

本文引用格式: 黄阔,陈国宇,郑桂兴,等.太阳能平板集热器热性能关键参数影响研究[J].自动化与信息工程,2022,43(5):17-22,49.
HUANG Kuo, CHEN Guoyu, ZHENG Guixing, et al. Study on the influence of key parameters of thermal performance of solar flat-panel collector[J]. Automation & Information Engineering, 2022,43(5):17-22,49.

太阳能平板集热器热性能关键参数影响研究*

黄阔 陈国宇 郑桂兴 黄允生

(广州能源检测研究院, 广东 广州 510170)

摘要: 通过改变影响太阳能平板集热器热性能的关键参数: 通道间距、流体流量、吸热板热流密度、流体进口温度, 研究流体流动与传热规律。结果表明, 通道间距为 0.5~1.0 mm 时, 流体的传热系数、温升速率、压降的变化明显比通道间距为 1.0~2.5 mm 时高, 通道间距越小, 温升速率越快; 随着流体流量增大, 流体出口温度逐渐减小, 温升速率保持稳定, 阻力系数减少, 压降逐渐增大, 强化传热评价因子逐渐增加; 吸热板热流密度越大, 流体出口温度越高, 温升速率越快; 流体进口温度越高, 流体出口温度越高, 进出口温差和温升速率保持稳定。

关键词: 太阳能平板集热器; 热性能; 通道间距; 流体流量; 吸热板热流密度; 流体进口温度

中图分类号: TK513

文献标识码: A

文章编号: 1674-2605(2022)05-0004-07

DOI: 10.3969/j.issn.1674-2605.2022.05.004

Study on the Influence of Key Parameters of Thermal Performance of Solar Flat-panel Collector

HUANG Kuo CHEN Guoyu ZHENG Guixing HUANG Yunsheng

(Guangzhou Energy Testing and Research Institute, Guangzhou 510170, China)

Abstract: By changing the key parameters that affect the thermal performance of the solar flat plate collector: channel spacing, fluid flow, heat flow density of the heat sink, fluid inlet temperature, the flow and heat transfer laws of the fluid are studied. The results show that when the channel spacing is 0.5~1.0 mm, the changes of heat transfer coefficient, temperature rise rate and pressure drop of fluid are significantly higher than those when the channel spacing is 1.0~2.5 mm. The smaller the channel spacing is, the faster the temperature rise rate of fluid is; With the increase of fluid flow, the outlet temperature of fluid decreases gradually, the temperature rise rate remains stable, the resistance coefficient decreases, the pressure drop increases, and the comprehensive thermal performance evaluation factor increases gradually; The higher the heat flux of the heat absorbing plate is, the higher the fluid outlet temperature is, and the faster the temperature rise rate is; The higher the fluid inlet temperature is, the higher the fluid outlet temperature is, and the temperature difference between the inlet and outlet and the temperature rise rate remain stable.

Keywords: solar flat-plate collector; thermal performance; channel spacing; fluid flow; heat flow density of heat absorbing plate; fluid inlet temperature

0 引言

在全球碳达峰、碳中和背景下, 发展清洁能源已成为国际社会的普遍共识。我国太阳能资源丰富, 是世界最大的太阳能热水系统生产国和安装国^[1], 以真空管型和平板型太阳能集热器为代表的集热产品占据了市场主流。太阳能平板集热器因具有承压效果好、

热效率高、便于与建筑一体化等特点, 应用更为广泛^[2]。目前, 太阳能平板集热器的研究主要集中在热水系统构建及热性能等方面。在提高集热效率方面, 国内外学者主要通过改变吸热板形状和流道来实现^[3-5]。随着强化传热技术的发展, 窄缝流道因结构紧凑、换热面积大而备受关注。窄缝流道根据流道窄缝

* 基金项目: 广东省市场监督管理局科技项目(2020CZ05); 广东省自然科学基金面上项目(2020A1515010947); 广州市市场监督管理局科技项目(2020kj33, 2020kj34); 广州市基础与应用基础研究项目(202002030439)。

