

《温差电器件发电性能测试方法》

团体标准编制说明

中国科学院上海硅酸盐研究所

“温差电器件发电性能测试方法”团体标准制定工作组

2023年4月

温差电器件发电性能测试方法

1 目的意义

基于泽贝克（Seebeck）效应的温差发电（Thermoelectric Generator）是一种将热能直接转换成电能的环境友好型能量转换技术，具有全固态、工作无噪音、无排放等特点，主要应用于航天（特种电源）、工业节能减排（低品位余废热回收）、太阳光综合利用（光热发电）、分布式自供给电源（无线传感、物联网等）等领域。近年来，我国温差发电材料和器件技术发展迅速，整体技术达到国际先进，部分领域国际领先，温差电器件先后在我国航天（同位素温差电池）、汽车（尾气余热回收）、钢铁（低温余热发电）、太阳能（光电-温差电复合发电）等领域获得应用。随着我国航天、国防、工业等领域的深入发展和对新能源技术的迫切需求，温差发电器件正处于加速发展期。但是，对温差电器件的测量尚未形成标准，很难对现有的温差电材料和器件作出统一的评价，不同国家、不同机构（包括学术界和工业界）报道的温差发电材料和器件的性能已经出现了严重分歧。例如：工业界对学术界报道的温差发电材料和器件性能存在质疑，部分学术论文报道的数据无法被其他机构重复，不同机构对同一温差发电材料或器件的性能测量结果存在明显不同，等等。由于缺乏相关测量标准和权威的第三方检测机构，这些分歧无法进行检验或验证，这严重阻碍了温差电技术的发展和應用。无论在科研领域，还是在应用领域，温差电器件的测量标准化都是一项非常有意义的工作。

2010-2019年，国际能源署（International Energy Agency, IEA）交通运输先进材料合作项目（Advanced Materials for Transportation, AMT）中，美国橡树岭国家实验室（Oak Ridge National Lab., ORNL）牵头开展了温差发电材料和器件测量方法的研究（中科院上海硅酸盐研究所是国内唯一参与单位）。工作组在全球范围内组织了多个实验室开展了温差发电材料和器件的多轮次比对实验，发现了测量误差的主要来源，并提出了测量方法的改进意见。但是，由于缺少资金和项目支持，至今未能建立温差发电材料和器件性能测量的国际标准。

2 预期的社会效益

标准化是一项重要的基础性工作，贯穿于产品的研发和应用的全过程。标准的制定和实施不仅可以缩短研制周期、节省研制经费，还可以提高科研成果的可

靠性和通用性，推动科研成果的产业化，从而产生巨大的社会经济效益。

在本标准制定和实施前，用户一般要求研制的温差电器件必须满足指定的技术指标，验收时提交检测报告。为了满足用户要求，在产品交付前，需要耗费大量时间编制温差电器件性能测试大纲并进行专家评审。本标准的建立为温差电器件性能测试和检验提供了明确的依据和规范，提升了用户对温差电器件性能测试的认可度，可以节约测试、检验和交付时间，进而降低研制成本。另外，本标准的建立保证了本研究所研制的温差电器件质量，有助于提高本研究所的信誉，促进本研究所与其他科研机构和合作，带来经济效益。

标准的制定、颁布和不断修订的过程是随着当前技术水平而动态变化的，标准的制定反映当前本研究所的科研技术水平，标准的实施在很大程度上可以促进科研成果产业化的进程。

3 工作简况

3.1 任务来源

随着我国载人航天和探月工程的迅速发展以及我国对太阳系其他行星等深空探测计划开始实施。作为深空探测任务空间电源系统的关键技术之一，温差电器件工程化应用技术迫在眉睫。而温差电器件的发电功率和发电效率是衡量其性能好坏的一项关键指标，尽快建立起温差电器件发电效率测试方法的企业标准，对于提高温差电器件的产品质量、促进温差电器件工程化应用进程、拓展温差电器件的应用领域是十分必要的。

根据中国计量测试学会公布的2022年度第一批团体标准立项的通知，中国科学院上海硅酸盐研究所作为《温差发电器件性能测试方法》团体标准的申请立项单位，应尽快按要求开展“温差发电器件性能测试方法”标准的制定工作。

3.2 主要工作过程

收到《温差发电器件性能测试方法》团体标准项目立项通知后，中国科学院上海硅酸盐研究所立即成立了《温差发电器件性能测试方法》团体标准制定工作组。由柏胜强正高级工程师任工作组组长，廖锦城高级工程师、夏绪贵高级工程师、宋庆峰助理研究员、史迅研究员和陈立东研究员为工作组成员，随即召开了第一次工作讨论会，会议确定了标准的制定原则、制定方案、制定工作计划及各人主要分工（见下表1）。

