

利用航空发动机逃逸热能发电的热电材料及器件关键技术研究

Research on Thermoelectric Materials and Power Devices to Generate Electricity by Using Escape Thermal Energy in Aero Engine

■ 张志伟 朱锟 王斌 牟园伟 袁善虎 韩玉琪 付玉/中国航发研究院
邓元 祝薇 王瑶/北京航空航天大学材料科学与工程学院

热电材料是一种能实现热能与电能直接相互转换的功能材料，基于热电材料加工的发电器件非常适合用作微型电源。当前，四代机动力的能量利用率不足35%，逃逸热能在数万千瓦以上，如果能捕获和利用1%，则至少能提供数百千瓦的电能。本项目拟突破新型高效率高稳定性热电材料与发电器件的关键技术，实现航空发动机逃逸热能的捕获与利用，分阶段逐步达到为航空发动机传感器供电（0~1kW）、执行机构供电（1~20kW）和电动燃油泵供电（10~100kW）的目标。

热电材料是一种能实现热能与电能直接相互转换的固体功能材料。基于此种材料制作的热电器件可利用温差发电，也可在通电的情况下对部件进行制冷，如图1所示，具有结构简单、无机械部件、易控制、体积小、质量轻、寿命长、无噪声等优点。

利用汽车发动机尾气余热发电的研究已有报道，但利用航空发动机逃逸热能发电的研究尚未见报道。针对当前航空发动机能量利用率低的现状，以中国航发研究院为主导的创新团队拟开展新型高效率高稳定性热电材料与器件余热发电技术的研究，通过热能能量转换技术对逃逸热能进行捕获与再利用发电，实现为发动机附件系统供电，减轻整机的能量负荷。

温差发电的热电器件应用研究

航天与军事领域

20世纪60年代，温差发电首先

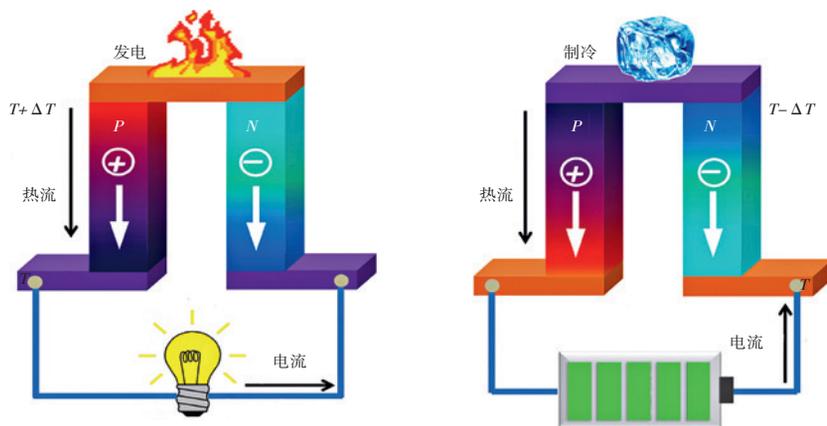


图1 热能能量转换原理图

应用于航天、军事等领域。美国和苏联研制了同位素温差发电机，作为太阳能电池的最佳替代动力源，可在太阳辐射量不足的外太空为卫星和航天器提供稳定持续的电能，如图2(a)所示。美国海军是海洋用放射性同位素温差发电器的最大用户，它的设计工作深度达10km，功率不小于1W，寿命长达10年，用于在深海中为无线电信号转发系统供电，该系统作为美国导弹定位系统网络的一个组成部

分，也可用于光纤电缆。

交通领域

随着纳米技术和先进材料合成技术的发展，热电材料的性能不断提高，温差发电技术在民用领域逐渐得到应用，尤其是在汽车、船舶等交通领域。

汽车发动机排气所带走的热量占其所消耗燃料产生热量的40%，残余废气的温度约在800℃，因此可以利用温差发电技术回收汽车尾气的余热来发电，如图2(b)所示。美国Hi-Z公

