

气泡结构调控组分对引气砂浆流动度及抗压强度的影响

张 雄¹, 叶 子¹, 郇 坤¹, 季 涛²

(1. 同济大学 先进土木工程材料教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 南京工程学院 建筑工程学院, 江苏 南京 211167)

摘要:选取两种代表性气泡结构调控组分,分析不同类型气泡结构调控组分对引气砂浆流动度及抗压强度的影响规律,通过对硬化砂浆孔结构特征参数和液体表面张力的测试分析,揭示气泡结构调控组分对引气砂浆流动度及抗压强度的作用机理.结果表明,增稠型调控组分环糊精通过提高砂浆液相黏度来延缓引气过程,使砂浆中的气泡(孔)细化,提高10~200 μm孔径的孔隙率,从而增大砂浆的流动度,提高其抗压强度;抑泡类调控组分聚醚硅氧烷共聚物取代液膜表面引气剂分子,降低液膜局部表面张力,低掺量下使大气泡细化成为小气泡,高掺量下气-液界面膜强度降低,气泡不能稳定存在,此时总孔隙率降低,导致砂浆流动度先增后减,抗压强度不断提高.

关键词: 引气砂浆; 气泡结构调控组分; 孔结构; 流动度; 抗压强度

中图分类号: TU578.1

文献标志码: A

Effect of Bubble Structure Modifying Agent on Fluidity and Compressive Strength of Air-Entrained Mortar

ZHANG Xiong¹, YE Zi¹, HUAN Kun¹, JI Tao²

(1. Key Laboratory of Advanced Civil Engineering Materials of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. School of Architectural Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

Abstract: Two representative kinds of bubble structure modifying agents were selected to study the effect of different types of bubble structure modifying agent on the fluidity and compressive strength of the air-entrained mortar. The mechanism of the bubble structure modifying agent on the fluidity and compressive strength of the air-entrained mortar was researched by testing pore structure parameters of the hardened air-entrained mortar with bubble structure modifying

agent and the surface tension of the liquid. The results show that the viscosity modifying agent, cyclodextrin (β -CD), can delay the air-entraining process by increasing the liquid-phase viscosity of the mortar, so that the bubbles (pores) in the mortar can be refined, the porosity of air void size ranging from 10 μm to 20 μm can be raised, and the fluidity and compressive strength of the mortar can be increased. The antifoaming agent, siloxane polyether copolymer (PSPEO), can replace the air-entraining agent molecules on the surface of the bubbles film and reduce the local surface tension. The big bubbles are refined into small bubbles with low-dosage PSPEO, while the strength of the gas-liquid interface film is reduced, bubbles cannot exist stably with high-dosage PSPEO and the total porosity is lowered. Therefore, the fluidity of the mortar first increases and then decreases, and the compressive strength continuously increases.

Key words: air-entrained mortar; bubble structure modifying agent; air void structure; fluidity; compressive strength

引气剂能够在新拌水泥基材料中引入大量气泡,气泡在水泥基材料硬化后形成大量气孔,研究表明其可显著提升水泥砂浆和混凝土的工作性能和耐久性能^[1-4].通常,引气会对水泥基材料的力学性能产生一定负面影响^[5-6],在水泥基材料中引入气泡结构调控组分可降低或消除这一影响^[7-9].

气泡结构调控组分通过改变气-液界面性质,使气泡液膜不易破裂,改变气泡的性质,最终影响水泥基材料的流动度和强度^[10].气泡结构调控组分对引气水泥基材料流动度和抗压强度的影响研究由来已久,Ouyang等^[11]将壬基酚聚氧乙烯醚(TX-10)引入引气砂浆中,发现TX-10掺量小于0.004%时砂浆流动度明显增加,而掺量超过0.006%后流动度则基

收稿日期: 2018-06-15

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0700800)

第一作者: 张 雄(1956—),男,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为建筑功能材料及其功能外加剂.

E-mail: zhangxiong@tongji.edu.cn

本不变。Łaźniewska-Piekarczyk^[12]的研究结果表明,多元醇类调控组分的引入不会改变自密实混凝土的含气量,但会使混凝土的坍落度下降。Mendes 等^[13]将十二烷基醚硫酸盐引气剂与十二烷基苯磺酸盐、三乙醇胺进行复配,发现引入调控组分后砂浆流动度提高,但抗压强度降低。Barfield 等^[14]研究发现,随葡聚糖掺量的增加,引气混凝土的坍落度增大,而抗压强度呈现先升后降的变化规律。

