

引用格式:艾素芬,王帅,杨庚翔,等.低温真空环境下不同密度二氧化硅气凝胶复合材料隔热性能研究[J].北京化工大学学报(自然科学版),2023,50(1):65-71.

AI SuFen, WANG Shuai, YANG GengXiang, et al. Thermal insulation properties of silica aerogel composites with different densities in vacuum and low temperature condition[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science), 2023, 50(1): 65-71.

低温真空环境下不同密度二氧化硅气凝胶复合材料隔热性能研究

艾素芬¹ 王 帅² 杨庚翔¹ 洪 崧³ 邱家稳⁴ 孟昊轩¹ 刘 佳¹

(1. 北京卫星制造厂有限公司, 北京 100094; 2. 北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094;
3. 北京化工大学 材料科学与工程学院, 北京 100029; 4. 中国空间技术研究院, 北京 100094)

摘 要:以正硅酸乙酯、乙醇等为原料,采用溶胶-凝胶反应和超临界干燥工艺制备了密度分别为 30、80、120、260、320 kg/m³ 的纤维增强二氧化硅气凝胶复合材料,分别在常压、25 ℃ 下以及真空、-130 ~ 25 ℃ 的条件下测定了所制备的气凝胶复合材料的导热系数,研究了复合材料的密度及组成对于气凝胶材料隔热性能的影响规律。结果表明:在常压、25 ℃ 条件下,在不同密度的气凝胶复合材料中,密度为 120 kg/m³ 的气凝胶复合材料的导热系数最小(0.013 W/(m·K));密度为 30、80、120 kg/m³ 的气凝胶复合材料的导热系数随密度增大而减小;密度为 120、260、320 kg/m³ 的气凝胶复合材料的导热系数随密度增大而增大。在真空、-130 ~ 25 ℃ 的条件下,密度为 120 kg/m³ 的气凝胶复合材料的导热系数最小;密度为 30、80、120 kg/m³ 的气凝胶复合材料的导热系数随密度增大而减小。在 130 ℃ 时,由于密度为 320 kg/m³ 的气凝胶复合材料采用了抗辐射性能优异的预氧丝增强纤维,因此其导热系数最小(0.006 2 W/(m·K))。

关键词:二氧化硅气凝胶;导热系数;低温真空;隔热性能;航天器

中图分类号: TB321 **DOI:** 10.13543/j.bhxbzr.2023.01.008

引 言

在宇宙中飞行的航天器经受着与地球表面完全不同的极端温度环境(-230 ~ 130 ℃)^[1],美国国家航空航天局(NASA)规定,一般电子设备应保持在-15 ~ 50 ℃ 的温度范围内以保证正常运行^[2]。在对于部组件轻量化程度要求极高的航空航天领域中,需要使用轻质、高效的隔热材料以使航天器设备能够正常工作。在高真空、低温的环境中,航天领域常采用多层隔热组件作为隔热材料,该组件由反射层和间隔层交替组成,反射层一般是有机薄膜(镀铝)或金属箔,间隔层是尼龙网或其他低导热系数材料。依靠金属箔的反射作用,多层隔热组件具有优异的抑制辐射传热的性能,在真空下其理论导热

系数仅为 10⁻⁵ W/(m·K)。多层隔热组件为轻质薄膜结构,质地较软,安装时必须依附于主体结构,受压后其隔热性能急剧下降。因此,对于隔热材料中具有组装功能的部组件,需要选择具有一定力学性能且隔热性能优异的隔热材料替代多层隔热组件。

气凝胶是一种由胶体粒子或高聚物分子相互聚积形成的具有纳米网络结构的多孔性固体材料。气凝胶材料的孔径(2 ~ 50 nm)小于空气分子的平均自由程(70 nm),能较好地抑制气体热流,使得气凝胶具有极低的导热系数(室温下导热系数仅为 0.013 W/(m·K)),是大气环境下隔热性能最为优异的隔热材料。气凝胶具有低密度和低导热系数的特点,使其作为一种高效的隔热保温材料而广泛应用于航空航天领域^[3-4]。NASA 在 1997 年和 2003 年将密度为 15 ~ 20 kg/m³ 的气凝胶分别应用于“索杰纳”和“勇气号”火星车上,以抵挡火星上平均温度为 -123 ℃ 的低温^[5]。我国在首个执行火星探测任务的“天问一号”火星探测

