

低压环境对引气混凝土气孔结构及抗冻耐久性影响

李雪峰^{1,2}, 张佳晖³

(1. 交通运输部公路科学研究院, 北京 100088; 2. 桥梁结构安全技术国家工程实验室, 北京 100088; 3. 哈尔滨工业大学经济与管理学院, 哈尔滨 150006)

摘 要: 为明晰低压环境对引气混凝土中各直径气孔分布的影响规律, 并进一步探明其对引气混凝土气孔结构及抗冻耐久性能的劣化效应。对不同气压环境下引气混凝土的含气量、气孔结构参数及抗冻耐久性指数进行测试, 研究分析低压环境对引气混凝土气孔结构及抗冻耐久性能的影响。结果表明: 低压环境导致引气混凝土硬化后含气量损失更为明显, 且含气量设计水平越高, 损失值越大, 低压下引气混凝土硬化后含气量平均及最大损失值较常压分别增加约 0.5% 和 0.7%; 与同含气量水平常压引气混凝土相比, 气压降低导致引气混凝土中“微孔”数量占比及含气量占比均明显降低, 其中尤以对直径不大于 100 μm 的“微孔”影响最为显著, 并最终导致低压引气混凝土气孔结构发生劣化, 抗冻耐久性能下降; 引气混凝土中“微孔”含气量与“截留气孔”含气量占比变化对其气孔间距系数影响最为显著; 气孔间距系数随“微孔”含气量特别是 $A_{(0, 100]}$ 与 $A_{(100, 200]}$ 占比的增大而减小, 随“截留气孔”含气量占比的增加而增大; 增大引气混凝土含气量可有效提高其中“微孔”含气量占比, 进而有效提升引气混凝土的抗冻耐久性; 在高原严酷冻融环境地区, 建议新拌混凝土含气量设计水平最大可较平原常压环境提高约 2.0%。

关键词: 引气混凝土; 抗冻耐久性; 低压环境

中图分类号: TU528 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2025)05-1088-10

网络出版时间: 2024-11-22



随着国家不断加大川藏地区交通基础设施的建设力度, 未来在青藏高原服役的混凝土结构将愈来愈多。由于青藏高原具有高寒及昼夜大温差等典型的气候特征, 因而对混凝土结构物的抗冻耐久性能提出较高要求^[1-4]。目前, 通过引气剂在混凝土内部引入微小气孔以有效缓解因冻融导致混凝土内部孔隙水产生的冻胀力或渗透力是提升其抗冻耐久性能的最有效手段之一, 而确保硬化后引气混凝土内部形成优异的气孔结构是制备抗冻混凝土的关键^[5-6]。然而, 引气混凝土的气孔结构受诸多因素影响。目前, 科研人员已分别从原材料组成、浇筑环境及施工工艺等方面对影响引气混凝土气孔结构的关键因素进行了研究^[7-8]。但近年来, 随着高原地区混凝土工程数量的逐年增多, 研究人员发现高原低气压环境会导致引气混凝土含气量明显不足^[9-10]。李雪峰等^[11-12]通过低压试验箱模拟不同海拔地区气压环境, 研究了低压环境对引气混凝土含气量及气孔稳

定性的影响, 结果表明当气压降低至常压时的 50% 时, 混凝土含气量下降约 20%~49%, 同时, 低压引气混凝土中气泡的稳定性也较常压时变差。Shi、王余杰、李雪峰等^[13-15]研究发现引气剂的起泡能力随气压的降低而减弱, 而低压下液体表面张力的增大可能是造成气孔稳定性较差而更容易损失的原因。Li 等^[16]研究发现低气压环境对不同水灰比水泥净浆的孔隙结构影响各异, 当气压降至 40 kPa 时, 高水灰比水泥净浆的平均孔隙直径减小了 75%, 低水灰比水泥净浆的平均孔隙直径则增大 39%。

综上所述, 低气压环境对引气混凝土的影响已逐渐引起研究人员的关注, 但由于研究工作尚处于起步阶段, 仅少量研究成果表明低压环境会对引气混凝土的气孔结构产生劣化作用, 而针对低压环境对混凝土抗冻耐久性能的影响研究也相对较少, 在保证含气量达到设计要求的低压引气混凝土其抗冻耐久性能是否还能满足要求亦尚未见相关报道。

收稿日期: 2024-07-17。 修订日期: 2024-10-06。

基金项目: 新疆自治区科技重大专项(2020A03003-4); 中央院所基本科研业务费项目(2018-9026)。

第一作者: 李雪峰(1983—), 男, 博士, 副研究员。

Received date: 2024-07-17. Revised date: 2024-10-06.

First author: LI Xuefeng (1983—), male, Ph.D., Associate Professor.

E-mail: lxfsure@163.com

为此，以高原与平原地区分别制备的引气混凝土为研究对象，通过对其进行硬化混凝土气孔结构参数及抗冻耐久性指数测试，研究比较不同气压环境下引气混凝土气孔结构参数及抗冻耐久性，揭示低压下引气混凝土气孔结构劣化规律及其对混凝土抗冻耐久性性能的影响，研究结论旨在为提升高原抗冻混凝土的设计水平提供理论与试验依据。

1 实验

1.1 原材料

所用水泥及粗细骨料基本性能如表 1 所示。试验中选用了目前较常用的 2 种液体引气剂，分别为烷基磺酸盐类(Alkyl sulfonate, 上海馨扬实业有限公司生产)和聚醚类(Polyether, 浙江舜洋建筑材料有限公司生产)，减水剂为西卡非引气型聚羧酸高效减水剂，减水率 30%，含固量 20%。水为饮用水。

1.2 方法

分别在拉萨(海拔高度 3550 m)和北京(海拔高度 31 m)的实验室内进行，按照海拔高度与气压间关系^[17]，两地气压分别为 64 kPa 和 101 kPa。试验过程中保证所有原材料及试验温度为(20±2)℃，实验室内相对湿度为 95%。参考《混凝土结构耐久性设计标准》(GB/T 50746—2019)中对不同冻融环境下新拌引气混凝土设计含气量的要求，所述试验选取 3 个引气混凝土含气量设计水平(D)，依次为 3%、5%和 7%，具体试验过程如下：首先，基于表 2 所示的基准混凝土配合比，通过调整引气剂掺量，制备上述 3 个含气量水平的引气混凝土，试验中将新拌混凝土含气量值与设计含气量水平值间的误差控制在±0.5%以内；然后，分别浇筑成型尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm 及 150 mm×150 mm×550 mm 的混凝土试样，24 h 脱模后进行标准养护；最后，试件养护至 28 d 后进行硬化混凝土含气量、气孔结构参数及抗冻耐久性性能测试。

