为3次累积冲磨量,kg; $t$ 为试验累积冲磨时间,h; $A$ 为试件受冲磨面积, $\text{m}^2$ ; $A\pi \times DH$ , $D$ 为圆环试件内径(可按0.3 m计算),m; $H$ 为圆环试件高(可按0.1 m计算),m。

Kang等<sup>[22]</sup>采用圆环法测试橡胶混凝土的抗冲磨性能,水流流速14 m/s,每0.25 h记录1次质量

损失。结果表明,随着橡胶体积掺量的增加(5%~15%),橡胶混凝土的抗冲磨强度逐渐提高,其冲磨质量损失率分别在 0.60%~1.15%,最高可以提高 116%。圆环法的试验结果与水下钢球法的试验结果一致,证实了橡胶颗粒的掺入可以较好地改善混凝土的抗冲磨性能。Yao 等<sup>[5]</sup>采用高速圆环法对混凝土进行冲磨测试,水流速度 40 m/s,对混凝土试件进行冲磨试验,结果表明,随着 PVA 纤维体积掺量的增加(0.8%~1.0%),混凝土的抗冲磨性能提高;相比于 5%的硅灰质量掺量,7%和 9%硅灰质量掺量的抗冲磨强度分别提高 7.51%和 22.9%。

目前文献研究结果表明,圆环法与高速圆环法更适用于模拟低速水流下悬移质(含砂水流)对混凝土的冲磨效果,具有试验简单、多次重复下数据稳定的特点,然而,该方法冲磨条件与其他方法相比相对温和,试验结果对 C40 以下混凝土的冲刷磨损数据较为敏感,而对于强度较高的混凝土,骨料及骨料与水泥浆体界面黏结这些主要影响冲磨性能的差异因素难以反应,对 C40 以上的高标号混凝土抗冲磨能力的区分度不敏感。对于悬移质冲磨,DL/T 5207—2021《水工建筑物抗冲磨防空蚀混凝土技术规范》<sup>[64]</sup>提出了适用于不同抗冲磨工况的试验方法,当含沙量小于 20 kg/m<sup>3</sup>或水流速率小于 20 m/s 时采用圆环法;当含沙量不小于 20 kg/m<sup>3</sup>或水流速率不小于 20 m/s 时采用高速圆环法或旋转射流法。

## 2.4 旋转射流法

旋转射流法是 DL/T 5150—2017《水工混凝土试验规程》规定的方法。旋转射流法是利用水流驱动砂粒以 40m/s 的流速冲击混凝土表面,用来评价混凝土抵抗高速悬浮物磨损的能力。冲磨质通常选用棕刚玉砂,含砂水流以旋转射流的形式垂直冲磨试件的内壁表面,采用抗冲磨强度 $[h/(kg \cdot m^{-2})]$ 和磨损率 $[kg/(h \cdot m^2)]$ 表征混凝土的抗冲磨性能。

$$\text{抗冲磨强度 } f_a = \frac{nbtA}{2\pi l \Delta m} \quad (6)$$

$$\text{磨损率 } L = \frac{2\pi l \Delta m}{nbtA} \quad (7)$$

其中:  $\Delta m$  为累积冲磨量, kg;  $t$  为试验累积冲磨时间, h;  $b$  为矩形管出口水平宽度, mm;  $A$  为试件冲刷面积, m<sup>2</sup>;  $n$  为矩形管出口个数;  $l$  为矩形管长度的一半, mm。

Bai 等<sup>[20]</sup>控制水流驱动砂粒以 40 m/s 的流速冲击橡胶混凝土表面。当 28 目的橡胶颗粒掺量 16% 时,测得其抗冲磨强度提高 7.7%,而采用高速水下

钢球法和水下钢球法测得其抗冲磨强度提高为 18%~22%。Wang 等<sup>[2]</sup>对低热硅酸盐水泥混凝土进行冲磨试验,结果表明,旋转射流法可量化区分不同组成的材料的抗冲磨性能,硅灰掺量对低热硅酸盐水泥混凝土的抗冲磨性能有显著影响,当硅灰掺量 3%~5%时抗冲磨强度可提高 10.0%~15.8%。

研究表明,旋转射流法与风砂枪法、圆环法相比,提升了冲磨介质的射流速度,对模拟高速含砂水流中悬移质对混凝土表面的冲磨损伤更具有适用性,其冲磨效率较圆环法提高约 50 倍<sup>[66]</sup>,也有学者发现采用旋转射流法测试的粉煤灰混凝土磨损效率约为高速水下钢球法的 2~5 倍、水下钢球法的 10~16 倍<sup>[67]</sup>。

## 2.5 水砂枪法

水砂枪法最早由 Liu 等<sup>[68]</sup>在 2005 年提出,用于测定混凝土在水和砂的共同作用下的抗冲磨性能。采用的冲磨介质为利用 5 mm 磨料制备得到的密度为 400 kg/m<sup>3</sup> 水砂混合料,试件尺寸为 200 mm×200 mm×50 mm,实验时位于喷嘴下方 200 mm 处,水和磨料的混合物在喷嘴出口处的速度控制在 10 m/s,水砂混合射流对混凝土试件的冲击角度可以改变,通常采用 45°角,试验时间 3 h,混凝土抗冲磨性能是根据单位时间内试样质量损失(g/min)进行表征。

水砂枪法主要反映水中悬移质与空蚀共同作用下的混凝土冲磨效应,能够更好地模拟混凝土处于不同含砂水流速度和冲击角度下的实际抗冲磨性能,这种方法也被研究人员广泛采用,并根据抗冲磨混凝土的特点,不断对水砂枪法进行改良。Abid 等<sup>[16]</sup>采用 0.30~3.35 mm 砾岩级配砂作为冲磨介质,研究了模拟实际水工构筑物在悬移质的磨损效应下混凝土冲磨规律。Hasan 等<sup>[69]</sup>使用了莫氏硬度为 9 和 16 的氧化铝(0.60~1.18 mm)、莫氏硬度为 7 的二氧化硅(0.15~0.30 mm)混合作为冲磨介质。除对冲磨介质的优化,相关学者采用变化冲磨速度(8.0~66.8 m/s)、冲磨角度(15°~90°)、圆形喷嘴直径(15.88~50.00 mm)、喷嘴与试件表面距离(20~30 mm)、磨料粒径(小于等于 5 mm)以及冲磨试验时间(3~9 h)对混凝土试件进行冲磨测试<sup>[35, 47, 69~70]</sup>。对于水砂枪法,Dandapat、Abid、Mohsin、Ayoob 等对不同强度等级的普通混凝土、纤维混凝土、ECC、地聚物混凝土进行了测试,得到其质量损失率范围为 0.54%~2.91%<sup>[42, 47]</sup>,质量损失范围为 30~105 g<sup>[16, 42, 69]</sup>。Mohsin 等<sup>[47]</sup>提出利用水砂枪实

