



接触热阻预测的研究综述

王安良^{①*}, 赵剑锋^②

① 北京航空航天大学宇航学院, 北京 100191;

② 中国空间技术研究院总体设计部, 北京 100094

* E-mail: wanganliang@buaa.edu.cn

收稿日期: 2009-12-22; 接受日期: 2010-02-05

摘要 本文对接触热阻的理论预测研究进行了较全面综述, 针对其物理数学模型和模拟方法, 及相关的表面几何形貌评价、微观力学变形分析和换热数学建模等方面. 通过系统地分析和评述, 提出了为实现接触热阻准确预测需解决的关键问题, 并指出了进一步的研究方向, 也利于人们对接触换热及其交叉学科问题的科学理解和工程应用.

关键词

接触热阻
接触热导
表面几何形貌
形变假设
预测模型
数值模拟

1 引言

当两个固体表面相互接触时, 实际固体对固体的接触仅发生在一些离散点或微小面积上, 其余的间隙部分是真空或填充介质(例如空气、水和油等). 由于间隙介质的导热系数与固体导热系数一般相差较大, 因而引起接触面附近热流发生变化, 形成接触换热的附加阻力, 即接触热阻(Thermal Contact Resistance, 简称 TCR), 其定义是固体接触界面温差与热流密度之比, 倒数形式为接触热导(Thermal Contact Conductance, 简称 TCC), 有的文献也称为界面热阻(Thermal Boundary Resistance)或连接热阻(Thermal Joint Resistance), 实际上它们描述的都是接触界面的换热特性, 本文中一般用“接触热阻”这个名词, 并主要针对固体之间接触的换热问题.

接触热阻问题已经涉及到机械制造、微电子、航空航天、化工、低温、超导、生物医学、核反应堆以及仪器仪表等科学与工程领域. 特别是近二三十年

来, 随着微电子领域的迅猛发展, 核心电子元器件功率的不断增加, 为了保证其在一定的温度范围内可靠工作, 冷却问题日趋严峻. Intel 公司早在 2000 年就宣布, 个人电脑的芯片散热问题已经制约了其功率的进一步提高^[1], 十年过去了依然没有多少改观. 由于大部分电子元器件的发热量首先需要通过接触导热传出, 然而受尺寸、空间和重量等的限制, 提高接触界面的换热能力具有普遍意义. 接触热阻研究尤其对航天领域具有重要的应用价值, 在低温、真空及微重力环境下, 对流换热不起或只有很小作用, 主要靠传导与辐射进行热交换. 例如, 接触传导是卫星上的主要换热方式, 如在仪器与支架、仪器与安装板、结构件之间等部位, 特别是其电子设备等产热部件, 它们需控制在一定温度范围才能有效工作, 进而才能保证卫星的可靠性和工作寿命^[2]. 所以, 准确获得接触热阻是卫星热分析和热控制过程的重要环节. 接触热阻分析和预测, 对空间推进器、深空探测器及载人航天器的热设计和控制同样必不可少^[3-5].

与许多工程问题一样, 接触热阻研究大致也可以分为工程应用和基础研究两个方面. 一方面在应用领域, 研究的目的是寻找有效措施减小(或增加)接触热阻以满足实际需求, 对含有电子元件等需要散热的设备, 重点考虑如何强化接触换热, 即尽可能减小接触热阻以有效散热, 保障设备工作的可靠性. 研发人员针对具体的工程要求, 提出了许多强化(或减弱)接触换热的方法与手段, 研制并实际应用了大量的特殊结构、界面热控材料, 如油脂、涂料、金属箔片、陶瓷和相变材料等. 大部分工程领域涉及到接触换热问题以实验研究为主, 并积累了许多的实验数据和经验方法. 另一方面, 探求可供研发人员采用的接触热阻半经验关联式、理论模型或数值模拟方法, 较准确地预测接触热阻的大小, 对设计和加工接触换热表面几何结构, 研制热控材料, 以及采用合理的装配工艺同样非常重要. 预测接触热阻的方法和数学模型是研究人员对表面几何形貌, 接触点变形机理和换热特征综合理解的基础上提出的, 对解决实际问题具有普遍的工程价值, 对认识接触换热物理机制也具有重要的科学意义.

本文重点综述接触热阻基础研究的理论预测工作. 主要内容包括以下几个方面: 2.1 节评述了几种代表性的单点接触热阻模型; 2.2 节重点对迄今为止的表面几何形貌研究进行较系统地综述, 并指出我们面临的关键问题, 这对其他接触问题也有直接价值; 关于接触点的变形, 2.3 节进行了说明与分析, 认为其难点是, 由于各种模型在接触点变形特征上假设成分多于理论与实验证据, 尚需要更深入广泛的研究; 在 2.4 节, 我们认为接触换热是复杂的跨尺度力-热耦合问题, 要有实质性的突破就不能回避这个特点, 而计算机数值模拟已成为必不可少的预测手段. 最后指出进一步研究的几个重点方向.

2 国内外研究现状及分析

自从 Alcock^[6]指出表面接触可以通过多点接触建模以来, 固体接触热阻的理论与实验研究已经开展超过半个世纪了. 典型的综述文献有: 对接触热阻的基本机理和预测模型比较, 如 Lambert 和 Fletcher^[7,8], Yovanovich^[9], Yovanovich 和 Marotha^[10]等人; 侧重于工业应用、接触热控材料和实验研究综述, 如 Fletcher^[11,12], Kraus 和 Bar-Cohen^[13], Yovanovich 和

Antonetti^[14], 以及 Madhusudana^[15]等人; 进展性综合报道, 如 Madhusudana 和 Fletcher^[16], Fletcher^[17], Swartz 和 Pohl^[18]和 Gmelin 等人^[19]. 这些研究使人们对接触换热机理有了较全面的了解, 并提供了许多工程实用的减少(或强化)接触热阻方法和手段. 从上个世纪 70 年代末以来, 国内学者们也逐渐开展了接触热阻的研究, 并取得了一定的成果. 代表性的研究组有: 南京航空航天大学顾慰兰^[20-22]较早开展了常温下接触热阻的实验研究, 定性分析了载荷和温度对接触热阻的影响. 针对低温及真空环境下的接触热阻, 上海交通大学徐烈课题组^[23-29], 华中科技大学王惠龄课题组^[29-31], 进行了一系列理论与实验研究. 南京理工大学韩玉阁^[32]、浙江大学应济^[33,34]、西安交通大学赵宏林^[35]和大连理工大学朱德才^[36]等人也对接触换热问题进行了实验与理论探索.

从经典传热学的角度来说, 能量在接触界面的主要传递方式有:

- 1) 固体微接触点之间的热传导, 一般起主要换热作用(见图 1);
- 2) 间隙介质的热传导或对流, 视具体情况可忽略或重点考虑;
- 3) 真空间隙之间的热辐射, 通常可忽略.

一般影响接触热阻的主要因素有表面几何形貌、接触点的形变特征、材料的物性参数和力学性能、接触面压力(或载荷)以及固体温度梯度分布等, 属于几何学、材料学、力学和传热学等多学科的交叉问题. 研究者们综合各学科的理论 and 经验, 从不同的认识角度建立了许多接触热阻的预测模型和方法.

