

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2023.08.017

# 细水雾与欠膨胀氢气喷射火相互作用的实验研究

章智慧<sup>1</sup>, 王昌建<sup>1</sup>, 刘义<sup>2</sup>, 李冰<sup>3</sup>, 周鹏刚<sup>3</sup>

(1. 合肥工业大学土木与水利工程学院, 安徽合肥 230009; 2. 中国石油大学(华东)化学化工学院, 山东青岛 266580; 3. 兖矿国宏化工有限责任公司, 山东邹城 273512)

**摘要:**文章对细水雾与欠膨胀氢气喷射火的相互作用进行了一系列实验研究,重点研究在不同的细水雾压力和竖直释放高度下,喷射火的火焰形态、火焰长度、温度场以及辐射场的变化情况。结果表明:在细水雾的作用下,火焰将发生偏折,并且火焰折角随细水雾压力的增大而增大;细水雾压力较小时,火焰出现膨胀现象,火焰水平长度有所增大;随着细水雾压力的增大,火焰长度逐渐减小;不合适的施加细水雾可能会导致火焰温度场和辐射场增强,进而带来潜在的二次危害危及人们的生命财产安全。

**关键词:**氢气喷射火;细水雾;辐射;温度;火焰长度

**中图分类号:**TK919

**文献标志码:**A

**文章编号:**1003-5060(2023)08-1115-07

## Experimental study of the interaction of water mist with under-expanded hydrogen jet flames

ZHANG Zhihui<sup>1</sup>, WANG Changjian<sup>1</sup>, LIU Yi<sup>2</sup>, LI Bing<sup>3</sup>, ZHOU Penggang<sup>3</sup>

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. School of Chemistry and Chemical Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China; 3. Yankuang Guohong Chemical Co., Ltd., Zoucheng 273512, China)

**Abstract:** A series of experiments were performed on the interaction of water mist with horizontal under-expanded hydrogen jet flames. The effects of various water mist pressures and vertical release positions on flame pattern, length, temperature, and radiant heat flux were studied. The results show that water mist causes the flame to be tilted, and the tilt angle of the flame increases with increasing water mist pressure. When the water mist pressure is small, the flame expands, and the horizontal length of the flame increases. As the water mist pressure increases, the horizontal length of the flame gradually decreases. It is also found that an inappropriate application of water mist may lead to the enhancement of flame temperature and radiation, which will bring potential secondary hazards and endanger people's lives and property.

**Key words:** hydrogen jet flame; water mist; radiation; temperature; flame length

氢气作为一种洁净无污染的二次能源,越来越受到人们的重视,并在工业领域得到了广泛的应用<sup>[1]</sup>。然而,由于高压氢气的意外泄漏并被点燃所形成的欠膨胀氢气喷射火通常会很长,并可能产生高温和热辐射危害,危及人们的生命和财产安全<sup>[2]</sup>。因此,为了减弱氢气喷射火带来的危

害,迫切需要寻找一种行之有效的方法来扑灭或阻隔氢气喷射火。文献[3]研究表明,细水雾具有较高的热容和汽化潜热,可以有效地降低火焰的热辐射。与此同时,细水雾还可以显著降低局部的氧浓度,从而降低火焰的燃烧效率。文献[4-5]对细水雾的研究和应用进行了较为全面的综述,

收稿日期:2022-01-09;修回日期:2022-03-21

基金项目:安徽省重点研发计划资助项目(S202104b11020035);兖矿集团2019年技术研发支持计划资助项目(YKZB2020-173)

作者简介:章智慧(1996—),男,安徽阜阳人,合肥工业大学硕士生;

王昌建(1975—),男,四川仁寿人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师,通信作者,E-mail:chjwang@hfut.edu.cn.

