

KH550 改性 SiO₂ 气凝胶及其掺杂对砂浆性能的研究

刘朝辉, 丁逸栋, 王飞, 班国东, 林锐

(解放军后勤工程学院 化学与材料工程系, 重庆 401311)

摘要: 目的 提高 SiO₂ 气凝胶颗粒与砂浆的相容性, 降低砂浆的导热系数。方法 以质量分数为 5% 的 KH550 硅烷偶联剂为改性剂, 先对 SiO₂ 气凝胶颗粒进行表面改性, 并以改性后的 SiO₂ 气凝胶颗粒为替换骨料, 采用等体积替换法制备 SiO₂ 气凝胶砂浆, 再用 SEM、XRD、傅里叶红外光谱(FTIR)和接触角测量仪对原材料性能和砂浆的微观形貌进行表征, 并研究不同替换比例的 SiO₂ 气凝胶颗粒对砂浆密度、力学性能、收缩性能以及导热系数等性能的影响。结果 采用 KH-550 硅烷偶联剂对 SiO₂ 气凝胶进行表面改性, 改性后的 SiO₂ 气凝胶能够稳定地镶嵌于砂浆中, 与无机胶凝材料的结合较为紧密, 填补了砂浆中的孔洞, 使得砂浆内部结构更为均匀, 形成较为稳定的复合体系; 随着 SiO₂ 气凝胶颗粒替换比例的增大, SiO₂ 气凝胶砂浆的密度、力学性能以及导热系数逐渐降低, 收缩率逐渐变大, 当替换率达到 60% 时, 密度由最初的 2014.1 kg/m³ 降至 1231.4 kg/m³, 28 天抗压和抗折强度分别降至 2.15 MPa 和 0.45 MPa、导热系数值从 0.6039 W/(m·K) 降至 0.1524 W/(m·K), 自收缩率增大到 2729×10⁻⁶。结论 从使用性能、材料成本、以及保温性能等方面综合考虑, 当替换比例为 50% 时, 为最优体积掺量, 此时, 其密度、抗压和抗折强度、自收缩率以及导热系数分别为 1387.1 kg/m³, 8.3 MPa 和 2.23 MPa, 1928×10⁻⁶, 0.2248 W/(m·K)。

关键词: 硅烷偶联剂; 保温砂浆; SiO₂ 气凝胶; 力学性能; 收缩率; 导热系数

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2016.06.017

中图分类号: TJ07

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2017)01-0071-07

Influences of KH550 Modified SiO₂ Aerogel on Mortar Property

LIU Zhao-hui, DING Yi-dong, WANG Fei, BAN Guo-dong, LIN Rui

(Dept of Chemistry & Material Engineering, Logistic Engineering University of PLA, Chongqing 401311, China)

ABSTRACT: Objective To improve compatibility between SiO₂ aerogel and mortar and reduce the thermal conductivity of mortar. **Methods** SiO₂ aerogel mortar was prepared by equal volume replacement method using the modified SiO₂ aerogel particles which were modified by the mass fraction of 5% KH550 silane coupling agent as modifier to replace sand. Properties of raw materials and microstructure of mortar were characterized via SEM, XRD, FTIR and contact angle gauge. Effects of different aerogel contents of SiO₂ aerogel particles on the density, mechanical properties, shrinkage performance, thermal conductivity, etc. were also investigated. **Results** The SiO₂ aerogel which was modified by silane coupling agent of KH-550 could be set in the mortar stably. It was more closely combined with inorganic gelled material and it could make up holes in mortar, make internal structure of mortar more uniform, and form relatively stable composite system. As replacement rate of SiO₂ aerogel par-

收稿日期: 2016-07-12; 修订日期: 2016-08-12

基金项目: 全军后勤科研计划项目(BY115C007)、重庆市自然科学基金(cstc2014jcyjA50026)

作者简介: 丁逸栋(1990—), 男, 浙江人, 硕士研究生, 主要研究方向为保温隔热材料。

通讯作者: 刘朝辉(1965—), 男, 重庆人, 博士, 教授, 主要研究方向为保温隔热技术。

ticles increased, density, mechanical properties and thermal conductivity of SiO_2 aerogel mortar decreased and shrinkage rate increased gradually. When the replacement rate reached 60%, the density decreased from the original 2014.1kg/m^3 to 1231.4kg/m^3 , the compressive and fracture strength of 28 days dropped to 2.15MPa and 0.45MPa respectively. The value of thermal conductivity fell from $0.6039\text{W/(m}\cdot\text{K)}$ to $0.1524\text{W/(m}\cdot\text{K)}$, and the shrinkage increased to 2729×10^{-6} . **Conclusion** Under the comprehensive consideration of usability, material cost and insulation performance, etc., the optimal volume fraction is achieved when the replacement rate is 50%. At this point, its density, compressive strength, rupture strength, shrinkage rate and thermal conductivity coefficient are $1387.1\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$, 8.3MPa , 2.23MPa , 1928×10^{-6} and $0.2248\text{W/(m}\cdot\text{K)}$ respectively..

