

单元组合转子管式太阳能动态集热器实验研究

王 晗, 杨卫民, 何立臣, 贾雨川, 阎 华*

(北京化工大学机电工程学院, 北京 100029)

摘要:针对管式太阳能集热器集热效率低的问题, 提出将太阳能光热利用与植物培养相结合的太阳能综合利用新方法——光热农业, 并设计动态集热器, 搭建单元组合转子管式太阳能动态集热实验台。以贮水温度变化、瞬时效率和平均效率作为检测指标, 对比单元组合转子对管式动态集热器光热转换过程的影响, 同时比较流速、转子结构和转子颜色的影响。实验结果表明, 低流阻黑色转子组在各个方面都展现出优异的性能, 光热转换效率在转子作用下大幅度提高, 其中平均效率比光管组高 32.63%; 与同结构的两叶片转子比较发现, 黑色转子性能优于透明转子; 不同结构的转子比较发现, 低流阻转子优于两叶片转子。同时组合转子无需外加动力、自清洁, 在光热农业中具有广阔应用前景。

关键词: 太阳能综合利用; 动态集热器; 单元组合转子; 场协同原理

中图分类号: TK512

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2018)02-0177-04

DOI: 10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2018.02.042

Experimental research on tubular solar dynamic heat collector with unit combined rotor

WANG Han, YANG Wei-min, HE Li-chen, JIA Yu-chuan, YAN Hua*

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: In view of the low collecting efficiency of tube solar collector, a new method of solar energy comprehensive utilization, which combines solar energy utilization and plant cultivation, is proposed. This method is called Photothermal Agriculture. Furthermore, the corresponding dynamic collector is designed, and the experimental table for tubular solar dynamic collector with unit combined rotors is set up. The changes of water storage temperature, instantaneous efficiency and average efficiency are taken as detection indicators, the influence of unit combined rotors on the photothermal conversion efficiency of tubular solar dynamic collectors is investigated, and the influences of fluid velocity, rotor structure and rotor color are also compared at the same time. The results show that the low flow resistance black rotor group exhibits excellent performance in all aspects. The photothermal conversion efficiency is greatly improved under the action of rotors, of which the average efficiency of the low flow resistance black rotor group is 32.63% higher than that of light tube group. Comparison of two blade rotors with the same structure shows that the black rotor has better performance than that of the transparent rotor. Comparison of rotors with different structures shows that the rotor with low flow resistance has better performance than that of two blade rotor. At the same time, the combined rotor needs no additional power, and it is able to avoid scaling, so it has broad application prospects in Photothermal Agriculture.

Key words: comprehensive utilization of solar energy; dynamic heat collector; unit combined rotor; field synergy principle

能源短缺、全球变暖和环境保护形势日益严峻, 新能源的开发利用迫在眉睫。太阳能清洁无污染、充足分布广, 成为人类社会可持续发展的重要选择^[1]。目前, 太阳能利用主要有光伏和光热 2 种。光伏技术发展成熟、应用广泛, 但光伏电池的生产过程高能耗、高污染^[2]。太阳能光热利用指直接将太阳辐射热能进行收集利用的方式^[3], 关键是将太阳的辐射能转化为热能, 而实现这种转化的器件是太阳能集热器, 因此, 太阳能集热器的研究、开发与应用对太阳能资源的高效利用至关重要。

太阳能集热器通常可分为平板集热器和真空管集热器^[4]。平板集热器凭借承压能力强、易与建筑相结合等特点得到广泛应用^[5], 但热损失严重, 制作成本高, 风阻大^[6], 制约着其发展。真空管集热器当中, 玻璃真空管结构简单, 制作成本低, 集热条件便于控制, 得到了广泛应用。由于太阳能本身分散、间断, 且在集热装置中只有上表面的集热介质能

够进行高效光热转换, 其他部分的介质大多采用热传导方式被加热, 目前集热装置都普遍存在着集热效率低的问题。

针对集热器集热效率低的问题, 有越来越多的研究采用将太阳能利用与其他技术相结合的方式, 进行太阳能综合利用, 如绿色建筑^[7]、太阳能沼气温室^[8]、光伏农业^[9]等。

