

新型搅混翼对燃料棒流致振动导致的微动磨蚀影响研究

袁 硕^{1,3} 柴 翔^{2,3} 刘晓晶^{1,2,3} 何 辉^{2,3}

1(上海交通大学 智慧能源与创新学院 上海 200240)

2(上海交通大学 机械与动力工程学院 上海 200240)

3(上海市数值反应堆技术融合创新中心 上海 200240)

摘要 针对由形状记忆合金制作的新型搅混翼的强化换热效果及其影响下的燃料棒微动磨蚀问题,利用双向流固热耦合的方法模拟了新型搅混翼下的流场分布、压降损失及燃料棒受力情况,并建立了燃料棒受力的非线性振动模型,计算了燃料棒相对于定位格架的微动磨蚀功率。结果表明:形状记忆合金搅混翼可不产生额外的压力损失而强化燃料棒与冷却剂间的传热;强化传热效果随着搅混翼的最大弯折角度的增大而增大;同时,燃料棒与定位格架间的微动磨蚀功率随着搅混翼的弯折角度增大而增大。

关键词 形状记忆合金, 搅混翼, 流致振动, 微动磨蚀, 计算流体力学

中图分类号 TL99

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2025.hjs.48.230466

CSTR: 32193.14.hjs.CN31-1342/TL.2025.48.230466

Study on the influence of novel mixing vanes on fretting wear caused by fuel rods flow-induced vibration

YUAN Shuo^{1,3} CHAI Xiang^{2,3} LIU Xiaojing^{1,2,3} HE Hui^{2,3}

1(Country College of Smart Energy, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

2(School of Mechanical and Power Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

3(Shanghai Digital Nuclear Reactor Technology Intergration Innovation Center, Shanghai 200240, China)

Abstract [Background] Mixing vanes can enhance the critical heat flux of fuel assemblies by generating vortices. Current studies primarily focus on the optimized design of traditional mixing vanes made of zirconium alloy and does not take into account the impact of mixing vanes on fretting wear of fuel rods. [Purpose] This study aims to propose a novel type of mixing vane made of shape memory alloys to address the micro motion abrasion problem of fuel rods. [Methods] The two-way fluid-structure-thermal coupling analysis was employed to simulate the flow field distribution, pressure drop loss and fuel rod stress under a new type of mixing vane. Then, a nonlinear vibration model of fuel rod force with mixing vane made of shape memory alloys was established. Finally, a comparative analysis was conducted on the impact of different mixing vanes on the fretting wear power between fuel rods and the

国家自然科学基金(No.U20B2011, No.52176082)、中国核工业集团公司领创研究项目

第一作者: 袁硕, 男, 1999年出生, 2024年毕业于上海交通大学, 现为硕士研究生, 研究领域为反应堆热工水力

通信作者: 何辉, E-mail: me_hehui@sjtu.edu.cn

收稿日期: 2023-12-08, 修回日期: 2024-03-26

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. U20B2011, No. 52176082), LingChuang Research Project of China National Nuclear Corporation

First author: YUAN Shuo, male, born in 1999, graduated from Shanghai Jiao Tong University in 2024, master student, focusing on reactor thermal hydraulic

Corresponding author: HE hui, E-mail: me_hehui@sjtu.edu.cn

Received date: 2023-12-08, revised date: 2024-03-26

spacer grids. **[Results]** The results indicate that shape memory alloys mixing vanes experience a similar pressure loss compared to traditional mixing vanes; the enhanced heat transfer effect increases with the maximum bending angle of the mixing vanes. Simultaneously, the fretting wear power between fuel rods and the spacer grids increases with the bending angle of the mixing vanes. **[Conclusions]** Shape memory alloys mixing vanes do not generate additional pressure loss while strengthening heat transfer between fuel rods and coolant.

Key words Shape memory alloy, Mixing vanes, Flow-induced vibration, Fretting wear, CFD

在压水堆中,堆芯燃料组件由定位格架具有预紧力的钢突/弹簧所固定和支撑,以保证燃料组件处于合适的位置。为保证燃料组件得到充分的冷却,定位格架上还布置了搅混翼,如图1所示。搅混翼可以通过产生涡流来平衡各个子通道间的焓值,提高燃料组件的临界热通量。吴增辉等^[1]使用粒子图像测量的方法测量燃料组件的横向流,实验表明定位格架下游流场分布受搅混翼影响很大。搅混翼在强化燃料组件与周围冷却剂间对流换热的同时,也会带来显著的压力损失,并且其产生的高雷诺数的涡流也会加剧定位格架与燃料棒束间的微动磨蚀。

目前,国内外关于搅混翼的优化设计已有较多研究。In等^[2]通过数值模拟的方法对比分析了不同类型搅混翼作用下的涡流和横向流差异,结果表明,更大的涡流强度会导致更大的压力损失。Kim等^[3]使用三维的雷诺时均数值模拟(Reynolds-Averaged Navier-Stokes simulations, RANS)进行了搅混翼的优化设计,研究表明,换热效果随着搅混翼曲折角度的增大而增大,压力损失随着搅混翼曲折角度而增大,换热效率的变化与涡强度的变化高度一致。

