

基于中心复合设计法的迷宫型节流件阻力特性研究

伍贤锋^{1,2} 余悦³ 王晓婷³ 赵鹏程^{1,2} 沈梦思^{1,2} 艾青松^{1,2} 成正澳^{1,2}
于涛^{1,2}

1(南华大学核科学技术学院 衡阳 421001)

2(先进核能设计与安全教育部重点实验室 衡阳 421001)

3(中广核研究院有限公司 深圳 518031)

摘要 在反应堆设计和运行过程中,因回路热工水力参数的变化,需调整内部节流件的压降。迷宫型节流件能够在短距离进行大幅降压,减少流体噪音和振动,可有效控制和调节冷却剂流体的流量、压力和速度,因此被广泛应用于核电等工程领域。迷宫型节流件局部阻力系数受多因素影响,主要包括挡板数目、挡板间距和挡板高度与管道直径之比等几何参数,目前几何参数对局部阻力系数的具体影响尚不明确。为探索局部阻力系数受上述几何参数的影响程度,本文以液态金属为流体,通过数值模拟方法研究了不同迷宫型节流件模型内的速度和压降分布规律,并采用中心复合设计法分析了节流件几何参数变化对局部阻力系数的独立效应和相互效应。结果表明,在入口质量流量一定的条件下,局部阻力系数受几何参数主要影响的程度如下:挡板高度与管道直径之比>挡板数目>挡板间距,其中挡板高度与管道直径之比的影响最为显著,而挡板间距的影响可近似忽略。研究结果可为铅铋回路中迷宫型节流件的优化设计和工程应用提供一定的参考价值。

关键词 迷宫型节流件, 局部阻力系数, 数值模拟, 中心复合设计法

中图分类号 TL99

DOI: 10.3724/j.0253-3219.2026.hjs.49.240475

CSTR: 32193.14.hjs.CN31-1342/TL.2026.49.240475

Resistance characteristics of labyrinth throttle based on central composite design

WU Xianfeng^{1,2} YU Yue³ WANG Xiaoting³ ZHAO Pengcheng^{1,2} SHEN Mengsi^{1,2} AI Qingsong^{1,2}
CHENG Zheng'ao^{1,2} YU Tao^{1,2}

1(School of Nuclear Science and Technology, University of South China, Hengyang 421001, China)

2(Key Lab of Advanced Nuclear Energy Design and Safety, Ministry of Education, University of South China, Hengyang 421001, China)

3(China Nuclear Power Technology Research Institute Co., Ltd., Shenzhen 518031, China)

Abstract [Background] Labyrinth throttle can greatly reduce pressure in a short distance and reduce fluid noise and vibration, hence is widely used in engineering fields such as nuclear power to control and adjust the flow, pressure and velocity of coolant fluid, ensuring the safety and stability of nuclear power plant system. Because the thermal hydraulic parameters of the reactor are often adjusted during design and operation, the pressure drop required to be achieved through the labyrinth throttle will also be adjusted. The local resistance coefficient of labyrinth throttle is determined by many factors, including the number of baffles (n), the distance between baffles (d) and the ratio of

第一作者: 伍贤锋, 男, 2000年出生, 2025年于南华大学获硕士学位, 研究领域为核能工程

通信作者: 赵鹏程, E-mail: zhaopengcheng1030@163.com; 沈梦思, E-mail: 562297568@qq.com

收稿日期: 2024-11-25, 修回日期: 2025-06-29

First author: WU Xianfeng, male, born in 2000, graduated from University of South China with a master's degree in 2025, focusing on nuclear engineering

Corresponding author: ZHAO Pengcheng, E-mail: zhaopengcheng1030@163.com; SHEN Mengsi, E-mail: 562297568@qq.com

Received date: 2024-11-25, revised date: 2025-06-29

baffle height to pipe diameter (C). At present, the relationship between the local resistance coefficient of labyrinth throttle and these factors is not clear. **[Purpose]** This study aims to investigate the specific impact of geometric parameters on the local resistance coefficient, offering insights for the design of labyrinth throttling components. **[Methods]** Firstly, the labyrinth throttling parts with baffle height of 60 mm, baffle spacing of 15 mm, thickness of 10 mm and number of 20 were taken as the research object for mesh independence analysis. Subsequently, several throttles with different parameters were designed, and the distribution of flow velocity and pressure and the change of pressure drop inside the labyrinth throttle were studied. Then, according to the central composite design, 15 throttles with different parameters were designed and their local resistance coefficients were calculated using computational fluid dynamics software FLUENT. Finally, the independent effect and mutual effect of different parameter changes on the local resistance coefficient were calculated, and the specific influence of geometric parameters on the local resistance coefficient was obtained. **[Results]** The calculation results show that when the inlet mass flow rate is constant, the local resistance coefficient is mainly related to the ratio of baffle height to pipe diameter and the number of baffles. The ratio of baffle height to pipe diameter plays a major role, and the baffle spacing has little effect on the local resistance coefficient. The independent effect factors of the labyrinth throttle's geometric parameters are $M(C)=67.275\ 03$, $M(n)=17.482\ 66$, and $M(d)=-0.592\ 72$, while the mutual effect factors are $I(n, C)=12.617\ 24$, $I(d, C)=7.769\ 52$, and $I(n, d)=0.102\ 1$. **[Conclusions]** Simulation results of this study demonstrate that the primary considerations should be the influences of the ratio of baffle height to pipe diameter and the number of baffles when designing a labyrinth throttle for liquid lead-bismuth flow to adjust its local resistance coefficient, providing a certain reference value for the optimization design and engineering application of labyrinth throttling parts in lead bismuth circuit.

Key words Labyrinth throttle, Local resistance coefficient, Numerical simulation, Central composite design

节流现象一般发生在管道流体所流经的阀门、孔口和窄缝等流通截面的突然变化的部位,在这些部位压力降低,局部损失增加。基于上述原理制造的节流件在核电等工程领域应用广泛,其中迷宫型节流件具有能在短距离进行大幅降压、减少流体噪音和振动的优势,主要用于控制和调节冷却剂流体的流量、压力和速度,以确保核电站的系统安全和运行稳定^[1]。迷宫型节流件结构示意图如图1所示^[2]。本文研究的迷宫型节流件用于铅铋反应堆^[3-4],关于铅铋反应堆的研究多集中在堆芯、换热器、反应堆腔室等结构^[5-8],针对节流件此类细微通道内流动和阻力特性研究较少。

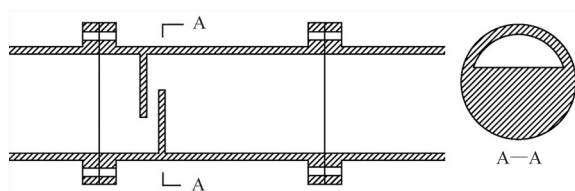


图1 迷宫型节流件示意图^[2]
Fig.1 Schematic diagram of labyrinth throttle^[2]

针对不同流体工质在节流件中的流动和阻力特性分析,国内外学者主要通过实验和数值模拟开展了大量研究。在空气流体研究中,Rafiee等^[9]通过数值模拟优化了涡流管的参数和几何形状,确定了最

佳节流件锥长以实现最大制冷效率;Gan等^[10]利用CFD(Computational Fluid Dynamics)方法预测并分析了方形薄孔板上单孔和多孔的压力损失特性,发现单孔方形薄孔板的局部阻力系数低于多孔方形薄孔板;Rhode等^[11]使用有限差分法模拟了矩形迷宫型节流件中可压缩流体的泄漏流;Wróblewski等^[12]优化了两个斜翼的直通式迷宫型节流件的结构,基于数值模拟与实验数据的对比结果,分析了倾角、翅片厚度和位置与减少空气泄漏的相关性;李浩冉等^[13]构建了孔板-管路系统的CFD仿真模型,与试验数据进行对比,发现压降受孔板内角影响比较显著,并在新的孔板压降计算公式中考虑了内角的影响。在水流体研究中,Okhotnikov等^[14]利用CFD数值模拟验证了新型单级节流阀在高流量流体动力系统中的有效性;Wang等^[15]通过数值模拟研究了直角转弯迷宫型节流件的水力特性,发现串联通道的多级压降可在控制流速的同时有效防止空化现象的产生。在液态金属流体研究中,Qin等^[16]以液态钠为工质,研究了迷宫型节流件水力特性随几何尺寸的变化规律。周志伟等^[17]以迷宫型节流件为对象研究了液态钠在自然循环和强制循环两种条件下的水力特性,通过实验和数值模拟对比,发现使用Realizable $k-\epsilon$ 模型得到的数值模拟结果误差最小,强制循环条件下回流区域明显小于自然循环,且收缩速度较快。

针对节流件此类细微通道内的流动特性分析多集中在空气、水和钠等流体,而对迷宫型节流件内液态铅铋的阻力特性研究较少。影响迷宫型节流件的压降主要几何参数为节流板的数目、节流板的高度、相邻节流板的间距,目前没有合适的实验研究方法,因此通常采用经验公式计算法^[18],但该方法需构建的模型数量较多,同时计算耗时较长。

