

# 太阳能集热器空气 / 水双循环换热特性模拟研究

马进伟, 李 葱, 方 浩, 杜 涛

(安徽建筑大学 环境与能源工程学院, 安徽 合肥 230601)

**摘 要:** 太阳能集热器通过吸收太阳辐照能加热水和空气, 实现太阳能的光热利用。为进一步探究集热器的集热性能, 利用 CFD 技术对水集热、空气集热、空气-水复合集热过程进行数值模拟, 研究换热工质在不同温度、流速条件下的集热特性。辐照度  $800 \text{ W/m}^2$  的模拟工况显示: 水集热模式下, 随着水流速度的增加, 集热效率不断升高, 流速  $0.1 \text{ m/s}$ 、入口温度  $290 \text{ K}$  时热效率最高, 可以达到  $74.73\%$ ; 空气集热模式下, 流速  $1.0 \text{ m/s}$ 、入口温度  $300 \text{ K}$  时集热效率最佳, 为  $51.74\%$ ; 复合集热模式下, 水集热和空气集热过程存在相互制约的关系, 空气、水流速分别  $0.5 \text{ m/s}$ 、 $0.1 \text{ m/s}$ , 入口温度  $300 \text{ K}$  时, 综合热效率最高, 达到  $71.66\%$ 。从能量利用效率角度分析, 水集热模式适用于春秋两季, 空气集热模式适用于冬季, 空气-水复合集热模式适用于夏季。

**关键词:** 太阳能; 集热器; 数值模拟; 换热; 热效率

中图分类号: TK519

文献标识码: A

文章编号: 2095-8382(2022)01-040-06

## Simulation Study on Heat Transfer Characteristics of Solar Collector with Air/Water Dual Circulation

MA Jinwei, LI Cong, FANG Hao, DU Tao

(School of Environment and Energy Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China)

**Abstract:** The solar collector heats water and air by concentrating radiation from the Sun. To study the collector performance, numerical simulations of solar water, air and air-water composite collector processes were performed with CFD technology to explore the collector characteristics of the heat transfer medium under different temperatures and flow rates. The simulation with an irradiance of  $800 \text{ W/m}^2$  show that with water heating mode, the heat collection efficiency increases with the increase of water flow rate, and reach the summit of  $74.73\%$  at a flow rate of  $0.1 \text{ m/s}$  and an inlet temperature of  $290 \text{ K}$ ; with air heating mode, the highest collection efficiency of  $51.74\%$  is achieved at a flow rate of  $1.0 \text{ m/s}$  and an inlet temperature of  $300 \text{ K}$ ; with composite heating mode, the water collector and air collector processes can interact with each other, and the highest collection efficiency of  $71.66\%$  is achieved when the air and water flow rates are  $0.5 \text{ m/s}$  and  $0.1 \text{ m/s}$  respectively, and the inlet temperature is  $300 \text{ K}$ . Considering the energy utilization efficiency, the water heating mode is preferable in spring and autumn; the air heating mode is preferable in winter, and the air-water composite heating mode is preferable in summer.

**Keywords:** solar energy; collector; numerical simulation; heat transfer; thermal efficiency

收稿日期: 2021-05-13

基金项目: 安徽省重点研究与开发项目(202004a07020049); 安徽省高校自然科学研究项目(KJ2020JD15); 安徽省高校协同创新项目(GXXT-2019-019); 安徽省教育厅高校研究生科学研究项目(YJS20210503)

作者简介: 马进伟(1986-), 男, 副教授, 博士, 研究方向: 太阳能光伏光热综合利用;

