

热管泡沫复合结构抑爆新技术探讨

张亚平,张拴伟,王建国,贺德佳

(西安科技大学 能源学院,陕西 西安 710054)

摘要:为了快速导出爆炸热量来抑制爆炸波的热破坏作用,最大限度降低爆炸时火焰和压力波耦合作用危害,提出一种新型热管泡沫复合抑爆结构。基于实例计算及数值模拟方法分析了泡沫金属及热管复合结构用于阻火器抑爆的效果。计算结果表明,内置泡沫铁镍金属可使爆炸温度降低率达 8.9%,内置复合热管通过相变形式可以快速导出 1.71×10^{12} J 能量。建立了该热管泡沫复合结构的数学模型,发现新型热管泡沫复合结构在 0.095 s 内可使火焰温度衰减至 1 600 K,从而热管泡沫复合结构可以使得火焰压力波得到有效衰减。对比了管道内 CH_4 和 CO_2 浓度分布情况,表明热管泡沫复合结构管道轴线处 CH_4 体积分数能够控制在 4.5% 左右,从而证实了该热管泡沫复合结构用于抑制爆炸的可行性。

关键词:热管;泡沫金属;爆炸;阻火器;温度

中图分类号:TD235

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2018)07-0141-04

Discussion on new explosion suppression technology with heat pipe foam composite structure

ZHANG Yaping, ZHANG Shuanwei, WANG Jianguo, HE Dejia

(School of Energy, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: In order to quickly derive the explosion heat to restrain the heat destruction role of the explosion waves, the explosion could maximally reduce the coupling function danger of the flame and pressure wave. A new heat pipe foam composite explosion suppression structure was provided. Based on the actual calculation and the numerical simulation method, the flame arrester explosion suppression effect of the foam metal and the heat pipe composite structure was analyzed. The calculation results showed that the built-in foam iron nickel metal could make the explosion temperature reduced by 8.9% and with the phase transition mode, the built-in composite heat pipe could rapidly derive the 1.71×10^{12} J energy. A mathematical model of the heat pipe foam composite structure was established. The new heat pipe foam composite structure showed that within 0.095 seconds, the flame temperature could be reduced to 1 600 K. Therefore, the heat pipe foam composite structure could effectively lose the flame pressure wave. In comparison with the CH_4 and CO_2 concentration distribution conditions in the pipe line, the CH_4 concentration at the shaft line of the pipe line in the heat pipe foam composite structure could be controlled about 4.5%. Thus the feasibility of the heat pipe foam composite structure applied to the suppression of the explosion was verified.

Key words: heat pipe; foam metal; explosion; flame arrester; temperature

0 引 言

管道内可燃气体爆炸发生瞬时释放出大量热量,且会伴随连续爆炸或多次爆炸,爆炸能量和压力

波的耦合作用往往导致灾害程度和作用范围增大^[1]。所以如何阻断二次爆炸产生的爆轰波及火焰的传播,及时把爆炸热量传递出去对于抑制爆炸的热破坏作用是至关重要的。

收稿日期:2018-03-29;责任编辑:王晓珍 DOI:10.13199/j.cnki.cst.2018.07.022

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金资助项目(51504188)

作者简介:张亚平(1977—),女,陕西凤翔人,副教授,硕士生导师,博士。通讯作者:张拴伟, E-mail:13669297513@qq.com

引用格式:张亚平,张拴伟,王建国,等.热管泡沫复合结构抑爆新技术探讨[J].煤炭科学技术,2018,46(7):141-144,177.

ZHANG Yaping, ZHANG Shuanwei, WANG Jianguo, et al. Discussion on new explosion suppression technology with heat pipe foam composite structure[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(7):141-144, 177.