表1 起草人员的项目分工

姓名	职称	项目分工
柏胜强	正高级工程师	标准的全面规划
陈立东	研究员	技术指导
史迅	研究员	技术指导
廖锦城	高级工程师	标准的调研和编写
夏绪贵	高级工程师	样品制备
宋庆峰	助理研究员	样品测试

第一次会议以后，标准制定工作组查阅了国内外的相关标准和技术资料，对国内外使用单位进行了充分调研，广泛征求意见，选取了具有代表性的样品进行了测试验证工作。

随后，中国科学院上海硅酸盐研究所在充分调研的基础上，按照 GB/T 1.1-2020《标准化工作导则 第1部分：标准的结构和编写》的要求开始起草标准文本，于2023年2月形成标准草案稿。

2023年3月23日，在严格的实验验证基础上，标准制定工作组在上海硅酸盐研究所召开了第二次会议，即，《温差电器件发电性能测试方法》团体标准草案稿预评会，根据实验结果对团体标准的草案进行了修改和完善。2023年4月10日，标准制定工作组形成了《温差电器件发电性能测试方法》团体标准征求意见稿（初稿）。

2023年4月初，标准制定工作组将《温差电器件发电性能测试方法》团体标准征求意见稿（初稿）发全国8家企业、高校以及研究机构征求意见。2023年5月底，标准工作组收到回复29条，各单位对标准征求意见稿提出的修改意见，编制组进行了认真整理，并对各单位的意见进行了汇总。经逐条分析，编制组采纳了部分意见，对于不采纳的，也给予明确答复，随后，标准制定工作组对收到的意见进行了充分仔细地分析和讨论，并认真的对标准进行必要的修改，最终形成《温差电器件发电性能测试方法》征求意见稿二稿，并提交中国计量测试学会委员会评审。

2023年xx月xx日，《温差电器件发电性能测试方法》团体标准审查会在中国科学院上海硅酸盐研究所举行。来自全国xx专家及生产和使用单位的代表共xx人

参加了会议。专家组对标准送审稿正文进行了逐字逐句审查，提出了具体修改意见，制定工作组按修改意见对标准送审稿作进一步修改、完善，发给标委会各个委员审核后，再经修改形成了标准报批稿。

4 标准编制的原则

本标准制定的原则是保持标准的科学性和适用性，建立一套简便、准确、可靠的温差电器件发电效率测试方法。目的是提供一个统一的温差电器件发电效率测试及性能评价方法，使同行测试数据具有可比性。更好的实现温差电器件产品的质量控制，促进温差电转换技术应用健康发展。

5 标准编制主要技术内容的说明

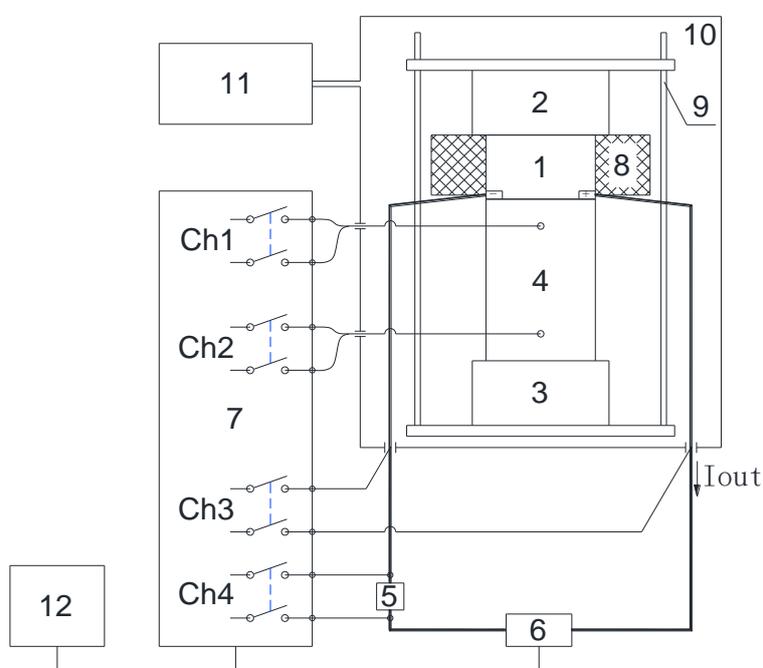
温差电器件按使用温度可分三类，分别为低温区（室温~300℃）、中温区（300~600℃）和高温区（600~1000℃），代表性的材料体系分别为低温区的 Bi_2Te_3 基体系、中高温区的 CoSb_3 基体系和 Half-Heusler、高温区 SiGe 基合金等。 Bi_2Te_3 体系市场上主要的应用领域是温差电制冷和低温区的温差发电机， CoSb_3 基材料可用于汽车尾气和工业余热回收发电、特种电源等，高温区的 SiGe 基材料则主要应用于深空探索用空间电源。多年来本工作组对不同使用区间的温差电器件测试方法开展了大量的研究和验证试验，并编制了《温差电器件输出功率测试方法》、《温差电器件发电效率测试方法》、及《温差电元件界面电阻率测试方法》三项企业标准，在此工作基础上编制此团体标准。本标准从温差电器件的测试目的出发，确定了温差电器件发电性能的测试方法，明确了测试过程中涉及到的测试条件、试样、设备和仪器等，并对测试步骤给出详细规定。

