

DOI:10.11918/202007097

# 负压成型水泥基材料孔结构特征

刘旭<sup>1</sup>, 陈歆<sup>1</sup>, 李立辉<sup>2</sup>, 葛勇<sup>1</sup>, 田波<sup>2</sup>

(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:** 为了研究低气压环境对水泥基材料引气性能的影响, 采用负压模拟试验的方法, 在不同的气压下测试引气剂溶液的发泡性能和气泡稳定性、引气水泥净浆的孔结构以及引气水泥砂浆的气孔结构。水泥净浆与水泥砂浆的试验样品均在设计气压下搅拌成型直至终凝硬化。试验结果表明: FC-1 和 FC-2 两种新型引气剂溶液的泡沫相较三萜皂苷类引气剂 (SJ-2) 溶液的泡沫具有更强的低气压环境适应性, 但该溶液试验的规律不完全适用于水泥基材料; 低气压成型会增加硬化水泥净浆的孔隙率及半径为 100~1 000 nm 孔的体积, 但在采用优质引气剂的前提下低气压基本不会对水泥砂浆的含气量和气孔结构产生劣化作用。SJ-2、FC-1 和 FC-2 三种引气剂均能满足高原低气压环境下抗冻混凝土的引气要求, 其中 FC-1 与 FC-2 在气孔结构优化与含气量控制方面更具优势。

**关键词:** 水泥基材料; 引气剂; 孔结构; 含气量; 低气压

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2021)09-0026-08

## Characterization of pore structure of cement-based materials produced in negative pressure

LIU Xu<sup>1</sup>, CHEN Xin<sup>1</sup>, LI Lihui<sup>2</sup>, GE Yong<sup>1</sup>, TIAN Bo<sup>2</sup>

(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:** In order to investigate the effect of low air pressure on the air entrainment of cement-based materials, simulation study of negative pressure was conducted. The foaming performance and bubble stability of air-entraining agent (AEA) solution, pore structure of air-entrained cement paste, and air-void structure of air-entrained cement mortar were tested in different air pressures. The cement paste and cement mortar specimens were stirred and formed in designed air pressures until hardening. Results show that the foams formed by two new types of AEAs (FC-1 and FC-2) were more stable than those formed by triterpenoid saponin type AEA (SJ-2) in corresponding aqueous solutions in negative pressure. However, this finding could not be extended broader to cover cement-based materials. The total porosity and the volume of pores with radii of 100–1 000 nm in hardened cement paste were found higher in negative pressure, while there was little adverse effect of low air pressure on either air content or air-void structure of hardened cement mortar when a suitable AEA was applied. SJ-2, FC-1, and FC-2 AEAs could satisfy the requirements of air entrainment for frost resistant concrete in high-altitude regions with low air pressure, among which FC-1 and FC-2 presented comparative advantages in air-void structure optimization and air content control.

**Keywords:** cement-based materials; air-entraining agent; pore structure; air content; low air pressure

青藏高原地区具有海拔高、空气稀薄、辐射强烈等环境特征, 使得该地区昼夜温差很大<sup>[1]</sup>, 年正负温交替天数远高于同纬度的低海拔地区<sup>[2-3]</sup>, 导致涉水混凝土结构在频繁的冻融循环作用下更容易发生开裂、剥蚀等破坏。掺加引气剂是提高混凝土抗冻性最常见、最有效的手段<sup>[4-5]</sup>。然而根据部分参

与高原地区基础设施建设的科研与工程人员反馈, 在相同引气剂掺量下高原地区混凝土的含气量要低于非高原地区混凝土的含气量, 并将之归因于高原地区的低气压环境<sup>[2,6-8]</sup>。为定量分析低气压环境对混凝土引气性能的影响, 研究者们分别采用了高原现场试验<sup>[2-3,7-11]</sup>和负压模拟试验<sup>[12-15]</sup>两套技术路线。尽管现有文献普遍肯定低气压环境对混凝土引气性能存在不利影响, 但是对于该不利影响的程度认定却存在着较大的分歧。例如, 文献[3]在西安和拉萨分别进行了混凝土气孔结构测试, 试验采用粉末状皂基引气剂, 结果表明标准养护条件下, 含气量在 5.5% 以下时拉萨成型的混凝土与西安成型

收稿日期: 2020-07-21

基金项目: 国家国际科技合作专项(2014DFR81000);  
国家重点研发计划(2018YFB1600100);  
国家自然科学基金青年科学基金(51608239)

作者简介: 刘旭(1996—), 女, 博士研究生;  
葛勇(1962—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 葛勇, hitbm@163.com

的混凝土含气量差异在 1.0% 以内, 且气孔尺寸基本一致; 文献 [11] 的现场试验结果显示, 对于性能优良的市售引气剂 (SJ-2), 低气压环境对引气混凝土的含气量和气孔尺寸的影响很小; 而文献 [13-14] 的模拟试验结果则显示, 无论对于何种引气剂, 低气压环境对混凝土的引气性能均有大幅度的劣化作用。相较高原现场试验, 负压模拟试验在原材料、设备、环境等无关变量的严格控制上更具优势, 其试验结果在研究气压单一变量所带来的影响时本应具备更强的说服力。但是, 目前的模拟试验普遍存在致命的缺陷——其只模拟了搅拌过程的气压条件而没有囊括整个搅拌成型和凝结硬化的过程, 即混凝土在负压下搅拌但在常压入模与振捣。根据玻意耳定律 ( $P_1V_1 = P_2V_2$ ), 气泡在外压骤变下必然会被压缩。因而, 采用“负压搅拌、常压装料”的方法进行混凝土含气量试验会使结果失真, 甚至导致整个试

