

闪沸条件下激波交互及其对射流间相互作用的影响

徐海丰^{1,2}, 李雁飞¹, 许鹿冰¹, 马骁¹, 帅石金¹

(1. 清华大学, 北京 100084; 2. 烟台大学, 山东烟台 264010)

Shock wave interaction and its influence on jet interaction under flash-boiling conditions

Xu Haifeng^{1,2}, Li Yanfei²

(1.Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2.Yantai University, Yantai 264010, China)

Abstract: 多孔直喷汽油机(GDI)的闪沸射流在某些工况条件下会产生喷雾坍塌现象,最近该现象被认为是由于射流的膨胀不足引起的,但目前对于影响激波交互的关键因素的研究较少。本研究采用高速显微纹影技术拍摄到了闪沸正己烷射流的近场激波交互的结构。测试是在一个恒体积容器中进行的,环境压力(P_{amb})为10至300 kPa,燃料温度(T_{fuel})为30至170°C,喷射压力(P_{inj})为2至10 MPa。对交互激波的宽度和长度两个方面对激波结构进行了仔细的分析。一般来说,交互激波的宽度和长度都随着 P_{amb} 的增加而减小,随着 T_{fuel} 的增加而增大。在相同热力学条件下增加油压,由于燃料流量的增加,会产生更大的激波尺寸。当激波发生交互后,会在次级胞格的下方出现新油束。新油束会对附近的低速燃料产生夹带作用,导致喷雾坍塌。此外,在强烈激波交互相互作用条件下原始激波结构会发生改变,较大的次级胞格会减少射流的径向膨胀作用并促进喷雾坍塌。实验的结果充分说明了影响激波间相互作用的因素,及其对喷雾坍塌中的重要作用。

关键词: 闪沸; 闪沸欠膨胀射流; 射流间相互作用; 闪沸欠膨胀激波; 喷雾坍塌

Key words: flash boiling; under-expanded jets; jet-to-jet interaction; shock waves; spray collapse

0 概述

目前,直喷汽油发动机(GDI)已成为乘用车的主动力源。由于混合气形成时间有限,喷雾性能对直喷发动机的性能起着至关重要的作用。喷射时刻的热力学条件可以在较宽的范围内进行变化,即绝对环境压力(P_{amb})可以在20–500 kPa之间变化。燃料温度(T_{fuel})可以从零下到150°C以上变化^[1]。由于汽油挥发性较好,在喷射时缸内压力较低,燃料通常处于过热状态。因此,闪沸现象在GDI发动机中经常发生。据报道,在实际驾驶排放测试中,闪沸现象的发生概率可达95%^[2]。

闪沸是当液体突然暴露在低于其饱和蒸汽压(P_{sat})的环境中时发生的剧烈相变。与传统的机械破

碎相比,热力学(闪沸)雾化的优点包括,减小液滴尺寸^[3-6]、增强燃料混合气质量^[7]、提高燃烧效率^[8,9],减少排放等优点^[10,11]。然而,当闪沸射流从多孔喷油器喷出时,射流会向喷油器轴方向收缩,甚至完全合并为一束射流^[12],引发喷雾坍塌。喷雾坍塌可能会导致喷雾撞壁、发动机爆震等一系列不良影响。因此,为了抑制喷雾坍塌,充分发挥闪沸喷射的优势,有必要对喷雾坍塌的机理进行了深入研究。

在闪沸条件下,由于周围高速射流的卷席作用,形成了低压区,从而导致喷雾崩溃^[13-16]。最近有研究报道,在高过热度条件下闪沸射流的蒸汽可以抵消该低压区,并提出上述理解(即卷吸引起的坍塌)

收稿日期: 2023-9-14

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (NO. 52076119)

作者简介: 徐海丰 (1997), 男, 硕士, 主要研究方向为气液两相流, E-mail: xhf_323@163.com;

李雁飞 (联系人), E-mail: liyf2018@tsinghua.edu.cn.

不能完全解释闪沸喷雾坍塌。近年来,人们对闪沸喷雾坍塌现象提出了一些新的认识。Xu等^[17, 18]认为,喷雾坍塌是由于射在近喷口区域的非弹性碰撞引起。Li等^[19, 20]认为,喷雾内部冷凝形成的低压区会促进喷雾坍塌。Lacey等^[21]认为近喷口区域的欠膨胀射流引发的快速膨胀,会造成射流间的相互作用,但并没有对具体的过程进行解析。Guo等^[22, 23]通过数值模拟发现,在单束闪沸欠膨胀射流内部存在激波,而距离较近的激波之间会发生相互作用,从而产生低压区并导致喷雾坍塌。但是在类似发动机的条件下,对于闪沸引起的欠膨胀现象的实验研究较少。

最近,Zhang等^[24],发现了激波的长度和宽度,分别与喷射压力及热力学因素相关。并且进一步的,通过实验和数值模拟^[25]证明了新油束的产生是由次级胞格所引起的,次级胞格是由原始激波间发生相互作用而产生的。但并未对影响激波交互的因素进行进一步说明。

