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.0454-5648.20250345

低真空环境长期暴露下水泥基材料的力学性能演变及预测

王晓龙，常洪雷，苏　旭，孔子航，李佳芩

(山东大学齐鲁交通学院，济南 250002)

摘　要：低真空环境会加速水泥基材料的水分损失，这会改变其微观结构从而严重威胁其长期力学性能。为此，对砂浆及不同水胶比、养护龄期的净浆与混凝土试件开展了为期 18 个月的模拟暴露试验，系统研究了长期低真空暴露对水泥基材料力学性能、质量损失、物相组成、水化程度以及孔结构的影响。结果表明：长期低真空环境下水泥基材料的强度演变呈现显著的非线性时变特征，即短期暴露会促进强度的提升，而长期暴露会导致强度的下降与损失。低真空环境下混凝土抗压强度与水胶比呈负相关，而与养护龄期呈正相关。此外，与普通大气环境相比，长期低真空暴露虽然不会改变水化产物类型，但会加速基体的失水从而抑制水化并导致总孔隙率和有害孔径(>100 nm)的增大。同时，低真空环境下基体的水化程度随水胶比的增大或养护龄期的延长而提高，这与基体孔结构的变化规律相对应。此外，低真空环境下混凝土的抗压强度遵循 Abrams 定律与成熟度理论，拟合曲线与测试数据高度吻合，其决定系数(R^2)为 0.94，并且基于增强数据集构建的 GWO-LSTM 模型可精准预测不同水胶比、养护龄期、暴露时间下的混凝土抗压强度(R^2>0.96)。研究成果揭示了低真空环境下水胶比、养护龄期与暴露时间对水泥基材料力学性能的影响机制，并据此构建了多因素耦合的强度预测模型，为低真空环境下水泥基材料的力学性能评估与预测提供了理论依据。

关键词：水泥基材料；低真空环境；力学性能；微观结构；预测模型
中图分类号：TU528　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2026)02–0484–16
网络出版时间：2026–01–14

随着高原工程、低真空管道超高速列车及太空探索等领域的快速发展，极端低真空环境下水泥基材料力学性能的稳定性日益受到关注[1–3]。相较于常压环境，低真空环境会加速基体内部的水分蒸发[4]，这可能会阻碍水泥水化进程并诱导孔隙结构劣化[5, 6]，进而削弱水泥基材料的力学性能。若低真空服役期间水泥基材料的力学性能发生显著劣化，将直接危及超高速列车管道等重大基础设施的结构安全性。因此，非常有必要针对该环境下水泥基材料的长期服役性能开展研究。

基于不同的工程应用场景，部分学者研究了低真空环境对不同龄期水泥基材料力学性能的影响。首先，对于早龄期水泥基材料，葛昕等[7, 8]将标准养护 1 d 的混凝土试件置于 51 kPa 和 76 kPa 环境中，结果显示低压养护 28 d 后混凝土的强度开始低于常压环境(101 kPa)中的试件；Zhang 等[9]的研究也发现，低压(50、60 kPa 和 70 kPa)养护 14 d 后早龄期水泥砂浆试件的强度相较于常压养护略有降低。此外，Chang 等[10]和 Lin 等[11]分别研究了低真空环境(2 kPa)对早龄期净浆和混凝土力学性能的影响，结果显示低真空暴露后试件的力学性能普遍低于普通大气环境中的试件。其次，对于成熟水泥基材料，Kanamori 等[12]研究发现，长期真空暴露后成熟砂浆试件的强度反而比水中养护的试块强度更高；Shangguan 等[13, 14]的研究发现，相比于标准养护或干燥环境，低真空暴露有利于成熟混凝土抗压强度的提升，但不利于抗折和抗剪强度的发展；而 Lin 等[11]的研究结果显示，相比于普通大气环境，低真空环境对成熟混凝土的弹性模量、抗压和抗折强度几乎没有影响。低真空环境对早龄期和成熟水泥基材料力学性能的影响规律存在明显不同。然而，现有的研究在表征早龄期水泥基材料时普遍采用较高的

收稿日期：2025–04–29。　修订日期：2025–05–26。
基金项目：国家自然科学基金青年科学基金项目(B 类)(52522804)；国家自然科学基金面上项目(52178226)；山东省自然科学基金优青项目(ZR2023YQ051)。
第一作者：王晓龙(1997—)，男，博士研究生。
通信作者：常洪雷(1988—)，男，博士，教授。

Received date: 2025–04–29.　**Revised date:** 2025–05–26.
First author: WANG Xiaolong (1997–), male, Doctoral candidate.
E-mail: wangxl923@mail.sdu.edu.cn
Correspondent author: CHANG Honglei (1988–), male, Ph.D., Professor.
E-mail: hlchang@sdu.edu.cn

气压值(50 kPa 以上)，并且对于成熟水泥基材料的力学性能时变规律尚缺乏一致的结论。因此，对于养护龄期(从早龄期到超长期)与低真空环境的耦合作用机制，仍需进一步研究。

除养护龄期外，低真空暴露时长与水泥基材料力学性能之间同样存在显著的非线性关系。葛昕等[7, 8]的研究结果显示，对于标准养护 1 d 的混凝土试件，低压养护 1 a 内其强度会持续提高；而 Sakoi 等[15]研究发现，对于标准养护 3 d 的砂浆试件，真空环境(0.13 Pa)下其抗压强度在暴露 18 d 时即出现了明显的下降趋势。此外，Kanamori 等[12]研究了长期低真空暴露对成熟水泥砂浆(标养 28 d)力学性能的影响，结果显示真空暴露后试件的强度会继续提升，但在暴露 315 d 后开始出现下降；常洪雷等[16]研究了低真空环境对成熟硬化水泥浆体(标养 82 d 和 128 d)力学性能的影响，发现短期(28 d)低真空暴露会增强试件的抗压强度，而长期低真空暴露则会导致试件的强度出现下降趋势。长期低真空暴露对水泥基材料力 学性能的影响与短期暴露显著不同，而由于缺乏加速暴露试验方法，现有的研究普遍存在暴露时长不足(＜360 d)的局限性，这导致超长期低真空暴露后材料力学性能的演变规律尚不清晰。因此，仍需进一步开展长期低真空暴露试验以丰富力学性能数据库，进而构建多因素耦合的时效损伤预测模型。

为此，本研究选取砂浆及不同水胶比、养护龄期的净浆与混凝土试件为对象，系统研究了长期(18 个月)低真空暴露对水泥基材料宏微观性能的影响。在宏观尺度上，通过测试动弹性模量、抗压强度、抗折强度和质量损失研究了低真空环境对砂浆和混凝土力学性能和水分损失的影响；在微观尺度上，通过定量 X 射线衍射(XRD)分析、热重分析(TGA)和压汞法(MIP)研究了长期低真空环境下基体物相组成、水化程度和孔结构的演变特征，揭示了暴露环境、水胶比和养护龄期等因素对材料力学性能的影响机理。最后，构建了考虑水胶比和养护龄期的多因素耦合预测模型，实现了长期低真空环境下混凝土抗压强度的精准预测。

1　实验

1.1　原材料

本研究采用 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥作为胶凝材料，其化学成分如表 1 所示。细集料采用天然河砂，其细度模数为 2.96。粗集料采用连续级配的石英碎石，其粒径为 5~25 mm。此外，减水剂采用减水率为 25%的聚羧酸高效减水剂(SP)，拌合水采用实验室自来水。

砂浆和混凝土的配合比分别如表 2 和表 3 所示。此外，水胶比分别为 0.43、0.53 和 0.63 的净浆试件(编号分别为 P1、P2 和 P3)被设计用于辅助微结构特征的研究。

表 1　水泥化学成分

Table 1　Chemical compositions of cement　　*w*/%

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	TiO_2	Na_2O	K_2O	SO_3
21.1	7.8	2.9	54.4	3.2	0.4	0.2	0.4	2.9

w is mass fraction.

表 2　砂浆配合比

Table 2　Mix proportion of mortar

Specimens	w/c	*w*(Cement)/%	*w*(Sand)/%	*w*(Water)/%
M0	0.53	100	240	53

w/c is water-cement ratio.

表 3　混凝土配合比

Table 3　Mix proportions of concrete

Specimens	w/c	Cement/(kg·m^{-3})	Sand/(kg·m^{-3})	Gravel/(kg·m^{-3})	Water/(kg·m^{-3})	SP/(kg·m^{-3})
C1	0.43	370	905	1000	159	11.1
C2	0.53	360	880	970	190	1.8
C3	0.63	348	850	937	219	0

SP is polycarboxylate superplasticizer.

1.2　试件成型与养护

成型的净浆和砂浆试件尺寸分别为 40 mm×40 mm×40 mm 和 40 mm×40 mm×160 mm。此外，分别采用 150 mm×150 mm×150 mm 和 100 mm×

100 mm×100 mm 2 种规格的混凝土试件用于测试质量损失和抗压强度。待浆体填满模具并振实后，用塑料薄膜密封浆体表面，以防止水分蒸发。浆体硬化 24 h 后拆模，然后将所有试件置于温度为(20±1) ℃、相对湿度为 95%以上的养护室中。为了研究低真空环境对不同养护龄期混凝土性能的影响，将水胶比为 0.53 的净浆和混凝土试件分成 3 组，分别养护至 3、28 d 和 60 d。除此之外，其余试件均养护至 28 d。达到相应的养护龄期后，取一组尺寸为 150 mm×150 mm×150 mm 的混凝土试件，先用湿布擦去其表面水分，然后用锡箔胶带对除暴露面以外的其他表面进行密封处理。

将所有的净浆和混凝土试件分别编号为 P#-*或 C#-*，其中，P#和 C#分别表示净浆和混凝土的配合比编号，而*表示试件的标准养护龄期(单位：d)。

1.3 环境暴露试验

将所有的净浆、砂浆和混凝土试件分成 2 组，分别置于自主设计的低真空环境箱和恒温恒湿室[温度(20±2) ℃，相对湿度(60±5) %，大气压值 99.85 kPa]中。此外，本研究设定低真空环境箱的温度为(20±2) ℃，并设置其每 6 h 抽 1 次真空以确保箱体内的气压始终维持在 9~10 kPa(水的沸点为 43.8~45.8 ℃)。这一气压范围不仅符合超高速列车的低真空运营环境(0.1~10.0 kPa)[10, 11]，而且易于在长期暴露过程中维持稳定从而避免沸点波动对试验结果的影响。此外，图 1 显示了低真空暴露 12 个月时经 1 次抽真空后环境箱内部的相对湿度变化。可以看到，抽真空后低真空环境箱内部的相对湿度会快速回升至 50%以上。总暴露时间设置为 18 个月，

