

专题: 热传导及其相关交叉领域研究

TiC/SiC 复合纳米流体在光热吸收中的协同增强效应研究*

杨印¹⁾ 文伟伟¹⁾ 成雨欣¹⁾ 董岚¹⁾²⁾ 宋梦譞¹⁾²⁾ 王元元^{1)2)†}¹⁾ (上海第二工业大学能源与材料学院, 上海 201209)²⁾ (上海先进热功能材料工程技术研究中心, 上海 201209)

(2026 年 2 月 23 日收到; 2026 年 3 月 25 日收到修改稿)

随着能源转型, 太阳能利用越发重要. 光热转换是利用太阳能的重要途径, 而纳米流体因其优异的热物理性能, 在提高光热转换效率方面表现出巨大潜力. 本文研究了一种水基碳化钛 (TiC) 和碳化硅 (SiC) 复合纳米流体, 深入探究其在光热吸收方面的协同作用和转换机制. 为解决纳米颗粒在基液中易团聚的问题, 本实验采用生物聚合物骨胶作为分散剂, 通过其良好的生物相容性确保所制备纳米流体的长期稳定性. 作为常用的基液, 去离子水提供了纯净的反应条件, 便于分析纳米颗粒对流体热物理性能的影响. 通过将 TiC 和 SiC 纳米颗粒复合使用, 实现协同增强效应, 实验结果表明, 在浓度为 0.020% 时, 所制备的复合纳米流体光热转换效率可达 94.7%, 较去离子水提高了 20.5%. 本研究通过详细的实验表征和机制分析, 表明该复合纳米流体在太阳能光热转换中具有一定的应用潜力, 为开发高效、环保的太阳能吸收材料提供了理论依据和实验支持.

关键词: 复合纳米流体, 光热协同, 太阳能利用, 稳定性**DOI:** 10.7498/aps.75.20260272**CSTR:** 32037.14.aps.75.20260272

1 引言

在能源转型的全球背景下, 开发高效、可持续的太阳能利用技术已成为一个迫切需要解决的难题^[1,2]. 其中, 太阳能光热转换作为可以直接将太阳能转化为热能的关键技术, 在太阳能热水、空间供暖以及工业余热利用等方面表现出巨大的潜力^[3-5]. 近年来, 作为一种新型传热介质, 纳米流体因其独特的热物理特性和强光吸收能力而被广泛关注^[6-8].

纳米流体, 即通过将纳米尺寸的固体颗粒均匀分散在基液中形成, 这些纳米颗粒可以提高流体的导热系数、太阳光吸收率等, 从而有效提升光热转换效率. Xue 等^[9]从拓宽太阳吸收光谱、高效热管

理和理想润湿性等方面讨论了高效光热蒸发的标准. Cheng 等^[10]介绍光热应用的场景, 阐明了纳米材料在太阳能光热转换中发挥的作用. Zou 等^[11]制备了 3 种不同基液, 分别为去离子水、乙二醇和 1, 2-丙二醇, 发现相同条件下, 去离子水基 TiN 纳米流体的光热转换效率最高, 达到 50.82%. Liu 等^[12]通过两步法制备离子液体基纳米流体, 发现添加质量分数为 0.05% 的氧化石墨烯 (GO) 可使导热系数提高 3.0%, 在 6000 s 的照射时间内, 光热转换效率可达 83%, 纳米流体的最高温度达到 105.89 °C. Zuo 等^[13]采用两步法制备胶原溶液基炭黑 (CS-CB) 纳米流体, 在室外实验中, CS-CB 纳米流体的最高温度为 56.8 °C, 对应的光热转换效率可以达到 75.1%.

随着研究的深入, 多元复合纳米流体在太阳能

* 上海市自然科学基金 (批准号: 23ZR1424300)、上海市“曙光学者”项目 (批准号: 22SG56) 和上海市浦东新区科技发展项目 (批准号: PKJ2024-N08) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: wangyuan@sspu.edu.cn

利用领域展现出较强的光热潜力,其主要机制是通过将不同类型的纳米颗粒分散到基液中,通过纳米材料的光学互补特性协同优化其光学吸收和热传输性能.例如 Bao 等^[14]制备了一种新型的多壁碳纳米管 (MWCNTs) 和碳化硅 (SiC) 纳米颗粒的复合水基纳米流体,来提高纳米流体的光热转换能力.这种复合纳米流体通过 MWCNTs 和 SiC 纳米颗粒互补的光学特性,克服单组分纳米流体的局限性,实现了较好的太阳能吸收.功能化 MWCNTs 也表现出更高的光热转换特性, Bao 等^[15]提出了羟基功能化多壁碳纳米管 (MWCNT-OH) 纳米流体,在一个太阳辐照下,浓度为 20 ppm ($1\text{ ppm} = 10^{-6}$) 时可实现 88.2% 的光热转换效率.除了碳基纳米材料,金属及其金属氧化物纳米颗粒也被广泛应用于复合纳米流体中, Jin 等^[16]制备了不同浓度的 Fe_3O_4 , Cu 和 Au 及其混合纳米流体,这类多金属复合纳米流体能够将不同金属的光学特性结合,实现更宽的光谱吸收和更高的转换效率. Wen 等^[17]利用偶联剂法制备了 TiN@SiCw 二元复合纳米颗粒,通过时域有限差分法对 TiN 和 SiCw 纳米颗粒的光耦合吸收特性进行数值模拟.结果表明, TiN@SiCw 纳米结构能够提高光谱吸收的宽度和强度.通过两步法制备了基于乙二醇的 TiN@SiCw 和 SiCw 纳米流体.实验表明, TiN@SiCw 复合纳米流体的导热性能和光吸收性能均强于 SiCw 单组分纳米流体和基液.其中, TiN@SiCw 纳米流体在最高浓度 140 ppm 时的能量吸收分数达到 96.2%、光热效率达到 90.5%,分别高于 SiCw 纳米流体 12.1%, 21.7%.除了上述材料,其他研究也探索了不同纳米颗粒的组合,以实现更加优异的光热转换效果.例如当前研究者也对 SiC/ITO, Cu/ Al_2O_3 等^[18,19]材料进行复合制备混合型纳米流体,在相关性能上都有较好的提升.

在多种复配的纳米颗粒流体体系中,碳化硅 (SiC) 纳米颗粒因其卓越的物理化学特性,如优异的耐高温性、耐腐蚀性以及良好的导热性和互补光学特性,被认为是开发高性能纳米流体的理想选择材料^[20,21].碳化钛 (TiC) 作为一种过渡金属碳化物,同样拥有诸多优良的性能,包括高熔点、高硬度、良好的导电性、导热性以及化学稳定性.并且, SiC 纳米颗粒在紫外和可见光波段具有很好的光吸收性能, TiC 纳米颗粒在近红外波段有着较强的光吸收能力,根据太阳全光谱范围,通过将 SiC 与 TiC

复合来制备纳米流体,可以实现协同效应来拓宽吸收光谱、提高吸收效率,从而获得更加优异的性能.