表 1 原材料基本性能
Table 1 Material properties

Material	Specific surface/(cm ² ·g ⁻¹)	Specific gravity	Fineness modulus	Mass fraction of mud/%	Apparent density/(kg·m ⁻³)	Volume density/(kg·m ⁻³)
Cement P·O 42.5	3310	3.15				
River sand		2.65	2.60	1.5	2586	1780
Crushed stone (5–20 mm)		2.56		0.55	2768	1390

表 2 基准混凝土配合比
Table 2 Mix ratio of reference concrete

Water cement ratio	Mix proportion/(kg·m ⁻³)					Slump/mm
	Cement	Water	Sand	Coarse aggregate	Water reducer	
0.45	380	171	720	1125	0.855	140

表 3 新拌混凝土含气量及引气剂掺量
Table 3 Air content of fresh concrete and amount of air-entraining agents

Sample No.	Air content/%	Amount of AEAs/%	Sample No.	Air content/%	Amount of AEAs/%
Al-3-L	3.2	0.3	Al-3-N	3.3	0.4
Al-5-L	5.4	0.5	Al-5-N	5.0	0.8
Al-7-L	7.2	0.4	Al-7-N	7.0	0.6
Po-3-L	3.5	0.6	Po-3-N	3.4	0.8
Po-5-L	5.1	0.4	Po-5-N	4.6	0.6
Po-7-L	7.1	0.6	Po-7-N	6.5	0.9

‘L’ and ‘N’ represents ‘low atmospheric pressure’ and ‘normal atmospheric pressure’, respectively. ‘Al’ and ‘Po’ represent ‘Alkyl sulfonate’ and ‘Polyether’ respectively. ‘3’, ‘5’ and ‘7’ represents design level of air content, respectively. ‘AEAs’ is an abbreviation for ‘air entraining agents’. The dosages of ‘AEAs’ are the mass fraction of cement, %.

为保证试验结果的可靠性，试验中所用混凝土原材料需保持一致。试验中每组含气量水平硬化混凝土气孔结构测试 3 组，测试仪器为混凝土

气孔结构分析仪(RapidAir 457)。本工作涉及的混凝土相关性能测试方法按照《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》(JTG 3420—2020)^[18]及《普

通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082—2009)^[19]进行。

2 结果与讨论

2.1 低压环境对硬化引气混凝土含气量的影响

图 1 为不同气压环境下新拌混凝土(A_f)与硬化混凝土含气量(A_h)的测试结果。结果表明,当 D 分别为 3%、5%和 7%时,常压下引气混凝土的含气量值分别损失约 0.52%、0.75%和 1.21%,而低压下该值分别为 0.64%、1.42%和 1.74%,即低压环境会导致引气混凝土硬化后的含气量损失较常压更为明显。对于试验中使用的烷基磺酸盐类(Al)及聚醚类引气剂(Po),在引气混凝土硬化后含气量损失方面,仅当 $D=3\%$,聚醚类引气剂(Po)较烷基磺酸盐类引气剂(Al)损失更小外,当 $D=5\%$ 和 $D=7\%$ 时,二者损失差别不大;在低压环境导致引气混凝土硬化后含气量损失方面,2 种引气剂也并无明显差异。上述试验结果与在室内环境箱模拟测试所得结论相类似^[11–12],即相较于常压引气混凝土,低压环境会导致 A_f 的损失增大,且含气量设计水平越高,损失程度越大。

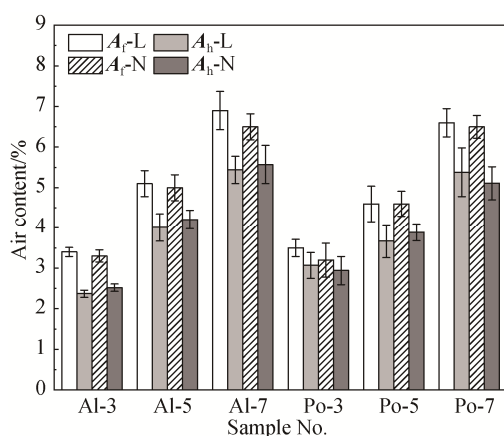


图 1 不同气压环境下引气混凝土含气量

Fig. 1 Air content of concrete under different atmospheric pressures

2.2 低压环境对引气混凝土气孔结构的影响

研究表明,引气混凝土中引气气孔的直径(d)分布范围通常为 20~1000 μm ^[20]。通过对 3 组硬化混凝土气孔结构的测试结果取平均值。图 2 为不同含气量水平下引气混凝土中引气气孔的孔径分布。结果表明:当 $D=3\%$ 时,低压引气混凝土中直径介于 10~30 μm 、120~240 μm 及 300~1000 μm 的气孔数量占比大于常压引气混凝土;当 $D=5\%$ 时,直径大于

80~100 μm 的气孔数量占比均明显大于常压引气混凝土,而当 $D=7\%$ 时,该值进一步减小至 30~40 μm 。可见,与同含气量水平的常压引气混凝土相比,随 D 值的增大,受低压影响导致气孔数量占比降低的最大气孔直径值逐渐减小。

为便于进一步分析,参照已有研究成果^[21],将引气混凝土中的引气气孔按孔径(d)大小,分别定义为“微孔”(0 $\mu\text{m} < d \leq 300 \mu\text{m}$)、“中孔”(300 $\mu\text{m} < d \leq 500 \mu\text{m}$)及“大孔”(500 $\mu\text{m} < d \leq 1000 \mu\text{m}$)。图 3 为上述 3 类气孔数量占比的变化趋势,并进一步将“微孔”细分为 $d_{(0, 100]}$, $d_{(100, 200]}$ 及 $d_{(200, 300]}$ 。结果表明,低压环境会降低引气混凝土引气气孔中“微孔”,特别是 $d_{(0, 100]}$ 气孔的数量占比,且 D 值越高,降低程度越大。另外,无论常压还是低压环境, D 值的提高均可明显提高引气混凝土中“微孔”的数量占比。同样,对 $d_{(0, 100]}$ 气孔的提升最为明显。可见,虽然与同含气量水平常压引气混凝土相比,低压引气混凝土中小直径气孔特别是“微孔”的数量占比减小,但对引气混凝土而言,提高含气量水平仍可有效提升其内部“微孔”的数量占比。