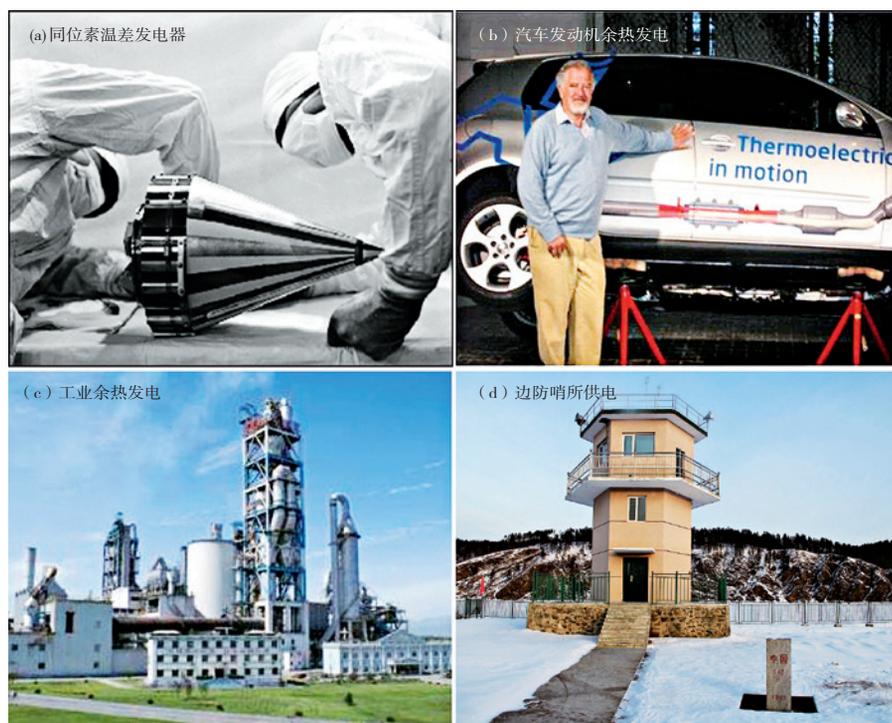


图2 温差发电的热电器件的应用

司研制出热电发电机，由72个HZ13模块组成，每个HZ13模块功率为13W，热电发电机总长为48.26cm，最大直径为22.86cm，总质量为13.6kg，最大功率为1068W。2008年在德国柏林举办的“温差电技术-汽车工业的机遇”会议，展示了一辆装有热电发电器的轿车，该热电发电机可为汽车提供600W电功率，满足其30%的用电需要，减少燃料消耗5%以上。在宝马公司与Amerigon公司、福特公司合作开展的温差发电器项目中，温差发电系统在测试中获得超过700W的功率输出，安装在宝马X6和林肯MKT上的温差发电系统在道路测试中获得超过450W的功率输出。

船舶所排出的高温烟气即便经过废气涡轮增压器仍然有300℃左右，这部分烟气将会带走30%~40%的热量，如果将这部分能量利用温差

发电技术回收利用，对船舶绿色运营有着重要意义。Michael Loupis等在Ecomarine项目中利用温差发电技术回收柴油机废气余热，利用几乎免费的海水作为冷源，回收装置搭载了750块温差发电片，对一台功率为1700kW的柴油机，预计回收效率为1.2%，可回收功率20.3kW。

工业余热回收发电

温差发电技术在工业废热余热回收利用方面具有很大潜力，不仅节能环保、提高能源利用率，还可为企业节约燃料成本、创造经济效益。国外在火电厂排烟及汽轮机排汽余热回收、煤炉余热回收等方面展开大量的研究工作。日本、美国等近年围绕废热、余热等低品位热能的利用开展了许多项目研究，如日本政府开展的固体废物燃烧能源回收研究计划，将温差发电装置安

装在垃圾焚烧炉上发电，不仅解决了大量垃圾的处理问题，还有效利用焚烧垃圾所产生的热量，达到废热合理利用的效果，如图2(c)所示。

其他领域

温差发电装置只要有温差存在即可发电，且携带方便。因此，在用电困难的高原气象站、边远山区、边防哨所等地，如图2(d)所示，可以利用半导体温差发电作电源使用；穿越荒凉地区的天然气和石油输运管道，可以利用温差发电装置作为金属管道的阴极保护电源以及油气输运状态的检测、通信、控制系统的电源等。国内在热电发电领域的研究起步较晚，还没有实际应用，但有许多学者在理论研究方面开展了很多工作。

热电发电器件在航空发动机中的应用探索

可行性分析

航空发动机内外涵道存在普遍的温差，而且航空发动机在运转过程中会产生大量逃逸能量，其中大部分逃逸能量都以热能的形式散失，如果通过热电器件对这部分热能进行捕获与再利用发电，则有望提升航空发动机的能量利用率，实现航空发动机逃逸热能的转换与利用。

当前，四代机动力的能量利用率不足35%，其逃逸能量在数万千瓦以上，如果能捕获和利用1%，则至少能提供数百千瓦的电能，可基本满足飞机的用电需求。因此，研究和开发热电材料与器件对航空发动机逃逸热能进行捕获与再利用发电具有实际意义和应用价值。

在航空发动机中实际应用时，因为要面临复杂的高温高压环境条

件，所以对热电材料与发电器件的要求更高。除了需要满足材料的高热电性能和发电器件的高转换效率外，还要求热电材料与发电器件具有耐高温、耐腐蚀和耐冲击性等较高的综合性能。目前还未见相关研究的公开报道。

