

模拟爆炸波的生物激波管

李馨东, 胡宗民, 姜宗林

中国科学院力学研究所, 高温气体动力学国家重点实验室(筹), 北京海淀区 100190

摘要 生物激波管主要模拟爆炸波的超压、正压作用时间以及负压三个参数, 本文对用于生物冲击伤实验的生物激波管的性能与改建进行了数值研究。计算结果发现: 驱动段前锥设置不宜过长; 驱动段过长会引起压力平台现象, 而缩短驱动段长度对正压区影响不大; 若在试验段设置双扩张管, 则正压区会出现略带双峰结构的压力波形, 表明其对波形无明显改良; 若在真空罐前设置收缩喉道, 则会产生上行反射波, 引起强烈的二次压力峰值, 当去掉收缩喉道后, 正压力曲线显示理想的尖锐单峰波形, 因此设计时建议不采用; 负压区持续时间的长短, 可以通过调节真空罐的压力大小得到改变。

关键词 生物激波管, 爆炸波, 数值模拟, 扩张管

0 引言

激波管是 18 世纪末出现的一种气动力实验设备, 19 世纪 50 年代后发展成为多学科多功能的气动力实验工具。在应用于冲击伤方面, 它逐步发展为专门或主要用于生物试验的激波管, 其产生的激波可以模拟核爆炸或炸药爆炸时产生的爆炸波。将动物置于生物激波管内或者管口处, 可发生不同程度的冲击伤, 从而为研究人体冲击伤的发生机理和防治提供较为理想的动物模型。国外早在上世纪 60 年代应用多种组合型激波管作为致伤源, 对数千只大小不同的动物进行了深入的试验研究, 取得了大量的研究成果。国内在 1985-1988 年先后研制大、中、小(微)系列的生物激波管, 大量的动物实验表明这些装置能满足国内冲击伤实验研究的需要^{[1][2]}。

生物激波管主要模拟爆炸波的两个参数: 超压、正压作用时间以及负压^[3]。而上述生物激波管产生的波形都是通过实验获得的, 与真实的爆炸波形存在一些差异, 且难以获得典型的负压波形, 因而模拟的程度较差。文献[3]虽然从特征线法的理论计算和实验两方面分析了扩张激波管模拟爆炸波时的管内流场, 表明其能提供理想的爆炸波形及较长的试验时间, 是模拟生物冲击的理想设备, 但是这仅对激波管的

扩张结构而言, 没有对生物激波管的其他结构或者整体进行综合考虑。同时, 利用数值方法研究生物激波管的文献也比较少见。因此, 本文主要通过数值模拟获得能产生理想爆炸波形的激波管的几何参数, 并对生物激波管构型进行适当的优化和预估, 为工程应用提供一些参考。

1 物理模型和计算方法

1.1 物理模型

生物激波管全长 72m, 主要由驱动段前锥、驱动段、试验段、扩张段 1、扩张段 2 (处在试验段)、扩张段 3、4 (连接消波段)、消波段及收缩喉道等组成, 驱动段和试验段末端分别为夹膜结构, 如图 1 所示。典型的几何参数: 驱动段前锥长 1m, 内径自 0.1m 至 0.2m; 驱动段总长 1.5m; 扩张段 1 长 1m, 内径自 0.2m 至 0.3m; 扩张段 2 长 1m, 内径自 0.3m 至 0.5m; 扩张段 3 长 1m, 内径自 0.5m 至 0.6m; 扩张段 4 长 1.5m, 内径自 0.6m 至 2m; 试验段长 51m, 内径 0.5m; 收缩喉道长 1m, 内径自 0.5m 减至 0.25m, 真空段长 18.5m, 内径 2m。设计原理: 利用驱动段末端的反射稀疏波, 使稀疏波和激波在管道同向运行。当稀疏波赶上激波时, 原先由激波产生的超压迅速下降, 当稀疏波尾压力低于初始压力时, 则可得到负压。据此可以模拟出既有

正压又有负压的爆炸波。通过适当调节驱动段、扩张段、试验段等结构的不同长度，可获得试验段的超压和负压峰值及其相应作用时间。

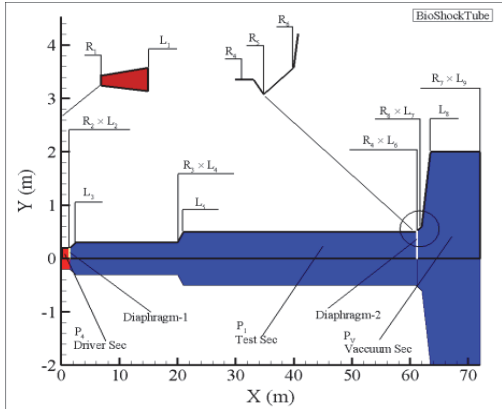


图 1 生物激波管结构示意图

1.2 计算方法

计算模型不涉及爆炸源，只对爆炸波在激波管内的运行情况进行数值模拟。假设气体是完全气体，不考虑体积力，外部热源和流体热（汇），守恒型的二维的 Euler 方程组为：

