



冻融试验参数对泡沫混凝土抗冻性影响综述

牛思稳, 孙洪军

(辽宁工业大学 土木建筑工程学院, 辽宁 锦州 121001)

摘要: 泡沫混凝土由于其轻质、隔热性、耐火性等优异性能,在许多国家被广泛用于面板、墙壁、道路填料、隔热墙板等方面。随着其应用场景多样化,复杂环境下泡沫混凝土的抗冻性能备受关注。文章主要总结了在冻融试验过程中,单次冻融循环时间、冻融温度、冻融方式、试件尺寸对泡沫混凝土抗冻性能的影响,并指出当前研究的不足。结果表明:冻结时间的长短与质量损失呈反比关系;随着冻结温度的降低,泡沫混凝土的抗冻性能呈下降趋势并趋于稳定;融化温度选择不当会导致泡沫混凝土开裂以及融化不完全;气冻水融法和慢冻法更利于维持泡沫混凝土的结构完整性,但其操作复杂和具有较长试验周期;随着试件尺寸的增大,试件的冻融破坏程度增加,100 mm立方体试件的抗冻表现最佳。

关键词: 泡沫混凝土; 冻融循环; 试验方法

中图分类号: TU528.2

文献标志码: A

文章编号: 1673-8993(2025)06-0001-08

doi:10.13402/j.gcjs.2025.06.067

Summary on influence of freeze-thaw test parameters on frost resistance of foam concrete

NIU Siwen, SUN Hongjun

(College of Civil Engineering and Architecture, Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001, Liaoning, China)

Abstract: Foam concrete is widely used in many countries for panels, walls, road fillers, insulated wall panels, etc., due to its excellent properties such as light weight, thermal insulation, and fire resistance. With the diversification of its application scenarios, the frost resistance of foam concrete in complex environments has attracted much attention. In this paper, the effects of single freeze-thaw cycle time, freeze-thaw temperature, freeze-thaw mode and specimen size of foam concrete on its frost-thaw resistance during freeze-thaw test are summarized, and the shortcomings of current research are pointed out. The results show that the length of freezing time is inversely proportional to mass loss. With the decrease of freezing temperature, the frost resistance of foamed concrete showed a decreasing trend and stabilized. Improper selection of melting temperature will lead to cracking and incomplete melting of foam concrete; The air-frozen water-thaw method and slow-freezing method are more conducive to maintaining the structural integrity of foam concrete, but it is necessary to pay attention to the complex operation and long test period. With the increase of the size of the specimen, the degree of freeze-thaw damage of the specimen increases, and the frost resistance of the 100 mm cube specimen is the best.

Key words: foam concrete; freeze-thaw cycle; test method

随着我国工业化进程不断加快,建筑节能减排越来越受到人们的重视,采用环保、低能耗的

新型材料成为建筑行业的当务之急^[1-3]。泡沫混凝土作为一种环保型新型建筑材料,具有废物利

收稿日期: 2024-10-24

作者简介: 牛思稳(2000—),男,硕士研究生,从事装配式复合墙板冻融循环性能研究。

通信作者: 孙洪军(1973—),男,博士,教授,从事装配式混凝土结构研究。

用、节能环保和低成本的优势^[4]，具备轻质、保温、耐火和抗震等多种优良特性^[5]。相较于其他类型混凝土，泡沫混凝土由于其保温性能优越，被广泛应用于建筑保温材料、园林装饰、地基回填、补偿地基等^[6]。随着泡沫混凝土在多元化应用场景中的广泛运用，其在复杂环境条件下的抗冻性能备受关注。泡沫混凝土会因外界正负温差交替造成冻融破坏，引起其抗压强度降低，质量损失和保温特性削弱^[7]。冻融循环是影响混凝土结构耐久性的重要因素^[8]。目前，针对冻融环境下泡沫混凝土性能的研究较少^[9]，关于泡沫混凝土经受冻融循环的文献大多致力于研究抗压强度，冻融循环参数对泡沫混凝土在冻融循环下抗冻性的影响研究较少。所以，认识并研究影响泡沫混凝土冻融循环试验的宏观参数及影响，进而通过实际情况优化调控参数，获得与实际耐久性相符的泡沫混凝土抗冻性结果具有现实意义。

