



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/eng



Research
Electrical and Electronic Engineering—Article

高功率便携式生物质燃烧驱动温差发电机的研发

李国能*, 应杰, 伊敏波, 郑友取, 汤元君, 郭文文

Department of Energy and Environment System Engineering, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, China

ARTICLE INFO

Article history:

Received 9 September 2021

Revised 15 February 2022

Accepted 17 June 2022

Available online 3 August 2022

关键词

生物质
温差发电机
热电联供
总效率

摘要

利用生物质燃烧产生电力是贫困地区解决照明、通信和医疗等基本需求的重要方式。本文开发和测试了一种高功率便携式生物质燃烧驱动的温差发电机 (biomass-combustion-powered thermoelectric generator, BCP-TEG), 详细研究了其温差分布、功率负载特性和不同层级的效率, 并开展了现场应用测试。研究结果发现该温差发电机在自身质量为 7.6 kg 的条件下可同时产生 750 W 的热力和 23.4 W 的电力, 热电联供效率达到 32.3%。温差发电机的发电净功率密度为 $2.41 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$, 均高于文献报道的所有基于闭式循环冷却的发电净功率密度。此外, 利用本文开发的温差发电机, 燃烧 1 kg 的木条所发出的电能可充满一个容量为 6.2 A·h 的 3.7 V 锂电池。最后, 本文详细讨论了 BCP-TEG 研究领域存在的问题和未来可研究的方向。

© 2022 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. 引言

世界上仍有超过 10 亿人生活在无电力供应的贫困地区, 2019 年新冠肺炎疫情加剧了这种情况[1]。提供基本的电力以支撑照明、通信和医疗是提升这些贫困地区文明程度的关键之一。生物质是贫困地区最重要的能量来源, 因此有大量的研究在开发通过燃烧生物质进行发电的技术[2]。与这个研究直接相关的技术是生物质燃烧驱动温差发电机 (biomass-combustion-powered thermoelectric generator, BCP-TEG), 这种设备利用塞贝克 (Seebeck) 效应将燃烧释放的部分热能转换成电能[3]。自 1996 年以来, 已有大量的研究人员开展了 BCP-TEG 的研究[4], 因此, BCP-TEG 不是一个新的概念。但是, 至今关于 BCP-TEG

还有几个关键的方面仍未研究清楚, 包括其评价标准、不同层级 (比如材料层级、器件层级和系统层级) 的效率分析和一种净输出功率达到 10 W 的便携式 BCP-TEG 的设计方法。表 1 对比分析了 20 多年以来已有的 BCP-TEG 研究[4–27]的研究重点和研究贡献, 清晰地阐明了这个研究领域的研究现状。由表 1 可见, 开发一个独立稳定的高功率的便携式 BCP-TEG 需要同时控制好运行温度、效率和冷却方法这三个方面。下文给出了当前研究领域的研究进展和存在的挑战。

1996 年出现了第一篇关于 BCP-TEG 的研究报道[4], 已有的研究花了 10 年的时间才使 BCP-TEG 的发电功率突破 10 W (2005 年的研究结果为 10.7 W [7], 2010 年的研究结果为 12.3 W [9]), 而且这些发电功率还只是稳压前的输

* Corresponding author.

E-mail address: 109026@zust.edu.cn (G. Li).

表1 文献报道的各种BCP-TEG的性能对比

References	Year	Cooling type	Fuel	TE material	N	m (kg)	$T_h/\Delta T$ (K)	Power generation			CHP	Efficiency (%)			
								P_{tot}/P_{out} (W)	P_{out}/m ($W \cdot kg^{-1}$)	P_{tot}/N (W)		η_{HC}	η_{TE}	$\eta_{overall}$	η_{CHP}
Killander and Bass[4]	1996	Air cooled	Wood	Bi_2Te_3	2	—	474/124	4.00–7.00/1.00–5.00	—	3.50	×	—	—	—	—
Nuwayhid et al. [5]	2003	Air cooled	Wood	Bi_2Te_3	1	—	—/68	0.90/0.90	—	0.90	×	—	—	—	—
Nuwayhid et al. [6]	2005	Air cooled	Wood	Bi_2Te_3	1	—	488/85	3.40/3.40	—	3.40	×	—	—	—	—
Nuwayhid et al. [7]	2005	Air cooled	Wood	Bi_2Te_3	3	40.00	512/120	10.70/10.70	0.27	3.60	×	—	—	—	—
Lertsatitthanakorn [8]	2007	Air cooled	Wood	Bi_2Te_3	1	12.00	513/150	2.40/—	—	0.20	×	—	3.20	—	—
Rinalde et al. [9]	2010	Water OLC	E-Heater	Bi_2Te_3	1	25.00 ^a	493/200	12.30/12.30	0.49	12.30	Hot water	—	—	—	—
Champier et al. [10]	2010	Water OLC	G-Heater	Bi_2Te_3	4	18.00 ^a	—/160	7.00/5.00	0.28	1.75	Hot water	—	2.00	—	—
Champier et al. [11]	2011	Water OLC	G-Heater	Bi_2Te_3	1	30.00 ^a	516/154	9.50/7.60	0.25	0.32	Hot water	—	—	—	—
Goudarzi et al. [12]	2013	Water OLC	Wood	Bi_2Te_3	21	—	—	155.00 ^b /150.00 ^b	—	7.38	Hot water	33.3	1.39	0.46	33.3
O'Shaughnessy et al. [13]	2013	Air cooled	Wood	Bi_2Te_3	1	—	533/200	5.90/3.00	—	3.00	×	—	—	—	—
Raman [14]	2014	Air cooled	Wood	Bi_2Te_3	1	—	573/240	4.50/3.67	—	4.53	×	—	—	0.13	—
Mal et al. [15]	2015	Air cooled	Wood	Bi_2Te_3	1	—	—	6.00/2.00	—	6.00	×	—	—	—	—
Mal et al. [16]	2016	Air cooled	Wood	Bi_2Te_3	2	—	—	10.00/4.00	—	5.00	×	—	—	—	—
Najjar and Kseibi [17]	2016	Air cooled	Wood	Bi_2Te_3	12	—	575/78	7.88/7.88	—	0.66	Warm air	23.8	0.65	0.15	23.8
Sornek et al. [18]	2016	Water OLC	Wood	Bi_2Te_3	1	—	—/150	6.00/6.00	—	6.00	×	—	—	—	—
Najjar and Kseibi [19]	2017	Air cooled	Peat	Bi_2Te_3	12	—	—/40	6.60/6.60	—	0.50	Warm air	—	—	—	—
BioLite [20]	2017	Air cooled	Wood	Bi_2Te_3	1	8.16	—	5.00/—	—	2.50	×	—	—	—	—
Montecucco et al. [21]	2017	Water OLC	Wood	Bi_2Te_3	4	60.00 ^a	573/250	27.00/19.00	0.32	6.75	Hot water	—	5.00	—	—
Deasy et al. [22]	2018	Water OLC	Wood	Bi_2Te_3	—	—	533/200	4.00/4.00	—	4.00	×	—	—	—	—
Obernberger [23]	2018	Water OLC	Wood	—	12	—	587/221	35.00 ^b /26.00	—	2.92	Hot water	—	1.53	0.29	19.2
Li et al. [24]	2018	Air cooled	Charcoal	Bi_2Te_3	8	5.30	442/119	12.90/4.70	0.89	1.61	Warm air	—	2.84	—	—
Sornek et al. [25]	2019	Water OLC	Wood	Bi_2Te_3	50	—	—	75.20/—	—	1.50	—	—	—	0.63	—
Li et al. [26]	2019	Water OLC	Charcoal	Bi_2Te_3	20	10.70	444/136	62.60/51.20	4.79	3.13	×	—	3.66	—	×
Li et al. [27]	2020	Water CLC	Charcoal	Bi_2Te_3	144	62.60	463/115	252.00/118.00	1.88	1.75	Warm air	34.2	2.49	0.87	34.0
Present	2020	Water CLC	Wood	Bi_2Te_3	6	7.60	512.2/174	23.40/18.30	2.41	3.90	Warm air	36.2	2.87	0.98	32.3

CLC: closed-loop cooling; OLC: open-loop cooling; E-heater: electrical heater; G-heater: gas heater; N : number of thermoelectric (TE) modules; m : mass weight of the BCP-TEG; T_h : hot-end temperature; ΔT : temperature difference; P_{tot} : total electric power; P_{out} : electric power output; CHP: combined heat and power; η_{HC} : heat collection efficiency; η_{TE} : TE efficiency; $\eta_{overall}$: overall efficiency; η_{CHP} : combined heat and power efficiency.