间距划分为大通道(大于 3 mm)、窄通道(1~3 mm)、微通道(1 μm ~1 mm) [6]。矩形通道作为典型的窄缝流道, 众多学者对其流动和传热特性开展了大量研究。SHAH 等[7]通过研究获得微矩形通道充分发展段的平均努塞尔数和泊淞数关联式。STEINKE 等[8]和 HRNJAK 等[9]对微矩形通道内单相流动特性进行实验研究, 认为常规通道的流动关系式也适用于微矩形通道。徐建军等[10]通过窄矩形通道内实验和数值模拟研究, 指出现有经验关系式适用于窄矩形通道充分发展段的紊流流动与换热规律。

目前, 矩形通道结构参数对流体流动与传热性能的影响研究相对较少。幸奠川等[11-12]通过改变矩形通道高宽比, 对单相层流进行流体摩擦阻力特性研究, 结果表明摩擦阻力随高宽比的减小而增大。马臻等[13]研究流动压降的影响, 得到矩形通道高宽比与层流流动压降数学表达式。王亮等[14]研究矩形通道长宽比对集热效率影响, 表明集热效率随长宽比增加而下降。上述研究仅从通道高宽比/长宽比单一影响因素开展, 忽略了高宽比/长宽比的改变会影响流体进入集热器的流量。

本文以太阳能平板集热器为研究对象, 研究影响其集热性能的关键参数: 通道间距、流体流量、吸热板热流密度、流体进口温度的变化规律, 为太阳能平板集热器结构优化和实际运行提供技术支撑。

1 太阳能平板集热器传热分析

太阳能平板集热器是一种将太阳能转化为热能, 具有单层玻璃盖板的板式太阳能集热器。太阳能辐射到平板集热器被有效吸收后转化为热能, 热能流向主要为: 1) 被流体吸收而有效利用; 2) 通过集热器玻璃盖板向环境散热; 3) 通过保温层向环境散热。太阳能平板集热器的流道由相互平行的吸热板和底板、位于通道两侧的密封条构成; 吸热板和底板都是平直板面, 其通道间距为 h 、宽度为 w 、长度为 l , 如图 1 所示。

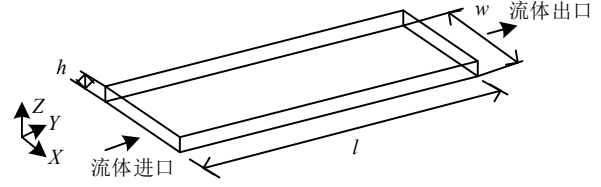


图 1 太阳能平板集热器流道示意图

太阳能平板集热器内流体吸收的有效热量主要受集热器采光面积、流体流量、流体定压比热、导热系数及流体进出口温差等影响, 根据能量守恒定律, 传热方程式为

$$whl\rho c_p(T_{\text{out}} - T_{\text{in}})/t = \alpha(T_d - T_m)wl \quad (1)$$

$$T_m = (T_{\text{out}} + T_{\text{in}})/2 \quad (2)$$

式中:

ρ ——流体密度, kg/m^3 ;

c_p ——定压比热, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$;

T_{out} ——流体出口温度, K ;

T_{in} ——流体进口温度, K ;

t ——流体流动时间, s ;

α ——对流传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$;

T_d ——吸热板表面平均温度, K ;

T_m ——流体平均温度, K 。

由公式(1)可得到太阳能平板集热器通道间距 h 与传热性能影响的关系式为

$$h\rho c_p(T_{\text{out}} - T_{\text{in}})/t = \alpha(T_d - T_m) \quad (3)$$

为进一步分析影响太阳能平板集热器热性能的关键参数, 本文采用 SHAH 等[7]提出的微矩形通道充分发展段的平均努塞尔数 Nu_{∞} 和泊淞数 fR_e 关联式。在层流充分发展段, 流体流动和传热充分发展段的 Nu_{∞} 和 fR_e 表达式分别为

