

复合纳米流体在直接吸收式 太阳能集热器中光热特性的研究

张宇航, 周璐, 吉祝昊, 马红和*

(太原理工大学电气与动力工程学院, 山西太原 030000)

摘要:为研究用于直接吸收式太阳能集热器的二元 Cu/SiO₂ 纳米流体的光吸收和光热转换, 制备了 PVP(聚乙炔吡咯烷酮)表面修饰的一系列不同组分的 Cu/SiO₂ 复合纳米流体, 并通过测量实验流体的透射率和日晒实验, 研究了水基复合纳米材料在不同情况下的光吸收和光热转换性能。结果表明, PVP 浓度增加对纳米流体在反复加热情况下的热稳定性有明显增强作用, 但存在最佳浓度使流体稳定效果达到最佳。日晒实验结果表明, 随着实验次数的增加, 测得纳米流体的透射率逐渐升高, 宏观表现为流体的稳定性变差、沉淀产生变多。通过复合纳米流体的光热转换实验并结合理论模型分析表明, 二元 Cu/SiO₂ 复合纳米流体的光热转换效率与 Cu/SiO₂ 材料的复合比例关系密切且存在最佳复合比例使二者达到最大值。

关键词: 纳米流体; 稳定性; 光热转换性能; 表面活性剂; 复合比例

中图分类号: TK513.1

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2024)09-0132-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2024.09.025

Study on photothermal properties of composite nanofluids in direct absorption solar energy collector

ZHANG Yu-hang, ZHOU Lu, JI Zhu-hao, MA Hong-he*

(College of Electrical and Power Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030000, China)

Abstract: In order to study the light absorbing and photothermal conversion performances of binary Cu/SiO₂ nanofluids that can be used in direct absorption solar collector, a series of Cu/SiO₂ composite nanofluids with different components modified on the surface of PVP are prepared. The light absorbing and photothermal conversion performances of water-based composite nanomaterials under different conditions are studied through measuring the transmittance of the experimental fluid and conducting sun exposure experiments. Results indicate that an increase in PVP concentration significantly enhances the thermal stability of nanofluids under repeated heating, but there is a peak concentration that maximizes the fluid stability effect. Sun exposure experiment indicates that as the number of experiments increases, the transmittance of the measured nanofluid gradually increases, and the macroscopic manifestation is that the stability of the fluid deteriorates, and more precipitation occurs. Through the photothermal conversion experiment of composite nanofluids and theoretical model analysis, it is shown that the photothermal conversion efficiency of binary Cu/SiO₂ composite nanofluids is closely related to the composite ratio of Cu/SiO₂ materials, and there is an optimal composite ratio to achieve the maximum value of both.

Key words: nanofluids; stability; photothermal conversion characteristics; surfactant; compositing ratio

纳米流体是指以一定的方式和比例在液体中添加纳米级金属或金属粒子制备成均匀、稳定、高导热的新型换热介质。1995年, Choi^[1]首次提出了“纳米流体(Nanofluids)”的概念。但是由于小尺寸的粒子的比表面积以及表面能都很大,使得纳米粒子有热力学不稳定性、动力学稳定性和聚集不稳定性特点,在基液中极易相互吸引团聚成大颗粒。

表面活性剂作为一种分散剂能够降低纳米粒子表面能,增加粒子之间的距离,降低纳米颗粒之间的

分子间作用力。在研究表面活性剂质量分数对分散稳定性的影响时, Ma等^[2]研究了不同浓度的PVP对流体性能的影响,同时发现表面活性剂存在最佳浓度使纳米流体的各项性能参数达到最佳。因此添加表面活性剂时,其浓度要适当,并非浓度越高纳米流体的稳定性越好,添加过量也会对纳米流体的稳定性产生不利影响。

近几年,由于纳米流体优异的光热转换性能以及热传输性能,有研究者提出可以将纳米流体作为

收稿日期: 2023-12-26; 修回日期: 2024-07-06

基金项目: 山西省应用基础研究计划项目(20210302123199)

