

基于生物质燃料的水冷式温差发电机的实验研究

朱凌云, 李国能, 康泰云, 陈华锋, 郑友取

(浙江科技学院能源与环境系统工程系, 浙江省杭州市310023)

摘要: 为解决无电区域和火灾、地震和雪灾等特殊条件下的供电问题, 设计了一种可燃用木柴和木炭等生物质燃料的水冷式温差发电机, 其特点在于引入了一种辐射型的集热器。温差发电机的总质量为23.3kg, 集成了直流稳压器, 可稳定地对外输出电能。测试了温差发电机的启动特性、空载特性和功率负载特性, 结果表明: 该温差发电机的平均工作温差为68℃, 最大空载电压达到116.3V。当接入负载时, 输出功率随外部负载电阻的增大而降低。当外部负载为1.6Ω时, 温差发电机可对外输出最大功率为22.4W; 继续降低负载电阻时, 温差发电机将不能维持稳定地输出电能。

引言

能源是人类生活的基础, 随着世界经济的发展, 能源短缺问题日益突出, 太阳能、地热能、生物质能等可再生清洁能源以及工业废热等低品位能源得到了越来越多的关注^[1-2]。

近年来, 一种温差发电技术引起了科研人员的广泛关注。温差发电是一种基于塞贝克效应的发电技术, 无机械运动部件, 结构紧凑, 维护成本低。此外, 热电材料无气态和液态介质存在, 在整个能量转换过程中没有废水和废气等污染物排出, 是一种绿色环保的能源技术。温差发电与太阳能发电和风力发电相比, 其最大的优点在于不受自然天气的约束。近年来, 随着半导体

技术的进步, 基于塞贝克效应的温差发电材料有了显著

的突破^[3-5], 温差发电技术逐渐具备了实用价值。在军事、余热利用和地热利用等领域已取得了广泛的应用^[6-7]。

世界上有30亿人口需要使用生物质等固体

燃料来烹饪食物、照明和取暖^[8]。

。在世界范围内仍有超过13亿人口无法获得

电力, 无法融入现代文明生活^[9]。

此外, 在发生自然灾害后, 如何就地便捷获取电力至今仍是技术难题。为解决无电区域和极端条件下的供电问题, 一种可行的方法是将传统的炉具与温差发电模块相结合, 在实现炊事和取暖的同时获得一定量的电力, 这种方法的应用即为温差发电炉。由于生物质燃料在生命周期内二氧化碳零排放的特性, 因此基于生物质燃料的温差发电炉具有重要的研究意义。

在国外, Montecucco等人^[10-11]

设计了一种以固体可燃物为燃料的温差发电炉。该温差发电炉冷端的散热方式为水冷散热, 在250℃的温差下, 最大平均输出功率可达27W, 其热电转换效率为4%~5

%。Nuwayhid等人^[12-14]

对温差发电炉进行了一系列的优化, 输出功率从最初的1W增加到3.4W, 最后可达到4.2W。该温差发电炉分别采用空气自然对流和回路型热管对温差发电片的冷端进

行散热。Najjar等人^[15]

在传统炉灶中加入

温差发电模块, 使该温差发电炉在正

常使用时产生7.8W的电能。Champier等人^[16-17]

设计了一种能提高燃烧效率的温差发电炉。该温差发电炉使用了直流稳压器, 同时在实验中对水冷和风冷2种不同的散热方式进行了对

比。结果表明水冷的效果优于风冷,

能产生6W的电能, 其热电转换效率约为2%^[16]

。随后, Champier等人对该温差发电炉进行了优化, 其最大输出功率可达9.5W^[17]。

Mal等人^[18]

研制了一种风冷型温差发电炉, 其发电功率约为3W

。Sornek等人^[19]

在壁炉烟囱上安装温差发电模块, 获

得了5W的最大发电功率。Lertsatitthanakorn^[20]

等人提出了一种基于翅片散热器的生物质温差发电炉, 研究了不同温度下的热电转换效率。实验结果表明, 在150

左右的温差下，最大输出功率可达2.4W，热电转换效率为3.2%。

在国内，任德鹏^[21]

等人研究了负载大小等参数对发电功率的影响，指出可以通过改善冷端的换热系数或强化热端的热流来提高温差发电器件的热电转换效率。陈伟^[22]

等人设计了一款具有错排扰流片结构的新型温差发电装置，用于回收汽车尾气余热。该装置可通过错排结构来提高换热通道的换热系数。实验表明，在发动机转速为3000r/min、换热通道入口处尾气温度为140℃的情况下，其发电电压为1.1~1.2V，发电功率约为1.3W。马洪奎等人^[23]

研制了由4片温差发电片组成的温差发电机，测量了其功率变化曲线，在温差为170℃的情况下，发电功率为8.9W。李国能等人设计了一种便携式温差发电炉^[24-25]，总质量为2.5kg，输出电压稳定为5V时可对外输出2.1W的电能。

综

上所述，

国内外对温差发电

炉的研究尚处于起步阶段，大部分文

献展示的温差发电炉的发电功率均小于10W^[26-27]

，仅有一款商品化销售的温差发电炉^[28]