李葱(1996-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 太阳能光热利用。

太阳能双效集热器将加热水和空气的功能相结合实现光热利用,广泛应用于建筑采暖、生活用水、产品干燥等领域<sup>[1-3]</sup>。

目前,为提高集热器的工作性能,国内外学者对太阳能集热器展开了大量的研究工作。Saim 等<sup>[4-6]</sup>通过实验和模拟研究了不同翅片结构对太阳能空气集热器集热效率的影响;胡建军等<sup>[7]</sup>利用构建的空气集热器模型,分析了集热器内部主动旋流和被动旋流的流动及传热特性;贾斌广等<sup>[8]</sup>提出涡旋型太阳能空气集热器并优化了扰流板的结构布置,进一步提升集热效率;刘爽等<sup>[9-10]</sup>对不同换热结构的空气流道进行优化,模拟结果显示集热效率最高达到 51.29%。Ma 等<sup>[11]</sup>将双效集热器与建筑相结合,对冬季采暖工况展开实验研究。结果表明,室内温度提高明显,节能效果显著;童维维等<sup>[12]</sup>基于 Fluent 软件平台对比模拟光电-空气、光电-水模式下的能效比率。综上所述,有关空气集热器的研究已较为广泛,而有关水集热、空气-水复合集热的模拟研究少有涉及。

针对上述问题,本文提出一种利用太阳能加热水/空气的双效集热装置,能够根据实际需求调节集热工况,解决空气、水单一集热模块季节性适用问题,同时空气、水集热模块的一体化结构可有效节约占地面积,实现太阳能的综合利用。结合夏热冬冷地区的气候特点,运用 Computational Fluid Dynamics (简称 CFD) 技术数值模拟集热器的换热工质在不同工况下,水集热、空气集热和空气-水复合集热的换热特性,拓宽太阳能集热器的应用领域,为进一步优化集热器性能提供新的思路 and 理论依据。

## 1 双效集热器模型

### 1.1 物理模型

太阳能双效集热器物理模型如图 1 所示,空气流道为下风道式。集热器尺寸大小为 2 000 mm × 1000 mm × 80 mm,其中,吸热板长 1 950 mm,宽 950 mm。吸热板上侧为高度 25 mm 的空气夹层,高度 35 mm 的空气流道分布在吸热板下侧。7 根内径 8 mm 的铜管均匀焊接在吸热板的背面,两端与直径为 22 mm 的集水管相连。集热器底部和边框采用玻璃纤维进行保温。表 1 为集热器的各项

物性参数。

表 1 物性参数表

材料	比热容 /J/(kg·K)	密度 /(kg/m <sup>3</sup> )	导热系数 /W/(m·K)
铜管	381	8979	387.6
玻璃盖板	829	2220	1.15
玻璃纤维	835	2300	0.071
吸热板	870	2720	202.4

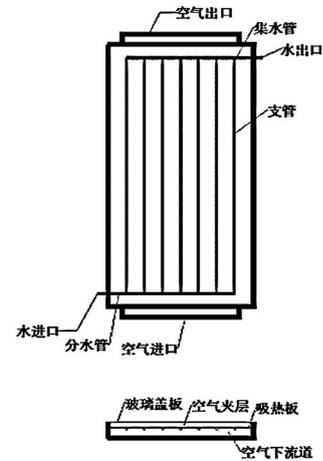


图 1 下流道式太阳能双效集热器结构示意图

### 1.2 数学模型

双效集热器中工质的循环流动满足以下方程:

(1) 连续性方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \left( \frac{\partial \rho u_x}{\partial x} + \frac{\partial \rho u_y}{\partial y} + \frac{\partial \rho u_z}{\partial z} \right) = 0 \quad (1)$$

式中, $\rho$  为流体密度, kg/m<sup>3</sup>;  $u_x, u_y, u_z$  为速度在  $x, y, z$  方向上分量, m/s。

(2) 能量守恒方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho T)}{\partial \tau} + \rho \left( u_x \frac{\partial T}{\partial x} + u_y \frac{\partial T}{\partial y} + u_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \\ = \frac{\lambda}{c_p} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + S_k \end{aligned} \quad (2)$$

式中, $T$  为温度, K;  $\lambda$  为导热系数, W/(m·K);  $c_p$  为工质比热容, J/(kg·K);  $S_k$  为内热源项, w。

(3) 动量守恒方程

$$\rho \frac{D\vec{v}}{Dt} + \nabla P = \phi + \psi \quad (3)$$

式中,  $\nabla P$  为压力梯度, Pa;  $\psi$  为粘滞阻力 N;  $v$  为速度, m/s;  $\phi$  为体积力, N; 其它参数含义如前。