为了研究迷宫型节流件几何参数对局部阻力系数以及各参数间相互依赖情况,本文采用了中心复合设计法(Central Composite Design, CCD),该实验设计方法在生物、化学领域均有应用^[19-21],通过添加中心点和轴向点来评估响应面的曲率,进而准确预测最优解。本文根据CFD模拟分析不同迷宫型节流件模型内的速度和压力分布规律以及压降的变化规律,并采用CCD方法分析节流件几何参数变化对局部阻力系数的独立作用和相互作用,以探寻压降和几何参数的影响关系。研究结果可为液态金属回路中迷宫型节流件的优化设计和工程应用提供一定的参考价值。

1 数值模拟方法

1.1 物理模型

本文的对象为多组挡板的迷宫型节流件,竖直放置于实验回路的旁路中,选取的液态金属为液态铅铋。液态铅铋从节流件下方流入,从上方流出,实验回路管径为25 mm,节流件的管径为80 mm,为实现节流件在实验回路的安装,在节流件出入口加设圆台,以法兰连接,如图2所示, H 为迷宫挡板高度, d 为挡板间距, D 为管道直径。

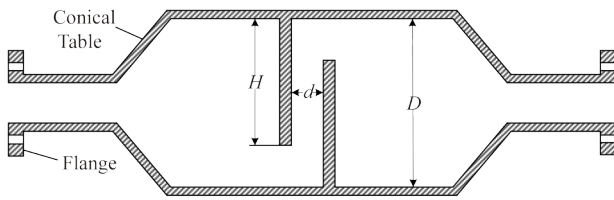


图2 实验回路中迷宫型节流件示意图
Fig.2 Schematic diagram of labyrinth throttling component in experimental circuit

1.2 数值模型

本文采用商用计算流体力学软件FLUENT开展数值模拟实验,整个系统封闭绝热,本文不考虑能量传递,求解的控制方程简化为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + (\nabla \cdot \rho \bar{V}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho \bar{V} = -\nabla \bar{p} - [\nabla \cdot \rho \bar{V} \bar{V}] - [\nabla \cdot (\bar{\tau}^{(v)} + \bar{\tau}^{(t)})] + \rho g \quad (2)$$

式中: ρ 是流体密度; t 是运动时间; $\bar{V}$ 是平均速度; $\bar{\tau}^{(v)}$ 和 $\bar{\tau}^{(t)}$ 分别是黏性应力和雷诺应力; g 是重力加速度。

在CFD模拟中一般采用以下5种湍流模型来研究液态金属湍流流动,包括标准 $k-\omega$ 模型、标准 $k-\varepsilon$ 模型、Realizable $k-\varepsilon$ 模型、Spalart-Allmaras(S-A)模型和应力剪切传输模型(Stress Shear Transport model, SST)。本文初步选择Realizable $k-\varepsilon$ 模型,再结合实验与不同湍流模型进行对比。

$k-\varepsilon$ 的控制方程如下^[22]:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \quad (4)$$

式中: k 是湍流动能; ε 是湍流动能耗散率; G_k 是由于平均速度梯度而产生的湍流动能; G_b 是由于浮力产生的湍流动能; Y_M 表示可压缩湍流中的脉动膨胀对总耗散率的贡献; C_2 、 $C_{1\varepsilon}$ 是常数; σ_k 、 σ_ε 分别是 k 和 ε 的湍流普朗特数; S_ε 表示用户为湍流耗散率方程添加的额外源项。

湍流黏度 μ_t 计算如下:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5)$$

式中: C_μ 是常数。

数值模拟中,入口设置为质量流量边界条件,出口采用压力边界条件,壁面则定义为光滑无滑移壁面。液态铅铋在320 °C,9.27 kg·s⁻¹的条件下,节流件入口处数值模拟的雷诺数 Re 为267 974。液态铅铋物性参考铅铋手册^[23],由于整个节流件系统封闭绝热,不考虑能量传递,由式(1)~(5)可知只需要考虑密度(式(6))和动力黏度(式(7))。

$$\rho = 11\,065 - 1.293T \quad (6)$$

式中: ρ 为流体密度,kg·m⁻³; T 为温度,K。

$$\eta = 4.94 \times 10^{-4} \cdot \exp\left(\frac{754.1}{T}\right) \quad (7)$$

式中: η 为流体动力黏度,Pa·s。

1.3 网格划分和独立性分析

网格划分通过ICEM软件完成,采用非结构化网格生成方法,并在壁面处生成5层边界层网格,首层厚度为0.063 mm。节流板区域的网格分布如图3所示。

以挡板高度60 mm、挡板间距15 mm、数量20的迷宫型节流件为例,在其他条件均相同的情况下

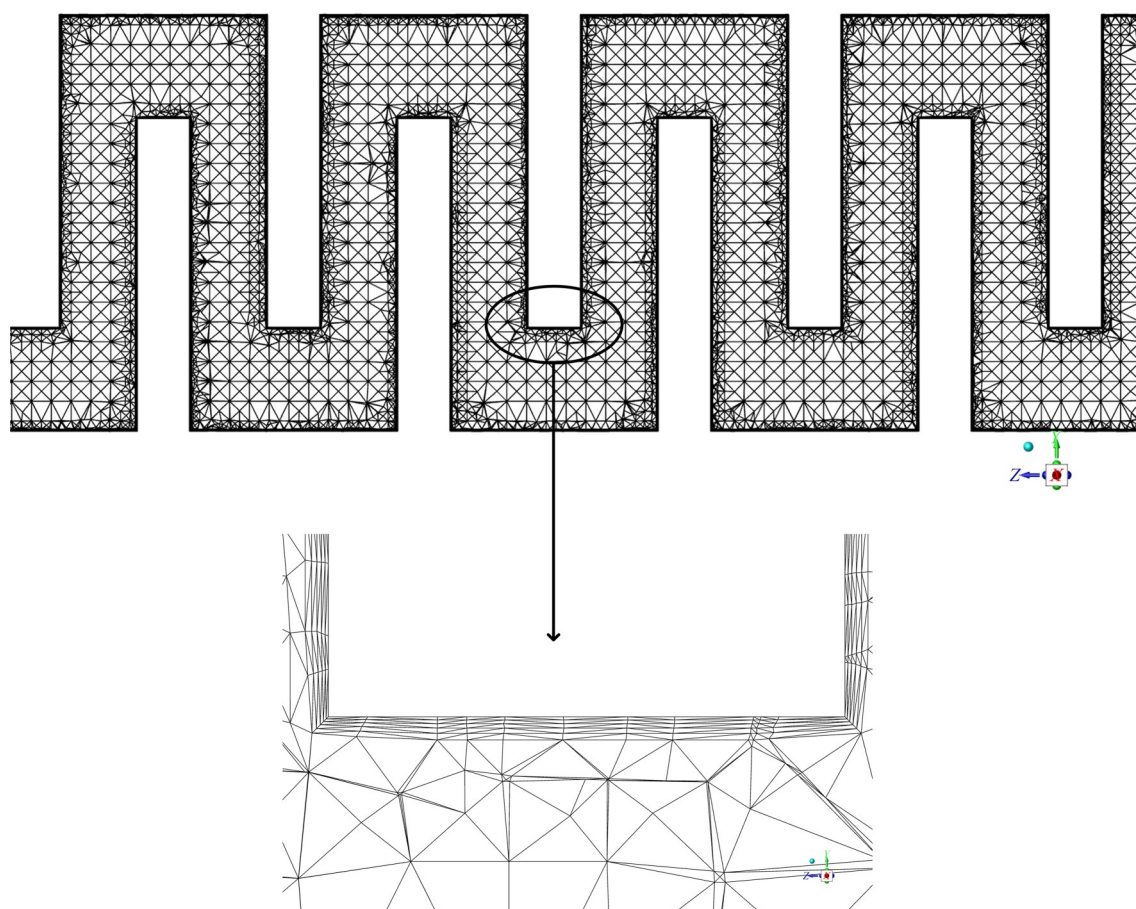


图3 节流件网格示意图
Fig.3 Schematic diagram of throttle grid

进行网格独立性分析,网格参数见表1,结果如图4所示。当网格数增至360万时,节流件进出口压降随网格数增加的变化趋于稳定,因此本文选择360万网格数量作为参考模型设计。

表1 网格参数
Table 1 Mesh parameter

网格数量 Grid number / 10^6	全局域网格尺寸 Full LAN grid size
0.9	2
1.72	1.5
2.4	1.25
3.6	1
4.6	0.9
6.0	0.8

1.4 不同湍流模型的计算比较

本文首先进行了迷宫型节流件流动特性的验证实验。出于安全考虑,实验采用水作为液态铅铋的替代工质,并对两者之间的实验参数进行了相似性转换。为保证实验结果的准确性,水力相似转换需满足几何、运动和动力相似性条件。实验回路的布

