

引文: 蒋新生, 周磊, 蔡运雄, 等. 基于多孔类抑爆材料的储油容器爆炸抑制实验[J]. 油气储运, 2023, 42(10): 1158-1165.

JIANG Xinsheng, ZHOU Lei, CAI Yunxiong, et al. Explosion suppression experiment of oil storage containers based on porous explosion suppression materials[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2023, 42(10): 1158-1165.

# 基于多孔类抑爆材料的储油容器爆炸抑制实验

蒋新生 周磊 蔡运雄 周东亮 陈日 秦希卓

中国人民解放军陆军勤务学院油料系

**摘要:** 为获得最适用于储油容器的多孔类抑爆材料, 选择铝合金网状抑爆材料、球形非金属抑爆材料、网状聚氨酯泡沫抑爆材料等3种代表性材料, 在密闭容器中开展油气爆炸抑制实验, 探究其抑爆机制, 分析其抑爆演变过程, 对比其爆炸特性参数。结果表明: “冷壁效应”“器壁效应”及爆炸波抑制理论在油气爆炸的抑制中均起到了重要作用, 但各种抑爆机制在不同材料条件下的贡献不同。在使用铝合金网状材料、球形非金属材料抑爆时, 容器内超压得到抑制, 但火焰因扰动作用而快速发展, 爆炸发展迅速; 在使用网状聚氨酯泡沫材料抑爆时, 火焰、超压都得到了较好抑制。以最大超压峰值和爆炸威力指数作为评价指标, 网状聚氨酯泡沫材料的抑爆性能明显优于其他两种材料, 表明其在油气安全防控领域有着重要的工程应用价值。(图7, 参24)

**关键词:** 油气; 多孔材料; 抑爆性能; 爆炸演变; 特性参数

中图分类号: X932; TE88

文献标识码: A

文章编号: 1000-8241(2023)10-1158-08

DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2023.10.009

## Explosion suppression experiment of oil storage containers based on porous explosion suppression materials

JIANG Xinsheng, ZHOU Lei, CAI Yunxiong, ZHOU Dongliang, CHEN Ri, QIN Xizhuo  
Petroleum, oil & Lubricant Department, Army Logistical Academy

**Abstract:** In order to obtain the most suitable porous explosion suppression material for oil storage containers, the gasoline-air mixture explosion suppression experiment in a closed container was carried out with the three representative explosion suppression materials, such as mesh aluminum alloy, spherical non-metallic material and reticulated polyurethane foam. On this basis, the explosion suppression mechanism was studied, the explosion suppression evolution process was analyzed, and the characteristic parameters of explosion were compared. The results show that the “cold wall effect”, “wall effect” and explosion wave suppression theory all play an important role in the suppression of gasoline-air mixture explosion, but various explosion suppression mechanisms have different contributions to the cases with different materials used. When the mesh aluminum alloy and spherical non-metallic material are used to suppress the explosion, the overpressure in the container is inhibited, but the flame develops rapidly due to the disturbance effect, causing the explosion generated rapidly. When the reticulated polyurethane foam is used, the flame and overpressure are well controlled. Herein, the maximum overpressure peak value and explosive power index were taken as the evaluation indexes, and the reticulated polyurethane foam has much better explosive suppression performance than the other two materials. It is indicated that the reticulated polyurethane foam has important engineering application value in the safety monitoring and control of oil and gas. (7 Figures, 24 References)

**Key words:** gasoline-air mixture, porous material, explosion suppression performance, explosion evolution, characteristic parameter

石油作为重要能源物资, 确保其安全供应关系到国防、经济及人民生活的方方面面, 但因其易燃易爆的特点, 在生产、储存、运输过程中经常发生火灾爆炸事故, 造成重大损失。油料存储是油料安全保障的重要

环节, 提高存储安全性对于提升油料保障能力具有重要意义。常见储油容器包括储油罐、舰船油舱、车辆油箱等, 在军事行动中这些容器通常会成为敌方重点火力打击目标, 一旦被炮弹击中将引发猛烈爆炸。在日

常生活中也会因静电、高温辐射、外力撞击等引发储油容器内油汽混合物爆炸,这不仅会导致严重的物资损失,还会对周围人员及设备设施造成巨大危害。选取合适的抑爆材料填充于储油容器内,防止油气爆炸或大幅度降低其爆炸威力,是提高储油安全的重要手段,因而针对各类型抑爆材料开展油气抑爆性能研究具有重要的实用价值。

油气混合物相对于氢气、甲烷等单质气体而言,其成分相对复杂,当前针对其开展的爆炸研究相对较少,主要探究初始体积分数<sup>[1]</sup>、点火方式<sup>[2]</sup>、障碍物<sup>[3-4]</sup>等条件对油气爆炸的影响,重点关注爆炸超压、火焰以及两者之间的相互作用<sup>[5-6]</sup>。在油气爆炸的抑制方面,部分学者考虑采用细水雾<sup>[7]</sup>、七氟丙烷<sup>[8]</sup>等介质作为抑制剂,但其不适用于汽车油箱、运加油车油罐等储油容器。相对而言,采用填充多孔类阻隔抑爆材料的方式更具可行性,安全系数更高。这是因为多孔类阻隔抑爆材料可在不影响设备性能和油料品质的情况下直接放置于容器内,相对于气体类、粉尘类抑爆材料实用性更强。但目前针对此类材料开展的抑爆研究相对较少,尤其是各种抑爆材料的性能对比研究更少。基于此,在密闭容器中针对3种代表性多孔类阻隔抑爆材料,开展油气爆炸抑制实验,以期优选出最适合于储油容器的多孔类抑爆材料,为油气防爆抑爆研究和储油安全提供参考。