然而,纳米颗粒在基液中易团聚的现象是限制纳米流体稳定性的重要难题.为解决这一问题,选择合适的分散剂至关重要^[22-25].一般制备纳米流体采用十二烷基苯磺酸钠 (SDBS)、十二烷基硫酸钠 (SDS) 等作为分散剂,比如 Sarsam 等^[26]探究了 SDBS, SDS, CTAB 等对石墨烯纳米流体稳定性及导热性的影响.但添加这些表面活性剂有时会产生泡沫,影响制备的纳米流体传热效率.因此本文采用生物相容性良好的天然生物聚合物-骨胶作为分散剂,以去离子水为基液,制备新型 SiC 和 TiC 复合纳米流体.实验表明,采用骨胶作为分散剂可以有效防止纳米颗粒团聚,维持纳米流体的稳定性,而且骨胶更加环保、没有毒性,对环境友好,能提供一种更为环保和可持续的纳米流体制备新途径.本研究所用的骨胶化学结构与明胶一致,都为胶原蛋白水解产物.并且有研究表明高纯度明胶在近红外区域无吸收峰、光吸收性能极弱,在激光照射后温升变化很小,光热温升效应可忽略^[27,28],且在本研究体系中浓度较低,因此可不计骨胶对光热的贡献.

综上,本研究将深入探究骨胶-去离子水基 TiC/SiC 复合纳米流体在光热吸收中的协同作用及其转换机制,并评估其在高效太阳能光热转换领域的应用潜力,为后续太阳能吸收材料的开发提供理论依据和实验支持.

2 实验方法

本实验采用两步法来制备纳米流体,所涉及的实验材料主要包括 SiC 粉末 (购自上海泰坦科技股份有限公司)、TiC 粉末 (购自中科托普新材料有限公司) 和牛骨胶原蛋白 (购自纳瑞诗科技有限公司),主要所涉及的实验仪器如表 1 所示.

表 1 实验仪器
Table 1. Experimental instruments.

设备名称	设备型号	生产厂家
扫描电子显微镜	Sigma360	德国蔡司公司
X射线衍射仪	D8 ADVANCE	德国布鲁克ASX公司
紫外光谱仪	UV-2600i	日本岛津公司
行星式球磨机	KE-2L	启东市宏仪器设备厂
超声波细胞粉碎机	KBS-900	昆山市超声仪器公司

图 1 为本实验制备的纳米流体流程图. 首先称取一定量的骨胶、SiC 粉末、TiC 粉末样品, 将称量好的原材料与研磨球共同放入行星球磨机中进行球磨一定时间, 即可得到复合纳米材料, 利用扫描电子显微镜等对样品进行形貌表征分析. 称取一定量的 TiC/SiC 复合材料, 利用超声波细胞粉碎机使其与去离子水充分混合均匀, 即可得到一定浓度下的纳米流体. 对制备的纳米流体, 利用 Zeta 电位分析仪对样品进行电位测试, 再结合紫外光谱仪测试样品的透射率, 比较前后静置一段时间透射率数值的变化, 将两者结合起来判断样品的稳定性能. 再通过自制组装的光热测试仪器, 测试不同浓度下的样品光热性能, 即可计算样品的光热转换效率, 以此来判定样品的光热吸收能力.

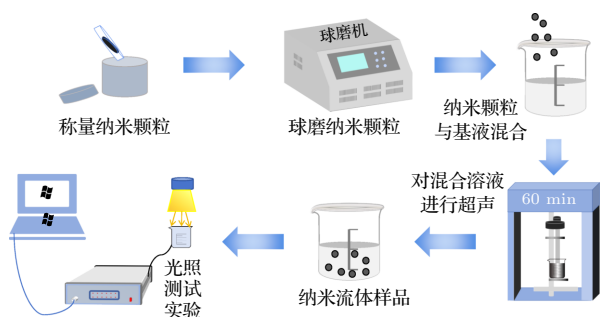


图 1 纳米流体制备及其相关测试流程图

Fig. 1. Nanofluid preparation and related testing flowchart.

3 结果与讨论

3.1 球磨时间对 TiC 和 SiC 形貌的影响

图 2 为未经过预处理的 TiC 粉末、SiC 粉末的

扫描电子显微镜 (SEM) 形貌图. 由图 2(a) 可见, 原始 TiC 粉末呈现不规则的块状与片状混杂结构, 颗粒表面较为粗糙但边缘轮廓清晰, 图 2(b) 为原始 SiC 粉末的 SEM 图像, 能够观察到 SiC 粉末颗粒尺寸整体偏小、形貌以细小的片状与碎块状为主.

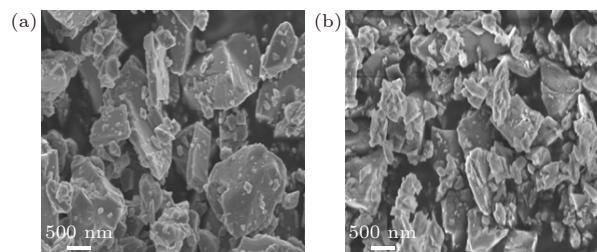


图 2 未经处理的样品 SEM 图 (a) TiC 粉末样品; (b) SiC 粉末样品

Fig. 2. SEM images of untreated samples: (a) TiC powder sample; (b) SiC powder sample.

