

文章编号:1000-6761(2007)02-247-04

里克管的数值模拟

张国俊, 钟英杰, 张雪梅, 徐璋, 任建莉

(浙江工业大学 热能所, 机械制造及自动化教育部重点实验室, 杭州 310014)

摘 要: 提出热源周围空气不稳定的热量与声压、脉动速度之间关系的新假设。在无外加强制作用下实现里克管脉动工况数值模拟, 与里克管作为自激热声装置的实际情况一致。以外流场处理方法研究里克管内流场问题, 进一步研究里克管的管口效应, 以降低由它引起的高强度噪声, 为里克管型强化脉动燃烧、强化传热装置产品化打下基础。通过实验, 验证了模拟的正确性, 并分析了模拟中出现的物理现象。图 6 表 2 参 7

关键词: 工程热物理; 里克管; 数值模拟; 热源模型; 流场; 管口效应

中图分类号: TK12 **文献标识码:** A

Numerical Simulation of Rijke Tubes

ZHANG Guo-jun, ZHONG Yin-jie, ZHANG Xue-mei, XU Zhang, REN Jian-li

(MOE's Key Lab of Mechanical Technology & Automation, Institute of Thermal Energy, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: A new hypothesis concerning the relationship between unsteady heat absorption of air surrounding a heat source and sonic pressure as well as the air's pulsating rapidity. Numerical simulation results of Rijke tubes, pulsating without forced triggering, agree with actual conditions of Rijke tubes acting as self-excited thermal-sonic devices. The flow field within Rijke tubes is here being studied together with the surrounding flow field. A foundation is laid for further research on the nozzle effect of Rijke tubes, on ways for reducing its noise level ways for effectuating intensification of Rijke tube type pulsating combustion and for developing the heat transfer installation into a product. Experimental results vindicated the correctness of the simulation and the physical phenomena displayed by simulation results are analyzed. Figs 6, tables 2 and refs 7.

Keywords: engineering thermophysics; Rijke tube; numerical simulation; heat source model; flow field; nozzle effect

热-声的转换是一种重要的现象。有时, 它会使得动力装置失效、破坏。另一方面应用可控热-声转换技术, 可以提高燃烧效率, 清除积灰, 降低燃烧污染物排放^[1]。自从 1859 年里克用热丝网代替火焰, 发现了里克管效应以后, 里克管成为研究热-声转换很好的对象。由于里克管的发声强度常常达到或超过

140 dB, 已经进入了非线性声学的领域, 属于非线性驻波的范畴, 所以对里克管发声的研究具有基础研究性质, 在学术上也很有意义。

数值模拟是一种研究里克管发声的手段。严红^[2]采用 TVD 格式模拟燃烧器内的二维脉动流场及温度场, 分析加热量对流动及对流传热过程的影响, 讨论脉动流动对对流传热率的作用。C. C. HANTSCHK^[3]采用对热源给出固定温度的方法, 并考虑了温度梯度的影响, 模拟了 2 端开口和 1 端开口 1 端闭合的热-声发声现象; J. Majdalani^[4]使用 FLOW-3D 软件模拟里克管内流动, 使用固体多孔介

收稿日期: 2006-05-10 修订日期: 2006-07-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50576087); 浙江省自然科学基金重点项目(Z503122)。

作者简介: 张国俊(1982-), 男, 硕士研究生, 从事脉动装置降噪方面的研究。

质作为热源。Prateep Chatterjee^[5]等采用燃烧模型来解析里克管中热-声不稳定现象。笔者也对里克管发声进行了数值模拟,其特点有 3 方面:第一,模型反映了里克管振荡的本质,体现了里克管自激脉动的特点,即依靠本身的参量,如压力、速度、温度激发里克管振荡,而不是由外界强加一个振荡源;第二,把里克管内流场模拟问题处理成里克管和它外部空间相耦合的一个外流场问题模拟。这样既可以得到里克管的管口效应,又比内流场处理必须人为假定进出口边界条件更符合实际情况,同时也为工程上里克管降噪研究做准备;第三,提出了新的热源模型假设。

