（2黑）喷孔锥度和燃油温度对柴油喷嘴

内空化流动特性的影响

（5宋）xxx1，xxx1, 2，xx2, 3，xx1, 2，xxx1

（小5宋）(1. 江苏大学能源研究院，212013，江苏镇江；2. 江苏大学能源与动力工程学院，212013，江苏镇江；

3. 山东中科先进技术研究院，250000，济南)

**摘要（5黑）**：为弄清喷孔锥度和燃油温度对柴油喷嘴内空化流动特性的影响，阐明喷嘴内气液两相空化流动初生机制。本文采用背景光高速显微成像技术获得不同锥度系数及燃油温度下简化竖直单孔柴油喷嘴内空化流动及近场喷雾光学图像。结果表明：随着喷射压力增大（0.2 MPa至1.0 MPa），柴油喷嘴内燃油逐步从单相流动发展为片空化、线空化、空气倒吸和超空化等多种气液两相空化流态；云空化、线空化和空气倒吸现象的初生强烈依赖于燃油喷射压力，且具有显著的瞬态不稳定性。与圆柱形喷孔相比，渐缩锥度喷孔对各类空化流态具有明显的抑制作用，且锥度系数越大，抑制作用越显著。同时，提高燃油温度（288 K、303 K和323 K）有利于各类空化流态的初生及发展。此外，喷孔内部空化两相流动加剧了燃油射流的不稳定性，促进了射流破碎雾化，有利于增大喷雾锥角。研究为揭示各空化流态特性及其对喷雾特性的影响规律奠定了理论基础。（5楷）

**关键词（5黑）**：空化；柴油喷嘴；喷孔锥度；燃油温度；流态；可视化试验（5楷）

**中图分类号（5黑）：自行查找填写（中国图书馆分类法 http://www.ztflh.com/） 文献标志码：A**

DOI: 10.7652/xjtuxb202208000 文章编号：0253-98X(2022)08-0000-00

**（4黑）Effects of the Taper Coefficient of Holes and Diesel Temperature**

**on In-Nozzle Cavitating Flows**

（5白）xxx1，xxx1, 2，xx2, 3，xx1, 2，xxx1

（6白）(1. Institute of energy research, Jiangsu University, Zhenjiang，Jiangsu 212013, China;

2. School of energy and power engineering, Jiangsu University, Zhenjiang，Jiangsu 212013, China;

3.Shandong Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Jinan 250000, China)

**Abstract（5黑）:** This study focuses on effects of the taper coefficient of holes and diesel temperature on patterns of in-nozzle flow regimes, and thus reveals the inception mechanism of cavitating flow. A self-circulating optical system for the internal flow and spray patterns was set up with a high-speed camera and a macro lens for the simplified vertical plain nozzles. Results show that the in-nozzle diesel flow will change from the single-phase flow to gas-liquid two-phase cavitating flow including the shear cavitation, cloud cavitation, string cavitation, air suction and super cavitation with the increase of injection pressure (from 0.2 MPa to 1.0 MPa). As well as the cloud cavitation, string cavitation and air suction are strongly depended on the diesel injection pressure and have significant transient instability. Meanwhile, the tapered nozzle orifices strongly suppressed the inception and development of the various cavitation regimes, and the suppression will be more significant if the hole has larger taper coefficient. Additionally, the higher diesel temperature (288, 303 and 323 K) is beneficial to the inception and development of the cavitation regimes. Moreover, the inner cavitating flow increases the turbulence and spray cone angle, and eventually enhances the diesel liquid jet atomization. The study provides a theoretical foundation for revealing the characteristics of cavitation flow patterns and their influence on spray characteristics. （5白）

**Key words（5黑）:** cavitation; diesel nozzle; hole conicity; flow regimes; optical experiment（5白）

由于日益严格的排放法规和能源危机，近年来均质压燃（HCCI）、低温燃烧（LTC）、反应控制压燃（RCCI）和部分预混压缩点火（PCCI）等多种新型燃烧模式应运而生[[1-4](#_ENREF_1)]。这些新型燃烧模式的发展雾化，进而影响内燃机燃烧及排放性能，因此引起了国内外学者的广泛关注[[5-7](#_ENREF_5)]。

本文旨在通过探讨不同锥度喷孔和不同燃油温度下简化喷嘴内部燃油流动特征，获得对不同空化流态演变规律的直观认识，揭示喷嘴内燃油流动特性，从而为柴油机喷嘴结构设计及为数值模拟研究燃油温度效应对喷嘴内空化流动及喷雾影响提供数据和理论支撑。