包括细水雾的发展趋势、面临的挑战以及其在抑爆、灭火和除烟中的应用;文献[6]研究了细水雾与大尺寸(1.10 MW)亚音速甲烷扩散火焰之间的相互作用,发现细水雾可以增加火焰的抬升距离,降低火焰的最高温度和热辐射。通过研究细水雾与甲烷气体扩散火焰之间的相互作用,文献[7]研究发现细水雾蒸发形成的水蒸气在衰减热辐射方面具有显著作用,实验测得的火焰辐射热通量明显小于没有细水雾作用时的辐射热通量,但细水雾作用前后火焰的高度和温度没有明显变化;文献[8]使用红外摄像仪来评估细水雾对高速非预混甲烷喷射火的影响,实验发现尽管细水雾无法扑灭火灾,但细水雾与火焰之间的热交换以

及细水雾对氧气的稀释隔离作用对火焰燃烧效率的降低有显著的影响。细水雾与火焰的相互作用是极为复杂的过程,并且与燃料的种类密切相关<sup>[9]</sup>。然而,关于细水雾与欠膨胀氢气喷射火相互作用的研究较少。因此,本文通过一系列的实验来探究细水雾对水平欠膨胀氢气喷射火的影响,进而评估细水雾在削弱氢气喷射火危害方面的有效性和合理性。

## 1 实验部分

实验装置主要由氢气喷射火系统、瓶组式细水雾发生系统、数据测量及采集系统组成,如图 1 所示。

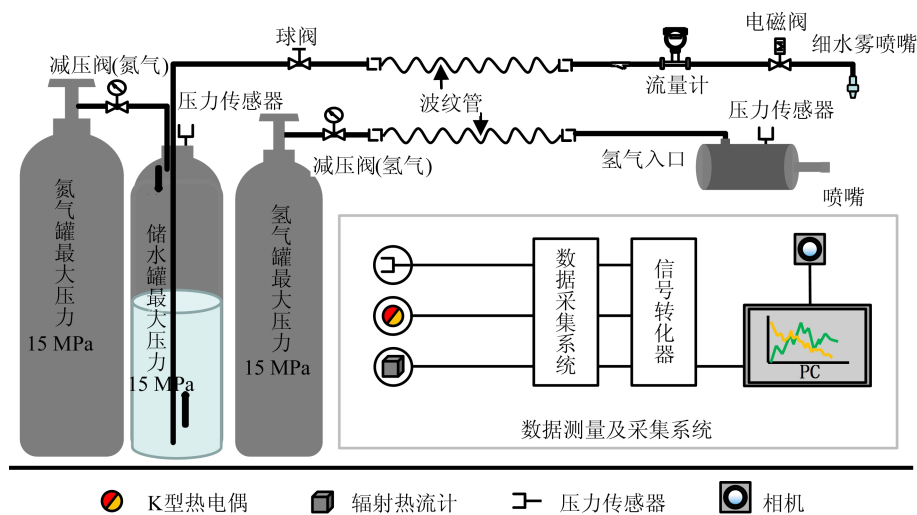


图 1 实验装置

实验选用瓶组式细水雾发生系统,通过调节高压氮气瓶上的减压阀来调节耐高压储水罐中的压力,储水罐上配有数显压力表(型号为 PUST. PLD. 0201,测量范围为 0~6 MPa,精度为 0.5%)来实时显示细水雾压力。采用单个实心锥形细水雾喷嘴垂直向下喷射,并与氢气喷嘴轴线垂直正交,细水雾雾性参数见表 1 所列。

表 1 不同压力和高度下细水雾雾性参数

压力/ MPa	雾化锥角/ (°)	流量/ (L/min)	平均有效雾通量/[L/(dm <sup>2</sup> ·min)]		
			30 cm	50 cm	70 cm
0.5	106.1	7.2	3.68	2.35	1.27
1.0	101.7	10.5	7.87	5.98	4.66
1.5	81.9	14.1	10.26	9.11	8.64
2.0	75.4	16.7	13.24	11.22	9.85

氢气喷射火系统主要由高压储氢罐、减压阀、缓冲罐、压力传感器、波纹管、喷嘴等组成,氢气由

储氢罐上的减压阀进行调节,通过波纹管流入缓冲罐进行降速稳压,然后通过喷嘴喷出。

因为本文主要考察实心锥形细水雾在不同施加高度以及施加压力下对欠膨胀氢气喷射火的影响,所以在所有测试场景中,氢气压力始终保持在 0.5 MPa,并使用直径为 3 mm 的圆形喷嘴。

实验将细水雾喷嘴水平设置在欠膨胀氢气喷射火焰水平长度的中间位置处,设置高度  $H$  分别为 30、50、70 cm,分别记作实验 A、B、C,不同的细水雾压力为 0.5、1.0、1.5、2.0 MPa,分别记为 1、2、3、4,以此来描述实验工况。实验采用 K 型热电偶来测量温度,由于氢气喷射火火焰温度可能超过 2 000 °C<sup>[4]</sup>,远远超出了所选热电偶的测量范围 0~1 300 °C。因此,本文通过测量火焰轴线末端羽流区域及周围环境温度,来反映喷射火对环境的热危害。热电偶在距离氢气喷嘴 80 cm 的位置开始布置,之后相邻热电偶间隔

