

合成双射流结合不同金属-水的微米流体的强化换热研究

于新莹,康 赢,罗振兵,邓 雄,程 盼*,王杨肖
(国防科技大学 空天科学学院,湖南 长沙 410073)

摘要:为提高临近空间飞行器电子设备系统散热能力,解决集成化、微型化电子设备芯片高热流密度的问题,针对合成双射流激励器、微米颗粒两相流及二者的结合开展换热性能的研究。对合成双射流激励器增强换热能力机理进行分析,并对合成双射流激励器与铜-水微米流体管内流动过程进行建模,运用单欧拉模型模拟分析五种颗粒体积分数对流体强化换热能力的影响,还对铜-水、氧化铜-水、氧化铝-水微米流体进行了数值模拟。结果显示:合成双射流激励器能增强流体换热能力,换热能力随微米颗粒体积分数的增加而提高;不同金属颗粒种类的两相流换热能力不同,随金属颗粒导热性能变化。当微米颗粒流体为颗粒体积分数为8%的铜颗粒时,开启合成双射流激励器后芯片温度由328.225 K降低至303.816 K。

关键词:合成双射流;微米流体;两相流;强化换热;数值模拟

中图分类号: O358;TK124 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2026)01-069-09

Enhanced heat transfer research by combining dual synthetic jets actuator with different metal-water micron fluids

YU Xinying, KANG Ying, LUO Zhenbing, DENG Xiong, CHENG Pan*, WANG Yangxiao
(College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: In order to improve the heat dissipation capacity of the electronic equipment system of the near space vehicle and solve the problem of high heat flux of integrated and miniaturized electronic devices, the heat transfer performance of the dual synthetic jets actuator, micron particle two-phase flow and their combination was studied. The mechanism of enhancing heat transfer capacity with dual synthetic jet actuator was studied and analyzed. The flow process of the dual synthetic jets actuator and Cu-water micron particle fluid in the tube was modeled, and the influence of five particle concentrations on the enhanced heat transfer capacity of the fluid was simulated by the single Euler model. Meanwhile, Cu-water, CuO-water and Al₂O₃-water micron particle fluids were simulated. The results show that the heat transfer capacity of fluid can be enhanced by the dual synthetic jets. The heat transfer capacity in-creases with the increase of micron particle concentration. The two-phase flow heat transfer capacity of different metal particles varies with the thermal conductivity of metal particles. When the micron particle fluid is a copper particle with a particle concentration of 8%, the chip temperature is reduced from 328.225 K to 303.816 K after the synthetic double-jet actuator is turned on.

Keywords: dual synthetic jets; micron fluids; two-phase flow; enhanced heat exchange; numerical simulation

随着各国对临近空间飞行器技术的研究,各类电子设备逐渐被广泛应用于飞行器。然而,一方面,临近空间环境特殊,空间外热流直接影响飞行器电子设备的工作性能,另一方面,随着电子设备朝向微型化、集成化的方向发展,电子芯片热流密度也越来越高。因此,急需一种高效的散热方

式满足电子元器件的散热需求。目前研究最广泛的微通道冷却技术是一种高效的散热技术。在其基础上结合微米颗粒流体,一方面能提高微通道内的强化换热能力,另一方面,其相较于纳米颗粒流体更环保。合成射流(synthetic jets, SJ)是一种基于旋涡运动的零质量射流^[1]。其利用合成射

收稿日期:2024-09-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(12472276);国家科技重大专项资助项目(J2019-III-0010-0054);结冰与防除冰重点实验室基金资助项目(IADL20220410);沈阳市飞机结冰与防除冰重点实验室基金资助项目(YL2022XF03)

第一作者:于新莹(2001—),女,河北承德人,硕士研究生,E-mail:yuxinying2001@163.com

*通信作者:程盼(1985—),男,湖北钟祥人,副教授,博士,硕士生导师,E-mail:chengpan1020@163.com

引用格式:于新莹,康赢,罗振兵,等.合成双射流结合不同金属-水的微米流体的强化换热研究[J].国防科技大学学报,2026,48(1):69-77.

Citation:YU X Y, KANG Y, LUO Z B, et al. Enhanced heat transfer research by combining dual synthetic jets actuator with different metal-water micron fluids[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2026, 48(1): 69-77.

流激励器产生能量、动量、尺度和频率可控的涡旋,作用于环境气流,使环境气流流动结构得以被控制^[2]。罗振兵等^[3-4]发展了合成双射流(dual synthetic jets, DSJ)及其流动控制技术,并且该技术具有环境适应性强、不需要提供额外质量流^[5-6]等特点,因此被广泛应用于热管理领域。综上,可通过将微通道、微米颗粒流体和合成双射流激励器三者结合进行强化换热研究。

20 世纪 90 年代,美国 Argonne 国家实验室的 Choi 等^[7]首次提出了崭新的概念——纳米流体,即将 1~100 nm 的金属或者非金属颗粒悬浮在基液中形成的稳定悬浮液^[8]。此后,研究人员展开了运用纳米流体进行强化换热的理论分析与实验研究。Hashimoto 等^[9]发现相较于基液,加入二氧化硅的纳米流体能显著增大换热能力,在相同流速下比乙二醇水溶液的传热效率高 10%。Go 等^[10]证明了纳米颗粒形成的层保持在热充分发展的区域,并且诱导了纳米流体传热能力的增强。王翠华等^[11]研究发现随着纳米流体浓度的增加,流体的传热系数增大,换热效果增强;相同浓度下随着雷诺数的增加,也有相似的变化趋势。随着研究机理的揭示,研究人员聚焦于将颗粒两相流体与其他主被动控制方式结合研究。王凯等^[12]采用铜-水纳米流体射流强化其内部流体换热,发现纳米流体体积分数越大,扰动效果越强;与纯水射流相比,加入纳米流体射流后夹套换热壁面平均传热系数显著提高。孙斌等^[13]研究发现对于添加了纳米流体的冲击射流冷却系统,换热效率得到显著提高。陆威等^[14]使用波节换热管结合纳米两相流,换热能力提升 1.4~2.2 倍。