1 物理模型

里克管的物理模型示于图 1。它是 2 端开口的直管,有热源,并有均匀气流通过。热源可以是电热丝网,也可以是火焰。均匀气流可以是竖立管的自然吸风,也可以是任何通风。热源停止或通风停止都会停止发声。其热源位置有一定要求,典型的一种是放在离下端 1/4 管长左右处。在 2 端开启的管中,从理论上说,基波声压在管的 2 端是节点,中央是腹点,质点速度正好相反。声压与速度之间的关系示于图 1。

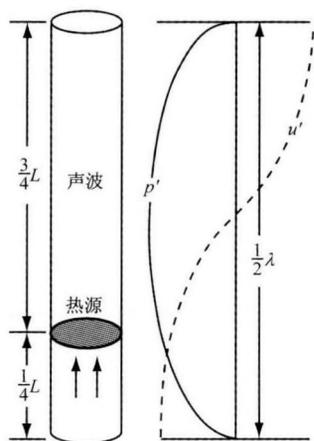


图 1 里克管和它的声学特性
Fig 1 Rijke tube and its acoustic characteristics

模拟里克管长 90 cm,直径 5 cm,430 W 功率电加热,热源位于距管下端 22.5 cm 处。前人大多未考虑由于管口效应存在的声泄漏,即里克管管口 2 端的声压不为 0 的事实。为了更准确地描述里克管的发声现象,借鉴大气数值模拟方法,把里克管和外部环境一同作为研究对象,管壁作为自由场中固体壁处理来进行数值模拟。从模拟的准确性和计算成本综合衡量,人为认定离里克管上下管口 6 倍直径远的地方为自由边界。外部空间范围是 $\phi 50$ cm,高

150 cm。这样,通过模拟里克管外部流场与里克管内部流场耦合作用,避开了管口效应这个难题。物理模型几何形状及尺寸如图 2 所示。

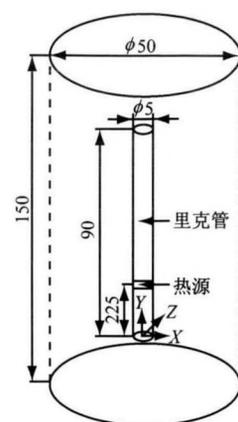


图 2 里克管和外部空间
Fig 2 Rijke tube and its external space

由图 2 可以看出:该模型存在严格的对称性,可以简化为二维问题模拟。气流从冷端透过热源流向热端,孔隙率是 0.9。加热从 0 开始增加到 430 W。里克管的热源布置如图 3 所示:

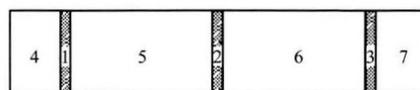


图 3 发热堆 1、2、3 电热丝,4、5、6、7 热源周围的空气
Fig 3 Heat pile with heating wires 1, 2, 3 and air surrounding the heat source represented by 4, 5, 6, 7

热源模型是模拟里克管激振的关键。同类文章对热源模型的假设几种:严红采用二阶精度 TVD 格式模拟燃烧器内的二维脉动流场及温度场,给热源项强加一个随时间正弦变化的源;T. Ishii^[6]用热源与吸热设备来模拟,给热源维持稳定的供热量,假设在热源与吸热设备之间存在很大的温度梯度,推出热源与吸热设备之间流体的速度有变化。由于速度的变化,流体得到的热量是可以波动的;C. Sangyeon^[7]用丙烷气体单步化学反应来模拟,没有考虑在实验中使用的火焰保持器影响因素,用强迫振动的方法作为触发器来模拟流体的不稳定行为。可以看出不管是添加随时间变化的热源项,还是人工创造的温度梯度都是一种外界强制的力量使里克管起振。显然,如果设计 1 个热源模型,利用里克管发声过程中本身就存在的量或是参数就能模拟气体热量的不稳定,进而得出整个管子的压力、速度、密度等量不稳定的表达形式,就更接近里克管自激振荡的事实。在分析物理情况和试验了许多模型以后,作者假设,热源处气体的热量 $q = \bar{q} + q'$,其中 \bar{q} 是时间平均得热量, q' 是里克管内流体参数脉动产生

