

# 纳米孔超级绝热材料研究现状及进展

封金鹏<sup>1,2</sup> 冯霞<sup>1</sup> 黄强<sup>1</sup>

(1 广西大学资源与冶金学院, 南宁 530004)

(2 广西大学化学与化工学院, 南宁 530004)

**文 摘** 纳米孔超级绝热材料是一种新型高效隔热材料, 具有轻质、耐高温、孔隙率高、导热率低等优点, 目前已成为保温隔热材料领域研究的热点, 其中最具有代表性的是气凝胶隔热材料和纳米粉末基复合隔热材料。本文对这两种隔热材料的研究现状进行了综述, 并对纳米孔超级绝热材料发展前景进行了展望。

**关键词** 纳米孔超级绝热材料, 气凝胶隔热材料, 纳米粉末基复合隔热材料, 发展前景

中图分类号: TB3

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2014.01.003

## Research Status and Development of Nanoporous Super Thermal Insulation Material

FENG Jinpeng<sup>1,2</sup> FENG Xia<sup>1</sup> HUANG Qiang<sup>1</sup>

(1 College of Resource and Metallurgy, Guangxi University, Nanning 530004)

(2 College of Chemistry and Chemical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004)

**Abstract** Nanoporous super thermal insulation material is a new type thermal insulation material with light weight, high temperature resistance, high porosity and low thermal conductivity. Based on these advantages, it has become a research hotspot in the field. The most representative nanoporous super thermal insulation materials are aerogel thermal insulation material and nanopowder based thermal insulating composites. In this paper the research status of nanoporous thermal insulation material is summarized and the development prospect is shown.

**Key words** Nanoporous super thermal insulation material, Aerogel thermal insulation material, Nanopowder based thermal insulating composites, Development prospect

### 0 引言

超级绝热材料概念是 20 世纪 90 年代提出的, 主要有真空绝热材料和纳米孔超级绝热材料两种, 目前研究比较广泛的是纳米孔超级绝热材料。纳米孔超级绝热材料是指热导率低于“无对流空气”热导率的绝热材料<sup>[1]</sup>(图 1), 该材料气孔尺寸小于空气分子平均自由程( $\leq 70$  nm), 具有轻质、耐高温、孔隙率高、导热率低等优点<sup>[2]</sup>, 是一种理想的保温隔热材料。广泛应用于航空航天、国防、化工、冶金、电力、交通等领域<sup>[3]</sup>。气凝胶隔热材料和纳米粉末基复合隔热材料是目前研究最多的纳米孔超级绝热材料。本文主要介绍这两种材料的研究进展。

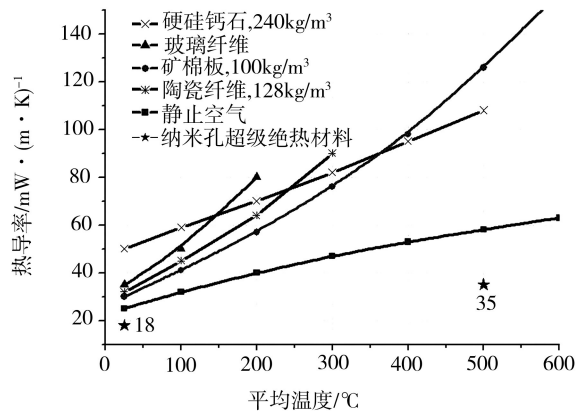


图 1 不同隔热材料热导率对比

Fig. 1 Comparison of thermal conductivity of different insulation materials

收稿日期: 2013-11-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 51264002)和广西重点实验室基金项目(2012K12)资助

作者简介: 封金鹏, 1979 年出生, 博士, 副教授, 主要从事纳米孔超级绝热材料研究。E-mail: goldminer@sina.com

# 1 气凝胶隔热材料

气凝胶是一种分散介质为气体的凝胶材料,因其半透明的色彩和超轻质量,也被称为“固态烟”,具有低折射率、低弹性模量、低热导率和优良的吸附性能,是一种性能优良的纳米孔超级绝热材料。一般采用溶胶—凝胶法制备而成,该方法包含两个步骤:水解缩合和超临界干燥(乙醇或二氧化碳)<sup>[4-5]</sup>。由于超临界干燥工艺需要的实验周期相对较长、产量较低、成本较高、存在安全隐患。因此,简单易行、经济实用、安全可靠的干燥技术成了研究者的关注热点。随着研究的深入,近几年各国研究者又开展了常压干燥和亚临界干燥等成本更为低廉的干燥技术研究,但目前仍处于实验室研究阶段,技术还不成熟。