$$Nu_{\infty} = 8.235(1 - 2.042 \ 1/a + 3.058 \ 3/a^2 - 2.476 \ 5/a^3 + 1.057 \ 8/a^4 - 0.186 \ 1/a^5) \quad (4)$$

$$fR_e = 96(1 - 1.355 \ 3/a + 1.946 \ 7/a^2 - 1.701 \ 2/a^3 + 0.956 \ 4/a^4 - 0.253 \ 7/a^5) \quad (5)$$

$$\text{其中: } Nu = \frac{\alpha \cdot d_e}{\lambda} \quad (6)$$

$$R_e = \frac{\rho u d_e}{\mu} \quad (7)$$

$$f = \frac{2 d_e \Delta p}{l \rho u^2} \quad (8)$$

$$u = \frac{V}{wh} \quad (9)$$

$$d_e = \frac{2wh}{w+h} \quad (10)$$

式中:

a ——矩形通道的高宽比;

f ——阻力系数, 无量纲;

R_e ——雷诺数, 无量纲;

d_e ——矩形通道的当量直径, m;

u ——流体的平均速度, m/s;

μ ——流体的粘度, Pa·s;

λ ——流体的导热系数, W/(m·K);

Δp ——通道内的压降, Pa;

V ——流体体积流量, m³/s。

温升速率作为热性能指标, 计算公式为

$$\gamma = (T_{\text{out}} - T_{\text{in}}) / t \quad (11)$$

式中:

γ ——温升速率, K/s;

t ——流体流动时间, s。

为准确评价关键参数对太阳能平板集热器热性能的综合影响, 采用强化传热评价因子 η 进行评价, 计算公式为^[15]

$$\eta = Nu / f^{1/3} \quad (12)$$

式中:

Nu ——努塞尔数, 无量纲。

2 关键参数对热性能影响

2.1 通道间距

在流体流量为 0.000 05 m³/s, 流体进口温度为

298.15 K, 吸热板热流密度为 800 W/m² 的条件下, 以水为流体介质对不同高宽比的太阳能平板集热器进行热性能研究。太阳能平板集热器通道尺寸如表 1 所示。

表 1 太阳能平板集热器通道尺寸 单位: mm

序号	通道长度	通道宽度	通道高度
1	2 000	500	0.5
2	2 000	500	1.0
3	2 000	500	1.5
4	2 000	500	2.0
5	2 000	500	2.5

在相同流体流量下, 分析通道间距对流体流速、雷诺数、传热系数、努塞尔数、流体出口温度、温升速率、阻力系数、压降、强化传热评价因子的影响。

流体流速和雷诺数随通道间距变化曲线如图 2 所示。

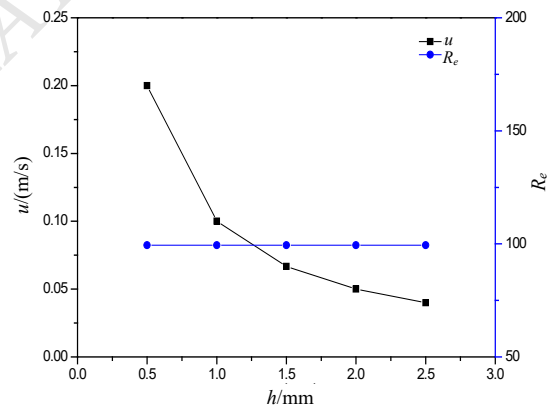


图 2 流体流速和雷诺数随通道间距变化曲线

由图 2 可知, 随着通道间距减小, 流体流速逐渐增大, 雷诺数变化较为平缓。

传热系数和努塞尔数随通道间距变化曲线如图 3 所示。

由图 3 可知, 随着通道间距减小, 传热系数逐渐增大, 努塞尔数变化较为平缓。当通道间距为 0.5 ~ 1.0 mm 时, 传热系数变化显著; 当通道间距为 1.0 ~ 2.5 mm 时, 传热系数变化较为平缓。当通道间距 $h = 0.5$ mm 时, 传热系数为 4 927 W/(m²·K); 当通道间距 $h = 2.5$ mm 时, 传热系数为 981 W/(m²·K), 对比发现,

