

文章编号:1006-9941(2024)09-0921-09

不同管材侧向环形切缝装药爆炸能量传递特性

程兵^{1,2,3},汪海波³,程扬帆²,汪泉²,吕闹³,韩体飞²

(1. 安徽理工大学煤炭安全精准开采国家地方联合工程研究中心, 安徽淮南 232001; 2. 安徽理工大学化工与爆破学院, 安徽淮南 232001; 3. 安徽理工大学土木建筑学院, 安徽淮南 232001)

摘要: 为了探究不同管材侧向环形切缝装药的爆炸能量传递特性,开展常规柱状装药和4种管材侧向环形切缝装药的爆炸实验,借助高速纹影拍照系统和冲击波超压监测系统捕获了爆炸波的传播历程和监测爆炸压力的分布情况,分析了侧向环形切缝装药爆炸能量传递规律,以及管材对其能量传递特性的影响。结果显示:侧向环形切缝装药爆炸之后,爆轰产物和冲击波均先朝着切缝方向向外传播,非切缝方向爆轰产物和冲击波的传播相对滞后;与常规柱状装药的爆炸压力对称分布相比,侧向环形切缝管会减小非切缝方向爆炸压力和增大切缝方向爆炸压力,爆炸压力的非对称分布证明侧向环形切缝装药在切缝方向诱发产生了聚能效应;不同管材侧向环形切缝装药的聚能效果强弱顺序为不锈钢(SS)>聚氯乙烯(PVC)>纤维增强塑料(FRP)>有机玻璃(PMMA)。

关键词: 侧向环形切缝装药;爆炸能量传递;冲击波超压;聚能效应;管材;高速纹影

中图分类号: TJ51;TD235

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2023266

0 引言

定向断裂爆破是从控界爆破演化而来,常见的实施方法有三种:炮孔中装填聚能装药^[1-3]、炮孔中装填切缝装药^[4-5]以及采用切槽炮孔^[6],其中切缝装药以其制作简单和使用方便的优势在各类工程中得到了广泛使用^[7]。近年来,学者们以双向线形切缝装药为研究对象进行了大量研究。在理论和实验研究方面,戴俊等^[8]借助弹塑性力学理论对双向线形切缝装药的裂纹扩展机理进行分析,并给出了与初始裂隙演化历程匹配的应力强度因子计算方法。岳中文等^[9-12]开展了双向线形切缝装药的单孔和双孔爆破实验,在单孔爆破实验中研究了爆破效果随装药结构和围压大小的变化规律,在双孔爆破实验中则探究了炮孔间距和微差时间对孔间裂纹

贯穿效果的影响。杨仁树等^[13]开展了双向线形切缝装药的水泥砂浆爆破实验,然后基于声速降低率对炮孔周围的损伤分布进行了定量评价。Zuo等^[14]采用圆柱体试件进行了双向线形切缝装药的爆破实验,然后使用显微扫描技术获得了裂纹的空间分布情况,结果显示沿着切缝方向形成了定向断裂面。在数值仿真方面,王雁冰等^[15]开展了双向线形切缝装药爆破的有限元模拟,对炮孔周围的应力场演化规律和质点振速分布进行了阐述。程兵等^[16]利用离散粒子与有限元联合仿真技术构建了双向线形切缝装药单孔爆破模型,仿真结果直观展现了双向线形切缝装药爆轰产物运移情况和孔壁岩体的定向破裂历程。申涛等^[17]构建了岩巷掘进光面爆破数值模型,模拟了不同装药类型下开挖边界外部岩体的动态损伤演化历程,结果显示采用双向线形切缝装药可以大幅降低开挖边界外部岩体的损伤程度。在工程应用方面,杨仁树^[18]和付晓强等^[19]针对煤矿井巷开挖边界的超挖现象,将双向线形切缝装药用于井巷开挖边界的定向成缝,最终实现了煤矿井巷周边的高质量成型。程兵等^[20]和廖涛^[21]则将双向线形切缝装药用于岩巷中深孔掏槽,通过对槽腔区域边界进行定向断裂来减小围岩对槽腔岩体的夹制效应,从而解决了岩巷中深孔掏槽爆破效果不佳的问题。根据上述可以看出,目

收稿日期:2023-12-18;修回日期:2024-01-22

网络出版日期:2024-03-12

基金项目:煤炭安全精准开采国家地方联合工程研究中心开放基金(EC2023022);安徽理工大学高层次引进人才科研启动基金(2022yjrc101)

作者简介:程兵(1995-),男,博士,讲师,主要从事爆破理论与技术研究。e-mail:2022053@aust.edu.cn

通信联系人:程扬帆(1987-),男,博士,教授,主要从事爆炸科学与工程研究。e-mail:cyf518@mail.ustc.edu.cn

引用本文:程兵,汪海波,程扬帆,等.不同管材侧向环形切缝装药爆炸能量传递特性[J].含能材料,2024,32(9):921-929.

CHENG Bing, WANG Hai-bo, CHENG Yang-fan, et al. Transfer Characteristics of Explosion Energy Released by the Charge Confined to Tubes of Different Materials with Lateral Annular Slits[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2024, 32(9):921-929.

