

硬脂酸钙稳泡机制及其对发泡水泥保温板泡孔结构的影响

刘萍, 唐爱东, 王健雁, 艾陈祥, 张崇, 冼诗翔, 潘春跃

(中南大学 化学化工学院, 湖南 长沙, 410083)

摘要: 以硬脂酸钙为主稳泡剂制备轻质发泡水泥保温板, 通过考察硬脂酸钙对发泡水泥泡沫稳定性、疏水性和泡孔结构等影响, 提出硬脂酸钙在化学发泡水泥中的稳泡机制。研究表明: 硬脂酸钙在化学发泡水泥中的稳泡机制为硬脂酸钙吸附在水泥颗粒表面使其呈现部分疏水性, 进而吸附在气泡的气液界面上使泡沫达到稳定。优化稳泡剂成分和用量所制备的高性能轻质发泡水泥保温板符合国家标准要求, 产品密度为 220 kg/m^3 , 抗压强度为 0.63 MPa , 导热系数为 $0.042 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, 体积吸水率为 9.8% 。

关键词: 建筑材料; 硬脂酸钙; 稳泡剂; 发泡水泥保温板; 泡孔结构

中图分类号: TQ172.4

文献标志码: A

文章编号: 1672-7207(2018)05-1054-08

Foam stabilizing mechanism of calcium stearate and its effects on pore structure of foam cement thermal insulation board

LIU Ping, TANG Aidong, WANG Jianyan, AI Chenxiang, ZHANG Chong, XIAN Shixiang, PAN Chunyue

(School of Chemistry and Chemical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Light weight foam cement thermal insulation board was prepared by using self-made composite foam stabilizer with calcium stearate as principal component. The foam stabilizing mechanism of the calcium stearate in chemical foaming cement was proposed by studying the effects of calcium stearate on foam stability, hydrophobicity and pore structure. The results show that the foam stabilizing mechanism is that cement particles are firstly absorbed by calcium stearate and then partly presented hydrophobic, and subsequently they are absorbed on gas-liquid interface of the bubbles to achieve a stable equilibrium state of the bubbles. The as-prepared lightweight foam cement thermal insulation board using self-made composite foam stabilizer meets the requirements of the national standard. The absolute dry density is 220 kg/m^3 , the compressive strength reaches 0.63 MPa , the thermal conductivity is $0.042 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ and the water absorption rate after 28 d of curing period is only 9.8% .

Key words: building materials; calcium stearate; foam stabilizer; foamed cement insulation board; pore structure

近年来, 无机轻质发泡水泥保温板因其密度小、多孔隔音、导热系数低、不燃等优点被视为有机保温材料的理想替代品^[1-2], 广泛应用于外墙保温、屋顶保温隔热、地面保温等^[3-4]。轻质发泡水泥保温板多采用

化学发泡方式, 双氧水的发泡速率适中易于控制, 环保无毒, 是最常用的化学发泡剂。稳泡剂可以控制泡孔结构使得发泡水泥板质量小、强度高^[5]。根据气液两相泡沫稳定理论, 泡沫稳定性主要取决于液膜的强

收稿日期: 2017-06-10; 修回日期: 2017-08-12

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金资助项目(51674293, 51374250); 中南大学大学生创新类校级米塔尔创新项目(MX2016428); 大学生自由探索项目(ZY2016563) (Projects(51674293, 51374250) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project (MX2016428) supported by the College Students' Innovative Mittal Innovation of Central South University; Project(ZY2016563) supported by the College Students' Free Exploration)

通信作者: 唐爱东, 博士, 教授, 从事功能材料化学研究; E-mail: adtang@csu.edu.cn

度、厚度及气体析出的速率。若增大溶液的黏度,则液膜排液速率减慢,气泡内气体析出的速度降低,泡沫稳定性增加。表面活性剂类稳泡剂可以降低液体的表面张力,是起泡与稳泡的必要条件^[6-7]。另外,蛋白质类稳泡剂和具有较好水溶性的高分子类化合物以及脂肪酸和脂肪醇可以增大基液黏度及增溶,提高泡沫表面膜的弹性和黏度,因此,也具有很好的稳泡效果^[6,8-9]。含油相或含固体颗粒的泡沫通常称为水基三相泡沫。发泡水泥浆体的泡沫是由气、液、固相经化学发泡而形成的不稳定体系^[10],为稳定固体三相泡沫,需要考虑固体颗粒对于泡沫稳定性的影响。人们探究了多种表面活性剂,如陈伟红等^[11]研究了氟碳表面活性剂的添加量对空心微珠三相泡沫在油面稳定性的影响,发现氟碳表面活性剂因具有疏水疏油特性,显著降低了泡沫中水分的析出速度,使三相泡沫内部骨架结构被保持。杨娜^[12]研究了表面活性剂 SDS 形成的油-水-气三相泡沫的稳定性影响因素,发现三相泡沫含油量越大,泡沫稳定性越强。董晓强等^[13]研究了疏水改性聚合物与表面活性剂的复配体系,对聚合物与表面活性剂在气液界面上的不同吸附构型及其泡沫稳定性的变化进行了研究,发现泡沫膜的稳定性与表面活性剂的浓度有关。秦波涛^[14]阐述了固体三相泡沫在防止煤炭自燃领域的应用及稳泡机理。目前,人们对固体三相泡沫在发泡混凝土领域^[15-16]中的稳泡机理还较少。硬脂酸钙属于疏水性长链羧酸盐类表面活性剂,其在发泡水泥保温板中稳定固体三相泡沫的机理研究还未见报道。为此,本文作者选用硬脂酸钙作为固体三相泡沫稳泡剂,探究硬脂酸钙的稳泡机理及其对发泡水泥保温板泡孔结构的影响。在此基础上,通过优化稳泡剂配方制备高性能发泡水泥保温板。

