

基于定容弹的缸内喷水喷雾特性试验研究

白杨¹, 王慧江¹, 吕阳¹, 康哲^{1,2,*}, 李雁飞³

(1. 机械与运载工程学院, 重庆大学, 重庆, 400044; 2. 机械传动国家重点实验室, 重庆大学, 重庆, 400044; 3. 汽车安全与节能国家重点实验室, 清华大学, 北京, 100084)

【摘要】内燃机缸内喷水技术因其在抑制爆震、减少排放及降低油耗方面的潜力而具广泛前景。本研究基于定容弹, 研究了五孔非对称布置喷射器水射流在不同条件下的喷雾特性。喷水温度范围为 30°C 至 240°C, 背景压力为 0.2bar 至 10bar。结果表明, 近场喷雾宽度随水温升高而增大。但在背压为 0.8bar 至 2.5bar 时, 较高的过热度会导致严重的喷雾坍塌。研究发现, 闪沸下的坍塌是由于喷雾中心存在低压区, 而较高的过热度会使低压区迁移至喷嘴出口附近, 从而导致喷雾坍塌增强。此外, 除了过热度和背景压力之外, 水射流喷雾坍塌与喷水压力之间也存在密切联系。

【关键词】缸内喷水; 闪急沸腾; 喷雾宽度; 喷雾坍塌; 喷雾形态

Experimental Research of Direct Water Injection Characteristics Based on Constant Volume Vessel

Yang Bai¹, Huijiang Wang¹, Lv Yang¹, Zhe Kang^{1,2,*}, Yanfei Li³

(1. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Chongqing University, Chongqing, 400044; 2. State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing, 400044; 3. State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy, Tsinghua University, Beijing, 100084)

Abstract: Direct water injection (DWI) within internal combustion engine has become a promising technology due to its potential for suppressing knock, reducing emissions and lowering fuel consumption. In this research, the spray characteristics of water jet discharged from a five-hole asymmetrical injector under different conditions were investigated based on a constant volume vessel. The water injection temperature ranged from 30°C to 240°C, and the ambient pressure varied from 0.2bar to 10bar. The results showed that the spray width at near-field increases with water temperature. However, at ambient pressures of 0.8bar to 2.5bar, higher superheat level resulted in severe spray collapse. It was identified that the collapse under flash boiling occurs as a result of the presence of the low-pressure zone at the center of the spray, and higher superheat level migrate the low-pressure zone closer to the nozzle exit, resulting in enhanced spray collapse. This work also suggests a strong correlation between spray collapse and water injection pressure, in addition to superheat level and ambient pressure.

Keywords: Direct water injection; flash boiling; spray width; spray collapse; spray morphology

基金项目: 国家自然科学基金(No.52002043); 中国博士后科学基金面上项目(No.2021M700581); 中央高校基本科研业务费专项 (No.2022CDJDX-004)

引言

喷水在内燃机领域作为一种很有潜力的技术得到广泛研究。其通过对爆震燃烧的有效抑制,使得发动机可以采用更高的压缩比、增压压力和提前点火正时来提高热效率^[1]。此外,在高温和富氧条件下产生的氮氧化物排放,也可以通过喷水的冷却和稀释作用而大幅度降低^[2,3],以满足严格的排放法规要求。喷水技术可按不同的喷水位置和方法进行分类^[4-6],其中缸内喷水因其更灵活的喷射控制(如喷水量、喷水时间、喷水温度、喷水压力)而具更广的发展前景。但不同的喷水策略可造成缸内温度、热效率和排放的显著差异^[7],使得其广泛应用存在一定困难。从缸内环境的角度分析,当水被喷入时,会经历雾化和汽化两个过程,其对进气、压缩和燃烧过程有很大影响。过低的喷水压力可能导致初级液滴破碎程度,从而对压缩冲程末端的水汽化产生不利影响^[8],此时可能出现金属腐蚀、机油稀释和失火等问题。为解决这些问题,由 Bilger 提出的内燃兰金循环(Internal combustion Rankine cycle, ICRC)得到广泛研究^[9]。在 ICRC 系统中,燃烧后的冷凝水经加压后吸收废弃余热形成高温高压水,再直接喷入缸内。由于环境压力骤降至当前水温的饱和压力以下,使得射流水处于过热状态,迅速蒸发、雾化并膨胀做功,使得发动机的循环热效率与做功能力得到提升,且其随着喷水温度而提高^[10,11]。然而,过热状态下的喷水喷雾特性会在不同条件下呈现较大差异,从而对发动机性能及排放造成潜在影响。

光学诊断技术已被广泛应用于缸内直喷汽油(Gasoline direct injection, GDI)发动机中研究燃油喷雾特性^[12-15],同样也可用于研究和分析射流水喷雾形态特征。GDI 发动机中普遍存在燃油闪急沸腾(简称闪沸)和喷雾塌陷现象。闪沸是指液体突然暴露在低于其饱和压力的环境中时迅速转变为气态的相变过程。在 GDI 发动机中,闪沸有助于改善燃油雾化效果并促进其与空气的混合^[12]。但当采用多孔喷油器时,闪沸下的喷雾可能出现坍塌^[15],此时各喷孔流束向喷油器中心轴线聚拢,表现为喷雾宽度显著减小,喷雾贯穿距大幅度增大。针对喷雾坍塌及内在机理,国内外学者开展了广泛研究。Wu 等人^[16]研究了近喷嘴燃料喷雾,发现喷雾坍塌程度随背压/饱和压力的减小而增加。Guo 等^[17]认为高背压条件下的近场坍塌是由于射流-空气相互作用引起的,称为射流诱发的喷雾塌陷;闪沸条件下的远场坍塌是由于温度急剧下降导致蒸汽凝结引起的,称为凝结诱发的喷雾坍塌。Li 等^[18]也认为多孔射流闪沸喷雾坍塌是由蒸汽凝结引起的,同时认为射流重叠是闪沸喷雾坍塌的必要条件。

