



中国热管理网

WWW.REGUANLI.COM

中图分类号: TK121

单位代码: 10425

学 号: S15060691



中国石油大学

硕士学位论文

China University of Petroleum Master Degree Thesis

微通道热沉中过热点问题研究及结构优化

Numerical Study of Hotspots and Structure Optimization in
Microchannel Heat Sink

学科专业: 动力工程及工程热物理

研究方向: 工程热物理

作者姓名: 徐玉鹏

指导教师: 巩 亮 副教授

二〇一八年五月

Numerical Study of Hotspots and Structure Optimization in Microchannel Heat Sink

A Thesis Submitted for the Degree of Master

Candidate: Xu Yupeng

Supervisor: Prof. Gong Liang

College of Pipeline and Civil Engineering
China University of Petroleum (East China)

关于学位论文的独创性声明

本人郑重声明：所呈交的论文是本人在指导教师指导下独立进行研究工作所取得的成果，论文中有关资料和数据是实事求是的。尽我所知，除文中已经加以标注和致谢外，本论文不包含其他人已经发表或撰写的研究成果，也不包含本人或他人为获得中国石油大学（华东）或其它教育机构的学位或学历证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对研究所做的任何贡献均已在论文中作出了明确的说明。

若有不实之处，本人愿意承担相关法律责任。

学位论文作者签名： 徐玉鹏

日期：2018年5月26日

学位论文使用授权书

本人完全同意中国石油大学（华东）有权使用本学位论文（包括但不限于其印刷版和电子版），使用方式包括但不限于：保留学位论文，按规定向国家有关部门（机构）送交、赠送和交换学位论文，允许学位论文被查阅、借阅和复印，将学位论文的全部或部分内 容编入有关数据库进行检索，采用影印、缩印或其他复制手段保存学位论文，授权但不限于清华大学“中国学术期刊(光盘版)电子杂志社”。用于出版和编入 CNKI《中国知识资源总库》等系列数据库。（保密的学位论文在解密后适用本授权书）

学位论文作者签名： 徐玉鹏

日期：2018年5月26日

指导教师签名： 姚

日期：2018年5月26日

摘 要

微通道热沉具有比表面积大、散热效率高等优点，被广泛应用在芯片的热管理中。但随着微电子技术的发展，芯片不仅整体的功率和热流密度显著提升，而且会在局部产生热流密度很高的过热点，对其性能产生极为不利的影 响。因此如何在保证整体换热性能的同时，对过热点进行有效地冷却，已成为芯片热管理亟待解决的问题。本文结合电子封装技术，建立了包含过热点和微通道热沉的封装模型，从流动换热和热应力两个角度对整体性能进行评估，并进行了几何结构优化。

首先，建立了包含单一过热点的微通道热沉模型，数值分析了过热点对热沉冷却性能的影响。研究表明，过热点会改变了部分区域的温度和热应力分布，增大了温度梯度，同时随着过热点热负荷的增大恶化趋势加剧，这将对热沉的性能产生不利影响。在此基础上，结合 MCM 和 BGA 封装技术的特点，建立了包含多芯片（过热点）和微通道热沉的 MCM-BGA 3D 封装模型，通过热-流-固耦合计算，分别从整体和局部分析流动换热性能、热应力分布特性，并对封装系统的热管理进行了综合评估。结果表明，温度和热应力都处在合理范围内，多数区域分布相对均匀，但是局部存在梯度过大的问题。其中温度集中分布在靠近出口的芯片和焊球上，而热应变和热应力最大值出现在焊点附近。接触热阻对换热和热应力性能都产生了不利影响。基于特性分析结果，选择最高温度、单一芯片最大温差和最大热应力作为目标，对部分材料和结构参数进行分析，发现两个区域的相对流动方向、热介质材料导热系数及厚度、热拓展面厚度和基板厚度，都改变了换热和热应力性能。在单一参数的分析结果基础上，通过 Nelder-mead 方法对 MCM-BGA 3D 封装模型进行了多目标优化设计。最后基于均匀过热点模型的分析结果，从热流密度和几何排布两个方面，建立过热点非均匀分布的模型，探究最佳性能下的内部排列。结果表明，对所研究的封装模型当靠近入口一排的芯片功率为 50W 时，模型有最佳的性能；对芯片平移和旋转都能改善流动特性，优化换热和热应力性能，平移距离约为 0.75mm 或旋转角度约为 10°时，整体性能最佳。

本文的研究结果对改善芯片上过热点的冷却效果，设计具有良好热性能的封装模型有重要指导意义。

关键词：微通道热沉；过热点；流动换热；热应力耦合

本研究得到了国家自然科学基金青年基金项目(51676287)和教育部博士点基金青年教师项目(20120133120007)的资助

Numerical study of Hotspots and Structure Optimization in Microchannel Heat Sink

Xu Yuepng (Power Engineering and Engineering thermophysics)

Directed by Professor Gong Liang

Abstract

With advantages of large specific surface area and high heat dissipation efficiency, microchannel heat sink has been widely used in chip cooling. But with rapid development of microelectronics technology, not only the total power and heat flux of chips are significantly increased, but also hotspots are locally generated with large heat flux, which has an extremely side effect on thermal performance. Therefore, how to effectively remove the heat on hotspot, while ensuring the total heat transfer performance becomes an urgent problem to solve in chip thermal management. In this paper, a package model containing hotspots and microchannel heat sink is established based on electronic packing. The total performance is evaluated from two aspects of flow heat transfer and thermal stress, and the geometric structure is optimized.

Firstly, a microchannel heat sink with a single hotspot is established, and the effect of the hotspot on cooling performance of heat sink was numerically investigated. The results show that the hotspot partly change the distribution of temperature and thermal stress and increases the corresponding gradient. Meanwhile, the deterioration gradually increases as the thermal load at the hotspot increases, which deteriorates thermal performance. Based on these results, combining the characteristics of MCM and BGA packaging technology, an MCM-BGA 3D package model containing multi-chip (hot-spot) and micro-channel heatsinks was established. Through the thermal-fluid-solid coupling calculations, the total and local flow heat transfer performance and thermal stress characteristics were analyzed separately, and comprehensively evaluate the thermal management of the package system. The results show that temperature and thermal stress are kept in a reasonable range and distribute quite uniform in most area, but it has huge gradient partly. The temperature concentrates on chips and chips solder balls near the outlet and the maximum thermal stress appears near the spot welds. The thermal interface resistance has negative effect on both heat transfer and thermal stress performance. Based on

the results of the characteristic analysis, the maximum temperature, the maximum temperature difference of the single chip, and the maximum thermal stress are selected as optimization objective, and the flow and structural parameters are optimized. Studies have shown that the relative flow direction of two areas, the thermal conductivity and thickness of the thermal medium material, the thickness of the thermal expansion surface and the thickness of the substrate all alter the heat transfer and thermal stress properties. Based on the single parameter optimization results, the Nelder-mead method was used to optimize the MCM-BGA 3D package model. Finally, the model of non-uniform distribution of hotspot was established from the aspects of heat flux density and geometric arrangement based on uniform hotspot model, and the internal arrangement under optimal performance was explored. The results show that the model has the best performance when the power of a chip near the entrance of a row is 50W. Both translation and rotation of the chips can improve the flow characteristics, optimize the heat transfer and thermal stress performance. The overall performance gets best when the translation distance is about 0.75mm or the rotation angle is about 10°.

The results and conclusion in this paper could improve cooling efficiency of hotspots on chips and provide important insights to design high thermal characteristic packing model.

Key words: Microchannel heat sink; hotspots; flow and heat transfer; thermal stress coupling

目 录

第一章 绪论	1
1.1 课题研究背景及意义	1
1.2 国内外研究现状	2
1.2.1 微通道热沉的优化研究	2
1.2.2 过热点问题的研究	5
1.2.3 微通道热沉热应力问题的研究	6
1.3 本文研究内容	7
1.4 论文的章节安排	8
第二章 过热点对微通道热沉的影响研究及封装技术概述	9
2.1 过热点热流密度对换热性能的影响分析	9
2.1.1 物理模型	9
2.1.2 模型假设	10
2.1.3 流动控制方程	10
2.1.4 热应力控制方程	11
2.1.5 边界条件	13
2.1.6 结果与讨论	13
2.2 电子封装技术简述	18
2.2.1 BGA 封装技术	19
2.2.2 MCM 封装技术	20
2.3 本章小结	20
第三章 过热点均匀分布的封装性能分析	21
3.1 MCM-BGA 模型	21
3.1.1 物理模型	21
3.1.2 基本假设	22
3.1.3 流动换热方程	23
3.1.4 热应力控制方程	24
3.1.5 边界条件	24
3.1.6 接触热阻	25

3.2 结果分析	26
3.2.1 网格独立性考核	26
3.2.2 流动换热结果	27
3.2.3 热应力结果	32
3.3 本章小结	35
第四章 过热点均匀分布模型的参数研究及优化	37
4.1 相对流动方向优化	37
4.2 参数研究	39
4.2.1 热介质材料的导热系数	39
4.2.2 热介质材料的厚度	40
4.2.3 热拓展面厚度	41
4.2.4 基板厚度	42
4.3 多目标优化结果	43
4.3.1 Nelder-mead 方法介绍	43
4.3.2 多目标优化结果	45
4.4 本章小结	47
第五章 过热点非均匀分布的封装性能研究	48
5.1 热流密度的非均匀分布	48
5.2 几何上的非均匀分布	50
5.2.1 平移处理	50
5.2.2 旋转处理	53
5.3 本章小结	54
结论与展望	56
参考文献	58
攻读硕士学位期间取得的学术成果	64
致谢	65

第一章 绪论

1.1 课题研究背景及意义

随着微、纳尺度加工技术的不断改善，电子元器件系统的微型化、功能化以及集成化性能显著增强，微电子产业得到了迅速发展，并被广泛应用于各个领域，显著改变人们的生活。微电子技术被视为技术革命的核心技术之一，影响着一个国家的综合国力以及人们的工作方式、生活方式和思维方式。没有微电子技术的发展，就没有今天的信息社会。因此许多国家都把微电子技术作为重要的战略技术，投入大量的人力、物理和财力进行研究和开发。

但是微电子技术的进步也为科技发展带来巨大挑战。一方面热流密度不断提升，尤其是在能源动力、航空航天、生物化工等先进工程领域中，热交换系统的热负荷及强度显著增大，微电子元件所承受的热流密度远高于常规尺度。根据国际半导体技术蓝图（International Technology Roadmap for Semiconductors, ITRS）的预测^[1]，到2019年高性能微处理器的尺寸将会降至15nm，每平方厘米晶体管的数量达到 10^9 ，但芯片尺寸被严格限定在 4cm^2 以内，因此芯片的热流密度大幅上升。国际电子制造商联盟(International Electronics Manufacturing Initiative, INEMI)预测^[2]，未来几年高性能的CPU热流密度可达 $190\text{W}/\text{cm}^2$ 。过高的热流密度必然会导致芯片的工作温度大幅上升，如果不能进行有效冷却，会导致工作性能显著降低，严重时导致芯片电子封装的失效。根据相关研究^[3]集成电路在 90°C 和 40°C 时的失效率比值为7.5:1，晶体管的失效率比值为8:1。因此对于微电子器件的冷却，需要一种有效的方法控制工作温度在合理范围内。

另一方面，电子设备的微型化、封装技术的改进及纳米技术的发展应用导致芯片内不同区域功率密度差异显著，形成过热点区域。对当前水平的微处理器，平均热流密度约为 $10\text{-}50\text{W}/\text{cm}^2$ ，而过热点区域的热流密度可以达到周围区域的六倍以上^[4]。这种局部区域的高热流，会导致芯片温度和温度梯度以指数倍的速度加速缩短产品的无故障时间，严重影响芯片性能，降低其可靠性和稳定性，进而缩短其生命周期。综上所述，对微电子系统的热管理，需要发展一种集成度高、散热能力强的冷却方式，不仅要求保证整体的基本换热性能，还要快速带走热点区域的热量，在维持整体温度的同时降低其热点区域的温度。

目前公认的最有效的冷却方式是微通道热沉。微通道热沉由Tuckerman和Pease^[5]

于 1981 年首次提出。微通道热沉的核心思想是：在微电子器件底部添加微小尺度流道，流体流经微通道以对流换热的方式将热量带走。该方法具有冷却效率高、比表面积大、集成度高等优点，三十多年来一直受到学者们的高度关注并被广泛研究。但是随着芯片热负荷的快速增大，过热点的热管理问题愈发突出，对微通道热沉的冷却性能提出巨大挑战。同时芯片内部由单一过热点发展为多个过热点，这些过热点通过封装技术集成，对整个系统的热管理提出了新的要求。因此针对微通道热沉的过热点研究，不能局限于微通道热沉，而要与封装技术结合建立合理的封装模型，保证整个芯片的冷却效率。

除了对整体的热管理提出新的要求，过热点还导致微通道热沉内部产生不均匀的温度分布，一方面在同种材料结构内部产生对应的热应力，同时也会在不同材料互连间的部分产生热应力，进而造成结构和互连的弯曲，造成互连分层，结构断裂等严重的机械失效问题。另一方面不均匀的温度分布使得局部出现过热点现象，导致热应力局部集中并引起相应的结构变形。严重时会造成微通道形的结构发生变化，直接改变相应的流动与换热过程，影响芯片的温度分布。因此需要通过研究流动换热与热应力的耦合问题，提高芯片的热可靠性。

对微通道热沉内过热点问题的研究，在微电子产业中具有广泛的适用性，对微电子技术的发展有重要的促进作用。目前我国处在信息化发展的关键阶段，对微电子技术有着迫切需求。然而由于过去对微电子产业的地位和发展紧迫性的认识出现偏差，以及发达国家对我国进行技术封锁等问题，导致了目前的微电子制造水平与国际先进水平还存在着相当大的差距。并且随着我国经济的高速发展，所面临的技术封锁等国际形势也会不断恶化，而对于航空航天、生物化工、军事等先进工业领域，迫切需要进行微电子器件热可靠性方面的自主研发。因此，为了配合并加快我国微电子产业的自主研发，必须对微尺度流动换热与热应力应变的耦合问题进行深入研究。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 微通道热沉的优化研究

随着电子设备的发展，热流密度显著提升，简单结构的微通道热沉已无法满足高功率器件的散热要求。因此学者们开始对微通道热沉进行结构优化，一些具有拓展表面的新模型不断涌现。

双层通道热沉是研究和应用最为广泛的模型之一，最早由 K.Vafai 和 Zhu^[6]提出。他们建立了三维双层微直流道热沉，通过数值模拟的方法研究了双层流道中的温度分布、

计算了热沉整体热阻的大小并对相关的几何结构参数进行了简要优化。研究发现相对于单层流道,双层流道表面的最高温度与温度梯度均有下降,并且在相同流道长度下,双层模型的进出口压降和泵功均有所下降。这一结果为双层流道热沉的后续研究奠定了重要的基础。众多学者在他们的结果基础上,对双层流道热沉进行了进一步研究与优化。Wong 等^[7]数值研究了双层流道热沉的传热流动特性,发现在低雷诺数及通道宽高比较小时,顺流换热效果优于逆流这一定性结论。Xie 等^[8-11]除了研究双层流道热沉的流动换热特性,还给出了通道高度的最优值。研究表明虽然逆流装填下底面最高温度大于顺流状态,但底面温度分布比顺流更加均匀,有利于提高设备的稳定性。Hung 等^[12]对双层微直通道模型中的基本几何参数进行定量研究,优化比较不同基底厚度 δ 、通道纵横比 α 、通道宽度与单元宽度之比 β 和通道数 N 。研究发现当参数取 $\beta=0.75$, $\alpha=6$, $N=100$ 时,模型整体的热阻最小,整体热阻随中间隔板厚度的增大而线性增大。Leng 等^[13]对双层流道结构进行了进一步优化,设计了一种上层流道部分截断的优化模型并研究其换热特性。结果显示截断长度与上层原长度比为 0.414 时,上层通道出口处温度与下层通道正好相同,模型换热效果达到最优。Leng 等^[14]还运用共轭梯度算法,对这种上层截断的双层流道热沉进行了结构参数优化。

柱鳍式微通道热沉具有封装密度高、热阻小、温度分布均匀等特点,同样收到了广泛研究。Nafar 等^[15]基于基本肋片模型的解析解,通过理论推导比较正方形、矩形、三角形、圆形四种截面的柱鳍型热沉模型的换热效果。其中圆柱形柱鳍有最长的优化高度和最小的有效传热表面区域,但同时具有最大的热阻。Kosar 等^[16-18]则通过实验研究,对流体横掠不同间距、布置形式、形状的微针肋热沉时的流动换热性能进行了分析。结果表明通过优化设计结构,可以在保证换热性能的基础上有效减小流动阻力。Rubio 等^[19]研究了一种柱鳍密度分区域变化的模型,发现柱鳍形状对压降的影响远大于对散热的影响,后者主要受到面体比 γ 的影响。随着柱鳍长度的增加,截面为椭圆形的模型散热效果改善最为明显,而扁平型的模型底面芯片温度最低。综合压降和温度,扁平型具有最好的性能。当柱鳍长度为 $100\mu\text{m}$ 时,模型压降在合理范围并且散热效果最好。但是对于柱鳍高度的影响,研究无法给出明确结论。涂福炳等^[20]采用实验与数值模拟相结合的方法,优化研究了空气射流矩形柱鳍热沉的肋片结构,发现热阻的减小程度与喷口雷诺数和高径比有关,且当热沉肋宽达到一定范围时其散热能力与散热经济性之间达到最优平衡。

波纹型微通道热沉具有强化流动效果并增大换热面积等优点,也被学者们视为微通道热沉的高效改进模型之一。由于正弦(余弦)函数的特点,形成的通道会使流体在流动过程中产生涡,极大改变了流动特性,部分学者对此进行了研究。Metwally等^[21]通过数值模拟的方法研究了波纹型通道中出现的横向涡的特性,并分析了其对换热的强化作用。研究显示增大波纹曲线振幅与波长的比值,通道容易在低雷诺数下生成横向涡,导致传热性能增强。Manglik等^[22]针对横向涡进行了进一步的研究,发现横向涡对波纹通道的流动起到了明显扰动。由于波纹型通道周期性的特点,这些横向涡不断破坏热边界层,起到了强化换热的功能。Sui等^[23]设计了正弦函数形状的波纹型微通道热沉,取12个单元作为模型计算,结果显示流体通过波浪型流道产生了二次流,增强了流体的混合,强化了流动换热效果。 Re 数由100增大到500,二次流显著增大。更多的学者比较了波纹型微通道整体及局部的换热性能,并进行了相关的参数优化。Mohammed等^[24]对波浪型的微通道热沉进行参数优化,发现随着函数的振幅与波长比 α 增大,模型换热性能提升,当 $\alpha=0.219$ 时,换热效果最好。而 $\alpha=0.25$ 时,由于形成的涡不能与流体较好地混合,反而恶化了传热。同时研究发现不同流道间的换热效果存在差异。Xie等^[25]研究了双层波浪型模型,并与单层波浪型和传统微直通道模型进行对比。研究表明双层波浪型模型可以显著地减小进出口压降,并一定程度地减小热阻,整体换热性能有所改善。波浪对应函数的振幅越大,优化效果越明显。Gong等^[26,27]研究了层流下波纹型微通道热沉的流动换热特性,并研究了通道对应曲线的振幅、波长和纵横比的影响。经过研究发现波纹型微通道热沉的整体换热性能相比传统微直通道提高了55%。

近年来随着微加工技术的成熟,一些具有复杂结构或表面的微通道热沉被成功建立。Haller等^[28]研究了包含弯管和丁字口的分叉型微通道热沉,发现模型强化换热所花费的压降损失远大于传统微直通道模型,减小压降总是会减小模型的有效性。文章还试图给出存在涡扰流的情况下的数学模型,以近似计算压降,但误差较大。Chai和Xia等^[29,30]等对带有凹穴的微通道热沉进行了广泛的数值研究,凹穴形状包括扇形和三角形。研究发现,凹穴能够破坏微通道内的流动和热边界层,起到强化换热的作用。翟玉玲^[31]设计了一种凹穴与内肋组合的复杂热沉,在相同雷诺数时,凹穴及内肋组合的微通道的摩擦系数及 Nu 数均比相同尺寸下凹穴型微通道及矩形微通道高。在凹穴及内肋组合的微通道中,凹穴区的流速最低而肋区附近的速度最高。具有相同形状凹穴时含有梯形内肋的微通道摩擦系数最大,含三角形内肋的最小。在低雷诺数下($Re<300$),三角凹穴及梯形

内肋组合的综合传热效果最优,而在较大雷诺数下($Re>300$),微通道三角凹穴及三角内肋的综合传热效果最优。

对上述研究进行总结后发现,虽然目前在微通道热沉的结构优化方面取得了丰硕成果,但是绝大多数计算采用的热边界条件为恒定热流边界,对与过热点类型的热边界条件下的结构优化研究较少。

1.2.2 过热点问题的研究

过热点问题是在微电子工业的发展过程中逐渐产生的,因此发展历史并不长。但是许多国外学者还是对过热点问题进行了相应的研究。目前应用最为广泛的是利用液体进行主动冷却。但是该方法通常需要配套的外部设备或外部能量输入来帮助实现有效散热。但是这会导致系统所需的泵功过大,难以在系统中整合所有元件。

热电冷却能够使散热器具有反应快、可靠性高、结构紧凑等优点,部分学者对其进行了研究。Koester等^[32,33]证明了热电式热扩散器能够有效地去除过热点的热量,并提高设备的可靠性。他们认为保证热电冷却性能的三个核心因素是:高效的热点材料、设计并制造小型薄热点器件、将热点冷却设备集成到系统中。Wang等^[34,35]将热电冷却与传统的水冷相结合,进一步提升了热点的去除效率。Chowdhury等^[36]研制出了超晶格薄膜热点制冷器,能够对芯片的过热点实现约15K的温降。但整体上看对热点冷却的研究还处于试验阶段,距离实际应用还有一定的差距。

还有部分学者尝试采用其它的热点去除方法。Bar-Cohen^[37]等人比较了池沸腾法、射流冲击法和喷雾冷却法等具有潜力的过热点散热法。虽然这些方法可以明显改进换热性能,但池沸腾和射流冲击受到需要较大泵功的限制。喷雾冷却具有更好地稳定性并能够使表面温度更均匀,但其受限于喷雾喷嘴的耐用性。Brunschwiler^[38]等人利用喷嘴喷射的水冷却过热点,喷嘴的喷射速度可以根据每个过热点的热流密度来进行调整。结果显示当芯片的结温和流体的入口的温度差值在20°C的范围内时,改变后的冷板的流体的流速和泵的功率和未改变的冷板相比,分别减少了28%和43%。Cho等^[39]建立了平行管道散热器模型和交联结合管道散热器模型,热点分布在微流道散热器的下游位置,通过实验研究气液两相流对芯片的过热点的散热特性。结果显示在入口和出口处均带有蓄水槽的微流道散热器中,流体流动不均使芯片的温度分布不均匀。

对于微通道热沉,目前大多数的研究采用的是均匀热流密度的热边界条件。但近年来针对需要迫切解决的过热点问题,许多学者进行了相关研究。Ansari和Kim^[40]研究了