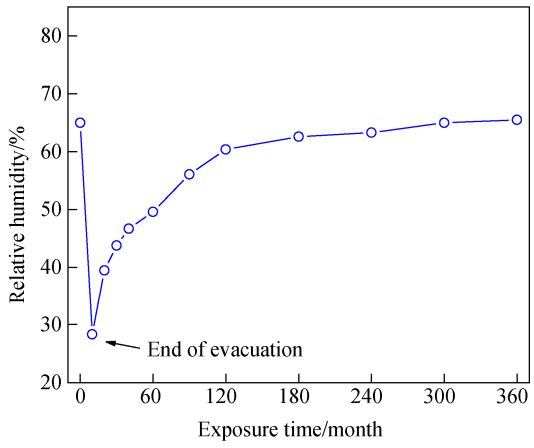


图 1 低真空暴露 12 个月时经 1 次抽真空后环境箱内部的相对湿度变化

Fig. 1 Evolution of relative humidity within chamber over time after one evacuation at 12 months of exposure

并且将测试龄期标记为 V-*和 A-*。其中，V 和 A 分别表示低真空和普通大气环境，*表示暴露时间(单位：月)。

1.4 力学性能试验

达到暴露龄期后(0、1、2、3、4、5、6、12、18 个月)，从相应的暴露环境中取出砂浆试件并依次测试其动弹性模量、抗折强度和抗压强度，其中，动弹性模量采用共振法进行测试。测试前先测量试件的质量，然后利用 DT-20 型动弹性模量测定仪测试试件的横向共振频率，最后采用式(1)计算砂浆试件的动弹性模量。此外，抗压强度和抗折强度均按照《水泥胶砂强度检验方法》(GB/T17671—2021)的规定进行测试，试验结果均取 3 组试件的平均值。对于混凝土试件，分别在低真空暴露 0、6、12、18 个月时测试其抗压强度，测试方法按照《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T50081—2019)的规定进行，试验结果取 3 组试件的平均值。

$$E = 13.244\times10^{-7}\times\frac{WL^3f^2}{a^4} \tag{1}$$

式中：E 为砂浆试件的动弹性模量，MPa；a 为正方形截面试件的边长，取值 40 mm；L 为试件的长度，160 mm；W 为试件的质量，g；f 为试件横向振动时的基频振动频率，Hz。

1.5 质量损失

达到暴露龄期后，从低真空环境箱中取出经密封处理的混凝土试件，然后采用精度为 0.01 g 的高精度电子秤测试其质量。考虑到试验数据在暴露初期波动较大，因此在暴露前 1 个月内每 1 d 测量试件的质量，1~3 个月内每 2 d 测量 1 次，3~5 个月内每 5 d 测量 1 次，之后每 10 d 测量 1 次。最后，根据式(2)计算出试件的失水率。

$$r_n = \frac{m_0 - m_n}{m_0}\times100\% \tag{2}$$

式中：r_n 为不同暴露时间下试件的失水率，%；m_0 为暴露前试件的质量，g；m_n 为不同暴露时间下试件的质量，g。

1.6 微观测试

1) 定量 XRD

达到暴露龄期后(0、6、18 个月)，从相应的暴露环境中取出净浆试件并进行破碎，获取相应的颗粒样品。之后，将这些颗粒样品浸没于异丙醇中 3 d 使其停止水化，接着取出并放置于真空干燥箱中干燥至恒重。干燥好后将颗粒进一步研磨成可通过 80 μm 筛的粉末。采用 Al_2O_3 作为已知相，与粉末

样品以 1 ∶ 9 的质量比充分混合并干燥，然后利用 XRD 检测样品的物相组成。采用日本理学 Ultima IV 型 X 射线衍射仪，扫描角度范围为 5°~70°，扫描速度为 5 (°)/min。扫描结束后将样品的 XRD 结果导入 Topas 软件中，利用全谱拟合[17, 18]得到各晶体的实际含量。

2) TGA

在制备 XRD 样品时，额外取约 30 mg 研磨后的样品(未掺入 Al_2O_3)置于刚玉坩埚中，然后将坩埚置于热重分析仪中进行测试。设备采用德国 NETZSCH STA 449F5 型同步热分析仪，其升温程序设置为：初始温度为 35 ℃，升温速率 20 ℃/min，升温至 950 ℃。此外，采用氮气为保护气，其流量设置为 20 mL/min。

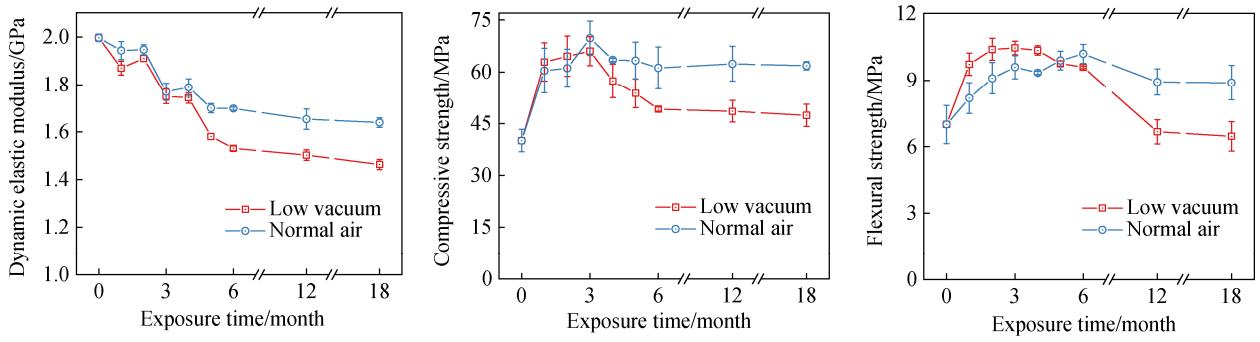
3) MIP

MIP 因其具有快速、简单及孔径测试范围大等优点而被广泛应用于表征多孔材料的孔结构特征[19]。在制备 XRD 样品的同时，采用精密切割机从净浆试件中切取厚度小于 2 mm 的薄片样品，然后从薄片中切得粒径为 1~3 mm 的颗粒 2 g 以上。将颗粒样品放入异丙醇中 3 d 以终止水化，然后放入 45 ℃的真空干燥箱中干燥 7 d。最后，采用 DV-2000 型压汞仪对样品进行 MIP 测试，该设备的孔径测试范围为 0.007~230.000 μm，测试中设置的表面张力为 480m N/m，接触角为 140°，压力范围为 0.003~323.000 MPa。

2　结果与讨论

2.1　低真空环境对砂浆力学性能的影响

图 2a 显示了低真空和普通大气环境下砂浆动弹性模量随暴露时间的变化情况。2 种环境下砂浆动弹性模量随暴露时间的变化规律基本一致，即整体上随暴露时间的增加先降低后趋于稳定。具体来说，随着暴露时间的增加，低真空环境下砂浆的动弹性模量分别比暴露前(0 d)降低 6.3%、4.3%、12.3%、12.7%、20.7%、23.3%、24.7%和 26.7%，而普通大气环境下的试件分别降低 2.7%、2.5%、11.3%、10.4%、14.8%、14.9%、17.1%和 17.9%。低真空暴露后的砂浆试件不仅具有更大的动弹性模量损失率，而且其动弹性模量与普通大气环境中试件的差异整体上随暴露时间的累积而增大，这表明长期低真空暴露会导致砂浆动弹性模量的损失。根据道尔顿蒸发定律，低真空环境会加速水泥浆体中的水分蒸发[4, 20]。因此，相比于普通大气环境，低真空暴露不仅会导致基体孔隙中的液相更容易被气相取代，而且会引起更大的收缩应力从而在基体内部产生新的缺陷，这是导致低真空暴露后砂浆动弹性模量相对较低的重要原因。



(a) Dynamic elastic modulus　(b) Compressive strength　(c) Flexural strength

图 2　低真空和普通大气环境下砂浆试件的力学性能

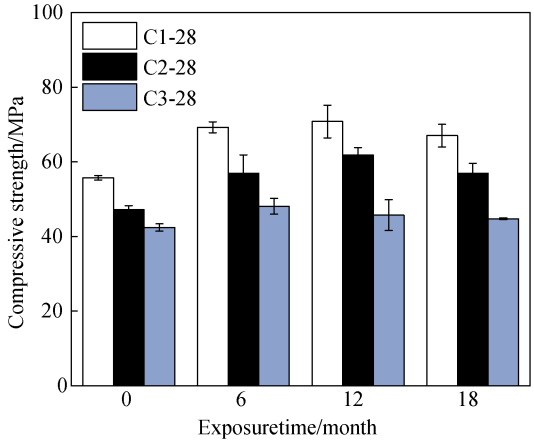
Fig. 2　Mechanical properties of mortar specimens under low vacuum and normal air conditions

图 2b 和图 2c 分别显示了 2 种环境下砂浆抗压强度和抗折强度随暴露时间的变化情况。低真空环境下砂浆的抗压强度和抗折强度基本上均随着暴露时间的增加先升高后降低直至趋于稳定。值得注意的是，与普通大气环境相比，低真空暴露 1、2 个月后砂浆试件的抗压强度分别提高 4.1%和 5.7%，且抗折强度在暴露 1、2、3、4 个月时分别提高 18.7%、14.3%、9.0%和 10.7%，这表明短期(小于 5 个月)低真空暴露会促进砂浆强度的提升，这与 Shangguan 等[14]和 Sakoi 等[15]的研究结果相一致。根据 Zhang 等[21]和 Fonseca 等[22]的研究结果，低真空暴露会加速基体中物理吸附水甚至部分层间水的损失，从而导致 C-S-H 凝胶结构的塌缩。此外，Chang 等[10]和 Shangguan 等[14]研究发现，短期(<100 d)低真空暴露

会减少基体中凝胶孔的数量。因此，相比于普通大气环境，低真空暴露可能会导致基体中生成更致密的水化硅酸钙(C-S-H)凝胶网络，这是导致短期低真空暴露后砂浆强度相对较高的主要原因。然而，结合本研究结果可以发现，随着暴露时间的进一步延长，低真空环境下砂浆强度不仅会降低，而且普遍低于普通大气环境中的试件，这表明长期低真空暴露不利于砂浆强度的维持和发展。具体来说，与普通大气环境相比，低真空暴露 6、12 和 18 个月后砂浆试件的抗压强度分别降低 19.7%、22.1%和 23.4%，抗折强度分别降低 5.9%，25.4%和 27.3%。与普通大气环境相比，低真空环境对砂浆强度的不利影响随暴露时间的延长而累积，这可能与长期暴露后基体内部的水化及孔结构变化的有关(见 2.4 节)。