在关于缸内喷水的研究中,在不同的缸压和喷水温度下,可能会出现喷雾塌陷的情况,从而对试验结果造成较大影响,这是一个重要但被忽视的因素。因此,本文从喷雾形态及其在时间上的演化过程出发,针对不同条件下的喷水喷雾特性开展了试验研究。此外,背景压力和喷水温度是影响喷雾形态的影响因素,因此本试验保持恒定的喷水压力和背景温度,研究了不同喷水温度(30℃至 240℃)和背景压

力（0.2bar 至 10bar ）下水射流喷雾形态。

1 研究方法

1.1 试验装置

图 1 为实验装置示意图。实验在一定容弹中进行，水经气液增压泵由高压氮气加压，然后通过安装在定容弹顶部的喷嘴（5 孔非对称布置，孔直径 0.18 mm、长径比 0.93）注入。水温由喷水器周围的带热电偶的加热器控制。通过离心泵

（HS452）实现定容弹内的亚大气压环境，通过高压气瓶实现高压环境，并分别由两个欧米茄压力表（DPG409-025HG 和 DPG409-002BG）进行精确监测。两个石英窗口相对安装，定容弹两侧各安装有一台高速摄像机（Photron SA X2）和一个 150W LED 光源。通过背光法拍摄水射流喷雾形态及其随时间的演化。相机拍摄速率为 20000 帧/秒，空间分辨率为 38μm/像素，图片分辨率为 1024*1024。

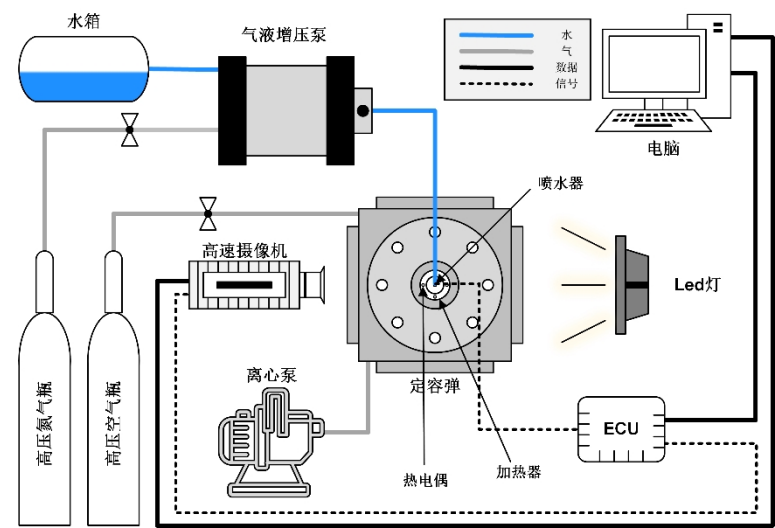


图 1 试验装置简图

1.2 试验条件

试验条件如表 1 所示。喷水压力恒定为 10MPa，喷水温度为 30℃至 270℃，背景压力为 0.2bar 至 10bar，背景温度恒定

为 20℃，喷水脉宽为 1.5ms。表中用无量纲数 R_P 表示水射流过热程度，其定义为喷水温度下的饱和压力与背景压力之比。其中每一试验点都重复进行了十次实验。

表 1 不同试验条件下的过热度大小

R_P		背压 (bar)												
		0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.5	2	2.5	3	5	7	9	10
水 温 (℃)	30	0.21	0.11	0.07	0.05	0.04	0.03	0.02	0.02	0.01	0.009	0.006	0.005	0.004
	60	1.00	0.50	0.33	0.25	0.20	0.13	0.10	0.08	0.07	0.04	0.03	0.02	0.02
	90	3.51	1.75	1.17	0.88	0.70	0.47	0.35	0.28	0.23	0.14	0.10	0.08	0.07
	120	9.92	4.96	3.31	2.48	1.98	1.32	0.99	0.79	0.66	0.40	0.28	0.22	0.20
	150	23.77	11.88	7.92	5.94	4.75	3.17	2.38	1.90	1.58	0.95	0.68	0.53	0.48
	180	50.10	25.05	16.70	12.52	10.02	6.68	5.01	4.01	3.34	2.00	1.43	1.11	1.00
	210	95.32	47.66	31.77	23.83	19.06	12.71	9.53	7.63	6.35	3.81	2.72	2.12	1.91
	240	167.01	83.50	55.67	41.75	33.40	22.27	16.70	13.36	11.13	6.68	4.77	3.71	3.34

