

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2019.03.003

# 不同压力下乙烷喷射火火焰特征研究<sup>\*</sup>

齐玉凤<sup>①</sup>  彭  旭<sup>①</sup>  杨  森<sup>②</sup>  何中其<sup>①</sup>

①南京理工大学化工学院(江苏南京,210094)

②江苏省特种安全防护产品质量监督检验中心(江苏泰州,225300)

[摘  要]  为了研究不同喷射压力对乙烷喷射火火焰形态和热辐射范围的影响,进行30、35、50 mm喷嘴口径下乙烷喷射火的引燃试验,通过对喷射火的火焰高度、温度和热辐射强度进行监测,分析不同喷射压力下乙烷喷射火的燃烧规律。结果表明,随着喷射压力和喷嘴口径的增大,火焰高度和温度逐渐升高;在50 mm喷嘴口径、0.20 MPa压力时,火焰最高温度达到1 260 ℃;在30 mm喷嘴口径和0.15、0.20 MPa喷射压力时,距离火焰30 cm处热辐射强度超过25 kW/m<sup>2</sup>,达到可能致死的辐射量级。

[关键词]  喷射火;喷射压力;喷嘴口径;火焰形态;热辐射

[分类号]  X932

## Study on Flame Characteristics of Ethane Jet Fire under Different Injection Pressure

QI Yufeng<sup>①</sup>, PENG xu<sup>①</sup>, YANG Sen<sup>②</sup>, HE Zhongqi<sup>①</sup>

①School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)

②Jiangsu Quality Supervision and Inspection Center for Special Safety Protection Products (Jiangsu Taizhou, 225300)

[ABSTRACT]  To analyze the influence of different injection pressure on the flame shape and thermal radiation range of ethane jet fire, the ignition experiments on ethane jet fire with 30, 35 and 50 mm nozzle diameter were conducted. The combustion rules of ethane jet fire under different injection pressures were analyzed through measuring the flame height, temperature and thermal radiation intensity of the jet fire. Results show that when the nozzle diameter and the injection pressure increases, the flame height and the temperature increase, and the maximum flame temperature reaches 1 260 ℃ at 50 mm nozzle diameter and 0.20 MPa pressure. Under the 30 mm nozzle diameter and the 0.15 and 0.20 MPa injection pressure, the thermal radiation intensity at 30 cm away from the flame exceeds 25 kW/m<sup>2</sup> and reaches a potentially lethal radiation level.

[KEYWORDS]  jet fire; injection pressure; nozzle diameter; flame shape; thermal radiation

## 引言

乙烷是天然气中第二大组成成分,也是工业中常用的制冷剂和裂解剂,在我国应用广泛,一旦发生火灾,后果不堪设想。然而,目前国内外缺乏对乙烷喷射火、防火防爆相关问题的研究。喷射火对外界伤害的主要作用方式是热辐射<sup>[1]</sup>,近年来,喷射火的热辐射特性得到了广泛研究。Cirrone等<sup>[2]</sup>进行了低温氢喷射火热辐射研究,针对3种不同的湍流模型,对低温氢的火焰长度和辐射热通量分别进行试验和模拟,建立了预测热危害的理论模型。Sun

等<sup>[3]</sup>采用理论计算与模拟方法研究射流火焰的温度分布,分析了射流速度和泄漏孔的宽高比对温度的影响,提出了沿中心线和燃料射流最高温度的简单函数。陈国华等<sup>[4]</sup>利用美国标准局发布的大尺寸喷射火试验数据,得到了火焰内部的温度分布和热辐射分布数据,并通过Fluent软件进行了验证。王其华等<sup>[5]</sup>对井喷失控喷射火进行分析,得出了温度场和热辐射场的分布直接关系到事故伤害范围的结论。

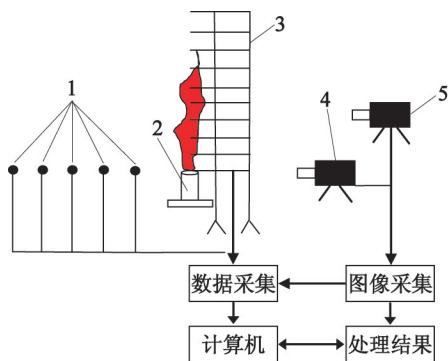
以往对喷射火燃烧特性的研究大部分是以甲烷、氢气、天然气等燃料为载体研究喷射火的某一特性<sup>[6-8]</sup>,几乎没有乙烷喷射火燃烧方面的研究。因