2.2 低真空环境对不同水胶比混凝土抗压强度的影响

图 3 显示了低真空环境下不同水胶比混凝土的抗压强度随暴露时间的变化情况。低真空环境下 C1-28、C2-28 和 C3-28 3 组试件的抗压强度均随暴露时间的增加先升高后降低，这与低真空环境下砂浆强度的发展规律基本一致。Flatt 等[23]的研究发现，C_3S 在相对湿度低于 80%时会停止水化。因此，低真空环境下基体会继续进行水化反应，这是导致短期暴露后各组试件抗压强度继续提升的主要原因，而后期抗压强度的降低可能是水化终止以及内部缺陷增多导致的(见 2.4 节)。进一步地，C1-28 和 C2-28 3 组试件的抗压强度均在暴露 18 个月时有所降低，而 C3-28 组试件的抗压强度在暴露 12 个月时即出现了明显的下降趋势，这表明在低真空环境下较高的水胶比不利于混凝土强度的维持与发展。此外，值得注意的是，低真空暴露后混凝土的抗压强度及其提升幅度整体上均随水胶比的增加而降低。具体来说，与暴露前的试件相比，低真空暴露 6、12 和 18 个月后 C1-28 组试件的抗压强度分别提升 24.2%、27.0%和 20.1%，C2-28 组试件的抗压强度分别提升 20.7%、30.9%和 20.6%，而 C3-28 组试件的抗压强度分别提升 13.4%、7.7%和 5.5%。对于高水胶比混凝土，低真空环境下其较差的密实性会加剧基体内部的水分损失，这会显著抑制基体的水化进程并提高其收缩开裂的风险[24]，这是导致其强度发展规律受低真空影响较大的主要原因。



C is concrete specimens; C1-28 is concrete specimens with water-cement ratio of C1(0.43), cured for 28 d.

图 3 低真空暴露后不同水胶比混凝土的抗压强度

Fig. 3 Compressive strength of concrete with different w/c after low vacuum exposure

2.3 低真空环境对不同养护龄期混凝土抗压强度的影响

图 4 显示了低真空环境下不同养护龄期混凝土的抗压强度随暴露时间的变化情况。C2-7、C2-28 和 C2-60 3 组混凝土的抗压强度随暴露时间的变化规律基本一致，即随着暴露时间的增加先升高后降低。与暴露前的试件相比，低真空暴露 6、12 和 18 个月后 C2-7 组试件的抗压强度分别提升 37.1%、46.2%和 39.5%，C2-28 组试件的抗压强度分别提升 20.7%、30.9%和 23.5%，而 C2-60 组试件的抗压强度分别提升 17.9%、28.2%和 22.7%。低真空暴露后混凝土抗压强度的提升幅度基本上随养护龄期的增大而降低，这是由于基体的初始水化程度随养护龄期的延长而提高，从而导致长期低真空环境下成熟混凝土的强度增长空间非常有限。此外，可以发现，当暴露时间相同时，混凝土的抗压强度基本上随养护龄期的延长而提高，需要注意的是，对于 C2-28

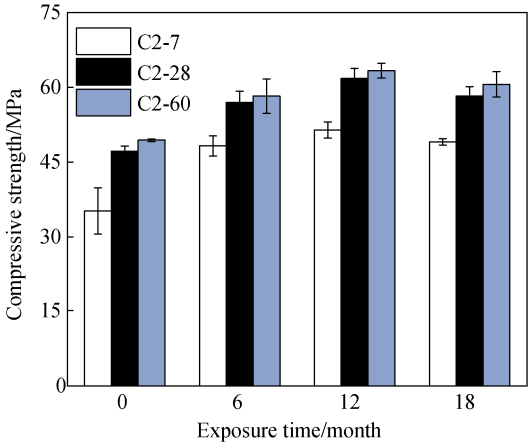


图 4 低真空暴露后不同养护龄期混凝土的抗压强度

Fig. 4 Compressive strength of concrete with different curing ages after low vacuum exposure

和 C2-60 组试件，低真空环境下其抗压强度较 C2-7 组试件显著提升，但 2 组间强度的最大差异仅为 2.3 MPa，这表明低真空环境对不同龄期成熟混凝土抗压强度的影响较小。因此，若要削弱低真空环境对混凝土力学性能的影响，必须要保证混凝土材料具有充足的养护时间(>28 d)。

2.4　机理分析

2.4.1　质量损失　　图 5 显示了低真空和普通大气环境下混凝土(C2-28)失水率随暴露时间的变化情况。2 种环境下混凝土的失水率均随暴露时间的增加而提高，但失水速率整体上随暴露时间的增加而降低，这表明 2 种环境下混凝土内部的水分损失将随暴露时间的增加逐渐趋于稳定。然而，值得注意的是，与普通大气环境相比，低真空环境下混凝土的失水率相对较高。具体来说，低真空和普通大气暴露 240 d 后混凝土的失水率分别为 4.9‰和 3.3‰。低真空环境会加剧混凝土的水分损失，这会阻碍基体的水化进程并提高基体收缩开裂的概率，这也是导致长期低真空暴露后砂浆力学性能普遍低于普通大气环境中试件的重要原因。

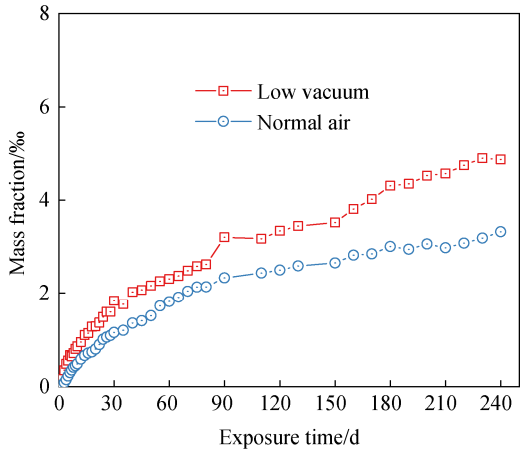


图 5　不同暴露环境下混凝土试件(C2-28)的失水率

Fig. 5　The moisture loss of concrete specimens (C2-28) under different exposure conditions

图 6a 显示了低真空环境下不同水胶比混凝土的失水率随暴露时间的变化情况。C1-28、C2-28 和 C3-28 3 组混凝土的失水率均随暴露时间的增加先提高后趋于稳定。进一步地，可以发现，低真空环境下混凝土的失水率基本上随水胶比的增大而增大，这表明低真空环境下混凝土的保水能力基本上随水胶比的增大而降低。一方面，混凝土内部可蒸发的自由水含量整体上随水胶比的增大而提高；另一方面，混凝土的密实性随水胶比的增大而降低，这会导致低真空环境下高水胶比混凝土内部的水分更容易散失。此外，图 6b 显示了低真空环境下不同养护龄期混凝土的失水率随暴露时间的变化情况。C2-7、C2-28 和 C2-60 组试件的失水率均随暴露时间呈现对数增长，这与不同水胶比混凝土失水率的变化规律基本一致。进一步地，低真空暴露 240 d 后 C2-7、C2-28 和 C2-60 3 组试件的失水率分别 8.2‰、4.9‰和 4.3‰，这表明在低真空环境下混凝土的失水率基本上随养护龄期的增加而降低。一方面，混凝土的初始含水率随养护龄期的增加而降低；另一方面，对于成熟试件，其较高的水化程度不仅会提高基体的密实性从而增大水分迁移的阻力，而且会减少暴露过程中因基体进一步水化而消耗的自由水量。此外，结合图 6a 和图 6b 可以发现，对于 C2-28 组混凝土，进一步降低水胶比或延长养护龄期对于提高其在低真空环境中的保水能力将变得十分有限。具体来说，与 C2-28 组试件相比，低真空暴露 240 d 后 C1-28 和 C2-60 2 组试件的失水率分别

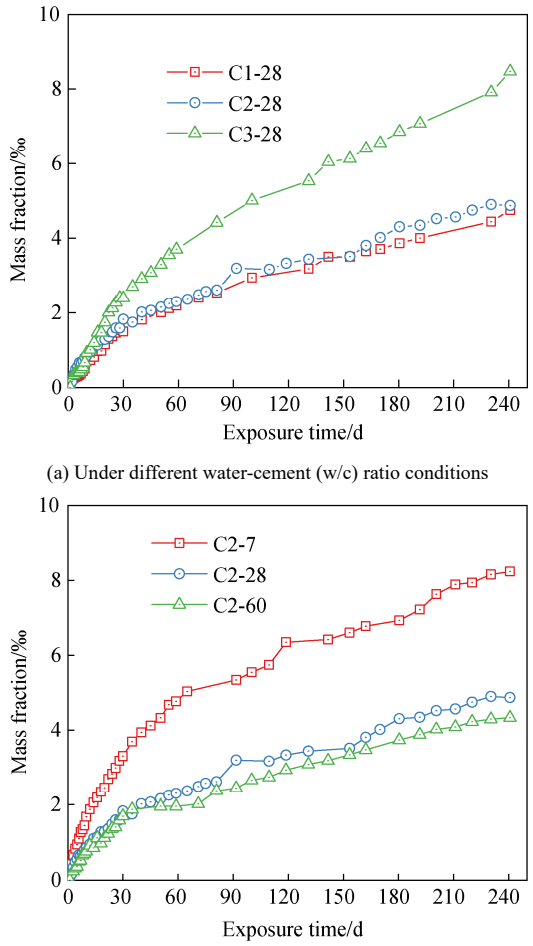
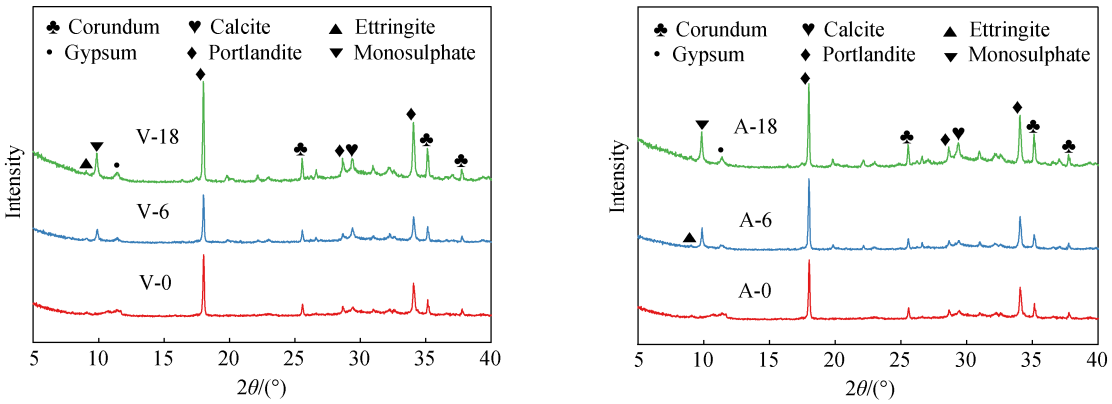