1.3 图片处理

为了定量及更准确地分析其不同条件下的差异及影响因素，需要对图像进行喷雾轮廓提取并得到空间分辨率信息。喷雾边缘轮廓提取由自主编写的 Python 程序实现，其过程如图 2 所示。图 2(a) 为一张选取的喷雾图，图 2(b) 为未喷水时刻的定容弹内背景图。由于本次拍摄的图均为灰度图，因此将图 2(b) 与 2(a) 做减法并选取 ROI 区域便得到 2(c)。为了保留 2(c) 中喷雾边缘的较暗区域，需要对 2(c) 做非线性变换得到图 2(d)，非线性变换函数如下：

$$O(r, c) = F(I(r, c)) \quad (1)$$

$$r \in [0, H), c \in [0, W)$$

$$F(I) = 4I^3 - 6I^2 + 3I \quad (2)$$

$$I \in [0, 1]$$

其中 O 为输出图像像素值大小， I 为输入图像像素值大小， r, c 代表像素点坐标。值得注意的是 2(c) 在进行非线性变换之前需要进行归一化处理，经过公式(1)、(2)后反归一化才能得到图 2(d)。利用 Otsu 法^[19] 对其进行二值化处理，并使用闭运算得到图 2(e)。利用图像梯度检测出图 2(e) 中所有的边缘轮廓 cnt_i ，计算轮廓包围面积 S_{cnt_i} ，保留面积最大轮廓即 $cnt = \{cnt_j | S_{cnt_j} = \max(S_{cnt_i}), i = 1, 2, 3 \dots, n\}$ ，并将轮廓绘制在原图得到图 2(f)，可以看出喷雾边缘与原始图像非常吻合。喷雾宽度与贯穿距的计算标准如图 2(f) 所示。

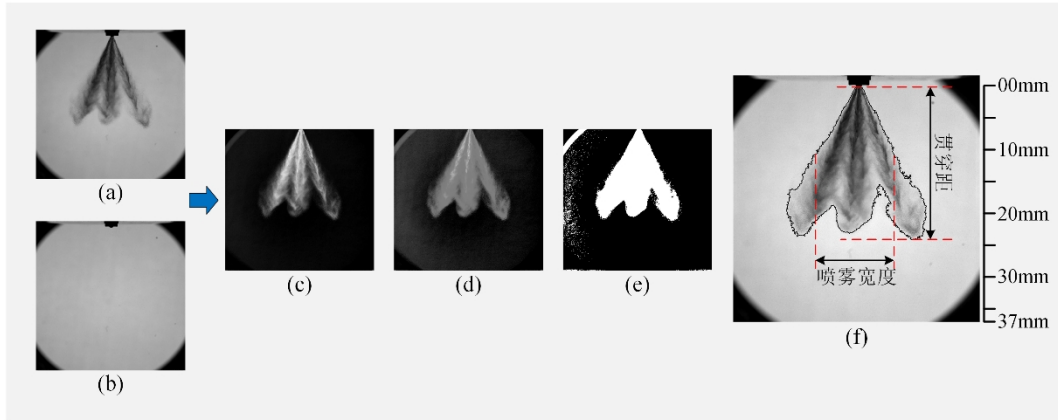


图 2 图片处理过程

2 试验结果与分析

2.1 喷雾结构

图 4 为不同喷水温度和环境压力下，喷水后 1.5 毫秒的喷雾形态。每试验条件下的 R_p 值都以白色标注在图中。以红线为分界线，上部分区域代表 $R_p < 1$ 的过冷水，下部分区域代表 $R_p > 1$ 的过热水。在过冷区和低背景压力条件下，由于本研究采用了 10MPa 的喷射压力，水射流表现出较高的速度和动能，使其克服表面张

力和粘度，从而迅速分散成细小的液滴。随着背景压力的增加，空气密度增大，阻力增加，雾化程度降低，喷雾逐渐产生清晰的流束。此外，在过冷条件下没有观察到射流明显的径向膨胀，因此整个喷雾宽度并无明显变化，这将在 2.2 节得到进一步证明。

对于过热水区域，由闪沸引起的射流内部气泡增长和破裂会增强其雾化效果^[20]。在背压低于 2.5bar 的情况下，在喷嘴

处可观察到喷雾的径向膨胀,但随着水温增大,中心轴线会逐渐出现更暗、更宽的"新流",这同样在其它研究中被观察到^[21, 22]。部分学者将这种结构归因于闪沸射流的径向膨胀,导致喷嘴出口处液滴之间的非弹性碰撞和动量交换。液滴的径向动量相互抵消,轴向动量则被保留,从而在喷雾中心形成一个较暗的区域。随着水温的升高,过热度进一步升高,在背压为0.8bar至2.5bar的范围内,可以明显观察到喷雾坍塌现象。另一方面,当水温保持不变,背压从0.2bar逐渐增大时,水射流过热度不断降低,喷雾坍塌程度呈现先增后减的趋势。并且可以发现,在过热度相

同但背压不同的情况下,喷雾形态仍存在显著差异。对于上述喷雾形态、坍塌与背压、过热度之间复杂的关系,部分学者认为过热度会增大射流之间的相互作用,但这并不一定意味着喷雾宽度的减小^[23]。相反,在较低的过热度下,闪沸引起的气泡破裂会导致喷雾宽度增大。在特定背压下,只有当过热度达到某个临界值时,射流间的距离才会逐渐减小,从而诱发喷雾坍塌。为了探究本实验中水射流喷雾形态不同条件下的差异与上述规律的异同,并建立喷雾形态、过热度 and 背压之间的联系,需要进一步开展定量分析。

