

基于 COMSOL 液冷板拓扑优化设计

液冷板广泛应用于航空航天、汽车、集成电路等设备中，用于高效散热。本案例通过对液冷流道的优化设计，提升了液冷板的散热性能，特别是均温性能，降低了功耗。

杨建东,熊敏,张横,冯培轩,丁晓红*

上海理工大学,机械工程学院

E-mail: dingxh@usst.edu.cn

引言

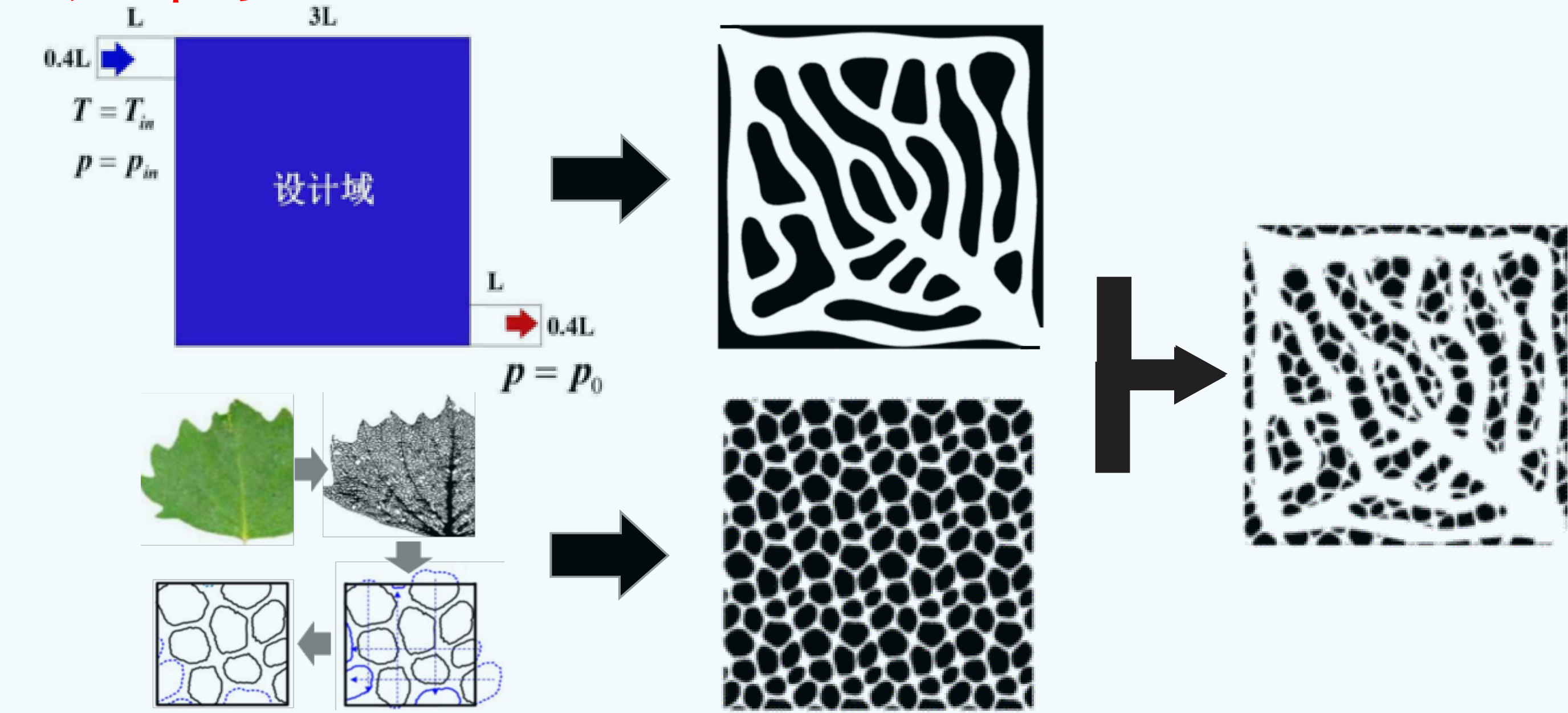
随着科技进步，高热流密度元器件已在多个领域广泛运用。这些元器件单位体积内产生的高热量导致热流密度增大，尤其在汽车和航天器这类温差变化显著的环境中，对散热系统的性能和效率提出了更为严苛的要求。某种意义上来说，散热技术的创新与突破已成为制约航空航天、精密仪器制造发展的重要因素之一。