1试验方法及研究方案（4宋）

1.1 可视化试验台的搭建（5黑）

图1给出了自循环喷嘴内流及喷雾可视化试验台工作原理，该试验装置主要包括燃油供给、光学喷嘴、油温控制及图像采集等4个系统，可实现喷嘴内部流动和近喷孔射流破碎形态同步可视化。



图1 简化喷嘴内部空化流动及喷雾（小5宋）

Fig. 1 Schematic of visual system （小5白）

试验中，根据所需喷油压力和燃油温度调节压力控制阀和加热装置，油箱内燃油经滤清系统和燃油泵流入待测喷嘴，最后经喷孔射出的燃油被收集回收又流回油箱实现试验台燃油自循环。其中，光学喷嘴由亚克力材料加工而成，具有良好的光学性质；待测喷嘴上游油路装有压力传感器、流量计和温度传感器，用于实时监测燃油的喷射工况和温度。油箱中安装有加热装置，可实现燃油温度的调节和控制，温度额定调节范围为15~70℃，精度±0.1℃。

1.2 试验喷嘴结构（5黑）

试验喷嘴加工有竖直喷孔，如图2所示。其中，喷孔上端加工有一大直径圆柱槽，用以模拟柴油机喷油器内燃油进入喷孔时流道方向的变化；圆柱槽直径*DU*和高度*LU*分别为20和15 mm。试验中喷孔出口直接连接大气环境，保证喷孔下游空间足以削弱出口边界对柴油流动特性的影响。喷嘴几何的外表面均为加工面，光滑的表面有利于对光路的控制。

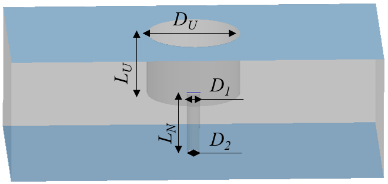


图2 简化喷嘴的几何结构

Fig. 2 The geometry of the simplified tested nozzle

喷孔的入口直径*D1*为2 mm、喷孔长度*LN*为10 mm，喷孔长径比为5。通过改变喷孔出口直径*D*2来调节喷孔的锥度系数（*kf*）。根据喷孔锥度系数*kf*的定义为

(1)

当喷孔的出口直径分别为1.9和1.8 mm时，喷孔的*kf*分别为1和2，呈渐缩圆锥形；而当喷孔出口直径为2 mm时，*kf*为0，即喷孔呈圆柱形。

1.3 试验方案（5黑）

本文分别研究了喷孔锥度系数和燃油温度对喷嘴内柴油流动特性的影响，具体试验方案见表1。其中，采用方案1、2和3分析不同锥度系数（0、1和2）喷孔内空化流动形态，揭示喷孔结构对喷嘴内部各种空化流态特性的影响规律；基于方案3、4和5。

表1 可视化试验方案（5楷）

Table 1 Schemes of the optical experiments（小5白）

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 方案 | *D1*  /mm | *D2*  /mm | *L* | *kf* | *T*  */K* |
| 1 | 2.0 | 2.0 | 5 | 0 | 288 |
| 2 | 2.0 | 1.9 | 5 | 1 | 288 |
| 3 | 2.0 | 1.8 | 5 | 2 | 288 |
| 4 | 2.0 | 1.8 | 5 | 2 | 303 |
| 5 | 2.0 | 1.8 | 5 | 2 | 323 |

2 结果与讨论(4宋)

2.1 内部空化流动瞬态演变特性的影响（5黑）

图3给出了1、2和3号喷孔内燃油流动及对应喷雾形态随喷油压力增大的演变过程图像。由图像可知，随着喷油压力增大，喷孔内先后出现单相流、初生空化、云空化、超空化和空气倒吸等多种空化流态。同时，空化为一种准稳态流动，即使喷油压力工况稳定，空化流动仍然具有强烈的瞬态特性。这里图3给出的图片序列代表了该工况下出现频率最高的空化流态，也被称为典型的流态。文中，空化数*K*的定义如下

** (2)

式中：*P*1表示喷油压力；*P*2表示喷射背压；*P*sat表示燃油饱和蒸汽压。

下游喷雾的破碎与雾化过程具有促进作用[[26](#_ENREF_26)]，空化流动增强了喷孔出口附近燃油流动湍动能，加剧了射流不稳定性，有利于射流破碎与液滴雾化。所以随着喷孔锥度的增大，喷雾质量逐步变差。

2.2 不同锥度喷孔内超空化流态特性（5黑）

图6给出了3个不同渐缩锥度喷孔内超空化流态的形成特性。超空化流态下，喷孔内空化充分发展，空化区域沿孔壁延伸直喷孔出口。图6中的黑色、红色和蓝色曲线分别表示了锥度分别为0、1和2的1、2和3号喷孔，实线表示该工况下喷孔内超空化流态的持续时间*fs*占统计图像总时间*ft*的比重*f*，虚线表示此工况下超空化流态出现频率的相对增长率*f*′，相关参数定义如下

