

ICS 点击此处添加 ICS 号

CCS 点击此处添加 CCS 号

T/CSMT

团 体 标 准

T/XXX XXXX—XXXX

温差电器件发电性能测试方法

Testing method for generator performance of thermoelectric device

（征求意见稿）

（本草案完成时间：2023 年 4 月）

— XX — XX 发布

XXXX — XX — XX 实施

中国计量测试学会 发布

目 次

前言	II
引言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 测试原理	2
5 测试设备和仪器	3
5.1 测试设备	3
5.2 测试仪器	3
6 测试条件	3
7 试样制备	3
7.1 试样规格	3
7.2 试样冷、热侧	3
8 测试程序	4
8.1 测试前准备	4
8.2 测试步骤	4
9 数据处理	4
9.1 输出功率	4
9.2 热侧吸热量	4
9.3 发电效率	5
9.4 线性回归曲线	5
9.5 最大输出功率	5
10 测试报告	5

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国计量测试学会提出、归口并实施。

本文件起草单位：中国科学院上海硅酸盐研究所，中国电子科技集团公司第十八研究所，上海第二工业大学，杭州大和热磁电子有限公司

本文件主要起草人：廖锦城，柏胜强，陈立东，侯旭峰，任保国，吴子华，谢华清，阮炜，吴永庆
本文件为首次制定。

引 言

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应用。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并亟需完善的工作。中国计量测试学会组织本文件的起草，为温差电器件发电性能评价提供依据。

温差电器件发电性能测试方法

1 范围

本文件规定了温差电器件发电性能测试的术语和定义、原理、设备及仪器、条件、试样、程序、数据处理和报告等要求。

本文件适用于温差电器件热侧温度在 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ~ $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内、冷侧温度在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ~ $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 工况下的发电性能测试，其他工况测试可参照执行。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

SJ 2855 温差电致冷名词术语

3 术语和定义

SJ 2855界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

温差电器件 Thermoelectric device

温差电器件是对SJ 2855中温差电元件(Thermoelectric element)、温差电偶(Thermoelectric couple)、温差电组件(Thermoelectric module)的统称。

