

基于 ANSYS 的内嵌式微通道芯片散热结构设计及优化

赵有莉¹, 李福松¹, 玉炳才¹, 陈锒旭¹, 刘东静^{1,*}

1. 桂林电子科技大学, 机电工程学院, 广西 桂林, 541004

摘要: 为有效解决大功率芯片散热瓶颈, 基于 ANSYS 设计传统并联直通通道、通断型微通道、通断扰流强化型微通道三种内嵌式芯片散热结构, 选取去离子水、 Al_2O_3 -水纳米流体、50%体积分数乙二醇水溶液三种冷却液, 在统一仿真边界条件下开展散热性能对比研究。仿真结果表明: 流道扰流结构与冷却液物性是决定芯片散热性能的两大核心因素, 相同结构下散热介质性能排序为 Al_2O_3 -水纳米流体>50%乙二醇水溶液>去离子水; 本文创新设计的通断扰流强化型微通道搭配 Al_2O_3 -水纳米流体, 可实现芯片最低面加权平均温度 304.59 K、最高总热通量 $1.78 \times 10^7 \text{ W/m}^2$, 相较于传统直通通道结构散热效率大幅提升。综合散热性能整体排序为: 通断扰流强化型微通道>通断型微通道>传统并联直通通道。相较于现有常规微通道散热方案, 本文结构换热比表面积更大、流体扰动更强、温度均匀性更优, 有效解决芯片局部热点堆积问题, 为高集成、高功率芯片的热管理结构优化及冷却液选型提供可靠的理论依据与工程参考。

关键词: 芯片散热; 内嵌式微通道; ANSYS 仿真; 热流密度; 结构优化

Design and Optimization of Embedded Microchannel Chip Cooling Structure Based on ANSYS

Zhao Youli¹, Li Fusong¹, Yu Bingcai¹, Chen Zengxu¹, Liu Dongjing^{1,*}

1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China

Abstract: To break the heat dissipation bottleneck of high-power chips, three embedded heat dissipation structures including traditional parallel straight microchannels, on-off microchannels and on-off turbulence-enhanced microchannels are designed based on ANSYS simulation platform. Three cooling fluids, deionized water, Al_2O_3 -water nanofluid and 50% volume fraction ethylene glycol aqueous solution, are adopted for comparative heat dissipation simulation under unified boundary conditions. The simulation results reveal that channel turbulence structure and thermophysical properties of coolant are two core factors affecting chip heat dissipation. For the same channel structure, the heat transfer performance of coolants follows the order: Al_2O_3 -water nanofluid > 50% ethylene glycol aqueous solution > deionized water. The innovatively designed on-off turbulence-enhanced microchannel matched with Al_2O_3 -water nanofluid achieves the minimum area-weighted average chip temperature of 304.59 K and maximum total heat flux of $1.78 \times 10^7 \text{ W/m}^2$, which greatly improves heat dissipation efficiency compared with traditional straight channels. The comprehensive heat dissipation performance ranking is: on-off turbulence-enhanced microchannel > on-off microchannel > traditional parallel straight microchannel. Compared with conventional microchannel cooling schemes, the proposed structure owns larger specific heat transfer area, stronger fluid turbulence and better temperature uniformity, which effectively eliminates local hot spots on chips. This research provides reliable theoretical support and engineering reference for thermal structure optimization and coolant selection of high-integration and high-power chips.

Keywords: Chip Heat Dissipation; Embedded Microchannel; Ansys Simulation; Heat Flux Density; Structural Optimization

现代电子设备性能的持续升级与热管理能力相对滞后的矛盾,已成为制约高端芯片产业发展的核心瓶颈^[1]。1981年,Tuckerman等人率先提出微通道散热方案,该结构水力直径小于1 mm,具备换热面积大、结构紧凑等优势,能够较好地满足航天器件对高热流密度与轻量化的双重需求^[2]。针对航天用氮化镓芯片在高温工况下的失效问题,Bloschock等通过将微通道与高导热基板相结合,有效降低了芯片热阻^[3]。然而,当前AI及通信芯片的局部热流密度已突破1000 W/cm²,远超传统散热技术的承载极限;高温环境加剧电子迁移现象,器件能耗增加。片上内嵌微通道被视为高集成度芯片散热最具潜力的技术路线之一,但关于其结构协同优化的系统研究仍显不足。