5.1 测量原理

根据温差电转换原理，测试温差电器件的发电性能主要通过在其两侧设置热源和热沉建立温差，将其输出端连接一个可变负载，通过改变负载大小，测试其不同负载下的输出功率和发电效率。根据定义，温差电器件的输出功率等于其输出电压和输出电流的乘积，温差电器件的发电效率等于其输出功率与热侧吸热量的比值。测试时当温差电器件热侧、冷侧温度维持恒定，电压-电流为线性关系，因此，将测试得到的电流-电压曲线进行线性拟合数据处理进一步得到温差电器件在该温差下的开路电压、短路电流、内阻、和最大输出功率。

显然，根据上述测试方法，输出电压和输出电流测试相对容易，测试误差取

决于测试仪表的精度。然而，由于热源温度较高，热传导、热对流及热辐射导致的热损失很难估测，要准确的测试热侧吸热量就相对困难很多，这也是温差电器件发电效率测试中的主要误差来源。高敏等编著的《温差电转换及应用》里提到的双器件对称安装的测量方法，虽然一定程度上减少了热损失，但是当测试中高温器件时，漏热也随之增加，而且该方法对整体结构的对称性要求高，不利于批量化操作。根据能量守恒原理，从温差电器件热侧吸热量一部分用于发电，剩下的从器件冷侧排出，若在器件冷侧连接一块规则的导热体，根据稳态热传导定律，器件冷侧排热量就等于流经该导热体的热流量。采用此测试方法冷侧温度低，热损失较小。综上，通过测试器件冷侧排热量，再将它和输出功率之和作为热侧吸热量的方法相对直接测量热侧吸热量更准确，是可行的，而且操作简便。



序号说明：

- 1——温差电器件试样；
- 2——热源；
- 3——热沉；
- 4——热流计；
- 5——标准电阻；
- 6——电子负载；
- 7——数据采集器；

- 8——保温材料；
- 9——样品架
- 10——样品室；
- 11——气氛控制系统；
- 12——计算机。

图 1 测试装置示意图

如图 1 所示为本标准采用的温差电器件发电性能测试装置示意图，将温差电器件试样冷侧与热流计对齐，置于热源与热沉之间并使用样品架夹紧，在试样周围包裹隔热材料，关闭样品室，打开真空系统建立测试气氛，调节热源与热沉的控温装置，在试样两端建立温差，待温度稳定后，控制电子负载使试样按一定步长由小到大输出电流，记录每个电流对应的热流计第一温度、热流计第二温度、标准电阻两端电压、及试样输出电压，根据公式（1）计算试样输出功率，

