

微尺度通道平板集热器的实验研究与数值模拟

张青, 邓先和*

(华南理工大学化学与化工学院, 广东 广州 510640)

摘要:将太阳能平板集热器流道设计为间距为0.7 mm的平行微尺度通道,这种微尺度通道集热器的特点是吸热板和底板之间距离较小,流体与吸热板间的传热系数较大,水的质量流量低,热容小,可使水温快速提升。通过对微尺度太阳能集热器与传统尺度太阳能集热器传热性能的分析对比,可看出微尺度集热器在水的升温速率和对流传热系数方面有显著的优越性,为太阳能集热器用于海水淡化提供了一条高效应用的途径。

关键词:平板集热器;微尺度通道;瞬时效率;对流传热系数;升温速率

中图分类号:TK124

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2014)12-0142-05

Experimental and numerical investigation of a flat-plate solar collector with a micro-channel

ZHANG Qing, DENG Xian-he*

(School of Chemistry and Chemical Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The flow channel of flat-plate solar collector is changed to micro-channel. The distance between two parallel plates is designed to be 0.7 mm. The flat-plate solar collector with a micro-channel is characterized by a smaller distance between the absorber plate and the bottom plate. It has high coefficient of heat transfer between the fluid and the heat absorbing plate, low mass flow rate and small heat capacity. So the flat-plate solar collector can make the water temperature increasing rapidly. Compared with the traditional flat collector, the flat-plate solar collector with a micro-channel has obvious superiority in coefficient of heat transfer and the heating rate. It provides an efficient way of application for seawater desalination.

Key words: flat-plate collector; micro-channel; instantaneous efficiency; convective heat transfer coefficient; heating rate

利用太阳能的光热不仅可以向人们生活提供热水或采暖,还能进行海水淡化,一方面可以解决全球淡水资源缺乏或供应不足,另一方面清洁且丰富的太阳能不会对环境产生任何污染,所以具有广阔的应用前景。

大规模的海水淡化系统主要采用热电联产的方式^[1],燃料成本较高。虽然太阳能海水淡化^[2-5]在能源的利用上有干净环保和低成本的优势,发展前景诱人,但单靠太阳能加热要达到多级蒸发的高温热水基本条件($>100^{\circ}\text{C}$)难度较大,一般的太阳能集热器不能达到此高温。采用太阳能与热电联产海水淡化相配合是一种较好的高低位能量优化组合与经济互补的方式,但简单地采用传统尺度的太阳能集热器,水加热升温速率是比较低的,从 30°C 的低温加热到 $70\sim 90^{\circ}\text{C}$ 的中温需较长时间,难以满足热电联产海水淡化系统对水快速加热升温的连续生产要求,不能匹配生产。为使太阳能与热电联产海水

淡化能够达成协调配合,需研发一种可快速使海水升温的太阳能集热器。

本文中提出了一种能使水快速升温的微尺度通道太阳能集热器^[6]。针对目前传统太阳能集热器流道尺寸较大(5 mm以上)、水的体积热容大、加热速度慢、水温提升时间长、流体传热系数较低的缺点,提出通过减小集热器的流道尺寸,减少水的体积热容,提高流体的传热系数,达到有效提高水温提升速率的目的。通过设计平板型集热器装置,将对流传热系数、升温速率与传统集热器进行对比分析,发现微尺度通道集热器的对流传热系数和升温速率可远远高于传统集热器。

1 实验装置介绍

1.1 实验装置图

微尺度通道太阳能集热器实验装置如图1所示,包括微尺度通道集热板1、上部储水槽2、出水管

3、降液管4、下部连管5、补水管6。实验采用高位水槽通过补水管向集热器补水,测量集热器中水的进出口温度与流量,并依此计算其吸热量 Q 。

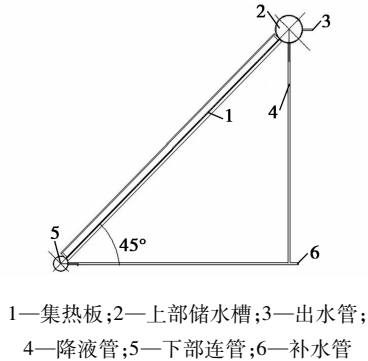


图1 实验装置图

本实验装置微尺度结构流体通道由相互平行的底板与受热面构成,底板与受热面的板面间距为0.7 mm。集热器有效采光面积为2 000 mm × 500 mm,吸热板的底部及集热器四周有15 mm的聚氨酯保温层。吸热板上涂氧化铜选择涂层,吸收率 $\alpha_s = 0.87$,发射率 $\varepsilon = 0.32$ 。

