

文章编号:1006-9941(XXXX)XX-0001-12

多级扩散室坑道内爆炸冲击波的衰减特性数值模拟研究

陆 邱^{1,2}, 彭 永², 王子国¹, 程 浩², 李翔宇², 李志斌²

(1. 青岛理工大学土木工程学院, 青岛 266520; 2. 国防科技大学理学院, 长沙 410003)

摘要: 为高效衰减坑道内爆炸冲击波强度,提出了在坑道内设置连续多个扩散室的防护设计思想。基于数值仿真方法,系统探讨了多级扩散室结构参数对消波效率的影响规律,考察了冲击波压力为2~11 MPa、正压时长为18.25~1000 ms在含单/双/三级扩散室坑道内的传播衰减特征。研究表明:扩散室数量的增加可有效提升坑道的消波效率,冲击波经过三级扩散室坑道后的压力峰值比经过相同长度无扩散室直坑道的压力峰值低81.08%,而扩散室之间的间距对坑道消波效率的影响比较有限;在扩散室总长度相等条件下,相比单个长的扩散室以及二级扩散室,三级扩散室对冲击波的衰减效果最好;相同正压时长下随着冲击波压力的增大,多级扩散室坑道的消波效率缓慢增强;相同超压峰值条件下,三级扩散室坑道的消波效率随正压时长的增加而大幅降低,但在1000 ms正压时长下仍能保持43.38%的消波效率。

关键词: 多级扩散室;冲击波;传播规律;消波

中图分类号: TJ55;O381

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2025072

0 引言

地下防护工程(如军事工程、城市地铁、公路隧道、人防设施)在国家安全与公共安全中的战略地位日益凸显^[1-4],如何高效衰减爆炸冲击波的强度,有效保护工程内部人员和设备的安全,是工程防护领域长期关注的重要问题。

爆炸冲击波在直坑道中的传播衰减规律得到了广泛的研究。张玉磊等^[5]在方形坑道内开展了爆炸试验,利用试验数据拟合了方形坑道内TNT爆炸冲击波超压峰值计算经验公式,为方形坑道内的爆炸防护设计提供了重要的理论依据。卢红琴等^[6]采用数值模拟方法,研究了直墙圆拱形、矩形、正方形及圆形4种不同截面形状坑道内的爆炸冲击波传播特性,结果表明冲击波在不同形状坑道内的衰减特性呈现出相似性,

其中圆形截面坑道对冲击波超压峰值衰减效果最明显。纪玉国团队^[7-8]则聚焦于温压炸药在直墙圆拱形坑道中的爆炸场景,针对口外、堵口及口内3种典型工况,开展了详尽的冲击波传播特性实验研究,基于口内爆炸实验数据建立了冲击波超压峰值的经验计算公式。杨科之等^[9]针对拱形坑道内化爆冲击波的传播规律开展研究,基于实验数据建立了直坑道场景下冲击波超压峰值的计算经验公式。此外,Liu等^[10]通过爆炸试验与数值模拟相结合的方法,深入研究了海拔高度对冲击波在隧道内传播的影响,结果表明相同当量相同距离处4500 m海拔隧道内冲击波超压峰值相比200 m海拔隧道内的超压峰值低10%左右。Li等^[11]设计了3种不同内壁直线型坑道,对比研究了波纹钢衬砌坑道中冲击波的传播规律。结果表明,波纹钢衬砌提高了坑道中冲击波的衰减效率。

在坑道内设置扩散室是降低爆炸冲击波强度的手段之一,其通过流场突变引发能量耗散实现冲击波衰减。胡宗民等^[12]聚焦于激波在带有扩散室的坑道中的传播过程以及消波效率进行了数值分析,结果表明不同马赫数入射激波的消波效率在同一扩散室坑道中相似,扩散室几何尺寸对消波效率作用明显。Zhou等^[13]基于激波管实验和数值仿真,针对冲击波在不同

收稿日期:2025-04-19;修回日期:2025-05-10

网络出版日期:2025-06-24

基金项目:国家自然科学基金(12372344)

作者简介:陆邱(2001-),男,硕士研究生,主要从事工程防护研究。e-mail:3175455972@qq.com

通信联系人:彭永(1989-),男,副教授,主要从事武器效应和工程防护研究。e-mail:pengy116@163.com

引用本文:陆邱,彭永,王子国,等.多级扩散室坑道内爆炸冲击波的衰减特性数值模拟研究[J].含能材料,DOI:10.11943/CJEM2025072.

LU Qiu, PENG Yong, WANG Zi-guo, et al. Numerical Simulation Study of the Attenuation Characteristics of Blast Shock Waves in Multi-Level Diffusion Tunnels[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), DOI:10.11943/CJEM2025072.

尺寸矩形扩散室管道中的传播特性展开研究,指出合理的扩散室尺寸对冲击波衰减作用明显,不合理的扩散室尺寸反而对冲击波有增强作用。余雯君等^[14]对爆炸冲击波在变截面坑道中的传播规律进行了数值研究,根据模拟结果拟合了冲击波在扩散室内的传播衰减计算公式。Shin等^[15]通过数值模拟研究了扩散室尺寸对坑道消波效率的影响,结果表明当扩散室的长宽比大于1时,能够有效衰减冲击波强度,衰减幅度可达47%,随着扩散室长宽比的增大而扩散室高度不变的情况下,消波效率可进一步提升但幅度有限,冲击波衰减效率最大达52%。随着武器的不断升级,其爆炸产生的冲击波峰值超压更大、正压持续时间更长,设置单个扩散室已无法满足现在工程的防护要求^[16]。

鉴于此,本研究提出了在坑道内设置连续多个扩散室的防护设计思想,并基于数值仿真方法系统探讨了多级扩散室结构参数对消波效率的影响规律,针对不同持时、不同强度冲击波在多级扩散室坑道内的传播和衰减开展了研究,得到多级扩散室在特定冲击波强度条件下的消波能力,旨在为具备抗高强度、长持续时间冲击波防护能力的新型扩散室设计提供设计依据。

1 数值仿真模型构建

1.1 CESE数值方法及其验证

1.1.1 CESE数值方法参数设置

基于LS-DYNA中的守恒元和解元(CESE)算法,构建爆炸冲击波在坑道中的传播衰减计算模型,研究扩散室对爆炸冲击波压力衰减的作用。CESE方法通过时空协同的离散策略,将守恒律方程的积分形式在非结构网格的守恒元(CE)中严格满足,同时在求解元(SE)中构造时空高阶多项式逼近物理量分布,有效抑制了传统有限体积法中由通量重构引入的数值耗散^[17]。在CESE算法中,只需建立冲击波传播的空气域,计算时将冲击波压力荷载加载在入射面上,无需对TNT进行建模,提高了计算效率,是研究扩散室对爆炸冲击波传播与衰减影响的理想方法。

数值模拟模型的边界条件定义如下:坑道四周通过关键字“CESE_BOUNDARY_SOLID_WALL_SET”设置为刚性固壁,输入冲击波通过关键字“CESE_BOUNDARY_PRESCRIBED_SET”预设三角波压力曲线,坑道出口端部通过“CESE_BOUNDARY_NON_

REFLECTIVE_SET”设置为无反射边界。空气使用理想气体参数建模,初始环境压力设置为标准大气压。空气材料参数如表1所示。

表1 空气材料参数

Table 1 Material parameter values for air

*CESE_MAT_GAS		*CESE_EOS_IDEAL_GAS		
C_1	C_2	P_r	C_v	C_p
1.458e-06	110.4	0.72	7.135e-06	1.002e-05

Note: C_1 is the first coefficient in the Sutherland viscosity formula. C_2 is the second coefficient in the Sutherland viscosity formula. P_r is the Prandtl number (used to determine the thermal conductivity). C_v is the specific heat at constant volume. C_p is the specific heat at constant pressure.

