第 49 卷第 10 期
2021 年 10 月

硅 酸 盐 学 报
JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY

Vol. 49，No. 10
October，2021

http://www.gxyb.cbpt.cnki.net

DOI：10.14062/j.issn.0454-5648.20200865

综 合 评 述

泡沫混凝土的稳泡措施和机理研究进展

张文华[1]，杨冯皓[1]，吕毓静[2]，吴培培[1]，曾伟钊[1]，许国东[3]

(1. 南京林业大学土木工程学院，南京 210037；2. 东南大学土木工程学院，南京 210096；
3. 江苏省建筑质量检测中心有限公司，南京 210028)

摘 要：泡沫的稳定性是决定泡沫混凝土综合性能的关键因素。然而，普通泡沫的泡径不均匀、稳定性较差，易发生聚结、歧化现象，产生大尺寸连通孔，造成泡沫混凝土物理力学、保温隔声性能下降。对近年来泡沫混凝土中泡沫的相关研究进行了全面阐述，主要聚焦于泡沫的制备、泡沫失稳机制、稳泡机理和措施 3 个方面。

关键词：泡沫混凝土；泡沫稳定性；失稳机制；稳泡机理
中图分类号：TU528　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2021)10–2266–10
网络出版时间：2021–09–06



Research Progress on Foam Stabilization Method and Mechanism of Foamed Concrete

ZHANG Wenhua[1], *YANG Fenghao*[1], *LV Yujing*[2], *WU Peipei*[1], *ZENG Weizhao*[1], *XU Guodong*[3]

(1. School of Civil Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037. China; 2. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China; 3.Jiangsu Testing Center for Quality of Construction Engineering, Nanjing 210028, China)

Abstract: Stability of foam is one of key factors to determine the comprehensive performance of foamed concrete. However, it is easy to cause coalescence and disproportionation of foams due to the uneven bubble diameter and poor stability of ordinary foam. As a result, the presence of large-sized connected holes will reduce the physical mechanics, thermal insulation and sound insulation properties of foamed concrete. In this review, recent studies on foam in foamed concrete were represented, focusing on three aspects, i.e., foam preparation, foam instability mechanism, bubble stabilization mechanism and measurement.

Keywords: foamed concrete; foam stability; instability mechanism; stabilization mechanism

泡沫混凝土(FC)[1–5]是利用快速搅拌或压缩空气等物理方法预先制备出泡沫，再将泡沫与水泥基材料浆体混合搅拌，经养护后形成的含有大量封闭气孔的轻质混凝土。由于内部含有大量封闭的气孔，泡沫混凝土具有轻质、保温、隔声和耐火的优越性能[6]，可以显著降低建筑能耗，是土木工程领域理想的保温材料[7–8]。

随着建筑节能要求的不断提高以及装配式建筑飞速的发展，泡沫混凝土已成为建筑领域的研究热点。目前，国内外学者们对泡沫混凝土原材料组分、养护制度以及工程应用等方面展开了大量研究，获得了很多有益的研究成果。在原材料组分方面，粉煤灰和硅灰等矿物掺合具有较好的粒形和较高的活性，对流动性能和力学性能具有较好的提升；Jones 等[9]在泡沫混凝土中掺入低 CaO 含量的粉煤灰，发现可显著提高泡沫混凝土的流变性能和抗压性能，同时可提高耐硫酸盐侵蚀性能；Gökçe 等[10]研究了粉煤灰和硅灰对泡沫混凝土硬化性能的影响，发现 2 种矿物掺合料的掺入可有效优化孔隙结构；陈兵等[11–13]研究了硅灰对泡沫混凝土的影响，发现掺加硅灰可优化孔径分布，获得均匀且封闭的圆形孔洞，从而提高抗压强度、隔热性能和耐水性能；此

收稿日期：2020–11–17。　修订日期：2021–01–07。
基金项目：国家自然科学基金面上项目(51978339，51678309)；江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)。
第一作者：张文华(1982—)，男，博士，副教授。
通信作者：许国东(1981—)，男，博士，高级工程师。

Received date: 2020–11–17.　**Revised date:** 2021–01–07.
First author: ZHANG Wenhua (1982–), male, Ph. D, Associate Professor.
E-mail: zhangwenhua2009@163.com
Correspondent author: XU Guodong (1981–), male, Ph. D., Professor.
E-mail: seuxgd@126.com

外，陈兵等[14]还研究了聚丙烯纤维的影响，发现纤维的掺入，可显著提高泡沫混凝土的抗压强度和劈裂抗拉强度。近年来，纳米科技得到了飞速发展，新型纳米材料不断涌现，越来越多的学者也将纳米材料掺加到泡沫混凝土中。胡建城等[15–16]研究了 2 种纳米颗粒对泡沫混凝土水化及性能的影响，结果表明，纳米二氧化硅的掺入会促进泡沫混凝土中硅酸盐矿物的水化，密实水化产物的微观结构，同时有效降低气孔的平均孔径；掺入纳米碳酸钙，可加速水化，提高结构致密化，提高泡沫混凝土的物理力学性能。除了矿物掺合料和纳米材料之外，水和纤维素醚也是泡沫混凝土中重要的组分，杨清等[17]研究了水灰比和羟丙基甲基纤维素醚对泡沫混凝土的影响，结果发现通过改变水灰比可以调节浆体粘度、优化泡沫混凝土的孔结构；羟丙基甲基纤维素醚对泡沫混凝土干密度基本没有影响，但改善了硬化泡沫混凝土的气孔结构，使其抗压强度增强。气泡是泡沫混凝土的重要组成部分，佘伟等[18–19]研究了气泡在碱性水泥浆体中的微结构形成和演化规律，揭示了泡沫的稳定机制。除了基体和气泡，两者之间的界面对泡沫混凝土性能也有影响，卢忠远等[20]对基体和气泡的界面展开了研究，发现泡沫混凝土的性能受界面过渡区影响，通过掺入纳米颗粒可以促进界面过渡区水泥水化，提高泡沫混凝土的力学性能。此外，Falliano 等[21]研究了不同养护条件对泡沫混凝土的断裂行为的影响，认为养护方式会影响泡沫混凝土的综合性能。随着泡沫混凝土理论和技术成熟，也有很多学者致力于泡沫混凝土在实际工程中的推广应用，陈忠平等将泡沫混凝土广泛应用于矿山填充[22–24]和路基回填[25]等，取得了良好的工程效果和经济效益。

泡沫混凝土内部所含的大量封闭孔，是区别于普通混凝土最显著的特征，同时也是引起其力学性能、隔声隔热性能发生质变的原因[26]。泡沫混凝土内部封闭孔的形成与混凝土凝结硬化前泡沫的性能密切相关，包括直径[19,27]、形状[28]、黏度[29–30]、均匀性[31]以及稳定性[32]等。泡沫是一种热力学不稳定的体系，在重力的作用下，发生迁移–融合–排液行为[33] (即泡沫歧化现象)，使泡沫的液膜变薄，稳定性变差。在泡沫混凝土早期结构形成过程中，由于水泥水化不完全，并未形成完整的泡沫混凝土骨架，泡沫歧化现象会使得内部出现大直径孔或连通孔，破坏泡沫混凝土的结构稳定，造成硬化后的泡沫混凝土的物理性能[34](包括保温隔热性能、隔声性能及吸水率等)及力学性能下降[2,35–37]。在实际工程应用中，由于泡沫稳定性问题的存在，限制了泡沫混凝土的一次性浇筑高度，甚至还可能在浇筑及养护过程中发生塌模现象。因此，泡沫的稳定性是决定泡沫混凝土早期的施工性能以及硬化后力学性能、隔声隔热性能的关键因素。