## 1 实验系统与方案

实验系统主要由实验容器、油气供给装置、油气体积分数测试仪、动态数据采集设备、高能无干扰点火器、同步触发控制器及计算机等组成(图1)。常见的储油容器,如车辆油箱、舰船油舱等通常为容积式空间,故实验容器设计为容积式空间,容器主体由厚度为10 mm的Q235钢材焊接而成,左右两侧和上顶使用螺栓连接,可以拆卸,便于放置抑爆材料。长宽高分别为1 260 mm、600 mm、540 mm,各连接处采用紫铜垫圈、橡胶垫等方式密封,确保良好的密闭性,设计承压2 MPa,能够满足强度需求。实验采用92号无铅汽油,油气混合物的产生和测量由油气供给系统和油气体积分数测试仪完成。压力信号的采集由江苏东华测试技术有限公司研制生产的DH8301型高性能动态信号测试分析仪配合使用ZXP660型压阻式高频瞬态压力传感器完成,量程为0~2 MPa、采集频率为200 kHz,实

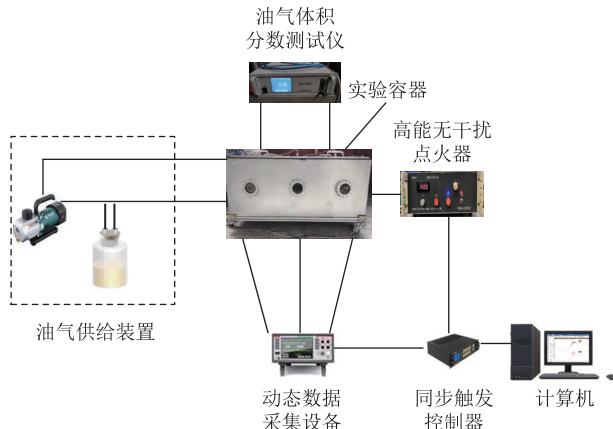


图1 储油容器爆炸抑制实验系统组成示意图  
Fig. 1 Explosion suppression experiment system of oil storage container

验共用到3个压力传感器,分别位于容器顶部的左、中、右3个位置。其他设备型号和操作方法与文献[6]一致,不再赘述。实验中油气体积分数设为1.7%,该浓度下的油气当量比略大于1,爆炸较激烈。点火位置位于容器后侧壁中心位置,点火能量设为1.5 J。

当前,中国可用于储油容器的多孔类抑爆材料主要有3种类型,分别是铝合金网状抑爆材料、球形非金属抑爆材料及网状聚氨酯泡沫抑爆材料,选取这3种材料开展抑爆性能对比实验。为充分对比各材料的抑爆性能,设定留空率为40%,为避免形成狭长受限空间,采用横向填充的方式。在后壁中心点火时,火焰更多是向左右两侧发展,为更大程度上发挥铝合金薄壁的阻火吸热性能,铝合金网状材料的抑爆实验大部分采用纵向放置方式,使铝合金薄壁结构与大部分火焰锋面的传播方向相垂直(图2a)。球形非金属抑爆材料为无序摆放(图2b)。为避免以上两种材料在爆炸中移动位置,采用大孔径细钢丝网在两端固定,相对于抑爆材料较小的孔径,大孔径固定钢丝网对火焰的扰动作用十分有限,可以忽略。网状聚氨酯泡沫抑爆材料的填充方式相对简单,直接将加工好的长方体材料依次放入容器内,达到设定留空率,材料表面与容器侧壁的摩擦使其能够较好地固定在指定位置(图2c)。实验时环境温度约26 °C,相对湿度约63%,环境压力约97 kPa。实验前,首先对各项设备预热调试,将各种抑爆材料按要求放置于容器后,检验设备的密封性,然后配置设定浓度的油气混合物,再由同步控制器同时开启点火器和数据采集设备,完成数据采集。同时,为了解各材料的抑爆性能,开展未填充抑爆材料时的油气爆炸实验,以便对比分析。为确保实验的可重复性



图2 储油容器爆炸抑制实验系统抑爆材料填充实物图

Fig. 2 Physical diagram of explosion suppression material filling in explosion suppression experiment system of oil storage container

和采集数据的可靠性,每种工况实验重复进行5次。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 材料理化性质与抑爆机制

为了了解3种材料的抑爆性能,对可用于储油容器内的多孔类阻隔抑爆材料的相关性质与抑爆机制(图3)进行分析。



图3 不同类型阻隔抑爆材料微观结构示意图

Fig. 3 Microstructure of explosion barrier and suppression materials in different types

