

研究论文

DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20180479

泄压条件下管道内瓦斯爆炸传播的氮气阻爆

路长¹, 刘洋¹, 潘荣昆¹, 王鸿波¹, 张运鹏¹, 余明高²

(1 河南理工大学煤炭安全生产河南省协同创新中心, 河南 焦作 454003; 2 重庆大学煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044)

摘要: 矿井瓦斯爆炸发生后, 采用灭火剂进行阻爆, 将有助于从根本上消除爆炸的灾难性后果。本文在爆炸管道上设置双喷头, 探索喷出 N₂ 来实现阻爆和熄灭火焰。对于四周保持密闭的平直管道, 采用不同压力将氮气喷出, 但均未能阻止爆炸火焰沿管道的传播。在管道下表面设置开口进行泄压后, 可以观测到爆炸过程中大量的高温气团和预混气从该开口流出, 并在开口外继续发生反应。结合侧向泄压, 当双喷头中左喷头(第二喷头)不喷 N₂ 时, 右喷头(第一喷头)所喷 N₂ 在各个压力下也仍未能实现阻爆。但当左喷头(第二个喷头)压力在 0.1 MPa 及以上时, 均能实现阻爆。并且双喷头所喷 N₂ 压力越大, 爆炸火焰被阻止和熄灭的位置越靠前。通过侧向泄压使管道内的反应变弱是有利于阻爆的第一个主要原因。侧向泄压使管道内爆炸火焰的传播速度下降, 从而喷出更多氮气并获得更长的时间来对预混气进行充分稀释, 这是实现阻爆和熄灭火焰的第二个主要原因。

关键词: 甲烷; 爆炸; 反应; 阻爆; 熄灭火焰; 泄压; 氮气

中图分类号: TD 712

文献标志码: A

文章编号: 0438—1157 (2018) 12—5339—09

Preventing gas explosion by N₂ in pipe with lateral ventingLU Chang¹, LIU Yang¹, PAN Rongkun¹, WANG Hongbo¹, ZHANG Yunpeng¹, YU Minggao²

(1 Henan Province Collaborative Innovation Center of Coal Safety Production, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, Henan, China; 2 State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics Control, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: In the mine gas explosion, preventing the explosion by extinguishant will help to fundamentally eliminate the disastrous consequence of gas explosion. In this paper, we set up double nozzles on the explosion pipeline, and explore the discharge of N₂ to achieve the explosion and extinguish the flame. For the straight pipe with surrounding sides inclosed, experiments are conducted with serial N₂ pressures, but none of them can prevent the explosion from spreading along the pipe. Then, in this paper, an opening on lower surface of the pipe is set for venting. It can be observed in the explosion process that a large number of high-temperature air masses and premixed gas flow out from the opening, and continuously react outside the opening. Combined with lateral venting, when the left nozzle in the double nozzle does not spurt nitrogen, the explosions still can't be prevented no matter the right nozzle spurting N₂ with various pressures. However, when the pressure of the left nozzle is 0.1 MPa and above, the explosions can be prevented. And the larger the N₂ pressure, the more easily preventing the explosion and quenching the flame is. The first major reason for preventing explosion is to weaken the reaction in pipe by lateral venting. Also, lateral venting in the pipe to reduce the explosion speed of propagation, more nitrogen is ejected out and longer period of time is obtained to fully dilute the premixed gas. That is the second main reason for preventing the explosion and

2018-05-07 收到初稿, 2018-08-03 收到修改稿。

联系人: 余明高。第一作者: 路长 (1975—), 男, 博士, 副教授。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51674103, 51774059); 教育部创新团队发展支持计划项目 (IRT_16R22)。

Received date: 2018-05-07.

Corresponding author: Prof. YU Minggao, 13333910808@126.com

Foundation item: supported by the National Natural Science Foundation of China (51674103, 51774059) and the Program for Innovative Research Team in University of Ministry of Education of China (IRT_16R22).

quenching the flame.

Key words: methane; explosion; reaction; preventing the explosion; quenching the flame; venting; nitrogen

引 言

煤矿瓦斯爆炸会造成巨大的财产损失和人员伤亡。据统计, 在我国的煤炭生产中, 一次死亡 10 人以上的特、重大事故总数中, 约 70% 是瓦斯、煤尘爆炸事故^[1]。面对瓦斯爆炸所造成的危害, 如何更好地进行防治是国内外学者们一直关注的重点问题。其中有大量的文献是研究灭火剂、抑爆剂的抑爆来降低爆炸危害。抑爆研究中所采用的抑爆剂包括有惰性气体、水系灭火剂、干粉类灭火剂和卤素化合物等。

在惰性气体抑爆方面, Mitu 等^[2]在甲烷-空气预混气中加入惰性气体 He, Ar, N₂, CO₂, 观测它们对层流预混火焰燃烧速度的影响。Liang 等^[3]通过实验了解 N₂ 的加入对甲烷爆炸的影响。Wang 等^[4]则研究了 N₂/CO₂ 混合气体对甲烷爆炸的削弱作用。钱海林等^[5]也研究了 N₂/CO₂ 惰性气体对甲烷爆炸的抑制作用。

在水系灭火剂抑爆方面, Ingram 等^[6]研究了含 NaOH 细水雾对氢气爆炸的抑制。Roosendans 等^[7]则研究了含 K₂CO₃ 的细水雾对爆炸的减缓削弱作用。Yu 等^[8]研究了细水雾中添加 NaCl 及感应电荷对甲烷爆炸的抑制及增强作用。陈晓坤等^[9]对比了清水细水雾和添加 NaHCO₃、NaCl、KCl 的细水雾的抑爆效果, 发现添加 KCl 时效果最好。裴蓓等^[10]采用 CO₂ 和细水雾双喷头对甲烷爆炸进行抑制研究。