收稿日期:2022-09-06

基金项目:国家自然科学基金(U20B2008)

第一作者:女,1979年生,研究员

E-mail: sufenai529s@163.com

器中,在“祝融号”火星车舱板上使用了密度为 30 kg/m^3 的二氧化硅气凝胶材料^[6]作为结构保温材料。近年来,国内外学者对气凝胶材料的隔热性能进行了较多的研究工作。雷尧飞等^[7]制备了低密度气凝胶复合材料并考察了在真空条件下以及火星大气环境下复合材料的隔热性能,结果表明,在火星大气环境下其导热系数仅为 $0.0066 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$,低于文献^[8]报道的 NASA 在同等条件下在火星车中使用的气凝胶的导热系数($0.015 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$)。NASA 将低温气凝胶毡和多层反射层联合制成隔热组件,肯尼迪航天中心低温测试实验室研究了这种隔热组件在低温、不同真空度条件下的导热系数,结果表明,在真空下该隔热组件具有比多层隔热组件更低的导热系数^[9]。上述研究集中于一种材料在真空下的隔热性能测试,对于不同密度的气凝胶在常压和真空下的隔热性能缺乏系统的研究,限制了其在航天领域的进一步应用。

气凝胶材料由于脆性大、强度低,在工程应用时,常通过与不同增强纤维进行复合,使气凝胶具有优良的力学性能、耐温性和隔热性能,同时具有一定的结构强度,可通过机械加工为沟、槽等结构进行组装,形成异型结构。在航天器的真空低温环境中,气凝胶复合材料因具有组装成部组件以及承载的能力,越来越多地代替多层组件而使用。2018 年在我国嫦娥四号月球着陆器探测任务中,同位素温差电池结构中采用了气凝胶材料作为保温材料,使热量尽可能多地通过温差电单体并实现热-电能量转换^[10]。随着气凝胶在真空环境下应用需求越来越多,探索不同密度的气凝胶材料在真空条件下的隔热性能变化规律,对于航天器应用具有十分重要的意义。

针对航天器的实际使用需求,本文制备了不同密度的纤维增强二氧化硅气凝胶复合材料,分别在常压、 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下以及真空、不同温度下测定了所制备的气凝胶复合材料的导热系数,研究了气凝胶密度以及复合材料组成对于气凝胶复合材料隔热性能的影响规律。

1 实验部分

1.1 实验材料

正硅酸乙酯、乙醇、盐酸和氨水,均为分析纯,北京化工厂;去离子水,实验室自制;玻璃纤维,密度分别为 10 、 150 kg/m^3 ,厚度为 10 mm ;预氧丝纤维,密

度为 210 kg/m^3 ,中材科技有限公司。

1.2 不同密度二氧化硅气凝胶的制备

将不同量的正硅酸乙酯溶于不同量的乙醇、水、盐酸及氨水中,将溶液充分混合后,制得质量分数为 2% 、 6% 及 10% 的硅溶胶,导入模具中,凝胶后取出,使用乙醇浸泡进行溶剂置换,然后使用超临界干燥设备($2\text{X}280\text{L}$ 型,贵州航天乌江机电设备有限公司)进行超临界 CO_2 干燥,获得不同密度的二氧化硅气凝胶。

1.3 不同密度二氧化硅气凝胶复合材料的制备

将不同量的正硅酸乙酯溶于不同量的乙醇、水、盐酸及氨水中,将溶液充分混合后,制得质量分数为 2% 、 6% 及 10% 的硅溶胶,然后倒入模具中,与不同密度的玻璃纤维或预氧丝增强纤维复合,复合过程中充分挤压,去除纤维中的气泡。溶胶凝胶后,进行超临界 CO_2 干燥,制得密度为 30 、 80 、 120 、 260 、 320 kg/m^3 的二氧化硅气凝胶复合材料,分别记为 S-30、S-80、S-120、S-260 和 S-320。本文制备的气凝胶复合材料的组成和密度见表 1,其中纤维含量为纤维占复合材料的质量分数。

表 1 气凝胶复合材料的组成和密度

Table 1 Composition and density of aerogel composites

样品 编号	硅溶胶 质量 分数/%	气凝胶 密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	纤维密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	复合材料 密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	纤维 含量/ %
S-30	2	20	10	30	33.3
S-80	6	70	10	80	12.5
S-120	10	110	10	120	8.3
S-260	10	110	150	260	57.7
S-320	10	110	210	320	65.6

