

# 基于大型激波管氢氧爆轰驱动方式产生冲击波 波形调控的数值模拟\*

郭丁<sup>1,2</sup>, 孙渊博<sup>1</sup>, 葛云心<sup>1</sup>, 王成<sup>1,2</sup>, 邵建锟<sup>1,2</sup>

(1.北京理工大学爆炸科学与安全防护全国重点实验室, 北京 100081

2.北京理工大学长三角研究院(嘉兴), 浙江 嘉兴 314000)

**摘要:** 爆炸冲击波具有鲜明的特征参数, 在实验复现时具有难度大、可重复性差的问题。而大型激波管的构建为解决这一问题提供低成本、高效率的实验平台, 且能规避小尺度缩尺实验中由于尺寸效应造成的实验结果不准确。应用大型激波管产生不同种类冲击加载的具体驱动方法仍值得深入研究。其中, 利用大型激波管氢氧爆轰模拟爆炸波的可行性问题, 已由中国科学院力学研究所基于大型激波风洞进行的大量实验研究加以论证, 但目前仍然缺乏利用大型激波管直接模拟炸药爆炸冲击波形的研究。因此, 进行大型激波管内氢氧爆轰驱动方式下冲击波生成与传播过程的数值模拟研究, 并基于模拟研究结果提出在大型激波管内对爆炸冲击波的模拟复现条件。首先, 根据现存大型激波设备结构特点, 建立具有驱动管、激波整形段和变截面出口特征的大型激波管二维模型。冲击波的生成与传播过程使用含有七步氢氧反应模型的二维非定常粘性可压缩流体控制方程表达, 湍流模型选取 RNG k- $\epsilon$  模型, 并选用二维瞬态耦合式求解器进行数值模拟计算。其次, 通过数值模拟计算研究在大型激波管采用氢氧爆轰驱动方式时, 驱动初始条件、低反应活性气体掺混、激波管构型等一系列因素对于爆轰形成冲击波波形的影响, 并提出其影响规律。最后, 选取黑火药爆炸冲击波实验数据作为目标, 依据数值计算结果, 模拟了大型激波管中冲击波波形调控过程, 实现了在大型激波管中利用氢氧爆轰驱动方式对爆炸冲击波的模拟复现。

**关键词:** 激波物理; 激波管; 数值模拟; 氢氧爆轰

中图分类号: O38

国标学科代码: 130.3520

文献标识码: A

## Numerical study of shock wave generated by hydrogen and oxygen detonation in a large shock tube

GUO Ding<sup>1</sup>, SUN Yuanbo<sup>1</sup>, GE Yunxin<sup>1</sup>, WANG Cheng<sup>1</sup>, SHAO Jiankun<sup>1</sup>

(1. State key laboratory of explosion science and safety protection, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Blast wave has distinct characteristic parameters, which makes it difficult to replicate in experiments. Large shock tubes provide a low-cost and high-efficiency experimental platform to solve this problem, which can avoid the inaccuracy of the experimental results caused by the size effect in the small scale experiment. The specific driving methods of using large shock tubes to produce different kinds of shock waves are still worthy of further study. The feasibility of using large shock tube hydrogen-oxygen detonation to simulate explosion waves has been demonstrated by a large number of experimental studies based on large shock tunnels conducted by the Institute of Mechanics of Chinese Academy of Sciences. However, there is still a lack

\*收稿日期: 2024-08-20; 修回日期: 2025-03-03;

基金项目: 爆炸科学与安全防护全国重点实验室自由探索项目(YBKT23-01); 国家自然科学基金创新研究群体项目(12221002);

第一作者: 郭丁(1999-), 男, 硕士研究生. E-mail: [guoding@bit.edu.cn](mailto:guoding@bit.edu.cn);

通信作者: 邵建锟(1989-), 男, 博士, 教授. E-mail: [jkshao@bit.edu.cn](mailto:jkshao@bit.edu.cn)。

of research on blast wave simulation using large shock tubes. Therefore, a numerical simulation study of the generation and propagation process of shock wave generated by hydrogen and oxygen detonation in a large shock tube were conducted, and the reproduction of blast wave in a large shock tube was realized based on numerical simulation. Firstly, based on the designs of existing large shock tubes, a two-dimensional axisymmetric model of a large shock tube with driving tube, shock shaping section and variable angle outlet was established. A two-dimensional unsteady viscous compressible flow governing equations with the seven-steps reaction of hydrogen and oxygen mechanism was used to simulate the generation and propagation process of shock wave. The RNG k- $\epsilon$  model was selected as the turbulence model, and the two-dimensional transient coupling solver was used for numerical simulation. Due to the large scale of the model, turbulence has little effect on the far-field shock wave. Therefore, the finite rate component transport model was selected to couple the interaction between turbulence and chemical reaction, and a two-dimensional transient coupled solver was used. Secondly, with hydrogen and oxygen detonation as the driving method, the effects of initial driving conditions, low chemical reactivity gas mixing, and shock tube configurations on the formation of blast waves were studied. The characteristics of the wave form, the amplitude of the peak pressure and the trend of the positive pressure time were analyzed. Finally, based on the numerical simulation results, the control process of shock wave was simulated in a large shock tube and a good reproduction of the real explosion shock wave in a large shock tube was achieved using hydrogen and oxygen detonation as the driving method.

**Keywords:** Shock wave physics; Shock tube; Numerical simulation; Hydrogen-oxygen detonation

## 1 引言

炸药爆炸伴随化学反应产生大量高温高压气体，这些高温高压气体会以极高的速度向外扩散，并强烈压缩四周空气介质，形成使介质压力、温度等物理参数突增的冲击波。炸药爆炸形成冲击波传播速度范围在 1000~9000 m/s，能量释放可根据炸药种类与装药量达到数十万甚至数百万焦耳。而在爆炸波形成的同时，在分界面处产生与冲击波反向的稀疏波使得冲击波后的爆炸产物压力迅速下降，当冲击波后压力下降至介质初始压力时，由于爆炸产物运动的惯性作用，波后区域压力会继续下降产生低于环境压力的负压区域<sup>[1]</sup>。理想状态下，爆炸波在空气中传播的压力波形变化曲线如图 1 所示。

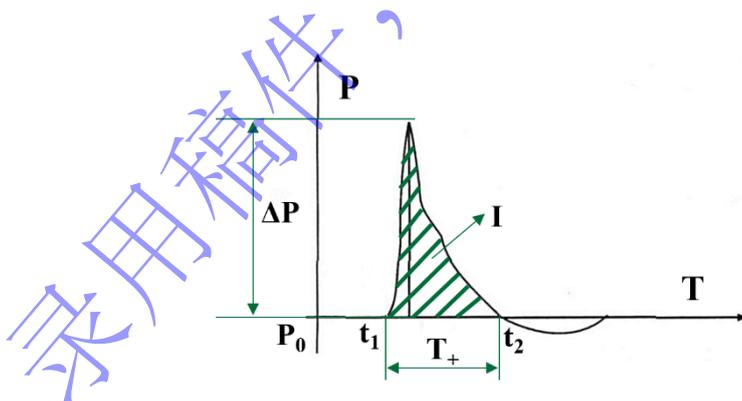


图 1 爆炸冲击波传播压力-时间变化曲线

Fig.1 Scale of shock wave propagation

图 1 中  $P_0$  表示环境压力， $t_1$  表示观测点处压力突增的时刻， $\Delta P$  为压力突增的峰值， $t_2$  为压力衰减至环境压力的时刻。一般选用冲击波峰值超压( $\Delta P$ )、正压作用时间( $T_+$ )和正压区冲量( $I$ )三个参数表征冲击波特征<sup>[1-3]</sup>。上世纪五十年代以来，国内外众多学者对空气中爆炸产生冲击波的传播方式及冲击波特征进行了研究。首先，研究集中于爆炸冲击波波形特征参数经验公式的总结。Sadovskii<sup>[4]</sup> 最早在 1952 年给出了爆炸波峰值超压拟合公式。Brode<sup>[5,6]</sup> 则基于高爆炸药爆炸提出了冲击波峰值超压

拟合公式。Henrych<sup>[7,8]</sup>基于大量实验研究增加了空气中爆炸波正压作用时间经验公式。Mills<sup>[9]</sup>则提出了另一种爆炸冲击波峰值超压表达式。除此之外，国内学者也针对炸药爆炸产生冲击波特征参数的表征展开诸多研究<sup>[10-12]</sup>。随着实验与检测手段的进步与更新，外场实验成为炸药冲击波研究的主要手段。Wu<sup>[13]</sup>等人研究了炸药置于地面的起爆现象。仲倩<sup>[14]</sup>进行了 TNT 空中爆炸冲击波特征参数实验研究，并依据结果提出优化计算公式。张军<sup>[15]</sup>等人研究了炸药驱动式爆炸管的载荷计算方法。