作者简介: 张宇航(1998-), 男, 硕士生, 研究方向为纳米流体在太阳能集热中的应用基础研究, zyh1092145147@qq.com; 马红和(1987-), 男, 博士, 教授, 研究方向为纳米流体传热传质, 通讯联系人, mahonghe@tyut.edu.cn。

直接吸收式太阳能集热器的循环工质^[3],利用纳米流体直接吸收太阳辐射能,以达到提高集热效率的目的。光热转换是利用太阳能最简单的方法,利用吸收装置将吸收的太阳能直接转化为热能。纳米流体的直接吸收技术简化了传热过程、降低了热阻,有利于温度的均匀分布。因此,基于纳米流体的太阳能直接吸收技术作为一种新型的集热方法受到了广泛关注。

由于单组分纳米流体的吸收带有限,很难实现太阳能的广谱利用,因此迫切需要开发基于纳米流体的广谱太阳能利用技术。Kim等^[4]制备得到纳米Cu颗粒附着在SiO₂纳米颗粒上的双组分复合纳米材料,并对实验流体的光吸收特性进行研究,但未提及复合材料中2种纳米颗粒的组成比例。Chen等^[5]研究了复合材料比例变化对双组分纳米流体光学特性的影响,并实现了在可见光和近红外区域的宽带吸收。因此,通过适当设计悬浮纳米颗粒的种类、结构和尺寸,可以实现不同纳米颗粒之间的协同效应,并有效拓宽纳米流体的吸收带。

金属铜具有良好的导热性能,且储量丰富、价格低廉,以铜纳米颗粒为填充物的纳米流体不仅具有良好的热传导能力,而且对可见光波段展现出强吸收性能^[6],非常适于作直接吸收式太阳能集热器的循环工质^[7-8]。纳米SiO₂是一种无定型白色粉末材料,表面存在不饱和悬键和不同键合状态的羟基,其分子状态呈三维网状结构,独特的结构使其表现出特殊的光学特性,相关研究表明^[9],纳米SiO₂对200~400 nm波段的紫外光有强吸收作用。

与一元纳米流体相比,混合纳米流体由于内部不同种类纳米颗粒性质不同以及不同颗粒之间存在复杂的协同作用和颗粒排布,表现出更为复杂的光吸收特性和传热特性。Junfei Fang等^[10]研究了基于水的CuO/ZnO复合纳米流体的光吸收、热导率和光热转换特性,由于ZnO的加入,CuO/ZnO复合纳米流体的光热转换性能得到了提高,纳米流体的最高温度达到约72℃,在30℃和70℃时分别具有97.35%和34.70%的最高光热转换效率。

因此,笔者采用一步法制备得到了不同浓度PVP修饰的Cu/SiO₂复合纳米流体。利用闷晒实验对不同流动状态下的纳米流体进行反复加热,并用紫外-可见分光光度计测量不同状态下纳米流体的吸光度,研究不同流动状态下及表面活性剂对纳米流体热稳定性的影响。同时通过改变Cu/SiO₂纳米材料的复合比例,探究不同复合比例对纳米流体的

光吸收和光热转换性能的影响。

1 实验

1.1 实验材料

实验选用去离子水作为纳米流体基液;KBH₄,分析纯,天津市凯通化学试剂有限公司生产;CuSO₄·5H₂O,分析纯,天津市风船化学试剂科技有限公司生产;NaOH,分析纯,天津市天力化学试剂有限公司生产;乙二醇四乙酸二钠,分析纯,武汉塞维尔生物科技有限公司生产;聚乙烯吡咯烷酮(化学纯)、纳米SiO₂颗粒[粒径为(20±5) nm,纯度为99.5%],上海麦克林生化科技有限公司生产。

F-009S型超声波清洗机,深圳市钰洁清洗设备有限公司生产;TGYF-B型磁力搅拌器,上海科雾仪器设备有限公司生产;CEL-HXF300-T3型氙灯光源系统,北京中教金源科技有限公司生产;Lambda 950型紫外-可见分光光度计,上海菁华科技仪器有限公司生产。