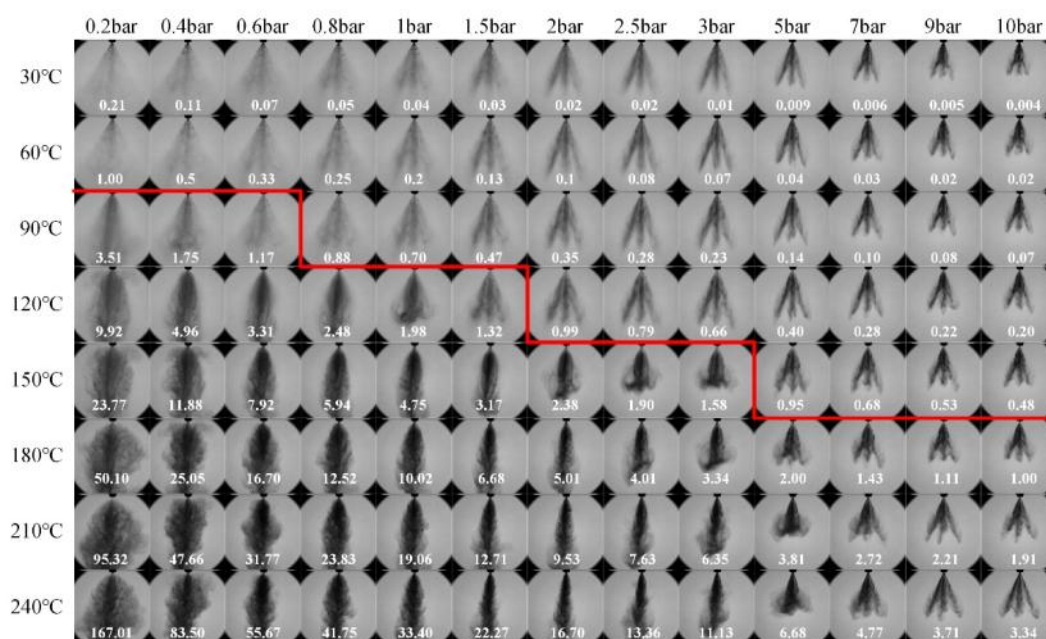


图3 喷水后 1.5ms 喷雾汇总图

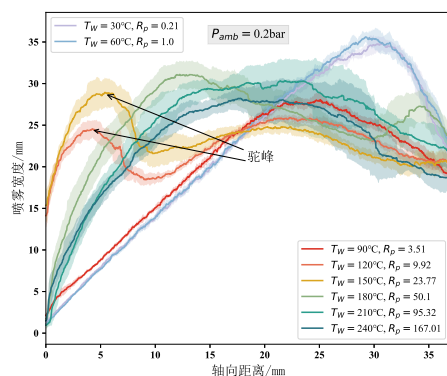
2.2 水温与背压的影响

将图3中喷雾图像进行1.3节中所述的图像处理,以获得喷雾宽度和贯穿距信息。为了保障计算的喷雾宽度与贯穿距的可靠性,在本节展示的所有图表中,对每试验点下10次重复循环的喷雾图像都进

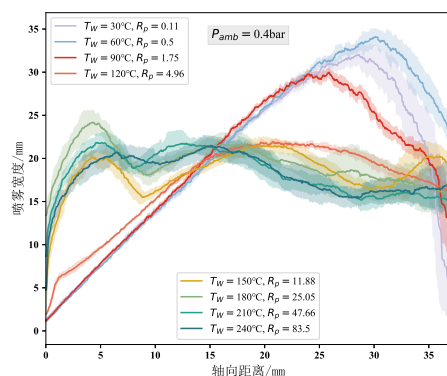
行了相同的图像处理,并将计算的10组数据的平均值作为最后结果,标准差以误差带的形式表示,图中 T_w 、 P_{amb} 分别表示喷水温度和背景压力。

图4为特定背压(0.2和0.4 bar)和30°C至240°C水温范围内,喷雾宽度沿轴向距离的变化情况。如图4(a)所示,当

水温从 30°C 升至 60°C 时，射流始终处于过冷状态，喷雾宽度基本保持一致。此外，此时背景气体的干扰较小，从而导致喷雾宽度与轴向距离之间几乎成正比关系。但值得注意的是，当轴向距离超过 30 mm 时，喷雾宽度会逐渐减小。这种下降可归因于圆形视窗导致拍摄图像周围存在阴影（如图 3 所示），从而导致无法识别和计算被阴影遮挡的喷雾，且水雾在喷雾末端会逐渐减少。因此，在某些条件下，将不讨论末端喷雾宽度的这种下降趋势。



(a)



(b)

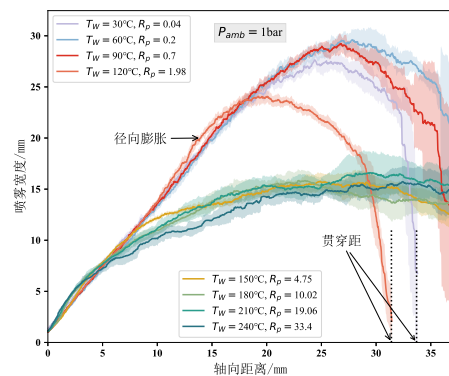
图 4 背压为 0.2bar 和 0.4bar 时不同水温下喷雾宽度随轴向距离变化

当温度升至 90°C 时，喷雾宽度仅略有增加。在距离喷嘴约 25 mm 处，观察到喷雾宽度逐渐减小，与过冷射流喷雾形成对比。分析认为，此时射流处于过热状态，闪沸引起的卷吸效应^[24]导致射流间距减

