

SiO₂ 气凝胶涂料的制备及应用研究进展

丁逸栋, 刘朝辉, 王飞, 叶圣天, 贾艺凡, 班国东, 林锐

(中国人民解放军后勤工程学院 化学与材料工程系, 重庆 401311)

摘要: SiO₂ 气凝胶自 1931 年由美国科学家 Kistler 制备问世以来, 因其热导率低、比表面积大、孔隙率大等优异性能一直被研究者所青睐。随着研究的深入, SiO₂ 气凝胶的制备加工工艺得到了优化, 使用性能在一定程度上得到了较大提升, 研究方向也从早期的制备、性能研究发展到现在的应用研究。现已研制开发出许多具有特殊功能的全新产品, 并通过与其他材料的复合得到性能更优越的 SiO₂ 气凝胶复合材料, 使其在航天航空、军事、建筑、医学等领域得到越来越广泛的应用。在 SiO₂ 气凝胶众多应用领域中, 其在涂料中的运用是极为重要的一个分支。针对目前 SiO₂ 气凝胶涂料推广应用难等现实情况, 先对 SiO₂ 气凝胶及其涂料制备过程中存在的主要问题做简要阐述, 再将利用 SiO₂ 气凝胶在某些方面的突出性质而制成的功能涂料进行分类, 并从 SiO₂ 气凝胶在各种功能涂料中的作用机理出发, 对不同功能的 SiO₂ 气凝胶涂料的研究进展情况归纳总结, 在此基础上, 展望了未来 SiO₂ 气凝胶涂料的发展方向。

关键词: SiO₂ 气凝胶涂料; 隔热涂料; 耐高温涂料; 防火涂料; 吸附涂料; 光催化涂料

中图分类号: TQ63 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2016)06-0153-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.06.023

Research Progress in Preparation and Application of Silica Aerogel Coatings

DING Yi-dong, LIU Zhao-hui, WANG Fei, YE Sheng-tian, JIA Yi-fan, BAN Guo-dong, LIN Rui

(Department of Chemistry & Material Engineering, LEU, Chongqing 401311, China)

ABSTRACT: Since firstly prepared in 1931 by Kistler, a scientist from the United States, silica aerogel has been favored by the researchers due to its outstanding properties, such as low thermal conductivity, large specific surface area and large porosity. With further study, its preparation technologies and functional performances have been optimized and improved. Also, silica aerogel research has developed from the early research on preparation methods and properties to its current applications. Nowadays, the development of new products with special uses and higher-performances is making silica aerogel more and more widely used in the fields of aviation and space, military, construction and medicine, among which its application in coatings is an extremely important branch. Targeting at the practical difficulties in the application and popularization of the coatings, this thesis briefly described the major problems in the preparation process of silica aerogel and silica aerogel coatings, classified the functional coatings made of silica aerogel according to their outstanding properties in specific fields, explained its mechanism of action on the coatings of different functions and summarized the research progress in all kinds of special functional silica aero-

收稿日期: 2016-01-11; 修订日期: 2016-05-22

Received: 2016-01-11; Revised: 2016-05-22

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

Biography: DING Yi-dong(1990—), Male, Master graduate student, Research focus: thermal insulation material.

通讯作者: 刘朝辉(1965—), 男, 博士, 教授, 研究方向为隔热保温技术。

Corresponding author: LIU Zhao-hui(1965—), Male, Ph. D., Professor, Research focus: thermal insulation technology.

gel coatings. Besides, this paper expounded silica aerogel coatings' main problems demanding prompt solution. Finally, the development tendency was prospected.

KEY WORDS: silica aerogel coatings, preparation; thermal insulation coatings; high temperature resistant coatings; fire-retardant coatings; absorption coatings; photocatalytic coatings

SiO₂气凝胶是一种以空气为主要组成成分、无定形态的 SiO₂ 为基本骨架, 具有复杂三维网络结构的纳米轻质多孔材料, 其基本物理性能: 表观密度 0.003~0.35 g/cm³, 比表面积 800~1000 m²/g, 孔隙率 80.0%~99.8%, 孔洞平均尺寸 20 nm, 导热系数 0.008~0.043 W/(m·K)^[1]。它同时囊括了低热导率、低密度、高孔隙率、高光透过性、高比表面积、低折射率以及低声速性等性质^[2-6], 从而在很多领域都有着广阔的应用前景^[7-9]。随着涂料使用量的增加及对涂料性能要求的提高, SiO₂气凝胶作为涂料的一种功能填料得到了许多研究者的关注^[10]。SiO₂气凝胶用作涂料的重要组成部分, 会使涂料具备隔热、耐高温、防火、吸附、光催化和隔音吸声等特殊功能。本文先简要阐述其制备过程, 然后按功能对目前的 SiO₂气凝胶涂料进行分类, 就其研究情况进行归纳总结, 并为下一步其应用领域和范围的拓展提供参考, 最后对其未来的发展方向进行展望。