1.2 纳米流体的制备

采用KBH₄液相还原法直接制备得到Cu-H₂O纳米流体^[11-12]。

(1)KBH₄只有在碱性条件下能够稳定存在,故用NaOH溶液溶解,配制KBH₄-NaOH溶液(摩尔比为1:4)作为还原体系,随后加入一定量的EDTA-2Na,用超声波清洗机超声振荡10 min得到溶液A。

(2)配制一定浓度的CuSO₄溶液(三者的摩尔比保持0.1:1:4不变),加入一定量的PVP以及一定量的EDTA-2Na,超声振荡10 min得到溶液B,与KBH₄-NaOH还原体系进行反应。

(3)将溶液B放入TGYF-B型磁力搅拌器进行油浴加热至50℃后,按照一定速率将溶液A缓慢滴入溶液B中。滴加完成后,使反应在50℃条件下持续进行30 min得到PVP表面修饰的Cu-H₂O纳米流体。

1.3 复合纳米流体制备

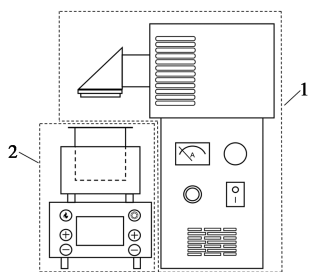
将一定量的纳米SiO₂颗粒添加到Cu-H₂O纳米流体中,用磁力搅拌器在恒温油浴50℃条件下搅拌15 min之后再进一步进行10 min超声振荡制备得到不同复合比例的二元Cu/SiO₂纳米流体。

1.4 试验方法

1.4.1 闷晒实验

利用CEL-HXF300型氙灯光源系统对Cu-H₂O纳米流体进行光照实验,实验中仪器产生的光强为

520 000 C。利用 TGYF-B 型磁力搅拌器对纳米流体进行边搅拌边加热(实验装置如图 1 所示)。烧杯总容积为 250 mL,烧杯底面和侧面均包裹一层保温层,保温层材料为市售石棉,厚度约为 3 cm。



1—CEL-HXF300 型氙灯光源系统;2—TGYF-B 型磁力搅拌器

图 1 搅拌闷晒实验装置

每组闷晒实验完成后,静置待实验流体自然冷却至室温后,用超声波清洗机超声振荡 5 min,重复上述步骤进行下一组实验。

同时每隔一定时间来测量流体温度并在不同温度节点对纳米流体取样静置,通过测量其透射率来反映该温度节点纳米流体的稳定性。

1.4.2 纳米流体稳定性实验

通过 Lambda 950 型紫外-可见分光光度计测量纳米流体的透射率,测试的波长范围为 200~1 000 nm,波长间隔为 20 nm。通过透射率数值的变化表征纳米流体在不同温度节点下的稳定性。

2 实验结果与分析

2.1 表面活性剂浓度对纳米流体热稳定性的影响

实验保持反应物物质的量之比为 $n(\text{CuSO}_4) : n(\text{KBH}_4) : n(\text{NaOH}) = 0.1 : 1 : 4$ 、反应温度为 50℃。改变 PVP 的浓度制备得到不同表面活性剂浓度的 Cu-H₂O 纳米流体,通过闷晒实验研究表面活性剂浓度对纳米流体的热稳定性以及光热转换特性的影响,实验方案如表 1 所示。

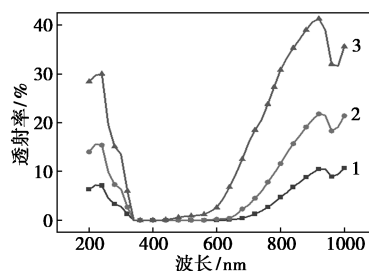
表 1 实验方案

编号	PVP	NaOH	Cu ²⁺	EDTA-2Na	KBH ₄
2-1	0.009				
2-2	0.018				
2-3	0.027				
2-4	0.036				
2-5	0.045	0.8	0.02	0.23	0.185
2-6	0.054				
2-7	0.063				
2-8	0.072				
2-9	0.081				

目前,评价纳米流体稳定性的方法主要有沉降观察法、粒度显微法、Zeta 电位测量法和透射率测量法^[13]。笔者主要通过透射率测量和静置沉降观察来表征不同情况下纳米流体的稳定性。

