

研究论文

一种削弱振荡管内反射激波能量的方法

胡大鹏, 刘培启, 朱 彻

(大连理工大学化工学院, 辽宁 大连 116012)

摘要: 激波吸收腔是影响热分离机效率的重要结构, 采用数值模拟和实验的方法对其进行研究, 结果表明: 数值模拟能够捕捉振荡管内激波和接触面两个间断; 反射激波压力最大值随吸收腔直径比 D/d 增加而减小, 随吸收腔长径比 L/d 增加而降低。提出一种实用的吸收腔结构——串联吸收腔, 对比 2 个和 3 个吸收腔串联结构后, 证明在膨胀比 $\alpha < 6$ 范围内 2 个吸收腔串联结构是最佳选择。

关键词: 热分离机; 反射激波; 振荡管; 消波技术

中图分类号: TQ 051.1

文献标识码: A

文章编号: 0438-1157 (2008) 03-0562-05

A weakening reflected shock wave method in oscillating tube

HU Dapeng, LIU Peiqi, ZHU Che

(School of Chemical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116012, Liaoning, China)

Abstract: Shock wave absorber is the most important component of thermal separator. This paper focuses on shock wave absorber by way of numerical simulation and experiment. The conclusions are as follows: two discontinuities in oscillating tube, shock wave and contact surface, can be captured very well by numerical simulation. Moreover, the reflected shock wave amplitude is reducing with increasing diameter ratio D/d and increasing length diameter ratio L/d . The paper proposes a new kind of structure, serial shock wave absorber and suggests that the two-stage series absorber is a better choice which can effectively weaken the reflected shock wave at an expansion ratio less than 6, compared with the three-stage one.

Key words: thermal separator; reflected shock wave; oscillating tube; weakening wave technology

引 言

热分离机是 20 世纪 70 年代发明的一种化学工业重要设备, 目前主要用于油田气和火炬管气轻烃回收、天然气脱水、化工厂尾气或废气净化、合成氨施放气中回收液氨等领域^[1-4]。旋转式热分离机^[5-6]由一个内部的气体分配器及呈放射状均布在其周围的振荡管束所组成, 如图 1 所示。工作时, 压缩气体经空心轴进入气体分配器并在喷嘴中加速, 从喷嘴出来的高速射流随气体分配器的转动而

连续地改变方向并依次射入四周呈放射状的振荡管中, 每根振荡管在两次射气间隔期间排气。振荡管内反射激波对管内新鲜气或者管外的已冷气的加热作用是影响效率的主要因素之一, 如何简单有效地削弱反射激波的能量一直是该领域的研究热点。目前采用的方法大致分为两种: 一是增加管长, 利用管内气体黏性和管壁摩擦作用有效地削弱反射激波的能量, 但这将导致机器体积的急剧增加, 如法国 NAT 公司热分离机管长达 12 m^[1-2]; 二是在振荡管末端增加吸收装置, NAT 公司在热分离机的振

2007-07-10 收到初稿, 2007-12-12 收到修改稿。

联系人及第一作者: 胡大鹏 (1963—), 男, 教授。

基金项目: 国家高技术研究发展计划项目 (2006AA05Z216)。

Received date: 2007-07-10.

Corresponding author: Prof. HU Dapeng. **E-mail:** hdphxp@163.com

Foundation item: supported by the High-tech Research and Development Program of China (2006AA05Z216).

荡管末端增加了一个直径比振荡管直径大 10~20 倍封闭环形管^[1]。方曜奇等^[3]对上述结构进行了改进，每根振荡管末端安装一个截面突扩吸收腔，有效地削弱了反射激波，减小了振荡管的长度。李学来等^[7]提出复合阻尼陷波器，在截面突扩管中安装多级孔板以形成旋涡组来充分耗散入射激波能量，并且利用外部强制冷却系统将激波耗散的能量及时取出。邹久朋等^[8]提出填料管结构，即在管末端添加填充物作为多孔填料来削弱反射激波能量。本文提出了一种串联吸收腔结构，并对其工作原理及其消波效果进行了初步验证。