在干粉灭火剂抑爆方面, Wang 等^[11]合成了碳酸氢钠和赤泥的复合材料, 并研究其对甲烷爆炸的抑制作用。Jiang 等^[12]建立了主动抑爆系统, 在管道内甲烷爆炸发生后快速喷出氮气和 ABC 干粉进行抑爆。丁浩青等^[13]研究了二氧化硅粉体对爆炸的抑制作用。罗振敏等^[14]发现超细纳米粉体对爆炸的抑制具有更好的效果。王信群等^[15]用 BC 干粉进行抑爆实验研究, 改性后抑制效果大为提高。张宇明等^[16]研究了 ABC 干粉对爆炸超压的抑爆降低作用。

在卤素化合物抑爆方面, Pagliaro 等^[17]研究了 CF₃Br(Halon 1301), C₆F₁₂O(Novec 1230), C₃H₂F₃Br(2-BTP), C₂HF₅(HFC-125)等卤素化合物对气体预混火焰的抑制和增强的双重作用。Yang 等^[18]通过实验发现三种卤素化合物抑制效果的相对强弱为:

HFC131I>HFC125>HFC227ea。邓军等^[19]分析了氟化酮对瓦斯爆炸的抑制作用。路长等^[20]研究了四氟乙烷对甲烷爆炸过程的抑制作用。薛少谦^[21]利用七氟丙烷进行甲烷爆炸的抑制实验研究。

这些研究都在一定程度上实现了对爆炸过程的削弱。相对应, 我国也在煤矿中大范围推广设置岩粉棚、水棚、水雾等防爆抑爆设施。但迄今, 这些抑爆措施都未能取得很好的效果。其根本原因在于这些抑爆措施主要起到减缓减弱爆炸的作用, 而无法阻止爆炸传播和熄灭爆炸火焰, 那么爆炸就仍会在整个预混气空间内完成传播和反应, 爆炸的威力仍然很大, 最终无可避免仍会造成很大的灾害。

更好的防治方法是阻止爆炸在煤矿巷道内的传播。在阻爆方面, 针对瓦斯输送管道, 我国已经制定了瓦斯管道阻爆的安全生产行业标准^[22]。多种用于管道瓦斯爆炸后的阻断机械装置已被研究和应用。但这些机械阻断管道的方法目前还不适用于煤矿巷道。因为巷道需要维持矿井通风, 否则会导致井下人员窒息。王凯等^[23]根据统计指出, 瓦斯爆炸后通风系统被破坏而风流紊乱、通风不畅, 导致的人员窒息死亡占到总死亡人数的 80% 以上。

还有一些研究, 将阻火器应用于阻爆。Nie 等^[24]进行了多孔陶瓷、多孔材料的抑爆研究。Wang 等^[25]研究了波纹阻火器对丙烷爆燃火焰的熄灭作用。Zhang 等^[26]分析了泡沫陶瓷对爆炸火焰和冲击波的耦合作用。魏春荣等^[27]从实验上分析了多孔材料的阻隔爆效果。孙建华等^[28]发现金属丝网和泡沫陶瓷组合体的抑爆效果比两者单用时效果都更好。这些多孔介质的研究应用也实现了管道中的阻爆。但如果在煤矿巷道中放置固体阻火器, 同样会阻断矿井通风, 使井下人员处于危险之中。

基于此, 如果采用灭火剂来进行阻爆, 将不会阻断巷道中的通风, 这将是一个很好的研究方向。然而目前这方面的研究和文献还很少。Wang 等^[29]应用南非的 HS 主动抑爆系统进行实验测试, 能达到快速喷粉和扑灭爆炸火焰的效果。另外, 荣佳等^[30]研制的纯机械触发方式自动抑爆装置可在 25 ms 内启动, 120 ms 内形成 30 m 长、雾面持续时间超过 6 min 的抑爆屏障, 可有效阻隔火焰的传播。

氮气对人的危害很小,应用于煤矿巷道中也不会阻断通风,不会破坏井下设施。目前用氮气进行抑爆和稀释爆炸预混气的研究很多,但关于用氮气进行阻爆的研究文献还未能检索到。本文通过实验来探讨喷出氮气实现阻爆和熄灭爆炸火焰的方法。这将有利于从根本上削弱和消除爆炸发生后所造成的灾难性后果,从而更有效地促进我国的瓦斯爆炸防治。

1 实验条件

实验系统如图1所示。整个系统大体可以分为管道部分、充气部分、点火部分、阻爆部分和测量部分等。主管道为透明的有机玻璃管,便于观测爆炸传播过程,尺寸为 $150\text{ mm}\times 150\text{ mm}\times 1600\text{ mm}$ 。实验中管道为半封闭式水平放置,右端保持封闭,左端在实验前用PVC薄膜封堵实验中泄压打开,开口尺寸为 $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 。在距右端 1100 mm 处,管道下表面也设置有一个泄压口,根据实验设计可进行封闭和泄压打开,泄压口尺寸也为 $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 。破膜压力在 3 kPa 左右。充气部分包括空气压缩机、甲烷钢瓶、气管、质量流量计、三通、充气口等。充气口设置在主管道的右端面上。充气时按比例设定好空气和甲烷的流量,由质量流量计进行控制,采用排气法充入4倍管道体积的预混气,从而使管道内的预混气浓度达到设计浓度^[31]。本文主要探讨喷出氮气的阻爆方法,为使爆炸火焰的传播速度稍慢一点,便于观测,本文采用的甲烷浓度为 10.5% 。充完气后静置 30 s 以使管内预混气充分均匀。

点火部分由电火花脉冲点火器、电源、开关组成。点火器安装于主管道右端面的正中心。点火能量为 0.15 J 。阻爆部分由双氮气瓶、双喷头、连接气

管、控制电磁阀、电源、开关等组成。电磁阀开关和点火器开关为一体式设计,在点火起爆的同时,电磁阀开启向管内喷出氮气。两个喷头分别设置在距管道右端面 1300 mm 处(为右喷头,第一喷头)和 1450 mm 处(为左喷头,第二喷头)。测量部分由高速摄像机、控制器、计算机组成,记录和存储爆炸火焰的传播过程及阻爆过程。