根据以上研究,发现不同气泡结构调控组分对引气水泥基材料的流动度和抗压强度的影响规律不同,气泡结构调控组分对引气水泥基材料的流动度和抗压强度的作用机理尚需进一步研究。系统研究气泡结构调控组分,阐明其对引气砂浆流动度和抗压强度的作用机理,通过气泡结构的调控为引气砂浆的实际应用奠定理论基础。本文根据常用水泥基材料中的气泡结构调控组分类别(一类是可提高气泡液膜表面黏度的增稠类物质,如明胶、骨胶、蛋白质等^[7],另一类是破坏大气泡的抑泡类物质,如高碳醇、有机硅化合物等^[15]),选取增稠类物质环糊精与

抑泡类物质聚醚硅氧烷共聚物,并掺入引气砂浆中进行试验研究。基于图像分析法^[16],通过测定各组砂浆试样的流动度、强度、孔隙率、平均孔径、孔径分布等参数,研究气泡结构调控组分对引气砂浆流动度及抗压强度的作用机理。

1 材料与方法

1.1 原材料

水泥,安徽海螺牌 P·II 52.5,其物理-力学性能如表 1 所示;砂,选用河砂,细度模数为 2.66;引气剂,上海凯星牌十二烷基硫酸钠,白色固体粉末;气泡结构调控组分,增稠类调控组分选取河南拓健牌环糊精,白色晶体粉末;抑泡类调控组分选取浙江湿威牌聚醚硅氧烷共聚物,黏稠液体;减水剂,江西奥兢牌高效固态萘系减水剂,褐黄色固体粉末,减水率为 18%;水,拌合水为上海用自来水,配置溶液用水为去离子水。

表 1 水泥性能

Tab.1 Performances of cement

密度/ (g·cm ⁻³)	比表面积/ (m ² ·kg ⁻¹)	标准稠度 用水量/%	凝结时间/min		抗折强度/MPa		抗压强度/MPa	
			初凝	终凝	3 d	28 d	3 d	28 d
3.14	370	26	109	154	6.3	10	31.5	63.1

1.2 配合比

各组砂浆试样配合比如表 2 所示。在各组试样配合比中,水泥:水:沙(质量比)均为 500:220:1250;减水剂掺量为 0.4%;引气剂以 H 表示,掺量为 0.003%;环糊精以 C 表示;聚醚硅氧烷共聚物以 J 表示;试件编号随气泡结构调控组分掺量增加由小到大排列。各外加剂掺量均按水泥用量的质量分数计。

1.3 试验方法

试件制备:在温度为 25℃,相对湿度为 75%的条件下按表 2 成型砂浆试件,尺寸为 40 mm×40 mm×160 mm,试件采用标准养护,养护龄期为 28 d。

流动度测试:参照《水泥胶砂流动度测定方法》(GB/T 2419—2005)^[17],测定各配合比砂浆的流动度。

抗压强度测试:参照《水泥胶砂强度检验方法》(GB/T 17671—1999)^[18],测定砂浆试件的 28 d 抗压强度,试件尺寸为 40 mm×40 mm×160 mm。

孔结构测试:为得到孔隙率与孔径分布,根据体

表 2 各砂浆试样气泡结构调控组分类别及掺量

Tab.2 Types and dosages of bubble structure modifying agent of mortar

试样	气泡结构调控组分掺量/%
H	0
C1	0.003
C2	0.005
C3	0.010
C4	0.015
C5	0.020
C6	0.025
C7	0.030
C8	0.035
C9	0.040
J1	0.003
J2	0.006
J3	0.009
J4	0.010
J5	0.012
J6	0.015
J7	0.018
J8	0.024
J9	0.030

视学原理,使用显微图像分析法,测定砂浆孔结构。将养护至 28 d 的砂浆试块用切割机切割为薄片,尺

寸为 $40\text{ mm} \times 40\text{ mm} \times 20\text{ mm}$. 使用磨片机打磨观测面, 使用抛光机抛光观测面, 并将观测面使用黑色墨水均匀涂黑. 将砂浆切片放入烘箱, 于 $(65 \pm 5)^\circ\text{C}$ 条件下烘干. 使用碳酸钙填充观测面表面气孔, 使用 OPLENIC 品牌 Pro-Micro San 系列 200 万像素电子目镜采集观测面数字图像, 用 Image-Pro Plus 6.0 软件处理显微图片, 操作流程如图 1 所示.

