

DOI: 10.11883/bzycj-2023-0094

基于高压气体驱动的爆炸波模拟激波管冲击波 衰减历程控制方法*

程 帅, 童念雪, 刘文祥, 殷文骏, 李秦超, 张德志

(西北核技术研究所强脉冲辐射环境模拟与效应全国重点实验室, 陕西 西安 710024)

摘要: 基于高压气体驱动的爆炸波模拟激波管, 一般采用驱动段、喉部、膨胀段的结构形式, 可产生特征与爆炸波接近的模拟冲击波, 是实验室中开展长正压作用时间爆炸毁伤效应研究的理想平台。通过调整激波管的变截面结构和驱动段形状, 实现冲击波超压衰减历程的控制, 是此类爆炸波模拟激波管设计面临的核心问题之一。基于实验室现有的爆炸波模拟激波管结构, 建立了激波管内一维流动数值计算模型; 参考统计学理论, 提出了基于决定系数的激波管模拟冲击波与标准爆炸波相似度评价方法; 进而以变截面激波管的流动特性为基础, 研究了驱动段形状对冲击波衰减历程的影响机理。研究结果表明: 采用距离喉部越远、截面直径越小的驱动段形状, 以决定系数为量化标准、优化驱动段形状, 控制稀疏波、压缩波在激波管内的运动过程, 可以获得接近于爆炸波指数衰减特征的模拟冲击波。

关键词: 激波管; 爆炸波模拟; 冲击波超压; 衰减历程调控; 相似度评估

中图分类号: O383.3

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

A control method for attenuation history of shock wave generated by blast simulation shock tube based on high pressure gas driving technic

CHENG Shuai, TONG Nianxue, LIU Wenxiang, YIN Wenjun, LI Qinchao, ZHANG Dezhi

(National Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, Shaanxi, China)

Abstract: A high-pressure-gas-driving blast wave simulation shock tube, commonly composed of driving section, throat section and expansion section, is an ideal platform for explosion damage effect research of long positive shock pressure duration time in the laboratory, as the ability of generating simulated shock wave with similar characteristics to real explosion wave. One of the core problems in the design of blast simulation shock tubes, is the control method of the simulated wave attenuation process by modifying the variable section structure and the driving section shape of the shock tube. In this article, a numerical calculation model of one-dimensional flow in the shock tube is established based on the explosion simulation shock tube in the laboratory, a similarity evaluation method of simulated shock wave and standard explosion wave in a shock tube based on determination coefficient is proposed referring to the statistical theory. Then, based on the flow characteristics of the variable section shock tube, the influence of the shape of the driving section on the shock wave attenuation history is studied. The results show that, it is feasible to acquire simulated wave with approximate exponential attenuation history of real blast wave, by using variable cross-section driving tube, of which the section diameter decreases with the growth of distance to the throat, optimizing the variable cross-section structure due to the determination coefficient, and controlling the motion property of expansion and compression wave in the shock tube.

Keywords: shock tube; blast wave simulation; shock wave overpressure; decay process control; similarity evaluation method

* 收稿日期: 2023-03-14; 修回日期: 2023-11-24

第一作者: 程 帅(1988—), 男, 硕士, 副研究员, chengshuai@nint.ac.cn

通信作者: 张德志(1973—), 男, 博士, 研究员, zhangdezhi@nint.ac.cn

高压气体驱动激波管可以产生正压作用时间长、特征与强爆炸相符合的冲击波, 是实验室内开展强爆炸冲击波毁伤效应研究的理想实验平台, 已经应用于武器装备^[1]、建筑结构^[2]、生物等爆炸损伤^[3]的实验研究。利用激波管产生冲击波, 再通过喉部和驱动段形状等变截面结构调控冲击波衰减历程, 是爆炸波模拟激波管物理设计、实验设计的核心技术问题之一。