## 2 模拟过程及方法

### 2.1 边界设定

- (1) 环境温度设为 300 K, 吸热板作为内热源;
- (2) 玻璃盖板设置对流与辐射混合边界;
- (3) 集热器四周为对流换热边界;
- (4) 水管与空气接触面设为耦合边界;
- (5) 空气及水进口设为速度入口, 出口设为压力出口。

### 2.2 网格划分

利用 SpaceClaim DesignModeler (SCDM) 对集热器模型精细化分割, 网格划分采用 Ansys Meshing 进行, 局部结构采用加密网格, 经网格无关性验证发现, 当网格数在 129 万时, 模拟结果趋于稳定。因此, 本模拟中网格数选择为 130 万。

### 2.3 模型选择

由于集热器内部工质流速较低, 温度变化幅度较大, 温度分层明显, 故选用 Boussinesq 假设考虑浮升力的影响。为更好地解释涡流、射流、二次流等复杂流动, 采用 Realizable  $k-\varepsilon$  模型考虑流体粘性和耗散率对传热过程的影响较为合适。选择 DO 辐射传热模型, 在空气集热, 水集热和空气-水复合集热模式下均采用 SIMPLIC 算法。动量与能量离散方程采用二阶迎风差分格式, 压力离散方程采用 Body Force Weighted, 湍动能及 DO 离散方程采用一阶迎风差分格式。

### 2.4 集热效率

集热效率为工质热能的增量与太阳辐照能之比:

$$\eta_e = \frac{\dot{m}c_p\Delta t}{A_k G_0} \quad (4)$$

其中:  $\dot{m}$  为工质的质量流量, kg/s;  $\Delta t$  为工质的进出口温差, K;  $A_k$  为吸热板的面积,  $m^2$ ;  $G_0$  为太阳能辐照强度,  $800 W/m^2$ 。

## 3 模拟结果及分析

### 3.1 水集热模拟

为探究水流速度变化对水出口温度和集热效率的影响, 当水流入口温度为 300 K 时, 改变水流进口流速 (0.01~0.1 m/s), 水出口温度及集热效率变化趋势如图 2 所示。由图分析可知, 随着水

流速的增加, 集热效率逐渐提升, 但提升幅度不断减小, 流速 0.1 m/s 时集热效率最高, 可以达到 66.58%。显然可见, 出口水温随着流速的增加逐渐降低, 当水流速度为 0.1 m/s 时, 水温仅升高 6.21 K, 但集热效率较 0.01 m/s 时提高 23.74%。因此, 提高水进口流速能有效提高水集热工况下的集热效率。

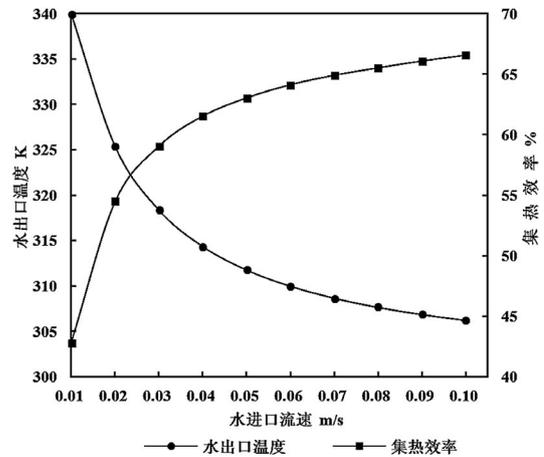


图 2 水进口流速对水集热性能的影响

水进口流速 0.1 m/s, 温度 300 K 时, 吸热板温度分布云图如图 3 (a) 所示。数据显示, 吸热板的平均温度为 317.87 K, 最高温度可以达到 344.61 K, 吸热板温度分布差异较为明显, 这是因为随着水流沿铜管方向逐渐被加热, 水温逐渐提升, 铜管与吸热板间的换热量减少。因此, 靠近水出口处的吸热板相对于进口处具有更高的温度。图 3 (b) 反映了水集热过程中铜管温度分布, 可见水集热过程中水温得到有效提升。集水管出口温度略低于支管水温, 原因在于集水管会与周围环境发生对流换热, 温度有所降低。