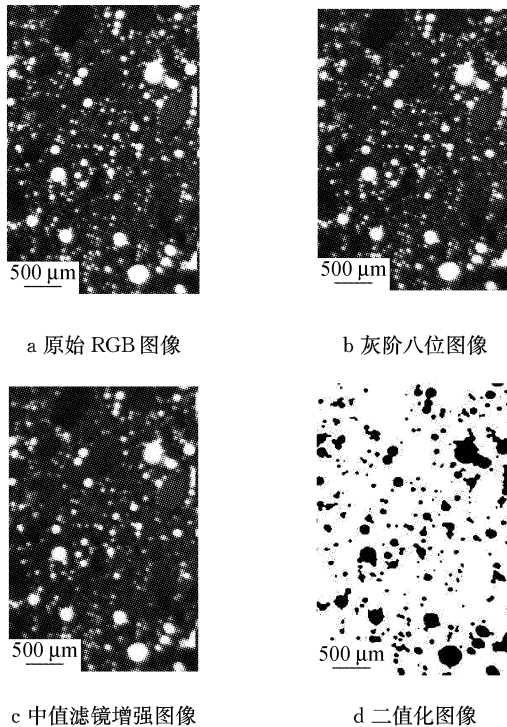


图 1 孔结构图像处理

Fig.1 Image processing of pore structure

黏度测试: 水泥浆体黏度测试使用 NXS-11B 型旋转黏度计测定, 测量系统选用 F 系统(外筒内径为 4 cm, 内筒外径为 2 cm, 内筒高度为 4 cm, 试样用量为 81.7 mL), 每 5 s 变化一次剪切速度, 连续检测 5 min 内浆体的黏度变化, 取其算术平均值为测定结果.

表面张力测试: 为得到各相界面处表面张力, 参照《混凝土外加剂匀质性试验方法》(GB/T 8077—2012)^[19], 使用 QBZY-2 型界面张力仪进行测定.

2 结果与讨论

2.1 气泡结构调控组分对流动度的影响

图 2 为在引气剂掺量不变的条件下, 不同气泡结构调控组分的掺量对新拌砂浆试样流动度的影响.

由图 2a 可见, 环糊精的掺量低于 0.030% 时, 引

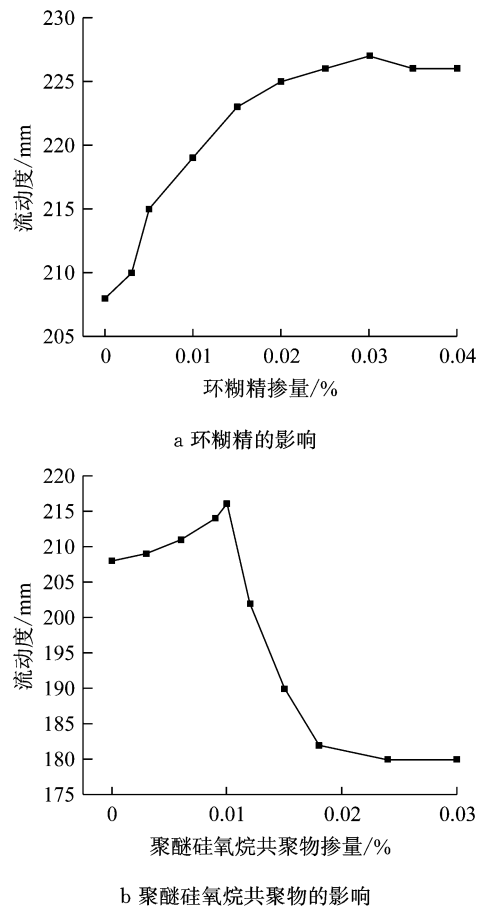


图 2 气泡结构调控组分对砂浆流动度的影响

Fig.2 Effect of bubble structure modifying agent on fluidity of mortar

气砂浆的流动度随环糊精的掺量而提高, 流动度最大值为 227 mm, 比基准试样流动度提高 9.1%; 当环糊精掺量超过 0.030%, 砂浆流动度不再随掺量增加而提高. 由图 2b 可见, 聚醚硅氧烷共聚物掺量低于 0.010% 时, 引气砂浆的流动度随掺量的增加而提高, 而掺量超过 0.010% 后, 引气砂浆的流动度则出现明显的降低趋势, 流动度甚至降低到小于基准试样. 以上研究表明, 增稠类调控组分与抑泡类气泡结构调控组分对引气水泥砂浆的流动性表现出不同的影响规律.

2.2 气泡结构调控组对抗压强度的影响

图 3 为在引气剂掺量不变的条件下, 不同气泡结构调控组分的掺量对硬化砂浆试样 28 d 抗压强度的影响.

