文章编号：1001-4888(2023)01-0091-10

氮气射流抑制氢气喷射火的实验研究*

吴越[1,2]，於星[1,2]，王伟[3]，汪宗成[1,2]，赵艳秋[1,2]，王昌建[1,4]，沈致和[1,4]，李冰[5]

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院，安徽合肥 230009；2. 安徽省氢安全国际联合研究中心，安徽合肥 230009；
3. 兖州煤业榆林能化有限公司，陕西榆林 719099；4. 安全关键工业测控技术教育部工程研究中心，安徽合肥 230009；
5. 大型煤气化及煤基新材料国家工程研究中心，山东济南 250000)

摘要： 为了探究抑制氢气喷射火的有效方法，并揭示氮气射流对氢气喷射火焰的影响规律，开展了一系列氮气作用下氢气喷射火实验。采用喷嘴直径为 3mm、滞止压力为 10atm 的氮气射流，并改变氮气喷射高度和水平喷射距离，对氢气喷射火进行抑制。选择 2 种典型的氢喷射火，分别为喷嘴直径为 3mm、滞止压力为 0.1atm 的过膨胀亚音速火焰和喷嘴直径为 1mm、滞止压力为 8atm 的欠膨胀超音速火焰。实验结果表明，在氮气射流作用下火焰发生偏转，氢气喷射火长度衰减率随氮气喷射高度增大而减小。当氮气作用于火焰根部时，能有效地扑灭氢气喷射火。随氮气喷射距离增加，氢喷射火长度衰减率减小。另外，欠膨胀超音速氢气喷射火存在火焰抬升现象，氮气更易使喷射火熄灭，且在较大的水平喷射距离下仍能使火焰熄灭；过膨胀亚音速氢气喷射火由于抬升高度不明显，氮气射流灭火效果较差，仅能够在较小的水平喷射距离下使火焰熄灭。

关键词： 氢气安全；氢气喷射火焰；火焰抑制；氮气射流

中图分类号： TK919 **文献标识码：** A DOI：10.7520/1001-4888-22-041

0 引言

氢具有零排放和能量转换效率高的特点，被广泛认为是未来有前途的能源载体之一[1]。然而，氢具有极低的点火能量(0.02mJ)和较宽的可燃极限(4%～75%)，易导致在加氢站、燃料电池汽车、燃料电池客船等应用场景下发生喷射火[2-4]。Li[2]、Yoo[5]和 Tomoya[6]等评估了气态加氢站和液态加氢站的风险，分析了气态加氢站发生喷射火灾、闪火和物理爆炸等严重事故的危害距离，认为氢气喷射火是典型的事故类型。为减小喷射火危害距离、避免人员伤亡，充分研究火焰行为以及相应的灭火措施具有重要意义。

针对氢气喷射火的火焰特性(包括火焰长度以及辐射分数等)，前人已经开展了大量研究。Proust 等[7]、Mogi 等[8]对较大压力范围内的氢气射流火焰特性做了详细的实验研究。Delichatsios[9]提出了一种基于无量纲火焰弗劳德数Fr_f的关联式来表征可见火焰长度。Schefer 等[10]验证了 Delichatsios 提出的关联式与实验数据的一致性，并通过直径“虚拟源”方法将关联式从亚音速扩展到超音速。Turns 等[11]提出火焰辐射分数与火焰滞留时间、普朗克吸收系数、绝热火焰温度相关。

氮气被认为是一种环境友好且经济的灭火剂[12]，在前人的研究中，氮气通常被用来抑制预混可燃

* **收稿日期：** 2022-02-16；**修回日期：** 2022-04-29
基金项目： 国家自然科学基金(项目号：52171348)；中央高校基本科研业务费专项资金(项目号：PA2020GDGP0052)；安徽省重点研发计划项目(S202104b11020035)；兖矿集团 2019 年技术研发支持计划项目(编号：YKZB 2020-173)资助
通信作者： 王昌建(1975－)，男，博士，教授，博士生导师。主要研究氢能的安全利用。Email：chjwang@hfut.edu.cn

气体形成的火焰传播。Ma[13]、Wang[14]等分别考察了二氧化碳和氮气对密闭室内甲烷-空气混合物爆炸的影响。Zhang[15]、Azatyan[16]、Qiao[17]和 Li[18]等研究了氮气对氢气-空气混合气预混火焰特性的影响,结果表明,氮气对氢气-空气预混火焰的传播有显著抑制效果[15],同时层流火焰燃烧速度随氮气含量增加而降低[16]。氮气由于具有容易制取、价格低廉等特点,也常被用来防治煤矿井与油罐火灾。杨松柳[19]通过数值模拟证明了氮气能够有效熄灭储油罐火灾。在抑制活泼金属火灾中,氮气不与活泼金属发生反应,因此也常被用来作为钠火的抑制剂[20]。氮气是一种优良的气体灭火剂,然而目前尚未见氮气应用于抑制氢喷射火的公开报道。

加氢站、燃料电池汽车、燃料电池客船等应用场景下发生的氢气喷射火灾不同于油类火灾、活泼金属火灾。氢气喷射火焰长,火焰温度高达 2000K 以上,可能会对现场人员和设备造成严重伤害[21]。因此,为降低氢气喷射火的伤害,本文开展高压氮气射流抑制氢气喷射火实验,研究了氮气喷射高度以及喷射距离对氢气喷射火的影响。

