高压物理学报
CHINESE JOURNAL OF HIGH PRESSURE PHYSICS
DOI：10.11858/gywlxb.20251099

弧形坑道和弧形扩散坑道内冲击波的传播规律

程浩[1,2]，彭永[1]，薛晓光[3]，陆邱[1]，李翔宇[1]，李志斌[1]

（1. 国防科技大学理学院，湖南 长沙 410003；
2. 中国人民解放军 63867 部队，吉林 白城 137000；）
3. 北京跟踪与通信技术研究所，北京 100094；

摘要：针对弧形拐弯坑道内冲击波衰减规律不清的问题，研究了半径和拐弯角度对弧形坑道中冲击波传播的影响，发现半径和拐弯角度对消波效率的影响有限，且弧形坑道与同角度直接拐弯坑道的消波效率相近，基本小于7.2%。为提高拐弯坑道对冲击波的衰减效率，提出以弧形坑道为基础设置扩散室构建成弧形扩散坑道的防护新思想，并探讨了扩散比、扩散形式（外侧扩撒、内侧扩散和两侧扩散）和冲击波特征参数对弧形扩散坑道消波效率的影响规律。计算表明，弧形扩散坑道可大幅提高冲击波衰减效率，衰减率可达 55.9%，其中，外侧扩散型弧形坑道的消波效率最高，内侧扩散型和两侧扩散型的消波效率次之，且消波效率随扩散比的提升而不断增大。随着冲击波压力峰值的变大，弧形扩散坑道的消波效率有所提高，可以达到 64.4%，继续提升压力峰值时，弧形扩散坑道的消波效率略有下降但基本保持不变；弧形扩散坑道的消波效率随冲击波正压时间的变大而降低，在正压持续时间为 100 ms 时，消波效率降至 25.4%，但随着正压时间的进一步变大，弧形扩散坑道的消波效率几乎保持不变。

关键词：弧形坑道；弧形扩散坑道；冲击波；传播规律；消波效率
中图分类号：O389; O521.9　　**文献标识码：**A

关键交通枢纽隧道、地下坑道是重要的关键基础设施，面临严峻的爆炸威胁。相对于开放空间而言，隧道、坑道等地下通道相对较为封闭，内部构造复杂多变，爆炸冲击波的传播过程更加复杂，研究爆炸冲击波在隧道、坑道内的传播特性，获得爆炸冲击波在典型通道结构内的传播衰减规律，可为隧道/坑道安全评估和防护设计提供直接技术支撑，也能为爆炸安全分析提供借鉴，是工程防护领域长期关注的重点。

冲击波在直坑道内传播衰减规律研究相对较为充分，杨科之[1]、张玉磊[2]、纪玉国[3]-[4]、徐利娜[5]、孔霖[6]等针对不同炸药、不同结构的直坑道内冲击波传播规律开展了充分的研究工作。冲击波在拐弯坑道内传播衰减与直坑道不同，李晓军等[7]研究发现直角拐弯坑道内冲击波传播的衰减系数为 0.96；杨科之等[8]研究发现冲击波在直角转弯处衰减系数随入射冲击波超压和作用时间的增大而增大，其数值范围在 0.85~1.0 之间；屈康康等[9]研究发现炸药在坑道入口处爆炸时，“L”形坑道末端的冲击波峰值为直坑道末端的 78.33%。当前的研究主要聚焦于直接拐弯坑道，已有规范[10]和相关研究中给出了冲击波衰减的建议算法。但针对弧形拐弯坑道，是否可以直接采纳相关直接拐弯坑道中冲击波衰减算法，未有明确的研究结果。

相对于直接拐弯坑道，弧形拐弯更利于通行，而以弧形坑道为基础设置扩散室形成的弧形扩散坑道可能兼具通行和消波的优势，可能对提升防护工程性能、优化坑道结构设计具有较大的工程应用价值。当前针对扩散室的研究主要基于直坑道，余雯君等[11]通过数值仿真研究发现扩散室截面面积越大，消波效果越好，并拟合了冲击波在扩散室内超压峰值计算公式；Jinwon 等[12]通过数值仿

收稿日期：2025-05-26；修回日期：2025-07-20
基金项目：国家自然科学基金（12372344）
作者简介：程　浩（1996-），男，硕士研究生，主要从事武器效应和工程防护研究. E-mail：chenghao14@nudt.edu.cn
通讯作者：彭　永（1989-），男，博士，副教授，主要从事武器效应和工程防护研究. E-mail：pengy116@163.com

真发现扩散室长径比大于 1 时冲击波趋于稳定，并分析了扩散室三维对消波效率的影响；陈虎林等[13]指出扩散室长径比为 3 时费效比较好。

针对坑道内的拐弯节点，通过数值仿真的方法，分析了不同半径和不同拐弯角度对弧形坑道消波效率的影响，并比较了弧形坑道与相同角度直接拐弯坑道消波效率的差异。进一步研究了以弧形坑道为基础设置扩散室形成的弧形扩散坑道对冲击波的衰减效果，并且分析了不同扩散形式（外侧扩散、内侧扩散和两侧扩散）、扩散比和冲击波特征参数对弧形扩散坑道消波效率的影响。

1 数值仿真模型与验证

1.1 数值仿真模型

采用 LS-DYNA 中的 Conservation Element/Solution Element（CESE）[14]算法进行爆炸冲击波在弧形坑道内的传播衰减数值仿真研究。CESE 算法一种用于可压缩流体求解的新型数值框架，其核心在于将时间和空间统一处理，避免了传统求解器中需要使用 Riemann 解的情况。CESE 算法可以只建立冲击波传播的空气域，计算时直接加载压力波，探索冲击波在不同空气域内的传播规律，大幅提高了计算效率。

