

专题: 纳米工程和热物理

热电空气消毒系统

季仁才¹⁾ 彭桂龙¹⁾ 徐振伟¹⁾ 杨诺^{1)†} 郝馨^{2)‡}¹⁾ (华中科技大学能源与动力工程学院, 武汉 430074)²⁾ (亚利桑那大学航空航天与机械工程系, 亚利桑那州图森市 美国 85721-0119)

(2022 年 4 月 20 日收到; 2022 年 6 月 19 日收到修改稿)

流行性病毒严重影响着人类健康和社会正常运行, 因此有效杀灭病毒变得尤为重要。本文对热电空气消毒系统的传热性能进行研究, 该系统利用半导体热片具有冷热两端的特点, 可以实现对空气加热(可用于消毒)与冷却降温至舒适温度。测量结果显示流入系统的空气首先被升至 80 °C 进行消毒, 之后被冷却降温至 35 °C。该系统总的能量利用率最高可达 1.2。此外, 结合测量结果和数值计算, 本文分析了热电片级数、输入功率、空气流量以及边界保温等参数对系统传热性能和能量利用率的影响。该系统在公共卫生、医疗、和家庭等空气消毒领域具有应用潜力。实际消毒效果需要结合医学应用进一步研究。

关键词: 半导体热电, 空气消毒, 能量利用率, 冠状病毒**PACS:** 84.60.Rb, 85.80.Fi, 44.15.+a, 44.25.+f**DOI:** 10.7498/aps.71.20220757

1 引言

病毒具有较强的传染性, 严重影响着公共卫生和生命健康, 例如埃博拉^[1,2]、甲型 H1N1^[3,4]、天花^[5,6]、HIV^[7,8] 等病毒。有些种类病毒是通过空气等气溶胶等途径传播, 例如 SARS^[9,10] 和新型冠状病毒^[11,12]。根据世界卫生组织^[13] 和 coronavirus.app^[14] 的统计数据, 截止到 2022 年 2 月中旬, 新型冠状病毒导致全球累计确诊 421930425 例, 死亡 5891516 例。为阻断这类病毒传播, 有效杀灭空气中的病毒尤为重要。

空气消毒方法一般有紫外线、等离子、热消毒等^[15]。紫外线消毒无法照射到缝隙中的病毒, 而且会在空气中产生臭氧, 以及对人体容易造成损伤^[16,17]。而通过空气加热灭活病毒的方法具有简单、方便、快速、安全性高和经济性强等优点, 且可将缝隙中的病毒失活^[18]。

大多数病毒都不耐高温^[19–25], Wang 等^[20] 在 56 °C 下测试 30 min, 发现加热对 SARS-COV-2 灭活有效果。Chin 等^[22] 证明, 当温度升至 70 °C 时, SARS-COV-2 灭活所需的时间仅需要 5 min。Burton 等^[19] 测试了在 56–95 °C 范围内的消杀, 温度越高所需的消杀时间也越短, 95 °C 只需要 1–5 min 即可。上述工作证明热法消杀病毒可行, 且随着温度增高消毒效果增强、消杀时间缩短。

在热法消杀对病毒的基础上, 结合吸附过滤的方法会显著提高消毒效果。Trancossi 等^[26] 提出可以通过热力学、传热传质等方面的研究进行详细分析, 以显著减少大流行感染的影响和新的全面封锁的经济风险。Ren 等^[27] 设计并分析一种新型的基于 Ni 泡沫的加热过滤装置, 温度可达 100 °C 及以上, 降低 SARS-COV-2 等通过空气传播的风险。Correia 等^[28] 提出暖通空调系统如果使用不当可能会导致 SARS-COV-2 的传播, 同时 Rezaei 等^[29] 提出一种先进的洁净室系统, 该系统可以利用废气

† 通信作者。E-mail: nuo@hust.edu.cn

‡ 通信作者。E-mail: qinghao@email.arizona.edu

的回收热量从通风系统中消除冠状病毒. Shan 等^[30]提出一种具有优异自消毒性能和便携性的新型低成本电热面罩, 可以达到 80 °C 以上的高温, 杀死大部分附着在过滤层上的已知病毒.

然而, 热法消毒在应用中也存在相应的问题. 比如 Shan 等^[30]提出的一种加热过滤面罩、Ren 等^[27]设计的一种基于 Ni 泡沫加热过滤装置消毒后的高温空气无法直接呼吸、不符合人体的舒适温度, 使用中还需配合额外的冷却装置. 因此, 笔者前期的工作^[31]提出热电空气加热与冷却一体式消毒的方案. 热电器件在通电的情况下可以在两侧产生温差, 即通电时可以一侧制热、另一侧制冷, 符合加热消杀并且冷却降温的要求.

本文对热电空气消毒系统的温度变化和能量效率进行研究. 首先, 搭建热电空气加热与冷却一体式消毒系统. 其次, 研究系统半导体热电片数量、输入功率、空气流量、保温层厚度等参数对热电消毒系统温度和能量利用率的影响. 最后对比实际应用与仿真计算边界绝热情况的差别, 并提出系统在后续可优化和进一步研究的方向.

2 系统和方法

2.1 系统设计

热电消毒系统的三维结构如图 1 所示, 这个系统主要包括流体区、换热翅片和半导体热电片几个部分区域, 它是一个带挡板的长方体通道, 系统整体尺寸为 742 mm × 102 mm × 84 mm. 流体区, 简单来说工质就是空气, 空气在管道内流动的区域就是流体区. 换热翅片的作用是加强空气在流动时与壁面的换热, 从而能够更好地加热消毒和冷却降温. 另外在空气流动过程中, 翅片还可以对空气中的病毒起到一定的吸附作用. 肋基尺寸是 60 mm × 60 mm × 2 mm, 肋基上有 9 个板状肋片, 肋片厚度 1.25 mm, 间距 6.3 mm, 高度 18 mm. 半导体热电片的尺寸为 62 mm × 62 mm × 4.2 mm, 上下有两个陶瓷板, 中间有成对的半导体材料热电元件, 这些热电元件通过铜互相连接. 整个系统选择 10 个热电片, 标记为 TE01—TE10, 这种设计可以控制热电片的每一级通过小电流产生很小的壁温差, 使空气逐渐上升然后逐渐冷却, 由于电流较小, 耗功较少, 可以获得更高的系统性能系数. 流体从入口进入加热段, 如图中虚线所示, 经最后一个半

导体热电片 TE10 折流后进入冷却段, 然后流出, 总体呈现出英文字母 U 字形.

该系统具有以下特点: 1) 系统结合半导体热电片自身的特征及空气消毒净化的方式, 相应设计利用热电器件进行热端消毒冷端冷却应用一体化系统, 并对其主要部分如半导体热电片、空气消毒净化流道和空气输出流道的结构及其具体布置方式进行设计和研究, 相应的可充分利用半导体热电片同时制热、制冷的特点, 对空气进行高温消毒, 并将加热消毒后的空气温度冷却降至一定的温度; 2) 由于半导体热电片是一个个封装好的模块, 体积小便于扩展, 如图 1 所示是采用 10 块半导体热电片, 其实可根据具体的场景需要、温度需要进行加长和缩减, 系统具有良好的扩展性能; 3) 采用多个半导体热电片串联组成的系统, 可以实现空气温度逐渐上升和下降, 每一级半导体热电片热端和冷端温差小从而可以减少耗功, 提高能量利用率; 4) 可以在最后一个热电片热端加上过滤吸附装置, 比如熔喷布等, 采用热法消毒和过滤吸附相结合的方式, 使得病菌吸附在高温段, 降低加热时间的影响; 5) 这个系统只是其中一种应用, 可以推广到一大类热电加热冷却的系统和方法, 与不同的空气设备相结合, 如中央空调、空气净化器等设备.