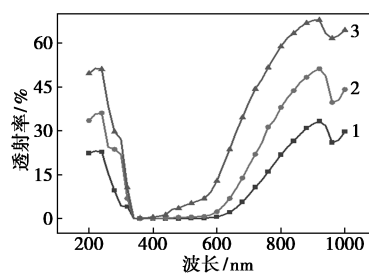
根据表 1 制备得到不同浓度变化的 7 组实验流体并分别对其进行闷晒实验。实验过程中发现,在 PVP 浓度低于 0.036 mol/L 时,Cu-H₂O 纳米流体仅能保证反复加热 3 次不发生明显沉淀,在第 4 次闷晒实验中纳米铜颗粒全部氧化为黑色沉淀;在 PVP 浓度增加到 0.045 mol/L 时,实验流体能够保证在 5 次闷晒实验过后仍保有一定的分散稳定性。在闷晒实验前期实验流体中纳米 Cu 颗粒氧化情况不明显,静置取上层纳米流体测量其透射率,其透射率变化相近,因此取第 5 次闷晒结束后测量的透射率数据进行对比,研究 PVP 浓度对纳米流体热稳定性的影响。

不同 PVP 浓度的 Cu-H₂O 纳米流体多次闷晒实验的透射率变化情况如图 2 所示。



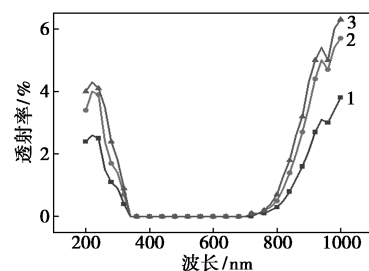
1—18℃;2—68℃;3—80℃

(a) $C_{\text{pvp}} = 0.045 \text{ mol/L}$



1—18℃;2—63℃;3—70℃

(b) $C_{\text{pvp}} = 0.054 \text{ mol/L}$



1—20℃;2—59℃;3—71℃

(c) $C_{\text{pvp}} = 0.063 \text{ mol/L}$

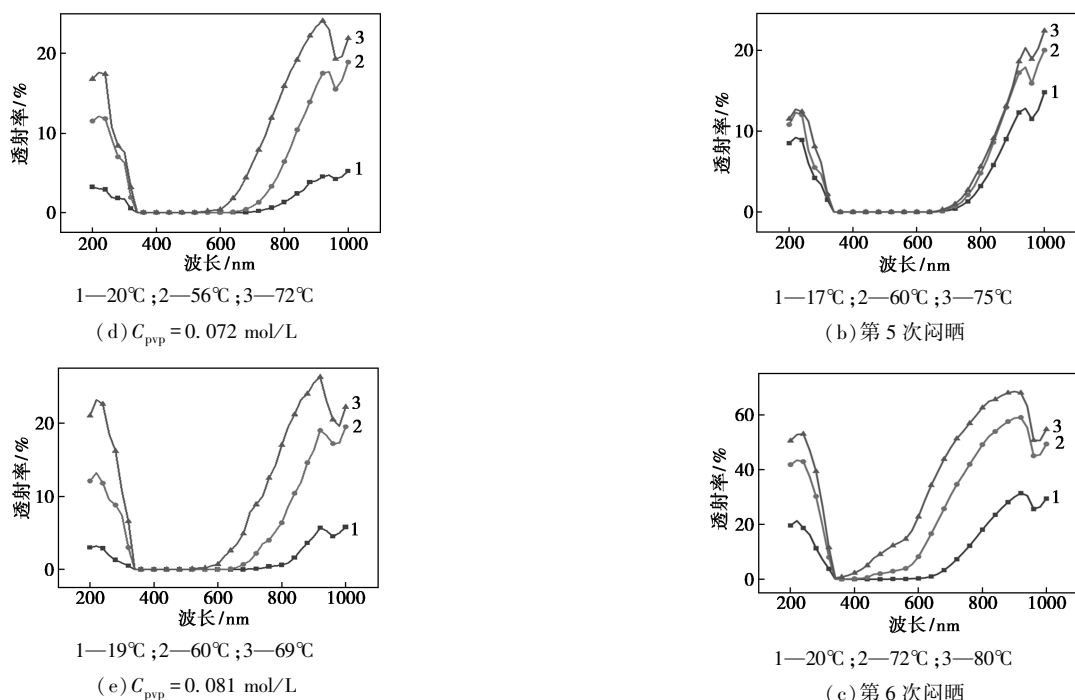


图2 不同PVP浓度纳米流体第5次闷晒实验结果