验失去意义 (虽然该试验操作与玻意耳定律不符, 但是试验中使用的含气量测定仪的工作原理是玻意耳定律)。

为了严格控制无关变量、完善负压模拟试验设计、准确分析低气压环境对水泥基材料引气性能的影响, 本文应用自主设计组装的试验装置, 使试件的整个搅拌成型和凝结硬化 (36 h) 过程均在恒定气压下进行, 以提高模拟过程的真实性与模拟结果的可信度。负压试验时绝对气压控制在 50 kPa, 对应珠峰大本营的大气压强, 即海拔高度为 5 200 m 处的大气压强。考虑到大气压强与海拔高度呈负相关, 该气压值趋近于中国绝大多数混凝土工程服役环境的气压下限 (中国高海拔的大型基础设施工程见表 1)。在该气压环境下进行试验, 可将实际工程中低气压环境对水泥基材料性能的影响放至最大。

表 1 中国高海拔大型基础设施工程

Tab.1 Large-scale infrastructure projects at high altitudes in China

大型基础设施工程类型	高海拔工程	最高点所在地	海拔高度/m
公路工程	中尼公路	嘉措拉山垭口	5 248
	新藏公路	界山达坂	5 248
铁路工程	青藏铁路	唐古拉山垭口	5 072
民航机场工程	稻城亚丁机场	稻城县桑堆乡海子山	4 411
水利工程	狮泉河水电站	葛尔县狮泉河 (坝顶)	4 318

研究由引气剂溶液冲击起泡试验 (下文简称“溶液试验”)、水泥净浆孔结构分析试验 (下文简称“净浆试验”) 与水泥砂浆气孔结构分析试验 (下文简称“砂浆试验”) 三部分组成, 并在此基础上分析低气压环境对混凝土引气性能的影响, 为高原地区 (主要指海拔为 2 000 m 以上、大气压强明显低于标准大气压的地区, 如民航咨询通告 AC-121-17 中提到的“高高原”) 混凝土工程抗冻性设计提供理论指导与技术支持。

验中水灰比为 0.45, 不参加减水剂, 各组引气剂种类、掺量与成型气压见表 2; 砂浆试验中水灰比为 0.45、胶砂比为 0.5、减水剂掺量为 0.4%, 各组引气剂种类、掺量与成型气压见表 3。试验设计的净浆与砂浆均具备自密实性能。

表 2 净浆试验引气剂种类、掺量与成型气压

Tab.2 Types and dosages of AEAs and air pressure during specimen preparation for tests on cement paste

组号	引气剂类型	掺量/ $10^{-4}$	绝对气压/kPa
C1-1.0	SJ-2	8	100
C1-0.5	SJ-2	8	50
C2-1.0	SJ-2	9	100
C2-0.5	SJ-2	9	50
C3-1.0	FC-1	2	100
C3-0.5	FC-1	2	50
C4-1.0	FC-1	3	100
C4-0.5	FC-1	3	50
C5-1.0	FC-2	0.7	100
C5-0.5	FC-2	0.7	50
C6-1.0	FC-2	1	100
C6-0.5	FC-2	1	50

## 1 原材料与方法

### 1.1 原材料与配合比

试验用水泥为亚泰天鹅牌普通硅酸盐水泥 (强度等级 42.5); 细集料为松花江哈尔滨段江砂 (细度模数为 2.3); 拌和用水为实验室自来水; 减水剂为西卡牌聚羧酸系高性能减水剂 (粉剂)。在前期试验结果的基础上, 选取表面活性强且发泡尺寸小的 FC-1、FC-2 两种新型引气剂与低海拔地区广泛使用的优质引气剂 SJ-2 型 (主要成分三萜皂苷) 作为试验用引气剂。

溶液试验中引气剂质量分数为 0.03%; 净浆试

表 3 砂浆试验引气剂种类、掺量与成型气压

Tab.3 Types and dosages of AEAs and air pressure during specimen preparation for mortar tests

组号	引气剂类型	掺量/ $10^{-4}$	绝对气压/kPa
M1-1.0	SJ-2	3	100
M1-0.5	SJ-2	3	50
M2-1.0	SJ-2	4	100
M2-0.5	SJ-2	4	50
M3-1.0	FC-1	0.6	100
M3-0.5	FC-1	0.6	50
M4-1.0	FC-1	0.9	100
M4-0.5	FC-1	0.9	50
M5-1.0	FC-2	0.15	100
M5-0.5	FC-2	0.15	50
M6-1.0	FC-2	0.30	100
M6-0.5	FC-2	0.30	50