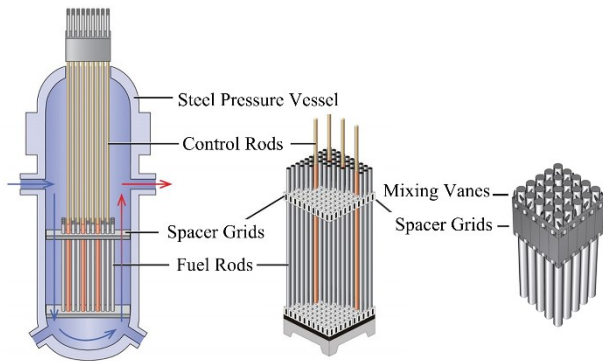


图1 压水堆燃料组件、定位格架及搅混翼结构图
Fig.1 Structure diagram of PWR fuel assembly, spacer grid and mixing vanes

上述研究主要集中在由锆合金制作的传统搅混翼的优化设计上,且未考虑搅混翼对燃料棒微动磨蚀的影响。本文提出了一种使用形状记忆合金材料制作的新型搅混翼,通过双向流固热耦合分析其影响下的流场分布、涡强度演化及压降损失,并最终对比分析了不同搅混翼对燃料棒与定位格架间微动磨

蚀功率的影响。

1 数值模拟理论

1.1 形状记忆合金

形状记忆合金(Shape Memory Alloys, SMA)具有在受到特定刺激(如热或磁变化)后能够恢复其原始形状的能力。形状记忆合金可存在于两种不同的相态,具有三种不同的晶体结构,即孪晶马氏体、去孪晶马氏体和奥氏体。奥氏体结构在高温下保持稳定,而马氏体结构在较低温度下保持稳定。图2为形状记忆合金的形状记忆效应原理图,展示了热驱动的形状记忆效应引起的新型搅混翼的微观结构和宏观结构变化^[4]。

当形状记忆合金被冷却时,其从奥氏体相转变为孪晶马氏体相。 M_s 表示马氏体相变开始温度; M_f 表示马氏体相变结束温度。此时,对孪晶马氏体施加外部载荷,孪晶马氏体将在特定方向上生长,转变为去孪晶马氏体。这个过程被称为去孪晶化。在宏观层面上,形状记忆合金搅混翼曲折角度增加。当形状记忆合金与周围冷却剂换热升温后,其从马氏体相转变为奥氏体相,即发生马氏体相变。在宏观层面上,形状记忆合金搅混翼恢复至原来的形状,曲折角度减小。 A_s 表示奥氏体相变开始温度; A_f 表示奥氏体相变结束温度。

使用ANSYS Workbench中的Auricchio模型定义形状记忆合金材料。该模型考虑了马氏体的去孪晶化、马氏体相变及奥氏体相变,可以很好地模拟热驱动的形状记忆效应。Auricchio本构方程如下^[5]:

$$\sigma = E: (\varepsilon - \varepsilon_{tr}) \quad (1)$$

$$\varepsilon_{tr} = \Delta \xi \frac{\partial F(\sigma_{tr})}{\partial \sigma} \quad (2)$$

$$F(\sigma_{tr}) = \sigma_{tr} + m \frac{J_3}{J_2} - R \quad (3)$$

$$\sigma_{tr} = \sigma' - [\tau_M(T) + h \|\varepsilon'_{tr}\| + \gamma] \frac{\varepsilon'_{tr}}{\|\varepsilon'_{tr}\|} \quad (4)$$

式中: σ 和 σ_{tr} 为总应力和相变应力; ε 和 ε_{tr} 为总应变和相变应变; σ' 和 ε'_{tr} 为偏应力和偏相变应变; F 和 $\Delta \xi$ 为屈服函数和相变应变倍增器; J_2 和 J_3 为相变应力的