1 泡沫混凝土冻融试验方法

泡沫混凝土在冻融试验中通常会将试件置于饱和水中，然后进行冻融循环。在此过程中，测量试件的初始质量、试样长度以及抗压强度，并对比其质量损失和抗压强度的变化。冻土区混凝土结构的开裂破坏和承载能力丧失是常见问题^[10]。为了确保泡沫混凝土在极端冻融环境中的长期稳定性和安全性，科学系统地评估其性能并制定相应的冻融循环试验规范至关重要。

根据中国现行标准《泡沫混凝土应用技术规程》(JGJ/T 341—2014)^[11]和《蒸压加气混凝土性能试验方法》(GB/T 11969—2020)^[12]，对于泡沫混凝土的抗冻性有具体要求：在非供暖区域，抗冻等级需达到 D15；在供暖区域，当相对湿度 ≤

60%时，抗冻等级应为 D25；当相对湿度 > 60%时，抗冻等级需达到 D35；而在干湿交替环境中，抗冻等级则需提高至 D50。在建筑设计阶段，应根据项目的气候条件(如是否需要供暖、湿度水平)以及建筑部位(如外墙、屋顶、地下室等)的具体要求，选择适当的泡沫混凝土抗冻等级。

目前，多数泡沫混凝土的冻融试验依据 JGJ/T 341—2014 进行，但也有部分研究者采用了不同的冻融参数。部分学者泡沫混凝土冻融试验参数选择如表 1 所示。由表 1 可以看出，研究者在泡沫混凝土冻融试验中所选用的单次冻融循环时间、温度、冻融方法以及试块尺寸存在差异。

1.1 单次冻融循环时间

学者们在进行冻融循环试验时，对于循环时间的选择，实际上反映了对试验速度和精度的权衡。并不是所有的冻融时间都会导致冻融循环，较短的融化时间可能导致融化阶段不完全，从而产生随时间累积的残余应力；而较长的融化时间虽然能使融化更加彻底，但也可能引起混凝土结构的变化，进而影响泡沫混凝土的性能。汪青杰等^[18]的研究表明，冻结时间的长短与质量损失呈反比关系：冻结时间越短，混凝土试块的质量损失越大；冻结时间越长，抗压强度则越低，但强度并未随质量减少而下降。如表 1 所示，不同的冻融循环时间，类似于标准中慢冻法与快冻法的选择。慢冻法通常指每次循环时间超过 4 h 的试验方法，而快冻法则在 2 ~ 4 h 内完成一次循环。这两种方法各有适用场景，主要取决于混凝土工程的具体抗冻性能要求^[19]。目前，关于泡沫混凝土单次冻融循环时间对其性能影响的研究尚不多见，仍需进一步探讨。针对泡沫混凝土的单次冻融循环时间研究应更加系统化，通过将单次冻融循环

表 1 泡沫混凝土冻融试验参数选择

作者	单次冻融循环 时间/h	温度/°C		冻融方法	试件尺寸/mm
		最高值	最低值		
TAN 等 ^[13]	8	40	-40	水冻水溶	100 × 100 × 100
DONG 等 ^[14]	11	20	-18	水冻水溶	100 × 100 × 100
冯扣宝等 ^[15]	11	20	-18	—	100 × 100 × 100
刘迪等 ^[16]	11	25	-15	气冻气溶	150 × 150 × 150
高志涵等 ^[17]	—	10	-18	水冻水融	100 × 100 × 100

时间的变化与泡沫混凝土的微观结构变化进行关联分析,深入理解其抗冻性能的机制。此外,还需考察不同环境条件(如温度、湿度)下单次冻融循环时间对泡沫混凝土性能的影响,以便为实际工程应用提供更具指导性的建议。

1.2 试验温度

在泡沫混凝土的冻融循环试验中,冻融循环试验中的温差越大,试件的冻融劣化就越快^[20]。尽管学者们对冻融循环的上下限温度设定差异不大,但温度的选择仍然是一个关键因素。考虑到实际环境条件及温度循环制度对混凝土抗冻性能的影响,通常选择的温度范围为 $-20\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。这个温度范围不仅决定了冻融循环的温差,还直接影响试验结果的准确性和可靠性。