通常所采用的抑爆和隔爆措施有隔爆水槽、水袋、岩粉棚等^[2],其机理在于转移燃烧区的热量,冷却终止燃烧化学反应,最终造成火焰淬熄,这些措施缺乏对爆炸能量波湍流场的抑制作用,忽略了爆炸火焰和冲击波的耦合作用^[3]。研究发现嵌有多孔壁面的管道对爆炸横波有一定削弱作用,泡沫陶瓷对瓦斯最大超压衰减可达51%^[4];泡沫陶瓷特殊的三维网状结构可有效破坏瓦斯爆炸反应的自由基,从而终止链式反应抑制瓦斯爆炸^[5]。

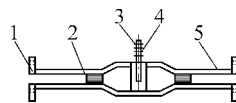
目前石油化工和煤矿工业中广泛应用的金属网型和波纹型等阻火器,因其对火焰的淬熄作用以及压力波抑制作用而逐渐被人们所重视^[6]。国内外学者对多孔材料的抑爆效果进行了研究^[7],发现多层网孔材料具有体积小、质量轻、淬熄性能好的优点^[8]。发现金属丝网、泡沫陶瓷、多孔泡沫铁镍对瓦斯爆炸火焰均有较好的衰减作用,多孔材料通过多次摩擦衰减爆炸动能从而削弱爆炸能量^[9];基于多孔材料对可燃气体爆炸传播的火焰起猝熄作用并对压力波产生抑制作用,提出钢丝网-泡沫陶瓷-钢丝网3层复合结构^[10];研究了压力波在硬质泡沫塑料、多孔铝等轻质多孔疏松材料的传播规律和冲击性能^[11];此外真空腔体阻隔爆技术对爆炸火焰和冲击波耦合作用抑制效果较好,但真空腔体存在临界体积,另外弱面材料能否及时恰好破碎也是限制因素^[12]。

课题组结合前期热管提取煤堆自燃热量的试验研究,已经证实了热管良好高效的导热性能^[13];研究发现金属泡沫能够有效削弱层流底层厚度而起到强化传热的效果^[14];爆炸发生瞬时热量极高,如果短时间内热量散不出去,在阻火器另一侧的可燃物会存在着着火危险,基于此提出将热管与多孔泡沫结构配合实现阻燃防爆,有望实现火焰及压力波双重抑制作用,并削弱两者耦合作用。

1 热管泡沫复合结构

热管泡沫复合结构是指在普通热管基础上,结合泡沫金属构成复合结构,简称热管泡沫复合结构,如图1所示,复合热管概念模型如图2所示。多孔泡沫金属吸液芯具有毛细极限大、流体流动阻力小、传热速率大等优势;与烧结金属粉末比,泡沫金属较高孔隙率增加工作液体流量使得最大传热量大幅提高,相对较高的渗透率可以使回流压力减少,相应增加毛细极限;泡沫铁镍芯体毛细力大、有效热导率

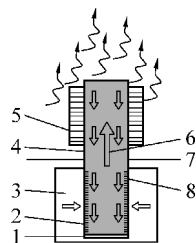
高、热阻小,另外毛细极限及沸腾极限高于丝网芯体,且不易出现传热极限。



1—连接件;2—泡沫铁镍板;3—肋片;4—热管;5—外壳

图1 热管复合结构抑爆装置

Fig.1 Heat pipe composite structure explosion suppression device



1—液体;2—泡沫铁镍吸液芯;3—热量;

4—液体;5—翅片;6—蒸汽;7—管壁;8—热管

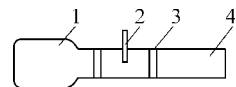
图2 热管泡沫复合结构模型

Fig.2 The model of heat pipe foam composite structure

多孔金属丝网衰减瓦斯爆炸冲击波和火焰能量能力低、抗烧结能力差。泡沫金属因其特殊孔隙结构、密度小、孔隙率高、比表面积大,对火焰波及压力波衰减作用明显,填充管内、镶嵌在管外和平板上已有研究,证明了其优良的传热特性,尤其多孔泡沫铁镍具有极好的热传输及通透性。研究发现0.3 g/cm³泡沫铁镍金属对管道内爆炸火焰温度衰减率为7.1%~70.7%,对爆炸超压值衰减率在55.1%~73.8%^[15];其中多孔泡沫铁镍对爆炸超压衰减率在12.9%~73.8%^[16]。因此笔者选择泡沫铁镍作为复合热管结构吸液芯。

