

Influence on the Performances of Foamed Concrete by Silica Aerogels

Cheng Hai-li¹, Yang Fei-hua², Wang Yi³, Hao Li-wei²

¹College of Civil Engineering, North China University of Technology, Beijing, China

²State Key Laboratory of Solid Waste Reuse for Building Materials (Beijing Building Materials Academy of Sciences Research), Beijing, China

³State Grid Yuyao Power Supply Company, Yuyao, China

Email address:

tkggig@sina.com (Cheng Hai-li), chyangfeihua@126.com (Yang Fei-hua), wang_yi@vip.126.com (Wang Yi), hlw717@126.com (Hao Li-wei)

To cite this article:

Cheng Hai-li, Yang Fei-hua, Wang Yi, Hao Li-wei. Influence on the Performances of Foamed Concrete by Silica Aerogels. *American Journal of Civil Engineering*. Vol. 3, No. 5, 2015, pp. 183-188. doi: 10.11648/j.ajce.20150305.18

Abstract: Aiming at the problems of organic thermal insulation material, SiO₂ aerogel was mixed into foamed concrete in two different ways, to investigate its effects on thermal conductivity, compression strength and volume water absorption of foamed concrete. XRD, FT-IR and SEM have also been used to analyze the relationship between both the amount and the mixing way of aerogel and macro properties of foamed concrete. The results show that directly mixing aerogel into foamed concrete has limited effects on improving its performance, mixing 0.5% of aerogel has little effect on improving thermal conductivity, while mixing 2.5% of aerogel can greatly decrease compression strength though thermal conductivity has been improved. If aerogel has been premixed with glycol and hydroxypropyl methyl cellulose(HPMC) ether and then mixed into foamed concrete, the compression strength will decrease less while thermal conductivity could decrease by 35%, volume water absorption by 31%.

Keywords: SiO₂ Aerogel, Foamed Concrete, Thermal Conductivity, Compression Strength, Volume Water Absorption

SiO₂气凝胶对发泡混凝土性能影响研究

程海丽¹, 杨飞华², 王翌³, 郝利炜²

¹北方工业大学土木工程学院, 北京, 中国

²固废资源化利用与节能建材国家重点实验室(北京建筑材料科学研究总院有限公司), 北京, 中国

³国网浙江余姚市供电公司, 余姚, 中国

邮箱

tkggig@sina.com (程海丽), chyangfeihua@126.com (杨飞华), wang_yi@vip.126.com (王翌), hlw717@126.com (郝利炜)

摘要: 针对目前有机绝热材料存在的问题, 将SiO₂气凝胶以两种不同的方式掺入发泡混凝土中, 研究其对发泡混凝土导热系数、抗压强度及体积吸水率的影响, 并用XRD, FT-IR和SEM的手段分析了气凝胶掺量及掺入方式与宏观性能的关系。结果表明: 气凝胶直接掺入发泡混凝土中对其性能的改善作用有限, 掺量0.5%时导热系数改善效果甚微, 掺量2.5%时导热系数虽有改善但抗压强度下降程度较大, 而将气凝胶与乙二醇和羟丙基甲基纤维素醚预混后掺入发泡混凝土中, 在同样掺量时可使其强度下降较小而导热系数降低35%、体积吸水率降低31%。

关键词: SiO₂气凝胶, 发泡混凝土, 导热系数, 抗压强度, 体积吸水率

1. 引言

随着国民经济的发展,建筑能耗已占据社会总能耗的1/4,建筑节能已成为刻不容缓的艰巨任务。有机绝热材料(主要包括聚苯板(EPS)、挤塑板(XPS)和聚氨酯(PU)三种)以其质轻、韧性高、绝热性好等优点广泛应用于建筑节能领域,然而,近年来全国各地建筑火灾频发,使其易燃、防火安全性差的缺陷再次成为政府监管部门和相关行业关注的焦点。传统的发泡混凝土作为无机材料,因其不燃、不老化、火灾时不产生有毒气体等优点成为替代有机绝热材料的选择之一,也成为近年来的研究热点。虽然目前发泡混凝土的导热系数可低至0.08 W/(K·m) [1],但与目前常用的有机绝热材料相比(导热系数一般在0.024-0.041 W/(K·m)之间) [2-3],其导热系数仍较大,不能满足保温节能的要求。SiO₂气凝胶(以下简称气凝胶)是一种纳米多孔材料,其内部孔洞率可高达80%以上,导热系数可低至0.015 W/(K·m),是一种性能优异的绝热材料。将气凝胶应用于发泡混凝土中以改善其绝热性能的研究文献目前尚不多见,因此,本文以导热系数为0.079 W/(K·m)的发泡混凝土为基础,研究气凝胶的掺入对其导热系数、抗压强度及体积吸水率的影响。

