

环膜液体射流破碎模式与气-液界面的关联性

杜青, 尹君

天津大学内燃机研究所, 天津大学内燃机燃烧学国家重点实验室, 天津, 300072

E-mail: duqing@tju.edu.cn

2007-04-28 收稿, 2007-10-16 接受

天津市应用基础研究计划资助项目(批准号: 05YFJMJC11100, 07JCYBJC03900)

摘要 利用线性不稳定性理论研究了环膜液体射流破碎模式与气-液界面的关联关系. 通过对色散方程的推导和数值求解, 研究了环膜液体射流内外气-液界面半径与两种特殊形式的射流-空心气体射流和实心液体射流之间的关系, 以及各种射流参数对环膜液体射流不稳定性的影响. 研究结果证明了类反对称模式主要与环膜射流的内气-液界面相关联, 而类对称模式主要与外气-液界面相关联. 因此, 虽然射流参数对类反对称模式和类对称模式不稳定的作用性质相似, 但作用效果的强烈程度不同. 与液相相关的力同时作用于内、外两个气-液界面上, 因而对两种破碎模式的影响均较为显著; 而与内气体介质相关的力主要影响类反对称模式的不稳定性, 外气体介质相关的力主要影响类对称模式的不稳定性, 各种作用力在“穿透”射流液相部分后被大大衰减.

关键词

液体环膜射流

破碎模式

气液界面

不稳定性

环膜液体射流的破碎较之圆柱液体射流、空心气体射流、平面液膜射流等射流现象要复杂得多, 原因在于, 对于环膜液体射流而言, 存在内、外两个气-液界面, 从而在两个界面上都可能形成不稳定的表面波. 由于表面波存在着不同的相位差, 就使环膜射流的破碎可能存在着多种模式. 而液体的密度、黏度、速度、旋转、内气体介质和外气体介质的密度、速度、旋转等射流参数的变化都可能影响射流破碎的模式, 因此, 对于环膜液体射流破碎机理的研究有助于理解其他多种射流破碎现象的本质, 并进而实现对于环膜液体射流破碎的有效控制. 考虑到环膜液体射流的破碎现象在包括内燃机、办公设备、农业灌溉、化工和制药过程等多个领域都有着极其广泛的应用, 对这一问题的研究又具有强烈的应用背景.

正因如此, 对于环膜液体射流的研究引起了研究者的关注. 然而, 由于该现象的复杂性, 对其本质的认识和理论解释还远未达到令人满意的程度^[1~3]. 研究者们提出了多种理论解释, 例如空气干扰说、湍流扰动说、空穴扰动说、边界条件突变说、压力振荡说等, 其中空气动力干扰说, 即不稳定性理论, 被认

为是发展得最完善、也是最有希望的理论. 即使如此, 到目前为止, 该理论仍然存在着一些与实际射流现象不符合的地方.

Crapper等人^[4~8]研究了不同射流条件下环膜液体射流破碎的不稳定性, 然而他们忽略了气体介质旋转运动. 一般认为, 气体介质的旋转运动对于环膜液体射流的破碎具有重要影响, 对于组织强烈气流运动的发动机缸内喷雾的破碎过程而言, 尤为重要.

Kang等人^[9~12]研究了气流运动对无黏圆柱液体射流破碎的影响, 获得了很多有价值的结论, 然而由于他们是以实心圆柱射流作为研究对象, 因此研究成果的普适性受到了一定的限制. Ponstein等人^[13,14]研究了气流运动对环膜液体射流破碎的影响, 然而在他们的研究中, 液体的黏性和气体介质并未被考虑. 这主要是由于液体黏性所带来的数学处理上巨大的困难所导致的. 显然, 这种处理方法掩盖了射流现象的一些本质特征, 因为在某些情况下, 液体的黏性会对射流的破碎结果产生显著的影响.

本文利用线性不稳定性理论研究了在黏性环膜射流的破碎模式与射流的内、外气-液界面的关系. 通

通过对描述黏性环膜射流不稳定性的色散方程的推导和数值求解,研究了液体射流参数和内、外气体介质参数对环膜射流破碎模式及其与气-液界面的关系的影响规律.

1 环膜液体射流模型及色散方程

1.1 环膜液体射流模型

图1给出了液体环膜射流及内、外界面不稳定表面波的示意图. 在环膜射流中,内界面的半径为 a^* ,外表面的半径为 b^* ,液体为密度 ρ_l ,液体动力黏度为 μ ,液体表面张力为 σ .液体射流轴向运动速度为 U_l^* ,其内外表面与气体介质接触.内气体介质的密度为 ρ_i ,轴向运动速度为 U_i^* ,气流做无旋旋转,旋转强度为 Γ_i^* .外气体介质的密度为 ρ_o ,轴向运动速度为 U_o^* ,气流做无旋旋转,旋转强度为 Γ_o^* .内、外界面表面波的幅值分别为 η_i 和 η_o .

