

基于定容燃烧弹氨高压喷射闪沸喷雾特性研究

黄吕萌¹, 南天天¹, 陈占明¹, 赵鹏云¹
(1.长安大学 能源与电气工程系, 西安 邮编: 710018)

Study on Characteristics of Ammonia High Pressure Jet Flash Boiling Spray Based on Constant Volume Combustion Bomb

Huang Lvmeng¹, Nan Tiantian¹, Chen Zhanming¹, Zhao Pengyun¹

(1. Department of Energy and Electrical Engineering, Chang'an University, 710018, China)

Abstract: The research on flash boiling spray of ammonia fuel can provide a theoretical basis for the optimization of spray and combustion effect of internal combustion engine. Based on this purpose, the spray test of liquid ammonia was carried out with high temperature and high pressure constant volume combustion bomb. At the same time, spray modeling calibration research and model simulation were carried out. The simulation focuses on exploring the influence degree of injection pressure and environmental pressure on flash boiling spray. It is found that with the increase of injection pressure, the development of flash boiling spray is accelerated and the droplet breakage is enhanced because fuel obtains greater kinetic energy. In addition, the flash boiling spray showed an iron anchor shape with development. Environmental back pressure has a great influence on flash boiling spray. With the increase of environmental back pressure, the penetration distance of flash boiling spray is reduced due to the reduction of the pressure difference inside and outside the spray hole and the obstruction of environmental gas. In addition, the late spray development of the intense flash boiling spray and the transition flash boiling spray is different. The degree of vaporization of the fuel droplets in the intense flash boiling state is higher, while the degree of vaporization of the droplets in the transition state is lower.

摘要:对于氨燃料的闪沸喷雾的研究可以为内燃机喷雾与燃烧效果的优化提供一定的理论基础。本课题基于该目的,以高温高压定容燃烧弹实验装置开展液氨的喷雾试验。同时,开展喷雾模型标定研究与模型仿真。仿真重点探究了喷射压力和环境压力对于闪沸喷雾的影响程度,研究发现随着喷射压力的提升,燃料获得了更大的动能,闪沸喷雾的发展加快,液滴破碎增强。此外,闪沸喷雾随着发展呈现出铁锚状。环境背压对于闪沸喷雾的影响较大,随着环境背压的提高,由于喷孔内外压力差的减小以及环境气体的阻碍,闪沸喷雾贯穿距缩小。剧烈闪沸喷雾与过渡闪沸喷雾的后期喷雾发展差别较大,剧烈闪沸状态的燃料液滴汽化程度更高,而过渡状态下的液滴汽化程度较低。

关键词: 氨燃料, 高压喷射, 闪沸喷雾, 冷态喷雾, 定容燃烧弹

Key words: ammonia fuel, high-pressure injection, flashing spray, cold spray, constant volume combustion bomb

中图分类号: TK4

文献标识码: A

0 绪论

氨^[1]作为一种储氢物质,具有单位质量热值高、便于储运、廉价易得,被认为是一种具有潜力的无碳燃料。

氨容易在室温条件下液化,尤其在储存、运输以及大规模生产中也具有更低的生产成本。近年来,为了缓解全球变暖,氨燃料发动机已经成为了一项极具潜力和前景的技术。

氨常温常压为气态,是一种低沸点燃料,高压

收稿日期: 2023-06-30

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(52006014);

作者简介: 黄吕萌(2001-),男,硕士生,主要研究方向为低碳与零碳燃料喷雾燃烧, E-mail: 1945147494@qq.com;

陈占明(联系人), E-mail: ZM_Chen@chd.edu.cn.

喷射条件下具有典型的闪沸效应，对于闪沸喷雾，其具有喷雾锥角大，贯穿距小，破碎效果与雾化效果好的特性，而且相对于不断地提高喷射压力更具有优势，可以使得实际发动机应用中的液氨-空气混合更加充分，同时能够减弱淬熄效应，优化汽缸内的燃烧过程，降低有害物的排放量。