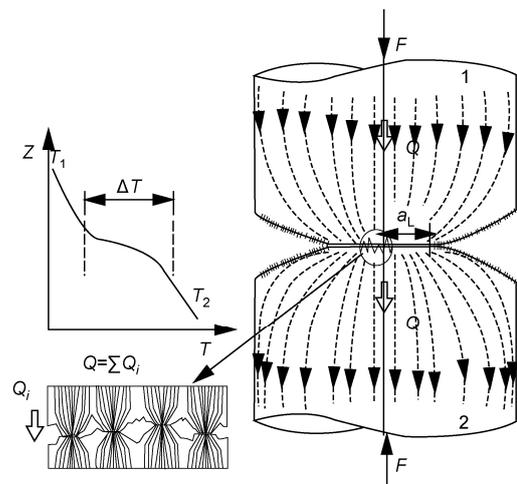


图 1 实际固体表面的接触换热示意图^[37,38]

2.1 单点接触热阻模型

接触热阻预测的逻辑出发点是单点接触传导的理论模型, 在不同表面几何形貌和间隙填充物条件下, 总热阻可简化为各接触点热阻的并联. 如果把接触点看作是热沉或热源与大空间传热, 则热流向接触点方向流入受到的换热阻力被称为压缩热阻 (Constriction Resistance), 反之热流向接触点外方向流出受到的阻力被称为扩展热阻 (Spreading Resistance). 实际上两固体表面的接触热阻既包括压缩热阻也有扩展热阻, 还有导热热阻.

单点接触的理想传热模型是接触点与半无限大空间传热. 许多学者从数学分析的角度, 推导了接触点为圆形、椭圆形、矩形、正多边形和圆环形等形状与半无限大空间的热阻模型, 如 Carslaw 和 Jaeger^[39], Gibson^[40]和 Yovanovich^[41]. Yovanovich^[9]在其专著中详细比较了不同形状接触点的接触换热系数.

另一类比半无限大空间接近实际的传热模型是半无限长的流管换热模型, 最简单的是圆柱形流管. 对这一理想模型进行详细研究的有 Mikic 和 Rohsenow^[42], Cooper 等人^[43], Gibson^[40], Yovanovich^[44], Negus 和 Yovanovich^[45]. 他们的研究结果是把接触热阻与流管的特征尺寸比相关联.

上述两类单点接触传导数学模型的理论基础是傅里叶热传导定律, 据此可建立一般粗糙表面的接触热阻模型. 而从原子(或分子)尺度来说, 接触界面的热量传导是通过热载体(电子、声子)在微接触点流动而传递的, 在低温下(<300 K), 温度对热载子的传递有一定影响, 进而影响接触点的热导率^[18, 19]. 若固体接触点尺度很小, 微尺度效应又会引起接触点热导率的显著变化, 有两个模型及其修正形式来处理这类问题: 声学失谐模型(Acoustic Mismatch Model)和扩散失谐模型(Diffuse Mismatch Model)^[18, 19].

无论如何, 固体微接触点之间的热传导是接触热阻预测研究的核心内容, 对一般粗糙表面, 关键问题是获取接触点的尺寸和空间分布信息, 进一步计算实际的接触面积.

2.2 表面几何形貌研究

表面几何形貌研究除了对接触换热外, 对摩擦、磨损、接触电阻和表面加工及测量等工程领域也具有广泛的应用价值^[46-48]. 由于一般机械加工表面的几

何形貌是形位误差、波度和粗糙度等几何偏差的叠加^[46], 两固体表面接触仅仅发生在一些离散的区域, 实际接触面积远远小于名义接触面积. 如果获知接触点大小与空间分布的准确信息, 应用上述单点接触传热模型, 就可以计算整个表面的接触热阻. 间隙包含填充材料的条件下, 已知间隙的面积后, 只需修正这部分换热能力. 所以, 研究真空条件下粗糙表面的接触换热模型具有普遍价值.

在真空条件下, 研究者们把通过粗糙表面的接触热阻分为宏观热阻和微观热阻来考虑, 如 Clausing 和 Chao^[49], Greenwood 和 Tripp^[50], Holm^[51], Yovanovich^[52], Burde 和 Yovanovich^[53], Lambert^[54], Lambert 和 Fletcher^[7], 他们把表面形位误差按当量球接触处理, 以当量尺寸的单个球接触点计算宏观接触热阻, 而微观接触热阻是由粗糙度等级的微观接触点所引起的, 并对接触换热具有重要影响, 人们关注也最多, 关键问题是如何确定微观接触点的尺寸与分布密度. 最近, Kumar 和 Ramamurthi^[55]认为粗糙表面波度等级的几何偏差对接触热阻也具有重要影响.

对于表面微接触点的尺寸和密度分布, 人们一般从表面粗糙度曲线统计分析的角度来研究, 开创性的工作始于 Greenwood 和 Williamson^[56, 57]. Greenwood 和 Williamson^[49]通过测量发现, 表面粗糙度的高度较符合高斯(Gaussian)分布, 而且他们认为即使轮廓曲线高度分布在正态性较差的情况下, 轮廓线的峰高也更符合高斯分布. 根据粗糙度曲线上峰与表面上凸点的对应关系, 建立了微接触凸点尺寸与密度的数学模型. 以此为基础, 许多学者建立了接触热阻模型, 如 Cooper 等人^[43], Greenwood 和 Tripp^[58], Mikic^[59], Bush 等人^[60], Sayles 和 Thomas^[61], McCool^[62]以及 Yovanovich^[63, 64]课题组的大量工作. 表面粗糙度以高斯分布的数学模型还广泛应用于摩擦、磨损和表面测量学等领域^[47]. 需要补充说明的是, Polycarpou 和 Etsion^[65]研究认为在一定的载荷范围内, 粗糙度曲线上的轮廓峰分布可以用指数来代替高斯分布, 使计算实际接触面积和接触点数较为简捷. 而 Greenwood 和 Wu^[66]也承认表面粗糙高度为高斯分布的一个假设前提是错误的.

直到上个世纪 80 年代末, 一般粗糙表面的接触热阻问题都是以高斯统计分布理论为基础进行分析建模的. Sayles 和 Thomas^[67]最早认为表面的粗糙度分

布是非平稳的随机过程. 同一时代, Mandelbrot^[68]创立了著名的分形几何学. 分形几何学为表面几何形貌的研究提供了新的有力手段. 把分形数学工具应用于表面形貌, 首先要回答的问题是表面几何形貌是否具有分形特征? Majumdar 等人^[69-71]用修正的 W-M 函数来描述机械加工表面的粗糙度曲线, 而 Warren^[72-74]等人用 Cantor 分形集模拟表面. 在此, 一个具有普遍价值的问题是, 如何精确地计算曲线的分形维数? 研究者们提出了盒子法、尺码法、差方法等等. Dubuc 等人^[75]比较了这些方法认为差方法最好. 而 Motoyoshi 等人^[76]和葛世荣等人^[77]比较认为协方差法精度最高. 王安良等人^[78-82]提出了计算曲线分形维数新的数学方法, 即小波变换方法. 通过对多种分形函数的计算比较表明, 小波变换方法的计算结果优于其它现有方法, 而且在宽广的范围具有一致性, 葛世荣和朱华^[83]在其专著《摩擦学的分形》中对小波方法进行了评述. 小波变换方法为评价粗糙度曲线的分形特征, 判别表面微观几何形貌类型, 提供了一个有效的数学工具.

