

封闭加固型计算机板卡锁紧结构接触热阻分析

马国军^{1,2}, 牟翠翠^{1,3}, 管晓乐⁴, 吴成伟¹

(1. 大连理工大学 工业装备结构分析国家重点实验室, 辽宁 大连 116024;

2. 大连理工大学 白俄罗斯国立大学联合学院, 辽宁 大连 116024; 3. 上海飞机设计研究院, 上海 201210;

4. 北京动力机械研究所, 北京 100071)

摘 要: 针对封闭加固型计算机芯片冷板和机箱导轨间的界面传热问题, 利用有限元软件对两种常用的导轨锁紧结构(3J 和 5J 结构)进行了建模与分析, 通过比较接触压力和接触热阻分布特点, 发现在相同条件下 5J 结构具有更低的接触热阻。随后, 以 5J 结构为研究对象, 详细分析了螺栓扭矩和表面粗糙度对其接触热阻的影响, 发现增加螺栓扭矩或减小表面粗糙度虽然都可以减小接触热阻, 但增加螺栓扭矩引起的热阻降幅较小, 且还会产生较高的接触压力, 不利于长期使用。原因分析表明: 机箱导轨刚度不足是导致界面接触不均、热阻分布不均和平均热阻偏大的主要原因, 因此对机箱导轨的结构与尺寸进行了优化。计算表明, 优化后的结构不仅显著降低了接触热阻, 而且大幅减小了界面接触压力, 减小效果在螺栓扭矩较大、表面粗糙度较小时更为明显。

关 键 词: 封闭加固型计算机; 接触热阻; 有限元; 优化

中图分类号: O 39

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2020)12-1747-07

Analysis on Thermal Contact Resistance of the Connecting Structure in Enclosed Rugged Computer

MA Guo-jun^{1,2}, MU Cui-cui^{1,3}, GUAN Xiao-le⁴, WU Cheng-wei¹

(1. State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. DUT-BSU Joint Institute, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 3. Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China; 4. Beijing Power Machine Institute, Beijing 100071, China. Corresponding author: MA Guo-jun, E-mail: gjma@dlut.edu.cn)

Abstract: The present work focuses on the thermal contact resistance (TCR) at the interface between the cooling board and the chassis rail in the enclosed rugged computer (ERC). Two types of connecting structures (3J and 5J structures) used in the ERC are studied using the finite element method (FEM) analysis software. Firstly, the contact pressure distribution and TCR distribution at the interface between the cooling board and the chassis rail are both studied. It is found that the TCR in 5J structure is much smaller than that in 3J structure. Secondly, the influences of bolt torque and surface roughness on the TCR of 5J structure are studied. The results show that TCR decreases with increasing bolt torque or decreasing surface roughness. However, a high bolt torque would result in a high contact pressure what may lower the service life of electronic devices. Further analysis shows that low stiffness of the chassis rail results in an inhomogeneous contact that leads to an inhomogeneous TCR distribution and high average TCR. Based on these findings, an optimization on the chassis rail is carried out to reduce both the average TCR and the contact pressure successfully. Moreover, the results show that the decrease in average TCR induced by the above optimization can be enhanced by increasing bolt torque or decreasing surface roughness.

Key words: enclosed rugged computer; thermal contact resistance; finite element; optimization

收稿日期: 2020-04-09

基金项目: 航空科学基金资助项目(20161963004); 军委科技委项目(2019-JCJQ-ZD-163-00); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(DUT19JC34)。

作者简介: 马国军(1978-), 男, 江西鄱阳人, 大连理工大学副教授; 吴成伟(1957-), 男, 辽宁大连人, 大连理工大学教授, 博士生导师。

现代战争对武器系统的信息化依赖程度不断提高,计算机作为信息系统的“中枢”,其重要性不言而喻,因此武器系统中的计算机必须具有极高的可靠性.在诸多可能引起计算机故障的原因中,有约 70% 与计算机芯片温度过高有关^[1],电子芯片的温度每升高 10 ℃,其可靠性将降低一半^[2],所以有效解决计算机芯片的散热问题是提高计算机运行稳定性及可靠性的关键.然而,舰载和机载计算机需要在诸如盐雾、霉菌、高温高湿以及振动冲击等恶劣环境中长期工作,往往需要采用封闭加固型设计^[3],一些强制制冷措施不便使用,芯片工作时产生的热量主要通过 PCB 板一侧的金属冷板传到机箱导轨(卡槽)上,再经箱体扩散至周围环境当中.显然,冷板与导轨壁面间的传热效率对整个计算机散热性能有着极为重要的影响.由于固体材料表面在微观上都是粗糙的,固体间的实际接触仅发生在少数粗糙峰之间,真实接触面积只占表观面积的极少部分^[4],导致热流在接触面上收缩而使界面两端产生温差,形成所谓接触热阻(后续部分简称为热阻)^[5].毫无疑问,对舰载或机载封闭加固型计算机来说,其冷板与导轨壁面间的热阻问题是影响整台计算机可靠性的关键因素,减小热阻对提升舰载和机载封闭加固型计算机的可靠性具有重要意义.