鉴于纳米颗粒的高比表面积易引发团聚, 进而影响纳米流体的分散稳定性与光热转换性能, 本实验采用两步法工艺制备 TiC/SiC 基复合纳米流体, 核心关键在于实现纳米颗粒与骨胶分散剂的高效结合, 以构建稳定的分散体系. 为达成这一目标, 本实验采用机械球磨技术, 通过机械力作用强化颗粒与分散剂的界面结合. 图 3 为 TiC 与 SiC 纳米颗粒经不同时长球磨后的样品 SEM 图, 当球磨时间达到 12 h 及 16 h 时, 两种纳米颗粒的粒径变化幅度趋于平缓, 表明纳米颗粒已达到较稳定的粒径分布状态. 结合表征分析, 球磨时间过长, 高能球磨产生的巨大机械能导致颗粒表面活性急剧增加, 形成硬团聚体, 使得颗粒尺寸分布不均匀, 分散性

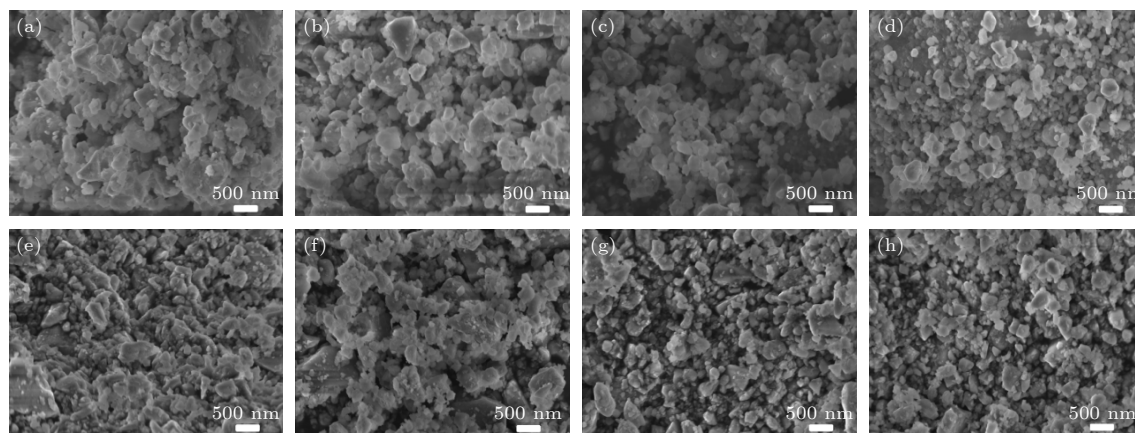


图 3 TiC 在不同球磨时间下样品形貌变化图 (a) 4 h; (b) 8 h; (c) 12 h; (d) 16 h. SiC 在不同球磨时间下样品形貌变化图 (e) 4 h; (f) 8 h; (g) 12 h; (h) 16 h

Fig. 3. Morphological changes of samples with different ball milling times for TiC: (a) 4 h; (b) 8 h; (c) 12 h; (d) 16 h. Morphological changes of samples with different ball milling times for SiC: (e) 4 h; (f) 8 h; (g) 12 h; (h) 16 h.

变差. 并且可能引入了过多的晶格缺陷或局部非晶化, 破坏了材料的晶体结构, 导致稳定性能的下降. 并且随着球磨时间的延长, 研磨罐与研磨球的磨损加剧, 可能引入微量杂质, 对材料纯度产生不利影响. 基于上述原因, 我们将 12 h 确定为最佳球磨时间, 为验证球磨 12 h 纳米颗粒的粒径分布变化, 表征了多张 TiC 和 SiC 纳米颗粒 SEM 图, 如图 4 所示, 球磨 12 h 后的纳米颗粒尺寸普遍一致, 为后续制备稳定性纳米颗粒提供了物理基础. 基于此, 本实验后续确定采用 12 h 球磨工艺, 将 TiC, SiC 纳米颗粒与骨胶分散剂进行混合球磨, 制备复合纳米流体.

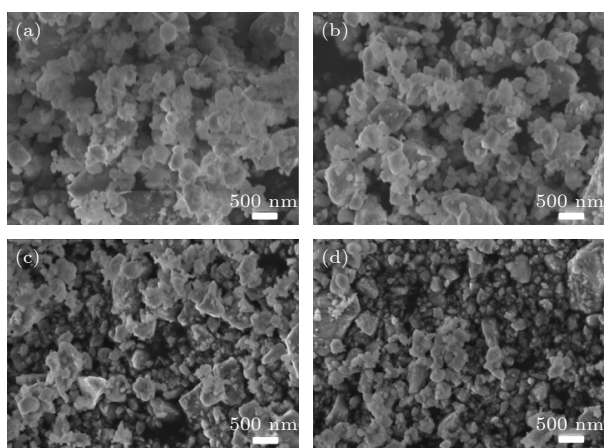


图 4 (a), (b) TiC 球磨 12 h 时间样品形貌变化图; (c), (d) SiC 球磨 12 h 时间样品形貌变化图

Fig. 4. (a), (b) Morphological changes of TiC samples after 12 h of ball milling; (c), (d) morphological changes of SiC samples after 12 h of ball milling.

3.2 骨胶分散剂对样品形貌影响

图 5 为 TiC/SiC 纳米颗粒与骨胶分散剂复合后的 SEM 图片及透射电子显微镜 (TEM) 图. 由图 5(a) 的 SEM 形貌可见, 经骨胶包覆改性后的

TiC/SiC 复合颗粒表面呈现均匀的包覆层结构, 直观表明骨胶分散剂成功吸附于纳米颗粒表面, 有效抑制了颗粒间的团聚行为, 改善了复合体系的分散稳定性. 为进一步验证骨胶分散剂在 TiC/SiC 颗粒表面的包覆状态, 本研究对复合颗粒进行 TEM 表征, 结果如图 5(b) 所示. 从 TEM 图像中可以清晰观察到, TiC/SiC 颗粒外围存在一层厚度均匀的浅色包覆膜, 与颗粒本体形成明显的明暗衬度差异, 这一特征直接证实了骨胶分散剂在颗粒表面形成了连续且致密的包覆层. 结合 SEM 与 TEM 的表征结果可知, 骨胶分散剂能够通过物理吸附作用附着在 TiC/SiC 颗粒表面, 为后续制备高稳定性的 TiC/SiC 基复合纳米流体提供了良好的微观结构基础.

3.3 纳米流体稳定性分析

分散稳定性是纳米流体在光热转换、传热强化等应用场景中发挥优异性能的核心前提, 决定后续性能表征的准确性与实际应用的可靠性. 本研究选取骨胶作为表面活性剂, 通过调控 TiC 与 SiC 的质量配比, 深入探究 TiC/SiC 复合纳米流体分散稳定性的调控机制与影响规律.

