

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2025.20250506

# 水工混凝土抗冻性快速检测方法研究现状及新设想

韩宏韬<sup>1</sup>, 宁逢伟<sup>2</sup>, 解颖超<sup>1</sup>, 王震<sup>1</sup>, 张耀<sup>1</sup>

(1. 南水北调(和龙)能源有限公司, 吉林 和龙 133500;

2. 中水东北勘测设计研究有限责任公司水利部寒区工程技术研究中心, 吉林 长春 130061)

**摘要:** 为保障水工混凝土抗冻性检验的及时性, 提高工程建设与运行安全, 系统回顾了既有混凝土抗冻性检测方法, 比较了慢冻法、快冻法、单面冻融法、抗盐冻剥蚀法的标准差异。分析了以快冻法为基础的抗冻性快速检测技术、以过程参数控制为依托的混凝土快速检测技术两个新趋势。提出了基于硬化混凝土结构参数、加速破坏试验、关键过程参数的混凝土抗冻性快速检测方法新设想, 构建了专用曲线核心理念, 阐明了新方法的具体应用流程, 为水工混凝土抗冻性检验提供了新思路。

**关键词:** 水工混凝土; 抗冻性; 检测方法; 快速检测

中图分类号: TV431

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2025)09-0078-05

## 1 引言

冻融破坏是寒区水工混凝土长期健康服役的主要威胁<sup>[1-2]</sup>。尽管混凝土抗冻设计技术日益成熟<sup>[3-4]</sup>, 但仍有不少工程出现冻害问题<sup>[5]</sup>, 如云峰电站、丰满电站、尼尔基水利枢纽、音河水库等<sup>[6-9]</sup>。究其原因, 抗冻混凝土配合比室内理论设计固然重要<sup>[10-11]</sup>, 能否成功落实则更为关键, 务必及时检验—反馈—纠偏。然而, 现有抗冻性检测周期长、时效性差, 难以满足优质、快速的施工需要。我国现行水利水电行业规范均基于快冻法进行混凝土抗冻等级设计与检验。不过, 快冻法仍旧不够“快”。寒区混凝土抗冻等级高, F300 试验耗时约 50 d; F400 试验耗时约 70 d。可研配合比设计、施工配合比设计、施工配合比复核、实体混凝土检验等均受此影响, 时效性差。以 F400 抗冻等级面板混凝土为例, 施工周期 3 个月左右, 基本与抗冻性检验时间相同(28 d+70 d), 若施工结束才发现损失无疑是巨大的。因此, 迫切需要寻找一种快速且准确的混凝土抗冻性检验方法。鉴于此, 本文回顾了既有混凝土抗冻性标准检测方法, 主要从试件尺寸、养护模式、冻融制度、评

价参数 4 方面对比了各自的异同点, 分析抗冻检测新趋势, 并提出快速检测新设想。

## 2 混凝土抗冻性标准检测方法现状

主要包括慢冻法、快冻法、单面冻融法、抗盐冻剥蚀法 4 个混凝土抗冻性标准检测方法。

### 2.1 慢冻法

慢冻法于 1962 年由前苏联引入我国, 慢冻法检测标准共 4 项, 见表 1。对比发现: ① 试件尺寸。四项标准<sup>[12-15]</sup>均采用立方体试件, 但尺寸不同。ГОСТ 10060<sup>[12]</sup> 含三种边长尺寸 100、150、200 mm, 其他三项标准<sup>[13-15]</sup>的试件尺寸只有 100 mm×100 mm×100 mm。ГОСТ 10060<sup>[12]</sup> 在苏联应用较广, 能够适应更大范围的骨料粒径需求。② 养护模式。ГОСТ 10060<sup>[12]</sup>、GB/T 50082<sup>[14]</sup> 和 TB/T 3275<sup>[15]</sup> 试件养护模式相同“标准养护 24 d 和泡水养护 4 d”。RILEM TC 117-FDC (tube test) 养护模式不同于其他 3 项标准, 具有“水+干+水”特点, 泡水养护 6 d+干燥养护 20 d+泡水(3% 氯化钠溶液) 养护 1 d。③ 冻融制度。RILEM TC 117-FDC (tube test)<sup>[13]</sup> 冻融制度为“冻结 16 h+溶解 8 h”, 循环耗时 24 h; 其他 3 项

