

文章编号:1006-9941(2020)01-0046-06

方形坑道内爆炸冲击波传播规律

张玉磊,王胜强,袁建飞,张俊锋,李尚青

(西安近代化学研究所, 陕西 西安 710065)

摘要: 为研究方形坑道内的爆炸冲击波传播规律,开展了1.00,3.25 kg和10.28 kg三种质量的梯恩梯(TNT)药柱坑道内爆炸试验,记录了不同距离处的冲击波压力曲线,得到了冲击波到达时间、超压峰值、冲量等参量。结果表明,坑道内爆炸冲击波的传播分为三个阶段:自由场球面波传播、一维平面波传播和二者之间过渡阶段;除临近爆心处之外,超压峰值满足立方根比例定律,拟合得到了计算偏差不大于10%的超压峰值计算经验公式,冲量不满足立方根比例定律。

关键词: 坑道;冲击波;立方根比例定律;超压峰值;冲量

中图分类号: TJ55; O381

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2018305

1 引言

随着精确制导武器的发展和日益增多的恐怖袭击,坑道内发生爆炸的可能性越来越大。与无约束爆炸相比,坑道爆炸冲击波传播过程复杂、峰值压力高、持续时间长,对坑道内的人员、设施及坑道结构本体具有极强的杀伤和破坏力。

作为一种常见的爆炸形式,坑道内爆炸一直以来都是研究热点。R W Charles^[1]和C Lunderman^[2]提出了坑道内冲击波超压的计算公式,可计算坑道内部、外部以及口部爆炸时坑道内的空气冲击波峰值超压。美国工程兵水道试验站(WES)的Britt J R^[3]和Welch C R^[4]采用比例模型实验模拟了球形装药在坑道入口正前方爆炸,提出了坑道口外爆炸时坑道内空气冲击波峰值超压在坑道内衰减的计算方法。庞伟宾^[5-6]通过实验建立了坑道口外部、口部及内部爆炸冲击波到达时间的预测公式。杨科之^[7]、刘晶波^[8]、徐利娜^[9]等对长坑道中的化爆流场进行了数值计算,归纳出坑道内冲击波超压和冲量的计算公式。O.Pennetier^[10]开展了地下坑道内冲击波传播规律和波形特性的数值计算和缩比实验

研究,苗朝阳^[11]等开展了不同药量坑道堵口爆炸实验和数值计算,探讨了坑道内爆炸冲击波相似律问题,田诗雅^[12]等通过研究管道中不同点火位置的瓦斯爆炸压力,对管道内冲击波冲量及压力上升速率进行了分析。

综上所述,国内外研究人员已开展了不少坑道内爆炸冲击波传播规律的研究,但对坑道内爆炸冲击波从初始的球面冲击波过渡为近似一维平面冲击波的过程及其规律研究较少,初始入射冲击波与壁面反射冲击波的耦合作用、冲量的传播规律认识还有待深入。为研究不同药量的TNT装药坑道内爆炸冲击波传播规律,本研究开展了1.00,3.25 kg和10.28 kg三种质量的TNT装药坑道内爆炸实验,在前人研究基础上对坑道内爆炸冲击波的发展、多波系耦合作用、冲击波超压、冲量的传播规律及其相似律进行了研究,进而揭示坑道内冲击波传播规律。

2 实验部分

2.1 试剂与仪器

实验样品为1.00,3.25 kg和10.28 kg三种质量的TNT药柱各3发,共9发。TNT为熔铸药柱,长径比约1:1,密度 $1.57 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。以10 g JH-14药柱为传爆药柱,用8号电雷管在药柱上端面中心起爆。

冲击波超压测试选用PCB公司ICP型113B系列通用高频压力传感器,谐振频率大于500 kHz,上升时

收稿日期:2018-10-23;修回日期:2019-01-02

网络出版日期:2019-04-28

作者简介:张玉磊(1987-),男,副研究员,主要从事毁伤评估技术研究。e-mail:kaka-zyl@163.com

引用本文: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 (Hanneng Cailiao), 2020, 28(1):46-51.

