

# 自激振荡射流微通道换热特性及热力学分析

陈巨辉<sup>1</sup>, 王俊乔<sup>1</sup>, 李丹<sup>1</sup>, 王妍<sup>2</sup>, 曲久鹤<sup>1</sup>, 曹希峰<sup>1</sup>, 刘晓刚<sup>1</sup>, 李九如<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨理工大学机械动力工程学院, 黑龙江省 哈尔滨市 150080;

2. 长春理工大学机电工程学院, 吉林省 长春市 130000)

## Heat Transfer Characteristics and Thermodynamic Analysis of a Self-excited Oscillating Jet Micro-channel

CHEN Juhui<sup>1</sup>, WANG Junqiao<sup>1</sup>, LI Dan<sup>1</sup>, WANG Yan<sup>2</sup>, QU Jiuhe<sup>1</sup>, CAO Xifeng<sup>1</sup>, LIU Xiaogang<sup>1</sup>, LI Jiuru<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical and Power Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, Heilongjiang

Province, China; 2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Changchun University of

Science and Technology, Changchun 130000, Jilin Province, China)

**ABSTRACT:** A simulation study of the fluid heat transfer performance in a self-excited oscillating jet micro-channel radiator is carried out. The results show that under different inlet mass flow rates (1.0~6.0 g/s), the movement of the high-pressure region in the self-excited oscillator causes the deflection of the jet in the micro-channel radiator, which creates the periodic cyclic oscillations of the jet and strengthens the perturbations in the fluid region at the same time. In addition, after comparative analysis, it is found that the impact range of the fluid region in the micro-channel is wider than that in the jet micro-channel, so its temperature uniformity performance is also better than that in the jet micro-channel. At the same time, the paper uses the thermodynamic principle to analyze and evaluate the effect of self-excited oscillation technology on the heat transfer performance of the fluid flow in the jet micro-channel. It is found that the oscillating jets produced by the self-excited oscillator can reduce the irreversible loss in the process of convective heat transfer of the fluid in the jet micro-channel, resulting in a remarkable thermal energy transfer efficiency of up to 98.48%.

**KEY WORDS:** jet micro-channel; self-excited oscillator; entropy generation; thermal energy transfer efficiency; heat transfer enhancement

**摘要:** 该文对自激振荡射流微通道内流体换热性能进行模拟

**基金项目:** 黑龙江省重大科技专项(2019ZX03A02); 黑龙江省重点研发项目(GA21A301); 国家自然科学基金项目(5210110314)。

Project Supported by Major Science and Technology Programs in Heilongjiang Province (2019ZX03A02); Key R&D Projects of Heilongjiang Province (GA21A301); National Natural Science Foundation of China (5210110314).

研究, 结果表明在不同入口质量流量(1.0~6.0 g/s)条件下, 自激振荡器内高压区域的移动造成了微通道散热器内射流的偏转, 形成射流周期性循环摆动的同时强化了流体区域的扰动。此外, 经对比分析后发现相较射流微通道内流体区域其冲击范围更广, 因此其均温性能也优于射流微通道。与此同时, 该文运用热力学原理分析评价自激振荡技术对射流微通道内流体流动换热性能的影响, 发现自激振荡器所产生的振荡射流可以减小射流微通道内流体对流换热过程中的不可逆损失, 其热能传输效率高达98.48%。

**关键词:** 射流微通道; 自激振荡器; 熵产; 热能传输效率; 强化换热

## 0 引言

随着近年来航空航天、车辆船舶与电子芯片等领域的飞速发展, 传统换热器已无法满足电子元件换热效率、功重比以及紧凑性等方面的需求<sup>[1-3]</sup>。自1981年 Tuckerman 等<sup>[4]</sup>率先提出微通道概念以来, 因良好的传热性能等优势, 微通道散热器逐渐成为传热领域的研究热点。据统计约55%的电子设备故障是由电子器件的温升引起的, 并且该现象还会使电子设备的失效过程加速<sup>[5-6]</sup>。因此, 设计并开发高性能的微通道散热器已迫在眉睫。

射流冲击是一种强化换热的有效方法, 而且微尺度射流冲击非常适用于大功率电子元件, 可有效散热并提高寿命<sup>[6]</sup>。Gan 等<sup>[7]</sup>研究发现射流微通道散热器的传热能力相较普通微通道散热器提升17.51%, 同时表现出更低的压降。近年来研究者为了改善射流微通道换热性能在其内部不断增设不