在之前的研究中,为了避免多孔喷雾给研究带来的困难,广泛使用双孔DI喷射器来探究闪沸条件下射流间的相互作用。因此本研究中使用了双孔喷射器,研究了喷射压力、燃料温度和环境压力对闪沸射流的形貌以及欠膨胀激波间相互作用的影响,并探索了影响激波交互的关键因素

1 试验装置与图像处理

1.1 试验系统

图 1 (a) 为实验装置的原理图,这些测试是在一个定容弹中进行的。喷油器安装在定容弹的顶部,两个石英窗相对安装。燃料会在进入喷油器之前进行加热,同时喷射器也被加热并保持相同温度。并且,分别由两个高精度热电偶($\pm 0.1^\circ\text{C}$)进行监测以保证燃料温度的准确性。采用高压氮气直驱的气液增压泵为喷油器提供喷射压力,采用离心真空泵(Agilent DS102)实现亚大气压环境和定容弹的扫气。图 1 (b) 为纹影可视化装置,包括一个 30W 的 LED 灯、一个光阑、一把光刀和两个凹面透镜($f = 1300\text{ mm}$),形成了一个穿过定容弹的光路。其中光刀的安装方向是垂直的,以增强密集喷雾产生的激波可视性。在光刀前方,用两个 $f = 35\text{ mm}$ 的凸透镜聚焦 LED 灯发出的发散光。高速摄影系统包括,高速相机(Photron SA-Z)用长焦镜头($f = 600\text{ mm}$)捕获图像。成像速度为 10000 fps,曝光时间为 99.0 μs 。视

图面积为 $44.4 \times 44.4\text{ mm}^2$,分辨率为 1024×1024 像素。

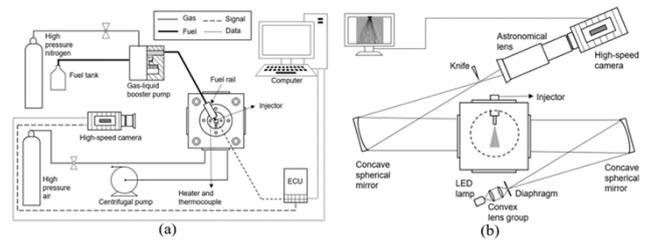


图 1 实验装置 (a) 及纹影平台 (b)

图 2 (a) 显示了由商用五孔喷射器改造而成的两孔喷射器的基本特征。在目前的试验中,如图 2 (b) 所示,孔 1、孔 3 和孔 4 被金属密封胶堵塞。测试的喷射器使用了原喷射器的 2 孔和 5 孔。较大的孔间距离有助于提高近喷嘴区域射流相互作用的光学穿透性。

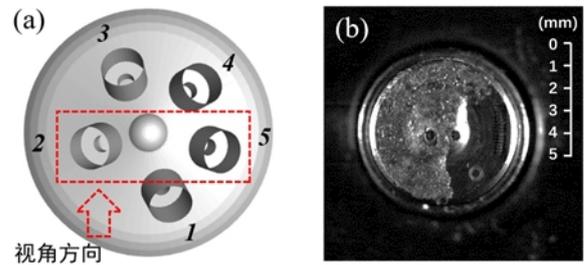


图 2 喷孔结构 (a) 及双孔示意图 (b)

1.2 测试工况

喷射燃料为正己烷,环境温度保持在 25°C 。 T_{fuel} 的范围为 $30 \sim 170^\circ\text{C}$,绝对压力 P_{amb} 的范围为 $10 \sim 101\text{ kPa}$, P_{inj} 的范围为 $2 \sim 10\text{ MPa}$ 。所有试验的注射持续时间均为 1.6 ms 。对于每个情况测试工况都重复了 10 次。本研究采用的过热度(R_p),定义为 P_{sat} / P_{amb} 的比值。

表 1 测试工况

参数	数值
燃料	正己烷
燃料温度	$30 \sim 170^\circ\text{C}$
背景气体	空气
背景温度	室温
背景压力	$10 \sim 300\text{ kPa}$
喷射压力	$2、5、10\text{ MPa}$
喷射脉宽	1.6 ms

1.3 数据处理

图 4 展示了使用内部 MATLAB 代码对纹影图像进行的处理过程。原始纹影图像如图 4 (a)所示。在图 4 (b)中, 将原始图像的亮度提高 40%, 并使用 0.4 的伽马值来增强激波的可见性。图 4 (c)显示了 10 次重复注射的平均图像。图 4 (d)显示了近喷嘴区域被放大的激波形貌。

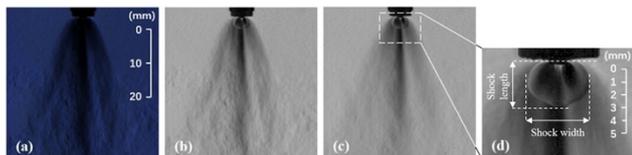


图 3 图像处理过程

2 试验结果与讨论

本文分为三个部分。在 2.1 节中, 介绍了油压变化对喷雾形貌的影响, 及其激波交互特性与新油束出现规律。在 2.2 节中, 在较宽的热力条件下对激波的尺寸进行了相关性讨论, 并说明了激波宽度和长度的控制因素。在 2.3 节中, 分析了激波的相互作用对新油束的影响模式, 并讨论了不同的激波形貌对射流特性的影响。