KEY WORDS: silane coupling agent; thermal insulation mortar; SiO_2 aerogel; mechanical properties; shrinking rate; thermal conductivity coefficient

SiO_2 气凝胶是一种具有三维空间网络结构的固体材料,因其具有极低的密度^[1]和低热导率^[2](常温下最低可达 $0.01\text{W/(m}\cdot\text{K)}$),使其在很多领域有着广泛的应用前景,尤其是作为一种高效保温隔热材料。随着研究的深入, SiO_2 气凝胶材料已经由军事和航空航天领域^[3]慢慢地转向民用领域,但 SiO_2 气凝胶材料本身强度低^[4],严重限制了其应用。目前主要通过两种方式:一是气凝胶本身的加强,该方法主要是通过有机高聚物来增加气凝胶的骨架强度,但在提高强度的同时也带来了导热系数的升高^[5],所以此方法用得不是很多;二是与各种纤维复合制成复合材料来增强其使用性能,有陶瓷纤维、碳纤维等。米春虎等^[6]以陶瓷纤维为增强材料,在不影响气凝胶材料隔热效果的前提下,提高其力学性能,结果表明, SiO_2 气凝胶复合材料的铺层面内方向压缩性能随温度升高而增强。纤维的复合可有效提高气凝胶的力学性能,拓宽了应用领域,使得其在建筑保温领域可替代石棉、玻璃纤维等传统的柔性保温材料。

在建筑保温隔热材料研究方面, Kim^[7]将 SiO_2 气凝胶粉末加入到水泥浆中发现,当 SiO_2 气凝胶粉末的质量占总质量的 2.0%时,其导热系数下降 75%。T. Gao^[8]将 SiO_2 气凝胶颗粒添加到混凝土中,并与 EPS 混凝土的性能相比较,主要研究了其掺量对气凝胶混凝土的密度、力学性能和导热系数的影响,并总结得出了此三者的关系。郭金涛^[9]以气凝胶和玻化微珠两种材料为保温骨料,将此两者按级配混合制备出新型保温砂浆。这些研究都为 SiO_2 气凝胶在建筑中的应用提供参考。将 SiO_2 气凝胶应用到建筑保温隔热材料方面首先要解决 SiO_2 气凝胶与胶凝材料的相容性问题和上浮问题,目前主要通过表面改性的方法,最常用的是硅烷偶联剂改性^[10]。

面对当前严峻的能源形势,建筑节能对建筑物本身的保温性能要求也越来越高,改变目前建筑中墙体、屋面等围护结构的保温性能,可应用 SiO_2 气凝胶材料来弥补这一缺陷,就目前来说,将 SiO_2 气凝胶用到混凝土和砂浆中的研究还较少。因此,实验采取替换法将 SiO_2 气凝胶颗粒添加到砂浆中来研究其替换比例对密度、力学性能、收缩率以及导热系数等性能的影响,进一步拓展其在建筑保温中的应用领域。

1 实验

1.1 SiO_2 气凝胶的表面改性

实验采用的是疏水性 SiO_2 气凝胶颗粒(主要性能指标见表 1),质轻、强度低、脆性大且疏水性强。在实验中发现,将气凝胶颗粒添加到砂浆中,一方面,在搅拌过程中出现气凝胶颗粒挥飞,另一方面,待砂浆浇筑成型后气凝胶颗粒极易上浮,且与胶凝材料的相容性较差,为此,采用 KH550 硅烷偶联剂对气凝胶颗粒进行表面改性^[11-13]。KH550 溶于水,且可在水中发生水解反应生成—OH,可与气凝胶颗粒表面发生化学键合,改变气凝胶颗粒表面与无机胶凝材料之间的界面状态,改善气凝胶颗粒与砂浆的相容性^[14]。