10 cm布置,共计 11 根,如图 2 所示。使用 4 个完全相同的 TS-34C 辐射热流计(光谱响应为 0.3~50  $\mu\text{m}$ ,输入范围为 $\pm 200 \text{ kW/m}^2$ ,灵敏度为优于  $2 \mu\text{V}/(\text{W/m}^2)$ ),来采集细水雾施加前后不同位置处的热辐射数据。

实验过程中使用佳能 ESO6D 相机来记录细

水雾与喷射火相互作用过程中火焰的行为变化,由于氢气火焰亮度相对较弱,同时为了减小火焰长度测量的误差,所有测试均在夜间进行,并使用黑色遮光布来消除背景光。所有的测试均在长为 30.2 m、宽为 8.4 m、高为 6.5 m 的封闭房间内进行,有效地避免了环境条件对本实验的影响。

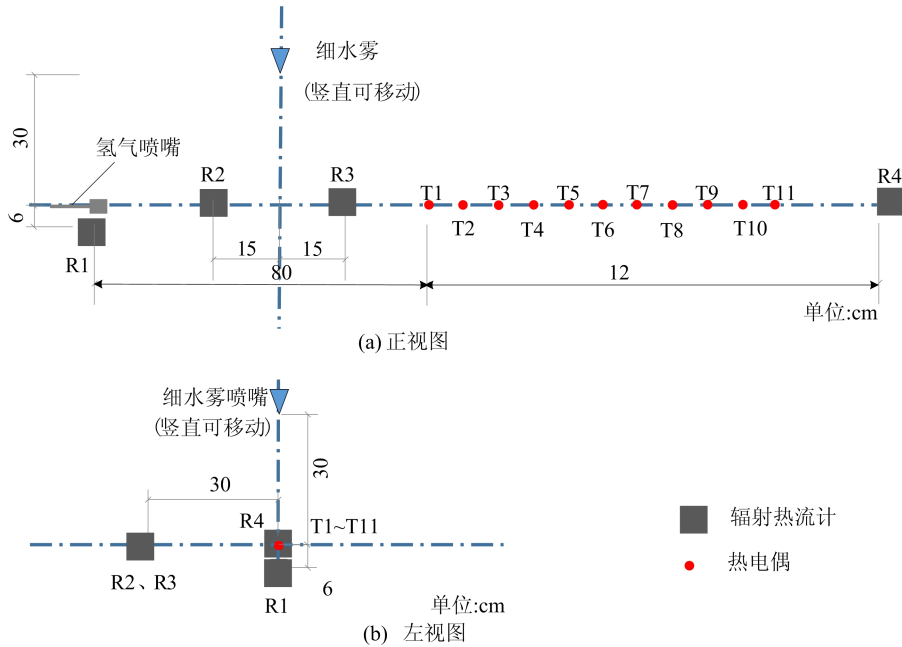


图 2 数据采集装置位置示意图

## 2 结果与讨论

### 2.1 火焰变化

实验工况 A-2 中的火焰形态随时间的变化情况如图 3 所示。

细水雾施加前的自由喷射火阶段记为  $t = 0 \text{ ms}$ ,此时火焰颜色主要为淡黄色,由于浮力的作用,火焰末端略微向上倾斜,火焰整体为水平射流状态。在  $t = 20 \text{ ms}$  时,细水雾阀门被打开,此时极少量的雾滴到达射流火表面,火焰整体形态未发生明显变化。

在  $t = 60 \text{ ms}$  时,雾滴被高温的氢气喷射火加热,雾滴迅速吸热汽化,体积迅速膨胀,使得火焰受到强烈干扰,火焰形态发生剧烈波动<sup>[10]</sup>。此外,具有一定动量的细水雾对燃烧区周围的空气具有卷吸作用,将氧气带入火焰内部,从而使火焰燃烧更加充分。在  $t = 80 \text{ ms}$  时,细水雾的流动状态已经稳定,其流量也几乎保持不变,此时火焰的颜色发生了明显的改变,变为明亮的黄色。在  $t = 100 \text{ ms}$  时,火焰形态发生改变,可以明显看到火焰水平长度被细水雾所抑制。