许多学者针对闪沸喷雾进行了不同角度的实验与研究，包括闪沸喷雾的宏观形态、多孔喷油器的闪沸喷雾形态等。上海交通大学的 Xu^[2]等通过高速摄影机研究了闪沸喷雾的宏观形态，发现当燃料温度不变时，随着环境压力的减小，闪沸现象愈发明显。过热度 (Rp) 大于 1.0 时，为冷态喷雾，喷雾间距较大且能清晰观察到各油束； Rp 小于 0.63 时，闪沸现象变得更加显著，喷雾的贯穿距变短；当 Rp 小于 0.3 时，闪沸现象变得十分剧烈。此外，闪沸工况下，多孔喷油器燃油喷雾油束之间的交叉干涉现象被称为“坍塌”^[3]。通过对闪沸工况下喷雾坍塌的广泛研究，发现适当的喷雾坍塌有利于喷雾的蒸发和雾化效率的提升^[4]。Aleiferis^[5]等在燃油过热条件下采用多孔喷油器研究了喷雾对混合气形成和燃烧的影响，结果表明，汽油闪沸喷雾能够提高火焰传播速度。清华大学的 Guo^[6]对直孔汽油机闪沸条件下多孔喷雾坍塌进行了研究，其结果表明，相变化学势和环境背压共同决定了内部闪沸的 GDI 射流宽度，同时他发现通过改变喷嘴喷孔的设计结构可以防止喷雾油束间的相互作用。

由上文可知许多学者进行了关于闪沸喷雾的宏观形态、多孔喷油器闪沸喷雾差异等多方面的研究。本文对于氨的闪沸喷雾的研究能够为单孔喷油器的闪沸喷雾研究以及后续的燃烧效果提供一定的理论基础。此外，对于氨燃料的闪沸喷雾研究仍处于初期探究的阶段，通过实验与仿真相结合的研究方法，利用标定的仿真模型模拟氨喷雾能够为内燃机的持续发展进步提供一些新思路。

本课题拟用实验室内搭建的高温高压定容燃烧弹实验装置开展液氨的喷雾试验并研究多控制参数下氨高压喷射的喷雾闪沸特性，通过实验获取相关

参数。同时，用仿真软件 CONVERGE2.4 开展喷雾模型标定研究并进一步探究喷射压力、背压对喷雾贯穿距、喷雾形态等的影响。

1 实验设备与方法

1.1 实验设备

如图 1-1 所示，实验所用的定容燃烧弹主体实验装置主要有外部采用不锈钢制成、内部具有耐高温陶瓷炉膛的容弹腔体、由电机驱动的高压油泵、燃料箱、过滤器以及电子控制器等组成。

在容弹腔体顶部安装有一个高压共轨燃料喷射器，利用容弹腔体中空部分形成的一个圆柱形空腔模拟内燃机燃烧室高温高压的环境，并且容弹腔体侧面通常留有四个圆柱形视窗，从而对燃料（如柴油、汽油）的喷雾和燃烧特性进行研究。本实验对氨的燃料喷雾特性进行研究，只需启用容弹顶部的喷油器进行试验。系统可以提供范围为 60MPa-300MPa 的喷射压力，满足本次实验喷射压力 60MPa 的要求。

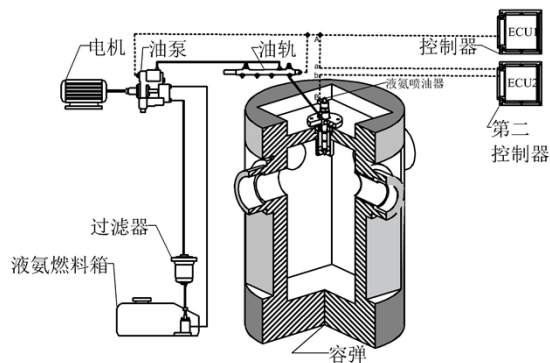


图 1-1 定容燃烧弹装置

表 1-1 实验喷雾工况

参数	喷雾
喷射压力/MPa	60
喷油脉宽/ms	1.0
喷孔直径/mm	0.14
环境温度/K	500
燃料温度/K	330

1.2 实验方法

如图 1-2 所示，纹影法采用典型的 Z 型光路图，其中卤素灯为光源，主反光镜和副反光镜为两个球面反射镜，中间矩形区域为流场区，常用高速摄影来采集。实验中，卤素光源发出的光，通过球面反射镜反射后经过流场区域，再经另一发射镜反射，由垂直于流场密度梯度的刀口切去一半，最终投入成像系统中捕捉到不同气流密度的流体。

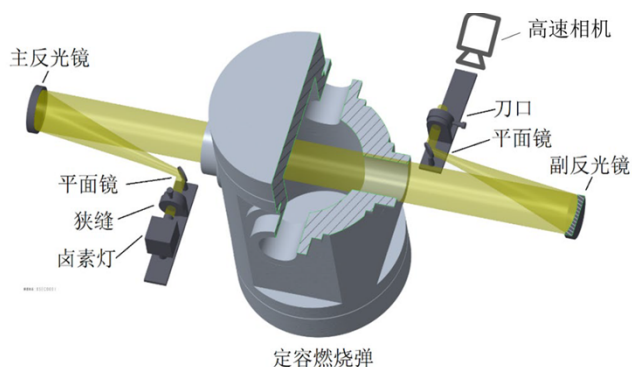


图 1-2 纹影法光路图

2 实验结果讨论

2.1 喷雾形态及二值化处理

实验采用纹影法采集液氨喷雾图像，并选取喷雾现象出现的第一帧作为喷雾图像的起点。图 2-1 与图 2-2 为在环境压力 4MPa，环境温度 500K，喷射压力 60MPa 下的喷雾图像。