收稿日期: 2025-03-19, 修回日期: 2025-04-28

基金项目: 中国南水北调集团新能源投资有限公司科研项目(NSBDXNY-KY-2024-006); 中水东北公司科技计划项目(202406)

作者简介: 韩宏韬(1986-), 男, 硕士、高级工程师, 研究方向为混凝土耐久性, E-mail: hanhongtao@csnwd.com.cn

通讯作者: 宁逢伟(1986-), 男, 博士、高级工程师, 研究方向为混凝土病害诊治, E-mail: 764366800@qq.com

表 1 国内外混凝土慢冻法检测标准情况

Tab. 1 Testing standards for slow freezing-thawing method at home and abroad

标准	立方体试件尺寸/mm <sup>3</sup>	养护模式	冻融制度	评价参数
ГОСТ 10060 <sup>[12]</sup>	100、150、200	标准养护 24 d 泡水养护 4 d	(-20~-15)℃气冻不少于 4 h, (15~20)℃水融不少于 4 h	质量损失率、抗压强度损失率
RILEM TC 117-FDC <sup>[13]</sup>	100	泡水养护 6 d 干燥养护 20 d 水或盐浸泡 1 d	16 h 水(盐)冻(20~-15)℃, (20±2)℃水(盐)融 8 h	吸水率、质量损失率
GB/T 50082-2024 <sup>[14]</sup> TB/T 3275-2018 <sup>[15]</sup>	100	标准养护 24 d 泡水养护 4 d	(-20~-18)℃气冻不少于 4 h, (18~20)℃水融不少于 4 h	质量损失率、抗压强度损失率

标准<sup>[12,14-15]</sup>均是“冻结 4 h+溶解 4 h”,单个循环耗时 8 h。RILEM TC 117-FDC(tube test)<sup>[13]</sup>冻融制度为水冻水融或盐冻盐融,与其他三项<sup>[12,14-15]</sup>“气冻水融”在冻融制度及原理方面均不相同。④评价参数。四项标准<sup>[12-15]</sup>评价参数均包括质量损失率;除 RILEM TC 117-FDC(tube test)<sup>[13]</sup>之外,其余三项标准<sup>[12,14-15]</sup>均引入抗压强度损失率。RILEM TC 117-FDC(tube test)<sup>[13]</sup>另有吸水率指标,多于其他 3 项标准。

2.2 快冻法

快冻法借鉴美国标准 ASTM C666 引入国内。快冻法检测标准共 7 项,见表 2。对比发现:①试件尺寸。ASTM C666<sup>[16]</sup>可以使用棱柱体或

圆柱体两种试件尺寸,其他标准<sup>[14-15,17-20]</sup>只有棱柱体试件,但尺寸也不相同。②养护模式。ASTM C666<sup>[16]</sup>中饱和和石灰水浸泡养护 14 d,其他标准为“标准养护 24 d+泡水养护 4 d”。③冻融制度。ASTM C666<sup>[16]</sup>包括气冻水融、水冻水融两种制度,且循环耗时相同。其他标准<sup>[14-15,17-20]</sup>仅采纳水冻水融。④评价参数。ASTM C666<sup>[16]</sup>包括相对动弹性模量、相对耐久性指数、长度变化率 3 个参数。其他标准<sup>[14-15,17-20]</sup>均没有引入长度变化率,但有质量损失率,它是快冻法与慢冻法结合而成的技术参数。JTG 3420<sup>[19]</sup>引入了相对耐久性指数,剩余 5 项标准<sup>[14-15,17-20]</sup>没有该参数。