<sup>\*</sup> 收稿日期:2018-12-17  
第一作者:齐玉凤(1994-),女,硕士,主要从事安全技术及工程的研究。E-mail:2075994387@qq.com  
通信作者:何中其(1978-),男,博士,主要从事安全技术及工程的研究。E-mail:hqz555@163.com

此,设计了不同喷射压力下乙烷垂直喷射火试验,研究乙烷喷射火的火焰形态、温度和热辐射范围,以期乙烷事故发生后如何确定救援人员能够接近火场的距离提供参考<sup>[9-11]</sup>。

## 1 试验模型

所构建的试验场所如图 1。试验装置包括乙烷储罐、不同口径的喷嘴、热电偶架、热流计组、摄像机、红外热像仪、计算机等。



1 - 辐射热流计; 2 - 喷嘴; 3 - 热电偶架;  
4 - 红外热像仪; 5 - 摄像机。

图 1 试验模型和测点布置

Fig. 1 Test model and lay out of measurement points

使用同一喷枪, 喷口内径为 1 mm, 所用喷嘴为圆形, 口径分别为 30、35、50 mm 3 种。采用铠装 K 型热电偶组, 沿喷嘴中轴线每 4 cm 设置一个, 共 10 个, 标记为 R1 ~ R10, 其中, R1 热电偶与喷嘴等高, 热电偶放置在热电偶支架上, 用绝缘电阻丝固定; 辐射热流计布置在喷嘴左侧, 距离火焰 20、30、40、50、60 cm 处各一个, 标记为 R11 ~ R15, 辐射热流计高度与喷嘴高度一致。红外热像仪放置在离火焰 1.5 m 处, 采集热辐射数据后由计算机输出。试验期间环境温度平均温度约为 30 ℃, 湿度约为 55%。

选取纯度为 99.99% 的乙烷为研究对象, 在喷嘴口径分别为 30、35 mm 和 50 mm 的条件下进行喷射火试验, 通过设置不同喷射压力, 对乙烷喷射火的火焰形态、温度和热辐射影响范围进行分析。

## 2 理论模型简介

喷射火特性参数与气体泄漏质量速率相关, 气体流速分为声速流动和亚声速流动, 不同气体流速对应的泄漏质量速率计算公式不同<sup>[12-13]</sup>。当管道

内、外压差满足  $p_0/p \leq [2/(k+1)]^{k/(k-1)}$  时, 管内气体为声速流动, 流速计算公式为

$$Q_0 = C_d A p_0 \sqrt{\frac{Mk}{RT} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}} \quad (1)$$

当管道内、外压差满足  $p_0/p > [2/(k+1)]^{k/(k-1)}$  时, 气体流动为亚声速流动, 流速计算公式为

$$Q_0 = C_d A p_0 \sqrt{\frac{2k}{k-1} \cdot \frac{Mk}{RT} \cdot \left[ \left( \frac{p_0}{p} \right)^{\frac{2}{k}} - \left( \frac{p_0}{p} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} \quad (2)$$

式中:  $p_0$  为当地大气压力, Pa;  $p$  为管内燃气压力, Pa;  $k$  为绝热指数, 乙烷取值 1.249;  $Q_0$  为泄漏质量速率, kg/s;  $C_d$  为泄漏系数, 圆形取值 1.00;  $M$  为气体摩尔质量, kg/mol;  $T$  为气体初始温度, K;  $A$  为泄漏孔面积, 试验取值  $3.14 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ ;  $R$  为气体常数, J/(mol · K)。

选取乙烷为试验对象, 采用 3 种喷嘴口径 (30、35、50 mm), 每种口径分别以 0.01、0.05、0.10、0.15、0.20 MPa 喷射压力为试验条件。根据式 (1)、式 (2) 计算得出: 当喷射压力为 0.01、0.05 MPa 时, 乙烷流动为亚声速流动; 当喷射压力为 0.10、0.15、0.20 MPa 时, 乙烷流动为声速流动。