图 6　低真空环境下不同混凝土试件的失水率

Fig. 6　Moisture loss of various concrete specimens under low vacuum condition

仅降低 0.1‰和 0.6‰，这与长期低真空暴露后 C1-28 和 C2-28 2 组试件强度同时下降以及 C2-28 和 C2-60 2 组试件强度差异较小的现象相对应(图 3 和图 4)。相关研究表明，水分损失在一定程度上会影响基体水化[6]，这会改变基体的孔隙结构进而降低混凝土的力学性能[25]。因此，基于水分损失可以合理解释低真空暴露后混凝土抗压强度随水胶比或养护龄期的变化规律。

2.4.2 物相组成 对低真空和普通大气环境下的各组样品进行物相分析，其 XRD 谱分别如图 7 和图 8 所示。由于掺入了 Al_2O_3 作为已知相用于辅助定量分析，所有图谱中均存在明显的刚玉特征峰。

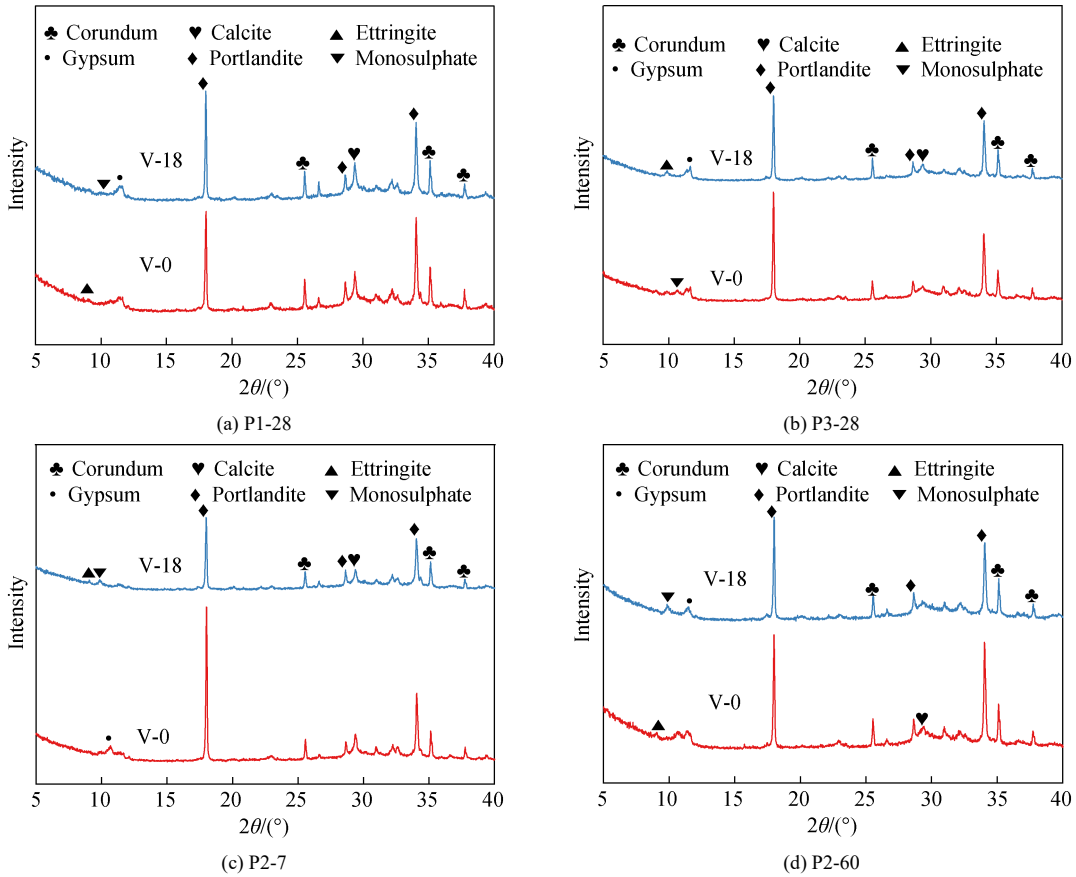


(a) Low vacuum (b) Normal air

V is low vacuum condition; V-0 is low vacuum exposure for 0 month; A is normal air condition; A-0 is normal air exposure for 0 month.

图 7 不同环境下净浆样品(P2-28)的 XRD 谱

Fig. 7 XRD patterns of paste samples (P2-28) under different conditions



(a) P1-28 (b) P3-28

(c) P2-7 (d) P2-60

P is paste samples; P2-28 is the paste sample with water-cement ratio of P2(0.53), cured for 28 d.

图 8 低真空环境下不同水胶比(w/c)和养护龄期净浆样品的 XRD 谱

Fig. 8 XRD patterns of paste sample with different w/c and curing ages under low vacuum

此外，可以看到，所有 XRD 谱中普遍存在氢氧化钙(CH)、$CaCO_3$、钙矾石(AFt)、单硫型水化硫铝酸钙(AFm)以及石膏的特征峰，这表明对于不同水胶比或养护龄期的净浆样品，低真空暴露后其 XRD 谱中并没有衍射峰的出现和消失，且 XRD 谱组成与普通大气环境中的样品基本一致，这表明长期低真空暴露基本不会改变硬化水泥浆体(不同水胶比和养护龄期)的水化产物类型。

混凝土的强度主要与基体中的 C-S-H、CH、AFt、AFm 及 $CaCO_3$(碳化产物)等主要水化产物的含量有关[26–28]。对低真空和普通大气暴露后的样品(P2-28)进行定量 XRD 分析，其结果如图 9 所示，2 种环境暴露后基体中主要水化产物的总量均随暴露时间的延长而增加，这符合 2 种环境暴露后砂浆强度会继续发展的规律。具体来说，随着暴露时间的增加，低真空暴露后基体中主要水化产物的总量分别为 84.4%、86.3%和 87.4%，而普通大气环境暴露后上述物相的总量分别为 84.4%、88.1%和 91.0%。与普通大气环境相比，低真空暴露后基体中主要水化产物的总量明显较低，这是导致长期(大于 5 个月)低真空暴露后砂浆强度普遍低于普通大气环境中试件的重要原因。进一步地，图 10 显示了低真空环境下不同水胶比和养护龄期净浆样品的定量 XRD 结果。低真空暴露后各组样品中主要水化产物的总量均有所提高，这与低真空暴露后不同水胶比和养护龄期混凝土抗压强度会继续发展的规律相对应。此外，值得注意的是，无论是暴露前还是暴露后，样品中主要水化产物的总量基本上随水胶比或养护龄期的增大而提高。因此，基于主要水化产物总量的变化可以合理解释低真空环境下混凝

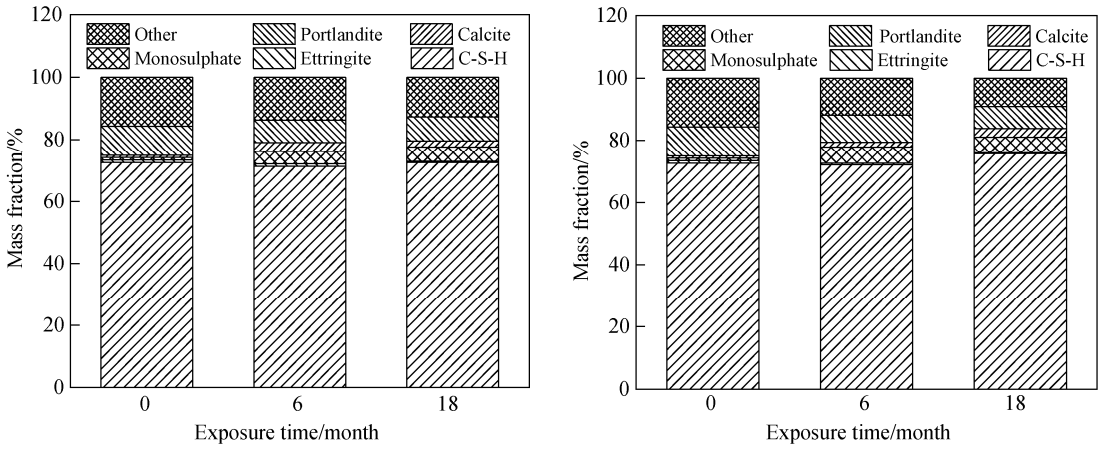


图 9　不同环境暴露后净浆样品(P2-28)的定量 XRD 结果

Fig. 9　Quantitative XRD results of samples (P2-28) after exposure to different conditions

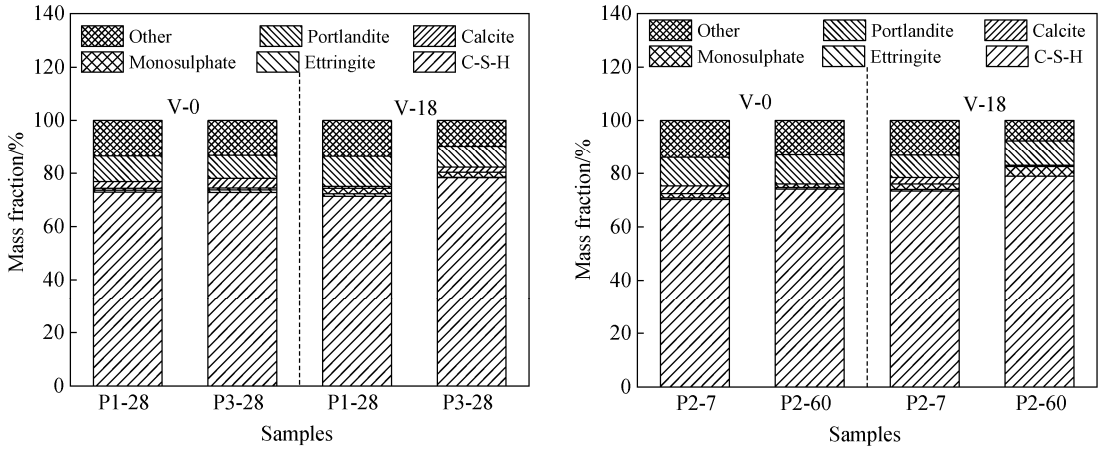


图 10　低真空暴露前后不同水胶比和养护龄期净浆样品的定量 XRD 结果

Fig. 10　Quantitative XRD results of paste samples with different w/c and curing ages before and after low vacuum exposure