前有关切缝装药的研究主要集中于双向线形切缝装药的爆破机理及其在控界爆破中的实践应用^[22-24]。

为了改善地下工程硬岩掏槽爆破效果,本课题组提出了在掏槽孔使用侧向环形切缝装药^[22],但对不同管材侧向环形切缝装药爆炸能量传递规律仍然认识不足。因此,本研究拟实施常规柱状装药与4种管材侧向环形切缝装药的小药量爆炸实验,利用高速纹影拍照系统捕捉爆炸波的动态传播历程,采用冲击波超压监测系统来获取爆炸压力的空间分布特征,进而分析不同管材侧向环形切缝装药爆炸能量的传递特性,从而为现场施工时切缝管材质的选取提供参考。

1 实验部分

1.1 样品与设备

工业二硝基重氮酚(DDNP),密度 $0.9\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,淮南舜泰化工有限责任公司;热塑管, $\Phi 3\text{ mm}\times 50\text{ mm}$;切缝管, $\Phi(14,8)\text{ mm}\times 100\text{ mm}$,中部设 $d=3\text{ mm}$ 的半圈环形切缝,材质分别为不锈钢(SS)、聚氯乙烯(PVC)、纤维增强塑料(FRP)、有机玻璃(PMMA),如图1所示。

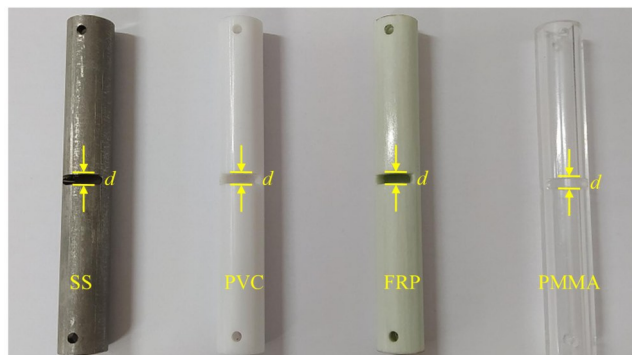


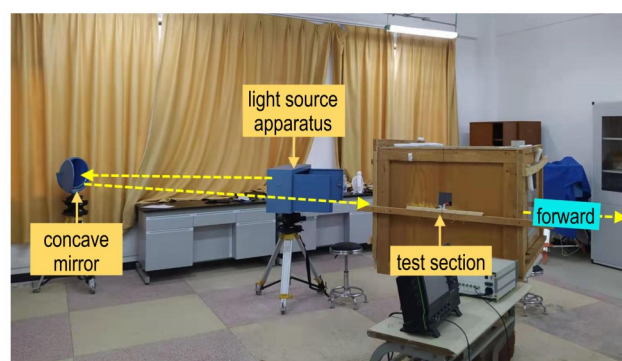
图1 4种材质切缝管

Fig.1 Slit tubes of four materials

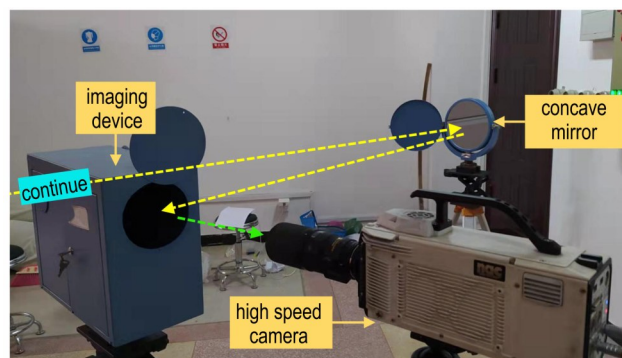
常规柱状装药:在热塑管内部装填220 mg的DDNP,热塑管的两端用橡皮泥封堵7 mm,热塑管内设置扭结的漆包线用于放电引爆DDNP。

侧向环形切缝装药:制备4支与上述规格相同的常规柱状装药,分别将其装填到4种材质的切缝管中,并将常规柱状装药固定在切缝管的中间位置。

高速纹影拍照系统:由纹影仪(中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室)和Memrecam HX-3E型高速相机(日本NAC Image Technology公司)组成,其中纹影仪包括光源装置、两个凹面反射镜和成像装置,如图2所示。纹影仪基于空气的密度与折射率之间的



a. first part



b. second part

图2 高速纹影拍照系统

Fig.2 High speed schlieren photographic system

对应函数公式,将实验段爆炸波传播历程中诱发的空气密度变化转化为具有亮度变化的可视影像^[25],再借助高速相机对爆炸波传播历程对应的动态可视影像进行实时拍照记录,采用外触发模式使炸药发生爆炸时高速相机立即开始拍照记录纹影。

冲击波超压监测系统,由CY-YD-202型传感器(江苏联能电子技术有限公司)、YE5853A型电荷放大器(江苏联能电子技术有限公司)和HDO4034A型示波器(Teledyne LeCroy公司)组成。在木质箱体的顶部中心开设悬挂窗用于悬挂装药;在木质箱体的前后两侧设立观察窗,观察窗安装有透明的亚克力板,调整纹影成像光路使其穿过前后观察窗;在木质箱体的左右两侧分别设置一个压力传感器,压力传感器与电荷放大器和示波器相连接。

1.2 实验步骤

两种装药下的实验装置布局如图3和图4所示。将装药悬挂于实验段的木质箱体内部,保证装药位于纹影观测光路的中间区域。然后,将压力传感器调整至距装药中心170 mm的位置,压力传感器与装药中心处于相同水平高度。而且,由图4b可以看出,对于