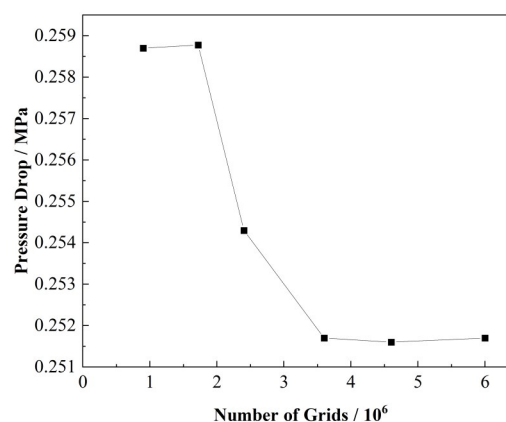


图4 网格独立性分析
Fig.4 Mesh independence analysis

置如图5所示。

实验中所使用的节流件参数详见表2。为确保几何相似性,实验节流件与铅铋回路中的迷宫型节流件在几何参数上完全一致。由于液态铅铋和水均被视为不可压缩的黏性流体,黏性力成为主导其流场水力特性的关键因素。通过确保两个流场的雷诺

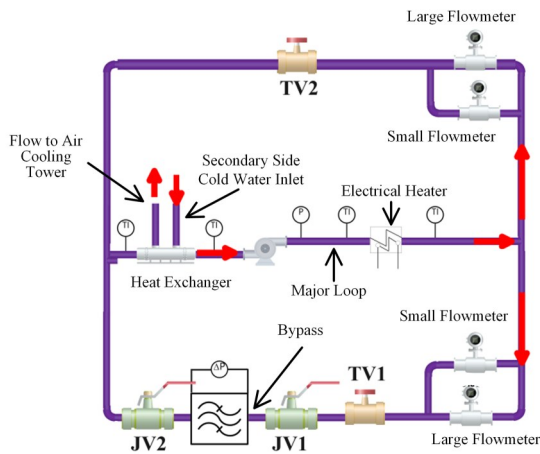


图5 水实验回路示意图
Fig.5 Diagram of water experimental circuit

数相同,实现了运动相似性和动力相似性。雷诺数(Re)作为无量纲参数,反映了惯性力与黏性力的比例关系。

表2 节流件参数
Table 2 Throttle parameters

参数 Parameter	数值 Numerical value
长度 Length L / mm	990
内径 Inner diameter D / mm	80
挡板厚度 Baffle thickness w / mm	10
挡板高度 Baffle height H / mm	60
挡板间距 Baffle spacing d / mm	15
挡板数目 Number of baffles n	25

$$Re = \frac{\rho V d}{\mu} \quad (8)$$

在雷诺数的计算中,见式(8),特征长度 d 采用节流件的内径,特征速度 V 取入口流速。

在铅铋回路中,流经迷宫型节流件的液态铅铋温度为320℃,其物性参数可通过式(6)~(7)计算。由于实验节流件与铅铋回路节流件尺寸一致,并在相同条件下运行,需保证两者的雷诺数相等以满足相似性要求。即:

$$Re_{LBE} = Re_{H_2O} \quad (9)$$

$$\frac{\rho_{LBE} V_{LBE} d_{LBE}}{\mu_{LBE}} = \frac{\rho_{H_2O} V_{H_2O} d_{H_2O}}{\mu_{H_2O}} \quad (10)$$

在迷宫节型节流件中,节流板引起的局部阻力是压降的主要来源。根据局部阻力系数的定义,管道流动的压降与阻力系数满足以下关系式:

$$\zeta = \frac{P_1 - P_2}{1/2 \rho V^2} \quad (11)$$

式中: P_1 、 P_2 为节流件入口、出口压力,MPa; V 为入口平均流速, $m \cdot s^{-1}$ 。

局部阻力系数 ζ 是雷诺数的单值函数 ζ ,即:

$$\zeta = f(Re) \quad (12)$$

因此,当不同流体的雷诺数相同时,其阻力系数相同。通过测量水流经节流件的压降,可根据欧拉相似准则计算液态铅铋在相同节流件中的压降,见式(13)、(14)。

$$Eu_{LBE} = Eu_{H_2O} \quad (13)$$

$$\frac{\Delta P_{LBE}}{\rho_{LBE} V_{LBE}^2} = \frac{\Delta P_{H_2O}}{\rho_{H_2O} V_{H_2O}^2} \quad (14)$$

实验中仅需测量节流件两侧的水流量和压降。相似转换后的迷宫型节流件水力参数详见表3。

表3 节流件水力参数
Table 3 Hydraulic parameters of throttling element

参数 Parameter	液态铅铋 Liquid lead bismuth	水 Water
温度 Temperature / °C	320	80
密度 Density / $kg \cdot m^{-3}$	10 298.9	971.9
流速 Velocity / $m \cdot s^{-1}$	1.836	3.9
动力黏度 Dynamic viscosity / $P_a \cdot s$	0.001 76	0.000 354

图6比较了不同湍流模型计算结果与实验数据,质量流量范围为0.023 8~9.27 $kg \cdot s^{-1}$,雷诺数范围为5 887~267 974。Realizable $k-\varepsilon$ 模型与实验结果最为接近。Standard $k-\varepsilon$ 模型的结果比实验值低3.2%~10.37%,而Standard $k-\omega$ 模型、SST $k-\omega$ 模型、应力剪切传输模型(SST)和Spalart-Allmaras(S-A)模型的结果分别比实验值高4.22%~12.7%、7.63%~18.03%、4.31%~16.45%和8.29%~10.8%。在额定流量9.27 $kg \cdot s^{-1}$ 时,Realizable $k-\varepsilon$ 模型模拟的压降为0.257 MPa,与实验结果的相对误差仅为4.01%,因此选择使用Realizable $k-\varepsilon$ 模型。

湍流模型计算精度的关键影响因素不仅包括网格数量,还涉及壁面法向网格距离,通常用无量纲数 y^+ 来表征, y^+ 的定义如下:

$$y^+ = \frac{\rho y V_\tau}{\mu} \quad (15)$$

式中: y 为壁面距离; V_τ 为壁面剪切速度。

图7显示,使用Realizable $k-\varepsilon$ 模型在 $y^+=25$ 时的数值结果与实验数据高度一致,在质量流量为9.27 $kg \cdot s^{-1}$ 的额定流量时,误差仅为2.79%。

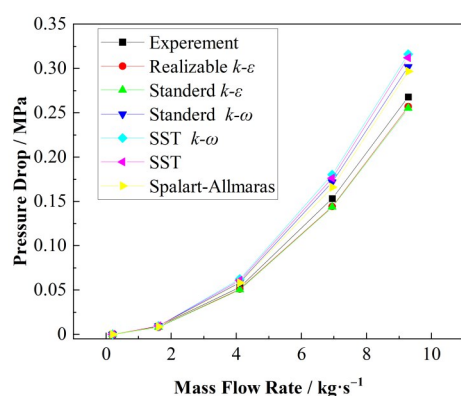


图6 不同湍流模型的比较(彩图见网络版)
Fig.6 Comparison of different turbulence models (color online)

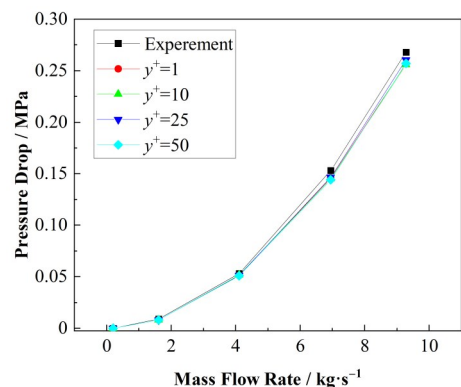


图7 不同 y^+ 的压降比较(彩图见网络版)
Fig.7 Comparison of pressure drop with different y^+ (color online)

2 CCD方法

CCD方法是一种常用于实验设计的响应曲面法(Response Surface Methodology, RSM),主要用于优化实验过程并构建二次模型来探索多个因子之间的独立效应和相互效应。CCD主要适用于二次回归模型(如二次多项式)的拟合,帮助找到输入变量与响应变量之间的最优组合。

2.1 方法介绍

CCD是一种基于全因子或部分因子设计的实验方法,通过添加轴点和中心点构建。每个输入参数包含3个值:最大值水平为+1,中间值为0,最小值为-1。实验设计主要由以下三部分组成:

1) 因子设计点

这部分包含的是基本的全因子或部分因子设计,通常是在各个因子的高水平(+1)和低水平(-1)处取值。这些点用于估计独立效应和相互效应。

对于 k 个因子的实验设计,因子点的数量为 2^k 。

例如,若有3个因子,则基本设计有8个实验点。

2) 轴点

轴点是沿着每个因子的轴线添加的点,即固定一个参数水平取+1和-1,其余参数水平取0。这些点的目的是帮助捕捉响应变量的二次效应,估计因子的非线性效应。

对于 k 个因子的实验设计,轴点的数量为 $2k$ 。例如,对于3个因子的实验,轴点的数量为6。

3) 中心点

中心点是所有因子均取中间水平的实验点。这些点用于估计实验中的纯误差,检验模型的适合度,并评估系统的线性。

总的实验点数可以通过式(16)计算:

$$N = 2^k + 2k + n_c \quad (16)$$

式中: n_c 为中心点数,通常取1。

2.2 参数设计

在进行参数设计之前,对入口质量流量、温度和运行压力对阻力特性影响进行了数值模拟分析,结果表明,入口质量流量、温度和运行压力对阻力特性影响较小。

本文研究了以下3个几何参数对迷宫型节流件压降的影响:1)挡板数目 n ;2)挡板间距 d ;3)挡板高度与管道直径之比 C ,由式(17)定义:

$$C = \frac{H}{D} \quad (17)$$

式中: H 为挡板高度,mm; D 为管道直径,80 mm,不同 C 对应的挡板高度见表4。

表4 不同 C 对应的挡板高度

Table 4 The height of the baffle corresponding to different C

挡板高度与管道直径之比 Ratio of baffle height to pipe diameter	挡板高度 Height of baffle plate / mm
0.625	50
0.75	60
0.875	70

