

文章编号:1007-9629(2023)08-0823-08

低气压养护对水泥砂浆微观孔隙及抗渗性能的影响

李林¹, 叶铜¹, 刘状壮^{1,2,*}

(1. 长安大学公路学院, 陕西西安 710054;

2. 长安大学特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西西安 710054)

摘要:利用低气压环境模拟箱对水泥砂浆进行养护,测试分析不同低气压(0.2 P_0 、0.5 P_0 、0.8 P_0 、1.0 P_0 , P_0 为标准大气压)养护条件下砂浆的力学性能、抗渗性能、气孔结构、微观形貌和水化产物,以探明低气压养护对水泥砂浆微观孔隙与抗渗性能的影响机理.结果表明:低气压养护劣化了硬化水泥砂浆的力学性能和抗渗性能,在(0.5~0.8) P_0 范围内的力学性能衰减特别明显;低气压养护下水泥砂浆的含气量增大,气孔间距系数增大,大孔所占比例增大,气孔结构显著劣化;硬化水泥砂浆的微观气孔结构对其宏观抗渗性具有显著影响,随着养护气压的降低,硬化水泥砂浆的含气量、气孔间距系数和平均孔径提高,导致其抗渗强度降低,原因包括凝胶结构、水分蒸发、水化产物以及气泡的引入等.

关键词:道路工程;微孔结构;抗渗性能;水泥砂浆;低气压;早龄期

中图分类号:U414

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2023.08.001

Effect of Low Air Pressure Curing on Micropore Structure and Impermeability of Cement Mortar

LI Lin¹, YE Tong¹, LIU Zhuangzhuang^{1,2,*}

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710054, China;

2. Key Laboratory of Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: To investigate the mechanism of influence of low air pressure curing on the micropore structure and impermeability of cement mortar, the low air pressure environment chamber was used in curing cement mortar, and the mechanical properties, impermeability, pore structure, micromorphology and hydration products of mortar under low air pressure (0.2 P_0 , 0.5 P_0 , 0.8 P_0 , 1.0 P_0 , where P_0 is the standard atmospheric pressure) were tested and analyzed. The results show that low curing air pressure degrades the impermeability and mechanical properties, and the mechanical properties decline most seriously in the range of (0.5–0.8) P_0 . Air content, pore spacing coefficient and the proportion of large pores of cement mortar cured in low air pressure increases, and the pore structure deteriorates significantly. Micropore structure of hardened cement mortar has a significant effect on its impermeability. With the decrease of curing air pressure, the air content, pore spacing coefficient and average pore aperture increase, resulting in the attenuation of impermeability. The cause of it includes the gel structure, water evaporation, hydration products and the introduction of bubbles.

Key words: road engineering; micropore structure; impermeability; cement mortar; low air pressure; early-age

近年来,高原地区的基础设施建设发展迅速^[1],高海拔引起的低气压对水泥建筑材料的影响难以忽

视,众多学者开展了高原低气压条件下水泥基材料性能的研究工作.纳启财^[2]、刘状壮^[3]和葛昕等^[4-5]研

收稿日期:2022-10-17; 修订日期:2022-11-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51708045)

第一作者:李林(1996—),男,山东禹城人,长安大学博士生.E-mail:lil1557113424@163.com

通讯作者:刘状壮(1986—),男,江苏泗阳人,长安大学教授,博士生导师,博士.E-mail:zzliu@chd.edu.cn

究发现,低气压养护对水泥基材料的宏观性能产生了潜在的不利影响,特别是低气压条件下其抗渗性能的劣化尤为引人注目^[6-7].Li等^[8-9]、李立辉等^[10]和朱长华^[11]研究发现,低气压能够显著削弱引气剂的引气能力,使混凝土的引气量减小,低气压环境下搅拌混凝土的气孔结构参数整体要劣于常压下搅拌的硬化混凝土^[12],并且抗冻性减弱^[13].通过对水化过程和微观结构的研究,葛昕^[14]和陈歆等^[15]发现低气压下水泥的水化速度降低,Liu等^[16]发现低气压下硬化浆体的微观孔隙结构改变,并存在约3%的水分蒸发.

然而,当前研究的重点围绕在高原环境下的混凝土引气量或气孔结构等层面,对于低气压环境下微观结构与宏观性能的关联研究较少.同时,低气压养护方面的研究通常与低养护湿度耦合,不易进一步揭示低气压环境对水泥砂浆硬化过程影响的内在机理.因此,有必要开展低气压下水泥基材料的微观结构变化及其宏观抗渗性能研究,进一步研究低气压下的水化过程,从水化的角度分析低气压养护条件对于水泥砂浆的影响.

本文通过对比试验研究低气压养护条件对水泥砂浆力学性能和抗渗性能等宏观性能的影响规律,并采用气孔结构分析、水化产物物相分析、热分析和微观形貌分析等方法阐明低气压条件对水泥砂浆微

观结构的影响,以期揭示低气压养护对水泥砂浆抗渗性能等宏观性能的影响程度及影响机理.

1 试验

1.1 原材料

研究用水泥砂浆水灰比为(质量比,文中涉及的水灰比、灰砂比除特别说明外均为质量比)0.45,灰砂比1:3.细集料为中国ISO标准砂,拌和水为饮用水,水泥为陕西冀东水泥厂生产的P·O 42.5普通硅酸盐水泥.依据JTG E30—2005《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》,测定水泥的物理和力学性能,结果如表1所示.