同形状、尺寸与数量以及不同排布方式的扰流元件<sup>[7]</sup>, 这无疑增加了换热器的加工难度, 经济效益降低。与此同时, 自激振荡器因无须借助动力, 仅靠自身结构就能够完成流体周期性运动, 作为一种利用自身结构产生压差便可使固定射流转变为振荡射流的特殊装置, 近年来已成为射流冷却技术的一种新兴实现方式, 并逐渐在流体工程领域得到广泛的应用<sup>[11]</sup>。Wu 等<sup>[15]</sup>通过数值模拟将两个流体振荡器和一个直接射流的传热性能与非稳态雷诺平均纳维-斯托克斯和大涡模拟湍流模型进行比较, 发现自振荡撞击射流通过提高了平均 Nu 数值并覆盖更大的撞击冷却表面, 有利于提高散热性能。Mosavati 等<sup>[16]</sup>对三维自振荡流动结构进行了研究, 评估了振荡方形和圆形射流的特性。结果表明, 振荡方形射流的扩散和衰减率较高, 而振荡的圆形射流在射流中心附近具有较高的湍流强度。Mosavati 等<sup>[17]</sup>对于振荡出现之前的起始湍流方形射流的近场中的涡流动力学也进行研究。结果表明, 涡旋环在喷嘴出口附近呈方形, 并且在下游约 0.7 个喷嘴直径处发生轴切换。超过该位置, 方形环开始变成一个直径约为一个圆形的涡旋环, 并在与墙壁撞击时产生涡流。Ming 等<sup>[18]</sup>提出一种以撞击面上方 30° 的角度倾斜的阵列式高性能微通道换热器以扩大射流的冲击区, 采用非稳态 RANS 湍流模型研究了射流阵列的流体动力学和传热性能。研究结果表明, 并联振荡器在同步和异步输出相位下会产生 3 种模式, 包括共向振荡、反向振荡和不规则振荡。在不同的振荡模式下, 扫掠射流的散热性能几乎相当。Aminzadeh 等<sup>[19]</sup>对自激振荡冲击冷却系统进行数值研究, 研究了喷嘴宽度对不同入口流速和冲击距离动结构和传热的影响。选择 SST  $k-\omega$  模型来模拟湍流效应。结果表明, 减小喷嘴宽度会增加恒定流速下的振荡频率, 常规静止射流的平均 Nu 数低于自激振荡射流的平均值, 撞击距离的微小变化略微改变了小喷嘴宽度下的平均 Nu 数。

综上所述, 目前对自激振荡器的研究主要集中于对微通道内流体动力学特点上, 且与射流冲击技术相结合的研究非常有限。因此, 本文采用数值模拟方法研究自激振荡对射流微通道内流体流动传热性能的影响, 建立基于热力学第二定律的熵产模型及热能传输效率模型, 对比分析了自激振荡射流微通道散热器的换热性能。

## 1 数学模型

### 1.1 控制方程

将微通道内的流体介质视为一种单相不可压缩的粘性流体, 对流换热过程中流固特性恒定不变, 且忽略辐射传热过程; 本文连续性方程、动量守恒方程与能量守恒方程分别如式(1)~(3)所示。

$$\nabla \cdot (\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(u_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (u_i v_j) = -\frac{1}{\rho} \nabla \cdot p + \nabla \cdot (\eta \nabla u) + S_\phi \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (u_i T) = \nabla \cdot \left( \frac{\lambda}{\rho C_p} \nabla T \right) + S_T \quad (3)$$

式中:  $\rho$  为流体密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $v$  分别为流体在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的速度,  $\text{m/s}$ ;  $\mu$  为动力粘度,  $\text{m}^2/\text{s}$ ;  $\lambda$  为导热系数,  $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ;  $C_p$  为流体比热容,  $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ;  $S_u$ 、 $S_v$ 、 $S_w$  与  $S_T$  均为广义源项, 其中  $S_T$  表达式为

$$S_T = S_h + \phi \quad (4)$$

式中:  $S_h$  为流体内热源;  $\phi$  为由于粘性作用机械能转换为热能的部分, 亦称耗散函数。

$$\phi = \eta \left\{ 2 \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial \omega}{\partial z} \right)^2 \right] + \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial \omega}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial \omega}{\partial y} \right)^2 \right\} + \lambda \text{div} U \quad (5)$$

式中  $\eta$  为动力粘度,  $\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。

### 1.2 湍流模型

RNG  $k-\varepsilon$  湍流模型能够增强逆压梯度情况下的边界层性能, 且适用于射流与、旋转流等复杂流动<sup>[20]</sup>。本文选用 RNG  $k-\varepsilon$  湍流模型来描述湍流条件下对流传热过程, 该模型隶属于两方程半经验模型。其中, 湍流动能  $k$  方程和湍流耗散率  $\varepsilon$  方程如式(6)、(7)所示。

$$\nabla \cdot (\rho v k) = \nabla \cdot [(\mu + \mu_t)/(\sigma_k \cdot \nabla k)] + G_k - \rho \varepsilon \quad (6)$$

$$\nabla \cdot (\rho v \varepsilon) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_{1\varepsilon} \left( \frac{\varepsilon}{k} \right) G_k + C_{2\varepsilon} \rho \left( \frac{\varepsilon^2}{k} \right) \quad (7)$$

式中  $\mu_t$  为涡流粘度, 表达式为

$$\mu_t = (\rho C_\mu k^2) / \varepsilon \quad (8)$$

式中:  $C_k$  为平均速度梯度产生的湍流动能;  $\sigma_k=1.0$ ,  $\sigma_\varepsilon=1.3$  分别为湍流动能与耗散率的有效普朗特数;  $C_{1\varepsilon}=1.44$ ,  $C_{2\varepsilon}=1.92$ 。

### 1.3 评价指标

#### 1.3.1 平均努塞尔数

平均 Nusselt 数 ( $\overline{Nu}$ ) 表示流体流动过程中对

流换热强烈程度的无量纲数，故本文将作为评价射流微通道传热性能的评价指标之一<sup>[21]</sup>，如式(9)所示。

$$\overline{Nu} = hD_h / \lambda \tag{9}$$

式中： $h$ 为对流换热系数，表达式为 $h = q / (T_w - \bar{T}_f)$ ， $W / (m^2 \cdot K)$ ； $D_h$ 为当量直径， $mm$ ； $\lambda$ 为流体导热系数， $W / (m \cdot K)$ 。

