

文章编号: 1001-1455(2003)03-0200-07

# 激波在带扩容室的变截面管中传播和消波效果的数值分析\*

胡宗民, 张德良, 张嘉华

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

**摘要:** 在利用实验结果验证程序的基础上, 对激波在具有复杂结构管道内的传播特性进行了数值模拟, 比较了不同入射激波条件和特征尺寸对扩容室消波效应的影响, 并考虑了二维(轴对称、平面)模型和三维模型的影响。计算结果表明, 同一尺寸的扩容室对不同马赫数入射激波的消波效果是相近的, 扩容室特征尺寸不同则消波效果差别很大。

**关键词:** 流体力学; 消波效果; 数值模拟; 扩容室; 激波

**中图分类号:** O354.5

**国标学科代码:** 130.2517

**文献标志码:** A

## 1 引 言

激波在变截面管道中的传播, 是激波管和风洞实验中经常遇到的物理问题, 在工程应用中也很常见, 例如高压设备中安全阀排空管的消音、坑道防护工程中对强激波的消波等。因此, 研究激波在变截面管道中传播的流场特性以及变截面管道对激波的消波作用机理是很有意义的。

针对激波在变截面管内的传播和衰减过程, 有很多学者做了相关研究。K. S. Chang 等<sup>[1]</sup>计算了激波在膨胀管中传播的流场, Z. Jiang 等<sup>[2~3]</sup>分别应用数值模拟和实验的方法, 研究了激波在突扩管中传播的瞬态流场。还有, H. Reichenbach 等<sup>[4]</sup>针对阻尼板系统(baffle)、A. Sasoh 等<sup>[5]</sup>针对钻孔管、E. M. Schmidt 等<sup>[6]</sup>针对膨胀腔对激波的衰减作用进行了研究。

激波在变截面管道内传播的流场很复杂, 会出现激波、稀疏波、接触间断和漩涡及其相互作用。同时, 还会出现激波在结构物上的反射、绕射和在对称中心的汇聚碰撞等复杂物理现象。理论分析几乎无法进行, 实验研究也十分费时费力; 但是通过数值模拟, 针对不同入射激波和不同特征尺寸等条件, 可对扩容室内的流场特性进行系统研究。

## 2 消波作用原理

对于给定的平面入射激波和特定扩容室尺寸, 激波在带有扩容室的变截面管道内的传播过程可能是: (1) 首先激波从扩容室开口绕射, 平面入射激波几乎变为球面波, 并在波形两侧形成漩涡, 使激波强度削弱, 但在波形中心变化不大, 这是扩容室的初步消波作用(如图 1(a)); (2) 随着入射激波前行, 在扩容室周向壁面的激波反射逐渐由规则反射演化为马赫反射, 在扩容室周向壁面附近, 反射激波逐步加强(见图 1(b)); (3) 在扩容室端壁上形成的高强

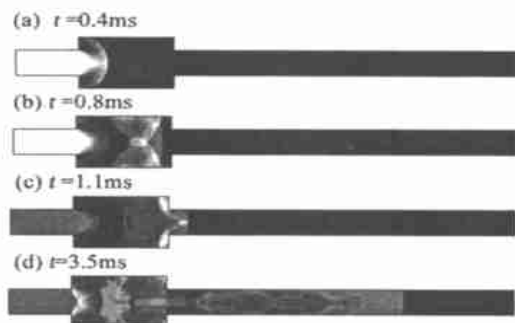


图 1 激波 ( $Ma = 3.0$ ) 在扩容室内传播不同时刻的密度分布  
Fig. 1 Sequential distribution of density contour

\* 收稿日期: 2002-05-09; 修回日期: 2002-08-21

基金项目: 国家自然科学基金委员会和中国工程物理研究院联合基金项目(10276035)

作者简介: 胡宗民(1970—), 男, 硕士。

度上行反射激波,一方面与上游气流介质相互作用,另一方面和其他相对较弱的波系相互作用后诱导漩涡,进一步削弱下游激波的强度(见图 1(c));(4)在一定时间之后,扩容室内形成复杂的波和漩涡结构(见图 1(d))。经过以上过程,扩容室上下游就形成一个明显的压力降,从而起到消波作用。