以分形理论为基础, Chang 和 Etsion^[84]较早建立了一个弹塑性接触模型. Majumdar 等人^[69-71]开展了表面形貌的分形描述, 并应用于接触摩擦和传热方面. Warren 等人^[72-74]采用 Cantor 集模拟表面, 建立了弹性-塑性接触和完全塑性接触的分形模型. Zahouani 等人^[85]把接触点密度与分形维数相关联. Blyth 和 Pozrikidis^[86]对不规则和具有分形特征的表面建立了接触热阻模型. 最近, Xu 等人^[29]以分形维数为参数进行了接触热阻的实验分析, Zou 等人^[87]和 Ciavarella 等人^[88]也以分形理论为基础建立了预测模型. 分形接触模型的特点是, 以分形几何表面形貌为基础, 把粗糙度曲线的分形维数作为计算接触点密度和接触面积的关键参数. 与高斯表面相对应, 分形表面是假设粗糙度高度为非平稳随机分布, 以粗糙度高度的自相似和自仿射性, 推演出接触点的尺度和空间分布特征, 进一步计算出接触点密度和实际接触面积. 实际上 Majumdar 和 Bhushan^[69]曾谨慎地指出, 凸点的面积分布指数与分形维数的关系尚需深入研究. 王安良等人^[89]发现机械加工表面凹坑或凸点的尺度分布与几何分形维数是两个含义不同的概念, 计算凸点(或凹坑)密度乃至实际总面积时应特别注意. 从某种意义上来说, 分形表面也是对表面几何形貌的一种理想化数学描述, 采用分形理论来处理接触热

阻、接触电阻、摩擦磨损等工程问题时, 还需要更多更细致的工作.

无论是传统的高斯统计方法还是分形方法, 研究思路一般假设粗糙度曲线上的轮廓(或峰)高度服从某种函数分布, 通过对分布函数的积分来计算接触点数或实际接触面积. 这样存在两个关键问题: 一是用统计平均参数描述表面无法表征机械加工表面的各向异性; 二是无法考虑机械加工表面三维凸点的尺寸与空间分布, 而实际参与接触的是表面上离散的凸点或区域. Li 等人^[90], Singhal 和 Garimella^[91]提出, 无论粗糙度曲线上的峰高服从何种分布, 都能以实际测量曲线上的单个峰(或者小区域内的当量峰)为对象, 分别确定单个峰的形变类型与接触热阻, 从而计算总的接触热阻. 他们把粗糙度曲线的统计特征与凸点的形变相关联, 提供了一种计算接触热阻的新思路.

总的来说, 以粗糙度曲线统计特征为对象的表面几何形貌研究方法, 用于接触热阻的预测尚存在以下几个问题:

- 1) 以往研究认为微观接触点是粗糙度级的误差造成的, 而一般的机加工表面包含三个等级的形貌特征, 如何从表面轮廓曲线中准确分离出粗糙度、波度和形位误差三方面的几何偏差, 现有分离粗糙度曲线的方法是否有效, 并且波度和形位误差对接触热阻是否有决定影响, 是目前尚未解决的问题;
- 2) 对某个实际机械加工表面, 测量的所有粗糙度曲线是否全部符合某种现有分布特征? 如高斯分布或分形分布? 粗糙度曲线上哪些峰才真正参与实际接触? 即忽略了接触峰评定规则对预测模型的影响;
- 3) 从接触峰到接触凸点, 人为设定的转换规则对计算实际接触面积有什么影响? 更高层次的问题是接触凸点是不规则的, 可看作孤立的点, 也可能连成一片的区域, 如何评价才是更接近实际的.

针对上述问题, 王安良等人^[92-94]采用实际测量轮廓曲线为原始数据, 建立了接触峰与凸点的分布规律以预测接触热阻.

首先, 用一组由标准正态函数生成的数据与一组基准曲线(如正弦曲线)的数据叠加作为基本数据, 检验了小波变换方法能有效地分离基准曲线与粗糙度曲线. 其次, 对多种加工方法生成的实验板测量不同位置的粗糙度轮廓曲线, 采用小波变换方法分离

了基准线和粗糙度曲线. 这里基准线实际上包含了形位误差与波度两类表面形貌误差. 然后, 对粗糙度曲线上轮廓高度进行统计分布检验. 检验结果表明, 粗糙度曲线并不服从严格的高斯分布, 但具有一定的正态性. 这个结果与 Greenwood 和 Williamson^[56]的结论是一致的. 而粗针对糙度曲线上哪些峰才有可能与其他表面发生接触, 我们提出了4种接触峰的评定规则. 对接触峰高的正态性检验表明, 接触峰分布特征与评定规则有关, 且统计结果与轮廓高度类似, 也不一定符合严格的正态分布. 从这个角度出发, 直接以实际测量粗糙度曲线上接触峰的分布特征为基础, 建立接触峰与接触凸点的联系, 进一步预测了不同载荷下的接触热阻.

随后, 对基于轮廓曲线的接触热阻预测结果进行了统计分析. 目前, 接触热阻分析模型都是从粗糙度曲线的统计分布假设为出发点, 接触点的密度和接触面积由粗糙度曲线上峰的分布特征推算出来的. Lambert 和 Fletcher^[7]比较了现有的分析模型与实验结果, 表明所有模型的预测结果都有较大的分散性. 我们认为其根本原因之一是采用了轮廓曲线的统计分布假设来描述表面几何形貌造成的. 根据研究结果, 同一表面不同位置测量的轮廓曲线, 以单条曲线上接触峰的统计特征为基础, 预测的接触热阻差别较大, 或者说仅采用两三个平均化参数来表征整个表面形

貌, 造成预测结果有很大的分散性, 如图2所示.

表面粗糙度轮廓曲线的信息毕竟是有限的, 在计算接触热阻时, 用粗糙度曲线的统计特征推算接触点密度和接触面积, 需要引入把接触峰转化为凸点等假设条件, 带来很多不确定因素. 所以, 需要从三维的角度来评价表面几何形貌. 然而, 一方面由于测量三维粗糙表面轮廓数据比较困难, 另一方面由于表面形貌不规则, 目前尚没有合适的描述凸点半径和密度等参数的方法.

目前, 测量三维表面几何形貌的方法有: 电学触针式轮廓仪、光学非接触式三维扫描仪、光学干涉显微镜、激光扫描显微镜和扫描隧道显微镜等. 这几种测量方法各有优缺点. 电学触针式轮廓仪优点是测量范围大, 操作方便, 对被测工件要求低, 数据处理方便, 测量成本相对较低. 触针式轮廓仪一般用于测量轮廓曲线, 对三维表面形貌需要从不同方向多次扫描, 重构三维表面形貌工作量巨大且精度较低. 目前, 大部分用于三维表面形貌测量是光学非接触式的仪器, 其优点是不破坏表面的形貌, 三维测量范围大且精度较触针式高, 数据处理方便, 其缺点是对工件清洁度要求高. 光学干涉显微镜、激光扫描显微镜和扫描隧道显微镜都属于高精度的三维表面形貌测量仪器, 测量尺寸范围受精度的限制较大, 且数据一般以照片的格式保存, 处理数据不方便. 无论上述方法的