进一步表征复合纳米流体的分散稳定性, 对各配比样品进行沉降性静置观察并进行 Zeta 电位测试, 结果如图 6 所示. 由图 6(a), (b) 可以看出静置前后的样品分散性良好, 无较大幅度沉淀. Zeta 电位是评估胶体分散体系稳定性的关键指标, Zeta 电位绝对值越高, 颗粒间的静电斥力越强, 体系分散稳定性越好^[29,30]. 由图 6(c) 可知, 所有配比复合纳米流体的 Zeta 电位数均高于 20 mV; 其中 TiC/SiC 质量比 1:4 的样品 Zeta 电位达到 34.6 mV, 为所有配比中的最大值. 这一结果证实该配比下复

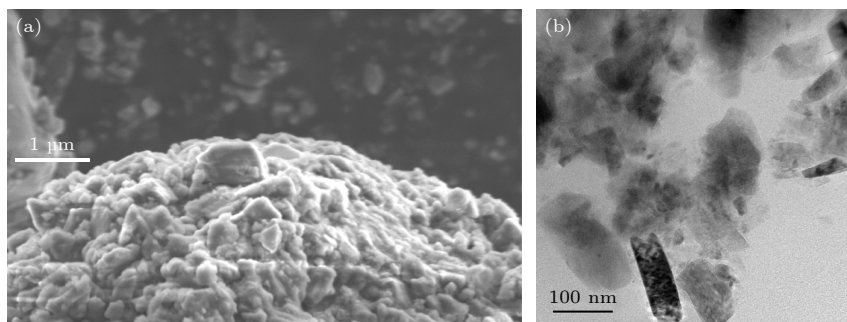


图 5 TiC/SiC 骨胶复合材料 (a) SEM 图; (b) TEM 图

Fig. 5. TiC/SiC bone glue composite material: (a) SEM image; (b) TEM image.

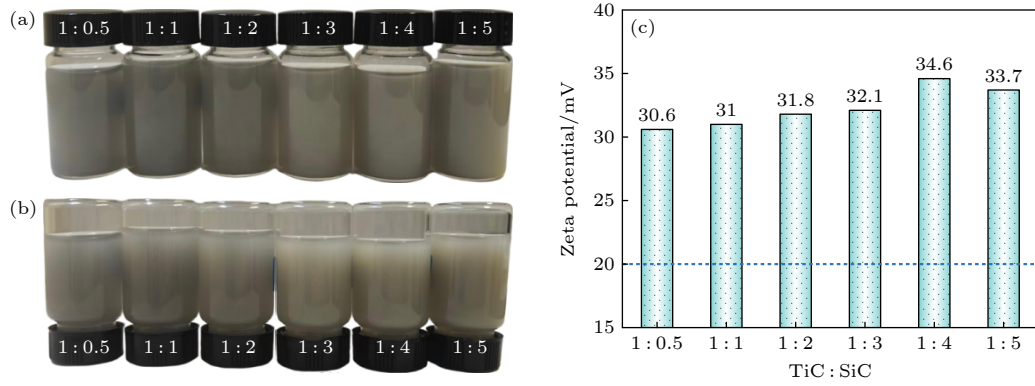


图6 TiC/SiC复合纳米流体 (a) 初始样品图; (b) 静置样品图; (c) 样品 Zeta 电位

Fig. 6. TiC/SiC composite nanofluid: (a) Initial sample image; (b) image of the sample after standing still; (c) Zeta potential of the sample.

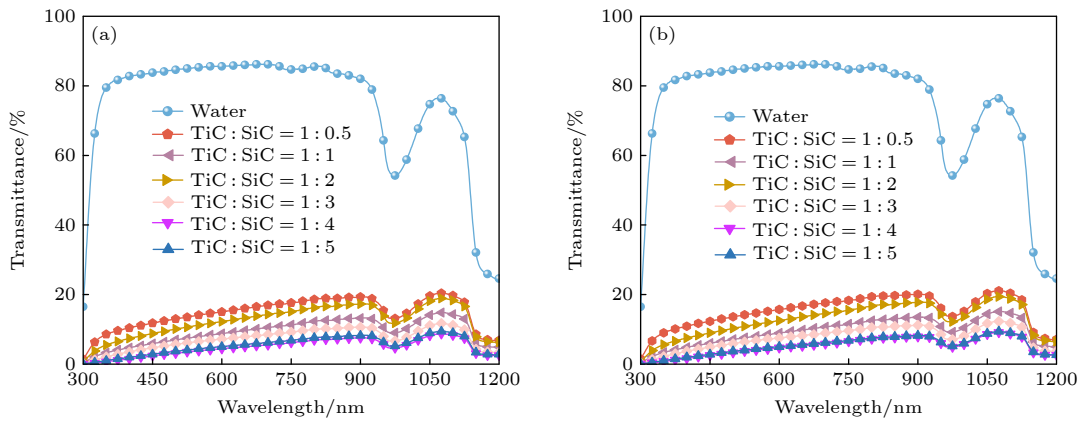


图7 TiC/SiC复合纳米流体透射率图 (a) 初始样品; (b) 静置 30 d

Fig. 7. Transmission rate diagram of TiC/SiC composite nanofluid: (a) Initial sample; (b) 30 days of standing.

合纳米流体具有最优的分散稳定性, 其优异的稳定性源于骨胶分散剂在颗粒表面的吸附作用, 以及 TiC 与 SiC 颗粒间协同产生的空间位阻效应与静电排斥作用, 为后续光热转换性能的提升奠定了基础.

研究人员常在固定波长下定期测量纳米流体的透射率或吸光度, 以评估其稳定性. 例如, 某些研究会关注透射率随时间的衰减, 或计算相对透射率保留率来量化稳定性^[31]. 图7为不同 TiC/SiC 质量配比 (1:0.5, 1:1, 1:2, 1:3, 1:4, 1:5) 下复合纳米流体的透射率表征测试结果. 其中, 图7(a)为各配比复合纳米流体的初始透射率谱图, 从图中可以清晰观察到, 随着 SiC 占比的增大, 复合纳米流体的透射率整体呈先降低后趋于稳定的变化趋势, 当 TiC 与 SiC 质量比为 1:4 时, 纳米流体的透射率达到最低值. 透射率的降低通常与体系内纳米颗粒的分散状态相关, 透射率较低表明该配比下颗粒在基液中分散均匀且无明显团聚, 能够更充分地散射

入射光, 初步证实 TiC/SiC 质量比 1:4 为兼顾分散性与光响应特性的最优配比. 所配制样品透射率先减小的原因在于 SiC 添加比例处于较低阶段, 适量 SiC 的引入可有效改善 TiC 基复相陶瓷的致密度、晶粒均匀性与界面结合状态, 减少气孔、杂相等光散射缺陷, 从而使红外/可见光透射率逐步改变. 随后出现增大的原因是当 SiC 比例继续升高, 过量第 2 相颗粒可能会导致晶界数量增多、晶粒尺寸不均、界面应力增大等原因, 同时可能伴随少量第 2 相团聚, 导致透射率出现阶段性增大. 后期再次减小的原因是随着 SiC 占比进一步提高, 复相体系逐渐形成连续均匀的微观结构, 两相界面匹配性改善、缺陷含量降低, 且 SiC 自身光学性能优势逐步体现, 使得透射率再次下降. 图7(b)为各配比复合纳米流体静置 30 d 后的透射率测试图. 对比图7(a)的初始数据可以发现, 静置 30 d 后各配比样品的透射率与初始值无较大差异, 且 TiC/SiC 质量比