目前,国内外研究多聚焦于微通道尺寸、冷却液流速等单一参数对换热性能及流动阻力的影响^[5],缺乏面向一体化内嵌散热结构的系统性创新。针对上述问题,本文设计一种内嵌式通断微通道结构,将流道集成于芯片基板之中,实现封装与散热的一体化。该设计利用结构扰动效应以强化换热,同时有助于快速均衡芯片温度分布,降低散热功耗,提升芯片长期工作条件下的热可靠性,以期高功率电子芯片的热管理提供理论依据与技术支持。

1 微通道模型结构设计

采用SolidWorks进行三维建模,微通道结构设计兼顾传热效率、流动阻力与结构可行性,核心设计原则包括:1)最大化换热面积,提升传热系数;2)优化通道布局,减少流动死区;3)控制通道尺寸,平衡传热效率与流动阻力;4)适配实际散热工况,确保冷却液与外部空气的换热协同性。

设计三种内嵌式微通道模型,分别为传统并联直通道、通断型微通道及通断扰流强化型微通道三种散热结构模型。三种模型结构散热通道不同,其余结构参数保持一致。模型材料为铜,微通道均采用平行相邻方式排列,且两侧通道进行加宽,使两侧空间压力减少,利用压力差使速度较小的气体向两侧流动,避免出现局部充液现象。当冷却液进入微通道时,流体会通过多层微通道进行层层流动,增强流动扰动以增强换热过程,通过改变平行微通道的形状以达到更好的微通道分液效果。三种不同的内嵌式微通道散热结构模型,如图1所示。

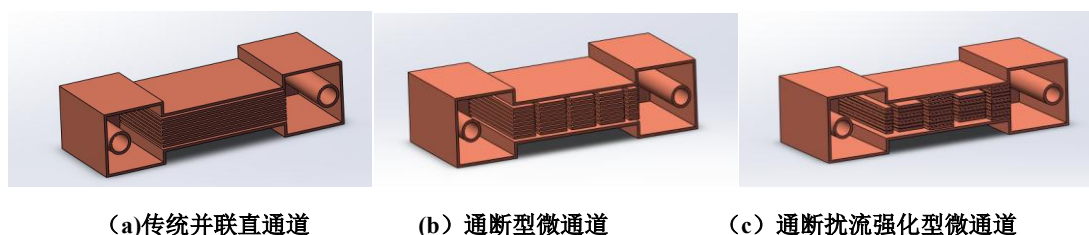


图1 三种不同的内嵌式微通道散热结构

Fig. 1 Three different embedded microchannel cooling structures

2 微通道模型结构建立

2.1 模型建立

本研究设计传统并联直通道、通断型微通道、通断扰流强化型微通道三种内嵌式微通道散热结构。核心差异体现在通道内部结构的不同,传统并联直通道为等截面平行直通式基础结构,换热比表面积有限,冷却液与壁面顺向接触无扰动,对流换热不充分;通断型微通道在传统直通道基础上增设等距横向隔断,通过局部流道变化形成轻微流动扰动,小幅增加换热面积、提升换热效率,但受限于隔断设计,流体扰动范围小、均匀性差,还伴随局部压降升高问题,散热提升幅度有限;通断扰流强化型微通道则采用非等距导流隔断、阶梯式变截面及通道两侧加宽设计,相较于前两者,增加冷却液的全域均匀强扰动,同时通过导流结构优化降低局部流动阻力、避免换热死角。

2.2 加载条件

芯片顶部施加恒温热源 373.15 K；冷却液入口温度 298.15 K，入口流速 5 m/s，出口压力 0 Pa；微通道内壁采用强制对流换热，外表面为空气自然对流。贴合高功率芯片实际发热场景；微通道内壁与冷却液直接接触，根据流体的流动特性与换热规律，模拟冷却液与通道壁面的强制对流换热过程，并在微通道外表面加载空气换热系数。

表 1 介质热物性参数表
Table 1 Thermal Physical Properties of Media

冷却工质	密度 $\rho / (\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	比热容 $c_p / [\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}]$	导热系数 $\lambda / [\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}]$	动力粘度 $\mu / (\text{Pa}\cdot\text{s})$
去离子水	997	4186	0.602	0.00089
水纳米流体	1020.6	4042	0.685	0.00108
50%乙二醇水溶液	1070	3450	0.415	0.0018