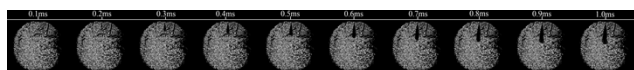


图 2-1 液氨喷雾发展图像 (0.1ms-1.0ms)

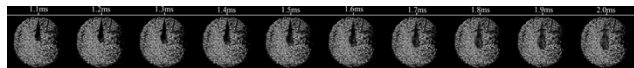


图 2-2 液氨喷雾发展图像 (1.1ms-2.0ms)

由图 2-1 与图 2-2 可知，液氨的汽化速度较快且在该喷射压力下，喷射油束随着时间的推移明显增大，液相区内的液氨形态较稳定，液相区的长度和位置在喷雾的后期变化并不大

从整体的喷雾发展来看，液氨喷雾在前期的发展快于后期的发展，主要原因可能是前期喷雾油束刚从喷孔内喷出，喷孔内外的较大压力差为燃油

束以及破碎液滴提供较大的动能，从而使得前期喷雾油束得到了快速发展。

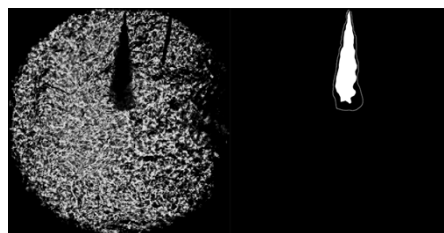


图 2-3 二值化图像处理前后对比图

为了能更好地观察到液氨喷雾气液相区的分别，对纹影图像进行二值化处理，示例如图 2-3 所示。

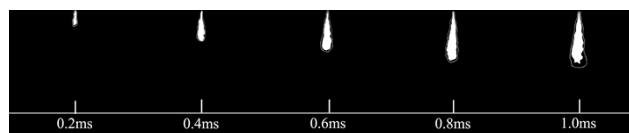


图 2-4 喷雾二值化图像 (0.2ms-1.0ms)

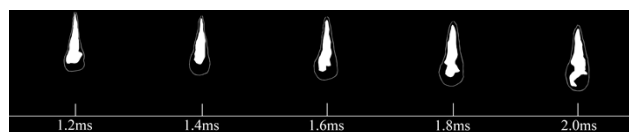


图 2-5 喷雾二值化图像 (1.2ms-2.0ms)

从图 2-4 与图 2-5 可以观察到在喷射压力 60MPa，环境压力 4MPa 以及环境温度 500K 的工况下，2ms 内液氨喷雾发展过程中气液相区域的变化。从整体上看，该工况下液氨的冷态喷雾油束前期的发展较快，后期的发展与前期相比逐渐减缓。

在 1.0ms 之前，观察到喷雾的气液相区域没有明显分离，两者的区域面积相近，气相区域紧紧包裹液相区域，原因可能是喷雾前期，尤其是在喷油脉宽 1.0ms 之前，仍然有液氨燃料从喷孔内喷出，使得在液滴汽化时存在喷孔内新喷出的液氨燃料的补充，最终导致气液相区域的分离不显著。

在 1.0ms 之后，燃料喷射完毕不再从喷孔内喷射出新燃料，因此随着燃料液滴的汽化不断，后期气液相区域便出现了明显分离，且分离明显的位置位于喷雾油束的头部以及头部四周，因为喷雾油束的头部最早与环境气体接触，接触时间最长。

在 1.0ms 之后，液氨喷雾出现的另一个较为明显的现象是液氨喷雾的液相区域前端均出现了不同程度的头部凸起。对于这种喷雾体头部的随机凸起部

分面积大，存在时间长，形状不规则的现象，主要原因是环境气体粘度和燃料的蒸发特性会影响喷雾的气相区域，同时在喷油过程中，油束会受到高温环境的影响而迅速蒸发，初始动能和惯性对喷雾气相影响不大^[7]。因此，在后期喷雾发展的过程中，喷雾头部的形状变化较多。

