

DOI: 10.3969/j.issn.1009-9492.2017.03.002

# 大功率LED灯具与热泵相结合的光热综合节能技术研究\*

岑继文<sup>1</sup>, 廖少雄<sup>2</sup>, 李志斌<sup>1</sup>, 王亦伟<sup>1</sup>, 蒋方明<sup>1</sup>, 梁富文<sup>2</sup>, 刘培<sup>1</sup>

(1. 中国科学院广州能源研究所, 广东广州 510640; 2. 广州虎辉照明科技公司, 广东广州 510170)

**摘要:** LED将在本世纪全球范围内快速发展成为主流照明光源。LED是冷光源, 热量不能以红外线的形式辐射出来, 而聚集在灯具内, 可以利用这个特性很好地利用LED灯具热量。提出采用热泵技术与LED相结合进行光热的同时综合利用, 这样LED消耗的电能将充分被利用。同时以高杆灯为实例进行了相关实验, 分析了冷却水流量和LED灯具功率等参数对系统性能的影响。实验结果表明: 与热泵相结合后, 大功率LED灯具能够起到很好的节能效果, 能源得以充分利用, 为后续的产品开发起到指导作用。

**关键词:** LED; 热泵; 光; 热; 节能

中图分类号: TM923.3 文献标识码: A 文章编号: 1009-9492(2017)03-0006-05

## Research on the Comprehensive Light and Heat Energy Saving System of Large LED Lamp Combined with Heat Pump

CEN Ji-wen<sup>1</sup>, LIAO Shao-xiong<sup>2</sup>, LI Zhi-bin<sup>1</sup>, WANG Yi-wei<sup>1</sup>, JIANG Fang-ming<sup>1</sup>,  
LIANG Fu-wen<sup>2</sup>, LIU Pei<sup>1</sup>(1. Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;  
2. Guangzhou Tigerhead Lighting Technology Co., Ltd., Guangzhou 510170, China)

**Abstract:** LED will become the primary light source in this century. LED is cold light source, that is, the heat can not be radiated by infrared ray but collected inside the lamp. Then, according to the characteristic of the LED and we can utilize its heat. In this paper, we propose to use heat pump to recover the LED heat. By this method, the energy consumption of the LED lamp is fully utilized. At the same time, experiment was carried out with a prototype of high-pole LED lamp combined with heat pump. The effects of some parameters, such as cooling water flow rate and LED power, on the system performance is analyzed. The experimental results show that the combined system is good for energy saving. The results are helpful for further product development.

**Key words:** LED; heat pump; light; heat; energy saving

### 0 引言

LED(Light Emitting Diode, 称发光二极管), 属于固态光源, 具有非常好的节能环保优势, 相同光效下耗能仅为白炽灯的10%~20%, 被誉为“21世纪的照明新光源”, 近年来已经成为研究和开发热点<sup>[1]</sup>。与传统光源相比, 半导体光源有节能、高效、体积小、寿命长、响应速度快、驱动电压低、抗震动等优点。

LED发光机理是靠电子在能带间跃迁产生光, 其光谱中不包含红外部分, 所以其热量不能靠辐射散出, 所以说LED是‘冷’光源。但是,

目前LED的发光效率仅能达到10%~20%, 还有80%~90%的能量转变成了热量。若不加散热措施, 则大功率LED的器芯温度会急速上升, 当其结温上升超过最大允许温度时(一般是150℃), 大功率LED会因过热而损坏。

LED光源的这个特性对半导体器件来说是一个缺点, 必须做好散热措施以保证器件寿命。很多文献<sup>[1-9]</sup>报导了如何提高灯具的散热效果, 以延长LED灯具寿命。

市场上普遍传统的LED散热方式是铝翅片散热器散热, 如Dong<sup>[2]</sup>等人对LED球泡灯的铝散热

\* 广州市科技计划项目(编号: 201604010018)