为防止偶联剂水解产生沉淀,偶联剂溶液采取现配现用。将偶联剂加入水中,配制成一定浓度的偶联剂溶液,然后将其倒入到 $300\text{mm}\times 250\text{mm}\times 65\text{mm}$ 的矩形盘中超声分散 5 min,边加热边超声,再将 SiO_2 气凝胶颗粒倒入其中,时间为 5 min,然后将改性好的气凝胶颗粒加入砂浆中。经实验证明,当偶联剂溶液的质量分数为 5%时,效果最好。

表 1 SiO_2 气凝胶颗粒的主要性能指标

Density/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Particle size range/mm	Specific surface area/($\text{m}^2\cdot\text{g}$)	Porosity/%	Pore diamter/nm	Thermal conductivity/($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
100	0.1~5	575.634	> 90	20~100	0.020 (Normal temperature)

1.2 SiO₂ 气凝胶砂浆的制备

采用等体积替换法，用 SiO₂ 气凝胶颗粒替换砂浆中的沙来制备 SiO₂ 气凝胶砂浆。实验中 SiO₂ 气凝胶颗粒替换沙的体积比分别为 0，10%，20%，30%，40%，50%和 60%，水胶比为 0.38，硅灰占水泥质量分数的 10%，减水剂为胶凝材料质量分数的 1%，胶凝材料与沙的质量比初始值为 1:3，设计的配合比见

表 2 SiO₂ 气凝胶砂浆的配合比(40 mm×40 mm×160 mm)

Sample No.	Mix proportion						Aerogel fraction	
	Cement/g	Silica fume/g	Water/g	Water reducing agent/g	Sand/g		Aerogel/ml	Aerogel/%
1	900	100	380	10	3000		0	0
2	900	100	380	10	2700		180	10
3	900	100	380	10	2382		360	20
4	900	100	380	10	2072		540	30
5	900	100	380	10	1764		720	40
6	900	100	380	10	1464		900	50
7	900	100	380	10	1164		1080	60

1.3 性能测试与表征

采用粉末法，用 XRD-6100 型 X 射线衍射仪(日本岛津)测试 SiO₂ 气凝胶颗粒改性前后的晶型结构，管压为 40 kV，管流为 30 mA，扫描速度为 4 (°)/min，扫描范围(2θ)为 10°~80°。采用 Drop Meter A-100 型接触角测量仪(宁波海曙)对 SiO₂ 气凝胶颗粒改性前后的接触角进行测试。采用 KBr 压片法，用 Nicolet 6700 傅里叶红外光谱(美国 Thermo Fisher)对 SiO₂ 气凝胶颗粒改性前后的基团进行表征，扫描范围为 400~4000 cm⁻¹。采用 TYEH-2000 型微机控制恒加载压力试验机按 JGJ/T 70—2009 测量砂浆的抗压和抗折强度，试样尺寸为 40 mm×40 mm×160 mm，抗压测试时加载速率为 0.6 kN/s，抗折测试时加载速率为 0.05 kN/s。采用博远 CABR-NES-E 型非接触式混凝土收缩变形测定仪对 SiO₂ 气凝胶砂浆的自收缩率进行测定。采用 DR-300A⁺型平板导热仪(武汉盛科)按 GB/T 10294-2008 测量砂浆的导热系数，试样尺寸为 300 mm×300 mm×30 mm。采用 S-3700N(日本日立公司)观察 SiO₂ 气凝胶颗粒及砂浆的表面形貌。按照 GB/T 20473—2006 要求对砂浆的抗冻性能进行测试。

2 结果与讨论

2.1 偶联剂改性

2.1.1 XRD 分析

图 1 表示改性前后 SiO₂ 气凝胶颗粒的 XRD 图谱。由图 1 可以看出，改性前后在 22°附近都出现很宽的非晶弥散峰，为无定形态 SiO₂，但改性后，峰强有了

表 2。制备过程大致为：从总用水量中取出一部分，先配制成 5%的 KH550 硅烷偶联剂(其通式为 RSiX₃)溶液对 SiO₂ 气凝胶颗粒进行表面改性，然后按照配合比将水泥、硅灰、沙加入到搅拌机中干拌 2 min，再将余下的水配制成 5%的 KH550 硅烷偶联剂溶液缓慢加入其中搅拌 3 min，最后再将表面改性过的 SiO₂ 气凝胶颗粒加入其中，搅拌均匀后装入试模。

