

•水利与土木工程•

DOI:10.15961/j.jsuese.201900994

面向热光伏发电系统的紧凑式换热结构设计及性能分析

鞠 铖¹, 谢和平^{1,2*}, 孙立成¹, 唐继国¹, 莫政宇¹, 李碧雄³

(1.四川大学 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室 水利水电学院, 四川 成都 610065; 2.深圳大学 深地科学与绿色能源研究院 土木与交通工程学院, 广东 深圳 518052; 3.四川大学 深地科学与工程教育部重点实验室, 四川 成都 610065)

摘 要:中低温地热温差材料热光伏发电是世界性研究热点,其难点是如何提高热光伏发电的热电转换效率。本文提出一种基于自相似结构(SSHS)的换热结构设计方案,可以大大减小一般热电转换系统换热结构的体积与重量,同时提高热电转换效率。以一个热端热沉的流动换热过程为例,利用数值计算方法对其换热和流动阻力特性进行了模拟和分析,并与两种传统换热结构进行了对比。计算结果表明:SSHS热沉具有更强的换热能力,换热均匀性更好,流量范围 $0.010\sim 0.0186\text{ kg/s}$ 、热流密度 2 W/cm^2 及进口热水温度 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下,SSHS热沉的换热能力可达一般换热结构的2倍以上,换热面(释热面)温度高出 $5\sim 10\text{ K}$,温度分布均匀性提高了50%以上,进而有利于提高热电转换效率;此外,SSHS虽然相较传统结构有更大的流动阻力,但对于当前设计总流动阻力也不超过 450 Pa ,因此SSHS热沉非常适合用于模块化的热电直接转换系统。

关键词:地热发电;热电转换;自相似微通道热沉;换热结构

中图分类号:TM616

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2019)06-0054-06

Analysis and Design of Compact Heat Exchanger for a Thermo-voltaic Power Generation System

JU Cheng¹, XIE Heping^{1,2*}, SUN Licheng¹, TANG Jiguo¹, MO Zhengyu¹, LI Bixiong³

(1.State Key Lab. of Hydraulics and Mountain River Eng., College of Water Resource & Hydropower, Sichuan Univ., Chengdu 610065, China;

2.Inst. of Deep Earth Sci. and Green Energy, College of Civil and Transportation Eng., Shenzhen Univ., Shenzhen 518052, China;

3.Key Lab. of Deep Underground Sci. and Eng. for Ministry of Education, Sichuan Univ., Chengdu 610065, China)

Abstract: Middle and low temperature geothermal power generation by thermoelectric materials receives increasingly attention, while the key difficulty involved is how to increase the thermoelectric conversion efficiency. This paper presents a conceptual design of heat exchanger on the basis of a Self-Similarity microchannel Heat Sink (SSHS) which can reduce the volume and weight of the system to a great extent and increase the thermo-electric conversion efficiency. With a heat exchanger of the hot side as an example, its heat transfer and flow resistance characteristics were numerically evaluated and compared with two traditional heat exchange structures. The calculation results indicate that the current design of SSHS has a better performance and uniformity in heat transfer. Under conditions of flow rates of $0.0103\sim 0.0186\text{ kg/s}$, heat flux of 2 W/cm^2 and entrance water temperature of $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, its heat transfer ability is over twice of that of a conventional heat exchanger, and average temperature of the heat release surface is raised by $5\sim 10\text{ K}$, and uniformity in temperature distribution is increased over 50%. As a consequence, an improved thermoelectric conversion efficiency is obtained, although a larger flow resistance is hard to avoid. For the current design the total pressure drop is no more than 450 Pa , it is still very suitable for a direct thermo-electric conversion system.