。本文设计了一种基于生物质燃料的水冷式温差发电机，搭建了相关实验测试平台，对该发电机的启动特性、空载特性和功率负载特性进行了测试。该研究可为后续开发更大功率的温差发电炉提供参考。

1 温差发电机和测试系统

1.1 水冷式温差发电机简介

水冷式温差发电机由燃烧器、集热器和温差发电单元组成。图1为该温差发电机的样机，主要由炉膛、环形烟道、集热器、连接卡环、保温棉和温差发电单元构成。温差发电单元是温差发电机的核心部件，由均热铝板、温差发电片、水冷散热器和水泵组成。炉膛主体采用不锈钢材料，直径为100mm，竖直高度为530mm，在不同位置打孔安装导热铜棒构成集热器，即24根直径为12mm的导热铜棒分6组均匀安装在炉膛的周围，每根铜棒间隔40mm，深入炉膛40mm。在靠近底部140mm的位置开有100mm×70mm的矩形添料口，其底部焊有炉排，用于支撑生物质燃料。炉膛顶部设有一个四分之一的环形烟道，用环形卡环与炉膛连接。环形烟道上焊有一个130mm×110mm方形拉环，用于手持移动。整个装置由3根不锈钢支架支撑，炉膛底部距离地面120mm。



图 1 基于生物质燃料的温差发电机样机

Fig. 1 Prototype of thermoelectric generator based on biomass fuel

在装配温差发电单元时，首先在均热铝板上打孔，将导热铜棒通过螺纹固定在均热铝板上；然后，再把铜棒插入炉膛内部，以便与烟气充分接触，吸收烟气热量；其次，将导热硅脂均匀地涂在温差发电片的两端以减少温差发电片与铝板和水冷散热器的接触热阻。温差发电单元如图2所示。温差发电片的型号是“TEP-126T200”，最高耐温260℃，半导体材料为碲化铋，电堆数为126对，尺寸为40mm(长)×40mm(宽)×3.8mm(高)。在温差发电单元下方的炉膛外包有保温棉，防止热量流失。实验中，将4片温差发电片串联连接成1组，一共6组，6组温差发电片的串并联方式由实际实验需要进行调整。

