

管道内甲烷-空气预混火焰传播特性实验研究

刘 丽 (安徽理工大学能源与安全学院, 安徽 淮南 232000)

摘要: 为研究甲烷与空气预混合气体的爆炸火焰传播特性, 利用火焰加速管道与高速摄像机等实验装置, 采集爆燃压力与火焰传播速度的数据并拍摄火焰图像, 分析甲烷浓度对预混气火焰传播特性的影响。结果表明: 随着甲烷浓度的增加, 爆燃压力与火焰传播速度上升、压力峰值出现时间延长、火焰边界模糊、前锋阵面褶皱增加。

关键词: 预混气体; 瓦斯爆炸; 爆燃压力; 火焰传播速度; Tulip 火焰

0 引言

煤矿井下一旦发生瓦斯爆炸便很严重, 多为特重大事故, 造成了巨大的人身伤亡、财产损失。因此, 研究瓦斯爆炸特性及火焰传播规律对有效预防和控制瓦斯爆炸事故具有重要意义。

可燃气的火焰传播受许多因素的影响, 其中初始浓度直接影响反应速率。已有多位学者研究了管道内不同甲烷预混气浓度对火焰传播特性的影响。余明高^[1]等研究 10% 非均匀预混瓦斯, 发现扩散成纵向浓度梯度时, 管道内出现三重火焰, 然后速度、超压迅速下降; 徐进生^[2]等得出贫燃或富燃条件下火焰形态易发生不规则变化的结论; 王秋红^[3]等发现其实验管道上部燃烧比下部燃烧剧烈, 10% 的火焰最明亮, 最大爆炸压力和火焰温度峰值都取得最大值。

本文通过实验模拟了巷道内瓦斯爆炸后火焰传播的场景。实验浓度为 8%、10%, 接近最剧烈爆炸浓度 9.5%, 利用高速摄像机分析火焰传播的形态与位置变化, 使用压力与火焰传感器获得压力与速度的变化规律, 对甲烷-空气预混气的火焰传播过程进行了对比分析。

1 实验系统

1.1 实验装置

实验装置由水平火焰加速管道、配气系统、点火系统、数据采集系统和高速摄像机等组成。

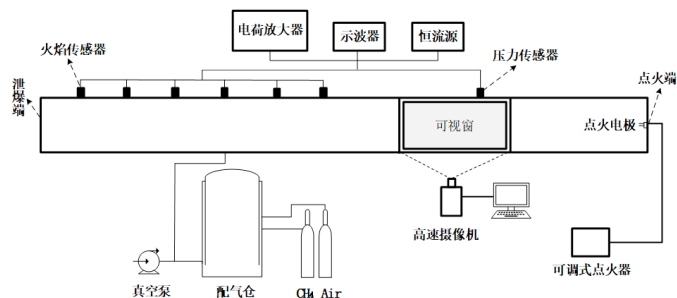


图1 实验系统示意图

系统示意图如图1所示。圆柱形的火焰加速管道主体由不锈钢制成, 内径 120mm、总长 5.5m, 为便于高速摄像机采集火焰图像, 在距点火端约 130cm 处设有 40cm × 7cm 的可视观察窗, 管道点火端与泄爆端封闭。

1.2 实验过程

根据道尔顿分压定律, 将高纯甲烷与空气配制成浓度为 8%、10% 的混合气体, 在配气仓中静置 3~5h 使

气体混合均匀。首先将管道抽至真空, 缓慢充入预先配制好的甲烷-空气预混气体, 观察水银计变化控制进气流量, 使管道内压力达到 101.325kPa, 然后用 2 层聚乙烯薄膜封闭泄爆端。可调式电火花点火器的电压设为 90V, 对应点火能 3J。管道上有 6 支火焰传感器与 1 支压力传感器, 采集的数据均保存在示波器中。高速摄像机拍摄速率为 2000 帧/s。存储数据后清理管道, 一个浓度做 4 组实验。

