炸药驱动式爆炸管的载荷计算

张军，黄含军，王军评，毛勇建，王鹏，彭湃，岳晓红

（中国工程物理研究院总体工程研究所，四川 绵阳 621900）

摘要：目的 建立管道内冲击波参数工程预示方法，指导炸药驱动式爆炸管载荷设计和试验调试。**方法** 建立炸药爆炸的多介质流动数值模型，研究圆形管道内冲击波的传播规律，给出冲击波参数与炸药量、传播距离之间的变化关系，基于已有的坑道内冲击波超压预示公式，建立表征模型。**结果** 冲击波在管道中经过一定距离的传播后，会逐渐形成平面冲击波。随着传播距离的增加，平面冲击波的超压峰值逐渐降低，正压持续时间逐渐增大。增大炸药量可以在相同距离下获得更高超压峰值的平面冲击波，已有坑道冲击波超压预示公式同样适用于圆形管道。**结论** 该冲击波参数预示模型可应用于爆炸激波管载荷设计和试验调试。

关键词：冲击波；炸药爆炸；激波管；传播特性

中图分类号：TJ410 **文献标识码：**A **文章编号：**1672-9242(2021)05-0021-07

DOI：10.7643/ issn.1672-9242.2021.05.004

Simulation on the Blast Load Inside the Explosively Drived Shock Tube

ZHANG Jun, *HUANG Han-jun*, *WANG Jun-ping*, *MAO Yong-jian*, *WANG Peng*, *PENF Pai*, *YUE Xiao-hong*

(Institute of Systems Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

ABSTRACT: The paper aims to establish the engineering prediction method and guide the blast load design of the explosive test among the pipe. The multi-phase flow numerical model of explosion was constructed, and the propagation of shock wave was studied in the pipe. The relationship between shock wave parameters, quantity of explosion and propagation distance was given. The characteristic model of shock wave parameter was established based on the existing prediction equation. The plane shock wave was gradually generated after the propagation for a certain distance along the pipeline. With the increase of the propagation distance, the peak overpressure of the plane wave gradually decreased and the duration of positive pressure increased. The plane shock wave with higher peak overpressure could be obtained at the same distance by increasing the amount of explosion. The existing prediction model was also suitable for the current circle tube. The presented prediction method of shock wave parameters can be applied to guide the load design and test debugging of explosion in the shock tube.

KEY WORDS: shock wave; explosion; shock tube; propagation property

收稿日期：2021-03-27；**修订日期：**2021-04-10

Received：2021-03-27；**Revised：**2021-04-10

基金项目：国家自然科学基金（11602256, 12072334, 11802292）

Fund：National Natural Science Foundation of China (11602256, 12072334, 11802292)

作者简介：张军（1988—），男，博士，副研究员，主要研究方向冲击动力学试验技术及其应用。

Biography：ZHANG Jun (1988—), Male, Doctor, Associate researcher, Research focus: experimental technology of impact dynamic and its application.

通讯作者：毛勇建（1976—），男，博士，研究员，主要研究方向为冲击动力学与环境试验技术。

Corresponding author：MAO Yong-jian (1976—), Male, Doctor, Researcher, Research focus: impact dynamics and environmental test technique.

引文格式：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, 18(5): 021-027.

ZHANG Jun, HUANG Han-jun, WANG Jun-ping, et al. Simulation on the blast load inside the explosively drived shock tube[J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(5): 021-027.

军事和民用领域内可能会发生炸药爆炸以及天然气、化工爆炸等异常事故，爆炸冲击波为该类事件中重要的破坏载荷形式之一，因此开展冲击波作用下结构响应特征的实验研究对于安全性评价、毁伤效应评估和抗爆安全防护设计具有重要意义[1-5]。爆炸激波管是冲击波实验研究的重要手段[6-11]。在爆炸激波管实验设计中，一方面要知道冲击波波阵面在什么位置形成稳定的平面波；另一方面要知道在试验段中达到预期设计的冲击波超压指标所需的装药量。因此，管道中炸药量-距离-冲击波特征参数的耦合规律就成为了爆炸管载荷设计中亟待解决的关键性问题之一。

目前，国内已有少量公开发表的文献给出了爆炸波模拟试验装置内的波传播规律[12-19]。刘瑞朝等[12]针对 9 m 跨度的近半圆形大型爆炸波模拟装置，开展了不同炸药量下波传播特性的数值分析。汪维等[13]针对大气室多膜片驱动加载的模拟装置进行了数值模拟。刘平等[14]模拟了变截面式管道内多点、延时起爆对冲击波参数的影响规律。杨科之等[15]利用三维数值模拟计算程序，分析了半圆拱型坑道内化爆冲击波的传播规律，结合量纲分析，给出了冲击波超压值、冲量与爆炸能量、坑道横截面积、横道纵向距爆心的距离等工程预示关系。杜扬等[16]开展了 T 型分支管道中爆炸冲击波超压和火焰传播形态影响规律的实验研究。这些数据和结论表明：在爆炸初期阶段，冲击波在上下左右壁面的反射下，形成了微弱的马赫反射；随着反射次数的增多，流场比较杂乱；随着主激波到达一定传播距离后，同一横截面上各点的冲击波超压值趋于相同，才得到较为稳定的平面波。

