FLiBe流经百叶窗翅片紧凑式换热器的热工水力性能数值分析

Bahadır Doğan[1], M. Mete Ozturk[2], L. Berrin Erbay[1,*]

[1] 机械工程系，工程与建筑学院，埃斯基谢希尔奥斯曼加齐大学，Batı-Meşelik 26480，埃斯基谢希尔，土耳其

[2] 交通职业学校，埃斯基谢希尔技术大学，26140 埃斯基谢希尔，土耳其 y

* 通讯作者：L. Berrin ERBAY，教授、博士

电子邮箱：lberbay@ogu.edu.tr

地址：土耳其埃斯基谢希尔 Batı-Meşelik 26480，埃斯基谢希尔奥斯曼加齐大学工程与建筑学院机械工程系

电话：+90 222 224 1391
传真：+90 222 224 1392

字数：8300（不含图注和表注） 图数：24（含子图） 表数：1 相似度指数：12%
（Ithenticate 报告，未包含关键词、符号说明和参考文献列表）

FLiBe流经百叶窗翅片紧凑式换热器的热工水力性能数值分析

Bahadır Doğan[1], M. Mete Ozturk[2], L. Berrin Erbay[1,*]

[1] 埃斯基谢希尔奥斯曼加齐大学工程与建筑学院机械工程系，Batı-Meşelik 26480，埃斯基谢希尔，土耳其

[2] 埃斯基谢希尔技术大学交通职业学校，26140 埃斯基谢希尔，土耳其 y

摘要：本研究聚焦于熔盐反应堆（MSR）冷却回路中，LiF-BeF2（FLiBe）熔盐流经带多百叶窗翅片紧凑式换热器时的稳态热流体行为。本数值基准研究旨在获取反应堆基准工况以及冷却剂循环缓慢问题工况的数据。研究针对基于百叶窗间距的低雷诺数（100–500）进行了一系列数值测试，采用不同的翅片间距（1.5、2.0 和 2.5 mm）及翅片百叶窗角度（20°、 24°、 28°、 32°、 36°）。对稳态速度分布、温度场和压力场进行了详细研究。传热系数和压降数据以 Colburn j因子、范宁摩擦因子 f 以及体积优值因子（$j/f^{1/3}$）的形式报告，以比较 FLiBe 作为熔盐反应堆冷却剂时的性能。 分析结果表明，随着百叶窗角度增大，熔盐流动会更直接地沿百叶窗方向流动，从而增强翅片与熔盐之间的相互作用和传热。相反，随着翅片间距增大，流动会更多地沿通道方向流动，减少翅片与 FLiBe 的接触，进而导致热性能下降。

关键词：熔盐、FLiBe、百叶窗翅片、紧凑式换热器

* 通讯作者：lberbay@ogu.edu.tr（L. Berrin ERBAY）埃斯基谢希尔奥斯曼加齐大学工程与建筑学院机械工程系，Batı-Meşelik 26480，土耳其埃斯基谢希尔

符号说明

A_a 空气侧传热面积，m^2 A_c 最小流通面积，m^2 A_{fr} 迎风面积，m^2 c_p 定压比热容，$Jkg^{-1}K^{-1}$

f 摩擦因子 F_d 流道深度，mm F_h 翅片高度，mm F_p 翅片间距，mm h 传热系数，$Wm^{-2}K^{-1}$

j Colburn j因子 k 热导率，$Wm^{-1}K^{-1}$

L_α 百叶窗角度，o L_h 百叶窗高度，mm

L_p 百叶窗间距，mm $\dot{m}$ 质量流量，$kg\ s^{-1}$

P 压力，Pa Pr 普朗特数 $\dot{Q}$ 传热率，W Re_{Lp} 基于百叶窗间距的雷诺数 St 斯坦顿数

t 百叶窗翅片厚度，mm T 温度，K

T_i 入口温度，K T_d 管深，mm T_p 管间距，mm T_o 出口温度，K T_s 表面温度，K

ΔT_m 对数平均温差，K V 速度，$m\ s^{-1}$ u_c 最小流通面积处的最大速度，$m\ s^{-1}$ u_{in} 入口自由流速，$m\ s^{-1}$

希腊字母 α 热扩散率，m^2s^{-1} μ 动力黏度，$kg\ m^{-1}s^{-1}$ ρ 密度，$kg\ m^{-3}$ υ 运动黏度，m^2s^{-1}

缩写 ANP 航空器核动力 ARE 航空反应堆实验 FOM 性能指标 MSBR 熔盐增殖反应堆 MSRE 熔盐反应堆实验 MSRs 熔盐反应堆 NGNP 下一代核电厂 ORNL 橡树岭国家实验室 TEMA 管式换热器制造商

1. 引言

鉴于核事故、公众反对，以及有害碳排放导致的严重气候变化问题，下一代核电厂（NGNP）项目和第四代核反应堆系统（第四代）将熔盐反应堆（MSR）视为六种极具吸引力的候选方案之一，认为其有望在未来以最低的碳排放实现可靠、可持续的核能发电。

熔盐核反应堆并非核工程领域的新兴关注点。关于这一主题的初步研究始于20世纪40年代的田纳西州 [1]。与此同时，在探讨熔盐反应堆（MSR）在不同领域的应用时，研究人员在多个项目中开展的航空器核动力（ANP）、航空反应堆实验（ARE）和航空反应堆测试（ART）可视为成功的研究。继橡树岭国家实验室的研究之后，Furukawa 等人提出并研究了名为 Fuji 的小型熔盐反应堆（MSR）[2-5] ，将其纳入钍熔盐核能协同（THORIMS-NES）系统。Fuji-MSR 最适用的流体之一是 FLiBe，它在堆芯侧与蒸汽轮机侧之间的换热器中流动，用于输送燃料和冷却剂。

近期，新成立的 MSR 企业开展了相关研究，提出了不同的熔盐反应堆设计，但遗憾的是，这些设计实际上都未提供换热器的详细信息。MSR 换热器设计是一项颇具挑战的课题。在早期研究中，橡树岭国家实验室针对 MSR 换热器设计开展了多项研究，并提出了关键设计考量，尤其是针对壳管式换热器的设计；相关内容已有详尽记载 [6-9]。换热器的类型和设计是依据壳管式换热器的技术和标准确定的。Erbay [10] 提出并研究了 MSR 与斯特林热机的组合方案。研究指出，需要设计高性能换热器：熔盐 FLiBe 流经斯特林热机热端头部的通道，氦则在通道内部流动。Erbay [11] 提供了 MSR 换热器方面的专业知识，以阐明 Fuji-MSR 的排热系统 [3] 。尽管 EVOL 和 SAMOFAR 等项目提出了一些新的换热器设计 [12-14], ，但迄今为止，这些设计既未定型，也未制造出来。

液体冷却剂对于气体冷却系统而言性能优异，能够降低换热器两端的温降和泵功率。熔盐凭借其出色的热工优势和优异特性 [15, 16]，被用作MSR中的燃料和冷却剂流体。MSR中使用的熔盐冷却剂在高温下具有化学稳定性和辐照稳定性，蒸气压低，同时沸点高、比热容高且热导率高。与高温材料具有良好的相容性且价格低廉，也是熔盐冷却剂的重要特性

。熔盐冷却剂的体积热容比加压水高出近25%，约为液态钠的五倍。因此，较高的体积热容和安全的工作压力使紧凑式换热器设计成为可能。

熔盐实验存在一些困难。高熔点这一优势却给对流传热实验带来了困难，因为整个系统都需要加热设备，冷却设备也不例外。管道系统和容器的腐蚀带来了额外的困难。因此，从这一角度来看，计算流体力学研究是评估熔盐热工水力特性的重要替代辅助手段。为了揭示熔盐的对流传热特性，并检验文献中众所周知的熔盐经验对流传热关联式的有效性，近期开展了一些实验[17-21] 和数值[1, 22-25] 研究。这些研究考察了$LiNO_3$, LiF- NaF-KF（FLiNaK）、$NaNO_2$-KNO_3-$NaNO_3$, LiF-BeF_2-ThF_4-UF_4, $NaBF_4$-NaF，以及LiF-BeF_2（称为FLiBe）等熔盐。

这些有价值的研究探讨了熔盐在不同类型通道几何形状中的对流传热，包括圆管、环形管道、管束外部以及双层管。MSR中的传热强化对于降低成本和减少流体存量至关重要。应调整MSR堆芯外的燃料量，以防止形成新的临界质量。鉴于MSR发电厂中传热强化的重要性，以及为避免滞留问题而要求设备体积较小，采用紧凑式换热器布局较为合适。Heatric制造了一种名为印刷电路板式换热器（PCHE）的新型设备，它兼具结构紧凑、压降小、效能高以及能够在较大压差下运行等特点 [26, 27]。

对于MSR而言，采用翅片表面并适配合适工作流体的紧凑式换热器（CHE）设计将发挥重要作用。橡树岭国家实验室（ORNL）为支持MSR实验和熔盐增殖反应堆计划，已对多种熔盐进行了广泛研究 [26]。由于FLiBe既适用于MSR燃料盐，也适用于冷却剂，因此在流体选择过程中被认为是一种很有前景的候选材料。因此，有必要研究FLiBe流经翅片表面时的热力学和水力学特性。遗憾的是，在公开资料中，尚无关于与MSR相关的百叶窗翅片扁管式紧凑换热器的实验或数值研究结果。计算流体力学（CFD）可用于弥补该领域数据和信息的不足。

综合考虑上述各项说明，本研究采用百叶窗翅片扁管式紧凑式换热器，以获得较高的传热率和更大的传热面积。FLiBe

（LiF-BeF_2）是熔盐反应堆和熔盐快堆中常用的一种熔盐，本研究选用其作为工作流体。基准研究考察了低速度范围内，FLiBe在熔盐反应堆冷却回路中流经多百叶窗翅片紧凑式换热器时的稳态热工水力行为。该换热器可用作一次侧或二次侧换热器。为模拟冷却剂泵故障等异常工况，数值测试针对100–500的低雷诺数进行。针对不同的翅片间距（如1.5、2.0和2.5 mm）以及20^o、 24°、 28°、 32°、 36^o等翅片百叶窗角度，开展了一系列百叶窗间距数值测试。研究获得了速度分布、温度场和压力场。为比较FLiBe作为熔盐反应堆冷却剂时的性能，报告了以Colburn j因子和范宁摩擦因子f表示的传热系数和压降数据，以及体积优值因子（$j/f^{1/3}$）。尽管人们日益关注在核反应堆中使用熔盐，但关于可用于此类系统的替代换热器的研究仍然很少。本研究有望为MSR相关文献作出贡献。本文首先介绍百叶窗翅片流道的几何结构，然后说明用于模拟FLiBe在百叶窗翅片上对流传热的计算流体力学模型，并给出验证结果。