1 实验装置与图像处理

1.1 实验装置

本文采用的实验装置如图 1 所示。氢气由 4 个钢瓶组成的气瓶组供给,供气压力约为 12MPa(本文所有压力均为表压,即相对压力),氢气经减压阀减压后被输送到缓冲罐内。缓冲罐直径 16cm、长 29cm,氢气进入罐内后可以保持较低的马赫数(小于 1×10^{-3}),使得罐内测得压力和温度基本接近滞止状态下的参数[10]。缓冲罐内的压力由压力传感器(MEACON,压力为 0～1MPa,精度为 0.1%)测量并由示波器记录。缓冲罐内的氢气经喷嘴流出,喷射方向竖直向上。实验过程中采用连续放电的方式进行点火,放电点位于喷嘴上方 5cm 处,放电能量为 7J。为保证点火成功,在实验初期氢气压力设置为 10^{-3}MPa,然后逐渐提高到预定值。氮气由初始压力约为 12MPa 的气瓶组供应,经减压阀减压后,将氮气输送到缓冲罐中。缓冲罐直径 25cm、长 100cm,罐内压力采用 MEACON 压力传感器(压力为 0～10MPa,精度为 0.1%)测量。氮气水平喷射,与氢气喷射火的方向垂直。氮气喷射的启动和关闭由电磁阀控制。

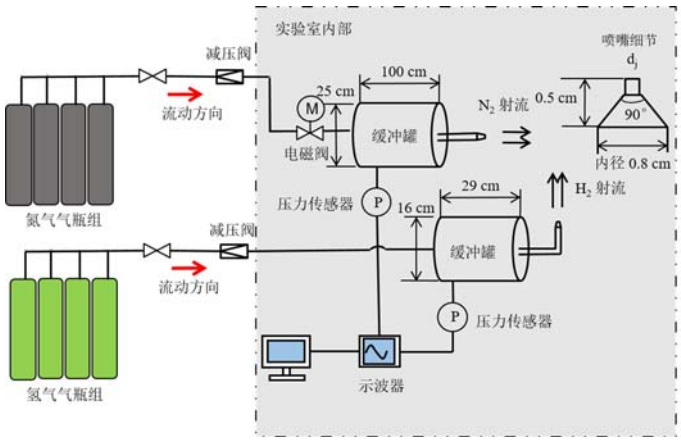


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental set-up

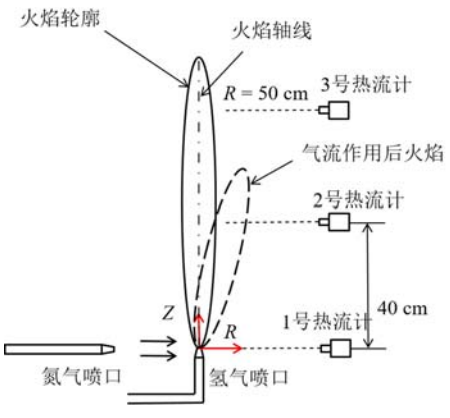


图 2 热流计布置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of thermal radiometers

所有实验都在黑暗的环境下开展,以提高火焰能见度。火焰图像是由佳能相机(EOS 6D,24fps)拍摄,相机安装在距离氢气喷射火约 2m 处。采用 3 个安装在平行火焰轴线 0.5m 处的热流计(Captec,HS-34CB)来测量不同高度的总热流,热流计距氢气喷嘴的轴向高度分别为 0m、0.4m、0.8m,热流计布置如图 2 所示。氮气作用下火焰将发生偏转,这将对下游的火焰总热流造成显著影响。为了提高实验的准确性,每组工况进行 3 次重复实验。

1.2　图像处理

氢气喷射火长度是氢气喷射火的关键参数。图 3 给出了火焰原始图像与火焰二值图像的对比。图像处理时，均通过 Python 程序提取视频录像中压力稳定时的火焰图像，并通过火焰亮度与背景环境之间区别较大的 RGB 值，选择最优阈值将彩色火焰图像转变为黑白二值化图像。本研究中，将自由喷射火长度与偏折状态下的喷射火长度分别定义为L_f、L'_f。

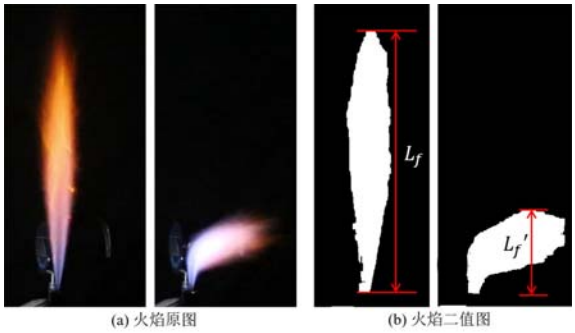


图 3　火焰长度与火焰长度衰减率的提取

Fig. 3　Extractions of flame length and its reduction rate

为了更好地对火焰长度进行量化分析，将火焰长度衰减率 R 定义为

$$R = \left| \frac{L_f - L'_f}{L_f} \right| \times 100\% \tag{1}$$

2　结果与讨论

2.1　氮气喷射高度对火焰的影响

根据可压缩流动理论[22]可知，氢气射流出口处的流动参数可根据以下公式计算：

$$\frac{T_0}{T_j} = 1 + \left(\frac{\gamma - 1}{2}\right) \cdot M_j^2 \tag{2}$$

$$\frac{P_0}{P_j} = \left(1 - \frac{\gamma - 1}{2} \cdot M_j^2\right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \tag{3}$$

$$\frac{\rho_0}{\rho_j} = \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} \cdot M_j^2\right)^{\frac{1}{\gamma - 1}} \tag{4}$$

$$\frac{a_0}{a_j} = \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} \cdot M_j^2\right)^{\frac{1}{2}} \tag{5}$$

$$U_j = a_j \cdot M_j \tag{6}$$

$$a_0 = \sqrt{\gamma R} \tag{7}$$

式中：下标 0 代表滞止状态的参数，j 代表射流出口参数。T、P、ρ、U 分别为温度、压力、密度与速度；a_0、a_j分别为缓冲罐内与射流出口条件下的当地音速；M_j为马赫数，当音速流动时为 1；γ 与 R 分别为氢气比热容比与气体常数。将本实验中氢气射流喷嘴直径 d 与滞止压力 P_{stag}等代入式(2)～(7)计算可知，当喷嘴直径为 3mm、滞止压力为 0.1atm 时，氢气为过膨胀亚音速流动状态；当喷嘴直径为 1mm、滞止压力为 8atm 时，氢气则为欠膨胀超音速流动状态。

