

# 含有热界面材料的界面热阻模型

袁超 付星 罗小兵

(华中科技大学能源与动力工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要** 界面材料不完全填充固体界面间隙时, 界面热阻  $R_j$  由两部分组成: 界面材料和固体接触处的接触热阻  $R_c$  及间隙内的气体热阻  $R_g$ 。界面热阻  $R_j$  难以测量, 建立有效模型准确地预测界面热阻十分重要。基于界面化学模型, 建立了一个针对填充具有流体性质的界面材料的界面热阻模型。比较发现界面热阻模型的预测值比界面化学模型的预测值与实验值更加吻合。分析表明: 残留在间隙内的气体热阻  $R_g$  在界面材料导热系数  $k_{TIM}$  较大时不能忽略; 界面热阻  $R_j$  随固体界面粗糙度  $\sigma$  的增大而增大, 随界面材料导热系数  $k_{TIM}$  的减小而增大。

**关键词** 界面材料; 界面热阻模型; 努森数

**中图分类号:** TK123

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0253-231X(2013)04-0746-05

## An Interface Resistance Model of Thermal Interstitial Materials

YUAN Chao FU Xing LUO Xiao-Bing

(School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract** When thermal interface materials can't fill crevices of two contact surfaces completely, thermal interface resistance consists of two parts: the contact resistance between the thermal interface material and solid, and the gap resistance of the gas left in the surfaces crevices. Thermal interface resistance is hard to be measured, so it is important to build an effective model to predict it. Based on the surface chemistry model, thermal interface resistance model of fluidic interstitial materials is built. The comparisons between experimental and modelling results indicate the thermal interface resistance model matches the experimental results better than the surface chemistry model. The comparisons also show that the gap resistance cannot be neglect when the thermal conductivity of the thermal interface material is relatively high. And the thermal interface resistance will increase with substrate roughness increasing, and thermal conductivity decreasing of the thermal interface material.

**Key words** thermal interface materials; interface resistance model; Knudsen

## 0 引言

在大多数电子设备中, 热量从发热器件传导至散热器不可避免会经过各种界面, 并在界面上产生接触热阻。较高的接触热阻导致电子设备温度升高, 影响其使用寿命及可靠性。减少接触热阻的一种方法是在各界面间填充具有高导热率的固体热界面材料, 如焊料、金属薄片、弹性体材料等<sup>[1,2]</sup>。含有高导热率颗粒的具有流体性质的高分子材料如导热硅脂、相变材料等<sup>[3]</sup>, 也被广泛应用。两固体间填充具有流体性质的界面材料后, 界面处的热阻由两部分组成: 界面材料的体热阻  $R_{bulk}$  和界面材料与固体间的界面热阻  $R_j$ , 如图 1 所示。当填充过程在非真空环境下完成时, 由于固体界面间存在的气体无法被排尽, 界面材料难以完全填充固体界面间的间隙。因此, 界面热阻  $R_j$  由两部分组成: 界面

材料和固体接触处接触热阻  $R_c$  及间隙内气体的热阻  $R_g$ 。

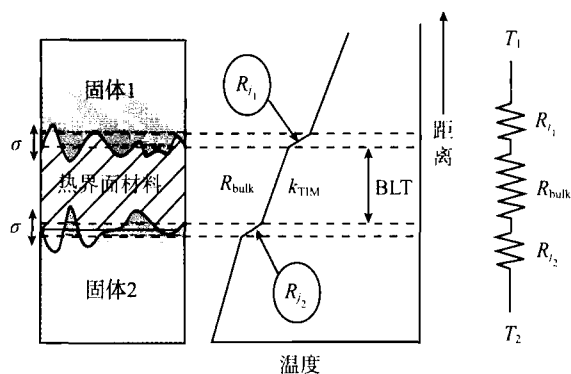


图 1 热界面热阻示意图

Fig. 1 Schematic of thermal interface resistance

收稿日期: 2013-01-07; 修订日期: 2013-03-22

基金项目: 国家 973 资助项目 (No.2009CB320203); 国家 863 资助项目 (No.2011AA03A109)

作者简介: 袁超 (1989-), 男, 博士研究生, 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