1.2 测试仪器仪表的选择

温度测量使用的是K型热电偶数字温度表,精度0.1℃,太阳能辐射率用太阳能功率表测量,精度1 W/m²,水流量使用转子流量计测量,精度0.2 L/h。

太阳辐射值每隔20 min测量一组数据并记录,测量时感应部位放在玻璃盖板上与玻璃盖板平行。

集热器3个测试点都在板的中心轴线上,测点1距离上部边缘线垂直距离500 mm,测点2距离1 000 mm,测点3距离1 500 mm。

2 微尺度通道集热器热性能测定与分析

2.1 瞬时效率

集热器效率是评估集热器性能的一个重要参数。它是集热器有用能量收益与投射到集热器上的太阳能之比。由于太阳投射到集热器的能量随时间变化,因此有瞬时效率和平均效率之分。计算平均效率时,需要在一段时间内例如1天的时间来进行实验测试。而集热器瞬时效率的测定,可取测试数据的时间间隔为流体流经集热器所需的时间,为维持数据的相对稳定,本实验选择20 min为测试数据的时间间隔,用一段时间的平均效率替代瞬时效率。其计算公式为:

$$\eta = Q_u / \bar{A}I = mc_p(t_2 - t_1) / \bar{A}I \times 100\% \quad (1)$$

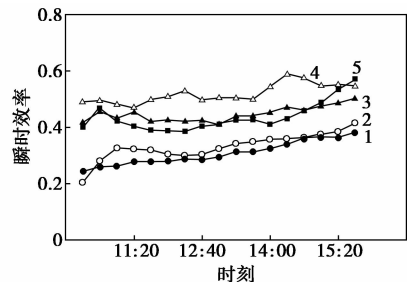
式中, η 为集热器瞬时效率,%; \bar{I} 为某段时间内的平

均太阳能辐射强度,W/m²; t_2 与 t_1 分别为进出口水温,℃; m 为水的质量流量,kg/s。

在稳定日照条件下,本实验在光照强度基本相同的几天中测量不同体积流量的数据,以体积流量作为变量,进口水流量分别为6、7、8、15 L/h。每个确定流量下每隔20 min测量一组数据,流量为15 L/h的实验结果如表1。

表1 太阳辐射强度、吸热板及瞬时效率数据

时刻	太阳辐射强度/ (W·m ⁻²)	进口水温/ ℃	出口水温/ ℃	集热板点1 温度/ ℃	集热板点2 温度/ ℃	集热板点3 温度/ ℃	水吸热量/ W	瞬时效率/ %
10:00	485	27.3	40.5	29.2	35	36.3		
10:20	509	27.4	41.3	30.8	35.3	37.5	243.48	48.99
10:40	574	27.2	42.8	31.6	35.6	38.7	267.83	49.46
11:00	665	27.2	43.6	32.2	36.6	40.7	285.22	46.04
11:20	715	28.2	44.2	33.3	38.2	41.1	295.66	42.85
11:40	738	28.9	48.7	34.2	40.5	44.1	356.53	49.07
12:00	756	28.7	50.7	35.8	41.3	46.2	379.14	50.75
12:20	910	31.0	54.1	37.5	43.8	51.5	441.75	53.03
12:40	970	32.9	55.9	40	45.7	52.1	433.05	46.07
13:00	1014	31.4	58.5	38.5	45.2	55.6	445.23	44.88
13:20	1022	31.4	60.7	39.5	47.3	53.4	509.58	50.06
13:40	998	31.6	60.1	40.1	47.1	55.1	499.14	49.42
14:00	952	29.1	61.5	38.1	45.8	56.6	520.01	53.33
14:20	920	29.1	60.5	37.7	45.1	52.9	546.10	58.34
14:40	904	29.2	59.3	36.9	44.8	51.9	525.23	57.59
15:00	872	29.2	57.1	36.3	43.4	50.3	485.23	54.64
15:20	807	28.4	55.8	35.3	42.5	50.6	462.62	55.11
15:40	762	28.3	53.1	34.3	40.7	48.2	429.57	54.76