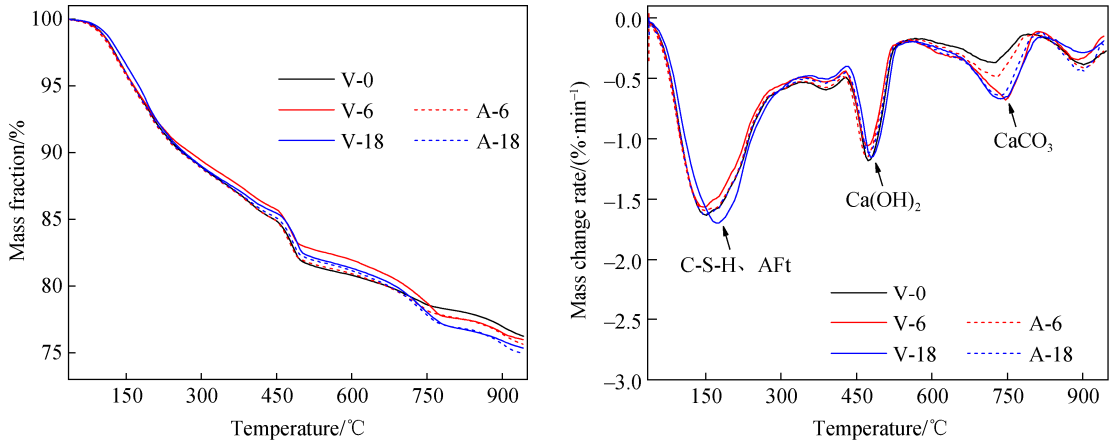
土抗压强度随养护龄期的变化规律。然而，值得注意的是，基于主要水化产物总量的变化并不能合理解释低真空环境下混凝土抗压强度随水胶比的增大而降低的现象，这是由于基体水胶比的增大除了会提高其水化程度外，还会增大其孔隙率(占主导作用)。

2.4.3 水化程度 采用 TGA 表征各组净浆样品的水化程度，其 TG–微分热重分析(DTG)曲线分别如图 11 和图 12 所示。所有的 DTG 曲线均存在 3 个明显的热分解峰，分别对应 C-S-H 和 AFt (35~200 ℃)、CH (350~500 ℃)以及 $CaCO_3$(550~900 ℃)。进一步地，分别统计 35~500 ℃和 350~500 ℃区间内的质量损失，以计算样品中的化学结合水和 CH 含量。需要注意的是，试件在养护、暴露和制样过程中会不可避免地发生碳化。因此，为了提高试验结果的准确性，根据 Snoeck 等[29]提出的方法，计算因碳化导致的化学结合水和 CH 的减少量，从而对化学结合水量和 CH 量进行修正，计算方法如式(3)和式(4)所示，结果如表 4 所示。

$$w_{H_2O} = \Delta\eta_{35-500\ ℃} + \Delta\eta_{550-900\ ℃}\frac{M_{H_2O}}{M_{CO_2}} \tag{3}$$

$$w_{CH} = \Delta\eta_{35-500\ ℃}\frac{M_{CH}}{M_{H_2O}} + \Delta\eta_{550-900\ ℃}\frac{M_{CH}}{M_{CO_2}} \tag{4}$$

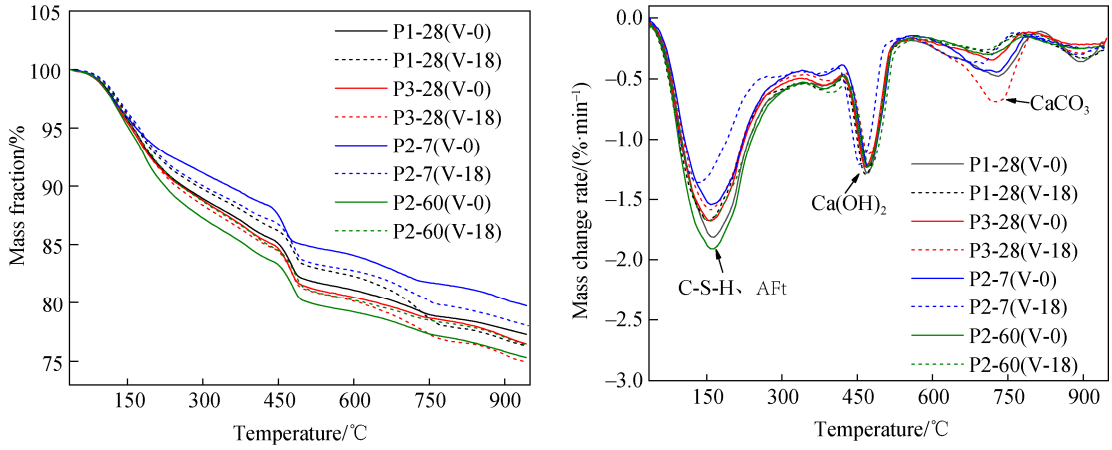
式中：w_{H_2O} 和 w_{CH} 分别表示化学结合水和 CH 的质量分数，%；$\Delta\eta_{35-500\ ℃}$、$\Delta\eta_{350-500\ ℃}$和 $\Delta\eta_{550-900\ ℃}$分别表示 TG 曲线在 35~500、350~500 ℃和 550~900 ℃区间内对应的质量损失率，%；M_{CH}、M_{H_2O} 和 M_{CO_2} 分别表示 $Ca(OH)_2$、H_2O 和 CO_2 的相对分子质量，即 74、18 和 44。



(a) TG curves (b) DTG curves

图 11 不同暴露环境下净浆样品(P2-28)的 TG–DTG 曲线

Fig. 11 TG–DTG curves of paste samples (P2-28) under different exposure conditions



(a) TG curves (b) DTG curves

图 12 低真空暴露前后不同水胶比和养护龄期净浆样品的 TG–DTG 曲线

Fig. 12 TG–DTG curves of paste samples with different w/c and curing ages before and after low vacuum exposure

由表 4 可知，对于 P2-28 组样品，低真空和普通大气环境下其 CH 含量均随暴露时间的增加而提高，这表明 2 种暴露后基体内部均会进行水化反应，这与定量 XRD 结果相对应(图 9)。然而，值得注意的是，低真空和普通大气暴露 18 个月后样品的 CH 含量分别为 32.0%和 32.2%，这表明长期低真空暴露在一定程度上会抑制基体的水化，这符合长期低真空暴露后砂浆强度低于普通大气环境中试件的规律。进一步地，对于化学结合水，2 种环境下其含量的变化规律并不相同。具体来说，与暴露前(V-0)相比，低真空暴露后基体中的化学结合水含量略有降低，而普通大气环境下其含量整体上随暴露时间的延长而提高，这表明低真空暴露会加剧基体中的化学结合水损失。考虑低真空暴露后基体中的 CH 含量会继续提升，所以这种损失主要是由 AFt 和 C-S-H 的分解或脱水导致的，其中，定量 XRD 结果可以印证长期低真空暴露会导致基体中 AFt 分解的现象(图 9)，这也符合 Shangguan 等[14]的研究结论。此外，C-S-H 脱水(如层间水)可能会缩小其层间距从而形成更加紧密的凝胶网络，这可能是导致短期低真空暴露后砂浆强度高于普通大气环境中试件的重要原因。

表 4　不同净浆样品中化学结合水和 CH 的含量

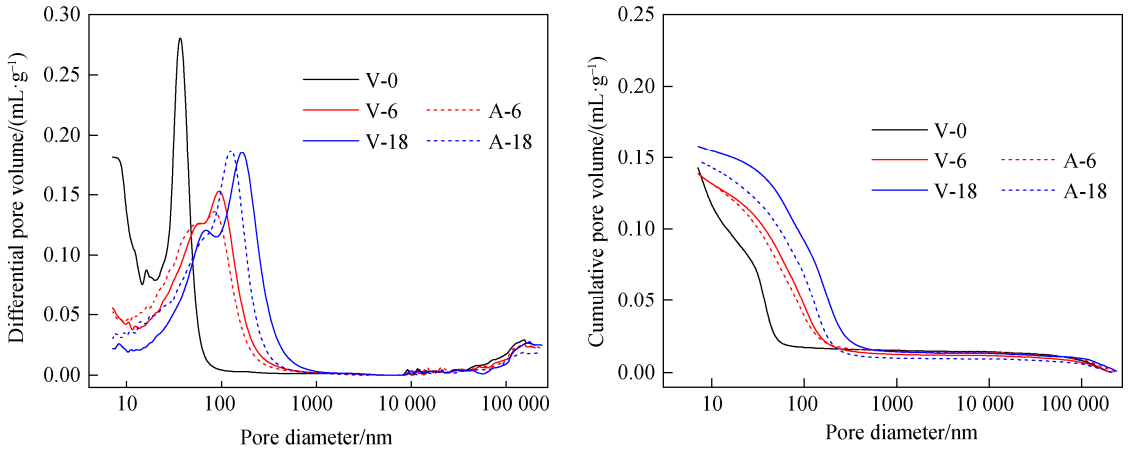
Table 4　Content of chemically bound water and CH in different paste samples　　*w*/%

Samples	Exposure condition	Chemically bound water/%	CH%
P2-28	V-0	20.0	31.3
	V-6	19.5	31.4
	V-18	19.9	32.0
	A-6	20.1	31.4
	A-18	20.3	32.2
P1-28	V-0	19.5	30.0
	V-18	19.2	32.1
P3-28	V-0	20.2	31.5
	V-18	20.9	32.9
P2-7	V-0	16.8	28.4
	V-18	18.3	29.7
P2-60	V-0	21.4	31.3
	V-18	20.2	32.0

