



上海海事大学
Shanghai Maritime University



2024年中国制冷展专题研讨会—制冷空调技术创新与应用

印刷电路板换热器 (PCHE) 研究进展 及其在低温领域的应用

田镇

副教授，热能教研室主任

18818213836

2024. 04. 08 北京



上海海事大学
Shanghai Maritime University



01

研究背景及现状

02

印刷电路板换热器研究进展

03

课题组完成的一些工作

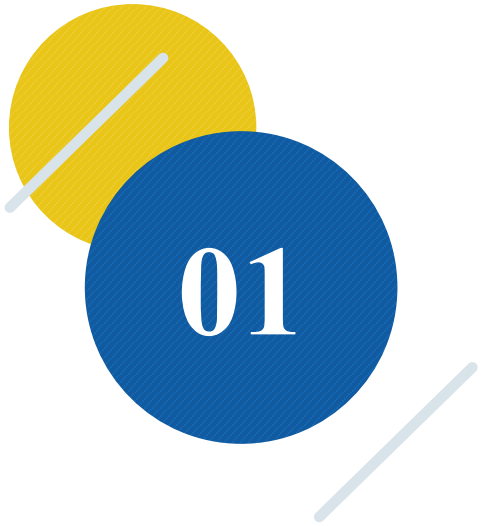
04

未来的研究工作



上海海事大學

Shanghai Maritime University



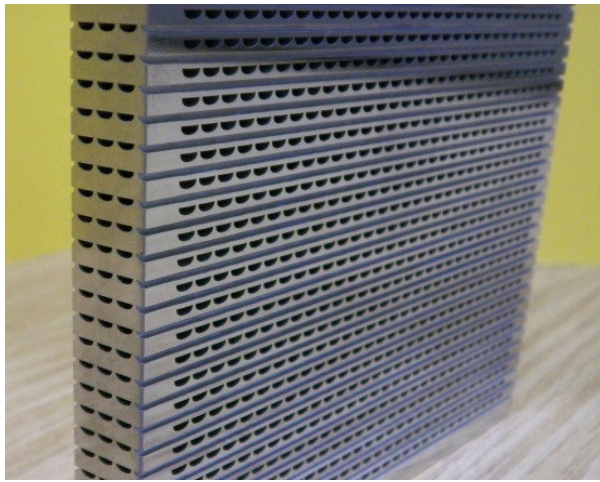
01

研究背景及现状

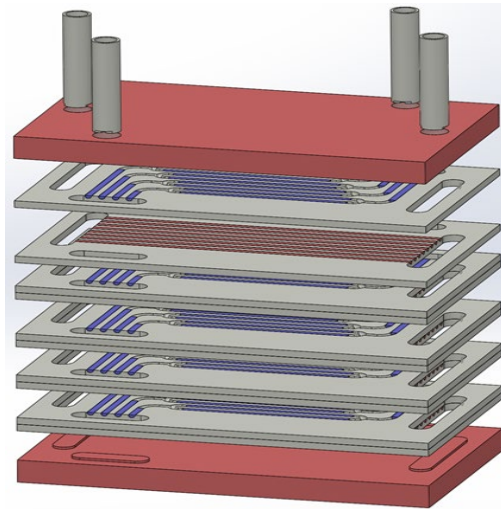


一、研究背景及现状

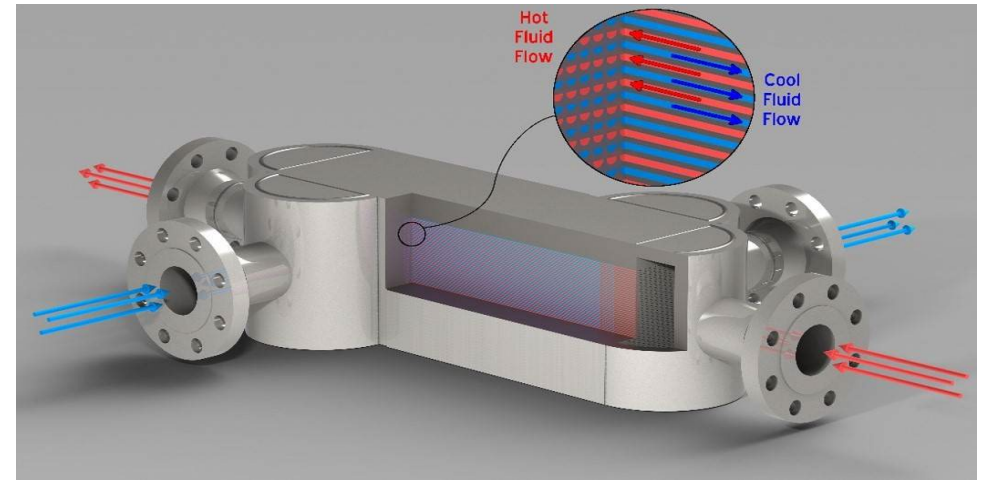
印刷电路板式换热器 (PCHE) Printed Circuit Heat Exchanger



微小通道



冷 (热) 板



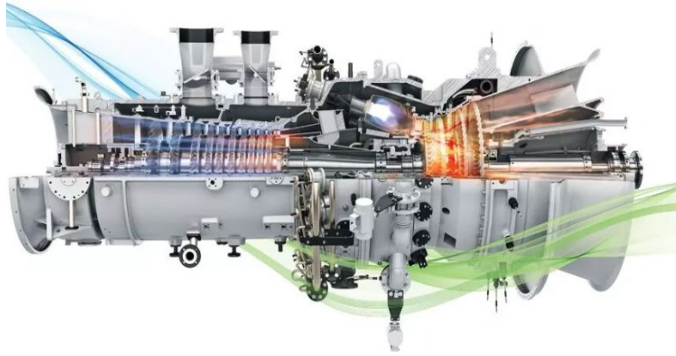
换热装置

- 金属板**电化学刻蚀**、**扩散焊**工艺、通道通常为**mm**级别
- 体积和重量**↓~85%**、耐**高温 (70K-1100K)**、耐**高压 (~60MPa)**、**大温差**快速响应
- 在**海洋工业**、**制冷**、**航空航天**等领域具有广阔的应用前景

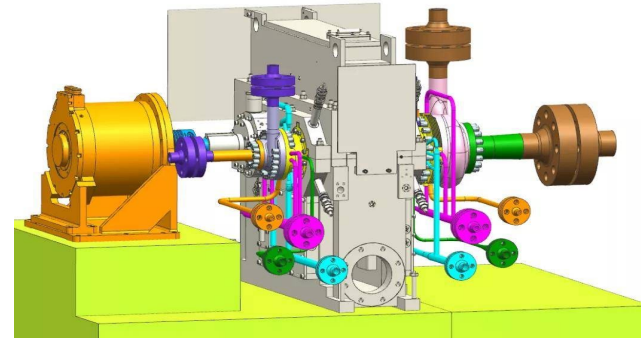
一、研究背景及现状

高温
高压
超临界

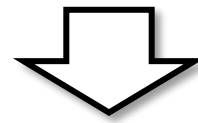
燃料燃气轮机预热



SCO₂布雷顿循环



太阳能发电

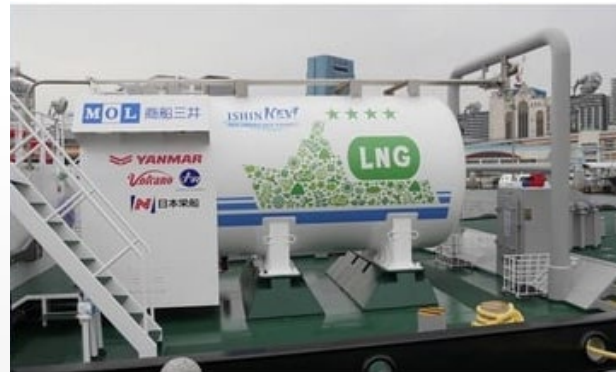


低温
高压
超临界

FSRU



FGSS



氢液化



一、研究背景及现状

国家双碳战略：



- 习近平主席在第七十五届联合国大会上提出“**3060双碳目标**”
- 交通运输部“**十四五规划**”加快低碳转型、促进零排放发展

国际排放条约：



- 2030年和2050年，航运业**碳强度**将比2008年**下降40%和70%**
- 国际航运公会于2021年5月递交“**碳排税**”提案



LNG混合动力船舶

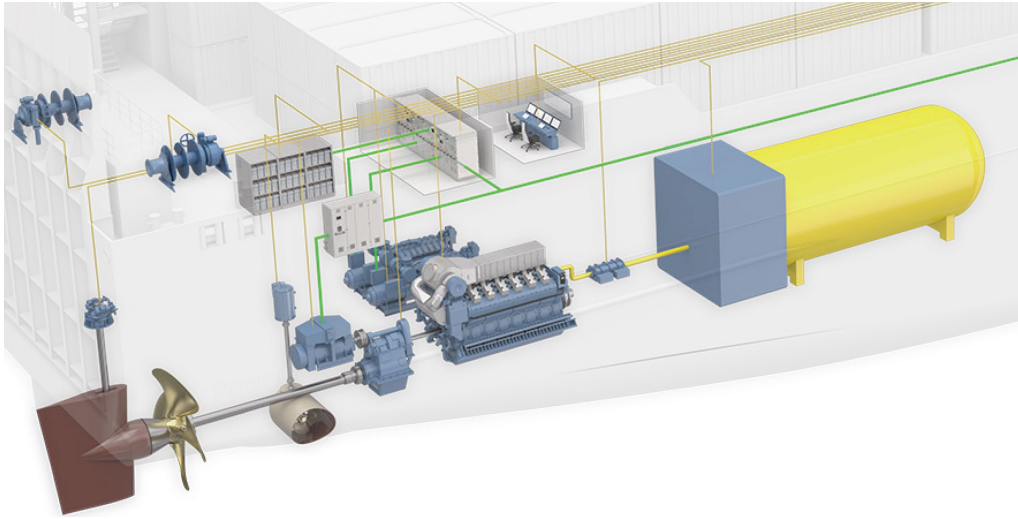


浮式储存及再气化装置FSRU



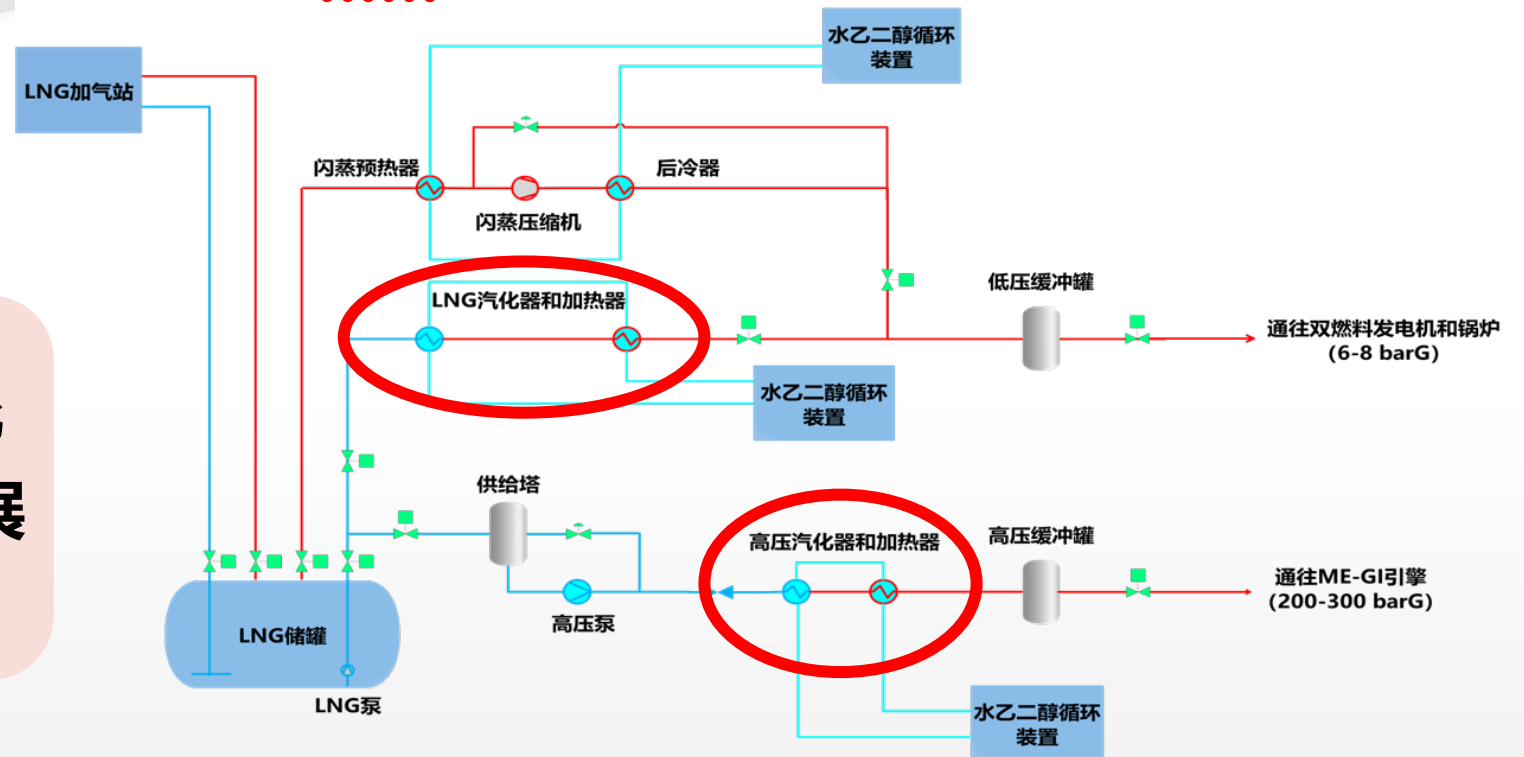
一、研究背景及现状

船用LNG燃料供气系统 (FGSS)



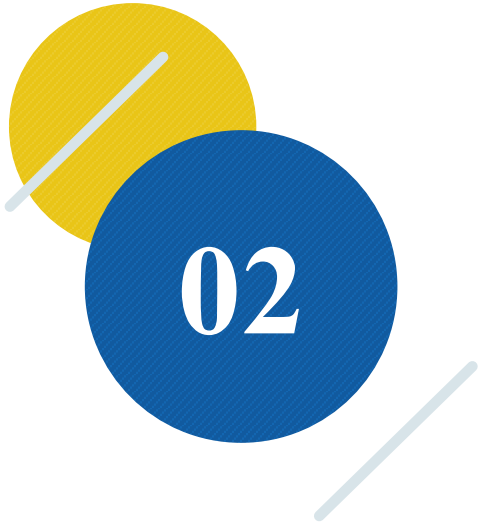
- LNG (-163°C)
- 主机供气温度 (20~60°C)
- 超临界LNG (~300bar)
- 防冻结问题
- 海洋摇晃工况
-