表1 水泥的物理和力学性能
Table 1 Physical and mechanical properties of cement

Item	Setting time/min		Compressive strength/MPa		Flexural strength/MPa	
	Initial	Final	3 d	28 d	3 d	28 d
	Measured value	165	202	28.9	46.4	5.1
Standard value	≥45	≤390	≥17.0	≥42.5	≥4.0	≥6.5

1.2 低气压养护环境

低气压养护环境由高低温低气压试验箱控制,其主要技术参数如表2所示,养护气压(p)分别为 $0.2 P_0$ 、 $0.5 P_0$ 、 $0.8 P_0$ 、 $1.0 P_0$ (P_0 为标准大气压),养护温度为 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$,相对湿度大于95%.

表2 高低温低气压试验箱的主要技术参数
Table 2 Main technical parameters of experimental chamber

Temperature range/ $^\circ\text{C}$	Temperature deviation/ $^\circ\text{C}$	Pressure range/kPa	Pressure deviation/kPa
-70~150	± 2.0	0.5~101.0	$\pm 2.00(p > 40 \text{ kPa})$
			$\pm 0.05(p = 4\text{--}40 \text{ kPa})$
			$\pm 0.10(p < 4 \text{ kPa})$

1.3 试验方法

1.3.1 力学性能测试

水泥砂浆的抗折强度和抗压强度测试依据JTG E30—2005中“水泥胶砂强度检验方法(ISO法)”相关规定执行.抗折强度试件尺寸为 $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 160 \text{ mm}$,抗压强度试件为抗折强度试验后的残件.

1.3.2 抗渗性能测试

水泥砂浆抗渗性能测试按照JGJ/T 70—2009《建筑砂浆基本性能试验方法》执行,砂浆试样为上口直径70 mm、下口直径80 mm、高30 mm的圆台体.试样养护龄期为7 d,养护温度为 20°C ,养护气压分别为 $0.2 P_0$ 、 $0.5 P_0$ 、 $0.8 P_0$ 、 $1.0 P_0$.

试验时,从0.2 MPa开始加压,恒压2 h后升压至0.3 MPa,以后每隔1 h增加0.1 MPa,直至6个试件中有3个试件表面渗水时为止,并记录当前压力(H).

以6个试件中4个试件没有出现渗水的最大压力作为抗渗压力(P),其值为:

$$P = H - 0.1 \quad (1)$$

1.3.3 气孔结构测试

气孔结构影响水泥基材料的抗冻性能及抗渗性能.由于粗骨料对混凝土含气量的影响不大^[13],因此低气压对水泥砂浆气孔结构的影响规律可作为混凝土设计时的参考.采用混凝土气孔结构分析仪研究低气压对砂浆气孔分布的影响,水泥砂浆试件尺寸为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$,制备方法依据JTG E30—2005相关规定执行.先将试件在拟定的气压下养护7 d后切割成20 mm厚的薄片,接着将截面处依次采用50 $^\#$ 、600 $^\#$ 、1 000 $^\#$ 和2 000 $^\#$ 的砂纸打磨至近似镜面为止,然后将试样置于超声波清洗机中用无水乙醇清洗15 min,自然干燥后在其表面均匀的涂上碳

素墨水,待墨水干透后在表面涂抹白色纳米 CaCO_3 使其填满气孔,增强孔与孔壁的对比度,最后用刮刀刮去多余的粉末.试样完成后参照 ASTM C457/C457M 《Standard test method for microscopical determination of parameters of the air-void system in hardened concrete》,采用 CABR-457 型硬化混凝土气孔结构分析仪分析气孔结构参数(含气量、平均孔径和气孔间距系数等),试样制备过程如图 1 所示,分析

得到的典型气孔分布图如图 2 所示,每张图片尺寸为 $1.0\text{ mm} \times 1.0\text{ mm}$.分析结果中:比表面积指气孔的表面积与体积的比值,表示气孔的大小,气孔越小,比表面积越大;气孔间距系数指浆体中任意一点至孔隙的平均距离,在一定含气量时,气孔尺寸越小,间距系数越小;含气量指气孔体积占砂浆体积(包括所含气孔体积)的百分比;气孔含量指某孔径范围的气孔体积占砂浆体积(包括所含气孔体积)的百分比.

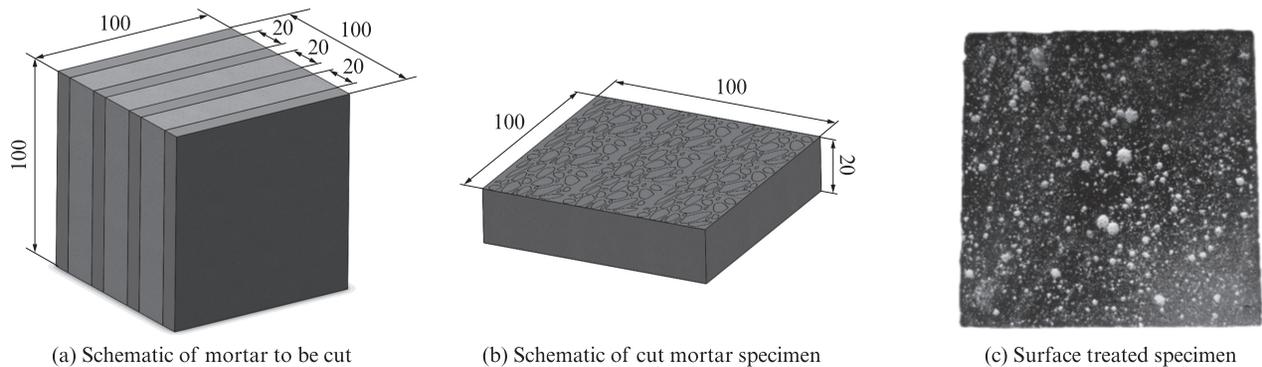


图 1 气孔结构分析试样制备过程

Fig. 1 Preparation process of pore structure analysis sample(size: mm)