表 4 为不同气压下硬化混凝土主要的气孔结构参数。结果表明,与含气量接近的常压引气混凝土相比,低压引气混凝土中气孔的比表面积(α)更小,气孔数量(N)偏少,即气孔平均直径较大;相应地,低压引气混凝土的气孔间距系数($\bar{L}$)将明显变大。可见,环境气压的降低劣化了引气混凝土的气孔结构。

表 4 硬化混凝土气孔结构参数

Table 4 Air void parameters of hardened air-entrained concrete

Sample No.	$A_h/\%$	$\bar{L}/\mu\text{m}$	α/mm^{-1}	N
Al-3-L	2.37±0.91	437±16	16.53±0.27	224±2
Al-3-N	2.52±0.54	366±21	19.17±0.77	292±22
Po-3-L	3.07±0.32	398±57	16.35±2.47	347±36
Po-3-N	2.94±0.69	314±1	20.08±0.24	370±5
Al-5-L	4.01±0.34	211±9	27.70±1.28	730±15
Al-5-N	4.21±0.23	142±32	40.94±7.04	1115±44
Po-5-L	3.67±0.61	180±3	32.94±0.50	653±53
Po-5-N	3.89±0.21	121±6	46.95±3.33	1050±227
Al-7-L	5.45±1.14	152±16	33.51±7.68	1012±77
Al-7-N	5.57±0.57	88±12	58.02±10.04	1909±149
Po-7-L	5.38±0.80	156±29	33.21±8.84	1046±168
Po-7-N	5.11±0.41	86±3	55.46±7.99	1807±71

The Value after ‘±’ represents the standard deviation. A_h is air content of hardened concrete. $\bar{L}$ is pore spacing coefficient. α is specific surface area of pores. N is number of pores.

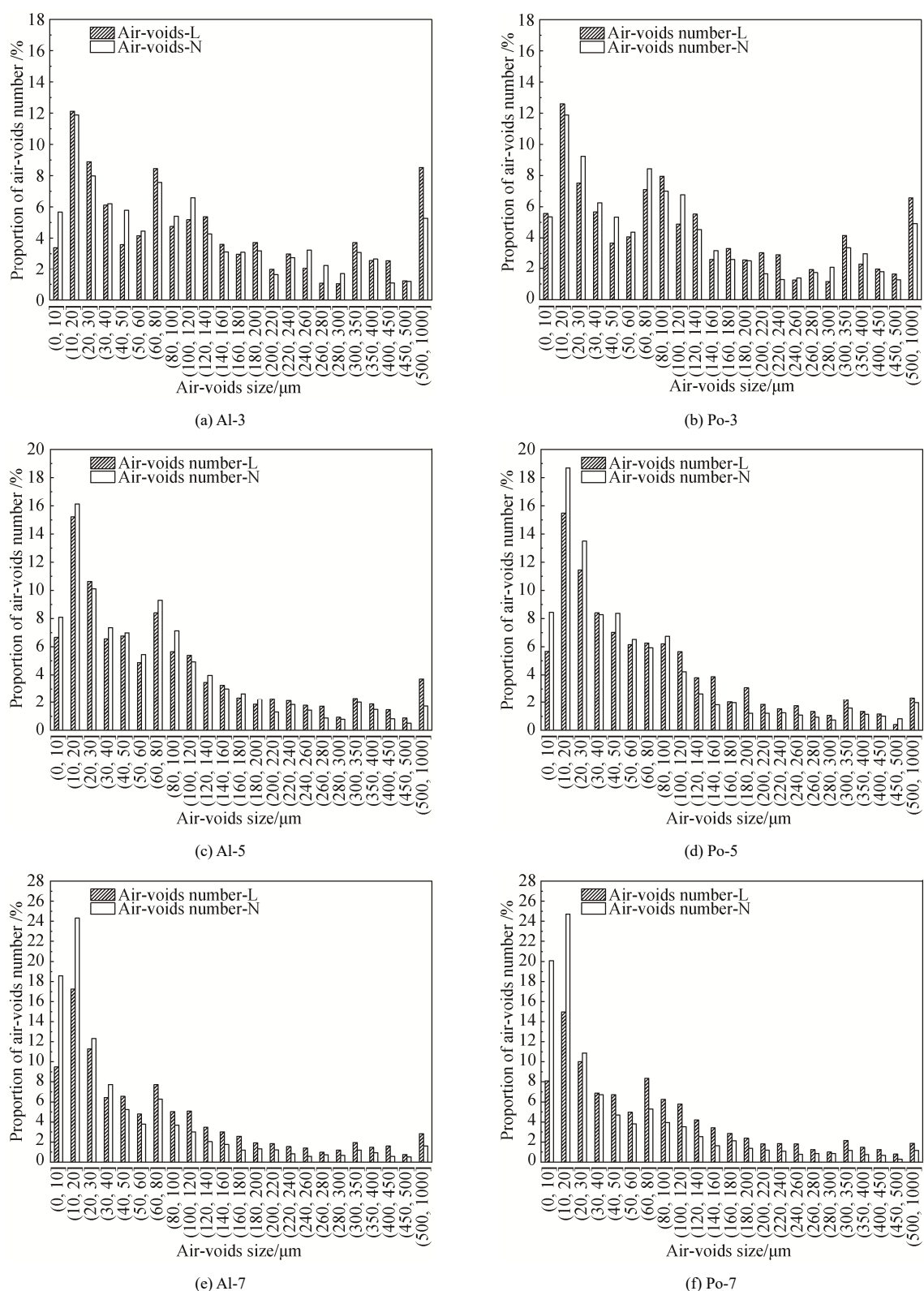


图 2 不同气压环境下引气混凝土各直径气孔占比

Fig. 2 Size distribution of air-entrained voids under different atmospheric pressures

2.3 低压环境对引气混凝土“微孔”含气量的影响

由于引气混凝土中各直径气孔数量占比分布尚无法准确反映其具体含气量,而研究发现^[22],实际决定混凝土抗冻耐久性能的关键指标为引气含气量

A_{1000} (数字“1000”代表气孔直径不大于 1000 μm ,下同),特别是“微孔”中 A_{300} 的大小。因此,有必要进一步就低压环境对引气混凝土含气量特别是“微孔”含气量的影响进行分析。