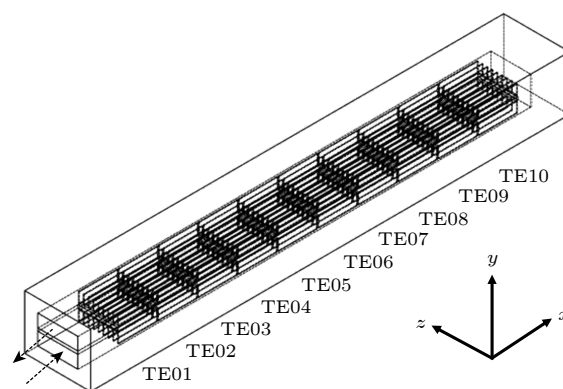


图 1 热电消毒系统结构示意图

Fig. 1. Diagram of thermoelectric disinfection system.

2.2 性能参数

由图 1 的结构模型和系统介绍可知, 热电消毒系统涉及热电帕尔贴效应和空气流动传热两个过程, 为衡量空气换热量多少, 认为空气的物性在温度变化不大时保持不变, 可根据测量的温度以及空气的物性进行计算:

$$Q = q_m C_p (T_2 - T_1), \quad (1)$$

其中 q_m 是空气流量, C_p 是空气定压比热, T_1 和 T_2 是空气在两个状态下的温度.

考虑到设计的装置同时利用热端与冷端两方面的温差来进行换热, 而大多数热电装置的应用都是用于制冷, 为衡量系统的设计情况, 除需要满足温度热端消杀冷端冷却的条件外, 还需要观察整个系统的能量利用率情况, 对于这个系统, 在这里定义系统的总能量利用率 COP^* 、冷端能量利用率 COP_c 和热端总能量利用率 COP_h :

$$COP^* = \frac{Q_c + Q_h}{W_{te}}, \quad (2)$$

$$COP_c = \frac{Q_c}{W_{te}}, \quad COP_h = \frac{Q_h}{W_{te}}, \quad (3)$$

其中 Q_c 和 Q_h 分别是空气在半导体热电片两端的换热量, W_{te} 是半导体热电片的输入功耗, 实际测量时可根据电源进行读取, 同样也可以根据下式进行计算:

$$W_{te} = S_m I \Delta T + I^2 R_m, \quad (4)$$

其中 S_m 和 R_m 分别是半导体热电片的总塞贝克系数和总电阻, I 是电流, ΔT 是半导体热电片两侧的温差.

2.3 系统搭建

根据图 1 的设计搭建实验测试系统, 主要包括半导体热电片、换热片、电源、风扇、流量计、热电偶、XPS 泡沫等 (如图 2 所示). 整个热电消毒测量系统由多个半导体热电片 TEC1-12730 (图 2(a)) 和换热翅片基本单元组成, 然后进行多级串联 (图 2(b)). 半导体热电片市场上可以购买到, Bi_2Te_3 热电材料的参数可以参考文献: $S = 2.06 \times 10^{-4}$ V/K, $\sigma = 100000$ S/m, $\kappa = 1.5$ W/(m·K)^[32]. 电源给半导体制冷片供电后, 红色线代表电源接正极, 黑色接负极, 在半导体热电片两侧分别涂上导热硅脂, 并涂上换热片加强换热壁面与空气流动的换热.

空气在换热片与 XPS 泡沫围成的通道内流动, 通道内部如图 2(b) 所示, 用风扇提供动力源. 风扇安装在冷端出口处, 风扇接通电源工作后, 对系统进行抽吸来促使系统内部的空气流动, 可以通过调节风扇的工作电压来控制系统的流量大小, 在热电消毒系统的热端进口部分安装流量计进行流量测量. 由于采用多个半导体热电片以及风扇, 需

要多个电源进行供电. 系统内部的温度分布, 在系统制作过程中可以在半导体制冷片壁面或者换热片肋片根部位置粘贴热电偶, 忽略热电偶与接触壁面的接触热阻, 用热电偶测量换热壁面的温度. 同时采用一定的方式固定热电偶, 使得热电偶悬空与空气接触, 测量空气在系统内部流经不同位置时的温度.

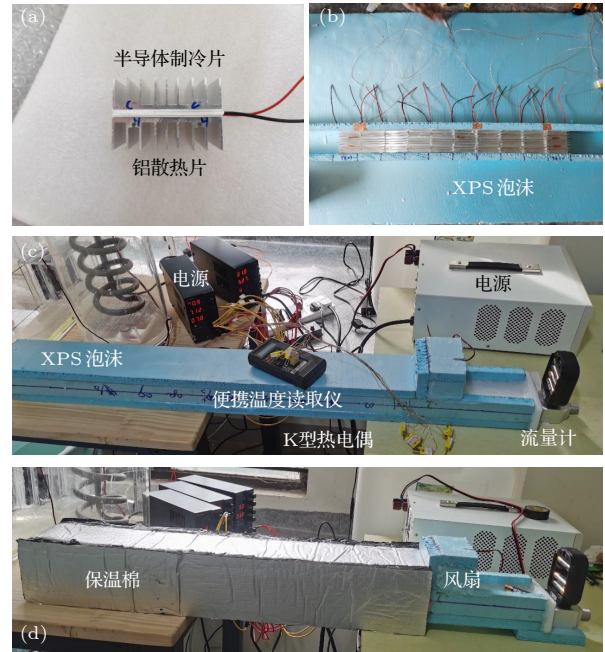


图 2 实验搭建测量平台实物图 (a) 单个半导体制冷片和换热片单元; (b) 多级半导体热电片组成通道; (c) 测量过程实物图; (d) 加厚保温层后测量实物图

Fig. 2. Physical diagram of the measurement platform built in the experiment: (a) A single semiconductor refrigeration element and heat exchange element unit; (b) the multi-stage semiconductor thermoelectric element constitutes a channel; (c) the physical diagram of the measurement process; (d) the physical diagram of the measurement after adding the insulation layer.

封装后的系统实物如图 2(c) 所示. 制作过程中, 为方便半导体热电片接通电源工作, 有很多导线在外接电源时穿透包裹的 XPS 泡沫. 为防止空气在 XPS 泡沫围成的管道中流动时存在泄露, 从而影响加热消杀效果以及流量检测的误差, 在导线附近以及泡沫裁剪拼接管道的连接处进行加胶密封. 分析边界散热的问题可以进一步在系统外侧包裹一层保温棉, 通过加厚的方式增加热阻减少散热. 在内部包含热电片的部分加保温棉, 加保温棉之后的实验装置如图 2(d) 所示.

