第 49 卷第 8 期
2021 年 8 月

硅 酸 盐 学 报
JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY

Vol. 49，No. 8
August，2021

http://www.gxyb.cbpt.cnki.net

DOI：10.14062/j.issn.0454-5648.20200922

综 合 评 述

低气压环境下水泥混凝土性能研究进展

刘 旭[1]，陈 歆[1]，田 波[1,2]，李立辉[2]，葛 勇[1]

(1. 哈尔滨工业大学交通科学与工程学院，哈尔滨 150090；2. 交通运输部公路科学研究院，北京 100088)

摘 要：对低气压环境下水泥混凝土性能的研究现状进行了综述，重点论述了低气压对引气剂溶液的泡沫性能、混凝土的含气量与孔结构、混凝土的强度与收缩等的影响规律。低气压环境会降低搅拌机的有效功率，进而可能影响混凝土的搅拌质量；低气压对混凝土含气量与孔结构的影响因引气剂品种而异，在选择优质引气剂且搅拌质量良好的前提下，低气压下搅拌、成型对混凝土含气量及孔结构的影响有限；低气压养护对混凝土力学与收缩性能不利，但低气压环境不会使养护充分的混凝土力学性能发生劣化。此外，还提出了目前研究存在的问题并对应地提出了研究展望。

关键词：混凝土；孔结构；收缩；引气剂；低气压
中图分类号：TU528　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2021)08–1743–10
网络出版时间：2021–06–17

Cement Concrete Properties under Low Atmospheric Pressures-A Short Review

LIU Xu[1], *CHEN Xin*[1], *TIAN Bo*[1,2], *LI Lihui*[2], *GE Yong*[1]
(1. School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China;
2. Research Institute of Highway, Ministry of Transport, Beijing 100088, China)

Abstract: The properties of cement concrete at low atmospheric pressures (LAP) were reviewed, including the foaming performance of air-entraining agent solution, air content and pore structure of concrete, concrete strength and concrete shrinkage. The effective power of the concrete mixer at LAP was reduced, so that the mixing quality of fresh concrete was adversely affected. The effect of LAP on the air content and pore structure of concrete was dependent on the type of the air-entraining agent. LAP has little effect on the air content and pore structure of concrete in the presence of a good air-entraining agent and the maintaining of mixing quality control. Moreover, LAP can detrimentally affect the mechanical and shrinkage properties of concrete. However, the mechanical properties of the well-cured concrete cannot be deteriorated at LAP. In addition, the problems mentioned in the literatures and the corresponding solutions were also discussed.

Keywords: concrete; pore structure; shrinkage; air-entraining agent; low atmospheric pressure

青藏高原地区由于海拔高、辐射强，其年均气温较低且昼夜温差很大，正负温交替频繁，导致该地区服役的混凝土工程更易发生冻融破坏[1–4]。早在青藏铁路二期工程(格尔木-拉萨段)开工建设前，中国铁道科学研究院建材防腐研究专题组就多次对位于同走廊带的在役青藏公路进行了混凝土病害调研[5]。调研发现，青藏公路部分涉水桥梁在其建成十年间就出现了严重的冻融破坏[5]。在工程中，通过掺加引气剂在混凝土中引入细小密集的气泡是提高混凝土抗冻性能的有效手段[6–8]。但在青藏铁路二期工程的建设过程中，朱长华等[9]首次报告在格尔木南山口对混凝土引气远较在北京时困难，并将

收稿日期：2020–12–16。　修订日期：2021–01–07。
基金项目：国家国际科技合作专项项目(ISTCP 2014DFR81000)。
第一作者：刘 旭(1996—)，女，博士研究生。
通信作者：葛 勇(1962—)，男，博士，教授。
陈 歆(1991—)，男，硕士，工程师。

Received date: 2020–12–16.　**Revised date:** 2021–01–07.
First author: LIU Xu (1996–), female, Doctoral candidate.
E-mail: liuxu20@hit.edu.cn.
Correspondent author: GE Yong (1962–), male, Ph.D., Professor.
CHEN Xin (1991–), male, Master, Engineer.
E-mail: hitbm@163.com; xin.chen@alu.hit.edu.cn

之归结于青藏高原地区的低气压自然环境。岑国平等[10]在玉树机场建设过程中也发现，在西安完成配合比设计的混凝土于玉树机场现场试拌时含气量大为降低，认为与玉树当地环境气压较低、拌和水较冷和砂石含泥量较高有关。后来，陆续有更多的高等院校与科研院所开始更具体地研究不同环境气压对新拌混凝土含气量与硬化混凝土气孔结构的影响，但各单位的研究结果彼此间并不完全一致，甚至存在较大分歧，有待进一步归纳梳理。

青藏高原地区的低气压环境除了可能通过影响混凝土含气量和气孔结构[11]降低其抗冻性能外，还会与当地的低湿度、大风速和强辐射等其他环境因素耦合，加速混凝土中的水分散失：一方面迟滞早龄期混凝土的强度发展[12–14]；另一方面加大混凝土干缩开裂的风险[3–4,15–17]。以青藏铁路二期工程为例，尽管在建设中后期采取了优化外加剂组成与混凝土配合比设计、强化混凝土保温保湿养护等措施使得混凝土开裂较建设初期得到了大幅改善，但后来的回访和调研显示青藏铁路二期工程的混凝土开裂现象仍较低海拔地区更为普遍[3,16]。近年来，部分高校开始研究低气压与低湿度耦合作用对混凝土性能的影响，取得了一定的成果。

从混凝土的引气效果与水分散失两方面着手，系统地梳理了国内外学者关于低气压环境对混凝土性能影响的研究进展，对其中的研究方法与研究成果进行了分析与讨论。

1 低气压对引气剂溶液性能的影响

1.1 引气剂溶液的表面张力

有学者认为低气压环境中引气剂溶液的表面张力会增大，从而导致气泡的稳定性变差。王余杰等[18]利用简易毛细管法测量不同模拟气压下水的表面张力，发现环境气压降低会导致水体表面张力系数明显增大。Shi 等[19]和 Li 等[20–21]在不同的海拔测试了引气剂溶液的表面张力，王明武[22]和贾旭宏等[23]也在不同的海拔测试了水成膜泡沫灭火剂溶液的表面张力，见表 1。

表 1 不同气压下表面活性剂溶液表面张力的研究

Table 1 Researches on surface tension of surfactant solution in different atmospheric pressures

Author	Test apparatus/method	Atmospheric pressure/kPa	Temperature /℃	Surfactant	Results
Shi[19]	Platinum ring surface tension apparatus	101, 66, 57		AEA A and AEA B	Atmospheric pressure: 101→57 kPa, surface tension increase: 5.2 mN/m (AEA A) and 4.3 mN/m (AEA B).
Li[20]	Automatic interface tension meter JZ-200A	101, 61	20 ± 3	SJ (Triterpenoid), SD (Sodium dodecylbenzene sulfonate), DC (Gemini quaternary ammonium salt cationic surfactant)	Atmospheric pressure: 101→61 kPa, surface tension increase: 1.0–1.6 mN/m.
Wang[22]	Automatic interface tension meter A60 / Platinum plate	95, 71, 61	5	AFFF	As the atmospheric pressure reduced, the surface tension of AFFF increased 0.2–1.5 mN/m.
Jia[23]	Automatic interface tension meter A60	95, 71, 61	20	AFFF	As the atmospheric pressure reduced, the surface tension of AFFF linearly reduced (the reduction < 1 mN/m).