收稿日期: 2016-12-16

器结构如翅片长短、间隔密度进行了参数对比优化研究。夏国栋<sup>[3]</sup>等人制作了一种一体化平板热管用于解决LED散热问题。研究表明平板热管具有良好的均温性。涂娟<sup>[4]</sup>等研究了半导体热电制冷器应用于LED灯具散热的情况，结果表明热点制冷器降温效果十分明显。Tang<sup>[5]</sup>等人开发了一种新颖的柱状热管引线框架，高功率LED直接封装在框架上面，测试结果表明其散热性能远高于铜引线基板。Deng<sup>[6]</sup>等人采用液态金属作为冷媒对高功率LED进行冷却。经过与水冷技术进行对比发现液态金属冷却是一种非常优良的LED灯具冷却技术。Lin<sup>[7]</sup>等人在铝板上加工槽道形成脉动热管用于LED灯具散热，取得良好效果。Dong<sup>[8]</sup>等人采用离子风技术对LED灯具进行散热，并对其进行CFD理论计算分析和实验验证，阐述了离子风应用于LED灯具散热的优越性。以上这些方法是避免LED节温过高而提高LED散热效果，将热量高效散入周边环境中的各种技术。而针对LED灯具热量对周边温度影响的考虑，Ahn<sup>[9]</sup>等人提出将室内照明LED灯具与建筑物的通风空调系统结合起来设计，即将LED散热器置于冷气通风风道中，避免了LED产生的热量对室内直接加热，从而减少了建筑物的制冷功耗，达到综合节能减排的效果。

但反过来从热利用这一角度来看，也许是一个优点，它帮我们把热量收集了起来，不像白炽灯一样把热量以红外线的方式向空间辐射。LED灯具这个收集热量的特性为LED灯具的余热利用提供了方便。

LED灯具要保持较低的温度，提供的余热温度不可能太高，而热泵是一种热量温度提升的优良系统，因此本文提出并实验测试了将热泵系统与大功率LED灯具相结合，既有效冷却LED灯具，又通过热泵收集灯具余热制出可用的温度较高的热水。这样，LED消耗的电能得到了接近百分之百的利用，

进一步提高其节能减排的效益。

## 1 实验系统及工作原理

本文的热泵技术回收大功率LED灯具余热实验系统以高杆灯系统作为研究对象，实验测试系统如图1所示。

如图1所示，该系统由LED灯具兼蒸发器、回油调节阀、压缩机、冷凝器、膨胀阀以及各连接管路组成等构成。灯体做的蒸发器是一个密闭半球的结构，半球的半径为420 mm，在半球倒立着，半球底面朝上，离半球顶面往下约160 mm的位置，围着半球表面布置了6个直径为38 mm的圆形开口，开口为LED发光模块安装处，采用法兰加密封圈的方式LED铝基板背面正好将几个正方形开口掩盖密封，这样蒸发器腔体中的制冷剂就可以直接与LED铝基板背面接触换热。在进行不同加热实验中，为了实验方便，LED发光模块用一铝块中间插上两根加热棒代替，这样可以在实验中精确的计量加热量。在实验过程中灯具外表面和各冷媒管道全部用保温材料包裹，防止其与环境进行热交换。压缩机型号为日立G533QB1Z，额定功率953 W；冷凝器为一个套管式换热器，加热自来水。该换热器为杭州沈式换热器公司生产的套管式换热器，型号为：QH2P286254，外管直径38 mm，内管直径22 mm，换热面积约为1 m<sup>2</sup>，管层走水，壳层走制冷剂。膨胀阀为一针阀代替。各部件用8 mm直径铜管连接，在多处布置（见图1）k型热电偶测温，高低压侧用压力传感器测压，压力传感器型

