

真空低温下接触表面对接触热阻的影响

徐烈 张涛 熊炜 杨军 徐佳梅*

(上海交通大学, 上海 200030)

(* 上海金狮亚洲投资咨询有限公司, 上海 201705)

(收稿日期 1997-12-23)

THE EFFECT OF CONTACT INTERFACES ON THERMAL CONTACT RESISTANCE AT LOW TEMPERATURE AND VACUUM

Xu Lie Zhang Tao Xiong Wei Yang Jun Xu Jiamei

(Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030)

(* Shanghai Jinshi Asia Investment consultation Ltd. Co., Shanghai 201705)

Abstract: Theoretical model of relations between the surface and interface contact thermal contact resistance are introduced on the basis of observation results of the contact interface. The effecting of some associated parameters to thermal contact resistance is obtained from experiments.

Keywords: Thermal contact resistance, Cryogenics, Vacuum.

摘要: 通过接触表面的形貌分析, 建立了表面形貌和界面接触热阻的理论模型。通过实验得出了有关参数对接触热阻的影响关系。

关键词: 接触热阻、低温、真空。

分类号: TB61、TB71、O4821。

当前众多的高技术应用中, 经常涉及到小冷量(mW级)电子器件的冷却与加热、高能热流密度的冷却、高效绝热结构的安置等应用场合。而这些场合大多处在高真空和低温的情况下, 它们的冷却或绝热效果主要涉及到固体界面的接触热阻。如卫星上探测器的红外元件的冷却, 辐射制冷器与探测元件之间的热耦合, 杜瓦(或制冷机)与负载的耦合等都是通过固体接触导热实现的。又如, 卫星用“接触”式热交换器, 就是通过这种“接触”换热将热量传出。未来的空间站将有类似结构将高达100 kW热量传出。对一些高效绝热设备, 又要求增大其接触热阻。而影响接触热阻的因素又众多, 如表面性质和状态、接触温度、接触压力、连接方式等。它们的不确定性给接触热阻的分析和计算带来困难。因此, 对于众多的高技术应用中, 接触热阻的研究有着非常重要意义。国外对流体与固体界面的接触热阻(又称卡皮查热阻)研究较多, 而对于两固体界面间的接触热阻研究尚不多见。国内有关固体界面间的接触热阻的论文不多, 特别是在低温真空的条件下, 对于这类接触热阻的研究更是甚少。以往的研究没有与表面分析与表面形貌相结合^[1,2], 故不能很好地与实验结果相符。

1 表面形貌分析和表面形貌模型

即便是非常光滑的表面, 由于加工过程中表面层的熵增或表面流动, 会形成一系列不同幅度和频率的凹凸面, 它导致了固体间的不完全接触。表面凹凸面的分布很大程度上取决于加

工的方法和材料本身的性质。在实际工作中,常用电子干涉或反射显微技术的光学测量方法以及测量表面轮廓等机械测量方法来测量微观表面的几何特性。可以用两个参数之一来确定表面结构,即用表面粗糙度的中线平均高度和均方根高度来描述。

从统计学观点看,表面结构可用其轮廓高度的分布函数来描述

$$F(z) = \int_{-\infty}^{+\infty} \Psi(z) dz \quad (1)$$

式中, z 为量自中线的轮廓高度; $\Psi(z)$ 为轮廓高度分布的概率密度函数。

一些研究发现,许多表面轮廓高度是高斯正态分布,如图1所示。其高斯分布曲线或其密度函数可以表示为

$$\Psi(z) = \Psi_0(z) \exp(z^2/2\sigma^2) \quad (2)$$

由此可见,表面轮廓形状是一个随机的现象,很难建立一个适用于普遍有效的真空表面的模型。然而,目前借助用于摩擦研究的 GM (Greenwood 和 Millamson) 模型来分析两固体界面的微观真空接触表面。 $\Psi_0(z)$ 为标准高斯分布函数, σ 为均方差。如图2所示,凸起顶部平均高度处在平均表面上部 z_s 处,其标准偏移为 σ_s , 则其凸起高度的概率密度 $f(z_s)$ 为

$$f(z_s) = \exp(-z_s^2/2\sigma_s^2) / \sigma_s (2\pi)^{1/2} \quad (3)$$

那么,高度分布在 $(z_s, z_s + dz_s)$ 之间的概率为 $f(z_s) dz_s$, 而凸起高度大于 d 的概率为

$$P(z_s > d) = \int_d^{\infty} f(z_s) dz_s \quad (4)$$

虽然这一积分不能以简单函数表示,但有关高斯分布的概率已有列表,故式(4)可写为

$$P(z_s > d) = \int_{d/\sigma_s}^{\infty} \Psi_0(x) dx = F_0(d/\sigma_s) \quad (5)$$