2.1 射流特性及激波形貌

图 4 以喷射压力 $P_{inj}=10$ MPa 为例, 给出了测试条件下的喷雾图像。根据热力学状态以及喷雾的坍塌特性, 将宏观的喷雾形貌分为了五个区域。在区域 A 中, 燃料处于非闪沸状态, 射流沿着喷孔轴线自由发展。而在区域 B、C 和区域 D 中, 燃料处于闪沸状态 ($R_p > 3.3$)。并且可以明显看出喷雾形态随 R_p 增加其闪沸程度增强, 其坍塌程度加。在区域 B 燃料的过热程度相对较高, R_p 一般在 5 ~ 12 之间。其喷雾特性随着 R_p 的增加, 在两束射流之间可以发现一些蒸汽, 但射流方向仍沿着喷孔轴线发展。而在 R_p 更高的 C 区, 在两束射流之间伴随着新油束的出现, 这在 Zhang 等人^[26]的研究中也有发现。关于新油束的形成机理及其与喷雾坍塌特性的关系将在 2.2 节中进行讨论。区域 D 中, 其明显特征表现为新油束占主导地位, 喷雾坍塌明显, 油束向中轴线偏移。

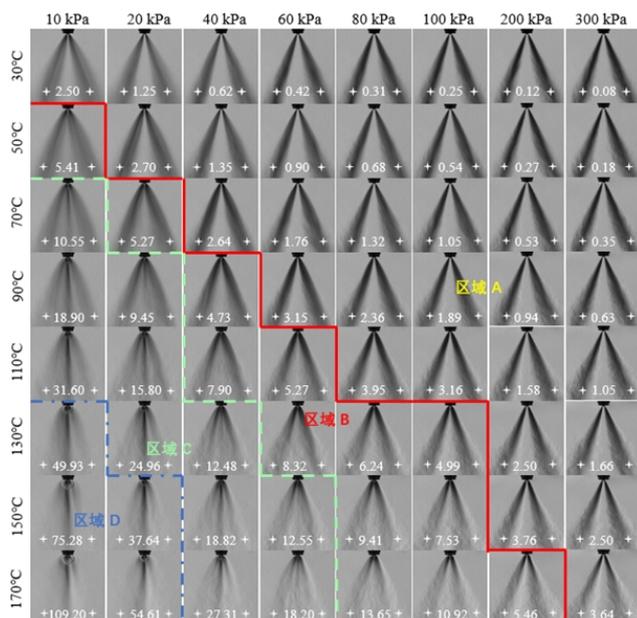


图 4 $P_{inj}=10$ MPa 在不同 P_{amb} 和 T_{inj} 条件下的喷雾形貌

在对 $P_{inj}=10$ MPa 条件下的喷雾特性展开探究后, 下面将对不同喷射压力下的射流特性展开研究。其结果如图 5 所示, 随着喷射压力由 2 MPa 增加到 5 MPa 后, 可以发现两个主要区别: (1) 区域 D 中的喷雾坍塌更强, 并且强坍塌区域增大。(2) 随着油压的增加, 在相同热力学条件下的射流径向膨胀明显增加, 射流间的相互作用增强。

在前人的研究中指出, 通过调控燃料的喷射压力可以导致不同的喷雾坍塌特性。最近的研究表明, 无论是对于气态还是闪沸欠膨胀射流, P_{inj} 对激波特性的影响^[27, 28, 29]起着重要的作用。Zhang 等人^[25], 进一步表明激波的宽度与长度分别由不同的因素控制, 而油压增加会显著拉长激波长度。同时, 油压增加会使得激波形态发生变化, 而激波形态的差异最终影响激波间的交互作用, 引发喷雾坍塌。该结果也为通过喷射压力及其喷孔布置的调控提供了空间。

