

The Application Research of Thermoelectric Generation Technology in Gas Water Heater

Hong-xia Wu¹, Jian-yun Zhao¹, Xiao-ling Qi¹, Yu-guang Ou³, Li-qian Liu¹, Dong-sheng Zhu^{1,2}

¹Key Lab of Enhanced Heat Transfer and Energy Conservation, the Ministry of Education, School of Chemistry and Chemical Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China

²School of Mechanical and Power Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China

³Guangzhou Fuxin Electronic Technology Co. Ltd, Guangzhou 528306, China

Email: 448085141@qq.com

Abstract: Thermoelectric material is a kind of material which can convert thermal energy into electric energy directly. In this paper, thermoelectric generation system which was made of Bi₂Te₃-based material was installed in the gas water heater in order to explore the utilization of thermoelectric technology on the waste heat recovery of gas water heater. The system installed location was determined using the infrared thermal image instrument. The relation between the output power and water flow and the relation between the output power and gas pressure were discussed. The experimental results show that the output power decreases with the increasing of the rate of water and increases with the increasing of gas pressure. Moreover, the series connection of thermoelectric modules precedes to the parallel connection.

Keywords: thermoelectric material; Thermoelectric technology; Waste heat recovery; Gas-fired water heater

温差发电在燃气热水器上的应用研究

吴红霞¹, 赵建云¹, 漆小玲¹, 区煜广³, 刘力千¹, 朱冬生^{1,2}

¹华南理工大学 化学与化工学院强化传热与过程节能教育部重点实验室, 中国广东 广州 510640

²华东理工大学 机械与动力工程学院, 中国上海 200237

³广东富信电子科技有限公司, 中国广东 广州 528306

Email: 448085141@qq.com

摘要: 热电材料是能将热能和电能直接相互转化的功能材料。本文将 Bi₂Te₃ 基热电材料制作的温差发电组件应用到燃气热水器上, 探索研究温差发电技术在燃气热水器余热回收方面的应用。采用红外热成像仪确定发电组件的安装位置, 考察水流量、燃气压力与发电系统输出功率之间的关系。实验结果表明: 随着热水器出水流量的增大, 温差发电系统的输出功率呈下降趋势; 而随着燃气压力的增大, 输出功率则呈上升趋势; 发电组件串联的输出功率优于并联的。

关键词: 热电材料; 温差发电; 余热回收; 燃气热水器

1. 引言

随着能源危机和环境污染的加剧, 节能环保成为时代的主题。中国作为一个发展中国家, 能源短缺, 能源的利用率较低, 节能降耗成为可持续发展的必由之路^[1]。目前, 各种工业余热、汽车废热等没有得到有效利用, 迫切需要新型能源利用技术以节约能源和提

高效率^[2]。半导体温差发电是一种利用热电材料的塞贝克效应将热能转换成电能的新型发电方式, 具有无运动部件、体积小、重量轻、移动方便和可靠性高等特点, 是绿色环保的发电技术^[3]。最重要的是这种发电方式不受温差限制, 有温差存在就可发电, 特别适合低品位热源的回收利用。热电材料作为热电器件的核心部分, 性能的好坏直接决定器件效能的优劣^[1], 近年来, 一批高性能热电材料的出现, 为温差发电技术在工业和民用产业的应用提供了可能。以燃气热水器为例, 随

基金项目: 广东省重大专项项目 (2009A080302002)
广东省省部产学研专项资金项目 (2009B090300377)

随着人民生活水平的提高和国民经济的快速发展，热水器成为了老百姓的生活必需品。据统计，全国燃气热水器的使用量已超过7000万台，行业年产量已达2000万台以上^[4-5]。由于燃气热水器的使用特点，燃气中大约60%的热量被浪费掉，如果这部分余废热能够得到有效的回收利用，不仅可以节约能源，降低单位产品的耗能量，而且可以减少环境污染，带来可观的经济效益和社会效益。本文根据塞贝克效应使用Bi₂Te₃基热电材料制作了温差发电组件，以燃气热水器烟气余热作为热源，通过实验确定温差发电组件系统安装位置，并考察燃气热水器操作参数水流量和燃气压力与发电系统功率输出之间的关系^[6-9]，目的在于实现温差发电技术在热水器余热回收方面的可行性应用。