1.1.2 数值方法验证

为验证坑道内冲击波传播数值仿真模型的准确性,对张玉磊等^[5]开展的方形坑道内爆炸冲击波传播规律实验进行数值仿真,其中实验坑道为长直坑道,截面尺寸为1.2 m×1.8 m,坑道长60 m。爆炸实验所用TNT当量为1.00, 3.25 kg和10.28 kg。以实验中坑道内距离爆心16 m处的爆炸冲击波压力曲线作为数值模拟初始荷载输入,将数值模拟获得的20, 28 m和36 m处冲击波超压峰值与文献中对应位置实测数据对比,验证数值模拟的准确性。图1给出了数值仿真结果与实验数据的对比,可以看出:在3.25 kg和10.28 kg TNT当量爆炸工况下,冲击波超压峰值在20, 28 m和36 m处3个测点处的误差均在10%以内,最大误差为7.10%,可认为本数值算法精度满足要求。

1.2 多级扩散室数值仿真模型

1.2.1 模型建立

为高效衰减坑道内爆炸冲击波强度,本研究提出了在坑道内设置连续多个扩散室的防护设计思想,为探讨单/双/三级扩散室坑道对冲击波超压衰减效率的影响,以Zhao等^[18]研究中的坑道尺寸作为基准,设计并建立如图2所示的多级扩散坑道模型。图2a中所示为无扩散室的对比坑道,坑道截面宽3.5 m、高5.0 m。图2b中所示为含扩散室坑道,扩散室宽度为10 m约为坑道宽度的3倍,长宽比为1.0,高度为7 m。单个扩散室的设计参数参考了Shin等^[15]研究成果,以确保设计的合理性和科学性。

针对多级扩散室构型,本研究在单扩散室基础上构建了两种模型:图2c为双扩散室坑道模型,扩散室间距 $L=1.0 d, 2.0 d, 3.0 d$ (d 为扩散室长度)。三级扩散室坑道(图2d)采用等间距布置方式,相邻扩散室间距 $L=1.0 d, 2.0 d, 3.0 d$,图中所示 $L=1.0 d$ 。

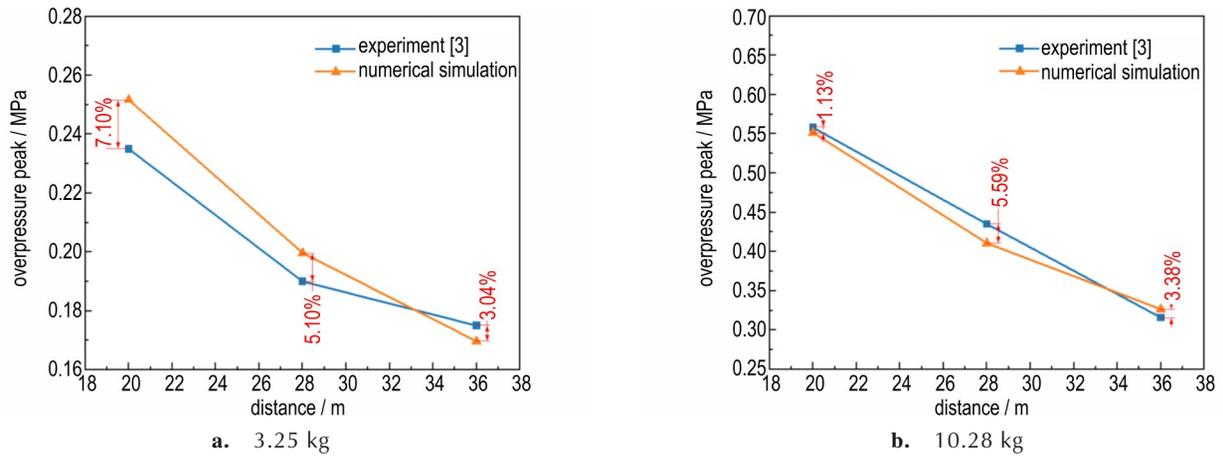


图1 数值模拟结果可靠性分析

Fig.1 Reliability analysis of numerical simulation results

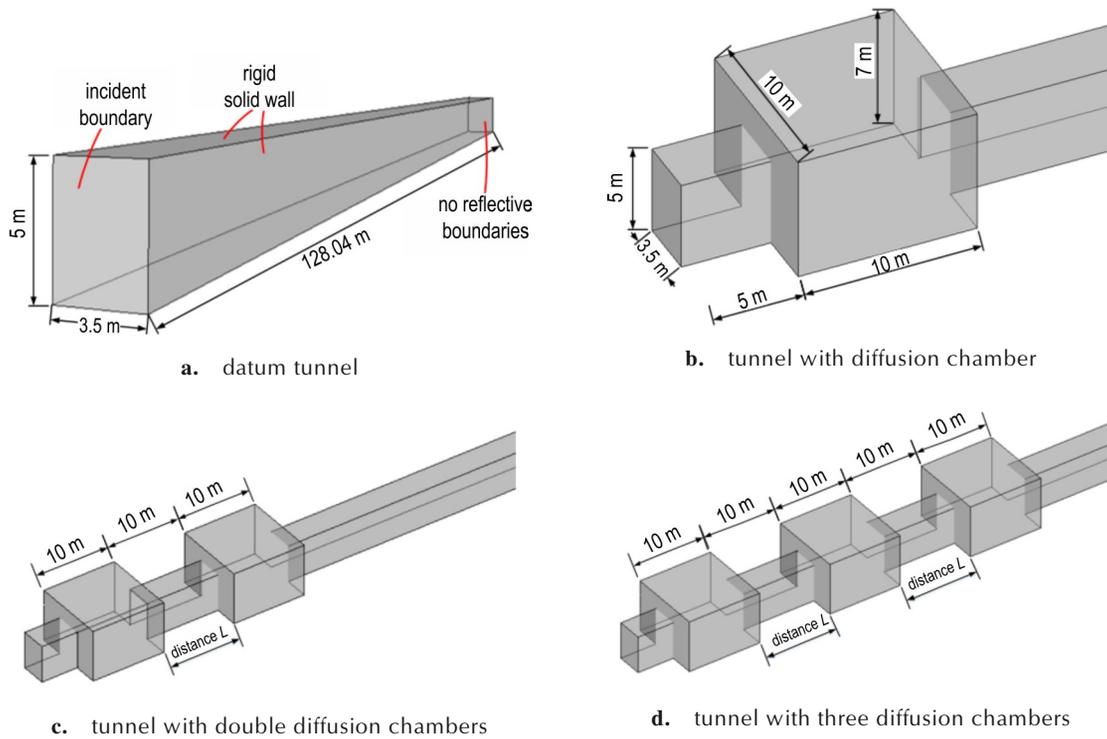


图2 多级扩散室坑道以及基准直坑道模型

Fig.2 Multi-stage diffusion chamber pit and reference straight pit model

1.2.2 网格敏感性分析

1000 kg TNT 爆炸荷载是地下隧道、矿井等基础设施抗爆安全评估中的通用荷载条件^[19-23]。由于冲击波传播数值计算模型对于网格尺寸的敏感性较强,以 1000 kg TNT 在坑道口部爆炸作为基本工况展开网格敏感性分析。依据杨科之^[9]超压峰值经验公式(式(1)),张玉磊等^[24]正压作用时间公式(式(2)),可计算得到 15 m 处的峰值压力 8 MPa、正压作用时间 18.25 ms,以此