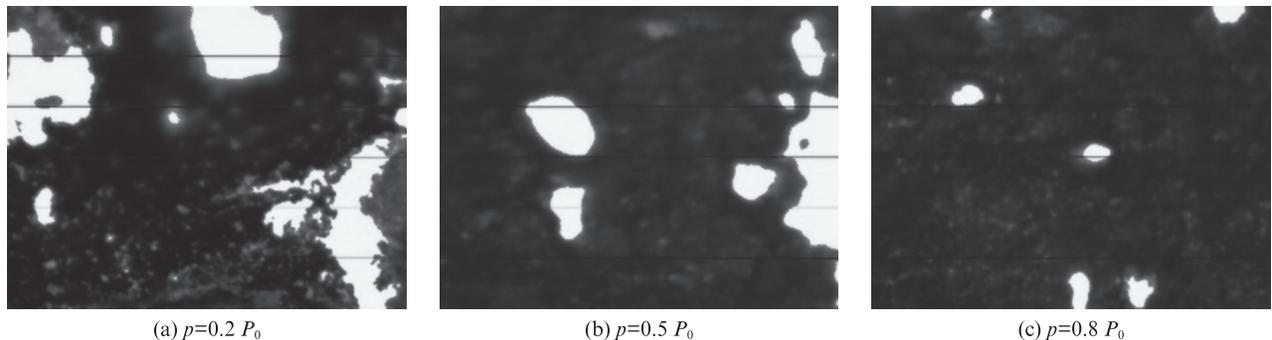


图 2 水泥砂浆的气孔结构图

Fig. 2 Pore structure diagram of cement mortar

1.3.4 微观形貌测试

微观形貌分析采用飞纳 World 台式场发射电子显微镜(SEM),所有样品均经 10 nmPt 涂层处理,以获得更好的导电性.所用样品为力学性能测试后的残件.

1.3.5 X射线衍射分析

物相分析采用 Bruker D8-Advanced 型 X 射线衍射仪(XRD, $\text{Cu-K}\alpha$),扫描角度 $5^\circ \sim 75^\circ$.所用样品为力学性能测试后的残件.

1.3.6 热重分析

使用美国 TA SDT 650 型同步综合热分析仪(TGA)研究低气压条件对水泥砂浆水化产物的影响,升温程序设置为:初始温度 30°C ,升温速率 $20^\circ\text{C}/\text{min}$,升温至 1050°C .所用样品与 XRD 分析相同.

2 结果与分析

2.1 力学性能

图 3 为养护气压对水泥砂浆力学性能的影响.由图 3 可见:水泥砂浆 3、7 d 强度(抗折强度和抗压强度)的分布规律一致,均是在 $0.2 P_0$ 养护条件下最低,在 $1.0 P_0$ 养护条件下最高,且随着气压的升高线性增大;与在 $1.0 P_0$ 养护条件下相比,试样在 $0.2 P_0$ 养护条件下的 3 d 抗折强度、抗压强度分别降低了 14.00% 和 7.50% ,7 d 抗折强度、抗压强度分别降低了 11.00% 和 9.85% ;在 $(0.5 \sim 0.8) P_0$ 范围内水泥砂浆的强度变化最快,说明在此气压范围内水泥砂浆内部结构的发展对养护气压的变化较为敏感.青藏高原大部分地区气压均在 $(0.5 \sim 0.8) P_0$ 范围内,因此在