2.实验原理

温差发电组件是整个热水器余热温差发电系统的核心,因此有必要弄清温差发电的基本原理。温差发电是基于热电材料的塞贝克效应发展起来的一种发电技术^[10]。将P型和N型两种不同导电类型的热电材料（P型是富余空穴材料，N型是富电子材料）一端相连形成PN结，如图1所示，使其一端置于高温状态，另一端处于低温态，由于热激发作用，P（N）型材料高温端空穴（电子）浓度高于低温端，在浓度梯度的驱动下，空穴和电子向低温端扩散，从而形成电动势，这样热电材料就通过高低温端间的温差将高温端输入的热能直接转化成电能^[11]。

单独的一个PN结，形成的电动势很小，如果将很多相同的PN结串联起来，就可以得到足够高的电压而成为一个温差发电组件。Bi₂Te₃基热电材料是目前室温下性能最好的热电材料^[12]，也是研究最早最成熟，应用最广的热电材料之一，所以本实验采用Bi₂Te₃基热电材料的温差发电组件。

3.实验

本实验以万和牌JSQ21-10A型强鼓式燃气热水器为研究对象，其额定压力为2800Pa，将温差发电组件应用到燃气热水器上进行实验。实验系统如图2所示。实验系统由供气系统、水路系统、试验系统和测试系统组成。

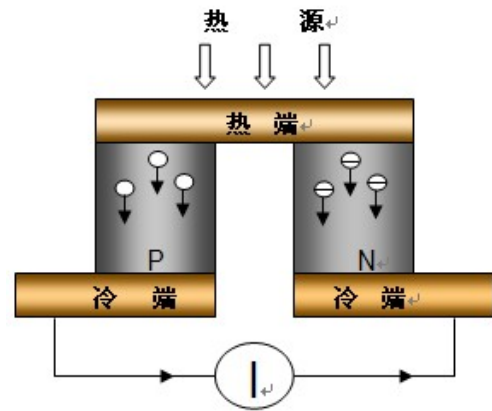


Figure 1. Principle of thermoelectric power generation

图1 温差发电原理示意图

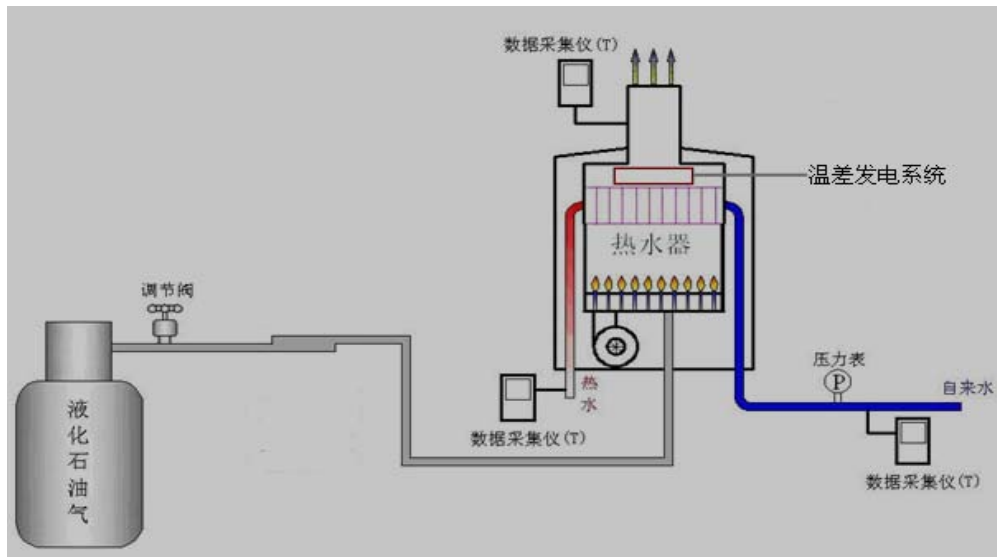


Figure2.Schematic diagram of experimental system

图2 实验系统示意图

供气系统由 LPG 罐瓶、出口调节阀和供气管道组成。供水系统由自来水系统、截止阀和供水管道组成。自来水经由截止阀调压后，由热水器的进水管进入换热器加热。进水温度、出水温度由设置在进水管上的热电偶测量，并由数据采集仪收集数据。在试验段系统内，燃气流过热水器的稳压阀，被点燃后，烟气升温则将热量传递到温差发电系统的热面，冷端则由散热器保持较低的冷面温度^[13]，从而温差发电组件两面形成温差，通过赛贝克效应完成热电转换。热水器表面布置热电偶，通过 Agilent 数据采集仪电脑联机采集温度、电压、电流数据。电路中，外加电阻由 JR-21 变阻箱来实现。