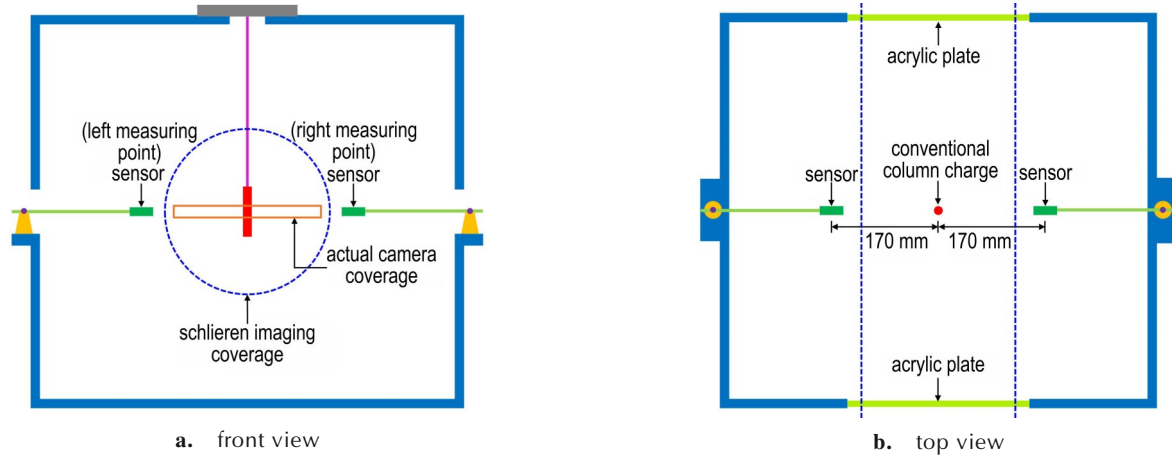


图3 常规柱状装药下实验装置布局图

Fig.3 Layout diagram of experimental devices under conventional column charge

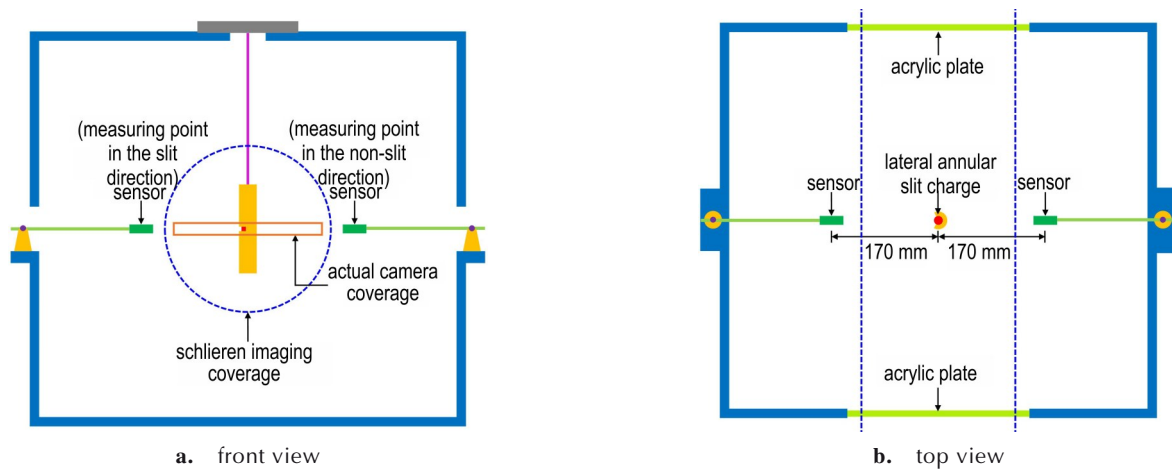


图4 侧向环形切缝装药下实验装置布局图

Fig.4 Layout diagram of experimental devices under lateral annular slit charge

侧向环形切缝装药来说,压力传感器必须位于其1/2对称面上,其1/2对称面还要与纹影成像光路相互垂直。此外,以装药中心为实际拍摄区域的中心,调整拍摄区域的高度和宽度分别为7.2 mm和80.0 mm。最后,引爆装药开始记录爆炸波传播历程和监测爆炸压力。

2 结果与讨论

2.1 管材对爆炸波传播的影响

采用图3所示的实验装置对常规柱状装药进行爆炸波传播测试,得到常规柱状装药的爆炸波传播历程图,如图5所示。由图5可以看出,装药左右两侧的爆炸波传播历程相同,左右两侧与图3中测点位置对应。当DDNP发生爆炸后,爆轰产物立即向四周扩展并压缩空气诱发产生冲击波。在20~40 μs内爆轰产物和冲击波的影像相互重合,但由于冲击波的移动速度大

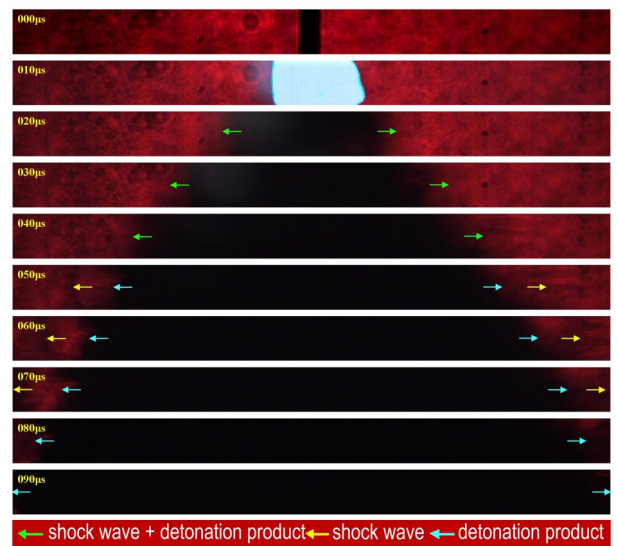


图5 常规柱状装药爆炸波传播历程

Fig.5 Propagation of explosion wave for conventional column charge

于爆轰产物,所以在 50 μs 二者彼此分离,冲击波所在位置超前于爆轰产物。随着爆炸波的继续传播,冲击波在 70 μs 抵达拍摄区的端部,此时爆轰产物距离拍摄区的端部还有一定距离,直到 90 μs 才抵达拍摄区的端部。

采用图 4 所示的实验装置对 4 种管材进行爆炸波传播测试,得到不同管材侧向环形切缝装药的爆炸波传播历程,如图 6 所示。由图 6a 和图 6b 可以看出,对于 SS 管和 PVC 管侧向环形切缝装药,炸药爆炸后爆轰产物立刻由切缝向外扩展,并压缩空气诱发产生冲击

