

SiO₂ 气凝胶在建筑行业的应用

葛辉

中国二十冶集团有限公司，上海，201999；

摘要：气凝胶凭借其超低密度和优异的隔热性能，为建筑节能方面提供了新思路。文章介绍了 SiO₂ 气凝胶的基本特性，包括其独特的纳米多孔结构、极低的导热系数以及良好的隔音效果。探讨了气凝胶在建筑行业的多种应用形式，如气凝胶涂料、气凝胶绝热毡、气凝胶玻璃、气凝胶保温砂浆等。这些复合材料在提升建筑保温隔热性能、降低能耗、增强防火隔音效果等方面展现出显著优势。未来，气凝胶在建筑行业的应用前景将更加广阔，有望为实现绿色建筑和可持续发展做出重大贡献。

关键词：气凝胶；建筑节能；建筑材料；保温隔热；导热系数

DOI：10.69979/3029-2727.26.01.041

引言

随着时代的发展，人们对居住环境的舒适度和建筑节能情况日益重视，现有建筑材料的保温隔热效果一般，无法满足人们对室内冬暖夏凉的要求，且温度流失易产生能源的浪费，建筑行业急需新型材料来改善这一现象。

气凝胶是世界上密度最小的固体，按种类可分为硅系、硫系、碳系、金属系、金属氧化物系等。一般常见的气凝胶为 SiO₂ 气凝胶，其最早由美国科学家 Kistler^[1] 在 1931 年制备。将气凝胶材料应用于建筑行业，衍生出一系列新型复合材料，这些材料具有热导率低、轻质、隔音效果好、阻燃等特性^{[2][3]}，非常适用于建筑节能材料方面。本文介绍了气凝胶的基本特性及现阶段气凝胶材料在建筑行业中的应用，并对气凝胶材料在建筑行业中的应用进行展望。

1 气凝胶

1.1 气凝胶的基本特性

气凝胶材料密度极低，目前世界上最轻的气凝胶为“全碳气凝胶”，密度仅为 0.16mg/cm³，是空气密度的 1/6^[4]，也是迄今为止最轻的材料。如图 1 所示，气凝胶独特的纳米级网络结构是由 1~20nm 的颗粒和 2~50nm 的孔结构组成，孔隙率高达 85%~99.8%^[5]。

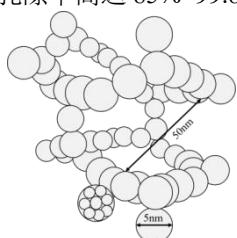


图 1 SiO₂ 气凝胶结构示意图

凭借其独特的分子结构，气凝胶拥有很好的保温隔热性能和隔音效果。常温常压下，气凝胶导热系数低至 0.013W/(m·K)，是目前导热系数最低的固体材料，即使在温度为 800℃ 的高温情况下，其导热系数也仅为 0.043W/(m·K)，可见气凝胶这种材料隔热性能同样优异。

1.2 气凝胶的绝热原理

物质之间主要通过热传导、热对流和热辐射来进行热传递。气凝胶材料得益于其独特的纳米多孔结构，孔隙率极高，内部充满空气，常温常压下空气的分子自由程约为 40nm，而气凝胶的孔径一般在 2~50nm，因此气凝胶内部孔洞中的气体分子的热对流运动几乎停止；气凝胶的纳米多孔结构会形成“无穷热隔板”效应，对热辐射具有遮蔽作用。总之，气凝胶材料拥有如此优良的隔热性能主要得益于其独特的纳米多孔结构，这种结构在导热、对流和辐射三方面均能有效抑制热量的传递。

2 气凝胶在建筑行业的应用

气凝胶材料拥有极佳的保温隔热和隔音性能，可以提升建筑的室内舒适度并降低能源消耗。但是气凝胶材料强度低、韧性差，易受到外力破坏，不可作为建筑材料单独使用，可将气凝胶材料与现有的建筑材料进行结合，得到兼顾力学性能和保温隔热性能的复合材料。目前常见的气凝胶复合材料有气凝胶隔热涂料、气凝胶绝热毡、气凝胶玻璃、气凝胶砂浆等。