(1)金属拉网成型的网状金属材料,其中以铝合金切割拉伸盘卷成型的蜂窝状材料(图3a)最具代表性,六边形的蜂窝状薄壁结构使其具有较大的比表面积,密度低而强度高,具有较好的导热性能。该材料最初被美国、加拿大等国家用于作战装备的油箱抑爆,并制定了相应规范。铝箔厚度0.05 mm,表观密度约29 kg/m<sup>3</sup>,燃油置换率约0.7%,几乎不吸附燃油,具有良好的导电性,能够有效消除储油容器内的静电聚集,符合美军标MIL-B-87162A-1994中类型II的A级标准。由于该

材料比表面积较大、导热性能优异,当火焰经过时,蜂窝状结构可以将火焰分割为多个细小火焰团,吸收火焰热量,有效降低反应速率,甚至淬熄火焰。此外,铝箔有一定弹性,在压力波传播中能够吸收部分能量,改变压力波的传播方向,抑制部分热声耦合现象。

(2)以聚烯烃、聚酰胺及ABS树脂等高分子材料为基材,通过注塑成型加工而成的球形镂空材料(图3b),该材料中间有多个大小不同的孔隙,能够较好阻碍火焰传播。单个球体外形直径为300 mm,径向薄片厚度约0.8 mm,纬向薄片厚度约0.6 mm,实测质量为1.763 g(±0.06 g),具有较高的承压能力,能够更好填充地局部小空间和异形空间,导热导静电性能较好。

(3)以异氰酸酯和聚醚(脲)多元醇为主要原料,采用全水合发泡技术及爆炸去泡壁法得到的具有明显骨架结构的网状聚氨酯泡沫材料(图3c)。该材料为深圳市国志汇富公司研发的一种网状高分子抑爆材料,其表观密度约22 kg/m<sup>3</sup>,网孔平均尺寸约2.4 mm,拉伸强度大于100 kPa,燃油置换率小于2%,具有较好的水解稳定性及抗腐蚀性,可加工为任意形状以便于填充。网状聚氨酯泡沫抑爆材料的耐热性逊色于以上两种材料,在高温下会发生熔融,但这种特性使其能够在爆炸火焰的高温作用下形成多个独立空间,阻止火焰传播,形成较好的抑爆效果。

油气爆炸演变过程涉及火焰的传播和压力波的发展,对应的多孔材料抑爆理论包含火焰淬熄及爆炸波抑制等<sup>[9-15]</sup>。但由于爆炸反应中火焰与压力波的相互耦合,淬熄理论和爆炸波抑制理论在爆炸抑制中应该是共同作用的。可燃气体的爆炸理论包含热爆炸理论和链式反应理论,对应的火焰淬熄理论也包含两种观点。一种是基于热爆炸理论的“冷壁效应”,该观点指出火焰在多孔介质中传播时与壁面的热量传递使之温度降低,根据Arrhenius定律和Fourier定律,燃烧反

应速率(即热释放速率)与温度呈指指数关系,而热量流失速率与温度呈线性关系。若容器内反应产生的热量来不及耗散,则在正反馈作用下燃烧反应将越来越激烈,反之在“冷壁效应”下热量流失大于热量产生,则爆炸便得到了控制。但多孔介质中热量传递过程相对复杂,包括材料骨架之间及骨架与流体接触时的热传导,介质空隙中燃烧产物与反应物之间的对流换热,介质材料与流体本身及相互之间的辐射换热。另一种火焰淬熄观点是基于链式反应理论的“器壁效应”,该观点指出火焰锋面处激发态的反应基团在与多孔介质壁面的碰撞中将失去活化能形成稳定分子,这将导致活化中心基团浓度的降低,从而阻断链的传播,降低反应速率,使爆炸得到抑制<sup>[16-17]</sup>。

爆炸波抑制理论则指出多孔材料能够吸收横波,削弱爆炸波强度<sup>[18-20]</sup>。从火焰与压力波相互耦合的角度考虑,容器内超压的降低并不能显著改变反应速率,这是因为在碳氢燃料的化学反应中,相对于温度的影响,压力改变对燃烧速率的影响相对较小<sup>[21]</sup>。但压力波强度的降低能够削弱其对火焰锋面的干扰,避免燃烧不稳定性进一步加剧,即通过削弱热声耦合作用来降低反应速率,使热量释放速率降低,从而弱化爆炸威力。虽然这并不能从根本上使火焰熄灭,阻止爆炸的发展,但对压力波的抑制也能够在较大程度上降低爆炸超压峰值,对于削弱爆炸威力具有积极作用。“冷壁效应”“器壁效应”及爆炸波抑制等理论在多孔介质的抑爆过程中均具有重要作用,但在不同工况下各种机制的具体贡献有所差异。

