

文章编号: 1000-8055(2010)02-0295-07

加速度环境下涡旋微槽传热特性实验

杨 晟, 余建祖, 高红霞, 席有民

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191)

摘 要: 对矩形截面涡旋微槽试件在过载加速度环境下的传热特性进行了实验研究, 所用工质为体积分数为 30 % 的乙二醇水溶液, 并由离心式恒加速度试验机为试件提供离心力来模拟所需的过载加速度环境。通过实验对不同工质流量、不同加热功率下的涡旋微槽在不同加速度条件下的传热性能进行了考察, 分析了加速度环境对其传热特性的影响。结果表明: 加速度方向对其传热特性有着决定性的影响, 且 Dean 数越大, 涡旋微槽适应过载加速度对其传热特性的影响的能力则越强。

关 键 词: 传热特性; 涡旋微槽; 加速度环境; 离心力

中图分类号: V434⁺.14

文献标识码: A

Experiments of heat transfer characteristics for swirl microchannel under acceleration environment

YANG Sheng, YU Jian-zu, GAO Hong-xia, XI You-min

(School of Aeronautic Science and Engineering,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: The experiment of heat transfer characteristics in rectangular cross section swirl microchannel test pieces under acceleration environment was conducted with ethylene glycol solution of 30 % (volume concentration), and the acceleration environment was simulated in test by centrifugal acceleration test machine. Heat transfer characteristics of swirl microchannel under different acceleration environment situations were investigated with various conditions of fluid flux and heating power, and the influencing factors were analyzed. The results show that, the acceleration direction has significant effect on the heat transfer of swirl microchannels, and the ability of swirl microchannel against the influence is as larger as the Dean number get higher.

Key words: heat transfer characteristics; swirl microchannel; acceleration environment; centrifugal force

航空电子设备在现代航空航天技术的发展中起着举足轻重的作用, 而高速发展的航空电子技术, 给有效冷却电子元器件, 保证其可靠工作带来了严峻挑战。使用液体工质的微槽散热器具有结构简单、体积小、可直接作用于毫米甚至微米级热源、换热效率高等特点, 为解决高热流密度电子设

备散热提供了一条新思路。为了深入认识微槽流动与传热特性, 人们已进行了大量实验及理论研究^[1-2]。

在飞行器做机动飞行时, 常规的平直微槽散热器将处于过载加速度环境下, 液体的力学特征变化会造成液体冷却剂脱离散热面而使电子元器

收稿日期: 2009-02-11; 修订日期: 2009-06-29

基金项目: 国家自然科学基金(50676007)

作者简介: 杨晟(1984 -), 男, 湖南岳阳人, 博士生, 主要从事工程热物理传热传质研究。

件过热损坏.为了进一步强化传热以及适应航空电子设备在过载加速度环境下的散热要求,文献[3]提出涡旋微槽的散热结构,并对其在重力场下的传热特性进行了实验研究.

涡旋微槽是指槽道沿流动方向为涡旋状的微槽.由于沿流动方向,微槽壁面的曲率不断变化,流体在流动过程中受到离心力的作用,将使流体流动结构发生变化,从而导致涡旋微槽与平直微槽中的流动和传热特性产生很大的不同:一方面涡旋微槽具有更强的传热能力;另一方面涡旋微槽还具有适应航空电子设备在飞行器做机动飞行时散热条件恶化的潜力.因此,本文采用恒加速度离心机对涡旋微槽在加速度环境下的传热特性进行了模拟实验研究,考察了涡旋微槽在不同加速度大小和方向下的传热特性,为涡旋微槽散热器的设计和实际应用提供理论依据和技术支撑.

1 加速度环境涡旋微槽实验系统

1.1 涡旋微槽试件结构

涡旋微槽结构如图 1 所示,在紫铜基板上由微细加工技术加工得到 6 个矩形截面涡旋微槽道,图 1 中所示 X 和 Y 方向即为所施加加速度方向,沿平面法线向外为 Z 正向,向内为 Z 负向.表 1 为 3 种规格的涡旋微槽道的几何尺寸.图 2 为涡旋微槽试件的结构示意图,其中液体工质从进口管流入,沿微槽道向内涡旋状流动四圈后从涡旋微槽道中心处流出,如图 2 所示,涡旋槽基板与盖板之间采用聚四氟乙烯薄膜密封,以防止液体工质在槽道间窜流.进出口管侧安装有温度传感器直接与液体接触,用以测量液体工质的进出口

温度.涡旋槽基板侧面距槽底 1.5 mm 处开有 8 个小孔(每个侧面 2 个孔),均安装有用以测量涡旋槽壁面温度的温度传感器.