纳米流体因其颗粒直径较小而被广泛关注,Hashimoto 等^[15]研究发现,随着颗粒数密度的增加,颗粒直径减小,较小的颗粒比较大的颗粒对强化传热的贡献更大。颗粒粒径偏小时,容易发生团聚效应。Turkylmazoglu^[16]研究发现,速度场会受到纳米颗粒体积分数 ϕ 的影响。综上,纳米颗粒体积分数的增加,在带来更好换热性能的同时,也会带来更严重的团聚效应,因此,微米流体的加入能否平衡这类问题成为研究方向之一。

合成射流作为一种主动射流控制方式深受国内外学者关注,其在热方面的应用也备受国内外学者关注。Gil 等^[17]观察到合成射流冷却自由对流和强制对流的分界线,并观察到驻点传热系数在共振频率处的局部最大值。Talapati 等^[18]获得了最大局部努塞特数与雷诺数的关联式,并发现局部努塞特数在激励频率达到 200 Hz 时增加,超

过 200 Hz 后减小,并在射流到平板距离为射流孔径 2 倍时达到最大值。Kumari 等^[19]通过模拟找出使传热速率最大的湍流壁面射流最佳振幅和频率,发现对于每个频率,平均努塞特数与振幅呈现二次关系。振幅和频率的进一步增加增大了回流区,从而降低了传热速率。吕晨等^[20]研究了合成双射流激励器对电脑显卡的散热特性;郑穆等^[21]对合成双射流与小型复合结构翅片进行组合散热以研究其参数影响;董昭锋等^[22]基于合成双射流对三氧化二铝纳米流体进行数值研究,分析其强化机理。

综上,将合成双射流技术和微通道技术结合传统液冷散热技术能够取得更为优越的传热性能。在其基础上增加微米颗粒流技术,既可以通过微米颗粒流加强流体的对流换热和导热能力,又不显著增加通道的压降,还可以通过合成双射流与来流相互作用,减少微米颗粒的沉积,增强流体掺混,提高流体的对流换热能力。最终达到提高整个换热装置的综合性能,从而节能减排的目的。因此,本文在合成双射流微通道液冷散热技术的基础上增加不同金属-水的微米流体,并改变微米流体的颗粒种类、颗粒体积分数以通过数值模拟的方法研究其散热特性。

1 模型介绍及验证

1.1 合成双射流激励器模型建立与验证

为降低复杂程度,初步对合成双射流降温效果进行研究,本文忽略展向换热影响,对具有对称结构的物理模型进行二维简化,进行流场换热机理研究。建立二维合成双射流激励器、直径为 2 mm 的微通道和芯片相结合的计算域模型。其中,激励器腔体尺寸为 43 mm × 6 mm,设置 4 mm × 2 mm 的双射流出口,间距为 4.25 mm。芯片布置于微通道之上的中间位置,忽略芯片厚度影响,根据侧视图将其简化为一条长度为 10 mm 的线段。进而生成结构网格并在模型需要加密的地方进行调整,设置第一层网格厚度为 0.01 mm。最后生成总数为 121 020 的网格。模型尺寸如图 1 所示,生成的网格如图 2 所示。

应用仿真软件进行数值模拟计算。流体视为连续介质、不可压缩、无内热源流体,环境为二维对流传热,湍流模型选用剪切应力输运(shear stress transport, SST) $k-\omega$ 模型,开启能量方程。为简化计算,激励器腔体内压电振子处边界条件等效设置为左右两个速度入口。速度呈正弦周期性波动,相位差为 180°。合成双射流激励器为 30 Hz。

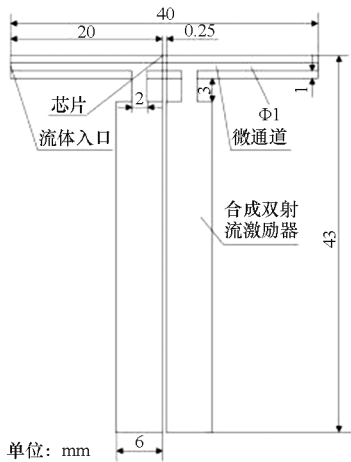


图 1 合成双射流激励器与微米两相流结合模型
Fig. 1 Model of DSJ and micron two-phases flow

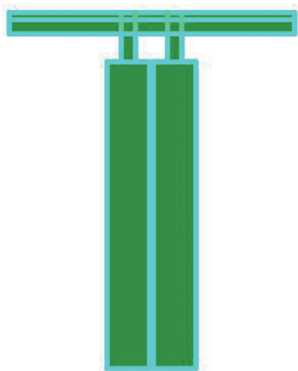


图 2 合成双射流激励器与微米两相流结合网格
Fig. 2 Grid of DSJ and micron two-phases flow

通过用户自定义函数设置速度入口分别为:

$$\begin{cases} v_1 = A_m \sin(2\pi f) \\ v_2 = A_m \sin(2\pi f + \pi) \end{cases} \quad (1)$$

其中: v_1, v_2 均为入口速度; A_m 为激励器等效振幅; f 为激励器频率。

微通道流体域入口设置为速度入口,速度为 $0.02 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,流体域出口设置为压力出口,其余均设置为壁面,壁面材料为铜。内部设置为流体域,流体为含不同体积分数/粒径的微米颗粒流体,固体材料为铜。初始温度为 300 K ,芯片散热量为 $100\,000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。设置流体域与管壁固体域系统自动耦合。激励器计算 200 个周期。设置完毕后进行计算。