## 2.2 抑爆演变过程对比

实验中共用到放置于容器不同位置的3个传感器,但由实验数据可知,不同位置的超压数据极为接近。其原因是容器相对较小,而爆炸发展较缓慢,容器内各位置的超压几乎一致,因而在超压分析中只选取其中一个测点的数据,即可得到采用铝合金网状抑爆材料、球形非金属抑爆材料、网状聚氨酯泡沫抑爆材料填充以及未填充抑爆材料4种工况下爆炸超压与瞬时升压速率曲线(图4)。在爆炸演变中,超压数据存在一定的高频干扰信息,且在最大峰值附近有高频振荡,为计算各时刻的超压上升速率,需要利用快速傅里叶变换滤波器对原始数据进行平滑滤波处理<sup>[22]</sup>,数据处理中低通截止频率设为200 Hz,在得到较光滑的压力曲线之后进行微分,从而得到瞬时升压速率。

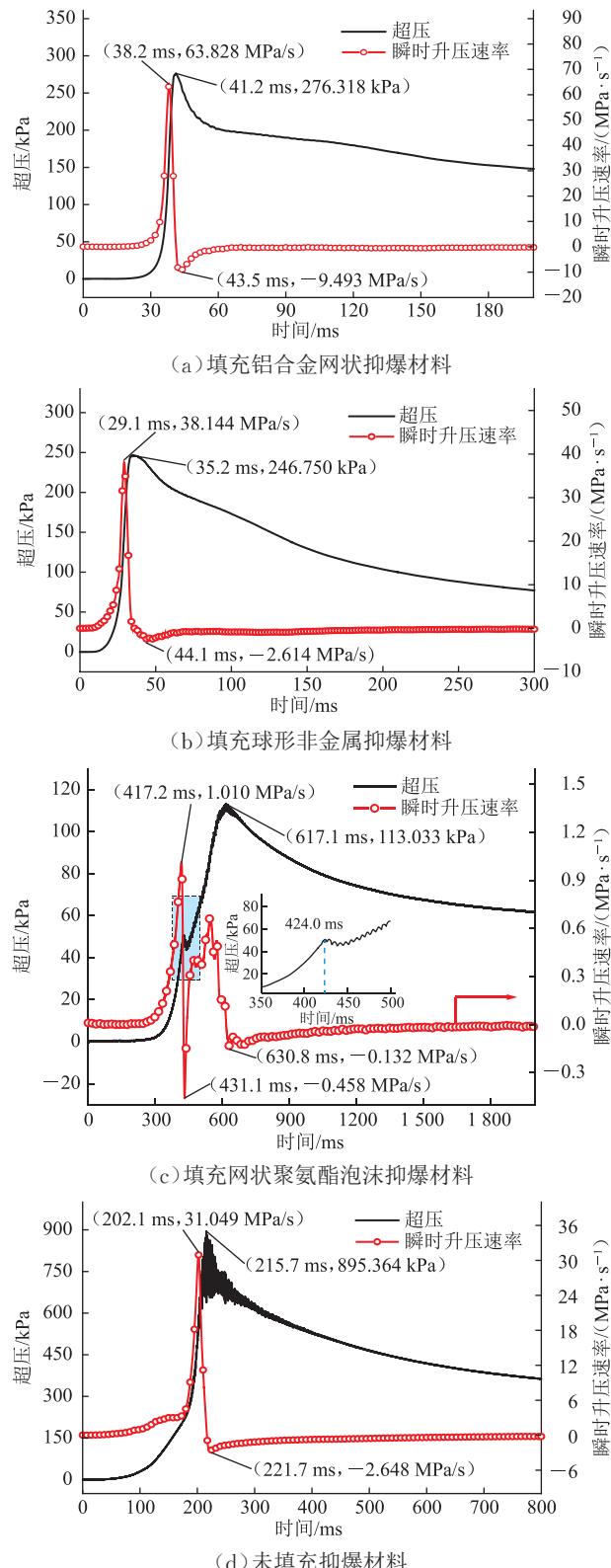


图4 不同抑爆材料填充工况下超压与瞬时升压速率时序曲线

Fig. 4 Time series curve of overpressure and instantaneous pressure rise rate under different filling conditions of explosion suppression materials

对比不同工况下超压时序曲线可知,在填充抑爆材料工况下,前期超压发展极为缓慢,尤其是在填充铝合金网状材料(图4a)和网状聚氨酯泡沫材料(图4c)

时较为明显。在未填充抑爆材料工况下,油气混合物点爆的开始阶段,虽然超压发展也较缓慢,但容器内的超压持续上升(图4d),升压速率稍大于填充抑爆材料工况下的升压速率。在填充抑爆材料工况下,在前期缓慢的超压发展之后,超压快速提升,尤其是在填充铝合金网状材料(图4a)和填充球形非金属抑爆材料(图4b)时较明显,对应的瞬时升压速率分别在第38.2 ms、第29.1 ms时达到最大值63.828 MPa/s、38.144 MPa/s,大于未填充抑爆材料工况在第202.1 ms时的最大值31.049 MPa/s,即较未填充抑爆材料工况下的超压发展更快。但在填充网状聚氨酯泡沫材料工况下,超压明显上升阶段的发展仍然较缓慢,在第417.2 ms达到最大瞬时升压速率时,仅为1.010 MPa/s,显著小于其他工况的升压速率。在填充抑爆材料工况下,前期缓慢的超压发展阶段正是火焰在抑爆材料中传播的过程,在火焰传播出抑爆材料后,超压开始明显上升,超压快速上升阶段发生于火焰在未填充抑爆材料区域快速燃烧的阶段。在实验中,3种抑爆材料均不能有效淬熄火焰,阻止爆炸发生,但能够显著降低爆炸超压。