界面压力、界面温度以及表面轮廓(包括表面粗糙度、表面波度以及形位误差等)是影响热阻最重要的三大因素^[5-6],但这些因素的具体影响还与材料的力学和热学性质有关,导致热阻研究具有相当的复杂性.大量研究表明,界面压力增加总会使热阻减小,这是因为界面压力增加会使界面上的接触峰产生变形(弹性、弹塑性或塑性)^[7],从而增加真实接触面积.界面温度的增加,一般会使热阻减小^[8]:一是因为温度增加导致材料变软,压力作用下材料更容易发生变形而增大真实接触面积;二是与温度升高导致界面间辐射传热效率增加有关;三是因为部分材料的热传导系数会随着温度的增加而增加,从而增加界面热传输效率,减小热阻.表面轮廓的影响相对较为复杂,其中表面粗糙的增加一般会使热阻增加^[6],但表面粗糙度还会与表面波度以及形位误差共同对热阻产生作用,从而表现出更为复杂的变化,Zhang 等^[9]认为热阻与表面粗糙度之间无直接关系,Tang 等^[10]甚至发现粗糙度的增加反倒使热阻减小.由此可见,热阻影响因素及规律研究的确具有复杂性.

对舰载或机载计算机板卡与机箱导轨间的热

阻问题来说,其界面温度通常不属于可设计参数,而且温度肯定越低越好,所以通过温度来调节热阻对舰载或机载计算机而言不具任何实际意义.通过降低表面粗糙度来减小界面间的热阻应该是可行方法,但表面粗糙度的减小意味着产品加工成本增加,而且板卡往往需要重复插拔,多次使用后难免会在表面产生不同程度的损伤,破坏原有表面形态,从而削弱提高表面质量带来的效果.在压力方面,提高接触压力显然可以降低接触热阻,但电子产品往往不宜承受过高的载荷,所以进行相关结构设计时,不能一味增加装配载荷,而应注重整体上增加良好接触区域的总面积来降低界面总体热阻.因此,为了有效减小舰载和机载计算机板卡与机箱导轨间的热阻,需要针对其具体结构和材料上的特点进行专门研究,提出更为有效的解决办法.

本文以某型机载封闭加固型计算机板卡与机箱导轨壁面间的热阻问题为研究对象,利用有限元软件对两种典型的板卡锁紧结构的接触热阻问题进行了数值模拟,得到了界面接触压力和接触热阻的分布规律,分析了影响热阻分布的主要因素及影响规律,比较了两种锁紧结构对热阻的影响差异,最后以减小界面间的热阻为目的,对机箱导轨结构进行了优化设计.

1 有限元计算

本文考察了封闭加固型计算机常用的三段式和五段式两种典型锁紧装置,如图 1 所示,本文简称为 3J 结构和 5J 结构.实际装配时,3J 结构中的楔块 2 预先通过螺钉与 PCB 板和冷板相连,5J 结构中则是楔块 3 与 PCB 板和冷板相连.插入机箱导轨内后,通过拧紧锁紧装置上的螺栓,会使各楔块沿横向发生相对运动,使相应部件的表面与导轨壁面产生挤压,从而起到将板卡固定在导轨内的作用.实际工作中芯片产生的热量主要通过冷板传递到导轨壁面,再由导轨传到箱体,最终向周围环境扩散.由此可见,冷板与导轨壁面间的热阻是影响整个板卡传热效率的关键因素.由于冷板与导轨壁面间的接触行为是由锁紧装置各楔块的相对运动引起的,而楔块的运动又是通过拧紧螺杆来控制的.因此,本文将首先分析上述两种锁紧装置在不同螺栓(螺杆)载荷作用下的压力与热阻变化规律,比较两种结构传热性能的优劣,在此基础上再提出相应的优化设计方案.