### 3 控制方程和数值方法

忽略粘性、热传导和重力作用,不考虑化学反应和多介质效应,采用无粘的 Euler 方程组来描述激波在扩容室的传播过程。在二维平面和轴对称坐标系下方程组为

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}(\mathbf{U})}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}(\mathbf{U})}{\partial y} + \frac{i}{y} \mathbf{S}(\mathbf{U}) = \mathbf{0} \quad (1)$$

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} \rho \\ u \\ v \\ e \end{bmatrix}, \quad \mathbf{F}(\mathbf{U}) = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ \rho uv \\ \rho u(e+p) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{G}(\mathbf{U}) = \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho uv \\ \rho v^2 + p \\ \rho v(e+p) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{S}(\mathbf{U}) = \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho uv \\ \rho v^2 \\ \rho v(e+p) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中:  $\rho$  为密度,  $u$  和  $v$  为沿  $x$  和  $y$  轴速度分量,  $e$  为体积总能,  $p$  为压力。由理想气体状态方程可导出

$$p = (\gamma - 1) \left( e - \frac{u^2 + v^2}{2} \right) \quad (3)$$

$i=0,1$  分别对应二维平面和轴对称问题。高精度 TVD 格式的本质就是构造一种数值通量函数,它能够在激波上下游较易出现振荡的区域通过适量的数值粘性来抑制频散消除振荡,并保证格式模拟激波的精度。

对于 Euler 方程组, TVD 格式构造过程包括方程的线性化、局部系数冻结、Jacobian 矩阵的对角化以及数值通量向量的构造和熵条件等。

### 4 计算结果与分析

#### 4.1 计算程序验证

为了验证数值方法和编制程序的可靠性,对激波在自 50mm 激波管的开口绕射过程进行数值模拟。图 2(a) 为实验纹影照片<sup>[7~8]</sup>,波前是静止空气;图 2(b) 为数值纹影图。两者相比,除个别细节略有差异外,整个绕射波系非常接近,入射激波、接触间断、反射激波、Prandtl-Meyer 膨胀区、桶形激波、羽状边界以及涡结构都被模拟得很好。图 3(a) 为激波在突扩管内传播的干涉照片<sup>[9]</sup>,图 3(b) 为相应的数值干涉图,是密度在垂直管轴的方向上的积分,小管和大管的直径比为 1/2。由图可见,两者吻合得较好。因此应用本文的程序计算激波在开口绕射和在变截面管道中传播问题是可行的。

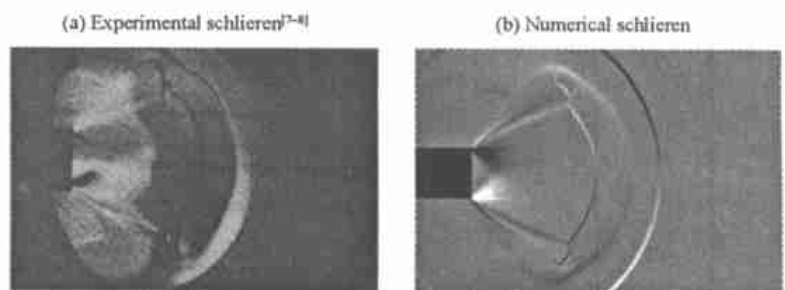


图 2 右行激波 ( $Ma = 3.5$ ) 开口绕射  
Fig. 2 Shock wave diffraction from open end

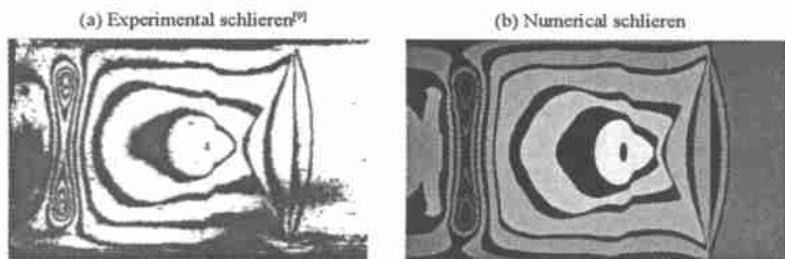


图 3 激波 ( $Ma = 1.3$ ) 在突扩管内传播  
Fig. 3 Shock wave propagating into expansion tube