高热流密度电子元件高效散热的技术挑战包括：如何在有限的空间内分布导热通道，将热源处的热量迅速有效地引导到热沉处；如何设计液冷流道拓扑形态，在系统低功耗条件下实现高效散热；散热结构不仅需要满足高热流密度产品的高温性要求，而且要满足航天航空类电子产品严苛的均温性。

设计方法

拓扑优化方法可以使设计结构在给定的约束条件下，达到所求的最佳性能。设计中使用拓扑优化设计方法，对液冷板流道进行无量纲优化设计，使得设计结果更具普适性。为了保证液冷板刚度性能，对液冷板进行了热流固耦合优化设计，以防止液冷板在承载时出现变形或损坏。最后，引入仿生叶脉设计理念，结合宏观流道拓扑优化设计结果，形成双尺度流道，从而增加液冷板的换热面积，提升了液冷板的散热和均温性能，实现低功耗下的高效散热。

设计原理



设计过程

$$\begin{aligned} \text{maximize } J &= w_1 J_{th} - w_2 J_f, \\ \gamma &\in [0,1] \\ J_{th} &= \int_{\Omega} (1-\gamma) h^* (1-T^*) d\Omega, \\ J_f &= \int_{\Omega} \nabla^* \mathbf{u}^* \cdot (\nabla^* \mathbf{u}^* + \nabla^* \mathbf{u}^{*T}) \\ &\quad + \alpha^* \mathbf{u}^* \cdot \mathbf{u}^* d\Omega, \\ \text{s.t. } \int_{\Omega} \gamma d\Omega &\leq V_f \cdot Vol_{\Omega}, \\ \int_{\Gamma_{in}} p_{in}^* \mathbf{u}^* \cdot d\Gamma &= 1. \end{aligned}$$