对于不同体积分数/粒径大小的微米颗粒流体,在单欧拉模型的基础上,将颗粒与溶液视为一个整体,针对其物性参数进行计算。其密度、比热和黏度的公式参考文献[11]计算。

颗粒流体密度:

$$\rho_m = (1 - \varphi)\rho_f + \varphi\rho_p \quad (2)$$

颗粒流体比热:

$$(\rho C_s)_m = (1 - \varphi)(\rho C_s)_f + \varphi(\rho C_s)_p \quad (3)$$

颗粒流体黏度:

$$\mu_m = \frac{\mu_f}{(1 - \varphi)^{2.5}} \quad \varphi > 2\% \quad (4)$$

其中, m, f, p 分别代表流体、溶液、微米颗粒, ρ 为密度, φ 为微米颗粒体积分数, μ 为黏度, C_s 为流体/固体比热。

颗粒流体导热系数参考文献[23]计算。

$$k_m = \frac{k_p + 2k_f - 2(k_f - k_p)\varphi}{k_p + 2k_f + 2(k_f - k_p)\varphi} k_f + 5 \times 10^4 \beta \varphi \rho_f (C_p)_f \sqrt{\frac{kT}{\rho_p d_p}} f(T, \varphi) \quad (5)$$

式中: β 为随颗粒运动的液体体积的分数,取 0.01 ; k 为玻耳兹曼常数,取 $1.380\,7 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ 。函数 $f(T, \varphi)$ [17] 计算公式为:

$$f(T, \varphi) = (2.821\,7 \times 10^{-2} \varphi + 3.917 \times 10^{-3}) \frac{T}{T_0} + (-3.066\,9 \times 10^{-2} \varphi - 3.011\,23 \times 10^{-3}) \quad (6)$$

式中: T 为流体温度; T_0 为参考温度,取 273 K 。

计算其密度、比热容、导热系数与黏度等参数后,在数值仿真软件中创建新流体并在流体域中进行相应选择设置,而后进行计算。

初步选用铜颗粒[24]作为微米颗粒,并将其与水配备为微米流体。铜颗粒密度为 $8\,940 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,比热为 $386 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$,颗粒导热系数为 $398 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

不同颗粒种类、体积分数微米流体热物理参数如表 1、表 2 所示。

表 1 不同颗粒种类颗粒微米流体热物理参数 [25-27]

Tab. 1 Micro particle fluid physical parameters of different particle kinds [25-27]

颗粒种类	$\rho/$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	$C_s/$ ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	$k_m/$ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	$\mu/$ ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
Cu	996.450	4 176.700	0.612	8.62×10^{-4}
CuO	1 436.734	2 860.462	0.728	1.06×10^{-3}
Al ₂ O ₃	1 234.334	3 298.853	0.729	1.06×10^{-3}

1.2 网格无关性验证

为保证数据准确性,消除网格对于数据的影响,在网格生成之后,对网格无关性进行了验证。选取网格密度为稀疏、适中、较密三种情况对微米两相流状态下的芯片温度进行稳态模拟。网格无关性验证结果如表 3 所示。

表 2 不同体积分数铜颗粒微米流体热物理参数

Tab.2 Micro particle fluid physical parameters of copper particles with different concentrations

体积 分数/ %	$\rho/$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	$C_s/$ ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	$k_m/$ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	$\mu/$ ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
0	996.450	4 176.700	0.612	8.62×10^{-4}
2	1 155.321	3 590.043	0.680	9.07×10^{-4}
4	1 314.192	3 145.226	0.726	9.55×10^{-4}
6	1 473.063	2 796.357	0.751	1.01×10^{-3}
8	1 631.934	2 515.414	0.755	1.06×10^{-3}

表 3 网格无关性验证结果

Tab.3 Grid independence verification results

网格密度	网格数量	芯片温度/K
稀疏	72 192	328.221
适中	97 423	328.225
较密	121 020	328.225

由表 3 可得,随着网格数量的增加,芯片温度基本无变化。为保证计算精度,选择较密网格进行后续模拟。

1.3 模型验证

为保证模拟可靠性,将算例中的数学模型验证与贾芳芳等^[28]的实验进行对比。选取水和氧化铝纳米流体进行模拟。比较不同雷诺数下圆管的内壁温度,对比结果如图 3 所示,最大误差为 20.49%。最大误差出现在雷诺数为 2 300 时的氧化铝工况。其余误差均在 20% 以下。这是因为模拟时模型设计为二维模型,且实验设计、纳米流体的配置均存在误差。整体温度降低趋势与实验吻合较好,验证了本方法的可行性。

