

# 交变流动中突变截面局部损失特性分析

陈燕燕<sup>1,2</sup> 张宇坤<sup>1,3</sup> 戴巍<sup>1</sup> 罗二仓<sup>1</sup>

(1. 中国科学院理化技术研究所低温工程学重点实验室, 北京 100190;

2. 中国科学院力学所国家微重力实验室, 北京 100190; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要** 从突变截面流道内流体满足的方程组出发, 给出交变流动中突变截面阻力系数的定义以及考察方法, 采用量纲分析法获得影响局部阻力特性的四个无量纲影响参数: 动态雷诺数与幅值雷诺数之比、幅值雷诺数、变截面面积比、声场压力、速度相位差。通过 PIV(粒子成像测速仪) 测量, 分析了流场结构特征, 并与 CFD 计算结果对比, 验证了 CFD 计算结果的可靠性, 进而利用 CFD 模拟考察了四个无量纲参数对阻力特性的影响规律。

**关键词** 交变流动; 突变截面; 局部损失; PIV 测量; CFD 模拟

**中图分类号:** TK123 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2012)02-0186-05

## Minor Losses of Oscillating Flow Through a Sudden Change Area

CHEN Yan-Yan<sup>1,2</sup> ZHANG Yu-Kun<sup>1,3</sup> DAI Wei<sup>1</sup> LUO Er-Cang<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Cryogenics, Technical Institute of Physics and Chemistry of CAS, Beijing 100190, China;

2. State Key Laboratory of Microgravity Research, Institute of Mechanics of CAS, Beijing 100190, China;

3. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** Minor losses for oscillating flow in a duct with sudden area change have been investigated through non-linear theoretical analysis. PIV measurement and CFD simulation. The flow field was analyzed and results from the PIV measurement and CFD simulation were compared. It shows that the CFD simulation is useful for the flow characteristics analysis in oscillating flow. The influence of the four nondimensional parameters namely the dynamic Reynolds number, Reynolds number, the ratio of the area and the phase difference between pressure and velocity on the minor losses has been analyzed by CFD simulation.

**Key words** oscillating flow; sudden change area; minor losses; PIV measurement; CFD simulation

## 0 引言

在热声热机中, 不同部件通常具有不同的流通面积, 在连接之处会存在面积的突变, 例如脉冲管制冷机中, 换热器与回热器之间、脉冲管与惯性管之间、压缩机与连接管之间等。一方面, 突变截面引起的局部流动现象会对某些关键部件内部的流场产生扰动。例如, 在斯特林脉冲管制冷机中, 惯性调相管与脉冲管的截面积会存在量级上的差别, 气体从惯性管进入脉冲管时, 如不采取任何措施则会产生强烈的射流和拐角处的二次流动现象, 导致制冷机性能恶化。而在另一方面, 突变截面的流动损失也产生功的损耗, 甚至引起更大尺度的声流现象如 Gedeon 声流, 也会对系统性能产生不利影响, 这种局部损失已经是线性热声理论无法准确预测和描述的。为了对热声热机的性能提高提供依据, 迫切需要对这类交变流动中的复杂流动现象进行系统研究。

目前对于交变流动中局部损失的研究非常匮乏, 因此在交变流动中, 局部损失的量化计算只能借用稳态流动研究成果。当幅值雷诺数非常大时, 一般根据 Iguchi 的假设<sup>[1]</sup>, 即流体在往复运动过程中没有记忆, 流动在每个瞬时产生的损失与稳定流动相同。但是这种做法缺乏严格的理论分析与实验验证。随着声学以及热声相关技术的发展, 交变流动中的流动、换热问题越来越受到人们的重视, 相关研究也开始逐步展开。Jaworski 等人<sup>[2-5]</sup>利用 PIV 对流场进行锁相测量并结合数值模拟对置于驻波管中的平行板叠端部的流动形态做了详细的研究, 板叠末端的流动现象主要是旋涡从板末脱落并聚集, 并随后消散在湍流中。Smith 和 Swift<sup>[6]</sup>对喷射泵进行了细致的研究工作, 主要是考察喷射泵产生的时间平均压差与流道尺度、端部倒角以及幅值雷诺数的关系,