对于其他水胶比或养护龄期的净浆样品，可以看到，低真空暴露后其 CH 含量均有所提高，但提升幅度整体上随水胶比或养护龄期的增大而降低，这与低真空环境下混凝土抗压强度的提升幅度随水胶比和养护龄期的变化规律相对应。例如，与暴露前(V-0)相比，低真空暴露 18 个月后 P1-28 和 P3-28 2 组样品中的 CH 含量分别提高 7.3%和 4.6%，而 P2-7 和 P2-60 组样品的 CH 含量分别提高 4.5%和 2.6%。此外，对比 P1-28、P2-28 和 P3-28 3 组样品可知，低真空环境下基体中的化学结合水和 CH 含量整体上均随水胶比的增加而提高，这表明低真空环境下基体的水化程度随水胶比的增加而提高，这符合低真空环境下基体中主要水化产物的总量随水胶比的增大而提高的规律(图 10a)。进一步地，对比 P2-7、P2-28 和 P2-60 组样品可以发现，低真空暴露前后样品中化学结合水和 CH 的含量基本上随养护龄期的延长而增大，这与混凝土抗压强度随养护龄期的延长而增大的规律相对应。此外，值得注意的是，除了 P2-28 组样品外，低真空暴露后 P1-28 和 P2-60 组样品的化学结合水含量也出现了降低的现象，这表明低真空暴露会加剧低水胶比或成熟基体中的化学结合水损失。

2.4.4　孔结构　　孔结构是决定混凝土强度最主要的结构因素[26]，根据文献[30–32]中对孔的分类，小于 20 nm 的孔为无害孔，20~100 nm 的孔为少害孔，100~200 nm 的孔为有害孔，大于 200 nm 的孔为多害孔。因此，为了建立低真空环境下水泥基材料的强度与孔结构的对应关系，采用 MIP 对各组净浆样品的孔结构特征进行测试，获得的孔径分布曲线和孔结构参数分别如图 13、图 14 和表 5 所示。

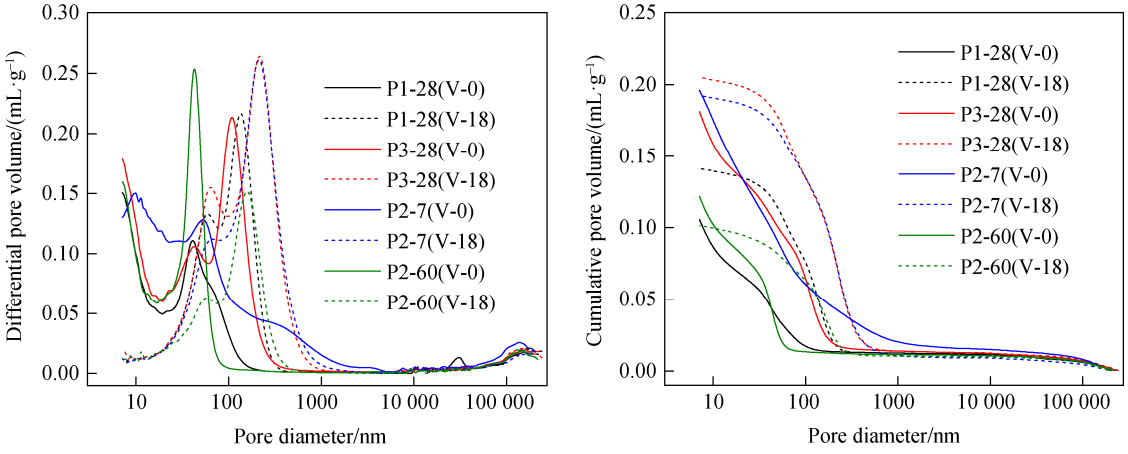
由表 5 可知，对于 P2-28 组样品，低真空暴露后其总孔隙率先降低后升高，而在普通大气环境下其始终保持相对恒定。此外，低真空和普通大气环境暴露 18 个月后基体的最可几孔径从 36.6 nm 分别提高至 163.4 nm 和 125.5 nm，这表明低真空暴露后的基体具有更大的最可几孔径(有害孔)。此外，值得注意的是，与普通大气环境相比，低真空暴露 6 个月时基体的最可几孔径(少害孔)略有增大，而总孔隙率相对较低，这表明短期低真空暴露在一定程度上会改善基体的孔结构，这可以合理解释短期低真空暴露会促进砂浆强度提升的现象。进一步地，2 种环境下基体中无害孔和少害孔的孔隙率均随暴露时间的增加而降低，而有害孔和多害孔的孔隙率均随暴露时间的增加而提高。例如，低真空暴露 18 个月后基体中无害孔、少害孔、有害孔和多害孔的孔隙率分别为 1.6%、8.9%、7.6%和 7.0%，而在普通大气环境下其分别为 2.6%、9.2%、7.1%和 3.2%。相比于普通大气环境，低真空暴露 18 个月后基体中的无害孔和少害孔数量略有减少，而有害孔和多害孔的数量则显著增多，这可以合理解释长期低真空暴露后砂浆强度出现下降且普遍低于普通大气环境中试件的现象。



(a) Differential distribution curves (b) Cumulative distribution curves

图 13 不同环境下净浆样品(P2-28)的孔径分布

Fig. 13 Pore size distribution curves of paste sample (P2-18) under different conditions



(a) Differential distribution curves (b) Cumulative distribution curves

图 14 低真空环境下不同 w/c 和养护龄期净浆样品的孔径分布

Fig. 14 Pore size distribution curves of paste samples with different w/c and curing ages under low vacuum

表 5 低真空环境下各组净浆样品的孔结构参数

Table 5 Pore structure parameters of various paste samples under low vacuum conditions

Samples	Exposure condition	Total porosity/%	Most probable aperture/nm	Porosity			
				<20 nm	20–100 nm	100–200 nm	>200 nm
P2-28	V-0	22.1	36.6	8.3	11.1	0.2	2.6
	V-6	21.5	94.6	3.0	11.0	4.6	2.9
	V-18	25.1	163.4	1.6	8.9	7.6	7.0
	A-6	22.2	83.4	3.6	12.1	3.4	3.1
	A-18	22.1	125.5	2.6	9.2	7.1	3.2
P1-28	V-0	18.1	40.9	6.5	8.6	0.7	2.3
	V-18	23.8	136.4	1.0	9.7	9.5	3.6
P3-28	V-0	26.3	108.9	6.7	10.2	6.6	2.8
	V-18	30.4	219.4	1.0	9.3	7.4	12.8
P2-7	V-0	29.3	53.0	9.0	11.2	2.5	6.7
	V-18	30.0	209.4	0.9	7.9	7.5	13.7
P2-60	V-0	19.7	42.8	6.4	11.1	0.2	2.0
	V-18	17.4	155.6	1.1	5.4	6.4	4.5

此外，对于其他水胶比或养护龄期的净浆样品，低真空暴露后其总孔隙率、最可几孔径、有害孔和多害孔的孔隙率均有所提高，而无害孔和少害孔的孔隙率均有所降低，这与 P2-28 组样品的孔结构发展规律基本一致。然而，对比 P1-28、P2-28 和 P3-28 3 组样品可以发现，无论是暴露前还是暴露后，基体的总孔隙率和最可几孔径均随水胶比的提高而增大。此外，值得注意的是，低真空暴露 18 个月后 P1-28 组样品中多害孔的孔隙率从 2.3%提高至 3.6%，P2-28 组样品中从 2.6%提高至 7.0%，而 P3-28 组样品中从 2.8%提高至 12.8%。随着水胶比的提高，低真空暴露后基体中的多害孔数量增加越明显，这符合低真空环境下混凝土抗压强度随水胶比的提高而降低的结论。进一步地，对比 P2-7、P2-28 和 P2-60 组样品可知，低真空环境下基体的总孔隙率和最可几孔径均随养护龄期的延长而降低。低真空暴露前后基体中无害孔、少害孔、有害孔和多害孔的孔隙率均随养护龄期的延长而降低。例如，低真空暴露 18 个月后 P2-7 组样品中多害孔的孔隙率从 6.7%提升至 13.7%，而 P2-60 组样品从 2.0%提升至 4.5%，这与低真空环境下混凝土抗压强度随养护龄期的延长而提高的规律相对应。综上，基于孔结构可以合理解释低真空环境下砂浆和混凝土(不同水胶比和养护龄期)力学性能的演变规律。

2.5　强度预测模型

2.5.1　相关性分析及线性拟合　　皮尔逊相关系数可以衡量 2 个变量之间的线性相关性。为此，本工作分别计算了水胶比、养护龄期、暴露时间与抗压强度之间的皮尔逊相关系数，其结果如表 6 所示。可以看到，低真空环境下混凝土抗压强度与水胶比呈现显著负相关性(–0.70)，这符合 Abrams 定律关于水胶比影响强度的经典描述[33]。此外，养护龄期和暴露时间均与抗压强度存在弱正相关性，这不仅符合成熟度理论[34]，而且与低真空环境下混凝土抗压强度随暴露时间先升后降的非线性特征相一致(见 2.2 节和 2.3 节)。基于此，本工作构建了包含水胶比、养护龄期及暴露时间二次项的复合方程[式(5)]。通过实验数据拟合验证(图 15)，方程预测值与实测值高度吻合，决定系数(R^2)达 0.94。

$$f=\beta_0+\beta_1\frac{1}{(\mathrm{w}/\mathrm{c})^n}\beta_2\ln(1+\frac{t}{t_0})+\beta_3x_3+\beta_4x_3^2 \quad (5)$$

式中：f 为抗压强度，MPa；w/c 为水胶比，无量纲；n 为非线性指数；t 为养护龄期，d；t_0 表示时间偏移常数，取 1.0；x_3 为暴露时间，月；β_i 为回归系数。

表 6　原始数据的皮尔逊相关系数

Table 6　Pearson correlation coefficient of the original data

Items	w/c	Curing age	Exposure time	Compressive strength
w/c	1.00	0	0	–0.70
Curing age	0	1.00	0	0.37
Exposure time	0	0	1.00	0.38
Compressive strength	–0.70	0.37	0.38	1.00

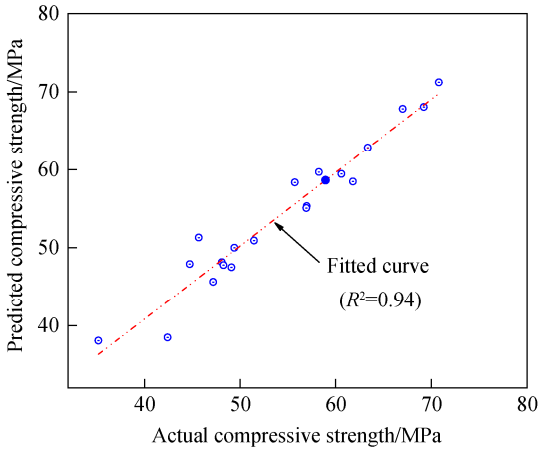


图 15　预测值与实际值对比

Fig. 15　Comparison of predicted value and actual values

2.5.2　数据增强及模型构建与预测　　本工作采用系统化参数扩展策略，选定水胶比(0.43、0.48、0.53、0.58、0.63)、养护龄期(7、14、28、60 d)及暴露时间(0、6、12、18、24 个月)作为核心控制变量。采用全因子实验设计方法构建参数空间，获得 5(水胶比)×4(养护龄期)×5(暴露时间)=100 组理论参数组合(包含 20 组原始参数组合)。接着按照以下步骤进行数据增强：首先，采用 2.5.1 节构建的复合方程进行理论计算，获得 80 组新增抗压强度数据；随后依据《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T50081—2019)在新增数据中叠加标准差为 15%的高斯白噪声以模拟实测误差；最后采用混合数据集策略，在保留 20%原始试验数据的基础上融合增强数据(100 组)。在此基础上，构建融合灰狼优化算法(Grey Wolf Optimizer, GWO)与长短期记忆网络(Long Short-Term Memory, LSTM)的智能预测模型。