本研究选用 2 种不同的氢气喷射火进行实验。氢气喷射火长度由氢气喷嘴直径 d 与氢气滞止压力 P_{stag}决定，其中滞止压力为缓冲罐中气体压力。图 4 分别给出了喷嘴直径为 3mm、滞止压力为 0.1atm 和喷嘴直径为 1mm、滞止压力为 8atm 的自由喷射火焰图像。图 4 左图为喷嘴直径为 3mm、滞止压力为 0.1atm 的亚音速火焰图像，火焰长度约为 0.58m，最大火焰宽度约为 0.10m。图 4 右图为喷嘴直径为 1mm、滞止压力为 8atm 的超音速火焰图像，火焰长度约为 0.37m，且火焰在喷嘴处出现抬升现象，抬升距离约为 0.05m。

表 1 为氢气喷射火焰长度实验值与 Schefer 模型[10]预测值的对比。Schefer 模型[10]基于火焰弗劳



图 4 过膨胀亚音速氢气火焰与欠膨胀超音速氢气火焰图像对比

Fig. 4 Comparison of over-expanded subsonic hydrogen flame and under-expanded supersonic hydrogen flame

德数 Fr_f 建立,定义为

$$Fr_f = \frac{u_e f_s^{3/2}}{(\rho_e \rho_\infty)^{1/4} [(\Delta T_f T_\infty) g d_j]^{1/2}} \tag{8}$$

式中:u_e 为射流出口速度;f_s 为化学计量条件下燃料的质量分数;(ρ_e/ρ_∞) 为喷嘴处气体密度与环境中大气密度之比;d_j 为喷嘴直径;ΔT_f 为燃烧放热造成的火焰温度与环境温度的差值。无量纲火焰长度 L^* 也被定义为

$$L^* = \frac{L_f f_s}{d_j (\rho_e \rho_\infty)^{1/2}} = \frac{L_f f_s}{d^*} \tag{9}$$

式中:L_f 是可见火焰长度;d^* 是射流动量直径,$d^* = d_j(\rho_e/\rho_\infty)^{1/2}$。在浮力主导的火焰中($Fr_f < 5$)与动量主导的火焰中($Fr_f > 5$),$L^*$ 分别表示为

$$L^* = \frac{13.5\ Fr^{2/5}}{(1+0.07\ Fr^2)^{1/5}} \qquad Fr_f < 5 \tag{10}$$

$$L^* = 23 \qquad Fr_f > 5 \tag{11}$$

由式(8)计算可知,2 种火焰的 Fr_f 均大于 5,均属于动量主导的火焰。Schefer 火焰长度模型[10]预测值略大于实验测量值,预测值与实验值的偏差分别为 7.5%与 9.4%。这表明 Schefer 模型[10]能够较好地预测氢气喷射火焰长度。

表 1 氢气喷射火焰长度实验值与预测值对比

Tab. 1 Comparison of measured and predicted data of hydrogen jet flame length

d/mm	P_{stag}/atm	Fr_f	实验值/m	预测值/m	实验值与预测值的偏差
1	8	48.3	0.37	0.40	7.5%
3	0.1	9.7	0.58	0.64	9.4%

图 5 给出了氮气射流在不同喷射高度下对氢气喷射火焰的影响。实验中,氮气水平喷射,喷嘴直径为 3mm,滞止压力为 10atm。氮气喷嘴与氢气射流中心线之间的水平距离为 50cm,设定的喷射高度分别为 0cm、5cm、10cm 和 20cm。氢气喷嘴直径为 3mm,滞止压力为 0.1atm 时,氢气的流动状态属于过

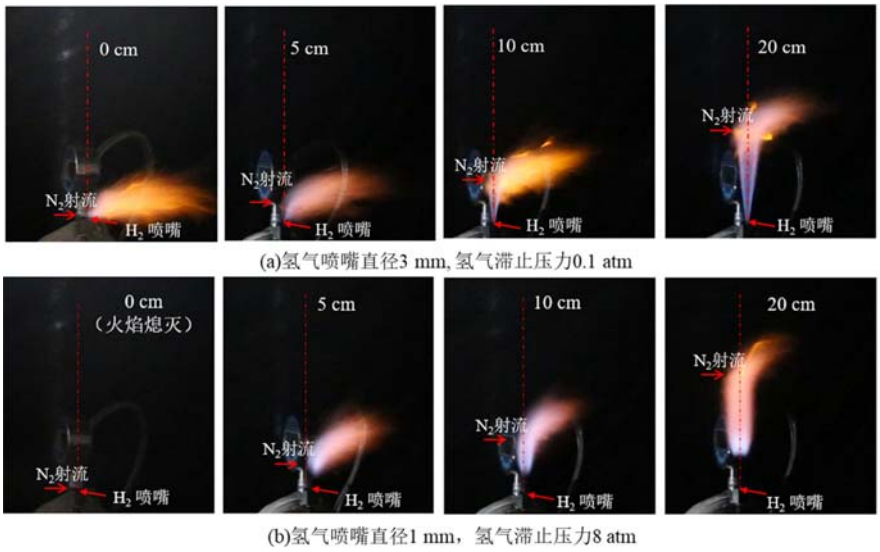


图 5 氮气喷射高度对氢气喷射火形态的影响

Fig. 5 Effects of vertical injection distance of nitrogen on hydrogen flame shape