尽管表 1 中 Li 等[20]、王明武[22]和贾旭宏等[23]的结论不尽相同，但可以看出表面活性剂溶液的表面张力随气压的变化较小，约 40 kPa 的压差对应的表面张力变化小于 1.6 mN/m。Shi 等[19]在常压和低气压下测得的引气剂溶液表面张力的差别较大，可能是由于溶液温度差异导致的误差。国内外其他行业对高压下(常压至数十甚至数百倍的标准大气压)液体表面张力与压力的关系早有研究，一般认为表面张力与压力呈负相关[24–25]。不过值得注意的是，若考查其中 0.5 个标准大气压的压差(对应混凝土工程中关注的海平面至海拔 5 200 m 处的大气压差)对表面张力的影响，可发现表面张力变化非常小，可忽略不计。

另外，Bruere 等[26]的研究发现十二烷基醇和十二烷基醇钠混合试剂的水溶液对比十二烷基硫酸钠的水溶液具有更低的表面张力，但是在以水泥浆滤液作溶剂时却呈现出了相反的规律。因此，引气剂对水的表面张力的改变规律与其对水泥浆体表

面张力的改变规律不一定能完全匹配。

1.2　引气剂溶液的泡沫性能

工程实践中，为了节约试验成本、简化试验步骤，有时会根据经振荡后引气剂水溶液的泡沫几何形态与经时变化近似地判断引气剂在混凝土中的起泡性能及气泡稳定性。不少学者[4,9,10,19,27]在研究不同气压环境对引气混凝土含气量的影响时都曾在不同的海拔进行过类似的试验，普遍发现在高海拔地区摇泡的引气剂溶液较低海拔地区泡沫尺寸大、稳定性差，各试验结果见表 2。李立辉等[27]认为，初始泡沫尺寸是影响泡沫稳定性的关键因素：初始泡沫尺寸越大、泡沫体系中大气泡吞噬、合并小气泡的速度越快。从表 2 还可发现，在高海拔地区摇泡的引气剂溶液起泡高度要低于低海拔地区，但各研究中反映出的具体差异不尽相同。

表 2　不同气压下引气剂溶液的泡沫性能研究

Table 2　Researches on foam property of air-entraining agent solution in different atmospheric pressures

Author	Air entraining agents	Atmospheric pressure/kPa	Foam height or volume	Foam duration	Size and number of bubbles
Zhu[9]	SJ-2	101	11 mL	27 h	Smaller size, more number
		69	10 mL	15 h	Larger size, less number
Cen[10]	Sodium lauryl sulfate	96	140 mm	Much shorter in lower air pressure	
		65	95 mm		
	Rosin soap	96	40 mm		
		65	25 mm		
Ke[4]	AEA	101	12 mL	28 h	Smaller size, more number
		65	11 mL	14 h	Larger size, less number
Shi[19]	AEA A	101	Full	≥72 h	Smaller size
		66	Full	≥48 h	Larger size, less number
		57	50 mL	≥48 h	Sparse
	AEA B	101	38 mL	≥36 h	Moderate size
		66	32 mL	≥24 h	Larger size, less number
		57	29 mL	≥24 h	Sparse
Li[27]	AES, 303R	101			Larger initial size and quicker growing in lower air pressure
		81			
		64			

除上述不同海拔的现场摇泡试验外，也有研究人员在实验室模拟不同的气压环境测试引气剂溶液的泡沫性能。刘旭[28]在模拟低气压下的试验得到了与上述现场试验类似的结果，发现低气压下引气剂溶液起泡和稳泡能力有所下降，下降程度因引气剂种类而异。李扬等[29]在模拟低气压下采用高速机械搅拌(11 000 r/min)的方法对引气剂溶液起泡，测量泡沫高度并观察泡沫发展过程，发现低气压对气泡产生和发展基本没有影响，可见高速搅拌与慢速振荡两种发泡机制下的试验结果并不一致。该研究中溶液搅拌速度远高于混凝土的搅拌速度，高速机械搅拌产生的泡沫尺寸小、稳定性好，受低气压环境的影响较小，但其试验结果对混凝土的借鉴价值有待斟酌。

另外，消防行业的研究人员对不同气压下发泡类表面活性剂(水成膜类泡沫灭火剂)的泡沫性能也有类似研究[22,23,30–32]，其研究结论因泡沫发生装置的工作机理而异。当控制进入泡沫发生装置的气体量不变时，低气压对溶液的发泡倍数影响不大[22]。

总地来说，低气压环境对引气剂溶液的泡沫性能(泡沫高度、气泡尺寸和泡沫稳定性)有着不利的影响。由前文可知低气压对引气剂溶液的表面张力影响有限，低气压可能主要是通过改变与运动溶液接触的气体分子数量和引气剂溶液中泡沫体系的内外压差，进而影响引气剂溶液的发泡效率和泡沫稳定性。因此，低气压环境下配制引气混凝土时，应选择发泡效率高、泡沫稳定性好、气泡尺寸小的引气剂，同时可适当延长搅拌时间，保证搅拌质量。

2　低气压对混凝土含气量的影响

2.1　新拌混凝土的含气量

不少学者在不同海拔地区测试了混凝土的含气量，尽管这些研究都发现在高海拔地区混凝土的含

气量较低，但具体的降低程度却不完全一致。朱长华等[9]和 Shi 等[19]分别在低海拔地区和高原地区测试了新拌混凝土的含气量，结果表明在高原地区拌制的混凝土含气量明显低于在低海拔地区拌制的混凝土，两地混凝土含气量差值在 1.5%～3.5%(绝对值之差)，且低海拔地区含气量越高(即引气剂掺量越大)，高原地区混凝土含气量(在等引气剂掺量下)相对低海拔地区的降低幅度越大。岑国平等[10]、曾晓辉等[33]等在不同海拔地区的试验也得到了类似的结论。Li 等[20](十二烷基苯磺酸钠作引气剂除外)、路明等[34]、陈华鑫等[35]和何锐等[36]的研究显示在低海拔地区与西藏地区拌制的混凝土含气量差异均在 0.3%～1.4%。