1 实验

试剂为:硬脂酸钙(CA,邵阳天堂化工有限公司生产(国标));十二烷基硫酸钠(SDS,天津博迪化工股份有限公司生产);十二烷基苯磺酸钠(SDBS,天津市致远化学试剂有限公司生产);坪湘牌复合硅酸盐水泥 PC325,自来水;工业级双氧水质量分数为 27.5%(武汉永清化工生产)。

仪器为:发泡水泥保温板设备 1 套(山东天翼机械, TYF-01);量筒;恒速搅拌器(BEVS 2501);塑料模具直径为 10 cm,高为 15 cm;接触角测量仪(上海方瑞仪口服有限公司制造, JCY);水桶;万能压力试验

机(TST-B605S);电子天平(LT1000B);导热系数测定仪(QTM-500)。

1.1 水泥试件疏水性测试

分别将表面活性剂(SDS, SDBS 和 CA) 0.6 份与 100 份 PC325 水泥混合,并加入 50 份常温水,搅拌约 3 min,使水泥浆表面自然流平,保持平整,在室温中静置养护 7 d 后,在烘箱中干燥至恒质量。将水泥制块脱模,切割成矩形方块,利用接触角测量仪测量水滴在水泥试块表面的接触角。

1.2 泡沫稳定性测试

泡沫稳定性常以泡沫半衰期表征,半衰期为泡沫体积破灭一半时所需要的时间^[17]。制备三相泡沫所需的各组分,其特性见表 1。

表 1 各组分特性

组分	特性
表面活性剂	降低液体表面张力,形成气泡
粉煤灰	与水拌合后呈碱性,短时间内不会凝结、硬化
水泥	与水拌合后呈碱性,与水发生水化反应凝结、固化
双氧水	在碱性条件下,易分解放出氧气

3 种表面活性剂(SDS, SDBS 和 CA)均为 0.6 份,分别与 100 份粉煤灰、80 份自来水混合,机械搅拌约 3 min,加入 5.8 份双氧水搅拌约 10 s,迅速转移至 500 mL 量筒中,观察加入不同类型表面活性剂的粉煤灰浆发泡体积和泡沫稳定半衰期。

1.3 硬脂酸钙对发泡水泥保温板性能的影响

为了观察硬脂酸钙的添加量对发泡水泥保温板泡孔结构、抗压强度等性能的影响,只添加硬脂酸钙制备发泡水泥保温板。

PC325 水泥 100.00 份,硬脂酸钙分别为 0, 0.50, 0.75 和 1.00 份,水为 50.00 份,双氧水 5.80 份,水温随环境温度的变化进行调节。制备发泡水泥保温板,脱模切割,在自然条件下养护 28 d,测试前干燥。

1.4 发泡水泥保温板的制备

以无机盐作为增强剂,硬脂酸钙为稳泡剂主要成分,优化配方,制备一种复合稳泡增强剂。利用发泡水泥保温板生产设备制备保温板,养护并测试。

往料罐中加入 100 份 PC325 复合硅酸盐水泥、3 份自制稳泡增强剂,加入 48 份清水(54 ℃,视环境温度而定),机械搅拌 120 s 左右;加入 5.2 份双氧水,

搅拌 8~10 s 后将浆料快速倒入模具, 静置, 待发泡停止后加盖塑料薄膜保湿, 室温静置养护 24 h 后脱模, 72 h 后切割, 进行后期养护。

1.5 发泡水泥保温板性能测试

发泡水泥保温板性能测试参数为干密度、抗压强度、软化系数和体积吸水率。根据 GB/T 5486—2008 “无机硬质绝热制品实验方法” 提供的实验方法进行测试。

2 结果与讨论

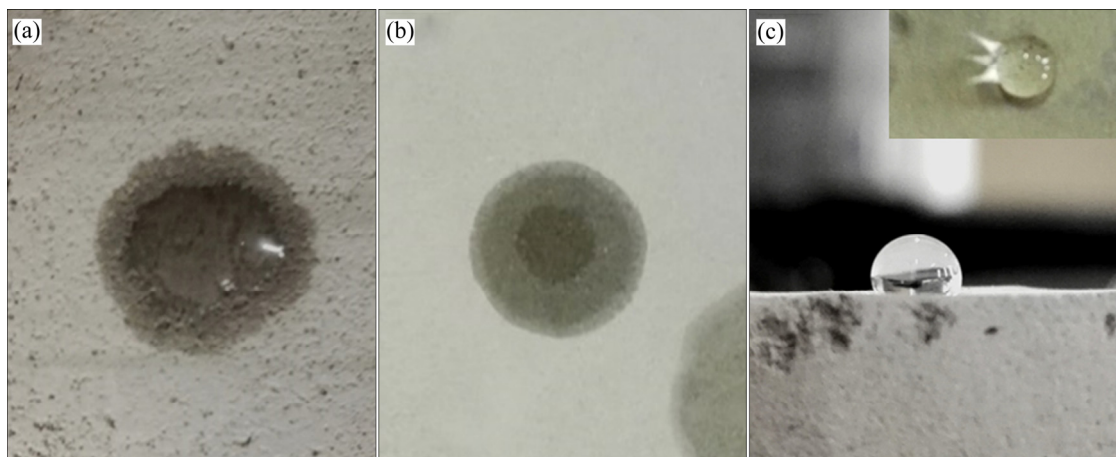
2.1 表面活性剂对水泥制品表面疏水性的影响

将 3 种不同表面活性剂加入水泥浆中制备成未发泡水泥试块, 测试其表面的接触角, 研究表面活性剂对水泥制品表面疏水性的影响。将水泥制块脱模, 并将脱模后的样品切割成矩形方块。在自然条件下养护 7 d 后在恒温干燥箱中干燥至恒质量, 用接触角测量仪测量水泥制块表面的水滴接触角, 结果如图 1 所示。对于不添加表面活性剂的水泥试块表面, 水滴会立即