CESE 算法可以将空气域的一侧边界设为冲击波压力入射边界，另一侧设为冲击波压力透射边界，其余的边界设置为固壁边界。其中入射边界通过“CESE_BOUNDARY_PRESCRIBED_SET”加载预设的压力波，透射边界通过“CESE_BOUNDARY_NON_REFLECTIVE_SET”关键字设置，固壁边界通过“CESE_BOUNDARY_SOLID_WALL_SET”关键字设置为刚性固壁，计算时可以将空气材料假设为理想气体，计算时空气域的大气压取 P_0=0.1 MPa。

其中空气模型采用 CESE_MAT_GAS 材料模型和 CESE_EOS_IDEAL_GAS 状态方程[15]，材料模型使用热传导系数和萨瑟兰粘度公式进行表征，对于绝大多数气体，热传导系数 P_r 为确定的常数，萨瑟兰粘度公式为：

$$\mu = \frac{C_1 T^{3/2}}{T + C_2} \tag{1}$$

式中：C_1 和 C_2 为材料参数，T 为温度。

状态方程通过定体积比热 C_v 和定压比热 C_p 来表征，空气的材料参数和状态方程参数见表 1。

表 1 空气模型参数取值[15]

Table 1 Values of air model parameters

C_1	C_2	P_r	C_v	C_p
1.458×10^{-6}	110.4	0.72	7.135×10^{-6}	1.002×10^{-6}

Note:The system of units iscm-g-μs。

1.2 模型验证

为验证 CESE 算法在冲击波传播数值仿真方面的准确性，基于杨科之等[1]开展的爆炸实验开展数值仿真，实验工况为 250 kg TNT 炸药在截面积为 10 m^2 的直墙圆拱坑道内爆炸，在爆心距离 36 m 处测得坑道内冲击波超压峰值为 1.61 MPa。建立长 75m 的坑道模型，以 36 m 处的冲击波压力时程作为输入条件[16]，加载在如图 1 所示数值模型的入射边界上，计算冲击波在后续坑道内的传播规律，验证仿真结果是否与实验或拟合的经验公式相匹配。计算时冲击波压力曲线简化为三角波。

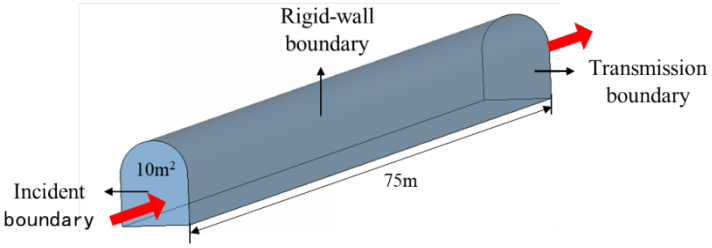


图 1 直坑道模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a straight tunnel model

在计算中，压力波以稳定平面冲击波的形式沿着空气域模型向前传播。在空气域左右方向各 1.5 m 处、高度 2m 处依次设置压力测点，记录到达该点的冲击波超压时程曲线。图 2 给出了不同位置处冲击波超压峰值数值仿真结果与实验[1]数据的对比，同时，图中也给出了杨科之[1]经验公式的计算结果，从图中可以看出数值仿真结果与实验结果误差在 13%以内，验证了数值计算模型的准确性。

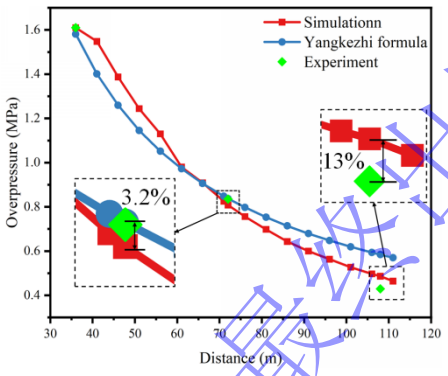


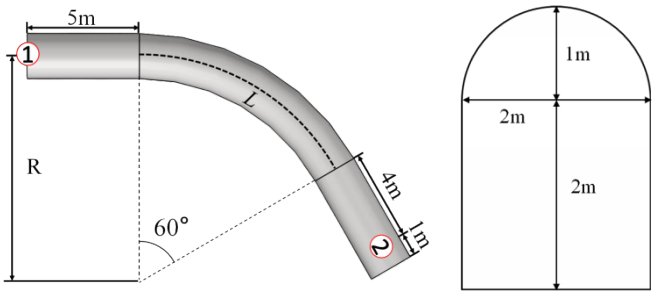
图 2 数值计算结果验证

Fig. 2 Numerical simulation results of straight tunnel

2 弧形坑道消波效率及影响因素分析

2.1 弧形坑道半径对消波效率的影响

为探讨不同半径对弧形坑道消波效率的影响，建立了如图 3 所示的弧形坑道模型，坑道截面为直墙圆拱结构，坑道宽度 2 m、直墙高 2 m、圆拱高 1 m。图中设置弧形半径分别为 10m、15m、20m、25m，对应的弧长分别为 10.47 m、15.7 m、20.93 m 和 26.16 m。将弧形坑道左侧 1 号点位处设立为入射边界，加载压力峰值为 3 MPa、持续时间为 3ms 的三角波形冲击波荷载，坑道右侧设立为透射边界，并在距离透射边界 1 m、左右距离 1 m、高度 2 m 处的 2 号点位处设立测点，用于监测经过弧形坑道后的冲击波参数。同时建立与弧形坑道长度相同、横截面完全一致的直坑道模型，并在直坑道内距离透射边界 1 m 处的相同位置建立测点，比较直坑道与弧形坑道同位置的 2 号测点压力，分析弧形坑道的消波效率。



