

引文格式:袁子,陈果,周段亮,等.超顺排碳纳米管薄膜堆叠体超高温高性能绝热材料在多种极端场景中的应用探索[J].航空制造技术,2026,69(17):25010175.

YUAN Zi, CHEN Guo, ZHOU Duanliang, et al. Application exploration of super-aligned carbon nanotube stacked films as thermal insulation materials in extreme conditions[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2026, 69(17): 25010175.

超顺排碳纳米管薄膜堆叠体超高温高性能绝热材料在多种极端场景中的应用探索

袁子¹,陈果¹,周段亮¹,柳鹏¹,姜开利^{1,2,3}

(1.清华大学物理系,低维量子物理国家重点实验室,北京100084;

2.清华大学量子信息前沿科学中心,北京100084;

3.北京未来芯片技术高精尖创新中心,北京100084)

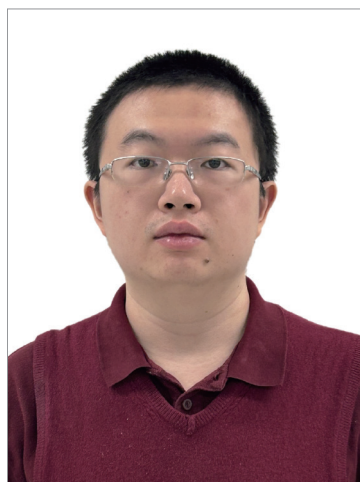
[摘要] 超顺排碳纳米管薄膜堆叠体(SACNT-SF)凭借自身纳米级碳管直径、高度各向异性的多孔结构、超低密度以及 sp^2 碳的高消光系数和热稳定性,在宽温域内展现出卓越的热绝缘性能。基于前期基础研究,本文系统介绍了SACNT-SF的基本物性及其宽温域绝热机理,并进一步探讨了该材料在工程应用领域的潜力。SACNT-SF具备优异的柔韧性与可成型性,能够通过缠绕成型工艺实现与复杂异形表面的共形包裹。为拓展SACNT-SF的适用环境,本研究采用包覆氧化铝保护层工艺,提升了材料在空气中的工作温度与抗灼烧性能。通过将SACNT-SF作为绝热层集成于微型超高温管式炉,实现了工作温度达3000℃时功耗仅110W。SACNT-SF在极端高温环境下的卓越性能将为航空航天及相关领域下一代热防护材料的研发提供新的解决方案。

关键词: 碳纳米管;绝热材料;高温材料;碳纳米材料;热防护

中图分类号: V2; TB321; TB35

文献标志码: A

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.25010175



袁子

博士后,研究方向为碳纳米管表征及应用。

随着航空航天技术向高超声速、长航时方向不断发展,飞行器热防护系统面临着日益严峻的超高温环境挑战。当飞行速度超过5Ma时,气动加热效应可使飞行器表面温度达到2000℃以上,这对热防护材料的耐温极限、隔热效率及可靠性提出了极高要求。研发能够在宽温域(室温至3000℃)内保持稳定高效隔热性能的新型材料,已成为突破下一代空天装备技术瓶颈的关键之一。

目前,广泛使用的高温隔热材料^[1]主要包括多孔陶瓷纤维^[2-5]、气凝胶^[6-9]、发泡材料^[10-11]及石墨毡等。这类材料在中低温范围内表现出良好的隔热性能,但在极端高温环境下,其性能会显著衰退。例如,陶瓷纤维材料在长时间超过1500℃的工况下易发生烧蚀脆化;石墨毡虽可耐受更高温度,但自身热导率会随温度升高而急剧增大,且在氧化环境中稳定性差^[12-13]。此外,传统隔热材料

收稿日期:2025-11-25;退修日期:2025-12-16;录用日期:2026-01-19

基金项目:国家重点研发计划(2024YFA1210601,2018YFA0208400);国家自然科学基金(51788104,51727805);清华大学(北京)未来芯片技术高精尖创新中心,真空电子技术国家重点实验室,中国博士后科学基金(2025M780093)

通信作者:柳鹏,副研究员,博士,研究方向为低维碳纳米材料电子学、电子与材料作用机制及真空电子学。

姜开利,教授,博士,研究方向为碳纳米管生长机理、可控合成、物性及应用。

通常呈刚性或半刚性板状,难以适配现代飞行器日益复杂的异形曲面结构,在实现轻量化、共形集成方面存在固有局限。

针对上述挑战,超顺排碳纳米管薄膜堆叠体(SACNT-SF)作为一种新兴的碳基纳米绝热材料,展现出独特优势^[14]。SACNT-SF以其纳米级碳管直径(10~20 nm)、高度各向异性的多孔网络结构、超低密度(可低至 2 kg/m^3)以及 sp^2 碳键的高消光系数等特性,使之能够协同抑制热传导、气体对流与辐射传热这3种热量传递路径。本课题组前期的基础研究工作表明,SACNT-SF在真空环境中从室温至 $2600\text{ }^\circ\text{C}$ 的宽温域内,均能保持超低的有效热导率(室温 $0.004\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; $2600\text{ }^\circ\text{C}$ 时 $0.03\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$),性能显著优于传统绝热材料。同时,材料固有的柔韧性为在复杂曲面上的共形包裹提供了可能。

尽管SACNT-SF的隔热性能卓越,但此材料从实验室走向工程应用仍面临两大关键问题:一是如何实现材料在复杂构件上规模化的可控成型制造;二是如何提升其在富氧环境中的长期工作稳定性。现有研究多集中于材料本身的性能表征,对其工程化工艺路径和特定应用场景下性能验证的探索尚显不足。