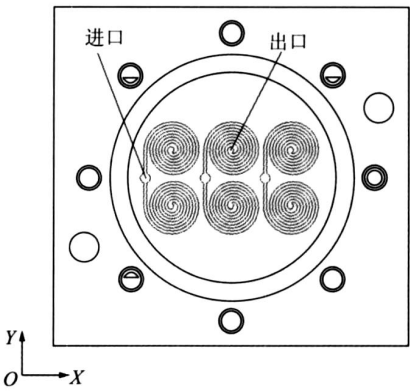


图 1 涡旋微槽结构和加速度方向示意图

Fig. 1 Swirl microchannel structure

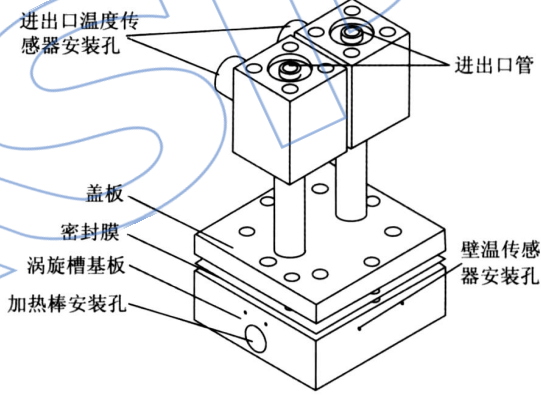


图 2 涡旋微槽试件示意图

Fig. 2 Swirl microchannel test pieces structure

表 1 涡旋微槽道的几何尺寸

Table 1 Physical dimensions of microchannel test pieces

试件	基圆直径 D_0 /mm	槽宽 W_c /mm	间壁 W_b /mm	槽深 H /mm	深宽比 γ	水力直径 d_h /mm	槽数 N
No. 1	0.7	0.5	0.3	1.0	2	0.4	6
No. 2	0.7	0.5	0.3	1.5	3	0.45	6
No. 3	0.7	0.5	0.3	2.0	4	0.48	6

1.2 加速度环境实验装置

加速度环境涡旋微槽实验装置如图 3 所示.实验系统由工质循环与冷却子系统、恒加速度试验机、微槽试件及其加热系统、数据测量系统等组成.实验中液体工质选用体积分数为 30 % 的乙二醇水溶液.工质从恒温水槽中流出,经泵提高压力后分

出一路,流入安装在离心机悬臂上的试件中,流量由微量调节阀所控制,并由金属管浮子流量计 L ZD-15 所测量.工质在涡旋槽进出口处的温度由探头直径为 1 mm 的 K 型热电偶所测量,涡旋槽壁面温度由在槽下方布置的直径为 0.5 mm,精度为 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的热电偶探头所测量.测量信号经

HP34970A 高速数据采集系统传输到计算机中.由两根直径 6 mm 的加热棒为试件提供恒热流密度加热.加热棒由能提供 0~1000 W 加热功率的可调节功率直流电源 DH1716A-13 为其供电,调节精度可达 0.1 W.由 Y53100-3/ZF 型 100 kg 离心式恒加速度试验机为实验提供恒定加速度环境,由离心机轴向转动为放置在离心机悬臂上的试件提供离心力以模拟 0~100 g (重力为 1 g) 的加速度,调节精度在 5% 以内,实验中重点对 5 g (过去战斗机上设备所承受加速度)、10 g (现在成熟战斗机上过载加速度) 和 15 g (今后高超声速飞行器上加速度环境) 的加速度环境下的涡旋微槽传热特性进行了研究.