(a) Curved tunnel (b) Section parameter

图 3 计算所用的弧形坑道模型

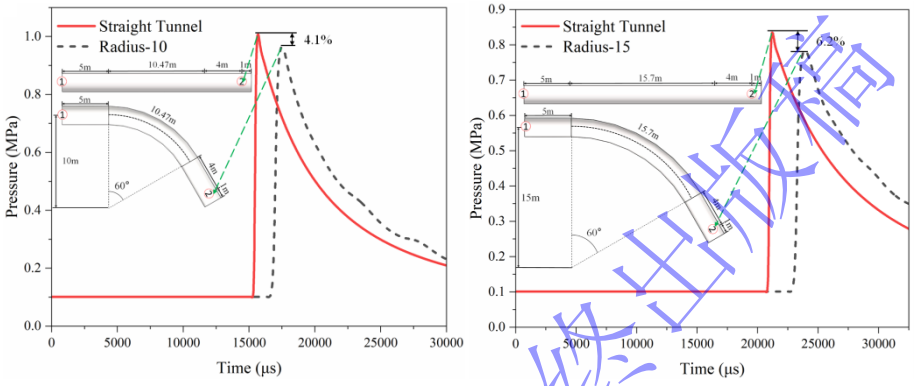
Fig. 3The curved tunnel model used for calculation

为准确评估弧形坑道的衰减效率，以直线坑道内相同传播距离处冲击波压力峰值作为基准，定义表征弧形坑道消波效率的冲击波相对衰减系数为：

$$\eta = \frac{P_0 - P_1}{P_0} \tag{2}$$

式中，P_0 为直坑道内冲击波压力峰值；P_1 为传播出弧形坑道后的冲击波压力峰值。

图 4 给出了冲击波经过 60°弧形坑道后和具有相同距离直坑道后的冲击波压力时程曲线对比，可以传播出弧形坑道的冲击波与对应直坑道内的冲击波相比，压力峰值有所降低、冲击波到达时间有所延迟，但幅值不大。



(a) Radius: 10 m(b) Radius: 15m

图 4 不同半径弧形坑道压力时程曲线

Fig. 4Attenuation efficiency of curved tunnel with different radius

图 5 给出了不同半径弧形坑道的消波效率对比，可以看出弧形坑道的消波效率整体较小，最大仅为 7.2%。此外，当弧形半径较小时，随着转弯半径的增大，弧形坑道的消波效率增大，但当弧形半径超过一个阈值时（本算例中介于 20 m~25 m 之间），其消波效率逐渐降低，当弧形半径达到坑道宽度的 12.5 倍时，即便坑道为弧形拐弯坑道，因为拐弯半径过大，坑道的曲率非常小，可近似为直坑道，弧形拐弯结构对冲击波传播的影响可以忽略。

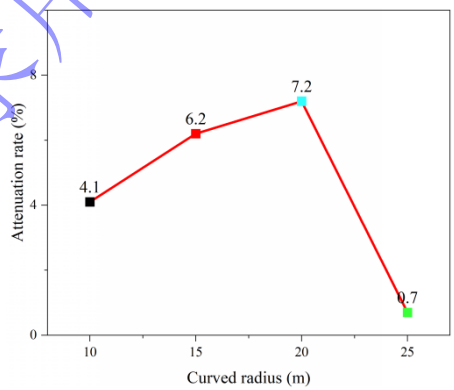


图 5 弧形坑道消波效率

Fig. 5Wave dissipation efficiency of curved tunnel

2.2 弧形坑道与直接拐弯坑道的消波效率对比

为探讨弧形坑道的消波效率与直接拐弯坑道是否存在区别，将直接拐弯坑道的消波效率与弧形坑道的消波效率进行比较。考虑不同拐弯角度对消波效果的潜在影响，在前述 60°弧形坑道模型基础上，建立了拐弯角度为 90°、半径为 15 m 的弧形坑道模型，坑道横截面尺寸与 60°弧形坑道完全一致。依据公式（2）定义的冲击波相对衰减系数，建立与 90°弧形坑道相同长度的直坑道，以直坑

道内冲击波压力峰值为基础，分析 90°弧形坑道的消波效率。

图 6 给出了弧形坑道与直接拐弯坑道内消波效率的对比，其中直接拐弯坑道的消波效率采用邓烨等[17]提出的模型进行计算，弧形坑道参数及消波效率采用数值模拟计算结果。从图中可以看出，90° 弧形坑道的消波效率为 7.2%，与 60° 弧形坑道相比的消波效率提升不大，增大角度对消波效率的提升有限。同时相同拐弯角度的弧形坑道和直接拐弯坑道的消波效率相近，所以可以使用已有规范和相关研究中针对直接拐弯坑道的冲击波衰减效率算法来估计冲击波在弧形坑道中的衰减规律。

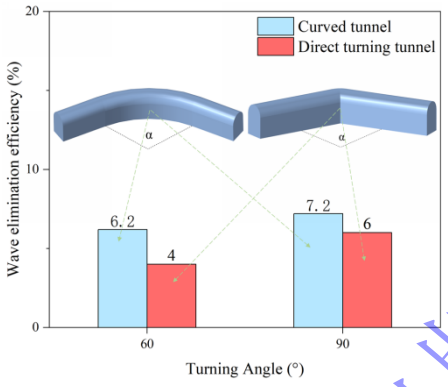
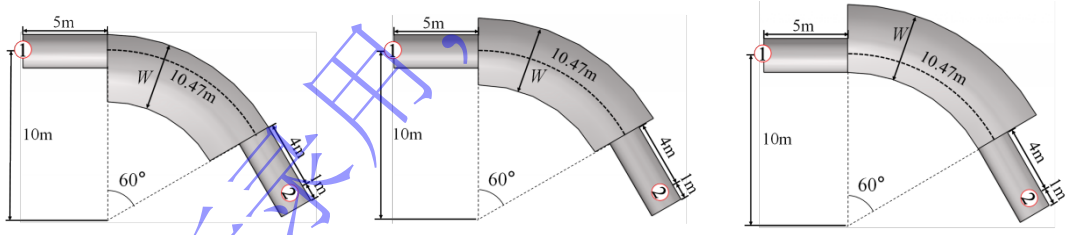


图 6 弧形坑道与直接拐弯坑道内消波效率的对比

Fig. 6Comparison of wave absorbing efficiency in curved and direct turning tunnel