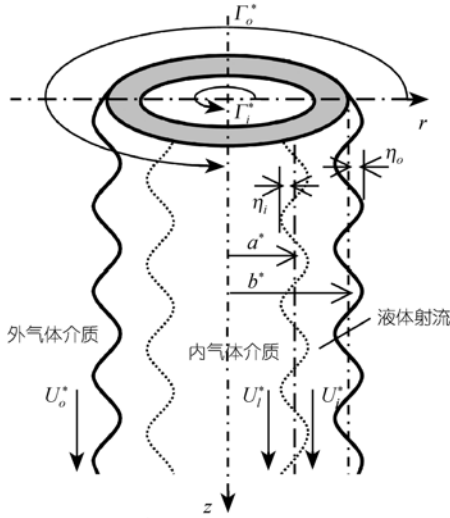


图1 环膜液体射流模型及表面波

1.2 环膜液体射流不稳定性的色散方程

对于液体射流和内、外气体介质分别建立描述其运动特征的连续性方程、动量方程(N-S方程).假设扰动具有简正模态形式,并具有时间模式的发展特征,即扰动幅值在空间上稳定,而随时间发展.此时,扰动所引起的气体介质场和液体射流的各种参数变化具有如下形式:

$$(\mathbf{u}_j, p_j, \eta_i, \eta_o) = (\tilde{\mathbf{u}}_j(r), \tilde{p}_j(r), \tilde{\eta}_i(r), \tilde{\eta}_o(r)) \exp(\omega^* t + i\alpha z), \quad (1)$$

其中 $\tilde{\mathbf{u}}_j(r)$, $\tilde{p}_j(r)$, $\tilde{\eta}_i(r)$ 和 $\tilde{\eta}_o(r)$ 分别为速度、压力、内外气-液界面位移的扰动初始幅值;复频率 ω^* 的实

部即为表征射流不稳定性的扰动增长率; α 为扰动的波数, j 可取为 i, l, o ,分别表示内气体介质、液体射流和外气体介质.

借助第一类和第二类虚宗量贝塞尔函数,可得到对于液体射流和内、外气体介质的压力场和轴向、径向、周向速度场的表达式.利用内、外气-液界面上的动力边界条件和运动边界条件,经过一系列复杂的推导过程,最终可以得到描述黏性环膜液体射流破碎不稳定性的色散方程(dispersion equation).

所得到的色散方程可由下式给出:

$$|\mathbf{M}| = 0 \quad (2)$$

$|\mathbf{M}|$ 为一 10×10 阶的行列式,其中各项的表达式为

$$\begin{aligned} M_{1,1} &= -\frac{k}{\omega + ki} I_1(ka), \quad M_{1,2} = \frac{k}{\omega + ki} K_1(ka), \\ M_{1,3} &= -\frac{ki I_1(sa)}{s}, \quad M_{1,4} = \frac{ki K_1(sa)}{s}, \quad M_{1,5} = \frac{I_0(sa)}{a}, \\ M_{1,6} &= \frac{K_0(sa)}{a}, \quad M_{1,9} = -(\omega + ki), \\ M_{2,8} &= -\frac{k I_1(ka)}{Q_i(\omega + U_i ki)}, \quad M_{2,9} = -(\omega + U_i ki), \\ M_{3,1} &= -\frac{k}{\omega + ki} I_1(kb), \quad M_{3,2} = \frac{k}{\omega + ki} K_1(kb), \\ M_{3,3} &= -\frac{ki}{s} I_1(sb), \quad M_{3,4} = \frac{ki}{s} K_1(sb), \quad M_{3,5} = \frac{1}{b} I_0(sb), \\ M_{3,6} &= \frac{1}{b} K_0(sb), \quad M_{3,10} = -(\omega + ki), \\ M_{4,7} &= \frac{k K_1(kb)}{Q_o(\omega + U_o ki)}, \quad M_{4,10} = -(\omega + U_o ki), \\ M_{5,1} &= -\frac{2k^2 i I_1(ka)}{\omega + ki}, \quad M_{5,2} = \frac{2k^2 i K_1(ka)}{\omega + ki}, \\ M_{5,3} &= \frac{k^2}{s} I_1(sa) + s I_1(sa), \\ M_{5,4} &= -\frac{k^2}{s} K_1(sa) - s K_1(sa), \quad M_{5,5} = \frac{ki}{a} I_0(sa), \\ M_{5,6} &= \frac{ki}{a} K_0(sa), \\ M_{6,5} &= s^2 i \left[I_0(sa) - \frac{1}{sa} I_1(sa) \right] - \frac{si}{a} I_1(sa), \\ M_{6,6} &= s^2 i \left[K_0(sa) + \frac{1}{sa} K_1(sa) \right] + \frac{si}{a} K_1(sa), \\ M_{7,1} &= -I_0(ka) - \frac{2k^2}{Re(\omega + ki)} \left[I_0(ka) - \frac{1}{ka} I_1(ka) \right], \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 M_{7,2} &= -K_0(ka) - \frac{2k^2}{Re(\omega + ki)} \left[K_0(ka) + \frac{1}{ka} K_1(ka) \right], \\
 M_{7,3} &= -\frac{2ki}{Re} \left[I_0(sa) - \frac{1}{sa} I_1(sa) \right], \\
 M_{7,4} &= -\frac{2ki}{Re} \left[K_0(sa) + \frac{1}{sa} K_1(sa) \right], \\
 M_{7,5} &= \frac{2}{Re} \left[-\frac{I_0(sa)}{a^2} + \frac{s}{a} I_1(sa) \right], \\
 M_{7,6} &= -\frac{2}{Re} \left[\frac{K_0(sa)}{a^2} + \frac{s}{a} K_1(sa) \right], \quad M_{7,8} = I_0(ka), \\
 M_{7,9} &= \frac{1-a^2k^2}{a^2We} + Q_i a \Gamma_i^2, \quad M_{8,1} = -\frac{2ik^2 I_1(kb)}{\omega + ki}, \\
 M_{8,2} &= \frac{2ik^2 K_1(kb)}{\omega + ki}, \quad M_{8,3} = \frac{k^2}{s} I_1(sb) + s I_1(sb), \\
 M_{8,4} &= -\frac{k^2}{s} K_1(sb) - s K_1(sb), \quad M_{8,5} = \frac{ki}{b} I_0(sb), \\
 M_{8,6} &= \frac{ki}{b} K_0(sb), \\
 M_{9,5} &= s^2 i \left[I_0(sb) - \frac{1}{sb} I_1(sb) \right] - \frac{si}{b} I_1(sb), \\
 M_{9,6} &= s^2 i \left[K_0(sa) + \frac{1}{sb} K_1(sb) \right] + \frac{si}{b} K_1(sb), \\
 M_{10,1} &= -I_0(kb) - \frac{2k^2}{Re(\omega + ki)} \left[I_0(kb) - \frac{1}{kb} I_1(kb) \right], \\
 M_{10,2} &= -K_0(kb) - \frac{2k^2}{Re(\omega + ki)} \left[K_0(kb) + \frac{1}{ka} K_1(kb) \right], \\
 M_{10,3} &= -\frac{2ki}{Re} \left[I_0(sb) - \frac{1}{sb} I_1(sb) \right], \\
 M_{10,4} &= -\frac{2ki}{Re} \left[K_0(sb) + \frac{1}{sb} K_1(sb) \right], \\
 M_{10,5} &= \frac{2}{Re} \left[-\frac{I_0(sb)}{b^2} + \frac{s}{b} I_1(sb) \right], \\
 M_{10,6} &= -\frac{2}{Re} \left[\frac{K_0(sb)}{b^2} + \frac{s}{b} K_1(sb) \right], \quad M_{10,7} = K_0(kb), \\
 M_{10,10} &= -\frac{(1-b^2k^2)}{b^2We} + Q_o \frac{\Gamma_o^2}{b^3}
 \end{aligned}$$