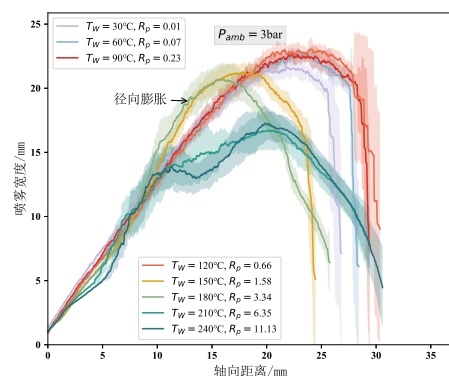
小。另一方面，喷雾边缘处更小的液滴尺寸使得其轴向动能衰减更快，最终导致远场的喷雾宽度逐渐减小。随着过热度的增加，喷嘴内气泡的成核率和增长速度迅速加快。使得射流在喷嘴处发生明显的径向膨胀，喷雾宽度显著增加。这在水温为 120°C 和 150°C 情况下尤为明显，可观察到在轴向距离 0mm 处（即喷嘴出口处），喷雾宽度大约增至 15mm。同样地，高过热度下射流间的相互作用变得更加强烈，径向膨胀的水雾由于缺少来自后续射流的动能补充，轴向速度迅速下降。其表现为喷雾宽度沿轴向距离突然减小，在曲线上呈现出驼峰形状，如图 4(a)所示。当进一步增大水温，相比过冷射流，喷雾宽度在轴向上仍有明显增大，但喷嘴出口处的喷雾径向膨胀却消失。且随着过热度的增加，喷雾宽度曲线逐渐下移。当背压为 0.4 bar 时，如图 4(b) 所示，喷雾宽度在不同水温下呈现与上述相同的变化趋势。

图 5 为背压为 1bar 和 3bar 时不同水温下喷雾宽度随轴向距离变化。从图 5(a)可以看出，当背压从 0.4bar 逐渐增大至 1bar 时，近喷嘴处喷雾宽度逐渐不随水温而变化。值得注意的是，图中曲线的结束点对应的轴向距离即是喷水后 1.5ms 下的喷雾贯穿距。当水温从 30°C 增大至 120°C (R_p 为 0.04~1.98)，尽管喷雾宽度随轴向距离的变化趋势并无明显差异，但是贯穿距以 $R_p=1$ 为分界线，呈现先增后减的趋势：对于过冷射流，其热力学能随温度增加，可以看到贯穿距由大约 34mm 延伸至视窗底部（即 37mm）；当射流温度为 120°C，其贯穿距突然减小。当继续增加增加射流

温度时，喷雾发生坍塌，喷雾宽度立即降低，贯穿距增大。此现象在图 5(c)中更为明显，即在低过热度下的射流贯穿距会有所减小，这在其它学者的研究中同样被发现[24, 26]，他们将此状态下的射流称为过渡闪沸。



(a)

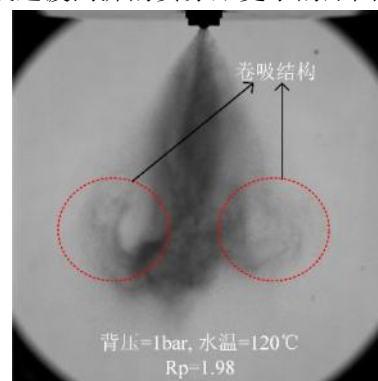


(b)

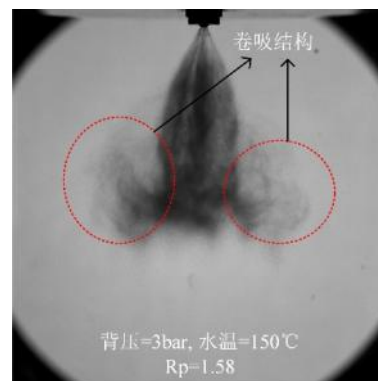
图 5 背压为 1bar 和 3bar 时不同水温下喷雾宽度随轴向距离变化

为了解释上述现象原因，这里展示出过渡闪沸对应的喷雾图像，如图 6(a)、图 6(b)所示。此情况下的喷雾宽度在轴向距离 13mm 处会有明显的增大，表明射流不同于之前的低背压、高过热度的情况，低过热度下闪沸引起的径向膨胀并不会发生在喷嘴出口处，而是在远端。喷雾外缘径向膨胀的水雾速度衰减更快，对喷雾中心的射流产生向上的阻力，在靠近喷雾底端处形成卷吸。此时喷雾外缘的阻力大部分

来自液滴的表面力，而不是非闪沸状态下的空气阻力（空气粘度更低），这可能是造成过渡闪沸的贯穿距更小的原因。



(a)

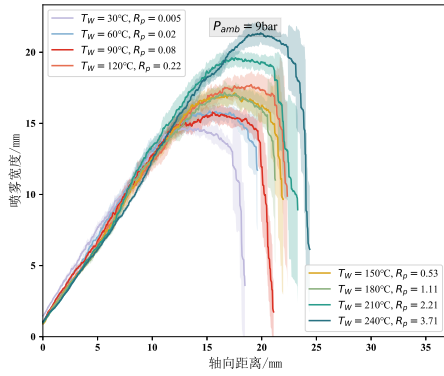


(b)