本研究提出将太阳能光热利用与植物培养相结合的太阳能综合利用方法——光热农业, 并设计对应的动态集热器; 搭建单元组合转子管式太阳能动态集热实验台, 并通过实验分析单元组合转子对管式动态集热器性能的影响。

1 技术原理

1.1 太阳能综合利用新技术

有研究表明, 绿色植物的生长主要依靠红蓝光, 其他波长的光甚至不利于植物生长^[10](图 1)。依

据这一原理及选择性透光膜的分光作用,将农业大棚与太阳能集热器相结合,进行光热农业,实现太阳能综合利用。如图 2 所示,光热农业装置由选择性透光膜、集热管件及墙体等组成。红蓝光穿过选择性透光膜供给植物生长,非红蓝黄被收集利用,后续可进行热发电或直接利用热能等。由图 2 可知,光热农业需要动态集热装置,而目前关于管式集热器的研究多涉及静态结构,且集热介质质量小。针对此太阳能综合利用技术,需要开发一种高光热转换率的太阳能动态集热器。

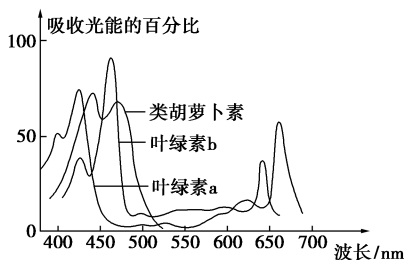
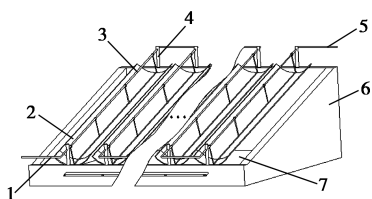


图 1 植物色素光谱吸收特性图



1—出水管;2—选择性透光膜;3—集热管;4—支架;
5—入水管;6—墙体;7—绿色植物种植区

图 2 光热农业原理图

1.2 单元组合转子管式太阳能动态集热器技术原理及结构方案

1998 年过院士提出“场协同”原理^[11],证明减小速度矢量和温度梯度之间的夹角是强化对流传热的有效途径,即流动的存在可以强化传热。在真空集热管内安装单元组合转子,通过流体流动使其旋转形成多个纵向涡流(图 3),增强管内流体扰动,强化管内光热转换过程,达到提高太阳能管式集热器光热转换效率的目的。

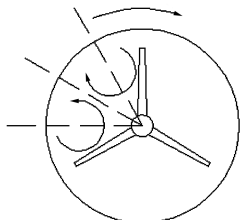
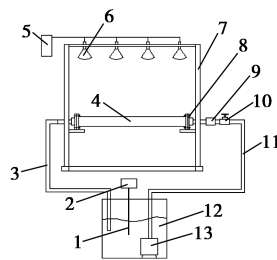


图 3 单元组合转子管内纵向涡流示意图

单元组合转子管式太阳能动态集热实验台结构如图 4 所示,由集热系统、动态循环系统以及检测系

统组成。集热系统包括集热管、太阳光模拟灯、电源和支架组成,采用 4 个均匀布置的全光谱太阳光模拟灯模拟太阳光的照射;动态循环系统包括泵、水槽、阀门和出入水管;检测系统包括温度传感器、测温探头和流量计。



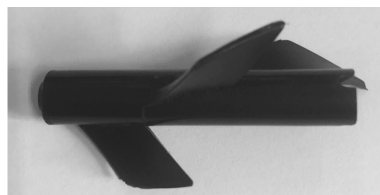
1—测温探头;2—温度传感器;3—出水管;4—集热管;
5—电源;6—太阳光模拟灯;7—支架;8—连接法兰;
9—流量计;10—阀门;11—入水管;12—水槽;13—泵