### 1.3.2 熵产理论

根据 Bejan<sup>[22]</sup>所提出的熵产理论，可知射流微通道熵产由两部分构成：1) 流体从射流微通道中流动时其摩擦损失引起的流动熵产  $S_{\Delta p}$ ；2) 流体与射流微通道的加热面进行热量传递所引起的传热熵产  $S_{\Delta T}$ ，而两者之和为射流微通道内总熵产值  $S_{gen}$ ，如式(10)所示：

$$S_{gen} = S_{\Delta p} + S_{\Delta T} = Q \cdot (T_b - T_f) / (T_b \cdot T_f) + \Delta p \cdot m / (\rho \cdot \bar{T}_f) \tag{10}$$

式中： $Q$ 为热源总热量， $W$ ，其表达式为 $Q = q \cdot A_b$ ，其中  $A_b$ 为射流微通道底面加热面的面积。

### 1.3.3 热能传输效率

Liu 等<sup>[23]</sup>引入一个既能反映能量的质量又能反映能量的数量的物理量，并开发一种最小化不可逆损失的方法来优化传热过程，因射流微通道内流体无内热源，从焓的角度最终推导出微通道换热过程的热能传输效率( $\eta$ )，如式(11)所示：

$$\eta = \frac{Q_e}{Q} = \frac{Q - Q_d}{Q} = 1 - \frac{Q_d}{Q} \tag{11}$$

式中： $Q$ 为输入或输出微通道内流体的总热流量， $W$ ； $Q_e$ 为微通道有效热流量， $W$ ； $Q_d$ 为微通道内流体的热消耗， $W$ ；其表达式为 $Q_d = \iiint_{\Omega} E_d dV = \iiint_{\Omega} [\lambda(\nabla T)^2] / T dV$ 。

## 2 模型验证

### 2.1 物理模型

本文射流微通道结构如图1所示，模型底部加热面设有热流密度恒定的热源，热量即通过加热面传到模型中。射流微通道上方布置有12个截面相同、间隔均匀的冲击射流孔。通过上述12个冲击射流孔进入微通道，与下方的微通道底部高温区域进行耦合换热，最终使热量随着流体通过模型两边的出口流出，如图2所示。

本文射流微通道具体尺寸详见表1，其中 $L$ 、 $W$ 、 $H$ 分别为射流微通道的长、宽、高，射流孔截面为正方形，其边长为 $L_1$ ，相邻射流孔的距离为 $L_2$ ，射

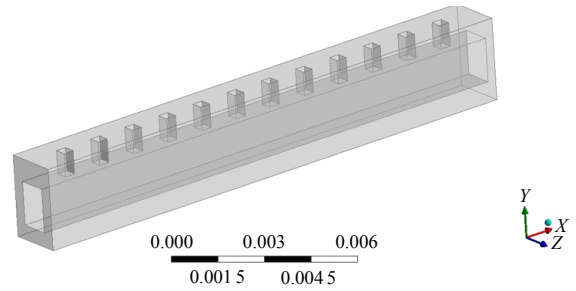


图1 射流微通道整体结构图

Fig. 1 Overall structure of jet micro-channel

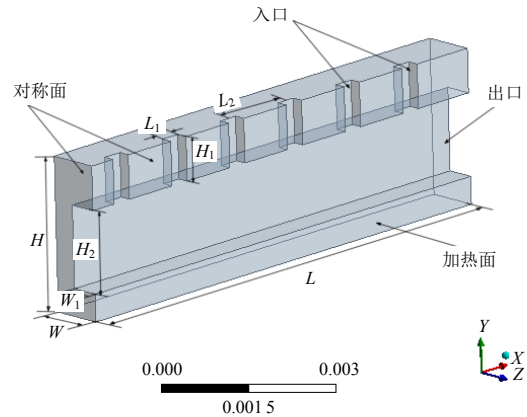


图2 射流微通道结构示意图

Fig. 2 Jet micro-channel structure diagram

表1 射流微通道几何尺寸

Table 1 Self-excited oscillator geometry

参数	数值/mm	参数	数值/mm
$L$	9.1	$L_2$	1.4
$W$	0.91	$H_1$	0.8
$H$	2.8	$H_2$	1.5
$L_1$	0.4	—	—

流孔的深度为 $H_1$ ，微通道截面的高为 $H_2$ ，宽为 $W_1$ 。

由于自激振荡器的出口射流具有摆动振荡的特性，从而在摆动射流时流场呈现动态变化，故本在射流微通道基础上添加自激振荡器作为产生振荡射流的装置(如图3所示)，并将其竖直居中布置于射流微通道上方。本文自激振荡器由动力喷嘴，混合室、出口喉部以及反馈通道这4个部分组成(如图4所示)，具体尺寸详见表2。