双层微通道热沉中不均匀的热流条件对换热性能的影响。他们通过拉丁超立方体抽样的方法,随机生成十一个几何尺寸和热流密度各不相同热点,双层流向设定为顺流、逆流和交错流,并将结果与没有热点的模型比较。结果显示,当流动方向为逆流时,热阻、温升和热点间的温度变化最小。而当流动方向为交错流时,进出口压降最低。Lee 等^[41]采用倾斜翅片,提出了不同区域翅片的节距和间距可变的改进方案并进行实验研究,模型中热点为非均匀分布。结果表明,这种改进设计能够适应各种不均匀的加热条件,其中在 2 个热点的条件下,其最大温度和温度差相比传统倾斜翅片模型降低了 17.1°C 和 15.4°C,而压降损失仅为 10%-20%,并且剩余的芯片面积不发生过热,芯片整体的温度分布比较均匀。Lorenzini 等^[42]提出了一种柱鳍密度可变的柱鳍型热沉,通过实验和数值模拟研究了模型内热点对流动换热的影响。冷却介质选择去离子水,热点的热流密度控制在 250-750W/cm²。经过研究发现,这种设计能够将最高温度控制在 65°C 以下,整体换热性能较好,并且保持压降降低在允许的范围内。吴云川^[43]数值研究了 2D 芯片和 3D 堆叠芯片的热点冷却。对 2D 芯片,单一热点在上游位置或双热点且上游热点的热流密度较大时,散热特性最好。对比交联结合微通道散热器和平行微流道散热器,前者的热点散热特性更均匀。对 3D 芯片采用夹层水冷方法,随着热点功率增大,各层芯片的温度急剧上升,并且分布的不均匀性在增加,其中底层温度上升幅值最大。

通过以上成果可以发现,目前过热点问题的研究主要针对过热点自身的有效热管理,结合微通道热沉的研究以单一过热点为主。而对过热点导致的不同温度分布特性的研究介绍。同时仍然需要对包含多个过热点的封装体内的热性能进行系统研究。

1.2.3 微通道热沉热应力问题的研究

随着芯片的发展,芯片尺寸不断减小而热流密度逐渐增大大,导致温度梯度增大,温度分布出现不均匀现象,微通道热沉存在由于微尺度流动换热导致的热应力及应变的耦合问题。并且相比常规尺度,在微尺度下该问题的严重性被放大。

由于热应力问题往往涉及到热-流-固耦合,需要考虑的因素较多,计算过程比较复杂,许多学者针对其中的某一方面做了相应研究。Zhang 等^[44]开发了一种预测电子封装系统中焊点机械变形和疲劳耐久度的全局-局部方法。这种方法涉及全局变形分析、局部关键焊点分析和疲劳寿命分析。经过研究发现超球珊阵列封装比细距球珊阵列封装具有更好的耐久性。Huang 和 Zhang^[45]采用两种方法描述多层结构中,梯度残余应力与弹性形变之间的关系。结合理论发展,他们提出了一种通过微机械双层臂悬描述残余应力的

方法。Chao 等^[46]通过研究耦合传热,对 MEMS 中的热剪切应力进行了研究。研究发现虽然单独计算和耦合计算模型在速度分布上相似,但是剪切应力的分布产生巨大差异。他们还发现浮力的存在虽然不会显著改变速度分布,但是会显著影响热传感器附近的温度梯度,对剪切应力的测量产生偏差。An 等^[47-50]研究了一般平面变形(General Plane Deformation, GPD)的精度。比较倒装铜柱封装和一般平面变形模型的机械性能,通过对芯片的最大应力分析,在相同的边界条件下,采用 GPD 和半 GPD 模型计算得到的应力值与全芯片模型不同。此外她们还对 MEMS 的梳齿结构由于热应力产生的失效问题进行了研究。王志等^[51]对利用有限元的方法对非制冷红外焦平面阵列的微桥结构进行热应力研究,提出利用低膨胀系数的电极材料和表面沉积 SiN_x 薄膜有效控制热应力。樊泰君等^[52]利用有限元方法分析了重力、 SiN_x 薄膜的本征应力以及应力梯度对微桥结构形变的影响,发现薄膜本征应力是影响微桥的主要原因。此外文献^[53-56]也都对流动传热与热应力的耦合问题进行了研究,在一定程度上揭示了在各种环境下热应力分布的特性,分析了流动传热引起的温度分布不均以及由此产生的材料结构的热应力问题。

通过总结对微通道热沉热应力问题的研究成果,目前相关研究主要针对热应力本身,而对换热和热应力同时分析的相关研究较少。并且针对封装体热应力的研究主要集中在可靠性分析上,很少有针对热应力在整体和局部区域分布特性的研究。

1.3 本文研究内容

针对现有的研究成果中,缺乏对过热点引起的换热及热应力特性的分析,以及不能满足封装体内多个过热点的有效热管理。本文将微通道热沉与电子封装技术结合,建立包含多个过热点的封装模型,通过数值计算对流动换热及热应力特性进行分析,评估封装体性能。随后通过改变流动与结构参数进行优化。最后建立过热点非均匀分布的模型,探究整体最佳性能下的过热点排布。研究主要内容如下:

(1) 建立包含单一过热点的微通道热沉模型,通过数值模拟的方法计算换热和热应力特性,与将相同热量均匀分布的模型对比,探究过热点及其热流密度对微通道热沉性能的影响。

(2) 建立包含多个过热点和微通道热沉的封装模型,分析整体以及局部关键位置的流动和换热性能,考察是否存在换热性能较差的局部区域。在流动换热性能的基础上,进行热-流-固耦合计算,分析热应变和热应变的分布,对封装模型进行性能评估。

(3) 针对建立的封装模型中流动换热及热应力存在的问题, 选取合理的优化目标, 对流动布置及部分结构参数进行优化, 探寻最佳换热性能下的结构参数。

(4) 通过改变过热点分布, 建立非均匀过热点模型, 对建立的封装模型进一步优化, 并探究最佳换热性能下的排布。

1.4 论文的章节安排

第二章建立了微通道热沉的过热点模型, 将数值计算结果与相同热量均匀分布的模型对比, 分析过热点对微通道热沉的影响。随后结合 MCM 和 BGA 封装技术的特点, 设计具有多个过热点的 MCM-BGA 模型, 并确立了边界条件。最后对问题求解利用的 COMSOL Multiphysics 软件原理进行简要介绍。

第三章对 MCM-BGA 的流动换热结果从整体和局部进行定性分析, 重点研究是否存在局部换热性能较差的区域。基于流动换热结果进行热-流-固耦合计算, 分析热应变的分布特性, 对 MCM-BGA 性能。

第四章基于对 MCM-BGA 的性能分析, 针对模型在流动换热与热应力分布上存在的问题, 选取优化目标参数, 通过改变流动布置方式及部分参数, 对模性能进行优化, 得到最佳的参数。

第五章通过改变芯片排布, 建立 MCM-BGA 的非均匀过热点模型, 进一步优化 MCM-BGA 模型的流动换热和热应变的性能, 得到最佳的性能下的布置方式。

第二章 过热点对微通道热沉的影响研究及封装技术概述

过热点高热流的特性，对微通道热沉的换热性能及热应力分布产生了影响。同时过热点的热负荷大小将进一步改变相关特性。因此本章建立了存在单一过热点的微通道模型，与将相同热量均匀分布的模型进行对比，探究过热点及其热流密度对换热及热应力性能的影响程度。然后简要介绍目前常用的电子封装技术，阐明 BGA 和 MCM 封装技术的特点，为后续研究模型的做了理论铺垫。

2.1 过热点热流密度对换热性能的影响分析

2.1.1 物理模型

为了分析过热点对微通道冷却性能及热应力分布的影响规律，本章分别建立了存在单一过热点的微通道热沉，以及将相同发热量均匀分布在底面的对比模型，如图 2-1 所示，其中过热点布置在底面中心。过热点的热流密度及微通道热沉的尺寸如表 2-1 和 2-2 所示。

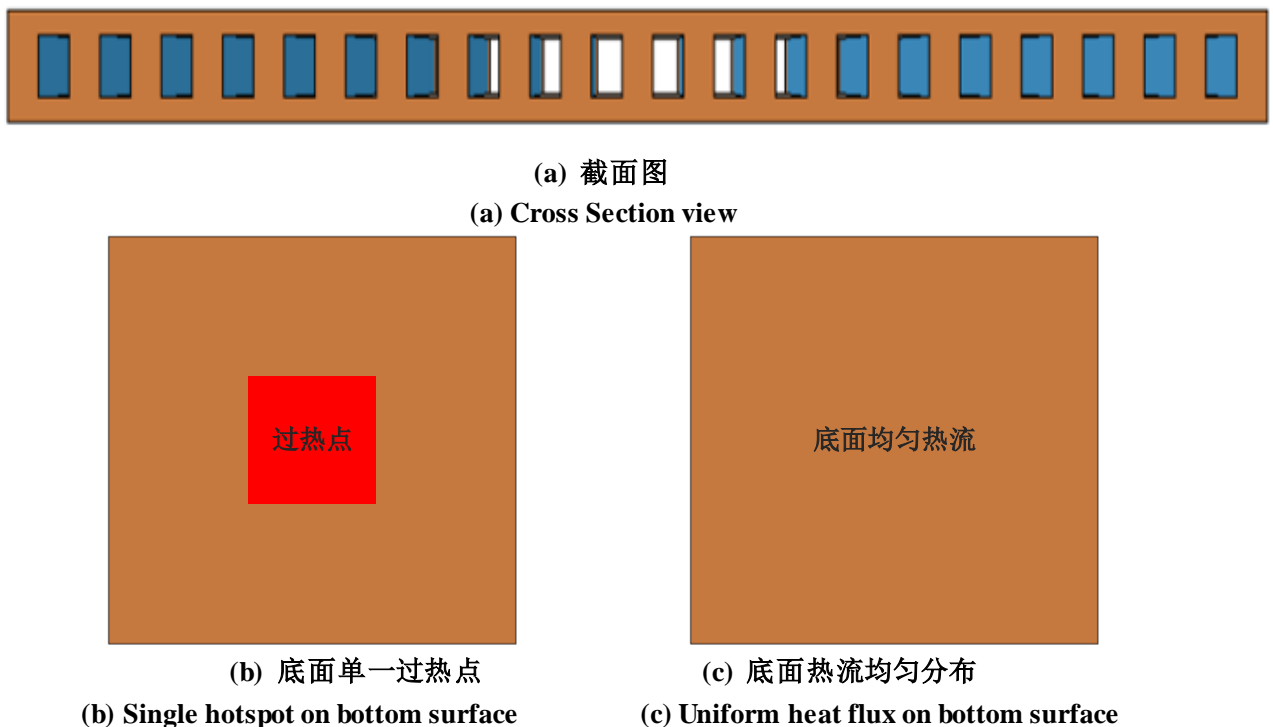


图 2-1 传统微直通通道热沉示意图

Fig 2-1 Traditional straight microchannel heat sink

表 2-1 相同过热点热流均匀分布对应的热流密度(W/m²)

Table2-1 Heat flux with uniform distribution

热流密度	过热点 2×2 cm ²	过热点 5×5 cm ²
250W/cm ²	69444.4	434027.7
350W/cm ²	97222.2	607638.9
450W/cm ²	125000	781250
550W/cm ²	152777.8	954861.1

表 2-2 传统微直通道热沉尺寸

Table2-2 Traditional straight microchannel heat sink parameters

位置	尺寸/mm
整体尺寸	12×12×1.0
通道尺寸	12×0.3×0.5
通道间水平距离	0.3
上下层通道间距	0.2
通道距顶(底)面距离	0.2
热点大小	2×2.5×5

2.1.2 模型假设

模型尺寸为毫米数量级,满足宏观下连续介质假设的使用条件,选择的入口速度经过计算在层流范围内,为简化模型计算时间,数值计算过程采取的主要假设如下:

- (1) 计算过程设定为稳态;
- (2) 物性参数均为常物性;
- (3) 流体流动状态为层流;
- (4) 在流固耦合界面不考虑速度滑移和温度跳跃。

2.1.3 流动控制方程

根据设定的假设,数值计算采用的控制方程如下,质量守恒方程:

$$\frac{\partial(\partial u_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (2-1)$$

流体动量方程:

$$\frac{\partial(\rho u_j u_i)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial p}{\partial x_i} \quad (2-2)$$

流体能量方程:

$$\frac{\partial(\rho c_p u_j T)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(k_f \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) \quad (2-3a)$$

固体能量方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left(k_s \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) = 0 \quad (2-3b)$$

其中 ρ 、 μ 和 c_p 为流体的密度、动力黏度和比热, k_f 和 k_s 为流体和固体的导热系数, u 和 p 表示对应的流速和压力。

此外固体材料选择铜, 冷却流体为水。计算所用到的物性参数如表 2-3 所示。

表 2-3 流动换热计算的相关物性参数

Table2-3 Flow heat transfer parameters of fluids

铜的导热系数 W/(m·K)	水的密度 kg/m ³	水的动力黏度 N·s/m ²	水的比热 J/(kg·K)	水的导热系数 W/(m·K)
390	998.2	1.01×10 ⁻⁶	4.187×10 ³	0.6

2.1.4 热应力控制方程

过热点导致局部发热量提升, 在相同的换热条件下, 对应的局部温度和温度梯度增大, 导致热沉产生了明显的热应变和热应力。在三维直角坐标系中, 热应变与热应力间的本构方程为:

$$\varepsilon_x - \varepsilon_0 = \frac{\sigma_x}{E} - \frac{\nu}{E} (\sigma_y + \sigma_z), \gamma_{xy} = \frac{E}{2(1+\nu)} \tau_{xy} \quad (2-4a)$$

$$\varepsilon_y - \varepsilon_0 = \frac{\sigma_y}{E} - \frac{\nu}{E} (\sigma_z + \sigma_x), \gamma_{yz} = \frac{E}{2(1+\nu)} \tau_{yz} \quad (2-4b)$$

$$\varepsilon_z - \varepsilon_0 = \frac{\sigma_z}{E} - \frac{\nu}{E} (\sigma_x + \sigma_y), \gamma_{zx} = \frac{E}{2(1+\nu)} \tau_{zx} \quad (2-4c)$$

其中 σ 是热应力, ε 是热应变, E 为杨氏模量, ν 是泊松比。

对固体材料的热应变 ε_0 , 对应关系式为:

$$\varepsilon_0 = \alpha(T - T_0) = \alpha \cdot \Delta T \quad (2-5)$$

ΔT 为温度的变化量, α 为材料的线性膨胀系数。对于各相同性的三维结构, 其各个方向的应变相同, 且不会产生剪应力。

对于存在约束的结构, 热应变将产生热应力, 而所产生的热应力又会引起该点发生弹性应变。所以一般情况下, 结构的总应变为热应变与弹性应变之和, 即:

$$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon\}_E + \{\varepsilon\}_t \quad (2-6)$$

根据弹性应变与弹性应力的关系式:

$$\{\sigma\} = [D] \{\varepsilon\}_E \quad (2-7)$$

当结构弹性应变和热应变共同存在时，结构物理方程：

$$\{\sigma\} = [D] (\{\varepsilon\} - \{\varepsilon\}_t) = [D] ([B] \{q^e\} - \{\varepsilon\}_t) \quad (2-8)$$

其中 $[D]$ 是弹性矩阵， $[B]$ 是应变矩阵。

根据弹性力学节点力公式， $\{F\}^e = \iiint [B]^T \{\sigma\} dx dy$ ，可得：

$$\begin{aligned} \{F\}^e &= \iiint [B]^T [D] ([B] \{q^e\} - \{\varepsilon\}_t) dx dy dz \\ &= \iiint [B]^T [D] [B] \{q^e\} dx dy dz - \iiint [B]^T [D] [B] \{\varepsilon\}_t dx dy dz \\ &= [k]_E^e \{q\}^e - \iiint [B]^T [D] \Delta T \cdot \alpha dx dy dz \end{aligned} \quad (2-9)$$

其化成矩阵形式为：

$$[k]_E^e \{q\}^e = \{F\}^e + \{R\}_t^e \quad (2-10)$$

式中， $\{F\}^e$ 为节点力矩阵， $[k]_E^e$ 是单元刚度矩阵， $\{R\}_t^e = \iint [B]^T [D] \Delta T \cdot \alpha dx dy$ 是由于单元温度变化而等效产生的节点载荷矩阵。

将所有单元因温度变化而等效产生的节点载荷叠加，即可形成整体结构的温度载荷矩阵，即：

$$\{R\}_t^e = \sum_{e=1}^n \{R\}_t^e \quad (2-11)$$

依据此时的刚度方程， $[k] \{q\} = [R]_t$ ，可求解热应变 $\{q\}$ ，将热应变 $\{q\}$ 再带入结构物理方程即可求出对应的热应力。

热应力计算所需的材料属性参数如表 2-4 所示。

表 2-4 材料结构计算参数
Table 2-4 Structure parameters of materials

杨氏模量/Pa	泊松比	热膨胀系数/(°C) ⁻¹
1.1×10 ¹¹	0.35	1.7×10 ⁻⁵

2.1.5 边界条件

对应边界条件如下，入口边界为给定速度和温度：

$$u = u_{in} = 0.1 \sim 2 \text{ m / s}, T = T_{in} = 293.15 \text{ K} \quad (2-12)$$

出口边界为给定压力：

$$p = p_{out} = 0 \text{ Pa} \quad (2-13)$$

过热点及底面均匀热流密度：

$$-\lambda_w \frac{\partial T}{\partial y} = q_w = 250 \sim 550 \text{ W / cm}^2 \quad (2-14)$$

流固耦合界面温度连续，速度无滑移：

$$T_f = T_s, k_f \frac{\partial T_f}{\partial n} = k_s \frac{\partial T_s}{\partial n} \quad (2-15)$$

其它外壁面为绝热边界条件：

$$-\lambda_w \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad (2-16)$$

2.1.6 结果与讨论

对发热区域为恒定热流密度的微通道热沉，最高温度出现在发热区域上，降低该区域的温度对改进微通道热沉的换热性能起到重要作用，因此必须要对比对应发热区域的温度分布。选取过热点和均匀热流分布模型中的对应研究作为研究目标，示意图如图 2-2 所示。图 2-3 和 2-4 给出了入口速度为 1m/s 的条件下，过热点热流密度为 250W/cm² 和 550W/cm²、面积为 2×2cm² 的模型及对应均匀热流模型的温度分布，可以看出过热点显著改变了对应发热区域的温度分布。在热流均匀分布的模型中，最高温度出现在最靠近出口的位置，整体温度梯度较小，温度分布均匀。而在过热点模型中最高温度向中间区域偏移，并且最高温度和温度梯度显著增大。增大过热点的热流密度，不改变发热区的温度分布，但进一步增大了中间部分的温度梯度。图 2-5 给出了入口速度为 1m/s 的条件下，底面发热区域的最大温差。可以看出对过热点模型最大温差显著高于热流均匀分布的模型。随着过热点热流密度的增大，过热点模型的最高温度显著上升，并且过热点模型和热流均匀分布模型的最大温差之间的差异同样增大，从上面的结果可以看出，过热点改变了发热区域的温度分布，导致温度差异增大，对换热起到了不利影响。

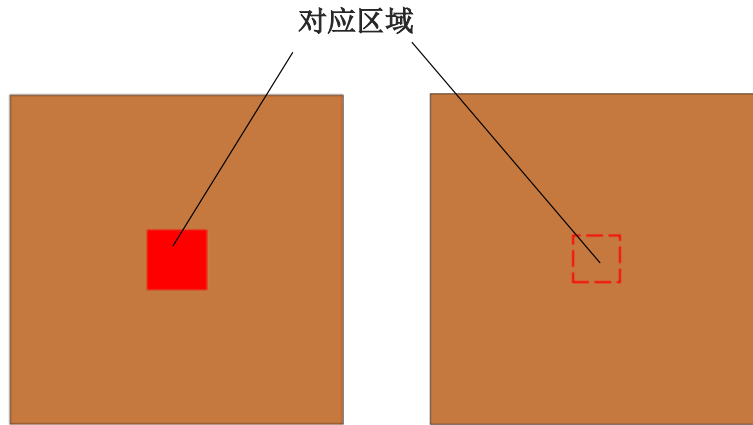


图 2-2 研究温度分布选择的区域

Fig2-2 Object region for temperature distribution

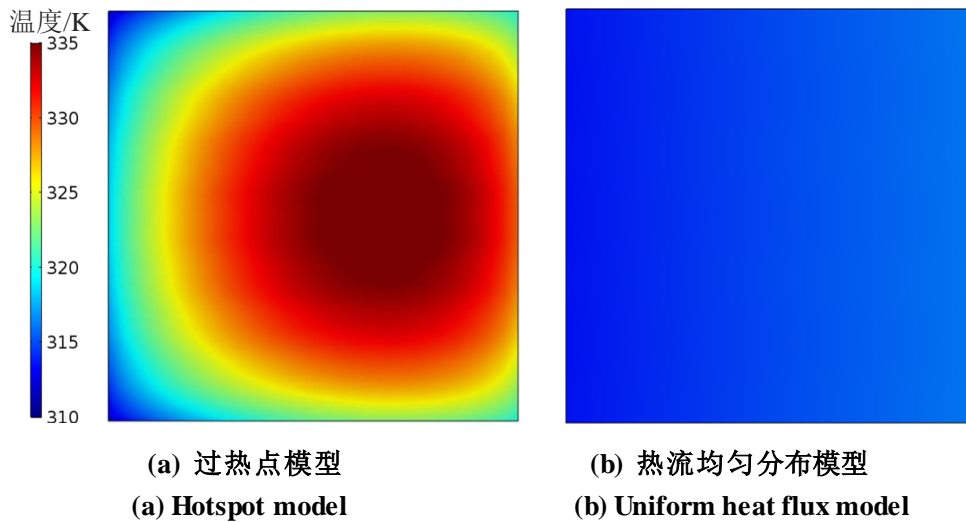


图 2-3 过热点热流密度为 $250\text{W}/\text{cm}^2$ 、过热点面积 $2\times 2\text{cm}^2$ 的温度分布

Fig2-3 Temperature distribution under heat flux is $250\text{W}/\text{cm}^2$, area is $2\times 2\text{cm}^2$ of hotspot

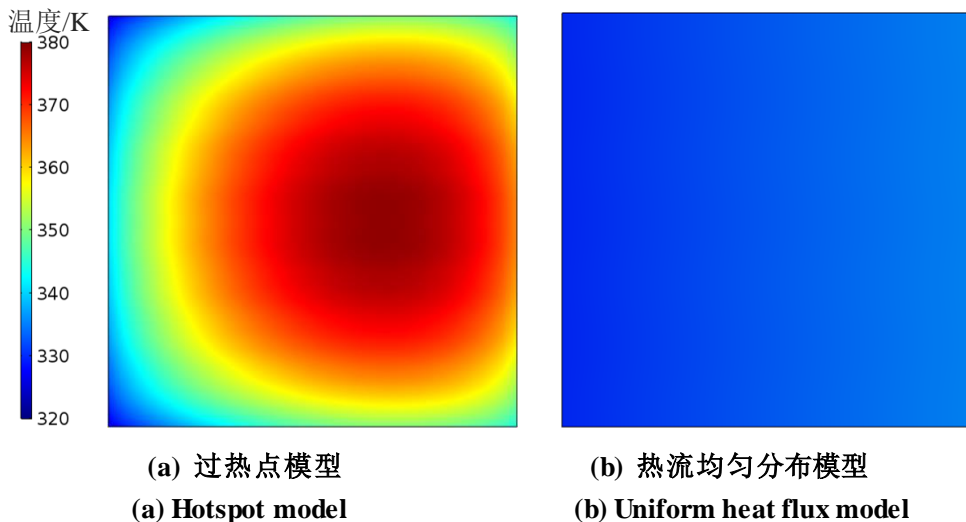


图 2-4 过热点热流密度为 $550\text{W}/\text{cm}^2$ 、过热点面积 $2\times 2\text{cm}^2$ 的温度分布

Fig2-4 Temperature distribution under heat flux is $550\text{W}/\text{cm}^2$, area is $2\times 2\text{cm}^2$ of hotspot