2 实验结果与分析

2.1 火焰爆燃压力分析

图2是甲烷-空气预混气火焰传播过程中爆燃压力随时间变化曲线图。8%、10% 最大压力分别是 A_1 的 3.38kPa 和 B_2 的 9.53kPa, 10% 的压力峰值均比 8% 高, 且三个峰值出现时间都比 8% 晚。

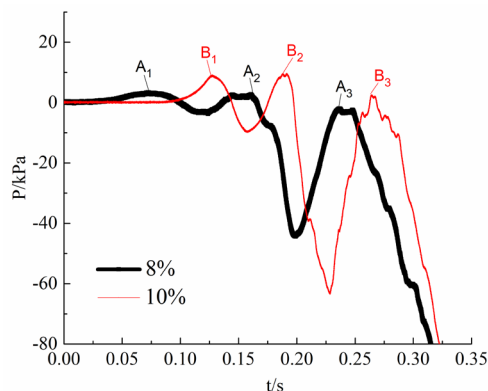
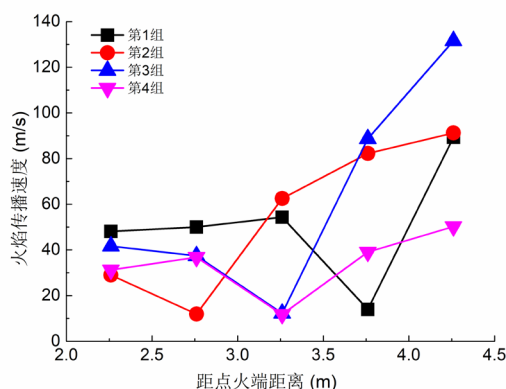


图2 爆燃压力-时间曲线图

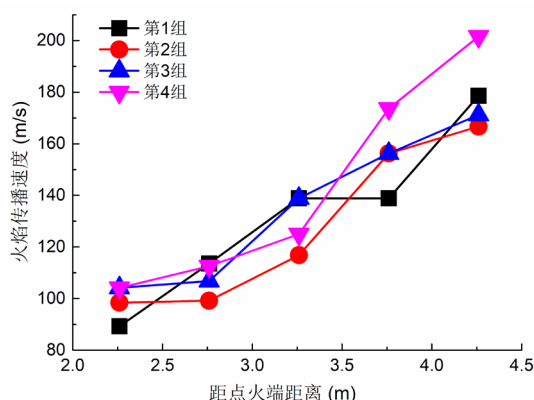
混合气被点燃后以波的形式向泄爆端传播, 前驱冲击波与燃烧波的相互影响造成了爆燃压力的波动。图2中三个峰值分别表示^[4]: 破膜压力; 冲出管道的未燃预混气与燃烧波外部爆炸产生的反向压力波; 产生负压后管内气体震荡加剧了火焰湍流程度, 最后管内气体恢复常压则压力骤降。

2.2 火焰传播速度分析

气体的火焰传播速度指火焰锋面向未燃气体的移动速度, 8%、10% 甲烷-空气预混气的火焰传播速度如图3所示。由图可知, 距点火端最远的火焰传播速度最大, 8% 速度峰值为 131.58m/s, 而 10% 高达 201.61m/s, 且还有加速趋势。这是泄爆端有稀疏波^[5]的原因, 致使火焰传播速度急剧上升。



(a) 甲烷浓度 8%



(b) 甲烷浓度 10%

图 3 火焰传播速度曲线图

随着火焰锋面向泄爆端传播,越来越多的未燃预混气参与反应,两个浓度的火焰传播速度整体都呈上升趋势。不同的是,4组平行实验下,10%预混气的火焰传播速度线性增长,而8%速度曲线均呈“V”型,有一个先减小后增加的趋势且各组最低值出现位置不一致。

