

面向强化装配界面接触热性能的 导热特性异质化设计方法

王晨^{1,2}, 林起崑^{1,2}, 丘铭军^{1,2,3,4}, 洪军^{1,2}

(1. 西安交通大学现代设计及转子轴承系统教育部重点实验室, 710049, 西安; 2. 西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安; 3. 金属成形技术与重型装备全国重点实验室, 710018, 西安; 4. 中国重型机械研究院股份公司, 710018, 西安)

摘要: 为解决装配界面接触热性能不足引起的散热性能和工作性能不足的问题, 首先, 构建了基于实测粗糙表面形貌的装配界面接触热性能数值分析模型; 其次, 测试了相应压力和温度工况下接触热阻以验证数值模型的准确性; 最后, 从装配界面微观接触传热机理出发, 提出了装配界面导热特性异质化设计思路, 建立了装配界面导热特性渐进迭代优化设计方法。结果表明: 构建的装配界面接触热性能数值分析模型能够实现接触热性能的高精度预测, 与实验结果对比, 相对误差为15.52%; 装配界面导热特性异质化设计通过提高界面温度梯度分布均匀性, 有效降低接触热阻, 优化设计后接触热性能提高23.12%。该研究为保障电子芯片封装、航天飞行器等热敏感复杂机械产品的接触热性能与整体散热性能提供了新的技术支撑。

关键词: 复杂机械产品; 装配界面; 接触热阻; 导热特性; 异质化; 优化设计

中图分类号: TH122 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202509007 **文章编号:** 0253-987X(2025)09-0065-12

Heterogeneous Design Method of Thermal Conductivity for Enhancing the Thermal Contact Performance of Assembly Interfaces

WANG Chen^{1,2}, LIN Qiyin^{1,2}, QIU Mingjun^{1,2,3,4}, HONG Jun^{1,2}

(1. Key Laboratory of Education Ministry for Modern Design and Rotor-Bearing System, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 3. National Key Laboratory of Metal Forming Technology and Heavy Equipment, Xi'an 710018, China; 4. China National Heavy Machinery Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710018, China)

Abstract: To address the inadequate heat dissipation and operational performance caused by insufficient contact thermal performance at assembly interfaces, this study first establishes a numerical analysis model for contact thermal performance based on measured rough surface topography of assembly interfaces. Subsequently, contact thermal resistance under corresponding pressure and temperature conditions is tested to verify the accuracy of the numerical model. Finally, starting from the microscopic heat transfer mechanism at the assembly interface, a heterogeneous design approach for thermal conductivity is proposed, establishing a progressive iterative optimization design method for the thermal conductivity of assembly interfaces. The results demonstrate that

收稿日期: 2025-03-05。 作者简介: 王晨(1999—), 男, 博士生; 林起崑(通信作者), 男, 教授, 博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金优秀青年科学基金项目(52222508); 国家自然科学基金联合基金资助项目(U24B6006); 国家自然科学基金重点项目(52335011)。

网络出版时间: 2025-04-27

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20250425.1509.002>

the constructed numerical analysis model for contact thermal performance can achieve high-precision predictions, with a relative error of 15.52%. The heterogeneous design of thermal conductivity effectively reduces contact thermal resistance by improving the uniformity of temperature gradient distribution at the interface, resulting in a 23.12% improvement in contact thermal performance after optimization. This study provides new technical support for ensuring the contact thermal performance and overall heat dissipation in thermally sensitive complex mechanical products, such as electronic chip packaging and aerospace vehicles.

Keywords: complex mechanical products; assembly interface; thermal contact resistance; thermal conductivity; heterogeneous; optimal design

随着复杂机械产品向高集成化方向发展,由装配体内部热量聚集和热流密度急剧攀升引发的热性能不足问题^[1],已成为制约设备工作效能与运行稳定性的关键瓶颈。值得注意的是,复杂机械产品作为若干零部件组装而成的特定功能的装配连接体,其内部各零部件间存在大量具有热传导特性的装配界面^[2-3]。装配界面和其承托的接触热性能作为整机装配热性能的重要组成部分和中间传递媒介,直接决定了整机装配热性能、服役性能及性能稳定性。因此,如何强化装配界面接触热性能已成为突破电子芯片封装等热敏感复杂机械产品热管理技术瓶颈的研究热点。

接触热阻(TCR)作为表征界面传热效率的关键指标,本质上是一个具有多物理场耦合特性的跨尺度参数^[4-6]。其形成机制涉及接触力学与传热学的深度交互,受到表面形貌微结构(粗糙度、波纹度)、材料热物性参数(导热系数、硬度)、界面介质特性(空隙填充物、氧化层)以及动态工况(接触压力、温度梯度)等多维度因素的协同作用^[7-8]。研究表明,界面热性能劣化的物理根源在于微观尺度下粗糙表面的凸峰接触特性:实际接触面积仅占表观接触面积的极小部分,导致超过90%的热流被迫通过微空隙中的介质传导,从而产生显著的TCR效应。当前学术研究主要聚焦于两大方向:接触热阻的精确预测建模与界面热性能的强化设计技术,其中前者通过建立多尺度耦合模型揭示界面热传导机理,为后者的工程优化提供理论支撑。

针对装配界面接触热性能的精准预测研究,当前主要形成了理论建模、数值仿真与实验测试三位一体的技术体系。在理论分析层面,表面形貌重构作为研究基础,已经发展出基于统计理论的随机生成法、基于分形理论的生成法与基于表面形貌测量仪的实测法^[9]。基于此,学术界相继提出多物理场耦合的TCR理论模型,如张平教授团队^[10-11]提出了考虑环境压力和温度影响的间隙介质导热性能变

化与近场热辐射影响的TCR理论分析模型。然而,理论模型受限于接触形变简化假设、材料各向同性假设等固有约束,其工程适用性仍面临挑战。数值模拟技术因具有多物理场耦合分析优势,已成为突破理论局限的重要途径。例如,陶文铨院士团队^[12-16]基于模拟粗糙表面和真实粗糙表面,使用有限元分析方法和玻尔兹曼分析方法开展了大量数值分析研究工作,涉及多种温度、压力载荷工况下的多个材料接触对。此外,有限体积法^[17]和边界元法^[18]也被用于接触热性能精准预测分析中。值得关注的是,数值模型的验证需要依赖高精度实验数据。当前测试技术主要分为稳态法与瞬态法两类。稳态法虽然测试精度高、操作方便,但对样品形状及尺寸有严格要求,且测试时间成本高。例如,宣益民院士团队^[19-20]提出了通过红外热像温度测试仪无损测试代替热电偶传感器测试的接触界面温度分布测试方法,并提出了一种上下对称布置稳态双向加载热流的高温条件下界面接触热阻测试方法。各种瞬态法能够实现多领域不同尺寸样品的快速测量,但在数据处理算法复杂度与误差补偿机制方面仍需突破。