1.4 测试与表征

根据 GB/T 10295—2008《绝热材料稳态热阻及有关特性的测定:热流计法》,使用导热系数测试仪(HFM446 型,德国耐驰公司)测定不同密度的气凝胶复合材料在常压、 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下的垂直导热系数。样品尺寸为 $300 \text{ mm}\times 300 \text{ mm}$,室温下导热系数仪器自身的测试误差为 1% 。

根据 GB/T 10294—2008《绝热材料稳态热阻及有关特性的测定:防护热板法》,使用导热系数测试仪(GHP456 型,德国耐驰公司)测定不同密度的气凝胶复合材料在真空(0.01 Pa)条件下在 $-130\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的范围内的垂直导热系数。样品尺寸为 $300 \text{ mm}\times 300 \text{ mm}$,真空低温下导热系数的测试误差为 2% 。

使用场发射扫描电子显微镜 (SEM) (JEOL JSM-7800F 型, 日本电子株式会社) 观察玻璃纤维和气凝胶复合材料的微观结构, 测试电压为 10.0 kV。使用高分辨透射电子显微镜 (TEM) (JEOL JEM-3010 型, 日本电子株式会社) 观察气凝胶的纳米结构, 制样时, 用铜网微栅支持膜从气凝胶样品的新制断面上粘取少量微粒, 放置于 TEM 中观察。

使用氮吸附仪 (ASAP2010 型, 美国 Micromeritics 公司) 测试气凝胶的比表面积和孔径。将气凝胶在自封袋中碾压成粉末, 在测试设备中经 300 ℃ 脱气处理后进行测试, 孔分布曲线采用 BJH 方程模拟计算获得。

2 结果与讨论

2.1 常压、25 ℃ 条件下不同密度气凝胶复合材料的导热系数

常压、25 ℃ 条件下不同密度二氧化硅气凝胶复合材料的导热系数如图 1 所示。可以看出, 对于密度为 30 ~ 120 kg/m³ 的气凝胶复合材料, 导热系数随着密度的增大而减小, S-30 的导热系数最大 (0.023 W/(m·K)), S-120 的导热系数最小 (0.013 W/(m·K)), 结果表明其隔热性能优异。

纤维增强 SiO₂ 气凝胶复合材料具有良好的隔热性能, 与其特殊的微观结构和传热方式有关。图 2 为玻璃纤维 (ρ = 10 kg/m³) 和不同密度气凝胶

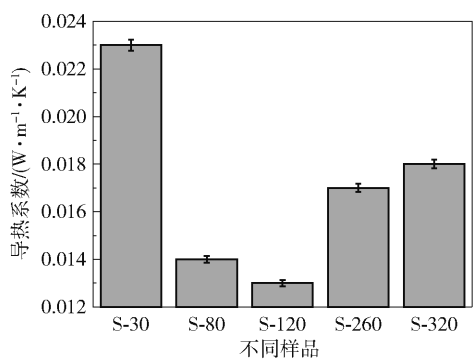


图 1 在常压、25 ℃ 条件下不同密度二氧化硅气凝胶复合材料的导热系数

Fig. 1 Thermal conductivity of silica aerogel composites with different densities at atmospheric pressure and 25 ℃

复合材料的 SEM 图。由图 2(a) 可以看出, 玻璃纤维的直径约为 1 ~ 3 μm, 该纤维属于超细玻璃纤维, 具有较低的导热系数。由图 2(b) ~ (d) 可以看出, 在这 3 种气凝胶复合材料中, 玻璃纤维均被 SiO₂ 覆盖, 这样减少了纤维与纤维之间接触的固体热传导。

在气凝胶复合材料中, 传热方式主要有纤维本身的固体热传导、气凝胶固体热传导、气凝胶孔隙内的气体对流和辐射传热^[11]。对于纯气凝胶而言, 一方面, 气凝胶具有 98% 以上的孔隙率, 使其固体含量占到 2% 以下, 其固体结构为由纳米级小球组成的弯曲复杂的链状结构, 具有无限长路效应, 使气凝