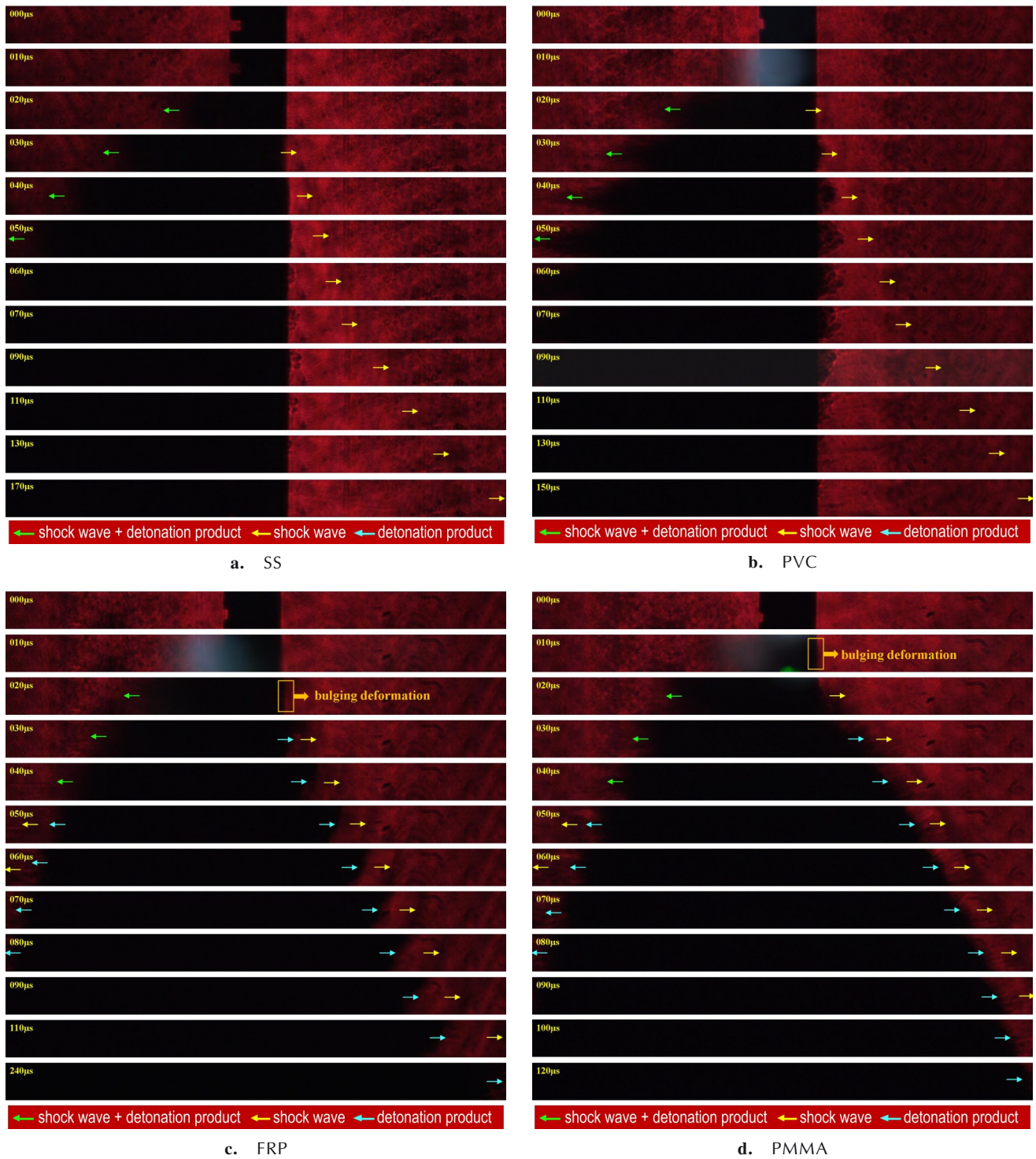


图 6 不同管材侧向环形切缝装药爆炸波传播历程

Fig.6 Propagation of explosion wave for lateral annular slit charge with different tube materials

波。在 20~50 μs 内爆轰产物和冲击波的影像相互重合,但由于冲击波移动速度大于爆轰产物,所以纹影成像最前端为冲击波^[26]。而且,相比于常规柱状装药的爆炸波传播历程,切缝方向爆炸波的传播速度显著加快,切缝方向的爆炸波均在 50 μs 就抵达了拍摄区的端部。对于非切缝方向,切缝管的约束效应导致爆轰产物不能向外扩展,更不能压缩空气诱发产生冲击波。然而,两种装药非切缝方向分别在 30 μs 和 20 μs 开始有冲击波在向前移动,这是管内冲击波部分透过切缝管所形成的,但该冲击波的移动速度明显较慢,两种装药的右侧冲击波分别在 170 μs 和 150 μs 才抵达拍摄区的端部。

由图 6c 和图 6d 可以看出,对于 FRP 管和 PMMA 管侧向环形切缝装药,切缝方向爆炸波传播历程与使用 SS 管和 PVC 管时基本类似,区别主要在于爆炸波和爆轰产物分别在 60 μs 和 80 μs 才抵达拍摄区的端部。对于非切缝方向,在装药爆炸前期切缝管具有约束效应,导致爆轰产物不能向外扩展,无法压缩空气诱发产生空气冲击波。然而,两种装药分别在 20 μs 和 10 μs 切缝管发生鼓胀变形,并且分别在 30 μs 和 20 μs 非切缝方向开始有爆轰产物和冲击波在向前移动。不过,相比于常规柱状装药的爆炸波传播历程,两种装药非切缝方向爆炸波的传播速度显著变慢,110 μs 和 90 μs 冲击波抵达拍摄区的端部,此时爆轰产物距离拍摄区的端部还有一定距离,直到 240 μs 和 120 μs 才抵达拍摄区的端部。

图 7 为爆后不同切缝管形态变化,可见,SS 和 PVC 材质的切缝管强度较高,在 DDNP 爆炸后仍能维持原有形态,切缝管的约束效应令爆轰产物不能向非切缝方向扩展,但管内部分冲击波会透过切缝管,所以非切缝方向仅有冲击波在向前移动。由图 7c 和图 7d 可以看出,FRP 和 PMMA 材质的切缝管强度较低,在 DDNP 爆炸后随即发生破坏,切缝管的约束效应不复存在,爆轰产物可以朝着非切缝方向扩展并压缩空气产生空气冲击波,所以非切缝方向同时有爆轰产物和冲击波在向前移动。