激波管是研究高温高压工况下物理问题的常用实验设备，国内外诸多学者已经开展了激波管内冲击波波形的研究，但尺度多限于小型激波管<sup>[16-18]</sup>。然而针对武器装备、防护结构等大型标的的抗爆性能实验，由于尺寸效应的存在，只能建立大尺度的爆炸冲击模拟装置才能得到可重复性强、可靠性高的实验数据。任辉启<sup>[19]</sup>主持建设了我国首个超大型爆炸波模拟装置，大型激波管设备的建立为研究大尺度的冲击波力学效应提供低成本、高效率的实验平台。此类设备结构简单、运行稳定可靠、参数变化灵活、重复性好，能满足多种冲击加载实验需要。大型激波管进行冲击加载实验时，产生冲击波的常见驱动方式有以下几种：①高压气体驱动②爆轰驱动③炸药驱动等。谷笛华<sup>[20]</sup>等人针对激波管不同驱动方式进行对比分析，其中，高压气体驱动方式不能达到较高峰值超压的实验需求，且实验所需时间成本较长。而炸药驱动方式能够达到较高的峰值超压需求，但实验重复性较低，驱动产生冲击波波形品质较差。相比之下，氢氧爆轰驱动因其满足提供高品质冲击波加载的同时，又具有较高的可重复性和较低的实验成本，成为模拟爆炸冲击波加载的理想驱动方式。中国科学院力学研究所俞鸿儒院士于上世纪八十年代开始进行爆炸波模拟研究<sup>[21-23]</sup>，提出利用氢氧爆轰进行爆炸波模拟的关键思路，并基于大型激波风洞进行了大量实验研究，论证利用大型激波管氢氧爆轰驱动复现爆炸波的可行性，但目前仍然缺乏利用大型激波管直接模拟炸药冲击波形的研究。

基于上述背景，本文研究目标是利用数值模拟方法探究基于大型激波管氢氧爆轰驱动方式的爆炸冲击波波形调控方法，从而实现在大型激波管中炸药冲击波的模拟复现。研究将基于计算流体力学 ANSYS Fluent 软件探究大型激波管氢氧爆轰驱动方式下多种因素对于形成冲击波特征参数的影响，共分以下几个部分进行研究讨论。首先，介绍本文采用的数值模拟计算方法，分别介绍了数值模型构建方法、模型参数、化学反应模型，并进行模型收敛性分析。其次，介绍数值模拟研究结果，分别研究了氢氧爆轰驱动方式下驱动气体初始条件、激波管几何构型等因素对于形成冲击波特征参数影响。最后，根据模拟结论，通过数值模拟的手段实现对黑火药爆炸产生冲击波波形实验数据的复现，并总结研究结论。

## 2 数值模拟计算方法

### 2.1 数值计算方法与模型构建

数值模拟基于 ANSYS Fluent 软件进行计算，将大型激波管简化为二维轴对称模型进行计算。计算采用有限体积法计算，时间空间离散精度均为二阶，驱动管内氢氧爆轰冲击波的形成传播可以使用含有化学反应的二维非定常粘性可压缩流体控制方程表达。本研究选取标准 k- $\epsilon$  湍流模型，化学反应动力学模型采用七步氢氧化学反应简化机理模型。由于本研究主要关注远场冲击波的作用效果，且模型尺度较大，湍流对于远场冲击波作用的影响较小，因此选取有限速率组分输运模型耦合湍流与化学反应的相互作用，对不同初始条件下氢氧爆轰驱动产生冲击波加载以及其传播过程的激波管流场进行数值模拟。

本研究构建的大型激波管结构由驱动管、激波整形段与变截面出口构成，驱动管结构受启发于美国大型激波管 LBST，该装置采用 9 根内径 1.83 m、长 11-29 m 的圆柱形驱动管驱动，各驱动管末端连接拉瓦尔喷管<sup>[24]</sup>。本研究所构建结构选取 9-30 m 可变长度驱动管，出于降低模型复杂度与简化计算量考量，本研究只模拟单管驱动产生冲击波。激波管具体几何参数为：驱动管长 9-30 m，管径 1.0 m，驱动管通过喷管与激波整形段相连接。激波整形段长 60 m，直径 6 m，变截面出口长 10 m，

出口设置  $50 \times 50$  m 空气域，激波管设备壁面设置为绝热刚性壁面，空气域四周设置压力出口以模拟开阔空间。根据气相爆轰直接起爆理论<sup>[25]</sup>，以高能量源作为起爆能量源时，爆轰瞬间形成且没有经历火焰加速的预爆轰阶段。因此，在驱动管前段设置强点火区模拟点火器装置，点火区为半径 0.1 m 的圆形区域，点火温度设置为 3000 K，压力设置为 10 MPa。驱动管出口处设置喷管，在喷管出口处设置观测点 A，监测表明喷管出口可达 2.84 马赫。选取距变截面出口 8 m 处作为观测点 B，提取冲击波加载压力波形数据。对模型进行二维非结构化网格划分，由于化学反应集中发生在驱动管内，因此采用驱动部分局部加密计算网格，驱动部分网格平均尺寸  $0.01 \times 0.01$  m，其余部分网格尺寸  $0.05 \times 0.05$  m，划分网格边界层，初始层高为 0.1 倍网格尺寸，增长率为 1.1，网格总量为 110 万左右，二维模型构建与网格划分具体如图 2 所示。

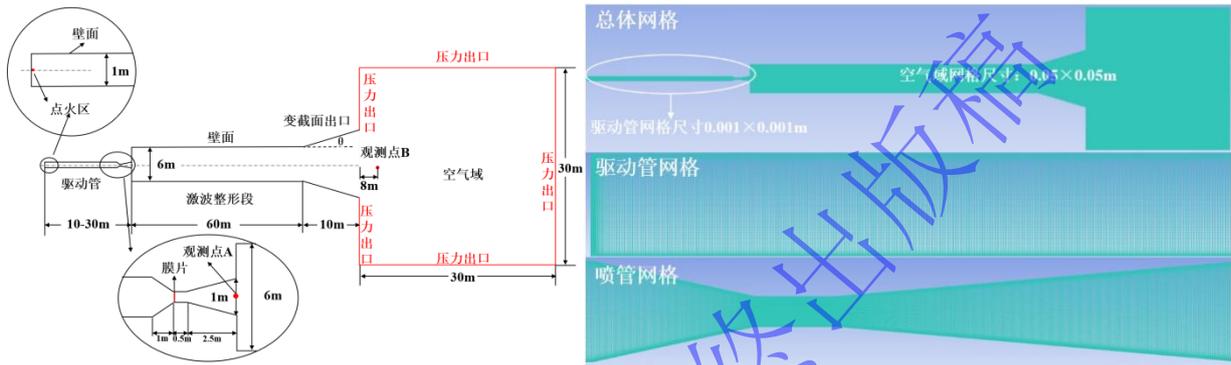


图 2 二维模型构建与网格划分

Fig.2 2D model and grid

高压气体从驱动管喷出后压缩介质气体形成稳定冲击波，这一过程称为激波整形，发生在大型激波管激波整形段，如图 3 所示。根据图 3 中的计算结果，激波在 55 m 后整形为平面波，因此设置激波整形段长 60 m。稳定激波可在激波管内部对待测目标进行冲击加载，也可经变截面出口对处于开阔空间的目标进行冲击加载，设置变截面出口开口角度设为  $\theta$ 。

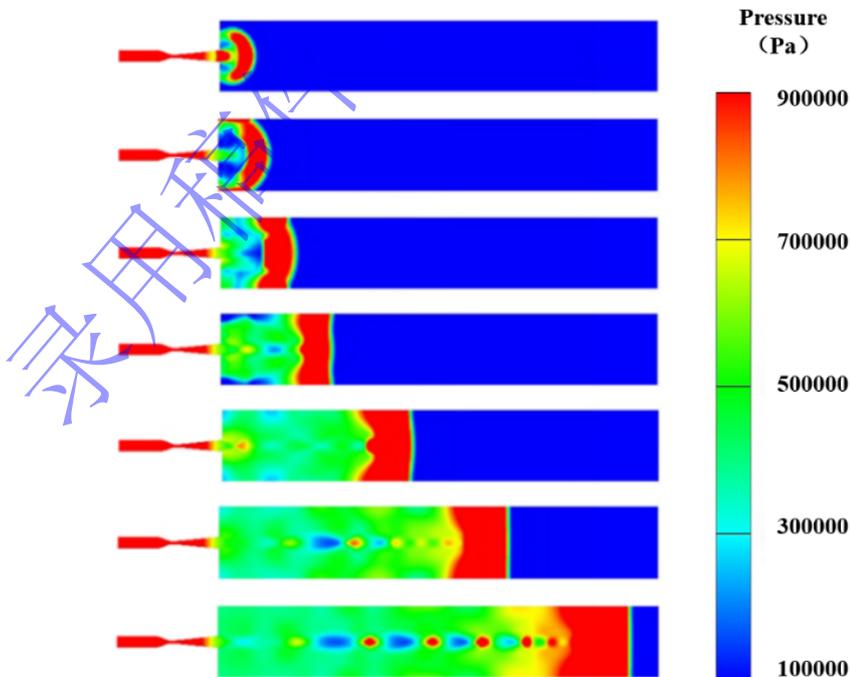


图 3 激波整形过程

Fig.3 Shock wave shaping process

## 2.2 模拟工况介绍

在驱动管中填充特定组分、压力、温度的驱动气体，并在喷管喉管处设置膜片，膜片右侧激波整形段与外场开阔空间均为空气域，初始压力为一个大气压，初始温度为 300 K，由 21%O<sub>2</sub> 与 79%N<sub>2</sub> 构成。由于驱动管内初始压力与空气域具有压力差，因此在计算中先将膜片设置为壁面条件模拟破膜前状态，当爆轰形成冲击波即将到达膜片处，将膜片边界条件设置为开口模拟破膜后状态。模拟采用控制变量的方法，通过改变驱动气体初始温度、压力、组分，并设置不同变截面出口开口角度，探究驱动初始条件以及激波管几何构型对形成爆轰冲击波特征参数的影响。因此，设置如表 1 的不同工况。

