

SiO₂ 气凝胶保温隔热材料在建筑节能技术中的应用

王飞, 刘朝辉, 叶圣天, 贾艺凡, 丁逸栋, 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: SiO₂ 气凝胶是一种三维空间网络结构固体材料, 具有低密度、低热导率、高光透过率、高孔隙率以及高比表面积等特性, 同时还兼有防火、防水等优良性能, 是一种不可多得的轻质、环保、多功能材料, 在建筑保温隔热领域有着广阔的应用前景。以建筑节能为目标, 简要叙述了对 SiO₂ 气凝胶的研究, 从制备原材料种类的多样化, 以及原材料和干燥成本降低等方面论述了其大规模生产应用的可能性, 重点阐述了 SiO₂ 气凝胶玻璃、SiO₂ 气凝胶隔热涂料、SiO₂ 气凝胶纤维复合材料以及 SiO₂ 气凝胶混凝土和砂浆等在建筑保温隔热方面的应用研究进展; 然后, 从其所具备的优良特性出发, 提出了一种由 SiO₂ 气凝胶材料在建筑节能技术中的应用设想, 主要从 SiO₂ 气凝胶材料在保温隔热、防水、防火以及简化施工工艺等方面的优势, 构建了全部由 SiO₂ 气凝胶材料替代当前保温隔热材料在建筑节能中的应用体系, 最后对 SiO₂ 气凝胶材料在建筑保温隔热中的应用前景做了展望。

关键词: SiO₂ 气凝胶; 建筑节能; 保温隔热; 节能体系; SiO₂ 气凝胶玻璃; SiO₂ 气凝胶隔热涂料

中图分类号: TQ630.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2016)02-0144-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.02.023

Application of Building Energy-saving Technology Based on SiO₂ Aerogel Thermal Insulation Materials

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

(Department of Chemistry and Material Engineering, Logistic Engineering University, Chongqing 401311, China)

ABSTRACT: SiO₂ aerogel is a kind of solid material with three-dimensional network structure, which has low density, low thermal conductivity, high transmittance, high porosity and high specific surface area as well as the character of fire prevention and waterproof, etc. Therefore, it is a rare lightweight, multifunctional and environmental protection material, which especially has a broad application prospect in the field of building thermal insulation. In this paper, the building energy efficiency was the target. The researches of SiO₂ aerogel were briefly reviewed. The possibility of its mass production application was discussed from the aspects of variation of preparation of raw materials species and the cost reduction of raw materials and drying. And the paper mainly focused

收稿日期: 2015-11-03; 修订日期: 2015-11-28

Received: 2015-11-03; Revised: 2015-11-28

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)

Fund: Supported by the Logistical Scientific Research Projects of Army (BY115C007) and the National Natural Science Foundation of Chongqing (cstc2014jcyjA50026)

作者简介: 王飞(1988—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为保温隔热材料。

Biography: WANG Fei(1988—), Male, Master graduate student, Research focus: thermal insulation material.

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

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

on the application research progress of heat preservation and heat insulation in construction using SiO₂ aerogel glass, SiO₂ aerogel insulation coatings, SiO₂ aerogel fiber composites and SiO₂ aerogel materials such as concrete and mortar. Then in view of its excellent properties, the idea of application of SiO₂ aerogel material in building energy efficiency technology was put forward. The advantages of SiO₂ aerogel materials in thermal insulation, waterproof, fire prevention performance and simplify the construction technology and so on were discussed. The building energy conservation system was built by using SiO₂ aerogel material to replace the current building thermal insulation materials. Finally, the application prospect of SiO₂ aerogel materials in the building heat preservation and heat insulation was proposed.

KEY WORDS: SiO₂ aerogel; building energy efficiency; heat preservation and insulation; energy saving system; SiO₂ aerogel glass; SiO₂ aerogel insulation coating

随着经济和社会的发展,能源问题越来越成为制约我国经济和社会发展的一大考验,作为能耗的重要组成部分——建筑能耗,其所占比重约为社会总能耗的30%,成为节能减排中的一个重要组成部分。在建筑能耗中,建筑围护结构占绝大部分的比重(约70%~80%),因此提高建筑围护结构的保温隔热性能极为关键。建筑保温隔热材料一方面可减少室内热量向室外扩散,起到保温的作用;另一方面,也可阻止室外的高温向室内热传导,起到隔热作用,从而有效降低空调负荷和空调能耗,成为建筑节能的关键环节。但目前的建筑保温隔热材料存在不同程度的质量、防火和防水等缺陷,导致保温隔热性能降低,无法满足节能需求。