间小于 $1 \mu\text{s}$, 配套使用美国 PCB 公司 402A 型信号调理仪; 数据采集仪为德国 HBM 公司的 Nicolet GENESIS 高速数据采集仪, 数据采样频率设置为 1 MHz。经校准计算, 该压力测试系统的压力测量扩展不确定度为 8.7%, 冲量测量扩展不确定度为 9.9%。

2.2 实验过程

实验用坑道为方形截面的钢筋混凝土结构长直坑

道, 坑道截面尺寸为 $1.2 \text{ m} \times 1.8 \text{ m}$, 坑道长 60 m。实验时, 药柱悬挂于距离口部 5 m 的坑道截面几何中心位置处, 质心高度 0.9 m。压力测点布设于坑道一侧壁面, 高 0.9 m, 共计 7 个, 距爆心所在截面的水平距离分别为 2、6、10、16、20、28、36 m, 布设如图 1 所示。压力数据采集仪采用通断式外部触发, 触发线缠绕于药柱。

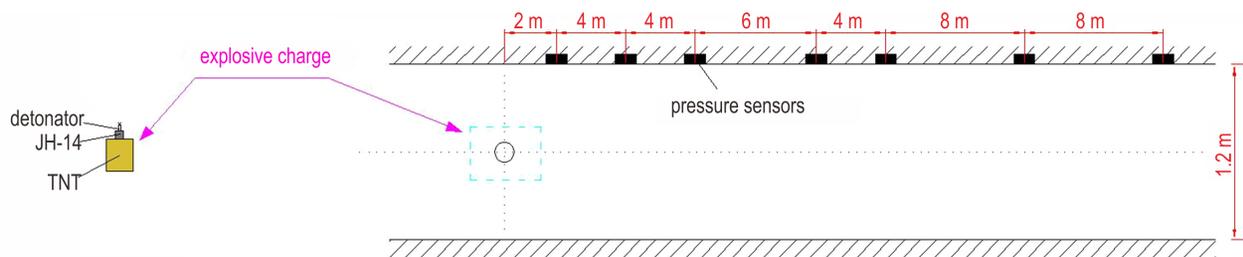


图 1 实验测点布局示意图
Fig.1 Schematic of test section

3 结果与讨论

3.1 冲击波走时分析

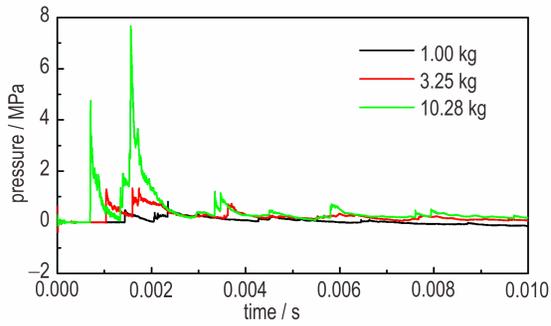
以距离爆心 2、16 m 和 36 m 处测点得到的冲击波压力时程曲线分别为近场、中场和远场的典型冲击波压力曲线, 如图 2 所示。在近场 2 m 处(图 2a), 冲击波超压曲线呈现多峰, 首峰一般非最高峰值, 在中场 16 m (图 2b) 和远场 36 m (图 2c) 处, 冲击波超压曲线均为典型的单峰波, 但 36 m 处的超压曲线较 16 m 处更为光滑。这些现象是坑道内炸药爆炸冲击波的传播规律的表现。爆炸冲击波在坑道内的传播可分为三个阶段。第一阶段, 是炸药起爆后的近似球面冲击波的自由传播过程, 传播规律可用自由场衰减定律描述; 第二阶段, 是冲击波作用于坑道各面发生多次反射、叠加的过渡阶段, 也是坑道内冲击波最难定量描述的过程, 受装药质量及其外形、坑道截面形状等多因素的影响; 第三阶段, 是冲击波阵面整形后形成近似平面波的一维传播过程, 可用平面波衰减定律描述。

从图 2b 和图 2c 可以看出, 在中远场, 冲击波压力衰减到环境压力后继续下降形成负压, 然后缓慢回升, 装药量越大负压峰值越大。其中, 10.28 kg 装药的实测负压峰值已经超过 -0.1 MPa , 已经失去了物理意义。造成此现象的原因可能是压力传感器的热寄生输出。传感器在热作用下, 内部石英晶体的预紧力下降后输出负压, 装药量越大爆炸热效应越显著, 导致非正常负压输出越大, 甚至超过 -0.1 MPa 。因此, 热作用