融化温度的不同直接影响了冻融循环过程中混凝土的应力变化和水分迁移。随着冻融循环最低温度的降低,混凝土的劣化程度会加剧^[21]。冻结温度对不同密度的泡沫混凝土抗冻性的影响也不尽相同,泡沫混凝土密度的增加会降低孔隙率,从而减少冻结过程中的水分含量和冻胀压力。CUI等^[22]通过设置 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 这4种冻结温度,研究了其对泡沫混凝土抗冻性的影响,结果表明:在相同条件下,对于低密度试样,冻结温度对其累积应变的影响尤为明显。在相同密度下,随着冻结温度的降低,在动荷载作用下,析出物逐渐析出,试样的孔结构受到严重破坏,使得试样在动荷载作用下更容易发生变形,导致冻融过程对力学性能的劣化更加严重。范坤坤^[23]在冻融试验中控制冻结温度,进一步研究了泡沫混凝土冻融循环后的动力特性变化规律,发现随着冻融循环温度的降低,泡沫混凝土的抗冻性能呈下降趋势。泡沫混凝土内部的孔隙水因冻胀作用产生的温度应力逐渐趋于平稳,导致内部孔隙损伤减弱,抗冻性变化趋势逐渐稳定。刘迪等^[24]揭示了3种融化温度对裂缝形成的影响,在 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,试件出现大量开裂现象;而在 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,表面仍有部分结冰未融化。然而,3种融化温度下的冻融循环试验结果相差不大。如果温度选择不当,可能会导致混凝土试件在循环过程中出现大量开裂,甚至试件表面结冰而未能完全融化,从而影

响对混凝土抗冻性能的准确评估。

上述研究说明:冻融循环试验温度对泡沫混凝土的抗冻性能具有显著影响。为了确保试验结果的可靠性,必须综合考虑温度范围、泡沫混凝土的密度和孔隙率、微观结构损伤以及外部荷载等因素。合理设置冻融循环的冻结和融化温度,有助于准确评估泡沫混凝土的抗冻性能,并减少试验过程中的过度损伤。

1.3 冻融方式

在评估泡沫混凝土抗冻性能的研究领域,学者们开发了多种试验方法。这些方法包括临界饱和度测试^[25],用于揭示混凝土在特定饱和度下的性能;顶面冻结测试^[26],旨在模拟顶部受冻的情况;此外还有依据《特性材料拦阻系统》(MH/T 5111—2015)^[27]和《Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing》(ASTM—C666)标准的冻融循环试验。泡沫混凝土抗冻试验方法的对比如表2所示。然而,临界饱和度和顶面冻结测试在全面评估泡沫混凝土的冻融耐久性方面存在局限性。我国目前大部分标准采用气冻水融的冻融循环试验评定泡沫混凝土的抗冻性,但忽视了试验样品与实际暴露在自然环境中的混凝土建筑物之间的差异。寒冷环境下,温度变化速率、试样预处理等多种因素都会影响泡沫混凝土的抗冻性。因此,为了更准确评估泡沫混凝土抗冻性,需采用科学的试验方法,模拟真实环境中的变化,并开发针对性的冻融循环试验^[28]。

根据MH/T 5111标准,冻融测试方法在非饱水状态下模拟混凝土的冻融过程,这更接近实际使用情况。而ASTM C666标准则规定了两种冻融循环方法:1)在水中完成整个冻融循环,类似于我国的快冻法;2)在空气中冻结并在水中融化,类似于我国的慢冻法。由于ASTM C666标准在控制泡沫混凝土冻融循环过程中含水量方面存在不足,研究人员基于该标准进行了创新性改进,引入了初始渗透深度、吸收率及吸收速率等多个关键因素^[29]。