表 1 不同工况初始条件设置

Table 1 Initial settings of different working conditions

序号	驱动气体 组分	低反应活性气体掺 混量 (体积分数)	初始温度	初始压力	驱动管 长度	氢氧混合 当量比	变截面出口倾 斜角度(θ)
1	H <sub>2</sub> /O <sub>2</sub>	-	300K	1.0MPa-2.0MPa	30m	1	0.3
2	H <sub>2</sub> /O <sub>2</sub>	-	300K-360K	2.0MPa	30m	1	0.3
3	H <sub>2</sub> /O <sub>2</sub>	-	300K	3.0MPa	9-30m	1	0.3
4	H <sub>2</sub> /O <sub>2</sub> /Ar	50%	300K	1.0MPa	30m	1	0.3
5	H <sub>2</sub> /O <sub>2</sub> /He	50%	300K	1.0MPa	30m	1	0.3
6	H <sub>2</sub> /O <sub>2</sub> /N <sub>2</sub>	25%-50%	300K	1.0MPa	30m	1	0.3
7	H <sub>2</sub> /O <sub>2</sub>	-	300K	1.0MPa	30m	1	0.1-0.4

## 2.3 化学反应模型

本文模拟大型激波管驱动管内部氢氧爆轰产生冲击波压力波形，计算尺度较大。因此，为简化计算本文采用七步氢氧化学反应简化机理模型，对爆轰反应过程进行数值模拟。所选用化学反应机理如表 2 所示。

表 2 七步氢氧化学反应简化机理 (CGS 单位制)

Table 2 Seven steps hydrogen and oxygen mechanism (CGS)

反应步数	基元反应	指前因子 A	温度系数 n	活化能 E <sub>a</sub> (cal/mol)	组元
1	H <sub>2</sub> +O <sub>2</sub> = OH+OH	1.70E+013	0.00	24157.0	
2	H+O <sub>2</sub> = O+OH	1.20E+017	-0.91	8310.5	
3	H <sub>2</sub> +OH = H <sub>2</sub> O+H	2.20E+013	0.00	2591.8	
4	H <sub>2</sub> +O = OH+H	5.06E+004	2.67	3165.6	
5	OH+OH = H <sub>2</sub> O+O	6.30E+012	0.00	548.6	H <sub>2</sub> 、O <sub>2</sub> 、H <sub>2</sub> O、 N <sub>2</sub> 、Ar、He
6	OH+H+M = H <sub>2</sub> O+M	2.12E+022	-2.00	0.0	
	H <sub>2</sub> (2.5)、H <sub>2</sub> O (12)、N <sub>2</sub> (1.0)、Ar (0.4)、He (0.4)				
7	H+H+M = H <sub>2</sub> +M	7.30E+017	-1.00	0.0	
	H <sub>2</sub> (2.5)、H <sub>2</sub> O (12)、N <sub>2</sub> (1.0)、Ar (0.5)、He (0.5)				

该机理为 R. A. Baurle<sup>[26]</sup>提出的七步氢氧化学反应简化机理，化学反应速率采用 Arrhenius 公式形式表达。模拟中各组分均为真实气体，由于驱动管内的氢氧爆轰发生后，驱动管内压力可达到数十兆帕，因此采用 Peng-Robinson 真实气体状态方程表征，该状态方程适用于描述高压气体物理过程，其比热容和气体常数为温度的函数。

## 2.4 模型验证与收敛性分析

Akio<sup>[27]</sup>在长度为 4.5 m 直径为 50 mm 的爆轰驱动管中进行氢氧爆轰驱动实验，氢氧体积比为 2:1，初始压力 303 kPa，反向点火器进行点火，并在爆轰管等间距布置 8 个压力传感器监测爆轰波压力数据。为验证本文数值模型可靠性，利用本文数值模型对该实验进行数值仿真，对比模拟结果与实验测得压力数据如图 4 所示。结果显示模拟数据与实验数据拟合良好，因此认为本文数值模型精度较高，计算准确且合理可靠。

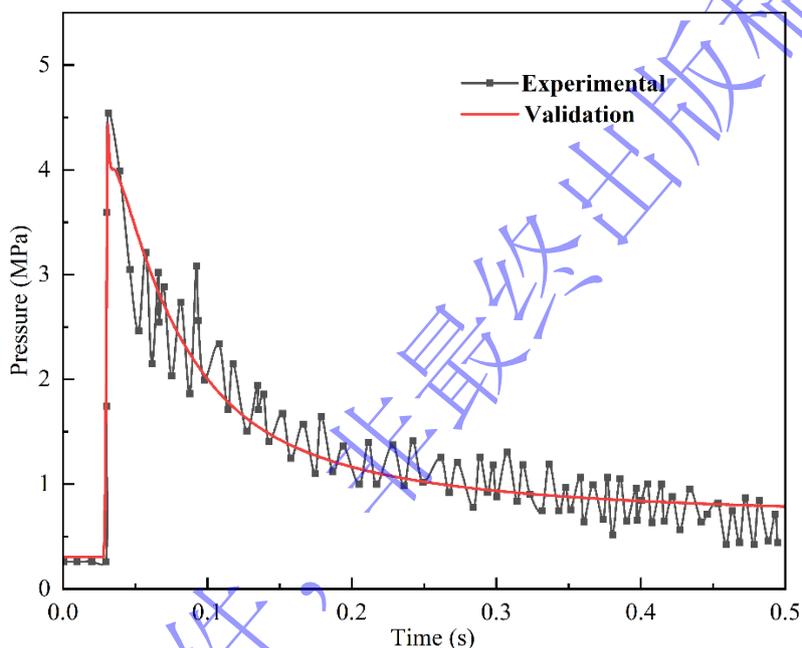


图 4 数值验证结果

Fig.4 Numerical validation results

在保证计算精度的情况下，为减少计算量可适当选取网格尺寸较大模型进行计算。由于在强扰动与弱扰动下，模型对于网格精度的敏感性均较强，因此选取表 1 中序号 1，初始压力为 1.0 MPa 与 2.0 MPa 初始条件，建立  $0.005 \times 0.005 \text{ m} - 0.06 \times 0.06 \text{ m}$  网格尺寸进行模型收敛性分析，收敛性计算结果如图 5 所示。结果显示随着网格尺寸的细化计算结果均收敛于  $0.005 \times 0.005 \text{ m}$ ，且与  $0.01 \times 0.01 \text{ m}$  尺寸网格计算结果基本一致。因此，出于简化计算考虑选用  $0.01 \times 0.01 \text{ m}$  尺寸网格进行计算。

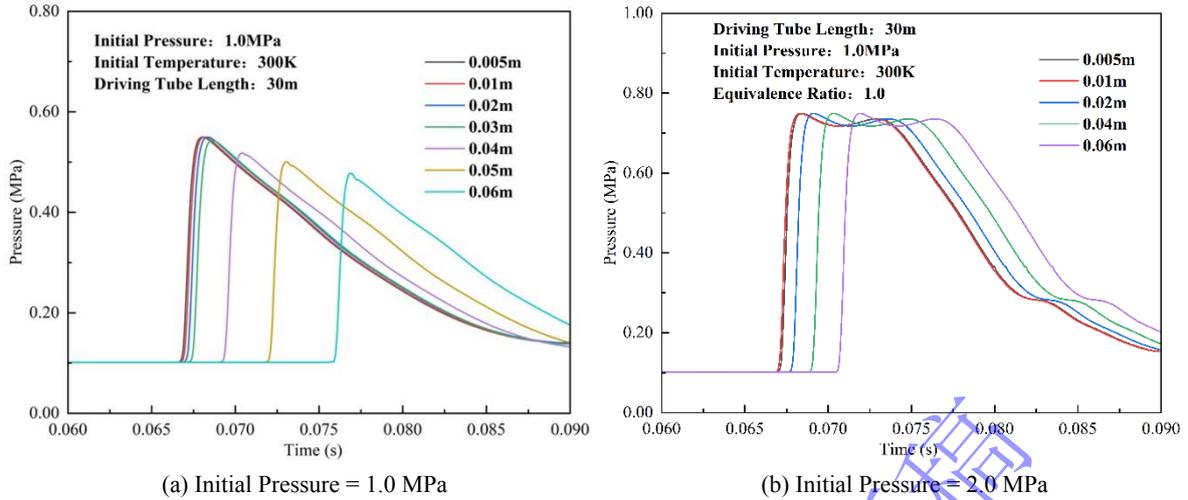


图5 网格收敛性分析结果

Fig 5 Grid convergence analysis results

### 3 模拟结果及分析

#### 3.1 驱动气体初始条件

##### 3.1.1 驱动气体初始压力影响

采用大型激波管氢氧爆轰驱动方式，氢氧混合驱动气体初始压力通常在 0.5~2.5 MPa，更改氢氧混合气体初始压力是对爆轰冲击波简单易行的操作之一。因此，在驱动气体初始温度 300 K，氢氧混合体积比 2:1 的初始条件下对 1.0-2.0 MPa 间不同初始压力的驱动气体进行模拟，模拟结果如图 6 所示。