在本文所有实验中,条件变化仅包括:(1)向下的侧向泄压口保持封闭或泄压打开;(2)两个喷头处的氮气压力值进行系列改变。此外,所有其他条件均保持不变。

2 结果与分析

2.1 无侧向泄压的爆炸传播

主管道上的下表面泄压口保持封闭,左端在充气阶段用PVC薄膜封堵,爆炸发生后破裂泄压,实验中让爆炸火焰沿着平直管道水平传播。在点火的同时打开电磁阀喷出氮气进行抑爆。喷头压力 $0.2\text{--}0.1\text{ MPa}$,及 $0.3\text{--}0.2\text{ MPa}$ 下的爆炸火焰传播过程分别如图2(a)、(b)所示。喷头压力 $0.2\text{--}0.1\text{ MPa}$ 表示双喷头中左喷头压力为 0.2 MPa ,右喷头压力为 0.1 MPa 。 $0.3\text{--}0.2\text{ MPa}$ 表示左喷头压力 0.3 MPa ,右喷头压力 0.2 MPa 。沿火焰传播方向,右喷头在前,左喷头在后。

从图2可以看出,爆炸火焰在到达喷头位置前,整个火焰面都比较平滑,主要表现为层流火焰。火焰在到达喷头位置后,由于氮气的喷入混合作用,火焰面呈现出紊乱状态,主要表现为湍流火焰。最终爆炸火焰穿过氮气区,继续沿着管道传播,并没有被氮气所阻止。

改变两个喷头的氮气压力,其他条件保持不

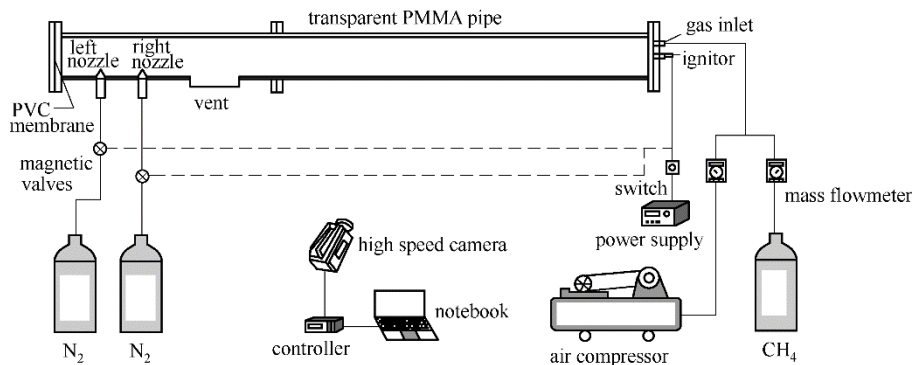


图1 实验系统示意图

Fig.1 Schematic of experimental system

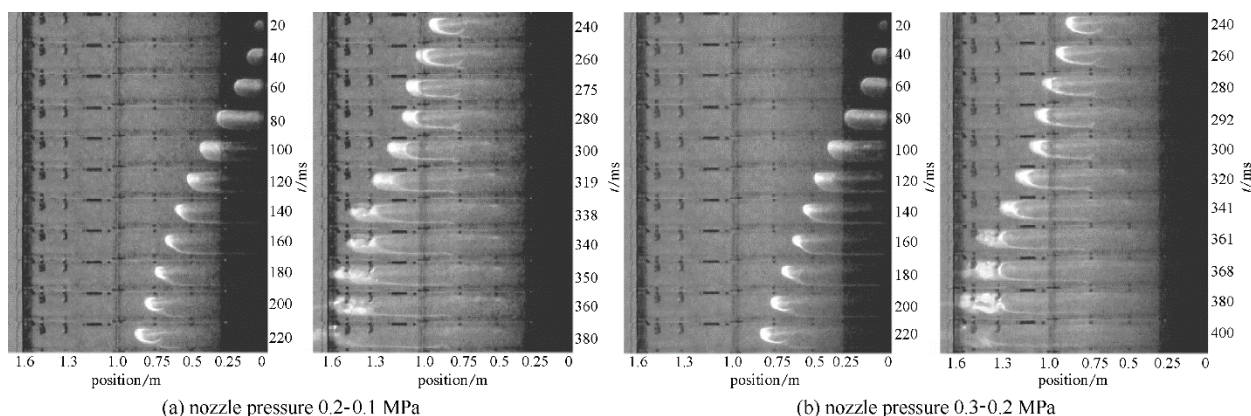


图 2 无侧向泄压下的爆炸传播过程

Fig.2 Propagation of gas explosion without lateral venting

表 1 无侧向泄压下爆炸火焰的传播情况

Table1 Flame spread characteristics of explosion without lateral venting

No.	Left-right nozzle pressure /MPa	Arriving the vent moment /ms	Arriving right nozzle moment /ms	Arriving left nozzle moment /ms	Arriving left pipe end moment /ms	Preventing the explosion or not
1	0	271	315	336	347	no
2	0.1-0	282	326	346	355	no
3	0.2-0.1	275	319	338	350	no
4	0.3-0.2	292	341	361	368	no

变, 爆炸火焰在管内的传播情况如表 1 所示。从表 1 中可以看出, 喷氮气条件下, 爆炸火焰在管道内的总传播时间都比不喷氮气时大。随着所喷氮气压力的增大, 传播时间在趋势上也是增大的, 即传播速度有所下降。这与诸多文献中惰性气体的抑爆作用规律是一致的^[3-6]。

但从表 1 中也看到实验 3 的传播时间比实验 2、4 的都稍小一点, 传播时间随喷气压力没有呈现单调递增的规律。这种波动是由于爆炸过程的复杂性造成的。即使设定条件一样, 各次实验中的传播速度、火焰形状等都会有一定的波动、变化, 但各次实验爆炸过程的规律都是一致的。

对于本文所关心的阻爆和熄灭爆炸火焰的情况, 在各个氮气压力的实验中均未能实现。在有关抑爆的文献中^[7-19], 也未看到阻爆和熄灭爆炸火焰的情形 (对于预先加入大量抑爆剂而使预混气未能被点燃、起爆的情形, 不在本文的讨论分析之列)。这说明由于爆炸反应的剧烈性、传播的高速性, 直接喷入灭火剂是很难实现阻爆和熄灭爆炸火焰的。