实际计算时,首先利用有限元软件 Abaqus 对

上述 3J 和 5J 结构进行建模和网格划分,机箱卡槽、螺杆、PCB 板及冷板采用线性单元(C3D8I),其他部分采用修正的四面体二次单元(C3D10M)。经网格收敛性检验,3J 结构的总网格数为 192 423,节点数为 282 208,5J 结构的总网格数为 166 596,节点数为 244 318,最终所得到的有限元网格模型如图 1 所示。3J 结构中,机箱箱体、导轨、冷板、楔块 1、楔块 2 为 6061-T6 铝合金(简称 T6 合金),锁紧装置中的楔块 3、螺杆为 1Cr8Ni9Ti 不锈钢(简称不锈钢),PCB 板即为环氧酚醛层压板,因为本研究并不关注 PCB 板的应力应变状态,所以将其简化为均匀材料。5J 结构中,机箱箱体、导轨、冷板、楔块 1、楔块 2、楔块 3 和楔块 4 为 T6 合金,锁紧装置中的楔块 5、螺杆由不锈钢制成。考虑到实际使用时不允许发生塑性变形,所以只进行线弹性分析。T6 合金的弹性模量为 68 GPa,泊松比 0.31,不锈钢的弹性模量 184 GPa,泊松比 0.3,PCB 板弹性模量 15 GPa,泊松比 0.28。上述参数部分通过试验直接测得,其他由生产厂家提供。由于温度变化范围较小,而且关注的是结构所呈现出来的规律性变化,并不追求计算结果的绝对精确,所以本文不考虑热力耦合效应。

具体计算时,冷板与导轨界面间的接触压力和热阻变化是重点考察对象,接触压力计算结果可以直接输出至数据文件,但由接触压力计算接触热阻,必须知道两者之间的对应关系。在前期研究中已对 T6 合金的热阻进行了测试,当界面温度在 80~110℃ 之间,粗糙度分别为 0.5、2 和 3 μm 时,热阻与压力之间的具体关系式分别为:
 $R_c = e^{-P/0.65} + 1.17e^{-P/9.05} + 0.13$, $R_c = 2e^{-P/0.66} + 1.56e^{-P/9.84} + 0.39$ 和 $R_c = 2.6e^{-P/0.69} + 1.59e^{-P/13.05} + 0.44$ 。

此外,由于实际计算时发现冷板与导轨界面部分区域会发生分离(接触压力为零),但最大间隙都不超过 10 μm,所以计算冷板与导轨接触热阻还必须知道界面存在间隙时热阻的变化规律,此前已通过实验研究了该问题。实测结果表明,热阻与界面间隙近似成正比,间隙为 1.5、15、60 和 120 μm 时,热阻分别为 5.78×10^{-4} 、 7.49×10^{-4} 、 8.58×10^{-4} 和 12.69×10^{-4} °C·m²/W。但冷板与导轨界面分离时实际最大间隙不超 10 μm,热阻变化范围很小,所以在计算时进行了简化,凡是界面发生分离的区域热阻大小都统一取为 6×10^{-4} °C·m²/W。本文利用 Matlab 编制了热阻计算程序,通过读取 Abaqus 输出的界面节点压力数据,

然后利用上述各公式逐点计算出各节点处的热阻,便可得到界面上的热阻分布云图。为了便于各种条件下进行相互比较,本文还将各单元节点对应的热阻在单元内进行平均后乘以单元面积再在整个界面内积分求和,最后再除以总面积便得到界面平均热阻,该值越小越有利于提高界面传热效率。

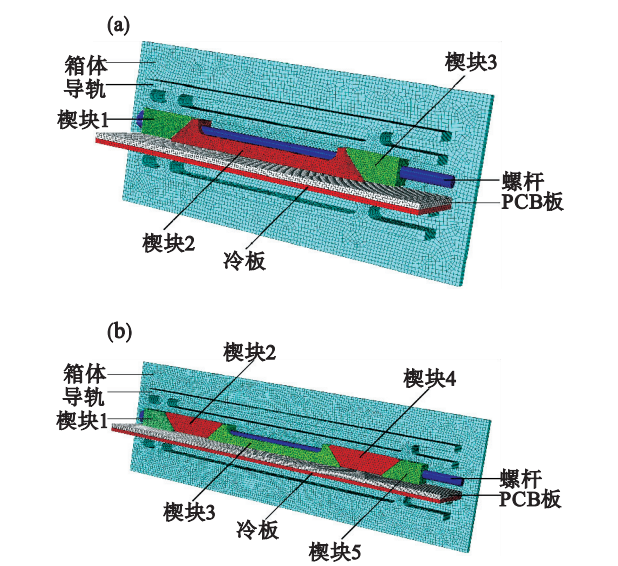


图 1 两种典型的计算机板卡锁紧装置及其与板卡、机箱导轨之间的装配关系
Fig. 1 Schematics of two types of connecting structures used in ERC
(a) — 三段式锁紧装置; (b) — 五段式锁紧装置。

