

## 摘要

液态包层是磁约束核聚变反应堆中的实现能量转换的重要部件, 增强换热能力是包层研发的重要任务。针对液态包层内的强迫对流传热问题, 本文采用数值模拟的方法研究内置绕流片对壁温和能量输送率的作用。本研究中的流道具有绝热、绝缘壁, 内部作用有沿水平方向呈现指数分布的体积热源, 在热壁上设置了绕流片, 以分析绕流片的几何特征和放置位置以及磁场强度对流动传热性能的耦合作用。由于流道受到垂直于热源梯度和流体流动方向的强磁场作用, 模拟中应用了准二维模型, 在 Navier-Stokes 方程中添加哈特曼制动时间项, 表示 Hartmann 壁对准二维流动的影响。采用有限体积法对该磁-热-流多场耦合问题进行数值求解。分析了扰流片的高度、形状、放置位置和数量对热通量和进出口压降的影响, 以及不同雷诺数以及哈特曼数下的对热通量和进出口压降的影响。本文为了描述不同工况提升流体温度与降低壁面温度的效果, 定义了一个表征相对温度的参数, 其由放置扰流片与没有放置扰流片时流体相对温度与壁面相对温度的比值, 并总结了该参数在不同扰流片放置情况下以及不同参数下的变化规律。与不加扰流片管道中的流动情况相比, 扰流片处脱落的涡能够将热壁处的流体与中部核心区的流体进行混合, 但是同时对流体的流动速度产生阻缓的作用, 放置扰流片在本问题中对流动热通量的提高很小, 并且提高了进出口的压降。随着雷诺数的增加, 热通量与进出口压降均增加; 随着哈特曼数增加, 进出口压降增加, 但是热通量变化很小。

## 控制方程以及计算模型

计算模型图以及控制方程如下图所示:

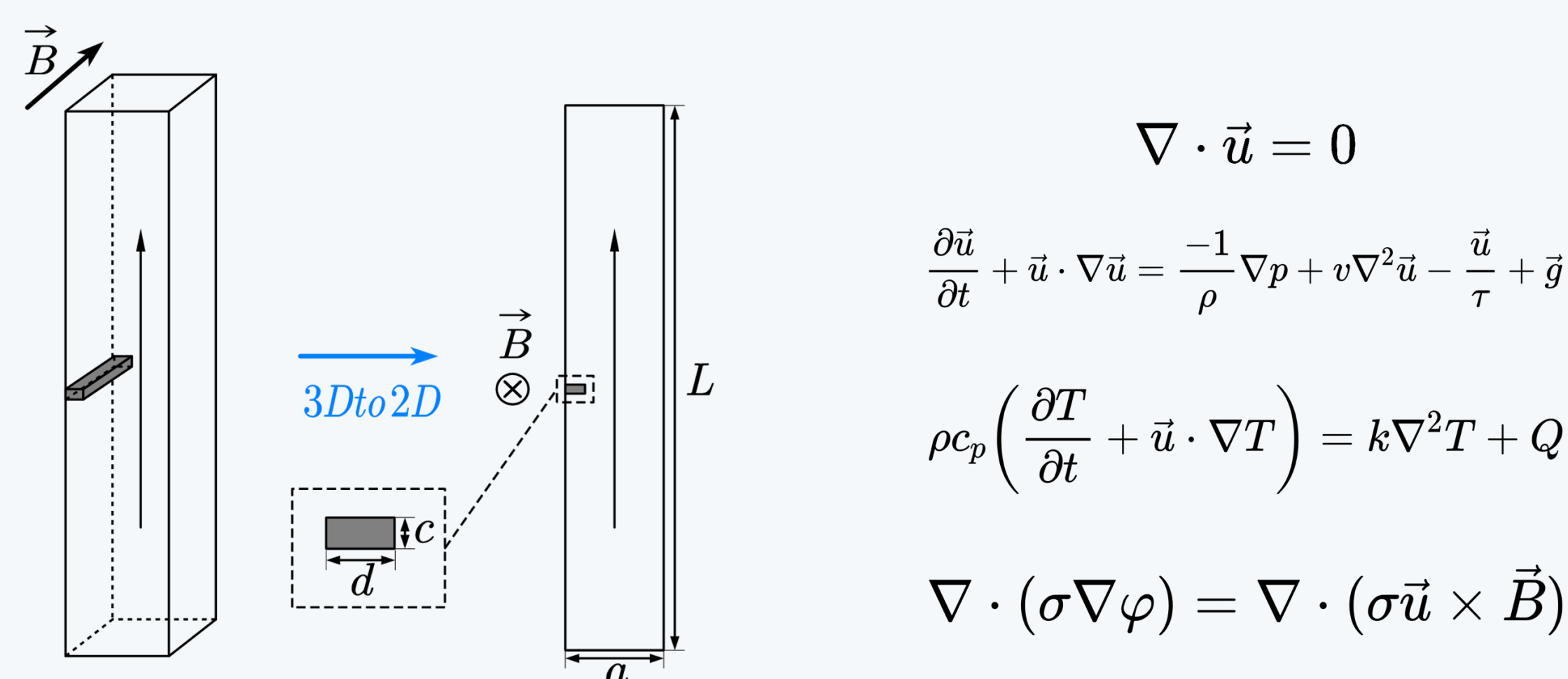


图 1. 模型和控制方程图

其中, 扰流片的形状以矩形方式作为展示, 半圆形由于篇幅问题不作展示。

## 边界条件

- 入口:  $u_y = v_0 = 0.06, T = T_0 = 460^\circ\text{C}, \frac{\partial p}{\partial n} = 0$  出口:  $\frac{\partial \vec{u}}{\partial n} = 0, \frac{\partial T}{\partial n} = 0, p = 0$
- 侧壁:  $\vec{u} = 0, \frac{\partial T}{\partial n} = 0, \frac{\partial p}{\partial n} = 0$  扰流片壁:  $\vec{u} = 0, \frac{\partial T}{\partial n} = 0, \frac{\partial p}{\partial n} = 0$

## 研究内容

- 评判标准在液态包层内, 金属流体与中子作用会产生体积热源, 流道的外层为铁壁, 为了保证结构的安全性, 铁壁的温度不能过高; 同时, 为了保证结构的运行效率, 希望能够得到更高的出口温度。为此, 设置一个评判标准:  $\eta = \frac{T_{\text{fluid,max}} - T_{\text{channel,max}}}{(T_{\text{wall}} - T_{\text{channel,max}})_{\text{max}}}$

## 工况概况

工况	形状	位置 (距离入口)	数量	间距 (扰流片之间距离)
A	/	/	/	/
B	矩形	1	1	0
C	矩形	1	2	0.1
D	矩形	1	2	0.05
E	半圆	1	2	0.05
F	半圆	1	2	0.03

