第 48 卷第 8 期　　硅　酸　盐　学　报　　Vol. 48，No. 8
2020 年 8 月　　JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY　　August，2020
http://www.gxyb.cbpt.cnki.net　　**DOI**：10.14062/j.issn.0454-5648.20200003

不同结构的引气剂对溶液及混凝土性能的影响

单广程[1]，陆　超[2]，陈　健[1]，高南箫[1]，乔　敏[1]，冉千平[1,3]，刘加平[1,3]

(1.高性能土木工程材料国家重点实验室，江苏苏博特新材料股份有限公司，南京 211103；
2.中国长江三峡集团有限公司，北京 100038；3.东南大学材料科学与工程学院，南京 211189)

摘　要：分别研究了不同疏水链长度(C8～C14)和不同阴离子基团(硫酸根、磺酸根和磷酸根)的表面活性剂的亲疏水性和离子基团对表面活性、泡沫行为和水泥砂浆中引气性能的影响规律。结果表明：表面活性剂分子的界面自组装行为越强，界面自由能降低越多，表面活性越强，其水溶液的泡沫性能越好，在水泥砂浆中的引气效果也越好。十二烷基硫酸钠具有最高的界面自组装排列密度和最低的界面自由能，在水溶液中具有最好的泡沫性能，在砂浆中具有最好的引气性能，同样具有最优的硬化砂浆气孔调节性能。

关键词：引气剂；界面自由能；表面活性；溶液泡沫；气孔
中图分类号：TU528　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2020)08–1256–07
网络出版时间：2020–06–23



Effect of Air Entraining Agent on Properties of Aqueous Solutions and Concretes

SHAN Guangcheng[1], LU *Chao*[2], *CHEN Jian*[1], *GAO Nanxiao*[1], *QIAO Min*[1], *RAN Qianping*[1,3], *LIU Jiaping*[1,3]
(1. State Key Laboratory of High Performance Civil Engineering Materials, Jiangsu Sobute New Materials Co. Ltd., Nanjing 211103, China; 2. China Three Gorges Corporation, Beijing 100038, China;
3. School of Material Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract: Alkyl sulfate surfactants with different hydrophobic chains (*i.e.*, C8−C14) and surfactants with different anionic groups (*i.e.*, sulfate, sulfonate and phosphate) were analyzed, and the effects of hydrophobicity and ionic groups on the surface activity, foam behavior and air-entraining performance in cement mortars were investigated. The results show that the more intense interfacial self-assembly behavior of surfactants can reduce the interfacial free energy and increase the surface activity, thus resulting in a greater foaming property of aqueous solutions and a higher air entraining performance in cement mortars. Sodium lauryl sulfate has the maximum interfacial self-assembly density, the minimum interfacial free energy, and the superior air entraining performance in aqueous solutions and cement mortars, as well as the optimum air-void adjustment performance of hardened cement mortars.

Keywords: air entraining agent; interfacial free energy; surface activity; foam; air-void

混凝土引气剂在新拌和硬化混凝土中能够引入适量微小、均匀、密闭的气泡，这些气泡类似滚珠，具有分散润湿作用，从而提高混凝土的和易性、耐久性和抗融冻性[1]。目前广泛使用的混凝土引气剂为一类具有特定亲水亲油平衡值(HLB)的表面活性剂，其常规分子结构为一端为疏水链段，另一端为离子基团的单链型两亲性分子。它们可以通过疏水链段之间的疏水作用在气液界面定向排列，从而降低水溶液的表面张力，使得气泡更加容易生成。按化学结构分，常用的混凝土引气剂主要包括改性松香磺酸盐、烷基磺酸盐类化合物[2]、烷基聚氧乙烯醚磺酸盐类化合物[3]、烷基聚氧乙烯醚类化合物[4]、

收稿日期：2020–01–02。　修订日期：2020–03–20。
基金项目：国家重点研发计划(2017YFB0310100)；国家自然科学基金杰出青年基金(51825203)；江苏省第十五批六大人才高峰项目(JZ-058)。
第一作者：单广程(1992—)，女，硕士，助理工程师。
通信作者：乔　敏(1984—)，男，博士，高级工程师。

Received date: 2020–01–02.　**Revised date:** 2020–03–20.
First author: SHAN Guangcheng (1992–), female. Master, Associate Engineer.
E-mail: shanguangcheng@cnjsjk.cn
Correspondent author: QIAO Min (1984–), male, Ph.D., Senior Engineer.
E-mail: qiaomin@cnjsjk.cn

烷基铵类化合物[5]等。但是现有对于混凝土引气剂的研究大都集中在对于混凝土含气量、强度以及耐久性等宏观性能的影响[6−7]，而对于引气剂的界面自组装行为、溶液泡沫行为和砂浆混凝土气孔调控行为等作用机制并不清晰。

