

动边界条件下喷油器三维流场分析

张俊红^{1,2}, 彭荣翔¹, 张乐振¹, 马常海³, 刘晓杰⁴, 戴胡伟¹

(1. 天津大学先进内燃动力全国重点实验室, 天津 300072; 2. 天津仁爱学院机械与动力工程学院, 天津 301636;
3. 潍柴动力股份有限公司, 潍坊 261021; 4. 北油电控燃油喷射系统(天津)有限公司, 天津 301729)

摘要: 以某大流量喷油器为研究对象, 建立喷油器内部流道数学模型, 利用喷油器流动特性实验结果对模型进行了验证, 获得喷油器球阀与针阀的运动规律。以此为动边界, 进行喷油器内燃油流动状态三维瞬态数值模拟, 分析动边界条件下阀门及阀座处的空化效应以及阀门的位移对三维流场的影响。研究表明: 在喷油全过程中, 空化集中分布在阀门与阀座的密封环面处、喷孔入口处等流通截面变化大、压力突变快的区域; 随着阀门的运动, 阀门及阀座、喷孔等处的空化程度均在不断变化, 针阀下降时喷孔处空化明显强于针阀上升时, 且形成了超空化现象, 喷孔入口处空化面积最高达 58.9%, 是针阀完全开启时的 2.63 倍; 连接控制腔的节流孔处随着阀门的运动会出现 600 m/s 以上的高流速以及强烈的湍流, 在连接回油室与控制腔的导流孔处也会出现大面积的蒸汽体积分数略低于 5% 的两相变化区域, 造成孔内流速不稳定、局部压力波动, 影响喷射精度。

关键词: 喷油器; 空化现象; 针阀运动; 球阀运动; 动网格

中图分类号: TK421

文献标志码: A

文章编号: 0493-2137(2026)07-0699-12

Three-Dimensional Flow Field Analysis of Fuel Injector Under Dynamic Boundary Conditions

Zhang Junhong^{1,2}, Peng Rongxiang¹, Zhang Lezhen¹, Ma Changhai³, Liu Xiaojie⁴, Dai Huwei¹

(1. State Key Laboratory of Engines, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. School of Mechanical and Power Engineering, Tianjin Ren'ai College, Tianjin 301636, China;

3. Weichai Power Co., Ltd., Weifang 261021, China;

4. Beiyou Electronic Control Fuel Injection System (Tianjin) Co., Ltd., Tianjin 301729, China)

Abstract: A mathematical model of the internal flow passage of a high-flow injector was established. The model was verified using the experimental results of the flow characteristics of the injector, and the motion laws of the ball and needle valves of the injector were obtained. Taking this as the dynamic boundary, a three-dimensional (3D) transient numerical simulation of the fuel flow state inside the injector was performed to investigate the cavitation effect at the valve and valve seat under dynamic boundary conditions, as well as the influence of the valve displacement on the 3D flow field. The findings reveal that throughout the injection process, cavitation is concentrated in regions with large flow cross-sectional changes and rapid pressure fluctuations, such as the sealing ring surface between the valve and valve seat and the nozzle entrance. As the valve moves, the cavitation degrees at the valve and valve seat, nozzle, and other locations change constantly. When the needle valve descends, the cavitation at the nozzle is significantly stronger than that when it rises, inducing a supercavitation phenomenon. The cavitation area at the nozzle entrance increases to approximately 58.9%, which is 2.63 times the value when the needle valve is fully open. At the throttle hole connecting the control chamber, a high flow velocity of over 600 m/s and intense turbulence occur as the valve moves. At the diversion hole connecting the return oil and control chambers, a large area of a two-phase change

收稿日期: 2025-03-10; 修回日期: 2025-05-12.

作者简介: 张俊红 (1962—), 女, 博士, 教授.

通信作者: 张俊红, zhangjh@tju.edu.cn.

基金项目: 天津市科技领军企业重大创新项目 (23YDLOGX00080).

Supported by the Major Innovation Project of Leading Technology Enterprises of Tianjin, China (No. 23YDLOGX00080).

region with a steam volume fraction slightly lower than 5% also appears, causing unstable flow velocity and local pressure fluctuations in the hole, thereby affecting the injection accuracy.

Keywords: fuel injector; cavitation phenomenon; needle valve movement; ball valve movement; dynamic mesh

不断提高的热效率和日益严格的排放法规对发动机燃油喷射压力的要求越来越高^[1-3]。在燃油喷射过程中,喷油器内部燃油压力和流速急剧变化引发空化现象^[4-6],燃油流动紊乱,流量系数降低^[7]。同时,空泡溃灭造成空蚀会改变压力骤降或流道截面突变处的孔道流动特性和阀门启闭特性^[8],导致喷油特性出现偏差,进而影响整个发动机的循环稳定性^[9]。因此,对喷油器进行三维流场及空化现象的分析是喷油器设计中的重要环节。

研究表明,空化的演变过程会造成压力波动形成空蚀^[10-11],影响阀门响应时长与喷油量等,而空化的演变又受到针阀与球阀运动的影响。Desantes 等^[12]通过模拟发现针阀运动会显著影响喷嘴内空化的产生与发展。高永强等^[13]通过试验验证喷孔空化强度受针阀升程影响。刘振明等^[14]模拟研究了不同针阀升程下的喷嘴空化情况,发现针阀运动时针阀台阶夹角、阀座倒圆半径、喷孔锥度对空化的影响比较大。Prasetya 等^[15]通过对放大型三孔压力室喷油器进行高速成像发现针阀升程会影响压力室内的燃油流动状态,从而形成不同类型的空化,造成喷嘴内燃油流动变化,最终影响射流角的变化。赵文伯等^[16]模拟发现针阀横向振动对喷嘴各孔燃油流动、空化现象等会存在影响。夏少华等^[17]模拟发现球阀处会发生空蚀现象,并且与球阀位移有关。石磊等^[18]通过搭建可视化试验台,研究了不同球阀升程下控制阀区域空化两相流动的特性,得到了空化剧烈部位与空蚀点相对应的结果。Ma 等^[19]采用可视化试验和数值模拟的方法研究了不同球阀升程下控制阀的空化流动特性,并提出了一种收敛模型能够有效降低密封环附近的空化强度,同时指出空化强度会随着球阀升程的增大而增大,球阀升程范围应在流量的基础上设计得尽可能短。但由于试验中的进口压力较低,与实际情况仍有一定区别。刘景斌等^[20]发现燃油在经过球阀时发生的空化程度与位置变化受球阀升程的影响,并分析了不同轨压和不同工作脉宽对空化效应的影响。Ren 等^[21]模拟了球阀运动时流场的变化,探究了球阀及阀座空化机理、分析了空化分布规律。由此可见,对喷油器动边界条件下三维流场分析,研究喷油器内空化流动特性与空蚀现象^[22],是实现喷油量的精确控制的关键,能为结构设计提供重要参考。

现阶段,关于喷油器内部空化流动特性的研究普遍采用简化建模方法,即将球阀与针阀所在区域作为

独立系统进行分析^[23]。此类研究存在一定的局限性:其一,现有模型多聚焦于局部特征区域(如阀座、喷孔)的流动特性,而对压力室、控制腔、节流孔等腔室的流场动态响应缺乏系统性考量;其二,未充分考虑阀门运动与各腔室流场间的耦合作用,导致流动分析的动态完整性不足。这种割裂式研究方法难以真实反映喷油器内部的瞬态特征,致使流动特性分析精度受限,制约了喷油器性能优化设计。