2. 材料与方法

如前所述，本研究对一种采用扁平管和百叶窗翅片、以 FLiBe 为工质的紧凑式换热器进行数值研究，以初步评估其在熔盐反应堆领域的适用性。尽管熔盐反应堆可使用多种工质，本研究选择了 FLiBe。本节第一部分说明材料选择的考量因素，第二部分介绍数学方法的详细内容。

2.1 冷却剂选择的考量因素

为提高反应堆的效率，研究人员提出并采用了多种工质。由于反应堆可使用多种熔盐，因此选择合适的工质至关重要。为便于选择，Kim等人根据冷却剂所需的一般特性，提出了一系列性能指标（FOM）[28] （见表1）。通过考察冷却剂各项一般特性对应的建议优值，可以从更全面的角度比较熔盐反应堆中考虑使用的熔盐。反应堆中使用的典型熔盐的物理性质及其优值汇总于表2。原始表格可参见文献[28]，其中还列出了气体和液态金属的相关结果。表2除列出Kim等人报告的典型熔盐[28], 外，本研究还在表格底部列出了FLiBe的物理性质和优值。在所提出的优值中，第一个FOM_{ht} 与冷却剂的传热性能有关。关于如何评估这些建议优值的结果，Kim等人[28] 指出，FOM_{ht} 会取得较高的数值，而

其余几项（FOM_p、 FOM_{cv}、 FOM_{ccv} 和 FOM_{hl}）则需要取得较低的数值，才能实现更好的性能。从这一重点来看，FLiBe优于其他候选熔盐。尽管其FOM_{ht}处于中等水平，但其余四项优值均为最低。

表 1. 优值（FOM）的定义

	FOM	
冷却剂的传热性能 其中，$FOM_{ht,0}=(k)^{0.6}(\rho)^{0.58}$❓$C_p$❓$^{0.4}(\mu)^{-0.47}$	$FOM_{ht}=\dfrac{(k)^{0.6}(\rho)^{0.58}\text{❓}C_p\text{❓}^{0.4}(\mu)^{-0.47}}{FOM_{ht,0}}$	(1)
冷却剂的泵功率 其中 $FOM_{p,0}=(\rho)^{-2}$❓C_p❓$^{-2.8}(\mu)^{02}$	$FOM_p=\dfrac{(\rho)^{-2}\left(C_p\right)^{-2.8}(\mu)^{02}}{FOM_{p,0}}$	(2)
冷却剂体积 其中 $FOM_{cv,0}=(\rho)^{-0.84}$❓$C_p$❓$^{-1.16}(\mu)^{0.1}$	$FOM_{cv}=\dfrac{(\rho)^{-0.84}\left(C_p\right)^{-1.16}(\mu)^{0.1}}{FOM_{cv,0}}$	(3)
结构材料体积 其中 $FOM_{ccv,0}=(P)\ (\rho)^{-0.84}$❓$C_p$❓$^{-1.16}(\mu)^{0.1}$	$FOM_{ccv}=\dfrac{(P)\ (\rho)^{-0.84}\text{❓}C_p\text{❓}^{-1.16}(\mu)^{0.1}}{FOM_{ccv,0}}$	(4)
冷却剂热损失 其中 $FOM_{hl,0}=(k)^{0.6}(\rho)^{0.34}$❓$C_p$❓$^{0.06}(\mu)^{-0.44}$	$FOM_{hl}=\dfrac{(k)^{0.6}(\rho)^{0.34}\text{❓}C_p\text{❓}^{0.06}(\mu)^{-0.44}}{FOM_{hl,0}}$	(5)

表2. 不同冷却剂的优值比较

冷却剂	熔点（℃）	k (W/mK)	ρ (kg/m³)	C_p (J/kgK)	μ (Pa·s)	P (atm)	FOM_{th} -	FOM_p -	FOM_{cv} -	FOM_{ccv} -	FOM_{hl} -
水（25℃）	0	0.61	997.05	4181	0.00089	1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
LiF-NaF-KF	454	0.92	2020	1886	0.0029	1	0.80	2.87	1.57	1.57	0.92
NaF-ZrF4	500	0.49	3140	1173	0.0051	1	0.45	5.02	1.98	1.98	0.56
KF-ZrF4	390	0.45	2800	1046	0.0051	1	0.38	8.70	2.50	2.50	0.51
氟化锂-氟化钠-四氟化锆	436	0.53	2920	1233	0.0069	1	0.40	5.36	2.05	2.05	0.50
氯化锂-氯化钾	355	0.42	1520	1198	0.00115	1	0.55	14.99	3.07	3.07	0.76
氯化锂-氯化铷	313	0.36	1880	890	0.0013	1	0.47	23.08	3.67	3.67	0.70
氯化钠-氯化镁	445	0.50	1680	1096	0.00136	1	0.58	16.28	3.18	3.18	0.81
氯化钾-氯化镁	426	0.40	1660	1160	0.0014	1	0.50	14.31	3.02	3.02	0.70
氟化钠-四氟硼酸钠	385	0.40	1750	1507	0.0009	1	0.71	5.66	2.04	2.04	0.88
氟化钾-四氟硼酸钾	460	0.38	1700	1305	0.0009	1	0.64	8.98	2.47	2.47	0.84
氟化铷-四氟铷	442	0.28	2210	909	0.0009	1	0.54	14.63	3.01	3.01	0.75
FLiBe 氟化锂-二氟化铍	459	1.00	1940	2414.17	0.0056	1	0.67	1.78	1.30	1.30	0.73

2.2 数学方法

所研究的百叶窗翅片几何结构的技术图如图 1 所示。翅片材料为 Hastelloy-N，这是一种由橡树岭国家实验室（ORNL）和国际镍公司为熔盐反应堆开发的镍基合金。分析了翅片间距分别为 F_p=1.5、2.0 和 2.5 mm，百叶窗角度分别为 L_α=20o、24o、28o、32o 和 36o 时百叶窗翅片的性能；百叶窗间距和翅片厚度则分别固定为 L_p=1.7 mm 和 t=0.1 mm。

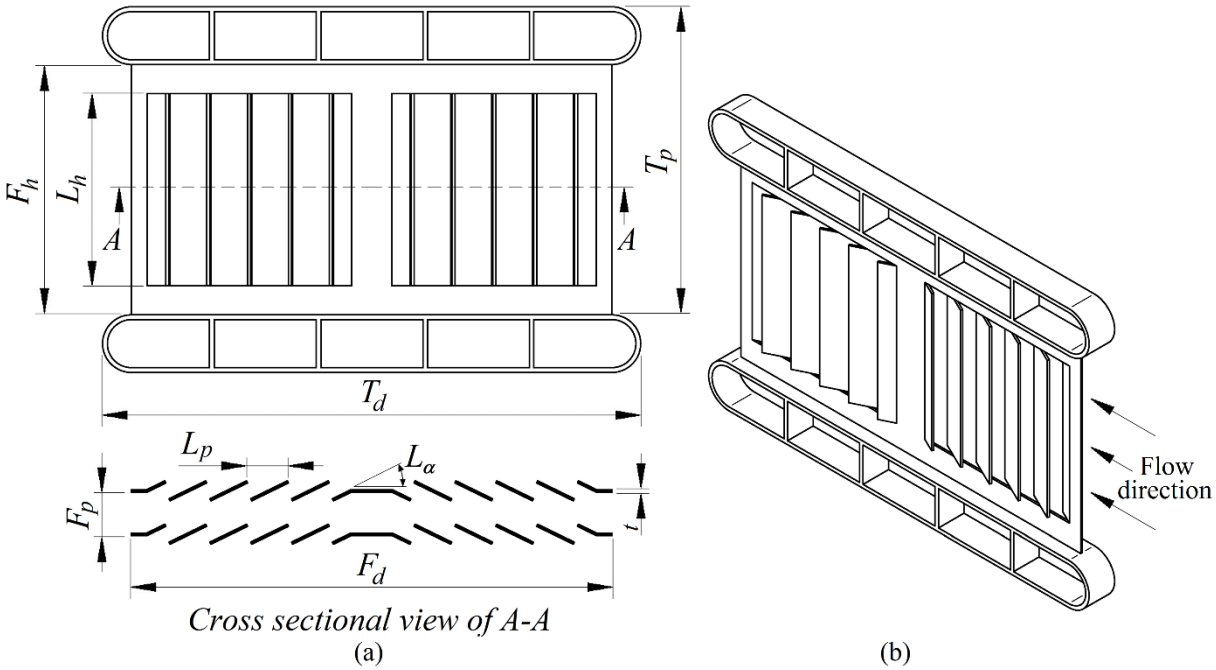


图 1. 所研究百叶窗翅片的技术图：(a) A-A 的二维剖面图；(b) 三维外观

基于百叶窗间距定义的冷却剂侧雷诺数为

$$Re_{Lp} = \frac{u_c L_p}{\upsilon} \tag{6}$$

其中

$$u_c = u_{in} \frac{A_{fr}}{A_c} \tag{7}$$

冷却剂侧的传热系数由式 8 确定。

$$h = \frac{\dot{Q}}{A_a \Delta T_m} \tag{8}$$

其中，传热率和对数平均温差定义为

$$\dot{Q} = \dot{m}c_p(T_o - T_i) \tag{9}$$

$$\Delta T_m = \frac{T_i - T_o}{ln[(T_s - T_o)/(T_s - T_i)]} \tag{10}$$

在换热器设计中，采用总体性能指标，而不是直接使用传热系数。熔盐流经百叶窗翅片时，压力梯度是需要考虑的关键设计参数之一。百叶窗翅片换热器的热工与水力性能以 Colburn 因子 (j) 和摩擦因子 (f) 表示，定义见式 11–12。

$$j = StPr^{2/3} \tag{11}$$

$$f = \frac{2\Delta P}{\rho u_c^2} \cdot \left(\frac{A_c}{A_a}\right) \tag{12}$$

其中

$$St = \frac{h}{\rho u_c C_p} \tag{13}$$

采用面积优值因子 j/f 和体积优值因子 $j/f^{1/3}$，以展现百叶窗翅片换热器总体性能的新视角。

2.3 数值方法

考虑到为避免侵蚀和腐蚀，换热器各截面的最大速度需限制在 5 m/s 以内 [13]。假设 FLiBe流动在 Re_{Lp}≤1300[29] 条件下为层流。二维、稳态、层流且不可压缩流动的质量方程、动量方程和能量方程分别见式 14–16。

$$\nabla \cdot V = 0 \tag{14}$$

$$(V \cdot \nabla)V = -\frac{1}{\rho}\nabla P + \upsilon \nabla^2 V \tag{15}$$

$$(V \cdot \nabla)T = \alpha \nabla^2 T \tag{16}$$

在对MSR中带百叶窗翅片的主换热器和二次侧换热器进行建模与分析时，假定FLiBe和Hastelloy-N的预期物性保持不变，如表3所示。

表 3. FLiBe 和 Hastelloy-N 材料的性质

	ρ (kg/m^3)	c_p (J/kg K)	k (W/mK)	μ (kg/ms)	Pr
Hastelloy-N [13]	8860	578	23.6	-	-
FLiBe [15]	1940	2414.17	1.0	0.0056	13.525