2 抑爆实例分析

目前国内在网孔吸收材料对管道内强制抑制爆轰的研究主要集中在传播过程中火焰速度和温度的变化特征^[17]。对管道内火焰厚度及持续时间进行了研究,如图3所示。



1—爆炸罐;2—热管;3—泡沫铁镍;4—管道

图3 计算实例

Fig.3 Illustration of an example

首次得到了金属网的几何参数与临界淬熄速度、临界淬熄压差、淬熄量和最大超压值下降比例之间关系的经验公式^[18]。研究了多孔可压缩材料对

爆炸传播的影响^[19],证明了多孔材料用于衰减爆炸能量波的可行性。

管道内径 159 mm,管道外环境温度 26 ℃,泡沫铁镍厚度 60 mm,本计算引用原始空管中管道内温度峰值 t 与管道长度 x 关系^[20]为

$$t = -3.029x^3 + 48.811x^2 - 266.570x + 1\,058.700 \quad (1)$$

泡沫铁镍布置在距爆炸罐右端口 1 m 处,代入式(1)得左端泡沫铁镍起始端初始温度 $t_0 = 837.91$ ℃;热管布置在 1.2 m 处,热管处原始温度 $t_1 = 803.88$ ℃,后置泡沫铁镍布置于 1.4 m 处。高温体积分数 8% 甲烷空气混合气体进入泡沫铁镍传热,包含孔隙内流体的导热、流体泡沫骨架之间导热、泡沫骨架表面辐射换热、流体与骨架之间对流换热,泡沫材料有效导热系数为 $\lambda = \varepsilon\lambda_g + (1-\varepsilon)\lambda_s$,泡沫材料孔隙率为 $\varepsilon = 0.3$,甲烷空气混合气体导热系数 λ_g 取 0.060 28 W/(m·K);泡沫铁镍导热系数 λ_s 取 91.70 W/(m·K),则 $\lambda = 64.21$ W/(m·K)。

泡沫铁镍材料处简化为平壁稳态导热,壁面温度为

$$t_{w2} = t_{w1} - q \frac{\delta}{\lambda} \quad (2)$$

式中: t_{w1} 、 t_{w2} 分别为泡沫铁镍简化平壁的起始端,终止端壁表面温度,℃; q 为热流密度,W/m²; δ 为平壁厚度,m。

q 取 8.02×10^5 W/m²,代入式(2)得 $t_{w2} = 762.96$ ℃,温度降低率为

$$\eta = \frac{t_{w1} - t_{w2}}{t_{w1}} = 8.9\%$$

分析热管断面,得出热管管径 d 及热管倾角 θ 与蒸发段吸热量 Q 间的关系式为

$$Q = \rho l r = \frac{\rho^2 g d^4 (\theta - \sin \theta) \left(1 - \frac{\sin \theta}{\theta}\right) i}{256 \mu} r \quad (3)$$

式中: ρ 为工质水的密度,kg/m³; l 为蒸发段长度,m; r 为介质工作态的汽化潜热,kJ/kg; g 为当地重力加速度,N/kg; d 为热管直径,m; μ 为工质动力黏度,N·s/m²; i 为热管安装的坡度值,(°)。

选用热管为不锈钢-水热管,冷凝段和蒸发段长度比为 6:1,热管直径 d 取 20 mm,长度 1 500 mm,壁厚 3 mm,热管倾角 60°。则蒸发段传热量可达 1.71×10^{12} J。计算发现热管泡沫复合结构能高效

快速地将管内集聚的热量传出管外,破坏管内蓄热环境,表明热管泡沫金属复合结构可以有效降低管道爆炸压力波温度,破坏管内蓄热环境,有效抑制了爆炸波的热破坏发生。

3 模拟分析

笔者在距离点火点 1.5、3.5 m 处分别布置热管和泡沫铁镍,泡沫铁镍尺寸为 0.3 m×0.3 m×0.6 m,管内为体积分数 9.5% 的甲烷混合气体,右边为压力出口。边界条件设定:①轴对称边界:建立二维轴对称管道模型;②壁面:采用壁面边界条件限定 Fluid 和 Solid 区域,采用无滑移壁面边界条件,设定壁温恒为 300 K;③压力出口:设定初始压力 1.01×10^5 Pa,在压力出口边界处设置静压;④多孔区域:孔隙率 0.90,比热容 0.42×10^3 J/(kg·K),密度 0.8 g/cm³,计算黏性阻力系数及惯性阻力系数;考虑燃烧过程的化学反应,以距离点火点 3.6 m 处火焰温度来反映瓦斯燃烧爆炸过程不同类型管降温淬火性能。