由图2中可以看出,随着PVP浓度的不断增加,制备得到的Cu-H₂O纳米流体的稳定性呈现先增加后减小的趋势。几组实验流体的透射率变化趋势保持一致,各个范围内的峰值点对应的波长大致相同,不同的是峰值点所对应的透射率不断增加,这是由于适量的表面活性剂能够促进纳米流体稳定分散,过多添加表面活性剂反而不利于流体稳定,且其浓度越高对传热的恶化越严重。因为当表面活性剂浓度过高时,会在纳米颗粒表面形成反溶胶束^[14],出现饱和吸附现象,不利于纳米流体的分散稳定性。

当PVP浓度为0.063 mol/L时,第7次闷晒实验完成后,实验流体中的Cu纳米颗粒全部氧化为黑色沉淀。不同闷晒次数下该组实验流体的透射率变化情况如图3所示(由于前3次实验中透射率没有明显变化,因此选取第4次实验后透射率变化作图)。

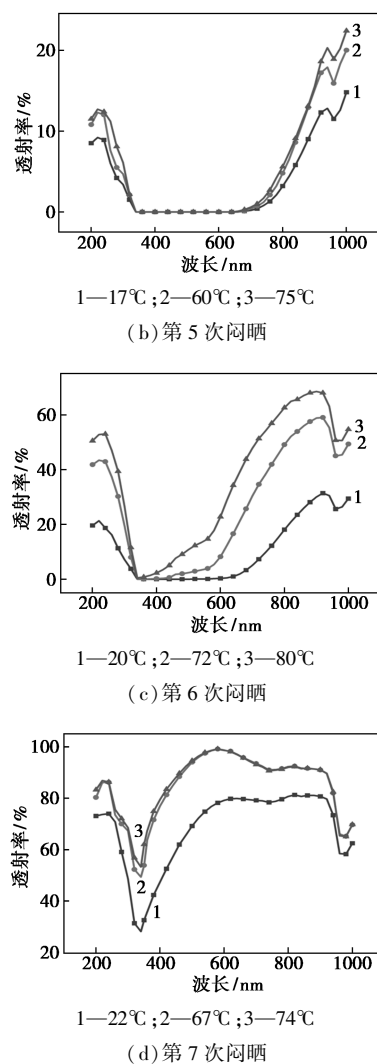
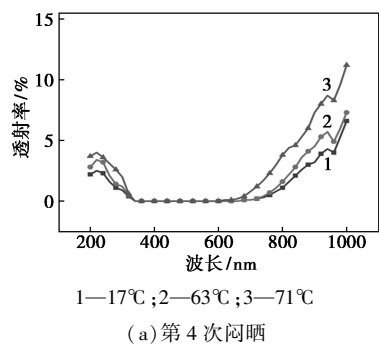


图3 $C_{pvp} = 0.063 \text{ mol/L}$ 时实验流体多次闷晒透射率变化情况

由图3中可以看出,实验流体在近紫外光波长范围(200~380 nm)内透射率呈现先增加后减小的趋势,在波长为240 nm时透射率达到最大;在可见光波长范围(380~700 nm)内,前几次闷晒由于并未发生沉淀或没有发生较大范围的沉淀,且实验流体在该波长范围内呈现出光不透过性,但是随着闷晒实验次数的增加,纳米流体中的Cu纳米颗粒不断氧化沉淀,表现在宏观上即实验流体颜色变淡,有少量光透过;在近红外波长范围(700~1 000 nm)内,实验流体的透射率呈现先增加后在900~920 nm之间达到最大值之后减小,在960 nm左右达到最小值,在980~1 000 nm波长范围内透射率持续增加。