— denotes not found or not studied; × denotes not provided.

^a Estimated weight based on water tank volume (L).

^b Estimated results.

输出功率。提高BCP-TEG的总发电功率在接下去的10年里陷入了停滞，直到2017年Montecucco等[21]报道了新的研究结果，总发电功率达到了27.0 W。值得提及的是，Goudarzi等[12]研发了一种发电功率达到155.0 W的BCP-TEG。虽然上述功率（155.0 W）只是理论发电功率，而不是实验测量结果，但其研究为后续研究继续改进BCP-TEG的性能提供了新的观点。近年来，研究人员采用了多个热电模块（TE module, TEM）成功地提高了BCP-TEG的总发电功率。例如，2018年的报道结果为35.0 W [23]，2019年的报道结果为75.2 W [25]，笔者在2018年至2020年的研究结果分别为12.9 W [24]、62.6 W [26]和252.0 W [27]。尽管如此，输出功率超过10 W的独立的高功率便携式BCP-TEG仍未研发出来。生物质燃烧温度和

TEM工作温度的不一致给提高BCP-TEG的发电功率带来了很大的困难，而且这种困难并不能仅仅通过增加TEM数量来解决。BCP-TEG的能量流动如图1所示。

效率是BCP-TEG性能的一个重要方面，但是只有为数不多的几篇研究文献报道了相关的测试。效率测试包括几个层级，例如，总效率反映了生物质化学能转换成电能的能力。换言之，总效率考虑了所有的热损失，包括不完全燃烧热损失、排烟热损失、对流/辐射热损失。因此，总效率一定比热电转换效率（ η_{TE} ）[28]低。前人的工作报道了不同的热电转换效率，包括Lertsatitthanakorn [8]报道的3.20%，Champier等[10]报道的2.00%，Goudarzi等[12]报道的1.39%，Najjar和Kseibi [17]报道的0.65%，Montecucco等[21]报道的5.00%，Obernberger等[23]报道的

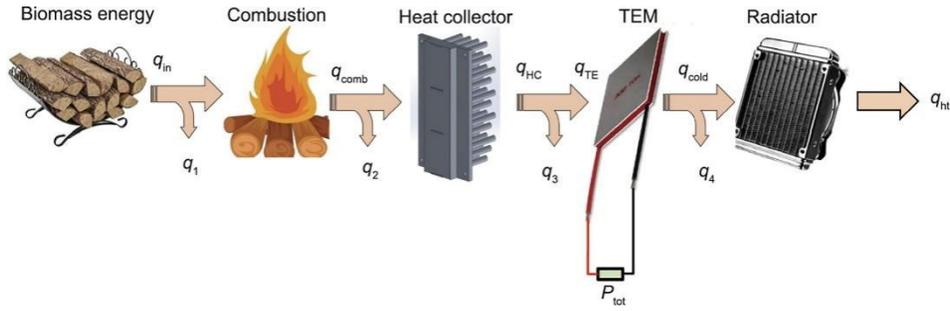


图1. 包含了各种热损失的BCP-TEG能量流动图。

1.53% 和本文作者[24–27]近期报道的 2.84%、3.66% 和 2.49%。上述报道的BCP-TEG都采用了碲化铋基的TEM，这种TEM最大的热电转换效率约为5%，因此，上述报道的热电转换效率都在合理的范围内。与燃气燃烧驱动的TEG的总效率（约为3%）相比，上述研究文献尚未报道总效率超过1%的BCP-TEG。Sornek等[25]报道了其研发的BCP-TEG的总效率为0.5%，本文作者近期研发的BCP-TEG的总效率为0.87% [27]。然而，上述两种BCP-TEG [25,27]都有较大的质量，因此更适合固定场所的应用。

造成低效率的主要原因是集热效率 (η_{HC}) 有限。烟气的流动阻力必须足够小，否则生物质的燃烧过程会受到严重的影响。在已有研究中只有三项工作测量了集热效率，包括33.3% [12]、23.8% [17]和34.2% [27]。有限的集热效率意味着当前的研究仍有很大的优化空间，包括在保证生物质燃烧不受影响的条件下将总效率从已有研究报道的低于1%提高到3%。总体而言，开发一种合适的低流动阻力的集热器，从而提高其集热效率，是获得高功率便携式BCP-TEG的重要方法。

由表1可见，水冷型BCP-TEG的性能优于风冷型BCP-TEG，这得益于水的热容远高于空气热容[29]。然而，在已有的BCP-TEG研究中，水冷通常是指利用自来水进行开放式水冷（open-loop cooling, OLC）[26]或者利用一个大容量的蓄水箱进行水冷，如25 L [9]、18 L [10]和60 L [21]的蓄水箱。因此，运行在OLC模式下的BCP-TEG需要满足大量水资源和TEM数量足够少这两个条件，否则BCP-TEG的冷端散热会导致水箱内的水发生沸腾，从而削弱BCP-TEG的性能。此外，OLC运行模式导致了BCP-TEG的质量较大，从而只适合于固定场所的应用。基于上述讨论，闭式水冷（closed-loop cooling, CLC）的BCP-TEG还有待开发，其发展潜力巨大。初步的尝试发现运行在CLC模式下的BCP-TEG的净输出功率密度 (P_{out}/m) 达到了 $1.88 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$ [27]，显著高于前人的相关研究。归纳起来，冷却方法的不同导致有效对比各种BCP-

TEG性能的难度增大。开发一种独立高功率的便携式BCP-TEG需要采用CLC冷却模式。

TEM的短期和长期容许运行温度相差较大。例如，碲化铋基的TEM的长期容许运行温度应低于523 K，短期容许运行温度可以达到573 K。因此，单个TEM的发电功率 (P_{tot}/N) 的变化幅度大。由表1可见，几项前人的研究报道了相当高的 P_{tot}/N （大于5 W），如12.30 W [9]、7.38 W [12]、6.00 W [15]、5.00 W [16]、6.00 W [18]和6.75 W [21]，与此相对应的工作温差介于150 K到250 K之间。值得指出，250 K的工作温差意味着BCP-TEG的热端温度已经高于523 K，由此将会加剧TEM的老化。对于一些具有大 P_{tot}/N 的BCP-TEG，其产生原因还可能与TEM的尺寸有关。虽然都是基于碲化铋的TEM，但是其尺寸各异，常规的尺寸规格包括60 mm × 60 mm、56 mm × 56 mm、40 mm × 40 mm和30 mm × 30 mm等。 P_{tot}/N 等于10 W意味着通过TEM的热流率达到200 W，这即使对尺寸为60 mm × 60 mm的TEM而言仍是一个挑战，因为基于气-固表面之间的集热热流密度必须达到 $5.6 \times 10^4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ [29]。因此，后续在关于BCP-TEG评价标准的研究中值得深入探讨这个问题。归纳起来，不同的工作温度导致了BCP-TEG发电潜力迥异的现状。开发一种稳定高功率的便携式BCP-TEG，其工作温度必须维持在长期容许工作温度以下，这意味着要严格控制TEM的 P_{tot}/N 。

以上的文献回顾表明了开发高功率便携式BCP-TEG的重要性，这正是本研究的动机。本文介绍了一种质量为7.6 kg的BCP-TEG，其发电功率达到了23.4 W，相比于前人的研究结果获得了显著的进步。此外，本文详细给出了所开发的BCP-TEG的温度分布、功率负载特性、不同层级的效率和现场应用测试结果，同时开展了深入细致的讨论。

本文的创新性在于率先开发了一种发电功率达23.4 W的高功率便携式BCP-TEG（7.6 kg）。研发的策略实现了集热、均热、热流匹配和CLC的相互耦合，从而填补了有效提高便携式BCP-TEG性能的设计方法的空缺。

此外, 本文也是首个完成便携式BCP-TEG各个层级效率分析的研究, 这些效率包括了集热效率、热电转换效率、总效率和热电联供 (combined heat and power, CHP) 效率。

2. TEG结构和实验测试系统

2.1. TEG结构

图2给出了BCP-TEG的外观图和结构图, 它由一个改进的“火箭型”生物质炉、两个包含了均温器的集热器、6个TEM和一个CHP组件组成。由于在燃烧生物质方面的良好性能, “火箭型”生物质炉在世界上应用广泛[30]。对于传统的“火箭型”生物质炉, 燃烧用的木条一般通过下部开口添加到炉膛中[30], 这种设计导致残灰难以移除, 同时增加了新增鼓风机用于改进燃烧的难度。如图2(c)所示, 本文改进的“火箭型”生物质炉将火焰支撑器(炉排)上移一定高度, 并在其上方增加一个开口用以添加燃烧用的木条。这种改进将添加木条的开口与除灰口进行了分离, 并从根本上解决了添加生物质燃料与为了收集足够热量而不得不采用具有伸出物的集热器之间的矛盾。