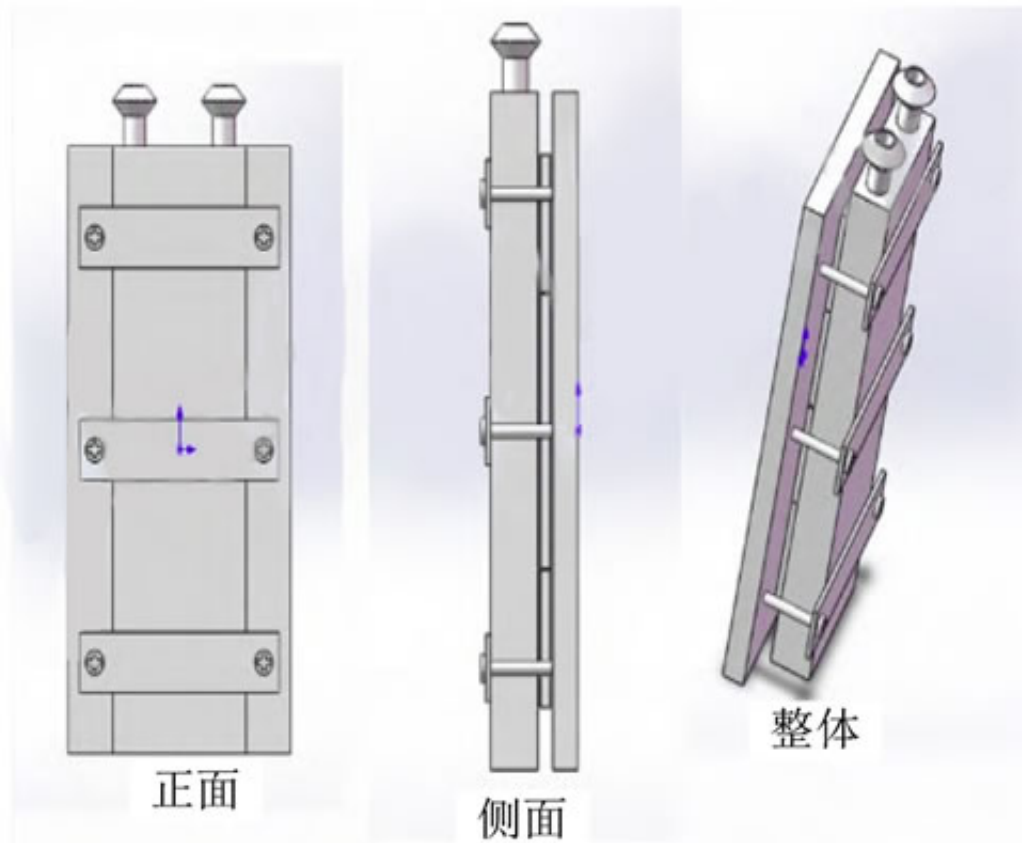


图 2 温差发电单元示意图

Fig. 2 Sketch of a unit of thermoelectric generator

1.2 实验测试系统简介

实验测试系统如图3所示，该测试系统由K型热电偶、数据采集系统和电子负载组成。将6组发电单元按顺序编号，在每个温差发电单元中的铝板和水冷散热器的上表面打孔安装热电偶，测量每个温差发电单元冷端和热端的温度，因此，整个装置共布置有12个K型热电偶。热电偶直径为2mm，精度为1.0%。图4为该温差发电机实验测试时热电偶的分布图。温差发电机的功率负载特性采用Prodigit3311F电子负载进行测试，其电压的输入范围为0~60V，精度为0.5%。在测量该温差发电机的最大输出电压时，使用万用表对电压进行测量。实验时所使用的燃料是日常生活中容易获得的松木块，通过燃烧松木块产生实验所需的高温烟气，供铜棒吸收热能。图5为实验测试系统的实际场景。