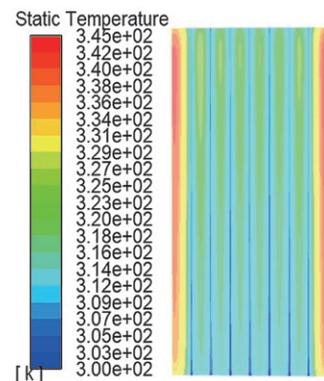


图 3 (a) 水集热工况下吸热板温度分布

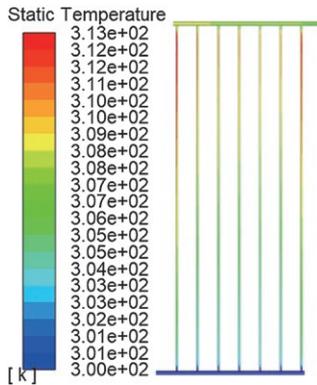


图 3(b) 水管温度分布

水流进口温度对集热器效率的影响如表 2 所示。水流进口速度为 0.1 m/s 的工况下,改变进口温度,随着进口温度的提高,水集热效率不断降低。当进口温度为 290 K 时,效率最高为 74.73%,较进口温度为 310 K 时提高了 16.29%。从能量利用效率来看,水集热更加适用于春秋季节。其主要原因是在冬季时,虽然能够获得容易获得较低的进口温度,但外部环境温度过低,集管、吸热板与外界环境温度差大,会造成大量的热量损失。在夏季,虽然能够获得高温热水,但是由于进口水温较高,效率明显低于春秋两季。

表 2 水进口温度对集热效率的影响

$v$ (m/s)	$T_{w-i}$ (K)	$T_{w-o}$ (K)	$\eta_w$ (%)
0.1	290	297.11	74.73
0.1	293	299.84	71.90
0.1	295	301.66	70.00
0.1	297	303.48	68.11
0.1	300	306.21	66.58
0.1	303	308.93	62.33
0.1	305	310.75	60.44
0.1	307	312.56	58.44

### 3.2 空气集热模拟

图 4 反映了空气集热效率、空气出口温度随空气进口流速的变化趋势。进口空气温度为 300 K 的工况下,改变空气进口流速 (0.2~1.0 m/s),随着进口流速的增加,集热效率逐渐升高,当流速为 1.0 m/s 时,集热效率为 51.74%,较流速 0.2 m/s 时效率提高了 28.94%。结果显示,空气出口温度随进口流速的增加逐渐降低,但降低幅度逐渐减小。当空气进口流速由 0.2 m/s 增大到 1.0 m/s 时,出口温

度由 339.16 K 降低到 317.77 K,温度变化幅度达 21.39 K,原因在于随着空气流速的增加,空气与吸热板换热时间减少,换热量降低。

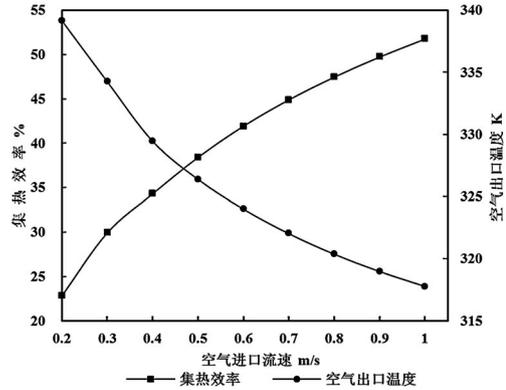


图 4 空气进口流速对空气集热性能的影响

空气集热效率随进口温度变化趋势如表 3 所示。空气进口流速为 0.5 m/s 时,空气进口温度从 290 K 变化到 310 K。数据显示,空气集热效率随进口温度升高逐渐降低,当进口温度为 310 K 时,其瞬时集热效率仅为 31.68%,较进口温度 290 K 时降低了 13.39%,且其变化趋势接近线性变化。从表 3 分析可知,空气集热适用于冬季建筑采暖,原因在于冬季室外空气温度较低,对应着更高的空气集热效率。当进口温度为 290 K,流速为 0.5 m/s 时,出口温度可以达到 320.96 K,集热器效率达到 45.07%,可以满足冬季室内采暖需求。

