# SiO2气凝胶隔热性能的影响因素研究

# 周星光,柳世灵,王通,杨钦,梁迪,陈浩

(上海航天精密机械研究所,上海 201600)

摘要:目的 在不同热流条件下,通过调整 SiO<sub>2</sub> 气凝胶的孔隙率、涂层厚度等,以满足合适的隔热要求。方法 针对中短程飞行器飞行时外壁面承受短时高热流的特点,在分析孔隙率对 SiO<sub>2</sub> 气凝胶热导率影响规律的基础上,通过数值仿真研究不同气凝胶孔隙率、气凝胶厚度及热流作用下的温度响应。结果 得到了不同条件下满足隔热要求的气凝胶最小厚度,以及气凝胶表面的最高温度。高温情况下,气凝胶孔隙率为 96%时, 有效热导率最低,孔隙率超过 96%时,隔热性能变差。结论 当飞行器内壁面温度满足要求时,增大气凝胶 的孔隙率,则需要减小气凝胶的厚度,相应的气凝胶表面温度会升高,但升幅很小。当飞行器外壁面承受 长时间大热流时,仅调整气凝胶的厚度和孔隙率不能达到结构的隔热要求。

关键词: 气凝胶; 孔隙率; 热防护; 热导率; 高温 中图分类号: V414.8 文献标识码: A 文章编号: 1672-9242(2022)05-0094-06 DOI: 10.7643/ issn.1672-9242.2022.05.012

### Influence Factor of Thermal Insulation Performance of SiO<sub>2</sub> Aerogel

ZHOU Xing-guang, LIU Shi-ling, WANG Tong, YANG Qin, LIANG Di, CHEN Hao

(Shanghai Spaceflight Precision Machinery Institute, Shanghai 201600, China)

**ABSTRACT:** In order to get the structure design of  $SiO_2$  aerogel that meet the insulation requirements under heat flux. According to the characteristics of short-range flight vehicle that bearing short time high heat flux, the effect of porosity on thermal conductivity of  $SiO_2$  aerogel is analyzed in this study. Using the finite element method, the minimum thickness of aerogel that meet the insulation requirements under heat flux, and the effect of magnitude and time of heat flux on the surface temperature of aerogel have been investigated. The results show that, the high temperature effective thermal conductivity of aerogel is the lowest when the porosity is 96%, and then becomes worse when the porosity is over 96%. Reducing the thickness of aerogel requires higher aerogel porosity due to the inner wall temperature of the structure. When the structure is subjected to long time high heat flux, only adjusting the thickness and porosity of the aerogel cannot meet the thermal insulation requirements. The results provide a basis for the structure design of  $SiO_2$  aerogel that meet the insulation requirements under heat flux. KEY WORDS: aerogel; porosity; thermal insulation; thermal conductivity; high temperature

航空航天的快速发展驱使人们对高温隔热领域 更加关注,对热防护材料的要求更加严苛<sup>[1]</sup>。航天器 在超声速飞行时,壁面承受较高的气动热流或燃气热流<sup>[2]</sup>,因此热防护结构及材料的设计对其内部的结构

收稿日期: 2021-04-10; 修订日期: 2021-06-22

Received: 2021-04-10; Revised: 2021-06-22

作者简介:周星光(1991-),男,硕士,工程师,主要研究方向为热环境工程。

Biography: ZHOU Xing-guang (1991—), Male, Master, Engineer, Research focus: thermal environment engineering.

引文格式:周星光,柳世灵,王通,等.SiO2气凝胶隔热性能的影响因素研究[J]. 装备环境工程,2022,19(5):094-099.

ZHOU Xing-guang, LIU Shi-ling, WANG Tong, et al. Influence Factor of Thermal Insulation Performance of SiO<sub>2</sub> Aerogel[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(5): 094-099.