验条件下与普通混凝土冲磨质量损失差值的百分比来表征地聚物混凝土抗冲磨性能。

此外, 为了进一步模拟实际冲磨环境, 较多的研究学者也改用矩形喷嘴(10 mm×200 mm 或 10 mm×100mm), 变化冲磨速率(10~20 m/s)和冲磨角度(0°~90°), 磨料粒径(0~5 mm), 冲磨试验时间(1.5~3.0 h)对混凝土试件进行冲磨实验<sup>[40, 68, 71~72]</sup>, 与圆形喷嘴相比, 矩形喷嘴产生的水流更接近溢洪道的水流, 更能反应出水工建筑物真实的冲磨环境。混凝土的冲磨损伤是持续的过程, 因此, 有研究人员采用质量与时间的关系来表征混凝土的抗冲磨能力。Grdic、Zarrabi 等<sup>[40, 71]</sup>在水砂枪法冲磨试件之后, 采用冲磨速率 g/min 表征纤维混凝土抗冲磨性能, 冲磨速率随抗压强度提高(18.0~42.8 MPa)而降低(0.135~0.710 g/min); Ismaeil 等<sup>[72]</sup>则在水砂枪法试验中利用冲磨深度计算冲磨速率(mm/h), 发现随着冲磨角度(0°~60°)的变化而变化, 冲磨速度范围为 0.011~0.100 mm/h, 当冲磨角度为 45°时, 冲磨速率最高。

## 2.6 基于 3D 扫描技术的抗冲磨性能表征方法

混凝土在冲磨之后, 表面凹凸不平, 有研究人员提出通过冲磨后试件表面的磨损深度表征抗冲磨

性能。Witzke 等<sup>[73]</sup>在 24~72 h 水下钢球法试验后, 测得混凝土磨损深度逐渐增加, 范围在 4~7 mm。Rahmani 等<sup>[4]</sup>在水砂枪法试验后, 对纤维混凝土(纤维体积掺量 0~0.5%)的磨损深度进行测量, 在 0.3% 掺量时磨损深度最低(11.5 mm)。然而, 利用深度计对混凝土冲磨深度的测试繁琐, 且对混凝土冲磨之后的表面深度量化指标单一, 难以全面反映混凝土冲磨后的表面特征信息。

近年来, 研究人员将 3D 扫描技术应用于混凝土冲磨后的表面形貌表征, 可从扫描云图获取试件各位置的磨损程度, 能够更精确的表征出混凝土试块的具体部位的具体冲磨状况, 即使是具有相同磨损量的混凝土试块, 采用 3D 扫描测试之后, 其云图也不尽相同。Liu 等<sup>[70]</sup>在水砂枪法试验后, 使用 3D 扫描仪测量了磨损深度的实际值以及不同磨损区域的磨损深度(见图 2)。结果表明, 随着抗压强度的提高(31~67 MPa), 磨损深度降低(3~8 mm)。

Horszczaruk 等<sup>[12]</sup>同样采用了 3D 扫描技术测试了冲磨深度(mm)和平均体积损失量(cm<sup>3</sup>), 与水下钢球法的测试结果基本吻合。

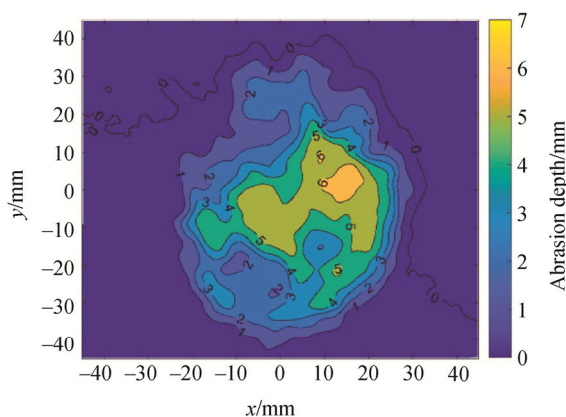


图 2 混凝土试件表面磨损形态及其 3D 扫描云图<sup>[70]</sup>

Fig. 2 Surface abrasion morphology of concrete specimens and its 3D scanning maps<sup>[70]</sup>

3D 扫描技术能够更精确、全面的量化混凝土冲磨损伤的信息, 研究学者也对 3D 扫描的数据进行了更深度的分析。Li 等<sup>[53]</sup>采用 3D 扫描精确量化了磨损深度随时间的变化规律, 从水下钢球法与高速水下钢球法试验后的扫描云图(见图 3)可以看出, 高速水下钢球法的冲磨速率明显高于水下钢球法。并给出了随冲磨时间变化的具体公式, 即磨损深度  $h=at^b$ , 其中  $t$  为冲磨试验时间, 对于水下钢球法和高速水下钢球法有不同  $a$  和  $b$ , 具体

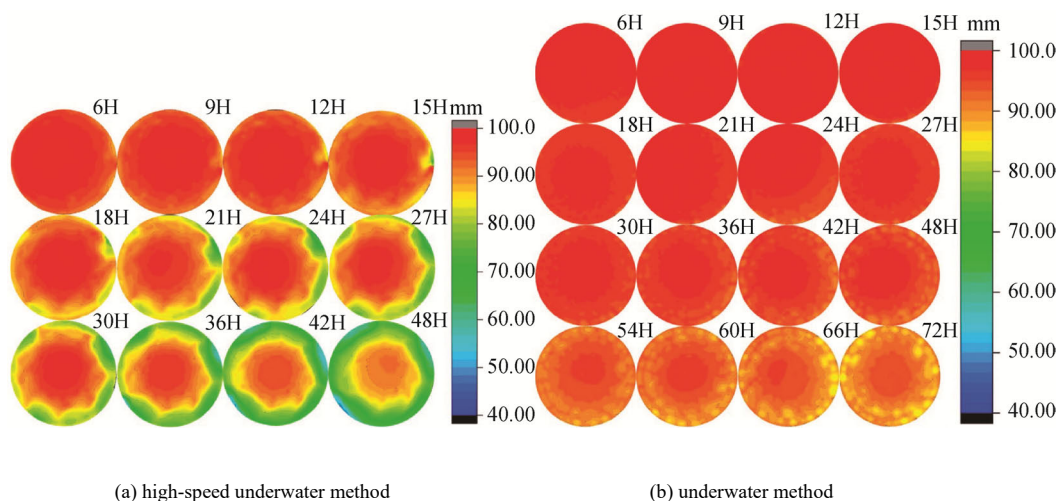
参数如下表所示。

表 4 磨损深度拟合参数<sup>[53]</sup>

Table 4 Fitting parameters of abrasion depth<sup>[53]</sup>

| Test method                  | $a$  | $b$  | $R^2$ |
|------------------------------|------|------|-------|
| Underwater method            | 0.45 | 0.99 | 0.98  |
| High-speed underwater method | 0.39 | 0.80 | 0.98  |

同时, 由于磨损体积损失与磨损深度成正比, 磨损深度与时间同样存在类似函数关系, Li 等<sup>[53]</sup>采用  $V=a^1t^b$ , 对磨损损失体积与时间进行了拟合。