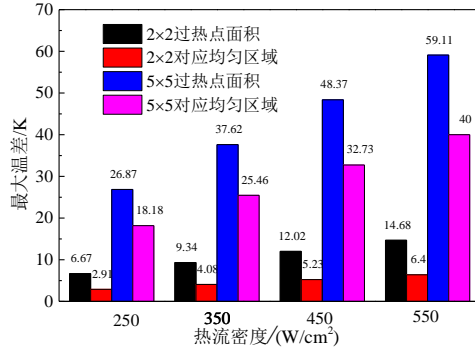


图 2-5 过热点表面最大温差图

Fig2-5 The maximum temperature difference of different models

由于过热点导致最高温度和最大温差显著增大，因此需要给出对应努赛尔数的变化情况，探究整体换热性能的改变。平均努赛尔数的定义如下：

$$Nu = \frac{hD_h}{\lambda} \tag{2-17}$$

其中 D_h 表示水力直径， h 为对流换热系数，计算公式如下：

$$D_h = \frac{4A}{P} \tag{2-18}$$

$$h = \frac{q_w}{A_h(T_w - T_f)} \tag{2-19}$$

其中 A 为单个通道的面积， P 为通道湿周， q_w 为热通量， A_h 为换热面积， T_w 和 T_f 为壁面和流体的平均温度。

图 2-6 给出了不同热流密度下，过热点面积为 2×2 模型的努赛尔数与雷诺数的变化曲线。可以发现随着热流密度的增大，努赛尔数出现小幅度降低，并且在低雷诺数条件下，努赛尔数差异明显增大。虽然过热点的存在基本没有改变努赛尔数的变化趋势，热流密度增大只是小幅降低了努赛尔数。但是由于最高温度显著提升，最大温差增大，整体换热明显降低。

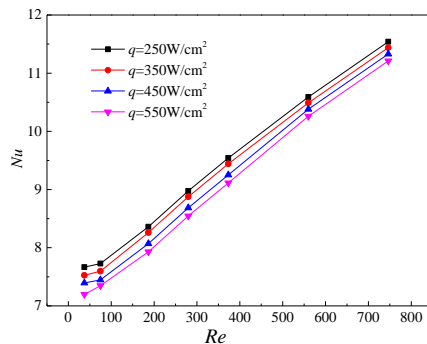


图 2-6 不同热流密度下努赛尔数的变化

Fig2-6 Variation of Nusselt number under different heat flux

通过前面的分析,过热点导致模型的传热效果恶化,可能对热应变和热应力力特性产生影响。由于热应力计算设置整个热沉的底面为固定约束,因此顶面的热应变相对较大,需要考察其分布特性。图 2-7 和 2-8 给出了入口速度为 1m/s 的条件下,过热点热流密度为 $250\text{W}/\text{cm}^2$ 和 $550\text{W}/\text{cm}^2$ 、面积为 $2\times 2\text{cm}^2$ 的模型及对应均匀热流模型的顶面热应变分布。结果表明过热点同样改变了顶面的热应变分布,对热流均匀分布的模型,顶部热应变集中在出口附近,最大值处在出口所在平面的两个角上。而对过热点模型,热应变集中在底面过热点对应的区域,最大热应变和该区域的热应变梯度显著增大。随着过热点热流密度的增大,顶部最大热应变对应增大。

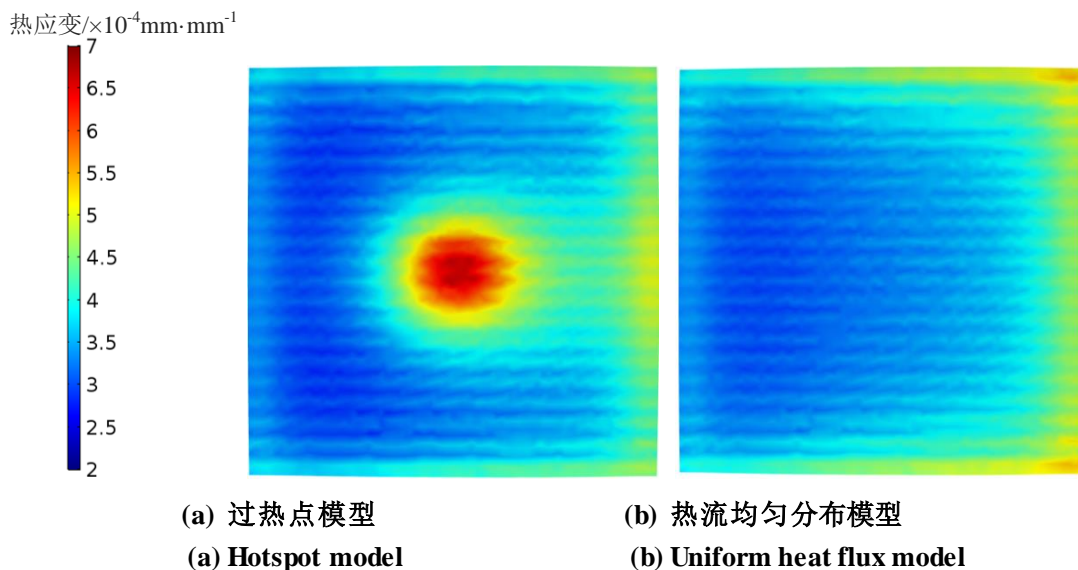


图 2-7 过热点热流密度为 $250\text{W}/\text{cm}^2$ 、过热点面积 $2\times 2\text{cm}^2$ 的顶面热应变分布

Fig2-7 Thermal strain distribution under heat flux is $250\text{W}/\text{cm}^2$, area is $2\times 2\text{cm}^2$ of hotspot

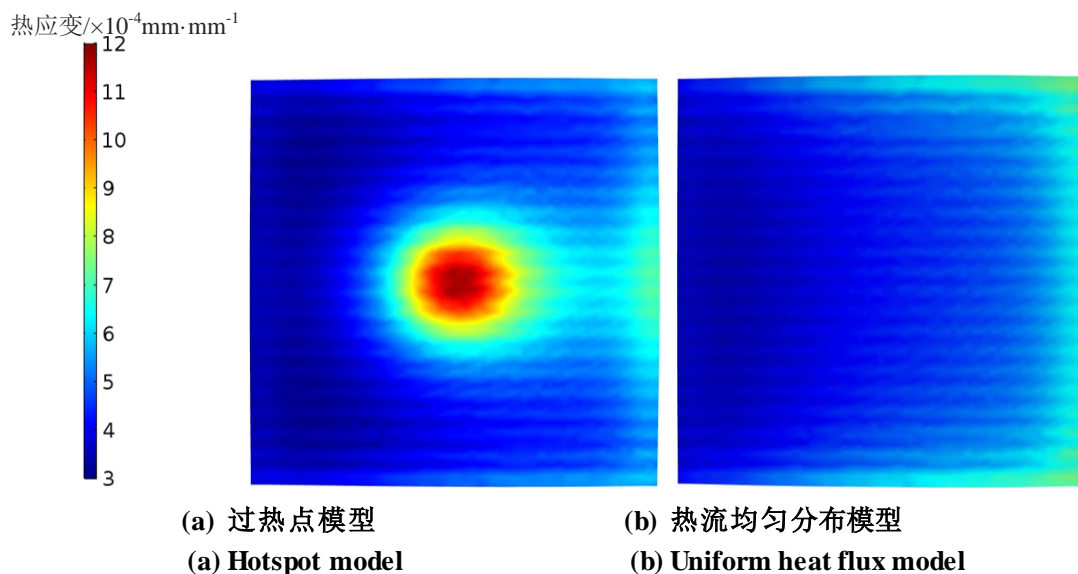


图 2-8 过热点热流密度为 $550\text{W}/\text{cm}^2$ 、过热点面积 $2\times 2\text{cm}^2$ 的顶面热应变分布

Fig2-8 Thermal strain distribution under heat flux is $550\text{W}/\text{cm}^2$, area is $2\times 2\text{cm}^2$ of hotspot

根据顶部热应变的分析，对热流均匀的微通道热沉在出口面上的两个顶角热应变较大，是热应力的“死点”，需要对该处的热应力变化进行分析。由于模型和边界条件对称，选择其中的一个点作为研究目标，如图 2-9 所示。图 2-10 给出了改点在不同的热流密度条件下最大热应力的变化趋势。结果显示过热点降低了该处的热应力，但影响程度较小。一个可能的原因是热流均匀分布的模型，发热区域为整个底面，导致热应力向出口方向偏移，“死点”处的热应力增大。而对于过热点模型，发热区域在底面中心，相对于顶面的中间区域，“死点”处的热应力下降。但是过热点对“死点”处热应力的降低程度，远远小于其对于顶部的热应变增大。整体上看过热点同样对热应变和热引力产生了不利的影响。

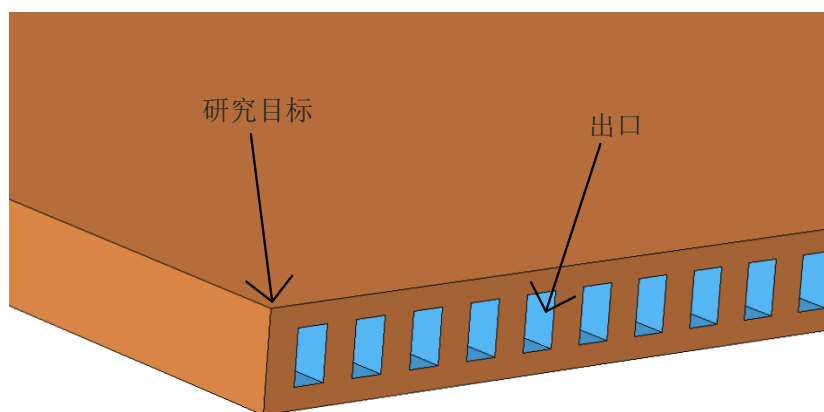
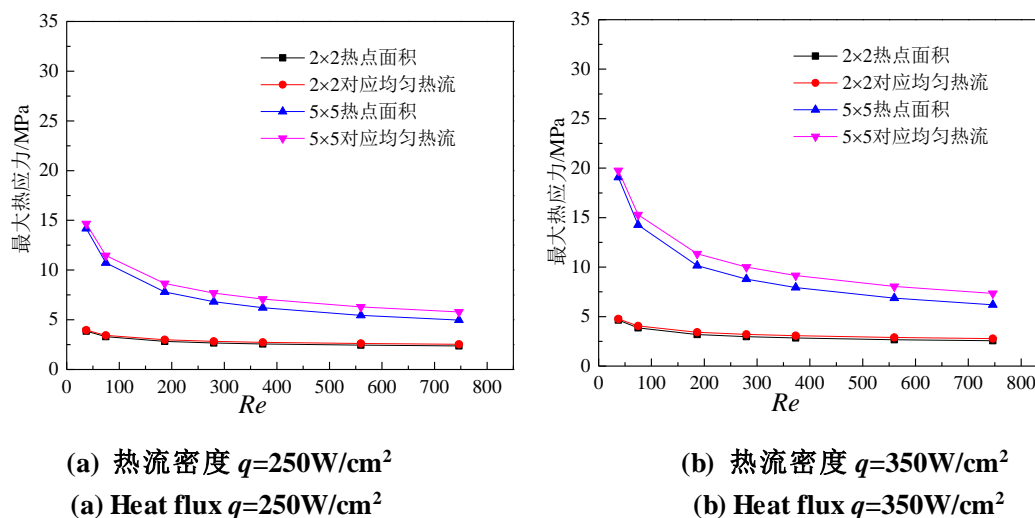


图 2-9 热应力研究目标

Fig2-9 Research objectives of thermal stress



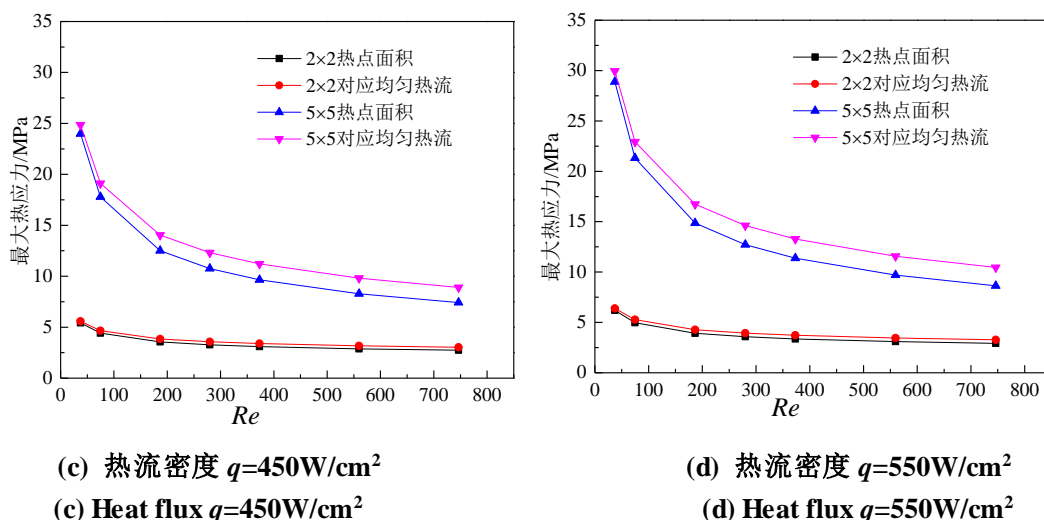


图 2-10 不同热流密度下最高温度变化曲线

Fig2-10 Variations of the highest temperature under different heat flux on hotspots

结合换热和热应力两个方面的分析结果，过热点一方面改变了发热区域的温度分布，最高温度和发热区的温度梯度显著增大，另一方面同样增大了顶面的最大热应变和热应变梯度，对整体性能产生了不利影响。因此在微电子元件的热管理中，需要开发高效地冷却方法，能够迅速传递过热点的热量，控制温度在合理范围。

2.2 电子封装技术简述

根据前面的研究结果，随着芯片功率的提升，将导致电子器件的换热性能恶化。同时随着微电子技术的发展，电子器件内由单一芯片发展为多个芯片，这些芯片通过封装技术集成在一起，对器件的热管理提出了更高的要求。因此对于过热点问题的研究，不能局限于仅研究微通道热沉本身，还需要结合先进的电子封装技术。

对微电子系统，集成电路（Integrate Circuit, IC）是其最基础的组成部分^[57]，它是继承了晶体管、电阻、电容等具有特定功能的电路。而封装则是把 IC 和其它元件连接到系统电路板上，形成相应的微电子系统。在系统内部，芯片的各个输入、输出端通过封装技术实现与外界过度，同时封装不仅负责对 IC 的集成与保护作用，还是其功能实现的重要组成部分。在微电子工业中，封装维持着集成电路性能的可靠性，并对提高电性能、热性能以及整机的小型化和集成化有重要作用。

在封装技术的发展过程中，存在许多问题困扰着研究人员，最具有代表性的是以下三点：

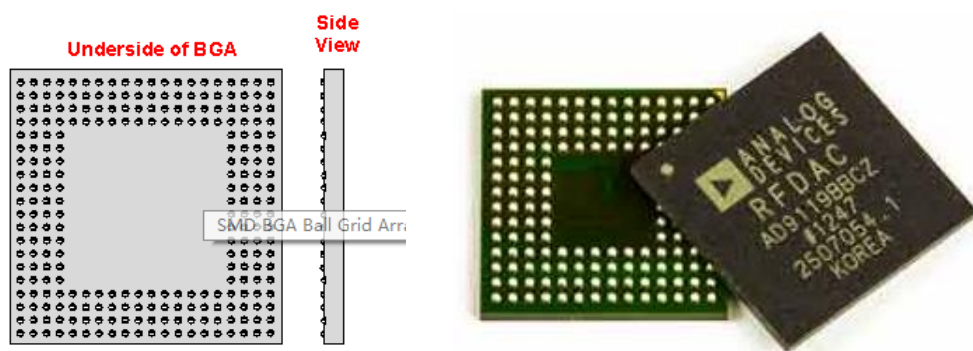
- (1) 随着元件功率的提升和结构的复杂化，要求封装中有越来越多的 I/O 数目；
- (2) 高的引脚数目要求越来越小的引线间距，由此会产生“细节距”问题；

(3) 高引线数目使得引线更细，因此更为脆弱，降低了元件的疲劳寿命；

为了解决这些问题，研究人员先后发明并改进了多种封装技术，但目前应用最为广泛的还是球栅阵列封装(Ball Grid Array, BGA)和多芯片封装(Multi-Chip Module, MCM)。

2.2.1 BGA 封装技术

图 2-11 给出了基本 BGA 封装模型的示意图。所谓 BGA 封装技术是指在封装底部，引脚均为焊球并排列成格子形状，其 I/O 端子以圆形或柱状焊点按阵列形式分布在封装下面，是一种高密度的表面附着封装技术。BGA 封装是在传统的四方扁平式封装的基础上，针对其存在的问题而提出的改进方法。由于四方扁平式封装具有非常细且紧密间隔的引脚，这些引脚的可靠性较低，即使在严格控制的环境下引脚也很容易损坏，造成封装体的失效。此外它们还需要对焊接过程进行严格控制，否则焊桥的不良率会显著上升。BGA 封装就是为了解决这些问题而发展的。



(a) BGA 结构图 (b) 实际应用中的 BGA
(a) Structure model of BGA (b) BGA in practical applicaiton

图 2-11 BGA 模型示意图^[58]

Fig2-11 Structure of BGA model

四方扁平式等封装仅适用封装侧面进行连接，导致引脚空间有限，必须非常紧密地间隔开，并且为了提供所需的连接导致尺寸大幅减小。相比之下，BGA 封装适用封装的底面，保证连接处有相当大的面积，大幅替身过了封装的可靠性。此外 BGA 封装还具有以下优点：

(1) 高密度。BGA 封装不会出现双列直插等封装中当引脚越来越靠近时，焊锡桥接至相邻引脚的情况，因此可以保证较高的封装密度。

(2) 较好的导热性能。BGA 封装能够显著降低内部的热阻，尤其是与 PCB 的连接处，提升内部的导热能力，对封装起到保护作用。

(3) 优良电子特性。BGA 封装能够减小芯片与电路板之间的路径，提高整体的导电性，减少不必要的信号失真。

由于 BGA 封装的特点,其相比传统的细节距脚型封装技术,能更适用于 MCM 封装,稳定性和可靠性显著提升,并实现高密度、高性能的封装。

2.2.2 MCM 封装技术

MCM 是指在一个封装中包含两个或两个以上芯片,通过基板互相连接,共同构成整个电路系统的封装形式。MCM 的主要作用有:为组件中的各个芯片提供信号互联、I/O 管理、热控制、机械支撑以及环境保护等等。MCM 是一种重要的封装技术,被广泛应用在航空航天、超级计算机、生物医药等领域。

对于高效实用的 MCM,必须满足以下标准:

- (1) MCM 中芯片的间距必须尽量小,以减小信号传输延迟。这意味着基板的布线设计必须能够避免信号失真,并且布线导体必须具备很好的导电能力以避免附加电阻;
- (2) MCM 必须能将最高温度控制在合理范围内,实现封装整体有效的热管理;
- (3) MCM 必须为下一级系统提供可靠的 I/O 互连方式;
- (4) MCM 必须提供相应的环境保护。无论是密封或者只是涂敷/包封,必须采用一种方式保护芯片互连。

和每块芯片单独封装的方案相比,MCM 技术能够增加封装效率、减小芯片间距以提高电性能、减少芯片和电路板间的互连数以提高可靠性、提高产量降低成本。

2.3 本章小结

本章首先建立了存在单一过热点的平直微通道热沉模型,通过模型结果对比研究了过热点及其热流密度对微通道热沉冷却性能及热应力特性的影响。结果表明过热点改变了温度和热应变(力)的分布趋势,显著增大了最大值和对应的梯度,对性能产生了不利影响,并且这种恶化趋势随着过热点热流密度的提升而增大。随后对封装常用的 BGA 和 MCM 技术进行了介绍,其中将 MCM 与 BGA 技术结合具有更好的稳定性和可靠性,为后面的模型建立奠定了理论基础。

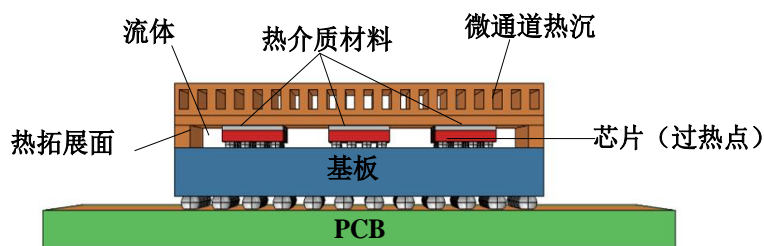
第三章 过热点均匀分布的封装性能分析

根据上一章介绍的 BGA 与 MCM 封装技术的特点，将 MCM 与 BGA 技术结合，能够使封装体具有更高的集成度和更好的性能，因此 MCM-BGA 封装具有广泛的研究空间。徐云龙^[59]曾针对 MCM-BGA 模型进行过相关研究，但其计算模型为二维，模型尺寸相对较大，并且没有系统的分析流动换热以及热应力的性能。本章在其基础上建立芯片（过热点）均匀分布并包含微通道热沉的 MCM-BGA 模型，其中整体尺寸大幅降低，热流密度显著提升，在两个区域同时引入流体，并在考虑边界热阻对换热的影响。通过设定合理的假设和边界条件，对整体和局部的流动换热计算结果进行系统分析。并在此基础上，进行热-流-固耦合计算，对热应变和热应力的分布进行了探究，评估整体性能。