除气压外，可能影响混凝土含气量的因素还包括配合比、搅拌工艺与环境、其他化学外加剂与引气剂的适应性等[37–40]。岑国平等[10]指出高原地区原材料(尤其是拌和水)温度较低、砂石骨料中含泥量较大，对混凝土含气量有明显的不利作用。Chen 等[41]分别在哈尔滨和日喀则测试了新拌砂浆(选用基准水泥和标准砂)的含气量，发现在日喀则拌制的砂浆比哈尔滨拌制的砂浆出机温度低 10 ℃，含气量低 1%；但通过原材料温度控制使拌合物温度一致的试验结果则显示，两地新拌砂浆的出机含气量和 45 min 含气量损失情况基本一致。

在同一地点模拟不同的气压环境进行试验，能保证气压为单一变量，排除无关变量对试验结果的影响。Li 等[42–45]首先利用低气压试验箱在常压地区模拟不同的气压环境搅拌混凝土，搅拌结束后打开箱体，在当地的常压环境中进行新拌混凝土含气量试验并成型试件。结果表明，新拌引气混凝土含气量随搅拌气压降低而减小。之后又有其他研究人员[46–47]采用此方法进行研究，并得到了类似的结论。然而，该研究方法受到了 Chen 等[41]的质疑：认为该试验方法忽视了气体的可压缩性(玻义耳定律)，新拌混凝土中的气体会在开箱瞬间被压缩，致使混凝土的含气量与孔结构发生改变，导致后续试验失去意义。因此，该模拟气压的方法还有待改进。

有从事超高性能混凝土研究的学者考虑采用真空搅拌以提高混凝土的密实度(负压搅拌，常压成型)[48–50]。如 Dils 等[49]的研究表明搅拌气压由 101 kPa 降低至 5 kPa 时，利用“真空”(5 kPa)搅拌的各组新拌混凝土在常压下的含气量均在 0.5%以下，且尺寸在 10 μm～3 mm 的气泡数量均有所降低，说明高真空度下非引气混凝土拌合物仍有一定的含气量。而高原地区的混凝土施工自搅拌至成型都处于低气压环境中，不存在文献[42–50]中的气压变化。

混凝土的均匀程度与工作性能也会影响引气剂的引气效果[51]。冉宇舟[46]在试验中发现控制搅拌速度相同时，低气压环境下搅拌机的功率和将混凝土拌合物搅拌均匀所需的功会增大，但搅拌速度不变时低气压不会影响搅拌均匀所需要的时间。Li 等[20]分别在北京和拉萨测试了新拌混凝土的坍落度，发现其随气压降低而有所降低。但从 Li 等[20]的试验结果看，掺加 SJ 型引气剂、坍落度在 200 mm 左右的混凝土，在拉萨与在北京的坍落度仅相差 5 mm，基本可认为在试验误差范围内。另外，高原低气压环境下空气稀薄，电机散热能力变差，导致电机电机功率下降[52–54]。但环境温度随海拔高度增加而降低，故高原地区实际工程中混凝土搅拌机功率是否受低气压环境影响尚有待甄别，且该潜在影响与引气混凝土搅拌质量的关系也有待进一步分析。

2.2 硬化混凝土的含气量

考虑到测试的快捷方便，现行规范中用于评价混凝土抗冻性的指标一般是新拌混凝土的含气量，而事实上硬化后混凝土的含气量对混凝土的抗冻性能具有更重要的意义。刘旭[28]改进了模拟试验，使试样在低气压环境搅拌、成型并养护至终凝，发现低气压对硬化砂浆含气量的影响因引气剂种类而异，掺加 SJ-2 型引气剂时低气压下成型的砂浆含气量甚至较常压下略有提高。李立辉等[27]分别在北京、楚雄和拉萨制备了砂浆试件，发现随气压降低硬化砂浆含气量有所降低(气压降低 40 kPa，含气量降低 0.8%～2.1%)，该降低值折算到混凝土中为 0.5%～1.2%，认为这个幅度的差异不至于导致工程意义上的引气困难。陈华鑫等[35]分别在西安和拉萨制备了混凝土试件并进行 28 d 标准养护，对硬化混凝土进行孔结构分析，结果表明：硬化后含气量在 4%以内的混凝土，西安组和拉萨组的含气量差在 0.2%以内；硬化后含气量在 4%～5.5%的混凝土，拉萨组比西安组的含气量低 1.0%。在 Chen 等[41]的研究中，在哈尔滨制备的硬化砂浆含气量与在日喀则制备的硬化砂浆基本一致。

2.3 低气压下混凝土的含气量控制

根据 Li 等[20]、Chen 等[41]的研究，在高原地区掺加 1.6×10^{-4} 以内的 SJ-2 型引气剂即可使得新拌混凝土的含气量达到 5%以上，满足该地区混凝土的抗冻性要求。朱长华等[9,55]、谢永江等[1]针对高原复

杂恶劣的气候环境研制了 DZ-1 系列复合型外加剂，以 SJ-2 型引气剂作为复合型外加剂中的引气组分，可满足青藏铁路的混凝土抗冻性要求。故低气压下混凝土的含气量可通过优选引气剂品种、适当提高引气剂掺量和提高搅拌质量等措施来调节，值得重视但不必过分担忧。

3　低气压对混凝土孔结构的影响

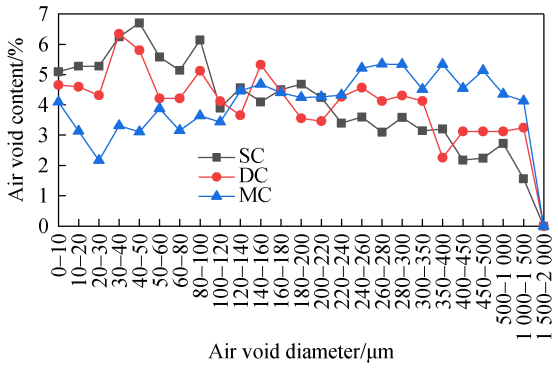
3.1　硬化混凝土的孔结构与气孔结构

Shi 等[19]和李立辉等[27]分别在不同海拔地区制备水泥净浆，并利用压汞法测试其孔结构，发现在高原地区制备的净浆中直径 100 nm 以上尤其是 200 nm 以上孔的比例高于在低海拔地区制备的水泥净浆。刘旭[28]的模拟试验则发现，模拟低气压环境下搅拌成型的水泥净浆中直径在 400 nm～2 μm 的孔的比例高于常压下制备的水泥净浆，但低气压对水泥净浆孔结构的影响会随养护龄期延长而有所减弱。