浸湿并消失在水泥块表面。添加了 SDS 和 SDBS 的水泥试块表面水滴接触角接近于 0° (见图 1(a) 和图 1(b)), 即水泥试块表面为亲水性。而加入硬脂酸钙的水泥试块, 其表面水滴接触角接近于 90° (见图 1(c)), 可以认为是疏水性表面, 即硬脂酸钙可以吸附在水泥颗粒表面, 进而使颗粒表面转变为疏水性。

3 种表面活性剂的分子结构如图 2 所示。虽然表面活性剂分子都具有亲水端和疏水端, 但硬脂酸钙不溶于水, 疏水端有 2 条碳十八烷基链, 所以, 其吸附在水泥颗粒表面时, 表面呈现出疏水性。而十二烷基硫酸钠和十二烷基苯磺酸钠均易溶于水, 疏水端均只有 1 条碳十二烷基链, 吸附在水泥颗粒表面, 其表面仍然呈现出亲水性。

当硬脂酸钙的添加量分别为 0, 0.05, 0.25, 0.50, 0.75 和 1.00 份时(水泥均为 100.00 份), 得到未发泡的水泥试块, 测试其上、下表面的接触角, 研究不同添加量的硬脂酸钙对水泥制品表面疏水性的影响, 结果如图 3 所示。从图 3 可见: 随着硬脂酸钙添加量增多, 水泥试块表面的疏水性越强, 最大接触角为 87° ; 在硬脂酸钙添加量超过 0.75% 后, 水泥试块下表面的疏



(a) SDS; (b) SDBS; (c) CA

图 1 掺 3 种表面活性剂的水泥试块表面与水滴接触的照片

Fig. 1 Photos of water drop contact with surface of cement test block adding 3 kinds different surfactants

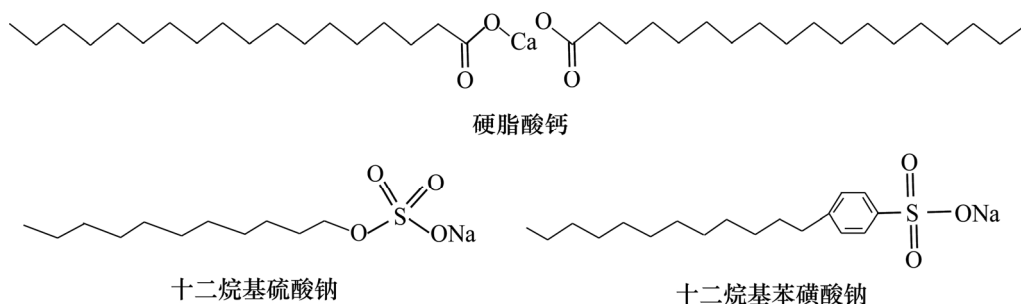


图 2 表面活性剂的分子结构式

Fig. 2 Molecular structures of surfactants

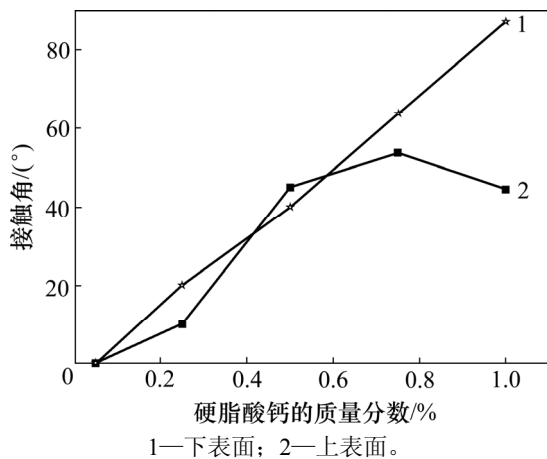


图3 掺不同量硬脂酸钙的水泥试块上下表面的接触角
Fig. 3 Contact angle of upper and lower surface of cement test block surface with different amounts of calcium stearate

水性要比上表面的疏水性强, 且上表面疏水性有减弱趋势, 说明增加硬脂酸钙的量会导致水泥颗粒分散不均匀, 因此, 硬脂酸钙的添加量以低于 0.75% 较好。

2.2 不同表面活性剂对三相泡沫稳定性的影响

根据粉煤灰的化学发泡效果评价不同表面活性剂对泡沫的稳定作用。3 种表面活性剂对粉煤灰的稳泡效果见表 2。

表2 不同表面活性剂对粉煤灰三相泡沫稳定性的影响
Table 2 Effects of different surfactants on stability of fly ash three phase foam

表面活性剂	质量分数/%	发泡体积/mL	半衰期/min
无(对照组)	0	0	0
十二烷基硫酸钠(SDS)	0.6	300	15
十二烷基苯磺酸钠(SDBS)	0.6	120	3
硬脂酸钙(CA)	0.6	290	780

从表 2 可知: 不添加任何表面活性剂的对照组, 碱性粉煤灰浆与双氧水混合, 双氧水释放出 O₂, 但无法稳定形成三相泡沫。这说明单纯的粉煤灰浆由化学发泡法无法形成泡沫, 需添加表面活性剂以降低液体表面张力。加入了 SDS 的粉煤灰浆发泡体积最大, 泡孔细小, 泡沫半衰期为 15 min; SDS 作为稳泡剂在发泡过程中易发生气泡合并, 最终破裂坍塌, 泡沫半衰期为 3 min。这是因为 SDBS 碳链上带有苯环, 分子之间的相互作用力不如 SDS 强烈, 分子排列不够致密, 导致泡沫易合并^[18]。加入了硬脂酸钙的粉煤灰浆形成的三相泡沫孔径均匀, 气泡呈现出球状。随着时间延长, 虽然可以观察到液膜排液现象, 但其稳定性并未受到影响。