## 3 结果与分析

### 3.1 火焰形态

试验过程中保持喷嘴口径不变, 通过减压阀调节乙烷气瓶的喷射压力, 记录喷射火稳定燃烧 1 min 的录像, 得到图 2 所示不同喷嘴口径 (30、35、50 mm)、不同喷射压力 (0.01、0.05、0.10、0.15、0.20 MPa) 下同一时刻的火焰形态。

由图 2 可知, 在保持喷嘴口径不变的情况下, 随喷射压力增加, 火焰高度随之增加, 其主要原因同一种喷嘴口径下, 喷射压力增加, 单位时间内乙烷流量增大, 使得燃烧的样品量变大, 火焰高度升高。在保持喷射压力不变的情况下, 随喷嘴口径增大, 火焰宽度增加、高度减小, 由“高瘦”型变成“矮胖”型。由此可见, 在乙烷流量不变时, 同一喷射压力下, 喷嘴口径变大, 乙烷喷出被点燃时的扩散面积增大, 火焰宽度增加, 高度变小。综上所述, 在同种喷嘴口径下, 随着喷射压力变化, 火焰只有高度发生改变, 但形态大致相同。

### 3.2 最高温度曲线

通过红外热像仪对试验中的火焰温度进行采

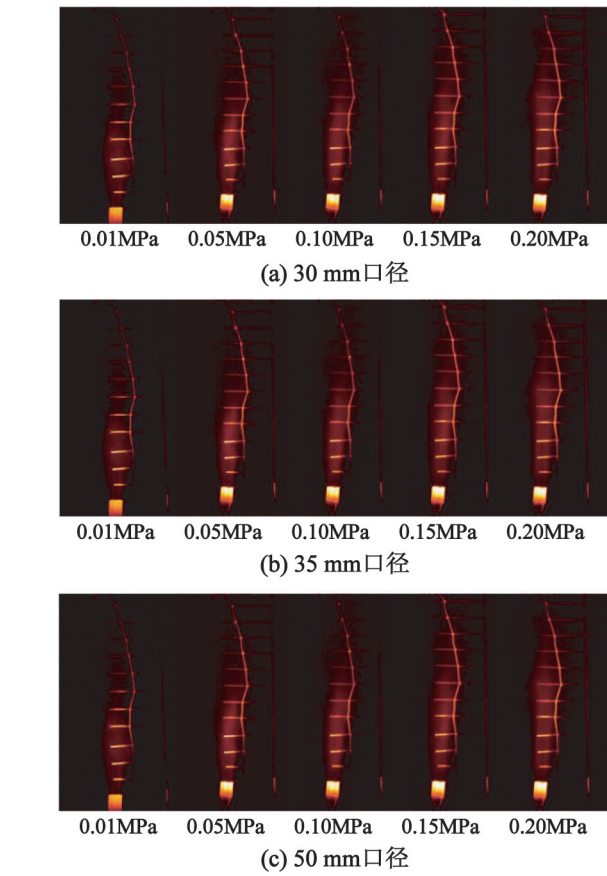


图2 不同口径、不同喷射压力下的火焰形态

Fig.2 Flame morphology under different calibers and different pressures

集,由Origin8.0处理,得到不同喷嘴口径(30、35、50 mm)和不同喷射压力下乙烷燃烧最高温度曲线,如图3所示。

由图3(a)得,火焰最高温度随着喷射压力的增大而升高。其中,在0.01 MPa时,最高温度最小,在1 070 ℃上下浮动;在0.20 MPa时,最高温度最大,在1 200 ℃上下浮动。当喷射压力从0.01 MPa升高到0.05 MPa时,温度升高了42.5 ℃;从0.05 MPa升高到0.10 MPa时,温度只升高了31.5 ℃;从0.10 MPa升高到0.15 MPa时,温度升高了20.2 ℃;从0.15 MPa升高到0.20 MPa时,温度只升高了9.3 ℃。由此可见,随着喷射压力的增大,火焰最高温度升高,但上升的幅度逐渐减小。

