

文章编号: 0254-0096(2001)02-0148-05

冷、热端温度对半导体热电堆发电性能影响的初步研究*

张华俊, 陈 浩, 王 俊, 陶文铨

(西安交通大学能源与动力工程学院制冷与低温工程系, 西安 710049)

摘 要:对半导体热电堆的发电性能进行了实验研究, 得出这种半导体热电堆在冷端温度不变的情况下, 其发电性能与热端温度的关系, 以及半导体热电堆在热端温度不变的情况下, 冷端温度对其发电性能的影响; 发现半导体热电堆作为电源时, 其内阻对它的性能指标有很大的影响, 而且内阻随着温度的升高而增大。采用简化的方法从理论上计算了热电堆的特性, 得到的计算值与实验结果基本吻合。

关键词:半导体热电堆; 发电性能; 冷端温度; 热端温度; 内阻

中图分类号: TK519

文献标识码: A

1 引 言

近年来, 国内外的许多研究人员都致力于如何利用低品位热源的研究, 各自都取得了比较大的成果, 如利用汽车尾气的固体吸附式空调器^[1], 又如利用太阳能的热水器-制冷空调复合机^[2], 但是, 利用热电效应直接把低品位的热能转换为电能的研究在国内却很少提及。就我国来说, 包括地热、太阳能、工业废热在内的低品位的热源十分丰富, 如果借助于热电器件能有效地利用这些热量, 将它转化为电能, 无疑能够减少能量消耗, 缓解日益严重的环境污染问题, 必定具有很大的经济价值和社会效益。

早在 19 世纪人们就发现了热电效应, 但由于材料的限制, 在这 100 多年里除了把金属热电偶用于温度测量外, 热电效应在工程技术上没有得到实际应用。20 世纪 50 年代以后, 半导体材料在各个领域得到广泛应用, 发展非常迅速, 热电性能较好的半导体材料已经使得热电效应的效率大大提高, 从而使半导体热电发电走向实用化。在国外, 半导体热电发电已用于浮标灯用电源、石油管道中无人中继站电源和野战携带电源^[3]。有应用于偏远无人地区的以天然气为燃料的热电发电机; 也有用于汽车柴

油机的余热发电机^[4], 其正常运行时的功率已经达到了 1kW; 特别值得一提的是在宇宙航行器上应用的碲化铅 (PbTe) 半导体热电发电机 (以放射性同位素为热源) 的效率已达到 7%。热电发电适应于广泛的热源温度, 没有旋转机械, 在合适的温度范围内, 可以保持很长的运行寿命。因此, 它开辟了发电技术的一个崭新的分支, 解决了许多场合的发电问题, 必然具有广阔的应用前景^[5]。

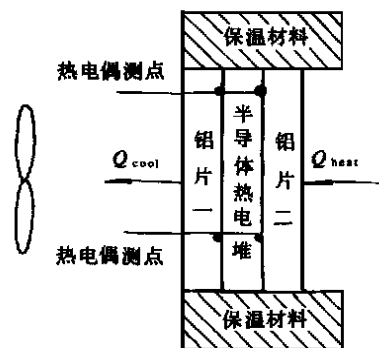


图 1 热电堆组装结构示意图

Fig. 1 Schematic of assembly structure of thermoelectric-pile.

2 实验系统简介

实验用热电堆的半导体材料为目前许多国家在

* 收稿日期: 2000-04-20

基金项目: 西安交通大学科学研究基金资助项目

较低热源温度发电时所采用的铋碲合金,它们的一些性质参见表 1^[5]。P 型:(70%~75%)(分子)Sb₂Te₃+(25%~30%)(分子)Bi₂Te₃+P 型杂质:N 型:(90%~93%)(分子)Bi₂Te₃+(7%~10%)(分子)Bi₂Se₃+复合杂质。热电堆尺寸为:50mm×50mm×5mm,包括 127 对半导体热电偶(臂),两面采用氧化铝陶瓷片,热电偶由铜汇流片串联起来。

表 1 Bi₂Te₃、Sb₂Te₃、Sb₂Se₃ 的晶体结构、平均原子质量及禁带宽度

Table 1 The crystal structure, mean atomic mass and forbidden band width of Bi₂Te₃ Sb₂Te₃ Sb₂Se₃

复合物	结构	平均原子质量	禁带宽度 eV(300K时)	
			热力学	光学
Bi ₂ Te ₃	菱形晶	160.2	0.16	0.13
Sb ₂ Te ₃	菱形晶	125.3	0	0.30
Sb ₂ Se ₃	斜方晶	96.1	—	1.20