1 SiO₂气凝胶及其涂料的制备

目前 SiO₂气凝胶的制备方法很多, 其主要过程包括由溶胶-凝胶法制备出 SiO₂湿凝胶以及干燥得到 SiO₂气凝胶。SiO₂湿凝胶的制备过程相似, 主要区别在于干燥方法, 采用不同干燥技术制备出的 SiO₂气凝胶在性质和质量上都会有所差异, 图 1 是 SiO₂气凝胶制备的简要过程^[11]。采用超临界干燥法干燥时, 凝胶的骨架网络不会出现收缩和塌陷, 制成的 SiO₂气凝胶质量高, 各方面性能优越, 但实验条件苛刻, 制作周期长, 成本较高, 不能实现批量生产。为改善以上不足, 很多研究者都在探索非临界干燥法。Ravindra Deshpande 等^[12]最先使用常压干燥的方法, 制备出了 SiO₂气凝胶。之后又有研究者探索出真空冷冻、共沸蒸馏等其他干燥方法^[13-14]。但采用非超临界干燥法时, 不可避免会出现纳米粒子团聚现象, 制得的气凝胶比表面积、孔

隙率等物理参数下降明显, 导致性能不同程度地降低。虽然实验条件要求不高, 制作过程简单, 周期短, 但与超临界干燥制备出的 SiO₂气凝胶相比, 各方面性能还存在一定差距。

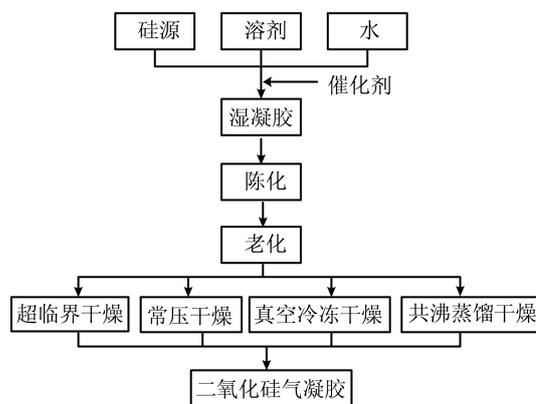


图 1 SiO₂气凝胶制备的简要过程

Fig.1 The brief process of the preparation of silica aerogel

SiO₂气凝胶涂料是 SiO₂气凝胶应用中的一个重要分支, 制备过程如图 2 所示。在 SiO₂气凝胶制备的基础上, 添加稳定剂、分散剂等助剂, 通过多种分散方法将其先制成 SiO₂气凝胶浆料, 再和成膜树脂、助剂、溶剂以及其他颜填料相混合, 最后通过高速分散制得 SiO₂气凝胶涂料。整个制备

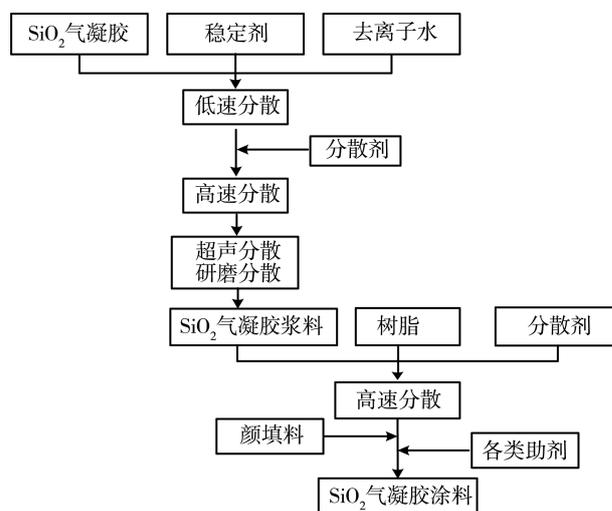


图 2 SiO₂气凝胶涂料制备的简要过程

Fig.2 The brief process of the preparation of silica aerogel coating

过程中, SiO₂ 气凝胶浆料的制备过程是最关键的一步, 也是 SiO₂ 气凝胶涂料性能优越与否的直接影响因素。该过程需要解决纳米粒子在介质中的团聚问题, 使 SiO₂ 气凝胶纳米颗粒均匀稳定地分散于溶剂中。即使到现在, 纳米粒子的分散问题还是没能很好地得到解决, 这阻碍了纳米材料表面效应、尺寸效应、量子效应和体积效应的发挥^[15], 制备得到的纳米涂料的纳米效应受到了不同程度的限制。

2 SiO₂ 气凝胶涂料的分类

各种 SiO₂ 气凝胶涂料的制备过程大致相同, 但其所利用的 SiO₂ 气凝胶主要特性各有差异, 涂料中加入的颜填料、助剂也各有特殊性能, 因此制成的 SiO₂ 气凝胶涂料的主要功能差异也较大。按功能划分, SiO₂ 气凝胶涂料的具体分类如图 3 所示。

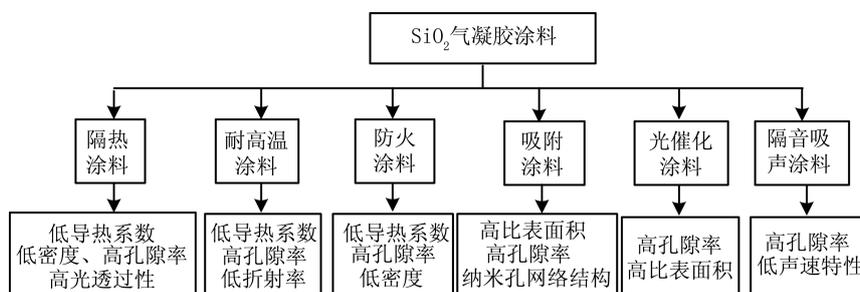


图 3 SiO₂ 气凝胶涂料的分类

Fig.3 Classification of silica aerogel coatings

2.1 隔热涂料

SiO₂ 气凝胶隔热涂料因 SiO₂ 气凝胶本身的结构特性, 能有效降低热量的传输, 起到改善环境、降低能耗的作用。SiO₂ 气凝胶的纳米孔以及三维网状结构破坏了基质的热量传导路径, 这是它具有极低导热系数的一个重要原因^[16]。独特的纳米孔结构限制了空气分子的自由流动, 抑制了空气的对流传导, 无限多的孔壁形成了热辐射的反射面和折射面, 具有“无穷隔热板效应”^[17], 最大限度地抑制了辐射导热。因此将具有优异隔热性能的 SiO₂ 气凝胶用于隔热涂料中会使涂膜的隔热效果得到很大提升。