3.1 火焰温度对比分析

从图 4 可以明显看出,距离点火点 3.6 m 处空管、泡沫铁镍型管、热管泡沫复合结构型管内火焰温度依次明显降低,泡沫铁镍型管温度最大值降低率为 7.5%,温度衰减率为 23.08%;热管泡沫复合结构型管温度最大值降低率为 40%,温度衰减率为 11.11%,进而说明热管泡沫复合结构降温淬火性能较好。当火焰经过热管泡沫复合结构型管道向管道出口端传播时,在 0.095 s 时温度被衰减到 1 680 K 左右,远低于最低点燃温度 1 202 K。

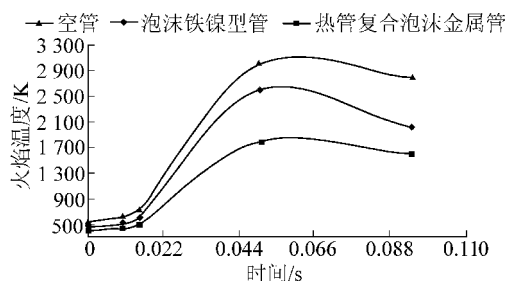


图 4 3 种类型管道距离点火点 3.6 m 处火焰温度随时间变化

Fig.4 Flame temperature changes of three types of pipes at 3.6 m distance from ignition point with time

图 4 中热管泡沫复合结构型管道内火焰能量衰减效果明显,这是由于将复合热管与多孔泡沫结构配合可以将燃烧的高热量快速导出,使得爆炸必须

的能量得不到及时供应而抑制了新一轮爆炸发生。

3.2 CH₄、CO₂ 浓度对比分析

在 0.095 s 时热管泡沫复合结构型管内 CH₄ 剩余体积分数在 4.5% 左右(表 1),即还没有充分反应完毕,而布置有泡沫金属的管道及空管内 CH₄ 基本全部反应。由表 1 数据得管道中放置泡沫铁镍抑制爆炸效果显著,但是也并没有完全的阻断火焰,热管泡沫复合结构型管内可燃气体瓦斯略有剩余,说明热管泡沫复合结构降温淬火效果显著。

通过对 3 种不同管道结构内火焰传播情况及 CH₄、CO₂ 浓度分布,可得内置热管泡沫复合结构型管道内瓦斯爆炸情况得到很好的抑制,其主要原因是在瓦斯爆炸火焰传播过程中,泡沫铁镍具有热性能好、耐高温和耐冲击力强的优点,反应产生的热与其孔隙壁面发生碰撞反应,使得自由基数量骤减,导致反应中断从而达到淬熄爆炸火焰的目的。热管泡沫复合结构破坏火焰和压力波之间的耦合,起到阻隔爆炸的作用,有效衰减管道后部的易燃易爆气体能量而抑制二次爆炸发生。

表 1 0.095 s 时 3 种类型管道轴线处 CH₄ 和 CO₂ 浓度对比

Table 1 CH₄ and CO₂ concentration comparison in axis of pipeline of three types of pipes at 0.095 s

气体	气体浓度/(mg·m ⁻³)		
	空管	泡沫铁镍型管	热管泡沫复合结构型管
CH ₄	0.000 002	0.001 12	0.045 15
CO ₂	0.01	0.007 51	0.000 007 4

4 结 论

1) 提出一种新型热管泡沫复合抑爆结构,计算发现该复合结构中单个泡沫铁镍板可使温度降低率达 8.9%,复合热管以相变形式可传出 1.71×10^{12} J 热量,对称分布的泡沫铁镍金属可以有效削弱爆炸压力波。