2.3 爆燃火焰传播形态分析

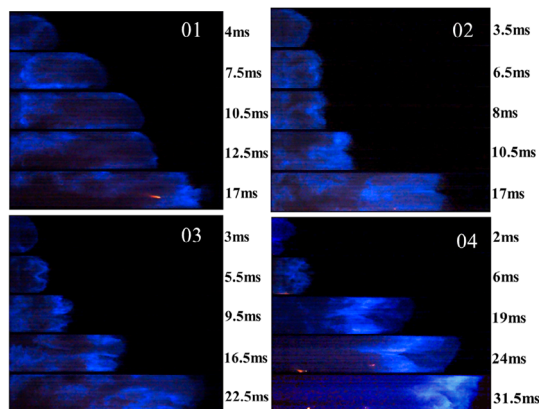
图4是8%、10%甲烷预混气各进行4次点火实验后,高速摄像机拍到的火焰传播初期形态变化图。为便于观察,假定火焰前锋进入可视窗的前1幅照片为 $t=0\text{ms}$ 时刻。

对比两图可知,10%的火焰图像相比8%更明亮,火焰锋面更模糊,8%的甲烷-空气预混气火焰锋面在第二、三、四组实验中均形成了经典的“郁金香(Tulip)”火焰。10%甲烷预混火焰虽未形成Tulip火焰,但出现了斜压效应^[6]的倾斜形态,火焰锋面易遭到压力波破坏,褶皱更明显。

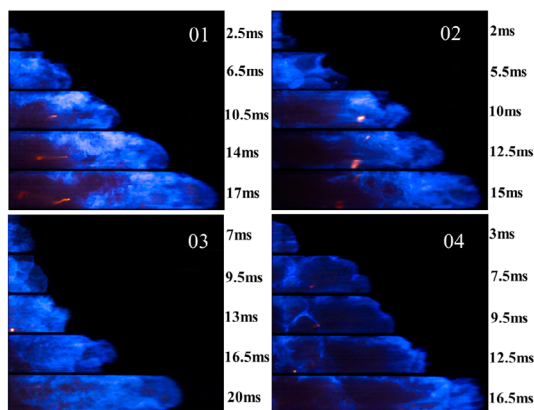
3 结论

①两个浓度的混合气体均出现三个压力峰值,10%甲烷预混气爆燃火焰超压峰值比8%高6.15kPa,超压峰值出现的时间更晚;②10%甲烷预混气火焰传播速度比8%高,峰值速度分别为201.61m/s、131.58m/s,10%速度线性增长,而8%速度曲线呈“V”型;③火焰传播初期,8%甲烷预混气比10%更易形成“Tulip”火焰,10%火焰湍流程度更高、褶皱更多。由此可知,甲烷浓度增

加会加快火焰传播速度,增大爆燃压力,增加火焰锋面褶皱,从而又扩大了火焰锋面与未燃气的接触面积,便会加速火焰的传播,这是一个循环的影响过程。



(a) 甲烷浓度 8%



(b) 甲烷浓度 10%

图 4 火焰传播形态图

参考文献:

- [1] 余明高,陈传东,王雪燕,等.管道内瓦斯非均匀预混火焰传播特性实验研究[J].煤炭学报,2014,39(09):1449-1454.
- [2] 徐进生,刘洋,陈先锋,等.甲烷与空气质量浓度当量比对火焰结构及传播特性的影响[J].中国安全科学学报,2014,24(09):64-9.
- [3] 王秋红,王二飞,陈晓坤,等.管道内瓦斯爆炸火焰传播压力与温度特性[J].中南大学学报(自然科学版),2020,51(01):239-47.
- [4] 常伟达,汪泉,李志敏,等.弱封闭管道向抑爆装置内泄爆对火焰传播特性的影响[J].火工品,2019(05):52-6.
- [5] 何学超,孙金华,陈先锋,等.管道内甲烷-空气预混火焰传播特性的实验与数值模拟研究[J].中国科学技术大学学报,2009,39(04):419-23.
- [6] 陈先锋.丙烷-空气预混火焰微观结构及加速传播过程中的动力学研究[D].合肥:中国科学技术大学,2007.

作者简介:

刘丽(1997-),女,贵州贵阳人,安徽理工大学硕士研究生,安全工程专业,甲烷-空气混合气体爆炸的研究方向。