为了方便读者深入了解泡沫混凝土中泡沫及其作用机理，进一步推动泡沫混凝土研究与应用，本综述对近年来泡沫混凝土中泡沫的相关研究进行了全面阐述，主要聚焦于泡沫的制备、泡沫失稳机制、稳泡机理和措施 3 个方面。此外，还对泡沫稳定的科学问题进行了总结与展望。

1　泡沫的制备

1.1　发泡剂的种类

泡沫混凝土采用的物理发泡剂，本质上都是溶于水后能降低液体表面张力的添加剂，对其搅拌或引入空气可产生大量均匀而稳定的泡沫。物理发泡剂的种类较多，常见的有松香树脂类($C_{20}H_{30}O_2$)、表面活性剂类、蛋白类、复合类及其他 5 大类[5,38]。

不同种类的发泡剂，有各自不同的特点。松香树脂类发泡剂与水泥相容性好，对泡沫混凝土有一定增强效果，但发泡率低、泡沫稳定性差。表面活性剂类发泡剂是目前较为常见的，可分为阴离子型、阳离子型、非离子型和两性型；阴离子型发泡性较好，但泡沫稳定性较差；阳离子型表面活性剂发泡性和稳定性均优于阴离子型，但价格较高，且组分可能对泡沫混凝土制品存在一定影响；两性表面活性剂制得的泡沫稳定性高[39]，对水化产物的形成有影响，泡沫混凝土的强度和耐久性更优异，但成本较高；非离子表面活性剂制得的泡沫稳定性好、液膜坚韧、不易破裂，但发泡率低。蛋白类发泡剂起泡力好，泡沫泡径均匀、稳定性高[1,3,40]，受外界条件的影响较小，可用于制备超轻泡沫混凝土[41]，但植物蛋白较难获取，价格昂贵；动物蛋白可能会延长泡沫混凝土的凝结时间。复合类是研究人员在普通发泡剂基础上复合稳泡固泡成分形成的新的发泡剂，发泡能力好、泡沫稳定性高，是目前研究的热点方向[42]。

1.2　泡沫的发泡机理

泡沫的发泡机理，是发泡剂中表面活性物质或表面活性剂溶于水以后，形成一种双电子结构，将空气包围形成的气泡。气泡的形成需克服液体表面张力，以溢出表面，泡沫由很薄的水膜包裹空气形成。发

泡剂本质都是活性较高的表面活性剂[18,29–30,43]，能在液膜表面定向吸附、排列，在一定浓度范围内，可有效降低液体表面张力[44–46]。因此，一般来说，液膜表面张力越低，气泡形成越容易，发泡剂的发泡性能越好[18,47–49]；然而，表面张力大小并不能完全反映发泡能力[27]。研究表明，发泡剂的发泡能力还与自身分子内在作用力、温度以及发泡方式等多种因素有关[50–53]。文献[54]从泡沫混凝土的角度揭示发泡剂、泡沫及相关因素之间的关系。

2 泡沫失稳

2.1 泡沫失稳现象

泡沫体系不是一个静态的平衡系统，其结构和性能会随着时间的推移而发生变化。

佘伟等[4]利用原位 X 射线断层扫描技术(XCT)，观察到了泡沫混凝土早期(10、40、60 min 和 180 min)内部浆体的变化规律。通过 XCT 图像发现：在 40 min 内，由于早期凝结硬化产生的水化产物等相互搭接形成的结构不能抵抗泡沫上浮产生的浮力，导致泡沫混凝土出现分层和密度不均匀；随着时间的推移，分层现象逐渐不明显，并逐步形成泡沫混凝土骨架。

Sun 等[37]研究了合成型表面活性剂(SS)、植物表面活性剂(PS)和动物胶/血基表面活性剂(AS) 3 种不同发泡剂制得的湿泡沫在空气中的稳定性及泡沫混凝土的物理力学性能。试验发现：不同的泡沫在空气中均会发生歧化，在宏观上表现为泡沫液膜变薄、逐步液化还原成发泡液；但不同泡沫的稳定性不同，SS 泡沫的稳定能力优于 AS 泡沫，PS 泡沫次之；SS 型泡沫制得的泡沫混凝土，孔结构分布、强度、干缩性能、抗冻性能均优于其他 2 种。

上述研究表明，泡沫在空气中和泡沫混凝土成型、养护阶段均存在失稳歧化的现象，可以通过某些措施提高泡沫的稳定性，抑制泡沫歧化现象的发生，或延缓泡沫歧化的速度。对于研究和工程人员来讲，若要采取措施抑制泡沫歧化，提高泡沫的稳定性能，制备出性能优异的泡沫混凝土，必须了解泡沫歧化失稳的机理，才能既高效又有针对性并在一定程度上降低泡沫混凝土的制备成本。

2.2 泡沫失稳机理

总结文献[18,32,55–59]等的研究，可认为泡沫失稳是由泡沫液膜的排液变薄、气体扩散和膜破裂 3 种作用共同引起[59]。

泡沫液膜的排液可分为重力排液和表面张力排液。重力排液发生在气泡间的液膜，由于液体密度远大于气体密度，在重力和表面张力作用下，产生向下的排液现象，使液膜变薄，最终破裂。表面张力排液是气泡大量堆积的结果，当泡沫大量聚集时，会形成多面体泡沫，在气泡交界处形成 Plateau 边界(图 1)。*B* 处可近似看成平液面，*A* 处为气泡交界处的凹液面；由 Young–Laplace 公式[式(1)]知，*A* 处的压力小于 *B* 处($R=\infty$)的液体压力，液体从 *B* 处向 *A* 处排液，使 *B* 处的液膜逐渐变薄，最终破裂。

$$p=\gamma/R \tag{1}$$

其中：p 为气泡的附加压力(N)；γ 为表面张力(mN/m)；R 是液膜的曲率半径(m)。

气体扩散是由于相邻泡沫的泡径不均匀，导致附加压力不等，在力的作用下发生了泡沫的迁移和气体扩散。在气液体系中，泡径越小，泡沫的附加压力越大，小气泡会通过液膜向大气泡排气，使小气泡变小直至消失，大泡变大，同时液膜变薄，最终破裂。此外，由于内部的附加压力大于大气压，液面上的泡沫会通过液膜直接向大气排气，最后破灭。

膜破裂是气泡液膜变薄的结果。在气液体系中，泡沫表面的能量很大，在液膜表面形成一个小孔所需的活化能约为 γn^3，其中 γ 为泡沫的表面张力(mN/m)，n 为液膜的厚度(m)。随着液膜变薄，形成小孔所需的活化能越小，越容易发生膜的破裂。

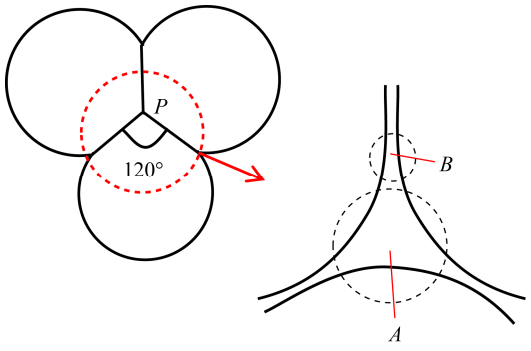


图 1 Plateau 边界示意图

Fig. 1 Diagram of Plateau boundary

3 种变化共同作用，引起泡沫间的融合、破灭，造成了泡沫的歧化、失稳[55]。上述机理分析表明，泡沫稳定性主要取决于泡沫大小的均匀性和泡沫液膜的质量。提高泡沫孔径的均匀性和泡沫液膜的厚度和韧度，是制备超稳定泡沫的关键所在，更是制备泡沫混凝土不可忽视的重要环节。