虽然慢冻法更接近实际环境,但由于试验周期长、工作量大,不适合大规模测试。相比之下,快速冻融法则具有试验周期短、灵敏度高的优

表 2 泡沫混凝土抗冻试验方法的对比

规范	试样预处理	冻融循环制度	表征参数
《蒸压加气混凝土性能试验方法》(GB/T 11969—2020) 《泡沫混凝土制品性能试验方法》(JC/T 2357—2016)	浸泡在(20±2)℃水中 48 h	空气中冷冻: (-15±2)℃, 8 h; 水中融化: (20±2)℃, 6 h	15 次冻融循环后的 质量损失和抗压强 度损失
《泡沫混凝土应用技术规程》(JGJ/T 341—2014)	在(60±5)℃下干燥 24 h, 然 后在 80℃下烘干至恒质, 浸泡 在(20±5)℃水中 48 h	空气中冷冻: (-20±2)℃, 6 h; 水中融化: (20±5)℃, 5 h	达到规定冻融循环 后的质量损失和抗 压强度损失
《Standard Test Method for Evaluating the Freeze-Thaw Durability of Dry-Cast Segmental Retaining Wall Units and Related Concrete Units》(ASTM-C1262/ C1262M—16)	将一面浸泡在水或 3% 氯化钠 溶液(16~27℃)中浸泡 24 h	单面在水中冷冻: (-18±5)℃, 4~5 h; 单面在水中融化: (24±5)℃以完全融化	20 次冻融循环后的 质量损失
《特性材料拦阻系统》(MH/T 5111— 2015)	在(40±5)℃下干燥 24 h, 然 后在(60±5)℃下烘干至恒 质。在(20±2)℃, ≥90% RH 的湿度室中保存 48 h	空气中冷冻: (-20±2)℃, 6 h; 空气中融化: 室温, 5 h。	25 次冻融循环后的 质量损失和抗冻系 数

点^[30], 但在实际应用中需考虑其试验条件与实际环境的差异。陈嘉宇^[31]通过对比研究气冻水融与气冻气融两种冻融方式对泡沫混凝土的抗冻性影响, 发现泡沫混凝土在气冻气融后的抗冻性明显优于气冻水融。研究表明, 密度低于 700 kg/m³的试块在经历 15 次气冻水融后出现严重损坏, 质量损失率超过 25%, 并伴随较大强度损失。而在气冻气融冻融方式下, 泡沫混凝土试块在经过 15 次冻融后仍能保持良好形态, 且满足强度损失率小于 25%、质量损失率小于 5% 的要求。KARAGÖL 等^[32]研究了水冻水融和气冻水融对泡沫混凝土抗冻性的影响, 发现相较于气冻水融, 水冻水融后泡沫混凝土的抗压强度损失率更大, 且经过 200 次气冻水融循环后, 泡沫混凝土的相对动弹性模量更高。这是因为水冻水融在水中进行, 而快速冻融法则是在空气中冻结并在水中融化, 泡沫混凝土的水饱和状态会增加冻融循环的影响。如表 2 所示, 不同的抗冻试验规范有不同的试验要求, 合理选择规范更有利于获得符合实际的试验结果。由以上研究可知, 快速冻融法由于其较高的冻融速率, 容易在水分饱和状态下加剧泡沫混凝土的冻融损伤。相比之下, 气冻水融法和慢冻法更利于维持混凝土的结构完整性, 但

操作较为复杂, 试验周期也较长。因此, 在选择冻融循环试验方法时, 应综合考虑实际应用条件、试验目的以及周期与成本。

1.4 试件尺寸

在深入研究泡沫混凝土的抗压性能时, 研究人员发现其强度特性与试样截面尺寸密切相关。TOKYAY 等^[33]的研究指出, 随着试样尺寸的增加, 其抗压强度通常会下降; 当尺寸超过一定临界值后, 这种强度降低的趋势趋于稳定。然而, SUDIN 等^[34]的研究则得出了不同的结论: 100 mm 立方体试样在抗压试验中的表现优于 150 mm 和 50 mm 立方体, 表现出更高的抗压强度。此外, 150 mm 立方体试样在抗压试验中也显示出比 50 mm 立方体更强的抗冻性能。

在研究泡沫混凝土的抗冻性能时, 试件尺寸的选择通常与其所采用的冻融损伤检测方法紧密相关。多数学者倾向于使用 100 mm × 100 mm × 100 mm 的试件进行研究。然而, 在实际应用中, 泡沫混凝土的使用厚度多为 70 mm 左右^[35]。刘迪^[24]的研究表明, 随着试件尺寸的增大, 试件表面的剥蚀破坏程度也随之增加。70 mm 立方体试件对外部环境温度变化更为敏感, 并且质量损失率变化较大。相比之下, 150 mm 和 100 mm 立方

体试件在冻融循环试验中的表现较为接近。考虑到搬运和磕碰等因素,选择100 mm立方体试件进行冻融循环试验似乎更为合理。由以上研究可知,100 mm立方体试件因其较高的强度和较小的质量损失率而成为一种合理的选择。然而,在选择试件时,还需考虑泡沫混凝土在实际应用中的使用厚度。