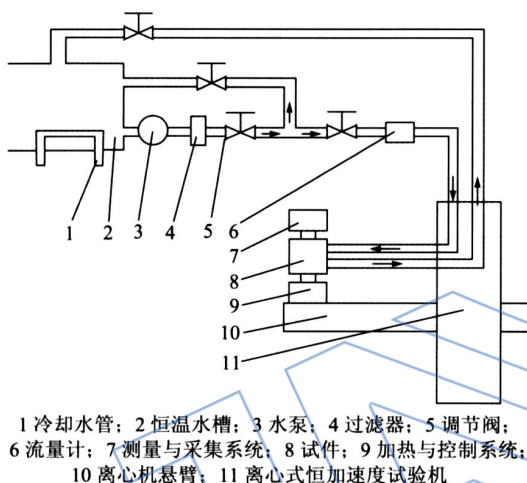


图3 加速度环境涡旋微槽实验装置示意图

Fig.3 Test facility of swirl microchannel under acceleration environment

2 数据处理与不确定度分析

2.1 Dean 数

Dean 首次对螺旋弯曲槽道中的“二次流”进行了深入的理论分析^[4-5].他采用小曲率假设(即认为槽道半径与螺旋半径相比为无穷小量)对动量方程和连续性方程进行了简化,用无量纲参数得到了包括主流轴向流动和二次流的动态近似解,该无量纲参数为

$$2Re^2 \left(\frac{d}{D} \right) \quad (1)$$

这里 Re 为雷诺数,可表征流体流动过程中的惯性力与黏性力之比,其特征尺度为管道水力直径.把这个无量纲数的后半部分开方就得到了 Dean 数

$$De = Re \left(\frac{d}{D} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

分析可知, De 数可表征弯曲微槽中惯性力与离心力和黏性力之比.由于“二次流”由离心力和黏性力的相互作用引起,因此 De 数可作为涡旋微槽中“二次流”强度的量度.

本文实验在稳态下进行,工质密度 ρ 和黏度 μ 假定为常数,又涡旋微槽试件为矩形截面微槽道,故式(2)中 d 取槽道的水力直径 d_h .根据所测得的流量可以算出微槽内工质流速 u ,进一步可求得 Re 数为

$$Re = \frac{\rho u d_h}{\mu} \quad (3)$$

取涡旋微槽道中心线处的曲率直径作为涡旋槽的名义曲率直径 D .由于中心线处的曲率直径是连续变化的,因此 De 数也是连续变化的.对 De 数取平均得

$$De = \frac{\int Re \left(\frac{d_h}{D} \right)^{\frac{1}{2}} dl}{L} \quad (4)$$

2.2 表面传热系数

工质流经涡旋微槽所获得的稳态传热量为

$$Q = \rho q_v c_p \Delta T \quad (5)$$

式中 q_v 为体积流量; c_p 为比热容; $\Delta T = (T_{out} - T_{in})$ 为工质温升; T_{in} 和 T_{out} 分别为工质进出口温度.

因此工质与涡旋微槽道壁面间的平均表面传热系数有

$$h = Q / (NA_w \Delta T_m) \quad (6)$$

式中平均换热温差 ΔT_m 为

$$\Delta T_m = T_w - \frac{1}{2} (T_{in} + T_{out}) = \frac{1}{8} \sum_i T_{im} - \frac{1}{2} (T_{in} + T_{out}) \quad (7)$$

式中 T_w 表示微槽壁面平均温度; T_{im} 表示利用热电偶测得的温度由能量守恒对测点位置进行修正得到的壁面温度值,这里将 8 个测点的平均值作为微槽壁面平均温度.

以上各式中工质物性参数由文献[6]中数据拟合得到,特征温度取进出口温度的算术平均值.

2.3 不确定度分析

实验中的直接测量量有温度、流量等,间接测量量有表面传热系数、换热量、热流密度等.通过对各测量量进行不确定度分析可得^[7]:置信概率为 99% 的情况下, h 的相对不确定度为 $\frac{U(h)}{h} \leq$

28.3 %,置信概率为 95 %的情况下, h 的相对不确定度为 $\frac{U(h)}{h} \leq 12\%$.

3 实验结果与分析

3.1 加速度方向不同对微槽传热性能的影响

通过在微槽不同方向上加载加速度来研究加速度方向对微槽传热性能的影响,试件上加载加速度的方向参见图 1, Y 正向和 Y 负向的加速度环境对关于 X 轴对称的涡旋微槽结构的力学影响相同,故只取 Y 正向.图 4(a) ~ (c) 分别为微槽 No. 2 在体积流量为 21.5 L/h,加热量分别为 97.2,

