

大型通道中主动式水雾抑爆现象的实验研究^{*}

谢波^{1,2}, 范宝春², 夏自柱¹, 王克全¹

(1. 煤炭科学研究总院重庆分院, 重庆 400037;

2. 南京理工大学动力工程学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 采用自制的主动水雾抑爆器, 对主动水雾抑爆过程中的激波、火焰抑制作用进行了实验研究。实验结果表明: 采用主动水雾抑爆时, 在水雾区及其后的一定距离内激波均表现出不同程度的衰减, 激波衰减随水雾空间密度增加而明显; 当水雾区长度为 1.6 m 时, 在 48.75 kg/m³ 附近存在一个水雾密度临界值, 水雾密度低于此值时, 激波穿过水雾区后会再次成长增强, 不能发生完全抑爆; 保持水雾空间密度 32.5 kg/m³ 不变时, 水雾区越长, 激波衰减作用越明显; 在 2.5 ~ 3.0 m 之间存在一个激波完全衰减成为压缩波的水雾区临界长度。可以预知, 随水雾区密度和长度变化, 存在一抑爆临界曲线, 此曲线将整个试验范围划分为抑爆区和非抑爆区两部分。

关键词: 爆炸力学; 抑爆; 主动式水雾; 激波衰减; 大型通道;

中图分类号: O384; TK123 **国标学科代码:** 130°3510 **文献标志码:** A

1 引言

主动水雾抑爆方法是通过超前测得气体爆炸火焰或压力信号, 触发水雾扩散机构, 在激波与火焰阵面到达之前形成水雾抑爆带, 从而达到抑制火焰传播、衰减激波的作用。地下巷道或坑道中发生可燃气体爆炸, 通常采用主动水雾抑爆方法进行控制, 以减小爆炸灾害作用的程度和范围。

主动水雾抑爆现象极其复杂, 包括水雾与激波、水雾与火焰、激波与火焰的相互作用等, 人们已对此进行了大量的理论和实验研究^[1~4]。在相应抑爆装置及应用技术研究中, 人们往往只是通过对抑爆过程中火焰的抑制情况的实验考察来检验抑爆效果, 而对抑爆过程中激波衰减现象的研究则相对较少^[5]。但抑爆系统参数的设计与优化、以及抑爆效果与适用范围的准确评价都需要了解实际抑爆过程中的激波衰减。因此, 该研究具有重要的工程使用价值。

我们设计加工的简易主动式水雾抑爆器, 采用爆炸抛撒成雾, 具有成雾迅速、水雾参数可调等特点, 利用该装置在长 25 m、直径 700 mm 的大型爆炸试验管道中再现了水雾抑爆现象, 并针对主动水雾抑爆过程中水雾密度、水雾区长度等参数对激波衰减作用的影响进行了实验研究。

2 实验设备与方法

2.1 主动水雾抑爆装置

图 1 为主动水雾抑爆器结构示意图。抑爆器由储水泡沫、水雾扩散动力、电雷管、塑料密封袋、外壳等部件组成。

储水泡沫为阻燃聚胺脂泡沫柱体, 存储其中的水分布比较均匀, 可改善成雾空间分布状态。储水泡沫用塑料袋密封, 并用金属网外壳加固成型。置于储水泡沫轴心的导爆索为水雾扩散动力部件, 传感器控制信号触发抑爆器头部的电雷管, 起爆导爆索, 使储存在抑爆器中的抑爆剂(水)迅速向周围空间扩散形成水雾。在自由敞开空间对抑爆器性能参数的实测结果见表 1。

* 收稿日期: 2002-04-16; 修回日期: 2002-10-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(19832030)

