

# 基于结构函数理论的微通道冷板热阻研究

翁夏

(西南电子技术研究所, 成都 610036)

**摘要:** **目的** 寻找微通道冷板热阻与沸腾程度的关系。**方法** 在结构函数的理论基础上, 使用 T3Ster 对微通道冷板进行测量, 从实验系统热路的微分结构函数中分离出微通道冷板的一维热阻。**结果** 单相流动时冷板的一维热阻与热流密度之间不存在明显的关联。**结论** 两相流动时冷板的一维热阻总体上随着微通道内沸腾的加剧而呈现出波动下降的趋势。

**关键词:** 结构函数; T3Ster; 热阻; 微通道冷板; 两相流

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2018.06.016

**中图分类号:** TK124      **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2018)06-0082-06

## Thermal Resistance of Micro-channel Cold Plate Based on Structure Function Theory

WENG Xia

(Southwest Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China)

**ABSTRACT: Objective** To research the relationship between thermal resistance of micro-channel plate and degree of boiling. **Method** Based on the structure function theory, the micro-channel cold plate was tested with T3Ster to isolate the one dimensional thermal resistance from the differential structure function of the thermal circuit of the experimental system. **Results** The results indicate that the one dimensional thermal resistance of the cold plate was not connected with heat flux when the flow was single phase. **Conclusion** By and large, the one dimensional resistance of the cold plate show a fluctuant downward trend when boiling in the micro-channel is intensifying.

**KEY WORDS:** structure function; T3Ster; thermal resistance; micro-channel cold plate; two phase flow

近年来, 一些国内外学者使用基于结构函数的测试方法对部分典型芯片(尤其是LED)的内热阻进行了详细的测量<sup>[1-2]</sup>。也有学者用其对简单传热形式进行测量, 并与理论结果进行对比, 发现该方法的精度较高<sup>[3]</sup>。与此同时, 部分学者也发现了该测试方法可以用于其他一些复杂结构形式的热阻测量, 如直埋电缆等<sup>[4]</sup>。接触热阻及热特性时间响应同样可以使用该方法进行测量, 并得到较为稳定的结果<sup>[5-8]</sup>。类似地, 也有学者使用该方法对微尺度散热器进行相关研究<sup>[9]</sup>。

由于微通道冷板具有体积小、换热系数高等优势, 已经被应用在部分高热流密度的电子设备上, 并被用作主要的散热手段。微通道内的沸腾流动换热能够极大地提高换热系数、降低热阻, 因此需要采取一种测试方式对微通道内的两相流动进行精确的传热研究。

文中在前人研究的基础上, 拓展了基于结构函数的热阻测试的使用范围, 使用该方法对两相流动的微通道冷板进行了传热测试, 并研究了不同工况下的流动对冷板热阻的影响。

收稿日期: 2018-03-17; 修订日期: 2018-04-06

基金项目: 国防科工局基金项目(TDZX-17-048-2)

作者简介: 翁夏(1987—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电子设备热设计。

# 1 结构函数原理

## 1.1 系统描述方式

最简单的热路系统可以用一个热阻和一个热容来描述<sup>[10]</sup>，这里称其为基本系统。对基本系统施加热耗  $P$ ，则热源的温度变化可描述为：

$$T(t) = PR_{th}(1 - \exp(-t/\tau_i))$$

式中： $\tau$  为系统的时间常数， $\tau=R_{th}C_{th}$ 。真实的系统可以看作多个基本系统之和，其热源的温度变化可描述为：

$$T(t) = P \sum_{i=1}^n R_{thi}(1 - \exp(-t/\tau_i))$$

上式的各项之间并不是独立存在的，一个项可以由另一个项进行计算<sup>[10]</sup>。在真实的系统中，物理结构是由无限个时间常数的数量来描述的。由于热容和热阻不能独立存在，因此可将物理系统化为 Foster 型结构，如图 1 所示。在真实的系统中，热路上的每个热容都是接地的，因此须将 Foster 型结构化为接地的 Cauer 型物理结构，如图 2 所示。