表 2 混凝土快冻法检测标准情况

Tab. 2 Testing standards for fast freezing-thawing method at home and abroad

标准	试件尺寸	养护模式	冻融制度	评价参数
ASTM C666-2008 <sup>[16]</sup>	圆柱体或棱柱体。棱柱体:宽和高 5~125 mm,长 275~400 mm	饱和和石灰水中养护 14 d	程序 A:水冻水融,单个冻融循环 2~5 h 程序 B:气冻水融,单个冻融循环 2~5 h	相对动弹性模量、相对耐久性指数、长度变化率
SL/T 352-2020 <sup>[17]</sup>	100 mm×100 mm×400 mm	标准养护 24 d,泡水养护 4 d	水冻水融,单个冻融循环 2~4 h	相对动弹性模量、质量损失率
DL/T 5150-2017 <sup>[18]</sup>			水冻水融,单个冻融循环 2~4 h	相对动弹性模量、质量损失率
JTS/T 236-2019 <sup>[19]</sup>			水冻水融,单个冻融循环 2.5~4 h	相对动弹性模量、质量损失率
GB/T 50082-2024 <sup>[14]</sup>			水冻水融,单个冻融循环 2~4 h	相对动弹性模量、质量损失率
TB/T 3275-2018 <sup>[15]</sup>				相对动弹性模量、质量损失率、相对耐久性指数
JTG 3420-2020 <sup>[20]</sup>				相对动弹性模量、质量损失率、相对耐久性指数

2.3 单面冻融法

单面冻融法由国际材料与结构研究实验联合会 RILEM 提出,2009 年引入我国,单面冻融法检测标准共 5 项<sup>[13-15,20-21]</sup>,见表 3。对比发现:①冻融介质。RILEM TC 117-FDC 包括 CDF 法和 CF 法,冻融介质分别是盐和水;RILEM TC 176-IDC<sup>[21]</sup>中 CIF 法由 CDF 法演变而来,沿用盐介质;其他 3 项标准<sup>[14-15,20]</sup>均用盐介质。②试件尺寸。RILEM TC 176-IDC<sup>[21]</sup>试件尺寸 150 mm×110 mm×70 mm(长×宽×高),与国家标准、铁路行业标准相同;公路行业标准使用 Φ200 mm×80 mm 圆柱体试件,不同于另外 3 项标准<sup>[14-15,20]</sup>。③养护模式。RILEM TC 117-FDC<sup>[13]</sup>、RILEM TC176-IDC<sup>[21]</sup>、GB/T50082<sup>[14]</sup>、TB/T3275<sup>[15]</sup>

表 3 混凝土单面冻融法检测标准情况

Tab. 3 Testing standards for single-side freezing and thawing method at home and abroad

标准	试件尺寸	养护模式	冻融制度	评价参数
RILEM TC 117-FDC <sup>[13]</sup>	底面:150 mm×150 mm 高:50 mm~150 mm	6 d 泡水养护 21 d 干燥养护	CDF:盐冻盐融 单个冻融循环 12 h CF:水冻水融,单个冻融循环 12 h	单位面积剥落量
RILEM TC 176-IDC <sup>[21]</sup>	150 mm×110 mm×70 mm	1 d 拆模,6 d 泡水养护,21 d 干燥养护	1 个冻融循环 12 h	单位面积剥落量、质量增长率、超声波相对动弹性模量
GB/T 50082-2024 <sup>[14]</sup> TB/T 3275-2018 <sup>[15]</sup>	70 mm	干燥养护		
JTG 3420-2020 <sup>[20]</sup>	∅200 mm×80 mm	1 d 拆模,22 d 干燥养护,5 d 泡水养护	盐冻盐融,单个冻融循环 10 h	单位面积剥落量、质量增长率

养护模式相同,均为“1 d 拆模+6 d 泡水养护+21 d 干燥养护”,JTG 3420<sup>[20]</sup>不同,为“1 d 拆模+22 d 干燥养护+5 d 泡水养护”。④冻融制度。与养护模式相似,仅有 JTG 3420-2020<sup>[20]</sup>不

同于其他标准,溶解温峰由 20 ℃ 降至 10 ℃,冻融周期由 12 h 缩短至 10 h。⑤评价参数。RILEM TC 117-FDC<sup>[13]</sup>评价参数只有单位面积剥落量,RILEM TC 176-IDC<sup>[21]</sup>增加了质量增长率(吸水率)、超声波相对动弹性模量;GB/T 50082<sup>[14]</sup>、TB/T 3275<sup>[15]</sup>与 RILEM TC 176-IDC<sup>[21]</sup>相同,均有 3 个评价参数;JTG 3420-2020<sup>[20]</sup>不同,没有引入超声波相对动弹性模量。

