第 54 卷第 2 期
2026 年 2 月

硅 酸 盐 学 报
JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY

Vol. 54，No. 2
February，2026

http://jccsoc.cbpt.cnki.net

DOI：10.14062/j.issn.0454-5648.20250423

基于真空脱水的低气压环境无砟轨道现浇混凝土表面抗冻性提升技术

董昊良[1,2]，李化建[1,2]，杨志强[1,2]，石贺男[1,2]，李良顺[1,2]，温家馨[1,2]，易忠来[1,2]

(1. 中国铁道科学研究院集团有限公司铁道建筑研究所，北京 100081；2. 高速铁路轨道系统全国重点实验室，北京 100081)

摘　要：冻融粉化是无砟轨道等高铁平面结构混凝土在高海拔地区所面临的主要劣化问题之一。本工作研究了不同真空度(0.06、0.08 MPa)与真空时间(1～10 min)对不同含气量(2.0%～6.0%)现浇混凝土表面抗冻性的影响，并结合压汞试验和气动致裂原理揭示其作用机制。结果表明：真空脱水技术能够有效提升平面结构现浇混凝土的表面抗冻性，含气量 2.0%、4.0%、6.0%的真空脱水现浇混凝土在单面冻融循环 28 次后的单位面积剥落物质量较基准组分别降低了 5.0%～44.1%、37.8%～82.9%和 21.9%～94.6%，且提高含气量能够提升现浇混凝土的真空脱水效率，其原因是真空脱水后现浇混凝土表层强度的提升以及孔隙的改善，且气泡的破裂使连通孔数量增加，从而加速了新拌现浇混凝土内部水分随空气被排出的速率。本工作提出了低气压环境下不同含气量现浇混凝土的“最佳真空制度”，建立了综合考虑混凝土含气量、真空度与真空时间的平面结构现浇混凝土表面抗冻性评价模型。以期为低气压环境下平面结构现浇混凝土的表面抗冻性提升提供参考。

关键词：真空脱水；无砟轨道；现浇混凝土；单面冻融；气动致裂
中图分类号：U213.244　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2026)02–0689–11
网络出版时间：2025–11–27

截止 2024 年底，中国铁路运营里程达到 16.2 万公里，其中高速铁路运营里程已超过 4.8 万公里[1]。高速铁路混凝土具有结构类型多样、呈条带状分布且直接暴露于大气环境等特点，这使得高速铁路混凝土结构易受环境气候影响[2]，其中无砟轨道等平面结构作为高速铁路主要的结构类型，其耐久性直接决定了高速铁路的服役寿命和安全运营[3]。随着高速铁路逐渐向高海拔、严寒地区建设，高速铁路混凝土结构的耐久性面临诸多全新挑战[4]。高铁无砟轨道混凝土因严酷环境而出现的劣化问题与传统桥墩混凝土等立面结构有较大差距。在表面积雨、积雪和长期的冻融循环作用下，高铁无砟轨道混凝土表面逐渐呈现表面粉化、层状剥离等典型的混凝土表面冻融破坏特征[5]。同时，无砟轨道现浇混凝土出现表面冻融破坏的风险远高于 CRTS III 型板式无砟轨道等预制平面结构混凝土[6]，高铁无砟轨道现浇混凝土结构更应注重环境对其耐久性的影响。

引气是目前最常用于提升混凝土抗冻性的手段。引气剂通过引入均匀分布的微小气泡在混凝土内部形成“压力缓冲”，当毛细孔中的自由水结冰膨胀时，气泡能够吸收膨胀应力，从而抑制微裂缝的扩展[7, 8]。引气技术有助于提升完全饱水的混凝土结构如水工混凝土或水中桥墩结构的抗冻性，但高铁无砟轨道混凝土仅是表层暴露于外界环境，这便导致混凝土内部气泡对表层应力的缓解作用有限[9]。同时，对处于高海拔地区的无砟轨道现浇混凝土而言，低气压环境下现浇混凝土的引气效果也较标准大气环境下有所降低。Lan 等[10]发现当环境气压下降到 0.7 个大气压时，混凝土的含气量降低了 14%～41%。Li 等[11, 12]研究认为，低气压环境下新拌现浇混凝土内部的气泡稳定性变差，从而使混凝土的含气量较标准大气环境降低了 28%～52%，其本质在于低气压环境通过影响了气泡的表面张力。同时研究发现，低气压环境会加速现浇混凝土内部的水分蒸发速率，劣化孔隙结构，从而降低混凝土的强度[13]。Liu 等[14]研究发现，在相同水胶比下，混凝土的力学性能随着气压的降低而下降。水胶比为 0.35 和 0.45 的混凝土的抗压强

收稿日期：2025–05–30。　修订日期：2025–06–15。
基金项目：国家自然科学基金(52438002)；新基石科学基金会科学探索奖。
第一作者：董昊良(1999—)，男，博士研究生。
通信作者：李化建(1976—)，男，博士，研究员。

Received date: 2025–05–30.　**Revised date:** 2025–06–15.
First author: DONG Haoliang (1999–), male, Doctoral candidate.
E-mail: dhlCARS@163.com
Correspondent author: LI Huajian (1976–), male, Ph.D., Professor.
E-mail: chinasailor@163.com

度分别较常压时降低了 38.1%和 63.2%。因此，探索一种适用于低气压环境的高铁无砟轨道现浇混凝土表面抗冻性提升方法成为高速铁路在高海拔严酷环境建设的必要措施。

真空脱水技术作为一种表面物理改性手段，对于无砟轨道现浇混凝土而言具有操作简便、抗冻性提升效果显著等优势[15]。真空脱水技术通过施加真空负压，强制排出新拌混凝土表层的自由水与气泡，从而降低水胶比、提高密实度[16, 17]。真空脱水技术最初用于对富水土壤进行真空固结强化，以此实现土壤的表层强化[18, 19]。真空预压有效地加固了质地软黏、高压缩性的黏土物质，能够显著改善土壤质量，其最大固结沉降可达 2.0 m[20]。Zhou 等[21]提出了一种利用预制垂直排水管在附加荷载和真空预压下进行多层土体系轴对称固结的单元胞模型，实现了对土壤真空固结的评估预测。Wang 等[22]认为过高含水量土壤在真空固结过程中因堵塞排水孔洞从而降低了真空脱水效率。对于与富水土壤相同，同时具备固—液—气三相的新拌混凝土而言，同样可以通过对其表面进行真空脱水处理来强化混凝土的表层性能。Hatanaka 等[16]验证了真空脱水技术在提升混凝土表层强度方面的可行性，并明确了混凝土在真空处理前后的强度和密度分布规律。杨志强等[15]研究表明，在真空度为0.06～0.08 MPa 范围内真空处理 1～10 min 即可使混凝土的单位面积剥落物质量降低 25.8%～95.5%，混凝土的表面吸水率降低 7.9%～77.0%，并建立了考虑真空度和真空时间的无砟轨道混凝土真空脱水效果评价方法。但目前尚未探明真空脱水技术对于低气压环境下高铁无砟轨道现浇混凝土表面抗冻性的提升效果，亟待提出针对提升低气压环境无砟轨道现浇混凝土的真空脱水技术及提升其表面抗冻性的评价方法。

本工作以低气压环境下高铁无砟轨道现浇混凝土为研究对象，研究了含气量在 2.0%～6.0%范围内无砟轨道现浇混凝土在真空度为 0.06 MPa 和 0.08 MPa 时处理 1、3、5 min 和 10 min 时的表面抗冻性。通过微观试验结合理论分析解释了气泡对于无砟轨道现浇混凝土真空脱水效果的影响机理。建立了同时考虑混凝土含气量、真空度和真空时间的无砟轨道现浇混凝土结构真空脱水效果评价模型，以期为提升高海拔、严寒环境下的无砟轨道现浇混凝土结构的表面抗冻性提供理论依据。