随着建筑节能要求的提高和节能技术的发展,建筑保温隔热材料也向轻质、多功能和节能环保方向发展。近年来, SiO₂ 气凝胶材料作为一种新型纳米轻质、多功能、环保材料,以其独特的性质(低密度、高比表面积、低热导率以及高光透过性等^[1-4])越来越受到人们的广泛关注,尤其是被作为一种高效保温隔热材料已经成为研究的热点;它质轻、耐火、透明、绝热而且环保,与传统的保温隔热材料相比,它有着无与伦比的优势^[5-13]。因此,开展 SiO₂ 气凝胶材料在建筑节能中的应用具有重大的现实意义。本文主要根据 SiO₂ 气凝胶的独特性质,综合国内外 SiO₂ 气凝胶材料在建筑保温隔热中的研究情况,进而提出一种 SiO₂ 气凝胶材料在建筑节能技术应用中的设想。

1 SiO₂ 气凝胶概况

SiO₂ 气凝胶被称为“蓝烟”,其组成中96%以上是气体,是目前世界上最轻的固体,密度最低达0.003 g/cm³、常温下导热系数最低为0.013 W/(m·K)^[14]、光透过率最高可达99%,它最初是由美国太平洋大学的 Kistler^[15] 以水玻璃为原料采用超临界干燥法制

备出来的。随着研究的深入,制备 SiO₂ 气凝胶的原材料种类越来越多,干燥方法也在不断改进和完善,成本也有很大程度降低,发展较为迅速,已经由航空航天等高端领域转向民用领域,应用范围不断扩大,尤其是在建筑保温隔热领域研究应用越来越多。

目前制备 SiO₂ 气凝胶主要有水玻璃、正硅酸乙酯、多聚硅氧烷等,尽管水玻璃价格最低,但成本依然很高。近年来,研究者们也在不断寻找廉价的硅源^[16]用来制备 SiO₂ 气凝胶。Tang 等^[17]以稻壳灰为原材料,通过 CO₂ 超临界干燥法制备出密度 38 kg/m³、比表面积 597.7 m²/g、孔径 10~60 nm 的 SiO₂ 气凝胶,该项研究从原材料上降低了 SiO₂ 气凝胶的制备成本。Li 等^[18]通过改进技术,以常压干燥的方法制备出密度 0.33 g/cm³、比表面积 500 m²/g、孔径 5~60 nm 的 SiO₂ 气凝胶,该方法不仅降低了原材料的成本,也降低了干燥成本。通过这些研究, SiO₂ 气凝胶的原材料成本可通过选择自然界中已存在的廉价的材料来代替,为 SiO₂ 气凝胶的推广应用提供了便利。

SiO₂ 气凝胶的制备目前有超临界干燥法^[19-23]、冷冻干燥法^[24]、亚临界干燥法和常压干燥法^[25-27],最常用的主要是超临界干燥法和常压干燥法,但这两种方法各有利弊。超临界干燥法可以制备出超低密度的 SiO₂ 气凝胶,但其制备过程复杂、干燥设备成本高;常压干燥法虽不需要价格昂贵的干燥设备,制备过程也相对简单,但其干燥体积收缩大、易开裂。就技术发展的成熟程度来看,超临界干燥法现在基本已经成熟^[28],相比以甲醇和乙醇为干燥介质的超临界干燥技术需要高温和高压,以液态 CO₂ 为干燥介质则不需要,因而,设备成本得到一定程度的降低,同时采用此方法减少了表面修饰的过程,降低了试剂成本。此方法仍是制备超低密度 SiO₂ 气凝胶的最佳选择,其干燥方法仍然具有一定的发展潜力。常压干燥制备过程简单、干燥成本低,而其易开裂和体积收缩大则可通过网络增强、溶剂置换以及表面改性等方法得

到改善^[29]。所以,常压干燥法是实现工业化生产,大规模推广应用的最好选择,具有广阔的发展前景。

2 在建筑保温隔热中的应用

SiO₂ 气凝胶材料在建筑保温隔热中的应用^[30-31]主要依据其低密度、绝热、阻燃以及高光透过性等性质。目前,应用形式有 SiO₂ 气凝胶玻璃、SiO₂ 气凝胶隔热涂料、SiO₂ 气凝胶纤维复合材料以及 SiO₂ 气凝胶混凝土和砂浆。