2 试验参数影响泡沫混凝土性能机理分析

冻融破坏是泡沫混凝土在寒冷气候中常见的性能劣化现象,冻融过程中的水分结冰、融化、膨胀与收缩,会引起泡沫混凝土内部应力积累,导致表面剥落、微裂纹扩展以及强度下降。其中,冻融试验的研究涉及单次冻融循环时间、温度变化、冻融方法以及试块尺寸,这些参数不仅影响泡沫混凝土的冻融循环过程,还会通过不同的物理和力学机制影响泡沫混凝土的损伤程度和冻融耐久性。以下将分别从这些参数的角度,探讨其对泡沫混凝土性能的影响机理。

2.1 单次冻融循环时间的影响

冻融循环时间的长短直接影响水在泡沫混凝土内部的冻结速度以及冰晶膨胀的程度。在冷冻过程中,水分开始结冰并膨胀。随着冷冻时间的增加,水分在孔隙中结冰的过程更为完全,冰晶的体积膨胀更加剧烈,结晶压力也随之增加。SCHERER及BRESME提出的结晶压力理论^[36]指出,多孔材料的孔结构通常具有较高的复杂性,球形孔与圆柱形孔之间存在显著的界面曲率差异,这导致孔内冰晶的各向压力处于不平衡状态,进而使固态冰倾向于融化为液态水。为了达到冰水界面的热力学平衡,材料基体对冰晶施加了额外的结晶压力,当这种结晶压力超过材料所能承受的极限时,便可能引发结构破裂。随着冷冻时间的增加,冰晶充分形成和增长,导致泡沫混凝土内的结晶压力较大,加剧冻融损伤。

在融化过程中,冰晶逐渐融化,导致孔隙中的水分重新分布。根据SETZER提出的微冰晶理论^[37]可知,当外界温度升高时,冰晶逐渐融化,凝胶孔隙会从收缩状态转变为膨胀状态。水分的传输过程表现为从被冰占据的毛细孔通过蒸发-

凝聚作用向较小的毛细孔或凝胶孔迁移,增加了混凝土的饱和度。这种水分的迁移导致凝胶孔的收缩,凝胶孔壁会承受拉应力。当融化时间较长时,冰晶的逐渐融化会引起孔隙膨胀,冰晶融化所产生的应力和水分的迁移过程使得混凝土的饱和度进一步增加,从而导致微裂缝的扩展,使得原本坚硬的结构变的松散,最终降低泡沫混凝土的抗冻性。因此,合理控制单次冻融循环时间,有助于减少冻融损伤,提高泡沫混凝土的抗冻性能。

2.2 试验温度的影响

根据POWERS^[38]的静水压理论,孔隙水在结冰过程中会引发约9%的体积膨胀。当水泥混凝土的水饱和度过高时,结冰膨胀会使未结冰的孔隙水向孔隙外部流动。此时,孔隙水的流动会产生静水压力,进而对混凝土内部结构产生应力,导致混凝土的破坏。冻结温度越低,孔隙水冻结量越大,导致膨胀压力增加,加剧孔隙壁的损伤,尤其对低密度泡沫混凝土影响更大;融化温度越高,冰晶融化和水分迁移速率加快,孔隙壁拉应力增大,可能诱发表面裂缝扩展,而较低融化温度则能缓解这一过程,但可能导致部分冰晶未完全融化,进一步影响循环损伤积累。此外,温差较大时,混凝土内部会产生较大的温度梯度,这会导致温度应力的产生。根据LITVAN^[39]的蒸发冷凝结晶理论可知,在温度梯度较大的情况下结晶过程主要是液相蒸发成气相,然后在固体表面发生冷凝结晶。温度梯度的作用使得混凝土内部的水分分布不均匀,导致结晶在不同位置以不同速度发生,引起孔隙的膨胀和收缩,导致孔隙壁受拉力作用甚至发生破裂,进而生成和扩展微裂纹,改变孔隙连接,影响孔隙的连通性,从而影响水分的迁移和结冰速度,进一步加剧冻融损伤。因此,为了提高泡沫混凝土的抗冻性,应在试验设计中合理控制冻融温度的范围,避免过大的温度梯度和极端温度条件对混凝土结构的破坏。