及设备安全至关重要[3-4]。

多纳米孔隙气凝胶因其具有密度低、隔热性能 好的特点,在航天器的隔热领域具有广阔的应用前 景<sup>[5]</sup>。目前的研究及应用主要以 SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>系的气 凝胶材料为主,其中 SiO2 气凝胶及其复合材料由于 更低的密度和更高效的隔热性能更受关注<sup>[6]</sup>。然而由 于 SiO<sub>2</sub> 气凝胶耐受温度不高,使其在作为隔热材料 方面受到限制。现阶段大多通过热防护结构的设计, 将气凝胶隔热材料应用于间隔层内来提升其耐热性 能<sup>[7-9]</sup>,但是又会降低结构在强度、刚度及振动方面的 性能[10-12]。研究表明,在气凝胶中添加纤维、颗粒[13] 及遮光剂等可显著增强气凝胶的热稳定性和红外辐 射能力<sup>[14]</sup>。Wei 等<sup>[15]</sup>制备了一种碳纳米纤维/SiO2复 合气凝胶,抑制了气凝胶内部的辐射传热,并且在 500 ℃时具有超低的热导率和良好的热稳定性。张君 君等<sup>[16]</sup>通过添加 YCl<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O 实现了 SiO<sub>2</sub> 气凝胶在 900 ℃下经过 2 h 仍然具有良好的热稳定性。通过在 气凝胶上下层分别铺放 MLI 和 APA-2, 使用 Nextel 440 纤维布包装后,其耐热温度可达1600 ℃<sup>[17]</sup>。

不同孔隙率的 SiO2 气凝胶的热导率不同,热稳 定性也不同。周红梅<sup>[18]</sup>分别建立了 SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 及 ZrO2气凝胶的微尺度模型,分析了孔隙率和温度对气 凝胶热导率的影响,并研究了3种材料复合时气凝胶 的隔热性能,得到了各组分的最佳配比。习常清等<sup>[19]</sup> 探讨了开孔泡沫铝的孔隙率和孔径大小对热传导率 的影响。张涛等<sup>[20]</sup>将泡沫金属结构进行了简化,并将 传热单元分为9个导热层,以热阻分析推导出了整体 有效导热系数与泡沫金属孔隙率的计算式。热防护的 最终目的是要保障飞行器的正常飞行和内部设备温 度不能过高[21-22], 传统陶瓷纤维类隔热材料热导率偏 高, 难以满足新一代高超飞行器对耐高温及高效隔热 的一体化要求。对于中短程飞行器来说,外壁面会承 受短时高热流,在飞行结束时也没有达到热稳定状 态,理论上可以大大地减弱结构的热防护设计,比 如更薄的气凝胶厚度、更高的材料孔隙率以及耐热 温度更低的材料。因此,研究气凝胶的厚度、孔隙 率等对热防护结构隔热特性的影响规律具有重要的 工程意义。

为研究不同热流条件对气凝胶隔热效率的要求, 首先通过理论分析了孔隙率对气凝胶有效热导率的 影响规律。其次,通过数值仿真研究了气凝胶孔隙率 和厚度对隔热效率、气凝胶表面温度的影响规律。最后,研究了热流大小和作用时间对气凝胶厚度和表面 温度的影响,为热防护结构的设计提供数据支撑。

## 1 气凝胶隔热结构的计算模型

### 1.1 气凝胶热防护结构及热仿真模型

以 4340 不锈钢代替飞行器壁板结构,在壁板外 壁涂覆 SiO<sub>2</sub> 气凝胶,如图 1 所示。当外部热流作用 在气凝胶外表面时,热量从气凝胶外表面传递至壁板 内壁。经历一定时间后,要求壁板内壁面的安全温度 不高于 140 ℃,同时对气凝胶外表面温度还有一定要 求。在实际工程中,承受高温的气凝胶需要通过耐高 温无机胶粘贴在基材表面,在热流作用的外表面冷刷 环氧树脂,从而提供强度支持及提升耐温性能。由于 环氧树脂等对热防护结构的综合隔热性能影响较小, 本文在计算过程中不考虑环氧树脂以及无机胶等的 影响。



图 1 气凝胶热防护结构仿真模型 Fig.1 Simulation model of aerogel gel thermal protection structure

本文采用Comsol建立图1对应的二维平面有限元 模型,为计算不同热流条件下满足温度要求的气凝胶 孔隙率和厚度,考虑不同参数条件对隔热效率的影响, 参数取值范围见表 1。本文所用到的材料性能均参考 Comsol材料库。热边界条件为:壁板在长度和深度方 向尺度相对厚度方向的尺寸较大,所以结构左右两侧 无热交换;结构内壁与空气之间的热交换系数为 5 W/(m·K);气凝胶表面受热后,要考虑向周围环境的 热辐射,其发射率取 0.8;环境初始温度为 20 ℃。对 结构划分四边形网格,经验证,在气凝胶与基板局部 加密后的网格与结果无关,网格密度满足收敛要求。