现有降低TCR、增强散热性能的调控设计方法主要包括:改善装配连接工艺提高接触热性能、装配界面表面处理提高接触热性能、填充优质热界面材料(TIMs)提高接触热性能等手段。典型螺栓连接结构中,常采用螺栓预紧力、拧紧顺序等装配连接工艺的优化设计,提高螺栓连接界面接触应力分布均匀性和有效接触面积,进而有效提高装配界面接触热性能^[21]。但是,受限于宏观尺度设计理念,难以解决微观形貌引起的局部热阻问题。装配界面表面氧化膜、表面涂层以及表面微细结构对接触热性能具有重要影响^[22],通过在表面涂覆优质导热特性能够有效调控接触热性能,但其定向设计能力不足且工艺成本较高。TIMs依靠其高导热性和柔韧性能能够有效提高装配界面真实接触面积,进而改善固体传热中的接触热性能,广泛应用于电子芯片封装系

统等各类电子设备中,是目前降低 TCR 最常用的途径^[23-24]。但是,使用 TIMs 会带来高成本、使用不稳定以及老化衰退等问题,并且在结构紧凑且形状复杂的电子设备中的使用受到限制。因此,亟需新的热设计技术以解决装配界面接触热性能不足的问题。

装配界面接触热性能涉及接触变形和接触传热两个阶段,接触变形由弹性模量等力学特性决定^[25],接触传热由导热系数等热学特性决定。作者先前已经揭示了导热特性(导热系数)、温度梯度以及接触热性能 3 者之间的内在联系,并且发现正是由于均一化导热系数分布无法解决非均匀温度梯度分布,进而形成 TCR^[26]。因此,本文以电子芯片封装中提取的装配接触对为研究对象,构建了基于实测粗糙表面形貌的装配界面接触热性能数值分析模型,并与实验测试结果对比验证其准确性,为优化设计提供计算工具。在此基础上,从装配界面微观接触传热机理出发,提出了装配界面导热特性“异质化”设计思路,建立了装配界面导热特性渐进迭代优化设计方法,通过主动设计装配界面导热特性分布以提高温度梯度分布均匀性,并且对比分析了优化设计前后接触热性能以验证所提方法的有效性。

1 实验测试方法与系统

1.1 实验测试系统

本文作者基于稳态热流法测试原理在文献^[26]中构建了接触热阻实验测试系统,如图 1 所示。其中, T_H 和 T_{down} 表示测试样品 1 顶面温度和样品 2 底面温度, Z_H 和 Z_C 分别为测试样品 1 顶面和测试样品 2 底面位置坐标, T_{up} 、 T_{down} 为测试样品组合上、下接触表面的温度值, T_i ($i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$) 表示热流计上 6 个关键测试点温度; Z_i ($i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$) 表示热流计上 6 个关键测试点位置坐标。

试系统由主测试系统、低温水循环系统、数据采集和处理系统组成。主测试系统包括旋转压力装置及压力负荷控制传感器、加热装置、用于实现温度梯度的冷却装置、两个由已知高热导率系数的铜材料制成的热电阻热流计。将热统计连接到加热和冷却装置上以测量通过上、下测试样品的热流密度。两个热流计上各安装 3 个高精度热电偶温度传感器(德国开普勒公司生产)以测试热流量。每个测试样品上安装 2 个高精度热电偶温度传感器,用于测试

样品组合接触界面之间的温差。所用热电偶温度传感器严格满足一级精度标准要求,以保证实验测试过程中温度测试精度。加热装置可实现上表面温度 20~500 °C 的变化范围,冷却装置可实现下表面温度 20~100 °C 的变化范围。压力加载装置在 0~10 MPa 范围内施加所需压力载荷。

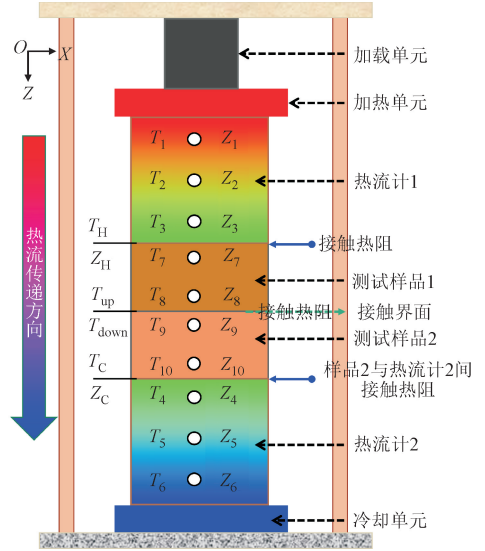


图 1 接触热性能实验测试系统^[26]

Fig. 1 Thermal contact performance test system^[26]

1.2 实验测试原理

如图 1 所示,利用热流计 1 和 2 上的温度传感器获取 6 个关键测试点的温度,根据铜制标准热流计的热导率,以及关键温度测试点 1、3 和测试点 4、6 之间的距离 (d),计算得到测试样品表面平均热流量 (Q)。 Q 的定义为^[26]

$$\begin{cases} Q_1 = \frac{k_1 A (T_1 - T_3)}{d} = \frac{k_1 A (T_1 - T_3)}{(Z_1 - Z_3)} \\ Q_2 = \frac{k_4 A (T_4 - T_6)}{d} = \frac{k_4 A (T_4 - T_6)}{(Z_4 - Z_6)} \end{cases} \quad (1)$$

$$Q = \frac{Q_1 - Q_2}{2} \quad (2)$$

式中: k_1 和 k_4 表示热流计 1 和 2 的热导率; Q_1 和 Q_2 分别表示通过测试样品 1 和 2 的接触表面热流量; A 表示样品名义接触表面积。

基于测试样品上 4 个关键测试点的温度测试值和相对位置,可计算得到测试样品组合上、下接触表面的温度 (T_{up} 、 T_{down})。 T_{up} 和 T_{down} 的定义为

$$\begin{cases} T_{up} = T_H - \frac{d_6 (T_7 - T_8)}{d_5} = T_H - \frac{(Z_H - Z_7) (T_7 - T_8)}{(Z_7 - Z_8)} \\ T_{down} = T_C - \frac{d_8 (T_9 - T_{10})}{d_7} = T_C - \frac{(Z_{10} - Z_C) (T_9 - T_{10})}{(Z_9 - Z_{10})} \end{cases} \quad (3)$$

式中： d_5 、 d_6 、 d_7 和 d_8 分别表示温度测试点 7 和 8 相对距离、温度测试点 7 与上表面相对距离、温度测试点 9 和 10 相对距离、温度测试点 10 与下表面相对距离。

最终,根据装配部件接触表面温差和热流密度,接触热阻 R_{TCR} 可计算为

$$R_{\text{TCR}} = \frac{\Delta T}{q} = \frac{(T_{\text{up}} - T_{\text{down}})}{Q/A}$$

(4)

式中： ΔT 表示界面温差; q 表示界面热通量。

1.3 测试误差分析

与 TCR 相关的测试误差包括界面热流测试误差和界面温差测试误差,根据式(4),TCR 相对测试误差可计算为

$$\frac{u(R_{\text{TCR}})}{R_{\text{TCR}}} = \sqrt{\frac{u(\Delta T)^2}{\Delta T^2} + \frac{u(q)^2}{q^2(q + u(q))}} = \sqrt{\frac{u(\Delta T)^2}{\Delta T^2} + \frac{u(q)^2}{q^2}}$$

(5)