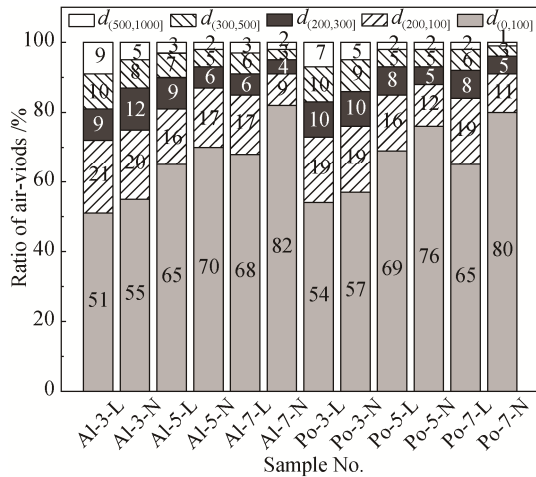


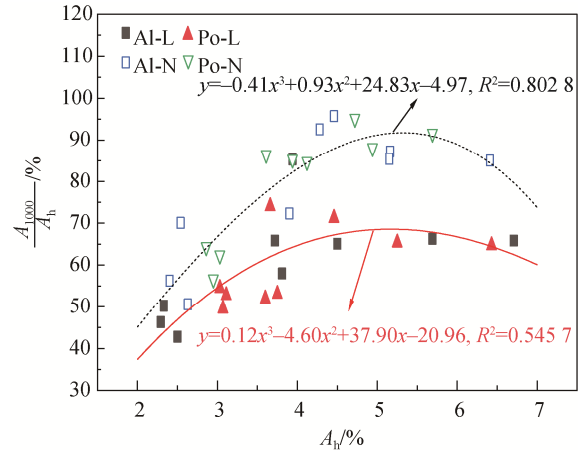
图3 不同气压环境下各直径气孔数量占比

Fig. 3 Proportion of different types of voids in hardened concrete under different atmospheric pressures

研究表明^[23], 引气混凝土中的气孔按成因主要分为 2 类: 一类为“引气气孔”, 主要通过掺引气剂以降低气-液界面的表面张力, 进而使混凝土在搅拌过程中形成大量微小规则的气孔($20\ \mu\text{m} \leq d \leq 1000\ \mu\text{m}$); 一类为“截留气孔”, 主要为部分空气在混凝土机械搅拌过程被截留于混凝土内部而自然形成一定数量的不规则大直径气孔($1000\ \mu\text{m} < d \leq 4000\ \mu\text{m}$)。当引气混凝土硬化后, “引气气孔”的含气量被称之为引气含气量(A_{1000}), 其值一般随引气剂掺量的增加而增大; “截留气孔”的含气量被定义为固有含气量($A_{(1000, 4000)}$), 其值通常受引气剂掺量变化的影响较小。上述 2 类含气量之和基本构成了硬化引气混凝土的总含气量(A_h)。由于“引气气孔”的形成极大地增加了新拌混凝土中气-液两相界面的表面自由能, 从而导致新拌混凝土中的引气结构在热力学上呈现不稳定状态, 为减小系统内表面自由能, 已引入的微小气泡在混凝土硬化过程中会趋于合并、逸出或破裂以最大程度降低气-液界面面积。

图 4 所示为 A_{1000} 随 A_h 的增加其占比的变化趋势。结果表明: 常压和低压环境下, A_{1000} 的占比随 A_h 的增加整体呈先增大后减小的变化趋势。这主要是因为当引气混凝土含气量水平较低时, A_{1000} 随含气量水平的增加而逐渐增大, 由于 $A_{(1000, 4000)}$ 通常受含气量水平变化影响较小, 因此, A_{1000} 在 A_h 中的占比也会逐渐增加; 但当含气量水平达到一定程度后, 由于系统界面自由能自动趋于最小化, 引气气泡最终稳定存在于混凝土中将变得愈发困难。因此, 随含气量水平的增大, 一方面, A_{1000} 的增幅将逐渐降

低; 同时, 由于一定数量的微小气泡自发进行的合并及破裂会形成较大直径或不规则气孔, 从而使得 $A_{(1000, 4000)}$ 也出现了一定程度地增加, 最终导致 A_{1000} 的占比出现了一定幅度的降低。

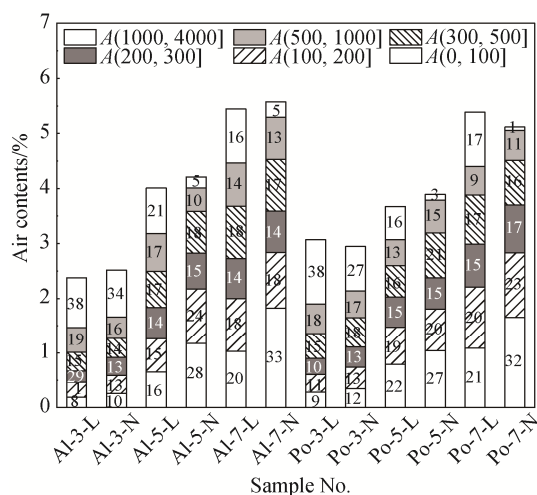
图4 A_{1000} 占比随 A_h 增加的变化趋势Fig. 4 Change trend of the proportion of A_{1000} with increasing A_h

此外, 以本试验结果为例, 对于含气量水平接近的常压与低压引气混凝土, 常压引气混凝土中 A_{1000} 占比均明显高于低压引气混凝土; 常压环境下, 随 A_h 的增加, A_{1000} 的最大占比值接近 91% 后逐渐下降, 而低压环境下该值不到 70%; 当引气混凝土含气量设计水平分别为 3%、5% 和 7% 时, 常压环境下平均能引入的 A_{1000} 分别约为 1.64%、3.50% 和 4.73%, 而低压下该值分别约为 1.34%、2.36% 和 3.93%。上述结果也再一次说明低压环境下引气较常压环境更加困难。

另外, 由于低压环境中, 同含气量水平下混凝土硬化后测得 A_{1000} 值之间离散性较大, 导致低压环境下, A_{1000} 占比变化与 A_h 增加二者之间的相关系数 ($R^2=0.5457$) 明显较常压环境下 ($R^2=0.8028$) 低, 这也再一次验证低压环境会导致引气气泡的稳定性降低^[12]。

图 5 为不同气压环境下引气混凝土中各类气孔含气量的占比。结果表明, 当 A_h 接近时, 环境气压的降低导致引气混凝土中“微孔”含气量特别是 $A_{(0, 100]}$ 的占比明显降低, 同时, $A_{(1000, 4000]}$ 的占比则普遍增大, $A_{(300, 500]}$ 和 $A_{(500, 1000]}$ 的占比则受影响相对较小。含气量水平越高, 上述现象愈发明显。这与 2.2 节中得到的结论类似, 即气压的降低会导致 $d_{(0, 100]}$ 气孔的含气量占比明显减少, 但通过提高含气量水平, 同样可以有效提升引气混凝土中“微孔”

的含气量值。此外, 低压下 $A_{(1000, 4000]}$ 的占比的增加也与前文所述的低压下“引气气泡”易合并及破裂形成大直径气泡有关。



Numbers in the bar chart represent the percentage of air content of voids with different diameters to the air content of hardened concrete.