2.4 仿真计算设置

实验过程中热电偶测试温度是点温度,为更好描述实验平台中流体在系统中的流动状况、温度场以及在实际测试过程中与环境的换热情况,构建与实物等比例的三维模型进行有限元仿真计算.模型中除固体传热、强制对流换热以外,还涉及系统与环境的散热即自然对流散热和辐射换热过程.涉及到自然对流过程,需要将系统放入大的环境当中,自然对流的仿真要求在重力方向上物体上方空间尺寸需要大于两倍的物体高度(y 向),前后左右环境的尺寸至少是系统长度和宽度的两倍(x 和 z 向).计算的模型以及划分的网格如图3所示,内部紫色的框部分是热电消毒系统的结构,外部黄色的框区域是环境空间,模型内部及周围需要进行一定的加密,外部环境可以疏一些.重力方向沿着负 y 轴方向.

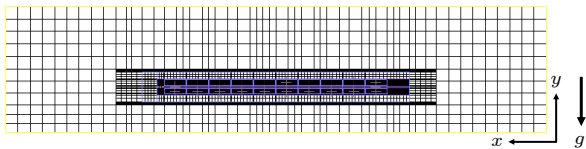


图3 热电消毒系统数值计算网格模型

Fig. 3. Numerical calculation grid model of thermoelectric disinfection system.

各个部件的材料以及物性条件见表1,边界条件设置入口流量以及每块半导体热电片两端的温度.流量的值是实验过程中通过流量计进行测量,多次记录流量计的测量值求取均值.温度值是通过热电偶进行测量,由于热电偶未测量所以半导体热电片的温度,对未测量的壁面温度可以根据前后位置的壁面温度进行线性插值.为验证计算的准确性,可以将计算的空气在不同位置的空气温度值与实验测量的相应位置的空气温度值进行比较分析.

表1 仿真模型材料物性

Table 1. Material properties of the simulation model.

材料及部件	热导率/ (W·(m·K) ⁻¹)	密度/ (kg·m ⁻³)	比热/ (J·(kg·K) ⁻¹)	表面发射率
半导体制冷片	1.5	7700	154	0.9
铝换热片	201	2710	913	0.038
XPS保温泡沫	0.03	25	2376.2	0.1
流体空气	0.0261	1.1614	1006.5	—

3 结果和讨论

3.1 功率对系统性能的影响

考虑到实验设备的复杂性和操作的便捷性,给处于工作状态的半导体热电片输入同样的电压,采用万用表测试半导体热电片的内阻为 $1\ \Omega$,在温度变化较小时,电阻变化不大,因此改变电压的大小来改变输入功率.将10个半导体热电片都接通电源工作,如图4(a)中的插图所示,TE01—TE10格子内有颜色填充表示都工作.空气流量固定为 $6.8\ \text{L/min}$,依次改变输入电压为 $1\ \text{V}$, $1.2\ \text{V}$, $1.3\ \text{V}$,用热电偶测量系统内部空气在不同位置处的温度,并将壁面温度作为边界条件进行仿真计算与实验的空气温度进行比较.

如图4(a)所示,测量和计算输入电压为 $1.3\ \text{V}$ 的温度,实线是计算的沿不同位置的空气温度,散点是热电偶测量的空气温度,发现仿真计算的温度与实验测量的温度相一致,误差小于10%,这也验证了仿真计算的准确性.从图中可以发现空气温度在热端不断升高,在冷端逐渐降低,实现热端加热消毒和冷端冷却的功能.将不同电压下的热端温度、冷端温度进行比较,如图4(c)所示.随着输入功率增大,热端温度从 $58.5\ ^\circ\text{C}$ 升至 $81.3\ ^\circ\text{C}$,冷端出口温度也有略微升高,从 $30.65\ ^\circ\text{C}$ 升至 $37.7\ ^\circ\text{C}$.热端温度升高明显有利于热端的消毒效果,冷端升高不明显便于出口冷却.计算的不同输入电压下的温度云图如图4(b)所示,也能观察到系统内部末端最后几级热电片、换热片、空气的温度随着电压升高也增加,并且功率增大时内部高温区域明显增加.

根据(1)式计算空气与壁面的换热量,结果如图4(d)所示,换热量随着功率增大而增大,主要归因于功率增大后空气温度的升高,温升、温降范围增大.将热端、冷端换热量与电源输出功率比值得到 COP^* ,发现 COP^* 随着功率增大而略微减小,从0.86下降到0.82, COP^* 值相比于绝热边界的计算结果 COP^* 降低很多,主要原因是该实验测试系统处于大的环境中,边界条件并不是绝热边界,系统内部大部分热量散失到环境中.从热阻角度分析,功率增大后系统内部平均温度增高,环境温度基本不变,系统内部与环境的温差变大,从图4(b)可以看出来,另外从系统内部到外部环境的导热热阻、对流换热热阻不变,加上辐射换热的影响,因而 COP^* 随着功率增大而减小.

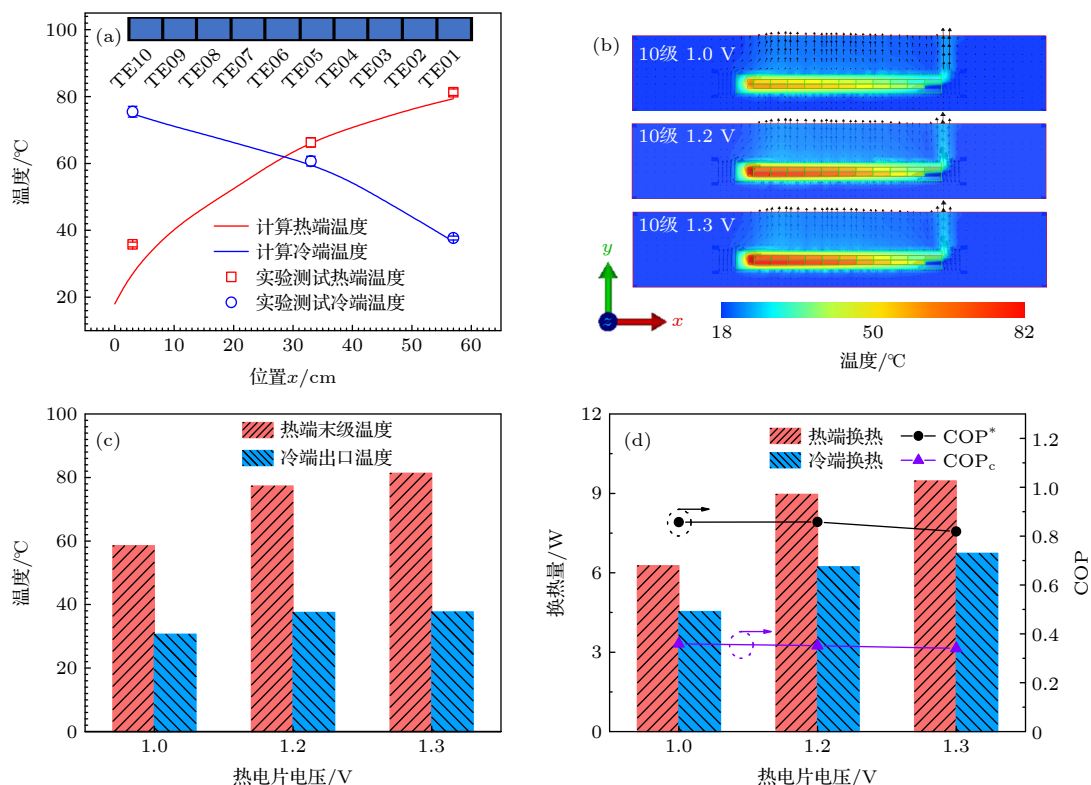


图 4 不同功率下实验测试和计算结果 (a) 电压 1.3 V 时不同位置的空气温度测试和计算; (b) 不同功率下计算的温度云图; (c) 不同功率下的温度比较; (d) 不同功率下的换热量和性能系数

Fig. 4. Experimental test and calculation results under different input powers. (a) Temperature measurement and calculation at different positions when the voltage is 1.3 V; (b) cloud diagram of temperature under different power; (c) comparison of temperature under different power; (d) heat exchange and COP under different power.