1 实验

1.1 原材料

水泥：P·O 42.5 普通硅酸盐水泥，其化学组成及主要性能如表 1 所示。

粉煤灰：F 类I级粉煤灰，28 d 活性指数为 78.1%，主要技术指标如表 2 所示。

矿渣粉：S95 级矿渣粉，其主要性能如表 3 所示。

细骨料：细度模数为 2.8、级配II区的凝灰岩机制砂，级配曲线如图 1 所示。

粗骨料：5～10 mm，10～20 mm 的连续级配碎石。

减水剂：聚羧酸系高性能减水剂，减水率为 27%。

引气剂：江苏苏博特有限公司生产的 GYQ 型混凝土高效引气剂。

拌合水：自来水。

表 1 水泥基本性能

Table 1 Basic properties of cement

Density/(g·cm^{-3})	Specific surface area/(m^2·kg^{-1})	Stability	Condensation time/min		Flexural strength/MPa		Compressive strength/MPa	
			Initial setting	Final setting	3 d	28 d	3 d	28 d
3.08	364	Qualified	165	235	6.2	8.9	28.3	54.6

表 2 粉煤灰主要技术指标

Table 2 Main technical indicators of fly ash *w*/%

45 μm square-hole sieve residue	Water demand ratio	Loss on ignition	Moisture content	SO_3	CaO	28 d activity index
6	93	3.97	0.1	0.41	0.03	78.1

w is mass fraction.

表 3 矿渣粉主要技术指标

Table 3 Main technical indicators of slag powder

Density/(g·cm^{-3})	Specific surface area/(m^2·kg^{-1})	28 day activity index/%	Fluidity ratio/%	Moisture content/%	$w(SO_3)$/%	$w(Cl^-)$/%	Loss on ignition/%
2.81	438	101	102	0.1	0.08	0.012	0.18

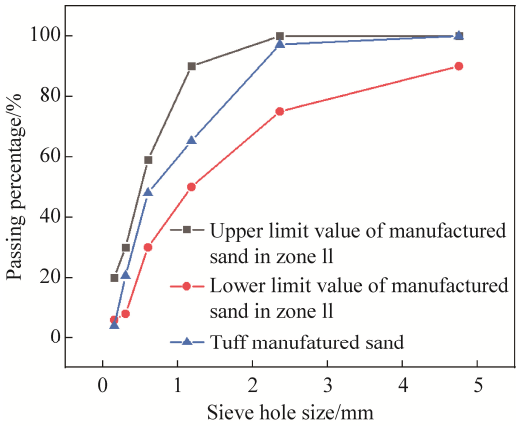


图 1　凝灰岩机制砂级配曲线

Fig. 1　Gradation curve of tuff manufactured sand

1.2　配合比

试验制备现浇混凝土的配合比如表 4 所示，参考《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》(GB/T 50080—2016)[23]中含气量试验要求，测试在新拌添加不同用量的引气剂后现浇混凝土的含气量。通过调整新拌混凝土含气量最终制备得到含气量分别为 2.0%、4.0%和 6.0%的现浇混凝土试件，并用以开展真空脱水试验。

1.3　真空脱水现浇混凝土制备

本工作参考《铁路混凝土》(TB/T 3275—2011)[24]，首先将所有原材料在 60 s 内投入搅拌机，并启动搅拌设备后持续运行 180 s 后停机，将拌合物倒入成型模具。使用自主研制的真空负压脱水装置对自密实混凝土表面实施真空脱水处理。设置装置的真空负压分别为 0.06 MPa 和 0.08 MPa，控制处理时间分别为 1、3、5 min 和 10 min，以制备得到不同真空度、真空时间处理后的现浇混凝土试件。同时保留未处理试件作为对照样本。完成真空脱水作业后的现浇混凝土试件立即覆盖密封薄膜，转移至(20±2) ℃恒温环境静置 24 h 进行初期养护。经拆模处理后，将试件移入相对湿度≥95%的标准养护箱持续养护至预定龄期。

1.4　试验方法

1.4.1　真空脱水率　　为评估真空脱水处理技术对不同含气量现浇混凝土的表层脱水效果，分别称量每组混凝土真空脱水处理后收集的水的质量，以脱水量与试件质量之比作为真空脱水处理后现浇混凝土的真空脱水率，如式(1)所示。

$$\varphi=\frac{m_{\mathrm{w}}}{m_{\mathrm{c}}}\times 100 \tag{1}$$

式中：φ 为真空脱水过程中新拌现浇混凝土的真空脱水率(%)；m_{w} 为新拌现浇混凝土在真空脱水过程中抽出水的质量(kg)；m_{c} 为现浇混凝土试件的质量(kg)。

表 4　混凝土配合比

Table 4　Concrete mix proportion　　kg/m^3

Sample No.	Cement	Fly ash	Slag powder	Gravel		Sand	Water	Air-entraining agent
				10–20 mm	5–10 mm			
ZK-2.0%	250	63	159	374	374	913	182	0.075
ZK-4.0%	250	63	159	374	374	913	182	0.300
ZK-6.0%	250	63	159	374	374	913	182	0.425

1.4.2　表面抗冻性能　　为评价真空脱水处理对不同含气量现浇混凝土表面抗冻性的影响，每组分别成型 3 块 150 mm×150 mm×150 mm 的混凝土试块。参考《混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082—2024)[25]，将现浇混凝土试件切割为 70 mm×110 mm×150 mm 的混凝土试块。为模拟高铁无砟轨道现浇混凝土的受冻特征，采用成型面作为冻融面来模拟无砟轨道的表面冻融劣化，并采用式(2)计算冻融循环过程中现浇混凝土的单位面积剥落物质量。

$$m_n=\frac{\sum m_{\mathrm{s}}}{A}\times 10^6 \tag{2}$$

式中：m_n 为 n 次冻融循环后，试件单位面积剥落物总质量(g)；m_{s} 为每次测试间隙得到的试件剥落物质量(g)；A 为单个试件测试表面的表面积(m^2)。

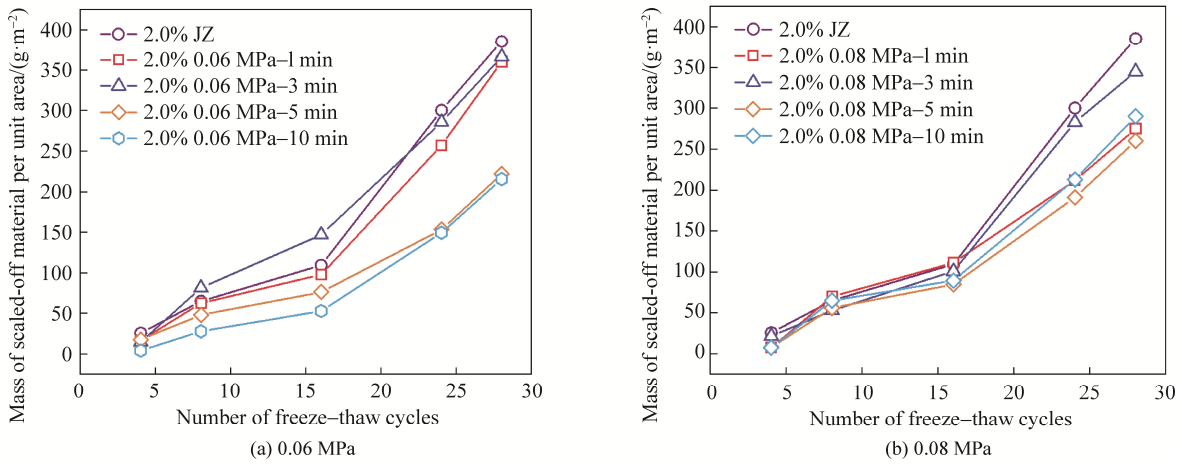
1.4.3　孔隙结构(压汞法)　　待真空脱水现浇混凝土标准养护 28 d 后，将其破碎为直径约 3 mm 的浆体颗粒，放入无水乙醇中浸泡 3 d。测试前将试验取出在 40 ℃条件下真空干燥至恒重，采用 MicroActive AutoPore V 9600 型压汞仪测试试样的压汞曲线，压汞测试范围为 0.689 kPa～413.400 MPa。