### 1.2 溶液试验装置与方法

溶液试验的研究对象为圆柱形有机玻璃管(内径为 50 mm、长度为 1 000 mm,管壁有刻度)中的引气剂溶液,溶液体积为 200 mL。试验分别在绝对气压为 100 kPa(常压)与 50 kPa(负压)的环境下进行。

进行常压试验时,用橡胶塞封闭有机玻璃管管口,管身竖直,以“顺时针 180°+逆时针 180°”为一个循环对管内溶液进行交变冲击起泡,在  $60 \pm 2$  s 内连续完成 50 次交变冲击循环。发泡结束后,将有机玻璃管竖直静置,记录泡沫柱在 30 min 内高度的经时损失情况。

进行负压试验时,用预埋抽气管并外设阀门的橡胶塞替换普通橡胶塞,待管内绝对气压降至 50 kPa 后关闭阀门,并分离抽气装置,然后按照常压试验的方法继续完成剩余步骤。

同一时刻负压下引气剂溶液泡沫柱高度相对常压下降的百分比  $P(t)$  计算公式<sup>[16]</sup>为

$$P(t) = \frac{H_f(t) - H_c(t)}{H_c(t)} \quad (1)$$

式中:  $P(t)$  为  $t$  时刻负压下泡沫柱高度相对常压下降的百分比;  $H_c(t)$  为  $t$  时刻常压下的泡沫高度, mm;  $H_f(t)$  为  $t$  时刻负压下的泡沫高度, mm。

### 1.3 拌合物成型装置与方法

水泥净浆与砂浆的搅拌成型在一套自主设计组装的立轴式装置中进行,装置结构见图 1。在常压下制件时,只需接通电源 2 进行搅拌,搅拌至规定时间后断开。在负压下成型试件时,需同时接通电源 1 与电源 2,搅拌完成后断开电源 2,电源 1 保持接通 36 h。电源 1 接通时,电接点压力表根据装置内

实际压力自动控制真空泵的工作状态,使装置内绝对压力稳定在预设的 50 kPa。

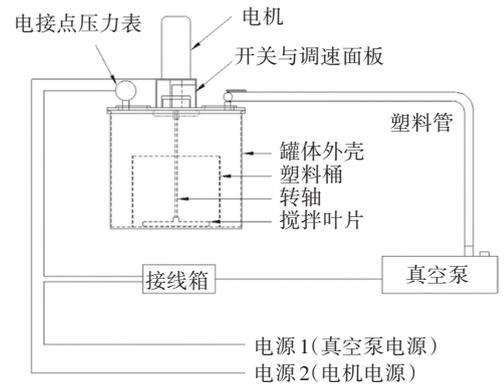


图 1 水泥净浆及砂浆搅拌成型装置示意

Fig.1 Skech of the equipment for mixing and setting of cement paste and mortar specimens

装置内有可拆卸圆柱体自制模具充当搅拌锅,不锈钢螺旋桨(图 2)充当搅拌叶片。水泥净浆与砂浆的搅拌均为一次性投料,搅拌速度为 120 r/min,搅拌时间为 3 min。搅拌完成后,轻晃装置 5 次,保证拌合物成型面基本平整。搅拌完成的拌合物继续在装置内静置 36 h 以确保拌合物达到终凝状态,然后打开装置进行脱模,脱出的硬化拌合物(以砂浆为例)见图 3。将硬化的水泥净浆或砂浆沿搅拌叶片凿成 3 块(各呈扇形),标准养护至 28 d。



图 2 搅拌叶片

Fig.2 Propeller for mixing



图 3 脱模后的砂浆

Fig.3 Demoulded hardened mortar

### 1.4 孔结构分析装置与方法

#### 1.4.1 净浆试验

净浆试验为压汞法孔结构分析,利用全自动压汞仪(Auto Pore IV 9500)进行。将28 d龄期的水泥净浆制备成适应压汞样品管的球形颗粒,并终止水化(无水乙醇浸泡24 h+60 ℃烘箱干燥24 h)。压汞法主要测试硬化水泥净浆中半径为3~50 000 nm(即孔径为6~100 000 nm)的孔,主要为毛细孔与少部分的气孔。通过试验得出硬化水泥净浆的孔隙率、平均孔径等参数与孔径分布规律。

#### 1.4.2 砂浆试验

将养护完成的砂浆切成矩形板状试件,参照《水工混凝土试验规程》DL/T 5150—2017<sup>[17]</sup>“4.28 混凝土气泡参数试验”,采用直线导线法进行砂浆气孔结构试验。测试对象为硬化砂浆中10 μm 以上的球形气孔(气孔结构参数是水泥基材料抗冻性能评价的关键指标)。每组试件最小观测总面积为6 000 mm<sup>2</sup>,最小导线总长度为1 900 mm。试验结果包括砂浆抗冻性指标(含气量、气泡间距系数)与气孔尺寸参数(平均孔径、比表面积)。

## 2 结果与分析

### 2.1 气压对引气剂溶液发泡与气泡稳定性的影响

引气剂溶液中气泡形貌的经时变化情况见图4。初始时气泡与溶液均匀混合,气泡彼此间隔一定距离,且尺寸较小,呈球形。随后气泡在浮力作用下迅速上浮,泡沫与溶液出现明显的分层。在静置过程中,气泡间的液体在重力与表面张力作用下不断排出,导致气泡间隔缩小直至紧密相接,此时气泡不是球形。