另外, 分析冷端的性能因子, 如图 4(d) 所示. 结果显示随着电压增大, 冷端的性能系数 COP_c 也在下降, 原因和上述 COP^* 的类似. 但 COP_c 的值在 0.36 左右, 相比于系统的整体性能系数 COP^* 较低, 这也体现该系统相比于制冷应用的优势, 利用冷热两端的热量, 性能系数高. 热端的性能系数可以用两者的差值来表示, 在 0.5 左右, 可以发现热端的热能利用对于系统的性能系数提高具有重要影响.

3.2 热电机数量对系统性能的影响

对工作的半导体数量进行分析, 分析不同半导体热电机数量同时工作的影响, 采用 3 个、6 个、8 个、10 个分别进行测试. 上述已经分析 10 个半导体热电机在不同功率下空气温度和能量利用率的情况, 同样, 在不改变实验系统结构的条件下, 分别对 3 个、6 个、8 个半导体热电机工作时进行测试, 对不同输入功率进行测量.

在电压不变时, 以输入电压 1.3 V 为例, 结果

如图 5 所示. 随着半导体热电机工作数量的增加, 热端温度也逐渐上升, 冷端温度有一些降低, 从 3 级到 10 级, 热端温度有 10—20 °C 的上升, 在功率大的时候增大的幅度更大, 冷端温度有 5—10 °C 的下降. 从温度的角度去理解, 可以发现半导体热电机数量增加对系统是有利的, 热端温度更高消杀效果更佳, 冷端温度低便于后续の利用. 但工作的级数相对较少时, 比如仅 3 级工作, 将不同电压下的热端温度、冷端温度进行比较, 随着输入功率增大, 热端温度从 48.9 °C 升至 58 °C, 消毒效果不太理想, 冷端出口温度也有略微升高, 从 38.8 °C 升至 45.3 °C, 主要原因是工作的数量少, 加热和冷却的距离短. 所以需要根据需求选择合适的半导体热电机数量.

对于 COP^* 的情况, 如图 5(b) 所示. 可以发现, 在电压不变时, 随着半导体热电机工作数量的增加, COP^* 的值呈现出先下降后上升的情况, 变化幅度不明显, 即半导体热电机工作级数的多少对系统 COP^* 的影响较小. 主要的原因是从空气温度随

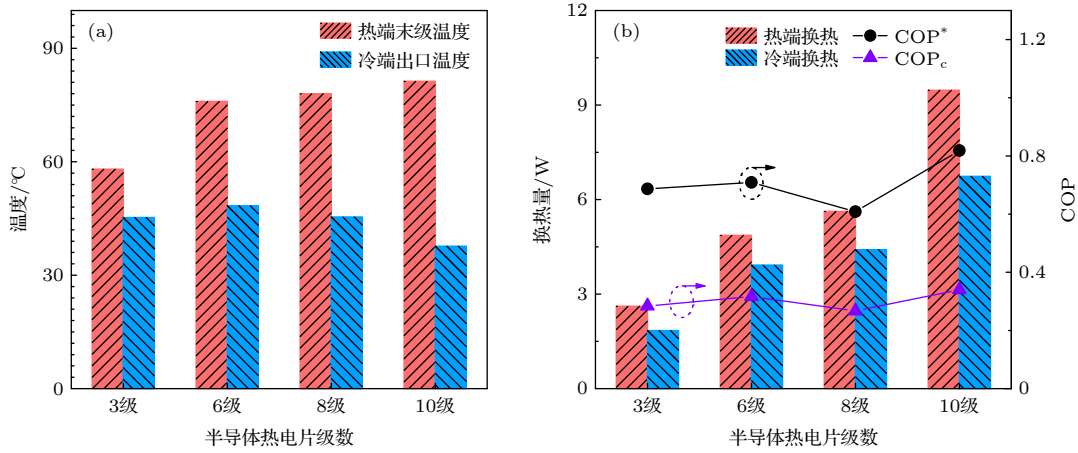


图 5 不同半导体热电片数量工作的影响 (电压 1.3 V) (a) 温度比较; (b) 换热量和性能系数

Fig. 5. The effect of the number of different semiconductor thermoelectric sheets (voltage 1.3 V): (a) Comparison of temperature; (b) heat exchange and COP.

流动位置 x 的变化可以看出, 基本是一个类似于线性的变化, 改变工作级数就改变加热和冷却的长度. 半导体热电片数量增加后, 空气流动距离增大, 加热和冷却的长度增大, 温度变化增大导致换热量增大, 与此同时半导体热电片数量增加, 耗电功率也增大, 多一块半导体热电片就多一份功耗, COP^* 基本维持在 0.8 左右. 对于冷端的性能系数 COP_c , 可以发现随着级数增加, 也基本影响较小.

3.3 空气流量对系统性能的影响

空气流量的大小也是影响系统温度和 COP^* 的重要因素, 调节风扇的工作电压来改变风扇的工作点, 进而改变实验系统入口的空气流量. 在风扇工作的额定电压范围内, 选取 6 组不同的流量, 半导体热电片工作数量为 10 级, 每级的电压为 1 V, 流量计监测流量的大小, 依次改变流量为 1.39 L/min, 3.03 L/min, 4.79 L/min, 5.74 L/min, 7.52 L/min, 8.91 L/min, 用电偶测量系统内部空气在不同位置处的温度, 并进行仿真计算与实验的结果进行比较.

图 6(a) 所示流量为 7.52 L/min 的实验测量和计算结果. 结果显示仿真计算的温度与实验测量的温度相一致. 从图 6 可以发现, 空气温度在热端逐渐升高, 在冷端逐渐降低, 实现热端加热消毒和冷端冷却的功能. 将不同流量下的热端温度、冷端温度进行比较, 如图 6(c) 所示. 随着流量增大, 热端温度呈现出先上升后几乎稳定不变, 再降低的趋势, 从 51.6 °C 升至 58 °C 左右, 流量为 8.91 L/min 时

温度降到 49.5 °C. 原因是流量增大时, 一方面是空气与壁面的换热系数增大, 这可从一些 Nu 与 Re 相关的实验经验公式中理解 [33,34], 经验公式中雷诺数的指数都大于 0, 换热增强温度就会升高. 另一方面流量增大, 流速继续增大, 空气流动过程中与壁面接触的时间短, 所以温度又降低, 若再进一步增大流量, 热端温度会进一步降低, 温度低于 56 °C 就会影响消毒的效果. 冷端出口温度几乎保持不变, 维持在 30 °C 左右, 计算的不同流量下的温度云图如图 6(b) 所示.