变截面激波管中冲击波的早期研究以理想激波管流动理论^[4]为基础, 拓展到收缩、扩张截面对冲击波阵面强度、波后气流速度的影响, 形成了比较经典的 CCW 理论^[5-8], 可用于变截面激波管中冲击波强度变化的预估。冲击波衰减历程的调控方法主要有两种。第一种是在驱动段中加入系列不同漏空率的带孔板, 通过带孔板控制稀疏波的反射、透射过程, 达到了延长冲击波正压作用时间、并将冲击波由平台状调整为指数衰减形状的目的^[9]。但这种方法要求驱动段内的挡板数量可变、漏空面积可调、位置可变, 工程实施的难度较大^[10]。第二种方法是将激波管设计为变截面结构, 首先在驱动段后增加喉部^[11-12], 再将驱动段改为锥形、阶梯形^[13], 利用喉部和驱动段的形状变化, 控制冲击波衰减历程。基于变截面的冲击波衰减历程控制方法在爆炸波模拟激波管的建设中应用比较广泛^[14], 但相关的公开文献中, 大多只是简要介绍了计算方法, 较少涉及规律性认识和实验结果, 且几乎没有涉及激波管模拟冲击波与真实爆炸波相似度的评价方法问题。

本文中, 针对高压气体驱动爆炸波模拟激波管的冲击波衰减历程控制问题, 通过分析激波管内一维流动特征, 研究变截面结构对冲击波衰减历程的影响规律; 构建激波管模拟冲击波与标准爆炸波相似度的评价方法; 设计变截面驱动段的激波管以产生衰减历程符合指数特征的模拟冲击波, 并开展实验加以验证。

1 激波管结构和计算模型

如图 1 所示, 高压气体驱动方式的爆炸波模拟激波管结构包含驱动段、喉部、膨胀段 3 个部分, 分隔高压驱动气体的膜片位于驱动段和喉部之间。膜片破裂后, 高压气体、低压气体的间断面形成冲击波, 通过喉部进入膨胀段; 运动一定距离后到达试验段, 逐渐形成符合效应实验要求的冲击波。激波管的物理和实验设计, 主要是通过控制结构尺寸、驱动参数, 使试验段冲击波历程符合实验需求。

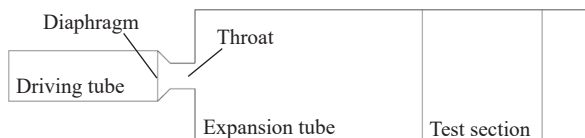


图 1 爆炸波模拟激波管结构

Fig. 1 Structure of blast wave simulation tube

为了高效地计算激波管产生的冲击波历程, 通常将图 1 的变截面激波管系统简化为可压缩流体的一维非定常流动模型。一维流动模型的基本假设包括: (1) 在试验段附近, 冲击波经过喉部后已经运动了足够长距离, 变截面引起的二维流动特征对冲击波历程的影响可忽略^[15]; (2) 气体为理想气体; (3) 系统与外界的热交换可忽略。基于上述假设, 可以仅沿激波管轴向划分网格, 建立管内一维流动的守恒方程组:

$$\begin{cases} \frac{\partial(\rho A)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u A)}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial(\rho u A)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2 A + p A)}{\partial x} - p \frac{\partial A}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial}{\partial t} \left[\rho \left(e + \frac{u^2}{2} \right) A \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[\rho \left(e + \frac{u^2}{2} \right) u A + p u A \right] = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: ρ 为密度, A 为截面积, u 为粒子速度, t 为时间, p 为压力, e 为比内能, x 为激波管轴向长度坐标。

在式 (1) 的基础上, 结合理想气体状态方程, 添加初始条件、边界条件、人工黏性, 即可进行差分求解^[16-17], 获得激波管内冲击波流场特征。计算模型的具体尺寸为: 驱动段直径 100 mm, 长度 1 000 mm; 膨胀段直径 264 mm, 长度 15 m; 喉部直径 50 mm, 长度 50 mm。

2 模拟冲击波相似度评估方法

激波管产生的模拟冲击波与真实爆炸波的历程很难完全一致, 因此有必要建立相似度的量化评估方法, 作为评价模拟冲击波质量的依据。相似度评估主要涉及两个问题: (1) 标准爆炸波曲线计算方法; (2) 相似度量化的计算方法。