135 W 和 186 W,加速度大小分别为 5 g,10 g,15 g 时的在各加速度方向下的平均表面传热系数对比图.

由图 2 可以看出,在体积流量、加热量和加速度大小相同的情况下,微槽在不同加速度方向下的平均传热系数有着明显区别,且无论加速度大小如何变化,其传热系数在方向不同的各加速度环境下均有着相同的变化规律,即 X 正向时最大, X 负向和 Y 方向时有所减小, Z 负向时次之,而 Z 正向时传热系数最小.这表明加速度方向的不同对涡旋微槽在过载加速度环境下的传热性能有着重要影响, X 正向下影响较小,传热性能最好,而 Z 正向下传热性能最为恶化,其平均传热系数较 X 正向要减小 15 %.而不同加热功率时试件内液体工质的温度不同,密度和黏度也相应有所变化,从而导致 Re 数、 D_e 数和 Nu 数有所变化,因此 h 随加热功率的不同也有所差异.

3.2 加速度大小不同对微槽传热性能的影响

由于加速度方向对微槽的传热性能有着明显的规律性影响,下面的分析将针对差异最为显著的加速度方向为 X 正向和 Z 正下的微槽传热性能.通过在微槽 X 正向和 Z 正向施加大小不同的加速度来考察加速度大小对微槽传热性能的影响.图 5(a) 和 (b) 分别为 X 正向和 Z 正向下微槽 No. 2 在体积流量为 21.5 L/h,加热量分别为 97.2,135 W 和 186 W,加速度大小分别为 5 g,10 g 和 15 g 时的平均传热系数变化图,以及它们与无加速度影响的重力环境下相应数值的对比.

由图 5(a) 可以看出,在 X 正向下,由重力环境变化到 5 g 的加速度环境时,不同加热量下的微槽内平均传热系数均有所增加,而随着加速度由 5 g 增大到 10 g 再增大到 15 g,微槽内的传热系数均逐渐略为减小.而由图 5(b) 可以看出,对于 Z 正下的涡旋微槽,其不同加热量下的平均传热系数在由重力环境变化到 5 g 的加速度环境时,均大幅降低 12.5 % 左右,而随着加速度不断增大,微槽内的传热系数均逐渐略为减小.

分析实验结果可知,涡旋微槽在重力环境和加速度环境下的传热性能有着明显不同,且加速度方向即加速度环境与微槽内工质流动状态的相关性对微槽传热性能的改变有着决定性的影响:在 X 正向下,由于加速度方向与工质流动方向的平面平行且有助于从进口经涡旋槽道流向出口的工质流动,间接的提高了流体的 D_e 数和 Nu 数,增强了槽道内流动的换热能力,因此在由重力环境变化到加速度

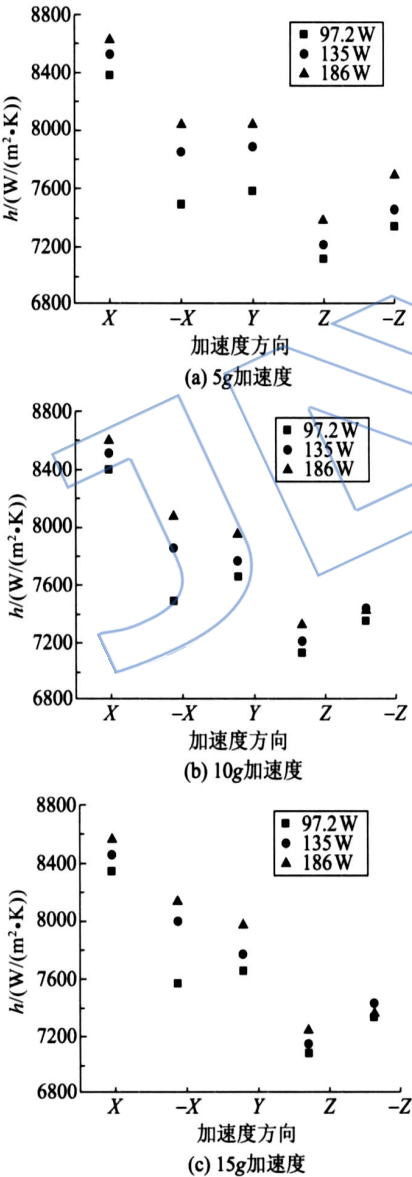


图 4 不同加速度大小下传热系数随加速度方向的对比
Fig. 4 Heat-transfer coefficients versus acceleration directions under different acceleration sizes