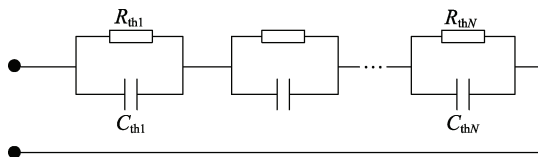


图 1 Foster 型物理结构

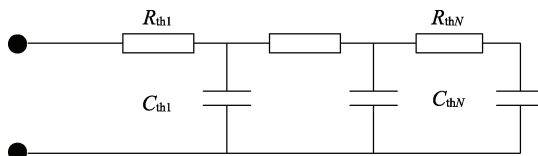


图 2 Cauer 型物理结构

一个基于真实系统的随机热路可以用 Cauer 结构来描述。通过该结构，可以得到计算结构函数（也称为 Protonotarios-Wing 函数<sup>[11]</sup>），由此可派生出微分结构函数，定义为计算热容的导数与计算热阻的导数之商，该函数可用于描述跨区域、跨界面的热路结构。

$$S(R_{\Sigma}) = \frac{dC_{\Sigma}}{dR_{\Sigma}}$$

## 1.2 实验原理

文中使用 T3Ster（半导体器件封装热特性测试仪）进行热测试。T3Ster 用于结构热阻测试的基本原理如图 3 所示。T3Ster 通过对被测系统施加源得到的反馈电信号进行数学处理，得出系统的结构函数，包含热阻值和热容值。

对于一般的半导体器件，其加载电压总是随着结温的上升而呈现下降趋势。一般在（25~125）℃这一

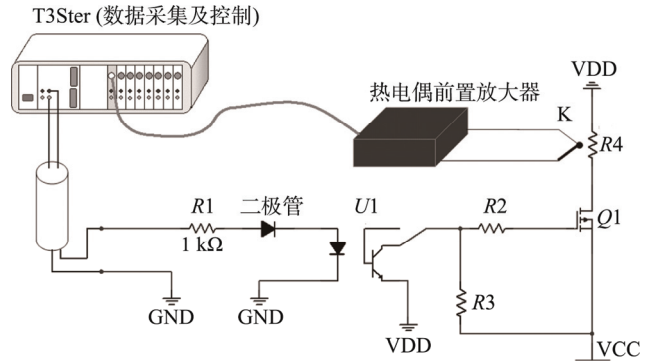


图 3 T3Ster 用于结构热阻测试的基本原理

温度区间内，加载电压与结温之间呈现很好的反比例线性关系，且直线的下降斜率称为  $k$  系数（ $k$  coefficient）。

测试时，通过恒流源，T3Ster 对被测器件施以变化的电流值，如图 4 所示。图 4 中的大电流是发热电流，目的是使半导体器件发热；小电流是测试电流，目的是通过对其施加恒定电流来使其两端加载电压，该电流不会使得被测半导体器件出现热效应。接着，仪器将记录下加载在器件两端的电压随着时间的变化曲线，如图 5 所示。测试开始时，加载的小电流（测试电流）会在器件两端施加  $V_{F,sense,0}$  的电压。一旦大电流（加热电流）开启，则器件两端电压会突然上升至  $V_{F,drive,1}$ 。由于随着实验进行，大电流会使得器件的结温逐渐上升，因此加载在器件两端的电压会逐渐略微下降，直至器件结温保持恒定，此时的加载电压为  $V_{F,drive,0}$ 。当加热完毕，仪器会撤去大电流，再次施以小电流对器件进行测试。刚切换至小电流时，由于器件温度较高，因此此时的加载电压略低于之前加载小电流时的电压，为  $V_{F,sense,1}$ 。随着器件逐渐冷却，加载电压会逐渐恢复到原先的水平，即  $V_{F,sense,0}$ ，此段曲线称为半导体器件的冷却曲线。T3Ster 仪器将抽出这一段冷却曲线（有时也可以是加热曲线）并进行连续的数学变换，并得出测试结果。