在 GWO-LSTM 混合模型中，设置狼群规模为 5、最大迭代次数 20 次、待优化参数维度 3，通过初始化 Alpha、Beta、Delta 狼的搜索空间建立优化框架。算法执行过程包含 3 个关键阶段：1) 利用 GWO 的群体智能机制对 LSTM 超参数(隐

含层神经元数量、初始学习率、Dropout 比率)进行全局寻优；2) 基于最优参数组合构建 LSTM 网络架构；3) 实施模型训练与仿真验证，通过数据反归一化处理获得抗压强度预测值，其算法实现流程如图 16a 所示。

图 16b 显示了 GWO-LSTM 模型的混凝土抗压强度预测结果。可以看到，模型在训练集与测试集中均展现出优异的拟合性能，即预测值与原始数据点呈现高度空间耦合特征。进一步地，采用 R^2、评价绝对误差(MAE)和均方误差(MSE)作为数据拟合度的评价指标，其结果如表 7 所示，其中，R^2 用于衡量模型对因变量波动的解释能力(即预测性能)，而 MAE 和 MSE 用于衡量预测值与实际值之间差异的整体大小。模型在训练集和测试集上均表现出较高 R^2 值，且其 MAE 和 MSE 普遍较小，这表明 GWO-LSTM 模型在预测长期低真空环境下混凝土的抗压强度方面表现出优良的精度以及正确性。

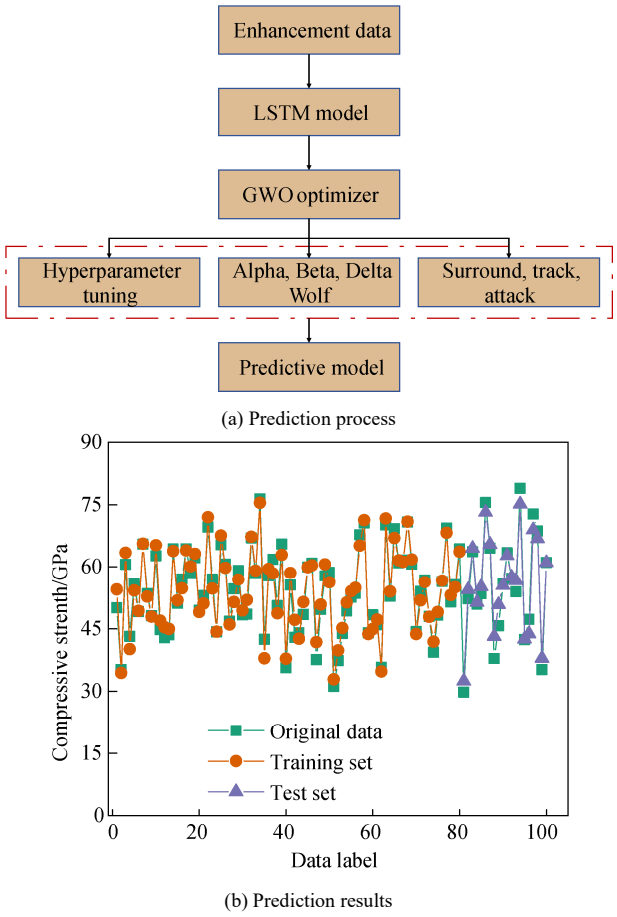


图 16 GWO-LSTM 模型的混凝土抗压强度预测流程及预测结果

Fig. 16 Prediction process and result of concrete compressive strength with GWO-LSTM modeling

表 7 训练集和测试集的评价指标对比

Table 7 Comparison of evaluation metrics for training and test sets

Items	R^2	MAE	MSE
Training set	0.960	1.612	3.888
Test set	0.961	2.064	6.756

R^2 is coefficient of determination; MAE is mean absolute error; MSE is mean squared error.

2.5.3 局限性分析 本工作的强度预测模型是基于特定低真空环境(9~10 kPa)下的试验数据构建的，其输入参数仅包含水胶比、养护龄期和暴露时间 3 个变量。图 17 显示了文献报道的混凝土抗压强度与本文模型预测值的对比结果。可以看到，该模型能够较好地反映低真空环境下混凝土抗压强度的发展趋势，但在具体数值层面存在一定偏差，这主要是由于本工作所采用的气压梯度与水泥强度等级等参数与文献存在差异。因此，后续仍需通过系统试验以量化暴露气压和水泥强度等级等因素对混凝土力学性能的影响机制，进而完善模型的输入特征体系并提高预测精度。

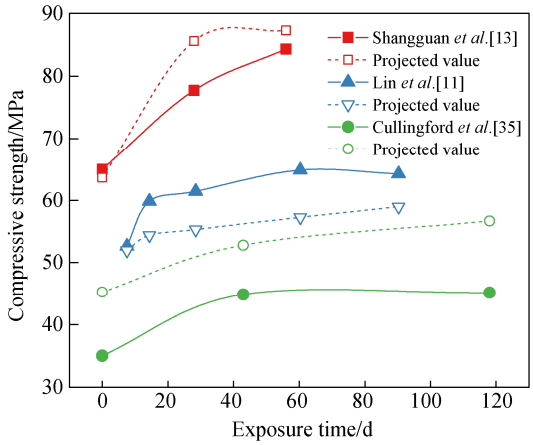


图 17 文献报道的混凝土抗压强度与模型预测值的对比结果[11, 13, 35]

Fig. 17 Comparison of compressive strength reported in the reference with the values predicted by the model[11, 13, 35]

3 结论

1) 砂浆和混凝土强度分别在低真空暴露 6、12 个月后出现下降趋势，这表明长期低真空环境下水泥基材料的强度演变呈现显著的非单调时变特征。此外，与普通大气环境相比，短期(<5 个月)低真空暴露后砂浆抗压强度和抗折强度分别提高 4.1%~5.7%和 9.0%~18.7%，而长期低真空暴露后其分别降低 19.7%~23.4%和 5.9%~27.3%。

2) 低真空环境下混凝土抗压强度与水胶比呈负相关，而与养护龄期呈正相关。同时，水胶比的降低或养护龄期的延长可以提高基体的密实性，从而降低长期低真空暴露后力学性能的下降幅度。

3) 长期低真空暴露虽然不会改变水化产物的类型，但会加速失水从而抑制基体后期的水化。此外，低真空环境下基体的水化程度随水胶比的增大或养护龄期的延长而提高，这与基体中主要水化产物总量的变化规律相对应。

4) 与普通大气环境相比，短期(6 个月)低真空暴露后基体的孔结构略有改善，而长期低真空暴露则会导致总孔隙率和最可几孔径的增大。同时，基体的总孔隙率和最可几孔径基本上随水胶比的减小或养护龄期的延长而降低。

5) 低真空环境下混凝土的抗压强度遵循 Abrams 定律与成熟度理论，拟合方程与测试原始高度吻合，其 R^2 为 0.94。同时，基于该方程构建的增强数据库表明，GWO-LSTM 模型能够有效预测低真空暴露后不同水胶比和养护龄期混凝土的抗压强度(R^2>0.96)。

6) 本工作揭示了低真空环境下水胶比、养护龄期与暴露时间对水泥基材料力学性能的影响机制，为现有研究提供了重要补充。然而，本工作仅采用了 1 个气压范围和 1 种水泥强度等级，因此后续仍需开展实验研究以量化上述参数的影响，进而提升强度预测模型的准确性。

参考文献:

[1] ZENG X H, LAN X L, ZHU H S, et al. Investigation on air-voids structure and compressive strength of concrete at low atmospheric pressure[J]. Cem Concr Compos, 2021, 122: 104139.

[2] WANG K T, LEMOUGNA P N, TANG Q, et al. Lunar regolith can allow the synthesis of cement materials with near-zero water consumption[J]. Gondwana Res, 2017, 44: 1–6.

[3] PARK J, KIM L H, NAM S W, et al. Performance evaluation of airtightness in concrete tube structures for super-speed train systems[J]. Mag Concr Res, 2013, 65(9): 535–545.

[4] 左胜浩, 元强, 黄庭杰, 等. 低气压环境下硬化水泥浆体的水分传输特性[J]. 硅酸盐学报, 2023, 51(5): 1104–1114.
ZUO Shenghao, YUAN Qiang, HUANG Tingjie, et al. J Chin Ceram Soc, 2023, 51(5): 1104–1114.

[5] COLLIER N C, SHARP J H, MILESTONE N B, et al. The influence of water removal techniques on the composition and microstructure of hardened cement pastes[J]. Cem Concr Res, 2008, 38(6): 737–744.

[6] LIU Z Z, LOU B W, SHA A M, et al. Microstructure characterization of Portland cement pastes influenced by lower curing pressures[J]. Constr Build Mater, 2019, 227: 116636.

[7] GE X, GE Y, DU Y B, et al. Effect of low air pressure on mechanical properties and shrinkage of concrete[J]. Mag Concr Res, 2018, 70(18): 919–927.

[8] 葛昕. 高原气候条件对混凝土性能及开裂机制影响的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
GE Xin. The research on effect of plateau climatic conditions on concrete performance and cracking mechanism[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.

[9] ZHANG A, YANG W C, GE Y, et al. Effect of nanomaterials on the mechanical properties and microstructure of cement mortar under low air pressure curing[J]. Constr Build Mater, 2020, 249: 118787.

[10] CHANG H L, WANG X L, WANG Y F, et al. Influence of low vacuum condition on mechanical performance and microstructure of hardened cement paste at early age[J]. Constr Build Mater, 2022, 346: 128358.

[11] LIN H W, HAN S, HAN B, et al. Development of mechanical properties of concrete in vacuum tunnel of vacuum-based maglev train[J]. Constr Build Mater, 2024, 445: 137928.

[12] KANAMORI H, MATSUMOTO S, ISHIKAWA N, Long-term properties of mortar exposed to a vacuum[J], Spec Publ, 1991, 125: 57–70.