2.4 边界条件

所研究的二维计算域如图2所示。由于百叶窗翅片具有周期性，百叶窗翅片的界面定义为周期性表面，并在翅片表面施加无滑移边界条件。由于Hastelloy-N的熔化温度约为1300-1400°C，因此假定翅片壁面的恒定温度为973 K。百叶窗翅片入口处的冷却剂温度为773 K，这是因为燃料和冷却剂温度确定在490-800°C[30]范围内。FLiBe的入口速度为0.15-0.80 m/s，以确保百叶窗翅片入口处为层流状态；百叶窗翅片出口处施加0 Pa的表压。数值模型的质量方程、动量方程和能量方程采用Ansys Fluent 14 [31]中的二阶迎风格式求解。采用SIMPLE算法，以尽可能缩短百叶窗翅片上冷却剂速度场和压力场耦合的计算时间[30]。

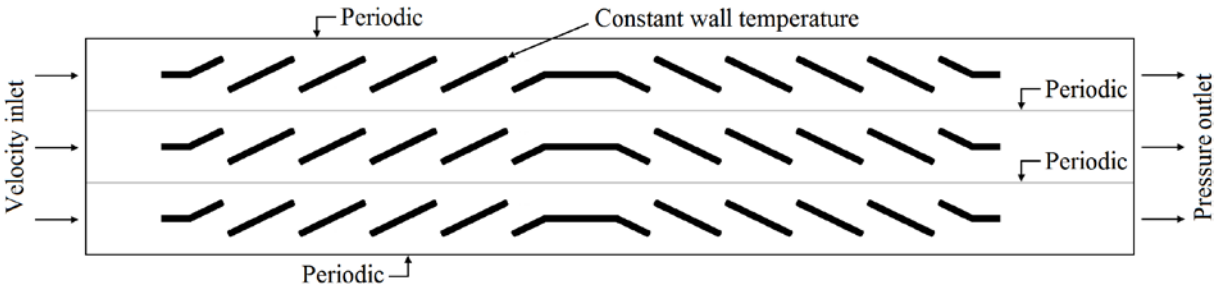
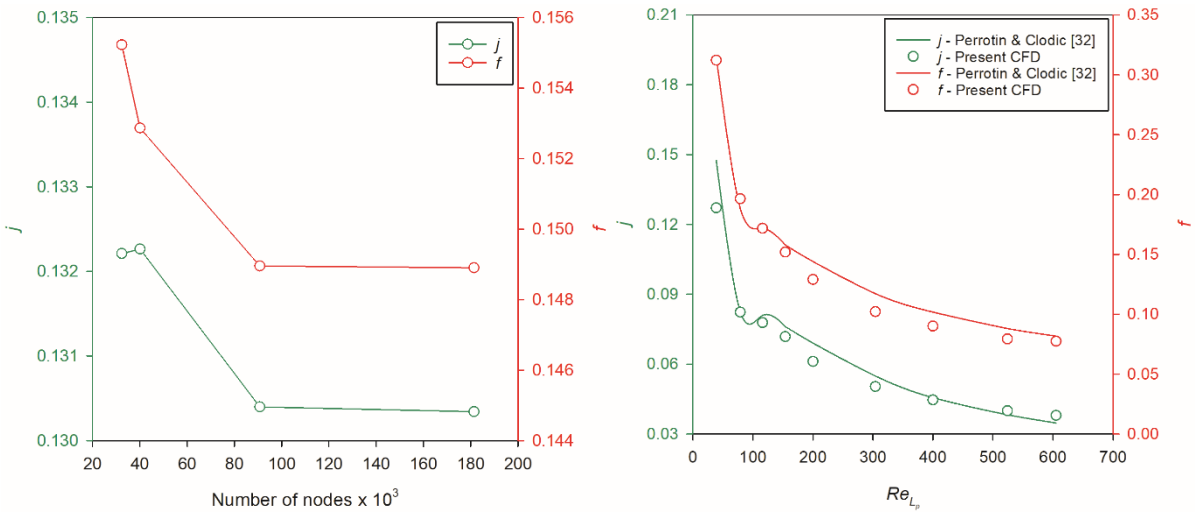


图 2. 二维数值模型及边界条件

2.5 计算域验证

如图 3a 所示，采用四种不同尺寸的四边形单元来确定二维数值模型的网格无关性。结果发现，对于节点数超过 90741 的网格，j 和 f 的解分别相差约 0.16% 和 0.96%。由于关于 FLiBe 熔盐流经带百叶窗翅片的紧凑式换热器这一工况的信息严重缺乏，因此很难将本研究的计算结果与文献结果进行验证。主要困难不仅在于熔盐与紧凑式换热器的组合，还在于制造 CHEX 所用扁平管的流道深度非常狭窄。鉴于这些挑战，本研究采用基本对比来验证所用模型。由于不存在关于这一特定主题的实验结果，因此通过 Perrotin 和 Clodic [32] 针对图 3b 报告的一项数值研究来检验模型的可靠性。尽管所引用的研究考察了多种工况，但其中 F_p=1.30 mm、L_p=0.95 mm、L_α=20°、F_d=16.5 mm 的模型最适合与本研究的模型进行比较。如图所示，该模型的计算流体力学结果与 Perrotin 和 Clodic [32]的数值结果吻合良好。



(a) (b)

图 3. (a) 网格无关性 (b) 与文献结果的比较

3. 结果与讨论

本研究通过数值方法研究了熔盐 FLiBe 的热工水力性能。研究考察了不同流体速度（范围为 0.1 m/s - 0.8 m/s）、翅片间距（范围为 1.5 - 2.5 mm）以及翅片百叶窗角度（范围为 20° - 36°）下的性能。模拟结果以有量纲形式（传热系数与迎面速度的关系、压降与迎面速度的关系）或无量纲形式（Colburn 因子与雷诺数的关系、摩擦因子与雷诺数的关系）呈现。首先展示流线、压力和温度的等值线图，以便更好地了解所研究熔盐的流动特性。随后，通过传热系数、压降、Colburn j因子和摩擦因子的相关图表展示 FLiBe 的热工水力性能。

FLiBe流动过程中与局部速度矢量相切的流线如图 4 所示，适用于翅片间距 F_p=1.5 mm、角度 L_α=20° - 32°，其中 Re_{Lp}=100。分析过程中利用这些线观察流动方向的倾斜程度。就图中所示情况而言，当流动在某一方向上增强时，颜色会由蓝色转为红色。蓝色表示流动较弱，红色则表示流动较强。从示意图可以看出，当百叶窗角度较小（L_α=20°）时，熔盐倾向于流经百叶窗翅片之间的空隙，因此 FLiBe 与翅片表面的相互作用较弱。相反，随着百叶窗角度增大，翅片表面与 FLiBe 之间的相互作用增强。如图 4 所示，当 FLiBe 流经翅片时，熔盐流的流线增强，流线颜色转为红色。值得注意的是，角度越大，熔盐流动越趋向于百叶窗翅片，从而形成“百叶窗导向流”；反之，角度适中时，熔盐流则转为沿通道流动。

压力沿百叶窗翅片发生变化，因此可以从图 5 中观察到上游与下游之间的压降。可以看出，随着百叶窗角度从 L_α=20°增至 32°，从上游到下游的压力变化幅度增大。如图所示，FLiBe 在上游的压力较高，并且在局部区域有所上升，尤其是在两种所示百叶窗角度下的前缘处。翅片越陡，前缘处的压力升幅越大，因为其对流动的阻力更高。熔盐沿翅片流动时，压力沿流动路径下降，并在下游达到最低值。翅片越陡，熔盐流入口与出口之间的压差越大；随着百叶窗角度变得更平缓，流动阻力降低，这种差异也随之减小。