3.1 MCM-BGA 模型

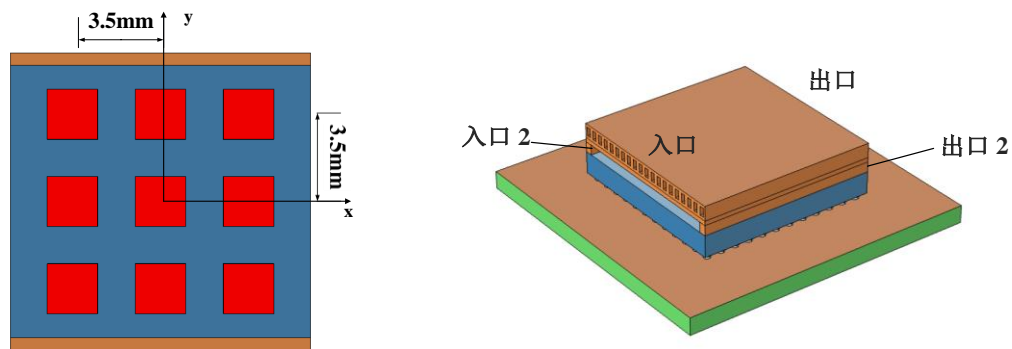
3.1.1 物理模型

结合 MCM 与 BGA 封装技术的优点，建立了 MCM-BGA 模型，基本示意图如图 3-1 所示。整个模型由芯片、基板、焊球、PCB、微通道热沉、热拓展面组成。其中九个芯片以 3×3 的排列方式均匀分布在中间区域，如图 3-1(b)所示。芯片通过焊球与基板相连，每个芯片对应的焊球以 4×4 均匀排列的方式分布。在基板的另一面，基板通过 12×12 均匀排列的焊球与底部 PCB 连接。平直微通道热沉布置在整个封装体的最顶部。在热沉下方布置热拓展面，以强化模型整体的换热性能。在芯片与热拓展面中间，铺设一层热介质材料，保证整体的散热效果，热拓展面底部与基板相连。为了使 PCB 的表面温度尽可能均匀，在 PCB 底面铺设一层铜层。与一般的封装模型中冷却介质仅流经微通道不同，本文建立的 MCM-BGA 模型中，除了微通道中布置流体外，热拓展面与基板形成的中间区域内同样布置流体。该部分流体直接流过芯片和焊球表面，起到强化流动换热的作用。模型的几何尺寸参数如表 3-1，微通道热沉的结构参数如表 3-2 所示。



(a) 竖直方向截面图

(a) Vertical cross section



(b) 芯片水平截面图 (c) 整体 3D 视角
 (b) Chips horizontal cross section (c) Total 3D view

图 3-1 MCM-BGA 模型示意图
 Fig3-1 Structure of MCM-BGA model

表 3-1 MCM-BGA 模型几何尺寸
 Table3-1 Geometry sizes of MCM-BGA

部位	尺寸/mm
芯片	2×2×0.35 3×3 均匀分布
芯片焊球	直径: 0.3 高: 0.2 中心间距: 0.5 4×4 均匀分布
基板	12×12×1
基板焊球	直径: 0.6 高: 0.4 中心间距: 1.5 12×12 均匀分布
PCB	20×20×1.2
热拓展面	12×12 上部分: 0.3, 下部分: 0.7
热介质材料	厚: 0.15
PCB 底面薄层	厚: 0.15

表 3-2 微通道热沉的几何尺寸
 Table 3-2 Geometry sizes of Microchannel heat sink

部位	尺寸/mm
整体尺寸	12×12×1
通道尺寸	12×0.3×0.6
通道距顶(底)部距离	0.2
通道间壁厚	0.3
两侧壁厚	0.15

3.1.2 基本假设

模型的流动传热过程为：芯片产生的热量，一方面由流经其表面的流体直接通过流动换热带走，另一方面经由固体间的传导，通过微通道内流体流动或表面自然对流耗散。并且固体与流体的传热过程相互耦合，互为边界。在不改变主要传热特征的前提下，考虑到计算效率及实际应用中考察电子设备运行的主要指标，提出如下假设：

1) 传热过程均为稳态。对电子设备的实际应用，主要考虑其在稳定状态下能否有效换热，因此数值计算的流动换热过程均为稳态。

2) 流动为单相层流。对电子设备，在流动为湍流或发生相变的情况下，均会对稳定性产生不利影响，因此研究设定的流动形态为单相层流。

3) 材料物理参数均为常物性。对本研究选择的材料，温度对于物性的影响均相对较小，而变物性的相关计算将极大增加整体的计算量。为优化计算效率，所有材料均为常物性。

4) 忽略表面的粗糙度。本文主要针对封装模型的流动换热及热应力性能进行研究，不考虑表面效应对性能的影响。并且模型尺寸为毫米数量级，表面粗糙度的影响很小，可以忽略。

5) 在流固壁面上连续，即速度无滑移、温度无跳跃。

3.1.3 流动换热方程

对 MCM-BGA 模型内的流动换热进行三维数值研究，研究分为固体与流体两个区域。由于建立的模型几何尺寸为毫米数量级，远大于平均分子自由程，因此仍然适用宏观条件下的流动换热的相关假设及方程。结合前面所设定的假设条件，流动为单相流、层流，得到的对应控制方程与章节 2.1.3 中的控制方程(2-1)至(2-3)相同。计算过程中固体所需的材料和导热系数如表 3-3，流体流动换热的相关物性参数如表 3-4 所示。

表 3-3 固体材料及导热系数

Table3-3 Materials and thermal conductivity of solids

部位	材料	导热系数 W/(m·K)
芯片	硅	82
芯片焊球	5Sn/95Pb	36
基板	聚酰亚胺	0.2
基板焊球	60Sn/40Pb	50
PCB	FR4	8.37
热拓展面	铜	390
热介质材料	导热脂	1.2
PCB 底面薄层	铜	390
微通道热沉	铜	390

表 3-4 流体流动换热的物性参数

Table3-4 Materials and flow heat transfer parameters of fluids

冷却介质	密度 kg/m ³	动力黏度 N·s/m ²	比热 J/(kg·K)	导热系数 W/(m·K)
水	998.2	1.01×10 ⁻⁶	4.187×10 ³	0.6

3.1.4 热应力控制方程

对于 MCM-BGA 模型, 由于多个芯片的存在, 整体具有较高的发热量, 同时封装体内部件众多, 因此对于热应力的计算不能局限在微通道热沉部分, 而要对整体的热应力性能分析, 作为封装性能评估的重要部分。由于对热应力的计算假设以及流动传热方程与第二章相同, 因此模型热应力的控制方程与章节 2.1.4 相同。热应力计算用到的材料参数如表 3-5 所示。

表 3-5 材料结构计算参数
Table3-5 Structure parameters of materials

材料	杨氏模量/Pa	泊松比	热膨胀系数/(°C) ⁻¹
硅	1.7×10^{11}	0.28	2.6×10^{-6}
5Sn/95Pb	2.6×10^{10}	0.4	1.9×10^{-5}
聚酰亚胺	3.2×10^9	0.35	7.0×10^{-5}
60Sn/40Pb	1.0×10^{10}	0.4	2.1×10^{-5}
FR4	2.2×10^{10}	0.15	1.8×10^{-5}
铜	1.1×10^{11}	0.35	1.7×10^{-5}
导热脂	3.1×10^9	0.4	6.5×10^{-6}

3.1.5 边界条件

在电子设备中, 封装模块需要与其它系统相连以保证工作效率, 例如为提供冷却所需的泵功。因此结合实际运行情况, 设定相应的边界条件如下。

(1) 流动换热计算

微通道入口为给定入口速度、入口温度:

$$u = u_{in1} = 0.1 \sim 2 \text{ m/s}, T = T_{in1} = 293.15 \text{ K} \quad (3-1)$$

中间流动区域入口为给定入口速度、入口温度:

$$u = u_{in2} = 1 \text{ m/s}, T = T_{in2} = 293.15 \text{ K} \quad (3-2)$$

微通道出口为给定出口压力:

$$p = p_{out1} = 0 \text{ Pa} \quad (3-3)$$

中间流动区域出口为给定出口压力:

$$p = p_{out2} = 0 \text{ Pa} \quad (3-4)$$

芯片热源为恒定功率, 总功率为:

$$Q = 90 \text{ W} \quad (3-5)$$

流固耦合界面温度连续, 速度无滑移:

$$T_f = T_s, k_f \frac{\partial T_f}{\partial n} = k_s \frac{\partial T_s}{\partial n} \quad (3-6)$$

PCB 底面薄层传热可表示为，薄层厚度在表 3-1 中给出：

$$-\mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = d_s Q_s \nabla_t \mathbf{q}_s \quad (3-7)$$

$$\mathbf{q}_s = -d_s k_s \nabla_t T \quad (3-8)$$

其余外表面设定为与空气自然对流，自然对流系数如下：

$$h = 10 \text{W} / (\text{m}^2 \cdot \text{K}) \quad (3-9)$$

(2) 热应力计算

对热应变（应力）的计算，需要设定一个基准面作为约束，考虑到电子设备的实际运行情况，将 PCB 底面设为固定约束。

3.1.6 接触热阻

虽然在计算中忽略了表面粗糙度的影响，但是局部接触界面由于表面粗糙度的影响，会产生接触热阻，对换热性能产生重要影响。在本文的模型中，热拓展面与微通道热沉的接触面是热传导过程的重要媒介，会对换热性能产生极为重要的影响，因此在计算过程中不能忽略。

接触热阻的方程表示如下：

$$-\mathbf{n}_d \cdot \mathbf{q}_d = -h(T_u - T_d) + rQ_b \quad (3-10a)$$

$$-\mathbf{n}_u \cdot \mathbf{q}_u = -h(T_d - T_u) + (1 - r)Q_b \quad (3-10b)$$

其中 h 为换热系数，可以由如下公式表示：

$$h = h_c + h_g \quad (3-11)$$

为了简化计算，选用 Cooper-Mikic-Yovanovich 关联式进行计算，相关公式如下：

$$h_c = 1.25c_{\text{contact}} \frac{m_{\text{asp}}}{\sigma_{\text{asp}}} \left(\frac{p}{H_c} \right)^{0.95} \quad (3-12)$$

$$h_g = \frac{k_{\text{gap}}}{Y_{\text{gap}} + M_{\text{gap}}} \quad (3-13)$$

$$\frac{2}{k_{\text{contact}}} = \frac{1}{(k_u \mathbf{n}_u) \cdot \mathbf{n}_u} + \frac{1}{(k_d \mathbf{n}_d) \cdot \mathbf{n}_d} \quad (3-14)$$

$$M_{\text{gap}} = \alpha\beta\Lambda \quad (3-15)$$

$$\Lambda = \frac{k_B(T_u + T_d)}{2\sqrt{2\pi}D^2\rho_{\text{gap}}} \quad (3-16)$$

接触热阻计算过程中用到的参数如表 3-6。

表 3-6 接触热阻计算参数

Table3-6 Calculation parameters of thermal resistance

名称	对应值
表面粗糙平均高度(σ_{asp} , μm)	1
表面粗糙平均斜率 (m_{asp})	0.4
接触压力 (p , N/m^2)	20000
微硬度 (H_c , MPa)	165
气体导热系数 (k_{gap} , $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$)	0.025
气体压力(p_{gas} , Pa)	1 atm
气体热调节参数(α)	1.7
气体流动参数(β)	1.7

3.2 结果分析

基于建立的模型和设定的边界条件，对 MCM-BGA 模型进行数值计算，进行了相应的网格独立性考核，并从流动换热和热应变两个方面对计算结果进行分析。本章主要给出相关的定性结论。

3.2.1 网格独立性考核

在分析封装系统的性能之前，需要先进行网格独立性考核。本文分别对网格数为 1,274,614、2,407,986、5,715,282、10,886,474、20,964,588 的五套网格进行了网格独立性考核，选取顶部微通道的进出口压差作为考察目标，其变化如图 3-2 所示，可以看出随着网格数的增加，压降的变化迅速。表 3-7 给出了相邻两套网格的相对偏差，取相对偏差为 0.5% 作为合理标准。经过计算发现当网格数取 10,886,474 和 20,964,588 时，压降的相对偏差已分别降至 0.49% 和 0.37%。虽然网格数取 20,964,588 时具有更好的计算精

度, 但会极大增大计算时间。考虑到在数值计算中需要提高计算效率等因素, 最终选取网格数为 10,886,474。

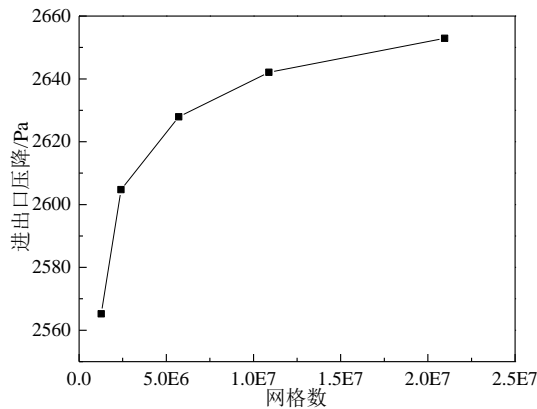


图 3-2 网格独立性考核

Fig3-2 Grid Independency test

表 3-7 相邻网格的相对偏差

Table3-7 Difference between consecutive grid

网格数	相对偏差
1,274,614 和 2,407,986	1.54%
2,407,986 和 5,715,282	0.89%
5,715,282 和 10,886,474	0.49%
10,886,474 和 20,964,588	0.37%

3.2.2 流动换热结果

由于在本文建立的封装模型中, 不仅微通道内设置了流体, 而且在热拓展面与基板形成的中间区域同样设置流体, 使得流体直接流经芯片表面, 对换热性能产生重要影响, 因此需要首先对中间区域的流动情况进行分析。图 3-3 给出了中间区域的速度水平截面图。可以看出流速分布差异明显, 沿流动方向芯片间的区域流速较高, 而在每一排芯片的后方存在低流速区域。对于芯片焊球间的区域, 整体流速相对较低且分布极为不均匀。其中对靠近入口一排的芯片, 由于受入口流动的影响, 焊球间的流速较高。而对于后两排芯片, 焊球间的速度明显降低, 尤其是在垂直于流动方向的焊球间的区域, 流速几乎为 0。这种速度分布不均, 会导致不同芯片的换热出现差异, 温度梯度增大, 对整体换热及热应力性能产生显著影响, 因此需要对模型截面上的温度分布进行单独分析。对本章后续的云图如果没有特殊说明, 均为在顶部微通道的入口速度为 1.0m/s 条件下的计算结果。

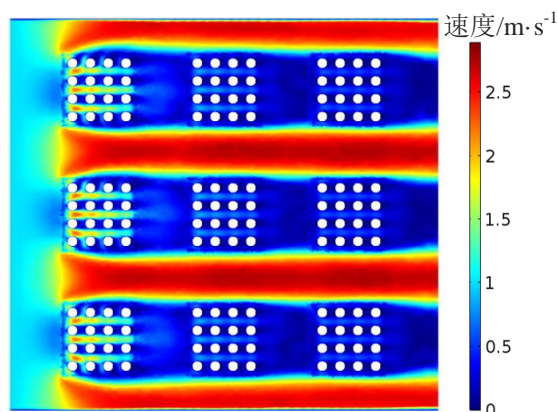


图 3-3 中间区域截面速度分布图

Fig3-3 Velocity magnitude distribution of middle area cross section

由于芯片为核心发热区，其温度分布反映了整体换热性能的强弱，因此需要单独对芯片的截面温度进行分析。选择截面为：在垂直于流动方向，选取每排芯片 x 方向中间截面作为目标（以入口所在的 x 截面为 $x=0$ 基准面，则选择 $x=2.5\text{mm}$ 、 6.0mm 和 9.5mm 三个截面），示意图如图 3-4 所示。图 3-5 给出了研究截面上的温度分布，通过对比可以明显看出，绝大部分的区域温度较低，而温度主要集中分布在芯片附近。并且中间流动区域的速度分布影响了芯片截面上的温度分布，其中靠近入口一排的芯片温度较低，芯片周围温度分布均匀。而最高温度出现在靠近出口一排的芯片上，最大值为 361.5K ，接近整个模型的最高温度 364.3K ，并且在芯片周围区域存在巨大的温度梯度。这种温度分布差异表明，在 MCM-BGA 内局部存在换热性能不均的问题，会对整体的换热产生不利的影响。需要指出的是，对于芯片周围区域的温度，底部周围区域明显高于顶部周围区域，温度从下方呈现扩散状分布。一个可能的原因是，由于在模型中间区域同样引入流体，并且该部分的流动换热性能高于顶部的微通道部分，因此热量更多的被经过中间区域的流体带走，导致芯片周围温度向下产生偏移。

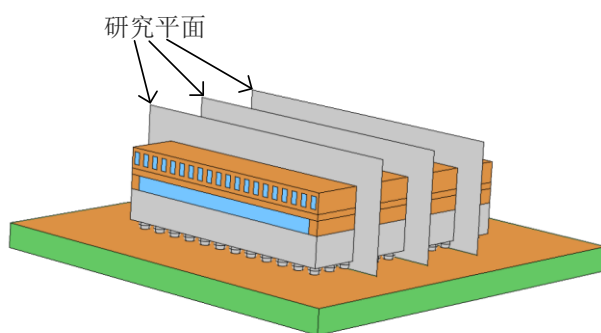


图 3-4 温度分布所研究的截面

Fig3-4 Corresponding x cross section of temperature distribution

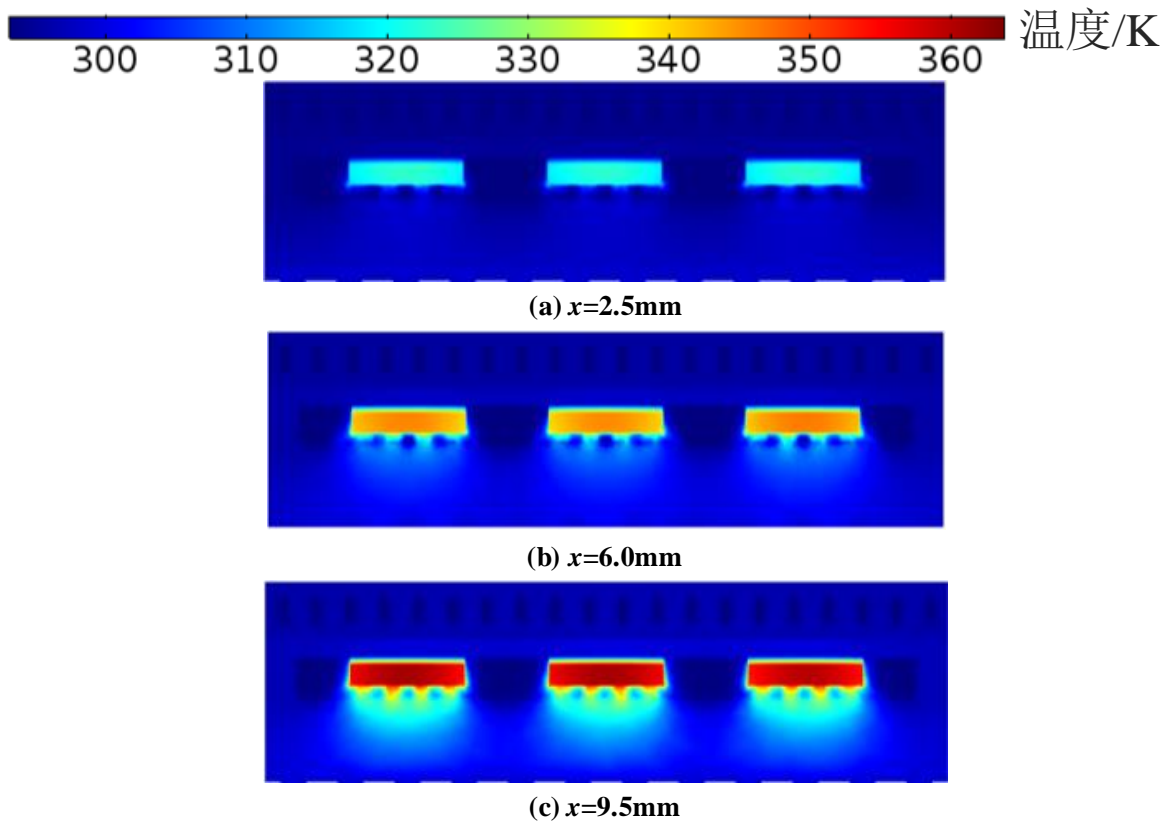


图 3-5 不同 x 截面的温度分布图

Fig3-5 Temperature distribution of different x cross section

根据速度分布，垂直于流动方向芯片之间的流速较小，可能造成局部温度上升。图 3-6 是芯片底面所在的水平面中心线上的温度变化曲线，可以看出三个曲线高峰对应中心线经过的三个芯片。并且芯片表面的温度显著高于周围区域，最高温度出现在靠近出口一排的芯片末端，这与图 3-4 的结果是吻合的。值得注意的是，由于靠近出口两排芯片的后方，流速较低而芯片温度显著上升，使温度曲线出现两个小的峰值区域，其中靠近出口的芯片后方的温度上升较高。

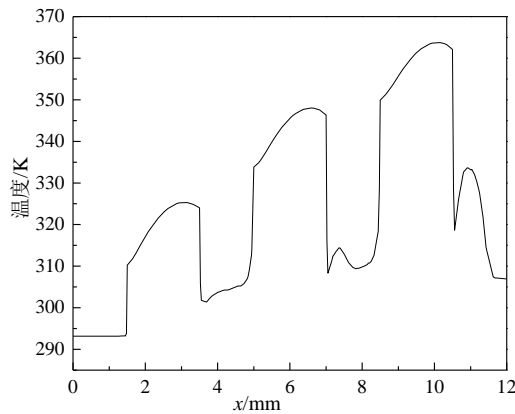


图 3-6 芯片底面所在的水平面中心线上温度变化

Fig3-6 Temperature variation of middle line on bottom surface of chips

焊球作为连接芯片和基板、基板和 PCB 的重要部件,对系统的稳定性有重要影响。因此除了对芯片的截面温度进行单独分析外,还需要分析焊球的水平截面温度分布。图 3-7 给出了芯片焊球的水平截面温度分布图。芯片焊球的温度分布与芯片的分布相似,整体分布极不均匀。对靠近出口的两排芯片的焊球,由于附近的流体流速较低,换热性能相比入口区域出现下降。尤其是在沿流动方向的高温焊球间,出现局部高温区域。整个芯片焊球的最高温度出现在最靠近出口的芯片焊球上,最高温度接近芯片的最高温度。图 3-8 给出了基板焊球的水平截面温度分布。相比芯片焊球,基板焊球的温度大幅降低,最大温差较小,整体温度分布较为均匀,最高温度出现在靠近出口一排芯片的中间所对应区域。

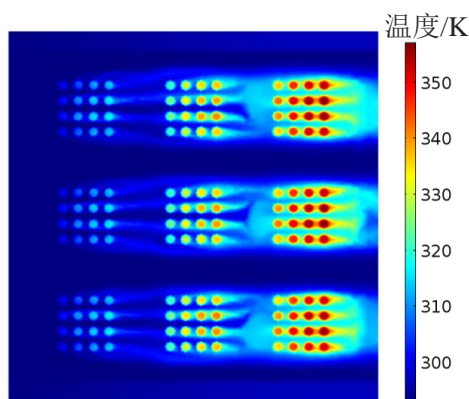


图 3-7 芯片焊球的水平截面温度分布

Fig3-7 Temperature distribution on horizontal cross section of chips solder balls

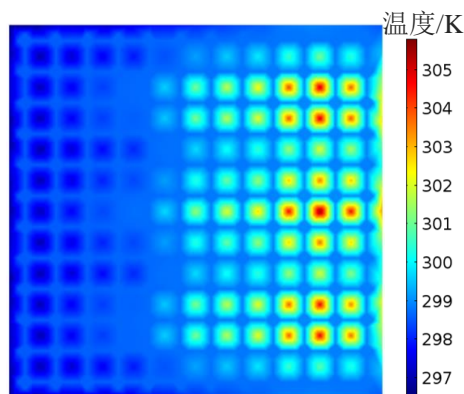


图 3-8 基板焊球的水平截面温度分布

Fig3-8 Temperature distribution on horizontal cross section of substrate solder balls

