文章编号:1007-9629(2023)07-0746-09

碱激发泡沫混凝土早期稳定行为及机理

党钧陶^{1,2}, 汤小松², 肖建庄^{1,*}, 段珍华¹, 韩爱红²

(1. 同济大学 土木工程学院,上海 200092;

2.华北水利水电大学 土木与交通学院,河南 郑州 450045)

摘要:研究了不同种类泡沫在碱性环境和碱激发泡沫混凝土中的早期稳定时变行为.结果表明:相比 植物型、动物蛋白型发泡剂,复合型发泡剂在碱性环境中具有更好的稳定能力;随着激发剂模数和碱 当量的增加,碱激发泡沫混凝土的沉降距逐渐增大,沉降时间逐渐缩短,沉降速率倍增;碱激发泡沫 混凝土的早期稳定性是由泡沫本身的稳定性和碱激发混凝土浆体的协同作用所决定,在激发剂模数 1.0、碱当量3%、矿渣与粉煤灰质量比为8:2和复合型发泡剂发泡的条件下,可以制备出具有良好早 期稳定性的碱激发泡沫混凝土.

关键词:碱激发泡沫混凝土;碱激发剂模数;碱当量;发泡剂;稳定性 中图分类号:TU528.01 文献标志码:A doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2023.07.007

Early Stability Behavior and Mechanism of Alkali-Activated Foamed Concrete

DANG Juntao^{1,2}, TANG Xiaosong², XIAO Jianzhuang^{1,*}, DUAN Zhenhua¹, HAN Aihong²

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. School of Civil Engineering and Communication, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China)

Abstract : The early stability behaviors with time-varying of various foams in alkaline environment and alkali-activated foamed concrete were studied. The results show that compared with plant foam agent and animal protein foam agent, compound foam agent has better stability in alkaline environment. With the increase of alkali activator modulus and alkali equivalent, the settlement distance increases gradually, and the settlement time of alkali-activated foamed concrete shortens gradually, the settlement rate accelerates rapidly. The early stability of alkali-activated foamed concrete is determined by the synergistic effect of foam stability and alkali-activated concrete paste. Under the condition of activator modulus of 1.0, alkali equivalent of 3%, mass ratio of slag to fly ash of 8 to 2 and compound foam agent, alkali-activated foamed concrete; alkali activator modulus; alkali equivalent; foam agent; stability

泡沫混凝土是通过向由水泥基胶凝材料等组成 的料浆中引入气泡后,再经浇筑成型、养护而成的一 种特殊混凝土材料.其内部存在大量的封闭孔洞,具 有保温隔热、耐火隔音等优点,同时还具有良好的强 度以及耐久性能,是一种节能型建筑材料.泡沫是制 备泡沫混凝土的重要组成部分,而泡沫的稳定性是 决定泡沫混凝土早期施工性能和硬化成型后力学、 隔热和吸声性能的关键^[1].研究发现,在重力作用下 泡沫会发生迁移一融合一排液行为,使泡沫液膜变 薄,稳定性降低.因此,综合评价泡沫和泡沫混凝土

收稿日期:2022-08-20;修订日期:2022-10-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52208247);河南省重点研发与推广专项(科技攻关)项目(222102320112);河南省高等学校重点科 研项目(22A560013)

第一作者:党钧陶(1990—),男,河南郑州人,同济大学博士后,博士.E-mail:Dang_juntao@tongji.edu.cn 通讯作者:肖建庄(1968—),男,山东沂南人,同济大学教授,博士生导师,博士.E-mail:jzx@tongji.edu.cn

的稳定性至关重要.

碱激发泡沫混凝土是在碱激发胶凝材料浆体中 掺入泡沫混合形成的无机轻质多孔混凝土,具有低 碳、早强和耐腐蚀等优点.与微碱性的普通硅酸盐水 泥浆体相比,碱激发胶凝材料浆体所使用的激发剂多 为NaOH、水玻璃等强碱性物质.因此,泡沫在水泥基 浆体和碱矿渣-粉煤灰基浆体中的稳定性存在差异^[2].