需要指出的是,为使计算结果具有一般性,色散方程的各个参数经过无量纲化的处理过程,其中 h 为尺度特征.

$$\begin{aligned}
 a &= a^*/h, \quad b = b^*/h, \\
 Q_i &= \rho_i/\rho_l, \quad Q_o = \rho_o/\rho_l, \\
 U_i &= U_i^*/U_l^*, \quad U_o = U_o^*/U_l^*,
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \Gamma_i &= \Gamma_i^*/U_l^*h, \quad \Gamma_o = \Gamma_o^*/U_l^*h, \\
 Re &= U_l^*h/\nu, \quad We = \rho_l U_l^{*2}h/\sigma, \\
 \omega &= \omega^*h/U_l^*, \quad k = \alpha h
 \end{aligned}$$

色散方程中, k 为波数, ω 为复频率, Re 为雷诺数, We 为韦伯数, a, b 分别为内外界面半径, Q_i, Q_o 分别为内外气体与液体的密度比, U_i, U_o 分别为内外气体与液体的速度比, Γ_i, Γ_o 分别为内外气体的旋转强度, I_0, I_1 分别为零阶和一阶第一类贝塞尔函数, K_0, K_1 分别为零阶和一阶第二类贝塞尔函数,

$$i = \sqrt{-1}, \quad s = \sqrt{k^2 + Re(\omega + ik)}.$$

未标明各项的值均为零.

上述的推导过程事实上是极其复杂的,必须借助于一些符号运算程序才能获得.本文使用了MAPLE™程序完成色散方程的推导和简化过程,然而,对于色散方程的求解仍必须借助于数值化计算方法获得.

对上述色散方程的数值求解可采用Muller法进行.求解结果可获得一定射流条件下环膜液体射流的最大扰动增长率及其对应的波数和截止波数,以及各种射流参数对环膜射流不稳定性及破碎模式的影响规律.为考虑普适性,不稳定性的分析都是以无量纲的形式进行的.

2 两种特殊形式的射流

为分析环膜液体射流的破碎模式,首先研究环膜液体射流的两种特殊形式,即无界液体中的圆柱气体射流和无界气体中的圆柱液体射流.

2.1 无界液体中的圆柱气体射流

保持环膜液体射流内气-液界面的半径 a 不变化,外气-液界面的半径 b 趋近于无穷大时,环膜液体射流退化为无界液体中的圆柱气体射流.此时,外气-液界面消失,表面波只存在于内气-液界面上.

在此条件下,原色散方程(2)退化为

$$|\mathbf{M}_1| = 0, \quad (3)$$

$|\mathbf{M}_1|$ 为一 5×5 阶的行列式,其中各项的表达式可根据方程(2)考虑当 b 趋近于无穷大时化简得到.

图2给出了根据方程(3)计算所得到的内气体介质旋转运动与射流不稳定性的关系.