2.1 SiO₂ 气凝胶玻璃

SiO₂ 气凝胶是一种同时具备两种特性(低导热系数和高光透过性)的材料,尤其是具备高光透过率,因而它可以被用到建筑玻璃上^[32-34],既可以减少室外的热量向室内扩散,也可以阻止室内的热量向室外传递,起到保温隔热的作用,同时还太不影响室内采光。目前的研究表明, SiO₂ 气凝胶应用到玻璃中主要有两种方式:一是做到两层玻璃的夹层中,二是在普通玻璃外面镀膜。这种玻璃目前国外研究者研究较多,而国内则鲜有报道。

起初, Jensen K I 等^[35]将密度 150 kg/m³、厚度 18 mm 的单片硅气凝胶夹在两块 4 mm 后的玻璃中间,制成 1 m×1 m 的窗户,最终测得制成的玻璃中间和整体传热系数分别为 0.52、0.57 W/(m²·K)。Schultz J M 等^[36]在其基础上改进,采用真空夹板的形式,将气凝胶先制成平板,再夹到两块玻璃中间,制成厚度 15 mm、面积 55 cm×55 cm 的玻璃,并将中间抽真空;同时也对密封圈做了改进,此方法制得气凝胶玻璃的太阳光透过率为 76%,玻璃的中心热损失系数为 0.66 W/(m²·K)。后来, Reim 等^[37]将 SiO₂ 气凝胶颗粒填充到玻璃中得到气凝胶玻璃的透光率为 88%,传热系数为 0.4 W/(m²·K),极大提高了其性能。此方法的优势在于气凝胶夹在两块玻璃中间可避免与空气中的水分接触,导致导热率升高,但实际应用时气凝胶的使用量较大,成本较高。

Kim 等^[38]通过常压干燥法在玻璃表面增加一层 SiO₂ 气凝胶薄膜,在涂膜厚度为 100 μm 时,玻璃的透光率超过 90%,导热系数为 0.016 W/(m²·K)。镀膜玻璃能够较大程度地降低玻璃的导热系数,但其与空气直接接触,长时间暴露在太阳光下,有可能会造成涂膜损坏,保温隔热能力降低,但镀膜玻璃相对夹层玻璃成本较低。

2.2 SiO₂ 气凝胶隔热涂料

SiO₂ 气凝胶粉体还可作为填料加入到涂料中,制成 SiO₂ 气凝胶隔热涂料^[39-41],在建筑中起到保温隔热的作用。王德民^[42]以 SiO₂ 气凝胶为功能填料制备隔热涂料,当 SiO₂ 气凝胶占涂料总质量的 1% 时,测得玻璃板上下温差约 9℃,此时隔热效果最好。在此基础上,卢斌等^[43]以丙烯酸树脂为成膜物,先对 SiO₂ 气凝胶进行改性并制备浆料,再配以助剂制成透明隔热涂料涂装在玻璃上,结果表明:在涂膜厚度为 20 μm 时,涂膜上下温差最大可达 14℃,使其隔热效果得到进一步提升。而 Ibrahim M 等^[44]将 SiO₂ 气凝胶隔热涂料应用到墙体上,从热量衰减系数、能耗指标、热舒适度方面,以模型仿真和实际测量结果为依据,最终得出:在持续加热情况下,将涂料涂装在中间墙和外墙时能耗最低;在间歇加热和没有暖气的情况下,将涂料涂装在内墙上舒适度最佳; SiO₂ 气凝胶隔热涂料的保温隔热性能要比其他的材料效果好。

2.3 SiO₂ 气凝胶纤维复合材料

SiO₂ 气凝胶虽然具有超高的绝热性能,但它自身也存在强度低、易碎的缺点,导致使用范围受限。所以, SiO₂ 气凝胶在研究和应用中一般采用纤维作为增强材料与其复合制成纤维复合材料^[45-47],进一步提高其机械强度和使用性能,目前来说主要采用以下两种方式:一是在溶胶-凝胶制备 SiO₂ 气凝胶的过程中将纤维直接添加制成纤维复合材料;二是将制备好的 SiO₂ 气凝胶与纤维物理混合制成复合材料。前一种方法由于能够较为均匀地使得 SiO₂ 气凝胶与纤维混合,所以使用较多。