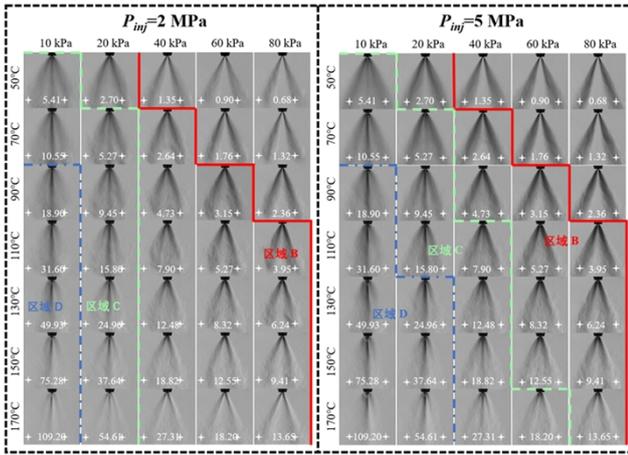


图 5 喷射压力为 2 MPa 与 5 MPa 条件下的喷雾特性

在上述研究中，我们总结了不同喷射压力条件下的射流特性，并说明了喷雾坍塌程度随喷射压力变化的关系。最近，Zhang 等^[25]研究人员发现，新油束的产生与激波交互有着密切的关系。在本节中，为了更好地观察激波及其在不同热力学条件下的演变，以及不同的喷射压力对激波特性带来的变化。将对喷雾进行局部放大，以方便观察激波交互与新油束之间的关系。其结果如 **Error! Reference source not found.**和图 7 所示。其中，只有在一定的 R_p 以上才能观察到激波。但是，这并不意味着在冲击不可见的情况下没有激波，这可能是由于在相对较低的 R_p 下液相密度较大，光无法穿透导致。

Error! Reference source not found.为喷射压力 10 MPa 条件下的近场射流特性，并且在图中框出了激波发生交互的区域。在 10 kPa 条件下，随着温度的增加燃料的闪沸程度增强，可以明显看出激波发生交互，且激波交互的尺寸增加。这是合理的，在之前 Guo 等人^[24]研究中也表明，随着温度增加，激波宽度受到相变的影响，其径向膨胀程度增加。当背压增加时，其膨胀阻力增大同时闪沸程度减弱，导致其激波尺寸减小。

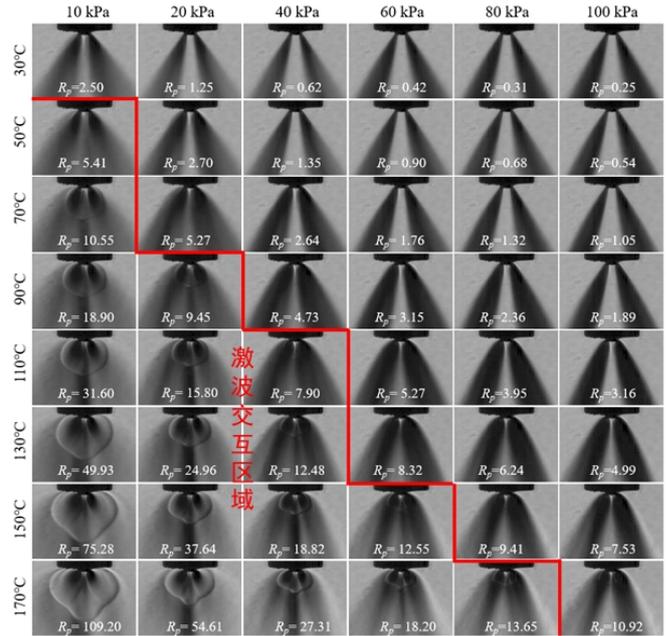


图 6 $P_{inj}=10\text{MPa}$ 条件下的近场喷雾特性

图 7 分别为喷射压力 2 MPa 和 5 MPa 的喷雾近场区域图。激波尺寸随 R_p 变化，即随着 T_{inj} 的增加， P_{amb} 的减少，激波交互的总体趋势与 $P_{inj}=10\text{MPa}$ 相似。但是，可以看出随着油压增加，其激波尺寸存在较大差异。这是因为燃料的流量增加，导致燃料的液相浓度增加，促进了燃料的相变。且当 R_p 增加时，随液体浓度的减少激波逐渐变的明显。

如图 6 中激波交互区域所示，在喷射压力 10 MPa 条件下，当激波发生交互时通常伴有新油束的产生。在激波未发生交互的区域，尽管两束射流相互靠拢，但两束射流仍是单独发展并未出现合并现象和新油束的出现，并且坍塌程度相较于激波交互区域坍塌程度较低。而在图 7 中，当喷射压力处于 2 MPa 和 5 MPa 时，可以看到当激波发生交互时也同时出现了新油束。需要说明的是，受到光学条件的限制，在部分低过热度条件下（例如： $T_{fuel}=50^\circ\text{C}$ 、 $P_{amb}=10\text{kPa}$ ），并未看到明显激波形态，但其射流形态与出现激波的射流形态相似，并且同样出现了新油束。因此我们可以合理的认为激波间的相互作用是引发新油束和喷雾塌陷的必要条件。