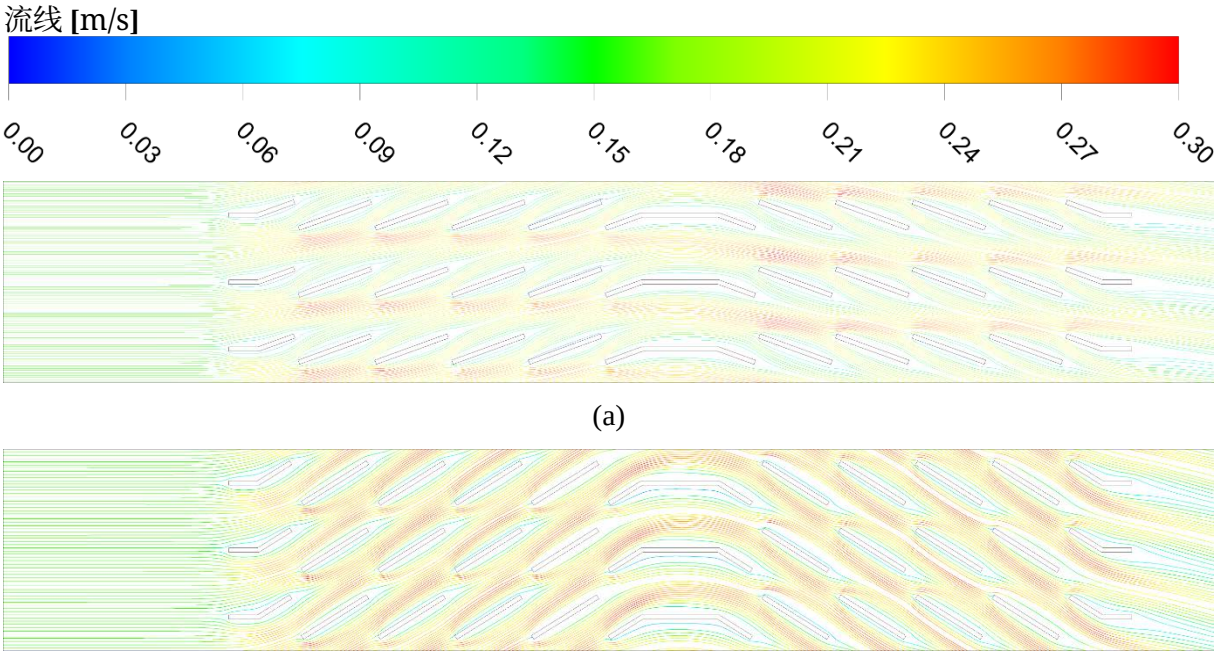


图 4. F_p=1.5 mm和Re_{Lp}=100条件下，FLiBe流经百叶窗翅片的流线：(a) L_α=20°；(b) L_α=32°

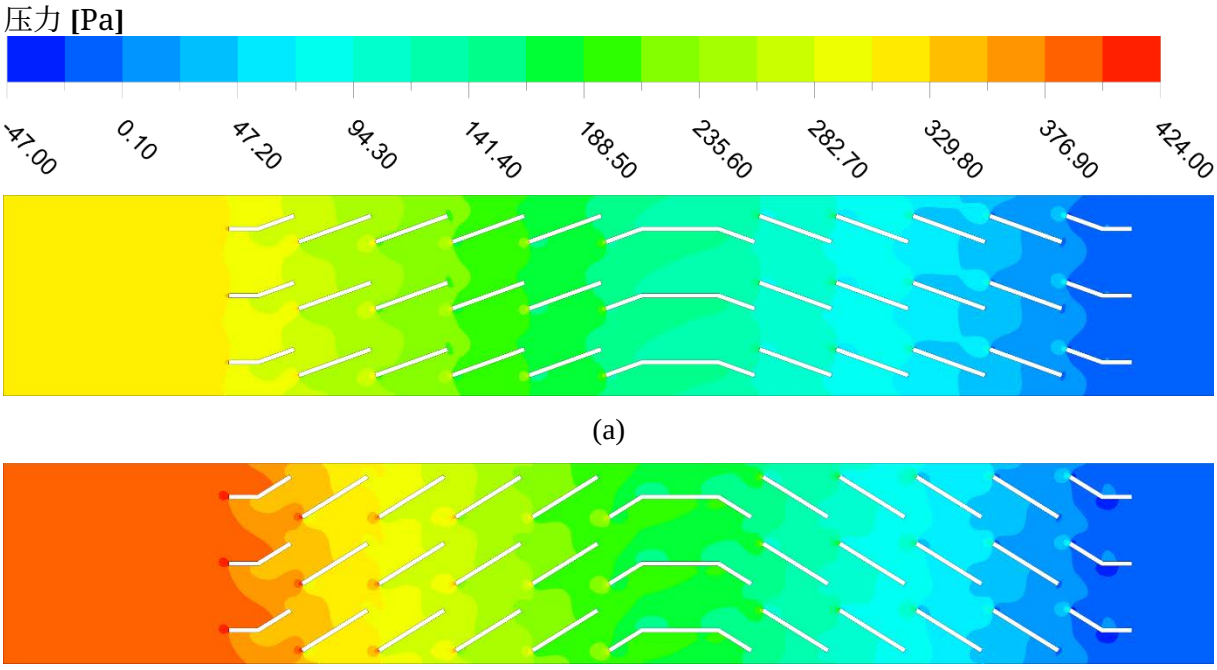


图 5. F_p=1.5 mm和Re_{Lp}=100条件下，FLiBe流经百叶窗翅片的压力场：(a) L_α=20°；(b) L_α=32°。

图 6 展示了在 Re_{Lp}=100 下，F_p=1.5 mm 和 L_α=20°- 32° 条件下沿百叶窗翅片的温度分布。从所示等值线图中可以清楚地看到，熔盐温度从上游到下游逐渐升高。FLiBe 在上游的温度为 773 K，而在

就翅片向熔盐传热而言，下游局部温度可升至 853–873 K。由于翅片表面与 FLiBe 之间的相互作用，翅片周围区域有更多热量传递至熔盐，温度可升至 950 K，如图中红色所示。随着角度增加，熔盐吸收更多热量；当 L_α 从 20°增至 32°时，熔盐温度逐渐升高。百叶窗角度较大时，FLiBe 的温度更高，这主要是由图4所示的流动特性导致的。随着百叶窗角度增大，流动方向由沿通道方向转为沿百叶窗方向，从而增强翅片与熔盐之间的相互作用，进而改善传热。

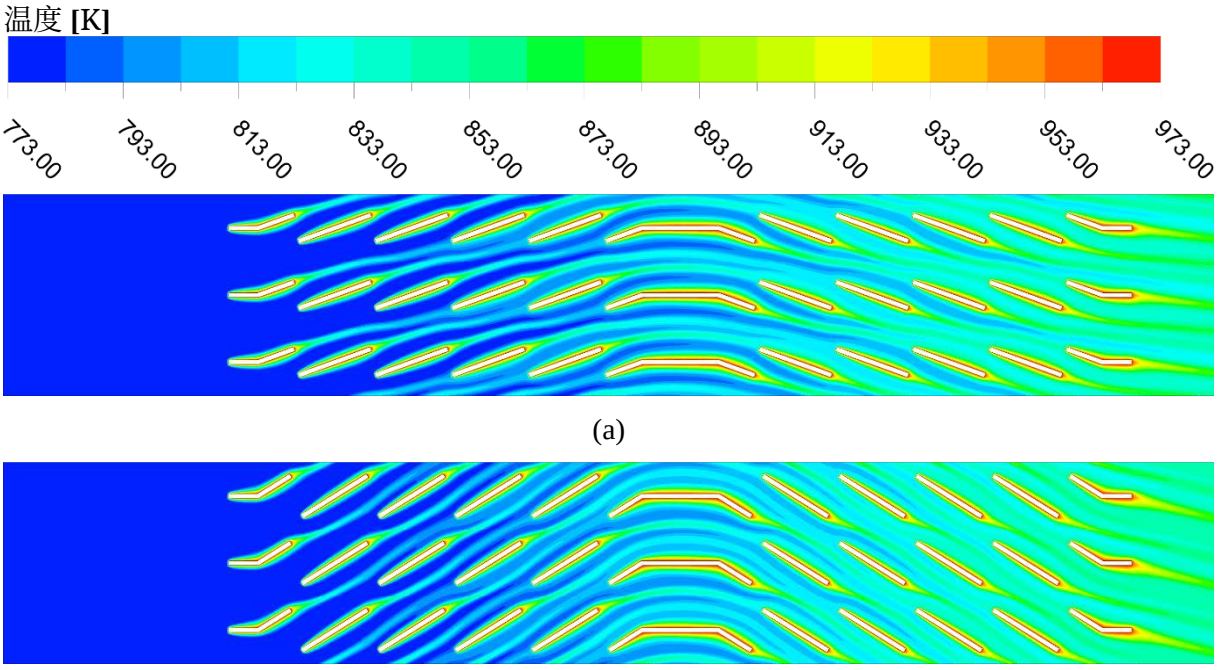
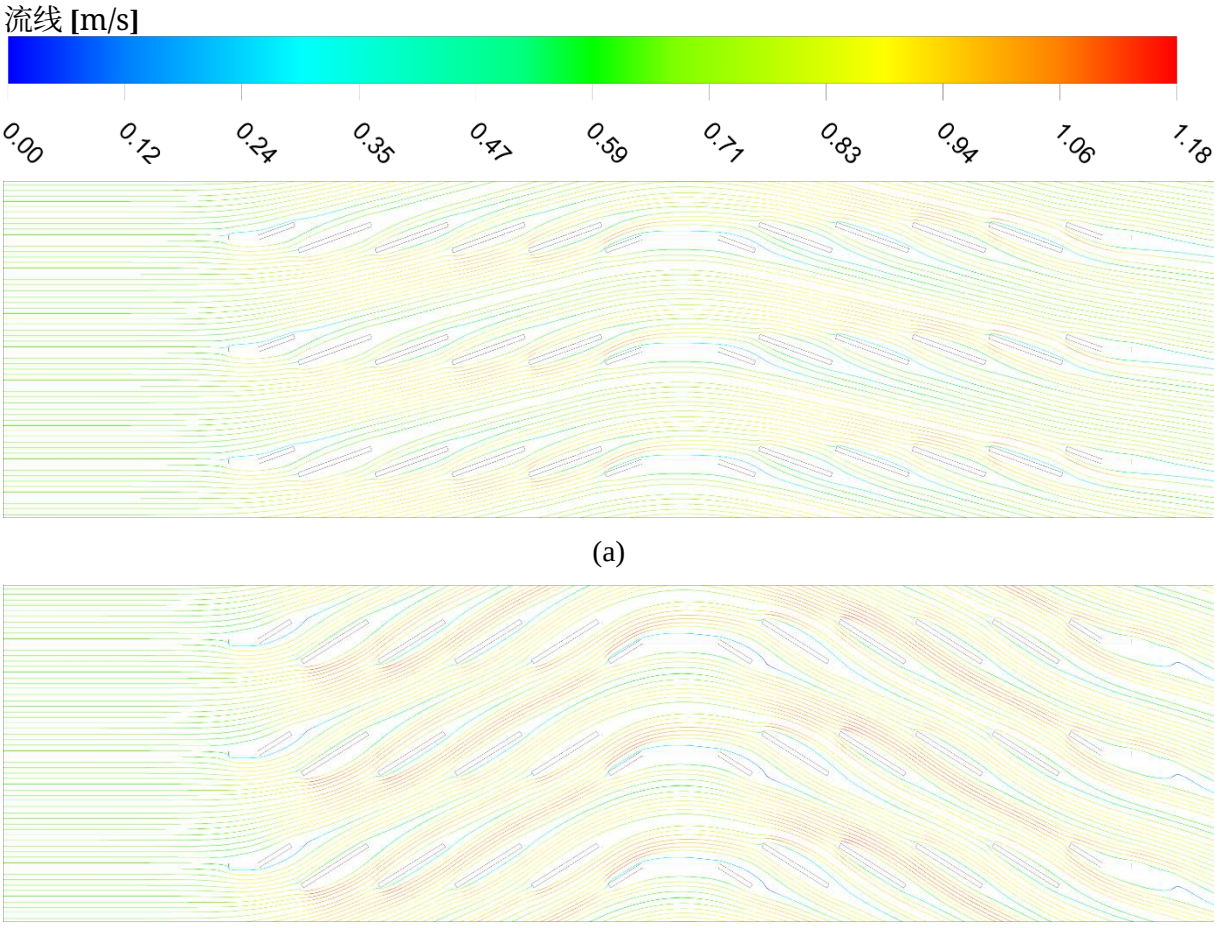