表 1 气凝胶热防护结构要求及参数

Tab.1 Parameters and structural requirements of SiO <sub>2</sub> aerogel					
热流密度/(kW·m <sup>-2</sup> )	热流作用时间/s	气凝胶孔隙率/%	气凝胶厚度/mm	基板厚度/mm	内壁控制温度/℃
50~350	20~120	85~98	0.5~5	10	140

### 1.2 气凝胶孔隙率与传热系数的关系

气凝胶纳米多孔材料的热量传递有气相导热、固

相导热和热辐射 3 种方式。在高温下,气相对流传热 相对较小<sup>[23]</sup>,热辐射与固相传热是气凝胶热传递的主 要方式。气凝胶结构的有效热导率  $\lambda_{eff}$ 可以通过式(1) 计算。

$$\lambda_{\rm eff} = \lambda_{\rm g} + \lambda_{\rm rad} \tag{1}$$

式中: λ<sub>g</sub> 为固相热导率; λ<sub>rad</sub> 为辐射热导率。气 凝胶的热辐射主要与材料的密度、温度和比消光系数 有关, 气凝胶满足光学厚近似条件<sup>[24]</sup>。采用 Rossland 扩散近似方程进行辐射热导的计算,见式(2)。

$$\lambda_{\rm rad} = 16\sigma n^2 T^3 / (3K_{\rm B}\rho) \tag{2}$$

式中:  $K_{\beta}$  为材料的比消光系数,  $K_{\beta}$  越大, 红外 辐射越小;  $\sigma$  为 Boltzmann 常数;  $\rho$  为材料密度, 取 值为 5.67×10<sup>-8</sup> W/(m<sup>2</sup>·K<sup>4</sup>); n 为周围介质的折光率, 低密度材料取值为 1; T 为材料的平均热力学温度。

孔隙结构的固相传热与材料的微观结构及基材 热导率有关,其传热机理较为复杂<sup>[25]</sup>。忽略气凝胶的 微观孔隙结构,对固相传热进行简化,见式(3)。

$$\lambda_{\rm g} = \lambda_{\rm bulk} \left( 1 - \varepsilon \right) \tag{3}$$

式中: λ<sub>bulk</sub> 为基材的热导率; ε 为气凝胶的孔隙 率。根据式(1)可以得到不同孔隙率 SiO<sub>2</sub>气凝胶的 有效热导率和温度之间的关系,分别对比 20 ℃和 1000 ℃时的有效热导率,如图 2 所示。20 ℃时,有 效热导率随孔隙率的增大而降低。1000 ℃条件下, 当孔隙率不超过 96%时,有效热导率随孔隙率的增大 而降低;当孔隙率超过 96%时,有效热导率随着孔隙 率的增大而增大。这是由于孔隙率过大时,辐射热传 导占据主导地位,并且热辐射随温度的升高急剧增大 而引起的。





# 2 结果与讨论

### 2.1 孔隙率的影响

当气凝胶孔隙率为 90%,不锈钢壁板表面涂覆不同厚度的气凝胶在 100 kW/m<sup>2</sup>热流作用 30 s 后,壁板 内壁表面温度随气凝胶厚度的变化如图 3 所示。可以 看出,随着气凝胶厚度的增加,壁板内壁的温度降低。 将厚度精确到 0.01 mm,得到气凝胶厚度为 1.49 mm

时,壁板内壁表面温度满足控制温度的要求,为 139.7℃,此时气凝胶外表面的温度为1011.9℃。由 于不锈钢的热导率相对较高,温度梯度在壁板厚度方 向很小,30s时温度在厚度方向的变化如图4所示。