一定程度的减弱。主要原因可能是表面改性使得粒子的分散性得到提高，粒径变小，峰强降低。总的来说，特征峰出现的位置没有变化，所以改性前后仍然是同一种物质。

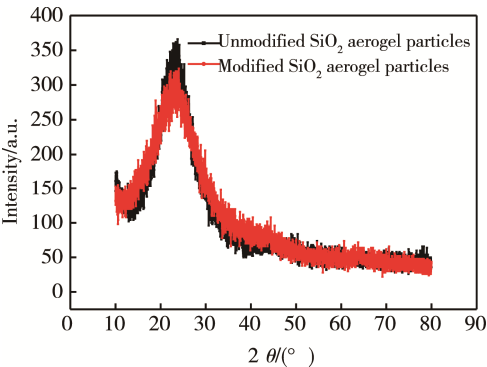


图 1 未改性和改性的 SiO₂ 气凝胶颗粒

2.1.2 接触角分析

实验采用的是疏水性 SiO₂ 气凝胶颗粒，其疏水性可以通过图 2 中的接触角来表示。可以得出：未改性的 SiO₂ 气凝胶颗粒接触角大约在 145°左右，表现出强烈的疏水性，不利于 SiO₂ 气凝胶颗粒与砂浆形成共混，因此需对 SiO₂ 气凝胶颗粒进行表面改性。实验中发现，经过硅烷偶联剂 KH-550 溶液改性后的 SiO₂ 气凝胶颗粒的接触角变小，表面能够被水浸润，有利于下一步 SiO₂ 气凝胶颗粒与砂浆更好地粘结。

2.1.3 FTIR 分析

硅烷偶联剂 KH-550 溶液的红外光谱图^[15—17]如图 3 所示，硅烷偶联剂 KH-550 易溶于水，且在水中会发生水解，因此，在 3455 cm⁻¹ 处可能是—NH 的伸缩振动和水解后 Si—OH 的伸缩振动发生重叠，

1636 cm^{-1} 处为—NH 的弯曲振动, 2974, 1390, 1079 cm^{-1} 处出现了 Si—O—CH₂CH₃ 基团的特征峰。SiO₂ 气凝胶颗粒改性前后的红外光谱图如图 4 所示, 可以看出, 改性后的 SiO₂ 气凝胶红外光谱图发生很大变化^[18—19], 首先在 2973, 2927, 1480, 1443, 1390 cm^{-1} 处均出现与 KH-550 相对应的吸收峰, 而未改性的则不存在, 说明气凝胶表面存在 KH-550; 其次, 改性后, 在 1095 cm^{-1} 处的 Si—O—Si 的振动吸收峰变宽, 一方面可能是 KH-550 水解后的 Si—O—Si 键与气凝胶的 Si—O—Si 键振动吸收峰在同一吸收带上, 另一方面 KH-550 与气凝胶发生化学反应, 产生新的 Si—O—Si 键; 此外, 847 cm^{-1} 和 957 cm^{-1} 处的吸收峰明显增强, 可能是 KH-550 在这两处有 2 个强的吸收峰而造成的。