3　稳泡措施和机理

泡沫体系是亚稳定的，采用稳定剂可提高泡沫的稳定性能，有效减缓泡沫歧化的不同机制，即排液、气体扩散和膜破裂[55]。

传统稳泡剂按其作用方式可分为 2 类：一类是通过协同作用加强表面吸附分子之间的相互作用，使泡沫膜的弹性增大，透气性减小，从而提高泡沫的稳定性，典型代表是月桂醇、硅树脂聚醚乳液[60]等；另一类主要是通过提高液相黏度来降低泡沫的排液速率，延长半衰期，从而提高泡沫稳定性，典型代表是聚丙烯酰胺[61]、明胶、聚乙二醇等。随着技术的进步，目前出现了第三类稳泡剂——纳米固体粒子稳泡剂。

3.1　协同型稳泡剂

3.1.1　月桂醇　　在发泡液中加入适量月桂醇时会在气/液界面形成更加致密的混合膜结构，月桂醇分子穿插入液膜中表面活性离子团之间，可有效增加分子间的 van der Waals 力，提高液面黏度；月桂醇分子的添加可有效降低表面活性剂负离子团之间的电排斥性作用，提高液膜强度。

3.1.2　硅树脂聚醚乳液　　加入适量的硅树脂聚醚乳液，可改变液膜分子的排列结构，泡沫液膜上分子间排列更为紧密，改善液膜的自修复能力与弹性，从而起到稳泡的效果。

3.1.3　硬脂酸钙　　硬脂酸钙(CaSt)是一种有机化合物(分子式为 $C_{36}H_{70}CaO_4$)，作为稳泡剂可降低溶液的表面张力[62]，与阴离子表面活性剂发挥协同作用，提高泡沫的稳定性，缩小泡沫的泡径，提高均匀性。采用 CaSt 稳定泡沫可使泡沫混凝土内部孔径变小，减少连通孔比例，从而提高泡沫混凝土的物理、力学性能。

3.1.4　表面活性剂　　表面活性剂中的表面活性分子可在液膜表面定向排列，降低表面张力，抑制空间密度在气/液界面上的波动[58]；表面活性剂具有一定黏度[63]，提高界面弹性，延缓泡沫排水[58]。2 者的协同作用使得表面活性剂具有一定的稳泡效果，但不同表面活性剂的发泡性能和稳定性能不同。

1) 表面活性分子的烷基链和疏水链是影响泡沫稳定性能的主要因素，通过烷基链段和疏水链段的结构和长度表现出来。表面活性分子中的某些元素可与氢、氧离子以配位键相结合[64]，有效增强表面活性分子之间的相互作用，提高泡沫的稳定性能。Zhang 等[64]研究了可可酰丙基二甲胺的表面活性剂($UC_{11}AMPM$))和十二烷基硫酸钠(SDS)的相互作用机理，认为分子间的静电吸引力可促进表面活性剂分子排列在泡沫液膜的表面，提高泡沫的稳定性能。

2) 与单链结构的表面活性剂相比，双链表面活性剂的稳泡性能更好。双链表面活性剂存在连接基，连接基存在氢键作用，使分子间的相互作用力增强，形成的液膜更稳定。

3) 双层泡沫比单层泡沫的稳定性更好。Du 等[65]设计了与胶体气膜结构相似的多层膜超稳定泡沫。该泡沫液膜由十二醇(DDA)、十二烷基磺酸钠(SDS)和聚乙烯醇(PVA)分子自发形成。通过分子动力学(MD)模拟，分析了泡沫膜中水分子的状态和分子排列，认为多(双)层泡沫通常能承受较大的波动阈值，可有效增强气液界面分子网络的密实度，降低气体扩散速率，使泡沫体系稳定。

分析已有研究可发现，协同型稳泡剂具备一定的稳泡效果，可和其他发泡剂协同作用，增强泡沫的稳定性能。但此类稳泡剂的稳泡效果有限，通常需要引入其他类别的泡沫稳定剂，进一步提高泡沫的稳定性能。

3.2　增黏性稳泡剂

增黏性稳泡剂的掺入，可增加发泡液黏度、延缓液膜的排水速度、细化泡沫孔径[40]，延缓泡沫的歧化过程，起到提高泡沫均匀性和稳定性的作用[66]。这也是目前最常见的稳泡方式，常见的增黏性稳泡剂有如下几种：

3.2.1　聚乙二醇　　聚乙二醇分子量增加，使水相黏度增加，一方面会影响起泡剂分子从水相扩散到气/液表面的扩散速率，表面张力降低幅度较小，使得起泡剂的起泡性能下降；另一方面，水溶液黏度增加，降低了液膜排液速率，起泡剂稳泡性能增加[52]。

3.2.2　纤维素　　纤维素作为一种高分子化合物，可与发泡剂中的表面活性分子相互作用，显著增强液膜的厚度和韧度，提高液膜弹性和自修复能力，减缓泡沫排液速率[4,66–68]。此外，在泡沫引气溶液中加入纤维素可优化泡沫形貌，增加发泡液的黏度，细化泡沫孔径，提高泡沫的均匀性，抑制泡沫的迁移、融合和破灭。

3.2.3　胶体　　在制备泡沫混凝土时，采用的胶体稳泡剂有黄原胶和明胶 2 种。

黄原胶(XG)具有良好的水溶性和增稠能力，可有效提高液体黏度，增加液膜的厚度[69]，降低泡沫

的泌水率，提高泡沫孔径的均匀性，提高泡沫稳定性。采用黄原胶作为泡沫稳定剂，制备的泡沫混凝土的孔隙较小且孔径均匀，孔壁厚度大，连通孔隙少[70]，使得泡沫混凝土在外力作用下各孔隙受力均匀，力学性能得到明显提升。

明胶作为大分子物质没有降低表面张力的作用，因此不具备增强起泡性的能力；但添加明胶能提高液体的黏稠度，使制得的泡沫质量较高，透气性小，稳定性提高。若掺量过大，会使液体黏稠太大，克服黏滞阻力做的功也越大，起泡力降低，且液膜中液体的比例增加，加快了重力排液，降低了泡沫的稳定性。明胶的合适掺量(质量分数)为 1%。

目前，增稠性稳泡剂是最常用的稳泡剂，稳泡效果显著，价格低廉，制备工艺简单，已逐步应用于实际工程中，其中以纤维素和胶体最为常见。某些高分子聚合物类增稠型稳泡剂(如聚丙烯酰胺等)在高温条件下极易分解，且残留有机物会造成环境污染，应谨慎使用。

3.3 固体粒子稳泡

固体颗粒[71]是最理想的稳泡材料，颗粒[72–75]不可逆地、自发地吸附在气液界面[71]，平衡界面的张力，形成固–液–气三相泡沫[76–79]，防止气相转移，阻碍气液相间的物理排水。在泡沫混凝土中加入三相泡沫，不仅可提高泡沫稳定性，还可以优化泡沫混凝土的孔隙结构、提高孔隙结构强度。研究表明，硅灰颗粒[78]、纳米二氧化硅颗粒[4]和碳纳米管粒子[79]均可有效保持甚至改善泡沫的细胞结构，提高泡沫的稳定性能。

3.3.1 硅灰稳泡 硅灰本质上是无机纳米到微米尺寸的硅颗粒，与表面活性剂之间存在静电作用，可在气/液界面处静电吸附，形成固–液–气三相泡沫，提高液膜厚度和韧度，使泡沫更加稳定；硅灰比表面积极大，可吸附大量水分，提高发泡液粘度，延缓液膜排水，提高泡沫的稳定性。