的热量。

2 数学模型

里克管竖直放置,它是浮力作用下的非稳态二维流场问题。

$$\text{连续方程: } \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0$$

$$\text{动量方程: } \frac{\partial \rho u_j}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j u_i}{\partial x_i} = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial \tau_{ji}}{\partial x_i}$$

$$\text{其中 } \tau_{ji} = \eta \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \frac{2}{3} \eta \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ji}$$

式中, η 为动力粘度,粘性系数均匀时 $\frac{\partial u_i}{\partial x_j}$ 为 0, $\frac{2}{3} \eta$

$\frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ji}$ 为粘性项。

能量方程:

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(u_i(\rho E + p)) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} + u_j \tau_{ij} \right) + s_k$$

状态方程: $p = \rho RT$

以上方程式中 $i = 1, 2; j = 1, 2$ 。

总的加热量为 430 W, 起始阶段加热作用分为 2 部分: 一部分是对电热丝加热, 其值为 s_d , 其中电热丝温度和得热量 s_d 的关系服从傅里叶定律; 另一部分是电热丝传热给热源周围的空气, 就是能量方程中的 s_k 。因此, $430 \text{ W} = s_d + s_k$ 。为符合传热学书写习惯, 把 s_k 写成 q 。由前面假设得, $q = \bar{q} + q'$, \bar{q} 可以根据牛顿冷却公式计算。 $\bar{q} = \bar{h} \cdot A_s \cdot \Delta T$ 。 \bar{h} 和 ΔT 是电热丝和热源周围空气的表面换热系数和温差关于时间的平均值。为了便于理解, 我们分 2 步来说明: h 为 $h(t)$ 的简写, 它表示任意时刻电热丝和热源周围空气的表面换热系数。 h 用平板对流换热的实验关联式来计算。首先计算自然对流, 强迫层流, 强迫湍流 3 种情况下的 h 值, 然后取其中的最大值。计算公式如下:

$$Nu = 0.57(Gr \times Pr)^{1/4} \quad Gr \times Pr \leq 10^9$$

$$Nu = 0.14(Gr \times Pr)^{1/3} \quad Gr \times Pr > 10^9 \quad (5)$$

$$Nu = 0.664 \times Pr^{1/3} Re^{1/2} \quad (6)$$

$$Nu = Pr^{1/3}(0.036 Re^{0.8} - 836) \quad (7)$$

前面 3 式计算得到 Nu 数, 取其最大值, 根据 $Nu = hL/k$, 得到 h 。

$$Gr = g\beta |T_w - T_\infty| L^3 (\rho/\mu)^2 \quad (8)$$

$$Pr = C_p \mu / k, Re = \rho u L / \mu \quad (9)$$

式中, L 是电热丝特征长度, k 是空气热传导系数, g

是重力加速度, β 是体积膨胀系数, T_w 是电热丝温度, T_∞ 是热源周围空气温度, ρ 是空气密度, μ 是空气动力粘度, C_p 是空气定压比热容, u 是空气速度。

求解步骤:

(1) 选择 FLUENT 作为求解算法, 它基于有限容积法进行求解, 针对热源及周围空气网格来说, 速度变量取网格面上的值, 除速度外的其它变量取网格中心的值。

(2) 求 \bar{h}

根据前面定义, $\bar{h}(t) = (h(t) + h(t - \delta t))/2$ 。

其中, $h(t)$ 是当前时间的表面换热系数, $h(t - \delta t)$ 是上个时间步的表面换热系数, δt 是时间步长。

(3) 求 q'

我们注意到热量是一个能量概念, 声强

$$\bar{I} = \langle p'u' \rangle = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau p'u' dt$$