$$P_{Out}^i = V_{Out}^i \times \frac{V_S^i}{R_S} \quad (1)$$

式中：

I——测量步序号，数值为 1, 2, 3, ……，N；

P_{Out}^i ——试样输出功率，单位为 W；

V_{Out}^i ——试样输出电压，单位为 V；

V_S^i ——标准电阻两端电压，单位为 V；

R_S ——标准电阻的阻值，单位为 Ω 。

根据公式（2）计算试样冷侧排热量，

$$Q_c^i = \lambda \times \frac{(T_1^i - T_2^i) \times A}{L} \quad (2)$$

式中：

I——测量步序号，数值为 1, 2, 3, ……，N；

T_1^i ——热流计第一温度，单位为开尔文（K）；

T_2^i ——热流计第二温度，单位为开尔文（K）；

λ ——热流计的热导率，单位为 W/m·K；

A——热流计的截面积，单位为 m^2 ；

L ——热流计第一温度点与第二温度点之间的距离，单位为……

试样热侧吸热量等于输出功率和冷侧排热量之和，根据公式（3）计算，

$$Q_h^i = P_{out}^i + Q_c^i \quad (3)$$

式中：

i ——测量步序号，数值为 1, 2, 3, ……，N；

P_{out}^i ——试样输出功率，单位为 W；

Q_c^i ——试样冷侧排热量，单位为 W；

Q_h^i ——试样热侧吸热量，单位为 W。

将公式（1）和（2）代入公式（4）计算温差电器件试样发电效率：

$$\eta_i = \frac{P_{out}^i}{P_{out}^i + Q_c^i} \times 100\% \quad (3)$$

式中：

i ——测量步序号，数值为 1, 2, 3, ……，N；

η_i ——试样发电效率；

P_{out}^i ——试样输出功率，单位为 W；

Q_{out}^i ——试样冷端排出热量，单位为 W。

为了确保本方法更加准确，首先，为了进一步减少漏热，测试时必须在真空环境进行，并在器件内部及周围填充并包裹隔热材料；其次，作为热流计的导热体应尽量选用热导率高、稳定性好的材料，建立选用室温热导率不低于 350W/m·K，且在初次使用前对其热导率进行测量标定。

5.2 试样

为确保测试的准确性，温差电器件试样外形为长方体，长度范围 10 mm~50 mm，宽度范围 10 mm~50 mm，高度范围 2 mm~30 mm，试样截面长宽比不大于 1.5，试样热、冷侧应平整，平面度 ≤ 0.05 mm，表面粗糙度 $Ra \leq 1.6 \mu m$ ，两侧的平行度 ≤ 0.05 mm。

5.3 设备及仪器

5.3.1 设备

样品室：温差电器件是包括半导体温差电材料、电极层、绝缘层等构成的复杂组件，在高温条件下有些材料易于氧化导致温差电器件失效，因此需要将样品放置在气氛可控的样品室中测试，极限真空度小于 0.1Pa。

样品架：用于安装试样，测试时为了使试样的热侧、冷侧具有良好的热接触，样品架应具有夹紧功能，夹紧力在 0.1KN ~ 20KN 范围内可调，此外，样品架还应耐高温、具有一定强度，建议使用不锈钢材料，夹紧力控制精度不低于±5N。

热源：用于建立温差电器件试样的热侧温度，安装面应能包络试样，额定使用温度应高于最高测试温度的 20%以上，具有升降温速率控制，应采用耐高温、抗氧化、具有一定强度的高导热金属、石墨、或陶瓷材料等。

热流计：用于测试温差电器件冷侧排热量，截面尺寸应与温差电器件试样一致，高度尺寸为 30 mm~50 mm，上、下两端面应平整，表面粗糙度小于 1.6 μm，且平行度优于±0.05 mm，建议使用高纯铜。

热沉：用于建立温差电器件试样的冷侧温度，安装面应平整且能包络试样。

恒温器：对热沉进行冷却控制，为了满足测试需求，可控温度范围为 -10 °C ~ 90 °C，最高流速不低于 20 L/min；

计算机：连接设备和仪器，具有温度控制模块、数据（电压、温度）采集模块、数据分析处理模块、数据保存模块，实现测试全过程自动控制，避免手动干预，提高测量的准确性。

5.3.2 仪器

温控器：控温范围为 0 ~ 1000，精度不低于 0.2 级；

标准电阻：额定电流不低于 1 A，精度不低于 0.01 级；

电子负载：电流量程不低于 1 A，电压量程不低于 0.1 V；

数据采集器：电压量程不低于 0.1 V，精度不低于 0.01 级；

5.4 测试程序

5.4.1 将温差电器件试样安装到样品架上，并施加不低于 0.3 MPa 的压力，关闭样品室（当试样与热源、热流计接触不佳时，可在试样的热面垫一层厚度小于 0.3mm 的石墨纸，在冷面涂一薄层导热膏）；

5.4.2 抽真空到真空度小于 5.0 Pa，充入高纯氩气至真空度为 2.5×10^2 Pa，并重复不少于两次；

5.4.3 启动温差电器件发电性能评价软件，按照表 1 进行参数设置；

表 1 参数设置

参数	数值
数据采集间隔, s	≤10
热侧温度波动值, °C/3min	≤1.0
测试电流步长, A	≤1.0
电流-电压扫描时热侧温度波动值, °C/10s	≤0.2
电流-电压扫描结束条件	输出功率低于最大值的30%