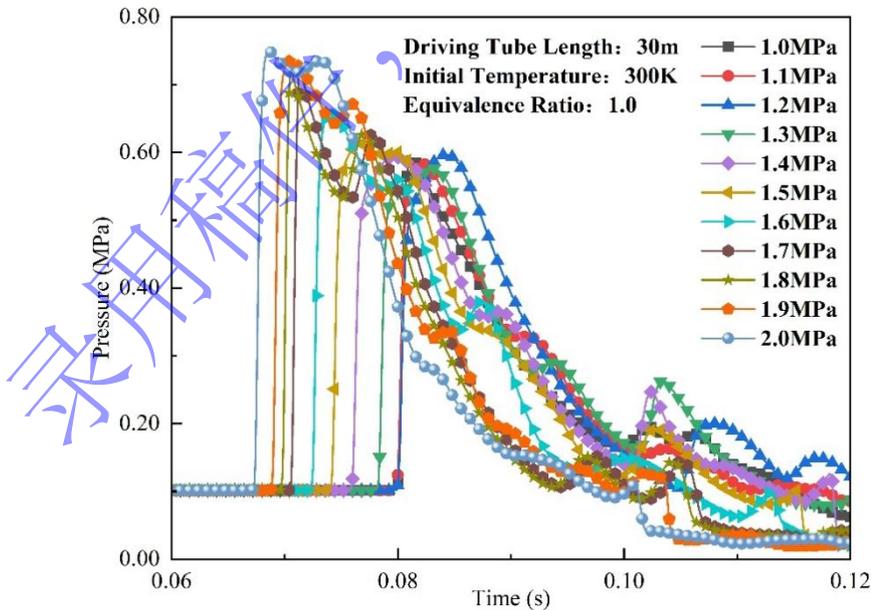


图6 不同初始压力条件下观测点处冲击波压力-时间曲线

Fig.6 Pressure-time histories of shock waves at observation point under different initial pressures

随着氢氧混合气体初始压力的增加，驱动管内氢氧混合气体密度增大。因此，爆轰产生冲击波

峰值压力随初始压力增加而上升。提取压力数据进行线性拟合，如图 7 所示。该函数表明在 300 K、体积比为 2:1 氢氧混合气体驱动条件下，出口冲击波与驱动气体初压成正相关关系。

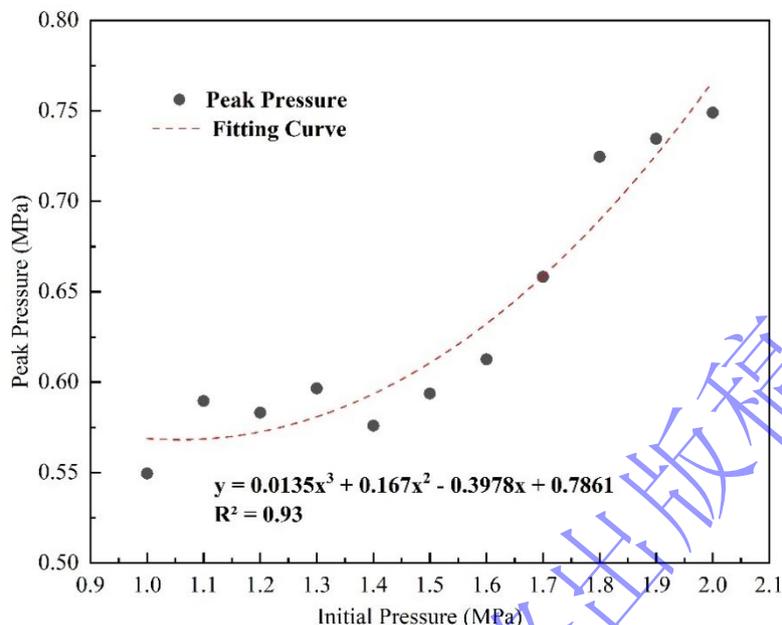


图 7 峰值压力-初始压力拟合

Fig.7 Peak pressure-initial pressure fitting

随着驱动气体初始压力的增加，驱动管内驱动气体密度增大，氢氧爆轰反应提供更多能量，导致爆轰形成冲击波峰值压力升高，冲击波波速也相应加快。另外，部分冲击波压力波形出现二次压力上升，分析原因是由于冲击波在激波管内的边界层效应与不规则反射造成的压力波起伏，这也导致了冲击波正压作用时间数据不具有参考价值，因此本文主要研究了正压作用时间的变化趋势。计算初始压力影响下峰值压力变化幅度，即初始压力每升高 0.1 MPa，观测点 B 峰值压力抬升百分比。初始压力在 1.0-2.0 MPa 范围内峰值压力的平均变化幅度为 3.22%，而当初始压力小于等于 1.5 MPa 时，峰值压力平均变化幅度仅为 1.62%，而在 1.5-2.0 MPa 范围内的变化幅度为 4.81%。由此可知在初始压力相对较高的时，峰值压力对于初压的变化更为敏感。

### 3.1.2 驱动气体初始温度影响

根据气体状态方程，在初压与体积一定的情况下增加反应物初始温度，反应物物质的量会相应减少。在驱动气体初始压力为 1.0 MPa，氢氧混合体积比 2:1 的初始条件下，改变驱动气体初始温度研究对爆轰产生冲击波特征参数的影响，模拟结果如图 8 所示。

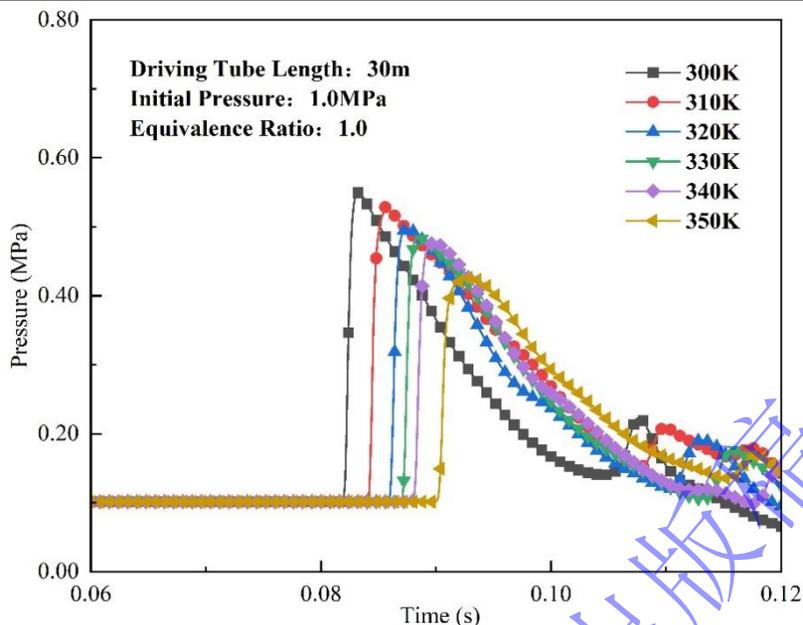


图8 不同初始温度条件下观测点处冲击波压力-时间曲线

Fig.8 Pressure-time histories of shock waves at observation point under different initial temperature condition

分析上述结果，由于初始温度的上升，氢氧反应终态产物趋于解离态，化学平衡逆向移动，因此反应释放能量降低。另外，由于模拟驱动管内气体组分为真实气体，根据气体状态方程，驱动气体初始温度升高使单位体积氢氧气体浓度降低，导致驱动管内氢氧爆轰反应产生总能量降低，进一步影响激波整形段内形成冲击波强度下降，导致监测点处冲击波峰值压力与冲击波传播速度降低。

提取压力数据与初始温度进行线性拟合，如图9所示。计算初始温度影响下峰值压力变化幅度，即初始温度每升高10K，峰值压力抬升百分比。初始温度300-350K变化范围内峰值压力变化平均幅度为4.92%，表明初始温度的调控对于爆轰产生冲击波峰值压力的调控作用是较为显著的。而模拟结果还能反映出，初始温度对冲击波正压作用时间的调控作用微弱，因此可以通过调节驱动气体初始温度对冲击波峰值压力进行针对性调控。