Wang 等[78]研究了硅灰颗粒对泡沫混凝土的稳定性能，结果表明：在液体发泡阶段(F1)，硅灰的加入可细化使泡沫孔径，提高泡沫稳定性；在制备混凝土时加入硅灰(F2)，同样有利于稳定泡沫，但稳定效果不同。通过对比分析，发现 F1 样品具有更佳的强度/质量比，且其孔径最小，孔径分布合理，故具有更好的性能。

硅灰具备粒径小，比表面积极大的特点，因此在发泡液中添加硅灰，可吸附大量的水分，提高发泡液的黏度，这对于提高泡沫稳定性是有益的。在浆体中掺入硅灰，亦可提高浆体的黏度，提高浆体对泡沫的约束力，抑制泡沫迁移融合，提高泡沫的稳定性能，促进泡沫混凝土早期骨架的形成。此外，硅灰具有较高的活性，能与水泥水化产物——氢氧化钙发生二次水化反应，生成水化硅酸钙等反应产物，可显著提高泡沫混凝土的强度。相较于其他类别的稳泡剂而言，硅灰的价格较为便宜，且制备工艺简单，只需要加入搅拌均匀即可，却能起到非常好的稳泡效果，因此硅灰是一种非常理想的稳泡和强度增强矿物掺合料，可将其应用于实际工程中。

3.3.2 纳米二氧化硅粒子稳泡 近年来，纳米技术迅速发展，工程研究人员在泡沫混凝土制备过程中，将纳米二氧化硅作为泡沫混凝土的泡沫稳定剂[44,80–85]。Hou 等[86]在发泡液中掺入亲水性纳米二氧化硅，发泡液的黏度增加，预制泡沫的稳定性明显提高；Krämer 等[76]采用椰油酰胺丙基甜菜碱和亲水性气相纳米二氧化硅制备出超稳定三相泡沫，并将其引入到泡沫混凝土中。采用能量色散 X 射线光谱仪(EDX)和扫描电子显微镜(SEM)分析孔隙结构，发现在三相泡沫的影响下，在孔内表面和孔外表面形成了一层较薄的 $Ca(OH)_2$ 和 C–S–H 共生长晶体，有效提高泡沫混凝土强度。

佘伟等[4]采用疏水性纳米二氧化硅(NS)、HPMC 和甜菜碱表面活性剂制备出超稳定性湿泡沫。认为 NS、HPMC 和表面活性剂之间存在相互作用力，吸附在气液表面，协同稳泡；同时增加胞壁的黏度，减缓气泡的聚结和歧化。NS 不仅可提高泡沫的稳定能，同时可与混凝土的有效成分发生反应，导致了胞壁结构的致密化，提高泡沫混凝土的强度。

Chen 等[87]给出了与佘伟完全相悖的结论，认为完全亲水的粒子不会吸附在气/液界面上，接触角接近 90°的亲水粒子(部分疏水)可作为泡沫稳定剂，接触角大于 90°的疏水性粒子会使得泡沫不稳定，被用作消泡剂。

由上述研究可知，研究人员对于纳米粒子的稳定机理尚未得到一个统一的认知，甚至相互矛盾[88]。但目前混凝土领域对纳米二氧化硅粒子稳泡机理的理论研究还较少，而其他领域对于纳米二氧化硅的吸附[89]、稳泡机理相对成熟，借鉴总结其他领域的研究对纳米二氧化硅粒子的稳定机理作出如下总结概述：

疏水性纳米二氧化硅和亲水性纳米二氧化硅均可作为稳泡剂使用[90–91]，但均存在一个临界胶束浓

度[92–93]。纳米二氧化硅粒子在气–液界面的聚集吸附[94–96]，可降低表面能[97]和表面张力[98]，有效提高泡沫的发泡性能，同时可显著提高膜的强度、黏弹性支撑力和泡沫稳定性[88,99–101]。由于表面润湿性能不同，亲水性纳米二氧化硅颗粒和疏水性纳米二氧化硅颗粒对泡沫的稳定机理，并不完全相同。

除了纳米粒子的表面润湿性能，纳米颗粒的粒径对泡沫的稳定性有重要影响。粒径越小，颗粒在界面上堆集越密集，阻止液膜泡排液能力越强，稳泡效果越好。此外，表面活性剂浓度对纳米粒子的吸附作用亦存在不可忽视的影响[94]。

疏水性 NS 颗粒对泡沫的稳定性能是双面的。低浓度的疏水性 NS 颗粒，泡沫流失速率较快，不利于稳泡，主要原因为：当疏水性 NS 粒子浓度较低时，颗粒加入泡沫体系后，表面活性剂的疏水链以疏水吸附方式吸附于 NS 粒子的表面上[104]，粒子表面由疏水性转变为亲水性，同时表面活性剂无法在气/液界面聚集，液膜表面的表面活性剂浓度降低[92,99]，液膜的表面黏度降低，液膜自修复作用下降，液膜的排液速率加快，泡沫变得极不稳定[105]。当浓度大于临界胶体浓度时(约 3.0%[94,102–103])，疏水性 NS 粒子起稳泡作用。疏水性 NS 粒子虽然在一定程度上消耗了表面活性剂单体[106]，降低了表面活性剂的活性，减少发泡体积，但研究表明表面活性剂和 NS 颗粒之间会发生静电相互作用[107]，增强界面附近表面活性物质的能力，有效降低液体表面张力，更易产生泡沫。此外，NS 粒子逐渐聚集向气–液界面移动，形成一个保护网，从而增加了表面强度，泡沫稳定性得到很大提升。

与疏水性 NS 粒子一致，亲水性 NS 粒子的浓度对泡沫稳定性有不可忽视的影响[108]。在系统中，存在一个临界浓度，在此浓度下纳米颗粒的吸水性和水合物的形成可能会达到平衡。在低浓度时，NS 颗粒分离良好，聚集度较低。高浓度情况下，NS 颗粒易发生聚集，增加水的吸收，液体黏度增加。对于亲水性粒子的稳定机理，尚未得到统一。总结归纳，亲水性 NS 的稳泡作用是由于如下 3 种原因：

1) 普通增黏作用。当亲水性纳米粒子浓度低于临界胶束浓度(约为 4.0%)时，亲水性粒子可有效提高泡沫的黏度，增强泡沫的稳定性；当颗粒浓度达到临界胶束浓度时，随着搅拌作用的增加，纳米颗粒与团聚体之间的碰撞会加剧，这对纳米颗粒表面吸附的水膜产生了较强的破坏作用。纳米效应的消失和吸附力的减弱导致亲水性纳米颗粒对泡沫的作用从促进到抑制。

2) 亲水颗粒改性。泡沫稳定剂(包括表面活性剂)可对亲水性 NS 颗粒表面进行改性[109−110]，使其具备一定的疏水性[87]。Wang 等[101]通过红外光谱测试，发现亲水性 NS 表面的主要亲水基团是羟基。羟基氢键结合水分子，与水合物直接竞争宿主分子。在亲水性 NS 表面吸附的水分子与羟基基团形成氢键，在疏水甲烷分子通过弱 van der Waals 力的影响下，羟基基团保持稳定。因此，吸附在纳米颗粒表面的水分子很难重新排列，形成包合水合物结构，纳米颗粒的聚集和水或气体的吸附达到了平衡。

3) 物理屏障作用。Singh 等[111]使用亲水、荧光标记的二氧化硅纳米颗粒(FL-NP)进行了共聚焦激光扫描显微镜扫描，得到了 2D 图像，并对图像进行 3D 重建。结果表明，纳米颗粒在 2 个气泡之间的液体膜中形成物理屏障，起胶状护层作用，可以延缓气泡的凝聚和粗化过程，增强了泡沫的稳定性。