图 3 混凝土表面冲磨进程<sup>[53]</sup>Fig. 3 Concrete profiles of the abrasion process<sup>[53]</sup>

## 2.7 其他抗冲磨性能表征方法

为了模拟更多的抗冲磨环境,研究人员也设计了其他的冲磨试验方法。Wu 等<sup>[18, 74]</sup>针对泥石流对混凝土的冲磨特点,配制具有一定浓度的料浆以模拟泥石流的状态,设计了转鼓磨损装置(见图 4),制备了不同料浆浓度[土水比(S/W)0~1.5]和碎石颗粒含量(质量分数 10%~30%)的泥石流材料进行泥石流磨损试验,研究了冻融循环作用和泥石流冲磨耦合作用下<sup>[75]</sup>,混凝土的耐久性规律。Wu 等<sup>[18]</sup>采用冲磨速率(g/h)表征钢纤维混凝土在泥石流下的抗冲磨强度,研究发现,随着钢纤维体积掺量增加(0~1.5%),冲磨速率降低(0.043~0.089 g/h);此外,对混凝土进行冻融循环之后,进行冲磨试验,随着混凝土冻融循环次数的增加(0~70 次)以及冲磨速度的增加(2.5~3.5 m/s),混凝土抗冲磨性能降低,范围为 0.04~0.21 g/h<sup>[75]</sup>。

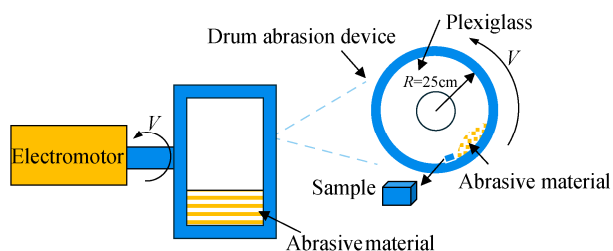


图 4 转鼓磨损设备示意图

Fig. 4 A schematic illustration of a rotating-drum abrasion device

针对空蚀与冲磨的耦合作用,Wang 等<sup>[76]</sup>研发了高速水流空蚀与冲磨混合作用实验方法和装置(见图 5),研究了泄水建筑物空蚀与冲磨耦合作用,结果表明,耦合作用下试件质量损失大于单独冲磨

与单独空蚀下试件质量损失之和,耦合作用磨蚀损伤平均增大 61.4%,说明试验装置具备有效的空蚀与冲磨耦合效果,证明了空蚀与冲磨之间存在促进和增强作用。

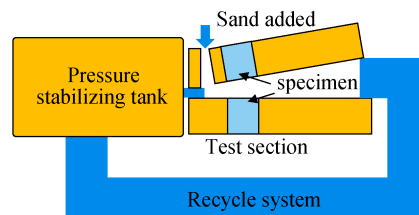


图 5 空化与冲磨耦合作用装置

Fig. 5 Test device for the combined action of cavitation and abrasion

对于海水冲磨环境,Islam 等<sup>[77]</sup>研究了关于海盐对暴露于模拟潮汐区、飞溅区海洋条下的结构混凝土的影响,根据海洋环境的特点,将其划分为大气区、飞溅/潮汐区和浸没区。在湿度和温度可变的室内建造了 6 个砖砌体水箱,通过控制水箱内液体的类型和状态来模拟不同区域环境。结果表明,飞溅区和潮汐区在潮水、波浪和温度波动等影响作用下,是海水中盐离子积累区域,混凝土结构更容易发生损伤。

## 3 混凝土抗冲磨损伤机理表征手段

目前对混凝土材料的冲磨损伤形成原因主要可分为推移质冲击、悬移质磨损以及水流的空蚀三方面的作用,近年来研究人员通过不同的实验表征手段,在不同角度探索了混凝土冲磨损伤破坏过程,本节笔者在表征手段的角度对近年来混凝土冲磨损伤

机理方面取得的研究进展进行总结。

### 3.1 推移质冲击损伤机理

推移质对混凝土的损伤作用可通过水下钢球法及高速水下钢球法进行模拟, 研究人员通过钢球从各个角度冲击刚性混凝土表面, 使混凝土表层发生脆性破坏, 导致表面砂浆剥落, 内部产生微裂纹, 粗集料松动甚至脱落, 对混凝土造成严重的冲击损伤, Liu 等<sup>[78]</sup>利用水下钢球法研究了混凝土因推移质作用而产生的磨损损伤主要有 2

种类型: 一是推移质持续滑动摩擦产生的剪切应力; 二是推移质对混凝土表面的冲击产生的冲击应力。Liu 等<sup>[70]</sup>改变钢球冲击角度, 发现了推移质破坏损伤方式与水性颗粒的冲击角有关: 当冲击角小于  $45^\circ$  时, 剪切应力为主导, 水性颗粒对混凝土表面持续冲切, 导致磨损面积增加; 当冲击角大于  $45^\circ$  时, 冲击应力为主导, 水性颗粒对混凝土表面持续冲击, 导致磨损深度变深。损伤破坏过程如图 6 所示。

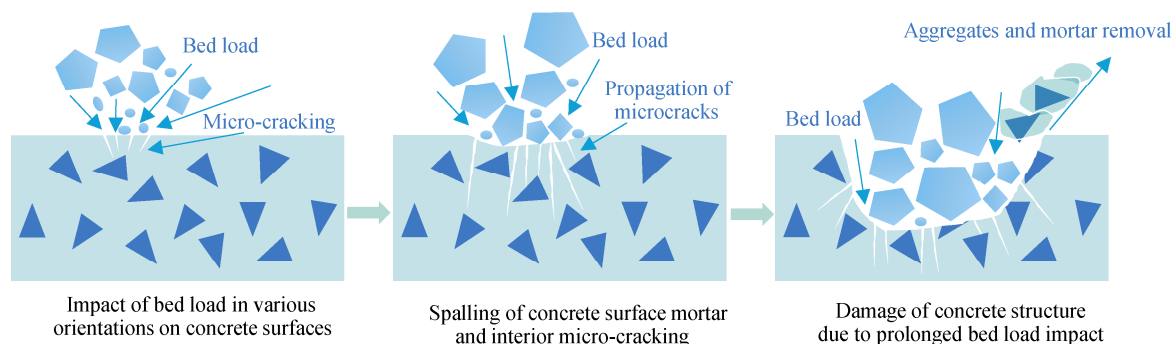


图 6 推移质冲击损伤过程  
Fig. 6 Bed load impact damage process

近年来, 研究人员以水下钢球法为基础, 通过理论计算进一步定量探讨了推移质冲击损伤过程与机理。Li 等<sup>[53]</sup>提出采用水下钢球法实验后样品的均方根高度  $S_q$ 、算数平均高度  $S_a$  随时间变化的折线图的拐点定量粗骨料进入磨蚀阶段, 粗糙参数拐点出现后, 混凝土的试件损伤程度加速, 骨料在混凝土中出现集中剥落。