基于此,本文旨在系统介绍SACNT-SF材料体系的基础上,重点突破其

工程化应用的关键技术。全文主要围绕以下3个部分展开:首先,基于本课题组已发表的SACNT-SF基础研究工作^[14],系统介绍其制备方法、基本物性及宽温域绝热机理,为国内相关领域研究人员全面阐述这一新型材料的本征特性;其次,重点探讨SACNT-SF的工程应用潜力,包括开发适用于异形表面的缠绕成型工艺、通过表面沉积氧化物保护层以提升抗氧化性能的策略,以及构建基于SACNT-SF绝热层的微型化低功耗超高温管式炉进行应用验证;最后,对SACNT-SF在极端高温环境下的技术价值与应用前景进行总结与展望,以期为我国新一代空天装备的热防护技术发展提供从材料到构件的一体化解决方案。

1 SACNT-SF的制备、性能与绝热机理

本章内容基于本课题组已发表的研究成果进行总结与改编,旨在为国内相关领域研究者提供关于超顺排碳纳米管薄膜堆叠体(SACNT-SF)基础特性的系统化阐述。原研究首次报道了SACNT-SF在宽温域内(室温至 $2600\text{ }^\circ\text{C}$)的超低热导率特性及其微观机理。作为全文的基础理论章节,本章将系统阐述SACNT-SF从材料制备到性能优化的完整知识体系,旨在为后续章节的工程应用探

索奠定理论基础。

1.1 材料制备

SACNT-SF的制备始于SACNT阵列的合成,进而通过抽膜-堆叠工艺实现从阵列到薄膜再到堆叠体材料的转化。本小节将基于本课题组已建立的方法体系,系统介绍SACNT-SF的制备流程。

SACNT阵列采用低压化学气相沉积法(LPCVD)制备,以铁纳米颗粒作为催化剂,乙烯或乙炔为碳源,氩气为载气,在硅片或石英衬底上进行生长^[15-17]。

SACNT薄膜通过从SACNT阵列中直接抽拉获得,如图1(a)所示^[14]。该过程的物理基础在于SACNT阵列中碳纳米管之间存在较强的范德华力,且碳纳米管具有高度取向性。当使用镊子或其他工具从阵列中夹取碳纳米管时,并非获得离散的管束,而是借助碳纳米管之间范德华力的连续传递作用,使相邻碳纳米管被依次拉出,首尾相连形成连续、自支撑的薄膜^[17-18]。单层SACNT薄膜的厚度为数十纳米,面密度约为 20 mg/m^2 。在现有工艺条件下,可在石英衬底上制备最大尺寸为 $550\text{ mm}\times 300\text{ mm}$ 的SACNT阵列,并由此抽拉出宽度为 550 mm ,长度约 300 m 的连续SACNT薄膜。

SACNT-SF的最终成型主要采用两种方式:一是将SACNT薄膜直

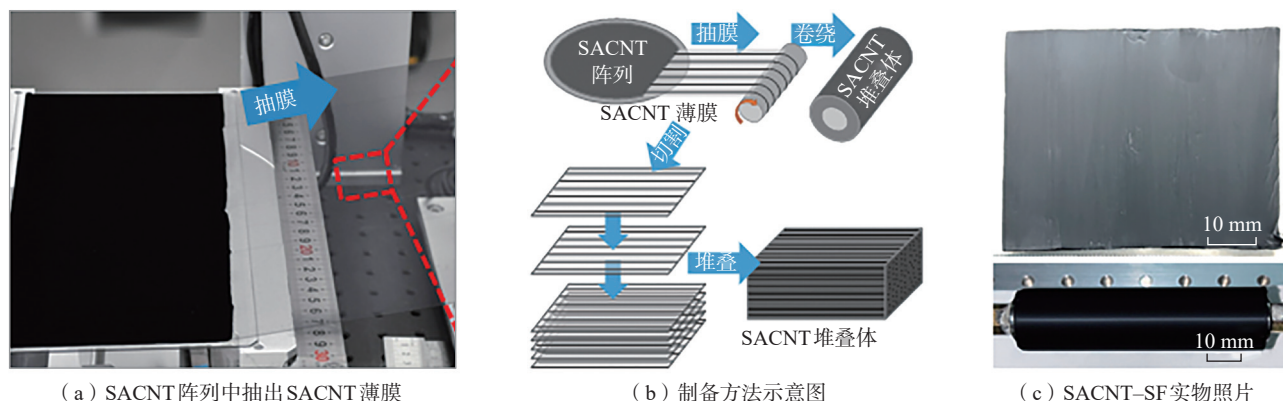


图1 SACNT-SF制备方法^[14]
Fig.1 SACNT-SF fabrication method^[14]

接堆叠;二是将薄膜连续卷绕于圆柱形芯模表面。其制备过程示意图如图1(b)所示^[14],两种方法所得样品的实物照片如图1(c)所示^[14]。通过控制堆叠层数或缠绕圈数,可按需调控SACNT-SF的厚度与密度,SACNT-SF密度通常在 $5\sim 100\text{ kg/m}^3$ 范围内可调,最低可达 2 kg/m^3 ,以适应不同应用场景的需求。该制备工艺赋予SACNT-SF良好的形状适应性,使之能够贴合多种复杂几何表面,为后续工程应用提供了重要便利。

1.2 基本物性

SACNT-SF的宏观性能与自身独特的微观结构密切相关。本节基于已有研究,系统介绍SACNT-SF在绝热性能、热稳定性、力学性能以及微观结构4个方面的基本物性,为在极端环境中的应用提供理论依据。

在垂直于SACNT薄膜方向,SACNT-SF表现出优异的绝热性能。在真空环境中,其室温热导率可低至 $0.004\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$;在 $2600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 高温下有效热导率也仅为 $0.03\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$,性能显著优于传统隔热材料。对比试验表明,0.6 mm厚SACNT-SF的隔热效果优于3.5 mm厚石墨毡。将5 mm厚SACNT-SF包裹在石墨棒外,当石墨棒被电流加热至 $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,其外表面可直接徒手触摸,显示出良好的隔热能力。