换热量和 COP^* 的结果如图 6(d) 所示, 在测试的流量范围内, COP^* 和 COP_c 随着流量增大而增大, COP^* 从 0.13 增至 0.98, COP_c 从 0.035 增至 0.41, 增大的原因主要是流量增大引起的换热量增大, 在温差相差不大和耗电功率几乎不变时 COP 就增大. 上面的温度分析可知, 流量进一步增大, 温度变化就会减小, 因而随着流量继续增大, 换热量和 COP^* 会呈现先上升再下降的趋势, 这里由于风扇工作电压的限制, 并没有实际测试更大流量的工况, 主要是流量为 8.91 L/min 时热端温度仅有 49.5 °C, 继续增大流量达不到消毒的效果, 因此满足消毒的要求是首先要考虑的, 在满足的同时要尽可能提高 COP^* .

3.4 保温对系统性能的影响

通过上面的计算发现, 制作的实验测量系统的能量利用率 COP^* 值与 Ji 等 [31] 绝热边界条件下的 COP^* 值相比并不是很高, 可能的原因是输入功

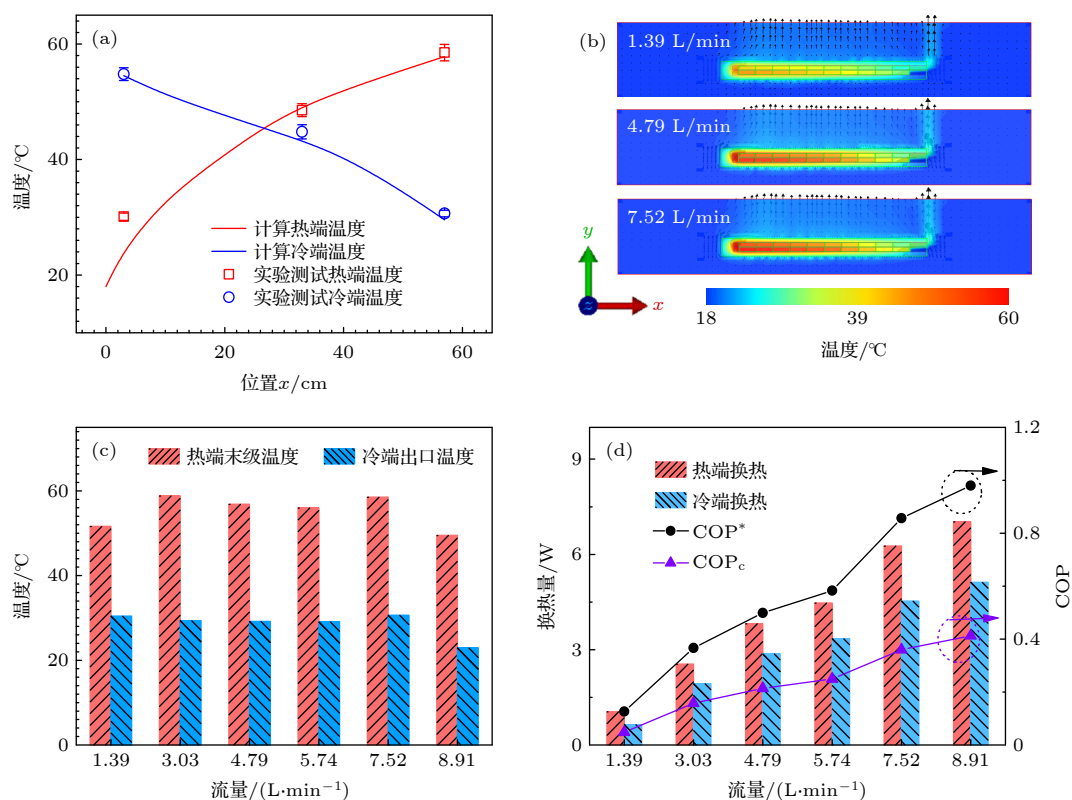


图 6 (a) 流量为 7.52 L/min 温度测试和计算; (b) 不同空气流量下的温度云图; (c) 不同空气流量下的温度; (d) 不同空气流量下的换热量和 COP^*

Fig. 6. (a) Temperature test and calculation with a flow rate of 7.52 L/min; (b) temperature cloud diagram under different air flow rates; (c) temperature under different air flow rates; (d) heat exchange and COP^* under different air flow rates.

率中有部分会散失到环境当中. 为探究边界散热的影响, 如图 2(d) 所示在实验测量系统外侧再包裹一层泡沫材料, 厚度从 1.5 cm 增加至 3 cm. 从而增加内部与环境的热阻, 用于减少热量损失.

保温层加厚后, 分别对 6 个、8 个、10 个半导体热片工作进行测试, 改变工作的半导体热片功率, 结果如图 7(c) 所示. 工作级数为 6 级时, 加保温层后电压 1 V 时热端温度可达 64.3 °C, 冷端出口温度 42.2 °C, 电压 1.2 V 时热端温度可达 79.6 °C, 冷端出口温度 47 °C. 可以发现, 在相同功率时, 加保温层后系统的热端温度更高, 这个很容易理解, 加厚保温层热阻增大, 散失到环境中的热量减小, 内部空气可以获得更多的热量提高自身的热能, 所以温度升高.

同样测量工作数量分别为 8 级和 10 级的加保温层后的工况, 结果如图 7(c) 所示. 在输入电压分别为 1 V 和 1.2 V 时, 8 级加厚保温层后的热端温度可达 69.9 °C 和 82.5 °C, 10 级的加厚保温层后的热端温度可达 67.4 °C 和 82.6 °C, 同样可以发现加保温层后热端温度是升高的, 升高 15% 左右. 热

端温度升高对系统的热端消毒是有利的, 即加厚保温层是有利于消毒效果.

上述流量的影响分析流量增大后热端温度就会影响消毒效果, 如空气流量为 8.9 L/min 时热端温度低于 50 °C. 加上保温层之后进行测试, 测试和计算结果如图 7(a) 所示. 加厚保温层后, 空气温度在热端不断升高, 在冷端逐渐降低, 实现热端加热消毒和冷端冷却的功能. 发现热端温度升高至 56.9 °C, 即加厚保温层对较大流量的温度条件也有利. 计算温度分布云图如图 7(b) 所示, 可以发现加厚保温层后, 高温区域范围增大, 有利于病毒的消毒.

将加厚保温层的结果与未加厚保温层的不同工况结果进行比较, 温度结果如图 7(c) 所示. 分析可以发现, 在工作级数、空气流量、输入功率某个因素相同时, 加厚保温层后的系统热端温度都有所提高, 热端温度比加厚保温层之前提高 10 °C 左右, 冷端温度仅提高 2—5 °C, 这有利系统温度的条件.