采用 ANSYS Meshing 进行网格划分，对微通道区域，芯片热源接触区等热流梯度较大的关键区域进行网格加密。在 ANSYS Fluent 求解环境中，开启能量方程，选取 SST k- ω 湍流模型以适配微通道内的强制对流换热。分别建立去离子水、2%体积分数 Al_2O_3 -水纳米流体以及 50%体积分数乙二醇水溶液三种流体材料，冷却液的入口温度统一设置为 298.15 K，入口流速为 5 m/s，出口采用自由出流边界。微通道内壁面与冷却液之间设置为耦合换热边界，实现固体区域与流体区域之间的热量传递；结构外表面施加空气自然对流边界条件。完成材料加载与边界条件设置后，进行初始化计算，直至能量残差降至 10^{-6} 以下并保持稳定，再提取面加权平均温度、总热通量等数据用于后续分析。

3 仿真结果分析

3.1 温度分布分析

三种微通道散热结构均能实现芯片热量的有效导出，但其对芯片温度的控制能力与温度分布均匀性存在显著差异。通断扰流强化型微通道散热结构在冷却液作用下的温度分布如图 2 所示。

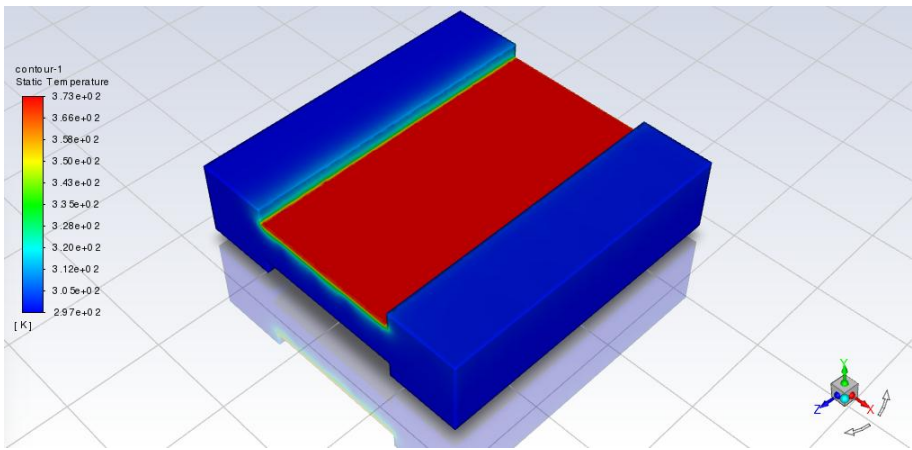


图 2 微通道结构温度分布云图

Fig. 2 Temperature distribution cloud diagram of microchannel structures

由不同冷却工质下的仿真数据可知，散热结构形式与冷却液物性均对芯片散热效果存在显著影响。在相同边界条件下，分别对三种不同的内嵌式微通道散热结构的散热性能进行对比，数据如表 2，表 3，表 4 所示。

表 2 去离子水在不同微通道结构下的散热性能						
Table 2 Heat Dissipation Performance of Deionized Water in Different Microchannel Structures						
散热结构	最高温度 (K)	最低温度(K)	面加权平均温 度(K)	面加权平均温 度 (°C)	温度极差 (K)	总热通量 (W/m²)
传统并联微通道	373.15	298.1534	322.603	49.4537	74.9966	1.07×10 ⁷
通断型微通道	373.15	297.558	305.1523	32.0023	75.592	1.30×10 ⁷
通断扰流加强型微通道	373.15	295.3222	304.7881	31.6381	77.8278	1.60×10 ⁷

表 3 Al ₂ O ₃ -水纳米流体在不同微通道结构下的散热性能						
Table 3 Heat dissipation performance of Al ₂ O ₃ -water nanofluid under different microchannel structures						
散热结构	最高温度 (K)	最低温度 (K)	面加权平均温 度 (K)	面加权平均温 度 (°C)	温度极差 (K)	总热通量 (W/m²)
传统并联微通道	373.15	297.2492	322.6037	49.4537	75.9008	1.37×10 ⁷
通断型微通道	373.15	297.2028	304.9781	31.8281	75.9472	1.66×10 ⁷
通断扰流加强型 微通道	373.15	295.612	304.5913	31.4413	77.538	1.78×10 ⁷