SiO₂ 气凝胶本身透光性好, 可以制备纳米透明隔热涂料涂覆在玻璃上, 该涂料吸收波长在小于 400 nm 的紫外线波段, 透过波长在 400~760 nm 的可见光波段, 阻隔波长在 760~2500 nm 的近红外波段。当前, 已经有利利用 SiO₂ 气凝胶制备透明隔热涂料的相关成果。这种制备工艺利用 SiO₂ 气凝胶为隔热涂料的基本填料, 再采用合适的稳定剂将 SiO₂ 气凝胶有效地均匀分散, 将其制成浆料, 然后再利用成膜物, 将这两种材料和其他的助剂混合均匀而成。早在 2003 年 Gun-Soo Kim^[18]等就在玻璃窗上涂覆了 SiO₂ 气凝胶透明隔热膜, 其透光率达到 90%, 当膜厚为 100 μm 时, 其导热系数可

降到 0.2 W/(m·K), 是未涂膜时的 1/10。郭迪^[19]以 SiO₂ 气凝胶为填料制得气凝胶浆, 然后以水性丙烯酸树脂为成膜物, 在助剂的配合下制得水性纳米透明隔热涂料。实验表明, 与普通玻璃的透过率相比, 可见光透过率达到了 95%, 红外光阻隔率达到了 65%, 温差为 5~10 °C 左右。同样以 SiO₂ 气凝胶为功能填料, 丙烯酸树脂为成膜剂, 许辉等^[20]将制备成的透明隔热涂料涂覆于 5 mm 厚的普通玻璃上, 样品与空白玻璃温差可达 11 °C, 但是涂膜的可见光透过率仅为 40% 左右, 效果较差。卢斌等^[21]用稳定剂爱利索 TM[®]M-825 对 SiO₂ 气凝胶进行了改性, 在助剂的配合下制得了水性纳米透明隔热涂料。实验表明, 当涂覆膜厚为 20~25 μm 时, 与空白玻璃对比最大温差可达 14 °C, 比之前都有较大的提高, 可见光透过率至少可达 89%, 透明性好。这种隔热涂料的基本特点就是既没有改变玻璃原有的良好透光性能, 也有效地阻挡了紫外线和红外热辐射对室内环境以及室内温度的影响, 以其节能环保、性能优良的特点, 成为隔热涂料开发、研究与生产的主要方向。

SiO₂ 气凝胶隔热涂料也可用在建筑物其他部位上, 与传统的墙体隔热材料相比, SiO₂ 气凝胶涂料不仅施工方便, 更是弥补了一般有机保温材料 (如聚苯泡沫板) 防火阻燃性差和无机保温材料

(如岩棉、玻璃棉等)密度大且保温效果欠佳的缺陷^[22]。此类隔热涂料国内外都有较多的研究。Mohamad Ibrahim^[23]等用传热数学模拟和现实条件实验相结合的方法,发现 SiO₂ 气凝胶涂层的隔热效果比其他隔热材料都要好,且在连续和间歇加热情况下可将绝热层置于墙体不同位置来实现最佳隔热效果。同样以建立数学模型为基础,Søren Kiil^[24]得出了相同的结论,他以众多实验数据验证模型,测试了当粘结剂嵌入 SiO₂ 气凝胶时涂层的导热系数,并得出在没有粘结剂的理想状态下,仅含 SiO₂ 气凝胶颗粒的涂料的隔热性能比在涂料中加入空心玻璃微珠或其他空心高分子化合物的都要好。在国内,刘成楼等^[25]以自交联丙烯酸乳液为成膜物,以 SiO₂ 气凝胶、硅酸铝纤维等为填料制备隔热涂料。实验表明,导热系数为 0.027 W/(m·K)的 1 mm 厚 SiO₂ 气凝胶涂层节能率比 8 cm 厚聚苯泡沫板高 5%。刘红霞等^[26]用改性后的 SiO₂ 气凝胶、空心微珠作为填料,添加到丙烯酸酯白色外墙涂料中制成隔热涂料,测得涂 SiO₂ 气凝胶涂料的箱内温度比涂普通涂料的箱内温度低 5.3 °C。

此类 SiO₂ 气凝胶涂料可广泛应用于建筑物内外墙、仓储、冷库等,具有薄层施工、纳米孔隔热、安全防火、环保节能、性价比高等优点。早在 2010 年上海世博会零碳馆及万科实验中便已投入使用,事实证明了该涂料具有突出的节能效果。