2.3 冻融方法的影响

冻融方法的选择直接决定了混凝土冻融破坏的演变方式。气冻水融法的特点是试样在空气中冻结,再在水中融化。冻结过程中,水分在孔隙

内开始结冰,冰晶膨胀对孔隙壁产生压力,造成微裂纹的形成。在融化阶段,融化的水分进入孔隙,增加了混凝土的水饱和度,使得冰晶膨胀和水分的渗透作用相互叠加,加剧了冻融损伤。由于这种方法涉及水的浸润,泡沫混凝土在冻融过程中承受较大的水分膨胀压力,尤其是在低密度泡沫混凝土中,冰晶膨胀导致结构损坏更为严重,强度和弹性模量大幅下降。气冻气融法的特点是试样在冻结和融化过程中均处于空气中,不涉及水分的浸润。冻结时,水分主要存在于表面及表层孔隙中,冰晶的膨胀压力相对较小,冻融过程中混凝土结构受到的内部应力较低。融化时,由于没有水分的渗透作用,冰晶的膨胀不会对孔隙壁造成过大压力,冻融损伤的程度相对较轻。由于水分对混凝土的影响较小,气冻气融法能够有效保持混凝土的结构完整性,特别是在低密度泡沫混凝土中,冻融循环后的强度损失较小,质量损失也较低。与气冻水融法相比,气冻气融法能更好地保持泡沫混凝土的抗冻性能。水冻水融法的特点是在整个冻融过程中,泡沫混凝土试样始终处于水中冻结和融化。这种方法导致泡沫混凝土的水分始终处于高饱和状态,冰晶膨胀产生的压力作用更加突出。冻结时,水分在孔隙内冻结,膨胀的冰晶在孔隙壁上产生较大的应力,导致裂缝的形成和扩展。融化时,水分的渗透进一步加剧了混凝土的冻融损伤,冰晶的融化和水分渗透共同作用,导致结构的持续劣化。由于水的渗透作用和冰晶膨胀的叠加,水冻水融法下泡沫混凝土的冻融损伤最为严重,抗压强度和损失较大。因此,在实际应用中,选择合适的冻融方法需综合考虑环境条件、泡沫混凝土使用功能以及预期的耐久性等多方面因素。

2.4 试块尺寸的影响

POWERS 等提出的渗透压理论^[40]认为混凝土中的大孔隙液体冻结时,混凝土周围离子浓度将升高,进而与小孔隙中的液体形成浓度差。浓度差促使未冻结的水从小孔隙向大孔隙迁移,结果使得大孔隙内的液体压力逐渐增加,最终导致混凝土结构的损伤。当泡沫混凝土的试件尺寸增大时,内部孔隙结构的复杂性和孔隙数量增加,使

得在冻融过程中,水分冻结膨胀时的应力分布更加不均匀。在较大的试件中,较大的孔隙和较长的水流路径使得水分迁移效应更加明显。大尺寸试件的外层受到较大的冰膨胀压力,而内层的水分则可能迁移到外层,进一步加剧冻融损伤。在较大的孔隙中,冰的膨胀可能导致渗透压效应加剧,形成更大的应力差,导致表面剥蚀、裂纹扩展和质量损失。

较小尺寸的试件由于其孔隙结构相对紧凑,冰的膨胀压力和渗透压效应较为均匀。水在结冰过程中所产生的压力分布较为均匀,从而减小了局部破坏的可能性。因此,在选择试件尺寸时,应充分考虑实际应用中的使用厚度,选择适当的试件尺寸,以确保测试结果的合理性与实际应用的一致性。

3 结论与展望

在积极倡导节能减排并致力于构建环保节约型社会的背景下,泡沫混凝土的应用迅速普及,其在墙体和屋面保温方面的卓越性能,不仅提升了寒冷地区房屋的保温效果,还有效增强了炎热地区房屋的隔热功能。然而,在严寒地区,冻融循环导致的破坏严重制约了泡沫混凝土的广泛应用,因此对抗冻性的研究显得尤为重要。本文阐述了泡沫混凝土在冻融循环试验中各影响因素对抗冻性能的作用,包括单次冻融循环的时间、温度、冻融方式及试件尺寸,研究得出:选择合适的冻融循环时间和方法可以显著提升泡沫混凝土冻融试验的准确性;试验温度的选择是冻融循环试验中的关键环节,泡沫混凝土的抗冻性能会随着冻融循环温度的降低而减弱,因此试验者在实际操作中应充分考虑当地的温度情况;与其它尺寸相比,100 mm 立方体试件在冻融循环试验中表现出更佳的抗冻性能。这些研究成果为泡沫混凝土的抗冻试验提供了宝贵的经验,但仍存在不足之处。针对现有研究及其存在的问题,为了更好地推进泡沫混凝土材料的研究与应用,以下几点值得关注:

(1) 目前,学者们对于冻融循环速度对泡沫混凝土损伤程度的看法不一。一些研究表明,快

速冻融循环可能导致泡沫混凝土内部结构发生剧烈变化,从而造成更大损伤;而另一些研究则认为,冻融循环的速度影响不大,关键在于冻融循环的总次数和温度变化的幅度。关于泡沫混凝土单次冻融循环时间对抗冻性能的影响研究较少,仍需进一步探讨。

(2)在冻融试验中,不同的冻结和融化温度会影响泡沫混凝土在冻融循环中的应力变化与水分迁移。选定的温度参数不仅限定了冻融循环过程中的温差范围,还直接影响泡沫混凝土在冻融条件下的耐受能力。目前,关于泡沫混凝土在冻融试验中冻结和融化温度对抗冻性能的影响研究较为匮乏,需要进一步深入研究。

参考文献:

- [1] 虞晓婧,王建刚,王海波,等. 建筑垃圾再生微粉对C30~C40再生混凝土性能的影响[J]. 混凝土,2024(4):147-151.
- [2] 郭峻驿,闫亚杰. 大掺量粉煤灰微珠泡沫混凝土试验研究[J]. 新型建筑材料,2019,46(1):79-81.
- [3] 谢洪阳,戴宜文,董建军,等. 不同因素对泡沫混凝土性能的影响[J]. 中国粉体技术,2023,29(4):120-129.
- [4] 金明山,宋杨,鹏飞,等. 粉煤灰泡沫混凝土抗冻性能研究[J]. 水利科技与经济,2022,28(7):94-98.
- [5] 郭凌云,陈波,高志涵,等. 基于细观数值模拟的玄武岩纤维泡沫混凝土力学性能[J]. 复合材料学报,2025,42(4):2302-2316.
- [6] 罗云峰. 泡沫混凝土及其应用于制备复合夹芯墙板的研究[D]. 广州华南理工大学,2017.
- [7] 董昊良,李化建,杨志强,等. 混凝土冻融破坏机理及寿命预测方法[J]. 材料导报,2024,38(2):143-153.
- [8] 段桂珍,方从启. 混凝土冻融破坏研究进展与新思考[J]. 混凝土,2013(5):16-20.
- [9] 周程涛,陈波. 基于三维结构光扫描的泡沫混凝土冻融损伤演化特性[J/OL]. 复合材料学报,2025,42(5):2764-2774.
- [10] CHEN B, HE M, HUANG Z, et al. Long-term field test and numerical simulation of foamed polyurethane insulation on concrete dam in severely cold region [J]. Construction and Building Materials, 2019, 212: 618-634.
- [11] 泡沫混凝土应用技术规程: JGJ/T 341—2014 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- [12] 蒸压加气混凝土性能试验方法: GB/T 11969—2020 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- [13] TAN X, CHEN W, TIAN H, et al. Degradation characteristics of foamed concrete with lightweight aggregate and polypropylene fibre under freeze - thaw cycles [J]. Magazine of Concrete Research, 2013, 65(12): 720-730.
- [14] DONG Q Z, SHU G W, YU G, et al. Experimental study on freeze-thaw resistance of modified magnesium oxychloride cement foam concrete [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1885(3): 032009.
- [15] 冯扣宝,王路明,蒋蕾,等. 超轻水泥基发泡混凝土抗冻融性能试验研究[J]. 混凝土,2015(12):38-42.
- [16] 刘迪. 超轻泡沫混凝土耐久性表征与评价方法研究[D]. 北京: 中国建筑材料科学研究总院, 2021.
- [17] 高志涵,陈波,陈家林,等. 冻融环境下泡沫混凝土的孔结构与力学性能[J]. 复合材料学报,2024,41(2):827-838.
- [18] 汪青杰,张延年,刘旭峰,等. 冻融时间对早期混凝土抗压性能的影响试验[J]. 沈阳大学学报(自然科学版),2014,26(1):61-65.
- [19] 郭晓芳. 混凝土快冻与慢冻试验方法浅析[J]. 四川水泥,2016(12):336-337.
- [20] JIANG Z, HE B, ZHU X, et al. State-of-the-art review on properties evolution and deterioration mechanism of concrete at cryogenic temperature [J]. Construction and Building Materials, 2020, 257: 119456.
- [21] 袁斌. 水工混凝土室内快速冻融与自然冻融关系探讨与应用[D]. 宜昌: 三峡大学, 2018.
- [22] CUI Z D, ZHANG L J, FAN K K, et al. Coupling effect of freezing-thawing cycles and dynamic loading on the accumulative deformation and microstructure of foam concrete [J]. Materials and Structures, 2024, 57(6): 136.
- [23] 范坤坤. 高铁荷载作用下泡沫混凝土路基冻融前后力学特性研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2023.
- [24] 刘迪,王玲,王振地,等. 超轻质混凝土的抗冻性试验方法研究[J]. 混凝土与水泥制品,2022(6):31-36.
- [25] ROULET C A. Expansion of aerated concrete due to frost-Determination of critical saturation [J]. Proceedings Autoclaved Aerated Concrete, Moisture and Properties, 1983: 157-169.
- [26] KAMADA E, KOH Y, TAPATA M. Frost deterioration of cellular concrete [C]//Third International Conference on the Durability of Building Materials and Components. VTT Symposium, 1984: 50.
- [27] 特性拦阻系统: MH/T 5111—2015 [S]. 北京: 中国民

