

快速捕捉太阳能全天候温差发电装置

宋亚楠,王浩蕾

(南京航空航天大学 能源与动力学院,江苏 南京 210016)

摘要:以太阳能作为热源的温差发电技术在野外生存和太空供电中具有广阔的前景,但太阳能存在着随时间和空间变化而不稳定的缺点,温差发电技术难以获得持续的热源以产生电能。采用具有高导热高吸光能力的氮化铝-氮化钛-石蜡仿生型复合相变材料作为中间储/传热介质,用于吸收太阳能转化为热量供于温差发电片来产生可持续的电能。实验结果表明:该装置受太阳能资源波动影响小,持续发电能力强,具有野外和太空供电推广价值。

关键词:温差发电;太阳能;仿生复合相变材料;光热转换

中图分类号:TM615 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2022)06-0165-04

Device of Fast Capture Solar Energy and All-weather Thermoelectric Power Generation

SONG Yanan, WANG Haolei

(College of Energy and Power, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Although the thermoelectric power generation technology adopting solar energy as a heat source has broad prospects for survival in the wild and power supply in space, solar energy has the disadvantage of instability due to the changes of time and space, giving rise to the difficulty for thermoelectric power generation devices to gain a continuous heat source in electricity generation. Aluminum nitride-titanium nitride-paraffin bionic composite phase change material with high thermal conductivity and high solar absorption capacity is applied as the intermediate storage/heat transfer medium to absorb solar energy and convert it into heat for thermoelectric power generation device to generate sustainable electricity. The experimental results show that the device is less affected by the fluctuation of solar energy resources and strong in continuous electricity generation, with promotion value for power supply in the wild and space.

Keywords: thermoelectric power generation; solar energy; biomimetic composite phase change material; photothermal conversion

0 引言

随着工业社会的不断发展,电能在人们的生活中不可或缺,太阳能资源已经成为人们热衷于利用的能源。目前在野外生存和外太空等特殊场合利用太阳能的主流发电技术主要有光伏发电和温差发电等。但光伏发电由于半导体带隙的限制不能全光谱利用太阳能,且生产硅板的过程中污染严重,成本较高^[1-2],而以太阳能为热源的温差发电技术不存在这一问题。温差发电技术作为一种新型的发电手段,具有成本低廉、安全无污染的优点。其原理是利用了半导体中的塞贝克效应^[3-5],当两端存在温度差时即可产生电能。这一特性要求温差发电片有稳定的温度差,然而以太阳能为热源的温差发电片易受太阳能资源强度与时间、空间不匹配的影响,尤其是在夜间和阴雨天气没有太阳能可利用,这就造成温差发电装置不能全天候发电,限制了其进一步发展;而相变储热材料因其优异的储/放热性能而被广泛应用于太阳能应用领域^[6-7]。当

在太阳能强的时候相变材料熔化吸收热量存储热量,在太阳能弱或者没有的时候,相变材料凝固释放潜热,从而源源不断地提供热能,且相变过程保持温度不变,这也在一定程度上保证了发电片热端不会过热而发生损坏。

为了解决上述问题,本文通过引入仿生型的氮化铝(AIN)-氮化钛(TiN)-石蜡复合相变材料充当中间储/传热介质。在太阳能强的时候一边提供热量,一边发生熔化存储热量,在太阳能弱或者没有的时候,相变材料凝固释放热量提供给温差发电装置。实验测试结果表明其可以持续、稳定地产生电能,解决了传统太阳能驱动温差发电装置存在的痛点。

1 设计方案

1.1 整体装置设计

整体装置示意图如图1所示。该装置主要由仿生AIN-TiN-石蜡复合相变材料、陶瓷温差发电片、真空石英

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51820105010;52076106);南京航空航天大学研究生创新基地(实验室)开放基金项目资助(kfj20200215)