在  $t = 200 \text{ ms}$  时,火焰的形态开始趋于稳定,在细水雾的巨大冲击下,火焰被打折,在细水雾与火焰相互作用的地方开始形成一定的折角。随着时间的进一步推移,在  $t = 400 \text{ ms}$  时,喷射火火焰偏折的角度几乎保持不变,同样的现象出现在其余实验工况中。

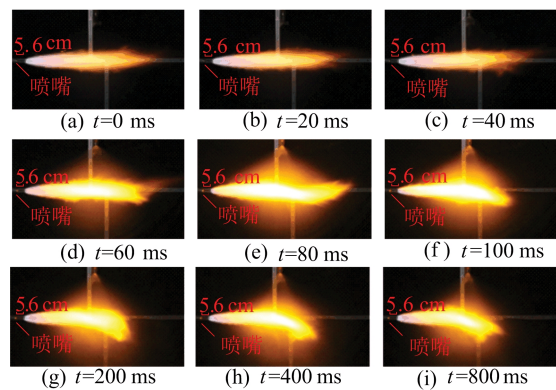


图 3 实验工况 A-2 中火焰形态随时间的变化情况

### 2.2 火焰折角与水平长度

以细水雾喷嘴轴线与喷射火轴线垂直正交的点为原点,向下偏折的火焰部分与火焰射流轴线

所形成的夹角定义为火焰折角。细水雾在不同施加高度和施加压力下,火焰折角大小的变化情况如图 4 所示。从图 4 可以看出,随着细水雾压力的增大,火焰折角逐渐增大,这是由于细水雾压力增大,使得细水雾流量随之增大,细水雾的动能也随着增大,进而在细水雾的冲击作用下,火焰发生偏折。随着细水雾施加高度的增加,火焰折角逐渐变小,这是由于细水雾施加高度的增大,使得其有效雾流量减小进而导致细水雾动量减小造成的。

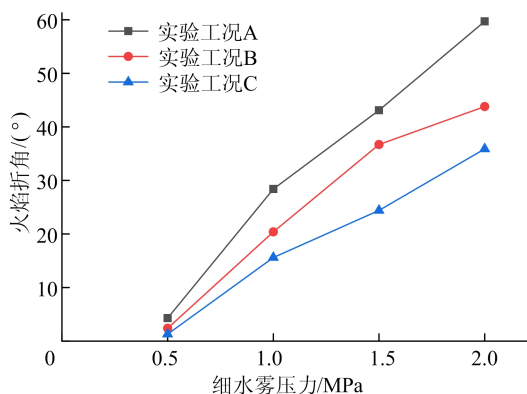


图 4 火焰折角变化情况

不同实验工况下施加细水雾后喷射火水平火焰长度的变化情况如图 5 所示。

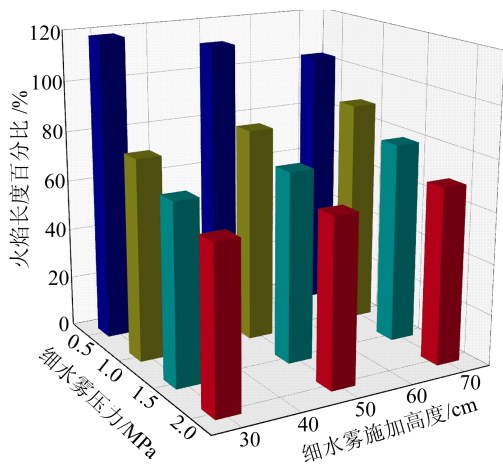


图 5 火焰水平长度

在细水雾压力较小时(0.5 MPa),由于细水雾施加后而产生的火焰膨胀现象,使得火焰水平长度反而有所增大,最大变为原来的 118%,并且随着细水雾施加高度的增大而膨胀效果逐渐减小。随着细水雾压力的增大,火焰水平长度开始逐渐缩短,并且压力越大长度越短,在细水雾压力为 2.0 MPa 时,火焰水平长度最大缩短为原来的