2.2 喷雾贯穿距

在本次容弹内液氨喷雾实验中，对实验时液氨冷态喷雾的气液相贯穿距进行了数据采集，绘制了该工况下气液相的贯穿距随时间推移的发展的折线图，如图 2-6 所示。

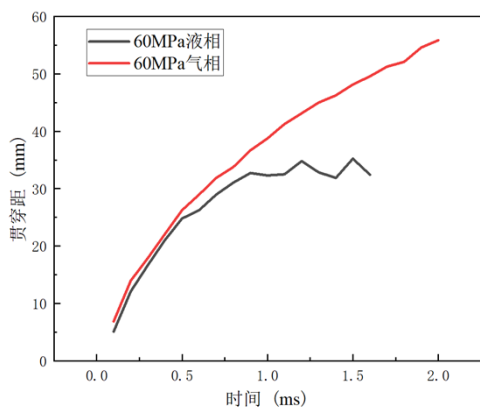


图 2-6 液氨喷雾气液相贯穿距发展图

图 2-6 为环境背压为 4MPa，环境温度为 500K 时，液氨在喷射压力 60MPa 下的气液相喷雾贯穿距随时间的变化图。由于喷油脉宽为 1.0ms，可以从图中观察到自喷雾开始到 1.0ms，由于喷孔内外的压差较大造成气液相贯穿距均增大。1.0ms 后，气液相贯穿距的增长速度减慢，主要是由于后期环境气体对喷雾的阻碍作用增强。此外，喷油结束后液相贯穿距呈现微小波动的趋势，而气相贯穿距则继续增大，可能原因是由于环境温度较高，而液氨因其沸点低和活泼特性继续气化而造成气相贯穿距的增长。

从整体角度来讲，液氨的气液相贯穿距先随着油束的喷出一同增大，在喷油脉宽 1.0ms 后，气液相区分离明显造成气液相贯穿距的显著分离，主要原因是随着燃料液滴的气化，液体颗粒与气体颗粒逐渐分离，且气体颗粒的增加也伴随着液体颗粒的减

少，因此气液相区出现了分离现象。

2.3 喷雾面积

实验采集了氨的喷雾面积数据，对气液相区域面积进行了比对，绘制了氨的气液相喷雾面积发展图，如图 2-7 所示。

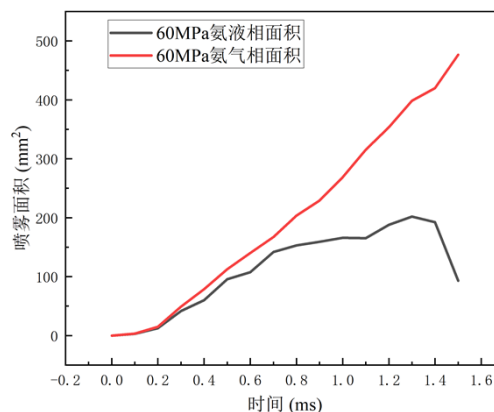


图 2-7 氨液相喷雾面积发展图

由图 2-7 可知，从整体上看，随着时间的推移，气液相喷雾出现了明显的分离，气相喷雾面积不断增加而液相喷雾面积在约 1.4ms 之后迅速减小，在 1.0ms 左右，能够观察到气液相喷雾的面积差距明显增大。

分段来看，从喷油开始到 1.0ms 喷油脉宽结束，氨燃料喷雾的气液相面积均上升，且面积几乎相同，主要原因是喷雾初始阶段，燃料从喷孔内喷出，受喷孔内外压力差影响以及环境压力远小于喷射压力，使得喷雾油束的发展迅速，扩散较快，喷雾面积逐渐增大；同时，由于喷雾发展早期，气液相的发展还未拉开差距，燃料的汽化程度也不高，使得气液相的面积近似。自 1.0ms 后，可以观察到氨的气液相喷雾面积差距增大，气相面积继续增大，且从曲线的斜率上可以发现气相面积的增长速度并未减小，而反观液相，氨的液相喷雾面积增长速度迅速减缓，面积增长程度大大减小，当发展到 1.4ms 之后，液相面积已经急剧减小。

3 仿真结果讨论

3.1 仿真模型标定

本课题利用液氨在喷射压力 60MPa，环境背压 4MPa 以及环境温度 500K 下的喷射获取特性参数，并标定 CONVERGE 定容弹液氨喷雾模型。在标定完喷雾模型后，将仿真计算得到的喷雾贯穿距、喷雾发展图像等与实验喷雾结果对比，从而验证模型是否正确，能否利用该模型进行更进一步的仿真模拟。此外，在进行模型的标定时，还需进行计算基础网格的无关性验证，经过验证可以利用网格大小 2mm 与 3mm 进行计算，经过试验，使用 3mm 基础网格大小可以较好地兼顾计算周期与计算精确度。