表 3 空气进口温度对集热效率的影响

$v$ (m/s)	$T_{w-i}$ (K)	$T_{w-o}$ (K)	$\eta_w$ (%)
0.5	290	320.96	45.07
0.5	295	323.67	41.74
0.5	300	326.37	38.39
0.5	305	329.07	35.04
0.5	310	331.76	31.68

空气进口流速 0.5 m/s,温度 300 K 时,空气出口温度分布如图 5(a) 所示,空气出口存在明显的温度分层现象,靠近吸热板一侧的空气温度明显高于底部空气温度,原因在于空气与吸热板换热过程中温度较高的空气密度较低,在浮升力的作用下逐步聚集在集热板附近,而温度较低的空气,密度较大,在重力作用下,向底部聚集。同时,底部的热空气与集热器背部发生对流换热,温度进一步降低。

因此,在工业化生产过程中,空气集热器的下流道不宜过高,一般取 15 mm–25 mm<sup>[13]</sup>。此工况下吸热板温度分布如图 5 (b) 所示,当空气进口流速为 0.5 m/s, 温度 300 K 时,吸热板平均温度为 346.95 K, 最高温度为 351.83 K,吸热板温度较水集热工况下提高了 32.08 K,但温度分布的均匀性有所提高。

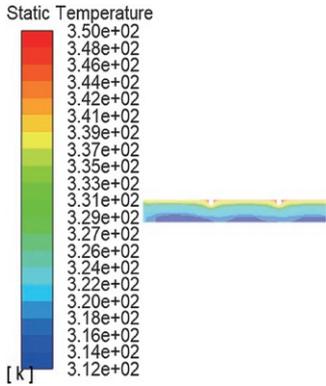


图 5 (a) 空气出口温度分布

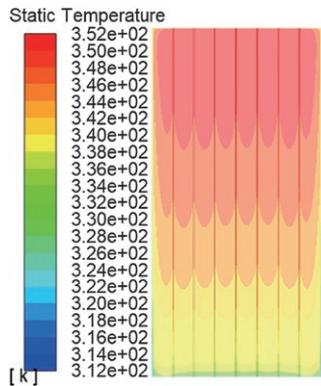


图 5 (b) 空气集热工况下吸热板温度分布

### 3.3 空气 – 水复合集热模拟

空气进口流速 0.5 m/s 时, 改变水进口流速 (0.06 ~0.10 m/s), 复合模式下的各项集热效率变化趋势如表 4 所示。水集热效率、空气 – 水复合集热效率随水进口流速增加而缓慢提高, 空气集热效率则略有下降。当水流速为 0.1 m/s 时, 空气 – 水复合集热效率达到最佳。水进口流速为 0.1 m/s, 改变空气进口流速 (0.1 m/s~0.5 m/s), 各项集热效率如表 5 所示, 空气集热效率, 空气 – 水复合集热效率随空气进口流速增加逐渐提高, 而水集热效率缓慢下降。当进口流速为 0.5 m/s, 空气 – 水综合集热效率达到最佳, 为 71.66%。综合表 4 及表 5 可以看出, 改变单一工质的流速能够提高空气 – 水复

合集热的瞬时效率, 但会降低另一工质的瞬时集热效率。因此, 在空气 – 水复合集热工况下, 空气集热效率与水集热效率存在相互制约的现象。

表 4 不同水进口流速工况下各项集热效率

$v$ (m/s)	$T_{w-0}$ (K)	$T_{a-0}$ (K)	$\eta_a$ (%)	$\eta_w$ (%)	$\eta_c$ (%)
0.06	309.06	308.30	12.11	58.28	70.39
0.07	307.89	307.95	11.60	59.21	70.81
0.08	306.99	307.68	11.21	59.95	71.16
0.09	306.28	307.43	10.84	60.60	71.44
0.10	305.70	307.23	10.55	61.11	71.66

表 5 不同空气进口流速工况下各项集热效率

$v$ (m/s)	$T_{w-0}$ (K)	$T_{a-0}$ (K)	$\eta_a$ (%)	$\eta_w$ (%)	$\eta_c$ (%)
0.1	306.08	312.19	3.56	65.19	68.74
0.2	305.94	310.36	6.05	63.69	69.73
0.3	305.84	309.00	7.88	62.61	70.49
0.4	305.76	308.00	9.34	61.76	71.09
0.5	305.7	307.23	10.55	61.11	71.66