Key words: geothermal heat; thermo-electric conversion; self-similarity microchannel sink; heat exchanger structure

地热能具有储量大、分布广、清洁环保、稳定可靠等特点,是一种极具竞争力的清洁能源^[1]。目前,中国地热资源主要以中低温地热资源($<150\text{ }^{\circ}\text{C}$)为

主,利用方式主要为直接利用于干燥物料、制冷、采暖或供应生活热水等^[2-3]。以水热型地热资源为例,每年可开采量折合标准煤 $18.65\times 10^8\text{ t}$,相当于中国

收稿日期:2019-10-17

基金项目:国家自然科学基金项目(51706149; 51709191); 四川省科技计划资助项目(2019YJ0053)

作者简介:鞠 铖(1995—),男,硕士生。研究方向:热管理技术。E-mail: 522039470@qq.com

*通信联系人 E-mail: xieh@scu.edu.cn

网络出版时间:2019-11-13 16:54:18

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20191113.1401.001.html>

<http://jsuese.ijournals.cn>

<http://jsuese.scu.edu.cn>

2015年煤炭消耗的50%,但实际开采率仅为0.2%,且其中发电仅占0.5%^[4]。充分利用这部分总量巨大的中低温热源具有重要的实际意义^[1]。热电直接转换技术具有运行简单、无运动部件、原地发电等优点,用于中低温热源发电具有独特优势^[1,5-6]。当前,利用温差材料发电的热电转换效率低,通常低于10%。

目前,中低温地热温差发电已经是世界性研究热点,谢和平院士等^[1]在国际上率先提出地热能资源发电的概念、定义及技术构想。光伏发电的核心技术难点是如何提高热电转换的效率,相关热学、热动力学,特别是热电转换原理和技术及热电发电系统的结构设计等方面的创新突破,对提高光伏发电效率至关重要。基于热电直接转换技术的热电发电系统的设计与应用方面,已有部分研究报道^[7-8],但由于一般系统的冷热端换热结构设计普遍体积偏大,单端的厚度为热电发电片(TEG)厚度的3倍以上^[7],导致现有的设计存在装置体积大、设备布置困难和TEG模块数量相对较少等问题,不利于热电直接转换技术的模块化设计和规模化开发利用。本文提出一种基于自相似微通道热沉(selfsimilarity micro-channel heat sink, SSHS)的冷热端板式换热结构设计方案,可实现多个热沉并联使用,利于热电系统的模块化组合和规模化利用,并大大减少系统的体积和重量,有效避免一般设计中换热结构过于庞大的问题;同时,利用数值分析方法,对该换热结构的总体性能进行了评价与分析。

1 自相似微通道热沉结构及其工作原理

2013年,Brighenti等^[9-10]在分流式微通道热沉(manifold micro-channel heat sink, MMHS)的基础上,提出自相似微通道热沉(SSHS)概念设计。由于SSHS子通道和主通道间存在结构上的相似性,因此被命名为自相似微通道热沉,其结构和内部工质流动过程如图1所示。和MMHS相同,SSHS在换热通道上方增加了分流结构(manifold),但SSHS中的微通道(溢流通道,图1中由分流层肋和底部槽道包围的部分,即虚线标示的部分)高度低,且长度很短,可使SSHS的整体结构更加紧凑。短微通道设计可以充分利用入口段效应,大大提高溢流通道的换热能力。

自相似微通道热沉的主要优势使其非常适合作为热电转换系统的冷热端换热结构:1)高紧凑性可大大减小热电转换系统的体积和重量;2)换热均匀性可提高热电模块冷热端的温度分布均匀性,进而提高系统的热电转换效率。唐巍^[11-12]和王喆^[13]等指出,SSHS内部流量分配均匀性决定了其换热过程的均匀性,这一优势可使SSHS用于对换热均匀性

要求较高的换热过程。热电转换模块系统对温度分布均匀性的要求较高,SSHS热沉很好地满足了这一要求。

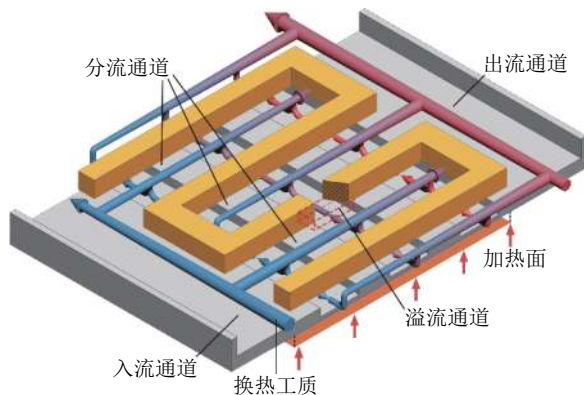


图1 SSHS基本结构及内部工质流动过程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of basic structure and flow process with respect to SSHS