环境的情况下,表面传热系数不降反升;在 z 正向下,由于加速度方向与工质流动方向的平面正交,且该方向下的加速度环境趋向于将流动工质电离加热面,因此造成了槽道内散热条件的恶化,在由重力环境变化到加速度环境的情况下,表面传热系数大幅降低。此外,由图 5(a) 和 (b) 可以看出,当过载加速度的大小超过 $5g$ 而继续增加时,加速度环境对不同加速度方向下的微槽内传热性能的进一步影响均只能让其平均表面传热系数略为降低,即加速度大小在超过一定值时,其对涡旋微槽传热性能的进一步影响甚微。

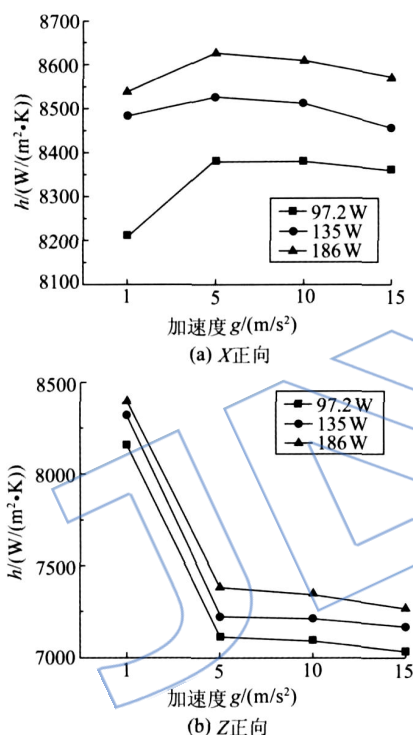


图 5 不同加速度方向下传热系数随加速度大小的变化

Fig. 5 Heat-transfer coefficients versus acceleration sizes under different acceleration directions

3.3 不同流量下加速度对微槽传热性能的影响

图 6(a) 和 (b) 分别为微槽 No. 2 在 X 正向和 Z 正向的加速度环境下,体积流量为 15.5、21.5 L/h 和 29 L/h 的不同加热量时的平均传热系数随加速度大小的变化图。由图 6 可以看出,增大体积流量,即可提高微槽内流体的 De 数和 Nu 数,微槽内流动的平均传热系数将随之增大,且加速度环境对微槽内传热条件的影响将随之减小。对微槽试件 No. 2,在 X 正向加速度环境下,当体积流量为 29 L/h 时,传热系数略有升高后即稳定不变,当体积流量为 21.5 L/h 时,传热系数略为

升高后又有所回降,而当体积流量为 15.5 L/h 时,传热系数随加速度的增大而平稳降低;在 Z 正向加速度环境下,当体积流量为 29 L/h 时,换热系数比重力环境时平均下降 10.6%,当体积流量为 21.5 和 15.5 L/h 时,该值比重力环境时分别平均下降 12.4% 和 14.5%。

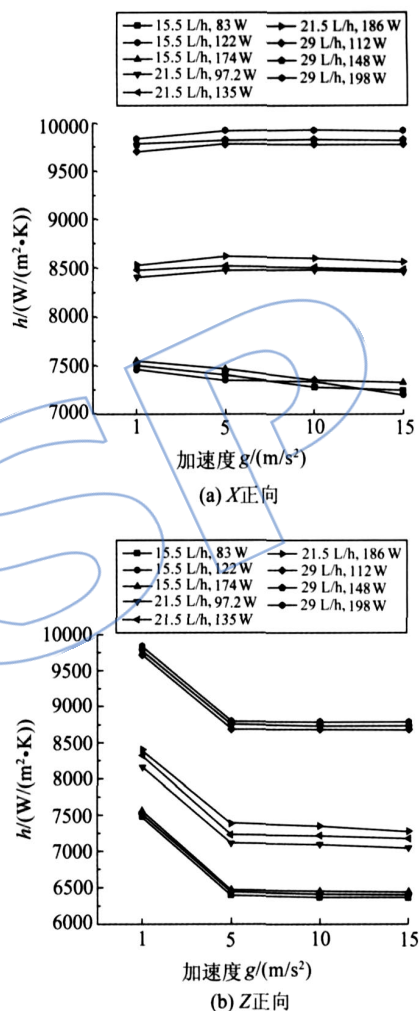


图 6 不同加速度方向下传热系数随体积流量的变化

Fig. 6 Heat-transfer coefficients versus fluid fluxes under different acceleration directions