图 3 90%孔隙率气凝胶在 100 kW/m<sup>2</sup> 热流下不同气凝胶 厚度对应的内壁和气凝胶表面温度





图 4 温度沿厚度方向的变化 Fig.4 Temperature variation in the direction of thickness

热流条件不变,仍为100 kW/m<sup>2</sup> 热流作用 30 s, 分析不同气凝胶孔隙率下满足壁板内壁表面控制温 度要求的气凝胶最小厚度,结果如图 5 所示。从图 5a可以看出,给定热流时,当气凝胶的孔隙率增大, 满足控制温度需要的气凝胶最小厚度逐渐减小。当孔 隙率超过96%时,气凝胶的最小厚度反而增大。这是 由于孔隙率过大时,气凝胶的有效热导率增大而引起 的。不同孔隙率下,满足内壁面温度要求的气凝胶最 小厚度对应的气凝胶表面的温度如图 5b 所示。孔隙 率为 85%时, 气凝胶表面的温度为 998.2 ℃; 孔隙率 为96%时, 气凝胶表面的温度为1023.2℃。可以看 出,考虑不同孔隙率的气凝胶所需要的最小厚度不 同,孔隙率对气凝胶表面的最高温度影响不大。因此, 在实际工程中,为保证气凝胶孔隙结构在高温下不发 生塌陷,如果热流不变,仅调整气凝胶的孔隙率是不 可行的,必须改进气凝胶在高温下的热稳定性。





### 2.2 热流大小和持续时间的影响

由于发射率对材料的组分不敏感,当给定壁板内 壁表面控制温度时,影响气凝胶表面温度的主要是热 流的大小及持续时间。根据上述分析,在给定的气流 下,气凝胶孔隙率为96%时所需的气凝胶厚度最小。 为研究热流的大小和持续时间对隔热结构的要求,取 气凝胶孔隙率为96%,内壁控制温度仍为140℃。

首先,研究热流大小的影响,给定持续时间为 30 s。当热流在 50~350 kW/m<sup>2</sup>变化时,需要的气凝胶 最小厚度逐渐增加,如图 6a 所示。从图 6b 可以看出, 气凝胶外表面的最高温度随热流的增大不断升高。当 热流为 100 kW/m<sup>2</sup>时,气凝胶外表面的温度超过了 1 000 ℃;当热流为 250 kW/m<sup>2</sup>时,气凝胶外表面的 温度超过了 1 500 ℃。

其次,研究热流持续时间的影响,给定热流大 小100 kW/m<sup>2</sup>,当持续时间在20~120 s变化时,气 凝胶最小厚度随持续时间呈近似线性增大,如图 7a 所示。持续时间对气凝胶外表面的影响如图 7b所示。 可以看出,30 s 后气凝胶表面的温度超过了 1 000℃。随后增长逐渐缓慢,到120 s时,温度也不 超过1250℃。





Fig.6 Curvature of the minimum thickness (a) and surface temperature (b) of aerogel that change with the magnitude of heat flux





Fig.7 Curvature of the minimum thickness (a) and surface temperature (b) of aerogel that change with the time of heat flux

从热流大小和时间的影响来看,气凝胶的耐受温度极大地限制了其应用范围。100 kW/m<sup>2</sup> 热流作用 30 s 时,气凝胶表面的温度就已经超过了1000 ℃。 如果需要气凝胶能够承受更高的热流和更长的作用 时间,仅仅通过调整气凝胶的孔隙率和厚度是不可行 的。此时,需要调整气凝胶的组分,或者在气凝胶的 外表面涂覆其他材料(如冷刷环氧树脂),在提升气 凝胶热防护结构耐热性能的同时,还可以为热防护结 构提供强度支持。然而,调整气凝胶组分或在外表面 涂覆其他材料后,热防护结构整体隔热性能又会发生 改变,需要根据本文所述方法,对重组后的热防护结 构隔热特性进行研究。

### 3 结论

本文在对气凝胶孔隙结构有效热导率进行理论 计算的基础上,建立了热防护结构的有限元模型,分 析了 SiO<sub>2</sub>气凝胶孔隙率及厚度对其隔热效率的影响, 并讨论了不同热流和作用时间下气凝胶表面温度的 变化规律,得出如下结论:

 1)常温时气凝胶有效热导率随孔隙率的增大而 减小,但温度为1000℃时,气凝胶的有效热导率随 孔隙率的升高而先下降、后升高,并且在孔隙率为 96%时达到最低。

2)当给定热流和作用时间时,为满足壁板内壁 控制温度的要求,气凝胶的涂覆厚度随孔隙率的增大 而减小。孔隙率对气凝胶外表面的温度影响不大,孔 隙率超过 96%时,隔热性能变差。