CHP组件包括一个水泵、一个膨胀箱、一个风扇、一个散热器和一个电能管理系统 (electric energy management system, EEMS)。水泵的型号为HYS-1203B (深圳市恒源昇电子有限公司), 风扇的型号为WFB-1212M (中国台达电子工业股份有限公司)。水泵和风扇连接到EEMS中, 并接受EEMS的控制。EEMS中还包括两个用于电能调理的由深圳市晒邦能源有限公司生产的DC-DC转换器 (型号为007915)、一个信的电子科技(上海)有限公司生产的电能表 (型号为J7-7)、一个具有报警功能的电量表、一个热端温度显示仪和两个电能输出口 (5 V和12 V)。储能电池设计成外置, 主要考虑是电池在充满电后可取出使用。TEM的型号为TEG1-12708, 由湖北赛格瑞斯新能源科技有限公司生产, 其外部尺寸为40.0 mm × 40.0 mm × 3.8 mm。图2所示的新型集热器是本文的创新点之一, 这种集热器通过计算机数控加工技术用一整块铝加工而成, 因此完全排除了集热器和均温器单独生产并进行装配而产生的接触热阻。文献[26]报道的BCP-TEG采用铜棒或铝片作为集热器, 这种设计在采用多个TEM时可能会产生收集热量不充足的问题, 同时带来燃料添加困难的问题。此外, 已有研究表明铜棒和均温器之间的间隙会导致BCP-TEG的故障[26]。图2给出了集热器上的错列针式肋柱的尺寸。均温器的厚度为14 mm, 这种均温器适

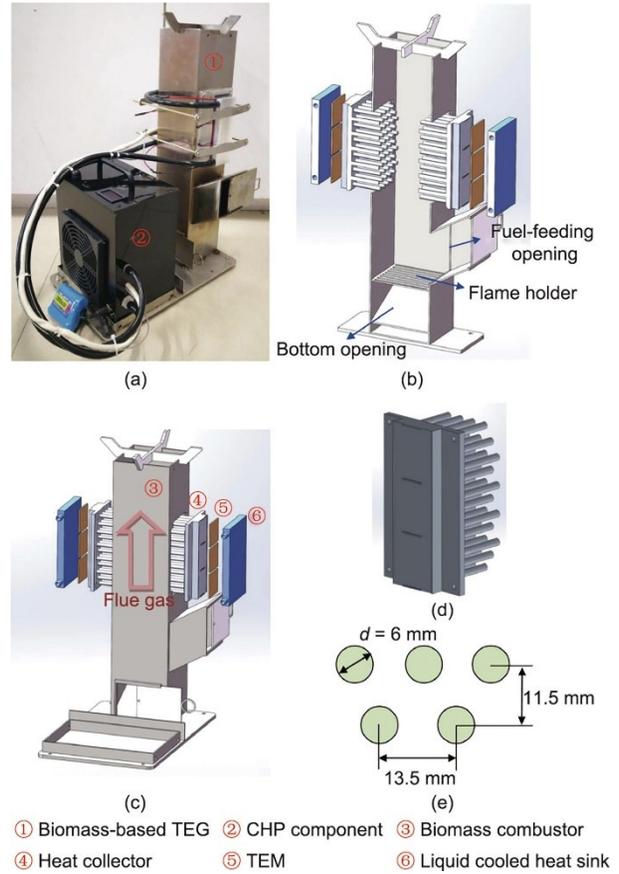


图2. BCP-TEG的外观及其结构。(a) 外观图; (b) 截面图; (c) TEG结构; (d) 集热器; (e) 针式肋柱的尺寸。

合于具有6个TEM的TEG [28]。TEM的安装压力为1 MPa [28]。整个BCP-TEG的质量仅为7.6 kg, 运行该设备只需要一些可燃的木条即可。

2.2. 实验测试系统

图3给出了实验测试系统。木条在生物质燃烧室内燃烧, 这种特殊结构的“火箭型”燃烧器将自发提供助燃空气。燃烧后的高温烟气流经针式肋柱, 烟气中的部分热量被集热器收集, 并通过均温器进行热流分配。这些热量在水冷器维持TEM冷端温度的条件下通过TEM。为确保水冷器的温度, 在水泵的驱动下冷却水在散热器和水冷器之间循环, 并采用一个散热风扇将热量从散热器排放到环境中。因此, 从散热器出来的热量是高品质的热功率, 可用于独立空间的供暖。为测量热端温度、冷端温度、环境温度、冷却水温度和暖风温度, 从而表征BCP-TEG的工作性能, 实验测试系统一共安装了17个K型热电偶。热电偶的生产厂家为上海自动化仪表集团, 型号为WREK-101。实验采用美国安捷伦公司 (Agilent Technologies, USA) 生产的型号为34970A的数据采集系统 (data acquisition, DAQ) 采集温度信号。EEMS系统负责将温差发电

获得的电压稳定在 12.6 V（这个电压可给锂电池充电）和 5.0 V（USB 设备）。在 BCP-TEG 启动时，机器内置的电池给水泵和散热风扇供电；当 BCP-TEG 启动后，机器内部的用电设备实现自供电。BCP-TEG 发电功率的一小部分即可满足水泵和散热风扇的供电需求，剩余的电能将储存在电池中或通过 USB 接口对外输出。在进行功率负载特性测试时，系统关闭 EEMS，采用博计电子股份有限公司生产的 3311F 型电子负载在不同外部负载条件下进行相关测试。电子负载的精度为 0.2%。暖风的风速采用韩荣乐嗣电子（上海）有限公司生产的型号为 MS6252B 的涡轮风速计进行测量，其测量精度为 2.0%。BCP-TEG 的整体温度场通过浙江大立科技股份有限公司生产的 T8 红外热成像仪进行测量，其测量分辨率为 25 μm 。本文的实验误差分析可见本文研究团队近期的工作报告[27]。发电功率、供暖功率、热电转换效率和总效率的误差分别为 0.2%、3.0%、3.4% 和 3.4%。

2.3. 实验步骤和工况

实验步骤根据运行条件分为两个系列。对于功率负载特性测试，涉及以下步骤：①使用外部电源给水泵和散热风扇供电；②借助几片纸张把木条点燃；③在热端温度和冷端温度稳定时进行相关测量；④根据热端温度的显示仪的读数添加燃料；⑤当测量完成后停止添加燃料，并等待剩余的木条燃烧干净后停止系统。对于应用测试，上述的第①步改成打开 EEMS 系统，其余步骤相同。在实验过程

中，水泵和散热风扇的工作电压维持在 11.5 V，消耗的总功率为 5.43 W（DC-DC 转换器之前）。值得注意的是，水泵和散热风扇所消耗的功率随时间波动，上述的 5.43 W 是由 5 个小时的单独实验测量获得的平均值。

实验一共开展了 18 个工况的研究。前面 17 个实验工况测量了温度分布、功率负载特性和各个层级的效率。因此，在热端温度维持在 523 K 的条件下，改变 17 个不同的外部负载，从而测试了 BCP-TEG 的性能。最后一个实验工况是应用测试，具体的内容是记录燃烧 1 kg 的木条过程中的各个参数，从而获得 BCP-TEG 的发电量。因此，在进行最后一个实验工况研究时，EEMS 系统介入工作，此时的水泵和散热风扇工作在自供电模式下。单独的实验测试获得了 DC-DC 转换器的转换效率，对于一个常规的具有最大功率追踪技术的 DC-DC 转换器，其转换效率为 94%。

BCP-TEG 测试的燃料为松木，松木条的尺寸约为 20 mm \times 20 mm \times 300 mm，低位发热量（lower heat value, LHV）和密度分别为 16.8 MJ \cdot kg $^{-1}$ 和 482 kg \cdot m $^{-3}$ 。LHV 通过长沙开元仪器股份有限公司生产的型号为 5E-C5800 的量热仪测量获得。燃料的成分通过长沙开元仪器股份有限公司生产的型号为 5E-CHN2000 的元素分析仪测量获得，结果为 $w_C = 41.89\%$ 、 $w_H = 4.51\%$ 、 $w_O = 40.16\%$ 、 $w_N = 0.22\%$ 、 $w_S = 0.05\%$ 。BCP-TEG 没有采用助燃鼓风机，燃烧中上升烟气为典型的自然通风效应驱动的烟气。