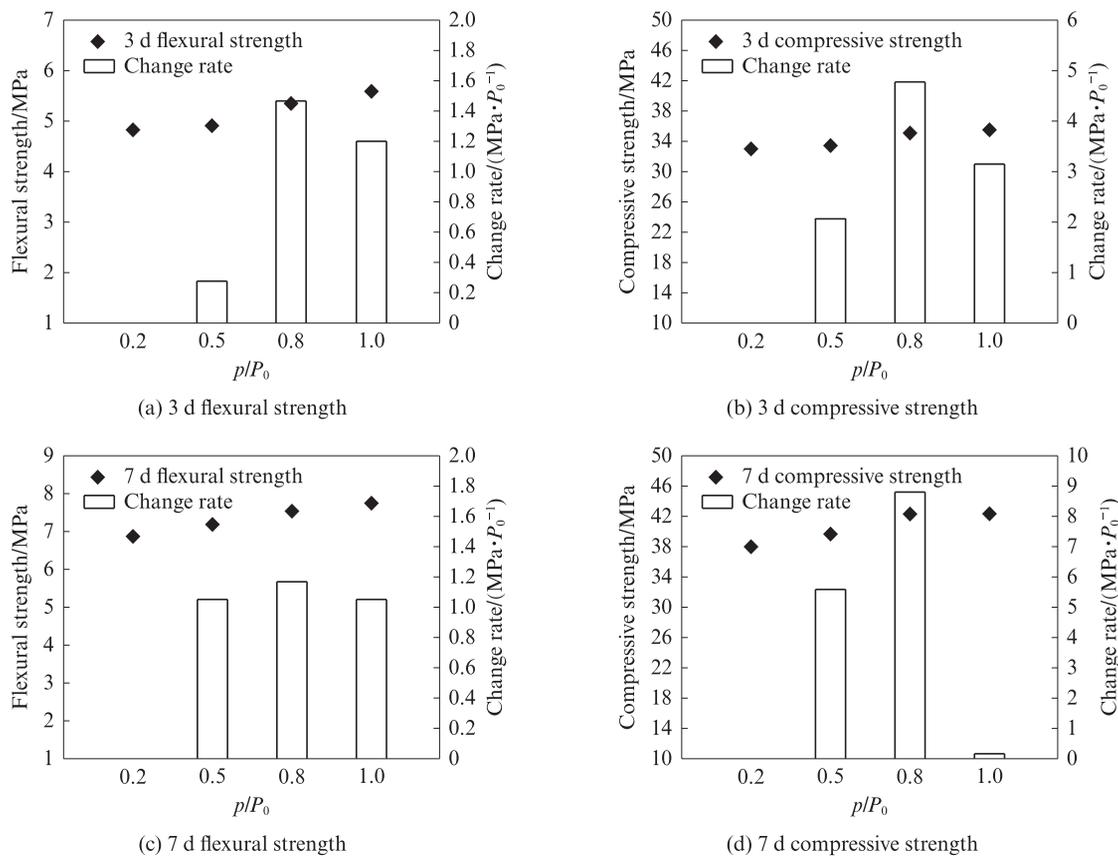


图3 养护气压对水泥砂浆力学性能的影响

Fig. 3 Influence of curing air pressure on mechanical properties of cement mortar

这些地区进行工程建设时必须考虑到低气压对结构强度衰减的影响。

2.2 抗渗性能

图4为养护气压对水泥砂浆抗渗性能的影响。由图4可见:抗渗性能对于养护气压的变化极为敏感,当养护气压为 $0.2 P_0$ 时,砂浆的抗渗强度仅为 0.6 MPa ,为 $1.0 P_0$ 养护下的 40.0% ;总体上看,养护气压越低,水泥砂浆的抗渗性能越差,渗透压力基本上随着气压的升高线性增长;与在 $1.0 P_0$ 养护条件下

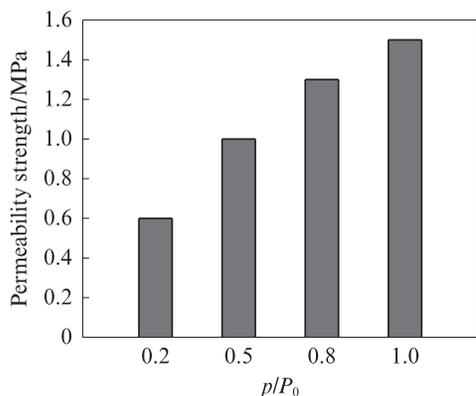


图4 养护气压对水泥砂浆抗渗性能的影响

Fig. 4 Influence of curing air pressure on permeability resistance of cement mortar

相比,在 $0.8 P_0$ 养护条件下水泥砂浆的抗渗强度下降了 13.0% ,在 $0.5 P_0$ 养护条件下下降了 33.3% 。

2.3 气孔结构

不同养护气压下的砂浆含气量和各孔径范围的气孔含量如图5所示。由图5可见:随着养护气压的降低,砂浆的含气量逐渐提高, $1.0 P_0$ 养护条件下的含气量为 0.25% , $0.2 P_0$ 养护条件下的含气量为 2.57% ;大尺寸气孔所占比例也随着气压的降低而增大, $0.2 P_0$ 养护条件下孔径为 $2000 \sim 2500 \mu\text{m}$ 的气孔含量最高,为 1.43% , $0.5 P_0$ 养护条件下该孔径气孔含量为 0.86% , $0.8 P_0$ 、 $1.0 P_0$ 养护条件下含量最高的气孔孔径降低,其气孔含量也降低。

图6为低气压养护下的气孔特征参数。气孔间距系数、气孔比表面积、气孔平均直径是表征气孔结构的重要参数,其中气孔间距系数是影响水泥砂浆抗渗性和抗冻性的关键指标,当气孔间距系数小于 $200 \sim 300 \mu\text{m}$ 时,水泥砂浆具有优良的抗冻性和抗渗性^[12,17]。由图6可见:平均孔径随着养护气压的降低而升高,在 $0.8 P_0$ 、 $1.0 P_0$ 养护条件下的平均孔径分别为 89 、 $44 \mu\text{m}$,在 $0.2 P_0$ 、 $0.5 P_0$ 养护条件下分别为 758 、 $423 \mu\text{m}$,这表明 $(0.5 \sim 0.8) P_0$ 之间的气压差异对砂浆的气孔结构发展产生了显著影响;砂浆的