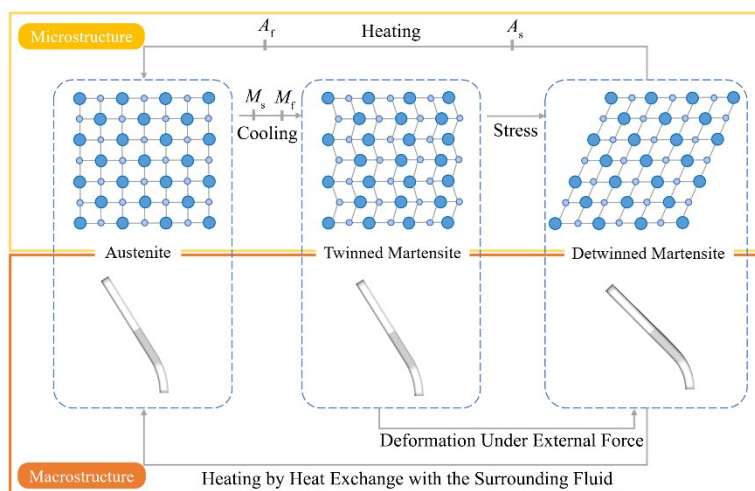


图2 形状记忆效应原理图
Fig.2 Principle diagram of shape memory effect

第二和第三不变量； E 和 R 为杨氏模量和弹性域半径； $\tau_M(T)$ 和 h 为麦克斯韦应力和相变过程材料硬化参数。

1.2 双向流固热耦合

本文使用 ANSYS Workbench 下的 System Coupling 模块耦合流体域和固体域。双向流固热耦合计算流程如图3所示^[6]，耦合模块分别为求解流体的 Fluent 模块和固体的瞬态动力学模块。使用 APDL (ANSYS Parametric Design Language) 命令修改固体单元类型，使得瞬态动力学模块也可求解固体热分布。使用 System Coupling 建立流体和固体间的双向数据传递。

双向流固热耦合求解从流体域开始，通过 Fluent 模块求解流场，流场求解收敛后求解得到的力、温度等数据通过耦合面插值至瞬态动力学模块的耦合面。瞬态动力学模块将其耦合面的数据作为边界条件，求解出收敛后的结构变形及热分布，之后通过流固耦合面将位移、温度等数据插值至 Fluent 模块的耦合面。Fluent 通过动网格技术适应固体域引起的流体域变形以完成新的流场求解。循环重复此过程，直至流体域与固体域间的数据传输收敛，再进行下一个时间步的计算。

双向流固热耦合在经典的流固耦合基础上增添了热数据的传输，分别为从流体域传向固体域的传热系数和壁面边界温度，以及从固体领域传向流体域的对流换热参考温度。固体域接收到流体域的热数据后，求解内部热分布。当达到奥氏体相变开始温度时，瞬态动力学模块根据 Auricchio 形状记忆合金本构模型驱动新型搅混翼的形状记忆效应，即曲折角度开始减小恢复至初始角度。

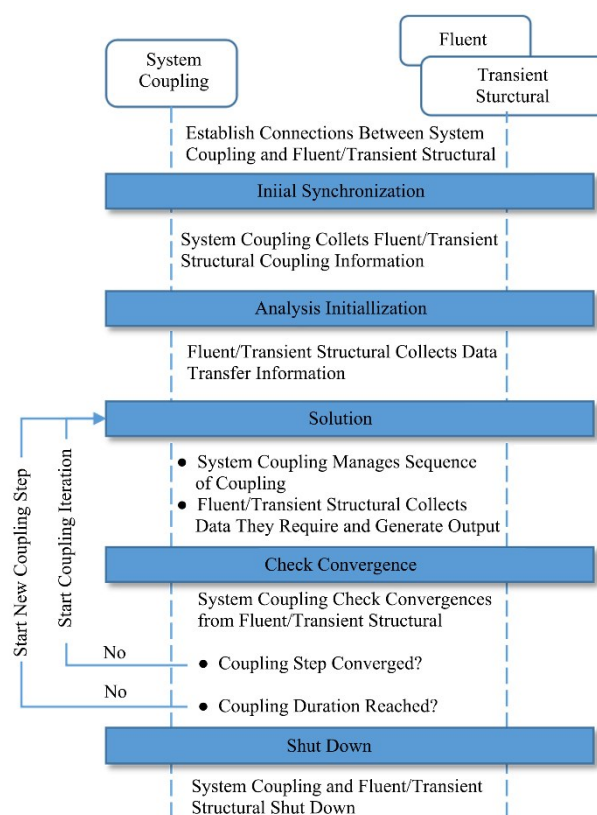


图3 双向流固热耦合算法示意图
Fig.3 Illustration of two-way fluid-structure-thermal coupling algorithm

1.3 非线性振动模型

由于受到随机湍流力的作用，燃料棒受到的来自定位格架的支撑力取决于其自身的位移。燃料棒受到的来自定位格架的支撑力其本质是一个非线性力，这使得燃料棒固体响应系统是一个多自由度的非线性响应系统。燃料棒-定位格架非线性振动系

统的控制方程为^[7]:

$$[M_s]\{\ddot{x}\} + [C_s]\{\dot{x}\} + [K_s]\{x\} = \{F\}_{\text{fluid}} + \{G\} \quad (5)$$

式中: M_s 、 C_s 和 K_s 分别为多自由度系统的惯性矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; F 为燃料棒受到的来自流体的随机湍流; G 为格架支撑力; x 为振幅。

燃料棒定位格架支撑力为非线性约束力,当燃料棒的位移超过燃料棒和定位格架间的间隙时,格架支撑力模型就会被激活。当燃料棒朝远离格架刚突/弹簧的方向运动,间隙逐渐被打开,两者间无接触,支撑力模型失效。格架支撑力被分解为法向支撑力和切向摩擦力,其法向支撑力被定义为:

$$F_N = \begin{cases} F_N = 0 & U_N > 0 \\ F_N = K_N U_N & U_N \leq 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中: U_N 为燃料棒和定位格架刚突/弹簧间的距离; K_N 为定位格架刚突/弹簧的法向刚度。