从图 3 可以看出, 环糊精和聚醚硅氧烷共聚物对引气砂浆抗压强度的影响规律相似, 掺入调控组分后的引气砂浆试样抗压强度均高于基准试样, 同时随着调控组分掺量的增加, 抗压强度呈现出先增大后稳定的变化规律. 但是, 环糊精与聚醚硅氧烷共

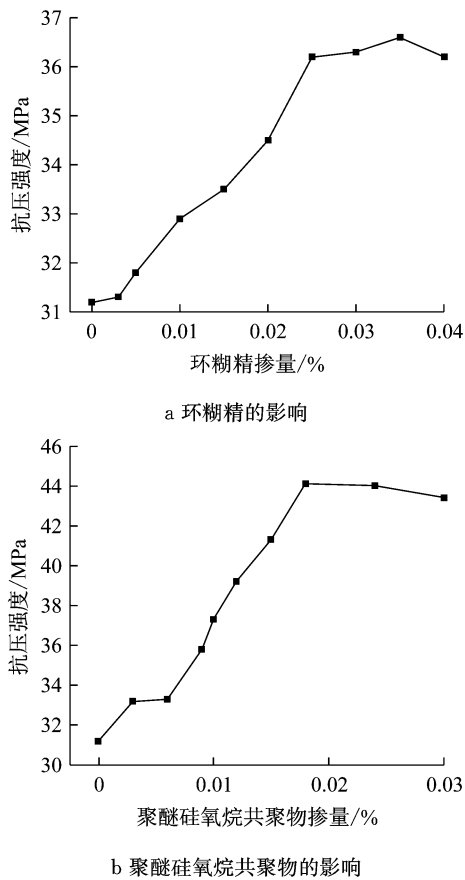


图 3 气泡结构调控组分对砂浆 28 d 抗压强度的影响
Fig.3 Effect of bubble structure modifying agent on 28 d compressive strength of mortar

聚物对引气砂浆抗压强度的提高程度有较大差异:与基准试样相比,掺入环糊精的硬化砂浆试样抗压强度最大可提高 17.3%;而聚醚硅氧烷共聚物在掺量为 0.018% 时最大可提高 41.3%。

2.3 硬化砂浆孔结构分析

如 2.1 及 2.2 所述,两种气泡结构调控组分对引气砂浆流动度和抗压强度表现出不同的影响规律,为深入研究气泡结构调控组分对水泥砂浆流动度和强度造成不同影响的原因,本文从亚微观尺度通过显微图像分析法测试分析了不同砂浆试样的总孔隙率、平均孔径、气泡间距系数、分级孔隙率和比表面积等孔结构特征参数。

2.3.1 气泡结构调控组分对总孔隙率的影响

图 4 为气泡结构调控组分的掺量对硬化砂浆试样总孔隙率的影响。

从图 4a 可以看出,随环糊精掺量的增加,硬化砂浆总孔隙率在 11.0%~11.5% 范围内波动,可认为环糊精不会对硬化砂浆总孔隙率产生明显影响。从图 4b 可以看出,当聚醚硅氧烷共聚物掺量小于 0.010% 时,气泡结构调控组分对硬化砂浆试样的总

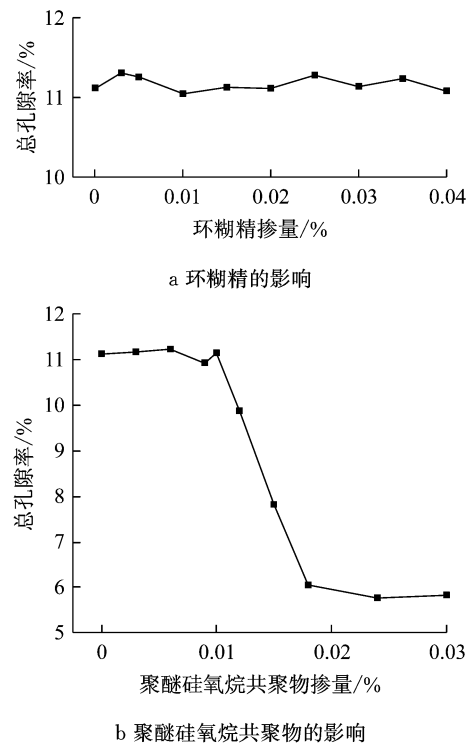


图 4 气泡结构调控组分对砂浆总孔隙率的影响
Fig.4 Effect of bubble structure modifying agent on total porosity of mortar

孔隙率没有显著影响;当掺量在 0.010%~0.018% 时,砂浆试样的总孔隙率随掺量增加显著降低;而掺量超过 0.018% 后,硬化砂浆试样的总孔隙率又基本维持不变。

文献研究表明,新拌砂浆含气量与硬化后砂浆孔隙率存在显著线性对应关系^[20],可通过硬化砂浆试样总孔隙率的实测值计算新拌砂浆的含气量。总孔隙率的研究结果表明,与环糊精相比,聚醚硅氧烷共聚物引入水泥砂浆后,新拌砂浆含气量和硬化砂浆的总孔隙率显著下降,含气量的降低会导致砂浆流动性的降低,孔隙率的下降使得砂浆密实程度提高,从而提升砂浆的抗压强度。