科研人员对界面热阻进行了大量的理论分析和实验研究。Fuller 和 Marotta<sup>[4]</sup> 提出了一个热界面材料为弹性体材料的界面热阻模型, 此模型在预测界面热阻时须得到界面材料的硬度和杨氏模量等固体特性参数, 因而不适用于预测具有流体特性的界面材料的界面热阻。Das 和 Sadhal<sup>[5]</sup> 提出了一个界面材料完全填充固体间隙的界面热阻模型, 此模型虽不符合实际情况, 但可以预测同种情况下界面热阻的最小值, 其他模型的预测值不能小于该值。Prasher<sup>[3]</sup> 提出了具有流体性质的界面材料不完全填充固体间隙的界面化学热阻模型, 该模型预测结果和实验值匹配得较好, 然而, 该模型忽略了残留在界面材料和固体间气体的热阻, 此部分热阻在某些情况下不能忽略。综上所述, 目前并没有一个模型能够准确地预测填充具有流体性质的界面材料的界面热阻。

本文在 Prasher 等人的研究基础上, 建立了一个界面热阻模型, 并将该模型的预测值和 Prasher 等人的界面化学模型预测值及其实验值<sup>[6]</sup> 进行比较。最后, 通过对模型的具体分析, 得到影响界面热阻大小的因素。

## 1 表面形貌

界面热阻模型的建立受固体表面形貌的影响。便于界面热阻模型的建立, 现将固体表面真实的粗糙度轮廓曲线简化成图 2 所示轮廓线。简化后的轮廓线由一系列的斜槽组成, 并且假设斜槽的形状为圆锥形。图 2 中波峰和波谷呈周期分布, 波峰与波谷的间距等于粗糙度测量时所采用的取样长度  $r_0$ , 峰谷的高度差等于均方根表面粗糙度  $\sigma$ 。

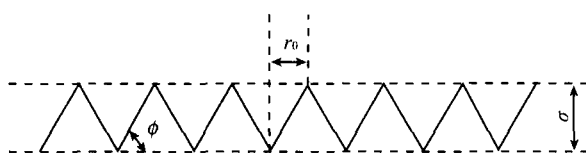


图 2 固体表面简化轮廓曲线

Fig. 2 Simplified surface profile of solid

流体滴于固体表面时, 所形成的形状可以用接触角  $\theta$  来描述。当填充材料滴入斜槽内时, 填充材料-固体界面, 气-固界面和气体-填充材料界面的形状如图 3 所示。界面材料的表面自由能在微小半径的斜槽内产生毛细力, 将界面材料推入斜槽内。对于界面材料, 根据外界压力、斜槽内气体压力和毛细力的力平衡关系, 可建立如下等式:

$$P + \frac{2\gamma_1 \sin(\theta + \phi)}{r_0 - x \cot \phi} = P_0 \frac{r_0^3}{(r_0 - x \cot \phi)^3} \quad (1)$$

式中,  $P$  和  $P_0$  分别为外界压力和斜槽内气体压力,  $\gamma_1$  为液体表面自由能,  $\phi$  为斜槽与水平方向间的夹角,  $r_0$  为斜槽半径,  $x$  为界面材料滴入斜槽的深度。假设  $P = P_0$ , 可以得到  $x$  近似解:

$$x = \frac{2\gamma_1 \sin(\theta + \phi)}{3P_0 \cot \phi} \quad (2)$$

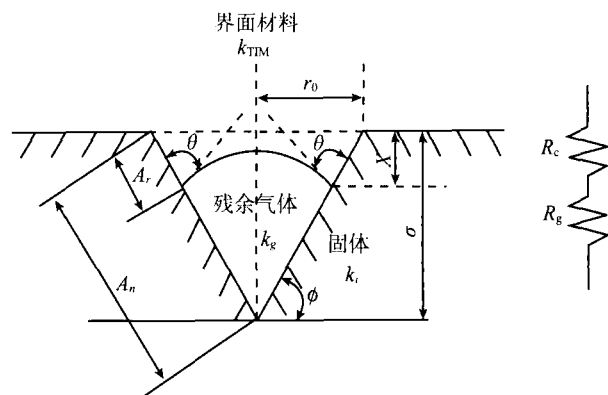


图 3 界面形貌

Fig. 3 The shape of interface

## 2 界面热阻模型

### 2.1 接触热阻 $R_c$

假设固体表面大致平整, 并且忽略气体对固体与界面材料间热交换的影响, 此时, 接触热阻由下式给出<sup>[3]</sup>:

$$R_{c_i} = \frac{\sigma_i A_n}{k_c A_r} \quad (3)$$

其中,

$$k_c = \frac{2k_i k_{TIM}}{k_i + k_{TIM}} \quad (4)$$

式中,  $R_c$  为界面材料与固体表面的接触热阻,  $\sigma_i$  为上或下固体表面粗糙度,  $A_n/A_r$  为固体表面名义面积与界面材料-固体实际接触面积之比,  $k_c$  为有效导热系数,  $k_i$  为固体导热系数,  $k_{TIM}$  为填充材料导热系数。当  $k_i \gg k_{TIM}$ ,  $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma$  时, 上下表面的总接触热阻可表示为:

$$R_{c_{1+2}} = \frac{\sigma A_n}{k_{TIM} A_r} \quad (5)$$

斜槽为圆锥型, 根据图 3, 可以分别得到  $A_n$  和  $A_r$  的表达式:

$$A_n = \pi r_0 \sqrt{r_0^2 + \sigma^2} \quad (6)$$

$$A_r = \pi \sqrt{x^2 + (x \cot \phi)^2} (2r_0 - x \cot \phi) \quad (7)$$

由式 (3), (4) 和 (5), 可以得到接触热阻  $R_{c_{1+2}}$  表达式:

$$R_{c_{1+2}} = \frac{\sigma}{k_{TIM}} \left[ \frac{\pi r_0 \sqrt{r_0^2 + \sigma^2}}{\pi \sqrt{x^2 + (x \cot \phi)^2} (2r_0 - x \cot \phi)} \right] \quad (8)$$

## 2.2 气体热阻 $R_g$

气体在两个非接触的平行平板间的流动根据努森数  $Kn$  的不同可以被分为四种领域: 连续领域, 滑流领域, 过渡流领域和分子自由流领域 [7]。努森数定义为:

$$Kn = \frac{\Lambda}{\delta} \quad (9)$$

式中,  $\Lambda$  为气体分子平均自由程,  $\delta$  为气体层厚度。

在连续领域 ( $Kn \ll 1$ ), 两平板间的传热主要通过气体分子之间的碰撞来完成, 傅里叶热传导定律在这一领域内适用。当气体压力逐渐降低, 分子间碰撞频率减小, 气体分子和平板之间的能量交换开始影响气体导热, 这一状态的气体分子处在滑流领域 ( $0.01 < Kn < 0.1$ ), 由于气体分子和平板表面的能量交换并不完全, 在气-固表面, 温度会产生跳跃。当气体压力极低或气体温度极高, 分子几乎不相互碰撞, 此时热传导主要通过气体分子和平板表面的能量交换来完成, 这一领域就是所谓的分子自由流领域 ( $Kn > 10$ )。在滑流领域和分子自由流领域之间有一个过渡流领域 ( $0.1 < Kn < 10$ ), 这一领域内, 分子间的碰撞和分子与平板的能量交换对热传导都很重要。

对于本文的研究对象, 气体层的厚度和固体表面粗糙度在一个数量级 ( $10^{-6}$ ) 上, 工业上常用气体的平均自由程约为  $10^{-6}$  m [8], 可以推断残余气体处在过渡流领域。在这种情形下, 气-固表面的温度跳跃对热传导产生影响。为了反映这一影响, 需对气体导热系数做修正  $k_g^{* [9]}$ :

$$k_g^* = \frac{k_g}{1 + 1.67 \frac{\Lambda}{\delta} \frac{T_0}{288} \frac{760}{P_0} \left( \frac{2 - a_1}{a_1} + \frac{2 - a_2}{a_2} \right)} \quad (10)$$

式中,  $k_g^*$  为修正后气体导热系数,  $k_g$  为气体导热系数,  $T_0$  为气体平均温度,  $P_0$  为气体平均压强,  $a_1$  为气-固热适应系数,  $a_2$  为气-界面材料热适应系数。本文假设  $a_1 = a_2$ 。