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{A} \iint_A Z^2(x, y) dx dy} \quad (8)$$

$$S_a = \frac{1}{A} \iint_A |Z(x, y)| dx dy \quad (9)$$

其中:  $A$  为混凝土试件磨损表面的面积,  $\text{mm}^2$ ;  $Z$  为混凝土表面在点  $(x, y)$  处的高度,  $\text{mm}$ ;  $x$ 、 $y$  分别为建模后点的横、纵坐标。

Feng 等<sup>[21]</sup>对水下钢球对混凝土表面的撞击过程进行数值计算, 假设质量为  $m$  的钢球以速度  $V$  和冲击角  $\alpha$  撞击混凝土表面, 并以相同的速度  $V$  反弹回来, 提出了在垂直方向上对混凝土表面推移质冲击力的表达式:

$$F_y = \frac{2mv \cos \alpha}{\Delta t} \quad (10)$$

根据动能原理分析冲击力  $F_y$  的结果表明, 在反复切割和冲击作用下, 混凝土强度达到疲劳极限,

出现表面剥落等损伤, 由于水泥石的强度低于骨料强度, 首先达到疲劳极限并被磨损, 证明了粗糙和裸露的骨料比凹形水泥石承受更多的冲击力, 在切割和冲击的作用下, 整个粗骨料最终会脱落或逐渐被磨平。

### 3.2 悬移质冲磨损伤机理

悬移质对混凝土的损伤作用可通过风砂枪法、圆环法、旋转射流法及水砂枪法进行模拟, 高速挟砂介质对混凝土表层持续不断地冲刷磨蚀, 使混凝土表面薄弱的水泥石逐层磨蚀, 骨料暴露, 进而对骨料不断磨损, 最终骨料剥离基体, 对混凝土产生磨蚀损伤, 损伤破坏过程如图 7 所示。Gong 等<sup>[23]</sup>的研究表明, 当粗骨料的强度高于砂浆时, 骨料的剥落和磨碎程度低于砂浆, 骨料与砂浆的接触面积逐渐变小, 暴露在外的粗骨料在水性颗粒冲击下, 剥离混凝土基体, 导致砂浆中出现分散的空隙。Liu 等<sup>[70]</sup>通过水砂枪实验表征方法, 在能量角度分析混凝土的冲磨损伤原理, 认为悬移质冲磨过程中, 部分动能被试样吸收, 剩余能量用于磨料颗粒的回弹或转化为热能, 量化了冲磨过程中的能量组成:

$$U_i = \frac{1}{2} MV^2 = U_a + U_r + U_h \quad (11)$$

其中:  $U_i$  为总动能;  $M$  为含沙水流总质量;  $V$  为水

流流速； $U_a$  为总动能对试件的冲击能量； $U_r$  为磨料冲击混凝土表面后反弹的能量； $U_h$  则为该过程中所产生的热量。

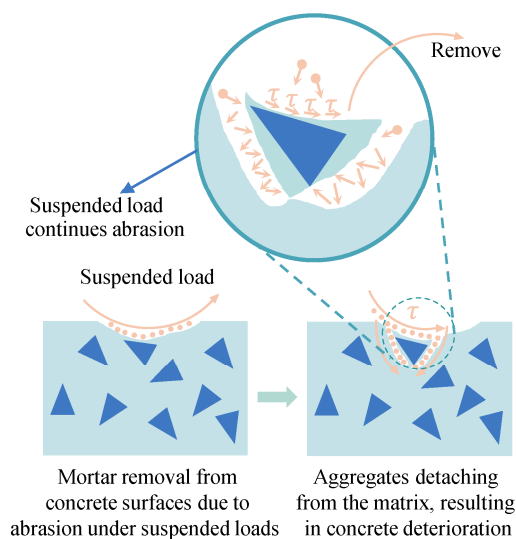


图7 悬移质磨损过程

Fig. 7 Suspended load abrasion damage process

表明悬移质随着固体颗粒持续冲击，松散沙子进入空隙并迅速旋转，增大了水砂摩擦产生的空隙，随后小空洞壁破裂，形成大空洞，研究进一步通过数据拟合，得到了不同悬移质冲磨条件下的混凝土损伤程度模型：

$$W = \frac{\frac{1}{2} M (V \sin \alpha)^2 \mu}{11450 S} + \frac{\frac{1}{2} M (V \cos \alpha)^2 \mu}{4050 S} \quad (12)$$

其中： $W$  为混凝土材料的体积损失； $\alpha$  为冲击角度； $\mu$  为导致混凝土破坏所消耗的能量与总动能的比值； $S$  为混凝土的抗压强度。

### 3.3 空蚀效应冲磨损伤机理

空蚀效应对混凝土的损伤作用在一定程度上可通过水砂枪法中高速水流冲击混凝土表面过程中模拟，在高速水流对混凝土表面冲击的同时，水流中的气泡撞击混凝土表面并破裂，产生冲磨作用，在混凝土表面形成侵蚀孔，在水流中的气泡持续撞击下，侵蚀孔表面向四周扩展，内部向纵深扩展，对混凝土产生空蚀损伤。Guo 等<sup>[79]</sup>研究发现，混凝土表层剥落后，在持续的冲磨作用下逐渐产生不均匀的磨损坑，导致水流冲刷时形成各种类型的涡流，使局部压力降低，在周围水体的压缩下产生强大的冲击力，从而加剧混凝土空蚀损伤，损伤破坏过程如图8所示。

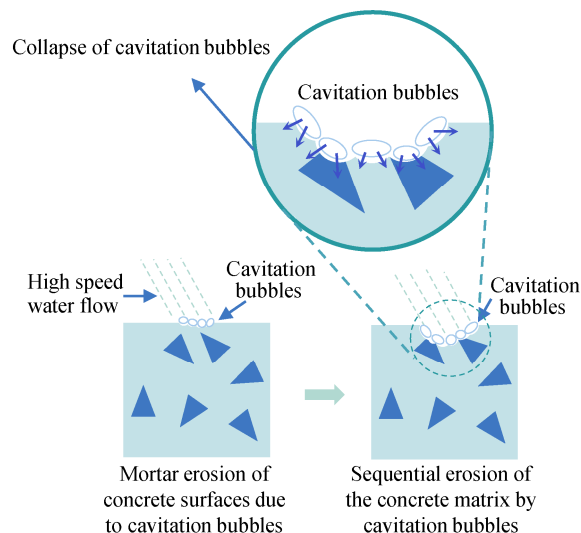


图8 空化损伤过程

Fig. 8 Cavitation erosion damage process

Gou 等<sup>[80]</sup>通过振动与搅拌结合的装置，表征模拟了空化、磨损和离子侵蚀协同对混凝土产生损伤，表明在氯离子环境中，氯离子会穿透混凝土表面的微裂纹，导致水化硅酸钙溶解，形成膨胀化合物，使得孔隙率增大，进而降低抗压强度，加剧了空化侵蚀，如图9所示。