空气进口流速 0.5 m/s, 水进口流速 0.1 m/s, 进口温度为 300 K 时, 吸热板温度分布情况如图 6 所示, 吸热板平均温度为 313.92 K, 最高温度为 333.14 K。空气 – 水复合集热工况下, 吸热板温度明显低于空气集热、水集热工况下的吸热板温度, 空气 – 水复合集热效率较水集热、空气集热工况分别提高了 5.08% 和 33.27%。因此, 空气 – 水复合集热能有效提高太阳能集热器的热性能。其主要原因是复合集热工况能够带走更多的热量, 有效降低吸热板与玻璃盖板之间的温差, 减少与周围环境之间的辐射散热, 吸热板温度分布情况与水集热工况类似。

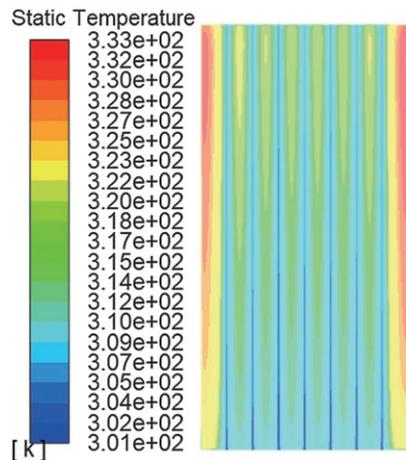


图 6 空气 – 水复合集热工况下吸热板温度分布

## 4 结论

(1) 模拟结果显示,集热器空气进口流速 1.0 m/s,进口温度为 300 K 时,集热效率为 51.74%;水进口流速 0.1 m/s、进口水温 290 K 时,集热效率可以达到 74.73%。相比于空气集热,水集热效率更高。

(2) 空气-水复合集热模式下,提高空气或水的流速可以提高复合集热效率,但空气和水的瞬时集热效率存在相互制约的情况。水流进口速度 0.1 m/s、空气进口速度 0.5 m/s 时,复合集热效率达到最佳,为 71.66%。