冯坚等^[48]采用上述第一种方式将无机陶瓷纤维与 SiO₂ 溶胶混合,采用超临界干燥法制备纤维复合材料,结果表明:纤维与 SiO₂ 气凝胶结合较为紧密,同时纤维的加入为 SiO₂ 气凝胶提供了力学支撑,极大地提高了其力学性能,且复合材料的隔热性能也没有受到太大影响,其热导率在 200℃ 和 800℃ 分别为 0.017 W/(m²·K) 和 0.042 W/(m²·K),此方法不仅提高了 SiO₂ 气凝胶的使用性能,还在一定程度上降低了 SiO₂ 气凝胶的使用成本,为 SiO₂ 气凝胶的应用奠定了基础。

Yuan 等^[49]采用上述第二种方式,对 SiO₂ 气凝胶和玻璃纤维采取冲压成型制成复合材料,结果表明:当玻璃纤维的质量分数为 20% 时,复合材料的热导

率在 300 ℃ 和 600 ℃ 分别为 0.025 W/(m² · K) 和 0.030 W/(m² · K)。此方法工艺上稍加繁琐,最后制成的复合材料的热导率也相对较高。

SiO₂ 气凝胶纤维复合材料自 Aspen 公司研制成功开始,国外一直进行技术垄断,且该材料的应用仅限于航空航天等高端领域。但就目前的情况来说,国内很多企业也慢慢掌握了其关键技术,其应用领域也已经逐渐拓展,民用领域也慢慢使用其该材料。国内较为领先的企业主要有浙江纳诺科技有限公司生产的 FM 系列 SiO₂ 气凝胶绝热毡和绝热板,以及广东埃力生高新科技有限公司生产的 GY 系列、DRT 系列绝热毡和绝热板,其产品常温下的导热系数基本保持在 0.020 W/(m² · K) 左右,具有良好的保温隔热性能,因而,在建筑以及其他领域都有着广泛应用,而且其价格是 SiO₂ 气凝胶价格的十分之一左右。这两种材料可替代目前市场上防火性能较差的产品(如挤塑板、EPS 板等)。

2.4 SiO₂ 气凝胶混凝土和砂浆

目前,将 SiO₂ 气凝胶应用到混凝土和砂浆中还处在研究阶段,可能是源于 SiO₂ 气凝胶价格高的原因,该方面的研究报道也比较少。Kim^[50] 曾将 SiO₂ 气凝胶粉末加入到水泥浆中发现,当 SiO₂ 气凝胶粉末的质量占总质量的 2.0% 时,其导热系数下降 75%。Gao^[51] 将 SiO₂ 气凝胶颗粒添加到混凝土中,主要研究了掺杂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,这些研究都为从事此方面研究提供了参考。郭金涛^[52] 以气凝胶和玻化微珠两种材料为保温骨料,将此二者混合制备出新型保温砂浆。这些研究都为 SiO₂ 气凝胶在此方面的应用提供很好的借鉴,为下一步应用的奠定基础。

3 在建筑保温体系中的应用设想

综上所述,总结近年来 SiO₂ 气凝胶材料的应用研究进展,不难发现其在建筑领域的应用有着不可替代的优势,质轻,可有效减轻自重对建筑本身的负担;高效绝热和耐火,可在具备优异的保温隔热性能前提下;兼具耐火性能,可替代目前建筑中使用的挤塑聚苯板、岩棉等易燃材料;环保,可最大程度地减少产生的各种污染,降低对自然环境的污染和人体的损害。为此,从 SiO₂ 气凝胶材料的这些优点出发,设想出一