收稿日期: 2011-01-12; 修订日期: 2012-01-17

基金项目: 国家自然科学基金重大项目 (No.50890181); 国家重点基础研究发展计划 973 项目 (No.2010CB227303)

作者简介: 陈燕燕 (1982-), 女, 湖南邵阳人, 博士后, 主要从事热声基础理论研究。

并指出采用稳定流动局部损失机制所预测到的压差将偏大。然而 Morris<sup>[7]</sup> 对突变截面的数值模拟却显示所得时间平均压差是基于 Iguchi 假设而采用稳态流动损失机制的计算结果的三倍。

Masaru<sup>[8]</sup>对管道与气库连接处的进出口效应进行了数值模拟研究,并对入口效应长度进行考察。指出管道侧入口效应长度取决于幅值雷诺数与Womersley的开方之比,即取决于流体位移幅度与管道直径之比。

但以上研究均未对交变流动下进出口效应产生的局部损失阻力特性进行具体、系统的分析。本文从适用于二维突变截面流道的方程组出发,通过理论分析获得交变流动下突变截面局部损失的考察方法;并采用 PIV 实验测量,考察了突变截面流道内的流场的分布特性,同时对采用 FLUENT 商业软件进行的 CFD 模拟结果进行了验证;而后采用 CFD 模拟对突变截面流道的阻力特性进行了详细的考察。

## 1 理论分析基础

对于图 1 所示的二维突变截面流道,设声传播方向为  $x$ , 垂直声传播方向为  $y$ , 流道截面在  $x$  方向上产生突变,从流道半宽  $b_l$  突变到  $b_r$ 。本文中考察的流道以流道宽度远大于热穿透深度为主,且流道无平均温度梯度,因此流体与固壁间的换热可近似视为绝热,流道内阻力特性的考察可以略去能量方程的影响而只需关注质量守恒方程与动量守恒方程。在突变截面附近,由于流道的突缩、突扩,流道将产生显著的  $y$  方向的运动,因此可以预想  $x$  方向速度  $u$  与  $y$  方向速度  $v$  具有相同量级,即  $u \sim v$ , 同时各参数在  $x$  方向上的梯度与  $y$  方向上的梯度也可比,即  $\partial X/\partial x \sim \partial X/\partial y$ 。设突变截面流道产生的进出口效应  $L$  远小于声波长  $\lambda$ , 基于以上假设与分析,二维突变截面适用的方程组可简化为以下形式:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} &= 0 \\ \rho_0 \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) &= -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu_0 \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \\ \rho_0 \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) &= -\frac{\partial P}{\partial y} + \mu_0 \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \quad (1)$$

下标“0”表示时均量。

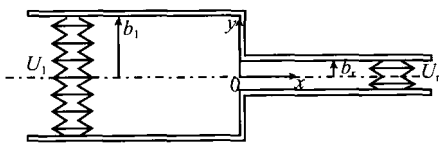


图 1 二维突变截面流道简图

Fig. 1 Schematic diagram of the 2D duct with sudden change area

### 1.1 平均阻力系数推导

对方程组 (1) 取截面平均,由于所考察二维突变截面为横向对称流道,因此消去了动量方程组中的  $y$  方向方程,再分别对变截面左、右侧管段取向 ( $x$ ) 方向积分并相加,得:

$$\rho \frac{\partial U}{\partial t} \left( \frac{L_l}{A_l} + \frac{L_r}{A_r} \right) + \int_{-L_l}^{L_r} \frac{1}{A} \int_A \left[ \rho \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{2} u^2 \right) + \left( \rho v \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] dA dx = (\bar{P}_{(x=-L_l)} - \bar{P}_{(x=L_r)}) - \int_{-L_l}^{L_r} \frac{\tau_w p}{A} dx \quad (2)$$

其中,  $A$  为流道横截面积;  $\tau_w$  为壁面剪切力;  $p$  为流道横截面湿周;  $L_l$  与  $L_r$  分别为左右侧的入口效应长度。令:

$$\bar{\Psi} = \int_{-L_l}^{L_r} \frac{1}{A} \int_A \left[ \rho \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{2} u^2 \right) + \left( \rho v \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] dA dx / (L_l + L_r)$$