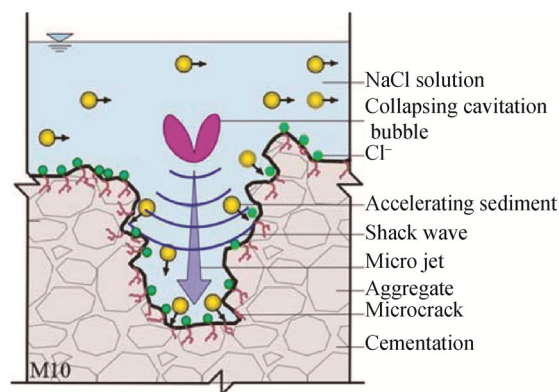


图9 混凝土在空化、磨损与离子侵蚀协同作用下损伤机理示意图<sup>[80]</sup>

Fig. 9 Failure mechanism of concrete under synergistic erosion caused by cavitation, abrasion and corrosion<sup>[80]</sup>

### 3.4 多因素耦合下混凝土的冲磨破坏加速机理

近年来，研究人员关注多环境因素耦合的作用下混凝土材料的冲磨破坏过程。在寒冷地区，水工混凝土会遭受冻融损伤和水力冲刷的共同作用，影响结构安全。Zhu 等<sup>[81]</sup>利用表面扫描手段，表征了混凝土在冲磨与冻融损伤耦合下的破坏机制，在表面冻融剥落后增加了表面粗糙度，降低了混凝土的抗冲磨性能。Wu<sup>[74]</sup>通过提出公式  $A_r = a + bu^2$  ( $A_r$  磨损

速率  $g/h$ ,  $u$  为泥石流流速  $m/s$ ), 证明了  $a$  值越高表明混凝土的磨损率越高,  $b$  值越高表明泥石流对混凝土的影响越大, 随着冻融次数的增加, 量化表征了混凝土磨损率增加的主要原因是冻融损伤使得混凝土孔隙率增加和力学性能降低, 在磨损过程中, 加剧了磨损损伤程度。Qin 等<sup>[15]</sup>通过 XRD 定量分析表征手段, 证明耦合条件下辅助胶凝材料的加入参加二次水化反应, 生成 C-S-H 凝胶填充孔隙, 降低混凝土孔隙率, 提高内部密实度, 进而提高了混凝土的抗冲磨性能。

李进辉等<sup>[82]</sup>采用分子动力学模拟手段, 构建了 C-S-H 及 C-A-S-H 分子模型, 采用水分子作为冲击质模拟推移质对 UHPC 胶凝浆体微结构抗冲磨性能, 并采用 C-A-S-H 基底内各类原子在水流冲磨后各类原子的位移变化来表征 UHPC 抗冲磨强度。距离水流越近, 原子的位移越大, 表明了水流冲磨作用对 C-A-S-H 基底原子的影响是随着距离的增加而逐渐减少的。基底内 Ca 原子的位移明显大于 Si、Al 和 O 原子, 通过与 C-S-H 分子模拟对比, 证实了 Al 相的存在提高了各类化学键的稳定性, 进而提高了 C-A-S-H 基底的结构稳定性, 从而削弱了冲磨作用的影响, 提高 UHPC 的抗冲磨强度。从纳微观尺度分析验证了冲磨与侵蚀作用下 UHPC 的微结构演变及性能退化机理。

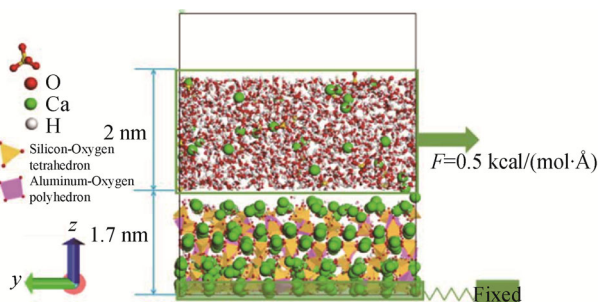


图 10 构建的冲磨与侵蚀耦合条件下 C-A-S-H 分子模型<sup>[82]</sup>  
Fig. 10 Constructed abrasion-resistance C-A-S-H molecular models<sup>[82]</sup>

## 4 结论

1) 混凝土的抗冲磨性能主要由表面水泥砂浆的强度、破坏后对裂缝发展程度的控制能力、粗集料的强度、粗集料与水泥浆体的粘结力、界面过渡区强度、材料对冲击能量的吸收能力等因素决定。因此, 目前抗冲磨混凝土的组成设计方向主要从通过提高混凝土密实性(掺加辅助胶凝材料或纳米填料)、改善耐磨能力(掺加耐磨骨料)、降低材料冲磨

开裂风险(掺加纤维或橡胶颗粒)几个方面来考虑。

2) 混凝土的抗冲磨性能与力学性能(抗压强度)直接相关, 抗冲磨强度总体随着抗压强度的提高而提高, 目前, 反应混凝土抗冲磨能力的表征指标较多, 然而均以冲磨损失量(质量/体积)为基础, 抗冲磨强度  $h/(kg \cdot m^{-2})$  包含了试验时间、磨损质量、磨损面积信息, 可更全面的反映出混凝土的抗冲磨性能。

3) 超高性能混凝土在抗冲磨性能上具有突出优势, 而基于标准组成的超高性能混凝土, 对纤维、骨料、胶凝体系等角度对其组成进行进一步优化的研究目前还相对有限, 是未来抗冲磨混凝土材料的发展方向之一。

4) 3D 扫描技术不仅具备更精确地测试出体积损失、磨损深度等相关指标的能力, 且可更全面地在 3D 扫描云图中观测到不同部位的磨损状况, 因此, 基于 3D 扫描技术, 分析提出能够更全面反映抗冲磨能力与冲磨损伤特征的参数, 具有进一步研究的科学价值。

5) 混凝土材料的冲磨损伤形成原因主要可分为推移质冲击、悬移质磨损以及水流的空蚀 3 方面。3 种机制相互共存、彼此促进, 协同对混凝土造成冲磨损伤, 近年来, 多环境因素耦合作用下的混凝土冲磨破坏过程逐渐成为研究热点, 区分模拟不同冲磨环境对混凝土的损伤机理, 对不同冲磨特征环境下的混凝土的性能提升具有重要意义。

## 参考文献:

- [1] WANG L, ZHOU S H, SHI Y, et al. Effect of silica fume and PVA fiber on the abrasion resistance and volume stability of concrete[J]. Compos Part B Eng, 2017, 130: 28–37.
- [2] WANG Q H, LIU R X, LIU P Y, et al. Effects of silica fume on the abrasion resistance of low-heat Portland cement concrete[J]. Constr Build Mater, 2022, 329: 127165.
- [3] 王磊, 何真, 杨华全, 等. 硅粉增强混凝土抗冲磨性能的微观机理[J]. 水利学报, 2013, 44(1): 111–118.  
WANG Lei, HE Zhen, YANG Huaquan, et al. J Hydraul Eng, 2013, 44(1): 111–118.
- [4] RAHMANI K, PIROTI S, GHAMEIAN M. Analysis of the effect of kevlar fibers on abrasion resistance, flexural strength and hydraulic conductivity coefficient of silica fume concretes[J]. Iran J Sci Technol Trans Civ Eng, 2020, 44(2): 669–674.
- [5] YAO Q, QI S C, WU F M, et al. Abrasion-resistant and temperature control of lining concrete for large-sized spillway tunnels[J]. Appl Sci, 2020, 10(21): 7614.
- [6] YEN T, HSU T H, LIU Y W, et al. Influence of class F fly ash on the abrasion-erosion resistance of high-strength concrete[J]. Constr Build Mater, 2007, 21(2): 458–463.
- [7] 吐尔洪·吐尔地, 曾力. HF 粉煤灰与硅粉混凝土抗冲耐磨性能试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2012(10): 111–113.