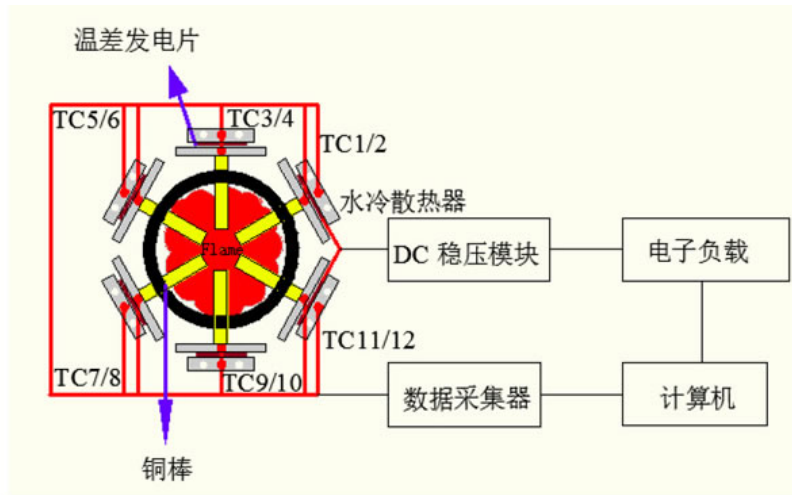


图 3 实验系统示意图

Fig. 3 Sketch of the experimental system

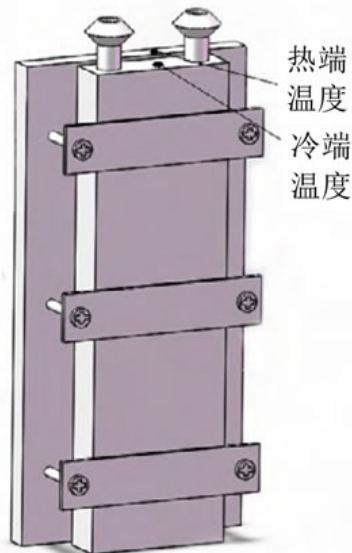


图 4 热电偶分布示意图

Fig. 4 Sketch of thermocouple location

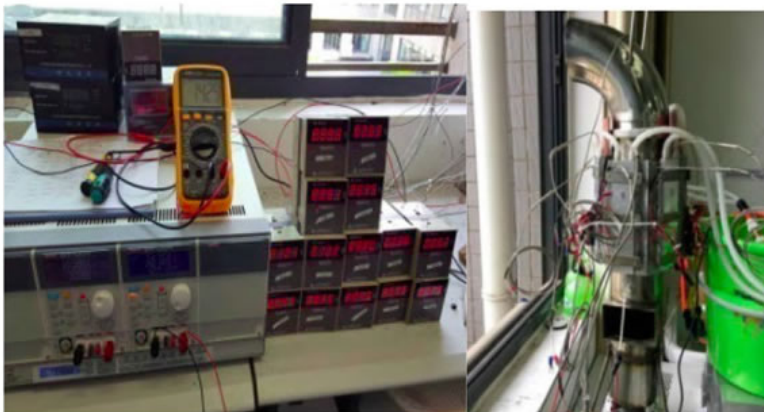


图 5 实验系统照片

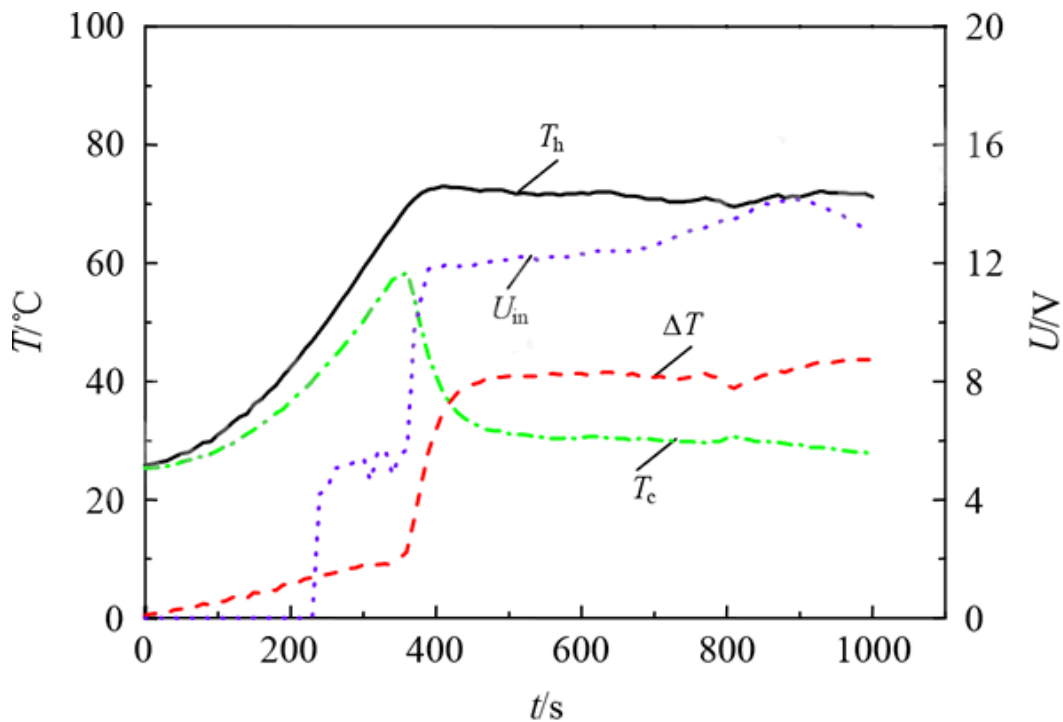
Fig. 5 Photograph of the experimental system

实验测试分为3个部分：1) 启动特性测试：该部分实验从点火开始记录输入电压、水泵电压、电流以及冷热端温度数据，直至自供电水泵开始正常工作，待系统达到一个稳定的工作状态后，停止实验记录，整个过程所耗时间约为1000s。2) 空载特性测试：该部分实验从点火开始记录温度与输出电压的关系，直至输出电压达到最高后，停止添加木块，让剩余的木块继续燃烧，直至炉膛内的燃料燃烧完全后，且冷热端温度降低至与实验开始时冷热端温度基本相同时停止。3) 功率负载特性：当燃烧稳定后，通过调节Prodigit3311F电子负载获得不同的外部负载阻值，以测试该温差发电机在不同负载下的功率输出特性。

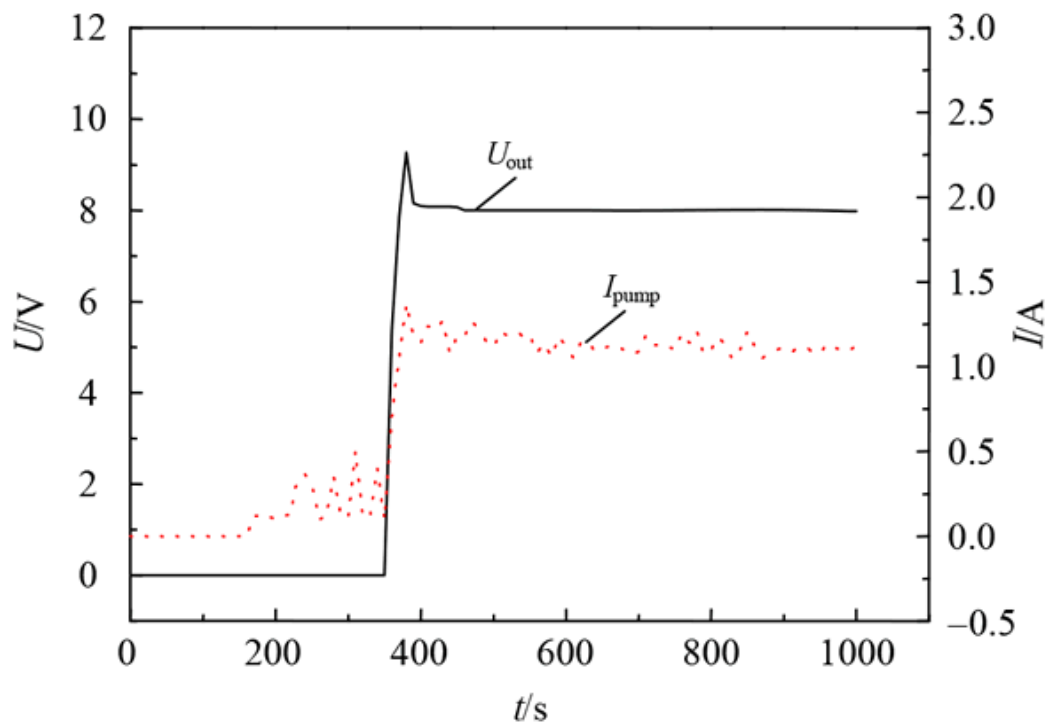
2实验结果与分析

2.1启动特性

实验经过反复测试，在6组温差发电单元全部并联的情况下，温差发电机具有自启动能力。实验时，在测试系统中接入一个可调节的直流稳压器，设定输出电压为8V，系统自启动后，整个系统能进入良性循环。