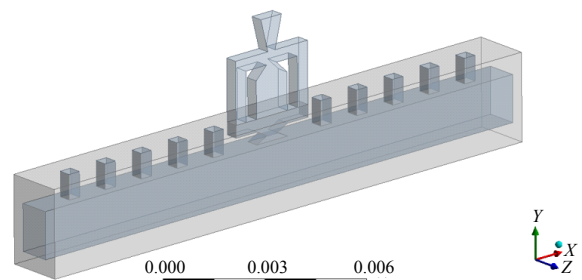


图3 振荡射流微通道整体结构图

Fig. 3 Overall structure of the oscillating jet micro-channel

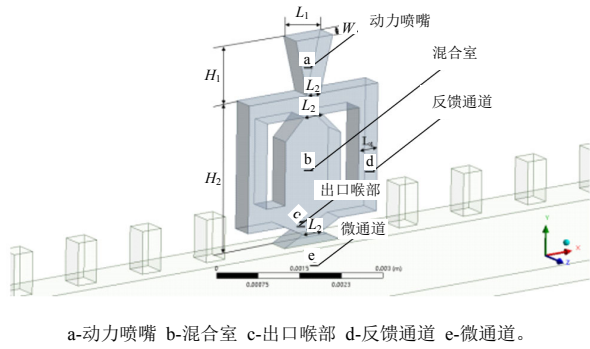


图 4 射流微通道结构示意图

Fig. 4 Self-excited oscillator structure diagram

表 2 自激振荡器几何尺寸

Table 2 Self-excited oscillator geometry

参数	数值/mm	参数	数值/mm
$L_1$	0.8	$L_5$	1.4
$L_2$	0.28	$H_1$	1.06
$L_3$	0.4	$H_2$	2.8
$L_4$	0.4	$W$	0.4

### 2.2 网格无关性验证

由于振荡射流会造成流体流动呈现动态变化，对网格提出了更高的要求。为确保数据结果不受网格数量的影响，故对振荡射流微通道模型进行网格独立性验证。

本文采用 ANSYS Meshing 网格划分软件进行网格划分。自激振荡器的计算区域均为流体区域，主要包括振荡器的动力喷嘴、混合室、反馈通道、出口喉部以及底部的流体通道。由表 3 可看出，当网格数达到 3 329 295 后，加热面均温变化不到 0.1%。为保证数据精度的同时减少计算资源，振荡射流微通道模型网格数选用 3 329 295 个。

表 3 振荡射流微通道网格无关性验证

Table 3 Mesh-independence verification of oscillating jet micro-channels

网格数量	加热面均温/K
897 290	319.683
1 322 262	320.415
2 012 065	320.930
3 329 295	321.352
6 169 440	321.420

### 2.3 模型验证

为验证 RNG  $k-\epsilon$ 模型对于射流微通道的适用性，本文参考 Sung 等<sup>[24]</sup>实验模型进行数值模拟，并将模拟数据与其实验数据进行对比。图 5 为 X 方向加热面温度分布实验/模拟数据对比图。由图可看出，实验与模拟的数据趋势相同且差距不大，两者

误差仅为 0.3%，远远小于 10%的误差，故可以说明 RNG  $k-\epsilon$ 模型在射流微通道的数值模拟中拥有较高的精确度。

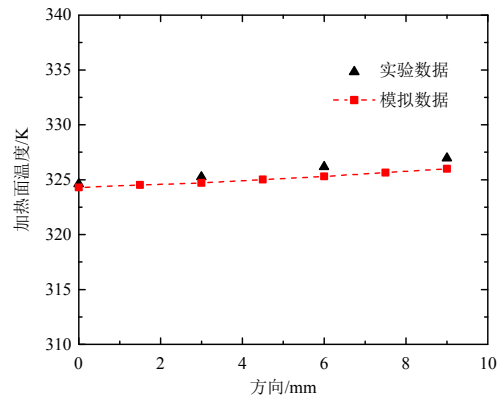


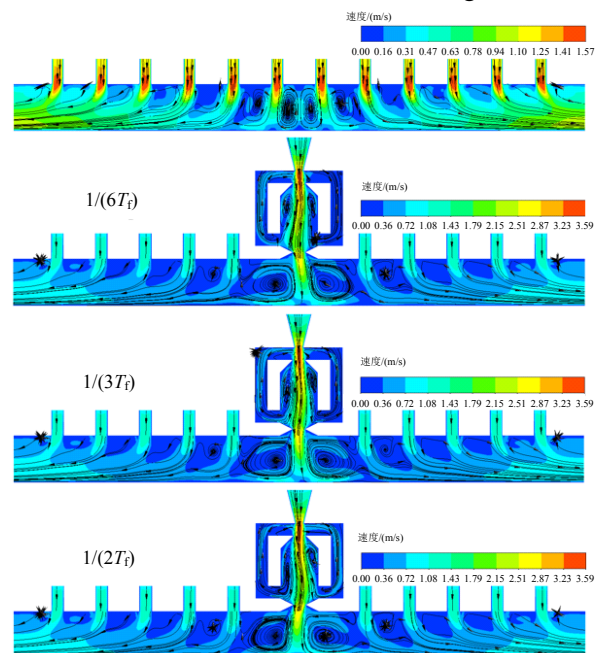
图 5 模拟数据与实验数据对比图

Fig. 5 Comparison of present simulation results with available experimental and numerical data sets