2.2 耐高温涂料

SiO₂ 气凝胶耐高温涂料是指能长期在 200 °C 以上高温环境中使用,能够对基材进行保护,且涂层自身的物理化学性能仍能保持相对稳定的一种功能涂料^[27-28]。SiO₂ 气凝胶可在 900 °C 以下保持良好的多孔网络结构特性^[29],但当温度达到 900 °C 以上时会发生烧结现象,Si—O—Si 网络结构会收缩并团聚,孔结构遭到破坏,比表面积在温度达到 900 °C 后急剧下降,导热系数会随着温度的升高而提高^[30-31]。为实现 SiO₂ 气凝胶在超高温下维持原有的纳米孔网络结构,保持其低热导率及高孔隙率,一般通过掺杂其他耐高温材料的方法来制备耐高温复合材料。

Wei 等^[32]用自加速的溶胶-凝胶方法,通过在 SiO₂ 气凝胶中加入质量分数为 20% 的碳纳米纤维的方法,成功制备出了耐高温的碳纳米纤维增强

SiO₂ 气凝胶复合材料,经测试,其在 500 °C 时的导热系数仅为 0.05 W/(m·K),兼具耐高温和低热导率特点。孙登科^[33]通过掺杂 TiO₂ 遮光剂来制备 SiO₂ 复合气凝胶,在 500 °C 和 800 °C 时导热系数分别为 0.0372 W/(m·K)和 0.0495 W/(m·K),较大地提高了 SiO₂ 气凝胶的高温绝热性能。SiO₂ 气凝胶良好的耐高温性是用其制备耐高温涂料的主要原因,现已有研究者成功制备出了 SiO₂ 气凝胶耐高温涂料。刘成楼等^[34]以纳米 SiO₂ 气凝胶、改性六钛酸钾晶须 (PTW)、硅铝基陶瓷空心微珠等为主要功能填料,以耐高温有机硅树脂乳液和丙烯酸乳液为成膜物,在多种功能助剂的配合下制备成耐高温绝热涂料。制备的耐高温隔热涂料导热系数较低,在 0.027~0.031 之间,可承受 600 °C 的高温,耐热性好。

SiO₂ 气凝胶耐高温涂料具有厚度薄、耐高温、绝热等特性,且在高温环境下,可根据使用环境温度和要达到的降温幅度,选择施工的涂膜厚度,适应性好、可控性强,有着极为广泛的用途,可以应用于高温蒸汽管道、高温炉、石油裂解设备、发动机部位和冶金行业的金属高温防护等领域。

2.3 防火涂料

SiO₂ 气凝胶防火涂料是涂敷在可燃性基材表面,能有效阻止热量的传递,降低基材可燃性以及延滞甚至阻止火灾的蔓延,可提高被涂基材耐火极限的一种特种功能涂料。SiO₂ 气凝胶防火涂料的防火机理主要在于 SiO₂ 气凝胶本身属于难燃性物质,从而使涂料具有难燃特性。SiO₂ 气凝胶的孔隙尺寸在 2~50 nm 之间,空气中主要成分氮气和氧气的平均自由程均在 70 nm 左右,如果涂料够密实,就能有效阻止被保护基材与空气的直接接触。SiO₂ 气凝胶极低的导热系数,可以较大地降低火焰温度,使被保护基材达不到自身着火点。以 SiO₂ 气凝胶为功能填料,均匀分散于涂料的稳定体系中,当涂料被涂刷形成涂层时,能有效地起到良好的绝热保护作用,从而提高其耐火性,起到防火的作用。

李建涛等^[35]以 SiO₂ 气凝胶为功能填料,加入无机胶凝材料和有机乳胶粉复配的粘结剂和各种助剂制备了薄层隧道防火涂料,并且确定硅气凝胶浆料的质量分数为 4% 时涂料的性能达到最佳。此涂料在隧道混凝土砌块表面形成涂层时,能够有效

地对混凝土砌块及分布于其中的钢筋起到良好的绝热保护作用,从而大大地提高了隧道的耐火性,起到了隧道防火的作用。气凝胶防火涂料能较大幅度降低建筑设施遭遇火灾时的毁坏程度,也可利用其优越的防火性能来保护人员的安全。Jason Koravos^[36]等通过实验对比来凸显气凝胶涂层的防火性能,测得在基材温度分别为 160 °C 与 200 °C 时,1 mm 厚的气凝胶涂层比陶瓷涂层使人体的皮肤接触温度多降低了 14 °C 和 18 °C,并且测得其热阻是陶瓷涂层的 6~11 倍,为气凝胶涂层在 200 °C 以下时的防火保护提供了实验基础。

以 SiO₂ 气凝胶为主要功能填料做成的防火涂料可以适应于众多场合,用以保护建筑物、器材设备、人员安全等,而且其防火效果远好于普通的防火涂料及其他防火材料。

2.4 吸附涂料

SiO₂ 气凝胶具有纳米多孔网络结构,加上其巨大的内表面积,使其具备了吸附材料应有的结构特性,对有机溶剂和有机物质有超强的吸附能力,且吸附性能比现在常见的吸附剂(活性炭、硅胶、氧化铝、分子筛等)还要好^[37-39]。同时由于其表面原子数众多,缺少相邻的原子与之结合,导致 SiO₂ 气凝胶表面原子具有很高的化学活性,极容易吸附其他原子,从而具有较强的吸附作用^[40]。