由图3(b)得,火焰最高温度随喷射压力的变化趋势与图3(a)类似。其中,在0.01 MPa时,最高温度最小,在1 100 ℃上下浮动;在0.20 MPa时,最高温度最大,在1 210 ℃上下浮动;由此可见,喷嘴口径的增大使火焰最高温度随之增大。

由图3(c)得,火焰最高温度随喷射压力的变化趋势与图3(a)、图3(b)类似。其中,在0.01 MPa

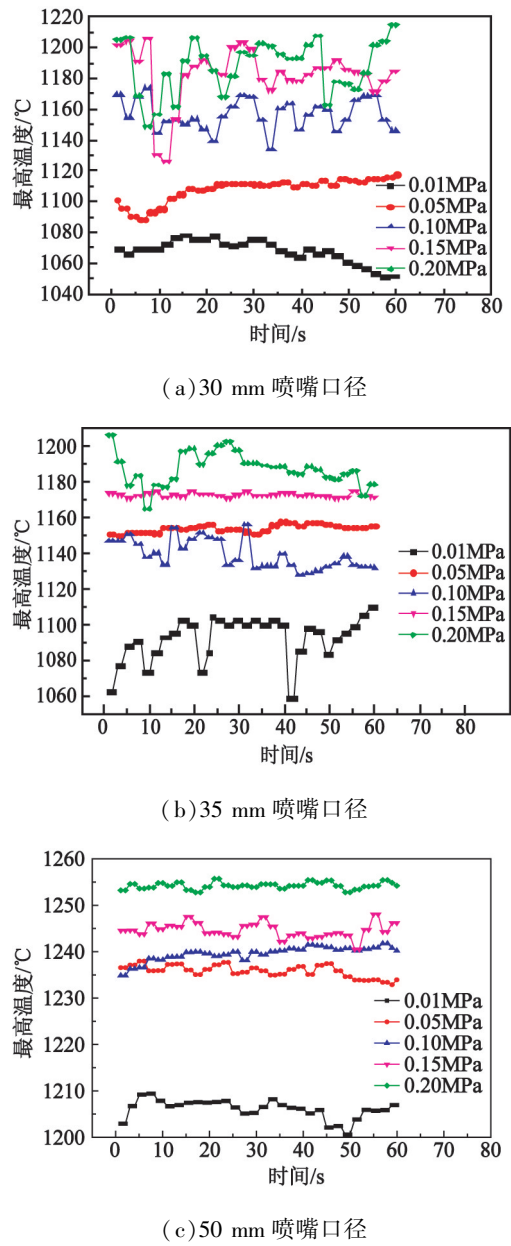


图3 不同喷嘴口径、不同喷射压力下火焰的最高温度

Fig.3 Maximum temperature of flame under different nozzle diameters and different pressures

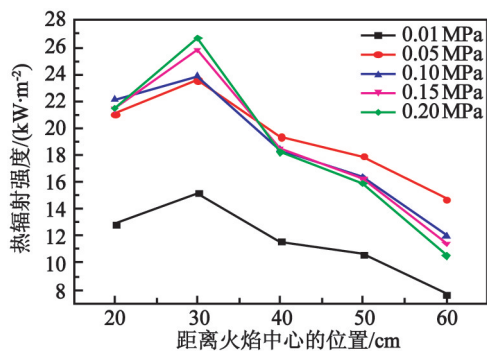
时,最高温度最小,在1 200 ℃上下浮动;在0.20 MPa时,最高温度最大,在1 260 ℃上下浮动。随着压力的增加,单位时间内的样品量显著增加,导致反应总热量升高,同时与环境之间的传热比例也就相对降低,导致了火焰温度绝对值升高。

### 3.3 热辐射曲线

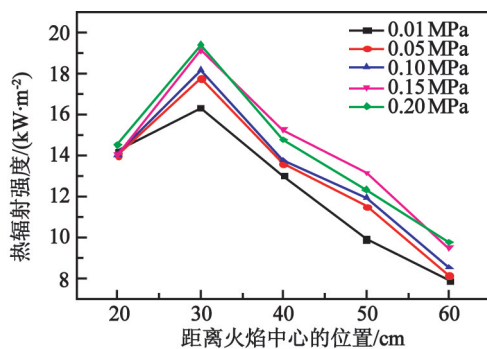
热辐射破坏准则<sup>[14-15]</sup>中指出:当热辐射强度为4.0 kW/m<sup>2</sup>时,该位置的现场暴露人员会被轻度烧伤;当热辐射强度为12.5 kW/m<sup>2</sup>时,该位置的现场暴露人员会被重度烧伤;当热辐射强度到达25.0 kW/m<sup>2</sup>时,该处人员暴露超过1 min的死亡率将达