本文同时考虑球阀与针阀的运动对三维流场的影响,构建了喷油器全域流动协同演化模型,通过动力学仿真计算得到某大流量喷油器阀门运动规律,基于动网格技术实现计算流体力学分析中的运动边界加载,对喷油器内部阀门运动时其内流场的变化进行了数值计算,揭示动边界条件下阀门及阀座处、喷孔等处的空化效应,获得控制腔与压力室等重要部位的流场演化规律,以及节流孔与喷孔出口质量等流量特性,从方法论层面推动了喷油器空化研究的革新,为揭示喷油器内部复杂流动的时空演化规律提供了新视角。本文系统阐明了阀门运动相位与多腔室流场参数的互馈机理,对新一代高性能喷油器的设计优化具有重要指导价值。

1 一维仿真计算

1.1 模型构建

本文研究对象为某电磁阀式喷油器,在 AMESim 液压流动仿真平台下构建其内部流动仿真模型如图 1 所示,部分关键参数如表 1 所示。

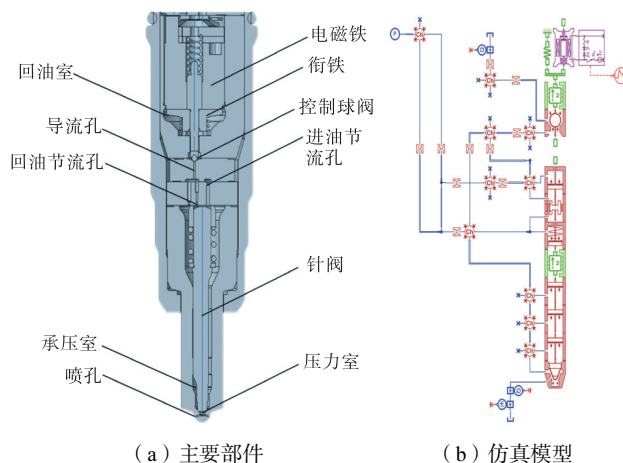


图 1 电磁阀式喷油器主要部件与内部流动仿真模型
Fig.1 Simulation model of the main components and internal flow of solenoid valve fuel injector

当 ECU 发出喷油信号时,电磁线圈被激活,产生磁场,吸引电磁阀衔铁,球阀在电磁力作用下抬起,控制腔内的高压燃油通过球阀与阀座之间的流通截面,使得控制腔内压力下降,针阀抬起.燃油从喷油器内部流向喷嘴,通过喷嘴喷出.当 ECU 停止发送喷油信号,电磁线圈失电,电磁力消失,电磁阀衔铁在弹簧力的作用下回位,球阀逐渐关闭至完全闭合,控制腔压力上升,针阀在液体力与弹簧力的作用下开始关闭至完全闭合,喷射结束.

表 1 喷油器部分关键结构参数

Tab.1 Part of key structural parameters of the fuel injector

参数	数值	参数	数值
球阀升程/mm	0.05	针阀弹簧预紧力/N	50
球阀弹簧刚度系数/(N/m)	20 000	针阀弹簧刚度系数/(N/m)	80 000
球阀弹簧预紧力/N	120	针阀质量/g	10
球阀质量/g	1.84	喷孔数	8
针阀升程/mm	0.2	喷孔直径/mm	0.294

1.2 模型验证

在喷油器流动特性试验台上进行喷油器喷油流量测试,如图 2 所示,获得喷油器喷油量随上电时间的变化规律.将喷油量试验结果与数值计算对比(图 3)发现,模拟值与试验值的变化趋势基本一致,喷油量计算误差不超过 5%,所建立的模型具有较高的准确性.

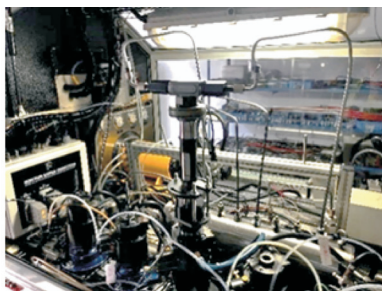


图 2 喷油器流动特性试验台

Fig.2 Test bench of fuel injector flow characteristic

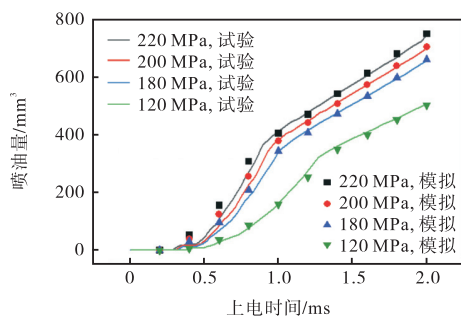


图 3 试验值与模拟值对比

Fig.3 Comparison between test values and simulation values

1.3 球阀与针阀运动规律

喷油器球阀、针阀的位移与速度随时间变化规律如图 4 所示.

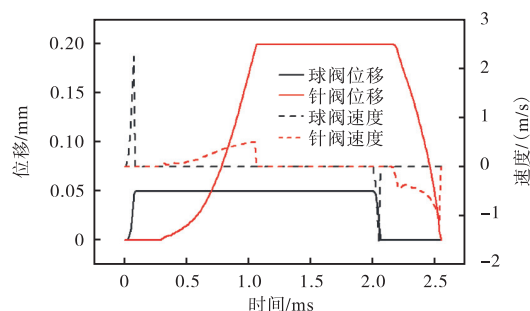


图 4 球阀与针阀运动规律

Fig.4 Motion laws of ball valve and needle valve

0 ms 时 ECU 发出激励信号,电磁阀通电,球阀在电磁力作用下升起,上升速度加快,最快可达 2.258 0 m/s. 0.087 5 ms 时,球阀达到最大升程 0.05 mm.在此期间,控制室内的高压燃油经泄压节流孔流入回油室,控制室内油压降低. 0.275 0 ms 时,针阀受到向下作用力小于向上作用力,针阀开启,喷油开始,针阀速度整体呈增大趋势,1.050 0 ms 时,达到最大速度 0.513 0 m/s. 1.062 5 ms 时针阀到达最大升程 0.20 mm. 2.000 0 ms 时 ECU 停止发出激励信号,电磁阀停止通电,球阀下行,2.050 0 ms 时,最大速度可达 1.515 0 m/s,直至 2.062 5 ms 时完全关闭.此时,控制室压力升高,2.150 0 ms 时,在高压作用下针阀开始下行,速度整体呈增大趋势,2.537 5 ms 时达到最大速度 1.126 1 m/s,直至 2.550 0 ms 时完全关闭,喷油停止.

2 三维仿真计算

2.1 模型构建

选取球阀腔至喷嘴出口部分为计算域,如图 5 所示,喷油器三维模型采用非结构化网格,在狭窄流道处进行网格加密,并进行网格无关性验证(图 6),从网格数 5 176 290 逐渐增加网格密度,当总网格数高于 33 601 858 时,质量流量的计算结果接近稳定,因此后续计算模型使用此网格数.

