气凝胶阻燃隔热涂料

李康宁 张晨阳 朱尚文 李贞玉*
长春工业大学化学工程学院，吉林 长春 130012

[摘要]为解决船舶内涂料隔热效果差以及普通隔热涂料易燃的问题，本文以疏水性二氧化硅气凝胶与空心玻璃微珠为功能填料、酚醛树脂为成膜材料，制备了一种兼具强效阻燃与高效隔热的气凝胶阻燃隔热涂料。在酒精灯外焰灼烧测试中；该涂层经外焰灼烧直至碳化未产生起火现象，展现出优异的阻燃性能，并且该涂层导热系数低至 0.0476W/（m·K），在冷热面温差测试中于 200℃ 下加热 30min 后保持完整的形貌冷面温度为 67℃，温差高达 133℃；在 300℃ 下加热 30min 后冷面温度为 86℃，温差高达 214℃。同时本文研究了消泡效果对涂层的影响以及气凝胶涂料的低导热机制，拓展了气凝胶涂料的应用领域。

[关键词]船舶隔热；阻燃；涂料；消泡；低导热
DOI：10.33142/nsr.v3i3.20400 中图分类号：TQ637.6 文献标识码：A

Aerogel Flame-Retardant Thermal Insulation Coating

LI Kangning, ZHANG Chenyang, ZHU Shangwen, LI Zhenyu*
School of Chemical Engineering, Changchun University of Technology, Changchun, Jilin, 130012, China

Abstract: To address the problems of poor thermal insulation of interior coatings for ships and the flammability of conventional thermal insulation coatings, this paper uses hydrophobic silica aerogel and hollow glass microspheres as functional fillers and phenolic resin as the film-forming material to prepare an aerogel-based flame-retardant and thermal-insulation coating that combines strong flame retardancy with high thermal insulation performance. In the alcohol lamp outer flame burning test, the coating did not ignite after being subjected to the outer flame until carbonization, demonstrating excellent flame-retardant properties. Furthermore, the coating exhibits a thermal conductivity as low as 0.0476 W/(m·K). In the hot–cold surface temperature difference test, after heating at 200 ℃ for 30 min, the coating maintained its intact morphology with a cold-side temperature of 67 ℃, giving a temperature difference as high as 133 ℃; after heating at 300 ℃ for 30 min, the cold-side temperature was 86 ℃, and the temperature difference reached 214 ℃. Meanwhile, this paper investigates the effect of defoaming on the coating and the low thermal conductivity mechanism of the aerogel coating, thereby expanding the application scope of aerogel coatings.

Keywords: ship thermal insulation; flame retardancy; coating; defoaming; low thermal conductivity

背景

在全球航运业能效准入和船舶安全标准持续强化的背景下，国际海事组织（IMO）通过能效设计指数（EEDI）和碳强度指标（CII）对船舶能效提出了量化约束，而《国际海上人命安全公约》（SOLAS）则对船舶结构与舱室的阻燃隔热提出了严格要求[1-3]。船舶机舱、排烟管道、居住舱室及液货舱围护系统等区域，同时面临高温热源强烈辐射、火灾风险高发的严重威胁。传统隔热材料如岩棉、陶瓷纤维毯虽具有一定的耐火性能，但其厚度大、密度高、施工困难且隔热性能容易衰减，难以满足现代船舶对轻量化隔热与本质阻燃的一体化需求。在此背景下，具备超低热导率和出色热稳定性的二氧化硅气凝胶及其功能涂料，正逐步成为船舶热管理与被动防火领域极具潜力的替代材料。二氧化硅气凝胶是一种纳米多孔无定形固体，其孔隙尺度（<70nm）小于空气分子平均自由程，能够通过克努森效应（Knudsen effect）显著抑制气相热传导，加之固相骨架所特有的“无穷长路径”传热机制，使其常温热导率可低至 0.015W/（m·K），是目前隔热性能最为极致的固体材料之一[4-6]。将其粉体或浆料与成膜树脂复合制备的气凝胶涂料，不仅保留了纳米孔结构赋予的超隔热特性，更以薄层涂装的方式克服了传统气凝胶毡/板难以适应船舶异形构件和复杂舱壁结构的工艺瓶颈。仅需亚毫米至毫米级涂层厚度即可构建起高效热屏障，显著降低机舱向邻舱的热流密度、减少空调制冷负荷，并抑制在高温高湿环境下舱壁凝露所引发的电气安全隐患。在阻燃与高温防护维度，气凝胶涂料展现出区别于常规有机膨胀型防火涂料的多重优势。一方面二氧化硅气凝胶自身不可燃且具有极高的比表面积和热稳定性，其三维纳米骨架在高温下可逐