紧凑式、耐高压、抗变形、高热流密度的换热装置是FGSS模块化发展的迫切需求





上海海事大学
Shanghai Maritime University



印刷电路板换热器研究进展





二、印刷电路板换热器研究进展

PCHE通道类型

连续型通道

直线型通道

zigzag通道

正弦型通道

非连续型通道

翼型翅片

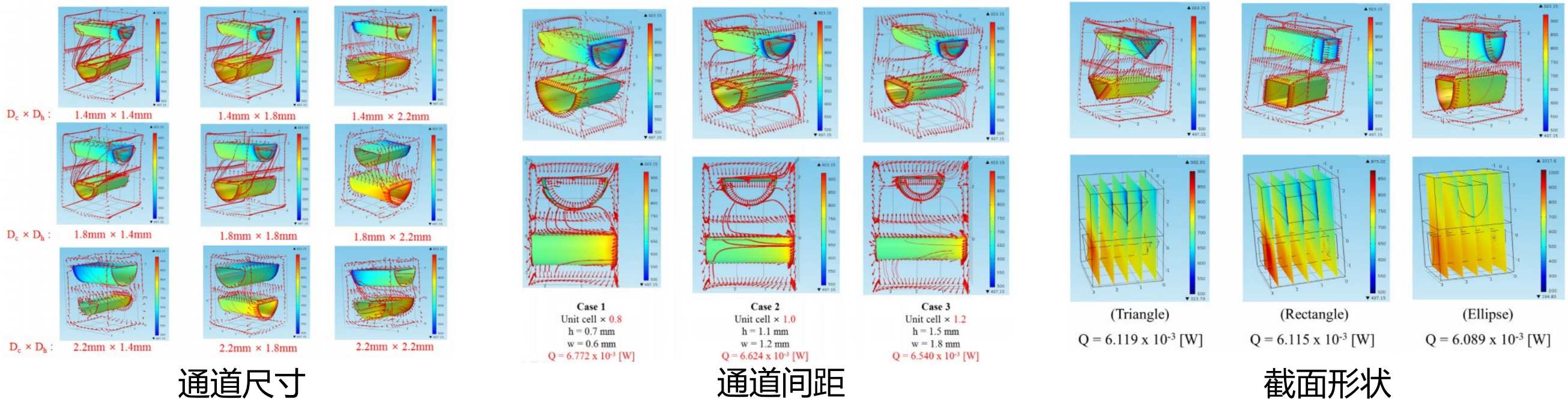
S型翅片

其他多样翅片

二、印刷电路板换热器研究进展

直线型通道

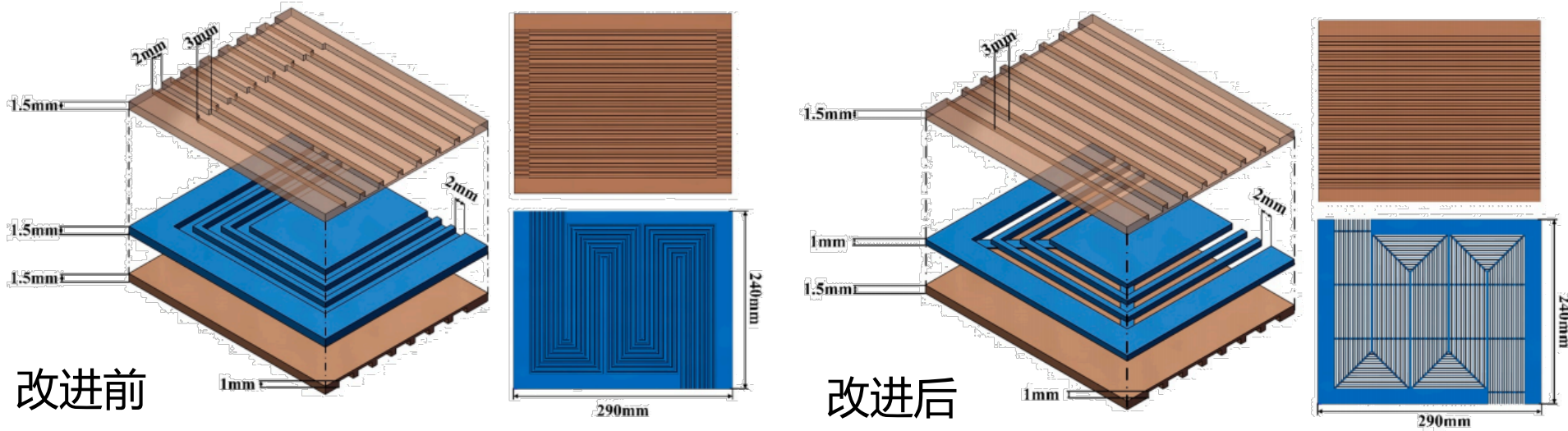
直线型通道的结构参数包括**等效水力直径**、**横截面形状**、**横向节距**和**垂直节距**



- 随着通道尺寸的增大，PCHE的热性能单调降低
- 通道间距对PCHE的热性能影响不大。然而，间距对PCHE的结构可靠性有显著影响
- 在通道水力直径一定的情况下，通道截面形状对热工性能的影响不显著

二、印刷电路板换热器研究进展

直线型通道新探索



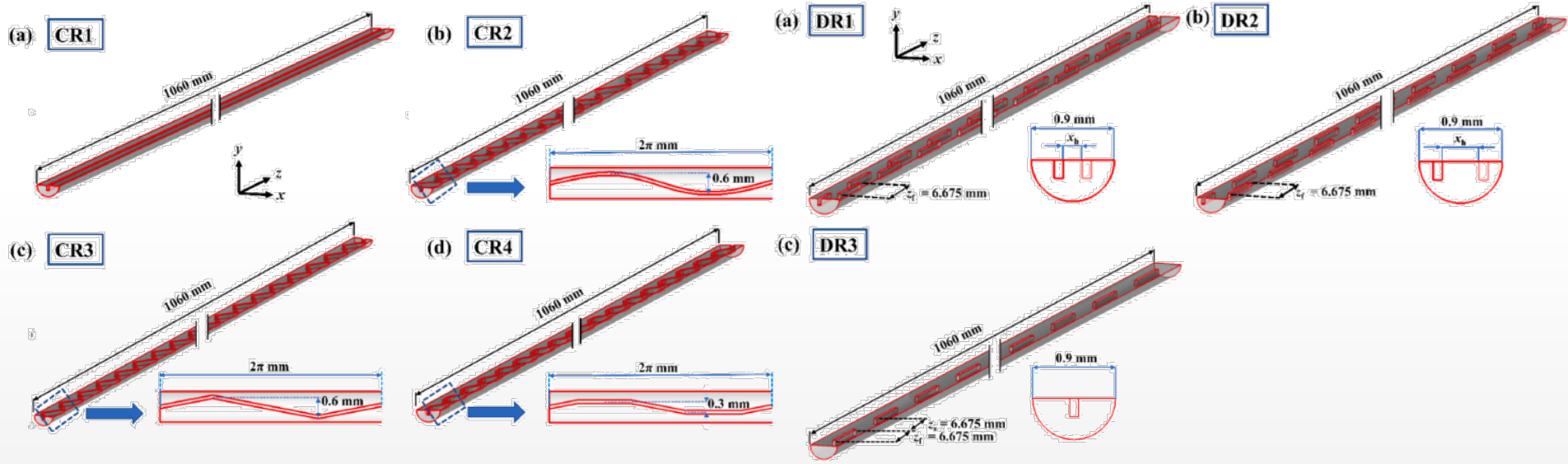
综合性能提高

11.92%

H. Zhang *et al.*, Analysis of printed circuit heat exchanger (PCHE) potential in exhaust waste heat recovery. *Applied Thermal Engineering* 204, (2022)

肋形结构增强协同作用，
增强了换热；短肋结构 (DR3
沟道) 综合性能最好，相对提
高19.3 ~ 19.8%。

Z. Han, J. Guo, X. Huai, Theoretical analysis of a novel PCHE with enhanced rib structures for high-power supercritical CO₂ Brayton cycle system based on solar energy. *Energy* 270, (2023)

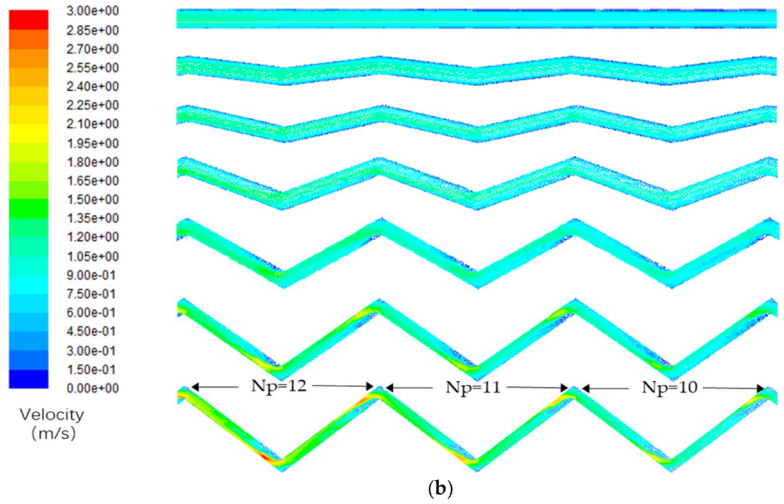




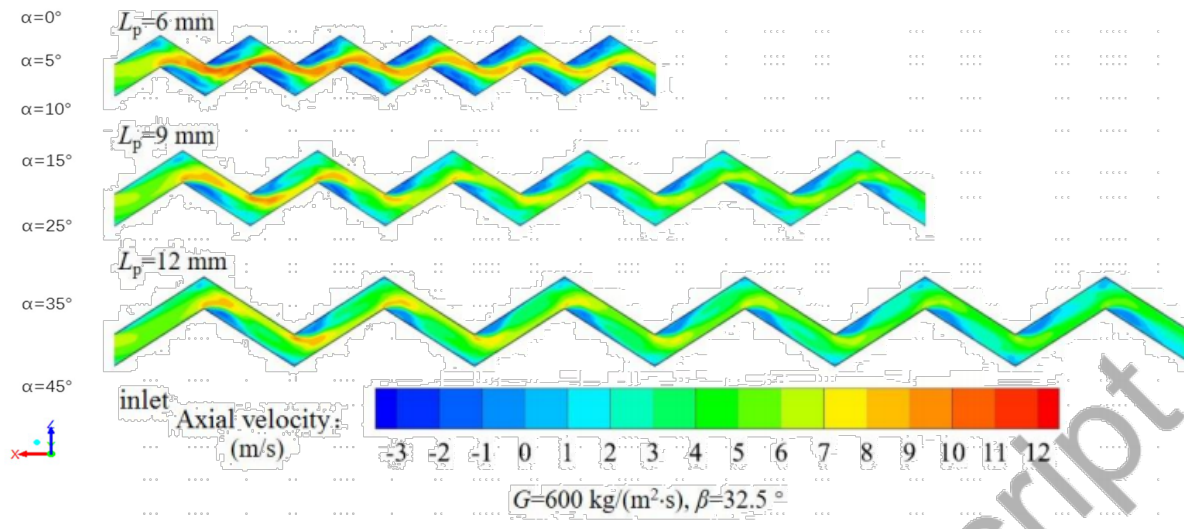
二、印刷电路板换热器研究进展

zigzag通道 (包括正弦)

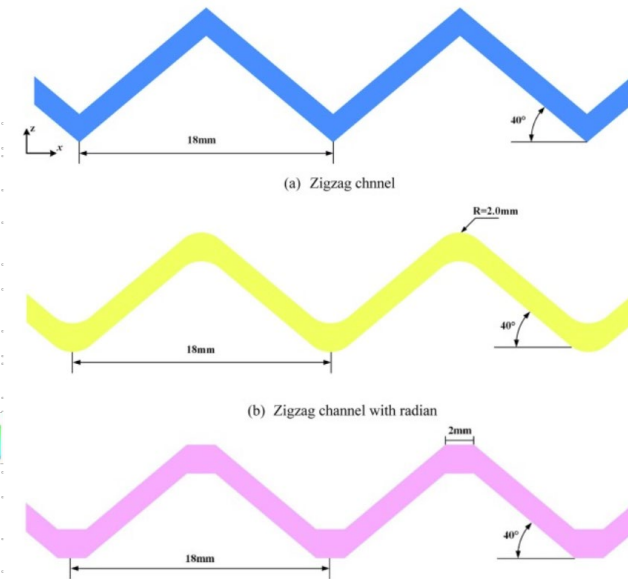
增加结构参数包括之字角度、之字节距、横向节距和转角半径



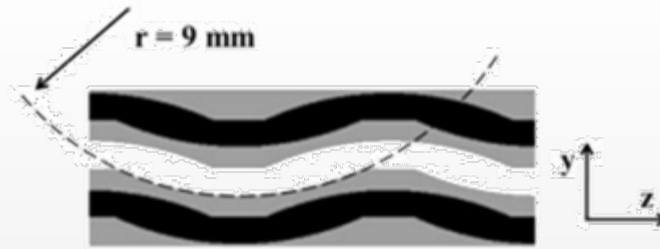
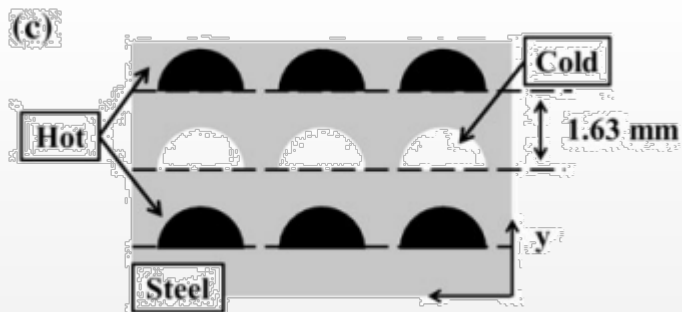
15°~25°综合性能最佳