从图中可以看出,此时射流的最大扰动增长率较大,射流破碎较为迅速,破碎尺度较大,增长率曲线较为“丰满”,最大扰动增长率所对应的波数与射

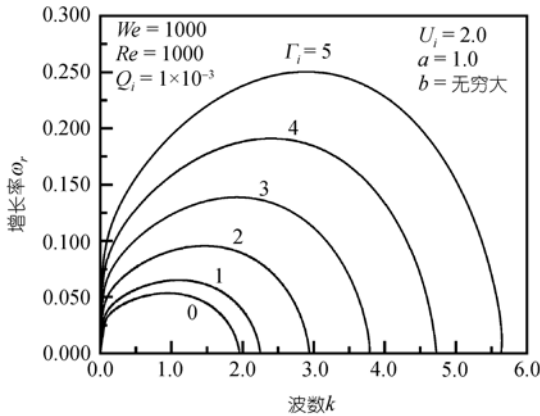


图2 无界液体中圆柱气体射流的不稳定性

流的截止波数相差较大, 最大扰动增长率所对应的波数位于不稳定曲线的前部。同时, 随着内气体介质旋转强度的增强, 射流的不稳定性迅速增加。

2.2 无界气体中的圆柱液体射流

当保持环膜液体射流外气-液界面的半径 b 不变, 外气-液界面的半径 a 趋近于零时, 环膜液体射流退化为无界气体中的圆柱液体射流。此时, 内外气-液界面消失, 表面波只存在于外气-液界面上。

在此条件下, 原色散方程(2)退化为

$$|M_2| = 0 \quad (4)$$

$|M_2|$ 为一 5×5 阶的行列式, 其中各项的表达式可根据方程(2)考虑当 a 趋近于零时化简得到。

图3给出了根据方程(4)计算所得到的外气体介质旋转运动与射流不稳定性的关系。

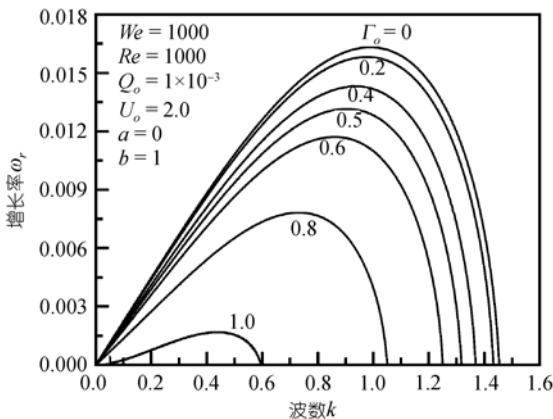


图3 无界气体中圆柱液体射流的不稳定性

从图中可以看出, 此时射流的最大扰动增长率较小, 射流破碎较为缓慢, 破碎尺度较小, 增长率曲

线较为“扁平”, 最大扰动增长率所对应的波数与射流的截止波数较为接近, 最大扰动增长率所对应的波数位于不稳定曲线的中后部。同时, 随着内气体介质旋转强度的增强, 射流的不稳定性迅速减小。

3 射流破碎模式与气-液界面的关联关系

与上述特殊形式的射流破碎模式不同, 环膜液体射流存在着内、外两个气-液界面, 不稳定的表面波分别存在于这两个界面上。两个界面上的表面波存在着一定的相位关系。

进一步的研究结果表明, 两个表面波的相位存在两种不同的形式。对于平面液膜射流而言, 两者的相位差可能 0° , 这种模式被称为对称模式(varicose mode); 相位差也可能是 180° , 这种模式被称为反对称模式(sinuous mode), 如图4所示。对于环膜液体射流, 内外表面波的相位差与此类似, 但并不完全相同, 因此, 对应于环膜液体射流的两种扰动模式被称之为类对称模式(para-varicose mode)和类反对称模式(para-sinuous mode)。

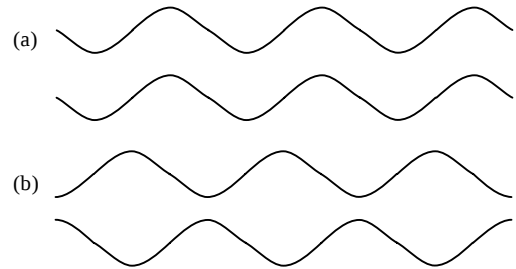


图4 液膜射流的扰动模式

(a) 反对称模式(sinuous mode); (b) 对称模式(varicose mode)

为研究环膜液体射流的破碎模式与内、外气-液界面的关联关系, 分别利用环膜射流不稳定性的色散方程(2)研究了内外气-液界面半径的变化对环膜射流两种破碎模式的影响规律。

图5给出了环膜液体射流内气-液界面半径对于射流扰动增长率的影响规律。从图中可以看出, 随着内气-液界面半径 a 的减小, 对于类反对称模式而言, 扰动增长率先减小, 随后增加; 对于类对称模式而言, 随着内气-液界面半径的减小, 扰动增长率持续增加, 同时, 类对称模式的不稳定性曲线逐渐趋近于图3中无界气体中的圆柱液体 $\Gamma_0 = 0.5$ 的曲线。而无界气体中的圆柱液体射流只有一个外气-液界面, 这证明了环膜液体射流的类对称破碎模式是与射流的外气-液界面直接关联的, 而与内气-液界面的关联程度不