第一作者简介:宋亚楠(1996—),男,河南驻马店人,硕士研究生,研究方向为相变储热及高效热管理。

保温罩、散热装置组成。该装置将复合相变材料紧密贴合在温差发电片的热端,裸露在外侧的一端接收太阳能,通过仿生复合相变储热材料将热量传递给温差发电片作为热源,且相变材料相变过程温度不变,可防止发电片热端温度过高而损坏,发电片的冷端与散热装置相贴以提供冷源。此外,为了最大限度利用热量,且低温热辐射主要为红外波长,石英红外波段透过率低^[7-8],采用双层真空石英保温罩来减少热对流和热辐射损失,底部用高温胶密封。

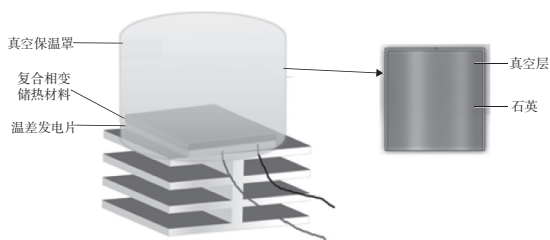
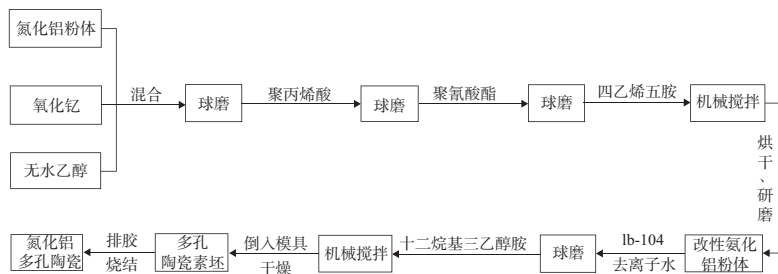


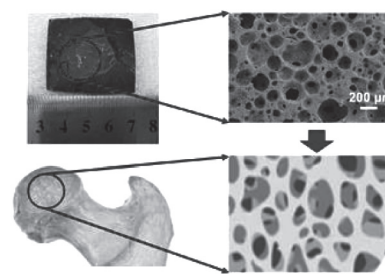
图1 装置设计示意图

1.2 仿生型 AlN-TiN-石蜡复合相变储热材料制备及性能表征

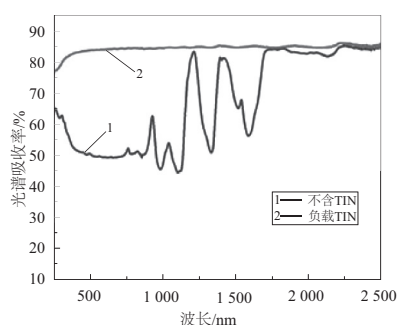
如图2(a)所示,采用发泡法^[9-11]制备了孔隙率约为70%的高导热 AlN 陶瓷骨架。具体工艺流程为:首先进行 AlN 的抗水解改性处理,将 AlN 粉体与氧化钇、无水乙醇按照质量比为 100:3:70 进行混合并球磨 0.5 h,随后加入 0.2 wt.% 的分散剂聚丙烯酸继续球磨 0.5 h,待其充分混合后加入 1 wt.% 抗水剂聚氧酸酯球磨 0.5 h。球磨结束后加入交联剂四乙烯五胺并机械搅拌 0.5 h,随后烘干、研磨得到改性后的 AlN 粉体。将改性后的 AlN 粉体与 0.3 wt.% 分散剂 Ib-104、去离子水混合制备成固体含量为 25 Vol%