图 5 不同气压环境下硬化引气混凝土中各直径气孔含气量
Fig. 5 Air content of voids with different diameters in hardened air-entrained concrete under different atmospheric pressures

2.4 低压环境对引气混凝土抗冻耐久性性能的影响

如前所述, 相较于常压环境, 低压环境劣化了引气混凝土的气孔结构, 由于引气混凝土气孔结构直接决定了其抗冻耐久性性能, 因此, 有必要进一步明确低压环境对引气混凝土抗冻耐久性性能的影响程度。

表 5 为基于快冻法得到的混凝土抗冻耐久性指数 (F_D) 的测试结果, 进一步考察不同气压下 F_D 随 A_h 增加的变化趋势后发现 (见图 6), F_D 随 A_h 的增大呈线性增加, 并当 A_h 大于一定值 (约 3.8%) 后, F_D 几乎不再增大; 而对比发现, 低压引气混凝土的抗冻耐久性能与同含气量水平的常压引气混凝土相比, 均出现不同程度的下降。

表 5 不同气压环境下混凝土抗冻耐久性指数

Table 5 Frost resistance durability index (F_D) of air-entrained concrete under different atmospheric pressures

No.	F_D /%	No.	F_D /%
Al-3-L	45	Al-3-N	65
Po-3-L	55	Po-3-N	80
Al-5-L	90	Al-5-N	102
Po-5-L	92	Po-5-N	102
Al-7-L	105	Al-7-N	103
Po-7-L	103	Po-7-N	105

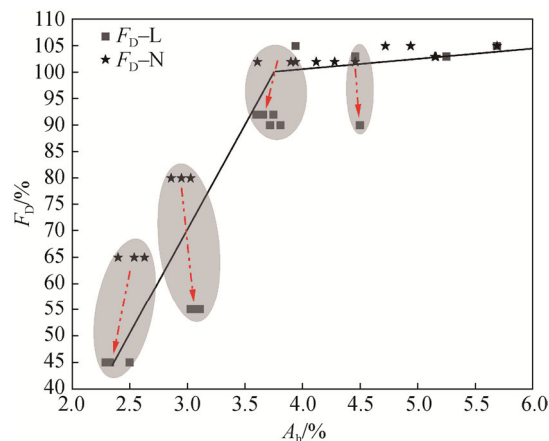


图 6 不同气压环境下 A_h - F_D 间关系

Fig. 6 F_D change trend with increasing A_h under different atmospheric pressures

由于气孔间距系数 ($\bar{L}$) 与 F_D 间具有良好的函数关系^[24], 因此, 可通过考察各直径气孔含量占比变化对 $\bar{L}$ 的影响规律, 以进一步探明低压环境造成引气混凝土抗冻耐久性性能降低的内在机理。通过统计回归得到常压 (101 kPa) 和低压 (64 kPa) 环境下硬化混凝土含气量为 2.29%~6.41% 时各直径气孔含气量占比 (R_v) 与气孔间距系数 ($\bar{L}$) 间的函数关系 (见图 7)。结果表明, 按照相关性大小排序, 依次为 $A_{(0, 100]}$ 、 $A_{(1000, 4000]}$ 、 $A_{(100, 200]}$ 、 $A_{(200, 300]}$ 、 $A_{(500, 1000]}$ 和 $A_{(300, 500]}$, 即“微孔”与“截留气孔”含量占比变化对间距系数大小影响较为显著, 具体表现为“微孔”含气量占比特别是 $A_{(0, 100]}$ 的占比越大, 混凝土气泡间距系数越小, “截留气孔”含气量占比越大, 混凝土气泡间距系数越大, 而“中孔”和“大孔”含气量占比与间距系数间的相关性最弱。出现上述结果的本质是由于“微孔”含气量占比的增加使得大量微小气泡广泛分布于混凝土的硬化砂浆基体中, 使其具备较小的气孔间距系数, 当混凝土受冻时能够为其提供“储水容器”, 从而最终提升混凝土的抗冻耐久性性能。可见, 低压环境造成引气混凝土中 $A_{(0, 100]}$ 和 $A_{(100, 200]}$ 占比的降低是导致其与同等含气量水平常压引气混凝土相比, 耐久性能出现一定程度下降的原因。

2.5 低压环境下引气剂性能弱化机理

如前文所述, 引气混凝土中气泡从新拌混凝土中生成、融合、破裂及逸出, 并最终固化成为硬化混凝土中的引气气孔这一过程是一种复杂的物理-化学反应, 影响因素众多。虽然目前对于低压环境能够削弱引气剂的引气能力已为研究人员所共识, 但目前对于其影响机理仍处于定性分析阶段。