2.2 复合材料比例变化对纳米流体太阳能集热性能的影响

混合纳米流体由不同种类的纳米颗粒与基液混

合制备而成,因此兼具不同种类纳米颗粒的优良特性,表现出比一元纳米流体更优异的光学特性和热物性。其中纳米颗粒的混合比例是影响纳米流体光学特性以及热物性的重要参数^[15],不同种类的纳米颗粒以不同的混合比例制备得到的复合纳米流体由于悬浮液中团簇构成的不同而在各方面表现出巨大的差异。

将纳米 SiO₂ 和纳米 Cu 颗粒复合制备得到水基 SiO₂-Cu 纳米流体,通过改变流体中纳米 SiO₂ 与纳米 Cu 添加量来研究纳米颗粒混合比例对复合纳米流体光热转换特性的影响。

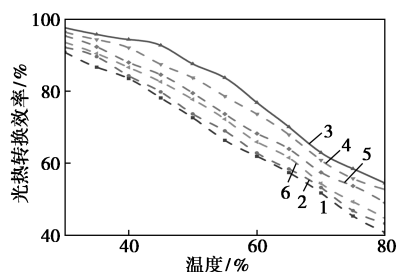
此外,纳米流体的光热转换效率 η 的计算式^[16]:

$$\eta = [mC_p(T_s - T_i)] / (AG\Delta t)$$

式中: m 和 C_p 分别为纳米流体的质量和比热; T_i 为纳米流体的初始温度; T_s 为纳米流体瞬时温度; A 为实验样品暴露在光辐射下的顶表面积; G 为入射光通量; Δt 为暴露于光辐射的时间。

在实验中,由于复合纳米流体的浓度较小,纳米流体的比热大约等于纯水的比热,其他参数均可通过实验测试或理论计算得到。

不同组分比例的纳米流体在 30~80℃ 范围内的光热转换效率曲线如图 4 所示。从图 4 中可以看出,对于所有纳米流体,光热转换效率最大值在第 1 个节点出现,该节点对应的温度为 30℃,之后光热转换效率随照射时间的推移而逐渐降低。同时随着纳米 SiO₂ 颗粒添加质量分数的不断增加,复合纳米流体的光热转换效率呈先增加后减小的趋势,在 SiO₂ 添加质量分数为 40% 时光热效率达最大值 97.64%,添加质量分数为 20% 的 Cu/SiO₂ 复合材料显示出最低的光热效率,为 90.81%。



1—20% SiO₂; 2—30% SiO₂; 3—40% SiO₂; 4—50% SiO₂;
5—60% SiO₂; 6—70% SiO₂

图 4 SiO₂ 质量分数对复合纳米流体光热转换效率的影响

在实验中纳米流体的温度升高是因为纳米流体

吸收的光辐射转化为热能。纳米流体的导热性、比热和光吸收特性被认为是温度升高的主要原因^[17]。由图 4 可知,当温度升高至 80℃ 时,几种复合纳米流体的光热效率均降低到最小值。同时能够直观地看出转换效率随 SiO₂ 添加质量分数的变化规律。因此,对于 Cu/SiO₂ 复合材料来说,存在能使光热转换效率达到最高的最佳 SiO₂ 质量分数。

3 结论

(1) 基于液相还原法(一步法)制备的 Cu-H₂O 纳米流体,通过闷晒实验与基液(去离子水)进行对比发现,纳米颗粒的加入对流体温升速率及光热效率的影响明显。

(2) 在反复加热的前提下,纳米流体在静置状态下的温升速率远大于流动状态下纳米流体的温升速率,但是流动状态下纳米流体的热稳定性要优于静置状态的纳米流体。

(3) 通过透射率的变化来直观反映流体的热稳定性,主要研究了表面活性剂(PVP)浓度对反复加热条件下纳米流体的稳定性影响。结果表明,存在一个最佳的表面活性剂浓度使得流体能够在反复加热情况下保证良好的稳定性。