目前，已有数据主要针对的是大型近似半圆拱形、矩形坑道、T 型管道等特定尺寸和形状，对其他形状（如圆形）和尺寸下的数据库较为缺乏，而不同结构形式（形状和尺寸）的管道内波传播规律并不完全相同。鉴于此，文中围绕圆形管道约束下爆炸冲击波传播特性的问题开展相关研究工作。基于 AUTODY 软件，建立了炸药爆炸到冲击波形成和长距离传播的有限元模型，研究并探讨了炸药量和传播距离对冲击波特征参数的影响规律，进而建立了圆管形式下冲击波传播特性的工程预示关系，从而为爆炸激波管载荷设计提供参照依据。

1　炸药驱动的爆炸管分析模型介绍

某冲击波加载试验，预期在直径 2500 mm 的圆形管道中开展。其基本原理为：在爆炸室内，炸药起爆后，产生的高温高压气体向另一端扩散，形成冲击波。经过整形传播后，在试验段内形成特定平面冲击波，进而开展试验研究。通过调整管道长度、炸药当量等参数可以获得不同参数的冲击波载荷，如图 1 所示。为有效指导试验载荷设计、减少试验调试数量，建立了炸药驱动的爆炸管载荷分析模型。

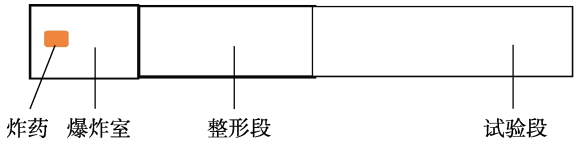

图 1　计算模型

Fig.1 The schematic diagram of simulation model

采用多介质流动方法进行建模。模型中，空气为理想绝热等熵气体，炸药为 TNT 球形装药，炸药密度为 1630 kg/m^3，P_{CJ} 点压力为 21 GPa，爆速 D 为 6930 mm/ms，采用 JWL 状态方程，见式（1）。

$$p = A\left(1-\frac{\omega}{R_1\overline{v}}\right)\mathrm{e}^{-R_1\overline{v}} + BA\left(1-\frac{\omega}{R_2\overline{v}}\right)\mathrm{e}^{-R_2\overline{v}} + \frac{\omega E}{\overline{v}} \quad (1)$$

式中：p 为压力；E 为单位体积炸药的初始内能；$\overline{v}$ 为相对比容（$\overline{v}=\rho_0/\rho$）；A、B、R_1、R_2、ω 为状态方程的参数。见表 1。

表 1　炸药的 JWL 状态方程参数

Tab.1 The parameters of JWL state equation of explosive

A/Pa	B /Pa	R_1	R_2	ω	E/(J·m^{-3})
3.71×10^{11}	3.23×10^{9}	4.15	0.95	0.3	7×10^{9}

炸药位于管道轴线上，且距封闭端 1000 m 处，在炸药球心处起爆。考虑到该结构及其力学响应具有轴对称性，冲击波参数仅与半径和轴线长度相关。因此，为了减少计算量，采用二维轴对称模型，X 轴为旋转轴。模型中空气和炸药均采用 Euler 网格。为分析不同位置的冲击波参数衰减规律，计算中输出了沿轴向 X（4000~50000 mm 内，每个监测点间隔 2000 mm）、径向 Y 不同位置处（Y_A=0 mm、Y_B=250 mm、Y_C=500 mm、Y_D=750 mm、Y_E=1000 mm）的冲击波压力时程曲线，计算输出步长为 20 μs。试验设计中，需要重点关注平面波的形成位置和超压大小。因此，定义稳定平面波需要满足以下 2 个条件：

1）冲击波到达同一截面的时刻基本一致，以考核对象可接受的平整度为 30 mm，冲击波以速度 1000 mm/ms 传播为例，初步认为在 0.03 ms 内算同时到达。

2）同一截面上半径 1000 mm 范围内的冲击波超压峰值平均偏差不超过 10%。

为尽可能提高计算精度，应尽量使用较密的网格，但由此会带来较大的计算量。在炸药自由场爆炸问题数值研究中，文献[20-21]指出：当网格尺寸与炸药尺寸之比不超过 1/14 时，可确保所给出的远场冲击波到达时间、上升沿、超压峰值等参数在可接受范围内。针对管道内的冲击波传播研究问题，可直接借鉴的较少，且无统一标准。因此，笔者在计算中，以 20 kg 炸药爆炸为例，考察了 5 mm×5 mm、10 mm×10 mm、20 mm×20 mm、30 mm×30 mm、40 mm×40 mm、50 mm×50 mm 等多种网格尺寸对计算结果的影响，