表 1. 工况概况图

- 无量纲参数  $Ha=3272, Re=2.66e4;$

## 温度云图概览

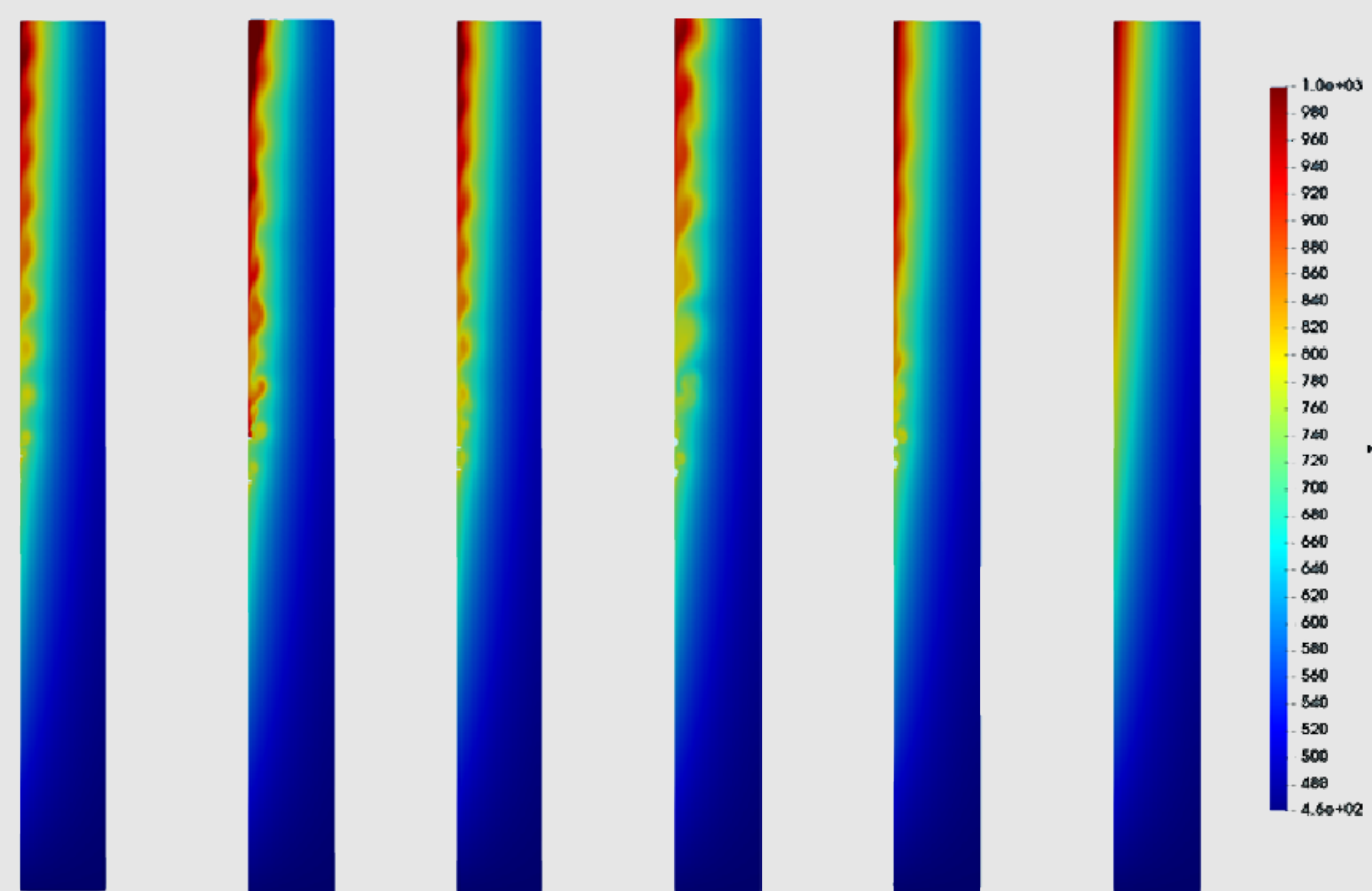


图 2. 温度云图: 从左到右依次是 B、C、D、E、F、A 工况

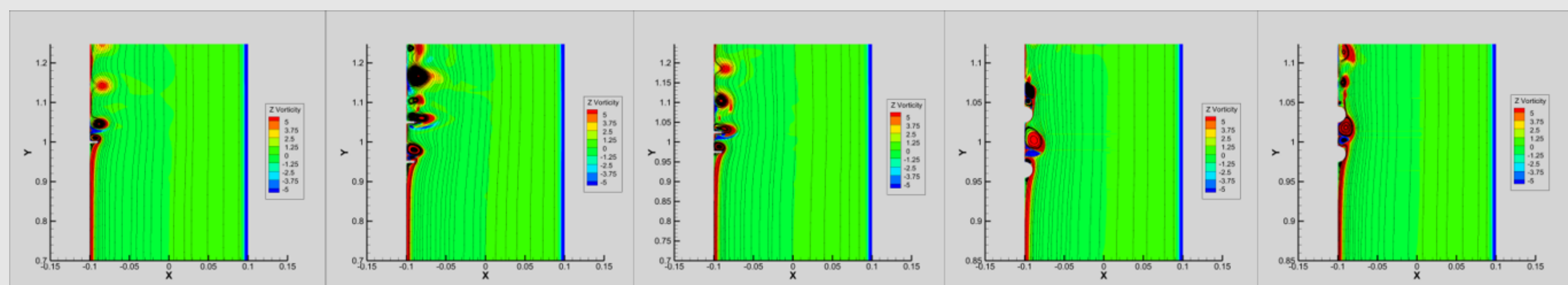


图 3. 扰流片附近涡量场附加流线图: 从左到右依次是 B、C、D、E、F 工况

由以上不同工况的温度云图中可以看出, 当扰流片不存在的时候, 即 A 工况, 其所展现的温度云图是稳定且热壁附近的流体未被扰动; 扰流片的存在使在扰流片后方的流产生涡脱落, 扰动边界层附近的流动, 在局部产生温度下降的效果。并且从云图中还可以看出形状为方形的扰流片比形状为圆形的扰流片在出口处的最大温度更高。