3) 热流的大小和作用时间都会对气凝胶表面温 度产生影响。如果结构承受长时间大热流,需要对气 凝胶材料的组分进行改进,以使其结构能够继续隔热。

#### 参考文献:

- 张霞,张晶,柳岩,等. 铌合金表面热防护涂层研究进展[J]. 装备环境工程, 2020, 17(11): 125-131.
   ZHANG Xia, ZHANG Jing, LIU Yan, et al. Progress in Research on Thermal Protective Coatings of Niobium-Based Alloys[J]. Equipment Environmental Engineering, 2020, 17(11): 125-131.
- [2] 时圣波, 王韧之, 严立, 等. 运载火箭尾段防热/承载一体化热防护系统设计及性能分析[J]. 上海航天(中英文), 2020, 37(4): 64-73.

SHI Sheng-bo, WANG Ren-zhi, YAN Li, et al. Design and Property Analysis of Integrated Thermal Protection System for Tail Cabin of Launch Vehicle[J]. Aerospace Shanghai (Chinese & English), 2020, 37(4): 64-73.

[3] 徐世南, 吴催生. 超声速导弹多功能结构设计[J]. 计算机仿真, 2020, 37(5): 45-48.
 XU Shi-nan, WU Cui-sheng. Multi-Functional Structure Design in Supersonic Missile[J]. Computer Simulation,

2020, 37(5): 45-48.

- [4] 吴云峰,熊宴斌,吴俊峰. 运载火箭尾段底板表面凸起物热响应研究[J]. 强度与环境, 2015, 42(1): 31-39.
   WU Yun-feng, XIONG Yan-bin, WU Jun-feng. Study on Thermal Response Performance of Launch Vehicle Protuberance at the Tail and Bottom[J]. Structure & Environment Engineering, 2015, 42(1): 31-39.
- [5] 吴东旭. 多孔材料导热特性研究[D]. 徐州: 中国矿业 大学, 2020.
   WU Dong-xu. Study on the Thermal Conductivity Properties of Porous Materials[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.
- [6] 高庆福. 纳米多孔 SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>气凝胶及其高效隔热复 合材料研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2009. GAO Qing-fu. Nano-Porous Silica, Alumina Aerogels and Thermal Super-Insulation Composites[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009.
- [7] JONES S. Composite Aerogel Multifoil Protective Shielding[R]. NASA Tech Briefs, 2013.
- [8] Keller K, Pfeiffer E, Handrick K, et al. Advanced high temperature insulations[C]//Proceedings of 5th European Workshop on Thermal Protection Systems and Hot Structures. Netherlands: [s. n.], 2006.
- [9] HUGHES S, CHEATWOOD F, DILLMAN R, et al. Hypersonic Inflatable Aerodynamic Decelerator (HIAD)Technology Development Overview[C]//21st AIAA Aerodynamic Decelerator Systems Technology Conference and Seminar. Virginia: AIAA, 2011.
- [10] 孟松鹤,杨强,霍施宇,等.一体化热防护技术现状和 发展趋势[J]. 宇航学报, 2013, 34(10): 1295-1302.
  MENG Song-he, YANG Qiang, HUO Shi-yu, et al. State-of-Arts and Trend of Integrated Thermal Protection Systems[J]. Journal of Astronautics, 2013, 34(10): 1295-1302.
- [11] 邹军锋,李文静,刘斌,等.飞行器用热防护材料发展 趋势[J]. 宇航材料工艺, 2015, 45(4): 10-15.
   ZOU Jun-feng, LI Wen-jing, LIU Bin, et al. Development of Thermal Protection Materials for Aircraft[J]. Aerospace Materials & Technology, 2015, 45(4): 10-15.
- [12] 孙学文. 高超声速气动热预测及热防护材料/结构响应研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2020. SUN Xue-wen. Prediction of the Aerodynamic Heating and the Response of Thermal Protection Material/Structure in Hypersonic[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2020.
- [13] MADYAN O A, FAN Mi-zi, FEO L, et al. Enhancing Mechanical Properties of Clay Aerogel Composites: An Overview[J]. Composites Part B: Engineering, 2016, 98: 314-329.
- [14] 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 Yan ging HANG Yong gang FENG Jian et al Pro-

QIN Yan-qing, JIANG Yong-gang, FENG Jian, et al. Progress in Research on the Use of Infrared Opacifiers in Silica Aerogel[J]. Materials Review, 2015, 29(11): 129-132.