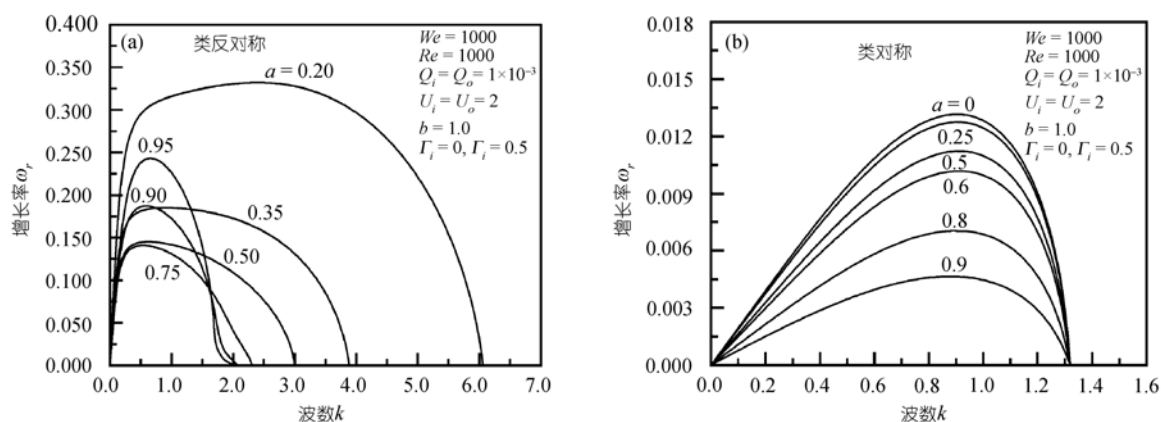


图 5 环膜射流内气-液界面半径对射流不稳定性的影响

(a) 类反对称模式; (b) 类对称模式

大. 换言之, 任何直接作用于外气-液界面上的作用力都会对类对称模式的破碎起着显著的影响, 而作用于内气-液界面上的作用力对类对称模式的破碎影响则有可能被液体射流强烈衰减, 使得作用效果不明显.

需要说明的是, 随着内气-液界面半径 a 的减小, 对于类反对称模式而言, 扰动增长率先减小, 随后增加. 出现这样的非单调的变化规律可以解释为在射流不稳定性表现为破碎(breakup)的模式下(对应于小波数), 扰动增长率随 a 的减小而减小; 而当射流不稳定性表现为雾化(atomization)的模式下(对应于大波数), 扰动增长率随 a 的增大而减小.

图 6 给出了环膜液体射流外气-液界面半径对于射流不稳定性的影响规律. 从图中可以看出, 随着内气-液界面半径 b 的增加, 对于类反对称模式而言, 扰动增长率逐渐减小; 对于类对称模式而言, 随着内气-

液界面半径 b 的增加, 扰动增长率持续增加. 同时, 类反对称模式的不稳定性曲线逐渐趋近于图 2 中空圆柱气体射流 $\Gamma_i = 1$ 的曲线. 而空圆柱气体射流只有一个内气-液界面, 这证明了环膜液体射流的类反对称破碎模式是与射流的内气-液界面直接关联的, 而与外气-液界面的关联程度不大. 换言之, 任何直接作用于内气-液界面上的作用力都会对类反对称模式的破碎起着显著的影响, 而作用于外气-液界面上的作用力对类反对称模式的破碎影响则有可能被液体射流强烈衰减.

4 若干影响因素对环膜射流破碎模式与气液界面关联关系的影响

4.1 无量纲韦伯数(We)的影响

韦伯数(We)主要用于定量描述液体的表面张力. 由于液体的表面张力同时作用于内、外两个气-

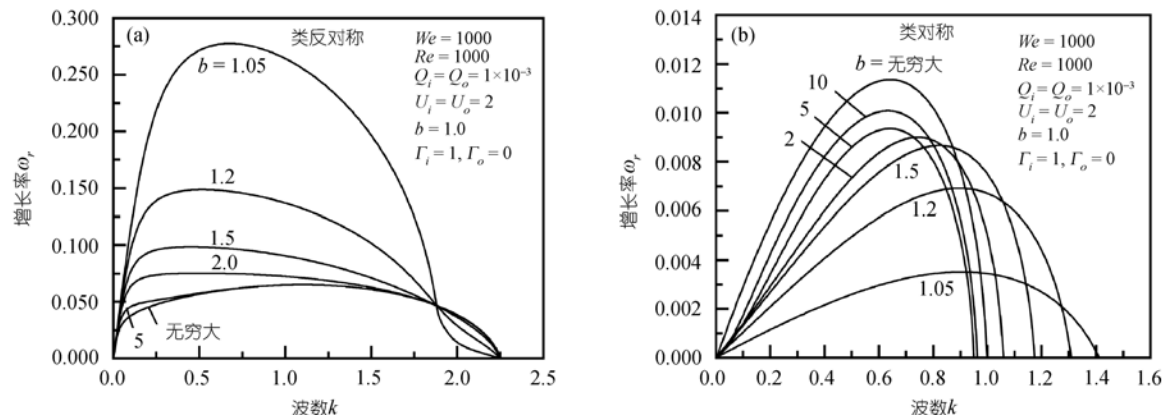


图 6 环膜射流外气-液界面半径对射流不稳定性的影响

(a) 类反对称模式; (b) 类对称模式

液界面上, 因此, We 数对类对称模式和类反对称模式的不稳定性均有显著影响, 随着 We 数的增加, 两种模式的扰动增长率都呈现出先下降, 然后增加的趋势, 如图 7 所示。