其中,  $\bar{\Psi}$  为变截面流道内流体的体积平均非线性惯性力。定义特征速度  $u_c = \frac{U}{L_l + L_r} \left( \frac{L_l}{A_l} + \frac{L_r}{A_r} \right)$ , 令变截面流道受壁面黏性剪切力的平均值以及水力直径为:

$$\begin{aligned} (\tau_w)_\text{mean} &= \left( \int_{-L_l}^{L_r} \frac{\tau_w p}{A_f} dx \right) \left( \int_{-L_l}^{L_r} \frac{A}{p} dx \right) / (L_l + L_r)^2, \\ d_{\text{hc}} &= \left( \int_{-L_l}^{L_r} \frac{4A_f}{p} dx \right) / (L_l + L_r) \end{aligned}$$

对于图 1 所示的二维变截面流道,在垂直纸面方向取单位长度,则  $d_{\text{hc}} = 4 \left( \frac{b_l L_l + b_r L_r}{L_l + L_r} \right)$ 。根据以上参数定义,方程 (2) 变化为:

$$\frac{(\bar{P}_{(x=-L_l)} - \bar{P}_{(x=L_r)})}{L_l + L_r} = \rho \frac{\partial u_c}{\partial t} + \bar{\Psi} + \frac{4(\tau_w)_\text{mean}}{d_{\text{hc}}} \quad (3)$$

式 (3) 即为简化得到的突变截面进出口效应范围内的平均动量方程。对于交变流动,可将各波动参数写成以下形式:

$$X(x, y, z, t) = X_0 + \hat{X}(x, y, z, t) =$$

$$X_0 + \text{Re} [X_1(x, y, z) e^{i\omega t} + X_2(x, y, z) e^{i2\omega t} + \dots] \quad (4)$$

将式 (4) 待入到方程 (3) 中,可获得各阶谐波的动量方程。

由于在热声系统中,携带声功、进行有用热声转换的波以基频波为主,同时我们关注的是流道结构本身带来的非线性效应,因此本文将只考察远离变截面流道的主流场为单频波的情况。变截面的存在

诱发的谐波分量(包含时均量)将均记为损失。从而对变截面产生的能量损失的考察也只集中考察一阶波动分量。当然,一阶波动分量中损失的产生根本上是受诱发的谐波分量(包含时均量)影响的,能量将从一阶波动向时均流动及高次谐波传递,并最终被黏性耗散借鉴稳态流动中达西阻力系数的定义,对于一阶波动,定义压差系数:

$$f_{\Delta P} = \frac{(P_{1(x=-L_l)} - P_{1(x=L_r)}) d_{hc}}{(1/2) \rho |u_{c1}| u_{c1} (L_l + L_r)} = \frac{2i\omega d_{hc}}{|u_{c1}|} + \frac{\bar{\Psi}_1 d_{hc}}{(1/2) \rho |u_{c1}| u_{c1}} + \frac{4(\tau_{w1})_{mean}}{(1/2) \rho |u_{c1}| u_{c1}} \quad (5)$$

等式右边第一项表示流场当地加速度对压差系数的贡献,第二项为非线性效应的贡献,第三项为黏性项的贡献。与稳定流动相比,交变流动中不仅增加了流场当地加速度对压差的影响,同时流场非均匀性产生的惯性力与黏性剪切力都可能对压差产生不同于稳定流动的影响。为讨论非线性惯性项与黏性剪切力产生的阻力特性,定义阻力系数  $f = f_{\Delta P} - 2i\omega d_{hc}/|u_{c1}|$ 。