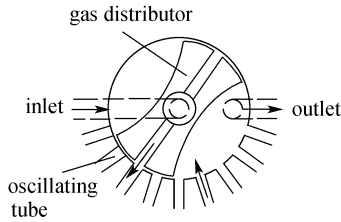


图1 旋转式热分离器示意图

Fig.1 Scheme of rotating thermal separator

1 研究方法

1.1 计算模型与数值方法

由于实际中主要关心振荡管内主流的参数变化，故数值模拟中简化为二维模型；控制方程采用可压 N-S 方程，离散方法为有限体积法；针对可压缩气体的高速湍流问题，选用 Realizable $k-\epsilon$ 模型^[9-11]；进入振荡管的气体逐渐压缩内部气体时，管内会产生压力和温度间断面——激波面，两种气体之间存在温度间断面——接触面，为了具有良好的捕捉间断能力，数值运算在空间域上采用了三阶精度的 MUSCL 离散格式^[12]；在时间域上采用的是全隐式时间积分方案，最后求解方程时采用所有变量联立的耦合式解法。

边界条件：入口设定总压 p_{in} ，出口由于速度较低，设定静压 p_{out} ，转速为 $2000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

计算区域由于存在转动与静止两种状态，喷嘴入口采用滑移网格进行处理，喷嘴划分为一个区，振荡管划分为一个区，如图 2 所示。

1.2 实验装置

图 3 为实验流程示意图，压缩机提供的高压气体通过储气罐和缓冲罐进入旋转式热分离器中进行制冷，入口压力由球阀 10 来调节，球阀 11 控制排

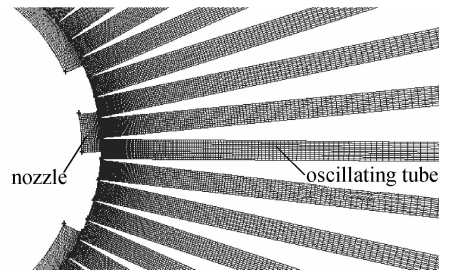


图2 数值模拟的网格划分

Fig.2 Computational domain and grid

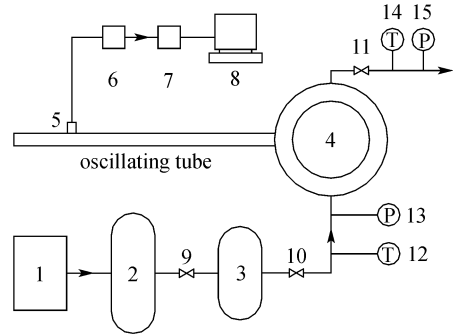


图3 旋转式热分离器实验装置流程图

Fig.3 Schematic diagram of experimental set-up

1—air compressor; 2—gasholder; 3—buffer tank; 4—thermal separator; 5—pressure sensor; 6—amplifier; 7—transistor; 8—computer; 9, 10, 11—valve; 12, 14—thermometer; 13, 15—manometer

气压力，入口、出口压力用精度为 0.4 级的压力表 13、15 测量；入口、出口温度用 SWX-02 型数字测温仪 12、14 测量；转速通过 SEMB-12 型传感器及 XJP-061 转速仪测量；压力波测量系统由 MB26 系列硅压阻式压力传感器 5、信号放大器 6、数据采集器 7 和计算机 8 组成。