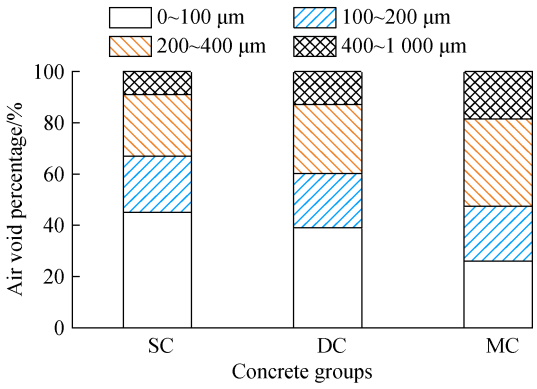
在混凝土中引气以提高抗冻性，主要通过在单位体积的浆体中提供足够多的气泡来实现。Li 等[20,56]的研究发现在北京制备的混凝土平均气孔直径和气泡间距系数均小于在拉萨制备的混凝土。具体到掺加 SJ 型引气剂的混凝土，拉萨组对比北京组气泡间距系明显增大(由 227.3 μm 增大到 343.0 μm)。然而分析该组试验数据发现，两个地区制备的混凝土含气量(出机)和平均气孔直径差别都很小(含气量相差 0.3%，平均气孔直径相差 3.2 μm)。根据气泡间距系数的几何意义，两地混凝土的气泡间距系数不应有如此大的差别，可能是振捣成型与后续硬化过程中含气量发生变化所致。

何锐等[36]分别在西安和拉萨制备了混凝土试件并测试其气孔结构(见图 1)，发现新拌混凝土含气量在 5.2%～6.3%之间时硬化混凝土的平均孔径和气泡间距系数均在 250 μm 以下。其中在拉萨制备并标准养护的混凝土(SC 组)平均孔径较在西安制备并标准养护的混凝土(DC 组)更小，认为原因是低气压下搅拌成型的混凝土气泡的稳定性差，大尺寸气泡容易溃灭。

考虑到粗骨料对混凝土含气量的贡献一般不大，为减少工作量、提高试验精度，部分学者[28,41]采用砂浆代替混凝土研究了低气压与常压环境中砂浆的气孔结构。如刘旭[28]在模拟试验中发现，低气压(50 kPa)对引气砂浆的气孔结构影响不大，其试验中各组砂浆的气泡间距系数均在 200 μm 以内；Chen 等[41]在现场试验中发现低气压对砂浆的气孔结构无明显影响，当砂浆含气量在 9%左右(换算到混凝土中约为 5.4%)时，常压与低气压下砂浆的气泡间距系数均在 220 μm 以内，其中掺加 SJ-2 引气剂的砂浆气泡间距系数在 190 μm 以下，足以满足抗冻性要求。



(a) Size distribution of air-voids in hardened concrete



(b) Size proportion of air-voids in hardened concrete

图 1　不同环境下混凝土的孔径分布与占比[36]

Fig. 1　Distribution and proportion of air-voids in concrete prepared in different environments[36]

3.2　混凝土气泡与溶液泡沫的差异

在不同海拔地区采用摇泡法测试引气剂溶液的泡沫性能，会发现低气压下溶液的泡沫性能变差，如尺寸增大、数量减少等。但是 Li 等[20]、Chen 等[41]的研究表明，不同气压下掺加 SJ-2 型引气剂的混凝土气泡尺寸几乎没有差别。何锐等[36]的试验甚至发现低气压下拌制的混凝土气泡尺寸较常压下略小。这说明引气剂溶液中产生的泡沫与引气剂在混凝土中引入的气泡存在较大差异，主要是因为溶液振荡与混凝土搅拌时二者与空气接触的方式(如接触面积、相对速度等)不一样。

水溶液中的泡沫的组成为气、液两相。在初始阶段，泡沫由被厚液膜所隔开的近于球状的气泡群组成。随后在重力和表面张力共同作用下，液膜逐

渐变薄[28,57–58]。对于二维泡沫，为保持力学平衡，泡沫隔膜以互成 120°的方式相交，因此观察到的泡沫多近似地呈正六边形，见图 2[59]。不同于彼此相连的泡沫，硬化后混凝土中的气泡呈比较规则的球状且彼此间存在一定间隔。另外，Corr 等[60]的研究表明在新拌混凝土中气泡表面不是简单的液膜，而是一层由不均匀细颗粒(主要为水泥颗粒和部分水化产物)组成的外壳，见图 3[60]。根据气泡经典成核理论[61–62]，影响气泡在溶液(均相成核)与混凝土(异相成核)中稳定存在的因素并不相同。故在研究低气压下混凝土气泡参数时，简单地将低气压环境对引气剂溶液引气效果的影响直接用于混凝土中并不一定合适。

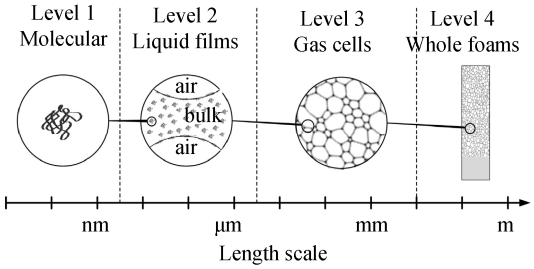


图 2 不同长度尺度上溶液中产生的泡沫结构[59]

Fig. 2 Structure of foams generated in solution at different length scales[59]

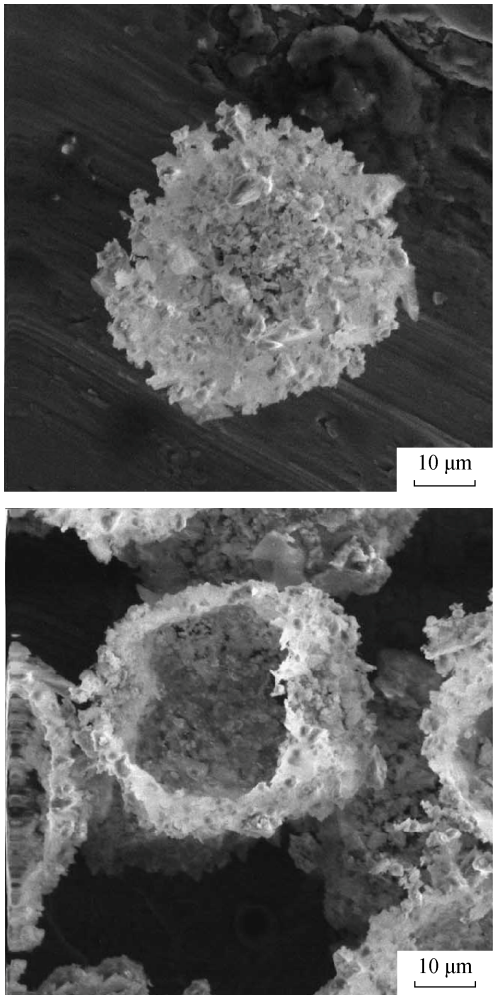


图 3 水泥净浆中产生的气泡形态[60]

Fig. 3 Morphology of bubbles generated in cement paste[60]