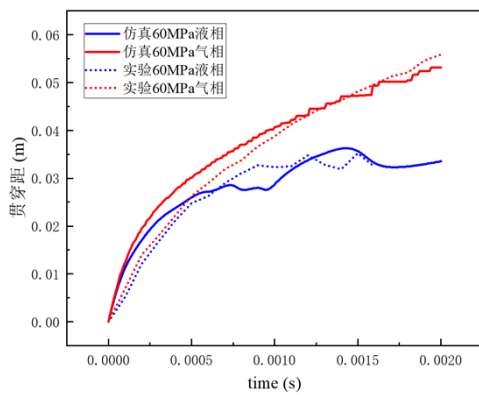


图 3-1 喷射压力 60MPa，环境背压 4MPa，容弹温度 500K 时，实验与仿真的气液相贯穿距对比图

如图 3-1，将实验与仿真的喷雾贯穿距的数据做成折线图对比后，可以确定仿真喷雾的气液相贯穿距发展趋势与实验时的定容弹内喷雾发展趋势一致。

由于贯穿距能够较好地反映喷雾的发展速度与趋势，因此综合实验与仿真的喷雾贯穿距发展对比，可以确定仿真模型的标定是较为准确的，可以利用该模型研究多工况下氨的闪沸喷雾特性。

3.2 闪沸喷雾仿真

表 3-1 闪沸喷雾仿真工况

参数	数值							
喷射压力/MPa	30	60	30	60	30	60	30	60
环境温度/K	600							
环境压力/MPa	0.4		0.6		0.8		1.0	
燃料温度/K	320							
喷孔直径/mm	0.14							

喷油脉宽/ms 1.0

表 3-2 喷雾状态划分

过热度范围	喷雾名称
$R_p < 0.3$	剧烈闪沸喷雾
$0.3 < R_p < 1$	过渡闪沸喷雾
$R_p > 1$	冷态喷雾

表 3-1 说明了闪沸条件下所要模拟的液氨喷雾的工况。闪沸工况下本课题主要探究了喷射压力 (30MPa、60MPa) 和环境背压 (0.4 MPa、0.6 MPa、0.8 MPa、1.0 MPa) 对于氨的闪沸喷雾的影响。由于环境温度对于闪沸喷雾的影响程度小于喷射压力与环境背压且效果不显著，因此本课题不将环境温度作为变量进行模拟。所有仿真工况的环境温度为 600K，喷油脉宽设置为 1.0ms，喷孔直径为 0.14mm 与实验室容弹喷孔条件保持一致。

由过热度的定义 (环境压力 P_∞ 与此液体温度下的饱和蒸汽压力 P_{sat} 之比)、320K 温度下的液氨饱和蒸汽压力约为 1.8MPa 以及表 3-2，可以判断当环境压力为 0.4MPa、0.6MPa 时，液氨的过热度 $R_p < 0.3$ ，液氨喷雾均处于剧烈闪沸状态；当环境压力为 0.8 MPa、1.0 MPa 时，液氨的过热度 $0.3 < R_p < 1$ ，液氨喷雾处于过渡闪沸状态。本章将从喷射压力、环境压力探究其对液氨闪沸喷雾的发展会产生怎样的影响。

3.3 不同喷射压力下的闪沸喷雾特性

为表明喷射压力对闪沸喷雾特性的影响，本节选取了环境温度为 600K，环境压力即背压为 0.6MPa 时的工况，变量仅为 30MPa 与 60MPa 的喷射压力。利用 Tecplot 将仿真得到的喷雾结果制作了相应的时间切片以显示液氨喷雾随时间的演变，绘制了闪沸喷雾的气液相贯穿距随时间的变化对比图。

如 **Error! Reference source not found.**所示，展示了两种喷射压力下闪沸喷雾随时间的变化发展，以 0.4ms 为步进时间节点。