2　结果与讨论

2.1　不同含气量真空脱水混凝土的表面抗冻性

图 2～图 4 分别为含气量 2.0%、4.0%和 6.0%的现浇混凝土在单面冻融试验过程中的单位面积

剥落物质量。真空脱水技术对现浇混凝土抗冻性的提升主要体现在20次冻融循环之后。真空脱水对现浇混凝土的抗冻性提升主要体现在对其距表面 50 mm 左右表层的强化。含气量为 2.0%、4.0%和 6.0%的真空脱水现浇混凝土在冻融循环28 次后的单位面积剥落物质量较基准组分别降低了

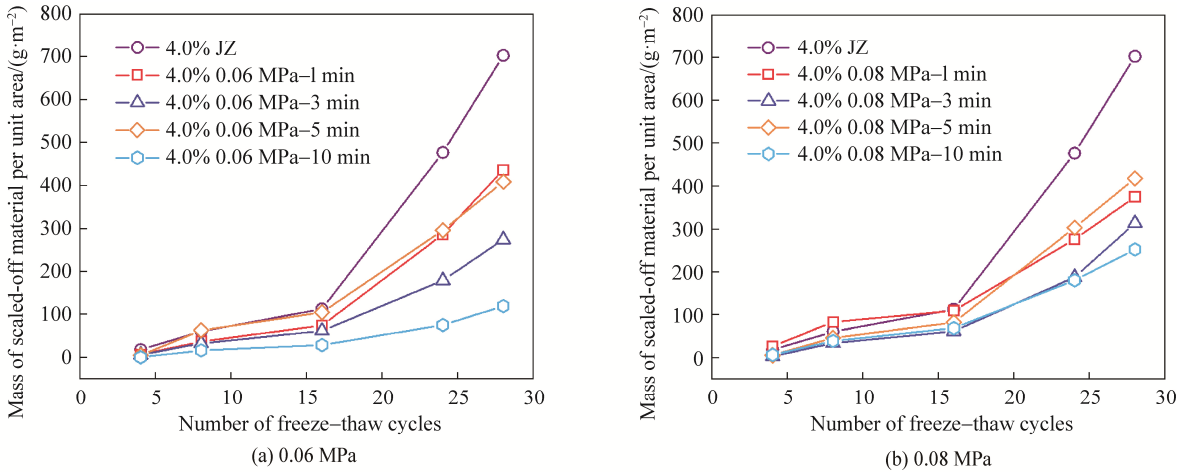


(a) 0.06 MPa (b) 0.08 MPa

JZ refers to concrete specimens that do not undergo vacuum dewatering treatment.

图 2 含气量 2.0%现浇混凝土真空处理后的单位面积剥落物质量

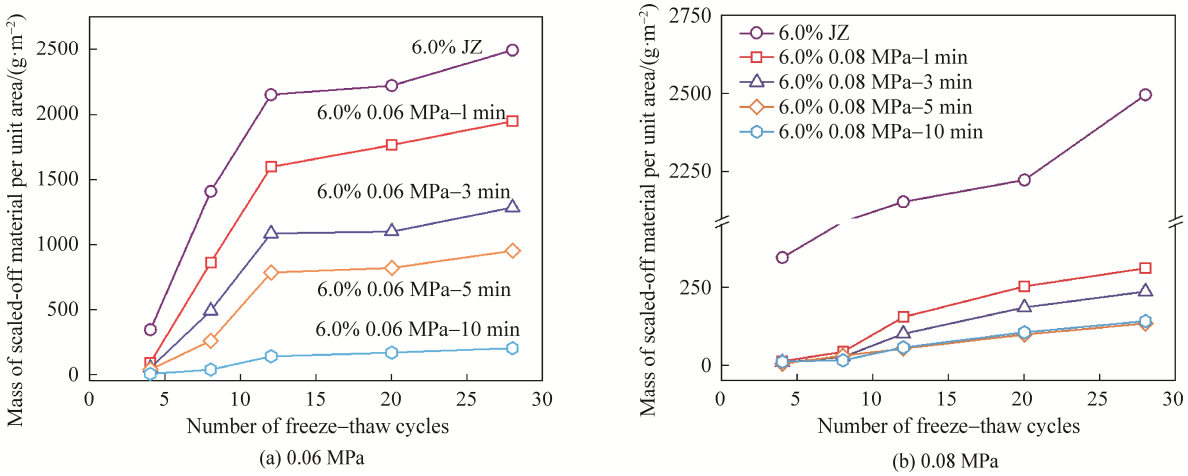
Fig. 2 Mass of spalling per unit area of cast-in-place concrete with a gas content of 2.0% after vacuum treatment



(a) 0.06 MPa (b) 0.08 MPa

图 3 含气量 4.0%混凝土真空处理后的单位面积剥落物质量

Fig. 3 Mass of spalling per unit area of cast-in-place concrete with a gas content of 4.0% after vacuum treatment



(a) 0.06 MPa (b) 0.08 MPa

图 4 含气量 6.0%混凝土真空处理后的单位面积剥落物质量

Fig. 4 Mass of spalling per unit area of cast-in-place concrete with a gas content of 6.0% after vacuum treatment

5.0%～44.1%、37.8%～82.9%和 21.9%～94.6%。由此证明，真空脱水技术有效提升了无砟轨道现浇混凝土在长期冻融循环过程下的表面抗冻性。值得注意的是，冻融环境下未进行真空脱水处理时，现浇混凝土含气量的提升反而会降低其表面抗冻性，含气量为 2.0%、4.0%和 6.0%的现浇混凝土在单面冻融循环 28 次后的单位面积剥落物质量分别为 386.1、703.0 g/m^2 和 2496.5 g/m^2。其原因一方面是新拌现浇混凝土内部的气泡在浆体浮力的作用下向表面移动，降低了现浇混凝土表层的密度。同时，气泡提升混凝土整体抗冻性的原理是当毛细孔中的自由水结冰时，混凝土内部的气泡可发挥吸能缓释作用，吸收混凝土内部冰晶膨胀产生的内应力，避免因应力集中导致微裂缝扩展[7–8]。而对于无砟轨道现浇混凝土结构而言，混凝土结构仅表面受冻融环境的影响，且结构整体并非处于完全饱水状态，因此气泡对于混凝土结构表层的吸能缓释作用影响有限。

对比不同含气量现浇混凝土在真空脱水过程的表面抗冻性提升效果可知，现浇混凝土的表面抗冻性并非一直随着真空度和真空时间的增加而不断提升。不同含气量的现浇混凝土结构均存在最佳的真空试验制度，能够使其表面抗冻性达到最佳。但过高的真空度或过长的真空时间会导致现浇混凝土表层出现“过度真空”问题。其原因是当以过高真空度或处理时间过长时，孔隙中的水分排出已达到上限，继续真空处理会导致混凝土内部浆体结构受损，从而降低混凝土抗冻性的提升效果[26]。结果证明，含气量为 2.0%、4.0%和 6.0%的真空脱水现浇混凝土的最佳真空脱水制度分别为 0.06 MPa–10 min、0.06 MPa–10 min 和 0.08 MPa–5 min。