目前对芯片的研究认为,当芯片的最高温度不超过 95°C (约 368K) 时,芯片能够保持稳定的工作状态。图 3-9 给出了芯片最高温度的变化曲线,可以看出最高温度在稳定工作的要求范围内。随着顶部微通道流动的雷诺数增大,芯片最大温差下降了大约 4K ,下降幅度并不明显。这是由于在中间区域引入冷却流体的关系,顶部区域对于整体换热的影响比重下降。同时由于芯片部分的温度较高,如果单一芯片表面的温差过大,会严

重影响单个芯片的正常工作情况，进而对系统的性能和稳定性产生不利影响。因此需要单独考察芯片的最大温差，图 3-10 给出了对应的温差随顶部微通道流体雷诺数的变化曲线。可以看出对 MCM-BGA 模型，单个芯片最大温差在 53-57K，会极大影响芯片的失效率，并且说明芯片的局部温度分布并不均匀，MCM-BGA 模型的换热性能还有巨大的改善空间。

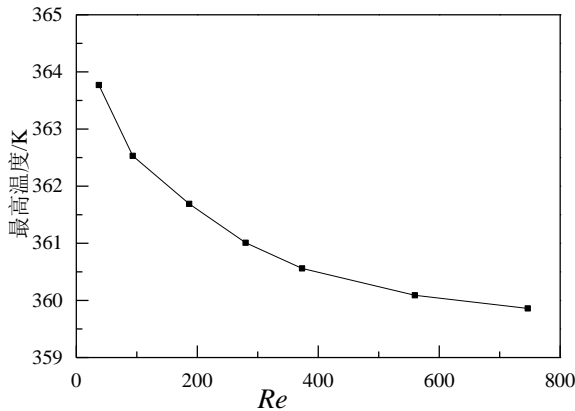


图 3-9 芯片最高温度变化图

Fig3-9 Variation of maximum temperature

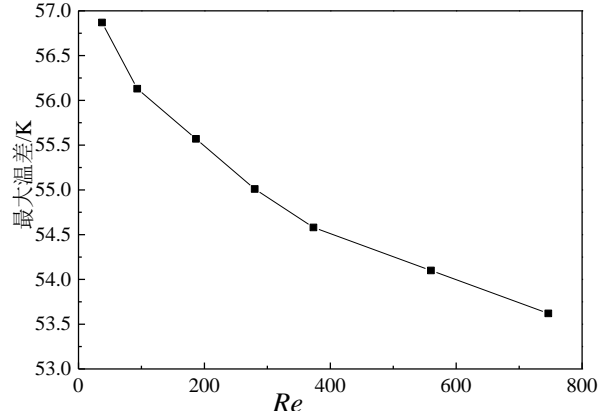


图 3-10 芯片最大温差变化图

Fig3-10 Variation of maximum temperature difference on chips

由于建立模型的过程中，根据实际要求在热拓展面与微通道热沉的接触面设定了接触热阻，对换热性能产生了一定的影响，因此将设定接触热阻的计算结果与不加入接触热阻的结果对比，图 3-11 给出了最高温度的对比曲线。可以看出，虽然最高温度随雷诺数的变化趋势基本没有改变，但设定接触热阻后，最高温度提升了约 4K，对整体换热性能起到了显著的影响。因此即使模型尺寸是毫米数量级，在模型建立与计算过程中，也不能忽略接触热阻的影响。

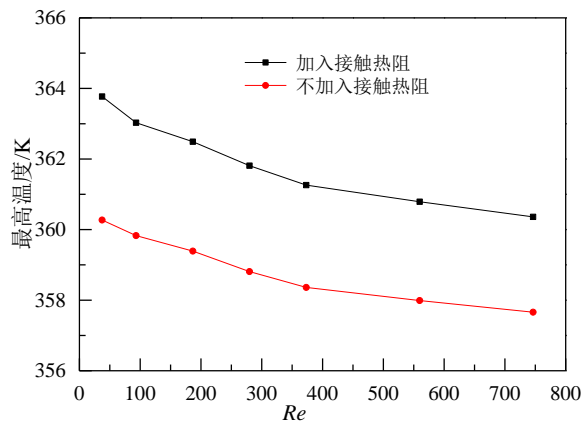


图 3-11 接触热阻的影响对比

Fig3-11 Comparison of thermal interface materials

3.2.3 热应力结果

在微尺度下，由于芯片的热流密度较大，导致整体温度和温差相对较高，在材料结构内部产生热应变。同时封装内部温度的分布不均，会造成局部热应力过大，导致结构出现较大变形，严重影响系统的正常工作。因此为了提高芯片的可靠性和稳定性，除了研究流动和换热性能外，还必须进行热-流-固耦合计算，探寻整体及局部热应变的分布，评估封装系统的性能。

根据之前对不同芯片截面上的温度分析，靠近出口一排芯片的温度远高于其它两排芯片，因此同样需要单独进行热应变分析。选取与图 3-4 相同的 x 截面，图 3-12 给出了截面上的热应变分布图。与对应界面上的温度分布不同，由于焊球的固定作用，芯片上的热应变都很小且分布较为均匀。而热应变集中分布在出口附近的芯片焊球和基板附近，其中最大热应变出现在对应的芯片焊球与基板连接的位置上。从这里可以看出，焊球和基板对保持整体封装的稳定起到了重要作用。经过计算，当顶部微通道入口速度为 1.0m/s 时，热应变最大值为 $0.0244\text{mm}\cdot\text{mm}^{-1}$ ，也就是也由于温度分布不均最大产生了超过 2.4% 的热应变，相比整个模型不超过 20mm 的尺寸，这个热应变值是相当大的。因此对于 MCM-BGA 封装，需要对基板和芯片焊球部分进行后续优化。

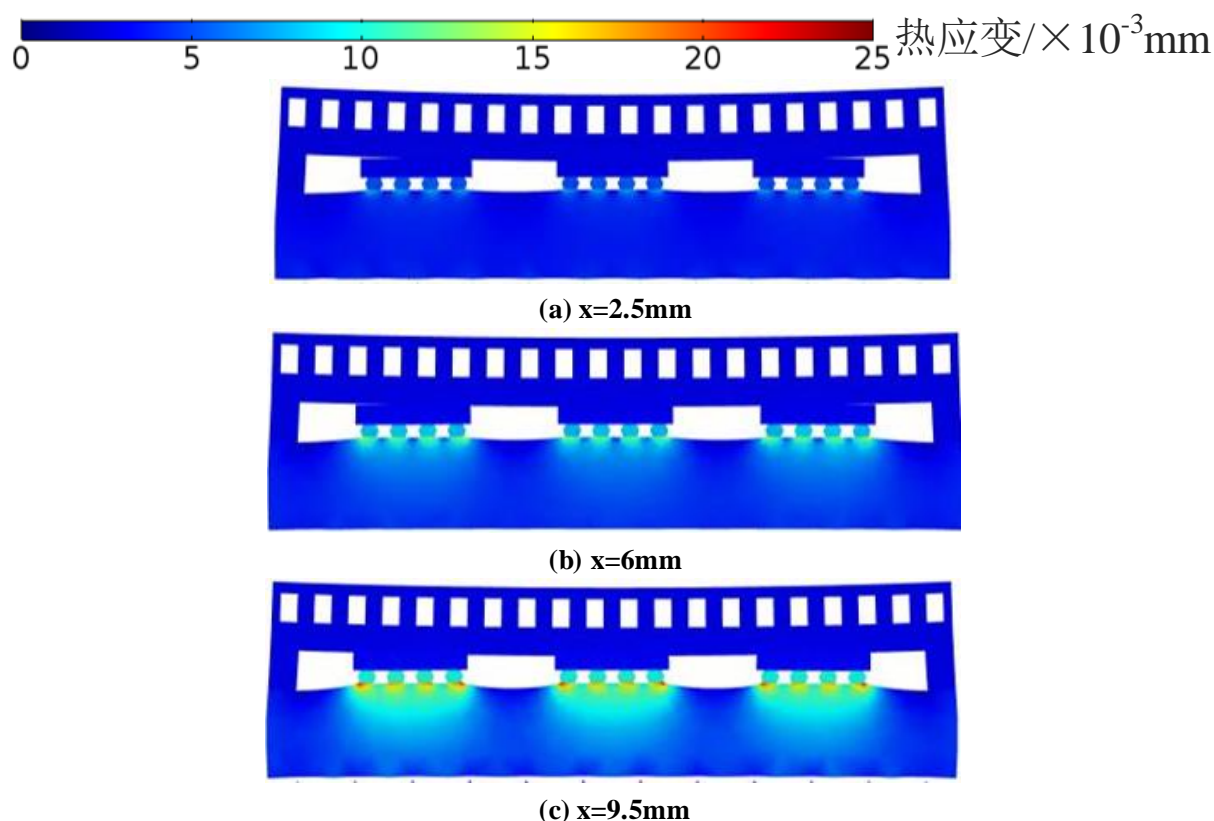


图 3-12 不同 x 截面的热应变分布图

Fig3-12 Thermal strain distribution of different x cross section

焊球在 MCM-BGA 封装中对保证系统的稳定性起到重要作用，因此焊球本身的热应变分布同样成为研究的重要目标。图 3-13 给出了芯片焊球的截面热应变分布。与对应的芯片截面温度分布相似，不同芯片焊球截面的热应变差异巨大，靠近入口一排芯片的焊球热应变较低，最大热应变出现在距离出口最近的一排芯片焊球表面。芯片焊球的最大热应变与模型的最大热应变相近。图 3-14 为基板焊球的截面热应变分布。相比芯片焊球，基板焊球的热应变显著降低，最大热应变出现在与最高温度对应的区域，其中两侧热应变略大于中间部分。值得注意的是，对芯片焊球和基板焊球的截面热应变分布，均在流动出口附近产生比入口附近大的形变。这是因为流动换热导致出口附近的温差增大，热应变明显大于入口区域，与前面对温度和热应变的分析是一致的。

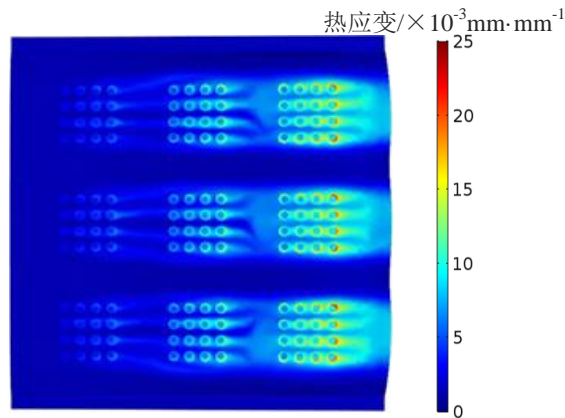


图 3-13 芯片焊球的截面热应变分布

Fig3-13 Thermal strain distribution on horizontal cross section of chips solder balls

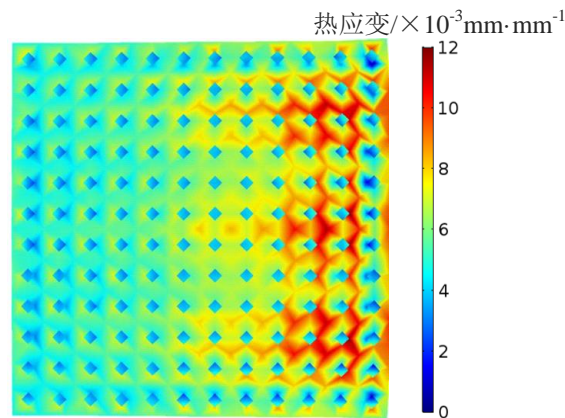


图 3-14 基板焊球的截面热应变分布

Fig3-14 Thermal strain distribution on horizontal cross section of substrate solder balls

芯片焊球对芯片起到了固定作用，因此其焊点处的热应力相对较大，图 3-15 给出了九个芯片的焊球焊点上的热应力分布图。可以看到整个封装模型的最大热应力出现在芯

片焊球的焊点上，并且其热应力显著高于芯片其它区域。不同焊点之间的热应力差异显著，沿着流动方向焊点热应力显著增大，最大热应力出现在最靠近出口的焊点上。

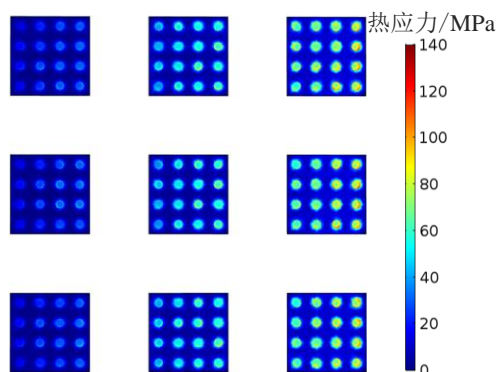


图 3-15 芯片与芯片焊球接触面上的热应力分布图

Fig3-15 Thermal stress distribution of contact surface between chips and solder balls

参考传统微通道热沉的研究结果，在出口截面存在热引力的“死点”，存在较大的热应力值，因此需要对“死点”的热应力分布进行单独分析。由于芯片处于中间流动区域，参照传统微通道热沉的分析结果，应力“死点”可能出现在出口面上热拓展面和基板处的四个点，示意图如图 3-16 所示。图 3-17 给出了四个研究点的热应力变化图，可以看出 2 号研究点的热应力最大，即出口面上热拓展面、基板和中间流动区域的交界点为热应力“死点”。同时四个研究点的热应力随雷诺数的变化较大。根据之前的结果，基板顶部与芯片焊球相连区域存在较大的热应变。因此需要单独分析基板顶部的热应力变化。对基板顶部，由于两侧的热应变略高于中间的热应变，因此沿着流动方向在基板顶部下方，选择经过芯片焊球底部的中心线，图 3-18 给出了对应的热应力变化曲线。可以看出曲线上的热应力相比最大热应力明显减小，但变化相对较大，说明基板的存在对控制热应力起到了关键作用。在芯片对应的区域热应力出现三个高峰区，每个高峰区又由于芯片焊球的存在形成几个小峰值，最大热应力出现在与最靠近出口的芯片焊球相连的区域。需要说明的是，在第二排和第三排芯片间，热应力出现明显上升并成一个小的峰值。这是因为在两排芯片之间的区域，流体流速较慢，换热性能显著下降导致温差增大，热应力相应的出现上升，与前面对温度和热应变的分析是一致的。将图 3-17 和 3-18 的热应力与图 3-15 比较，“死点”和基板顶部的最大热应力都远远小于焊点处的最大热应力。这说明对于 MCM-BGA 3D 封装模型，焊点处的热应力对整体结构的稳定起到主导作用。

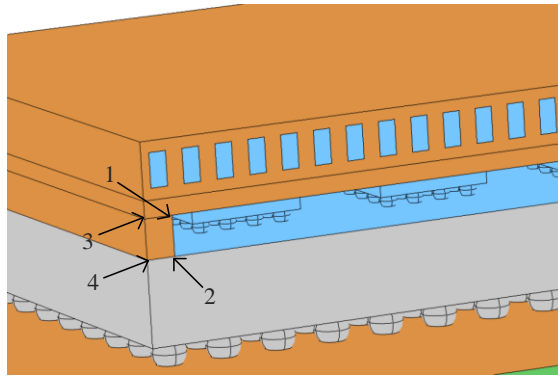


图 3-16 热应力研究的局部点

Fig3-16 Objective points for thermal stress research

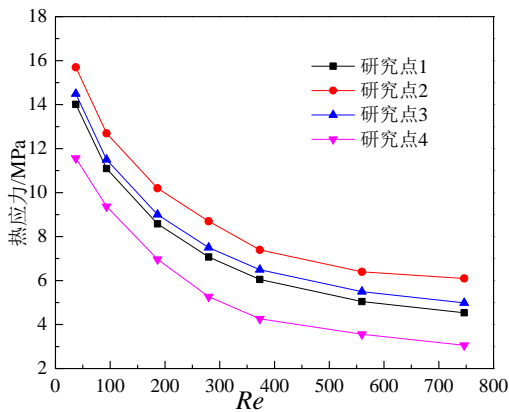


图 3-17 研究点的热应力变化曲线

Fig3-17 Thermal stress variation of objective points

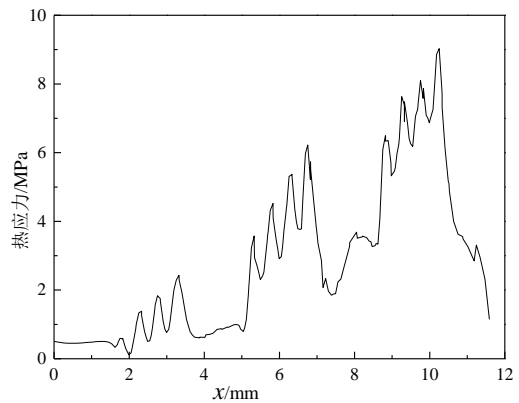


图 3-18 基板顶部一直线上热应力的变化曲线

Fig3-18 Thermal stress variation of one line on top surface of substrate

3.3 本章小结

本章结合 BGA 与 MCM 封装技术的特点，建立了 MCM-BGA 封装模型，对整体和局部的流动换热性能进行了探究，并在此基础上进行热-流-固耦合计算，分析热应变和热应力的分布，对整体性能进行评估。其结论如下所述：

(1) 在中间区域通入流体，导致芯片和焊球间的流速不均，芯片后方存在低流速区域，入口附近焊球间的速度显著高于其它焊球，这种流动特性对整体的换热性能产生了较大影响。

(2) 大部分区域温度较低，但局部温度区域分布不均，芯片和芯片焊球的温度显著高于其它区域，最高温度出现在靠近出口一排的芯片上，并且单个芯片的最大温差较大，接触热阻对计算产生了不可忽略的影响。

(3)热应变分布差异巨大,其中芯片焊球和基板附近的热应变显著高于其它区域,最大热应变出现在与靠近出口的芯片焊球连接的基板上;而最大热应力出现在芯片焊球的焊点处。

第四章 过热点均匀分布模型的参数研究及优化

根据第三章对流动换热与热应力的性能分析，虽然 MCM-BGA 模型具有不错的换热能力，但存在最高温度较高，局部温度分布不均，热应变和热应力较大的问题，需要进行进一步的优化。常用的优化方法是改变流体流动方式、改变相关的结构参数以及重新布置内部元件的分布。其中改变内部元件的排布，主要是改变芯片的相对位置，使其变为非均匀分布，对该部分的优化将在第五章中阐述。在本章中将选择相应的优化目标，通过改变内部流体的流动以及相关的结构参数，改进 MCM-BGA 模型存在的问题，进一步提升其换热性能及可靠性。优化采用的封装模型与图 3-1 所示相同。

对于优化研究需要选定合适的目标参数。本文研究的主要内容是封装模型内流动换热以及热应力的性能。而对于一个封装整体，需要其在保证结构稳定性的前提下，实现系统有效的热管理。因此综合考虑选择以下参数作为优化目标：

(1) 整体最高温度。对于封装模型的热管理，最重要的是保证整体温度分布相对均匀，避免最高温度过高导致电子元件失效。因此最高温度是衡量封装体换热性能的重要指标。

(2) 单个芯片上的最大温差。由于芯片的热流密度较大，芯片整体温度较高，如果单个芯片的最大温差较大，会导致芯片产生较大的热应力，同时增大周围焊球和基板的热应力，对系统稳定性产生不利的影响。因此控制单个芯片上的最大温差对保持系统的可靠性有重要作用。

(3) 整体最大热应力。封装结构在最大热应力处最容易出现结构弯曲甚至断裂的现象，导致封装的稳定性下降甚至出现失效问题。从这个角度来看，控制最大热应力对系统稳定有重要意义。

4.1 相对流动方向优化

由于本文建立的 MCM-BGA 模型除了在顶部的微通道中通入流体以外，在热拓展面和基板所形成的中间区域同样引入流体，因此模型存在上下两个流动区域。两个流动区域可视为一种双层流道结构，因此改变相对流动方向，对于换热性能有着比较大的影响。在原模型计算过程中，两个区域的流动方向为顺流，因此优化过程分别选择逆流和交错流进行对比，示意图如图 4-1 所示。

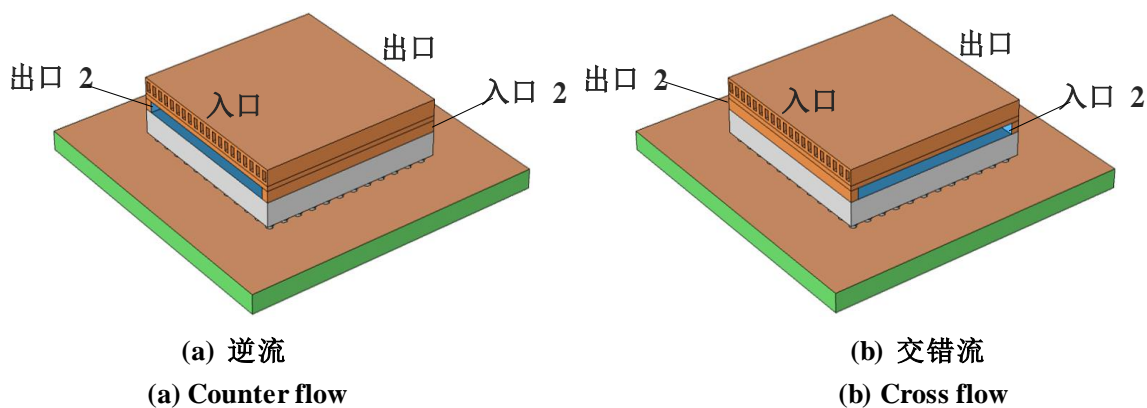
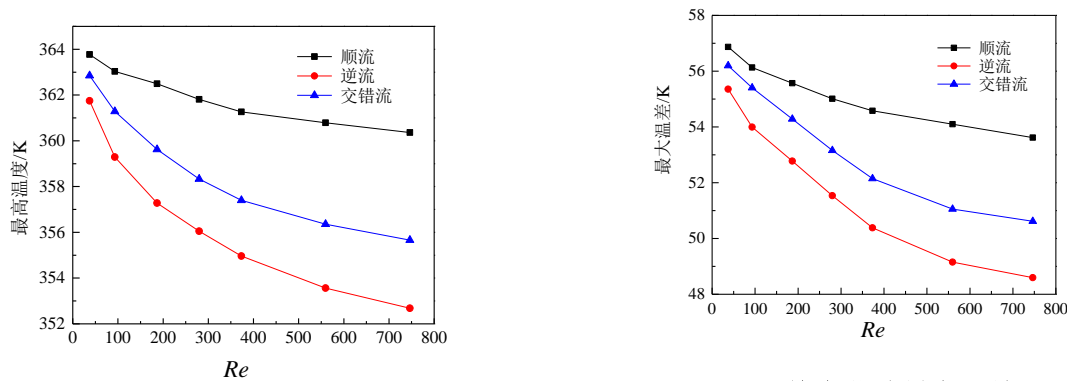