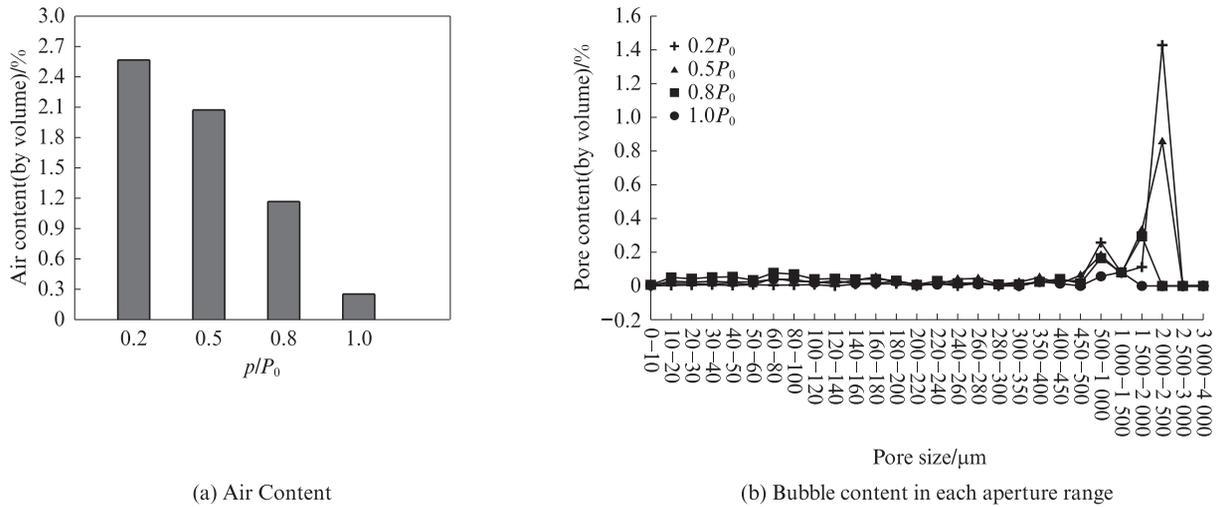


图5 不同养护气压下的砂浆含气量和各孔径范围的气孔含量
Fig. 5 Air content and bubble content in each aperture range of mortar under different curing air pressure

气孔间距系数同样随着气压的下降而升高,在 $0.8 P_0$ 、 $0.5 P_0$ 、 $0.2 P_0$ 养护条件下的气孔间距系数分别为 $1.0 P_0$ 养护条件下的1.2、4.3、8.3倍;气孔的比表面积随着养护气压的降低而减小,其原因在于常压养护试样中小孔径的气孔含量较大,而低气压养护下砂浆的气孔以大孔径为主,因此养护气压越低,气孔的比表面积越大;在低气压使平均孔径增大的同时,气孔间距系数也增大,表明气孔数量下降.以 $1000 \mu\text{m}$ 孔径为界将气孔分为大孔与小孔,随着养护气压的提高,大孔所占比例逐渐减小,小孔逐渐增多,在 $0.2 P_0$ 、 $0.5 P_0$ 、 $0.8 P_0$ 、 $1.0 P_0$ 养护条件下小孔所占比例分别为71.0%、75.2%、95.8%和98.7%.

护条件下的砂浆内部仍然有较多的未水化颗粒,水化产物间的间距较大,水化硅酸钙(C-S-H)凝胶对于空隙的填充较小,孔隙较多,整体结构最为松散;在 $0.2 P_0$ 养护条件下砂浆试样已经生成了各类水化产物,而且可以发现块状氢氧化钙(CH)和少量的针状钙矾石(AFt),但各水化产物间的连接仍不紧密;在 $0.5 P_0$ 养护条件下养护的试样中可以明显观察到块状的CH和细长针状的AFt,水化产物间的连接较为紧密;在 $1.0 P_0$ 养护条件下养护的试件中絮状的C-S-H之间的连接较多,形成了网状结构.总的来说,低养护气压下水泥砂浆的微观组织结构疏松,与常压养护相比略有劣化.

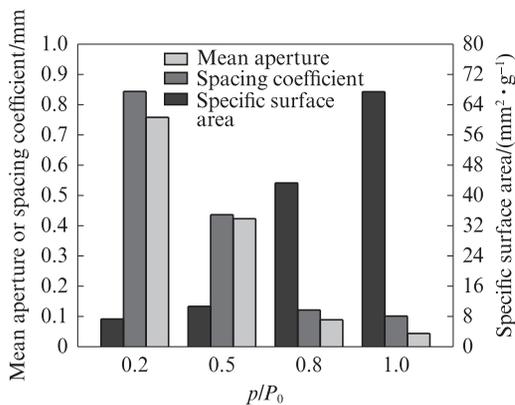


图6 低气压养护下的气孔特征参数
Fig. 6 Pore characteristics of mortars under low curing air pressure

2.4 微观形貌

图7为不同养护气压下水泥砂浆的SEM图像.由图7可见:3种养护条件下水泥砂浆试样的整体结构仍较为松散,相比较而言, $1.0 P_0$ 养护条件下的砂浆试样较为密实, $0.5 P_0$ 养护条件下次之, $0.2 P_0$ 养

2.5 物相组成

图8为不同养护气压下水化产物的XRD图谱,试样水灰比均为0.45,养护温度为 20°C ,养护龄期为7 d,养护气压为 $0.2 P_0$ 、 $0.5 P_0$ 、 $0.8 P_0$,未水化的硅酸盐水泥粉末作为对照.由图8可见:图中强度最高的衍射峰为石英砂,这是由于砂浆试样中含有较多的标准砂颗粒,其含量较高,衍射强度也较高;主要水化产物中CH的衍射峰也较为明显,且3种气压下的衍射峰强度相差不大,表明低气压条件对CH含量的影响不大,下文将采用热重分析技术对CH的含量进行定量分析.值得注意的是,在XRD图谱中未发现另一种重要的水化产物三硫型水化硫铝酸钙(AFt),这是由于随着水化反应进行AFt全部转化为单硫型水化硫铝酸钙(AFm),该现象与文献[16]保持一致.