## 4.2 扩容室内流场特性分析

如图4所示,选取直径0.25m、总长4m、带有扩容室abcd的圆形管道为计算区域,采用均匀网格,左、右分别给定入射激波和出口条件,固壁采用反射条件。扩容室特征尺寸 $D$ 分别选取 $2d$ 、 $3d$ , $L$ 分别选取 $1d$ 、 $2d$ 、 $3d$ ,入射激波马赫数 $Ma$ 分别取3.0、3.5、4.0、5.0,其对应的出口与入口压力比的计算结果见表1。由于在出口点的压力随时间变化,表中给出的是平均值。由图5可以看出,经过扩容室后,入射激波的波后压力 $p_3$ 比扩容室上游的压力 $p_1$ 小,这体现了扩容室的消波作用。计算结果表明,相同特征尺寸的扩容室对不同马赫数入射激波的消波性能存在差异,相同马赫数入射激波在不同尺寸扩容室内传播过程和消波性能也不同。

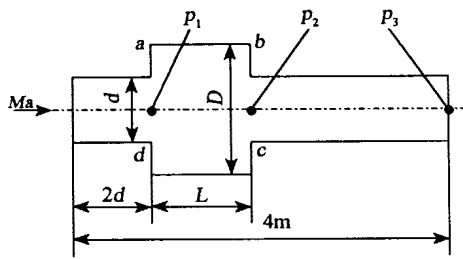


图4 扩容室结构和特征尺寸

Fig. 4 Sketch of expansion chamber

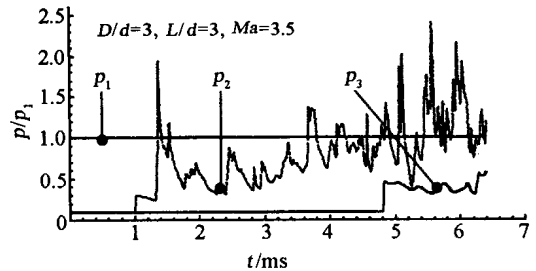


图5 带有扩容室的管道不同点上的压力时间曲线

Fig. 5 Pressure time history at different points

表1 不同尺寸扩容室和马赫数对应的出口与入口压力比

Table 1 Effect of the size of expansion chamber on attenuation of shock wave with various mach number

$D/d$	$L/d$	$p_3/p_1$			
		$Ma = 3.0$	$Ma = 3.5$	$Ma = 4.0$	$Ma = 5.0$
	1	0.9	0.9	0.9	0.9
2	2	0.8	0.7	0.7	0.8
	3	0.8	0.7	0.8	0.8
	1	0.9	0.9	0.9	0.9
3	2	0.6	0.6	0.6	0.5
	3	0.4	0.4	0.4	0.5

图6为 $Ma = 3.5$ 的入射激波在三种尺寸扩容室内的传播的压力分布和密度分布,得到的消波效应相差很大,对应 $p_3/p_1$ 分别为0.9、0.7、0.4。

由图6可见,激波传播的流场特性和消波机理有以下几点明显的不同:(1)当 $D/d = 3, L/d = 1, Ma = 3.5$ 时,入射激波在开口绕射后,其波形中心部分直接传播到下游管道中,壁面反射激波由于速度较绕射激波中心部分的传播速度低,滞留在扩容室内传播并诱导漩涡,直接耗散,未形成一个整体的上行反射激波;而另外两种情况时,形成了一体化的高强度上行反射激波,它和上游高速气流的作用以及后期的涡(vortex)成为激波耗散的主要途径。(2)入射激波在扩容室内绕射后的衰减程度不同。当 $D/d = 3, L/d = 3, Ma = 3.5$ 时,由于扩容空间相对较大,入射激波绕射后,充分发展成为球面波,形成明显的剪切层(shear layer)、桶形激波(barrel shock)、反射激波(reflected shock)和接触间断面(contact discontinuity surface),对应的 $p_3/p_1$ 小,因此消波效果相对较好。(3)当 $D/d = 3, L/d = 1, Ma = 3.5$ 时,激波经过扩容室后,在下游管道中心发生多次激波汇聚,形成二次激波(second wave),由于中心汇聚使得这一激波的中心部分强而两侧弱,此后又由于壁面上的马赫反射而使得激波在两侧加强,这两个过程

