

基于 CMY 模型改进的界面热阻模型及其应用

陈剑楠¹ 邹 颢¹ 罗小兵^{1,2}

(1. 华中科技大学能源与动力工程学院, 湖北 武汉, 430074;

2. 华中科技大学武汉光电国家实验室 MOEMS 研究部, 湖北 武汉, 430074)

摘 要 导热膏填充的接触界面热阻由接触热阻和间隙热阻两部分组成。本文采用截锥体接触的单热流通道模型代替 CMY 模型中的圆盘接触的单热流通道模型, 推导出了改进的接触热阻计算公式。本文还结合间隙热阻的计算公式, 得到了一种改进的导热膏填充的接触界面热阻模型。通过分析得出了如下结论: 对于使用导热膏填充的接触界面的热阻而言, 其主要影响因素为接触表面的粗糙度和导热膏的导热系数, 而接触界面间压力对其的影响则相对较小。

关键词 接触热阻; 截锥体模型; 导热膏

中图分类号: TK123

文献标识码: A

文章编号: 0253-231X(2012)03-0509-04

An Improved Thermal Joint Resistance Model Based on CMY Model and its Application

CHEN Jian-Nan¹ ZOU Yong¹ LUO Xiao-Bing^{1,2}

(1. Energy and power institute, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. Division of MoEMS, Wuhan National Lab. for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract The thermal resistances of grease-filled interfaces consist of contact resistance and gap resistance. The single heat flux model of cut-off cone contact was used to replace CMY's disk contact model and an improved contact resistance equation was derived. Combined with gap resistance equation, an improved thermal joint resistance model was obtained. Based on this model, it can be found that for the resistance of grease-filled interfaces, the main influencing factors are roughness of contact surfaces and thermal conductivity of grease, however, pressure between contact surfaces has relative small influence.

Key words thermal contact resistance; cut-off cone; grease-filled interface

0 引 言

电子器件工作时的热流路径上存在着许多接触界面, 界面间的接触热阻会影响电子器件的传热性能和工作可靠性。因此, 建立合理的接触热阻模型, 对接触热阻进行准确的预测, 成为工程设计中重要环节。填充导热膏是一种常用的减小接触热阻的手段, 针对这种填充导热膏的接触界面, 需要一套合理的模型对其接触界面的热阻进行预测。

随着人们对接触热阻研究的不断深入, 科研人员基于各种假设和方法提出了多种接触热阻模型, 以 Cooper 等人的 CMY 模型^[1] 适用范围最广、更为准确和更便于使用, 故 CMY 模型的普及度最高。CMY 模型中的热模型使用的是圆盘接触的单热流通道模型。有学者指出^[2], 采用截锥体作为实际接触面上的热流通道更接近实际的接触情况。本文

采用截锥体模型作为单热流通道模型对 CMY 模型进行了改进, 并推导出了计算式。填充导热膏的接触界面的热阻可由实际的接触热阻和导热膏填充的间隙的热阻两部分组成。通过组合改进的接触热阻模型和间隙热阻模型即可得到导热膏填充的接触界面热阻模型, 本文对此作了分析。

1 基于 CMY 模型的改进的接触热阻模型

1.1 建立改进模型

接触热阻模型的建立从三个方面进行: 表面形貌模型、力学模型和热模型。CMY 模型的建立亦是如此。实际的接触表面是由许多微凸峰的接触构成

收稿日期: 2011-12-07; 修订日期: 2012-02-14

基金项目: 国家 973 项目资助项目 (No.2009CB320203)

作者简介: 陈剑楠 (1988-), 男, 博士生, 主要从事流动和传热研究。通信作者: 罗小兵, 教授, Email: Luoxb@mail.hust.edu.cn