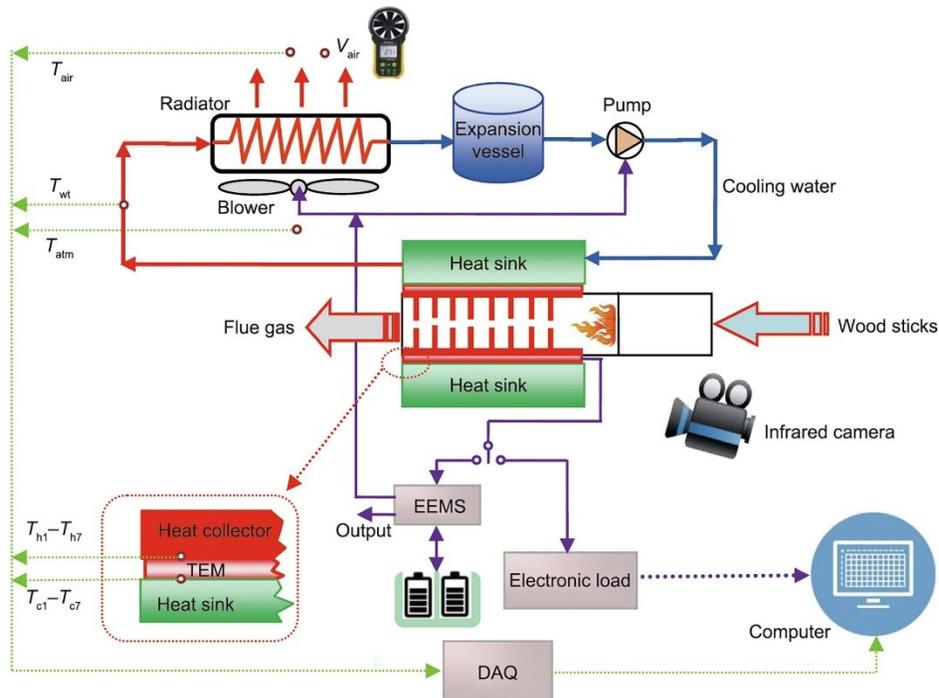


图3. 用于测量不同层级各种效率的BCP-TEG的实验系统。

2.4. 参数定义

生物质能是 BCP-TEG 的输入能量，通过以下公式进行定义：

$$q_{in} = m_{wd} \text{LHV} / \Delta t \quad (1)$$

式中， q_{in} 是输入能量； m_{wd} 是在 Δt 时间内燃烧的木条质量；LHV 是木条的低位发热量。由于不完全燃烧的存在，不是所有的生物质能都能释放出来，由此产生了不完全燃烧热损失 (q_1)。燃烧过程释放了大量的热流，一部分热流被集热器收集成为集热热流 (q_{HC})，剩余的热流为排烟和壁面热损失 (q_2)。在实验中难以测量不完全燃烧热损失 (q_1) 以及排烟和壁面热损失 (q_2)。前文已有阐述，并不是所有的集热热流都可以通过 TEM，而是存在一部分热流通过集热器的对流和热辐射发生了损失，定义为集热器热损失 (q_3)。 q_3 通过以下公式进行计算：

$$q_3 = h_{air} A_{HC} (T_{HC} - T_{atm}) + \varepsilon \sigma A_{HC} (T_{HC}^4 - T_{atm}^4) \quad (2)$$

式中， A_{HC} 是集热器的传热面积 (m^2)； T_{HC} 是集热外表面温度 (K)； T_{atm} 是环境温度 (K)； σ 是斯蒂芬-玻尔兹曼常数 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$)。对流换热系数 (h_{air}) 和辐射率 (ε) 在本文研究团队近期的一项工作[28]中进行了详细的介绍。流过 TEM 的热流中的一部分转变为总发电功率 (P_{tot})，其余的热流 (q_{cold}) 被水冷器吸收带走。 q_{cold} 分为两部分：水泵和连接管热损失 (q_4) 和散热器的供暖功率 (q_{ht})。 q_4 和 q_{ht} 分别通过以下公式[28]计算获得：

$$q_4 = h_{air} A_{PH} (T_{PH} - T_{atm}) + \varepsilon \sigma A_{PH} (T_{PH}^4 - T_{atm}^4) \quad (3)$$

$$q_{ht} = c_p \rho_{air} V_{air} A_R (T_{air} - T_{atm}) \quad (4)$$

式中， A_{PH} 是散热器、连接管路和水泵的总外表面积 (m^2)； T_{PH} 是散热器、连接管路和水泵的表面温度 (K)； c_p 是空气的热容 ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)； ρ_{air} 是空气密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)； V_{air} 是从散热器出来的风速 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)； A_R 是散热器的面积 (m^2)； T_{air} 是散热器出口的空气温度 (K)。

因此， q_{HC} 和通过 TEM 的热流 (q_{TE}) 可分别通过以下公式计算获得：

$$q_{HC} = q_3 + q_4 + q_{ht} + P_{tot} \quad (5)$$

$$q_{TE} = q_4 + q_{ht} + P_{tot} \quad (6)$$

散热器的供暖功率 (q_{ht}) 可以用来加热单独的空间。因此，本文开发的 BCP-TEG 是同时提供清洁热力和电力的热电联供解决方案。基于上述公式可获得不同层级的效率。集热效率是一个关键的参数，通过以下公式计算：

$$\eta_{HC} = q_{HC} / q_{in} \quad (7)$$

热电转换效率、总发电效率和 CHP 效率从不同层级反映了本文开发的 BCP-TEG 的性能。热电转换效率衡量了 TEM 器件层级的性能，总发电功率体现了 BCP-TEG 系

统层级的性能。此外，CHP 效率反映了能量利用的深度。热电转换效率、总发电效率和 CHP 效率通过以下公式计算获得：

$$\eta_{TE} = P_{tot} / q_{TE} \quad (8)$$

$$\eta_{overall} = P_{tot} / q_{in} \quad (9)$$

$$\eta_{CHP} = (P_{tot} + q_{ht}) / q_{in} \quad (10)$$

3. 结果和讨论

3.1. 温度分布

图 4 给出了 BCP-TEG 的热成像图和冷热端温度在集热器上的分布曲线。热成像仪通过单独的实验采用热电偶进行了标定，铝表面的发射率设定为 0.4 [28]。热成像图表明生物质燃烧炉在没有保温层时表面温度很高，说明保温是一个增加烟气温度的有效措施。详细的温度测量结果如图 4 (b) 所示，热端的温度分布是不均匀的，表明不是所有的 TEM 都工作在 523 K。因此，为了保护工作在最高温度下的 TEM，必须采取一些折中的措施，从而导致另外的 TEM 的发电潜力没有发挥出来。如图 4 (b) 所示，热端温度介于 503 K 和 523 K 之间，这意味着集热器上的温度存在 20 K 的不均匀度。均温器厚度 (本文是 14 mm) 是一个可以实现高温区的超额热流传递到低温区的关键参数，如果降低均温器厚度，集热器温度的不均匀性将继续恶化。采用 14 mm 的均温器厚度是适用三个 TEM 的集热器的优化结果[28]。在确保消耗的电力足够小和理想的便携性的条件下，冷端温度采用 CLC 模式进行控制。冷端温度呈现出轻微增加的趋势，其数值介于 336 K 和 339 K 之间。综上可得，TEM 的工作温差介于 164 K 和 188 K 之间。

3.2. 发电性能

图 5 给出了 BCP-TEG 功率负载特性的测试结果，从而可获得最大发电功率对应的外部负载。BCP-TEG 的发电电压随着外部负载的增大而增加，而负载电流则随着外部负载的增大而降低。当外部负载 $R_{ld} = 14 \Omega$ 时获得最大的发电功率，为 23.4 W。此外，系统的发电功率随着外部负载的增加先增大，达到最大值后随即呈现下降趋势。对比表 1 所示的文献报道结果，本文首次报道了一个总发电功率超过 20 W 的便携式 BCP-TEG，发电功率远高于具有相当质量的 BCP-TEG 的发电功率 (5.0 W [20] 和 12.9 W [24])。获得上述结果的主要措施是融合了紧凑的 CLC 方法、优化的集热器和“火箭型”生物质炉三个方面的优势。分布合理的针式肋柱确保了烟气的低流动阻力和充足