Kashif Nawaz^[41-42]等通过浸渍涂敷技术将 SiO₂ 气凝胶涂敷在金属泡沫上,并对动态蒸汽进行吸附实验,测试其除湿性能。测得 SiO₂ 气凝胶涂层越厚、扩散系数越小,其吸附水能力越强。通过计算,建立了一个数学模型,用来确定不同类型干燥剂和涂层厚度的吸附饱和时间。同时他还用扫描电镜观测气凝胶涂层的微观结构,测出了涂层结构中孔的直径和孔连接处的尺寸,并与固体干燥剂的多孔结构形成对比,评估了涂层基材类型与微观结构的影响,指出这取决于在凝胶溶胶法中使用质量扩散率的催化剂。该发现可用于开发和绩效评估含有 SiO₂ 气凝胶涂层在除湿中的应用。Yi-Feng Lin 等^[43]用—CF₃ 官能团对疏水型 SiO₂ 气凝胶进行了改性,改性后的 SiO₂ 气凝胶对 CO₂ 表现出了更强的吸附作用,且能持续长时间的使用,并保持良好的吸附性能,同时指出了其广阔的应用前景。国内也有较多学者在研究 SiO₂ 气凝胶的吸附性能。张志华等^[44]

以多聚硅 E-40 为硅源制备了高气孔率的疏水性 SiO₂ 气凝胶,通过吸附材料测试比较得出它比活性炭纤维(activated carbon fibre, ACF)和活性炭颗粒(granule of activated carbon, GAC)更优越。实验还发现 SiO₂ 气凝胶可脱附进行再次吸附,且再吸附容量基本不变。SiO₂ 气凝胶具有良好的吸附和解吸特性,可与其他基材复合形成新的吸附材料。不管 SiO₂ 气凝胶本身,还是它与其他基材复合形成的新材料,其吸附性能比常见的吸附材料都有所增强。但目前将其作为主要的功能填料制备吸附涂料的较少,这将是以后发展吸附涂料的一个重要方向。

SiO₂ 气凝胶吸附涂层可循环利用、绿色经济,具备优越的发展潜力,可被广泛应用于空气净化、污水处理、水蒸气吸附、医药过滤、海水淡化等领域,具有广阔的应用前景。

2.5 光催化涂料

通过溶胶-凝胶法制备的 SiO₂ 气凝胶孔隙率最高可达 99.8%,比表面积最高将近 1000 m²/g,这些固有的性质使它在催化剂的应用中获得了极高的关注^[45]。SiO₂ 气凝胶光催化涂料能在一定波长光的照射下具有催化反应功能,这种涂料具有分解有毒物质、杀菌消毒、降解有机物和净化空气等作用。SiO₂ 气凝胶特殊的性质使建立高效的催化降解体系、实现气凝胶的高层次利用成为可能,也为研究 SiO₂ 气凝胶材料对污染物的光催化机理和新的应用前景提供了理论依据。

白麓楠等人^[46]用 SiO₂ 气凝胶和 WO_x-TiO₂ 复合光催化粒子为主要的功能性无机光催化剂添加相,合成制备了 SiO₂ 气凝胶/WO_x-TiO₂ 复合空气净化涂料。实验表明光催化剂占涂料质量分数的 5.0% 时,具有稳定、较高的光催化率。用其光催化降解甲醛气体时,3 h 内对甲醛气体的降解率高达 84.62%。SiO₂ 气凝胶光催化涂料不仅对空气中的有害气体有降解作用,还可以用于工业对污染物进行催化降解。陈晨等^[47]利用 TiCl₄ 和工业水玻璃为原料,通过溶胶凝胶、常压干燥法制备了 TiO₂-SiO₂ 气凝胶,并用乙醇作为分散剂,制成了 TiO₂-SiO₂ 复合气凝胶涂层。该凝胶涂层在可见光照射 4 h 后,光催化降解罗丹明 B(工业生产中最常用的有机染料)的效率能达到 77%。同样研究 TiO₂-SiO₂ 气凝胶的光催化降解性能,王玉栋等^[48]通过它与 TiO₂

粉末进行对比实验,结果表明在任何酸碱性环境下, TiO_2 - SiO_2 气凝胶的光催化效果都远远优于 TiO_2 粉末,并且在 $\text{pH}=9$ 、6.5 h时,其降解率达到97%。

现今全球工业发展迅速,人们的生活水平得到显著的提高,社会对绿色、环保、节能日益重视,污染治理已成为当今世界关注的热点问题。光催化作为一种新兴的环境修复技术在治理污染方面的应用日益受到人们的重视。

2.6 隔音吸声涂料

SiO_2 气凝胶具有低声速特性,可用作吸声隔音材料,其作用机理在于它具有大量微小的连通孔隙,声波可沿着这些孔隙深入内部,与 SiO_2 气凝胶发生摩擦作用进而将声能转化为热能,从而达到隔音效果。

目前,少有单独使用 SiO_2 气凝胶作吸音材料,一般都是与其他材料复合形成吸声材料,或者将 SiO_2 气凝胶涂层涂覆在其他吸音材料表面上制成吸声效果更强的隔音材料。周成飞^[49]等采用 SiO_2 气凝胶和3,3',4,4'-二苯甲酮四酸二酐为原料,制得了 SiO_2 -PUI复合硬泡。在125~4000 Hz范围内测试其吸声性能,随着 SiO_2 气凝胶加入量的增加,泡沫的开孔率递增,平均吸声系数增大,吸声性能得到提高。Siamak Motahari等^[50]将 SiO_2 气凝胶涂层涂敷在全棉非织造垫(CNM)上,合成了 SiO_2 气凝胶的全棉非织造垫,用此作为吸音材料。实验数据表明,当使用气凝胶作为涂层时,CNM的吸音效果得到显著提升,最高吸声频率可达到2500 Hz,且通过实验发现该复合材料最好的吸音频率段在250~2500 Hz之间。