3 种表面活性剂对粉煤灰三相泡沫稳泡效果如图 4 所示。从图 4(c)可见: 加入硬脂酸钙的粉煤灰浆形成的三相泡沫孔径均匀且稳定, 气泡呈现出球状。部分疏水性固体颗粒可以使三相泡沫稳定性增强。亲水性固体颗粒存在于泡沫液膜之间, 液膜排液流出, 接着是气体扩散, 最后, 固体骨架网络坍塌^[19-21], 固体三相泡沫在较短时间内破灭。而部分疏水性固体颗粒会吸附在体系内气泡的气液界面上, 使其具有聚结稳定性, 可以减缓液膜变薄的速率, 降低泡沫内气体扩散速率^[20, 22-23], 所以, 泡沫的稳定时间更长。

当在粉煤灰浆液中加入不同量的硬脂酸钙时, 其泡沫半衰期和发泡倍数如图 5 所示。从图 5 可见: 在双氧水加量一致的条件下, 当硬脂酸钙的质量分数为 0~0.75% 时, 发泡倍数与泡沫半衰期均逐渐增大。这说明硬脂酸钙加量越多, 体系中疏水性颗粒越多, 泡沫越稳定, 进一步证明疏水性固体颗粒可较好地稳定固体三相泡沫。当硬脂酸钙的质量分数大于 0.75% 时, 发泡倍数继续增大, 泡沫半衰期略有降低, 这可能是因为发泡倍数过大, 泡沫液膜厚度变得更小, 致使泡沫稳定性降低^[24]。

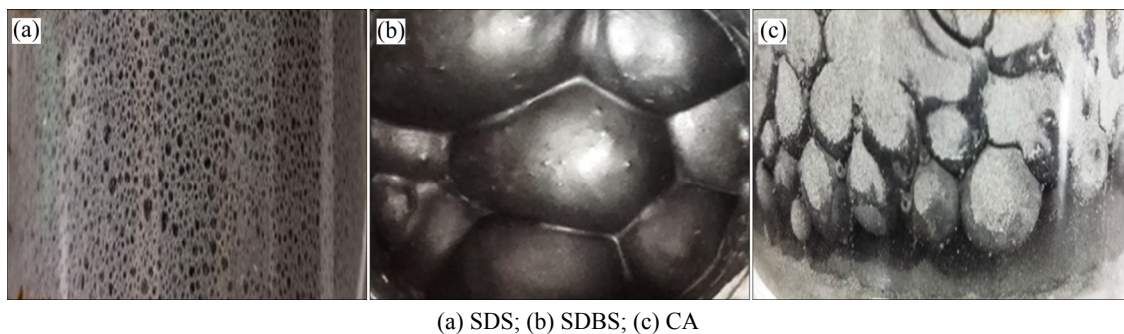


图4 表面活性剂稳定粉煤灰三相泡沫的形貌对比

Fig. 4 Comparison of morphologies of fly ash three-phase foam stabilized by different surfactants

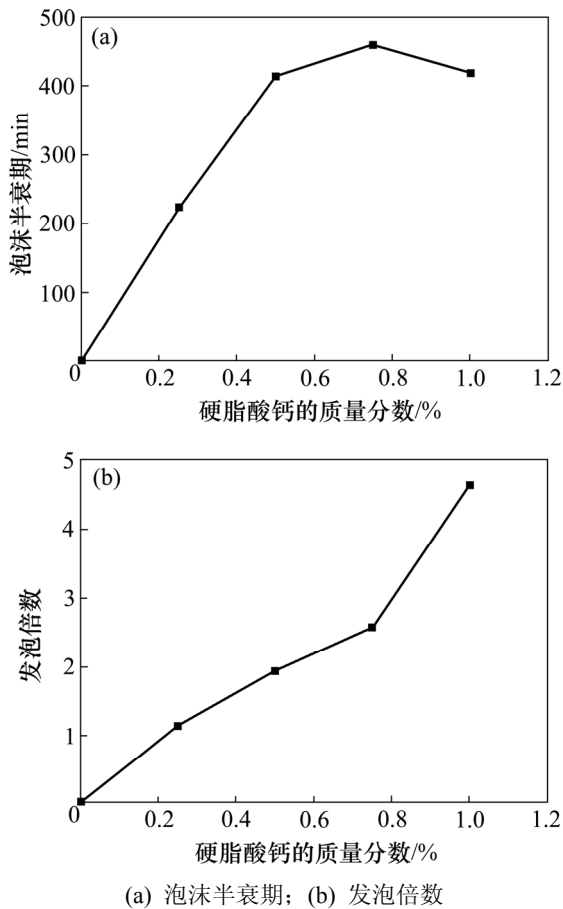


图 5 不同硬脂酸钙的添加量对粉煤灰三相泡沫的稳定性影响

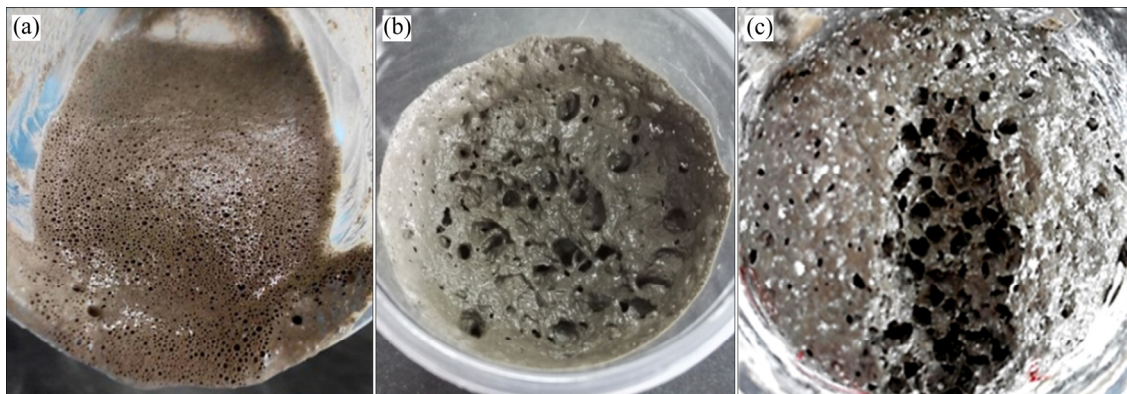
Fig. 5 Effect of different amounts of calcium stearate on stability of fly ash of three-phase foam