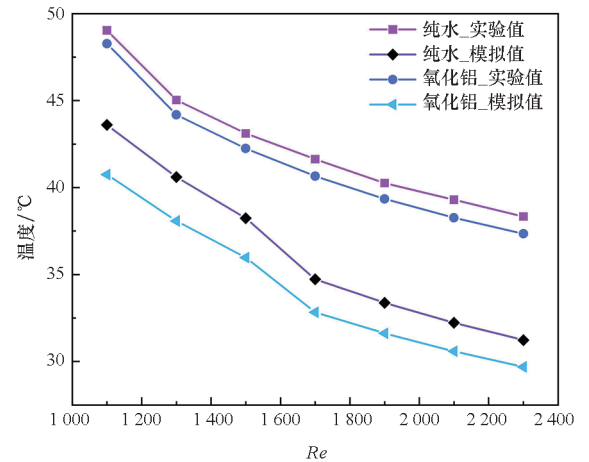
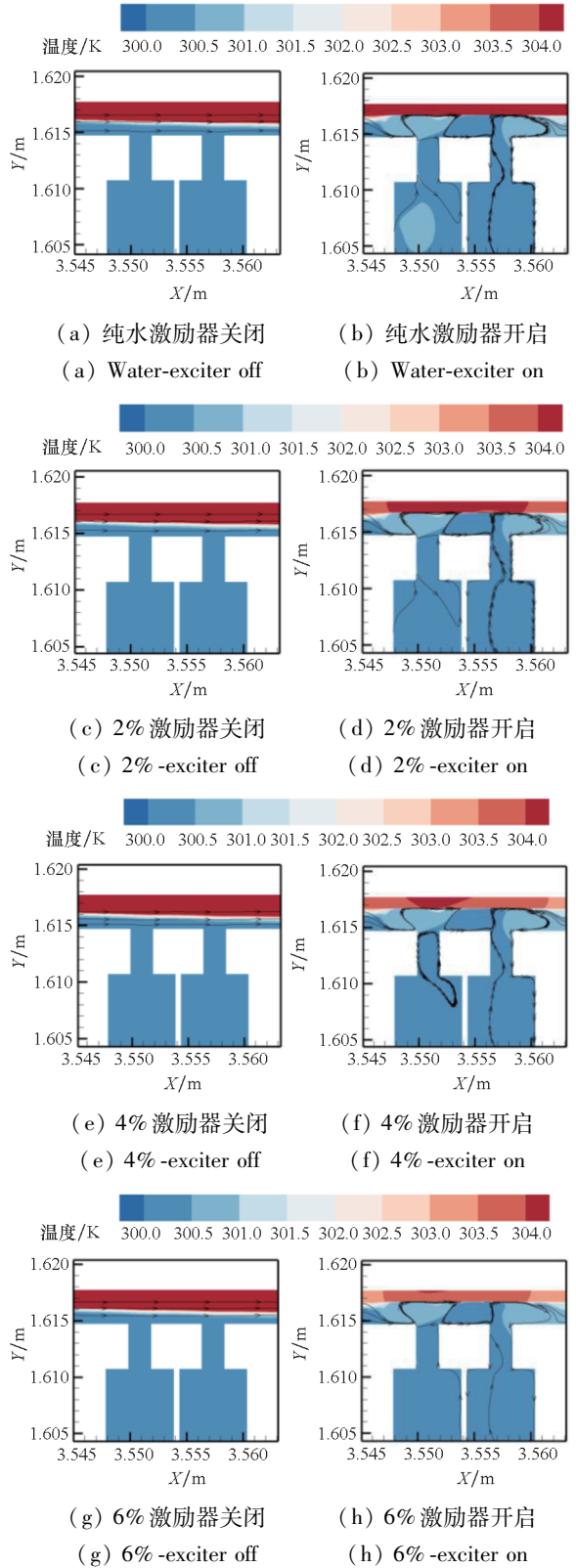


图 3 模型验证对比
Fig.3 Comparison of model validation

2 结果与讨论

2.1 合成双射流激励器对强化换热能力的影响

针对合成双射流激励器的散热效果进行了对比研究,分别设置了不同工况下激励器开、闭两种情况,并对其各自芯片温度变化进行监测,结果如图 4 所示。



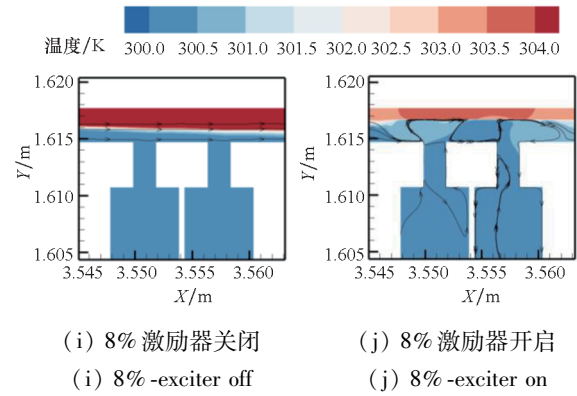


图 4 不同工况下激励器状态温度云图

Fig.4 Temperature contour of driver state under different working conditions

取流体为纯水,由图 4 可知,激励器开启时温度模型上壁面温度存在显著降低。由流线可明显观测激励器造成的流场扰动。在条件相同的前提下,关闭合成双射流激励器的芯片温度为 331.62 K,而同种情况下开启合成双射流激励器的芯片温度降为 304.83 K,即合成双射流使 26.79 K 芯片温度降低了,使原管道换热能力提升 8.08%。

表 4 为不同工况下激励器开闭情况下的芯片温度,激励器开启整体温度均低于激励器关闭,表明激励器具有增强换热能力,降低芯片温度的效果。图 5 为开启合成双射流激励器时一周期内流场速度分布云图与流线图。在 $0T \sim 0.25T$ 时,左侧腔体向流体管道内部吹出流体,右侧腔体向流体管道内部吸入流体,且速度逐渐增大,直至 $0.25T$ 时刻达到最大值,出入口均有明显涡对形成;在 $0.25T \sim 0.5T$ 时,速度方向保持不变,速度大小逐渐减小,激励器左右两侧腔体吹吸状态不变,吹吸强度变小,直至 $0.5T$ 时刻速度绝对值达

表 4 不同工况下激励器芯片温度

Tab.4 Temperature of driver chip under different working conditions				
工况	激励器 开启温 度/K	激励器 关闭温 度/K	温降/K	效率/%
纯水	304.833	331.624	26.791	8.079
Cu_2%	304.35	329.838	25.488	7.727
Cu_4%	304.06	328.795	24.735	7.523
Cu_6%	303.898	328.285	24.387	7.429
Cu_8%	303.816	328.225	24.409	7.437
CuO_8%	304.086	328.805	24.719	7.518
Al ₂ O ₃ _8%	304.329	328.884	24.555	7.466