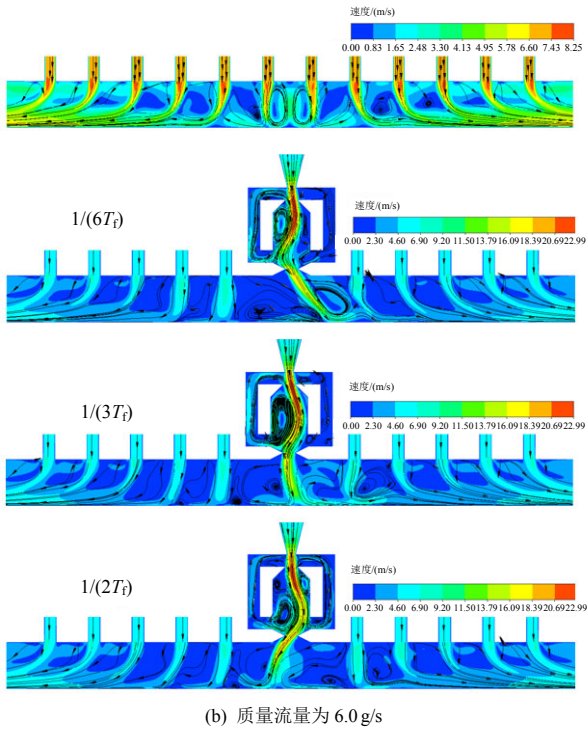
## 3 模拟结果与讨论

### 3.1 流动特性分析

如图 6 所示，流体由于 Coanda 效应<sup>[25]</sup>从动力喷嘴喷出的动力射流将附着于混合室的侧壁，流场因此呈现出不对称的状态，同时在流动过程中两个反馈流道之间产生压差，从而使得动力喷嘴底部的射流方向产生变化。由于自激振荡器左右对称，其内部的流场、压力场左右重复相同的过程，导致射流方向反复改变，呈现周期性脉动的特征，振荡器内的射流不断左右脉动，导致由出口喉部射流出的流体不断来回扫射振荡器下方的微通道流体域。在低质量流量下，由于质量流量仅为 1.0 g/s，自激振



(a) 质量流量为 1.0 g/s



(b) 质量流量为 6.0 g/s  
图 6 不同质量流量射流微通道与自激振荡射流微通道速度分布流线图

Fig. 6 Streamline diagram of velocity distribution of different jet micro-channels at high mass flow rate

荡器中流体最大速度仅为 3.6 m/s，振荡幅度很小，导致振荡器下方微通道流体域虽受到振荡器振荡效果的影响，其流场随时间不断变化，但变化范围很小，对振荡器两侧固定射流的影响较弱。在高质量流量下，由于质量流量为 6.0 g/s，自激振荡器中流体最大速度高达 23.0 m/s，出口喉部流出的振荡射流振荡幅度很大，振荡射流带动振荡器下方流体域及两侧固定射流不断变化，对整个微通道流体域都产生了较大的影响。

由图 7 可知，由于自激振荡器是依靠压降差推动流体在振荡器内不断流动从而产生振荡射流，使

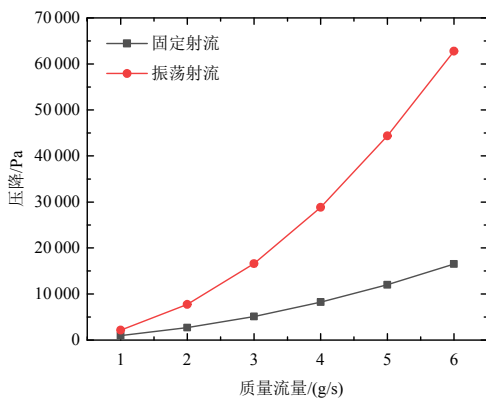


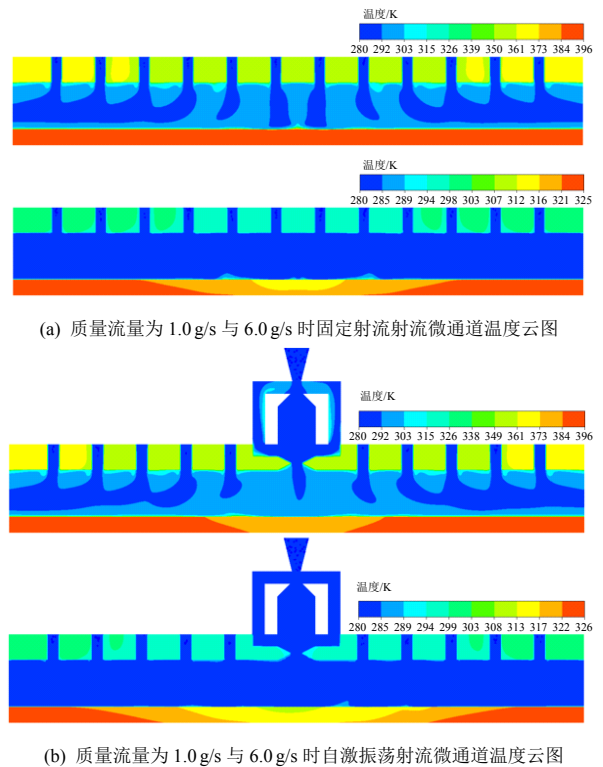
图 7 不同射流微通道压降变化图

Fig. 7 Variation diagram of pressure drop in different jet micro-channels

得振荡器产生的压降相较固定大。在低质量流量情况下，由于动力喷嘴处流体速度很低，Coanda 效应不明显，自激振荡器内流体流动阻力较小，使得振荡射流微通道的压降略大于射流微通道；随着质量流量增大，动力喷嘴处流体速度提高，Coanda 效应加剧，自激振荡器内流体流动阻力激增，加之振荡射流在微通道内不断扰流，使得振荡射流微通道的压降值数倍于射流微通道，最高达到其压降值的约 3.79 倍。