通道间距 $h = 0.5 \text{ mm}$ 时的传热系数为通道间距 $h = 2.5 \text{ mm}$ 时的 5.02 倍。由此可知，通过减少通道间距可提高传热系数。

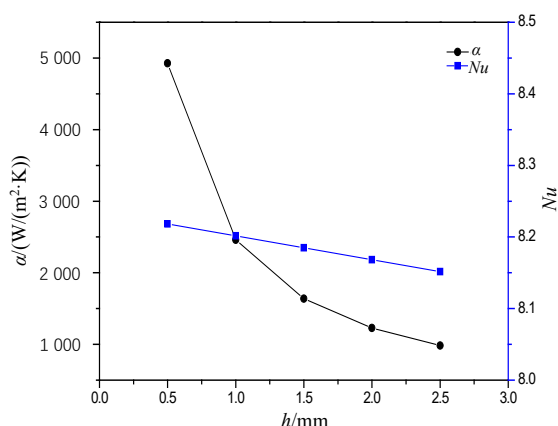


图3 传热系数和努塞尔数随通道间距变化曲线

流体出口温度和温升速率随通道间距变化曲线如图4所示。

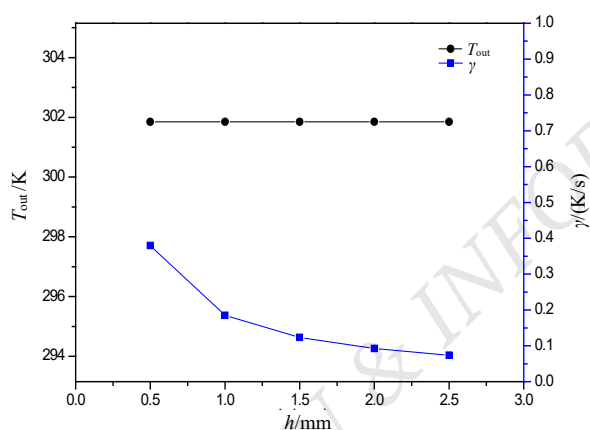


图4 流体出口温度和温升速率随通道间距变化曲线

由图4可知，随着通道间距减小，流体出口温度稳定，温升速率逐渐增大。当通道间距为 0.5~1.0 mm 时，温升速率变化显著；当通道间距为 1.0~2.5 mm 时，温升速率变化较为平缓。当通道间距 $h = 0.5 \text{ mm}$ 时，温升速率为 0.38 K/s；当通道间距 $h = 2.5 \text{ mm}$ 时，温升速率为 0.074 K/s。由此可知，通道间距对温升速率影响显著，可通过减小通道间距提高温升速率。当通道间距从 2.5 mm 减小到 0.5 mm 时，温升速率提高了 4.14 倍。

阻力系数和压降随通道间距变化曲线如图5所示。

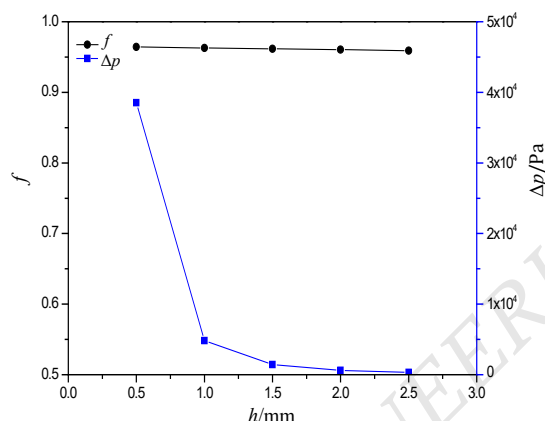


图5 阻力系数和压降随通道间距变化曲线

由图5可知，随着通道间距减小，阻力系数变化较为平缓，压降则快速增大。当通道间距 $h = 2.5 \text{ mm}$ 时，流体压降为 $0.031 \times 10^4 \text{ Pa}$ ；当通道间距 $h = 1.0 \text{ mm}$ 时，流体压降为 $0.482 \times 10^4 \text{ Pa}$ ；在通道间距 $h = 0.5 \text{ mm}$ 时，流体压降为 $3.85 \times 10^4 \text{ Pa}$ 。