4. 结果分析及讨论

4.1 燃气热水器表面温度分布

强鼓型燃气热水器表面温度有所不同，从燃烧室到换热器再到排烟通道，温度从几十度到几百度不止。因此，有必要研究热水器表面温度分布，以确定温差发电系统安装位置。在燃气热水器表面布置 5 根热电偶，各位置如图 3 所示，以确定各位置的温度分布情况。

测得温度分布见图 4(a)。从图 4(a)可以看出测试的 5 个位置温度各不相同，燃烧室（位置 1）由于四壁采用隔热材料处理，所以，虽然燃气燃烧时温度超过 600 °C，其外表面温度却只有 60 °C 左右。燃烧后

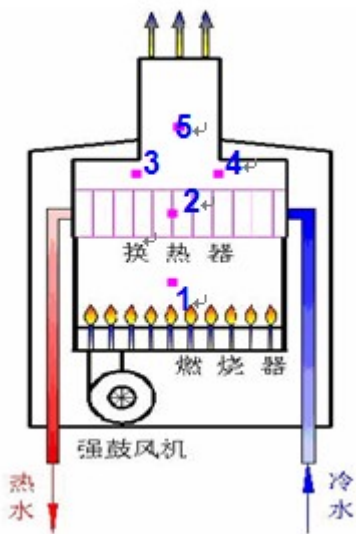
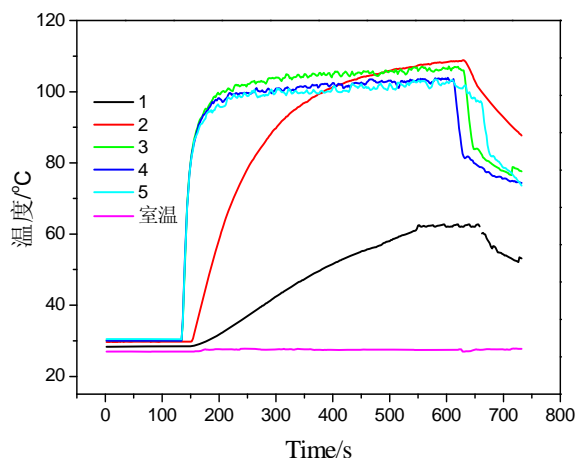


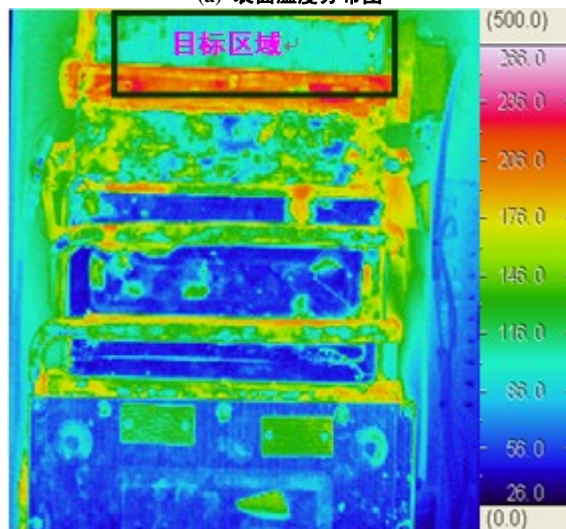
Figure 3. Layout of thermocouples at Gas Water Heater surface
图 3 燃气热水器表面热电偶布置图

的高温烟气通过热交换室里的高效换热器与冷水进行热量交换，提供热水供洗浴之用。经测试，热交换室处外壁（位置 2）的温度为 113 °C。完成热水加热工作的烟气带着剩余的热量在风机动力推动下进入位置 3、4 的区域，测试该区域温度大约为 105 °C。最后，烟气由排烟通道排出室外，烟气通道外部温度大约为 100 °C。