2.3 不同表面活性剂对发泡水泥保温板泡孔结构的影响

与粉煤灰不同,水泥是无机颗粒混合物,会因发生水化作用而固化。不同表面活性剂对水泥的稳泡效

果如图 6 所示。从图 6 可见:3 种表面活性剂作为发泡水泥保温板的稳泡剂其稳泡效果不同;表面活性剂加量均为水泥质量的 0.6%,以 SDS 作为稳泡剂并不能稳定水泥三相泡沫;静停发泡一段时间后,拨开表面,内部为透明泡沫,未形成水泥骨架结构,几十分钟后,浆料仍未固化;加入 SDBS 作为稳泡剂,发泡过程中会鼓起大泡,短时间内小气泡合并成大泡,最终泡沫破裂而塌陷;以硬脂酸钙作为稳泡剂时,发泡水泥泡孔均匀,孔径为 1.5~2.0 mm。图 6(c)所示为用玻棒拨开未完全固化浆体的稳泡效果,可以看到已经形成水泥骨架结构。显然,硬脂酸钙适合作为发泡水泥保温板的稳泡剂,该实验结果与粉煤灰三相泡沫稳定性实验结果一致。

表面活性剂硬脂酸钙在水泥/粉煤灰浆中的行为见图 7。从图 7 可见:硬脂酸钙对水泥三相泡沫的作用机理分为 4 个阶段。1) 水泥颗粒与水拌合,相互接触后立即发生水化,固相与液相之间开始以离子形式发生物质交换。由水分子向物质表面提供 H^+ , 熟料中的 Ca^{2+} 进入溶液,液相中 SO_4^{2-} , OH^- , $Al(OH)_4^-$, K^+ 和 Na^+ 等离子浓度迅速增加,数分钟之内就开始出现第 1 批空心针状水化产物(钙矾石),颗粒聚集^[25-26]。硬脂酸钙吸附在水泥颗粒或水泥颗粒聚集体的表面,形成部分疏水性颗粒;2) 向均匀的水泥浆中加入 H_2O_2 并快速搅拌,使得 H_2O_2 均匀分散在浆料中,在碱性条件下分解释放出氧气,形成气泡;气泡慢慢变大,疏水固体颗粒会渐渐吸附到气泡的气液界面上并形成一层刚性壁垒,阻止气泡进一步变大。3) 泡沫之间形成的三维网络结构抑制了泡沫的运动,三相泡沫变得更加稳定。4) 随着时间延长,水泥水化经过加速期、减速期和稳定期,形成的水化产物 C-S-H 由低密度逐渐生长为高密度,水泥浆逐渐硬化,气泡内气体扩散消失,形成水泥骨架网络结构^[27-28]。



(a) SDS; (b) SDBS; (c) CA

图 6 不同稳泡剂对发泡水泥的稳泡效果对比

Fig. 6 Comparison of morphologies of cement three-phase foam stabilized by different surfactants

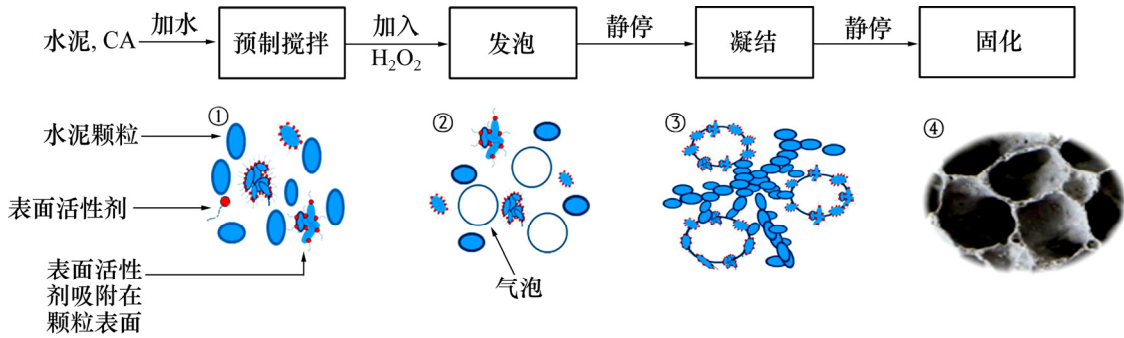


图7 硬脂酸钙对水泥三相泡沫作用机理示意图

Fig. 7 Schematic diagram of function mechanism of foam cement and calcium stearate

2.4 硬脂酸钙对发泡水泥保温板泡孔结构的影响

PC.325 水泥 100.00 份, 硬脂酸钙分别为 0, 0.50, 0.75 和 1.00 份, 水为 50.00 份, 双氧水 5.80 份制备发泡水泥保温板。自然养护至 28 d, 讨论硬脂酸钙对泡孔结构的影响。图 8 所示为保温板横截面泡孔结构实物图。利用 Image Pro Plus 软件对发泡水泥板横截面进行分析, 统计其 Feret 直径分布。不同硬脂酸钙添加量的发泡水泥保温板泡孔直径分布见图 9。