2 结果与分析

2.1 3J 结构与 5J 结构性能比较

本文首先对比了 3J 和 5J 两种结构在给定扭矩作用下冷板与机箱导轨壁面间的压力和热阻分布规律,计算时表面粗糙度先只考虑为 0.5 μm 时的情况。图 2a 给出的是螺栓扭矩为 0.84 N·m 时 3J 结构和 5J 结构对应的界面压力云图。由于两种模型在结构上存在明显差异,所以冷板与导轨间的接触压力分布也明显不同。3J 结构中接触区只有两处,接触面积较大,5J 结构中接触区为 4 处,各处接触面积较小,难以直接比较两者接触状态好坏。为此图 2b 给出了对应的接触热阻分布云图,可以看到 3J 结构两端有较大的界面分离区(深红色区域),导致其有效接触区域的面积整体上比 5J 结构要小。

为了进行更详细和直观的对比,采用前述平均热阻的计算方法,分别计算了 3J 和 5J 结构中冷板与机箱导轨壁面间平均热阻随螺栓扭矩的变化情况以及它们之间的相对差,结果如图 3 所示。从图可以看出,5J 结构中冷板与机箱导轨壁面间

的平均热阻要显著小于 3J 结构,而且随着扭矩的增加,这种差别更为明显,从最初的相差约 14% 增加到约 17%,意味着 5J 结构在载荷较大时更具有散热优势,所以实际产品在条件允许时应采用 5J 结构. 回顾图 2a 给出的压力值可以看到,在螺栓扭矩都为 0.84 N·m 时 5J 结构中的最大接触压力约为 66.4 MPa,3J 结构中的最大接触压力约为 55.2 MPa,前者较后者高约 20%. 对实际产品而言,高接触压力会带来一些不利影响,因此在进行具体结构的设计或标准件选择时,还需要根据实际情况同时兼顾热阻和接触压力的影响,本文后续优化分析部分还将讨论该问题,但在此之前有必要详细地分析螺栓扭矩和表面粗糙度对结构热阻的影响规律. 为了控制论文篇幅,后续分析只以 5J 结构为研究对象.

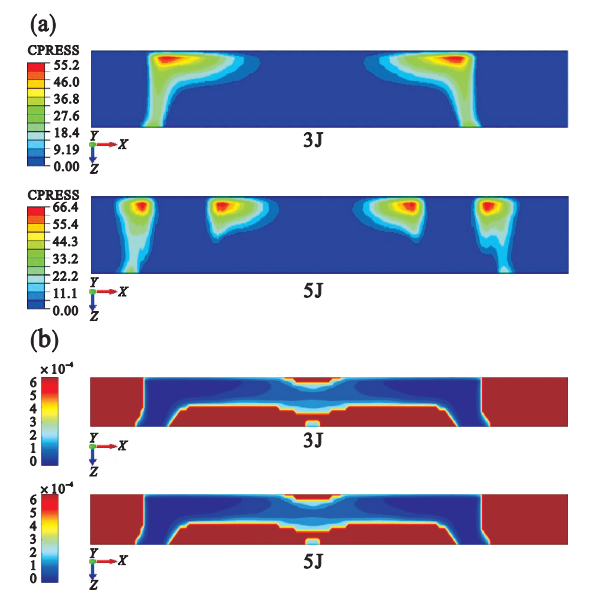


图 2 表面粗糙度 R_a 为 0.5 μm ,螺栓扭矩为 0.84 N·m 时 3J 和 5J 结构中冷板与机箱导轨表面的接触压力云图和热阻云图 (压力单位为 MPa,热阻单位为 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^2/\text{W}$)

Fig. 2 Contact pressure distribution and TCR distribution in 3J and 5J model when the surface roughness R_a is 0.5 μm and the bolt torque is 0.84 N·m (The unit of contact pressure is MPa,and the unit of TCR is $^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^2/\text{W}$)

(a)—接触压力云图; (b)—热阻云图.

2.2 扭矩与粗糙度对 5J 结构性能影响

加大螺栓扭矩是最常用来减小界面接触热阻的方法,但实际使用时发现螺栓扭矩增加会大幅增加锁紧结构与机箱导轨界面之间发生黏合的概率,长期使用后拆卸困难. 因此,本文分析螺栓扭矩对计算机冷板与机箱导轨间接触压力与热阻的影响. 令粗糙度不变 (R_a 为 0.5 μm),螺栓扭矩分别为 0.36,0.84 和 1.36 N·m,图 4a 和图 4b 给