强化传热评价因子随通道间距变化曲线如图6所示。

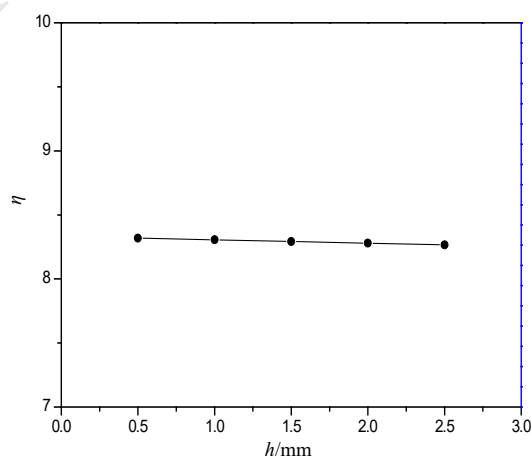


图6 强化传热评价因子随通道间距变化曲线

由图6可知，随着通道间距减小，强化传热评价因子变化平缓。总体而言，通道间距减小有利于太阳能平板集热器综合热性能的提高。

2.2 流体流量

在太阳能平板集热器通道长度为 2 000 mm，宽度为 500 mm，高度为 1.0 mm，流体进口温度为 298.15 K，吸热板热流密度为 800 W/m^2 的条件下，研究流体流量对太阳能平板集热器热性能的影响。流体

流速和雷诺数随流体流量变化曲线如图 7 所示, 传热系数和努塞尔数随流体流量变化曲线如图 8 所示。

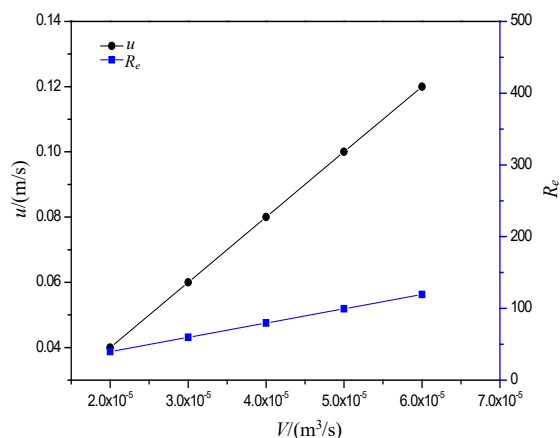


图 7 流体流速和雷诺数随流体流量变化曲线

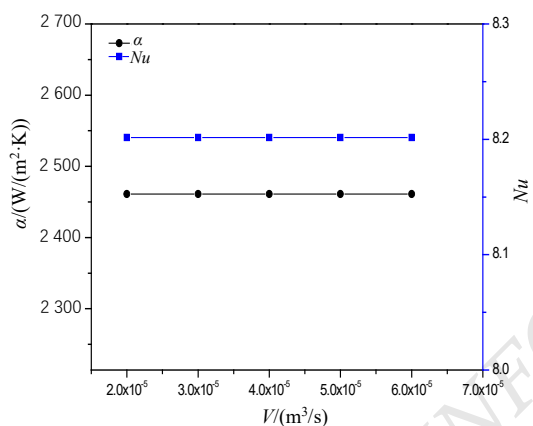


图 8 传热系数和努塞尔数随流体流量变化曲线

由图 7、8 可以看出, 随着流体流量增大, 流体流速和雷诺数逐渐增大, 传热系数和努塞尔数稳定。

流体出口温度和温升速率随流体流量变化曲线如图 9 所示。

由图 9 可知, 随着流体流量增大, 流体出口温度逐渐减小, 温升速率保持稳定。由此可知, 流体流量影响流体出口温度, 对温升速率影响不大。

阻力系数和压降随流体流量变化曲线如图 10 所示。

由图 10 可知, 随着流体流量增大, 阻力系数逐渐减少, 压降逐渐增大。在流体流量 $V = 0.000\ 02\ m^3/s$ 时, 压降为 $1.93 \times 10^3\ Pa$; 在流体流量 $V = 0.000\ 06\ m^3/s$ 时, 压降为 $5.78 \times 10^3\ Pa$ 。