由图4a、图4b可知,火焰在铝合金网状抑爆材料和球形非金属抑爆材料内传播时,超压上升极为缓慢,甚至看不到超压的明显变化。但火焰的发展相对较快,仅20~30 ms便传播出抑爆材料,超压快速上升,分别在第41.2 ms、第35.2 ms达到最大超压峰值,相比于未填充抑爆材料工况下的215.7 ms大幅缩短,表明火焰在这两种材料中传播时得以加速。火焰穿过抑爆材料后产生加速的情况,在Jin等<sup>[17,23]</sup>采用金属网对密闭管道中氢气和甲烷的抑爆研究中也有出现,其原因也是抑爆材料对火焰锋面的扰动。但当火焰在抑爆材料内加速传播时,超压基本未增长,表明在铝合金网状材料和球形非金属材料的抑爆中,“冷壁效应”起到了主要作用。可能由于孔径较大或爆炸初期能量较高,抑爆材料并未淬熄火焰,仅在火焰的传播中吸收了燃烧释放的热量,较好地抑制了温度提升,因而容器内的超压几乎无变化。由Arrhenius定律,温度提升能够使反应速率快速提高,这是由于未填充抑爆材料时,爆炸发展初始阶段升压越来越快。但在填充抑爆材料工况下,促使反应速率加快的是抑爆材料的扰动作用,而非温度变化。在未填充抑爆材料的工况下,爆炸前期火焰发展较缓慢,火焰锋面没有外界扰动。但在填充抑爆材料工况下,火焰锋面进入多孔材料后迅速湍

流化,这不仅使锋面表面积增大,未燃物和已燃物的混合速率加快,锋面处活化中心的传递速率还因湍流脉动而加快,这些都促使燃烧速率大幅提升,高于层流状态时的火焰速率。因此,在填充抑爆材料工况下,即使温度没有明显变化,火焰位移速率也能够快速提升,超压与火焰的耦合作用在抑爆材料的“冷壁效应”下被解开,两者各自发展。

但是,抑爆材料并非都能使火焰加速,如在网状聚氨酯泡沫抑爆材料填充工况下,火焰传播仍然极为缓慢,燃烧约300 ms才传播出抑爆材料,又经过约300 ms才达到最大超压峰值(图4c),火焰不仅在抑爆材料内的位移速率较慢,传播出材料后也无明显加速。Chen等<sup>[24]</sup>在金属泡沫对密闭管道甲烷的抑爆研究中也指出,金属泡沫可以降低超压但对火焰速率的影响很小,说明不同材料对火焰速率的影响并不一致。这可能是多孔介质的表征参数不同造成的,如孔径分布、孔形状、比表面积、导热系数等。网状聚氨酯泡沫抑爆材料相比于铝合金网状抑爆材料和球形非金属抑爆材料孔径更小,且排布更混乱,火焰在传播中被划分为更加细小的火焰团,虽然有湍流的扰动,但部分激发态自由基团在与材料骨架壁面的碰撞中变为稳定分子,反应速率得不到提高。此外,该材料的熔点相对于其他材料较低,在火焰传播过程中部分材料熔融形成独立的小空间,进一步阻止了火焰的传播。因此,在抑爆材料内的火焰位移速率一直较缓慢,火焰传播出材料之后才逐渐发展。在网状聚氨酯泡沫材料的抑爆中,“冷壁效应”和“器壁效应”都较明显,由图4c可知,在第424.0 ms时超压短暂下降,且出现了强度较弱的超压振荡,这是因为火焰锋面传播出材料后,逐渐接触左右两端未填充抑爆材料区域的侧壁,容器内热量部分流失,超压短暂下降。同样由于火焰锋面与侧壁的接触,激发了一定程度的热声耦合现象,因此在超压降低的同时出现了超压振荡,但其强度远低于未填充抑爆材料(图4d)时的超压振荡强度,对容器内整体超压的提升作用有限。同时,通过观察可知,在发生超压振荡后,振荡幅度变化很小,不像未填充抑爆材料时随着超压的发展而加强。其原因可能是火焰传播太慢,激发的热声耦合作用较弱,加之压力波传播到抑爆材料时被削弱,反射的压力波不足以激发更强烈的超压振荡。但在使用铝合金网状抑爆材料(图4a)和球形非金属抑爆材料(图4b)填充时,并未出现明显的超压振荡,其主要原因可能是火

焰传播太快,没来得及触发热声耦合作用火焰锋面便已全部接触侧壁,进入超压下降阶段;也有部分原因可能是抑爆材料对压力波较强的削弱作用,使容器内无法产生明显的超压振荡。