2.2 边界条件

喷油器进、出口边界条件如图 5 所示.连接共轨系统的管道设为压力入口,压力值为 220.0 MPa;球阀腔上端的出口连接回油油路,设置为 0.1 MPa 的压力出口,喷孔出口压力设为 15.0 MPa.球阀与针阀定义为运动边界.通过在 Fluent 中编译 UDF 程序加载

阀门运动规律,动网格选用 smoothing 与 remeshing 的更新方式,采用混合多相流模型进行非定常两相流模拟。



图 5 喷油器流道网格划分与边界条件设置

Fig.5 Fuel injector flow channel mesh division and boundary condition setting

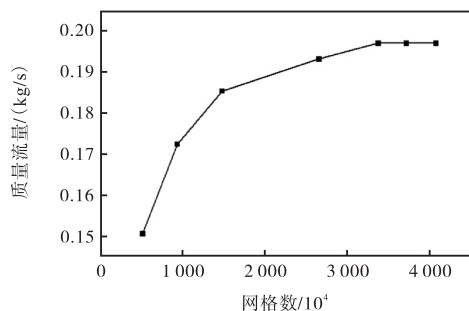


图 6 网格无关性验证

Fig.6 Mesh independence verification

由于喷油器针阀、球阀等处进出油孔尺寸小、压差大、流速大,属于典型的微通道结构,这些因素对空化现象有较大影响^[24]。考虑到模型的适用性、计算稳定性等,湍流模型选择 *realizable k-ε*,空化模型选择 Schnerr-Sauer 模型^[25]。

2.3 模型验证

将三维计算所得的喷孔出口流量与一维计算结果对比(图 7),两者具有较好的一致性。Fluent 的模拟结果略高于 AMESim 主要是由于三维计算要满足

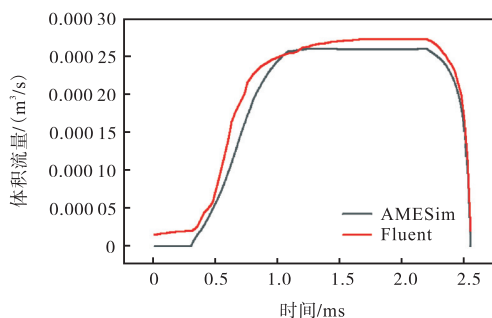


图 7 模型验证

Fig.7 Model verification

连续介质假设,设定了初始间隙,起始喷孔出口流量不为 0,因此整个喷油过程的喷孔出口流量会略高于 AMESim。除此之外,三维仿真误差不超过 5%,可以较为准确地模拟喷油器内燃油流动,能较好地描述空化的生成和发生情况。

3 结果与讨论

喷油器内燃油流动不断变化且存在气、液之间的转换,提取了喷油器球阀处、节流孔处、针阀处截面在不同时刻的蒸汽体积分数、压力、速度、湍动能云图,对整个喷油过程空化的产生、发展、溃灭以及三维流场的变化进行分析。

3.1 球阀处流动特性

球阀处的蒸汽体积分数、速度、压力、湍动能云图如图 8 所示。0 ~ 0.0875 ms 为球阀开启过程。由图 8(a)可知,在球阀的整个开启过程中,空化程度一直保持较高水平,最高蒸汽体积分数可达 90% 以上。这是由于球座孔口处存在较大截面变化,尖角的存在和几何形状的导流作用使得燃油在此处产生气泡。如图 8(b)所示,在球阀开启时,导流孔中流体速度较大的主流部分在惯性作用下首先冲向球阀面,造成球面处相对阀座表面速度较高。此时由于导流孔里的高速燃油遇到球面时,发生滞止效应,导致球下部压力升高,在球的下部形成一个高压区,且越靠近球面中心位置压力越大,如图 8(c)所示,当 $t = 0.0125$ ms 时,滞止区域平均压力约为 151.0 MPa,而导流孔中其余部位压力约为 149.5 MPa,滞止区域压力略高于其余部位。随着球阀上升,流通截面增大,滞止效应范围逐渐减小。之后高速燃油以及产生的空泡一起冲入球阀腔中,首先在阀座密封环面附近产生剧烈空化,其中阀座表面空化强度较高,之后在球阀形状与压力的影响下弯折向球阀座面。在相对低速的球阀腔内形成了较大的漩涡,涡流裹挟空化云团,导致该区域的空泡不易被带走,空蚀风险更大。在此期间,球阀腔始终存在较高程度的空化。因此,发生空蚀的部分主要集中在密封环带附近,即文献[26]中拍摄的控制阀实际空蚀位置,如图 9 所示。

当球阀停止运动后,球阀与阀座流通截面压差减小、流速有所降低,使得球阀腔内涡流能量下降。随着针阀上升,阀座与球阀表面空化强度和范围均有所减小,部分大型空化云团开始溃灭,随后空化状态处于相对平稳的阶段。

2.000 0 ~ 2.062 5 ms 为球阀关闭过程,由于流通面积减小、压差增大,狭缝处流速开始增加,靠近狭

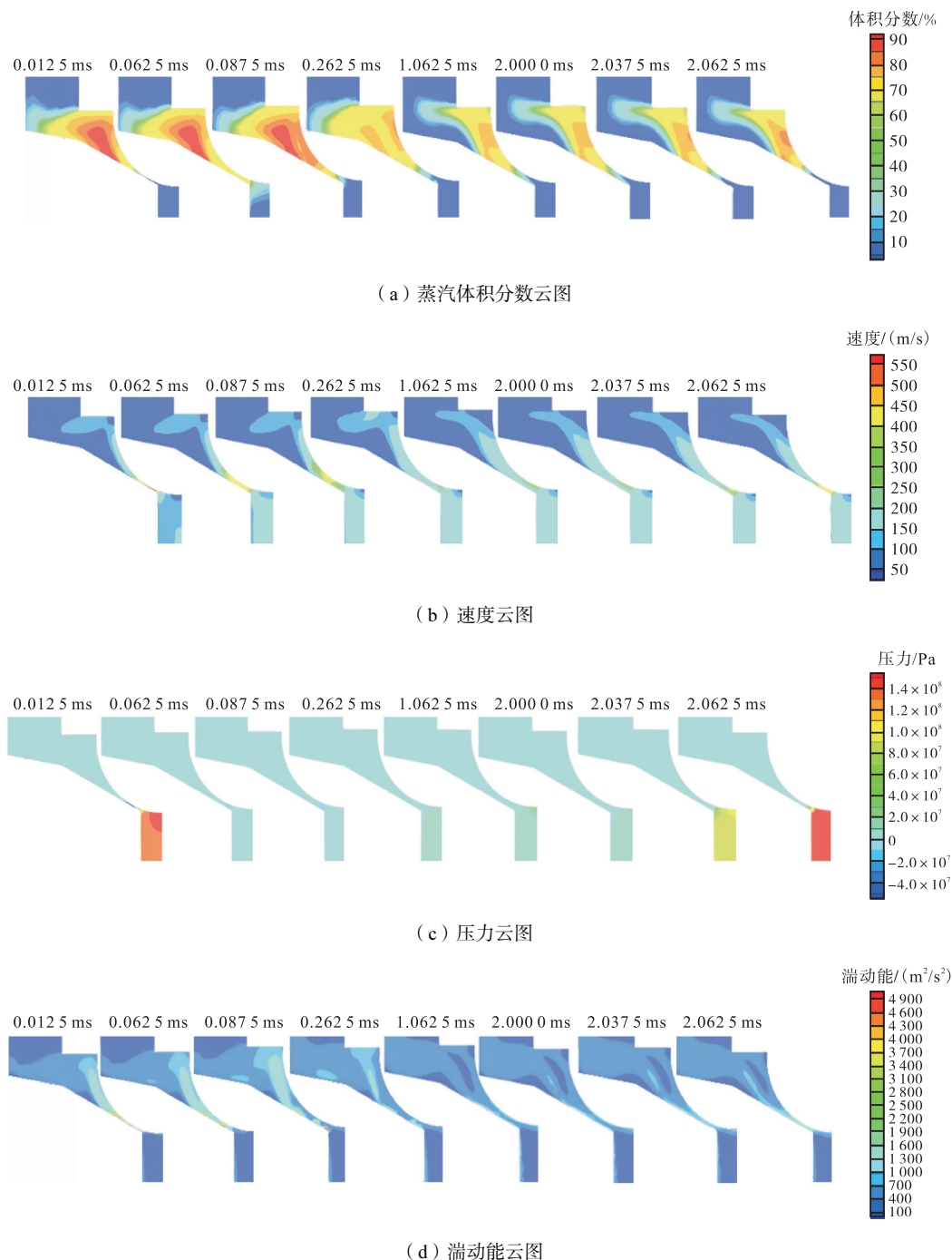
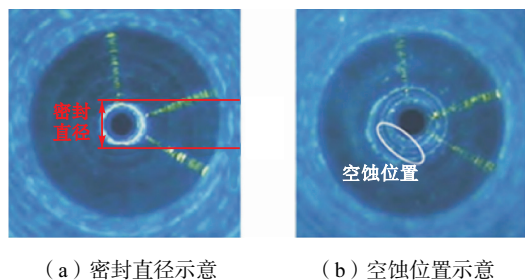