迄今为止,已研制出的气凝胶有很多种,有单相气凝胶(如 SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、TiO<sub>2</sub>、ZrO<sub>2</sub>、B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CuO、MoO<sub>2</sub>、MgO、SnO<sub>2</sub>、Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 等)、多相气凝胶(如 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>、TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CuO/ZnO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MgO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> 等)、有机气凝胶(如 RF、PF、MF 等)和碳气凝胶。其中, SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 ZrO<sub>2</sub> 气凝胶已在隔热材料领域得到广泛应用,其基本物理性质见表 1。

表 1 三种氧化物气凝胶的物理性质

Tab.1 Physical properties of three kinds of oxide aerogels

氧化物	比表面积 /m <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup>	孔体积 /m <sup>3</sup> ·g <sup>-1</sup>	平均孔径 /nm	表观密度 /g·cm <sup>-3</sup>
SiO <sub>2</sub>	700~950	2.0~4.0	6~12	0.05~0.14
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	600~750	5.0~7.0	30~48	0.05~0.1
ZrO <sub>2</sub>	400~500	1.6~1.8	14~16	0.1~0.2

## 1.1 SiO<sub>2</sub> 气凝胶

SiO<sub>2</sub> 气凝胶是目前研究最为广泛的一种隔热材料,其孔隙率高达 80%~99.8%,孔洞的典型尺寸为 1~100 nm,比表面积为 200~1 000 m<sup>2</sup>/g,而密度可低达 3 kg/m<sup>3</sup>,室温热导率可低达 12 mW/(m·K),其形貌如图 2 所示。

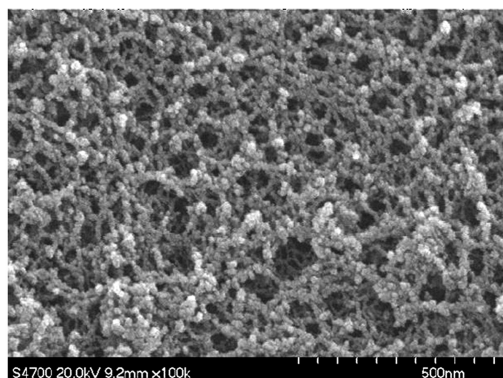


图 2 典型 SiO<sub>2</sub> 气凝胶样品 SEM 图

Fig.2 SEM images of typical SiO<sub>2</sub> aerogel sample

具有实用价值的纳米孔超级绝热材料应同时兼有良好的隔热和力学性能,通常是将 SiO<sub>2</sub> 气凝胶与红外遮光剂以及增强体进行复合,以提高 SiO<sub>2</sub> 气凝胶的隔热和力学性能。常用的红外遮光剂有碳化硅、TiO<sub>2</sub>(金红石型和锐钛型)、炭黑、六钛酸钾等,常用的增强材料有陶瓷纤维、无碱超细玻璃纤维、多晶莫来石纤维、硅酸铝纤维、氧化锆纤维等。

纯 SiO<sub>2</sub> 气凝胶隔热效果差、不耐高温、力学性能低,为了提高 SiO<sub>2</sub> 气凝胶的隔热性能, Lee 等<sup>[6]</sup>通过在气凝胶中掺加炭黑的方法来抑制热辐射传热,这种方法在一定程度上提高了气凝胶材料的高温隔热性能,但同时出现了炭黑高温氧化问题,限制了其最高服役温度。为了进一步提高 SiO<sub>2</sub> 气凝胶的最高使用温度, Kwon 等<sup>[7]</sup>引入了 TiO<sub>2</sub> 作为红外遮光剂,这种方法不仅使 SiO<sub>2</sub> 气凝胶材料的隔热性能显著提高(400℃热导率 24.8 mW/(m·K)),而且使用温度也得到显著提升。为了提高 SiO<sub>2</sub> 气凝胶的力学性能,美国国家宇航局(NASA) Ames 研究中心<sup>[8]</sup>在 SiO<sub>2</sub> 气凝胶中加入陶瓷纤维作为增强材料,制备了 SiO<sub>2</sub> 气凝胶-陶瓷纤维复合隔热瓦,与原隔热瓦材料相比热导率大大降低(表 2),同时还具有一定的机械强度。