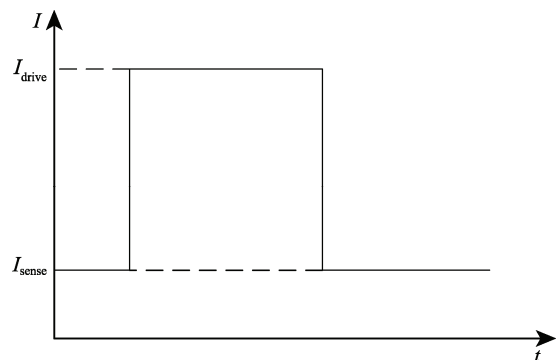


图 4 测试时 T3Ster 的恒流源输出的电流曲线

将抽出冷却曲线的纵坐标以  $k$  系数作为分母进行变换，可得到如图 6 所示的结温变化曲线。对图

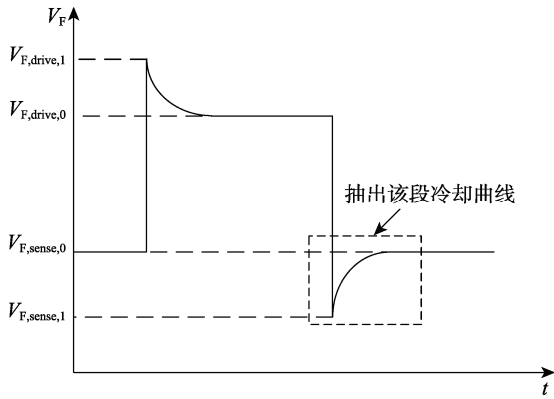


图5 被测半导体器件加载电压随时间的变化曲线

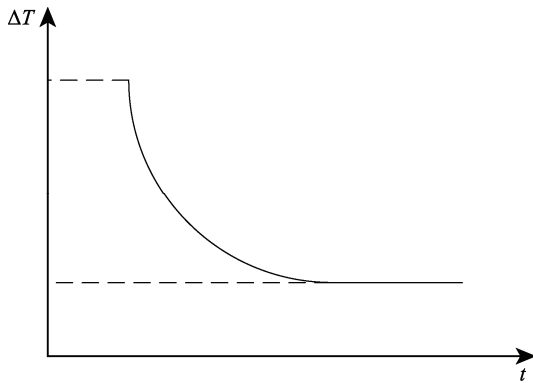


图6 半导体器件的结温变化曲线

6中的结温曲线以器件功率作为分母再次进行变换, 可得如图7所示的热阻曲线, 图7中横坐标为时间常数 ( $\tau=R_{th}C_{th}$ ), 纵坐标为热阻  $R_{th}$ 。

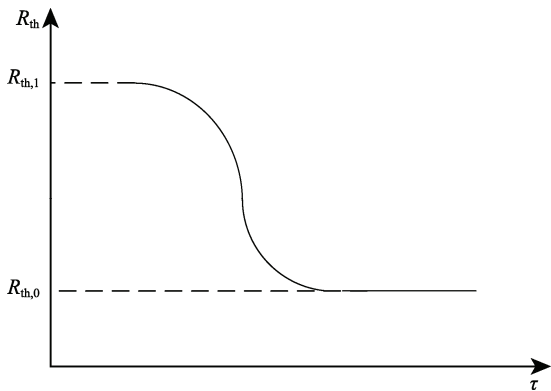


图7 半导体器件的热阻曲线

对图7再次进行数学变换, 可得微分结构函数, 如图8所示。图8中横坐标是热阻, 纵坐标是热容对热阻的微分。可以看出, 器件的微分结构函数一般具有多个极值点, 每两个极值点之间的距离即为该半导体器件传热热路中某一层的热阻。实验将利用这一原理, 从微分结构函数中分离出半导体器件安装冷板的一维传热热阻, 并对不同工况的实验结果进行对比分析。