整体而言,3种抑爆材料都较好地削弱了超压振荡。当填充铝合金网状抑爆材料和球形非金属抑爆材料时,爆炸超压明显降低,但对火焰的加速作用会使爆炸发展加快;当填充网状聚氨酯泡沫抑爆材料时,爆炸超压和发展速率都得到了控制。

### 2.3 超压特性参数对比

利用多种超压特性参数,对抑爆材料的抑爆性能进行量化对比。根据图4对填充不同抑爆材料工况下的爆炸超压数据进行处理,得到最大超压峰值 $p_{\max}$ 、最大超压峰值形成时间 $t_{\max}$ 、最大瞬时升压速率 $(dp/dt)_{\max}$ 、最小瞬时升压速率 $(dp/dt)_{\min}$ 、平均升压速率 $(dp/dt)_{\text{ave}}$ 、爆炸威力指数 $E_{\max}$ 各参数对比图(图5~图7,其中A、B、C、D分别代表填充铝合金网状抑爆材料、球形非金属抑爆材料、网状聚氨酯泡沫抑爆材料及未填充抑爆材料)。

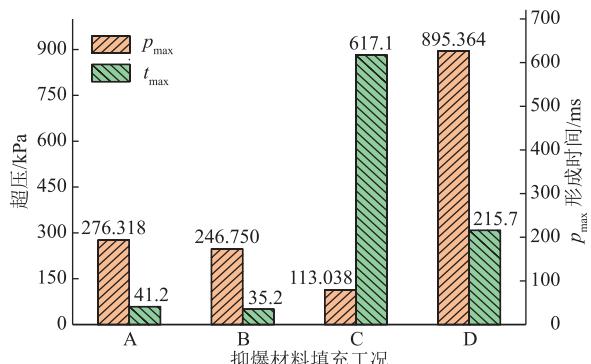


图5 不同抑爆材料填充工况下最大超压峰值与形成时间柱状图

Fig. 5 Histogram of maximum overpressure peak and formation time under different filling conditions of explosion suppression materials

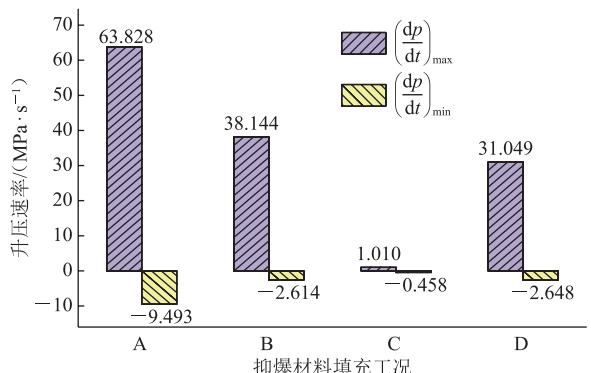


图6 不同抑爆材料填充工况下瞬时升压速率最值柱状图

Fig. 6 Histogram of maximum and minimum instantaneous pressure rise rate under different filling conditions of explosion

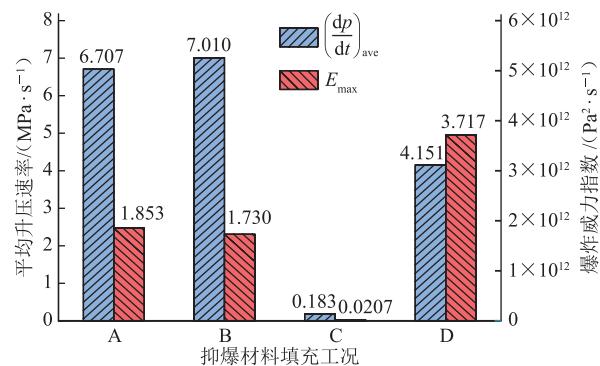


图7 不同抑爆材料填充工况下平均升压速率与爆炸威力指数柱状图

Fig. 7 Histogram of average pressure rise rate and explosion power index under different filling conditions of explosion suppression materials

由图5可知,抑爆材料大幅削弱了爆炸超压,在铝合金网状材料、球形非金属材料及网状聚氨酯泡沫材料填充工况下 $p_{\max}$ 分别为276.318 kPa、246.750 kPa、113.038 kPa,相比未填充抑爆材料工况下的895.364 kPa,分别削弱了69.1%、72.4%、87.4%。在抑制超压方面各材料均有较好表现,但同时可以看出,铝合金网状材料和球形非金属材料对火焰传播也有一定的促进作用,达到最大超压峰值的时间缩短。

由图6可知,在火焰锋面传播出抑爆材料后,前两种材料填充下的爆炸发展更激烈,最大升压速率分别为63.828 MPa/s、38.144 MPa/s,相比于未填充抑爆材料时的31.049 MPa/s,分别提升了105.6%、22.9%,因而在图7中这两种工况下的 $(dp/dt)_{\text{ave}}$ 相对较大。进一步分析爆炸威力指数 $E_{\max}$ ,3种抑爆材料填充工况下的爆炸威力指数分别为 $1.853 \times 10^{12} \text{ Pa}^2/\text{s}$ 、 $1.730 \times 10^{12} \text{ Pa}^2/\text{s}$ 、 $2.071 \times 10^{10} \text{ Pa}^2/\text{s}$ ,相比于未填充抑爆材料时的 $3.717 \times 10^{12} \text{ Pa}^2/\text{s}$ ,分别降低了50.1%、53.5%、99.4%。综上,以最大超压峰值和爆炸威力指数作为评价指标,3种抑爆材料均有效抑制了油气爆炸,其中铝合金网状材料、球形非金属材料的抑爆性能相近,而网状聚氨酯泡沫材料的抑爆性能最好。