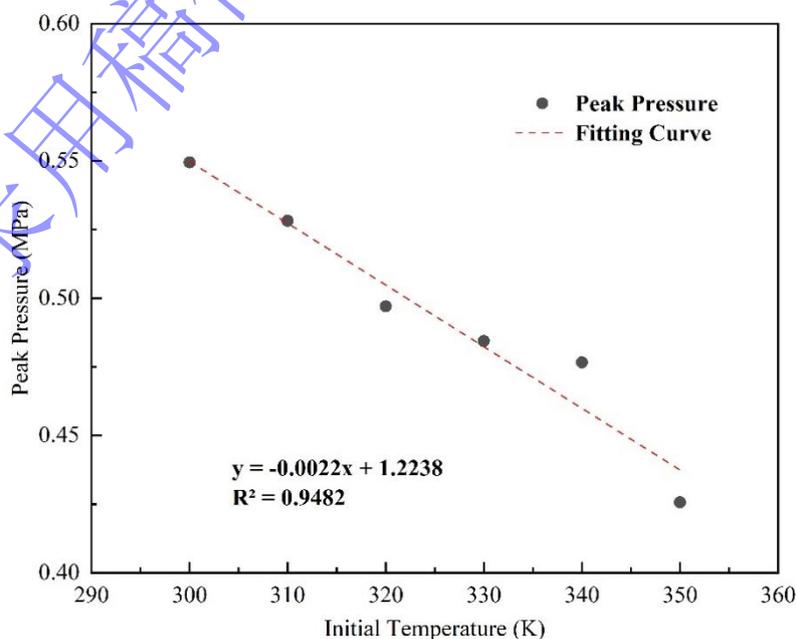


图9 峰值压力-初始温度拟合函数

Fig.9 Peak pressure-initial temperature fitting function

### 3.1.3 不同低反应活性气体掺混影响

低反应活性气体由于其几乎没有反应活性，可以用作稀释剂掺混至驱动气体中，达到对爆轰冲击波的调控作用。氢氧混合气体被点燃后，瞬时产生大量高温高压气体并向激波整形段扩散，所产生高温高压气体主要成分为水蒸气，而低反应活性气体由于其相对分子质量的不同可以相比于水蒸气相对分子质量分为轻气与重气。为探究轻重气体的掺混对于爆轰产生冲击波特征的影响，在驱动气体初始温度 300 K、初始压力 1.0 MPa、氢氧混合比 2:1 的条件下，掺混与氢氧混合气体等体积的氦气、氮气、氩气，模拟得到各工况下爆轰产生冲击波的压力-时间曲线并与未掺混氢氧混合气对比，结果如图 10 所示。

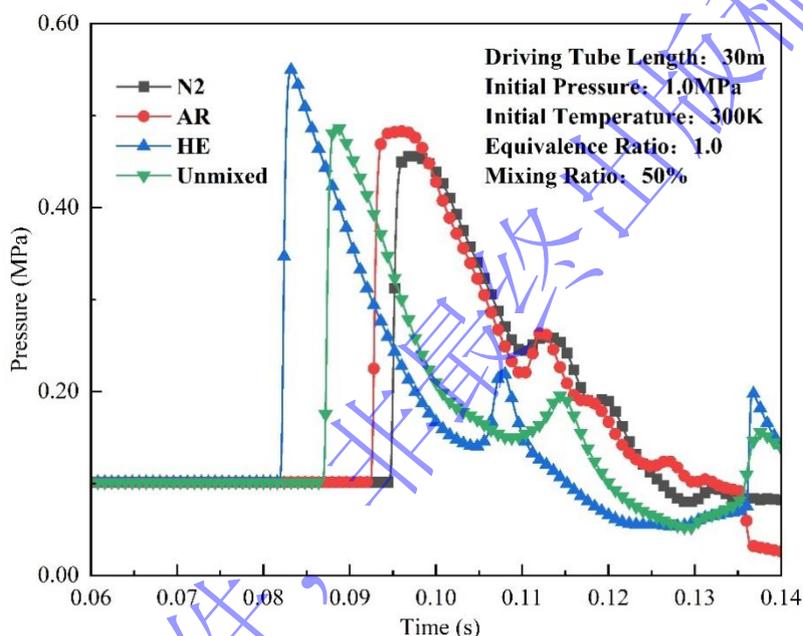


图 10 不同的低反应活性气体掺混条件下观测点处冲击波压力-时间曲线

Fig.10 Pressure-time histories of shock waves at observation point under different inert gas mixing conditions

由图 9 可知，轻重低反应活性气体的掺混对于爆轰产生冲击波特征参数的影响不同，其中与未掺混低反应活性气体的爆轰相比，氦气的掺混提高了爆轰产生冲击波的峰值压力与波速。相反在两种重气掺混条件下，观测位置冲击波峰值压力均降低，冲击波波速下降，且在同比例条件下，氮气掺混下爆轰产生冲击波峰值压力与波速均低于氩气。

分析产生上述结果原因，在驱动管内由于氦气作为相对分子质量较小气体，包含氦气的产物气体可以将氢氧混合爆轰产生的能量更好地转化为动能，因此对冲击波特征参数有较大促进作用。而氮气和氩气由于相对分子质量较重，被驱动时消耗更多能量，使得峰值压力、冲击波波速等参数下降。虽然氩气相对分子质量重于氮气，但在 300-2000 K 温度范围内氮气比热容均高于氩气，吸收爆轰反应放热较多，因此爆轰产生冲击波峰值超压与波速降低更为显著。其次，喷管的存在对流动具有加速作用，模拟数据表明虽然掺混气体不同，但在喷管入口处均为马赫数 0.2 的亚声速流动，经过喷管加速后掺混氦气流动马赫数增加至 2.8，而掺混氦气与氮气的冲击波马赫数为 2.5 左右。由于被驱动部分均为空气域，声速一致，因此氦气掺混的冲击波传播速度较快。

### 3.1.4 低反应活性气体掺混量影响

不同低反应活性气体的掺混可以对爆轰产生冲击波进行有效调控，而掺混量的改变同样对冲击波参数产生影响。在驱动气体初始压力 1.0 MPa、初始温度 300 K、氢氧混合体积比 2:1 条件下，模拟驱动气体掺混氮气体积分数为 0 %、25 %、50 %、70 % 条件下驱动产生冲击波过程，模拟结果如图 11 所示。

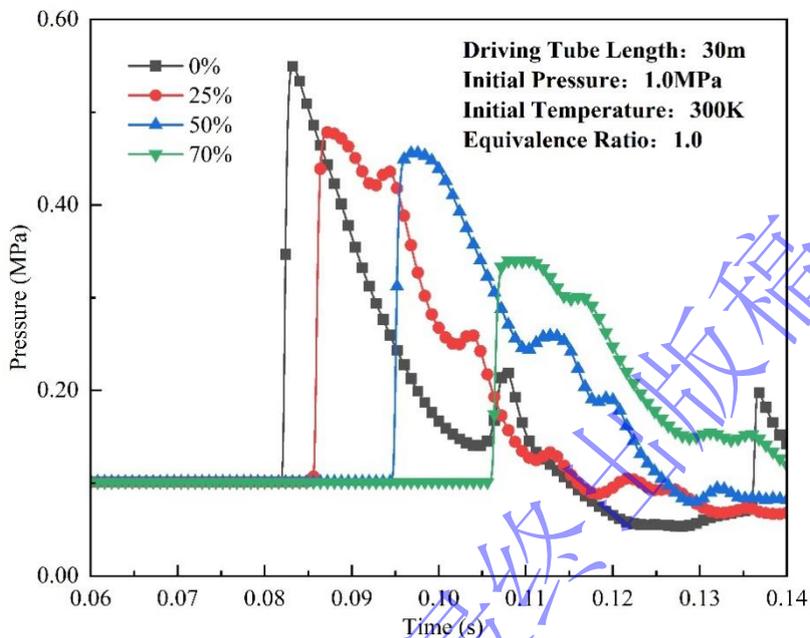


图 11 不同氮气掺混量条件下观测点冲击波压力-时间曲线

Fig.11 Pressure-time histories of shock waves at observation point with different nitrogen loading

模拟结果显示，随着氮气掺混量的不断增加，爆轰产生冲击波特征参数也随之规律性变化。氮气掺混量的增加使冲击波峰值压力减小。同时，随掺混量的增加冲击波传播速度减慢。另外，氮气掺混体积的增加也使得冲击波正压作用时间得到延长。因此调整驱动气体氮气掺混量是有效调控爆轰冲击波峰值压力、冲击波波速、正压作用时间等参数的有效手段。