图 4 单元组合转子管式太阳能动态集热实验台结构示意图

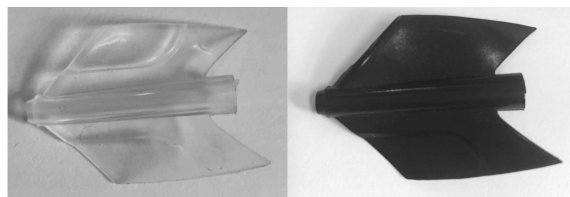
集热管内可通过固定件、转轴来安装单元组合转子,集热介质的流动带动转子转动,从而实现光热转换效率的增强。

2 实验探究

选用在强化传热传质过程中表现出优异性能的低流阻转子和两叶片转子^[12],设置光管组、低流阻黑色转子组、两叶片透明转子组和两叶片黑色转子组,转子结构如图 5 所示。



(a) 低流阻转子



(b) 两叶片转子

图 5 转子结构图

集热管采用有机玻璃加工而成,为真空管,管长 1 m,直径 30 mm。

太阳光模拟灯(欧司朗,UV 300 W),测定辐射强度为 340 W/m²;泵(森森,HQB-5500),流量通过阀门调节;水槽采用有机玻璃加工而成,尺寸为

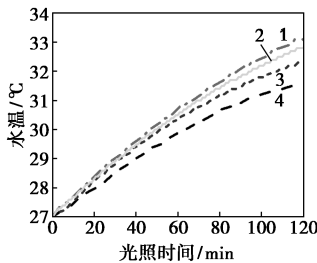
30 cm×30 cm×30 cm,壁厚 1 cm,实验介质为清水,贮水体积为 29 cm×29 cm×16 cm。

3 结果与分析

将一定体积的水加入水槽后,打开泵和太阳光模拟灯,期间设定每隔 1 min 自动记录一次水槽内温度。以贮水温度变化、瞬时效率和平均效率作为检测指标,对比单元组合转子对管式太阳能动态集热器光热转换效率的影响,同时比较流体流速、转子结构和转子颜色的影响。

3.1 贮水温度变化的比较

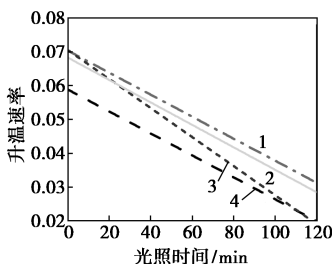
贮水温度是衡量集热器性能的重要参数,在 150 L/min 流量下,不同实验组随光照时间、贮水温度的变化如图 6 所示。由图 6 可知,随光照时间变长水温不断升高,安装有转子的集热管明显比光管温度更高,在 120 min 时,低流阻黑色组水温达到 33.1℃,而光管水温为 31.6℃。对比不同转子发现,两叶片转子组的水温低于低流阻转子组,且在两叶片转子当中,黑色转子组的水温明显高于透明转子组。



1—低流阻黑色;2—两片叶黑色;3—两片叶透明;4—光管

图 6 贮水温度随光照时间的变化

用二次函数拟合贮水温度变化曲线,拟合结果的确系数都大于 0.999 5,求导后得到升温速率随时间的变化关系,如图 7 所示。可见,光管组、低流阻黑色转子组和两片叶黑色转子组的升温速率曲线基本平行,即升温速率随时间具有相似的变化规律,但有转子组升温速率明显更高。透明转子组开始升温速率很高,但降低很快。



1—低流阻黑色;2—两片叶黑色;3—两片叶透明;4—光管

图 7 升温速率随时间的变化

集热介质的流动带动转子转动,转子的转动反作用于流体,增强了流体的径向湍动程度,提高了光能转换为热能的效率。该实验证明了场协同原理同样适用于光热转换过程。同时,不同转子对光热转换效率的影响不同,由实验结果可知,低流阻转子结构优于两叶片转子,黑色转子优于透明转子。