由于纳米二氧化硅粒径极小，而比表面积巨大，因此适量亲水性纳米二氧化硅可吸收大量水分，提高发泡液的黏度，延缓泡沫歧化，细化泡沫的孔径，提高泡沫均匀性和稳定性，即亲水性纳米二氧化硅可作为增稠性稳泡剂。而对于疏水性纳米二氧化硅而言，可与表面活性剂发生反应，促进三相泡沫的生成，提高泡沫的稳定性，即疏水性纳米二氧化硅可作为协同稳泡剂。

目前，纳米二氧化硅的制备工艺较为成熟，相较于其他类别的纳米材料，造价相对较低。由于用于稳泡作用的 NS 掺量较小，分散工艺简便，具备实际工程应用的潜力。

3.3.3　碳纳米管稳泡　　Krämer 等[79]采用甜菜碱制备泡沫，并在泡沫结构中引入纳米管，制备出增强的三相泡沫(TPF)，将其掺入超高性能泡沫混凝土，发现甜菜碱、纳米管对泡沫混凝土水化产物的结构和形貌有影响，有效优化泡沫混凝土的力学性能。并利用分子动力学软件，计算了碳纳米管表面羧基的统计距离，认为 Ca^{2+}与碳纳米管之间存在静电相互作用，首先发生在碳纳米管脱质子的羧基上，当 Ca^{2+}吸附后，甜菜碱分子的羧基相互作用；烷基链与碳纳米管表面之间出现 van der Waals 力，使甜菜碱的亲水基靠近碳纳米管表面，促进吸附。此外，纳米管不仅通过官能团与钙离子相互作用，而且由于其具有非均相成核的能力，其表面可能会析出含

有钙离子的反应产物。因此，在泡沫中掺入适量 CNTs 不仅可有效提高泡沫的稳定性，同时可提高泡沫混凝土的力学性能。

目前碳纳米管的生产工艺还不完全成熟，无法大批量获得，故 CNT 材料的造价非常昂贵；此外，由于碳纳米管表面能巨大，在自然状态下极易发生团聚，在使用过程中需采用复杂的颗粒分散技术和分散工艺。因此，碳纳米管稳泡的技术手段，还仅停留于试验室的理论研究阶段，还未能大批量地用于实际工程中。

3.4 其他

文献[4]和文献[36]指出，泡沫稳定平衡态时，有 5 种力作用在气泡上，分别是泡沫约束力(F_c)、液膜排液力(F_d)、内部泡沫压力(P_i)、泡沫表面张力(F_{st})以及泡沫浮力(F_b)。约束力 F_c 由浆体提供，与浆体性能密切相关，其他 4 种均由泡沫本身决定[112]。

泡沫的稳定状态，可通过调整水胶比[113]、矿物掺合料[114]等方法调控。水胶比越小，浆体黏度越高，浆体对泡沫的约束力越高，可有效抑制泡沫迁移融合，避免发生逸泡、离析现象[113]，提高泡沫的稳定性能。此外，可通过掺入适量矿物掺合料，调整浆体黏度，改善孔隙结构。例如，掺入适量的粉煤灰[115]或硅灰[116]，可提高浆体的黏度，提高浆体对泡沫的约束力，抑制泡沫迁移融合，提高泡沫的稳定性能，促进泡沫混凝土早期骨架的形成。

4 结论与展望

综上所述，泡沫失稳是由泡沫液膜的排液变薄、气体扩散和膜破裂 3 种作用协同引起的。因此，研究人员多采用了如下稳泡措施：

1) 提高泡沫液膜的厚度、韧度和黏度；

2) 降低气/液界面的界面张力；

3) 细化泡沫的孔径，减少液膜排液，阻止泡沫内气体扩散，降低膜破裂的可能性；

4) 提高浆体黏度，增加浆体对泡沫的约束力，抑制泡沫迁移融合，提高泡沫的稳定性能。

目前，中国正处于全面推动绿色装配式建筑的进程中，泡沫混凝土作为易于装配化的轻质保温材料受到广泛关注，但由于泡沫稳定性较差，在一定程度上限制了泡沫混凝土的推广应用。基于以上分析，提出以下建议：

1) 从理论出发，深入研究各类稳定剂对泡沫的影响，揭示泡沫的稳定机理。

2) 优选适用于泡沫混凝土的物理发泡剂，综合研究发泡剂种类对泡沫混凝土综合性能的影响，包括凝结时间、水化产物的形成和物理力学性能等，为实现泡沫混凝土大规模工业化做准备。

3) 研究泡沫在泡沫混凝土制备至固化过程中的形貌变化过程，描述泡沫混凝土早期的水化作用对泡沫稳定性和分布状态的影响，并做出定量描述和理论预测，避免由于早期稳定性差，强度低而造成塌模。

参考文献:

[1] AMRAN Y H M, FARZADNIA N, ABANG ALI A A. Properties and applications of foamed concrete: a review[J]. Constr Build Mater, 2015, 101: 990–1005.

[2] RAMAMURTHY K, KUNHANANDAN NAMBIAR E K, et al. A classification of studies on properties of foam concrete[J]. Cem Concr Compos, 2009, 31(6): 388–396.

[3] RAJ A, SATHYAN D, MINI K M. Physical and functional characteristics of foam concrete: A review[J]. Constr Build Mater, 2019, 221: 787–799.

[4] SHE W, DU Y, MIAO C, et al. Application of organic-and nanoparticle-modified foams in foamed concrete: Reinforcement and stabilization mechanisms[J]. Cem Concr Res, 2018, 106: 12–22.

[5] 张巨松, 王才智, 黄灵玺, 等. 泡沫混凝土[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2016.

[6] 王洪镇, 曹万智, 付东根. 流态轻集料微孔混凝土技术[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2013.

[7] LI P, WU H, LIU Y, et al. Preparation and optimization of ultra-light and thermal insulative aerogel foam concrete[J]. Constr Build Mater, 2019, 205: 529–542.

[8] 张文华, 吕毓静, 刘鹏宇. EPS 混凝土研究进展综述[J]. 材料导报, 2019, 33(13): 2214‒2228.
ZHANG Wenhua, LV Yujing, LIU Pengyu. Mater Rep (in Chinese), 2019, 33(13): 2214–2228.

[9] JONES M, MCCARTHY A. Utilising unprocessed low-lime coal fly ash in foamed concrete[J]. Fuel, 2005, 84(11): 1398–1409.

[10] GÖKÇE H S, HATUNGIMANA D, RAMYAR K. Effect of fly ash and silica fume on hardened properties of foam concrete[J]. Constr Build Mater, 2019, 194: 1–11.

[11] CONG M, BING C. Properties of a foamed concrete with soil as filler[J]. Constr Build Mater, 2015, 76: 61–69.

[12] 陈兵, 胡华洁, 刘宁. 生土泡沫混凝土试验研究[J]. 建筑材料学报, 2015, 18(1): 1–6.
CHEN Bing, HU Huajie, LIU Ning. J Build Mater (in Chinese), 2015, 18(1): 1–6.

[13] 陈兵, 刘睫. 纤维增强泡沫混凝土性能试验研究[J]. 建筑材料学报, 2010, 13(3): 286–290+340.
CHEN Bing, LIU Jie. J Build Mater (in Chinese), 2010, 13(3): 286–290+340.

[14] LAUKAITIS A, KERIENĖ J, MIKULSKIS D, et al. Influence of fibrous additives on properties of aerated autoclaved concrete forming mixtures and strength characteristics of products[J]. Constr Build Mater, 2009, 23(9): 3034–3042.

[15] 胡建城. 纳米材料改性水泥粉煤灰体系泡沫混凝土的性能研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2019.

HU Jiancheng. Research on performance of cement-fly ash system foamed concrete modified by nano materials (in Chinese, dissertation). Wuhan: Wuhan University of Technology, 2019.