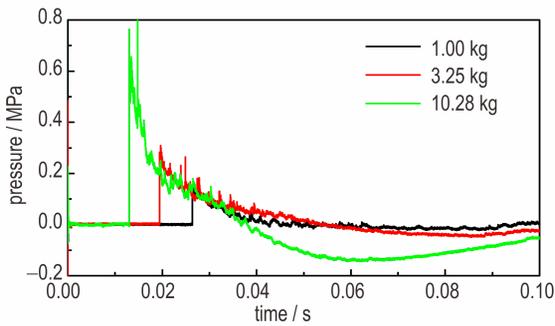
不可忽略的压力测试工况下, 压力传感器需要采取热防护措施, 如涂抹隔热油脂等。

由于坑道内流场的复杂性, 上述三个阶段的时空界限尚不能准确划定, 这也是坑道内爆炸冲击波效应研究需要解决的难题。以图 3 所示的 10.28 kg 装药 2 m 处的压力曲线上升过程为例, 该区域的冲击波传播为自由场传播阶段和过渡阶段。a 峰是自由场入射波在传感器表面的反射压, b 峰是传感器正对壁面的反射波形成的, c 峰是顶和底壁面的反射波形成的。在一定范围内波形具有相似性, 在该测点前的某处, 波形也是四峰结构, 在传播过程中反射波逐步赶上前沿入射冲击波, 最终合成一个压力峰传播至 2 m 处, 形成了图 3 中 d 峰, 其到达测点的时间晚于 2 m 测点处的人射波和反射波。随着爆心距的增加, 各峰的到达时间差逐渐减小, 最终形成单峰波。

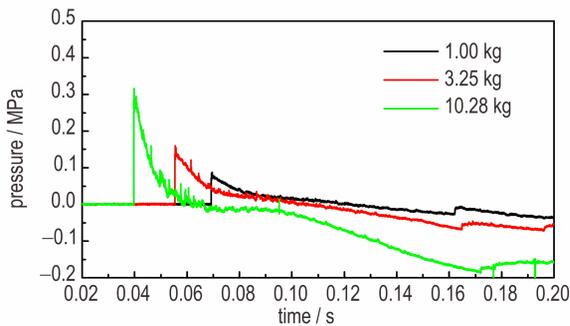
不同测点处的冲击波压力曲线的上升时刻为冲击波压力到达时间, 如表 1 所示。为研究坑道内的冲击波传播速度规律, 根据测点间距和到达时间差, 得到如图 4 所示的不同距离处相邻测点间的平均速度 v 。由表 1 与图 4 可以看出, 装药质量越大, 其在坑道内爆炸形成的冲击波压力越大、传播速度越快, 各测点的冲击波达到时间越短且速度下降越迅速。在自由传播阶段和复杂反射阶段, 冲击波速度下降较为迅速, 在平面波传播阶段, 冲击波速度下降较为缓慢, 近似线性衰减。对于三种质量的装药, 2~6 m 区间段的平均速度较 0~2 m 区间段下降均约 50%, 而 28~36 m 区间段的平均速度较 20~26 m 区间段下降均不足 10%。



a. 2 m



b. 16 m



c. 36 m

图2 三种装药量TNT在近、中、远场的典型冲击波压力曲线波形
Fig. 2 Typical pressure-time curves of TNT charges with three mass at short, medium and long distances

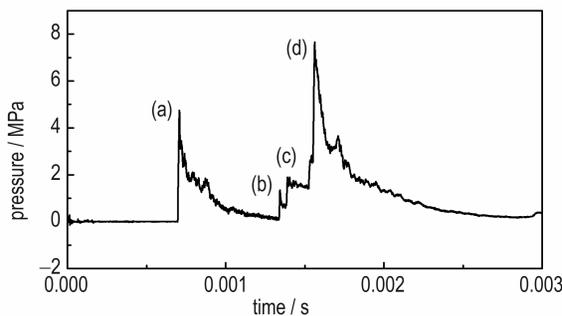


图3 10.28 kg TNT爆炸后2 m处压力曲线局部放大图
Fig.3 Partial enlargement of pressure-time curve of 10.28 kg TNT charge at 2 meters

表1 不同距离处测点的冲击波波阵面到达时间

Table 1 Arrival time of shock wave front at different distances

m_{TNT} /kg	Distance from explosion center /m						
	2	6	10	16	20	28	36
1.00	1.430	7.772	14.855	26.387	34.575	51.588	69.279
3.25	1.030	5.221	10.374	19.402	26.071	40.356	55.431
10.28	0.696	3.434	6.835	12.982	17.664	28.117	39.730

Note: m_{TNT} is the mass of TNT.