实验是在西安交通大学制冷与低温工程研究所的温差实验台上进行的,热电堆组装结构如图 1 所示。实验台主要包括三个部分。

- 1) 加热、冷却系统:热电堆冷端采用强迫空气对流冷却,热端由电加热器送风,使热端保持一定的温度。
- 2) 测试系统:热电堆接入一闭合回路中,该回路中包括一个可变电阻箱,精密数字电流表,数字电压表;在热电堆的冷、热端分别贴有三支铜-康铜测温热电偶,取其平均值作为冷、热端的温度;微机控制的温度数据采集系统。
- 3) 主体及辅助设施:将尺寸为 50cm×50cm×25cm 的冰箱用发泡剂保温材料中间切出一个约 50mm×50mm 的方孔,然后将热电堆嵌入其中,用脱脂棉将缝隙塞紧,以保证热电堆冷、热端不存在对流换热,热量只能通过热电堆中的电臂传导;测温热电偶参考端用冰水混合物的保温瓶。

在冷端温度不变时调整热端温度至特定的值,改变热电堆闭合电路中的负荷电阻,测得可变电阻的电压和电流值,利用伏安特性就可以求出这一对温度下的开路电动势,短路电流及热电堆内阻;使热端温度的达到不同的值就得到热电堆的热端实验特性曲线。同样,热端温度不变时,就可以得到热电堆

冷端实验特性曲线。由于实验环境并不是一个无限大的空间,所以实验的难点在于保持冷、热端温度稳定于特定的值。

3 实验结果

从图 2 中可以看出,在给定的工况下(热端温度和冷端温度一定),半导体热电堆的伏安特性直线和输出功率曲线与普通的电源是完全相同的。不过,从图中也可以看出半导体热电堆的内阻为 4.615 Ω ,因此它的输出功率是较小。

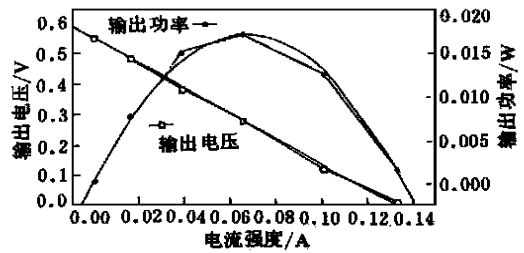
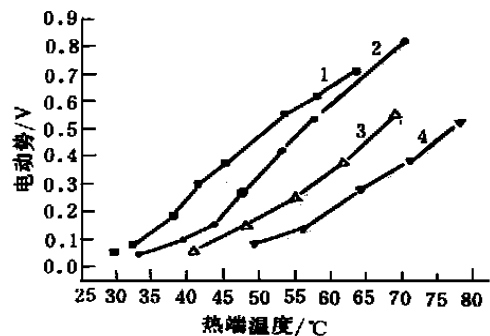


图 2 热电堆的输出电压、输出功率与电流关系

Fig. 2 Relationship among output voltage, output power and current intensity.

图 3 是不同冷端温度下,半导体热电堆输出电压与热端温度的依变关系,总的趋势都是随热端温度增加,输出电压上升,而且其增加的速度大致相同;而不同冷端温度下,输出电压的起始值大致相等,冷端温度越低,温差越大,输出电压越高。

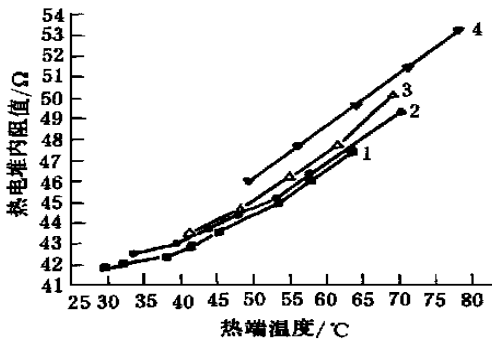


1 冷端温度 24 2 冷端温度 29
3 冷端温度 35 4 冷端温度 42

图 3 冷端温度不变输出电压随热端温度的变化曲线

Fig. 3 Relationship between output voltage and hot side temperature under constant cold side temperature

图 4 是不同冷端温度下,热电堆内阻与热端温度的关系。在冷端温度为 24、29、35、42 4 种情况下,热电堆的内阻都随温度的升高而增大,且冷端温度越高内阻越大,但这种区别很小。



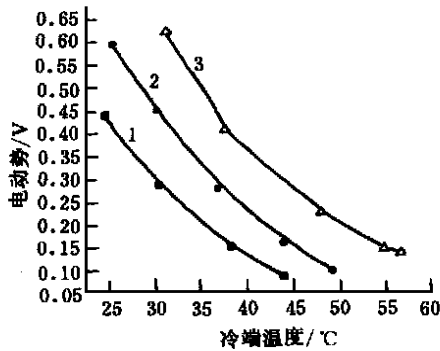
1 冷端温度 24 2 冷端温度 29
3 冷端温度 35 4 冷端温度 42

图 4 冷端温度不变内阻随热端温度的变化曲线

Fig. 4 Relationship between inner resistance and hot side temperature under constant cold side temperature