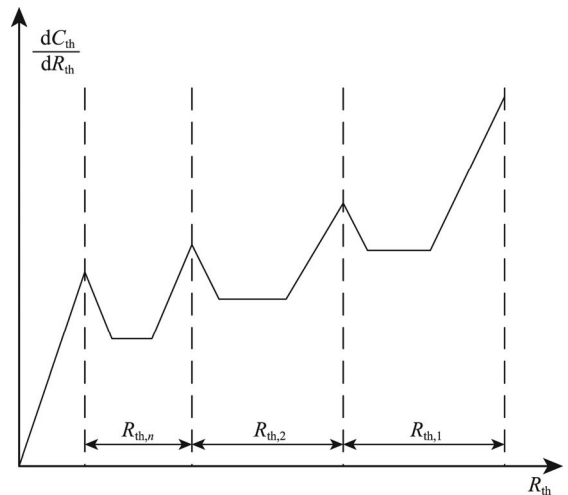


图8 半导体器件的微分结构函数

## 2 实验设计

实验整体系统如图9所示。齿轮泵将密封储液器中的工质FC-72抽出, 经过过滤器, 进入微通道冷板。使用银浆分别在冷板的两个面粘接了LTCC热源和SOT封装三极管。通过调整齿轮泵的流量和LTCC热源的发热功率, 使微通道冷板处于不同的状态。接下来工质流经气液换热器, 使用风机将之冷却。最后, 工质回到密封储液器完成一轮循环。测试时, 利用三极管的二极管特性, 将其P结和N结连接到T3Ster设备上, 利用实验原理得出热路的微分结构函数, 并分离出微通道冷板在不同状态下的一维传热热阻。

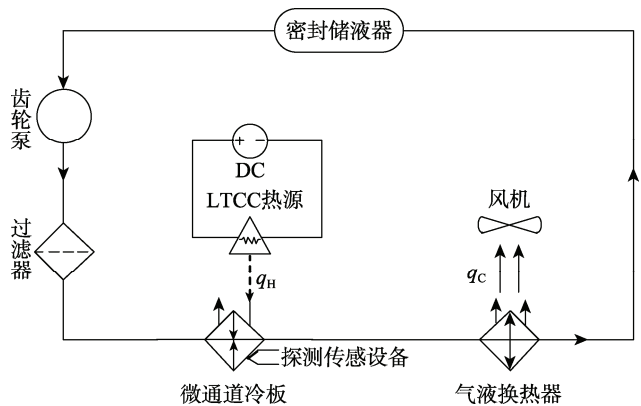


图9 实验系统

微通道冷板和LTCC热源如图10所示。冷板中为矩形微通道, 每个通道截面尺寸为1.5 mm×0.4 mm。LTCC热源共具有64个发热电阻阵, 粘接在微通道冷板上。每个电阻的尺寸为1 mm×2 mm, 采用并联的方式为所有64个电阻供电。三极管的连接方式如图11所示。