式中： $u(R_{\text{TCR}})$ 表示 TCR 的误差; $u(\Delta T)$ 表示界面温差测试误差; $u(q)$ 表示界面热流测试误差。其中, $u(\Delta T)$ 和 $u(q)$ 的定义为

$$\frac{u(\Delta T)}{\Delta T} = \sqrt{\frac{u(T_7 - T_8)^2}{(T_7 - T_8)^2} + \frac{u(d_5)^2}{d_5^2} + \frac{u(d_6)^2}{d_6^2}}$$

(6)

$$\frac{u(q)}{q} =$$

$$\sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{u(k)^2}{k^2} + \frac{u(\Delta T)^2}{\Delta T^2} + \frac{u(d)^2}{d^2} \right) + \left(\frac{q_{\text{loss}}}{q} \right)^2}$$

(7)

式中： k 为导热率; $u(k)$ 表示热流计热导率误差; $u(\Delta T)$ 表示热流计上关键测试点温度测试误差; $u(d)$ 表示关键测试点相对位置误差; q_{loss} 表示热损失误差; $u(T_7 - T_8)$ 、 $u(d_5)$ 和 $u(d_6)$ 均为热传感器相对位置安装以及制造误差。经计算得到, $u(\Delta T)$ 最大相对误差为 16.49%, $u(q)$ 最大相对误差为 5.50%。最终,得到 TCR 的最大相对误差为 17.38%,满足现有稳态法测试精度需求。

2 数值分析模型与方法

2.1 粗糙表面重构

根据测试平台尺寸要求,加工了两个表面边长为 14 mm、高度为 8 mm 的 Inconel 718 材料长方体样品,样品侧面分别按需加工两个放置热电偶温度传感器的圆孔,用于开展数值分析结果的验证,详细测试原理和系统见图 1。不同温度下 Inconel 718 材料属性如表 1 所示。

表 1 不同温度下 Inconel 718 材料属性^[26]

Table 1 Material properties of Inconel 718 at different temperatures^[26]

温度/ K	弹性模量/ GPa	泊松比	屈服强度/ MPa	导热系数/ (W · m ⁻¹ · K ⁻¹)
300	208	0.3	1 172	10.11
500	198	0.3	1 132	12.44
700	186	0.3	1 075	12.78
900	172	0.3	1 022	13.12
1 100	160	0.3	983	13.46

为提高数值分析结果的准确度,采用激光共焦粗糙度测量系统 Leica DCM8,测量上述样品组合中接触表面的微观三维形貌,用于完成实测真实粗糙表面的数值重构。Leica DCM8 系统的平面分辨率为 140 nm, Z 方向显示分辨率小于 1 nm,最大分辨率为 0.1 nm,完全满足微观三维形貌测试精度要求。装配部件接触表面实测粗糙形貌如图 2 所示,车削工艺加工形成的粗糙表面呈现明显的加工痕迹。经计算得到,上、下接触表面微观形貌的均方根高度分别为 1.55 和 1.26 μm 。

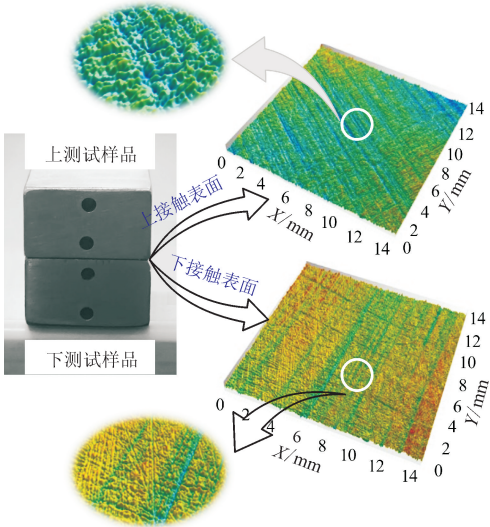


图 2 装配部件接触表面实测粗糙形貌
Fig. 2 Measured roughness of contact surfaces on assembled components

2.2 数值分析模型

本文使用 ABAQUS 软件开展装配界面接触热性能数值分析,构建的数值分析模型如图 3 所示。首先,根据图 2 中获取的接触表面实测粗糙形貌,采用调整单元节点的方法重构粗糙接触表面网格模型。为综合考虑计算精度和效率,将实体模型分为

接触区域和基体区域。其中,接触区域和基体区域的网格单元数不同,接触区域的网格单元密度为基体区域的 2.5 倍。需要说明的是,网格节点和采样点数决定了粗糙表面形貌重构精度和数值分析精度。经网格无关性分析,最终网格划分方案为:粗糙表面边长上划分 100 个网格节点,共计 10 000 个网格节点和采样点;接触区域厚度方向划分 10 个网格节点,整个模型共有 520 000 个网格单元。

受限于微观接触分析中机械和传热过程直接耦合的收敛性差和计算成本高的问题,使用机械-传热顺序耦合分析方法完成接触热性能分析。具体而言,先采用接触机械分析,计算上述微观接触粗糙表面的接触变形行为,确定最终微观接触状态;随后,将机械分析获得的最终微观接触状态作为传热分析的初始输入,计算接触表面温度分布和热通量分布,进而计算装配界面接触热阻。其中,接触机械分析接触方式采用有效滑移方程的面-面离散化方法,并且调整接触对的初始主面位置以实现精准接触状态。接触法向和切向变形行为计算使用罚函数接触算法、硬接触法向接触模型和各向同性库仑摩擦模型。机械和传热分析中采用的网格单元类型分别是 8 节点线性立方体单元 C3D8R 和 DC3D8。

如图 3 所示,装配界面接触热性能数值分析模

型边界条件包括接触机械分析和接触传热分析两部分。为充分说明微观粗糙表面形貌对接触热阻的影响,消除外界宏观不均匀载荷引起的接触热阻,在顶面施加均匀压力载荷(P_0)为 3.0 MPa。接触机械分析中,顶面位移约束 $U_1 = U_2 = 0$,底面的位移约束为 $U_{R1} \sim U_{R3}$ 和顶面位移约束 $U_1 \sim U_3$ 相同,均等于 0。其中 $U_1 \sim U_3$ 和 $U_{R1} \sim U_{R3}$ 分别表征 X、Y、Z 方向的直线位移和旋转位移。顶面热源温度定义为 $T = T_h = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$,底面热沉温度定义为 $T = T_l = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

需要说明的是,为提高装配界面接触热性能分析准确度,本文数值分析模型考虑了接触表面固体接触传热、间隙介质传热以及辐射传热 3 部分。其中,间隙介质传热的传热系数(λ)可以表示为间隙距离和间隙介质热导率的函数,具体定义为

$$\lambda = \lambda(g, \bar{T}) = \frac{k(\bar{T})}{g} = \frac{q_c}{T_a - T_b} \tag{8}$$

式中: g 表示上、下接触面对应的任意网格节点 a 和 b 之间的间隙距离; T_a 表示上接触表面接触点 a 的温度; T_b 表示下接触表面接触点 b 的温度; $\bar{T}$ 表示接触点 a 和 b 的平均温度; $k(\bar{T})$ 表示平均温度下间隙介质的热导率; q_c 为接触点传递的热量。此外,接触表面间热辐射作为接触传热的重要组成部分,尤其在高温工况下不可忽略,定义为表面平板热辐射。