种基于 SiO₂ 气凝胶材料的建筑围护结构保温体系,具体的设想如图 1 所示。

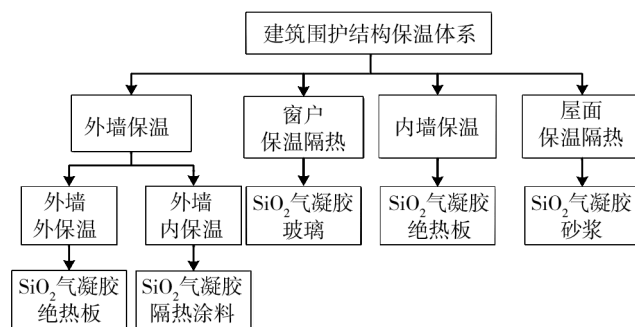


图1 基于 SiO₂ 气凝胶材料的建筑围护结构保温体系

Fig.1 Insulation system of building envelope based on SiO₂ aerogel materials

3.1 外墙保温

建筑围护结构中,墙体所占面积最大,在建筑能耗中约占 30% 左右,因而做好外墙的保温隔热是建筑节能中的重点。外墙的保温隔热可分为:外墙外保温和外墙内保温。目前在建筑外墙的保温中基本上只做外保温,而很少做内保温,外保温材料主要采用挤塑聚苯板和 EPS 保温板等,这些材料作为外墙保温材料,施工上也较繁琐,从结构层→粘接层→找平层→抹灰层→保温层→保护层,施工工序较多,虽然保温性能较好但易燃,一旦出现火灾,燃烧还会产生有毒的烟雾,对建筑物和人体都会造成较大的影响。所以,从节能和环保的角度出发,在建筑外墙外保温上拟采用 SiO₂ 气凝胶隔热涂料,不仅具有优良的保温隔热性能,且耐高温,能够有效削弱太阳辐射对建筑物内部温度的影响;而且施工方便,直接涂刷在墙体上,减少很多的施工工序。Ibrahim M 曾将其应用到墙体上,并与其他材料作对比,为 SiO₂ 气凝胶隔热涂料的应用提供参考。在外墙内保温上,采用现在市场上已经规模化生产的 SiO₂ 气凝胶绝热板,浙江纳诺以及广东埃力生等公司都有市售,其导热系数基本在 0.020 W/(m² · K),具有良好的保温隔热性能,且能耐 400 ℃ 以上高温,不仅可以有效阻止室内热量向室外扩散,起到保温的作用,而且还具有阻燃的效果。

3.2 窗户保温隔热

建筑窗户虽然占围护结构的面积小,但其能耗却占总能耗的 25% 左右,目前居民建筑窗户基本起不到保温隔热的作用,且室内的热量经常从窗户向外扩散,室外的太阳光往往通过窗户直接照射到室内,造

成室内温度上升。在本设想中,拟采用 SiO_2 气凝胶玻璃,该玻璃不仅具有良好的保温效果,还可以有效削弱太阳辐射对室内温度造成的影响,起到隔热的作用;同时该玻璃还具有高光透过性,与普通玻璃相比,对室内采光也不会造成较大的影响。目前的 SiO_2 气凝胶玻璃主要有夹层玻璃和镀膜玻璃两种,夹层玻璃需要的气凝胶量较大,因而成本相对较高。所以,从成本的角度出发,在本节能体系中采用 SiO_2 气凝胶镀膜玻璃,其价格较 SiO_2 气凝胶夹层玻璃价格低很多,而且光透过率可达 88%,不影响室内采光,还具有良好的保温隔热性能。

3.3 内墙保温

内墙保温往往是建筑保温中忽略的一个重要方面,室内的热量可通过内墙从一个房间扩散到另一个房间,并通过其他的方式传到室外,所以,本设想中将内墙保温也纳入进来。对内墙的保温,既要有良好的保温效果,而且这种材料污染要小,不会对人体造成伤害,还要具有防火的作用。因此,采用 SiO_2 气凝胶绝热板,不仅具有节能环保的效果,而且可耐 400 °C 以上高温,起到防火的目的还兼有隔音的效果。

3.4 屋面保温隔热

屋面作为建筑物围护结构之一,因室内外温差而传热消耗热量,在建筑物的总能耗中占 8% 左右。因此,屋面所能发挥的保温、隔热作用也较大,是建筑节能的主要部位。目前,一般建筑屋面的保温体系从下而上依次为结构层→找坡层→找平层→保温层→防水层→保护层,施工工序之多且耗时费力,而采用 SiO_2 气凝胶砂浆作为保温层,在本节能体系中可直接于结构层上施工,省去了保温层前的两道施工工序。Gao^[6] 等人在前期研究中使用 SiO_2 气凝胶颗粒等体积替换其中的沙,当替换比例达到 60% 时,其导热系数为 $1.86 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,抗压强度可达到 8.3 MPa,为后续研究提供很好的参考。本人在其基础上通过等体积替换法使用 SiO_2 气凝胶颗粒等体积替换其中的沙,当替换比例达到 60% 时,其导热系数达到 $0.086 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,抗压强度可达到 2.45 MPa,同时该砂浆还兼有一定的防水性能。所以,采用 SiO_2 气凝胶砂浆作为保温层,可在一定程度上减少施工工序,省时省力。

3.5 其他围护结构保温隔热

其他围护结构在建筑能耗中也占有很重要的地

位,如楼地面、各种管道等,在本节能体系的设想中,对于楼地面和各种管道的保温采用柔性和保温性能较好的 SiO_2 气凝胶绝热毡,该材料目前市场上也较多,其导热系数一般在 $0.020 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 左右,具有很好的隔热效果且兼有防水、防火的效果。