膨胀亚音速射流,氢气流量达 0.29g/s[23],此时氮气射流并不能有效熄灭氢气喷射火,如图 5(a)所示。

氮气喷射高度增大时，氮气对氢气喷射火的影响区域也随之上移。当氮气的喷射高度为 0cm 时，氮气直接作用于火焰根部，火焰整体向氮气射流下游方向发生偏转，竖直方向火焰长度由 0.58m 减小至 0.06m，衰减率达到 89%；水平方向火焰长度约为 0.19m，火焰与射流中心线偏转角度大约为 80°。随着氮气喷射高度增加，火焰在竖直方向上的衰减率分别降低至 86%、78%和 66%，水平方向火焰长度分别为 0.17m、0.15m 和 0.1m，火焰偏转角度约为 72°、66°和 60°。由火焰长度衰减率逐渐降低的变化规律可知，氮气虽然无法熄灭喷嘴直径为 3mm、滞止压力为 0.1atm 的氢气喷射火，但依然具有一定的抑制作用，且氮气对亚音速氢气喷射火长度的抑制效果随氮气喷射高度增大而降低。图 5(b)给出了氮气射流对喷嘴直径为 1mm、滞止压力为 8atm 的氢气喷射火的影响。要说明的是，氢气射流流量由下式计算

$$q_m = \frac{\pi}{4}\rho_j U_j d_j^2 \tag{12}$$

式中：d_j为喷嘴直径；ρ_j、U_j分别由式(4)、式(6)得出。这种条件下的氢气射流处于欠膨胀超音速流动状态，射流流量为 0.44g/s[23]。氮气射流的灭火效果与图 5(a)有较大差异。当氮气射流直接作用于火焰根部时，火焰熄灭。针对图 5(b)中喷射高度为 0cm 的工况，图 6 给出了火焰熄灭的全过程，火焰从自由竖直状态到完全熄灭仅 0.084s。在 0.042s 时，火焰向下游偏转后熄灭。当氮气喷射高度增加时，氮气射流仅能抑制氢气喷射火，使其火焰长度衰减，却无法熄灭，这一点与图 5(a)类似。喷射高度为 5cm 时，火焰整体向氮气射流下游方向发生偏转，竖直方向上的火焰长度为 0.12m，衰减率达到 68%，水平火焰长度为 0.11m。当喷射位置提高至 10cm 和 20cm 时，竖直方向上火焰长度分别为 0.16m 和0.25m，氮气射流与氢气喷射火作用位置下方的火焰不会受到影响，与自由火焰相同。因此，随着氮气喷射高度增加，氮气对超音速氢气喷射火长度的抑制效果减弱。

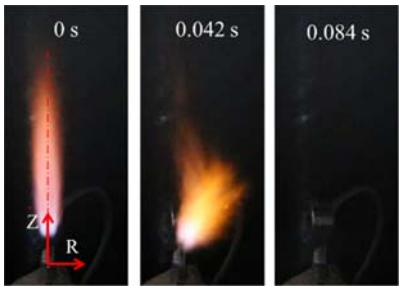


图 6　火焰熄灭过程(氢气喷嘴直径 d=1mm，滞止压力 P_{stag}=8atm)

Fig. 6　Flame extinguishing process (hydrogen nozzle diameter: d=1mm, the stagnation pressure: P_{stag}=8atm)

图 7 为火焰长度衰减率与氮气喷射高度之间的关系。随着氮气喷射高度增大，火焰长度衰减率减小。氮气射流在火焰根部释放时，喷嘴直径为 1mm、滞止压力为 8atm 的氢气喷射火被熄灭，因此火焰长度衰减率为 100%。当氮气喷射高度增大时，火焰均无法被熄灭，火焰长度衰减率均小于 100%。喷嘴直径为 3mm、滞止压力为 0.1atm 的亚音速氢气喷射火焰长度衰减率均大于喷嘴直径为 1mm、滞止压力为 8atm 的超音速火焰长度衰减率。这是由于亚音速火焰长度(0.58m)大于超音速火焰(0.37m)，因此当氮气喷射高度保持不变时，喷射高度与火焰长度的比值减小，导致氮气相对喷射高度减小，火焰长度衰减率较高。

图 8 给出了氮气喷射高度对火焰总热流的影响。以喷嘴直径为 1mm、滞止压力为 8atm 的超音速氢气喷射火为例，随着氢气被点燃，热流计接收到的总热流先增加后维持稳定。由于氮气喷射高度的不同，热流计接收到的总热流变化存在显著差异。图 8(a)表明：当氮气作用于火焰根部时，氮气射流导致火焰熄灭，火焰下游的总热流迅速降低，最终趋近于 0。图 8(b)表明：氮气高度为 5cm 时，火焰向氮气射流下游方向偏转，火焰方向几乎与氮气射流方向持平，因此与氢气喷嘴等高的 1 号热流计接收到大量热量，其总热流平均值达到 1.59kW/m^2，与自由火焰状态下的总热流 0.15kW/m^{2}相比，提高了 960%。而 2 号热流计因布置的高度较高，测得的总热流比 1 号热流计小，仅为 0.42kW/m^2。3 号热流计与火焰距离较远，测得的总热流略微下降。当氮气喷射高度为 10cm 时，热流计测得的总热流如图 8(c)所示。氮气释放后，热流计数值的变化与图 8(b)相似，但 2 号热流计数值增加的幅度要大于 1 号热流计，这主要是因为氮气喷射高度增加后，火焰的偏转角度减小，氮气携带大量的高温蒸汽朝着 2 号热流计流动，这一点可以从图 5(b)中得到印证。3 号热流计数值略微减小，与图 8(b)相同。图 8(d)给出了喷射