## 1.2 阻力特性量纲分析

应用量纲分析法来考察影响阻力特性的无量纲参数,首先来看流道的结构。对图1所示的突变截面流道,流道结构只由大、小流道半宽  $b_l$ 、 $b_r$  决定,可转换成  $d_{hc}$ 、 $b_r/b_l$ 。再来看流场控制参数,流场的运行频率  $f_{req}$ , 变截面左侧边界压力波动  $|P_{1(x=-L_l)}|$ , 速度波动  $|\bar{u}_{1l}|$ ,  $\Phi(P_{1(x=-L_l)}/\bar{u}_{1l})$  压力速度相位差或是右侧边界的  $P_{1(x=L_r)}$ ,  $|\bar{u}_{1r}|$ ,  $\Phi(P_{1(x=L_r)}/\bar{u}_{1r})$ 。将以上参数采用量纲分析法进行整合,得到阻力系数  $f$  与有关参数的函数关系的一般表达式为:

$$f = \psi \left( \frac{\omega d_{hc}}{|u_{c1}|}, \frac{\rho_0 |u_{c1}| d_{hc}}{\mu_0}, \frac{b_r}{b_l}, \Phi(P_1/u_1) \right) \quad (6)$$

式(6)说明,突变截面的阻力特性决定于流道水力直径与流体振荡位移幅度之比  $Re_\omega/Re_1 = \omega d_{hc}/|u_{c1}|$ (其中动态雷诺数  $Re_\omega = \rho_0 \omega d_{hc}^2/\mu_0$ ), 幅值雷诺  $Re_1 = \rho_0 |u_{c1}| d_{hc}/\mu_0$ , 变截面比  $r_A = b_r/b_l$ , 以及流场中某点的压力、速度相位差  $\Phi(P_1/u_1)$ 。式(6)为考察突变截面阻力特性提供了工况设计参考以及数值分析依据。

## 2 流场特性的实验测量

采用双扬声器锁相驱动的实验装置。待测试段连接在两个扬声器之间,通过调节两扬声器驱动电压的相对幅值与相位差,可获得对待测位置压力、速度幅值及二者相位差的可控调节。扬声器的额定功率为 500 W, 待测实验段处纸盆最大线性位移为

15 mm。采用 PCB 压电式压力传感器测量流场压力波动,粒子成像测速仪测量速度场示,结合锁相测量方式,可实现对周期性交变流动的流场测量。

实验中扬声器驱动频率 30 Hz, 流道中为常温常压下的空气,踪粒子采用檀香烟雾。流体粘性穿透深度约为 0.4 mm, 该尺度远远小于流道固定宽度 100 mm。因此,与管道固定面平行的流道中心平面的流动可视为二维。待测变截面流道由横截面 100 mm×100 mm 突变到 80 mm×100 mm, 即变截面面积比 0.8。以下分别对突变截面附近的瞬时速度场、中心速度及截面平均速度分布,以及时均流场进行考察。

### 2.1 瞬时速度场

图2为4个间隔为 90° 相位的时刻,变截面处速度场的分布情况,其中速度相位的参考零点为主流速度从负转正的零点。测量工况为对应图1中距离突变截面左侧 100 mm 处压力幅值  $P_{1l} = 0.4$  kPa, 距离突变截面右侧 100 mm 处压力波动与左侧压力波动相位差为  $\Phi(P_{1l}/P_{1r}) = 20^\circ$ 。以变截面处为中心,流道上壁面为上限,测量范围为 69.9 mm×63.4 mm, 速度分析的空间分辨率为 1 mm×1 mm。可以看出,由于变截面的存在,在变截面处两侧出现两个方向相反的涡旋,在一个周期中,处于流动下游的涡旋强度增强,而流动上游的涡旋强度减小且被带往下游。