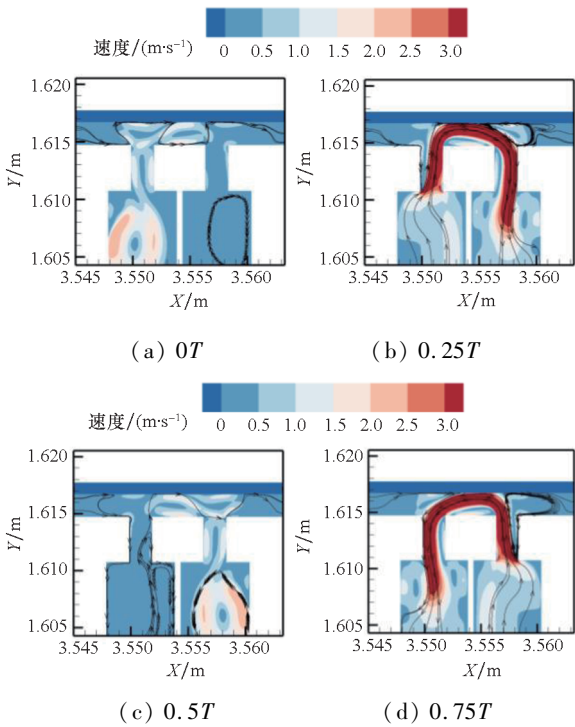


图 5 一周期内流场速度分布云图与流线图

Fig.5 Flow field velocity distribution cloud map and flow diagram within one cycle

到最小;在 $0.5T \sim 0.75T$ 时,右侧腔体向流体管道内部吹出流体,左侧腔体向流体管道内部吸入流体,速度逐渐反向增大,在 $0.75T$ 时刻达到反向最大;在 $0.75T \sim 1T$ 时,速度逐渐减小,至 $1T$ 时达到最小,此周期吹吸过程结束,下一周期开始。

合成双射流激励器由单膜双腔构成,激励器内膜片的振动导致腔体内压强改变,腔体内气体被同时挤压和吸入。其对流体的反复吹吸导致原本管内自左向右的流体扰动增大,由流线图可知,微通道中出现的涡结构增加了流体与颗粒的运动速度,但延长了其脱离散热区域的时间,增加了管内流体与管壁的对流换热能力,进而导致芯片温度降低。综上,合成双射流激励器通过增加流体内部扰动进而提高了管内流体的换热能力。

2.2 颗粒两相流体积分数对强化换热能力的影响

微米颗粒体积分数,是微米颗粒流体的重要参数之一。因此在合成双射流激励器开启的基础上,保持其他参数不变,在水中加入不同数量的微米颗粒,并对芯片温度进行监测分析,结果如图 6 所示。

对于无合成双射流工作的情况,在纯水、微米颗粒体积分数为 2%、4%、6%、8% 五种工况下芯片温度分别为 331.624 K、329.838 K、328.795 K、

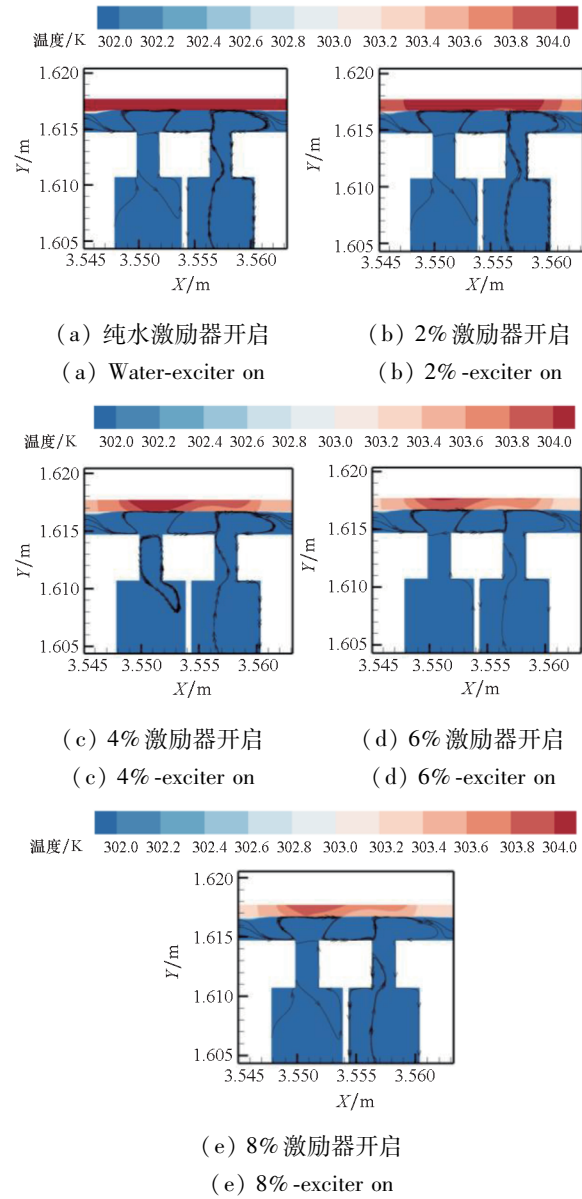


图 6 不同体积分数微米颗粒流体芯片温度云图

Fig. 6 Temperature cloud image of fluid chip with different micron particle concentrations

328.285 K、328.225 K。图 7 为微米颗粒体积分数与芯片温度图。由图 7 可知,随着微米颗粒体积分数的增大,芯片温度呈下降趋势,即在算例情况下,流体换热能力随微米颗粒体积分数的增大而增大。相较于纯水情况,添加微米颗粒使其换热能力分别增加 0.539%、0.853%、1.007%、1.025%。

对于有合成双射流激励器工作的情况,由图 7 可得,当流体为纯水、合成双射流激励器吹吸 90 个周期时,芯片温度为 304.833 K,在微米颗粒体积分数分别为 2%、4%、6%、8% 时,激励器工作 90 个周期时,芯片温度分别为 304.35 K、304.06 K、303.898 K、303.816 K,换热能力分别增加 0.158%、0.254%、0.307%、0.334%。由此可