表 2 SiO<sub>2</sub> 气凝胶复合隔热瓦与原隔热瓦热导率比较

Tab.2 Comparison of thermal conductivity between SiO<sub>2</sub> aerogel composites insulation tiles and original insulation tiles

温度 /℃	热导率/mW·(m·K) <sup>-1</sup>		温度 /℃	热导率/mW·(m·K) <sup>-1</sup>	
	原隔热瓦	复合隔热瓦		原隔热瓦	复合隔热瓦
100	60	28	600	90	53
200	64	32	700	100	64
400	76	40	800	110	76
500	82	46	900	120	90

国内在 SiO<sub>2</sub> 气凝胶材料隔热和力学性能研究方面也有许多报道,如同济大学的王珏等<sup>[9]</sup>以玻璃纤维作为增强材料来提高 SiO<sub>2</sub> 气凝胶的力学性能,董志军等<sup>[10]</sup>则制备了莫来石纤维增强 SiO<sub>2</sub> 气凝胶复合隔热材料,该材料在未增加热导率的前提下,力学性能显著提高;北京科技大学的倪文等<sup>[11]</sup>首先采用钙质原料和硅质原料制备了硬硅钙石材料,并压制成多孔板材作为骨架,然后采用真空浸渍法将 SiO<sub>2</sub> 气凝胶溶注入硬硅钙石骨架中,制备了 SiO<sub>2</sub> 气凝胶-硬硅钙石复合隔热材料,该材料在继承 SiO<sub>2</sub> 气凝胶优良隔热性能的同时,通过硬硅钙石纤维的增强作用,使复合材料力学性能显著提升。

此外,吸水率也是影响材料性能的主要因素之一。由于绝热材料在生产、运输和存放过程中难免要

遇到潮湿的环境,如果吸水率过高,会导致材料绝热性能、力学性能等下降而影响其正常使用。因此,材料吸水率的高低直接决定了其使用性能和应用范围。因此,研究者通过添加表面改性剂来制备疏水性  $\text{SiO}_2$  气凝胶,常用的表面改性剂有三甲基硅烷、二甲基二乙氧基硅烷等。与传统  $\text{SiO}_2$  气凝胶相比,新型疏水  $\text{SiO}_2$  气凝胶在干燥过程中能保持较好的外形尺寸,同时吸水率显著降低<sup>[12-13]</sup>。

### 1.2 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 气凝胶

由于氧化硅体系气凝胶使用温度不高,高温热稳定性差,难以满足高温领域的使用要求。因此,耐高温的氧化铝气凝胶就成了研究者关注的热点,氧化铝气凝胶最早是由美国的 Yoldas<sup>[14]</sup> 制备出来的,具有密度小、热导率低、比表面积大、孔隙率高、使用温度高等优点,其制备工艺与  $\text{SiO}_2$  气凝胶相似,如 J. F. Poco 等<sup>[15]</sup> 以三仲丁基醇铝为先驱体采用溶胶-凝胶法,通过超临界干燥技术成功制备了一种耐高温、热稳定性好、孔隙率高、无裂缝的块状氧化铝气凝胶。该方法制备的氧化铝气凝胶与  $\text{SiO}_2$  气凝胶相比,使用温度大幅度提高(最高使用温度  $> 1050^\circ\text{C}$ ),但是和纯  $\text{SiO}_2$  气凝胶一样仍存在脆性大等力学性能差问题,因此,研究者也尝试通过在  $\text{Al}_2\text{O}_3$  气凝胶中加入增强材料的方法来改善  $\text{Al}_2\text{O}_3$  气凝胶力学性能,并取得了一定的成果。