2) 建立数学模型研究了泡沫铁镍型管道及新型抑爆结构型 2 种管道内火焰分布情况,发现热管泡沫复合结构在 0.095 s 时可以将火焰温度衰减到 1 600 K 左右,温度最大值降低率为 40%,温度衰减率为 11.11%;CH₄ 体积分数达 4.5% 左右,文中所提出的热管泡沫复合结构能够快速导出燃烧热量,验证了该复合结构用于抑制爆炸的可行性。

参考文献 (References) :

- [1] LEBECKI K. Functional safety in industrial explosion protection [J]. Transactions of the VSB – Technical University of Ostrava, Safety Engineering Series, 2012, 7(2): 44–48.
- [2] MURPHY J F, CHASTAIN W, BRIDGES W. Initiating events and independent protection layers [J]. Process Safety Progress, 2010, 28(4): 374–378.
- [3] Ramírez A, García-Torrent J, Tascón A. Experimental determination of self-heating and self-ignition risks associated with the dusts of agricultural materials commonly stored in silos [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 175(1): 920–927.
- [4] 聂百胜, 何学秋, 张金锋, 等. 泡沫陶瓷对瓦斯爆炸火焰传播的影响 [J]. 北京理工大学学报, 2008, 28(7): 573–576.
NIE Baisheng, HE Xueqiu, ZHANG Jinfeng, et al. The effect of foam ceramics on the flame propagation of gas explosion [J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2008, 28(7): 573–576.
- [5] ZHANG J F, LIANG X M, MA Zhongyuan, et al. Study on chain scission of gas explosion reaction in foam ceramics [J]. Procedia Engineering, 2011, 26: 2369–2375.
- [6] 张巨峰, 王 晖, 武 元, 等. 管道内多层金属丝网对预混可燃气体爆炸火焰传播的影响 [J]. 湖南科技大学学报: 自然科学版, 2012, 27(2): 18–21.
ZHANG Jufeng, WANG Hui, WU Yuan, et al. Effects of multi-layer metal wire mesh on the propagation of premixed flammable gas explosion in pipes [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2012, 27(2): 18–21.
- [7] Rudy W, Rafa Porowski, Teodorczyk A. Propagation of hydrogen-air detonation in tube with obstacles [J]. Journal of Power Technologies, 2011, 91(3): 122–129.
- [8] 朱传杰, 林柏泉, 江丙友, 等. 煤矿瓦斯爆炸冲击波多相破坏效应研究 [J]. 中国矿业大学学报, 2013, 42(5): 718–724.
ZHU Chuanjie, LIN Baiquan, JIANG Bingyou, et al. Study on multi-phase failure effect of coal mine gas explosion shock wave [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2013, 42(5): 718–724.
- [9] Ciccirelli G. Explosion propagation in inert porous media [C]. Philosophical transactions, Series A, Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2012: 647.
- [10] 纪晨润. 阻隔煤矿瓦斯爆炸传播的新技术研究 [J]. 煤炭技术, 2010, 29(3): 110–113.
JI Chenrun. A new technology for obstructing the propagation of coal mine gas explosion [J]. Coal Technology, 2010, 29(3): 110–113.
- [11] 王永刚, 胡时胜, 王礼立. 爆炸荷载下泡沫铝材料中冲击波衰减特性的实验和数值模拟研究 [J]. 爆炸与冲击, 2003(6): 516–522.
WANG Yonggang, HU Shisheng, WANG Lili. Experimental and numerical simulation of shock wave attenuation characteristics in foam aluminum material under explosive load [J]. Explosion and Impact, 2003(6): 516–522.