2 结果与讨论

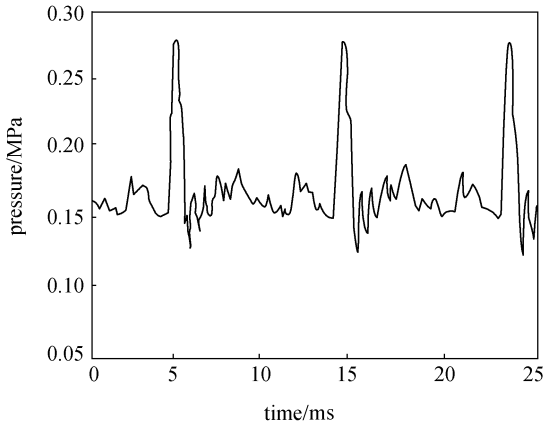
2.1 实验和计算结果分析

由于激波的强弱可通过波前后压力变化反映出来，所以实验和数值模拟中把一点处压力作为变量来研究。

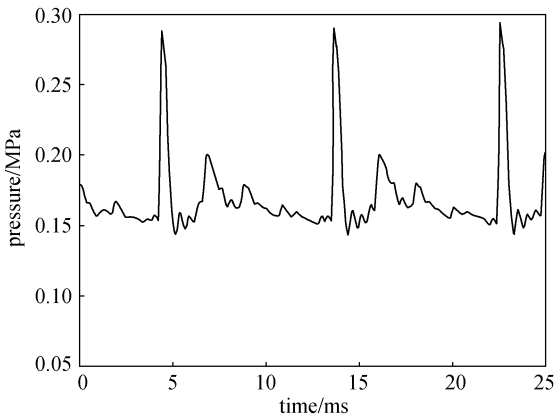
对 $d=10 \text{ mm}$ 的振荡管，激波吸收腔^[3,13]长度为 150 mm ，直径为 $8d=80 \text{ mm}$ ，在入口总压为 $p_{in}=0.45 \text{ MPa}$ 、出口压力为 $p_{out}=0.15 \text{ MPa}$ 、转速为 $2800 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的情况下进行实验，并与数值模拟结果进行对比。

实验得到距离吸收腔 500 mm 处的 A 点压力-时间曲线见图 4 (a)，而数值模拟结果见图 4 (b)，

可以看出振荡管内压力波的相位、形状及其峰值等实验与模拟符合较好,这说明数值计算能反映出管内的流动规律,而且形象地说明了吸收腔对反射激波的削弱作用,当激波进入吸收腔时,由于容积的突然扩大,高压气体膨胀,必然使其压力降低;而且由于吸收腔的存在,提供了一个缓冲的空间,使得入口关闭时产生的膨胀波能够从容赶上激波,从而使得激波在振荡管内尽可能多地耗散能量;两者共同作用结果使得反射激波压力降低,从而反向加热新鲜气或已冷气体作用降低,利于制冷。



(a) experimental result of pressure vs time



(b) calculating result of pressure vs time

图 4 A 点压力-时间历程曲线

Fig. 4 Pressure of point A versus time curve

2.2 激波吸收腔直径的研究

操作条件和边界条件同上,通过对不同直径吸收腔进行模拟得出膨胀比 α 分别为 2、4 和 6 时反射激波压力最大值 RSW_{max} 随吸收腔与振荡管的直径比 D/d 的变化 (图 5),从图中可以看出:当 $D/d=2\sim 20$,反射激波压力最大值 RSW_{max} 随着直径比 D/d 增加而降低。原因是由于吸收腔直径增

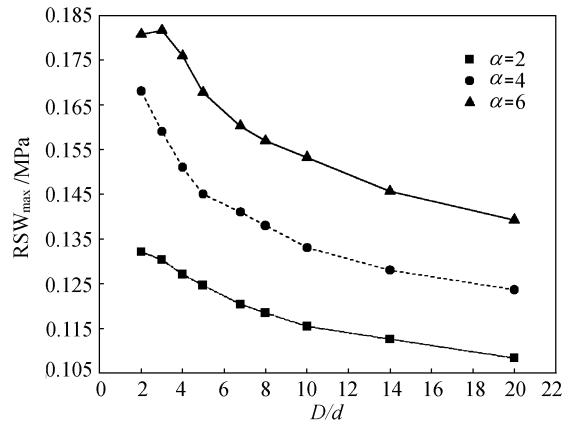


图 5 D/d 对 RSW_{max} 的影响

Fig. 5 Effect of D/d on RSW_{max}

大,突扩的空间增大,气体膨胀越完全,入射波压力降低,从而反射激波压力最大值减小。

2.3 激波吸收腔长度的研究

同上采取跟踪 A 点压力的方法对吸收腔长度进行研究,吸收腔直径均取 50 mm,操作条件和边界条件不变。图 6 是膨胀比 α 分别为 2、4 和 6 时反射激波压力最大值 RSW_{max} 随吸收腔长度和振荡管直径比 L/d 的变化,从图中可以看出:反射激波压力最大值 RSW_{max} 随长径比的增大而降低。原因是由于吸收腔长度增大,膨胀波削弱激波的时间增长,激波的压力降低,反射激波压力最大值变小。