节距越短, 换热效果增强, 但压降增大



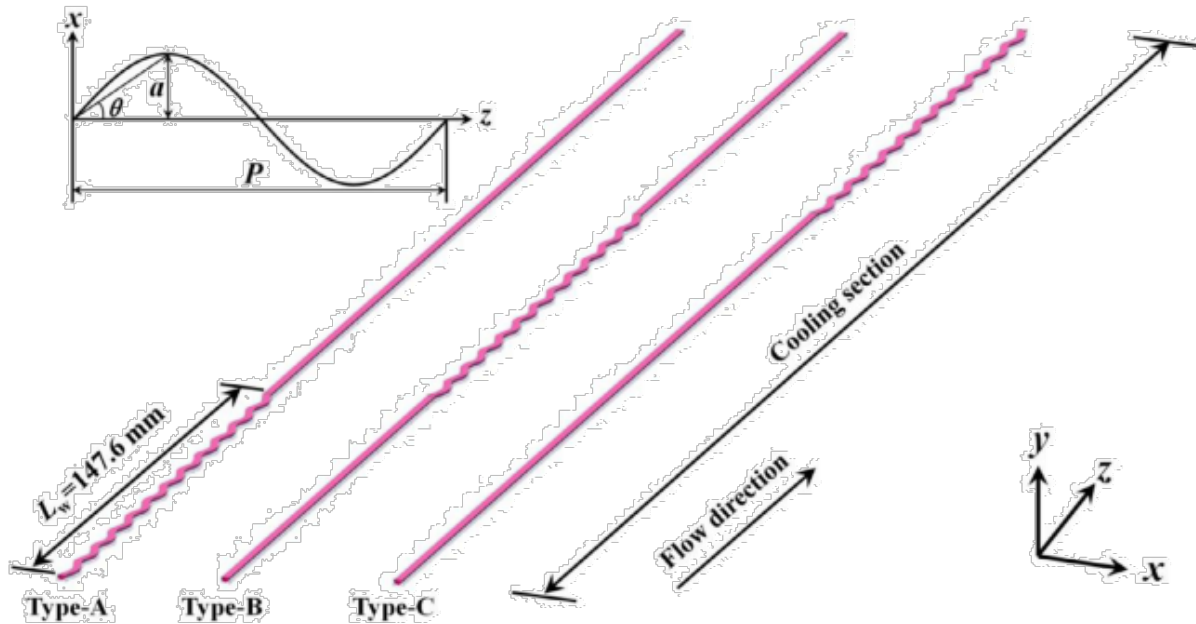
圆角可提高通道的热-水力性能, 进而出现正弦通道



Y方向上波动的zigzag通道形成高低起伏

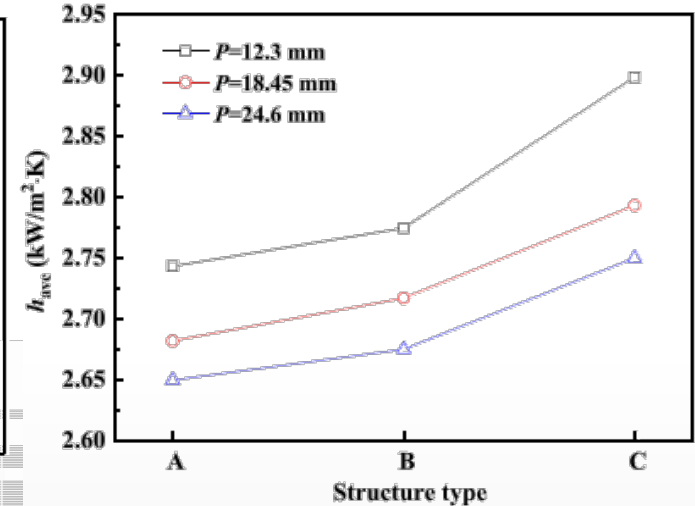
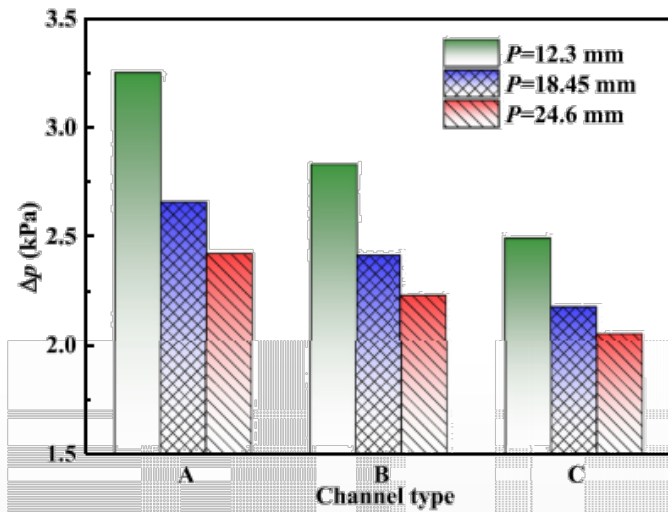
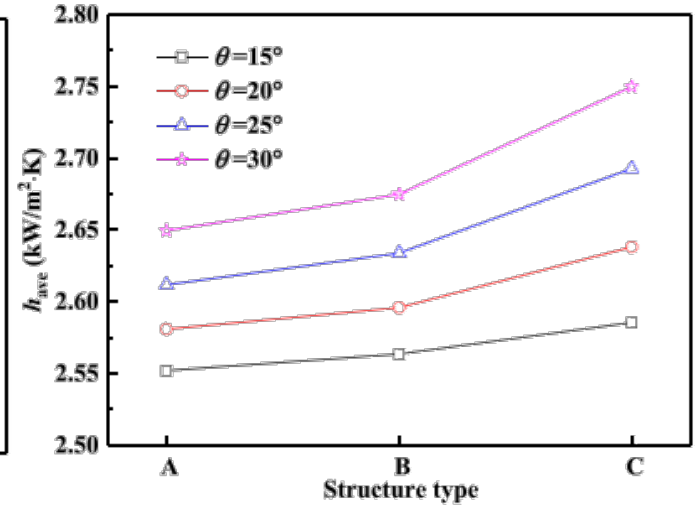
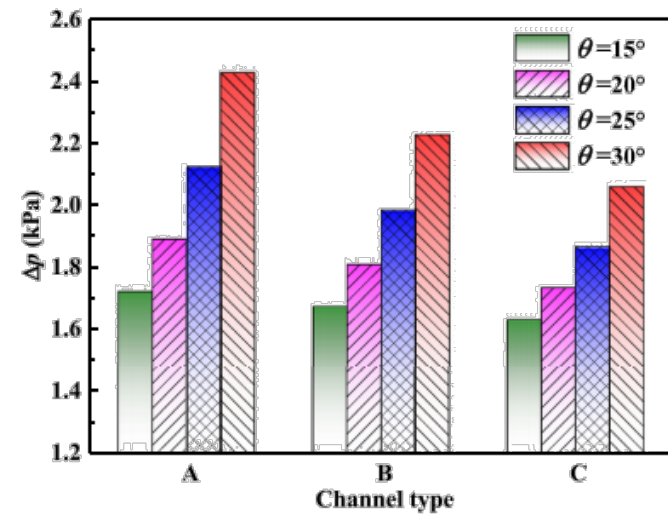
二、印刷电路板换热器研究进展

zigzag通道新探索



基于热物性匹配的分段强化传热思想

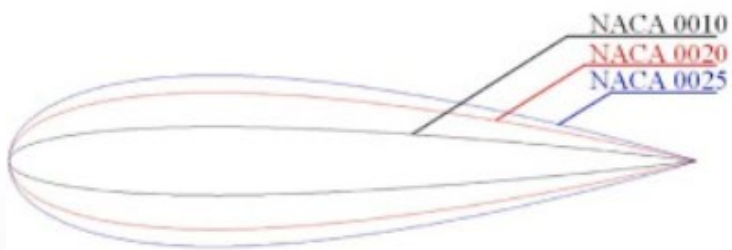
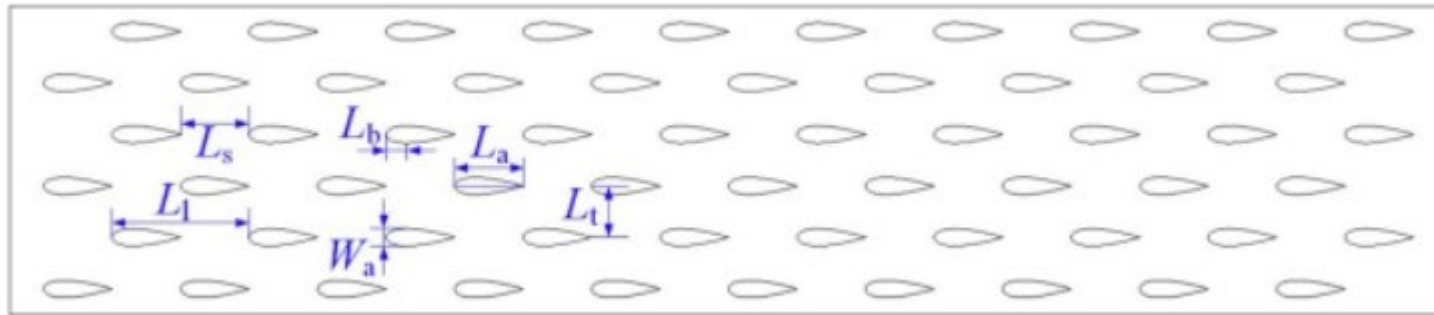
在其研究范围内，C型通道最大压降降低效率为**23%**。与直通道相比，C型换热系数的提升是A型的**2.6倍**。与全波通道和其他两种混合通道相比，C型通道的综合热工性能最好。



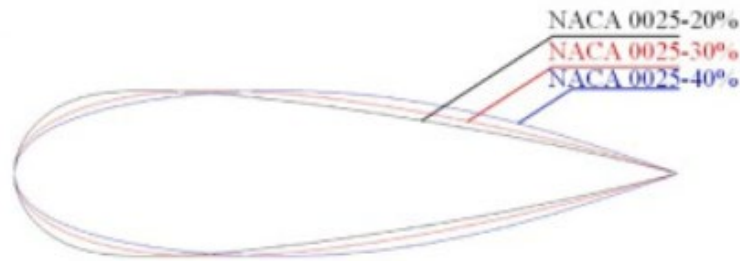
二、印刷电路板换热器研究进展

翼型翅片

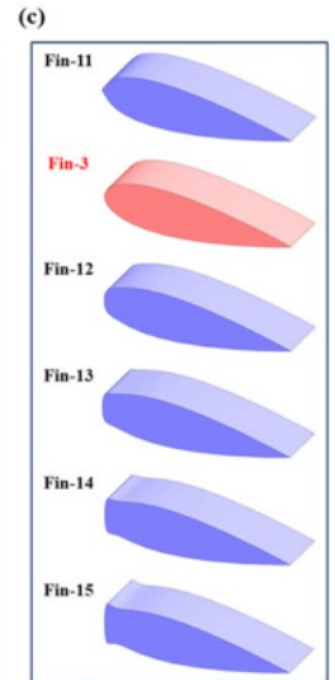
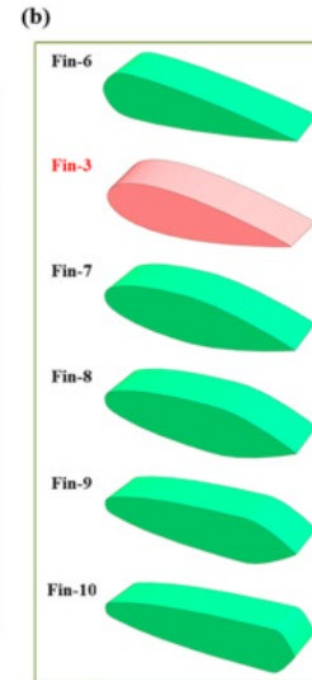
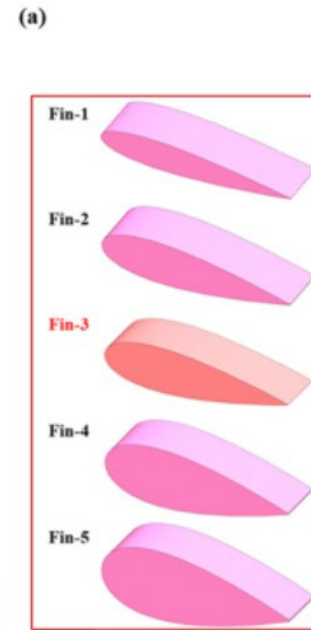
结构参数包括**形状参数**、**最大厚度**、**排布方式**、**横向节距**和**交错节距**等



(a) Schematic diagram of three different airfoils



(b) Schematic diagram of the maximum thickness location of the airfoil (NACA 0025)

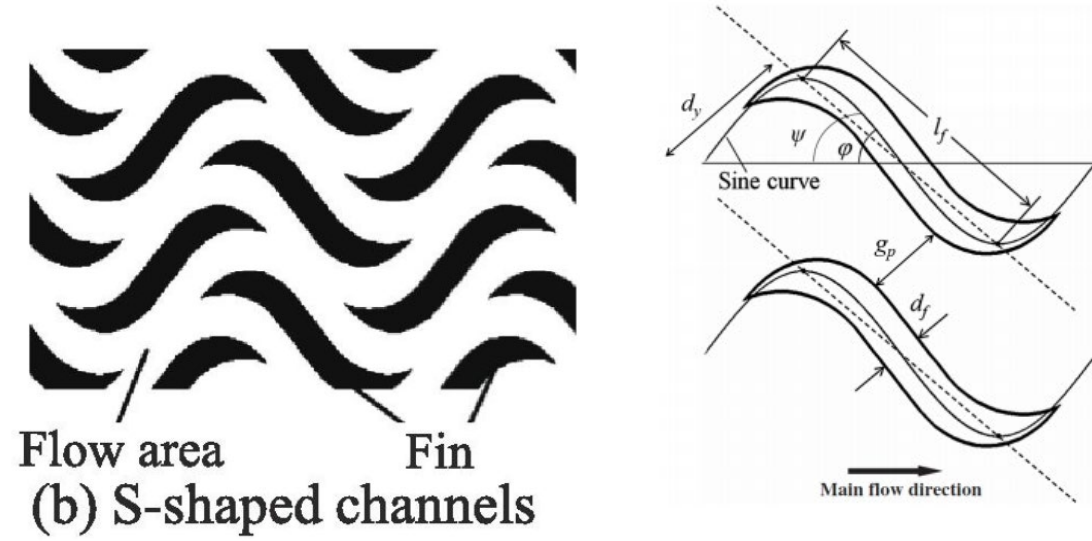




二、印刷电路板换热器研究进展

S型翅片

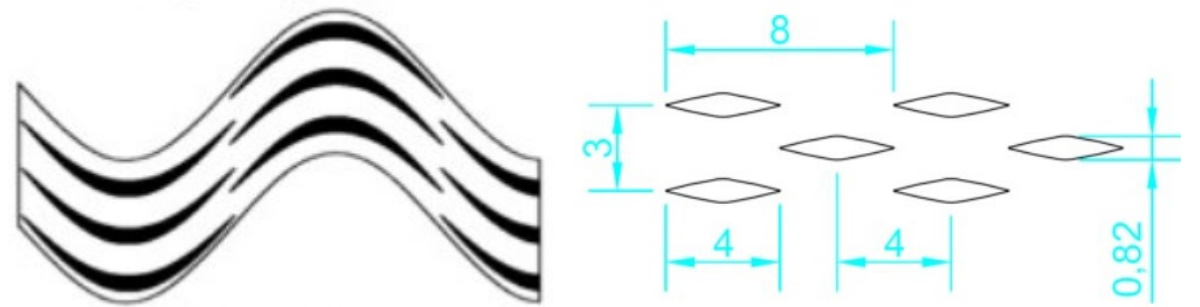
结构参数包括翅片角度和翅片长度



大翅片长度的小翅片角通道能够减小压降，而小翅片长度的大翅片角通道有利于提高换热器的热效率。根据需求选择合适的结构。

未来，有更多的设计因素，如翅片弧长和雷诺数依赖性。

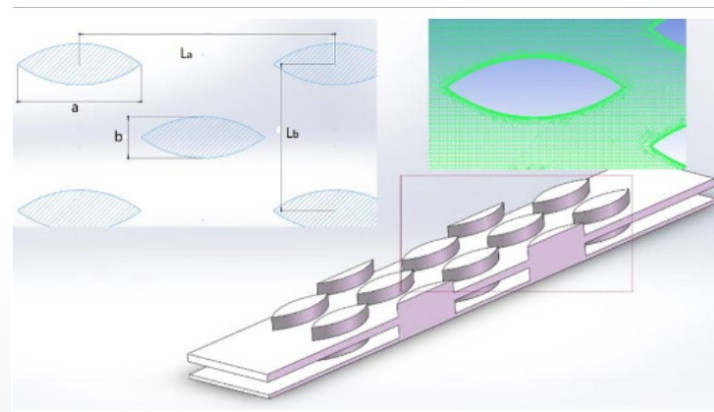
其他新型翅片



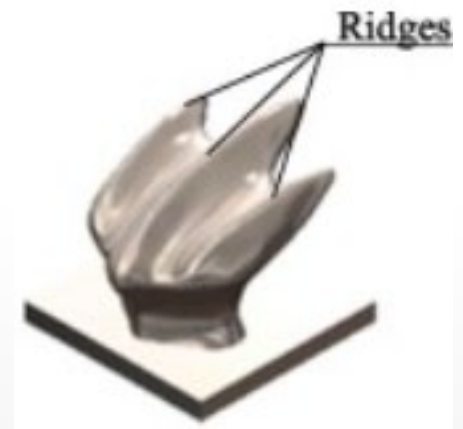
新月形

菱形

仿生



剑鱼鳍

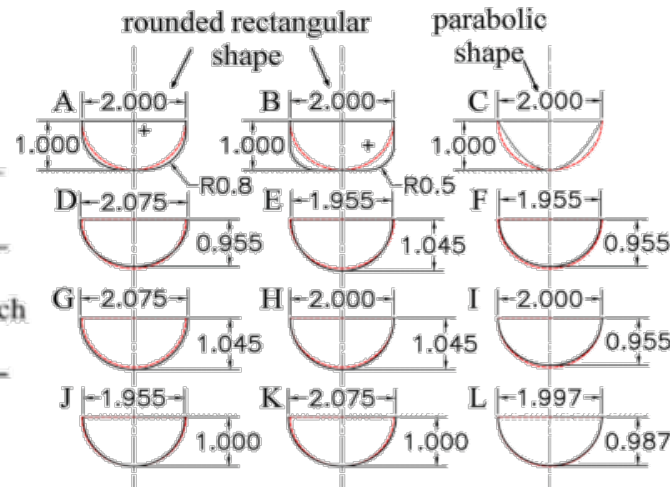
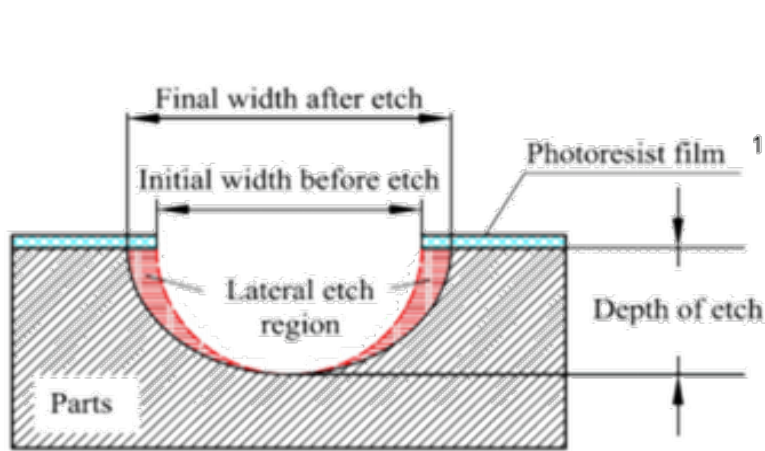