交替发生,使得二次激波的传播速度不断加快,最终追上前导激波并与之叠加,使得下游管道中的激波加强;在另外两种情况时,虽然也有二次激波发生,但次数并不多,下游管道中很快形成比较平缓而均匀的压力场。

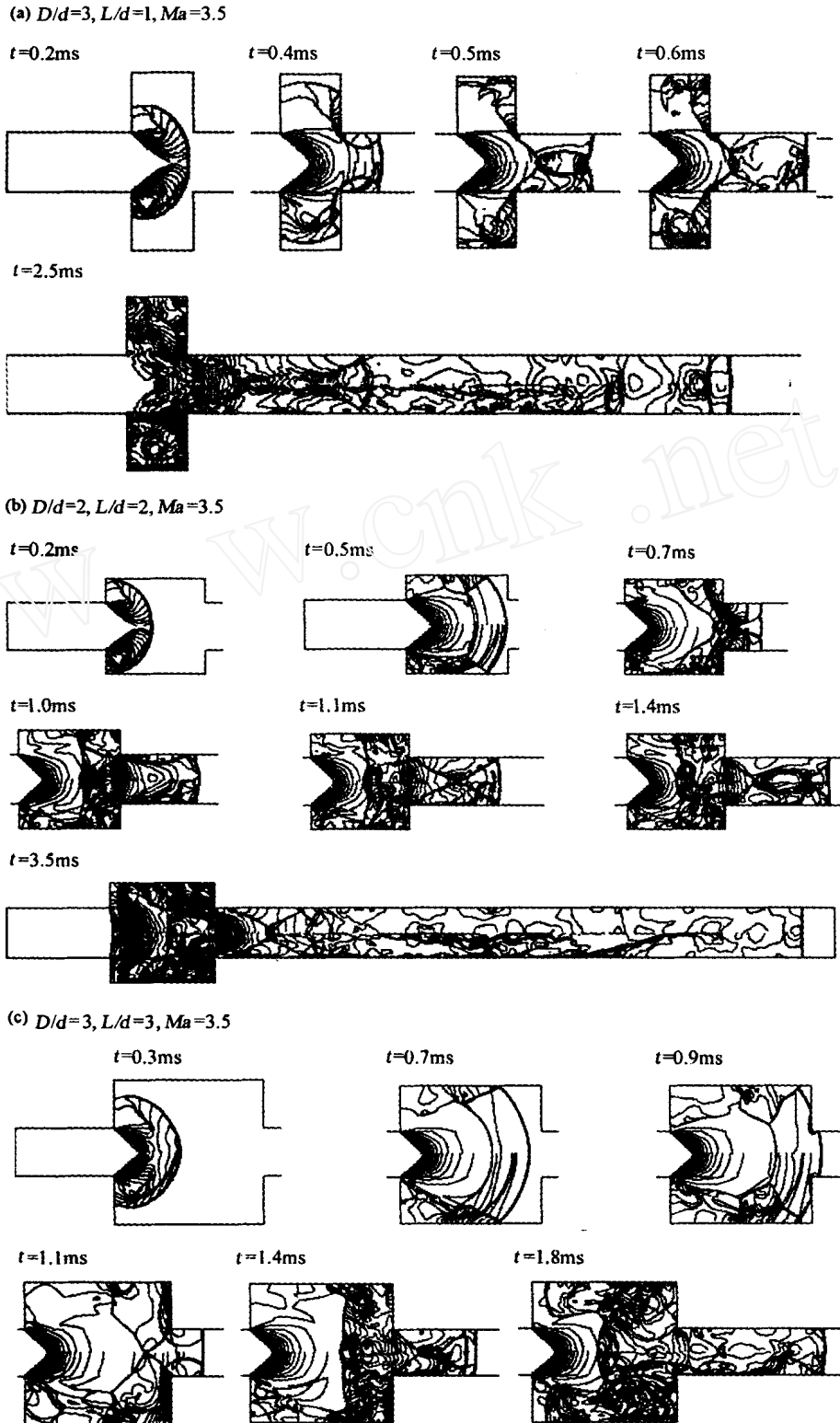


图 6 压力分布(上半)和密度分布(下半)