2. 主要原材料及其性能

表1 P·O 42.5水泥的主要性能。

| 凝结时间/min | | 抗压强度/MPa | | 抗折强度/MPa | |
|----------|-----|----------|------|----------|-----|
| 初凝 | 终凝 | 3d | 28d | 3d | 28d |
| 105 | 190 | 27.0 | 55.1 | 7.1 | 8.4 |

①水泥: 强度等级42.5的普通硅酸盐水泥产自唐山冀东水泥股份有限公司,其主要性能如表1所示;

②乙二醇: 分析纯试剂;

③羟丙基甲基纤维素醚(表2中简称“HPMC”): 粘度为75000 mp·s;

④减水剂: SUNBO PC-1016(P) 聚羧酸系减水剂;

⑤硅灰: 比表面积为39200 m²/kg;

⑥玻璃纤维: 长度9 mm, 直径14 μm;

⑦早强剂: 液态160早强剂, 主要成分为Al₂(SO₄)₃;

⑧SiO₂气凝胶: 韩国进口,其傅利叶红外光谱(FT-IR)及X-Ray衍射图谱(XRD)如图1、图2所示;从图1可以看出,1130 cm⁻¹处强而宽的吸收带是Si-O-Si反对称伸缩振动,760 cm⁻¹、456 cm⁻¹处的峰为Si-O键对称伸缩振动和弯曲振动,2963 cm⁻¹和2907 cm⁻¹处是-CH₃中C-H的对称伸缩振动和不对称伸缩振动,1387 cm⁻¹和760 cm⁻¹是-CH₃中C-H的剪式弯曲振动和平面摇摆弯曲振动,1256 cm⁻¹和851 cm⁻¹是Si-C的振动峰,说明在SiO₂气凝胶的末端支链上连有疏水基团-CH₃,972 cm⁻¹处的峰是Si-OH弯曲振动峰,说明该气凝胶支链末端仍有亲水性基团-OH存在,3400 cm⁻¹处宽而不明显的谱带及1633 cm⁻¹处的峰分别是H-O-H的不对称伸缩振动和弯曲振动峰,说明该样品放置空气中易吸附水分,3400 cm⁻¹处极不明显,表明吸附空气中水分较少[4-5]。

图2内有二个馒头状的峰,衍射峰主峰约在22° (2θ),与无定形SiO₂(如石英玻璃和硅胶等^[6])的主峰相当,由此可见, SiO₂气凝胶的结晶程度很差,为无定形(非晶态)的物质。