2 模块化热电转换系统设计

目前,热电转换效率依然较低,必须通过大量热电模块的联合工作,才能实现热电直接转换的规模化利用。鉴于SSHS换热结构紧凑和换热均匀性高的优点,基于板式换热器结构,并将SSHS热沉结构用作热电模块的冷热端换热结构,给出模块化热电转换系统设计方案,见图2。系统采用板式布置方案,热电模块冷热端均采用SSHS换热结构,换热工质流程和板式换热器相同。模块化设计可实现根据实际需要增减热电模块数量,进而降低建造和安装成本。

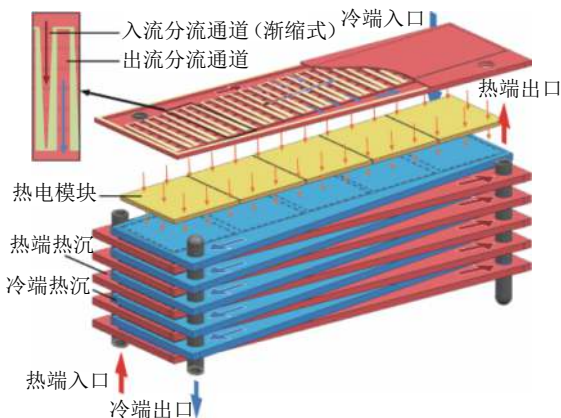


图2 模块化的板式热电转换系统结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of plate-type thermoelectric conversion system

根据课题组前期关于SSHS的研究结果^[11-13], SSHS热沉原有设计依然存在一定程度的流动和换热不均问题,通过将入口分流通道的等截面改为渐缩截面设计, SSHS的换热均匀性得到了大幅提高。鉴于提高热电模块冷热端的温度分布均匀性可进一步

提升热电转换效率,因此,系统设计采用了改进的SSHS热沉结构。

3 板式热电转换系统换热性能分析

鉴于当前设计为板式模块化设计,冷热端热沉均采用相同结构。通过分析单个热沉的换热性能,便可获得系统整体的换热特性。故以一个热端的热沉为对象,采用数值模拟的方法,对其换热及流动阻力特性进行分析,以评价SSHS的性能和适用性。数值模拟采用ANSYS FLUENT 16.0软件平台完成。