图 4-1 不同相对流动方向示意图

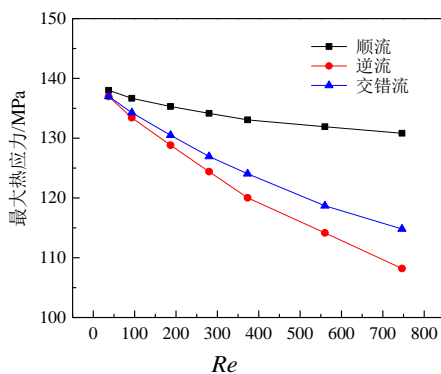
Fig4-1 Schematic figure of different relative flow direction

图 4-2 给出了流动方向为逆流时，模型整体最高温度、单个芯片最大温差以及整体最大热应力的变化曲线。对于温度目标参数，逆流和交错流的对应参数有相似的变化趋



(a) 最高温度
(a) The maximum temperature

(b) 单个芯片最大温差
(b) The maximum temperature difference of a single chip



(c) 最大热应力
(c) The maximum thermal stress

图 4-2 流动方向对性能的影响

Fig4-2 The effect of flow direction for total characteristic

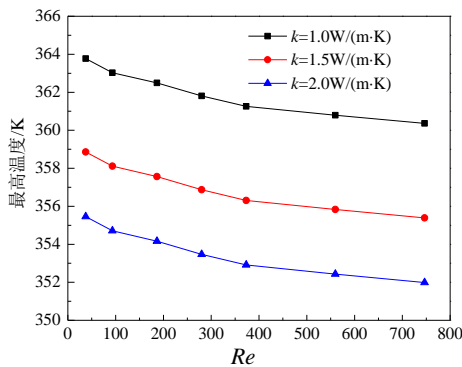
势，都显著降低了模型最高温度和单个芯片的最大温差。随着雷诺数的增大，温度下降趋势对应增大。对比逆流和交错流的曲线，逆流的换热性能优于交错流。对最大热应力，当雷诺数较低时，三种流动间几乎没有区别。但随着雷诺数的增大，逆流和交错流的最大热应力相比顺流明显降低，其中逆流的性能仍然要好于顺流。综合两个方面的性能，针对流体流动方向的优化，当两个流动区域为逆流时，整体换热和热应力性能有最好的改善。

4.2 参数研究

封装系统内存在众多元件，理论上每个元件的相关参数都会对整体性能产生影响。但在实际过程中收到客观的工艺水平和制造标准要求，许多参数无法改变。比如芯片制造受到材料和半导体工艺的限制，并且其尺寸显著影响热流密度的改变，因此在研究过程中不能通过改变其厚度优化整体性能。本文针对在整个封装系统的换热中起到关键作用的过程，选取相关参数进行优化。

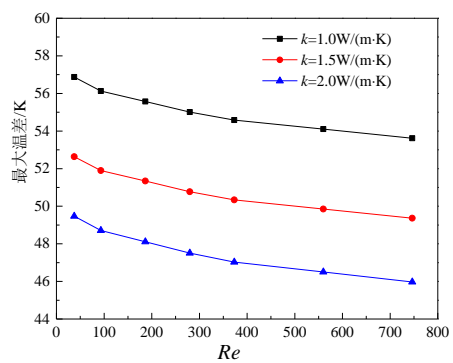
4.2.1 热介质材料的导热系数

在 MCM-BGA 封装中，热拓展面通过增大与微通道热沉的换热面积，起到强化换热的重要作用。而热介质材料作为连接芯片与热拓展面的重要部分，其换热系数的大小对整个封装系统的换热和热应力有重要影响。图 4-3 给出了在不同热介质材料的导热系数下，最高温度、芯片最大温差和最大热应力的变化曲线。从图中可以看出，改变热介质材料的导热系数，并没有改变相关参数的变化趋势。增大热介质材料的导热系数，能够同时大幅降低最高温度、单个芯片的最大温差以及整体最大热应力，整体换热及热应力性能显著改善。随着导热系数的增大，热介质材料对性能的优化程度有所降低。



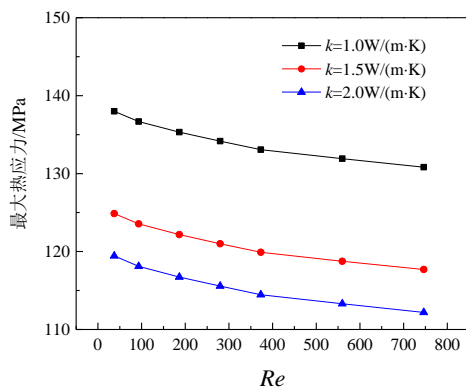
(a) 最高温度

(a) The maximum temperature



(b) 单个芯片最大温差

(b) The maximum temperature difference of a single chip



(c) 最大热应力

(c) The maximum thermal stress

图 4-3 热介质材料的导热系数对性能的影响

Fig4-3 The effect of thermal materials coefficient for total characteristic

从传热过程中热阻的角度进行分析。芯片产生的热量，一部分经中间区域的流体带走，剩下热量的首先通过热介质材料传递至热拓展面。因此该处的热阻在传热过程中占主导地位，而热阻与导热系数紧密相关。因此热介质材料的导热系数能够显著的影响整体换热性能。但采用具有较高导热系数的热介质材料，会显著提高相应的制造成本。目前广泛采用的热介质材料为导热脂，当其导热系数大于 $1.5 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 时，就被认为是高导热脂。虽然目前国际上有公司开发出了导热系数为 $3.89 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 的导热脂，但其生产成本巨大，仅在个别的迫切需要高导热性能领域进行尝试。目前在微电子封装中使用的热介质材料的导热系数相对较小。

4.2.2 热介质材料的厚度

根据热量传递过程，热介质材料在导热过程中具有主导地位，因此除导热系数以外，其厚度也一定程度的影响着整体的热性能。同时热介质材料的厚度也对中间区域的尺寸产生重要的影响，需要对其进行优化。图 4-4 给出了不同热介质材料厚度下，优化目标参数的变化曲线。其中原始模型的热介质材料厚度为 0.15 mm 。可以看出增大热介质材料导致最高温度和单一芯片最大温差小幅上升，而最大热应力出现下降，但变化幅度都比较小。这是因为虽然热介质材料在导热过程中处于主导地位，但是其本身的导热系数远远小于热拓展面等固体区域，增大热介质材料厚度增大了传热过程的热阻，不利于热传导的进行。而对于热应力，由于热介质材料的热膨胀系数相比与其它材料明显降低，因此产生的热应变和热应力相对较小。但由于热介质材料的厚度受到模型尺寸和制造成本的控制，在实际封装中热介质材料的厚度很小，对模型性能的影响不大。

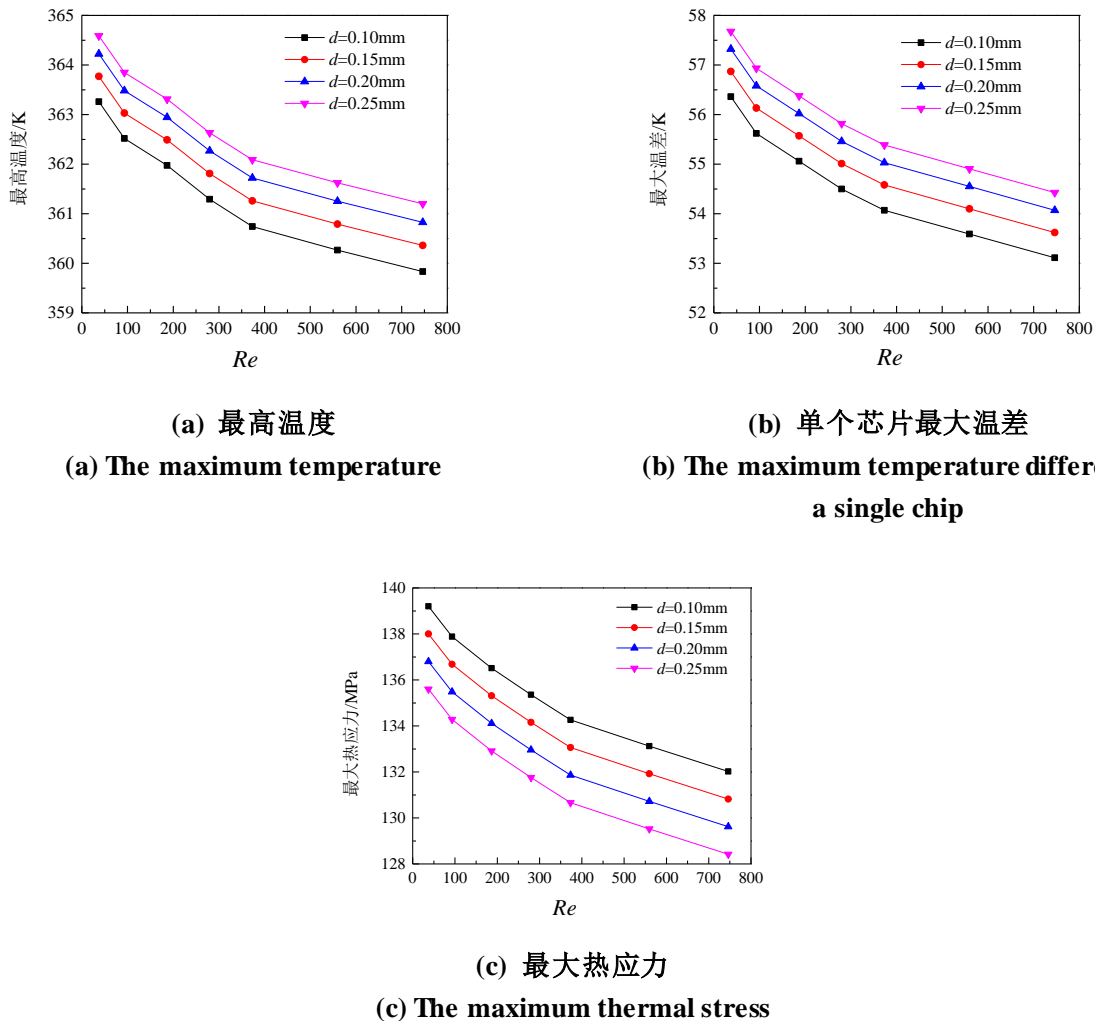


图 4-4 热介质材料厚度对整体性能的影响

Fig 4-4 The effect of thermal interface material thickness for total characteristic

4.2.3 热拓展面厚度

热拓展面作为 MCM-BGA 封装中重要的换热部件，对强化整体的换热起到重要作用，因此其厚度对整体换热性能有着巨大影响。同时由于本文选择铜作为热拓展面的材料，导致热拓展面整体重量较大，对优化热拓展面厚度的优化明显降低封装的整体重量。因此有必要对热拓展面的厚度进行优化研究。图 4-5 给出了不同热拓展面厚度下，最高温度、芯片最大温差和最大热应力的变化曲线。可以看到增大热拓展面的厚度，能够降低最高温度和单个芯片表面的最大温差，但是反而增大了封装整体的最大热应力。从换热和热应力两个角度分析，一方面由于铜的导热系数显著高于封装体的其它材料，增大热拓展面的厚度能够增强导热性能，导致温度梯度增大。但是另一方面，增大温度梯度会导致热应变增大，同时由于封装模型较小，导致最大热应力出现增大。考虑到热拓展面显著影响整体的重量，因此热拓展面的厚度取值不宜过大。

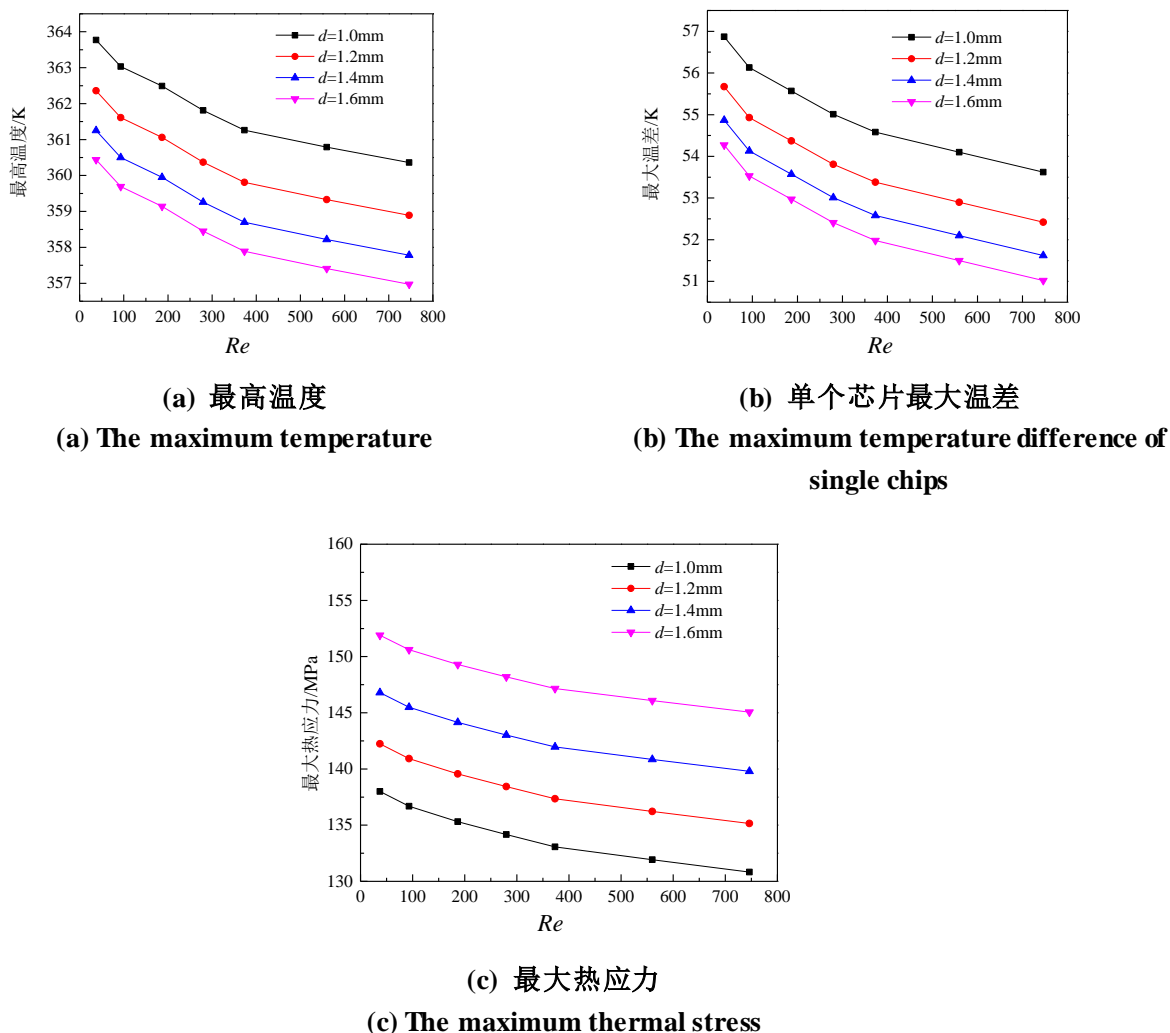


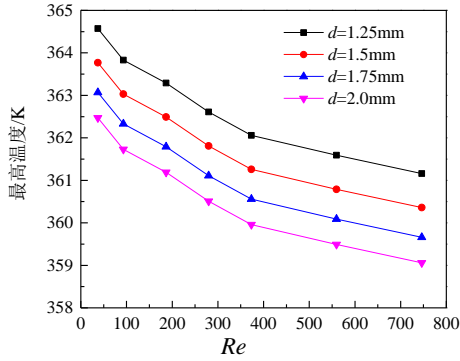
图 4-5 热拓展面厚度对整体性能的影响

Fig4-5 The effect of heat spreader thickness for total characteristic

4.2.4 基板厚度

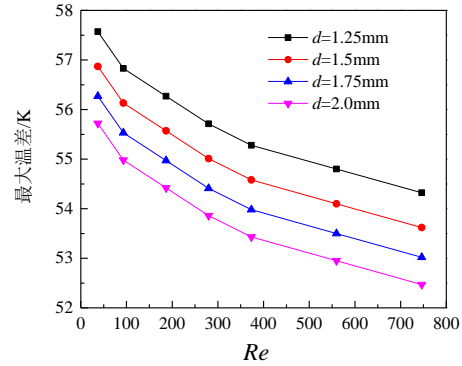
在 MCM-BGA 封装中，芯片和 PCB 通过对应的焊球与基板相连。基板通过维持焊点的稳定，保证封装整体在正常工作时的可靠性。同时根据之前的研究结果，热应力的最大值出现在与靠近出口的芯片焊球连接的基板上，需要对基板的参数进行优化。同时基板也显著影响着封装整体的重量。因此有必要讨论基板厚度对性能的影响。图 4-6 给出了不同基板厚度下，最高温度、芯片最大温差和最大热应力的变化曲线，其中初始基板厚度为 1.5mm。可以很明显的看到，增大基板厚度能够小幅降低最高温度、单个芯片的最大温差，同时明显降低整体的最大热应力。将改变基板厚度的优化结果与改变热拓展面厚度对比，可以看出改变基板厚度对温度产生的影响小于热拓展面，但对最大热应力的改变程度与热拓展面相近。这说明虽然改变基板尺寸对模型整体性能的影响小于热拓展面，但由于其对封装体的稳定起到关键作用，在热应力的优化方面具有不可忽视的

作用。由于基板的体积相对较大，增大基板厚度一定程度上增加了整体的重量，因此在选择基板尺寸时需要结合实际的制造水平及需求决定。



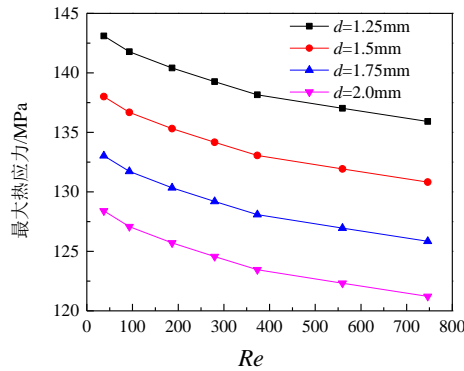
(a) 最高温度

(a) The maximum temperature



(b) 单个芯片最大温差

(b) The maximum temperature difference of single chips



(c) 最大热应力

(c) The maximum thermal stress

图 4-6 基板厚度对性能的影响

4.3 多目标优化结果

MCM-BGA 模型的结构参数间存在着耦合关系，对流动换热和热应力性能起到共同作用。同时由于制造工艺、成本等因素的限制，封装必须要考虑到整体的重量，因此除了单独分析参数影响结果外，还需要利用相关优化算法进行多目标优化。

4.3.1 Nelder-mead 方法介绍

Nelder-mead 算法^[60,61]是一种常用的直接搜索方法，是对传统的单纯型搜索方法的改进，用于求解非线性问题，具有广泛的适用性。Nelder-mead 算法的基本思路为：对于

N 个变量的函数最小化问题, 采用反射、压缩、扩张等操作, 通过比较单纯型的 $N+1$ 个顶点的目标值, 用新的点替换目标函数值最大的顶点, 通过迭代不断更新单纯型, 最终单纯型将逼近问题的最优解。其具体过程描述如下:

(1) 初始化。设置初始的单纯型 $Y_0^0 = \{y_0^0, y_0^1, \dots, y_0^n\}$, 计算每个点对应的函数值 f , 设定后续计算用到的参数范围:

$$0 < \gamma^s < 1, -1 < \delta^{ic} < 0 < \delta^{oc} < \delta^r < \delta^e \quad (4-1)$$

(2) 排序。对 $n+1$ 个点排序, 形成新的单纯型 $Y^0 = \{y^0, y^1, \dots, y^n\}$, 满足要求:

$$f^0 = f(y^0) \leq f^1 = f(y^1) \leq \dots \leq f^n = f(y^n) \quad (4-2)$$

(3) 反射。计算除去顶点 y^n 以外的单纯型的中心 $y^c = \sum_{i=0}^{n-1} y^i / n$, 定义对 y^n 的反射为:

$$y^r = y^c + \delta^r(y^c - y^n) \quad (4-3)$$

计算对应的函数值 $f^r = f(y^r)$, 如果 $f^0 \leq f^r < f^{n-1}$, 则用反射点 y^r 代替 y^n 进行下一次迭代: $Y_{k+1} = \{y^0, y^1, \dots, y^{n-1}, y^r\}$

(4) 扩张。如果 $f^r < f^0$, 则定义扩张点:

$$y^e = y^c + \delta^e(y^c - y^n) \quad (4-4)$$

计算对应的函数值 $f^e = f(y^e)$, 如果 $f^e \leq f^r$, 用扩张点 y^e 代替 y^n 进行下一次迭代:

$Y_{k+1} = \{y^0, y^1, \dots, y^{n-1}, y^e\}$; 否则用反射点 y^r 代替 y^n 进行下一次迭代:

$Y_{k+1} = \{y^0, y^1, \dots, y^{n-1}, y^r\}$ 。

(5) 收缩。如果 $f^r \geq f^{n-1}$, 则定义 y^r 和 y^n 间的收缩点。收缩分为向外收缩和向内收缩。如果, 定义向外收缩:

$$y^{oc} = y^c + \delta^{oc}(y^c - y^n) \quad (4-5)$$

计算对应的函数值 $f^{oc} = f(y^{oc})$ 。如果 $f^{oc} \leq f^r$, 用收缩点 y^{oc} 代替 y^n 进行下一次迭代:

$Y_{k+1} = \{y^0, y^1, \dots, y^{n-1}, y^{oc}\}$, 否则进入步骤 (6)。

如果 $f^r \geq f^n$, 定义向内收缩:

$$y^{ic} = y^c + \delta^{ic}(y^c - y^n) \quad (4-6)$$

计算对应的函数值 $f^{ic} = f(y^{ic})$ 。如果 $f^{ic} \leq f^n$ ，用收缩点 y^{ic} 代替 y^n 进行下一次迭代：

$Y_{k+1} = \{y^0, y^1, \dots, y^{n-1}, y^{ic}\}$ ，否则进入步骤（6）。

（6）压缩。对每个顶点进行如下操作：

$$y^i = y^0 + \gamma^s(y^i - y^0), i = 1, \dots, n \quad (4-7)$$

代替对应的顶点并进行下一次迭代： $Y_{k+1} = \{y^0 + \gamma^s(y^i - y^0), i = 1, \dots, n\}$ 。

4.3.2 多目标优化结果

根据前面的介绍，温度和热应力是反映换热性能和热应力性能最重要的指标。由于需要考虑重量的影响，因此对所有固体区域，选择加权平均温度和加权热应力，即单位质量下的平均温度和平均热应力作为目标函数，表达式如下：

$$\bar{T} = \frac{\sum T_i \cdot m_i}{\sum m_i} \quad (4-1)$$

$$\bar{\sigma} = \frac{\sum \sigma_i \cdot m_i}{\sum m_i} \quad (4-2)$$

对 MCM-BGA 3D 封装，各部分尺寸收到诸多因素的限制，因此约束条件不能随意给定。本节研究的约束条件为：总功率 90W，微通道热沉入口速度为 1.0m/s，中间流动区域的入口速度为 1.0m/s，模型整体高度控制在 5-5.5mm 之间。表 4-1 给出了计算过程中，优化变量的对应初值及变化范围。经过迭代得到了最佳性能下的对应参数，如表 4-2 所示。