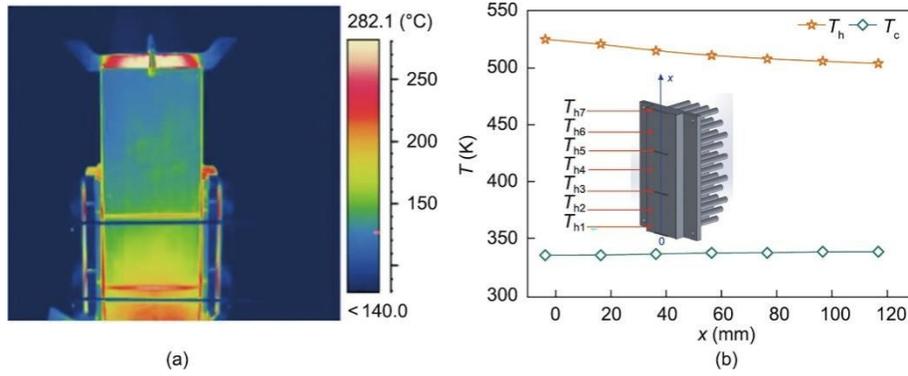


图4. (a) BCP-TEG 的热成像图; (b) 热端和冷端的温度分布。

的发电热流。此外，均温器具有足够的厚度以确保相对均匀的热端温度，从而最大程度地从每个 TEM 中提取电能。

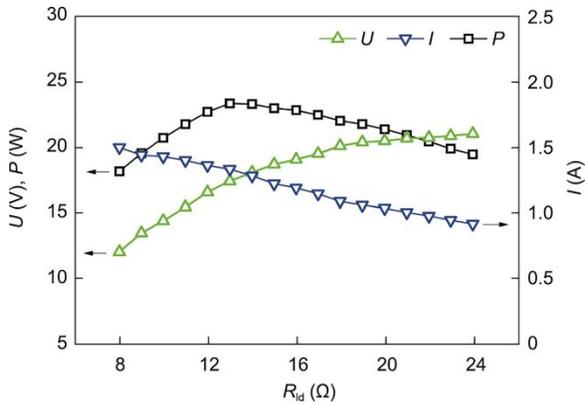


图5. 热端温度维持在 523 K 时 BCP-TEG 的功率负载特性。

3.3. 效率

由公式 (1) ~ (6) 可获得各个参数。 q_{in} 、 q_3 、 q_4 、 q_{ht} 、 q_{HC} 、 q_{TE} 分别为 2393.2 W、 49.8 W、 42.0 W、 750.4 W、 865.6 W 和 815.8 W。由此可获得 BCP-TEG 的能流分布图，如图 6 所示。不完全燃烧热损失以及通过烟气和壁面散失的热损为 1527.6 W；这个热损是比较大的，可用于烹饪。

额外的独立实验发现本文的 BCP-TEG 可用于烹饪，同时不影响 CHP 联产。 q_{ht} 可用于给独立的空间供暖。因此，本文开发的 BCP-TEG 是一种 CHP 解决方案，同时提供了清洁热力和电力。

由图 6 所示的能流分布图和公式 (7) ~ (10) 可获得多个不同层级的效率。集热效率、热电转换效率、总效率和 CHP 效率分别为 36.2%、 2.87%、 0.98% 和 32.3%。虽然热电转换效率接近 3%，但总效率非常低（小于 1%）。这个结果反映了有相当比例的生物质燃烧释放的热流通过烟气散失了，回收这一部分通过烟气散失的热量是一个重要的方面，但是本文选择放弃这一部分热损。这种放弃主要是为了获得更小的质量从而确保 BCP-TEG 的便携性。当前有几种方法可从上述散失的热损中提取额外的热流用于 CHP 应用，如在炉壁上采用水冷套或在排烟口上安装翅片型换热器。本文开发的 BCP-TEG 的总效率高于已有的文献报道结果（0.63% [25] 和 0.87% [27]）。后续的研究可重点关注集热效率的提高。此外，BCP-TEG 的 CHP 效率达 32.3%，意味着该系统是一个同时提供清洁热力和电力的解决方案。

结合表 1 所示的已有文献结果对比分析本文获得的热电转换效率和集热性能，可揭示 BCP-TEG 研究领域的发

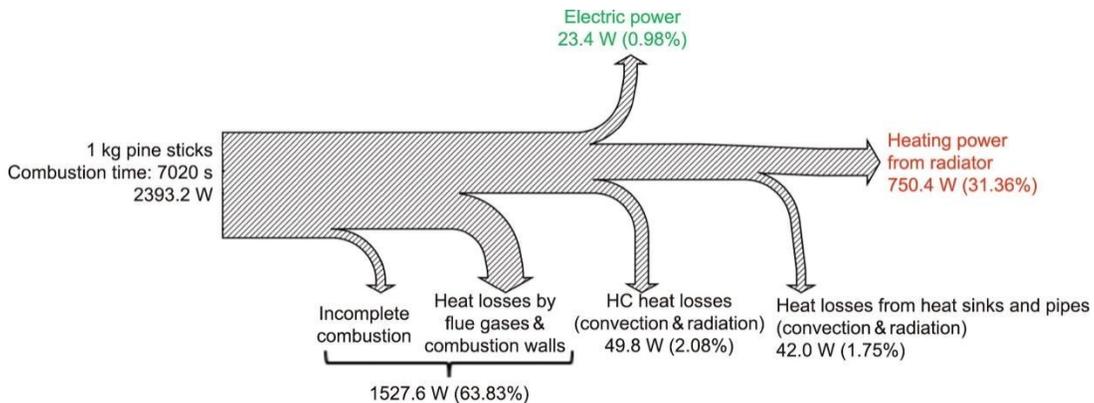


图6. 热端温度 (T_{h1}) 维持在 523 K 时 BCP-TEG 的能量流动图。

展模式。①增加发电功率需要采用多个TEM，但是集热器上不可避免的温度不均匀性限制了一部分TEM的性能发挥。这种由于工作温度不匹配的限制降低了热电转换效率。②在自然通风的生物质燃烧器上安装集热器需要确保低的流动阻力，否则需要增加一个复杂的强迫燃烧的控制系統，从而导致更多的内部电力消耗。因此，在低流速的烟气中安装低流动阻力的集热器必然导致有限的集热效率。③总效率是燃烧效率、集热效率和热电转换效率三者的乘积。因此，上述两个模式（①和②）导致了有限的总效率。

3.4. 应用测试

上述3.2节功率负载特性测试的主要目的是获得BCP-TEG的最大发电功率。然而，在实际应用时内部电阻与外部负载电阻往往不匹配，从而导致最大发电功率不能被全部提取出来。因此，本文开展了一次应用测试研究，从而获得燃烧1 kg木条时的实际发电量。在应用测试时，测试条件与3.1~3.3节所述一致，即热端温度保持在 $T_{h1} = 523 \text{ K}$ 。得益于EEMS的接入，此时的BCP-TEG运行在完全独立的模式下。需要说明的是，测试时BCP-TEG内部的电池要能够全部接收系统的输出功率，而不是处于充满状态。当电池转为充满状态时，必须更换为另外一个未充满电的电池。图7给出了BCP-TEG在燃烧1 kg木条时的发电性能。热端温度维持在523 K左右，DC-DC转换器上游的输出电压介于12.0 V和13.5 V之间，DC-DC转换器下游的电压设定为12.6 V。在电池能完全接收电能的条件 下，DC-DC转换器上游和下游的电压不能维持在固定的值；当电池处于充满状态时，DC-DC转换器下游的电压稳定在12.6 V，而DC-DC转换器上游的电压将升高至一个高电压值，意味着BCP-TEG的发电功率没有被完全提

取出来。如图7(a)所示，在第80分钟时DC-DC上游的电压升高至13.5V，意味着电池已经接近充满状态，实验中在此时更换了一个未充满电的电池。

由于电池的内阻与BCP-TEG内阻的不匹配，应用测试获得的发电功率低于第3.2节的理论预测结果。在应用测试时采用一个电量表测试了BCP-TEG在燃烧1 kg松木条时的总发电功率。结果表明，一共获得了35.2 W·h的电量，其中10.6 W·h ($5.43 \text{ W} \times 1.95 \text{ h}$)的电量用于BCP-TEG内部的水泵和风扇的供电。BCP-TEG内部的水泵和风扇的平均功耗已经在第2.3节中进行了介绍。因此，23.1 W·h，即 $(35.2 - 10.6) \text{ W} \cdot \text{h} \times 94\%$ 的电量被存储在电池中，这些电量能充满一个容量为3.7 V的6.2 A·h的电池 ($23.1 \text{ W} \cdot \text{h} / 3.7 \text{ V} = 6.2 \text{ A} \cdot \text{h}$)。上述分析阐明了采用本文研发的BCP-TEG在燃烧1 kg木条时的发电量可充满一部智能手机，如iPhone 12 Pro的电池容量仅为3.69 A·h。获得上述这样的结果主要得益于1 kg木条的生物质能远大于一部智能手机所存储的电量，即使总发电效率低于1%。本文在已有相关研究中第一个报道了采用BCP-TEG燃烧1 kg木条时的发电量。文献[31]报道，贫困地区的最低电量需求是每天3 W·h。因此，本文开发的BCP-TEG满足了贫困地区的最低电量需求，同时还可以拓展一些其他应用，如采用水泵泵水和驱动一些小型医疗设备。