不能阻爆的原因在于, 预混气没有完全被稀释到爆炸极限以下。大量的预混气和所喷入的氮气都同时处于管道内, 甲烷/空气预混气与氮气就会发生

混合, 喷出的氮气是否能阻爆实际上就是预混气全部被稀释到爆炸极限以下的速度与爆炸火焰传播到达速度之间的竞争。按照燃烧理论, 扩散混合过程是比较慢的, 当爆炸火焰到达喷头区域时, 若仍有部分气体处于可燃极限以上, 那么火焰就会点燃这些气体, 从而穿过喷头区域, 不能实现阻爆。

2.2 侧向泄压下的爆炸传播

主管道上的下表面泄压口和左端面在充气阶段都用 PVC 薄膜封堵, 爆炸发生后这两处薄膜都会破裂泄压。实验中, 从右端面点火使爆炸火焰沿着管道向左传播。在点火的同时打开电磁阀喷出氮气进行阻爆灭火。喷头压力 0.1-0 MPa 和 0.2-0.1 MPa 下的爆炸火焰传播过程分别如图 3(a)、(b)所示。喷头压力 0.1-0 MPa 表示双喷头中左喷头的压力为 0.1 MPa, 右喷头压力为 0 即不喷气。0.2-0.1 MPa 表示左喷头压力为 0.2 MPa, 右喷头压力为 0.1 MPa。沿爆炸火焰传播方向, 右喷头在前为第一喷头, 左喷头在后为第二喷头。

从图 3(a)可以看到, 最终管道内的爆炸火焰被阻止于左喷头 (第二喷头) 处, 有零星的火焰在达到和穿越左喷头 (第二喷头) 所在断面时也都被扑灭。因此, 通过侧向泄压有效地实现了对管道内爆炸传播的阻止和火焰的扑灭。

图 3(a)中,当爆炸火焰在 247 ms 传播到侧向泄压口处以后,管道内的气体和火焰就持续通过侧向泄压口向管道外流出,直到所有反应结束。图中泄压口处的管内和管外部分都同时有大面积的明亮火焰,说明除了已燃的高温气体向外泄出,大量的未燃预混气也在向外泄出,并在管道外发生剧烈的反应。泄压口左侧第二喷头所喷出的氮气也成为驱动未燃预混气从泄压口流出的动力源。由于管道内的预混气浓度下降,可以看到 300~380 ms 这段时间火焰在管道内的传播变得很弱。因此,管道内大量未燃预混气的泄出,使管道内的火焰传播变弱,是易于阻爆和扑灭火焰的内在原因之一。从 400 ms 开始爆炸火焰头部又逐渐填满整个管道断面,并继续向左边传播。这说明由于爆炸反应的剧烈性和空间分布性,只要还存在火焰和可燃预混气,那么爆炸就仍会完成整个预混气空间的传播。当 480 ms 爆炸火焰到达第二喷头处以后,火焰却不能越过喷头断面向左方传播,说明在该断面上预混气浓度已经被稀释至可燃浓度以下,断面完全被氮气所遮断。在表 1 所示的无侧向泄压各实验中,火焰传播到第二喷头处的最长时间是 388 ms,也要比本次实验的

480 ms 小很多。这说明侧向泄压口左侧气体向泄压口流出(向右)与火焰传播方向(向左)形成逆流,大大降低了火焰的传播速度。第二喷头所喷氮气获得更长的时间来充分稀释该断面上的预混气,形成断面遮蔽,这是实现在该处阻爆和扑灭爆炸火焰的内在原因之二。

从图 3(b)可以看到,最终管道内的爆炸火焰被阻止于右喷头(第一喷头)处,在 440~560 ms 这段时间内有零星的火焰到达和穿越右喷头(第一喷头)所在断面时也都被扑灭。同样,通过侧向泄压很有效地实现了对管道内爆炸火焰的传播阻止和扑灭。而且相比于图 3(a),随着喷头压力的增大,更易于实现阻爆。

图 3(b)中当爆炸火焰在 260 ms 传播到侧向泄压口处以后,同样,管道内的气体和火焰就持续通过侧向泄压口向管道外流出,直到所有反应结束。泄压口处的管内和管外部分都同时由大面积的明亮火焰,说明已燃的高温气体向外泄出的同时,大量的未燃预混气也在向外泄出,并在管道外发生剧烈的反应。泄压口左侧第一喷头、第二喷头所喷出的氮气也成为驱动未燃预混气从泄压口流出的动力