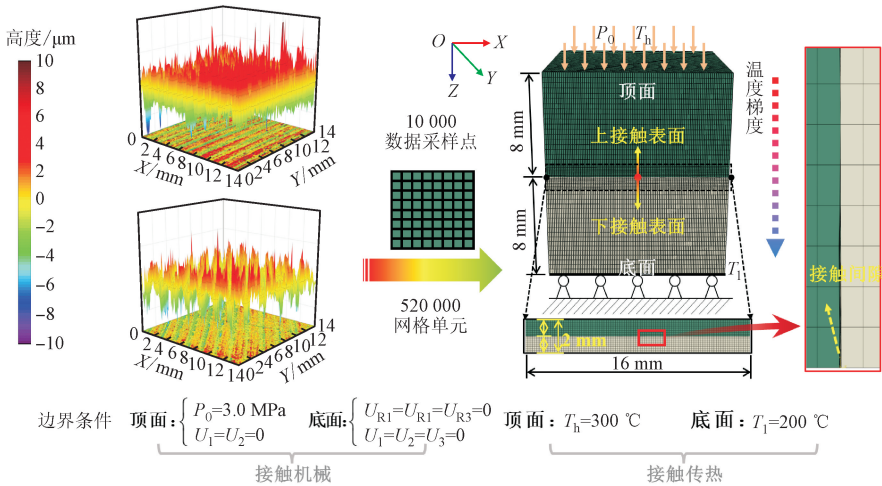


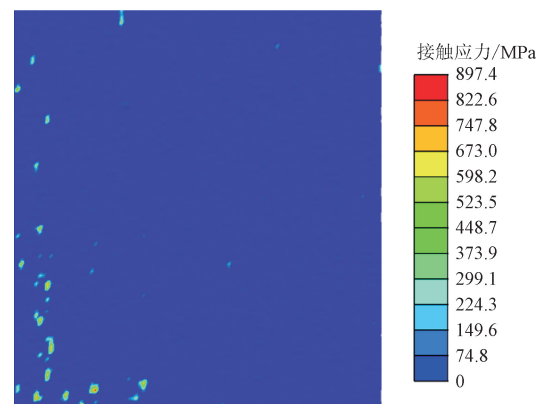
图 3 装配界面接触热性能数值分析模型

Fig. 3 Numerical model for the thermal contact performance at assembly interface

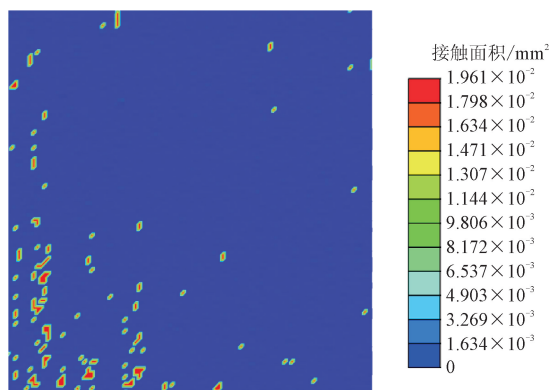
2.3 数值分析结果

基于构建的装配界面接触热性能数值分析模型,计算得到了接触应力、面积和位移分布,如图 4 所示。由于微观粗糙表面的存在,仅有左侧区域发生真实接触。接触应力分布显示最大接触压力

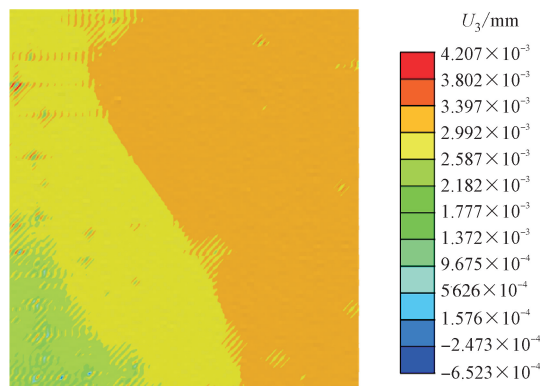
为 897.4 MPa,存在应力集中点,表面真实接触面积积极小。并且,由接触位移分布可知,由于接触区域节点发生接触后会发生相向移动,接触区域位移明显低于非接触区域,进一步说明仅有部分区域发生接触。



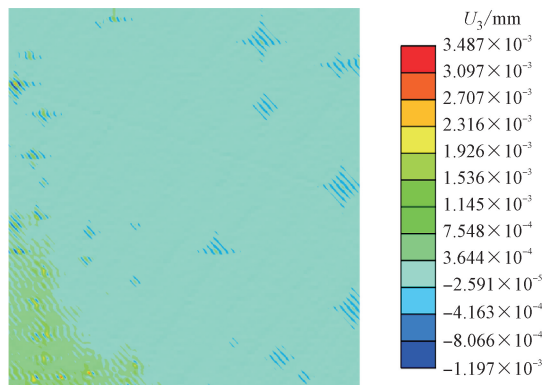
(a) 接触应力分布



(b) 接触面积分布



(c) 上接触表面位移分布



(d) 下接触表面位移分布

图 4 接触应力、面积和位移分布

Fig. 4 Contact stress, area, and displacement distributions

根据接触机械分析结果,计算得到上、下接触表面温度分布和热流量分布。为了充分说明优化设计方法的有效性,优化设计前、后导热系数积分和一致。如图 5 所示,由于仅部分区域发生真实接触,因此接触表面真实接触区域温度连续,非接触区域温度不连续。因此,上接触表面真实接触区域温度较低,非接触区域温度较高,下接触表面与之刚好相反。接触表面温度分布不均匀产生的直接影响是接触区域的温度梯度分布不均匀。由实际热导率定义可知,单独部件温度梯度分布均匀性与导热性能息息相关,进而造成装配界面真实导热能力降低。经计算得到,装配界面上、下接触表面的平均温度分别为 454.49 K 和 426.25 K。接触表面热通量分布与温度分布相似,真实接触区域的热通量高于非接触区域。装配界面上、下接触表面的平均热通量为 $188.83 \text{ mW} \cdot \text{mm}^{-2}$ 。最终,该压力和温度载荷工况下的装配界面接触热阻可计算为

$$R_{\text{TCR}} = \frac{\Delta T}{q} = 0.1496 \times 10^{-3} \text{ K} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{m}^2 \quad (9)$$

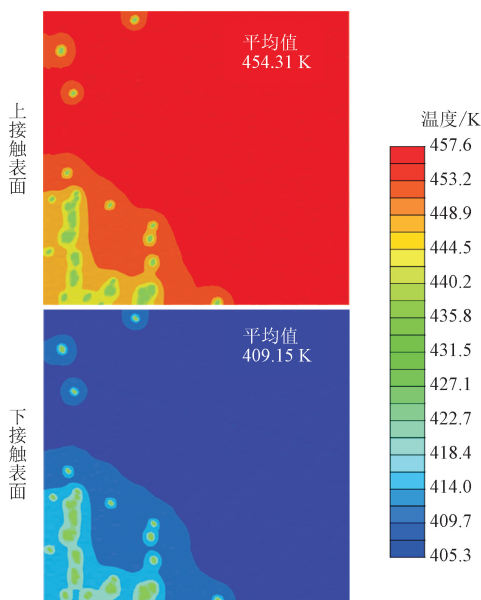


图 5 上、下接触表面温度分布

Fig. 5 Temperature distributions of upper and lower contact surfaces

2.4 结果验证

应用本文实验测试系统和方法,开展均匀压力载荷为 3.0 MPa、顶面热源温度为 300 °C 以及底面热沉温度为 20 °C 载荷工况下的实验测试。经实验测试后,装配界面上、下接触表面的平均温度分别为 453.51 K 和 424.58 K,界面温差为 28.93 K。装配界面上、下接触表面的平均热通量为 $223.43 \text{ mW} \cdot \text{mm}^{-2}$ 。最终,该压力和温度载荷工况下的装配界面接触热