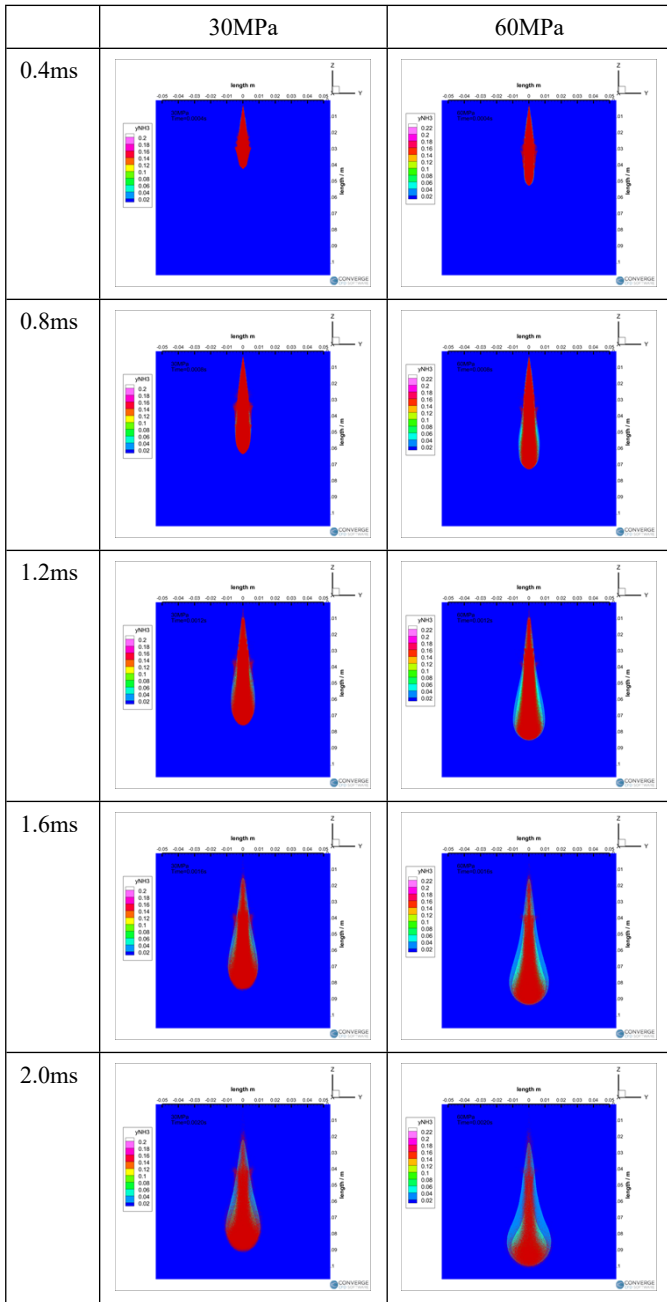


图 3-2 不同喷射压力下喷雾发展对比

由图 3-2 可知，液氨闪沸喷雾的形态与冷态喷雾差别较大，闪沸喷雾初期呈现出一个大致菱形形状，喷雾的前端与后端较窄而中部较宽，同时随着时间的推移，闪沸喷雾的形状逐渐发展为铁锚状，喷雾的两侧发生了涡旋^[8]的现象。产生涡旋的主要原因是因为闪沸条件下加强了燃料液滴的蒸发汽化与破碎，导致液氨喷雾与容弹内部环境气体氮气之间

的相互影响增强。

将图 3-2 进行横向比较发现，闪沸喷雾的发展随着喷射压力的提高而加快，液滴加速破碎，汽化程度提升。压力提高导致喷孔内外压力差的增大，使得喷雾的铁锚形状更加明显，同时喷射压力越高，喷雾两侧液滴雾化破碎效果增强。从喷雾的氨质量分数云图能够确定喷射压力的提高加速了燃料的汽化且喷雾油束中后段的液滴蒸发汽化较为强烈。

下图 3-3 为两种喷射压力下，闪沸喷雾的贯穿距随时间发展的对比图。

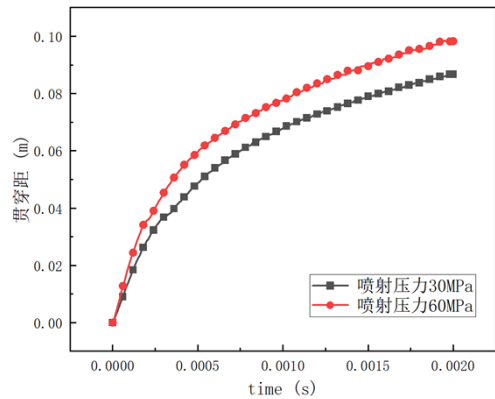


图 3-3 不同喷射压力下喷雾贯穿距对比

由图 3-3 可知，不同的喷射压力会对闪沸喷雾的贯穿距产生一定的影响。首先，可以看出喷射压力对于闪沸喷雾的影响是简单明了的，即喷射压力的提高会使得液氨闪沸喷雾的贯穿距也得到相应的增长。喷射压力由 30MPa 提高到 60MPa 使得燃料液滴从喷孔内喷出时能够获得更多的动能，能够运动推进的距离也就变得越远，同时喷射压力的提高加强了燃料液滴与环境气体的作用，两者的相互作用使得液滴的破碎与蒸发加快，从而导致了更大的闪沸喷雾贯穿距。另一个会造成这种现象的因素则有可能是容弹内较高的环境温度，此工况下的环境温度为 600K，较高的温度也会加快燃料液滴的汽化速度，使得液滴转变为气体分子的过程得到加速。