由图 9 所示泡孔孔径分布可知: 当硬脂酸钙的加量(质量分数)为 0 时, 孔径分布在 3~5 mm 范围内的比例达到 36.2%; 当硬脂酸钙的加量为 0.50% 时, 孔径分布在 1~2 mm 范围内的比例达 42.0%; 当硬脂酸钙的加量为 0.75% 时, 孔径分布在 1~2 mm 范围内的比例达 48.7%; 当硬脂酸钙的加量为 1.00% 时, 孔径分布在 1~2 mm 范围内的比例为 45.6%, 且 67.3% 的泡孔直径分布在 0.6~2.0 mm 范围内, 与 0.75% 样品的泡孔孔径相比有减小的趋势。说明添加硬脂酸钙能有效地

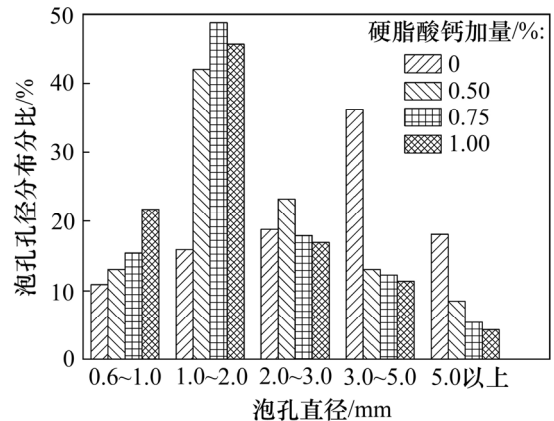


图9 不同硬脂酸钙添加量的发泡水泥保温板泡孔直径分布

Fig. 9 Pore size distribution of foam cement insulation board with different dosages of calcium stearate

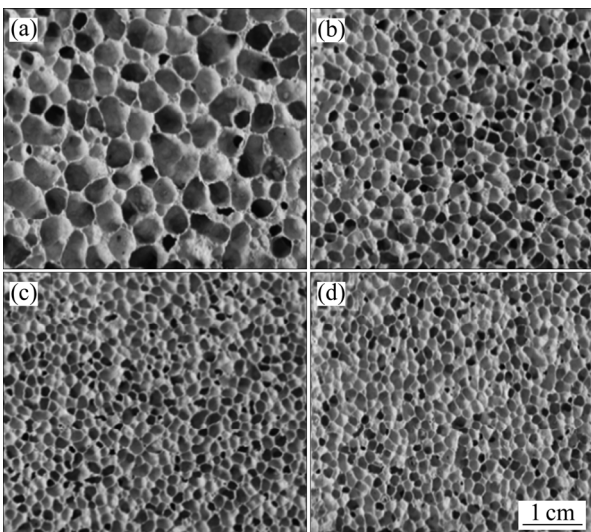
控制发泡水泥的孔径, 硬脂酸钙的用量为 0.75% 最好。

不同硬脂酸钙加量制备的发泡水泥保温板的性能见图 10。分析图 10 可知: 不加硬脂酸钙时, 发泡水泥板的泡孔直径较大, 多分布在 3~5 mm 范围内, 孔隙率较高, 抗压强度低; 当硬脂酸钙加量在 0.50%~0.75% 范围内时, 泡孔直径越来越多地集中在 1~2 mm 范围内, 孔径减小, 孔隙率逐渐降低, 抗压强度增高; 当硬脂酸钙加量为 1.00% 时, 泡孔直径更小, 多分布在 0.6~2.0 mm 范围内, 但因为硬脂酸钙越多, 发泡倍数越大, 孔隙率再次升高, 抗压强度降低。图 10 中样品 28 d 时的密度大于 7 d 时的密度, 说明随着时间延长, 水泥水化程度加深, 水化产物由低密度变为高密度^[29]。

由以上结果可知: 泡孔直径随着硬脂酸钙加量的增多而逐渐减小; 对于保温板强度, 硬脂酸钙加量不宜超过 0.75%。

2.5 高性能发泡水泥保温板的制备

利用上述实验结论, 加入增强剂, 优化配方制备出复合稳泡增强剂。自制复合稳泡剂性能优良, 在发



硬脂酸钙添加量/%: (a) 0; (b) 0.50; (c) 0.75; (d) 1.00

图8 不同硬脂酸钙添加量的发泡水泥保温板横截面

Fig. 8 Cross sections of foam cement insulation board with different dosages of calcium stearate

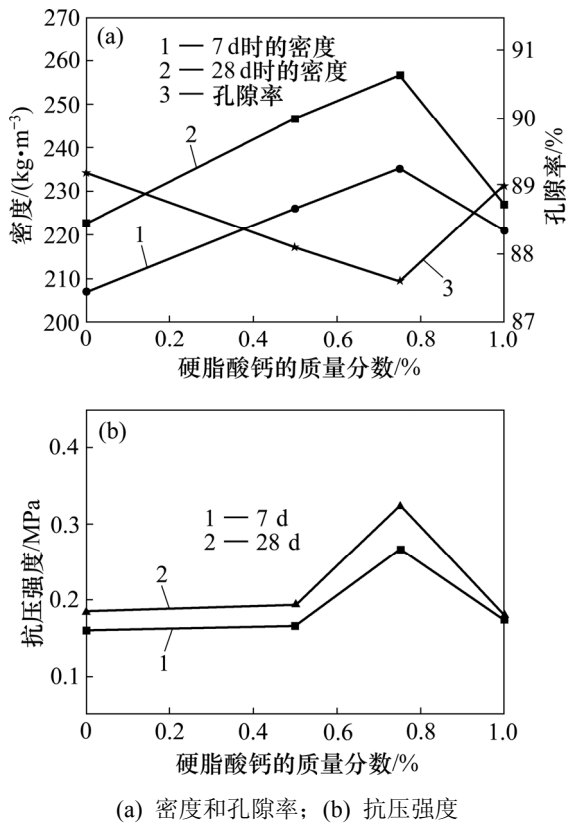


图 10 不同硬脂酸钙加量制备的发泡水泥保温板的性能
Fig. 10 Properties of foamed cement insulation board by adding different amounts of calcium stearate