本工作中研究了不同疏水链和不同阴离子基团的表面活性剂的界面自组装行为、溶液行为、泡沫行为以及对于混凝土气泡调控行为的影响规律。

1　实验

1.1　原料

表面活性剂包括 C_8SO_4Na、$C_{10}SO_4Na$、$C_{12}SO_4Na$、$C_{14}SO_4Na$、$C_{12}SO_3Na$ 和 $C_{12}PO_4Na_2$：Aldrich 产。聚羧酸高性能减水剂 PCA：江苏苏博特新材料股份有限公司产。标准硬水：$c(Ca^{2+})$+$c(Mg^{2+})$=1 500 mg/L，$m(Ca^{2+})$: $m(Mg^{2+})$=2.4:1(质量比)；水泥：P·Ⅱ52.5，符合 GB 175—2007，南京江南小野田公司产，其化学成分如表 1 所示。

表 1　水泥的化学组成和矿物组成

Table 1　Chemical composition and mineral composition of cement　　*w*/%

Chemical composition								Mineral composition			
SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	Fe_2O_3	SO_3	Na_2O_{eq}	Loss	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
21.1	6.16	64.8	1.94	4.41	2.52	0.48	2.59	52.50	21.40	6.40	13.10

w is mass fraction.

1.2　方法

1.2.1　溶液表面张力测试　　采用德国 Krüss 公司 K100 型全自动表面张力仪在 25 ℃测试所有表面活性剂的表面张力。分别在去离子水中制备不同浓度的样品溶液，从含有不同浓度的储备溶液中移取一定量的溶液制备 50 mL 不同摩尔分数的表面活性剂样品，每个样品平行测试 3 次，取中间有效值作为最终测试结果。

1.2.2　泡沫形态测试　　采用德国 Krüss 公司 DFA100 型动态泡沫分析仪在 25 ℃测量配制表面活性剂溶液的泡沫高度、泡沫图片及气泡尺寸分布。Krüss 泡沫仪参数设置：鼓泡 1.5 min，稳泡 18.5 min，共计 20 min，气体流量为 0.2 L/min。

1.2.3　砂浆性能表征方法　　依据 JGJ/T70—2009《建筑砂浆基本性能试验方法标准》对新拌砂浆的初始和 1 h 含气量进行测试。将 1 000 g 水泥，1 500 g 沙子，400 g 水(水灰比 0.4)，8.0 g 10% PCA 水溶液与不同的表面活性剂进行混合。首先慢搅 60 s，然后静置 90 s，再快搅 60 s，随后在 SANYO 砂浆含气量测定仪上测试含气量。

将新拌砂浆浆体倒入 10 cm×10 cm×10 cm 的立方体模具中，标准养护 28 d 后，将试块切割成厚度为 1~2 cm 的试件，选取不同位置的 3 块切片，经打磨、抛光、清洁并喷涂荧光剂，待干燥后放入日本 MIC-840-01 型硬化混凝土孔隙结构分析仪中测试硬化砂浆气孔参数(硬化砂浆含气量、气泡间距系数、平均气泡直径)。

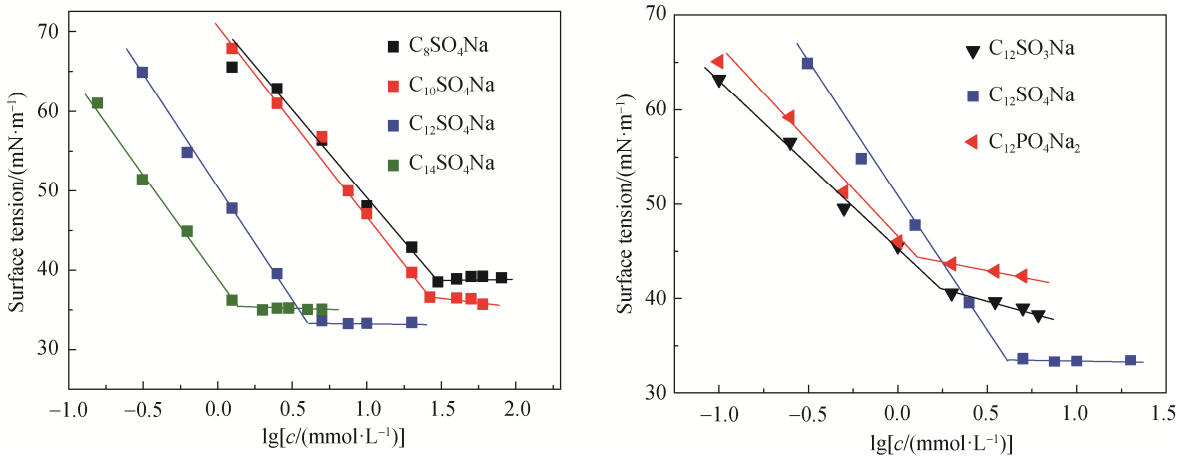
2　结果与讨论

2.1　表面活性剂的界面自组装行为

图 1 为不同浓度的表面活性剂溶液的表面张力。随着表面活性剂浓度的增加，所有表面活性剂溶液的表面张力均呈线性降低，当达到临界胶束浓度时，表面张力下降缓慢并逐渐达到最低值。由图 1a 可见，在 4 种不同碳链长度的阴离子表面活性剂中，$C_{12}SO_4Na$ 溶液的表面张力下降的比其他 3 种表面活性剂更快，并且有最小的表面张力值，说明 12 个碳链长度的阴离子表面活性剂有较高的表面活性。由图 1b 可知，在 3 种相同碳链长度不同阴离子基团的阴离子表面活性剂中，$C_{12}SO_4Na$ 比 $C_{12}SO_3Na$ 和 $C_{12}PO_4Na_2$ 溶液的表面张力值更低，说明硫酸根离子基团的表面活性剂比磺酸根和磷酸根表面活性剂的表面活性要高。