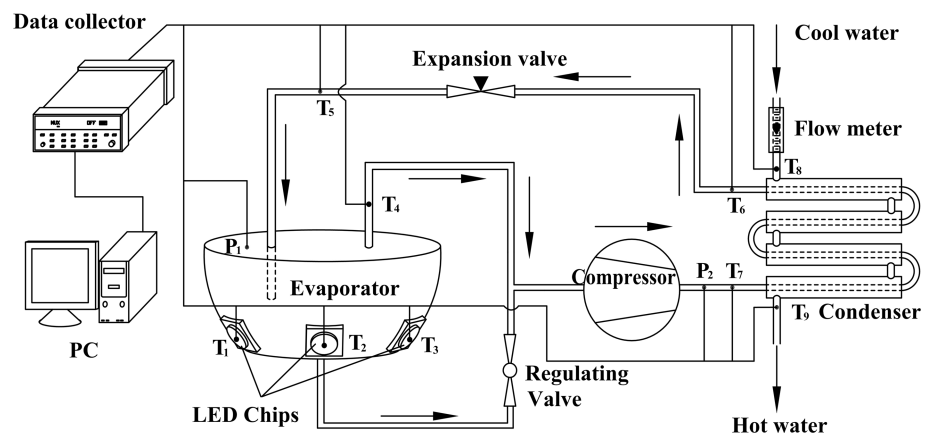


图1 利用热泵技术回收大功率LED灯具余热实验系统示意图

号为。温度和压力信号由安捷伦数据采集仪器采集，后传入计算机进行数据存储和处理。

本系统的工作过程是：从膨胀阀流出的低温冷媒分别进入LED灯具兼蒸发器，冷媒从中吸收热量，相变汽化制冷。使LED灯具能够维持在合理温度范围内。这个合理温度是通过膨胀阀的节流开度来实现的。膨胀阀可以是热力膨胀阀，也可以是电子膨胀阀等带控制功能的膨胀阀。吸热汽化后的冷媒被吸入压缩机吸气口进行蒸汽压缩成为高温冷媒，随后进入水冷冷凝器进行冷凝，从而制热水。从冷凝器出来的冷媒进入膨胀阀膨胀，从而完成循环。本实例以LED高杆灯为设计目标，灯具的结构形式是一个半球状的密闭腔体，腔体周围布置多孔洞，孔洞由LED发光模块基板密封堵上。冷媒充注量最好能使得系统工作时，液态的制冷剂能够浸没孔洞LED发光模块基板背面，这样液态制冷剂在基板背面吸热沸腾产生蒸汽，而蒸汽是自然往上走的，因此冷媒的进口和出口均在灯具半球结构的上方，但这样的系统所需的润滑油会沉积在蒸发器半球结构的底部，因此为了解决蒸发器积油的问题，在灯具半球的底部设置出油口，通过一个回油调节阀调节出油量，并与压缩机进气管道相连。回油调节阀用于控制和避免液态制冷剂从蒸发器出油口流出。

## 2 结果和讨论

图2为冷却水流量对LED基板温度的影响。随着冷却水流量的增加，LED基板温度略微降

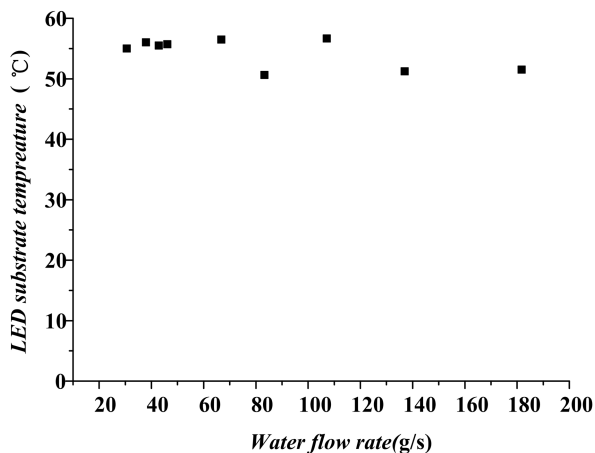


图2 不同水流量下LED基板温度 (总加热功率1 600 W)

低，但降低幅度不大。这可能是由于这些流量下冷凝器的水侧表面换热系数已经趋于饱和，即使

增大流速，也不能大幅度增加冷凝器总换热量。然后冷凝器换热量变化幅度不大，进入节流入口的冷媒温度也没有随着冷却水流量的增加而减小很多，因而通过节流后进入蒸发器的冷量也自然不会增大太多，即蒸发器蒸发温度降幅不大，进而使得LED基板温度变化不大。该特性使得人们更加方便地使用这种光热节能综合利用系统，在需要高水温的时候减小冷却水流量，却不会导致LED灯具芯片温度很大程度上恶化。