4 展望

随着研究地深入, SiO_2 气凝胶材料必将取代目前建筑中的保温隔热材料,迎来其广阔的应用前景,但仍需从以下几方面做出努力。

1) 稻壳灰等廉价硅源的出现,促使制备 SiO_2 气凝胶原材料成本的降低,为推广应用奠定基础,但是其提纯问题还有待解决,大规模的工业化生产还有待提高。

2) 常压干燥方法的应用为制备 SiO_2 气凝胶降低了干燥设备成本,但要想获得超低密度、高性能的 SiO_2 气凝胶,其干燥工艺还有待优化。

3) 在 SiO_2 气凝胶成本降低的基础上,还需降低 SiO_2 气凝胶材料的成本,其施工工艺也有待进一步完善。

参考文献

- [1] HRUBESH L W. The World's Lightest Solids[J]. Chemistry and Industry, 1990(24): 824—827.
- [2] BOND G C, FLAMERZ S. Structure and Reactivity of Titania-supported Oxides: Reaction of Isopropanol over Vanadia-titania Catalysts[J]. Applied Catalysis, 1987, 33(1): 219—230.
- [3] FRICKE J, EMMERLING A. Aerogels-preparation, Properties, Applications[M]. Berlin: Springer-heidelberg, 1992.
- [4] MULDER C A M, VAN LIEROP J G. Preparation, Densification and Characterization of Autoclave Dried SiO_2 Gels[M]. Berlin: Springer-heidelberg, 1986.
- [5] 沈军. 有机气凝胶和碳气凝胶的研究与应用[J]. 材料导报, 1994(4): 54—57.
SHEN Jun. Investigation and Application of Organic Aerogels and Carbon Aerogels[J]. Mater Rev, 1994(4): 54—57.
- [6] 沈军, 王钰, 吴翔, 等. 硅气凝胶的结构控制研究[J]. 材料科学与工艺, 1994, 2(4): 87—93.
SHEN Jun, WANG Yu, WU Xiang, et al. Study on Structure Controlling of Silica Aerogels[J]. Material Science and Technology, 1994, 2(4): 87—93.