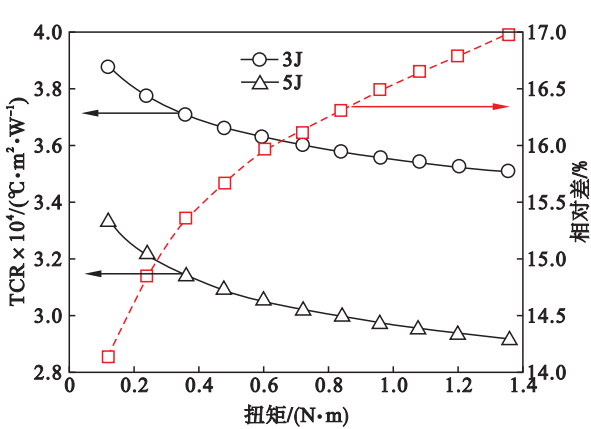


图 3 螺栓扭矩变化时 3J 和 5J 结构中冷板与机箱导轨间平均热阻绝对变化和相对变化趋势

Fig. 3 The absolute change and relative change in average TCR with varying bolt torque for 3J and 5J model

出了界面压力和热阻的具体变化. 从图 4a 的压力分布图可以看出,螺栓载荷增加对整个界面的接触压力分布几乎没有影响,但最大接触压力快速增加. 如扭矩为 0.36 和 1.36 N·m 时,最大接触压力分别约为 28.3 和 107.9 MPa,是前者的约 3.8 倍. 再看图 4b 的热阻云图,整个热阻分布区域也没有明显变化,但扭矩大时各处热阻幅值相对较低,这单纯是因为接触压力大导致局部热阻减小. 由此可见,增加螺栓扭矩使热阻减小仅是因为增加了接触区的压力,而未明显增加整个接触区面积. 此时再看图 3a 所示数据,当螺栓扭矩从 0.36 增加到 1.36 N·m (提高约 2.8 倍),5J 结构的界面平均热阻从约 3.14×10^{-4} 下降到约 $2.91 \times 10^{-4} \text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^2/\text{W}$,仅下降约 7.3%,而 3J 结构更是仅下降约 5.4%. 可见依靠增加螺栓扭矩来减小接触热阻效果有限,却带来高接触压力这一副作用. 高接触压力是诱发界面黏合的重要因素之一^[11],所以增加螺栓扭矩这一策略不利于结构长期、反复使用,应慎重选择.

表面粗糙度的减小一般都可以减小接触热阻^[5],但对计算机冷板与机箱导轨间接触究竟会产生多大影响还不清楚,因此本文分析了三种粗糙表面 (R_a 分别为 0.5,2 和 3 μm) 对结构热阻的影响. 图 5 为上述三种粗糙表面在不同螺栓扭矩时的界面平均热阻变化图,可见随着表面粗糙度的降低,界面平均热阻整体会减小,但表面粗糙度的变化并不明显改变平均热阻随螺栓扭矩的变化趋势. 通过详细对比还发现,在螺栓扭矩为 0.36 N·m 时,三种粗糙表面对应的平均热阻分别为 3.14×10^{-4} , 3.66×10^{-4} 和 $3.86 \times 10^{-4} \text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^2/\text{W}$,最小值比最大值小约 18.7%. 在螺栓扭矩为

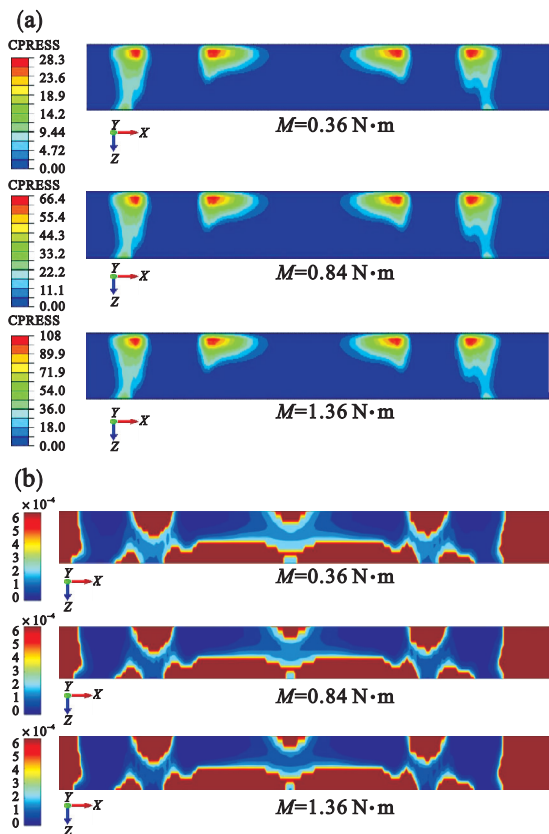


图 4 粗糙度不变 (R_a 为 $0.5\text{ }\mu\text{m}$) 时界面接触压力云图和接触热阻云图

Fig. 4 The contact pressure distribution and TCR distribution while the surface roughness is $0.5\text{ }\mu\text{m}$