## 2.4 抗盐冻剥蚀法

抗盐冻剥蚀法与单面冻融法相似,都是盐冻盐融试验。不同的是,单面冻融法盐溶液在试件底部,抗盐冻剥蚀法盐溶液在试件上表面。该方法 2020 年引入国内,现有检测标准共 3 项<sup>[17,21-22]</sup>,见表 4。由表 4 可知:①试件尺寸。ASTM C672<sup>[22]</sup>对表面尺寸要求最高,按照正方形表面估算,边长不少于 211 mm;RILEM TC 176-IDC<sup>[21]</sup>表面尺寸次之,边长 150 mm;SL/T 352<sup>[17]</sup>引入抗盐冻剥蚀法后,表面尺寸降幅较大,直径 110 mm。②养护模式。ASTM C672<sup>[22]</sup>、RILEM TC 176-IDC<sup>[21]</sup>均有较长的干燥养护过程,14 d 或 21 d,SL/T 352<sup>[17]</sup>不同,全程标准养护。③冻融制度。3 项标准大体相近,循环温度在 -20~20 ℃ 之间,总的循环时间一致,为 24 h。④评价参数。SL/T 352<sup>[17]</sup>集结了 ASTM C672<sup>[22]</sup>和 RILEM TC 176-IDC<sup>[21]</sup>的所有参数,包括定性评价参数和定量评价参数,即表面剥落状态分级(六级:0~5)、单位面积盐冻剥蚀量,相对比较完善。

表 4 混凝土抗盐冻剥蚀法检测标准情况

Tab. 4 Testing standards for salt resistant freeze-thaw denudation method at home and abroad

标准	试件尺寸	养护模式	冻融制度	评价参数
ASTM C672-2012 <sup>[22]</sup>	表面积至少 0.045 m <sup>2</sup> , 厚度至少 75 mm	14 d 标准养护, 14 d 干燥养护	盐冻盐融, 单个冻融循环 24 h 23~-18 ℃ 冻结 -18~23 ℃ 溶解	表面剥落状态分级(六级:0~5)
RILEM TC 176-IDC <sup>[21]</sup>	150 mm×150 mm×50 mm	1 d 拆模, 6 d 泡水养护, 21 d 干燥养护, 3 d 表面重饱水养护	盐冻盐融, 单个冻融循环 24 h 20~-20 ℃ 冻结 -20~20 ℃ 溶解温	单位面积盐冻剥蚀量
SL/T 352-2020 <sup>[17]</sup>	∅110 mm×50 mm	标准养护 28 d	盐冻盐融, 单个冻融循环 24 h, 23~-17 ℃ 冻结 -17~23 ℃ 溶解	表面剥落状态分级(六级:0~5)、单位面积盐冻剥蚀量

## 3 混凝土抗冻性检测方法新趋势

### 3.1 以快冻法为基础的水工混凝土抗冻性快速检测技术

四种主流的抗冻性检测方法中,慢冻法早在 2001 年被水工规范舍弃,一方面,试验周期长;另

一方面,气冻水融原理与水工混凝土服役环境不太相符,两个原因均致命。单面冻融法、抗盐冻剥蚀法属于盐冻盐融范畴,上表面或下表面浸泡均表现为表面盐类结晶剥蚀破坏,混凝土受冻破坏进程加快,试验周期缩短,模拟环境更适合除冰盐,与大坝混凝土水中服役工况相差甚远,物理化学过程契合度不高,不具备直接适用条件。经过多年实践,快冻法模拟的水冻水融工况仍最适合评价水工混凝土抗冻性。然而,快冻法试验周期长,难以满足施工质量管控时效性需要,实体检测问题尤其突出,传统抗冻性检验占用了大量停水检修开放时间,延长了决策周期,在水工建筑物逐渐进入“高龄”服役状态的今天,开发以快冻法为基础的抗冻性快速检测技术是新趋势之一。

### 3.2 以过程控制为主的实体混凝土抗冻性快速检测技术

混凝土抗冻性受水胶比、含气量等多因素影响,很难通过简单的拌合物性能检测有效预判混凝土抗冻等级。标准快冻法检测周期长,取样覆盖范围或代表性有限,开发实体混凝土龄期内的过程检验手段为新趋势之一。如超声波、动弹性模量等无损检测技术,未来可能开发便捷、高效且精确的设备与方法,实现结构实体小范围混凝土抗冻性能检测。