根据上述分析可以得出,常规柱状装药爆炸以后,爆轰产物和冲击波是均匀向四周传播的;4 种管材侧向环形切缝装药爆炸以后,由于侧向切缝管的约束效应,爆轰产物和冲击波均是最先从环形切缝向外传播,非切缝方向爆轰产物和冲击波的传播相对比较滞后。而且,切缝管为 SS 管和 PVC 管时,非切缝方向只有冲击波在向前移动;切缝管为 FRP 管和 PMMA 管,非切

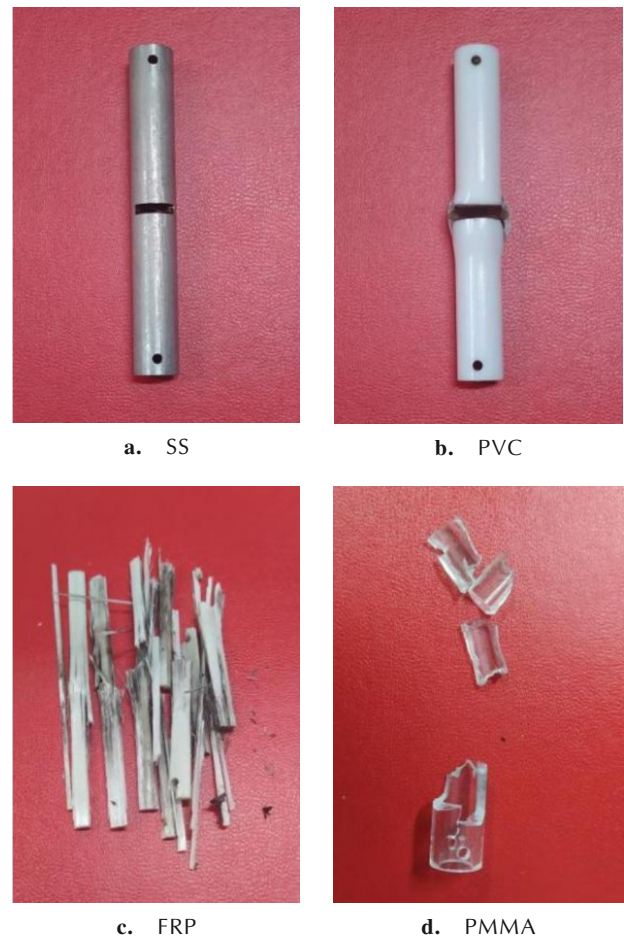


图 7 爆后不同切缝管形态变化

Fig.7 Morphological change of different slit tubes after explosion

缝方向同时有爆轰产物和冲击波在向前移动。由于爆炸波是爆炸能量的表现形式,根据爆炸波传播历程的差异还可以进一步得出:常规柱状装药的爆炸能量是均匀向四周释放的,侧向环形切缝装药在切缝方向和非切缝方向的爆炸能量释放传递是不均匀的,并且切缝管材质还会对其爆炸能量传递产生影响。

2.2 爆炸压力测试结果与分析

在捕捉爆炸波传播历程的同时,利用冲击波超压监测系统对爆炸压力进行测试。图 8 所示是常规柱状装药下测点的冲击波超压曲线。由图 8 可以看出,两侧测点的冲击波超压曲线几乎重合,左侧测点的超压峰值为 97.48 kPa,右侧测点的超压峰值为 96.96 kPa,二者大小几乎是相等的。上述结果表明常规柱状装药爆炸以后爆炸压力沿装药中心对称分布,爆炸压力的空间对称分布则意味着爆炸能量是沿着装药周围均匀释放的。

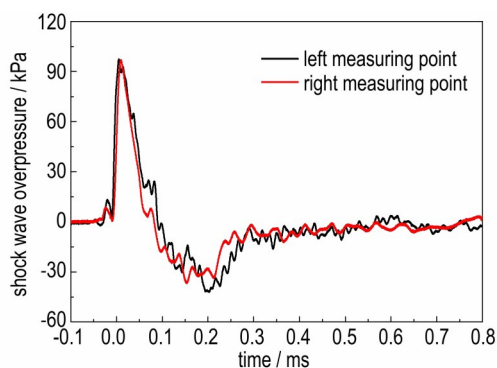


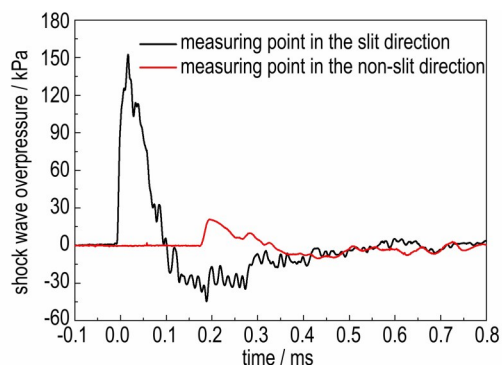
图8 常规柱状装药下测点的冲击波超压曲线

Fig.8 Shock wave overpressure curves of measuring points under conventional column charge

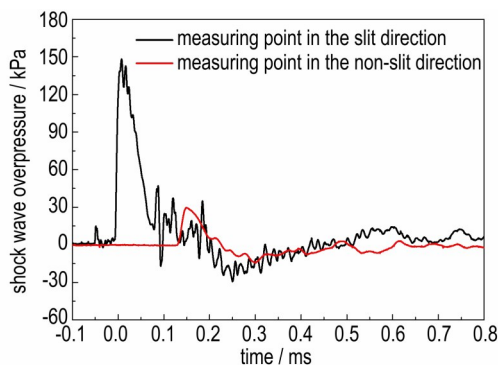
图9是4种管材侧向环形切缝装药下测点的冲击波超压曲线,图10是不同管材侧向环形切缝装药下测点的冲击波超压峰值。由图9和图10可以看出,无论侧向切缝管使用何种管材,切缝方向测点的超压峰值始终高于非切缝方向测点,而且常规柱状装药下测点的超压峰值(97.48 kPa)始终低于切缝方向测点和高于非切缝方向测点。上述实验结果显示:通过增设侧向环形切缝管可以减小非切缝方向爆炸压力和增大切缝方向爆炸压力。这种爆炸压力的空间非对称分布,意味着侧向环形切缝装药爆炸以后在切缝方向会诱发产生聚能效应。