鲨鱼齿

二、印刷电路板换热器研究进展

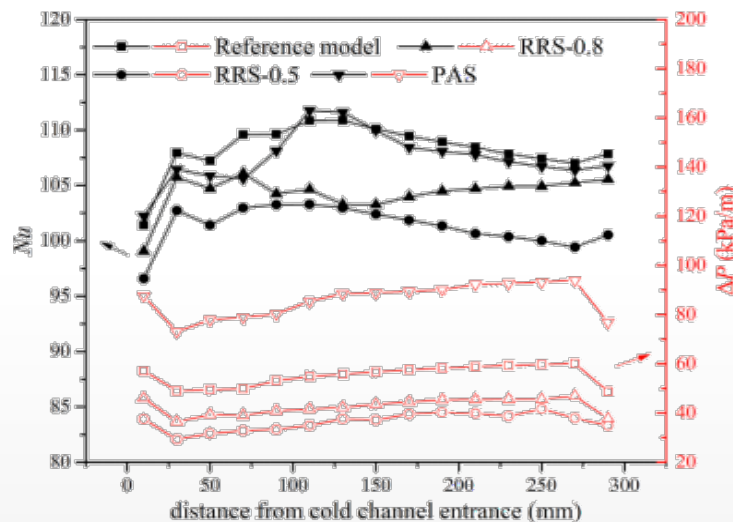
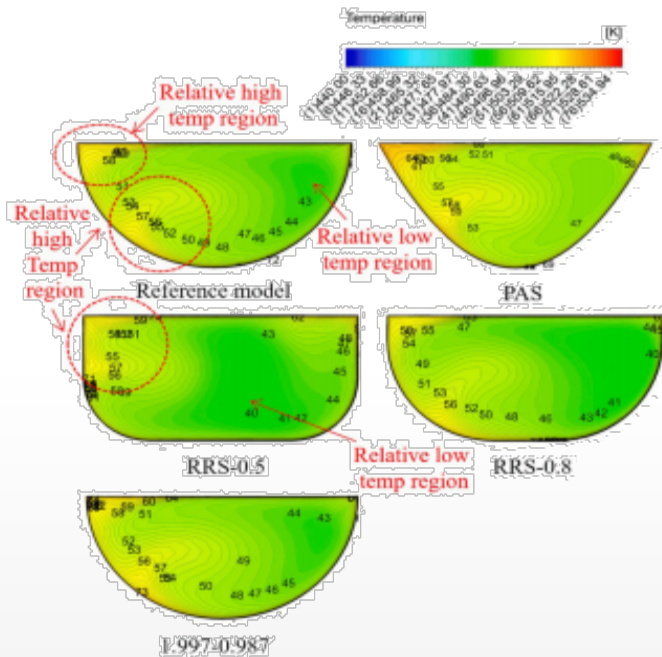
高温高压的应用场景

存在着**高温设计问题**、**材料可用性**和**制造问题**需要解决



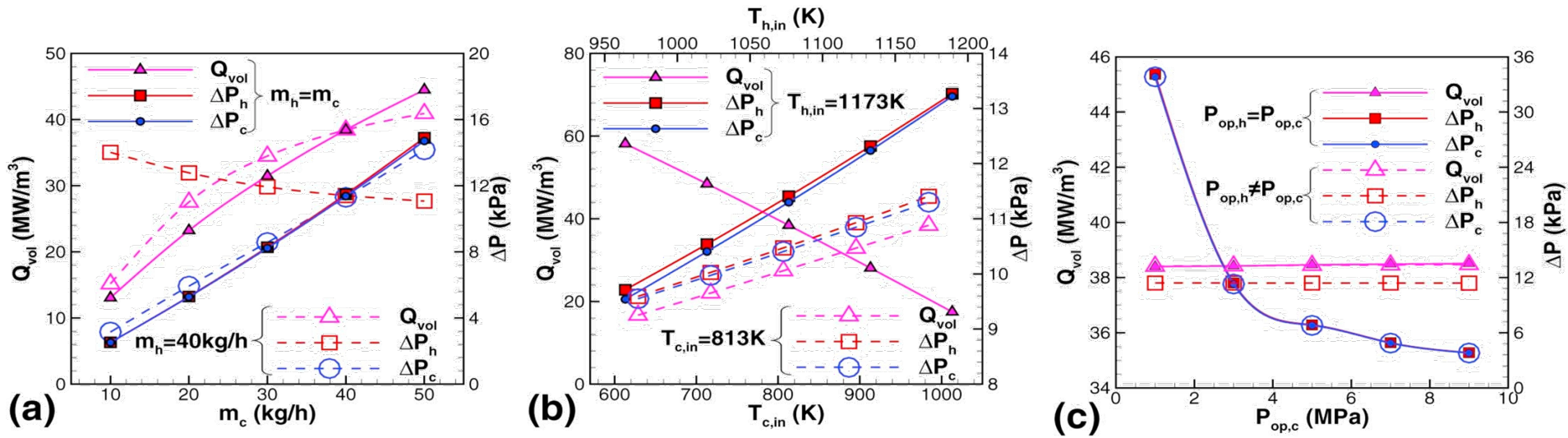
在SCO₂布雷顿循环中，制作过程造成的**几何形状偏差**对通道热水力性能的影响

- **通道宽度**对换热的影响更大，而**通道深度**对压降的影响更大。
- 蚀刻过程中应**避免沟道截面的抛物线形状**，圆角矩形形状可以显著降低压降，当半径为0.5 mm时，可降低压降约34%。
- 扩散焊后，通道层数越多或厚度越大的焊块，其水力直径的相对偏差逐渐减小。

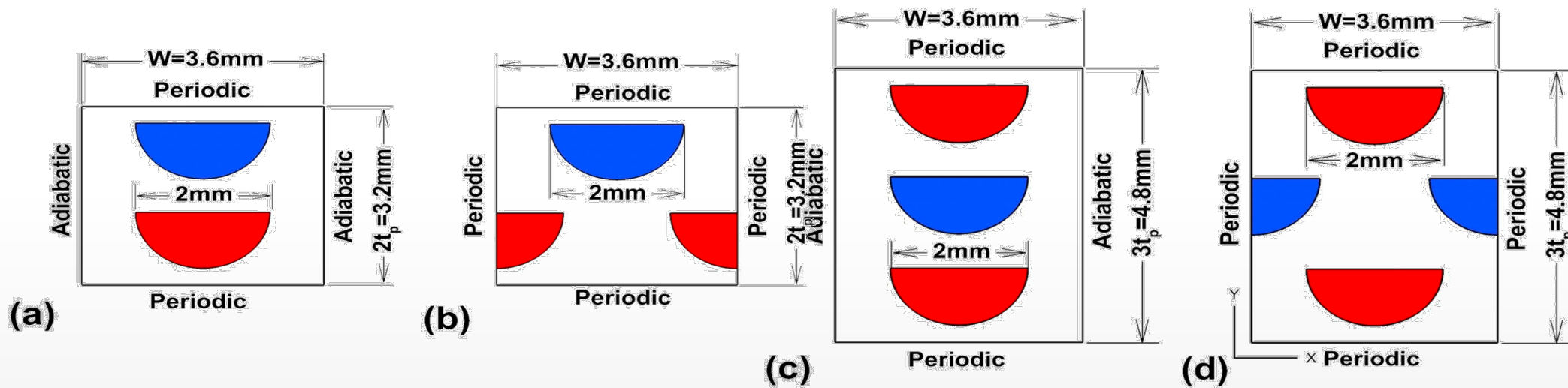


二、印刷电路板换热器研究进展

高温高压的应用场景



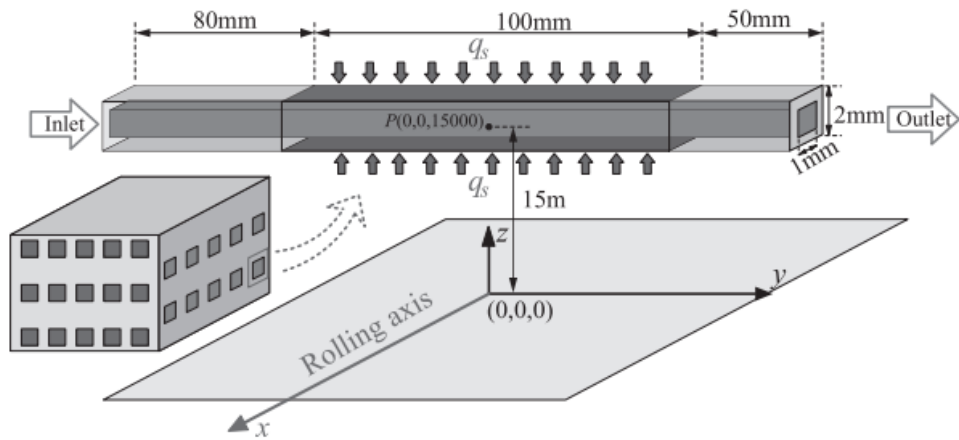
PCHE用作热核聚变实验堆换热器时，探究操作条件、排布方式、单双组通道的性能



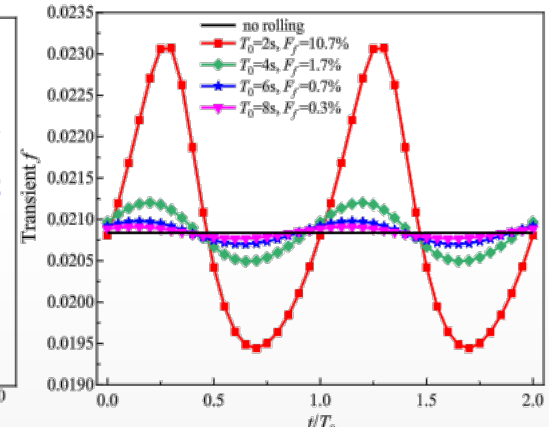
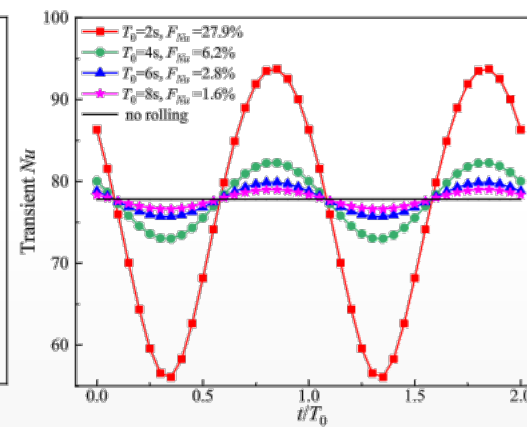
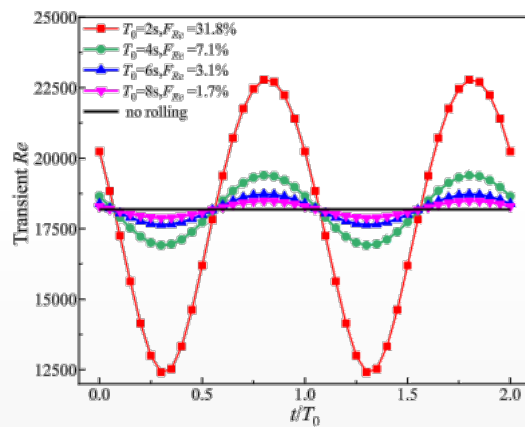
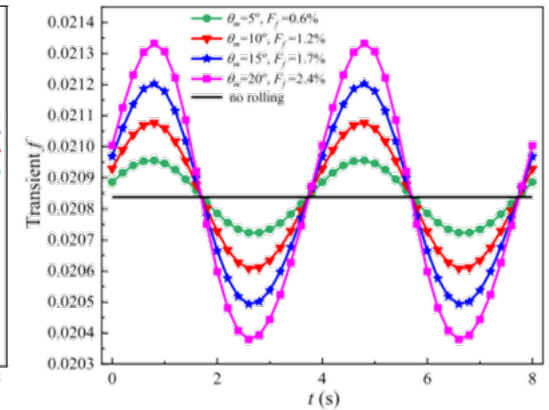
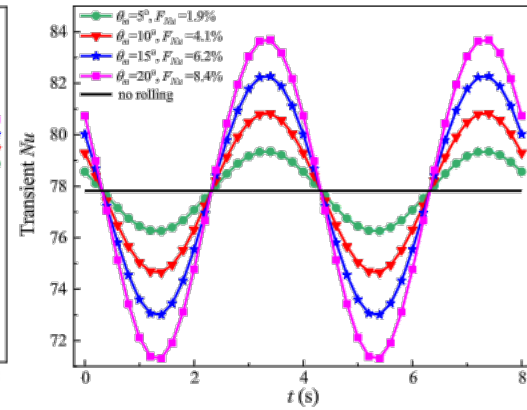
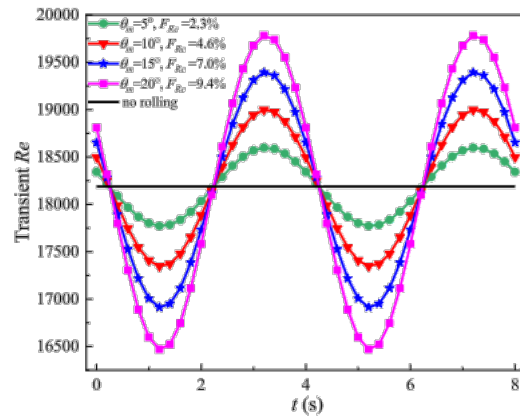
二、印刷电路板换热器研究进展

低温高压的应用场景

PCHE用作FSRU中的汽化器，面临着独特的**海洋环境**，对其的**紧凑型**和**稳定性**有更高的要求。



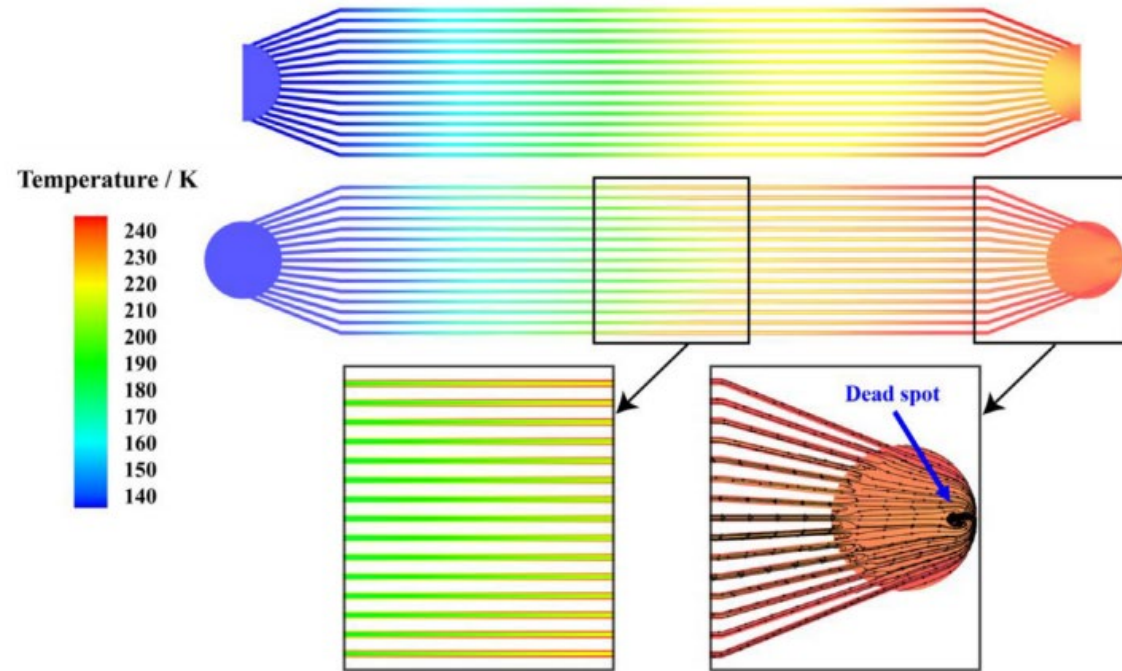
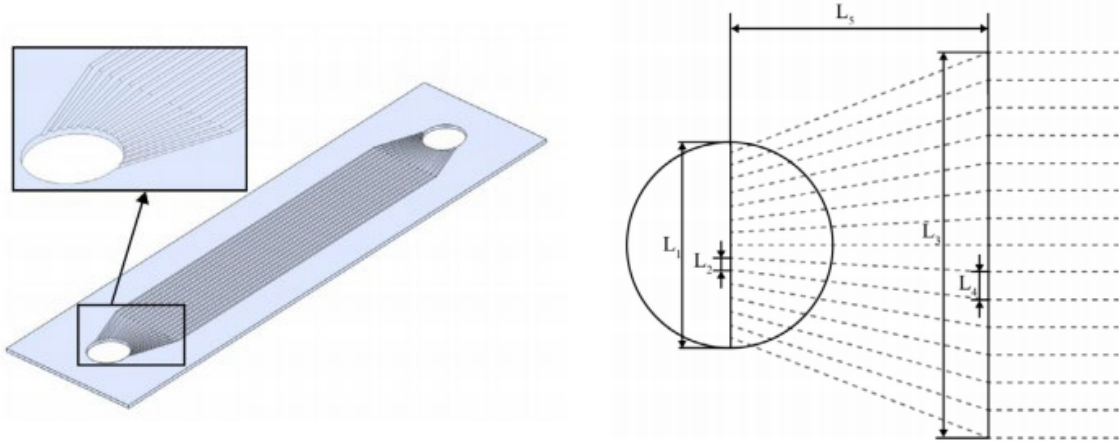
- Re 、 Nu 和 f 在滚动运动下的波动周期与滚动周期相似。
- 减小滚动周期和增大滚动幅值会增加波动的效果。
- 滚动效应首先影响速度分布，然后速度影响换热。