为了更直观的观察燃气热水器表面的温度分布，实验采用红外热成像仪在常规操作条件下，对燃气热水器表面的温升状况进行拍摄，拍摄过程中，根据加热片的表面材质选取的发射率为 0.95，拍摄间隔为 30s/张^[14]。拍摄像图如 4(b)所示。对照图 4 的(a)和(b)，可以发现红外热成像图与实验测试结果吻合。



(a) 表面温度分布图



(b) 红外热像图

Figure 4. Diagram of temperature distribution and infrared thermogram of gas water heater

图 4 燃气热水器表面温度分布图(a)和红外热成像图(b)

对于温差发电系统，要获得比较高的工作性能，除了要求温差较高之外，还要求接触面尽量平整，以减小热源表面与温差发电组件表面之间的接触热阻。另外，方便安装也是要考虑的因素。因为 3、4 位置处表面平整，温度较高，原先热水器设计中保留的答孔方便于安装，所以通过综合考虑，选择将温差发电系统安装在热水器 3、4 的位置。在实验条件下，选择安装两片温差发电组件，型号为 TEG1-126-1.5，冷端采用热沉进行散热。

4.2 水流量对温差发电系统输出功率的影响

水流量能够影响烟气温度，进而对温差发电系统的工作性能产生影响。在保持燃气压力恒定的情况下，利用自来水管出口处的截止阀改变热水器的出水流量，以测试水流量对系统发电输出功率的影响。测试结果见下图 5。

由图 5 可知，随着水流量的增加，温差发电系统输出功率呈下降趋势。出水流量由 4.1 L/min 提高到 6.3 L/min，而输出功率则由 0.32 W 降低到 0.305 W。这是因为出水流量增大，烟气-水的换热强度增大，烟气的排烟温度随之降低，进而使得发电系统高低温间的温差减小。冷热端温差对发电系统的工作性能有重要影响，所以排烟温度的降低使得输出功率下降。经曲线拟合得到输出功率 P_{out} 与出水流量 V 之间的关系为：

$$P_{out} = 0.3550 - 0.0079V$$

4.3 燃气压力对温差发电系统输出功率的影响

两温差发电组件串联，水流量分别设定为 4.1L/min, 5.4 L/min, 6.0 L/min，利用调节阀改变燃气

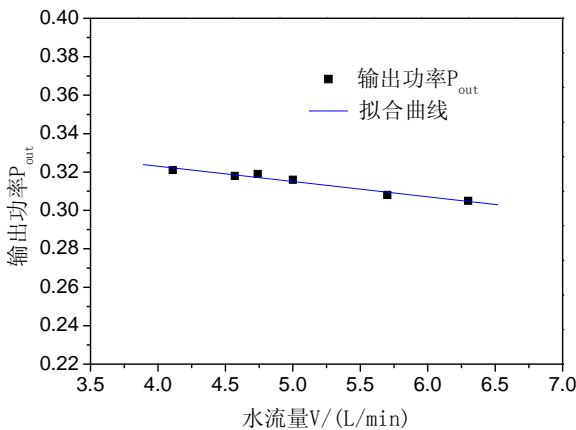


Figure 5. Variation of P_{out} with the water flow
图 5 水流量与输出功率 P_{out} 的关系

压力，分别测量在三种恒定水流量下燃气压力的改变对输出功率的影响。图 6 表示的是输出功率随燃气压力的变化趋势。

从图 6 可以看出，3 种水流量下，随着燃气压力的增大，温差发电系统输出功率均不断增大。当水流量为 4.1 L/min 时，在本测试条件下得到最大输出功率 0.325 W。燃气压力增大，温差发电系统工作性能提高的原因主要是提高了烟气的温度，增大了高低温端间的温差。烟气温度提高包括两个方面：一方面是燃气压力变大后，燃烧强度增大，产生的烟气温度升高；另一方面是因为燃气流量变大，烟气的流速随之增加，传热表面的利用率降低，同时烟气在换热室的停留时间减少，烟气与板片之间换热不充分，使得排出热水器的烟气温度升高。烟气温度的提高为输出功率的增大提供了条件。

由曲线拟合得到关系公式为：

$$P_{out} = 0.2074 - 0.0684P_g + 0.0732P_g^2 - 0.0136P_g^3$$

($V = 4.10L / \text{min}$)

$$P_{out} = 0.0763 + 0.1154P_g - 0.0103P_g^2 - 7.234E - 4P_g^3$$

($V = 5.40L / \text{min}$)

$$P_{out} = 0.1005 + 0.0595P_g + 0.0153P_g^2 - 0.0046P_g^3$$

($V = 6.00L / \text{min}$)