- TUErhong·TUErdi, ZENG Li. China Rural Water Hydropower, 2012(10): 111–113.
- [8] 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): 2140003.
- [9] CAI X H, HE Z, TANG S W, et al. Abrasion erosion characteristics of concrete made with moderate heat Portland cement, fly ash and silica fume using sandblasting test[J]. Constr Build Mater, 2016, 127: 804–814.
- [10] RAMESH KUMAR G B, SHARMA U K. Abrasion resistance of concrete containing marginal aggregates[J]. Constr Build Mater, 2014, 66: 712–722.
- [11] CHEN X R, HE Z, CAI X H, et al. Abrasion resistance of cement paste with granulated blast furnace slag and its relations to microhardness and microstructure[J]. J Wuhan Univ Technol Mater Sci Ed, 2022, 37(3): 410–415.
- [12] HORSZCZARUK E, BRZOZOWSKI P. Effects of fluidal fly ash on abrasion resistance of underwater repair concrete[J]. Wear, 2017, 376: 15–21.
- [13] JIANG C M, JIANG L H, CHEN C, et al. Evaluation and prediction on the hydraulic abrasion performance of high belite cement-based concrete[J]. KSCE J Civ Eng, 2021, 25(6): 2175–2185.
- [14] OJHA P N, TRIVEDI A, et al. High performance fiber reinforced concrete—for repair in spillways of concrete dams[J]. Res Eng Struct Mater, 2021, 7(4): 505–522.
- [15] QIN Q L, MENG Q S, YANG H M, et al. Study of the anti-abrasion performance and mechanism of coral reef sand concrete[J]. Constr Build Mater, 2021, 291: 123263.
- [16] ABID S R, SHAMKHI M S, MAHDI N S, et al. Hydro-abrasive resistance of engineered cementitious composites with PP and PVA fibers[J]. Constr Build Mater, 2018, 187: 168–177.
- [17] CHENG T C, CHENG A, HUANG R, et al. Abrasion properties of steel fiber reinforced silica fume concrete according to los angeles and water abrasion tests[J]. Mater Sci, 2014, 20(4): 498–502.
- [18] WU F, YU Q L, CHEN X Q. Effects of steel fibre type and dosage on abrasion resistance of concrete against debris flow[J]. Cem Concr Compos, 2022, 134: 104776.
- [19] WANG L, ZENG X M, LI Y, et al. Influences of MgO and PVA fiber on the abrasion and cracking resistance, pore structure and fractal features of hydraulic concrete[J]. Fractal Fract, 2022, 6(11): 674.
- [20] BAI Y, CAI Y, LI J. Effect of rubber particles on properties of abrasion resistant concrete[C]. 2021 7th Int Conf Hydraul Civ Eng & Smart Water Conserv Intell Disaster Reduct Forum ICHCE & SWIDR, 2021.
- [21] FENG L Y, CHEN A J, LIU H D. Effect of waste tire rubber particles on concrete abrasion resistance under high-speed water flow[J]. Int J Concr Struct Mater, 2021, 15(1): 37.
- [22] KANG J F, ZHANG B, LI G Y. The abrasion-resistance investigation of rubberized concrete[J]. J Wuhan Univ Technol Mater Sci Ed, 2012, 27(6): 1144–1148.
- [23] GONG J W, QIN C, TANG X J, et al. Experimental study and field application of abrasion resistance for the repair of concrete water-conveying structures[J]. Mater Struct, 2022, 55(7): 167.
- [24] OMODING N, CUNNINGHAM L S, LANE-SERFF G F. Effect of using recycled waste glass coarse aggregates on the hydrodynamic abrasion resistance of concrete[J]. Constr Build Mater, 2021, 268: 121177.
- [25] OMODING N, CUNNINGHAM L S, LANE-SERFF G F. Influence of coarse aggregate parameters and mechanical properties on the abrasion resistance of concrete in hydraulic structures[J]. J Mater Civ Eng, 2021, 33(9): 04021244.
- [26] TAN L X, YANG J, LI C X, et al. Effect of polyoxymethylene fiber on the mechanical properties and abrasion resistance of ultra-high-performance concrete[J]. Materials, 2023, 16(21): 7014.
- [27] LI J H, WANG X P, CHEN D D, et al. Design and application of UHPC with high abrasion resistance[J]. Constr Build Mater, 2021, 309: 125141.
- [28] 丁庆军, 李进辉, 耿雪飞, 等. 橡胶颗粒掺杂提高超高性能混凝土的抗冲磨性能及其机理[J]. 硅酸盐学报, 2020, 48(10): 1636–1643.
- DING Qingjun, LI Jinhui, GENG Xuefei, et al. J Chin Ceram Soc, 2020, 48(10): 1636–1643.
- [29] LI S X, TANG L, SHI W Y, et al. Experimental investigation on hydroabrasive erosion of steel fiber UHPC and rubber UHPC[J]. Adv Mater Sci Eng, 2020, 2020(1): 5920824.
- [30] RAJPUT B L, PIMPLIKAR S S. Abrasion and impact resistance of concrete produced with nano-silica[J]. Mater Today Proc, 2022, 59: 115–119.
- [31] RAHMANI K, RAHMANZADEH B, PIROTI S. Experimental study of the effect of water-cement ratio on compressive strength, abrasion resistance, porosity and permeability of nano silica concrete[J]. Frat Ed Integrità Strutturale, 2018, 12(44): 16–24.
- [32] HE Z, CHEN X R, CAI X H. Influence and mechanism of micro/nano-mineral admixtures on the abrasion resistance of concrete[J]. Constr Build Mater, 2019, 197: 91–98.
- [33] 韩俊强. 纳米颗粒对水工混凝土抗冲磨性的影响及其机理研究[J]. 混凝土, 2020(3): 97–100.
- HAN Junqiang. Concrete, 2020(3): 97–100.
- [34] IMAN M, SHAHHEIDARI F S, ALI HASHEMI S M, et al. Investigation of steel fiber effects on concrete abrasion resistance[J]. Adv Concr Constr, 2020, 9(4): 367–374.
- [35] N S AYOOB, S R A A N H Y H D. Water-impact abrasion of self-compacting concrete [J]. Mag Civ Eng, 2020, (96): 60–69.
- [36] ABID S R, HILO A N, AYOOB N S, et al. Underwater abrasion of steel fiber-reinforced self-compacting concrete[J]. Case Stud Constr Mater, 2019, 11: e00299.
- [37] HORSZCZARUK E. Abrasion resistance of high-strength concrete in hydraulic structures[J]. Wear, 2005, 259(1–6): 62–69.
- [38] HORSZCZARUK E K. Hydro-abrasive erosion of high performance fiber-reinforced concrete[J]. Wear, 2009, 267(1–4): 110–115.
- [39] ABID S R, HILO A N, DAEK Y H. Experimental tests on the underwater abrasion of engineered cementitious composites[J]. Constr Build Mater, 2018, 171: 779–792.
- [40] ZARRABI N, MOGHIM M N, EFTEKHAR M R. Effect of hydraulic parameters on abrasion erosion of fiber reinforced concrete in hydraulic structures[J]. Constr Build Mater, 2021, 267: 120966.
- [41] YAO D, LI J Z, XIAO H G, et al. Research on the surface abrasion resistance performance of basalt fiber reinforced concrete[J]. J Build Eng, 2024, 88: 109125.
- [42] DANDAPAT R, DEB A. A probability based model for the erosive wear of concrete by sediment bearing water[J]. Wear, 2016, 350: 166–181.
- [43] SABARINATHAN P, ANNAMALAI V E, SANGEETHA P. Mechanical and abrasion resistance properties of concrete containing