(a) 热端温度、冷端温度、温差和输入电压
随时间的变化曲线



(b) 输出电压和水泵电流随时间的变化曲线

图 6 温差发电机的自启动特性曲线

Fig. 6 Start-up characteristics of
the thermoelectric generator

图6为温差发电机的自启动特性曲线。图6(a)为冷热端温度、温差和输入电压随时间的变化曲线,其中热端温度和温差为6组温差发电单元的平均值;图6(b)为直流稳压器后的输出电压和水泵电流随时间的变化曲线。实验从点火开始记录数据,200s左右水泵电路出现微小电流,此时温差为4.8 $^{\circ}\text{C}$ 。在240s后,输入电压开始迅速上升,到360s时,水泵开始工作,系统进入强迫对流散热模式,冷端温度开始迅速下降,此时温差为11 $^{\circ}\text{C}$,输入电压为5.7V,输出电压为5.4V。

360s后,各参数开始迅速上升,380s时输出电压达到峰值电压9.3V,此时温差为23 $^{\circ}\text{C}$,输入电压为10.9V。400s后水泵的工作状态稳定在8V/1A左右,此时温差为32 $^{\circ}\text{C}$ 。温差发电机进入稳定工作后,水泵的运行电压可降低,最后在功率为3W时即可满足温差发电机的散热需求。

2.2空载特性

测试温差发电机的空载特性时,水泵由外部电源供电,这样可以更准确地反映该温差发电机的发电性能,排除直流稳压器的影响。将6组温差发电单元串联后接入电压表,测量该温差发电机的最大电压。从燃烧启动开始记录数据,当输出电压达到峰值时停止继续投放燃料,直至系统冷却,记录整个动态燃烧实验过程。在实验过程中,冷端温度保持在30 $^{\circ}\text{C}$ 左右,热端温度不断上升,峰值为102 $^{\circ}\text{C}$ 。