本文首先在碱性稀释液中研究不同种类发泡剂 的泌水量和沉降距随时间的演化规律,并通过计算 泌水率来定量分析泡沫的稳定能力;然后,研究碱激 发剂模数和碱当量的变化对碱激发泡沫混凝土浆体 的临界沉降距、临界沉降时间和平均沉降速率的影 响,进一步评价碱激发泡沫混凝土浆体中泡沫的稳 定性,为实现其早期稳定行为的可知、可控提供重要 的试验基础.

1 试验

1.1 原材料

试验所使用的发泡剂各项性能均符合 JC/T 2199—2013《泡沫混凝土用泡沫剂》的相关规定,其 中P类发泡剂为植物型发泡剂,主要成分为植物表面 活性剂,由含氮的有机氨衍生物组成;A类发泡剂为 生物蛋白质类发泡剂,由动物蛋白加入化工原料水 解而成;C类发泡剂为复合型发泡剂,由蛋白质、表面 活性剂和纤维素醚复配而成.激发剂由水玻璃和 NaOH按一定的比例配制而成,水玻璃中SiO₂和 Na₂O的质量分数分别为26.5%和8.5%,NaOH为分 析纯.试验用水为自来水.矿渣(密度为2800 kg/m³, 比表面积为410 m²/kg)和粉煤灰(密度为2600 kg/m³, 比表面积为420 m²/kg)为碱激发材料的前驱体,通 过X射线荧光分析仪(XRF)测定其化学组成(质量 分数,文中涉及的组成、含量、水固比等除特别说明 外均为质量分数或质量比)如表1所示.

1.2 配合比

1.2.1 碱性环境下泡沫的配合比

制备模数(M,SiO₂与Na₂O的摩尔比)分别为 1.0、1.2、1.4的激发剂,碱当量(Na₂O占稀释液质量 的百分比)分别为3%、4%、5%的碱性稀释液,发泡 剂稀释倍数为30倍,以水溶液稀释为基准组.碱性 环境下泡沫的配合比如表2所示.其中:P-0表示植 物型发泡剂在水溶液中稀释制备的基准泡沫组; P-1.0-3%表示植物型发泡剂在激发剂模数为1.0, 碱当量为3%的稀释液中进行稀释制备的泡沫组, 其余以此类推.

表1 矿渣和粉煤灰的化学组成 Table 1 Chemical compositions of slag and fly ash

											w/%
Material	SiO_2	$\mathrm{Al}_2\mathrm{O}_3$	CaO	$\mathrm{Fe_2O_3}$	MgO	TiO_2	Na_2O	K_2O	MnO	$\mathrm{P_2O_5}$	IL
Slag	32.72	15.28	39.48	1.40	7.28	1.41	0.34	0.33	0.30	0.07	1.38
Fly ash	64.08	19.94	4.98	4.66	1.65	1.39	0.44	0.86	0.11	0.54	1.19

表2 碱性环境下泡沫的配合比

					g
Sample	Foam agent(P,A,C)	Water	Sodium silicate	NaOH	
P-0, A-0, C-0	66.67	2 000.00	0	0	
P-1.0-3%, A-1.0-3%, C-1.0-3%	66.67	1 727.50	219.11	53.39	
P-1. 2-3%, A-1. 2-3%, C-1. 2-3%	66.67	1 688.48	262.93	48.58	
P-1.4-3%, A-1.4-3%, C-1.4-3%	66.67	1 649.47	306.76	43.78	
C-1.0-4%	66.67	1 636.67	292.15	71.18	
C-1.0-5%	66.67	1 545.83	365.19	88.98	

1.2.2 碱激发泡沫混凝土的配合比

制备激发剂模数分别为1.0、1.2、1.4,碱当量 (Na₂O占胶凝材料的质量百分比)分别为3%、4%、 5%,矿渣与粉煤灰的质量比为8:2,水固比为0.35, 泡沫掺量为总体积的70%,干密度等级为A06(试验 干密度为645 kg/m³)的碱激发泡沫混凝土.以激发 剂模数1.0,碱当量3%为基准组,其详细配合比如表 3所示.其中:FC-1.0-3%表示制备的碱激发泡沫混凝 土的激发剂模数为1.0,碱当量为3%,其余以此类推.