Fig. 6 Pressure contour (upper half) and density contour (lower half)

### 4.3 计算模型的影响

对于结构复杂的管道,比如分叉、弯管等,轴对称模型不再适用。为了考虑计算模型的影响,对带有一个扩容室的方管道,分别应用二维平面、轴对称和三维模型(三者具有相同特征尺寸)计算了  $D/d = 3, L/d = 2$  时  $Ma = 3.5$  的入射激波的传播,其压力分布如图 7~8 所示。当激波到达管道出口瞬间,三维计算得到出口和入口压力比  $p_3/p_1 = 0.6$ ,对应平面和轴对称情况,  $p_3/p_1$  分别为 0.8 和 0.6(与表 1 中的值意义不同),本算例中轴对称模型和三维模型的计算结果更接近于实际情况。这种情况下,激波衰减的空间是三维的,计算结果更能代表扩容室的消波(消音)能力。

由图 8 可看出,由于方腔的三维效应,使激波在其中的反射和相互作用过程更为复杂。

### 4.4 多级扩容室的计算结果和分析

单个扩容室对激波的耗散效应并不理想。对强度较高的入射激波,需要多级扩容室串联,以达到更高的整体消波能力。

如图 9 所示,在总长 20m 的管道中,串联 4 个扩容室。取 3 种扩容室尺寸情况 ( $D/d = 2, L/d = 2; D/d = 2, L/d = 3; D/d = 3, L/d = 3$ ) 进行计算。其中  $d = 0.25\text{m}, L_1 = 20\text{m}, L_2 = 4\text{m}, L_3 = 3.75\text{m}, L_4 = 4.75\text{m}$ 。对  $Ma = 3.5$  (作用时间 10ms) 的激波,具有 4 个扩容室的变截面管道,分别应用轴对称模型和平面模型,比较模型效应,并分析多级扩容室串联对激波消波效应的影响。坑道左、右分别给定入射激波和出口条件,固壁和对称中心线采用反射条件。从计算结果中选取具有代表性的两组压力波形  $p_2, p_4, p_6, p_8, p_{10}$  和  $p_3, p_5, p_7, p_9$  来分析和比较。