图3显示不同冷却水流量下出水温度随着水流量的增大迅速衰减接近进水温度，按照换热器能量平衡原理，其原因是显而易见的。总加热功率为1 600 W的情况下，水流量在30 g/s以内才能达到近50 °C的生活常用热水温度。

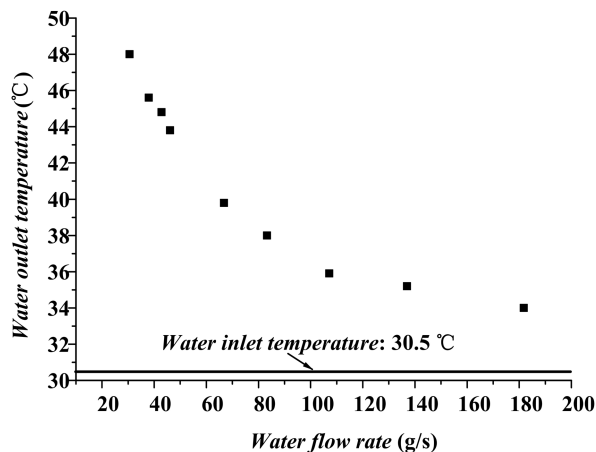


图3 不同水流量下出水温度 (总加热功率1 600 W)

图4显示了不同冷却水流量对压缩机功耗的影响。由4图可知，随着水流量的加大，压缩机

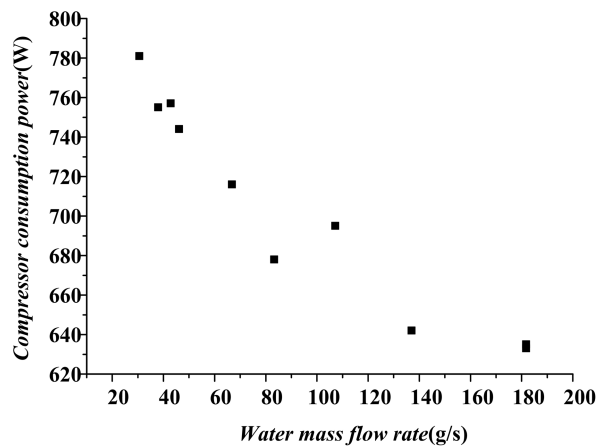


图4 不同水流量下压缩机功耗 (总加热功率1 600 W)

功耗逐渐降低，但降低幅度随着水流量的增加而逐渐减弱。这样对系统工作效率来说，水流量越大越好，但是由图2可知水流量越大，出水温度迅速降低，如果水温不够高，温水的可利用性越差，应用范围越窄。因而需要进行权衡，在满足用水温度的情况下，尽量增加水流量，但不可无限增大。由于水流量的增大使得冷凝器换热增加了，进而使得冷凝器冷媒侧饱和温度降低，其对应的饱和压力也随之降低。这样降低了压缩机的出口压力，降低了压比，从而使得压缩机的功耗降低。

图5为冷却水流量对热泵系统COP的影响情况。从图可知，随着水流量的增加COP逐渐增大，而增大的幅度随着流量加大而减少。从30 g/s到140 g/s的流量使得COP从2.8升至约3.7，增幅较为明显。其原因与图3相似，主要是冷却水流量增大降低了压缩机功耗，而总产热量是来自基本固定不变的LED灯具发热量加上压缩机功率的部分能量转换为热，根据COP定义即总产热量与压缩机功率之比，则COP升高。COP越高，整套LED与热泵相结合的综合节能效应更为明显。

