

文章编号 :0254-0096(2001)04-0394-04

半导体热电堆串、并联发电性能 及热电堆复现性研究*

张华俊,陈 浩,王 俊,陶文铨,李洪峻,蒲 亮

(西安交通大学能源与动力工程学院,西安 710049)

摘 要:对半导体热电堆的复现性进行了实验研究,以此为基础进行了热电堆的串联、并联实验,得到了半导体热电堆串联、并联的规律,并用有限差分法对热电堆的各项发电性能指标进行了数值计算,为热电发电技术做了有益的探索。

关键词:半导体热电堆;串联;并联;发电性能;数值计算;复现性

中图分类号:TK514

文献标识码:A

0 引 言

热电现象发现了已经有一个世纪了,但直到近几十年,归功于半导体材料的迅猛发展,才使热电制冷和热电发电走向了实用,从而广泛地应用在社会生活的各个方面,使热电材料与热电技术的研究、发展和应用达到了空前的高峰,解决了很多传统的发电方法难于甚至是无法解决的问题。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^[1]。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^[2],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飞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 70%^[3]。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,解决了许多特殊场合的发电问题,必然具有广阔的应用前景。

本文在西安交通大学制冷与低温工程研究所的温差实验台上对半导体热电堆的复现性进行了实验研究,并以此为基础进而对半导体热电堆的串并联性质做了实验研究;然后对热电堆的各项性能指标进行了有限差分的数值计算,最后对计算值和实验值作了详细的对比,为热电堆的串并联提供了理论和实验的依据,为热电发电的实用化奠定了基础。

1 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。

P 型:(70~75)% (分子) Sb_2Te_3 + (25~30)% (分子) Bi_2Te_3 + P 型杂质;

N 型:(90~93)% (分子) Bi_2Te_3 + (7~10)% (分子) Bi_2Se_3 + 复合杂质。

热电堆尺寸为:50mm × 50mm × 5mm,包括 127 对半导体热电偶(臂),两面采用氧化铍陶瓷片(氧化铍是一种极好的导热绝缘体,即使在极高的温度下,其热导率也是氧化铝的 4 倍),热电偶由铜汇流片串联起来。

表 1 Bi_2Te_3 、 Sb_2Te_3 、 Sb_2Se_3 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 Bi_2Te_3 , Sb_2Te_3 , Sb_2Se_3

复合物	结构	平均原子质量	禁带宽度 eV (300K 时)	
			热力学	光学
Bi_2Te_3	菱形晶	160.2	0.16	0.13
Sb_2Te_3	菱形晶	125.3	0	0.30
Sb_2Se_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。实验台主要包括 3 个部分。

1) 加热、冷却系统:热电堆冷端采用强迫空气对

* 收稿日期:2000-07-12

基金项目:西安交通大学科学研究基金资助项目

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:串连或并联的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 100cm ×50cm × 25cm 的冰箱用发泡剂保温材料切出二个约 50mm × 50mm 的方孔,然后分别将热两块电堆嵌入其中,用脱脂棉将缝隙塞紧,以保证热电堆冷、热端不会发生对流换热,热量只能通过热电堆中的电臂传导;测温热电偶参考端用盛有冰水混合物的保温瓶。

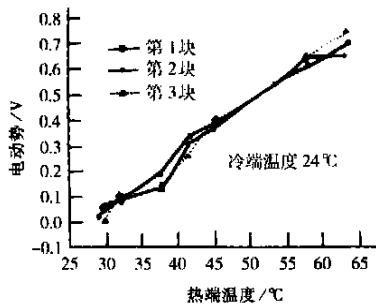


图 1 复现性实验电动势曲线

Fig. 1 The reappearance experiment of voltage value

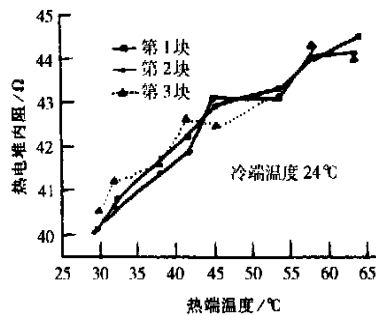


图 2 复现性实验热电堆内阻曲线

Fig. 2 The reappearance experiment of inner resistance value

首先任意选择 3 块热电堆进行复现性的实验。在这样的条件下:冷端温度保持 24 ,热端温度从 30 ~ 60 变化,分别测定热电堆的发电性能指标。复现性实验重要的一点是要将冷端温度保持在 24 ,另外环境温度也需要保持在一定的范围内,以达到外界因素不变的目的。改变电路中变阻箱的电阻,就可以测得需要的数据。

其次进行热电堆串并联实验。将两块热电堆串

连起来,调整冷却风机的风速和电加热器的电流,使冷端温度不变而热端温度逐渐改变,改变热电堆闭合电路中的负荷电阻,可测得热电堆热端温度曲线;同样,保持热端温度不变,可以测得冷端温度曲线。类似地,测量热电堆并联时的性质。由于实验环境并不是一个无限大的空间,所以实验难点在于保持冷、热端温度的稳定。