强化传热评价因子随流体流量变化曲线如图 11 所示。

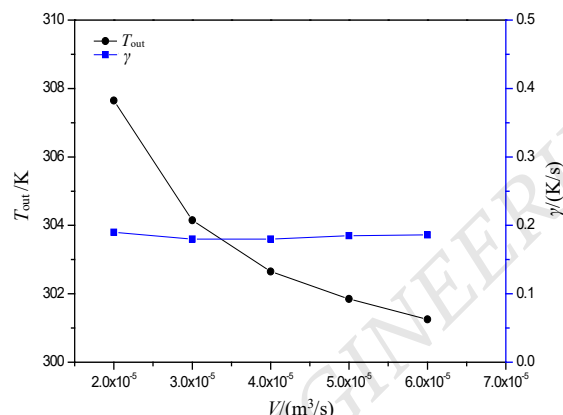


图 9 流体出口温度和温升速率随流体流量变化曲线

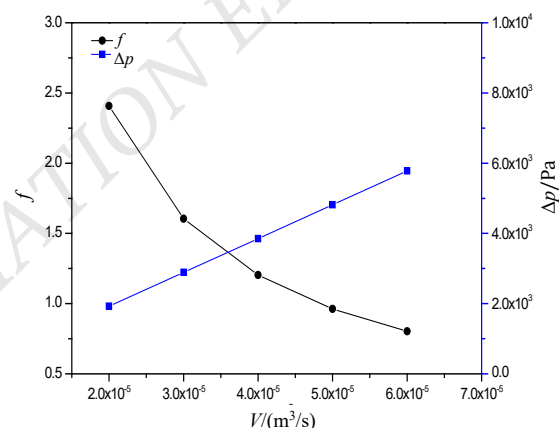


图 10 阻力系数和压降随流体流量变化曲线

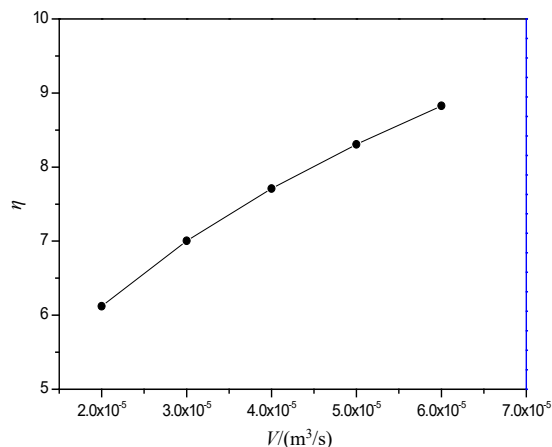


图 11 强化传热评价因子随流体流量变化曲线

由图 11 可知, 随着流体流量增大, 强化传热评价因子逐渐增加。在流体流量 $V = 0.000\ 02\ m^3/s$ 时, 强化传热评价因子为 6.12; 在流体流量 $V = 0.000\ 06\ m^3/s$ 时, 强化传热评价因子为 8.8。

时,强化传热评价因子为 8.83。由此可知,增大流量有利于太阳能平板集热器综合热性能的提高。

2.3 吸热板热流密度

在太阳能平板集热器通道长度为 2 000 mm,宽度为 500 mm,高度为 1.0 mm,流体流量为 0.000 05 m³/s,进口温度为 298.15 K 的条件下,研究吸热板热流密度对太阳能平板集热器热性能影响。