SACNT-SF具备优异的热稳定性与可靠性。SACNT-SF在惰性气氛中可耐受 $3000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 高温;在真空中耐受温度达 $2600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。经过310次从室温至 $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的热循环后,材料热阻衰减率低于5%,表现出卓越的抗热冲击性能。SACNT-SF还具有良好的阻燃性,在 $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 明火灼烧下仅发生缓慢氧化,且无烟尘产生,为高温应用提供安全保障。在空气环境中,SACNT-SF与石墨类似,约在 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 开始氧化。

在力学性能方面,SACNT薄膜凭借其纳米级厚度而具备良好柔韧

性,可连续、共形地附着于不同形状表面,适用于复杂形貌的共形隔热层。沿碳纳米管轴向,单层SACNT薄膜的抗拉强度约为 13 N/m ,比强度约为 $600\text{ MPa}/(\text{g}/\text{cm}^3)$ 。SACNT-SF的典型密度范围为 $2\sim 200\text{ kg/m}^3$,其抗拉强度相应为 $1\sim 100\text{ MPa}$ 。在 $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 高温下,SACNT-SF的抗拉强度约为室温条件下的50%。在垂直于碳管方向,材料在受压时发生弹性变形,但当压缩量超过约20%后,会产生塑性变形。利用这一特性,可通过压缩调控SACNT-SF的密度,从而调节其绝热性能以适应不同工况需求。

扫描电子显微镜(SEM)图像显示(图2(a)),SACNT-SF中碳纳米管沿抽膜方向高度取向排列,离散傅里叶变换分析表明,碳纳米管取向分布的半高宽约为 5° ,显示出高度一致的取向性。透射电子显微镜(TEM)图像显示SACNT-SF中碳纳米管直径范围为 $10\sim 20\text{ nm}$ (图2(b)),碳管之间通过局部束状结构相互连接,形成三维网络结构。这种高度各向异性的网络结构是SACNT-SF在特定方向上表现出优异绝热性能的关键原因。

1.3 SACNT-SF绝热机理——纳米结构赋能高效绝热

石墨烯和碳纳米管作为典型的高导热碳纳米材料,其热导率可与金刚石相媲美。但由碳纳米管构筑的SACNT-SF却表现出截然不同的宏观传热特性,在从室温至 $3000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的宽温域内展现出优异绝热性能。

SACNT-SF的绝热特性主要源于其独特的纳米结构能够协同抑制3种主要的热量传递途径:固体热传导、辐射传热及气体传热。

在固体热传导方面,较低的热导率归因于材料内部高度各向异性排列的碳纳米管所形成的“之”字形传热路径。当热量沿垂直于薄膜方向传导时,需曲折通过取向排布的碳纳米管,导致有效传导路径远大于表观厚度,显著增大热阻。同时,SACNT-SF具有低密度特性,固体占比较小,有效减少了传热路径的有效截面积。因此,尽管组成单元碳纳米管本身具有极高的本征热导率,但其所构建的三维网络宏观体却表现出极低的固体热导率。

在高温条件下,辐射传热逐渐成为主导。SACNT-SF通过3种机制高效抑制辐射传热:第1种,极大的比表面积增强了对红外波段光子的吸收与散射作用;第2种,碳纳米管具有良好的导电性,其中的自由电子可高效吸收和散射热辐射;第3种,碳纳米管电子能带结构中存在的范霍夫奇点使之在红外波段具备高的光吸收效率,该波段恰与高温热辐射波段相重合。因此,SACNT-SF在保持高消光系数的同时,仍具有较低的固体热导率,克服了传统绝热材料难以兼顾高消光与低导热的矛盾。

在气体传热方面,SACNT-SF内部的纳米级孔隙可有效抑制气体对流传热。同时,其孔隙尺寸与气体分子平均自由程相当,克努森效应显著

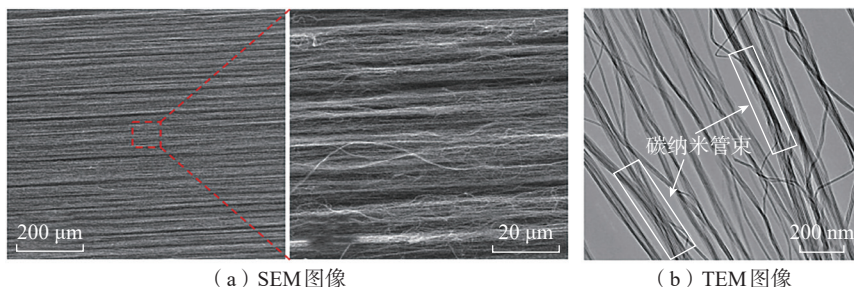


图2 SACNT-SF电子显微图像

Fig.2 Electron microscope image of SACNT-SF

(Knudsen effect, 指当多孔介质特征孔径与气体分子平均自由程相当时, 气体分子与孔壁碰撞频率显著增加, 使表观气体热导率低于其本体值的现象)。当气压降至 10 kPa 以下时, SACNT-SF 中气体传热贡献可被基本抑制。

SACNT-SF 通过自身纳米尺度结构设计, 实现了对固体导热、辐射传热及气体传热 3 种途径的协同抑制, 这是其具备超宽温域高效绝热能力的物理基础。

1.4 SACNT-SF 绝热性能优化途径

基于对 SACNT-SF 绝热机理的理解, 其绝热性能可通过调控材料的结构参数进行优化。本节重点介绍两种优化策略: 材料密度的理性调控与碳纳米管取向的优化设计, 以实现在特定工作条件下绝热性能的最优化。