在不同的冷端温度下,测试回路中的电流强度与热端温度的关系是:冷端温度不变时,电流强度随热端温度的增加而增大,但增大的速率并不相同;冷端温度越低,增大的速率越大。

图 5 是不同热端温度下,输出电压与冷端温度的关系。可以看出,随冷端温度的上升输出电压迅速下降,且热端温度越高,下降的速度越快。



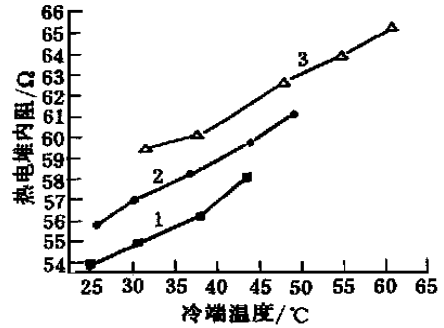
1 热端温度 52 2 热端温度 60
3 热端温度 70

图 5 热端温度不变输出电压随冷端温度的变化曲线

Fig. 5 Relationship between output voltage and cold side temperature under constant hot side temperature

图 6 是不同热端温度下,热电堆内阻与冷端温度的关系。随着冷端温度的增加,内阻逐渐增大;而且热端温度越高,内阻越大。

在不同的热端温度下,测试回路中的电流强度与冷端温度的关系是:随着冷端温度的增加,电流强度迅速减弱。同样,也是热端温度越高,下降得越快。



1 热端温度 52 2 热端温度 60
3 热端温度 70

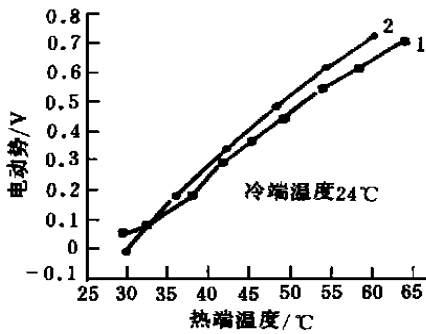
图 6 热端温度不变内阻随冷端温度的变化曲线

Fig. 6 Relationship between inner resistance and cold side temperature under constant hot side temperature

4 结果讨论与对比

半导体热电堆的温差电动势可以通过解电臂的微分方程组得到。方程组包括导热微分方程、载流子输运方程、载流子浓度方程,将这些方程离散化,得到有限差分方程,就可以计算电臂中的温度分布,温差电动势率及电导率与温度的关系,但实际上,采用这种方法的文章鲜有报道。文献[6]中,利用数值差分法解得导热微分方程,利用经验拟合式计算了热电堆的性能参数,得到了基本满意的结果。本文准备以一种简单的方法来计算热电堆的温差电动势和内阻,我们以热电臂中的平均温度作为电臂的定性温度,借助于材料参数的拟合关系式计算出热电堆性能指标随温度的变化情况,得到了可以接受的结果。

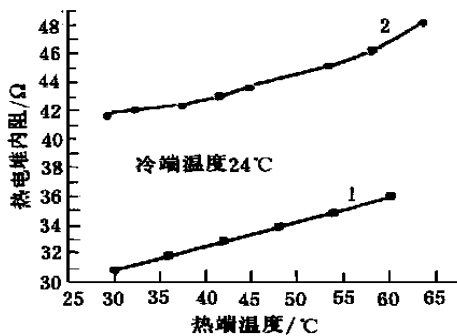
假设热电材料的导热系数在实验所涉及到的较小的温度范围内近似是常数,则热电臂中的温度分布是线形的,其平均温度可以取冷热端温度的算术均值: $T = (T_h + T_c) / 2$ 。电臂的几何尺寸为: $a = 2\text{mm}$, $b = 2\text{mm}$, $c = 3.8\text{mm}$ 。根据文献[7],提供的 P 型和 N 型半导体的塞贝克系数和电导率的拟合关系式,可以得到理论计算的温差电动势(即开路电压)和内阻,如图 7 和图 8 所示。从图 7 中看到,理论计算得到的电动势值要高于实验值,但相差很小,且总的趋势基本保持一致。实际上,我们在计算时认为热电堆中的各对电臂是完全相同的,但在生产制造中,生产工艺的缺陷、材料的不均匀性都可能导致出现偏差,因此有这样的差别是可以接受的。