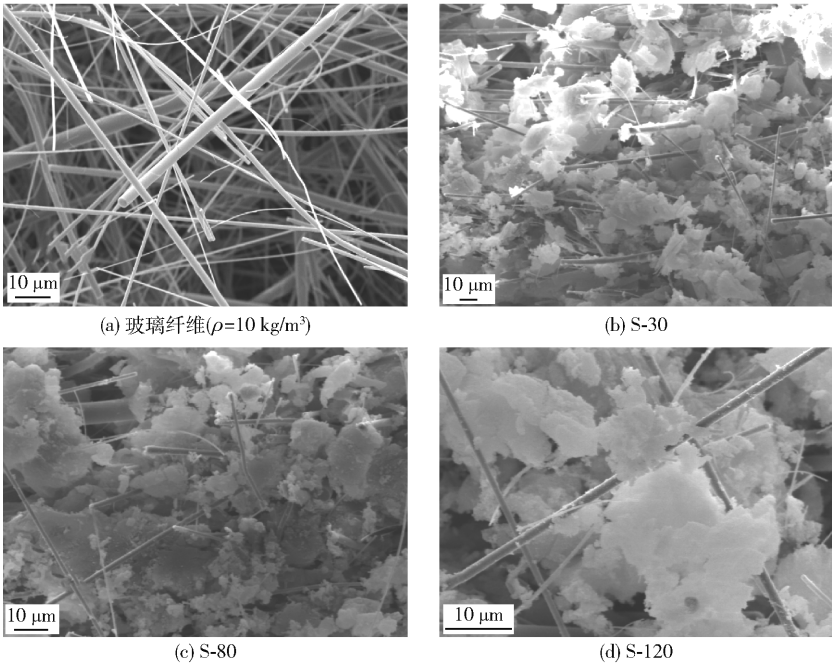


图 2 玻璃纤维 (ρ = 10 kg/m³) 和不同密度气凝胶复合材料的 SEM 图

Fig. 2 SEM images of glass fiber (ρ = 10 kg/m³) and aerogel composites with different densities

胶具有较低的固相热传导系数;另一方面,常温条件下辐射热传导对总导热系数的贡献较小,而气凝胶中绝大部分孔洞的尺寸小于常温下空气分子的平均自由程,其纳米结构具有很强的气相对流传热抑制作用^[12]。尽管对流、传导和辐射这 3 种传热方式对气凝胶的宏观导热系数均有贡献,但是三者所占的比例明显不同。有研究表明,在常温条件下,气凝胶密度在 200 kg/m³ 以下时,气相对流传热对气凝胶导热系数的贡献大于其他两种热传导方式^[13]。

对于采用相同密度增强纤维的 S-30、S-80 和 S-120 样品,其导热系数的不同主要来自于复合材料中不同密度气凝胶的孔结构。S-30、S-80 和 S-120 复合材料中气凝胶密度分别为 20、70、110 kg/m³。图 3 为低密度气凝胶($\rho = 20 \text{ kg/m}^3$)和高密度气凝胶($\rho = 110 \text{ kg/m}^3$)的透射电子显微镜照片。由结果可知,低密度气凝胶的骨架尺寸约为 2 ~ 4 nm,高密度气凝胶的骨架尺寸约为 8 ~ 10 nm。低密度气凝胶由于单位体积内溶胶颗粒较少,颗粒倾向于形成

较为疏松的堆积方式,因此溶胶颗粒间形成的孔隙较大,多数大于 100 nm。而对于密度为 110 kg/m³ 的气凝胶材料,其孔洞尺寸小于 70 nm。

通过氮气吸附实验(BET)测试密度为 20、70、110 kg/m³ 的气凝胶的孔径和比表面积,结果如表 2 所示。这 3 种气凝胶的孔径在介孔范围(2 ~ 100 nm)内,气凝胶结构中存在 BET 不可测定的大孔尺寸(>100 nm),这些大孔影响气凝胶的抗对流性能。按照文献[14]的计算方法得到密度为 20、70、110 kg/m³ 的气凝胶中不可测试的大孔比例(大于 100 nm 孔的比例)分别为 86.2%、74.1% 和 69.6%,气凝胶本体的抗对流能力随大孔结构减少而增强,说明气凝胶本体对应的 S-30、S-80 和 S-120 气凝胶复合材料抗对流能力随密度增大而呈现增强的趋势,因此导热系数随着气凝胶密度的增大而减小。有研究表明,在密度低于 50 kg/m³ 的气凝胶中,密度相对更低的气凝胶中大孔比例更高,更有利于气体分子的对流传热,因此其气相热导率更大,在室温下气凝胶的导热系数更高^[15]。