对于标准爆炸波曲线计算, 采用文献 [18] 的思路: 以吨级爆炸实验中获得的不同爆心高度冲击波数据为基础, 利用 Sachs 比例定律计算不同爆炸当量、环境条件、超压峰值的标准爆炸波历程。

对于相似度量化的计算方法, 采用统计学 [19] 中决定系数作为相似度量化的标准, 以计算得到的模拟冲击波历程曲线为样本曲线, 记为 y_i ; 以标准爆炸波曲线作为回归曲线, 记为 $\hat{y}_i$ 。决定系数 R^2 的计算方法如下:

$$R^2(y, \hat{y}) = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \quad (2)$$

式中: $\bar{y}$ 为样本曲线的平均值。计算得到的 R^2 即可作为相似度的量化指标。 R^2 越接近 1, 模拟冲击波历程越接近标准爆炸波。

3 高压气体驱动爆炸波模拟激波管的基本流动特性

如图 1 所示, 基于高压气体驱动的爆炸波模拟激波管, 其基本结构是变截面激波管, 但其驱动段仍然是等截面形式。对驱动段等截面激波管内流动特性的深入认识, 是进行冲击波衰减历程控制方法研究的基础。参照基于高压气体驱动的爆炸波模拟激波管结构, 建立如图 2 所示的变截面激波管模型, 计算驱动段、试验段的压力特性曲线, 研究驱动段等截面激波管内的基本流动特性。图中 p_d 为驱动段测点压力, p_e 为试验段测点压力, p_{di} 为初始驱动压力, p_{ei} 为初始被驱动段压力 (即环境压力)。根据计算结果, 对于驱动段等截面激波管, 驱动段、试验段内的压力曲线均具有阶梯状衰减特征。图 2 对阶梯状衰减特征的形成原因进行了分析。当膜片破裂时, 激波管内形成向左运动的稀疏波和向右运动的冲击波。当稀疏波到达驱动段内测点后, 测点处压力开始降低。同时, 向右运动的冲击波在喉部处, 部分透射、部分反射: 透射冲击波进入膨胀段, 继续向右运动; 反射的压缩波向左运动, 经过驱动段测点时, 测点处压力升高, 并形成压力台阶。稀疏波、压缩波到达驱动段端面后反射, 到达喉部时部分透射、部分反射。稀疏波、压缩波的往复运动使驱动段内形成若干压力阶梯。

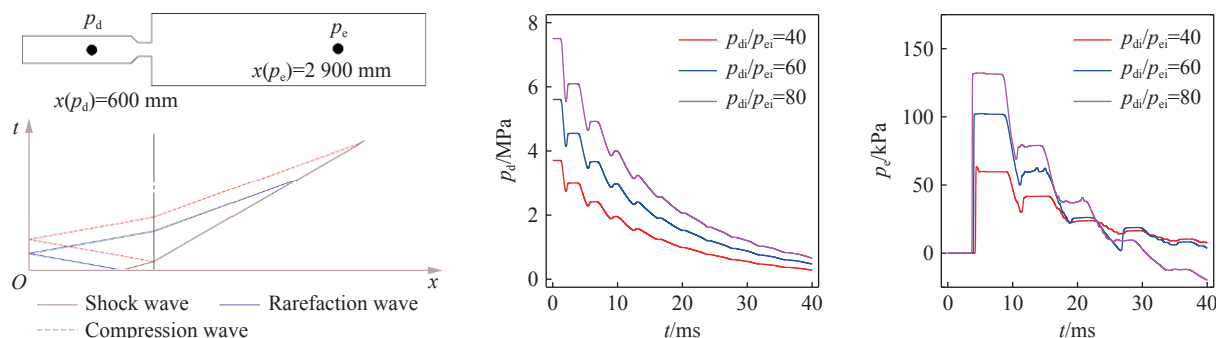


图 2 驱动段等截面激波管的流动特性

Fig. 2 Flow characteristics in blast tube with uniform driving section

为验证以上流动过程的分析结果, 使用实验室爆炸波模拟激波管开展了验证性实验, 通过在试验段壁面平齐安装的传感器, 获取了冲击波超压历程数据。图 3 为驱动压力 7.8 和 8.7 MPa 时, 冲击波历程实验数据和一维数值计算结果, 可见实验获得的冲击波历程曲线具有明显的阶梯状下降趋势, 验证了驱动