发泡水泥保温板中添加量为 3.00%。根据 GB/T 5486—2008 “无机硬质绝热制品实验方法”提供的实验方法进行测试。分别测试水泥保温板的干密度、抗压强度、软化系数、体积吸水率等性能,测试结果如表 3 所示。由表 3 可知:发泡水泥板性能指标符合行业标准。

表 3 发泡水泥保温板性能(28 d)

Table 3 Properties of foamed cement thermal insulation board(28 d)

参数	自制发泡水泥保温板	JC/T 2200—2013
绝干密度/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	220	≤ 250
抗压强度/MPa	0.630	≥ 0.400
软化系数	0.770	≥ 0.700
体积吸水率/%	9.800	≤ 10.00
导热系数/ $(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	0.042	≤ 0.065

3 结论

1) 讨论了发泡水泥保温板中稳泡剂的稳泡作用与稳泡机理。硬脂酸钙作为一种有效的稳泡剂成分,

在 PC325 水泥中添加量为 0.75%较合适。

2) 硬脂酸钙作为稳泡剂的稳泡机理为:通过搅拌硬脂酸钙与水泥浆料,使硬脂酸钙逐渐吸附在水泥颗粒表面,水泥颗粒转变为部分疏水性颗粒,进而吸附在气泡的气液界面上,阻止气泡进一步变大与合并,因此,可以在较长时间内稳定气泡;随后,水泥凝结固化,而泡孔结构被保留,形成轻质发泡水泥保温材料。硬脂酸钙的加量越多,泡孔孔径越小。

3) 应用自制的复合稳泡增强剂制备了发泡水泥保温板,经过 28 d 自然养护,密度为 $220 \text{ kg}/\text{m}^3$,抗压强度达到 0.63 MPa,导热系数为 $0.042 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,吸水率为 9.8%,达到并超过了行业标准,为新型建筑材料的研制与开发提供了理论依据。

参考文献:

- 王天杭. 外墙外保温材料的优缺点分析[J]. 中国化工贸易, 2015, 20(7): 211-212.
WANG Tianhang. Analysis of advantages and disadvantages of exterior wall thermal insulation material[J]. China Chemical Trade, 2015, 20(7): 211-212.
- SAMSON G, PHELIPOT-MARDELÉ A, LANOS C. A review of thermomechanical properties of lightweight concrete[J]. Magazine of Concrete Research, 2016, 69(4): 1-16.
- 荀晓霖, 刘秀丽. 住宅外墙外保温系统的综合评价[J]. 低温建筑技术, 2016, 38(1): 139-141.
XUN Xiaolin, LIU Xiuli. Comprehensive evaluation of external thermal insulation system for exterior wall of residential buildings[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2016(1): 139-141.
- 陈伟良, 诸涤. A1 级防火性能的发泡水泥保温板[J]. 江苏建筑材料, 2012(1): 23-24.
CHEN Weiliang, ZHU Di. On the foamed cement insulation board with A1 level fireproof performance[J]. Jiangsu Building Materials, 2012(1): 23-24.
- JIANG Lei, LI Songyuan, YU Wenyang, et al. Interfacial study on the interaction between hydrophobic nanoparticles and ionic surfactants[J]. Colloids & Surfaces A Physicochemical & Engineering Aspects, 2016, 488: 20-27.
- 吴卫国. 稳泡剂在加气混凝土生产中的作用及机理分析[J]. 砖瓦, 2012(5): 57-58.
WU Weiguo. Analysis of the effect and mechanism of the stabilizing agent in the production of aerated concrete[J]. Brick and Tile, 2012(5): 57-58.
- 孙烜, 苏宇峰, 魏博磊, 等. 温度和浓度对发泡剂表面张力和泡沫稳定性的影响[J]. 墙材革新与建筑节能, 2016(9): 28-32.
SUN Xuan, SU Yufeng, WEI Bolei, et al. The effect of temperature and concentration on surface tension and foam stability of foaming agent[J]. Wall Materials Innovation & Energy Saving in Buildings, 2016(9): 28-32.
- 王其伟, 周国华, 李向良, 等. 泡沫稳定性改进剂研究[J]. 大