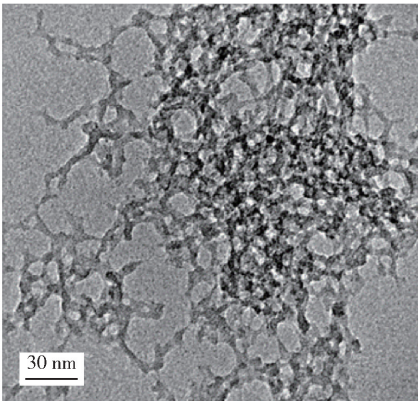
表 2 不种密度气凝胶的比表面积、平均孔径和孔体积

Table 2 Specific surface area, average pore size and pore volume of aerogels with different densities			
气凝胶密度/ (kg·m ⁻³)	比表面积/ (m ² ·g ⁻¹)	平均 孔径/nm	总孔体积/ (cm ³ ·g ⁻¹)
20	698.1	34.1	7.1
70	720.2	41.3	5.2
110	750.5	48.2	3.1

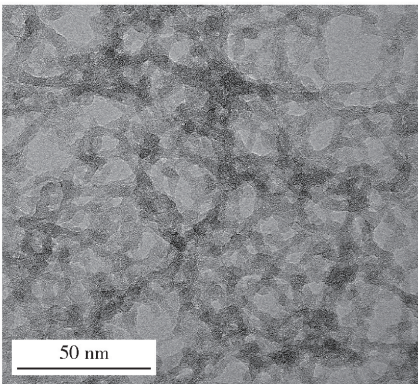
由图 1 还可以看出,对于密度为 120 ~ 320 kg/m³ 的气凝胶复合材料,其导热系数随着密度的增大而增大,S-320 样品的导热系数由 S-120 的 0.013 W/(m·K) 增大至 0.018 W/(m·K)。S-120、S-260 和 S-320 气凝胶复合材料均采用了密度为 110 kg/m³ 的气凝胶,因此具有相同的气相对流传热性能。这 3 种复合材料采用了不同密度(10、150、210 kg/m³)的增强纤维,纤维在复合材料中的含量分别为 8.3%、57.7% 和 65.6%,纤维含量增加使纤维固相热传导能力增强,因此导热系数随密度的增大而增大。

2.2 真空条件下不同密度气凝胶复合材料的导热系数随温度的变化

在 0.1 Pa 的真空条件下没有气体对流,热量以辐射和固体传导的方式从绝热材料的一端(热端)传向另一端(冷端)。测试了真空条件下不同密度



(a) 低密度气凝胶($\rho=20 \text{ kg/m}^3$)



(b) 高密度气凝胶($\rho=110 \text{ kg/m}^3$)

图 3 低密度气凝胶($\rho = 20 \text{ kg/m}^3$)和高密度气凝胶($\rho = 110 \text{ kg/m}^3$)的 TEM 图

Fig. 3 TEM images of low density aerogels ($\rho = 20 \text{ kg/m}^3$) and high density aerogels ($\rho = 110 \text{ kg/m}^3$)

气凝胶复合材料的导热系数随温度的变化,结果如图 4 所示。在真空条件下,在 $-130 \sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的范围内,不同密度气凝胶复合材料的导热系数均表现出随温度上升而增大的趋势。一方面,在低温条件下,随着温度的升高,分子热运动加快,固体骨架的导热速率增加,固体导热系数增大;另一方面,波尔兹曼定律指出黑体辐射强度与温度的四次方成正比,温度越高,辐射传热量越大,辐射传热系数越大。固体导热速率加快和辐射传热量增大,使得不同密度气凝胶复合材料的导热系数随温度上升而增大。

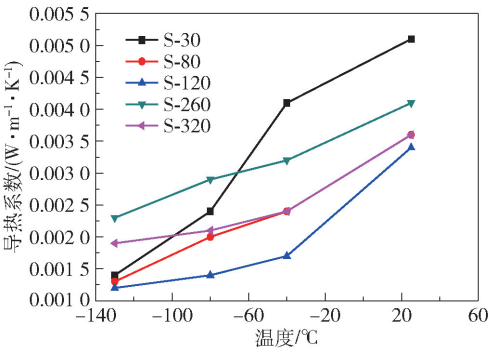


图 4 真空条件下不同密度气凝胶复合材料的导热系数随温度的变化
Fig. 4 Variation of thermal conductivity of aerogel composites with different densities with temperature under vacuum condition