三角波形冲击波荷载作为加载曲线,施加到前述无扩散室直坑道仿真模型的输入端(图 2a),开展数值模型网格敏感性分析。

冲击波超压峰值 ΔP_m :

$$\Delta P_m = 0.1692\left(\frac{m}{Sx}\right)^{1/3} + 0.0269\left(\frac{m}{Sx}\right)^{2/3} + 2.031\frac{m}{Sx} \quad (1)$$

式中, m 为坑道内爆炸的炸药质量, S 为坑道等效截面积, x 为坑道内爆心距。

冲击波正压时长 t^+ :

$$t^* = 1.49m^{1/3} x^{1/2} \quad (2)$$

经过前期大量试算,选取网格尺寸为10、20、40 cm进行网格敏感性分析,结果如图3所示,可以看出:在峰值压力8 MPa、正压作用时间18.25 ms的三角波形冲击波荷载作用下,网格尺寸为10 cm与20 cm的各

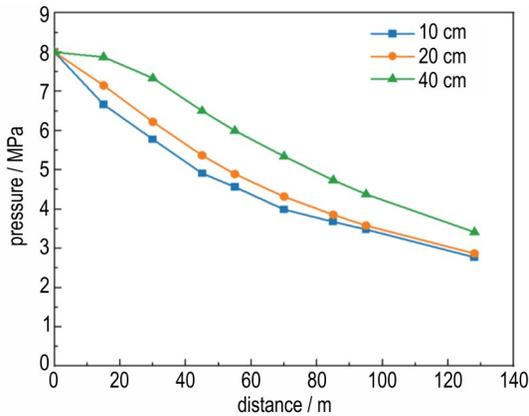


图3 网格尺寸对冲击波压力衰减的影响

Fig.3 Effect of grid size on shock wave pressure attenuation

测点冲击波压力峰值相对误差较小,即当网格尺寸小于20 cm时,对冲击波压力衰减结果的影响较小,综合考虑计算效率和精度,选定为20 cm作为后续研究的网格尺寸。

1.3 冲击波在含扩散室坑道内传播时的平面波形成位置

冲击波经过扩散室后流场发生突变,需在横截面无变化的直坑道内传播一段距离才能形成平面波,形成平面波后才便于量化消波效率。为确定含扩散室坑道中平面冲击波的形成位置,建立如图4所示含扩散室的坑道,在扩散室后预留坑道7倍等效截面直径,即 $7D$ ($D=4.72$ m,由 3.5 m \times 5.0 m矩形截面换算获得)的坑道长度,分别在距离扩散室出口 $4D$ (18.88 m)、 $5D$ (23.60 m)、 $6D$ (28.32 m)、 $7D$ (33.04 m)处设置a、b、c、d 4个监测截面,其中在截面上布置4个超压测点,通过计算同一平面处4个超压测点的相对误差,确定冲击波出扩散室后平面冲击波形成位置。

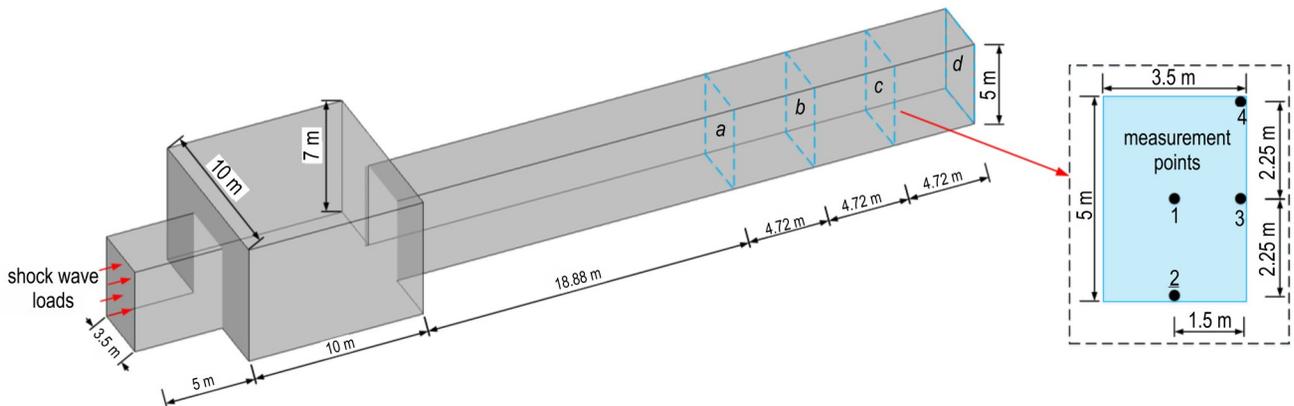


图4 截面监测位置与同截面测点布置

Fig.4 Monitoring locations of the cross-section and arrangement of measurement points at the same cross-section

在峰值压力8 MPa、正压作用时间18.25 ms的三角波形冲击波荷载作用下,数值模拟结果表明:距离扩散室出口18.88 m的a截面相对误差达11.54%,表明近场区存在冲击波扰动;b、c截面误差分别为3.83%、5.53%,符合冲击波重构过渡期的特征;d截面误差降至1.61%(图5),即距离扩散室出口 $7D$ 位置满足平面波稳定条件。据此确立距离扩散室出口 $7D$ (33.04 m)为特征截面,用于确定多级扩散室的消波效率。

图6为坑道测点布置图,沿冲击波传播方向,在坑道截面中心每隔一定距离设置超压测点,量化分析冲击波的衰减,以三扩散室且相邻扩散室间隔 $L=3d$ 为例。基于图5测点位置标定,本研究针对超压的主要监测位置位于测点9处,从扩散室出口至测点9间隔

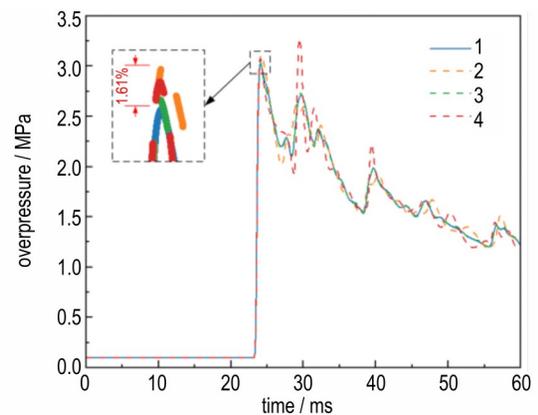


图5 距离扩散室出口33.04 m的d截面各测点超压对比

Fig.5 Comparison of overpressure at each measurement point of d-section 33.04 m away from the outlet of the diffusion chamber

为7D(33.04 m),足以形成较稳定的平面波超压。测点1~8的布置主要是为了观察坑道内不同位置处冲击波压力的动态演变特征。为方便对比,其他类型坑道中测点位置与图6中测点布置相同。