作者简介: 谢波(1968—), 男, 博士研究生。

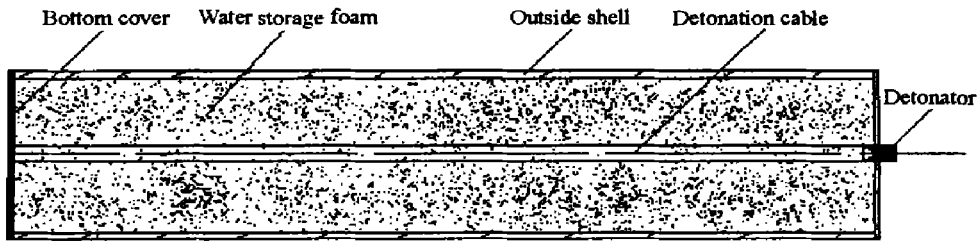


图 1 主动水雾抑爆器结构示意图

Fig.1 Configuration of the active water-spray suppressor

其中,水雾扩散速度是采用高速摄影机在抑爆器径向观测到的一定时间内达到的水雾面积,表明了抑爆器形成水雾的快慢。实测结果表明:在直径 700 mm 的爆炸试验管道中,该抑爆器形成的水雾区尺寸和存在时间完全能够满足实验所需。

表 1 抑爆器性能参数实测结果

Table 1 The test results of parameter for the active water-sprary suppressor

直径/m	储水量/(kg/m)	水雾扩散速度/(m ² /ms)	延迟时间/ms	水雾存在时间/ms
0.25	50	$\frac{1}{15}$	< 10	> 500

2.2 实验管道与测试

实验系统由大型爆炸管道、CS2092H 高速瞬态测试分析仪、点火装置及实验辅助单元组成,如图 2。大型实验管道全长 25 m、直径 700 mm,由法兰连接而成,管道一端由铰链连接的旋转端板封闭(实验中可用螺栓紧固),另一端开口。管道封闭端旋转端安装的点火装置,通过时间延迟器控制电雷管起爆 5 g 梯恩梯形成初始激波状态。开口端有封膜压环,可用一定强度的纸膜封闭以形成密闭气体状态。

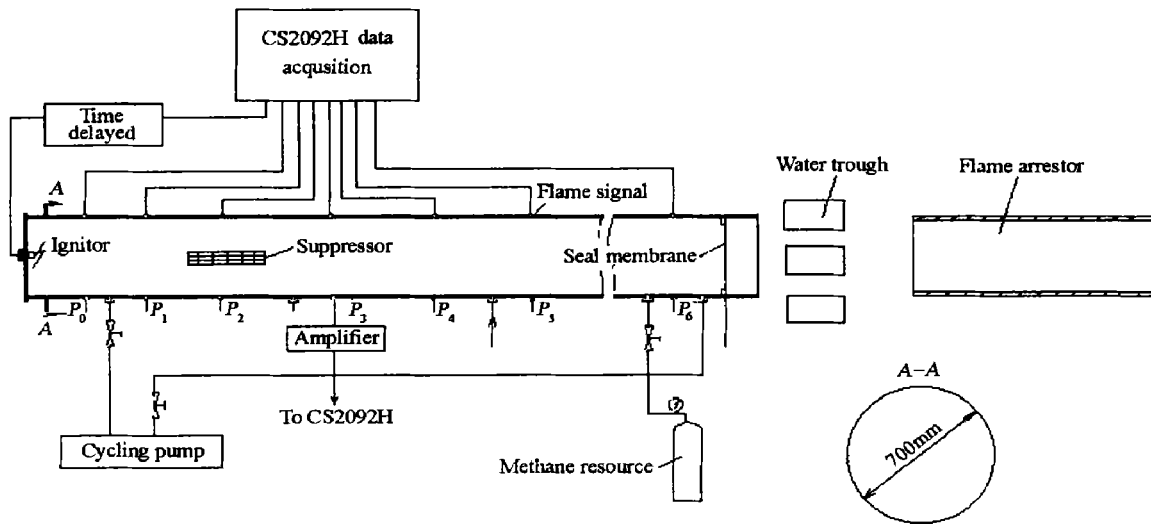


图 2 主动水雾抑爆大型管道实验系统示意图

Fig.2 Schematic of large-scale experimental system of passive explosion suppression

CS2092H 瞬态测试分析仪为 16 通道高速数据采集处理系统,可实时采集压力、火焰等传感器信号,并以数据文件的方式存储、处理和分析。压力、火焰测点对称布置在管道两侧,分别距封闭端点火头 1.25、4.33、8.45、11.45、14.45、17.3、23.3 m。压力传感器为 CYG1105 型固态压阻式,其输出信号经前置放大后,由 CS2092H 采集处理。火焰传感器由红外光敏三极管敏感元件和放大器组成,敏感元件产生的电脉冲信号经放大后由 CS2092H 采集处理。