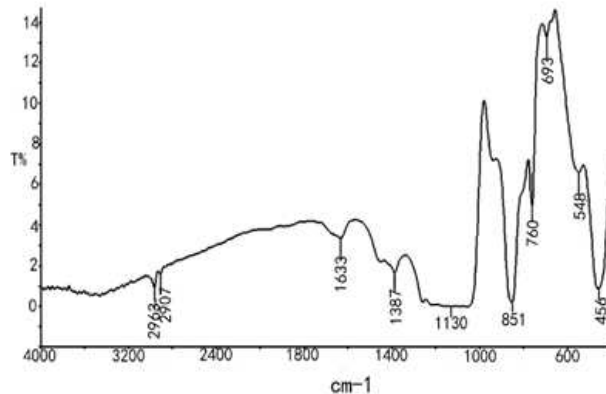


图1 气凝胶FT-IR图谱。

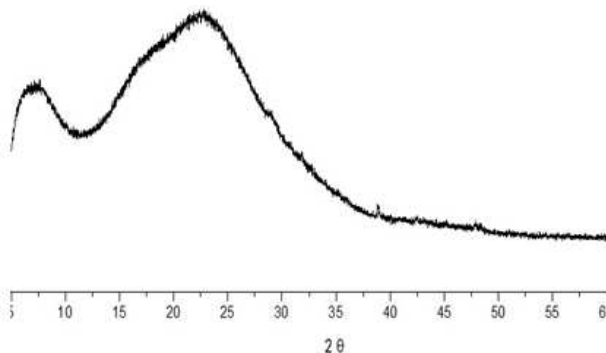


图2 气凝胶XRD图谱。

3. 试验过程

3.1. 试件制作

将水泥及其他粉料(硅灰,减水剂,玻璃纤维,早强剂等)预拌2min,再加入水和早强剂进行搅拌,并控制新拌料浆的初始状态,这一过程一般搅拌1~2min,随后在高速搅拌的同时,迅速加入化学发泡剂,继续搅拌约6~8s,最终将搅拌均匀的料浆倒入模具内静停发泡,待试件达一定强度后拆模,所有试件均采用自然养护至28 d时进行各项性能测试。

气凝胶的掺入方式分二种:①将气凝胶直接与水泥等粉料混合后加水搅拌制作成型(以下简称“直掺法”);②将气凝胶先与乙二醇混合成悬浮状态,再将其与羟丙基甲基纤维素醚(以下简称“纤维素醚”)一起掺入水泥等粉料中进行搅拌(以下简称“预混法”)。配合比及其性能见表2。

3.2. 性能测试方法及主要仪器

抗压强度按GB/T 5486-2008《无机硬质绝热制品试验方法》测定,体积吸水率按JG/T 041-2011《复合发泡水

泥板外墙外保温系统应用技术规程》附录A测定，导热系数按GB/T10294-2008《绝热材料稳态热阻及有关特性的测定防护热板法》测定，X-衍射图谱（XRD）采用德国布鲁克AXS有限公司产D8X射线衍射仪测试，傅立叶红外光谱（FT-IR）采用PERKIN-ELMER产PE1750傅立叶变换红外光谱仪测试。扫描电镜图（SEM）采用日本日立公司的S-3400N型的扫描电镜测试。

龄期28d时的试件取样进行FT-IR、XRD和SEM测试，其FT-IR图谱见图3，XRD图谱见图4，SEM图见图5、图6。

4. 结果与分析

表2. 气凝胶的掺入对发泡混凝土性能的影响。

| 编号 | 气凝胶掺入率 /% | 普通硅酸盐水泥/g | SiO ₂ 气凝胶 /g | 羟丙基甲基纤维素醚/g | 乙二醇 /g | 体积吸水率 /% | 28d抗压强度/MPa | 导热系数/W/(m·k) |
|----|-----------|-----------|-------------------------|-------------|--------|----------|-------------|--------------|
| A1 | 0.0 | 800 | — | — | — | 8.0 | 0.521 | 0.079 |
| A2 | 0.5 | 796 | 4 | — | — | 7.4 | 0.472 | 0.072 |
| A3 | 1.0 | 792 | 8 | — | — | 7.2 | 0.419 | 0.074 |
| A4 | 1.5 | 788 | 12 | — | — | 6.9 | 0.401 | 0.068 |
| A5 | 2.0 | 784 | 16 | — | — | 6.4 | 0.357 | 0.062 |
| A6 | 2.5 | 780 | 20 | — | — | 6.0 | 0.329 | 0.060 |
| B1 | 0.0 | 800 | — | — | — | 7.6 | 0.535 | 0.079 |
| B2 | 0.5 | 796 | 4 | — | — | 7.2 | 0.480 | 0.073 |
| B3 | 1.0 | 792 | 8 | — | — | 6.7 | 0.445 | 0.073 |
| B4 | 1.5 | 788 | 12 | 0.18 | 16 | 6.3 | 0.423 | 0.066 |
| B5 | 2.0 | 784 | 16 | — | — | 5.9 | 0.402 | 0.055 |
| B6 | 2.5 | 780 | 20 | — | — | 5.5 | 0.375 | 0.051 |