1:4 的样品依旧保持最低透射率, 这一现象直观表明所制备的复合纳米流体具有优异的静置稳定性, 在长时间存放过程中未出现显著的颗粒团聚与沉降行为. 当 TiC 与 SiC 以 1:4 的比例混合时, 两种纳米颗粒在微观尺度上形成了“空间位阻-静电斥力”的协同稳定机制. SiC 纳米颗粒表面富含羟基, 在水中表现出较强的负电性 (Zeta 电位绝对值较高), 提供了主要的静电斥力, 有效抑制了颗粒的团聚; 而 TiC 纳米颗粒则起到了“间隔物”的作用, 通过物理阻隔进一步阻止了 SiC 颗粒之间的直接接触. 这种“静电主导、空间辅助”的协同作用, 使得复合体系的总势垒显著高于其他比例纳米流体.

3.4 纳米流体的光学性能分析

光学性能是调控纳米流体在光热转换、光伏冷却等应用场景中核心特性的关键因素之一, 其光谱透射率、吸收率及消光系数直接决定纳米流体对太阳辐射的捕获与转换效率. 本实验以不同质量浓度 (0.005%, 0.010%, 0.015%, 0.020%, 0.025%) 的 TiC/SiC 复合纳米流体为研究对象, 去离子水设置为空白对照组, 在 300—1200 nm 波长范围内 (覆盖紫外至近红外区域, 匹配太阳辐射主要波段) 开展光学性能测试, 结果如图 8 所示. 图 8(a) 为不同浓度复合纳米流体的光谱透射率图. 由图可知, 与去离子水相比, 添加微量的 TiC/SiC 复合纳米颗粒, 能显著降低体系的光透射率, 且透射率随纳米颗粒浓度的升高呈逐渐下降趋势. 其中, 当纳米流体浓度为 0.010% 时, 其在 300—1200 nm 波段的平均透射率较去离子水下降幅度达 75%; 随着浓度

进一步提升至 0.025%, 透射率持续降低并趋于平缓. 这一现象表明, TiC/SiC 复合纳米颗粒对宽波段光具有极强的遮挡与散射能力, 微量添加即可实现优异的遮光效果. 图 8(b) 为不同浓度复合纳米流体的光谱吸收率曲线. 与透射率的变化规律呈反向对应, 复合纳米流体的光吸收率随颗粒浓度的升高呈单调递增趋势: 低浓度 (0.005%) 样品的吸收率较低, 且在近红外波段 (800—1200 nm) 存在明显吸收低谷; 随着浓度提升至 0.025%, 吸收率在测试波段内显著增强, 尤其是在 300—600 nm 的紫外-可见光区域, 吸收强度提升最为显著. 这是由于随着颗粒浓度增大, 体系内可参与光吸收与散射的纳米颗粒数量增多, 对入射光的捕获概率大幅提升, 从而强化了整体吸收性能.

消光系数在描述纳米流体对入射光的吸收能力有着重要作用, 消光系数是表征物质对光衰减能力的关键参数, 其值越大, 表明物质对光的吸收与散射综合作用越强, 可通过 (1) 式基于透射率数据计算得到:

$$A(\lambda) = -\frac{\ln(\lambda)}{y}, \quad (1)$$

式中, $A(\lambda)$ 为波长 λ 处的消光系数, $T(\lambda)$ 为波长 λ 处的样品透射率, y 为测试比色皿的光程长度. 图 9(a) 为不同浓度复合纳米流体的消光系数光谱曲线. 由图可见, 空白对照组去离子水的消光系数在 300—1200 nm 全波段内趋近于 0, 表明其对光的衰减作用可忽略不计; 而添加 TiC/SiC 复合纳米颗粒后, 流体的消光系数显著提升, 且随浓度升高呈明显递增趋势. 以 300—900 nm 的紫外-可见

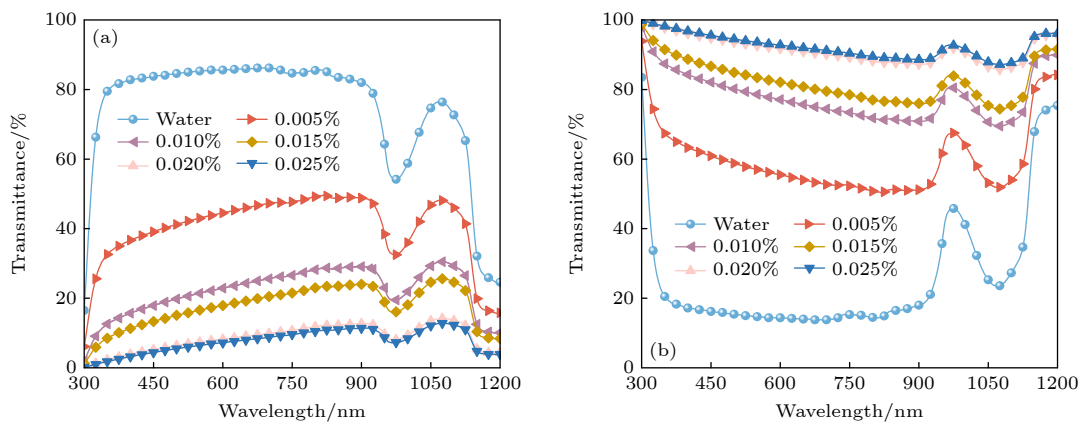


图 8 (a) 不同浓度样品透射率图; (b) 不同浓度样品吸收率图

Fig. 8. (a) Transmission rate diagrams of samples at different concentrations; (b) absorption rate diagrams of samples at different concentrations.

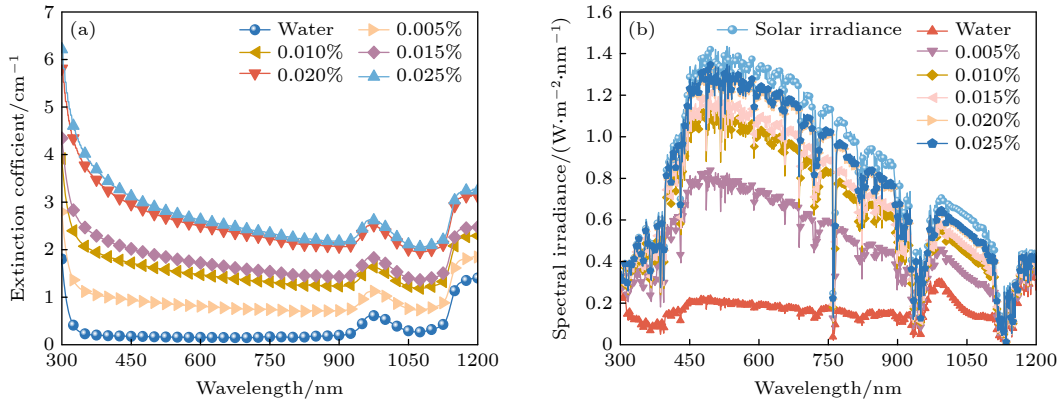


图 9 (a) 不同浓度样品消光系数图; (b) 不同浓度样品辐照度谱图

Fig. 9. (a) Scattering coefficient diagrams of samples at different concentrations; (b) irradiance spectra diagrams of samples at different concentrations.