为精确量化含扩散室坑道对冲击波的衰减效率的影响,以无扩散室坑道内相同传播距离上的冲击波超压峰值作为参照基准,定义含扩散室坑道的消波效

率为:

$$\alpha = \frac{(P_0 - P)}{P_0} \quad (3)$$

式中, P_0 为无扩散室坑道内测点9处的冲击波超压峰值,MPa; P 为经过含扩散室坑道后测点9处的冲击波超压峰值,MPa。消波效率本质上就是含扩散室坑道相对于无扩散室坑道的冲击波衰减率。

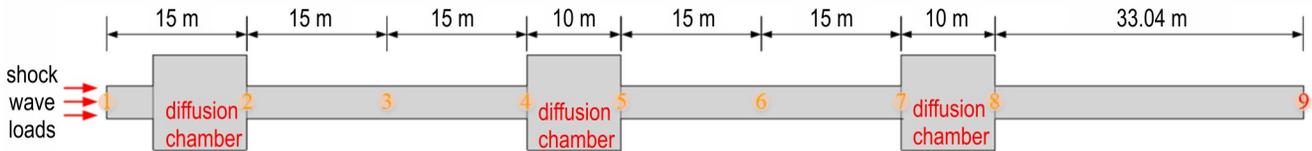


图6 测点示意图

Fig.6 Schematic diagram of measurement points

2 多级扩散室结构参数对冲击波衰减特性的影响规律

为探讨多级扩散室结构对冲击波衰减特性的影响规律,将峰值压力8 MPa、正压作用时间18.25 ms的三角波形冲击波荷载作为加载曲线,施加到前述图2所示不同坑道模型中,重点对比各模型中距离加载面128.04 m处测点(即前述测点9)的超压峰值,系统考察结构参数对冲击波传播的影响规律。

2.1 冲击波在扩散室内的传播衰减过程

图7展示了冲击波在单扩散室坑道结构中的传播演化过程。当平面冲击波进入扩散室后,近壁面传播的冲击波在结构转角处发生明显衍射效应,形成向空间扩散的涡旋(图7a),该现象在坑道底面与侧面均呈现明显特征。衍射冲击波随后与扩散室侧壁及顶面发生反射作用,而未受影响的冲击波主体继续沿原方向传播(图7b)。

在冲击波前沿穿越扩散室出口进入后续坑道区域时,部分冲击波与出口端面发生碰撞反射,导致扩散室结构表现出显著的“拦截”效应(图7c)。当冲击波传出扩散室在坑道中继续传播的同时,扩散室内部残留的冲击波仍持续进行反射与衍射过程。经特定距离传播后,传出扩散室的冲击波逐渐形成较稳定的平面波。

图8展示了冲击波经过单扩散室坑道及无扩散室直坑道时,不同距离测点超压峰值的对比曲线。分析表明,相较于无扩散室坑道,冲击波进入扩散室时截面突变和在扩散室内部经历多次反射、衍射形成复杂的波系相互作用,导致冲击波经过扩散室时,测点超压峰值显著降低;随后,坑道内冲击波超压演变趋势与无扩散室情形趋于一致。结果显示工况下冲击波经过单扩散室坑道后的测点9处压力峰值比在无扩散室坑道测点9处的压力峰值低48.01%,即单扩散室消波效率达到48.01%。

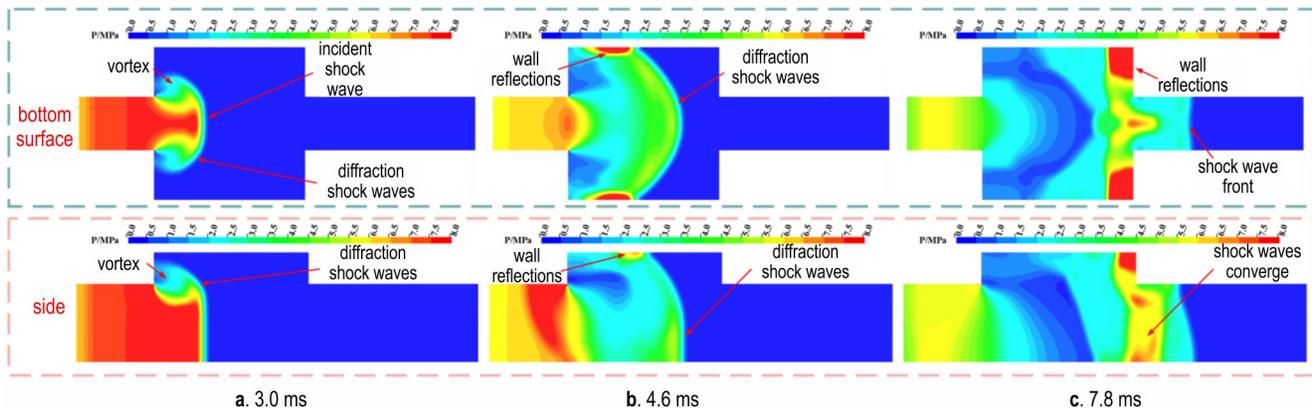


图7 冲击波在扩散室内传播过程

Fig.7 Shock wave propagation in the diffusion chamber

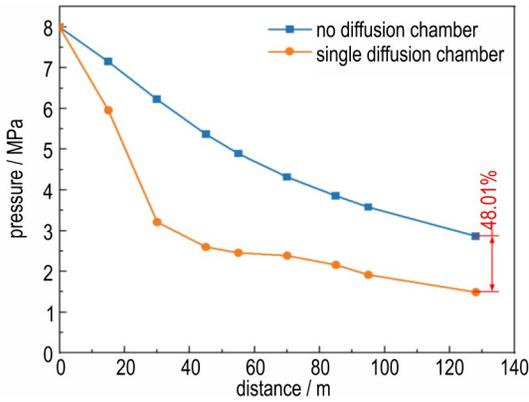


图8 单扩散室坑道与直坑道超压峰值对比
 Fig.8 Comparison of the peak overpressure of a single diffusion chamber pit and a straight pit

2.2 扩散室间距对冲击波衰减效率的影响分析

图9所示为含两个同尺寸扩散室的坑道, 两扩散室间距 L 分别为 $1.0 d$ 、 $2.0 d$ 及 $3.0 d$ (其中 $d=10 m$ 为扩散室长度) 时, 冲击波衰减特性的对比分析。结果表明: 在仅调整两扩散室间距的条件下, 冲击波衰减率的变化幅度非常有限, 但呈现出随间距增大而稍有递增的趋势。当两扩散室间距为 $L=30 m$ 时, 冲击波衰减率达到 $68.26%$, 但相较于间距 $L=10 m$ 时的衰减率, 仅提升了 $1.67%$ 。

图10所示为含三个相同尺寸扩散室坑道的消波效率与扩散室间距 L 之间的关系, 其中相邻扩散室采用等间距布置方式, 扩散室间距 L 分别设置为 $1.0 d$ 、 $2.0 d$ 及 $3.0 d$ (其中 $d=10 m$ 为扩散室长度) 时。分析表明: 在仅调整扩散室间距的条件下, 冲击波衰减效率随间距的增大而逐渐提升。当间距增至 $L=30 m$ 时, 冲击波衰减率达到 $81.08%$, 相较于间距 $L=10 m$ 时的衰减率, 提高了 $8.37%$ 。