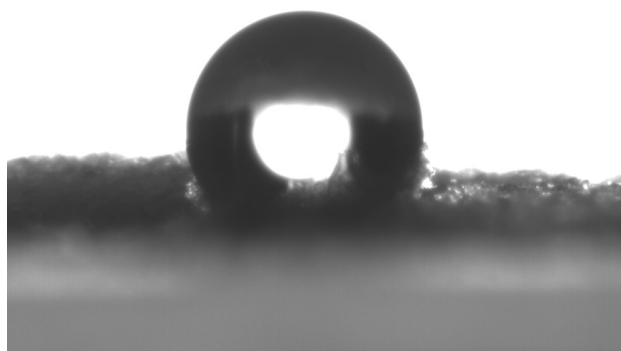


图 2 SiO₂ 气凝胶颗粒的接触角

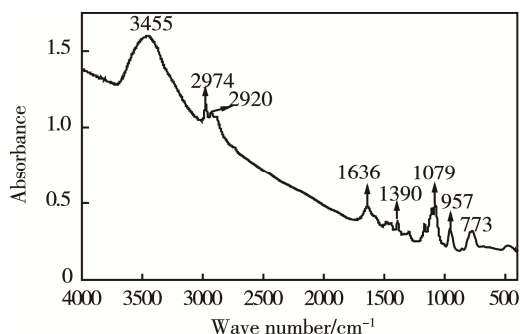


图 3 硅烷偶联剂 KH-550 溶液的 FTIR 光谱

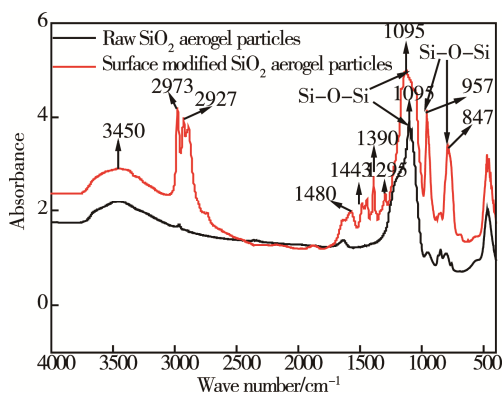
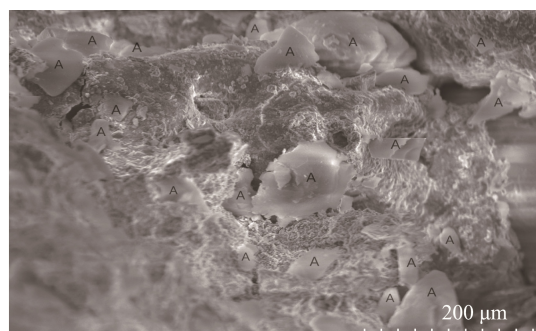


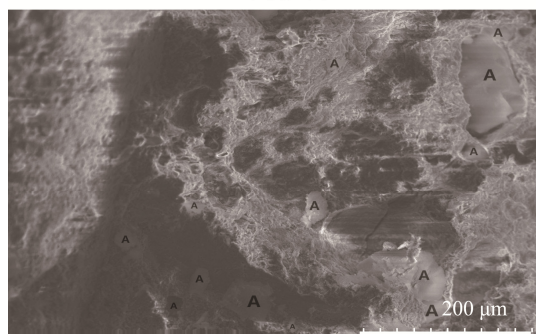
图 4 改性前后 SiO₂ 气凝胶颗粒的 FTIR 光谱

2.1.4 颗粒稳定性分析

SiO₂ 气凝胶颗粒的替换比例达为 30% 时, SiO₂ 气凝胶颗粒在经改性和未经改性的条件下在砂浆中的情况如图 5 (图片中的 A 代表 SiO₂ 气凝胶颗粒, 下同) 所示。实验过程中发现, 在未经改性的情况下, 当 SiO₂ 气凝胶颗粒的替换比例达到 30% 时, 搅拌时会出现严重的挥飞现象, 导致 SiO₂ 气凝胶颗粒的大面积损耗, 为此, 采用表面改性的方法来解决此问题。从图 5 可看出, 改性前后 SiO₂ 气凝胶颗粒都可稳定的存在于砂浆中, 且可保持原有大致形状, 改性前存在于砂浆中的颗粒较大, 而改性后较小的颗粒也可较多地存在于砂浆中。同时从图 5a 中可以看出, 未经改性的 SiO₂ 气凝胶颗粒只是散落在砂浆中, 并未与砂浆表现出较好的粘结。从图 5b 中可以看出, 改性后的 SiO₂ 气凝胶颗粒能够更为稳定的镶嵌于砂浆之中, 与无机胶凝材料的结合较为紧密。说明经偶联剂改性后, SiO₂ 气凝胶颗粒能够与砂浆更好地共混, 形成较为稳定的复合体系, 这与文献[7—8]所得出的结果一致。



a 未改性的



b 改性的

图 5 SiO₂ 气凝胶颗粒在砂浆中

2.2 不同体积掺量

2.2.1 对密度的影响

图 6 表示不同体积掺量 SiO₂ 气凝胶颗粒与砂浆密度的关系。从图 6 可以看出, 随着 SiO₂ 气凝胶颗粒体积分含量的增加, SiO₂ 气凝胶砂浆的密度整体呈线性下降趋势, 当替换的比例达到 60% 时, 其密度由最初的 2014.1 kg/m^3 下降到 1231.4 kg/m^3 。主要是由于