实验辅助系统包括充气、循环及浓度检测单元、管口火焰处理设施等,充气循环和浓度检测单元包括气源、流量计、循环泵、管路和甲烷浓度测定仪组成。实验管道出口端附近设置的盛水水槽与火焰捕集管道,可及时扑灭或捕集管口火焰,保证实验安全。

实验时,在管道内布置好抑爆器并封闭管道开口端后,由四个等距的充气孔向管道内充入定量的质量浓度为 99.5% 的甲烷。启动循环泵搅拌约 30 min,在实验管道内形成体积分数 8.0% (误差不超过 8%) 的甲烷空气混合物。通过 CS2092H 系统发出实验点火信号直接触发抑爆器,点火信号由延时器延时约 80 ms 后点爆甲烷-空气混合物进行实验,同时触发 CS2092H 系统采集压力和火焰数据。

3 实验结果与讨论

主要考虑水雾空间密度和水雾区长度对激波衰减作用的影响,对实验管道内的压力与火焰信号进行系统的测量,所得结果与分析如下。

3.1 雾空间密度的影响

在管道内距离点火源 10 m 处的管轴中心位置固定安装长度为 1.6 m 的抑爆器,并在抑爆器内分别灌入 15、20、30 的水,绕轴转动使水均匀存储在抑爆器导爆索周围。在管道内形成约 1.6 m 的水雾区,其水雾空间密度分别为 24.37、32.5、48.75 kg/m³。图 3 是三种水雾空间密度条件下激波速度沿管道的变化情况及其与空载实验结果的对照(图 3 中的激波速度是两个压力测点间距离的平均值)。

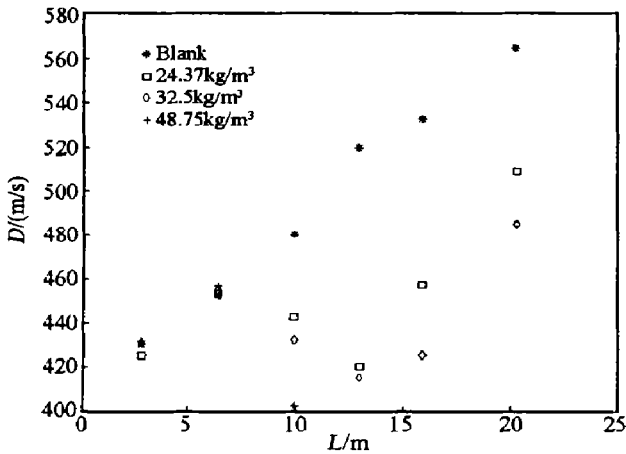


图 3 水雾密度对激波速度的影响

Fig.3 Effects of spray density on wave velocity

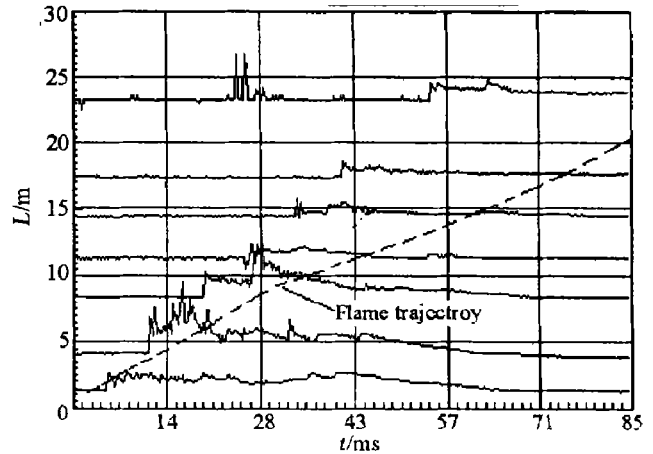


图 4 水雾密度为 24.37 kg/m³ 时的压力波变化及火焰迹线

Fig.4 Pressure waves and flame trajectory for 24.37 kg/m³

由图 3 可知,未加载主动水雾抑爆时,激波速度在整个实验管道长度内呈持续增加的趋势;在有主动水雾抑爆时,在水雾区及其后面的一定距离内,激波速度均表现出不同程度的下降趋势,且下降的幅度随着水雾空间密度的增加而增加。导致激波强度衰减的原因主要有两方面:(1)当激波阵面到达抑爆器产生的水雾区时与其作用,激波使水雾进一步破碎、雾化而被消耗部分能量;(2)火焰阵面穿行进入水雾区后受水雾抑制作用而降低了传播速度,从而削弱了对激波的增强作用。