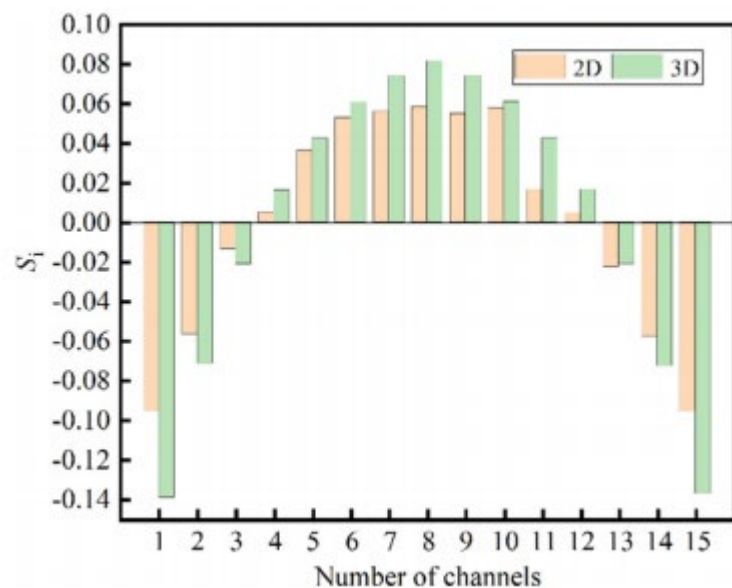
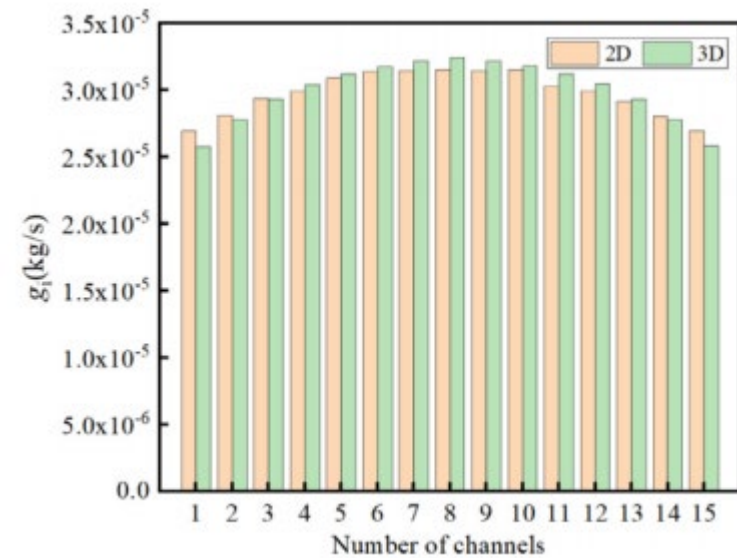
二、印刷电路板换热器研究进展

低温高压的应用场景

流动不均是PCHE在实际应用中存在的一个重要问题，导致换热器的性能下降。



- SLNG在中间通道的质量流量最大，向上下通道依次减小。
- 出口歧管内回流和涡流造成的**死点**降低了流动性能。

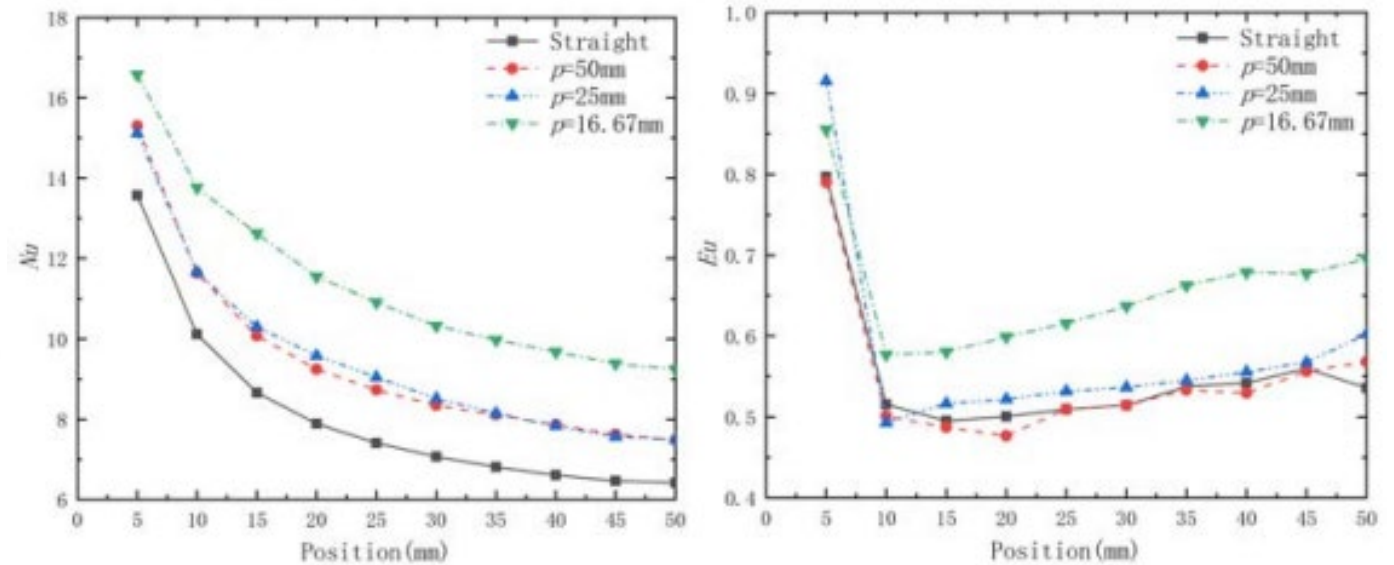
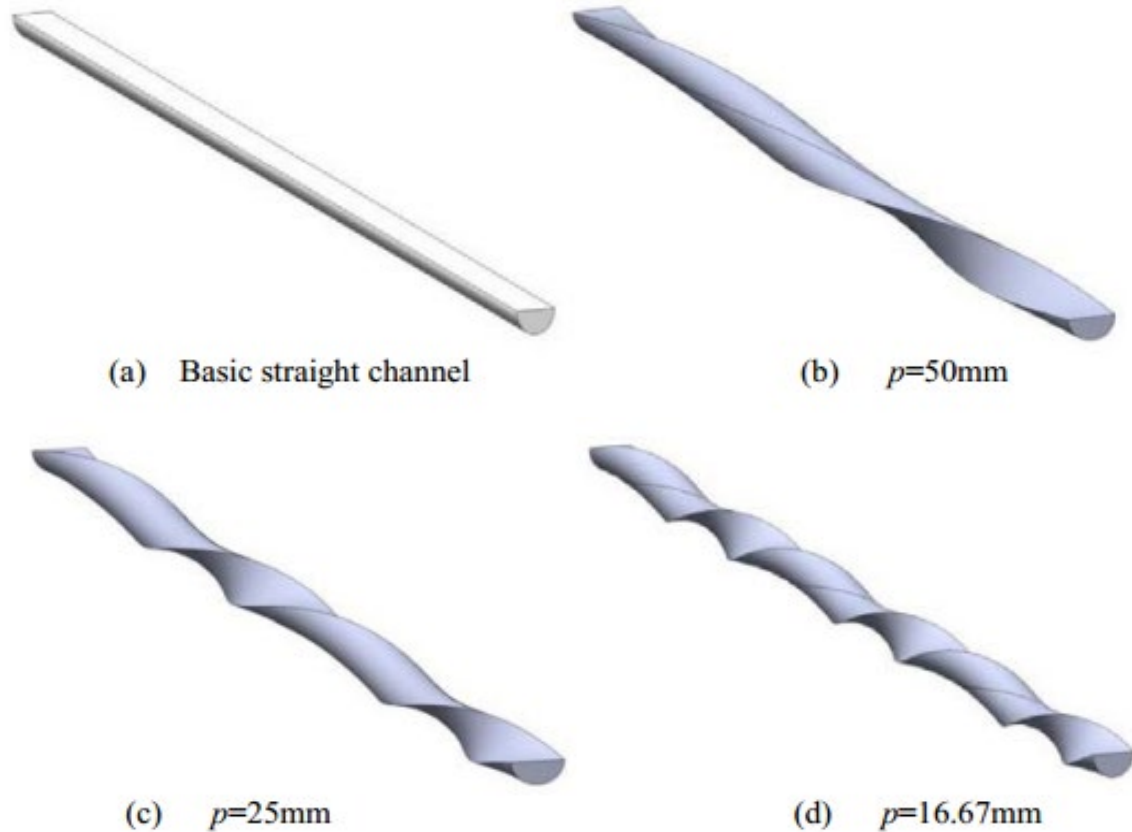




二、印刷电路板换热器研究进展

低温高压的应用场景

对于**稳定安全**的LNG，建立**螺旋**微通道。

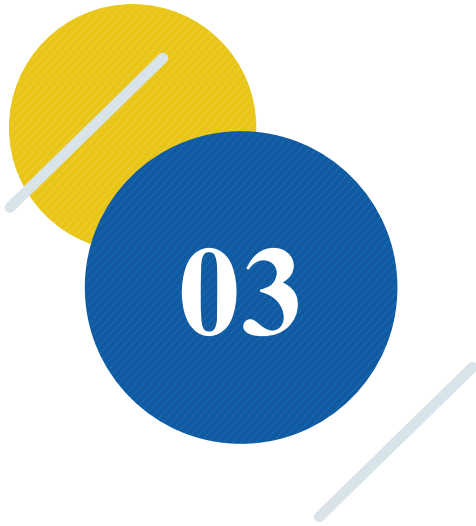


随着节距的减小，换热性能得到改善，但流动特性降低。与直线通道相比，**适当螺距值**的螺旋通道可以显著改善换热性能，但对流动特性的影响较小。



上海海事大學

Shanghai Maritime University



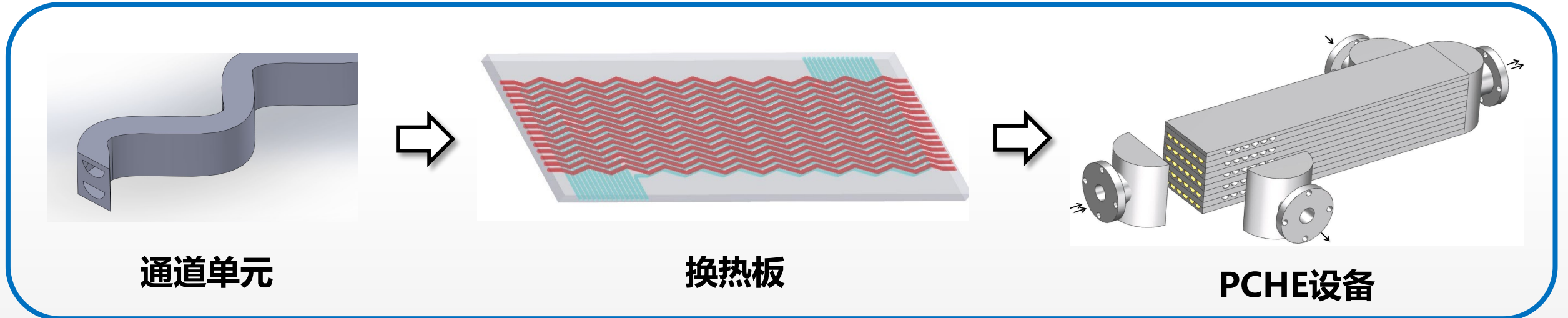
课题组完成的一些工作



课题支持

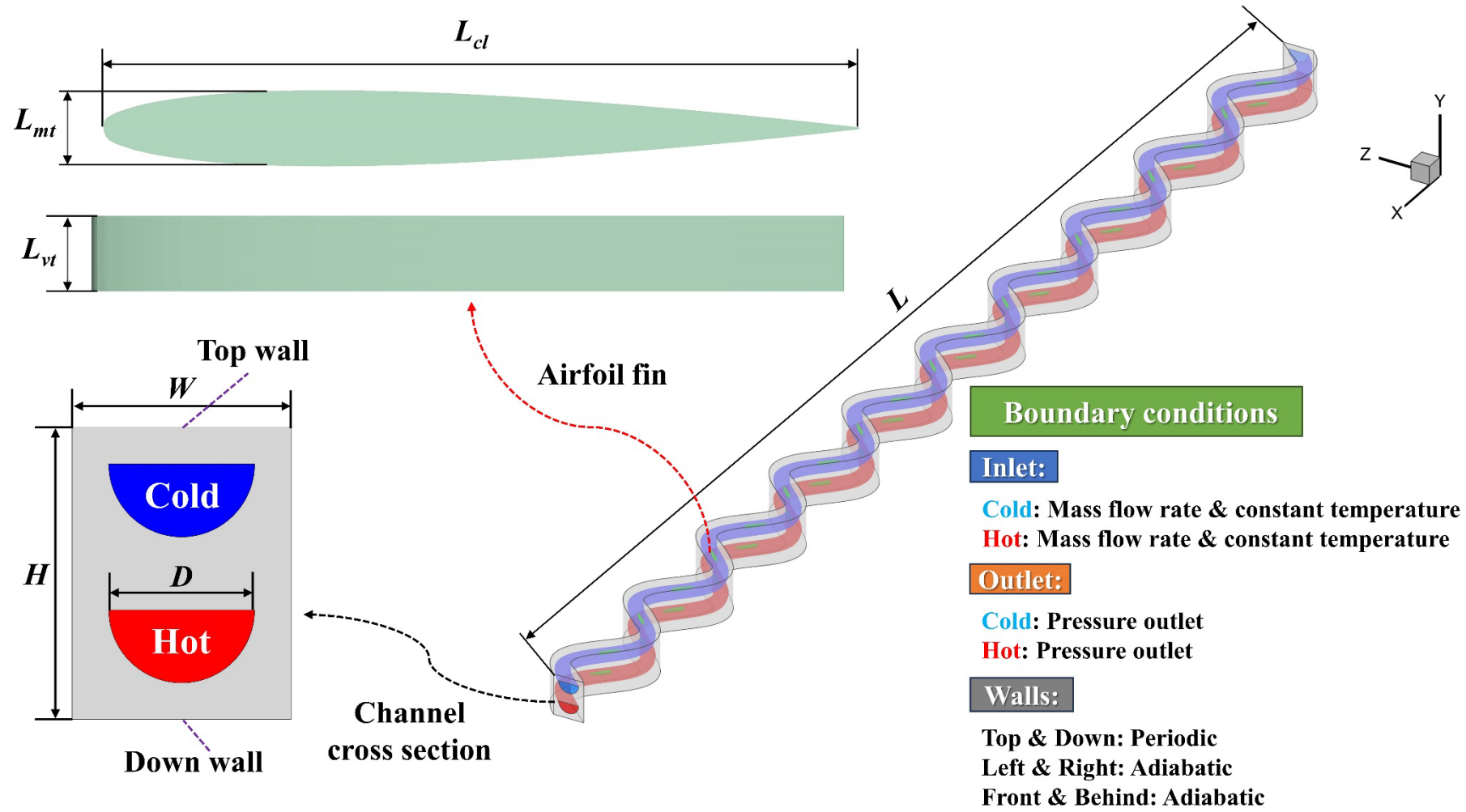
- **中央引导地方科技发展资金项目**—LNG海洋油气领域用换热设备性能研究
- **上海市自然科学基金**—海洋环境下微尺度冷凝热-流-力三场耦合机理研究
- **海南省重点研发计划**—面向深远海天然气高效液化的微纳尺度相变换热关键技术及装置研发