SiO_2 气凝胶可以用来当成隔音吸声材料做成各种形式的吸声体,用于家庭住户、商场办公楼、工业设备等各种需要隔音吸声的场合。

3 展望

SiO_2 气凝胶具有许多优异的性能,可用它作功能填料制成具有多重功能的涂料,且材料无毒无害成分,环保性好,完全符合现在的发展理念。现在 SiO_2 气凝胶的制备工艺得到了优化,研究也比较深入,对其复合材料的研究及应用的关注度也在不断提升,但还需在以下几个方面进一步改进:

1) 现在 SiO_2 气凝胶的制备工艺虽有很大改进,但其价格还是较高,在航空航天、军事等高新领域使用较多,然而在民用领域的应用受到较大阻力。改进 SiO_2 气凝胶的生产工艺,降低成本并增加使用寿命是现在急需解决的现实问题。

2) 制备 SiO_2 气凝胶涂料时, SiO_2 气凝胶在涂料中的分散性和团聚现象始终没有很好地解决,限制了性能的发挥,大大降低了使用效果。

3) SiO_2 气凝胶在高温环境下遮挡红外辐射能力差,热导率也随着温度的升高而上升,现在许多研究都是针对它的制备工艺和隔热性能,对它的高温稳定性研究较少,因此 SiO_2 气凝胶材料在高温隔热方面的应用成为关键问题。

4) 在 SiO_2 气凝胶特种功能涂料中,最常见的是利用 SiO_2 气凝胶的低热导率特性制备隔热涂料,其他优异性能并没有被重视,导致在其他涂料领域中的应用研究较少。

参考文献

- [1] PAJONK G M. Transparent Silica Aerogels[J]. Journal of Non-crystalline Solids, 1998, 225: 307—314.
- [2] HRUBESH L W. Aerogels: The World's Lightest Solids[J]. Chemistry and Industry, 1990(24): 824—827.
- [3] BOND G C, Flamerz S. Structure and Reactivity of Titania-supported Oxides. Part 3: Reaction of Isopropanol over Vanadia-titania Catalysts[J]. Applied Catalysis, 1987, 33 (1): 219—230.
- [4] MULDER C A M, VANLIEROP J G. Preparation, Densification and Characterization of Autoclave Dried SiO_2 Gels[M]. Aerogels: Springer Berlin Heidelberg, 1986: 68—75.
- [5] SUN H, XU Z, GAO C. Multifunctional, Ultra-flyweight, Synergistically Assembled Carbon Aerogels[J]. Advanced Materials, 2013, 25(18): 2554—2560.
- [6] SMIRNOVA I, SUTTIRUENGWONG S, ARLT W. Feasibility Study of Hydrophilic and Hydrophobic Silica Aerogels as Drug Delivery Systems[J]. Journal of Non-crystalline Solids, 2004, 350: 54—60.
- [7] HRUBESH L W. Aerogel applications[J]. Journal of Non-crystalline Solids, 1998, 225: 335—342.
- [8] SCHMIDT M, SCHWERTFEGER F. Applications for Silica Aerogel Products[J]. Journal of Non-crystalline Solids, 1998, 225: 364—368.
- [9] AYERS M R, HUNT A J. Synthesis and Properties of Chitosan-Silica Hybrid Aerogels[J]. Journal of Non-crystalline Solids, 2001, 285(1): 123—127.
- [10] 蔡亮珍, 杨挺. 纳米 SiO_2 在 高分子领域中的应用[J]. 现代塑料加工应用, 2002, 14(6): 20—23.
CAI Liang-zhen, YANG Ting. Application of Nano- SiO_2 in