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} + \frac{i}{y} S = 0$$

S 为几何源项，i=0,1 分别表示平面和对称的情形。其中

$$U = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ E \end{bmatrix} \quad F = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ \rho uv \\ (E + p)u \end{bmatrix}$$

$$G = \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho uv \\ \rho v^2 + p \\ (E + p)v \end{bmatrix} \quad S = \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho uv \\ \rho v^2 \\ (E + p)v \end{bmatrix}$$

气体状态方程：

$$p = (\gamma - 1)\rho e = (\gamma - 1)[E - \frac{1}{2}\rho(u^2 + v^2)]$$

计算区域采用贴体单块网格，网格数 5000×50 ，CFL=0.6，控制方程采用有限差分离散化，激波捕捉格式为 DCD 差分格式，时间和空间均为二阶精度。初始条件为：

$$P_1 = 0.5atm, P_4 = 50atm, P_V = 0.25atm, T_1 = 290K, T_4 = 290K, T_V = 290K; \text{边界为刚性壁面，满足滑移反射条件。}$$

2 数值结果与分析

理想的爆炸波形应类似于下图所示，图 2 显示的是在不考虑驱动段前锥（结构见图 1）的条件下得到的波形：爆炸波过后立即出现超压峰值，随后维持约 80-100ms 的正压作用时间，继而出现一段时间的负压。

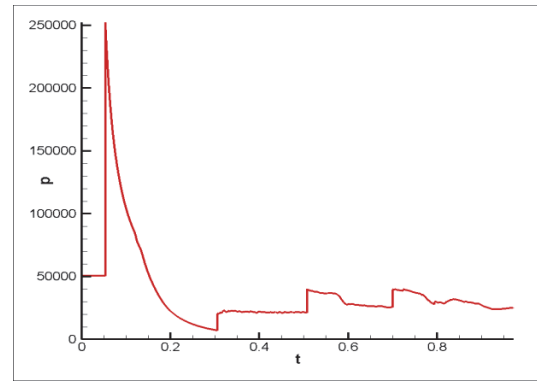


图 2 典型的爆炸波形

现在以图 2 所示的爆炸波形和相应的几何参数为参考标准（见表 1 的 case0），从以下几个方面讨论影响爆炸波形的因素。表 1 为数值计算的典型算例，单位为米（m）和一个大气压（atm）。

表 1 算例的几何参数对比

Case	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	P1	P4	Pv
0	0.2	0.2	0.5	0.5	0.5	0.6	2.0	1.0	1.5	2.5	20	21	51	52	53.5	72	0.5	50	0.25
1	0.05	0.2	0.5	0.5	0.5	0.6	2.0	1.0	1.5	2.5	20	21	51	52	53.5	72	0.5	50	0.25
2	0.05	0.2	0.5	0.5	0.5	0.6	2.0	3.5	4.0	5.0	20	21	51	52	53.5	72	0.5	50	0.25
3	0.2	0.2	0.5	0.5	0.5	0.6	2.0	1.0	4.0	5.0	20	21	51	52	53.5	72	0.5	50	0.25
4	0.2	0.2	0.3	0.5	0.5	0.6	2.0	1.0	1.5	2.5	20	21	51	52	53.5	72	0.5	50	0.25
5	0.2	0.2	0.5	0.5	0.2	0.6	2.0	1.0	1.5	2.5	20	21	51	52	53.5	72	0.5	50	0.25

					5														
6	0.2	0.2	0.5	0.5	0.5	0.6	2.0	1.0	1.5	2.5	20	21	51	52	53.5	72	0.5	50	0.1
7	0.2	0.2	0.5	0.5	0.5	0.6	2.0	1.0	1.5	2.5	20	21	51	52	53.5	72	0.5	50	0.5

2.1 驱动段前锥的影响

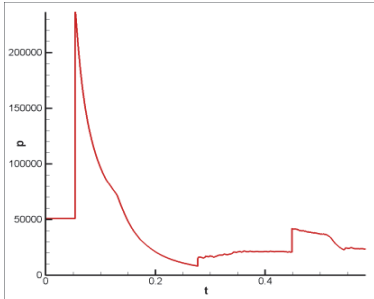


图 3a 驱动段有前锥时的波形

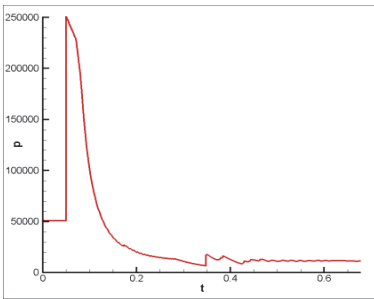


图 3b 驱动段前锥增长后的波形

case1 与 case0 的情形相比，图 3a 的爆炸波形较合理。但是当当前锥长度增加时超压峰值会略显一个压力平台，如图 3c 所示，这说明若在激波管前设置前锥时，不宜过长，见 case2。