图6. FLiBe流动通过百叶窗翅片时的温度场，F_p=1.5 mm，Re_{Lp}=100；(a) L_α=20°；(b) L_α=32°

图 7–9 通过等值线图展示了翅片间距为 F_p=2.5 mm 时相同参数（流线、压力和温度）的变化。为了从另一个角度呈现研究结果，所示图中选用了较大的翅片间距（F_p=2.5 mm）和较高的雷诺数（Re_{Lp}=400），并绘制了这些特定工况下的温度、压力和流线等值线图。再次选取百叶窗角度 L_α=20°-32°，以展示角度变化对熔盐流动特性的影响。各图中对应参数呈现出相似的趋势。例如，图 7 中，百叶窗角度为 L_α=20° 时，流动表现为“沿通道流动”；而当百叶窗角度变陡（L_α=32°）时，则转变为“沿百叶窗流动”。

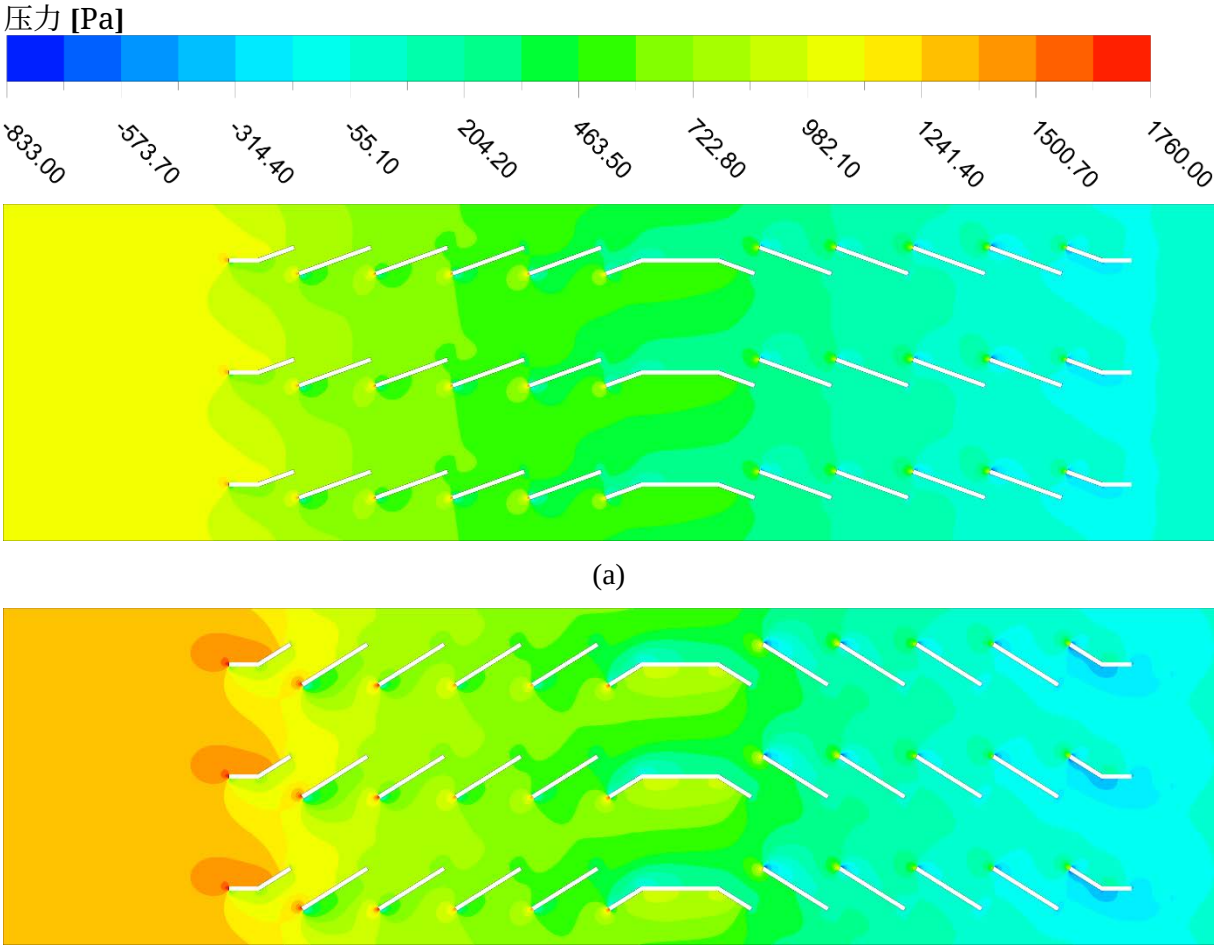


(a)

(b)

图7. F_p=2.5 mm、Re_{Lp}=400条件下 FLiBe 流经百叶窗翅片的流线：(a) L_α=20°；(b) L_α=32°

沿流动方向，压力逐渐降低；在两种角度 L_α=20°-32°下，上游压力较高，下游压力较低。由于百叶窗翅片倾角较大时阻力更大，L_α=32°时上游压力较高，因此入口与出口之间的压差也更大，如图 8 所示。图 9 还显示，在熔盐与翅片相互作用的过程中，熔盐的温度分布沿流动方向逐渐升高。尽管观察到的趋势相同，所示图中也呈现出一些值得注意的特征。例如，尽管流动方向一致，但由于该模型采用了较大的翅片间距，流线较为稀疏（图 7）。这种显著变化的主要原因是百叶窗翅片之间的间隙，即翅片间距，此处为 2.5 mm。随着间隙增大，更多熔盐会从间隙中流过，而不是流经翅片上方，流动也因此变得更加“沿通道流动”，而非“沿百叶窗流动”。这也是热性能变差的主要原因。



(a)

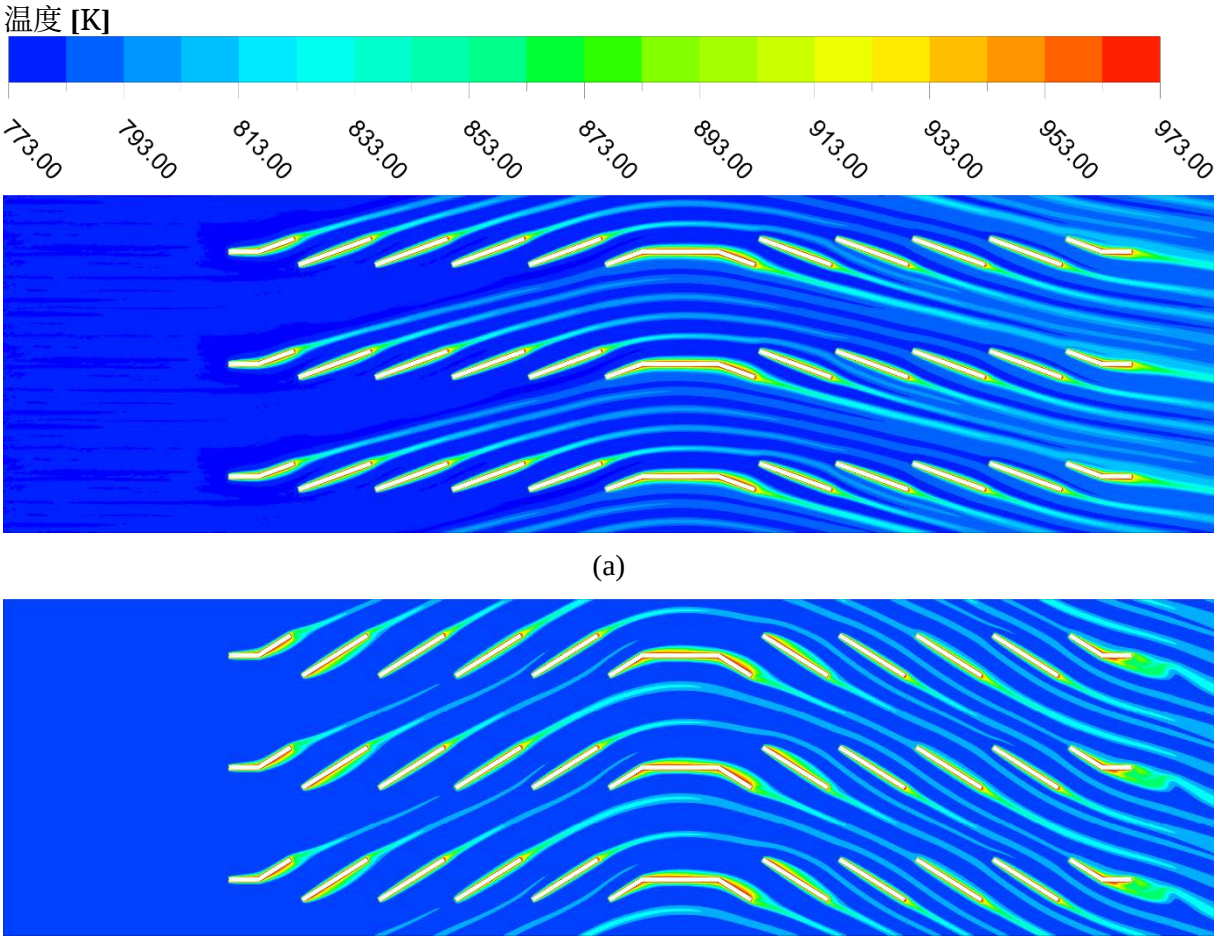
(b)

图8. FLiBe流经百叶窗翅片时的压力场，F_p=2.5 mm 和 Re_{Lp}=400(a) L_α=20°（b）L_α=32°

图9. 如图所示，从翅片处获得热量的区域非常有限，这是因为FLiBe与翅片之间的相互作用变差。随着接触减少且熔盐拥有更多自由空间进行流动，翅片向FLiBe的传热逐渐下降，温度分布图中代表入口温度的蓝色区域也随之增多。

图 10 展示了三种不同翅片间距（F_p=1.5、2.0 和 2.5 mm）下，传热系数（h）和压降（ΔP）随熔盐迎面速度的变化情况。随着速度增加，无论百叶窗翅片的角度如何变化、翅片间距如何改变，传热性能都会提升。图中左侧对应传热系数，即上方的曲线簇；右侧对应压降，即下方的曲线簇。在所研究的百叶窗角度中，L_α=36°的传热效果最佳，且随着迎面速度升高，传热系数进一步增大。这种改善主要归因于百叶窗角度变化所带来的流向变化，如前文所示