阻实验测试结果为 $0.1295 \times 10^{-3} \text{ K} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{m}^2$ 。数值分析结果与实验测试结果对比表明,相对误差为15.52%,考虑到实际测试过程中各种误差,能够说明数值分析结果的有效性。

3 优化设计与结果

3.1 优化设计问题描述

由上述分析可知,装配界面接触热阻引起不均匀接触表面温度梯度分布,而理想接触表面温度梯度分布绝对均匀。已有研究已经表明,温度梯度分布不均匀度与接触热阻直接相关,换言之,温度梯度接触热阻产生的根本原因是装配界面接触表面微观形貌引起的局部温度梯度集中和不均匀分布。因此,如果能够消除微观形貌引起的温度梯度不均匀分布,以实现接触表面温度梯度理想分布状态,便能降低甚至消除接触热阻。

本文从导热系数分布与温度梯度分布之间的关联关系出发,发现导热系数作为调整温度梯度分布的根本材料属性,理论上通过设计装配界面导热系数分布可以降低接触表面温度梯度分布不均匀性,进而降低接触热阻。现有温度梯度分布不均匀的直接原因是导热系数分布绝对均匀,无法调节微观形貌引起的不均匀温度梯度分布。若通过主动设计装配界面导热系数分布,以降低甚至消除不均匀温度梯度分布,有望实现装配界面接触热性能的有效提升。优化设计方法示意图如图6所示,不同颜色代表不同的材料属性。主动设计前,装配界面导热系数分布呈现均一化分布状态;主动设计后,依据均匀化温度梯度分布实际需求,设计区域导热系数呈现异质化分布状态。其中,设计区域定义为上、下装配部件距离接触表面0.3 mm的接触区域,其余部分为非设计区域。

本优化设计旨在主动寻找设计区域上的单元材料导热系数最优分布,以实现最小化接触热阻。为充分对比说明设计区域导热系数异质化分布相较于均一化分布状态的先进性,保持设计区域导热系数积分和始终保持常数不变,以消除整体导热系数增加带来的导热能力增强的影响。优化设计时,忽略温度对导热系数的影响,优化设计前,导热系数全部定义为 $10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。因此,该优化设计问题的数学模型可以定义如下

$$\begin{cases} k = \{k(\omega_1), k(\omega_2), \dots, k(\omega_t)\} \\ \min R_{\text{TCR}} \\ \text{s. t. } \int_{\Omega} k dV = k_0 V \end{cases} \quad (10)$$

式中: $k(\omega_1), k(\omega_2), \dots, k(\omega_t)$ 表示每一个设计子区域单元的导热系数; V 表示设计区域体积; k_0 表示设计区域初始导热系数; $k_0 V$ 为定值。

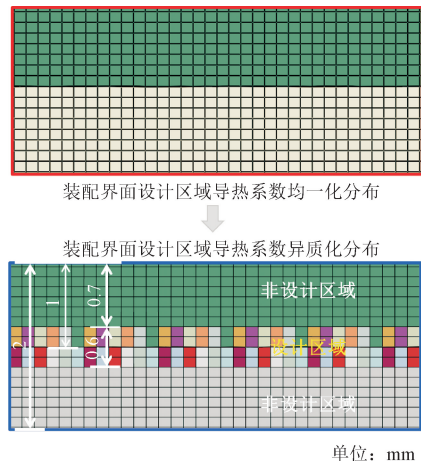


图6 优化设计方法示意图

Fig. 6 Schematic diagram of optimization design method

3.2 优化设计算法

考虑到装配界面微观接触热性能数值分析的计算效率,本文采用渐进迭代设计方法,以期在最少计算次数中找到最优导热系数分布。基于导热系数分布和温度梯度分布两者之间的内在联系,建立了导热系数分布迭代设计准则,可实现每次迭代设计中导热系数分布的快速更新。基于该迭代优化设计准则,构建了装配界面接触热性能驱动的表面导热系数渐进迭代优化设计方法,可实现每个迭代优化设计步导热系数分布的精准定义。导热系数分布迭代公式可描述为

$$k^{n+1}(\omega_t) = \frac{k^n(\omega_t) |\nabla T(\omega_t)|}{\int_{\Omega} [k^n(\omega_t) |\nabla T(\omega_t)|] dV} \sum_{\Omega} k^n(\omega_t) \quad (11)$$

$$k^{n+1}(\omega_t) = \begin{cases} k_{\min}, & k^{n+1}(\omega_t) \leq k_{\min} \\ k^{n+1}(\omega_t), & k_{\min} < k^{n+1}(\omega_t) < k_{\max} \\ k_{\max}, & k^{n+1}(\omega_t) \geq k_{\max} \end{cases} \quad (12)$$

式中: $k^n(\omega_t), k^{n+1}(\omega_t)$ 表示第 $n, n+1$ 迭代步中设计子区域单元 ω_t 的导热系数; $\nabla T(\omega_t)$ 表示设计子区域单元 ω_t 的温度梯度; $k_{\min}$ 表示导热系数设计下限; $k_{\max}$ 表示导热系数设计上限。此外,本优化设计的迭代终止条件是连续3次迭代过程设计目标相对变化量小于迭代收敛因子 λ 。

装配界面导热系数渐进迭代优化设计方法的设计流程如图7所示,主要包括定义初始设计变量和

设计参数、接触热性能数值分析、迭代收敛条件判断以及最后的输出结果。详细步骤如下。

(1)定义初始设计变量和设计参数:定义迭代收敛因子 χ 、设计区域材料导热系数下限 $k_{\min}$ 、设计区域材料导热系数上限 $k_{\max}$ 。

(2)接触热性能数值分析:定义装配界面设计区域单元材料属性,完成接触热性能数值分析,并输出设计区域导热系数分布、温度梯度分布以及 R_{TCR} 结果。

(3)迭代收敛条件判断:判断本次迭代是否满足收敛条件,如果满足条件则执行步骤 4;若不满足条件,则根据导热系数分布迭代式(11)和式(12),更新得到下一迭代步中导热系数分布,并执行步骤 2,开始新一轮迭代计算。