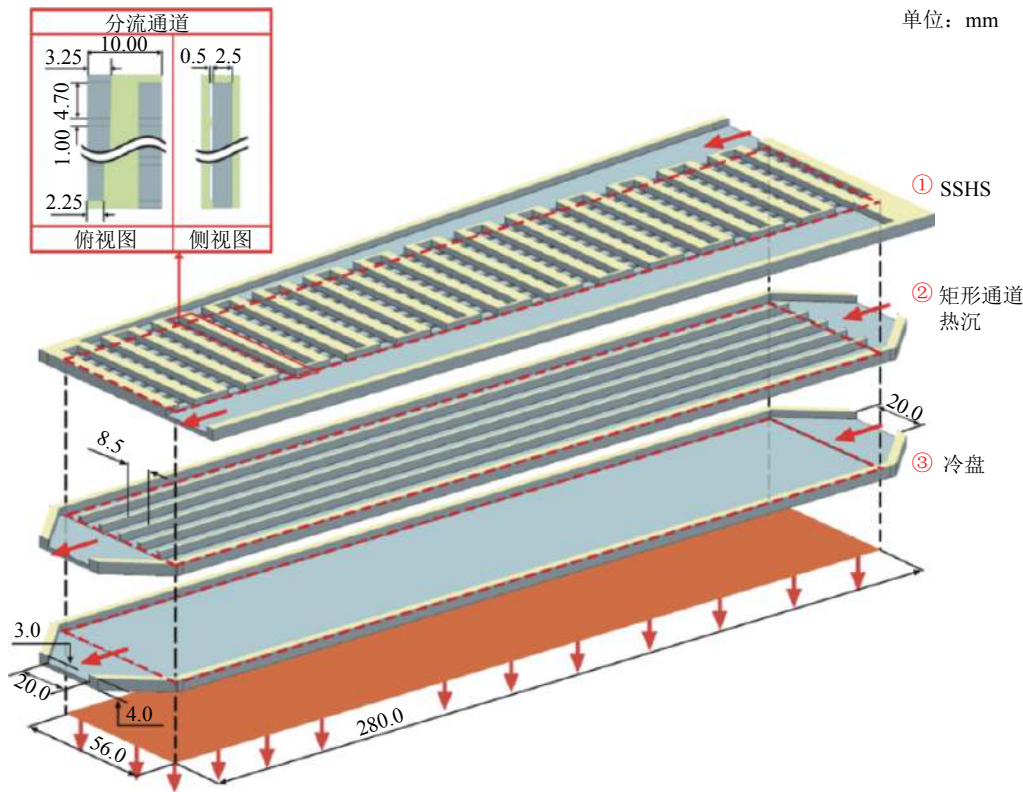


图 3 换热器单元计算模型尺寸

Fig. 3 Geometry size of a single heat exchanger unit in calculation

为消除入口及出口段效应对计算结果的影响,入口及出口分别设置了约5倍于出入流通道水力直径的延长段。热沉底部外表面(红色虚线标示的部分)为与热电模块的接触面,当高温流体流经热沉内部时,热量经由接触面传导进入热电模块,其中大部分热量最终被冷端热沉内容低温流体带走。

3.2 计算模型及边界条件设置

由于热沉内设计流量较低(0.010 0~0.018 6 kg/s),流道内的雷诺数均小于2 300(微通道内雷诺数为80~160),故计算模型采用层流模型,并做如下假设:1)流体不可压缩;2)不考虑重力影响;3)固体物性为常物性。热沉入口水温为373.15 K,出口设定为自由出流边界条件,热沉与换热模块换热面施加

3.1 几何模型

除本文所设计的SSHS热沉,同时选取了矩形小通道热沉和冷盘两种常见热沉设计方案作为参照。为方便对比,分别编号为① SSHS;② 矩形通道热沉;③ 冷盘。几何模型结构和尺寸如图3所示,三者底部换热面积相同(图3中红色虚线标示区域),厚度(4 mm)及热沉内部高度(3 mm)均相同。①的分流层包括14组进出口分流通道的分流层下地板上加工有高度为0.5 mm的肋隔成的10条槽道;②中包含6个宽度为8.5 mm的矩形换热通道。

2 W/cm²恒定热流(热沉释放热量)。热沉材料为铜,换热工质为水,其粘度 μ (kg/(m·s))由式(1)计算:

$$\mu = 4.07 \times 10^{-2} - 2.98 \times 10^{-4} T + 7.32 \times 10^{-7} T^2 - 5.98 \times 10^{-10} T^3 \quad (1)$$

3.3 网格无关性验证

为确保网格数量满足数值模拟结果精度要求,首先进行网格无关性验证。图4给出了进口质量流量分别为0.014 5和0.018 6 kg/s时,不同网格数量条件下SSHS热沉的总压降,当网格数量达到476万后,继续增加网格数对模型进出口压降影响很小,故在后续计算中SSHS热沉采用476万网格数量。其他两种换热结构的网格数量,经过网格校验后分别确定为460万和502万。

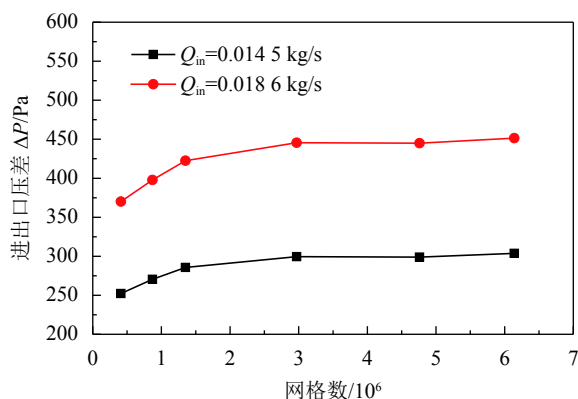


图4 网格无关性验证

Fig. 4 Grid independence verification

3.4 SSHS热沉性能评价

3.4.1 换热性能

图5为进口流量为0.012 4和0.016 5 kg/s时3种换热结构换热接触面(与热电模块相接触的换热面)温度分布情况。

对于高温端而言,换热面的温度越高且温度分布越均匀,热电转换效率也越高。由图5明显可知,SSHS热沉换热面的温度高于其他两种设计,且温度均匀性也更高。当进口流量为0.012 4 kg/s, SSHS接触换热面的平均温度为367.62 K,而矩形通道结构和冷盘换热结构的这一参数分别为362.38和358.48 K;三者接触换热面的高低温温差分别为6.58、14.10和13.97 K。对于进口流量为0.016 5 kg/s时的情况,也相近。因此,SSHS换热结构设计显著优于常规的热沉换热结构,对热电转换系统具有很高的适用性。