计算结果见图 2 和表 2。结果表明：粗网格引起的超压峰值略微偏低，冲击波到达时间略微延后；在计算代价可接受范围内，10 mm×10 mm 网格能获得可接受的稳定计算结果，其网格与炸药尺寸比为 1/22，略高于文献中自由场爆炸数值计算采用的 1/14。这是因为约束管道中冲击波系相互作用更为复杂，需要更精细的网格予以刻画。

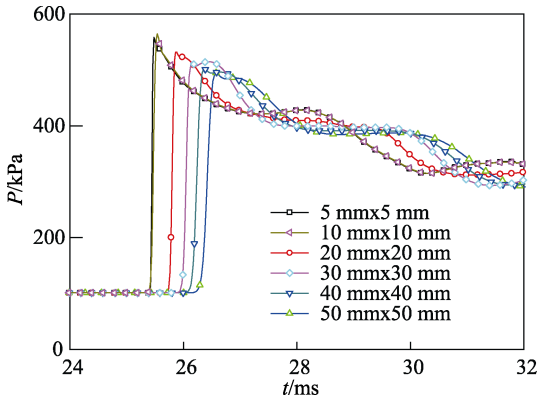

图 2　不同网格尺寸下典型冲击波压力时间曲线

Fig.2 Typical pressure-time curves of shock wave with different grid sizes

表 2　不同网格尺寸下平面波参数计算结果

Tab.2 Simulated results of shock wave parameters with different grid sizes

网格尺寸/mm	平面波形成距离/m	到达时间/ms	不同位置处的平均超压/MPa			
			24 m	28 m	32 m	36 m
50×50	20	20.3	0.391	0.347	0.313	0.287
40×40	22	23.0	0397	0.351	0.316	0.289
30×30	22	22.9	0.406	0.359	0.322	0.294
20×20	18	17.4	0.413	0.363	0.326	0.297
10×10	18	17.3	0.426	0.375	0.333	0.303
5×5	18	17.3	0.427	0.379	0.341	0.301

2　圆管中爆炸波产生过程与冲击波传播规律分析

2.1　爆炸压力云图

利用上述分析模型，得到了爆炸后不同时刻的压力云图，10 kg 炸药爆炸的计算结果如图 3 所示。可以看出，管道中爆炸及其冲击波传播过程如下：1）在爆炸初期阶段，球装药爆炸产生球面波向外膨胀。

2）冲击波和爆炸产物在上下圆管壁面以及尾部壁面上发生反射，且在壁面处形成了微弱的马赫反射，并逐渐追赶轴线传播的球形波阵面。

3）随着反射次数的增多，前沿冲击波流场进一步紊乱传播。

4）前端的冲击波在管道约束情况下，经过不断整形，逐渐形成较为平整的平面波，并以此在管道内继续传播。

2.2　冲击波参数的传播规律分析

不同位置处典型的压力曲线如图 4 所示。可以看出，随时间的延长，波形整体呈现衰减趋势。在离爆炸点较近的位置处，压力曲线为多峰的复杂波形，这与爆炸点附近来回反射有关。随着传播距离的增大，波形的振荡峰值相对减少。表 3 和表 4 进一步给出了不同位置处冲击波的到达时刻和超压峰值，图 5 给出了超压峰值随传播距离的变化规律。

结合图表中的结果，可以得出以下结论：

1）在离管道端面 16 m 以后，冲击波到达某一截面的时刻标准偏差不高于 30 μs，可以认为 16 m 以后截面上的冲击波基本同时到达；在 16 m 以后，截面上各点的超压峰值平均偏差不超过 5%。因此，初步