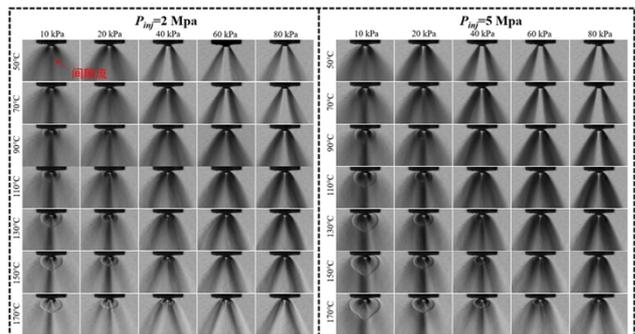
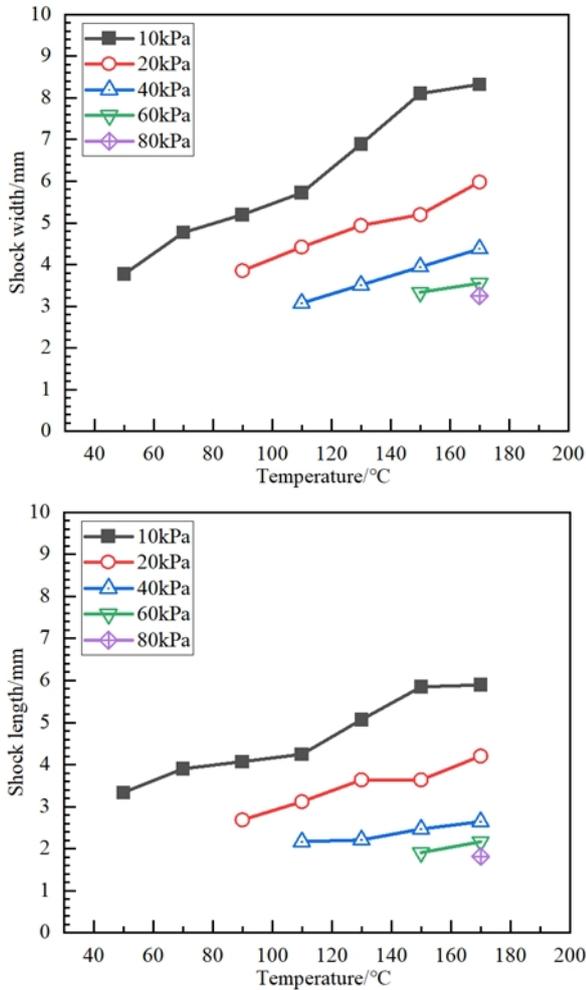


图 7 $P_{inj}=2\text{ MPa}$ 与 $P_{inj}=5\text{ MPa}$ 的近场喷雾特性

2.2 激波尺寸相关性分析

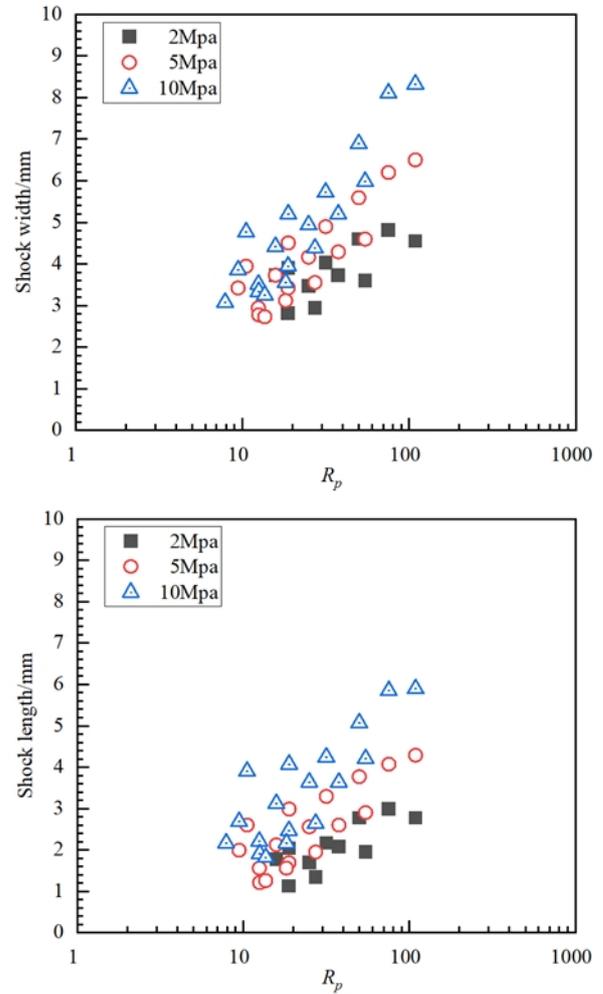
在对激波间相互作用以及新油束出现的规律做出描述后, 本节将主要展开对相应工况数据的量化分析。为了定量表征激波间相互作用下激波系统的大小, 我们对交互后的激波宽度和长度进行了提取, 结果如图 8 所示。其中, 激波宽度和长度都会随着 P_{amb} 的减少或 T_{fuel} 的增加而增加。较高的过热度 and 较低的环境气密度有助于激波尺寸的扩张。

图 8 $P_{inj}=10\text{ MPa}$ 条件下温度与背压对激波宽度 (上) 与激波长度 (下) 的影响

燃料的过热度水平 (R_p) 通常被认为是衡量闪沸喷雾行为的一个重要因素, 同时也有研究使用 R_p 来预测喷雾的径向膨胀程度^[24]。因此探究 R_p 对闪沸欠膨胀激波形态的影响是有必要的。图 9 (上) 和 (下) 显示了 R_p 对激波宽度和长度的影响。结果表明, 在相同 R_p 条件下随着油压的增加, 其激波具有更大的尺寸。而在单一喷射压力下, 激波宽度和长度与 R_p