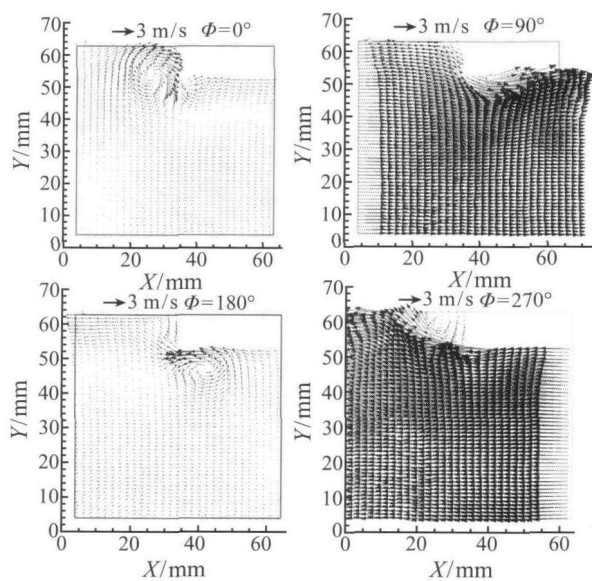


图2 一个周期内变截面处速度场的变化

Fig. 2 Instantaneous flow filed within one period

### 2.2 中心速度与截面平均速度分布

图3给出的是图2对应工况的流道中心速度与截面平均速度在各个时刻随声传播方向  $x$  的分布。中心速度在  $x$  方向上存在明显梯度,且半周期明显不对称

性,这主要是由于时均速度场的存在引起的。截面平均速度在突变截面附近出现较大梯度,这主要由壁面附近的旋涡贡献,越远离壁面,速度的过渡越平缓。

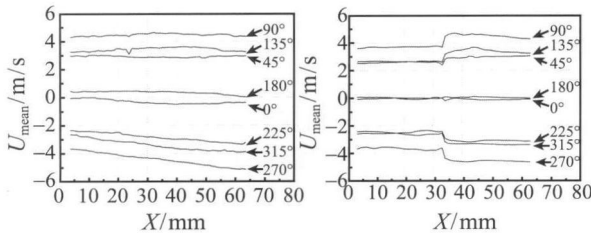


图 3 一个周期内中心速度与截面平均速度的变化

Fig. 3 Instantaneous velocity along the centerline and averaged along the cross section

### 2.3 时均流场

图 4 给出了不同入口压力幅值下 (保持  $\phi$  ( $P_{1l}/P_{1r}$ ) = 20°, 等效于改变来流速度幅值), 变截面处时均流场的变化, 图中连续黑线为瞬时流线, 断续黑线为速度矢量。变截面处附着着两个时均旋涡, 随着来流速度幅值的增加, 这对旋涡强度逐渐增强, 直径增大, 并出现逐渐增强并远离变截面的第二对旋涡。随着来流速度增加, 所有旋涡强度增强, 且第二对大尺度旋涡的中心逐渐向壁面靠近。

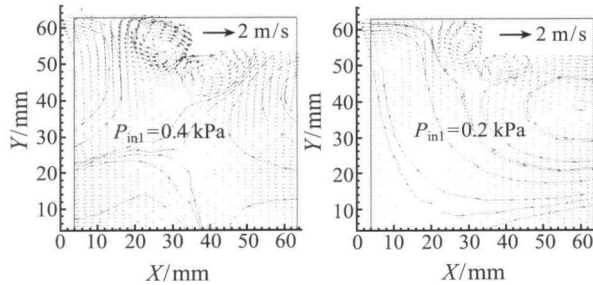


图 4 变截面处时均流场

Fig. 4 Time mean flow field

## 3 阻力特性的 CFD 模拟

上节中, 利用 PIV 对突变截面流场的基本结构进行了实验测量和初步分析。然而以目前的条件, 局部阻力特性的考察若完全依赖实验测量, 还存在一定的局限性。比如流道壁面反光造成近壁面的流场较难测量; 难以实现一些高频、高流速的工况等。而且测量系统的有限工作频率也无法实现实时瞬态测量, 而只能采用锁相测量, 同时实验中很难兼顾流场高分辨率与大的流场测量范围。因此, 一般对单一工况的测量, 不仅需要进行多相位点测量, 还需要进行多空间位置测量, 以获得足够的时间分辨率与空间分辨率。如此一来实验周期比较长, 数据量大, 再加

上流场特性需要进行多参数的考察, 如果完全依赖实验测量, 实验工况的选择也会存在一定的盲目性, 从而需要一些试探性测量并进行工况重选, 工作量将非常巨大。因此, 即使是流动特性的实验测量, 也迫切需要理论依据来指导对实验工况的选择。为此, 在验证 CFD 模拟的可靠性基础上, 本文利用商业软件 FLUENT 对交变流动中突变截面的阻力特性进行多参数的全面考察。