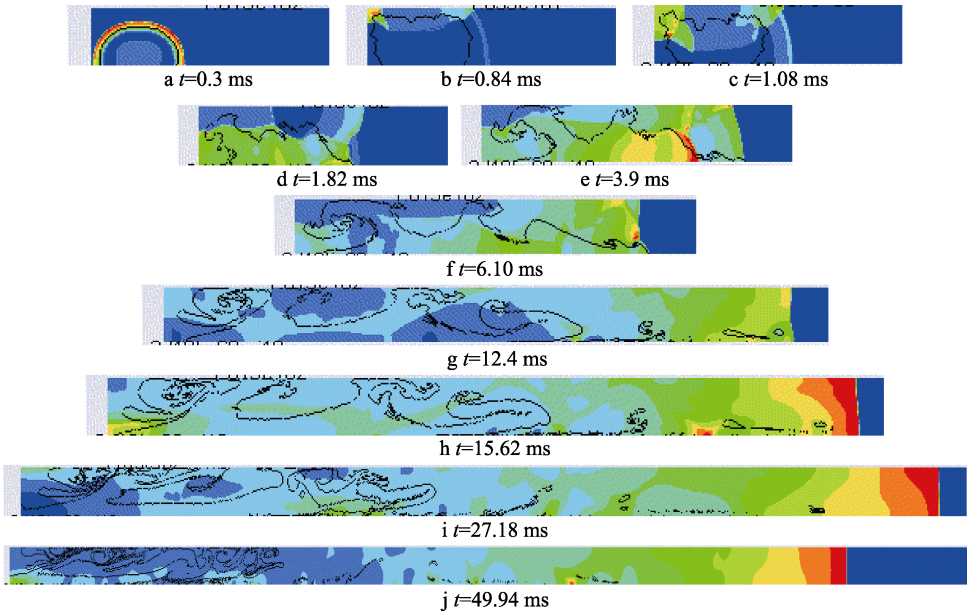

图 3　10 kg 球装药爆炸后不同时刻的压力云图

Fig.3 Pressure nephogram at different times after the explosion of 10 kg spherical charge

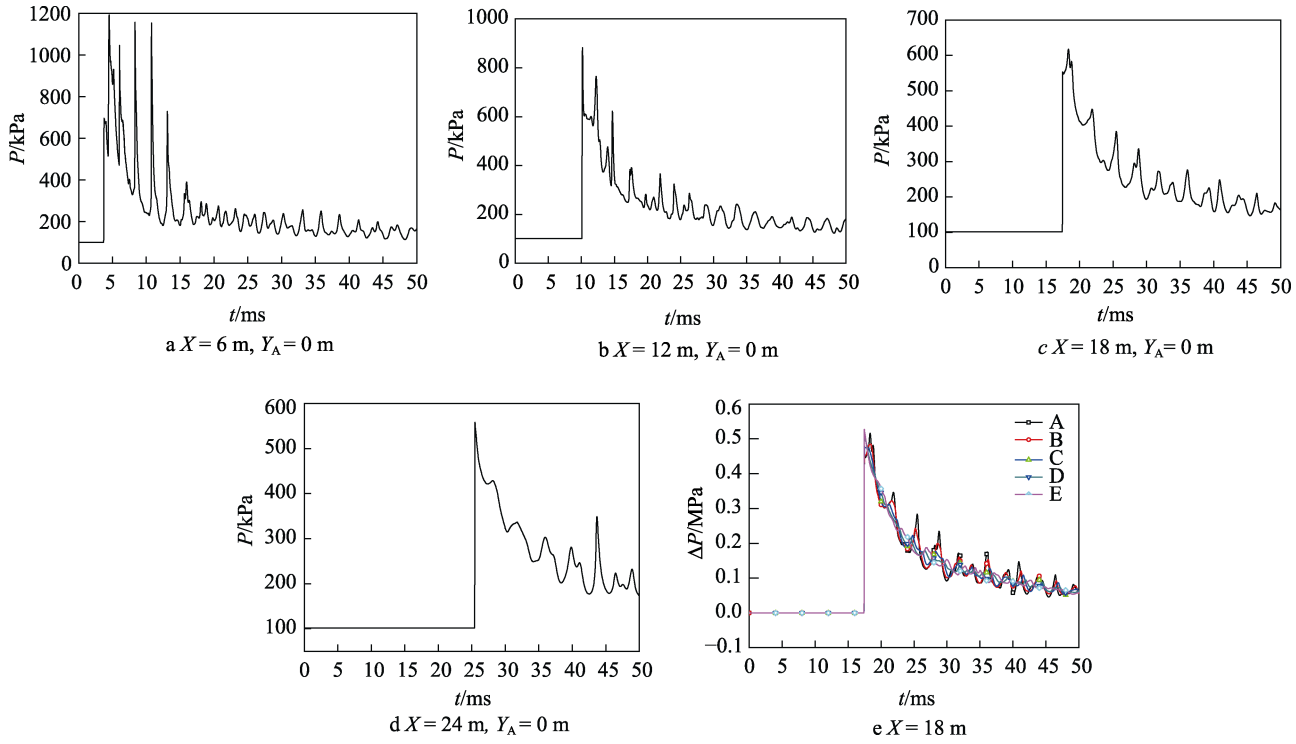

图 4　10 kg 炸药爆炸时不同位置处典型的压力曲线

Fig.4 Typical pressure-time curves at different positions during the explosion of 10 kg spherical charge