4.2 无量纲雷诺数(Re)的影响

无量纲雷诺数(Re)主要用于描述液体的黏性力。由于液体的黏性力亦同时作用于内、外两个气-液界面上, 因此, Re 数对类对称模式和类反对称模式的不稳定性均有显著影响, 随着 Re 数的增加, 两种模式的不稳定性都呈现出增加的趋势, 如图 8 所示。

4.3 无量纲速度比(U_i 和 U_o)的影响

无量纲速度比(U_i 和 U_o)主要用于描述气液惯性力。由于 U_i 主要作用于内气-液界面上, 因此, U_i 对环膜射流的类反对称模式的扰动增长率具有显著的影响。从图 9 中可以看出, 随着 U_i 的增加, 类反对称模

式的最大扰动增长率先下降, 随后又迅速增加。而对于类对称模式, 作用效果要微弱得多, 显然, 由于类对称模式主要与外气-液界面直接关联, U_i 的作用在“穿透”液体射流后被大大衰减了。

图 10 给出了 U_o 对环膜射流最大扰动增长率的影响。由于 U_o 是直接作用于外气-液界面上, 因此对于类对称模式的不稳定性影响十分显著。而对于类反对称模式的不稳定性的作用效果则相对较弱。

4.4 无量纲密度比(Q_i 和 Q_o)的影响

无量纲密度比(Q_i 和 Q_o)主要用于描述气液作用力。由于 Q_i 主要作用于内气-液界面上, 因此, Q_i 是环膜射流类反对称模式的强烈失稳因素。从图 11 中可以看出, 随着 Q_i 的增加, 类反对称模式和类对称模式的最大扰动增长率均增长, 但类反对称模式增加更加明显。这显然是由于类反对称模式是与内气-液界