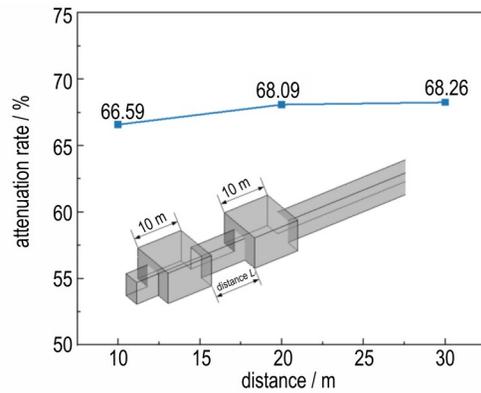


图9 双扩散室不同间距超压峰值衰减
 Fig.9 Attenuation of overpressure peaks at different spacings in the double diffusion chambers

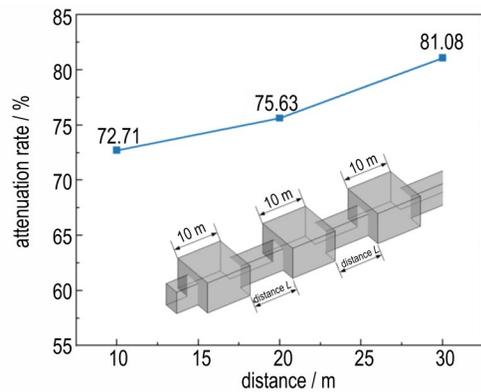


图10 三扩散室不同间距超压峰值衰减
 Fig.10 Attenuation of the peak overpressure at different spacings in the three diffusion chambers

2.3 扩散室数量对冲击波的衰减效率对比分析

图11展示了冲击波在具有三个扩散室(相邻扩散室间距设定为 $30 m$) 中的传播演化过程, 由压力云图可知: 冲击波沿通道持续传播过程中, 进入扩散室后发生反射与衍射的叠加效应; 在扩散室出口处, 冲击波传

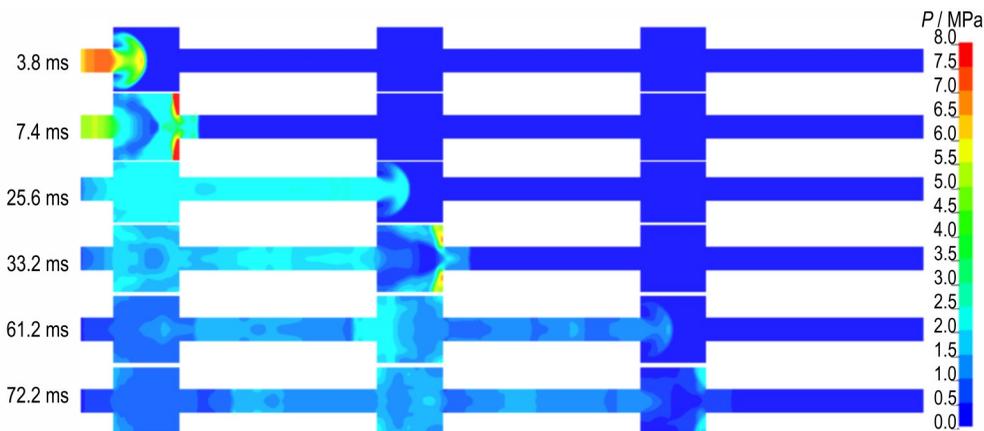


图11 三扩散室中冲击波传播
 Fig.11 Shock wave propagation in a three-diffusion chamber

播路径受到空间结构制约,呈现显著的“拦截”效应;经过第三级扩散室后,相对于初始输入冲击波,体现出明显的衰减特征。

图 12 展示了不同扩散室配置下冲击波超压衰减特性的对比分析。结果表明:随着扩散室数量的增加,冲击波能量通过空间内的多次反射与衍射等作用实现梯度衰减,使冲击波衰减效率呈递增趋势,但增幅逐渐降低。当扩散室数量从单室增至双室时,冲击波衰减率最大提升 20.25%;而从双室增至三室时,该增幅下降至 12.82%。这一现象表明,通过单纯增加扩散室数量以提升冲击波衰减效率存在阈值效应,需在扩散室建设成本与衰减效能之间寻求优化平衡。

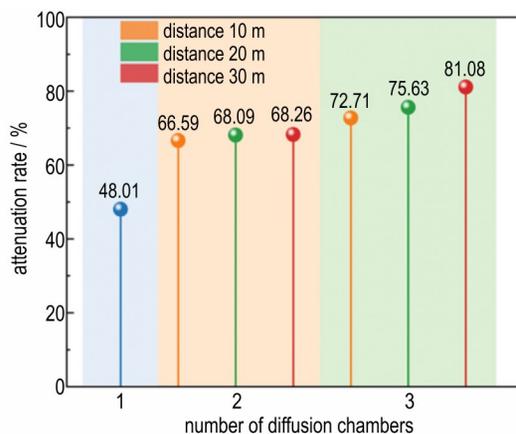


图 12 不同扩散室数量的冲击波超压衰减对比

Fig.12 Comparison of shock wave overpressure attenuation with different number of diffusion chambers

进一步对比分析显示,在扩散室数量相同的情况下,其间距对衰减效率影响有限。当扩散室间距由 1 d (双扩散室坑道)调整为 3 d 时,冲击波衰减效率仅提升 1.67%;在三扩散室坑道下则提高 8.37%的衰减率。因此,在扩散室数量确定的前提下,优化扩散室间距设计可提升冲击波防护效能的。

2.4 扩散室布置形式对冲击波衰减效率的影响

为探究扩散室总长度恒定条件下,不同工程布置形式对冲击波衰减效率的影响,本节构建了如图 13 所示的五种不同形式扩散室坑道:单扩散室坑道(扩散室长度 30 m,坑道断面尺寸 10 m \times 7 m)、10 m+20 m 串联组合坑道、15 m+15 m 对称组合坑道、20 m+10 m 逆序组合坑道及 10 m+10 m+10 m 三段式组合坑道,各相邻扩散室间距统一设定为 30 m。模拟加载采用峰值压力 8 MPa、正压作用时长 18.25 ms 的三角波形冲击波荷载,以无扩散室坑道下的冲击波压力峰值作为基准参照,分析不同组合形式对冲击波衰减效率的

影响规律。

图 14 展示了在扩散室总长度恒定条件下,不同工程布置形式对冲击波衰减效能的影响。分析结果表明:在给定的加载工况下,在单扩散室坑道中冲击波能量在单一空间内无法通过多级反射实现有效耗散,导致其冲击波衰减率最低,仅为 65.43%;而 10 m+20 m 串联组合坑道、15 m+15 m 对称组合坑道及 20 m+10 m 逆序组合坑道中冲击波经首级扩散室反射、衍射等物理过程作用后,转化为次级波源并进入次级扩散室,在后续空间中重复经历相似能量耗散机制,此过程中,冲击波能量通过两级扩散室内多次反射、衍射的协同作用,实现梯度式衰减使得冲击波衰减效率相近,范围在 73.52% 至 74.58% 之间,此区间差异主要源于不同组合的扩散室几何特征对冲击波作用的影响;10 m+10 m+10 m 三段式组合坑道形成梯度耗散场,实现冲击波能量的阶梯式衰减,使其冲击波衰减率最高,达 81.08%。此结果证实,在扩散室总长度恒定条件下,合理优化工程布置形式可有效提升冲击波衰减效能,其中三段式组合坑道布局表现出最优效果。