4 低气压对混凝土其他性能的影响

4.1 低气压对混凝土力学性能的影响

根据道尔顿蒸发定律，气压与相对湿度越低，蒸发速率越快。青藏高原地区大气压强与相对湿度低[63–64]、蒸发能力大[65–67]，会加速混凝土孔隙中自由水的散失，迟滞胶凝材料的水化进程，从而影响混凝土的性能。纳启财[14]在青海省河卡山地区研究了不同养护条件下 C50 混凝土的力学和耐久性能，发现高原地区自然养护环境对混凝土的力学与耐久性能有明显的不良影响，应加强保温保湿养护，其中养护湿度比养护温度对混凝土力学性能的保障更重要。

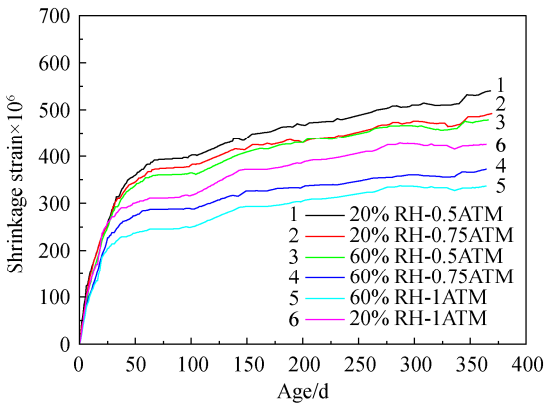
哈尔滨工业大学[12,13,68–71]研发了低气压低湿度养护试验装置并以此研究不同气压、不同湿度养护条件对混凝土性能的影响。Ge 等[13]将常压下覆膜养护 1 d 的混凝土拆模后置于低压低湿环境中养护至不同龄期，发现低气压与低湿度环境都会对混凝土的力学性能产生明显劣化作用。Zhang 等[70]将标准胶砂常压标准养护 3 d 后在不同的气压下以相对湿度 60%继续养护至 28 d，发现经历 3 d 标准养护后标准胶砂的 28 d 强度受后续 25 d 养护期间低气压环境的影响很小。Ge 等[13]与 Zhang 等[70]试验结果的差异来源于前期保湿养护的龄期，Zhang 的试验中标准养护龄期有所延长，水泥水化更充分，故试件受后期低压环境的影响减小。另外，马新飞[71]的研究发现掺加粉煤灰的混凝土在低气压、低湿度的养护条件下强度提升减缓，可见低压低湿环境加速的混凝土中自由水的散失，阻碍了活性矿物掺合料的二次水化。由上述研究成果可知，在高原低气压、低湿度环境施工时宜适当延长混凝土(特别是掺加活性矿物掺合料或中低强度的混凝土)的保湿养护龄期。

除了高海拔地区的混凝土，一些特殊工程和研究中的混凝土也会处于低气压环境。随着人类对宇宙探索的不断深入，研究人员开始探究在外星球建造混凝土工程的可行性[72–75]。Cullingford 等[76]研究了高真空度(0.026 6 Pa)环境对混凝土性能的影响。其结果表明，将已硬化混凝土(龄期 66 d)置于真空

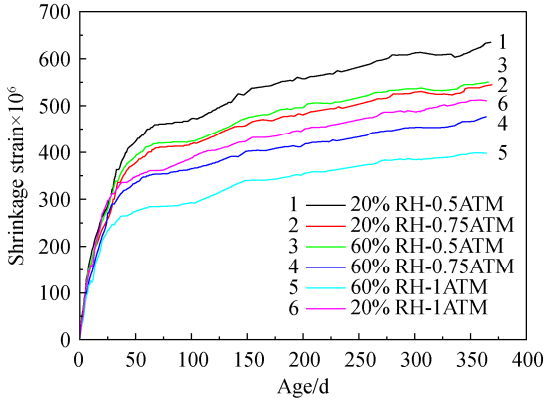
环境后将释放出水蒸气，但暴露在真空环境 43 d 后抗压强度没有发生明显的劣化。Horiguchi 等[77]将与月球上钙长石矿物组成相近的钙长石煅烧研磨以模拟月球水泥，采用干拌–蒸汽法代替常规的湿拌法制备混凝土，发现硬化后的混凝土暴露在真空环境中 11 个月后内部孔结构仍未发生劣化。由于真空环境可以看作低气压、低湿度环境的极限情况，故这些研究进一步说明了低气压低湿度环境对经充分养护混凝土的力学性能无不利影响。

4.2　低气压对混凝土收缩性能的影响

青藏高原地区的低气压与低湿度耦合作用会加速水分散失，除在养护阶段影响混凝土的强度发展外，还可能会在服役期加大混凝土的开裂风险。Ge 等[13]研究了混凝土(常压下覆膜养护 1 d 后拆模)处于不同气压、湿度环境下在 360 d 龄期内的收缩性能(见图 4)，发现 7 d 龄期后气压对混凝土收缩率的影响较为明显，气压越低混凝土收缩率越大。因此，低气压低湿度环境下混凝土收缩开裂的风险加大。



(a) C30



(b) C50

图 4　低气压低湿度对混凝土收缩的影响[13]

Fig. 4　Effect of low air pressure and low humidity on concrete shrinkage[13]

4.3　低气压对混凝土抗冻性能的影响

青藏高原年均气温低、昼夜温差大，对混凝土的抗冻性提出了更高的要求。不过，低气压环境对混凝土抗冻性的可能影响主要通过影响其含气量和气孔结构来实现。在采取有效措施保证混凝土的含气量与优化混凝土的气孔结构后，青藏高原上的工程混凝土均能达到设计要求的抗冻等级。例如，青藏铁路二期工程通过优选外加剂引气组分，保证其重要构件混凝土抗冻等级达到 F300 以上[2]。还有玉树机场工程通过适当增加引气剂掺量、严格控制砂石料中的总含泥量和适当提高混凝土拌合用水的温度等措施，配制了高原机场道面高抗冻性混凝土，施工回访发现该机场道面服役 4 a 未出现冻融破坏问题[77–78]。也就是说，工程建设期的低气压环境可能通过影响混凝土的气孔结构而影响其抗冻性，但暂时没有证据显示工程服役期低气压环境会与冻融循环作用耦合以加速混凝土的破坏。

5　结论与展望

根据现有研究，低气压环境对引气剂溶液的泡沫性能存在一定的不利影响。对于采用优质引气剂的混凝土，通过加强原材料指标与搅拌工艺控制能保证高原低气压环境下搅拌的混凝土达到设计含气量，但采用普通引气剂的混凝土可能更易受到包括气压在内各种因素的影响。此外，搅拌机功率与搅拌时间对含气量也有一定的影响。高原地区低气压与低湿度的耦合作用会对混凝土力学、收缩和耐久性能造成不良影响，加速加剧混凝土结构的开裂。经充分养护后混凝土的力学性能在低气压低湿度环境中不会进一步劣化，故在高原地区宜适当延长混凝土结构的保湿养护龄期。