1.4.1 密度调控

SACNT-SF 的总热导率由固体骨架导热、辐射传热及气体传热 3 部分共同贡献。三者随材料密度的变化呈现不同趋势。固体热导率通常随密度增加而近似线性增大; 而辐射传热与气体传热则因结构更为致密、消光能力增强以及克努森效应更为显著而降低。这种相反的依赖关系导致总热导率与密度之间呈现非单调的非线性特征, 因而存在一个使总热导率最低的最佳密度值。在室温附近, 辐射传热贡献较弱, 固体导热占主导地位, 此时低密度 SACNT-SF 通常表现出更优的隔热性能; 而在高温条件下(如超过 1000 °C), 辐射传热急剧增强并成为主导机制, 适当提高密度可增强对辐射传热的抑制, 其收益超过固体导热增加带来的负面影响, 因此高温下的最优密度值向高密度方向偏移。上述机理表明, 针对不同应用场景的工作温度, 可通过理性调控 SACNT-SF 的密度, 实现其绝热性能的定制化提升。

1.4.2 碳纳米管取向调控

碳纳米管在 SACNT 薄膜中具

有高度取向性, 且沿其长度方向具有良好的导电性。因此, 碳纳米管对不同偏振的辐射具有选择吸收特性。当光子的电场矢量方向平行于碳纳米管时, 其吸收性能较强; 当电场矢量方向垂直于碳纳米管时, 吸收性能则较弱。类比偏振片的工作原理, 在堆叠 SACNT 薄膜时, 若使相邻层中碳纳米管的取向相互垂直, 相较于平行堆叠方式, 可有效降低辐射透过率, 从而进一步抑制辐射传热。试验结果表明, 采用相邻层间具有一定夹角的 SACNT 薄膜堆叠方式所制备的 SACNT-SF, 其热导率较完全平行取向堆叠时有明显下降。

2 SACNT-SF 的工程化制造与极端场景应用探索

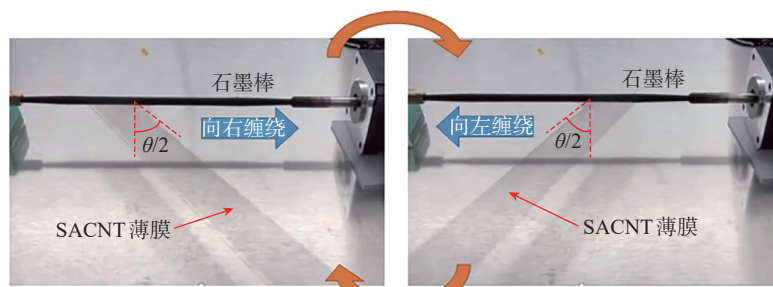
在系统掌握 SACNT-SF 材料本征特性与绝热机理的基础上, 本章重点开展其工程化制造与极端场景应用探索。针对航空航天等领域对热防护材料在复杂异形表面适配、高温有氧环境耐受及空间受限场景中的特殊需求, 围绕 3 个方向展开研究工作: 首先考察缠绕成型工艺在复杂构件制造中的适用性; 其次探索表面改性策略对提升材料抗氧化性能的潜力; 最后通过微型高温炉的集成示

范验证其在实际工况下的隔热效能。这些探索性研究为厘清 SACNT-SF 从材料走向工程应用的关键技术挑战提供了依据, 初步验证了 SACNT-SF 材料体系在极端场景下的应用潜力, 为后续面向具体应用场景的深入研发与技术优化奠定基础。

2.1 面向异形表面的 SACNT-SF 缠绕成型工艺

缠绕成型工艺作为一种成熟的纤维增强复合材料制造技术, 为 SACNT-SF 在复杂异形表面的共形包裹提供了可行的工程化路径。该工艺的核心在于通过连续、可控的方式将纤维材料定向排布于模具表面, 从而形成具有特定几何形状和结构完整性的构件。基于 SACNT 薄膜优异的柔韧性和宏观尺度下的连续性, 借鉴并发展适用于其特性的缠绕成型方法, 是实现 SACNT-SF 从基础材料研究走向实际工程应用的关键一步。

为实现 1.4.2 节中理论分析所揭示的通过调控相邻 SACNT 薄膜层间夹角以优化辐射隔热性能的目标, 需发展相应的制备技术。本研究受碳纤维及玻璃纤维缠绕成型工艺的启发, 采用了如图 3 (a) 所示的往复缠绕工艺。具体操作流程如下: 在将 SACNT 薄膜缠绕于目标芯模(如石



(a) 工艺示意图



(b) 石墨棒上往复缠绕工艺制备的 SACNT-SF

图3 缠绕成型工艺制备 SACNT-SF

Fig.3 SACNT-SF fabricated by filament winding process

墨棒)表面时,首先使薄膜的取向与芯模表面法向保持 $\theta/2$ 夹角进行缠绕。当缠绕至芯模一端时,随即改变缠绕方向,如此往复循环。在此过程中,单层 SACNT 薄膜在芯模表面呈螺旋状路径排布,而相邻两层薄膜之间的取向夹角则控制在 θ 。通过这种可控的缠绕方式,能够有效地实现 SACNT-SF 内部结构的定向设计,以满足特定的热学性能需求。图 3(b)则展示了通过此往复缠绕工艺在石墨棒上制备的 SACNT-SF 样品。

为了进一步展示 SACNT-SF 缠绕成型工艺在复杂结构上的应用潜力,本研究选取了一款具有复杂曲面的异形零件作为示范对象,如图 4 所示。SACNT-SF 凭借其纳米级厚度所带来的极佳柔韧性,能够完美地贴合此类复杂几何表面,实现共形包裹。此特性使得 SACNT-SF 作为一种高性能隔热材料,有望应用于现代航空航天器、动力系统等装备中各类异形热端部件的热防护层,为解决复杂构件在极端高温环境下的隔热难题提供了新的技术途径。

通过调控缠绕角度、张力、层数等参数,可以有效控制所制备 SACNT-SF 构件的密度、厚度及层间结构,进而调控其绝热性能。这种可调控性为实现材料隔热性能的“定制化”奠定了基础,使其能够更好地适应不同应用场景下的特定需求。