能量利用率 COP^* 的结果如图 7(d) 所示. 柱状图比较可以观察到加厚保温层后的系统能量利

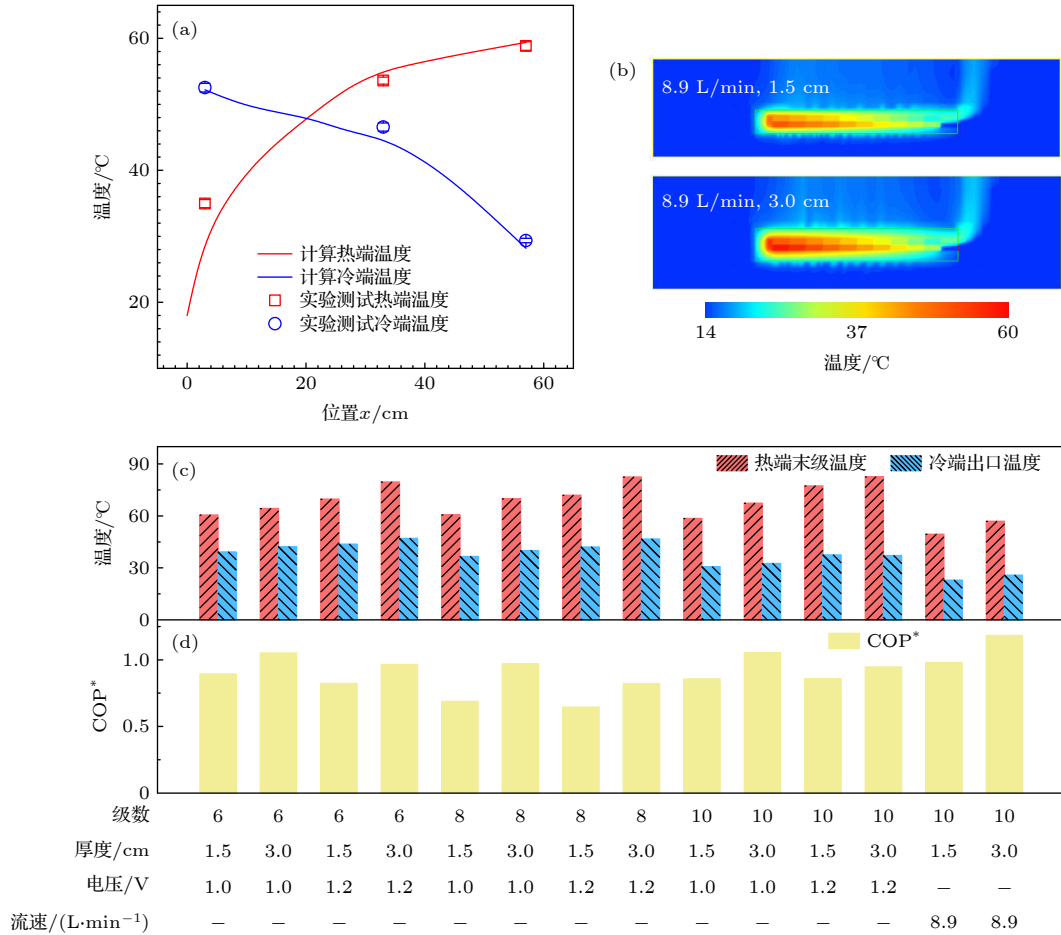


图 7 (a) 流量为 8.91 L/min 温度测试和计算; (b) 保温层加厚前后的温度云图; (c) 不同工况下加厚保温层前后的温度对比; (d) 不同工况下加厚保温层前后的 COP* 对比。

Fig. 7. (a) Temperature test and calculation with a flow rate of 8.91 L/min; (b) temperature cloud diagram before and after thickening of the thermal insulation layer; (c) comparison of temperatures before and after thickening the thermal insulation layer under different working conditions; (d) comparison of COP* before and after thickening the thermal insulation layer under different working conditions.

用率也有所提高, 从 0.8 提高到 1 左右, 提高幅度在 25% 左右, 尽管绝对值提高并不明显, 但也为系统的研究提供一种新的改进和优化的方向, 即增大系统的热阻、减小漏热损失是该系统实际应用的一个重要的因素。

3.5 系统散热分析

上面分析系统的输入功率并没有完全转化为空气的内能, 即系统边界存在散热, 有部分热量散失到环境中, 对具体散失的热量进行定量的计算和分析。通过两种方式进行计算, 第一种是直接计算, 从散热途径去考虑, 包括导热对流和辐射散热, 对流换热的方式是计算系统的热阻, 系统的热阻包括导热热阻和对流换热热阻, 再根据内部平均温度与环境温度的温差计算得到散热量; 辐射换热是根据

辐射换热四次方公式。另一种计算方式是根据能量守恒的原理, 根据热电偶测试的温度进行计算, 空气的内能增大, 即输入功率空气获得的内能, 再用总消耗的输入功率减去空气获得的能量就是散热量。

选取几个代表性的工况进行分析, 计算结果如图 8 所示, 包含工作级数、输入功率、保温层厚度、空气流量几个因素。首先, 可以发现两种方式计算的散热量的总值接近, 也就验证两种计算方式是正确的。其次, 通过两种计算方式可以知道总的散热量之外, 还可以知道辐射散热量的值, 如图 8 中橙色的柱, 可以发现辐射散热的值与导热对流散热的值处于相同的量级, 在研究自然对流散热时往往辐射的影响不能忽略。然后, 不同工况下系统内部平均温度越高, 散失到环境中的热量越多, 这个可以

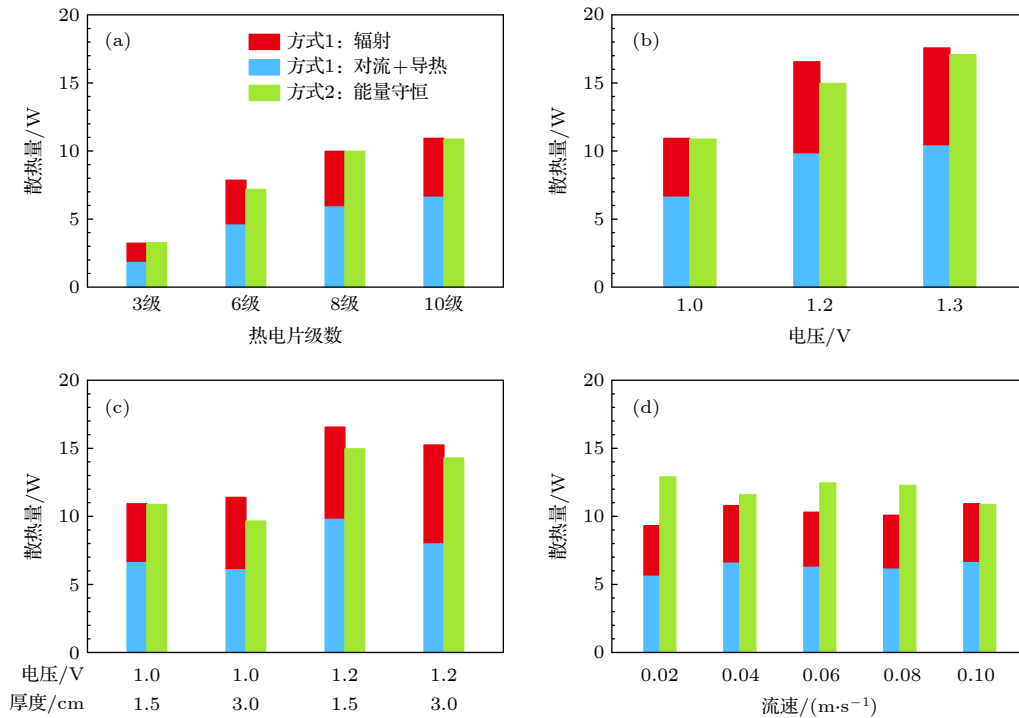


图 8 散热量计算 (a) 不同工作级数的影响 (其他因素是流速 0.1 m/s, 电压 1.0 V, 保温层厚度 1.5 cm); (b) 不同电压的影响 (其他因素是 10 级工作, 流速 0.1 m/s, 保温层厚度 1.5 cm); (c) 不同保温厚度的影响 (其他因素是 10 级工作, 流速 0.1 m/s); (d) 不同流速的影响 (其他因素是 10 级工作, 电压 1.0 V, 保温层厚度 1.5 cm)