\bar{I} 也是表征能量的量, 而决定声强的主要变量是 $p'u'$, 另外, $p'u'$ 的最大值是在离冷端管口 $1/4L$ 的地方, 这与热源在该处最容易自激的事实相符。经过多次数值模拟试验以及数值结果与实验结果比较后, 我们假设 $q' = k(p'u')^{1/2}$, k 是比例系数。

脉动量表达式如下:

$$\overline{p(t)} = (p(t) + p(t - \delta t))/2, p(t)' = p(t) - \overline{p(t)}$$

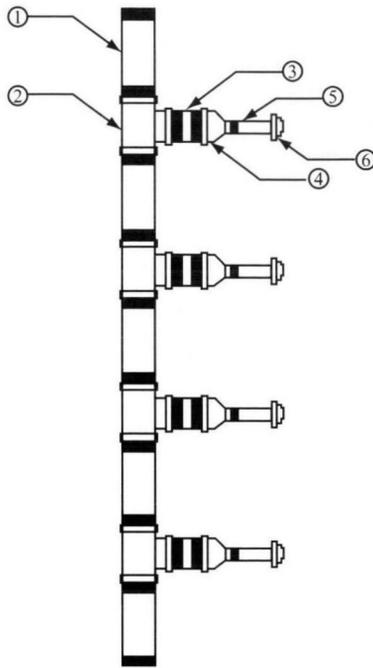
$$\overline{u(t)} = (u(t) + u(t - \delta t))/2, u(t)' = u(t) - \overline{u(t)}$$

3 边界条件与离散格式

外围空间是自由边界条件, 即压力为环境大气压, 温度 300 K。里克管的壁面取耦合壁面, 空气密度根据理想气体状态方程计算得出, 电热丝和热源周围空气是能量源项, 用 FLUENT 中 UDF 编制程序计算 s_d, s_k 。另外, 由于里克管竖直放置, 所以要考虑浮力的作用。选择分离式求解器, 因为计算的是不稳定的流场, 所以压力与速度耦合方式用 PISO。

4 计算结果分析

这里克管实验测试结果已经由文献[4]给出, 实验装置示意如图 4 所示。装置设计成简单的圆柱体, 这样在需要的时候可以很方便的替换。这个里克管装置包括几个可互换的组件。50 mm 长螺纹钢管①, 连接用的 T 型螺纹接头②。在②的一端即②处接 1 个短的螺纹接头③。这个短的螺纹接头连着减压器④, 在长螺纹接头⑤和螺帽⑥的地方放入微型麦克风。里克管热源是用电热丝加热, 放在离冷端管口 $1/4L$ 的地方, 加热方式是从零增加到最终值 430 W。沿着管长的方向在 4 个不同的位置布置测



1—螺纹钢管 2—T型螺纹接头 3—短螺纹接头
4—减压器 5—长螺纹接头 6—螺帽

图 4 实验装置示意图

Fig 4 Schematic diagram of the experimental apparatus

点,来测试它们的频率和压力振幅。通过布置在长螺纹接头和螺帽间的微型麦克风,连接到双通道的 HP-3582A 频谱分析器上。表 1 给出振荡稳定时计算与实验结果的声压分贝数对比。计算结果与实验数据吻合很好。

表 1 数值计算结果与实验的对比

Tab.1 Comparison of calculation results with experimental data

测点位置 从底部算起/cm	实验数据 /dB	数值结果 /dB	相对误差
25	134.5	135	0.37%
35	135.7	135.6	0.07%
55	135.6	132	2.65%
65	132.5	129.5	2.26%

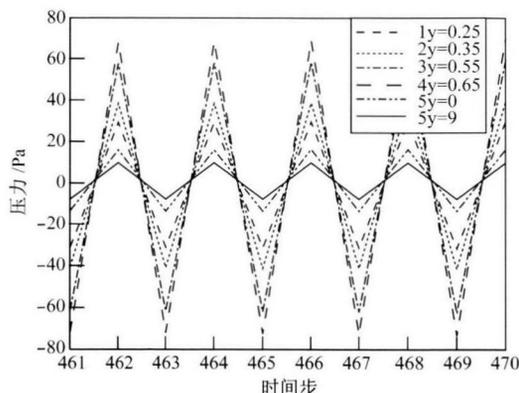


图 5 里克管振荡稳定时沿轴向各截面声压振幅

Fig 5 Sonic pressure amplitudes at various locations along the axis of the Rijke pipe during its steady state of oscillation