表 4 50%体积乙二醇溶液在不同微通道结构下的散热性能						
Table 4 Heat dissipation performance of 50% volume ethylene glycol solution under different microchannel structures						
散热结构	最高温 度 (K)	最低温度 (K)	面加权平均温度 (K)	面加权平均温度 (°C)	温度极差 (K)	总热通量 (W/m²)
传统并联微通道	373.15	298.4947	305.0755	31.9255	74.6553	1.37×10 ⁷
通断型微通道	373.15	297.1846	304.0611	30.9111	75.9654	1.66×10 ⁷
通断扰流强化型微 通道	373.15	295.5653	303.6772	30.5272	77.5847	1.78×10 ⁷

3.2 热通量分布分析

去离子水工况下，传统并联微通道、通断型微通道、通断扰流强化型微通道的芯片面加权平均温度依次为 322.603 K、305.1523 K、304.7881 K，总热通量分别为 1.07×10⁷ W/m²、1.30×10⁷ W/m²、1.60×10⁷ W/m²。随着结构扰流作用增强，芯片平均温度逐步降低，热交换能力显著提升。在 2% Al₂O₃-水纳米流体工况下，相同结构的散热效果进一步增强。三种结构的面加权平均温度分别为 322.6037 K、304.9781 K、304.5913 K，总热通量提升至 1.37×10⁷ W/m²、1.66×10⁷ W/m²、1.78×10⁷ W/m²。相较于去离子水，纳米流体可在不改变结构的前提下有效强化换热，降低芯片工作温度。

冷却液为 50%体积分数乙二醇水溶液，三种结构的面加权平均温度分别为 305.0755 K、304.0611 K、303.6772 K，总热通量分别为 1.37×10⁷ W/m²、1.66×10⁷ W/m²、1.78×10⁷ W/m²。乙二醇溶液散热

表现介于去离子水与纳米流体之间，温度分布更为均匀，具备良好的综合散热能力与工程适用性。

从结构角度来看，三种微通道的流场特性与换热机制存在本质差异，这是导致散热性能分层的核心原因。传统并联直通道的流道形态单一、流体流动路径平滑，冷却液在通道内易形成充分发展的边界层，热边界层厚度持续增长，传热比表面积有限，流体扰动不足，导致冷却液与芯片发热面的换热不充分，热量易在芯片单侧形成堆积，最终表现为芯片面加权平均温度最高、总热通量最低，散热效果最弱。图 3 为传统并联直通通道结构在 2% Al_2O_3 -水纳米流体冷却工况下的表面热通量分布云图。

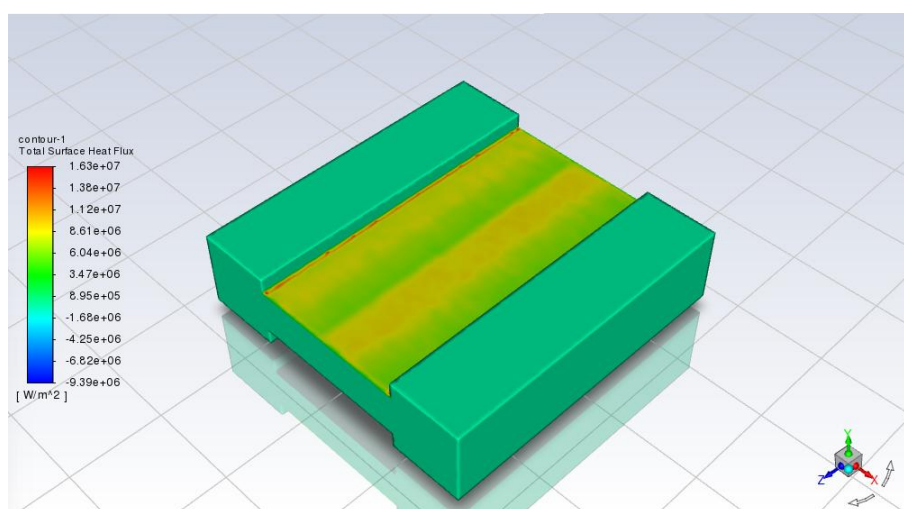


图 3 传统并联直通通道在 2% Al_2O_3 -水纳米流体工况下的表面热通量分布云图

Fig. 3 Cloud map of surface heat flux distribution of the traditional parallel straight channel under the working condition of 2% Al_2O_3 -water nanofluid