### 3.2 大型激波管几何构型

大型激波管为实现多样化冲击波加载可以采用多驱动管组成的驱动段实现，可以通过改变驱动管数量、驱动管长度等实现灵活加载。而不同几何构型对于冲击波特征参数的影响也各不相同，本研究通过改变驱动管管长以及变截面出口开口角度，研究其对爆轰冲击波特征参数产生的影响。

#### 3.2.1 驱动管管长影响

由于驱动管初始压力温度不变，驱动管的长度决定氢氧混合气体量。在驱动气体初始压力 1.0 MPa、初始温度 300 K、氢氧混合体积比 2:1 条件下，分别设置长为 9-30 m 的驱动管进行模拟。提取观测点处的压力-时间曲线，结果如图 12 所示。

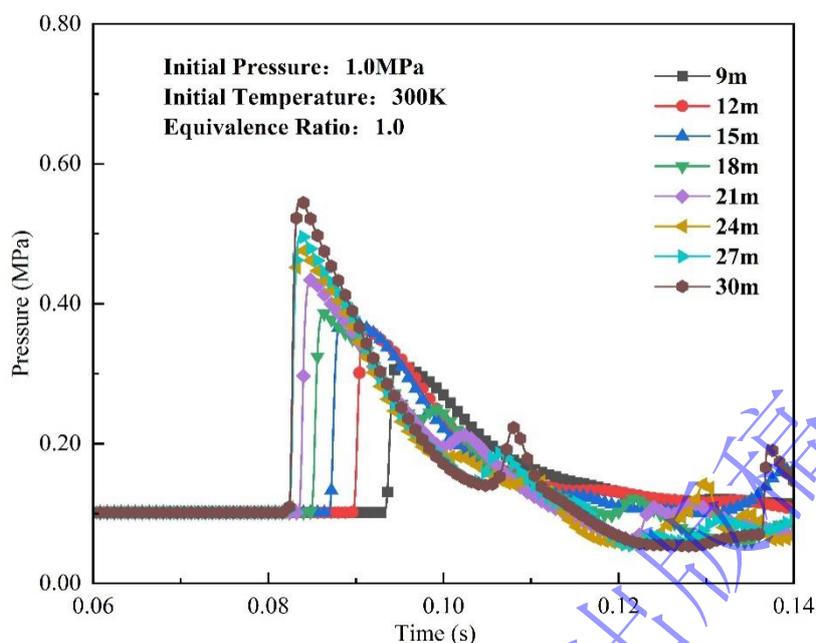


图 12 不同驱动管管长条件观测点冲击波压力-时间曲线

Fig.12 Pressure-time histories of shock waves with different driving tube lengths

模拟结果显示，驱动管长对于爆轰冲击波特征参数的影响较为复杂。随着驱动管长增加爆轰产生冲击波峰值压力增大，且增加幅度呈线性趋势，如图 13 所示。

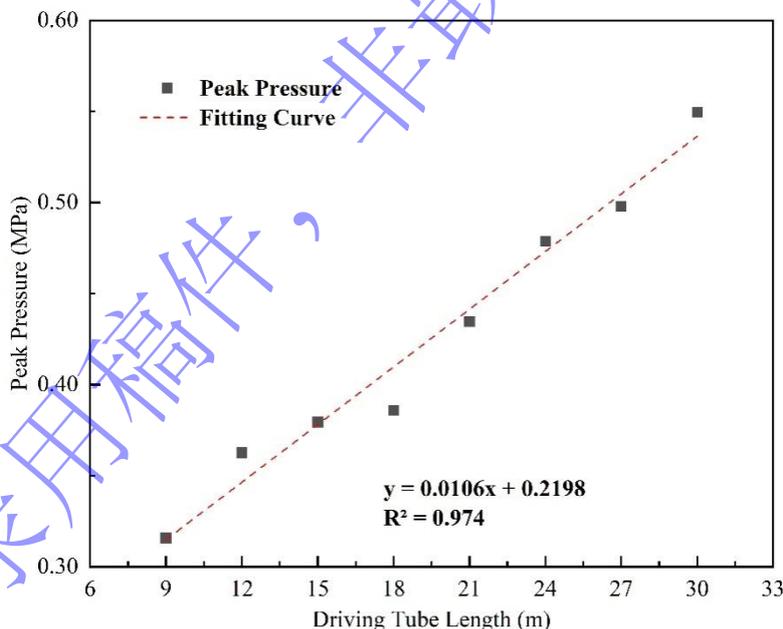


图 13 峰值压力-驱动管长度拟合函数

Fig 13 Peak pressure-driver section length fitting

计算驱动管长影响下峰值压力变化幅度，即驱动管长每增长 3 m，观测点 B 处测得峰值压力抬升百分比。驱动管长 9-30 m 变化范围内峰值压力变化平均幅度为 7.25 %，相比驱动初始压力与初始温度条件的影响，驱动管长对于峰值压力的调控作用最为显著，可用于大范围峰值压力变动。另外，改变驱动管长对冲击波波速的调控是非线性的，当驱动管长大于等于 24 m 时，爆轰产生冲击波到达观测点时间几乎一致，而当管长小于 20 m 时，冲击波到达观测点时间随管长减小而延后。不同驱动

管长条件下，管内驱动气体总量不同，管长增加氢氧爆轰反应产生总能量增大，使得冲击强度增强。

### 3.2.2 变截面出口开口角度影响

在激波整形段后设变截面出口，通过更改出口开口角度观察对冲击波特征产生的影响。在驱动气体初始压力 1.0 MPa、初始温度 300 K、氢氧混合体积比 2:1 且未掺混条件下，设置四种变截面出口开口角度，其正切值分别为 0.1、0.2、0.3、0.4，模拟结果如图 14 所示。

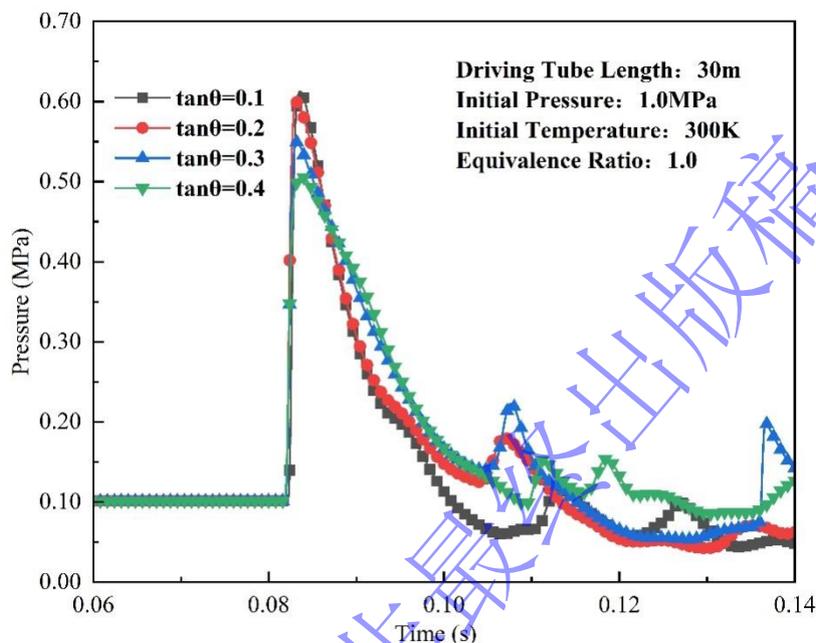


图 14 变截面出口不同开口角度下观测点冲击波压力-时间曲线

Fig.14 Pressure-time histories of shock waves with different opening angles

由图可知，随着变截面出口开口角度的增加，冲击波波速基本不变，冲击波峰值压力有所衰减，正压作用时间增长。爆轰冲击波在大型激波管内传播的压力云图如图 15 所示，可知冲击波在激波整形段的波面为平面，驱动面积较小，而进入变截面出口后管壁附近激波速度有所衰减，冲击波界面转变为曲面，进入开阔空间后以球面逐渐扩散，驱动面积逐渐增大。因此在相同驱动能力下变截面出口开口角度越大，冲击波因驱动面积不断增大所受阻力的阻力越大，峰值压力相应减小。