其切向摩擦力被定义为^[8]:

$$F_{sy} = \begin{cases} F_{sy} = \mu K_N U_N \sqrt{F_{sy}^2 + F_{sz}^2} - \mu F_N > 0 \\ F_{sy} = F \sqrt{F_{sy}^2 + F_{sz}^2} - \mu F_N = 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中: μ 为摩擦系数; F_{sy}/F_{sz} 为切向力。

求解燃料棒的非线性振动系统得到的法向支撑力 F_N 和滑移距离 s 用来计算微动磨蚀功率。西屋公司的Frick^[9]在Archard公式的基础上提出了微动磨蚀功率 $\dot{w}$,其被定义为单位时间内法向接触力和滑移距离乘积的积分:

$$\dot{w} = \frac{1}{t} \int F_N ds \quad (8)$$

2 计算模型

2.1 双向流固热耦合计算模型

双向流固热耦合计算模型为单根燃料棒及一对布置在子通道内的搅混翼,如图4所示。燃料棒直径 D 为9.5 mm。为有效减小入口流动不稳定以及出口效应对关注区域的影响^[10],搅混翼上游设置了长为76 mm的入口区域,搅混翼下游设置了长为304.8 mm的流道。为了避免在搅混翼与流道相切位置生成纵横比过大的低质量网格,流道外壁面向外扩展了1 mm。搅混翼的类型为广泛应用的分裂式搅混翼,其根部长度(L)为4.19 mm,高度(H)为5.54 mm,曲折角度(α)为32°。

对于流体域,入口速度设置为 $v=(0,0,5) \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,其雷诺数 $Re_D=0.96\times 10^5$ 。其边界条件设置如表1所示。流体-搅混翼交界面被设置为系统耦合面,以进行双向流固热耦合的数据传递。同时,由于搅混翼受负载及热驱动的曲折角度变化,流体-搅混翼交界面被定义为动网格区域边界,并使用网格重构法(Remeshing)使流体域网格适应形状记忆合金搅混翼的大变形,避免出现网格负体积的情况。通过Udf来控制流体的入口温度,保证形状记忆合金搅混翼的去孪晶化过程在奥氏体相变开始温度以下。

表1 边界条件
Table 1 Boundary conditions

边界面 Boundary Surfaces	边界条件 Boundary conditions	输入 Inputs
入口 Inlet	速度入口 Velocity inlet	$v=(0, 0, 5) \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
出口 Outlet	压力出口 Pressure outlet	$p=0 \text{ Pa}$
外壁面 Outer wall	静止壁面 Stationary wall	无滑移 No slip
流体-搅混翼交界面 Fluid-mixing vanes interface	系统耦合面 System coupling wall	动网格 Dynamic mesh

对于固体域,搅混翼的初始温度被设置为马氏体相变结束温度以下。对此状态下的形状记忆合金搅混翼施加外力,使得形状记忆合金发生去孪晶化过程。搅混翼-流体交界面的边界也被设置为系统耦合面,其和流体域的系统耦合面互相映射,双向传输耦合数据。

使用 ICEM (The Integrated Computer Engineering and Manufacturing code)生成了和流动方向一致的六面体网格,如图4所示。几何模型主要被分为三个块,分别为流体域块、燃料棒块以及搅混翼块。两个搅混翼被进一步细分为两个块来保证网格质量。此外,使用外 O-grid 块来单独创建边界

层块,以方便调整边界层网格尺寸。总的网格数量约为1 000万。

为了考察新型搅混翼片的曲折角度对通道流动和传热特性的影响^[11],本研究设计了4个计算工况,包含三个不同最大曲折角度(α)的工况,工况参数如表2所示。其中工况4为固定曲折角度的传统搅混翼。

2.2 燃料棒非线性振动模型

图5为燃料棒非线性振动的有限元分析模型。该模型基于西屋公司(Westinghouse)开发的VITRAN(Vibration Transient Analysis Non-linear)代码的全长燃料棒模型^[12]。其为一个定位格架的双跨

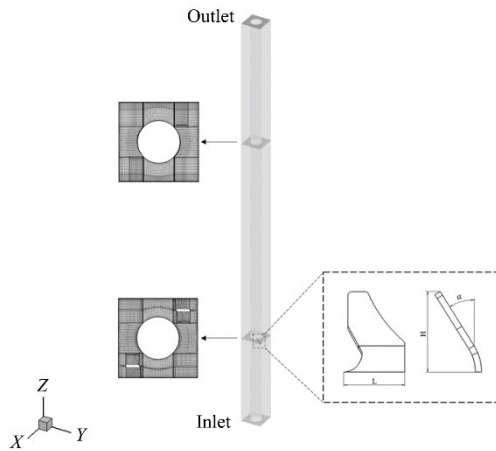


图4 计算模型几何结构示意图
Fig.4 Geometry diagram of computational model

表2 计算工况参数表
Table 2 Parameters for CFD cases

工况 CFD cases	最大曲折角度 Maximum bending angle / (°)	搅混翼材料 Materials of mixing vanes
1	48	形状记忆合金 Shape memory alloy
2	44	形状记忆合金 Shape memory alloy
3	40	形状记忆合金 Shape memory alloy
4	32	锆合金 Zirconium alloy