图6和7进一步统计出了在更宽流量范围内(0.0103~0.018 6 kg/s)3种换热结构接触换热面平均温度与高低温差的变化情况。随着流量的增加,3种换热结构的接触换热面的平均温度随之增加,高低温差随之下降。虽然换热性能均有提高,但SSHS热沉依然显著优于其他两种换热结构。换热面的平均温度平均高出其他换热结构5和10 K左右;换热面高低温差范围由13~18 K降至5~9 K;温度分布均匀性提高了50%以上。可以通过热电转换效率的理论计算公式(式(2))评估这一影响。

$$\eta_{\max} = \frac{T_H - T_C}{T_H} \times \frac{\sqrt{1+ZT} - 1}{\sqrt{1+ZT} + \frac{T_C}{T_H}} \quad (2)$$

式中: T_H 和 T_C 分别为热电模块高温侧和低温侧面温度, K; ZT 为性能系数,通过现有成熟技术已经能够制备室温下 $ZT>1$ 的热电材料^[14]。为方便比较, ZT 值

取为1.2,并假设冷端热沉内的冷却水的进口温度为20℃,流量和热端热沉相同(0.018 6 kg/s),因此换热过程也比较接近。结构①~③根据式(2)估算出的热电转换效率分别为4.0%、3.5%和3.0%, SSHS热沉换热结构可显著提升热电转换效率。