为探究流速对光热转换的影响,通过调节阀门,设置不同流速。实验结果如图 8 所示,其中(a)为光管组实验结果,(b)为低流阻黑色转子组实验结果。由图 8 可知,不论光管组还是低流阻黑色转子组,流量对水温的变化没有明显影响,因此可以推断出,在一定流量范围内,流量的变化对光热转换效率几乎没有影响。这是由于在集热管内只有上表面的集热介质能够进行高效光热转换,其他部分的介质大多采用热传导的方式被加热,轴向流速的增加并不能改变这一状况,因此流量的变化对光热转换效率几乎没有影响,即轴向的流动对光热转换过程没有影响。

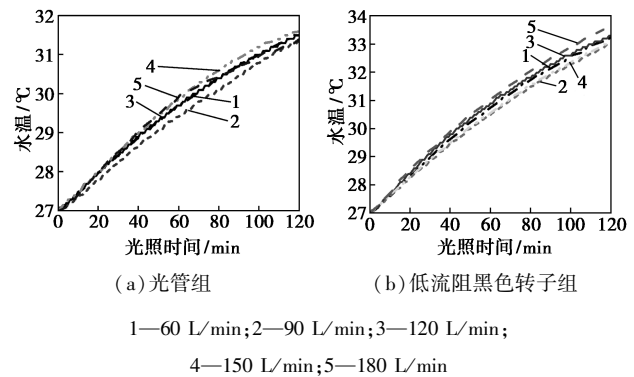


图 8 不同转速下贮水温度随光照时间的变化图

3.2 瞬时效率

瞬时效率指某一时刻太阳能集热器的光热转换效率,理论上讲,测量及计算间隔越短将越接近于真实值,但考虑到在较短时间内光照不能引起水温的可测性变化,本文中取 10 min 作为测量间隔,计算公式为:

$$\eta = [m c_p (T_{i+1} - T_i) / \Delta \tau] / (A I + q_{\text{泵}}) \quad (1)$$

式中, η 为瞬时效率; m 为装置中贮水总质量,kg; c_p 为水的比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; T 为水温, $^\circ\text{C}$;下标 $i, i+1$ 表示前后 2 个时刻; A 为集热器采光面积; I 为太阳光模拟灯辐射强度, W/m^2 ; $q_{\text{泵}}$ 为泵产生的热量, J ; $\Delta \tau$ 为测试时间,s。

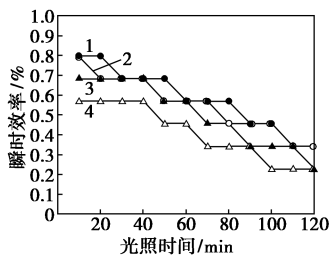
通过实验测量泵产生的热量 $q_{\text{泵}}$ 。采用单元组合转子管式太阳能动态集热器进行泵产热的测量,实验采用光管进行,关闭太阳光模拟灯,只打开泵,进行管出口处的温度测量。实验测量得到 2 h 内水

温变化了 2.3℃。计算公式为：

$$q_{\text{泵}} = mc_p \Delta T / \Delta \tau \quad (2)$$

计算得到泵产生的热量为 17.94 J。

通过式(1)计算得到瞬时效率,计算结果如图 9 所示。由图 9 可知,4 个实验组的瞬时效率随光照时间的延长而不断降低,即 t 增大, η 减小。这是由于随时间延长,水温不断升高,装置的温度也整体升高,对外热损失就会越严重,尽管装置选用了真空集热管,但其他链接管件仍然存在少量热损。从整体上看,低流阻黑色转子组及两叶片黑色转子组在刚开始时瞬时效率达 80%,透明转子组初始效率为 68.44%,可见黑色转子更能够提高光热转换效率,这是由于黑色转子本身黑度高,能够吸收一部分热量,将这部分热再传递给水。同时,光管组的初始效率仅为 57.04%,转子通过提高径向湍动程度提高了光热转换效率。同时,同为黑色的低流阻转子和两叶片转子始终保持相近的变化规律,但两叶片的效率始终低于低流阻转子,可见,转子结构对光热转换效率也有一定影响,这是由于不同转子产生的径向湍动程度也不同,因此对光热转换的影响程度也有所不同。