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

渐转变为致密的陶瓷化层，形成坚固的凝相阻隔屏障；另一方面，当与含磷、氮或成炭型阻燃树脂体系复合时，涂层在火灾条件下能够通过协同成炭效应迅速构建连续致密的膨胀炭层，有效隔绝氧气与热量向基材的传递，延缓钢结构温升速率，从而满足防火要求。同时，气凝胶纳米孔的“迷宫效应”可有效抑制烟气与有毒热解产物的扩散，显著提升火灾场景下的能见度和人员逃生安全性。上述隔热与阻燃的功能同源性，使气凝胶涂料在船舶机舱、排气管及逃生通道等关键防火区域具有独特的应用价值。然而，以隔热与阻燃协同性能为靶向的气凝胶涂料仍面临诸多科学挑战。然而，高含量气凝胶粉体的引入虽可降低涂层热导率，却常因填料-树脂界面不相容而导致涂层膨胀阻燃过程中炭层强度不足、过早开裂甚至脱落，引发隔热与阻燃性能的此消彼长。本文旨在制作气凝胶阻燃隔热涂料，并探索其隔热与阻燃性能。

1 实验

1.1 材料

原料	规格参数	生产商
气凝胶粉末	50μm	上海瑞太久合高新材料有限公司
空心玻璃微珠	80μm	佛山市南海区蓝岭化工材料销售部
酚醛树脂	固含量 48%，工业级	广东鸿宇塑胶科技有限公司
5040 分散剂	工业级	广州市润宏化工有限公司
润湿剂	工业级	科莱恩化工（中国）有限公司
消泡剂	工业级	毕克化学（铜陵）有限公司
增稠剂	工业级	广州市永熹新材料有限公司
防冻剂	分析纯	上海麦克林生化科技股份有限公司
成膜助剂	≥99%	上海麦克林生化科技股份有限公司
去离子水	≥99%	实验室自制
KH550	工业级	工业级

1.2 二氧化硅气凝胶涂层的制备

1.2.1 KH550 改性疏水气凝胶粉

在 500ml 烧杯中加入 400ml 水、100ml 乙醇搅拌下加入稀盐酸调节溶液酸碱度调至 3～4，加入 10g KH550 后 50℃ 搅拌 1h，加入 20g 气凝胶粉末搅拌 12h 温度不变。将得到的分散液导入离心管中 6000 转分离 1min，并将得到的粉体用乙醇清洗三次后干燥。改性后的气凝胶粉体表面清水易吸湿影响重量需在 40℃ 烘箱中保存。

1.2.2 气凝胶涂料的制备

在 250ml 烧杯中加入适量去离子水、分散剂、润湿剂、部分消泡剂搅拌 10min 后加入改性气凝胶粉体并高速搅拌 1h，然后在低速搅拌下缓缓加入酚醛树脂搅拌 1h 后低速搅拌下加入空心玻璃微珠、防冻剂、成膜助剂、适量增稠剂（根据施工条件选取黏度）得到气凝胶涂料，将气凝胶涂料静置一夜消泡后在玻璃上刮涂一到两层（不宜过厚，单次成膜厚度应小于 2mm）梯度干燥后制成气凝胶涂料，根据不同的气凝胶添加量，将样品命名为 SA-0、SA-2、SA-4、SA-6、SA-8、SA-10，气凝胶的含量分别为 0%、4%、6%、8%、10%、12%。

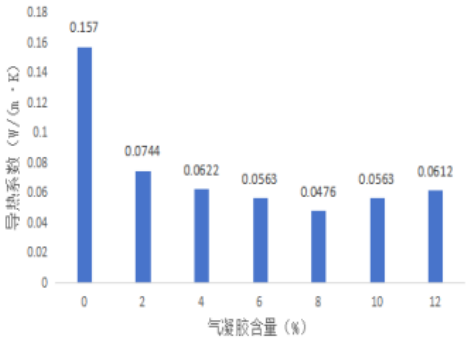
1.3 测试与表征

气凝胶涂料在室温下的热导率使用热导率分析仪（TC300E 型，西安）测定。冷热面温差测试使用热板法测试装置（RBC-1-10KN，湘科 TM）测定。阻燃性能使用酒精灯常温常压测试。