在现有的研究成果的基础上，尚有以下几个方面需要进一步研究：

1) 引气剂溶液的泡沫性能测试有助于快捷地进行引气剂初步筛选，但是引气剂在水溶液中的泡沫性能与其在混凝土中引入气泡的各项参数不能很好地匹配。若要实现以引气剂溶液中的泡沫性能预判引气混凝土的气孔结构，应寻求更合适的泡沫发生机制，并提出可行的评判标准。

2) 已有研究中关于低气压对混凝土含气量影响程度的试验结果并不一致，彼此间的分歧与各自研究中引气剂的选择、原材料的控制、原材料的温度、搅拌设备与时间控制等因素直接相关。高原低气压环境对混凝土含气量和气孔结构可能的影响机

理仍需深入研究。虽然目前可确定采用优质引气剂(如 SJ-2 型/三萜皂苷类)的混凝土在低气压下含气量变化很小，但低气压对其他市售引气剂的影响还不明确，需要进行系统的研究。

3) 在混凝土结构的服役阶段，低气压与其它因素(如昼夜温差、冻融循环、干湿循环等)耦合后对混凝土性能的劣化作用尚需进一步研究。

参考文献:

[1] 谢永江, 仲新华, 朱长华, 等. 青藏铁路桥隧结构用高性能混凝土的耐久性研究[J]. 中国铁道科学, 2003, 24(1): 108–112.
XIE Yongjiang, ZHONG Xinhua, ZHU Changhua, et al. China Railw Sci (in Chinese), 2003, 24(1): 108–112.

[2] 孟鑫鑫, 胡玉兵, 熊羽, 等. 青藏高原环境下混凝土现状与性能提升综述[J]. 商品混凝土, 2017,(11): 28–33.
MENG Xinxin, HU Yubing, XIONG Yu, et al. Ready–Mixed Concr (in Chinese), 2017 (11): 28–33.

[3] 陈建兵, 熊治华, 李军, 等. 青藏高原冻土区桥梁使用状况调研及对新建工程的启示[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2018, 14(2): 255–258.
CHEN Jianbing, XIONG Zhihua, LI Jun, et al. J Highw Transp Res Dev (Appl Technol Ed) (in Chinese), 2018, 14(2): 255–258.

[4] 柯国炬, 田波, 李雪峰, 等. 川藏公路南线（西藏境）构造物水泥混凝土调研与分析[C]//工业建筑杂志社.《工业建筑》2015年第45卷增刊. 北京: 工业建筑杂志社, 2015: 58–65.
KE Guoju, TIAN Bo, LI Xuefeng, et al. Research on concrete structures destroyed along South Line of Sichuan–Tibet Highway (Tibet border)[C]//Industrial Construction Magazine Agency. Industrial Construction (in Chinese). Vol. 45, Supplement. Beijing: Industrial Construction Magazine Agency, 2015: 58–65.

[5] 石人俊. 青藏铁路混凝土建筑物耐久性及技术对策[J]. 铁道建筑技术, 2001(6): 51–55.
SHI Renjun. Railw Constr Technol (in Chinese), 2001(6): 51–55.

[6] DU L X, FOLLIARD K J. Mechanisms of air entrainment in concrete[J]. Cem Concr Res, 2005, 35(8): 1463–1471.

[7] WONG H S, PAPPAS A M, ZIMMERMAN R W, et al. Effect of entrained air voids on the microstructure and mass transport properties of concrete[J]. Cem Concr Res, 2011, 41(10): 1067–1077.

[8] POWERS T C. Void spacing as a basis for producing air–entrained concrete[J]. ACI J, 1954, 50(5): 741–760.

[9] 朱长华, 谢永江, 张勇, 等. 环境气压对混凝土含气量的影响[J]. 混凝土, 2004(4): 9–10.
ZHU Changhua, XIE Yongjiang, ZHANG Yong, et al. Concrete (in Chinese), 2004(4): 9–10.

[10] 岑国平, 洪刚, 王金华, 等. 高原机场道面混凝土含气量的影响因素及控制措施[J]. 施工技术, 2012, 41(377): 33–35.
CEN Guoping, HONG Gang, WANG Jinhua, et al. Constr Technol (in Chinese), 2012, 41(377): 33–35.

[11] HUO J Y, WANG Z J, CHEN H X, et al. Impacts of low atmospheric pressure on properties of cement concrete in plateau areas: a literature review[J]. Materials, 2019, 12(9): 1384.

[12] 葛昕, 葛勇, 杜渊博, 等. 高原气候条件下混凝土力学性能的研究[J]. 混凝土, 2020(3): 1–4.
GE Xin, GE Yong, DU Yuanbo, et al. Concrete (in Chinese), 2020(3): 1–4.

[13] 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.

[14] 纳启财. 高原地区环境及养护条件对混凝土性能的影响[J]. 混凝土与水泥制品, 2016(1): 10–13.
NA Qicai. China Concr Cem Prod (in Chinese), 2016(1): 10–13.

[15] 张寿红, 张建忠, 李顺平, 等. 青藏铁路桥隧混凝土开裂原因及修补材料研究[J]. 中国铁路, 2016(5): 21–27.
ZHANG Shouhong, ZHANG Jianzhong, LI Shunping, et al. China Railway (in Chinese), 2016(5): 21–27.

[16] 仲新华, 李化建, 叶阳升, 等. 青藏铁路桥梁混凝土裂缝成因及防治技术[C]//中国铁道学会, 青海省科学技术协会, 西藏自治区科学技术协会. 青藏铁路运营十周年学术研讨会论文集. 拉萨: 中国铁道学会, 2016: 38–49.
ZHONG Xinhua, LI Huajian, YE Yangsheng, et al. Causes, prevention and cure of bridge concrete cracks of the Qinghai–Tibet Railway[C] // China Railway Society, Qinghai Association for Science and Technology, Tibet Autonomous Region Association for Science and Technology. Symposium for 10th anniversary of the Qinghai–Tibet Railway Service (in Chinese). Lhasa: China Railway Society, 2016: 38–49.

[17] 陈鹏. 青藏铁路严寒大温差条件下桥梁耐久性混凝土施工技术[J]. 铁道标准设计, 2008(10): 30–34.
CHEN Peng. Railw Stand Des (in Chinese), 2008(10): 30–34.

[18] 王余杰, 张陆陈, 骆少泽． 环境气压降低对水体表面张力系数的影响[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(36): 136–138.
WANG Yujie, ZHANG Luchen, LUO Shaoze. Sci Technol Eng (in Chinese), 2017, 17(36): 136–138.

[19] SHI Y, YANG H Q, ZHOU S H, et al. Effect of atmospheric pressure on performance of AEA and air entraining concrete[J]. Adv Mater Sci Eng, 2018, 2018: 6528412.

[20] LI Y, WANG Z D, WANG L. The influence of atmospheric pressure on air content and pore structure of air–entrained concrete[J]. J. Wuhan Univ Technol–Mater Sci Ed, 2019, 34(6): 1365–1370.