1.3 试验方法

1.3.1 试样制备

首先,提前将NaOH、水玻璃和水搅拌均匀制成 不同碱激发剂模数和碱当量的碱性稀释液,将碱性 稀释液和发泡剂混合搅拌制成发泡液;然后,使用发

表 3 碱激发泡沫混凝土的配合比 Table 3 Mix proportions of alkali-activated foamed concretes

Sample	m(slag)/g	m(fly ash)/g	<i>m</i> (sodium silicate)/g	m(NaOH)/g	<i>m</i> (water)/g	Foam volume/L
FC-1.0-3%	2 643.92	660.98	362.07	88.22	989.65	5.86
FC-1.2-3%	2 629.51	657.38	432.12	79.84	944.12	5.86
FC-1.4-3%	2 615.25	653.81	501.40	71.55	899.09	5.87
FC-1.0-4%	2 595.69	648.92	473.96	115.48	916.93	5.86
FC-1.0-5%	2 549.19	673.30	581.83	141.77	846.81	5.85

泡机制备出碱性泡沫,将泡沫完全填满玻璃烧杯,用 平口刀刮平顶部多余泡沫,常温静置,开展碱性泡沫 的稳定性测试.

碱激发泡沫混凝土制备方法如下所示:首先,将 矿渣和粉煤灰倒入砂浆搅拌机中搅拌120s,获得均 匀的干粉料;然后,加入预配的碱性激发剂和减水剂 搅拌120s,静置30s,再搅拌120s,获得流态的碱激 发净浆;最后,掺入相应体积的泡沫搅拌60~120s, 使净浆与泡沫充分混合均匀,制备出碱激发泡沫混 凝土浆体,对其进行稳定性试验.

1.3.2 性能测试

根据JG/T 266—2011《泡沫混凝土》,发泡倍数 (N)和气泡群密度(ρ)为:

$$N = \frac{V_1}{(m_2 - m_1)/\rho_{\rm p}} \tag{1}$$

$$\rho = \frac{m_2 - m_1}{V_1} \tag{2}$$

式中: V_1 为玻璃容器的容积, $L;m_1$ 和 m_2 分别为玻璃容器的质量和装满泡沫后的质量, $g;\rho_p$ 为稀释后的泡沫液密度,g/L.

用游标卡尺测量泡沫顶部到烧杯口的距离,即 为泡沫在相应时间(t₁)的沉降距(H).同时,在对应时 刻测量泌出溶液的体积,即为泡沫在对应时刻的泌 水量(B).测得泡沫的完全泌水量(B₀),则每一时刻的 泌水率(R)按照R=B/B₀计算.

碱激发泡沫混凝土搅拌均匀后,立刻注入直径为35.7 mm的量筒中,浇筑高度为250 mm,浆体总体积为250 mL.沉降试验过程中,保持激光位移传感器(BX-LV100,精度0.001 mm)发出的激光点处于浆体表面中央.记录指示灯读数从开始测量到基本无变化这一段时间内的临界沉降距(L)和临界沉降时间(t),平均沉降速率(v)按照v=L/t计算.

2 结果和讨论

2.1 碱性环境下泡沫的稳定性

- 2.1.1 激发剂模数对发泡倍数、气泡群密度、沉降距和泌水率的影响
 - 图1为激发剂模数对发泡倍数的影响.由图1

可见:

(1)在水溶液环境下,3种发泡剂的发泡倍数 在15~30之间,其中C类发泡剂的起泡能力较强. 在碱性环境下,激发剂模数对P类和A类发泡剂的 发泡倍数影响较小.这是由于P类和A类发泡剂稀 释液中的表面活性分子在激发剂模数为1.0时已经 达到了临界胶束浓度,减少了水分子与表面活性剂 分子之间亲和的可能性^[3],致使其发泡倍数变化 不大.