2 结果与讨论

2.1 涂料的导热系数

当气凝胶的添加量小于等于 8%时，气凝胶在树脂当中处于均匀分散的状态，涂层的隔热效果逐渐增强（图 1a），当气凝胶的添加为 8%时涂料的导热系数最低为 0.0476 W/（m·K），但随着气凝胶的量继续添加，导热系数开始增大，当气凝胶的添加量达到 12%时涂层的导热系数增大到 0.612W/（m·K）（图 1b）。这是由于气凝胶的添加量大于 8%时气凝胶开始团聚，无法均匀地被树脂包覆导致涂料的隔热效果变差、导热系数下降。同时伴随着气凝胶的团聚，涂料中的气泡逐渐增多且难以消除，当气凝胶的添加量大于 12%时，涂料经 24h 静置后气泡未能消除且在干燥后表面出现孔洞。



（a）气凝胶涂层的导热系数

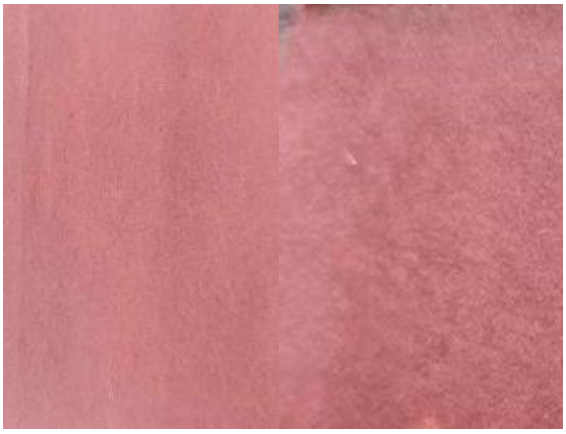
（b）过量气凝胶涂层

图 1 气凝胶涂层的导热系数与过量气凝胶涂层

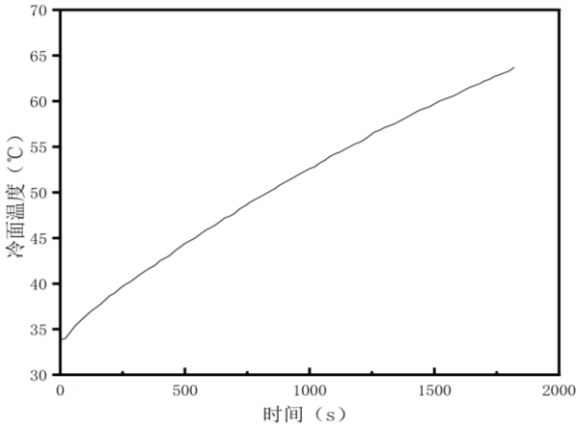
Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

2.2 涂料的冷热面温差测试

当涂层以 50N 在 200 ℃ 下恒温加热 30min 后涂层未发现明显变化（图 2a），且背面温度最高为 67 ℃，温差为 143 ℃（图 2b），这表明涂料在经过干燥固化后可以耐 200 ℃ 高温使用。当涂层以 50N 在 300 ℃ 下恒温加热 30min 后涂层开始变黑但未开裂（图 2c），且背面温度最高为 86 ℃，差为 214 ℃（图 2d），这是由于酚醛树脂在高温下开始逐步碳化，但受益于酚醛树脂的优异成膜性能，在 300 ℃ 下涂层依然保持较好的形貌特征，虽然出现颜色变化，但依然保留优异的隔热性能。