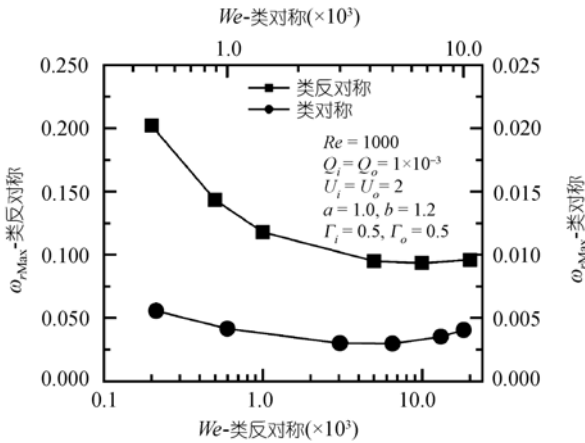


图 7 We 数对环膜射流不稳定性的影响

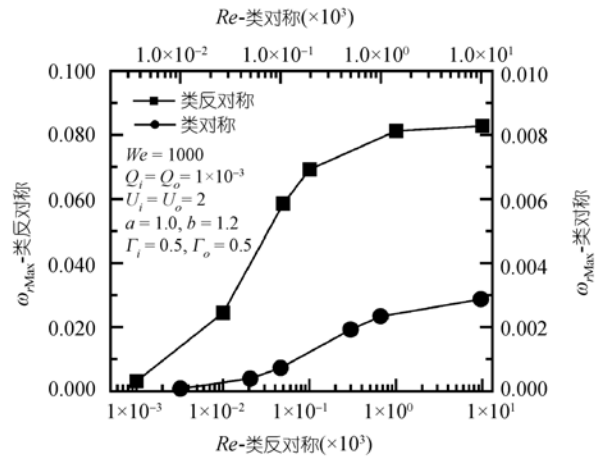


图 8 Re 数对环膜射流不稳定性的影响

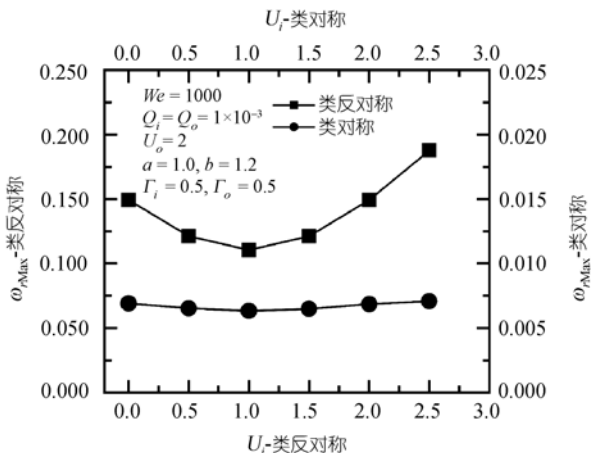


图 9 U_i 对环膜射流不稳定性的影响

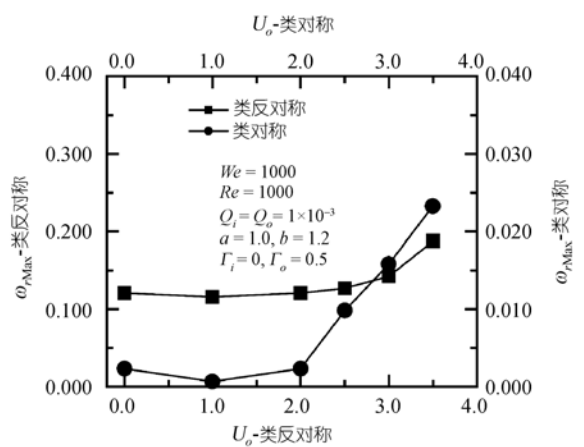


图 10 U_o 对环膜射流不稳定性的影响

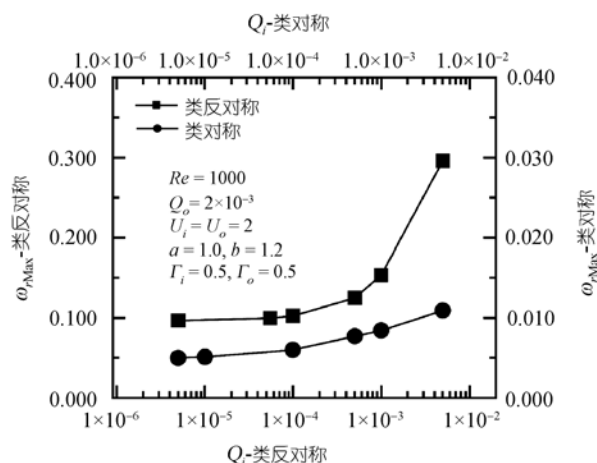


图 11 Q_i 对环膜射流不稳定性的影响

面直接关联的原因。

与此相反, Q_o 主要作用于外气-液界面上, 因此, Q_o 是环膜射流类对称模式的强烈失稳因素. 而对于类反对称模式不稳定性的影响则相对较小, 如图 12 所示.

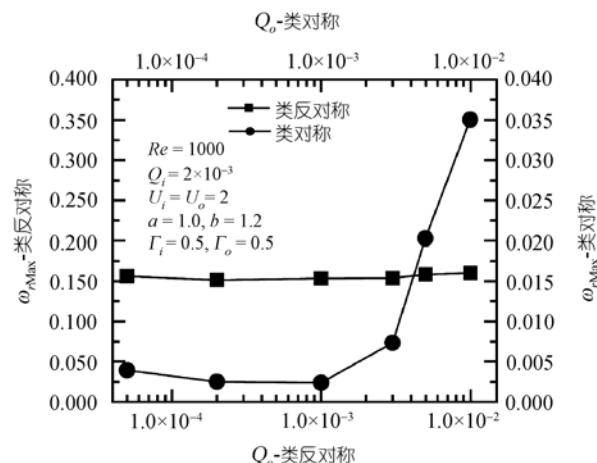


图 12 Q_o 对环膜射流不稳定性的影响

4.5 无量纲旋转强度(Γ_i , Γ_o)的影响

无量纲气体旋转强度(Γ_i , Γ_o)主要用于描述气体旋转离心力.

Γ_i 对于环膜液体射流有失稳作用, 但由于 Γ_i 主要作用于内气-液界面上, 因此, Γ_i 对类反对称模式的作用较之类对称模式要强烈得多, 如图 13 所示. 另一方面, Γ_o 是环膜液体射流的促稳因素, 但由于 Γ_o 作用于外气-液界面上, 因此, 对于类对称模式的促稳作用更为强烈, 如图 14 所示.

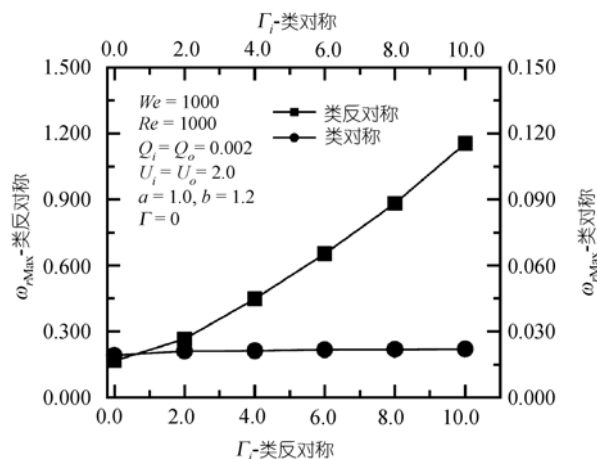


图 13 Γ_i 对环膜射流不稳定性的影响

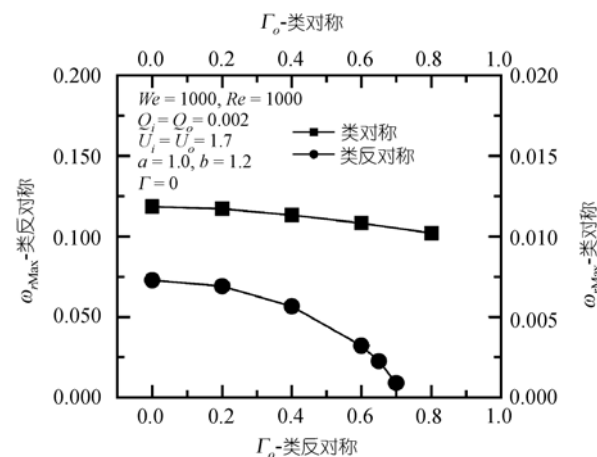


图 14 Γ_o 对环膜射流不稳定性的影响

5 结论

() 环膜射流的类反对称模式主要与射流的内气-液界面相关联, 而类对称模式主要与射流的外气体-液界面相关联;