流量:1—5 L/h;2—6 L/h;3—7 L/h;4—8 L/h;5—15 L/h

图2 不同流量下的瞬时效率图

从图2中得出结论,随着进口流量的增加,系统的瞬时效率也随之增加,流量为15 L/h时,瞬时效率最高时候可以达到58.0%,而5 L/h流量的最高

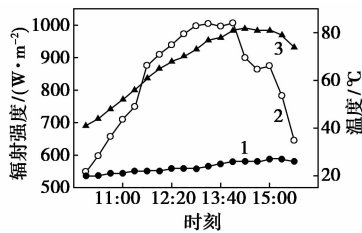
效率只有 38.2%。原因主要是 2 方面:一是流量大水速高有利于提高吸热板与水间的传热系数,可降低传热温差;二是水流量大带走的热量多,出口水温低,二者都会使得吸热板的板面温度降低,减小集热器的顶部热损失。所以,流量大时,集热器效率会比小流量时的效率高。

2.2 单位板长的升温速率

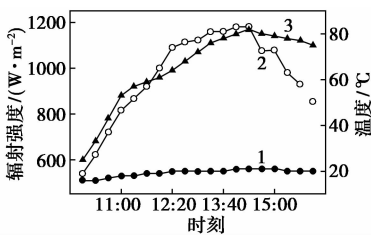
太阳能集热器单位板长的升温速率可反映一个太阳能集热器在一定日照条件下,传热介质在集热器内单向流动过程中温升的快慢程度。用 U 表示升温速率,即:

$$U = (T_{out} - T_{in})/L \tag{2}$$

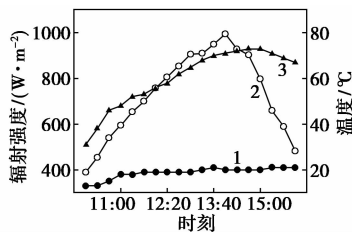
实验数据见图 3。



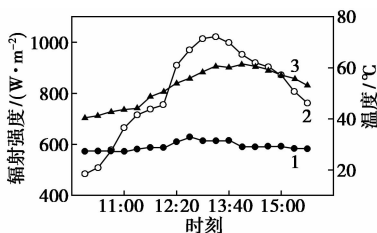
(a) 流量 6 L/h



(b) 流量 7 L/h



(c) 流量 8 L/h



(d) 流量 15 L/h

1—光照强度;2—水进口温度;3—水出口温度

图 3 不同流量下水的进出口水温和辐射强度变化图

取算术平均值可得,当水进口流量为 6、7、8、15 L/h,即流速为 0.004 8、0.005 5、0.006 3、0.012 m/s 其升温速率分别为 22.97、20.71、20.39、11.72°C/m。从实验结果可看出,随着水流量的增加,集热器单位板长的升温速率在逐渐下降,而集热器的吸热效率则逐渐提高,这说明吸热板面温度越高,集热器的散热损失越大。在快速提升水温的同时,也需要采用适当的强化绝热措施减少高温吸热板面的热损失。

2.3 集热器单位板长升温速率的比较

按照传统知识,流体在管内做强制层流时,当 $Re < 2300, 0.6 < Pr < 6700, Re Pr (d_e/L) > 100$ 时,努塞尔数可以用西德尔(Sieder)和塔特(Tate)关联式,即:

$$Nu = 1.86Re^{1/3}Pr^{1/3}(d_e/L)^{1/3}(\mu/\mu_w)^{0.14} \tag{3}$$

其中: $d_e = 4 \times (\text{通道截面积})/\text{润湿周边}$ 。

μ_w 取壁温下流体的黏度,其他物理性质均按流体进、出口算术平均温度取值。

采用本实验测量 15 L/h 的太阳能辐射数据,见表 1。假设将集热器通道尺寸由 0.7 mm 分别扩展为 5、10、20、40 mm,在相同的进口流速(0.007 m/s)、进口水温(25°C)与集热器吸热效率的条件下按照能量守恒计算集热器的出口平均水温,并按公式(3)计算对流传热系数,再由对流传热系数计算集热器吸热板与水之间的平均传热温差,集热器单位板长的升温速率按公式(2)计算,对比结果见表 2。

表 2 不同流道尺寸下集热器单位板长升温速率的比较

流道尺寸/ mm	水出口平均 温度/°C	对流传热系数/ (W·m ⁻² ·°C ⁻¹)	平均传热 温差/°C	单位板长升温速 率/(°C·m ⁻¹)
0.7	65.7	3603.564	0.11	20.4
5	30.7	437.800	0.96	2.9
10	27.9	219.302	1.92	1.4
20	26.5	96.922	4.33	0.7
40	25.8	78.516	5.34	0.4

由升温速率对比可知,在传热介质流动速率一定、其他条件相同时,太阳能集热器中吸热板与底板间的通道尺寸在一定范围内(本文中该范围为 0.7~40 mm)越小,集热器单位板长的升温速率越大,传热温差越小;反之,太阳能集热器中吸热板与底板间的通道尺寸越大,集热器单位板长的升温速率也越小,而传热温差越大。集热器吸热板与水之间的传热温差越大则意味着需要的吸热板表面温度