### 3.2 传热特性分析

如图 8 所示，由于振荡射流微通道中间的振荡射流不断扫掠底部靶面，导致其固体域低温区域面积明显大于射流微通道。与此同时，由于振荡射流对两侧固定射流处流体域具有实时变化的扰动作用，两侧的流体换热效果增强，弥补了质量流量较低时换热能力不足的劣势，使得振荡射流微通道底部固体域的温度与射流微通道基本一致。此外，由于振荡射流扫掠部分靶面温度较低，两侧固定射流冷却靶面温度较高，在流体不断扰动的过程中自激振荡射流微通道内流体冲击覆盖范围更广，在质量流量较高时呈现更好的均温性能(如图 8 所示)。由图 9 可知，随着质量流量的增大，两种射流微通道



(a) 质量流量为 1.0 g/s 与 6.0 g/s 时固定射流射流微通道温度云图

(b) 质量流量为 1.0 g/s 与 6.0 g/s 时自激振荡射流微通道温度云图

图 8 不同质量流量射流微通道与自激振荡射流微通道温度云图

Fig. 8 Temperature nephogram of different jet micro-channels at 1.0 g/s and 6.0 g/s mass flow

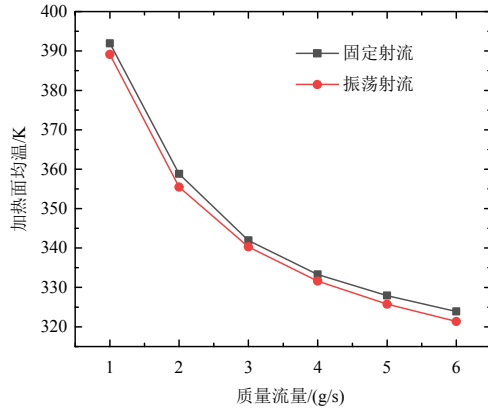


图 9 不同射流微通道加热面均温变化图

Fig. 9 Variation diagram of the average temperature of the heating surface of different jet micro-channels

加热面温度均有不同程度的降低。由于振荡射流微通道中振荡器下方固体域的温度明显低于固定射流，而振荡射流两侧固体域温度与固定射流无明显差距，导致在此质量流量范围内振荡射流微通道加热面均温均低于射流微通道，加热面均温相差约为 2.79℃。

如图 10 所示，在质量流量为 1.0~6.0 g/s 的范围内，对比分析两种射流微通道的  $\overline{Nu}$  随质量流量的变化。由图 10 可知，由于振荡射流微通道中间的振荡射流对底部靶面的扫掠冷却作用及对整个流体域的实时扰动作用，导致整个微通道系统的换热性能得到了强化，尤其是高质量流量时，振荡射流微通道的  $\overline{Nu}$  相比射流微通道增长了约 4%。从  $\overline{Nu}$  的角度来看，加入自激振荡器有利于增强射流微通道的换热性能。

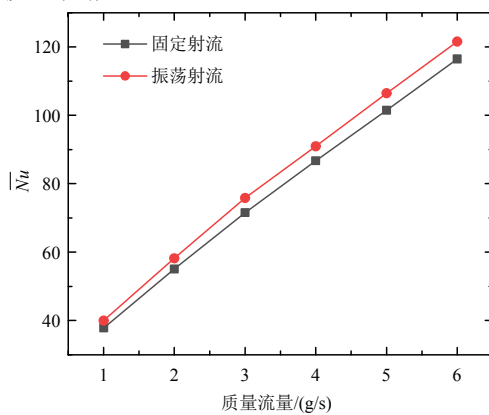


图 10 不同射流微通道  $\overline{Nu}$  变化图

Fig. 10 Variation diagram of the average Nusselt number of different jet micro-channels

### 3.3 热力学特性分析

如图 11 所示，振荡射流微通道的传热熵产相比于射流微通道增长约 4%。从传热熵产的角度来看，加入自激振荡器有利于减小由传热引起的不可

逆损失。如图 12 所示，在 1.0~6.0 g/s 的质量流量范围内，振荡射流微通道的流动熵产要大于射流微通道，且其差距随着质量流量的增大而增大，在最大质量流量时，振荡射流微通道的流动熵产约为射流微通道的 3.79 倍。从流动熵产的角度来看，加入自激振荡器会大幅增加由流体摩擦产生的不可逆损失。振荡射流微通道的传热熵产低于射流微通道，而其流动熵产却大于射流微通道，导致随着质量流量的增加，两者在总熵产上的差距被不断拉近，但由于传热熵产与流动熵产在量级上的差距，导致在高质量流量时，振荡射流微通道的总熵产仍低于射流微通道。

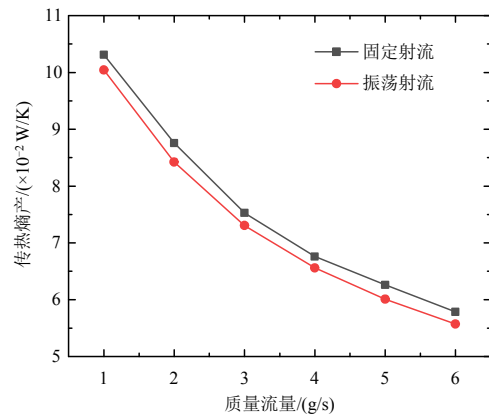


图 11 不同射流微通道传热熵产变化图

Fig. 11 Variation diagram of heat transfer entropy production in different jet micro-channels