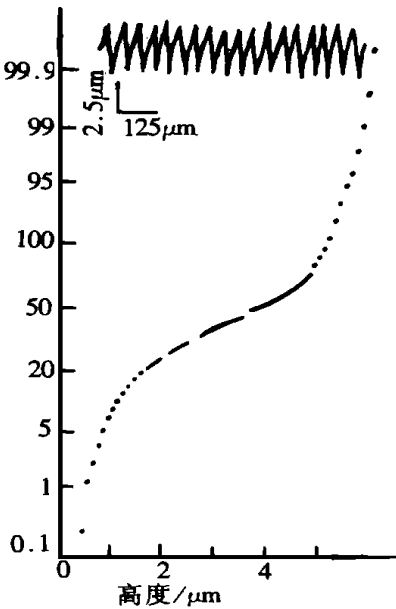
如果已知凸峰高度 D_{sum} , 则实际发生接触的凸起数 n 为

$$n = D_{sum} F_0(d/\sigma_s) \quad (6)$$

从上述推导中可以看出 GM 模型包含三个参量: 凸起部分的曲率半径 R 、 σ_s 、 D_{sum} 。

2 粗糙表面的表面接触热模型

图1 呈正态分布的表面轮廓高度



根据研究^[3],接触热阻的成因主要是由于在接触处热流收缩而导致的。由于实际粗糙表面相接触时存在许多小的微小接触面积,其大小和分布又相当复杂。如图3所示。

当一个粗糙表面与一个假设的理想平坦表面相互挤压时,两表面的基准面互相靠近。设其平均接触面与基准面的距离为 d , 假设距基准面的高度大于 d 的凸起将发生接触。其接触面积 A_c 为

$$\frac{A_c}{D_{sum}} = \int_d^{\infty} \pi R (z_s - d) f(z_s) dz_s = \pi R \sigma_s F_1(d/\sigma_s) \quad (7)$$

式中, $\Psi_0(x) = \frac{\exp(-x^2/2)}{(2\pi)^{1/2}}$, $F_1(d/\sigma_s) = \int_{d/\sigma_s}^{\infty} (x - d/\sigma_s) \Psi_0(x) dx$ (接触界面压力函数)

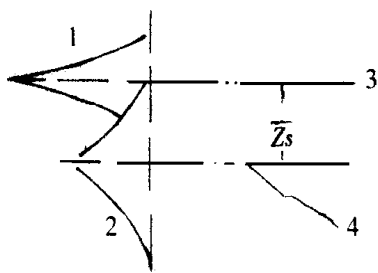


图2 表面高度分布和峰高度分布图
1—凸峰高度分布;2—表面高度分布
3—凸峰方法平面;4—表面方法平面

根据文献^[4]提出的固体表面压力关系式,文献^[5]给出了

接触界面压力与整体位移的关系式, $F = \frac{4}{3} E^x R^{1/2} \delta^{3/2}$, 可以得出单个粗糙颗粒所乘受的平均载荷为

$$\frac{F}{D_{sum}} = \frac{4}{3} E^x R^{1/2} \delta^{3/2} F_{3/2}\left(\frac{d}{\sigma_s}\right) \quad (8)$$

式中, $F_{3/2}\left(\frac{d}{\sigma_s}\right) = \int_{d/\sigma_s}^{\infty} (x - \frac{d}{\sigma_s}) \Psi(x) dx$; E^x 为 x 方向的弹性模量; $\delta = z_s - d$ 。

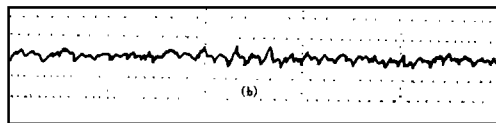


图3 粗糙表面形貌概率分布图, (a)为文献值^[2], (b)为实测值
1—平均接触面与基准面之距离;2—平均接触面;3—凸峰基准面

则其接触热导 h 为

$$\frac{h}{D_{sum}} = \sum_{i=1}^{D_{sum}} h_i / D_{sum} = 4kR^{1/2} \sigma_s^{1/2} \frac{1}{\Psi(\epsilon)} F_{1/2}(d/\sigma_s) \quad (9)$$

式中, $F_{1/2}(d/\sigma_s) = \int_{d/\sigma_s}^{\infty} (x - d/\sigma_s)^{1/2} \Psi(x) dx$;

k 为材料热导率; $\Psi(\epsilon)$ 为轮廓高度分布的概率密度函数(ϵ 为待定常数)。从中可以看出, 粗糙表面的接触热导是一个与材料热导率、弹性模量、压力、表面粗糙度等有关的函数。而粗糙度是一个重要因数, 它与表面形貌是一个随机的分布函数。要建立真实表面的普遍有效的模型是很困难的。在消化了几种表面模型的基础上, 推导了上述的方程式, 并对形貌表面状态以及对其接触热阻进行了测定。

3 实测结果

实验结果列于图4~图6。其中图4, 图5是温度135 K、210 K时铝试样的接触热阻与粗糙度的等压线。图6是不锈钢材料的接触热阻与粗糙度的等压图。从中可以得出如下的结果: 1) 相同的粗糙度下, 承受的压力增加, 其两固体接触面间的接触热阻下降; 2) 同种材料在相同的粗糙度下, 在高温区的接触热阻小; 3) 随着粗糙度增加, 其两固体接触面间的接触热阻增大; 4) 粗糙度与接触热阻的变化不成直线关系。对于不锈钢材料, 在350 K附近, 在2.856