4.1. 气凝胶的掺入对发泡混凝土抗压强度的影响

从表2可以看出，无论是直掺法还是预混法，气凝胶的掺入均会使混凝土强度下降，且随其掺量的增加，强度下降幅度增大，这一方面是因为随气凝胶掺量增加水泥含量相对下降，另一方面也与气凝胶自身强度低有关，气凝胶虽然掺量不高，但其占居的体积较大，自身强度又低，相当于增加了发泡混凝土固体相的孔隙率，因而强度降低。但当气凝胶掺量相同时，预混法发泡混凝土强度较直掺法略高，且随气凝胶掺量的增加其强度下降幅度较直掺法小。

从图3可以看出，直掺法掺入0.5%气凝胶时（图3中A2），与不掺气凝胶相比（图3中A1），Ca(OH)₂晶体（以下简称“CH”）的（001）面（d=0.490 nm）的衍射峰显著增强，而（101）面（d=0.263 nm）衍射峰减弱，即其晶体取向性增强，取向指数达到2.77（CH晶体以（101）晶面为参照面时，其（001）晶面的取向指数 $R = (I_{(001)} / I_{(101)}) / 0.74$ 。若CH晶体无取向时， $R=1$ ；有取向时， $R>1$ ）[7]。图4(A2) FT-IR图谱中3647 cm⁻¹处CH的特征峰较不掺时更加明显，表明少量加入气凝胶时，其高表面活性[8-9]早期对水泥水化有促进作用[10]，使之深度水化，生成更多的CH，同时，由于发泡混凝土的多孔性，使生成的CH有较大的空间发生取向性排列，但由于气凝胶掺量少不足以发生火山灰反应而消耗CH，加之生成的CH取向度高以及水泥用量的相对减少，因而强度产生一定程度的下降。

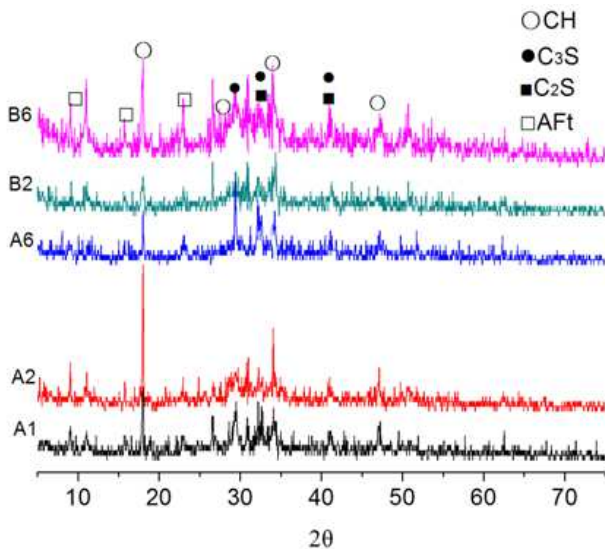


图3 气凝胶不同掺量时发泡混凝土XRD图谱。

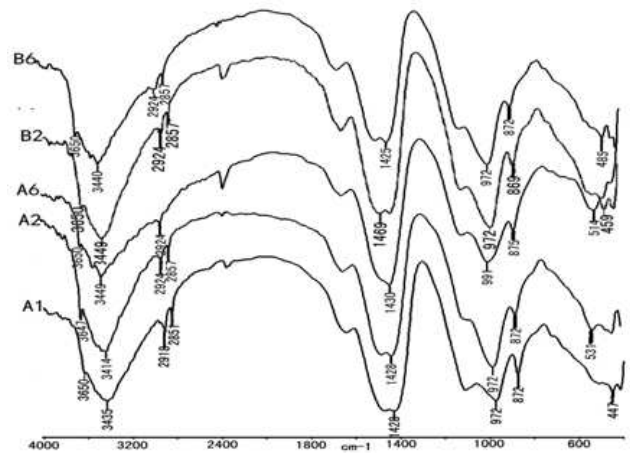


图4 气凝胶不同掺量时发泡混凝土FT-IR图谱。

图5为直掺气凝胶的发泡混凝土SEM图,从中可以看出,体系中六方CH晶型完整清晰,且呈散落状,与周围的钙矾石等物相边界清楚、相互结合程度低,散落的CH取向程度较大。