2.1 气凝胶涂料

气凝胶涂料是通过将气凝胶粉体分散在专用的高

性能树脂乳液或无机粘结剂体系中制备而成，是一种高性能建筑保温隔热材料。刘成楼^[6]等人以自交联丙烯酸乳液为成膜物，以 SiO₂ 气凝胶、硅酸铝纤维等材料为填充物，在多种助剂的配合下制备出 SiO₂ 气凝胶涂料。研究表明，该气凝胶涂料导热系数低至 0.027W/(m·K)，试验测得 1mm 厚气凝胶涂料的保温隔热性能优于 8cm 厚的聚苯泡沫板。韩晓飞^[7]等人通过将 SiO₂ 气凝胶与 WPU 乳液基体结合，制备出 SiO₂ 气凝胶/WPU 透明隔热复合涂料。试验结果表明随着 SiO₂ 气凝胶含量的增加，复合涂料的隔热性能和附着力均呈增长趋势，透明度保持良好，变化不大，其力学强度在含量为 20% 时达到最佳。

气凝胶涂料除拥有良好的保温隔热性能以外还具有轻薄和施工便利等优点。相比于传统的保温材料，气凝胶涂料可以更灵活地应用于建筑内外墙，节省时间和成本。

2.2 气凝胶绝热毡

气凝胶绝热毡以纳米二氧化硅气凝胶为主要材料，通过特殊工艺与玻璃纤维棉或预氧化纤维毡复合而成。气凝胶绝热毡的导热系数极低，可低至 0.021W/(m·K)，远低于传统保温材料。这一特性意味着它能有效阻止热量传递，为建筑提供优异的保温效果。在相对湿度较高的环境中，其导热系数依然保持稳定，确保了保温性能的持久可靠。作为柔性保温毡，气凝胶绝热毡可随意弯曲、折叠，适应各种复杂形状的建筑结构。施工人员可根据实际需求，轻松裁剪成所需尺寸和形状，便于安装和铺设，大大提高了施工效率和灵活性。同时气凝胶绝热毡属于无机材料，具有 A 级不燃特性，在高温下不会燃烧，也不会释放有毒烟雾，为建筑提供了可靠的防火保障。

气凝胶绝热毡凭借其优异的性能，在建筑行业拥有着广阔的应用前景。在外墙保温方面，气凝胶绝热毡可作为保温层，替代传统的保温材料，能够有效阻止室内外热量交换，提高建筑的建筑的保温隔热效果，降低建筑整体能耗。在屋面保温方面，气凝胶绝热毡可用于屋面保温层，其超低的导热系数和良好的疏水性能不仅减少屋面热损失，还能有效防止屋面渗漏，延长屋面使用寿命。气凝胶绝热毡同样可作为管道保温材料，其柔软特性和无机防火特性使其能够紧密包裹在管道表面，减少热量的散失，还能有效防止管道在高温或火灾情况下

的损坏。随着建筑节能要求的不断提高和环保意识的增强，气凝胶绝热毡作为一种新型高效保温材料，其市场需求和发展潜力巨大。

2.3 气凝胶玻璃

玻璃在建筑领域扮演着举足轻重的角色，它关系到室内的采光、通风，直接影响建筑的能耗水平。目前气凝胶玻璃主要有三种，整块状气凝胶玻璃、气凝胶涂膜玻璃和颗粒气凝胶填充玻璃。整块状气凝胶玻璃隔热性能优异，但是强度较弱，制造、安装及使用时易发生损坏，不适合大规模使用。气凝胶涂膜玻璃是将气凝胶涂层覆盖在玻璃表面，可以有效降低玻璃的导热系数，但是涂层直接与外部环境接触，容易损坏。颗粒气凝胶填充玻璃则是将气凝胶颗粒填充到玻璃夹层中，其拥有优异的隔热性能的同时还具有良好的物理性能。

SiO₂ 气凝胶玻璃是将气凝胶填充到两片玻璃之间，形成一种“三明治”式的构造，赋予了玻璃全新的性能。首先，大幅降低气凝胶玻璃的导热系数，Reim^[8]在玻璃之间填充气凝胶颗粒，将透光率提升至 88%。这样的透光率与普通玻璃相差不大，满足室内对自然光照的要求。气凝胶玻璃的采光系数大于 20%，远高于《建筑采光设计标准》规定的 5%。不仅如此，气凝胶玻璃的隔音效果和防火性能同样不容小觑。气凝胶玻璃比一般金属和玻璃的隔音效果强 4 倍以上，能够有效阻隔噪音干扰，为室内营造一个宁静的空间。同时，它属于 A 级不燃材料，在高温下不会燃烧，也不会产生有毒烟雾，这一特性对于提高建筑的消防安全性能至关重要。