62%,而在细水雾施加高度为 50、70 cm 时,火焰水平长度分别缩短为原来的 66%、69%。

从图 5 可以看出,在相同的细水雾压力下,细水雾的施加高度越低,水平火焰长度缩短得越显著。综上所述,细水雾的施加会导致火焰发生偏折,进而会对火焰下方区域造成潜在的危害,此外,不当地施加细水雾还可能会导致火焰出现膨胀现象,使得火焰长度有所增大,带来更为严重的危害。因此,为了有效缩短火焰长度,细水雾的释放位置应尽可能靠近火焰,除此之外,还应增大细水雾的施加压力。

### 2.3 温度

不同实验工况下的温度变化曲线如图 6 所示。从图 6a 可以看出,实验工况 A-1 的细水雾施加前后温度的变化情况。在自由喷射火阶段,沿轴线方向上的温度随着远离氢气泄露喷嘴距离的增加而降低。细水雾施加后,距离氢气喷嘴较近的热电偶 T1~T8 所测量到的温度开始降低,而后方的热电偶 T9~T11 所测量到的温度反而略有升高。在热电偶 T11 处,测量温度显著升高,最高约 210 °C(比原来的温度高出近 110 °C)。从图 6b、图 6c 可以看出,在细水雾压力为 0.5 MPa 的其他实验工况 B-1、C-1 中,也出现了温度升高的现象。一方面,低压细水雾的施加导致射流火火焰燃烧强化和膨胀现象的出现<sup>[1]</sup>;另一方面,由于此时的细水雾流量相对较小,冷却效果相对较弱。因此,在这 2 个因素的共同作用下导致温度升高。

随着细水雾施加高度的增加,细水雾的冷却效果逐渐降低,这是由于细水雾施加高度增加导致其平均有效雾流量开始逐渐减少,细水雾分布得更分散进而导致细水雾的冷却效果逐渐减弱。从图 6d 可以看出,随着细水雾压力的增大,在细水雾压力为 1 MPa 时,细水雾施加后,火焰轴线后方温度快速下降,在较短的时间内,温度不再趋于稳定,而是随着时间推移在不断降低,可以发现距离火焰越近的热电偶,温度降低的速率越快。这主要是细水雾的冲击作用使得火焰发生偏折,进而导致火焰远离热电偶。此外,由于细水雾压力的增大,使得其流量增大,细水雾的冷却效果也起着重要影响。当细水雾的压力大于等于 1 MPa 时,将不再出现温度升高的情况,并且还可以发现,温度的降低与细水雾的流量成正相关,类似的现象也出现在其他的实验工况 B、实验工况 C 中。