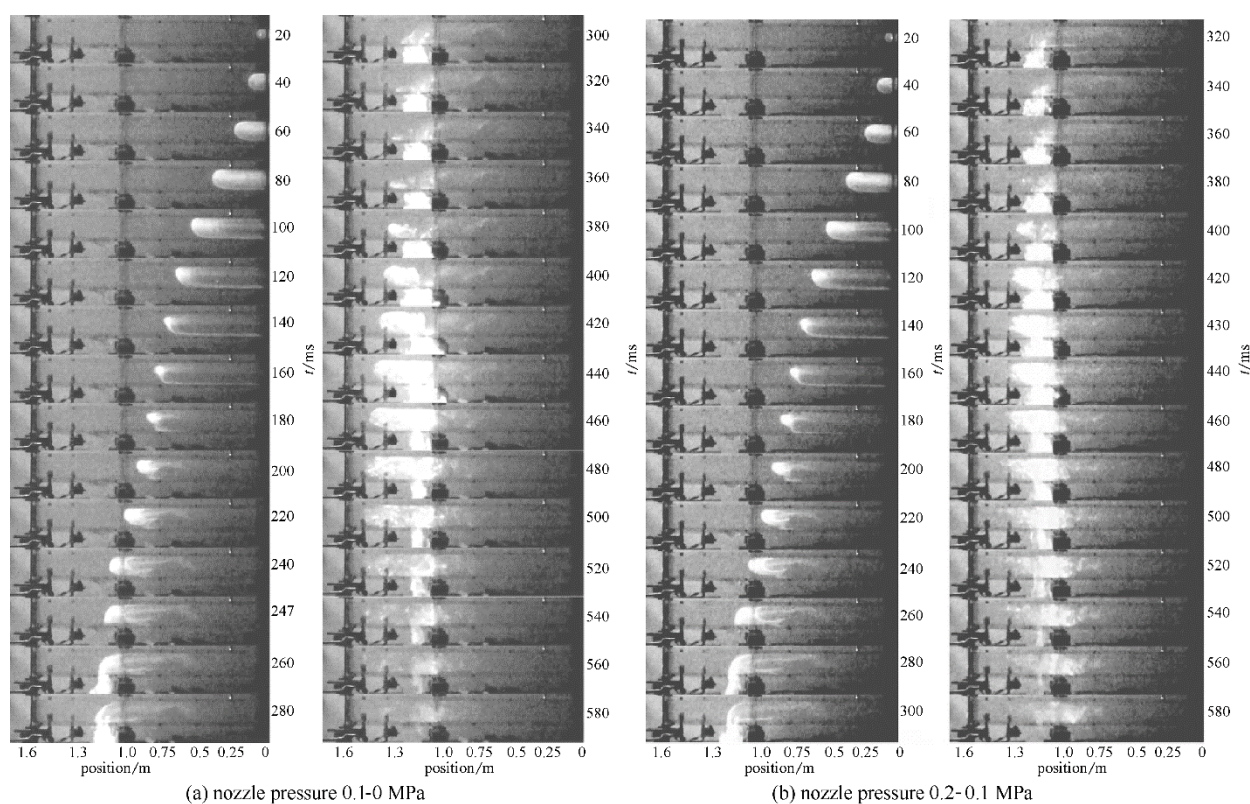


图 3 侧向泄压下的爆炸传播过程

Fig.3 Propagation of gas explosion with lateral venting

源。由于管道内的未燃预混气浓度下降, 可以看到 320~380 ms 这段时间火焰在管道内的传播是比较弱的。在 400~480 ms 这段时间, 泄压口左侧火焰虽有所增强, 但总体还是减弱了。因此, 管道内大量预混气的泄出, 使管道内的火焰反应变弱, 有利于爆炸的阻止和火焰的扑灭。

图 3(b)中, 爆炸火焰到达第一喷头的时刻是 430 ms, 这同样比表 1 中所有实验的火焰到达第二喷头处时间都要长。这段更长的时间有利于喷出更多的氮气, 同时充分稀释整个断面上的预混气, 从而形成断面遮蔽, 因此有利于在该处实现爆炸传播的阻止。

N_2 喷头压力 0.3-0.2 MPa 和 0-0.3 MPa 下的爆炸火焰传播过程如图 4(a)、(b)所示。喷头压力 0.3-0.2 MPa 表示左喷头压力为 0.3 MPa, 右喷头压力为 0.2 MPa。0-0.3 MPa 表示左喷头压力为 0 即不喷气, 右喷头压力为 0.3 MPa。沿爆炸火焰传播方向, 右喷头在前, 左喷头在后。图 4(a)中当爆炸火焰在 260 ms 传播到侧向泄压口处以后, 管道内的气流和火焰就持续通过侧向泄压口向管道外流出, 直到所有反应结束。泄压口外也持续发生剧烈的反应, 说明管道内的未燃预混气同样在不断地从泄压口流出。泄压口左侧第一喷头、第二喷头所喷出的氮气也成为驱动未燃预混气从泄压口流出的动力源。由于 0.3-0.2 MPa 的喷头压力值较大, 因此喷头区域附近的

预混气迅速被稀释和驱离, 泄压口左侧管道内的火焰变得很弱。在 460 ms 时, 爆炸火焰往左传播到最远处, 距右端面约 1250 mm, 但未能到达第一喷头的 1300 mm 处。管道内的火焰不能再继续向左传播, 而是被驱离和扑灭。

图 4(a)中, 爆炸火焰在管道内的传播最终并未到达第一喷头位置就被阻止和扑灭。说明随着喷头压力的进一步增大, 所喷出的氮气更有利于熄灭管道内的爆炸火焰, 阻止其继续沿着管道传播。

侧向泄压条件下能实现阻爆的机理如下: 首先, 泄压口打开后管内气体快速流出, 使泄压口处的压力迅速下降, 未燃预混气在爆炸火焰到达泄压口前就持续流出管外; 其次, 喷出的氮气也是一个压力源, 在稀释下方预混气的同时, 也驱动未燃预混气进一步从泄压口流出; 第三, 当爆炸火焰到达泄压口处时, 泄压口与氮气喷头之间区域的甲烷、氧气不管是绝对数量还是浓度占比都已经大幅度下降, 按照燃烧爆炸理论, 此时不管是反应速率还是传播速度都会出现大幅度下降, 实验观测也是如此; 第四, 当爆炸火焰到达泄压口处以后, 由于泄压的作用就是降压, 因此泄压口处的压力是比较低的, 但泄压口处已变成了燃烧区, 而喷头处是未燃烧区但氮气压力较大, 此时压力梯度方向与火焰传播方向是相反的, 按照流体力学理论, 这将使火焰传播速度下降, 实验图中也可以看到火焰到达泄压口左