通断型微通道通过在流道中引入周期性通断结构，强制流体发生流动分离与再附着，周期性破坏热边界层的充分发展，有效减薄边界层厚度，增强流体掺混与换热强度，同时扩大有效换热面积，使芯片平均温度较传统结构显著降低，散热性能明显提升，表现出优于传统直通道的换热能力。图 4 通断型微通道在 2% Al_2O_3 -水纳米流体冷却工况下的表面热通量分布。

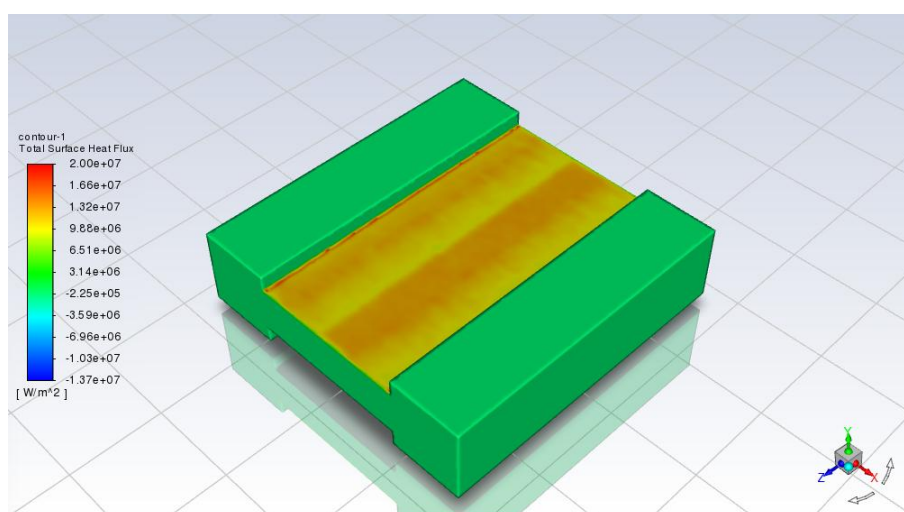


图 4 通断型微通道在 2% Al_2O_3 -水纳米流体工况下的表面热通量分布云图

Fig. 4 Surface heat flux distribution map of the on-off microchannel under the condition of 2% Al_2O_3 -water nanofluid

图 5 为通断扰流强化型微通道在通断结构在 2% Al_2O_3 -水纳米流体冷却工况下的表面热通量分

布, 通断扰流强化型微通道在通断结构的基础上, 进一步集成了梯形肋片扰流结构, 实现边界层破坏和二次流诱导的双重强化机制: 一方面, 通断结构阻断热边界层的沿程发展, 维持近壁面高换热系数; 另一方面, 肋片扰流结构诱导流体产生纵向二次流, 强化流体横向掺混, 破坏热边界层, 增加换热比表面积, 优化流量分配, 使冷却液与壁面的换热更充分, 有效抑制芯片局部热点。因此, 该结构在去离子水、纳米流体、乙二醇水溶液三种冷却液工况下, 均实现最低的芯片面加权平均温度与最高的总热通量, 散热性能显著优于通断型与传统并联微通道, 呈现较优的综合散热能力。

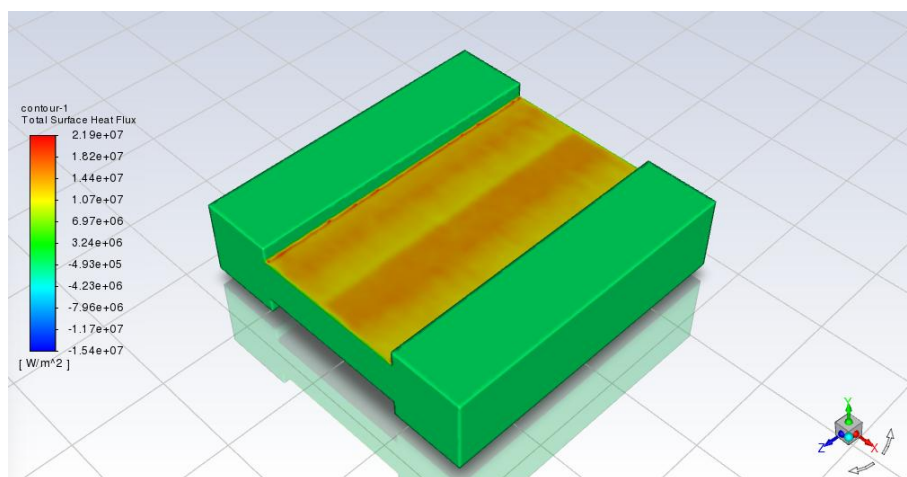


图5 通断扰流强化型微通道在2% Al_2O_3 -水纳米流工况下的表面热通量分布云图

Fig. 5 Surface heat flux distribution map of the on-off turbulence-enhanced microchannel under the condition of 2% Al_2O_3 -water nanofluid