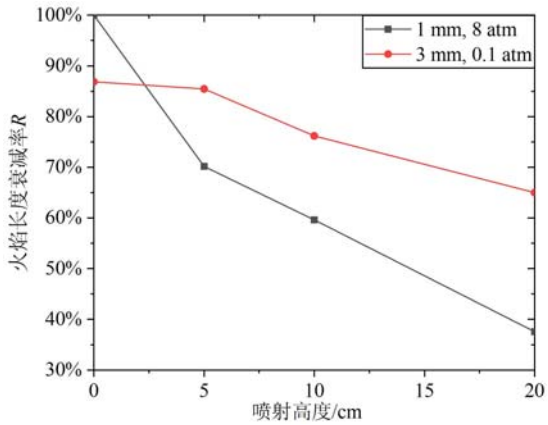


图 7 火焰长度衰减率与氮气喷射高度的关系

Fig. 7 Relationship between the reduction rate of flame length and the vertical injection distance of nitrogen

高度为 20cm 时总热流的变化,不同于前面的 3 组工况,氮气释放后仅 2 号热流计出现了较大变化,总热流平均值由 0.10kW/m^{2}增加至 2.70kW/m^2。这是由于氮气喷射高度位于火焰中部,使得偏转火焰的流动方向靠近 2 号热流计,如图 5(b)所示。同时,由于氮气喷射高度为 20cm,下部火焰并未受到氮气的影响,因此 1 号热流计测得的数值基本不变;而 3 号热流计由于距离过远,其数值下降后基本维持不变。

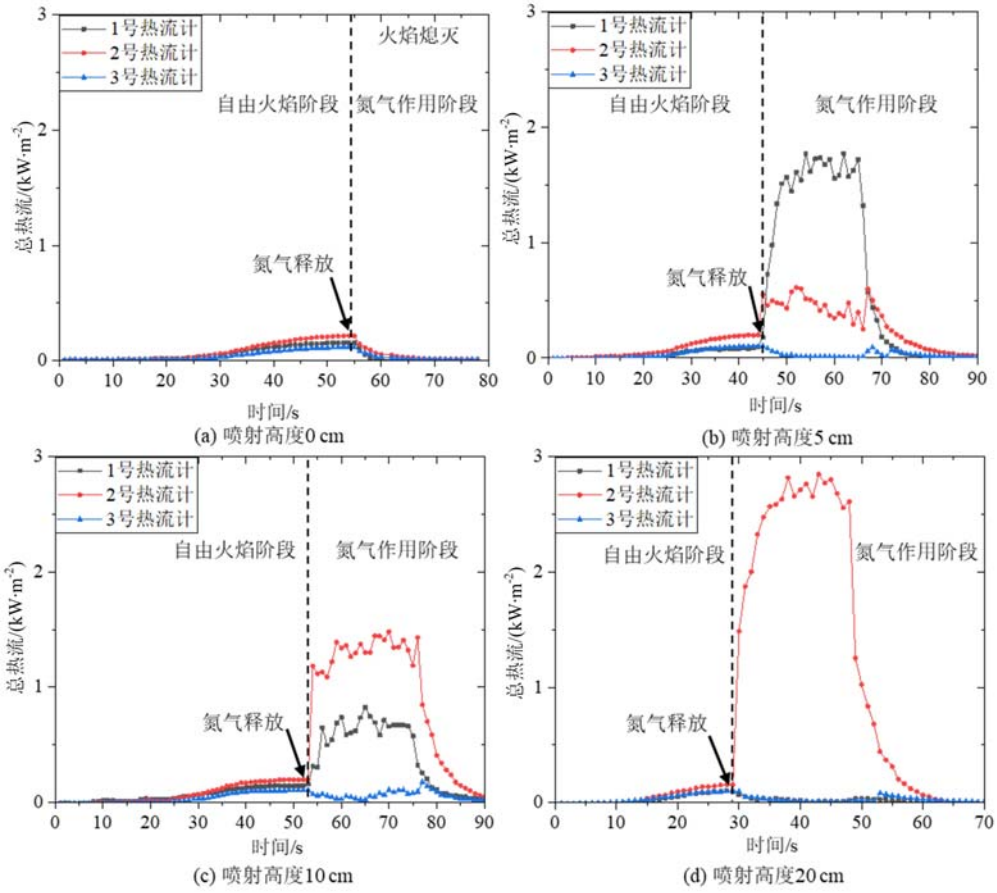


图 8 氮气喷射高度对火焰总热流的影响(氢气喷嘴直径 d=1mm,滞止压力 P_{stag}=8atm)

Fig. 8 Effects of vertical injection distance of nitrogen on total heat flux of jet flame (hydrogen nozzle diameter d=1mm, the stagnation pressure P_{stag}=8atm)