## 4 抗冻性快速检测方法新设想

### 4.1 硬化混凝土结构参数预测方法

结合《水工混凝土耐久性技术规范》(DL/T 5241-2010)<sup>[23]</sup>、《混凝土结构耐久性设计与施工指南》(CCES 01-2004)<sup>[24]</sup>、《铁路混凝土结构耐久性设计规范》(TB10005-2010)<sup>[25]</sup>等关于抗冻混凝土气泡间距系数不大于 300 μm 具体要求,以及胡泽清等<sup>[26-29]</sup>发现的气泡间距系数与抗冻等级之间相关性研究成果,提出了采用早龄期气泡间距系数快速预测抗冻等级的设想。所谓“早龄期”为不超过设计龄期且不超过 28 d 的时间节点,期望达到抗冻等级不迟于抗压强度的预测效果。方法流程见图 1。

该方法聚焦混凝土施工配合比设计及实施阶段,设计过程同步开展早龄期至设计龄期(3、7、14、28、... d)气泡间距系数和抗冻等级。对多组施工配合比试验结果进行汇总,绘制对照表格。施工过程根据实体混凝土气泡间距系数查对照表快速预判抗冻等级。气泡间距系数大小与混凝土含气量、浆骨比等有关,依据对照表预判抗冻等级

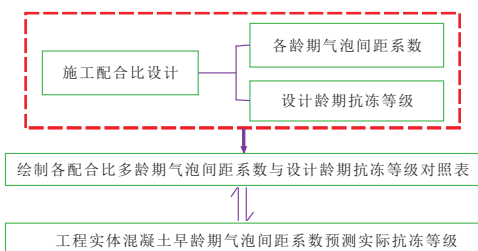


图 1 硬化混凝土结构参数预测方法流程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of prediction method based on structure parameters

也要综合这些因素。该方法在原材料、配合比均不变条件下适用,对照表具有“专用曲线”特点。抗冻等级还受硬化含气量、气孔直径、水胶比、掺合料品种及掺量等影响。当专用曲线经验数据积累到相当数量,该方法有望升级成气泡间距系数等多因素预测抗冻等级的普适性依据。

#### 4.2 关键过程参数预测方法

采用快冻法冻融试验过程关键参数进行预测,从冻融循环破坏原理出发<sup>[30]</sup>,根据早期试验迹象预判长期抗冻性。现有评价参数如相对动弹性模量、质量损失、吸水率等均不敏感,ASTM C666<sup>[16]</sup>提出的长度变化率有一定的借鉴和参考价值。陈蔚凡<sup>[31-32]</sup>提出根据冻融变形率预测抗冻等级的方法,开发了冻融变形测试系统,发现残余变形率与抗冻等级(相对动弹性模量)具有较好的相关性。不过,该试验装置并未标准化,一次或多次冻融循环变形率缺少可靠的累积变形判据。尤其对于抗冻等级非常高的混凝土,几次冻融循环变形率判断数百次冻融循环后混凝土劣化情况仍是一个技术难题。总的来说,关键过程参数预测抗冻等级的探索价值很高,倘若在两次冻融循环以内取得结论,能够达到与抗压强度相同的试验周期。

#### 4.3 加速破坏试验预测方法

加速破坏试验预测方法即用一种周期更短的试验方法提前预判快冻法抗冻等级。单面冻融法、抗盐冻剥蚀法试验周期均比快冻法短。极端温度冻融交替侵蚀也有望显著加快破坏进程<sup>[33]</sup>。鉴此,加速破坏试验预测方法流程见图 2。

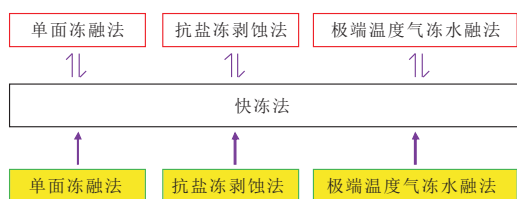


图 2 加速破坏试验预测方法流程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of prediction method based on accelerated failure experiments