从图中还可以看出，随着水流量增加，温差发电系统输出功率是下降的，这与 4.2 讨论的规律一致。

4.4 组件串并联方式对温差发电系统输出功率的影响

在保持燃气压力恒定的情况下，逐渐改变水流量，分别测量串联组件和并联组件在相同水流量下的输出功率，观察温差发电组件串并联对于输出功率的影响。测试结果见图 7。从图中可以知道，组件串联时的输

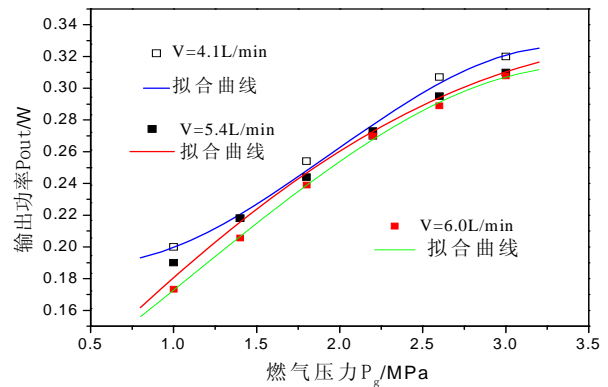


Figure 6. Variation of P_{out} at different gas pressure
图 6 燃气压力与输出功率 P_{out} 的关系

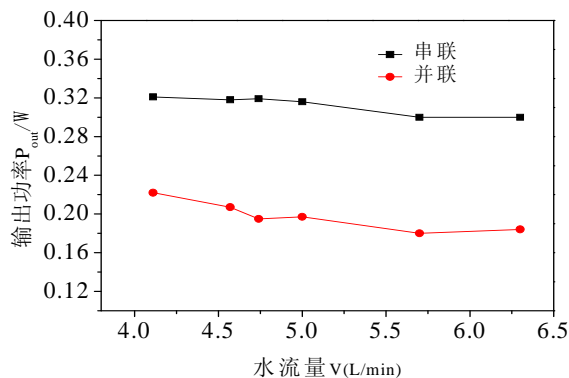


Figure 7. Effect of connection mode to P_{out}

图7 串并联方式对输出功率的影响

输出功率大于并联时的结果。这是因为在同等的工作条件下，两片温差发电组件并联后发电机虽然电动势保持不变，但是其总内阻减小为单个组件阻值的 1/2，加上回路中内外电阻值相等，因此回路中的电流会增加，电流的帕尔帖效应增强，使温差发电组件中有效传热流减小，组件的温度降低。而串联时负载的电阻值与串联成的发电器的总内阻值相等，整个发电器的电动势与组件的串联数成正比，回路的外阻与内阻始终相等，因此串联后回路中的电流保持不变。温差发电组件串联后发电系统的输出功率及负载电压均随串联组件数的增加而呈比例上升。本实验中，串联最大输出功率最高 0.32 W；并联时最大输出功率 0.23 W。综合作用的结果是串联时输出功率可比并联时提高 32%。

5. 结论

半导体温差发电是一种新型的发电方式，它在余热、废热回收领域的前景越来越受到各国科研人员的关注^[10]。文章对利用温差发电技术回收利用燃气热水器烟气余热的课题进行了探索性研究。主要是确定了温差发电系统的安装位置，考察了出水流量、燃气压力、组件串并联方式与发电系统工作性能之间的关系，得到如下结论：

(1) 通过实验和红外热成像的方法研究燃气热水器表面温度分布，寻找最符合温差发电系统安装的位置。最终确定将温差发电系统安装在换热器上方的烟气通路方腔上。燃气燃烧时，该位置的温度大约为 110 °C。

(2) 考察了进水流量和燃气压力对于发电系统工作性能的影响。随着出水流量增大，输出功率呈减小的趋势，而随着燃气压力增大，输出功率呈增大的趋势。

(3) 单片温差发电组件的热电转换能力是有限的。通常都是采用多片组件串并联的方式得到较大电量。文章对串并联方式进行了考察，结果显示串联比并联效果要好，串联时输出功率可比并联时提高 32%。