(4) 通过复合纳米流体的光热转换实验并结合理论模型分析表明,纳米 SiO₂ 的引入有效地提高了基于水的 Cu 纳米流体的光学性能,且对于 Cu/SiO₂ 复合材料来说,存在一个最佳的比例使得复合纳米流体光热转换效率达最大值。

参考文献

- [1] Choi S U S, Eastman J A. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles[J]. *Asme Fed*, 1995, 231(1): 99-105.
- [2] Ma M, Zhai Y, Yao P, et al. Effect of surfactant on the rheological behavior and thermophysical properties of hybrid nanofluids[J]. *Powder Technology*, 2021, 379: 373-383.
- [3] 何钦波,汪双凤,曾社铨,等.直接吸收式太阳能集热纳米流体辐射特性实验研究[J]. *制冷学报*, 2014, (1): 109-113.
- [4] Kim Y H, Kim C W, Cha H G, et al. Preparation and characterization of Cu-SiO₂ nanocomposite[J]. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 2007, 472(1): 217-223.
- [5] Chen L, Xu C, Liu J, et al. Optical absorption property and photo-thermal conversion performance of graphene oxide/water nanofluids with excellent dispersion stability[J]. *Solar Energy*, 2017, 148: 17-24.
- [6] 张立德. 纳米材料和纳米结构[J]. *中国科学院院刊*, 2001, 16(6): 444-449.

(下转第 142 页)