2.2　氮气水平喷射距离对火焰的影响

当氮气喷射作用在火焰根部时，对火焰的抑制效果优于火焰中部。图 9 给出了氮气射流在火焰根部喷射，水平喷射距离变化对火焰抑制效果的影响。实验中氮气水平喷射距离设定为 10cm、20cm、30cm、40cm、50cm、60cm、80cm 和 100cm。图 9(a)为氢气喷嘴直径为 3mm、滞止压力为 0.1atm 的过膨胀亚音速氢气喷射火受到氮气抑制时的图像。从图中可以看出，当水平喷射距离小于或等于 40cm 时，氮气能有效熄灭火焰；当水平喷射距离大于或等于 50cm 时，氮气仅能抑制火焰，并不能将其熄灭，表明氮气水平喷射距离增大会降低氮气射流对氢气喷射火的抑制效果。可能的原因是，当氮气喷射距离增大时，作用于氢气喷射火的动量减小；同时由于氮气在射流膨胀过程中流动截面积不断增大，因此有效作用于喷射火的氮气流量必然减小。氮气射流熄灭氢气喷射火的时间极短，基本在 1s 以内。以喷射距离 40cm 的工况为例，$t=0$s 时刻，火焰呈现竖直向上的自由状态，如图 10 所示。$t=0.042$s 时，氮气射流作用于火焰根部，使火焰出现了上下分层的现象，一部分火焰仍然维持着竖直向上的状态，另一部分则被氮气射流冲击且随着氮气气流向下游燃烧。$t=0.084$s 时，火焰不再竖直向上燃烧，整体向氮气射流下游方向偏转，该现象维持了约 0.168s。在 $t=0.252$s 时刻，火焰熄灭。当喷射距离大于或等于 50cm 时，氮气不能熄灭火焰，但喷射距离的增大对火焰形态的影响较小，此时火焰长度衰减率基本维持在 79%～89%。图 9(b)给出了氮气射流对喷嘴直径为 1mm、滞止压力为 8atm 的超音速氢气喷射火的影响。与图 9(a)不同的是，氮气对超音速火焰的抑制效果远好于亚音速火焰。当水平喷射距离小于或等于 80cm 时，氮气均可熄灭氢气火焰；而当喷射距离为 100cm 时，不能熄灭氢气火焰。与图 9(a)中喷射距离 100cm 的工况相比，氮气对超音速火焰造成的偏转角相对较小，这主要是因为超音速火焰的射流速度比亚音速火焰大。由图 9(a)和图 9(b)对比可知，氮气射流对喷嘴直径为 1mm、滞止压力为 8atm 的超音速氢气火焰的抑制效果要优于对喷嘴直径为 3mm、滞止压力为 0.1atm 亚音速火焰的抑制效果，这可能与氢气的流动状态有关。当氢气的滞止表压高于 0.9atm 时，氢气在喷嘴处的压力高于大气压，此时氢气并未完全膨胀，火焰出现抬升现象，在高压氮气的作用下火焰易于熄灭。另外，高压氮气由滞止状态流动至喷嘴处降压后，此过程可视为等熵流动，因此温度迅速下降[23]，会对抬升范围内的氢气进一步冷却吸热，使其不易发生燃烧反应。而对于喷嘴直径为 3mm、滞止压力为 0.1atm 的亚音速火焰，由于抬升现象不明显，氮气直接冲击在高温火焰表面，冷却作用很小，因此火焰难以熄灭。

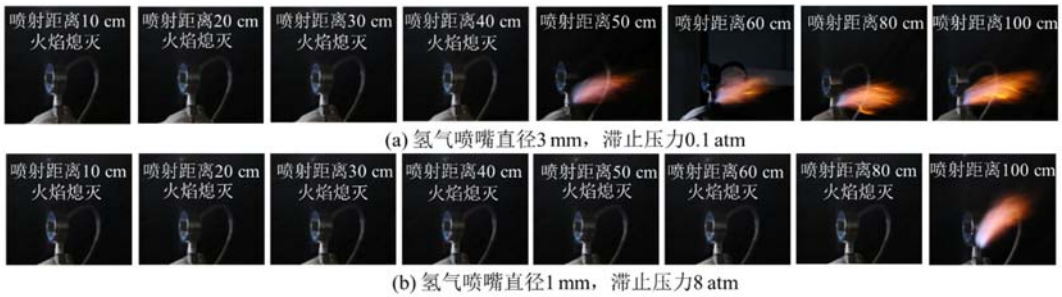


图 9　氮气水平喷射距离对火焰形态的影响

Fig. 9　Effects of horizontal injection distance of nitrogen on hydrogen flame shape

表 2 给出了火焰长度衰减率与氮气喷射距离之间的关系。氢气喷射火均能够在较小的喷射距离下熄灭，而喷射距离增大，火焰将无法熄灭。当火焰仅能够被氮气射流抑制时，随着喷射距离增大，火焰长度衰减率也逐渐降低，这表明氮气射流对火焰长度的抑制效果随喷射距离的增大而减弱。

表 2　火焰长度衰减率随氮气喷射距离的变化

Tab. 2　Relationship between the reduction rate of flame length and the horizontal injection distance of nitrogen

氮气喷射距离/cm	10	20	30	40	50	60	80	100
$d=1$mm，$P_{stag}=8$atm	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	43%
$d=3$mm，$P_{stag}=0.1$atm	100%	100%	100%	100%	89%	85%	84%	79%

图 11 给出了氮气在不同水平喷射距离作用下的氢气喷射火总热流变化。在氢气喷嘴为 3mm、滞

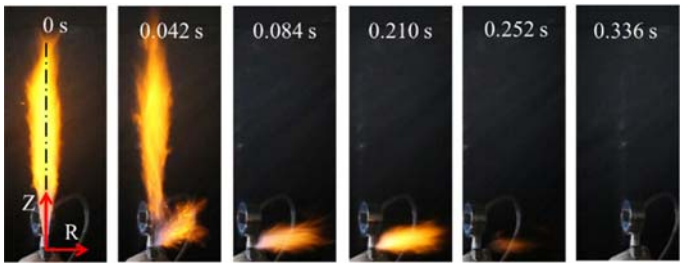


图 10 火焰熄灭过程(氢气喷嘴直径 d=3mm,滞止压力 P_{stag}=0.1atm,氮气水平喷射距离 40cm)

Fig. 10 The process of flame extinguishing (hydrogen nozzle diameter d=3mm, the stagnation pressure P_{stag}=0.1atm, the horizontal injection distance of nitrogen: 40cm)