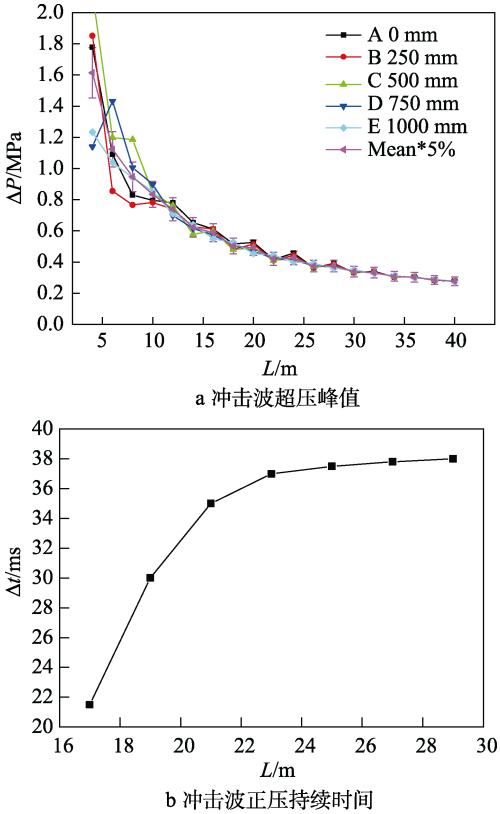

图 5　10 kg 炸药爆炸时不同位置处的冲击波参数随距离的变化关系

Fig.5 The variation of shock wave parameters with propagation distance during the explosion of 10 kg spherical charge: a) peak overpressure of shock wave; b) positive pressure duration of shock wave

表 3　10 kg 炸药爆炸时不同位置冲击波到达时间

Tab.3 The arrival time at different positions during the explosion of 10 kg spherical charge

截面距离/m	到达时间/ms					标准差/μs
	径向 A	径向 B	径向 C	径向 D	径向 E	
4	2.04	2.08	2.08	1.98	1.92	69.1
6	3.64	3.70	3.74	3.82	3.90	102.1
8	5.82	5.96	6.06	6.06	6.02	100.7
10	7.90	8.00	8.08	8.12	8.08	88.1
12	10.02	10.12	10.18	10.20	10.24	85.8
14	12.40	12.44	12.48	12.48	12.48	35.7
16	14.82	14.84	14.84	14.86	14.88	22.3
18	17.34	17.34	17.34	17.34	17.34	0.0
20	19.92	19.92	19.92	19.92	19.92	0.0
22	22.58	22.58	22.58	22.58	22.58	0.0
24	25.34	25.34	25.34	25.34	25.34	0.0
26	28.14	28.14	28.14	28.14	28.14	0.0
28	31.04	31.04	31.02	31.02	31.02	9.8
30	33.96	33.96	33.96	33.96	33.96	0.0
32	36.98	36.96	36.96	36.96	36.96	9.4
34	40.02	40.02	40.02	40.02	40.02	0.0
36	43.14	43.14	43.14	43.14	43.12	8.7
38	46.28	46.28	46.28	46.28	46.30	8.4
40	49.50	49.50	49.50	49.50	49.50	0.0

表 4　10 kg 炸药爆炸时不同位置超压峰值

Tab.4 The peak value of overpressure at different positions during the explosion of 10 kg spherical charge

截面距离/m	超压峰值/MPa					偏差/%
	径向 A	径向 B	径向 C	径向 D	径向 E	
4	1.778	1.851	2.066	1.141	1.233	25.10
6	1.091	0.856	1.198	1.433	1.038	18.95
8	0.830	0.767	1.185	1.007	0.942	17.23
10	0.796	0.783	0.843	0.899	0.853	5.59
12	0.781	0.739	0.763	0.699	0.710	4.68
14	0.653	0.627	0.579	0.616	0.640	4.53
16	0.612	0.611	0.598	0.574	0.549	4.59
18	0.516	0.485	0.480	0.509	0.527	4.01
20	0.527	0.514	0.492	0.468	0.455	6.15
22	0.417	0.411	0.411	0.426	0.444	3.28
24	0.457	0.444	0.422	0.408	0.401	5.56
26	0.364	0.366	0.370	0.380	0.392	3.10
28	0.391	0.386	0.374	0.364	0.359	3.67
30	0.332	0.333	0.338	0.344	0.351	2.34
32	0.340	0.337	0.332	0.329	0.326	1.72
34	0.304	0.305	0.308	0.311	0.313	1.24
36	0.306	0.306	0.304	0.301	0.298	1.14
38	0.282	0.283	0.285	0.288	0.290	1.18
40	0.280	0.280	0.278	0.275	0.273	1.12

认为在 10 kg 炸药量情况下，形成稳定平面冲击波阵面的位置距管道起始端面约 16 m。图 4e 中，轴向 18 m、径向不同位置的压力曲线基本重合，也证实了该位置处平面冲击波已近似稳定。