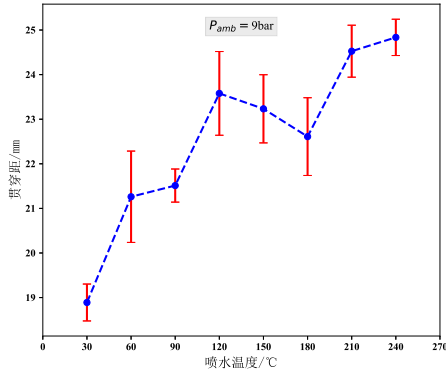
图 6 不同条件下喷水后 1.5ms 喷雾图

值得注意的是，背压在 2 至 5bar 下，喷雾宽度随水温的变化规律有着一定的相似性，因此不再一一讨论。同样地，对于更高背压的情况，此处只讨论 9bar 下的喷雾规律，如图 7 所示。此时水温升高时，喷雾宽度并无明显变化，贯穿距总体上呈增大趋势。尽管过热度为 3.71 时，射流仍然存在明显的径向膨胀，也没有表现出坍塌的倾向。分析认为，在更高背压下，射流速度会更低，导致射流之间的相互作用会更弱。但是这种解释并没有将过热度纳入考虑，因此造成射流水在不同背压和水温下的较大差异的原因以及喷雾坍塌机

理需要进一步讨论和分析。



(a) 喷雾宽度随轴向距离变化

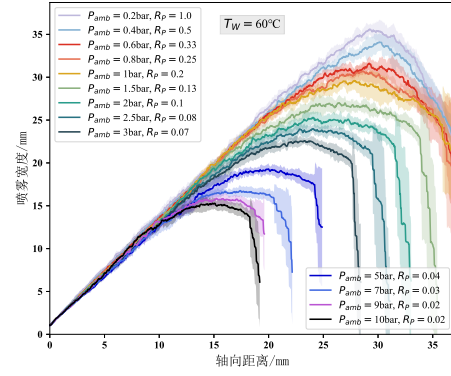


(b) 喷雾贯穿距随水温变化

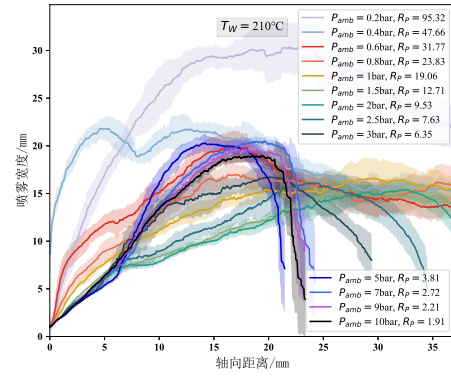
图 7 背压为 9bar 时不同水温下的喷雾宽度与贯穿距

图 8 为定水温，不同背压下的喷雾宽度在轴向距离上的变化。从图 8(a)可以观察到相同水温下的喷雾宽度在不同背压下变化趋势保持相对一致。

然而，在闪沸条件下，如图 8(b)所示，不同背压下的喷雾宽度变化趋势呈现明显差异。当环境压力从 10bar 降至 2bar（对应 R_p 从 1.91 增至 9.53），喷雾宽度在远场呈持续减小趋势，表明喷雾逐渐发生坍塌并增强。然而随着背压的继续减小，喷雾宽度整体逐渐增大，喷雾坍塌逐渐减弱。



(a)



(b)

图 8 水温为 60 $^\circ\text{C}$ 和 210 $^\circ\text{C}$ 时不同背压下喷雾宽度随轴向距离变化

2.3 喷雾坍塌机理

为进一步探究喷雾坍塌与背压及过热度之间的复杂关系，图 9 展示了 2bar 背压下三种典型射流状态（非闪沸、过渡和坍塌）在发展初期随时间的演变过程。白色虚线代表喷嘴的轴线方向。可以看到，在非闪沸状态下，射流在喷嘴出口处立即雾化成微小液滴，且沿喷嘴轴线方向保持稳定发展。通过比较坍塌状态下的喷雾形态，可观察到在喷水后 100 μs 时喷嘴出口处喷雾有明显的径向膨胀，射流方向与喷嘴轴线保持一致。然而，随着时间的推移，射流逐渐偏离喷嘴轴线并向中心汇聚，在喷雾的两侧形成了第 2.2 节中提到的卷吸结构，这种结构在 350 μs 时变得更加明显。前述认为形成此结构的主要原因为喷雾随

时间演化的过程中射流方向的偏移，导致下游水雾缺乏来自后续射流的动能补充。在过渡闪沸的情况下，同样可以观察到结构在 $350\mu\text{s}$ 时初步形成，表明其在低过热度下形成阶段更晚且更缓慢。分析认为，射流方向的偏移是由闪沸条件下喷雾中心的低压区造成。并且在相同的背压下，更高的过热度会导致喷雾中心的低压区更靠近喷嘴，从而导致更剧烈的喷雾坍塌。然

而，目前关于低压区的形成尚未得到一致的[17, 27, 28]，本文倾向将其归因于射流下游的闪沸，流束的径向膨胀使得射流形成闭环结构，阻止了喷雾中心与背景气体的交换，同时射流的轴向运动使得喷雾内部形成低压区并诱发坍塌。这很好地解释了在低过热水平下低压区位于远场的现象，因为此时射流内部气泡密度和破裂程度更低[29]。