5.4.4 设置试样测试温度和恒温器温度；

5.4.5 开始测试，温控器工作，开始升温，数据采集器采集信号；

5.4.6 电流-电压扫描测试：控制电子负载改变试样输出电流，同步采集试样对应的输出电流、输出电压、热流计第一温度和第二温度，并计算试样输出功率和发电效率；

5.4.7 采用最小二乘法对电流—电压曲线进行线性拟合、分析，得到试样的开路电压、短路电流、内阻、最大输出功率及最大输出功率对应的输出电流、输出电压；

5.4.7 取发电效率的最大值作为试样的最大发电效率；

5.4.8 结束测试，记录测试结果。

5.5 采用此测试技术标准在不同型号设备上验证比对

温差电器件在不同型号设备上的验证试验是在自制的 (SICCAS) 和商用的日本 ULVAC 公司生产的 PEM-2 两种温差电器件发电性能评价设备上进行，并将两者的测试结果与理论计算值 (Calculate) 相比较。

温差电器件样品采用配比为 $\text{Yb}_{0.3}\text{Co}_4\text{Sb}_{12}$ 的 N 型材料和配比为 $\text{CeFe}_{3.85}\text{Mn}_{0.15}\text{Sb}_{12}$ 的 P 型材料制备的 3 枚横截面为正方形，截面尺寸为 $20\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ ，高度为 14.5 mm 的温差电器件，包括 8 对 P/N 温差电单偶，其中 P 型、N 型元件的尺寸为 $4\text{ mm} \times 4\text{ mm} \times 12\text{ mm}$ 。样品 1 用于自制的设备测试，样品 2 用于 PEM-2 测试，样品 3 作为备用。将温差电器件安装到样品架上，并施加 30 kg 的压力。然后，在温差电器件周围裹上一层保温材料，关闭样品室，启动真空系

统，经过 3 次洗气后充入高纯氩气至 $2.5 \times 10^2 \text{Pa}$ 。最后，打开冷水机，设置循环水温度为 5°C ，设置温差电器件测试的热源温度为 400°C 、 500°C 、 550°C 、 600°C 。测试结果与理论计算值进行比较，如图 2 所示。结果表明，采用本标准测试的温差电器件发电性能更接近理论计算值。