2）从图 5 a 中的结果来看，随着传播距离的增加，超压峰值逐渐降低。到达 30 m 处时，超压峰值为 0.338 MPa，40 m 处为 0.278 MPa。

3）定义高于压力峰值的 10%作为正压持续时间，图 5b 给出了正压持续时间随传播距离的变化规律。从图 5b 中结果来看，随着传播距离的增加，平面冲击波的正压持续时间逐渐增大，从 17 m 处约 21.5 ms 增加到 29 m 处的约 39 ms。该现象可以结合冲击波 Hugoniot 关系进行解释，由于后续冲击波超压峰值随传播距离的增加而逐渐减低，因此传播速度逐渐降低，正压持续时间则随之增大。

为认识约束管道的优势，这里也和开放空间爆炸方式进行了比较。以 0.5 MPa 为试验所需超压峰值，利用 20 kg 炸药开放空间爆炸方式产生的预定超压峰值的位置位于 3 m 处，而利用 10 kg TNT 炸药在 2.5 m 直径的圆形管道爆炸，产生所需超压峰值的位置为 21 m；开放空间炸药爆炸的冲击波 3 m 处的正压持续时间约为 2.2 ms，而 10 kg TNT 炸药在 2.5 m 直径的圆形管道爆炸 21 m 处冲击波的正压持续时间高达 25 ms。虽然药量小于开放空间爆炸情况，但正压持续时间大大提高。与此同时，开放空间炸药爆炸的冲击波 3 m 处刚好处于爆炸物理区外，且波阵面为 3 m 半径的球面波，而 10 kg TNT 炸药在 2.5 m 直径的圆形管道爆炸 21 m 处已经处于平面冲击波。综合来看，约束管道是获得平面冲击波、提高能量利用效率的有效途径。

基于上述模型，依次分析给出了 10、15、20、25、30、35、40 kg TNT 当量炸药爆炸下平面冲击波的形成位置，结果见表 5。10 kg TNT 当量爆炸下形成稳定平面冲击波的位置约 16 m；当炸药量增加小于 20 kg 时，形成稳定平面冲击波的位置随着炸药量的增加略微延长，20 kg 时延长到约 20 m；当处于 25~35 kg 时，形成稳定平面冲击波的位置基本处于 24 m；当炸药量增加到 40 kg 时，形成稳定平面冲击波的位置进一步延长到 32 m。

表 5　不同 TNT 炸药量下平面冲击波的形成位置

Tab.5 The formation position of plane shock wave under different amount of TNT charge

TNT 炸药量/kg	10	15	20	25	30	35	40
平面冲击波形成位置/m	16	18	20	24	24	24	32

3　圆管中冲击波超压峰值-炸药量-传播距离的工程预示关系

基于上述模拟结果，获得了不同炸药量爆炸下不同位置截面的平均超压峰值，如图 6 所示。结果表明，在某一炸药当量下，冲击波超压峰值随着管道距离的增加逐渐减小。同一位置处，随着炸药量的增加，平均超压峰值提高。

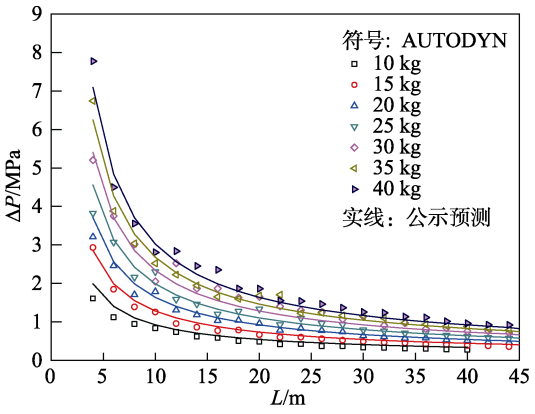

图 6　不同炸药量下冲击波超压峰值与传播距离的关系

Fig.6 The variation of peak overpressure with the propagation distance under different amount of TNT charge

杨秀敏院士根据量纲分析[8]，给出了坑道内超压峰值的具体预测表达式：

$$\Delta p = A\left(\frac{m}{sl}\right)^{1/3} + B\left(\frac{m}{sl}\right)^{2/3} + C\frac{m}{sl} \tag{2}$$

式中：Δp 为冲击超压峰值；m 为炸药 TNT 当量；s 和 l 分别为管道的横截面积和长度；A、B、C 为参数。根据式（2），利用最小二乘法拟合方法，给出了直径为 2.5 m 的圆形管道内不同位置超压峰值模拟结果，具体如下：

$$\Delta p = 0.5399\left(\frac{m}{sl}\right)^{1/3} - 0.1783\left(\frac{m}{sl}\right)^{2/3} + 3.2834\frac{m}{sl} \quad (3)$$