研究思路



三、课题组完成的一些工作

通道优化——正弦通道+翼型翅片结构



D	=	1.0 mm
H	=	2.0 mm
W	=	1.5 mm
L	=	$20\pi \text{ mm}$
L_{cl}	=	1.0 mm
L_{mt}	=	0.1004 mm
L_{vt}	=	0.1 mm

冷热流体呈**逆流状态**

冷通道: 32MPaLNG 113.15K

进口质量流量: 0.4-1.2kg/h

热通道: 0.1MPa乙二醇 293.15K

进口质量流量: 12kg/h

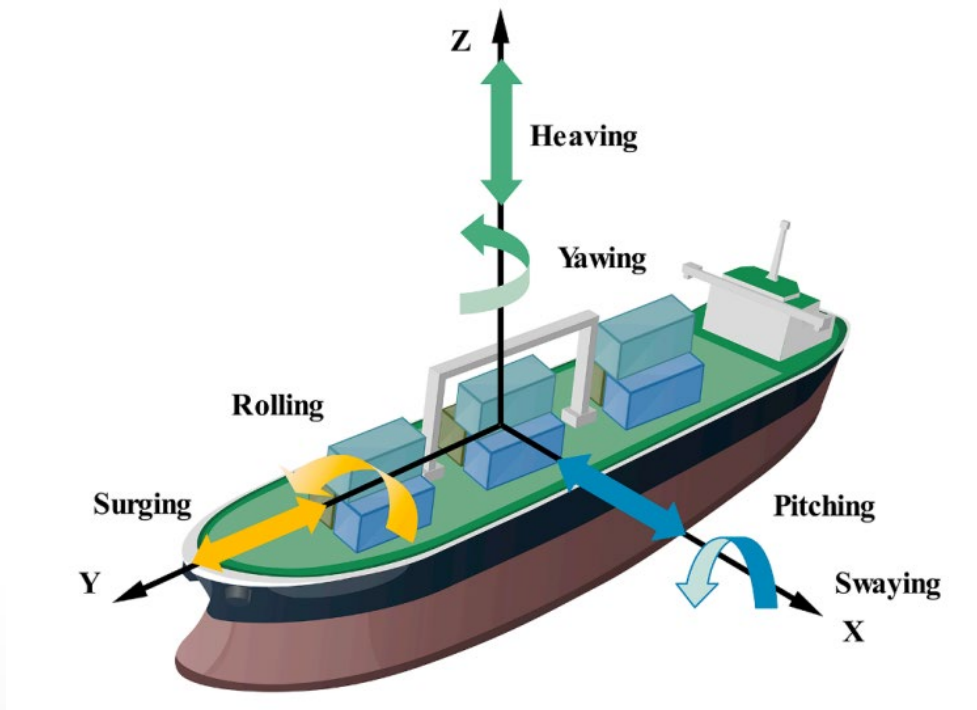


三、课题组完成的一些工作

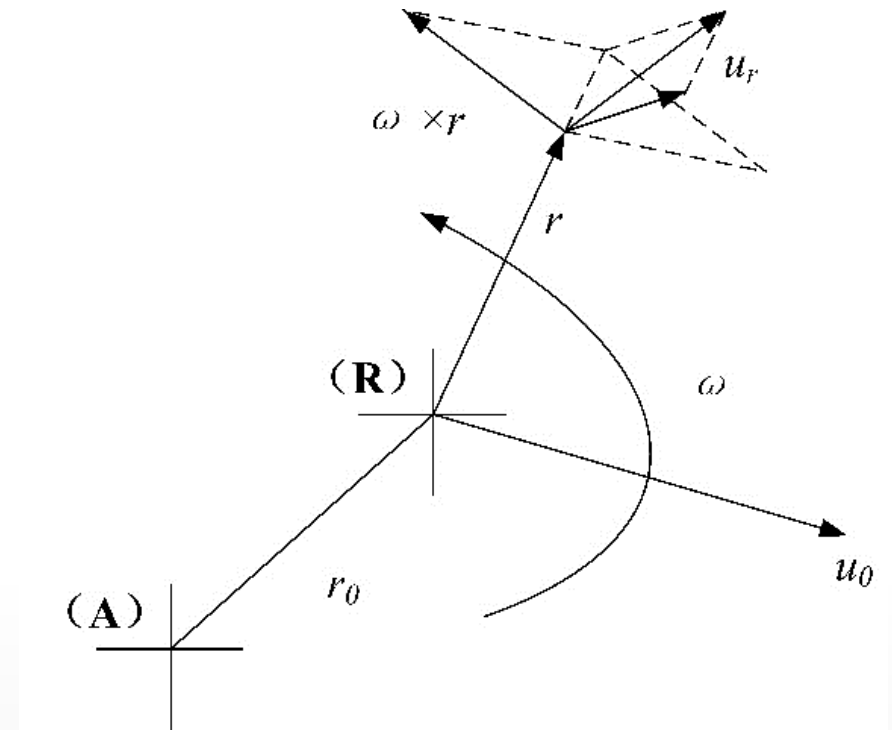
海洋动载的引入

海工装备**无法忽视**海洋环境的影响

海洋环境下考虑**非惯性参考系**



海洋环境的六自由度动载示意图

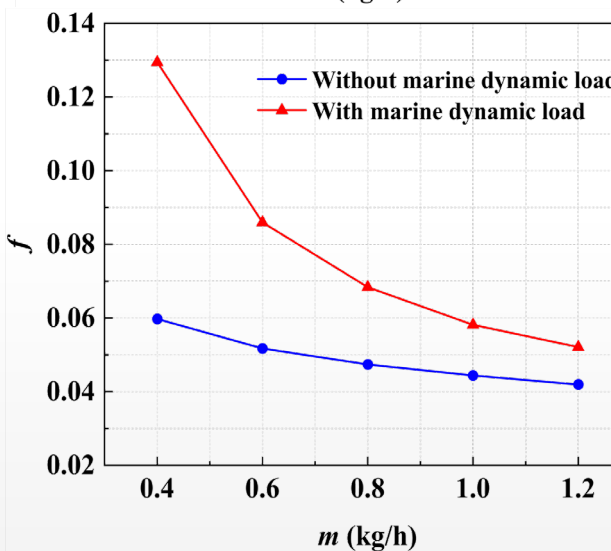
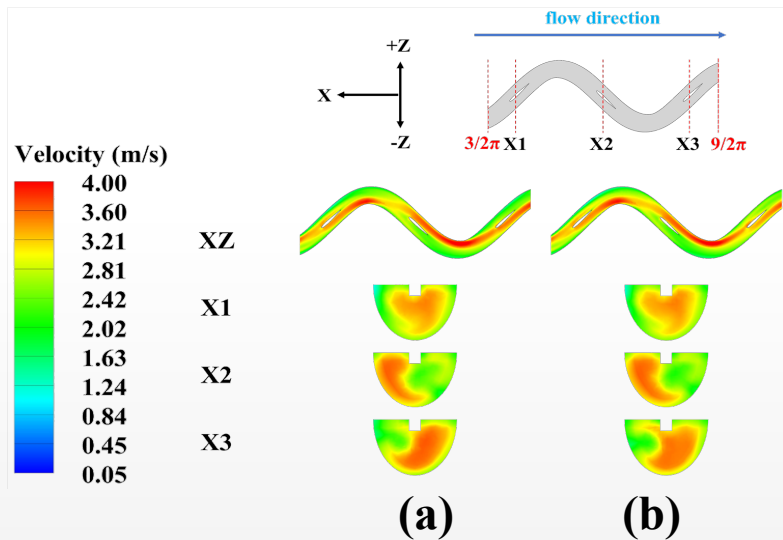
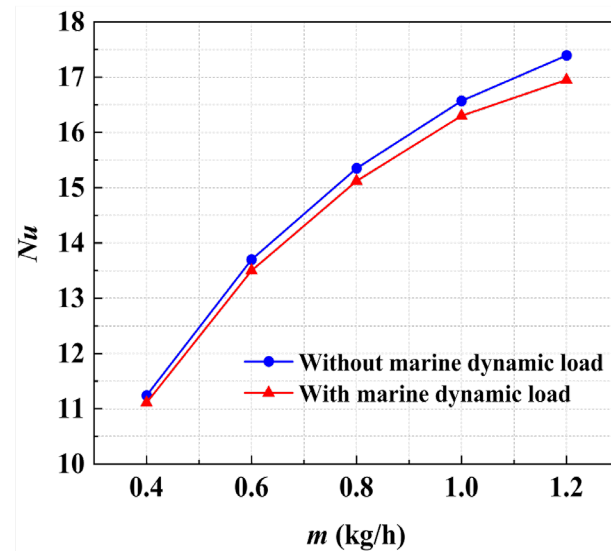
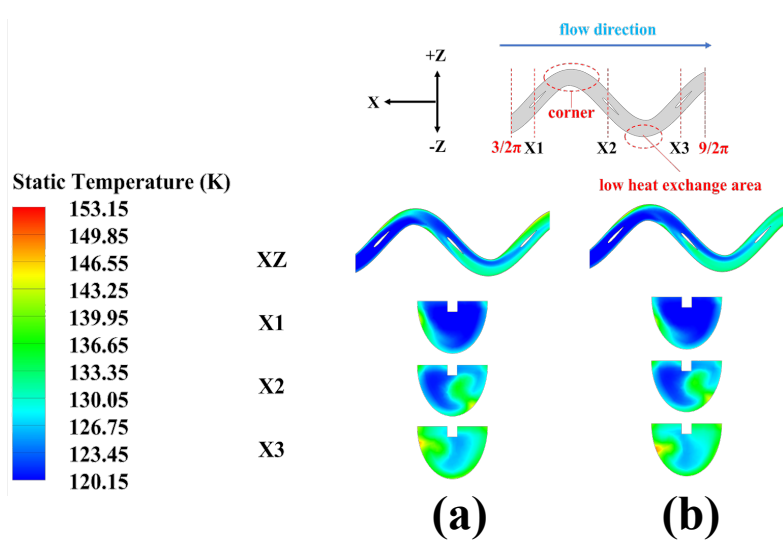


$$\vec{F}_{add} = -\rho \left[\left(-2\omega u_y - \omega^2 x - y \frac{d\omega}{dt} \right) \vec{i} + \left(2\omega u_x - \omega^2 y + x \frac{d\omega}{dt} \right) \vec{j} \right]$$



二、课题组完成的一些工作

海洋动载对正弦型通道的热力水力特性影响

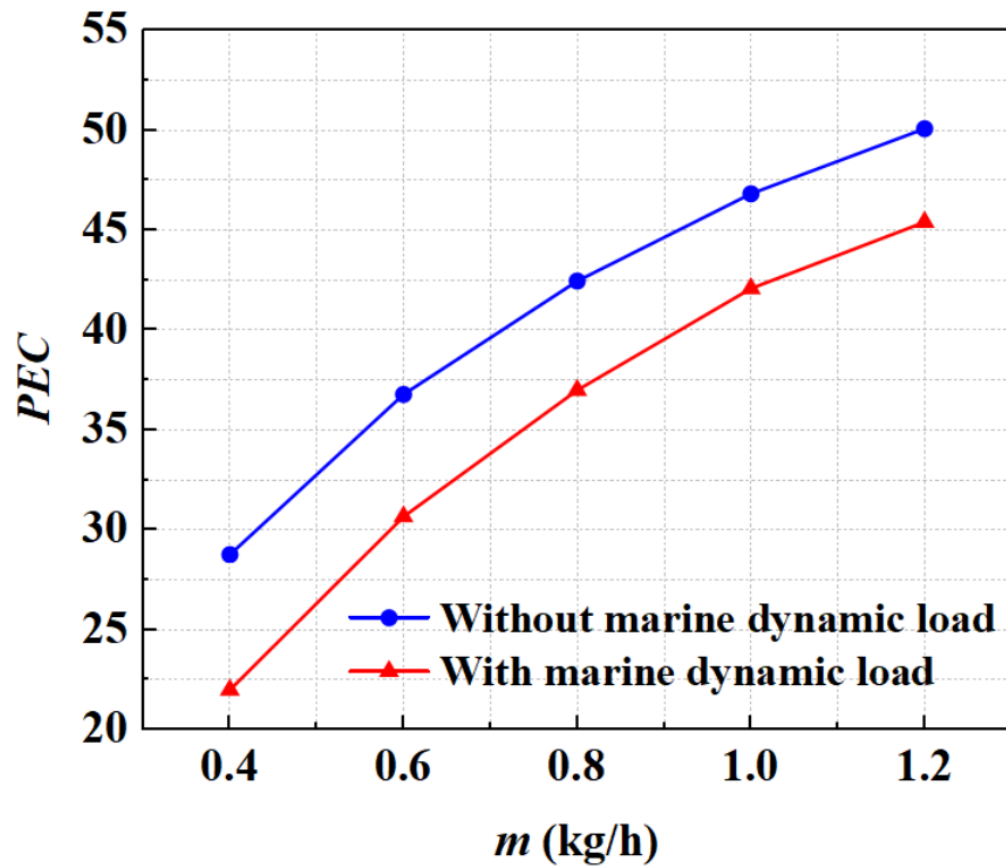


- 无海洋动载的 Nu 数均高于有海洋动载
- 有海洋动载时拐角处温度略低，但通道温度分布更均匀
- 有无海洋动载时，流体均选择最短路径进行流动，速度由于沿程阻力而减小
- 有海洋动载时局部速度减小3.3%