段等截面激波管内流动理论。此外,一维数值计算得到的冲击波前2个压力平台、冲击波历程整体变化趋势均与实验数据有较好的一致性,说明一维数值计算模型基本可靠。

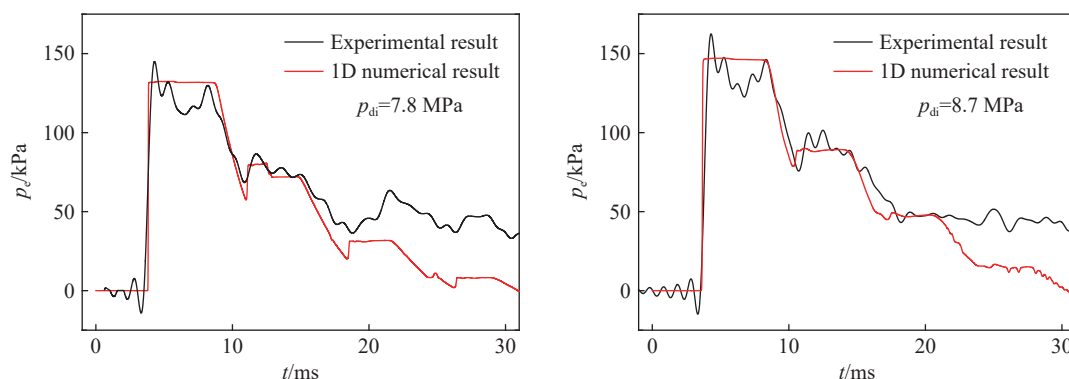


图3 驱动段等截面激波管的冲击波历程

Fig. 3 History of shock wave in blast tube with uniform driving section

4 驱动段形状对冲击波历程的影响

进一步将驱动段等截面激波管的驱动段形状改为从右向左逐渐收缩的形式,可以将模拟冲击波由阶梯状衰减调整到与爆炸波指数衰减接近的状态。图4分析了驱动段形状收缩对冲击波衰减历程的影响,图中 G_1 、 G_2 、 G_3 为测点到所在段上游端面的距离。在中心稀疏波2向驱动段左侧运动、遇到驱动段形状收缩结构时,部分中心稀疏波透射、继续向左运动,形成波系4;部分中心稀疏波反射,向喉部运动,形成波系3。稀疏波3到达喉部后,部分透射进入膨胀段,形成稀疏波7。在稀疏波7的影响下,冲击波开始衰减。因此,驱动段内的形状收缩提前了部分稀疏波的返回喉部、追及冲击波阵面的时间。类似地,喉部反射的压缩波运动过程也按同样的机理受到驱动段内形状收缩的影响。通过设置多组图4中的形状收缩结构,并合理设计形状收缩结构的位置、尺寸,即可将冲击波由阶梯状衰减调整为指数衰减特征。

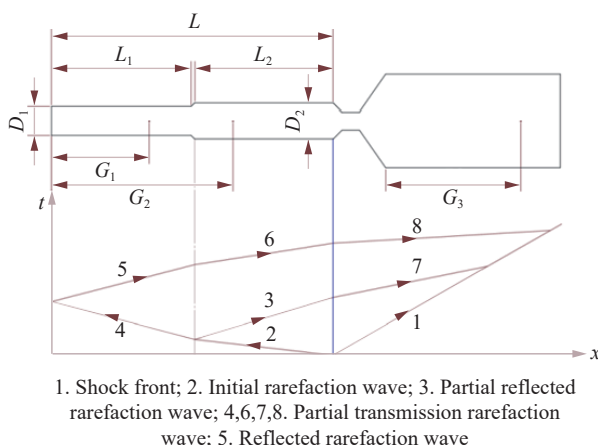


图4 变截面驱动段对冲击波衰减影响

Fig. 4 Influence of variable cross-section driving segment on shock wave attenuation