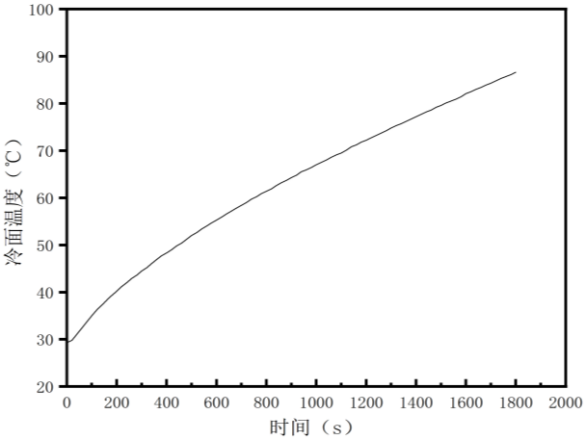


（a）200℃测试前后气凝胶涂层的外貌



（b）200℃冷热面测试曲线

（c）300℃测试后涂层外貌



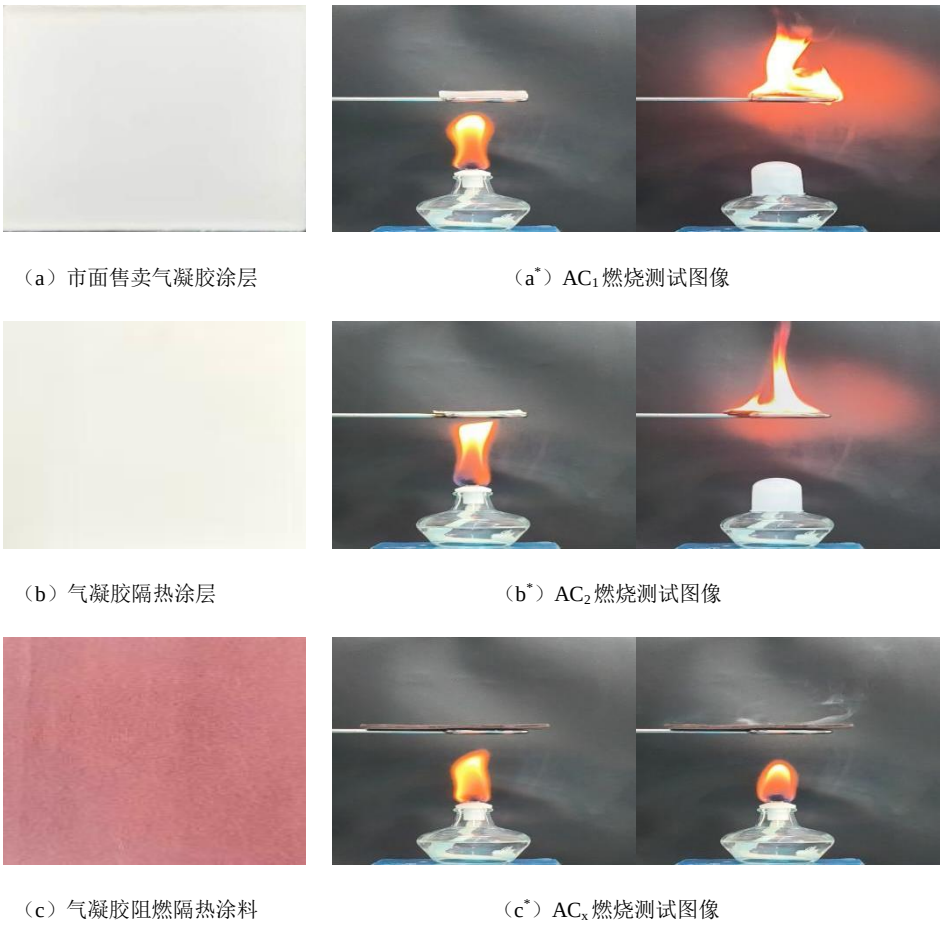
（d）300℃冷热面测试曲线

图 2　气凝胶涂料高温测试前后样貌与冷热面测试曲线

2.3 涂料的阻燃性能

本文比较了市面上售卖的气凝胶涂料（AC_1，成膜物质未知）（图 3a）与自己制备的以丙烯酸树脂为成膜材料（AC_2）的气凝胶隔热涂料（图 3b）的隔热性能与阻燃性能，两个涂料经过同样的制样与干燥条件，AC_1 的导热系数为 0.0415W/(m·K)，AC_2 的导热系数为 0.0396W/(m·K)，两者都具有优异的隔热性能。但在阻燃性能测试方面两者都属于易燃物（无附着物），在酒精灯外焰加热下都出现剧烈燃烧现象（图 3a*与图 3b*），这是由于其成膜物质的缘故，丙烯酸树脂燃烧时，会发生剧烈的自由基链式反应，生成二氧化碳和水蒸气，并放出大量热。燃烧产生的热量又会继续加热附近的树脂固体，使其进一步分解、产生更多可燃气体，形成自持续的燃烧循环。同样的条件下，测试 8%气凝胶含量酚醛树脂涂料（图 c）的阻燃性能，在酒精灯外焰灼烧测试中直至烧成碳化未被引燃（图 3c*），这表明该涂层有着优异的阻燃性能（AC_1 与 AC_2 燃烧测试图像选自灼烧开始时与灼烧 1min 后，AC_x 燃烧测试图像选自灼烧开始时与灼烧 5min 后）。

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.