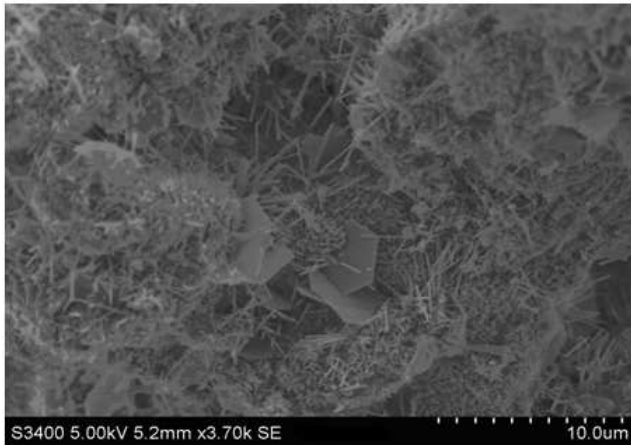


图5 未掺纤维素醚的发泡混凝土SEM图。

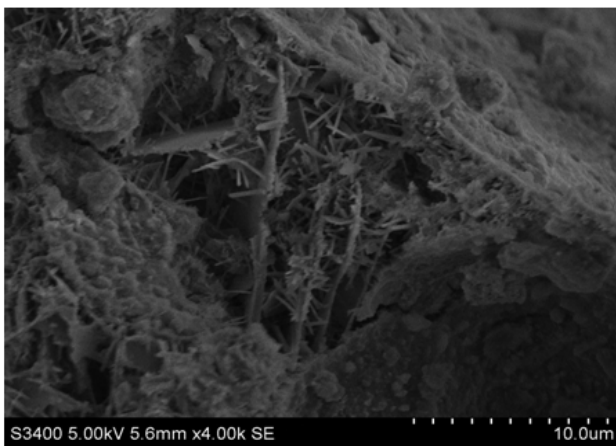


图6 掺加0.05%纤维素醚后的发泡混凝土SEM图。

当直掺法掺入2.5%气凝胶(图3中A6)时,CH(001)面的衍射峰较掺入0.5%时明显减弱,且取向程度也明显下降(取向指数下降到1.12),图4(A6)中3650 cm⁻¹处CH的特征峰也减弱,但C-S-H的特征峰左移,从972 cm⁻¹移到了991 cm⁻¹,这是C-S-H聚合度增加的表现,这说明增加气凝胶的掺量后,高活性的气凝胶中的Si-O-Si键在碱性环境中断裂,形成的水化硅酸根单体与C-S-H及CH解离的Ca²⁺和OH⁻结合,形成高聚C-S-H,既消耗了体系中的CH又提高了C-S-H的聚合度[11-12],这有利于发泡混凝土强度的提高;但另一方面,当气凝胶掺量多时,由于气凝胶粒子比表面积巨大、存在不饱和和残键和不同键合状态的羟基[13],与水泥水化产生的Ca²⁺、SO₄²⁻、Na⁺、OH⁻等离子结合,不仅导致气凝胶粒子本身团聚,且将水泥颗粒团聚在一起,妨碍水泥颗粒水化[14],因此与掺入0.5%比,气凝胶掺量2.5%时,团聚作用增大,水泥水化也受影响(图3中A6表现为熟料矿物衍射峰增强),因此,虽然有部分气凝胶发生二次水化反应,仍不足以弥补由于水泥用量减少、水泥水化受阻以及气凝胶团聚作用带来的强度的降低。