3.4 不同深宽比下加速度对微槽传热性能的影响

图 7(a) 和 (b) 分别为 X 正向和 Z 正向下微槽 No. 1, No. 2 和 No. 3 在体积流量为 21.5 L/h, 加热量为 186 W 时的平均表面传热系数随过载加速度大小的变化图。由图 7 可以看出,在相同的加速度方向、工质流量和加热量下,涡旋微槽的平均传热系数随着深宽比的增大而减小。这是由于随着深宽比的增加,试件的 d_h 和换热面积增大,使得

同样流量下流速降低,流体的 D_e 数和 Nu 数减小,表面传热系数减小.同时由图 7(b) 可以看出,随着深宽比的增加,加速度对微槽传热系数的影响越来越大.在 Z 正向加速度环境下, No.1 的传热系数比重力环境时平均下降 11.2%, No.2 下降 12.4%, No.3 则下降 13.7%. 这说明深宽比越小,同样流量下工质流速越高,流体的 D_e 数就越大,涡旋微槽抵御加速度环境改变对其传热条件的影响的能力也就越强.

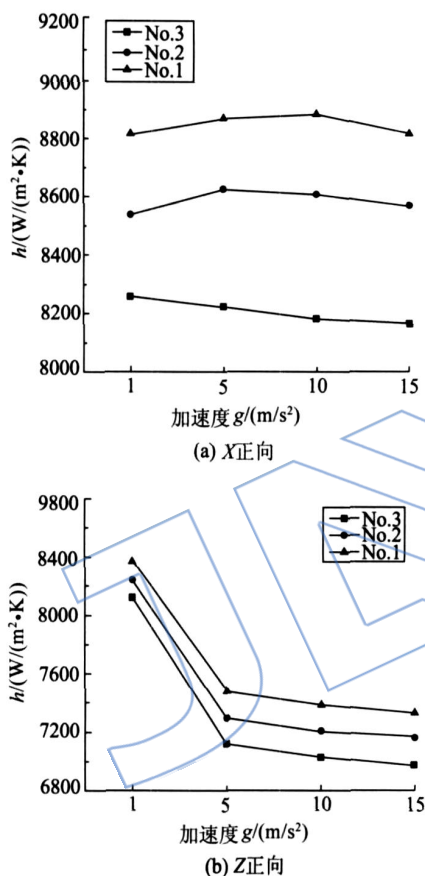


图7 不同加速度方向下传热系数随试件深宽比的变化
Fig. 7 Heat-transfer coefficients versus height-width ratios of test pieces under different acceleration directions

3.5 加速度对微槽传热性能影响的机理分析

文献[3]中对有着同等工质条件和试件结构的涡旋微槽在一般重力环境下的强迫对流传热性能进行了实验研究,并进一步得出涡旋微槽单相对流传热性能与其影响因素之间的数值依变关系,综合考虑工质物性、微槽结构等的影响,得出了如下关联式:

$$Nu = 0.2665 D_e^{0.54416} Pr^{0.43} \gamma^{0.075} \quad (8)$$

$$100 < D_e < 800, 10 < Pr < 18, 1 \leq \gamma \leq 4$$

式中 γ 为涡旋微槽的深宽比; Nu 为涡旋微槽平均努塞尔数; D_e 为涡旋微槽平均 D_e 数; D_e 和 Pr 的定性温度取工质进出口温度的算术平均值.由式(8)可知, D_e 数是决定涡旋微槽平均表面传热系数的重要参数.

而对于附加了过载加速度环境后的涡旋微槽,则由理论分析和以上实验结果可以看出,过载加速度环境所产生的离心力使得微槽内的工作流体逐渐脱离加热面,流体的黏性力降低,引起流场的变化,从而使得微槽的传热特性与无加速度影响的重力环境下相比产生了较大减弱.

图8为 X 正向和 Z 正向加速度环境下体积流量为 15.5 L/h 加热量为 174 W、体积流量为 21.5 L/h 加热量为 186 W 和体积流量为 29 L/h 加热量为 198 W 的 6 种工况时涡旋微槽内流体平均 D_e 数随加速度大小的变化图.由图可知,在 X 正向下,过载加速度产生的离心力有助于 D_e 数的提高,从而补偿了加速度环境对微槽内传热性能的减弱;而在 Z 正向下,过载加速度产生的离心力与流体的本身流动相抵消,减小了 D_e 数,从而加剧了加速度环境对微槽内传热性能的恶化作用,因此,过载加速度的方向对其传热性能有着决定性的影响.