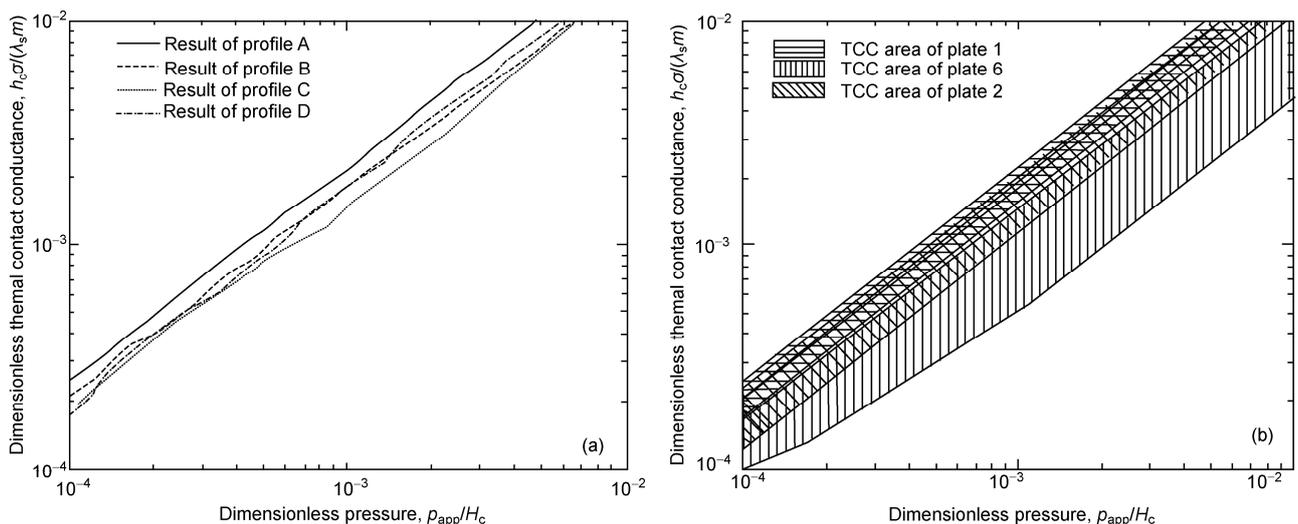


图2 基于粗糙度轮廓曲线统计特征的接触热阻预测结果^[94]

(a) 同一块实验板不同轮廓曲线; (b) 相同或不同平均粗糙度的实验板

三维测量精度如何, 关键难题还在于表面三维几何数据的处理和参数分析。

另一方面, 人们开展了三维表面几何形貌的数学模拟研究. 根据高斯表面假设, 人们采用线性矩阵变换、快速傅立叶变换和时间序列分析等方法, 模拟三维表面几何形貌, 如 Patir^[95], Waton 和 Spedding^[96], Whitehouse^[97], Newland^[98], Hu 和 Tonder^[99], Chilamankuri 和 Bhusan^[100], Mihailidis 和 Bakolas^[101], Wu^[102]等人. 而 Bakolas^[103]对描述曲面的空间参数和频谱参数的方法进行了综述, 提出了一种非高斯曲面的模拟方法. 自从分形几何创立以来, 曲面的分形模拟引起人们极大的兴趣, 并用于地理形貌的模拟, 主要模拟方法有随机分形和分形插值两大类^[104]. 更细致地划分, 随机分形曲面的模拟方法有 midpoint 移位法、逐次累加法 and 傅立叶滤波法等. McGaughey 和 Atiken^[105]使用分形和随机过程相结合的方法生成了随机分形曲面. 分形插值的基本思想是根据已知的部分数据, 通过插值得到更详细的数据. 所有数学模拟表面形貌的方法, 均不能回避的问题是模拟表面与哪一种现实表面相对应, 或者说在统计意义上的等价性?

无论采用实验测量还是数学模拟, 人们得到三维表面几何形貌数据后, 最终目的是计算接触点的尺度、密度及接触面积, 即采用哪些表征参数才能有效用于接触热阻预测模型? 这样带来两方面的问题:

1) 三维粗糙表面形貌的数据, 也是形位误差、波度和粗糙度三种几何偏差的叠加, 这就首先需要采用有效的数学方法, 分离各部分的几何偏差;

2) 基于三维粗糙度曲面的数据, 建立微观接触点尺寸和密度的数学模型, 进一步计算实际接触面积.

2.3 接触点的变形特征

固体接触面在受力条件下, 所有接触热阻预测模型对单个凸点的变形均作了简化假设. 根据宏观材料力学领域的研究结果, 在载荷作用下接触点一般可能发生塑性、弹性和弹塑性三种基本类型的变形, 进而直接影响接触热阻. 采用不同的变形假设, 有三类与载荷(或压力)相关的接触换热模型或半经验关联式.

2.3.1 塑性接触模型

Cooper 等人^[43]最早提出了一个基于高斯表面假

设的接触热阻模型, 他们认为塑性形变在表面受力后微观形变中起主导作用. 以 Cooper 等人的模型为基础, Yovanovich^[106]提出了一个基于塑性形变更准确的接触换热关联式. 随后, Hegazy^[107]在他的博士论文中引入微观硬度的概念, 研究了 Vickers 硬度、Brinell 硬度和 Rockwell 硬度的关系, 并计算了实际接触面积比、接触点密度和半径分布与名义载荷的关系. 与实验数据对比表明, 塑性接触模型在高载荷范围与实验值符合的较好, 但在中低载荷条件下有很大的分散性^[7].

2.3.2 弹性接触模型

根据 Herz 弹性变形理论, Mikic^[59]认为对于均匀粗糙表面, 载荷作用下微接触点主要发生弹性形变, 并给出了实际接触面积和接触点密度的计算公式. 更复杂的弹性接触模型如 Greenwood 和 Williamson^[56], Greenwood 和 Tripp^[58]等. Sridhar 和 Yovanovich^[64]比较了大量实验数据表明, 弹性接触模型在较硬材料的接触换热条件下符合的较好, 例如均匀粗糙的工具钢表面, 但不太适用于较软的材料.

2.3.3 弹塑性接触模型

Sridhar 和 Yovanovich^[108]综合了 Cooper 等人^[43]和 Mikic^[59]的特点, 认为实际接触过程中凸点可能发生弹性变形也可能发生塑性变形, 他们提出了一个弹塑性参数以修正积分表面几何参数, 并给出弹塑性变形下的微观硬度. Majumdar 和 Bhusan^[70]则认为弹性与塑性形变的分界点与分形维数有关.

综合考虑表面微观几何形貌、变形特征以及材料物性, 研究者们提出了许多半经验的接触热阻关联式, 常见形式如下:

$$H_c^* = H_c \frac{S}{K_s} = a \left(\frac{P}{M} \right)^b, \quad (1)$$

(1)式中 H_c^* , H_c 分别为无量纲和有量纲的接触热导; S 为与表面粗糙度相关的统计参数或其复合形式; K_s 为与固体材料导热性能相关的参数; P 为接触表面压力; M 为材料硬度或弹性模量; a , b 为待定系数.

基于对表面几何形貌和变形特征的认识, 研究者们根据各自的实验数据拟合得到 a 和 b 系数, 但系数之间差别很大. 至少有两方面因素: 一方面, 所有接触点形变是建立在假设基础上的, 当载荷变化时

单个微接触点的实际形变特征需要从微观上进行细致的研究,特别是综合利用材料学、晶体学、微观接触力学以及测量学等领域的知识,才能获得较全面的描述;而另一方面,正如上一节所论述,由于表面几何形貌和微观结构的复杂性,微凸点形状、尺寸以及位置的随机性,接触点结构与变形也就会有很大的分散性.从 Lambert 和 Fletcher^[7]的比较结果,可以看出现有模型与关联式的预测结果分散性都很大,即没有一个普遍适用的公式与所有实验数据都符合.虽然这类半经验关系式在针对具体工程问题时有一定的参考价值,且使用起来很方便.但在上述理论框架下,我们认为不可能找到一组普适的拟合参数满足所有的条件,预测结果不可避免地有较大误差.另外,宏观参数在工程实际中常常并不容易确定,比如接触界面的压强及分布,与安装方式与测量方法直接相关,这使得接触热阻预测更加复杂化,关联式的精度与适用范围也大大受到限制.

大部分凸点变形模型均以宏观尺度上的力学原理为依据,关键问题是:真实微凸点受力变形的规律是怎样的?对变形与尺度之间关系的研究也偏少,更缺乏充足的实验数据.需要结合表面微观几何形貌新结果,对微凸点的变形进行更多的实验和理论研究.