从表面活性曲线得出所有表面活性剂的 c_m(临界胶束浓度)和 γ_c(c_m 时的表面张力)的值[8−9]，如表 2 所示。烷基硫酸钠表面活性剂的 c_m 值随着碳链长度的增加而减小，这是由于碳链长度增加，表面活性剂的疏水性增强，表面活性分子在溶液中越容易形成胶束，临界胶束浓度就会越小。γ_c 代表表面活性剂降低表面张力的能力，$C_{12}SO_4Na$ 的 γ_c 值最小，C_8SO_4Na 的 γ_c 值最大，说明 $C_{12}SO_4Na$ 有更好的降低水的表面张力的能力，有更高的表面活性。相同碳链长度(碳数均为 12)的阴离子表面活性剂中，$C_{12}SO_4Na$ 的 γ_c 值最小，$C_{12}SO_3Na$ 次之，$C_{12}PO_4Na_2$ 的 γ_c 值最大，它们降低水的表面张力的能力从大到小为：$C_{12}SO_4Na$，$C_{12}SO_3Na$，$C_{12}PO_4Na_2$。以上结果说明，$C_{12}SO_4Na$ 的表面活性高于其他 3 种碳链长度的烷基硫酸钠表面活性剂，且高于相同碳链长度的烷基磺酸钠和烷基磷酸钠表面活性剂。

表 2 还列出了表面活性剂的其他 3 种界面自组装行为的重要参数，包括表面活性剂分子在单位面



(a) Sodium alkyl sulfate surfactants (b) Anionic surfactants

c is concentration of surfactant.

图 1 不同疏水性的烷基硫酸钠表面活性剂和不同离子基团的阴离子表面活性剂的表面张力曲线

Fig. 1 Surface tension curves of sodium alkyl sulfate surfactants with different hydrophobic and anionic surfactants with different charge types

积界面上的吸附密度 Γ_{max}，单个表面活性剂分子所占据的界面面积 A_{min} 和表面活性剂在界面自组装排列形成界面自由能 G_{inter}。它们的计算模型如式(1)、式(2)[10–12]和式(3)[13–14]所示，

$$\Gamma_{max}=-\frac{1}{nRT}\left(\frac{\partial\gamma}{\partial\lg c}\right) \tag{1}$$

$$A_{min}=\frac{1}{N_A\Gamma_{max}} \tag{2}$$

$$\Delta G_{ads}=\Delta G_{mic}-\frac{\pi_c}{\Gamma_{max}}=\ln X_c-\frac{\pi_c}{\Gamma_{max}} \tag{3}$$

式中：R 为理想气体常数；T 为温度(298 K)；N_A 为 Avogadro's 常数；$\frac{\partial\gamma}{\partial\lg c}$ 为在低于 c_m 时表面张力曲线的斜率；n 为单个表面活性剂分子能分解出的单元数量(n=2)；X_c 为表面活性剂在 c_m 时的摩尔分数；π_c 为表面活性剂在 c_m 时的表面张力的降低值，$\pi_c=\gamma_0-\gamma_c$，γ_0 为纯水的表面张力(72 mN·m^{-1})，γ_c 为表面活性剂在 c_m 时的表面张力。

由于 Γ_{max} 和 A_{min} 呈反比，因此表面活性剂的 A_{min} 的变化趋势与 Γ_{max} 相反。由表 2 可知，在不同疏水链长度的烷基硫酸钠表面活性剂中，随着疏水链长度从 8 增加到 12，表面活性剂分子在界面的自组装堆积密度 Γ_{max} 呈现先增加后减小的趋势，表面活性剂分子所占据的界面面积 A_{min} 呈现先减小后增加的趋势，$C_{12}SO_4Na$ 有最大的 Γ_{max} 值和最小的 A_{min} 值，同样 $C_{12}SO_4Na$ 的分子自组装后的界面自由能 G_{inter} 也最小，这说明 $C_{12}SO_4Na$ 的界面的稳定性最佳。在不同阴离子基团的表面活性剂中，$C_{12}SO_4Na$ 相比 $C_{12}SO_3Na$ 和 $C_{12}PO_4Na_2$ 具有更高的界面分子排列密度和更低的界面自由能。结果说明，与其他 3 种碳链长度的烷基硫酸钠表面活性剂和烷基磺酸钠和烷基磷酸钠表面活性剂相比，$C_{12}SO_4Na$ 分子在气液界面聚集排列的更紧密，界面自由能更低。