2 实验结果

热电堆的复现性是指,在相同的外界环境下(包括冷、热端温度,环境温度等),热电堆表现出相同的热电性能的性质。热电堆的复现性对于热电发电的实验和理论研究具有重要的意义:1)对于复现性好的热电堆,我们可以根据 2 块热电堆串并联的性质来预测多块的串并联的热电发电系统的热电性能,从而节约了实验成本;2)在实验测量时可以按照对称的原则大大减少实验测量工作量;3)热电堆的复现性从一个侧面也反应了大批量生产中批量生产质量的好坏。

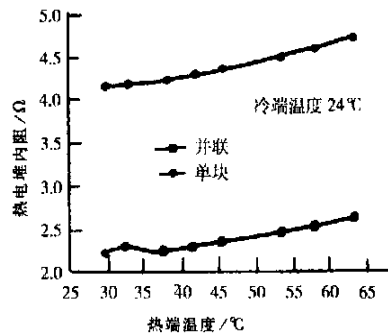


图 3 并联热电堆内阻与单块对比

Fig. 3 Comparison between inner resistance of parallel connection thermoelectric module and inner resistance of one thermoelectric module

关于复现性的详细的理论描述和计算本文不准备作过多的说明,因为它主要是一些统计学上的计算。从图 1、图 2 中可以看出,3 块半导体热电堆的内阻和电动势相差很小,说明实验所采用的半导体热电堆具有良好的复现性。

图 3 和图 4 是冷端温度 24 时并联热电堆与单块热电堆的电动势和内阻的比较。从图 3、图 4 和热端温度 60 时,并联热电堆与单块热电堆的电动势和内阻的对比可以看到,两块半导体热电堆并联时,电动势与单块的电动势基本相等,而内阻变为单

块内阻的一半。

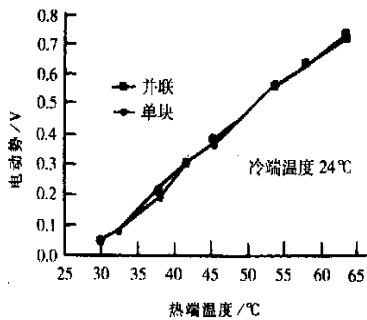


图 4 并联热电堆电动势与单块的对比

Fig. 4 Comparison between voltage of parallel connection thermoelectric module and voltage of one thermoelectric module

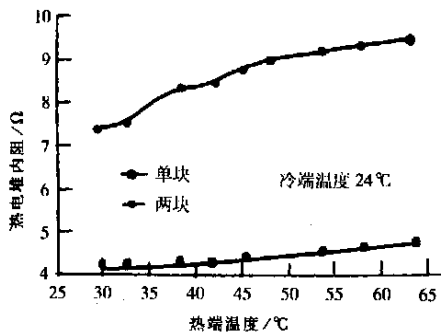


图 5 串联热电堆的内阻与单块的对比

Fig. 5 Comparison between inner resistance of series connection thermoelectric module and inner resistance of one thermoelectric module

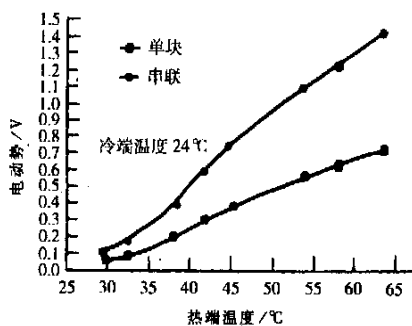


图 6 串联热电堆电动势与单块的比较

Fig. 6 Comparison between voltage of series connection thermoelectric module and voltage of one thermoelectric module

图 5 和图 6 是冷端温度 24 时串联热电堆与单块热电堆的电动势和内阻的比较。从图 5、图 6 和热端温度 60 时,串联热电堆与单块热电堆的电动势和内阻的对比可以看出,两块半导体热电堆串联时,电动势大约是单块电动势的一倍,而内阻也约是单块内阻的一倍。

此外从以上的图中也可以发现,冷端温度和热端温度对热电性能的影响也是不同的,冷端温度对热电堆的性能影响更大一些,而内阻是随着温度的升高而逐步增大的,这在设计和实验的过程中是十分值得注意两个问题。

3 数值计算及结果的分析与对比

实验所用的热电堆是由 127 对半导体热电偶(也就是一对热电臂)组成的,为了研究的方便,我们取一对热电偶作为研究的对象,分别对 P 型臂、N 型臂进行计算。考虑到实验中所采用的措施及热电堆的内部结构,可作如下假设:

- 1) 热电堆的冷端与热端及电臂和电臂之间的对流换热可以忽略;
- 2) 热电堆的冷端与热端及电臂和电臂之间的辐射换热可以忽略;
- 3) 假设电臂中的材料是均匀的,即导热只沿着电臂的臂长方向,在某一截面上温度是均匀的,没有导热的发生;
- 4) 因为热电堆回路中的电流强度很小,所以焦耳热对电臂中温度分布的影响可以忽略;
- 5) 因电流引起的珀尔帖效应与汤姆逊效应忽略。