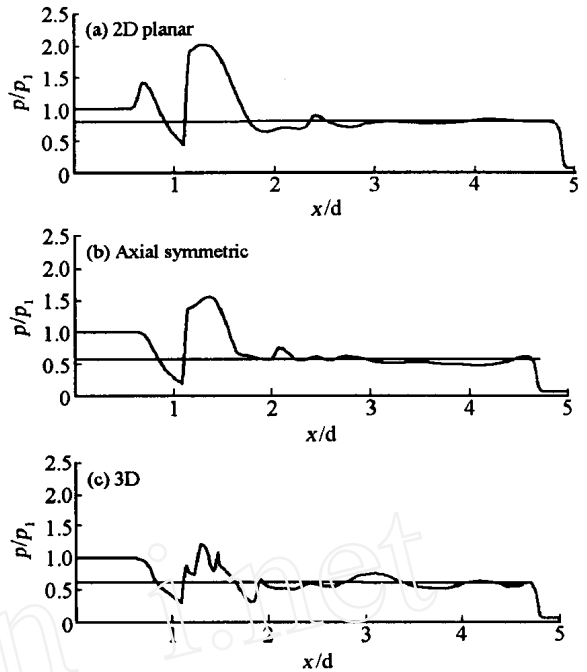


图 7 激波到达出口瞬间中心线上的压力分布  
Fig. 7 Pressure distribution along the center line

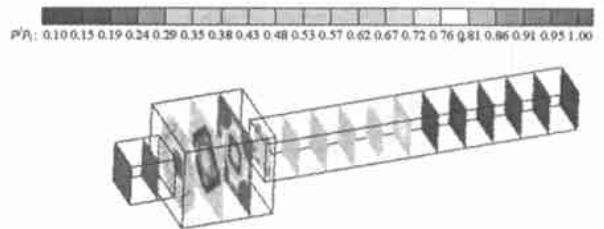


图 8 压力在不同截面上的分布  
Fig. 8 Pressure contour

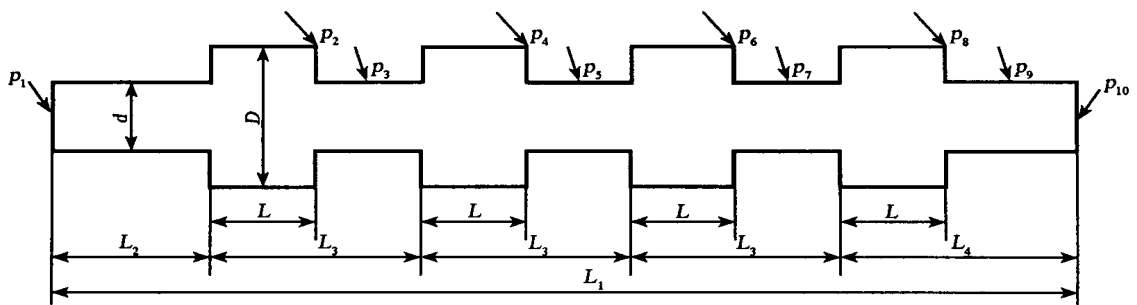


图 9 四级扩容室串联结构示意图

Fig. 9 Sketch of four-stage series-wound expansion chamber

图 10 给出了当  $D/d = 2, L/d = 2$  时指定点的压力时间曲线,可见激波到达管道出口的时间,采用轴对称模型时为约 26ms,而采用平面模型时为约 22ms;对于扩容室组的整体消波能力,出口与入口压

力比  $p_{10}/p_1$  分别降为 0.30 和 0.43。在另外两种情况时,相应结果见表 2,  $t$  为到达出口的时间。如果考虑管道出口的压力载荷或者整体消波(消音)效应和扩容室的工作载荷,扩容室组  $D/d=3, L/d=3$  效果最佳,其次是  $D/d=2, L/d=2$ ,最差是  $D/d=2, L/d=3$ ;但平面模型下,扩容室组  $D/d=2, L/d=3$  整体效果最好。

与轴对称模型相比,平面模型在各结构点附近的相应压力峰值偏高,而且通过管道的相应时间短,因此应用平面模型简化的计算结果是偏于苛刻的。图 10(d) 中,  $p_3、p_5、p_7、p_9$  有一个压力突跳的现象,这是由于扩容室内产生的上行激波造成的,而在轴对称计算结果中就没有出现。

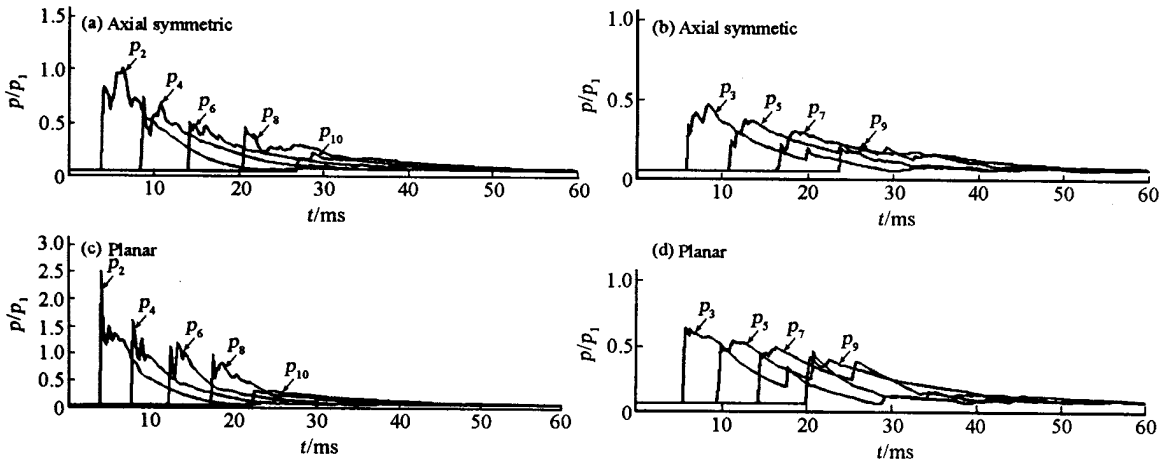


图 10 压力-时间曲线 ( $D/d=2, L/d=2$ )