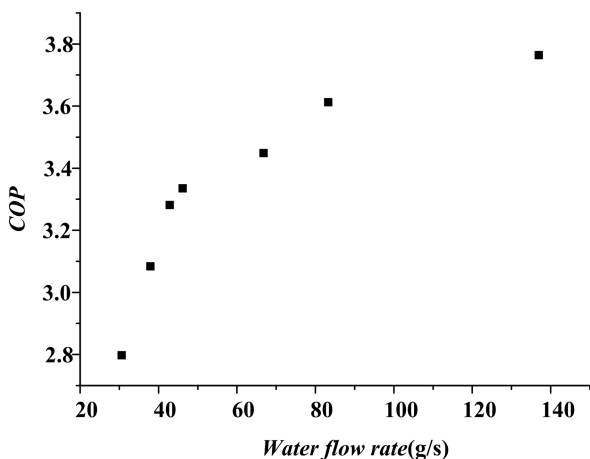


图5 不同水流量下COP (总加热功率1600 W)

如图6所示，LED基板温度随着LED功率的增大而增大，这是显而易见的，无需过多解释。在本实验测试产品的设计当中，总发热功率在1800 W的情况下，LED基板温度能够维持在60℃以内，如果灯具的功率降低，其LED基板温度甚至可以低于气温。按照LED寿命与LED结温关系，该系统的LED芯片寿命可以大大延长。

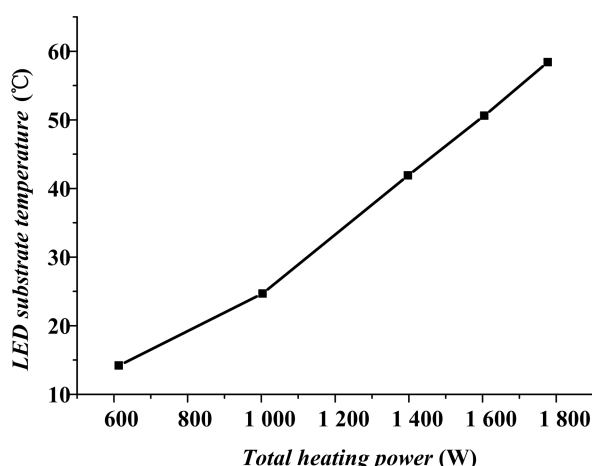


图6 不同加热功率下LED基板温度 (冷却水流量83.3 g/s)

但在实际应用过程中，LED温度不能太低，因为如果低于空气露点温度产生冷凝水将破坏LED芯片的电气性能，因而需要进行精确温控。

图7为不同总的加热功率下压缩机的功耗变化情况，随着LED功率的增大，压缩机功耗呈指数增加。这是因为随着加热量的增大，蒸发器内需要蒸发汽化更多的冷媒才能保持温度平衡，这样进入压缩机的蒸汽流量和温度都会增大，加大了压缩机的工作量，进而体现在压缩机的功耗增加上面。

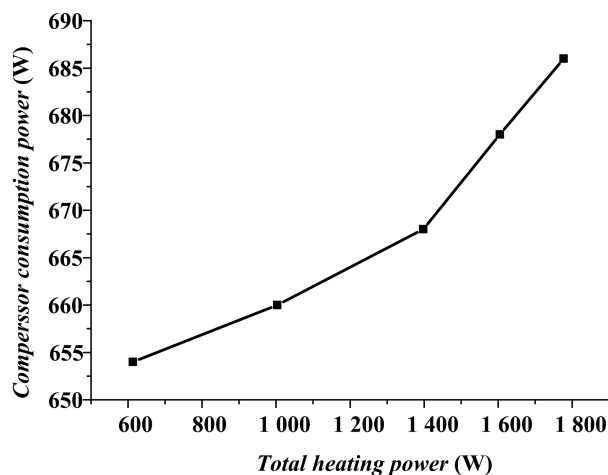


图7 不同加热功率下压缩机功耗 (冷却水流量83.3 g/s)

图8为不同加热功率对热泵系统COP的影响，图8中可知，系统COP随着加热量的增加而增加，接近线性关系。加热功率的增加，蒸发温度会相应提高，冷热端温差变小，按照理想制冷循环  $T_2 / (T_1 - T_2)$ ，制冷系数会相应提高，同样热