- recycled abrasive waste as partial replacement of fine aggregate[J]. Arab J Sci Eng, 2021, 46(11): 10943–10952.
- [44] 涂天驰. 超高性能混凝土的抗冲磨性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
- TU Tianchi. Study on abrasion resistance of ultra-high performance concrete[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.
- [45] 李志强. 基于有机纤维与弹性集料混杂的 UHPC 材料抗冲磨性能研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2023.
- LI Zhiqiang. Study on the Impact-abrasion Failure Behavior of UHPC Based on Hybrid of Organic Fibers and Elastic Aggregates[D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2023.
- [46] LI J H, YU Z, XU F, et al. The influence of curing system on the macroscopic performance and microstructure of anti-abrasive UHPC[J]. Coatings, 2024, 14(1): 45.
- [47] MOHSIN Z H, HILO A N, AL-GASHAM T S, et al. Experimental study on the depth of abrasion in hydraulic structures using samples of geopolymer concrete[J]. Mater Today Proc, 2022, 56: 1964–1971.
- [48] CHEYAD S M, HILO A N, AL-GASHAM T S. Comparing the abrasion resistance of conventional concrete and geopolymer samples[J]. Mater Today Proc, 2022, 56: 1832–1839.
- [49] RAMUJEE K, POTHARAJU M. Abrasion resistance of geopolymer composites[J]. Procedia Mater Sci, 2014, 6: 1961–1966.
- [50] WITZKE F B, BELTRAME N A M, ANGULSKI DA LUZ C, et al. Abrasion resistance of metakaolin-based geopolymers through accelerated testing and natural wear[J]. Wear, 2023, 530: 204996.
- [51] ABDULHASSAN N A, HILO A N, ABID S R, et al. Underwater surface abrasion of conventional and geopolymer concrete using the ASTM C1138 approach[J]. J Mater Res Technol, 2023, 25: 2556–2569.
- [52] MOHEBI R, BEHFARNIA K, SHOJAEI M. Abrasion resistance of alkali-activated slag concrete designed by Taguchi method[J]. Constr Build Mater, 2015, 98: 792–798.
- [53] LI J, BAI Y, CAI Y B, et al. Evaluation of concrete abrasion using traditional and high-speed underwater methods[J]. J Mater Civ Eng, 2023, 35(4): 0004693.
- [54] XU L Q, ZHANG K, LIU Y H. Hydraulic abrasion-resistant elastic epoxy resin materials[J]. Adv Mater Sci Eng, 2019, 2019: 9358139.
- [55] LIU Y W, CHO S W, HSU T H. Impact abrasion of hydraulic structures concrete[J]. J Mar Sci Technol, 2012, 20(3): 253–258.
- [56] 国家能源局. DL/T 5150—2017 水工混凝土试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
- [57] 中华人民共和国水利部. SL/T 352—2020 水工混凝土试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2020.
- [58] ASTM C1138, Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete (underwater method), ASTM International, West Conshohocken (PA) [S]. 2019.
- [59] OMODING N, CUNNINGHAM L S, LANE-SERFF G F. Influence of basalt micro-fibres on the abrasion resistance of concrete in hydraulic structures[J]. Mater Struct, 2021, 54(2): 65.
- [60] ALANSARI M S. Analysis of abrasion depth and rates in concrete[J]. Mod Appl Sci, 2021, 15(6): 1.
- [61] AYOOB N S, ABID S R. Analysis of abrasion rates in concrete surfaces of hydraulic structures[J]. IOP Conf Ser: Mater Sci Eng, 2020, 888(1): 012052.
- [62] ABID S R, ALI S H, MURALI G, et al. A simple suggested approach to reduce the testing time of concrete surface abrasion using ASTM C1138[J]. Case Stud Constr Mater, 2021, 15: e00685.
- [63] 吐尔洪·吐尔地, 王怀义. 水工混凝土抗冲磨试验方法(水下钢球法)改进研究[J]. 中国农村水利水电, 2014(4): 126–128.
- TUERHONG·TUERDI, WANG Huaiyi. China Rural Water Hydropower, 2014(4): 126–128.
- [64] 国家能源局. DL/T 5207—2021 水工建筑物抗冲磨防空蚀混凝土技术规范[S].
- [65] Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete by Sandblasting: ASTM C418-12[S]. ASTM International, 2012.
- [66] 刘瑞鑫. 硅粉对低热硅酸盐水泥混凝土抗冲磨性能的影响 [D] 沈阳: 沈阳建筑大学, 2023.
- LIU Ruixin. Effects of silica fume on the abrasion resistance of low-heat portland cement concrete[D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2023.
- [67] 白银, 李洁, 丁建彤, 等. 同强度等级下粉煤灰掺量对抗冲磨混凝土性能的影响[J]. 水电能源科学, 2022, 40(4): 166–169.
- BAI Yin, LI Jie, DING Jiantong, et al. Water Resour Power, 2022, 40(4): 166–169.
- [68] LIU Y W, YEN T, HSU T H. Abrasion erosion of concrete by water-borne sand[J]. Cem Concr Res, 2006, 36(10): 1814–1820.
- [69] HASAN M S, LI S S, ZSAKI A M, et al. Measurement of abrasion on concrete surfaces with 3D scanning technology[J]. J Mater Civ Eng, 2019, 31(10): 04019207.
- [70] LIU Q, LI L, ANDERSEN L V, et al. Studying the abrasion damage of concrete for hydraulic structures under various flow conditions[J]. Cem Concr Compos, 2023, 135: 104849.
- [71] GRDIC Z J, CURCIC G A T, RISTIC N S, et al. Abrasion resistance of concrete micro-reinforced with polypropylene fibers[J]. Constr Build Mater, 2012, 27(1): 305–312.
- [72] ISMAEL R H, HILO A N, AL-GASHAM T S, et al. Experimental study on erosion depth in hydraulic structures[J]. Mater Today Proc, 2021, 42: 2340–2345.
- [73] WITZKE F B, BELTRAME N A M, ANGULSKI DA LUZ C, et al. Abrasive wear of concrete measured by different accelerated tests and natural exposure[J]. Wear, 2023, 520: 204655.
- [74] WU F, CHEN X Q, CHEN J G. Abrasion resistance enhancement of concrete using surface treatment methods[J]. Tribol Int, 2023, 179: 108180.
- [75] WU F, CHEN X Q, CHEN J G. Abrasion resistance of concrete under coupled debris flow and freeze-thaw cycles[J]. Wear, 2023, 524: 204805.
- [76] WANG X, HU Y A, LI Z H. Experimental study on the mechanism of the combined action of cavitation erosion and abrasion at high speed flow[J]. Int J Concr Struct Mater, 2019, 13(1): 58.
- [77] ISLAM M S, MONDAL B C, ISLAM M M. Effect of sea salts on structural concrete in a tidal environment[J]. Aust J Struct Eng, 2010, 10(3): 237–252.
- [78] LIU Y W. Improving the abrasion resistance of hydraulic-concrete containing surface crack by adding silica fume[J]. Constr Build Mater, 2007, 21(5): 972–977.
- [79] GUO J J, GAO M H, WANG K, et al. Mechanisms and influential variables on the abrasion resistance hydraulic concrete[J]. Nanotechnol Rev, 2022, 11(1): 2997–3019.
- [80] GOU W J, HU Y, ZHANG H. Cavitation erosion in suspensions containing sediment and NaCl for cement paste and mortar[J]. Wear, 2024, 544: 205284.
- [81] ZHU X Y, BAI Y, CHEN X D, et al. Evaluation and prediction on abrasion resistance of hydraulic concrete after exposure to different