关键技术

热能的捕获与利用是国际研究的热点与难点，本项目提出利用热电材料与器件来实现对航空发动机逃逸热能进行捕获与再利用是一项多技术的协同创新，所涉及的关键技术主要有：高性能耐高温热电材料关键技术，包括材料的能带结构优化、纳米结构设计、纳米材料批量制备和高温快速烧结等；具有耐高温、耐腐蚀、耐冲击等高综合性能的高转换率热电发电器件关键技术，包括热电发电原理器件的结构设计、高性能电极制备、器件的集成加工制造与封装等；热电器件与航空发动机的集成关键技术，包括热电发电原理器件与航空发动机的连接技术、器件的合理布局仿真及器件集成后对航空发动机总体性能的影响仿真评估等。

为实现热电发电器件在航空发动机中的应用，项目研究团队主要从以下几方面开展研究工作：以耐高温热电材料为研究对象，通过纳米手段提升热电材料的 ZT 值；开发耐高温电极材料，降低热电材料与电极间的接触电阻和接触热阻，并改善不同材料间的扩散性能和界面性能；开发高稳定性封装材料并改进器件的集成工艺，提升热电器件的耐高温、耐腐蚀和耐冲击等综合性能；探索热电发电器件与航空发动机的连接技术，并对器件的布局及集成后对航空发动机总体性能的影响进行仿真评估。

希望突破新型高效率高稳定性热电材料与发电器件的关键技术，研究开发出可应用于航空发动机逃逸热能捕获与利用的热电材料与器件，分阶段逐步达到为航空发动机传感器供电（0~1kW）、执行机构供电（1~20kW）和电动燃油泵供电（10~100kW）的目标。

阶段性成果

采用溶胶凝胶法与高能球磨法，成功制备出P型 $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9$ 和N型 CaMnO_3 纳米粉体材料，材料为结晶

性较好的多晶颗粒组成，单个颗粒粒径约为100nm。对P型 $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9$ 和N型 CaMnO_3 分别进行Ag和Bi元素掺杂，并结合放电等离子烧结制备出 $\text{Ca}_{3-x}\text{Ag}_x\text{Co}_4\text{O}_9$ 和 $\text{Ca}_{1-x}\text{Bi}_x\text{MnO}_3$ 纳米复合块体材料，900K时 $\text{Ca}_{2.8}\text{Ag}_{0.2}\text{Co}_4\text{O}_9$ 和 $\text{Ca}_{0.97}\text{Bi}_{0.03}\text{MnO}_3$ 的 ZT 值分别达到0.3和0.2，与目前国际报道的最优值相当。

在电极材料方面，提出“过渡层”设计和“第二相”强化思路，实现了器件冷端热量与外界的快速传热。通过系统热能管理与仿真计算，得出提高热电器件性能的关键在于优化器件的结构，实现热流沿热电偶臂定向流动，避免无效热损失，提高热电臂两端温差。在优化器件结构的基础上，加工出热电发电原理器件，实现热电器件直接利用体温获得3.3V电压，能驱动电路与传感器工作。

在热电发电器件的基础上成功开发出无源无线温度传感器，结合后端无线通信模块和射频通信技术，实现了传感器的自供电和信号传输的无线化，解决了户外传感器的供电难题，实测传感器信号的收发距离达100m以上，如图3所示。

结束语

虽然热电材料与器件在能源转换领域存在巨大的应用潜力，但目前热电材料与器件的转换效率和可靠性较低，在一定程度上制约了其大规模应用。探索高性能热电材料、提高热电器件的转换效率和稳定性、拓展应用范围等都是亟待解决的关键问题。

航空动力

（张志伟，中国航发研究院，高级工程师，主要从事新能源器件技术、微纳传感器技术研究。）

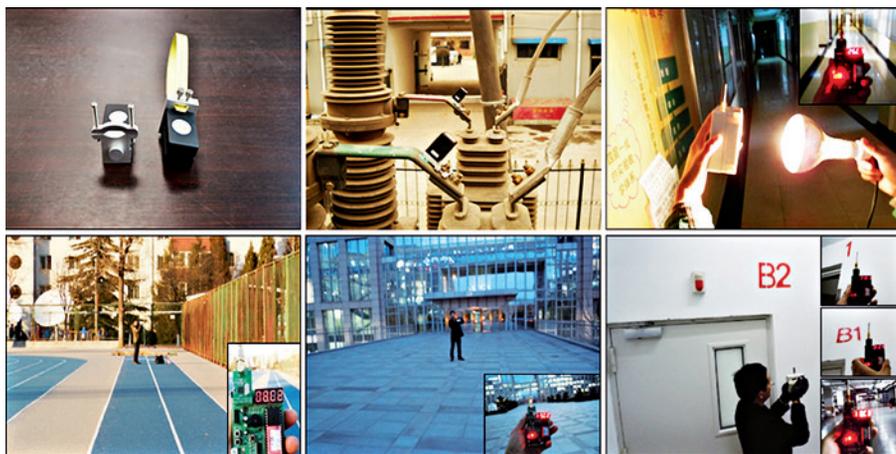


图3 无源无线温度传感器