2.2 泡沫行为

继续研究不同疏水性及不同离子基团的表面活性剂的泡沫行为，图 2 为所有样品水溶液的泡沫高度变化曲线。由图 2 可见，所有样品的泡沫高度随着鼓泡时间的延长而快速升高到最大值，随后在稳泡时间内出现不同程度的降低。由图 2a 可见，泡沫高度随着烷基硫酸钠阴离子表面活性剂的疏水链长度的增加而呈现先增加后减小的趋势，当疏水链长度为 12 时，最大泡沫高度最高，并且泡沫在 10 min 内保持较好的稳定性，说明 $C_{12}SO_4Na$ 有最好的起泡和稳泡性能。而 $C_{14}SO_4Na$ 水溶液的最大泡沫高度略小于 $C_{12}SO_4Na$ 水溶液，C_8SO_4Na 和 $C_{10}SO_4Na$ 水溶液的泡沫高度更低且泡沫稳泡性较差。由图 2b 可见，在不同阴离子基团的表面活性剂中，$C_{12}SO_4Na$ 相比 $C_{12}SO_3Na$ 和 $C_{12}PO_4Na_2$ 具有最高的泡沫高度和泡沫稳定性。

图 3 为所有样品在不同时刻的气泡数量。由图 3a 可见，增加烷基硫酸钠表面活性剂的疏水链长度时，气泡数量呈现先增加后减小的趋势，当

表 2　不同疏水性的烷基硫酸钠表面活性剂和不同离子基团的阴离子表面活性剂的表面活性和界面自组装参数

Table 2　Important surface activity parameters of alkyl sulfate compounds with different hydrophobic and anionic surfactants with different charge types

Surfactant	c_m/(mmol·L^{-1})	γ_c/(mN·m^{-1})	$\Gamma_{max}\times10^6$/(mol·m^{-2})	A_{min}/(nm^2)	G_{inter}/(kJ·mol^{-1})
C_8SO_4Na	39.80	35.50	4.00	0.415 7	8.88
$C_{10}SO_4Na$	30.90	38.90	4.00	0.413 6	9.67
$C_{12}SO_4Na$	3.88	33.46	6.20	0.267 8	5.40
$C_{14}SO_4Na$	1.51	34.46	5.30	0.312 0	6.47
$C_{12}SO_3Na$	1.67	40.52	3.95	0.419 9	10.24
$C_{12}PO_4Na_2$	1.23	44.67	3.96	0.419 0	11.27

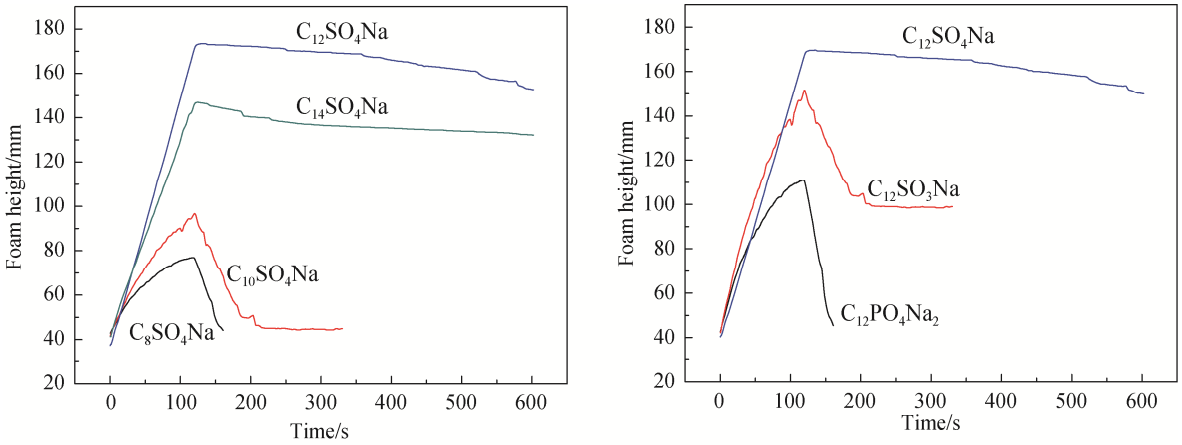


图 2　不同疏水性的烷基硫酸钠表面活性剂(a)和不同离子基团的阴离子表面活性剂(b)的泡沫高度曲线

Fig. 2　Changes in the foam heights of sodium alkyl sulfate surfactants with different hydrophobic (a) and anionic surfactants with different charge types (b)

疏水链长度为 12 时，$C_{12}SO_4Na$ 溶液在不同时刻引入的气泡数量最多。在 12 min 时，C_8SO_4Na 和 $C_{10}SO_4Na$ 的气泡完全破灭。由图 3b 可见，$C_{12}SO_4Na$ 水溶液引入的气泡数量明显多于磺酸钠和磷酸钠阴离子表面活性剂。

图 4 为所有样品在不同时刻的气泡尺寸。增加烷基硫酸钠表面活性剂的疏水链长度，表面活性剂引入的气泡尺寸呈现先减小后增加的趋势，$C_{12}SO_4Na$ 水溶液引入的气泡尺寸最小，$C_{14}SO_4Na$ 次之，$C_{10}SO_4Na$ 和 C_8SO_4Na 水溶液引入的气泡尺寸最大。$C_{12}SO_4Na$ 水溶液引入的气泡尺寸明显大于其他 2 种阴离子表面活性剂。气泡数量越多尺寸越小，泡沫越细密，稳定性越好。以上结果进一步说明，具有 12 碳链长度的烷基硫酸钠相比其他表面活性剂具有更好的泡沫稳定性。