2.4 跨尺度分析与模拟

从根本上来说,接触热阻是一个复杂的跨尺度热-力耦合问题.接触表面受热-力共同作用,虽然从宏观尺度描述对工程应用较方便,但物理机制应是界面上原子或分子之间的相互作用和运动.接触问题覆盖了从原子到宏观尺度的宽广范围内,表征其材料物质迁移、能量传递、结构演化、性能变异以及服役行为一直是材料学、固体力学乃至凝聚态物理等领域共同关心的关键科学问题,在某些领域还需考虑电磁场等的作用,情况更加复杂,也更具有挑战性.探求跨尺度力-热耦合以及热-力-电等多场耦合下的物理机理是接触热阻研究的必然趋势,包括其微观尺度、材料组分、界面结构、晶面取向、界面滑变、材料损伤、力学场、热学场及其他场等各种微观与宏观因素,单独或共同作用的物理机制,而且研究思路更加开阔.跨尺度范围内力-热耦合问题的焦点在微米和纳米尺度.

而微/纳尺度传热学正是当前的研究热点,新发

现层出不穷^[109, 110].例如,微尺度下宏观的傅里叶定律已不再适用;热传导会受尺度和边界效应的影响;Matthiessen 定律、量子热量输运、Casimir 极限等一批有趣的规律被发现.这些物理机制在传统的接触热阻预测模型均未深入考虑,目前虽然无法全面评估微尺度效应对接触传热有多大影响,但可以断定这方面的研究会越来越受到重视.

对涉及跨尺度、热力耦合的接触热阻预测,在研究手段方面,除了需要性能更强、测试参数更全面、精度更高的微/纳尺度实验设备及方法外,计算机数值分析与模拟已经成为必不可少的工具.

随着计算机技术的不断发展,人们已从宏观尺度和原子尺度两个相对层面逐渐逼近接触换热问题,即采用“Top-Down”和“Bottom-Up”两种思路来展开数学模拟.

从宏观的角度,早在上个世纪 70 年代, Yovanovich^[9]课题组就假设单个接触点为圆形、椭圆形、矩形、多边形以及其他形状等几何结构,基于经典的傅里叶热传导方程对各种单点接触热阻进行全面地分析和数值模拟研究,这些结果为各种分析模型的建立提供了理论依据^[108].后来 Rostami 等人^[111]基于热流管的概念,采用 Fluent 软件三维数值分析了接触点形状、尺寸以及气隙几何参数等的影响. Trujillo 和 Pappoff^[112]采用有限元网格分析了接触点几何结构对换热的影响. Wahid^[113]采用有限微分法对包含锥形台的圆柱接触连接进行了数值模拟,重点讨论了气隙与固体触点的换热比率. Black 等人^[114]也数值研究了圆柱连接的半径比、锥形角、气隙对热阻的影响.但是对于一般粗糙表面的接触换热问题,受准确描述表面微观几何形貌的困难和凸点形变特征的不确定性等因素限制,数值模型均有不同程度的简化,而在模型建立、网格划分及计算方法也包含了一些特有的处理技巧. Laraqi 课题组^[115-119]分析了单个理想几何结构传热模型,把接触点假设为一些不同尺寸的矩形块或圆盘,均匀或随机分布在表面上,采用分析模型、有限元数值方法等研究了接触点的尺寸、空间位置和密度对接触换热的影响,并研究了滑块速度对表面温度场的影响. Tomimura 等人^[120]对接触点随机分布的表面进行了定性的数值模拟. Zhang 等人^[121, 122]提出了一种巧妙的周向均匀网格划分圆柱接触表面,实际接触点随机分布在表面上,单个网格的接触导热系数用等效值来处理,随着网格密度

的增加总热阻值数值计算逐渐趋于稳定. 从“Top-Down”的思路开展接触热阻分析与数值模拟, 不同模型根本差别在于描述实际接触表面的微观几何边界和接触点的形变特征, 这正是影响预测模型准确性和适用范围的关键所在.

从微观的角度, 即以固体物质由原子、离子和分子组成为出发点, 采用量子分子动力学(Quantum Molecular Dynamics)、分子动力学(Molecular Dynamics)、Boltzmann 方程等分析方法, 人们在研究富里叶定律的适用性、热导率的尺度效应和边界效应、薄膜热传导等方面已经开展了相当广泛的研究工作^[105]. Touzelbaev 和 Goodson^[123]基于声子传输理论(Phonon Transport Theory)对金刚石-底材的接触热阻进行了分析计算, 以金刚石粒子分布梯度和边界层厚度为几何参数, 认为接触热阻直接受金刚石的粒子密度控制. Prasher 和 Phelan^[124]提出了一个考虑扩散和声学失谐的调和模型(Scattering-Mediated Acoustic Mismatch Model)来预测微尺度的接触热阻, 以晶格尺度为几何参数, 预测结果与 Rh/MgO 界面的实验数据符合的很好. Chen^[125]提出了一个基于 Boltzmann 方程的弹道扩散方程(Ballistic-Diffusive Equations)对接触薄膜实现了从纳米到宏观尺度的传导模拟, 很显然接触边界作了简化处理. 梁新刚和岳宝^[126]采用非平衡分子动力学方法(Non-Equilibrium Molecular Dynamic)模拟了纳米尺度下壁面粗糙度对接触热阻的影响, 粗糙度用原子半径及投影面积来定义(在 0.02~0.12 nm 范围), 发现随着粗糙度的增加, 面向热导率在减小. Liao 和 Yang^[127]采用分子动力学和有限元耦合计算的方法, 对接触界面传热进行了模拟计算, 发现原子移动造成温度的空间分布. 近来, 从微尺度角度开展的研究工作还有很多^[128-133]. 通过“Bottom-Up”的分析与模拟, 研究者在微尺度传热等领域取得了大量的成果, 揭示了许多有趣的新物理机制, 但总的来说模拟的尺度还很有限, 一般在纳米量级, 向宏观尺度扩展尚有大量问题需解决.

无论是宏观还是微观模拟, 面临的共同困难是, 受计算机能力的限制, 即使采用当前世界上最先进的计算设备, 跨越尺度建模的范围还是太窄, 模型中

对表面几何形貌和接触点变形特征等的描述过于简化, 且许多假设条件还缺乏有力的实验证据. 一个关键的技术问题是: 跨尺度接触热-力耦合问题的如何数学建模、适用条件与预测结果评判?

3 研究工作展望

几十年来, 接触热阻的预测问题一直是传热学界的热点, 人们从宏观和微观两个角度入手开展了大量的理论研究, 也提出了许多有科学理论基础与工程价值的模型或数值方法. 为了更好地对接触热阻进行有价值的预测, 以下工作尤其需要深入开展.

1) 由于表面几何形貌的不规则性和复杂性, 计算实际接触点尺寸和分布密度仍然是接触热阻预测的关键难题, 需开展更为系统广泛的三维表面几何形貌的测量和表征, 这方面研究对摩擦磨损、接触电导和沸腾换热等领域也具有重要意义; 有针对性地微/纳尺度上制造一些接触表面的特殊结构和界面材料, 一方面可直接满足工程需求, 另一方面也可作为接触热阻预测建模和仿真的边界条件.

2) 结合接触换热材料、表面凸点的尺寸与形状等特性, 对真实微观凸点的变形规律进行相适应的理论分析与建模, 同时需要重视对材料微观硬度、弹性及变形等的实验测试研究.

3) 从跨尺度和多场耦合的角度综合分析, 开展考虑因素更全面和物理机理更基础的数值模拟; 采用宏观尺度方法与微观尺度方法相结合, 是接触热阻预测研究的必然趋势.