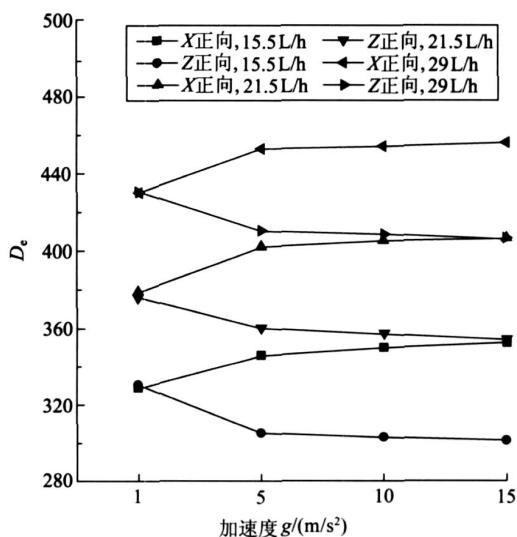


图8 X 正向和 Z 正向下 D_e 数随加速度大小的变化图
Fig. 8 Dean number versus acceleration sizes under X forward direction and Z forward direction

4 结 论

对矩形截面涡旋微槽在加速度环境下的传热

特性进行了实验研究,工质为 30 % 的乙二醇水溶液.研究表明:

1) 将涡旋微槽从重力环境下变化到相同大小不同方向的加速度环境下时,微槽中的传热特性表现出相同的趋势,即传热特性在 x 正向加速度环境中变化最小,在 z 正向加速度环境中最为恶化.

2) 对涡旋微槽施加大小不同的加速度时,微槽中的传热特性会有所不同,但加速度超过一定值时,无明显变化.

3) 由式(2)可知,流速和水力直径是决定 D_e 数的重要两项.在微槽宽度相同时,水力直径仅与深宽比有关,故 D_e 数对涡旋微槽传热性能的影响主要体现在流速和深宽比,即流速越大,深宽比越小, D_e 数则越大,传热性能则越好,这一规律在重力环境和加速度环境中有着同等表现.

4) 在加速度环境下, D_e 数越大,涡旋微槽抵御和适应过载加速度对其传热特性的影响的能力则越强.

参考文献:

- [1] 过增元. 国际传热研究前沿——微细尺度传热[J]. 力学进展,2000,30(1):1-6.
GUO Zengyuan. Frontier of heat transfer-microscale heat transfer [J]. Advances in mechanics, 2000,30(1):1-6. (in Chinese)
- [2] 毛军逵,常海萍. 重力场下细微循环通道内流体热驱动现象研究[J]. 航空动力学报,2003,18(2):239-243.
MAO Junkui,CHANG Haiping. Investigation of liquid thermal driving in small-size circular enclosures[J]. Journal of Aerospace Power,2003,26(6):239-243. (in Chinese)
- [3] 席有民,余建祖,谢永奇,等. 涡旋微槽内的单相强迫对流换热实验[J]. 北京航空航天大学学报,2009,35(3):288-291.
XI Youmin,YU Jianzu,XIE Yongqi,et al. Single-phase forced convective heat transfer in swirl microchannels[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2009,35(3):288-291. (in Chinese)
- [4] Dean W R. Note on the motion of fluid in a curved pipe[J]. The London,Edinburgh & Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science,1927,4:208-233.
- [5] Dean W R. The dtreamline motion of fluid in a curved pipe[J]. The London,Edinburgh & Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science,1928,5(7):673-695.
- [6] 刘光启,马连湘,刘杰. 化学化工物性数据手册(有机卷)[M]. 北京:化学工业出版社,2002.
LIU Guangqi,MA Lianxiang,LIU Jie. Handbook of chemical engineeringproperty(Organic Volume) [M]. Beijing:Chemical Engineering Press,2002. (in Chinese)
- [7] 陈虹夜,曹钢,卢军. 物理实验中不确定度的估算[J]. 山东轻工业学院学报,2002,16(3):73-76.
CHEN Hongye,CAO Gang,LU Jun. Estimate of indefinite degree[J]. Journal of Shandong Institute of Light Industry, 2002,16(3):73-76. (in Chinese)