为了更直观地理解气泡的形状及尺寸，图 5 列出了所有样品在 4 min 时的泡沫形态。从图 5 可以看出，$C_{12}SO_4Na$ 水溶液引入的气泡多且细密，$C_{14}SO_4Na$，$C_{10}SO_4Na$，C_8SO_4Na 水溶液引入的气泡数量相对较少且尺寸较大，$C_{12}SO_3Na$ 和 $C_{12}PO_4Na_2$ 水溶液引入的气泡比 $C_{12}SO_4Na$ 的大且少。说明 $C_{12}SO_4Na$ 有最好的泡沫起泡性和泡沫稳定性，$C_{10}SO_4Na$ 和 C_8SO_4Na 有较差的泡沫起泡性及泡沫稳定性。泡沫高度及其稳定性的结论与表面活性和界面自组装行为的结果一致，说明在分子结构相似的条件下，适宜的亲疏水性的表面活性剂具有较高的界面自组装排列密度和较低的界面自由能，同样具有较好的泡沫性能。

2.3　水泥砂浆性能

继续探究了两种体系的阴离子表面活性剂作为引气剂在水泥砂浆中的引气性能。砂浆含气量的测试结果如图 6 所示。由图 6a 可见，增加烷基硫酸钠表面活性剂的疏水链长度时，砂浆初始和硬化含气量先增加后减小，而当碳链长度为 12 时的初始和硬化含气量最高，说明 $C_{12}SO_4Na$ 具有最

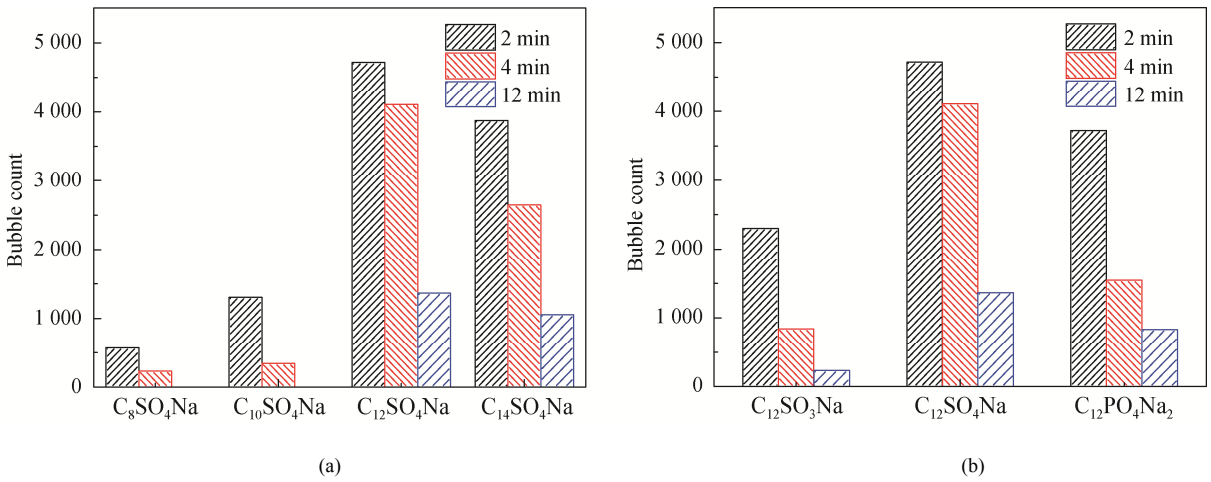


图 3 不同疏水性的烷基硫酸钠表面活性剂(a)和不同离子基团的阴离子表面活性剂(b)的泡沫数量

Fig. 3 Bubble counts in a unit area of the solutions of sodium alkyl sulfate surfactants with different hydrophobic (a) and anionic surfactants with different charge types (b)