- 2016, 105: 559–567.
- [3] Jorge A M S, Athira K K, Alves M B, *et al.* Textile dyes effluents: A current scenario and the use of aqueous biphasic systems for the recovery of dyes [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2023, 55: 104125.
- [4] He J, Zhai W, Wang S, *et al.* Persistently high Cr⁶⁺ removal rate of centi-sized iron turning owing to tribocatalysis [J]. *Materials Today Physics*, 2021, 19: 100408.
- [5] Cheng H, Liu Y, Li X, Adsorption performance and mechanism of iron-loaded biochar to methyl orange in the presence of Cr⁶⁺ from dye wastewater [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 415: 125749.
- [6] Futalan C M, Kan C C, Dalida M L, *et al.* Comparative and competitive adsorption of copper, lead, and nickel using chitosan immobilized on bentonite [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2011, 83 (2): 528–536.
- [7] Liu X, Wu F, Qu G, *et al.* Application prospect of advanced oxidation technology in wet process phosphoric acid production [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2022, 10 (6): 108868.
- [8] Chen G, Wu G, Li N, *et al.* Landfill leachate treatment by persulphate related advanced oxidation technologies [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 418: 126355.
- [9] Zheng J, Lei Z. Incorporation of CoO nanoparticles in 3D marigold flower-like hierarchical architecture MnCo₂O₄ for highly boosting solar light photo-oxidation and reduction ability [J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2018, 237: 1–8.
- [10] Liu J, Li Q, Xiao X, *et al.* Metal-organic frameworks loaded on phosphorus-doped tubular carbon nitride for enhanced photocatalytic hydrogen production and amine oxidation [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2021, 590: 1–11.
- [11] Wang Q, Zhou M, Zhang L, *et al.* A dual mode photoelectrochemical sensor for nitrobenzene and L-cysteine based on 3D flower-like Cu₂SnS₃@SnS₂ double interfacial heterojunction photoelectrode [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 382: 121026.
- [12] Afroz K, Moniruddin M, Bakranov N, *et al.* A heterojunction strategy to improve the visible light sensitive water splitting performance of photocatalytic materials [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2018, 6(44): 21696–21718.
- [13] Wang Q, Jiang M, Zhang L, *et al.* Label-free and visible-light driven photoelectrochemical sensor with CuCo₂O₄@CoO Core-shell hybrid rod as photoanode for selective sensing diclofenac [J]. *Electrochimica Acta*, 2021, 397: 139239.
- [14] Jiang M, Gao Y, Wang Z, *et al.* Photocatalytic CO₂ reduction promoted by a CuCo₂O₄ cocatalyst with homogeneous and heterogeneous light harvesters [J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2016, 198: 180–188.
- [15] Gao Q, Wang J, Wang J. Morphology-controllable synthesis of Cu-Co₂O₄ arrays on Ni foam as advanced electrodes for supercapacitors [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 789: 193–200.
- [16] Wang Q, Zhang L. An in situ engineered CuCo₂S₄@CuCo₂O₄ heterojunction with an O—S interpenetrated interface as a photoanode for selective photoelectrochemical bioanalysis [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2020, 8(18): 9077–9084.
- [17] Li Y, Yin J, An L, *et al.* FeS₂/CoS₂ interface nanosheets as efficient bifunctional electrocatalyst for overall water splitting [J]. *Small*, 2018, 14(26): e1801070.
- [18] Gu K, Pan X, Wang W, *et al.* In situ growth of Pd nanosheets on g-C₃N₄ nanosheets with well-contacted interface and enhanced catalytic performance for 4-nitrophenol reduction [J]. *Small*, 2018, 14(33).
- [19] Wang X, Li Y, Jin T, *et al.* Electrospun thin-walled CuCo₂O₄@C nanotubes as bifunctional oxygen electrocatalysts for rechargeable Zn-Air batteries [J]. *Nano Letters*, 2017, 17(12): 7989–7994.
- [20] You H, Zhang L, Jiang Y, *et al.* Bubble-supported engineering of hierarchical CuCo₂S₄ hollow spheres for enhanced electrochemical performance [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2018, 6(13): 5265–5270.
- [21] Czioska S, Wang J, Teng X, *et al.* Hierarchically structured CuCo₂S₄ nanowire arrays as efficient bifunctional electrocatalyst for overall water splitting [J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2018, 6(9): 11877–11883. ■
-
- (上接第 136 页)
- [7] Wu S, Wang H, Xiao S, *et al.* Numerical simulation on thermal energy storage behavior of Cu/paraffin nanofluids PCMs [J]. *Procedia Engineering*, 2012, 31: 240–244.
- [8] 毛凌波, 张仁元, 柯秀芳. 纳米铜粉在太阳能集热器循环工质中的分散 [J]. *有色金属*, 2010, 62(1): 22–26.
- [9] 刘景春, 韩建成. 跨世纪高科技材料纳米 SiO₂ 的应用领域 [J]. *化工新型材料*, 1998, (7): 3–6, 47.
- [10] Fang Junfei, Xuan Yimin. Investigation of optical absorption and photothermal conversion characteristics of binary CuO/ZnO nanofluids [J]. *RSC Advances*, 2017, 7(88): 56023–56033.
- [11] Granata G, Yamaoka T, Pagnanelli F, *et al.* Study of the synthesis of copper nanoparticles: The role of capping and kinetic towards control of particle size and stability [J]. *Journal of Nanoparticle Research*, 2016, 18(5): 1–12.
- [12] Xie H, Tian Y, Yang W, *et al.* Nano-copper: Wet-chemical synthesis and applications [J]. *Gongneng Cailiao/ Journal of Functional Materials*, 2017, 48(4): 04060–04065, 04071.
- [13] Kumar D Dhinesh, Arasu A Vala N. A comprehensive review of preparation, characterization, properties and stability of hybrid nanofluids [J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2018, 81(2): 1669–1689.
- [14] 李兴, 陈颖, 莫松平, 等. 表面活性剂对水基纳米流体固液相变特性的影响 [J]. *化工学报*, 2013, 64(9): 3324–3330.
- [15] 王少锋, 夏国栋, 吕远征. 混合比例对复合纳米流体在微通道内的流动换热特性影响研究 [J]. *工程热物理学报*, 2020, 41(7): 1689–1693.
- [16] Xuan Y, Duan H, Li Q. Enhancement of solar energy absorption using a plasmonic nanofluid based on TiO₂/Ag composite nanoparticles [J]. *RSC Advances*, 2014, 4(31): 16206–16213.
- [17] Chen L, Xu C, Liu J, *et al.* Optical absorption property and photothermal conversion performance of graphene oxide/water nanofluids with excellent dispersion stability [J]. *Solar Energy*, 2017, 148: 17–24. ■