接触热阻预测能力的提高, 显然离不开相关分支学科领域的实验测量方法和技术进步的支持. 一个常常萦绕在人们脑海中的疑问是: 有如此多的不确定因素, 能否找到一个普遍的规律或方法来描述接触热阻与各种因素的关系, 以准确地预测接触换热^[134]? 这是一个具有挑战性的科学与技术问题. 我们相信: 人们只要不断地做出努力, 使接触热阻的各种因素存真去伪, 将会理解其越来越真实的科学内涵, 也能满足越来越广泛的工程需求.

致谢 感谢北京航空航天大学航空科学与工程学院杨春信教授的支持, 袁修干教授的鼓励与关怀, 感谢第一作者所在宇航学院的刘宇教授课题组的大力支持.

参考文献

- 1 Viswanath R, Wakharkar V, Watwe A, et al. Thermal performance challenges from silicon to systems. *Int Technol J*, 2000, 4(3): 1–16
- 2 闵桂荣, 郭舜. 航天器热控制. 北京: 科学出版社, 1998
- 3 耿永兵, 魏延明, 潘海林, 等. 电推进的热控技术. 电推进技术专题研讨会论文集, 2007. 12: 6–11
- 4 Ramamurthi K, Kumar S S, Abilash P M. Thermal contact conductance of molybdenum-sulphide-coated joints at low temperature. *J Thermophys Heat Transf*, 2007, 21(4): 811–813
- 5 Culham J R, Khan W A, Yovanovich M M, et al. The influence of material properties and spreading resistance in the thermal design of plate fin heat sinks. *Trans ASME J Electron Pack*, 2007, 129: 76–81
- 6 Alcock J F. Communications on a review of recent progress in heat transfer. *Proc Institution Mech Eng*, 1943, 149: 126–130
- 7 Lambert M A, Fletcher L S. Review of models for thermal contact conductance of metals. *J Thermophys Heat Transf*, 1997, 11(2): 129–140
- 8 Lambert M A, Fletcher L S. Thermal contact conductance of non-flat, rough, metallic coated metals. *Trans ASME J Heat Transf*, 2002, 124: 405–412
- 9 Yovanovich M M. Conduction and thermal contact resistances (conductances). In: Rohsenow W M, Hartnett J P, Cho Y I, eds. *Handbook of Heat Transfer*. Chapter 3. New York: McGraw Hill, 1998
- 10 Yovanovich M M, Marotha E. Thermal spreading and contact resistance. In: Bejan A, Kraus A D, eds. *Heat Transfer Handbook*. Chapter 4. New York: Wiley, 2003
- 11 Fletcher L S. A review of thermal control materials for metallic junctions. *J Spacecr Rockets*, 1972, 9: 849–850
- 12 Fletcher L S. A review of thermal enhancement techniques for electronic systems. *IEEE T Compon Hybrid Manuf Technol*, 1990, 13(4): 1012–1021
- 13 Kraus A D, Bar-Cohen A. *Thermal Analysis and Control of Electronic Equipment*. New-York: McGraw-Hill, 1983
- 14 Yovanovich M M, Antonetti V W. Application of thermal contact resistance theory to electronic packages. In: Bar-Cohen A, Kraus A D, eds. *Advances in Thermal Modeling of Electronic Components and Systems*. New York: Hemisphere Publishing, 1988
- 15 Madhusudana C V. *Thermal Contact Conductance*. New York: Springer-Verlag, 1996
- 16 Madhusudana C V, Fletcher L S. Contact heat transfer—The last decade. *AIAA J*, 1986, 24(3): 510–523
- 17 Fletcher L S. Recent developments in contact conductance heat transfer. *Trans ASME J Heat Trans*, 1988, 110: 1059–1070
- 18 Swartz E, Pohl R. Thermal boundary resistance. *Rev Mod Phys*, 1989, 61: 605–668
- 19 Gmelin E, Asen-Palmer M, Reuther M, et al. Thermal boundary resistance of mechanical contacts between solids at sub-ambient temperatures. *J Phys D-Appl Phys*, 1999, 32: R19–R43
- 20 顾慰兰. 接触热阻的实验研究. *南京航空航天大学学报*, 1992, 24(1): 46–52
- 21 顾慰兰, 杨燕生. 温度对接触热阻的影响. *南京航空航天大学学报*, 1994, 26(3): 342–349
- 22 顾慰兰. 一种随机表面间接接触热阻的计算方法. *航空动力学报*, 1995, 10(3): 232–236
- 23 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
- 24 徐烈, 熊炜, 杨军, 等. 真空低温下接触表面对接触热阻的影响. *真空与低温*, 1998, 4(1): 1–4
- 25 张涛, 徐烈, 熊炜, 等. 接触热阻研究中理论模型的分析. *低温与超导*, 1998, 26(2): 58–64
- 26 徐烈, 张涛, 赵兰萍, 等. 双热流法测定低温真空下固体界面的接触热阻. *低温工程*, 1999, (4): 185–189
- 27 赵兰萍, 徐烈. 用轮廓离散法研究粗糙表面间的接触导热. *低温工程*, 2000, 6(118): 52–57
- 28 赵兰萍, 徐烈, 李兆慈, 等. 反复加载情况下低温固体界面间接接触导热的研究. *低温与超导*, 2000, 28(1): 51–54
- 29 Xu R P, Feng H D, Zhao L P, et al. Experimental investigation of thermal contact conductance at low temperature based on fractal description. *Int Commun Heat Mass Transf*, 2006, 33: 811–818
- 30 陈进. 低温固体界面传热过程计算机仿真研究. 博士学位论文. 武汉: 华中科技大学, 2004
- 31 石零. 低温固-固接触界面热传输研究. 博士学位论文. 武汉: 华中科技大学, 2006
- 32 韩玉阁, 宣益民, 汤瑞峰. 摩擦接触界面传热规律研究. *南京理工大学学报*, 1998, 22(3): 260–263
- 33 应济, 陈伟球, 陈子辰. 换热影响下的接触热阻估计. *浙江大学学报*, 1996, 30(4): 415–421
- 34 应济, 贾昱, 陈子辰, 等. 粗糙表面接触热阻的理论和实验研究. *浙江大学学报(自然科学版)*, 1997, 31(1): 104–109
- 35 赵宏林, 黄玉美, 徐洁兰, 等. 常用结合面接触热阻特性的实验研究. *西安理工大学学报*, 1999, 15(3): 26–29
- 36 朱德才. 固体界面接触换热系数的实验研究. 硕士学位论文. 大连: 大连理工大学, 2007
- 37 Bahrami M, Culham J R, Yovanovich M M, et al. Thermal contact resistance of nonconforming rough surfaces. Part 1: Contact mechanics model. *J Thermophys Heat Transf*, 2004, 18(2): 209–217
- 38 Bahrami M, Culham J R, Yovanovich M M, et al. Thermal contact resistance of nonconforming rough surfaces. Part 2: Thermal model. *J Thermophys Heat Transf*, 2004, 18(2): 218–227
- 39 Carslaw H S, Jaeger J C. *Conduction of Heat in Solids*. 2nd ed. Oxford: Clarendon Press, 1959