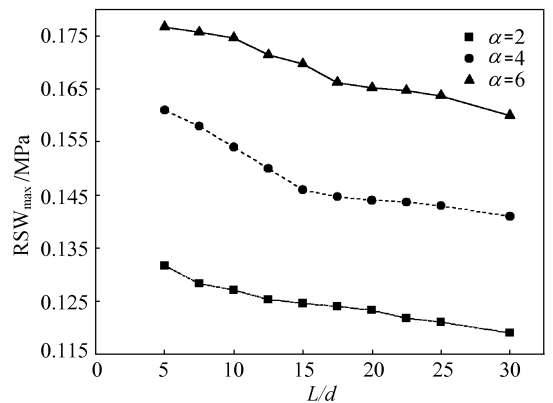


图 6 L/d 对 RSW_{max} 的影响

Fig. 6 Effect of L/d on RSW_{max}

通过以上两方面研究,可以看出激波吸收腔的直径越大长度越长反射激波压力最大值越小,但是实际应用中却希望减小直径,因此本文提出串联吸收腔结构。

2.4 串联吸收腔的研究

串联激波吸收腔,即通过管路串联多个直径

小、长度短的吸收腔，如图 7 所示，它既有吸收腔的突扩结构可以耗散激波能量，又有吸收腔长度的增加使得膨胀波削弱激波。

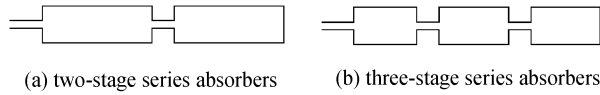


图 7 激波吸收腔示意图

Fig. 7 Schematic diagram of wave absorber

对于单个、2 个和 3 个吸收腔串联的结构（图 7），保持单个吸收腔直径比 $D/d=5$ ，长径比 $L/d=15$ ，得到不同结构下压力-时间曲线如图 8 所示，可以看出随着吸收腔的加入，反射激波被抹平，强度大幅降低，并且随着吸收腔级数增加，反射波变得更加平稳。在膨胀比 $\alpha=2\sim 6$ 范围内，对比反射激波压力最大值得出图 9，分析得出以下结论：反射激波压力最大值随膨胀比增加而增加；吸收腔串联结构比单个吸收腔对反射激波有更好削波作用，而且膨胀比 α 越大串联吸收腔的优势越明显；3 个吸收腔串联结构相对于 2 个吸收腔串联结构作用提升不大，实际应用中考虑结构简单性，2 个吸收腔串联结构是最佳选择。