度燃料棒模型,定位格架对燃料棒无初始预载荷,且与燃料棒间间隙为零。

定位格架的钢突/弹簧被建模为弹簧,并在燃料棒与定位格架间建立了点对点接触,以模拟燃料棒与定位格架间的相互作用。燃料棒因其细而长的几何特性,整体被建模为欧拉-伯努利梁。双向流固热耦合模拟中得到的作用于燃料棒表面的随机湍流力作为系统激励^[13]。

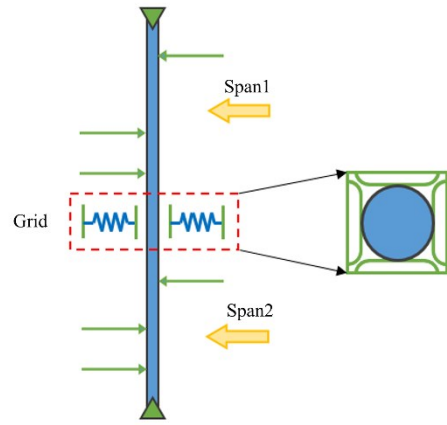


图5 两跨度一格架燃料棒有限元分析模型示意图
Fig.5 Diagram of FEA model of the fuel rod with two spans and one spacer grid

3 结果与讨论

3.1 双向流固热耦合结果

3.1.1 切向速度分布对比

为了研究搅混翼曲折角度对通道流动的影响,选取了各个工况最大曲折角度时的不同位置的瞬时切向速度分布,分别如图6~9所示。

在 $Z=D_h$ 位置,各个工况下都可观察到每个搅混翼均产生了两个明显的涡流结构,分别位于搅混翼与流道外壁面间及搅混翼与燃料棒表面间。不同工况下涡流位置的差异归因于不同的曲折角度。对比工况3和工况4,工况1和工况2,可知由于更大的曲折角度,其涡流具有更大的切向速度。

随着轴向距离的发展,在 $Z=5D_h$ 位置,搅混翼的搅混作用逐渐减弱,切向速度分布也逐渐变得均匀,靠近燃料棒表面的涡流逐渐耗散,转变为约 45° 的横向流。根据 Ikeda 等^[14]的实验研究,这种横向流可以促进流体与燃料棒表面间的对流传热,更有效地冷却燃料棒。工况1由于更大曲折角度的搅混翼,其在燃料棒表面附近发展出了流速更大的横向流。

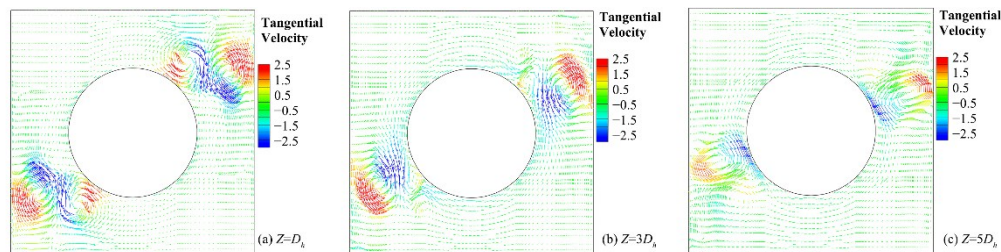


图6 工况1最大曲折角度时刻,在 $Z=D_h$ 、 $Z=3D_h$ 、 $Z=5D_h$ 处横截面的瞬时切向速度分布(彩图见网络版)
Fig.6 At the moment of the maximum bending angle in operating condition 1, the instantaneous tangential velocity distribution on cross-sections at $Z=D_h$, $Z=3D_h$, and $Z=5D_h$ (color online)

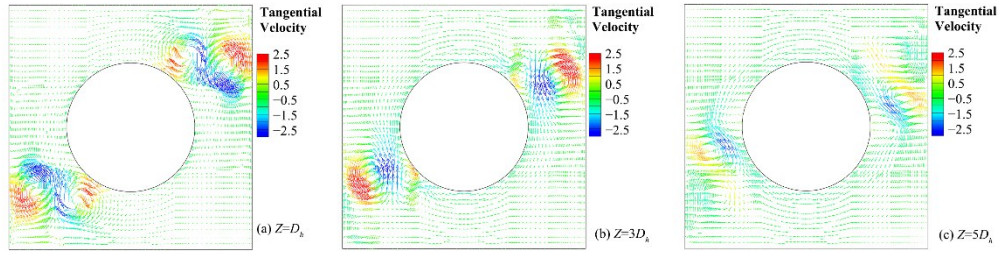


图7 工况2最大曲折角度时刻,在 $Z=D_h$ 、 $Z=3D_h$ 、 $Z=5D_h$ 处横截面的瞬时切向速度分布(彩图见网络版)
Fig.7 At the moment of the maximum bending angle in operating condition 2, the instantaneous tangential velocity distribution on cross-sections at $Z=D_h$, $Z=3D_h$, and $Z=5D_h$ (color online)