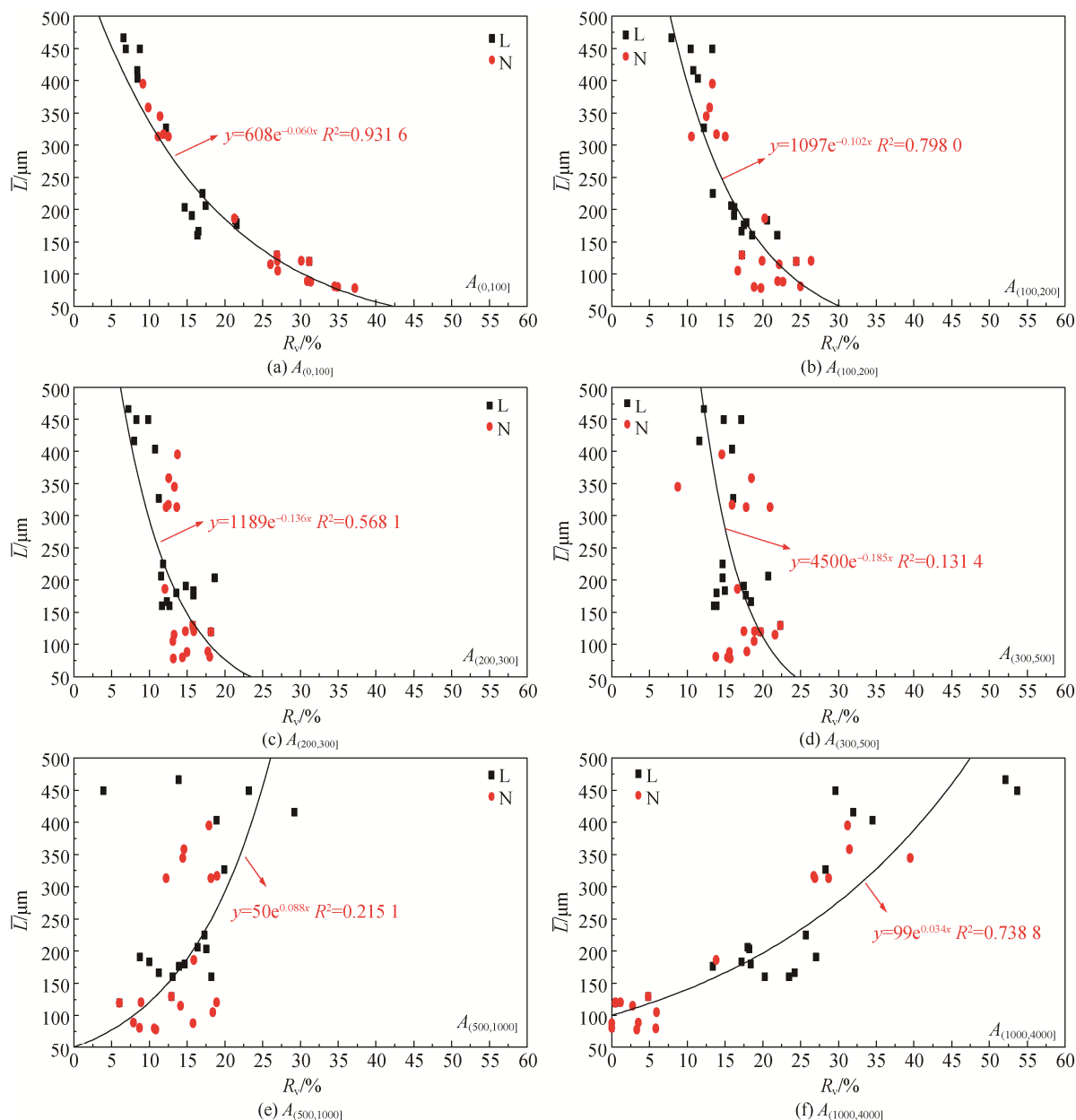


图7 不同直径气孔含气量占比与混凝土气孔间距系数关系

Fig. 7 Relationship between proportion of pore gas content (R_v) and $\bar{L}$ under different atmospheric pressures

文献[14]中的测试结果表明, 温度一定时气压的降低会导致液体的表面张力系数增大^[25]。此时, 要达到与常压引气混凝土接近的含气量水平, 理论上低压环境下需增大引气剂掺量, 本工作所述试验中也证实了上述推论(见表 3)。根据式(1)所示的拉普拉斯方程, 液体表面张力越大, 直径越小的气泡其内外压差越大, 此时, 保证气泡能够稳定存在所需的气泡膜强度也将越高。试验发现^[25], 低压环境会导致引气剂的亲水基团在液-气界面排列变得松散, 进而导致所形成的气泡其外壳较常压环境下变得更薄且疏松, 气泡膜强度变低。因此, 低压下直

径相对较小的气泡将越难于在混凝土中存留。

$$\Delta P = \frac{2\sigma}{r} \quad (1)$$

式中: ΔP 为气泡内外压差, Pa; σ 为液体表面张力, mN/m; r 为气泡直径, μm 。

所述试验结果也证实, 低压环境对引气混凝土中“微孔”特别是直径介于 0~100 μm 的气泡数量及含气量占比的影响最为显著, 进而劣化了引气混凝土的气孔结构。

2.6 低压环境下引气混凝土抗冻耐久性

由 2.2 和 2.3 节分析可知, 气压环境劣化了引气

混凝土的气孔结构, 最终导致其与同含气量水平常压引气混凝土相比, 抗冻耐久性能出现下降, 但气孔结构劣化后的低压引气混凝土能否满足抗冻耐久性能设计要求仍需进一步探讨。

基于本工作所述试验结果绘制得到不同气压环境下 F_D - $\bar{L}$ - A_{1000} 间的关系(见图 8), 由于低压(高原)环境下混凝土可能面临更为严酷的冻融环境。因此, 当水灰比为 0.44 时, 混凝土抗冻耐久性指数 F_D 达到 100% 时, 低压和常压下所需的 A_{1000} 分别约为 3.88% 和 2.92%, 而 2.2 节中分析表明低压下混凝土中能引入 A_{1000} 的最大值约为 3.93%, 常压下为 4.73%。显然, 虽然低压环境导致气孔结构劣化, 但只要保证引气混凝土中由引气剂引入的气泡含量达到一定水平, 仍能保证其满足抗冻耐久性要求。

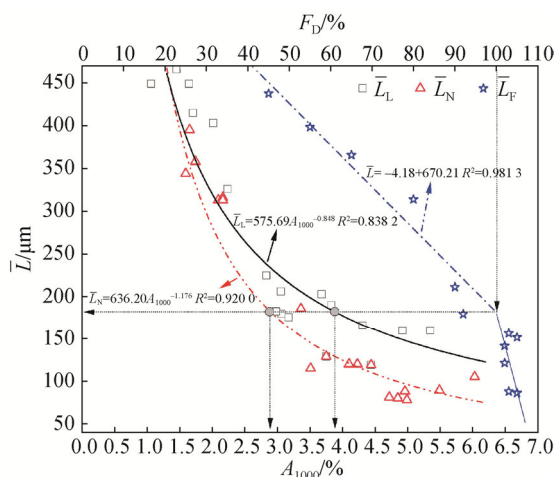


图 8 不同气压环境下 F_D - $\bar{L}$ - A_{1000} 间关系

Fig. 8 Relationship among F_D , $\bar{L}$ and A_{1000} under different air pressures

2.7 低压环境抗冻引气混凝土含气量设计

已有研究已充分说明, 低压环境导致了气泡稳定性变差进而造成混凝土硬化过程中含气量损失较常压时增大; 同时, 低压导致的气孔结构劣化使得要达到与常压引气混凝土相同的气泡间距系数, 低压引气混凝土需引入更多的引气含气量(A_{1000}), 且 $\bar{L}$ 越小(即 F_D 越大), 所需引入的 A_{1000} 也越大(见图 8)。以本工作试验结果为例, 可进一步得到 $\bar{L}$ 与 A_{1000} 及 A_h 三者间关系(见图 9)。结果表明, 当 F_D 分别为 60% ($\bar{L}=377 \mu\text{m}$)、80% ($\bar{L}=279 \mu\text{m}$) 和 100% ($\bar{L}=182 \mu\text{m}$) 时, 低压下引气混凝土中所需 A_{1000} 要比常压时分别增加约 0.1%、0.4% 和 1.0%, 而相应的 A_h , 低压下要比常压时分别增加约 0.2%、0.5% 和 1.3%。

