

文章编号: 1001 - 2486(2011)04 - 0001 - 05

爆炸激波管管口稀疏波对试验段的影响*

徐春光¹, 白晓征², 刘 瑜¹, 刘 君¹

(1. 国防科技大学 航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073; 2. 总参陆航研究所, 北京 101121)

摘要:数值模拟了爆炸激波管不同隔离段长度时管口稀疏波对试验段超压的影响。为了准确高效地模拟试验段入口的超压曲线,采用了一种将一维球对称程序和三维程序相结合的计算方法,并在一维计算中利用爆炸相似律,采用小当量爆炸来模拟实际超压波形。计算结果表明,隔离段长度 L 的变化不影响超压峰值; L 小于等于 20m 时,稀疏波的影响使得试验段超压的作用时间、比冲量减小; L 大于等于 30m 时,稀疏波对试验段超压无影响。

关键词:爆炸波;激波管;稀疏波;隔离段;超压

中图分类号: O383.3 **文献标识码:** A

Research on the Influence of Rarefaction Wave to the Experimental Section in Blast Shock Tube

XU Chun-guang¹, BAI Xiao-zheng², LIU Yu¹, LIU Jun¹

(1. College of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Army Aviation Research Institute, General Staff of PLA, Beijing 101121, China)

Abstract: The influence of rarefaction wave on the experimental section in blast shock tube with different isolator lengths was simulated. To simulate the incident wave at the entrance of experimental section exactly and efficiently, a new method which couples 1D and 3D computational programs was adopted, and small scale explosion was utilized to simulate actual overpressure waveforms in 1D computation according to blast similarity rule. The computation results demonstrate the following features: alteration of isolator length L does not affect the peak overpressure; when L is less than or equal to 20m, influence of rarefaction wave will reduce the impact time and impulse of overpressure in experimental section; while L is larger than or equal to 30m, the rarefaction wave doesn't affect these two parameters in experimental section.

Key words: blast wave; shock tube; rarefaction wave; isolator; overpressure

爆炸激波管是采用炸药的爆炸来产生冲击波的实验装置。在某型爆炸激波管的设计中,驱动段采用 TNT 装药的爆炸来产生冲击波,试验段放置实验模型,试验段之后是隔离段,隔离段外为环境大气。当冲击波到达隔离段管口后,会产生向管内传播的稀疏波,稀疏波到达试验段后会影响到试验段的超压波形,造成试验段超压作用时间变短。为了减小稀疏波的影响,可以加长隔离段的长度,但这会造成激波管占地面积增大、建筑成本攀升,因此,如何选择合适的隔离段长度,成为激波管设计中的一个重要问题。

对本文所研究的问题,实验研究的投入很大,而数值模拟具有周期短、费用低、危险性小的优点,已经在爆炸波与物体干扰流场的研究中得到了一定的应用^[1-2]。本文也采用数值模拟手段研

究不同隔离段长度下稀疏波对试验段超压波形的影响。为了模拟试验段入口处的超压波形,采用了一种将一维球对称程序和三维程序相结合的计算方法。一维计算考虑了炸药的爆轰,同时为了减小计算量,根据爆炸相似律采用小当量爆炸来模拟真实的超压波形。计算采用有限体积方法数值求解多组分 Euler 方程组,采用“点火-生长”模型模拟炸药的爆轰, AUSM⁺-up 格式计算通量。

1 物理和计算模型

1.1 物理模型

激波管的模型如图 1 所示,试验段长为 10m,试验段与激波管出口间为隔离段,长为 L ,激波管管口外是环境大气。试验段之前为驱动段(图中

* 收稿日期:2010 - 09 - 19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(90505003,10602064);国家 973 资助项目(2009CB723802)