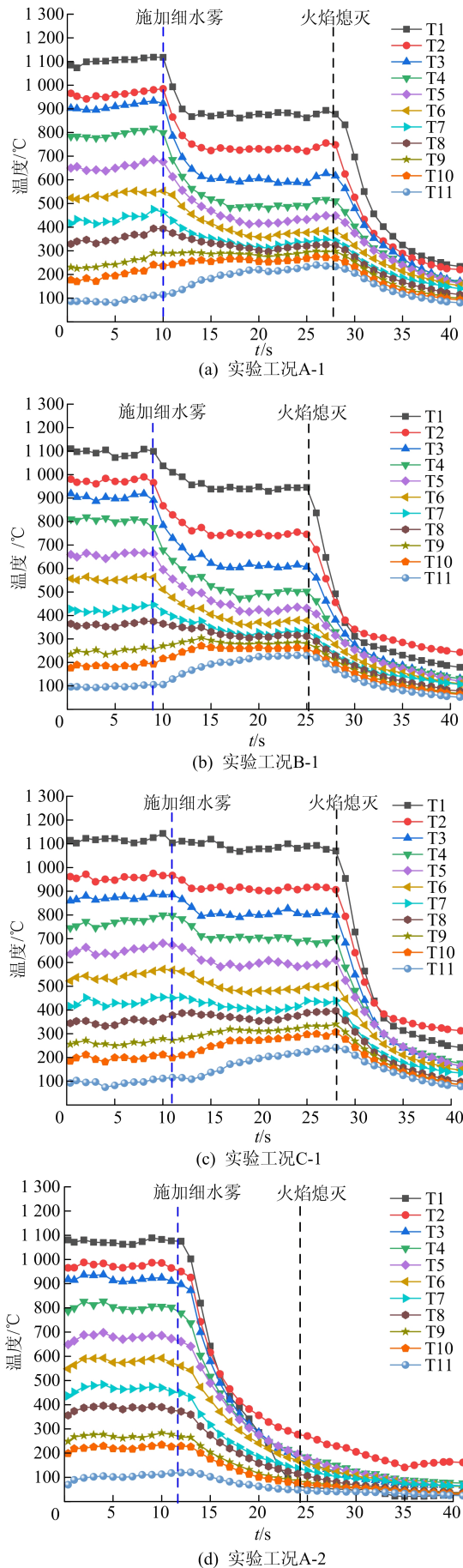


图 6 不同实验工况下温度变化情况

### 2.4 辐射

细水雾施加前后,不同工况下辐射强度变化情况如图 7 所示。从图 7a 可以看出,细水雾压力为 2 MPa 时,施加细水雾后辐射热流计 R1 出现了辐射增大情况,细水雾施加高度为 70 cm 时, R1 的辐射密度从原来的 1.83 kW/m<sup>2</sup> 增加到约 2.52 kW/m<sup>2</sup>,并且随着细水雾施加高度的降低,辐射密度增大的幅度越来越大。施加高度为 50、30 cm 时, R1 的辐射密度分别增大到约 2.84 kW/m<sup>2</sup> 和 3.15 kW/m<sup>2</sup>。在高压细水雾的冲击作用下,使得火焰发生偏折,而且随着施加高度的降低,在相同的细水雾压力下,火焰偏折的角度更大,使得火焰越发靠近辐射热流计 R1,进而采集到的辐射密度就越大。

因此,在实际的工程应用中,使用较高压力的细水雾非但不会起到保护泄漏源安全的效果,相反可能会造成更为严重的二次危害。此外,在正对火焰轴线方向位置上的辐射密度,在施加细水雾后也出现了辐射增大的情况(图 7b)。

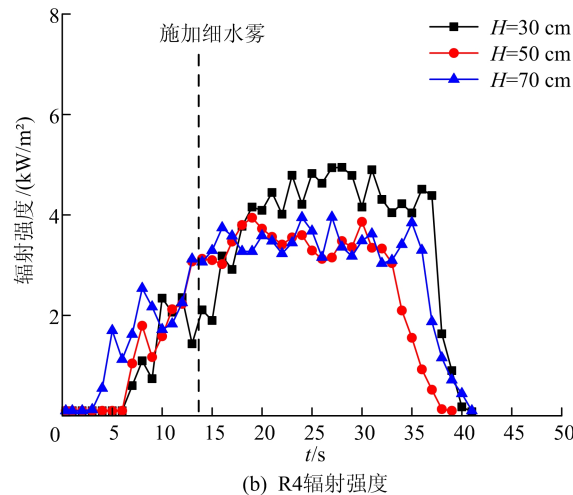
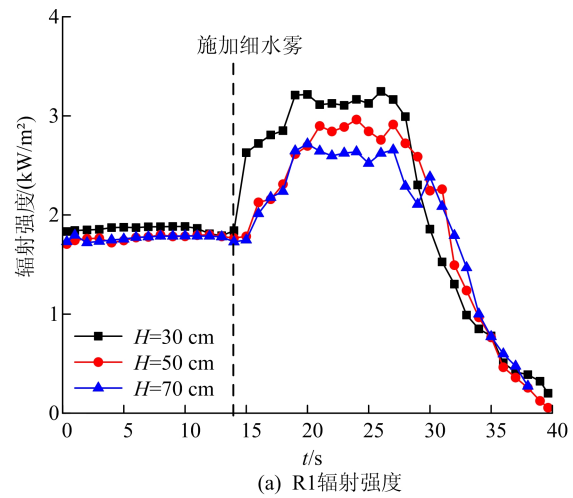


图 7 不同实验工况下 R1 和 R4 的辐射强度变化情况

当细水雾的压力为 0.5 MPa 时,细水雾的施加导致火焰膨胀现象的出现。此外,在细水雾压力较低的情况下,其有效雾通量相对较低,进而导致细水雾隔绝和衰减辐射的能力也相对较弱,因此在这 2 个因素的共同影响下导致了辐射热流计 R4 位置处的辐射出现增大的情况。这说明,当施加的细水雾压力较低时,会带来更为严重的热辐射危害,对火焰轴线下游区域的设施设备以及人员带来严重的威胁。而随着细水雾压力的增大,火焰下游区域辐射增大的情况开始消失,同样的现象出现在其他实验工况中。