(4)输出结果:输出满足迭代收敛准则的优化设计后的装配界面设计区域导热系数分布、温度梯度分布以及最优 R_{TCR} 结果。

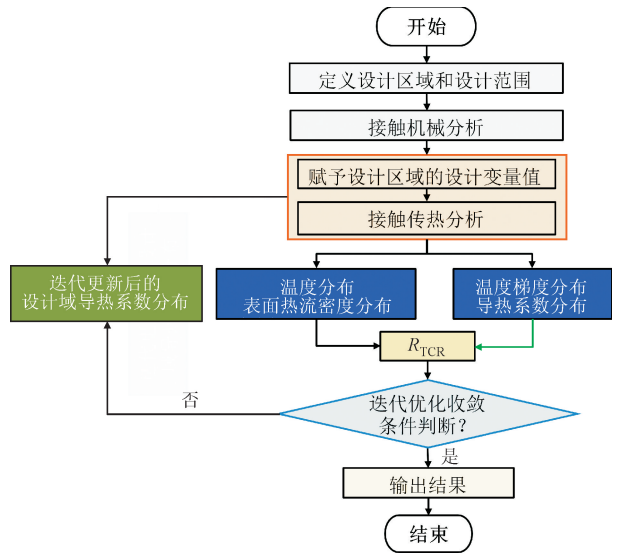


图 7 优化设计流程图
Fig. 7 Optimization design flow chart

3.3 优化设计迭代过程

应用上述提出的装配界面导热特性渐进迭代优化设计算法和设计流程,开展均匀压力载荷工况下以降低 R_{TCR} 、强化接触热性能为目标的装配界面导热特性优化设计研究。装配界面导热特性优化设计目标变量迭代历程如图 8 所示。随着迭代次数的增加,装配体结构温度梯度分布标准差(σ)不断降低,平均值(∇T)不断增加,最终温度梯度分布均匀度不断增加。由此, R_{TCR} 随着温度梯度分布均匀性提高的同时不断降低。并且,由于装配部件受力均匀、表面微观形貌相似,两装配部件的温度梯度分布基本

一致,故而 σ 和 ∇T 变化基本完全重合。迭代前期 σ 、 ∇T 以及 R_{TCR} 变化明显,随后不断趋于平缓,直到第 8 次迭代时满足迭代收敛条件,迭代终止。

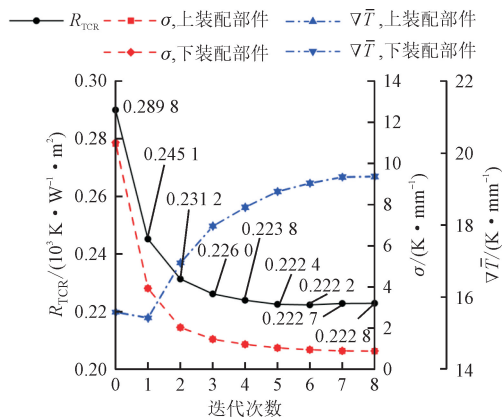


图 8 目标变量迭代历程
Fig. 8 Iteration process of target variable

装配界面导热特性优化设计上接触表面导热系数分布迭代历程如图 9 所示,由于导热系数两极化差异较大,因此颜色标尺为对数刻度值。初始导热系数为均一化分布状态,随后为了消除微观表面形貌引起的不均匀温度梯度分布,初始真实接触区域的导热系数不断增大,非接触区域的导热系数降低,进而最终确定满足装配界面均一化温度梯度分布的最优异质化导热系数分布状态。此外,用于上、下接触表面对应的温度梯度分布基本一致,所以迭代过程中导热系数分布基本相同。

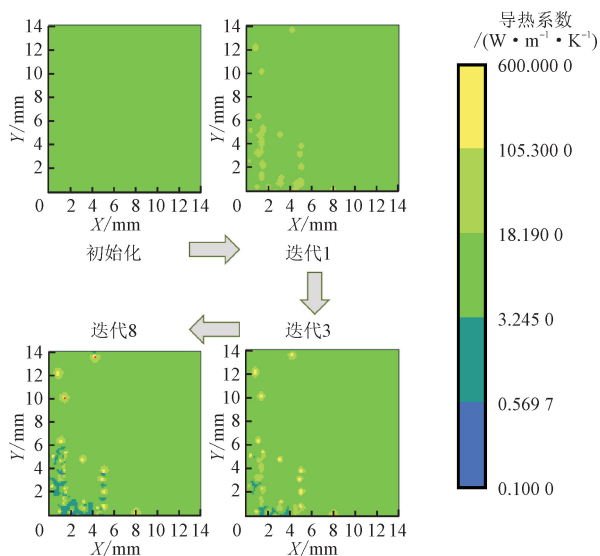


图 9 上接触表面导热系数分布迭代历程
Fig. 9 Iteration process of thermal conductivity distributions on upper contact surface

与接触表面导热系数分布迭代历程相对应的是温度梯度分布迭代历程。上接触表面温度梯度分布迭代历程如图 10 所示,明显能够发现初始温度梯度分布极不均匀,真实接触区域的导热系数明显高于非接触区域,并且该不均匀温度梯度分布现象在高粗糙度表面形貌下更明显。随着迭代次数的增加,温度梯度分布均匀度不断提高,最后基本完全一致,有效提高了温度梯度均匀度。但需要说明的是,装配界面导热特性设计仅能在初始真实微观接触力学状态上进行热流路径规划,并不能改变真实接触状态。因此,其温度梯度分布均匀性虽然明显提高,但由于装配界面极小的真实接触面积未改变,所以无法实现绝对均一化的温度梯度分布状态。如果在忽略微观粗糙度的全接触状态工况中,通过主动设计导热特性分布,能够实现绝对均匀的温度梯度分布,对消除仅外部非均匀温度梯度边界条件带来的局部温度梯度集中点和热应力集中点意义重大。

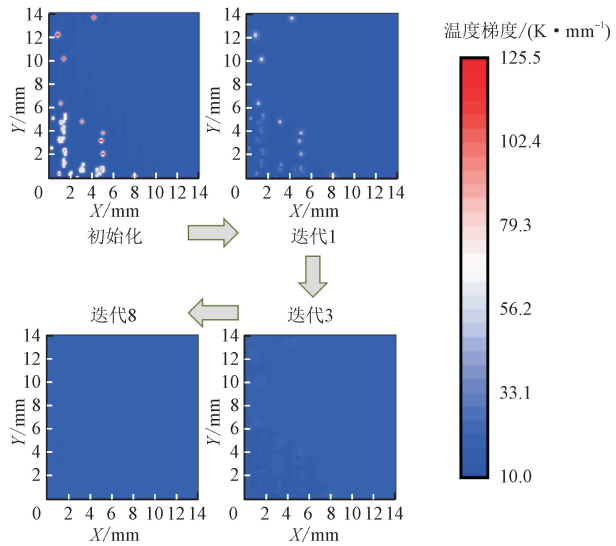


图 10 上接触表面温度梯度分布迭代历程

Fig. 10 Iteration process of temperature gradient distributions on upper contact surface

装配界面下接触表面初始温度梯度分布和最终导热系数分布如图 11 所示。最终导热系数分布与初始温度梯度分布状态几乎一一对应,这进一步说明了导热系数分布精准调控温度梯度分布的作用。下接触表面初始温度梯度分布和最终导热系数分布与图 9 和图 10 中上接触表面分布基本完全一致,仅有温度梯度和导热系数略微高于上接触表面。下接触表面温度梯度最高为 $126.5\text{ K}\cdot\text{mm}^{-1}$,上接触表面温度梯度最高为 $125.5\text{ K}\cdot\text{mm}^{-1}$ 。该现象主要与上、下接触表面微观粗糙形貌有关,由图 2 可知,