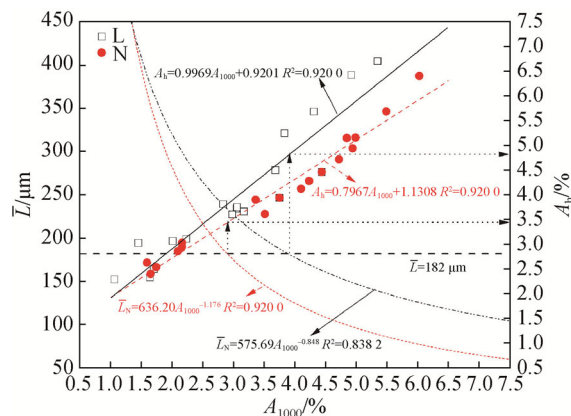


图 9 不同气压环境下 $\bar{L}$ - A_{1000} - A_h 三者间的转换关系

Fig. 9 Conversion relationship among $\bar{L}$, A_{1000} and A_h under different atmospheric pressures

由文献[24]得出的研究结论及 2.1 节所述的试验结果可知, 低压环境下引气混凝土硬化后含气量损失值较常压最大增加约 0.7%; 同时, 满足文献[2]提出的高原严酷冻融环境下混凝土抗冻耐久性设计要求($F_D=100$)时, 低压环境下的 A_h 要比常压下大 1.3%。因此, 在低压环境下进行抗冻引气混凝土含气量设计时, 应适当提高含气量设计水平。建议在确保引气混凝土力学性能满足设计要求的前提下, 新拌混凝土含气量水平最大可较常压环境下提高约 2.0%, 以保障混凝土抗冻耐久性能满足设计要求。

3 结论

1) 低压环境导致引气混凝土硬化后含气量损失更为明显, 且含气量设计水平越高, 损失值越大, 低压下引气混凝土硬化后含气量平均及最大损失值较常压分别增加约 0.5% 和 0.7%。

2) 对于含气量水平接近的低压与常压引气混凝土, 环境气压的降低导致引气混凝土中“微孔”的数量占比及其含气量占比均较常压环境降低, 其中尤以对直径不大于 $100 \mu\text{m}$ 的“微孔”的影响最为显著, 并最终导致低压引气混凝土气孔结构发生劣化, 抗冻耐久性能下降。

3) 引气混凝土中“微孔”含气量与“截留气孔”含气量占比的变化对其气孔间距系数的影响最为显著; 气泡间距系数随“微孔”含气量特别是 $A_{[0, 100]}$ 与 $A_{[100, 200]}$ 占比的增大而减小, 随“截留气孔”含气量占比的增大而增大。

4) 增大引气混凝土含气量可有效提高引气含气量中“微孔”含气量的占比, 进而提升引气混凝土

的抗冻耐久性能；鉴于高原地区严酷的冻融环境，建议新拌混凝土含气量设计水平最大可较常压环境提高约 2.0%。

参考文献:

- [1] 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, 2020, 33(7): 29–41.
- [2] 李雪峰, 付智, 王华牢. 青藏高原地区混凝土冻融环境量化方法[J]. 农业工程学报, 2018, 34(2): 169–175.
LI Xuefeng, FU Zhi, WANG Hualao. Trans Chin Soc Agric Eng, 2018, 34(2): 169–175.
- [3] 武海荣, 金伟良, 吕清芳, 等. 基于可靠度的混凝土结构耐久性环境区划[J]. 浙江大学学报(工学版), 2012, 46(3): 416–423.
WU Hairong, JIN Weiliang, LV Qingfang, et al. J Zhejiang Univ Eng Sci, 2012, 46(3): 416–423.
- [4] WANG S J, CHEN J B, ZHANG J Z, et al. Development of highway constructing technology in the permafrost region on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Sci China Ser E Technol Sci, 2009, 52(2): 497–506.
- [5] ZHANG P, LIU G G, PANG C M, et al. Influence of pore structures on the frost resistance of concrete[J]. Mag Concr Res, 2017, 69(6): 271–279.
- [6] 陈霞, 杨华全, 周世华, 等. 混凝土冻融耐久性与气泡特征参数的研究[J]. 建筑材料学报, 2011, 14(2): 257–262.
CHEN Xia, YANG Huaquan, ZHOU Shi-hua, et al. J Build Mater, 2011, 14(2): 257–262.
- [7] SHAH H A, YUAN Q, ZUO S H. Air entrainment in fresh concrete and its effects on hardened concrete—a review[J]. Constr Build Mater, 2021, 274: 121835.
- [8] DU L X, FOLLIARD K J. Mechanisms of air entrainment in concrete[J]. Cem Concr Res, 2005, 35(8): 1463–1471.
- [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, 2004(4): 9–10.
- [10] 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.
- [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] 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(1): 1–7.
- [14] 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, 2017, 17(36): 136–138.
- [15] 李雪峰. 气压环境对不同引气剂性能及引气混凝土气孔结构的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(24): 144–150.
LI Xuefeng. Trans Chin Soc Agric Eng, 2018, 34(24): 144–150.
- [16] LI Y, WANG Z, WANG L. Influence of low atmospheric pressure on fluidity and pore size of cement paste[J]. Revista Romana de Materiale, 2019, 49(1): 88–94.
- [17] 李雪峰, 付智, 罗翥, 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, et al. J Southeast Univ (Chin Ed), 2014, 44(5): 1046–1051.
- [18] SL/T 352—2020 水工混凝土试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2020.
- [19] GB/T 50082—2009 普通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.
- [20] 陈建奎. 混凝土外加剂原理与应用[M]. 北京: 中国计划出版社, 2004: 129–154.
- [21] Wang R, Hu Z, Li Y, et al. Review on the deterioration and approaches to enhance the durability of concrete in the freeze-thaw environment[J]. Constr Build Mater, 2022, 321: 126371.
- [22] ŁAŻNIEWSKA-PIEKARCZYK B. The influence of selected new generation admixtures on the workability, air-voids parameters and frost-resistance of self-compacting concrete[J]. Constr Build Mater, 2012, 31: 310–319.
- [23] MIELENZ, R.C. AND V.E. WOLKODOFF. Origin, evolution, and effects of the air void system in concrete. part 1—entrained air in unhardened concrete. J Am Concr Inst, 1958, 55(7): 95–121.
- [24] 李雪峰, 付智, 王华牢. 高原地区抗冻引气混凝土含气量设计方法研究[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(8): 2600–2608.
LI Xuefeng, FU Zhi, WANG Hualao. Bull Chin Ceram Soc, 2021, 40(8): 2600–2608.
- [25] ZENG X, LAN X, ZHU H, et al. Investigation on air-voids structure and compressive strength of concrete at low atmospheric pressure[J]. Cem Concr Comp, 2021, 122: 104139.