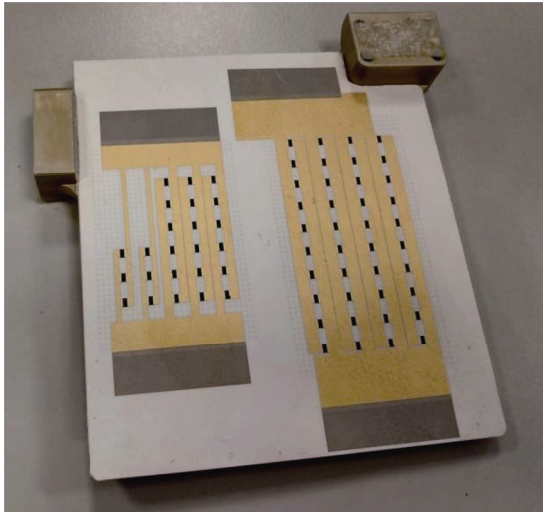
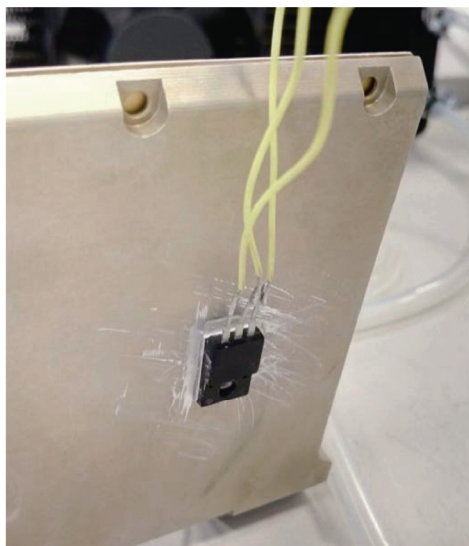
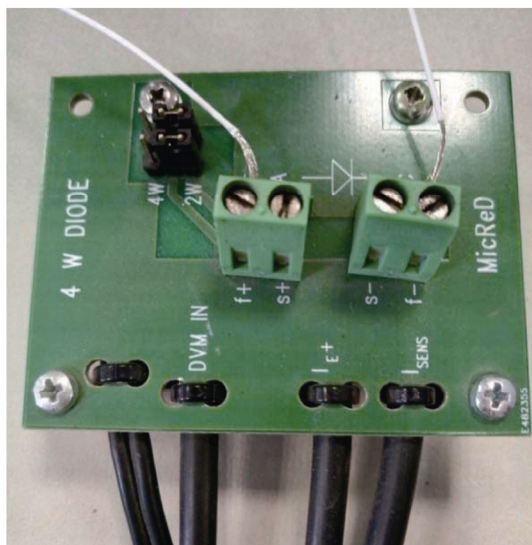


图 10 粘接在微通道冷板上的 LTCC 热



a 三极管与冷板间以银浆粘接



b 三极管与MicReD夹具的线路连接

图 11 三极管的连接方式

### 3 实验结果与分析

将工质的流量保持在 0.3 L/min，调节加热电压，实验实现了 5 种工况，见表 1。

表 1 各实验工况下的实测功率和热流密度

工况	加热电压/V	实测功率/W	单个电阻的平均热流密度/(W·cm <sup>-2</sup> )
A	0	0	0
B	5.0	19	14.8
C	10.0	76	59.4
D	12.5	118.8	92.8
E	15.0	153	119.5

使用 T3Ster 对 A—E 工况分别进行了测试，得出了各自的微分结构函数，如图 12 所示。从图 12 中可知，微分结构函数图中最右侧的极大值区间为该实验中冷板的一维传热热阻。图中从右往左的函数曲线极大值区间分别可以描述以下物理量：冷板的一维传热热阻、冷板和三极管之间的粘接接触热阻以及三极管内部热阻。

以上工况下的测试结果列在表 2 中，各工况冷板一维热阻如图 13 所示。从图 13 中可以看出，单相流动时，冷板一维热阻变化不大。产生气泡之后，冷板热阻出现了较为明显的下降，且随着沸腾的加剧，热阻总体上呈现下降趋势。D 工况相对于 C 工况的一维热阻略有上升的原因是：较多气泡导致通道内干度上升，而空气的导热系数较低，较多气泡通过相对强烈的流动带来的较高  $Re$  数无法抵消低导热系数所带来的损失。通过 E 工况可看到，虽然气泡进一步增多、干度进一步上升，但是强烈流动带来的高  $Re$  数已经可以弥补低导热系数带来的传热损失。加热电压为 15 V 时（此时热流密度为 119.5 W/cm<sup>2</sup>，出现汽液分层现象），微通道冷板的一维热阻较不加热时下降了 25.3%。因此，冷板一维热阻总体上随着沸腾的加剧呈现出波动下降的趋势。