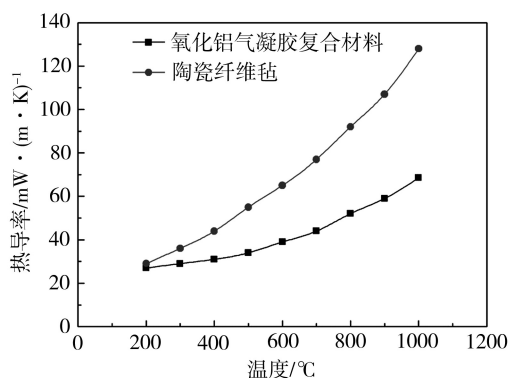


图3  $\text{Al}_2\text{O}_3$  气凝胶复合材料与陶瓷纤维毡在不同热面温度的热导率

Fig. 3 Thermal conductivities of alumina aerogel composites and ceramic fiber felt at different temperatures

如高庆福等<sup>[16]</sup> 采用溶胶-凝胶工艺,以无机陶瓷纤维毡作为增强材料,仲丁醇铝为先驱体,在超临界条件下制备了  $\text{Al}_2\text{O}_3$  气凝胶复合隔热材料,与纯  $\text{Al}_2\text{O}_3$  气凝胶相比,该  $\text{Al}_2\text{O}_3$  气凝胶复合材料的力学性能得到了显著改善,热导率也比陶瓷纤维毡隔热材料显著降低(图3)。为了进一步提高  $\text{Al}_2\text{O}_3$  气凝胶的高温热稳定性, P. R. Aravind 和 Horiuchi 等

人<sup>[17-18]</sup> 在超临界条件下制得了  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$  二元气凝胶,该气凝胶具有良好的高温热稳定性,最高使用温度可以达到  $1200^\circ\text{C}$  以上。

### 1.3 $\text{ZrO}_2$ 气凝胶

$\text{ZrO}_2$  气凝胶的孔径小于空气分子的平均自由程,在气凝胶中没有空气对流,孔隙率极高,固体所占的体积比很低,使气凝胶的热导率很低。与  $\text{SiO}_2$  气凝胶相比, $\text{ZrO}_2$  气凝胶的高温热导率更低,更适宜于高温段的隔热应用,在作为高温隔热保温材料方面具有极大的应用潜力。但是,目前关于  $\text{ZrO}_2$  气凝胶应用于隔热领域的报道还比较少,研究者主要致力于  $\text{ZrO}_2$  气凝胶制备工艺的研究。 $\text{ZrO}_2$  气凝胶是由锆盐前驱体通过一系列的水解缩聚过程得到的,它最先是 Teichner 等制备出的。其制备主要包括两部分:湿凝胶的制备及干燥。一般采用超临界干燥和冷冻干燥。常用的湿凝胶制备方法有锆醇盐水解法、沉淀法、醇-水溶液加热法、滴加环氧丙烷法和无机分散溶胶-凝胶法。

锆醇盐水解法是以锆醇盐为前驱体,经过水解、缩聚反应得到醇凝胶,再经过陈化、超临界干燥等处理而得到  $\text{ZrO}_2$  气凝胶,该方法制备的气凝胶具有比表面积高、纯度高、粒径细小均匀等优点。但是该制备方法使用的锆醇盐价格昂贵,制备工艺复杂且超临界干燥条件苛刻,应用范围受到了极大的限制。因此,以价格低廉的无机锆盐为前驱体制备  $\text{ZrO}_2$  气凝胶成了研究者的研究热点之一。沉淀法、醇-水溶液加热法、滴加环氧丙烷法和无机分散溶胶-凝胶法均是以无机锆盐为前驱体制备  $\text{ZrO}_2$  气凝胶。梁丽萍等<sup>[19]</sup> 以  $\text{ZrO}(\text{NO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  为前驱体,采用溶胶-沉淀法和超临界干燥技术制备了粒径细小均匀的氧化锆气凝胶粉体,该制备方法工艺简单,操作过程易于控制、原料成本相对低廉。但是制备的气凝胶存在比表面积较低、重复性差等缺点。而醇-水加热法对制备高比表面积氧化锆气凝胶很有优势,Wu 等<sup>[20]</sup> 以硝酸氧锆为原料,采用醇-水加热法并结合超临界干燥技术制得了  $\text{ZrO}_2$  气凝胶,该制备方法工艺简单,制得的气凝胶不仅具有高比表面积,而且能耐高温,可被推广使用。郭兴忠等<sup>[21]</sup> 以硝酸氧锆为前驱体,1,2-环氧丙烷为凝胶促进剂,在常压干燥条件下制备了比表面积高达  $645 \text{ m}^2/\text{g}$  的轻质  $\text{ZrO}_2$  气凝胶。该方法制备周期短、原料易得、成本低廉、不存在安全隐患,对开发研制新型气凝胶具有重大的研究意义。上述各方法制备的氧化锆气凝胶存在力学性能低、成型性差等缺点,为了提高氧化锆气凝胶的力学性能,杜艾等<sup>[22]</sup> 在滴加环氧丙烷法的基础上,引入低分子量的聚丙烯酸作为分散剂和引导剂,使凝胶化机理改变,