等值线图显示，角度越大，熔盐流动越受百叶窗导向，从而增强 FLiBe 与翅片之间的相互作用，提升热性能。在所有测试工况中，最大 h 值为 27000 W/m²K，出现在该角度（L_α=36°）和 0.8 m/s 的速度下；最小值为 12000 W/m²K，出现在（L_α=20°）和 0.1 m/s 的速度下。尽管 L_α=36°与其余角度之间存在明显差异，但随着 L_α 减小，这种差异并不显著，因此较小角度下的 h 值开始趋于一致，并随迎面速度呈现相同的变化趋势。

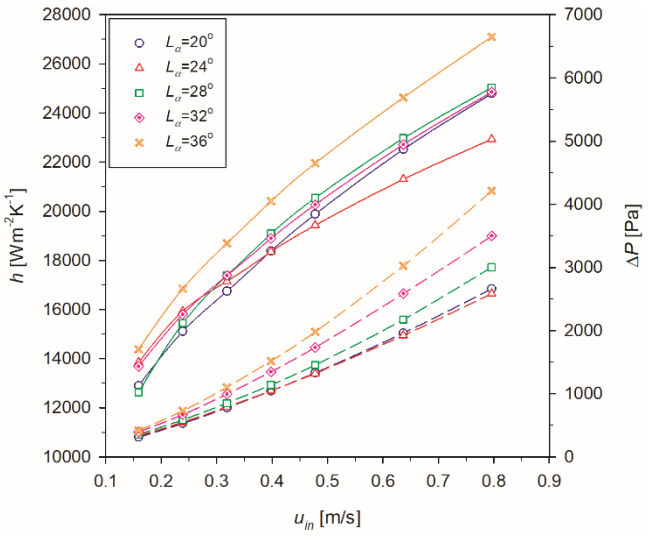


(a)

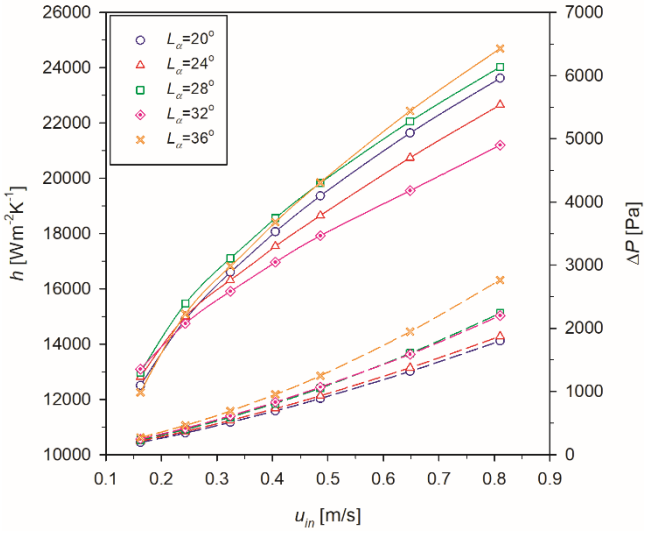
(b)

图9. FLiBe流经百叶窗翅片时的温度场，F_p=2.5 mm 和 Re_{Lp}=400 条件下：(a) L_α=20°；(b) L_α=32°

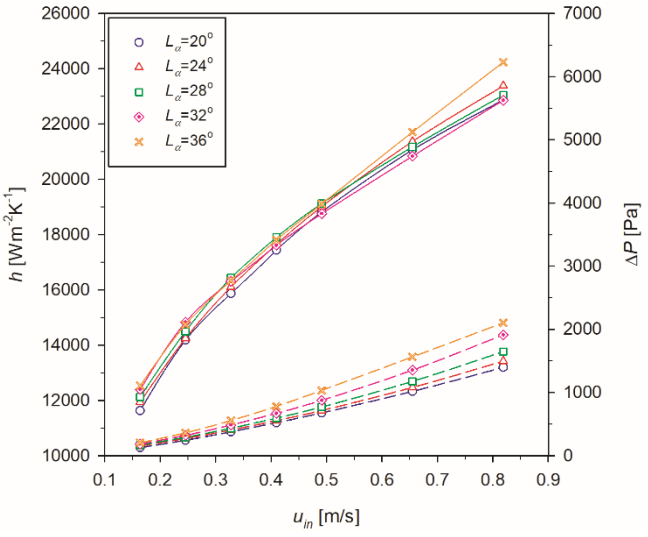
同一图中的压降（ΔP）曲线更清楚地展现了其变化特征（图10a）。随着百叶窗角度增大，翅片变得更加倾斜，因此前缘压力升高，上游与下游之间的差异也更加明显。在最大迎面速度下，最大角度对应的压降最高；而在最低速度下，最小角度对应的压降最低。



(a)



(b)

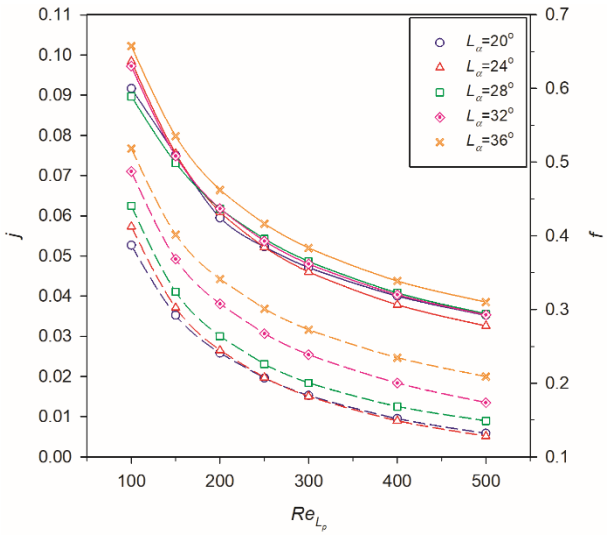


(c)

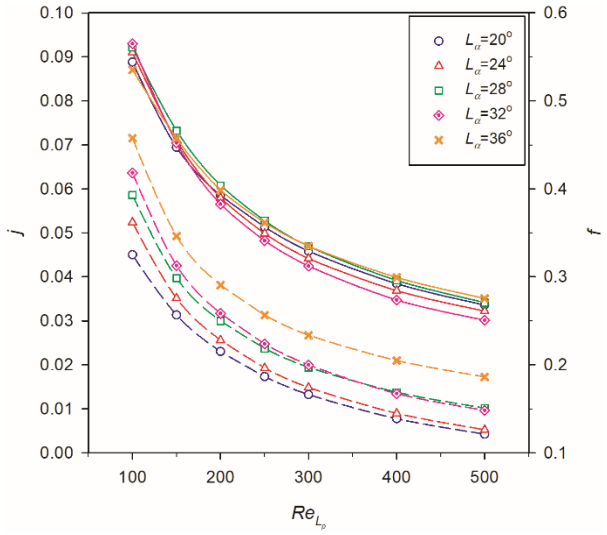
图10. FLiBe（u_{in}）的传热系数（h）和压降（ΔP）相对于迎面速度的偏差：（a）F_p=1.5 mm；（b）F_p=2.0 mm；（c）F_p=2.5 mm

所报告的变化可能与角度有关。随着角度增大，熔盐流的阻力也随之增大，从而导致压降升高。同样，速度越大，压降也越高。与此相反，随着迎面速度降低，压降也会降低；当速度降至约 0.1 m/s 时，在这一特定速度下，熔盐流经翅片时几乎所有角度对应的压降都相近。可以看出，角度增大所产生的阻力在较低迎面速度下不会像在较高迎面速度下那样产生影响。图10b中，F_p=2.0 mm 对应的传热（h）和压降（ΔP）也呈现出类似的变化趋势。如图所示，随着熔盐迎面速度增大，h 或 ΔP 均会升高；此外，二者也都会随着百叶窗角度变大而升高。与图10a不同的是，不同百叶窗角度下的 h 曲线在较高迎面速度下更加明显。各百叶窗角度下 h 曲线的逐渐上升趋势比前一种翅片间距更为清晰。当 L_α= 36° 且 v=0.8 m/s 时，h 达到最高值，约为 25000 W/m^{2}K。至于 ΔP，在这一翅片间距下，各曲线之间的差异有所减小，但仍然明显。角度从 L_α=32° 变为 28° 对压降影响不大，其数值介于 L_α=36° 和 24° 之间。尽管 L_α=20° 对应的 ΔP 在所分析的角度中最小，但 L_α=24° 时的 ΔP 与之非常接近，二者差异不明显。图 10c 展示了翅片间距为 F_p = 2.5 mm 时传热系数（h）和压降（ΔP）的变化情况。虽然其趋势与此前的结果相同，但 h 的数值比前面的曲线更为接近；前面的曲线对应的翅片间距为 1.5 mm 和 2.0 mm。由于百叶窗翅片之间的间距增大，熔盐沿管道流动的趋势更加明显，因此与翅片的相互作用减弱，热性能随之降低。基于上述原因，角度对热性能的影响也减弱，h 仍可达到 24000 W/m^{2}K。尽管 ΔP 的变化趋势及各角度对应的排序相似，但与前面的图相比，ΔP 的数值和曲线分布范围更窄。较小的翅片间距下，压降可超过 3000 Pa，甚至达到 4000 Pa；而当翅片间距为 F_p = 2.5 mm 时，ΔP 略高于 2000 Pa。

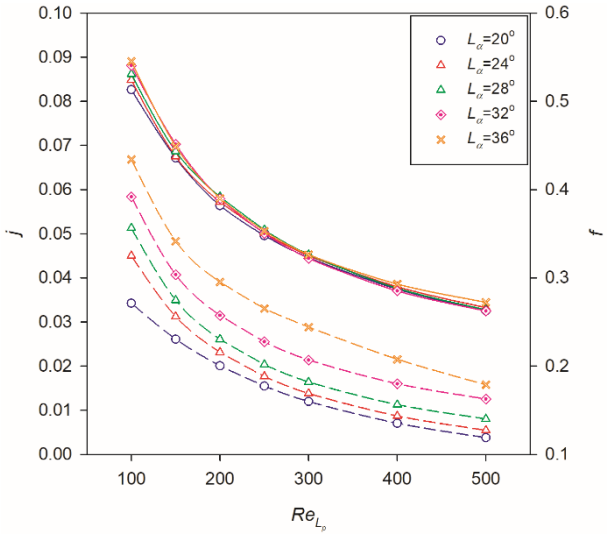
图 11 给出了三种不同翅片间距（F_p=1.5、2.0 和 2.5 mm）下 Colburn j 因子和摩擦因子 f 随雷诺数的变化，以从无量纲角度考察角度和速度对性能的影响。根据这些因子的定义，Colburn j 因子和摩擦因子 f 均随雷诺数增大而减小。与此前的研究结果一致，百叶窗角度最大时 Colburn j 因子最高。当百叶窗角度小于 L_α=36° 时，Colburn j 因子曲线开始交叉；对于 1.5 mm 的翅片间距，角度低于此值时似乎对热工水力性能影响不大（图 11a）。尽管 L_α=24° 对应的曲线与其他曲线之间存在些许差异，但这种差异并不显著。在此特定条件下，Colburn j 因子的最低值约为 0.035。