（a）市面售卖气凝胶涂层　（a*）AC_1燃烧测试图像

（b）气凝胶隔热涂层　（b*）AC_2燃烧测试图像

（c）气凝胶阻燃隔热涂料　（c*）AC_x燃烧测试图像

图 3　气凝胶涂料阻燃性能测试

2.4 气泡对涂料的影响

涂料的制作采用浆料法，气凝胶通过亲水改性后在分散剂的作用下通过长时间的机械搅拌均匀分散在水中，形成均匀的气凝胶分散液，而后加入树脂与助剂制成涂料。在此过程中由于气凝胶本身的多孔结构，在经过机械搅拌时易产生大量的气泡，气泡不但会使得气凝胶大量团聚并且在调漆后也会大量残留难以消除，干燥后的涂层表面也会留有大量空洞严重影响隔热效果。消泡效果的评估可通过以下公式进行：

$$R=\frac{V_{pa}-V_{pc}}{V_{pa}}\times 100\% \qquad (1)$$

其中，R 表示消泡率；V_{pa}表示消泡前泡沫体积；V_{pc}表示消泡后泡沫体积。通过测定消泡前后的泡沫体积变化，可以评估消泡效果的好坏[7]。

2.5 涂层的低热导率机制

在本研究中，气凝胶涂层可被视为一种连续粘附介质，其内部封装着离散且均匀分布的颗粒，其中气凝胶和空心玻璃微球作为分散相颗粒。因此，该材料可被视为一种三相复合材料。此类多相材料的有效热导率可通过模型进行预测。本文引入了麦克斯韦模型用于计算：该模型最初由麦克斯韦提出，用于计算复合材料的电导率；通过利用热导率与电导率之间的相似性，该模型推导出了热导率表达式。模型假设分散相由均匀分布在连续相中的球形颗粒组成。该模型公式为：

$$\frac{k-k_0}{k+2k_0}=\varphi_1\frac{k_1-k_0}{k_1+2k_0}+\varphi_2\frac{k_2-k_0}{k_2+2k_0}+\ldots \qquad (2)$$

其中k表示涂层的热导率；k_0表示连续相的热导率；k_1和k_2分别代表不同分散相的热导率；φ_1和φ_2则表示各分散相的体积分数。在此情况下，假设气凝胶颗粒和中空玻璃微球作为球形颗粒均匀分散于连续相中，同时考虑了孔隙率对涂层热导率的影响。随着填料体积分数的增加，涂层内部会产生更多气泡，导致孔隙率增大，进而影响涂层的热导率。并得出修正后的模型表达式如下：

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

$$k_c=\left(1-\varphi_p\right)k_c^{'}+\varphi_p k_p \quad (3)$$

其中，k_c代表涂层的热导率；k_c为等式（1）中麦克斯韦模型预测值；p表示涂层的孔隙率；k_p则代表涂层孔隙内的热导率。由于涂层孔隙主要由空气气泡构成，空气的热导率k_p在 25℃时为 0.0467W/（m·K）。结果表明，该考虑孔隙率的改进模型能够有效解释涂层隔热性能的变化规律。通过调节气凝胶添加量与孔隙率，可调控其热导率，从而提升其实际应用价值[8]。

3 结论

综上所述，我们以酚醛树脂包覆气凝胶与空心玻璃微珠制成气凝胶阻燃隔热涂料，在满足阻燃性能的前提下充分保留涂料的隔热性能，使其导热系数低至 0.0467W/（m·K），解决隔热材料难以兼顾隔热性能与阻燃性能的问题，适用于多种实际应用场景。本研究充分展现了这一创新设计在显著拓展气凝胶在隔热材料及船舶领域应用潜力方面的价值。

基金项目：吉林省自然科学基金（YDZJ202301ZYTS534）。

[参考文献]

[1]张云.多式联运下的船舶运输模式研究[J].中国物流与采购,2025(1):137-138.

[2]张云.基于大数据分析的船舶运输可持续性研究[J].船舶物资与市场,2024,32(11):1-3.

[3]杨伟东.海运企业船舶运输成本管理与控制[J].产业创新研究,2024(21):137-139.

[4]S S S,Rai N,Chauhan I.Multifunctional Aerogels:A comprehensivereview on types,synthesis and applications of aerogels[J].Journal of Sol-GelScience and Technology,2023,105(2):324-336.

[5]Ziegler C,Wolf A,Liu W,et al.Modern Inorganic Aerogels[J].AngewandteChemie(International ed.in English),2017,56(43):13200-13221.

[6]Smirnova I,Gurikov P.Aerogels in Chemical Engineering:StrategiesToward Tailor-Made Aerogels[J].Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering,2017(8):307-334.

[7]白涛,李树国,周力为,等.水性纳米二氧化硅气凝胶隔热涂料的制备与隔热性能研究[J].化学与粘合,2026,48(3):308-311.

[8]Xiang Y ,Yan M ,Li L , et al.Low thermal conductivity and self-cleaning silica aerogel coating based on a secondary coating encapsulation strategy[J].Construction and Building Materials,2025(1):472140878-140878.

作者简介：李康宁（2002—），男，汉族，甘肃玉门人，硕士在读，长春工业大学化学工程学院，研究方向为气凝胶涂料。

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.