从图 6 可以看出，基于杨秀敏预测公式的工程预测结果与由 AUTODYN 计算所获得的结果较为吻合，表明所建立的工程预测模型及获得的参数能够较好地表征 2.5 m 直径的圆形管道内超压峰值与炸药量以及传播距离的演化规律。

由于实际爆炸试验设计中，还要关注获得不同的正压持续时间，因此需要在不同长度的爆炸管内开展试验。在上述工程预示关系基础上，可以进一步给出超压峰值与炸药量之间的关系，如图 7 所示。从图 7 结果来看，在 20、25、30、35、40 m 等不同位置处获得相同的 2.5 MPa 超压峰值，所需的炸药量分别为 65、85、98、115、130 kg。因此，在试验的载荷设计与调试试验中，通过查询工程预示图，可以快速获得不同冲击波超压参数对应的试验炸药总量，以及试验件距起爆点的位置参数。

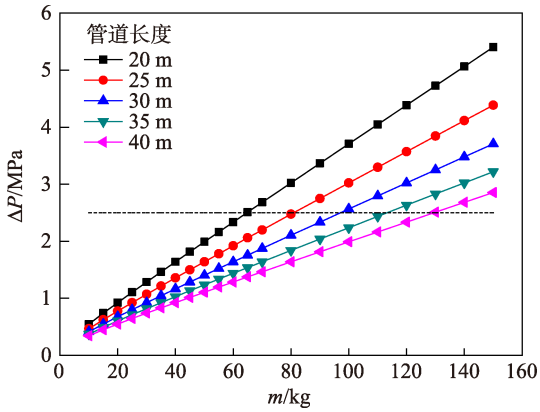

图 7 冲击波超压峰值与炸药量的预示关系

Fig.7 The variation of peak overpressure of shock wave with explosive quantity

4 结论

通过建立圆形管道内炸药爆炸和冲击波传播的两相流数值模型，研究冲击波参数与管道长度、炸药量等变量的关系，获得的主要结论如下：

1）相比开放空间爆炸，约束管道是获得平面冲击波、提高能量利用效率的一种有效形式。

2）管道长度增加，所获得平面冲击波超压峰值会降低，正压持续时间会延长，提高炸药量可以获得更高超压峰值。

3）基于已有的坑道内冲击波参数预示模型，拟合建立了圆形管道中炸药-距离-平面冲击波超压的耦合工程预示关系，可为爆炸管实验设计提供依据，后续将进一步开展试验验证。

参考文献：

[1] 丁亮亮, 李翔宇, 卢芳云, 等. 充压壳体在爆炸冲击波作用下的毁伤特性研究[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(26): 211-216.
DING Liang-liang, LI Xiang-yu, LU Fang-yun, et al. Research on damage characteristic of pressurized shell under the explosion shock wave loading[J]. Science technology and engineering, 2016, 16(26): 211-216.

[2] 年岗, 顾晓辉, 成凤生, 等. 内爆炸载荷作用下爆炸容器振动响应试验研究[J]. 装备环境工程, 2011, 8(5): 77-81.
NIAN Gang, GU Xiao-hui, CHENG Feng-sheng, et al. Experimental research on vibration dynamic responses of explosion vessel under internal explosion loadings[J]. Equipment environmental engineering, 2011, 8(5): 77-81.

[3] 田娟, 石全. 爆炸振动环境中电子装备的损伤模拟[J]. 装备环境工程, 2007, 4(6): 44-46.
TIAN Juan, SHI Quan. Simulation of electronic equipment damage in the explosive vibration environment[J]. Equipment environmental engineering, 2007, 4(6): 44-46.

[4] 田娟, 石全, 王勇. 浅析爆炸振动中冲击波的损伤特性[J]. 装备环境工程, 2008, 5(2): 70-73.
TIAN Juan, SHI Quan, WANG Yong. Analyses of the damage characteristic of explosive vibration[J]. Equipment environmental engineering, 2008, 5(2): 70-73.

[5] SIMON K C. Non-linear long duration blast loading of cylindrical shell structures[J]. Engineering structures, 2014, 59: 113-126.

[6] TAKANO Y, AKAMATSU T. A diaphragmless shock tube[J]. Journal of physics E: Scientific instruments, 1984, 17: 644-646.

[7] VEGARD A, EGIL F, MAGNUS L, et al. A shock tube facility to generate blast loading on structures[J]. International journal of protective structures, 2016, 7(3): 340-366.

[8] MICHAEL W C, AMY C C. Note: A table-top blast driven shock tube[J]. Review of scientific instruments, 2010, 81: 126103.