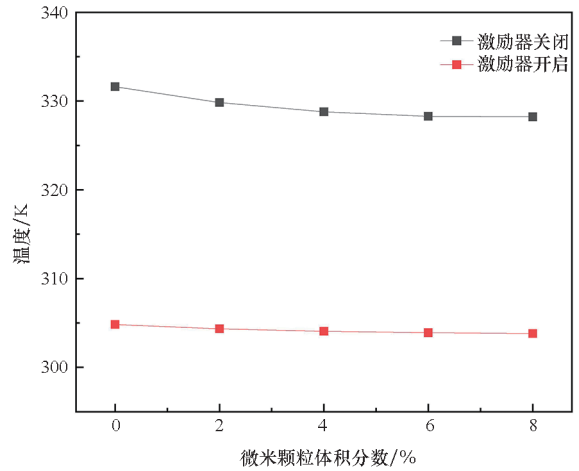


图 7 微米颗粒体积分数与芯片温度图

Fig. 7 Micron particle concentration and chip temperature diagram

见,随着微米颗粒体积分数的增加,芯片温度呈下降趋势,即流体换热能力逐渐增大。且合成双射流激励器的增加提升了原管道与流体之间的对流换热能力。

流体中增加金属微米颗粒时,一方面金属换热能力大于流体,双介质的存在增加了流体换热能力,另一方面,双介质的布朗运动导致金属离子运动,多介质运动增加原流体之间的扰动。微米颗粒体积分数增加代表同量溶液中微米颗粒数量的增加。微米颗粒数量的增加使得微米颗粒的无规则运动加剧,进而增加微米颗粒与壁面、流体之间的换热能力,最终导致管道流体对芯片的散热效果增强。综上,合成双射流与微米颗粒两相流相结合能提高流体换热能力,且在算例条件下,微米颗粒体积分数与换热能力呈正相关趋势。

2.3 颗粒两相流颗粒种类对强化换热能力的影响

在前一模拟的基础上,控制微米流体颗粒体积分数不变,改变微米颗粒种类,使其分别为氧化铜、氧化铝,并分别对含有不同金属颗粒种类的微米颗粒流体热导率进行计算,对芯片温度进行监测分析,结果如图 8 所示。图 9 为不同颗粒种类微米颗粒流体芯片温度云图。

对于无合成双射流工作的情况,微米颗粒种类分别为铜、氧化铜、氧化铝,所测得芯片温度分别为 328.225 K、328.805 K、328.884 K。由图 8 可知,不同颗粒种类对流体换热能力的增强效果不同。相较于纯水,分别使温度降低 3.399 K、2.819 K、2.740 K。铜颗粒导热系数最高,相应制备为微米颗粒两相流时换热能力最强。氧化铜与

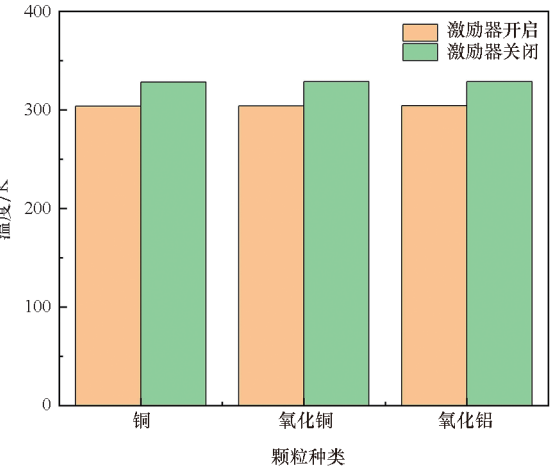


图 8 不同颗粒种类微米颗粒流体芯片温度
Fig.8 Microfluidic particle fluid chip temperature with different particle types

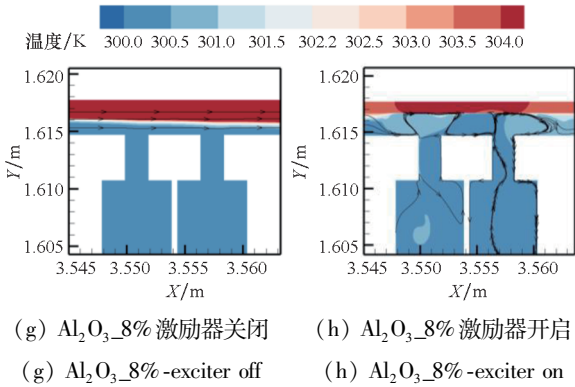
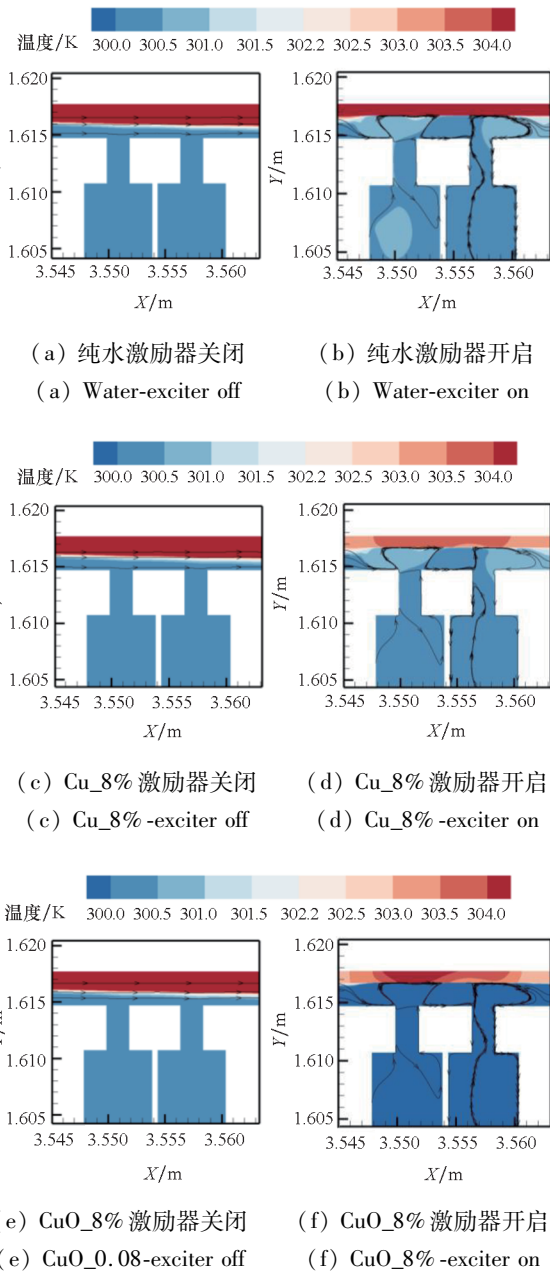