的相关性较差。

有研究指出, 环境背压的阻力会影响射流的发展^[24]。为了减轻环境阻力带来的影响, 在图 10 中使 $R_p \cdot P_{amb}^{-0.5}$, 以更好的表示激波尺寸与 R_p 拟合背压后的关系。图 10 显示, 考虑环境阻力后, $R_p \cdot P_{amb}^{-0.5}$ 与激波宽度及激波长度的相关性有了明显的提升。该结果表明激波的径向膨胀与轴向发展与相变强度密切相关。然而, 在前人的研究中激波长度与相变的相关性较差。一个可能的原因是当激波发生交互时会影响激波的轴向发展, 导致激波长度与 R_p 的相关性较好。

图 9 不同喷射压力下 R_p 与激波宽度 (左) 和激波长度 (右) 的关系

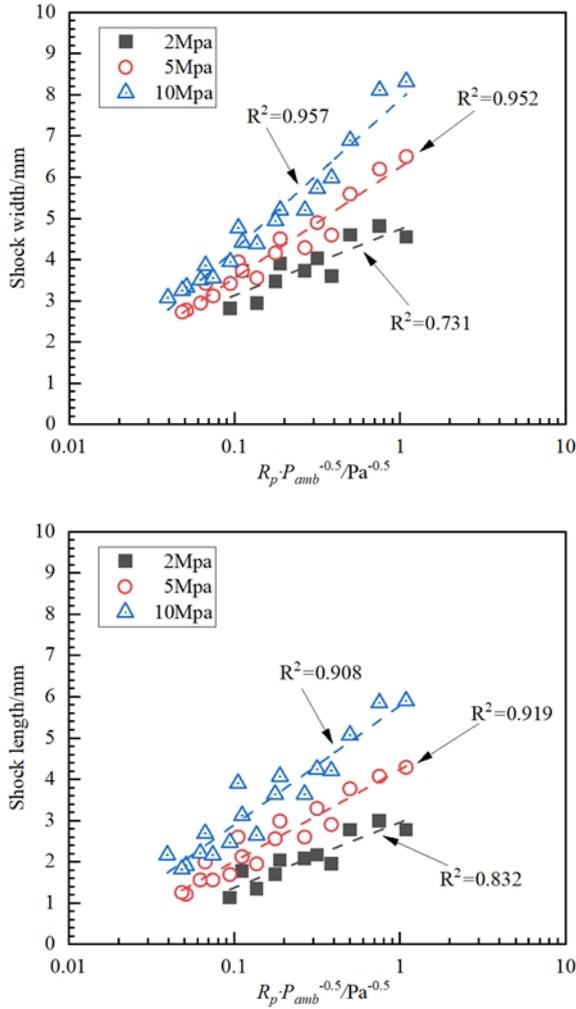


图 10 不同喷射压力下 $R_p \cdot P_{amb}^{-0.5}$ 与激波宽度（上）和激波长度（下）的关系

在上述研究中我们发现激波的交互尺寸可能会受到不同热力学条件的影响，最终形成不同的激波形态。因此，为了进一步说明交互后的激波形态和了解激波宽度和长度之间的关系，绘制了不同热力学条件下的激波宽度与激波长度的关系，其结果如图 11 所示。显然，大多数点位于激波长度(L)大于宽度(W)的区域。由图 10 可知，在相同热力学条件下，较高的喷射压力具有更大的交互激波尺寸。但图 11 可以得出，在不同喷射压力条件下随温度增加，其激波尺寸增大的斜率相同，即激波形态比例 (L/W) 相同。该结果表明，提高喷射压力对于激波宽度与激波长度增加的贡献相近，导致不同喷射压力条件下其激波的 (L/W) 相关性较强。

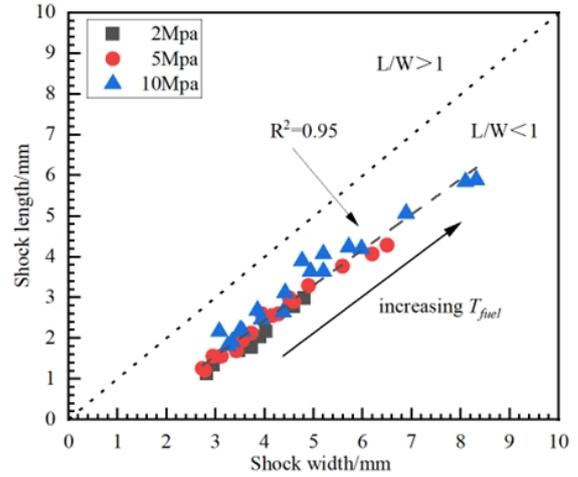


图 11 不同喷射压力下的 L/W 特性

2.3 激波结构的差异

通过上述研究，我们发现随油压增加，由于燃料流量的增加促进了激波的径向膨胀，增强了激波间的交互作用。为了更好地呈现激波交互的形态差异，选择了几个典型工况进行展示，以便探究交互激波的结构差异。如图 12 所示工况 II 到工况 IV 可以看到，相互作用的激波由初级胞格和次级胞格组成。在图中可以很好地观察到当两个初级胞格发生相互挤压时产生的次级胞格与初级胞格间具有较为明显的分界线。