越高,集热器的散热损失也会越高,绝热保温的难度也就越大。因此,采用微尺度通道集热器在提高集热器单位板长的升温速率及提高集热器的吸热效率方面均有显著的优势。

3 微尺度通道集热器的数值模拟研究

计算流体力学商业软件 FLUENT 包含各种丰富先进的物理模型,可精确地模拟无黏流、层流、湍流等形态、不可压缩到高度可压缩范围内的复杂流动状况。因采用了多种求解方法和多重网格加速收敛技术,所以 FLUENT 能达到最佳的收敛速度和求解精度^[7]。

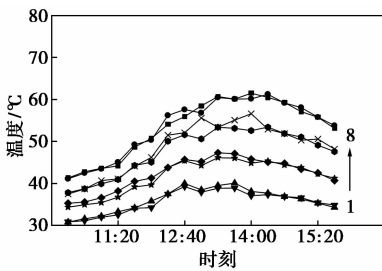
边界条件设置见表 3。

表 3 边界条件设置

符号	T_{in}/K	$v_{in}/(m \cdot s^{-1})$	P/Pa	$q/(W \cdot m^{-2})$
数值	298.15	0.007	101325	800

3.1 实验与模拟对比

在流量为 15 L/h 时,将模拟的出口温度值与加热板 3 个测点位置的温度值与表 1 实验值进行对比,见图 4。



1—吸热板测点 1 实验值;2—测点 1 模拟值;3—测点 2 实验值;
4—测点 2 模拟值;5—测点 3 实验值;6—测点 3 模拟值;
7—出口温度实验值;8—出口温度模拟值

图 4 实验值与模拟值的比较

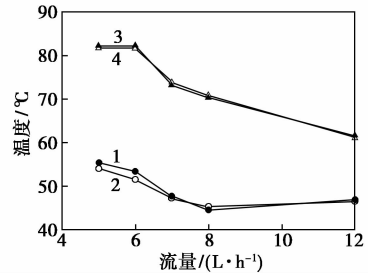
当水的进口流量为 5、6、7、8、15 L/h 时,在 1 天中所达到的最高温度各不相同,这个最高温度对于本课题的研究有着很大意义,所以模拟这 5 个时刻

表 4 最高出口温度时的相关实验数据

进口流量/ (L·h ⁻¹)	进口流速/ (m·s ⁻¹)	进口水温/ °C	出口水温/ °C	吸热板平均 温度/°C
5	0.0040	22.2	82.2	55.3
6	0.0048	21.1	82.1	53.3
7	0.0055	20.3	72.3	47.7
8	0.0063	19.4	70.4	44.5
15	0.0120	31.6	61.5	46.8

的传热状况和实验进行对比。这 5 天中出现最高温度时的相关数据见表 4。

将不同流量下模拟的出口温度和吸热板平均温度值与表 4 实验值进行对比,见图 5。由图 4 和图 5 的对比结果可知,两者的误差都在 1% 以内,所以认为模型是可靠的。



1—加热板温度实验值;2—加热板温度模拟值;
3—出口温度实验值;4—出口温度模拟值

图 5 实验值与模拟值的比较

3.2 不同通道尺寸模拟

可以通过数值模拟分析微通道和常规通道内流体的热性特征及区别。分别模拟流道尺寸为 5、10、20、40、80、100 mm 时,在相同的进口流速(0.007 m/s)、进口温度(298.15 K)和相同的加热壁面热流量(800 W/m²)下,对比各个模型下传热系数、努塞尔数、阻力系数。

阻力系数的表达式为:

$$f = 64/Re \quad (4)$$

水的对流传热系数:

$$\alpha = Q/(A \cdot \Delta T) = q/(T_w - T_m) \quad (5)$$

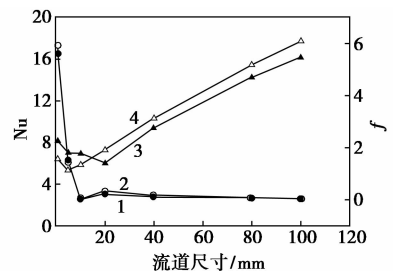
式中, Q 为总太阳辐射能,W; A 为传热面积,m²; q 为单位太阳辐射能,W/m²; T_w 为加热壁面的平均温度,K。