2.2 基于表面沉积氧化物的

SACNT-SF 抗氧化性能提升策略

SACNT-SF 作为一种碳基材料,在空气环境中高温下易发生氧化反应。热重分析结果显示其起始氧化温度约为 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$,一定程度上限制了材料本身在富氧高温这一极端场景下的应用。为解决此瓶颈,本研究采用表面工程改性策略,通过在碳纳米管表面构建一层致密的耐高温保护层,来有效提升其抗氧化性能

原子层沉积 (ALD) 是一种基于

表面自限制、交替反应的薄膜沉积技术,能够通过前驱体的交替脉冲,在复杂三维结构表面实现原子级精度的薄膜生长。该技术最突出的优点在于其优异的共形沉积能力,即能够在具有高深宽比的复杂孔隙结构内部,以及像 SACNT-SF 这类由纳米纤维构成的多孔材料的所有暴露表面上实现均匀、无孔且厚度精确可控的薄膜包覆。这使得它非常适合用于对 SACNT-SF 进行整体性、无损的表面改性,从而在最大限度保持其原有纳米多孔结构和低密度特性的前提下,赋予其新的表面功能。

氧化铝具有良好的高温稳定性、优异的阻隔性能,并且是 ALD 技术中工艺最为成熟且应用广泛的材料体系之一,便于进行工艺验证和重复。因此本研究采用 ALD 工艺在 SACNT-SF 上沉积氧化铝保护层。如图 5(a)所示,沉积完成后 SACNT-SF 的外观由黑色转变为灰

色;如图 5(b)所示,SEM 图像显示,经过约 50 nm 厚度的氧化铝包覆后, SACNT-SF 中纤维直径从原始的 $10\sim 20\text{ nm}$ 增加至约 100 nm ,保护层均匀完整地包裹在碳纳米管表面。

抗氧化性能测试结果(图 6)显示,沉积了 50 nm 厚氧化铝保护层的单层 SACNT 薄膜和 SACNT-SF 样品,在空气中均能耐受长时间的丁烷火焰(超过 $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$)灼烧,仅发生缓慢的表面变化,表明沉积了保护层的样品的抗氧化性能和热稳定性得到了显著提升。

然而,表面保护层会在一定程度上损失材料的绝热性能。结合 1.3 节所述的 SACNT-SF 绝热机理进行分析可知,保护层增加了固体骨架的密度和热导率,会在一定程度上增强固体热传导。此外,纤维直径的增大会轻微改变材料的纳米孔隙结构,可能对抑制气体传热和辐射传热的效果产生复杂影响。因此,在实际应用中



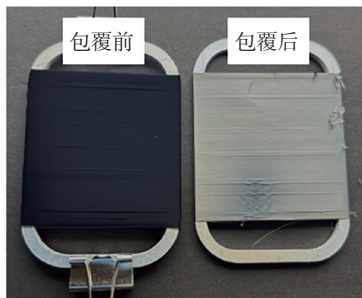
(a) 原始状态异形零件



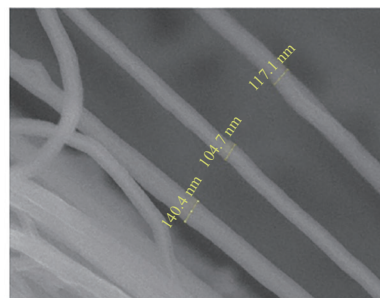
(b) 表面包裹 SACNT-SF 后的异形零件

图 4 异形零件表面共形制备的 SACNT-SF

Fig.4 SACNT-SF conformally fabricated on an irregular-shaped component



(a) SACNT-SF (左) 和沉积氧化铝的 SACNT-SF (右)



(b) 沉积氧化铝的 SACNT-SF 的 SEM 图像

图 5 ALD 氧化铝的 SACNT-SF

Fig.5 SACNT-SF with ALD alumina

需要在抗氧化性能与绝热效能之间进行权衡优化。表面保护层在包覆碳纳米管时,也会作为“黏接剂”增强碳纳米管之间的相互作用并增加纤维的直径,因此会在一定程度上提升 SACNT-SF 的强度和刚性。

SACNT-SF 表面沉积的无机氧化物保护层在提升其抗氧化性能的同时,也会对材料的热学和力学性能产生一定影响。从热学性能角度看,氧化物沉积层增加了固体组分的体积分数,可能会在一定程度上提高材料的固体热导率。然而,沉积层同时会细化材料的孔结构,增强克努森效应,从而有利于抑制气相传热。沉积层引入的额外界面还能增强对热辐射的散射作用,这对高温下的绝热性能有益。力学性能方面,氧化物沉积会在碳纳米管表面形成刚性壳体,适度提升材料的刚度和压缩强度,但可能会在一定程度上降低其柔韧性。因此,在工程应用中需要综合考虑抗氧化性能提升与热力学性能变化的平衡,通过优化沉积厚度和工艺参数寻求最佳性能匹配。

除氧化铝外,ALD 技术还可用于沉积多种其它功能材料,未来可进一步探索沉积具有其他特性的保护层材料,例如碳化钎等超高温陶瓷材料。这类材料具有更高的熔点和更好的高温稳定性,有望通过抑制碳纳米管在极高温下的升华过程,从而进一步提升 SACNT-SF 在惰性气氛或真空中的极限使用温度。

利用 ALD 技术进行表面氧化物沉积是提升 SACNT-SF 环境适应性的有效策略,本研究验证了氧化铝保护层的可行性,为该材料在更广阔工况下的应用提供了技术参考,同时也指明了通过优化保护层材料进一步提升其性能的潜在方向。