3 不同特征冲击波在多级扩散室内的传播规律

3.1 冲击波压力对衰减效率的影响

为探究不同冲击波压力对衰减效率的影响,本节选取前文所述消波效率最佳的三扩散室坑道(扩散室间距设定为 3 d)作为目标研究坑道。施加荷载为峰值压力依次取 2, 5, 8, 11 MPa 的三角波形冲击波,其正压作用时长恒定保持 18.25 ms。研究以无扩散室坑道内的冲击波压力峰值作为基准参照,分析冲击波压力参数对衰减效率的影响规律。

图 15 对比分析了在冲击波正压作用时长相同(18.25 ms)的条件下,无扩散室结构坑道与三扩散室结构坑道中,不同输入压力对冲击波传播衰减特性的影响规律。结果表明:对于无扩散室坑道结构,其冲击波衰减趋势随输入压力的增大未呈现显著差异,各压力下衰减曲线形态基本一致;三扩散室坑道各压力条件下曲线虽总体趋势相近,但在距荷载输入面 55 m 处均出现显著突变点,且随着冲击波输入压力的增大,冲击波衰减幅度呈现增强特征。

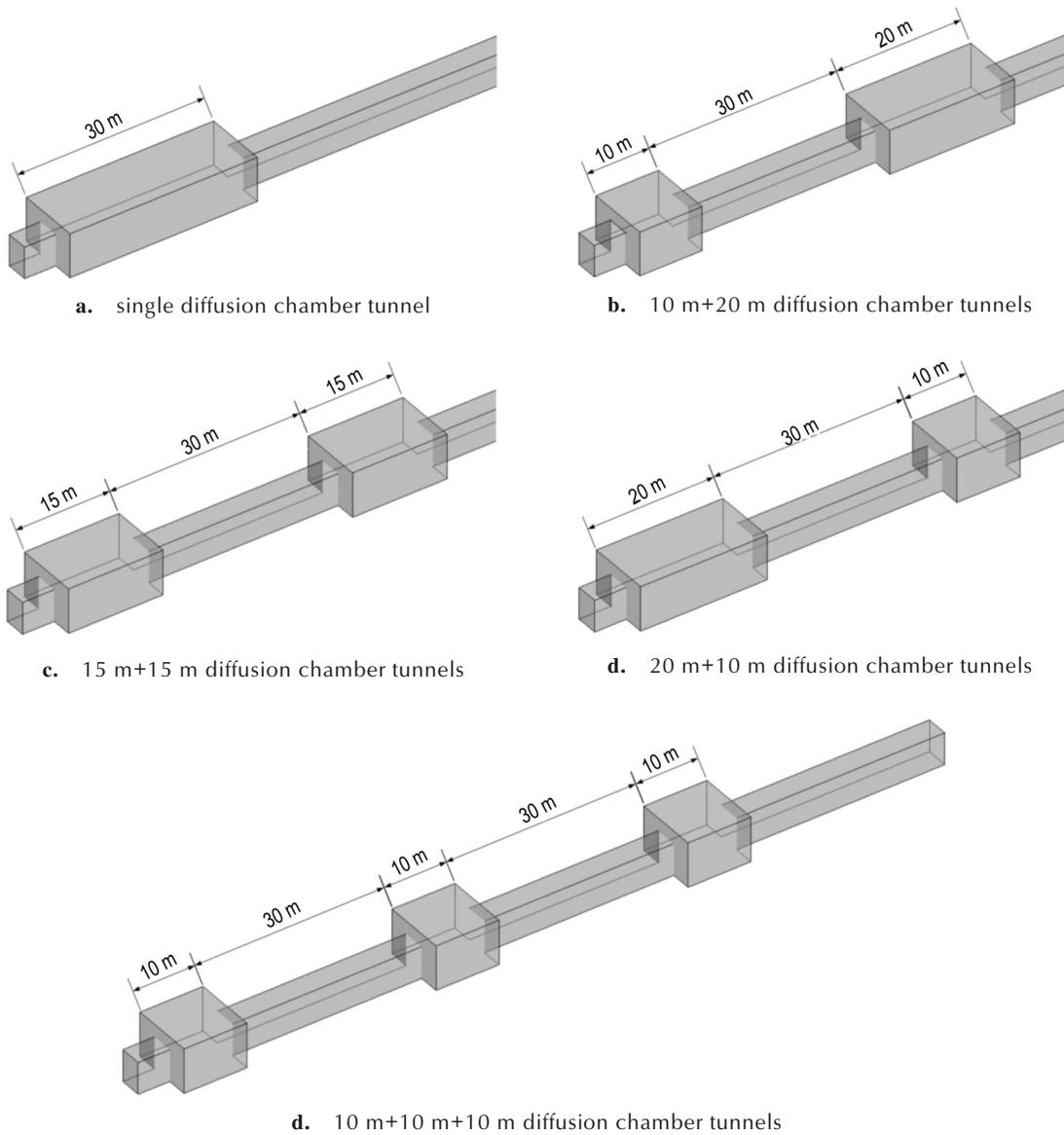


图 13 不同扩散室组合

Fig.13 Combination of different diffusion chambers

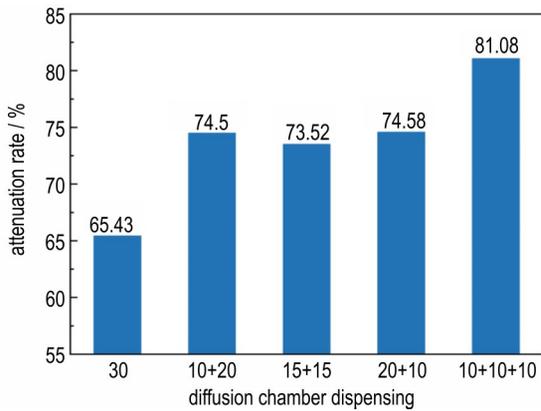


图 14 不同扩散室组合对衰减效率的影响

Fig.14 Effect of different diffusion chamber combinations on attenuation efficiency

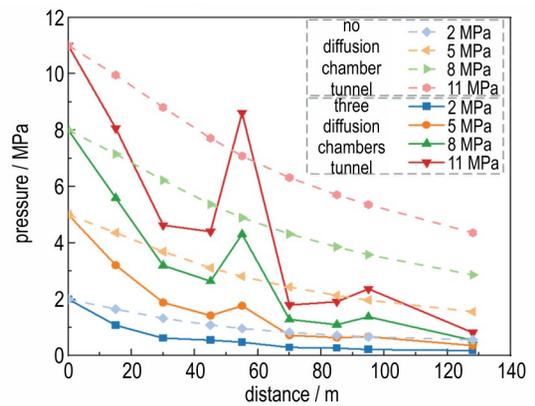


图 15 不同输入冲击波压力下的传播衰减

Fig.15 Propagation attenuation under different input shock wave pressures

图 16 展示了不同冲击波压力条件下的衰减效率对比。结果显示：冲击波衰减率与初始压力呈非线性正相关关系，且随压力梯度升高，其增幅呈现递减趋势。具体表现为：当冲击波压力从 2 MPa 增至 5 MPa 时，衰减效率增加 9.7%；而当压力从 8 MPa 增至 11 MPa 时，衰减效率仅相差 0.2%。该现象表明，冲击波衰减