2.2　不同含气量真空脱水混凝土的真空脱水率

图 5 为不同含气量现浇混凝土在不同真空脱水试验制度下的真空脱水率。由图 5 可见，随着真空时间和真空度的增加，现浇混凝土表层在真空脱水过程中抽吸出的水量越多。随着真空处理时间从 1 min 增加至 10 min，现浇混凝土表层的真空脱水率提升了 1.0～1.5 倍，且相较于以 0.06 MPa 的真空度进行脱水处理，以 0.08 MPa 的真空度进行脱水处理后的现浇混凝土表层脱水率还会提升 5%～8%。其原因是新拌现浇混凝土在真空脱水处理时，其脱水过程中形成的孔隙水压力促使自由水在有效应力下完成迁移排出。该过程遵循多孔介质流体动力学原理，通过压力梯度实现液相组分的定向传输[16]。

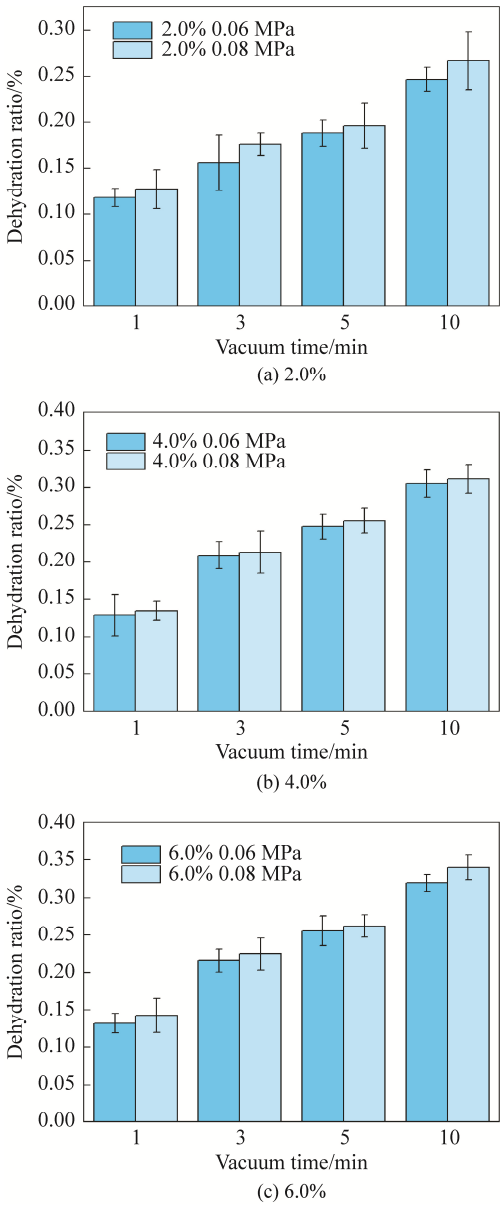


图 5　不同含气量现浇混凝土的真空脱水率

Fig. 5　Vacuum dewatering ratio of cast-in-place concrete with different air contents

随着真空脱水率增加，现浇混凝土表层的水胶比逐渐降低，现浇混凝土表层的密实度和强度提升，故而使得无砟轨道现浇混凝土具有更为优异的表面抗冻性。研究表明，真空负压作用主要作用于现浇混凝土表层 50 mm 的范围内[15]。因此，依据表中真空脱水现浇混凝土配合比参数，假设一块尺寸为 70 mm×110 mm×150 mm 的现浇混凝土试件的质量为 4.5 kg，结合图 5 和式(3)可计算得出不同真空制度下现浇混凝土表层水胶比的演变规律，如表 5 所示。由表可知，随着现浇混凝土的真空脱水率提升，现浇混凝土表层的水胶比逐渐降低。相较于未进行真空脱水处理时基准组现浇混凝土 0.392 的水胶比，

真空脱水现浇混凝土的表层水胶比显著下降。真空脱水现浇混凝土的水胶比较基准组现浇混凝土降低了 3.8%～11.2%，真空脱水现浇混凝土的水胶比最低可降低至 0.348。现浇混凝土表层强度计算可参考《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ 55—2011)[27]中混凝土的配合比计算方法得到，计算得到的真空脱水现浇混凝土的表层强度如表 5 所示。由表 5 可知，真空脱水技术能够使新拌现浇混凝土的表层强度($f_{cu,0}$，MPa)由基准组现浇混凝土的 61.5 MPa 最高可提升至 69.8 MPa，相较于基准组现浇混凝土的表层强度提升了 4.4%～13.5%。

表 5 真空脱水现浇混凝土表层水胶比和强度

Table 5 Water-binder Ratio and Strength of Surface layer of vacuum dehydrated cast-in-place concrete

Air content/%	Vacuum degree/MPa	Vacuum time/min	Water-binder ratio of the surface concrete	Strength of the surface concrete/MPa
2.0	0.06	1	0.377	64.2
		3	0.372	65.1
		5	0.368	65.8
		10	0.360	67.3
	0.08	1	0.375	64.4
		3	0.369	65.5
		5	0.367	66.0
		10	0.358	67.8
4.0	0.06	1	0.375	64.4
		3	0.365	66.4
		5	0.360	67.3
		10	0.353	68.8
	0.08	1	0.374	64.6
		3	0.364	66.5
		5	0.359	67.5
		10	0.352	69.0
6.0	0.06	1	0.386	62.4
		3	0.381	63.4
		5	0.371	65.3
		10	0.351	69.2
	0.08	1	0.380	63.6
		3	0.373	64.8
		5	0.363	66.7
		10	0.348	69.8

$$\mathrm{W/B}=\frac{\alpha_a f_b}{f_{cu,0}+\alpha_a\alpha_b f_b} \tag{3}$$

式中：W/B 为现浇混凝土的水胶比；α_a 和 α_b 分别为回归系数，参考《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ 55—2011)[27]中碎石骨料的回归系数取值，分别取 0.53 和 0.20；f_b 为胶凝材料 28 d 胶砂抗压强度(MPa)，依据表 4 中的配合比数据并参考《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ 55—2011)[27]可计算得到，取 49.3 MPa。

同时，随着现浇混凝土中含气量的增加，相同真空度和真空时间条件下现浇混凝土的真空脱水率和表层强度均逐渐提升，证明现浇混凝土中的气泡有利于提升其真空脱水效率。以不同含气量现浇混凝土在 0.08 MPa 处理 10 min 的真空脱水制度为例，含气量为 2.0%、4.0%和 6.0%的现浇混凝土在相同真空脱水制度下的真空脱水率分别为 0.27%、0.31%和 0.34%。由此说明，虽然高含气量会降低无砟轨道现浇混凝土结构的表面抗冻性，但在高海拔环境中，仍可通过适当提高混凝土含气量来提升新拌现浇混凝土的真空脱水效率。同时证明，真空脱水技术适用于低气压环境的无砟轨道现浇混凝土的施工，能够有效提升无砟轨道现浇混凝土的表面抗冻性。