本文采用CCD方法,3个几何参数在水平上的变化用-1、0和+1表示,分别代表最小值、中间值和最大值(见表5)。由式(16)可知,基于CCD设计的节流件数量为15。15个节流件的设计值见表6。

每个节流件都根据其几何参数进行了特定命名,例如(15, 10, 0.625)对应序号为1的节流件。该命名法将在本文的其余部分用于标识特定的节流件。使用局部阻力系数作为指标研究几何参数的影响。

n, d 和 C 的独立效应影响因子 M 表示当 n, d 和

表5 中心复合设计的几何参数
Table 5 Geometric parameters for central composite design

参数水平 Parameter level	挡板数目 Number of baffles	挡板间距 Baffle spacing / mm	挡板高度与管径之比 Ratio of baffle height to pipe diameter
-1	15	10	0.625
0	20	15	0.750
+1	25	20	0.875

表6 15个节流件的中心复合设计
Table 6 Central composite design of 15 throttles

序号 Serial number	n	d	C	参数水平 Parameter level		
				n	d	C
1	15	10	0.625	-1	-1	-1
2	25	10	0.625	+1	-1	-1
3	15	20	0.625	-1	+1	-1
4	25	20	0.625	+1	+1	-1
5	15	10	0.875	-1	-1	+1
6	25	10	0.875	+1	-1	+1
7	15	20	0.875	-1	+1	+1
8	25	20	0.875	+1	+1	+1
9	20	15	0.750	0	0	0
10	15	15	0.750	-1	0	0
11	25	15	0.750	+1	0	0
12	20	10	0.750	0	-1	0
13	20	20	0.750	0	+1	0
14	20	15	0.625	0	0	-1
15	20	15	0.875	0	0	+1

C 从低水平(-1)变为高水平(+1)设置时,局部阻力系数的平均变化。 M 为正数表示局部阻力系数与该参数成正相关, M 为负数表示局部阻力系数与该参数呈负相关,且数值越大相关性越强。三者的影响因子计算公式为式(18)~(20),式中 l 是某一个参数水平为+1或-1的节流件的个数,以式(18)为例,参数 n 水平为+1的节流件个数为5(表6序号为2、4、6、8、11的节流件),水平为-1的节流件个数为5(表6序号为1、3、5、7、10的节流件),所以 $l=5$ 。

$$M_{(n)} = \left[\frac{\sum_{i=1}^l (\xi)_{n_{i(+1)}}}{l} \right] - \left[\frac{\sum_{i=1}^l (\xi)_{n_{i(-1)}}}{l} \right] \quad (18)$$

$$M_{(d)} = \left[\frac{\sum_{i=1}^l (\xi)_{d_{i(+1)}}}{l} \right] - \left[\frac{\sum_{i=1}^l (\xi)_{d_{i(-1)}}}{l} \right] \quad (19)$$

$$M_{(C)} = \left[\frac{\sum_{i=1}^l (\xi)_{C_{i(+1)}}}{l} \right] - \left[\frac{\sum_{i=1}^l (\xi)_{C_{i(-1)}}}{l} \right] \quad (20)$$

相互效应影响因子 I 表示一个参数的变化对另一个参数设置的影响,该值为正数时表示一个参数增加,另外一个参数也增加,此时局部阻力系数会随之增加,为负数时表示,一个参数增加,另一个参数增加时局部阻力系数会减少,且数值越大减少得越多。影响因子使用式(21)~(23)计算,式中 l 表示两个参数中其中一个的水平为+1或-1的节流件个数,以式(21)为例,当参数 d 的水平为+1的节流件个数为5(表6中序号为3、4、7、8、13的节流件),在这5个节流件中,参数 n 的水平为+1的个数为2(表6中序号为4、8的节流件),所以 $l=2$ 。

$$I_{(n,d)} = \left[\left(\frac{\sum_{i=1}^l (\xi)_{n_{i(+1)}}}{l} \right) - \left(\frac{\sum_{i=1}^l (\xi)_{n_{i(-1)}}}{l} \right) \right]_{d_{(+1)}} - \left[\left(\frac{\sum_{i=1}^l (\xi)_{n_{i(+1)}}}{l} \right) - \left(\frac{\sum_{i=1}^l (\xi)_{n_{i(-1)}}}{l} \right) \right]_{d_{(-1)}} \quad (21)$$

$$I_{(d,C)} = \left[\left(\frac{\sum_{i=1}^l (\xi)_{d_{i(+1)}}}{l} \right) - \left(\frac{\sum_{i=1}^l (\xi)_{d_{i(-1)}}}{l} \right) \right]_{C_{(+1)}} - \left[\left(\frac{\sum_{i=1}^l (\xi)_{d_{i(+1)}}}{l} \right) - \left(\frac{\sum_{i=1}^l (\xi)_{d_{i(-1)}}}{l} \right) \right]_{C_{(-1)}} \quad (22)$$

$$I_{(n,C)} = \left[\left(\frac{\sum_{i=1}^l (\xi)_{n_{i(+1)}}}{l} \right) - \left(\frac{\sum_{i=1}^l (\xi)_{n_{i(-1)}}}{l} \right) \right]_{C_{(+1)}} - \left[\left(\frac{\sum_{i=1}^l (\xi)_{n_{i(+1)}}}{l} \right) - \left(\frac{\sum_{i=1}^l (\xi)_{n_{i(-1)}}}{l} \right) \right]_{C_{(-1)}} \quad (23)$$

3 模拟结果与讨论

3.1 速度与压降分布规律

1) 压降与速度局部分布特征分析

以设计参数为(20, 15, 0.75)的节流件为例,该节流件所有的参数都取中间值,从入口处第一个挡板开始,将每5个挡板分成一段,一共4段,如图8所示,其中图8(a)为挡板1~5,图8(b)为挡板6~10,图8(c)为挡板11~15,图8(d)为挡板16~20,每张图左边为流速矢量图,右边为压力云图。流体进入转弯处狭窄通道时速度会显著增加,而在离开狭窄通道进入较宽区域时速度则会减小。由于流体在通过转弯处狭窄通道时受到的收缩效应和惯性作用,出现了高流速区域。各段流速的分布模式基本一致,表明迷宫区域的流速分布较为均匀。压力沿着迷宫型节流件的流动距离逐步递减。每个转弯处的狭窄通道都是明显的压降区域,流体经过每个挡板时,压力会急剧下降。在每个挡板上方在这些区域会出现空化区域,在这些区域会有明显的低压分布。液态铅铋在流经节流板时,部分可用压头转化为动能^[24],通过多级挡板后,压力会显著低于入口压力,因此压力分布在迷宫处逐级递减。

图9是4种设计参数节流件中的流速和压力的轴向分布,在节流中设置了8个监测面,流速和压力均取面平均值。其中监测面1和8设置在节流件出入口,监测面2和7设置在第一个挡板前和最后一个挡板后,监测面3~6等距离设置在迷宫内部,如图9所示。从流速分布图可见,流体通过节流件后流速减小。在节流件内部,流速在突扩后降低,并在迷宫内均匀分布。不同设计参数下,流速分布有所差异,但仅改变挡板数量时,内部流速分布基本一致。压力分布图显示,迷宫出口处压力趋于稳定,而内部压力随挡板数量增加呈线性下降趋势。

2) 整体压降的几何参数影响分析

在迷宫型节流件中,流经节流件的质量流量一定时,节流件的压降和流速分布主要与挡板间距 d ,挡板高度与管道直径之比 C ,以及挡板数目 n 有关,本文研究了这3个参数变化时流速和压降的分布,设计了不同参数的节流件,每次变化一个参数,另外两个参数取中间值,计算结果见图11,其中,图11(a~c)分别为压降随 d 、 C 、 n 的变化趋势。从图11可以看出,通过设置多个挡板设计的节流件在额定流量为 $9.27 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,节流件的压降达到了MPa量级。在工程应用上,可加装于旁路测量主回路流量,由式(9)、(24)、(25)可知,当主回路总质量流速一定时,旁路压降升高,局部阻力系数增大,此时旁路流速减