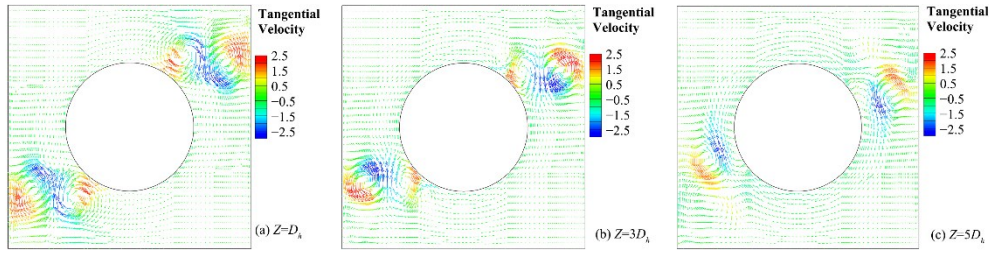


图8 工况3最大曲折角度时刻,在 $Z=D_h$ 、 $Z=3D_h$ 、 $Z=5D_h$ 处横截面的瞬时切向速度分布(彩图见网络版)
Fig.8 At the moment of the maximum bending angle in operating condition 3, the instantaneous tangential velocity distribution on cross-sections at $Z=D_h$, $Z=3D_h$, and $Z=5D_h$ (color online)

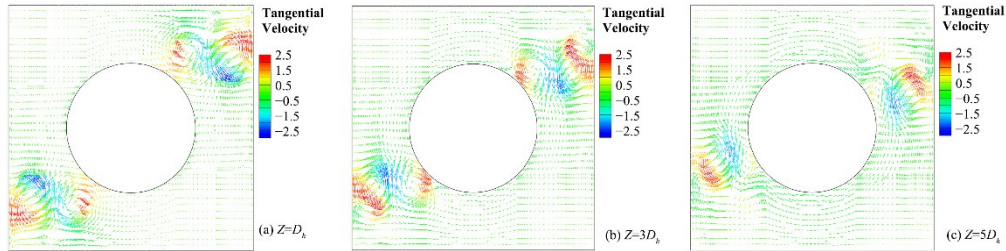


图9 工况4(固定曲折角度)在 $Z=D_h$ 、 $Z=3D_h$ 、 $Z=5D_h$ 处横截面的瞬时切向速度分布(彩图见网络版)
Fig.9 Operating condition 4 with fixed bending angle, the instantaneous tangential velocity distribution on cross-sections at $Z=D_h$, $Z=3D_h$, and $Z=5D_h$ (color online)

3.1.2 涡强度分布对比

为了定量分析不同工况下的切向速度分布,使用涡强度表征不同曲折角度的搅混翼对流体的搅混强度^[15]。涡强度被定义为:

$$C = \frac{\sqrt{u_x^2 + u_y^2}}{U} \quad (9)$$

式中: u_x 和 u_y 分别为切向速度分量; U 为体速度。

图10为不同工况下涡强度随搅混翼下游的演化。涡强度都在搅混翼附近达到最大值,随着轴向距离的发展而逐渐衰减。由于工况1具有最大的弯折角度,工况1的涡强度明显大于其余工况。与工况4相比,工况1、工况2及工况3的最大涡强度分别增长了36.25%、25.63%和15.63%。根据Kim等^[3]的研究,增强的涡强度可表明燃料棒与冷却剂之间的传热效率得到了提高。

此外,从图10还可看出,搅混翼的弯折角度对

涡强度的影响主要集中在 $Z=10D_h$ 的范围内,随着轴向距离的增长,各工况下涡强度的差异逐渐减小。

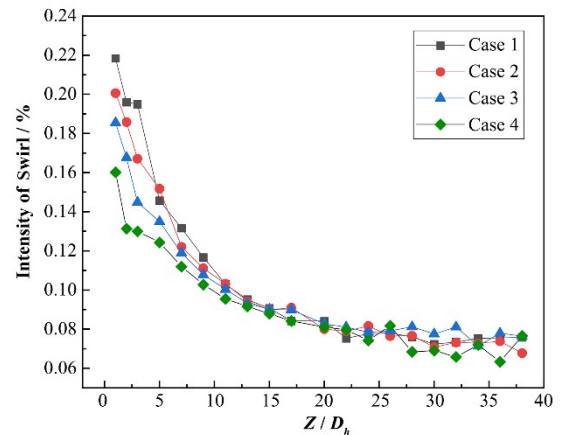


图10 涡强度随搅混翼下游演化图
Fig.10 Intensity evolution diagram of swirls downstream the mixing vanes