当水雾密度为 24.37、32.5 kg/m³ 时,激波速度在水雾区及随后的一段距离内虽然有所降低,但在距点火源位置约 15 m 以后反而出现了增加的迹象。可以认为水雾区后出现激波增强的原因是由于水雾密度较小,导致对随后到达的火焰抑制作用不够,火焰穿过水雾区并形成了对先导激波的支持。图 4、5、6 给出了水雾密度分别为 24.37 kg/m³、32.5 kg/m³、48.75 kg/m³ 时,实测压力波波沿管道的变化情况和火焰传播的距离-时间迹线。从图 4 中明显看出,当水雾密度为 24.37 kg/m³ 时,激波压力在水雾区有衰减的迹象,但在管道约为 15 m 后再次出现增大,火焰阵面穿过水雾区并有加速的趋势且到达了管道开口端。可见,当水雾区长度为 1.6 m、水雾空间密度低于 32.5 kg/m³ 时,激波具有一定的衰减作用,但未能完全抑制爆炸。

当水雾密度增加到 48.75 kg/m³ 时,实测压力波波沿管道的变化情况与火焰距离时间迹线如图 6 所示,距点火源 10 m 处激波速度衰减到仅为 402.8 m/s,之后则完全衰减成为压缩波,火焰被扑灭在距离点火源约 12 m 的水雾区。可见当水雾密度为 48.75 kg/m³ 时爆炸被完全抑制。

因此,当水雾区长度为 1.6 m 时,在水雾密度约 48.75 kg/m^3 附近可能存在一个临界值,当水雾密度低于此值时,激波穿过水雾区后会再次成长增强,不能发生完全抑爆。

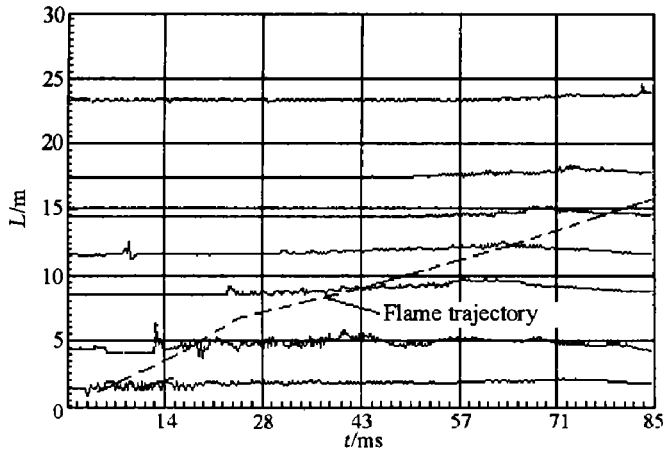


图 5 水雾密度为 32.5 kg/m^3 时压力波变化及火焰迹线
Fig. 5 Pressure waves and flame trajectory for 32.5 kg/m^3

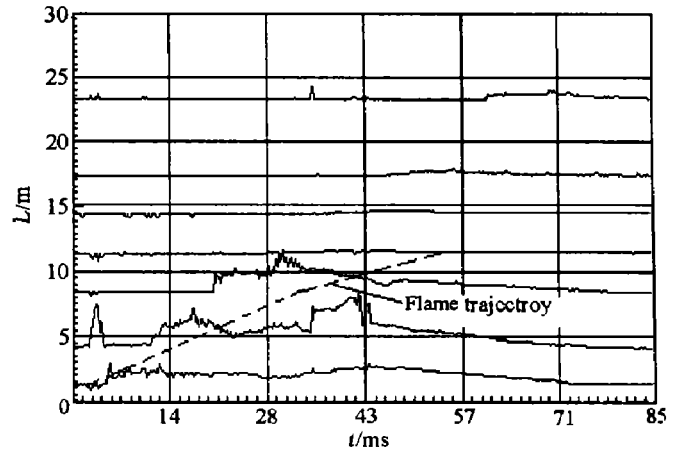


图 6 水雾密度为 48.75 kg/m^3 时压力波变化及火焰迹线
Fig. 6 Pressure waves and flame trajectory for 48.75 kg/m^3