(2)激发剂模数对C类发泡剂的发泡倍数影响显著.随着激发剂模数的增加,C类发泡剂的发泡 倍数逐渐下降,可以归因于碱性激发剂降低了稀释 液中的活性分子浓度,使活性分子的数量减少且间 距较大^[3],造成表面张力梯度值的降低,削弱了泡 沫的自修复功能,使得变薄的液膜区域难以恢复至 原有状态,从而导致发泡倍数显著降低.当激发剂 模数增加至1.4时,C类发泡剂稀释液中的表面活 性分子达到临界胶束浓度,致使发泡倍数相差 不大.







激发剂模数对气泡群密度的影响如图2所示.由 图2可见:

(1)相比于未掺入激发剂的基准组,掺入激发剂 增加了泡沫的气泡群密度.原因在于水玻璃调配稀 释液的密度大于水溶液调配稀释液的密度,导致其 产生泡沫的气泡群密度增大.



图 2 激发剂模数对气泡群密度的影响 Fig. 2 Effect of alkali activator modulus on bubble group density

(2)随着激发剂模数的增大,3类泡沫的气泡群密 度均呈不同程度的增长.可以发现,C类泡沫的气泡群 密度远高于P类和A类泡沫.气泡群密度的差异归因 于在泡沫体积一定时,泡沫的单位质量随着发泡倍数 的降低而增大,从而导致气泡群密度逐渐增大. 图 3 为不同激发剂模数下气泡沉降距的时变规 律.由图 3 可见:

(1)相比于未掺入激发剂的基准组,掺入激发剂 后P类泡沫的沉降距初期迅速升高而后期相对降低, A类泡沫的沉降距总体相对较高.原因在于A类发 泡剂由动物蛋白制得^[3],蛋白极易受酸碱度的影响而 变性,水玻璃和NaOH的加入抑制了蛋白质分子肽 键在界面上的伸展行为,破坏了肽键间相互作用形 成的保护网,导致泡沫产生剧烈地消泡破裂,致使沉 降距快速增长.

(2)随着激发剂模数的增加,P类泡沫和A类泡 沫的沉降距逐渐减小,而C类泡沫的沉降距逐渐增 大.这可能是由于激发剂模数的增加造成P类和A类 泡沫体系内SiO₂和Na₂O的增多,引起泡沫表面张力 的变化,使得植物表面活性剂和动物蛋白在稀释液 中形成的泡沫双电子层结构损伤,导致气泡壁的破 坏,相邻的小气泡互相连通形成大气泡^[4],有利于维



Fig. 3 Time-varying law of bubble settlement distance under different alkali activator modulus

持泡沫的结构体系,从而降低了泡沫的沉降;C类泡 沫较厚的气泡壁使得连通融合的泡沫较少,随着 SiO₂和Na₂O的增多,气泡壁破坏越剧烈,相邻泡沫 连通速率低于大泡破坏速率,导致气泡破裂逐渐增 多,沉降距逐渐增大.

图 4 为不同激发剂模数下泌水率的时变规律. 由图 4 可见:相比于未掺入激发剂的基准组,掺入 激发剂增大了泡沫的泌水率,并且随着激发剂模数 的增加和时间的演化而增大;激发剂模数的变化对 各类泡沫泌水率的影响程度有所不同.这主要归因 于气泡壁厚和泡径的差异^[3,5]:对于A类泡沫,碱的 加入使得蛋白质小分子和疏水基团减少,特殊基团 间形成的氢键作用也随之降低,从而形成了强度较低、壁厚较薄且直径较大的泡沫,易破裂分泌成液体,导致泌水率较高;P类泡沫在酸性介质中具有良好的表面活性,但在碱性介质中容易析出而失去表面活性,造成泡沫破裂,导致其泌水率逐渐增加;相比于P类和A类泡沫,蛋白质、表面活性剂和纤维素醚复配能够降低C类泡沫的表面张力,可以制备出泡壁较厚且泡径较小的泡沫,能够承受相对较大的波动阈值,增强气液面分子网络的密实度,减缓体系内气体的扩散速率,从而提高了泡沫体系的稳定性,减少了破裂的泡沫量,降低了泡沫的泌水率.