2.3 基于 SACNT-SF 绝热层的微型超高温炉构建与性能验证

为探索 SACNT-SF 在空间和重量受限的极端场景(如航空器热管

理、小型试验卫星载荷等)中的应用潜力,本研究设计并构建了一款基于 SACNT-SF 绝热层的微型超高温管式炉。该装置既可作为高温测试平台,其自身也是对 SACNT-SF 在微型化高温装备中应用能力的直接验证。

与现有商业化管式炉相比,本研究开发的微型超高温炉在结构和性能上具有显著优势。传统商用管式炉通常采用陶瓷或石墨纤维以及多层金属辐射屏作为绝热材料,由于这些材料的热导率相对较高,为实现在

高温环境的工作需求,需要采用数厘米至数十厘米厚的绝热层,导致设备体积庞大、质量较重、热惯性大。本研究基于 SACNT-SF 在高温下极低的热导率特性,使装置仅需 2.5 mm 厚的绝热层即可有效抑制热量散失,从而实现了微型化与轻量化设计。

微型超高温管式炉结构示意图如图 7(a)所示。该装置以高纯石墨管(长度为 60 mm,外径为 3 mm,内径为 1.6 mm)作为发热体兼炉腔,通过缠绕成型工艺在其外表面制备

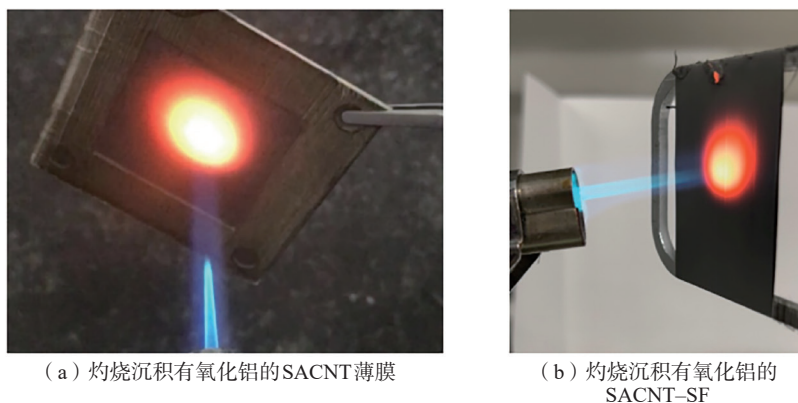
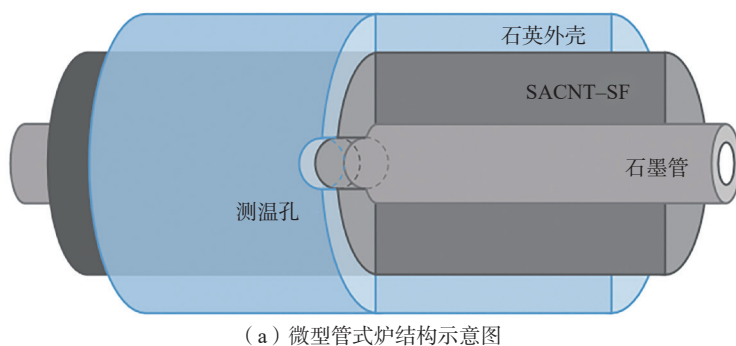


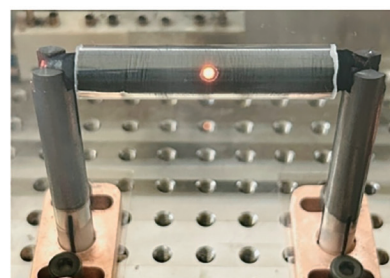
图 6 灼烧沉积有氧化铝的 SACNT
Fig.6 Calcination of SACNT film with deposited alumina



(a) 微型管式炉结构示意图



(b) 微型管式炉实物图



(c) 处于高温工作状态的微型管式炉

图 7 基于 SACNT-SF 绝热层的微型超高温管式炉
Fig.7 Micro high-temperature tubular furnace with SACNT-SF thermal insulation layer

了厚度为 2.5 mm 的 SACNT-SF 绝热层。采用激光切割工艺在绝热层中部加工测温孔后,将部件同轴封装于石英护套内。该微型炉的核心部分(不含石英护套)质量仅为 0.5 g。实物图如图 7 (b) 和(c) 所示。

性能测试结果表明(图 8), 在 10 kPa 的氩气环境中,该微型炉仅需 110 W 的加热功率即可将炉体温度升至 3000 °C,升温时间不足 1 min,表现出极快的热响应速度。作为对比,相同尺寸的无绝热层石墨管在同等条件下需要约 4000 W 的功率才能达到相同温度,集成 SACNT-SF 绝热层后功耗降低了 97% 以上。

这种低功耗、快速响应的特性使该微型炉特别适用于能源受限的移动或航天应用场景。其小型化设计不仅为材料的高温性能测试提供了便携式解决方案,也凸显了 SACNT-SF 在实现设备微型化方面的独特价值。本小节中的研究通过微型超高温炉的构建,验证了 SACNT-SF 在极端高温、空间约束条件下的工程适用性。为开发适用于航空航天领域的小型化、高效率热管理装备提供了新的技术路径,也为 SACNT-SF 在更多特殊环境下的应用拓展了可能性。

2.4 SACNT-SF 应用前景与挑战

基于对 SACNT-SF 材料特性的系统认识及相关工程化验证的推进,该材料在极端环境中的应用前景日

益清晰。本节将深入探讨此材料在航空航天、能源装备、电子器件等领域的应用潜力,分析当前面临的关键技术挑战,并展望可能的解决路径。

在航空航天领域, SACNT-SF 的特性与高超声速飞行器、可重复使用航天器的热防护需求高度契合。对于马赫数超过 5 的飞行器,气动加热可使表面温度达到 2000 °C 以上,传统陶瓷基隔热材料面临烧蚀脆化和质量过大的双重挑战。SACNT-SF 的优异热稳定性和超低热导率为解决此难题提供了新途径,可将其应用于飞行器前缘、发动机热端部件等局部高温区域,通过 2.1 节演示的缠绕成型工艺实现与复杂曲面的共形包裹。例如,在进气道唇口、机翼前缘等部位,利用 SACNT-SF 柔韧性可实现与传统碳碳复合材料的一体化集成,形成梯度隔热结构。经过抗氧化改性的 SACNT-SF 还具有直接作为再入时热防护和耐烧蚀材料的应用潜力。