为分析驱动段形状收缩结构对冲击波衰减历程的影响规律,按照表1建立模型,进行对比计算,得到的计算结果如图5~6所示,分别比较驱动段形状收缩结构直径、长度、位置变化对驱动段内压力历程、试验段内冲击波历程的影响,图中标准曲线为驱动段等截面模型的计算结果。由图可见,驱动段内增加形状收缩结构后,驱动段、试验段内原本的阶梯状压力衰减曲线,出现了以下3方面的变化趋势:

(1) 整体上看,驱动段内的形状收缩结构,使压力曲线在原有驱动段等截面模型的基础上,各个压力阶梯衰减的时间提前;

(2) 细节上看,驱动段内形状收缩后的直径越小,引起的后续衰减台阶越低(图5);驱动段形状收缩结构的位置越靠近喉部,试验段内冲击波开始衰减的时间越早(图6);驱动段、试验段内压力曲线的整体变化趋势、波动过程的细节,均与稀疏波、压缩波在激波管内的运动过程一致;

(3) 驱动段形状收缩结构对冲击波正压作用时间的影响, 可以与驱动段容积的变化建立定性关系——收缩结构的直径越小、变截面位置越接近喉部, 驱动段的容积降低越多, 在喉部面积不变的情况下, 驱动气体释放所需的时间越短, 冲击波正压作用时间也越短。

表 1 计算模型参数

Table 1 Parameters of calculation model

Model	L/mm	L_1/mm	L_2/mm	D_1/mm	D_2/mm	G_1/mm	G_2/mm	G_3/mm
Ref	1000	—	—	—	50	100	800	1750
1	1000	400	450	45	50	100	800	1750
2	1000	400	450	40	50	100	800	1750
3	1000	550	300	40	50	100	800	1750
4	1000	250	600	40	50	100	800	1750

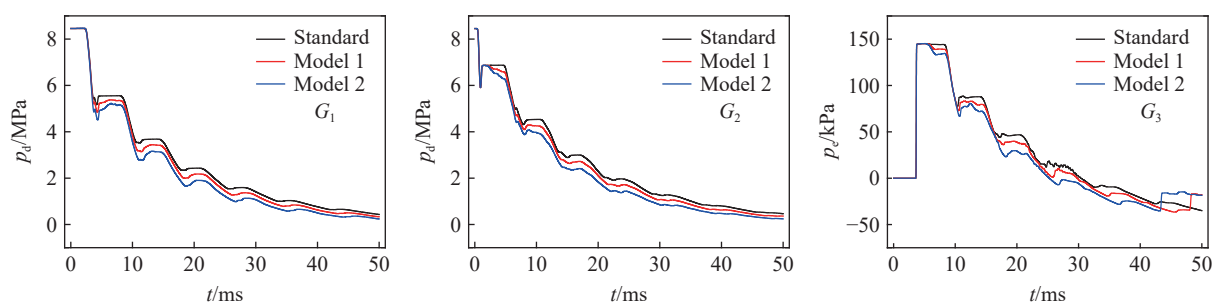


图 5 驱动段形状收缩结构直径对冲击衰减历程的影响

Fig. 5 Influence of contraction structure diameter of the driving tube on the attenuation of the impact

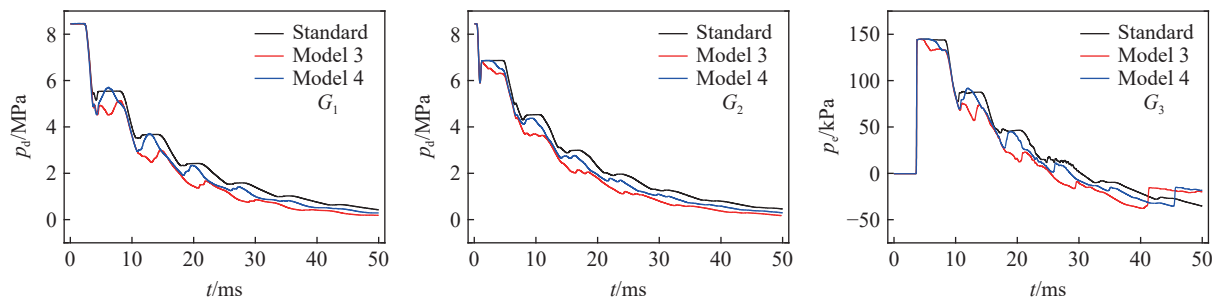


图 6 驱动段形状收缩结构位置对冲击衰减历程的影响

Fig. 6 Influence of contraction structure location of the driving tube on the attenuation of the impact