2.1.2 碱当量对发泡倍数、气泡群密度、沉降距和泌水率的影响

基于前期试验,C类泡沫的泌水率和沉降距相对 较低,故选择C类发泡剂进一步研究碱当量对泡沫 性能的影响.图5为碱当量对气泡群密度和发泡倍数 的影响.由图5可见: (1)随着碱当量的增加,发泡倍数持续降低,而 气泡群密度迅速增大.发泡倍数较基准组分别减小 了 49.57%、66.53%、71.19%,这可以归因于随着 Na₂O含量的持续增大,泡沫表面存在的大量活性分 子逐渐从界面处脱离,导致发泡剂溶液中的表面活 性分子持续减少,从而降低了发泡倍数^[3].





(2)与未掺入激发剂的基准组相比,当碱当量增加至3%、4%和5%时,气泡群密度分别增加了105.90%、212.97%和273.82%.原因在于碱当量的增加导致稀释液中含有大量的Na₂O,但其不能完全进入气泡内部反而集中游离在液膜附近,从而增大了气泡群的整体密度.

图 6 为不同碱当量下气泡沉降距的时变规律.由 图 6 可见,随着碱当量的增加和时间的推移,气泡沉 降距逐渐增大.气泡沉降距在 90 min之前增长相对 缓慢,而 90 min之后迅速增长.原因在于前期液膜的 厚度和韧度受 Na₂O 含量增多的影响,其自我修复能 力和液膜弹性开始降低,相邻的小泡破裂融合形成 大泡,使得泡沫结构体系变化不大,延缓了泡沫的沉 降;但是后期液膜的自我修复能力损失和本身弹性 较差,大泡开始破裂导致泡沫体系被破坏,致使沉降 距迅速增大^[6].

图 7 为不同碱当量下泌水率的时变规律.由图 7 可见:随着碱当量的增大和时间的演化,泡沫的泌水





率不断增加;与未掺入激发剂的基准组相比,当碱当 量增加至3%、4%和5%时,60min泌水率分别增加 了26.60%、32.70%和46.91%.原因在于泡沫中 Na₂O含量的增加破坏了表面活性分子在液膜表面的 活性分子排列^[7],使得表面张力增大,促进了空间密 度在气体和液体界面上的波动,从而降低了界面处 的弹性,最终加剧了泡沫的泌水.另外,相比于激发 剂模数,碱当量的变化对泡沫泌水率的影响程度更 显著,这是由于碱当量会引起体系中SiO₂和Na₂O含 量的更大变化.

2.1.3 碱性泡沫的稳定性评价

泡沫膜破裂、液膜排液变薄和气体扩散的相互 作用,共同导致泡沫的融合破裂、歧化失稳^[7-8].相比 于水溶液环境,碱性稀释液环境更容易诱发泡沫结 构的不稳定行为且不断演化.随着激发剂模数和碱 当量的增加,泡沫受表面张力和重力的作用逐渐明 显,增加了泡沫的排液速率,造成液膜逐渐变薄,泡 沫稳定性变差^[9].相邻气泡的直径大小不同引起的附 加压力梯度差造成气泡迁移融合和气体扩散,液膜 也慢慢变薄,直至泡沫破裂.因此,碱性环境加速了 气泡的凝聚和粗化,导致泡沫结构失稳破坏.泡沫失 稳机理示意图如图8所示.