(3) 从能量利用效率来看,空气集热模式适用于冬季建筑物采暖,水集热模式适用于春秋两季生产生活热水,空气-水复合集热模式适用于夏季同时获取热水、热空气。

### 参考文献:

- [1] Seveda M S. Performance studies of solar tunnel dryer for drying aonla (*embilica officinalis*) pulp[J]. *Applied Solar Energy*, 2012, 48 (2): 104-111.
- [2] Roustapour, Gazor H R. Influence collector inclination of solar dryer on apple 'golab' chips drying[J]. *Agriculturae Conspectus Scientificus*, 2015, 80 (2): 101-108.
- [3] Ivanova T, Havrland B, Hutla P, et al. Drying of cherry tree chips in the experimental biomass dryer with solar collector[J]. *Research in Agricultural Engineering*, 2012, 58 (No.1): 16-23.
- [4] Saim, R, Abboudi, et al. Numerical simulation of turbulent forced convection in solar collector provided with thickness baffles and fins[J]. *International Review of Mechanical Engineering*, 2009, 3 (4): 373-381.
- [5] Ammar M, Mokni A, Mhiri H, et al. Numerical analysis of solar air collector provided with rows of rectangular fins[J]. *Energy Reports*, 2020, 6: 3412-3424.
- [6] Gong X T, Wang F Q, Wang H Y, et al. Heat transfer enhancement analysis of tube receiver for parabolic trough solar collector with pin fin arrays inserting[J]. *Solar Energy*, 2017, 144: 185-202.
- [7] 胡建军, 郭萌, 张广秋, 等. 利用旋流效应强化平板型太阳能空气集热器性能[J]. *农业工程学报*, 2020, 36 (6): 188-195.
- [8] 贾斌广, 刘芳, 王达, 等. 扰流板太阳能空气集热器的流道优化[J]. *化工进展*, 2019, 38 (2): 819-825.
- [9] 刘爽, 马进伟, 方廷勇, 等. L 型翅片式太阳能平板双效集热器集热性能数值模拟研究[J]. *建筑科学*, 2019, 35 (10): 79-83.
- [10] 王亮, 满意. 单、双风道折形折流板式空气集热器对比分析[J]. *可再生能源*, 2020, 38 (5): 612-619.
- [11] Ma J W, Zhao Q, Su Y H, et al. The thermal behavior of a dual-function solar collector integrated with building: an experimental and numerical study on the air heating mode[J]. *Energies*, 2018, 11 (9): 2402.
- [12] 童维维, 方浩, 马进伟, 等. 太阳能光电光热综合利用模块数值模拟[J]. *安徽建筑大学学报*, 2019, 27 (6): 70-75.
- [13] 郭超, 马进伟, 何伟. 平板型太阳能双效集热器空气集热性能的理论分析[J]. *安徽建筑工业学院学报(自然科学版)*, 2013, 21 (5): 100-104.
- [14] 王亮, 满意. 单、双风道折形折流板式空气集热器对比分析[J]. *可再生能源*, 2020, 38 (5): 612-619.
- [15] Ma J W, Zhao Q, Su Y H, et al. The thermal behavior of a dual-function solar collector integrated with building: an experimental and numerical study on the air heating mode[J]. *Energies*, 2018, 11 (9): 2402.
- [16] 童维维, 方浩, 马进伟, 等. 太阳能光电光热综合利用模块数值模拟[J]. *安徽建筑大学学报*, 2019, 27 (6): 70-75.
- [17] 郭超, 马进伟, 何伟. 平板型太阳能双效集热器空气集热性能的理论分析[J]. *安徽建筑工业学院学报(自然科学版)*, 2013, 21 (5): 100-104.
- [18] Wang Y C, Lakes R. Analytical parametric analysis of the contact problem of human buttocks and negative Poisson's ratio foam cushions[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2002, 39 (18): 4825-4838.
- [19] Bertoldi K, Reis P M, Willshaw S, et al. Negative poisson's ratio behavior induced by an elastic instability[J]. *Advanced Materials*, 2010, 22 (3): 361-366.
- [20] Bendsøe M P. Optimal shape design as a material distribution problem[J]. *Structural Optimization*, 1989, 1 (4): 193-202.
- [21] SOKOLNIKOFF I S. *Mathematical theory of elasticity*[M]. Malabar: Krieger Publishing Company, 1983.
- [22] 包海玲. 细观力学模型在混凝土层裂实验中的应用[J]. *安徽建筑大学学报*, 2017, 25 (5): 26-29, 34.
- [23] Hu H, Wang Z Y, Liu S. Development of auxetic fabrics using flat knitting technology[J]. *Textile Research Journal*, 2011, 81 (14): 1493-1502.
- [24] Grima J N, Jackson R, Alderson A, et al. Do zeolites have negative poisson's ratios?[J]. *Advanced Materials*, 2000, 12 (24): 1912-1918.
- [25] Ma Y H, Scarpa F, Zhang D Y, et al. A nonlinear auxetic structural vibration damper with metal rubber particles[J]. *Smart Materials and Structures*, 2013, 22 (8): 084012.
- [26] Bertoldi K, Reis P M, Willshaw S, et al. Negative poisson's ratio behavior induced by an elastic instability[J]. *Advanced Materials*, 2010, 22 (3): 361-366.

(上接第 26 页)

sensitive self-powered strain sensing capabilities to monitor human body movement[J]. *Advanced Functional Materials*, 2017, 27 (25): 1-7.

- [16] Li Q, Kuang Y, Zhu M L. Auxetic piezoelectric energy harvesters for increased electric power output[J]. *AIP Advances*, 2017, 7 (1): 2158-3226.
- [17] Grima J N, Jackson R, Alderson A, et al. Do zeolites have negative poisson's ratios?[J]. *Advanced Materials*, 2000, 12 (24): 1912-1918.
- [18] Ma Y H, Scarpa F, Zhang D Y, et al. A nonlinear auxetic structural vibration damper with metal rubber particles[J]. *Smart Materials and Structures*, 2013, 22 (8): 084012.
- [19] Bertoldi K, Reis P M, Willshaw S, et al. Negative poisson's ratio behavior induced by an elastic instability[J]. *Advanced*