### 3.1 CFD 模拟与实验测量对比

图 5 给出了 CFD 模拟与 PIV 实验测量的时均流场对比图, 其中 CFD 模拟采用实验测量中所得距离变截面左侧及右侧 100 mm 处的压力波动作为计算边界。图 6 给出的是八个不同工况下 (基本保持左侧压力波动幅值不变, 而改变左、右侧压力波动相位差) 小流道侧距离变截面 100 mm 处截面平均速度幅值, 各工况下实验计算结果与测量所得差别均小于 6%。通过对时均速度场以及截面平均速度的比较, 说明 CFD 的计算结果与 PIV 实验测量符合较好, 因此基于 CFD 模拟对局部阻力特性的考察是具有指导意义的。

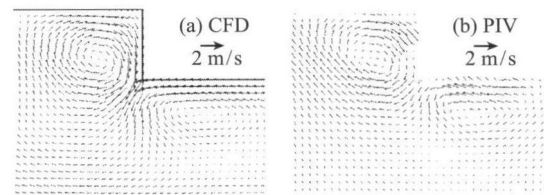


图 5 数值计算和实验测量的突变截面附近时均速度场对比  
Fig. 5 Comparison of the time mean velocity field between CFD and PIV

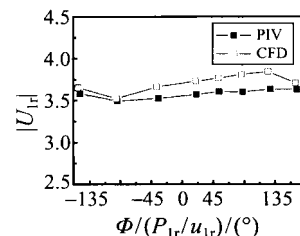


图 6 PIV、CFD 所得右侧速度的对比

Fig. 6 Outlet velocity comparison between CFD and PIV

### 3.2 阻力特性分析

#### 3.2.1 进出口效应长度

由于非线性效应主要集中在变截面区域, 因此可定义当地非线性惯性项与局部加速度项之比  $R$ , 并根据  $R$  的分布来获得进出口效应长度:

$$R = \left| \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{2} u^2 \right)_1 + \left( v \frac{\partial u}{\partial y} \right)_1 \right| \bigg/ \left| \frac{\partial \bar{u}_1}{\partial t} \right| \quad (7)$$

本文定义变截面附近  $R \geq 1\%$  对应的流道长度

区域为进出口效应区域，分别获得进出口效应长度  $L_l, L_r$ 。图 7 为变截面比为 0.5 时，相似声场相位分布下，逐渐增大速度波动幅度获得的进出口效应长度，可见  $L_l, L_r$  随特征速度增大而增大， $L_l > L_r$ ，说明大尺度管道侧的进出口效应长度比小管道侧更长。

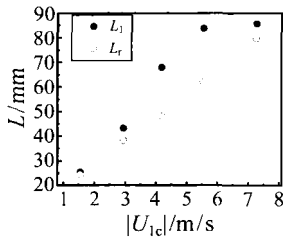


图 7 进出口效应长度  
Fig. 7 The length of entrance effect

### 3.2.2 阻力系数随各无量纲参数的变化

根据式 (6)，以下将分别分析四个无量纲参数对阻力系数的影响。首先来看相位的影响，如图 8 所示，一定流道结构下，保持速度幅值不变，而改变流场中的压力速度的相位差。可见声场相位的改变对阻力系数的影响很小，说明变截面处的阻力损失与声功输入的方向近乎无关，这与稳定流动中出现“突缩管”和“突扩管”的情况不同。

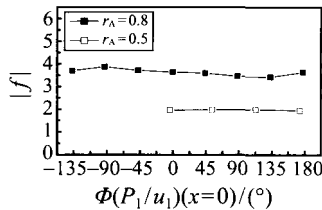


图 8 声场相位对阻力系数的影响

Fig. 8 Influence of Phase difference between pressure and velocity on the friction factor