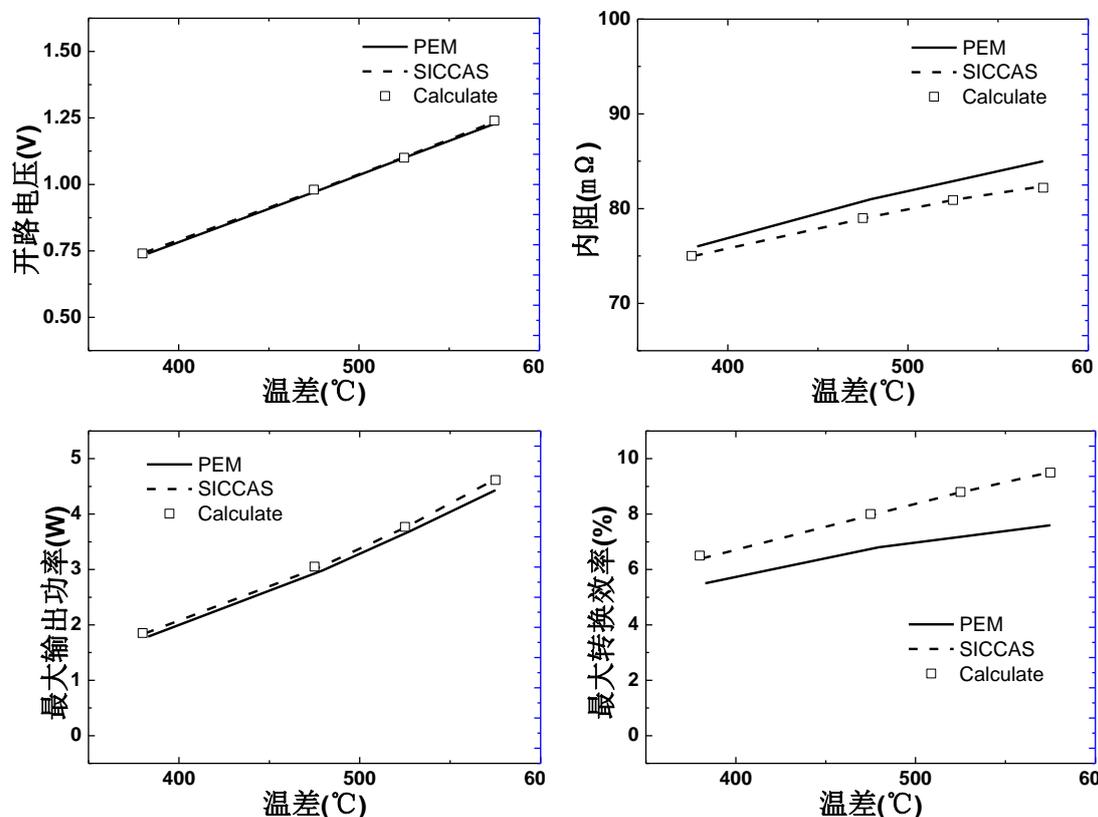
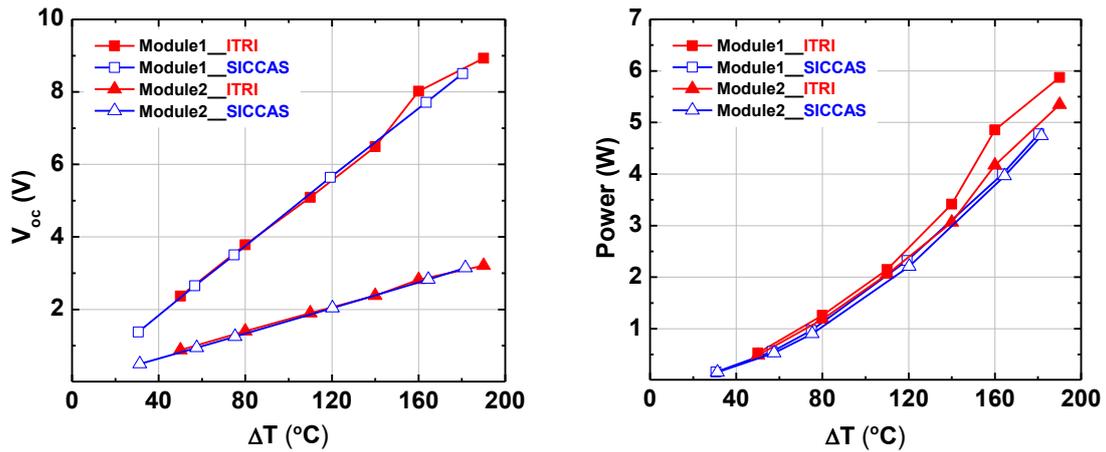


图 2 同一规格 CoSb_3 器件在不同设备上测试对比

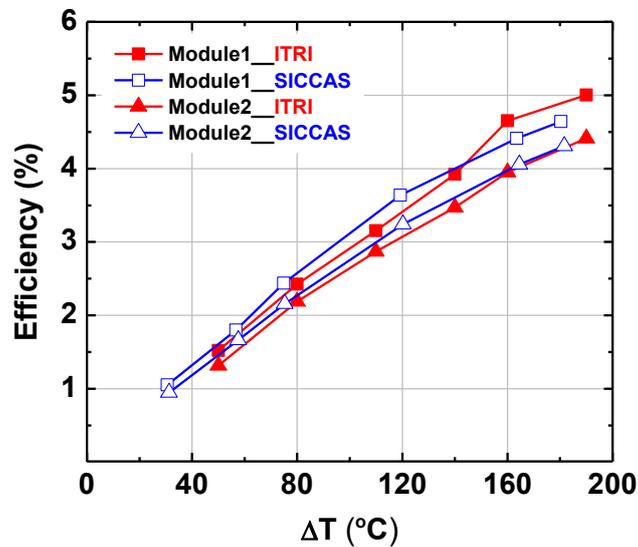
5.6 采用此测试技术标准在不同测试单位进行验证比对

温差电器件在不同单位测试的验证试验是采用来自台湾工业技术研究院材化所的 Bi_2Te_3 基温差电器件，试样包括规格为截面尺寸为 $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ ，温差电单偶为 127 对的样品 1 (Module 1)，和 49 对的样品 2 (Module 2)，两种规格的样品分别在上海硅酸盐研究所 (SICCAS) 和台湾工业技术研究院材化所 (ITRI) 进行测试。采用本标准方法设置相同的测试条件，冷面温度为 30°C ，热面温度从 $50^\circ\text{C} \sim 220^\circ\text{C}$ 阶梯升温，测试环境为真空，测试结果包括试样的开路电压、输出功率、发电效率随温度变化如图 3 所示。结果表明，两家测试的结果基本一致，偏差 $< 10\%$ 。