Influence of Low Atmospheric Pressure on Air Void Structure and Frost Resistance Durability of Air-entrained Concrete

LI Xuefeng^{1,2}, ZHANG Jiahui³

(1. Research Institute of Highway Ministry of Transport, Beijing 100088, China; 2. National Engineering Laboratory for Bridge Structure Safety Technology, Beijing 100088, China; 3. School of Management Harbin Institute of Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150006, China)

Extended Abstract

Introduction Due to the distinctive climatic characteristics of the Qinghai-Tibet Plateau, such as an extremely frigid climate and significant diurnal temperature fluctuations, concrete structures in this region necessitate substantial freeze-thaw durability. Presently,

one of the most efficacious approaches to enhance the freeze-thaw durability of concrete involves incorporating tiny air bubbles into the mixture through the use of air-entraining agents (AEAs). Nevertheless, researchers have discovered that the low atmospheric pressure (LAP) prevalent on the plateau may result in inadequate air content within air-entrained concrete (AEC). Only a limited number of research findings have confirmed that LAP deteriorates the air-void structure of AEC, with relatively few studies investigating its impact on freeze-thaw durability of AEC. Furthermore, there is limited research on the impact of LAP on the distribution of air-void diameters in AEC. Therefore, the air content, air-void structure parameters and freeze-thaw durability of the AEC prepared under normal atmospheric pressure (NAP) and LAP were examined in this study. The primary focus is to investigate the impact of LAP on the distribution of air-voids with varying diameters, thus to further explore how these influences degrade both the air-voids structure parameters and freeze-thaw resistance durability of AEC.

Methods Ordinary Portland cement was used in the experiment. The coarse aggregate was crushed stone and the fine aggregate was river sand. In the experiment, two types of AEAs and a high-efficiency superplasticizer were used to produce the AEC. The experiments were conducted in laboratories located in Lhasa, China (atmospheric pressure values of 64 kPa) and Beijing, China (101 kPa). Three air content design levels (D) were used in this study, namely, 3%, 5%, and 7%. Air content tests, air-void analyzing tests and freeze-thaw durability tests were conducted.

Results and discussion Compared to the AEC-N (AEC prepared under NAP), the LAP resulted in a significant increase in the loss of air content of fresh concrete (A_f), with a greater magnitude observed as D increased. The average and maximum losses in air content of hardened concrete (A_h) for AEC-L (AEC prepared under LAP) were approximately 0.5% and 0.7% higher than those for AEC-N, respectively. Furthermore, due to decreased atmospheric pressure, microvoids within AEC experienced a more substantial decrease with increasing D . Notably, air-voids ranging from 0–100 μm exhibited the most pronounced influence. However, increasing D still effectively enhanced the proportion of microvoids within AEC. The proportion of A_{1000} (the air content in voids with diameters no greater than 1000 μm , the same below) in A_h showed an overall increasing trend followed by a subsequent decreasing trend as A_h increased, both under LAP and NAP conditions. However, when comparing AEC-N to AEC-L with similar D , the former demonstrated significantly higher proportions of A_{1000} . With similar A_h , the reduction in atmospheric pressure led to a significant decrease in the proportion of microvoids (especially $A_{(0,100]}$), a pronounced increase in the proportion of trapped air-voids proportion ($A_{(100,400]}$), and small changes in the proportion of mesovoids ($A_{(300,500]}$) and macrovoids ($A_{(300,500]}$) within the AEC. The variation in the proportion of microvoids and trapped air-voids significantly influenced the spacing factor ($\bar{L}$). Specifically, an increase in the air content of microvoids (particularly $A_{(0,100]}$), leads to a decreased in the $\bar{L}$ of concrete. Conversely, an increase in the air content of trapped air-voids resulted in an increase in the $\bar{L}$. However, the proportion of air content in the mesovoids and macrovoids was most weakly correlated with the $\bar{L}$.

Concrete subjected to a plateau environment may experience more severe freeze-thaw conditions. when the water-cement ratio was 0.44, the required A_{1000} under LAP and NAP was about 3.90% and 2.92%, respectively, for achieving a frost resistance durability factor (F_D) of 100%.

The analysis presented in this study demonstrates that the maximum allowable F_D in concrete under LAP is around 3.93%, whereas under NAP it is 4.73%. Clearly, despite the deterioration of air void structures caused by LAP, as long as the air content introduced by AEAs in AEC reaches a certain threshold level, the frost resistance durability requirements can still be met. It is suggested that while meeting the mechanical performance requirements of AEC design, there should be an increase in the maximum air content level of fresh concrete by approximately 2.0% compared to plain areas. This adjustment aims to ensure that the frost resistance performance of concrete meets the design requirements.

Conclusions The LAP caused a more pronounced loss in the air content of hardened AEC-L, and the loss increased as the D increased. The average and maximum loss was about 0.5% and 0.7% higher than those under AEC-N, respectively. Compared to the AEC-N with the same D , a decrease in atmospheric pressure resulted in a reduction in the air content of the microvoids within the AEC-L. This effect was particularly pronounced for air-voids with diameters not exceeding 100 μm , and consequently leading to the deterioration of the air-void structures and a reduction in frost resistance performance of the AEC-L. The variation in the proportion of air content in microvoids and trapped air-voids has a significant impact on the $\bar{L}$ of the AEC. The $\bar{L}$ decreases with an increase in the proportion of air content of microvoids, particularly $A_{(0,100]}$ and $A_{(100,200]}$, while it increased with an increase in the proportion of air content of trapped air-voids. The increase in the D of the concrete effectively enhanced the air content proportion of microvoids, thereby enhancing the frost resistance durability of concrete. It is recommended that when designing AEC for plateau areas with severe freeze-thaw environments, the D of fresh concrete should be increased by a maximum of approximately 2.0% compared to plain areas.

Keywords air-entrained concrete; frost resistance durability; low atmospheric pressure