Fig. 8. Heat dissipation calculation: (a) Influence of different working stages (other factors are flow velocity 0.1 m/s, voltage 1.0 V, insulation layer thickness 1.5 cm); (b) influence of different voltages (other factors are 10-stage operation, flow velocity 0.1 m/s), the thickness of the insulation layer is 1.5 cm); (c) the influence of different insulation thickness (other factors are 10-level work, the flow rate is 0.1 m/s); (d) the influence of different flow rates (the other factors are 10-level work, the voltage is 1.0 V, The thickness of the insulation layer is 1.5 cm).

理解为从系统内部到外部环境热阻变化不大, 内外温差越大, 散失到环境中的热量越多. 最后, 从计算的散热量值可以发现, 对于每一个工况而言, 散失到环境的热量占整个耗电输入功率的 90%, 相当大比例的能量被浪费, 原因还是多级系统的边界与大环境接触的面积较大, 系统的热阻相对较小. 这就需要在满足温度要求的同时, 要尽可能增大系统的热阻减小散热损失, 从而提高 COP*.

实验测试系统有热量散失, 但从温度的角度去理解, 热端温度可以达 60—90 °C, 冷端出口温度在 40 °C 左右, 增大功耗同样可以实现热端升温大热消毒冷端降温. 将耗功和 COP* 与 Ji 等 [31] 绝热边界进行比较, 温升变化大致相等, 结果如图 9 所示. 可以发现, 加厚保温层后散失到环境中的热量越少, 达到相同温度所需的总耗功率越小, 流速为 0.1 m/s 时的绝热边界耗功仅 1 W, 比相同情况的实验测试系统耗功节省 10 W, 因而 COP* 也可提高约 10 倍左右. 即图中 3 种工况, 实际工况加厚保温层前后, COP* 的值从 0.85 增至 1.05, 绝热边

界工况增至 9.2. 对于空气流量更大的情况, 笔者前期工作 [31] 计算绝热边界流速为 0.5 m/s 的工况, 需要更多的功耗, 因而 COP* 会降低, COP* 的值为 5.76. 另外还计算绝热边界下使用 ZT 值更大的热电材料 $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$, 在流速为 0.5 m/s 时, COP* 的

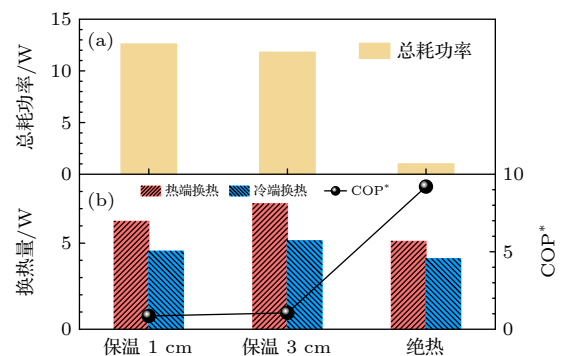


图 9 绝热边界与实际比较 (a) 耗功比较; (b) 换热量和 COP* 比较

Fig. 9. Comparison of adiabatic boundaries with reality: (a) Comparison of power consumption; (b) comparison of heat exchange and COP*.

值为 7.43. 因此, 增大系统的热阻减小散热损失、使用 ZT 值更大的热电材料, 对这个系统的应用更有利, 在该领域有更好的效果和应用前景.

4 总结和展望

本文通过数值计算和实验测量, 研究了热电空气加热与冷却一体式消毒系统的传热特性, 对半导体热电的应用进行扩展.

从温度角度验证了该系统的可行性, 并研究多个参数对系统能量利用率的影响:

1) 输入功率的影响. 随着输入功率增大, 热端温度从 58.5 °C 升至 81.3 °C, 高温对消毒效果有利, 但总能量利用率 COP^* 会有略微降低.

2) 热电片级数的影响. 工作级数从 3 级到 10 级, 热端温度上升 10—20 °C, 升温效果更佳. 同时, 冷端温度下降 5—10 °C, 利于空气降温. 系统总能量利用率数值变化不大.

3) 流量的影响. 测试的入口空气流量范围为 1.39—8.91 L/min. 随着流量的增大, 热端温度先从 51.6 °C 升至 58 °C, 后降至 49.5 °C. 在测试的流量范围内, COP^* 随着流量增大从 0.13 升到 0.98.

4) 边界保温的影响. 加保温层对系统工作有利, 热端温度比加保温层之前提高 10 °C 左右, 冷端温度仅提高 2—5 °C. COP^* 数值比不添加保温层也增大 20%, 减小系统与环境的漏热可明显提高能量利用率.

本文研究的热电消毒系统既能够对空气加热 (可用于消毒), 并进行冷却降温至舒适温度. 该系统具有: 体积小、易扩展和组装、无噪音、可靠性高、易控制等特点, 在空气消毒领域具有应用潜力. 本文仅从传热和能量相关角度进行验证和分析, 具体消毒效果需要结合医学应用进一步研究. 本文相关系统设计和内容受专利保护^[35–37].

参考文献

- [1] Baize S, Pannetier D, Oestereich L, Rieger T, Koivogui L, Magassouba N F, Soropogui B, Sow M S, Keita S, De Clerck H 2014 *N. Engl. J. Med.* **371** 1418
- [2] Feldmann H, Geisbert T W 2011 *The Lancet* **377** 849
- [3] Chidlow G, Harnett G, Williams S, Levy A, Speers D, Smith D W 2010 *J. Clin. Microbiol.* **48** 862
- [4] Hurt A C, Ernest J, Deng Y M, Iannello P, Besselaar T G, Birch C, Buchy P, Chittaganpitch M, Chiu S C, Dwyer D 2009 *Antiviral Res.* **83** 90