(a) 开路电压

(b) 输出功率



(c) 发电效率

图 3 两种规格 BiTe 器件在不同单位的比对测试结果

5.7 采用此测试技术标准在具有资质认定许可技术能力的实验室主导下的多家比对

借助 IEA-AMT 国际合作平台，在美国橡树林国家实验室（ORNL）的主导下，选取上海硅酸盐研究所研制的 $20\text{mm} \times 20\text{mm}$ 半赫斯勒单级器件，采用本标准方法和相同的测试条件，对同一样品完成两个不同实验室（Lab.1 和 Lab.2）的比对测试，两个实验室的测试结果基本吻合，说明本标准的测量准确性。

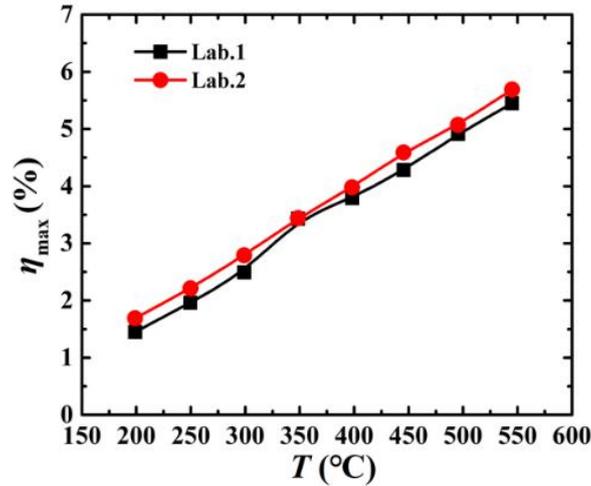


图 4 ORNL 主导下不同单位对同一温差器件转换效率比对测试结果

6 误差来源分析

本标准测试方法误差来源主要有以下三个方面：

6.1 温差电器件试样

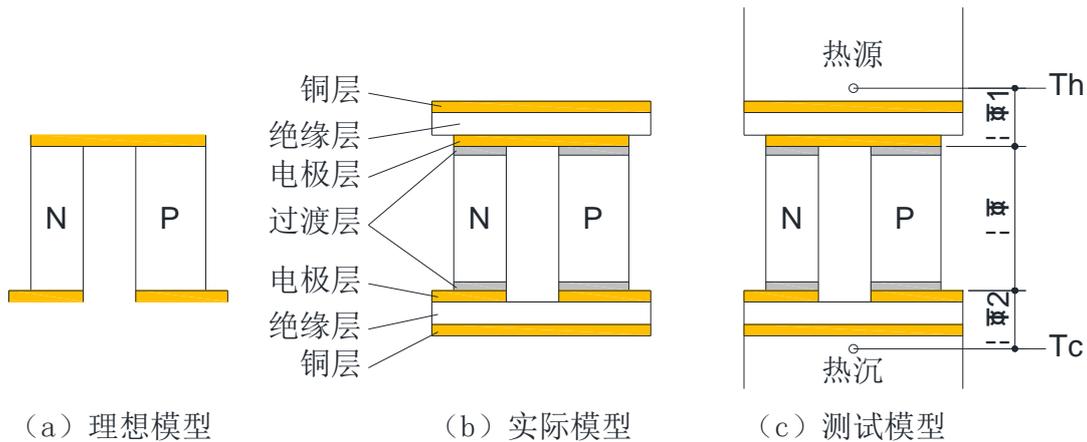


图 5 温差电器件模型

如图 5 所示为温差电器件模型示意图，显然，相对理想模型实际模型更加复杂，实际模型中铜层、绝缘层、电极层的厚度、材质、及连接质量均影响器件的发电性能，因此，**制备工艺好坏**和测试时试样与热源、热沉的**接触性能好坏**是影响温差电器件性能的两个主要因素，因此，本标准规定在安装试样时当试样与热源、热沉接触不佳时，可在试样的热侧与热源之间垫一层厚度小于 0.3 mm 的石墨纸，在试样的冷侧与热沉（或热流计）之间涂一层导热膏，目的就是为了改善试样与热源、热沉（或热流计）的接触性能。

6.2 测量参数

根据 5.1 所述的测试原理，本标准规定的温差电器件发电性能测试方法所涉及的测量参数包括输出电压、输出电流（测量分流器两端的电压）、热流计温差，热流计热导率及其几何参数长、宽、高，其中，热流计相关参数只需要在初次使用时进行测量标定。根据以上分析，测量不确定度主要取决于电压、温度测量相关测试仪表，本标准推荐使用具有六位半精度的数字多用表（例如：吉时利 6510、是德 34460A 等）。