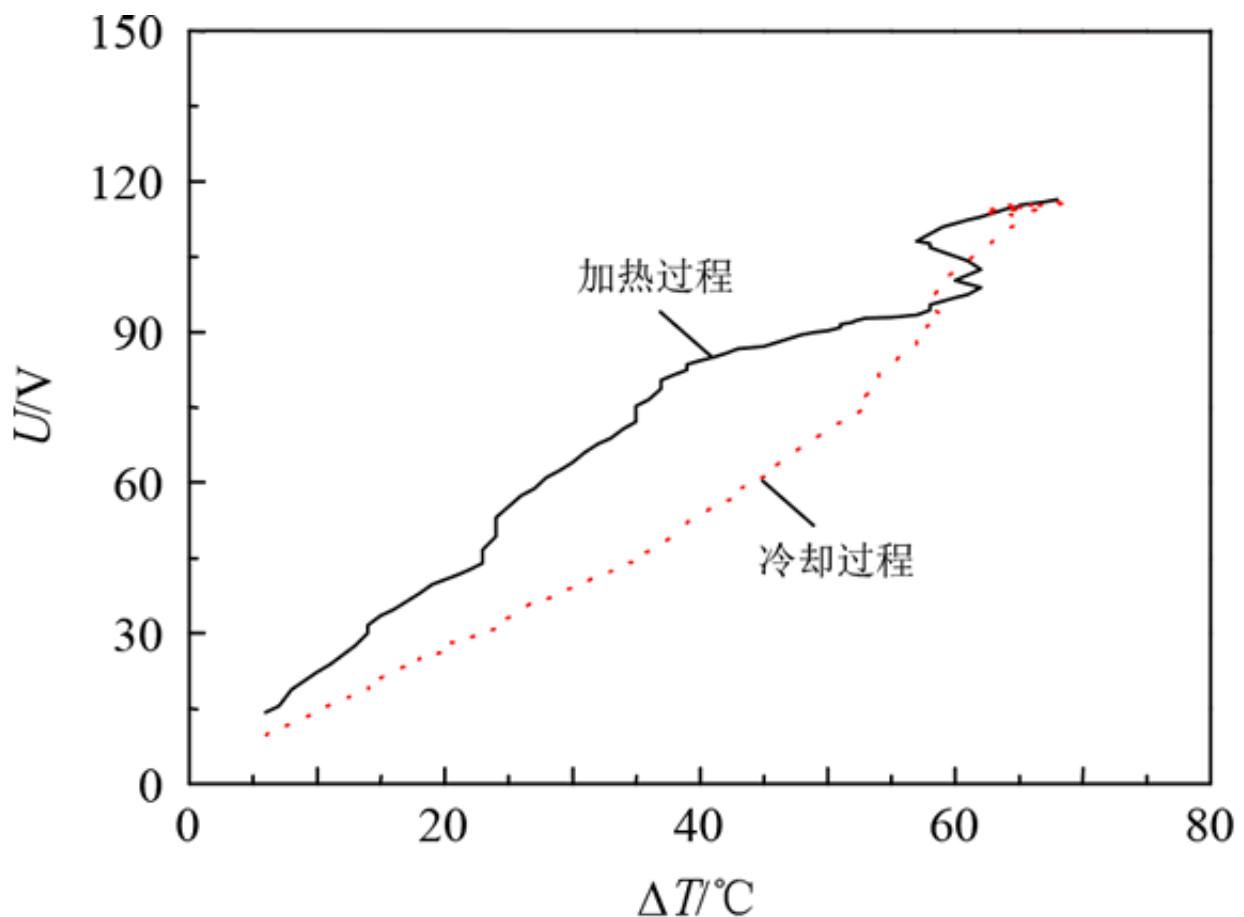


图 7 温差发电机空载特性曲线

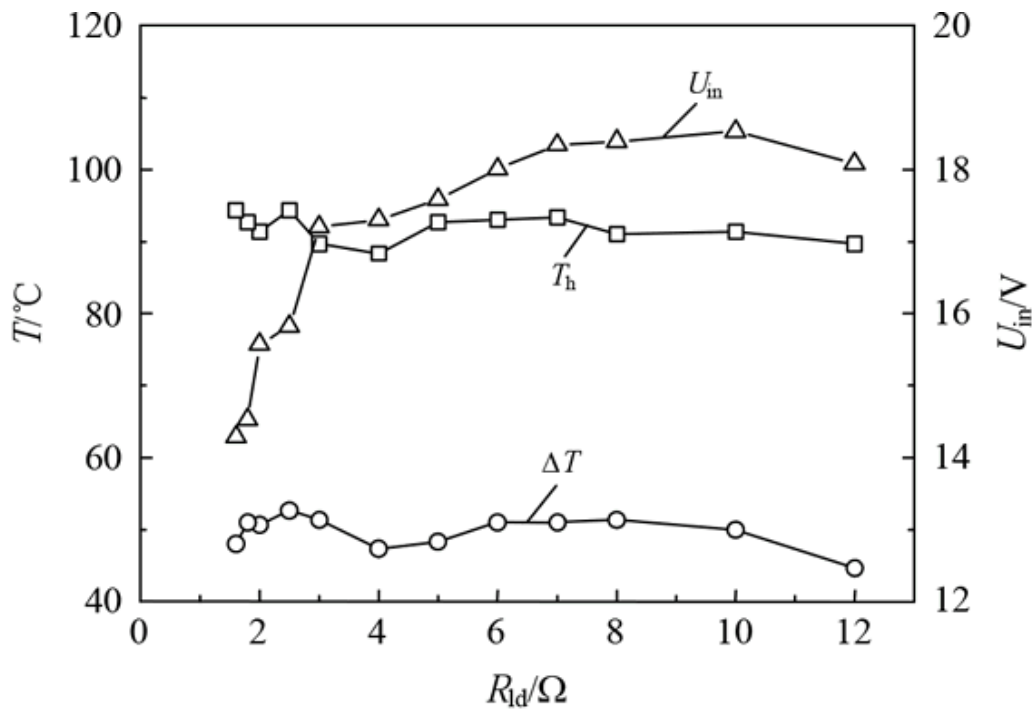
Fig. 7 No-load characteristic of thermoelectric generator

图7为温差发电机空载特性曲线,其中温差为6组温差发电单元的平均温差。由图7可见,温差发电机的输出电压与冷热端温差成正比,温差越大,输出电压越大。当温差达到68 $^{\circ}\text{C}$ 时,输出电压达到116.3V。该数值为该装置中6组温

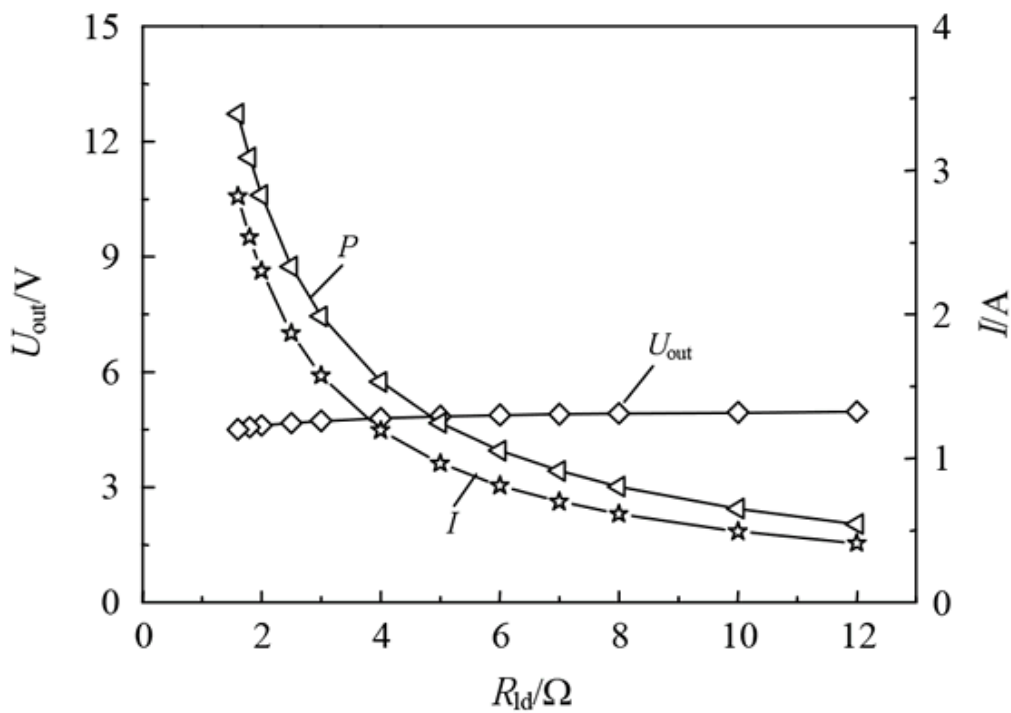
差发电单元串联后，在该温差下的最大空载电压，此时单片温差发电片的输出电压为4.85V。值得注意的是，在温差相同的情况下，温差发电机在温差上升过程中的输出电压要比温差下降过程的输出电压大。这种特性一方面是由热电材料本身造成的，另一方面是由于热电偶测温时其时间常数较大，测量数值不能及时跟随温差变化，导致升温过程中测量温差小于实际温差，而在降温过程中测量温差大于实际温差。