[21] 李扬. 低气压下气泡全生命期特征及引气混凝土性能提升[D]. 北京: 中国建筑材料科学研究总院, 2020.
LI Yang. Characteristics of air bubbles over the life cycle under low air pressure and improvement of the performance of air entrained concrete (dissertation, in Chinese). Beijing: China Building Materials Academy, 2020.

[22] 王明武. 高高原低压低氧对水成膜泡沫灭火剂的性能影响研究[D]. 广汉: 中国民用航空飞行学院, 2015.
WANG Mingwu. A study on the effects of hypobaric hypoxia on the AFFF performance (dissertation, in Chinese). Guanghan: Civil Aviation Flight University of China, 2015.

[23] 贾旭宏, 贾乐强, 陈现涛. 海拔高度对水成膜泡沫灭火剂性能的影响[J]. 消防科学与技术, 2016, 35(4): 556–558.
JIA Xuhong, JIA Leqiang, CHEN Xiantao. Fire Sci Technol (in Chinese), 2016, 35(4): 556–558.

[24] RICE O K. The effect of pressure on surface tension[J]. J Chem Phys, 1947, 15(5): 333–335.

[25] 严继民, 胡日恒. 表面张力与压力的关系[J]. 化学学报, 1964, 30(1): 1–9.
YEN Chimin, HU Jihheng. Acta Chim Sin (in Chinese), 1964, 30(1): 1–9.

[26] BRUERE G M. Fundamental actions of air–entraining agents[C]// International Symposium on Admixture for Mortar and Concrete,

Brussels, Belgium, 1967: 5–23.

[27] 李立辉, 陈歆, 田波, 等. 大气压强对混凝土引气剂引气效果的影响研究[J/OL]. 建筑材料学报, 2020. https://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1764.TU.20200818.1001.012.html.
LI Lihui, CHEN Xin, TIAN Bo, et al. Study on the effect of atmospheric pressure on air–entraining performance of air–entraining agents of concrete[J/OL]. J Build Mater (in Chinese), 2020.

[28] 刘旭. 低气压环境对混凝土引气效果及孔结构影响的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
LIU Xu. Effect of low atmospheric pressure on air entraining effectiveness and pore structure of concrete (dissertation, in Chinese). Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.

[29] 李扬, 王振地, 王玲. 低气压对引气剂溶液气泡产生和发展的影响[J]. 混凝土, 2019(8): 144–148.
LI Yang, WANG Zhendi, WANG Ling. Concrete (in Chinese), 2019(8): 144–148.

[30] 陈现涛. 低压低氧对水成膜泡沫灭火剂性能影响研究[J]. 消防科学与技术, 2016, 35(7): 990–993.
CHEN Xiantao. Fire Sci Technol (in Chinese), 2016, 35(7): 990–993.

[31] 伍毅, 孙强, 张汉飞, 等. 低压环境对AFFF发泡和析液性能影响研究[J]. 消防科学与技术, 2017, 36(11): 1567–1571.
WU Yi, SUN Qiang, ZHANG Hanfei, et al. Fire Sci Technol (in Chinese), 2017, 36(11): 1567–1571.

[32] 王鹏, 康青春, 李玉, 等. 高原低压环境对泡沫灭火剂发泡倍数的影响[J]. 消防科学与技术, 2017, 36(10): 1421–1424.
WANG Peng, KANG Qingchun, LI Yu, et al. Fire Sci Technol (in Chinese), 2017, 36(10): 1421–1424.

[33] 曾晓辉, 兰旭丽, 朱华胜, 等. 低气压环境下混凝土气泡稳定性现场试验[C]//中国硅酸盐学会水泥分会.中国硅酸盐学会水泥分会第八届学术年会论文摘要集.中国硅酸盐学会, 2019: 40.
ZENG Xiaohui, LAN Xuli, ZHU Huasheng, et al. Air bubble stability of concrete in low atmospheric pressure: a field study[C]//The Cement Branch of the CCS. Abstract book of 8th academic annual conference of the Cement Branch of the CCS (in Chinese). The CCS, 2019: 40.

[34] 路明, 周兴朝. 浅谈高海拔地区碾压混凝土含气量影响因素[J]. 水电与新能源, 2019, 33(12): 47–50.
LU Ming, ZHOU Xingchao. Hydropower New Energy (in Chinese), 2019, 33(12): 47–50.

[35] 陈华鑫, 王铜, 何锐, 等. 高原复杂气候环境对混凝土气孔结构与力学性能的影响[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2020, 40(2): 30–37.
CHEN Huaxin, WANG Tong, HE Rui, et al. J Chang'an Univ (Nat Sci Edn) (in Chinese), 2020, 40(2): 30–37.

[36] 何锐, 王铜, 陈华鑫, 等. 青藏高原气候环境对混凝土强度和抗渗性的影响[J]. 中国公路学报, 2020, 33(7): 29–41.
HE Rui, WANG Tong, CHEN Huaxin, et al. China J Highw Transp (in Chinese), 2020, 33(7): 29–41.

[37] ANSARI F, ZHANG Z J, MAHER A, et al. Effects of synthetic air entraining agents on compressive strength of Portland cement concrete–mechanism of interaction and remediation strategy[R]. FHWA–NJ–2002–025, 2002.

[38] 杨文萃. 无机盐对混凝土孔结构和抗冻性影响的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
YANG Wencui. Effect of inorganic salts on pore structure and frost resistance of concrete (dissertation, in Chinese). Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.

[39] SPÖREL F, UEBACHS S, BRAMESHUBER W. Investigations on the influence of fly ash on the formation and stability of artificially entrained air voids in concrete[J]. Mater Struct, 2009, 42(2): 227–240.

[40] HUANG H, YUAN Q, DENG D H, et al. Effects of chemical and mineral admixtures on the foam indexes of cement–based materials[J]. Case Stud Constr Mater, 2019, 11: e00232.

[41] CHEN X, LIU X, TIAN B, et al. Effect of low atmospheric pressure on air entrainment in cement–based materials: an on–site experimental study at different elevations[J]. Materials, 2020, 13(18): 3975.

[42] 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.

[43] 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.

[44] 李雪峰, 付智, 罗鹭, 等. 高原低气压环境对新拌混凝土含气量的影响[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2014, 44(5): 1046–1051.
LI Xuefeng, FU Zhi, LUO Zhu. J Southeast Univ (Nat Sci Ed) (in Chinese), 2014, 44(5): 1046–1051.

[45] 李雪峰. 青藏高原地区混凝土抗冻设计及预防措施研究[D]. 南京: 东南大学, 2015.
LI Xuefeng. Anti–frost design method and preventive measures for concrete structure in the Qinghai–Tibet Plateau (dissertation, in Chinese). Nanjing: Southeast University, 2015.

[46] 冉宇舟. 低气压环境下水泥基材料搅拌分散与引气特性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
RAN Yuzhou. Research on mixing and air entraining characteristics of cement–based materials in low air pressure environment (dissertation, in Chinese). Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.