预混法气凝胶掺量0.5%时与直掺法气凝胶掺量0.5%时相比,图3(B2)可明显看出,CH的(001)面衍射峰减弱,且取向程度大大降低(取向指数仅为0.74),而熟料矿物的特征峰较直掺0.5%时增强,图4(B2)中3640 cm⁻¹处CH的特征峰也减弱,原因有两个方面:①当掺入纤维素醚时,纤维素醚可快速与水分子形成氢键并溶解在水中[15],一方面增加了水泥浆体的粘度,导致Ca²⁺、SO₄²⁻、OH⁻等离子的移动速率降低,另一方面,纤维素醚吸附在未水化的水泥颗粒和水化产物的表面,阻止了水泥颗粒与水接触进行反应及水化产物成核、长大和沉淀[16],两种效应共同作用,延缓了水泥的水化,因而表现出CH生成量少、取向度低。②由于气凝胶本身具有多孔材料的物理吸附性[17-20],其硅羟基又易与纤维素醚上的羟丙基结合而吸附于纤维素醚之上[21],这样,纤维素醚既相当于“桥架”,又相当于“隔离剂”,阻碍了气凝胶与水泥的接触反应,从而阻止或阻碍了其直掺时对水泥水化的促进作用。两个方面原因共同作用下,使得预混法气凝胶掺量0.5%与直掺法气凝胶掺量0.5%时相比,强度变化不大。

当预混法气凝胶掺量2.5%时,与预混法气凝胶掺量0.5%相比,图3(B6)中CH(001)面的特征峰强度和取向度增强(取向指数达到1.55),图4(B6)中3650 cm⁻¹处CH的特征峰也略有增强,这是因为,纤维素醚含量不变,而增加气凝胶掺量时,其效果类似于直掺0.5%时,一部分未被纤维醚“桥架阻隔”的气凝胶仍会对水泥的深度水化有促进作用,但由于气凝胶掺量增加,相当于增加了发泡混凝土固体相的孔隙率,同时水泥掺量减少,加之CH取向程度增加,使之较预混0.5%时强度下降。但与直掺2.5%时比,强度下降幅度要小,从图3(B6)可见,CH产物增多,且取向度增加,而熟料矿物相减少,说明纤维素醚与气凝胶结合的“隔离剂”作用不仅减少了气凝胶的团聚作用,也减小了气凝胶因与水泥水化产物作用而使水泥团聚的作用,“解放”了一部分气凝胶,一方面有利于气凝胶与水泥水化产物中的CH发生二次水化反应,另一方面也恢复了水泥的正常水化作用,同时,这种“桥架”作用也更有利于发泡混凝土固体相中的物质连接成一个整体。图6为预混法掺入气凝胶的发泡混凝土的SEM图,与图5相比可看出,固体相中CH、AFt及C-S-H凝胶等物相上面有覆盖物(为纤维素醚),且边界模糊,结合紧密。综合以上因素,因此强度较直掺法气凝胶掺量2.5%时下降幅度减小。

4.2. 气凝胶的掺入对发泡混凝土导热系数的影响

在发泡混凝土中掺入气凝胶降低其导热系数的理想状态是保证气凝胶在发泡混凝土中的完整性、分散性及与发泡混凝土本体的粘结性,即,气凝胶本身的纳米孔结构不因掺入发泡混凝土体系中被破坏、气凝胶颗粒能单颗粒分散在发泡混凝土中而不团聚、气凝胶颗粒能与泡沫混凝土本体结合成一个整体而不脱出。而实际上,气凝胶因具有以下特点而很难达到以上理想状态:①强度低、脆性大,纳米级孔隙结构在外在压力(搅拌、成型)下很容易被破坏,②其表面开放多孔结构以及亲水性基团硅羟基的存在使之非常容易吸收水或水蒸气,造

成材料的载荷大量增加, 抗拉强度大幅度降低, 有时甚至会导致气凝胶开裂直至完全损坏, ③由于硅气凝胶的主要成份是 SiO_2 , 极易与水泥的水化产物中的CH等成份发生化学反应而破坏其自身的结构, ④纳米级的 SiO_2 也极易团聚, ⑤气凝胶颗粒极轻, 在掺入发泡混凝土中时容易逸散。这些因素, 均可使气凝胶对发泡混凝土绝热性能的改善效果产生不利影响。

从表2可以看出, 无论是直掺法还是预混法, 随着气凝胶掺量的增加, 对发泡混凝土的导热系数确实产生了改善作用, 但掺入方式不同, 改善效果有异。直掺时, 导热系数从 $0.079 \text{ W}/(\text{K}\cdot\text{m})$ 降低到了 $0.06 \text{ W}/(\text{K}\cdot\text{m})$, 降低了24%, 而预混时, 导热系数从 $0.079 \text{ W}/(\text{K}\cdot\text{m})$ 降低到 $0.051 \text{ W}/(\text{K}\cdot\text{m})$, 降低了35%。