图 9 不同颗粒种类微米颗粒流体芯片温度云图
Fig.9 Temperature cloud image of micrometer particle fluid chip with different particle species

氧化铝为氧化物并非纯金属颗粒,导热能力相对较差。

对于有合成双射流激励器工作的情况,由图 9 可得,当颗粒体积分数为 8%、合成双射流激励器吹吸 90 个周期时,铜颗粒芯片温度为 303.816 K,降温效果最好。当微米颗粒种类分别为氧化铜和氧化铝时,激励器工作 90 个周期时,芯片温度分别为 304.086 K、304.329 K,起到降温作用。相较于激励器关闭时的纯水情况,微米颗粒种类为铜、氧化铜、氧化铝时的换热能力分别提高 1.036%、0.857%、0.833%;相较于激励器开启时的纯水情况,三者换热能力分别提高 0.335%、0.246%、0.166%。

由此可见,微米颗粒的存在能提高原流体的换热能力,不同颗粒种类的微米流体换热能力与颗粒的导热能力成正比,金属颗粒相较于金属氧化物颗粒换热能力较好,但金属氧化物使用寿命相较于金属颗粒长。且上述结果再次印证合成双射流激励器的开启提升了原管道与流体之间的对流换热能力。

3 结论

本文开展了合成双射流激励器与微米颗粒两相流结合的换热性能研究。运用单欧拉模型对其工作情况进行稳态和瞬态模拟,分析芯片温度变化情况和流场内部速度变化情况,并运用控制变量的方法深入研究微米流体参数与微米颗粒种类对换热能力的影响情况。主要研究结论如下:

合成双射流激励器结合微米两相流颗粒的换热性能随微米颗粒流体颗粒体积分数的增加而提高。微米颗粒两相流种类为铜、体积分数为 8% 时换热性能最好,开启合成双射流激励器,芯片温度

由 328.225 K 降低至 303.816 K, 换热能力提高 7.437%; 相较于纯水, 芯片温度降低 1.017 K, 换热能力提升 0.335%。

微米两相流颗粒换热性能随微米颗粒种类的不同而不同。与金属颗粒导热性能呈正相关。选取铜颗粒、氧化铜颗粒、氧化铝颗粒体积分数为 8% 进行计算, 均有一定降温能力。其中铜颗粒换热能力最强。在本文中, 温度降低程度为 24.409 K, 将芯片温度由 328.225 K 降低至 303.816 K, 接近静态非工作条件下芯片温度。根据阿伦尼乌兹公式计算, 芯片温度每升高 10 ℃, 其运行寿命减半^[28]。从温度降幅来看, 本研究具有一定的工程应用前景。

合成双射流与微米颗粒两相流相结合情况下, 合成双射流因增强了流体扰动与分子之间的运动而导致对流换热能力大幅度提升; 颗粒参数的变化也具有一定降温效果, 但降幅有限。

致谢

本次工作离不开国防科技大学空天科学学院主动流动控制和热管理教研室老师的指导, 特此致谢!

参考文献 (References)

[1] 罗振兵, 夏智勋. 合成射流技术及其在流动控制中应用的进展[J]. 力学进展, 2005, 35(2): 221 - 234.
LUO Z B, XIA Z X. Advances in synthetic jet technology and applications in flow control [J]. Advances in Mechanics, 2005, 35(2): 221 - 234. (in Chinese)

[2] 刘贺, 董金钟, 伍耐明, 等. 合成射流激励器控制喷管矢量研究[J]. 航空动力学报, 2009, 24(12): 2748 - 2755.
LIU H, DONG J Z, WU N M, et al. Investigation of nozzle vector control using synthetic jet actuator [J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24 (12): 2748 - 2755. (in Chinese)

[3] 罗振兵, 夏智勋, 方丁酉, 等. 合成射流影响因素[J]. 国防科技大学学报, 2002, 24(3): 32 - 35.
LUO Z B, XIA Z X, FANG D Y, et al. The factors influencing the synthetic jet [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2002, 24 (3): 32 - 35. (in Chinese)

[4] 罗振兵, 夏智勋, 邓雄, 等. 合成双射流及其流动控制技术进展[J]. 空气动力学报, 2017, 35(2): 252 - 264.
LUO Z B, XIA Z X, DENG X, et al. Research progress of dual synthetic jets and its flow control technology [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2017, 35 (2): 252 - 264. (in Chinese)

[5] 邓雄, 夏智勋, 罗振兵, 等. 合成双射流矢量特性影响因素分析[J]. 推进技术, 2014, 35(8): 1131 - 1138.
DENG X, XIA Z X, LUO Z B, et al. Analysis of impact factors on vectoring characteristic of dual synthetic jet actuator [J]. Journal of Propulsion Technology, 2014, 35(8): 1131 - 1138. (in Chinese)

[6] 向立平, 夏智勋, 罗振兵, 等. 合成射流流动与传热特征的数值模拟[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2015, 30(1): 36 - 40.
XIANG L P, XIA Z X, LUO Z B, et al. Numerical study on flow and heat transfer characteristics of synthetic jets [J]. Journal of Hunan University of Science & Technology (Natural Science Edition), 2015, 30(1): 36 - 40. (in Chinese)

[7] CHOI S U S, EASTMAN J A. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles [C]//Proceedings of ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition, 1995.