- 40 Gibson R D. The contact resistance for a semi-infinite cylinder in a vacuum. *Appl Energy*, 1976, 2: 57–65
- 41 Yovanovich M M. Thermal constriction resistance of contacts on a half-space: Intergral formulation. In: *Progress in Astronautics and Aeronautics: Radiative Transfer and Thermal Control*. New York: AIAA, 1976. 397–418
- 42 Mikic B B, Rohsenow W M. Thermal Contact Resistance. *Mech Eng Repts*, DSP74542-41, MIT. 1966
- 43 Cooper M G, Mikic B B, Yovanovich M M. Thermal contact conductance. *Int J Heat Mass Transf*, 1969, 12: 279–300
- 44 Yovanovich M M. General thermal constriction resistance parameter for annular contacts on circular flux tubes. *AIAA J*, 1976, 14(6): 822–824
- 45 Negus K J, Yovanovich M M. Constriction resistance of circular flux tubes with mixed boundary conditions by linear superposition of Neumann solutions. *ASME-84-HT-84*, ASME. 1984
- 46 毛起广. 表面粗糙度的评定和测量. 北京: 机械工业出版社, 1991
- 47 周仲荣. 摩擦学发展前沿. 北京: 科学出版社, 2006
- 48 郭凤仪, 陈忠华. 电接触理论及其应用技术. 北京: 中国电力出版社, 2008
- 49 Clausing A M, Chao B T. Thermal contact conductance in a vacuum environment. *Trans ASME J Heat Transf*, 1965, 87: 243–251
- 50 Greenwood J A, Tripp J H. The elastic contact of rough spheres. *J Appl Mech*, 1967, 89(1): 153–159
- 51 Holm R. *Electric Contacts: Theory and Applications*. New York: Springer-Verlag, 1967
- 52 Yovanovich M M. Overall constriction resistance between contacting rough, wavy surfaces. *Int J Heat Mass Transf*, 1969, 12: 1517–1520
- 53 Burde S S, Yovanovich M M. Thermal resistance at smooth sphere/rough flat contacts: Theoretical analysis. *AIAA* 78–871. 1978
- 54 Lambert M A. *Thermal Contact Conductance of Spherical Rough Surfaces*. Dissertation of Doctoral Degree. Houston: Texas A & M University, 1995
- 55 Kumar S S, Ramamurthi K. Influence of flatness and waviness of rough surfaces on surface contact conductance. *Trans ASME J Heat Transf*, 2003, 125: 394–402
- 56 Greenwood J A, Williamson J B P. Contact of nominally flat surfaces. *Proc Roy Soc A*, 1966, 295: 300–319
- 57 Greenwood J A. The area of contact between rough surfaces and flats. *J Lubricant Technol*, 1967, 81: 81–91
- 58 Greenwood J A, Tripp J H. The contact of two nominally flat rough surfaces. *Proc Inst Mech Eng*, 1970, 185: 625–633
- 59 Mikic B B. Thermal contact conductance: Theoretical considerations. *Int J Heat Mass Transf*, 1974, 17: 205–214
- 60 Bush A W, Gibson R D, Thomas T R. The elastic contact of rough surface. *Wear*, 1975, 35: 87–111
- 61 Sayles R S, Thomas T R. Thermal conductance of a rough elastic contact. *J Appl Energy*, 1976, 2: 249–267
- 62 McCool J I. Comparison of models for the contact of rough surfaces. *Wear*, 1986, 107: 37–60
- 63 Yovanovich M M. Thermal contact correlations. In: *AIAA 16th Thermophysics Conference*, Palo Alto, California, USA, 1981. 83–95
- 64 Sridhar M R, Yovanovich M M. Review of elastic and plastic contact conductance models: Comparison with experiment. *J Thermophys Heat Transf*, 1994, 8(4): 633–640
- 65 Polycarpou A A, Etsion I. Analytical approximations in modeling contacting rough surfaces. *Trans ASME J Tribol*, 1999, 121: 234–239
- 66 Greenwood J A, Wu J J. Surface roughness and contact: An apology. *Meccanica*, 2001, 36(6): 617–630
- 67 Sayles R S, Thomas T R. Surface topography as a nonstationary random process. *Nature*, 1978, 271(2): 431–434
- 68 Mandelbrot B B. *Fractal, Form, Chance and Dimension*. Freeman: Sanfacisco, 1977
- 69 Majumdar A, Bhushan B. Role of fractal geometry in roughness characterization and contact mechanics of surfaces. *ASME J Tribol*, 1990, 112(1): 205–216
- 70 Majumdar A, Bhushan B. Fractal model of elastic-plastic contact between rough surfaces. *ASME J Tribol*, 1991, 113(1): 1–11
- 71 Majumdar A, Tien C L. Fractal characterization and simulation of rough surface. *Wear*, 1990, 136: 313–324
- 72 Warren T L, Krajcinovic D. Fractal models of elastic-perfectly plastic contact of rough surfaces based on the Cantor set. *Int J Solid Struct*, 1995, 32(19): 2907–2922
- 73 Warren T L, Krajcinovic D. Random cantor set models for the elastic-perfectly plastic contact of rough surfaces. *Wear*, 1996, 196: 1–15
- 74 Warren T L, Majumdar A, Krajcinovic D. A fractal model for the rigid-perfectly plastic contact of rough surfaces. *Trans ASME J Appl Mech*, 1996, 63: 47–54
- 75 Dubuc B, Tricot C, Zucker S W. Evaluating the fractal dimension of profiles. *Phys Rev A*, 1989, 39(3): 1500–1512
- 76 Hasegawa M, Liu J, Okuda K, et al. Calculation of the fractal dimensions of machined surface profiles. *Wear*, 1996, 192: 40–45
- 77 葛世荣, 索双富. 表面轮廓分形维数计算方法的研究. *摩擦学学报*, 1997, 17(4): 354–362
- 78 王安良, 杨春信. 评价机械加工表面形貌的小波变换方法. *机械工程学报*, 2001, 37(8): 65–69
- 79 王安良, 杨春信. 机械加工表面形貌分形特征的计算方法. *中国机械工程*, 2002, 13(8): 714–718
- 80 王安良, 杨春信. 小波变换方法评价曲线的分形特征. *机械工程学报*, 2002, 38(5): 80–85
- 81 Wang A L, Yang C X, Yuan X G. Evaluation of the wavelet transform method for machined surface topography II: Fractal characteristic analysis. *Tribol Int*, 2003, 36(7): 527–535
- 82 Wang A L, Yang C X, Yuan X G. Evaluation of the wavelet transform method for machined surface topography I: Methodology validation.