3.2

热侧温度 Hot side temperature

温差电器件热侧表面的平均温度(T_h),单位为开尔文(K)。

3.3

冷侧温度 Cold side temperature

温差电器件冷侧表面的平均温度(T_c),单位为开尔文(K)。

3.4

开路电压 Open circuit voltage

温差电器件没有负载,无电流输出时输出端的电位差(V_{oc}),单位为伏特(V)。

3.5

输出电压 Output voltage

温差电器件连接负载时输出端的电位差(V_{out}),单位为伏特(V)。

3.6

输出电流 Output current

温差电器件连接负载时回路中产生的电流(I_{out}),单位为安培(A)。

3.7

输出功率 Output power

温差电器件发电时产生的电功率(P_{out}),单位为瓦特(W)。

3.8

温差电器件内阻 Thermoelectric device resistance

温差电器件输出端之间的内部电阻(R_{in}),单位为欧姆(Ω)。

3.9

最大输出功率 Maximum output power

温差电器件发电时可产生的最大电功率(P_{out}),单位为瓦特(W)。

3.10

热侧吸热量 Hot side thermal input

温差电器件工作时热侧吸入的热流量 (Q_h)，单位为瓦特 (W)。

3.11

冷侧排热量 Cold side thermal output

温差电器件工作时冷侧排出的热流量 (Q_c)，单位为瓦特 (W)。

3.12

发电效率 Generator efficiency

温差电器件发电时，其输出功率与热侧吸热量的比值 (η)。

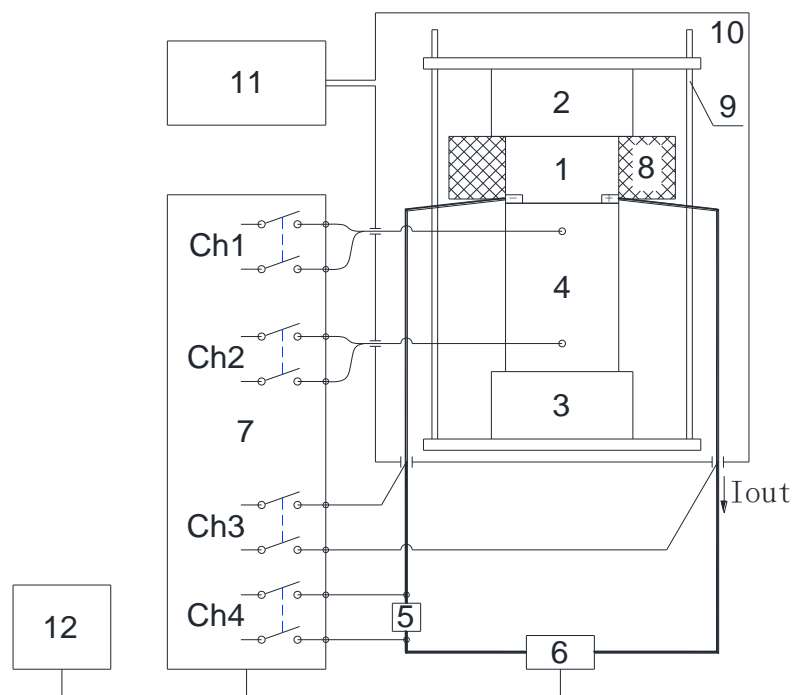
3.13

最大发电效率 Maximum generator efficiency

温差电器件发电时，发电效率可能达到的最大值 (η_{\max})。

4 测试原理

如图1所示为温差电器件发电性能测试装置示意图，基于泽贝克(Seebeck)效应，在给定的温差下，温差电器件的输出功率等于输出电压与输出电流的乘积，发电效率等于其输出功率与热侧吸热量的比值。



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——隔热材料;
- 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

5 测试设备和仪器

5.1 测试设备

5.1.1 样品室

具有气氛可控功能，极限真空度小于0.1 Pa。

5.1.2 样品架

具有夹紧功能，夹紧力范围为 0.1 KN ~ 20 KN，夹紧力控制精度不低于 ± 5 N。

5.1.3 热源

安装面应能包络试样，且额定使用温度不低于最高测试温度的20 %。

5.1.4 热流计

截面尺寸应与温差电器件试样一致，室温热导率不低于350W/m·K。

5.1.5 热沉

安装面应能包络试，可控温度范围为 0 °C ~ 300 °C。

5.1.6 恒温器

可控温度范围为 -20 °C ~ 90 °C，最高流速不低于20 L/min。

5.1.7 计算机

具有温度控制模块，电压、温度采集模块、数据分析处理模块及数据保存模块。

5.2 测试仪器

5.2.1 温控器

控温范围为 0 ~ 1000 °C，精度不低于0.2级。

5.2.2 标准电阻

额定电流不低于1 A，精度不低于0.01级。

5.2.3 电子负载

电流量程不低于1 A，电压量程不低于0.1 V。

5.2.4 数据采集器

电压量程不低于0.1 V，精度不低于0.01级。

6 测试条件

测试环境应整洁，无腐蚀性气体，无强磁场和电磁波干扰，环境温度不高于35°C，湿度不高于75%。

7 试样制备

7.1 试样规格

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，长度高度比例不大于1.5。

7.2 试样冷、热侧

试样热侧、冷侧应平整，平面度 ≤ 0.05 mm，表面粗糙度 $Ra \leq 1.6$ μm ，两侧的平行度 ≤ 0.1 mm。

8 测试程序

8.1 测试前准备

- 8.1.1 开启电源，检查设备及仪器连接是否正常；
- 8.1.2 检查热源、热沉安装面是否清洁、无污染，必要时使用分析纯酒精进行擦拭；
- 8.1.3 测量温差电器件试样的外形尺寸。

8.2 测试步骤

- 8.2.1 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；
- 8.2.2 抽真空到真空度小于 5.0 Pa，充入高纯氦气至真空度为 2.5×10^2 Pa，并重复不少于两次；
- 8.2.3 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%

- 8.2.4 设置试样测试温度和恒温器温度；
- 8.2.5 开始测试，温控器工作，开始升温，数据采集器采集信号；
- 8.2.6 电流-电压扫描测试：控制电子负载改变试样输出电流，同步采集输出电流、输出电压、热流计第一温度和第二温度，计算试样输出功率、发电效率；
- 8.2.7 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；
- 8.2.8 取发电效率的最大值作为试样的最大发电效率；
- 8.2.9 结束测试，记录测试结果。