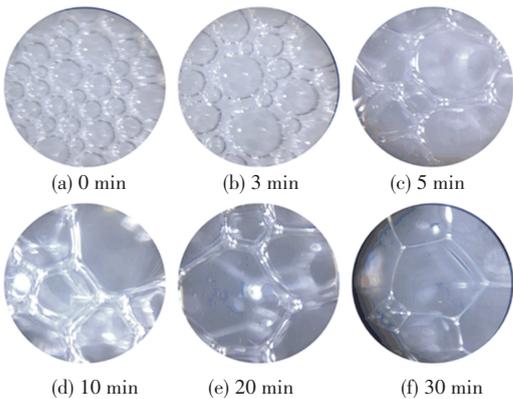


图4 溶液中气泡形貌的经时变化

Fig.4 Variation of geometric characteristics of bubbles in solution with time

溶液试验中,常压与负压下泡沫高度随静置时间的变化见图5,负压下引气剂溶液泡沫柱高度相对常压下降的百分比  $P(t)$  随时间的变化见图6。

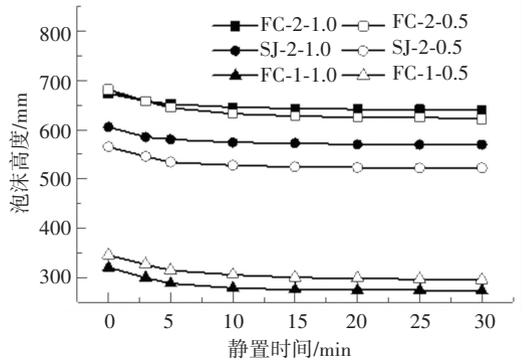


图5 泡沫高度随时间的变化

Fig.5 Variation of foam height with time

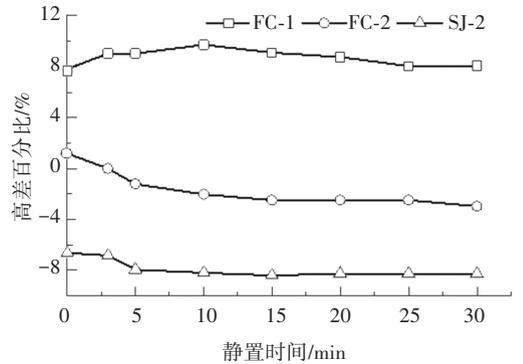


图6 同时刻负压与常压泡沫的高差百分比

Fig.6  $P(t)$  of foams in negative pressure and ordinary pressure

结合图5与图6可见,SJ-2与FC-2溶液的泡沫高度在负压下均较常压有所降低( $P(t)$ 基本 $< 0$ ),而FC-1的泡沫高度在负压下较常压有所升高( $P(t) > 0$ )。即负压环境不利于SJ-2与FC-2的发泡,但对FC-1的发泡无不利影响。另外,3种引气剂溶液的泡沫高度在不同气压下都表现出了随时间下降的趋势。其中,SJ-2溶液在负压下泡沫高度的下降速度明显大于其在常压下的下降速度,而FC-1与FC-2溶液在负压和常压下的下降速度则未表现出明显的差异性( $P(t)$ 基本保持稳定)。即气压对SJ-2溶液所形成泡沫的稳定性有较明显的不利影响,而对FC-1与FC-2溶液所形成泡沫的稳定性影响较小。试验结果中气压对SJ-2溶液发泡与气泡稳定性的影响规律与文献[7]的泡沫试验得出的结论基本一致,与文献[12]的泡沫试验结论分歧较大。分析差异原因,是因为来源于不同的起泡方式——文献[12]采取高速机械搅拌(转速为11 000 r/min)与混凝土搅拌机的搅拌速率相差较大,而本试验中交变冲击的频率与混凝土搅拌频率比较接近。

### 2.2 气压对引气水泥净浆孔结构的影响

不同气压下成型的引气水泥净浆孔隙率与平均孔半径见图7。从图7可发现,负压成型的引气水泥净浆具有相较常压成型更大的孔隙率,但未发现

气压对引气水泥净浆的平均孔径有明显影响。此外,图 7 也未能反映净浆孔隙率随引气剂掺量增加而增大的趋势,这可能是部分引入净浆中的气泡聚集发育成较大的尺寸,在搅拌过程中逸出或超出了压汞仪的测量范围。