freeze-thaw cycles[J]. *Constr Build Mater*, 2022, 316: 126055.

[82] 李进辉. 抗冲磨超高性能混凝土制备与微结构调控机理研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2021.

LI Jinhui. Study on preparation and microstructure control mechanism of abrasion-resistant ultra-high performance concrete [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2021.

## Review on Performance and Characterization of Abrasion-Resistant Concrete Materials

ZHAO Mingyu<sup>1,2</sup>, ZHU Baoshuang<sup>1</sup>, WANG Qing<sup>1</sup>, ZHANG Gaozhan<sup>3</sup>, YANG Jun<sup>3</sup>, DING Qingjun<sup>2</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China; 2. State Key Laboratory of Silicate Materials for Architectures, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 3. School of Materials and Chemical Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China)

### Extended Abstract

Abrasion-resistant concrete is crucial for the durability and safety of hydraulic engineering structures, bridge piers, coastal embankments, and other specialized infrastructure. These structures are exposed to harsh conditions such as high-velocity water flow, sand erosion, and debris impacts. This review examines recent advancements in abrasion-resistant concrete materials, focusing on material composition, characterization methods, and abrasion damage mechanisms. It aims to provide theoretical insights and practical guidance for developing durable concrete in demanding environments.

Abrasion resistance is enhanced by optimizing material composition, including supplementary cementitious materials (SCMs), fiber reinforcement, wear-resistant aggregates, rubber particles, and ultra-high-performance concrete (UHPC). SCMs such as silica fume, fly ash, and slag powder improve hydration products and densify the microstructure, significantly enhancing abrasion resistance. However, excessive silica fume can cause shrinkage cracking. Fiber reinforcement, particularly steel fibers (0.75%–1.00% by volume), improves tensile strength and abrasion resistance, with reported increases of over 20%. Wear-resistant aggregates, including iron ore and recycled glass, play a critical role, with their mechanical properties and particle size significantly influencing performance. Rubberized concrete (5%–25% rubber content) absorbs impact energy, reducing abrasion damage, though excessive rubber content may compromise strength. UHPC, with its exceptional strength and density, offers superior abrasion resistance, and further optimization of its fiber, aggregate, and cementitious components is key to its performance in complex environments.

Concrete abrasion resistance is evaluated using various characterization methods that simulate different mechanisms of wear. The underwater method (ASTM C1138, DL/T 5150—2017) measures bed load impacts in high-velocity water flow. The sandblasting test, or water-borne sand jet method, simulates suspended load erosion under varying impact angles and velocities. The ring method and high-speed ring method (SL/T 352—2020) assess abrasion in low-velocity sand-laden water flow, while the rotating jet method simulates high-speed suspended load abrasion. The water-borne sand jet method combines suspended load and cavitation effects to provide a comprehensive evaluation of abrasion resistance. Recently, 3D scanning technology has been increasingly adopted to characterize surface morphology, offering precise measurements of wear depth and volume loss for detailed analysis of abrasion damage.

Abrasion damage mechanisms in concrete involve bed load impact, suspended load abrasion, and cavitation erosion. Bed load impact, caused by large particles such as rocks, results in brittle failure, surface spalling, and internal microcracking, as simulated by the underwater steel ball method. Suspended load abrasion, driven by the continuous scouring of sand particles, gradually erodes the cement paste and exposes aggregates, as modeled by the sandblasting and rotating jet methods. Cavitation erosion, caused by the collapse of bubbles in high-velocity water, forms erosion pits that expand over time, as simulated by the water-borne sand jet method. In real-world environments, concrete is often subjected to combined abrasion mechanisms alongside environmental stressors such as freeze-thaw cycles, debris flow, and seawater exposure. For example, freeze-thaw cycles weaken the concrete matrix, exacerbating erosion by suspended sediments. These combined effects significantly accelerate abrasion damage, highlighting the need for a deeper understanding of the synergistic interactions between abrasion mechanisms and environmental factors.

**Summary and prospects** This review highlights recent progress in abrasion-resistant concrete materials, emphasizing material composition, characterization methods, and damage mechanisms. It offers valuable insights for enhancing durability in harsh environments. Future research should focus on optimizing UHPC composition for specific applications, exploring the combined effects of environmental stressors on abrasion resistance, and leveraging advanced techniques such as 3D scanning for precise damage assessment. By clarifying abrasion mechanisms and improving material performance, this research will drive innovation in hydraulic engineering and coastal protection, ensuring infrastructure resilience in demanding service conditions.

**Keywords** anti-abrasion concrete; material composition; techniques for representation; abrasion resistance; abrasion mechanisms