3 弧形扩散坑道的消波机理及消波效率

为提高弧形坑道对冲击波的衰减效率，考虑到扩散室对冲击波的良好衰减效果，以弧形坑道为基础，设置扩散室形成的弧形扩散坑道可能兼具通行和消波的优势。为分析弧形扩散坑道的消波效率，以图 3 中半径 10m 的 60°弧形坑道为主体，构建内侧扩散型、两侧扩散型和外侧扩散型三种类型弧形扩散室，如图 7 所示，图中 W 为弧形扩散室的宽度。与三种弧形扩散室相连的主体坑道大小、形状一致，皆为宽度为 2 米的直墙圆拱形坑道。



(a) Inner diffusion (b) Two side diffusion (c) Outer diffusion

图 7 不同扩散形式弧形坑道模型示意图

Fig. 7Schematic diagram of curved tunnel model with different diffusion forms

显然，不同的扩散形式和扩散室宽度会对冲击波的传播产生影响。定义弧形扩散室截面宽度 W 与主体坑道截面宽度的比值为扩散比。为了分析扩散比和扩散形式对消波效率的影响，基于三种不同的扩散类型，设计 5 种不同扩散比工况，如表 2 所列，用于后续的讨论和对比分析。

表 2 不同扩散比工况

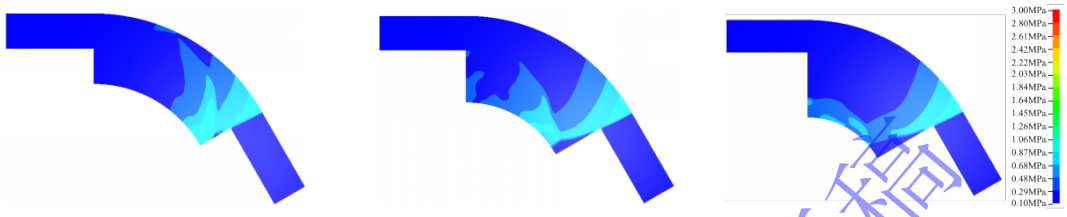
Table 2 Different diffusion ratio conditions

Number	Diffusion width W/m	Diffusion ratio	Diffusion form
1	2	1.0	a. Inner diffusion
2	3	1.5	b. Two side diffusion
3	4	2.0	c Outer diffusion

4	5	2.5
5	6	3.0

3.1 扩散比对弧形扩散坑道消波效率的影响

图 8 给出了冲击波传出内侧扩散型弧形扩散室时的压力云图，可以看到随着扩散比的增大，冲击波扩散到内侧壁面产生的反射波逐渐不能与外侧壁面的反射波发生相互作用，同时扩散到内侧壁面的冲击波压力随扩散比的增大而减小。当扩散比为 3 时可以明显看到，传播出弧形扩散室时的冲击波主要为外侧壁面的反射波。

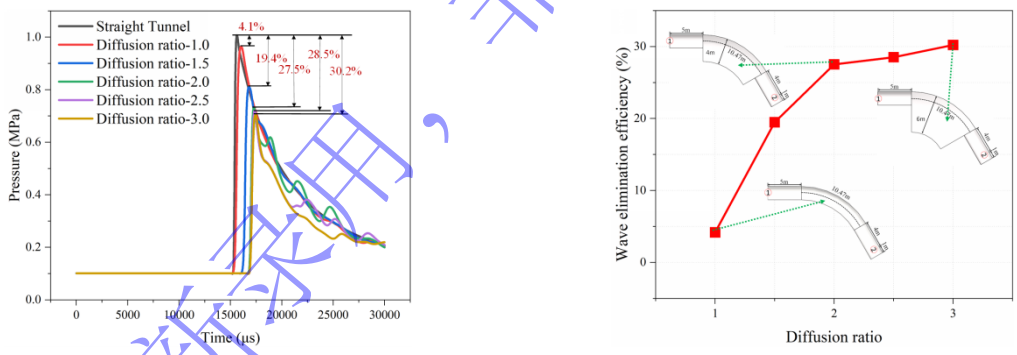


(a) Diffusion ratio：2　　(b) Diffusion ratio：2.5　　(c) Diffusion ratio：3

图 8 典型时刻冲击波在内侧扩散型弧形坑道内的压力云图

Fig. 8The pressure cloud images of shock wave in inner diffusion curved tunnel at typical time

图 9 给出了扩散比对内侧扩散型弧形坑道消波效率的影响规律，其中消波效率的定义详见公式（2），即传出扩散坑道的稳定冲击波压力峰值相对于同长度直坑道的距离入射边界相同距离测点压力峰值的相对衰减率。从图 9（a）中可以看出，在内侧扩散型坑道内冲击波波的传播距离不随扩散比的增大而增加，弧形扩散坑道的消波能力不断增强。从图 9（b）可以看到，消波效率在扩散比为 3 时达到 30.2%并接近上限，进一步提高扩散比对消波效率的提升作用不明显。可能是因为随扩散比的增大，产生的内壁面反射波越来越小，对外侧壁面反射波的影响降低，且外侧壁面反射波降低较少，所以消波效率提升较少。

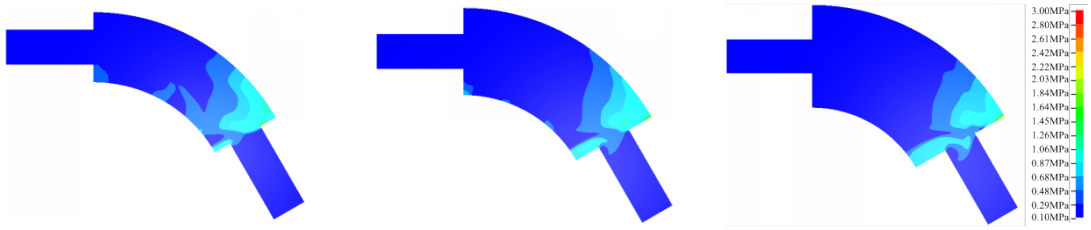


(a) Pressure time-history curve　　(b)Attenuation efficiency

图 9 内侧扩散型扩散室对冲击波传播的衰减规律

Fig. 9 The propagation attenuation law of shock wave in the inner diffusion curved tunnel