2.3 功率负载特性

由于电子负载仪器、稳压器对电流值的限制，为保证实验的安全性，避免测试最大输出功率时的最大电流超过实验仪器的额定电流，实验时任意选择3组温差发电单元并联用于测试该温差发电机的功率负载特性。目前手机和LED灯等小型用电装置的工作电压普遍为5V，因此实验时通过稳压模块设定输出电压为5V，其中稳压模块的耗电由温差发电机供电，无需外界电源，同时实验过程中保持温差基本不变。图8给出了温差发电机经过直流稳压器后输出功率的负载特性曲线。如图8所示，随着外部负载阻值的减小，温差发电机的输出功率与电流均不断增大，输出电压基本保持不变，稳定在4.51~4.88V之间。当外部负载阻值下降至 1.6Ω 时，温差发电机仍能维持稳定运行，此时输出功率和电流分别是12.7W和2.8A。整个测试过程中，热端温度和温差维持在91 和50 左右。当电子负载低于 1.6Ω 时，温差发电机不能持续稳定运行。



(a) 热端温度、温差和输入电压随外部负载大小的变化曲线



(b) 输出电压、输出电流和输出功率随外部负载的变化曲线

图 8 温差发电机的功率负载特性曲线

Fig. 8 Power load feature of thermoelectric generator

由上述实验可知, 3组温差发电单元并联时最大输出功率为12.7W, 输出电压为4.5V, 输出电流为2.8A。因此整个温差发电机最大输出功率可达25.4W。扣除水泵耗电3W, 可对外净输出22.4W。当外部负载保持 1.6Ω 时, 而且炉膛内燃并且可以持续保持稳定输出。为便于对比分析, 表1给出了文献和市场中部分已有的温差发电机的性能对比。

表 1 部分温差发电机的性能对比

Tab. 1 Performance comparison of some available thermoelectric generators

来源	散热	功率/W	重量/kg	功率重量比/ (W/kg)
文献[12-14]	风冷	4.2	40	0.11
文献[20]	风冷	2.4	12	0.2
文献[24-25]	风冷	2.1	2.5	0.84
文献[28]	风冷	5	8.2	0.61
本文	水冷	22.4	23.3	0.96

由表1可见, 本文设计的水冷式温差发电机的发电功率高于大部分已报道的温差发电机的发电功率, 基本可以满足一些小型用电器的充电要求, 应用范围广泛。但是, 随着发电功率的上升, 温差发电机的重量不断增加。由表1可见, 本文设计的温差发电机的重量仅比Nuwayhid等人的设计轻便一些, 与其他3个设计差距较大, 未达到小巧便携。从单位质量发电功率的角度上看, 本文设计的温差发电机有一定的优势, 这主要得益于全新设计的星型集热结构。值得注意的是, 表1中所示的5款温差发电机中仅本文设计的温差发电机采用水冷散热方式, 这为今后研发高功率轻便型的水冷式温差发电机提供了一定的参考价值。此外文献[10-11]中的水冷式温差发电炉可最大输出27W的电功率, 与本文设计的输出功率较为接近, 但文献[10-11]未给出其重量, 因此未能进行性能对比。

3结论

设计了一种基于生物质燃料的水冷式温差发电机, 并对该发电机的可行性进行了测试, 分析了该装置的启动特性、空载特性和功率负载特性, 获得以下几点结论:

- 1) 该生物质燃料温差发电机通过水冷方式对冷端进行散热, 最大可对外以5V电压输出功率22.4W。
- 2) 当温差发电单元全部串联时, 该温差发电机能产生的最大空载电压为116.3V, 用户可根据需求进行适当的串并联组合以获得所需的电压。
- 3) 输出功率随外部电阻的减小而增大, 当外部电阻值为 1.6Ω 时, 发电机净对外输出功率达到最大值, 为22.4W。当外部电子负载低于 1.6Ω 时, 温差发电机不能维持稳定运行。
- 4) 提出的星型集热器设计, 可有效提高功率重量比, 测试结果显示该温差发电机的功率质量比可达0.96W/kg。