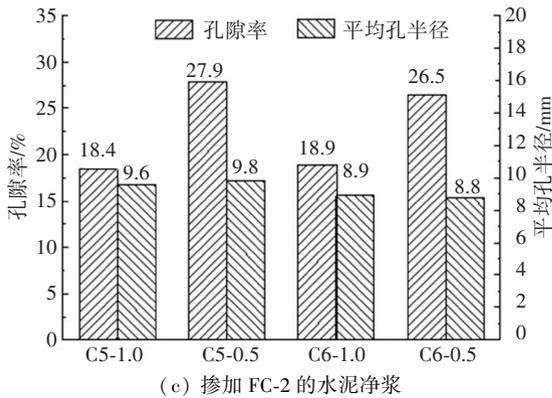
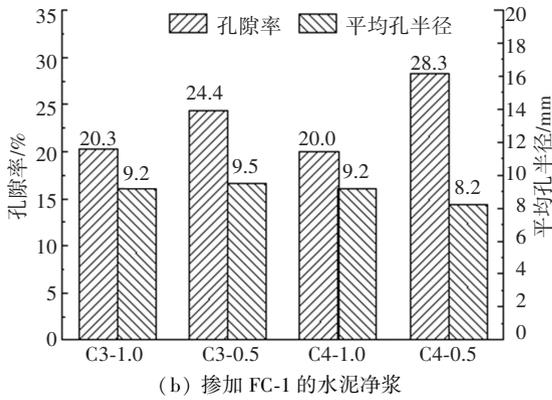
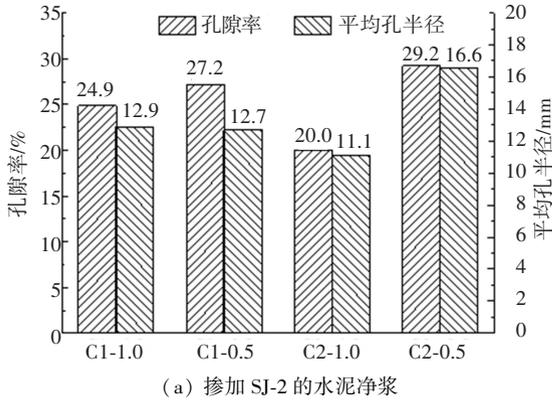
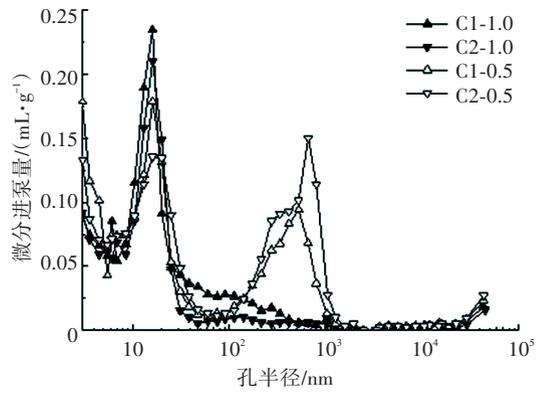


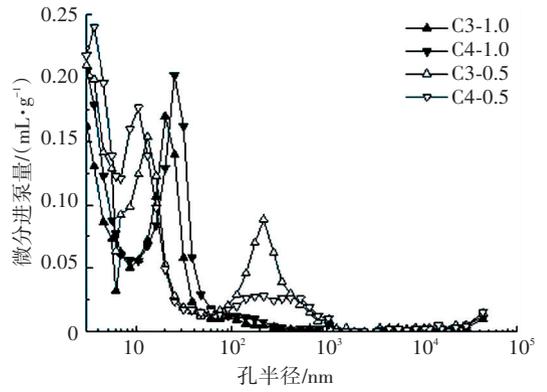
图 7 不同气压下成型的水泥净浆的孔隙率与平均孔径

Fig.7 Porosity and average pore radius of hardened cement paste prepared in different pressures

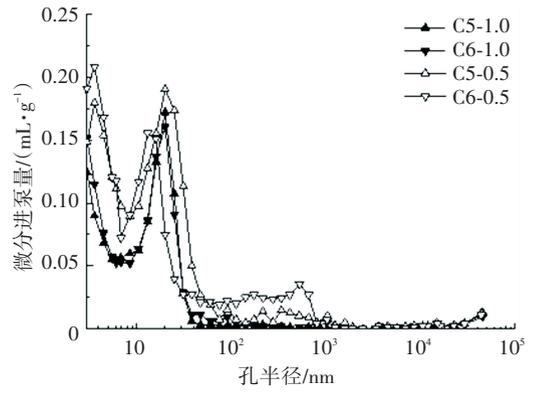
不同气压下成型的引气水泥净浆孔径分布见图 8。从试验结果可以看出,成型气压对引气水泥净浆的孔结构有一定的影响,受气压影响的孔径大致在 200~2 000 nm 之间,在此孔径范围内负压成型的净浆孔体积明显大于常压成型的净浆。该现象以掺加 SJ-2 的水泥净浆最为明显,掺加 FC-1 的水泥净浆次之,掺加 FC-2 的水泥净浆最末。



(a) 掺加 SJ-2 的水泥净浆



(b) 掺加 FC-1 的水泥净浆



(c) 掺加 FC-2 的水泥净浆

图 8 不同气压下成型的水泥净浆的孔径分布

Fig.8 Pore size distribution of hardened cement paste prepared in different pressures

### 2.3 气压对引气砂浆气孔结构的影响

#### 2.3.1 气压对引气砂浆抗冻性指标的影响

不同气压下成型的引气砂浆的抗冻性指标见图 9。针对孔结构的抗冻性指标包括含气量与气泡间距系数两项。一定范围内,含气量越大、气泡间距系数越小,则水泥基材料的抗冻性能越好。