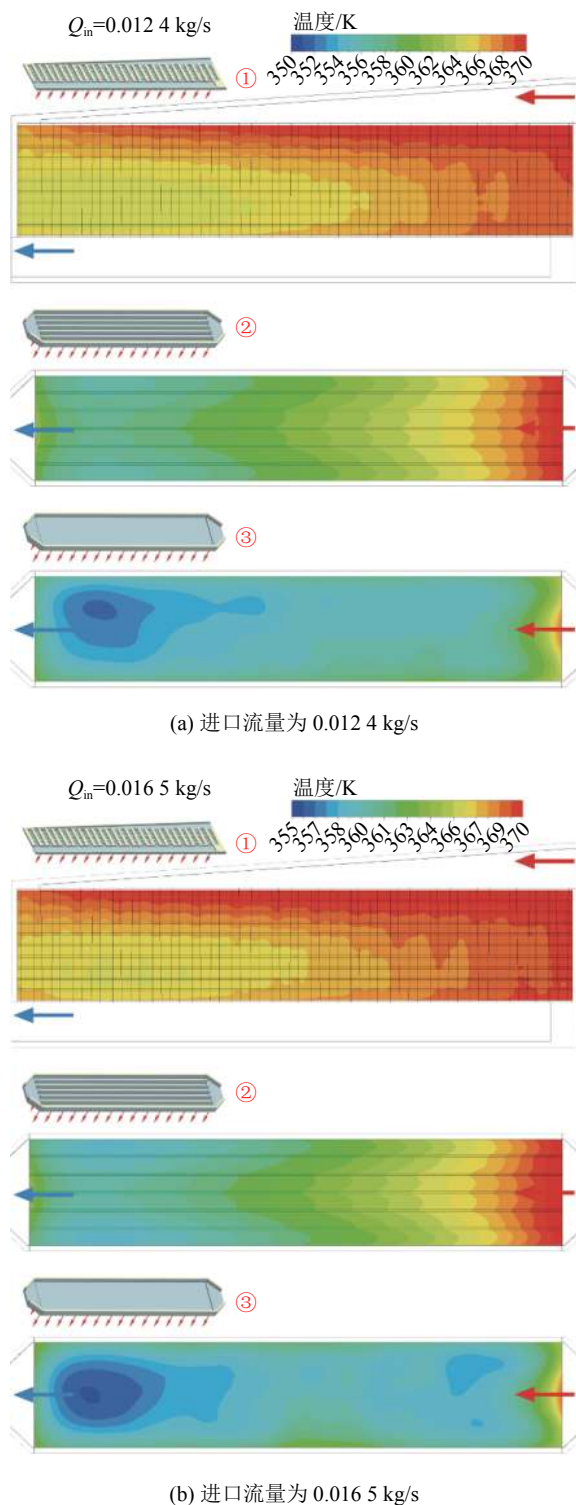


图5 相同流量时接触面温度分布

Fig. 5 Temperature distribution across contact surface at the same flow rate

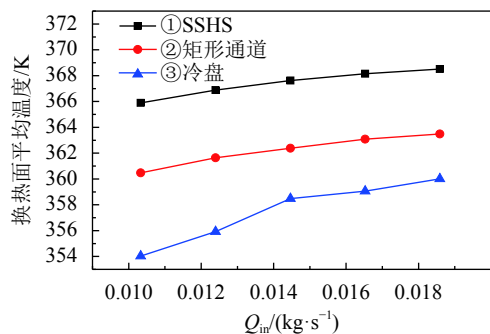


图 6 接触换热面平均温度

Fig. 6 Average temperature of contact heat exchange surface

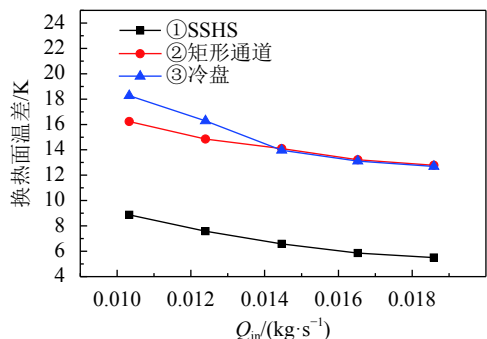


图 7 接触换热面高低温差

Fig. 7 High and low temperature difference of contact heat exchange surface

图8为不同流量时3种换热结构的平均换热系数。由图8可知, SSHS的换热系数达到了 $5\,000 \sim 8\,000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, 而另外两种换热结构的换热系数均未超过 $2\,500 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。这说明SSHS换热结构不仅提高了换热均匀性, 且换热能力可达一般换热结构的2倍以上。

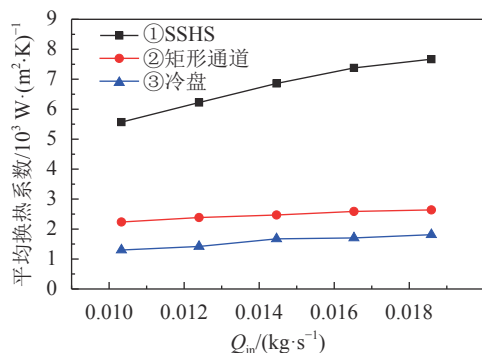


图 8 3种换热结构平均换热系数

Fig. 8 Average heat transfer coefficient of three heat exchange structures

3.4.2 流动阻力特性

图9为不同流量工况下, 3种换热结构不同流量时的进出口压降变化规律。由图9可知, SSHS的换热结构虽然具有很强的换热能力和换热均匀性, 但其流动阻力压降也显著高于另外两种换热结构, 相同流量时几乎是另外两者的3倍。但从绝对压降值来

看, 在计算范围内最大的压降也仅为 445 Pa , 在一般的使用条件下均可接受。

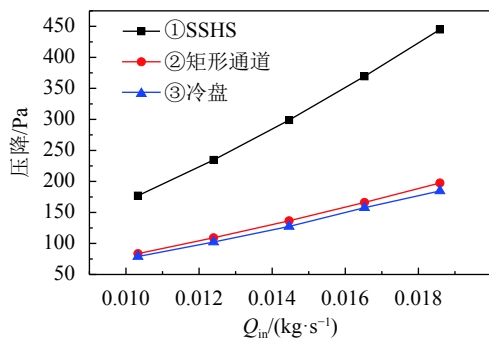


图 9 流动阻力特性

Fig. 9 Flow resistance characteristics

4 结 论

基于SSHS热沉的换热均匀性和紧凑度高的优势, 提出板式模块化热电转换系统概念设计, 同时对分析了SSHS热沉的换热性能, 得到以下结论:

1) 采用SSHS热沉作为热电转换系统冷热端换热结构, 可实现系统的板式和模块化设计, 有利于规模化利用余热或地热资源。

2) 相较传统换热结构, SSHS热沉具有更强的换热能力和换热均匀性。流量范围 $0.010 \sim 0.018 \text{ kg/s}$ 、热流密度 $2 \text{ W}/\text{cm}^2$ 及进口热水温度 $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 条件下, 换热能力可达一般换热结构的2倍以上, 温度分布均匀性提高50%以上。在冷端水温为 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 可将热电转换效率提升约15%~30%。

3) SSHS的流动阻力明显高于普通的冷盘或矩形换热小通道设计, 但是在计算流量范围内最大流动阻力也仅约为 445 Pa , 可满足绝大多数使用条件对流动阻力特性的要求。

参考文献:

- [1] Xie Heping, Ang Ran, Li Bixiong, et al. Principle and technological conception of middle-low temperature geothermal power generation based on large-scale single crystals of thermovoltaic materials[J]. Advanced Engineering Sciences, 2018, 50(2): 1-12. [谢和平, 昂然, 李碧雄, 等. 基于热伏材料中低温地热发电原理与技术构想[J]. 工程科学与技术, 2018, 50(2): 1-12.]
- [2] 工业锅炉及火焰加热炉烟气余热资源量计算方法与利用导: GB/T 17719—1999[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- [3] 翁一武. 低品位热能转换过程及利用[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2014.
- [4] Wang Guiling, Zhang Wei, Liang Jiyun, et al. Evaluation of geothermal resources potential in China[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2017, 38(4): 449-450. [王贵玲, 张薇, 梁继运, 等. 中国地热资源潜力评价[J]. 地球学报, 2017, 38(4): 449-450.]

- [5] Alghoul M A, Shahahmadi S A, Yeganeh B, et al. A review of thermoelectric power generation systems: Roles of existing test rigs/prototypes and their associated cooling units on output performance[J]. *Energy Conversion and Management*, 2018, 174: 138–156.
- [6] Suter C, Jovanovic Z R, Steinfeld A. A 1 kW(e) thermoelectric stack for geothermal power generation—Modeling and geometrical optimization[J]. *Applied Energy*, 2012, 99: 379–385.
- [7] Lv S, He W, Jiang Q, et al. Study of different heat exchange technologies influence on the performance of thermoelectric generators[J]. *Energy Conversion and Management*, 2018, 156: 167–177.
- [8] Patil D S, Arakerimath R R, Walke P V. Thermoelectric materials and heat exchangers for power generation—A review[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2018, 95: 1–22.
- [9] Brighenti F, Kamaruzaman N, Brandner J J. Investigation of self-similar heat sinks for liquid cooled electronics[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2013, 59(1/2): 725–732.
- [10] Kamaruzaman N B, Brighenti F, Brandner J J, et al. Prediction of micro surface cooler performance for different rectangular type microchannels dimensions[J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2013, 44: 644–651.
- [11] Tang W, Sun L C, Liu H T, et al. Improvement of flow distribution and heat transfer performance of a self-similarity heat sink with a modification to its structure[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 121: 163–171.
- [12] Tang Wei, Sun Licheng, Liu Hongtao, et al. A numerical analysis of the enhanced performance in heat transfer of a manifold micro-channel heat sink[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2018, 47(6): 864–868. [唐巍, 孙立成, 刘洪涛, 等. 分流式微通道热沉强化传热性能数值分析[J]. 电子科技大学学报, 2018, 47(6): 864–868.]
- [13] Wang Zhe, Sun Licheng, Liu Hongtao, et al. Analysis of heat transfer performance of a self-similarity microchannel heat sink and structure optimization[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2018, 50(1): 101–106. [王喆, 孙立成, 刘洪涛, 等. 自相似结构微通道传热分析及结构优化[J]. 工程科学与技术, 2018, 50(1): 101–106.]
- [14] He W, Zhang G, Zhang X X, et al. Recent development and application of thermoelectric generator and cooler[J]. *Applied Energy*, 2015, 143: 1–25.

(编辑 李轶楠)

引用格式: Ju Cheng, Xie Heping, Sun Licheng, et al. Analysis and design of compact heat exchanger for a thermo-voltaic power generation system[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2019, 51(6): 54–59. [鞠铖, 谢和平, 孙立成, 等. 面向光伏发电系统的紧凑型换热结构设计及性能分析[J]. *工程科学与技术*, 2019, 51(6): 54–59.]