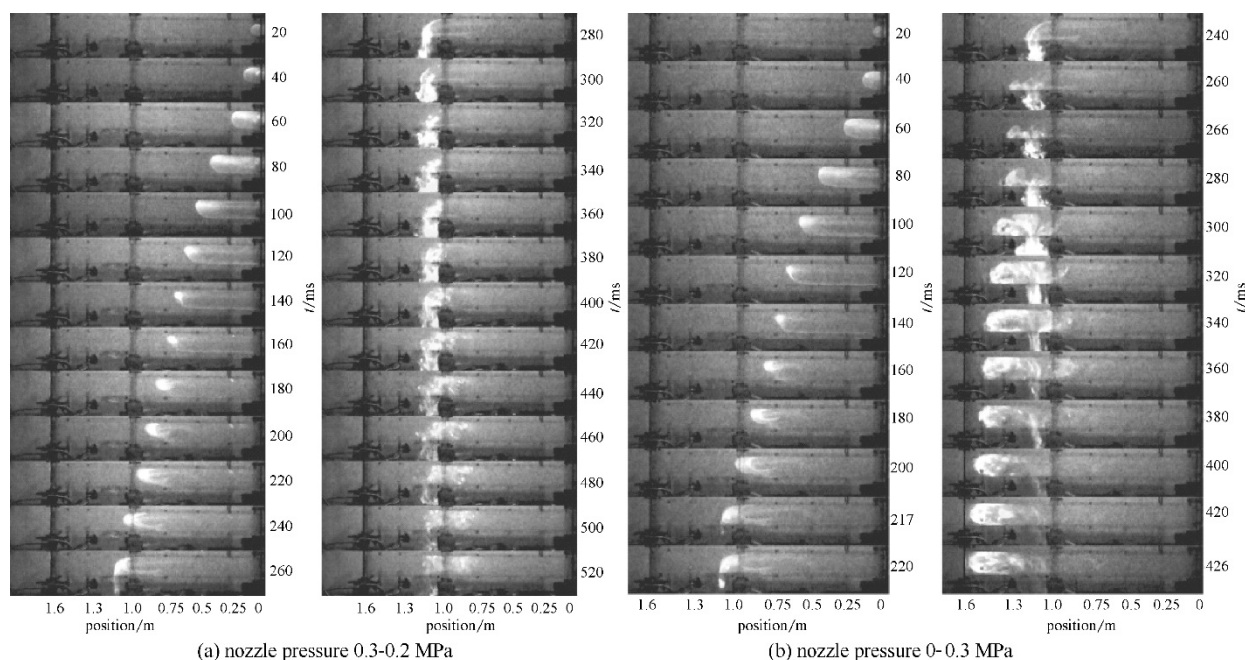


图 4 侧向泄压下的爆炸传播过程

Fig.4 Propagation of gas explosion with lateral venting

侧以后, 火焰和高温气团逆着传播方向回流到泄压口流出; 第五, 在传播速度大幅度下降的情况下, 有更长的时间喷出更多的氮气, 有利于形成窒息区; 第六, 大量的甲烷和氧气流出到管道外以后, 喷头下方区域就很容易被完全稀释到可燃极限以下; 因此泄压条件下能有效地用氮气实现阻爆。

但在图 4(b)中, 同样是侧向泄压和喷氮气, 爆炸火焰沿着管道的传播却未能被阻止和扑灭, 最终火焰越过氮气区域传播到管道的最左端。对比图 3(a)喷头压力 0.1-0 MPa 和图 4(b)喷头压力 0-0.3 MPa, 两者都是单喷头喷氮气, 且后者的压力比前者还要大, 但前者能阻止和扑灭管内的爆炸火灾, 后者却不能。两者最主要的区别在于喷气喷头的位置不同。前者是左喷头喷气, 离泄压口较远, 后者是右喷头喷气, 离泄压口较近。

分析图 4(b)中的火焰传播过程, 火焰在 217 ms 时到侧向达泄压口处, 同样, 大量的预混气从泄压口流出, 在 240~360 ms 之间泄压口外都形成剧烈的燃烧。同时在 240~280 ms 之间可以看到也有较弱的火焰沿着管道内继续向左传播, 并在 266 ms 时到达第一喷头处。但在第一喷头处火焰并没有被阻止, 可以看到在 280 ms 时, 火焰越过了喷头所在断面。随后在 300 ms 时火焰持续越过第一喷头并持续扩大, 在 320 ms 时火焰已经重新扩展到了整个管道截面。由于第二喷头没有喷氮气, 因此火焰越过第一喷头继续向左传播就没有再遇到阻拦, 在 340 ms 时火焰到达第二喷头处, 在 426 ms 时到达管道左端, 不能实现阻爆。氮气喷头各压力条件下的爆炸火焰传播情况如表 2 所示。从表 2 中可以看到, 实验 1 不喷氮气情况下, 爆炸火焰传播到第一喷头(右喷头)的时间是 439 ms, 比实验 2~7 喷氮气情况

下经历的时间都长, 说明喷氮气所导致的气体紊流会使火焰传播加速。另一方面在同类实验 5~8 中随着氮气压力增大, 火焰达到第一喷头(右喷头)的时间相应延长, 又说明氮气对爆炸传播的阻滞作用是随压力而增大的。在接近右喷头的相同距离上, 实验 8 所需时间已超过实验 1 不喷氮气的情形。因此, 喷入氮气时对爆炸传播具有紊流加速和惰性稀释阻滞的双重作用。加速作用和阻滞作用哪一个占主导并不是固定的, 而跟具体的实验条件有关。

从表 2 数据还可看到, 不能阻止扑灭爆炸火焰的实验 2~4 中, 火焰到达喷氮气喷头(右喷头)的时间都不超过 273 ms。而能阻止扑灭爆炸火焰的实验 5~8 中, 火焰到达被阻止扑灭位置的时间都不小于 430 ms, 这比不能扑灭的 273 ms 大很多。说明在爆炸火焰到达前, 是否喷出更多氮气, 及是否有足够长时间以充分稀释整个管道断面的预混气到可燃极限以下, 是能否阻爆成功的关键。

表 2 中单用右喷头的实验 2、3、4 及对应的图 4(b)中, 未能阻止爆炸沿管道传播的主要原因在于, 火焰到达第一喷头(右喷头)耗时短, 仅 260~270 ms 多就已到达。此时喷头所在断面上仍有部分预混气未被稀释到可燃极限以下, 因此就会被火焰点燃, 使得火焰穿过了第一喷头断面。由于左侧的第二喷头没有喷氮气, 因此爆炸火焰随后向左的传播就不再受到任何阻止, 从而火焰区不断增强, 最后就会传播到管道最左端。不能阻爆的关键在于, 单喷头形成的稀释区域小, 而且在爆炸火焰到达时, 所喷氮气未能将整个管道断面的预混气都充分稀释到可燃极限以下。

表 2 中单用左喷头的实验 5、6 中能实现阻爆的主要原因在于, 火焰到达左喷头经历的时间更长,

表 2 侧向泄压下爆炸火焰传播情况

Table 2 Flame spread characteristics of explosion with lateral venting

No.	N ₂ pressure of left-right nozzle /MPa	Moment of arriving vent /ms	Moment of arriving right nozzle /ms	Moment of arriving left nozzle /ms	Moment of arriving left pipe end /ms	Preventing explosion or not
1	0	273	439	653	767	no
2	0-0.1	205	273	323	397	no
3	0-0.2	219	262	331	409	no
4	0-0.3	217	266	340	426	no
5	0.1-0	247	383	482	—	preventing at left nozzle
6	0.2-0	249	402	492	—	preventing at left nozzle
7	0.2-0.1	260	430	—	—	preventing at right nozzle
8	0.3-0.2	254	(460) —	—	—	preventing between right nozzle and vent

Note: “—” represents flame not reaching this position and no data; “(460)—” represents that flame can't reach right nozzle, and moment of flame reaching position nearest to right nozzle is 460 ms.