2.3 真空脱水现浇混凝土孔隙结构

为探明含气量对现浇混凝土真空脱水表层强化效果的影响，分别测试了真空度为 0.06 MPa 和 0.08 MPa 下处理 5 min 的现浇混凝土试件表层的孔隙结构。图 6 为不同含气量下真空脱水处理后现浇混凝土的孔隙率。由图 6 可见，真空脱水处理能够降低现浇混凝土表层的孔隙率。当现浇混凝土的含气量为 2.0%、4.0%和 6.0%时，其孔隙率在真空脱水处理后相较于基准组分别降低了 11.4%～15.6%、24.9%～30.7%和 12.9%～13.7%。证明现浇混凝土表层的孔隙随着真空脱水率的提升而不断改善。

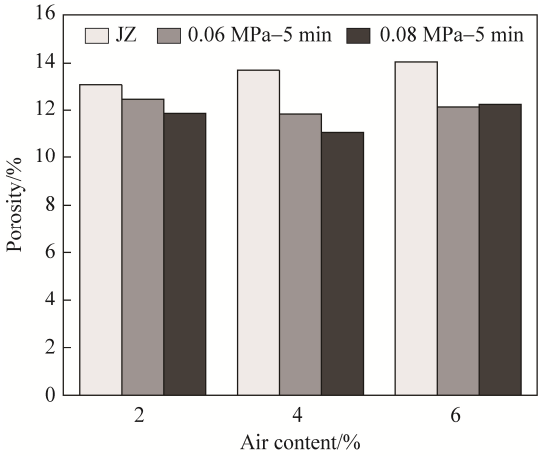


图 6 不同含气量下真空脱水现浇混凝土孔隙率

Fig. 6 Porosity of vacuum-dehydrated cast-in-place concrete with different gas contents

图 7 和图 8 分别为不同含气量真空脱水现浇混凝土的累计进汞量—孔径曲线。从孔径分布曲线中可获得不同含气量真空脱水现浇混凝土浆体部分最可几孔径的变化，用以反映真空制度和含气量对不

同尺度孔隙结构的影响。不同含气量真空脱水现浇混凝土的阈值孔径和最可几孔径如表 6 所示。由表 6 可知，真空脱水技术能够显著改善现浇混凝土表层的孔隙结构。含气量为 2.0%、4.0%和 6.0%现浇混凝土在真空脱水处理后的最可几孔径相较于基准组分别降低了 44.5%～80.7%、82.1%～82.7%和 25.3%～68.7%。真空脱水后现浇混凝土浆体部分最可几孔径的降低证明新拌现浇混凝土表层孔隙在真空负压作用下逐渐收缩，从而使混凝土表层浆体部分的最可几孔径降低。同时表明，真空脱水技术除能够提升现浇混凝土表层强度外，还能够通过改善混凝土表层孔隙结构来提升其表面抗冻性。

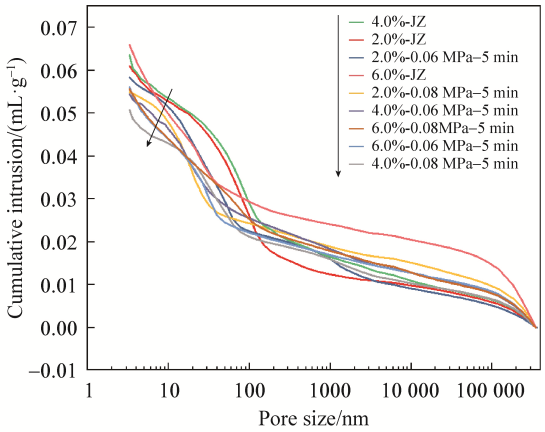


图 7　不同含气量下真空脱水现浇混凝土累计进汞量–孔径曲线

Fig. 7　Cumulative mercury intrusion-pore size curves of vacuum-dewatered cast-in-place concrete with different air contents

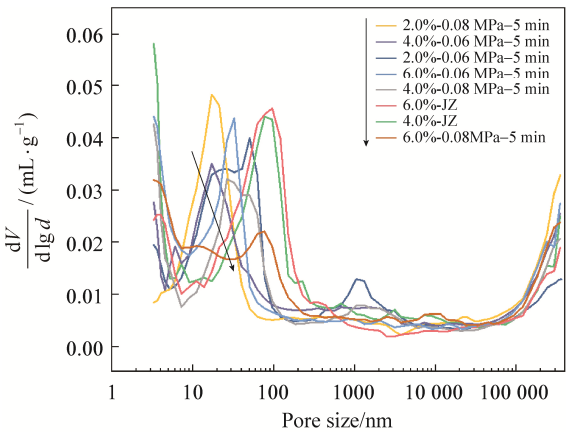


图 8　不同含气量下真空脱水现浇混凝土孔径分布曲线

Fig. 8　Pore size distribution curves of vacuum-dewatered cast-in-place concrete with different air contents

2.4　气动致裂原理

现浇混凝土真空脱水效率的提升来源于混凝土内部气泡在真空脱水处理过程中的传输作用。新拌现浇混凝土的真空脱水过程可以看作一个压实固结过程，随着真空脱水时间的增加，新拌现浇混凝土的压实度(S)逐渐增加，如图 9 所示。真空脱水过程中，新拌现浇混凝土表层因负压作用形成低压区，而内部孔隙水仍维持常压状态，从而形成内部高压至表层低压的水力梯度。该梯度驱动水分从混凝土内部向表面迁移，迁移至表面的水分随即被真空抽吸排出[16]。

表 6　真空脱水现浇混凝土的孔结构特征

Table 6　Pore structure characteristics of vacuum-dewatered cast-in-place concrete

Air content/%	Vacuum system	Most probable pore diameter/nm
2.0	JZ	90.2
	0.06 MPa−5 min	50.1
	0.08 MPa−5 min	17.4
4.0	JZ	95.4
	0.06 MPa−5 min	17.1
	0.08 MPa−5 min	26.8
6.0	JZ	102.4
	0.06 MPa−5 min	32.1
	0.08 MPa−5 min	76.5

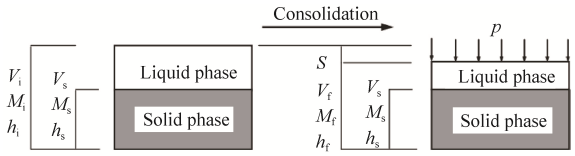


图 9　新拌现浇混凝土压实固结原理示意图[16]

Fig. 9　Schematic diagram illustrating compaction-consolidation mechanisms of fresh cast-in-place concrete[16]

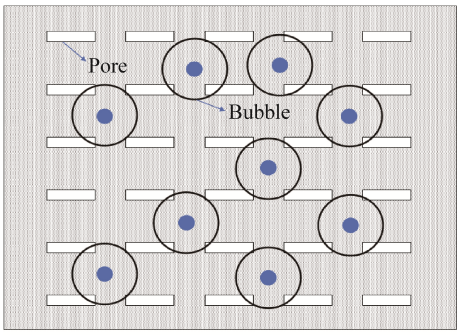
针对含气量对新拌现浇混凝土真空脱水效率的影响，可依据气动致裂原理进行解释[28, 29]。在真空脱水过程中，混凝土表面施加的负压会在气泡中产生压力差，当新拌现浇混凝土内部气泡所受应力超过临界值时，孔隙便会进一步开裂连通，从而在新拌现浇混凝土表层创造更多的连通孔隙，加速孔隙水向外部的传输。图 10a 为新拌现浇混凝土内部气泡的分布及真空负压作用下的气泡单元模型，在新拌现浇混凝土的表面真空负压作用下，可将新拌现浇混凝土内部孔隙看作内部预设的排水管(PVD)，新拌现浇混凝土表层水分通过孔隙排出。图 10b 为气泡单元模型，在真空负压作用下气泡满足式(4)所示的稳定模型。依据式(4)可转化为评价气泡真空负压应力计算模型，如式(5)所示。

$$\frac{\partial^2 p_{\mathrm{air}}}{\partial r_0^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial p_{\mathrm{vac}}}{\partial r}=0 \tag{4}$$