阻力系数:

$$f = (2 \cdot d_e \cdot \Delta p)/H\rho u^2 \quad (6)$$

式中, Δp 为通道内的压降,Pa; H 为通道的长度,m。

利用公式(3)、(4)计算微尺度流道中流体的经验努塞尔数和阻力系数。大尺寸模拟的结果按照公



1—经验值 f ;2—模拟值 f ;3—经验值 Nu ;4—模拟值 Nu

图 6 模拟结果与经验公式验证

式(5)计算传热系数,公式(6)计算阻力系数。经验值和模拟值的结果比较如图 6 所示。由图 6 可见,通过模拟方法得到的 Nu 值与经验值之间的误差 $<18\%$,而二者的阻力系数间的误差则 $<12\%$,在工程应用上,此误差认为是可以接受的,这说明数值模拟计算的方法是可行的。

图 7 是不同流道尺寸下传热系数对比图。从图 7 中可以看到,传热系数随流道尺寸的增加而减小,并且随着通道尺寸的降低,这种变化越来越明显。采用微尺度通道结构的太阳能集热器与常规太阳能集热器相比,流道截面积可缩小,相应的在相同流速下可大幅减少水的体积热容,流道尺寸在 20 mm 以后的对流传热非常弱,传热系数很小,而且趋于平缓。

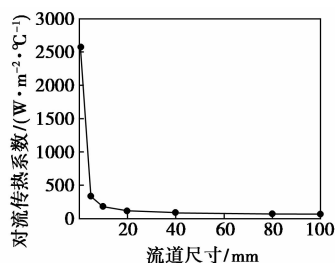


图 7 不同流道尺寸下传热系数对比

4 结论

由上述比较结果可见,太阳能集热器中传热介质的通道尺寸较小更有利于对流传热强化,较小的

通道尺寸能使传热介质快速升温,随着通道尺寸的降低,这种变化越来越明显。根据实验和计算的结果可得以下结论。

(1)在流体流速一定时,通道尺寸较小,流体的质量流率就较小,用相同的热量加热低流率的流体其温度的提升可显著加快。

(2)集热器通道尺寸越小,传热介质与吸热板之间的传热系数越大,传递相同的热量需要的传热温差越小,越有利于降低吸热板的表面温度,提高集热器的吸热效率,能获得较高的出口水温。

参考文献

- [1] 侯勇,王桂华. 海水淡化技术现状与发展[J]. 吉林电力,2011,39(1):8-10,14.
- [2] kalogiou S. Seawater desalination using renewable energy sources [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2005, 31(3): 242-281.
- [3] Eftihia Tzen, Richard Morris. Renewable energy sources for desalination [J]. Solar Energy, 2003, 75(5): 375-379.
- [4] Soteris Kalogiou. Use of parabolic trough solar energy collectors for sea-water desalination [J]. Applied Energy, 1998, 60(2): 65-88.
- [5] Ben Corry. Designing carbon nanotube membranes for efficient water desalination [J]. J Phys Chem B, 2008, 112(5): 1427-1434.
- [6] 邓先和,王娜,张青. 一种微尺度通道太阳能集热器: CN, 201220694795.7 [P]. 20113-06-12.
- [7] 王福军. 计算流体力学分析——CFD 软件原理与应用 [M]. 北京:清华大学出版社,2004. ■

海洋生物多糖材料研究获新进展

近日,中国科学院大连化学物理研究所生物医用材料工程组在海洋生物多糖材料的应用研究方面取得新进展,科研人员在对海洋多糖材料深入研究的基础上,首次发现了海藻酸钠形成的聚合物具有抑制胰蛋白酶酶解这一新的生物学特性。

据介绍,以海藻酸钠为代表的海洋生物多糖材料来源广泛、生物安全性高、可降解,并且具有抗病毒、增强机体免疫力等多种生物活性,在生物医用材料及药物传递系统领域有广泛的应用研究。科研人员在对海洋多糖材料深入研究的基础上,首次发现了海藻酸钠形成的聚合物具

有抑制胰蛋白酶酶解这一新的生物学特性。该聚合物通过缠绕包裹作用束缚蛋白酶,阻止其与底物的接触,从而实现抑制酶解作用。

此项研究工作以活性蛋白药物胰岛素为模型,以海藻酸钠为蛋白酶抑制剂。体外酶解实验表明,该抑制剂可有效阻止胰蛋白酶对口服药物的酶解,其抑酶效率约为现有同类商品的 400 倍,是理想的蛋白及多肽类活性药物的功能性载体。这项研究为解决蛋白与多肽类药物口服提供了新的策略,在生物医药领域具有广阔的应用前景。(张力)