从图 9 可见,掺加 SJ-2 的硬化砂浆 (M1、M2) 中,含气量随引气剂掺量增加而增大,气泡间距系数随引气剂掺量增加而减小。即从气孔结构上看,该组砂浆的抗冻性应随引气剂掺量增加而提高。当掺加 SJ-2 的砂浆在负压下成型时,其含气量相较常压

成型时略大,气泡间距系数相较其常压成型时略小,即其孔结构上的抗冻性指标没有体现出随成型气压降低而劣化的趋势。

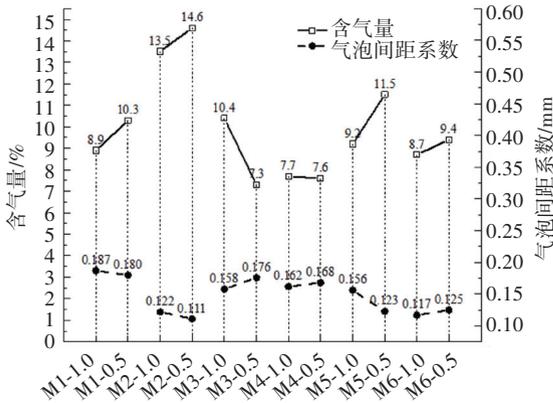


图9 不同气压下成型的砂浆的抗冻性指标

Fig. 9 Frost-resistance parameters of mortar prepared in different pressures

从图9可见,对于掺加FC-1型引气剂(M3、M4)和FC-2型引气剂(M5、M6)的水泥砂浆,其含气量并没有随着引气剂掺量(试验范围内)增加而增大。当掺加FC-1的砂浆在负压下成型时,其含气量相较常压成型时小,气泡间距系数相较其常压成型时大,即其孔结构上的抗冻性指标随成型气压降低而劣化,呈现出了与掺加SJ-2的砂浆截然相反的趋势。而当掺加FC-2的砂浆在负压下成型时,其含气量较常压成型时大,但气泡间距系数与成型气压没有呈现出明晰的相关性。

2.3.2 气压对引气砂浆气孔尺寸的影响

不同气压下成型的引气砂浆的气孔尺寸参数见图10。图10中气孔尺寸参数有平均半径与比表面积两项,二者彼此负相关,平均半径越小或比表面积越大,证明引入的气孔尺寸越小。

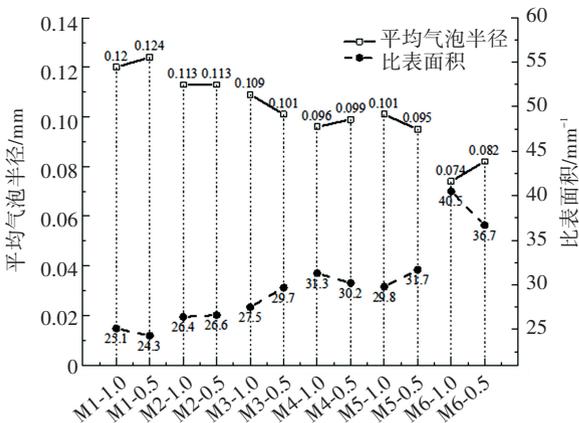


图10 不同气压下成型的砂浆的气孔尺寸参数

Fig. 10 Size parameters of air-voids in mortar prepared in different pressures

由图10可以发现,砂浆的气孔尺寸随着引气剂

掺量增加而略有缩小。但是,砂浆的气孔尺寸没有呈现出与气压变化相关的规律,这一点与文献[3]的研究结果相似。对比图中各组数据,FC-1(M3、M4)和FC-2(M5、M6)两种新型引气剂在砂浆中引入的气孔比SJ-2(M1、M2)引入的气孔要小,即因为引气所致的对水泥基材料力学性能的潜在不利影响更轻。

2.3.3 气压对引气砂浆气孔尺寸分布的影响

引气砂浆的气孔尺寸分布由按直线导线法进行试验的过程中导线切割气孔的弦长分布来表征。统计不同气压下成型的引气砂浆气孔弦长分布如图11所示。

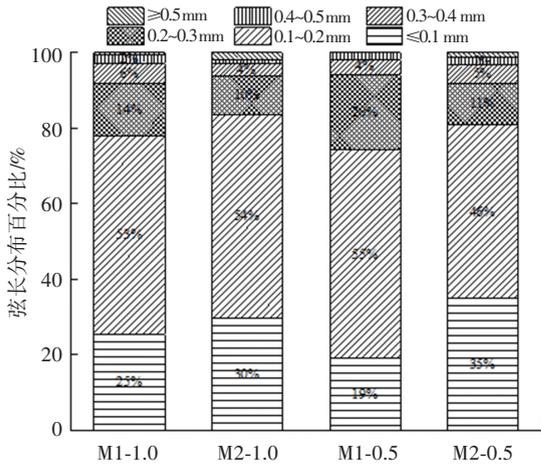
总体上看,成型气压的差异没有显著影响导线切割砂浆气孔所得弦长的大体分布。对比图11(a)~11(c),发现相较于SJ-2与FC-1,FC-2引入的气孔尺寸中弦长小于0.1mm的孔比例更大,即可在宏观上认为掺加FC-2的砂浆相比于掺加SJ-2或FC-1的砂浆小孔比例更大及总体孔尺寸更小,后者在图10中得到了验证。