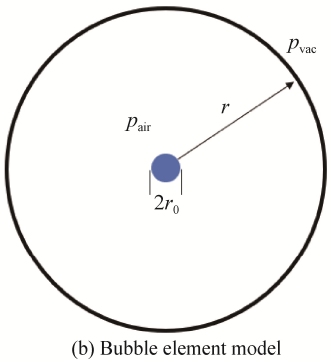
式中：r_0 为等效气泡压力半径(m)；p_{air} 为气泡内压力；p_{vac} 为气泡表面的真空度(kPa)；r 为气泡半径(m)。

$$u=\frac{p_{\mathrm{vac}}-p_{\mathrm{air}}}{\ln(r/r_0)}\ln\left(\frac{r}{r_0}\right)+p_{\mathrm{air}} \tag{5}$$

式中：u 为气泡真空负压应力(MPa)。



(a) Internal bubble distribution



(b) Bubble element model

r_0 is the equivalent bubble pressure radius; p_{air} is the internal bubble pressure; p_{vac} is the vacuum negative pressure on the bubble surface; r is the bubble radius.

图 10　真空负压作用下新拌现浇混凝土内气泡分布模型[29]

Fig. 10　Bubble distribution model in fresh cast-in-place concrete under vacuum-induced pressure gradient[29]

参考文献[29]，新拌现浇混凝土内部孔隙在真空负压作用下的有效切向应力按式(6)计算。根据渗流动力学，新拌现浇混凝土的有效渗透率与其孔隙率及孔隙通道的连通性呈正相关。因此，孔隙在真空脱水过程中为新拌现浇混凝土表层提供的更多通道，有效缓解了水泥颗粒堵塞毛细孔的问题，从而提升了新拌现浇混凝土的真空脱水效率。随着真空过程中气泡的破坏和连通孔隙数量的增加，新拌现浇混凝土表层的“输水通道”数量随着真空压力的提高而不断增加，新拌现浇混凝土内部水分最终随着空气被排出体外。

$$\sigma_\theta(r)=\sigma_{\mathrm{h}}-(p_{\mathrm{air}}-p_{\mathrm{w}})\frac{1}{2}\left(\frac{r_0}{r}\right)^3 \tag{6}$$

式中：σ_θ 为新拌现浇混凝土孔隙中的有效切向应力(kPa)，当 σ_θ 超过新拌现浇混凝土的屈服拉应力时内部气泡破裂进而产生连通孔；σ_{h} 为初始有效水平应力(kPa)；p_{w} 为初始孔隙压力(kPa)。

2.5　真空脱水效果评价

作为典型的压实固结过程，新拌现浇混凝土在真空脱水过程中的脱水率与其 S 呈正相关。同时考虑真空度、真空时间和新拌现浇混凝土内部含气量的大小，提出不同含气量新拌现浇混凝土在真空脱水过程中的固结度计算模型，如式(7)所示。同时，新拌现浇混凝土在真空脱水过程中脱水率 q 可依据式(8)计算得到。

$$S=H\times\frac{C_c}{2\left(1+e_0^{-1}\right)}\times\lg\left(1+\frac{|p_{\mathrm{vac}}|}{\sigma}\right)\times\left(\frac{t^{0.4}}{120}\right) \tag{7}$$

式中：H 为新拌现浇混凝土试件高度(m)，取 0.1 m；C_c 为压缩指数，取 0.45[30]；e_0 为新拌现浇混凝土的含气量(%)；p_{vac} 为新拌现浇混凝土表层的真空度(kPa)；σ 为平均初始垂直有效应力，取 0.475[31]；t 为真空脱水时间(min)。

$$q=100\times\frac{S\times L\times W}{m} \tag{8}$$

式中：q 为新拌现浇混凝土的真空脱水率(%)；S 为新拌现浇混凝土固结度；L 为新拌现浇混凝土真空面长度(m)；W 为新拌现浇混凝土真空面宽度(m)；m 为新拌现浇混凝土试件质量(kg)。

针对本工作所使用的真空试验制度，设置新拌现浇混凝土试件尺寸为 70 mm×110 mm×150 mm，取混凝土试件质量为 4.5 kg，依据式(7)～式(8)计算得到新拌现浇混凝土的真空脱水率如图 11 所示。由图 11 可见，新拌现浇混凝土的真空脱水预测模型计算结果与试验测试结果相符，证明式(7)～式(8)能够准确预测不同含气量的新拌现浇混凝土在不同真空脱水试验制度下的脱水效果。

同时，混凝土的表面抗冻性与其真空作用下对混凝土表层密实程度的提升效果有关[32]。随着真空脱水效果的增加，混凝土表层的密实程度逐渐提升，混凝土的表面抗冻性越好。由于不同含气量混凝土的表面抗冻性有较大差距，为建立新拌现浇混凝土抗冻性和真空脱水效果之间的关系，选择真空脱水作用下现浇混凝土与对应基准组混凝土的单位面积剥落物质量的下降率作为评价指标。同时，为剔除“过度真空”对现浇混凝土表面抗冻性带来的不利影响，选择真空时间在 5 min 以内的真空脱水率数据进行统计分析，由此建立真空脱水现浇混凝土与真空脱水效果之间的关系，如图 12 所示，现浇混凝土的表面抗冻性提升效果与其真空脱水率之间呈指数相关，随着真空脱水效果的增加，现浇混凝土的表面抗冻性逐渐提升，但提升速率逐渐降低，二者

的关系模型如式(9)所示，相关系数 R^2=0.82，具有良好的相关性。

$$\Delta\phi = 110.4q^2 + 261.9q + 24.6 \tag{9}$$

式中：$\Delta\phi$为真空脱水现浇混凝土的单位面积剥落物质量降低率(%)。

联立式(7)～式(9)可得到同时考虑真空度、真空时间和新拌现浇混凝土含气量的真空脱水混凝土表面抗冻性评价模型，如式(10)所示。可为指导真空脱水处理提升不同含气量的无砟轨道现浇混凝土的表面抗冻性提供参考。

$$\Delta\phi = 110.4\left(\frac{100S\times L\times W}{m}\right)^2 + 261.9\left(\frac{100S\times L\times W}{m}\right) + 24.6 \tag{10}$$

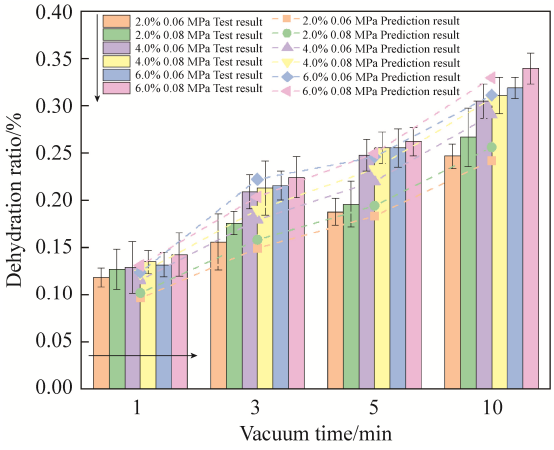
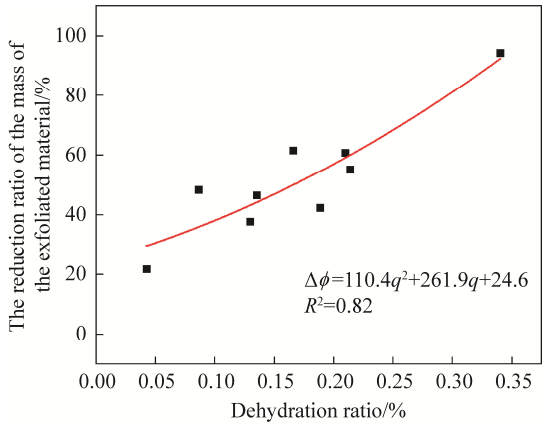


图 11　真空脱水制度下新拌现浇混凝土脱水率

Fig. 11　Temporal evolution of water removal ratio in fresh cast-in-place concrete under vacuum dewatering regime



$\Delta\phi$ is the reduction rate of spalling mass per unit area; q is the vacuum dewatering rate; R^2 is the correlation coefficient.