1—低流阻黑色;2—两叶片黑色;3—两叶片透明;4—光管

图 9 瞬时效率随光照时间的变化

3.3 平均效率

平均效率指的是,在太阳辐射条件下,一段时间内,集热器当中集热介质吸收的热量与采光面上的太阳辐射能量之比。平均效率计算公式为：

$$\eta_m = [mc_p(T_e - T_s) / \Delta \tau] / (AI + q_{\text{泵}}) \quad (3)$$

式中, η_m 为一段时间内的平均效率; T_s 为初始贮水温度,℃; T_e 为终止贮水温度,℃。

4 组集热管的平均效率计算结果如表 1 所示。

表 1 不同实验组平均效率的比较 %

实验组	光管组	低流阻黑色转子组	两叶片透明转子组	两叶片黑色转子组
平均效率	44.01	58.37	50.71	55.50

从表 1 可以得出,低流阻转子组比光管组的平均效率高 32.63%,而同样结构的两叶片转子组当

中,黑色转子的平均效率比透明转子高 9.45%,同为黑色的不同结构的转子平均效率也有一定差异,低流阻转子比两叶片转子高 5.17%。可得出与之前相同的结论。

4 结论

(1) 单元组合转子能够提高动态集热器的光热转换效率。流体流动带动组合转子的转动,形成多个纵向涡流,提高径向湍动程度,从而提高光热转换效率,场协同原理能够推广到光热转换过程。

(2) 轴向流动对光热转换过程几乎没有影响。在一定流量范围内,流量的增大能够提高轴向流动速度,但是轴向流动对光热转换过程几乎没有影响。

(3) 不同转子结构对光热转换效率的提高程度不同。低流阻转子结构优于两叶片转子结构。

(4) 转子颜色对光热转换过程有一定影响,黑色转子优于透明转子。

本文中着重讨论了组合转子对光热转换性能的影响,与此同时,组合转子更具备了自清洁、无需加动力的优点,符合绿色农业的要求。光热农业能够实现太阳能综合利用,而单元组合在大规模光热农业上具有很好的应用前景。

参考文献

- [1] 缪仁杰,李淑兰.太阳能利用现状与发展前景[J].应用能源技术,2007,(5):28-33.
- [2] 瞿露,付宏祥,汪诚文,等.我国太阳能电池板生产中的环境污染问题[J].环境工程,2013,31(S1):398-400.
- [3] 殷志强.太阳能光热技术的进展[J].太阳能,2011,(18):29-33.
- [4] 谭志文,曹小林,黄晓峰,等.太阳能集热器的研究动向[J].家电科技,2011,(8):72-73.
- [5] Gianpiero Colangelo, Ermani Favale, Paola Miglietta, et al. Innovation in flat solar thermal collectors: A review of the last ten years experimental results[J].Renewable and Sustainable Energy Reviews,2016,(57):1141-1159.
- [6] 杨先亮,刘新雨,田胜楠,等.平板型太阳能集热器性能影响因素模拟分析[J].煤气与热力,2016,36(12):11-14.
- [7] 达卉莉.绿色建筑太阳能热利用综合效益评价研究[D].西安:西安科技大学,2015.
- [8] 崔景峰,胡江.太阳能沼气温室综合利用试验[J].中国沼气,1996,(3):39-41.
- [9] 张小杭,崔寿福,刘福平.光伏农业的发展概况[J].安徽农业科学,2015,(19):229-231.
- [10] 胡阳,江莎,李洁,等.光强和光质对植物生长发育的影响[J].内蒙古农业大学学报:自然科学版,2009,(4):296-303.
- [11] Guo Z Y, Li D Y, Wang B X. A novel concept for convective heat transfer enhancement[J].International Journal of Heat and Mass Transfer,1998,41(14):2221-2225.
- [12] 何长江.组合转子阻垢特性理论及实验研究[D].北京:北京化工大学,2015.■