光波段为例, 0.005% 浓度样品的平均消光系数约为 1 cm^{-1} , 而 0.025% 浓度样品的平均消光系数可达 3 cm^{-1} 以上, 增幅超过 3 倍, 进一步定量证实了复合纳米流体光吸收能力随浓度的调控规律。

图 9(b) 为不同浓度复合纳米流体的光谱辐照度曲线, 光谱辐照度的计算公式如下:

$$I_A(\lambda) = (1 - e^{-\alpha(\lambda)y}) I_{AM1.5}, \quad (2)$$

式中, $I_{AM1.5}$ 表示一定波长范围内的入射太阳照射, $I_A(\lambda)$ 为辐照度, $\alpha(\lambda)$ 为消光系数, y 是比色皿光程长度. 理论光谱辐照度反映了流体对太阳辐射能量的捕获能力, 其值越接近标准太阳辐射照度, 表明流体对太阳能的吸收利用潜力越强. 由图可知, 随着复合纳米流体浓度的升高, 其光谱辐照度逐渐增大, 当浓度提升至 0.020%—0.025% 时, 辐照度曲线已基本贴近标准太阳辐射照度曲线, 说明该浓度范围内的复合纳米流体能够高效捕获太阳辐射能量, 为后续实现高效光热转换提供了充足的能量基础。

3.5 纳米流体的光热性能分析

光热转换效率是评估纳米流体光热应用潜力的核心指标, 其量化表征已成为相关研究的通用评价标准. 本研究采用经典光热转换效率计算公式如下所示 [32]:

$$\eta = \frac{(T_{\max} - T_{\text{en}}) B m_n C_n}{A S_m}, \quad (3)$$

式中, $T_{\max}$ 为所测试纳米流体趋于平衡时的最大温度, T_{en} 为测试的环境温度, B 为常数, m_n 为测试纳米流体质量, C_n 为比热容, A 为纳米流体接收光

照面积, S_m 为太阳模拟器辐照度. 常数 B 的取值计算公式如下 [32]:

$$\ln \left(\frac{T(t) - T_{\text{en}}}{T_{\max} - T_{\text{en}}} \right) = -Bt. \quad (4)$$

基于上述计算方法, 本实验系统分析了质量浓度为 0.005%, 0.010%, 0.015%, 0.020%, 0.025% 及 0.030% 的 TiC/SiC 复合纳米流体的光热转换性能, 测试条件为 1000 W/m^2 模拟太阳光照, 结果如图 10 所示. 图 10(a) 为不同浓度复合纳米流体及去离子水 (空白对照组) 的升温-降温全周期曲线. 由图可以看出, 所有测试样品均呈现一致的温度变化规律, 完整经历加热、平衡、冷却 3 个阶段。

图 11(a) 为不同浓度复合纳米流体及去离子水的最高温升对比结果, 可知去离子水的最高温升仅为 $49.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$; 而添加 TiC/SiC 复合纳米颗粒后, 各浓度样品的最高温升均显著提升, 分别达到 51.9, 54.2, 55.3, 57.5, 54.9 及 53.4. 这进一步证实复合纳米颗粒的添加可提高水体对太阳辐射的吸收能力, 进而提升光热转换效果. 值得注意的是, 随着纳米颗粒浓度的升高, 最高温升呈现先上升后下降的变化趋势, 其内在机理为: 低浓度范围内, 太阳辐射可完全穿透纳米流体至底部, 体系内颗粒均能充分参与光热转换, 吸收率随浓度升高而增强, 最高温升同步提升; 当浓度超过饱和值 (本实验为 0.020%) 后, 过量的纳米颗粒会导致太阳辐射在流体表层即被大量吸收, 穿透深度显著减小, 底部颗粒无法有效接收光照参与光热转换, 底部温度主要依赖表层颗粒的热传导传递, 整体产热效率下降, 最高温升随之降低. 这一现象表明, 复合纳米流体的光热性能存在最优浓度区间, 在该区间内提升颗粒浓度可

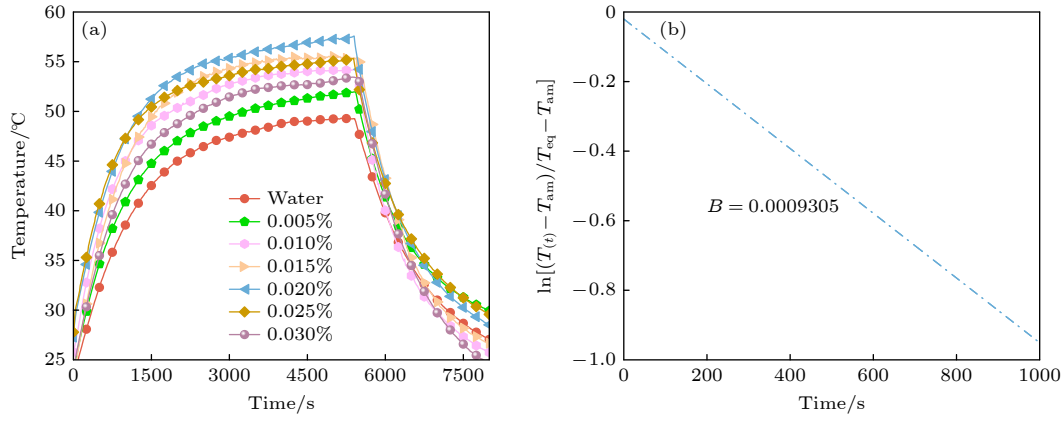
图 10 (a) 不同浓度样品光照温升曲线图; (b) 降温阶段 B 取值

Fig. 10. (a) Curve diagram of temperature rise of samples under illumination at different concentrations; (b) value of B during the cooling stage.