2.3.2 气泡结构调控组分对孔结构特征参数的影响

使用显微图像分析法测试分析了引气砂浆试样的孔结构特征参数,其平均孔径、气泡间距系数和比表面积参数如表 3 所示。

由表 3 可以看出,引气砂浆中掺入适量的环糊精可显著降低平均孔径与气泡间距系数,并增大气孔的比表面积,结果表明环糊精使得引气砂浆中的气泡(孔)趋向于分布更为均匀的小尺度气泡(孔)。水泥基材料平均孔径与气泡间距系数减小,其显微硬度会提高,引气砂浆的抗压强度也相应提高^[21]。

同时,砂浆中均匀分布的众多小气泡能起到滚珠轴承的作用,从而提高砂浆的流动性^[22]。

表 3 砂浆气孔结构特征参数

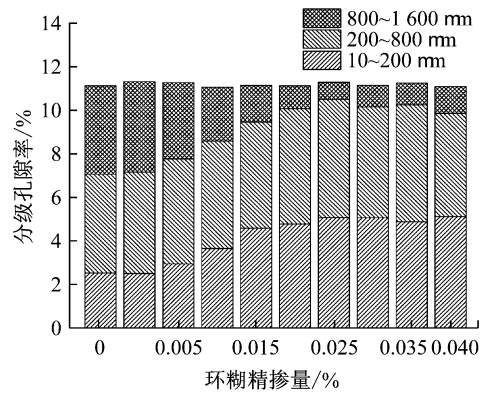
试样	气泡结构调控组分掺量/%	平均孔径 (28 d)/ μm	气泡间距系数(28 d)/ μm	比表面积/ μm^{-1}
H	0	114.71	233.52	0.016 0
C1	0.003	115.17	239.01	0.012 9
C2	0.005	103.14	211.67	0.015 0
C3	0.010	80.42	169.49	0.019 4
C4	0.015	71.69	147.64	0.022 9
C5	0.020	64.13	136.33	0.025 1
C6	0.025	59.17	125.62	0.027 5
C7	0.030	58.04	123.11	0.027 2
C8	0.035	61.53	128.39	0.027 2
C9	0.040	59.95	125.37	0.027 8
J1	0.003	102.36	212.11	0.014 9
J2	0.006	94.44	195.99	0.016 4
J3	0.009	71.62	149.54	0.022 6
J4	0.010	64.19	135.45	0.025 2
J5	0.012	82.38	171.34	0.019 3
J6	0.015	90.17	186.30	0.017 4
J7	0.018	97.68	201.59	0.015 8
J8	0.024	102.24	211.77	0.015 0
J9	0.030	100.67	208.68	0.015 2

由表 3 还可以看出,当聚醚硅氧烷共聚物掺量小于 0.010% 时,引气砂浆平均孔径与气泡间距系数随其掺量的增加而逐渐降低,比表面积不断增加,砂浆中的气泡(孔)随气泡结构调控组分掺量的增加而细化;当聚醚硅氧烷共聚物掺量超过 0.010% 时,随着聚醚硅氧烷共聚物掺量的增加,平均孔径、气泡间距系数与比表面积则呈现相反趋势。

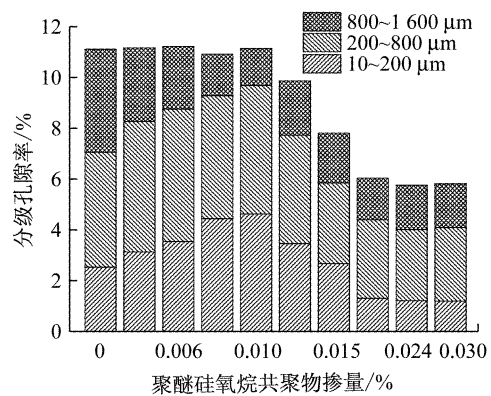
2.3.3 气泡结构调控组分对孔径分布的影响

图 5 为气泡结构调控组分的掺量变化对硬化砂浆试样的孔径分布的影响。

由图 5a 可见,掺入环糊精的砂浆试样,200~800 μm 分级孔隙率变化不明显,表明环糊精对孔径为 200~800 μm 的气孔的影响有限。当环糊精掺量小于 0.025% 时,随着掺量的增大,10~200 μm 孔径范围的气孔数量逐渐增多,而 800~1 600 μm 孔径范围的气孔不断减少;当掺量大于 0.025% 后,各范围的气孔所占分级孔隙率变化不大。孔径分布与流动性、抗压强度关系密切^[7, 23],对比研究试样 C1 和 C6,发现两者总孔隙率相近,但试样 C6 的流动度比试样 C1 高 16 mm,抗压强度高 12 MPa。这是因为, C6 试样在 10~200 μm 范围内的分级孔隙率较大,而在 800~1 600 μm 范围内分级孔隙率较小,造成其气孔(泡)更加细密均匀,因而流动度与抗压强度较高。