气凝胶颗粒的密度远小于沙的密度,因此用气凝胶颗粒等体积替换沙,必然导致砂浆密度降低。

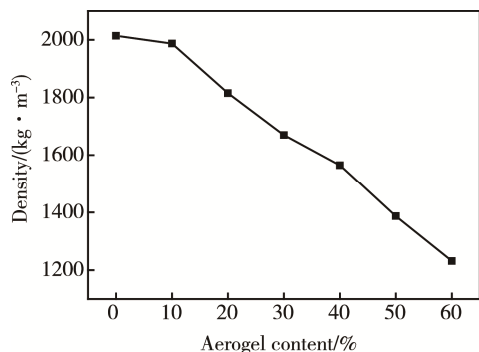


图6 SiO₂ 气凝胶砂浆的密度

2.2.2 对力学性能的影响

图7表示不同体积掺量 SiO₂ 气凝胶颗粒与砂浆力学性能的关系。从图7可以看出,随着 SiO₂ 气凝胶颗粒掺量的增加,其强度呈现明显的下降趋势,其28天的抗压和抗折强度分别降至2.15 MPa和0.45 MPa。从理论上来说,由于 SiO₂ 气凝胶颗粒本身强度低,随着 SiO₂ 气凝胶颗粒体积替换比例的增加,气凝胶颗粒逐渐充当起骨架作用,这就必然导致砂浆强度降低。

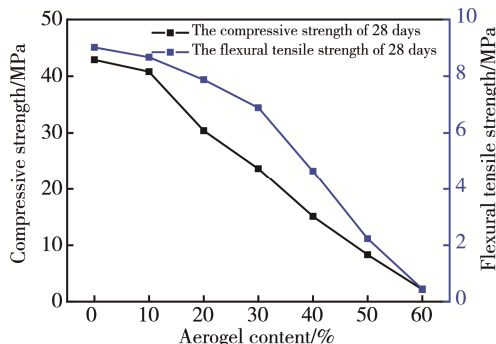


图7 SiO₂ 气凝胶砂浆的力学性能

2.2.3 对自收缩的影响

图8表示不同体积掺量 SiO₂ 气凝胶颗粒与砂浆自收缩^[20-22]的关系。从图8可以看出,随着 SiO₂ 气凝胶颗粒掺量的增加,其自收缩率也逐渐变大,当 SiO₂ 气凝胶颗粒的体积掺量为60%时,其自收缩率为 2729×10^{-6} 。同时可看出各掺量的自收缩率都呈现相似的趋势,即随着时间的推移,自收缩率前期增长较快,后期慢慢趋于稳定。主要可能是随着水泥水化作用的进行,砂浆中的自由水参加反应,水分减少,而原本由水填充的孔隙,逐渐被气凝胶颗粒和沙填充,但气凝胶颗粒的级配没有标准沙好,因而,在体积掺量增加的情况下,内部孔隙结构就变得更加不均匀,所以导致收缩率变大。

2.2.4 对导热系数的影响

图9表示不同体积掺量 SiO₂ 气凝胶颗粒与砂浆

导热系数的关系。从图9中可以刊出,随着气凝胶颗粒体积掺量增加,砂浆的导热系数呈线性下降趋势,当掺量达到60%时,导热系数值从0.6039 W/(m·K)降至0.1524 W/(m·K)。根据 Landauer R^[23]的理论模型,从理论上可计算 SiO₂ 气凝胶砂浆的导热系数,如式(1)所示。从结果可以得出,实测值比理论值偏大,一方面可能是因为水泥基体本身不均匀;另一方面, SiO₂ 气凝胶颗粒的加入改变了原本较为均匀状态,因此导致实测值较理论值偏大一点。

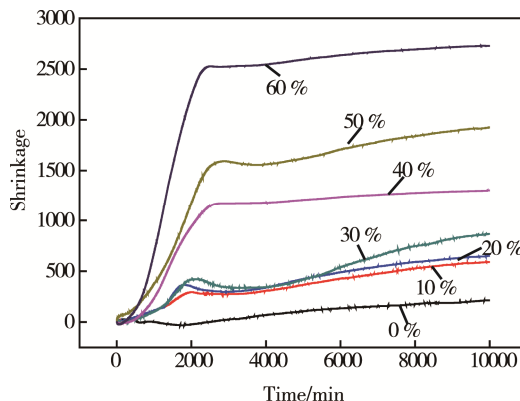


图8 SiO₂ 气凝胶砂浆的收缩率

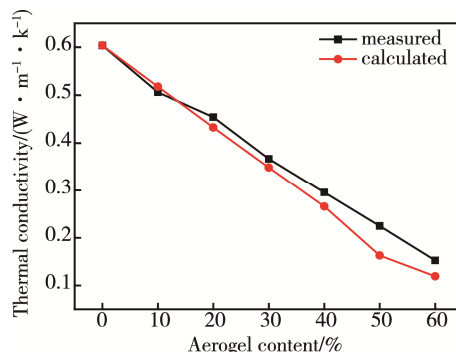


图9 SiO₂ 气凝胶砂浆的导热系数

$$\lambda = \frac{1}{4} [(3X_A - 1)\lambda_A + (3X_C - 1)\lambda_C + \sqrt{((3X_A - 1)\lambda_A + (3X_C - 1)\lambda_C)^2 + 8\lambda_A\lambda_C}] \quad (1)$$