基于以上试验结果和分析可以发现,相比于植物型P类发泡剂和动物蛋白型A类发泡剂所产生的碱性泡沫,复合型C类发泡剂产生的碱性泡沫的气泡群密度较大,发泡倍数较小,泌水率和沉降距较低.这说明复合型C类发泡剂产生的泡沫受激发剂 模数和碱当量的影响相对较小.气泡群密度与泡沫的稳定性成正比,泌水率、沉降距和发泡倍数与泡沫的稳定性成反比^[10].因此,复合型C类发泡剂产生的



Fig. 8 Schematic diagram of alkaline foam defoaming

泡沫在碱性环境中稳定性较好,更适用于制备碱激 发泡沫混凝土.

2.2 碱激发泡沫混凝土的稳定性

基于前述试验结果,选择稳定性较好的复合型C 类发泡剂制备碱激发泡沫混凝土,研究不同激发剂 模数和碱当量的碱激发泡沫混凝土浆体沉降时变行 为,进一步评价碱激发泡沫混凝土的稳定性.

2.2.1 激发剂模数对碱激发泡沫混凝土浆体沉降的 影响

激发剂模数对碱激发泡沫混凝土浆体沉降的影响如图9所示.由图9可见:





(1)不同激发剂模数碱激发泡沫混凝土的沉降距随着时间的推移先快速增大,在达到临界沉降距后逐渐平稳.原因在于碱激发矿物材料所起到的胶凝作用, 使得浆体包裹气泡形成早期骨架,并随着时间的推移, 浆体逐渐硬化,使其能够抵抗气泡的不稳定力,限制了 泡沫不稳定行为的发展,最终导致沉降距趋于稳定.

(2)试样 FC-1.0-3%、FC-1.2-3%、FC-1.4-3% 的临界沉降距分别为2.491、2.631、3.171 mm,临界 沉降时间分别为76、42、28 min,平均沉降速率分别 为0.033、0.063、0.113 mm/min.可以发现,随着激发 剂模数的增加,碱激发泡沫混凝土的沉降距逐渐增 大、沉降时间逐渐缩短、沉降速率倍增.泡沫在碱性 稀释液中较差的稳定性是导致泡沫在碱激发混凝土 中沉降距增大和沉降速率加快的主要原因.激发剂 模数的增加促进了碱激发泡沫混凝土早期骨架的形 成,增强了基体对泡沫的约束力,导致临界沉降时间 逐渐缩短.

(3)碱激发泡沫混凝土沉降前期有微小的膨胀, 如试样 FC-1.2-3% 在前4 min 时的沉降距和沉降速 率为负.主要归因于早期周围浆体不能有效地约束 泡沫,反而泡沫的浮力和浆体的挤压使整个体系向 上膨胀^[11];同时,环境温度变化也可能会导致碱激发 泡沫混凝土的膨胀^[12].

2.2.2 碱当量对碱激发泡沫混凝土浆体沉降的影响

碱当量对碱激发泡沫混凝土浆体沉降的影响如 图 10 所示.由图 10 可见:

(1)不同碱当量碱激发泡沫混凝土的浆体沉降 距随着时间的增长先迅速变大,后逐渐趋于稳定.这 与不同激发剂模数碱激发泡沫混凝土的浆体沉降时 变规律相一致.

(2) 试样 FC-1.0-3%、FC-1.0-4%、FC-1.0-5% 的临界沉降距分别为2.491、4.198、5.515 mm,临界 沉降时间分别为76、46、32 min,平均沉降速率分别 为0.033、0.091、0.172 mm/min.可以发现,随着碱当 量的增加,碱激发泡沫混凝土的沉降距和沉降速率 逐渐增大,达到稳定的临界时间逐渐减少.原因在于





随着碱当量的增加,体系中Na₂O的增多加速了泡沫 液膜的破坏,引起泡沫发生歧化破裂,导致沉降距的 增大和沉降速率的加快;同时,碱激发剂会促进矿 渣-粉煤灰胶凝材料的溶解和反应,有助于生成水 化硅铝酸钙(钠)(C-(N-)A-S-H)凝胶^[13],导致浆体快 速凝结,临界沉降时间逐渐缩短.