[8] 闫佳, 夏国栋, 马丹丹. 银铜合金纳米流体的热物性影响因素分析[J]. 工程热物理论, 2023, 44 (1): 131 - 136.
YAN J, XIA G D, MA D D. Analysis of influencing factors on thermophysical properties of silver copper alloy nanofluids [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2023, 44(1): 131 - 136. (in Chinese)

[9] HASHIMOTO S, HARADA M, HIGUCHI Y, et al. Enhancement mechanism of convective heat transfer via nanofluid: an analysis by means of synchrotron radiation imaging [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 159: 120081.

[10] GO E M, SHIN E, SON C, et al. Theoretical study on enhancement of heat transfer of nanofluids with functionalized graphene flakes in confined nanopipe system [J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2023, 119: 395 - 403.

[11] 王翠华, 张文权, 荣铎, 等. 圆管内纳米流体层流流动及强化传热的数值研究[J]. 辽宁化工, 2022, 51 (8): 1037 - 1039, 1097.
WANG C H, ZHANG W Q, RONG D, et al. Numerical study on laminar flow of nanofluids in circular tubes and enhanced heat transfer [J]. Liaoning Chemical Industry, 2022, 51(8): 1037 - 1039, 1097. (in Chinese)

[12] 王凯, 蒯美旭, 赵玉荣, 等. Cu - H₂O 纳米流体流动与强化换热的数值模拟研究[J]. 节能, 2021, 40 (1): 21 - 23, 27.
WANG K, LIN M X, ZHAO Y R, et al. Numerical study of flow and enhanced heat transfer of Cu - H₂O nanofluid [J]. Energy Conservation, 2021, 40 (1): 21 - 23, 27. (in Chinese)

[13] 孙斌, 曲艺. Al - 水纳米流体冲击射流流动换热特性研究[J]. 东北电力大学学报, 2017, 37(4): 67 - 73.
SUN B, QU Y. Experimental research on heat transfer and flow characteristics of impinging jet with Al nanofluids [J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2017, 37(4): 67 - 73. (in Chinese)

[14] 陆威, 张学文, 吴志根, 等. 波节换热管内纳米流体传热与流动实验研究[J]. 热能动力工程, 2024, 39 (6): 107 - 112, 122.
LU W, ZHANG X W, WU Z G, et al. Experimental study on heat transfer and flow of nanofluids in corrugated tube [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2024, 39(6): 107 - 112, 122. (in Chinese)

[15] HASHIMOTO S, KURAZONO K, YAMAUCHI T. Anomalous enhancement of convective heat transfer with dispersed SiO₂ particles in ethylene glycol/water nanofluid [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 150: 119302.

[16] TURKYILMAZOGLU M. Flow of nanofluid plane wall jet and

heat transfer[J]. European Journal of Mechanics-B/Fluids, 2016, 59: 18-24.

[17] GIL P, WILK J. Heat transfer coefficients during the impingement cooling with the use of synthetic jet[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2020, 147: 106132.

[18] TALAPATI R J, KATTI V V, HIREMATH N S. Local heat transfer characteristics of synthetic air jet impinging on a smooth convex surface[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2021, 170: 107143.

[19] KUMARI A, KUMAR A. Effect of frequency of the wavy wall on turbulent wall jet heat transfer characteristics[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2023, 185: 108013.

[20] 吕晨, 曹泽宇, 马瑶, 等. 合成双射流激励器对电脑显卡的散热特性研究[J]. 科学技术创新, 2022(2): 73-76.
LYU C, CAO Z Y, MA Y, et al. Experimental investigation on heat dissipation for graphic card of computer using dual synthetic jets actuator[J]. Scientific and Technological Innovation, 2022(2): 73-76. (in Chinese)

[21] 郑穆, 罗振兵, 邓雄, 等. 合成双射流与小型复合结构翅片组合散热参数影响[J]. 气体物理, 2022, 7(3): 27-37.
ZHENG M, LUO Z B, DENG X, et al. Parameter influence on combined heat dissipation of dual synthetic jets and small composite fins[J]. Physics of Gases, 2022, 7(3): 27-37. (in Chinese)

[22] 董昭锋, 邓雄, 罗振兵, 等. 基于合成双射流的 Al_2O_3 纳米流体散热数值研究[J]. 空气动力学学报, 2024, 42(8): 10-22.
DONG Z F, DENG X, LUO Z B, et al. Numerical investigation on heat dissipation of Al_2O_3 nanofluid based on dual synthetic jets[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2024, 42(8): 10-22. (in Chinese)

[23] VAJJHA R S, DAS D K, NAMBURU P K. Numerical study of fluid dynamic and heat transfer performance of Al_2O_3 and CuO nanofluids in the flat tubes of a radiator[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2010, 31(4): 613-621.

[24] 王涛, 金伟娅, 高增梁, 等. 管内 Cu-水微米颗粒流湍流强化传热研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(5): 108-113.
WANG T, JIN W Y, GAO Z L, et al. Turbulent flow and enhanced heat transfer induced by Cu-water microfluid in tube[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(5): 108-113. (in Chinese)

[25] 贾壮壮. Al_2O_3 -CuO/ H_2O 纳米流体传热实验研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2020.
JIA Z Z. Experimental study of heat transfer in Al_2O_3 -CuO/ H_2O nanofluid heat transfer experiment research[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2020. (in Chinese)

[26] 王涛. 微米颗粒多相流强化换热机理及影响规律研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2020.
WANG T. Study on the mechanism and influence law of heat transfer enhancement of microparticle multiphase flow[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2020. (in Chinese)

[27] MOHAMMADPOUR J, SALEHI F, LEE A, et al. Nanofluid heat transfer in a microchannel heat sink with multiple synthetic jets and protrusions[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2022, 179: 107642.

[28] 贾芳芳, 潘加飞, 纪书明, 等. 阿伦尼乌兹方程在铅酸蓄电池寿命计算中的使用研究[J]. 蓄电池, 2020, 57(5): 232-234, 239.
JIA F F, PAN J F, JI S M, et al. Study on the application of Arrhenius equation in the life calculation of lead-acid battery[J]. Chinese LABAT Man, 2020, 57(5): 232-234, 239. (in Chinese)