表 4-1 多目标优化计算设定

Table4-1 Setting of multi-objectives optimization

参数名称	初始值/mm	最小边界	最大边界
热介质材料厚度	0.15	0.1	0.3
热拓展面厚度	1.0	1.0	2.0
基板厚度	1.5	1.0	2.0

表 4-2 最佳性能对应的参数

Table4-2 Corresponding parameters under best performance

热介质材料厚度 /mm	热拓展面厚度 /mm	基板厚度/mm	加权平均温度/K	加权平均热应力 /MPa
0.15	1.2	1.5	297.85	2.527

将优化后的结果与原始模型进行对比,图 4-7 给出了芯片底面所在平面的温度分布,可以看出虽然优化没有改变截面的温度分布规律,但是整体温度有明显降低,靠近出口的芯片附近温度显著下降。图 4-8 为热应力“死点”处的热应力变化曲线,可以看出“死点”处的热应力有明显降低。表 4-3 给出了微通道入口速度为 1m/s 时,整体最高温度、单个芯片最大温差和整体最大热应力的数据对比。可以看出换热和热应力性能都得到了优化,其中热应力的优化效果更为明显,说明结构参数对热应力起主导作用。

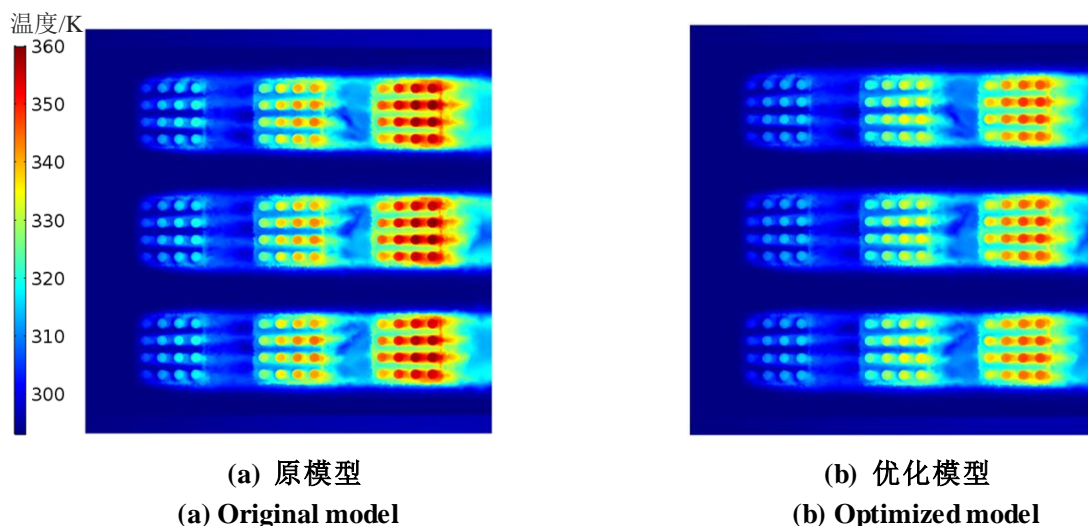


图 4-7 芯片底面所在截面温度分布

Fig4-7 Temperature distribution of bottom surface cross section on chips

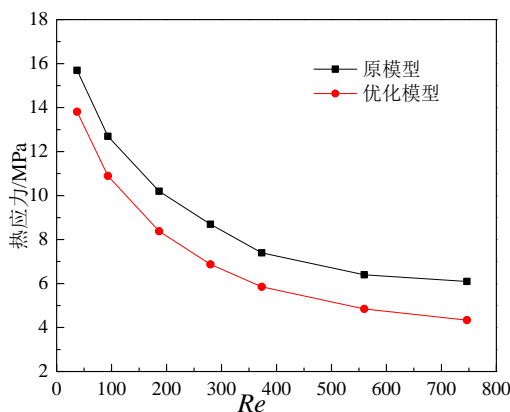


图 4-8 靠近出口一排芯片的热应变分布

Fig4-8 Thermal strain distribution of chips near the outlet

表 4-3 相关优化参数对比

Table4-3 Relative optimized parameters comparison

	最高温度/K	单个芯片最大温差/K	最大热应力
原模型	361.3	54.6	133.1
优化模型	356.8	50.2	122.5

4.4 本章小结

本章针对 MCM-BGA 封装模型中存在的局部换热和热应力分布不均的问题，从流体流动方向和封装体结构参数两个方面进行了优化研究，通过对比得到了最佳参数，得相关结论如下：

(1) 在顺流的基础上，改变相对流动方向能够明显改进整体的流动换热及热应力性能，并且随着雷诺数的增大，性能改进的幅度逐渐增大。逆流相比交错流有更好地优化效果。

(2) 增大热介质材料的导热系数、热拓展面厚度和基板厚度都会降低整体最高温度和单个芯片的最大温差，起到优化换热性能的作用。但是增加热拓展面厚度和基板厚度，会导致整体的最大热应力相应增大，同时增加封装整体的重量。需要结合实际需要选择对应的参数。

(3) 采用多目标优化方法，选取加权平均温度和加权平均热应力作为目标，得到最佳性能下的结构参数，其中热介质材料厚度、热拓展面厚度和基板厚度分别为 0.15mm，1.2mm 和 1.5mm。

第五章 过热点非均匀分布的封装性能研究

前两章针对 MCM-BGA 模型的封装性能研究及优化,都是在过热点均匀分布的基础上进行的。但在实际的电子器件中,芯片(过热点)通常不是均匀分布的。同时由于流体的流动特性,可以通过将芯片不均匀分布,缓解均匀分布模型中存在的温度不均等换热问题,提高整体的换热及热应力性能。

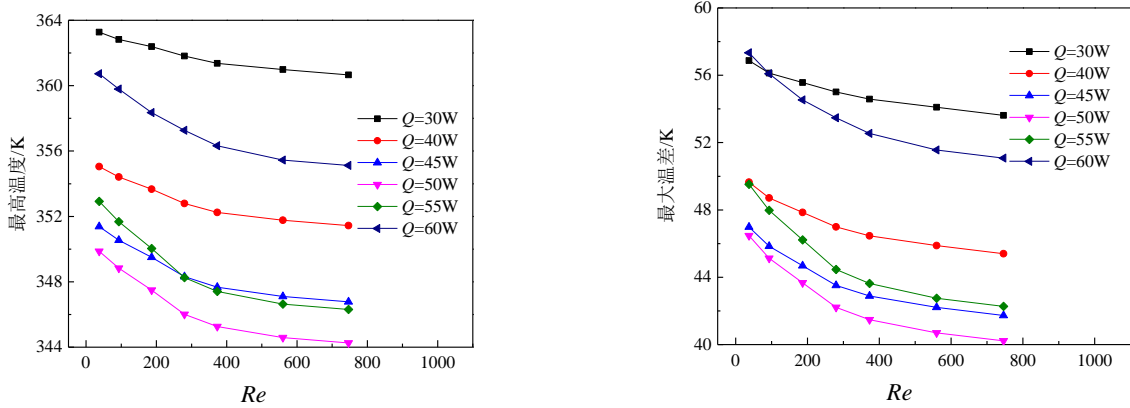
已经有学者对微通道热沉的非均匀过热点问题进行了研究,例如 Ansari 和 Kim^[42]采用拉丁超立方体抽样的方法,生成大小和热流密度随的热点区域,对换热性能进行了研究。但是在实际封装模型中,需要考虑到电子元件的排布问题,尤其是对芯片这种高功率元件,不能影响其正常工作性能和稳定性。考虑到对封装边界的影响,在封装体内芯片不会排布在极端区域。因此对封装中的过热点非均匀分布问题,难以采用数学上的随机生成方法。

过热点的不均匀分布,包括功率即热流密度上的不均匀和几何分布上的不均匀。本章从这两个方面针对过热点均匀分布中出现的问题,进一步优化流动换热和热应力性能,探寻最佳的排布方式。研究的基础模型与图 3-1 所示相同,优化目标仍然选取整体最高温度、单一最大芯片温差以及整体最大热应力。

5.1 热流密度的非均匀分布

根据之前对流动性能的分析,在中间区域引入流体后,对靠近入口一排的芯片和芯片焊球,具有良好的流动换热性能。因此在维持芯片总功率的前提下,对芯片的功率采取梯级分布,增大靠近入口一排芯片上的功率,以降低整体的最高温度并改善温度分布不均的现象。但又需要将功率控制在合理范围内,避免热流密度过大导致换热恶化。图 5-1 给出了在不同靠近入口一排芯片的功率下,整体最高温度、单个芯片最大温差以及最大热应力的分布曲线。从两个温度曲线图中可以看出,随着靠近入口一排的芯片功率上升,整体最高温度和单个芯片的最大温差先下降后上升。在功率为 50W 时,最高温度和最大温差达到最小值。值得注意的是,由于芯片功率相对集中,在低雷诺数的情况下,换热性能较以前有所降低。对于最大热应力,当功率为 50W 时达到最小值,但相比功率为 45W 时,优化效果并不明显。图 5-2 给出了当靠近入口一排的芯片功率为 50W 时,中间截面的温度分布。相比之前建立的模型,在芯片功率梯级分布后,虽然最高温度依然出现在靠近出口一排的芯片上,但是最高温度显著下降,并且前两排芯片的温度

有所上升，温度分布更加均匀。综上所述，当靠近入口一排芯片的功率设置为 50W 时，封装模型有最好的性能。

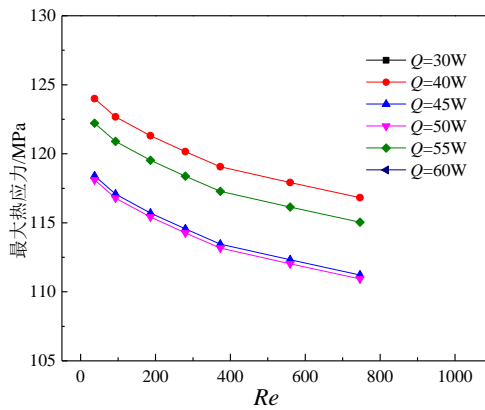


(a) 最高温度

(a) The maximum temperature

(b) 单个芯片最大温差

(b) The maximum temperature difference of a single chip



(c) 最大热应力

(c) The maximum thermal stress

图 5-1 靠近入口一排的芯片热流密度对整体性能的影响

Fig5-1 The effect of power on chips near the inlet for total characteristic

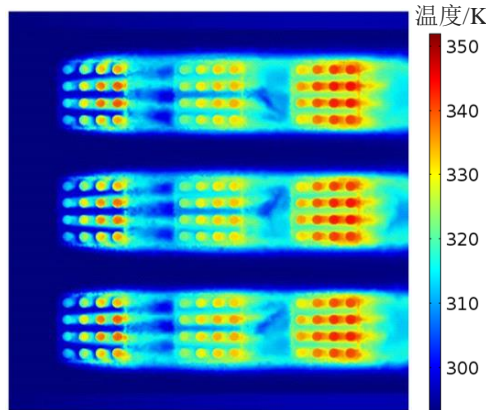


图 5-2 中间区域的温度截面图

Fig5-2 Temperature distribution of middle area cross section

5.2 几何上的非均匀分布

当过热点呈几何均匀分布时，对中间区域的流体流动，后排的芯片及芯片焊球受到前排的阻挡，流动性能产生下降，造成出口一排芯片的温度和温差过大，整体热应力分布不均。在芯片的发展过程中，存在通过改变内部元件的相对排布进一步优化芯片性能的案例，因此考虑通过改变前后的相对排布，使流体尽可能的流经芯片和芯片焊球的表面，进一步改善流动换热效果。

5.2.1 平移处理

以中间一排芯片作为基准，对靠近入口和出口的两排芯片在垂直于流动方向上进行平移，并且这两排的平移方向相反，如图 5-3 所示。

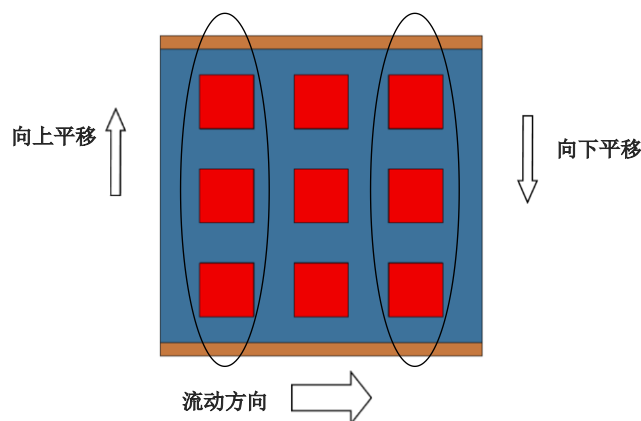


图 5-3 过热点平移处理示意图

Fig5-3 Schematic diagram of hotspots translation

选择平移距离为 0.25mm、0.5mm 和 0.75mm，图 5-4 给出了不同平移距离下中间区域的速度截面图可以看出随着平移距离的增大，中间区域的最大速度上升，沿流动方向两排芯片之间的低流速区域有所减小，后两排芯片的焊球间流动出现明显改善。中间区域对应的截面温度分布如图 5-5 所示。可以看出随着流动性能的改善，后两排芯片及其焊球的温度明显降低，流动换热性能显著增强。其中当平移距离为 0.75mm 时，三排芯片的温度分布相对均匀，温度梯度明显下降。整体最高温度、单个芯片的最大温差和整体最大热应力的变化如图 5-6。可以看到通过平移处理，最高温度降低接近 20K，最大温差下降超过 15K，而最大热应力最低降幅超过 40%。并且随着平移距离的增加，目标参数进一步降低，整体性能持续上升。其中当平移距离为 0.75mm 时，最大热应力降至 48MPa，极大缓解了最大热应力过大的问题，封装整体具有优良的性能。

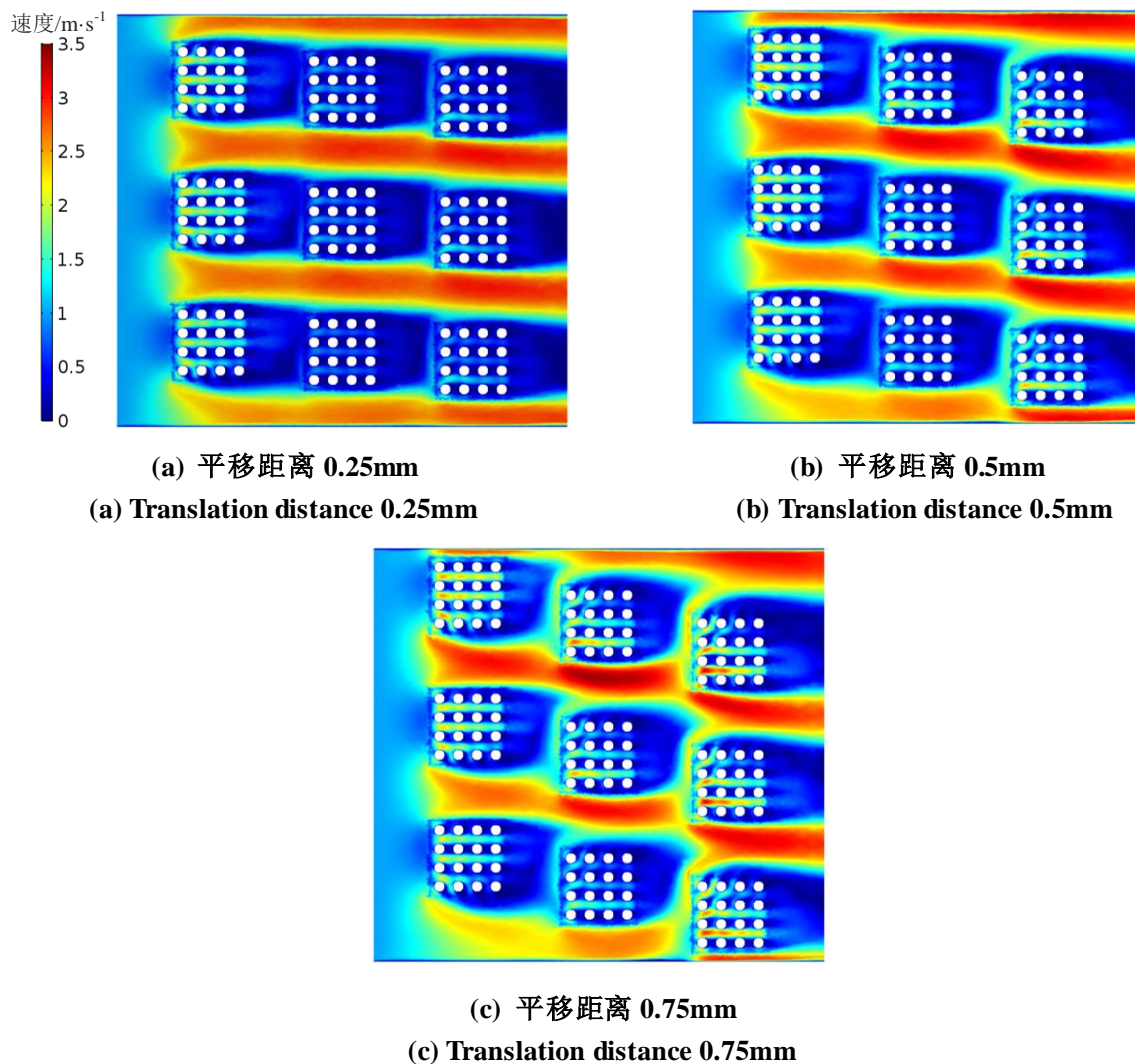
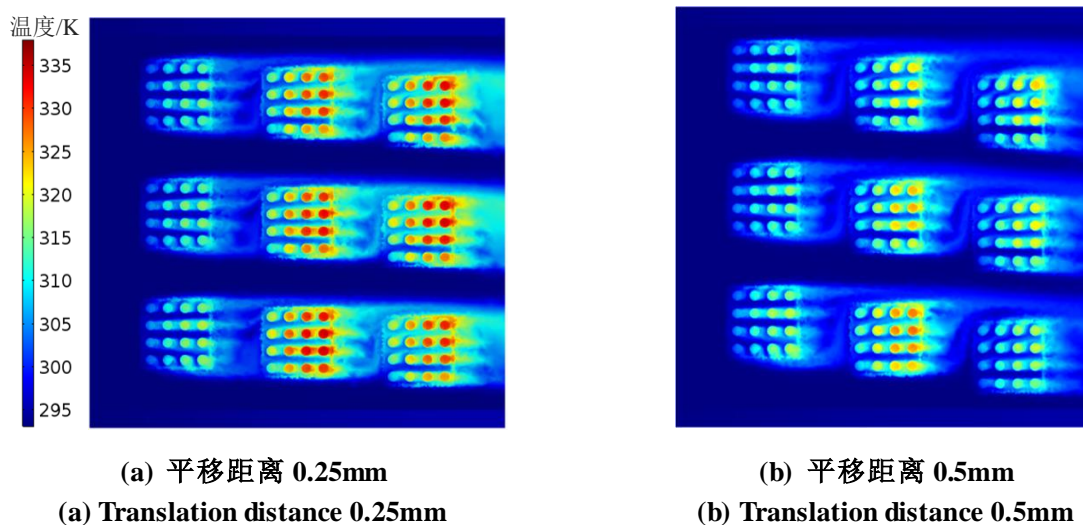
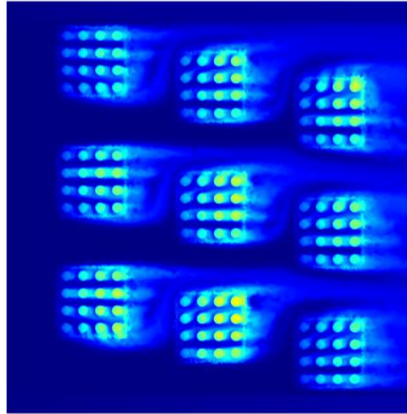


图 5-4 不同平移距离的中间区域速度截面图

Fig5-4 Velocity distribution of cross section on middle area under different translation distance



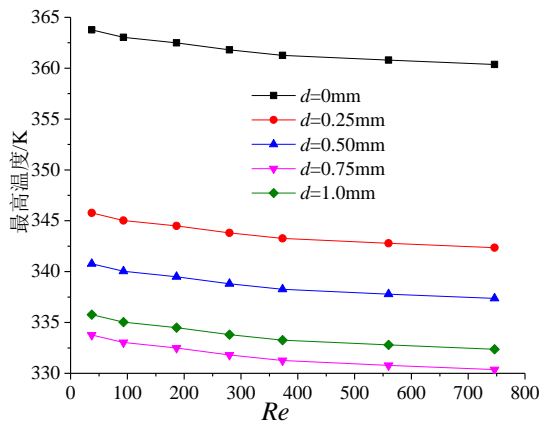


(c) 平移距离 0.75mm

(c) Translation distance 0.75mm

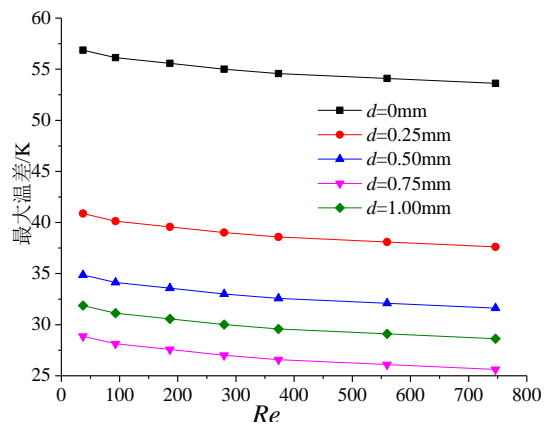
图 5-5 不同平移距离的中间区域温度截面图

Fig5-5 Temperature distribution of middle area cross section under different translation distance



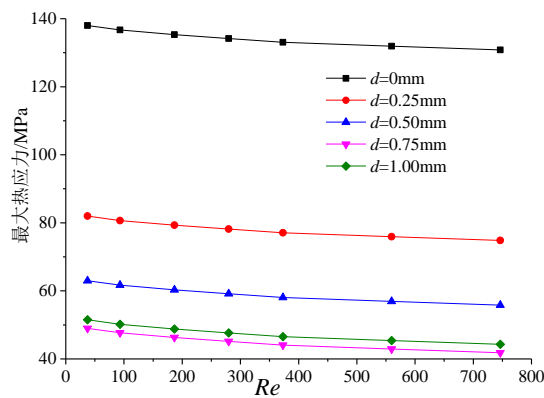
(a) 最高温度

(a) The maximum temperature



(b) 单个芯片最大温差

(b) The maximum temperature difference of a single chip



(c) 最大热应力

(c) The maximum thermal stress

图 5-6 平移距离对整体性能的影响

Fig 5-6 The effect of translation distance for total characteristic

5.2.2 旋转处理

除了对芯片和焊球进行平移，还可以通过旋转的方式改变相对位置分布，通过增大来流方向的换热面积改善性能，示意图如图 5-7 所示。但由于尺寸及排布的限制，旋转角度范围为 0° - 15° 。