References (参考文献)

- [1] ZHENG Yihua, MA Yongzhi. Thermoelectric Generation Technology and Application for Energy Conservation [J]. Energy Conservation Technology, 2006, 136(24): 142-146.
郑艺华, 马永志. 温差发电技术及其在节能领域的应用 [J]. 节能技术, 2006, 136(24): 142-146.
- [2] YUAN Zhong-xian. Energy Situation in China and Corresponding Strategy [J]. China Metallurgy, 2005, 15(5): 7-9.
苑中显. 中国能源状况与发展对策 [J]. 中国冶金, 2005, 15(5): 7-9.
- [3] Rowe D M. Thermoelectrics, an environmentally friendly source of electrical power [J]. Renewable Energy, 1999, (16): 1251-1256.
- [4] NI Wei-dou, CHEN Zhen, LI Zheng. China Energy Situation and Some Important Strategic Position [J]. China Energy, 2008, 30(12): 5-9.
倪维斗, 陈贞, 李政. 我国能源现状及某些重要战略对策 [J]. 中国能源, 2008, 30(12): 5-9.
- [5] XU Hongxing. Energy Utilization in China and Countermeasures [J]. Sino-Global Energy, 2010, 15(1): 3-14.
许红星. 我国能源利用现状与对策 [J]. 中外能源, 2010, 15(1): 3-14.
- [6] GAO Min, ZHANG Jingshao, Rowe D M. Transformation and Application of Thermoelectric [M]. Beijing: Weapon Industry Publishing Company, 1996.
高敏, 张景韶, Rowe D M. 温差电转换及其应用 [M]. 北京: 兵器工业出版社, 1996.
- [7] Shunmin TAN. Research progress of modern water heater [J]. Domestic Gas Appliance, 2004, (5): 2-4.
谭顺民. 现代家用燃气热水器发展综述 [J]. 家用燃气具, 2004, (5): 2-4.
- [8] Tao YANG. Classification and investigation of two kind of Domestic gas implements [J]. Science and Technology Innovation Herald, 2009, (2): 232-234.
杨韬. 家用快速燃气热水器的分类和发展前景 [J]. 科技创新导报, 2009, (2): 232-234.
- [9] Zhiyin SUN. The Development and Prospect of Gas Water Heater [J]. City Gas, 2001, 32(1): 51-53.
孙知音. 燃气热水器的发展评价与展望 [J]. 城市燃气, 2001, 32(1): 51-53.
- [10] Teng ZHANG, Zheng ZHANG. Thermoelectric Generation Technology and Current Application [J]. Energy Technology, 2009, 30(1): 35-39.
张腾, 张征. 温差发电技术及其一些应用 [J]. 能源技术, 2009, 30(1): 35-39.
- [11] Jianyun ZHAO, Dongsheng ZHU, Zeguang ZHOU, Changhong WANG, Hong CHEN. Research progress of thermoelectric power generation [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2010, 34(3): 310-313.
赵建云, 朱冬生, 周泽广, 王长宏, 陈宏. 温差发电技术的研究进展及现状 [J]. 电源技术, 2010, 34(3): 310-313.
- [12] Xianhua HOU, Shejun HU, Qiang RU, Lingzhi ZHAO, Hongwen YU, Weishan LI. Research progress of Bi_2Te_3 thermoelectric material [J]. Materials Review, 2007, 21(7): 111-118.
侯贤华, 胡社军, 汝强, 赵灵智, 余洪文, 李伟善. Bi_2Te_3 基热电材料的研究现状及发展 [J]. 材料导报, 2007, 21(7): 111-118.
- [13] Hanying HU, Dongsheng ZHU. Review of Recent Thermoelectric Refrigeration Technology [J]. Journal of Refrigeration, 2008, 29(5):

1-7.

胡韩莹,朱冬生.热电制冷技术的研究进展与评述[J].制冷学报, 2008, 29(5): 1-7.

[14] Hongyan LIU, Yiping WANG, Bing YUAN. New Blackbody Radiation Source for Calibration of infrared Thermal

Im-ager[J].Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 279(5): 533-535.

刘鸿雁,王一平,袁兵.标定红外热像仪的一种新型黑体辐射源 [J].仪器仪表学报,2006,279(5): 533-535.