如图 12 结果所示，选择四种特殊工况，以分别代表不同的激波交互强度。在工况 I 中，单束射流内部可以观察到典型的激波机构，但两个激波并没有发生交互，射流沿着喷射轴向自由发展。其他三种情况代表了激波间的交互作用但强度不同的情况。工况 II 与工况 I 相比，在相同的热力学条件下，提高喷射压力激波发生交互。这是因为，增加喷射压力流量增大，燃料相变量增加，促进了激波的径向膨胀，产生激波交互。并且，在二级胞格的下方可以看到新油束的产生。工况 III 则在低过热度状态下激波发生了交互，激波底部处于扁平状，二级胞格较工况 II 而言更大。同时，在二级胞格下方的新油束也更加明显。工况 IV 在高过热度状态下，激波已经完全交互，并且具有更大的二级胞格。此时，两束射流已经完全坍塌为一束。

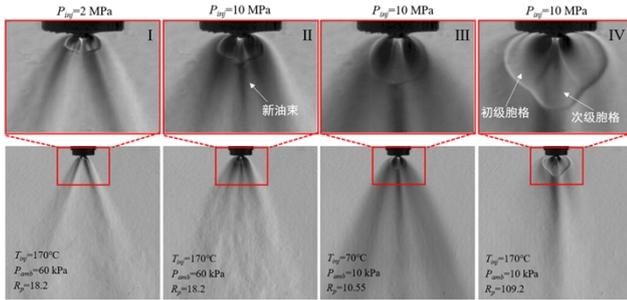


图 12 不同热力学条件及喷射压力对激波结构的影响

从图 12 结可以解释在高 P_{amb} 条件下，闪沸喷雾呈现出非塌缩特征的现象，这可能是由于激波间的相互作用消失所导致。在较高的 P_{amb} 条件下，激波间的相互作用所需的 R_p 应该更高，也可以增加油压以提高燃料的相变量来促进激波的径向膨胀。当交互激波宽度增大也会使喷雾宽度增加，这也可以解释随着 P_{amb} 的减小，闪沸坍塌喷雾在近喷嘴区域会变宽的现象。

3 结论

本文探究了喷射压力对射流特性及其激波间交互规律的影响，获得了射流宏观形貌和激波尺寸在不同油温和背压下的变化规律，分析了激波宽度和激波长度与过热度 R_p 之间的关系。主要结论如下：

(1) 随着油压的增加燃料流量的增加，激波间的相互作用会增强，从而导致不同的射流间相互作用行为。当激波未发生相互作用时，射流沿喷孔轴向自由发展。在激波间交互程度较弱的区域，新油束在次级胞格下方出现，但喷雾并没有完全坍塌。在高度相互作用区域，可以观察到新油束和喷雾坍塌现象。

(2) 激波交互后的宽度和长度与 $R_p \cdot P_{amb}^{-0.5}$ 具有良好的相关性，这表明燃料的相变强度与环境背压的阻力是影响激波尺寸的关键性因素。并且当激波发生交互后，激波的长度和宽度之间可能会相互耦合。

(3) 增加喷射压力，可以增加交互激波的尺寸，但对于激波长度与激波宽度之比 (L/W) 的影响是有限的。

(4) 次级胞格的形态会影响新油束的射流形貌（包括射流宽度、贯穿据、浓度）。当激波间发生强烈的相互作用会相互挤压，促使次级胞格占据更

大的激波面积，使得喷雾完全坍塌为一束射流。

参考文献：

- [1] Aleiferis PG, van Romunde ZR. An analysis of spray development with iso-octane, n-pentane, gasoline, ethanol and n-butanol from a multi-hole injector under hot fuel conditions. *Fuel* 2013;105(1):143 - 68.
- [2] Kramer M, Kull E, Wensing M. Flashboiling-induced targeting changes in gasoline direct injection sprays. *Int J Engine Res* 2016;17(1):97 - 107.
- [3] her E, Bar-Kohany T, Rashkovan A. Flash-boiling atomization. *Progress in Energy and Combustion Science* 2008;34(4):417-39.
- [4] Zeng W, Xu M, Zhang Y, Wang Z. Laser sheet dropsizing of evaporating sprays using simultaneous LIEF/MIE techniques. *Proceedings of the Combustion Institute* 2013;34(1):1677-85.
- [5] Xu M, Zhang Y, Zeng W, Zhang G, Zhang M. Flash boiling: easy and better way to generate ideal sprays than the high injection pressure. *SAE Technical Paper*. SAE Technical Paper; 2013.
- [6] Guo H, Ma X, Li Y, Liang S, Wang Z, Xu H, et al. Effect of flash boiling on microscopic and macroscopic spray characteristics in optical GDI engine. *Fuel* 2017;190:79-89.
- [7] Yang J, Xu M, Hung DLS, Wu Q, Dong X. Influence of swirl ratio on fuel distribution and cyclic variation under flash boiling conditions in a spark ignition direct injection gasoline engine. *Energy Conversion and Management* 2017;138(1):565-76.
- [8] Sun Z, Cui M, Nour M, Li X, Hung D, Xu M. Study of flash boiling combustion with different fuel injection timings in an optical engine using digital image processing diagnostics. *Fuel* 2021;284:119078.
- [9] Yang J, Dong X, Wu Q, Xu M. Influence of flash boiling spray on the combustion characteristics of a spark-ignition direct-injection optical engine under cold start. *Combustion and Flame* 2018;188:66-76.
- [10] Senda J, Wada Y, Kawano D, Fujimoto H. Improvement of combustion and emissions in diesel engines by means of enhanced mixture formation based on flash boiling of mixed fuel. *International Journal of Engine Research* 2008;9(1):15-27.
- [11] Dong X, Yang J, Hung DLS, Li X, Xu M. Effects of flash boiling injection on in-cylinder spray, mixing and combustion of a spark-ignition