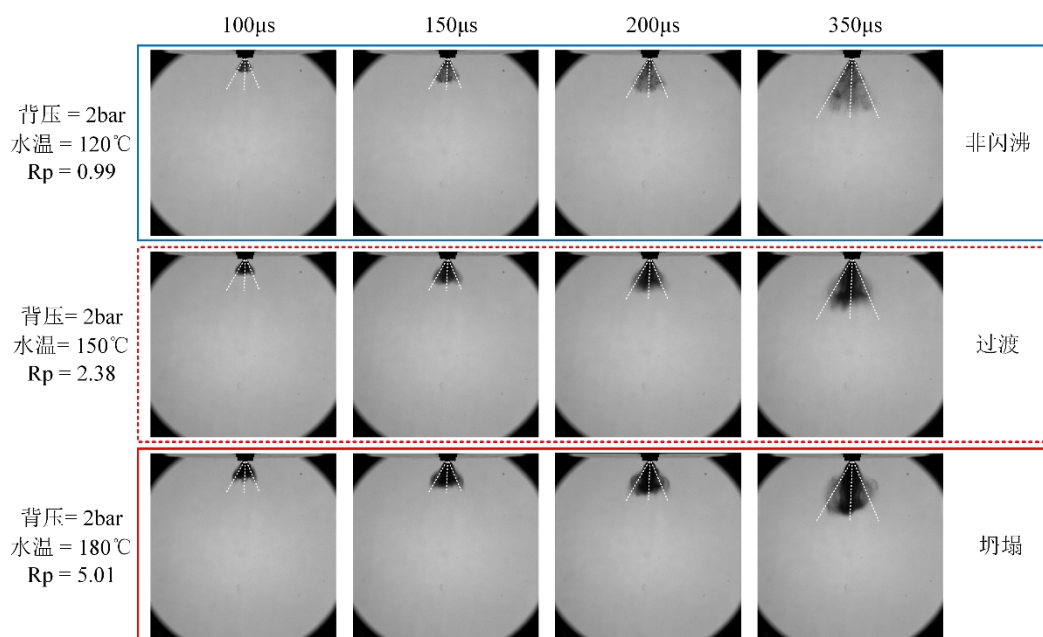


图 9 2bar 背压下不同射流状态喷雾形态随时间演化过程

这同样可用于解释在 2.2 节中观察到的现象，即 0.2bar 背压下过热射流的喷雾宽度在喷嘴出口会有明显的增大，但进一步增大水温会使得此增量逐渐消失。事实上，在喷雾发展初期，高过热度下的射流在喷嘴出口都会发生明显的径向膨胀，但由于后续低压区的形成导致射流的汇聚并形成稳定结构，使得其逐渐消失。然而，从图 3 可以发现 0.2bar 背压下即使射流过热度达到了 90，喷雾同样未发生坍塌现象，而 1.5bar 背压下过热度 3 的射流就已发生严重的坍塌。分析认为，在低背景压

力下，喷射压力和背压之间的巨大压差会使得非闪沸状态下的射流发生强烈雾化（称为机械主导破裂）。因此，当射流状态拓展至闪沸时，闪沸诱发的低压区不足以引起喷雾完全的径向收缩。随着背景压力的逐渐升高，机械破裂程度会降低，而过热度则保持在相对较高的水平，射流之间的仍存在较强的相互作用，导致发生严重坍塌。随着背压的进一步增加，较低的射流速度导致低压区减弱，同时过热度降低进一步导致低压区的形成远离喷嘴，使得坍塌减弱。并且可以看出，当背景压力

达到 10bar 时, 即使过热度达到 3 时仍能清晰地观察到单个流束形态, 此时射流的径向膨胀并不能使其构成闭环结构从而无法形成低压区。因此, 可以认为喷水压力同样是影响过热水射流喷雾形态的一个重要因素。若在低背压条件下降低喷水压力或高背压条件下增加喷水压力都可能导致喷雾坍塌。然而, 上述猜想仍需进一步实验验证。

3 总结

(1) 对于过冷水射流, 在相同背压下, 喷水温度的变化对喷雾宽度的影响极小, 而贯穿距则随水温成比例增加。同样, 当水温保持一致时, 不同背压对喷雾的影响相对较小, 贯穿距则随着背压的升高而减小。

(2) 在定背压条件下, 喷雾形态可分为三个区域。在低背压区域, 射流在喷嘴出口处出现明显的径向膨胀, 导致喷雾宽度增大。但随着水温的增大, 宽度随之减小。在 0.8 bar 至 3 bar 的背压范围内, 过热射流在近场的喷射宽度随着水温的升高呈减小趋势, 并逐渐发生坍塌。在高背压区域, 水温对喷雾宽度的影响相对较小, 但贯穿距随水温增大。

(3) 闪沸下的喷雾坍塌是由喷雾中心的低压区引起, 在定背压条件下, 增加喷水温度以增大过热度会导致低压区向喷嘴出口靠近, 从而加剧喷雾坍塌。

(4) 喷水压力同样是影响过热水射流喷雾形态的重要因素。在低背压条件下, 水压与背压之间的压差使得边缘喷雾能够抵抗中心低压区的影响。在高背压条件下, 射流速度降低, 且流束之间的间隔变大,