3.5. 讨论

3.5.1. CLC的重要性

BCP-TEG的一个核心指标是净输出功率密度 (P_{out}/m)，这个指标衡量了供电电源基于质量方面的紧凑性。图8给出了各种BCP-TEG研究获得的净输出功率密度。本文作者之前的一项工作获得了 $4.79 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的净输出功率密度[26]，但是这项工作[26]的BCP-TEG需要借助河流

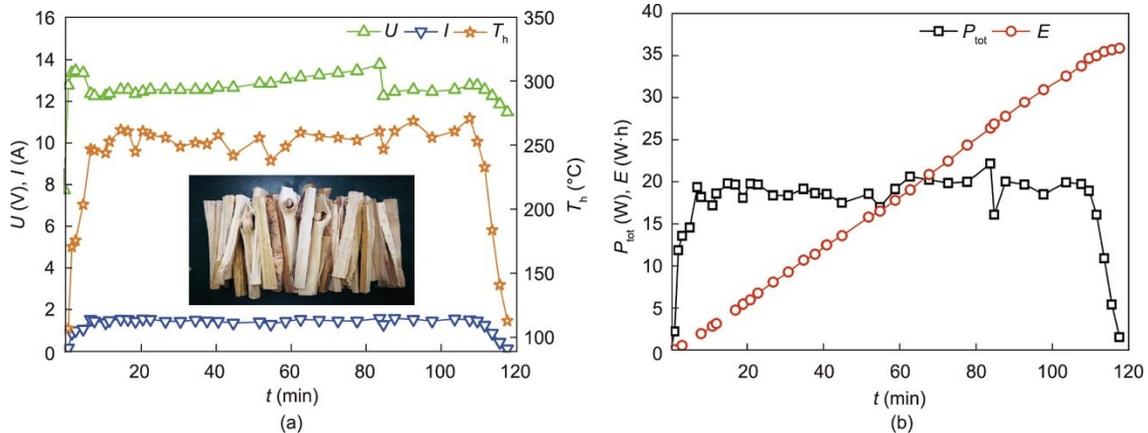


图7. BCP-TEG 燃烧1 kg木条的发电性能。(a) 发电电压 (U)、电流 (I) 和热端温度 (T_h) 的时间变化曲线；(b) 发电功率 (P) 和发电量 (E) 随运行时间 (Δt) 的变化规律。

或湖泊的水进行冷却。换言之，这种冷却方式需要大量水，而且冷却后的水被直接排放掉，不能循环使用。其他的工作在 OLC 或空气冷却模式下，BCP-TEG 的净输出功率密度较低 ($0.27 \text{ W}\cdot\text{kg}^{-1}$ [7]、 $0.49 \text{ W}\cdot\text{kg}^{-1}$ [9]、 $0.28 \text{ W}\cdot\text{kg}^{-1}$ [10]、 $0.25 \text{ W}\cdot\text{kg}^{-1}$ [11]、 $0.32 \text{ W}\cdot\text{kg}^{-1}$ [21] 和 $0.89 \text{ W}\cdot\text{kg}^{-1}$ [24])。造成 BCP-TEG 较低的净输出功率密度的原因包括空气冷却方式的低冷却效率和 OLC 方法要求的大容积水箱。此外，运行在 OLC 模式下的 BCP-TEG 在启动后，由于缺少散热器排除热量，水箱内的水温将不断升高。为了提高净输出功率密度，同时确保 BCP-TEG 能够在各个地方正常工作，必须开发 CLC 方法。CLC 方法要求增加额外的散热器和散热风扇把热量排放到环境中。然而，CLC 方法将必须增加数个部件，包括一个膨胀箱、一个水泵、一个散热器和散热风扇，同时这些设备的存在将耗费一定的发电功率。因此，需要仔细地权衡在 CLC 模式下运行的 BCP-TEG 的最终性能。本文作者之前的一项工作成功地在一个中型的 BCP-TEG 上采用了 CLC 方法，并获得了正面的结果 ($1.88 \text{ W}\cdot\text{kg}^{-1}$)。由此可见，即使 CLC 方法需要额外的部件进行散热，但是该方法依然有潜力被应用在便携式 BCP-TEG 上。对于本文的 BCP-TEG，运行在 CLC 模式下的净输出功率密度达到了 $2.41 \text{ W}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，而且该数值仍有优化的空间，因为当前的 BCP-TEG 采用了厚度为 2 mm 的不锈钢。实际上，可大幅度减小不锈钢的厚度。上述讨论揭示了 CLC 方法在开发独立高功率的便携式 BCP-TEG 过程中的重要性。其潜在的机理是冷却水具有很大的热容，从而可以借助轻质的铝制翅片散热器和塑料散热风扇均匀地控制 BCP-TEG 的冷端温度。最终的输出电能平衡了水泵和散热风扇的耗电。实际上，本文研发的 BCP-TEG 相比于运行在空气冷却或具有大水箱的 OLC 模式下的 BCP-TEG 具有更大的发电功率。

3.5.2. BCP-TEG 获得 1% 总效率的挑战

效率低是 TEG 特别是 BCP-TEG 的主要缺点。对于气

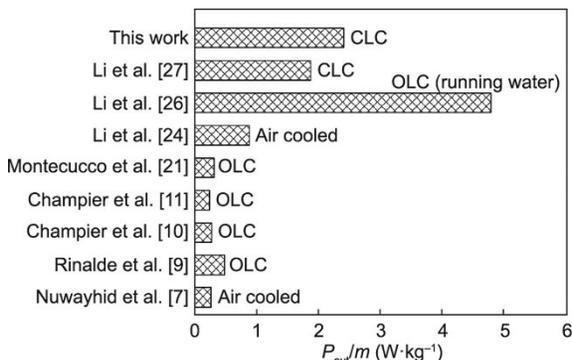


图 8. 不同冷却方法下 BCP-TEG 的发电净功率密度的对比。

体燃烧驱动的 TEG，直接气体燃烧驱动的 TEG 的总效率可达到 3% [32]，催化气体燃烧驱动的 TEG 的总效率可达到 2.5% [33]。关于气体燃烧驱动的 TEG 的详细研究综述可见 Mustafa 的工作 [34]。

如表 1 和图 9 所示，只有几篇关于 BCP-TEG 的研究报道了总效率。尽管 BCP-TEG 的研究已经有二十多年了，但是其总效率仍低于 1%。深入的分析发现 BCP-TEG 的集热效率远低于气体燃烧驱动 TEG 的集热效率 (大于 80%)。因此，总效率收到了很大的限制。截至发稿，只有三篇已有文献报道了 BCP-TEG 的集热效率 (33.3% [12]、23.8% [17] 和 34.2% [27])。如图 9 可见，本文研发的 BCP-TEG 的总效率为 0.98%，大于目前已有的文献报道值。造成这种低效率的原因是从生物质燃烧烟气中收集热量比较困难，这种烟气含有大量的炭黑，同时其流动速度很低。低流动速度意味着生物质燃烧过程对流动阻力非常敏感，安装一个具有充足扩展面积的集热器以便收集充足的热流会导致相当大的流动阻力，从而会影响生物质的燃烧过程。因此，设计开发 BCP-TEG 时必须平衡集热效率和生物质燃烧状态之间的关系，从而避免影响总效率的提升。一种可行的策略是完全控制生物质燃烧的过程，换言之，所有的燃烧空气都由鼓风机提供。这种策略可同时增强生物质燃烧过程和提高集热效率，在后续的研究中需要开展相应的实验验证。