 (3)

 (4)

式中：和分别为*P*1和*P*2的喷射压力下喷孔内超空化流态的持续时间。

根据图6横坐标和曲线位置知，表征3号喷孔的蓝色线条位于最右侧的高喷油压力区，而表征1续增大喷孔的锥度，则孔内超空化流态的临界喷射压力会增加得更快，这意味着锥度较大的喷孔内难以形成超空化现象。



图4 不同锥度喷孔内空化流态对应空化数（小5宋）

Fig. 4 The cavitation number of various （小5白）



（a）渐缩锥形喷孔内部燃油流动速度分布特征



（b）圆柱形喷孔内部燃油流动速度分布特征

图5 渐缩锥形和圆柱形喷孔内的燃油速度分布（小5宋）

Fig. 5 Schematic diagram of fuel velocity （小5白）

2.3 不同锥度喷孔内的空气倒吸现象特性（5黑）

与超空化流态相似，空气倒吸现象也具有瞬态性。本文所述空气倒吸现象指空化初生后随着喷射压力增大，喷孔出口附近空气在逆压效应下倒流入。

图6 喷孔内超空化现象出现的概率及概率变化（小5宋）

Fig. 6 Proportions and relative growth rate（小5白）

3 结 论(4宋)

(1)随着喷油压力增加，喷孔内部流动将从单相流先后转捩为空化初生、云空化、线空化、空气倒吸和超空化等流态；且升高燃油温度和减小喷孔锥度更易于空化初生、流态转捩和射流破碎雾化。

(2)喷孔内部的空化流动具有显著的瞬态不稳定性，且云空化脱落呈准周期性，云空化脱落、溃灭产生的高频微射流和冲击波周期性作用于孔壁，是导致喷孔空蚀的主要原因。

(3)空化现象是影响射流雾化最为关键的机制之一。空化发展及溃灭过程加剧了燃油射流的不稳定性，有益于喷雾锥角增加，优化雾化的质量。

参考文献：(5黑) 要求至少25条，中英文文献都有

[1] DUAN X, LAI M-C, JANSONS M, et al. A review of controlling strategies of the ignition timing and combustion phase in homogeneous charge compression ignition (HCCI) engine [J]. Fuel, 2021, 285: 119142.

[2] KRISHNAMOORTHI M, MALAYALAMURTHI R, HE Z, et al. A review on low temperature combustion engines: Performance, combustion and emission characteristics [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2019, 116: 109404.

[3] 赵玉伟,汪映,雷雄,孟庆斌,刘圣华.预混均质充量压缩燃烧发动机燃烧与排放特性[J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(07): 23-28.

ZHAO Y, WANG Y, LEI X, et al. Combustion and emission characterisrics of premixed charge compression ignition engine [J]. Journal of Xi’an Jiaotong Univerisity, 2014, 48(07): 23-28.

[4] 陈伟泽,张尊华,龙焱祥,邵超凡,李格升.燃烧室结构与喷油策略对天然气-柴油反应活性控制压燃发动机的影响研究[J]. 内燃机工程, 2022, 43(01): 39-47.

CHEN W, ZHANG Z, LONG Y, et al. Effects of Piston Bowl Geometry and Injection Strategy on Natural Gas-Diesel Reactivity Controlled Compression Ignition Engine [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2022, 43(01): 39-47.

[5] BALZ R, VON ROTZ B, SEDARSKY D. In-nozzle flow and spray characteristics of large two-stroke marine diesel fuel injectors [J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 180: 115809.

[6] 麻斌,高莹,刘宇,刘洪岐,陈伟,徐英健.相间滑移对喷油器喷孔内空化现象数值模拟研究的影响[J]. 西安交通大学学报, 2017, 51(01): 59-64+78.

MA B, GAO Y, LIU H, et al. Effects of slip velocity on the modeling of cavitation phenomenon in injector nozzle [J]. Journal of Xi’an Jiaotong Univerisity, 2017,51(01):59-64+78.

[7] BAO H, MAES N, AKARGUN H Y, et al. Large Eddy Simulation of cavitation effects on reacting spray flames using FGM and a new dispersion model with multiple realizations [J]. Combustion and Flame, 2022, 236: 111764.

[8] 郑直,赵鹏坤,闵为,冀宏.液压阀口空气型空化周期特性的实验研究[J]. 西安交通大学学报, 2019, 53(10): 72-78+150.

ZHENG Z, ZHAO P, MIN W, et al. An experimental investigation on periodic characteristics of gaseous cavitating flow in hydraulic valve orifices [J]. Journal of Xi’an Jiaotong Univerisity, 2019,53(10):72-78+150.