忽略圆弧顶的气体体积, 将气体所占的区域简化为圆锥形, 并且假设热流方向垂直固体宏观表面, 如图 4 所示。在  $r$  方向上, 取一段微小长度  $dr$ , 在  $dr$  内, 热流  $dQ_g$  传导的距离都为  $\delta$ ,  $dr$  内的导热热阻可以表示为:

$$dR_{A_g} = \frac{\delta}{k_g^* dA_g} = \frac{\delta}{k_g^* 2\pi r dr} \quad (11)$$

对  $dR_{A_g}$  积分, 即,

$$R_{A_g} = \int_0^{r_0 - x \cot \phi} \frac{\delta}{k_g^* 2\pi r dr} \quad (12)$$

其中, 将式 (10) 带入积分式 (12) 中, 则

$$R_{A_g} = \frac{\sigma^2}{-2\pi r_0^2 k_g^* \left[ \ln \frac{\Gamma}{\sigma - x + \Gamma} (\sigma - x + \Gamma) + \sigma - x \right]} \quad (13)$$

其中,

$$\Gamma = 1.67 \frac{\Lambda}{\delta} \frac{T_0}{288} \frac{760}{P_0} \left( \frac{2 - a_1}{a_1} + \frac{2 - a_2}{a_2} \right) \quad (14)$$

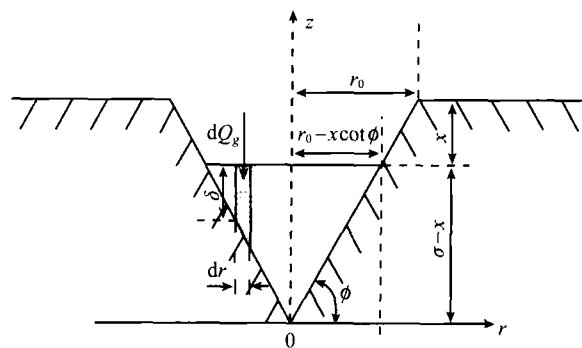


图 4 气体简化区域  
Fig. 4 Simplified region of gas

上下界面残留气体的导热热阻相同  $R_{A_{g1}} = R_{A_{g2}}$ 。气体总面积热阻  $R_{g_{1+2}}$  等于气体总热阻和等效圆锥面积 ( $A_g^*$ ) 的乘积, 可表示为:

$$R_{g_{1+2}} = 2R_{A_g} \times A_g^* = \frac{\sigma^2 (r_0 - x \cot \phi)^2}{3k_g r_0^2 \left[ x - \sigma - \ln \frac{\Gamma}{\sigma - x + \Gamma} (\sigma - x + \Gamma) \right]} \quad (15)$$

其中,

$$A_g^* = \pi (r_0 - x \cot \phi)^2 / 3 \quad (16)$$

## 2.3 界面热阻 $R_j$

由图 3 可知, 接触热阻  $R_c$  和残余气体的热阻  $R_g$  是串联关系。即可得到界面热阻:

$$R_{j_{1+2}} = R_{c_{1+2}} + R_{g_{1+2}} = \frac{\sigma}{k_{TIM}} \left[ \frac{\pi r_0 \sqrt{r_0^2 + \sigma^2}}{\pi \sqrt{x^2 + (x \cot \phi)^2} (2r_0 - x \cot \phi)} \right] + \frac{\sigma^2 (r_0 - x \cot \phi)^2}{3k_g r_0^2 \left[ x - \sigma - \ln \frac{\Gamma}{\sigma - x + \Gamma} (\sigma - x + \Gamma) \right]} \quad (17)$$

其中,

$$x = \frac{2\gamma_1 \sin(\theta + \phi)}{3P_0 \cot \phi} \quad (18)$$

$$\Gamma = 1.67 \frac{\Lambda}{\delta} \frac{T_0}{288} \frac{760}{P_0} \left( \frac{2 - a_1}{a_1} + \frac{2 - a_2}{a_2} \right) \quad (19)$$

### 3 理论模型与实验比较

使用 Prasher 的实验数据<sup>[6]</sup>与已建立的界面热阻模型及 Prasher 的界面化学模型<sup>[3]</sup>的预测值进行比较。Prasher 的实验采用了 4 种不同导热系数的导热硅脂和 2 种不同导热系数的相变材料作为热界面填充材料,并采用了 3 对不同粗糙度的铜基板。界面材料和基板的参数分别见表 1 和表 2,表 2 也给出了实验时两种材料的组合方式。上下铜基板具有同样的粗糙度。环境温度 ( $T_0$ ) 为 15°C, 压强 ( $P_0$ ) 为 1.013 MPa。