3.4 不同环境压力下的闪沸喷雾特性

为表明环境压力（背压）对闪沸喷雾特性的影响，本节选取了喷射压力为 30MPa，环境温度为 600K 时的工况，变量为 0.4MPa、0.6MPa、0.8MPa、1.0MPa

的环境压力（当环境压力为 0.2MPa 时，喷雾仿真结果会显示液氨的闪沸喷雾因发展过快与容弹底部接触从而无法作为正常的仿真结果进行分析，最终并未选用环境压力 0.2MPa 时的喷雾图像）。将仿真得到的喷雾结果制作了时间切片以显示液氨喷雾随时间的演变过程，绘制了闪沸喷雾的贯穿距随时间的变化对比图。与环境温度和喷射压力相比，环境背压对液氨闪沸喷雾的影响程度是最大的，它改变的是喷射过程中喷孔内外的压力之差。

下图 3-4 为三种环境压力下液氨闪沸喷雾的发展对比，同样以 0.4ms 为步进时间。

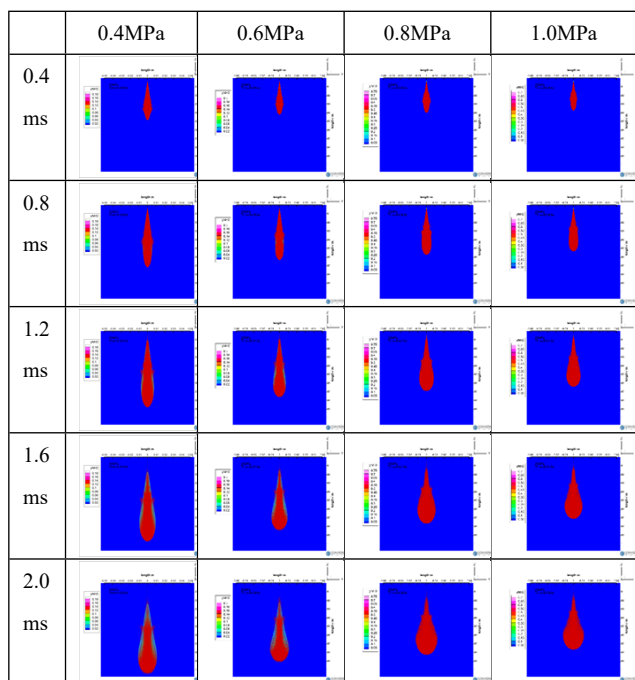


图 3-4 不同环境压力下喷雾发展对比

由图 3-4 可知，环境背压对于闪沸喷雾形态和发展的影响程度大于环境温度和喷射压力。此外，环境背压选取范围的不同还会导致出现不同程度与形态的闪沸喷雾，即剧烈闪沸喷雾（环境背压为 0.4MPa 与 0.6MPa 时， $R_p < 0.3$ ）和过渡闪沸喷雾（环境背压为 0.8MPa 与 1.0MPa 时， $0.3 < R_p < 1.0$ ）。

当环境背压为 0.4MPa 时，从横向的比较可以看出液氨闪沸喷雾的发展速度最快，同时随着喷雾的发展，可以辨别出闪沸喷雾从最初的菱形状逐渐转变为铁锚状外形，且从图中可以看出；对于环境背

压为 0.6MPa 时，闪沸喷雾的仿真图像被完全捕捉，可以较为清楚地观察到液氨燃料在容弹内部闪沸状态下喷雾发展的全过程，到后期闪沸喷雾的两侧汽化较为明显使得喷雾形状呈现出铁锚状。随着环境压力的提高，闪沸喷雾的喷射速度受环境背压的影响与环境气体的阻碍作用而减缓；当环境背压为 0.8MPa 时，闪沸喷雾出现了与前两种环境压力下闪沸喷雾的明显不同的形态，闪沸喷雾的发展速度由于环境背压的增大而得到了阻碍与减缓，而且喷雾后期的汽化速度也减慢，气相区域减小，喷雾的前端头部面积十分肥大较为圆润；当环境背压为 1.0MPa 时，闪沸喷雾呈现的形态与 0.8MPa 时较为接近。将四种工况下的喷雾形态放在整体上看，可发现随着环境压力的提升，闪沸喷雾的发展逐渐减慢且汽化速度也得到了一定程度上的抑制。最为明显的，就是剧烈闪沸状态下的喷雾与过渡闪沸状态下的喷雾在后期存在较大的差别，汽化程度不同，喷雾头部的面积也不同。

因此，了解环境压力对于闪沸喷雾发展的影响规律之后，对于要在实验室内利用定容燃烧弹系统进行实际的喷雾实验时，均需要选取合适的环境压力即背压。因此环境背压对于液氨闪沸喷雾的影响较大，值得更深入的探究。