为验证本文研究的创新性与优越性, 选取国内外近年公开的微通道散热仿真与实验成果进行横向对比。国内学者刘敏珊等^[4]采用常规微通道+去离子水散热方案, 芯片稳态平均温度为 38.6°C , 最大热通量 $1.12 \times 10^7 \text{ W/m}^2$; 王晓松等^[5]优化普通通断微通道结构, 搭配复合冷却液后, 芯片最低平均温度为 35.2°C , 热通量提升幅度不足 35%。对比可知, 本文设计的通断扰流强化型微通道+ Al_2O_3 -水纳米流体最优方案, 芯片平均温度低至 31.44°C , 较现有最优研究成果降温 2.36°C 以上, 热通量提升 7.8%, 散热效率与温度控制精度均优于国内外现有常规方案。

4 结论

本文基于 ANSYS 仿真平台, 完成三种内嵌式微通道散热结构的建模与仿真分析, 通过多冷却液工况对比、与现有研究成果横向对标, 明确了结构形式与冷却工质对高功率芯片散热性能的协同影响机制, 核心重点结论如下:

(1) 本文创新设计的通断扰流强化型结构, 通过非等距导流、阶梯变截面、两侧加宽的复合设计, 形成“边界层破坏+二次流掺混”双重强化换热机制, 解决传统流道换热死角多、流体扰动弱的问题, 相较于传统直通道结构, 芯片平均降温幅度最高达 18.01°C , 热通量提升 66.3%, 散热性能提升效果显著。

(2) 冷却液物性决定散热上限, 工质与结构存在最优匹配关系。相同散热结构下, 三种冷却液散热性能排序为: Al_2O_3 -水纳米流体 > 50% 体积分数乙二醇水溶液 > 去离子水。高导热纳米流体可充分发挥优化结构的换热优势, 实现散热性能最大化, 而乙二醇水溶液温度均匀性更优, 可适配低温、高稳定性需求工况。

(3) 最优协同方案实现了散热性能的显著提升。通断扰流强化型微通道搭配 2% 体积分数 Al_2O_3 -水纳米流体, 在降温和热通量导出效率方面表现出优异性能, 有效缓解了高功率芯片局部过热与温

度分布不均的问题。该结果验证了“结构扰动-工质导热”协同增强散热理论的可行性与普适性，为高集成芯片热管理提供了新的理论依据与设计方向。

参考文献

- [1] Zhang J Z, An J, Xin G M, et al. Numerical investigation of novel manifold microchannel heat sinks with countercurrent regions [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2023, 214: 124389.
- [2] Tuckerman D B, Pease R F W. High-performance heat sinking for VLSI [J]. IEEE Electron Device Letters, 1981, 2(5): 126-129.
- [3] Bloschock K P, Bar-cohen A. Advanced thermal management technologies for defense electronics[C]//Proceedings of SPIE 8405, Defense Transformation and NetCentric Systems. Baltimore: SPIE, 2012.
- [4] 刘敏珊, 王国营, 董其伍. 微通道内液体流动和传热研究进展 [J]. 热科学与技术, 2007, 6(4): 283-288.
- [5] 王晓松, 游峰, 张敏吉, 等. 集装箱式储能系统数值仿真模拟与优化[J]. 储能科学与技术, 2016, 5(4): 577-582.

基金项目: 广西高校大学生创新创业训练计划支持项目 (S202510595340) 和 (S202510595149)。

¹ **第1作者简介:** 赵有莉 (2003-), 女, 桂林电子科技大学本科在读, 研究方向: 电子封装可靠性。

E-mail: zyl15507731083@163.com。

***通讯作者简介:** 刘东静 (1986-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 电子封装结构设计。E-mail:

ldj168168@126.com。