泵 COP 也是提高的。但蒸发温度不能无限提高，受到 LED 基板温度不可过高的限制。

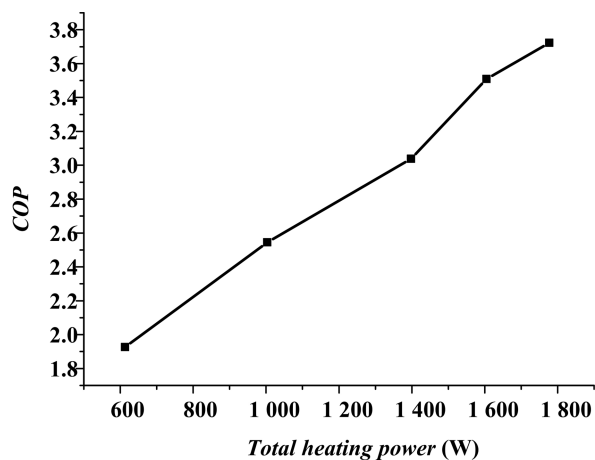


图8 不同加热功率下 COP (冷却水流量 83.3 g/s)

### 3 结论

本文提出 LED 灯具余热利用设想，并进行热泵系统与高杆灯结合实验研究得到以下结论：(1) 冷却水流量对 LED 基板温度的影响不大，在需要高水温的时候减小冷却水流量，却不会导致多大的 LED 灯具芯片温度恶化；(2) 随着冷却水流量的加大，压缩机功耗逐渐降低，但降低幅度随着水流量的增加而逐渐减弱；(3) 随着冷却水流量的增加 COP 逐渐增大，而增大的幅度随着流量加大而减少；(4) 总发热功率在 1 800 W 的情况下，LED 基板温度能够维持在 60℃ 以内，如果灯具的功率降低，其 LED 基板温度甚至可以低于气温；(5) 随着 LED 功率的增大，压缩机功耗呈指数增加；(6) 系统 COP 随着加热量的增加而增加，接近线性关系。

总之，该综合节能系统由于使用主动蒸发制冷方式对 LED 灯具进行冷却，只要压缩机匹配合理是完全能够保障 LED 发光模块保持在合理温度范围内的，而且在冷却的同时，它们发出的热量将通过热泵制成热水进一步使用；而且由于避免了直接向空气散热，就不需要庞大的空气散热器，节省金属材料，降低成本。

#### 参考文献：

[1] A.D. Almeida, B. Santos, B. Paolo, et al. Solid state lighting review—potential and challenges in Europe [J]. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 2014, 34: 30–48.

- [2] Dong Ho Park, Dong Beom Lee, EungRyeolSeo, et al. A parametric study on heat dissipation from a LED-lamp [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 108: 1261–1267.
- [3] 夏国栋, 程岳, 黄素格, 等. 应用于 LED 散热一体化平板热管的传热性能 [J]. *北京工业大学学报*, 2015, 41 (6): 933–939.
- [4] 涂娟, 王长宏. 热电冷却 LED 散热系统性能实验 [J]. *云南电力技术*, 2013, 41 (5): 94–95.
- [5] Yong Tang, XinruiDing, Binhai Yu, et al. A high power LED device with chips directly mounted on heat pipes [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2014, 66: 632–639.
- [6] Yueguang Deng, Jing Liu. A liquid metal cooling system for the thermal management of high power LEDs [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2010, 37: 788–791.
- [7] Zirong Lin, Shuangfeng Wang, JiepengHuo, et al. Heattransfer characteristics and LED heat sink application of aluminum plate oscillating heat pipes [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2011, 31: 2221–2229.
- [8] Dong Ho Shin, Soo Hong Baek, Han SeoKo. Development of heat sink with ionic wind for LED cooling [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, 93: 516–528.
- [9] Byung-Lip Ahn, Seunghwan Yoo, Jonghun Kim, et al. Thermal management of LED lighting integrated with HVAC systems in office buildings [J]. *Energy and Buildings*, 2016, 127: 1159–1170.

第一作者简介：岑继文，男，1978年生，广西靖西人，博士研究生，副研究员。研究领域：电子器件冷却，制冷热泵技术。

(编辑：阮毅)