3.2 水雾区长度的影响

如图 7 所示,在距离点火源 10 m 处的管道中心轴分别安装长度为 1.6、2.0、2.5、3.0 m 的抑爆器,并在抑爆器内分别灌水 20、25、31.25、37.5 kg,以在管道内形成密度为 32.5 kg/m^3 的水雾区,考察同一水雾密度下水雾区长度对激波衰减作用的影响。

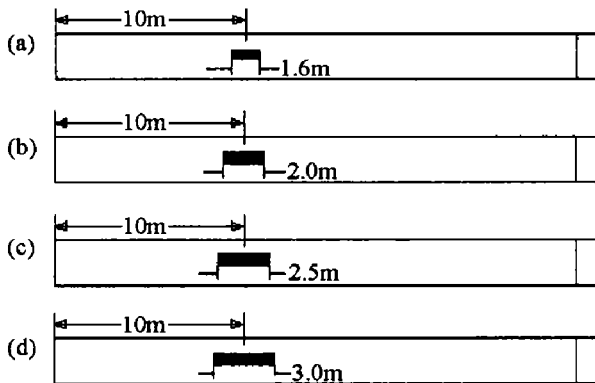


图 7 主动水幕抑爆装置布置方式
Fig. 7 Installation of active water-sprays suppressor

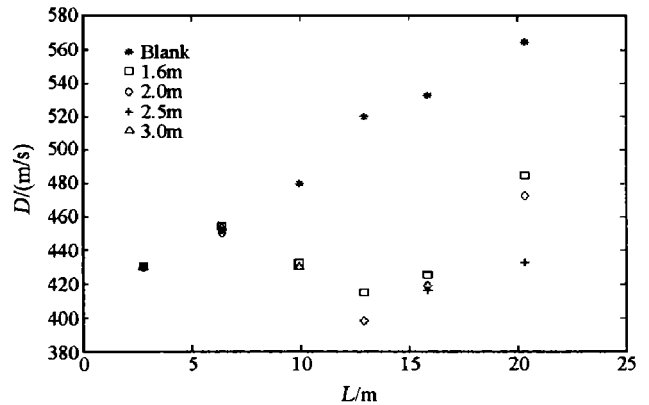


图 8 不同水雾区长度下激波速度的变化
Fig. 8 Effects of spray length on wave velocity

实验结果如图 7 所示,与前面的实验结果类似,在水雾区及其后的一定距离内激波速度均有下降的趋势,但在管道后半部分两个测试区段的激波速度随着水雾区长度的增加而降低,这表明水雾区越长,激波衰减作用越明显。

值得注意的是:(1)当水雾区长度增加到 2.5 m 时,测点 P_4 (距点火源 14.45 m)的压力波形表明此区间激波被衰减成为压缩波,但 P_5 以后又出现激波生成的趋势,图 9 中给出的压力波形变化清楚地表明了这一事实;(2)当水雾区长度增加到 3.0 m 时,则在测点 P_4 以后均为压缩波。上述情况表明:当水雾空间密度为 32.5 kg/m^3 时,在水雾区长度为 2.5 ~ 3.0 m 之间,存在一个激波完全衰减的临界长度。

3.3 抑爆范围讨论

根据前面的实验结果及讨论,当给定水雾区长度,则存在某一水雾空间密度临界值,低于此值,激波穿过水雾区后会重新成长增强因而不能完全抑爆;如果给定水雾密度,则存在一临界水雾区长度,当水雾区长度低于此临界值时,爆炸仍不能完全被抑制。图 10 是在水雾空间密度-水雾区长度平面上(ρ, L)给出的几个主要数据点。可以看出:当水雾区长度在 2.5 ~ 3.0 m 时,临界水雾密度约为 32.5 kg/

m^3 ;当水雾区长度为 1.6 m 时,临界水雾密度增至 48.75 kg/m^3 附近。因此,可以认为在水雾空间密度-水雾区长度平面上存在的某一抑爆临界曲线,此曲线将整个可能的试验范围划分为抑爆区(0)和非抑爆区(1)两部分,如图 10。