止压力为 0.1atm 条件下,分别测量了喷射距离为 40cm(火焰熄灭)和 50cm(火焰未熄灭)时的火焰总热流。当氮气水平喷射距离为 40cm 时,与氢气喷嘴高度持平的 1 号热流计测得的总热流由 0.18kW/m^2 快速上升至 0.9kW/m^2 之后迅速下降,而 2 号和 3 号热流计测得的总热流快速下降,如图 11(a)所示。这是由于火焰在氮气释放后向氮气喷射下游方向偏转,造成火焰与热流计之间的水平距离大幅减小,总热流快速升高,但在 0.25s 后火焰熄灭,总热流急剧下降。2 号和 3 号热流计由于离火焰较远,火焰的偏转并未对其造成较大影响,相反由于火焰长度大幅减小,热流计测得的总热流不断减小。图 11(b)给出了当氮气喷射距离为 50cm 时火焰下游热流计测得的总热流,火焰不发生熄灭时,热流计测得的总热流与图 11(a)有所不同。氮气喷射后,1 号热流计处的总热流快速增大,之后逐渐达到稳定值,约4.1 kW/m^2,相比氮气未作用时增长了约 3.9kW/m^2。这是由于火焰在氮气喷射作用下向氮气下游方向偏转,1 号热流计与氢气喷嘴高度一致,与火焰的距离明显减小。2 号、3 号热流计因安装高度较高,测得的总热流变化幅度很小。

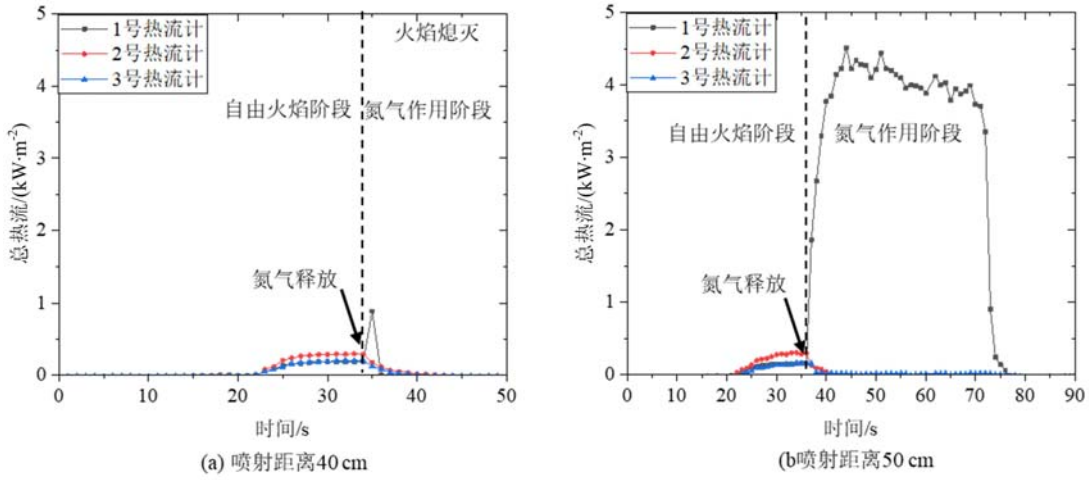


图 11 氮气水平喷射距离对火焰总热流的影响(氢气喷嘴直径 d=3mm,滞止压力 P_{stag}=0.1atm)

Fig. 11 Effects of horizontal injection distance of nitrogen on total heat flux of jet flame (hydrogen nozzle diameter d=3mm, the stagnation pressure P_{stag}=0.1atm)

3 结论

本文采用氮气射流分别对过膨胀亚音速喷射火和欠膨胀超音速喷射火开展了抑制实验,获得了不同工况下火焰的形态变化以及不同测点的总热流。主要结论如下:

(1) 氮气射流对氢气喷射火焰长度的抑制效果随喷射高度增加而减弱。当氮气射流作用于火焰根部时,能直接扑灭氢气喷射火;当氮气射流作用于火焰中部时,并不能有效扑灭火焰,但能使火焰弯转、使火焰长度大幅减小,达到一定的抑制效果。氢气喷射火长度衰减率随氮气喷射高度增大而减小。

(2) 氮气射流对氢气喷射火焰长度的抑制效果随氮气水平喷射距离增加而减弱。当氮气射流离火

焰根部较近时，氢气喷射火更容易熄灭。随着水平喷射距离增大，氮气灭火剂仅能使火焰发生偏转。氢气喷射火长度衰减率随氮气喷射距离增大而减小。对于欠膨胀超音速氢气喷射火，火焰存在抬升现象，高压氮气作用容易导致氢气喷射火焰熄灭，在较大的水平喷射距离下，仍能够使火焰熄灭。而对于过膨胀亚音速氢气喷射火，氮气仅能够在较小的水平喷射距离下使火焰熄灭。

（3）当氮气射流在过膨胀亚音速喷射火根部喷射导致火焰熄灭时，与氢气喷嘴等高处总热流先快速上升后下降，而更高处测得的总热流则快速下降。氮气射流无法导致过膨胀亚音速氢喷射火焰熄灭，但在不同水平喷射距离下仍能使竖直方向氢喷射火焰长度的衰减率达到 79%～89%，火焰在氮气射流作用下向气流下游方向偏转，导致与氢气喷嘴等高处的总热流快速增大直至稳定。

参考文献：

[1] Dincer I, Acar C. Review and evaluation of hydrogen production methods for better sustainability[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014, 40(34):11094－11111.

[2] Li Z Y, Pan X M, Ma J X. Harm effect distances evaluation of severe accidents for gaseous hydrogen refueling station[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2010, 35(3):1515－1521.

[3] Matthijsen A J C M, Kooi E S. Safety distances for hydrogen filling stations[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2006, 19(6):719－723.

[4] Li F, Yuan Y, Yan X, et al. A study on a numerical simulation of the leakage and diffusion of hydrogen in a fuel cell ship[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 97:177－185.

[5] Yoo B H, Wilailak S, Bae S H, et al. Comparative risk assessment of liquefied and gaseous hydrogen refueling stations[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(71):35511－35524.