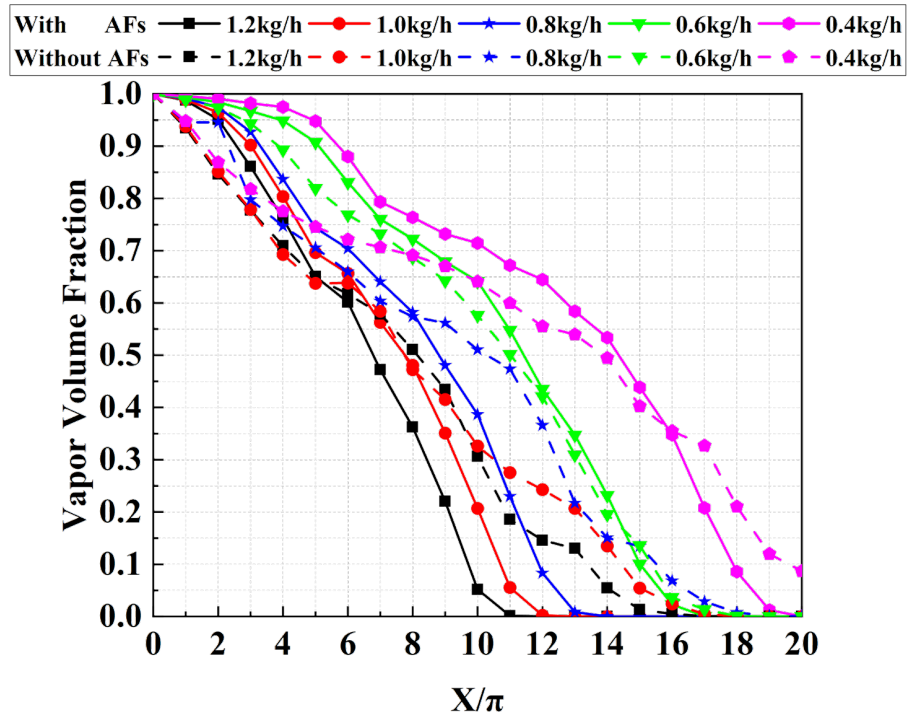
二、课题组完成的一些工作

海洋动载对正弦型通道的综合特性影响



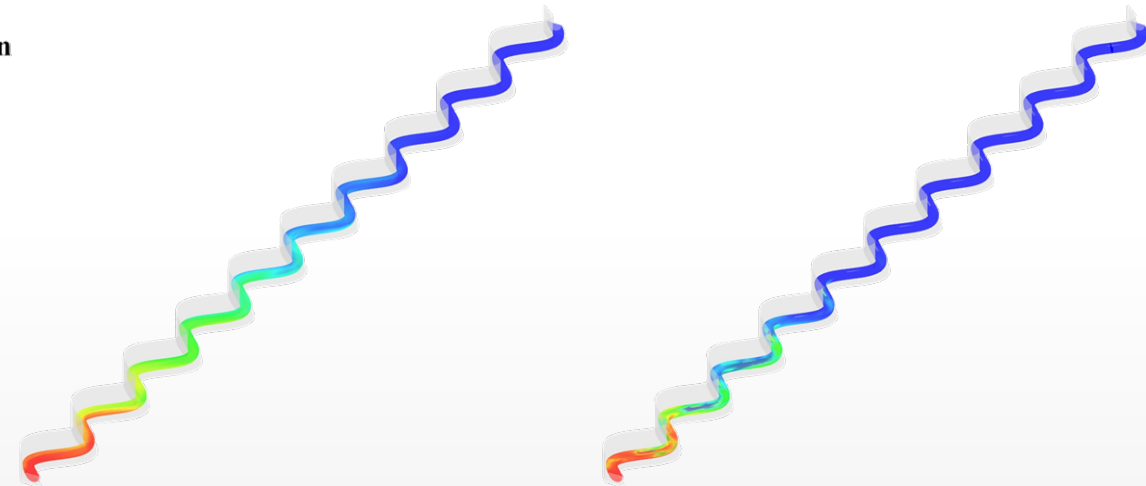
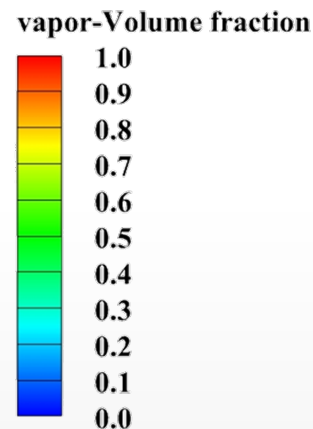
- PEC 均随进口质量流量的增加而增加
- 海洋动载恶化通道的综合性能，但恶化效果随进口质量流量增加逐渐削弱

有机工质在PCHE中的相变冷凝模拟



➤ 翼型翅片能够**加快丙烷冷凝的速度**。在有翼通道中，丙烷在**第四个周期**左右完全冷凝，而在无翼通道中，丙烷在**第七个周期**左右完全冷凝。

- 通道中的气相体积分数**沿着流动方向逐渐减小**。随着进口质量流量的增加，气相体积分数的减小速度越来越快。
- 有翼通道中的气相体积分数在减小的过程中先大于无翼，随后小于无翼，最后**较无翼先达到完全冷凝**。



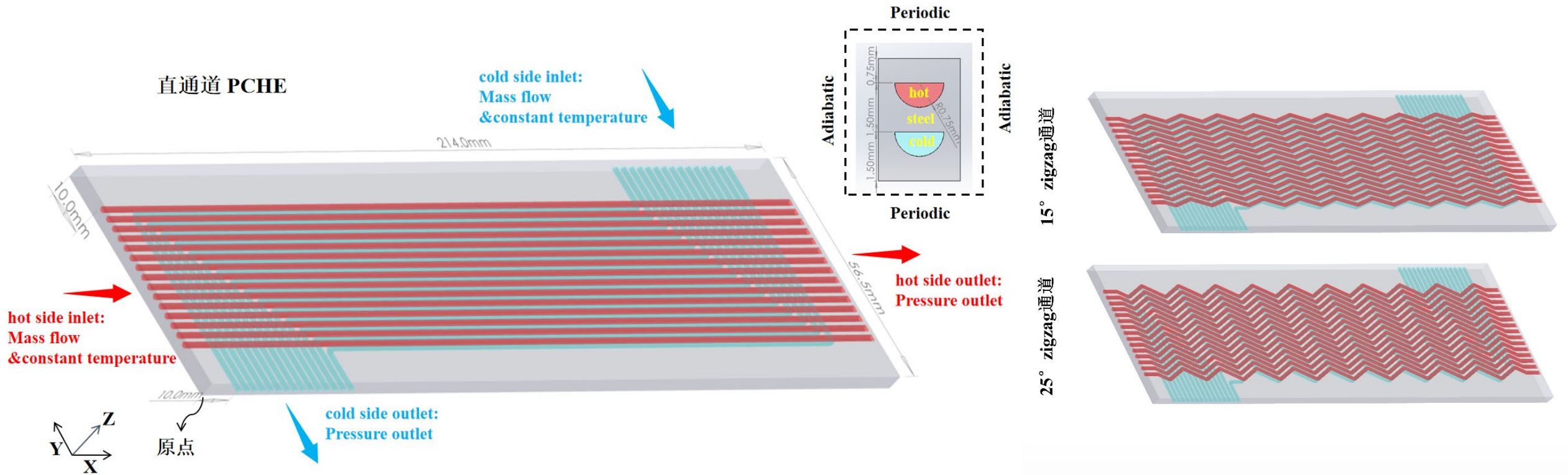
无翼型翅片

有翼型翅片



三、课题组完成的一些工作

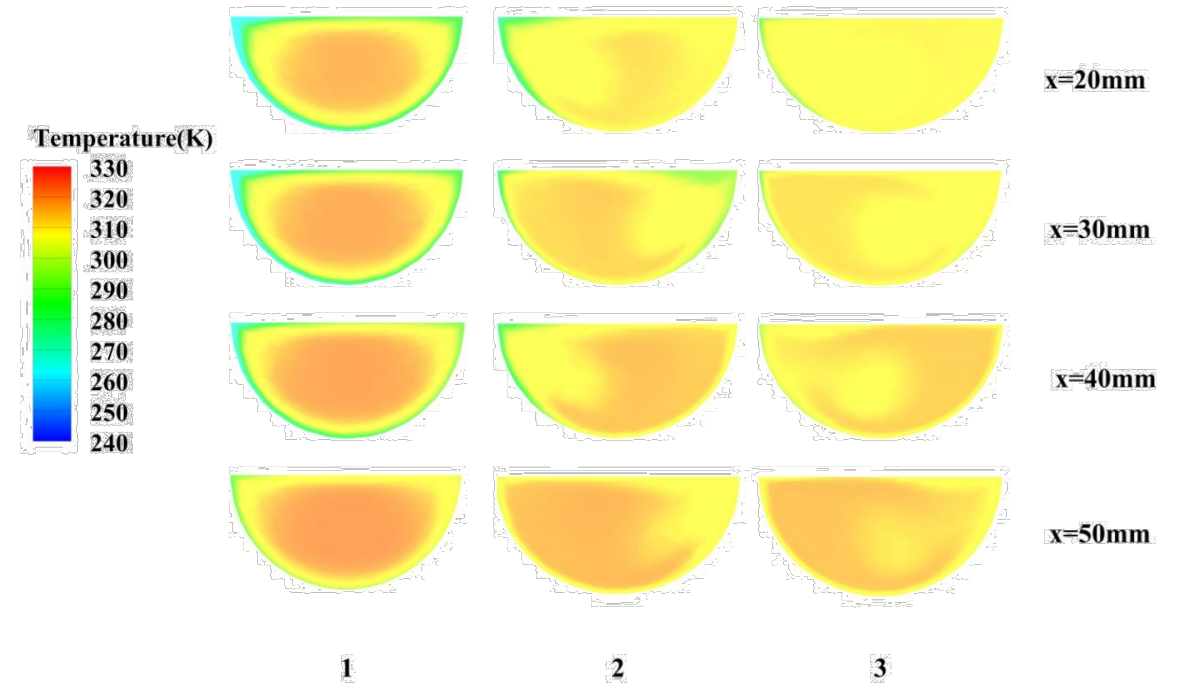
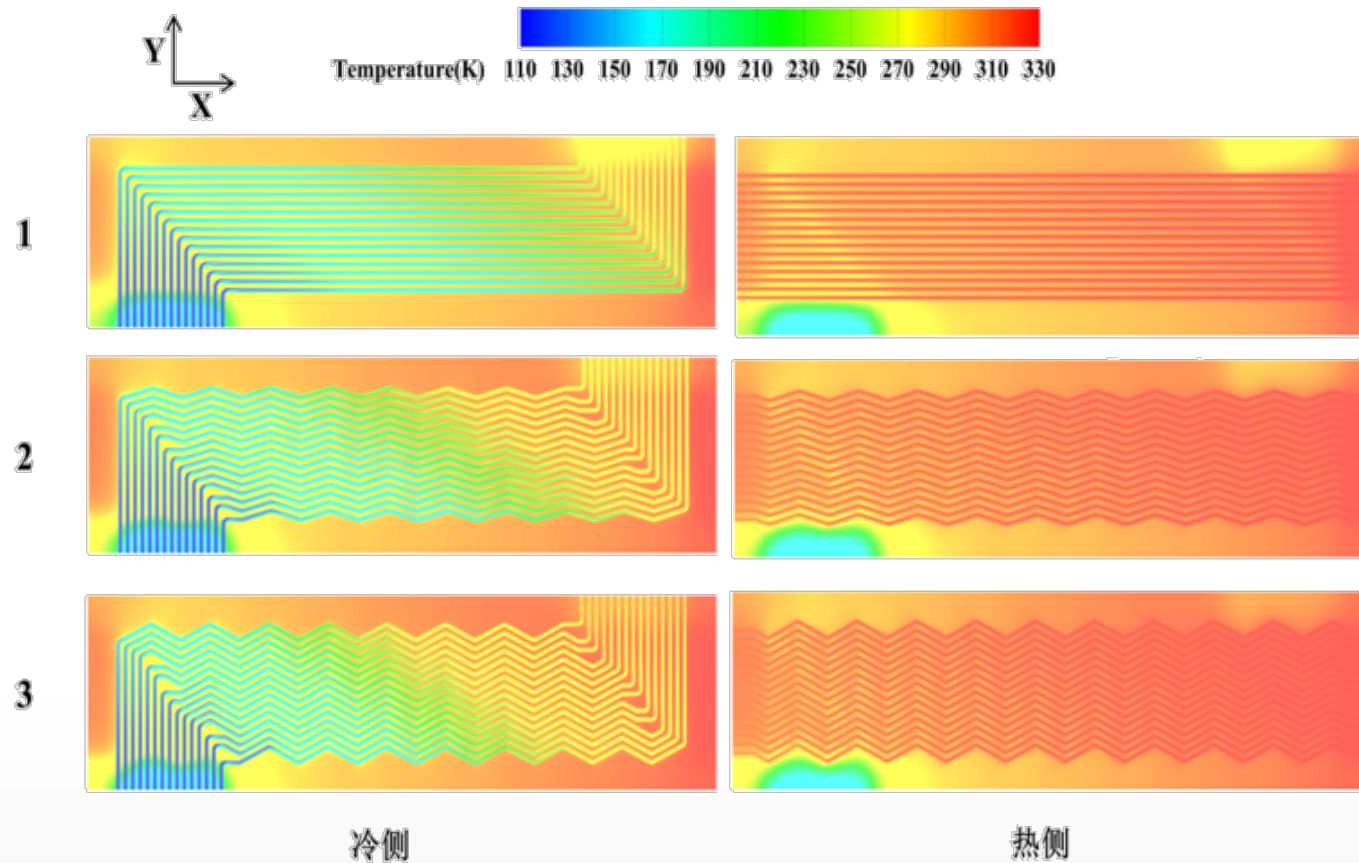
换热板流动形式的研究