- [7] CARLSON G, LEWIS D, MCKINLEY K, et al. Aerogel Commercialization: Technology, Markets and Costs[J]. *Journal of Non-crystalline Solids*, 1995, 186: 372—379.
- [8] HERRMANN G, IDEN R, MIELKE M, et al. On the Way to Commercial Production of Silica Aerogel [J]. *Journal of Non-crystalline Solids*, 1995, 186: 380—387.
- [9] SHEN J. The Structure Investigation of Silica Aerogels via Small Angle X-ray Scattering[J]. *Journal of Inorganic Materials*, 1996, 11: 753—756.
- [10] SMITH D M, MASKARA A, BOES U. Aerogel-based Thermal Insulation[J]. *Journal of Non-crystalline Solids*, 1998, 225: 254—259.
- [11] FRICKE J, EMMERLING A. Aerogels-recent Progress in Production Techniques and Novel Applications[J]. *Journal of Sol-gel Science and Technology*, 1998, 13(1/3): 299—303.
- [12] SCHMIDT M, SCHWERTFEGER F. Applications for Silica Aerogel Products [J]. *Journal of Non-crystalline Solids*, 1998, 225: 364—368.
- [13] REIM M, REICHENAUER G, KÖRNER W, et al. Silica-aerogel Granulate-structural, Optical and Thermal Properties [J]. *Journal of Non-crystalline Solids*, 2004, 350: 358—363.
- [14] GESSER H D, GOSWAMI P C. Aerogels and Related Porous Materials[J]. *Chemical Reviews*, 1989, 89(4): 765—788.
- [15] KISTLER S S. Coherent Expanded Aerogels and Jellies[J]. *Nature*, 1931, 127: 741.
- [16] NAZRIATI N, SETYAWAN H, AFFANDI S, et al. Using Bagasse Ash as a Silica Source when Preparing Silica Aerogels Via Ambient Pressure Drying[J]. *Journal of Non-crystalline Solids*, 2014, 400: 6—11.
- [17] TANG Q, WANG T. Preparation of Silica Aerogel from Rice Hull Ash by Supercritical Carbon Dioxide Drying[J]. *The Journal of Supercritical Fluids*, 2005, 35(1): 91—94.
- [18] LI T, WANG T. Preparation of Silica Aerogel from Rice Hull Ash By Drying at Atmospheric Pressure [J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2008, 112(2): 398—401.
- [19] ROIG A, MATA I, MOLINS E, et al. Silica Aerogels by Supercritical Extraction[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 1998, 18(9): 1141—1143.
- [20] TEICHNER S J, NICOLAON G A, VICARINI M A, et al. Inorganic Oxide Aerogels[J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 1976, 5(3): 245—273.
- [21] KOCON L, DESPETIS F, PHALIPPOU J. Ultralow Density Silica Aerogels by Alcohol Supercritical Drying[J]. *Journal of Non-crystalline Solids*, 1998, 225: 96—100.
- [22] BŁASZCZYŃSKI T, ŚLOSARCZYK A, MORAWSKI M. Synthesis of Silica Aerogel by Supercritical Drying Method [J]. *Procedia Engineering*, 2013, 57: 200—206.
- [23] ESTELLA J, ECHEVERRIA J C, LAGUNA M, et al. Effect of Supercritical Drying Conditions in Ethanol on the Structural and Textural Properties of Silica Aerogels[J]. *Journal of Porous Materials*, 2008, 15(6): 705—713.
- [24] PAJONK G M, REPELLIN-LACROIX M, ABOUARNADA-SSE S, et al. From Sol-gel to Aerogels and Cryogels [J]. *Journal of Non-crystalline Solids*, 1990, 121(1): 66—67.
- [25] LAND V D, HARRIS T M, TEETERS D C. Processing of Low-density Silica Gel by Critical Point Drying or Ambient Pressure Drying [J]. *Journal of Non-crystalline Solids*, 2001, 283(1): 11—17.
- [26] 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.
- WU Guo-you, CHENG Xuan, YU Yu-xi, et al. Preparation of Silica Aerogels Via Ambient Pressure Drying[J]. *Progress of Chemistry*, 2010, 22(10): 1892—1900.
- [27] XU M Y, TAN D J, WANG Y, et al. Current Research and Development of Silica Aerogel Drying Method [J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 919: 2048—2051.
- [28] 沈军, 连娅, 祖国庆, 等. 气凝胶低成本制备及其在建筑保温领域中的应用[J]. *功能材料*, 2015, 46(7): 7001—7007.
- SHEN Jun, LIAN Ya, ZU Guo-qing, et al. Aerogel Low-cost Preparation and Its Application in the Field of Building Insulation[J]. *Journal of Functional Materials*, 2015, 46(7): 7001—7007.
- [29] MALEKI H, DURÃES L, PORTUGAL A. An Overview on Silica Aerogels Synthesis and Different Mechanical Reinforcing Strategies[J]. *Journal of Non-crystalline Solids*, 2014, 385: 55—74.
- [30] 路国忠, 何光明, 郭建平. SiO₂ 气凝胶性能研究及其在建筑保温中的应用[J]. *墙材革新与建筑节能*, 2013(2): 41.
- LU Guo-zhong, HE Guang-ming, GUO Jian-ping. Performance Research of SiO₂ Aerogel and Its Application in Building Insulation[J]. *Journal of Wall Materials Innovation and Building Energy Conservation*, 2013(2): 41.
- [31] BAETENS R, JELLE B P, GUSTAVSEN A. Aerogel Insulation for Building Applications: a State-of-the-art review[J]. *Energy and Buildings*, 2011, 43(4): 761—769.
- [32] 王欢, 吴会军, 丁云飞. 气凝胶透光隔热材料在建筑节能玻璃中的研究及应用进展[J]. *建筑节能*, 2010(4): 35—37.
- WANG Huan, WU Hui-jun, DING Yun-fei. Advance in the Study and Application of Aerogels as Translucent Insulation Materials in Building Energy-saving Glass[J]. *Building Energy Efficiency*, 2010(4): 35—37.