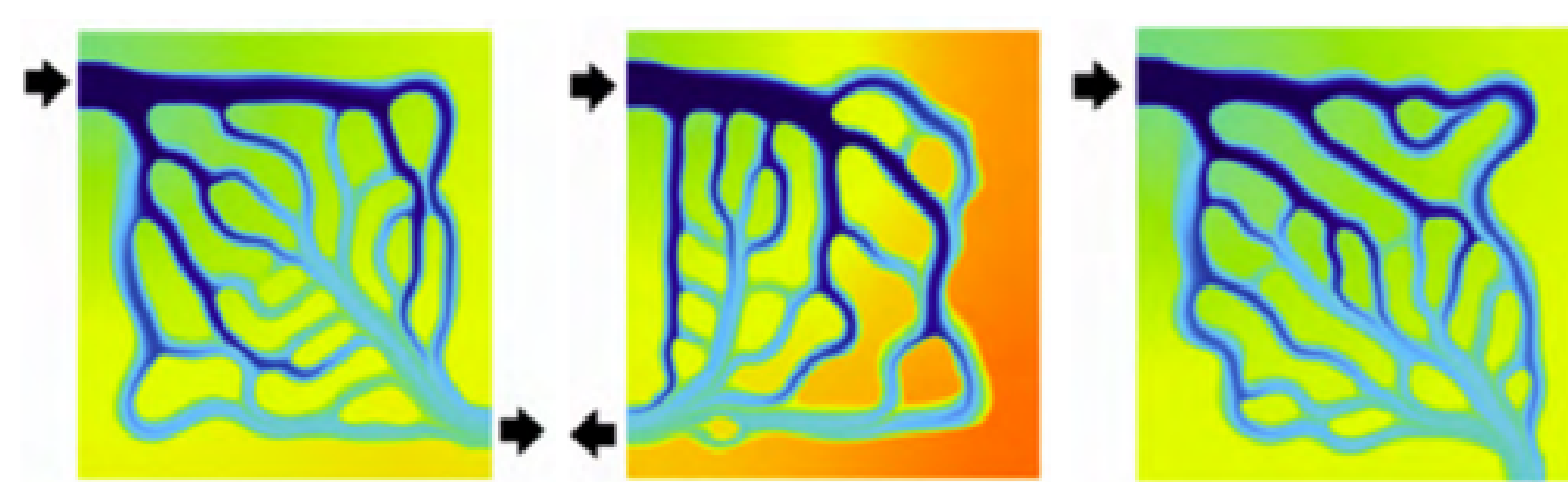
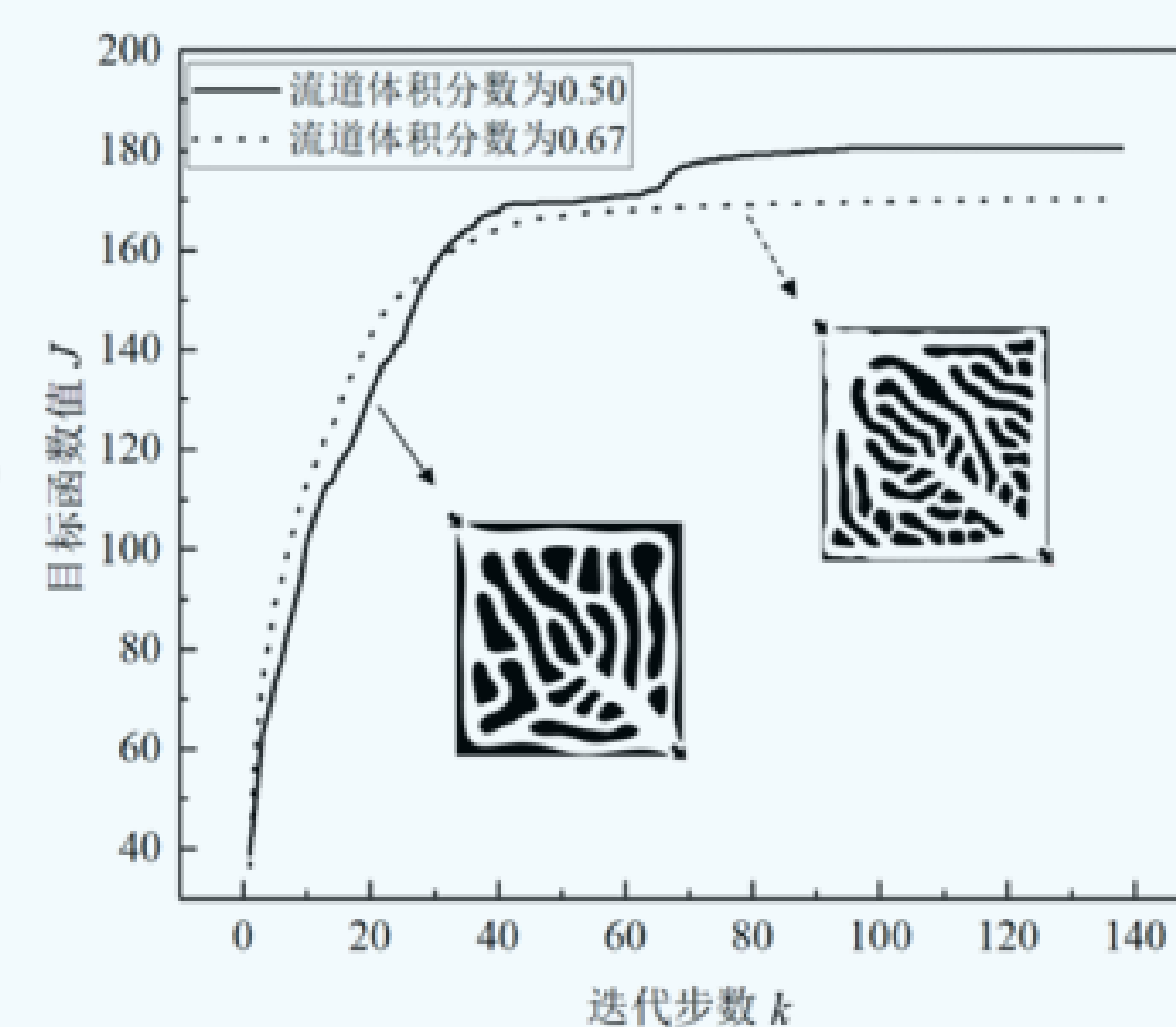