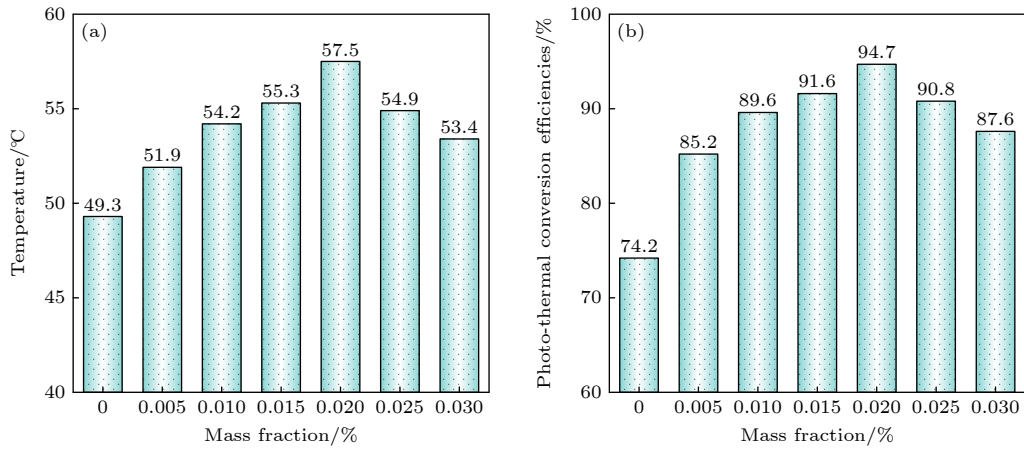


图 11 (a) 不同浓度最高温升柱状图; (b) 不同浓度光热效率柱状图

Fig. 11. (a) Bar chart of the maximum temperature rise at different concentrations; (b) bar chart of the photothermal efficiency at different concentrations.

有效优化光热转换效果. 图 11(b) 为不同浓度复合纳米流体与去离子水的光热转换效率对比. 由图可知, 去离子水的光热转换效率仅为 74.2%; 而复合纳米流体的光热转换效率均显著高于对照组, 且随浓度变化呈现先升后降的趋势: 浓度从 0.005% 提升至 0.020% 时, 光热转换效率从 85.2% 逐步攀升至 94.7% (最大值); 当浓度进一步提升至 0.025% 时, 效率回落至 90.8%. 这一变化规律与最高温升的变化趋势一致, 再次验证了复合纳米流体光热性能的浓度依赖性. 结合前文光学性能分析可知, 0.020% 浓度样品兼具较高的光吸收率与合理的光穿透深度, 能够在高效捕获太阳辐射的同时, 保证体系内颗粒充分参与光热转换, 实现最优的光热转换效率. 根据纳米流体的误差传递原理^[33], 我们需要综合考虑质量测量、温度测量、光强波动、光照面积测量、纳米流体比热容、热损失系数等误差带

来的影响. 因此本实验采用方和根法计算最高光热效率的不确定度为 $\pm 3.8\%$.

4 结 论

本文采用两步法制备骨胶-去离子水基 TiC/SiC 复合纳米流体, 利用光学互补特性探究其纳米颗粒在光谱范围内的吸收能力. 使用球磨工艺将纳米颗粒与分散剂充分结合阻止其团聚, 实现纳米流体的长期稳定性, 通过对球磨时间的探索, 发现 12 h 为最佳球磨时间, 配置相关浓度的纳米流体利用紫外光谱仪和 Zeta 电位仪测试样品的透射率和电位值来测试样品光吸收能力和稳定性能, 在 TiC:SiC 为 1:4 时光吸收能力最好. 同时使用光热测试仪器测试其光热转换性能. 结果表明 TiC/SiC 复合纳米流体的光热转换性能显著优于去离子水,

且在 0.020% 质量浓度下达到最优, 光热转换效率达 94.7%. 这一研究结果不仅证实了 TiC/SiC 复合纳米颗粒对水基光热性能的强化作用, 也为后续实际应用中复合纳米流体的浓度选型提供了关键数据支撑, 为在太阳能光热利用等领域的推广应用奠定了坚实基础.

参考文献

- [1] Thakur P P, Sonawane S S, Mohammed H A 2023 *CNANO* **19** 170
- [2] Farajollahi A 2025 *Front. Energy Res.* **13** 1560718
- [3] Xu B L, Ganesan M, Devi R K, Ruan X W, Chen W C, Lin C C, Chang H, Lizundia E, An A K, Ravi S K 2025 *Adv. Mater.* **37** 2406666
- [4] Li J Y, Long Y, Cao X Y, Sun H X, Jiao R, Zhu Z Q, Liang W D, Li A 2024 *Adv. Colloid Interface Sci.* **325** 103118
- [5] Chen C L, Wang M, Chen X, Chen X C, Fu Q, Deng H 2022 *Chem. Eng. J.* **448** 137603
- [6] Babar H, Wu H W, Zhang W B, Shah T R, McCluskey D, Zhou C 2024 *Adv. Colloid Interface Sci.* **325** 103112
- [7] Ali N, Bahman A M, Aljuwayhel N F, Ebrahim S A, Mukherjee S, Alsayegh A 2021 *Nanomaterials* **11** 1628
- [8] Bacha H B, Ullah N, Hamid A, Shah N A 2024 *Int. J. Thermofluids* **22** 100595
- [9] Xue C, Yu Z P, Qi C, Tang M Q 2024 *Mater. Today Sustain.* **28** 101002
- [10] Cheng P F, Wang D, Schaaf P 2022 *Adv. Sustainable Syst.* **6** 2200115
- [11] Zou Y, Qin C Y, Yang B, Liu H T, Zhang B, Wu X H 2024 *Plasmonics* **19** 1371
- [12] Liu C, Shi X, Gao D, Cao Y, Gu Y, Rao Z 2023 *J. Therm. Sci.* **32** 1956
- [13] Zuo X H, Yang W M, Zhang Z H, Song L J, Yan H, Guan C F, Zhan J, Zhu W L, Li H W, Zhang D L, Wen X, An Y 2022 *Case Stud. Therm. Eng.* **38** 102371
- [14] Bao Y Q, Huang A, Zheng X, Qin G Z 2023 *J. Mol. Liq.* **387** 122577
- [15] Bao Y Q, Luo Q L, Zheng X, Qin G Z 2023 *Diamond Relat. Mater.* **140** 110489
- [16] Jin X, Lin G P, Zeiny A, Jin H C, Bai L Z, Wen D S 2019 *Renew. Energy* **141** 937
- [17] Wen J, Li X K, Zhang H, Chen M J, Wu X H 2022 *Renew. Energy* **193** 1062
- [18] Kim H, Ham J, Cho H 2022 *Case Stud. Therm. Eng.* **35** 102151
- [19] Alhamayani A, Al-lehaibi M 2024 *Case Stud. Therm. Eng.* **59** 104593
- [20] Liu T L, Yang L X, Chen Z F, Yang M M, Lu L 2023 *J. Mater. Res. Technol.* **25** 5184
- [21] He P, Pan Y L, Yan M Y, Gong L L, Shi L, Cheng X D, Zhang H P, Zhao J C 2024 *Compos. Part A* **181** 108153
- [22] Yadav P, Gupta S M, Sharma S K 2022 *J. Therm. Anal. Calorim.* **147** 6537
- [23] Zhang T C, Zou Q L, Cheng Z H, Chen Z H, Liu Y, Jiang Z B 2021 *Powder Technol.* **379** 457
- [24] Zhao M W, Lv W J, Li Y Y, Dai C L, Zhou H D, Song X G, Wu Y N 2018 *Materials* **11** 1385
- [25] Guo J F, Guo Z Q, Wang X F, Li Y J, Lv Q J 2015 *Appl. Mech. Mater.* **757** 7
- [26] Sarsam W S, Amiri A, Kazi S N, Badarudin A 2016 *Energy Conversion and Management* **116** 101
- [27] Shehap A M, Mahmoud K H, Abdelkader M F H, El-Basheer T M 2017 *Exp. Theo. Nanotechnology* **2** 103
- [28] Huang C Y, Yang H W, Wang H C, Hsu C Y, Wei K C, Chen P Y, Pang H H 2025 *Pharmaceutics* **17** 1353
- [29] Gupta P, Mundra R, Jha S K 2024 *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* **685** 133251
- [30] Wang J, Yang X, Klemes J J, Tian K, Ma T, Sundén B 2023 *Renew. Sustain. Energy Rev.* **188** 113854
- [31] Abdelrazik A S, Tan K H, Aslfattahi N, Saidur R, Al-Sulaiman F A 2020 *Int. J. Energy Res.* **44** 11487
- [32] Meng Z G, Li Y, Chen N, Wu D X, Zhu H T 2017 *J. Taiwan Inst. Chem. Engineers* **80** 286
- [33] Ham J, Kim H, Cho H 2024 *Energies* **17** 5059