图 8 球阀处的蒸汽体积分数、速度、压力、湍动能云图

Fig.8 Contours of vapor volume fraction, velocity, pressure and turbulent kinetic energy at ball valve

图 9 球阀座面损伤的光学显微照片^[26]Fig.9 Optical photomicrograph of the ball valve seat damage^[26]

缝处的区域空化强度与范围再次增大。但在同样升程下，该阶段空化强度会小于球阀开启时的空化强度，这是由于球阀开启时的流场变化相对关闭时更为剧烈，球阀开启瞬间球阀腔内燃油流速在短时间内急剧升高，根据伯努利原理，会导致局部压力骤降使得空泡大量生成，空化迅速发生，而关闭阶段虽然狭缝处燃油流速有所增大，但球阀腔内整体燃油流速有所下降，压力逐渐恢复为原来的背压，几乎不再产生新的空泡，该阶段主要以空泡溃灭为主，空化程度在靠

近狭缝处虽有增大,但得不到充分发展,故整个球阀腔中的空化强度明显小于球阀开启阶段。

由图 8(b)可知,在球阀开启与关闭阶段密封环面处达到 $400.000\ 0\text{ m/s}$ 以上的高流速,其主流部分更靠近球阀面,这使得球阀面处空化变化幅度较大,球阀腔内的涡流能量高,漩涡保持的时间长,因此球阀的开启与关闭期间空化云团较难溃灭,且主要集中在球阀表面与阀座表面中间部分。

3.2 节流孔处流动特性

部分学者^[19-20]在研究球阀处的流动特性时,虽然考虑了控制腔压力变化对球阀处的影响,但是常常忽

视连接球阀与控制腔之间节流孔、导流孔处的流动特性变化,然而该处的节流孔却在喷油器工作过程中起到关键作用,控制着燃油的流动和喷油器开关,因此通过对比该处不同时刻的流动特性,分析其对整个喷油过程的影响。其中喷油器主要有 2 个节流孔:进油节流孔和回油节流孔。进油节流孔位于燃油从高压接头流向控制腔的通道中,回油节流孔则连接控制腔与回油腔。

节流孔处的蒸汽体积分数、速度、压力、湍动能云图如图 10 所示。 $0\sim 0.087\ 5\text{ ms}$ 为球阀的开启过程,由于球阀腔的背压较低,球阀腔内的压力分布基

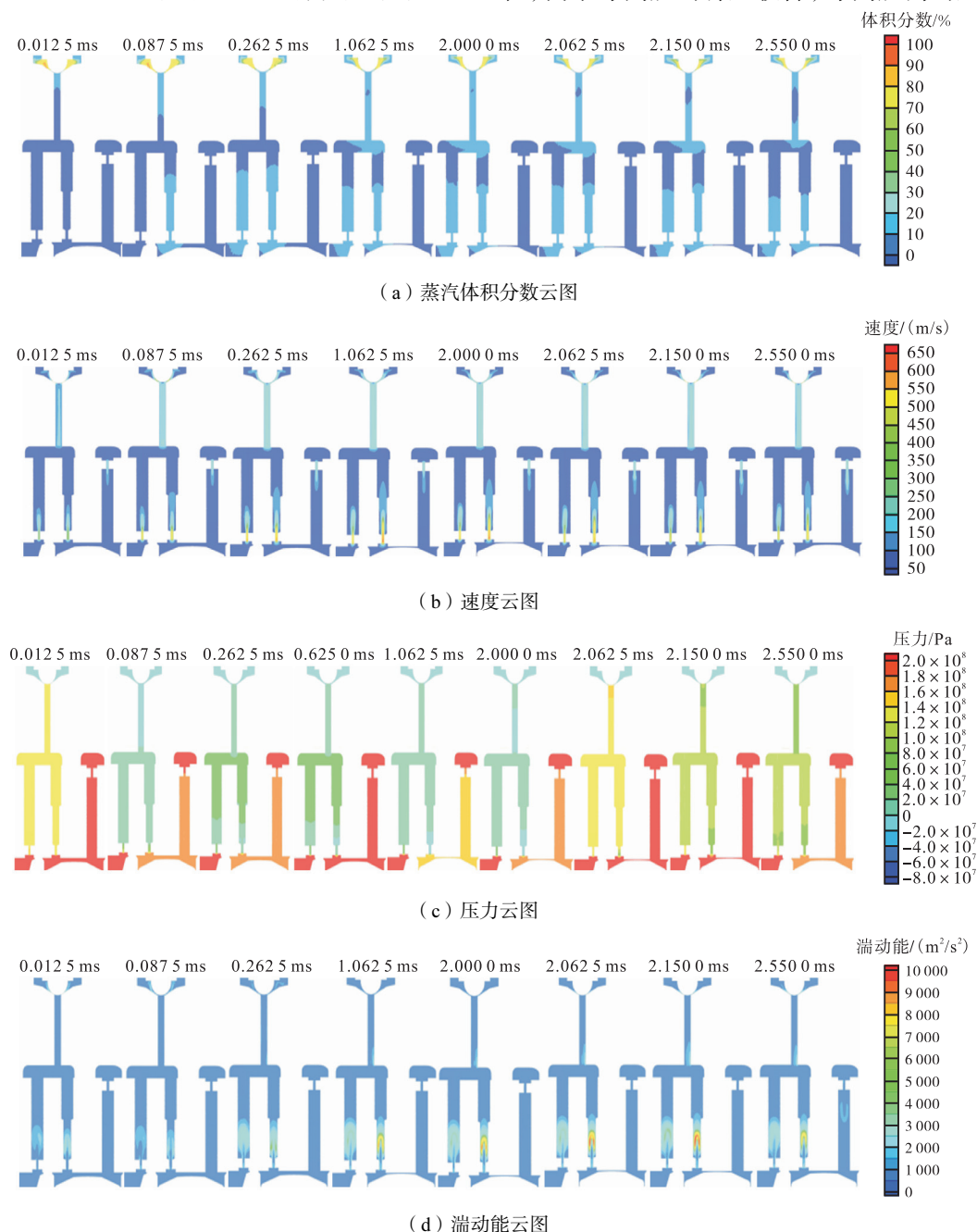


图 10 节流孔处的蒸汽体积分数、速度、压力、湍动能云图

Fig.10 Contours of vapor volume fraction, velocity, pressure and turbulent kinetic energy at throttle hole

本不变。随着球阀上升,球阀处流通截面变大,流动面积突变的球座孔口沿壁面向密封环带扩展一段区域有大量气体产生,如图 10(a)所示,球阀下方导流孔处也有少量气体产生,并随着球阀开启逐渐向下扩展。此时回油节流孔处的压力明显下降,控制腔处的压力也逐渐降低,相反,由于球阀处燃油流通面积的增大,球阀下方导流孔处燃油流速增大,特别在连接控制腔的狭窄管道节流孔处有明显提高,同时,有较小的湍流集中在该区域。在球阀最大升程位置,控制腔内压力基本稳定。