- [15] WEI Te-yu, LU S Y, CHANG Yu-cheng. A New Class of Opacified Monolithic Aerogels of Ultralow High-Temperature Thermal Conductivities[J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2009, 113(17): 7424-7428.
- [16] 张君君,仲亚,沈晓冬,等.氧化钇掺杂块状 SiO<sub>2</sub>气凝 胶的制备与表征[J]. 无机化学学报,2014,30(4):793-799.
  ZHANG Jun-jun, ZHONG Ya, SHEN Xiao-dong, et al. Properties and Characterization of SiO<sub>2</sub> Monolithic Aerogels Doped with Yttrium[J]. Chinese Journal of Inorganic Chemistry, 2014, 30(4): 793-799.
- [17] 吕双祺, 李想, 左渝钰, 等. 气凝胶隔热复合材料在空 天飞行器热防护技术中的应用[J]. 飞航导弹, 2020(5): 19-25.

(LÜ/LV/LU/LYU) S Q, LI Xiang, ZUO Yu-yu, et al. Application of Aerogel Insulation Composite Material in Thermal Protection Technology of Space and Space Aircraft[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2020(5): 19-25.

- [18] 周红梅. 泡沫金属与三元气凝胶复合材料隔热性能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2020.
   ZHOU Hong-mei. Study on Thermal Insulation Performance of Foam Metal and Ternary Aerogel Composite[D].
   Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [19] 习常清,李志强,敬霖,等.开孔泡沫金属热传导性能的理论研究与数值模拟[J].稀有金属材料与工程, 2014,43(3):686-691.

XI Chang-qing, LI Zhi-qiang, JING Lin, et al. Theoretical Study and Numerical Simulation of Effective Thermal Conductivities of Open-Cell Metallic Foam[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2014, 43(3): 686-691.

[20] 张涛, 余建祖. 相变装置中填充泡沫金属的传热强化 分析[J]. 制冷学报, 2007, 28(6): 13-17. ZHANG Tao, YU Jian-zu. Analysis on Thermal Conductivity Enhancement for PCM Embedded in Metal Foam[J]. Journal of Refrigeration, 2007, 28(6): 13-17.

- [21] 锁浩, 王伟, 江胜君, 等. 耐高温气凝胶隔热材料研究 进展[J]. 上海航天, 2019, 36(6): 61-68.
  SUO Hao, WANG Wei, JIANG Sheng-jun, et al. Research Progresses on High Temperature Resistant Aerogel Insulation Materials[J]. Aerospace Shanghai, 2019, 36(6): 61-68.
- [22] 王东伟,王志瑾.高超声速飞行器气动热流载荷数据 高效传递及包络处理方法[J]. 航天器环境工程,2020, 37(4): 336-341.
  WANG Dong-wei, WANG Zhi-jin. Modified Method for Transferring the Aerodynamic Heat Flow Data for Hypersonic Vehicles and an Enveloping Algorithm[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2020, 37(4): 336-341.
- [23] 魏高升,张欣欣,于帆. 超级绝热材料气凝胶的纳米孔 结构与有效导热系数[J]. 热科学与技术, 2005, 4(2): 107-112.
  WEI Gao-sheng, ZHANG Xin-xin, YU Fan. Nano-Porous Structures and Effective Thermal Conductivity of Aerogel Super Insulator[J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2005, 4(2): 107-112.
- [24] 何雅玲,谢涛. 气凝胶纳米多孔材料传热计算模型研究进展[J]. 科学通报, 2015, 60(2): 137-163.
  HE Ya-ling, XIE Tao. A Review of Heat Transfer Models of Nanoporous Silica Aerogel Insulation Material[J]. Chinese Science Bulletin, 2015, 60(2): 137-163.
- [25] XIE Tao, HE Ya-ling, HU Zi-jun. Theoretical Study on Thermal Conductivities of Silica Aerogel Composite Insulating Material[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, 58(1-2): 540-552.

责任编辑:刘世忠