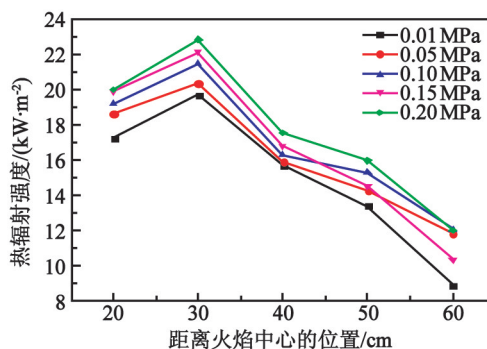
到 100%。试验中,得到火焰左侧 20、30、40、50 cm 及 60 cm 位置处热流计接收到的乙烷火焰热通量变化情况,如图 4 所示。



(a) 30 mm 喷嘴口径



(b) 35 mm 喷嘴口径



(c) 50 mm 喷嘴口径

图 4 不同位置处热流计的热辐射强度

Fig.4 Thermal radiation intensity of heat flow meter under different locations

由图 4 得,在同一喷嘴口径下,随着喷射压力的增大,热辐射强度增大;在同一喷射压力下,随着喷嘴口径的增大,热辐射强度增大。热辐射强度最大值出现在 R12(30 cm)热流计处,而不是离火焰最近的 R11(20 cm)处,其主要原因热流计与喷嘴口径等高,喷嘴对火焰热辐射扩散存在阻挡作用。同时,最高热辐射强度出现在 30 mm 喷嘴口径、0.20 MPa 条件下,而不是出现在最大喷口、最大喷射压力下,由此可得出冷空气的侵入对热辐射的影响作用较

大。压力升高,火焰变高,与热流计之间的相对位置发生变化,使得此处热流计接收的辐射热流量增加。

试验中,热辐射强度超过  $25 \text{ kW/m}^2$  有两种情况:喷嘴口径为 30 mm,压力分别为 0.15、0.20 MPa。根据热辐射破坏准则,这两种情况属于可能致死的辐射量级。

## 4 结论

分析了喷嘴口径为 30、35、50 mm,喷射压力分别为 0.01、0.05、0.10、0.15、0.20 MPa 条件下乙烷喷射火火焰的形态、高度和热辐射范围,然后根据数据分析与热辐射破坏准则作比较,得到了如下结论:

1)在同种喷嘴口径下,随着喷射压力的增大,火焰高度增加,最高温度升高且上升幅度逐渐减小,但火焰的形态大致相同;同时,热辐射强度也随之增大。

2)在同种喷射压力下,随着喷嘴口径的增大,火焰高度增加,最高温度升高且增长速率降低,火焰由“高瘦”型变成“矮胖”型;同时,热辐射强度也随之增大。

3)在 30 mm 喷嘴口径和 0.15、0.20 MPa 喷射压力条件下,距离火焰 30 cm 处热辐射强度超过  $25 \text{ kW/m}^2$ ,达到可能致死的辐射量级。

## 参 考 文 献

- [1] 周魁斌,刘娇艳,蒋军成. 高压可燃气体泄漏动力学过程与喷射火火灾分析[J]. 化工学报,2018, 69(4): 1276-1287.  
ZHOU K B, LIU J Y, JIANG J C. Analyses on dynamical process of high pressure combustible gas leakage and thermal hazard of jet fire [J]. CIESC Journal, 2018, 69(4): 1276-1287.
- [2] CIRRONE D M C, MAKAROV D, MOLKOV V. Thermal radiation from cryogenic hydrogen jet fires [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2018, 16(2): 1-12.
- [3] SUN L P, YAN H B, LIU S H, et al. Load characteristics in process modules of offshore platforms under jet fire: the numerical study [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2017, 47: 29-40.
- [4] 陈国华,周志航,黄庭枫. FLUENT 软件预测大尺寸喷射火特性的实用性[J]. 天然气工业,2014, 34(8): 134-140.  
CHEN G H, ZHOU Z H, HUANG T F. A validation

study of the fire dynamics simulator Fluent for modeling large-scale impinging gas jet fires[J]. Natural Gas Industry,2014,34(8):134-140.