## 3 结论

(1)铝合金网状材料、球形非金属材料、网状聚氨酯泡沫材料这3种多孔类抑爆材料均可有效抑制油气爆炸。但在不同抑爆材料填充工况下各种抑爆机制的具体贡献有所差异,由于铝合金网状材料和球形非金属材料的孔径较大,火焰传播中未被淬熄,但被吸收了

大量的燃烧热量,抑制了温度的提升,抑爆中“冷壁效应”起到了主要作用,而在网状聚氨酯泡沫材料的抑爆中“冷壁效应”和“器壁效应”均作用明显。

(2)火焰在铝合金网状材料、球形非金属材料、网状聚氨酯泡沫材料这3种多孔类抑爆材料传播过程中压力上升均较为缓慢,在铝合金网状材料、球形非金属材料中传播时,火焰锋面受到外界干扰,湍流化加剧,火焰位移速率加快,而在网状聚氨酯泡沫材料传播过程中受到材料表征参数的影响,位移速率依旧缓慢。为了解决火焰加速促进爆炸剧烈发展的安全问题,需进一步研究抑爆材料对火焰位移速率的影响作用。

(3)以最大超压峰值和爆炸威力指数作为评价指标,结合抑爆材料其他特性参数可知,填充3种多孔类抑爆材料工况下,相较于未填充抑爆材料时,超压峰值削弱了69.1%、72.4%、87.4%,爆炸威力指数分别降低了50.1%、53.5%和99.4%。相比于铝合金网状抑爆材料和球形非金属抑爆材料,火焰位移速率和爆炸超压在网状聚氨酯泡沫抑爆材料中均得到较好控制,爆炸发展受到有效遏制。网状聚氨酯泡沫材料的抑爆性能优异,但其填充数量和填充方式等参数变化对抑爆性能的影响规律还不明确,缺乏定量研究,还需进一步研究完善。

## 参考文献:

- [1] WANG S M, WU D J, GUO H, LI X D, PU X Y, YAN Z H, et al. Effects of concentration, temperature, ignition energy and relative humidity on the overpressure transients of fuel-air explosion in a medium-scale fuel tank[J]. Fuel, 2020, 259: 116265. DOI: 10.1016/j.fuel.2019.116265.
- [2] 吴松林,杜扬,张培理,梁建军.点火方式对受限空间油气爆燃规律的影响[J].化工学报,2016,67(4):1626-1632. DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20150958.  
WU S L, DU Y, ZHANG P L, LIANG J J. Effect of ignition node on gasoline-air deflagration behavior in confined space[J]. CIESC Journal, 2016, 67(4): 1626-1632.
- [3] 李国庆,杜扬,齐圣,王世茂,张培理,韦世豪,等.障碍物位置和油气浓度对油气泄压爆炸特性影响[J].化工学报,2018,69(5): 2327-2336. DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20171184.  
LI G Q, DU Y, QI S, WANG S M, ZHANG P L, WEI S H, et al. Effects of obstacle position and gas concentration on gasoline-air explosion venting[J]. CIESC Journal, 2018, 69(5): 2327-2336.
- [4] LI G Q, WU J, WANG S M, BAI J, WU D J, QI S. Effects of gas concentration and obstacle location on overpressure and flame propagation characteristics of hydrocarbon fuel-air explosion in a semi-confined pipe[J]. Fuel, 2021, 285: 119268. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.119268.
- [5] 杜扬,李蒙,李国庆,王世茂,张培理,齐圣,等.含双侧分支结构受限空间油气泄压爆炸超压特性与火焰行为[J].化工进展,2018,37(7):2557-2564. DOI: 10.16085/j.issn.1000-6613.2017-2522.  
DU Y, LI M, LI G Q, WANG S M, ZHANG P L, QI S, et al. Effects of bilateral branches structure on characteristics of gasoline-air mixtures explosion overpressure and flame behavior in a semi-confined space[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2018, 37(7): 2557-2564.
- [6] CAI Y X, JIANG X S, WANG S M, LIANG J J, ZHANG P L. Experimental study on explosion overpressure and flame propagation characteristics of simulated vertical dome oil tank[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2022, 76: 104752. DOI: 10.1016/j.jlp.2022.104752.
- [7] WANG S M, CAI Y X, GUO H, WU D J, XIE Y L. Effect of fuel concentration, inert gas dilutions, inert gas-water mist twin fluid medium dilutions, and end boundary condition on overpressure transients of premixed fuel vapor explosion[J]. Fuel, 2022, 309: 122083. DOI: 10.1016/j.fuel.2021.122083.
- [8] 王子拓,蒋新生,蔡运雄,余彬彬,王春辉.含弱约束端面直角管道汽油蒸气爆炸及七氟丙烷抑爆研究[J].中国安全生产科学技术,2021,17(4):60-64. DOI: 10.11731/j.issn.1673-193x.2021.04.010.  
WANG Z T, JIANG X S, CAI Y X, YU B B, WANG C H. Study on gasoline vapor explosion and heptafluoropropane explosion suppression in right-angle pipeline with weak constraint ends[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2021, 17(4): 60-64.
- [9] PAYMAN W, WHEELER R V. The propagation of flame through tubes of small diameter[J]. Journal of the Chemical Society, Transactions, 1918, 113: 656-666. DOI: 10.1039/CT9181300656.
- [10] 温小萍.瓦斯湍流爆燃火焰特性与多孔介质淬熄抑爆机理研究[D].大连:大连理工大学,2014.  
WEN X P. Mechanism study on flame characteristics and porous media quenching suppression of gas turbulent deflagration[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014.
- [11] WEN X P, XIE M Z, YU M G, LI G, JI W T. Porous media quenching behaviors of gas deflagration in the presence of obstacles[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2013, 50:

37–44. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2013.05.002.

[12] 喻健良. 预混火焰在微小通道中传播和淬熄的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2008.

YU J L. The research of premixed flame's propagation and quenching in narrow channels[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008.

[13] SUN J H, ZHAO Y, WEI C R, XIE S, HUANG D H. The comparative experimental study of the porous materials suppressing the gas explosion[J]. Procedia Engineering, 2011, 26: 954–960. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.11.2262.

[14] RADULESCU M I, LEE J H S. The failure mechanism of gaseous detonations: experiments in porous wall tubes[J]. Combustion and Flame, 2002, 131(1/2): 29–46. DOI: 10.1016/S0010-2180(02)00390-5.

[15] 喻健良, 闫兴清. 硅酸铝棉对火焰速度和爆炸超压的抑制作用[J]. 爆炸与冲击, 2013, 33(4): 363–368. DOI: 10.3969/j.issn.1001-1455.2013.04.005.

YU J L, YAN X Q. Suppression of flame speed and explosion overpressure by aluminum silicate wool[J]. Explosion and Shock Waves, 2013, 33(4): 363–368.

[16] PAN H. Selection of flame damper in petrochemical unit design[J]. Petroleum Refinery Engineering, 2002, 32: 37–39.

[17] JIN K Q, DUAN Q L, CHEN J Y, LIEW K M, GONG L, SUN J H. Experimental study on the influence of multi-layer wire mesh on dynamics of premixed hydrogen-air flame propagation in a closed duct[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(21): 14809–14820. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.03.232.

[18] DUPRÉ G. Propagation of detonation waves in an acoustic absorbing walled tube[M]//BORISOV A, KUHL A L, BOWEN J R, LEYER J C. Dynamics of explosions. Washington, D.C.: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1988: 248–263.

[19] GOLOVASTOV S V, BIVOL G Y, ALEXANDROVA D. Evolution of detonation wave and parameters of its attenuation when passing along a porous coating[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2019, 100: 124–134. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2018.08.030.

[20] ZALOSH R. Deflagration suppression using expanded metal mesh and polymer foams[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2007, 20(4/6): 659–663. DOI: 10.1016/j.jlp.2007.04.039.

[21] BYCHKOV V V, LIBERMAN M A. Dynamics and stability of premixed flames[J]. Physics Reports, 2000, 325(4/5): 115–237. DOI: 10.1016/S0370-1573(99)00081-2.

[22] WANG J G, GUO J, YANG F Q, ZHANG J Q, LU S X. Effects of hydrogen concentration on the vented deflagration of hydrogen-air mixtures in a 1-m<sup>3</sup> vessel[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2018, 43(45): 21161–21168. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.09.108.

[23] NIE B S, HU S T, YANG L L, WANG L K, SU X Q. Characteristics of flame velocity of gas explosion with obstruction in pipeline[J]. Perspectives in Science, 2016, 7: 277–281. DOI: 10.1016/j.pisc.2015.12.003.

[24] CHEN P, HUANG F J, SUN Y D, CHEN X X. Effects of metal foam meshes on premixed methane-air flame propagation in the closed duct[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2017, 47: 22–28. DOI: 10.1016/j.jlp.2017.02.015.

(收稿日期:2023-07-29; 修回日期:2023-08-22; 编辑:刘朝阳)

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目“基于 PLIF 油料着火爆炸化学动力学驱动与抑制机理研究”, 51574254; 军委科技委基础加强计划重点基础研究项目“战场燃烧状态特性及爆炸燃烧机理”, 2019-JCJQ-ZD-198-04。

**作者简介:** 蒋新生, 男, 1972 年生, 教授, 博士生导师, 2008 年博士毕业于中国人民解放军后勤工程学院油气储运工程专业, 现主要从事石油与天然气工程油气安全与防护基础理论、技术与装备研究。地址: 重庆市沙坪坝区大学城北一路 20 号, 401331。电话: 023-86731151。Email: jxs\_dy@163.com

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