在航天器推进系统方面, SACNT-SF 的轻质特性具有显著优势。液体火箭发动机推力室、喷管等部位对隔热材料的质量极为敏感,减轻的每一公斤载荷均可带来可观的经济效益。本研究构建的微型管式炉已验证了 SACNT-SF 在 3000 °C 下的隔热能力,为其在火箭发动机隔热方面的应用提供了技术依据。未来研究中需要开展针对性的试验验证,包括在模拟推进剂环境中的化学相容性研究,以及在高加速度、剧烈热震条件下的结构完整性测试。

SACNT-SF 在能源装备中同样展现出应用潜力。在第四代核反应堆系统中,高温气冷堆的隔热材料需要耐受 1000 °C 以上的长期服役温度。SACNT-SF 的热稳定性和抗辐照性能(碳纳米管基材料本身具有良好的抗辐照性)使之成为潜在候选材料。在聚变堆领域,面向等离子体部件中的热障材料面临粒子流和高热负荷

的双重挑战, SACNT-SF 的各向异性热导特性可能为定向热管理提供新思路。

在电子器件热管理方面, SACNT-SF 的柔性和低热导率特性可用于高端芯片的三维封装隔热层。随着芯片功率密度的不断提升,局部热点成为制约性能的关键因素,在发热单元之间插入超薄隔热层可能成为热设计的有效手段。

在储能领域,锂离子电池系统在实际运行中面临热失控连锁反应的风险。为抑制单体热失控蔓延至整个电池组,可在电池单体间布置 SACNT-SF 作为热屏障材料。此材料具备的低热导率和不易燃特性,可有效延缓热能在单体之间的传递,从而提升电池系统的整体安全性能。SACNT-SF 所具有的各向异性导热特性,使之在实现有效隔热的同时,能够抑制局部热点的形成。结合 SACNT-SF 材料轻质和可柔性成型的优点,可在有限空间内实现高效热隔离,展现出在航空航天电源热管理等高端领域的应用潜力。

在性能优化方面,未来研究可聚焦于材料结构的精准调控。通过控制碳纳米管的手性、直径等参数,可能实现对其本征热导率的定向调节。表面工程与涂层技术是拓展 SACNT-SF 材料体系适用边界的另一关键,例如包覆氧化锆等高熔点氧化物可提高抗氧化能力;沉积碳化钨等超高温陶瓷涂层,则可抑制碳管在极高温下的升华,进而提升在惰性气氛或真空中的极限使用温度。

随着材料制备成本的逐步降低与工程化技术的日益成熟, SACNT-SF 有望成为新一代高性能热防护材料体系的重要组成部分。SACNT-SF 材料体系可为未来装备向更高温、更轻量化及更长寿命方向发展提供关键技术支持。同时, SACNT-SF 材料体系的应用也将持续拓展纳米碳材料在热管理领域的性能边界。

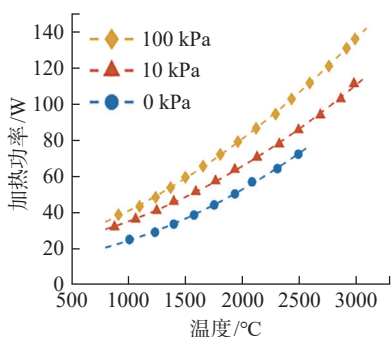


图 8 微型超高温炉功耗-温度曲线

Fig.8 Power consumption versus temperature curve of the miniature ultra-high-temperature furnace

3 结论

本文系统研究了超顺排碳纳米管薄膜堆叠体(SACNT-SF)的材料特性及其在极端场景下的应用潜力。在系统阐述材料制备方法、基本物性与绝热机理的基础上,重点对SACNT-SF的工程化应用路径进行了探索性研究。通过对缠绕成型工艺、表面改性技术和微型高温炉集成3个方面的研究,为SACNT-SF从实验室材料走向工程应用提供了技术支撑和实践依据。在应用探索的基础上,本文进一步讨论了SACNT-SF在航空航天及相关领域的应用前景与挑战。本文主要得出以下研究结论。

(1) 缠绕成型工艺实现了SACNT-SF在复杂构件上的共形制造。基于缠绕成型工艺开发了适用于异形表面的SACNT-SF制备工艺。该工艺在保持材料的绝热性能的基础上,赋予其良好的形状适应性,为在航空航天器复杂热端部件上的应用奠定了基础。通过调控相邻薄膜层间的缠绕角度、应力和层数,可根据工况优化材料的辐射隔热性能,为特定应用场景下的性能定制提供了技术途径。

(2) 表面沉积技术显著提升了SACNT-SF的环境适应性。采用原子层沉积技术构建氧化铝保护层,使SACNT-SF在空气中的工作温度从500℃提升至1000℃以上。微观结构表征显示,保护层均匀完整地包覆在碳纳米管表面,在保持材料多孔结构的同时有效阻隔了氧气扩散。这一技术为拓展SACNT-SF在富氧高温环境下的应用提供了潜在解决方案。

(3) 微型超高温炉的成功构建验证了SACNT-SF在空间受限场景下的应用价值。构建了基于SACNT-SF绝热层的微型管式炉,该装置在仅2.5 mm厚的绝热层与110 W的低功耗下,实现了3000℃的工作温度。该装置的小型化、低功耗特性充分体现了SACNT-SF在航空航天器等空