[16] 胡建城, 吕阳, 何晨昊, 等. 纳米二氧化硅粉末对水泥-粉煤灰体系泡沫混凝土力学性能及水化的影响[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(5): 1390–1394.
HU Jiancheng, LV Yang, HE Chenhao, et al. Bull Chin Ceramic Soc (in Chinese), 2019, 38(5): 1390–1394.

[17] 杨清. 超轻泡沫混凝土的性能及结构调控[D]. 山东: 济南大学, 2020.
YANG Qing. Performance and structure control of ultra-light foamed concrete (in Chinese, dissertation). Shandong: Jinan University, 2020.

[18] 余伟. 水泥基多孔材料微结构形成机理与传热行为的研究[D]. 南京: 东南大学, 2014.
SHE Wei. Investigation of microstructure formation mechanism and thermal transfer behavior of cement based porous material (in Chinese, dissertation). Nanjing: Southeast University, 2014.

[19] WEI S, YUNSHENG Z, JONES M R. Using the ultrasonic wave transmission method to study the setting behavior of foamed concrete[J]. Constr Build Mater, 2014, 51: 62–74.

[20] 侯莉. 泡沫混凝土界面过渡区调控机制研究[D]. 四川: 西南科技大学, 2020.
HOU Li. Study on regulation mechanism of interfacial transition zone in foam concrete (in Chinese, dissertation). Sichuan: Southwest University of Science and Technology, 2020.

[21] FALLIANO D, DE DOMENICO D, SCIARRONE A, et al. Fracture behavior of lightweight foamed concrete: The crucial role of curing conditions[J]. Theoret Appl Fracture Mech, 2019, 103: 102297.

[22] 张木毅, 陈忠平, 汪建斌, 等. 矿山采场的高性能泡沫砂浆充填方法[P]. 2011–11–30.
Zhang Muyi, Chen Zhongping, Wang Jianbin, et al. High performance foam mortar filling method for mine stope (in Chinese). 2011, 11: 30.

[23] 陈忠平, 翟淑花, 高谦, 等. 泡沫砂浆充填体力学特性及其应用研究[J]. 金属矿山, 2010(8): 7–10.
CHEN Zhongping, ZHAI Shuhua, GAO Qian, et al. Metal Miner (in Chinese), 2010(8): 7–10.

[24] 翟淑花, 高谦, 张梅花, 等. 高强轻质泡沫砂浆充填体在矿山的应用研究[J]. 化工矿物与加工, 2010, 39(12): 30–34.
ZHAI Shuhua, GAO Qian, ZHANG Meihua, et al. Chem Miner Process (in Chinese), 2010, 39(12): 30–34.

[25] 黄小波, 陈忠平. 泡沫轻质土在高速公路路基高填方的应用[J]. 低温建筑技术, 2017, 39(9): 119–121.
HUANG Xiaobo, CHEN Zhongping. Low Temp Build Tech (in Chinese), 2017, 39(0): 119–121.

[26] 李相国, 刘敏, 马保国, 等. 孔结构对泡沫混凝土性能的影响与控制技术[J]. 材料导报, 2012, 26(7): 141–144.
LI Xiangguo, LIU Min, MA Baoguo, et al. Mater Rep (in Chinese), 2012, 26(7): 141–144.

[27] 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. J Build Mater(in Chinese), 2020, 23(3): 589–595.

[28] SHE W, ZHAO G, CAI D, et al. Numerical study on the effect of pore shapes on the thermal behaviors of cellular concrete[J]. Constr Build Mater, 2018, 163: 113–121.

[29] 李玲. 表面活性剂与纳米技术[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2003.

[30] 赵国玺, 朱珋瑶. 表面活性剂作用原理[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2003.

[31] WU C, NESSET K, MASLIYAH J, et al. Generation and characterization of submicron size bubbles[J]. Adv Colloid Interface Sci, 2012, 179–182: 123–132.

[32] 穆枭. 三相泡沫稳定性与消泡研究[D]. 湖南: 中南大学, 2005.
MU Xiao. Study on stability and defoaming of three-phase foam (in Chinese, dissertation). Hunan: Central South University, 2005.

[33] LI X, YANG Y, MURRAY B S, et al. Combination of egg white protein and microgels to stabilize foams: Impact of processing treatments[J]. J Food Eng, 2020, 275: 109860.

[34] HE J, GAO Q, SONG X, et al. Effect of foaming agent on physical and mechanical properties of alkali-activated slag foamed concrete[J]. Constr Build Mater, 2019, 226: 280–287.

[35] NAMBIAR E K K, RAMAMURTHY K. Air−void characterisation of foam concrete[J]. Cem Concr Res, 2007, 37(2): 221–230.

[36] JONES M R, OZLUTAS K, ZHENG L. Stability and instability of foamed concrete[J]. Magazine Concr Res, 2016, 68(11): 542–549.

[37] SUN C, ZHU Y, GUO J, et al. Effects of foaming agent type on the workability, drying shrinkage, frost resistance and pore distribution of foamed concrete[J]. Constr Build Mater, 2018, 186: 833–839.

[38] 谷亚新, 王延钊, 王小萌. 不同工艺泡沫混凝土的研究进展[J]. 混凝土, 2013(12): 148–152.
GU Yaxin, WANG Yanzhao, WANG Xiaomeng. Concrete (in Chinese), 2013(12): 148–152.

[39] MÜLLER T, KRÄMER C, PRITZEL C, et al. Influence of cocamidopropyl betaine on the formation and carbonation of portlandite – A microscopy study[J]. Constr Build Mater, 2018, 163: 793–797.

[40] FALLIANO D, RESTUCCIA L, GUGLIANDOLO E. A simple optimized foam generator and a study on peculiar aspects concerning foams and foamed concrete[J]. Constr Build Mater, 2021, 268: 121101.

[41] FALLIANO D, DE DOMENICO D, RICCIARDI G, et al. Experimental investigation on the compressive strength of foamed concrete: Effect of curing conditions, cement type, foaming agent and dry density[J]. Constr Build Mater, 2018, 165: 735–749.

[42] 李文博. 泡沫混凝土发泡剂性能及其泡沫稳定改性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
LI Wenbo. The comparison of foaming agent and the researeh of foam stability modification (in Chinese, dissertation). Dalian: Dalian University of Technology, 2009.

[43] 陈宗淇, 王光信, 徐桂英. 胶体与界面化学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.

[44] KUMAR S, MANDAL A. Investigation on stabilization of CO_2 foam by ionic and nonionic surfactants in presence of different additives for application in enhanced oil recovery[J]. Appl Surf Sci, 2017, 420: 9–20.

[45] 孙乾. 改性 SiO_2 纳米颗粒稳泡机理及渗流特征研究[D]. 山东: 中国石油大学(华东), 2015.
SUN Gan. Properties of nanoparticle-stabilized foam and its flow behavior in porous media (in Chinese, dissertation). Shandong: China University of Petroleum, 2015.

[46] SINGH L P, BHATTACHARYYA S K, KUMAR R, et al. Sol-Gel processing of silica nanoparticles and their applications[J]. Adv Colloid Interface Sci, 2014, 214: 17–37.

[47] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JG/T266-2011 泡沫混凝土标准[S]. 2011.

[48] TYOWUA A T, BINKS B P. Growing a particle-stabilized aqueous

foam[J]. J Colloid Interface Sci, 2020, 561: 127–135.

[49] QIAO M, CHEN J, YU C, et al. Gemini surfactants as novel air entraining agents for concrete[J]. Cem Concr Res, 2017, 100: 40–46.

[50] 吴文祥, 徐景亮, 崔茂蕾. 起泡剂发泡特性及其影响因素研究[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2008(3): 72–75.
WU Wenxiang, XU Jingliang, CUI Maolei. J Xi'an Shiyou U (Nat Sci Ed) (in Chinese), 2008(3): 72–75.