图 5 是监视点压力达到稳定周期振动的计算结果。从图 5 中 5、6 两条计算曲线可以看出,管口的声压并不为零。为了捕捉到振荡,采用 0.0025 s 作为一个时间步。理论上里克管发声基频 $f = mc_0/2L = 1 \times 340/(2 \times 0.9) = 189$ (Hz),从图 5 上看出数值模拟得到的里克管发声频率是 200 Hz。

选择 $y = L/4$,即 $y = 22.5$ cm 的地方为典型采样面,对该处的温度、压力、速度进行监测,结果示于图 6。

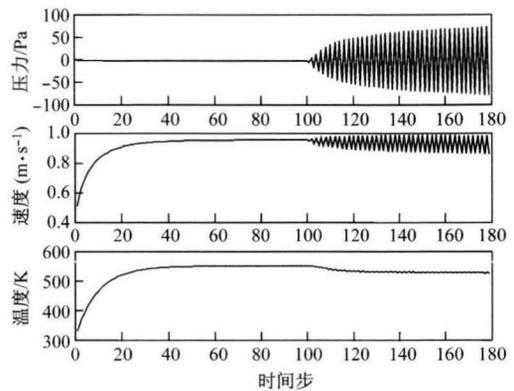


图 6 里克管激振全过程,监视点在 $y = 22.5$ cm 处

Fig 6 Whole progression of a Rijke tube's exited vibration, observed at the location $y = 22.5$ cm

从图 6(c)得知,刚加入的 430 W 热量,使电热丝温度不断上升,同时电热丝温度升高后与热源附近的空气产生温度差,热量从电热丝传给周围的空气。空气从管下端吸入,电热丝与其周围的空气发生对流换热。因为热源丝的温度小于 800 °C,不考虑辐射的影响。导热与对流换热的综合作用使得热源周围的空气温度上升。当电热丝的温度,热源周围空气的温度与流场取得平衡后,电热丝与其周围空气温度就不再上升。因为温度、压力、速度各个量由 N-S 方程和理想气体方程相互联系与相互制约,所以当温度不再上升达到一个最终条件后,其它的量也都达到一个最终条件。达到最终条件后的温度值是围绕一个平均值上下波动的。正是这个波动构成了里克管自激的初始源动力。运行 100 个时间步以后,监测点的压力、速度、温度开始振荡。

从图 6(a)得知,压力从零开始一直减少到一个最终条件。速度、温度从初始值开始一直增加到最终条件,其趋势与文献[4]一样,压力则与该文献不一样。根据空气动力学原理,热量对气流参数的影响示于表 2:

根据表 2,在监视的地方空气被加热,所以我们认为 p 应该从零开始逐渐减小。(下转第 281 页)

验脱硫率均有所提高,而且脱硫率保持在80%以上的时间都比空白试验延长了2~3 h。而且加入有机酸后可以在较低的pH条件下保持较高的脱硫率,大大提高了经济效益,减小了系统设备的结垢和堵塞。

3 结 论

① 其它条件不变时,随着进口SO₂浓度的增加,消耗的石灰石量增加,而同样浆液流量及石灰石含量下,石灰石的溶解来不及补充,出塔浆液pH下降,故脱硫率下降。② 己二酸强化石灰石脱硫试验过程的脱硫率随液气比L/G增大而提高,但当液气比达到4 l/m³后脱硫率提高的幅度明显减小。③ 在实验条件下,pH<4.8时,有机酸强化石灰石脱硫过程的脱硫率 η 随浆液pH近似线性提高,pH在4.8~6.2之间时,脱硫率保持稳定。考虑到脱硫率、石灰石利用率及防垢等多方面的因素,操作pH宜控制在4.8~6.2。④ 随着石灰石浆液浓度的增加,脱硫率也之提高,但是石灰石浆液浓度增加到一定程