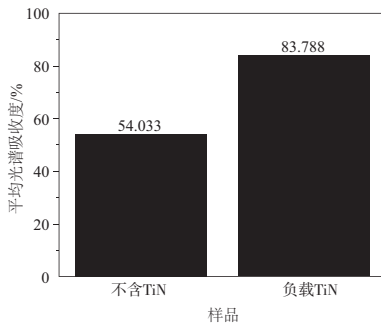
(a) AlN骨架制备工艺流程图



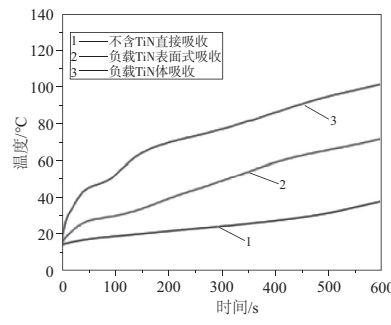
(b) AlN骨架物理尺寸及其孔隙结构与股骨孔隙结构对比



(c) 仿生复合相变储热材料光谱吸收率对比



(d) 仿生复合相变储热材料平均光谱吸收率对比



(e) 相同太阳照射条件下不同样品的升温图

图2 仿生型 AlN 骨架制备流程及 AlN-TiN-石蜡复合相变储热材料光热转换性能

的浆料,随后球磨 0.5 h,然后加入 0.7 wt.% 十二烷基硫酸三乙醇胺作为发泡剂机械搅拌 10 min,随后将浆料倒入方形模具中成型干燥脱模后得到多孔陶瓷素坯,在 600 °C 下排胶 4 h 后置于 1950 °C 氩气气氛中烧结 4 h,得到多孔 AlN 陶瓷。

如图2(b)所示,SEM 形貌图显示所制备的骨架孔隙结构与生物股骨内部孔隙结构极其相似,具有很好的仿生效果。将具有高光谱吸收能力的纳米 TiN^[12-14] 通过真空浸渍涂覆在骨架表面及内部,形成体系吸收,增强其光谱吸收能力。随后采用真空浸渍法^[15-17] 将熔融石蜡^[18-19] 浸入到 AlN-TiN 多孔骨架中,形成仿生型复合相变储热材料。如图2(c)-图2(d)所示,通过紫外分光光度计测得该仿生复合相变储热材料在全光谱波段均具有优秀的光谱吸收能力,平均光谱吸收率高达 83.78%,相对于未负载 TiN 的样品提高将近 30%。通过激光闪射导热仪测得该复合材料导热系数 $>30 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ^[20]。

为了证明体吸收的优势,将 3 种导热系数和尺寸相同的复合储热材料(表面和内部均涂覆 TiN 的体吸收样品、仅在复合材料表面涂覆 TiN 的表面式吸收样品、不含 TiN 的复合物直接吸收样品)同时置于阳光照射下,底部布置热电偶以检测温度变化,如图2(e)所示。可见表面和内部均含 TiN 的体吸收样品底部具有最快的升温速率,在 50 s 左右就达到了石蜡熔点,而仅在表面含 TiN 的表面式吸收样品则消耗了 300 s 才达到石蜡熔点,不含 TiN 的直接吸收样品的升温速率最慢,在 600 s 内仍未达到石蜡熔点。可见相对于传统的表面式吸收,该仿生复合相变储热材料可在光照下实现更均衡的体吸收,更快速地实现热量的均匀分布和传导。

2 装置性能测试

2.1 测试平台搭建

如图3所示,采用氙灯来模拟太阳光垂直照射在与发电片热端紧密贴合的仿生复合相变储热材料上,氙灯功率约 $15\,000\text{ W/m}^2$,发电片冷端与具有翅片结构的散热装置^[21]相连接,散热装置置于冰水混合物中以提供稳定冷源,其中仿生复合相变储热材料完全覆盖温差发电片热端,尺寸约为 $40\text{ mm}\times 40\text{ mm}\times 15\text{ mm}$,散热器尺寸为 $125\text{ mm}\times 125\text{ mm}$ 。分别利用氙灯光源的开关和可周期性旋转的叶片遮挡光源模拟了昼夜交替(白天有太阳,晚上无太阳)和多云天气(太阳时有时无)的工况。叶片旋转速度为 15 s/圈 ,氙灯光斑直径约 50 mm ,功率密度约为 $98\,000\text{ W/m}^2$ 。发电片产生的直流电压通过数据采集器实时记录。