在 $-130 \sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的范围内,S-120 样品在 5 种密度的气凝胶复合材料中具有最低的导热系数。对于 S-30、S-80 和 S-120 样品,当温度相同时,密度越大,导热系数越低。这 3 种样品均采用密度为 10 kg/m^3 的增强纤维,纤维含量分别为 33.3%、12.5%、8.3%,复合材料中大部分为气凝胶本体,但气凝胶本体的固体传导可忽略,而辐射传导占主导地位。随着气凝胶密度的增大,气凝胶内的固相单元增加,对辐射的吸收效应加强,使得气凝胶的罗斯兰德平均消光系数增大,辐射导热系数减小^[16],因此 S-30、S-80 和 S-120 样品表现出密度越大、导热系数越低的趋势。在 $-130\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,S-30 和 S-80 的导热系数分别为 $0.0014\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ 和 $0.0013\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$,二者较为接近。但是由于 S-30 的密度较小,其抗辐射性能较低,因此 S-30 的导热系数随温度升高而陡然增大。

对于 S-120、S-260 和 S-320 样品,其纤维含量分别为 8.3%、57.7% 和 65.6%。随着纤维含量的增加,纤维热传导在传热中的比重加大,使得复合材料整体的导热系数增大。由图 4 可以看出,S-260 和

S-320 的导热系数大于 S-120,而 S-320 的导热系数小于 S-260,说明虽然 S-320 的纤维含量大于 S-260,但是由于 S-320 中的增强纤维为预氧丝纤维,这是一种由聚丙烯腈在一定温度下经空气氧化而形成的环化结构的黑色纤维,具有红外遮光的作用,在 $-130 \sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的范围内,可以增强复合材料的抗辐射能力,因此 S-320 的导热系数小于 S-260。

为了说明预氧丝增强纤维的抗红外辐射作用,对比了真空条件下不同密度的气凝胶复合材料在 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的导热系数,结果如图 5 所示。当温度由 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 升高到 $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,S-320 的导热系数上升的幅度最小。当温度为 $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,虽然 S-320 的密度最大,但是其导热系数最小,仅为 $0.0062\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ 。热辐射以电磁波的形式传递,并且在真空下也能传播。高温下红外辐射传热是主要的能量传递方式,温度越高,热辐射能量越向短波方向集中,尤其是当温度高于 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,热辐射电磁波能量主要以 $2 \sim 8\text{ }\mu\text{m}$ 的红外电磁波进行传递。而气凝胶的骨架颗粒为纳米量级,纯 SiO_2 气凝胶对该波段的电磁波几乎完全透过,因此,纯气凝胶抑制高温辐射的性能很差^[17]。在温度为 $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,复合材料中纤维的红外辐射抑制能力占主导地位。在高温(如 $130\text{ }^{\circ}\text{C}$)时,红外线在预氧丝纤维内部经无数次反射、散射和吸收^[18],大幅度降低了复合材料的导热系数。在这 5 种密度的气凝胶复合材料中,虽然 S-320 的固相热传导能力最大,但是预氧丝纤维优异的抗辐射性能使其导热系数大幅度下降,因此在 $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下 S-320 的导热系数最小。

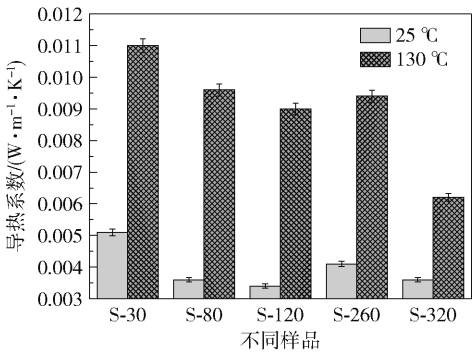


图 5 真空条件下不同密度的气凝胶材料在 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的导热系数
Fig. 5 Thermal conductivity of aerogel materials with different densities at $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ in vacuum

上述研究表明,气凝胶的传热行为与复合材料的密度及组成相关,在大气室温环境和真空环境中

表现出不同的传热性能,对于密度为 320 kg/m^3 的气凝胶复合材料,其表现尤为明显。在 25°C 的大气环境中,对流传热和热传导传热为主要传热方式,5 种气凝胶的导热系数大小排序为: $S-120 < S-80 < S-260 < S-320 < S-30$,其中 $S-320$ 的导热系数位于第四位置。而在真空环境下,传导和辐射传热为主要传热方式,由于 $S-320$ 气凝胶复合材料具有优异的抗辐射性能,5 种气凝胶的导热系数大小排序为: $S-120 < S-320 < S-80 < S-260 < S-30$,其中 $S-320$ 在 5 种密度的气凝胶中导热系数降低,位于第二位置。