(a) —界面接触压力云图；(b) —接触热阻云图。

1.36 N·m 时, 三种粗糙表面对应的平均热阻分别为 2.91×10^{-4} , 3.30×10^{-4} 和 $3.44\times 10^{-4}\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^2/\text{W}$, 最小值比最大值小约 15.4%。可见, 在研究范围内减小表面粗糙度始终能起到很好的热阻降低效果。此外, 表面粗糙度的改变基本不会导致界面接触压力变化, 所以也避免了增加螺栓扭矩导致局部压力过高的问题。不过锁紧结构需要重复插拔, 冷板和导轨表面在多次使用后不可避免会出现一些损伤, 势必削弱提高表面光洁度降低热阻的效果, 实际使用时需考虑这一点。

2.3 机箱导轨参数优化

通过前面的分析可以看到, 加大螺栓扭矩虽然能减小界面平均热阻, 但却不能改善界面接触状态, 降低表面粗糙度也是如此。如果能通过对结构进行优化设计来改善界面接触状态, 势必能进一步有效降低接触热阻。由图 2a 或图 4a 都可以看出, 接触压力沿导轨深度方向存在明显的不均, 即靠近导轨根部接触压力大, 越往外边缘压力迅速减小。究其原因乃是因为导轨沿其深度方向类似于悬臂结构, 根部一旦受挤压力, 必然产生弯曲

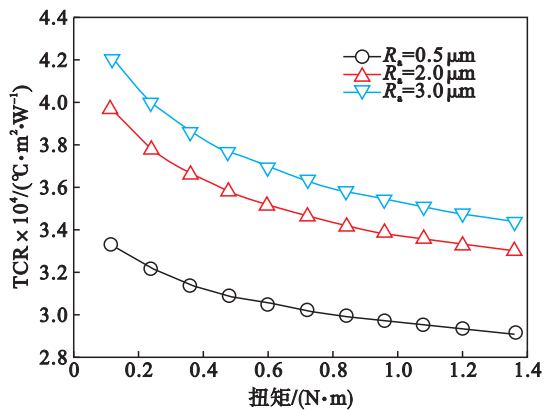


图 5 表面粗糙度不同时平均热阻随螺栓载荷的变化趋势图

Fig. 5 Relationship between the average TCR and the bolt torque with different surface roughness

变形, 越往外变形越大, 所以冷板与导轨界面从根部到外边缘会有逐渐分离的趋势。为了改变这种情况, 就需要提高机箱导轨的结构刚度。原设计中机箱导轨属于镂空结构, 显然有损结构刚度, 所以本文将通过改变导轨镂空部分的尺寸来尝试减小接触热阻。将导轨原始设计中的中间镂空尺寸记为 D_0 , 新设计中镂空部分的尺寸记为 D , 具体含义见图 6 中的插图。取两者的比值 D_0/D 作为控制参数, 记为 γ 。 γ 等于 1 时为原始设计, γ 为零时表示中间完全填充。计算时螺栓扭矩取为 $0.84\text{ N}\cdot\text{m}$, 表面粗糙度 R_a 取为 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ 。图 6 为界面平均热阻随 γ 的变化趋势, 可以看到随着 γ 由 1 到 0 逐渐变化, 界面平均热阻先小幅减小后又逐渐增加, 然后又迅速减小, 在 γ 约为 0.18 时达到最小, 随后平均热阻又逐渐上升直至一较小值。 γ 等于 1 和 0.18 时对应的平均热阻分别约为 3.00×10^{-4} 和 $2.48\times 10^{-4}\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^2/\text{W}$, 后者较前者降低约 17%, 热阻降低效果要优于前述通过增加螺栓扭矩或减小表面粗糙度产生的作用。

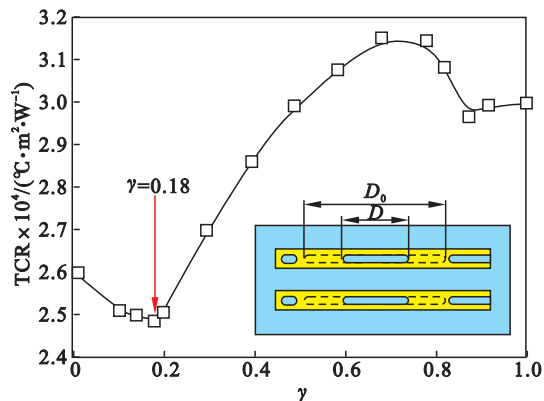


图 6 γ 变化时平均热阻变化图

Fig. 6 Changing trends in average TCR with relation to the controlling parameter γ

为了分析产生上述现象的原因,图 7 给出了 λ 为 0.18,0.48 和 1 时冷板和导轨间的接触压力云图与热阻云图.由图可以看到,随着导轨中间镂空部分尺寸的变化,界面上的压力分布明显不同,尤其沿导轨深度方向差别更为明显.当 γ 等于 0.18 时,沿导轨深度方向和长度方向都具有更好的接触效果,这些差别在图 7b 中的热阻云图中体现更为明显. γ 等于 0.18 时中间区域几乎都能保持接触,而其他两种情况中间区域则存在较大的分离区.