喷头喷出更多的氮气,也有更多的时间对喷头下区域进行充分稀释,同时预混气也在不断地流出管外,时间越长流出得越多,管内喷头区域就越容易被稀释到可燃极限以下。表 2 中实验 5 和 6 中,火焰到达左喷头的时间都超过了 480 ms,远超过实验 2、3、4 中到右喷头的时间(273、262、266 ms)。更长的时间有利于流出更多预混气,喷出更多氮气,更彻底进行混合稀释。因此单采用左喷头时也能有效实现阻爆。

3 结 论

(1) 由于爆炸反应的剧烈性,当瓦斯爆炸在四周保持封闭的管道内传播时,本文采用双喷头喷入各种压力的氮气均未能实现阻爆。

(2) 在管道下表面开口进行泄压条件下,左喷头不喷氮气仅靠近泄压口的右喷头喷氮气时,爆炸火焰在管道内的传播也不能被阻止。但当左喷头喷氮气,且双喷头氮气压力在 0.1-0 MPa 及以上时,均能在所喷氮气区域内实现阻爆并熄灭爆炸火焰。而且氮气压力越大,越有利于阻止爆炸传播。

(3) 侧向泄压时大量高温气团及未燃预混气从泄压口流出,使管道内的爆炸反应变弱,这是有利于阻爆和扑灭管道内火焰的一个主要因素。从泄压口流出的预混气越多,越容易实现爆炸传播的阻止。

(4) 到达侧向泄压口后,爆炸火焰在管内的传播速度大幅下降。火焰到达前,喷头有更多时间喷出氮气,并有更多的时间来稀释和驱离预混可燃气。当所喷氮气区域的所有预混气浓度都下降到可燃极限以下时,火焰就不能继续沿管道传播,这是实现阻爆和熄灭爆炸火焰的另一个主要因素。爆炸火焰传播速度越慢,越容易实现阻爆。

References

- [1] 周心权, 陈国新. 矿井重大瓦斯爆炸事故致因的概率分析及启示[J]. 煤炭学报, 2008, **33**(1): 43-46.
ZHOU X Q, CHEN G X. The probability analysis of occurrence causes of extraordinarily serious gas explosion accidents and its revelation[J]. Journal of China Coal Society, 2008, **33**(1): 43-46.
- [2] MITU M, GIURCAN V, RAZUS D, *et al.* Inert gas influence on the laminar burning velocity of methane-air mixtures[J]. Journal of Hazardous Materials, 2017, **321**: 440-448.
- [3] LIANG Y T, ZENG W, HU E J. Experimental study of the effect of nitrogen addition on gas explosion[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2013, **26**: 1-9.
- [4] WANG Z R, NI L, LIU X, *et al.* Effects of N₂/CO₂ on explosion characteristics of methane and air mixture[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2014, **31**: 10-15.
- [5] 钱海林, 王志荣, 蒋军成. N₂/CO₂ 混合气体对甲烷爆炸的影响[J]. 爆炸与冲击, 2012, **32**(4): 445-448.
QIAN H L, WANG Z R, JIANG J C. Influence of N₂/CO₂ mixture on methane explosion[J]. Explosion and Shock Waves, 2012, **32**(4): 445-448.
- [6] INGRAM J M, AVERILL A F, BATERSBY P, *et al.* Suppression of hydrogen/oxygen/nitrogen explosions by fine water mist containing sodium hydroxide additive[J]. Journal of Hydrogen Energy, 2013, **38**: 8002-8010.
- [7] ROOSENDANS D, WINGERDEN K V, HOLME M N, *et al.* Experimental investigation of explosion mitigating properties of aqueous potassium carbonate solutions[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2017, **46**: 209-226.
- [8] YU M G, WAN S J, XU Y L, *et al.* Suppressing methane explosion overpressure using a charged water mist containing a NaCl additive[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016, **29**: 21-29.
- [9] 陈晓坤, 林滢, 罗振敏, 等. 水系抑制剂控制瓦斯爆炸的实验研究[J]. 煤炭学报, 2006, **31**(5): 603-606.
CHEN X K, LIN Y, LUO Z M, *et al.* Experiment study on controlling gas explosion by water-depressant[J]. Journal of China Coal Society, 2006, **31**(5): 603-606.
- [10] 裴蓓, 余明高, 陈立伟, 等. CO₂-双流体细水雾抑制管道甲烷爆炸实验[J]. 化工学报, 2016, **67**(7): 3101-3108.
PEI B, YU M G, CHEN L W, *et al.* Suppression effect of CO₂-twin fluid water mist on methane/air explosion in vented duct[J]. CIESC Journal, 2016, **67**(7): 3101-3108.
- [11] WANG Y, CHENG Y S, YU M G, *et al.* Methane explosion suppression characteristics based on the NaHCO₃/red-mud composite powders with core-shell structure[J]. Journal of Hazardous Materials, 2017, **335**: 84-91.
- [12] JIANG B Y, LIU Z G, TANG M Y, *et al.* Active suppression of premixed methane/air explosion propagation by non-premixed suppressant with nitrogen and ABC powder in a semi-confined duct[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016, **29**: 141-149.
- [13] 丁浩青, 温小萍, 邓浩鑫, 等. 障碍物条件下纳米 SiO₂ 粉体抑制瓦斯爆炸特性[J]. 安全与环境学报, 2017, **17**(3): 958-962.
DING H Q, WEN X P, DENG H X, *et al.* Suppression function of SiO₂ nanoparticles against the gas explosion in the presence of obstacles[J]. Journal of Safety and Environment, 2017, **17**(3): 958-962.
- [14] 罗振敏, 邓军, 文虎, 等. 纳米粉体抑制矿井瓦斯爆炸的实验研究[J]. 中国安全科学学报, 2008, **18**(12): 84-88.
LUO Z M, DENG J, WEN H, *et al.* Experimental study on the suppression of gas explosion with nanometer powder in coalmines[J]. China Safety Science Journal, 2008, **18**(12): 84-88.
- [15] 王信群, 王婷, 徐海顺, 等. BC 粉体抑爆剂改性及抑制甲烷/空气混合物爆炸[J]. 化工学报, 2015, **66**(12): 5171-5178.
WANG X Q, WANG T, XU H S, *et al.* Modification of commercial BC dry chemical powder suppressant and experiments on suppression of methane-air explosion[J]. CIESC Journal, 2015, **66**(12): 5171-5178.
- [16] 张宇明, 邹高万, 郅冶, 等. ABC 干粉对爆炸超压的抑制[J]. 燃烧科学与技术, 2012, **18**(5): 456-460.
ZHANG Y M, ZOU G W, GAO Y, *et al.* Explosion overpressure suppression by ABC powder[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2012, **18**(5): 456-460.
- [17] PAGLIARO J L, LINTERIS G T, SUNDERLAND P B, *et al.* Combustion inhibition and enhancement of premixed methane-air