[9] GUO G, HE Z, WANG Q, et al. Numerical investigation of transient hole-to-hole variation in cavitation regimes inside a multi-hole diesel nozzle [J]. Fuel, 2021, 287: 119457.

[10] GUO G, HE Z, JIN Y, et al. Visualization Investigations of Flow Regimes in Different Sizes of Diesel Injector Nozzles and Their Effects on Spray [J]. Atomization and Sprays, 2018, 28(6): 547-563.

[11] PAYRI R, SALVADOR F, GIMENO J, et al. Study of cavitation phenomenon using different fuels in a transparent nozzle by hydraulic characterization and visualization [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2013, 44: 235-244.

[12] 韩桂华,洪健,侯进军,李大尉,赵孟石,裴禹,姚立明.孔板通道结构参数对空化效应的影响[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2022, 27(01): 108-114.

HAN G, HONG J, HOU J, et al. Influence of orifice channel structure parameters on cavitation effect [J]. Journal Of Harbin University Of Science And Technology, 2022, 27(01): 108-114.

[13] CUI J, LAI H, FENG K, et al. Quantitative analysis of the minor deviations in nozzle internal geometry effect on the cavitating flow [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2018, 94: 89-98.

[14] MOON S, HUANG W, WANG J. Spray formation mechanism of diverging-tapered-hole GDI injector and its potentials for GDI engine applications [J]. Fuel, 2020, 270: 117519.

[15] LEŠNIK L, KEGL B, BOMBEK G, et al. The influence of in-nozzle cavitation on flow characteristics and spray break-up [J]. Fuel, 2018, 222: 550-560.

[16] CHEN Z, HE Z, SHANG W, et al. Experimental study on the effect of nozzle geometry on string cavitation in real-size optical diesel nozzles and spray characteristics [J]. Fuel, 2018, 232: 562-571.

[17] CAI T, LIU B, MA F, et al. Influence of nozzle lip geometry on the Strouhal number of self-excited waterjet [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2020, 112: 109978.

[18] 高永强, 魏明锐, 颜伏伍, 等. 喷孔几何特征对孔内流动及近孔区域燃油雾化的影响[J]. 农业机械学报, 2016, 47(12): 347-353.

GAO Y, WEI M, YAN F, WEN H. Influence of nozzle geometry on internal flow characteristics of injection nozzle and near nozzle region injection and atomization [J]. Journal of Agricultural Machinery. 2016; 47:347-353.

[19] HOSBACH M, GITAU S, SANDER T, et al. Effect of taper, pressure and temperature on cavitation extent and dynamics in micro-channels [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2019, 108: 25-38.

[20] DAI X, WANG Z, LIU F, et al. The effect of nozzle structure and initial state on the primary breakup of diesel spray [J]. Fuel, 2020, 280: 118640.

[21] RANE Y S, MARSTON J O. Computational study of fluid flow in tapered orifices for needle-free injectors [J]. Journal of controlled release: official journal of the Controlled Release Society, 2020, 319: 382-396.

[22] 钟汶君, 何志霞, 王谦, 等. 不同燃油温度喷嘴内部流动可视化试验[J]. 内燃机学报, 2015, 33 (03): 238-242.

ZHONG W, HE Z, WANG Q, TAO X, SHAO Z. Visualization of Cavitating Flow in Diesel Nozzles at Different Fuel Temperatures [J]. Transactions of CSICE. 2015;33:238-242.

[23] ZHANG X, HE Z, WANG Q, et al. Effect of fuel temperature on cavitation flow inside vertical multi-hole nozzles and spray characteristics with different nozzle geometries [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2018, 91(Supplement C): 374-387.

[24] 高莹, 邓海鹏, 麻斌, 等. 喷孔长度和喷油体温度对乙醇柴油空化及近场喷雾的影响[J]. 工程热物理学报, 2020, 41(5): 1261-1269.

Gao Y, Deng H, Ma B, Liu H, Wang Y. Effects of orifice lengths and injector temperature on cavitating characteristics and near-field spraying based on ethanol-diesel [J]. Journal of Engineering Thermophysics. 2020;41:1261-1269.

[25] 王军, 金毅, 张幽彤. 高压共轨系统中的燃油温度变化及其影响[J]. 内燃机工程, 2018, 39 (03): 16-22.

WANG J, JIN Y, ZHANG Y. Fuel temperature change and its effect on high pressure common rail system [J]. Chinese internal combustion engine engineering. 2018, 39 (03): 6-22.

[26] SUN Y, GUAN Z, HOOMAN K. Cavitation in diesel fuel injector nozzles and its influence on atomization and spray [J]. Chemical Engineering & Technology, 2019, 42(1): 6-29.