比较在细水雾轴线位置左右各 15 cm 相同距离处辐射热流计 R2、R3 所测得的辐射变化情况,如图 8 所示。

从图 8 可以看出,随着细水雾压力的增大,细水雾对辐射热流计 R2、R3 处的辐射强度的衰减效果逐渐显著,当细水雾的压力从 0.5 MPa 提升至 2.0 MPa,其对辐射热流计 R2、R3 位置处的辐射衰减效果分别提升 20.0%、32.8%。

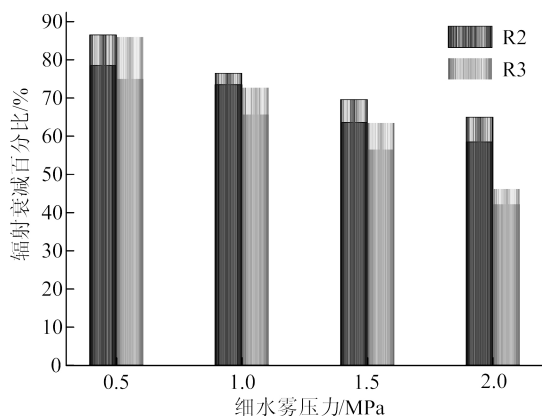


图 8 不同实验工况下 R2 和 R3 的辐射强度衰减情况

此外,在相同的细水雾压力下,细水雾对辐射热流计 R3 位置处的辐射衰减效果要优于辐射热流计 R2 位置处;因为欠膨胀氢气喷射火在水平方向上具有很大的动量<sup>[12]</sup>,所以使得垂直向下喷洒的细水雾流场发生偏移和改变,雾滴在火焰吹扫的作用下开始向 R3 位置处汇聚,进而使得此处的辐射衰减的效果更加显著。

### 3 结 论

本文通过一系列的实验对细水雾与欠膨胀氢气喷射火之间的相互作用进行了研究。主要结论如下:

1) 虽然细水雾不能熄灭欠膨胀氢气喷射火,

但火焰的折角随着细水雾压力的增加而增加,与自由欠膨胀氢气喷射火相比,火焰的水平长度最大缩减为原来的 62%。这意味着细水雾虽然可以缩短火焰的水平长度,但会对喷射火下方区域带来危害。

2) 细水雾的施加会导致辐射出现增大或者减小 2 种截然不同情况的发生。如细水雾压力为 0.5 MPa 时,在火焰轴线后方位置,会出现辐射增大的情况,随着细水雾压力的增大,这种情况开始消失。但是在较高的细水雾压力下,氢气源位置处的辐射强度又会有所增大,进而可能产生意想不到的二次危害。

3) 细水雾对欠膨胀氢气喷射火的影响不仅与细水雾的压力有着密切关系,还与细水雾的施加高度密不可分。细水雾压力较小时(0.5 MPa),其施加高度越高,火焰膨胀的效果就越弱,就越有利于安全。但在较高的细水雾压力下,细水雾的施加高度越高,对火焰长度的缩减效果就越弱,这又是不利的一面。

4) 细水雾一方面可以降低射流火的温度场和辐射场,另一方面又会导致射流火燃烧的强化和火焰的膨胀。这 2 种作用机理同时存在、共同作用,并且与细水雾的压力和释放高度密切相关。

### [参 考 文 献]

- [1] WINTER C J. Hydrogen energy-abundant, efficient, clean; a debate over the energy-system-of-change[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2009, 34(14): 1-52.
- [2] MOLKOV V, SAFFERS J B. Hydrogen jet flames[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2013, 38(19): 8141-8158.
- [3] 王景栋, 贺元骅, 陶波. 单、双喷头细水雾对正庚烷池火灾的抑制作用[J]. 消防科学与技术, 2021, 40(5): 696-700.
- [4] GRANT G, BRENTON J, DRYSDALE D. Fire suppression by water sprays[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2000, 26(2): 79-130.
- [5] ZHUIGANG W, XISHI W, YANGING H, et al. Experimental study on fire smoke control using water mist curtain in channel[J]. Journal of Hazardous Materials, 2018, 342: 231-241.
- [6] MCCAFFREY B J. Momentum diffusion flame characteristics and the effects of water spray[J]. Combustion Science & Technology, 1989, 63: 315-335.
- [7] DOWNIE B, POLYMERPOULOS C, GOGOS G. Interaction of a water mist with a buoyant methane diffusion flame[J]. Fire Safety Journal, 1995, 24(4): 359-381.
- [8] PALIS S, STRUBIG F, VOIGS S, et al. Experimental inves-