下图 3-5 为三种环境压力下，闪沸喷雾贯穿距随时间发展的对比图。

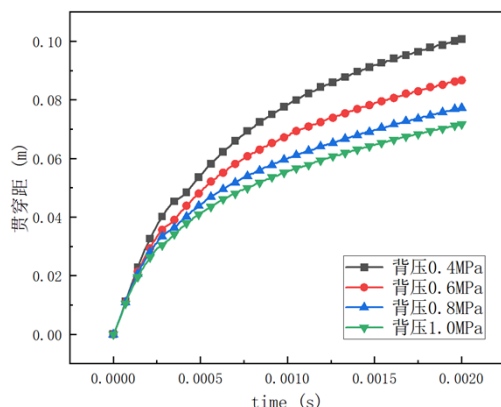


图 3-5 不同环境压力下闪沸喷雾贯穿距对比

由图 3-5 可知，环境压力的变化对于闪沸喷雾的贯穿距影响较为明显。可以看出闪沸喷雾的贯穿距的差距在不同的背景压力下所呈现出的相互之间

的差距是最大的。同时，随着环境压力即背压的提高，闪沸喷雾贯穿距的减小程度也在逐渐降低，主要是因为环境背压的减小带来的是内外压差的差距不断缩小，因此贯穿距的接近程度在逐渐增大。

当喷射压力不变时，环境背压越小，喷孔内外的压力差越大，造成喷雾的贯穿距也相应地增大，因此燃料的破碎与蒸发程度加强，环境气体的阻碍作用减弱，液滴能获得更大的动能；而当环境背压增大时，压力差减小，环境气体对破碎液滴的阻碍作用增强，因此最终能看到 1.0MPa 的环境背压下闪沸喷雾的贯穿距最小，0.4MPa 的环境背压下闪沸喷雾的贯穿距最大。

4 总结

本文研究了液氨在闪沸条件下的喷雾特性。从实验与仿真结果中主要获得了以下结论：

(1) 实验探究了液氨的冷态喷雾随时间的发展规律，气液相贯穿距以及喷雾面积的变化规律。在较高的喷射压力下，液氨的冷态喷雾发展较快，且在喷油脉宽结束后会出现明显的气液相区分离。

(2) 闪沸条件仿真中，探究了喷射压力对于液氨闪沸喷雾发展、贯穿距等特性参数的影响规律。首先，随着喷射压力的提升，由于获得了更大的动能，闪沸喷雾的发展加快，液滴破碎增强。此外，闪沸喷雾随着发展呈现出铁锚状。

(3) 闪沸条件仿真中，探究了环境背压对液氨闪沸喷雾的影响。环境背压对于闪沸喷雾的影响较大，随着环境背压的提高，由于喷孔内外压力差的减小以及环境气体的阻碍，闪沸喷雾的发展减缓，贯穿距也相应缩小。此外，剧烈闪沸喷雾与过渡闪沸喷雾的后期喷雾发展差别较大，剧烈闪沸状态的燃料液滴汽化程度更高，而过渡状态下的液滴汽化程度相对较低。

参考文献：

[1] 舟丹. 氨燃料的未来机遇 [J]. 中外能源, 2022,

27(09): 82.

- [2] XU M, ZHANG Y, ZENG W, et al. Flash Boiling: Easy and Better Way to Generate Ideal Sprays than the High Injection Pressure [J]. SAE International Journal of Fuels and Lubricants, 2013, 6(1): 137-48.
- [3] 解方喜, 赵士杰, 王梓森等. 多孔喷油器闪急沸腾喷雾坍塌影响因素的仿真分析 [J]. 吉林大学学报(工学版): 1-10.
- [4] 袁志远, 崔明利, 李雪松等. 缸内直喷发动机燃油喷射压力对闪沸喷雾特性的影响研究 [J]. 车用发动机, 2020, (05): 11-4.
- [5] 杜家坤, 陈泓, 李钰怀等. 汽油机直喷喷油器闪沸喷雾形态研究 [J]. 内燃机与动力装置, 2019, 36(02): 7-13.
- [6] 郭恒杰. 直喷汽油机闪沸条件下多孔喷雾坍塌的实验与模拟研究 [D]; 清华大学, 2018.
- [7] 赵鹏云, 陈占明, 王涛等. 二甲醚和柴油高压喷射喷雾与燃烧可视化对比研究 [J]. 西安交通大学学报: 1-7.
- [8] FANG Y, MA X, ZHANG Y, et al. Experimental Investigation of High-Pressure Liquid Ammonia Injection under Non-Flash Boiling and Flash Boiling Conditions [J]. Energies, 2023, 16(6).