流体出口温度和温升速率随吸热板热流密度变化曲线如图 12 所示。

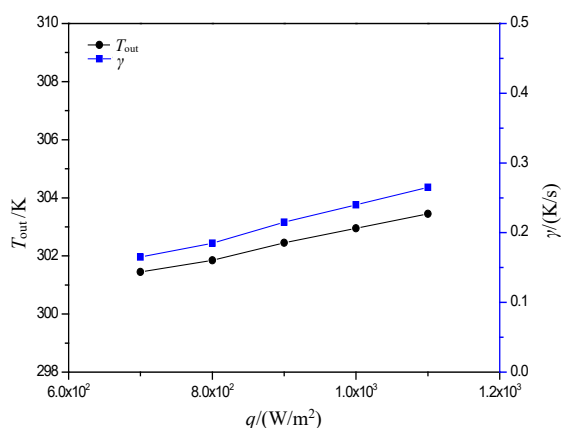


图 12 出口温度和温升速率随吸热板热流密度变化曲线

由图 12 可知,随着吸热板热流密度增大,流体出口温度和温升速率逐步增大。当吸热板热流密度为 700 W/m²时,流体出口温度为 301.45 K,温升速率为 0.165 K/s;当吸热板热流密度为 1 100 W/m²时,流体出口温度为 303.45 K,温升速率为 0.265 K/s,温升速率提高了 60%。由此可知,吸热板热流密度越大,流体出口温度和温升速率越高。

2.4 流体进口温度

在太阳能平板集热器通道长度为 2 000 mm,宽度为 500 mm,高度为 1.0 mm,流体流量为 0.000 05 m³/s,吸热板热流密度为 800 W/m²的条件下,研究流体进口温度对太阳能平板集热器热性能的影响。流体出口温度和温升速率随流体进口温度变化曲线如图 13 所示。

由图 13 可知,随着流体进口温度增大,流体出口温度逐渐增大,出口温度和进口温度温差始终保持

在 3.7 K;温升速率为 0.185 K/s,保持稳定。

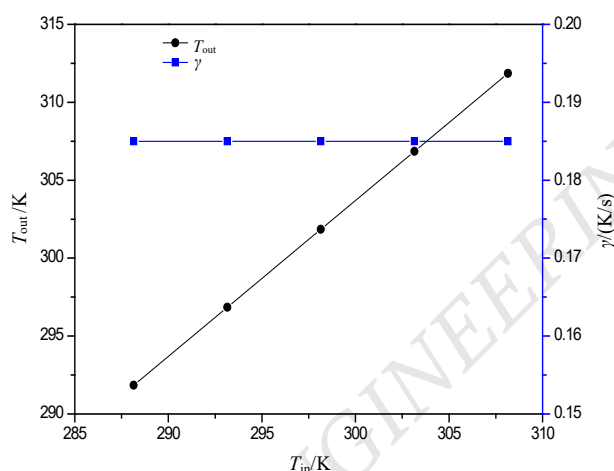


图 13 流体出口温度和温升速率随流体进口温度变化曲线

3 结论

本文通过研究影响太阳能平板集热器热性能的关键参数:通道间距、流体流量、吸热板热流密度、流体进口温度的变化规律,为太阳能平板集热器结构优化和实际运行提供技术支撑。结论如下:

- 1) 通道间距越小,流体温升速率越快;
- 2) 随着流体流量增大,流体出口温度逐渐减小,温升速率保持稳定;阻力系数减少,压降逐渐增大;强化传热评价因子逐渐增大,总体而言,增大流量有利于太阳能平板集热器综合热性能的提高;
- 3) 吸热板热流密度越大,流体出口温度越高,温升速率越快;
- 4) 流体进口温度越高,流体出口温度越高,进出口温差和温升速率始终保持稳定。

综上所述,通道间距和吸热板热流密度影响流体温升速率,流体流量和吸热板热流密度影响流体出口温度;当吸热板热流密度一定时,通道间距越小、流体流量越小,流体温升速率越大,出口温度越高。

参考文献

- [1] 王峥,任毅.我国太阳能资源的利用现状与产业发展[J].资源与产业,2010,12(2):89-92.
- [2] 卢郁,于洪文,丁海成,等.平板太阳能集热器热性能数学建模及模拟[J].济南大学学报(自然科学版),2013,27(3):293-297.

(下转第 49 页)