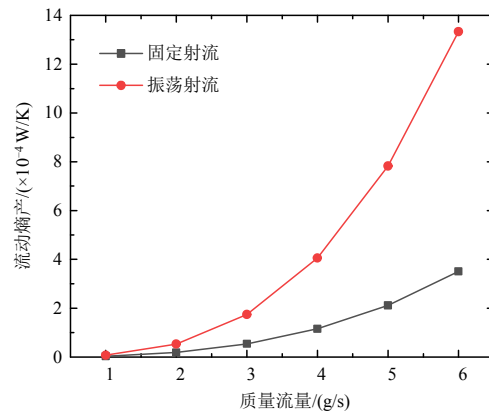


图 12 不同射流微通道流动熵产变化图

Fig. 12 Variation diagram of flow entropy production in different jet micro-channels efficiency of different jet micro-channels

由图 13 可知，在质量流量为 1.0~6.0 g/s 的范围内，振荡射流微通道的传热熵产低于射流微通道，而其流动熵产要远大于射流微通道，导致随着质量流量的增加，两者在总熵产上的差距被不断拉近，但由于传热熵产与流动熵产在量级上的差距，导致在高质量流量时，振荡射流微通道的总熵产始终低

于射流微通道。从总熵产的角度来看,加入自激振荡器可以使不可逆损失降到更低。

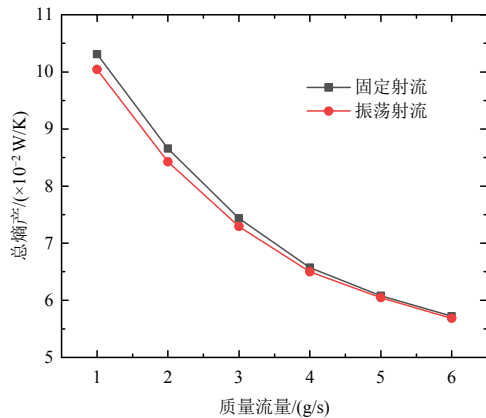


图 13 不同射流微通道总熵产变化图

Fig. 13 Variation diagram of total entropy production in different jet micro-channels

图 14 为不同射流微通道热能传输效率变化图,在质量流量为 1.0~6.0 g/s 的范围内,对比分析两种射流微通道的热能传输效率随流体质量流量的变化。由图 14 可知,在此质量流量范围内,振荡射流微通道的  $\eta$  均大于射流微通道。在质量流量较低时,振荡射流微通道的热能传输效率明显大于射流微通道,两者相差 2.49%。这是由于在质量流量较低的情况下,自激振荡射流微通道内流体受不断变化涡流的扰动,使得流体在对流换热过程中流体的温度梯度相较射流微通道更小,进而传热损失更低,最终强化了微通道换热器的换热效果。随着质量流量的增大,两者的差距逐渐减小,且自激振荡射流微通道的热能传输效率在此工况下高达 98.48%。因此从热能传输效率的角度来看,加入自激振荡器有利于增加热能传输效率。

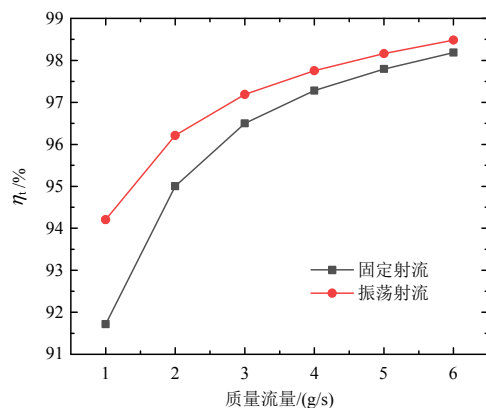


图 14 不同射流微通道热能传输效率变化图

Fig. 14 Variation diagram of thermal energy transfer efficiency of different jet micro-channels

## 4 结论

本文将自激振荡技术与射流微通道相结合,针对自激振荡射流微通道的流动传热特性进行模拟研究,并运用熵产原理与热能传输效率对其换热特性进行分析,得到如下结论:

1) 自激振荡技术使射流微通道内流体产生 Coanda 效应,导致其流体流态随时间不断变化,增强了射流微通道内流体的扰动,进而强化了射流微通道的换热性能。

2) 随着质量流量的增加,自激振荡技术使得射流微通道内流体平均努塞尔数 ( $\overline{Nu}$ ) 明显增大,较射流微通道增幅约 4%,有效降低射流微通道加热面均温。

3) 随着质量流量的增加,自激振荡射流微通道内振荡射流的扫掠范围逐渐增大,进而射流微通道内部流体扰动范围的增大,使得加热面具有更大的温降区域。

4) 在质量流量为 1.0~6.0 g/s 的范围内,自激振荡射流微通道内不断变化的涡流使流体具有较小的温度梯度与传热损失,在强化换热的同时使得总熵产始终低于射流微通道。

5) 在质量流量为 1.0~6.0 g/s 的范围内,自激振荡技术可有效提升射流微通道的热能传输效率,自激振荡射流微通道的热能传输效率可高达 98.48%。

## 参考文献

- [1] ZHOU Jinzhi, CAO Xiaoling, ZHANG Nan, et al. Micro-channel heat sink: a review[J]. Journal of Thermal Science, 2020, 29(6): 1431-1462.
- [2] KABIR M, GEMEDA T, PRELLER E, et al. Design and development of a PCM-based two-phase heat exchanger manufactured additively for spacecraft thermal management systems[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, 180: 121782.
- [3] GKOUNTAS A A, BENOS L T, SOFIADIS G N, et al. A printed-circuit heat exchanger consideration by exploiting an Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-water nanofluid: effect of the nanoparticles interfacial layer on heat transfer[J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2021, 22: 100818.
- [4] TUCKERMAN D B, PEASE R F W. High-performance heat sinking for VLSI[J]. IEEE Electron Device Letters, 1981, 2(5): 126-129.
- [5] TONG H M, LAI Yishao, WONG C P. Advanced flip chip packaging[M]. New York: Springer, 2013.
- [6] RAMESH K N, SHARMA T K, RAO G A P. Latest advancements in heat transfer enhancement in the micro-channel heat sinks: a review[J]. Archives of