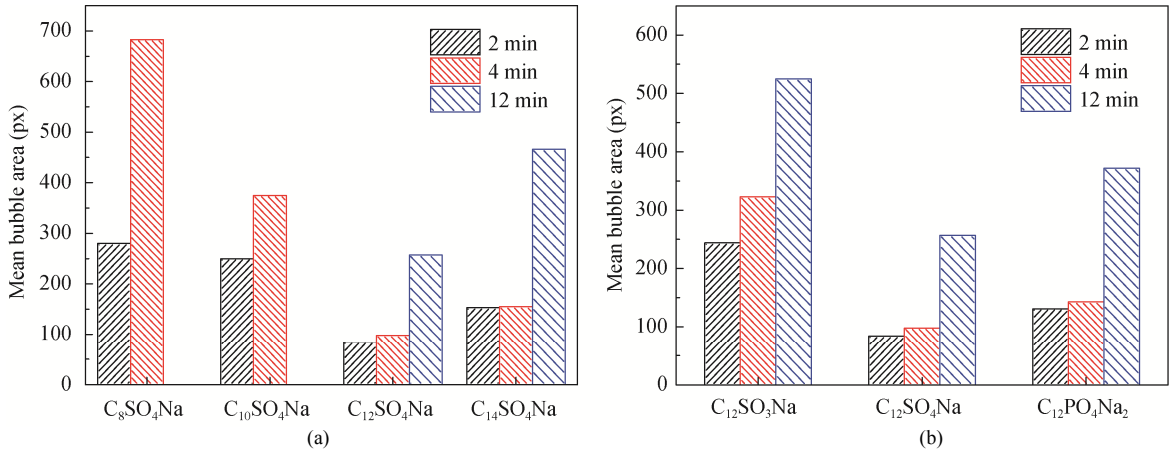


图 4 不同烷基硫酸钠表面活性剂(a)和不同阴离子表面活性剂(b)的泡沫尺寸

Fig. 4 Mean bubble areas in a unit area of the solutions of sodium alkyl sulfate surfactants (a) and anionic surfactants (b)

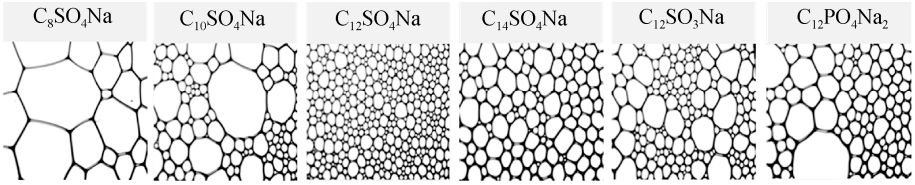
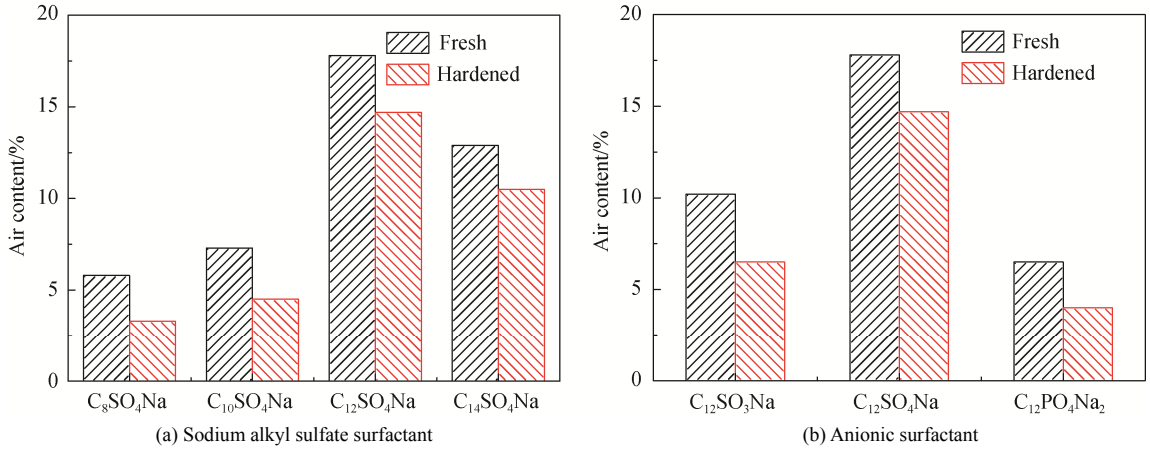


图 5 表面活性剂样品在 4 min 时的泡沫形态

Fig. 5 Bubble photographs of the sample solutions at 4 min

佳的砂浆引气性能，砂浆引气性能从优到差依次为 $C_{12}SO_4Na$，$C_{14}SO_4Na$，$C_{10}SO_4Na$，C_8SO_4Na。由图 6b 可见，在相同疏水链不同阴离子基团的表面活性剂中，由于 $C_{12}SO_4Na$ 中的硫酸基团比 $C_{12}SO_3Na$ 中的磺酸基团的电负性强，亲水性好，所以引气性能好。$C_{12}PO_4Na_2$ 中的磷酸基团容易与二价离子(如 Ca^{2+})产生强烈的络合作用，致使表面活性剂的电性减弱，亲水性下降，所以引气性能减弱。因此，$C_{12}SO_4Na$ 在砂浆中有最优的引气性能，$C_{12}SO_3Na$ 次之，$C_{12}PO_4Na_2$ 的引气性能最差。这一结论与泡沫性能的规律一致。以上试验结果表明，分子结构类似时，合适的亲水性在表面活性剂中起着关键作用。表面活性剂的溶液自组装行为同泡沫性能和砂浆引气性能之间存在明确的关联规律，即表面活性剂分子的界面自组装使得界面自由能降低，导致其水溶液的泡沫性能变好，在砂浆中的引气效果也越好。