[47] 陈再兴. 青藏高原地区混凝土抗冻设计及措施研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2017.
CHEN Zaixing. Study on frost resistance design and measures of concrete in Qinghai Tibet Plateau (dissertation, in Chinese). Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2017.

[48] SCHRÖFL C, GRUBER M, PLANK J. Structure performance relationship of polycarboxylate superplasticizers based on methacrylic acid esters in ultra–high performance concrete [C] // Second international symposium on ultra–high performance concrete, Kassel, Germany; 2008: 383–390.

[49] DILS J, BOEL V, SCHUTTER G D. Influence of cement type and mixing pressure on air content, rheology and mechanical properties of UHPC[J]. Constr Build Mater, 2013, 41: 455–463.

[50] ZDEB T. Effect of vacuum mixing and curing conditions on mechanical properties and porosity of reactive powder concretes[J]. Constr Build Mater, 2019, 209: 326–339.

[51] 朱蓓蓉, 吴学礼, 黄士元. 混凝土中气泡体系形成及其稳定性的影响因素[J]. 混凝土, 1999(2): 13–16.
ZHU Beirong, WU Xueli, HUANG Shiyuan. Concrete (in Chinese), 1999(2): 13–16.

[52] 黄国治, 傅丰礼. 中小旋转电机设计手册[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007: 440–450.
HUANG Guozhi, FU Fengli. Medium and Small Rotating Electrical Machines Design Manual (in Chinese). Beijing: China Electric Power Press, 2007: 440–450.

[53] 才家刚. 电机修理试验及性能分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010: 140–141.
CAI Jiagang. Motor Repair Test and Performance Analysis (in Chinese). Beijing: China Machine Press, 2010: 140–141.

[54] 姚银佩, 蔡泽山, 王辉林, 等. 高原矿井通风参数及风机选型研究与应用[J]. 黄金, 2020, 41(10): 37–39.
YAO Yinpei, CAI Zeshan, WANG Huilin, et al. Gold (in Chinese), 2020, 41(10): 37–39.

[55] 朱长华. 青藏高原多年冻土区高性能混凝土的试验研究[D]. 北京: 铁道部科学研究院, 2004.
ZHU Changhua. Research on high performance concrete in Qinghai–Tibet Plateau permafrost region (QT–HPC) (dissertation, in Chinese). Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2004.

[56] LI Y, WANG Z D, WANG L. Influence of low atmospheric pressure on fluidity and pore size of cement paste[J]. Rom J Mater, 2019, 49(1): 88–94.

[57] ZENG X H, LAN X L, ZHU H S, et al. A review on bubble stability in fresh concrete: mechanisms and main factors[J]. Materials, 2020, 13(8): 1820.

[58] 亚当森(顾惕人译). 表面的物理化学[M]. 北京: 科学出版社, 1984: 530–539.
ADAMSON A W (Translator: GU Tiren). The Physical Chemistry of Surfaces (in Chinese). Beijing: Science Press, 1984: 530–539.

[59] GERMAIN J C, AGUILERA J M. Multi–scale properties of protein–stabilized foams[J]. Food Struct, 2014, 1(1): 55–70.

[60] CORR D J, LEBOURGEOIS J, MONTEIRO P J M, et al. Air void morphology in fresh cement pastes[J]. Cem Concr Res, 2002, 32(7): 1025–1031.

[61] BLANDER M. Bubble nucleation in liquids[J]. AIChE J, 1975, 21: 833–848.

[62] 蔡业彬, 国明成, 彭玉成, 等. 泡沫塑料加工过程中的气泡成核理论(Ⅰ)——经典成核理论及述评[J]. 塑料科技, 2005(03): 11–16.
CAI Yebin, GUO Mingcheng, PENG Yucheng, et al. Plast Sci Technol (in Chinese), 2005(03): 11–16.

[63] 张方敏, 申双和. 中国干湿状况和干湿气候界限变化研究[J]. 南京气象学院学报, 2008, 31(4): 574–579.
ZHANG Fangmin, SHEN Shuanghe. J Nanjing Inst Meteorol (in Chinese), 2008, 31(4): 574–579.

[64] 胡琦, 董蓓, 潘学标, 等. 1961–2014年中国干湿气候时空变化特征及成因分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(6): 124–132.
HU Qi, DONG Bei, PAN Xuebiao, et al. Trans Chin Soc Agric Eng (in Chinese), 2017, 33(6): 124–132.

[65] 徐宗学, 巩同梁, 赵芳芳. 近40年来西藏高原气候变化特征分析[J]. 亚热带资源与环境学报, 2006, 1(1): 24–32.
XU Zongxue, GONG Tongliang, ZHAO Fangfang. J Subtrop Resour Environ (in Chinese), 2006, 1(1): 24–32.

[66] 张丁玲. 青藏高原水资源时空变化特征的研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2013.
ZHANG Dingling. The temporal and spatial variations of water resources over the Tibetan Plateau (dissertation, in Chinese). Lanzhou: Lanzhou University, 2013.

[67] 杜军, 翁海卿, 李春燕, 等. 1971—2006年珠穆朗玛峰地区蒸发皿蒸发量的变化及其影响因素[J]. 冰川冻土, 2009, 31(4): 597–604.
DU Jun, WENG Haiqing, LI Chunyan, et al. J Glaciol Geocryol (in Chinese), 2009, 31(4): 597–604.

[68] 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.

[69] 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 (dissertation, in Chinese). Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.

[70] 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.

[71] 马新飞. 低压低湿养护对混凝土性能影响的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
MA Xinfei. Effect of low humidity and low atmospheric pressure on the properties of concrete (dissertation, in Chinese). Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.

[72] KHITAB A, ANWAR W, MEHMOOD I, et al. Lunar concrete: prospects and challenges[J]. Astron Rep, 2016, 60(2): 306–312.

[73] CULLINGFORD H S, KELLER M D. Lunar concrete for construction[C]//2nd Conference on Lunar Bases and Space Activities, Houston, TX, 1992: 497–499.

[74] NASER M Z, CHEHAB A I. Materials and design concepts for space–resilient structures[J]. Prog Aerosp Sci, 2018, 98: 74–90.

[75] RECHES Y. Concrete on Mars: Options, challenges, and solutions for binder–based construction on the Red Planet[J]. Cem Concr Compos, 2019, 104: 103349.

[76] 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.

[77] HORIGUCHI T, SAEKI N, YONEDA T, et al. Behavior of simulated Lunar cement mortar in vacuum environment[J]. Space, 1998, 98: 571–576.

[78] 李建丰, 岑国平, 刘庆涛, 等. 高原机场高抗冻性道面混凝土冻融性能试验研究[J]. 施工技术, 2012, 41(377): 36–39.
LI Jianfeng, CEN Guoping, LIU Qingtao, et al. Constr Technol (in Chinese), 2012, 41(377): 36–39.