制备出了强度较高、成型性好的块状  $ZrO_2$  气凝胶材料。此外,为了提高  $ZrO_2$  气凝胶的高温热稳定性,许多研究者通过掺杂改性的方法来提高  $ZrO_2$  气凝胶的使用温度,但实践证明, $ZrO_2$  气凝胶的热稳定性仍没有得到明显改善。因此,如何使氧化锆气凝胶的高温热稳定性得到提高,还有待进一步研究。

尽管气凝胶隔热材料具有很多优点,但它的制备工艺复杂,干燥必须在超临界条件下进行。虽然也有大量的文献报道采用三甲基氯硅烷和六甲基二硅氧烷等改性剂进行表面改性后再常压干燥,然而到目前为止这种技术还不成熟,仍处于实验室研究阶段,只适于制备气凝胶粉末和较小的块体。气凝胶隔热材料工业化生产存在设备、成本等方面的困难。因此,采用干法成型工艺制备纳米粉末基复合隔热材料成了国内外研究的热点。

## 2 纳米粉末基复合隔热材料

目前,国内外所报道的纳米粉末基复合隔热材料大多都是以纳米  $SiO_2$  粉末作为基体材料,在干法条件下添加增强材料和其他添加剂,均匀混合后压制成型的。与气凝胶隔热材料相比,该方法摒弃了超临界干燥技术,制备工艺简单,制备的隔热材料具有耐温值高、强度高优点,可用于制备航天器陶瓷隔热瓦和对绝热性能有特殊要求的大型异型隔热构件,是一种极具发展潜力的新型超级绝热材料。

D. R. Smith 和 J. G. Hust<sup>[23]</sup> 于 1989 年采用干法成型工艺制备了陶瓷纤维增强纳米粉末基复合隔热材料,但是增强纤维在纳米粉末中分散性差,粉体颗粒很难黏附在纤维上,压制的块体材料强度不高。针对这一问题,日本学者<sup>[24]</sup> 利用纳米粉体改性设备将气相法  $SiO_2$ 、玻璃纤维和遮光剂均匀分散,然后施加 1.58 MPa 的压力压制成型,该材料具有优良的隔热性能(400℃ 热导率为 28.2  $W/(m \cdot K)$ )。此外,在不改变改性设备和原料配比的基础上,研究者还考察了设备转速、时间等运行参数对粘附在纤维上粉体颗粒形貌的影响(图 4)。结果表明,当转速为 3 000 r/min,混合时间为 10 min 时,纳米  $SiO_2$  颗粒与陶瓷纤维具有很好的结合度,纤维表面纳米颗粒包覆层的厚度可达 3  $\mu m$ ,材料的力学性能也有了显著提高,弯曲强度可达到 0.3 MPa,100℃ 时的热导率仅为 25.8  $mW/(m \cdot K)$ 。由于气相法  $SiO_2$  本身对红外辐射遮蔽性能差,需要添加适量红外遮光剂,降低高温辐射传热,提高材料高温使用性能,国外专利中提到的红外遮光剂主要有:  $ZrSiO_4$ 、 $SiC$ 、 $TiO_2$  等<sup>[25]</sup>,但由于技术保密,很少提及遮光剂的粒径、掺加量对材料隔热效果的影响。

宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2014 年 第 1 期

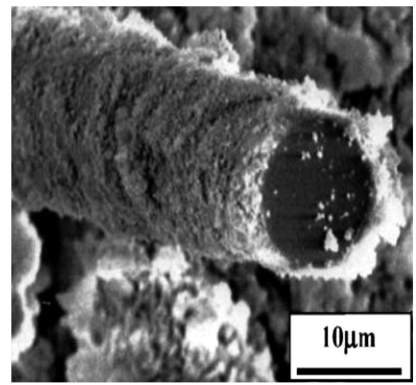


图 4 设备运行 10 min 时复合材料中玻璃纤维 SEM 图

Fig. 4 SEM images of the fiber composites with processing time of 10 min

目前,英国 Microtherm、美国 Unifrax、德国 Porextherm 等公司在纳米  $SiO_2$  粉末基绝热材料的生产和应用方面,走在世界的前列<sup>[26-27]</sup>,如美国 Unifrax 公司采用气相法  $SiO_2$  为主要材料,并添加少量硅酸盐和遮光剂生产出 Excelfrax 1900 绝热板。这种多孔绝热材料具有较低的热导率(图 5),使用温度 1 000℃ 以上,热稳定性好、无毒无害、易加工。

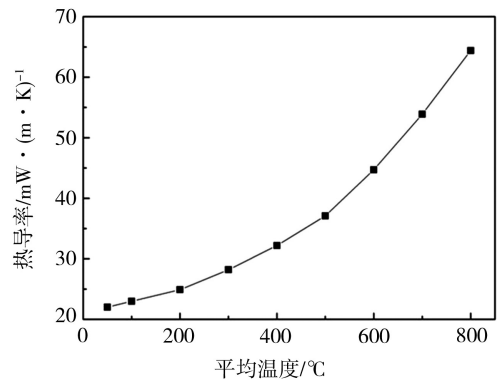


图 5 不同温度下 Excelfrax 1900 绝热板热导率

Fig. 5 Thermal conductivity of Excelfrax 1900 insulation panel under different temperatures

德国 Porextherm 公司将气相法  $SiO_2$ 、锆英石和其他添加剂复合,制备出多种形状的 WDS 绝热产品<sup>[28-29]</sup>,在高温环境下其热导率是传统隔热材料的 1/4,几乎达到了理论上的最低热导率,可以在 1 000℃ 下连续使用。但是由于气相法  $SiO_2$  易于吸水,故此类绝热材料对水较为敏感,防潮性较差,针对这一问题,本课题组在制备气相法  $SiO_2$  基复合隔热材料时,通过添加疏水气相法  $SiO_2$  来提高材料疏水性能,当添加量为 30wt% 时,吸水率可由 16.7% 下降至 5.7%,且添加量愈高,疏水效果愈明显(图 6)。此外,瑞典生产商 Unithermal Co. Ltd 基于纳米微孔原理(microporous)研制而成的 Unithermal 纳米绝热材料,也是一种新型纳米孔超级绝热材料,其主要成分是纳米级硅酸钛( $Ti_2Si_2O_5$ )等无机粉末,经过特殊工艺及专利黏结剂混合而成,具有常温下比静止空气还低的

热导率(表3),可在1 000℃高温下长期使用,线收缩率小于2%。

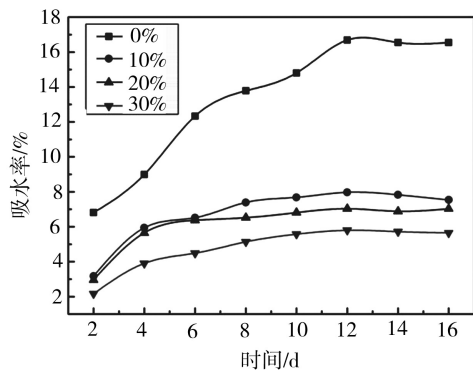


图6 疏水气相法 SiO<sub>2</sub> 添加量对吸水率的影响

Fig. 6 Effect of hydrophobic nano-silica content on water absorption

表3 不同温度下 Uniboard 热导率

Tab. 3 Thermal conductivity of Uniboard under different temperatures

平均温度 /℃	热导率 /mW·(m·K) <sup>-1</sup>	平均温度 /℃	热导率 /mW·(m·K) <sup>-1</sup>
200	21	600	28
400	25	800	34

### 3 纳米孔超级绝热材料发展前景

近年来,我国在纳米孔超级材料方面取得了一定的成果,试制产品也已在航空航天、冶金、建材、石化等领域应用。但在制备工艺和产品性能上仍存在不足之处,还需要在以下几个方面不断改进。