2.2 驱动段长短的影响

图 4 为 case3 计算的结果，与 case0 相比，驱动段长度由 0.5m 增至 3m，此时压力峰值图形不再尖锐，说明驱动段过长会引起压力平台现象。

原因在于当驱动段过长时，达到壁面的左行稀疏波和发射后的右行稀疏波要运行更长的距离，因而需要更多的时间才能到达试验段，在这多余的时间内激波后的压力峰值会保持一段时间，即出现了压力平台，因此在设计时驱动段不能太长。

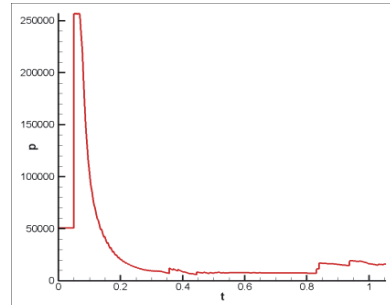


图 4a 驱动段增长后的波形

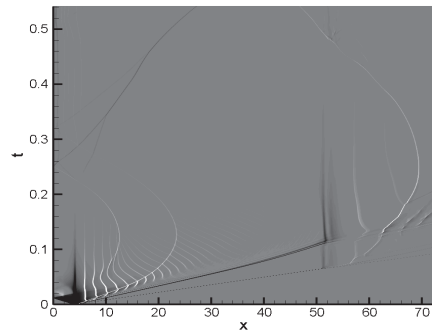


图 4b 激波管内流场云图

2.3 试验段单、双扩张管的影响

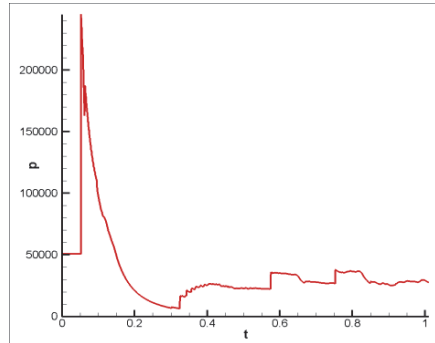


图 5a 双扩张管下的波形

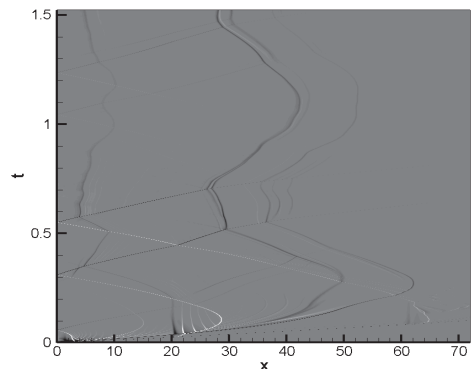


图 5b 激波管内流场云图

图 5a 和图 5b 分别是试验段设置双扩张管的情形的爆炸波形和流场云图，见 case4。

计算结果显示：双扩张结构在正压区会引起双峰结构的波形，但不明显。

原因主要是二次扩张时，产生的逆行二次激波对流场进行了干扰，这使得超压峰值下降时会迅速出现二次峰值，继而此处又经过一直右行的稀疏波，压力也迅速下降，因此双峰结构的波形图不是很明显。据此，双扩管结构对波形并没有明显的改良，建议不用。