(a)



(b)



(c)

图 11. FLiBe 的 Colburn j 因子和 f 因子相对于迎面速度的偏差：（a）F_p=1.5 mm；（b）F_p=2.0 mm；（c）F_p=2.5 mm

由百叶窗角度变化所导向的流动方向必然会影响热性能。随着角度增大，流动转向百叶窗导向流动，增强翅片与熔盐之间的相互作用，从而提升性能。至于摩擦因子 f，其变化曲线比 Colburn j因子曲线更为明显。所有研究的百叶窗角度下，摩擦因子 f 的总体趋势均为随 Re_{Lp} 数增大而减小。L_α=36°对应的 f 因子最高，在 Re_{Lp} 为 100 时达到 0.52；而 L_α=20°-24°对应的 f 因子最低，在 Re_{Lp} 为 500 时取得。如图所示，当 Re_{Lp} 大于 200 时，百叶窗角度为 L_α=20°-24°时的摩擦因子变得非常接近。超过这一阈值后，两条曲线重叠，呈现相同的变化趋势。可以看出，百叶窗角度越大，百叶窗翅片相对于流动方向越倾斜，对 FLiBe 流动造成的阻力越大。因此，压降增大，摩擦因子也随之上升。反之，角度越小，流动受到的阻力越低，尤其是在较低雷诺数下，从而能够更顺畅地流经翅片。

图11b展示了 F_p=2.0 mm 时 Colburn j 因子和摩擦因子 f 的变化趋势。除曲线绘制范围外，其整体趋势与 F_p=1.5 mm 时几乎相似。F_p=1.5 mm 时，图中数据范围为 0.10–0.04；而 F_p=2.0 mm 时，该范围变为 0.09–0.03。翅片间距为 2 mm 时，各角度下 Colburn j因子的变化曲线聚集在一起。只有较小角度（如 L_α=20°）对应的曲线较为明显。在这一特定条件下，性能最低，曲线位于其他研究角度对应的曲线下方。摩擦因子 f 的趋势也与 F_p=1.5 mm 时相似。最高和最低的曲线分别对应 L_α=36° 和 20°。在较高 Re_{Lp} 下，L_α=20° 与 24°之间的差异在此情况下更为明显。当 L_α=36° 且 Re_{Lp}=100 时，摩擦因子 f 达到最高值 0.07。L_α= 36°对应的摩擦因子最高，主要是因为熔盐流动时遇到的阻力较大，并且阻力会随着角度增大而上升。

图11c展示了 F_p=2.5 mm 时 Colburn j 因子和摩擦因子 f 的变化。尽管二者的趋势相同，但由于图中曲线簇更加密集，在这一翅片间距下很难辨别出效率最高的角度。与此前的翅片间距相比，Colburn j 因子曲线集中在更窄的范围内；随着翅片间距增大、流动变得更趋向于沿管道流动，角度对性能的影响也越来越难以辨别。与 Colburn j 因子不同，摩擦曲线的间距更大，且随着 F_p 增大，曲线之间的差异更加明显。最高和最低摩擦因子也更容易辨认。虽然趋势没有变化，但当 Re_{Lp} 为 100 时，在 L_α=36°下观察到的最大摩擦因子 f 约为 0.43；当 Re_{Lp} 为 500 时，在 L_α=20°下得到的最小 f 约为 0.03。综合考察所有图表可见，随着 F_p 增大，h、ΔP、j 和 f 的取值范围均会缩小。

总结而言，随着翅片间距增大，热性能指标会降低，这是由于不间断流动区域扩大，使流动更加趋向于沿管道流动。翅片间距减小时，熔盐流会转变为沿百叶窗流动，从而增强翅片与FLiBe 之间的相互作用，改善热性能。此外，百叶窗角度对压降和摩擦也有重要影响；随着角度变陡，熔盐从前缘开始遇到的阻力更大。

文献中也有其他类比方法用于研究翅片的性能。广泛采用的评价准则之一是体积优值因子（$j/f^{1/3}$），它能够综合考量热工与水力性能。图12整体展示了所有所研究角度和翅片间距下，体积优值因子随Re_{Lp}数的变化情况。图中将结果分为三个独立示意图，分别对应研究中分析的三种翅片间距。从左至右，图示分别对应F_p=1.5 mm、2.0 mm和2.5 mm的翅片间距。如图所示，优值因子的总体趋势是随着Re_{Lp}数增大而下降。尽管所有研究工况均呈现相似趋势，且所得数值范围相近、在各图中看似聚集，但在每个Re_{Lp}数下仍可观察到最大值和最小值。此外，曲线簇中也能辨认出一些不太寻常的特征。总体而言，对于大多数所研究的Re_{Lp}数，F_p=2.0 mm和L_α=20°对应的曲线性能较好，而F_p=2.5 mm和L_α=36°对应的曲线在体积优值因子方面表现最差。在Re_{Lp}数为100时，优值因子的最大值为0.13，对应工况为F_p=1.5 mm和L_α=24°；百叶窗翅片F_p=2.0 mm和L_α=36°的数值最低，为0.112。当Re_{Lp}数略有增加时，翅片对这一变化的响应仅有轻微改变。与第一种工况不同，F_p=2.0 mm和L_α=20°的性能优于其他翅片间距和百叶窗角度，而F_p=2.5 mm和L_α=36°的数值最低。该Re_{Lp}数下观察到的最高值和最低值分别为0.11和0.09。尽管差异并不明显，但在Re_{Lp}数为300和400时，体积优值因子最高和最低的百叶窗翅片分别对应F_p=2.0 mm、L_α=20°和F_p=2.5 mm、L_α=36°。当Re_{Lp}数为500时，尽管排序没有太大变化，表现最差的却变为F_p=2 mm和L_α= 32°对应的百叶窗翅片。如图所示，优值因子最高为0.13，最低为0.06。就结果而言，尽管L_α=20°对应的百叶窗翅片模型在传热和Colburn 因子方面均未表现出较高性能，但综合考虑Colburn j因子和摩擦因子的作用后，它成为最优选项，因为其压力损失和摩擦因子值明显低于其他工况。

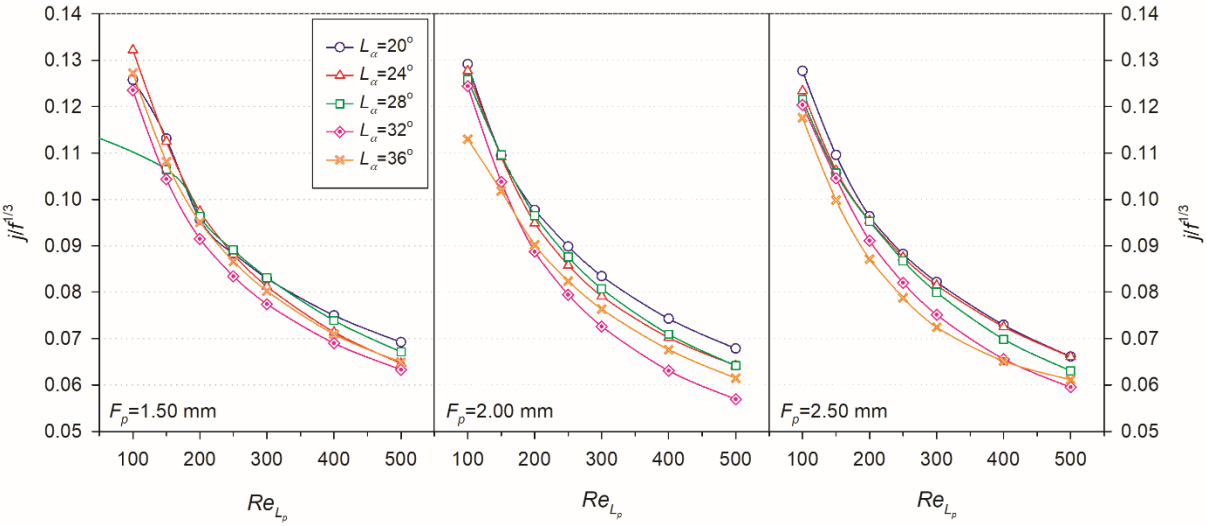


图12. 体积优值因子 (j/f $^{1/3}$) 相对于雷诺数的偏差

4. 结论

强烈建议尽可能减少MSR换热器中的燃料存量。应通过增大传热面积、减小体积，采用紧凑式换热器来最大限度地降低燃料存量。紧凑式换热器最有前景的方案是微型通道扁管上的百叶窗翅片。一次和二次流体回路中熔盐的物理性质不仅影响换热器的尺寸和成本，也会影响泵功率、管道尺寸、燃料存量，进而影响设计成本。为丰富MSR相关文献，本文针对典型MSR热工条件，研究了FLiBe流经带有多百叶窗翅片的紧凑式换热器（CHE）时的稳态热工水力性能。作为一项持续研究的初步工作，针对低速度范围，采用三种不同翅片间距和五种不同百叶窗角度开展了一系列数值测试。获得了五种不同雷诺数下的稳态速度分布、温度场和压力场，并以Colburn j因子和范宁摩擦因子f评估传热系数和压降，同时计算了体积优值因子（j/f $^{1/3}$）。

预测了旨在增强传热的百叶窗翅片的作用。传热系数得到了提高，但代价是压降增加。压降增加有助于减少燃料存量。本基准研究针对低速流动分布开展，旨在通过研究FLiBe流经紧凑式换热器（CHX）中的百叶窗翅片时的热工水力行为，了解紧凑式换热器在MSR应用中的适用性。所得结果可概括如下：

- 随着百叶窗角度增大，上游压力升高，而下游压力降低，因此压降也随百叶窗角度增大而增加。

- 随着百叶窗角度增大，FLiBe 的流动方向会更加沿百叶窗导向，从而增强熔盐与百叶窗翅片之间的相互作用，进而提升热性能。

- 随着翅片间距增大，翅片之间的空间随之扩大，流动逐渐转为沿流道流动，从而减弱熔盐与翅片之间的相互作用。相互作用减弱时，紧凑式换热器的热性能也会降低。

- 随着熔盐流速度提高，对于所有研究的翅片间距和百叶窗角度，传热系数和压降均会增加。F_p=1.5 mm 的最高“h”范围为 12000-28000 W/m^{2}K，而 F_p=2 mm 和 F_p=2.5 mm 的范围分别为 12000-25000 W/m^{2}K 和 12000-24000 W/m^{2}K。观察翅片间距对压降的影响时，也发现了类似的递减趋势。F_p=1.5 mm 的 ΔP 范围为 4500-0 Pa，而 F_p=2.0 mm 和 F_p=2.5 mm 的范围分别降至 3000-0 Pa 和 2000-0 Pa。