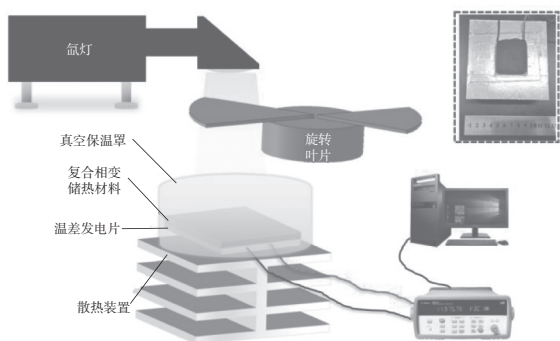


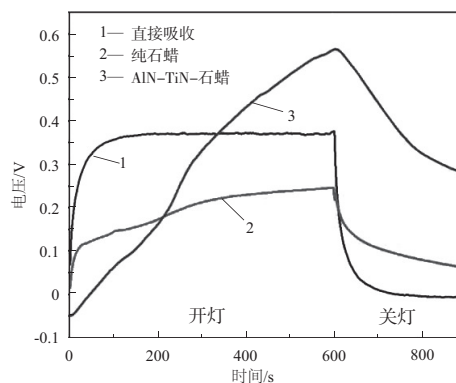
图3 全天候温差发电装置实验测试示意图

2.2 测试结果分析

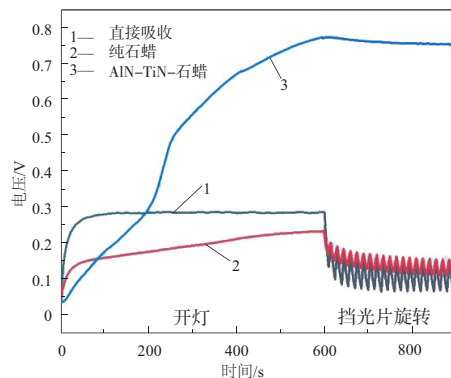
图4(a)展示了在相同光照条件下,无仿生复合相变材料(直接吸收)、有仿生复合相变材料(AIN-TiN-石蜡)及只含纯石蜡的发电片发电情况。可以看出,由于多了一层中间介质,初始太阳能能量需要先传递给仿生复合相变储热材料再传递给温差发电片,所以本文设计的发电装置初始发电电压值低于直接吸收太阳光的温差发电片,但由于仿生复合材料的高导热性和高吸光特性,其发电电压很快便超越直接吸收太阳光的温差发电片,而纯的石蜡材料由于其本身光谱吸收能力和导热系数低,不能很好地将热量传递给温差发电片,所以其发电电压一直都处于三者最小值。在氙灯照射 10 min 后关闭氙灯光源,因为仿生复合相变储热材料中的石蜡在氙灯照射时发生了相变,氙灯关闭时,发生凝固可以释放潜热给发电片,提供持续的热源,所以含仿生复合相变材料的发电片发电电压下降缓慢,但依然可以持续地产生电能。而仅含石蜡的发电片因为纯石蜡本身光谱吸收和导热性能差,没有发生相变,仅仅是存储了部分显热提供给发电片,所以发电片电压也很快下降,但下降速度没有直接吸收得快。不含石蜡直接吸收的发电片因为潜热和显热均没有得到储存,所以其产生的电动势很快便下降至未发电状态,不能持续产生电能。

图4(b)展示了在照射一段时间后相同遮挡板转动频率下的发电装置发电电压变化,可见前期趋势与模拟昼夜

交替的工况相同,照射 10 min 后开启旋转遮挡板,发现热端有纯石蜡和无石蜡直接吸收的发电片产生的电压先下降,然后随着遮挡板的旋转频率发生高低值的周期性变化,电压变得不稳定,波动严重,因为其存储的仅仅是显热或者没有热量。而含有仿生复合相变储热材料的温差发电片发电电压略有下降,随后基本维持在一个稳定值。其原因是在氙灯被遮挡时,仿生复合相变储热材料前期所存储的显热与潜热释放出来发挥了巨大的作用,氙灯未被遮挡时,其快速的光热捕捉转换能力又及时补充了热量。表1展示了两种工况平均发电电压大小,可见无论哪种工况,含仿生复合相变储热材料的发电电压都是处于三者最高值。



(a) 模拟昼夜交替工况时发电装置发电情况



(b) 模拟多云天气工况时发电装置发电情况

图4 不同工况下不同发电装置的发电性能对比

表1 三种发电片在两种工况下发电电压对比

单位:V

发电片类型	模拟昼夜工况	模拟多云工况
直接吸收	0.24	0.22
含纯石蜡	0.16	0.17
含 AIN-TiN-石蜡	0.32	0.57

3 结语

本文设计了一种利用具有容积式光热转换能力的仿生复合相变储热材料的全新温差发电装置,该仿生复合相变材料具有优异的高光谱吸收率、高导热特性,可以快速捕捉太阳能并就地转化为热量以提供持续不断的热源。