下接触表面粗糙度略低于上接触表面,故而温度梯度略高于上接触表面,最终导热系数分布也随温度梯度分布一致,同样略高于上接触表面。

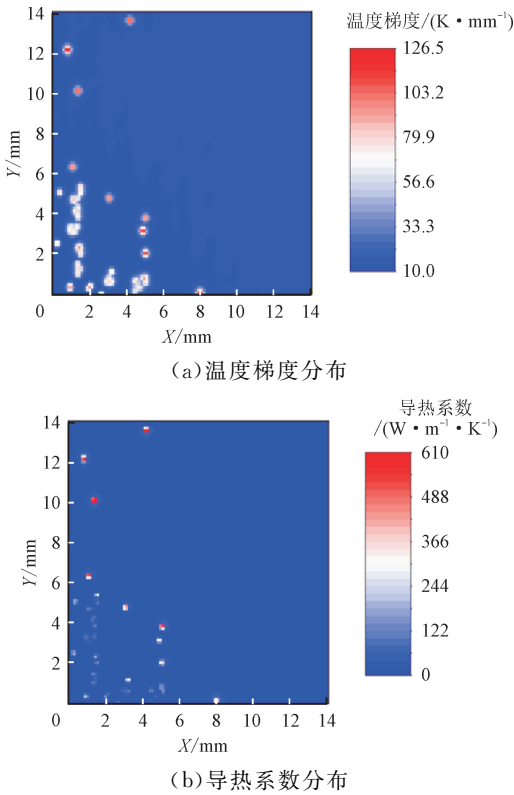


图 11 下接触表面初始温度梯度和最终导热系数分布

Fig. 11 Initial temperature gradient and final thermal conductivity distributions on lower contact surface

3.4 优化设计结果

为提高装配界面优化设计效率,优化设计时忽略温度对导热系数的影响,因此优化设计前导热系数全部定义为 $10\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 。应用上述装配界面接触热性能数值分析方法,得到优化设计前上、下接触表面温度分布如图 12 所示,装配界面上、下接触表面的平均温度分别为 454.31 K 和 409.15 K 。装配界面上、下接触表面的平均热通量为 $155.86\text{ mW}\cdot\text{mm}^{-2}$ 。最终,优化设计前均一化导热系数分布对应的装配界面 R_{TCR} 为 $0.2898\times 10^{-3}\text{ K}\cdot\text{W}^{-1}\cdot\text{m}^2$ 。由于导热系数明显低于上述 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 热源温度实验测试工况,故而其 R_{TCR} 提升明显。

应用上述装配界面渐进迭代优化设计方法,得到优化设计后上、下接触表面温度分布,如图 13 所示。在相同颜色标尺下,优化设计后装配界面上、下接触表面的温度分布均匀性提升明显。由于导热系数分布设计并未改变初始微观真实接触状态,进而仍然不可避免地存在局部热点,真实接触区域温度仍连续,非接触

区域非连续,温度分布状态与优化设计前相类似。装配界面上、下接触表面的平均温度分别为 451.43 K 和 412.03 K,平均热通量为 $176.86 \text{ mW} \cdot \text{mm}^{-2}$ 。最终,优化设计后,异质化导热系数分布对应的装配界面 R_{TCR} 为 $0.2228 \times 10^{-3} \text{ K} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{m}^2$ 。

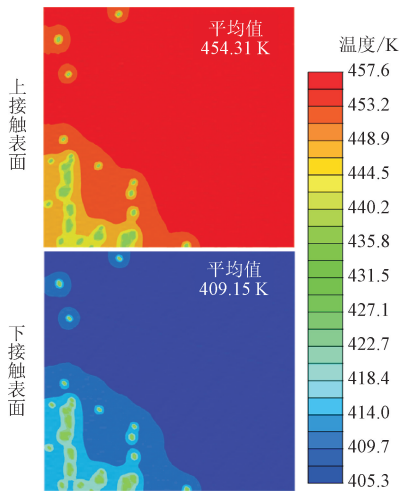


图 12 优化设计前上、下接触表面温度分布
Fig. 12 Temperature distributions of upper and lower contact surfaces before optimized design

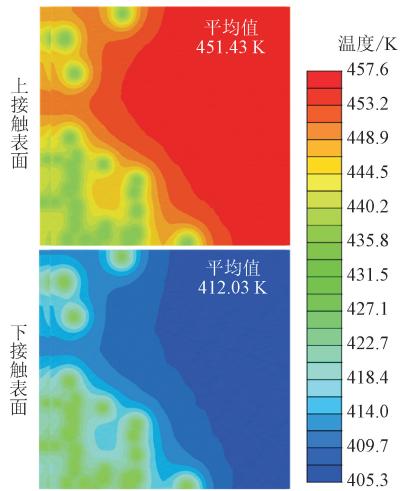


图 13 优化设计后上、下接触表面温度分布
Fig. 13 Temperature distributions of upper and lower contact surfaces after optimized design

为充分说明装配界面异质化设计方法的有效性和先进性,本文对优化前、后的关键热性能指标进行量化对比见表 2。数据显示, σ 锐减,降幅约 92%; ∇T 有效增加,提高了大约 24%。因此,装配部件温度梯度分布均匀性得到大幅提升,实现装配界面 TCR 大幅降低。装配界面 TCR 由初始值 $0.2898 \times 10^{-3} \text{ K} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{m}^2$ 显著降低至 $0.2228 \times 10^{-3} \text{ K} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{m}^2$,降幅达

23.12%。
表 2 设计前、后接触热性能对比
Table 2 Comparison of contact thermal performance before and after design

对比参数	优化 设计前	优化 设计后	相对 变化率/%
$R_{\text{TCR}} / (10^{-3} \text{ K} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{m}^2)$	0.289 8	0.222 8	23.12
上装配部件 $\sigma / (\text{K} \cdot \text{mm}^{-1})$	10.930 0	0.867 4	92.06
下装配部件 $\sigma / (\text{K} \cdot \text{mm}^{-1})$	10.990 0	0.873 2	92.05
上装配部件 $\nabla T / (\text{K} \cdot \text{mm}^{-1})$	15.58	19.33	—24.07
下装配部件 $\nabla T / (\text{K} \cdot \text{mm}^{-1})$	15.57	19.34	—24.21

本文为充分说明均一化和异质化设计的差异性,保证设计区域导热系数积分和为定常数以消除影响。若消除导热系数积分和限制,在无约束范围内开展导热系数优化设计,接触热性能得到大幅提升。本优化设计方法不仅能够实现装配界面接触热性能的提高,在改变渐进迭代公式的基础上,能够实现所需温度梯度分布的精准调控,进而实现强化传热、隔热等接触热性能的按需精准设计。