() 各种射流参数对类反对称模式和类对称模式不稳定性的作用性质是相同的, 但作用效果的强烈程度不同;

() 与液相相关的力同时作用于内、外两个气-液界面上, 因而对两种破碎模式的影响均较为显著;

() 与内气体介质相关的力主要影响类反对称模式的不稳定性, 而外气体介质相关的力主要影响类对称模式的不稳定性;

() 各种作用力在“穿透”射流液相部分后被大大衰减.

参考文献

- 1 Kendall J M. Experiments on annular liquid jet instability and on the formation of liquid shells. *Phys Fluids*, 1986, 29(7): 2086—2094[doi]
- 2 Lee J G. Breakup of cylindrical liquid sheets. Doctor Dissertion. Iowa: University of Iowa, 1990
- 3 Santangelo P J, Sojka P E. A holographic investigation of the near-nozzle structure of an effervescent atomizer-produced spray. *Atom Spray*, 1995, 5: 137—155
- 4 Crapper G D, Dombrowski N, Pyott G A D. Kelvin-helmholtz wave growth on cylindrical sheets. *J Fluid Mech*, 1975, 68(3): 497—502[doi]
- 5 Meyer J, Weihs D. Capillary instability of an annular liquid jet. *J Fluid Mech*, 1987, 179(6): 531—545 [doi]
- 6 Lee J G, Chen L D. Linear stability analysis of gas-liquid interface. *AIAA J*, 1991, 29(10): 1589—1595
- 7 Shen J, Li X. Instability of an annular viscous liquid Jet. *Acta Mech*, 1996, 114(1): 167—183 [doi]
- 8 Shen J, Li X. Breakup of annular liquid jets in two gas streams. *J Propul Power*, 1996, 12(4): 752—759
- 9 Kang D J, Lin S P. Breakup of swirling liquid jets. *Int J Eng Fluid Mech*, 1989, 2(1): 1647—1662
- 10 Lian Z W, Lin S P. Breakup of a liquid jet in a swirling gas. *Phys Fluids*, 1990, 2(12): 2134—2139[doi]
- 11 Parthasarathy R N, Subramaniam K. Temporal instability of swirling gas jets injected in liquids. *Phys Fluids*, 2001, 13(10): 2845—2850[doi]
- 12 Liao Y, Jeng S M, Jog M A, et al. The effect of air swirl profile on the instability of a viscous liquid jet. *J Fluid Mech*, 2000, 424(10): 1—20[doi]
- 13 Ponstein J. Instability of rotating cylindrical jets. *Appl Sci Res*, 1959, A8: 425—456[doi]
- 14 Liao Y, Jeng S M, Jog M A, et al. Instability of an annular liquid sheet surrounded by swirling airstreams. *AIAA J*, 2000, 38(3): 453—460

《中国科学 E 辑：技术科学》第 38 卷 第 3 期 目次

评述

零质量射流技术及其应用研究进展……………张攀峰 王晋军 冯立好

论文

HIMS 系统及其定制模型的开发与应用……………刘昌明 王中根 郑红星 张 槽 吴险峰

三维 Hall MHD 数值模拟中初始载流子对场向电流分布的影……………张贤国 濮祖荫 马志为 周煦之

制冷混合工质饱和液体焓的推算……………陈则韶 陈建新 胡 芃

多孔介质发动机压燃着火的数值研究……………赵治国 解茂昭

小型蒸汽压缩式制冷装置的研制及实验研究……………钟晓晖 吴玉庭 马重芳

定向凝固速率跃迁下平界面处液相溶质浓度变化及界面失稳……………李双明 傅恒志

单壁碳纳米管拉伸试验的分子动力学模拟……………付称心 陈云飞 焦继伟

纳米 Ta 基阻挡层薄膜及其扩散体系电阻特性研究……………陈海波 周继承 李幼真

Fe 基合金应力退火感生磁各向异性机理的 AFM 研究……………

……………方允樟 郑金菊 施方也 吴锋民 孙怀君 林根金 杨晓红 满其奎 叶方敏

Sol-gel 法制备 Bi_{3.4}Ce_{0.6}Ti₃O₁₂ 铁电薄膜及其性能……………

……………郭冬云 李美亚 刘 军 于本方 裴 玲 于 军 王耘波 杨 兵

填料粒径对各向同性导电胶渗滤阈值的影响……………吴海平 吴希俊 葛明园 刘化章 张国庆

脱硫肠状菌合成纳米硫化铅……………贡 俊 张肇铭 白红娟 杨官娥

瓷器热释光测定年代中古剂量的正确估算……………王维达

数学物理逆问题中测量信息的熵描述……………李 静 黄卡玛 赵 翔

快讯

AEMS 及其在上海电网试运行……………卢 强 何光宇 梅生伟 孙英云 阮前途 王 伟 张王俊 俞旭峰