相对于原有的温差发电技术,本文设计改进的温差发电装置具有优异的快速捕捉太阳能的全天候发电特性,可以在太阳能资源波动时保持稳定、持续、量大的电能输出,具有优异的性能,可满足野外供电和太空供电的稳定性需求。

参考文献:

- [1] 杨金焕,葛亮,谈蓓月,等. 太阳能光伏发电的应用[J]. 上海电力,2006,19(4):355-361.
- [2] 周虹,林丽华,朱锐敏,等. 太阳能光伏发电的前景分析[J]. 现代物业(中旬刊),2014,13(5):14-15.
- [3] 张鸿声. 温差发电芯片在太阳能热发电系统中的实验研究[D]. 广州:华南理工大学,2012.
- [4] 陈国庆. 半导体温差发电实验装置的研制[D]. 西安:陕西科技大学,2014.
- [5] 吕霄,陈家伟,刘聪,等. 半导体温差发电片的研究[J]. 通信电源技术,2019,36(7):17-18,22.
- [6] KHUDHAIR A M, FARID M M. A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials[J]. Energy Conversion and Management, 2004,45(2):263-275.
- [7] 石豪. 透明真空保温技术[J]. 新能源,1994(2):1-9.
- [8] 蔡如华,卢文全,丁宣浩. 热辐射波长测温法的理论研究[J]. 宇航计测技术,2003,23(4):19-23.
- [9] 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.
- [10] YIN L Y, ZHOU X G, YU J S, et al. Preparation of high porous silicon nitride foams with ultra-thin walls and excellent mechanical performance for heat exchanger application by using a protein foaming method[J]. Ceramics International, 2016, 42(1):1713-1719.
- [11] 徐勇刚. AlN/树脂复合材料的制备及性能研究[D]. 上海:中国科学院大学(中国科学院上海硅酸盐研究所),2018.
- [12] ELKORASHY A M. Optical absorption in tin monoselenide single crystal[J]. Journal of Physics and Chemistry of Solids, 1986,47(5):497-500.
- [13] MANYAKIN M D, KURGANSKII S I, DUBROVSKII O I, et al. A novel approach to the electronic structure and surface composition investigations of tin-oxygen system materials by means of X-ray absorption spectroscopy combined with ab initio calculations[J]. Computational Materials Science, 2016, 121: 119-123.
- [14] HU K Y, WANG D, ZHAO W, et al. Intermediate band material of titanium-doped tin disulfide for wide spectrum solar absorption[J]. Inorganic Chemistry, 2018, 57(7):3956-3962.
- [15] CHANG S J, WI S, LEE J, et al. Development of vacuum impregnation equipment and preparation of mass/uniform shape-stabilized phase change materials[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 132:817-824.
- [16] NOMURA T, OKINAKA N, AKIYAMA T. Impregnation of porous material with phase change material for thermal energy storage[J]. Materials Chemistry and Physics, 2009, 115(2/3):846-850.
- [17] LEE J, WI S, YUN B Y, et al. Thermal and characteristic analysis of shape-stabilization phase change materials by advanced vacuum impregnation method using carbon-based materials[J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2019, 70: 281-289.
- [18] LI M. A nano-graphite/paraffin phase change material with high thermal conductivity[J]. Applied Energy, 2013, 106:25-30.
- [19] LI X Y, SANJAYAN J G, WILSON J L. Fabrication and stability of form-stable diatomite/paraffin phase change material composites[J]. Energy and Buildings, 2014, 76:284-294.
- [20] LIU X L, WANG H L, XU Q, et al. High thermal conductivity and high energy density compatible latent heat thermal energy storage enabled by porous AlN ceramics composites[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, 175: 121405.
- [21] 徐婷婷,吴玉庭,马重芳. 不同环境中翅片散热器性能的仿真研究[J]. 电子器件,2009,32(4):850-854.

收稿日期:2021-07-20