- 庆石油地质与开发, 2003, 22(3): 80-81.
- WANG Qiwei, ZHOU Guohua, LI Xiangliang, et al. Study on foam stability improver[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2003, 22(3): 80-81.
- [9] 侯彦叶, 李冬梅. 我国发泡水保温板的研究现状[J]. *四川化工*, 2014, 17(2): 16-18.
- HOU Yanye, LI Dongmei. Research status of foam cement insulation board[J]. *Sichuan Chemical Industry*, 2014, 17(2): 16-18.
- [10] SHAO Zhenlu, WANG Deming, WANG Yanming, et al. Controlling coal fires using the three-phase foam and water mist techniques in the Anjialing Open Pit Mine, China[J]. *Natural Hazards*, 2015, 75(2): 1833-1852.
- [11] 陈伟红, 杜文锋, 徐晓楠, 等. 氟碳表面活性剂对空心微珠三相泡沫抗溶抗烧性能影响研究[C]// 2008(沈阳)国际安全科学与技术学术研讨会论文集. 沈阳, 2008: 182-186.
- CHEN Weihong, DU Wenfeng, XU Xiaonan, et al. Effect of fluorocarbon surfactant on the anti-dissolution and anti-burning performance of hollow micro-bead[C]// *Proceedings of 2008 (Shenyang) International Colloquium on Safety Science and Technology*. Shenyang, 2008: 182-186.
- [12] 杨娜. 油-水-气三相泡沫界面微观结构研究[D]. 西安: 西安石油大学化学化工学院, 2014: 3-7.
- YANG Na. Study on the interfacial microstructure of the oil-water-air three-phase foam[D]. Xi'an: Xi'an Petroleum University. Chemistry and Chemical Engineering, 2014: 3-7.
- [13] 董晓强. 纤维素、硅颗粒及石蜡与表面活性剂协同稳定的水基泡沫[D]. 济南: 山东大学化学与化工学院, 2010: 5-10.
- DONG Xiaoliang. Aqueous foam stabilized by cellulose/surfactant, paraffin/surfactant and paraffin/solid/surfactant[D]. Jinan: Shandong University. Chemistry and Chemical Engineering, 2010: 5-10.
- [14] 秦波涛. 防治煤炭自燃的三相泡沫理论与技术研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2008, 37(4): 585-586.
- QIN Botao. Research on theory and technology of three-phase-foam for preventing spontaneous combustion of coal[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2008, 37(4): 585-586.
- [15] 林益军, 刘萍, 王健雁, 等. 聚氨酯后处理对发泡水泥保温板性能的影响[J]. *功能材料*, 2016, 47(11): 11068-11071.
- LIN Yijun, LIU Ping, WANG Jianyan, et al. Effect of polyurethane-processing on the properties of foam cement[J]. *Functional Materials*, 2016, 47(11): 11068-11071.
- [16] 胡佩伟, 杨华明, 陈文瑞, 等. 高岭土尾砂活化及用于胶凝材料的研究[J]. *硅酸盐通报*, 2010, 29(2): 292-299.
- HU Peiwei, YANG Huaming, CHEN Wenrui, et al. Activation of Kaolin tailing and its application in cement materials[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2010, 29(2): 292-299.
- [17] FAMEAU A L, SALONEN A. Effect of particles and aggregated structures on the foam stability and aging[J]. *Comptes Rendus Physique*, 2014, 15(8/9): 748-760.
- [18] ROSEN M J, KUNJAPPU J T. 表明活性剂和界面现象[M]. 崔正刚, 蒋建中, 译. 北京: 化学工业出版社, 2015: 122-123.
- ROSEN M J, KUNJAPPU J T. Surfactants and interfacial phenomena[M]. CUI Zhenggang, JIANG Jianzhong, trans. Beijing: Chemical Industry Press, 2015: 122-123.
- [19] 秦波涛, 王德明. 三相泡沫的稳定性及温度的影响[J]. *金属矿山*, 2006(4): 62-65.
- QIN Botao, WANG Deming. Stability of three-phase foam and effect of temperature[J]. *Metal Mine*, 2006(4): 62-65.
- [20] 秦波涛, 王德明, 陈建华, 等. 粉煤灰三相泡沫组成成分及形成机理研究[J]. *煤炭学报*, 2005, 30(2): 155-159.
- QIN Botao, WANG Deming, CHEN Jianhua, et al. Study on components and forming mechanism of three-phase foam with fly ash[J]. *Journal of Coal Science & Engineering*, 2005, 30(2): 155-159.
- [21] 李改军, 陈阳, 林武清. 水泥灰三相泡沫的形成机理与稳定性试验研究[J]. *中国安全生产科学技术*, 2014, 10(11): 54-59.
- LI Zijun, CHEN Yang, LIN Wuqing. Experimental study on formation mechanism and stability of three-phase foam cement[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2014, 10(11): 54-59.
- [22] 鲁义. 防治煤炭自燃的无机固化泡沫及特性研究[D]. 徐州: 中国矿业大学安全科学与工程学院, 2015: 25-28.
- LU Yi. Study on inorganic curing foam and characteristics of coal spontaneous combustion[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology. School of Safety Science and Engineering, 2015: 25-28.
- [23] HUNTER T N, WANLESS E J, JAMESON G J, et al. Non-ionic surfactant interactions with hydrophobic nanoparticles: impact on foam stability[J]. *Colloids & Surfaces A Physicochemical & Engineering Aspects*, 2009, 347(1): 81-89.
- [24] 曹万智, 亢毅, 周茗如, 等. 多孔混凝土孔洞尺寸与分布状态对其性能的影响[J]. *新型建筑材料*, 2014, 41(3): 75-77.
- CAO Wanzhi, HANG Yi, ZHOU Mingru, et al. Influence of pore size and distribution on the performance of porous concrete[J]. *New Building Materials*, 2014, 41(3): 75-77.
- [25] 吕鹏, 翟建平, 聂荣, 等. 环境扫描电镜用于硅酸盐水泥早期水化的研究[J]. *硅酸盐学报*, 2004, 32(4): 530-536.
- LÜ Peng, ZHAI Jianping, NIE Rong, et al. Investigation on the early stage hydration of portland cement using environmental scanning electron microscopy[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2004, 32(4): 530-536.
- [26] 倪蔡辉, 吕生华, 朱琳琳, 等. 氧化石墨烯/发泡水泥基材料的微观结构及性能[J]. *混凝土与水泥制品*, 2017(1): 57-61.
- NI Caihui, LÜ Shenghua, ZHU Linlin, et al. Microstructure and properties of graphene oxide/foamed cement based materials[J]. *China Concrete and Cement Products*, 2017(1): 57-61.
- [27] DICKINSON E, ETELAIE R, KOSTAKIS T, et al. Factors controlling the formation and stability of air bubbles stabilized by partially hydrophobic silica nanoparticles[J]. *Langmuir*, 2004, 20(20): 8517-8525.
- [28] FYRILLAS M M, KLOEK W, VAN VLIET T, et al. Factors determining the stability of a gas cell in an elastic medium[J]. *Langmuir*, 1999, 16(16): 1014-1019.
- [29] LI Xiaolong, LI Guozhong. Study on the performance of new foamed cement insulation material[J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 648: 112-115.