SPECIAL TOPIC—Heat conduction and its related interdisciplinary areas

Synergistic enhancement effect of TiC/SiC composite nanofluids in photothermal absorption*YANG Yin¹⁾ WEN Weiwei¹⁾ CHENG Yuxin¹⁾ DONG Lan¹⁾²⁾SONG Mengxuan¹⁾²⁾ WANG Yuanyuan^{1)2)†}¹⁾ (*School of Energy and Materials, Shanghai Polytechnic University, Shanghai 201209, China*)²⁾ (*Shanghai Engineering Research Center of Advanced Thermal Functional Materials, Shanghai 201209, China*)

(Received 23 February 2026; revised manuscript received 25 March 2026)

Abstract

With the ongoing energy transition, the utilization of solar energy has become increasingly important. Photothermal conversion represents a key approach for harnessing solar energy, and nanofluids, owing to their excellent thermophysical properties, have shown great potential for enhancing photothermal conversion efficiency. This study investigates an aqueous-based titanium carbide (TiC) and silicon carbide (SiC) hybrid nanofluid, with a focus on its synergistic effects and underlying mechanisms in photothermal absorption. To address the issue of nanoparticle agglomeration in the base fluid, a biopolymer, bone glue, is employed as a dispersant. Its favorable biocompatibility ensures the long-term stability of the prepared nanofluid. Deionized water, as a commonly used base fluid, provides a pure reaction environment that facilitates the analysis of the influence of nanoparticles on the thermophysical properties of the fluid. By combining TiC and SiC nanoparticles, a synergistic enhancement effect is achieved. Experimental results demonstrate that at a concentration of 0.020%, the prepared hybrid nanofluid achieves a photothermal conversion efficiency of 94.7%, which is 20.5% higher than that of deionized water. Through detailed experimental characterization and mechanistic analysis, this study reveals the potential application of the hybrid nanofluid in solar photothermal conversion, providing both theoretical insights and experimental support for the development of efficient and environmentally friendly solar-absorbing materials.

Keywords: composite nanofluid, photothermal synergy, solar energy utilization, stability**DOI:** [10.7498/aps.75.20260272](https://doi.org/10.7498/aps.75.20260272)**CSTR:** [32037.14.aps.75.20260272](https://cstr.cn/32037.14.aps.75.20260272)

* Project supported by the Natural Science Foundation of Shanghai, China (Grant No. 23ZR1424300), the “Dawn” Program of Shanghai Education Commission, China (Grant No. 22SG56), and the Science and Technology Development Program of Pudong New Area of Shanghai, China (Grant No. PKJ2024-N08).

† Corresponding author. E-mail: wangyuanyuan@sspu.edu.cn

TiC/SiC复合纳米流体在光热吸收中的协同增强效应研究

杨印 文伟伟 成雨欣 董岚 宋梦譞 王元元

Synergistic enhancement effect of TiC/SiC composite nanofluids in photothermal absorption

YANG Yin WEN Weiwei CHENG Yuxin DONG Lan SONG Mengxuan WANG Yuanyuan

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 160802 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20260272

CSTR: 32037.14.aps.75.20260272

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20260272>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

钙钛矿太阳能电池材料缺陷对器件性能与稳定性的影响

Influence of defect in perovskite solar cell materials on device performance and stability

物理学报. 2024, 73(6): 063101 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231631>

表面纳米气泡的稳定性机制

Stability mechanisms of surface nanobubbles

物理学报. 2025, 74(16): 166801 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250521>

溶液法制备二维钙钛矿层提高甲脒碘化铅钙钛矿太阳能电池稳定性

Preparation of two-dimensional perovskite layer by solution method for improving stability of FAPbI₃ perovskite solar cells

物理学报. 2024, 73(6): 068801 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231678>

钌基共价有机框架复合材料的构建及其表面增强拉曼散射性能

Construction of ruthenium-based covalent organic framework composites and their surface-enhanced Raman scattering performance

物理学报. 2025, 74(24): 247401 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20251391>

分层化金属陶瓷光热转换涂层的微结构构筑与热稳定性

Microstructure building and thermal stability of cermet-based photothermal conversion coatings with layered structures

物理学报. 2023, 72(5): 057103 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20221693>

醋酸纤维素提高CsPbIBr₂无机钙钛矿薄膜质量及其太阳能电池光电性能

Enhancing quality of CsPbIBr₂ inorganic perovskite via cellulose acetate addition for high-performance perovskite solar cells

物理学报. 2022, 71(1): 018802 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211074>