图10同时显示,不同管材切缝方向测点的超压峰值大小顺序为 $p_{SS} > p_{PVC} > p_{FRP} > p_{PMMA}$,而非切缝方向测点的超压峰值大小顺序为 $p'_{SS} < p'_{PVC} < p'_{FRP} < p'_{PMMA}$ 。可见,侧向环形切缝装药采用不同类型管材时的聚能效应明显不同,各类管材的聚能效应强弱顺序为 $SS > PVC > FRP > PMMA$ 。这主要是因为不同管材的强度顺序为 $SS > PVC > FRP > PMMA$,导致对爆轰产物的约束作用存在差异,进而影响侧向环形切缝装药的聚能效果。

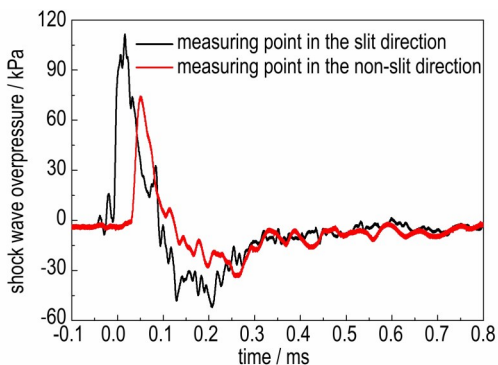
为进一步对比聚能效果,计算两侧测点超压峰值的差值,结果如图11所示。由图11可以看出,不同管材下两侧超压峰值的差值大小顺序为 $\Delta p_{SS} > \Delta p_{PVC} > \Delta p_{FRP} > \Delta p_{PMMA}$; Δp_{SS} 和 Δp_{PVC} 均大于100 kPa,表明当侧向环形切缝装药采用SS管和PVC管时诱发的聚能效果比较接近; Δp_{FRP} 和 Δp_{PMMA} 均小于40 kPa,表明当侧向环形切缝装药采用FRP管和PMMA管时诱发的聚能效果比较接近;而且,使用SS管和PVC管时所诱发的聚能效果要明显优于使用FRP管和PMMA管。这主要是因为SS和PVC材质的切缝管在DDNP爆炸后仍能维持原有形态,切缝管的约束效应令爆轰产物始



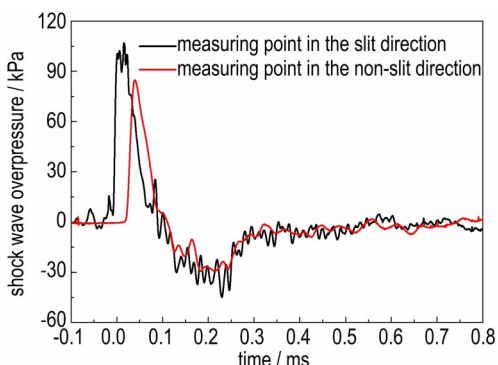
a. SS



b. PVC



c. FRP



d. PMMA

图9 不同管材侧向环形切缝装药下测点的冲击波超压曲线

Fig.9 Shock wave overpressure curves of measuring points under lateral annular slit charge of different tube materials

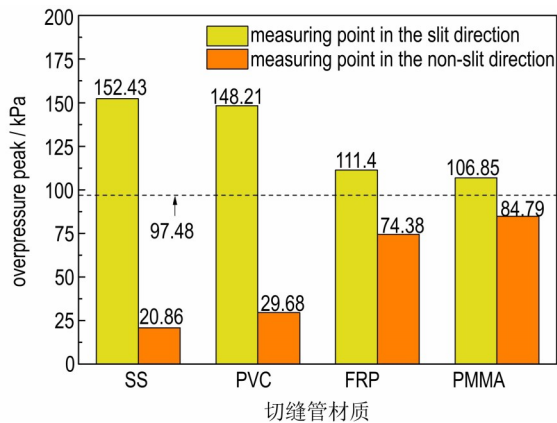


图 10 不同管材侧向环形切缝装药下测点的冲击波超压峰值
Fig.10 Shock wave overpressure peaks of measuring points under lateral annular slit charge of different tube materials

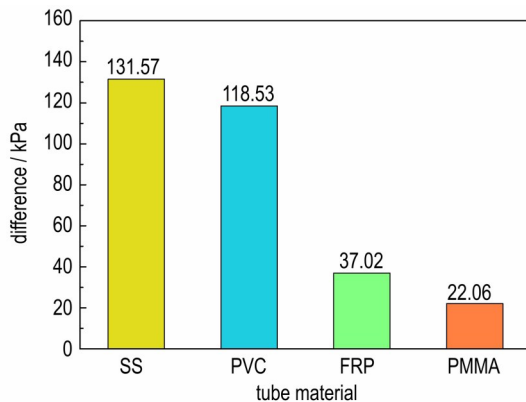


图 11 两侧超压峰值的差值
Fig.11 Difference between overpressure peaks on both sides

终朝切缝方向聚集;而FRP和PMMA材质的切缝管在DDNP爆炸后随即发生破坏,仅在装药爆炸初期切缝管对爆轰产物发挥了一定的约束效应,一旦发生破坏以后切缝管的约束效应不复存在。

根据上述分析可以得出,通过设置侧向环形切缝管可以减小非切缝方向爆炸压力和增大切缝方向爆炸压力,进一步证实了侧向环形切缝装药爆炸以后在切缝方向会诱发产生聚能效应。但是,不同管材侧向环形切缝装药的聚能效果有明显差异,其强弱顺序为SS>PVC>FRP>PMMA,且SS管和PVC管两种管材的聚能效果要显著优于FRP管和PMMA管,结果对现场施工时切缝管材质的选取具有参考意义。

3 结论

本研究选用常规柱状装药和4种管材侧向环形切缝装药开展爆炸实验,获取了爆炸波的动态传播历程和爆炸压力的分布情况,从而分析了侧向环形切缝装

药爆炸能量传递规律以及管材对其能量传递特性的影响,得到结论如下:

(1)4种管材侧向环形切缝装药爆炸以后,爆轰产物和冲击波均是最先朝着切缝方向向外传播,非切缝方向爆轰产物和冲击波的传播相对滞后。其中,当采用SS管和PVC管时非切缝方向只有冲击波在向前移动,当采用FRP管和PMMA管时非切缝方向则同时有爆轰产物和冲击波在向前移动;

(2)至于常规柱状装药,其爆炸压力是沿装药中心对称分布的,表明爆炸能量沿装药周围各个方向均匀释放;而通过增设侧向环形切缝管可以降低非切缝方向爆炸压力和增大切缝方向爆炸压力,表明侧向环形切缝装药在切缝方向诱发产生了聚能效应;

(3)4种管材的聚能效果强弱顺序为SS>PVC>FRP>PMMA,使用SS管和PVC管时两侧超压峰值的差值均大于100 kPa,使用FRP管和PMMA管时两侧超压峰值的差值均小于40 kPa,SS管和PVC管的聚能效果要显著优于FRP管和PMMA管。

参考文献:

- [1] 吴波, 韦汉, 徐世祥, 等. 基于SPH的椭圆双极性线性聚能药包控制爆破数值模拟研究[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(5): 135-142.
WU Bo, WEI Han, XU Shi-xiang, et al. Numerical analysis of controlled blasting of elliptic bipolar linear shaped charge based on SPH [J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(5): 135-142.
- [2] 邓永兴, 马宏昊, 王林桂, 等. 螺旋管聚能药包钻孔爆破试验研究与应用[J]. 振动与冲击, 2020, 39(12): 63-69.
DENG Yong-xing, MA Hong-hao, WANG Gui-lin, et al. Experiment research and application of borehole-blasting of spiral tube shape charge [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2020, 39(12): 63-69.
- [3] 邓永兴, 张中雷, 管志强, 等. 螺旋管聚能药包根底光面爆破机理研究及应用[J]. 爆炸与冲击, 2020, 40(1): 92-99.
DENG Yong-xing, ZHANG Zhong-lei, GUAN Zhi-qiang, et al. Research and application of root smooth blasting mechanism of shaped charge in spiral tube [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2020, 40(1): 92-99.
- [4] 杨仁树, 付晓强, 杨立云, 等. 冻结立井爆破冻结壁成形控制与井壁减振研究[J]. 煤炭学报, 2016, 41(12): 2975-2985.
YANG Ren-shu, FU Xiao-qiang, YANG Li-yun, et al. Research on the shaping control of frozen wall and blasting vibration mitigation of shaft wall effect in mine vertical shaft [J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(12): 2975-2985.
- [5] 胡建华, 邓煜林, 王昌, 等. 切缝药包光面爆破裂纹扩展时空演化分析[J]. 有色金属工程, 2019, 9(3): 82-88.
HU Jian-hua, DENG Yu-lin, WANG Chang, et al. Numerical analysis of the slotted cartridge blasting crack extension by temporal-spatial evolution [J]. *Nonferrous Metal Engineering*, 2019, 9(3): 82-88.