2.4 讨论

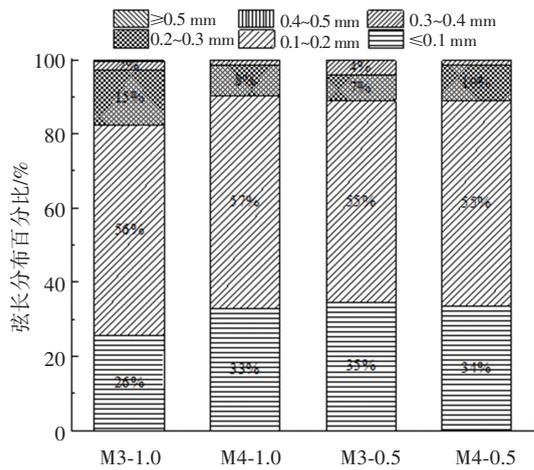
从文中2.1节可以发现,溶液试验中FC-1和FC-2体现出了比SJ-2更好的低气压环境适应性,但是该优势没有在2.2节(净浆试验)和2.3节(砂浆试验)中体现出来。判断其原因,为溶液泡沫柱中的气泡实际是拥有双界面(气-液界面和液-气界面)的球形液膜,区别于净浆或砂浆中只有单一界面的气泡。两类气泡体系虽有一定相似但本质并不相同,溶液中产生的泡沫很快会聚集在液面上方且气泡尺寸较大,而净浆或砂浆中的气泡分散在浆体内部且尺寸较小(上浮至表面的气泡会迅速消失);溶液上方气泡的破灭与气泡间液体的析出直接相关,而净浆或砂浆中的气泡(被浆体所包围)则不存在所谓析液的概念。

由2.3.1节可知,试验选用的3种引气剂中除FC-1外,引气性能受气压变化的影响不大。即在引气剂品质优良的前提下,50kPa绝对气压下(对应海拔5200m处,趋近中国大型基础设施工程服役环境的海拔上限,见表1)搅拌成型的水泥基材料的含气量与常压下基本一致。文献[11]在北京和拉萨进行了混凝土含气量试验,其中一个试验组采用了与本文相同的三萜皂苷类引气剂(SJ-2),结果显示拉萨成型的混凝土较北京成型的混凝土含气量差值仅为0.3%,而在气孔尺寸上几乎没有差别。根据文献[11]在常压(101kPa)和低气压(61kPa)下对若干种引气剂溶液表面张力的测试结果可知,低气压对溶液表面张力的影响不大(低气压下表面张力略

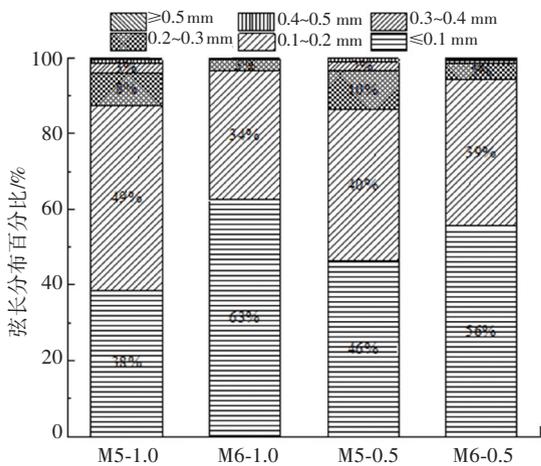
大,但增幅在 4.5% 以内且绝对值小于 1.6 mN/m)。根据拉普拉斯方程 ( $\Delta P = 2\sigma/r$ ), 由于不同气压下表面张力变化不大, 所以气孔尺寸受气压的影响较小。综合文中 2.3 节与文献[11]的试验结果, 认为 SJ-2 在低气压环境下仍然具备其在常压环境下的良好引气效果, 可适用于高原地区引气混凝土的配制。



(a) 掺加 SJ-2 的砂浆



(b) 掺加 FC-1 的砂浆



(c) 掺加 FC-2 的砂浆

图 11 不同气压下成型的砂浆的弦长分布

Fig. 11 Chord length distributions of air-voids in mortar prepared in different pressures

试验中 FC-1 和 FC-2 两种新型引气剂在砂浆中的引气量均在 7.3% 以上, 对应混凝土中 4.3% 的含气量, 同时气泡间距系数均在 0.176 mm 以下, 能很好地满足 C30 混凝土的抗冻性要求。在此前提下, 继续增加其掺量, 砂浆含气量不会明显增加, 即这两种新型引气剂在混凝土施工过程中的含气量控制方面有一定优势。