Fig. 10 Pressure-time history

表 2 多级扩容室串联模型效应

Table 2 Effect of model for multi stage series wound expansion chamber

二维模型	$D/d$	$L/d$	$p_3/p_1$	$p_5/p_1$	$p_7/p_1$	$p_9/p_1$	$t/ms$
平面	2	2	0.70	0.56	0.53	0.43	22
	2	3	0.73	0.56	0.42	0.35	23
	3	3	0.63	0.63	0.42	0.42	26
轴对称	2	2	0.63	0.49	0.39	0.30	26
	2	3	0.56	0.45	0.42	0.28	30
	3	3	0.49	0.35	0.28	0.21	33

以上结果还表明,激波沿多级扩容室串联管道传播过程中,管道内的压力峰值在通过每级扩容室后逐渐减小,多级扩容室串联比单级扩容室对激波的总体耗散作用高。

### 5 结束语

利用高精度 TVD 格式求解 Euler 方程,对激波在变截面管道内传播的流场进行了数值模拟。在马赫数分别为 3.0、3.5、4.0、和 5.0 时,不同尺寸的扩容室对激波的消波效果各不相同。

计算结果表明,三维模型和轴对称计算得到扩容室对激波消波效应的计算结果明显强于平面方法,多级扩容室串联管道对激波的消波作用明显优于单个扩容室。同一尺寸的扩容室对不同马赫数入射波的消波效果是相近的,扩容室特征尺寸不同则消波效果差别很大。

**参考文献:**

- [1] Chang K S, Kim J K. Numerical investigation of inviscid wave dynamics in an expansion tube[J]. Shock Waves, 1995, 5:33 - 45.
- [2] Jiang Z, Takayama K. Numerical simulation of shock wave flow in an expanding tube by the dispersion controlled scheme[A]. Proceedings of Japanese 8th Symposium of CFD[C]. Tokyo, Japan, 1994:45 - 48.
- [3] Jiang Z, Takayama K, Babinsky H, et al. Transient shock wave flows in tubes with a sudden change in cross section[J]. Shock Waves, 1997, 7:151 - 162.
- [4] Reichenbach H, Kuhl A L. Shock-induced turbulent flow in baffle systems[A]. Brun R, Dumitrescu L Z. Shock Waves @ Marseille IV[C]. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1995:69 - 74.
- [5] Sasoh A, Matsuoka K, Nakashio K, et al. Attenuation of weak shock waves along a pseudo-perforated walls[J]. Shock Waves, 1998, 8:149 - 159.
- [6] Schmidt E M, Duffy S J. Noise from shock tube facilities[R]. AIAA paper 85-0049, 1985.
- [7] Grönig H. Shock/ Vortex interaction[A]. Takayama K. The Second International Workshop on Wave/ Vortex Interaction [C]. Sendai, Japan, 1997:1 - 14.
- [8] Yu Q, Grönig H. Shock waves from an open-ended shock tube with different shapes[J]. Shock waves, 1996, 5:249 - 258.
- [9] Jiang Z, Takayama K. An investigation into the validation of numerical solutions of complex flowfields[J]. Journal of Computational Physics, 1999, 151: 479 - 497.

## Numerical analysis on shock wave propagation and attenuation in ducts with expansion chambers

HU Zong-min, ZHANG De-liang, ZHANG Jia-hua

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science, Beijing 100080, China)

**Abstract:** The propagation and attenuation of shock waves of different Mach numbers in the ducts with various expansion chambers were discussed. Planar and axial symmetrical 2D and 3D numerical calculations were performed. The numerical results indicate that the identical expansion tubes have similar attenuation effect on shock waves of different Mach numbers. The expansion tube size has noticeable effect on the shock wave propagation.

**Key words:** fluid mechanics; shock wave attenuation; numerical simulation; expansion chamber; shock waves