- Polymer[J]. *Modern Plastics Processing and Applications*, 2002, 14(6): 20—23.
- [11] PATEL R P, PUROHIT N S, SUTHAR A M. An Overview of Silica Aerogels[J]. *International Journal of Chem Tech Research*, 2009, 1(4): 1052—1057.
- [12] DESHPANDE R, SMITH D M, JEFFREY B C. Pore Structure Evolution of Silica Gel during Aging/Drying: Effect of Surface Tension[M]. London: Cambridge University Press, 1992:553.
- [13] PONS A, CASAS L, ESTOP E, et al. A New Route to Aerogels: Monolithic Silica Cryogels[J]. *Journal of Non-crystalline Solids*, 2012, 358(3): 461—469.
- [14] 刘海弟, 郭锴. 利用恒沸蒸馏干燥超细二氧化硅凝胶的研究[J]. *无机盐工业*, 2002, 34(6): 1—3.
LIU Hai-di, GUO Kai. Experimental Studies on Desiccating the Gel of Ultra-fine SiO₂ by Azeotropic Distillation[J]. *Inorganic Chemicals Industry*, 2002, 34(6): 1—3.
- [15] 云龙, 崇军, 秀珍. 纳米材料学概论[M]. 广州: 华东理工大学出版社, 2008.
YUN Long, CHONG Jun, XIU Zhen. Overview of Nanometer Material Science[M]. Guangzhou: East China University of Science and Technology Press, 2008.
- [16] 张瑞殊, 郑伟, 何方, 等. 纳米隔热涂料的研究进展[J]. *涂料工业*, 2014, 44(1): 75—79.
ZHANG Rui-shu, ZHENG Wei, HE Fang, et al. Research Progress in Nano Thermal Insulation Coatings[J]. *Paint & Coatings Industry*, 2014, 44(1): 75—79.
- [17] WU H J, FAN J T, DU N. Porous Materials with Thin Interlayers for Optimal Thermal Insulation[J]. *International Journal of Nonlinear Sciences and Numerical Simulation*, 2009, 10(3): 291—300.
- [18] KIM G S, HYUN S H. Synthesis of Window Glazing Coated with Silica Aerogel Films via Ambient Drying[J]. *Journal of Non-crystalline Solids*, 2003, 320(1): 125—132.
- [19] 郭迪. SiO₂气凝胶透明隔热涂料的制备及性能研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012.
GUO Di. Preparation and Performance Research of SiO₂ Aerogel Transparency and Heat-insulating Coating[D]. Changsha: Center South University, 2012.
- [20] 许辉, 汪牡丹, 涂进春, 等. SiO₂气凝胶对复合隔热涂料性能的影响[J]. *材料导报*, 2013, 27(14): 100—103.
XU Hui, WANG Mu-dan, TU Jin-chun, et al. Effect of SiO₂ Aerogel on the Performance of Composite Insulation Coating[J]. *Materials Review*, 2013, 27(14): 100—103.
- [21] 卢斌, 郭迪, 卢峰. SiO₂气凝胶透明隔热涂料的研制[J]. *涂料工业*, 2012, 42(6): 15—18.
LU Bin, GUO Di, LU Feng. Study of SiO₂ Aerogel Transparent Heat[J]. *Insulation Coatings*, 2012, 42(6): 15—18.
- [22] 张欣, 叶剑锋, 周海兵, 等. 新型外墙保温隔热材料的试验研究[J]. *硅酸盐通报*, 2013, 32(5): 982—985.
ZHANG Xin, YE Jian-feng, ZHOU Hai-bing, et al. Experimental Research on New Wall Thermal Insulation Material[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2013, 32(5): 982—985.
- [23] IBRAHIM M, BIWOLE P H, WURTZ E, et al. A Study on the Thermal Performance of Exterior Walls Covered with a Recently Patented Silica-aerogel-based Insulating Coating[J]. *Building and Environment*, 2014, 81: 112—122.
- [24] KIIL S. Quantitative Analysis of Silica Aerogel-based Thermal Insulation Coatings[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2015, 89: 26—34.
- [25] 刘成楼, 曹永久, 郭立群, 等. 薄层外墙纳米隔热涂料的研制[J]. *涂料技术与文摘*, 2014, 35(7): 15—18.
LIU Cheng-lou, CAO Yong-jiu, GUO Li-qun, et al. Preparation of Thin-film Nano-scale Thermal Insulation Coatings for Exterior Wall[J]. *Coatings Technology & Abstracts*, 2014, 35(7): 15—18.
- [26] 刘红霞, 陈松, 贾铭琳, 等. 疏水 SiO₂气凝胶的常压制备及在建筑隔热涂料中的应用[J]. *涂料工业*, 2011, 41(8): 22—26.
LIU Hong-xia, CHEN Song, JIA Ming-lin, et al. Preparation of Hydrophobic SiO₂ Aerogel under Ambient Pressure and Its Application in Heat[J]. *Insulating Architectural Coatings*, 2011, 41(8): 22—26.
- [27] 范星河, 谢晓峰. 耐高温聚合物及其复合材料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
FAN Xing-he, XIE Xiao-feng. High Temperature Resistant Polymer and Its Composite Material[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004.
- [28] COLOMBO P, MERA G, RIEDEL R, et al. Polymer-derived Ceramics: 40 Years of Research and Innovation in Advanced Ceramics[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2010, 93(7): 1805—1837.
- [29] AMEEN K B, RAJASEKAR K, RAJASEKHARAN T, et al. The Effect of Heat-treatment on the Physico-chemical Properties of Silica Aerogel Prepared by Sub-critical Drying Technique[J]. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 2008, 45(1): 9—15.
- [30] WANG J, KUHN J, LU X. Monolithic Silica Aerogel Insulation Doped with TiO₂ Powder and Ceramic Fibers[J]. *Journal of Non-crystalline Solids*, 1995, 186: 296—300.
- [31] ZENG S Q, HUNT A, GREIF R. Theoretical Modeling of Carbon Content to Minimize Heat Transfer in Silica Aerogel[J]. *Journal of Non-crystalline Solids*, 1995, 186: 271—277.
- [32] WEI T Y, LU S Y, CHANG Y C. Transparent, Hydrophobic Composite Aerogels with High Mechanical Strength and Low High-temperature Thermal Conductivities[J]. *The Journal of Physical Chemistry B*, 2008, 112 (38): 11881—11886.
- [33] 孙登科, 杨兵兵. TiO₂掺杂硅气凝胶的制备及性能研究[J]. *铸造技术*, 2015(6):72.
SUN Deng-ke, YANG Bing-bing. Preparation of TiO₂-doped-Silicon Aerogels and Its Properties[J]. *Foundry Technology*, 2015(6): 72.
- [34] 刘成楼, 郑德莲, 刘昊天. 纳米耐高温绝热涂料的研制[J]. *上海涂料*, 2015, 53(1): 10—13.
LIU Cheng-lou, ZHEN De-lian, LIU Hao-tian. Development of Nano High Temperature and Heat Insulating Coatings[J]. *Shanghai Coatings*, 2015, 53(1): 10—13.
- [35] 李建涛, 刘向荣, 苏智魁. 硅气凝胶隧道防火涂料的制备及性能研究[J]. *新型建筑材料*, 2014(10): 14—17.
LI Jian-tao, LIU Xiang-rong, SU Zhi-kui. Preparation and Properties of Silica Aerogel Fire-retardant Coatings for Tunnel[J]. *New Building Materials*, 2014(10): 14—17.
- [36] KORAVOS J, NORWOOD C, PESCATORE P, et al.