图 10 为冲击波传播出两侧扩散型弧形扩散室时的压力云图。从图中可以看出随着扩散比增大，冲击波向两侧扩散传播的距离增大，而弧形扩散室内侧的传播距离小于外侧，内侧的冲击波会先于外侧壁面传播出扩散室。当扩散比较小时，内侧壁面反射波与外侧壁面反射波相互作用，当扩散波增大时，两个反射波较难在扩散室内发生作用。

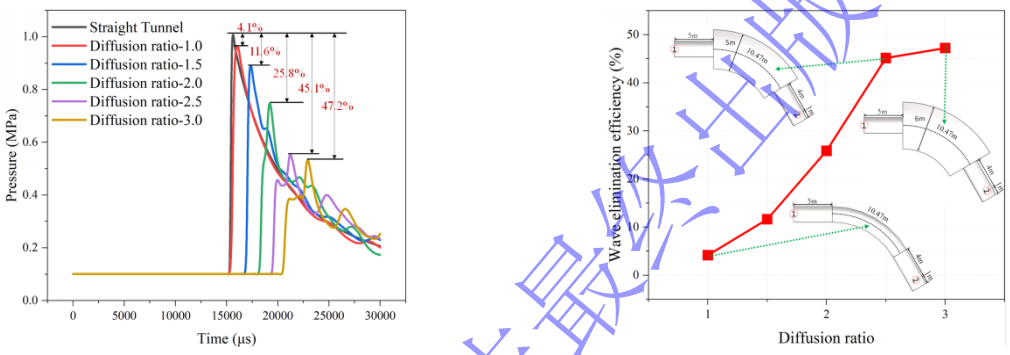


(a) Diffusion ratio：2　　(b) Diffusion ratio：2.5　　(c) Diffusion ratio：3

图 10 典型时刻冲击波在两侧扩散型弧形坑道内的压力云图

Fig. 10The pressure cloud images of shock wave in two side diffusion curved tunnelat typical time

图 11 给出了扩散比对两侧扩散型扩散室中冲击波传播的影响规律，并结合直坑道的计算结果，根据公式（2）计算出不同扩散比条件下的消波效率。从图 11（a）中可以看出，冲击波在弧形扩散坑道内的传播距离随扩散比增大而增加，从图 11（b）可知两侧扩散型弧形坑道的消波效率随扩散比的提高而增大，在扩散比为 3 时达到 47.2%，并且接近该型扩散坑道的消波效率上限，继续提高扩散比对消波效率的提升不明显。

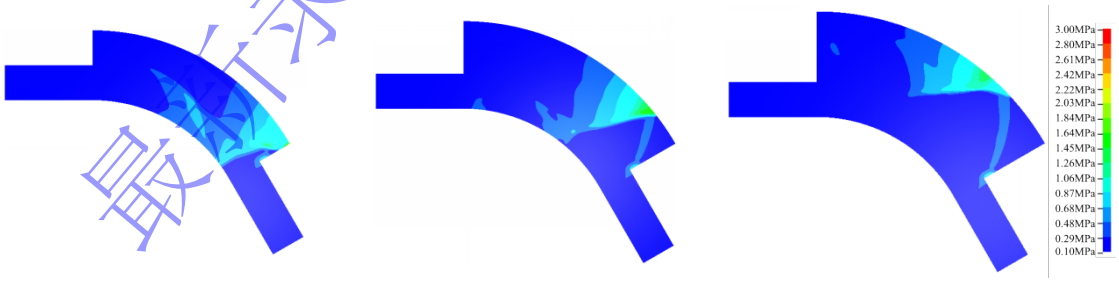


（a）Pressure time-history curve　　（b）Attenuation efficiency

图 11 两侧扩散型扩散室对冲击波传播的衰减规律

Fig. 11The propagation attenuation law of shock wave in two side diffusion curved tunnel

图 12 为冲击波传播出外侧扩散型弧形扩散室时的压力云图。从图 12 中可以看出随着扩散比的增大，向外侧壁面扩散传播的距离增大，外壁面反射波与沿着内侧壁面扩散传播的冲击波相互作用越少，最后不发生作用。同时，外侧壁面反射冲击波传播距离随扩散比的增大而增长，最后会随扩散冲击波传播出扩散室。

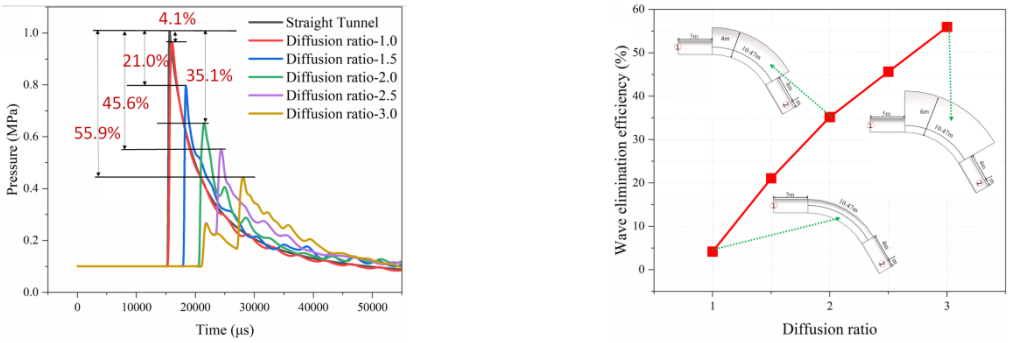


(a) Diffusion ratio：2　　(b) Diffusion ratio：2.5　　(c) Diffusion ratio：3

图 12 典型时刻冲击波在外侧扩散型弧形坑道内的压力云图

Fig. 12The pressure cloud images of shock wave in the outer diffusion curved tunnel at typical time