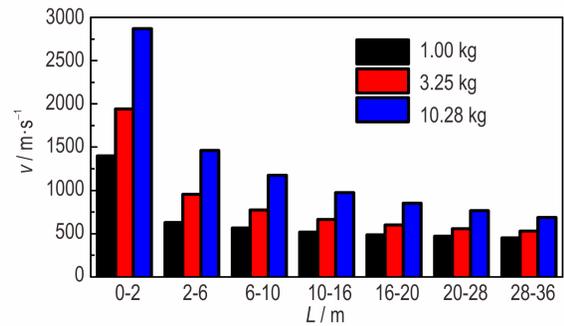


图4 各测点区间段内的冲击波平均速度

Fig.4 Average velocity of shock wave in different intervals

3.2 冲击波传播相似律分析

不同距离测点处的冲击波超压及冲量如图5和图6所示。从图5可以看出,三种不同药量装药的超压峰值在6 m内衰减较为迅速,16 m后呈近似线性缓慢衰减。1.00,3.25 kg和10.28 kg三种装药的爆炸冲击波从2 m传播至6 m,超压峰值分别下降了65.5%、52.9%和77.0%;而从16 m传播至36 m,超压峰值分别下降了41.1%、47.7%和55.6%。从图6可以看出,三种不同药量装药的冲量随距离的变化趋势各异,1.00 kg装药的冲量随距离增加的变化呈尾部轻度上扬的“M”型,36 m处的冲量较2 m处上升了70.9%;3.25 kg装药的冲量随距离增加的变化呈尾部下沉的“M”型,36 m处的冲量较2 m处下降了30.0%,10.28 kg装药的冲量随距离增加的变化呈阶梯状下降,36 m处

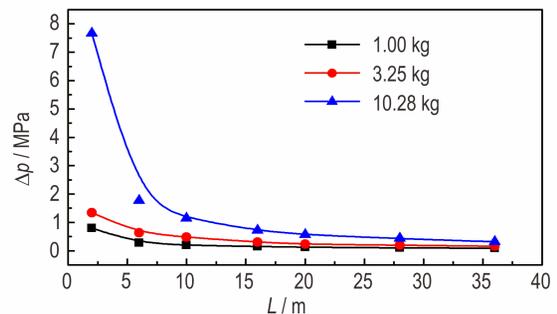


图5 超压峰值随距离变化曲线

Fig.5 Variation of peak overpressure with distance

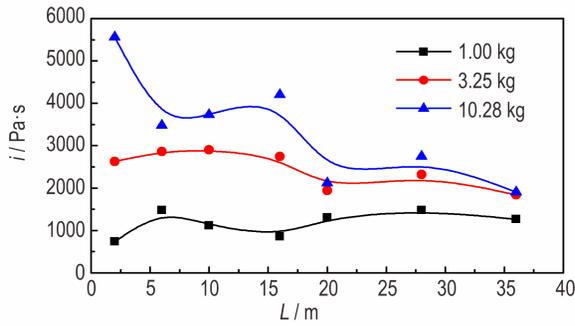


图6 冲量随距离变化曲线

Fig.6 Variation of impulse with distance

的冲量较2 m处下降达到65.8%。可以推断,坑道内爆炸冲击波冲量随爆心距的增加先有一个复杂的震荡变化过程,该过程结束后冲量将随着距离的增加而单调衰减,震荡变化的规律与装药量密切相关,有待深入研究。