[13] SHANGGUAN M H, XIE Y J, XU S Q, et al. Mechanical properties characteristics of high strength concrete exposed to low vacuum environment[J]. J Build Eng, 2023, 63: 105438.

[14] SHANGGUAN M H, XIE Y J, WANG F, et al. Effect of low-vacuum environment on the strength and permeability of cement-based materials[J]. Constr Build Mater, 2023, 400: 132676.

[15] SAKOI Y, HORIGUCHI T, SAEKI N. Durability of hardened mortar under high-vacuum condition[M]. Cement Combinations for Durable Concrete. Scotland Thomas Telford Publishing, 2005: 457–465.

[16] 常洪雷, 王晓龙, 郭政坤, 等. 低真空环境对硬化水泥浆体力学性能的影响[J]. 材料导报, 2024, 38(4): 113–118.
CHANG Honglei, WANG Xiaolong, GUO Zhengkun, et al. Mater Rep, 2024, 38(4): 113–118.

[17] SCRIVENER K L, FÜLLMANN T, GALLUCCI E, et al. Quantitative study of Portland cement hydration by X-ray diffraction/Rietveld analysis and independent methods[J]. Cem Concr Res, 2004, 34(9): 1541–1547.

[18] WHITFIELD P S, MITCHELL L D. Quantitative Rietveld analysis of the amorphous content in cements and clinkers[J]. J Mater Sci, 2003, 38(21): 4415–4421.

[19] LIU R, JIANG L H, XU J X, et al. Influence of carbonation on chloride-induced reinforcement corrosion in simulated concrete pore solutions[J]. Constr Build Mater, 2014, 56: 16–20.

[20] 陈歆, 刘旭, 董淑慧, 等. 高原低压低湿作用下水泥水化与孔结构发展[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2021, 53(2): 202–207.
CHEN Xin, LIU Xu, DONG Shuhui, et al. J Xi′an Univ Archit Technol Nat Sci Ed, 2021, 53(2): 202–207.

[21] ZHANG Z D, SCHERER G W. Evaluation of drying methods by nitrogen adsorption[J]. Cem Concr Res, 2019, 120: 13–26.

[22] FONSECA P C, JENNINGS H M. The effect of drying on early-age morphology of C–S–H as observed in environmental SEM[J]. Cem Concr Res, 2010, 40(12): 1673–1680.

[23] FLATT R J, SCHERER G W, BULLARD J W. Why alite stops hydrating below 80% relative humidity[J]. Cem Concr Res, 2011, 41(9): 987–992.

[24] WANG X L, CHANG H L, LI S W, et al. Influence of low vacuum and high temperature condition on moisture transport and dry shrinkage of mature concrete[J]. J Build Eng, 2024, 95: 110262.

[25] MARUYAMA I, NISHIOKA Y, IGARASHI G, et al. Microstructural and bulk property changes in hardened cement paste during the first drying process[J]. Cem Concr Res, 2014, 58: 20–34.
[26] 水中和, 魏小胜, 王栋民. 现代混凝土科学技术[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 33–37.
[27] CHEN T W, WU J, DONG G Q. Mechanical properties and uniaxial compression stress: Strain relation of recycled coarse aggregate concrete after carbonation[J]. Materials, 2021, 14(9): 2215.
[28] ZHAN B J, POON C, SHI C J. CO_2 curing for improving the properties of concrete blocks containing recycled aggregates[J]. Cem Concr Compos, 2013, 42: 1–8.
[29] SNOECK D, VELASCO L F, MIGNON A, et al. The influence of different drying techniques on the water sorption properties of cement-based materials[J]. Cem Concr Res, 2014, 64: 54–62.
[30] 吴中伟, 陶有生. 中国水泥与混凝土工业的现状与问题[J]. 硅酸盐学报, 1999, 27(6): 734–738.
WU Zhongwei, TAO Yousheng. J Chin Ceram Soc, 1999, 27(6): 734–738.
[31] OTSUKI N, YODSUDJAI W, NISHIDA T, et al. Developed method for measuring flexural strength and modulus of elasticity of micro-regions in normal and recycled aggregate concretes[J]. Mag Concr Res, 2003, 55(5): 439–448.
[32] GE X, GE Y, LI Q F, et al. Effect of low air pressure on the durability of concrete[J]. Constr Build Mater, 2018, 187: 830–838.
[33] ROUSSEL N, STEFANI C, LEROY R. From mini-cone test to Abrams cone test: Measurement of cement-based materials yield stress using slump tests[J]. Cem Concr Res, 2005, 35(5): 817–822.
[34] 龙朝飞, 张戎令, 段运, 等. 基于成熟度理论持续负温下不同入模温度工况的混凝土强度预测模型[J]. 材料导报, 2022, 36(6): 90–97.
LONG Zhaofei, ZHANG Rongling, DUAN Yun, et al. Mater Rep, 2022, 36(6): 90–97.
[35] CULLINGFORD H S, KELLER M D, HIGGINS R W. Compressive strength and outgassing characteristics of concrete for large vacuum-system construction[J]. J Vac Sci Technol, 1982, 20(4): 1043–1047.

Evolution and Prediction of Mechanical Properties of Cementitious Materials after Long-term Exposure to Low Vacuum Condition

WANG Xiaolong, *CHANG Honglei*, *SU Xu*, *KONG Zihang*, *LI Jiaqin*
(School of Qilu Transportation, Shandong University, Jinan 250002, China)

Extend Abstract

Introduction With the expansion of human activities, the application of cementitious materials has gradually extended from normal air condition to low vacuum environment. For instance, in high-altitude regions, concrete structures are affected by low pressure due to increased elevation. Moreover, for recently proposed the construction of low-vacuum pipeline transportation systems and space bases, concrete infrastructure will also face a challenge of operating under a low vacuum condition. Compared to normal air condition, low vacuum condition can accelerate the evaporation of moisture. This rapid moisture loss can affect hydration and alter pore structure of matrix, thereby posing a serious threat to its long-term mechanical properties. However, the existing studies generally use relatively high air pressure values (*i.e.*, above 50 kPa) and short exposure time when characterizing early-age cement-based materials. Moreover, there is still a lack of consistent conclusions regarding the time-varying laws of the mechanical properties of mature cement-based materials under long-term low vacuum condition, requiring a further research. This study was to investigate the effects of water-cement ratio, curing age, and exposure time on the mechanical properties, mass loss, phase composition, hydration degree, and pore structure of cement-based materials under a low vacuum condition. A multi-factor coupling prediction model considering water-cement ratio and curing age was proposed. This research could hold a great significance of the evaluation and prediction of the mechanical properties of cement-based materials under a low vacuum condition.

Methods Portland cement P·O 42.5 was used. Fine aggregates were medium river sand with a fineness module of 2.96, and coarse aggregates were continuous grading gravels with the diameters of 5–25 mm. In addition, tap water in laboratory was used for blending, and polycarboxylate superplasticizer (SP) was adopted to reduce water. Besides, cement paste, mortar, and concrete specimens were employed at different water-cement ratios (*i.e.*, 0.43, 0.53, and 0.63), respectively.

To investigate the effect of low vacuum condition on the concrete performance at different curing ages, cement paste and concrete specimens with a water-cement ratio of 0.53 were divided into three groups, and cured for 3, 28 d, and 60 d, respectively. All the other specimens were cured for 28 d. For the respective curing ages, the specimens in each group were further split into two groups, *i.e.*, one group was placed in a self-designed low vacuum chamber, while another was stored in a constant temperature and humidity chamber (*i.e.*, temperature: (20±2) ℃, relative humidity: 60%±5%, air pressure: 99.85 kPa). For the low vacuum chamber, the temperature was set to (20±2) ℃, and an automated evacuation process was performed every 6 h at 9–10 kPa. The exposure time was 0, 6, 12, and 18 months, respectively.

The effect of low vacuum condition on the mechanical properties and moisture loss of mortar and concrete after reaching the corresponding exposure ages was determined *via* testing the dynamic elastic modulus, compressive strength, flexural strength, and mass loss. Meanwhile, the evolution of phase composition, hydration degree, and pore structure of matrix under long term low vacuum condition were characterized by X-ray diffraction, thermogravimetric analysis, and mercury intrusion porosimetry. Finally, a

multi-factor coupling prediction model considering water-cement ratio and curing age was proposed to achieve an accurate prediction of concrete compressive strength under a long-term low vacuum condition.

Results and discussion The compressive strength of concrete under low vacuum condition is negatively correlated to water-cement ratio, while positively correlated to curing age. Meanwhile, reducing the water-cement ratio or extending the curing age can improve the compactness of matrix, thereby mitigating the degradation degree of concrete mechanical performance after a long-term low vacuum exposure.

Although long-term low-vacuum exposure does not change the type of hydration products, it accelerates water loss, thus inhibiting a further hydration of matrix. In addition, the hydration degree of matrix increases with the increase of water-cement ratio or the extension of curing age, which corresponds to the variation law of the total amount of main hydration products in the matrix.

Compared with normal air condition, a long-term low-vacuum exposure leads to an increase in total porosity and most probable pore size. Moreover, the total porosity and most probable pore size of matrix under a low vacuum basically decrease with the reduction of water-cement ratio or the extension of curing age.

The compressive strength of concrete under a low vacuum condition conforms to Abrams' Law and maturity theory, with the fitting curve showing a high degree of agreement with the test data ($R^2 = 0.94$). In addition, the enhanced database constructed based on this equation shows that the GWO-LSTM model can effectively predict the compressive strength of concrete at different water-cement ratios and curing ages after a low vacuum exposure (*i.e.*, $R^2 > 0.96$).

Conclusions The strength evolution of cement-based materials could exhibit a nonlinear time-dependent characteristic under a low vacuum condition. A short-term exposure boosts strength, while a long-term exposure causes degradation. Besides, the compressive strength of concrete under a low vacuum condition conformed to Abrams' Law and maturity theory. Moreover, compared with normal air condition, a long-term low vacuum exposure could not alter hydration product types but could accelerate water loss of matrix, inhibiting hydration and increases total porosity and harmful pores (*i.e.*, >100 nm). Meanwhile, under a low vacuum condition, the hydration degree of matrix increases at a higher water-cement ratio or a longer curing age, corresponding to the evolution law of the pore structure. Furthermore, the GWO-LSTM model based on enhanced dataset could accurately predict compressive strength of concrete under a low vacuum condition at different water-binder ratios, curing ages, and exposure time (*i.e.*, $R^2 > 0.96$).

Keywords cementitious materials; low vacuum condition; mechanical properties; microstructure; prediction model