(1) 研究工艺简单、成本低廉的纳米孔超级绝热材料。目前,制备气凝胶隔热材料工艺复杂、成本昂贵、存在安全隐患,应用范围受到极大的限制。而纳米粉末基复合隔热材料,虽然制备工艺相对简单,但成本较高。因此,低成本纳米孔超级绝热材料仍是今后发展的趋势。

(2) 纳米孔超级绝热材料的高温隔热性能和力学性能有待提高。选择高性能的增强纤维和红外遮光剂是提高超级绝热材料的力学性能和高温隔热性能的关键,也是超级绝热材料今后的研究热点。

(3) 提高纳米孔超级绝热材料的高温热稳定性。SiO<sub>2</sub> 气凝胶隔热材料服役温度较低, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、ZrO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> 气凝胶虽然服役温度有所提高,但制备工艺还不够成熟,到目前为止尚处于实验室探索阶段。纳米粉末基复合隔热材料虽然最高服役可达 800℃,但仍不能完全满足苛刻使用环境的要求。因此,开发新型高温收缩抑制剂是提高材料的高温热稳定性的研究方向。

(4) 提高纳米孔超级绝热材料的疏水性能。无论是气凝胶隔热材料还是纳米粉末基超级绝热材料,水的进入都可能导致纳米材料结构的瓦解。因此,如何提高隔热材料的疏水性能也是纳米孔超级绝热材料的研究热点。

### 参考文献

- [1] 刘涛,王慧,曾令可,等. SiO<sub>2</sub> 纳米孔超级绝热材料的研究现状[J]. 陶瓷, 2007(7): 45-49
- [2] 倪文,刘凤梅. 纳米孔超级绝热材料的原理及制备[J]. 新型建筑材料, 2002(1): 36-38
- [3] 宋杰光,刘永华,陈林燕,等. 国内外绝热保温材料的研究现状分析及发展趋势[J]. 材料导报, 2010, 24(15): 378-381
- [4] Dorcheh A S, Abbasi M H. Silica aerogel, synthesis, properties and characterization [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 199(26): 10-16
- [5] Reim M, Reichenauer G, Korner W, et al. Silica-aerogel granulate-structural, optical and thermal properties [J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2004, 350: 358-363
- [6] Lee D, Stevens P C, Zebg S O, et al. Thermal characterization of carbon-opacified silica aerogels [J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 1995, 186: 285
- [7] Kwon T G, Choi S Y, Kang E S. Ambient-dried silica aerogel doped with TiO<sub>2</sub> power for thermal insulation [J]. Journal of Materials Science, 2000, 35: 6075-6079
- [8] Endo T, Sugiura S, Salamaki M, et al. Sintering and mechanical properties of bata-wollastonite [J]. Journal of Materials Science, 1994, 29(6): 1501-1506
- [9] 王钰,邓忠生,沈军,等. 改性纳米保温材料及其生产工艺 [P]. CN1214319A, 1999
- [10] 董志军,颜家保,涂红兵,等. SiO<sub>2</sub> 气凝胶隔热复合材料的制备与应用 [J]. 化工新型材料, 2005, 33(3): 46-49
- [11] 倪文. 硅钙石型硅酸钙保温材料的特点与发展趋势 [J]. 新材料产业, 2002(11): 32-35
- [12] Wagh P B, Ingale S V. Comparison of some physico-chemical properties of hydrophilic and hydrophobic silica aerogels [J]. Ceramics International, 2002, 28: 36-42
- [13] 邓忠生,魏建东,吴爱梅,等. 疏水型 SiO<sub>2</sub> 气凝胶 [J]. 无机材料学报, 2000, 15(2): 381-384
- [14] Yoldas B E. Alumina sol preparation from ackoxide [J]. J. Ceram. Bull., 1975, 54: 289-290
- [15] Poco J F, Satcher Jr. J H, Hrubesh L W. Synthesis of high porosity, monolithic alumina aerogel [J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2001, 285: 57-63
- [16] 高庆福,张长瑞,冯坚,等. 氧化铝气凝胶复合材料的制备与隔热性能 [J]. 国防科技大学学报, 2008, 30(4): 39-42
- [17] Horiuchi T, Osaki T, Sugiyama T, et al. Maintenance of alumina heated at elevated temperatures above 1300℃ by preparing silica-containing pseudoboehmite aerogel [J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2001, 291: 187-198

(下转第 36 页)