频率对阻力系数的影响体现在无量纲参数  $Re_\omega/Re_1 = \omega d_{hc}/|u_{1c}|$  中，图 9 为不同频率、不同幅值雷诺数、不同变截面比下阻力系数随着  $\omega d_{hc}/|u_{1c}|$  的变化曲线。图 9(a) 中阻力系数幅值随  $\omega d_{hc}/|u_{1c}|$  的单调变化趋势表明影响阻力系数幅值的参数主要是  $\omega d_{hc}/|u_{1c}|$ ，图中的拟合曲线公式为：

$$|f| = 0.111 \cdot (\omega d_{hc}/|u_{1c}|)^{1.488} \quad (8)$$

而图 9(b) 中阻力系数相位对  $\omega d_{hc}/|u_{1c}|$  的依赖关系并不明显。

## 4 结 论

本文从交变流动中突变截面流道内流体满足的方程组出发，得到交变流场中二维突变截面处局部损失阻力系数的数学模型。通过 PIV 实验测量和 CFD 数值模拟的对比，验证了采用 CFD 数值模拟的手段研究交变流动中突变截面局部损失可行性。进而通过 CFD 数值模拟，考察了各无量纲参数对阻力系数的影响。分析表明，声场中压力、速度的相位差对突变截面阻力特性的影响很小，意味着阻力损失与声功输入的方向近乎无关，这与稳定流动的情况不同。阻力系数的幅值主要决定于动态雷诺数与幅值雷诺数之比（亦即流道水力直径与流体振荡位移幅度之比），而阻力系数相位则对动态雷诺数与幅值雷诺数之比、幅值雷诺数以及变截面比均有依赖关系。

## 参 考 文 献

- [1] Iguchi M, Ohmi M, Maegawa K. Analysis of Free Oscillating Flow in a U-Shaped Tube [J]. Bull JSME, 1982, 25: 1398-1405
- [2] Mao X, Yu Z, et al. PIV Studies of Coherent Structures Generated at the End of a Stack of Parallel Plates in a Standing Wave Acoustic Field [J]. Experiments in Fluids, 2008, 45(5): 833-846
- [3] Jaworski A J, Mao X A, Mao X R, et al. Entrance Effects in the Channels of the Parallel Plate Stack in Oscillatory Flow Conditions [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2009, 33(3): 495-502
- [4] Shi L, Yu Z B, Jaworski A J, et al. Vortex Shedding at the End of Parallel-Plate Thermoacoustic Stack in the Oscillatory Flow Conditions [J]. World Academy of Science Engineering and Technology, 2009, 49: 766-773
- [5] Shi L, Yu Z B, Jaworski A J. Vortex Shedding Flow Patterns and Their Transitions in Oscillatory Flows Past Parallel-Plate Thermoacoustic Stacks [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2010, 34(5): 954-965
- [6] Smith B L, Swift G W. Power Dissipation and Time-Averaged Pressure in Oscillating Flow Through a Sudden Area Change [J]. J Acoust Soc Am, 2003, 113(5): 2455-2463
- [7] Morris P J, Boluriaan S, et al. Numerical Simulation of Minor Losses Due to a Sudden Contraction and Expansion in High Amplitude Acoustic Resonators [J]. Acta Acustica United With Acustica, 2004, 90: 393-409
- [8] Masaru, S. Numerical Study Of Fluid Motion in the Entrance Region of a Straight Tube During Oscillatory Flow [C]// Proceedings of International Conference on Jets, Wakes and Separated Flows. Japan: The Japan Society of Mechanical Engineers, 2005: P-098

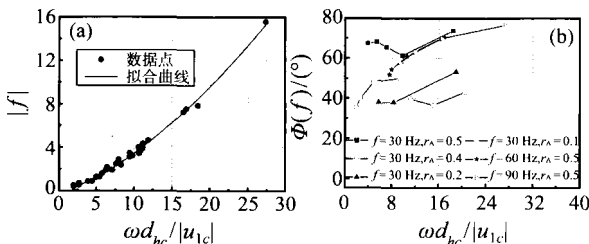


图 9 各工况下阻力系数  $f$  随  $\omega d_{hc}/|u_{1c}|$  变化曲线  
Fig. 9  $\omega d_{hc}/|u_{1c}|$  versus  $f$  for all calculated cases