得到简化的导热方程(1)

$$\frac{d^2 T}{dx^2} + \frac{d \cdot dT}{dx dx} = 0 \quad (1)$$

式中 $\frac{d \cdot dT}{dx dx}$ ——导热系数; T ——电臂某一截面的温度; $x=0$ 时, $T = T_c$; $x=l$ 时, $T = T_h$ 。

将电臂沿着臂长方向取 $N+1$ 个节点,采用外节点法^[4]将电臂划分为 N 个控制容积,然后将微分方程离散化,并解之。

下面是 P 型和 N 型半导体的塞贝克系数和电导的拟合关系式^[5]:

$$P \text{ 型 } S_p(T) = -0.46148628e - 4T^{1.0199956}$$

$$+ 0.53221164e - 4T - 0.27881979e - 3$$

$$N \text{ 型 } S_n(T) = -0.18514798e - 9T^{2.3199523}$$

$$+ 0.12844084e - 5T - 0.11337e - 3$$

$$P \text{ 型 } \rho_p(T) = 4.2667945T^{1.2600026} - 28.308127T$$

$$+ 4085.885$$

$$N \text{ 型 } \rho_n(T) = 998821.65T^{-1.14912366} + 1.3742368$$

$$- 1139.2904$$

由 Simpler 程序解出温度分布后,利用拟合关系式计算每一个控制容积内的电动势和电阻然后叠加就得到单条电臂的电动势和内阻。

下面是由程序计算所得结果与实验结果的对比。

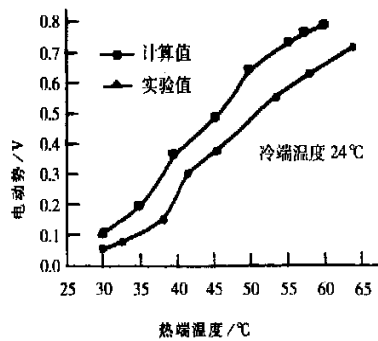


图7 电动势的计算值与实验值的对比

Fig. 7 Comparison between theoretic voltage and experimental voltage

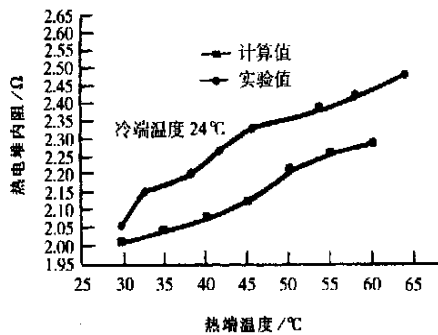


图8 热电堆内阻计算值与实验值的对比

Fig. 8 Comparison between theoretic inner resistance and experimental inner resistance

4 结 语

本文所进行的实验主要研究了半导体热电堆的

复现性及热电堆的串、并联性质,获得了详细的实验数据。从实验结果可以看到,所研究的半导体热电堆具有良好的复现性,而且其串、并联性质与普通直流电源的串、并联性质基本相同,因此在理论研究和实验应用时可将热电堆简化为一个具有一定内阻的直流电源。

本文用有限差分的数值方法对半导体热电堆进行了计算机模拟。我们将此问题简化为稳态一维第一类边界条件的简单问题,并以此计算得到了与实验结果相吻合的结果,说明这样的处理方法是可行的,也是可靠的。

[参考文献]

- [1] 钟广学等. 半导体制冷器件及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1989, 16—20.
- [2] Bass J C, Elsner N B, Leavitt F A. Performance of the 1 kW thermoelectric generator for diesel engines [A]. The 13th International Conference on Thermoelectric Energy Conversion [C]. Kansas, 1994.
- [3] 徐德胜. 半导体制冷与应用技术[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1992. 1—5.
- [4] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安交通大学出版社, 1988. 12—20.
- [5] Wartanowicz T, Krygowska M. Analysis of thermoelectric conversion of P - N junction considering temperature varying parameters [A]. Proceedings of The 4th International Conference on Thermoelectric Energy Conversion [C]. 1982.

RESEARCH ON THE GENERATING PERFORMANCE OF SERIES—PARALLEL CONNECTION AND REAPPEARANCE OF A SEMICONDUCTOR THERMOELECTRIC MODULE

Zhang Huajun, Chen Hao, Wang Jun, Tao Wenquan, Li Hongjun, Pu Liang

(Engineering School of Energy & Power, Xi'an Jiao Tong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In this paper, the experiment of series - parallel connection for the semiconductor thermoelectric module is carried out on the basis of the reappearance experiment, and the rules for series - parallel connection are obtained. From the experiment data, it is concluded that the reappearance of thermoelectric module is very good, and the rules of the series - parallel connection are similar with that of the common current power source. Based on one dimension, steady - state heat transfer model, numerical calculation on the dynamoelectric performance was conducted. The computational data agrees with experiment results satisfactorily.

Key words: semiconductor thermoelectric module; series - parallel connection; dynamoelectric performance; numerical calculation; reappearance