4 结 论

- (1)构建了基于实测粗糙表面形貌的装配界面接触热性能数值分析模型,分析了均匀压力载荷为 3.0 MPa、顶面热源温度为 300 ℃ 以及底面热沉温度为 20 ℃ 载荷工况下装配界面 TCR,并开展了对应工况下实验测试,相对误差为 15.52%,有效验证了数值分析方法的准确性。该模型为装配界面接触热性能分析提供了高精度计算工具。
- (2)创新性提出了装配界面导热特性异质化设计思路,通过建立导热系数梯度分布与温度梯度场的定量映射关系,开发了装配界面导热特性渐进迭代优化设计算法,仅 8 次迭代便能获取最优导热系数布局方案。优化设计后, σ 大幅降低,降幅达 92%。装配界面 TCR 从 $0.2898 \times 10^{-3} \text{ K} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{m}^2$ 降低至 $0.2228 \times 10^{-3} \text{ K} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{m}^2$,降幅达 23.12%,实现了接触热性能的有效提升。
- (3)揭示界面导热系数空间分布对温度梯度场的调控机制,建立了非均匀导热特性分布→温度梯度场均匀化→界面 TCR 降低的定量关联模型。该发现突破了传统均一化材料设计的思维定式,为热敏感器件实现定向强化传热(如电子芯片封装)或梯度隔热(如航天飞行器热防护)提供了可量化的设计准则,对推动热敏感复杂机械产品的热管理技术的

发展具有重要价值。

参考文献:

- [1] SHEKHAR S, BOGAERTS W, CHROSTOWSKI L, et al. Roadmapping the next generation of silicon photonics [J]. *Nature Communications*, 2024, 15(1): 751.
- [2] 周意葱, 林起崑, 王晨, 等. 自适应参数驱动的装配界面形状主动设计方法 [J]. *机械工程学报*, 2023, 59(5): 212-222.
- ZHOU Yicong, LIN Qiyin, WANG Chen, et al. Active design of assembly interface shape using self-adaptive parameters [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2023, 59(5): 212-222.
- [3] WANG Chen, QIU Mingjun, PAN Zongkun, et al. Optimized design of contact interfaces for enhanced heat dissipation in flip-chip package [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2025, 259: 124936.
- [4] 杨万奎, 郭啸宇, 曾和荣, 等. ODS MA754 合金传热界面接触热阻实验研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2024, 58(2): 100-108.
- YANG Wankui, GUO Xiaoyu, ZENG Herong, et al. Experimental study on thermal contact resistance of heat transfer interface of ODS MA754 alloy [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2024, 58(2): 100-108.
- [5] SUN Lin, JIA Huiyin, LEI Xiaoyu, et al. Research on thermal contact resistance between C/C and resin thermal protection materials for solid rocket motor nozzles considering real surface roughness [J]. *Tribology International*, 2023, 186: 108626.
- [6] WANG Chen, LIN Qiyin, PAN Zongkun, et al. Thermal contact analysis of flip-chip package considering microscopic contacts of double-layer thermal interface materials [J]. *Applied Energy*, 2024, 356: 122453.
- [7] SUN Ducheng, YOU Ersheng, ZHANG Ting, et al. A review of thermal contact conductance research of conforming contact surfaces [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2024, 159 (Part B): 108065.
- [8] PAN Xiaoshan, CUI Xiaoyu, LIU Shaoshuai, et al. Research progress of thermal contact resistance [J]. *Journal of Low Temperature Physics*, 2020, 201(3): 213-253.
- [9] 孟庆宇, 刘杨, 鄢欣欣, 等. 基于分形理论的电主轴系统热态分布特性研究 [J]. *机械工程学报*, 2021, 57(13): 63-69.
- MENG Qingyu, LIU Yang, YAN Xinxin, et al. Research on thermal distribution characteristics of motorized spindle system based on fractal theory [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 57(13): 63-69.
- [10] XIAN Yaoqi, ZHANG Ping, ZHAI Siping, et al. Re-estimation of thermal contact resistance considering near-field thermal radiation effect [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 157: 113601.
- [11] XIAN Yaoqi, ZHENG Zhiheng, ZHAI Siping, et al. The effects of roughness, temperature, and near-field thermal radiation on the thermal contact resistance between dissimilar materials Si, SiO₂ and SiC [J]. *ES Energy & Environment*, 2023, 19: 823.
- [12] REN Xingjie, DAI Yanjun, GOU Jianjun, et al. Numerical study on thermal contact resistance of 8-harness satin woven pierced composite [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2021, 159: 106584.
- [13] GOU Jianjun, REN Xingjie, DAI Yanjun, et al. Study of thermal contact resistance of rough surfaces based on the practical topography [J]. *Computers & Fluids*, 2018, 164: 2-11.
- [14] DAI Yanjun, GOU Jianjun, REN Xingjie, et al. A test-validated prediction model of thermal contact resistance for Ti-6Al-4V alloy [J]. *Applied Energy*, 2018, 228: 1601-1617.
- [15] REN Xingjie, DAI Yanjun, GOU Jianjun, et al. Numerical prediction of thermal contact resistance of 3D C/C-SiC needled composites based on measured practical topography [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 131: 176-188.
- [16] REN Xingjie, DING Hao, DAI Yanjun, et al. Experimental study on thermal contact resistance of carbon fiber reinforced silicon carbide composite with 3D needled preform (3DN C/SiC) [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2021, 124: 105271.
- [17] KOULALI A, ABDERRAHMANE A, JAMSHED W, et al. Comparative study on effects of thermal gradient direction on heat exchange between a pure fluid and a nanofluid: employing finite volume method [J]. *Coatings*, 2021, 11(12): 1481.
- [18] VALLEPUGA-ESPINOSAJ, UBERO-MARTÍNEZ I, RODRÍGUEZ-TEMBLEQUE L, et al. A boundary element procedure to analyze the thermomechanical contact problem in 3D microelectronic packaging [J]. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 2020, 115: 28-39.
- [19] 宣益民, 李强, 张平. 高温条件下的固-固界面接触热

- 阻测试方法与系统 [J]. 中国科学(技术科学), 2019, 49(5): 491-500.
- XUAN Yimin, LI Qiang, ZHANG Ping. Measurement method and instrument of thermal contact resistance at high temperature [J]. Scientia Sinica(Technologica), 2019, 49(5): 491-500.
- [20] CHEN Mengjun, LI Qiang, ZHANG Ping. Experimental investigation of high temperature thermal contact resistance of thin disk samples using infrared camera in vacuum condition [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 157: 119749.
- [21] 陈燕, 樊光亚, 林志辉, 等. 航空发动机法兰接触热阻特性实验研究 [J]. 航空动力学报, 2022, 37(4): 734-742.
- CHEN Yan, FAN Guangya, LIN Zhihui, et al. Experimental investigation on contact thermal resistance characteristics of aero-engine flange [J]. Journal of Aerospace Power, 2022, 37(4): 734-742.
- [22] TREGENZA O, SAHA M, HUTASOIT N, et al. An experimental evaluation of the thermal interface resistance between cold sprayed copper/ laser-textured alumina bi-layered composites [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2022, 188: 122606.
- [23] DAI Wen, WANG Yandong, LI Maohua, et al. 2D materials-based thermal interface materials: structure, properties, and applications [J]. Advanced Materials, 2024, 36(37): 2311335.
- [24] WEI Baojie, LUO Wenmei, DU Jianying, et al. Thermal interface materials: from fundamental research to applications [J]. SusMat, 2024, 4(6): e239.
- [25] WANG Chen, LIN Qiyin, PAN Zongkun, et al. Optimization design method of material stiffness of contact interface considering surface roughness for improving thermal contact performance [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2023, 149: 107131.
- [26] WANG Chen, GU Feiyu, HONG Jun, et al. Analysis of internal and external factors affecting thermal contact resistance from the perspective of entransy dissipation [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2025, 238: 126469.

(编辑 杜秀杰)