- Computational Methods in Engineering, 2021, 28(4): 3135-3165.
- [7] GAN Ting, MING Tingzhen, FANG Weijie, et al. Heat transfer enhancement of a microchannel heat sink with the combination of impinging jets, dimples, and side outlets[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2020, 141(1): 45-56.
- [8] PENG Ming, CHEN Li, JI Wentao, et al. Numerical study on flow and heat transfer in a multi-jet microchannel heat sink[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 157: 119982.
- [9] HOANG C H, RANGARAJAN S, KHALILI S, et al. Hybrid microchannel/multi-jet two-phase heat sink: a benchmark and geometry optimization study of commercial product[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, 169, 120920.
- [10] CUI H C, LAI X T, WU J F, et al. Overall numerical simulation and experimental study of a hybrid oblique-rib and submerged jet impingement/microchannel heat sink [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, 167: 120839.
- [11] 韩博. 自激励扫掠射流流动特性的数值研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2021.  
HAN Bo. Numerical study on flow characteristics of self-excited sweeping jet[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2021(in Chinese).
- [12] 甘婷. 高热流密度下复合型微通道散热器的性能研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2020.  
GAN Ting. Performance analysis of compound microchannel heat sink under high heat flux[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2020(in Chinese).
- [13] RAMAN G, RAGHU S. Cavity resonance suppression using miniature fluidic oscillators[J]. AIAA Journal, 2004, 42(12): 2608-2612.
- [14] RAMAN G, PACKIARAJAN S, PAPADOPOULOS G, et al. Jet thrust vectoring using a miniature fluidic oscillator[J]. The Aeronautical Journal, 2005, 109(1093): 129-138.
- [15] WU Yongjia, YU Shifeng, ZUO Lei. Large eddy simulation analysis of the heat transfer enhancement using self-oscillating fluidic oscillators[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 131: 463-471.
- [16] MOSAVATI M, BARRON R M, BALACHANDAR R. Characteristics of self-oscillating jets in a confined cavity[J]. Physics of Fluids, 2020, 32(11): 115103.
- [17] Mosavati M, Balachandar R, Barron M. R. CFD analysis of the near-field vortex dynamics in a confined square jet[C]. 5-6th Thermal and Fluids Engineering Conference, 2021: 169-176.
- [18] MING Tingzhen, WANG Zhiyi, LIAO Xiwang, et al. Unsteady RANS simulation of fluid dynamic and heat transfer in an oblique self-oscillating fluidic oscillator array[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, 177: 121515.
- [19] AMINZADEH M, KHADEM J, ZOLFAGHARI S A, et al. Numerical study of nozzle width effect on cooling performance of a turbulent impinging oscillating jet in a heated cavity[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2020, 118: 104899.
- [20] 耿铁, 李德群, 周华民, 等. 冲击射流换热数值模拟技术研究概述[J]. 航空制造技术, 2006, 49(2): 77-79.  
GENG Tie, LI Dequn, ZHOU Huamin, et al. Introduction of the study about numerical simulation of heat transfer with impinging jets[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2006, 49(2): 77-79(in Chinese).
- [21] 陈涛, 王桂莲, 吴永进, 等. 交错内肋微通道的流动和传热特性研究[J]. 热能动力工程, 2022, 37(9): 128-135.  
CHEN Tao, WANG Guilian, WU Yongjin, et al. Study on flow and heat transfer characteristics of microchannels with staggered internal ribs[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(9): 128-135(in Chinese).
- [22] BEJAN A. Entropy generation minimization: the new thermodynamics of finite-size devices and finite-time processes[J]. Journal of Applied Physics, 1996, 79(3): 1191-1218.
- [23] LIU W, JIA Huiqiang, LIU Zhichun, et al. The approach of minimum heat consumption and its applications in convective heat transfer optimization[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, 57(1): 389-396.
- [24] SUNG M K, MUDAWAR I. Single-phase and two-phase cooling using hybrid micro-channel/slot-jet module [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008, 51(15-16): 3825-3839.
- [25] GREGORY J, TOMAC M N. A review of fluidic oscillator development and application for flow control [C]//43rd AIAA Fluid Dynamics Conference. San Diego: AIAA, 2013: 2474.
- [26] ENGLAR R J. Overview of circulation control pneumatic aerodynamics: blown force and moment augmentation and modification as applied primarily to fixed-wing aircraft[M]//JONES G S, JOSLIN R D. Applications of Circulation Control Technology. Reston, VA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 2006: 23-68.



陈巨辉

在线出版日期: 2023-10-07。

收稿日期: 2023-05-24。

作者简介:

陈巨辉(1982), 女, 博士研究生, 教授, 博士生导师, 研究方向为流化床内两相流动与反应, chenjuhui@hrbust.edu.cn。

(编辑 张文鑫)