图1 不同进出口布置下无量纲设计结果温度云图 (体积分数0.5)

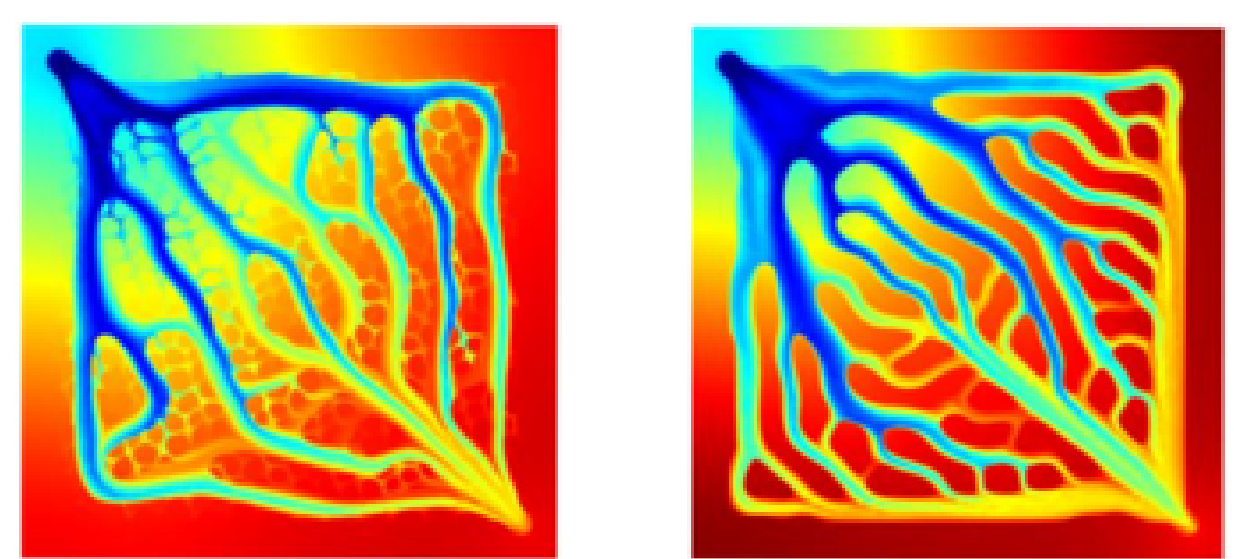


图2 不同尺度流道形态液冷板温度云图 (体积分数0.67)