的, CMY 模型通过合理的假设认为这些凸峰是随机分布的, 凸峰高度符合高斯分布, 完成了对表面接触的数学描述。CMY 模型使用 Herzt 接触力学的理论形成了自己的力学模型。同时, CMY 模型把实际相互接触的微凸峰近似为圆盘接触, 并以此建立了相应的热模型。表面形貌模型和力学模型结合起来, 可以得出通过热模型计算总的接触热阻时所需的几何参数: 微接触半径 a 、接触点密度 n 、相对接触面积 A_r/A_a 、热流通道相对接触半径 ε 。三个模型结合起来就形成了完整的接触热阻模型。

本文以 CMY 模型为基础, 结合截锥体型的单热流通道模型, 推导出改进的接触热阻模型。

总的接触面热流是经过每一个微凸峰接触的热流通道的单元热流的和, 即:

$$Q = \sum_{i=1}^N Q_i = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_N \quad (1)$$

N 是接触表面上接触点的个数, 即热流通道个数。又,

$$Q = \frac{\Delta T_c}{R_c} \quad (2)$$

ΔT_c 为接触界面上上下表面温差。而且,

$$\Delta T_c = \Delta T_{c1} = \Delta T_{c2} \dots = \Delta T_{cN} \quad (3)$$

故有,

$$\frac{1}{R_c} = \frac{1}{R_{c1}} + \frac{1}{R_{c2}} + \dots + \frac{1}{R_{cN}} \quad (4)$$

R_c 为界面接触热阻, R_{ci} 为第 i 个热流通道的热阻。

这里把每个微接触处的微凸峰用截锥体几何体近似, 较之前 CMY 模型使用圆盘近似增加了凸峰绝对平均斜度对微接触处的接触热阻的影响, 更接近真实情况, 如图 1 示。

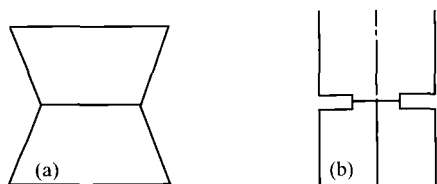


图 1 截锥体 (a) 和圆盘 (b) 单热流通道模型

Fig. 1 Single heat flux channel of cut-off cone (a) and disk (b)

截锥体接触单热流通道接触热阻的计算模型如图 2, 表达式为 [2]:

$$R_{ci} = \frac{1 - \varepsilon^2}{4.8\pi k a} \times \left[\frac{0.685 \cot \theta + (1.945 + 0.431 \cot \theta) \varepsilon}{\varepsilon} \right] \quad (5)$$

其中, $\cot \theta = m$, m 为表面绝对平均斜度。

为了方便每个微小接触的形变, 通过使用有效参数把两粗糙表面的接触简化为一个粗糙表面和一个光滑的刚性表面的接触, 如图 3 所示 [3]。

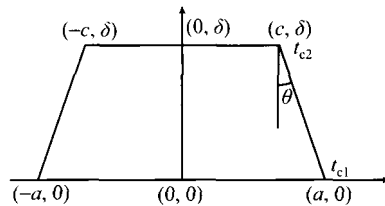


图 2 截锥体型凸峰热流通道的计算模型

Fig. 2 Computation model of cut-off cone channel

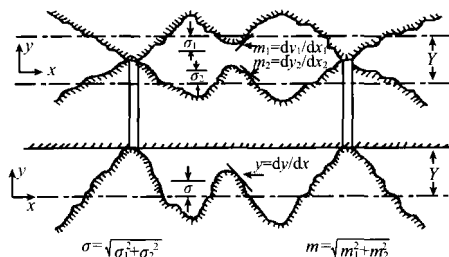


图 3 实际接触表面的简化过程

Fig. 3 Simplification of real contact surfaces

有效 RMS(均方根) 表面粗糙度 σ 与实际接触表面 RMS 粗糙度 σ_1, σ_2 的关系为:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \quad (6)$$