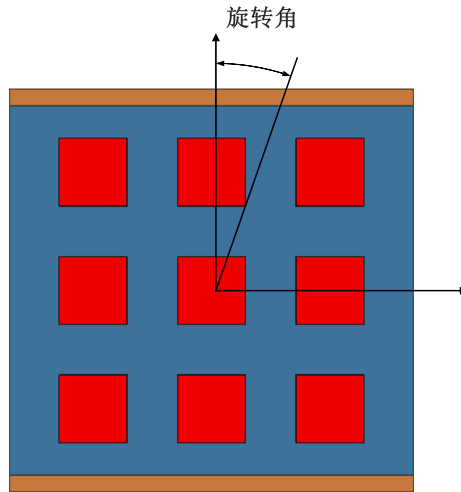


图 5-7 过热点旋转处理示意图

Fig 5-7 Schematic diagram of hotspots translation

研究选择除了中心以外的八个芯片和对应焊球为旋转目标，围绕中心点进行不同角度的旋转。由于改变了部分焊球的排布方向，必然对中间区域的流动产生了影响，图 5-8 给出了对应旋转角为 10° 的速度截面分布图。可以看到相比对芯片和焊球的平移，旋转情况下的最大速度有所提升，中间区域以及出口附近的芯片焊球间的流动情况进一步改善。但是在每一排芯片的后方区域，平均速度仍然较低。图 5-9 给出了对应的最高温度、单个芯片的最大温差和最大热应力的变化曲线。可以看到，对芯片和芯片焊球作旋转处理可以显著降低对应的优化目标参数。并且随着旋转角的增加，优化目标参数进一步

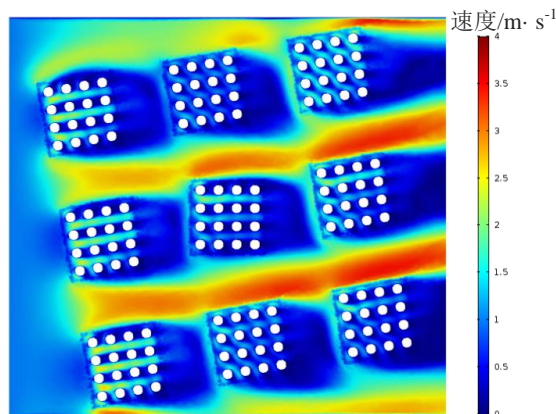
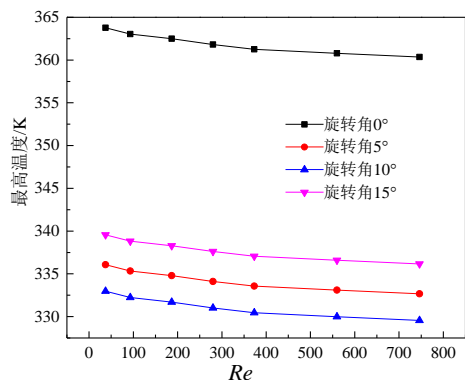


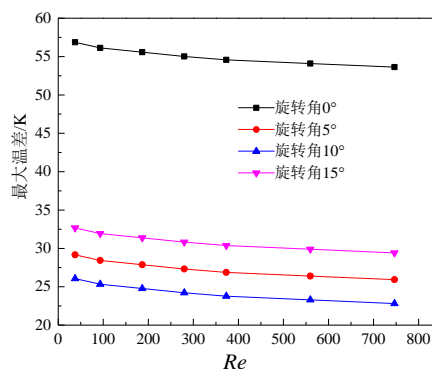
图 5-7 不同旋转角对应的中间区域速度截面图

Fig 5-7 Velocity distribution of cross section on middle area under different rotate angle



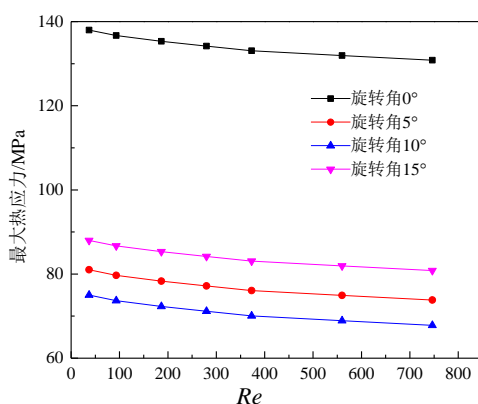
(a) 最高温度

(a) The maximum temperature



(b) 单个芯片最大温差

(b) The maximum temperature difference of a single chip



(c) 最大热应力

(c) The maximum thermal stress

图 5-8 平移距离对整体性能的影响

Fig 5-8 The effect of translation distance for total characteristic

步降低。当旋转角为 10° ，参数达到最小值。但当旋转角超过 10° 后，温度和热应力反而出现上升趋势。综合考虑两个方面的性能，当旋转角为 10° 时，封装模型有最好的性能。此时得到的最佳性能参数大于平移处理得到的最佳参数。对于实际的封装体，内部元件众多，结构极为复杂，采用旋转排布会严重影响内部空间的使用，增大制造加工难度。因此在电子元件中较少采取旋转排布的方式。

5.3 本章小结

本章针对非均匀分布的过热点问题，从热流密度非均匀和几何排布非均匀两个方面，对 MCM-BGA 的性能进行了优化研究。从热流密度非均匀的角度，对不同的芯片采取梯级功率分布，增大靠近入口一排的芯片功率，能够一定程度强化换热性能。改变功率分布对温度的影响明显大于对热应力的影响，当功率为 50W 时封装模型具有最佳的性能。对于几何排布上的不均匀，对芯片和焊球在垂直于流动方向平移和绕中心旋转都能

同时改善换热和热引力性能，其中通过平移的优化能够得到更低的温度和最大热应力。当平移距离为 0.75mm 或旋转角为 10°时，模型具有最佳性能。

结论与展望

结论

本文以微电子设备微通道冷却为背景，分别对芯片单过热点及 MCM-BGA 多过热点所导致能量分布不均、局部热应力集中等问题进行了数值分析。并对 MCM-BGA 3D 封装结构的热管理系统进行了结构优化分析

主要工作如下：建立包含单一过热点的传统平直微通道热沉，对比过热点及其热流密度对微通道热沉冷却性能及热应力特性的影响；建立过热点均匀分布的 MCM-BGA 封装模型，从整体和局部全面分析流动换热和热应力分布特性并综合评估封装性能；针对封装模型在温度和热应力分布方面存在的问题，选择整体最高温度、单个芯片的最大温差和整体最大热应力作为优化目标，通过改变流动和结构参数对换热和热应力性能进行优化；从热流密度和几何排布两个方面建立过热点非均匀分布的模型，探究换热和热应力特性，寻找最优性能下的排布方案。得到的主要结论如下：

(1) 过热点改变了部分区域的温度分布和热应力分布，提高了最大值和对应的温度梯度，对热沉的热性能产生了不利印象。并且随着过热点上热流密度的上升，恶化趋势逐渐增大。

(2) 对中间流动区域，芯片和焊球间的流速不均，芯片后方存在低流速区域，入口附近焊球间的速度显著高于其它焊球；模型换热性能较好，最高温度在合理范围内，但温度集中分布在芯片和芯片焊球上并显著高于其它区域，最高温度出现在靠近出口一排的芯片上；热应变集中分布在芯片焊球和基板附近，最大热应力出现在靠近出口的芯片焊点上，中间流动区域、热拓展面和基板的交接点为热引力“死点”。

(3) 改变两个流动区域的相对流向，能够起到强化换热的作用，并减小整体的最大热应力，其中逆流的优化效果要好于交错流；改变热介质材料的导热系数可以大幅影响换热和热应力的性能；减小热介质材料的厚度，或者增大热拓展面和基板的厚度，在改善换热性能的同时会增大整体的最大热应力；考虑到整体重量的影响，通过多目标优化，当热介质材料厚度 0.15mm，热拓展面厚度 1.2mm，基板厚度 1.5mm 时模型性能最优。

(4) 对芯片功率进行阶梯式分布，增大靠近入口一排芯片上的功率，可以起到强化换热，减小热应力的作用，当入口一排芯片的功率为 50W 时，整体性能最佳；通过平移和旋转的方式将芯片非均匀排布，能够改善后两排芯片及焊球间的流动情况，提升冷却

性能并降低热应力的值，其中当平移距离约为 0.75mm 或旋转角度约为 10°时整体性能最佳。

展望

本文虽然对过热点问题的研究和封装优化取得了一定的成果，但是同样存在许多不足，依然有进一步研究的空间，主要在以下几个方面：

(1) 现在封装模型流动区域存在两个进口和出口，可以采用机箱的结构形成一个进出口的模型，进一步提高封装的集成度。

(2) 对接触热阻的考虑目前仅存在于微通道热沉与热拓展面的交界处，需要在更多接触面计算基础热阻，以更接近实际情况。

(3) 研究中的芯片功率与目前最先进的芯片功率存在一定差距，热流密度还有提高的空间。

(4) 对非均匀过热点的排布，还存在更多的方式尚未研究，可以进一步提升优化性能。

参考文献

- [1] The International Technology Roadmap for Semiconductors 2.0: 2015. www.itrs2.net.
- [2] Electronics Manufacturing Initiative Technology Roadmap. www.inemi.org.
- [3] Pedram M, Nazarian S. Thermal modeling, analysis, and management in VLSI circuits: Principles and methods[J]. Proceedings of the IEEE, 2006, 94(8): 1487-1501.
- [4] Shakouri A, Zhang Y. On-chip solid-state cooling for integrated circuits using thin-film microrefrigerators[J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2005, 28(1): 65-69.
- [5] Tuckerman D B, Pease R F W. High-performance heat sinking for VLSI[J]. IEEE Electron device letters, 1981, 2(5): 126-129.
- [6] Vafai K, Zhu L. Analysis of two-layered micro-channel heat sink concept in electronic cooling[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1999, 42(12): 2287-2297.
- [7] Wong K C, Muezzin F N A. Heat transfer of a parallel flow two-layered microchannel heat sink[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2013, 49: 136-140.
- [8] Xie G, Liu J, Liu Y, Sunden B, Zhang W. Comparative study of thermal performance of longitudinal and transversal-wavy microchannel heat sinks for electronic cooling[J]. Journal of Electronic Packaging, 2013, 135(2): 021008.
- [9] Xie G, Li S, Sunden B, Zhang W, Li H. A numerical study of the thermal performance of microchannel heat sinks with multiple length bifurcation in laminar liquid flow[J]. Numerical Heat Transfer, Part A: Applications, 2014, 65(2): 107-126.
- [10] Xie G, Li S, Sunden B, Zhang W. Computational fluid dynamics for thermal performance of a water-cooled microchannel heat sink with different chip arrangements[J]. International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow, 2014, 24(4): 797-810.
- [11] Hung T C, Yan W M, Li W P. Analysis of heat transfer characteristics of double-layered microchannel heat sink[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2012, 55(11): 3090-3099.
- [12] Leng C, Wang X D, Wang T H. An improved design of double-layered microchannel heat sink with truncated top channels[J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 79: 54-62.

- [13] Leng C, Wang X D, Wang T H, Yan W M. Optimization of thermal resistance and bottom wall temperature uniformity for double-layered microchannel heat sink[J]. *Energy Conversion and Management*, 2015, 93: 141-150.
- [14] Nafar M, Tavassoli M. An analysis for optimization of heat transfer for various heat sink cross-section and length[J]. *Australian Journal of Basic & Applied Sciences*, 2011, 5(12):1685-1692.
- [15] Kosar A, Peles Y. Thermal-hydraulic performance of MEMS-based in fin heat sink[J]. *Journal of heat transfer*, 2006, 128(2):121-131.
- [16] Kosar A, Peles Y. Boiling heat transfer in a hydrofoil-based micro pin fin heat sink[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2007,50(5): 1018-1034.
- [17] Kosar A, Peles Y. Micro Scale Pin Fin Heat Sink-Parametric Performance Evaluation Study[J]. *IEEE Transaction on Components and Packing Technologies*, 2007, 30(4):855-865.
- [18] Krishnamurthy S, Peles Y. Flow boiling of water in a circular staggered micro-pin fin heat sink[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2008, 51(5): 1349-1364.
- [19] Rubio-Jimenez C A, Kandlikar S G, Hernandez-Guerrero A. Numerical analysis of novel micro pin fin heat sink with variable fin density[J]. *IEEE transactions on components, packaging and manufacturing technology*, 2012, 2(5): 825-833.
- [20] 涂福炳, 武荟芬, 周子民. 射流冲击下矩形柱鳍热沉结构优化[J]. *中南大学学报 (自然科学版)*, 2012, 3: 1171-1178.
- [21] Metwally H M, Manglik R M. Enhanced heat transfer due to curvature-induced lateral vortices in laminar flows in sinusoidal corrugated-plate channels[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2004, 47(10-11): 2283-2292.
- [22] Manglik R M, Zhang J, Muley A. Low Reynolds number forced convection in three-dimensional wavy-plate-fin compact channels: fin density effects[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2005, 48(8): 1439-1449.
- [23] Sui Y, Teo C J, Lee P S, Chew Y T, Shu C. Fluid flow and heat transfer in wavy microchannels[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2010, 53(13): 2760-2772.
- [24] Mohammed H A, Gunnasegaran P, Shuaib N H. Numerical simulation of heat transfer

- enhancement in wavy microchannel heat sink[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2011, 38(1): 63-68.
- [25] Xie G, Liu J, Zhang W, Sunden B. Analysis of flow and thermal performance of a water-cooled transversal wavy microchannel heat sink for chip cooling[J]. *Journal of Electronic packaging*, 2012, 134(4): 041010.
- [26] Gong L, Kota K, Tao W, Joshi Y. Parametric numerical study of flow and heat transfer in microchannels with wavy walls[J]. *Journal of Heat Transfer*, 2011, 133(5): 051702.
- [27] Gong L J, Kota K, Tao W, Joshi Y. Thermal performance of microchannels with wavy walls for electronics cooling[J]. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2011, 1(7): 1029-1035.
- [28] Haller D, Woias P, Kockmann N. Simulation and experimental investigation of pressure loss and heat transfer in microchannel networks containing bends and T-junctions[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2009, 52(11): 2678-2689.
- [29] Chai L, Xia G, Zhou M, Li J. Numerical simulation of fluid flow and heat transfer in a microchannel heat sink with offset fan-shaped reentrant cavities in sidewall[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2011, 38(5): 577-584.
- [30] Xia G, Chai L, Wang H, Cui Z. Optimum thermal design of microchannel heat sink with triangular reentrant cavities[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2011, 31(6-7): 1208-1219.
- [31] 翟玉玲. 复杂结构微通道热沉流动可视化及传热过程热力学分析[D]. 北京: 北京工业大学, 2015.
- [32] Koester D, Venkatasubramanian R, Conner B, Snyder G J. Embedded thermoelectric coolers for semiconductor hot spot cooling[C]. *The Tenth Intersociety Conference on IEEE*, 2006: 491-496.
- [33] Snyder G J, Soto M, Alley R, Koester D. Hot spot cooling using embedded thermoelectric coolers[C]. *Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, 2006 IEEE Twenty-Second Annual IEEE*, 2006: 135-143.
- [34] Wang P, Yang B, Bar-Cohen A. Mini-contact enhanced thermoelectric coolers for on-chip hot spot cooling[J]. *Heat Transfer Engineering*, 2009, 30(9): 736-743.
- [35] Yang B, Wang P, Bar-Cohen A. Mini-contact enhanced thermoelectric cooling of hot spots

- in high power devices[J]. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 2007, 30(3): 432-438.
- [36] Chowdhury I, Prasher R, Lofgreen K, Chrysler G, Narasimhan S, Mahajan R, Koester D, Alley R, Venkatasubramanian R. On-chip cooling by superlattice-based thin-film thermoelectrics[J]. *Nature nanotechnology*, 2009, 4(4): 235.
- [37] Bar-Cohen A, Arik M, Ohadi M. Direct liquid cooling of high flux micro and nano electronic components[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2006, 94(8): 1549-1570.
- [38] Brunschwiler T, Rothuizen H, Paredes S, Michel B, Colgan E, Bezama P. Hotspot-adapted cold plates to maximize system efficiency[C]. *Thermal Investigations of ICs and Systems, 15th International Workshop on. IEEE*, 2009: 150-156.
- [39] Cho E S, Koo J M, Jiang L, Prasher R S, Kim M S, Santiago J G, Kenny T W, Goodson K E. Experimental study on two-phase heat transfer in microchannel heat sinks with hotspots[C]. *Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, 2003 Nineteenth Annual IEEE*, 2003: 242-246.
- [40] Ansari D, Kim K Y. Performance Analysis of Double-Layer Microchannel Heat Sinks under Non-Uniform Heating Conditions with Random Hotspots[J]. *Micromachines*, 2017, 8(2): 54.
- [41] Yong J L, Lee P S, Chou S K. Hotspot mitigating with obliquely finned microchannel heat sink—an experimental study[J]. *IEEE Transactions on components, packaging and manufacturing technology*, 2013, 3(8): 1332-1341.
- [42] Lorenzini D, Green C, Sarvey T E, Zhang X, Hu Y, Fedorov A G, Bakir M S, Joshi Y. Embedded single phase microfluidic thermal management for non-uniform heating and hotspots using microgaps with variable pin fin clustering[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, 103: 1359-1370.
- [43] 吴云川. 基于三维微通道散热的芯片热点散热特性研究[D]. 电子科技大学, 2014.
- [44] Zhang T, Rahman S, Choi K K, Cho K, Baker P, Shakil M, Heitkamp D. A global-local approach for mechanical deformation and fatigue durability of microelectronic packaging systems[J]. *Journal of electronic packaging*, 2007, 129(2): 179-189.
- [45] Huang S, Zhang X. Gradient residual stress induced elastic deformation of multilayer MEMS structures[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2007, 134(1): 177-185.

- [46] Chao J, Shyy W, Thakur S S, Sheplak Mark, Mei R. Effect of conjugate heat transfer on MEMS-based thermal shear stress sensor[C]. ASME 2005 Summer Heat Transfer Conference collocated with the ASME 2005 Pacific Rim Technical Conference and Exhibition on Integration and Packaging of MEMS, 2005: 773-788.
- [47] An P, He Y, Jin Y, Hao Y. A reliability investigation of MEMS transducers with comb structures[C]. Electronic Packaging Technology & High Density Packaging, 2008. ICEPT-HDP 2008. International Conference on. IEEE, 2008: 1-6.
- [48] An P, Koo H C, Kohl P. Thermomechanical modeling of all-copper chip-to-substrate connections[C]. The Electrochemical Society, 2010 (32): 2009.
- [49] An P N, Kohl P A. Modeling simplification for thermal mechanical analysis of high density chip-to-substrate connections[J]. Journal of Electronic Packaging, 2011, 133(4): 041004.
- [50] An P N, Kohl P A. Thermal-mechanical stress modeling of copper chip-to-substrate pillar connections[J]. Components and Packaging Technologies, IEEE Transactions on, 2010, 33(3): 621-628 An P N, Kohl P A. Modeling simplification for thermal mechanical analysis of high density chip-to-substrate connections[J]. Journal of Electronic Packaging, 2011, 133(4): 041004.
- [51] 王志, 许向东, 周东. 热应力对非制冷红外焦平面微桥的影响及控制研究[J]. 光学学报, 2011, 31(3): 294-298.
- [52] 樊泰君, 许向东, 王志, 敖天宏, 马淑敏, 黄龙, 杨卓, 蒋亚东, 陈超. 非制冷红外焦平面微桥形变的主要原因及其控制. 红外激光与工程, 2012, 41(10): 2588-2592.
- [53] 李军伟, 刘宇. 圆转方内喷管换热特性[J]. 推进技术, 2004, 25(4): 298-302, 315.
- [54] 王振峰, 颜培刚, 陈凯. 气冷涡轮叶栅流动及热应力特性的数值研究[J]. 科学技术与工程, 2008, 18: 5356-5359.
- [55] 林长青. 工艺参数对预应力换热器性能的影响研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2009.
- [56] 徐行军. 柴油机冷却系统结构优化及缸盖热应力分析[D]. 天津: 天津工业大学, 2010.
- [57] Tummala R R. 微系统封装基础[M]. 东南大学出版社, 2005.
- [58] www.radio-electronics.com
- [59] 徐龙潭. 电子封装中热可靠性的有限元分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.

[60] Spendley W, Hext G R, Himsworth F R. Sequential Application of Simplex Designs in Optimisation and Evolutionary Operation[J]. Technometrics, 1962, 4(4):441-461.

[61] Nelder J A, Mead R. A Simplex Method for Function Minimization[J]. Comput J, 1965, 7(4):308-313.

攻读硕士学位期间取得的学术成果

- [1] Yupeng Xu, Liang Gong, Yongtong Li, Xinyue Duan, Jin Zhao. Study of flow heat transfer and thermal stress in double layer microchannel heat sink[C]. International Heat Transfer Symposium and Heat Powered Cycles Conference, Nottingham, UK, 2016.
- [2] 徐玉鹏, 巩亮, 李勇铜. 双层流道热沉内换热及热应力研究与结构优化[J]. 中国科技论文在线, 2016.
- [3] 徐玉鹏, 巩亮, 李勇铜. 双层流道热沉内流体流动换热研究及热应力分析[C]. 中国工程热物理学会传热传质分会, 大连, 2015.

待发表论文

- [1] Liang Gong, Yupeng Xu, Yongtong Li, Zhang Bai. Characteristic of heat transfer and thermal strain for double layer microchannel heat sink with cutting ribs.
- [2] Yupeng Xu, Liang Gong. Research of flow heat transfer and thermal strain and structure optimization of MCM-BGA package model.

致谢

时光飞逝，转眼间三年的硕士研究生学习生活即将接近尾声。回首这段人生中最重要时光，老师、同学、父母以及学校都给了我无私而又全面的帮助，在此向他们表达我心中最真挚的谢意。

首先要由衷地感谢我的导师巩亮副教授，不仅在学习上耐心、细致地指导，帮助我克服课题研究中的一个困难，而且在生活上无私地支持我，提供了许多宝贵的学术交流机会能够向国内外的专家学者近距离学习。更是在我懈怠、懒惰时不断敲打、警示我，避免我在科研中出现一些不该有的错误。巩老师严谨的治学风格、孜孜不倦的学术态度以及谦虚和蔼的待人处事风范，深深地影响着我，在此对他表达我最崇高的敬意和最衷心的感谢！

其次要感谢课题组内各位师兄师姐、师弟师妹对我在学习和生活上的帮助与关心。李勇铜博士对我的数值模拟工作提出了许多宝贵的建议，并屡次指出工作中存在的不足，帮助我不断学习前沿学者们的研究成果。白章博士在多篇论文的书写方面提供了许多帮助，尤其是在整体逻辑性上多次提出重要的意见，并多次与我交流学习心得，为我树立了一个优秀的榜样。其他的博士硕士伙伴们也在我遇到各种困难时，给予我及时的帮助，让我不断顺利地进行科研工作。在此对他们送上真心的祝福，希望同窗的友谊能够长存。

此外还要感谢父母对我多年的养育之情，理解并无私地支持我的求学之路，让我能心无旁骛地完成科研工作，追寻心中的理想。感谢学校为我提供良好的学习和学术交流环境，鼓励我展现自己的学术风采。

最后向参加论文评审的各位专家、学者致以崇高的敬意和深深的感谢！

徐玉鹏

2018年5月