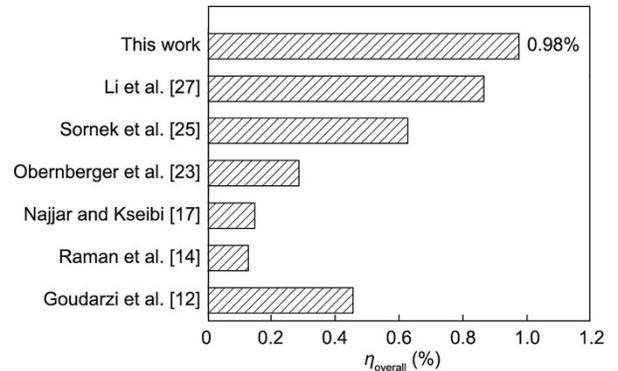


图 9. 各种已报道的 BCP-TEG 总效率的对比。

3.5.3. 单个 TEM 的热流问题

优化集热性能是提高 BCP-TEG 发电功率的重要方面。一个性能优异的集热器还需要一个先进的均热器，从而使收集的热量均匀地通过每个 TEM。因此，热端温度需要更加均匀。在本文，设计了厚度为 14 mm 的均热器进行热流的分配，从而确保本文开发的 BCP-TEG 的紧凑型和高功率。因此，需要对单个 TEM 的热流 (Q_{TEM}) 进行分析并与已有文献报道的热流进行对比。但是，仅有少量的文献报道了热电转换效率，所以只能采用那些 $P_{tot}/N > 3 \text{ W}$

和报道了热电转换效率或冷热端温度的文献结果进行对比分析。对于那些没有报道热电转换效率的文献，提供的冷热端温度可用于预测其热电转换效率。值得说明的是，这种预测的热电转换效率将用于计算单个 TEM 的热流 (Q_{TEM})，如图 10 所示。这种预测的过程存在一定的误差，尽管如此，图 10 给出了细致估算的 Q_{TEM} 。热电转换效率可通过以下公式[35]进行预测：

$$\eta_{\text{TE,theo}} = \frac{T_h - T_c}{T_h} \left\{ (1 + 2rw)^2 \left[2 - 0.5 \left(\frac{T_h - T_c}{T_h} \right) + \left(\frac{4}{ZT_h} \right) \left(\frac{1 + n/L}{1 + 2rw} \right) \right] \right\}^{-1} \quad (11)$$

式中， T_h 、 T_c 、 ZT_h 分别为热端温度、冷端温度和热电优值，其中 $ZT_h = 0.8$ 。此外， r 、 w 、 n 和 L 分别为接触热阻、陶瓷厚度与 TE 电臂长度之比、接触电阻和 TE 电臂长度。根据文献中报道的数据，预测的热电转换效率介于 1.36% 和 4.9% 之间，主要取决于冷热端温度的大小。如图 10 所示，通过单个 TEM 的热流 (Q_{TEM}) 各不相同，造成这种不同的原因之一是 TEM 之间不同的尺寸。例如，HZ-20 型 TEM 被文献[4,6-7,9]采用，其尺寸为 75 mm × 75 mm，根据产品数据册可知其可允许热流高达 500 W。实际上，上述采用了 HZ-20 型 TEM 的 BCP-TEG [4,6-7,9]，其 TEM 只工作在最大可允许 Q_{TEM} 的 50% 的条件下，从而没有充分发挥出 TEM 的发电潜力。在 Goudarzi 等[12]的工作中，虽然采用的 TEM 的尺寸仅为 56 mm × 56 mm，但是其 Q_{TEM} 却超过了 500 W。这意味着 Goudarzi 等[12]的工作超范围使用了这种型号为 TEP1-12556-0.6 的 TEM。因为根据其产品数据册，这种型号的 TEM 最大允许的 Q_{TEM} 小于 300 W。近年来的研究开始关注热流分布与 TEM 尺寸之间的匹配问题，换言之，当下的研究更多地倾向于采用一种尺寸为 40 mm × 40 mm 的 TEM，其运行的 Q_{TEM} 最大约为 150 W。这种趋势可方便地做热流管理，从而最大程度地释放 TEM 的发电潜力。图 10 揭示了开展这种热流匹配的重要性。例如，在 Ranman [14]的研究中，其 TEM 的运行 Q_{TEM} 为 136 W，接近允许的最大 Q_{TEM} (144 W)。

4. 结论

本文设计并测试了一种紧凑、独立的高功率便携式 BCP-TEG。论文通过实验详细研究了温度分布、功率负载特性和不同层级的效率，与此同时还开展了应用测试研究。通过对研究结果的分析 and 详细讨论，获得了以下结论：

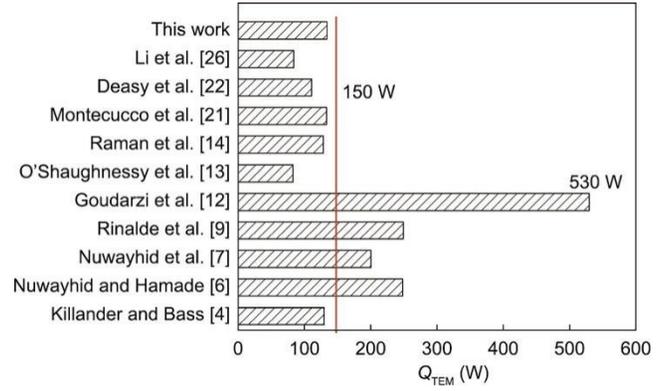


图 10. 各种 BCP-TEG 中单个温差发电模块的热流率对比。

(1) 研发的质量为 7.6 kg 的 BCP-TEG 可同时提供 23.4 W 的电力和 750 W 的清洁热力，净输出功率密度为 $2.41 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。在实际应用时，研发的 BCP-TEG 通过燃烧 1 kg 木条发电充满一个电压为 3.7 V、容量为 6.2 A·h 的电池。总效率和热电转换效率分别为 0.98% 和 2.87%，其中总效率高于已有文献报道结果。

(2) 详细的分析表明，即使 CLC 方法中的几个零部件（如膨胀箱、散热器和散热风扇）需要消耗额外的电力，但这种方法仍可有效提高 BCP-TEG 的发电功率。最终获得的净输出功率密度 ($2.41 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$) 高于采用携带大容积水箱的 OLC 方法的 BCP-TEG 的结果。

(3) 在优化 BCP-TEG 的性能时，必须平衡集热和烟气流动阻力之间此消彼长的问题。当生物质燃烧过程不受影响时，系统的集热效率越高越好。在后续的研究中，可尝试采用鼓风机完全控制生物质燃烧的通风量，从而提高总效率。

(4) 在设计开发高功率 BCP-TEG 时，需要首先考虑热流匹配问题。TEM 发电潜力只有在热流匹配、高集热效率和热流均匀分布这三个条件同时满足时才能得到充分的释放。

致谢

本工作得到了浙江省自然科学基金重点项目 (LZ21E060001) 和浙江省重点研发计划项目 (2020C03115) 的资助。

Compliance with ethics guidelines

Guoneng Li, Jie Ying, Minbo Yi, Youqu Zheng, Yuanjun Tang, and Wenwen Guo declare that they have no

conflict of interest or financial conflicts to disclose.

Nomenclature

A_{HC}	Heat transfer area of heat collector (m^2)
A_{PH}	Outside surface area of heat sinks, pipes, and water pump (m^2)
A_R	Area of radiator (m^2)
c_p	Heat capacity of air ($kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)
E	Electric energy ($W \cdot h$)
h_{air}	Convective heat transfer coefficient ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)
I	Current (A)
L	Length of thermoelectric leg (mm)
m	Mass weight of BCP-TEG (kg)
m_{wd}	Mass weigh of pine sticks (kg), $m_{wd} = 1$ kg
n	Electrical resistivity ratio (mm)
N	Number of thermoelectric modules (dimensionless)
P	Electric power (W)
P_{out}	Net electric power (W)
P_{tot}	Total electric power (W)
q_1	Incomplete combustion heat loss (W)
q_2	Heat loss by flue gases and combustion walls (W)
q_3	Heat loss by heat collector (W)
q_4	Heat loss by heat sinks, water pumps and connecting pipes (W)
q_{cold}	Heat flux rejected by the cold ends of BCP-TEG (W)
q_{comb}	Total heat flux released by biomass combustion (W)
q_{HC}	Total heat flux collected by heat collector (W)
q_{ht}	Heating power from the radiator (W)
q_{in}	Input power (W)
q_{TE}	Heat flux passing through thermoelectric modules (W)
Q_{TEM}	Heat flux per thermoelectric module (W)
r	Thermal contact ratio (dimensionless)
R_{ld}	Load resistance (Ω)
T	Temperature (K)
T_{air}	Air temperature from radiator (K)
T_{atm}	Atmosphere temperature (K)
T_c	Cold-end temperature (K)
T_{HC}	Outside surface temperature of heat collection (K)
T_h	Hot-end temperature (K)
T_{PH}	Surface temperature of heat sinks, pipes, and water pumps (K), $T_{PH} = T_{wt}$
T_{wt}	Cooling water temperature (K)