小,旁路分配的流量更小,能够达到通过用更小的流量测量主回路流量的目的,降低了对仪器仪表的流量要求。

$$G = G_1 + G_2 = \rho v_1 + \rho v_2 \quad (24)$$

$$\frac{\lambda_1 l_1}{d_1} \frac{v_1^2}{2g} + \xi_1 \frac{v_1^2}{2g} = \frac{\lambda_2 l_2}{d_2} \frac{v_2^2}{2g} + \xi_2 \frac{v_2^2}{2g} \quad (25)$$

式中: G 为主回路总质量流速, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$; G_1 为与旁路并联的支路质量流速, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$; G_2 为旁路质量流速, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$; v_1 为主回路断面平均流速, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; v_2 为旁路断面平均流速, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; λ 为沿程阻力系数; ξ 为局部阻力系数。

图12是选取3种设计参数节流件的速度矢量图(左)和压力云图(右),图12(a)是设计参数为(20, 10, 0.75)的节流件,结合图8可知,当 d 从10 mm增加到15 mm时,压降随着 d 增大,由于 d 增大,流体的流通面积增大,从两者之间的流速矢量图可以看出,挡板间的流速减小,能量损失降低,因此压降减小。 d 从15 mm增加到20 mm时,挡板间的流速变化和微小压降几乎不变。图12(b)是设计参数为(20, 15, 0.875)的节流件,结合图8可知, C 从0.75增加到0.875时,压降显著增加,由于管道是圆形,因此增加挡板高度,挡板与管道间流体的流通面积减小得越快,从速度矢量图就可以看出流体流经此处的流速大大增加,由于收缩效应和惯性作用的增强,导致能量损失增加,从而显著提高了压降。图12(c)是设计参数为(25, 15, 0.75)的节流件,结合图8可知, n 从20增加到25,由速度矢量图可知,两者的速度分布十分相似,流体在二者内部的流动几乎没有发生变化,迷宫型节流件的压降形式是多级压降,因此内部压降随着 n 的增加逐级增加。

上述研究通过数值模拟分析了参数变化对流速以及压力分布的影响,为了进一步研究单个参数变化的对节流件阻力特性的具体影响大小,以及参数之间变化对阻力特性的影响,后文将计算15个节流件的局部阻力系数 ξ ,并基于此分析不同参数下对 ξ 的影响,计算每个参数的独立效应和相互效应,计算分析 n 、 d 、 C 变化对 ξ 的具体影响。

3.2 基于 CCD 方法的局部阻力系数影响因素分析

1) 整体局部阻力系数影响因素分析

图13显示了在8个因子设计点(表6中序号1~8的节流件),即3个参数在高水平(+1)和低水平(-1)时的 ξ 值,其中图13(a)是设计参数分别为(15, 10, 0.625)、(25, 10, 0.625)、(15, 20, 0.625)、(25, 20, 0.625)的节流件对应的 ξ 值,图13(b)是设计参数分

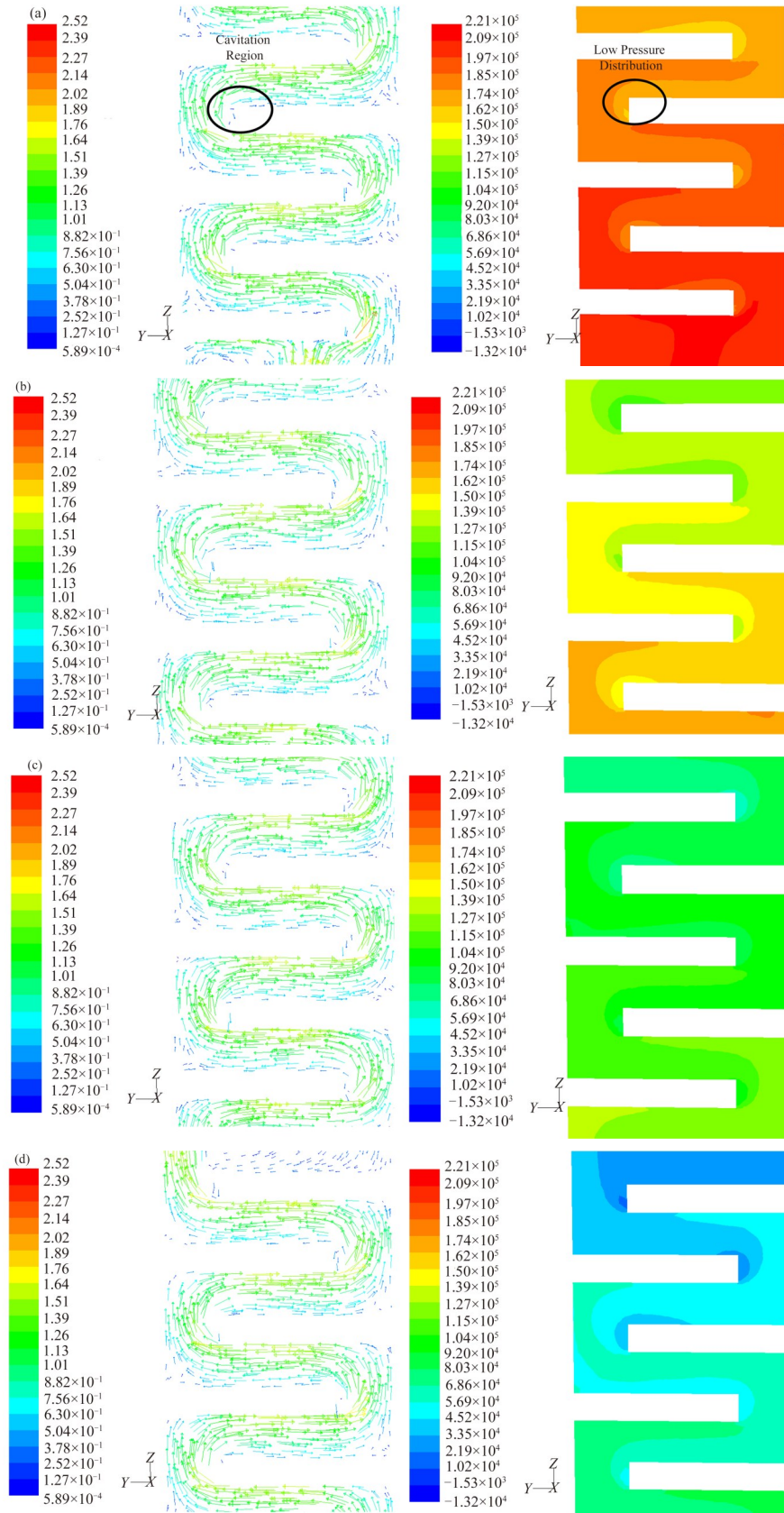


图8 设计参数为(20, 15, 0.75)的4组挡板流速矢量图(左)和压力云图(右)(彩图见网络版)

(a) 1~5, (b) 6~10, (c) 11~15, (d) 16~20

Fig.8 Flow velocity vector (left) and pressure cloud (right) diagrams for baffle groups with design parameters (20, 15, 0.75)

(a) 1~5, (b) 6~10, (c) 11~15, (d) 16~20 (color online)

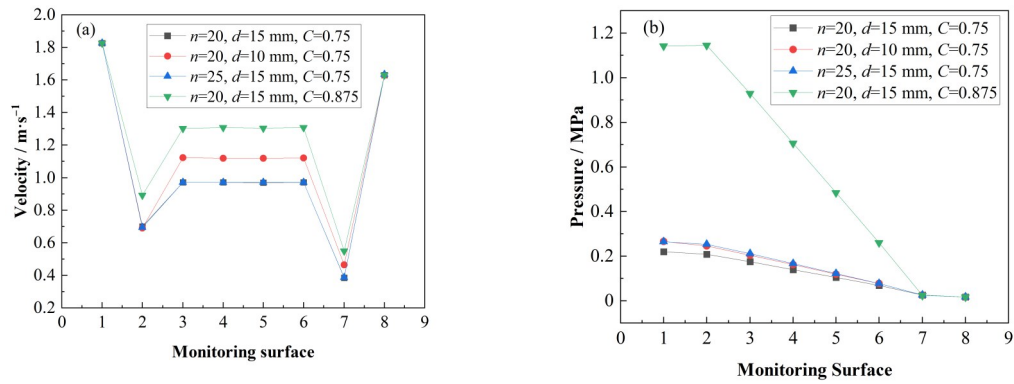


图9 4种设计参数节流件中的流速(a)和压力分布(b)(彩图见网络版)

Fig.9 Flow velocity (a) and pressure distribution (b) in 4 design parameters throttles (color online)