图 13 给出了扩散比对外侧扩散型扩散室中冲击波传播的影响规律，从图 13（a）中可以看到随着扩散比的增大，冲击波扩散传播的距离存在上限，而壁面反射波的传播距离继续增大。从图 13（b）可知，当扩散比增大外侧扩散型弧形坑道的消波效率随扩散比的增大而不断提升，在扩散比为 3 时达到了 55.9%，同时消波效率尚未达到上限，提高扩散比可以继续提高消波效率。



（a）Pressure time-history curve　　（b）Attenuation efficiency

图 13 外侧扩散型扩散室对冲击波传播的衰减规律

Fig. 13The propagation attenuation law of shock wave in the outer diffusion curved tunnel

3.2 扩散形式对弧形扩散坑道消波效率的影响

比较三种扩散形式弧形坑道的消波效率，可以发现扩散形式对弧形扩散坑道消波效率具有明显的影响。图 14 给出了三种扩散形式弧形坑道的消波效率，可以看出外侧扩散型弧形坑道在任何扩散比的条件下，具有最高的消波效率，且提升扩散比仍可大幅提升消波效率；相比外侧扩散型弧形坑道，内侧扩散型弧形坑道和两侧扩散型弧形坑道的消波效率相对较低，两者的消波效率也随着扩散比的变大而增大，但是当扩散比达到一定阈值后，消波效率随扩散比增大而增长的幅度不大，说明两种弧形扩散坑道的消波效率接近上限。

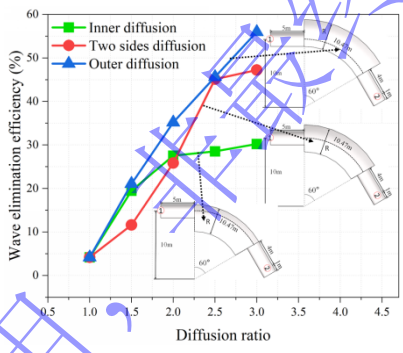
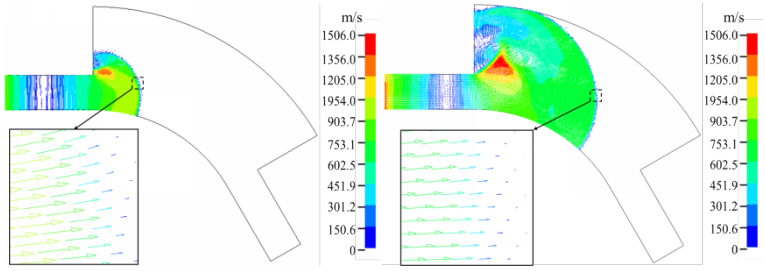


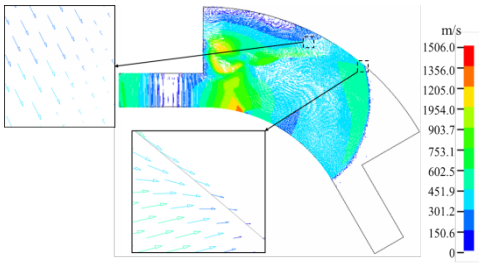
图 14 不同扩散形式弧形坑道的消波效率对比

Fig. 14Comparison of wave dissipation efficiency of curved tunnel with different diffusion forms

图 15 给出了冲击波在外侧扩散型弧形坑道内传播时质点的速度矢量，可以看到冲击波传播进入弧形扩散室后，以近似球面波的状态向右传播。当弧形扩散室的扩散方向与传播方向一致且未传播到壁面前，球面波的的传播状态不受影响；当球面波传播到壁面时发生反射作用，而后壁面反射波与扩散的冲击波发生作用，波的传播方向受质点速度较大的波的影响。从图 15（c）中可以看到，扩散的冲击波前波的质点速度略大于壁面反射波的质点速度，传播方向与入射传播方向的基本一致，而后波的质点速度小于反射波的质点速度，此时传播方向与向下方偏转。



(a) 5ms(b) 9ms



(c) 13ms

图 15 外侧扩散型弧形坑道内质点速度矢量图

Fig. 15Velocity vector diagram of particle in the outer diffusion curved tunnel

相比较而言，内侧扩散型的冲击波在传播方向上未发生扩散作用，冲击波与外侧壁面碰撞反射并改变冲击波的传播方向，靠近内侧壁面的冲击波经扩散作用仅少量降低压力峰值，所以传播出弧形扩散室的冲击波压力降低较少；外侧扩散型在传播方向上有巨大的扩散作用，冲击波压力降低明显，同时弧形扩散室的出口方向与冲击波传播方向存在角度，大部分冲击波被扩散室壁面反射回去，仅部分冲击波能够传出扩散室，因此有最好的消波效果。

3.3 冲击波特征对弧形扩散坑道消波效率的影响

为探究不同特征冲击波在弧形扩散坑道内的传播规律，以扩散比为 3 的外侧扩散型弧形坑道为研究目标，研究不同特征冲击波在弧形扩散坑道内传播时的消波效率。计算时在入射边界施加正压时间为 3 ms，压力峰值依次为 1 MPa、3 MPa、5 MPa、7 MPa、9 MPa、11 MPa 和 13 MPa 的三角波荷载，同时在对应的直坑道模型入射边界施加相同的荷载，根据公式（2）计算不同压力条件下的消波效率，研究冲击波压力峰值对弧形扩散坑道消波效率的影响规律。

图 16 给出了不同压力条件下的消波效率对比，结果显示随着坑道内传播的冲击波峰值的提高，弧形扩散坑道的消波效率先呈现上升趋势，在峰值压力为 7 MPa 时达到最大为 64.4%，而后呈下降趋势，在峰值压力为 13 MPa 时为 61.5%，相比较峰值压力为 11MPa 时下降了 1.7%。结果表明，冲击波压力较小时，弧形扩散坑道对冲击波的衰减效应较弱，其消波效率会随着冲击波压力的增大而增强；当超过一定值时，弧形扩散坑道的消波效率达到最大后开始缓慢降低，但是幅值不大，说明继续增大冲击波的压力，弧形扩散坑道仍能保持较好的消波能力。