同理有效表面绝对平均斜度为:

$$m = \sqrt{m_1^2 + m_2^2} \quad (7)$$

相应的有效导热系数表示为:

$$k = \frac{2k_1 k_2}{k_1 + k_2} \quad (8)$$

其中, 角标 1, 2 分别代表两个接触表面。

另外, 由于每个微小接触处的几何参数如 a, ε 都各不相同, 为了便于计算总的接触热阻, 把每个各不相同的微小的实际接触当量化为相同的微小接触, 总的接触热阻就有如下表达:

$$\frac{1}{R_c} = \frac{1}{R_{c1}} + \frac{1}{R_{c2}} + \dots + \frac{1}{R_{cN}} = \frac{N}{R_{ci}} = \frac{n A_a}{R_{ci}} \quad (9)$$

$$R_c = \frac{R_{ci}}{n A_a} \quad (10)$$

又由截锥体模型表达式 (5) 有:

$$R_c = \frac{1 - \varepsilon^2}{4.8\pi k a n A_a} \times \left[\frac{0.685 m + (1.945 + 0.431 m) \varepsilon}{\varepsilon} \right] \quad (11)$$

其中的 ε, a, n 参考 CMY 模型中的相关表达式得到 [2]:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{A_r}{A_a}} = \sqrt{\frac{P}{H_c}} = \sqrt{\frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{\lambda}{\sqrt{2}}\right)} \quad (12)$$

$$n = \frac{1}{16} \left(\frac{m}{\sigma}\right)^2 \frac{\exp(-\lambda^2)}{\operatorname{erfc}\left(\frac{\lambda}{\sqrt{2}}\right)} \quad (13)$$

表 1 改进模型
Table 1 Improved model

热阻	改进模型
接触热阻 R_c	$(1 - \eta^2 P/H_c) \exp\{\text{erfc}^{-1}(2P/H_c)\} \times (\frac{0.457}{\eta\sqrt{P/H_c}} + \frac{1.297}{m} + 0.287) \cdot \frac{\sigma}{A_a k}$
面积热阻 r_c	$(1 - \eta^2 P/H_c) \exp\{\text{erfc}^{-1}(2P/H_c)\} \times (\frac{0.457}{\eta\sqrt{P/H_c}} + \frac{1.297}{m} + 0.287) \cdot \frac{\sigma}{k}$

其中, $\eta = 0.55132 + 4.37653\sqrt{P/H_c} - 5.61467P/H_c$, 面积热阻 $r_c = R_c \cdot A_a$.

$$a = \sqrt{\frac{8}{\pi}} \left(\frac{\sigma}{m}\right) \exp\left(\frac{\lambda^2}{2}\right) \text{erfc}\left(\frac{\lambda}{\sqrt{2}}\right) \quad (14)$$

$$\lambda = \sqrt{2} \text{erfc}^{-1}(2P/H_c) \quad (15)$$

其中的 ε 为相对接触半径, 是基于半球形接触 Hertz 接触力学理论得到的, 在截锥体接触模型中需修正。因此引入修正系数 $\eta^{[4]}$,

$$\eta = 0.55132 + 4.37653\varepsilon - 5.61467\varepsilon^2 \quad (16)$$

将相应的参数代入接触热阻的表达式, 相应公式总结于表 1。

1.2 改进模型的验证

本文使用刘菊^[5]的实验数据与改进模型的计算结果进行了对比, 对比结果如图 4 示。

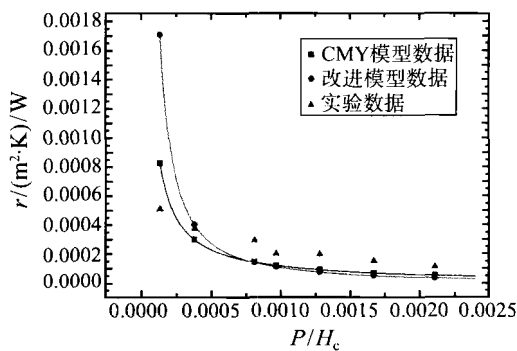


图 4 改进模型与实验数据的对比

Fig. 4 Data comparison between improved model and experiments

由对比可见, 改进模型与实验数据较为接近, 能较好预测实验数据。

2.2 利用模型分析导热膏填充的接触界面的热阻

下面将通过分析得出影响导热膏填充的接触界面热导的主要因素, 以期对工程实际起到指导作用。

图 6 是接触热导随表面粗糙度的变化, 可看出

2 应用模型分析填充导热膏的界面热阻

2.1 建立导热膏填充的接触界面热阻模型

对于填充导热膏的接触界面热阻 r_j 由两部分组成: 实际的接触热阻 r_c 和填充导热膏的间隙热阻 r_g 。应有:

$$1/r_j = 1/r_c + 1/r_g \quad (17)$$

为了表达方便, 故使用接触热导 h 来表达。因 $h = 1/r$, 有

$$h_j = h_c + h_g \quad (18)$$

其中, 实际接触热导 h_c 可由上述改进模型得到。

对于间隙热导的计算, 可以通过类似于计算实际接触热导时使用的等效方法, 将填充于相互接触的微凸体间间隙的导热膏等效为均布与两光滑平坦表面间的情况, 如图 5 所示。图中 Y 为平均高度线间距离, 也是等效间隙厚度。

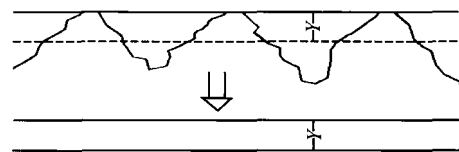


图 5 导热膏填充的接触界面的简化示意

Fig. 5 Schematic of grease-filled interfaces

于是导热膏填充的间隙热导就可以写为^[6]:

$$h_g = k_g/Y \quad (19)$$

$$Y = \sqrt{2} \text{erfc}^{-1}(P/H_c)\sigma \quad (20)$$

综合接触热导和间隙热导即可写出填充导热膏的接触界面热导:

$$h_j = h_c + h_g = \frac{k}{(1 - \frac{P}{H_c}) \exp\{\text{erfc}^{-1}(\frac{2P}{H_c})\} (\frac{0.457}{\sqrt{\frac{P}{H_c}}} + \frac{1.297}{m} + 0.287)\sigma} + \frac{k_g}{\sqrt{2} \text{erfc}^{-1}(\frac{P}{H_c})\sigma} \quad (21)$$

导热膏填充的间隙热导远大于实际的接触热导, 尤其是在较小的表面粗糙度时。可见填充导热膏可使接触界面的热导值有很大的提升, 这也为填充导热膏这一强化传热手段提供了理论依据。同时可以看

出表面粗糙度 σ 对于接触界面热导 h_j 的影响。 h_j 随 σ 的减小而增大,但在较大的 σ 值 ($\sigma > 3 \mu\text{m}$) 时这一影响并不明显,而在 σ 较小 ($\sigma < 1 \mu\text{m}$) 时, σ 值微弱的减小就会引起 h_j 值很大的提升。这就是说,对于工程实际中的有导热膏填充的接触界面,在条件允许的情况下,如果能使接触表面的粗糙度降低至 $1 \mu\text{m}$ 以下,导热膏将发挥更好的强化传热的作用,如果能够在此范围内进一步减小表面粗糙度,接触界面的热导值将有很大的提升。

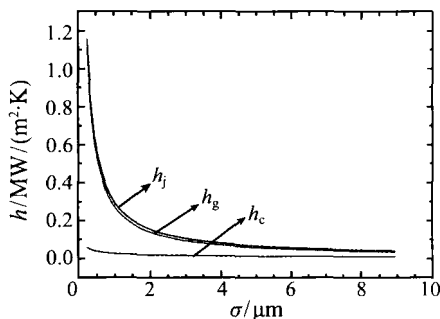


图 6 接触热导随表面粗糙度的变化曲线
Fig. 6 Variation of contact conductivity with surface roughness

图 7 是接触热导随相对接触压力变化的情况,亦可见接触界面的热导主要由导热膏填充的间隙热导决定。不过与表面粗糙度 σ 相比,相对接触压力 P/H_c 对于接触界面热导 h_j 的影响较弱。因而在采用了填充导热膏这一强化传热手段之后,没有必要通过追求更高的接触压力来增大接触热导强化传热,这样就可以减弱对于材料力学性能的要求,提高经济性。