(下转第 177 页)

- [14] 郑德超,张少博.采煤机螺旋滚筒的载荷模拟与分析[J].煤矿机械,2016,37(8):78-80.
ZHENG Dechao,ZHANG Shaobo.Load simulation and analysis of spiral drum of shearer[J].Coal Mine Machinery,2016,37(8):78-80.
- [15] 高洋,张贺.大功率采煤机滚筒负荷计算研究[J].煤矿机械,2013,34(9):11-14.
GAO Yang,ZHANG He.Load calculations and research of high-power shearer drum[J].Coal Mine Machinery,2013,34(9):11-14.
- [16] 刘送永,杜长龙,崔新霞,等.不同齿身锥度和合金头直径截齿的截割试验[J].煤炭学报,2009,34(9):1276-1279.
LIU Songyong,DU Changlong,CUI Xinxia,et al.Cutting experiment of the picks with different conicity and carbide tip diameters[J].Journal of China Coal Society,2009,34(9):1276-1279.
- [17] 高忠华,陈锡侯,彭东林.时栅角位移传感器在线自标定系统[J].光学精密工程,2015,23(1):93-101.
GAO Zhonghua,CHEN Xihou,PENG Donglin.Online self-calibration system for time crating angular displacement sensor[J].Optics and Precision Engineering,2015,23(1):93-101.
- [18] 贺声阳.大功率电牵引采煤机整机系统可靠性研究[D].太原:太原理工大学,2009:56-57.
- [19] 加力康,王勤贤,杨兆建,等.改进阈值函数的转子系统振动信号降噪研究[J].机械设计与制造,2016(5):71-74.
JIA Likang,WANG Qinxian,YANG Zhaojian,et al.Denoising of rotor vibration signals based on improved threshold function[J].Machinery Design & Manufacture,2016(5):71-74.
- [20] 刘春生,王庆华,李德根.镐型截齿截割阻力谱的分形特征与比能耗模型[J].煤炭学报,2015,40(11):2623-2628.
LIU Chunsheng,WANG Qinghua,LI Degen.Fractal characteristic and specific energy model of conical picks cutting resistance spectrum[J].Journal of China Coal Society,2015,40(11):2623-2628.
- (上接第144页)
- [12] 胡成洲.真空度和弱面材料厚度对真空腔抑爆效果影响的实验研究[D].徐州:中国矿业大学,2015.
- [13] 张亚平,余小玲,冯全科.热管热性能的实验研究[J].西安科技大学学报,2007,27(2):187-189.
ZHANG Yaping,YU Xiaoling,FENG quanke.Heat pipe thermal performance experimental study[J].Journal of Xi'an University of Science and Technology,2007,27(2):187-189.
- [14] 张亚平,姬长发,王建国,等.超轻泡沫散热器热性能模拟[J].低温与超导,2013,41(7):64-67.
ZHANG Yaping,WANG Jianguo,JI Changfa,et al.Simulation of ultra light foam radiator thermal performance[J].Cryogenics and Superconductivity,2013,41(7):64-67.
- [15] 孙建华,李艳霞,魏春荣,等.泡沫铁镍金属抑制瓦斯爆炸冲击波的实验研究[J].功能材料,2013,44(10):1390-1394.
SUN Jianhua,LI Yanxia,WEI Chunrong,et al.Experimental study on the shock wave of the foam iron and nickel metal inhibition gas explosion shock wave[J].Functional Material,2013,44(10):1390-1394.
- [16] 魏春荣.多孔材料对瓦斯爆炸抑制作用研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013:76-85.
- [17] YUN G,NG D,MANNAN M S.Key findings of liquefied natural gas pool fire outdoor tests with expansion foam application[J].Industrial & Engineering Chemistry Research,2011,50(4):2359-2372.
- [18] WEI G,DOBASHI R,MOGI T,et al.Effects of particle characteristics on flame propagation behavior during organic dust explosions in a half-closed chamber[J].Journal of Loss Prevention in the Process Industries,2012,25(6):993-999.
- [19] 李东进,刘培培,姚干兵,等.可燃物爆炸抑制的研究现状及发展[J].中国安全生产科学技术,2012,8(9):52-56.
LI Dongjin,LIU Peipei,YAO Ganbing,et al.Research status and development of combustible explosive suppression[J].China Safety Production Science and Technology,2012,8(9):52-56.
- [20] 李鹏.密闭空间瓦斯爆炸温度与压力变化规律研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2015.