式中: X_A 和 X_C 分别为砂浆中 SiO₂ 气凝胶和基体材料所占砂浆总体积的体积分数; λ_A 和 λ_C 分别为 SiO₂ 气凝胶和基体材料的导热系数, SiO₂ 气凝胶掺量为0时, $\lambda_A = 0.0200$ W/(m·K), $\lambda_C = 0.6039$ W/(m·K)。

2.2.5 对抗冻性能的影响

图10表示不同体积掺量 SiO₂ 气凝胶颗粒与砂浆抗冻性能的关系,图示为经过15次冻融循环后其强度损失率。从图10中不难看出,随着 SiO₂ 气凝胶颗粒含量的增加,其强度损失率先增长较快,后趋于平缓。主要可能是当达到一定程度后,气凝胶颗粒在砂浆里占绝大部分,强度主要由气凝胶颗粒充当,因而导致此结果。同时从图10中可知,当替换比例为60%

时,强度损失率达 19.89%。表 3 为 15 次冻融循环中砂浆试块表面的情况,从表观来看,经过 15 次冻融循环后,体积替换比例为 40%的试样表面有些许破损,50%和 60%的试样表面有些裂纹,其他的并无变化。

以上结果表明,采用 SiO_2 气凝胶颗粒等体积替换沙,随着掺量的增加,砂浆的密度、强度以及导热系数呈线性下降趋势,自收缩率逐渐增大。经 15 次冻融循环后,强度损失率先增长较快,后逐渐缓和。当掺量达到 30%后变化幅度不大,并且都符合抗冻性

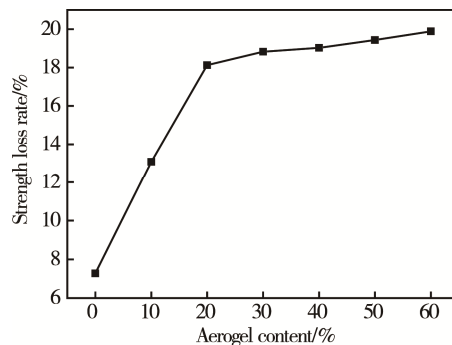


图 10 SiO_2 气凝胶砂浆的抗冻性能

表 3 冻融循环后 SiO_2 气凝胶砂浆的表观情况

Times	5 times	10 times	15 times
Appearance	All the sample have no changes in surface	The sample of (0 ~ 40%) have no changes in surface. The others have little damage in surface.	The sample of (0 ~ 30%) have no changes in surface. The sample of 40% has little damage in surface. The others have little crack in surface.

标准要求。综合考虑各因素可得出,当体积替换比例在 30%之前,其强度高、抗冻性能好、收缩率低,但密度和导热系数大,保温效果差,不是最优掺比;当体积替换比例在 30%以后,其密度、强度以及冻融循环后强度损失率的变化都不是太大,且其导热系数与 50%比例相差也较小;在 60%比例时,自收缩率明显高于其他比例,对砂浆的使用影响较大。故而从砂浆的使用性能、材料成本、保温性能的好坏等方面综合考虑,当 SiO_2 气凝胶颗粒体积替换比例为 50% 时,为最优体积掺量。

3 结论

1) 采用 KH-550 硅烷偶联剂对 SiO_2 气凝胶进行表面改性,改性后的 SiO_2 气凝胶能够稳定的镶嵌于砂浆中,与无机胶凝材料的结合较为紧密,填补了砂浆中的孔洞。改性前后仍然是同一种物质,同时 SiO_2 气凝胶颗粒的表面性质发生了很大的变化, KH550 与 SiO_2 气凝胶颗粒表面发生了化学反应,实现化学键合。一方面极大地降低了 SiO_2 气凝胶颗粒在搅拌过程中的挥发程度,另一方面表面改性使得气凝胶颗粒与无机胶凝材料的界面性能得到改善,使得其与无机胶凝材料的黏结性得到提高,使其更为稳定地存在于砂浆中,形成了较为稳定的复合体系。

2) 在最优体积掺量下,砂浆的密度为 1387.1 kg/m^3 , 28 天的抗压、抗折强度分别为 8.3 MPa 和 2.23 MPa , 自收缩率为 1928×10^{-6} , 导热系数为 $0.2248 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ 。