图9为不同气压下水化产物的组成.根据文献[25], 400°C 前水泥水化产物的质量损失主要是C-S-H凝胶和AFt脱水引起的.XRD分析结果表明,7 d龄期时AFt全部转化为AFm,因此可以认

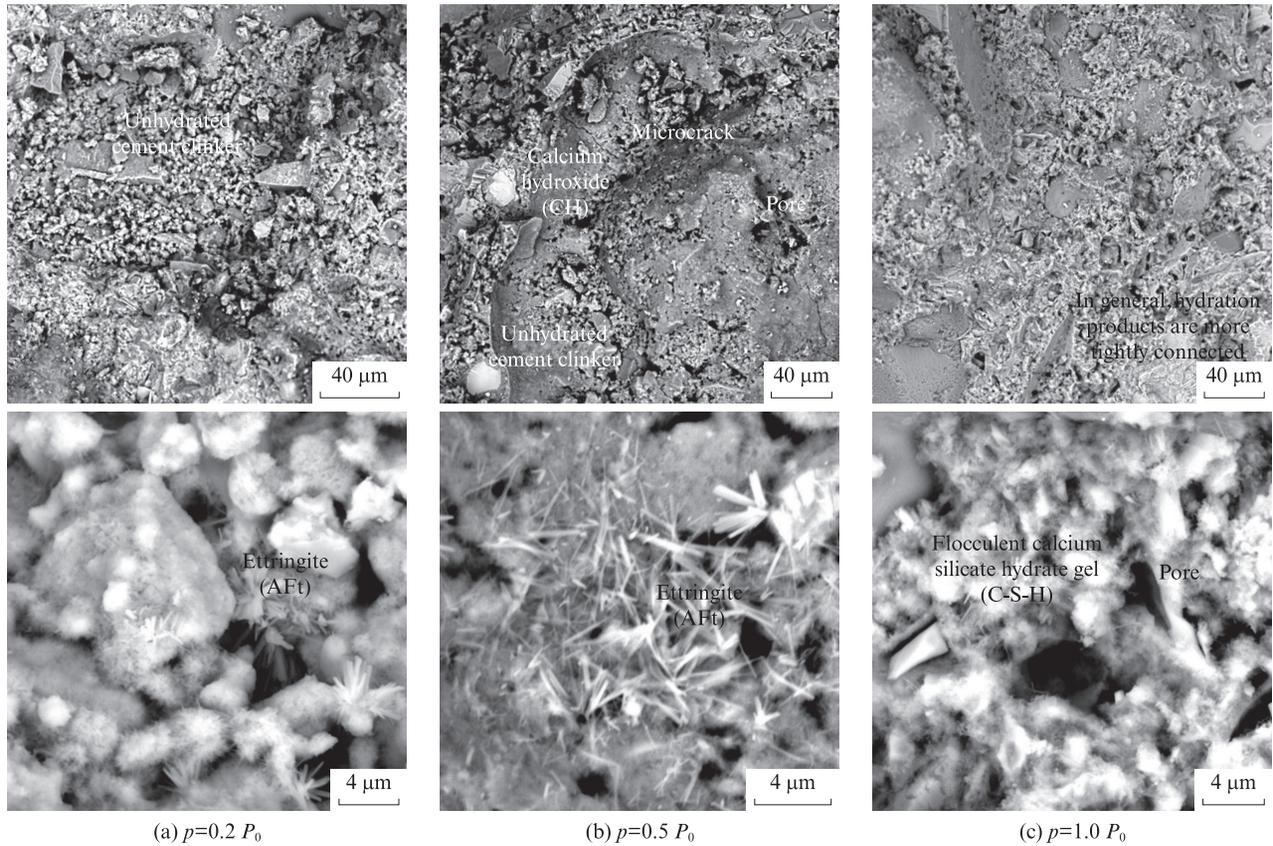


图7 不同养护气压下的水泥砂浆SEM图

Fig. 7 SEM of mortar under different curing air pressure

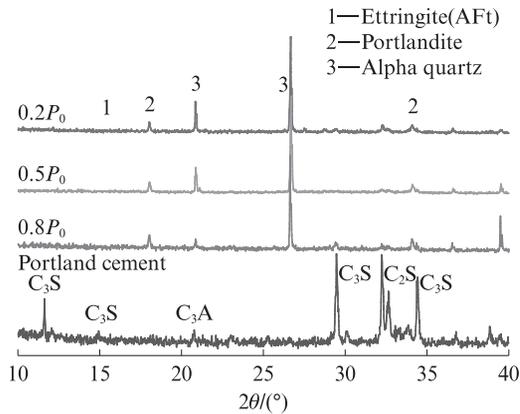


图8 不同养护气压下水化产物的XRD图谱

Fig. 8 XRD patterns of hydration products under different curing air pressure

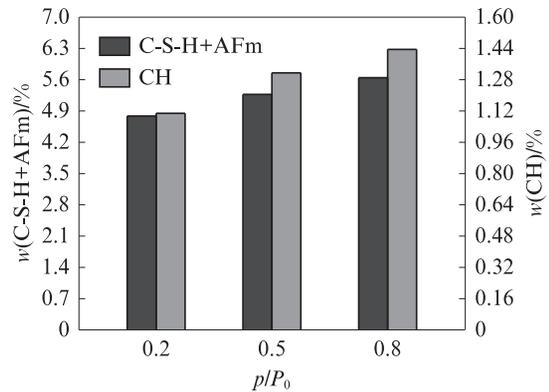


图9 不同气压下水化产物组成

Fig. 9 Hydration products composition at different air pressures

为50~400℃范围的质量损失是由C-S-H凝胶和AFm脱水引起的,这一阶段0.2 P_0 、0.5 P_0 、0.8 P_0 养护下试样的质量损失率分别为4.786%、5.271%、5.645%,显然0.8 P_0 养护下试样的C-S-H含量最高.400~500℃范围内的质量损失主要是由CH分解造成的,同样在0.8 P_0 养护下试样的质量损失率最高,为1.435%,在0.5 P_0 、0.2 P_0 养护下分别为1.315%和1.108%.因此,可以认为养护气压越低,水化产物C-S-H凝胶和CH的含量也越低,低气压

养护减缓了水泥的水化速率.

3 抗渗性能的影响机理

综合分析气孔结构与抗渗强度的关系可以发现,抗渗强度与含气量、平均孔径、间距系数和比表面积变化趋势存在密切关系:含气量越大、平均孔径越大、气泡间距越宽、比表面积越小,硬化基体结构越不密实,抗渗能力越差.低气压养护环境下,水泥硬化基体的气孔结构逐渐劣化,进一步降低了砂浆

的抗渗强度。