5 冲击波衰减历程控制方法和实验

以驱动段形状收缩结构对冲击波衰减历程的影响规律为基础, 通过设计更复杂的形状收缩结构, 获得与标准爆炸波相似度更高的模拟冲击波。为产生超压峰值 92 kPa、正压作用时间 24 ms 的爆炸波, 经过反复迭代, 确定了图 7 的四段驱动段结构。图 8 对比了采用该结构得到的冲击波曲线与参考冲击波的对比, 两者的相似度系数 $R^2=0.9389$ 。其中采用四段驱动结构时, 驱动气体压力为 7.8 MPa, 环境气体压力 95 kPa、温度为 15 °C; 根据文献 [18] 计算的标准冲击波曲线超压峰值为 92 kPa、正压作用时间为 24 ms。

按照图 7 的设计, 将实验室激波管驱动段调整为相应尺寸, 在相应的驱动压力、大气环境下开展验证实验。图 8 中给出了试验段测得的冲击波超压历程曲线, 可见激波管一维流动计算模型的预测结果与实验数据有较高的一致性, 说明计算模型基本可靠, 同时验证了基于驱动段变截面的激波管控制冲击波衰减历程的可行性。

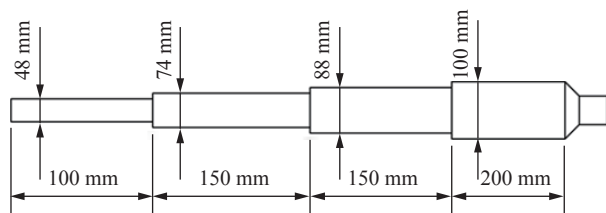


图7 冲击波衰减历程控制计算模型

Fig. 7 Computational model of blast wave attenuation process control

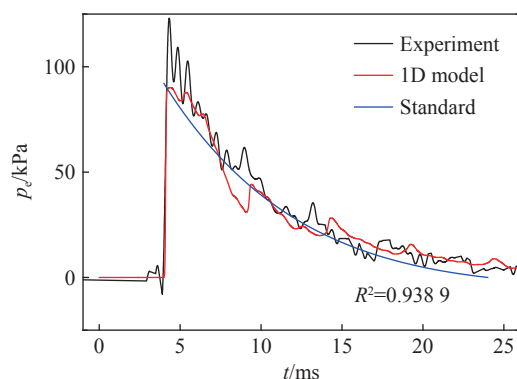


图8 冲击波衰减历程控制结果

Fig. 8 Result on the attenuation process control of blast wave

6 结 论

针对基于高压气体驱动的爆炸波模拟激波管中冲击波超压衰减历程控制问题,建立了激波管模型冲击波与标准爆炸波相似度评价方法,并通过激波管内一维流动数值计算模型,研究了驱动段等截面激波管的流场特性,分析了驱动段形状收缩结构对冲击波超压衰减历程的影响,给出了通过驱动段形状控制冲击波超压衰减历程的方法,并开展实验验证了可行性,得到的主要结论如下。

(1) 基于高压气体驱动的爆炸波模拟激波管,可以通过调整变截面结构,设计距离喉部越远、直径越小的变截面驱动段,产生超压历程符合爆炸波指数衰减规律的冲击波。

(2) 当驱动段为等截面结构时,基于高压气体驱动的爆炸波模拟激波管,产生的冲击波超压历程具有阶梯状衰减特征;驱动段内往复运动的稀疏波、压缩波,是导致阶梯状衰减特征的主要原因。