- tigation of the impact of water mist on high-speed non-premixed horizontal methane jet fires[J]. Fire Safety Journal, 2020, 114: 180-194.
- [9] 田兵,陈明毅,刘家豪,等. 细水雾对油池火热释放速率影响规律的实验研究[J]. 火灾科学, 2015, 24(3): 136-141.
- [10] KIM S C, HONG S R. An experimental and numerical study on fire suppression using a water mist in an enclosure [J]. Building and Environment, 2003, 38 ( 11 ): 1309-1316.
- [11] JIA H, SHEN H, XIANG H, et al. Analysis of the fire-extinguishing effect and the weakening of flame intensification of nonionic liquid water mist[J]. Combustion Science & Technology, 2020, 192(5): 902-914.
- [12] SCHEFER R W, GROETHE M, HOUF W G, et al. Experimental evaluation of barrier walls for risk reduction of unintended hydrogen releases[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2009, 34(3): 1590-1606.

(责任编辑 张 镛)

## (上接第 1096 页)

本文从边沿范围、摆率控制等方面与已有方案进行了对比,结果见表 3 所列。通过对比可以看出,本文采用的单电容方案避免了电容不同的偏差,修调电流的方式具有精度高、且不易产生波形畸变,抗干扰性好的特点。

表 3 不同方案性能的对比

性能	文献[5]	文献[6]	文献[7]	本文结果
边沿范围/ $\mu\text{s}$	0.3~1.0	0.3~0.5	0.3~0.5	0.3~0.7
高电平/V	1.040	1.120	1.156	1.097
低电平/V	—	0.075	0.012	0.035
方案	双电容	双电容	—	单电容
摆率控制	电容	电流	电容	电流

## 4 结 论

本文设计了一种摆率可控的 PD 发射机模拟前端电路,满足 USB PD 3.0 协议标准。对于 PD 通信中的 EMI 问题有很好的抑制作用,单电容的设计规避了传统不同电容方案带来的稳定性问题的影响;同一电流双路对称镜像结构能有效抑制波形畸变问题,宽电源范围的设计能更好地适应电源电压波动;两级运放作为输出级能提供大的线缆驱动能力,具有非常好的适用性。

## [参 考 文 献]

- [1] 路秋生. 常用手机电池快速充电技术与特点[J]. 电源技术

应用, 2016(7): 41-47.

- [2] 王玲玉. USB PD 3.0 协议中发送端物理层的设计与实现[D]. 沈阳: 辽宁大学, 2018.
- [3] 汪鑫, 罗学娇, 沈琪. 快充双协议识别方案设计[J]. 电子设计工程, 2019, 27(12): 39-42.
- [4] 方侃飞. 基于 USB PD 协议快充控制系统设计与验证[D]. 合肥: 安徽大学, 2018.
- [5] 李弦. 一种用于 USB PD 控制器的梯形波产生电路: 106533398 A[P]. 2017-03-22.
- [6] 栢殷实, 常昌远, 陈远明. 一种迟滞结构的高精度 USB-PD 驱动芯片[J]. 微电子学, 2021, 51(4): 539-545.
- [7] SIAMAK D, ABHIJEET K, ZHANG X. A BMC analog and digital PHY for USB Type-C power delivery[J]. Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering, 2020, 34(3/4): 195-202.
- [8] 阮志芳. USB Type-C 技术分析与应用[J]. 信息通信, 2020(11): 100-103.
- [9] 吴大正, 杨林耀, 张永瑞, 等. 信号与线性系统分析[M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2004: 119-133.
- [10] 邹传彬, 唐波, 杨美军, 等. 谐振振铃的原因和危害及解决办法[J]. 电子设计工程, 2018, 26(17): 126-130.
- [11] 刘正, 游铁雄, 王健, 等. CMOS 线驱动器输出信号压摆率控制的研究[J]. 微电子学报, 2003, 33(4): 276-279.
- [12] 陈昕宇, 陈红梅, 尹勇生. 一种用于 MIPI 低功耗发射器的压摆率调整电路[J]. 集成电路应用, 2020, 37(10): 14-17.
- [13] USB Implementers Forum. USB power delivery specification[M]. [S. l. : s. n. ], 2017: 76-93.

(责任编辑 张 镛)