[51] 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. J Southeast U (Nat Sci Ed) (in Chinese), 2020, 50(4): 651–657.

[52] 杨冰儒, 曲广淼, 杨小燕. 两性离子型起泡剂的性能评价研究[J]. 能源化工, 2017, 38(6): 54–58.
YANG Bingru, QU Guangmiao, YANG Xiaoyan. Ener Chem Eng, 2017, 38(6): 54–58.

[53] GONZENBACH U T, STUDART A R, TERVOORT E, et al. Stabilization of foams with inorganic colloidal particles[J]. Langmuir, 2006, 22(26): 10983–10988.

[54] SAHU S S, GANDHI I S R, KHWAIRAKPAM S. State-of-the-art review on the characteristics of surfactants and foam from foam concrete perspective[J]. J Ins Eng (India). Series A, 2018, 99(2): 391–405.

[55] RIO E, DRENCKHAN W, SALONEN A, et al. Unusually stable liquid foams[J]. Adv Colloid Interface Sci, 2014, 205: 74–86.

[56] PUGH R J, YKI Y I. Foaming, foam films, antifoaming and defoaming[J]. Adv Colloid Interface Sci, 1996, 64: 67–142.

[57] SHE W, DU Y, ZHAO G, et al. Influence of coarse fly ash on the performance of foam concrete and its application in high-speed railway roadbeds[J]. Constr Build Mater, 2018, 170: 153–166.

[58] 辜炯益. 活性二氧化硅稳泡剂的制备及泡沫性能研究[D]. 四川: 西南石油大学, 2018.
GU Jiongyi. Preparation of active silica foam stabilizer and study on foam properties (in Chinese, dissertation). Sichuan: Southwest Petroleum University, 2018.

[59] DHASINDRAKRISHNA K, PASUPATHY K, RAMAKRISHNAN S, et al. Effect of yield stress development on the foam-stability of aerated geopolymer concrete[J]. Cem Concr Res, 2020, 138: 106233.

[60] 马秋, 杨红健, 杨少明, 等. 氯氧镁水泥复合发泡剂的研究[J]. 新型建筑材料. 2018, 45(12): 56–60.
MA Qiu, YANG Hongjian, YANG Shaoming, et al. New Build Mater (in Chinese), 2018, 45(12): 56–60.

[61] 陈耿, 陈培鑫, 李建新, 等. 复配组分对复合型发泡剂性能的影响研究[J]. 广东土木与建筑. 2019, 26(3): 28–31.
CHEN Geng, CHEN Peixin, LI Jianxin, et al. Guangdong CE Arch (in Chinese), 2019, 26(3): 28–31.

[62] 高鹤, 王丽洁. 阴离子表面活性剂及其与稳泡剂协同作用对泡沫混凝土性能的影响[J]. 新型建筑材料, 2020, 47(2): 137–140.
GAO He, WANG Lijie. New Build Mater (in Chinese), 2020, 47(2): 137–140.

[63] MA L, BAO L, HU D, et al. Effect of interfacial properties on the stability of ultra-dry CO_2-in-water (C/W) foams stabilized with zwitterionic surfactants and nonionic/anionic polymers: Experimental and DPD simulation[J]. J Supercrit Fluids, 2020, 158: 104722.

[64] ZHANG P, BAI G, CUI G, et al. Enhanced CO_2 foam based on amide and amine surfactants and synergistically coupled with sodium dodecyl sulfate at high temperature and high pressure[J]. J Pet Sci Eng, 2019, 179: 266–275.

[65] 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]. Chem Eng Sci, 2017, 160: 72–79.

[66] WEI X, WANG H, XIE Y, et al. An experimental investigation on the effect of carboxymethyl cellulose on morphological characteristics of dust-suppression foam and its mechanism exploration[J]. Process Saf Environ Prot, 2020, 135: 126–134.

[67] 李天. 高性能泡沫混凝土关键影响因素与制备的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
LI Tian. Research on key influence factors and preparation of high performance foam concrete (in Chinese, dissertation). Chongqing: Chongqing University, 2018.

[68] 杜仪. 纳米改性泡沫混凝土的制备及其稳定增强机制[D]. 南京: 东南大学, 2018.
DU Yi. Preparation of nano-modified foamed concrete and its stability and enhancement mechanism (in Chinese, dissertation). Nanjing: Southeast University, 2018.

[69] ZHU H, CHEN L, XU J, et al. Experimental study on performance improvement of anionic surfactant foaming agent by xanthan gum[J]. Constr Build Mater, 2020, 230: 116993.

[70] HAJIMOHAMMADI A, NGO T, MENDIS P. Enhancing the strength of pre-made foams for foam concrete applications[J]. Cem Concr Compos, 2018, 87: 164–171.

[71] GONZENBACH U T, STUDART A R, TERVOORT E, et al. Ultrastable particle-stabilized foams[J]. Angew Chem Int Ed Engl, 2006(45): 3526–3530.

[72] JHAO J, YANG M, TSENG W J. Effect of solids concentration on pore structure of ZnO-foams prepared by particle-stabilized foaming route[J]. Ceram Int, 2014, 40(3): 4649–4654.

[73] HUNTER T N, PUGH R J, FRANKS G V, et al. The role of particles in stabilising foams and emulsions[J]. Adv Colloid Interface Sci, 2008, 137(2): 57–81.

[74] HOROZOV T. Foams and foam films stabilised by solid particles[J]. Curr Opin Colloid Interface Sci, 2008, 13(3): 134–140.

[75] LIU W, DU L, WANG Y, et al. Effects of foam composition on the microstructure and piezoelectric properties of macroporous PZT ceramics from ultrastable particle-stabilized foams[J]. Ceram Int, 2013, 39(8): 8781–8787.

[76] KRÄMER C, SCHAUERTE M, KOWALD T L, et al. Three-phase-foams for foam concrete application[J]. Mater Charact, 2015, 102: 173–179.

[77] KRMER C, KOWALD T, TRETTIN R. Three-Phase-Foams as New Lightweight Materials and Their Use in Foam Concretes[C]// Nanotechnology in Construction. 2015.

[78] WANG X, HUANG J, DAI S, et al. Investigation of silica fume as foam cell stabilizer for foamed concrete[J]. Constr Build Mater, 2020, 237: 117514.

[79] KRÄMER C, SCHAUERTE M, MÜLLER T, et al. Application of reinforced three-phase-foams in UHPC foam concrete[J]. Constr Build Mater, 2017, 131: 746–757.

[80] HU N, LIU W, JIN L, et al. Recovery of trace Cu^{2+} using a process of nano-adsorption coupled with flotation: SNP as an adsorbing carrier[J]. Sep Purif Technol, 2017, 184: 257–263.

[81] ZARGARTALEBI M, BARATI N, KHARRAT R. Influences of hydrophilic and hydrophobic silica nanoparticles on anionic surfactant properties: Interfacial and adsorption behaviors[J]. J Pet Sci Eng, 2014, 119: 36–43.

[82] KNAPIK E, STOPA J, MARZEC A. Foams stabilized with

nanoparticles for gas well reliquification[J]. Polish J Chem Technol, 2014, 16(2): 114–117.

[83] 王腾飞, 王杰祥, 韩蕾, 等. 纳米氢氧化铝稳定泡沫性能研究[J]. 西安石油大学学报(自然科学版). 2012, 27(5): 78–81.
WANG Tengfei, WANG Jiexiang, HAN Lei, et al. J Xi'an Shiyou U (Nat Sci Ed) (in Chinese), 2012, 27(5): 78–81.