参考文献

- [1] 庄雅妮, 杨秀媛, 金鑫城. 风光储联合发电运行技术研究[J]. 发电技术, 2018, 39(4): 296-303.
- [2] 布鲁斯·安德森, 黄湘, 孙海翔, 等. 新型布雷登塔式太阳能热发电系统[J]. 发电技术, 2018, 39(1): 37-42.
- [3] Zhao L D, Lo S H, Zhang Y, et al. Ultralow thermal conductivity and high thermoelectric figure of merit in SnSe crystals[J]. Nature, 2014, 508(7496): 373-377.
- [4] Biswas K, He J, Blum I D, et al. High-performance bulk thermoelectrics with all-scale hierarchical architectures[J]. Nature, 2012, 89(7416): 414-418.
- [5] Zhao L D, Tan G, Hao S, et al. Ultrahigh power factor and thermoelectric performance in hole-doped single-crystal SnSe[J]. Science, 2016, 351(6269): 141-144.
- [6] Zhao D, Tan G. A review of thermoelectric cooling: materials, modeling and applications[J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 66(1-2): 15-24.
- [7] Orr B, Akbarzadeh A, Mochizuki M, et al. Review

- of car waste heat recovery systems utilizing thermoelectric generators and heat pipes[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 101: 490-495.
- [8] Gao H B, Huang G H, Li H J, et al. Development of stove-powered thermoelectric generators: a review [J]. Applied Thermal Engineering, 2016(96): 297-310.
- [9] Najjar Y S H, Kseibi M M. Heat transfer and performance analysis of thermoelectric stoves [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 102: 1045-1058.
- [10] Montecucco A, Siviter J, Knox A R. A combined heat and power system for solid-fuel stoves using thermoelectric generators[J]. Energy Procedia, 2015(75): 597-602.
- [11] Montecucco A, Siviter J, Knox A R. Combined heat and power system for stoves with thermoelectric generators [J]. Applied Energy, 2017(185): 1336-1342.
- [12] Nuwayhid R Y, Rowed M, Min G. Low cost stove-top thermoelectric generator for regions with unreliable electricity supply[J]. Renewable Energy, 2003, 28(2): 205-222.
- [13] Nuwayhid R Y, Shihadeh A, Ghaddar N. Development and testing of a domestic woodstove thermoelectric generator with natural convection cooling[J]. Energy Conversion and Management, 2005, 46(9-10): 1631-1643.
- [14] Nuwayhid R Y, Hamade R. Design and testing of a locally made loop-type thermosyphonic heat sink for stove-top thermoelectric generators[J]. Renewable Energy, 2005, 30(7): 1101-1116.
- [15] Najjar Y S H, Kseibi M M. Heat transfer and performance analysis of thermoelectric stoves [J]. Applied Thermal Engineering, 2016(102): 1045-1058.
- [16] Champier D, Bedecarrats J P, Riletto I M, et al. Thermoelectric power generation from biomass cook stoves [J]. Energy, 2010, 35(2): 935-942.
- [17] Champier D, Bedecarrats J P, Kousksou T, et al. Study of a thermoelectric generator incorporated in a multifunction wood stove[J]. Energy, 2011, 36(3): 1518-1526.
- [18] Mal R, Prasad R, Vijay V K. Multi-functionality clean biomass cookstove for off-grid areas[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2016(104): 85-94.
- [19] Sornek K, Filipowicz M, Rzepka K. The development of a thermoelectric power generator dedicated to

- stove-fire places with heat accumulation systems [J]. Energy Conversion and Management. 2016(125): 185-193.
- [20] Lertsatitthanakorn C. Electrical performance analysis and economic evaluation of combined biomass cook stove thermoelectric (BITE) generator[J]. Bioresource Technology, 2007, 98(8): 1670-1674.
- [21] 任德鹏, 贾阳. 温差发电器工作特性的数值研究 [J]. 航天器工程, 2008, 17(4): 56-61.
- [22] 陈伟, 梁燕, 胡长军, 等. 新型温差发电装置的结构设计[J]. 热能动力工程, 2016, 31(3): 125-128.
- [23] 马洪奎, 高庆. 一种温差发电模块的研制及其性能测试[J]. 电源技术, 2013, 37(4): 589-592.
- [24] 李国能, 朱凌云, 郑友取, 等. 一种便携式温差发电炉的实验研究[J]. 科学通报, 2017, 62(11): 1191-1197.
- [25] Li G N, Zhang S, Zheng Y Q, et al. Experimental study on a stove-powered thermoelectric generator (STEG) with self starting fan cooling[J]. Renewable Energy, 2018, 121(6): 502-512.
- [26] 赵建云, 朱冬生, 周泽广, 等. 温差发电技术的研究进展及现状[J]. 电源技术, 2010, 34(3): 310-313.
- [27] 晏维, 邱国跃, 袁旭峰. 半导体温差发电技术应用及研究综述[J]. 电源技术, 2016, 40(8): 1737-1740.
- [28] BioLite. Available from: <https://www.bioliteenergy.com/>

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/144294.html>