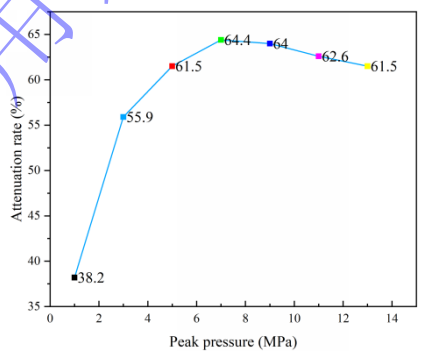


图 16 不同压力峰值条件下的消波效率

Fig. 16 Wave dissipation efficiency under different pressure peak conditions

以扩散比为 3 的外侧扩散型弧形坑道为研究目标，在入射边界施加峰值压力为 3 MPa，正压时间依次取 5 ms、11 ms、20 ms、100 ms、500 ms 和 1000 ms 的三角波荷载，研究不同正压时间条件下，弧形扩散坑道内冲击波的传播规律。在对应直坑道模型施加相同的荷载，根据公式（2）计算不同正压时间条件下的弧形扩散坑道消波效率。

图 17 给出了不同正压时间条件下的消波效率对比，结果显示弧形扩散坑道的消波能力会随冲击波正压时间的提升而减弱，最终稳定在一个区间内。从图 17 中可以看到，当冲击波正压时间小于 100 ms 时，弧形扩散坑道的消波效率随正压时间的提升大幅降低，在正压时间为 100 ms 时降到

了 25.4%，之后继续大幅度提升冲击波的正压时间，弧形扩散坑道消波效率无明显的变化，弧形扩散坑道消波效率几乎不受到冲击波正压时间的影响。

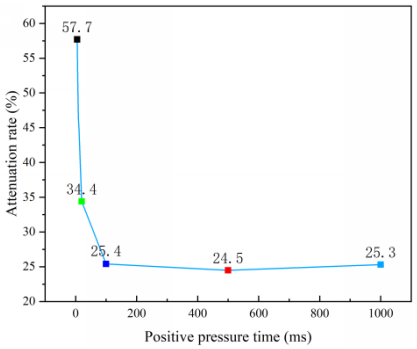


图 17 不同正压时间条件下的消波效率

Fig. 17Wave dissipation efficiency under different positive pressure time conditions

4 结　论

针对冲击波在弧形坑道内传播衰减规律不清的情况，开展了弧形坑道和弧形扩散坑道中冲击波传播规律的数值模拟研究，讨论了弧形半径和拐弯角度对弧形坑道消波效率的影响规律，对比了弧形坑道与相同角度直接拐弯坑道消波效率的区别，获得了弧形扩散坑道的消波效率，分析了扩散形式和扩散比对弧形扩散坑道消波效率的影响效果，探索了压力峰值和正压时间对弧形扩散坑道消波效率的影响规律，主要结论如下：

（1）弧形半径和拐弯角度对弧形坑道消波效率的影响较小，相同角度直接拐弯坑道和弧形坑道的消波效率相近，两者基本小于 7.2%。

（2）弧形扩散坑道具有很好的消波能力，消波效率可以达到 55.9%，提高扩散比可有效提高消波效率。其中外侧扩散弧形坑道的消波效率最高，内侧扩散型和两侧扩散型的消波效率次之，因为外侧型扩散室扩散方向与冲击波传播方向一致，对冲击波进行了充分扩散和阻滞，因而具有最好的消波效率。

（3）弧形扩散坑道的消波效率随冲击波压力的提升而增大，超过一定值后，其消波效率略有下降但总体稳定；弧形扩散坑道消波能力随冲击波正压时间的提高而不断降低，在正压持续时间为 100 ms 时降到 25.4%，之后弧形扩散坑道的消波效率几乎不受冲击波正压时间的影响。

参考文献

[1] 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(01): 37-40.
YANG K Z, YANG X M. Shock waves propagation inside tunnels[J].Explosion and Shock Waves, 2003, 23(01): 37-40.

[2] 张玉磊, 王胜强, 袁建飞, 等.方形坑道内爆炸冲击波传播规律[J].含能材料,2020, 28(01): 46-51.
ZHANG Y L, WANG S Q, YUAN J F,et al.Experimental Study on the Propagation Law of Blast Waves in a Square Tunnel[J].Chinese Journal of Energetic Materials, 2020, 28(01): 46-51.

[3] 纪玉国, 张国凯, 李干, 等. 坑道口部温压炸药爆炸热效应与冲击波传播规律实验研究[J]. 南京理工大学学报, 2022, 46(06): 649-658.
JI Y G, ZHANG G K, LI G,et al.Experimental study on thermal effect and shock wave propagation of thermobaric explosives at tunnel entrance[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2022, 46(06): 649-658.

[4] 纪玉国, 张国凯, 李干, 等. 坑道内爆炸条件下温压炸药的爆炸特性及其影响因素[J]. 爆炸与冲击, 2024, 44(03): 118-132.

JI Y G, ZHANG G K, LI G, et al. Explosion characteristics of thermobaric explosive (TBX) detonatedinside a tunnel and the related influential factors[J].Explosion and Shock Waves, 2024, 44(03): 118-132.

[5] 徐利娜，雍顺宁，王凤丹，等. 直坑道内爆炸冲击波超压传播规律研究[J]. 测试技术学报, 2014, 28(02): 114-118.
XU L N, YONG S N,WANG F D, et al.Study of Blast Wave Overpressure Propagation Inside Straight Tunnel[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2014, 28(02): 114-118.

[6] 孔霖，苏健军，李芝绒，等. 不同装药坑道内爆炸冲击波传播规律的试验研究[J]. 火工品, 2014, (03): 21-24.
KONG L, SU J J, LI Z R, et al. Test Study on Explosion Shock Wave Propagation of DifferentExplosives inside Tunnels[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2014, (03): 21-24.