- [5] Ferguson N M, Keeling M J, John Edmunds W, Gani R, Grenfell B T, Anderson R M, Leach S 2003 *Nature* **425** 681
- [6] Gani R, Leach S 2001 *Nature* **414** 748
- [7] Control C F D 2011 *MMWR Morb. Mortal. Wkly. Rep.* **60** 1618
- [8] Douek D C, Brenchley J M, Betts M R, Ambrozak D R, Hill B J, Okamoto Y, Casazza J P, Kuruppu J, Kunstman K, Wolinsky S 2002 *Nature* **417** 95
- [9] Stadler K, Masignani V, Eickmann M, Becker S, Abrignani S, Klenk H-D, Rappuoli R 2003 *Nat. Rev. Microbiol.* **1** 209
- [10] Fouchier R A, Kuiken T, Schutten M, et al. 2003 *Nature* **423** 240
- [11] Prather K A, Wang C C, Schooley R T 2020 *Science* **368** 1422
- [12] Chen N, Zhou M, Dong X, Qu J, Gong F, Han Y, Qiu Y, Wang J, Liu Y, Wei Y 2020 *The Lancet* **395** 507
- [13] World Health Organization. Coronavirus disease (COVID-19) <https://www.who.int/emergencies/diseases/novel-coronavirus-2019> [2022-02-20]
- [14] <https://coronavirus.app> [2022-02-20] (in Chinese) [疫情监测 <https://coronavirus.app> [2022-02-20]]
- [15] Liu Y, Xie S S, Yang K, Cao Q L, Tian B P, Wang M G 2017 *Occupat. Health* **33** 1422 (in Chinese) [刘洋, 谢珊珊, 杨凯, 曹巧玲, 田葆萍, 王木根 2017 职业与健康 **33** 1422]
- [16] Boo Y C 2020 *Antioxidants* **9** 637
- [17] Narayanan D L, Saladi R N, Fox J L 2010 *Int. J. Dermatol.* **49** 978
- [18] Yap T F, Liu Z, Shveda R A, Preston D J 2020 *Appl. Phys. Lett.* **117** 060601
- [19] Burton J, Love H, Richards K, Burton C, Summers S, Pitman J, Easterbrook L, Davies K, Spencer P, Killip M 2021 *J. Virol. Methods* **290** 114087
- [20] Wang T T, Lien C Z, Liu S, Selvaraj P 2020 MedRxiv 10.1101/2020.04.29.20085498 [Physics]
- [21] Pastorino B, Touret F, Gilles M, de Lamballerie X, Charrel R N 2020 BioRxiv 10.3390/v12060624 [physics]
- [22] Chin A W, Chu J T, Perera M R, Hui K P, Yen H-L, Chan M C, Peiris M, Poon L L 2020 *The Lancet Microbe* **1** e10
- [23] Pratelli A 2008 *Vet. J.* **177** 71
- [24] Darnell M E, Subbarao K, Feinstone S M, Taylor D R 2004 *J. Virol. Methods* **121** 85
- [25] Charm S E, Landau S, Williams B, Horowitz B, Prince A M, Pascual D 1992 *Vox Sang.* **62** 12
- [26] Trancossi M, Carli C, Cammistraro G, Pascoa J, Sharma S 2021 *Int. J. Heat Mass Transf.* **170** 120983
- [27] Yu L, Peel G K, Cheema F H, Lawrence W S, Bukreyeva N, Jinks C W, Peel J E, Peterson J W, Paessler S, Hourani M 2020 *Mater. Today Phys.* **15** 100249
- [28] Correia G, Rodrigues L, Da Silva M G, Gonçalves T 2020 *Med. Hypotheses* **141** 109781
- [29] Rezaei N, Jafari M, Nazari A, Salehi S, Talati F, Torab R, Nejad-Rahim R 2020 *AIP Adv.* **10** 085308
- [30] Shan X, Zhang H, Liu C, Yu L, Di Y, Zhang X, Dong L, Gan Z 2020 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **12** 56579
- [31] Ji R, Pan T, Peng G, Ma J, Yang N, Hao Q 2021 *Mater. Today Phys.* **19** 100430
- [32] Simons R, Ellsworth M, Chu R 2005 *J. Heat Transfer* **127** 76
- [33] Han J, Park J S, Lei C 1985 *J. Eng. Gas Turbines Power* **107** 628
- [34] Han J, Park J S 1988 *Int. J. Heat Mass Transf.* **31** 183
- [35] Yang N, Hao Q, Ji R C 2021 *Chinese Patent* CN 214 746 278 U (in Chinese) [杨诺, 郝馨, 季仁才 2021 中国专利 CN 214 746 278 U]

[36] Yang N, Hao Q, Ji R C Wang Y P Li Z W 2021 *Chinese Patent* CN 119 211 14 B(in Chinese)[杨诺, 郝馨, 季仁才, 王云鹏, 李忠伟 2021 *Patent* CN11921114 B]

[37] Yang N, Hao Q, Ji R C Ding Z D 2021 *Chinese Patent* CN 112 089 882 B (in Chinese) [杨诺, 郝馨, 季仁才, 定志东 2021 *Patent* CN112089882 B]

SPECIAL TOPIC—Nano engineering and thermophysics

Thermoelectric air disinfection system

Ji Ren-Cai¹⁾ Peng Gui-Long¹⁾ Xu Zhen-Wei¹⁾ Yang Nuo^{1)†} Hao Qing^{2)‡}

1) (*School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China*)

2) (*Department of Aerospace and Mechanical Engineering, University of Arizona, Tucson, Arizona 85721-0119, United States of America*)

(Received 20 April 2022; revised manuscript received 19 June 2022)

Abstract

Epidemic viruses seriously affect human health and the normal operation of society, so it is particularly important to effectively kill viruses. In this work, the thermal performance of a thermoelectric air disinfection system are studied. Utilizing the characteristics of semiconductor thermoelectric sheets with both cold and hot ends, the system can increase the air temperature by heating (could be used in sterilization), and then, reduce the temperature of the air by cooling. The measurement results show that the air temperature can be increased to 80 °C first, and then cooled to 35 °C. The total energy utilization rate of the system can reach up to 1.2. In addition, combined with the measurement results and numerical calculations, the parameters such as the number of thermoelectric element series, input power, air flow, and boundary insulation can be used to analyze their effects on the system performance. The system may have broad potential applications in public health, medical care, and household disinfection.

Keywords: semiconductor thermoelectricity, air disinfection, COP*, COVID-19

PACS: 84.60.Rb, 85.80.Fi, 44.15.+a, 44.25.+f

DOI: 10.7498/aps.71.20220757

† Corresponding author. E-mail: nuo@hust.edu.cn

‡ Corresponding author. E-mail: qinghao@email.arizona.edu

热电空气消毒系统

季仁才 彭桂龙 徐振伟 杨诺 郝馨

Thermoelectric air disinfection system

Ji Ren-Cai Peng Gui-Long Xu Zhen-Wei Yang Nuo Hao Qing

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 168401 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20220757

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220757>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

评估新型冠状病毒地区防控效果的一种近似方法

Approximate method to evaluate the regional control efficacy of COVID-19

物理学报. 2020, 69(10): 100201 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200441>

新型冠状病毒肺炎早期时空传播特征分析

Analysis on early spatiotemporal transmission characteristics of COVID-19

物理学报. 2020, 69(8): 080701 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200285>

流感病毒和冠状病毒的细胞表面结合与内化

Influenza virus and coronavirus: Cellular binding and internalization

物理学报. 2020, 69(20): 208701 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20201161>

稀薄空气中圆柱腔体内系统电磁脉冲的混合模拟

Hybrid modelling of cavity system generated electromagnetic pulse in low pressure air

物理学报. 2022, 71(5): 055201 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211524>

新型冠状病毒肺炎的流行病学参数与模型

Epidemiological parameters and models of coronavirus disease 2019

物理学报. 2020, 69(9): 090202 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200389>

基于连续感染模型的新冠肺炎校园传播与防控策略分析

Analysis of COVID-19 spreading and prevention strategy in schools based on continuous infection model

物理学报. 2020, 69(24): 240201 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20201106>