本文的实验结果与文献[6~7]对惰性粉尘的抑爆实验和数值结果具有一致性,即仅当抑爆剂浓度大于某一临界值时才能有效地抑制反应激波,否则激波穿越抑爆区后重新生成,或在抑爆区内形成另一种速度较低的两相爆轰。

值得注意的是图 10 仅为主动水雾抑爆范围示意图,如果实验数据足够,则可以准确地给出抑爆临界曲线的位置,而且可以给出考虑水雾粒度参数变化情况下曲线的变化。由于大型实验所需费用较高等原因,未对其加以深入研究。

4 结 论

简易主动水雾抑爆器具有成雾迅速、水雾空间大、存在时间长、水雾参数可调等特点。利用该装置在长 25 m、直径 700 mm,接近实际规模的大型爆炸试验管道中再现了水雾抑爆现象。实验结果表明:

(1)自制的主动水雾抑爆器具有良好的成雾性能,在接近实际规模的大型爆炸试验管道中利用该装置对主动水雾抑爆激波衰减现象研究是成功的,为深入研究主动水雾抑爆机理以及抑爆器适用范围的确定提供了一种新的手段。

(2)有主动水雾抑爆时,在水雾区及其后的一定距离内,激波速度均表现出不同程度的下降趋势。随着水雾空间密度的增加,激波衰减日趋明显,当水雾区长度为 1.6 m 时,在水雾密度为 $32.5 \sim 48.75$

kg/m^3 之间可能存在一个临界值,当水雾密度低于此值时,激波穿过水雾区后会再次成长增强,不能完全抑爆。在保持水雾空间密度不变的情况下,水雾区越长,激波衰减作用越明显。在水雾空间密度为 32.5 kg/m^3 时,在 2.5~3.0m 之间存在一个激波完全衰减成为压缩波的水雾区临界长度。

(3)随着水雾密度和水雾区长度的变化可能存在某一抑爆临界曲线,此曲线将整个可能的试验范围划分为抑爆区和非抑爆区两部分。因此,今后还应进一步利用具有实际规模的实验系统开展工作,给出抑爆临界曲线的精确位置,为抑爆系统设计、抑爆效果以及适用范围的评价提供准确的技术依据。

参考文献:

[1] 秦友花,沈兆吾,陆守香,等.水雾对气体火焰传播的实验研究[J].环境与安全学报,2001,(1):27-29.
 QIN You-hua, SHEN Zhao-wu, LU Shou-xiang, et al. Experimental study of the effect of water sprays on gas flame propagation [J]. Journal of Safety and Environment, 2001, (1):27-29

[2] Frolov S M. Modeling of droplet deformation and breakup conditions [A]. Proceedings of 16th International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems[C]. Cracow, Poland:[s.n.], 1997: 417-420.

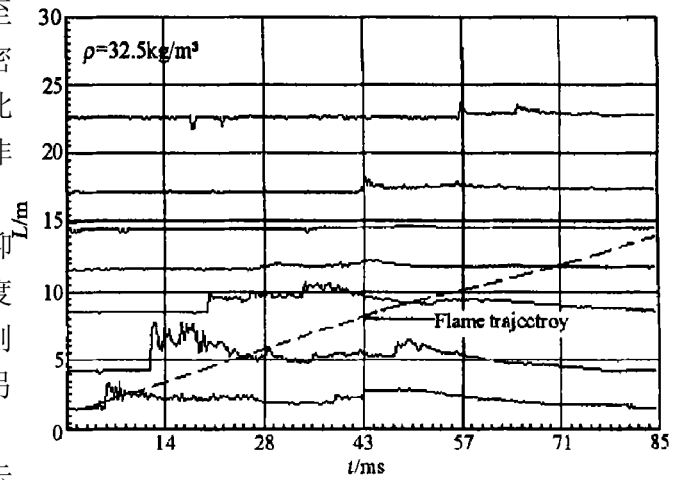


图 9 水雾区长度为 2.5 m 时压力波变化及火焰迹线
 Fig.9 Pressure waves and flame trajectory for 2.5 m spray length