0.262 5 ~ 1.062 5 ms 为针阀上升阶段,此时控制腔容积减小。随着针阀上升,在回油节流孔处出现强烈湍流,该湍流强度随着针阀上升而增大,这是由于针阀开启时,大量燃油从控制室流经孔径较小的回油节流孔,流速显著提高,容易导致层流向湍流转变,并且节流孔入口为直角设计,燃油流经时容易产生流动分离,形成涡旋区,故此时湍流强度明显增大。同时,在导流孔、节流孔处存在面积较大、蒸汽体积分数略低于 5% 的两相变化区域,气泡从球座孔口开始沿着导向壁面产生、发展,并且该区域随着针阀的上升而增大,这是由于导流孔、节流孔处前后缓冲区流域具有一定的压差,燃油流经该处时,流道截面变小,流速突增,压力降至燃油饱和蒸汽压力以下,发生流动分离、空化等现象^[24]。这将会造成该处出现穴蚀损伤,影响回油量的大小,从而影响喷射精度等。同时该阶段由于各个阀全部打开,节流发生在回油节流孔的最小孔径处,由图 10(b)可知节流孔处最高流速可达 600 m/s 以上。观察图 10(c)时发现在针阀上升的过程中控制腔压力有轻微上升的情况,这可能是由于控制腔处进油、回油节流孔与针阀运动导致控制腔处流量与容积变化导致的。

2.000 0 ~ 2.062 5 ms 时球阀关闭,控制腔回油量减少,同时进油孔在进油,两者流量的差别造成控制腔压力上升,此时回油节流孔湍流强度逐渐变大,如图 10(d)所示。球阀孔口的边缘和球阀密封带附近仍会产生大量的气泡,少量气泡沿着球阀座向导流孔方向扩展,随着球阀的关闭,导流孔处气泡范围有减小的趋势,并且在球的下部再次出现燃油滞止效应,在球阀完全关闭后,随着控制腔与导流孔处压力逐渐稳定,该滞止效应会有所缓解。

2.062 5 ~ 2.550 0 ms 时针阀关闭,由图 10(c)可知,该阶段导流孔处压力有下降趋势,可能是由于针阀下降时,控制腔容积增大,此时控制腔处受到进油、回油节流孔与针阀运动的影响,压力存在波动导

致球阀下方导流孔处的压力也有一定的波动。

从计算可以看出,球阀发生穴蚀的原因主要是流通截面的迅速变化,以及该处的压力突变造成气体产生,气体剥离固体表面产生破碎,造成表面损伤。故对于该处的穴蚀情况,除了选择合适的球阀和阀座材料外,表面涂层或材料的改进也有可能减小穴蚀带来的危害。同时也可通过设计更加合理的流通截面,尽量减少压力突变以尽可能地改善球阀处穴蚀情况,从而改善密封性,提高喷油器可靠性。

3.3 针阀处流动特性

针阀处的蒸汽体积分数、速度、压力、湍动能云图如图 11 所示。压力室压力、针阀座处狭缝压差和喷油孔进、出口压差是决定针阀抬升过程中瞬态流动特性的关键因素。为分析针阀抬升过程中瞬态内流特性,将其分为 3 个阶段。

0.262 5 ~ 0.625 0 ms 为针阀抬升第 1 阶段。此阶段针阀与阀座之间形成狭缝流道,狭缝上、下游压差较大,流速较高;由图 11(a)可知,燃油流经狭缝时由于流速较高,压力降低至饱和蒸气压,液相燃油气化,狭缝处产生明显的空化现象,此时空化强度没有像球阀开启阶段那样瞬间发展到压力室与喷孔是由于球阀腔室相对于压力室空间更为狭窄,更有利于加剧湍流和低压区的形成,而压力室的存在能够起到一定的缓冲作用,并且针阀的开启速度由图 4 可知远小于球阀的开启速度,故流场变化相对不够剧烈,从而空化发展速度较慢。

0.625 0 ~ 0.812 5 ms 为针阀抬升第 2 阶段。此时喷孔进出口压差逐渐增加,通过图 11(b)可以看出,液相燃油流动方向偏向喷孔的下表面,随着针阀开启,喷孔内燃油流速增加,且下表面速度高于上表面。此时狭缝位置由于流通截面增大,燃油的空化强度下降。

0.812 5 ~ 1.062 5 ms 为针阀抬升第 3 阶段。由图 11(c)可以观察到, $t = 0.812 5$ ms 后压力室压力达到相对稳定状态,虽然之后针阀仍在抬升,但其对压力室压力、狭缝压差、喷孔压差几乎没有影响。在该阶段喷孔进出口压差显著增大,狭缝两端压差减小。由此喷孔区域射流流速增大,随着针阀抬起,流速趋于稳定,而狭缝处流速减小。由于燃油通过狭缝流入喷孔时流速方向剧烈变化,液体燃油与喷孔上表面发生流动分离,在喷孔入口上表面形成低压区,且随着针阀上升,低压区逐渐增大,因此在狭缝处形成的空化向喷孔入口上表面发展。由于喷孔上表面存在空化造成液体燃油与壁面发生流动分离,导致喷孔下表面

流速明显高于上表面. 此时燃油流动方向偏向喷孔下表面, 喷孔上表面空化增强, 减小了该位置燃油的有效流通面积. 由图 11(d)可知在整个针阀开启的过程中, 湍流强度都在不断扩大, 尤其在喷孔入口处转角部分, 其中喷孔下表面转角部分湍流强度大于喷孔

上表面. 这是由于受到喷孔入口结构的影响, 下表面直接面对针阀抬升时形成的狭窄流道, 导致燃油在入口下表面流速更大, 变化更剧烈, 产生较大的速度梯度, 易触发流动分离, 形成涡旋区, 从而加剧湍流生成.