表 1 界面材料参数

Table 1 Parameters of thermal interface materials

界面材料	种类	导热系数 $k_{TIM}/W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
导热硅脂	a	3.1
	b	0.4
	c	0.25
	d	0.2
相变材料	a	0.7
	b	0.2

表 2 铜基板参数及实验组合

Table 2 Parameters of copper blocks and experimental program

铜基板	粗糙度 $\sigma/\mu m$	与导热硅脂组合	与相变材料组合
I	3.5	a,b,c,d	a,b
II	1.0	a,b	a
III	0.12	a	a

该实验在空气中进行,因此槽内残留气体为空气,所需要的空气物性参数见表 3。

表 3 温度 15°C 时空气的物性参数

Table 3 Parameters of air at 15°C

物性	数值
导热系数 $k_g/W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	0.0262
平均自由程 $\Lambda/\mu m$	0.064
热适应系数 $a$	0.9

图 5 给出了界面材料为导热硅脂时界面热阻模型的预测值  $R_j$  和 Prasher 的界面化学模型的预测值

$R_c$  及实验值三者的比较。同时,图 5 也给出了空气热阻模型的预测值  $R_g$ ,这一部分热阻被界面化学模型忽略。从图 5 可以看出,界面热阻模型的预测值比界面化学模型的预测值与实验值更加吻合。界面化学模型预测值  $R_c$  普遍比实验值小,特别是当界面材料导热系数  $k_{TIM}$  较大时,界面化学预测值  $R_c$  远远比实验值小,此时空气的热阻  $R_g$  不能忽略。本文建立的界面热阻模型因考虑了槽内残留空气的影响,使得该模型预测值  $R_j$  比界面化学模型预测值  $R_c$  大,且更加接近实验值。

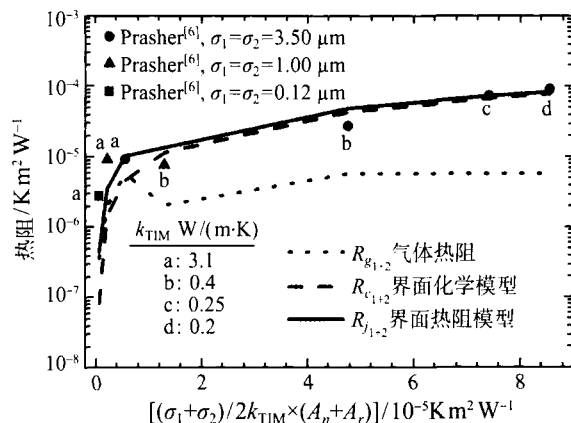


图 5 界面材料为导热硅脂时模型和实验值的比较

Fig. 5 Comparisons between experimental and modelling results for greases

图 6 给出了界面材料为相变材料时,界面热阻模型预测值  $R_j$  和界面化学模型预测值  $R_c$  及实验值三者的比较,从图 6 中,我们可以得到与图 5 相同的结论。

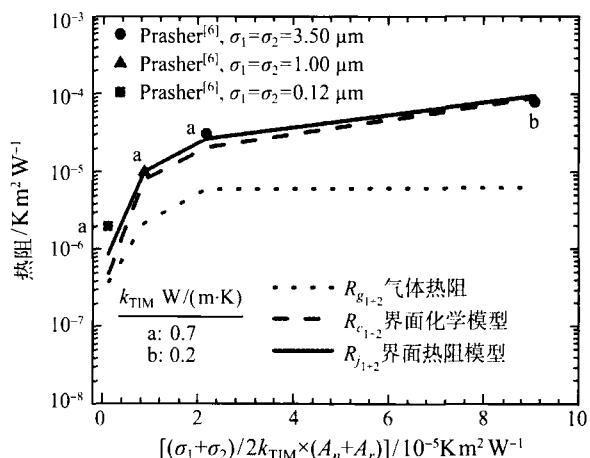


图 6 界面材料为相变材料时模型和实验值的比较

Fig. 6 Comparisons between experimental and modelling results for phase change materials