[6] Tomoya S, Kento S, Yu-ichiro I, et al. Quantitative risk assessment using a Japanese hydrogen refueling station model[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(11):8329－8343.

[7] Proust C, Jamois D, Studer E. High pressure hydrogen fires[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2011, 36(3):2367－2373.

[8] Mogi T, Horiguchi S. Experimental study on the hazards of high-pressure hydrogen jet diffusion flames[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2009, 22(1):45－51.

[9] Delichatsios M A. Transition from momentum to buoyancy-controlled turbulent jet diffusion flames and flame height relationships[J]. Combustion and Flame, 1993, 92(4):349－364.

[10] Schefer R W, Houf W G, Williams T C, et al. Characterization of high-pressure, underexpanded hydrogen-jet flames[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2007, 32(12):2081－2093.

[11] Turns S R, Myhr F H. Oxides of nitrogen emissions from turbulent jet flames: Part I-fuel effects and flame radiation[J]. Combustion and Flame, 1991, 87(3):319－335.

[12] Pei B, Yu M, Chen L, et al. Experimental study on the synergistic inhibition effect of gas-liquid two phase medium on gas explosion[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2017, 49:797－804.

[13] Ma L, Xiao Y, Deng J, et al. Effect of CO_2 on explosion limits of flammable gases in goafs[J]. Mining Science and Technology, 2010, 20(2):193－197.

[14] Wang Z R, Ni L, Liu X, et al. Effects of N_2/CO_2 on explosion characteristics of methane and air mixture[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2014, 31(1):10－15.

[15] Zhang C, Wen J, Shen X, et al. Experimental study of hydrogen/air premixed flame propagation in a closed channel with inhibitions for safety consideration[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(40): 22654－22660.

[16] Azatyan V V, Shebeko Y N, Shebeko A Y. A numerical modelling of an influence of CH_4, N_2, CO_2 and steam on a laminar burning velocity of hydrogen in air[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2010, 23(2):331－336.

[17] Qiao L, Kim C H, Faeth G M. Suppression effects of diluents on laminar premixed hydrogen/oxygen/nitrogen flames[J]. Combustion and Flame, 2005, 143(1-2):79－96.

[18] Li Y, Bi M, Huang L, et al. Hydrogen cloud explosion evaluation under inert gas atmosphere[J]. Fuel Processing

Technology, 2018, 180:96－104.

[19] 杨松柳. 储油罐火灾氮气灭火技术的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2011 (YANG Songliu. Research on the Nitrogen fire extinguishing technology in tanks fires[D]. Shenyang: Northeastern University, 2011 (in Chinese))

[20] 崔振铎, 杜海鸥. 基于 Fluent 的钠火事故下氮气灭火效果分析[J]. 科技资讯, 2018, 16(12):82－85 (CUI Zhenduo, DU Haiou. Fluent-based analysis of nitrogen fire suppression effect under sodium fire accident[J]. Science and Technology Information, 2018, 16(12):82－85 (in Chinese))

[21] 毛宗强. 氢安全[M]. 北京: 化学工业出版社, 2020:5－8 (MAO Zongqiang. Hydrogen safety[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2020:5－8 (in Chinese))

[22] 赵承庆, 姜毅. 气体射流动力学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1998:37－42 (ZHAO Chengqing, JIANG Yi. Gas jet dynamics[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1998:37－42 (in Chinese))

[23] Birch A D, Brown D R, Dodson M G, et al. The structure and concentration decay of high pressure jets of natural gas[J]. Combust Science and Technology, 1984, 36(5-6):249－261.

Experimental study of the mitigation of nitrogen jets for hydrogen jet flames

WU Yue[1,2], YU Xing[1,2], WANG Wei[3], WANG Zongcheng[1,2], ZHAO Yanqiu[1,2], WANG Changjian[1,4], SHEN Zhihe[1,4], LI Bing[5]

(1. School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China; 2. Anhui International Joint Research Centeron Hydrogen Safety, Hefei 230009, Anhui, China; 3. Yanzhou Nengyuan Yulin Nenghua Co., Ltd., Yulin 719099, Shaanxi, China; 4. Engineering Research Center of Safety Critical Industrial Measurement and Control Technology, Ministry of Education, Hefei 230009, Anhui, China; 5. National Engineering Research Center of Coal Gasification and Coal-Based Advanced Materials, Jinan 250000, Shandong, China)

Abstract: In order to explore an effective method to suppress hydrogen jet fires and to reveal the effects of nitrogen jets on hydrogen jet fires, a series of experiments were carried out for hydrogen jet fires under nitrogen jets. The nitrogen jet with a stagnation pressure of 10atm and nozzle diameter of 3mm were used to suppress the hydrogen jet fires at different vertical heights and horizontal distances. Two typical hydrogen jet flames were selected, an over-expanded subsonic flame with a nozzle diameter of 3mm and stagnation pressure of 0.1atm and an under-expanded supersonic flame with a nozzle diameter of 1mm and stagnation pressure of 8atm. The results show that the flame deflects due to the injection of the nitrogen jet. The reduction rate of hydrogen jet flame length decreases with the increase of vertical injection distance of nitrogen. When the nitrogen jet is injected at the root of the flame, it can extinguish the hydrogen jet flame more effectively. The reduction rate of hydrogen jet flame length decreases with the increase of horizontal injection distance of nitrogen. In addition, due to the lift-off phenomenon of under-expanded hydrogen jet fire, the jet flame is easier to be extinguished by a high-pressure nitrogen jet, and the nitrogen jet can extinguish the flame for a larger injection distance. On the contrary, the nitrogen jet cannot effectively extinguish the over-expanded subsonic hydrogen jet flame since the lift-off of the latter is not significant.

Keywords: hydrogen safety; hydrogen jet flame; flame mitigation; nitrogen jet