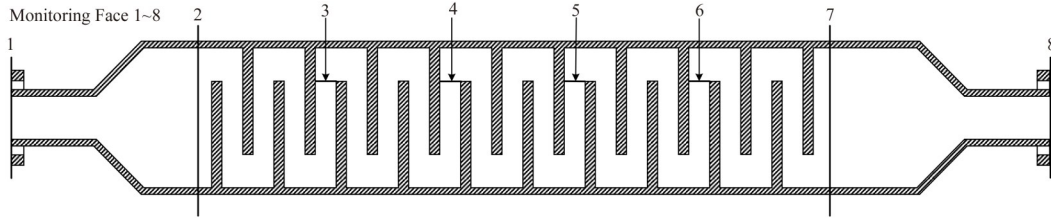
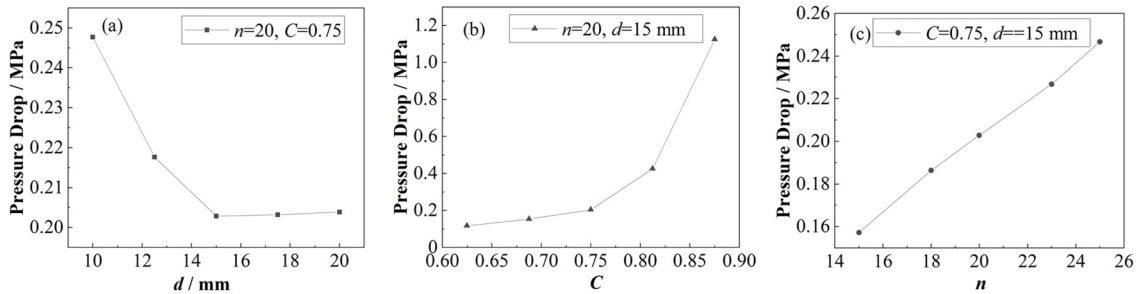


图10 8个监测面分布

Fig.10 Distribution of 8 monitoring surfaces

图11 压降随 d (a)、 C (b)、 n (c)的变化趋势Fig.11 Variations of pressure drop with d (a), C (b) and n (c)

别为 (15, 10, 0.875)、(25, 10, 0.875)、(15, 20, 0.875)、(25, 20, 0.875) 的节流件对应的 ξ 值。从图 13(a) 可以看出, 当 $C=0.625$ 时, d 不变, n 从 15 个增加到 25 个时, 局部阻力系数 ξ 分别增加了 52.2% 和 54.9%。 n 不变, d 从 10 mm 增加到 20 mm 时, ξ 下降了 59.3% 和 56.4%。从图 13(b) 可以看出, 在 $C=0.875$ 时, d 不变, n 从 15 个增加到 25 个时, ξ 分别增加了 64.3% 和 63.9%。 n 不变, d 从 10 mm 增加到 20 mm 时, ξ 增加了 5.3% 和 5.1%。结果表明 ξ 的变化主要与 n 和 C 相关。

图 14 显示了 n 、 d 和 C 的独立效和它们之间的相互效应。图 14(a) 是独立效应的计算结果, 由式 (16~18) 计算得出, 其中 $M_{(n)}=17.482\ 66$, $M_{(C)}=$

67.275 03, 说明 n 和 C 对局部阻力系数 ξ 的影响都是正面的, 其中 C 的增加能够显著增加 ξ 。 $M_{(d)}=-0.592\ 72$, 说明 d 对 ξ 影响虽然是负面的, 但是相对于 n 和 C 来说影响很小, 可以忽略不计。图 14(b) 是相互效应的计算结果, 由式 (19)~(21) 计算得出, 其中 $I_{(n,d)}=0.102\ 1$, 说明 n 与 d 之间的相互影响比较小, 只有 n 和 d 的变化时不会引起 ξ 的明显变化。 $I_{(n,C)}=12.617\ 24$, $I_{(d,C)}=7.769\ 52$, 说明 n 和 C 、 d 与 C 之间的相互影响因子较大, 无论 n 和 d 如何变化, 只要 C 从 0.625 增加到 0.875, 都能引起局部阻力系数的增加, n 和 C 的相互效应影响因子为正数且数值最大, 结合独立效应的计算结果可知 ξ 的调节主要由 n 和 C 主导, 且 C 的影响最大。在 C 较高导致节流件内部流速过快时, 可以适当减小 C , 增加 n 来达到保持较高

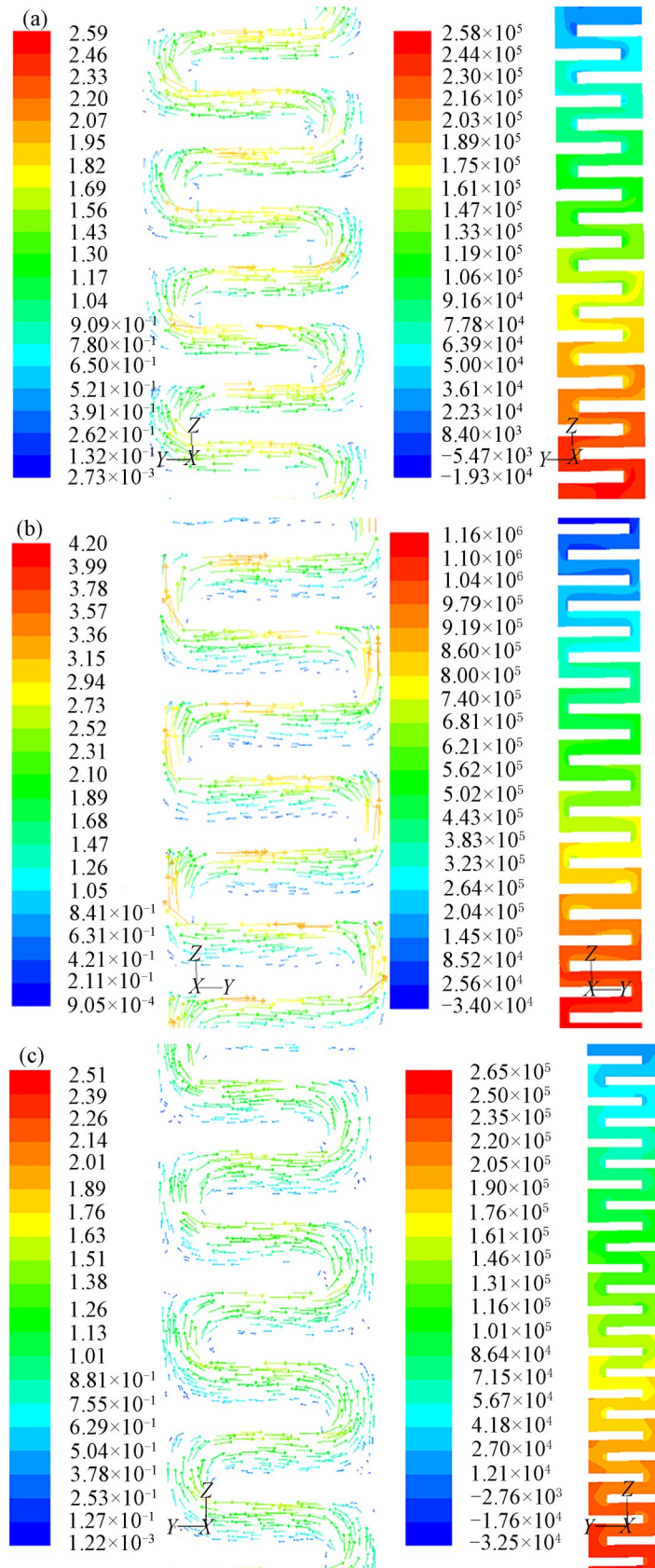
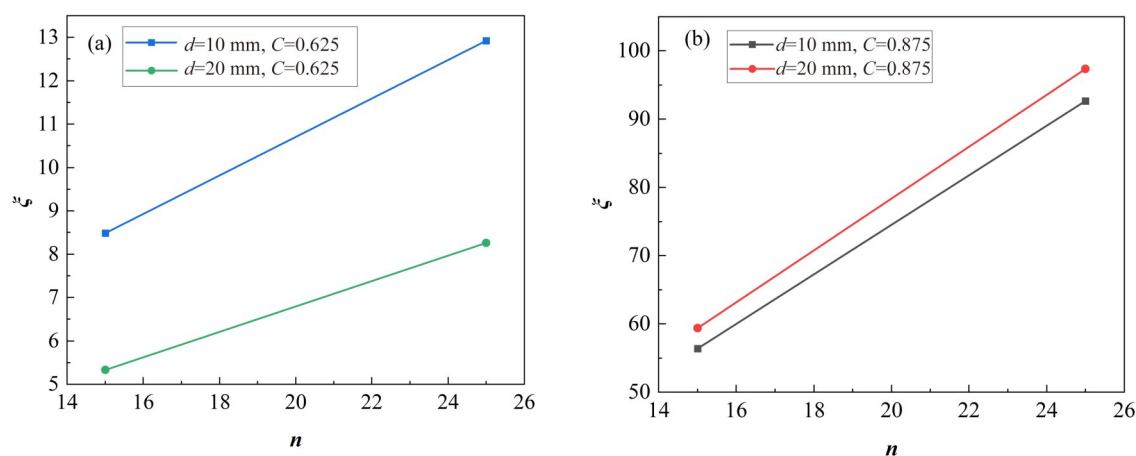
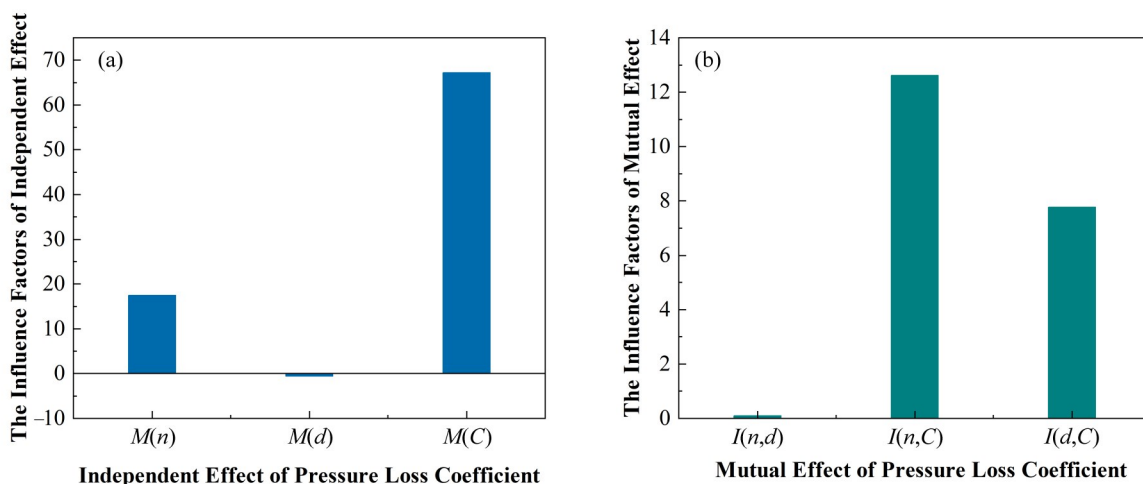