## 4 分 析

从图 5 和图 6 可以看出, 当界面材料导热系数  $k_{TIM}$  不变时, 随着基板粗糙度  $\sigma$  的增大, 接触热阻  $R_c$  和空气热阻  $R_g$  都增大。这是因为, Prasher 已通过实验和理论分析证明  $A_n/A_r$  与粗糙度  $\sigma$  无关<sup>[6]</sup>, 则根据接触热阻表达式 (1), 接触热阻  $R_c$  正比于  $\sigma$ ; 根据式 (2), 界面材料滴入斜槽深度  $x$  与粗糙度  $\sigma$  无关, 但当  $\sigma$  变大时, 斜槽内残余气体变多, 热流通过残余气体的平均厚度变大, 因而空气的热阻  $R_g$  变大。因此, 当其他条件不变时, 随着基板粗糙度  $\sigma$  增大, 界面热阻  $R_j$  增大。

基于图 5 和图 6, 当基板粗糙度  $\sigma$  不变时, 随着材料导热系数  $k_{TIM}$  的减小, 接触热阻  $R_c$  变大, 这是因为根据公式 (1),  $R_c$  与  $k_{TIM}$  呈反比关系。然而空气热阻  $R_g$  几乎不随  $k_{TIM}$  的变化而变化, 原因是  $k_{TIM}$  变化意味着界面材料的颗粒浓度变化, 但颗粒浓度变化对材料的表面自由能  $\gamma$  和接触角  $\theta$  影响较小, 根据式 (2), 界面材料滴入斜槽深度  $x$  变化也很小, 因而空气的热阻  $R_g$  变化很小。因此, 当材料导热系数  $k_{TIM}$  变化时, 因空气热阻  $R_g$  的变化甚微, 可以忽略其影响, 整体的界面热阻  $R_j$  根据接触热阻  $R_c$  的变化而变化。

## 5 结 论

在 Prasher 等人的研究基础上, 建立了界面材料具有流体特性的界面热阻模型, 并将该模型的预测值和 Prasher 等人的界面化学模型预测值及实验值进行了比较。结果表明, 所建立的界面热阻模型和实验值更加吻合。

通过建立的界面热阻模型, 分析得出: 当界面

材料导热系数  $k_{TIM}$  不变时, 随着基板粗糙度  $\sigma$  增大, 接触热阻  $R_c$  和空气热阻  $R_g$  都增大, 进而界面热阻  $R_j$  增大; 当粗糙度  $\sigma$  不变时, 随着界面材料导热系数  $k_{TIM}$  的变小, 接触热阻  $R_c$  变大, 空气热阻  $R_g$  几乎保持不变, 界面热阻  $R_j$  增大。

## 参 考 文 献

- [1] Snaith B, O'Callaghan P W, Probert S D. Minimizing the Thermal Resistance of Pressed Metallic Contacts [J]. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 1982, 24(8): 183-189
- [2] Zhao L, Phelan P E. Thermal Contact Conductance Across Filed Polyimide Films at Cryogenic Temperatures [J]. *Cryogenics*, 1999, 39(8): 803-809
- [3] Prasher R S. Surface Chemistry and Characteristic Based Model for the Thermal Contact Resistance of Fluidic Interstitial Thermal Interface Materials [J]. *Journal of Heat Transfer*, 2001, 123(3): 969-975
- [4] Fuller J J, Morotta E E. Thermal Contact Conductance of Metal/Polymer Joints: an Analytical and Experimental Investigation [J]. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 2001, 15(2): 228-238
- [5] Das A K, Sadhal S S. Analytical Solution for Constriction Resistance With Interstitial Fluid in the Gap [J]. *Heat and Mass Transfer*, 1998, 34(2/3): 111-119
- [6] Prasher R S, Simmons C, Solbrekken G. Thermal Contact Resistance of Phase Change and Grease Type Polymeric Materials [J]. *Proceedings of International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 2000, 11: 461-466
- [7] Springer G S. *Heat Transfer in Rarefied Gases* [J]. *Advances in Heat Transfer*, 1971, 7: 163-218
- [8] Kennard E H. *Kinetic Theory of Gases* [M]. New York: McGraw-Hill, 1938: 311-318
- [9] Yovanovich M M, Kitscha W W. Modelling the Effect of Air and Oil Upon the Thermal Resistance of a Sphere-Flat Contact [J]. *Proceedings of AIAA 8th Thermophysics Conference*, 1973, 13: 1973