度时,脱硫率随浆液浓度增加而提高的幅度变缓。⑤ 在实验条件下,5 mmol/l的己二酸对石灰石脱硫过程的强化作用最强,最高脱硫率达到96.2%;柠檬酸次之,最高脱硫率达到93.6%。所选的4种有机酸都具有缓冲浆液pH的作用,其中柠檬酸的缓冲性能最强,己二酸次之,甲酸缓冲性最弱,带一个苯环的苯甲酸较甲酸稍强。

参考文献:

- [1] 吴忠标,等.己二酸强化石灰石浆液溶解除硫工艺过程研究[J].高校化学工程学报,2003,17(5):540-544.
- [2] 陈学泳,等.有机羧酸添加剂对低浓度吸收剂脱硫效率的影响[J].华北电力技术,1999(7):23-25.
- [3] 黄 梅,等.有机羧酸对低浓度CaCO₃吸收液的烟气脱硫系统影响的初步研究[J].热力发电,1999(6):29-34.
- [4] 吴忠标,等.己二酸强化石灰石浆液脱硫工艺过程研究[J].高校化学工程学报,2003,5(17):500-544.

(上接第250页)

表2 热量对气流参数的影响

Tab.2 The effects of heat on the parameters of the air flow

参数	加热($Ma < 1$)	加热($Ma > 1$)
p	减小	增大
u	增大	减小
T	1	增大

$Ma < 1/\sqrt{k}$ 时增大, $Ma > 1/\sqrt{k}$ 时减小。 Ma 是马赫数, k 是比比,对于空气 $k=1.4$ 。

5 结 论

里克管的结构简单,但用数值方法模拟它的自激励过程十分复杂。由于声压波动幅度高达几百帕,很容易出现数值发散。另外,边界条件是固定值,而要得到的是不稳定、随时间变化的周期性解,因此数值模拟是十分困难的。这个数值模拟结果,与实验中测得的数据、实验观察到的一些现象有很好的-一致性,证明所用的热源项假设有其合理性,是一种可行的方法。另外,本文采用里克管和管外流场一起研究的方法,为研究管口效应及里克管降噪提供了基础。从热源假设以及自激开始到稳定的过程来看,里克管自激振荡是一个正反馈过程。开头不稳定的气流激发较小的声振荡,在经过热源时,不稳定的气流速度与声波都得到加强,这样它们的乘

积即声强得到加强。加强的声强使得热源热量损失波动更大,增加了激发,最后达到平衡进入振荡稳定阶段。

参考文献:

- [1] 钟英杰,陈福连,吴心平.热声转换和脉动燃烧技术研究现状及其应用[J].浙江工业大学学报,1998,26(1):34-39.
- [2] 严 红,陈福连,吴心平.脉动燃烧器内流场的数值模拟[J].燃烧科学与技术,2001,7(2):203-207.
- [3] Hantschk C-C, Vortmeyer D. Numerical simulation of self-excited thermoacoustic instabilities in a rijke tube [J]. **Journal of Sound and Vibration**, 1999, 277(3): 511-522.
- [4] Majdalani J, Entezam B, Van Moorhem W K. Full-scale numerical model of a rijke-type pulse combustor [C]. AIAA2001-2121, May 2001.
- [5] Prateep Chatterjee, Uri Vandsburger, William R. Saunders, etc. On the spectral characteristics of a self-excited Rijke tube combustor numerical simulation and experimental measurements [J]. **Journal of Sound and Vibration**, 2005, 283(3-5): 573-588.
- [6] Ishii T, Hihara E, Saito T. Numerical analysis on heat-induced vibration of air column [J]. **JSME International**, 1998, 41(3): 674-681.
- [7] Sangyeon C, Jaeheon K, Soogab L. Characteristics of thermoacoustic oscillation in a ducted flame burner [C]. In Proceedings of the 36th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, NV, 1998: 12-15.