参考文献:

- [1] HRUBESH L W. Aerogels: The World's Lightest Solids[J]. Chemistry and Industry, 1990(24): 824—827.
- [2] FRICKE J, EMMERLING A. Aerogels—Preparation, Properties, Applications[M]. Berlin: Springer-Heidelberg, 1992: 37—87.
- [3] FESMIRE J E. Aerogel Insulation Systems for Space Launch Applications[J]. Cryogenics, 2006, 46(2): 111—117.
- [4] WOIGNIER T, PHALIPPOU J. Mechanical Strength of Silica Aerogels[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 1988, 100(1): 404—408.
- [5] FRICKE J. Aerogels—Highly Tenuous Solids with Fascinating Properties[J]. Journal of Non-crystalline Solids, 1988, 100(1): 169—173.
- [6] 米春虎, 姜勇刚, 石多奇, 等. 陶瓷纤维增强氧化硅气凝胶复合材料力学性能试验[J]. 复合材料学报, 2014, 31(3): 635—643.
- [7] KIM S, SEO J, CHA J, et al. Chemical Retreating for Gel-Typed Aerogel and Insulation Performance of Cement Containing Aerogel[J]. Construction and Building Materials, 2013, 40(3): 501—505.
- [8] GAO T, JELLE B P, GUSTAVSEN A, et al. Aerogel-Incorporated Concrete: An Experimental Study[J]. Construction and Building Materials, 2014, 52: 130—136.
- [9] 郭金涛. 硅气凝胶/玻化微珠复合保温砂浆研究 [D]. 西安:长安大学, 2011.
- [10] 毋伟, 陈建峰, 屈一新. 硅烷偶联剂的种类与结构对二氧化硅表面聚合物接枝改性的影响[J]. 硅酸盐学报, 2004, 32(5): 570—575.
- [11] 戈晶晶, 徐壁, 蔡再生. 基于 SiO_2 及表征气凝胶的玻璃超疏水化改性[J]. 表面技术, 2013, 42(2): 101—103.
- [12] 沈远, 刘京雷, 侯峰, 等. 偶联剂对氧化铁红粉体的表面改性[J]. 表面技术, 2014, 43(1): 59—62.
- [13] 郝春静, 湛含辉, 王晓. 硅烷偶联剂链长对纳米 TiO_2

- 表面改性的影响[J]. 表面技术, 2013, 42(2): 10—13.
- [14] 马士玉, 郑少华, 郭洪娜, 等. 无定形纳米 ZrO_2 表面改性研究[J]. 材料工程, 2008(10): 366—369.
- [15] 高正楠, 江小波, 郭锴. KH550 的水解工艺及其对 SiO_2 表面改性的研究[J]. 北京化工大学学报: 自然科学版, 2012, 39(2): 7—12.
- [16] 胡静, 马建中, 邓维钧. 有机硅烷偶联剂对聚丙烯酸酯/纳米 SiO_2 复合材料性能的影响[J]. 功能材料, 2008, 39(12): 2065—2067.
- [17] 张峻岭, 魏风军, 张彦粉. 不同偶联剂改性 PTW 对 PP/GF 复合材料性能的影响[J]. 包装工程, 2016, 37(9): 31—35.
- [18] 朱建君, 翟秋阁, 李晓玲, 等. KH550 改性纳米 SiO_2 的制备及其界面相互作用研究[J]. 化学研究与应用, 2014, 26(7): 988—992.
- [19] 姚超, 高国生, 林西平, 等. 硅烷偶联剂对纳米二氧化钛表面改性的研究[J]. 无机材料学报, 2006, 21(2): 315—321.
- [20] TAZAWA E, MIYAZAWA S. Influence of Constituents and Composition on Autogenous Shrinkage of Cementitious Materials[J]. Magazine of Concrete Research, 1997, 49(178): 15—22.
- [21] TAZAWA E, MIYAZAWA S. Influence of Cement and Admixture on Autogenous Shrinkage of Cement Paste[J]. Cement and Concrete Research, 1995, 25(2): 281—287.
- [22] BABA Y, KASAI T. Shrinkage Characteristics of Cement Paste and Mortar at Very Early Ages[J]. Journal of the Society of Materials Science, Japan, 2007, 56(3): 294—301.
- [23] LANDAUER R. The Electrical Resistance of Binary Metallic Mixtures[J]. Journal of Applied Physics, 1952, 23(7): 779—784.