- Aerogel Insulative Coatings for Personnel Protection[J]. Paint & Coatings Industry, 2013, 44: 48—50.
- [37] 耿虹, 仲兆平. 活性炭纤维 (ACF) 在环境保护中的应用[J]. 能源研究与利用, 2003(5): 17—19.
GENG Hong, ZHONG Zhao-ping. Utilization of Activated Carbon Fiber in Environmental Protection[J]. Energy Research and Utilization, 2003(5): 17—19.
- [38] 张裕卿, 林灿生. 高吸附活性硅胶的合成及其对锆的选择分离[J]. 核科学与工程, 2000, 20(4): 353—359.
ZHANG Yu-qing, LIN Can-sheng. Synthesis of Silica Gels with High Adsorption Activity and Selection Separation for Zirconium[J]. Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering, 2000, 20(4): 353—359.
- [39] 杨秀英, 李广东, 邱敏蓉. 气凝胶在涂料中的研究与应用[J]. 石化技术, 2015(3): 33—37.
YANG Xiu-ying, LI Guang-dong, QIU Min-rong. Research and Application of Aerogel in Coatings[J]. Petrochemical Industry Technology, 2015(3): 33—37.
- [40] 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(S1): 546—552.
WU Jun-sheng, LI Xiao-gang, DU Wei, et al. The Application of Aerogels in Catalysis and Adsorption[J]. Journal of Functional Material, 2004, 35(S1): 546—552.
- [41] NAWAZ K. Aerogel-coated Metal Foams for Dehumidification Applications[J]. Ashrae Transactions, 2014, 120: 1654—1701.
- [42] NAWAZ K, SCHMIDT S J, JACOBI A M. Effect of Catalyst and Substrate on the Moisture Diffusivity of Silica-aerogel-coated Metal Foams[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, 73: 634—644.
- [43] LIN Y F, CHEN C H, TUNG K L, et al. Mesoporous Fluorocarbon-Modified Silica Aerogel Membranes Enabling Long-term Continuous CO₂ Capture with Large Absorption Flux Enhancements[J]. Chem Sus Chem, 2013, 6(3): 437—442.
- [44] 张志华, 倪星元, 沈军, 等. 疏水型 SiO₂ 气凝胶的常压制备及吸附性能研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2006, 33(12): 1641—1645.
ZHANG Zhi-hua, NI Xing-yuan, SHEN Jun, et al. Hydrophobic Silica Aerogels Prepared with Ambient Pressure Drying and Its Adsorption Properties[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2006, 33(12): 1641—1645.
- [45] MOHANAN J L, BROCK S L. CdS Aerogels: Effect of Concentration and Primary Particle Size on Surface Area and Opto-electronic Properties[J]. Journal of Sol-Gel Science and Technology, 2006, 40(2/3): 341—350.
- [46] 白麓楠, 刘敬肖, 史非, 等. SiO₂ 气凝胶/WO_x-TiO₂ 复合空气净化涂料的制备及性能[J]. 大连工业大学学报, 2014(1): 57—61.
BAI Lu-nan, LIU Jing-xiao, SHI Fei, et al. Preparation and Performance of SiO₂ Aerogel/WO_x-TiO₂ Composite Air Purification Coating[J]. Journal of Dalian Polytechnic University, 2014, 1: 57—61.
- [47] 陈晨, 史非, 唐乃岭, 等. TiO₂-SiO₂ 复合气凝胶涂层的制备和光催化性能[J]. 大连工业大学学报, 2012, 31(2): 33—36.
CHEN Chen, SHI Fei, TANG Nai-ling, et al. Preparation of TiO₂-SiO₂ Composite Aerogel and Its Photocatalytic Activity[J]. Journal of Dalian Polytechnic University, 2012, 31(2): 33—36.
- [48] 王玉栋, 郝志显, 甘礼华, 等. TiO₂/SiO₂ 气凝胶对吡啉的光催化降解[J]. 应用化学, 2004, 21(10): 1002—1005.
WANG Yu-dong, HAO Zhi-xian, GAN Li-hua, et al. Photocatalytic Degradation of Pyridine by TiO₂/SiO₂ Aerogel[J]. Chinese Journal of Applied Chemistry, 2004, 21(10): 1002—1005.
- [49] 周成飞, 翟彤, 曹巍, 等. SiO₂ 气凝胶/PUI 复合硬泡的制备及其特性研究[J]. 橡塑技术与装备, 2010, 36(7): 24—26.
ZHOU Cheng-fei, ZHAI Tong, CAO Wei, et al. Preparation and Performance Research of Silica Aerogel/PUI Rigid Foam[J]. China Rubber/Plastics Technology and Equipment, 2010, 36(7): 24—26.
- [50] MOTAHARI S, JAVADI H, MOTAHARI A. Silica-Aerogel Cotton Composites as Sound Absorber[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2014: 04014237.