图 12 不同设计参数节流件中的流速矢量图(左)和压力云图(右)(彩图见网络版)

(a) (20, 10, 0.75), (b) (20, 15, 0.875), (c) (25, 15, 0.75)

Fig.12 Flow velocity vector (left) and pressure cloud (right) diagrams of throttling components with design parameters of (a) (20, 10, 0.75), (b) (20, 15, 0.875), (c) (25, 15, 0.75) (color online)

图13 $C=0.625$ (a)、 $C=0.875$ (b)时8个因子设计点的局部阻力系数(彩图见网络版)Fig.13 Local resistance coefficient of 8 factor design points when $C=0.625$ (a), $C=0.875$ (b) (color online)图14 n 、 d 和 C 对 ζ 的独立效应(a)和相互效应(b)(彩图见网络版)Fig.14 The independent effects (a) and mutual effects (b) of n , d and C on ζ (color online)

局部阻力系数的目的。

2)不同部位局部阻力系数影响因素分析

本文进一步探究了节流件内部受几何参数的影响,根据图10划分的8个监测面,对节流件进行分段,相邻的两个监测面为一段,共有入口段1(监测面1~2),迷宫段2~6(监测面2~3、3~4、4~5、5~6、6~7),出口段7(监测面7~8)共7段,并计算了基于CCD设计的15个节流件计算了每一段几何参数 n 、 d 、 C 对 ζ 的独立效应和相互效应,计算结果见图15~16。

图15为 n 、 d 和 C 对局部 ζ 的独立效应的计算结果,在节流件内部,入口段和出口段的 $M_{(n)}$ 、 $M_{(d)}$ 和 $M_{(C)}$ 都很小,几乎为零,说明几何参数的变化对出口段和入口段的独立影响很小,可以忽略不计。在迷宫段,几何参数的变化对 ζ 的独立效应变化不大,与几何参数对整个节流件 ζ 的独立效应类似, $M_{(n)}$ 的平

均值为3.453 19, $M_{(C)}$ 的平均值为13.435 78,说明 n 和 C 对迷宫段局部阻力系数 ζ 的影响都是正面的,其中 C 的增加能够显著增加 ζ 。 $M_{(d)}$ 的平均值为-0.005 552 8,说明 d 对 ζ 影响虽然是负面的,但是对于 n 和 C 来说影响很小,可以忽略不计。

图16为 n 、 d 和 C 对局部 ζ 的相互效应的计算结果,在节流件内部,入口段和出口段的 $I_{(n,d)}$ 、 $I_{(n,C)}$ 和 $I_{(d,C)}$ 都很小,几乎为零,说明几何参数的变化对出口段和入口段的相互影响很小,可以忽略不计。在迷宫段,几何参数的变化对 ζ 的独立效应变化不大,与几何参数对整个节流件 ζ 的相互效应类似, $I_{(n,d)}$ 的平均值为0.115 79,说明 n 与 d 之间的相互影响比较小,只有 n 和 d 的变化时不会引起 ζ 的明显变化, $I_{(n,C)}$ 的平均值为6.551 49, $I_{(d,C)}$ 的平均值为1.678 32,说明在迷宫段内 n 和 C 、 d 与 C 之间的相互影响因子较大,无论 n 和 d 如何变化,只要 C 从0.625增加到

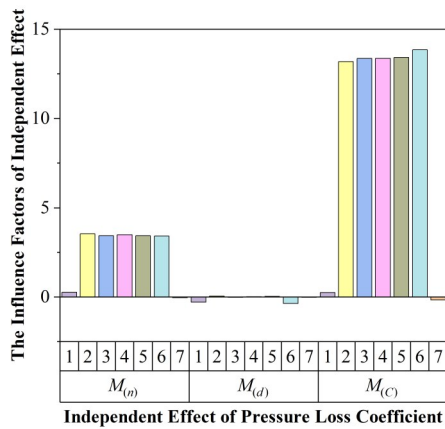


图15 n 、 d 和 C 对局部 ζ 的独立效应(彩图见网络版)
Fig.15 The independent effects of n , d and C on local ζ (color online)

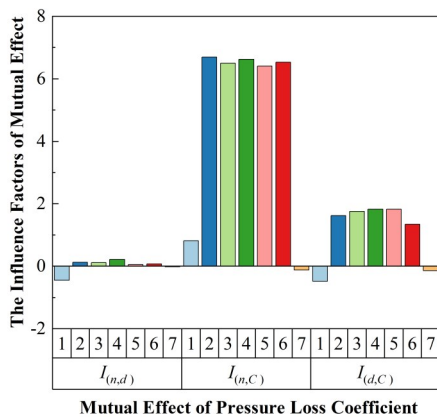


图16 n 、 d 和 C 对局部 ζ 的相互效应(彩图见网络版)
Fig.16 The mutual effects of n , d and C on local ζ (color online)

0.875,都能引起局部阻力系数的增加, n 和 C 的相互效应影响因子为正数且数值最大。结合图15可知,几何参数的变化对 ζ 的影响主要在节流件的迷宫段,且每一段的影响是相同的,对入口段和出口段 ζ 的影响很小。

4 结语

为探究几何参数对迷宫型节流件局部阻力系数 ζ 的具体影响,本文基于CCD方法,以液态金属为流体,针对迷宫型节流件的挡板数目 n 、挡板间距 d 、挡板高度与管道直径之比 C 这3个参数共设计了15个节流件模型,通过CFD模拟了其压力、流速分布规律以及压降的变化规律,并分析了不同几何参数变化对 ζ 的独立效应和相互效应,主要得出以下结果和结论:

1)流体在流经节流件后,出口速度会有所下降,

而在节流件迷宫内部,流速分布比较均匀,压力在节流件内随 n 均匀递减。压降随 n 增大,随 C 显著增大,且 C 增加后压降显著增大, d 在10~15 mm,压降随 d 减小, d 大于15 mm之后对压降几乎没有影响。

2)液态铅铋在温度为320 °C,入口质量流量为 $9.27 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ 的条件下,节流件几何参数的独立效应影响因子: $M_{(C)}=67.275 \ 03$, $M_{(n)}=17.482 \ 66$, $M_{(d)}=-0.592 \ 72$, ζ 受几何参数独立影响的程度如下: $C>n>d$,其中 C 的影响最为显著, d 的影响可近似忽略。节流件几何参数的相互效应影响因子: $I_{(n,C)}=12.617 \ 24$, $I_{(d,C)}=7.769 \ 52$, $I_{(n,d)}=0.102 \ 1$, ζ 受几何参数相互影响的程度如下: $(n,C)>(d,C)>(n,d)$,其中 n 和 C 的影响最为显著, n 和 d 的影响可近似忽略。

3)几何参数的变化对 ζ 的影响主要在节流件的迷宫段,且每一段的影响是相同的,对入口段和出口段 ζ 的影响可以忽略不计。在设计流体为液态铅铋的迷宫型节流件,需要调整流经节流件的局部阻力系数时,主要考虑 n 和 C 的影响。

作者贡献声明 伍贤锋负责起草文章,分析、解释数据;余悦、王晓婷负责采集数据;赵鹏程、沈梦思负责对文章的知识性内容作批评性审阅;艾青松负责调研整理文献;成正澳负责统计分析;于涛负责行政、技术或材料支持。