作者简介:徐春光(1977—),男,博士生。

未画出),驱动段中布置有 TNT 炸药,以产生冲击波^[3];通过调整炸药的装药量以及布置形式,可以

使试验段入口处的冲击波波形与自由大气中炸药爆炸的波形相似。

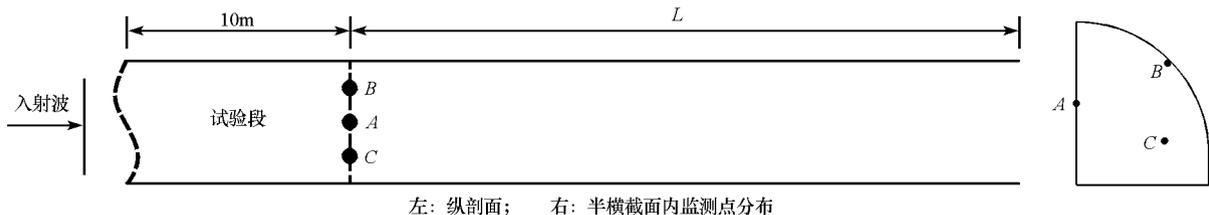


图1 激波管的计算模型
Fig.1 Computational model of shock tube

本文针对激波管的一个典型工况进行数值模拟,以研究管口稀疏波对试验段的影响。此工况下试验段入口处入射冲击波参数为:超压峰值为 0.25MPa,正压作用时间为 120ms。根据超压峰值和正压作用时间的经验公式^[4]:

$$\Delta P = 0.658 \times \left(\frac{\sqrt[3]{C}}{R}\right)^3 + 0.261 \times \left(\frac{\sqrt[3]{C}}{R}\right)^{1.5} \quad (1)$$

$$t_+ = 1.01 \times 10^{-3} \times \Delta P^{-0.313} \times \sqrt[3]{C} \quad (2)$$

其中, C 为装药的 TNT 当量,单位 kg, R 为爆炸距离,单位 m。由上述两式可得:

$$R = 131.25m, C = 456\ 294.6kg \quad (3)$$

也就是说,入射冲击波相当于 456tTNT 爆炸时在距爆心 131m 处产生的冲击波。在本文计算中, L 分别取 5m、10m、20m、30m、40m,考核不同 L 情况下,试验段出口横截面上观察点 A、B、C 的正压作用时间及超压峰值是如何变化的,从而考察激波管出口稀疏波对试验段的影响。观测点 A、B、C 在横截面内的分布如图 1 所示。

1.2 计算模型

计算面临的首要问题就是如何准确模拟入射冲击波参数。实验中,在驱动段中布置多个装有 TNT 炸药的驱动管^[3],并通过精心选择驱动段的布置形式来使驱动段产生的冲击波与自由大气中爆炸的冲击波波形相似。如果严格按照实验布置来进行模拟,计算量很大,而且本文主要关心的是下游稀疏波的影响,上游驱动段仅仅是为试验段提供一个入口的冲击波边界。因此,为了简化计算,本文直接模拟自由大气中炸药爆炸的冲击波波形,将此波形作为试验段的入口条件。对自由大气中炸药爆炸的模拟还可以在一维球对称假设下进行,从而极大地减小计算量。但需要注意的是,由于入射波波后气流是亚声速,因而入射波下游(即试验段)流场会对入射波上游流场产生影响,因此,上游和下游计算必须耦合进行。最终,本文采用的计算方法是:采用一维球对称程序计算冲击波的产生过程,采用三维程序计算冲击波

在试验段及隔离段的传播过程,一维计算和三维计算同步进行,并在边界处的两层网格互相交换数据。

一维计算时,TNT 装药从球心起爆,为了提高爆轰计算的精度,需要在装药区采用很小的网格,根据之前的经验,装药区内网格尺度至少为 0.1mm,然而本项目模拟的炸药装药量为 456 294.6kg,根据 TNT 装药的密度,计算出装药半径约为 4m,这样仅装药区内就需要约 4 万个网格,计算量很大。为了减小计算量,根据爆炸相似律,本文采用小当量爆炸的计算结果来模拟大当量爆炸。计算采用的装药半径为 0.1m,装药量为 6.8kg,与大当量爆炸间的换算系数为 $\sqrt[3]{W_1/W_2} = 40.63$,其中 W 为装药量。这样,大当量爆炸中 131.25m 处的冲击波与小当量爆炸中 3.23m 处的冲击波的波形是相似的。

采用小当量爆炸来模拟大当量爆炸的前提是爆炸相似律^[5],爆炸相似律中假设爆源仅由爆炸当量、炸药的密度、爆速三个变量所决定,这一假设忽略了爆源真实的物性方程和反应过程,因而将引入一定的误差。但考虑到本文模拟的是爆炸的远场区域,在远场区域,对爆源简化处理引入的误差可忽略不计,因此所采用的小当量爆炸来模拟大当量爆炸是可行的。

1.3 计算网格

三维计算时,由于问题的对称性,仅计算一半的区域。计算的外边界取得很大,可以保证计算过程中冲击波不会到达计算边界。不同算例的网格数不同, L = 5m 算例的网格数为 72.7 万个, L = 40m 算例的网格数为 126 万个。