1 实验值 2 理论值

图 7 理论与实验的电动势随热端温度变化

Fig. 7 Comparison between theoretic voltage and experimental voltage under variable hot-side temperature



1 理论值 2 实验值

图 8 理论与实验的内阻随热端温度变化

Fig. 8 Comparison between theoretic inner resistance and experimental inner-resistance under variable hot-side temperature

在图 8 中,虽然总的趋势都是随热端温度升高而增大,但理论值与实验值相差在 1 左右,显然是比较大的,其原因是热电臂与铜汇流片之间存在着接触电阻,而它是难于估计的,因为这也是和生产制造相关的。从实际应用的角度来看,3~4 这样大的内阻肯定是不可行的,如何才能降低热电堆的电阻呢?首先,调整热电臂的几何尺寸,如增大电臂的横截面积,缩短电臂长;其次,合理掺杂提高半导体材料中的导电机构,这有待于材料科学工作者的进一步研究;第三,改进制造工艺,努力减小热电臂与汇流片之间的接触电阻。

5 结 语

我们所进行的实验,主要研究了在材料选定的情况下其他一些因素对半导体热电发电的影响,这些因素包括:热电堆的冷端温度、热端温度,热电偶

电臂尺寸,热电偶的组合形式及热电堆的组合形式。事实上正如前文所述,我们发现,冷端温度对半导体热电发电性能影响很大,随着冷端温度的上升,温差电动势迅速下降,反之则上升。同样,热端温度也对半导体热电发电性能有较大的影响,随着热端温度的上升,温差电动势也随之上升,反之则下降。但需要注意的是,这种关系是非线性的。热电堆的内阻也是随冷、热端温度而变化的,且阻值偏大,需要进行电臂尺寸、材料及制造工艺上的改进设计。

目前各类文献中对这种半导体热电材料的理论数值计算大都采用半经验半理论的方法来模拟,还没有见到完全的将半导体基本方程组离散化进行数值计算的文献,这恐怕是一个还需要不断探索的领域,我们也将数值计算方面继续做一些探索和研究。另外,本文实验所采用的半导体热电材料主要适用 300~400 的热源的发电,而事实上,由于实验条件和热电堆本身制造工艺的限制,我们实验时的热端温度只能在 80 以内,冷、热端温差在 40 以内,因此输出功率是比较小的。有消息说,用于 500~1000 热源温度的热电材料也已经有人在研究。总之,半导体热电发电的实用化、市场化还有赖于性能更加优秀的半导体热电新材料的开发。因此,半导体热电发电这一领域无疑是值得深入研究的。

[参考文献]

- [1] 游全根,王如竹. 固体吸附式制冷在余热回收中应用. 新能源,1998,20(1):7-12.
- [2] 李明等. 太阳能热水器-空调复合机装置的实现. 新能源,1999,21(2):12-16.
- [3] 钟广学等编著. 半导体制冷器件及其应用. 北京:科学出版社,1989,16-20.
- [4] J C Bass, N B Elsner, F A Leavitt. Performance of the 1 kW Thermoelectric Generator for Diesel Engines. The 13th International Conference on Thermoelectric Energy Conversion. Kansas,1994.
- [5] 余德胜编著. 半导体制冷与应用技术. 上海:上海交通大学出版社,1992. 1-5,28-29.
- [6] C M Dominguez, D Garcia, et al. Simulation with Electric Analogy of a Drying - Shed of Cheese with Peltier Effect. Fifth European Workshop on Thermoelectric. 1999.
- [7] T Wartanowicz, M Krygowska. Analysis of Thermoelectric Conversion of P - N Junction Considering Temperature Vary

A PRIMARY RESEARCH ON GENERATION PERFORMANCE OF THE SEMICONDUCTOR THERMOELECTRIC MODULE UNDER VARIABLE COLD-SIDE AND HOT-SIDE TEMPERATURE

Zhang Huajun ,Chen Hao ,Wang Jun ,Tao Wenquan

(*Refrigerate and Cryogenic Institute , Power and Energy Engineering School ,
Xi 'an Jiao Tong University , Xi 'an 710049 , China*)

Abstract :In this paper ,an experiment for generating performance of semiconductor thermoelectric module is carried out , and some useful results are obtained. One is the relationship between generation performance and hot-side temperature , when cold-side temperature is kept constant. The other is the relationship between generation performance and cold-side temperature ,when hot-side temperature is kept constant. While semiconductor thermoelectric module is used as power supply ,inner-resistance which is changed with temperature has great influence on its performance. A simplified calculation based on theoretical method is conducted and calculated data agree well with the experimental results.

Key words :semiconductor thermoelectric module ;generating performance ;cold-side temperature ;hot-side temperature ;inner-resistance