图 7 为所有样品试件的硬化气孔参数。由图 7a 可见，增加烷基硫酸钠表面活性剂的疏水链长度时，试件的硬化平均气泡直径和气泡间距系数呈现先减

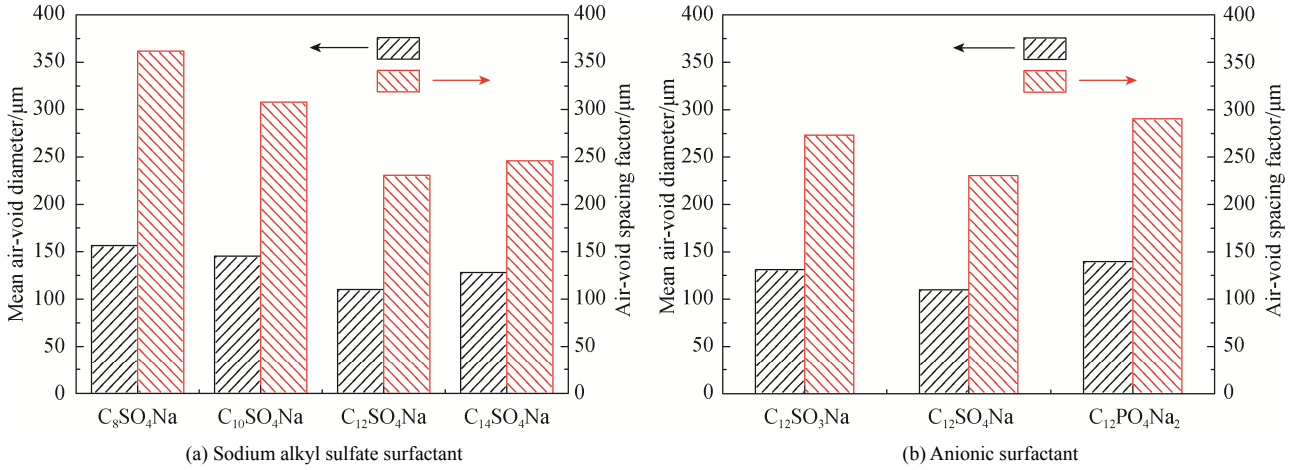


(a) Sodium alkyl sulfate surfactant　　(b) Anionic surfactant

W/C ratio=0.4; Dosage of surfactant: 0.04 % (in mass) of the cement.

图 6　不同表面活性剂的水泥砂浆含气量

Fig. 6　Air contents of the fresh and hardened cement mortars of different surfactants



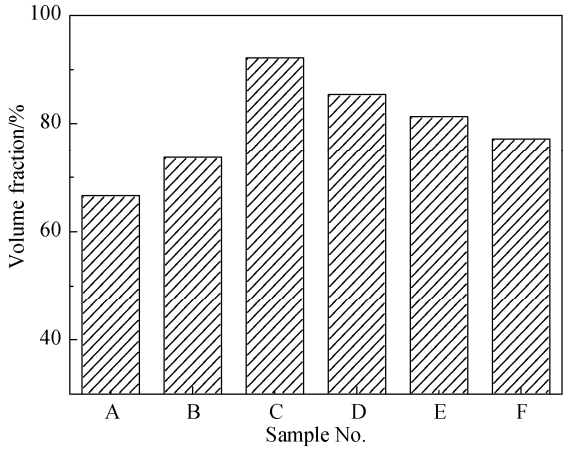
(a) Sodium alkyl sulfate surfactant　　(b) Anionic surfactant

图 7　不同表面活性剂的硬化平均气泡直径和气泡间距系数

Fig. 7　Mean air-void diameters and air-void spacing factors of the hardened cement mortars of different surfactants

小后增加的趋势，掺有 $C_{12}SO_4Na$ 的试件的平均气泡直径和气泡间距系数最小。由图 7b 可见，掺有 $C_{12}SO_4Na$ 的试件的平均气泡直径和气泡间距系数均比烷基磺酸钠和烷基磷酸钠要小。结果说明，$C_{12}SO_4Na$ 的硬化试件引入的硬化气孔最多且直径最小，其他表面活性剂的气孔大小和数量的变化规律与其表面活性和溶液的泡沫性能的变化规律一致。在硬化混凝土中，小于 200 μm 的细小且均匀的气孔不但不会影响混凝土强度，还有益于提高混凝土的工作性和耐久性[15]。图 8 列出了所有试件 0~200 μm 的气孔所占比例。由图 8 可以看出，增加烷基硫酸钠阴离子表面活性剂的疏水链长度时，样品试件的 0~200 μm 有效气孔所占比例先增加后减小，其中 $C_{12}SO_4Na$ 试件引入的 0~200 μm 有效气孔所占比例最高。同样，$C_{12}SO_4Na$ 试件在 0~200 μm 的微小气泡所占比例高于磺酸钠和磷酸钠阴离子引气剂。

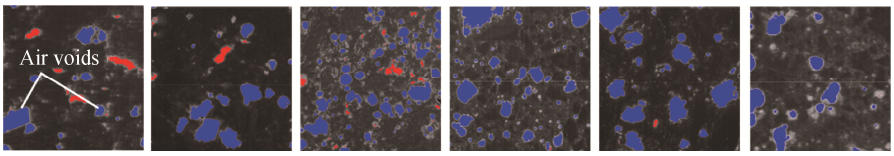
图 9 为硬化砂浆试件的气孔分布。从图 9 可以明显看出，表面活性、泡沫性能和砂浆引气性能越