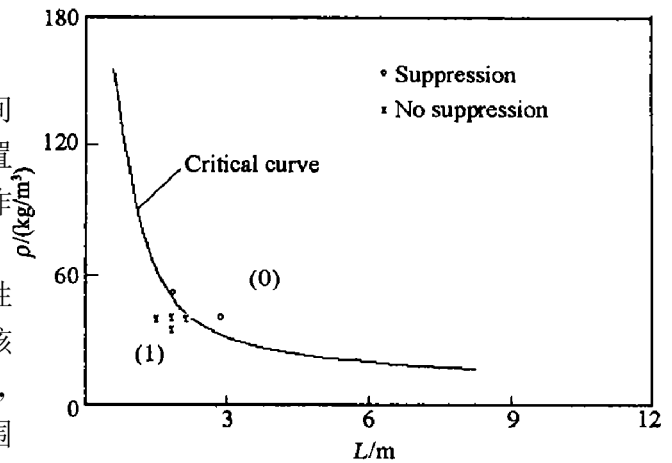


图 10 主动水雾抑爆范围分析图
 Fig.10 Analysis of explosion suppression range of active spray

- [3] Klenk W, Widdecke N, Frohn A. Disintegration of monodisperse droplet streams by shock wave[A]. Proceedings of 15th International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems[C]. [s.l.]: Boulder Co, 1995: 229—234.
- [4] Ranger A A, Nichols J A. Aerodynamic shattering of liquid drops [J]. AIAA J, 1969, 7(2): 285~290.
- [5] 夏自柱, 蔡周全, (作者), 等. YBW-I 型触发式抑爆装置的研究[R]. 重庆: 煤碳科学研究总院重庆分院, 1998.
- [6] 范宝春, 谢波, 张小和, 等. 惰性粉尘抑爆过程的实验研究[J]. 流体力学实验与测量, 2001, 21(54): 20—25.
FAN Bao-chun, XIE Bo, ZHANG Xiao-he, et al. Experimental study of explosion suppression with inert dust[J]. Experiments and Measurements in Fluid Mechanics, 2001, 15(4): 20—25.
- [7] 范宝春, 李鸿志. 惰性粉尘抑爆过程的数值模拟[J]. 爆炸与冲击, 2000, 20(3): 208—214.
FAN Bao-chun, LI Hong-zhi. Numerical simulation of explosion suppression with inert dust[J]. Explosion and Shock Waves, 2000, 20(3): 208—214.

Experimental study of explosion suppression by active water sprays in large-scale duct

XIE Bo^{1,2}, FAN Bao-chun², XIA Zi-zhu¹, WANG Ke-quan¹

(1. Chongqing Branch of the Central Coal Research Institute, Chongqing 400037, China;

2. Power Engineering College, Nanjing University of Science and Technology,
Nanjing 210094, Jiangau, China)

Abstract: In this paper, the effectiveness of shockwave attenuation and flame extinction has been experimentally studied using self-developed active explosion suppressor in large-scale test duct. The experimental results indicate that shockwave attenuation occurs in water sprays and its sequent district, and that shockwave attenuation becomes more marked with the spatial density of water spray increased. If the 1.6 meter-length water spray is used, the critical density of water spray is 48.75 kg/m^3 or so, below which the shockwave will be enhanced again once it travels through water spray district, and explosion suppression can't be achieved. If spray density is kept to be constant, i.e. 32.5 kg/m^3 , the strength of shockwave attenuation becomes more serious with length of spray district increased. It can be predicated that a critical length of spray district, 2.5~3.0 m or so, beyond which shock wave will attenuate to be compression wave. Therefore an approximate critical curve can be deduced from above results by which divides the whole possible experimental range into two parts, i.e. the suppression area and non-suppression area.

Key words: mechanics of explosion; explosion suppression; active water spray; shockwave attenuation; large-scale duct