2.4 真空罐前收缩喉道的影响

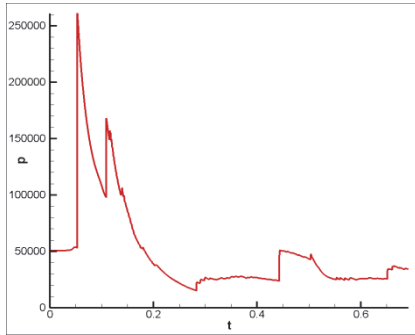


图 6a 有收缩喉道时的波形

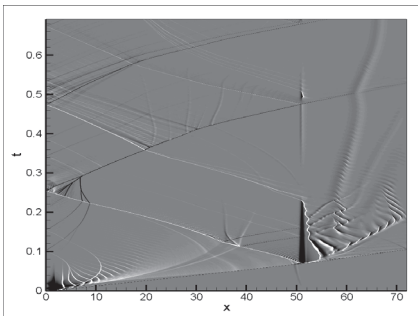


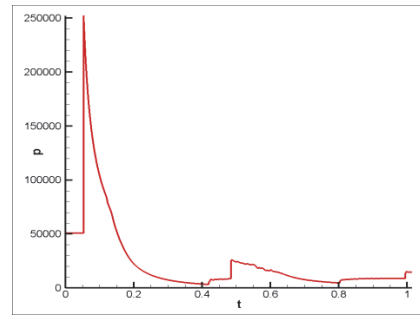
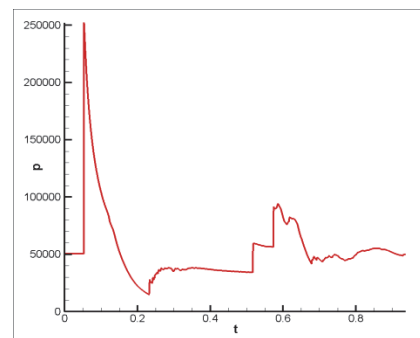
图 6b 激波管内流场云图

若在真空罐前设置收缩喉道，见 case5，计算结果如图 6a 所示。与 case0 相比，有收缩喉道时会引起强烈的二次压力峰值，这是由于喉道产生的上行反射波造成的，从流场密度云图也可以看到较强的反射波系，如图 6b。因此真空罐前不宜设置收缩喉道。

2.5 P_v 对负压区维持时间的影响

图 2 和图 7 表明：当真空罐的压力 P_v 越小，负压区维持时间就越长；反之，负压区的维持时间越短， P_v 继续增大时还会出现二次压力峰

值。因此，通过提高真空罐的压力可以改变负压区的维持时间，几何参数见 case0、case6 和 case7。

图 7a $P_v=0.1\text{atm}$ 时的波形图 7b $P_v=0.5\text{atm}$ 时的波形

3 结 论

数值计算可以很好地模拟爆炸波在激波管内的传播情况，还能对生物激波管的研制进行预估和优化。数值结果表明，为获得理想爆炸波形：

(1) 生物激波管驱动段的前锥可有可无，当设置时不宜过长，否则容易使爆炸波形出现压力平台；

(2) 驱动段不能太长，1.5m 左右较合适，否则压力峰值会出现平台现象；

(3) 采用双扩张结构的试验段对爆炸波形无明显改善，不如单扩张结构的情况；

(4) 若真空罐前设置收缩喉道，正压区会产生强烈的二次峰值；

(5) 增加真空罐的压力值可以较少正压作用后负压的维持时间。

参考文献

- 1 王正国, 俞鸿儒等. 系列生物激波管的研制与应用[J]. 爆炸与冲击, 1993, 13(1).

- 2 冷华光, 王正国等.生物激波管及动物耐受性的实验研究[J].爆炸与冲击, 1993,13(7).
- 3 谷笳华, 俞鸿儒, 李仲发, 李振华.模拟爆炸波的激波管[R].第四届全国激波管与激波学术会议文集, 1987,04.
- 4 俞鸿儒, 林建民等.扩张激波管流动波图观察[J].空气动力学报,1984,09(3).
- 5.徐春光, 白晓征等.爆炸激波管管口稀疏波对试验段的影响[J].国防科技大学学报,2011,33(4).
- 6 童秉纲, 孔祥言, 邓国华.气体动力学[M].北京: 高等教育出版社,1990,05.
- 7 张德良. 计算流体力学教程[M].北京: 高等教育出版社,2011,11.
- 8 A.J Laderman. Optimum shock-tube length with divergence at the diaphragm section [J]. AIAA.1967,5(11).
- 9 Zhengguo Wang, Liying Sun, Zhihuan Yang. Development of serial bio-shock tubes and their application [J]. Chinese Medical Journal, 1998,111(2):109-113.

A BIOLOGICAL SHOCK TUBE OF SIMULATION OF BLAST WAVE

LI Xindong, HU Zongmin, JIANG Zonglin

State Key Laboratory of High Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics, C A S, No.15 Beisihuanxi Road, Beijing 100190, China

Abstract: Three key parameters of a blast wave, i.e., overpressure, positive pressure time and negative pressure, can be simulated by a biological shock tube. In this paper, the performance and configuration of a biological shock tube was studied via CFD. The results show that a relatively long driver section may cause a plateau profile to the overpressure profile. A conic driver section has slight effect on the positive pressure area except that it may mitigate the plateau pressure phenomenon. If the test section is provided with a double-expansion tube, it will appear the pressure waveform with a double-spike structure in the positive pressure area. A throat before the vacuum section will cause reflected waves propagating upstream, arousing a second strong pressure peak at the test point. Therefore, the throat is not recommended for the shock tube configuration. The duration of negative pressure section can be regulated by changing the vacuum tank pressure.

Key words: biological shock tube, blast wave, numerical simulation, expansion pipe