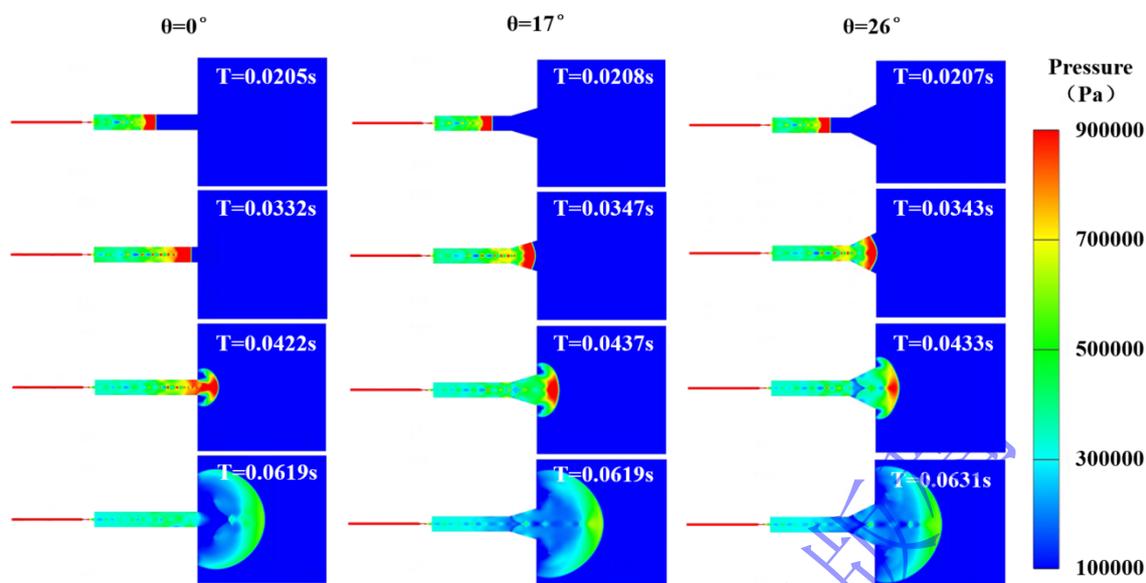


图 15 爆轰冲击波在不同开口角度条件下传播的压力云图  
Fig.15 Shock waves propagating with different opening angles

#### 4 基于氢氧爆轰的爆炸冲击波复现

以上模拟结果分析可知，氢氧爆轰驱动下产生冲击波受到诸多因素影响，且部分因素对于冲击波波形的调控是规律性的。因此本章将基于已有的爆炸冲击波实验数据，分析产生同样冲击加载的氢氧爆轰驱动初始条件，并以此条件进行数值模拟，将模拟结果与实验结果对比分析。参考文献<sup>[28]</sup>中黑火药在空气中爆炸实验的冲击波压力波形数据，其中，冲击波峰值压力为 1.19 MPa。将该数据带入初始压力与峰值压力关系拟合公式中，计算得到在驱动管长 30 m， $\tan \theta = 0.3$  时，设置驱动气体初始压力为 2.685 MPa、初始温度为 300 K、体积比 2:1 的氢氧混合气体，观测点处可以得到相似峰值压力。模拟该条件氢氧爆轰产生冲击加载，并提取模拟冲击波压力波形数据与实验数据对比，结果如图 16 所示。

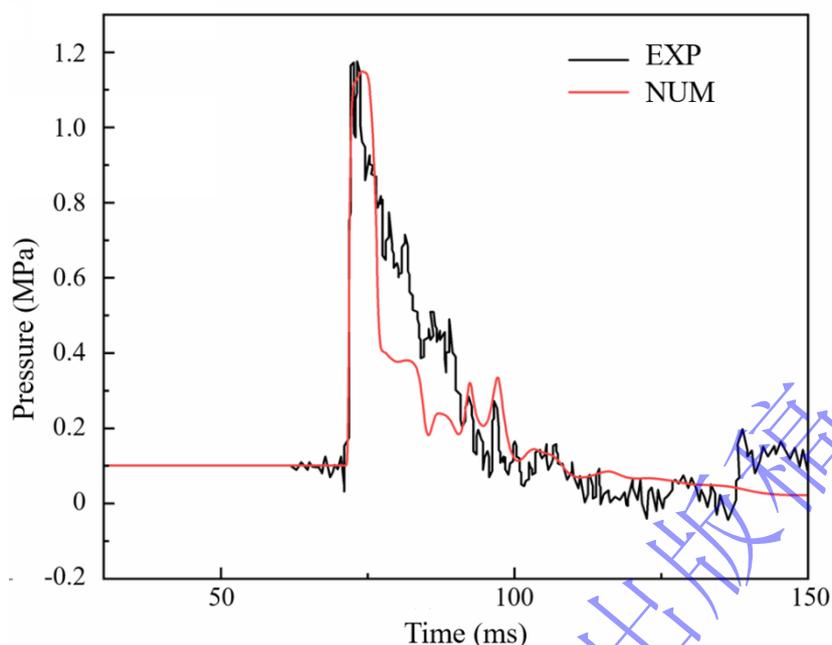


图 16 初压 1.62 MPa、初温 300 K 且无掺混条件下冲击波模拟复现结果

Fig.16 The result of shock wave simulation with 1.62 MPa, 300 K, no mixing

如图 16 所示，氢氧爆轰产生冲击波峰值压力成功复现实验数据，但冲击波正压作用时间并未能很好的与实验数据契合。由 3.2.2 可知，减小变截面开口角度可以增长冲击波正压作用时间，但会相对降低冲击波峰值压力。综合考量，选取驱动气体为初始压力 2.69 MPa、初始温度 300 K、体积比 2:1 的氢氧氮混合气体，设置激波管驱动管长 30 m，变截面开口角度正切值 0.4，模拟爆轰产生冲击波过程，提取观测点处压力波形数据与实验数据对比，结果如图 17 所示。

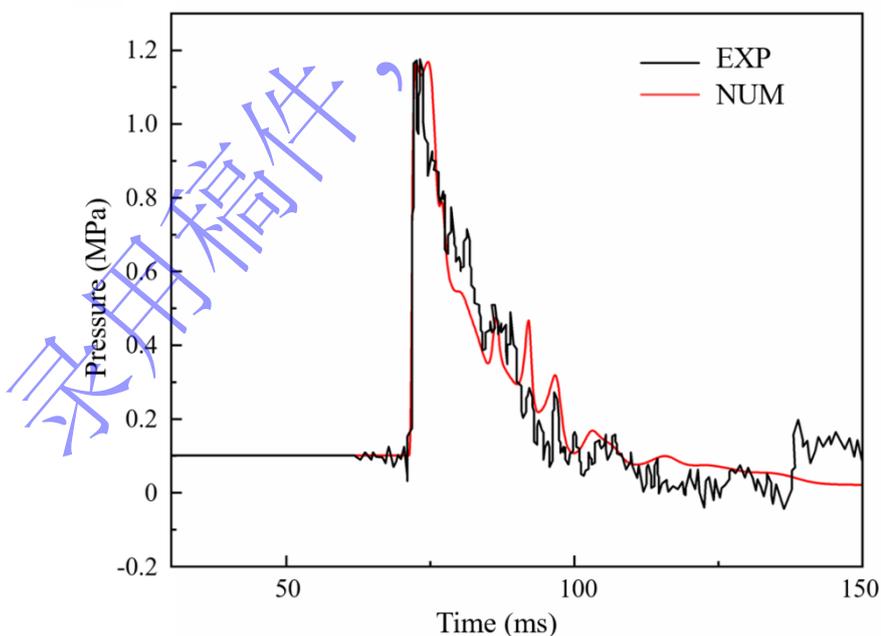


图 17 初压 1.62 MPa、初温 300 K 且掺混 25%氮气条件下冲击波模拟复现结果

Fig.17 The result of shock wave simulation with 1.62 MPa, 300 K, 25 %N<sub>2</sub> mixing

模拟结果表明,黑火药爆炸冲击波可由本研究提出的大型激波管以氢氧爆轰驱动方式产生的冲击波加以复现,且在峰值压力、正压作用时间等参数上实现了较为优良的模拟复现效果。综上所述,利用氢氧爆轰进行爆炸冲击波场景复现实验切实可行。

## 5 结论

本文进行大型激波管内氢氧爆轰驱动方式下冲击波形成的二维数值模拟,致力于探究不同影响因素对于形成冲击波特征参数的影响,本文计算结果可为大型爆炸模拟装置或大型激波风洞的波形调控提供模拟数据参考。经分析得到如下研究结论:

(1) 在大型激波管氢氧爆轰驱动方式下,爆轰冲击波特征参数受到诸多因素影响。驱动气体初始压力的增加会增加激波整形段内冲击波驱动强度,使冲击波峰值压力和波速上升,峰值压力对初压在不同范围内的变化敏感性不同。驱动管内,初始温度的上升使得氢氧反应终态产物趋于解离态,化学平衡逆向移动,因此反应释放能量降低。另外,由于模拟驱动管内气体组分为真实气体,根据气体状态方程,驱动气体初始温度升高单位体积氢氧气体浓度降低,导致驱动管内产生爆轰冲击波过程总能量降低,进一步影响激波整形段内形成冲击波强度下降,导致监测点处冲击波峰值压力与波速降低。

(2) 氢氧爆轰驱动方式下,在氢氧混合气体内掺混低反应活性气体也是调控爆轰冲击波特征参数的手段之一。模拟结果显示由于氦气作为轻气,相对分子质量较小,包含氦气的产物气体可以将氢氧混合爆轰产生的能量更好地转化为动能,因此对冲击波特征参数有较大促进作用。但低反应活性气体重量并非决定性因素,氮气虽轻于氩气,但由于其较高的定压比热容,在爆轰发生后可以吸收更多的反应释放能量,降低了化学能转化为动能的效率,因此氮气掺混对于冲击波驱动能力的减弱反而强于同体积的氩气掺混。除此之外,喷管结构的存在也可加速爆轰产生冲击波。