3 结论

(1)在常压、 25°C 条件下,在所测试的 5 种密度的二氧化硅气凝胶复合材料中,密度为 120 kg/m^3 的气凝胶复合材料的导热系数最小,为 $0.013 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$;对于密度为 $30 \sim 120 \text{ kg/m}^3$ 的气凝胶复合材料,导热系数随着密度的增大而减小;对于密度为 $120 \sim 320 \text{ kg/m}^3$ 的气凝胶复合材料,导热系数随着密度的增大而增大。

(2)在真空、 $-130 \sim 25^\circ\text{C}$ 的条件下,不同密度的二氧化硅气凝胶复合材料的导热系数随温度上升而增大;在所测试的 5 种密度的气凝胶复合材料中,密度为 120 kg/m^3 的气凝胶复合材料的导热系数最小;对于密度为 $30 \sim 120 \text{ kg/m}^3$ 的气凝胶复合材料,导热系数随着密度的增大而减小。在 130°C 时,由于密度为 320 kg/m^3 的气凝胶复合材料采用了具有优异抗辐射性能的预氧丝增强纤维,因此其导热系数最小,仅为 $0.0062 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。

上述结果表明,不同密度的二氧化硅气凝胶复合材料在大气室温环境下和真空低温环境下具有不同的传热规律,在实际应用时应结合具体的使用情况,优选出隔热性能最佳的气凝胶材料。

参考文献:

- [1] DE ROSA D, BUSSEY B, CAHILL J T, et al. Characterization of potential landing sites for the European Space Agency's Lunar Lander project[J]. Planetary and Space Science, 2012, 74(1): 224–246.
- [2] 侯增祺, 胡金刚. 航天器热控制技术: 原理及其应用[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2007: 7–8.
HOU Z Q, HU J G. Spacecraft thermal control technology: principle and application[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2007: 7–8. (in Chinese)
- [3] 彭飞, 姜勇刚, 冯坚, 等. 耐高温氧化铝气凝胶隔热复合材料研究进展[J]. 无机材料学报, 2021, 36(7): 673–684.
- [4] PENG F, JIANG Y G, FENG J, et al. Research progress on alumina aerogel composites for high-temperature thermal insulation[J]. Journal of Inorganic Materials, 2021, 36(7): 673–684. (in Chinese)
- [4] 朱召贤, 王飞, 姚鸿俊, 等. 遮光剂掺杂 Al_2O_3 - SiO_2 气凝胶/莫来石纤维毡复合材料的高温隔热性能研究[J]. 无机材料学报, 2018, 33(9): 969–975.
ZHU Z X, WANG F, YAO H J, et al. High-temperature insulation property of opacifier-doped Al_2O_3 - SiO_2 aerogel/mullite fiber composites[J]. Journal of Inorganic Materials, 2018, 33(9): 969–975. (in Chinese)
- [5] JONES S M, SAKAMOTO J. Application of aerogels in space exploration[M]//AEGERTER M A, LEVENTIS N, KOEBEL M M. Aerogels handbook. London: Springer, 2011: 721–746.
- [6] 艾素芬, 向艳超, 雷尧飞, 等. 火星车低密度纳米气凝胶隔热材料制备及性能研究[J]. 深空探测学报, 2020, 7(5): 466–473.
AI S F, XIANG Y C, LEI Y F, et al. Preparation and characterization of ultra-low density nano-aerogel insulation materials for Mars rover[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2020, 7(5): 466–473. (in Chinese)
- [7] 雷尧飞, 韩妙玲, 艾素芬, 等. 低密度气凝胶复合材料的火星环境适应性性能研究[J]. 宇航材料工艺, 2019, 49(6): 86–90.
LEI Y F, HAN M L, AI S F, et al. The adaptability of low-density aerogel composites to Mars environment[J]. Aerospace Materials & Technology, 2019, 49(6): 86–90. (in Chinese)
- [8] HICKEY G S. Materials for thermal control for Mars surface operations[J]. MRS Proceedings, 1998, 551: 25–31.
- [9] BEGAG R, WHITE S, FESMIRE J E, et al. Hybrid aerogel-MLI insulation system performance studies for cryogenic storage in space applications[J]. MRS Online Proceedings Library, 2011, 1306(1): 103.
- [10] 彭磊, 侯旭峰, 阎勇, 等. 嫦娥四号着陆器同位素温差电池设计与验证[J]. 电源技术, 2020, 44(4): 607–612.
PENG L, HOU X F, YAN Y, et al. Design and verification of radioisotope thermoelectric generator for Chang'e-4 lander[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2020, 44(4): 607–612. (in Chinese)
- [11] 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 J, GAO Q F, FENG J Z, 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. (in Chinese)