Δt	Time (s)
ΔT	Temperature difference, $\Delta T = T_h - T_c$ (K)
U	Voltage (V)
V_{air}	Air velocity from radiator ($m \cdot s^{-1}$)
w	Ratio of ceramic thickness to thermoelectric leg (dimensionless)
x	x coordinate (m)
ZT	Thermoelectric figure of merit (dimensionless)
ε	Emissivity (dimensionless)
σ	Stefan–Boltzmann constant ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$)
ρ_{air}	Air density ($kg \cdot m^{-3}$)
η_{CHP}	Combined heat and power efficiency (%)
η_{HC}	Heat collection efficiency (%)
$\eta_{overall}$	Overall efficiency (%)
η_{TE}	Thermoelectric efficiency (%)
$\eta_{TE,theo}$	Predicted thermoelectric efficiency (%)

Abbreviations

BCP	Biomass-combustion powered
CHP	Combined heat and power
CLC	Closed-loop cooling
DAQ	Data acquisition
HC	Heat collector
HEX	Heat exchanger
LHV	Lower heat value ($MJ \cdot kg^{-1}$)
OLC	Open-loop cooling
TE	Thermoelectric
TEG	Thermoelectric generator
TEM	Thermoelectric module

References

- [1] Rowling M. COVID-19 further threatens access to electricity for people living in poverty [Internet]. London: Thomson Reuters Foundation; 2020 May 28 [cited 2021 June 22]. Available from: <http://news.trust.org/climate>.
- [2] Twaha S, Zhu J, Yan Y, Li B. A comprehensive review of thermoelectric technology: materials, applications, modeling and performance improvement. *Renew Sustain Energy Rev* 2016;65:698–726.
- [3] Gao HB, Huang GH, Li HJ, Qu ZG, Zhang YJ. Development of stove-powered thermoelectric generators: a review. *Appl Therm Eng* 2016;96:297–310.
- [4] Killander A, Bass JC. A stove-top generator for cold areas. In: 15th international conference on thermoelectrics, Proceedings ICT '96; 1996 Mar 26–29; Pasadena, CA, USA. Piscataway: IEEE; 1996. p. 390–3.
- [5] Nuwayhid RY, Rowe DM, Min G. Low cost stove-top thermoelectric generator for regions with unreliable electricity supply. *Renew Energy* 2003;28(2):205–22.
- [6] Nuwayhid RY, Hamade R. Design and testing of a locally made loop-type thermosyphonic heat sink for stove-top thermoelectric generators. *Renew Energy* 2005;30(7):1101–16.
- [7] Nuwayhid RY, Shihadeh A, Ghaddar N. Development and testing of a domestic

- woodstove thermoelectric generator with natural convection cooling. *Energy Convers Manage* 2005;46(9–10):1631–43.
- [8] Lertsatitthanakorn C. Electrical performance analysis and economic evaluation of combined biomass cook stove thermoelectric (BITE) generator. *Bioresour Technol* 2007;98(8):1670–4.
- [9] Rinalde GF, Juanico LG, Tagliavere E, Gortari S, Molina MG. Development of thermoelectric generators for electrification of isolated rural homes. *Int J Hydrogen Energy* 2010;35(11):5818–22.
- [10] Champier D, Bédécarrats JP, Rivaletto M, Strub F. Thermoelectric power generation from biomass cook stoves. *Energy* 2010;35(2):935–42.
- [11] Champier D, Bédécarrats JP, Kousksou T, Rivaletto M, Strub F, Pignolet P. Study of a TE (thermoelectric) generator incorporated in a multifunction wood stove. *Energy* 2011;36(3):1518–26.
- [12] Goudarzi AM, Mazandarani P, Panahi R, Behsaz H, Renania A, Rosendahl LA. Integration of thermoelectric generators and wood stove to produce heat, hot water, and electrical power. *J Electron Mater* 2013;42(7):2127–33.
- [13] O’Shaughnessy SM, Deasy MJ, Kinsella CE, Doyle JV, Robinson AJ. Small scale electricity generation from a portable biomass cookstove: Prototype design and preliminary results. *Appl Energy* 2013;102:374–85.
- [14] Raman P, Ram NK, Gupta R. Development, design and performance analysis of a forced draft clean combustion cookstove by a thermo electric generator with multi-utility options. *Energy* 2014;69(5):813–25.
- [15] Mal R, Prasad R, Vijay VK. Design and performance evaluation of thermoelectric generator stove and comparison with traditional, natural and forced draft stoves. *Int J Energy Policy* 2015;11(3):220–33.
- [16] Mal R, Prasad R, Vijay VK. Multi-functionality clean biomass cookstove for off-grid areas. *Process Saf Environ* 2016;104(Pt A):85–94.
- [17] Najjar YSH, Kseibi M. Heat transfer and performance analysis of thermoelectric stoves. *Appl Therm Eng* 2016;102(6):1045–58.
- [18] Sornek K, Filipowicz M, Rzepka K. The development of a thermoelectric power generator dedicated to stove-fireplaces with heat accumulation systems. *Energy Convers Manage* 2016;125:185–93.
- [19] Najjar YSH, Kseibi M. Evaluation of experimental JUST thermoelectric stove for electricity-deprived regions. *Renew Sustain Energy Rev* 2017;69(3):854–61.
- [20] Li G, Yi M, Tulu M, Zheng Y, Guo W, Tang Y. Miniature self-powering and self-aspirating combustion-powered thermoelectric generator burning gas fuels for combined heat and power supply. *J Power Sources* 2021;506(9):230263.
- [21] Montecucco A, Siviter J, Knox AR. Combined heat and power system for stoves with thermoelectric generators. *Appl Energy* 2017;185(Pt 2):1336–42.
- [22] Deasy MJ, O’Shaughnessy SM, Archer L, Robinson AJ. Electricity generation from a biomass cookstove with MPPT power management and passive liquid cooling. *Energy Sustain Dev* 2018;43(4):162–72.
- [23] Obernberger I, Weiß G, Kössl M. Development of a new micro CHP pellet stove technology. *Biomass Bioenergy* 2018;116:198–204.
- [24] Li G, Zhang S, Zheng Y, Zhu L, Guo W. Experimental study on a stove-powered thermoelectric generator (STEG) with self starting fan cooling. *Renew Energy* 2018;121:502–12.
- [25] Sornek K, Filipowicz M, Żołądek M, Kot R, Mikrut M. Comparative analysis of selected thermoelectric generators operating with wood-fired stove. *Energy* 2019;166:1303–13.
- [26] Li G, Zheng Y, Hu J, Guo W. Experimental and a simplified theoretical model for a water-cooled, stove-powered thermoelectric generator. *Energy* 2019;185:437–48.
- [27] Li G, Zheng Y, Lv H, Hu J, Li J, Guo W. Micro combined heat and power system based on stove-powered thermoelectric generator. *Renew Energy* 2020;155(8):160–71.
- [28] Li G, Zheng Y, Guo W, Zhu D, Tang Y. Mesoscale combustor-powered thermoelectric generator: experimental optimization and evaluation metrics. *Appl Energy* 2020;272(8):115234.
- [29] Shen Z, Tian L, Liu X. Automotive exhaust thermoelectric generators: current status, challenges and future prospects. *Energy Convers. Manage* 2019;195(9):1138–73.
- [30] Maccarty N, Ogle D, Still D, Bond T, Roden C. A laboratory comparison of the global warming impact of five major types of biomass cooking stoves. *Energy Sustain Dev* 2008;12(2):56–65.
- [31] O’Shaughnessy SM, Deasy MJ, Doyle JV, Robinson AJ. Performance analysis of a prototype small scale electricity-producing biomass cooking stove. *Appl Energy* 2015;156(10):566–76.
- [32] Shimokuri D, Taomoto Y, Matsumoto R. Development of a powerful miniature power system with a meso-scale vortex combustor. *Proc Combust Inst* 2017;36(3):4253–60.
- [33] Abedi H, Migliorini F, Dondè R, Deluliis S, Passaretti F, Fanciulli C. Small size thermoelectric power supply for battery backup. *Energy* 2019;188(12):116061.
- [34] Mustafa KF, Abdullah S, Abdullah MZ, Sopian K. A review of combustion-driven thermoelectric (TE) and thermophotovoltaic (TPV) power systems. *Renew Sustain Energy Rev* 2017;71(5):572–84.
- [35] Rowe DM, Gao M. Evaluation of thermoelectric modules for power generation. *J Power Sources* 1998;73(2):193–8.