间受限场景中的应用优势,为下一代高温装备的微型化发展提供了新的技术路径。

SACNT-SF 凭借其在热防护领域优异的综合性能,在航空航天、能源装备、电子器件等领域展现出广阔的应用前景。从实验室材料到工程应用的转变仍面临诸多挑战,需要材料、工艺、设计等多方面的协同创新。随着相关技术的不断成熟完善,SACNT-SF有望为高端装备和极端环境的热管理提供新的解决方案。

参考文献

- [1] LANG S, DRÜCK H, BESTENLEHNER D. Ultrahigh temperature thermal insulation[M]//Ultra-High Temperature Thermal Energy Storage, Transfer and Conversion. Amsterdam: Elsevier, 2021: 201–219.
- [2] DARYABEIGI K. Analysis and testing of high temperature fibrous insulation for reusable launch vehicles[C]//37th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reston: AIAA, 1999: 1044.
- [3] DARYABEIGI K. Heat transfer in high temperature fibrous insulation[C]//8th AIAA/ASME Joint Thermophysics and Heat Transfer Conference. St. Louis: AIAA, 2002: AIAA2002-3332.
- [4] ZHANG B M, ZHAO S Y, HE X D. Experimental and theoretical studies on high-temperature thermal properties of fibrous insulation[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2008, 109(7): 1309–1324.
- [5] ZHAO S Y, ZHANG B M, HE X D. Temperature and pressure dependent effective thermal conductivity of fibrous insulation[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2009, 48(2): 440–448.
- [6] WEI G S, LIU Y S, ZHANG X X, et al. Thermal conductivities study on silica aerogel and its composite insulation materials[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2011, 54(11–12): 2355–2366.
- [7] LEE D, STEVENS P C, ZENG S Q, et al. Thermal characterization of carbon-opacified silica aerogels[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 1995, 186: 285–290.
- [8] SUN H Y, XU Z, GAO C. Multifunctional, ultra-flyweight, synergistically assembled carbon aerogels[J]. Advanced Materials, 2013, 25(18): 2554–2560.
- [9] ANONYMOUS. Composite silica aerogels opacified with titania[J]. NASA Tech Briefs, 2009, 33(11): 49–50.
- [10] WEN Z H, TANG Z Y, LIU Y W, et al. Ultrastrong and high thermal insulating porous high-entropy ceramics up to 2000℃[J]. Advanced Materials, 2024, 36(14): 2311870.
- [11] SHIMIZU T, MATSUURA K, FURUE H, et al. Thermal conductivity of high porosity alumina refractory bricks made by a slurry gelation and foaming method[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2013, 33(15–16): 3429–3435.
- [12] WANG C H, BAI L T, XU H X, et al. A review of high-temperature aerogels: Composition, mechanisms, and properties[J]. Gels, 2024, 10(5): 286.
- [13] AL-JOTHERY H K M, ALBARODY T M B, YUSOFF P S M, et al. A review of ultra-high temperature materials for thermal protection system[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 863(1): 012003.
- [14] YUAN Z, CHEN G, ZHOU D L, et al. Carbon nanostructure-enabled high-performance thermal insulation for extreme-temperature application[J]. Advanced Functional Materials, 2026, 36(9): e14142.
- [15] JIANG K L, LI Q Q, FAN S S. Spinning continuous carbon nanotube yarns[J]. Nature, 2002, 419(6909): 801.
- [16] ZHANG X, JIANG K, FENG C, et al. Spinning and processing continuous yarns from 4-inch wafer scale super-aligned carbon nanotube arrays[J]. Advanced Materials, 2006, 18(12): 1505–1510.
- [17] LIU K, SUN Y H, CHEN L, et al. Controlled growth of super-aligned carbon nanotube arrays for spinning continuous unidirectional sheets with tunable physical properties[J]. Nano Letters, 2008, 8(2): 700–705.
- [18] JIANG K L, WANG J P, LI Q Q, et al. Superaligned carbon nanotube arrays, films, and yarns: A road to applications[J]. Advanced Materials, 2011, 23(9): 1154–1161.

Application Exploration of Super-Aligned Carbon Nanotube Stacked Films as Thermal Insulation Materials in Extreme Conditions

YUAN Zi¹, CHEN Guo¹, ZHOU Duanliang¹, LIU Peng¹, JIANG Kaili^{1,2,3}

- (1. State Key Laboratory of Low Dimensional Quantum Physics, Department of Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
2. Frontier Science Center for Quantum Information, Beijing 100084, China;
3. Beijing Advanced Innovation Center for Future Chips, Beijing 100084, China)

[ABSTRACT] Super-aligned carbon nanotube stacked film (SACNT-SF) exhibits exceptional thermal insulation performance over a wide temperature range, owing to its nanoscale tube diameter, highly anisotropic porous structure, ultralow density, high extinction coefficient of sp^2 carbon, and excellent thermal stability. Based on prior foundational research, this article systematically introduces the fundamental properties of SACNT-SF and its thermal insulation mechanisms across broad temperature ranges, while further exploring the material's potential in engineering applications. SACNT-SF possesses excellent flexibility and moldability, enabling conformal wrapping on complex-shaped surfaces through a filament winding process. To extend the applicability of SACNT-SF, an alumina protective layer was deposited via atomic layer deposition, significantly enhancing the material's operating temperature and anti-ablation performance in air. By integrating SACNT-SF as a thermal insulation layer into a miniature ultra-high-temperature tubular furnace, low-power operation at 110 W was achieved under a working temperature of 3000 °C. The outstanding performance of SACNT-SF under extreme high-temperature conditions offers new solutions for the development of next-generation thermal protection materials in aerospace and related fields.

Keywords: Carbon nanotubes; Thermal insulation material; High-temperature material; Carbon nanomaterial; Thermal protection

(责编 晓月)