参考文献

- 刘少华,陆道纲,符精品,等.快堆主容器冷却系统组合式节流件流动特性水力实验研究[C]//第十六届全国反应堆热工流体学术会议暨中核核反应堆热工水力技术重点实验室2019年学术年会论文集.华北电力大学核科学与工程学院,华北电力大学非能动核能安全技术北京市重点实验室,2019: 8. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2019.047795.
- LIU Shaohua, LU Daogang, FU Jingpin, *et al.* Hydraulic experimental study on flow characteristics of combined throttling elements in cooling system of fast reactor main container[C]//The 16 th National Reactor Thermal Fluid Academic Conference and the 2019 Academic Annual Conference of the Key Laboratory of Thermal-Hydraulic Technology of China Nuclear Reactor. School of Nuclear Science and Engineering, North China Electric Power University, Beijing Key Laboratory of Passive Nuclear Energy Safety Technology, North China Electric Power University, 2019: 8. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2019.047795.
- 宋怡,陆道纲,秦亥琦,等.迷宫型节流件压降的数值模拟研究[J].核科学与工程,2020,40(2): 9. DOI: CNKI:

- SUN:HKXY.0.2020-02-020.
- SONG Yi, LU Daogang, QIN Haiqi, *et al.* Numerical analysis on pressure drop of the labyrinth throttle[J]. Nuclear Science and Engineering, 2020, **40**(2): 9. DOI: CNKI:SUN:HKXY.0.2020-02-020.
- 3 王凯, 杨俊康, 赵鹏程. 基于子通道程序的铅铋反应堆失流事故不确定性分析[J]. 核技术, 2024, **47**(8): 080603. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.080603.
WANG Kai, YANG Junkang, ZHAO Pengcheng. Uncertainty analysis of loss of coolant flow accident in lead - bismuth reactor using subchannel code[J]. Nuclear Techniques, 2024, **47**(8): 080603. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.080603.
 - 4 吴宜灿, 柏云清, 宋勇, 等. 中国铅基研究反应堆概念设计研究[J]. 核科学与工程, 2014, **34**(2): 201 - 208. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0918.2014.02.009.
WU Yican, BAI Yunqing, SONG Yong, *et al.* Conceptual design of China's lead-based research reactor, CLEAR-I [J]. Nuclear Science and Engineering, 2014, **34**(2): 201 - 208. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0918.2014.02.009.
 - 5 李卫, 刘晓晶, 柴翔, 等. 基于有限体积法的中子扩散和输运算法开发[J]. 核技术, 2025, **48**(1): 010603. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2025.hjs.48.240037. CSTR: 32193.14. hjs.CN31-1342/TL.2025.48.240037.
LI Wei, LIU Xiaojing, CHAI Xiang, *et al.* Development of neutron diffusion and transport algorithms based on finite volume method[J]. Nuclear Techniques, 2025, **48**(1): 010603. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2025.hjs.48.240037. CSTR: 32193.14. hjs. CN31-1342/TL. 2025.48.240037.
 - 6 向钊才, 陈洽锋, 赵鹏程, 等. 基于隐式重启Arnoldi方法的中子扩散本征值问题求解及其降阶研究[J]. 核技术, 2024, **47**(2): 020604. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.020604.
XIANG Zhaocai, CHEN Qiafeng, ZHAO Pengcheng, *et al.* Apply implicitly restarted Arnoldi method to solving eigenvalue problem and reducing dimensionality in neutron diffusion[J]. Nuclear Techniques, 2024, **47**(2): 020604. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.020604.
 - 7 温从义, 赵梓炎, 刘紫静, 等. SCO₂-PCHE 多目标结构优化研究[J]. 核技术, 2025, **48**(7): 070029. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2025.hjs.48.240350.
WEN Congyi, ZHAO Ziyang, LIU Zijong, *et al.* Multi-objective structural optimization design method for SCO₂-PCHE[J]. Nuclear Techniques, 2025, **48**(7): 070029. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2025.hjs.48.240350.
 - 8 温从义, 邓俊杰, 刘紫静, 等. 基于改进DMD和LSTM的铅铋快堆上腔室热分层降阶分析模型研究[J]. 核技术, 2025, **48**(4): 240147. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2025.hjs.48.240147.
WEN Congyi, DENG Junjie, LIU Zijong, *et al.* Reduced-order analysis model for thermal stratification in the upper plenum of lead-bismuth fast reactors based on improved DMD and LSTM[J]. Nuclear Techniques, 2025, **48**(4): 240147. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2025.hjs.48.240147.
 - 9 Rafiee S E, Sadeghiazad M M. Three-dimensional and experimental investigation on the effect of cone length of throttle valve on thermal performance of a vortex tube using $k - \varepsilon$ turbulence model[J]. Applied Thermal Engineering, 2014, **66**(1 - 2): 65 - 74. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2014.01.073.
 - 10 Gan G H, Riffat S B. Pressure loss characteristics of orifice and perforated plates[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 1997, **14**(2): 160 - 165. DOI: 10.1016/S0894-1777(96)00041-6.
 - 11 Rhode D L, Sobolik S R. Simulation of subsonic flow through a generic labyrinth seal cavity[C]//Volume 1: Aircraft Engine; Marine; Turbomachinery; Microturbines and Small Turbomachinery. March 18-21, 1985. Houston, Texas, USA. American Society of Mechanical Engineers, 1985: 1-A. DOI: 10.1115/85-gt-76.
 - 12 Wróblewski W, Frączek D, Szymański A, *et al.* Optimization of the straight-through labyrinth seal with a smooth land[C]//Volume 5B: Heat Transfer. June 11-15, 2018. Oslo, Norway. American Society of Mechanical Engineers, 2018, **140**(12): 122503. DOI: 10.1115/1.4040767.
 - 13 李浩冉, 刘磊, 张则亮, 等. 孔板压降的内角影响机理分析及计算公式改进[J]. 流体机械, 2022, **50**(11): 54 - 60.
LI Haoran, LIU Lei, ZHANG Zeliang, *et al.* Mechanism analysis and calculation formula improvement of orifice plate pressure drop affected by inner angle[J]. Fluid Machinery, 2022, **50**(11): 54 - 60.
 - 14 Okhotnikov I, Noroozi S, Sewell P, *et al.* Evaluation of steady flow torques and pressure losses in a rotary flow control valve by means of computational fluid dynamics [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2017, **64**: 89 - 102. DOI: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2017.02.005.
 - 15 Wang H M, Zhao Y, Wang J X, *et al.* Numerical simulation of flow characteristics for a labyrinth passage in a pressure valve[J]. Journal of Hydrodynamics, Ser B,

- 2016, **28**(4): 629 - 636. DOI: 10.1016/S1001-6058(16)60667-4.
- 16 Qin H Q, Lu D G, Zhong D W, *et al.* Experimental and numerical investigation for the geometrical parameters effect on the labyrinth-seal flow characteristics of fast reactor fuel assembly[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2020, **135**: 106964. DOI: 10.1016/j.anucene.2019.106964.
- 17 周志伟, 曹锋, 陆道纲, 等. 自然循环下钠冷快堆中迷宫型节流件水力特性研究[J]. *核科学与工程*, 2023, **43**(5): 979 - 988. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0918.2023.05.003.
ZHOU Zhiwei, CAO Feng, LU Daogang, *et al.* Study on hydraulic characteristics of labyrinth throttle in sodium cooled fast reactor under natural circulation[J]. *Nuclear Science and Engineering*, 2023, **43**(5): 979 - 988. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0918.2023.05.003.
- 18 宋怡. 迷宫型节流件水力特性的三维数值模拟研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2020. DOI: 10.27140/d.cnki.ghbbu.2020.001129.
SONG Yi. Three-dimensional numerical simulation study on hydraulic characteristics of labyrinth throttle[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2020. DOI: 10.27140/d.cnki.ghbbu.2020.001129.
- 19 Bhattacharya S. Central composite design for response surface methodology and its application in pharmacy[M]// *Response Surface Methodology in Engineering Science*. London: IntechOpen, 2021. DOI: 10.5772/intechopen.95835.
- 20 Asghar A, Raman A A A, Daud W M A W. A comparison of central composite design and taguchi method for optimizing Fenton process[J]. *The Scientific World Journal*, 2014, **2014**(1): 869120. DOI: 10.1155/2014/869120.
- 21 Sadhukhan B, Mondal N K, Chatteraj S. Optimisation using central composite design (CCD) and the desirability function for sorption of methylene blue from aqueous solution onto Lemna major[J]. *Karbala International Journal of Modern Science*, 2016, **2**(3): 145 - 155. DOI: 10.1016/j.kijoms.2016.03.005.
- 22 Kim S E, Choudhury D, Patel B. Computations of complex turbulent flows using the commercial code fluent [M]// *Modeling Complex Turbulent Flows*. Dordrecht: Springer Netherlands, 1999: 259 - 276. DOI: 10.1007/978-94-011-4724-8_15.
- 23 Organisation for Economic Co-operation and Development, Agency N E. Handbook on lead-bismuth eutectic alloy and lead properties, materials compatibility, thermalhydraulics and technologies[M]. Paris: OECD, 2015. DOI: 10.1787/42dcd531-en.
- 24 Rhode D L, Sobolik S R. Simulation of subsonic flow through a generic labyrinth seal cavity[C]// *Asme International Gas Turbine Conference & Exhibit*. American Society of Mechanical Engineers, 1985. DOI: 10.1115/85-GT-76.