一维计算共 3701 个网格点,装药区网格尺度为 0.1mm,远区网格尺度约为 2.46mm。远区网格尺度换算到大当量爆炸中为 10cm,这与试验段入口的三维网格尺度相同。

2 计算方法

2.1 控制方程

将本文一维和三维计算所用的控制方程写为如下的统一形式:

$$\frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial y} + \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial z} = \mathbf{S}_c + \mathbf{S}_s \quad (4)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ E \\ \rho_1 \\ \rho_2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{F} = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ \rho u v \\ \rho u w \\ (E + p)u \\ \rho_1 u \\ \rho_2 u \end{bmatrix} \\ \mathbf{G} = \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho v u \\ \rho v^2 + p \\ \rho v w \\ (E + p)v \\ \rho_1 v \\ \rho_2 v \end{bmatrix}, \quad \mathbf{H} = \begin{bmatrix} \rho w \\ \rho w u \\ \rho w v \\ \rho w^2 + p \\ (E + p)w \\ \rho_1 w \\ \rho_2 w \end{bmatrix} \\ \mathbf{S}_c = \alpha_c \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ Q_c \\ \sigma_1 \\ \sigma_2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{S}_s = -\alpha_s \frac{u}{x} \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ 0 \\ 0 \\ E + p \\ \rho_1 \\ \rho_2 \end{bmatrix} \end{array} \right. \quad (5)$$

其中, \mathbf{S}_c 是化学反应源项, \mathbf{S}_s 是球对称源项, ρ 为混合气体的密度, u, v, w 分别为 x, y, z 方向速度, p 为混合气体压力, E 为气体的总能, $E = \rho e + \frac{1}{2} \rho (u^2 + v^2 + w^2)$, e 为混合气体的比内能, n 为组分数, ρ_i 为第 i 种组分的密度, Q_c 为化学反应的放热项, σ_i 为第 i 种组分的生成率。在本文中, 下标 1 代表未反应炸药, 下标 2 代表产物气体, 下标 3 代表空气, 于是有

$$\rho_3 = \rho - \rho_1 - \rho_2 \quad (6)$$

在本文一维计算中, $v = w = 0, \alpha_c = \alpha_s = 1$; 三维计算中, $\alpha_c = \alpha_s = 0$ 。

2.2 状态方程

空气采用量热完全气体模型, 状态方程为

$$p = \rho RT \quad \text{或} \quad p = (\gamma - 1) \rho e \quad (7)$$

式中 p, ρ, T 分别是气体的压力、密度、温度, R 是气体常数, γ 为比热比。

炸药及爆炸产物均采用 Jones-Wilkins-Lee (JWL) 状态方程描述, 其形式为

$$p = p(\rho, e) = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 \bar{v}} \right) e^{-R_1 \bar{v}} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 \bar{v}} \right) e^{-R_2 \bar{v}} + \omega \rho e \quad (8)$$

式中, $\bar{v} = \rho_0 / \rho$, ρ_0 为未反应炸药的密度, C_V 为定容比热, A, B, R_1, R_2, ω 均为常数。

2.3 反应模型

反应模型采用 Lee 和 Tarver 提出的“点火 - 生长”反应模型^[6], 具体形式为:

$$\frac{d\lambda}{dt} = I(1 - \lambda)^x \left(\frac{\rho}{\rho_0} - 1 \right)^r + G(1 - \lambda)^x \lambda^y p^z \quad (9)$$

式中, ρ_0 为炸药的初始密度, λ 为反应度, 含义为爆炸产物的质量分数, I, G, x, y, z, γ 是与炸药有关的 6 个可调系数。

引入反应速率模型后, (5) 式中源项的各分量就可写为:

$$\sigma_1 = -(\rho_1 + \rho_2) \frac{d\lambda}{dt}, \quad \sigma_2 = -\sigma_1 \quad (10)$$

$$Q_c = (\rho_1 + \rho_2) \frac{d\lambda}{dt} \cdot Q_0 \quad (11)$$

其中, Q_0 为单位质量炸药爆轰释放的能量。

2.4 离散方法

本文采用有限体积方法离散控制方程(4)式, 将无粘通量与反应源项同步求解, 也即由 n 时刻的流动变量 \mathbf{Q}^n , 根据(5)式分别计算无粘通量与反应源项, 然后代入(4)式, 更新流动变量为 \mathbf{Q}^{n+1} 。采用 Green 公式计算单元内变量梯度, 获得空间二阶精度; 为了抑制振荡, 采用了 Venkatakrisnan 限制器^[7]; 采用 AUSM⁺-up^[8] 格式计算单元边界上的通量。时间推进采用二阶精度的四步 Runge-Kutta 方法^[9]。