气凝胶直掺时, 掺量从0.5%增加到2.5%时, 导热系数一定程度下降, 这是由于随着气凝胶掺量的增加水泥用量相对减少, 同时气凝胶的掺入相当于增加了发泡混凝土固体相的孔隙率, 同时当其占居发泡混凝土原有的孔隙时, 相当于减小了其孔径并将开口孔变成了闭口孔, 因而导热系数下降, 但下降幅度较预混法小。

预混法掺入气凝胶时, 随气凝胶掺量增加导热系数下降程度较之直掺法大, 特别是气凝胶掺量2.5%时, 纤维素醚的作用对导热系数的减少有较明显的作用, 原因: ①当气凝胶直掺且掺量大时, 虽然其本身会团聚, 但总有部分气凝胶不可避免的与水泥水化产物中的CH发生火山灰反应使其本身的纳米孔结构遭到破坏, 而当掺入纤维素醚时, 其“桥梁”或“隔离剂”的作用一定程度的阻碍了气凝胶与水泥的反应, 即, 预混法有利于保持气凝胶的完整性, 从而提高气凝胶在发泡混凝土试件中的有效利用率。②由于纤维素醚对水分通过氢键的吸附作用, 也减少了气凝胶与水直接接触而破坏其自身结构的几率。③纤维素醚对水泥浆体的增稠作用也有利于搅拌时气凝胶材料的分散, 同时对浆体的增稠也有利于气孔的稳定存在。这些因素均对导热系数的下降有促进作用。因而预混法与直掺法比, 在气凝胶掺量相同时, 其导热系数改善效果要好。

4.3. 气凝胶的掺入对发泡混凝土体积吸水率影响

从表2可以看出, 随着气凝胶掺量的增加, 体积吸水率下降。直掺法吸水率下降了25%, 而预混法降低了35%。原因是虽然气凝胶的掺入相当于增加了发泡混凝土的孔隙率, 但由于气凝胶纳米级的闭口结构, 实质上是改善了发泡混凝土的孔结构, 即将部分开口孔变成了闭口孔, 同时纳米级的气凝胶也相当于使发泡混凝土的孔径变小, 这些因素均有利于降低其吸水率; 另一方面, 气凝胶颗粒比表面积大, 需水量大, 因而随气凝胶掺量的增加浆体流动度下降, 有助于泡沫的稳定, 减少了泡沫破裂和开口孔增加的几率。

预混法较直掺法吸水率更小, 原因是纤维素醚的“桥梁”作用能减少气凝胶因与水泥发生火山灰反应而产生的破坏作用, 保持气凝胶纳米闭孔的完整性, 另一方面, 其保水作用也能够减少发泡混凝土因失水产生的连通孔的几率, 这些因素都会减小其体积吸水率。

5. 结论

1) 气凝胶直接掺入发泡混凝土中对其性能的改善作用有限, 掺量0.5%时导热系数改善效果甚微, 掺量2.5%时导热系数虽有改善但抗压强度下降程度达36.8%, 原因是掺量少时有利于促进水泥水化, 但会增加CH取向性; 掺量多时又会产生团聚, 均不利于发泡混凝土性能的改善。

2) 将气凝胶与乙二醇和羟丙基甲基纤维素醚预混后再掺入泡沫混凝土中, 可改善发泡混凝土绝热性能、降低吸水率, 气凝胶掺量2.5%时可使导热系数降低35%、体积吸水率降低31%, 且抗压强度达到 0.375 MPa , 下降幅度减小29.5%, 非常接近JG/T041-2011《复合发泡水泥板外墙外保温系统应用技术规程》中 0.40 MPa 的要求, 原因是羟丙基甲基纤维素醚有利于保持气凝胶的完整性, 即预混法可提高气凝胶在发泡混凝土中的掺量, 从而达到改善其绝热效果的目的。