6.3 温度控制

当温差电器件工作时，由于佩尔捷（Peltier）效应温差电器件会在热侧吸热、在冷侧放热（类似热泵），并且随着输出电流的增加，吸/放热量显著增加。测试时，如果无法保证热侧热量的充分供给和冷侧热量的及时排出，将引起器件热侧温度下降，冷侧温度上升，即：温差电器件两侧的有效温度减少，进而导致温差电器件偏离测试设定的温差条件，器件实际输出电压和输出功率减少。针对测试过程中的温度动态控制，日本 PEM-2 商用设备采用了延时方式，而本标准采用的是温度稳定判据（例如 5 秒内温度偏差小于 0.2°C ）实现精确的控温，保证整个电压—电流扫描过程中热侧温度在控制在允许的偏差范围内。如图 6 所示为两种温度控制方式在同一测试温度点的热侧温度变化曲线和电流—电压扫描曲线。更详细的测试结果表明见本说明 5.5 所述。

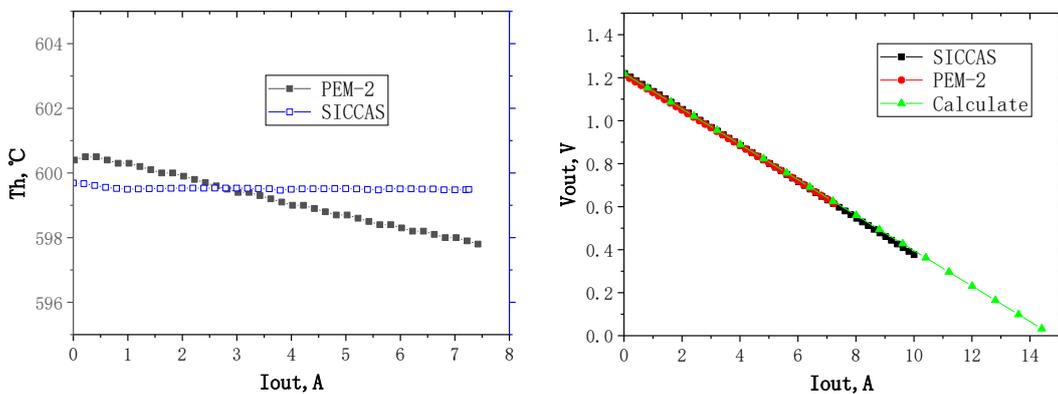


图 6 两种温度控制方式对电流—电压扫描测试影响

综上所述，采用高精度测试仪表，并对温差电器件热端、冷端进行精确的温度控制可以提高温差电器件发电效率测试的准确度，因此，定期对测试仪表进行检测校准是确保温差电器件发电效率测试的准确的基本条件。

7 主要试验（或验证）结果分析

为了验证《温差电器件发电性能测试方法》团体标准中相关数据和测试方法的科学性和适宜性,选取了本课题组自研的具有重要应用前景的中高温区半赫斯勒温差电器件和上海申和热磁电子科技有限公司生产的碲化铋器件作为试验对象,分别选取了 20×20、30×30、40×40 三个规格的试样,按照本标准的规定进行测试。

通过测试数据的整理分析表明,本标准中所确定的各项参数要求和测试方法是合理的,标准所确定的指标是适宜的,作为团体标准的依据也是可行的。

8 采用国际标准和国外先进标准情况、与国际、国外同类标准水平的对比情况

目前国内外尚无相关标准。

9与有关的现行法律、法规和强制性标准的关系

本标准在制定的过程中,已充分的查阅了相关的法律、法规及相关标准,完全符合现行相关法律、法规、强制标准的规定。

10 重大分歧意见的处理经过和依据

需征求意见后分析说明。

11 贯彻标准的要求和措施建议(包括组织措施、技术措施、过度办法、实施日期等)

本标准致力于建立一套简洁、有效、准确的温差电器件发电性能测试方法,规范温差电器件发电性能的代表工作。在本标准的贯彻过程中,将依赖行业内专家的大力支持和广泛地推荐,同时也需要各同行的大力配合推广使用。最后在标准的贯彻过程中,还将广泛在行业内和用户中宣传,紧密地同用户沟通交流,保证本标准的适用性、实用性。

12 废止现行相关标准的建议:

无。

13 其他应予说明的事项:

无。