3.1.3 压降损失对比

搅混翼产生涡流强化换热的同时,也会带来压力损失。图11(a)为各工况下最大曲折角度时的瞬时压力分布,其均在通过搅混翼时出现了明显的压力下降,随后沿轴向流动方向几乎线性下降,直至在出口处为0。工况1由于更大的曲折角度带来了更大的压力损失;工况2和工况3压力损失基本一致;工况4由于最小的曲折角度,其压力损失最小。

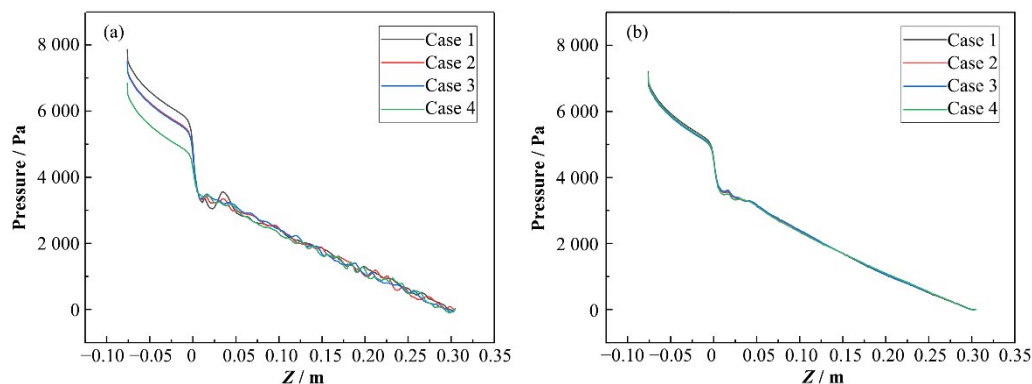


图11 轴向压力分布图(彩图见网络版) (a) 燃料棒表面瞬时压力分布,(b) 燃料棒表面平均压力分布

Fig.11 Axial pressure profiles along the rod (color online)

(a) Instantaneous pressure along the rod, (b) Mean pressure along the rod

3.2 燃料棒动态响应

求解燃料棒的非线性振动模型得到其法向支撑力和滑移距离用于计算微动磨蚀功率。各个工况下的微动磨蚀功率如表3所示。

由表3可知,对比工况4,工况1、工况2、工况3由于更大的曲折角度都出现了不同程度的微动磨蚀功率的增大,分别为48.68%、23.68%及17.11%。表4为工况1~3相较于工况4所带来的涡强度及微动

由于形状记忆合金搅混翼的曲折角度是随着周围流体温度而自动调整的,因此取其曲折角度由大变小的整个过程为一个时间周期,对比了同一时间周期下,不同工况的平均压力分布。从图11(b)可看出,在整个时间周期内,所有工况具有相似的压降趋势。这表明形状记忆合金搅混翼由于某些时刻具有更大的曲折角度而带来了更高的换热效率,同时在整个时间周期内没有产生额外的压力损失。

表3 各个工况的微动磨蚀功率
Table 3 Fretting wear power of all cases

工况 CFD cases	微动磨蚀功率 Fretting wear power / mW
1	0.011 3
2	0.009 4
3	0.008 9
4	0.007 6

磨蚀功率增长对比。

表4 涡强度及微动磨蚀功率增长率对比

Table 4 Comparison of the growth rate of intensity of swirls and fretting wear power

工况 CFD cases	涡强度增长百分比 Percentage increase in intensity of swirls / %	微动磨蚀功率增长百分比 Percentage increase in fretting wear power / %
1	36.25	48.68
2	25.63	23.68
3	15.63	17.11

从表4可看出,涡强度及微动磨蚀功率都随着新型搅混翼最大曲折角度的增大而增大,但两者的增长率有所差异。工况1由于最大的曲折角度,虽对涡强度的强化效果最为明显,但其微动磨蚀功率增长率也最大且大于涡强度的增长率。更大的微动磨蚀功率意味着更短的燃料棒失效时间,进而增加燃料组件的成本。工况2下的微动磨蚀功率增长率低于涡强度增长率,意味着其提升涡强度而带来的

微动磨蚀功率增长代价要小于工况1。

4 结语

本文通过双向流固热耦合数值模拟,对比分析了新型搅混翼对流动和微动磨蚀的影响,主要结论如下:

1) 涡强度随着新型搅混翼曲折角度的增加而增加,其影响范围集中在约 $Z=10D_h$ 范围内,超过此

范围的下游流动受搅混翼的影响较小;

2) 新型搅混翼因为某些时刻具有更大的曲折角度,而带来了更大的压力损失;但由于形状记忆合金效应,新型搅混翼的曲折角度具有随温度变化的自调整能力,使得在相同的时间周期内,其具有和传统搅混翼相似的压力分布,即没有产生额外的压力损失;