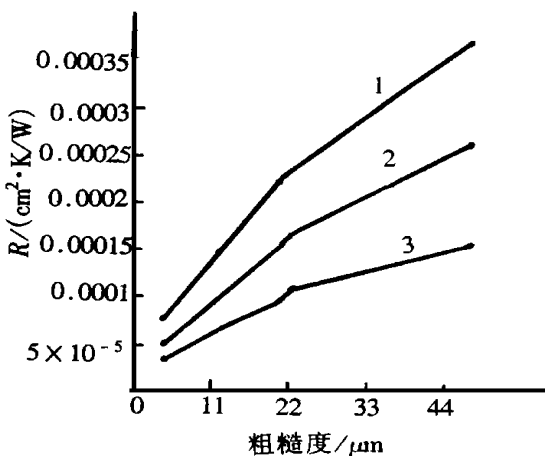


图4 铝试样在135 K时接触热阻与粗糙度的关系

(曲线1、2、3系在压力分别为1.06 MPa、1.67 MPa、2.86 MPa时作出的)

MPa 压力下,当粗糙度从 $49\text{ }\mu\text{m}$ 减小到 $18\text{ }\mu\text{m}$ 时,其接触热阻减少了 40%,而当粗糙度从 $18\text{ }\mu\text{m}$ 减少到 $2\text{ }\mu\text{m}$ 时,接触热阻减小了近 80%。

可见,接触面的形貌特征是影响表面接触热导的重要因素。而且,对于较小的表面粗糙度的接触面,通过改善其表面粗糙度能明显改变其热阻。而在文献^[3]中压力能改变接触热阻,实际上是通过改善接触状况来实现的。

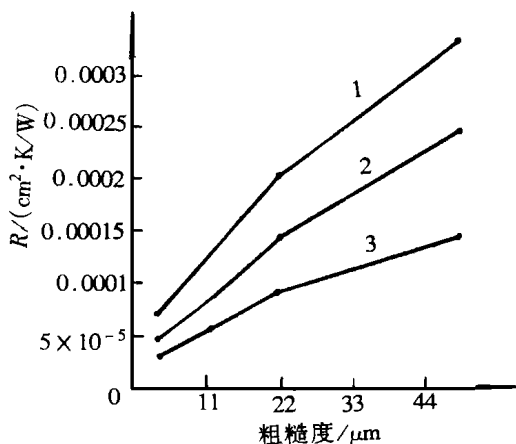


图5 铝试样在 210 K 时接触热阻与粗糙度的关系 (曲线 1、2、3 系在压力分别为 1.06 MPa、1.67 MPa、2.86 MPa 时作出的)

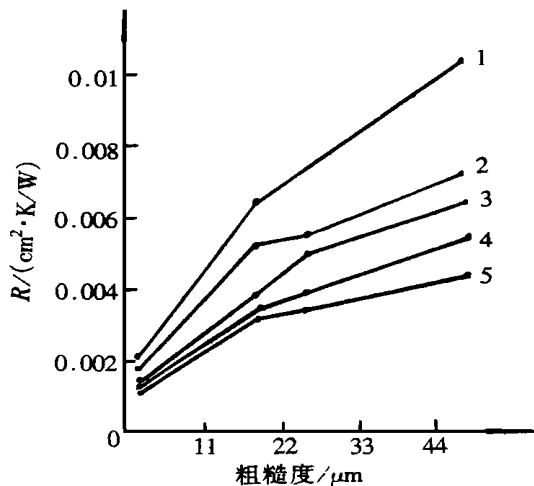


图6 不锈钢试样在 350 K 时接触热阻与粗糙度的关系 (曲线 1、2、3、4、5 系在压力分别为 1.06 MPa、1.36 MPa、1.67 MPa、2.04 MPa、2.86 MPa 时作出的)

参 考 文 献

- 1 Song S. Experimental study and modeling of thermal contact resistance across bolted joints. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 1994, 8(1): 159~163
- 2 Maddren J. Predicting thermal contact resistance at cryogenic temperature for spacecraft applications. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 1995, 32(3): 469~474
- 3 徐烈, 杨军, 徐佳梅等. 低温下固体表面接触热阻的研究. *低温与超导*, 1996, 24(1): 53~58
- 4 Greenwood J A. The area of contact between rough surfaces and flats. *Trans. ASME, Journal of Lubrication Technology*, 1967, 89F: 81~91
- 5 霍林主编(美). 摩擦学原理. 北京: 机械工业出版社, 1981

作者简介: 徐烈, 男, 1965 年毕业于浙江大学。现为上海交通大学动力与能源工程学院教授, 博士生导师。主要从事低温技术方面的研究与教学工作。负责与参与国家、省、市、部委科研项目 50 余项, 多次获重大科技成果奖, 发表论文 80 多篇。