需要强调的是,由图 7a 可以看到 γ 等于 0.18 和 0.48 时,最大接触压力都只有约 49.5 MPa,而 γ 等于 1 时最大接触压力约为 66.4 MPa,前者比后者小约 25.5%,与前述通过增加螺栓扭矩提高接触压力而降低热阻有本质区别.对实际结构而言,这种既减小热阻又减小接触压力的方法具有一举两得的效果.至于图 6 所示曲线表现出较为复杂的变化趋势,本文认为与刚度增加带来的两种效果有关,即机箱导轨结构刚度提高,在压力作用下导轨弯曲变形减小而避免界面分离,从而增加

了良好接触区域的面积,但由经典接触力学理论可知,接触区域的大小又与结构刚度成反比,这两种相反作用相互竞争便导致热阻出现图 6 所示的复杂变化.

为了详细了解上述改进设计在不同螺栓载荷和不同表面粗糙度条件下对热阻的具体影响,本文进一步计算了表面粗糙度 R_a 分别为 0.5 和 3 μm 时界面平均热阻随螺栓载荷的变化情况,具体结果分别如图 8a 和图 8b 所示.为了方便对比,特意将两图的坐标范围调整为完全一样.由图可见,当表面粗糙度和螺栓扭矩改变时,优化导轨镂空部分尺寸始终能显著减小界面平均热阻.此外,通过仔细对比还可以发现,粗糙度越小、接触压力越高,镂空部分尺寸变化对平均热阻的影响越显著,表 1 对这种差别进行了详细描述和对比,可见上述趋势十分明显.这意味着要提高舰载或机载封闭加固型计算机中冷板与导轨间的传热效率,可以同时采用提高表面质量、优化机箱导轨结构尺寸以及适当增加锁紧螺栓扭矩等综合措施加以实现.

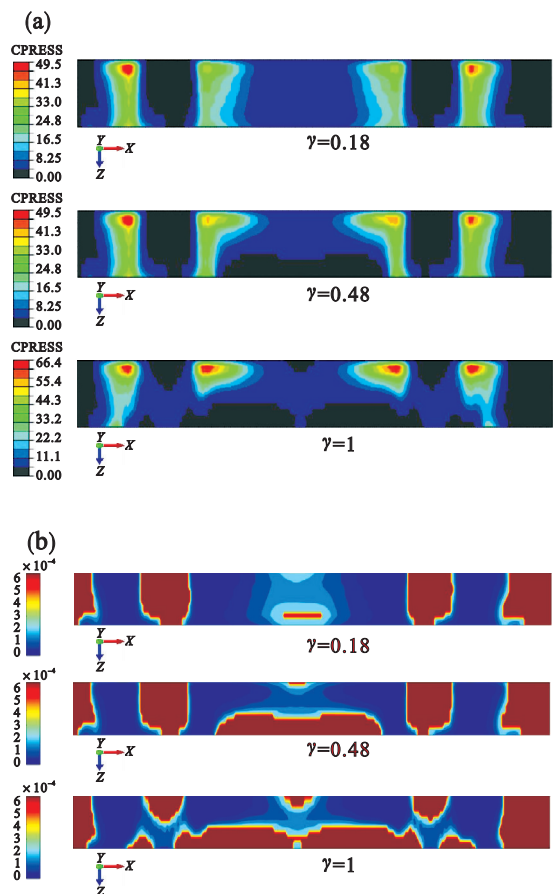


图 7 γ 分别为 0.18,0.48 和 1 时界面接触压力云图和热阻云图

Fig. 7 The contact pressure distribution and TCR distribution when γ equals to 0.18,0.48 and 1

(a)—界面接触压力云图;(b)—热阻云图.