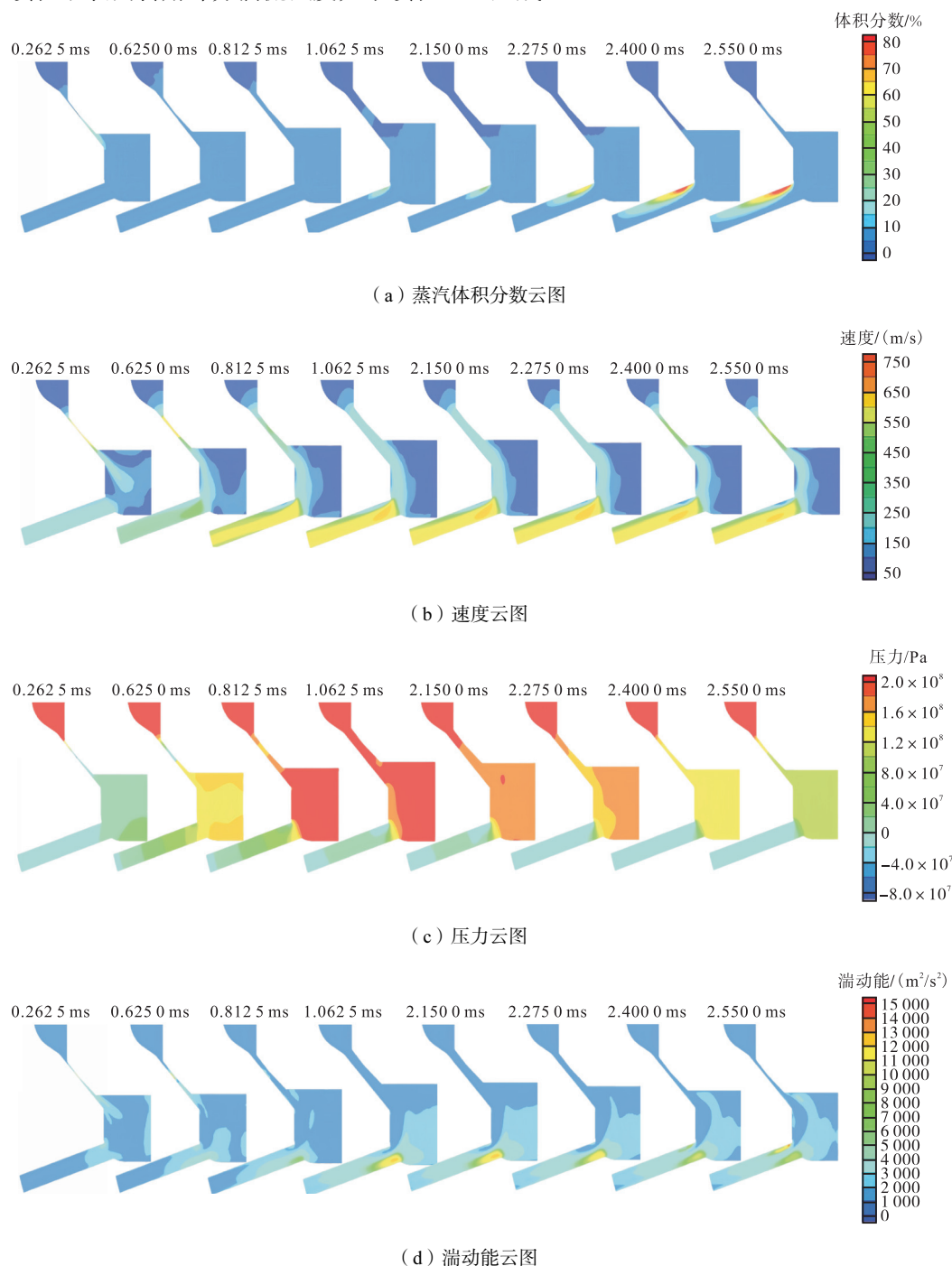


图 11 针阀处蒸汽体积分数、速度、压力、湍动能云图

Fig.11 Contours of vapor volume fraction, velocity, pressure, and turbulent kinetic energy at needle valve

1.0625 ~ 2.1500 ms 为针阀完全开启状态, 此时除压力室压力有轻微波动外, 蒸汽体积分数、速度、湍流强度均处于一个相对稳定的状态, 此时, 蒸汽体积分数最大值不到 35%.

2.1500 ~ 2.5500 ms 为针阀关闭阶段, 由图 12 可以明显观察到喷孔入口处空化更加剧烈, 并且空化由喷孔入口向喷孔出口处延伸, 此刻的空化强度大于针阀开启阶段. 当 $t = 1.0625$ ms 时, 即针阀刚到达最大

升程时喷孔入口处空化面积占喷孔总面积的比值仅为 22.4%, 而针阀关闭阶段空化面积百分比不断上升, 最高可达 58.9%, 提升了 1.63 倍. 这是由于在针阀关闭阶段, 由图 4 可知此时的关闭速度明显快于针阀开启时, 座面的有效流通截面积迅速减小, 流场中流速的急剧变化进一步加剧了低压区空化, 从而造成内部流动压强降低, 以致于空泡内压力大于空泡外压力, 使得很多没能生长的空泡进一步长大, 造成在这一时刻气相体积分数突增, 最大值达到 90% 以上. 这也说明了固定针阀升程条件下开展稳态计算已不能真实反映喷孔内的空化情况. 正如文献[14]中虽然考虑到了不同针阀升程下对应的蓄压腔边界压力有所不同, 但计算时仅采用针阀关键位置升程进行计算, 忽略了针阀运动是一个瞬态的过程, 从而导致计算时针阀开启与关闭阶段同一升程下喷孔内速度、压力等区别不大, 对计算结果有一定的影响.

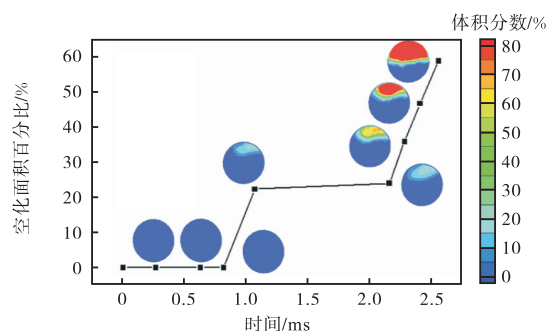


图 12 喷孔入口截面蒸汽体积分数变化曲线

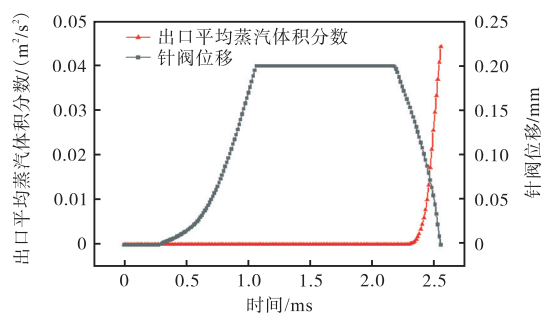
Fig.12 Steam volume fraction change curve of the orifice inlet section

3.4 喷孔出口参数变化

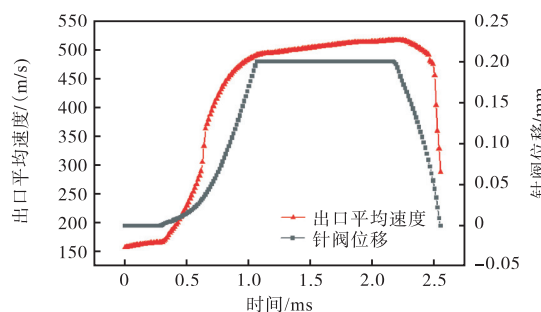
针阀位移与喷孔出口面积加权平均蒸汽体积分数、速度、湍动能随时间变化的曲线如图 13 所示.

如图 13(a) 与 (b) 所示, 随着针阀开启, 喷孔出口面积加权平均湍动能与速度均增大, 其增大的速度受针阀的开启速度与燃油流通截面的变化速度影响. 在针阀完全开启后, 出口面积加权平均速度依旧保持一定的上升趋势. 出口面积加权平均湍动能在针阀到达最大升程后的一小段时间里达到一个峰值后轻微下降又再次上升可能是由于压力室内与喷孔入口处压力波动导致. 之后随着针阀关闭, 出口面积加权平均湍动能与速度均下降. 如图 13(c) 所示, 出口加权平均蒸汽体积分数出现突变, 由最初的几乎为 0 到针阀下降到一定程度后开始突增, 说明在此之前, 喷孔内的空化还没发展到喷孔口就溃灭了, 当 $t = 2.3375$ ms 时, 从喷孔入口处产生的空化逐渐发展到了孔口, 出口蒸汽体积分数开始剧烈增长, 形成超空

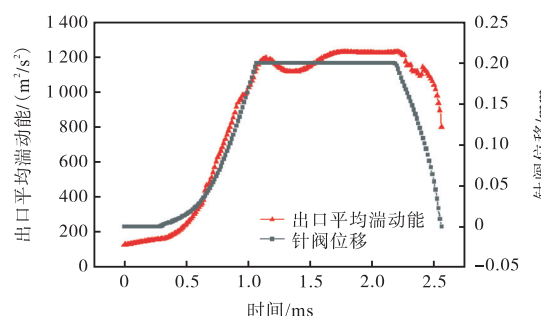
化现象.