[9] 任辉启, 王世合, 周松柏, 等. 大型爆炸波模拟装置及其应用[C]// 第十六届全国激波与激波管学术会议论文集. 洛阳: 中国力学学会激波与激波管委员会, 2014.
REN Hui-qi, WANG Shi-he, ZHOU Song-bai, et al. The Development and Application of Large Blast Wave Simulator[C]// The proceedings of the 16th national conference on shock and shock tube. Luoyang: Shock Wave and Shock Tube Committee of Chinese Academy of Mechanics, 2014.

[10] 王振宇, 任辉启. 国外大型爆炸波模拟装置设计研究

综述[J]. 防护工程, 2009, 31(6): 72-79.
WANG Zhen-yu, REN Hui-qi. A survey of design studies of large blast simulators[J]. Protective engineering, 2009, 31(6): 72-79.

[11] MANUEL G V. Distributed explosive-driven six-foot diameter by two-hundred foot long shock tube[R]. Sandia: Sandia National Laboratories, 2002.

[12] 刘瑞朝, 任辉启, 徐翔云. 大型爆炸激波管数值模拟工程[J]. 防护工程, 2009, 31(1): 31-35.
LIU Rui-chao, REN Hui-qi, XU Xiang-yun. Numerical simulation of large blast simulators[J]. Protective engineering, 2009, 31(1): 31-35.

[13] 汪维, 任辉启, 康冬丽, 等. 大型爆炸波模拟装置大气室多膜片驱动器驱动数值模拟研究[C]// 第十六届全国激波与激波管学术会议论文集. 洛阳: 中国力学学会激波与激波管委员会, 2014.
WANG Wei, REN Hui-qi, KANG Dong-li, et al. Numerical simulation research of large blast wave simulator loaded by multiple diaphragm atmospheric chamber driver[C]// The proceedings of the 16th national conference on shock and shock tube. Luoyang: Shock Wave and Shock Tube Committee of Chinese Academy of Mechanics, 2014.

[14] 刘平, 王予民, 刘瑞朝. 空气与土中爆炸波模拟装置的数值分析[J]. 焦作工学院学报, 2002, 21(4): 305–307.
LIU Ping, WANG Yu-min, LIU Rui-chao. Numerical analysis for simulation equipment of blasting wave in air and soil[J]. Journal of Jiaozuo Institute of Technology (natural science), 2002, 21(4): 305-307.

[15] 杨科之, 杨秀敏. 坑道内化爆冲击波的传播规律[J]. 爆炸与冲击, 2003, 23(1): 37-40.
YANG Ke-zhi, YANG Xiu-min. Shock waves propagation inside tunnels[J]. Explosion and shock waves, 2003, 23(1): 37-40.

[16] 杜扬, 李国庆, 吴松林, 等. T 型分支管道对油气爆炸强度的影响. 爆炸与冲击, 2015, 35(5): 729-734.
DU Yang, LI Guo-qing, WU Song-lin, et al. Explosion intensity of gasoline-air mixture in the pipeline containing a T-shaped branch pipe[J]. Explosion and shock waves, 2015, 35(5): 729-734.

[17] 刘瑞朝, 周松柏. 大型爆炸激波管出口段爆炸波传播的数值模拟[C]// 第 2 届全国工程安全与防护学术会议论文集. 北京: 中国岩石力学与工程学会, 2010.
LIU Rui-chao, ZHOU Song-bai. Numerical simulation of blast wave propagation at the exit of large blast shock tube[C]// Proceedings of the 2nd national conference on engineering safety and protection. Beijing: Chinese Society of Rock Mechanics & Engineering, 2010.

[18] 黄广炎, 冯顺山, 王云峰. 装药约束对腔室爆炸冲击波传播特性影响的数值分析[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(1): 58-64.
HUANG Guang-yan, FENG Shun-shan, WANG Yun-feng. Numerical analysis for influence of restriction of charges on shock wave propagation inside cavity[J]. Journal of system simulation, 2009, 21(1): 58-64.

[19] 喻健良, 高远, 闫兴清, 等. 初始压力对爆轰波在管道内传播的影响[J]. 大连理工大学学报, 2014, 54(4): 413-417.
YU Jian-liang, GAO Yuan, YAN Xing-qing, et al. Effect of initial pressure on propagation of detonation wave in round tube[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2014, 54(4): 413-417.

[20] 卢红琴, 刘伟庆. 空中爆炸冲击波的数值模拟研究[J]. 武汉理工大学学报, 2009, 31(19): 105-108.
LU Hong-qin, LIU Wei-qing. Research on numerical simulation of blast wave in air[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2009, 31(19): 105-108.

[21] 高轩能, 吴彦捷. TNT 爆炸的数值计算及其影响因素[J]. 火炸药学报, 2015, 38(3): 32-39.
GAO Xuan-neng, WU Yan-jie. Numerical calculation and influence parameters for TNT explosion[J]. Chinese journal of explosives & propellants, 2015, 38(3): 32-39.