图10为硬化水泥砂浆孔隙结构影响因素示意图。在低气压养护环境下水泥水化产物的物相分析表明,养护气压越低,相同龄期时水化产物C-S-H凝胶和CH的含量也越低,低气压养护减缓了水泥的水化速度。低气压养护对水泥砂浆试样气孔结果的影响可能来源于以下3个方面:(1)低气压养护影响了水泥的水化速率,C-S-H凝胶和CH的体积减小,对气孔的填充不充分,这增大了凝胶孔的含量。(2)低气压环境下,材料内部水分蒸发速率加快^[15, 16, 19-21],进而提高硬化基体中的毛细孔含量^[22]。(3)对于搅拌时引入的气泡,低气压下液体界面特性发生改变^[12],液体的表面张力值偏大,气泡膜变薄,混凝土中的气泡破裂、数量减少,导致大孔的比例提高,造成气孔间距系数增大。上述3个因素共同作用下,硬化水泥基体的含气量增大,大孔和连通孔隙增多,平均孔径变大,导致气孔结构劣化^[23-25],对水泥砂浆抗渗性能产生了不利影响。

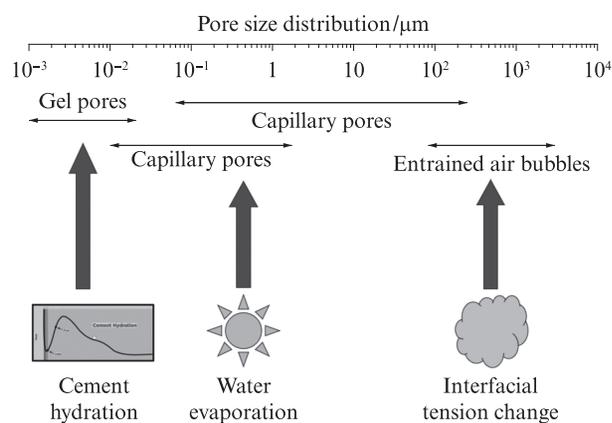


图10 气孔结构对抗渗性能的影响机理

Fig. 10 Influence mechanism of pore structure on impermeability

4 结论

(1)水泥砂浆的力学性能随着气压的降低逐渐劣化。在(0.5~0.8) P_0 气压范围内水泥砂浆内部结构的发展对养护环境气压的变化最为敏感。低气压对水泥砂浆抗渗性能的影响极大,与养护气压呈线性正相关关系,在0.2 P_0 养护条件下的砂浆抗渗强度仅为1.0 P_0 养护条件下的40.0%。

(2)低气压养护对于水泥砂浆气孔结构的影响是多方面的,随着养护气压的降低,砂浆的含气量提高,在0.2 P_0 养护条件下的含气量为0.25%,在1.0 P_0 养护条件下的含气量为2.57%。随着养护气压的降低,砂浆的气孔数量减少,气孔间距系数增大,气孔

平均孔径变大,在0.2 P_0 养护条件下的平均孔径是1.0 P_0 养护条件下的10倍。

(3)低气压环境导致砂浆的气孔结构劣化,尤其是200 μm 以上气孔的增多,引起了抗渗性能的下降。基于本文的研究结论,在高原低气压环境下,可以通过掺加早强剂或复合外加剂促进水泥水化和添加引气剂或添加粉煤灰利用其形态学来效应改善砂浆的气孔结构。

参考文献:

- [1] LIU Z Z, LOU B W, BARBIERI D M, et al. Effects of pre-curing treatment and chemical accelerators on Portland cement mortars at low temperature (5 °C) [J]. Construction and Building Materials, 2020, 240: 117893.
- [2] 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. The influence of environment and curing conditions on the properties of concrete in plateau region [J]. Concrete and Cement Products, 2016(1): 10-13. (in Chinese)
- [3] 刘状壮. 低温低压下硅酸盐水泥水化特性及水化调节技术[D]. 西安:长安大学, 2016.
LIU Zhuangzhuang. Hydration characteristics and hydration regulation technology of Portland cement under low temperature and low pressure [D]. Xi'an: Chang'an University, 2016. (in Chinese)
- [4] 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, 8.
GE Xin, GE Yong, DU Yuanbo, et al. Research on mechanical properties of concrete under plateau climate [J]. Concrete, 2020 (3): 1-4, 8. (in Chinese)
- [5] GE X, GE Y, DU Y B, et al. Effect of low air pressure on mechanical properties and shrinkage of concrete [J]. Magazine of Concrete Research, 2018, 70(17/18): 919-927.
- [6] 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. Study on the influence of low pressure and low humidity curing on the performance of concrete [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016. (in Chinese)
- [7] 胡玉兵, 曹瑞普. 高原地区混凝土内外结构性能的差异性研究[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(增刊1): 213-218.
HU Yubing, CAO Ruipu. Study on the difference of internal and external structural properties of concrete in plateau area [J]. Bulletin of the Chinese Ceramin Society, 2017, 36(Suppl 1): 213-218. (in Chinese)
- [8] LI X F, FU Z, LUO Z. Effect of atmospheric pressure on air content and air void parameters of concrete [J]. Magazine of Concrete Research, 2015, 67(8): 1-10. (in Chinese)
- [9] 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): 165-172.
LI Xuefeng, FU Zhi. Effects of plateau low-pressure environment on air content and bubble stability of air-entrained concrete [J].

- Chinese Journal of Agricultural Engineering, 2015, 31(11): 165-172. (in Chinese)
- [10] 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[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(4): 866-873.
LI Lihui, CHEN Xin, TIAN Bo, et al. Influence of atmospheric pressure on entraining effect of concrete entraining agent[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(4): 866-873. (in Chinese)
- [11] 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. Experimental study on high-performance concrete in the permafrost region of Qinghai-Tibet plateau[D]. Beijing: Ministry of Railways Research Institute, 2004. (in Chinese)
- [12] 李雪峰,付智,罗翥. 低气压环境对混凝土含气量及气孔结构影响研究[J]. 公路交通科技, 2015, 32(2): 49-54.
LI Xuefeng, FU Zhi, LUO Zhu. Research on the influence of low-pressure environment on the air content and pore structure of concrete[J]. Highway Traffic Science and Technology, 2015, 32(2): 49-54. (in Chinese)
- [13] 刘旭,陈歆,田波,等. 低气压环境下水泥混凝土性能研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2021, 49(8): 1743-1752.
LIU Xu, CHEN Xin, TIAN Bo, et al. Research progress on the properties of cement concrete under low-pressure environment[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2021, 49(8): 1743-1752. (in Chinese)
- [14] 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. Study on the influence of plateau climate conditions on concrete performance and cracking mechanism[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019. (in Chinese)
- [15] 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. Cement hydration and pore structure development under high altitude low pressure and low humidity[J]. Journal of Xi'an University of Architecture and Technology(Natural Science), 2021, 53(2): 202-207. (in Chinese)
- [16] LIU Z Z, LOU B W, SHA A M, et al. Microstructure characterization of Portland cement pastes influenced by lower curing pressures[J]. Construction and Building Materials, 2019, 227: 116636.
- [17] 熊剑平. 道路混凝土抗冻性与抗渗性关系的试验研究[J]. 西部交通科技, 2009(11): 5-9.
XIONG Jianping. Experimental study on the relationship between frost resistance and impermeability of road concrete[J]. Western Transportation Science and Technology, 2009(11): 5-9. (in Chinese)
- [18] QIN Y H, HILLER J E. Water availability near the surface dominates the evaporation of pervious concrete[J]. Construction and Building Materials, 2016, 111: 77-84.
- [19] VAN DE GRIEND A A, OWE M. Bare soil surface resistance to evaporation by vapor diffusion under semiarid conditions[J]. Water Resources Research, 1994, 30(2): 181-188.
- [20] 李晓光,王攀奇,张郁,等. 再生骨料混凝土毛细管负压和界面过渡区研究[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(6): 572-576.
LI Xiaoguang, WANG Panqi, ZHANG Yu, et al. Study on capillary negative pressure and interfacial transition zone of recycled aggregate concrete[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(6): 572-576. (in Chinese)
- [21] YOUNG J F, MINDESS S, DARWIN D. Concrete[M]. 2nd ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2002.
- [22] GIERGICZNY Z, GLINICKI M A, SOKOŁOWSKI M, et al. Air void system and frost-salt scaling of concrete containing slag-blended cement[J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(6): 2451-2456.
- [23] ZHANG J Z, BIAN F, ZHANG Y R, et al. Effect of pore structures on gas permeability and chloride diffusivity of concrete[J]. Construction and Building Materials, 2018, 163: 402-413.
- [24] LAFHAJ Z, GOUEYGOU M, DJERBI A, et al. Correlation between porosity, permeability and ultrasonic parameters of mortar with variable water/cement ratio and water content[J]. Cement and Concrete Research, 2006, 36(4): 625-633.
- [25] 何小芳,张亚爽,李小庆,等. 水泥水化产物的热分析研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2012, 31(5): 1170-1174.
HE Xiaofang, ZHANG Yashuang, LI Xiaoqing, et al. Research progress on thermal analysis of cement hydration products[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2012, 31(5): 1170-1174. (in Chinese)