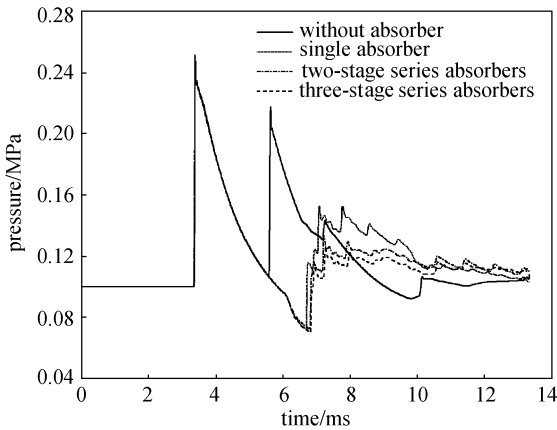


图 8 不同结构吸收腔的压力-时间历程曲线

Fig. 8 Pressure variation with time in different structures

3 结 论

本文对影响热分离机效率的重要结构——激波吸收腔进行了研究，得出以下结论：

(1) 对振荡管内气体流动情况进行的数值模拟描述了进气和出气的渐变过程，具有良好的捕捉间断能力，压力波形与实验吻合较好；

(2) 振荡管内反射激波压力最大值随着激波吸收腔的直径比 D/d 增加而降低；

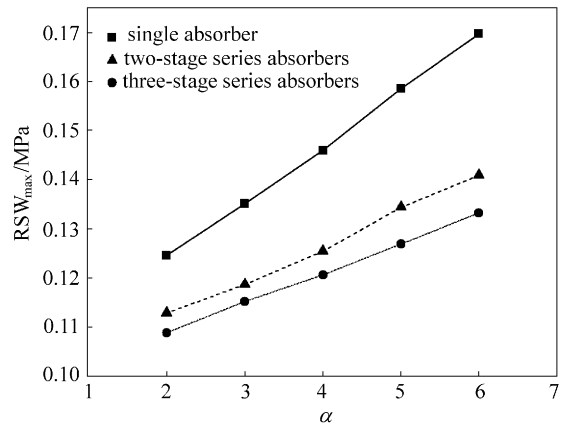


图 9 3 种吸收腔结构模拟结果对比

Fig. 9 Three different absorbers in different ratios

(3) 振荡管内反射激波压力最大值随着吸收腔长径比 L/d 增大而降低；

(4) 分析了串联吸收腔结构，在膨胀比 $\alpha=2\sim 6$ 范围内，2 个吸收腔串联是最佳选择；反射激波压力最大值随膨胀比增加线性增加；并且膨胀比 α 越大串联结构的优势越明显。

符 号 说 明

- D ——激波吸收腔直径，mm
- d ——振荡管直径，mm
- L ——激波吸收腔的长度，mm
- p_{in} ， p_{out} ——分别为进口总压、出口静压，MPa
- RSW_{max} ——反射激波压力最大值，MPa
- α ——膨胀比

References

- [1] Rennaz M C. New French gas cooler recovers 120bpd gasoline. *World Oil*, 1973 (8): 57-59
- [2] Christian D. Barge-mounted NGL plant boosts recovery from offshore field. *World Oil*, 1982 (7): 105-107
- [3] Fang Yaoqi (方曜奇), Hu Zhimin (胡志敏). The effect of the tube structure on the refrigeration efficiency of the thermal separator. *Aerodynamic Experiment and Measurement & Control*(气动实验与测量控制), 1993, 7 (4): 15-19
- [4] Li Xuelai (李学来), Guo Rongwei (郭荣伟), Fang Yaoqi (方曜奇), Yu Hongru (俞鸿儒). Influence of heat transfer conditions on performance of oscillatory tube. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)* (化工学报), 2000, 51 (1): 12-16
- [5] Zhao W, Jiang Z L, Yu H R. Wave propagation analysis in a pressure-wave-refrigerator. *World Scientific*, 2005, 19 (28): 1747-1750
- [6] Liang S B, Li X L, Ma H B. Thermoacoustic power effect

- on the refrigeration performance of thermal separators. *Cryogenics*, 2003, **43**: 493-500
- [7] Li Xuelai (李学来), Zhu Che (朱彻). Elimination of reflect shock wave in oscillatory tube. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)*(化工学报), 2001, **52** (5): 379-380
- [8] Zou Jiupeng (邹久朋), Liu Xuewu (刘学武), Chen Shuhua (陈淑花). Experiment about weakening the energy of the reflecting shock waves in the incepting tube. *Cryogenics* (低温工程), 2001 (3): 48-53
- [9] Shih T H, Liou W W, Shabbir A, Yang Z G, Zhu J. A new $k-\epsilon$ eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flows. *Compute Fluids*, 1995, **24** (3): 227-238
- [10] Fernández J A, Elicer-Cortés J C, Valencia A, Pavageau M, Gupta S. Comparison of low-cost two-equation turbulence models for prediction flow dynamics in twin-jets devices. *Heat and Mass Transfer*, 2007, **34** (5): 1-9
- [11] Tao Wenquan (陶文铨). Numerical Heat Transfer (数值传热学). Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2001: 36
- [12] van Leer B. Upwind-difference methods for aerodynamics problems governed by the Euler equations of gas dynamics. *Lectures in Applied Mathematics*, 1985 (22): 327-336
- [13] Li Xuelai (李学来), Huang Qifei (黄齐飞), Zhu Che (朱彻). Absorbing reflected shock wave in thermal separator. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)* (化工学报), 2003, **54** (2): 170-175