9 数据处理

9.1 输出功率

试样的输出功率根据公式（1）计算：

$$P_{out}^i = V_{out}^i \times \frac{V_s^i}{R_s} \dots\dots\dots (1.)$$

式中：

i ——测量步序号，数值为1, 2, 3, ……., n ；

P_{out}^i ——试样输出功率，单位为瓦（W）；

V_{out}^i ——试样输出电压，单位为伏特（V）；

V_s^i ——标准电阻两端电压，单位为伏特（V）；

R_s ——标准电阻的阻值，单位为欧姆（ Ω ）。

9.2 热侧吸热量

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，

$$Q_h^i = P_{out}^i + Q_c^i \dots\dots\dots (2.)$$

式中：

i ——测量步序号，数值为1, 2, 3, ……， n ；

Q_h^i ——试样热侧吸热量，单位为瓦（W）；

P_{Out}^i ——试样输出功率，单位为瓦（W）；

Q_c^i ——试样冷侧排热量，单位为瓦（W）。

试样冷侧排热量根据公式（3）计算：

$$Q_c^i = \lambda \times \frac{(T_1^i - T_2^i) \times A}{L} \dots\dots\dots (3.)$$

式中：

i ——测量步序号，数值为1, 2, 3, ……， n ；

Q_c^i ——试样冷侧排热量，单位为瓦（W）；

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，单位为瓦每米开尔文（W/m·K）；

A ——热流计的截面积，单位为平方米（m²）；

L ——热流计第一温度点与第二温度点之间的距离，单位为米（m）。

9.3 发电效率

将公式（1）和（2）代入公式（4）计算得到试样的发电效率：

$$\eta_i = \frac{P_{Out}^i}{Q_h^i} \times 100\% \dots\dots\dots (4.)$$

式中：

i ——测量步序号，数值为1, 2, 3, ……， n ；

η_i ——试样发电效率，单位为百分数（%）；

P_{Out}^i ——试样输出功率，单位为瓦（W）；

Q_h^i ——试样热侧吸热量，单位为瓦（W）。

9.4 线性回归曲线

采用最小二乘法对试样输出电流-电压曲线进行线性拟合得到的线性回归曲线，如公式（5）所示：

$$V_{Out} = V_{oc} - R_{in} \times I_{Out} \dots\dots\dots (5.)$$

式中：

V_{Out} ——温差电器件的输出电压，单位为伏特（V）；

V_{oc} ——温差电器件的开路电压，单位为伏特（V）；

R_{in} ——温差电器件的内阻，单位为欧姆（Ω）；

I_{Out} ——温差电器件的输出电流，单位为安培（A）。

9.5 最大输出功率

公式（5）表示的曲线的斜率即为试样的内阻，当输出电流 $I_{Out} = \frac{V_{oc}}{2 \times R_{in}}$ 时，根据公式（6）计算得到温差电器件的最大输出功率：

$$P_{max} = \frac{V_{oc}^2}{4 \times R_{in}} \dots\dots\dots (6.)$$

式中：

P_{max} ——温差电器件的最大输出功率，单位为瓦（W）；

V_{oc} ——温差电器件的开路电压，单位为伏特（V）；

R_{in} ——温差电器件的内阻，单位为欧姆（Ω）。

10 测试报告

应包括以下内容：

- a) 试样状态：送样单位，试样名称，试样形状，试样尺寸，试样编号等；
 - b) 测试数据：升温过程中试样热侧温度、试样冷侧温度、热流计第一温度、热流计第二温度、试样开路电压，以及各个温度条件下电流-电压扫描对应的试样输出电流、试样输出电压、试样热侧温度、试样冷侧温度、热流计第一温度、热流计第二温度；
 - c) 测试结果及分析：各个温度条件下试样输出电流与输出电压、输出电流与输出功率关系曲线图，负载与试样输出功率、负载与发电效率关系曲线图，以及各个温度条件下试样的开路电压、短路电流、内阻、最大输出功率及最大发电效率。
-