[84] DONG X, XU J, CAO C, et al. Aqueous foam stabilized by hydrophobically modified silica particles and liquid paraffin droplets[J]. Colloids Surf A Physicochem Eng Asp, 2010, 353(2/3): 181–188.

[85] HUNTER T N, WANLESS E J, JAMESON G J. Effect of esterically bonded agents on the monolayer structure and foamability of nano-silica[J]. Colloids Surf A Physicochem Eng Asp, 2009, 334(1): 181–190.

[86] HOU L, LI J, LU Z, et al. Effect of nanoparticles on foaming agent and the foamed concrete[J]. Constr, Build, Mater, 2019, 227: 116698.

[87] CHEN M, SALA G, VAN VALENBERG H J F, et al. Foam and thin films of hydrophilic silica particles modified by β-casein[J]. J Colloid, Interface Sci, 2018, 513: 357–366.

[88] YEKEEN N, MANAN M A, IDRIS A K, et al. A comprehensive review of experimental studies of nanoparticles-stabilized foam for enhanced oil recovery[J]. J Petrol Sci Eng, 2018, 164: 43–74.

[89] SHIRAZ H, PEAKE S J, DAVEY T, et al. Preparation of novel film-forming armoured latexes using silica nanoparticles as a pickering emulsion stabiliser[J]. J Colloid Interface Sci. 2018, 528: 289–300.

[90] ISHIDA N, HIGASHITANI K. Interaction forces between chemically modified hydrophobic surfaces evaluated by AFM—The role of nanoscopic bubbles in the interactions[J]. Miner Eng, 2006, 19(6): 719–725.

[91] LV W, LI Y, LI Y, et al. Ultra-stable aqueous foam stabilized by water-soluble alkyl acrylate crosspolymer[J]. Colloids Surf A Physicochem Eng Asp, 2014, 457: 189–195.

[92] KARAKASHEV S I, GROZDANOVA M V. Foams and antifoams[J]. Adv Colloid Interface Sci, 2012, 176–177: 1–17.

[93] 孙宠. 纳米 SiO_2 颗粒稳定泡沫体系的研制及性能评价[D]. 黑龙江: 东北石油大学, 2018.
SUN Chong. Preparation and performance evaluation of modified nano silica stabilized foam system (in Chinese, dissertation). Heilongjiang: Northeast Petroleum University, 2018.

[94] SUN Q, LI Z, WANG J, et al. Aqueous foam stabilized by partially hydrophobic nanoparticles in the presence of surfactant[J]. Colloids Surf A Physicochem Eng Asp, 2015, 471: 54–64.

[95] VIJAYARAGHAVAN K, NIKOLOV A, WASAN D. Foam formation and mitigation in a three-phase gas–liquid–particulate system[J]. Adv Colloid Interface Sci, 2006, 123: 49–61.

[96] WANG B, LI C, PENG X. Adsorption of nano-particles on bubble surface in nano-particle suspension[J]. China Particuol, 2005, 3(4): 208–212.

[97] JAFARI DAGHLIAN SOFLA S, JAMES L A, Zhang Y. Insight into the stability of hydrophilic silica nanoparticles in seawater for Enhanced oil recovery implications[J]. Fuel, 2018, 216: 559–571.

[98] PAL N, KUMAR N, SAW R K, et al. Gemini surfactant/polymer/silica stabilized oil-in-water nanoemulsions: Design and physicochemical characterization for enhanced oil recovery[J]. J Petrol Sci Eng, 2019, 183: 106464.

[99] FEI Y, JOHNSON R L, GONZALEZ M, et al. Experimental and numerical investigation into nano-stabilized foams in low permeability reservoir hydraulic fracturing applications[J]. Fuel, 2018, 213: 133–143.

[100] BABAMAHMOUDI S, RIAHI S. Application of nano particle for enhancement of foam stability in the presence of crude oil: Experimental investigation[J]. J Molecular Liquids, 2018, 264: 499–509.

[101] WANG R, LIU T, NING F, et al. Effect of hydrophilic silica nanoparticles on hydrate formation: Insight from the experimental study[J]. J Energy Chem, 2019, 30: 90–100.

[102] YEKEEN N, IDRIS A K, MANAN M A, et al. Bulk and bubble-scale experimental studies of influence of nanoparticles on foam stability[J]. Chin Jo Chem Eng, 2017, 25(3): 347–357.

[103] TAN H, TU S, ZHAO Y, et al. A simple and environment-friendly approach for synthesizing macroporous polymers from aqueous foams[J]. J Colloid Interface Sci, 2018, 509: 209–218.

[104] 李兆敏, 侯大炜, 鹿腾, 等. 疏水型 SiO_2 纳米颗粒稳定泡沫机理与泡沫耐温性能评价[J]. 油田化学. 2019, 36(3): 494–500.
LI Zhaomin, HOU Dawei, LU Teng, et al. Oilfield Chem (in Chinese), 2019, 36(3): 494–500.

[105] 吴达华. 消泡剂和消泡机理[J]. 油田化学. 1992(1): 65–72.
WU Dahua. Oilfield Chem (in Chinese), 1992(1): 65–72.

[106] JIANG L, LI S, YU W, et al. Interfacial study on the interaction between hydrophobic nanoparticles and ionic surfactants[J]. Colloids Surf A Physicochem Eng Asp, 2016, 488: 20–27.

[107] 李子薇, 胡楠, 杨松琴, 等. 纳米颗粒作为稳泡剂泡沫分离酪蛋白的工艺[J]. 化工进展, 2019: 1–8.
LI Ziwei, HU Nan, YANG Songqin, et al. Chem Ind Eng Prog (in Chinese), 2019: 1–8.

[108] PICHOT R, SPYROPOULOS F, NORTON I T. Competitive adsorption of surfactants and hydrophilic silica particles at the oil–water interface: Interfacial tension and contact angle studies[J]. J Colloid Interface Sci, 2012, 377(1): 396–405.

[109] WEI X, ZHANG W, LAI L, et al. Different cationic surfactants-modified silica nanoparticles for Pickering emulsions[J]. J Molecular Liquids, 2019, 291: 111341.

[110] LESOV I, TCHIOLAKOVA S, DENKOV N. Factors controlling the formation and stability of foams used as precursors of porous materials[J]. J Colloid Interface Sci, 2014, 426: 9–21.

[111] SINGH R, MOHANTY K K. Foam flow in a layered, heterogeneous porous medium: A visualization study[J]. Fuel (Guildford), 2017, 197: 58–69.

[112] RAMAMURTHY K, KUNHANANDAN Nambiar E K, IINDU Siva Ranjani G. A classification of studies on properties of foam concrete[J]. Cem Concr Compos, 2009, 31(6): 388–396.

[113] 丁曼. 防水性泡沫混凝土研究[D]. 湖南: 湖南大学, 2011.
DING Man. Research on waterproof foamed concrete (in Chinese, dissertation). Hunan: Hunan University, 2011.

[114] PASUPATHY K, RAMAKRISHNAN S, SANJAYAN J. Influence of recycled concrete aggregate on the foam stability of aerated geopolymer concrete[J]. Constr Build Mater, 2021, 271: 121850.

[115] 吴丽曼, 孙勇, 张晓莉, 等. 粉煤灰对超轻发泡混凝土孔结构及吸声性能的影响[J]. 硅酸盐通报. 2014, 33(9): 2387–2392.
WU Liman, SUN Yong, ZHANG Xiaoli, et al. Bull Chin Ceramic Soc (in Chinese), 2014, 33(9): 2387–2392.

[116] GÖKÇE H S, HATUNGIMANA D, RAMYAR K. Effect of fly ash and silica fume on hardened properties of foam concrete[J]. Constr Build Mater, 2019, 194: 1–11.