3 数值模拟结果与分析

首先进行一维计算, 在装药的球心处点火, 当爆炸波到达距球心 3.23m 处后, 三维计算开始。一维与三维同时计算时, 需按照爆炸相似律, 保证时间步长相一致。当物理时间达到 150ms 时计算停止, 以 $L = 40\text{m}$ 的算例为例, 此时一维计算共进行了 25.6 万步, 三维计算进行了 2468 步。一维计算的步数远多于三维, 这一方面由于一维的计算网格较密, 更主要的是由于爆炸后爆心处接近真空, 导致一维的时间步长极小。这一事实也说明, 本文采用小当量爆炸来模拟真实爆炸的处理方法是必要的。

图 2 给出了 $L = 10\text{m}$ 算例中不同时刻的对称面上的压力等值线图,等值线是在流场压力的最大最小值之间等间距取 31 条。可以看出,在 30ms 之前,冲击波一直在激波管内传播,波阵面为平面;之后,随着冲击波到达激波管管口,激波管管口压力迅速下降;由于气流在激波管管口的

绕流,管口右上方还出现了一个低压漩涡,随着冲击波的传播,此漩涡也在向前缓慢移动。在 90ms 附近,漩涡下方还拖着一道弱激波;与此同时,管口的稀疏波也在向管内传播,引起管口附近压力的下降。