图 12　真空脱水率与单面剥落物质量降低率的关系

Fig. 12　Relationship between vacuum dewatering efficiency and mass reduction ratio of unilateral spalling

3　结论

1) 真空脱水技术能够有效提升无砟轨道现浇混凝土的表面抗冻性。对于含气量在 2.0%～6.0%范围内的真空脱水现浇混凝土，其在经历 28 次单面冻融循环后的单位面积剥落物质量相较于基准组现浇混凝土降低了 5.0%～94.6%，但过高的真空度或过长的真空时间所引发的“过度真空”问题证明现浇混凝土存在“最佳真空脱水制度”。

2) 新拌现浇混凝土在真空脱水过程中形成的孔隙水压力促使自由水在有效应力下完成迁移并排出，其脱水率随真空度、真空时间和混凝土含气量的增加而不断提升。真空脱水过程中，现浇混凝土表层强度的提升和对孔隙的改善是其表面抗冻性提升的关键。真空脱水技术使无砟轨道现浇混凝土的表层强度较基准组提升了 4.4%～13.5%，最可几孔径较基准组降低了 25.3%～82.7%。

3) 真空脱水技术通过对现浇混凝土的压实固结来实现表层强化。在此过程中，当新拌现浇混凝土中的真空负压超过气泡所能承受的临界值，气泡便会在真空负压的作用下破裂。气泡的破裂使连通孔数量(即新拌现浇混凝土表层的“输水通道”数量)增加，从而加速了新拌现浇混凝土内部水分随空气被排出的速率。

4) 建立了同时考虑真空度、真空时间和现浇混凝土内部含气量的真空脱水现浇混凝土的表面抗冻性评价模型，实现了针对低气压环境不同真空度、真空时间的无砟轨道现浇混凝土真空脱水效果评价及其表面抗冻性提升效果的预测，但其仅适用于适当评估真空时间 5 min 以内真空脱水混凝土的表面抗冻性，未来还需提出不同真空脱水制度下现浇混凝土表面抗冻性评价方法。

参考文献：

[1] 新华社. 4.8万公里！我国高铁运营里程再创新纪录[EB/OL]. 中国政府网, 2025–01–02. https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202501/content_6995868.htm.
Xinhua News Agency. 48,000 kilometers! The operating mileage of high-speed railways in China has set a new record[EB/OL]. Chinese Government Website, 2025–01–02. https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202501/content_6995868.htm.

[2] CAO W W, FENG X N, ZHANG H. The structural and spatial properties of the high-speed railway network in China: A complex network perspective[J]. J Rail Transp Plan Manag, 2019, 9: 46–56.

[3] ZHANG Z H, GAO L, ZHONG Y L, et al. Numerical and experimental study of new fully prefabricated ballastless track[J]. Eng Struct, 2024, 311: 118178.

[4] WANG J H, TAN Y B, LI H J, et al. Impact of typical environments in China's western mountainous areas on the durability of railway concrete: A review[J]. Railw Sci, 2024, 3(5): 650–669.
[5] 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): 139–149.
DONG Haoliang, LI Huajian, YANG Zhiqiang, et al. Mater Rep, 2024, 38(2): 139–149.
[6] 李化建, 赵国堂, 高亮, 等. 严寒地区高速铁路无砟轨道用聚合物改性混凝土抗冻机理研究[J]. 铁道学报, 2023, 45(8): 1–9.
LI Huajian, ZHAO Guotang, GAO Liang, et al. J China Railw Soc, 2023, 45(8): 1–9.
[7] DU P, YAO Y, WANG L, et al. Using strain to evaluate influence of air content on frost resistance of concrete[J]. Cold Reg Sci Technol, 2019, 157: 21–29.
[8] ZARAUSKAS L, SKRIPKIŪNAS G, GIRSKAS G. Influence of aggregate granulometry on air content in concrete mixture and freezing - thawing resistance of concrete[J]. Procedia Eng, 2017, 172: 1278–1285.
[9] 王振, 李化建, 黄法礼, 等. 石灰岩机制砂混凝土抗冻性能研究[J]. 建筑材料学报, 2023, 26(5): 516–523.
WANG Zhen, LI Huajian, HUANG Fali, et al. J Build Mater, 2023, 26(5): 516–523.
[10] LAN X L, ZENG X H, ZHU H S, et al. Experimental investigation on fractal characteristics of pores in air-entrained concrete at low atmospheric pressure[J]. Cem Concr Compos, 2022, 130: 104509.
[11] LI X F, FU Z, LUO Z. Effect of atmospheric pressure on air content and air void parameters of concrete[J]. Mag Concr Res, 2015, 67(8): 391–400.
[12] 李雪峰, 付智. 低气压环境对混凝土含气量及气泡稳定性的影响[J]. 硅酸盐学报, 2015, 43(8): 1076–1082.
LI Xuefeng, FU Zhi. J Chin Ceram Soc, 2015, 43(8): 1076–1082.
[13] ZHANG G H, ZHENG H, WEI X, et al. Concrete mechanical properties and pore structure influenced by high permeability water pressure[J]. Dev Built Environ, 2024, 17: 100385.
[14] LIU X R, SI Z, HUANG L Z, et al. Performance of concrete under a low-pressure environment[J]. Constr Build Mater, 2025, 461: 139862.
[15] 杨志强, 董昊良, 李化建, 等. 高速铁路无砟道床真空脱水机制砂混凝土抗冻性能[J]. 铁道学报, 2024, 46(9): 148–155.
YANG Zhiqiang, DONG Haoliang, LI Huajian, et al. J China Railw Soc, 2024, 46(9): 148–155.
[16] HATANAKA S, HATTORI H, SAKAMOTO E, et al. Study on mechanism of strength distribution development in vacuum-dewatered concrete based on the consolidation theory[J]. Mater Struct, 2010, 43(9): 1283–1301.
[17] 欧阳幼玲, 张燕迟, 陈迅捷, 等. 真空脱水工艺改善混凝土抗冲磨性能试验研究[J]. 建筑材料学报, 2013, 16(5): 829–833.
OUYANG Youling, ZHANG Yanchi, CHEN Xunjie, et al. J Build Mater, 2013, 16(5): 829–833.
[18] BERGADO D T, JAMSAWANG P, JONGPRADIST P, et al. Case study and numerical simulation of PVD improved soft Bangkok clay with surcharge and vacuum preloading using a modified air-water separation system[J]. Geotext Geomembr, 2022, 50(1): 137–153.
[19] SONG D B, CHEN W B, YIN Z Y, et al. Recycling dredged mud slurry using vacuum-solidification combined method with sustainable alkali-activated binder[J]. Geotext Geomembr, 2023, 51(5): 104–119.
[20] SHANG J Q, TANG M, MIAO Z. Vacuum preloading consolidation of reclaimed land: A case study[J]. Can Geotech J, 1998, 35(5): 740–749.
[21] ZHOU W H, LOK T M, ZHAO L S, et al. Analytical solutions to the axisymmetric consolidation of a multi-layer soil system under surcharge combined with vacuum preloading[J]. Geotext Geomembr, 2017, 45(5): 487–498.
[22] WANG P, HAN Y B, ZHOU Y, et al. Apparent clogging effect in vacuum-induced consolidation of dredged soil with prefabricated vertical drains[J]. Geotext Geomembr, 2020, 48(4): 524–531.
[23] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 50080—2016 普通混凝土拌合物性能试验方法标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
[24] 中华人民共和国铁道部. TB/T 3275—2011 铁路混凝土[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2011.
[25] 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. GB/T 50082—2024 混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2024.
[26] 杨长友王蕴芝. 真空混凝土工艺与设备[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1988.
[27] 中国建筑科学研究院等. JGJ 55—2011 普通混凝土配合比设计规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
[28] YAO K, CHENG D, SHENG J H, et al. Real-time behaviour of dredged slurry treated by air-booster vacuum consolidation[J]. Appl Sci, 2023, 13(6): 3550.
[29] CHAI J C, QIAO Y F, DING W Q, et al. Mechanism of air-boosting and its effects on vacuum consolidation[J]. Geotext Geomembr, 2024, 52(4): 554–561.
[30] ANDA R, FU H T, WANG J, et al. Effects of pressurizing timing on air booster vacuum consolidation of dredged slurry[J]. Geotext Geomembr, 2020, 48(4): 491–503.
[31] WANG J, FU H T, ZHANG W K, et al. Effect of pressurization frequency and duration on the consolidation of a dredged soil using air booster vacuum preloading combined with prefabricated horizontal drains[J]. Geotext Geomembr, 2023, 51(1): 209–218.
[32] MICAH HALE W, FREYNE S F, RUSSELL B W. Examining the frost resistance of high performance concrete[J]. Constr Build Mater, 2009, 23(2): 878–888.