2.2.3 碱激发泡沫混凝土的稳定性评价

临界沉降距、临界沉降时间和平均沉降速率是 定量评价碱激发泡沫混凝土稳定性的重要指标.当 碱当量一定时,试样FC-1.0-3%的临界沉降距和平 均沉降速率最低,临界时间最长,为稳定组;试样 FC-1.4-3%的临界沉降距和平均沉降速率最高,临 界时间最短,为不稳定组;试样FC-1.2-3%为次稳定 组.当激发剂模数一定时,试样FC-1.0-3%的临界沉 降距和平均沉降速率最低,临界沉降时间最长,为稳 定组;试样FC-1.0-5%的临界沉降距和平均沉降速 率最高,临界沉降时间最短,为不稳定组;试样 FC-1.0-3%为次稳定组.因此,激发剂模数1.0和碱 当量3%制备的碱激发泡沫混凝土(FC-1.0-3%)具 有良好的早期稳定性.

碱激发泡沫混凝土的早期稳定性与激发剂模数 和碱当量密切相关,是由泡沫本身稳定性和碱激发 混凝土浆体的协同作用所决定.基于以上试验结果 和分析可以发现,泡沫混凝土的早期沉降主要与气 泡本身稳定性密切相关.碱性环境容易引起气泡的 凝聚和粗化,随着激发剂模数和碱当量的增加,泡沫 结构的稳定性逐渐恶化,致使碱激发泡沫混凝土沉 降距增大和沉降速率加快.同时,随着激发剂模数和 碱当量的增加,矿渣-粉煤灰基碱激发材料的聚合反 应加快,有助于生成C-(N-)A-S-H凝胶^[13]等水化产 物,不仅促进早期基体骨架的形成,而且提高了浆体 的黏度,从而增强了浆体对泡沫的约束力,抑制了泡 沫的迁移、融合、破裂,缩短了碱激发泡沫混凝土的 临界沉降时间.约束力包括泌水力fa(与液膜形成的 自由水有关)、浮力f₆(与浆体湿密度和泡径有关)、挤 压压力f(均匀环向力,与浆体的极限剪切应力和泡 沫的表面积有关)和摩擦力f(与浆体的极限剪切应 力有关)[14].泡沫在碱激发混凝土浆体中的受力示意 图如图11所示.因此,掺入适当激发剂模数和碱当量 的发泡剂可制备出泡沫体系相对稳定且满足性能要 求的碱激发泡沫混凝土.



泡沫在碱激发混凝土浆体中的受力示意图 图 11 Fig. 11 Schematic diagram of the force of foam in alkali-activated concrete paste

结论 3

(1)相比于植物型P类发泡剂和动物蛋白型A类 发泡剂,复合型C类发泡剂在碱性环境中产生了气 泡群密度较大、发泡倍数较小、泌水率和沉降距较低 的泡沫,具有较好的稳定能力.

(2)碱激发泡沫混凝土的沉降距随时间的推移先 快速增大,在达到临界沉降距后逐渐平稳.同时,随着 激发剂模数和碱当量的增加,碱激发泡沫混凝土的沉 降距逐渐增大,沉降时间逐渐缩短,沉降速率倍增.

(3)碱激发泡沫混凝土的早期稳定性是由泡沫 本身的稳定性和碱激发混凝土浆体的协同作用所决 定. 激发剂模数和碱当量的增加加速了气泡的凝聚 和粗化,导致泡沫结构失稳破坏;但是随着矿渣-粉 煤灰基碱激发材料聚合反应的加快,提高了浆体的 黏度,增强了浆体对泡沫的约束力,从而抑制了泡沫 的失稳行为.在激发剂模数1.0和碱当量3%的条件 下,可以制备出具有良好早期稳定性的碱激发泡沫 混凝土.