[5] 王其华,李占稳,艾志久,等. 不同产气量时井喷失控喷射火模拟仿真研究[J]. 安全与环境工程,2009,16(5):103-107.

WANG Q H, LI Z W, AI Z J, et al. Analog simulation research of the out-of-control gas well fire with different gas productions [J]. Safety and Environmental Engineering,2009,16(5):103-107.

[6] 刘少杰,刘鹏翔,雷婷,等. 天然气管道泄漏喷射火燃烧特性研究[J]. 安全与环境学报,2017,17(6):2184-2190.

LIU S J, LIU P X , LEI T, et al. Numerical simulation analysis for the combustion characteristic features of the jet fire caused by the natural gas pipeline leakage [J]. Journal of Safety and Environment, 2017,17(6):2184-2190.

[7] 朱建华,褚家成. 池火特性参数计算及其热辐射危害评价[J]. 中国安全科学学报,2003,13(6):25-28.

ZHU J H, CHU J C. Calculation of characteristic parameters of pool fire and assessment of its thermal radiation hazard [J]. China Safety Science Journal, 2003, 13(6):25-28.

[8] 黄有波,吕淑然. FDS 模拟小孔径喷射火特性的有效性研究[J]. 消防科学与技术,2016,35(2):162-166.

HUANG Y B, LÜ S R. Effectiveness study of FDS software simulated gas pipeline small leak hole jet fire[J]. Fire Science and Technology, 2016,35(2):162-166.

[9] SIKANEN T, HOSTIKKA S. Predicting the heat release rates of liquid pool fires in mechanically ventilated compartments [J]. Fire Safety Journal, 2017, 91:266-275.

[10] 董炳燕,黄有波,孟江,等. 障碍物对天然气喷射火影响的数值模拟研究[J]. 中国安全生产科学技术,2016,12(1):111-116.

DONG B Y, HUANG Y B, MENG J, et al. Numerical simulation on influence of obstacle on jet fire of natural gas [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2016,12(1):111-116 .

[11] 张媛媛,黄有波,吕淑然. 矩形泄漏孔水平喷射火热辐射研究[J]. 中国安全科学学报,2017,27(6):73-78.

ZHANG Y Y, HUANG Y B, LÜ S R. Study on thermal radiation of horizontally oriented rectangular source fuel jet fire [J]. China Safety Science Journal, 2017, 27(6):73-78.

[12] 张佳庆,姜晓燕,陆守香,等. 100 号航空汽油池火燃烧特性试验研究[J]. 安全与环境学报,2010,10(5):136-140.

ZHANG J Q, JIANG X Y, LU S X, et al . Experiment study on the burning characteristics of 100 aviation gasoline pool fire [J]. Journal of Safety and Environment, 2010,10(5):136-140.

[13] WANG C J, WEN J X, CHEN Z B, et al. Predicting radiative characteristics of hydrogen and hydrogen/methane jet fires using firefoam [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014,39(35):20560-20569.

[14] 陈思维,焦光伟. 汽油介质储输运过程火灾爆炸危险性研究[J]. 工业安全与环保,2011,37(1):51-53.

CHEN S W, JIAO G W. Study on fire explosion danger in gas pipeline transportation and storage [J]. Industrial Safety and Environmerctal Protection, 2011, 37 (1):51-53.

[15] 张培红,张怡,张云栗. 不同通风条件下柴油池火的实验研究[J]. 中国安全生产科学技术,2017,13(6):145-149.

ZHANG P H, ZHANG Y, ZHANG Y L. Experimental study on diesel pool fire under different ventilation conditions [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2017, 13(6):145-149.

声 明

1、本刊对发表的文章拥有出版电子版、网络版版权,并拥有与其他网站交换信息的权利。本刊支付的稿酬已包含以上费用。

2、本刊文章版权所有,未经书面许可,不得以任何形式转载。

《爆破器材》编辑部