## 热壁温度-形状以及间距的影响

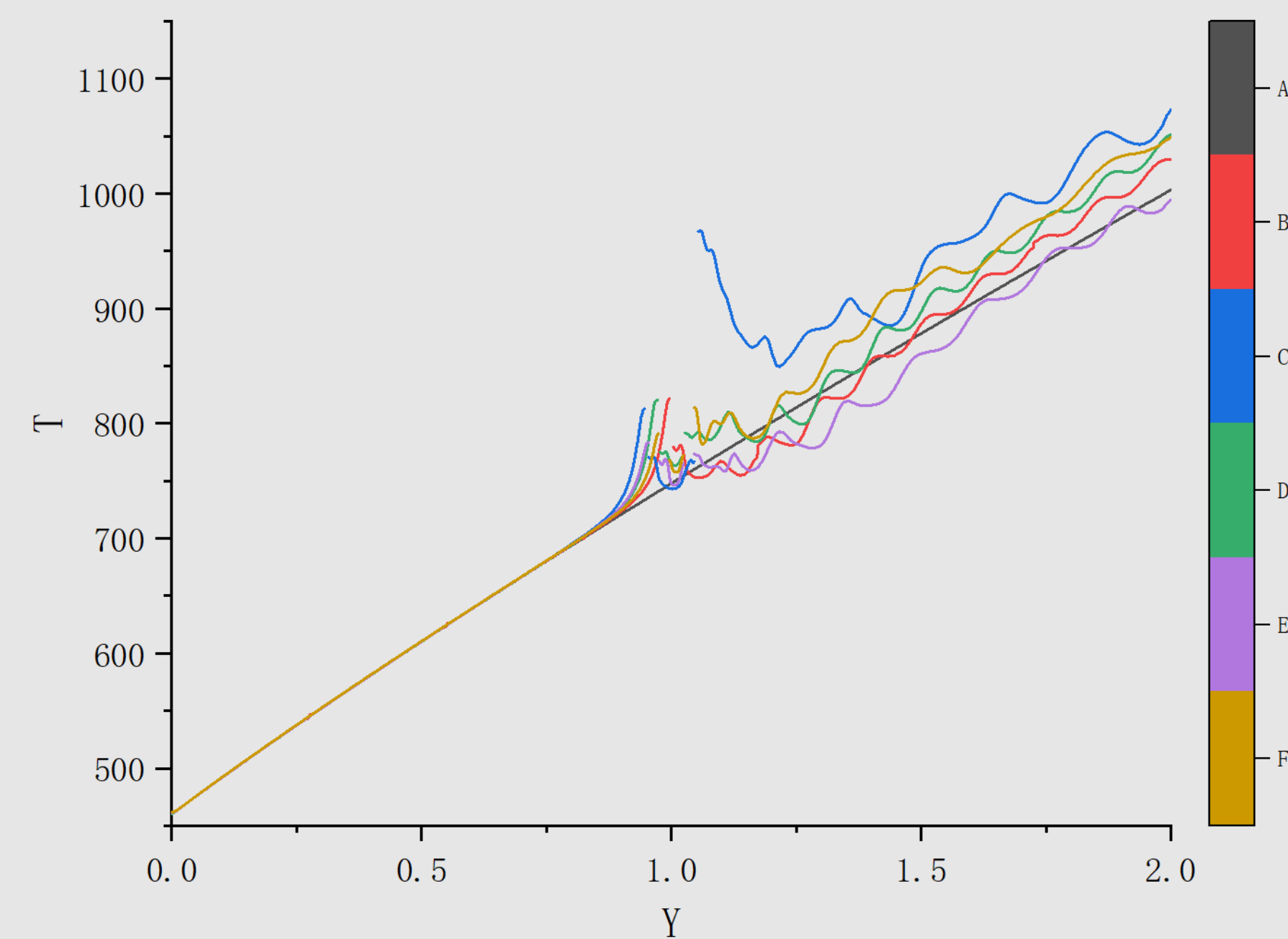


图 4. 不同工况下的热壁温度曲线图

## 扰流物形状对热壁温度的影响

由图 3 可知, 对热壁处有较为明显的降温效果的是 B 和 E 工况, 相较于矩形, 形状为圆形的扰流片, 其降温的效果更好, 降温范围更远; 形状为矩形的扰流片, 虽然在扰流片后方造成了热壁降温的效果, 但是, 过了一定的距离以后温度重新升高, 只能引起局部降温的效果, 对于结构的安全性提高并没有起到的好的效果。

## 扰流物间距对热壁温度的影响

对于 C、D 工况, 扰流片形状均为矩形且数量相同, 但是间距不同导致其对热壁降温的影响有较大的差别, 当两个矩形扰流片距离较远的时候, 即工况 C, 其相对于工况 D 来说会引起热壁的温度升高较大幅度, 造成不利影响。对于扰流片形状为圆形的工况 E 和 F, 当扰流片距离相对将小时, 即工况 F, 其的降温效果明显不如工况 E。由此可知, 扰流片之间的距离既不能过大也不能过小, 要放置于一个合适的位置才能达到最好的效果。