坑道内爆炸卷入的空气较自由场少得多,根据能量相似律^[13],对于两端开口的坑道,TNT装药当量可用(1)式计算:

$$m_e = 2\pi \frac{L^2}{S} m \quad (1)$$

式中, m_e 为 TNT 装药当量, kg; m 为装药量, kg; S 为坑道截面积, m^2 ; L 为爆心距, m。将(1)式代入比例距离因子 $Lm_e^{-1/3}$, 得到坑道内爆炸的比例距离因子为 $(SLm^{-1})^{1/3}$, 有超压峰值:

$$\Delta p = f \left(\frac{SL}{m} \right)^{1/3} \quad (2)$$

同理,可得坑道内爆炸冲击波冲量

$$i = g \left(\frac{S^2}{Lm^2} \right)^{1/3} \quad (3)$$

上述表明,只要满足 $(SLm^{-1})^{1/3}$ 相等的坑道内任意位置,超压峰值 Δp 就相等,只要满足 $(S^2L^{-1}m^{-2})^{1/3}$ 相等,冲量 i 就相等。为验证上述假设的正确性,作出本次实验的 $\Delta p-(SLm^{-1})^{1/3}$ 和 $i-(S^2L^{-1}m^{-2})^{1/3}$ 趋势线,分别如图7、图8所示。

从图7可以看出,本实验条件下,除图中圆圈标注的三个结果外,冲击波超压峰值很好地满足相似律。圆圈标注的2 m处的冲击波传播满足自由场爆炸相似律,该处的超压首峰值可以通过斜反射公式计算,但合成后的最大峰值难以精确计算。相同 $(SLm^{-1})^{1/3}$ 对应的三种质量装药的 Δp 测试结果基本相同, Δp 随 $(SLm^{-1})^{1/3}$ 的变化趋势可用式(4)描述

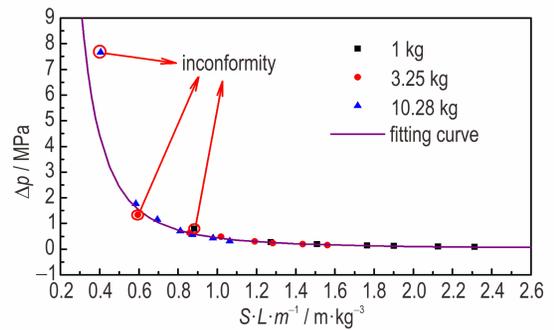


图7 超压峰值随比例距离因子的变化曲线

Fig.7 Variation of peak overpressure with scaling factor

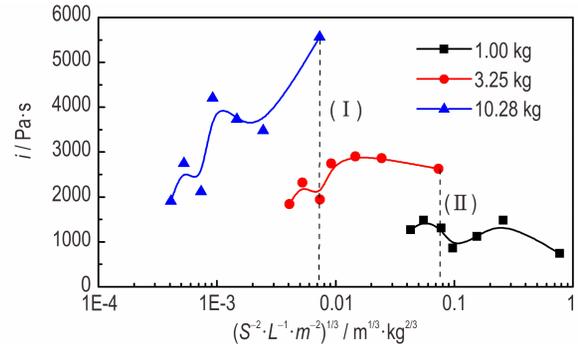


图8 冲量随比例距离因子的变化曲线

Fig.8 Variation of impulse with scaling factor

$$\Delta p = \frac{0.194}{(SL/m)^{1/3}} + \frac{0.405}{(SL/m)^{2/3}} + \frac{1.383}{SL/m} \quad (4)$$

式中, Δp 为冲击波超压, MPa, 式(4)结果如图7中的“fitting curve”所示。为验证其正确性,将本实验和参考文献[7, 9]中的坑道内爆炸实验的实测值 Δp_t 与式(4)计算值 Δp_c 进行了比较,结果列于表2。从表2可见,除了远场极个别点外,对公斤级到百公斤级的TNT装药,其坑道内爆炸冲击波超压峰值的计算偏差最大约为10%,可用于TNT装药坑道内爆炸的冲击波超压峰值预测。