a 环糊精的影响



b 聚醚硅氧烷共聚物的影响

图 5 气泡结构调控组分对砂浆不同孔径范围分级孔隙率的影响

Fig. 5 Effect of bubble structure modifying agent on porosity in different pore size ranges of mortar

由图 5b 可见,当聚醚硅氧烷共聚物掺量小于 0.010% 时,砂浆的总孔隙率相近,聚醚硅氧烷共聚物对孔径分布的影响规律与环糊精类似;而掺量大于 0.010% 时,硬化砂浆总孔隙率降低,同时各分级孔隙率也下降,分级孔隙率按降幅从大到小排序依次是:10~200 μm 、200~800 μm 、800~1 600 μm 。对比研究试样 J6 和 J7,发现试样 J6 的流动度比试样 J7 高 8 mm,抗压强度低 2.8 MPa。这是因为,两者在 200~800 μm 、800~1 600 μm 范围内的分级孔隙率相近,但试样 J7 在 10~200 μm 范围内的分级孔隙率比试样 J6 低 1.56%,小尺寸气孔(泡)的大量减少造成滚珠轴承作用弱化与砂浆密实程度提高,因而流动度较低且抗压强度较高。

2.4 气泡结构调控组分作用机理分析

2.4.1 增稠类调控组分的作用机理

环糊精属于增稠类调控组分,是一种具有空腔结构的环状低聚糖,其疏水空腔具有生成包络物的能力;同时,环糊精能够对液体的黏度进行调节。当

水泥砂浆中加入环糊精时,环糊精能够将十二烷基硫酸钠有效地包裹,在搅拌过程中其受剪切力作用不断地释放引气剂.由于引气剂进入水泥浆体的过程为一个持续缓慢的过程,因而产生大尺寸气泡概率大大降低.根据 Stokes 公式^[24],有

$$v_T = \frac{2gr^2(\rho_L - \rho_A)}{9\eta} \quad (1)$$

式中: v_T 为气泡上浮速度, $m \cdot s^{-1}$; g 为重力加速度, $9.8 m \cdot s^{-2}$; r 为气泡半径, m ; ρ_L 为液体密度, $kg \cdot m^{-3}$; ρ_A 为气泡密度, $kg \cdot m^{-3}$; η 为液相黏度, $Pa \cdot s$.

即气泡向上溢出的速率取决于水泥浆体的黏度与气泡的尺寸.由图 6 可以看出,环糊精增加了浆体的黏度,使得引入的气泡更为稳定,因此在水泥浆体硬化后能够产生孔径细小、分布均匀的孔隙,对砂浆流动度与抗压强度起到调节的作用.

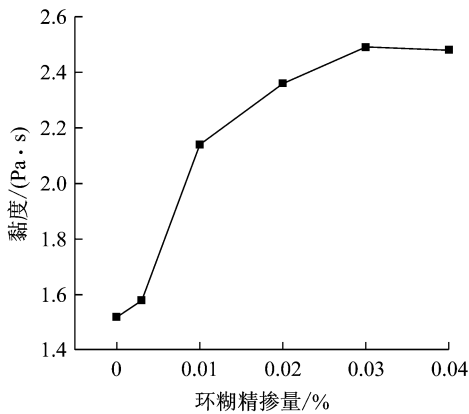


图 6 环糊精对砂浆黏度的影响

Fig.6 Effect of cyclodextrin on viscosity of mortar

2.4.2 抑泡类调控组分的作用机理

聚醚硅氧烷共聚物属于抑泡类调控组分,通过将聚醚链段引到硅氧烷链段上而制成,是一种具有调控、消泡作用的外加剂.公式(2)~(4)为表面活性物质与气-液界面作用时的透过系数 E 、铺展系数 S 与桥接系数 B ^[25-26].

$$E = \sigma_{AW} + \sigma_{OW} - \sigma_{OA} \quad (2)$$

$$S = \sigma_{AW} - \sigma_{OW} - \sigma_{OA} \quad (3)$$

$$B = \sigma_{AW}^2 + \sigma_{OW}^2 - \sigma_{OA}^2 \quad (4)$$

式中: σ_{AW} 为气-液(水泥浆体)界面的表面张力, $mN \cdot m^{-1}$; σ_{OW} 为油(聚醚硅氧烷共聚物)-液界面的表面张力, $mN \cdot m^{-1}$; σ_{OA} 为油-气界面的表面张力, $mN \cdot m^{-1}$.