- Tribol Int, 2003, 36(7): 517–526
- 83 葛世荣, 朱华. 摩擦学的分形. 北京: 机械工业出版社, 2005
- 84 Chang W R, Etsion I, Bogy D B. An elastic-plastic model for the contact of rough surfaces. *Trans ASME J Tribol*, 1987, 109: 257–263
- 85 Zahouani H, Vargiolu R, Loubet J L. Fractal models of surface topography and contact mechanics. *Math Comp Model*, 1998, 28(4-8): 517–534
- 86 Blyth M G, Pozrikidis C. Heat conduction across irregular and fractal-like surfaces. *Int J Heat Mass Transf*, 2003, 46: 1329–1339
- 87 Zou M Q, Yu B M, Cai J C, et al. Fractal model for thermal contact conductance. *J Heat Transf*, 2008, 130: 101301
- 88 Ciavarella M, Dibello S, Demelio G. Conductance of rough random profiles. *Int J Solid Struct*, 2008, 45(3-4): 879–893
- 89 王安良, 吴玉庭, 杨春信. 沸腾表面凹坑的尺度分布特征. *热能动力工程*, 2003, 18(3) 291–296
- 90 Li Y Z, Madhusudana C V, Leonardi E. Experimental investigation of thermal contact conductance: Variations of surface microhardness and roughness. *Int J Thermophys*, 1998, 19(6): 1691–1704
- 91 Singhal V, Garimella S V. Prediction of thermal contact conductance by surface deformation analysis. In: *Proceedings of 2001 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, New York, USA, 2001*. 43–50
- 92 赵剑锋, 王安良, 杨春信. 接触传热表面粗糙度曲线的统计特征分析. *低温工程*, 2003, 134(4): 49–56
- 93 赵剑锋, 王安良, 杨春信. 基于粗糙度曲线统计特征的接触热阻模型. *工程热物理学报*, 2004, 25(1): 145–147
- 94 Zhao J F, Wang A L, Yang C X. Prediction of thermal contact conductance based on the statistics of the roughness profile characteristics. *Int J Heat Mass Transf*, 2005, 48: 974–985
- 95 Patir N. A numerical procedure for random generation of rough surfaces. *Wear*, 1978, 47: 263–277
- 96 Waton W, Spedding T A. The time series modeling of non-Gaussian engineering processes. *Wear*, 1982, 83: 215–231
- 97 Whitehouse D J. The generation of two-dimensional random surfaces having a specified function. *Ann CIRP*, 1983, 32(1): 495–498
- 98 Newland D E. *An Introduction to Random Vibration and Spectral Analysis*. 2nd ed. London: Longman, 1984
- 99 Hu Y Z, Tonder K. Simulation of 3-D random rough surface by 2-D digital filter and Fourier analysis. *Int J Mach Tools Manuf*, 1992, 32: 83–99
- 100 Chilamankuri S K, Bhushan B. Contact analysis of non-Gaussian random surfaces. *Proc Inst Mech Eng*, 1998, 212: 19–32
- 101 Mihailidis A, Bakolas V. Numerical simulation of real 3-D rough surface. *J Balk Tribol Assoc*, 1999, 5: 231–247
- 102 Wu J J. Simulation of rough surface with FFT. *Tribol Int*, 2000, 33: 47–58
- 103 Bakolas V. Numerical generation of arbitrarily oriented non-Gaussian three-dimensional rough surfaces. *Wear*, 2003, 254: 546–554
- 104 周孝宽, 周杭, 李敦玲. 分形图像学. 北京: 北京教育出版社等联合出版, 1995
- 105 McGaughey D, Atiken G J M. Generating two-dimensional Brownian motion using the fraction Gaussian process (FGP) algorithm. *Physica A*, 2002, 311: 369–380
- 106 Yovanovich M M. Thermal contact correlations. In: *AIAA 16th Thermophysics Conference, Palo Alto, California, USA, 1981*. 83–95
- 107 Hegazy A A. Thermal Joint Conductance of Conforming Rough Surfaces: Effect of Surface Microhardness Variation. Dissertation of Doctoral Degree. Waterloo: University of Waterloo, 1985
- 108 Sridhar M R, Yovanovich M M. Elastoplastic contact conductance model for isotropic conforming rough surfaces and comparison with experiments. *Trans AMSE J Heat Transf*, 1996, 118: 3–9
- 109 刘静. 微米/纳米尺度传热学. 北京: 科学出版社, 2001
- 110 国家自然科学基金委员会工程与材料学部. 学科发展战略研究报告(2006–2010)—工程热物理与能源利用. 北京: 科学出版社, 2006
- 111 Rostami A A, Hassan A Y, Lim P C. Parametric study of thermal constriction resistance. *Heat Mass Transf*, 2001, 37(1): 5–10
- 112 Trujillo D M, Pappoff C G. A general thermal contact resistance finite element. *Finite Elem Anal Des*, 2002, 38: 263–276
- 113 Wahid S M S. Numerical analysis of heat flow in contact heat transfer. *Int J Heat Mass Transf*, 2003, 46: 4751–4754
- 114 Black A F, Singhal V, Garimella S V. Analysis and prediction of constriction resistance for contact between rough engineering surface. *J Thermophys Heat Transf*, 2004, 18(1): 30–36
- 115 Salti B, Laraqi N. 3-D numerical modeling of heat transfer between two sliding bodies: Temperature and thermal contact resistance. *Int J Heat Mass Transf*, 1999, 42: 2363–2374
- 116 Laraqi N. Thermal constriction resistance of coated solids-static and sliding contacts. *Int Commun Heat Mass Transf*, 1999, 26(3): 299–309
- 117 Laraqi N, Bairi A. New models of thermal resistance at the interface of solids connected by random disk contacts. *CR Mecanique*, 2002, 330: 39–43
- 118 Laraqi N, Bairi A. Theory of thermal resistance between solids with randomly sized and located contacts. *Int J Heat Mass Transf*, 2002, 45: 4175–4180
- 119 Laraqi N. Change of scale effect in the phenomena of thermal multi-constriction. *CR Mecanique*, 2002, 330:141–145
- 120 Tomimura T, Matsuda Y, Zhang X, et al. Two-dimensional modeling of heat transfer between contacting metal surfaces with spherical waviness: Estimation of thermal contact conductance based on random numbers surface model. In: *5th International Symposium on Heat Transfer, Beijing, China, 2000*. 137–142
- 121 Zhang X, Cong P, Fujiwara S, et al. A new method for numerical simulation of thermal contact resistance in cylindrical coordinates. *Int J*

- Heat Mass Transf, 2004, 47: 1091–1098
- 122 Zhang X, Cong P, Fujii M. A study on thermal contact resistance at the interface of two solids. *Int J Thermophys*, 2006, 27(3): 880–895
- 123 Touzellbaev M, Goodson K. Impact of nucleation density on the thermal resistance near diamond-substrate boundaries. *J Thermophys Heat Transf*, 1997, 11: 506–512
- 124 Prasher R S, Phelan P E. A scattering-mediated acoustic mismatch model for the prediction of thermal boundary resistance. *J Heat Transf*, 2001, 123: 105–112
- 125 Chen G. Ballistic-diffusive equations for transient heat conduction from nano to macroscales. *J Heat Transf*, 2002, 124: 320–328
- 126 梁新刚, 岳宝. 微尺度下壁面粗糙度对面向导热影响研究. *工程热物理学报*. 2006, 27(3): 475–477
- 127 Liao N, Yang P. Characterizations of interfacial heat transfer for electronic packages by multi-scale modeling. *J Thermophys Heat Transf*, 2008, 22(4): 581–586
- 128 Prasher R S, Phelan P E. Microscopic and macroscopic thermal contact resistances of pressed mechanical contacts. *J Appl Phys*, 2006, 100: 063538
- 129 Zhong H, Lukes J R. Interfacial thermal resistance between carbon nanotubes: Molecular dynamics simulations and analytical thermal modeling. *Phys Rev B*, 2006, 74: 125403
- 130 Hu M, Shenogin S, Keblinski P. Molecular dynamics simulation of interfacial thermal conductance between silicon and amorphous polyethylene. *Appl Phys Lett*, 2007, 91: 241910
- 131 Termentzidis K, Chantrenne P, Keblinski P. Nonequilibrium molecular dynamics simulation of the in-plane thermal conductivity of superlattices with rough interfaces. *Phys Rev B*, 2009, 79: 214307
- 132 Landry E S, McGaughey A J H. Thermal boundary resistance predictions from molecular dynamics simulations and theoretical calculations. *Phys Rev B*, 2009, 80: 165304
- 133 Lyver J W, Blaisten-Barojas E. Effects of the interface between two Lennard-Jones crystals on the lattice vibrations: A molecular dynamics study. *J Phys-Condens Matter*, 2009, 21: 345402
- 134 顾慰兰. 接触换热经验公式的研究及其它. 中国航空学会推进系统气动热力学专业委员会, CSAA-99-006. 1999: 1–4