3) 预混法气凝胶掺量2.5%时, 抗压强度偏低, 仅有 0.375 MPa , 已将气凝胶、早强剂、膨胀剂、硅灰为研究因素进行了正交试验, 可在保持导热系数 $0.051 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{k})$ 的情况下使抗压强度提高到 0.640 MPa , 篇幅所限, 后续将另行撰文阐述。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. JC/T 1062-2007. 发泡混凝土砌块[S]. 北京: 中国建材工业出版社, 2008.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JG/T314-2012. 聚氨酯硬泡保温板[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [3] 中华人民共和国建设部. JG149-2003 膨胀聚苯板薄抹灰外墙外保温系统[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.
- [4] EL RASSY H, PIERRE A. C. NMR and IR spectroscopy of silica aerogels with different hydrophobic characteristics [J] (Eng). Journal of Non-Crystalline Solids. 2005, 351(7): 1603 - 1610.
- [5] RAMI AL-OWEINI, HOUSSAM EL-RASSY. Synthesis and characterization by FTIR spectroscopy of silica aerogels prepared using several $\text{Si}(\text{OR})_4$ and $\text{R}'\text{Si}(\text{OR}')_3$ precursors [J] (Eng). Journal of Molecular Structure. 2009, 919(2): 140 - 145 <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022286008005759> - corlmailto:Houssam.Rassy@aub.edu.lb
- [6] 浙江大学, 等. 硅酸盐物理化学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1980. 120.
- [7] 叶青 硅溶胶对水泥基材料微观结构和力学性能的影响[J] 硅酸盐学报2008, 36(4): 425-430.
- [8] ZAVODINSKY V G, KUYANOV I A, ZAVODINSKAYA O M. Atomic and electronic structures of nanometer sized silica particles[J] (Eng). Journal of Non-Crystalline Solids. 1999, 243(2-3): 123-136.

- [9] 徐子芳,王君,张明旭. 纳米级SiO₂改性水泥胶砂作用机理研究[J]. 硅酸盐通报, 2007, 26(1): 58-63。
- [10] 范基骏,丛立庆,陈荣民. 探讨水泥基纳米复合材料的纳米诱导水化理论[J]. 建材发展导向, 2005(4):37-44。
- [11] 王磊,何真,杨华全等. 硅粉增强混凝土抗冲磨性能的微观机理[J]. 水利学报, 2013, 44(1): 111-118。
- [12] 杨南如,岳文海. 无机非金属材料图谱手册[M] 武汉 武汉工业大学出版社, 2000: 337-338。
- [13] 吴国友,程璇,余煜玺等常压干燥制备二氧化硅气凝胶[J]. 化学进展, 2010, 22(10):1892-1900。
- [14] 孔德玉,杜祥飞,杨杨等. 纳米二氧化硅团聚特性对水泥水化硬化性能的影响[J]. 硅酸盐学报, 2012, 40(11):1599-1606。
- [15] 苏雷,马保国,蹇守卫等. 纤维素醚-珍珠岩耦合作用下水泥浆体早期水化规律[J]. 功能材料, 2012, 43(15): 2102-2105。
- [16] 张国防,王培铭. 羟乙基甲基纤维素影响水泥浆体微观结构的研究[C]//第三届全国商品砂浆学术会议, 武汉, 2009: 150-157。
- [17] 曾淼,刘敬肖,史非二氧化硅气凝胶对硫酸庆大霉素的吸附和释放[J]. 硅酸盐学报, 2007, 35(8): 1081-1085。
- [18] 张志华,倪星元,陈世文等 SiO₂气凝胶常压制备、表面结构与吸附性质[J]. 原子能科学技术, 2005, 39(6): 498-501。
- [19] 吴俊升,李晓刚,杜伟等 纳米多孔气凝胶材料在催化和吸附领域的应用[J]. 功能材料, 2004, 35(7):2682-2688。
- [20] SOLEIMANI DORCHEH A, ABBASI M.H. Silica aerogel; synthesis, properties and characterization[J](Eng). Journal of materials processing technology. 2008, 199:10-26.
- [21] 郭润德,童筱莉,王锐兰. 聚丙烯酸酯原位乳液聚合包覆纳米硅溶胶的研究[J]. 有机硅材料, 2002, 16(5):5-8。