[7] 李晓军，张殿臣，李清献，等. 常规武器破坏效应与工程防护技术[M].洛阳:总参工程兵科研三所, 2001: 180-181.
LI X J, ZHANG D C, LI Q X, et al.Effects of Conventional Weapons and Engineering Protection Technologies[M]. LUOYANG: The Third Engineer Scientific Research Institute of the Headquarters of theGeneral Staff, 2001: 180-181.

[8] 杨科之，袁正如. 冲击波在坑道直角转弯处的衰减规律[J]. 防护工程, 2012, 34(03): 20-24.
YANG K Z, YUAN Z R. Shock wave attenuation at the orthogonal turning point in tunnels[J].Protective Engineering, 2012, 34(03): 20-24.

[9] 屈康康，闫云聚，刘洋，等. 爆炸冲击波在长直坑道和复杂坑道内传播规律的对比研究[J]，应用力学学报,2011, 28(04): 434-438.
QU K K, YAN Y J, LIU Y, et al. Comparative study on propagation rules of explosive shock-wave inlong straight and complex tunnel [J], Chinese Journal of Applied Mechanics,2011, 28(04): 434-438.

[10] 张瑞龙，赵贵华，田川平，等. 人民防空地下室设计规范 GB50038-2005[S]. 中华人民共和国建设部, 2005.
ZHANG R L, ZHAO G H, TIAN C P, et al.Code for Design of Civil Air Defence BasementsGB50038-2005[S].Ministry of Construction of the People's Republic of China, 2005.

[11] 余雯君，陈胜云，邓树新，等. 爆炸冲击波在变截面通道中传播规律数值研究[J].兵器装备工程学报,2024, 45(02): 166-173.
YU W J, CHEN S Y, DENG S X, et al. Numerical simulation of propagation law of explosion shock wave invariable cross-section channe[J], Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2024, 45(02): 166-173.

[12] Shin J, Pang S, Kim W.Enhancing blast mitigation in tunnels with expansion chamber subjected to high explosives detonations for protecting underground facilities[J].Tunnelling and Underground Space Technology,2024, 147: 105720.

[13] 陈虎林， 李广新， 任新见. 坑道口部内爆炸情况下扩散室中冲击波的数值分析[J].爆破,2010, 27(03): 105-109.
CHEN H L, LI G X, REN X J. Numerical Analysis on Propagation Effect of Shock Wave in DiffuserChambers under InternalBlast in the Entrance of Tunne[J]. Blasting, 2010, 27(03): 105-109.

[14] Edith GRIPPON, Nicolas VAN DORSSELAER, Vincent LAPOUJADE. A Contribution to CESE method validation in LS-DYNA[C]. 10th European LS-DYNA Conference 2015, DynaS+, 2015.

[15] LS-DYNA Keyword user's manual[M]. Livermore, CA, US: Livermore Software Technology, Corporation, 2006.

[16] 赵蓓蕾，赵继广，崔村燕，等. 扰流板结构参数对冲击波衰减特性影响的仿真分析[J]. 高压物理学报, 2018, 32(02): 158-166.

ZHAO B L, ZHAO G J, CUI C Y, et al. Simulation Analysis of Influence of Spoiler Structural Parameters onShock Wave Attenuation Characteristics [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2018, 32(02): 158-166.

[17] 邓烨，陶西贵，赵健，等. 复杂坑道内爆炸冲击波传播快速算法研究[J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18(04): 1127-1137.
DENG Y, TAO X G, ZHAO J, et al.Study on Fast Algorithm of Blast Wave Propagation in Complex Tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2022, 18(04): 1127-1137.

Shock Wave Propagation Law of Curved Tunnel and Curved Diffusion Tunnel

CHENG Hao[1,2], PENG Yong[1], XUE Xiaoguang[3], LU Qiu[1], LI Xiangyu[1], LI Zhibin[1]

（1. *College of Science, National University of Defense Technology, Changsha 410003, China;*
2. *Unit 63867 of the PLA, Baicheng 137000, Jilin, China*;
3. *Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094, China*）

Abstract: In view of the unclear attenuation law of shock wave in curved tunnel is unclear, the influence of radius and turning angle on shock wave propagation in curved tunnel is analyzed. It was found that its influence on the wave dissipation efficiency islimited, and the wave dissipation efficiency of curved tunnel is similar to that of direct turning tunnel with the same angle, which is basically less than 7.2%. In order to improve the attenuation efficiency of shock wave in curved tunnel, a new protective idea of constructing arc-shaped diffusion tunnels based on arc-shaped tunnels by setting up diffusion chambers was proposed. The influence laws of diffusion ratio and diffusion forms (inner diffusion, two side diffusion and outer diffusion) on the wave dissipation efficiency of curved diffusion tunnels were also discussed. The calculation shows that curved diffusion tunnel can greatly improve the attenuation efficiency of shock wave, and the attenuation rate can reach 55.9%. Among them, the outer diffusion curved tunnel has the highest wave dissipation efficiency, followed by the inner diffusion type and the double-sided diffusion type. Moreover, the wave attenuation efficiency increases continuously with the increase of the diffusionratio. As the peak pressure of the shock wave increases, the wave attenuation efficiency of the curved diffusion tunnel also improves, reaching up to 64.4%. When the peak pressure continues to increase, the wave attenuation efficiency of the curved diffusion tunnel slightly decreases but remains basically unchanged. The wave attenuation efficiency of the curved diffusion tunnel decreases with the increase of the positive pressure duration of the shock wave. When the positive pressure duration is 100 ms, the wave attenuation efficiency drops to 25.4%. However, as the positive pressure duration further increases, the wave attenuation efficiency of the curved diffusion tunnel remains almost unchanged.

Key word: curved tunnel; curved diffusion tunnel; shock wave; propagation law; attenuation efficiency