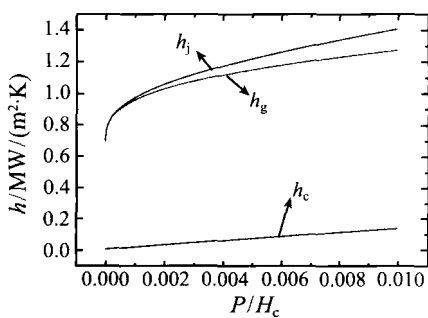


图 7 接触热导随相对接触压力的变化曲线
Fig. 7 Variation of contact conductivity with contact pressure

图 8 表示的是导热膏的导热系数对接触热导的影响,可见导热膏的导热系数直接影响着接触界面的热导值,二者几乎呈线性关系。因而导热膏的性能对于接触界面间传热情况有很大的影响,选取充满性好、导热系数大的导热膏可以显著减小接触界面的热阻。

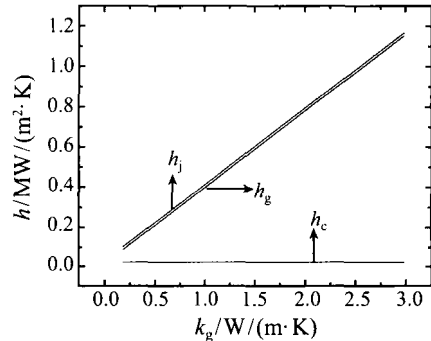


图 8 接触热导随导热膏导热系数的变化曲线
Fig. 8 Variation of contact conductivity with thermal conductivity of grease

3 结 论

本文在 CMY 模型的基础上,通过采用与实际情况更接近的截锥体接触的单热流通道模型代替圆盘接触的单热流通道模型,得到了改进的接触热阻模型,并且与实验数据的一致程度较高。

在得到实际接触热阻的基础上,结合间隙热阻模型,得到了改进的导热膏填充的接触界面热阻模型。并且通过分析,得出在表面粗糙度 $\sigma < 1 \mu\text{m}$ 时, σ 对于接触界面热阻有非常明显的影响;导热膏的导热系数 k_g 对接触界面热阻有直接影响;而界面间接触压力 P 则对导热膏填充的接触界面热阻影响不大。

参 考 文 献

- [1] Cooper M G, Mikic B B, Yovanovich M M. Thermal Contact Conductance [J]. Int J Heat Transfer, 1969, 12: 279-300
- [2] 黄志华, 韩玉阁, 王如竹. 用接触分热阻讨论接触热阻问题 [J]. 上海交通大学学报, 2001, 35(7): 1212-1216
Huang Zhihua, Han Yuge, Wang Ruzhu. Approach to Thermal Contact Resistance Using the Concept of Detached Thermal Contact Resistance [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2001, 35(7): 1212-1216
- [3] Yovanovich M M. Four Decades of Research on Thermal Contact, Gap, and Joint Resistance in Microelectronics [J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2005, 28(2): 182-206
- [4] 黄志华, 王如竹, 韩玉阁. 一种接触热阻的预测方法 [J]. 低温工程, 2000, 118(6): 40-47
Huang Zhihua, Wang Ruzhu, Han Yuge. A Prediction of Thermal Contact Resistance [J]. Cryogenics, 2008, 118(6): 182-206
- [5] 刘菊. 固体界面接触热阻及导热系数测量的实验研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2010
Liu Ju. The Experimental Research on Measurement of Thermal Contact Resistance of Two Contacted Solids and Thermal Conductivity [D]. Wu Han: Huazhong University of Science and Technology, 2010
- [6] Savija, Yovanovich M M, Culham J R and Marotta E E. Thermal Joint Resistance of Conforming Rough Surfaces with Grease-Filled Interstitial Gaps [J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 2003, 17(2): 278-283