参考文献:

[1] 张文华,杨冯皓,吕毓静,等.泡沫混凝土的稳泡措施和机理 研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2021, 49(10):2266-2275. ZHANG Wenhua, YANG Fenghao, LÜ Yujing, et al. Research progress on foam stabilization method and mechanism of foamed concrete[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2021, 49

(10):2266-2275. (in Chinese)

- [2] HE J, GAO Q, SONG X F, et al. Effect of foaming agent on physical and mechanical properties of alkali-activated slag foamed concrete[J]. Construction and Building Materials, 2019, 226: 280-287.
- [3] 张磊,张静,张颖,等.生物基发泡剂泡沫特征及其对泡沫混凝土性能的影响[J].建筑材料学报,2020,23(3):589-595.
 ZHANG Lei, ZHANG Jing, ZHANG Ying, et al. Foam characteristics of biological foaming agent and its effect on properties of foam concrete[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(3):589-595. (in Chinese)
- [4] 黎冰, 杜杰, 高玉峰, 等. 发泡剂性能评价指标[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2020, 50(4):651-657.
 LI Bing, DU Jie, GAO Yufeng, et al. Performance evaluation indexes of foaming agent[J]. Journal of Southeast University (Natural Science), 2020, 50(4):651-657. (in Chinese)
- [5] DU X, ZHAO L, HE X, et al. Ultra-stable aqueous foams with multilayer films stabilized by 1-dodecanol, sodium dodecyl sulfonate and polyvinyl alcohol [J]. Chemical Engineering Science, 2017, 160:72-79.
- [6] SHE W, DU Y, MIAO C W, et al. Application of organic- and nanoparticle-modified foams in foamed concrete: Reinforcement and stabilization mechanisms[J]. Cement and Concrete Research, 2018, 106:12-22.
- [7] MALR, BAOL, HUDD, et al. Effect of interfacial properties on the stability of ultra-dry CO₂-in-water (C/W) foams stabilized with zwitterionic surfactants and nonionic/anionic polymers: Experimental and DPD simulation [J]. Journal of Supercritical Fluids, 2020,158:104722.
- [8] 宋强,张鹏,鲍玖文,等.泡沫混凝土的研究进展与应用[J].硅

酸盐学报,2021,49(2):398-410.

SONG Qiang, ZHANG Peng, BAO Jiuwen, et al. Research progress and application of foam concrete [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2021, 49(2):398-410. (in Chinese)

- [9] 徐方,顾功辉,黄晓明,等.地质聚合物泡沫混凝土气孔结构 形成机理研究[J].建筑材料学报,2020,23(5):1024-1029.
 XU Fang,GU Gonghui,HUANG Xiaoming, et al. Investigation on formation mechanism of pore structure in geopolymer foam concrete [J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(5): 1024-1029. (in Chinese)
- [10] 叶慈彪,杨海平,陈倩倩,等.HPMC改性泡沫对泡沫混凝土 性能影响[J].新型建筑材料,2022,49(3):26-30.
 YE Cibiao, YANG Haiping, CHEN Qianqian, et al. Effect of HPMC modified foams on the performance of foamed concrete
 [J]. New Building Materials, 2022, 49(3):26-30. (in Chinese)
- [11] DHASINDRAKRISHNAK, RAMAKRISHNANS, PASUPATHY K, et al. Collapse of fresh foam concrete: Mechanisms and influencing parameters[J]. Cement and Concrete Composites, 2021, 122:104151.
- [12] DHASINDRAKRISHNA K, PASUPATHY K, RAMAKRISHNAN S, et al. Effect of yield stress development on the foam-stability of aerated geopolymer concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2020, 138:106233.
- YE T H, XIAO J Z, DUAN Z H, et al. Geopolymers made of recycled brick and concrete powder-A critical review [J]. Construction and Building Materials, 2022, 330:127232.
- [14] GU G H, XU F, HUANG X M, et al. Foamed geopolymer: The relationship between rheological properties of geopolymer paste and pore-formation mechanism[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 277:123238.