3) 新型搅混翼由于更大的涡强度,导致了燃料棒与定位格架间的微动磨蚀功率的上升;且微动磨蚀功率随着此新型搅混翼弯折角度的增大而增大。

作者贡献声明 袁硕负责设计数值模拟、实施研究、采集数据、分析/解释数据、统计分析;柴翔负责对文章的知识性内容作批评性审阅、获取研究经费、支持性贡献;刘晓晶负责获取研究经费、行政、技术或材料支持;何辉负责酝酿数值模拟,对文章的知识性内容作批评性审阅。

参考文献

- 1 吴增辉, 职政, 曲文海, 等. 棒束燃料组件横流的远心PIV测量方法[J]. 核技术, 2019, **42**(8): 080603. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.080603.
WU Zenghui, ZHI Zheng, QU Wenhai, *et al.* Telecentric PIV measurement of lateral flow in rod-bundle fuel assembly[J]. Nuclear Techniques, 2019, **42**(8): 080603. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.080603.
- 2 In W K, Oh D S, Chun T H. Flow analysis for optimum design of mixing vane in a PWR fuel assembly[J]. Nuclear Engineering and Technology, 2001, **33**(3): 327 - 338.
- 3 Kim K Y, Seo J W. Numerical optimization for the design of a spacer grid with mixing vanes in a pressurized water reactor fuel assembly[J]. Nuclear Technology, 2005, **149**(1): 62 - 70. DOI: 10.13182/nt05-a3579.
- 4 Mohd Jani J, Leary M, Subic A, *et al.* A review of shape memory alloy research, applications and opportunities[J]. Materials & Design (1980-2015), 2014, **56**: 1078 - 1113. DOI: 10.1016/j.matdes.2013.11.084.
- 5 ANSYS Material Reference, 2023R2, Section 4.15.1.2 Shape Memory Alloy (SMA) [OL]. https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v232/en/ans_mat/smas.html?q=shape%20memory%20alloy.
- 6 Chimakurthi S K, Reuss S, Tooley M, *et al.* ANSYS workbench system coupling: a state-of-the-art computational framework for analyzing multiphysics problems[J]. Engineering With Computers, 2018, **34**(2): 385 - 411. DOI: 10.1007/s00366-017-0548-4.
- 7 Matías R, Cantón R, Jiménez G. PWR fuel rod vibration simulation analysis for estimating grid-to-rod-fretting (GTRF) [OL]. <https://www.euronuclear.org/archiv/topfuel2018/fullpapers/TopFuel2018-A0079-fullpaper.pdf>.
- 8 ANSYS Mechanical APDL Theory Reference, 2023R2, Section 13.174.3 Frictional Model[OL]. https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v232/en/ans_thry/thy_el174.html%23contal74frict.
- 9 Frick T. An empirical wear projection technology with steam generator tube applications and relations to work-rate and wear simulations/tests[J]. ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 1997, **26768**: 275 - 282. DOI: 10.1115/IMECE1997-0121.1997.
- 10 陈杰, 雷涛, 彭园, 等. 定位格架新型搅混翼设计研究[J]. 核动力工程, 2014, **35**(5): 109 - 112. DOI: 10.13832/j.jnpe.2014.05.0109.
CHEN Jie, LEI Tao, PENG Yuan, *et al.* Design and research on new type mixing vanes of grids[J]. Nuclear Power Engineering, 2014, **35**(5): 109 - 112. DOI: 10.13832/j.jnpe.2014.05.0109.
- 11 苏前华, 范冠华, 吕路路, 等. 搅混翼定位格架排布方式对5×5棒束通道热工水力特性影响的CFD研究[J]. 核动力工程, 2023, **44**(4): 88 - 94. DOI: 10.13832/j.jnpe.2023.04.0088.
SU Qianhua, FAN Guanhua, LYU Lulu, *et al.* Effect of the arrangement for grid spacers with mixing vanes on the thermal hydraulic characteristics of a 5×5 rod bundle via CFD analysis[J]. Nuclear Power Engineering, 2023, **44**(4): 88 - 94. DOI: 10.13832/j.jnpe.2023.04.0088.
- 12 Rubiolo P, Young M Y. VITRAN: an advance statistic tool to evaluate fretting-wear damage[J]. Journal of Power and Energy Systems, 2008, **2**: 57 - 66. DOI: 10.1299/JPES.2.57.
- 13 Elmahdi A M, Lu R, Conner M E. Flow induced vibration forces on a fuel rod by LES CFD analysis[C]. International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermalhydraulics, Toronto, Ontario (Canada), 2011: 25 - 30.
- 14 Ikeda K, Makino Y, Hoshi M. Single-phase CFD applicability for estimating fluid hot-spot locations in a 5×

- 5 fuel rod bundle[J]. Nuclear Engineering and Design, 2006, **236**: 1149 - 1154. DOI: 10.1016/J.NUCENGDES.2005.11.006.
- 15 Benhamadouche S, Moussou P, Le Maitre C. CFD Estimation of the flow-induced vibrations of a fuel rod downstream a mixing grid[C]. Proceedings of the ASME 2009 Pressure Vessels and Piping Conference, Prague, Czech Republic, 2009, **4**: 489 - 497. DOI: 10.1115/PVP2009-78054.