单面冻融法、抗盐冻剥蚀法、极端温度气冻水

融法(-60℃, +60℃)是快速预判抗冻等级的新设想。实施过程中,三个加速试验方法选定其一即可。在可研配合比或施工配合比设计过程,构建 3~5 个水胶比、3 个含气量的多组混凝土设计龄期快冻法抗冻等级和加速破坏试验次数对照关系,绘制基于快冻法抗冻等级的加速破坏试验次数对照表,作为快速预判依据。施工过程中,根据设计龄期加速破坏试验次数,结合事先绘制对照表,快速预判混凝土快冻法抗冻等级。与结构参数预测方法、关键过程参数预测方法相比,该方法能够获取混凝土冻融破坏的直接证据,只是拓展了现有方法的预判用途,可信度更高。借鉴回弹法推定混凝土抗压强度专用曲线技术思路,短期内该方法仍只适合特定骨料、强度等级等条件下抗冻等级的快速预判,小范围指导工程设计和施工。

## 5 结论

通过梳理既有混凝土抗冻性标准检测方法,指出了快冻法检测周期长、时效性不足的突出问题,提出了以快冻法抗冻等级为基础的快速检测技术开发思路及绘制专用曲线的技术应用理念,构建了基于硬化混凝土结构参数、加速破坏试验的新理念和新方法,阐明了过程参数变形率预判抗冻等级的先进性和缺少累积变形判据的局限性。

#### 参考文献:

- [1] MEHTA P K. Durability of concrete-fifty years of progress? [J]. Am. concr. inst., SP,1991,126.
- [2] WANG R J, HU Z Y, LI Y, et al. Review on the deterioration and approaches to enhance the durability of concrete in the freeze-thaw environment[J]. Construction and building materials, 2022, 321: 126371.
- [3] NING N, SUN C Y, MA Z J, et al. A review of incorporating PCMs in various types of concrete: Thermal and mechanical properties, crack control, frost-resistance, and workability[J]. Journal of energy storage, 2025, 114: 115814.
- [4] ZHAO Y X, XI X Y, ZHENG Y X, et al. Evaluation indexes of the frost resistance of recycled aggregate concrete and improvement mechanisms: A review[J]. Journal of building engineering, 2024, 95: 110331.
- [5] ROSENQVIST M, PHAM L W, TERZIC A, et al. Effects of interactions between leaching, frost action and abrasion on the surface deterioration of concrete[J]. Construction and building materials, 2017, 149: 849-860.
- [6] 宋岩, 耿凡坤, 颜景枫. 云峰大坝坝顶表面修补处理方案的优化及实施[J]. 大坝与安全, 2019(2): 65-68.