## 间隙比 (G/d) 对传热的影响

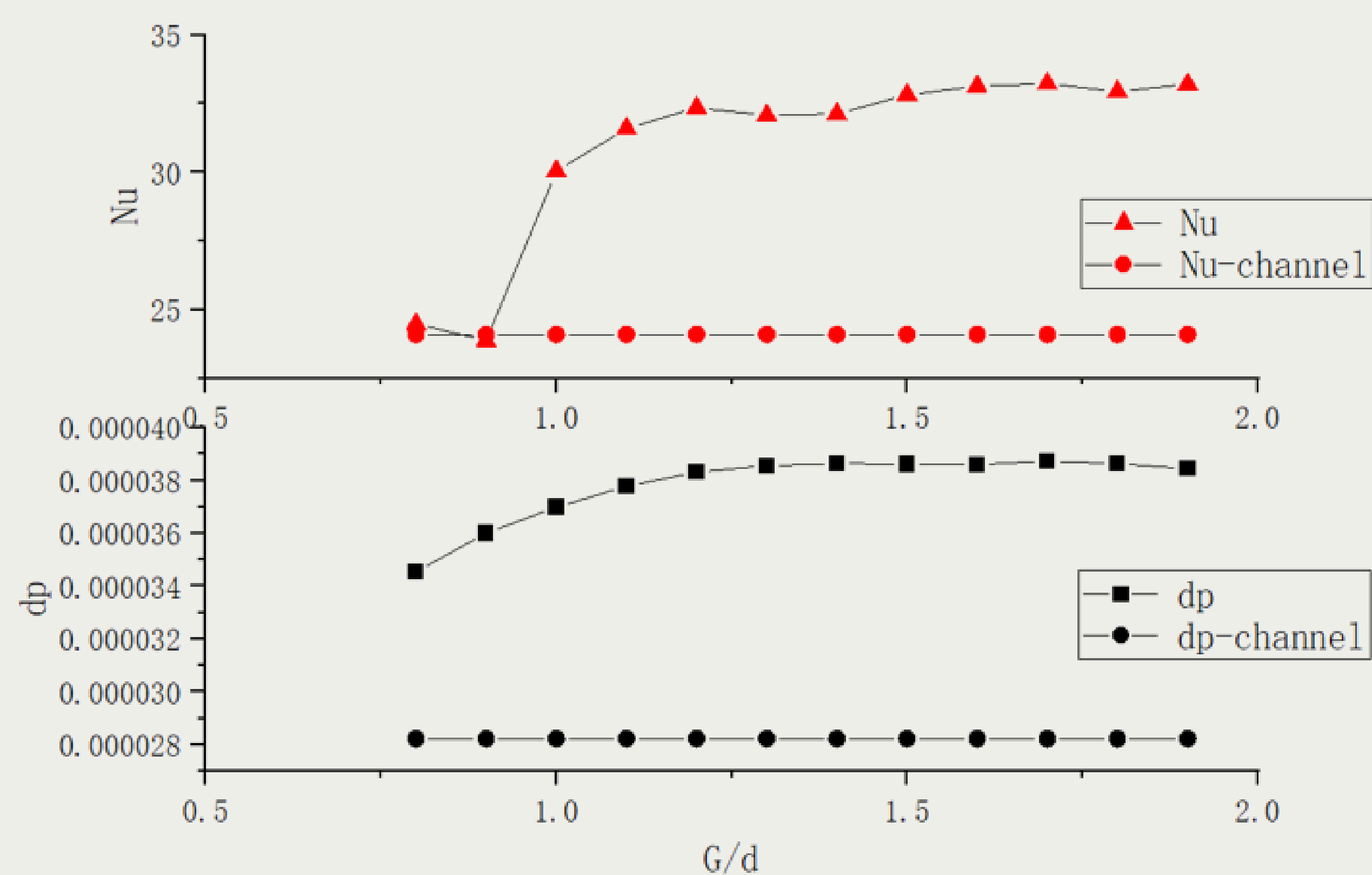


图 5. 不同 G/d 下的 Nu 和 dp 变化图 (Ha=320, Re=1000)

其中,  $Nu = \frac{\int \frac{\partial T}{\partial n} dA}{(T_{\text{hot}} - T_{\text{cold}}) \int dA}$ ,  $\Delta \bar{p} = \frac{\int P_{\text{out}} dA - \int P_{\text{in}} dA}{\int dA}$ . 此时两壁边界条件已经变为固定温度。

分析: 由图 4 可知, 当  $G/d < 1$  时, 即扰流片的位置距离热壁面较近的时候, Nu 数的值和不加扰流片的工况差不多, 甚至更低, 并没有带来增强换热的效果。当扰流片距离壁面的位置远离壁面到一合适位置时, 其 Nu 数的大小有了一个较大幅度的提高, 并随 G/d 的增大基本呈一个微幅的增长趋势, 然后趋于平稳。对于 dp 来说, 随着 G/d 的增长, 其先增大然后趋于平稳。从中可以得知, 扰流片的放置位置不能距离热壁太近, 太近了不仅没有增强换热, 而且增加了压降, 这对装置的运行效率是不利的。

## 不足与展望

扰流片的存在能够使得热壁上局部温度有所降低, 但是也同时导致热壁温度的波动且波动的最高温度相较于不加扰流片的工况来说仍然是有不同程度的提高, 这对结构的安全性与耐久性反而会有不利的影响。后续要考虑这方面的影响。