Frost Resistance Improvement Technology for Cast-in-Place Concrete Surfaces of Ballastless Tracks in Low-Pressure Environments Based on Vacuum Dewatering

DONG Haoliang[1,2], *LI Huajian*[1,2], *YANG Zhiqiang*[1,2], *SHI Henan*[1,2], *LI Liangshun*[1,2], *WEN Jiaxin*[1,2], *YI Zhonglai*[1,2]
(1. Railway Engineering Research Institute, China Academy of Railway Science Corporation Limited, Beijing 100081, China;
2. State Key Laboratory Track Technology of High-Speed Railway, Beijing 100081, China)

Extended Abstract

Introduction By the end of 2024, China's railway operating mileage has reached 162 000 kilometers, including over 48 000 kilometers of high-speed railway lines. High-speed railways, characterized by diverse structural types and ribbon-shaped distribution, are directly exposed to atmospheric environments. As the structure directly bears high-speed train loads, the durability of ballastless track determines the service life and safe operation of high-speed railways. With the gradual expansion of high-speed railway construction to high-altitude and frigid regions, the durability of concrete structures faces some challenges. The unique planar structure of ballastless track leads to significantly different degradation patterns under harsh environments, compared to vertical structures like conventional bridge piers. Under a prolonged exposure to surface rainwater accumulation, snow coverage, and freeze-thaw cycles, ballastless track concrete surfaces gradually exhibit typical freeze-thaw damage characteristics such as surface pulverization and layered spalling. Note that the cast-in-place bi-block ballastless track slabs demonstrate higher risks of surface freeze-thaw damage, compared to precast CRTS III track slab. Therefore, greater attentions should be paid to environmental impacts on the durability of cast-in-place concrete structures in ballastless tracks. The vacuum dewatering technology as a surface physical modification method offers distinct advantages for cast-in-place ballastless track concrete, including operational simplicity and significant frost resistance improvement. However, the effectiveness of this technology in enhancing surface frost resistance for low-air-content cast-in-place concrete under low-pressure environments remains unclear. This study was to focus on cast-in-place ballastless track concrete under low-pressure environments. The surface frost resistance of concrete with different air contents from 2.0% to 6.0% under different vacuum levels of 0.06 MPa and 0.08 MPa for different treatment durations of 1, 3, 5 min, and 10 min was analyzed. In addition, an evaluation model considering concrete air content, vacuum level, and duration was also proposed *via* the theoretical analysis of bubble influence mechanisms on vacuum dewatering effects. This research could provide a theoretical support for enhancing surface frost resistance of cast-in-place ballastless track concrete structures in high-altitude and frigid environments.

Methods According to the requirements of TB/T 3275-2011 standard, all raw materials were first loaded into a mixer within 60 s. The mixer was then operated continuously for 180 s before stopping, and the mixture was poured into molding forms. A self-developed vacuum negative pressure dewatering device was used to perform vacuum dewatering on the surface of self-compacting concrete. The device was run at different vacuum levels of 0.06 MPa and 0.08 MPa for different treatment durations of 1, 3, 5 min, and 10 min, respectively, to prepare cast-in-place concrete specimens treated under different vacuum levels and durations. Untreated specimens were retained as control samples. Immediately after vacuum dewatering, the cast-in-place concrete specimens were covered with sealing film and transferred to a constant-temperature environment of (20±2) ℃ for 24 h of initial curing. After demolding, the specimens were moved into a standard curing chamber with ≥95% relative humidity and maintained until reaching the designated curing age. The vacuum-dewatered specimens were subjected to surface frost resistance tests and vacuum dewatering ratio tests to validate the enhancement effect of vacuum dewatering technology on the frost resistance of cast-in-place concrete surfaces.

Results and discussion Vacuum dewatering technology can effectively enhance the surface frost resistance of cast-in-place ballastless track concrete. For 2.0% to 6.0% air-content vacuum-dewatered concrete under low-pressure environments, the mass loss per unit area after 28 single-sided freeze-thaw cycles is reduced by 5.0%–94.6%, compared to reference group specimens. However, the "over-vacuum" phenomenon caused by excessive vacuum levels or prolonged duration demonstrates the existence of an optimal vacuum dewatering regime for cast-in-place concrete.

During vacuum dewatering, the pore water pressure generated in fresh concrete drives free water migration and drainage under effective stress. The dewatering ratio continuously increases with higher vacuum levels, extended duration, and increased concrete air content. The key mechanisms for frost resistance improvement lie in a reduced water-to-binder ratio (*i.e.*, 3.8%–11.2% reduction) and an enhanced surface strength (*i.e.*, 4.4%–13.5% increase compared to reference group) in the concrete surface layer. Note that the strength improvement becomes more pronounced with a higher air content. These modifications collectively contribute to the enhanced frost resistance of the concrete surface through a vacuum dewatering treatment.

Conclusions Vacuum dewatering technology could enhance surface strengthening of cast-in-place concrete through compaction and consolidation. During this process, the bubbles ruptured under the pressure when the vacuum-induced a negative pressure in fresh concrete exceeded a critical threshold that air bubbles could withstand. This rupture increased the number of connected pores-acting as "water drainage channels" in the fresh concrete surface layer-thereby accelerating the expulsion ratio of internal moisture along with air. This work could establish a comprehensive evaluation model for surface frost resistance of vacuum-dewatered concrete that simultaneously considered vacuum level, duration, and air content in fresh concrete. The model enabled a quantitative prediction of vacuum dewatering effectiveness and surface frost resistance improvement for ballastless track cast-in-place concrete under varying low-pressure conditions. This could provide a theoretical support for applying vacuum dewatering technology to ballastless track cast-in-place concrete structures in low-pressure environments.

Keywords vacuum dewatering; ballastless track; cast-*in-situ* concrete; single-sided freeze–thaw; pneumatic fracturing