- [12] KISTLER S S, CALDWELL A G. Thermal conductivity of silica aerogel[J]. *Industrial and Engineering Chemistry*, 1934, 26(6): 658–662.
- [13] HRUBESH L W, PEKALA R W. Thermal properties of organic and inorganic aerogels[J]. *Journal of Materials Research*, 1994, 9(3): 731–738.
- [14] 雷尧飞. 气凝胶热导率关键结构辨识及控制[D]. 北京: 北京化工大学, 2017.
LEI Y F. Identification and control of key structural characteristics of thermal conductivity in aerogels[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2017. (in Chinese)
- [15] 孙言, 艾素芬, 雷尧飞, 等. 低密度二氧化硅气凝胶微观结构与隔热性能表征[J]. *北京化工大学学报(自然科学版)*, 2018, 45(1): 43–48.
SUN Y, AI S F, LEI Y F, et al. Micro-structure and thermal insulation performance characterization of low density SiO_2 aerogel[J]. *Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science)*, 2018, 45(1): 43–48. (in Chinese)
- [16] 张华. 纳米多孔材料传热特性分析研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2014.
ZHANG H. The study and analysis of nano-porous material heat transfer properties[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2014. (in Chinese)
- [17] 秦艳青, 姜勇刚, 冯坚, 等. 红外遮光剂在二氧化硅气凝胶中的应用研究进展[J]. *材料导报*, 2015, 29(11): 129–132.
QIN Y Q, JIANG Y G, FENG J, et al. Progress in research on the use of infrared opacifiers in silica aerogel[J]. *Materials Reports*, 2015, 29(11): 129–132. (in Chinese)
- [18] 周祥发, 冯坚, 肖汉宁, 等. 二氧化硅气凝胶隔热复合材料的性能及其瞬态传热模拟[J]. *国防科技大学学报*, 2009, 31(2): 36–40, 69.
ZHOU X F, FENG J, XIAO H N, et al. Performance and heat transfer simulation of silica aerogel composites[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2009, 31(2): 36–40, 69. (in Chinese)

Thermal insulation properties of silica aerogel composites with different densities in vacuum and low temperature condition

AI SuFen¹ WANG Shuai² YANG GengXiang¹ HONG Song³ QIU JiaWen⁴
MENG HaoXuan¹ LIU Jia¹

(1. Beijing Spacecrafts, Beijing 100094; 2. Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094;

3. College of Materials Science and Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029;

4. China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: Fiber reinforced silica aerogel composites with densities of 30, 80, 120, 260 and 320 kg/m^3 were prepared by sol-gel reaction and supercritical drying process using tetraethyl orthosilicate and ethanol as raw materials. The thermal conductivity of the prepared aerogel composites was measured at atmospheric pressure, 25 °C and vacuum, -130–25 °C, respectively. The effects of density and composition of the composites on the thermal insulation properties of aerogel materials were studied. The results show that the thermal conductivity of aerogel composites with a density of 120 kg/m^3 is the smallest (0.013 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) among aerogel composites with different densities under normal pressure and 25 °C. The thermal conductivity of aerogel composites with density of 30, 80, 120 kg/m^3 decreases with the increase of density. The thermal conductivity of aerogel composites with density of 120, 260, 320 kg/m^3 increases with the increase of density. Under the condition of vacuum and -130–25 °C, the thermal conductivity of aerogel composites with density of 120 kg/m^3 is the smallest. The thermal conductivity of aerogel composites with density of 30, 80, 120 kg/m^3 decreases with the increase of density. At 130 °C, the aerogel composite with a density of 320 kg/m^3 has the lowest thermal conductivity (0.0062 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) due to the use of pre-oxidized fiber reinforced fibers with excellent radiation resistance.

Key words: silica aerogel; thermal conductivity; low-temperature vacuum; insulation performance; spacecraft

(责任编辑: 于少云)