- [33] 吴春山. 多功能的气凝胶玻璃[J]. 中国建材, 1998(4): 40—40.
- WU Chun-shan. Multi-function Aerogel Glass [J]. China Building Materials, 1998(4): 40—40.
- [34] 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.
- GE Jing-jing, XU Bi, CAI Zai-sheng. Superhydrophobic Modification and Characterization of Glass Based on SiO_2 Aerogels[J]. Surface Technology, 2013, 42(2): 101—103.
- [35] JENSEN K I. Passive Solar Component Based on Evacuated Monolithic Silica Aerogel[J]. Journal of Non-crystalline solids, 1992, 145: 237—239.
- [36] SCHULTZ J M, JENSEN K I, KRISTIANSEN F H. Super Insulating Aerogel Glazing[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2005, 89(2): 275—285.
- [37] REIM M, KÖRNER W, MANARA J, et al. Silica Aerogel Granulate Material for Thermal Insulation and Daylighting [J]. Solar Energy, 2005, 79(2): 131—139.
- [38] 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.
- [39] 姚梦佳, 李春福, 何俊波. 隔热保温涂料的研究发展及应用[J]. 表面技术, 2015, 44(7): 61—67.
- YAO Meng-jia, LI Chun-fu, HE Jun-bo. Research Development and Application of Heat Insulation Coating[J]. Surface Technology, 2015, 44(7): 61—67.
- [40] 刘红霞, 陈松, 贾铭琳, 等. 疏水 SiO_2 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): 64—67.
- LIU Hong-xia, CHEN Song, JIA Ming-lin, et al. Preparation of Hydrophobic SiO_2 Aerogel under Ambient Pressure and Its Application in Heat-insulating Architectural Coatings [J]. Paint & Coatings Industry, 2011, 41(8): 64—67.
- [41] 贺香梅, 徐壁, 蔡再生. SiO_2 气凝胶隔热涂层织物的制备及性能研究[J]. 表面技术, 2014, 43(3): 95—100.
- HE Xiang-mei, XU Bi, CAI Zai-sheng. Preparation of Silica Aerogel Coated Fabric and Studies of Its Performance[J]. Surface Technology, 2014, 43(3): 95—100.
- [42] 王德民. 高红外反射率隔热涂料的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2008.
- WANG De-min. Study on the Thermal Insulation Coatings of High Reflectivity in Infrared Range [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2008.
- [43] 卢斌, 郭迪, 卢峰. SiO_2 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 SiO_2 Aerogel Transparent Heat-insulation Coatings[J]. Paint & Coatings Industry, 2012, 42(6): 15—18.
- [44] 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.
- [45] ZHANG Zhi-hua, NI Xing-yuan. Preparation and Characterization of Hydrophobic Silica Aerogels Doped with Fibers [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2008, 37: 16—19.
- [46] 杨海龙, 倪文, 梁涛, 等. 硅酸铝纤维增强纳米孔绝热材料的制备与表征[J]. 材料工程, 2007, 7: 63—66.
- YANG Hai-long, NI Wen, LIANG Tao, et al. Preparation and Characterization of Nanoporous Super Insulation Materials Reinforced with Aluminum Silicate Fiber [J]. Journal of Materials Engineering, 2007, 7: 63—66.
- [47] 徐广平, 何江荣, 宋一华. Al_2O_3 纤维增强 SiO_2 气凝胶复合材料的制备及其隔热机理[J]. 材料导报, 2013(2): 112—115.
- XU Guang-ping, HE Jiang-rong, SONG Yi-hua. Preparation and Mechanism of Thermal Insulation of Silica Aerogels Composites Reinforced by Al_2O_3 Fiber[J]. Mater Rev, 2013(2): 112—115.
- [48] 冯坚, 高庆福, 冯军宗, 等. 纤维增强 SiO_2 气凝胶隔热复合材料的制备及其性能[J]. 国防科技大学学报, 2010, 32(1): 40—44.
- FENG Jian, GAO Qing-fu, FENG Jun-zong, et al. Preparation and Properties of Fiber Reinforced SiO_2 Aerogel Insulation Composites[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2010, 32(1): 40—44.
- [49] YUAN B, DING S, WANG D, et al. Heat Insulation Properties of silica Aerogel/Glass Fiber Composites Fabricated by Press Forming[J]. Materials Letters, 2012, 75: 204—206.
- [50] KIM S, SEO J, CHA J, et al. Chemical Retreating for Gely-typed Aerogel and Insulation Performance of Cement Containing Aerogel [J]. Construction and Building Materials, 2013, 40: 501—505.
- [51] GAO T, JELLE B P, GUSTAVSEN A, et al. Aerogel-incorporated Concrete: an Experimental Study[J]. Construction and Building Materials, 2014, 52: 130—136.
- [52] 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.
- GUO Jin-tao. Study on Silica Aerogels/Glazed Hollow Beads Composite Thermal-insulating Mortar [D]. Xi'an: Changan University, 2011.