### 4 结论

文中以微通道冷板为研究对象，使用 T3Ster 半导体器件封装热特性测试仪，采取分离结构函数的研究方法，获取了多种工况下冷板的一维热阻。得到以下结论：采用分离结构函数的方法来测试冷板一维热阻是可行的；在文中研究的实验对象中，微分结构函数最右侧的极大值区间即为冷板一维热阻；单相流动时，即使热流密度上升，微通道冷板的一维热阻也不会出现较大的变化；随着热源热流密度上升，微通道内沸腾加剧，微通道冷板的一维热阻总体上呈现波动下降的趋势。

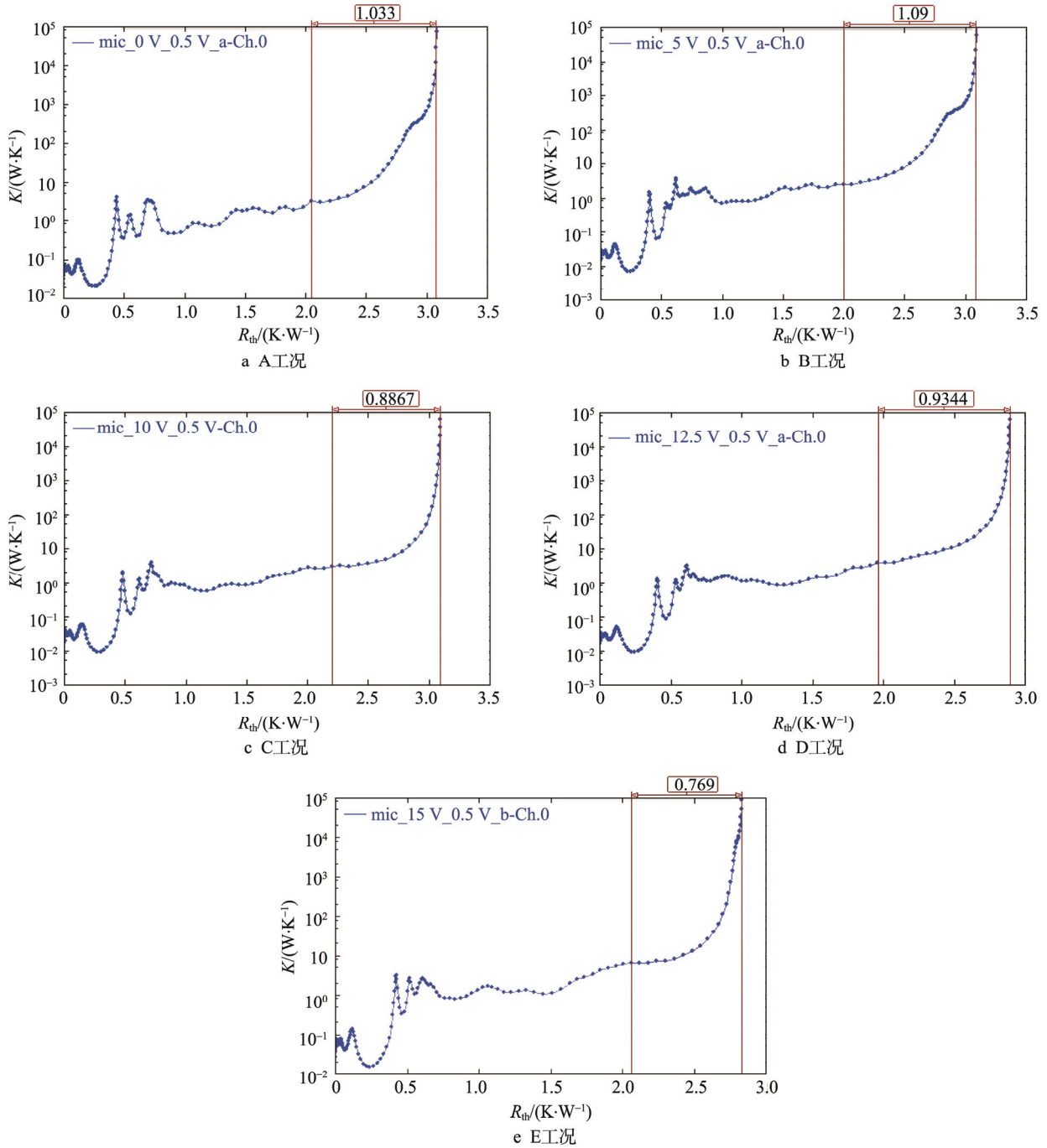


图 12 五种实验工况的微分结构函数

表 2 各工况的现象及冷板一维热阻

工况	现象	热阻/(K·W <sup>-1</sup> )
A	单相流	1.03
B	单相流	1.09
C	少量气泡, 两相流	0.887
D	较多气泡, 两相流	0.934
E	大量蒸汽, 汽液分层	0.769

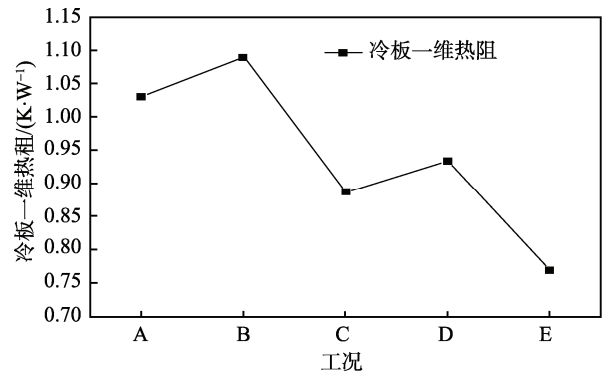


图 13 各工况冷板一维热阻

## 参考文献:

- [1] 赵学历, 金尚忠, 王乐, 等. 基于结构函数的 LED 热特性测试方法[J]. 光电工程, 2011, 38(9): 115-118.
- [2] 张立, 汪新刚, 崔福利. 使用 T3Ster 对宇航电子元器件内部热特性的测量[J]. 空间电子技术, 2011(2): 59-64.
- [3] MEY G, VERMEERSCH B, BANASZCYK J, et al. Thermal Impedances of Thin Plates[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2007, 50: 4457-4460.
- [4] VASILIS C, PANAGIOTIS C, IONNANIS P, et al. Dynamic Thermal Analysis of Underground Medium Power Cables Using Thermal Impedance, Time Constant Distribution and Structure Function[J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 60: 256-260.