- 无论翅片间距和百叶窗角度如何，Colburn j 因子和摩擦因子 f 都会随着雷诺数的增加而降低。随着翅片间距增大，由于相互作用减弱，热性能有所下降，Colburn j因子的范围也随之缩小。对于 F_p=1.5 mm，其范围为 0.10–0.04；而对于 F_p=2.0 mm 和 F_p=2.5 mm，其范围则分别降至 0.095–0.03 和 0.09–0.03。摩擦因子也呈现相同的趋势。

这项研究融合了熔盐反应堆与具有更大传热表面积的紧凑式换热器设计这两个领域。因此，它将有助于从事相关研究、实际产品设计以及 MSR 热工水力系统制造的人员。正如总结的研究结果所示，针对 MSR 采用最合适的边界条件，对 FLiBe 的热工水力特性进行全面研究，有助于开发效率更高的紧凑式换热器，从而增强堆芯的传热，缩小体积并减少堆芯外的燃料盐体积。

参考文献

[1] Z. Guo、J. Zhou、D. Zhang、K.S. Chaudri、W. Tian、G. Su、S. Qiu，耦合中子学/热-用于熔盐反应堆分析的流体力学，《核工程与设计》，258（2013）144-156。https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2013.01.013

[2] K. Furukawa、K. Mitachi、Y. Kato、S.E. Chigrinov、A. Lecocq、L.B. Erbay，通过 THORIMS-NES（钍熔盐核能协同系统）合理处置钚以生产铀，IAEA-TECDOC-840，国际原子能机构，（1995年），169-181，奥地利维也纳。

[3] K. Furukawa、K. Arakawa、L.B. Erbay、Y. Ito、Y. Kato、H. Kiyavitskaya、A. Lecocq、K. Mitachi、R. Moir、H. Numata、J.P. Pleasant、Y. Sato、Y. Shimazu、V.A. Simonenco、D.D. Sood、C. Urban、R. Yoshioka，通过单一熔融氟化物熔盐流动实现全球规模钍增殖燃料循环的路线图，《能源转换与管理》，49（2008年）1832-1848。https://doi.org/10.1016/j.enconman.2007.09.027

[4] K. Furukawa、E. D、L. Berrin、M. Hron、Y. Kato，《基于钍熔盐核能协同系统（THORIMS-NES）的新型可持续安全核工业》，载于：《核电——部署、运行与可持续性》（2011年）。

[5] K. Furukawa、L. Berrin Erbay、A. Aykol，《共生钍增殖燃料循环研究：通过 FUJI 实现 THORIMS-NES》，《能源转换与管理》63（2012年）51-54。https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.01.030

[6] R.E. MacPherson，《气冷熔盐热交换器》，ORNL-2605，橡树岭国家实验室，（1958年），橡树岭，田纳西州，美国。

[7] L.G. Alexander、B.W. Kinyon、M.E. Lackey、R.E. MacPherson、J.W. Miller、F.C. VanderLage、G.D. Whitman、J. Zasler，《实验性熔盐燃料30 MW动力堆》，ORNL-2796，橡树岭国家实验室，（1960年），美国田纳西州橡树岭。

[8] R.C. Robertson，《MSRE设计与运行报告第一部分：描述与反应堆报告》，ORNL-TM-728，橡树岭国家实验室，（1965年），美国田纳西州橡树岭。[9] S. Cantor，《多种熔融氟化物混合物的密度和黏度》，ORNL-TM-4308，橡树岭国家实验室，（1973年），美国田纳西州橡树岭。

[10] L.B. Erbay，《探讨斯特林热机与熔盐反应堆联合发电》，载于：《能源系统效率、成本、优化、模拟与环境影响国际研讨会论文集：ECOS'99》，日本东京，（1999年），第429-434页。

[11] L.B. Erbay，《钍熔盐反应堆换热系统的专业知识》，载于：11th 国际会议，主题为可持续能源技术，2012年，加拿大温哥华，（2012年）。

[12] M.S. Lippy，《熔盐反应堆微通道紧凑型一次热交换器的开发》，载于弗吉尼亚理工学院暨州立大学，弗吉尼亚州，美国，（2011年）。

[13] A. Valerio，《创新型熔盐快堆热交换器分析》，载于保罗·谢errer研究所，菲利根，瑞士，（2014年）。

[14] J. Serp, C. Koç, L.B. Erbay, E. Öğüt, H. Ayhan, E. Merle, J. Ragusa，熔盐快堆换热器设计研究，EPJ核科学与技术，5（2019年）。https://doi.org/10.1051/epjn/2019032

[15] S.S. Manohar、A.E. Matthias、S. Piyush、S. Phil，《液态盐工程数据库》热物理与热化学性质，爱达荷国家实验室，美国能源部核能办公室，（2010年）。https://doi.org/10.2172/980801[16] R. Tufeu, J.P. Petitet, L. Denielou, B. Le Neindre，熔融纯盐和盐混合物热导率的实验测定，《国际热物理学杂志》，6（1985年）315-330。https://doi.org/10.1007/bf00500266[17] L. Bin, W. Yu-ting, M. Chong-fang, Y. Meng, G. Hang，熔盐在圆管中的湍流对流换热，《国际传热与传质通讯》，36（2009年）912-916。https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2009.06.003[18] Y.-T. Wu, C. Chen, B. Liu, C.-F. Ma，熔盐在圆管中的强制对流换热研究，《国际传热与传质通讯》，39（2012年）1550-1555。https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2012.09.002[19] J. Lu, S. He, J. Ding, J. Yang, J. Liang，带冷却壁的垂直环形管道中高温熔盐的对流换热，《应用热工程》，73（2014年）1519-1524。https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.05.098[20] S. He, J. Lu, J. Ding, T. Yu, Y. Yuan，熔盐在换热器管束外部的对流换热，《实验热科学与流体科学》，59（2014年）9-14。https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2014.07.008[21] S. He, J. Ding, J. Lu, W. Wang, J. Yang，熔盐在垂直同心管道中流动时的传热特性，《能源进展》，61（2014年）2629-2632。https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.12.264[22] Y.M. Ferng, K.-Y. Lin, C.-W. Chi，计算流体力学研究FLiNaK盐作为换热流体时的热工水力特性，《应用热工程》，37（2012年）235-240。https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.11.021[23] A.K. Srivastava, A.M. Vaidya, N.K. Maheshwari, P.K. Vijayan，熔融氟化物盐在圆管中的传热和压降特性，《应用热工程》，61（2013年）198-205。https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.07.051[24] M.R. Rodríguez-Sánchez, C. Marugan-Cruz, A. Acosta-Iborra, D. Santana，熔盐外置吸热器的简化传热模型与计算流体力学模拟对比，《应用热工程》，73（2014年）993-1005。https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.08.072[25] L.B. Carasik, D.R. Shaver, J.B. Haefner, Y.A. Hassan，采用稳态雷诺平均纳维–斯托克斯方法计算串列式熔盐紧凑型横流换热器的压降，《核能进展》，101（2017年）209-223。https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2017.07.017[26] P. Sabharwall, D. Clark, M. Glazoff, G. Zheng, K. Sridharan, M. Anderson，熔盐用先进换热器开发，《核工程与设计》，280（2014年）42-56。https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2014.09.026[27] 什么是Heatric印刷电路板式换热器？（2012年），访问日期：2021年10月17日。https://www.heatric.com/heat-exchangers/[28] E.S. Kim, P. Sabarwall, N. Anderson，中间冷却剂表征与选择的性能指标（FOM）开发，INL/CON-11-20829，美国核学会年会，（2011年），佛罗里达州好莱坞。

[29] Y.-J. Chang, C.-C. Wang，百叶窗翅片几何结构的广义传热关联式，《国际传热传质杂志》，40（1997）533-544。https://doi.org/10.1016/0017-9310(96)00116-0

[30] M. Brovchenko、D. Heuer、E. Merle-Lucotte、M. Allibert、N. Capellan、V. Ghetta、A. Laureau，《改进熔盐快堆设计的初步安全计算》，载于：《反应堆物理进展：连接研究、工业与教育》，美国田纳西州诺克斯维尔，（2012年），第1–12页。

[31] ANSYS公司，《ANSYS Fluent用户指南》，14.0版（2011年）。

[32] T. Perrotin、D. Clodic，《百叶窗翅片-扁管式换热器的热工水力学CFD研究》，《国际制冷杂志》27（2004年），422-432页。https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2003.11.005

图注

图1. 所研究百叶窗翅片的技术图：（a）A-A的二维剖面图；
（b）三维外观

图 2. 二维数值模型及边界条件

图 3. (a) 网格无关性 (b) 与文献结果的比较

图 4. FLiBe流经百叶窗翅片的流线，F_p=1.5 mm、Re_{Lp}=100条件下：(a) L_α=20° (b) L_α=32°

图 5. FLiBe流经百叶窗翅片的压力场，F_p=1.5 mm、Re_{Lp}=100条件下：(a) L_α=20° (b) L_α=32°

图 6. FLiBe流经百叶窗翅片的温度场，F_p=1.5 mm、Re_{Lp}=100条件下：(a) L_α=20° (b) L_α=32°

图7. FLiBe流经百叶窗翅片时的流线，F_p=2.5 mm、Re_{Lp}=400（a）L_α=20°（b）L_α=32°

图8. FLiBe流经百叶窗翅片时的压力场，F_p=2.5 mm、Re_{Lp}=400（a）L_α=20°（b）L_α=32°

图9. FLiBe流经百叶窗翅片时的温度场，F_p=2.5 mm、Re_{Lp}=400（a）L_α=20°（b）L_α=32°

图10. FLiBe的传热系数（h）和压降（ΔP）相对于迎面速度的偏差（u_{in}）（a）F_p=1.5 mm（b）F_p=2.0 mm（c）F_p=1.5 mm

图 11. FLiBe 的 Colburn j 和 f 因子相对于迎面速度的偏差：（a）F_p=1.5 mm；（b）F_p=2.0 mm；（c）F_p=1.5 mm

图12. 体积优值因子（$j/f^{1/3}$）相对于雷诺数的偏差

表格标题

表1. 品质因数（FOM）的定义

表2. 不同冷却剂优值的比较

表3. FLiBe 和 Hastelloy-N 的性质