(3) 变截面驱动段对冲击波衰减历程的影响机理,是通过控制稀疏波、压缩波的反射、透射过程,使产生的冲击波在阶梯状衰减特征的基础上,提前各个压力阶梯的衰减时间,提升与标准爆炸波指数衰减过程的相似度。

参考文献:

- [1] 任辉启,王世合,周松柏,等. 大型爆炸波模拟装置研制及其应用 [C]//第十六届全国激波与激波管学术会议论文集. 河南,洛阳:中国力学学会激波与激波管专业委员会,2014.
- [2] NIAN W M, SUBRAMANIAM K V L, ANDREPOULOS Y. Experimental investigation on blast response of cellular concrete [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2016, 96: 105–115. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2016.05.021.
- [3] RENEER D V, HISEL R D, HOFFMAN J M, et al. A multi-mode shock tube for investigation of blast-induced traumatic brain injury [J]. *Journal of Neurotrauma*, 2011, 28(1): 95–104. DOI: 10.1089/neu.2010.1513.
- [4] RESLER E L, LIN S C, KANTROWITZ A. The production of high temperature gases in shock tubes [J]. *Journal of Applied Physics*, 1952, 23(12): 1390–1399. DOI: 10.1063/1.1702080.
- [5] CHESTER W. The quasi-cylindrical shock tube [J]. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 1954, 45(371): 1293–1301. DOI: 10.1080/1478641208561138.
- [6] CHISNELL R F. The motion of a shock wave in a channel, with applications to cylindrical and spherical shock waves [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1957, 2(3): 286–298. DOI: 10.1017/S0022112057000130.
- [7] WHITHAM G B. On the propagation of shock waves through regions of non-uniform area or flow [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1958, 4(4): 337–360. DOI: 10.1017/S0022112058000495.
- [8] CHESTER W. The propagation of shock waves along ducts of varying cross section [J]. *Advances in Applied Mechanics*, 1960, 6: 119–152. DOI: 10.1016/S0065-2156(08)70111-X.
- [9] COULTER G A, BULMASH G, KINGERY C. Feasibility study of shock wave modification in the BRL 2.44 m blast

- simulator: AD-A139631 [R]. U.S. Army Ballistic Research Laboratory, 1984.
- [10] HISLEY D M. Computational studies of wave-shaping in a blast simulator by perforated plates in the driver: AD-A188200 [R]. Aberdeen, UK: Ballistic Research Laboratory, 1987.
- [11] MARK A. Computational design of large-scale blast simulators [C]//19th Aerospace Sciences Meeting. St. Louis: AIAA, 1981.
- [12] OPALKA K O. Large blast and thermal simulator advanced concept driver design by computational fluid dynamics: AD-A-211364 [R]. Aberdeen, UK: Ballistics Research Laboratory, 1989.
- [13] JOSEY T, SAWYER T W. High fidelity simulation of free-field blast loading: the importance of dynamic pressure: DRDC-RDDC-2018-P003 [R]. Canada: Defense Research and Development, 2016.
- [14] GION E J. A multidriver shock tube model of a large blast simulator: AD-A208324 [R]. U.S. Army Ballistic Research Laboratory, 1989.
- [15] SCHRAML S J. Performance predictions for the large blast/thermal simulator based on experimental and computational results: AD-A-235728 [R]. Aberdeen, UK: Ballistics Research Laboratory, 1991.
- [16] 张德良. 计算流体力学教程 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2010: 151.
- ZHANG D L. A course in computational fluid dynamics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2010: 151.
- [17] OPALKA K O, MARK A. The BRL-Q1D Code: a tool for the numerical simulation of flows in shock tubes with variable cross-sectional areas: AD-A174254 [R]. U.S. Army Ballistic Research Laboratory, 1986.
- [18] SCHRAML S J, PEARSON R J. Computer programs for LB/TS test design: technical description, usage instructions and source code listings: AD-A-299247 [R]. Aberdeen, UK: Ballistics Research Laboratory, 1995.
- [19] 刘剑平, 陆元鸿, 曹宵临. 概率论与数理统计方法 [M]. 2 版. 上海: 华东理工大学出版社, 2004: 186–195.

(责任编辑 王小飞)