- [5] MARCIN J, JEDRZEJ B, BJORN V, et al. Generation of Reduced Dynamic Thermal Models of Electronic Systems from Time Constant Spectra of Transient Temperature Responses[J]. Microelectronics Reliability, 2011, 51: 1351-1355.
- [6] MARCIN J, ZOLTAN S, ANDRZEJ N. Impact of Nonlinearities on Electronic Device Transient Thermal Responses[J]. Microelectronics Journal, 2014, 45: 1721-1725.
- [7] MEY G, PILARSKI J, WOJCIK M, et al. Influence of Interface Materials on the Thermal Impedance of Electronic Packages[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2009, 36: 210-212.
- [8] CHIN P C, MUTHARASU D. Thermal Study on High Power Infrared Emitter with Different Thermal Interface Materials by Utilizing Dual Interface Method[J]. Thermochemica Acta, 2012, 544: 27-32.
- [9] TAKACS G, SZABO P, PLESZ B, et al. Improved Thermal Characterization Method of Integrated Microscale Heat Sinks[J]. Microelectronics Journal, 2014, 45: 1740-1745.
- [10] MARTA R. New Possibilities in the Thermal Evaluation, Offered by Transient Testing[J]. Microelectronics Journal, 2003, 34: 171-177.
- [11] PROTONOTARIOS E, WING O. Theory of Nonuniform RC Lines[J]. IEEE Trans, 1967, 14(1): 2-12.