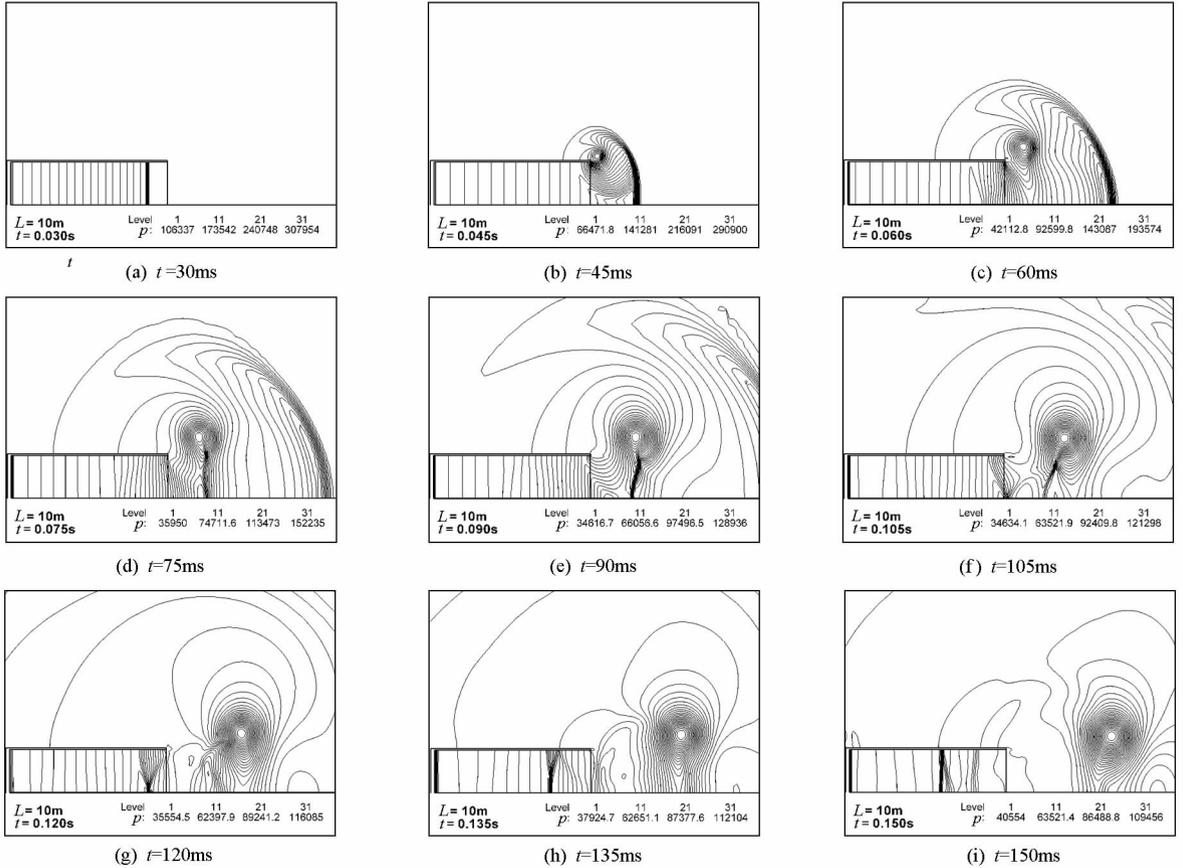


图 2 对称面上的压力等值线图

Fig.2 Pressure contours on the symmetry plane

由于入射波的压力按冲击波的压力波形变化,随着时间的增长,入射波的压力也迅速下降,直至低于环境大气压,导致激波管入口处压力低于出口处压力,这时在激波管中会产生一道反向运动的激波,在 135ms 和 150ms 的流场云图上都能清楚地看到此激波,试验段的低压气流经此激波减速增压,与外界气压达到平衡。

图 3 给出了 $L = 10\text{m}$ 算例中不同横截面上的超压时程曲线,每个截面输出了三条曲线,分别对应于该截面内的 A、B、C 三个监测点。 $x = 0$ 截面为试验段入口,其超压峰值为 0.252MPa,与经验公式(1)得到的 0.25MPa 十分接近,这说明了一维计算的正确性; $x = 10\text{m}$ 截面为试验段出口; $x = 20\text{m}$ 截面位于激波管出口,冲击波到达此截面后发生绕射,波后压力会加速下降,图中压力下降最快的为监测点 B,因为它位于激波管侧壁,而监测点 A、C 的压力下降稍慢。从图 3 也可以看出,

冲击波到达各截面的时间间隔逐渐变大,反映了冲击波波速的下降。

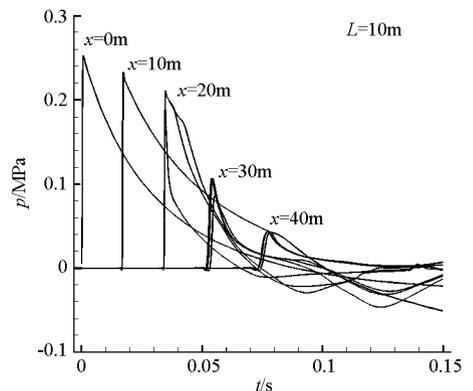


图 3 不同横截面上监测点的超压时程曲线 ($L = 10\text{m}$)

Fig.3 Time history of overpressure on different cross sections ($L = 10\text{m}$)

图 4 给出了 $x = 10\text{m}$ 截面上监测点 A 的超压曲线的比较。由于当管口稀疏波到达试验段时,

会造成超压曲线加速下降,因而从图中可以看到管口稀疏波对试验段的影响。可以看出, $L = 30\text{m}$ 和 $L = 40\text{m}$ 时,直到 150ms ,稀疏波都未影响到试验段; $L = 20\text{m}$ 时,稀疏波约在 130ms 时到达试验段; $L = 10\text{m}$ 时,稀疏波在 82ms 时到达试验段; $L = 5\text{m}$ 时,稀疏波在 55ms 时到达试验段。 $L = 5\text{m}$ 的超压曲线在 120ms 之后有一抬升,这是由于逆向传播的激波(如图 2(h)、(i)所示)到达此处。