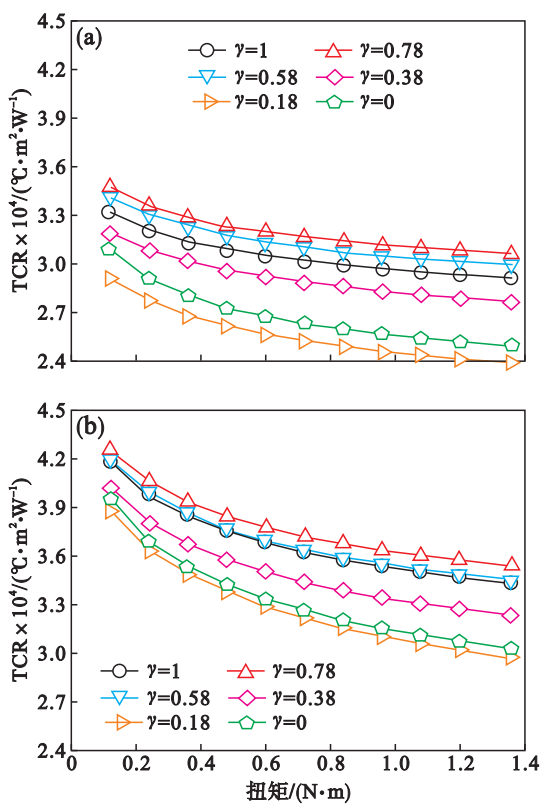


图 8 γ 取值不同时界面平均热阻随螺栓扭矩的变化趋势
Fig. 8 Changing trends in average TCR with relation to the bolt torque for different γ

(a)—粗糙度为 0.5 μm ; (b)—粗糙度为 3 μm .

表 1 机箱导轨镂空部分尺寸优化前后接触热阻变化
Table 1 Changes in the average TCR before and after optimizaion on the chasis rail

表面粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$	螺栓扭矩/($\text{N}\cdot\text{m}$)	平均热阻 $\times 10^4/(\text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{m}^2\cdot\text{W}^{-1})$		平均热阻绝对变化 $\times 10^4/(\text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{m}^2\cdot\text{W}^{-1})$	平均热阻相对 变化/%
		$\gamma = 1$	$\gamma = 0.18$		
0.5	0.12	3.33	2.91	0.42	12.6
	0.84	3.00	2.49	0.51	17.0
	1.36	2.91	2.39	0.52	17.9
3.0	0.12	4.21	3.89	0.32	7.6
	0.84	3.59	3.16	0.43	12.0
	1.36	3.44	2.98	0.46	13.4

3 结 论

- 1) 在同种条件下,5J 结构比 3J 结构具有更小的接触热阻,而且螺栓扭矩越大,减小效果越明显,但前者比后者最大接触压力要高.
- 2) 增加螺栓扭矩可以减小接触热阻,但效果不明显,而且还会导致界面接触压力快速增加.
- 3) 减小表面粗糙度可以有效减小接触热阻,而且其减小效果几乎不受外载大小影响,也不会导致界面接触压力过高.
- 4) 通过优化机箱导轨镂空部分的尺寸,可以有效改善计算机芯片冷板与机箱导轨间的接触状态,显著减小接触热阻,同时大幅减小接触压力.对 5J 结构而言,镂空部分尺寸减小至原来长度约 18% 时,达到最佳热阻减小效果,而且外载越大、表面粗糙度越小,热阻减小效果越明显.

参考文献：

[1] 齐广峰. 军用计算机热管理综述[J]. 航空计算技术,2009, 39(5):132-134.
(Qi Guang-feng. Summarization of thermal management of military computer [J]. *Aeronautical Computing Technique*, 2009,39(5):132-134.)

[2] Tan C. Overcoming intrinsic weakness of ULSI metallization electro migration performances[J]. *Thin Solid Films*,2004, 462(1):263-268.

[3] 刘上,曹宁生,马辰,等. 某高热密度密闭机箱散热设计 [J]. 舰船电子工程,2019,39(6):182-187.
(Liu Shang ,Cao Ning-sheng ,Ma Chen ,et al. Thermal design of a sealed cabinet with a high heat density [J]. *Ship Electronic Engineering*,2019,39(6):182-187.)

[4] Bush A W,Gibson R D,Thomas T R. The elastic contact of a rough surface[J]. *Wear*,1975,35(1):87-111.

[5] 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.

[6] Dou R, Ge T, Liu X, et al. Effects of contact pressure, interface temperature, and surface roughness on thermal contact conductance between stainless steel surfaces under atmosphere condition[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*,2016,94:156-163.

[7] Greenwood J A,Williamson J B P. Contact of nominally flat surfaces[J]. *Proceedings of the Royal Society of London*, 1966,A295:300-319.

[8] Bi D,Chen H,Ye T. Influences of temperature and contact pressure on thermal contact resistance at interfaces at cryogenic temperatures[J]. *Cryogenics*,2012,52:403-409.

[9] Zhang P,Cui T,Li Q. Effect of surface roughness on thermal contact resistance of aluminium alloy [J]. *Applied Thermal Engineering*,2017,121:992-998.

[10] Tang Q, He J, Zhang W. Influencing factors of thermal contact conductance between TC4/30CrMnSi interfaces[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*,2015,86: 694-698.

[11] 温诗铸,黄平. 摩擦学原理[M]. 4 版. 北京:清华大学出版社,2012.
(Wen Shi-zhu,Huang Ping. Principles of tribology [M]. 4th ed. Beijing:Tsinghua University Press,2012.)