喷雾中心无法形成低压区。

参考文献

- [1] Zhu S, Hu B, Akehurst S, et al. A review of water injection applied on the internal combustion engine[J]. Energy conversion and management, 2019, 184: 139-158.
- [2] Ma X, Zhang F, Han K, et al. Effects of intake manifold water injection on combustion and emissions of diesel engine[J]. Energy Procedia, 2014, 61: 777-781.
- [3] Iacobacci A, Marchitto L, Valentino G. Water injection to enhance performance and emissions of a turbocharged gasoline engine under high load condition[J]. SAE International Journal of Engines, 2017, 10(3): 928-937.
- [4] Park H K, Ghal S H, Park H C, et al. A Study on NO_x Reduction of Marine 4-Stroke Diesel Engine Using Charge Air Humidification[R]. SAE Technical Paper, 2011.
- [5] Worm J, Naber J, Duncan J, et al. Water injection as an enabler for increased efficiency at high-load in a direct injected, boosted, SI engine[J]. SAE International Journal of Engines, 2017, 10(3): 951-958.
- [6] Bhagat M, Cung K, Johnson J, et al. Experimental and numerical study of water spray injection at engine-relevant conditions[R]. SAE Technical Paper, 2013.
- [7] Mingrui W, Sa N T, Turkson R F, et al. Water injection for higher engine performance and lower emissions[J]. Journal of the Energy Institute, 2017, 90(2): 285-299.
- [8] Hoppe F, Thewes M, Baumgarten H, et al. Water injection for gasoline engines: Potentials, challenges, and solutions[J]. International Journal of Engine Research, 2016, 17(1): 86-96.
- [9] Bilger R W, Wu Z. Carbon capture for automobiles using internal combustion Rankine cycle engines[J]. 2009.
- [10] Kang Z, Feng S, Lv Y, et al. Effect of direct water injection temperature on combustion process and thermal efficiency within compression ignition internal combustion Rankine engine[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2021, 28: 101592.
- [11] Kang Z, Bai Y, Feng S, et al. Effect of direct water injection timing on cycle performance and emissions

- characteristics within a CI-ICRC engine[J]. Alexandria Engineering Journal, 2023, 72: 135-145.
- [12] Guo H, Ma X, Li Y, et al. Effect of flash boiling on microscopic and macroscopic spray characteristics in optical GDI engine[J]. Fuel, 2017, 190: 79-89.
- [13] Li Y, Guo H, Ma X, et al. Morphology analysis on multi-jet flash-boiling sprays under wide ambient pressures[J]. Fuel, 2018, 211: 38-47.
- [14] Wang Z, Badawy T, Wang B, et al. Experimental characterization of closely coupled split isoootane sprays under flash boiling conditions[J]. Applied Energy, 2017, 193: 199-209.
- [15] Guo H, Li Y, Lu X, et al. Radial expansion of flash boiling jet and its relationship with spray collapse in gasoline direct injection engine[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 146: 515-525.
- [16] Wu S, Xu M, Hung D L S, et al. Near-nozzle spray and spray collapse characteristics of spark-ignition direct-injection fuel injectors under sub-cooled and superheated conditions[J]. Fuel, 2016, 183: 322-334.
- [17] Guo H, Ding H, Li Y, et al. Comparison of spray collapses at elevated ambient pressure and flash boiling conditions using multi-hole gasoline direct injector[J]. Fuel, 2017, 199: 125-134.
- [18] Li Y, Guo H, Fei S, et al. An exploration on collapse mechanism of multi-jet flash-boiling sprays[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 134: 20-28.
- [19] Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms[J]. IEEE transactions on systems, man, and cybernetics, 1979, 9(1): 62-66.
- [20] Reitz R D. A photographic study of flash-boiling atomization[J]. Aerosol Science and Technology, 1990, 12(3): 561-569.
- [21] Xu Q, Yang S, Xiao D, et al. Tailoring the flash-boiling spray structure through the control of plume-to-plume interaction[J]. Atomization and Sprays, 2021, 31(6).
- [22] Xu Q, Pan H, Gao Y, et al. Investigation of two-hole flash-boiling plume-to-plume interaction and its impact on spray collapse[J]. International journal of heat and mass transfer, 2019, 138: 608-619.
- [23] Zeng W, Xu M, Zhang G, et al. Atomization and vaporization for flash-boiling multi-hole sprays with alcohol fuels[J]. Fuel, 2012, 95: 287-297.
- [24] Sphicas P, Pickett L M, Skeen S A, et al. Inter-plume aerodynamics for gasoline spray collapse[J]. International Journal of Engine Research, 2018, 19(10): 1048-1067.
- [25] Wu S, Yang S, Wooldridge M, et al. Experimental study of the spray collapse process of multi-hole gasoline fuel injection at flash boiling conditions[J]. Fuel, 2019, 242: 109-123.
- [26] Wu S, Yang S, Wooldridge M, et al. Experimental study of the spray collapse process of multi-hole gasoline fuel injection at flash boiling conditions[J]. Fuel, 2019, 242: 109-123.
- [27] Zhang G, Xu M, Zhang Y, et al. Macroscopic characterization of flash-boiling multihole sprays using planar laser-induced exciplex fluorescence. Part II: cross-sectional spray structure[J]. Atomization and Sprays, 2013, 23(3).
- [28] Guo H, Li Y, Xu H, et al. Interaction between under-expanded flashing jets: A numerical study[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 137: 990-1000.
- [29] Zhang Y, Li S, Zheng B, et al. Quantitative observation on breakup of superheated liquid jet using transparent slit nozzle[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2015, 63: 84-90.