- direct-injection engine. Proceedings of the Combustion Institute 2019;37(4):4921-8.
- [12] Zeng W, Xu M, Zhang GM, Zhang YY, Cleary DJ. Atomization and vaporization for flash-boiling multi-hole sprays with alcohol fuels. Fuel 2012;95(1):287-97.
- [13] Heldmann M, Bornschlegel S, Wensing M. Investigation of jet-to-jet interaction in sprays for DISI engines. SAE Technical Paper. SAE International; 2015.
- [14] Yang S, Song Z, Wang T, Yao Z. An experiment study on phenomenon and mechanism of flash boiling spray from a multi-hole gasoline direct injector. Atomization and Sprays 2013;23(5):379-99.
- [15] Kapusta ŁJ. Understanding the collapse of flash-boiling sprays formed by multi-hole injectors operating at low injection pressures. Energy 2022;247(1):123388.
- [16] Khan M, Helie J, Gorokhovski M, Sheikh N. Air entrainment in high pressure multihole gasoline direct injection sprays. Journal of Applied Fluid Mechanics 2017;10(1):1223-34.
- [17] Xu Q, Pan H, Gao Y, Li X, Xu M. Investigation of two-hole flash-boiling plume-to-plume interaction and its impact on spray collapse. International Journal of Heat and Mass Transfer 2019;138(1):608-19.
- [18] Xu Q, Yang S, Xiao D, Li X, Xu M. TAILORING THE FLASH-BOILING SPRAY STRUCTURE THROUGH THE CONTROL OF PLUME-TO-PLUME INTERACTION. Atomization and Sprays 2021;31(6):45-65.
- [19] Li Y, Guo H, Zhou Z, Zhang Z, Ma X, Chen L. Spray morphology transformation of propane, n-hexane and iso-octane under flash-boiling conditions. Fuel 2019;236(1):677-85.
- [20] Li Y, Guo H, Fei S, Ma X, Zhang Z, Chen L, et al. An exploration on collapse mechanism of multi-jet flash-boiling sprays. Applied Thermal Engineering 2018;134(1):20-8.
- [21] Lacey J, Poursadegh F, Brear MJ, Gordon R, Petersen P, Lakey C, et al. Generalizing the behavior of flash-boiling, plume interaction and spray collapse for multi-hole, direct injection. Fuel 2017;200(1):345-56.
- [22] Guo H, Li Y, Wang B, Zhang H, Xu H. Numerical investigation on flashing jet behaviors of single-hole GDI injector. International Journal of Heat and Mass Transfer 2019;130(1):50-9.
- [23] Guo H, Li Y, Xu H, Shuai S, Zhang H. Interaction between under-expanded flashing jets: A numerical study. International Journal of Heat and Mass Transfer 2019;137(1):990-1000.
- [24] 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.
- [25] Zhang J, Li Y, Xu H, Liu Y, Ma X, Xu H, et al. Characterizing under-expansion behaviors induced by rapid phase change of flash-boiling jets. Fuel 2022;329:125404.
- [26] Zhang J, Li Y, Xu H, Ma X, Shuai S. Investigation into shock-to-shock interactions induced by flash boiling and the impact on spray behaviors. Fuel 2023;337:127120.
- [27] Liu F, Gao Y, Zhang Z, He Xu, Wu H, Zhang C, et al. Study of the spray characteristics of a diesel surrogate for diesel engines under sub/supercritical states injected into atmospheric environment. Fuel 2018;230:308 - 18.
- [28] Gerber V, Baab S, Förster FJ, Mandler H, Weigand B, Lamanna G. Fluid injection with supercritical reservoir conditions: Overview on morphology and mixing. The Journal of Supercritical Fluids 2021;169:105097.
- [29] Franquet E, Perrier V, Gibout S, Bruel P. Free underexpanded jets in a quiescent medium: A review. Prog Aerosp Sci 2015;77:25 - 53.