虽然引入小气孔能有效提高混凝土的抗冻性, 但是引入的小气孔同时也降低了混凝土内部的密实度, 对混凝土的力学性能不利。相同含气量下, 引入的气孔尺寸越大, 混凝土力学性能的劣化越显著。试验中 FC-1 和 FC-2 在砂浆中引入的气孔均小于 SJ-2 引入的气孔。这是因为 FC-1 和 FC-2 两种引气剂的表面活性更强, 根据拉普拉斯方程, 表面张力降低, 气泡尺寸也会相应减小。由于气泡尺寸更小, 所以 FC-1 和 FC-2 在维持混凝土力学性能上较 SJ-2 也更有优势。

### 3 结 论

在严格控制试验原材料、温度、搅拌设备及搅拌工艺等一致的工况条件下, 研究负压成型的引气水泥基材料孔结构, 得到如下结论:

1) 在溶液试验中, FC-1 和 FC-2 两种新型引气剂形成的泡沫相较 SJ-2 形成的泡沫具有更好的低气压环境稳定性。但引气剂溶液试验结果与在水泥基材料中的引气效果并不完全对应。引气剂溶液泡沫性能的评价方法, 不一定能准确评价水泥基材料在低气压下的引气性能。

2) 低气压成型的水泥净浆的孔隙率及半径为 100~1 000 nm 孔的体积较常压成型的水泥净浆更大。

3) SJ-2、FC-1 和 FC-2 三种引气剂均能在低气压下保持较好的引气性能。低气压环境对掺加 SJ-2、FC-1 和 FC-2 型引气剂的水泥砂浆气孔结构(包括含气量与气泡间距系数等指标)基本没有不良影响。

4) FC-1 和 FC-2 在水泥砂浆中引入的气孔尺寸较 SJ-2 引入的气孔尺寸更小, 即在达到相同抗冻性要求时, 含气量更小, 对保证强度更加有利。

### 参 考 文 献

- [1] 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
- [2] 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
- CEN Guoping, HONG Gang, WANG Jinhua, et al. Factors influencing air content of pavement concrete for plateau airport and its control measures[J]. Construction Technology, 2012, 41(377): 33
- [3] 陈华鑫, 王铜, 何瑞, 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
- CHEN Huaxin, WANG Tong, HE Rui, et al. Effect of complex climatic environment on pore structure and mechanical properties of concrete[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2020, 40(2): 30. DOI: 10.19721/j.cnki.1671-8879.2020.02.004
- [4] EDWARD G, NAWY P E. Concrete construction engineering handbook [M]. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2008: 3
- [5] KOSMATKA S H, KERKHOFF B, PANARESE W C. Design and control of concrete mixtures [M]. 4th ed. Skokie: Portland Cement Association, 2003: 107
- [6] 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. DOI: 10.3390/ma12091384
- [7] 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
- ZHU Changhua, XIE Yongjiang, ZHANG Yong, et al. The effect of air pressure of environment on concrete's air-containing[J]. Concrete, 2004(4): 9
- [8] 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
- LU Ming, ZHOU Xingchao. Influencing factors of the air content in roller compacted concrete in high altitude area[J]. Hydropower and New Energy, 2019, 33(12): 47. DOI: 10.13622/j.cnki.cn42-1800/tv.1671-3354.2019.12.013
- [9] SHI Y, YANG H Q, ZHOU S H, et al. Effect of atmospheric pressure on performance of AES and air entraining concrete [J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2018, 2018: 6528412. DOI: 10.1155/2018/6528412
- [10] 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影响与机理分析[EB/OL]. 中国公路学报. (2020-05-29) [2020-06-12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1313.u.20200529.1127.002.html>
- HE Rui, WANG Tong, CHEN Huaxin, et al. Impact of Qinghai-Tibet plateau climate environment on the strength and permeability of concrete and mechanism analysis[EB/OL]. China Journal of Highway and Transport. (2020-05-29) [2020-06-12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1313.u.20200529.1127.002.html>
- [11] LI Y, WANG Z D, WANG L. The influence of atmospheric pressure on air content and pore structure of air-entrained concrete[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Materials Science Edition, 2019, 34(8): 1365. DOI: 10.1007/s11595-019-2200-1
- [12] 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
- LI Yang, WANG Zhendi, WANG Ling. Effect of low pressure on bubble generation and development of air entraining agent solution [J]. Concrete, 2019(8): 144. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3550.2019.08.033
- [13] LI X F, LUO Z, FU Z. Effect of atmospheric pressure on air content and air void parameters of concrete[J]. Magazine of Concrete Research, 2015, 67(8): 391. DOI: 10.1680/mac.14.00256
- [14] 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
- LI Xuefeng, FU Zhi. Effect of low-pressure of environment on air content and bubble stability of concrete[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2015, 43(8): 1076. DOI: 10.14062/j.issn.0454-5648.2015.08.09
- [15] 李雪峰, 付智. 高原低气压环境对引气混凝土含气量及气泡稳定性的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(11): 165
- LI Xuefeng, FU Zhi. Effect of low atmospheric pressure of plateau environment on air content and bubble stability of air-entrained concrete[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(11): 165. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.11.024
- [16] 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[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020
- [17] 国家能源局. 水工混凝土试验规程: DL/T 5150—2017[S]. 北京: 中国电力出版社, 2017
- National Energy Administration. Test code for hydraulic concrete: DL/T 5150—2017[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2017

(编辑 魏希柱)