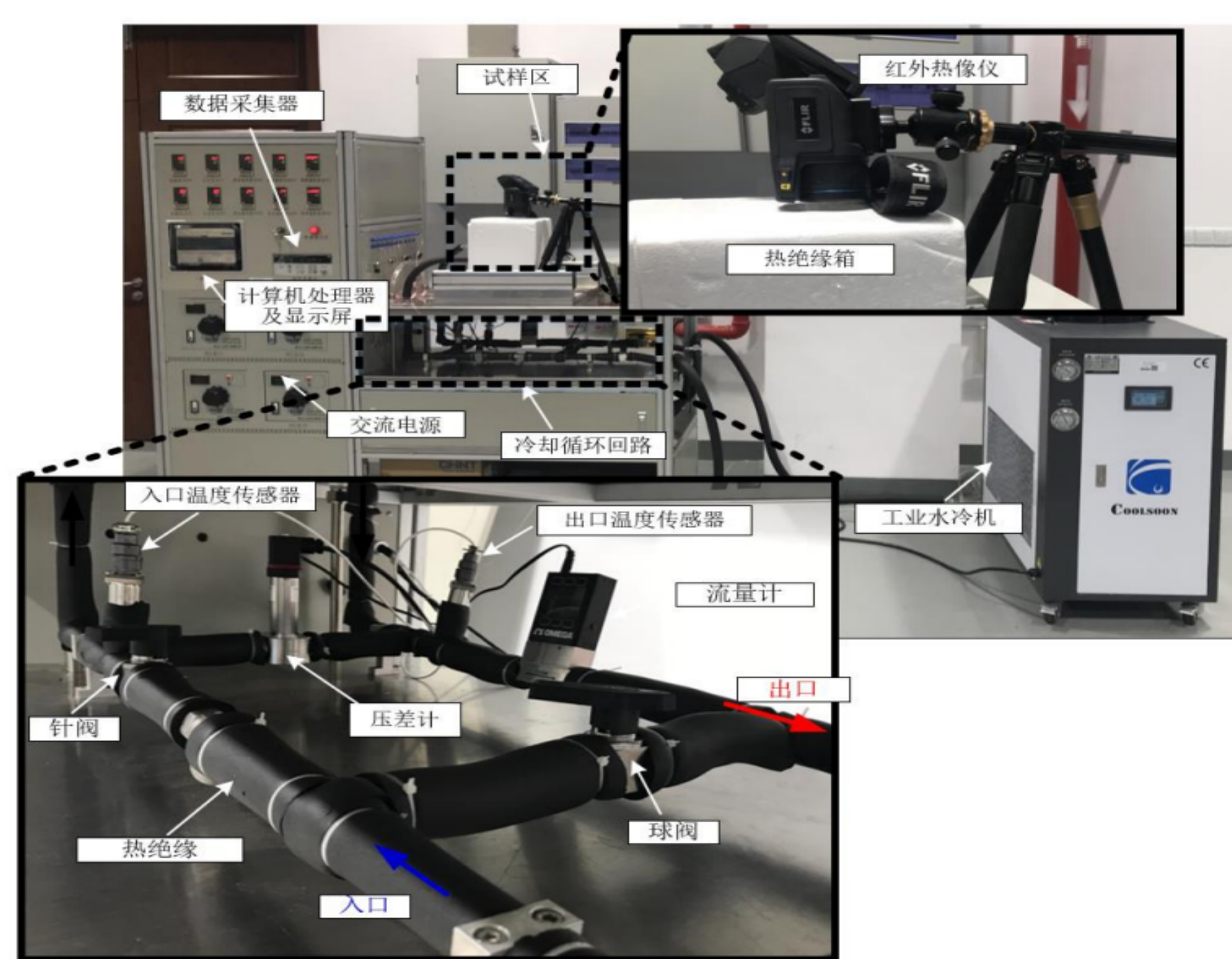


图3 散热系统实物示意图

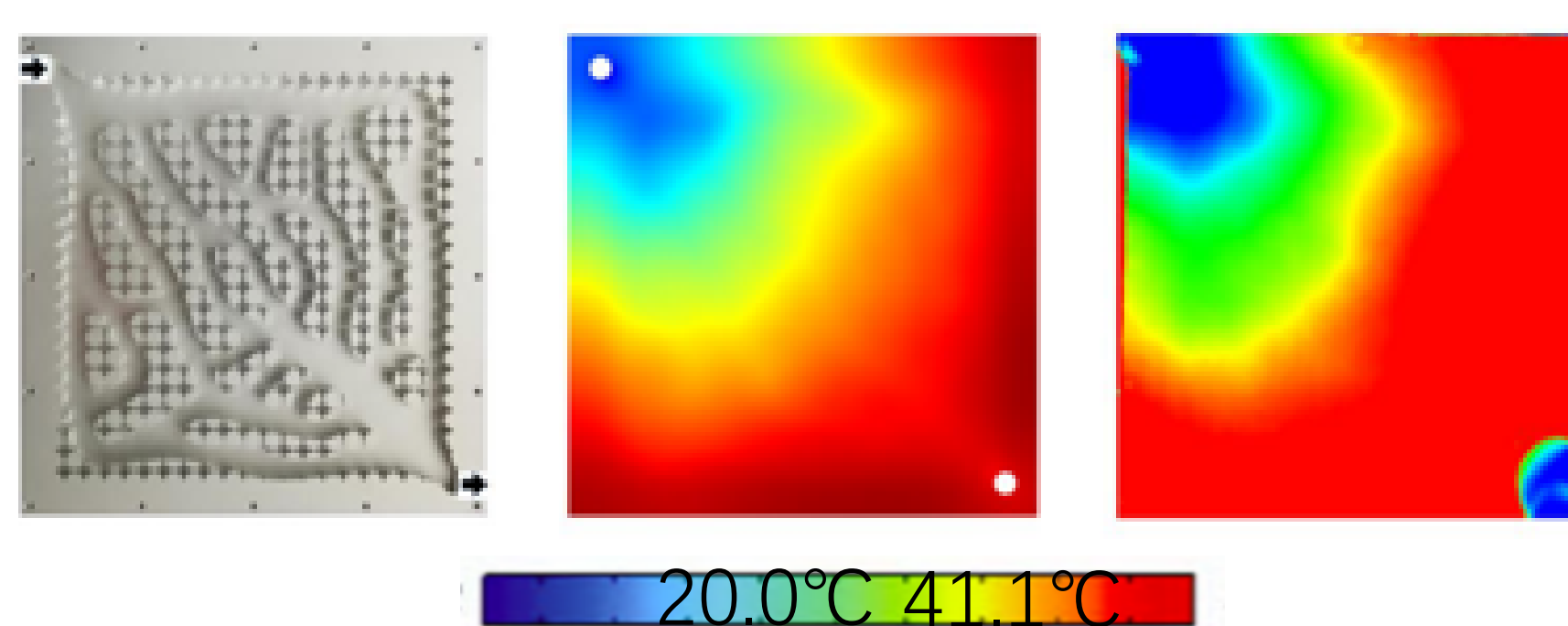


图4 加工结构以及仿真实验分析结果 (左: 仿真; 右: 实验)

结论

- (1)液冷板进出口布局对散热性能的优化具有显著影响，说明了设计中合理规划进出口位置的重要性。
- (2)同时考虑液冷板散热性能和承载能力时，增加液冷板变形能约束条件。
- (3)拓扑优化的宏观流道与仿生的微观流道相结合得到的双尺度液冷板能有效增加热交换面积，在低功耗的同时，获得良好的均温性和较低的最高温度。

发表相关论文

- [1]孟凡振,等.层次脉状结构液冷均温板优化设计研究[J].机械工程学报, 2022,58(22):426-437.
- [2]Hao Li, et. al, Experimental and numerical investigation of liquid-cooled heat sinks designed by topology optimization. International Journal of Thermal Sciences, 2019.
- [3]Hao Li, et. al, Optimal design and thermal modelling for liquid-cooled heat sink based on multi-objective topology optimization: An experimental and numerical study. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019.