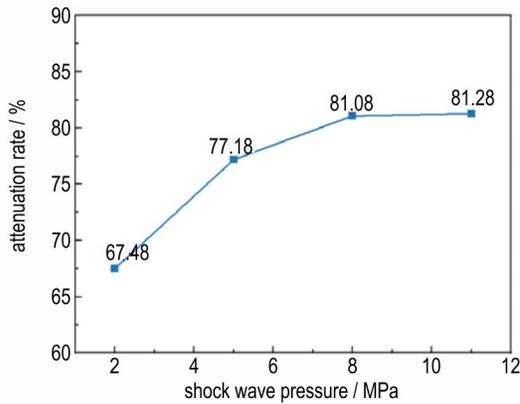


图 16 不同输入冲击波压力下的消波效率变化情况

Fig.16 Variation of wave damping efficiency under different input shock wave pressures

机制存在显著的压力阈值效应，即当压力超过特定阈值后，衰减率对压力变化的敏感性显著降低。

3.2 冲击波正压时间对衰减效率的影响

为探究不同冲击波正压时长对冲击波衰减效率的影响，本节同样选取三扩散室坑道(扩散室间距设定为 3 d)作为目标研究坑道。采用峰值压力 8 MPa 的三角波形冲击波作为加载条件，通过控制正压时长分别为 18.25, 100, 500 ms 及 1000 ms 开展参数化分析。研究以无扩散室工况下的冲击波压力峰值作为基准参照，分析冲击波正压时长参数对衰减效率的影响规律。

图 17 呈现了初始冲击波压力恒定(8 MPa)条件下，不同正压持续时长下，冲击波经过三级扩散室坑道与无扩散室坑道到达坑道出口时的压力云图对比。由图可知：当正压时长分别为 100.0 ms 和 1000.0 ms 时，相较于无扩散室坑道，三级扩散室内观察到冲击波在扩散室中的反射与衍射效应，此过程有效促进了冲击波能量的逐级耗散，且各级扩散室均表现出对冲击波超压的“梯级拦截”特征。

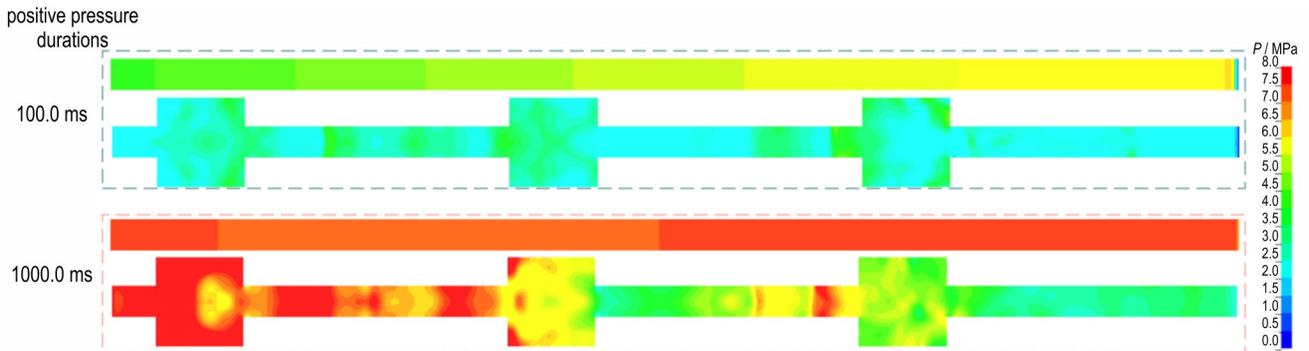


图 17 相同压力峰值不同正压时长初始冲击波经过坑道后的压力云图

Fig.17 Pressure contours of the initial shock wave after passing through the tunnel with the same pressure peak and different positive pressure durations

图 18 展示了不同冲击波正压时长条件下衰减效率的对比。分析表明：随着冲击波正压时长的增加，冲击波衰减率逐渐减小，且降幅随正压时长增长逐渐趋于平稳。具体而言，当冲击波正压时长由 18.25 ms 延长至 100 ms 时，衰减率从 81.08% 降至 56.39%，降幅达 24.69%；而当正压时长进一步延长至 500 ms 和 1000 ms 时，衰减率仅从 46.81% 降至 43.38%，降幅仅为 3.43%。该结果揭示：三扩散室坑道在应对高正压时长冲击波荷载时，仍可维持 40% 以上的有效衰减效能，验证了其作为冲击波防护结构的工程适用性。

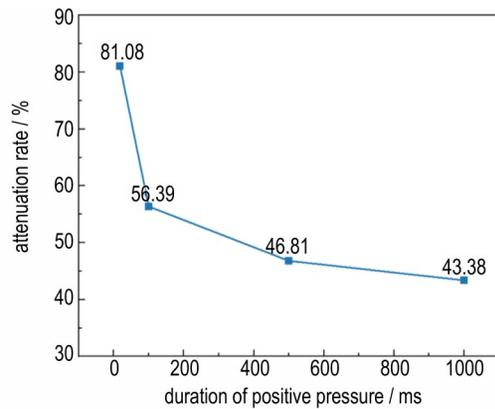


图 18 不同输入冲击波正压时长的衰减

Fig.18 Attenuation of positive pressure duration of different input shock waves

4 结论

针对保障坑道内爆炸冲击波防护措施的科学性与有效性, 基于坑道内设置连续多个扩散室的防护设计思想, 鉴于单扩散室消波效果不稳定、特定尺寸下可能增强出口冲击波而削弱防护效能的问题, 本研究设计了多级扩散室坑道, 并基于数值模拟方法系统分析了不同正压时长与不同强度的冲击波在多级扩散室内的传播特性及衰减规律, 得到多级扩散室在特定条件下的消波能力, 主要结论如下:

(1) 随着扩散室级数的增加, 冲击波衰减效能逐渐提升, 三扩散室坑道衰减率达 81.08%; 在扩散室数量确定条件下, 扩散室之间的间距对冲击波衰减效率的影响比较有限, 但增大多级扩散室之间的间距可实现衰减效率的进一步提高。

(2) 在扩散室总长度恒定条件下, 通过工程布局优化可显著提升冲击波衰减效率, 相比单个长扩散室以及二级扩散室, 三级扩散室组合坑道的消波效率分别提高 15.65% 和 6.5%。

(3) 对于具有相同正压作用时间、不同超压峰值的输入冲击波而言, 随着冲击波超压峰值的增大, 多级扩散室坑道的消波效率逐渐增强, 但增幅逐渐减小, 冲击波超压峰值为 11 MPa 时消波效率达 81.28%。

(4) 对于具有相同压力峰值、不同正压作用时间的输入冲击波而言, 三级扩散室坑道的消波效率随正压时长的增加而大幅降低, 但在正压时长为 1000 ms 时, 三扩散室坑道的消波效率仍达 43.38%。

参考文献:

- [1] FELDGUN V R, KOCHETKOV A V, KARINSKI Y S, et al. Internal blast loading in a buried lined tunnel [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2008, 35(3): 172-183.
- [2] GOEL R K, SINGH B, ZHAO J. Underground infrastructures: planning, design, and construction[M]. *butterworth-heinemann*, 2012.
- [3] SADIQUE M R, ZAID M, ALAM M M. Rock tunnel performance under blast loading through finite element analysis[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2022, 40(1): 35-56.
- [4] ZAID M, REHAN Sadique M. A simple approximate simulation using coupled Eulerian-Lagrangian (CEL) simulation in investigating effects of internal blast in rock tunnel [J]. *Indian Geotechnical Journal*, 2021, 51(5): 1038-1055.
- [5] 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(1): 46-51.
ZHANG Yu-lei, WANG Sheng-qiang, YUAN Jian-fei, et al. Experimental study on the propagation law of blast waves in a square tunnel [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Han-neng Cailiao)*, 2020, 28(1): 46-51.
- [6] 卢红琴, 刘伟庆. 坑道截面形状对化爆冲击波传播规律的影响程度分析[J]. *南京工业大学学报(自然科学版)*, 2009, 31(6): 41-44.
LU Hong-qin, LIU Wei-qing. Influence of cross-section shape of tunnel on in-tunnel air blast wave propagation [J]. *Journal of Nanjing Tech University (Natural Science Edition)*, 2009, 31(6): 41-44.
- [7] 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(6): 649-658.
JI Yu-guo, ZHANG Guo-kai, LI Gan, 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(6): 649-658.
- [8] 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(3): 118-132.
JI Yu-guo, ZHANG Guo-kai, LI Gan, et al. Explosion characteristics of thermobaric explosive (TBX) detonated inside a tunnel and the related influential factors [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2024, 44(3): 118-132.
- [9] 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.
- [10] LIU C, LI H, WANG Z, et al. Experimental and numerical simulation of the attenuation effect of blast shock waves in tunnels at different altitudes [J]. *Defence Technology*, 2025, 43: 120-141.
- [11] LI H, WU H, WANG Z, et al. Experimental and numerical simulation of the propagation law of shock waves in corrugated steel-lined tunnels [J]. *Process safety and environmental protection*, 2022, 168: 1019-1030.
- [12] 胡宗民, 张德良, 张嘉华. 激波在带扩容室的变截面管中传播和消波效果的数值分析[J]. *爆炸与冲击*, 2003(03): 200-206.
HU Zong-min, ZHANG De-liang, ZHANG Jia-hua. Numerical analysis on shock wave propagation and attenuation in ducts with expansion chambers [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2003(03): 200-206.
- [13] YAN Z, GUO S, YUAN S, et al. Influence of chamber geometrical parameters on suppressing explosion propagation [J]. *Shock and Vibration*, 2021, 2021(1): 6377887.
- [14] 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(2): 166-173+203.
YU Wen-jun, CHEN Sheng-yun, DENG Shu-xin, et al. Numerical simulation of propagation law of explosion shock wave in variable cross-section channel [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2024, 45(2): 166-173+203.
- [15] 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.
- [16] 苟兵旺, 李芝绒, 闫潇敏, 等. 复杂坑道内温压炸药冲击波效应试验研究[J]. *火工品*, 2014(2): 41-45.
GOU Bing-wang, LI Zhi-rong, YAN Xiao-min, et al. Experi-

- mental study on shock wave effects of thermo-baric explosive in complex tunnel [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2014 (2): 41-45.
- [17] CHANG S C. The method of space-time conservation element and solution element—A new approach for solving the navier-stokes and euler equations [J]. *Journal of computational Physics*, 1995, 119(2): 295-324.
- [18] ZHAO B, CUI C, CHEN J, et al. Numerical simulation about the effect of tunnel expansion chamber on the shock wave attenuation [C]//4th International Conference on Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering. Atlantis Press, 2015: 582-587.
- [19] HAN K C, JANG H D, KIM W B, et al. A study on the damage to a mine drift caused by blast welding [C]//ISRM International Symposium-Asian Rock Mechanics Symposium. ISRM, 2010: ISRM-ARMS6-2010-137.
- [20] KRALIK E J, BARAN M. Numerical analysis of the exterior explosion effects on the buildings with barriers [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 390: 230-234.
- [21] MANDAL J, GOEL M D, AGARWAL A K. Numerical simulation of underwater subway tunnel subjected to internal blast loading [M]//Advances in Engineering Materials, Structures and Systems: Innovations, Mechanics and Applications. CRC Press, 2019: 767-772.
- [22] MUSSA M H, MUTALIB A A, HAMID R, et al. Advanced dynamic response analysis of under-ground tunnel affected by blast ground distance [C]//The 5th International Technical Conference (ITC).(Malaysia. 2020). 2020.
- [23] VAGHEFI M, MOBARAKI B. Evaluation of the effect of explosion on the concrete bridge deck using LS-DYNA [J]. *Int. Rev. Civ. Eng*, 2021, 12: 135.
- [24] 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]. *弹箭与制导学报*, 2016, 36(6): 53-56.
ZHANG Yu-lei, WANG Sheng-qiang, YUAN Jian-fei, 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): 53-56.

Numerical Simulation Study of the Attenuation Characteristics of Blast Shock Waves in Multi-Level Diffusion Tunnels

LU Qiu^{1,2}, PENG Yong², WANG Zi-guo¹, CHENG Hao², LI Xiang-yu², LI Zhi-bin²

(1. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China; 2. College of Sciences, National University of Defense Technology, Changsha 410003, China)

Abstract: In order to attenuate the blast shock wave in the tunnel efficiently, the design idea of setting up multiple continuous diffusion chambers in the tunnel was proposed. Based on the numerical simulation method, the influence of the structural parameters of the multi-stage diffusion chamber on the wave absorption efficiency was systematically discussed, and the propagation attenuation characteristics of the shock wave with a pressure of 2-11 MPa and a positive pressure duration of 18.25-1000 ms in the pit containing single, double/tertiary diffusion chamber were investigated. The results showed that the increase in the number of diffusion chambers can effectively improve the wave dissipation efficiency of the tunnel, and the peak pressure of the shock wave after passing through the three-stage diffusion chamber pit is 81.08% lower than the peak pressure of the straight pit without diffusion chamber with the same length, while the spacing between the diffusion chambers has a limited effect on the wave dissipation efficiency of the tunnel. Under the condition that the total length of the diffusion chamber is equal, the tertiary diffusion chamber has the best attenuation effect on the shock wave compared with a single long diffusion chamber and the secondary diffusion chamber. With the increase of shock wave pressure under the same positive pressure duration, the wave dissipation efficiency of the multi-stage diffusion chamber pit slowly increases. Under the same peak overpressure condition, the wave loss efficiency of the three-stage diffusion chamber pit decreases greatly with the increase of positive pressure time, but it can still maintain a wave loss efficiency of 43.38% when the positive pressure time is 1000 ms.

Key words: multi-stage diffusion chamber; Shock wave; laws of propagation; wave dissipation

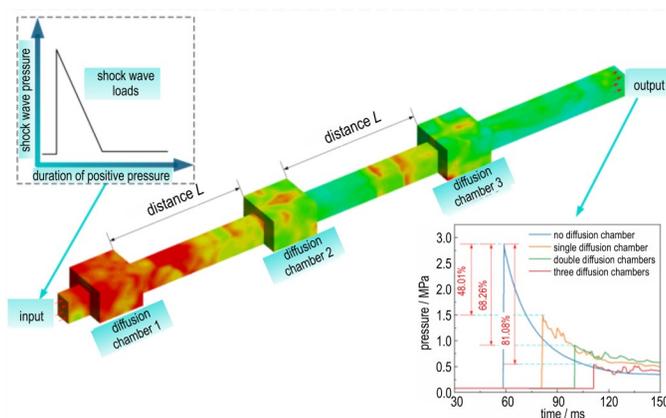
CLC number: TJ55; O381

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2025072

(责编: 高毅)

图文摘要:



This research proposes the concept of establishing multiple diffusion chambers for protective purposes, the influence of the structural parameters of the multi-stage diffusion chamber on the wave dissipation efficiency and the propagation attenuation characteristics of different characteristic shock waves in the tunnel containing the multi-stage diffusion chamber are systematically discussed.