- [6] 岳中文,邱鹏,杨仁树,等.切槽炮孔偏心装药爆源近区裂纹动态力学特征实验研究[J].岩石力学与工程学报,2017,36(S2):3792-3798.
YUE Zhong-wen, QIU Peng, YANG Ren-shu, et al. Experimental study on crack dynamic mechanical characteristic near blasting source of grooved borehole with eccentric decouple charge[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(S2): 3792-3798.
- [7] 宋俊生,王雁冰,高祥涛,等.定向断裂控制爆破机理及应用[J].矿业科学学报,2016,1(1):16-28.
SONG Jun-sheng, WANG Yan-bing, GAO Xiang-tao, et al. The mechanism of directional fracture controlled blasting and its application[J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2016, 1(1): 16-28.
- [8] 戴俊,吴丙权,孟振.切缝药包控制爆破初始裂缝形成分析[J].爆破器材,2013,42(3):49-52.
DAI Jun, WU Bing-quan, MENG Zhen. Analysis on formation of initial cracks in cutting seam cartridge due to controlled blasting[J]. *Explosive Materials*, 2013, 42(3): 49-52.
- [9] 岳中文,张士春,邱鹏,等.装药结构对切缝药包爆破效果影响的研究[J].振动与冲击,2018,37(10):27-34.
YUE Zhong-wen, ZHANG Shi-chun, QIU Peng, et al. Influence of charge structures on the slotted cartridge blasting effect[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2018, 37(10): 27-34.
- [10] 岳中文,田世颖,张士春,等.单向围压作用下切缝药包爆生裂纹扩展规律的研究[J].振动与冲击,2019,38(23):186-195.
YUE Zhong-wen, TIAN Shi-ying, ZHANG Shi-chun, et al. Expanding law of cracks formed by slotted cartridge blast under unidirectional confining pressure[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2019, 38(23): 186-195.
- [11] 岳中文,田世颖,陈志远.炮孔间距对切缝药包爆生裂纹扩展规律的影响[J].岩石力学与工程学报,2018,37(11):2460-2467.
YUE Zhong-wen, TIAN Shi-ying, CHEN Zhi-yuan, et al. Influence of the interval between holes on crack propagation in slit charge blasting[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(11): 2460-2467.
- [12] 岳中文,张士春,邱鹏,等.切缝药包微差爆破爆生裂纹扩展机理[J].煤炭学报,2018,43(3):638-645.
YUE Zhong-wen, ZHANG Shi-chun, QIU Peng, et al. Mechanism of explosive crack propagation with slotted cartridge millisecond blasting[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(3): 638-645.
- [13] 杨仁树,左进京,杨国梁.切缝药包定向控制爆破的试验研究[J].振动与冲击,2018,37(24):24-29.
YANG Ren-shu, ZUO Jin-jing, YANG Guo-liang, et al. An experimental study on slotted cartridge directional controlled blasting[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2018, 37(24): 24-29.
- [14] ZUO J J, YANG R S, GONG M, et al. Studies on directional breaking controlled theory of slotted cartridge blasting for rock[J]. *Arabian Journal Geosciences*, 2021, 14(18): 1928.
- [15] 王雁冰,李书莹,耿延杰,等.切缝药包爆破定向断裂机理及围岩损伤特性分析[J].工程科学学报,2023,45(4):521-532.
WANG Yan-bing, LI Shu-xuan, GENG Yan-jie, et al. Directional fracture mechanism and surrounding rock damage characteristics of slotted cartridge blasting[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2023, 45(4): 521-532.
- [16] 程兵,汪海波,宗琦.基于SPH-FEM耦合切缝药包爆破机理数值模拟[J].含能材料,2020,28(4):300-307.
CHENG Bing, WANG Hai-bo, ZONG Qi. Numerical simulation on blasting mechanism of slotted cartridge based on coupled SPH-FEM algorithm[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2020, 28(4): 300-307.
- [17] 申涛,罗宁,戚福州,等.切缝药包岩石巷道光面爆破数值模拟与优化研究[J].采矿与安全工程学报,2020,37(4):674-680.
SHEN Tao, LUO Ning, QI Fu-zhou, et al. Numerical simulation and optimization of smooth blasting in rock roadway with split-tube charge hold[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2020, 37(4): 674-680.
- [18] 杨仁树,张召冉,杨立云,等.基于硬岩快掘技术的切缝药包聚能爆破试验研究[J].岩石力学与工程学报,2013,32(2):317-323.
YANG Ren-shu, ZHANG Zhao-ran, YANG Li-yun, et al. Cumulative blasting experiment study of slotted cartridge based on hard-rock rapid driving technology[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(2): 317-323.
- [19] 付晓强,俞缙.冻结立井爆破井壁振动与围岩损伤控制研究[J].中国安全科学学报,2021,31(9):67-74.
FU Xiao-qiang, YU Jin. Shaft lining vibration and surrounding rock damage control after freezing shaft blasting[J]. *China Safety Science Journal*, 2021, 31(9): 67-74.
- [20] 程兵,汪海波,宗琦,等.基于切缝装药定向预裂的中深孔掏槽爆破研究[J].振动与冲击,2023,42(3):322-329.
CHENG Bing, WANG Hai-bo, ZONG Qi, et al. Mid-deep hole cutting blasting technology based on slit charge directional presplitting[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2023, 42(3): 322-329.
- [21] 廖涛,蒲传金,王俊青,等.岩巷切缝药包楔形掏槽爆破模型试验与分析[J].金属矿山,2015,53(2):40-44.
LIAO Tao, PU Chuan-jin, WANG Jun-qing. Model experiment and analysis of wedge-shaped cutting blasting with cutting seam cartridge in rock tunnel[J]. *Metal Mine*, 2015, 53(2): 40-44.
- [22] 程兵,汪泉,汪海波,等.侧向环形切缝装药爆破效应及其在硬岩掏槽中的应用[J].含能材料,2023,31(12):1245-1254.
CHENG Bing, WANG Quan, WANG Hai-bo, et al. Blasting effects and of lateral annular slit charge and application in hard rock cutting[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2023, 31(12): 1245-1254.
- [23] 郑星,黄海莹,毛勇建,等.基于高速纹影技术的爆炸冲击波图像测量研究[J].光学精密工程,2022,30(18):2187-2194.
ZHENG Xing, HUANG Hai-ying, MAO Yong-jian, et al. Research on image measurement of explosion shock wave based on high speed schlieren technology[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2022, 30(18): 2187-2194.
- [24] 陆军伟,汪泉,李志敏,等.环境压力对自由场冲击波传播影响的数值模拟[J].工程爆破,2021,27(2):51-57.
LU Jun-wei, WANG Quan, LI Zhi-min, et al. Numerical simulation of the influence of environmental pressure on free field shock wave propagation[J]. *Engineering Blasting*, 2021, 27(2): 51-57.

Transfer Characteristics of Explosion Energy Released by the Charge Confined to Tubes of Different Materials with Lateral Annular Slits

CHENG Bing^{1,2,3}, WANG Hai-bo³, CHENG Yang-fan², WANG Quan², LÜ Nao³, HAN Ti-fei²

(1. Joint National-Local Engineering Research Centre for Safe and Precise Coal Mining, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2. School of Chemical and Blasting Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 3. School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: To study the transfer characteristics of explosion energy released by the charge confined to tubes of different materials with lateral annular slits, explosion experiments were conducted involving charges with or without confinement to tubes of four materials. The high speed schlieren photographic system and shock wave overpressure monitoring system were employed to capture the propagation process of shock wave and obtain the distribution law of overpressure respectively, so that the explosion energy transfer law for the charges confined to tubes with lateral annular slits and the influence of tube material on its energy transfer characteristics were analyzed. The results showed that after the explosion of the charge confined to tubes with lateral annular slit, both the detonation product and shock waves firstly propagated outward towards the direction with slit, but the propagation towards the opposite direction is relatively delayed. Compared with the symmetric distribution of overpressure generated by a conventional cylindrical charge, the lateral annular slits in tubes could increase the overpressure in the direction with slit, but decrease that in the opposite direction. The asymmetric distribution of overpressure proved that the charge confined to tubes with lateral annular slits induced Munroe Effect in the slit direction. The hierarchy of Munroe Effect caused by lateral annular slits presented by materials: stainless steel (SS) > polyvinyl chloride (PVC) > fiber reinforced plastic (FRP) > plexiglass (PMMA).

Key words: charge confined to lateral annular slits; transfer of explosion energy; overpressure of shock wave; munroe effect; tubes of different materials; high speed schlieren

CLC number: TJ51;TD235

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2023266

Grant support: Open Research Grant of Joint National-Local Engineering Research Centre for Safe and Precise Coal Mining (No. EC2023022); Scientific Research Foundation for High Level Talents of Anhui University of Science and Technology (No. 2022yjrc101)

(责编:高毅)