表 4 为两相界面处表面张力参数,其中液相为十二烷基硫酸钠与饱和氢氧化钙溶液配制成质量分数为 1% 的溶液(模拟水泥浆体溶液环境).

表 4 表面张力参数

Tab.4 Surface and interfacial tension		
$\sigma_{AW}/(mN \cdot m^{-1})$	$\sigma_{OA}/(mN \cdot m^{-1})$	$\sigma_{OW}/(mN \cdot m^{-1})$
27.55	22.10	4.10

计算可知: $E > 0$ 且 $S < 0$, 这表明相比在液膜表面铺展从而降低局部表面张力的行为,聚醚硅氧烷共聚物分子更倾向于插入液膜.其在液膜中形成的桥梁处于不稳定状态($B < 0$),能够破坏液膜的稳定性,并在液膜断开后脱离接触处.当掺入少量聚醚硅氧烷共聚物时,其分子首先与半径较大的气泡接触,使液膜分裂,气相在浆体中重新形成小气泡.过量的掺入聚醚硅氧烷共聚物,其分子则在各尺寸气泡的液膜上大幅度取代引气剂分子,新界面膜强度不足以形成稳定的泡沫,气泡相互兼并变大并逸出浆体,此时明显降低引气剂的作用,消泡效果强烈,显著降低砂浆流动度并提高其抗压强度.

3 结论

(1) 不同类型的气泡结构调控组分对引气砂浆流动度与抗压强度具有不同的影响规律.随增稠类调控组分环糊精掺量的增加,引气砂浆的流动度与抗压强度逐渐升高.随抑泡类调控组分聚醚硅氧烷共聚物掺量的增加,引气砂浆的流动度先升后降,抗压强度不断提高.

(2) 增稠类调控组分环糊精能够提高砂浆液相黏度并与引气剂形成包络物,延缓引气的过程,并使气泡稳定在一个较小的尺寸.其对引气砂浆总孔隙率影响较小,掺量的增加有利于提高 $10 \sim 200 \mu m$ 孔径的孔隙率,降低 $800 \sim 1600 \mu m$ 孔径的孔隙率,使得孔隙平均孔径与气泡间距系数降低,比表面积增加,孔隙分布更加均匀,提高砂浆流动度与抗压强度.

(3) 抑泡类调控组分聚醚硅氧烷共聚物能够取代气泡液膜上的引气剂分子,降低液膜局部表面张力.其掺量小于 0.010% 时提高 $10 \sim 200 \mu m$ 孔径的孔隙率,降低 $800 \sim 1600 \mu m$ 孔径的孔隙率,使大气泡开裂形成细小气泡,掺量超过 0.010% 后气-液界面膜强度降低,不足以形成稳定气泡,此时引气砂浆总孔隙率降低,故砂浆流动度先增后减,抗压强度不断提高.

参考文献:

[1] ATAHAN H N, CARLOS C, CHAE S, et al. The morphology

- of entrained air voids in hardened cement paste generated with different anionic surfactants [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2008, 30(7):566.
- [2] CHATTERJI S. Freezing of air-entrained cement-based materials and specific actions of air-entraining agents [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2003, 25(7):759.
- [3] 朱蓓蓉, 杨全兵, 吴学礼, 等. 掺加 SJ-2 新型引气剂引气混凝土性能研究[J]. *建筑材料学报*, 1998, 1(2):88.
ZHU Beirong, YANG Quanbing, WU Xueli, *et al.* Study on performance of air-entrained concrete mixed with SJ-2 new air entraining agent[J]. *Journal of Building Materials*, 1998, 1(2):88.
- [4] DU L, FOLLIARD K J. Mechanisms of air entrainment in concrete [J]. *Cement and Concrete Research*, 2005, 35(8):1463.
- [5] KIM H K, JEON J H, LEE H K. Workability, and mechanical, acoustic and thermal properties of lightweight aggregate concrete with a high volume of entrained air[J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 29(4):193.
- [6] JIN S, ZHANG J, HAN S. Fractal analysis of relation between strength and pore structure of hardened mortar [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 135(3):1.
- [7] ŁAŻNIEWSKA-PIEKARCZYK B. The influence of selected new generation admixtures on the workability, air-voids parameters and frost-resistance of self compacting concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 31(1):310.
- [8] SIVA M, RAMAMURTHY K, DHAMODHARAN R. Sodium salt admixtures for enhancing the foaming characteristics of sodium lauryl sulphate[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2015, 57(3):133.
- [9] SATHYA N J, RAMAMURTHY K. Identification of set-accelerator for enhancing the productivity of foam concrete block manufacture[J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 37(3):144.
- [10] 陈建奎. 混凝土外加剂的原理与应用[M]. 北京:中国计划出版社, 1997.
CHEN Jiankui. The principle and application of concrete admixture[M]. Beijing: China Planning Press, 1997.
- [11] OUYANG X, GUO Y, QIU X. The feasibility of synthetic surfactant as an air entraining agent for the cement matrix[J]. *Construction and Building Materials*, 2008, 22(8):1774.
- [12] ŁAŻNIEWSKA-PIEKARCZYK B. The influence of admixtures type on the air-voids parameters of non-air-entrained and air-entrained high performance SCC[J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 41(4):109.
- [13] MENDES J C, MORO T K, FIGUEIREDO A S, *et al.* Mechanical, rheological and morphological analysis of cement-based composites with a new LAS-based air entraining agent [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 145 (S C):648.
- [14] BARFIELD M, GHAFOORI N. Air-entrained self-consolidating concrete: a study of admixture sources[J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 26(1):490.
- [15] OUCHI M, KAMESHIMA K, ATTACHAIYAWUTH A. Improvement in self-compacting properties of fresh concrete by eliminating large air bubbles using an antifoaming agent[J]. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2017, 15(1):10.
- [16] 张雄, 黄廷皓, 张永娟, 等. Image-Pro Plus 混凝土孔结构图像分析方法[J]. *建筑材料学报*, 2015, 18(1):177.
ZHANG Xiong, HUANG Tinghao, ZHANG Yongjuan, *et al.* Image-Pro plus analysis of pore structure of concrete [J]. *Journal of Building Materials*, 2015, 18(1):177.
- [17] 中国国家标准化管理委员会. 水泥胶砂流动度测定方法:GB/T 2419—2005[S]. 北京:中国标准出版社, 2005.
Standardization Administration of the People's Republic of China. Test method for fluidity of cement mortar; GB/T 2419—2005[S]. Beijing: China Standards Press, 2005.
- [18] 国家质量技术监督局. 水泥胶砂强度检验方法(ISO法):GB/T 17671—1999 [S]. 北京:中国标准出版社, 1999.
The State Bureau of Quality and Technical Supervision. Method of testing cements-determination of strength; GB/T 17671—1999[S]. Beijing: China Standards Press, 1999.
- [19] 中国国家标准化管理委员会. 混凝土外加剂匀质性试验方法:GB/T 8077—2012[S]. 北京:中国标准出版社, 2012.
Standardization Administration of the People's Republic of China. Method for testing uniformity of concrete admixture; GB/T 8077—2012[S]. Beijing: China Standards Press, 2012.
- [20] 张德思, 成秀珍. 硬化混凝土气孔参数的研究[J]. *西北工业大学学报*, 2002, 20(1):10.
ZHANG Desi, CHENG Xiuzhen. Study on the pore parameters of hardened concrete [J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2002, 20(1):10.
- [21] 高辉, 张永娟, 等. 筛余砂浆气孔结构对其 28 d 抗压强度的影响[J]. *建筑材料学报*, 2014, 17(3):378.
GAO Hui, ZHANG Xiong, ZHANG Yongjuan, *et al.* Effect of pore structure of sifted mortar on 28d compressive strength [J]. *Journal of Building Materials*, 2014, 17(3):378.
- [22] JIAO D, SHI C, YUAN Q, *et al.* Effect of constituents on rheological properties of fresh concrete—a review[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2017, 83(10):146.
- [23] 朱卫华, 印友法, 蒋林华, 等. 硅粉水泥石中微孔孔径分布及其对强度的影响[J]. *建筑材料学报*, 2004, 7(1):14.
ZHU Weihua, YIN Youfa, JIANG Linhua, *et al.* Study of micropore size distribution and its effect on the strength of silica fume cement paste[J]. *Journal of Building Materials*, 2004, 7(1):14.
- [24] 郭成举. 混凝土的物理和化学[M]. 北京:中国铁道出版社, 2004.
GUO Chengju. The physics and chemistry of concrete[M]. Beijing: China Railway Press, 2004.
- [25] DENKOV N D, COOPER P, MARTIN J. Mechanisms of action of mixed solid-liquid antifoams. 1. Dynamics of foam film rupture[J]. *Langmuir*, 1999, 15(24):8514.
- [26] LOBO L, WASAN D T. Mechanisms of aqueous foam stability in the presence of emulsified non-aqueous-phase liquids: structure and stability of the pseudoemulsion film [J]. *Langmuir*, 1993, 9(7):1668.