- 航出版社,2015.
- [28] 黄忠. 混凝土抗冻性试验方法浅析[J]. 科技经济市场,2018(10):28-29.
- [29] TIKALSKY P J, POSPISIL J, MACDONALD W. A method for assessment of the freeze-thaw resistance of preformed foam cellular concrete [J]. *Cement and Concrete Research*,2004,34(5):889-893.
- [30] 李中华,巴恒静,邓宏卫. 混凝土抗冻性试验方法及评价参数的研究评述[J]. 混凝土,2006(6):9-11.
- [31] 陈嘉宇. 陶粒泡沫混凝土试验方法与评价指标研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2020.
- [32] KARAGÖL F, YEGIN Y, POLAT R, et al. The influence of lightweight aggregate, freezing-thawing procedure and air entraining agent on freezing-thawing damage[J]. *Structural Concrete*,2018,19(5):1328-1340.
- [33] TOKYAY M, ÖZDEMİR M. Specimen shape and size effect on the compressive strength of higher strength concrete [J]. *Cement and Concrete Research*, 1997, 27(8):1281-1289.
- [34] SUDIN M A S, RAMLI M. Effect of specimen shape and size on the compressive strength of foamed concrete [J]. *MATEC Web of Conferences*,2014,10:02003.
- [35] 兰明章,李晓宁,陈智丰. 硫铝酸盐发泡水泥强度和碳化性能测试方法研究[J]. 新型建筑材料,2014,41(11):29-32.
- [36] VALENZA J J, SCHERER W G. A review of salt scaling: II. Mechanisms [J]. *Cement and Concrete Research*,2007,37(7):1022-1034.
- [37] SETZER J M. Micro-ice-lens formation in porous solid [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2001, 243(1):193-201.
- [38] POWERS T C. Void space as a basis for producing air-entrained concrete [J]. *Journal Proceedings*, 1954, 50(5):741-760.
- [39] LITVAN G G. Phase transitions of adsorbates: IV, mechanism of frost action in hardened cement paste [J]. *Journal of the American Ceramic Society*,1972,55(1):38-42.
- [40] POWERS T C, HELMUTH R A. Theory of volume changes in hardened portland-cement paste during freezing [J]. *Highway Research Board Proceedings*, 1953,32(1):285-297.

本刊编辑部版权许可声明

本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社、万方数据电子出版社、重庆维普资讯有限公司、超星学术期刊“域出版”、学术中国-知识产权服务平台等第三方平台在其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊编辑出版的文章。本刊不收取版面费、专家审稿费(相关著作权许可使用费与审稿费相抵,不再另行支付),对优质稿件支付稿酬。作者向本刊提交文章发表的行为视为同意上述许可声明,如有异议请来稿说明,本刊将作适当处理。