2.4 气凝胶保温砂浆

随着现代建筑节能要求的不断提高，传统砂浆密度大、保温性能差、能耗高等缺点日益凸显。随着科技的进步和环保意识的增强，气凝胶保温砂浆应运而生，为建筑节能带来了新的解决方案。

李莎^[9]等人使用玻璃微珠作为轻质骨料，以水泥、粉煤灰为胶凝材料，分别添加亲水性和疏水性气凝胶制成气凝胶保温砂浆，并研究气凝胶掺量对保温砂浆各项性能的影响。试验结果表明，保温砂浆的抗压强度随气凝胶掺量的增大呈先增加后降低的趋势，掺量为 4% 时，保温砂浆的抗压强度为最大；对于导热系数，亲水性气凝胶保温砂浆的最佳掺量为 4%，导热系数可达 0.077 W/(m·K)，然而掺入疏水性气凝胶则不利于保温砂浆导

热系数的提升。

封金财等^[10]人通过 SiO₂ 气凝胶与玻化微珠按不同体积比混合形成骨料，加入到水泥、粉煤灰等胶凝材料中形成保温砂浆，以此来研究不同体积比骨料对保温砂浆的性能影响。试验结果表明，当气凝胶占骨料的 35% 时，保温砂浆的导热系数最低仅为 0.136 W/(m·K)；从保温性能方面考虑，当保温骨料掺量为 70% 时效果最好。

气凝胶保温砂浆作为一种新型高效保温材料，凭借其轻质、防火、保温性能好等优点，其市场需求和发展潜力巨大。

3 结论

综上所述，气凝胶材料有着耐高温、密度低、隔音、透光性好等优异特性。气凝胶材料与传统建筑材料结合，形成了一大批性能优异的复合材料，如气凝胶涂料、气凝胶绝热毡、气凝胶玻璃、气凝胶保温砂浆等。复合材料可以有效提高建筑的保温隔热性能，降低建筑整体能耗，增强建筑防火和隔音效果，为实现舒适家居这一目标提供了有力支持。

参考文献

- [1] Kistler S S. Coherent expanded aerogels and jellies [J]. Nature, 1931, 127 (3211) : 741-741.
- [2] 吕亚军, 靳卫准, 吴会军, 等. SiO₂ 气凝胶在建筑中的应用探究 [J]. 工业建筑, 2018, 48(4): 99-105.
- [3] 李宁, 牛瑞文, 何智兵, 等. SiO₂ 纳米管气凝胶的制备工艺及性能 [J]. 硅酸盐学报, 2024, 52 (12) : 3

695-3702.

- [4] 刘超, 张颖, 朱照琪, 等. 气凝胶的绝热特性及应用进展 [J]. 化工新型材料, 2019, 047 (011) : 241-244.
- [5] Dorcheh A S, Abbasi M H. Silica aerogel; synthesis, properties and characterization [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 199 (1-3) ; 10-26.
- [6] 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, 22.
- [7] 韩晓飞, 冯佳勇, 张志航, 等. 透明隔热 SiO₂ 气凝胶/水性聚氨酯复合涂料的制备及性能研究 [J]. 化工新型材料, 2023, 51 (09) : 293-297.
- [8] Reim M., Korner W., Manara J., et al. Silica aerogel granulate material for thermal insulation and daylighting [J]. Solar Energy, 2005, 79 (2) : 131-139.
- [9] 李莎, 房猛, 王丹, 等. 掺亲、疏水气凝胶玻化微珠保温砂浆的制备与表征 [J]. 混凝土界, 2021 (06) : 58-60.
- [10] 封金财, 王怡人, 耿犟, 等. 骨料级配及掺量对硅气凝胶-玻化微珠复合保温砂浆性能影响的试验研究 [J]. 混凝土, 2018 (4) : 110-114.

作者：葛辉 (1998.06-)，男，汉族，河南商丘市人，硕士，助理工程师，主要从事研究建筑材料及应用。