(a) 出口平均蒸汽体积分数



(b) 出口平均速度



(c) 出口平均湍动能

图 13 针阀位移与喷孔出口面积加权平均蒸汽体积分数、速度、湍动能变化曲线

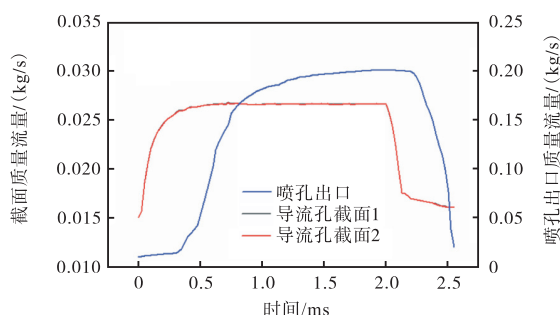
Fig.13 Needle valve displacement and orifice outlet area weighted average steam volume fraction, velocity, and turbulent kinetic energy change curves

3.5 质量流量特性

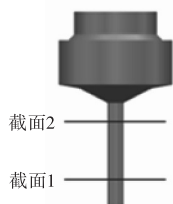
为研究喷油器内部燃油的质量流量特性, 截取了球阀下方导流孔处的截面, 并与喷孔出口处的质量流量进行对比, 如图 14 所示.

随着球阀开启, 回油通道流通面积增加, 导流孔处质量流量增大. 当球阀到达最大升程后, 导流孔处质量流量增长速度有所减缓, 在达到最大升程后的一小段时间内导流孔两处截面质量流量均稳定在 0.02665 kg/s 左右, 说明导流孔处质量流量不会因为位置的不同而变化. 随着针阀开启, 喷孔出口处的质量流量逐渐开始上升. 上升初期喷孔出口质量流量增长速度不断加快, 这是由于该阶段质量流量的大小

主要取决于针阀与阀座处流通截面的大小,在针阀上升一段距离后,出口质量流量增长速度有所减缓,该阶段质量流量的大小不仅受到针阀处流通截面大小的影响,还受到喷孔直径大小的影响,故该阶段喷孔出口质量流量增长速度有所减缓,并在针阀到达最大升程后一小段时间内,喷孔出口质量流量逐渐趋于稳定,保持在 $0.200\ 00\ \text{kg/s}$ 左右,该值约为球阀下方导流孔回油量的 7.5 倍左右.当球阀开始下降时,球阀流通面积减小,导流孔处质量流量开始下降,喷孔出口处的质量流量也随着针阀下降而逐渐下降.



(a) 质量流量



(b) 截面示意

图 14 质量流量对比

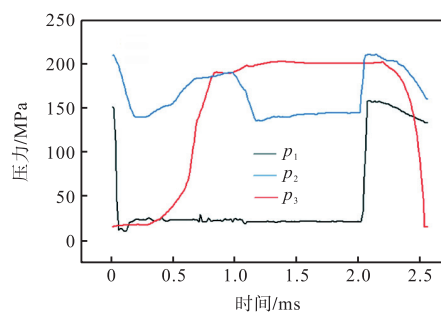
Fig.14 Comparison of mass flow

3.6 腔室压力变化

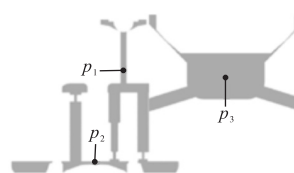
由于导流孔、压力室、控制腔在喷油器工作过程中起到至关重要的作用,因此在这 3 处位置设置压力监控点,分别为球阀下方导流孔处点 p_1 ,控制腔处点 p_2 ,压力室处点 p_3 .各点压力值随时间的变化曲线如图 15 所示.

随着球阀开启,控制腔压力逐渐下降,下降到针阀受到向上作用力大于向下作用力时,针阀开始上升,随着针阀开启,由于控制腔容积减小造成的压力增大速度快于控制腔泄油时造成的压力减小的速度,控制腔压力开始小幅度上升.当针阀到达最大升程时,由于控制腔容积保持不变,此时,控制腔内的燃油流入球阀腔中,因此控制腔压力又开始下降,下降到 $140\ \text{MPa}$ 左右保持稳定.当球阀开始下降时,控制腔压力开始再次上升,当上升到一定程度时,针阀受到向下作用力大于向上作用力,针阀开始下降,此时

控制腔容积增大,控制腔进油造成的压力增大的速度略小于针阀下降造成的压力减小的速度,因此控制腔压力有一定的下降趋势直到针阀完全关闭.



(a) 各腔室压力



(b) 压力监控点示意

图 15 各腔室压力对比

Fig.15 Comparison of chamber pressure

针阀开启前,压力室压力几乎保持不变,随着针阀开启,压力室压力逐渐增加,在针阀到达最大升程时,压力室压力达到 $200\ \text{MPa}$ 左右,此时压力室压力几乎不再受到针阀升程的影响,并保持相对稳定.一直到针阀下降时,压力室压力才开始下降.

球阀下方导流孔压力几乎只受到球阀升程的影响,仅在球阀开启与关闭瞬间出现突变.球阀开启前压力为 $150\ \text{MPa}$,球阀完全开启后压力在 $23\ \text{MPa}$ 左右保持稳定,球阀完全关闭后,该处压力再次上升到 $150\ \text{MPa}$.

4 结 论

本文构建了某大流量喷油器流动数值模型,通过一维计算获得球阀针阀运动规律,以其作为运动边界结合动网格技术对喷油器三维流动及空化行为进行计算,研究喷油喷射过程中喷油器内部三维流场的变化,获得主要结论如下.

(1) 球阀开启时,高速燃油会在球阀密封环面附近发生剧烈空化,蒸汽体积分数最高可达 90% 以上,与检测到的穴蚀最严重区域的位置吻合.在球阀开启与关闭时,球阀底部由于滞止效应会存在一个压力相对较大的滞止区域.

(2) 针阀刚抬起时,针阀与阀座狭缝处最先出现

空化,随着针阀开启,喷孔入口下表面流速明显高于上表面,在上表面形成低压区,空化逐渐向上表面发展。

(3) 在喷油过程中,连接控制腔的节流孔会出现 600 m/s 以上的高流速,湍流也会集中出现在该区域,尤其是回油节流孔,该处的湍流强度会随着针阀的上升而增强。同时在导流孔处也会出现面积较大、蒸汽体积分数略低于 5% 的两相变化区域。

(4) 导流孔处的质量流量主要受到球阀运动影响,而喷孔出口处不仅受到针阀运动影响还受到喷孔大小等影响。阀门完全开启时,导流孔回油流量约为 0.026 65 kg/s,而出口流量约为 0.200 00 kg/s,出口流量约为回油流量的 7.5 倍。

(5) 在阀门升程相同时,球阀和喷孔处的空化程度不同。球阀开启时该处的空化强度高于关闭时的空化强度,而喷孔处的空化主要集中在针阀关闭阶段。针阀开始关闭前,喷孔处蒸汽体积分数最大值不高于 35%,喷孔入口空化面积百分比仅为 22.4%,随着针阀关闭,空化逐渐发展为超空化流态,此时喷孔内蒸汽体积分数最大值高于 90%,喷孔入口空化面积百分比最高可达 58.9%,相比针阀完全开启时提升了 1.63 倍。

参考文献:

- [1] 顾远琪,范立云,苗秋露,等. 高压油泵阻尼孔对燃油系统压力特性的影响研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2024, 45(1): 70-76.
Gu Yuanqi, Fan Liyun, Miao Qiulu, et al. Investigation of the influence of the damping orifice of a high-pressure fuel pump on the pressure characteristics of a fuel system[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2024, 45(1): 70-76(in Chinese).
- [2] 刘宇,王向阳,李兴华,等. 喷油压力与喷孔参数对柴油机性能协同影响的仿真研究[J]. 车用发动机, 2023(2): 11-17.
Liu Yu, Wang Xiangyang, Li Xinghua, et al. Simulation of synergistic effect of injection pressure and injection hole parameters on diesel engine performance[J]. Vehicle Engine, 2023(2): 11-17(in Chinese).
- [3] 汪朝强,常仕英,于飞,等. 重型柴油机 DPF 非线性非稳态碳载量估算方法研究[J]. 车用发动机, 2023(5): 86-92.
Wang Chaoqiang, Chang Shiyong, Yu Fei, et al. Estimation of nonlinear unsteady soot load for heavy-duty engine DPF[J]. Vehicle Engine, 2023(5): 86-92(in Chinese).
- [4] Brennen C E. Cavitation and Bubble Dynamics[M]. Oxford: Oxford University Press, 1995: 136-140.
- [5] 麻斌,高莹,刘宇,等. 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(1): 59-64, 78.
Ma Bin, Gao Ying, Liu Yu, et al. Effects of slip velocity on the modeling of cavitation phenomenon in injector nozzle[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2017, 51(1): 59-64, 78(in Chinese).
- [6] 高莹,邓海鹏,麻斌,等. 喷孔长度和喷油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 Ying, Deng Haipeng, Ma Bin, et al. Effect of orifice lengths and injector temperatures on cavitating characteristics and near-field spraying based on ethanol-diesel[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2020, 41(5): 1261-1269(in Chinese).
- [7] 高莹,麻斌,邓海鹏,等. 低乙醇配比的乙醇-柴油混合燃料空化特性试验[J]. 西安交通大学学报, 2017, 51(11): 14-21.
Gao Ying, Ma Bin, Deng Haipeng, et al. Experimental investigation on the cavitation characteristics of ethanol-diesel blended fuels[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2017, 51(11): 14-21(in Chinese).
- [8] 郭勃,曹健,张翼,等. 柴油机喷油器喷孔内流穴蚀风险分析[J]. 车用发动机, 2024(1): 21-27.
Guo Qing, Cao Jian, Zhang Yi, et al. Risk analysis of cavitation erosion for diesel engine injector nozzle holes[J]. Vehicle Engine, 2024(1): 21-27(in Chinese).
- [9] 徐硕涵,赵凯,白天阳,等. 喷嘴内流影响下的喷油器性能参数敏感性分析[J]. 西安交通大学学报, 2025, 59(5): 189-197.
Xu Shuohan, Zhao Kai, Bai Tianyang, et al. Parameters sensitivity analysis of injector performance with the effect of nozzle internal flows[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2025, 59(5): 189-197(in Chinese).
- [10] Cao T, He Z, Zhou H, et al. Experimental study on the effect of vortex cavitation in scaled-up diesel injector nozzles and spray characteristics[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2020, 113: 110016.
- [11] 张文权,王谦,何志霞,等. 柴油机模型喷孔内空化与空蚀特性试验研究[J]. 内燃机工程, 2018, 39(5): 14-20.
Zhang Wenquan, Wang Qian, He Zhixia, et al. Experiment on characteristics of cavitation and erosion in diesel engine nozzle orifice[J]. Chinese Internal Com-

- bustion Engine Engineering, 2018, 39(5): 14-20(in Chinese).
- [12] Desantes J M, Salvador F J, Carreres M, et al. Large-eddy simulation analysis of the influence of the needle lift on the cavitation in diesel injector nozzles[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2015, 229(4): 407-423.
- [13] 高永强, 魏明锐, Li Fan, 等. 喷孔空化特性和近孔初始射流结构研究[J]. 农业机械学报, 2017, 48(9): 369-376.
- Gao Yongqiang, Wei Mingrui, Li Fan, et al. Cavitation characteristic inside nozzle and near-nozzle initial spray structure[J]. Journal of Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 369-376(in Chinese).
- [14] 刘振明, 欧阳璐菲, 郭立君, 等. 喷油器喷嘴结构参数对空化效应的影响[J]. 内燃机工程, 2020, 41(6): 72-77.
- Liu Zhenming, Ouyang Lufei, Guo Lijun, et al. Influence of the structural parameters of injector nozzle on cavitation effect[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2020, 41(6): 72-77(in Chinese).
- [15] Prasetya R, Sou A, Oki J, et al. Three-dimensional flow structure and string cavitation in a fuel injector and their effects on discharged liquid jet[J]. International Journal of Engine Research, 2021, 22(1): 243-256.
- [16] 赵文伯, 李玉洁, 邓俊, 等. 针阀运动规律及其对喷嘴内流和喷雾特性影响[J]. 吉林大学学报(工学版), 2022, 52(10): 2234-2243.
- Zhao Wenbo, Li Yujie, Deng Jun, et al. Needle motion and its influence on in-nozzle flow and spray jet characteristics[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2022, 52(10): 2234-2243(in Chinese).
- [17] 夏少华, 郑金保, 缪雪龙, 等. 电磁喷油器球阀流动分析[J]. 内燃机学报, 2012, 30(4): 354-358.
- Xia Shaohua, Zheng Jinbao, Miao Xuelong, et al. Cavitation analysis on ball valve in solenoid injector[J]. Transactions of CSICE, 2012, 30(4): 354-358(in Chinese).
- [18] 石磊, 许跃. 喷油器控制阀空化现象可视化试验与模拟分析[J]. 柴油机, 2019, 41(1): 38-43.
- Shi Lei, Xu Yue. Visualization experiment and numerical simulation of cavitation phenomenon in fuel injector control valves[J]. Diesel Engine, 2019, 41(1): 38-43(in Chinese).
- [19] Ma H, Zhang T, An Q, et al. Visualization experiment and numerical analysis of cavitation flow characteristics in diesel fuel injector control valve with different structure design[J]. Journal of Thermal Science, 2021, 30(1): 76-87.
- [20] 刘景斌, 刘振明, 吴杰长, 等. 喷油器动边界条件下球阀空化效应数值分析[J]. 内燃机学报, 2022, 40(1): 62-70.
- Liu Jingbin, Liu Zhenming, Wu Jiechang, et al. Numerical analysis of cavitation effect of ball valve under dynamic boundary condition of injector[J]. Transactions of CSICE, 2022, 40(1): 62-70(in Chinese).
- [21] Ren R, Su T, Ma F, et al. Study of the influence laws of the flow and cavitation characteristics in an injector control valve[J]. Energy Science & Engineering, 2022, 10(3): 932-950.
- [22] 邱龙彬, 李永奎, 张伟, 等. 喷油器喷油嘴偶件空化穴蚀仿真分析[J]. 现代车用动力, 2023(3): 32-37.
- Qiu Longbin, Li Yongkui, Zhang Wei, et al. Simulation analysis of cavitation and erosion of fuel injector nozzle[J]. Modern Vehicle Power, 2023(3): 32-37(in Chinese).
- [23] 张俊红, 李晨阳, 裴国斌, 等. 喷油嘴内流特性与喷雾特性研究及结构优化[J]. 内燃机工程, 2022, 43(2): 41-48.
- Zhang Junhong, Li Chenyang, Pei Guobin, et al. Research and optimization on flow and spray characteristics of nozzles[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2022, 43(2): 41-48(in Chinese).
- [24] 李子铭, 刘振明, 刘景斌, 等. 舰船柴油机微通道内燃油空化现象的模型对比[J]. 兵工学报, 2023, 44(10): 3091-3100.
- Li Ziming, Liu Zhenming, Liu Jingbin, et al. Model comparison of fuel cavitation phenomena in microchannels of marine diesel engines[J]. Acta Armamentarh, 2023, 44(10): 3091-3100(in Chinese).
- [25] Sa B, Klyus O, Markov V, et al. A numerical study of the effect of spiral counter grooves on a needle on flow turbulence in a diesel injector[J]. Fuel, 2021, 290: 120013.
- [26] 段炼, 袁寿其, 胡林峰, 等. 高压共轨喷油器控制阀空化研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(5): 321-327.
- Duan Lian, Yuan Shouqi, Hu Linfeng, et al. Cavitation analysis of control-valve in high-pressure common rail injector[J]. Journal of Agricultural Machinery, 2015, 46(5): 321-327(in Chinese).

(责任编辑: 王晓燕)