(3) 激波管几何结构同样是影响冲击波参数的重要因素。驱动管长度的变化导致驱动气体总量发生变化,驱动管内氢氧爆轰反应产生总能量相应改变,进一步影响激波整形段冲击波强度,使得监测点处冲击波峰值压力与波速发生变化。而变截面出口开口角度则改变了冲击波与被驱动空气的接触面积,使得驱动阻力发生变化,从而对冲击波特征参数产生影响。

(4) 基于模拟结果,选取黑火药爆炸冲击波实验数据作为目标,根据实验数据特征参数,利用数值方法模拟大型激波管氢氧爆轰驱动冲击波调控过程,实现了在大型激波管中利用氢氧爆轰驱动方式对爆炸冲击波的模拟复现。

致谢 本研究得到了国家自然科学基金面上项目(12472362)和国家自然科学基金创新研究群体项目(12221002)的资助。

## 附录

□□□□□□□□□□□□□□□□

## 参考文献

- [1] 杨鑫,石少卿,程鹏飞,等.爆炸冲击波在空气中传播规律的经验公式对比及数值模拟[J].四川建筑,2007,27(5):3. DOI: 10.3969/j.issn.1007-8983.2007.05.033.  
YANG X, SHI S Q, CHENG P F, et al. Comparison of empirical formulas and numerical simulation of the propagation law of explosion shock wave in air [J]. Sichuan Architecture, 2007, 27(5): 3. DOI: 10.3969/j.issn.1007-8983.2007.05.033.

- [2] 陈宏, 赵伟, 林建民, 等. 用双爆轰驱动的激波管技术[C]//全国激波与激波管学术讨论会. 2002. DOI: <http://dspace.imech.ac.cn/handle/311007/34966>.
- [3] 张玉磊, 王胜强, 袁建飞, 等. 不同量级 TNT 爆炸冲击波参数相似律实验研究[J]. 火箭与制导学报, 2016, 36(6):4. DOI: 10.15892/j.cnki.djzdx.2016.06.014.  
ZHANG Y L, WANG S Q, YUAN J F, et al. Experimental research on similarity law of explosive shock wave parameters with different orders of magnitude TNT [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2016, 36(6):4. DOI: 10.15892/j.cnki.djzdx.2016.06.014.
- [4] SADOVSKII M A. Mechanical action of air shock waves of explosion, based on experimental data [M]. Moscow: Izd Akad Nauk SSSR, 1952.
- [5] BRODE H L. Numerical solutions of spherical blast waves [J]. Journal of Applied Physics, 1955, 26(6):766-775. DOI:10.1063/1.1722085.
- [6] BRODE, HAROLD L. Blast wave from a spherical charge [J]. Physics of Fluids, 1959, 2(2): 217. DOI: 10.1063/1.1705911.
- [7] HENRYCH J. The dynamics of explosion and its use [M]. Amsterdam:Elsevier,1979.
- [8] 亨利奇. 爆炸动力学及其应用(1979年版) [M]. 熊建国, 译. 北京: 科学出版社,1987.
- [9] TOLBA A F F. Response of FRP-retrofitted reinforced concrete panels to blast loading. [D]. Carleton University (Canada). 2002.
- [10] 周丰峻, 郑磊, 孙云厚, 等. 真实空气中 TNT 装药爆炸近区冲击波传播特性研究[J]. 中国工程科学, 2017, 19(6):9. DOI: 10.15302/J-SSCAE-2017.06.004.  
ZHOU F J, ZHENG L, SUN Y H, et al. Research on propagation characteristic in close-in field of shock wave of TNT charge explosion [J]. Engineering Science, 2017, 19(6):9. DOI: 10.15302/J-SSCAE-2017.06.004.
- [11] 刘科种. 爆炸能量输出结构与高威力炸药研究[D]. 北京理工大学, 2010
- [12] 康越, 张仕忠, 张远平, 等. 基于激波管评价的单兵头部装备冲击波防护性能研究[J]. 爆炸与冲击, 2021. DOI: 10.11883/bzycj-2020-0395.  
KANG Y, ZHANG S Z, ZHANG Y P, et al. Research on anti-shockwave performance of the protective equipment for the head of a soldier based on shock tube evaluation [J]. Explosion and Shock Waves, 2021. DOI: 10.11883/bzycj-2020-0395.
- [13] WU C, HAO H. Modeling of simultaneous ground shock and airblast pressure on nearby structures from surface explosions [J]. International Journal of Impact Engineering, 2005, 31(6):699-717. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2004.03.002.
- [14] 仲倩, 王伯良, 黄菊, 等. TNT 空中爆炸超压的相似律[J]. 火炸药学报, 2010, 33(4):4. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7812.2010.04.008.  
ZHONG Q, WANG B L, HUANG J, et al. Study on the similarity law of TNT explosion overpressure in air [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2010, 33(4):4. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7812.2010.04.008.
- [15] 张军, 黄含军, 王军评, 等. 炸药驱动式爆炸管的载荷计算[J]. 装备环境工程, 2021. DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2021.05.004.  
ZHANG J, HUANG H J, WANG J P, et al. Simulation on the blast load inside the explosively driven shock tube [J]. Equipment Environmental Engineering, 2021. DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2021.05.004.
- [16] 白旭. 激波管波形控制技术研究[J]. 仪表技术, 2023.  
BAI X. Research on shock tube waveform control technology [J]. Instrumentation Technology, 2023.
- [17] 杨军, 薛斌. 激波管管长对阶跃压力波形的影响分析[J]. 振动与冲击, 2019, 38(3):6. DOI: CNKI:SUN:ZDCJ.0.2019-03-036.  
YANG J, XUE B. Effects of shock tube length on step pressure waveform [J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(3):6. DOI: CNKI:SUN:ZDCJ.0.2019-03-036.
- [18] 杨基明, 李祝飞, 朱雨建, 等. 激波的传播与干扰 优先出版[J]. 力学进展, 2016.

- YANG J M, LI Z F, ZHU Y J, et al. Shock wave propagation and interactions [J]. *Advances in Mechanics*, 2016.
- [19] 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**. 2014.
- [20] 谷笏华, 李仲发, 方治家. 用氢氧爆轰驱动气体直接模拟爆炸波[C]//**第十届全国激波与激波管学术讨论会**. 0[2023-11-25].
- [21] 俞鸿儒, 赵伟, 袁生学. 氢氧爆轰驱动激波风洞的性能[J]. *气动实验与测量控制*, 1993, 7(3): 5. DOI: CNKI: SUN: LTLC. 0.1993-03-007.
- YU H R, ZHAO W, YUAN S X. Performance of shock tunnel with H<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> detonation driver [J]. *Amrodynamic Experiment and Measurement & Control*, 1993, 7(3): 5. DOI: CNKI: SUN: LTLC. 0.1993-03-007.
- [22] 俞鸿儒. 氢氧燃烧及爆轰驱动激波管[J]. *力学学报*, 1999, 31(4):389-397. DOI: 10.3321/j.issn:0459-1879.1999.04.002.
- YU H R. Shock tube driven by hydrogen and oxygen combustion and detonation [J]. *Acta Mechanica Sinica*, 1999, 31(4):389-397. DOI: 10.3321/j.issn:0459-1879.1999.04.002.
- [23] 俞鸿儒, 李斌, 陈宏. 激波管氢氧爆轰驱动技术的发展进程[J]. *力学进展*, 2005(03): 13-20. DOI: CNKI: SUN: LXJZ.0.2005-03-002.
- YU H R, LI B, CHEN H. The Development of gaseous detonation driving techniques for a shock tube [J]. *Advances in Mechanics*, 2005(03): 13-20. DOI: CNKI: SUN: LXJZ.0.2005-03-002.
- [24] 崔云霄, 王万鹏, 王雷元, 等. 压缩气体驱动大型激波管内部流场的数值模拟[C] //**2014年中国计算力学大会**. 0[2023-12-13].
- [25] 韩文虎, 张博, 王成. 气相爆轰波起爆与传播机理研究进展[J]. *爆炸与冲击*, 2021, 41(12):32. DOI:10.11883/bzycj-2021-0398.
- HAN W H, ZHANG B, WANG C. Progress in studying mechanisms of initiation and propagation for gaseous detonations [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2021, 41(12):32. DOI:10.11883/bzycj-2021-0398.
- [26] DAVIDENKO D, ISKENDER G, DUFOUR E, et al. Numerical Simulation of Hydrogen Supersonic Combustion and Validation of Computational Approach[C]//**Aiaa International Space Planes & Hypersonic Systems & Technologies**. 2013. DOI: 10.2514/6. 2003-7033.
- [27] YAMANAKA A , ARIGA Y , OBBARA T ,et al.Study on Performance of Detonation-Driven Shock Tube[J]. *Jsmc International Journal*, 2004, 66(45):425-431. DOI:10.1299/jsmeb.45.425.
- [28] 佐建君. 典型环境中特定炸药爆炸冲击波超压及安全防护[D]. 北京理工大学, 2006.