从图8可以看出,坑道内的爆炸冲击波冲量不满足式(3)形式的立方根比例定律,在相同 $(S^2L^{-1}m^{-2})^{1/3}$ 处,装药量越大冲量越大。当 $(S^2L^{-1}m^{-2})^{1/3} \approx 0.007 m^{1/3} \cdot kg^{2/3}$ 时,10.28 kg 装药和 3.25 kg 装药的冲量分别为 5559.3 Pa·s 和 1940.1 Pa·s,如图中虚线段(I)所示;当 $(S^2L^{-1}m^{-2})^{1/3} \approx 0.07 m^{1/3} \cdot kg^{2/3}$ 时,3.25 kg 装药和 1.00 kg 装药的冲量分别为 5559.3 Pa·s 和 1940.1 Pa·s,如图中虚线段(II)所示。此外,不同质量装药的冲量随 $(S^2L^{-1}m^{-2})^{1/3}$ 的变化趋势呈波浪状起伏,10.28, 3.25 kg 装药的冲量随 $(S^2L^{-1}m^{-2})^{1/3}$ 的减小总体呈下降趋势,装药量越大,下降越迅速,而 1.00 kg 装药的冲量随 $(S^2L^{-1}m^{-2})^{1/3}$ 的减小总体呈现略

表2 实验值与式(4)计算值对比分析

Table 2 Comparisons between experimental results and calculated results from formula (4)

sources	m_{TNT} /kg	S /m ²	L /m	Δp_c /MPa	Δp_t /MPa	deviation /%
*	1	2.16	6	0.263	0.276	4.82
*	1	2.16	10	0.186	0.191	2.67
*	1	2.16	16	0.138	0.146	5.65
*	1	2.16	20	0.120	0.121	0.66
*	1	2.16	28	0.099	0.102	3.36
*	1	2.16	36	0.085	0.086	0.62
*	3.25	2.16	6	0.630	0.628	0.35
*	3.25	2.16	10	0.426	0.476	10.54
*	3.25	2.16	16	0.302	0.300	0.68
*	3.25	2.16	20	0.258	0.235	9.84
*	3.25	2.16	28	0.205	0.190	8.00
*	3.25	2.16	36	0.174	0.157	10.77
*	10.28	2.16	6	1.624	1.761	7.80
*	10.28	2.16	10	1.057	1.145	7.72
*	10.28	2.16	16	0.721	0.710	1.60
*	10.28	2.16	20	0.605	0.558	8.40
*	10.28	2.16	28	0.467	0.435	7.31
*	10.28	2.16	36	0.387	0.316	22.39
[7]	250	10.0	36	1.450	1.610	9.95
[7]	250	10.0	72	0.817	0.835	2.18
[7]	250	10.0	108	0.592	0.429	37.98
[9]	1	4.70	7	0.142	0.144	1.31
[9]	1	4.70	11.5	0.105	0.098	7.44
[9]	1	4.70	16.5	0.086	0.087	1.55
[9]	1	4.70	21.5	0.074	0.069	7.32
[9]	1	4.70	38	0.055	0.058	5.19

Note: m_{TNT} is the mass of TNT; S is the cross-sectional area of tunnel; L is the distance to explosion center; Δp_c is the calculated overpressure; Δp_t is the experimental overpressure; "*" denotes the experimental data in this paper.

微上升趋势。

上述分析可以看出,坑道内爆炸的冲量不能通过形如(3)式的立方根比例定律定量计算,其值与装药质量、坑道尺寸、爆心距等因素密切相关,是否满足其他形式的相似律还需进一步深入研究。

4 结论

(1) 坑道内爆炸冲击波的传播分为自由场传播、反射叠加传播和平面波传播三个阶段,但三阶段的时空边界尚未明晰。装药质量越大形成的冲击波初始压力和速度越大,且下降越迅速,平面波传播阶段的压力

和传播速度近似线性缓慢下降。

(2) 除临近爆心区域外,冲击波超压峰值满足立方根比例定律,基于试验数据拟合得到了坑道内冲击波超压峰值计算经验公式,计算结果与试验结果偏差小于10%。

(3) 坑道内爆炸的冲量不满足立方根比例定律,在相同($S^2 L^{-1} m^{-2}$)^{1/3}处装药量越大其冲量越大,是否满足其他形式的相似律,这有待进一步深入研究。

参考文献:

- [1] Charles R W. In-tunnel air blast engineering model for internal and external detonations [C]//Proceeding of the 8th International Symposium on Interaction of the Effects of Munitions with Structures. Mclean Virginia, 1997: 195-208.
- [2] Lunderman C, Ohrt A P. Small scale experiment of in tunnel air blast from external and internal detonations [C]//Proceeding of the 8th Symposium on the Interaction of Non-nuclear Munitions with Structure. McLean Virginia, 1997: 209-221.
- [3] Britt J R. Attenuation of short duration blast in entranceways and tunnels [C]//Proceeding of the 2nd Symposium on the Interaction of Non-nuclear Munitions with Structure. 1985: 466-471.
- [4] Welch C R. In-tunnel air blast engineering model for internal and external detonations [C]//Proceeding of the 8th International Symposium on Interaction of the Effects of Munitions with Structures. Mclean, Virginia, 1997: 195-208.
- [5] 庞伟宾,李永池,何翔. 化爆冲击波在T型通道内到时规律的试验研究[J]. 爆炸与冲击, 2007, 27(1): 63-67.
PANG Wei-bin, LI Yong-chi, HE Xiang. The regularity of arrival time of T-shaped tunnel for shock wave due to explosions from high explosive charges [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2007, 27(1): 63-67.
- [6] 庞伟宾,何翔,李茂生,等. 空气冲击波在坑道内走时规律的实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2003, 23(6): 573-576.
PANG Wei-bin, HE Xiang, LI Mao-sheng, et al. The formula for airblast time of arrival in tunnel [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2003, 23(6): 573-576.
- [7] 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.
- [8] 刘晶波,闫秋实,伍俊. 坑道内爆炸冲击波传播规律的研究[J]. 振动与冲击, 2009, 28(6): 8-12.
LIU Jing-bo, YAN Qiu-shi, WU Jun. Analysis of blast wave propagation inside tunnels [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2009, 28(6): 8-12.
- [9] 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(2): 114-118.
XU Li-na, YONG Shun-ning, WANG Feng-dan, et al. Study of blast wave overpressure propagation inside straight tunnel [J]. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2014, 28(2): 114-118.
- [10] Olivier Pennetier, Mame William-Louis, André Langlet. Numerical and reduced-scale experimental investigation of blast

- wave shape in underground transportation infrastructure[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2015, 94: 96-104.
- [11] 苗朝阳, 李秀地, 杨森, 等. 坑道内爆炸冲击波相似律问题探讨[J]. *爆破*, 2016, 33(1): 131-136.
- MIAO Chao-yang, LI Xiu-di, YANG Sen, et al. Discussion on similarity law of blast wave in tunnel [J]. *Blasting*, 2016, 33(1): 131-136.
- [12] 田诗雅, 刘剑, 高科. 密闭管道瓦斯爆炸冲击波冲量及压力上升速率的实验研究[J]. *中国安全生产科学技术*, 2015, 11(8): 16-21.
- TIAN Shi-ya, LIU Jian, GAO Ke. Experimental study on shock wave impulse and pressure rise rate of gas explosion in airtight pipeline[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2015, 11(8): 16-21.
- [13] 北京工业学院八系. 爆炸及其作用(下册). 北京: 国防工业出版社, 1979: 259-274.

Experimental Study on the Propagation Law of Blast Waves in a Square Tunnel

ZHANG Yu-lei, WANG Sheng-qiang, YUAN Jian-fei, ZHANG Jun-feng, LI Shang-qing

(Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, China)

Abstract: In order to study the propagation law of blast shockwaves in a square tunnel, TNT charges with different mass of 1.00 kg, 3.25 kg and 10.28 kg were detonated separately in the tunnel. The shock wave pressure-time curves at different distances were recorded and the parameters of shock waves such as the arrival time, the peak overpressure and the impulse were obtained. Results show that the propagation of shockwaves in tunnel is divided into three stages: the free-field spherical wave propagation, the one-dimensional planar wave propagation and the transition between them. The peak overpressures fit the Hopkinson-Cranz scaling law well except near the explosion center. An empirical formula for calculating peak overpressures was fitted, and the deviation between fitting results and measured values was not more than 10%. However, the impulse does not agree with Hopkinson-Cranz scaling law.

Key words: tunnel; shock wave; Hopkinson-Cranz scaling law; peak overpressure; impulse

CLC number: TJ55; O381

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2018305

(责编: 王艳秀)