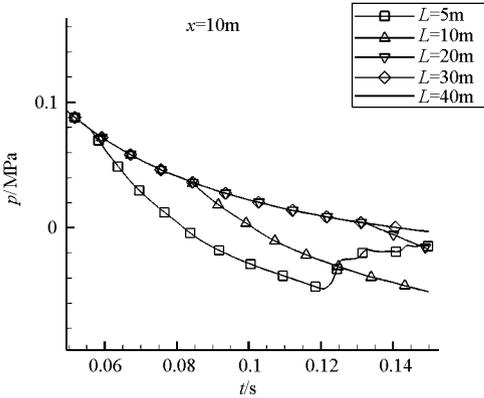


图 4 不同 L 对试验段超压曲线的影响

Fig.4 Influence of different L on the overpressure curves

表 1、表 2、表 3 分别列出了试验段出口 ($x = 10\text{m}$ 截面) 上监测点的超压峰值、超压作用时间、超压比冲量随 L 的变化,其中监测点 A、B、C 的位置如图 1 所示。从表 1~3 中可以看出, L 的变化对超压峰值没有影响;A、B、C 三个点的各个参数之间的差别也很小,说明各点超压曲线的一致性较好;当 L 小于等于 20m 时,随着 L 的减小,正压作用时间、正压比冲量都随之减小; L 大于等于 30m 时,正压作用时间、比冲量都不随 L 变化。其原因在图上也可以看出, L 小于等于 20m 时,稀疏波到达 $x = 10\text{m}$ 截面后,导致超压加速下降,因而造成超压的作用时间、比冲量减小;而 L 在 30m 以上时,管口稀疏波到达 $x = 10\text{m}$ 截面时,超压作用时间已结束。 $L = 20\text{m}$ 时,超压的作用时间、比冲量就已经很接近 $L = 40\text{m}$ 的值,因此可以认为 $L = 20\text{m}$ 时稀疏波对试验段的影响就已很小。

表 1 试验段出口处的超压峰值随 L 的变化(单位:MPa)

Tab.1 Variation of peak overpressure at the exit of experimental section along with L (Unit: MPa)

观测点	$L = 5\text{m}$	$L = 10\text{m}$	$L = 20\text{m}$	$L = 30\text{m}$	$L = 40\text{m}$
A	0.231	0.231	0.231	0.231	0.231
B	0.233	0.233	0.233	0.233	0.233
C	0.232	0.232	0.232	0.232	0.232

表 2 试验段出口处的超压作用时间随 L 的变化(单位:ms)

Tab.2 Variation of overpressure action time at the exit of experimental section along with L (Unit: ms)

观测点	$L = 5\text{m}$	$L = 10\text{m}$	$L = 20\text{m}$	$L = 30\text{m}$	$L = 40\text{m}$
A	65.1	84.4	118.7	124.6	124.6
B	64.7	84.1	118.9	124.6	124.7
C	64.9	84.2	118.9	124.6	124.7

表 3 试验段出口处的超压比冲量随 L 的变化(单位: $\text{Pa}\cdot\text{s}$)

Tab.1 Variation of overpressure specific impulse at the exit of experimental section along with L (Unit: $\text{Pa}\cdot\text{s}$)

观测点	$L = 5\text{m}$	$L = 10\text{m}$	$L = 20\text{m}$	$L = 30\text{m}$	$L = 40\text{m}$
A	6306.3	7247.5	7815.1	7825.3	7825.3
B	6300.2	7245.6	7815.7	7825.8	7825.8
C	6300.5	7244.7	7815.5	7825.5	7825.5

4 结论

(1) L 的变化对试验段的超压峰值无影响,也不影响试验段同一截面上不同点的超压曲线的一致性。

(2) L 小于等于 20m 时,试验段的超压曲线受到管口稀疏波的影响, L 越小,超压的作用时间、比冲量越小。 L 大于等于 30m 时,稀疏波对试验段的超压无影响。

(3) $L = 20\text{m}$ 时,超压的作用时间、比冲量与 $L = 30\text{m}$ 和 40m 已十分接近,综合各方面因素,对本文所计算的工况, 20m 的隔离段长度是一个较好的选择。

参考文献:

- [1] 宁建国,王仲琦,赵衡阳,等. 爆炸冲击波绕流的数值模拟研究[J]. 北京理工大学学报, 1999, 19(5): 543 - 547.
- [2] 刘君,刘瑞朝,贾忠湖,等. 爆炸波与物体干扰流场的数值模拟[J]. 空气动力学学报, 2000, 18(1): 55 - 60.
- [3] 白晓征,刘瑞朝,刘君. 驱动管中柱状装药爆轰过程的数值模拟[J]. 国防科技大学学报, 2009, 31(5): 106 - 111.
- [4] 防护工程防常规武器结构设计规范[S]. GJBz20419.2 - 98, 1998.
- [5] 周昕清. 爆炸动力学及其应用[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社, 2001.
- [6] Lee E L, Tarver C M. Phenomenological Model of Shock Initiation in Heterogeneous Explosives[J]. Physics of Fluids, 1980, 23 (12): 2362 - 2372.
- [7] Venkatakrishnan V. On the Accuracy of Limiters and Convergence to Steady Solutions[R]. AIAA 93 - 0880, 1993.
- [8] Liou M S. A Sequel to AUSM, Part II: AUSM+ -up for All Speeds[J]. Journal of Computational Physics, 2006, 214(1): 137 - 170.
- [9] Jameson A, Schmidt W, Friedrichshafen, et al. Numerical Solution of the Euler Equations by Finite Volume Methods Using Runge-kutta Time-stepping Schemes[R]. AIAA 81 - 1259, 1981.