A: C_8SO_4Na; B:$C_{10}SO_4Na$; C:$C_{12}SO_4Na$; D:$C_{14}SO_4Na$; E:$C_{12}SO_3Na$; F: $C_{12}PO_4Na_2$

图 8　表面活性剂的 0~200 μm 气孔的含量

Fig. 8　Air voids distribution (0–200 μm) of surfactants



(a) A (b) B (c) C (d) D (e) E (f) F

图 9 不同疏水性的烷基硫酸钠表面活性剂和不同离子基团的阴离子表面活性剂的硬化砂浆试件的气孔分布图

Fig. 9 Air-void images of the hardened cement mortar specimens of sodium alkyl sulfate surfactants with different hydrophobic and anionic surfactants with different charge types

强的表面活性剂引入的硬化气孔越细密均匀，该结果与硬化气孔参数的结论是一致的。

3 结论

1) 探明了混凝土气泡调控材料的溶液行为与作用机理。表面活性剂的界面自组装行为、泡沫性能和水泥砂浆引气性能之间存在明确的关联性规律：表面活性剂分子的界面自组装行为越强使界面自由能降低越多，表面活性越强，其水溶液的泡沫性能越好，在水泥砂浆中的引气效果也越好。

2) 十二烷基硫酸钠具有较高的界面自组装排列密度和较低的界面自由能，同样具有较好的溶液和砂浆引气性能。4 种不同碳链长度的烷基硫酸钠阴离子表面活性剂的表面活性、泡沫起泡和稳泡性、砂浆引气性能的强弱顺序为：$C_{12}SO_4Na$，$C_{14}SO_4Na$，$C_{10}SO_4Na$，C_8SO_4Na。

3) 相同碳链长度不同阴离子离团的表面活性剂中，表面活性、泡沫起泡和稳泡性、砂浆引气性能的强弱顺序为：$C_{12}SO_4Na$，$C_{12}SO_3Na$，$C_{12}PO_4Na_2$。

参考文献:

[1] 杨勇, 冉千平, 毛永琳, 等. 高性能混凝土引气剂的制备及其性能研究[J]. 新型建筑材料, 2013(4): 65–69.
YANG Y, RAN Q P, MAO Y L, et al. New Build Mater(in Chinese), 2013(4): 65–69.

[2] SOUZA M T, MAYKOT C K, ARAÚJO A C Z, et al. Electrolytes' influence on foamability and foam stability of cement suspensions[J]. Constr Build Mater, 2017, 157: 363–371.

[3] RODRIGUES F A, JOEKES I. Water reducing agents of low-molecular-weight- suppression of air entrapment and slump loss by addition of an organic-solvent[J]. Cem Concr Res, 1994, 24: 987–992.

[4] HE Z M, LIU J Z, WANG T H. Influence of air entraining agent on performance of inorganic thermal insulating mortar[J]. Appl Mech Mater, 2011, 71/78: 490–493.

[5] WANG X P, YE J D, LI X, et al. Production of in-situ macropores in an injectable calcium phosphate cement by introduction of cetyltrimethyl ammonium bromide[J]. J Mater Sci-Mater, 2008, 19: 3221–3225.

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

[7] CUI F K, SHANG H S, ZHAO T J, et al. Mechanical and failure criteria of air-entrained concrete under triaxial compression load after rapid freeze-thaw cycles[J]. Adv Mater Sci Eng, 2017, 1: 1–8.

[8] MENGER F M, KEIPER J S, AZOV V. Gemini surfactants with acetylenic spacers[J]. Langmuir, 2000, 16: 2062–2067.

[9] TEHRANI-BAGHA A R, HOLMBERG K, VAN GINKEL C G, et al. Cationic gemini surfactants with cleavable spacer: Chemical hydrolysis, biodegradation, and toxicity[J]. Colloid Interface Sci, 2015, 449: 72–79.

[10] ZHOU Q, ROSEN M J. Molecular interactions of surfactants in mixed monolayers at the air/aqueous solution interface and in mixed micelles in aqueous media: The regular solution approach[J]. Langmuir, 2003, 19: 4555–4562.

[11] KINSI M, NAOKO A, MTASUKI H, et al. Thermodynamic studies on adsorption at interfaces: VII. Adsorption and micelle formation of binary surfactant mixtures[J]. J Colloid Interf Sci, 1990, 139: 188–197.

[12] GALGANO P D, EL SEOUD O A. Surface active ionic liquids: study of the micellar properties of 1-(1-alkyl)-3-ethylimidazolium chlorides and comparison with structurally related surfactants[J]. J Colloid Interf Sci, 2011, 361: 186–194.

[13] SUGIHARA G, MIYAZONO A M, NAGADOME S, et al. Adsorption and micelle formation of mixed surfactant systems in water: A combination of cationic gemini-type surfactant with mega-10[J]. J Oleo Sci, 2003, 52: 449–461.

[14] BHADANI A, SINGH S. Novel geminipyridinium surfactants: Synthesis and study of their surface activity, DNA binding, and cytotoxicity[J]. Langmuir, 2009, 25: 11703–11712.

[15] CHEN J, QIAO M, GAO N X, et al. Cationic oligomeric surfactants as novel air entraining agents for concrete[J]. Colloids Surf A, 2018, 538: 686–693.