- [7] 刘勇, 林运东. 寒区电站尾水闸墩混凝土冻融破坏分析[J]. 东北水利水电, 2021, 39(5): 64-66.
- [8] 马红军, 杨甫权. 寒区水工混凝土破坏及防治措施[J]. 黑龙江水专学报, 2005(3): 107-108.
- [9] 宋恩来. 丰满大坝溢流面裂缝和渗水及冻融与冻胀对坝体结构安全影响分析[J]. 东北电力技术, 2008, 29(2): 1-6, 24.
- [10] CHATTERJI S. Freezing of air-entrained cement-based materials and specific actions of air-entraining agents[J]. Cement and concrete composites, 2003, 25(7): 759-765.
- [11] XUELIANG G E, CAIRONG L U, GUOXING M E I. Mechanical and frost resistance properties of high air content hydraulic concrete[J]. Materials research innovations, 2015, 19(S5): S5-510-S5-513.
- [12] 王宝卿, 杨晶杰. 混凝土抗冻性能试验方法的探讨[J]. 东北水利水电, 2004, 22(7): 46-47.
- [13] SETZER M J. Draft recommendations for test methods for the freeze-thaw resistance of concrete Slab test and cube test[J]. Materials and structures, 1995, 28(6): 366-371.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家市场监督管理总局. 混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准: GB/T 50082-2024[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2024.
- [15] 国家铁路局. 铁路混凝土: TB/T 3275-2018[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2018.
- [16] Standard test method for resistance of concrete to rapid freezing and thawing: ASTM C666-2008[S]. Pennsylvania: Annual book of ASTM Standards volume information, 2008.
- [17] 中华人民共和国水利部. 水工混凝土试验规程: SL/T 352-2020[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2020.
- [18] 国家能源局. 水工混凝土试验规程: DL/T 5150-2017[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2017.
- [19] 交通运输部. 水运工程混凝土试验检测技术规范: JTS/T 236-2019[S]. 北京: 人民交通出版社, 2019.
- [20] 中华人民共和国交通运输部. 公路工程水泥及水泥混凝土试验规程: JTG 3420-2020[S]. 北京: 人民交通出版社, 2020.
- [21] SETZER M J, AUBERG R, KASPAREK S, et al. CIF-Test-Capillary suction, internal damage and freeze thaw test [J]. Materials and structures, 2001, 34(9): 515-525.
- [22] Standard test method for scaling resistance of concrete surfaces exposed to deicing chemicals: ASTM C672-2012 [S]. Pennsylvania: Annual book of ASTM Standards volume information, 2012.
- [23] 国家能源局. 水工混凝土耐久性技术规范: DL/T 5241-2010[S]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [24] 中国土木工程学会. 混凝土结构耐久性设计与施工指南: CCES 01-2004[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- [25] 中华人民共和国铁道部. 铁路混凝土结构耐久性设计规范: TB 10005-2010[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2010.
- [26] 胡泽清, 邹一宝, 马芳. 用气泡参数判定混凝土抗冻耐久性的探讨[J]. 粉煤灰, 2009, 21(3): 3-4, 13.
- [27] YANG C, ZHANG J X, WANG J G, et al. Post-evaluation of frost resistance of cement concrete entities based on pore spacing factors of hardened concrete [J]. Construction and building materials, 2024, 411: 134342.
- [28] YUAN J, DU Z Y, WU Y, et al. Freezing-thawing resistance evaluations of concrete pavements with deicing salts based on various surfaces and air void parameters[J]. Construction and building materials, 2019, 204: 317-326.
- [29] YUAN J, WU Y, ZHANG J K. Characterization of air voids and frost resistance of concrete based on industrial computerized tomographical technology [J]. Construction and building materials, 2018, 168: 975-983.
- [30] 莫黎, 魏留明, 周强, 等. 不同养护制度下粉煤灰混凝土压缩冻融损伤演化[J]. 水电能源科学, 2024, 42(7): 101-104.
- [31] 陈蔚凡. 快速预测混凝土抗冻标号的研究(一)[J]. 港口工程, 1993, 13(3): 11-20.
- [32] 陈蔚凡. 快速预测混凝土抗冻标号的研究(二)[J]. 港口工程, 1993, 13(4): 10-16.
- [33] LI C, LI J Q, REN Q, et al. Durability of concrete coupled with life cycle assessment: Review and perspective [J]. Cement and concrete composites, 2023, 139: 105041.

## Research Progress and New Ideas on Rapid Test Methods for Frost Resistance of Hydraulic Concrete

HAN Hong-tao<sup>1</sup>, NING Feng-wei<sup>2</sup>, XIE Ying-chao<sup>1</sup>, WANG Zhen<sup>1</sup>, ZHANG Yao<sup>1</sup>

(1. South to North Water Diversion (Helong) Energy Co., Ltd., Helong 133500, China;

2. China Water Northeastern Investigation, Design and Research Co., Ltd., Changchun 130061, China)

**Abstract:** To ensure the timeliness of frost resistance testing of hydraulic concrete and improve the safety of construction and operation of project, the methods for testing the frost resistance of concrete were systematically reviewed. The standard differences among slow freezing method, fast freezing method, single-sided freeze-thaw method and salt-resistant erosion method were compared. Two new trends were analyzed including the rapid detection technology of frost resistance based on the rapid freezing method and the rapid detection technology of concrete relying on process parameter control. The new ideas for rapid testing methods of frost resistance were proposed based on structures parameters of hardened concrete, accelerated destructive experiment, key process parameters of freezing and thawing. The concept of dedicated curves was established, and the specific procedures of the new methods was clarified. The work of all the above could provide new ideas for the frost resistance testing of hydraulic concrete.

**Key words:** hydraulic concrete; frost resistance; test method; rapid test