板片规格: **214.0mm×56.5mm×1.5mm**, **1.5mm的半圆通道**, 间距为1mm, zigzag节距20mm

冷侧: SLNG, 热侧: 50%乙二醇

不同流动形式PCHE的传热性能分析



case	$T_{h_{min}}$ (K)
1	255.47
2	254.65
3	256.64

直通道 \longrightarrow zigzag通道

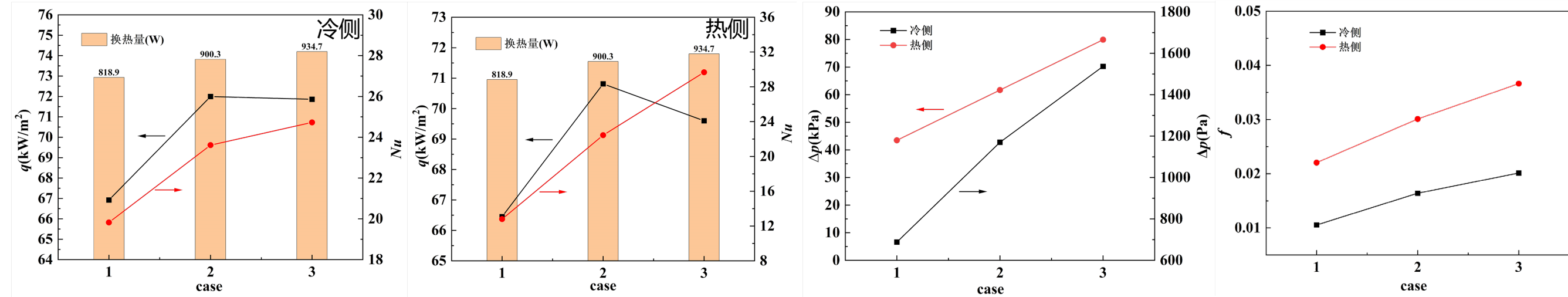
换热面积的增加

流体发生强烈的扰动

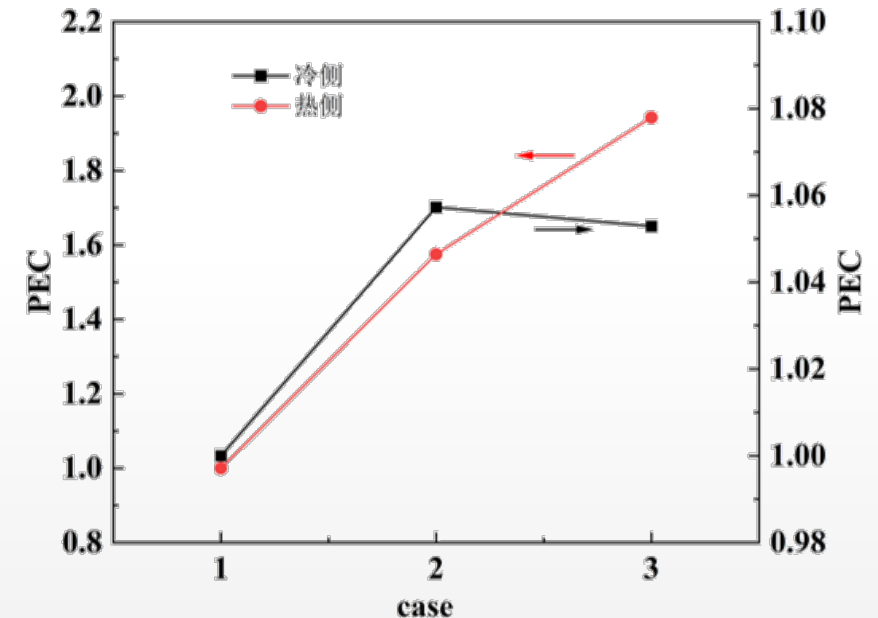


三、课题组完成的一些工作

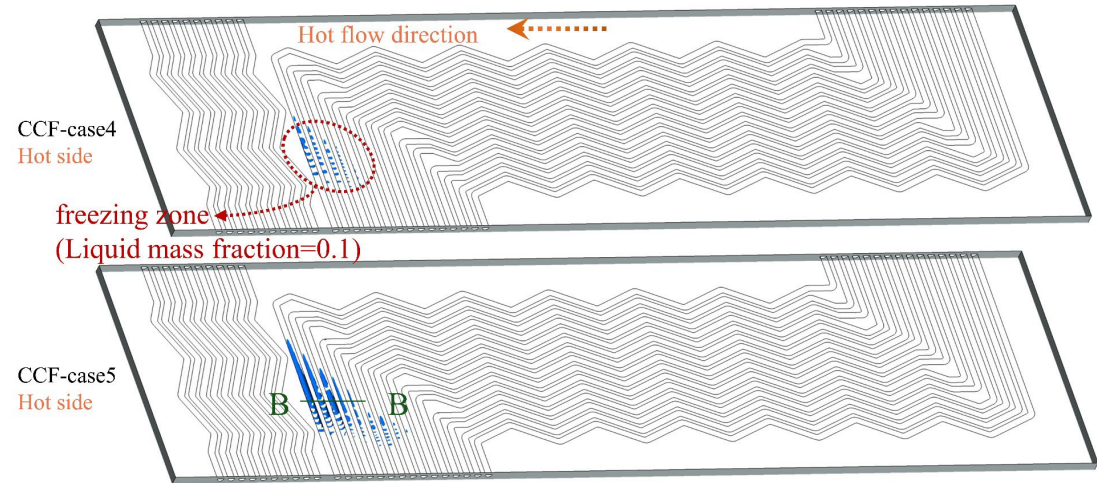
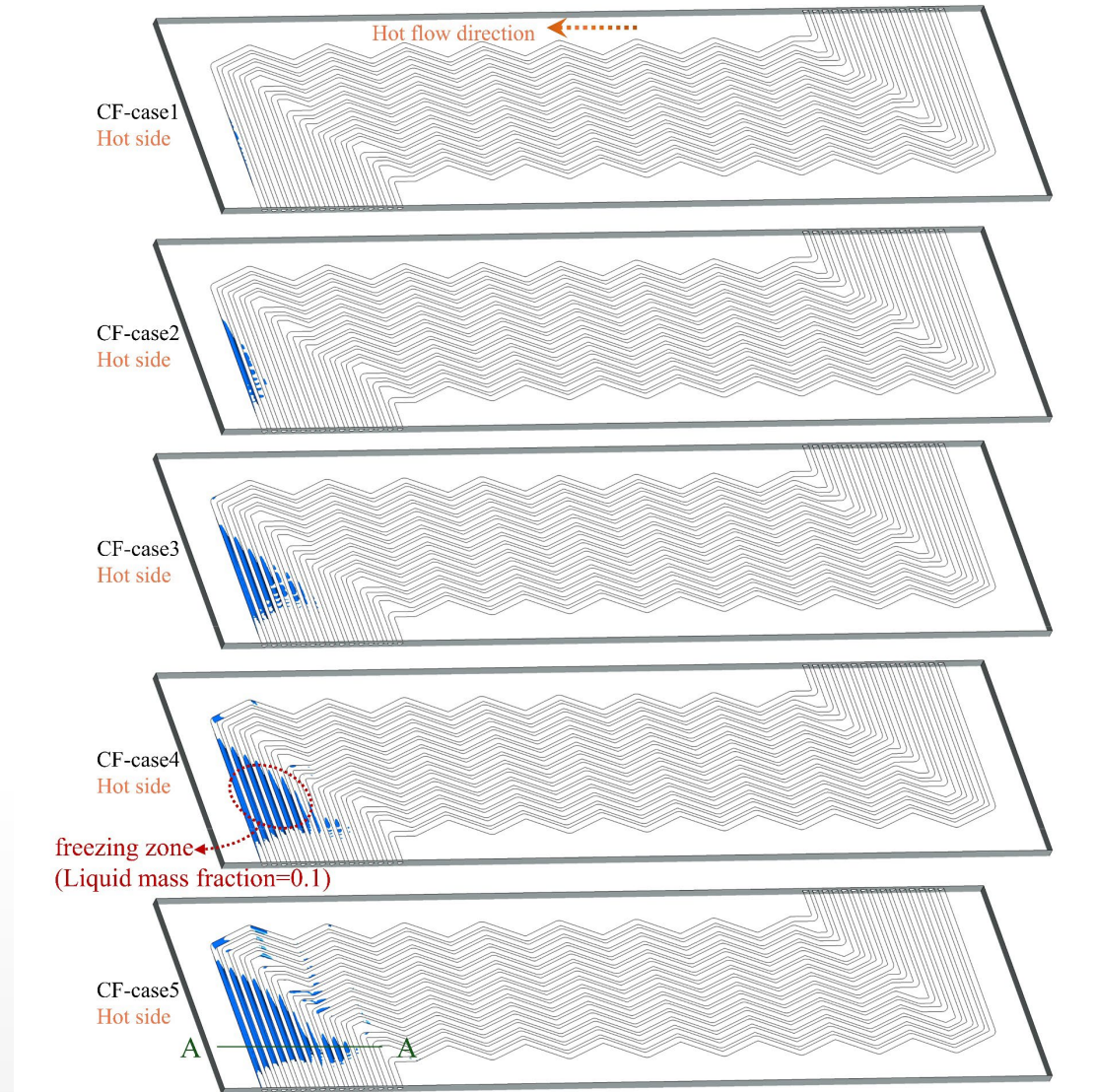
不同流动形式PCHE的综合性能分析



- 从整体换热量上来看，**25°zigzag通道换热能力最好，为934.7W。**
- 在不同case之间，壁温和流体温差越来越小，**Nu数逐渐升高。**
- zigzag通道压降有不同幅度的增大，随着**折角的增大**，流体流动方向的变化程度增大，波峰及波谷处的流动分离现象越明显，造成更大的压损。
- 采用 **$PEC = (j/j_0) / (f/f_0)$** 作为评价指标，**25°zigzag通道**在综合能力上有优势。

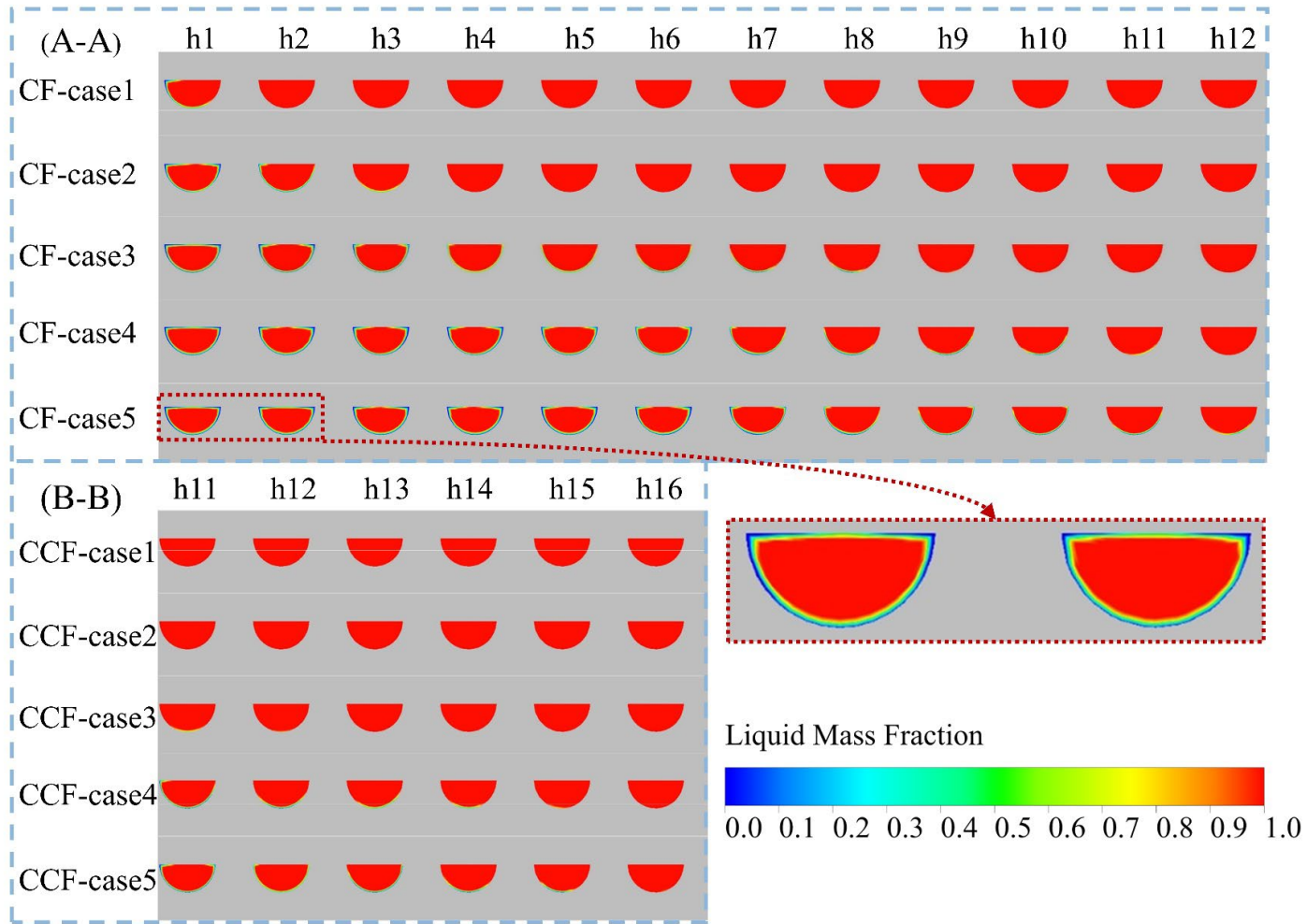


乙二醇防冻结优化

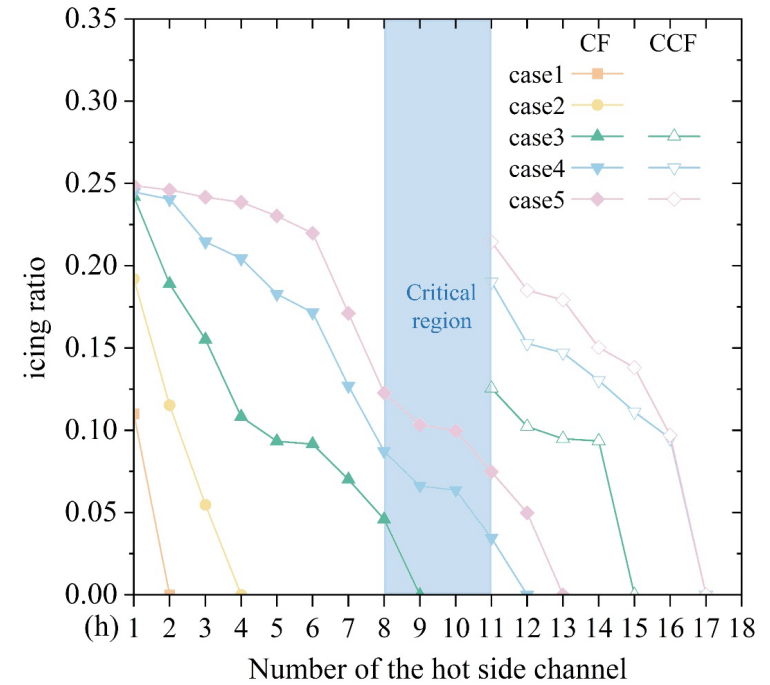


随着S-LNG质量流量的增加，热侧EG冻结通道数量逐渐增加，每个通道的冻结长度逐渐增加。CCF PCHE的冻结部分只出现在逆流通道中。这是因为EG的流量是按阻抗分布的，横流的流量大于逆流。也正因为如此，CCF PCHE的冻结较CF PCHE有所缓解。

乙二醇防冻结优化



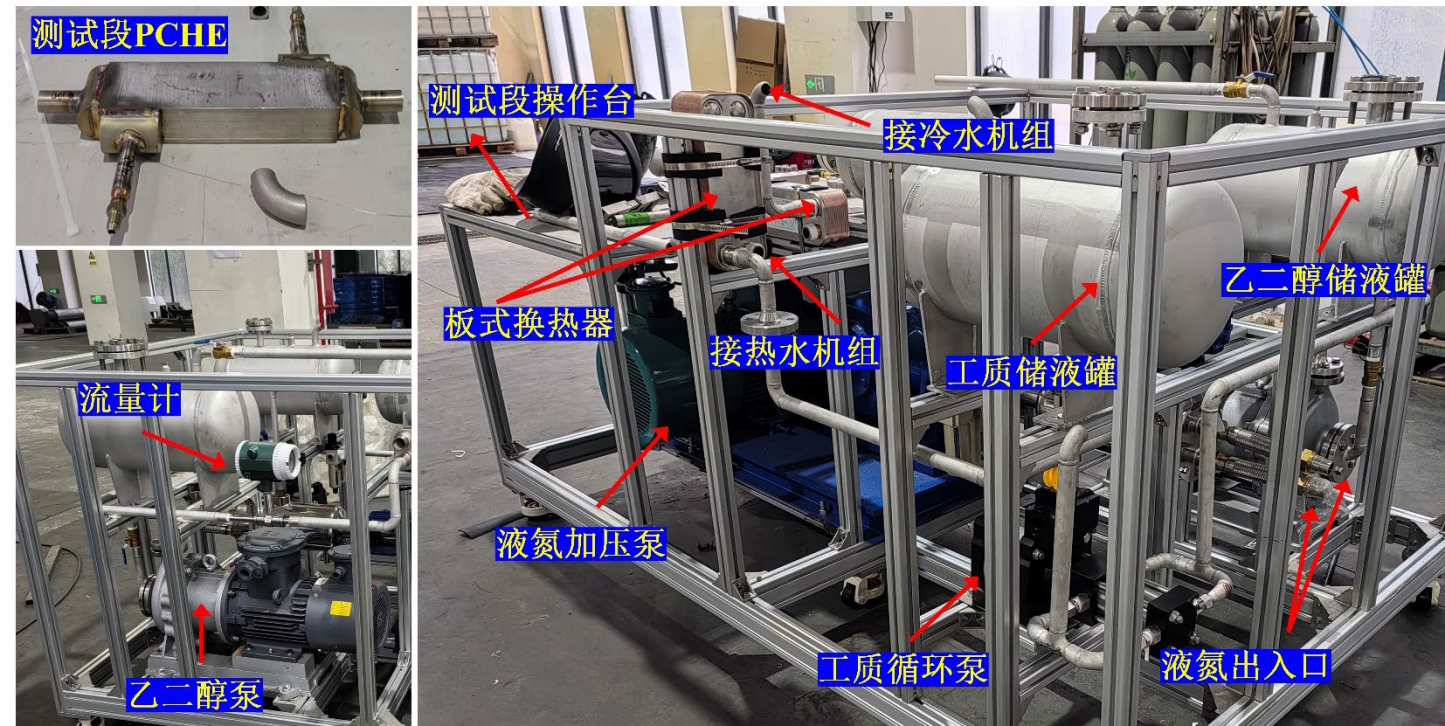
热侧泵功: 1.94W—5.22W



与CF PCHE相比, CCF PCHE冻结通道数减少4 ~ 6个, 通道内结冰比减少5% ~ 19%。此外, 当通道h1结冰率达到0.25, 且之前通道结冰率下降率小于0.04时, CF PCHE失效。当通道h11结冰比达到0.22时, CCF PCHE 失效。

四、未来研究工作

- PCHE性能**实验**测试
- 多自由度**动载耦合**对PCHE综合性能的影响
- 探究**动态响应**下PCHE与其他参数之间的定量关系





2024年中国制冷展专题研讨会—制冷空调技术创新与应用

敬请各位专家批评指正

田镇

副教授，热能教研室主任

18818213836

2024. 04. 08 北京