- flames by halon replacements[J]. *Combustion and Flame*, 2015, **162**: 41-49.
- [18] YANG Z, LIU H W, WU X. Theoretical and experimental study of the inhibition and inert effect of HFC125, HFC227ea and HFC1311 on the flammability of HFC32[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2012, **90**: 311-316.
- [19] 邓军, 朱熹, 程方明. 氟化酮灭火剂用于瓦斯抑爆研究综述[J]. *煤矿安全*, 2017, **48**(7): 181-183.
- DENG J, ZHU X, CHENG F M. Research overview of dodecafluoro-2-methylpentan-3-one fire suppression agent used in gas explosion suppression[J]. *Safety in Coal Mines*, 2017, **48**(7): 181-183.
- [20] 路长, 刘洋, 于子凯, 等. 四氟乙烷对甲烷/空气爆炸特性的影响[J]. *化工进展*, 2017, **36**(10): 3596-3603.
- LU C, LIU Y, YU Z K, *et al.* Experimental study on the effects of R134a on the characteristics of methane/air explosion[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2017, **36**(10): 3596-3603.
- [21] 薛少谦. 七氟丙烷抑制甲烷空气预混气体爆炸的实验研究[J]. *矿业安全与环保*, 2017, **44**(1): 5-8.
- XUE S Q. Experimental research on premixed methane-air explosion suppression with heptafluoropropane[J]. *Mining Safety & Environmental Protection*, 2017, **44**(1): 5-8.
- [22] 中华人民共和国安全生产行业标准, AQ1073—2009 瓦斯管道输送自动阻爆装置技术条件[S]. 2009.
- Safety production industry standard of P.R. China, AQ1073—2009 Specification for automatic preventing explosion devices of gas piping[S], 2009.
- [23] 王凯, 蒋曙光, 马小平, 等. 瓦斯爆炸致灾通风系统实验及应急救援方法[J]. *中国矿业大学学报*, 2015, **44**(4): 617-643.
- WANG K, JIANG S G, MA X P, *et al.* Experimental of the ventilation systems hazard by gas explosion and the methods of emergency rescue[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2015, **44**(4): 617-643.
- [24] NIE B S, HE X Q, ZHANG R M, *et al.* The roles of foam ceramics in suppression of gas explosion overpressure and quenching of flame propagation[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, **192**: 741-747.
- [25] WANG L Q, MA H H, SHEN Z W. The quenching of propane deflagrations by crimped ribbon flame arrestors[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2016, **43**: 567-574.
- [26] ZHANG J F, SUN Z Q, ZHENG Y M, *et al.* Coupling effects of foam ceramics on the flame and shock wave of gas explosion[J]. *Safety Science*, 2012, **50**: 797-800.
- [27] 魏春荣, 徐敏强, 王树桐, 等. 多孔材料抑制瓦斯爆炸火焰波的实验研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2013, **42**(2): 206-213.
- WEI C R, XU M Q, WANG S T, *et al.* Experiment of porous materials for suppressing the gas explosion flame wave[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2013, **42**(2): 206-213.
- [28] 孙建华, 赵益, 魏春荣, 等. 金属丝网和泡沫陶瓷组合体抑制瓦斯爆炸[J]. *煤炭学报*, 2012, **37**(7): 1156-1160.
- SUN J H, ZHAO Y, WEI C R, *et al.* Experimental study of combination of metal wire mesh and foam ceramic for suppressing the gas explosion[J]. *Journal of China Coal Society*, 2012, **37**(7): 1156-1160.
- [29] WANG J F, WU J M, YU S, *et al.* The experiment research of the powder jetting performance for the South Africa HS active explosion suppression system[J]. *Procedia Engineering*, 2011, **26**: 388-396.
- [30] 荣佳, 胡双启, 于传利, 等. 煤矿井下自动抑爆装置的研制[J]. *煤炭工程*, 2014, **46**(9): 135-137.
- RONG J, HU S Q, YU C L, *et al.* Development of automatic explosion suppression device for underground coal mine[J]. *Coal Engineering*, 2014, **46**(9): 135-137.
- [31] 路长, 李毅, 潘荣锬. 管道截面对氢气/空气预混爆炸影响的实验研究[J]. *火灾科学*, 2015, **24**(2): 68-74.
- LU C, LI Y, PAN R K. Experimental study of the duct cross section effects on the hydrogen/air premixed explosion[J]. *Fire Safety Science*, 2015, **24**(2): 68-74.