

船用氨燃料喷射器喷射特性仿真研究

李美斯¹, 礼博^{2, 1, 2}, 范立云, 毛运涛, 魏云鹏
(哈尔滨工程大学 动力与能源工程系, 51000)

Simulation study on injection characteristics of marine ammonia fuel injector

LIMEISI¹, LIBO^{1, 2}, FANLIYUN, MAOYUNTAO, WEIYUNPENG

(Power and Energy Engineering Department, Harbin Engineering University, 51000)

Abstract: As an emerging fuel in the field of ship engine, Ammonia fuel urgently needs breakthroughs in the key technology of its fuel injection system. This article studies the injection performance of ammonia fuel injectors. Based on the one-dimensional simulation model, The non-isothermal compressibility of fuel flow is considered. The impact of key parameters on various characteristics of ammonia fuel injectors is quantitatively analyzed to obtain the mechanism of each characteristic structure on injection performance. The research shows that for injection quantity, the impact weights of nozzle diameter, plunger diameter, and inlet orifice are the largest, accounting for 38.6%, 30.3%, and 9.6% respectively. For needle valve opening response, the impact weights of needle valve maximum lift, plunger diameter, and return orifice are the largest, accounting for 38.7%, 19.4%, and 17.4%, respectively. For needle valve closing response, the impact weight of plunger diameter is 65.3%, followed by inlet orifice diameter and needle valve maximum lift, accounting for 7.3% and 5.9%, respectively. For pressure fluctuation, the impact weights of plunger diameter, nozzle aperture, and inlet orifice aperture are the largest, accounting for 34.4%, 31.8%, and 9.2% respectively. For fuel tank temperature, the impact weights of nozzle aperture, plunger diameter, and solenoid valve pre-tightening force are the largest, accounting for 46.5%, 23.5%, and 7.6%, respectively.

摘要: 氨燃料作为船舶发动机领域的新兴燃料, 其燃油喷射系统的关键技术亟需突破。本文对氨燃料喷射器喷射性能开展研究, 基于一维仿真模型考虑燃料流动过程中的非等温可压缩性, 进行了氨燃料喷射器各个特性影响的关键参数的影响计算并进行量化分析, 获取各个特征结构对喷射性能的作用机理。研究表明: 对于喷射量, 喷孔直径、柱塞直径、进油孔的影响权重最大, 分别占 38.6%、30.3%、9.6%。对于针阀开启响应, 针阀最大升程, 柱塞直径, 回油孔的影响权重最大, 分别为 38.7%、19.4%、17.4%。对于针阀关闭响应, 柱塞直径影响权重 65.3%, 其次是进油孔直径、针阀最大升程, 分别为 7.3%、5.9%。对于压力波动, 柱塞直径、喷孔孔径、进油孔孔径影响权重最大, 分别为 34.4%、31.8%、9.2%。对于盛油腔温度, 喷孔孔径、柱塞直径、电磁阀预紧力影响权重最大, 分别为 46.5%、23.5%、7.6%。

关键词: 氨喷射器; 喷射特性; 结构特性; 量化分析

Keywords: ammonia injectors; injection characteristics; structural features; quantitative analysis

中图分类号: TK46+4 文献标识码: A

收稿日期: 2023-07-29

基金项目: 中央高校基本科研项目 (3072022QBZ0303)

作者简介: 李美斯 1 (2001-), 女, 博士生, 主要研究方向为动力工程与过程热物理, E-mail:1209293071@qq.com;
礼博 2 (15040512455), E-mail:libo2022@hrbeu.edu.cn.

0 概述

船舶在全球能源消耗中扮演着十分重要的角色。面对船舶温室气体减排目标,唯有从燃料源头着手解决排放问题可实现零排放[1]。内燃机因其热效率高成为应用最广泛的热力机械,为了达到碳中和目标,内燃机在未来5~10年需要能够燃烧替代燃料[2],同时内燃机碳中和燃料的供给和高效清洁燃烧的关键技术问题也成为近年来船舶动力领域的研究热点和行业难题。氨燃料从排放性、经济性、技术性和安全性等综合考虑之后被认为是最有希望的替代燃料之一[3]。内燃机直接燃烧氨被认为是一条可行的零碳技术应用路径。

Shiyan Li[4]等人对氨燃料喷射器喷嘴内的近场特性和气化过程进行了实验研究,液氨被蓄能器内的高压柱塞泵压缩供应到共轨柴油电磁喷射器。燃油管使用加热带包裹,设定温度与燃油目标温度相同,研究表明,过热度(SD*)和燃料温度(Tf)对气化率都起着至关重要的作用,在高燃料温度条件下,喷嘴内外分别实现了3.5%的气化率和200.0%的近场体积增量。高过热条件下,气化速率的线性增加将导致过热氨喷雾的燃料分布面积呈指数级增加。Stephanie Frankl[5]等人进行了氨的高压双燃料喷射数值研究^[5],使用WoodwardL 'Orange'的双燃料喷射器进行喷射,该双燃料喷嘴可以在高达1800bar的高压下独立喷射引燃燃料与高达500bar的主燃料。进行了氨HPDF数值仿真研究。研究表明,氨需要大量的活化能才能燃烧。能量越低,启动HRR的时间就越晚。较高的喷射压力和较高的燃料温度对氨燃烧的HRR具有积极影响。液氨的蒸发需要大量的能量。氨在450K时转变为超临界相。Zhenxian Zhang[6]等人进行了二冲程低速机氨/柴油双直喷性能特征实验,采用了液相氨和柴油高压直喷的策略。进行了不同燃烧模式的燃烧特性对比,研究表明喷射时间提前过多有产生超稀混合物区域的风险,并且氨的绝对扩散燃烧会牺牲总燃烧持续时间。液氨直喷可以增强喷雾羽流的相互作用,促进柴油的雾化和蒸发,煤烟和CO的排放得到明显抑制。随着氨燃烧,双燃料模式下烟灰和CO排放物氧化更加显著。氨/柴油双燃料与纯柴油模式相比,

总燃烧持续时间都缩短,这对氨发动机ITE的改进非常重要,总NO_x排放降低。-8°CAATDC的喷油正时是柴油和液相氨平衡发动机ITE和排放性能的最佳选择。

氨燃料发动机目前的研究集中在气态氨直接喷射,氨燃料喷雾及其表征,混合动力发动机燃烧特性,排放特性等方面[7],最近扩展研究了高压液态直喷、NH₃的化学动力学建模[8],数值评价的反应机理等几个方面,对于喷燃油系统中的关键部件喷射器中氨燃料喷射特性的研究较少。本文工作主要集中于氨燃料喷射器结构特性仿真分析以及量化分析,为之后氨燃料喷射器设计开发提供支撑。

1 氨燃料喷射器仿真模型建立

本文所研究的氨燃料喷射器基于BoschCRI2.20柴油喷射器。喷射器通过控制电磁阀的上电与断电控制控制腔中的建压与泄压,从而控制针阀启闭来进行喷油与断油。氨燃料对温度要比柴油更具敏感性,为了使模型更具有现实意义,采用非等温可压缩模型对氨燃料喷射器考虑热边界进行热效应分析。根据喷油器结构在AMESim平台上搭建的仿真模型如图1所示。氨燃料喷射器仿真模型由电磁阀模块、控制腔模块和针阀喷嘴模块组成。喷射器由发动机电子控制单元驱动。ECU发出喷油信号后,通过信号发射器将信号传输到喷射器电磁阀端,通过设定喷射脉宽和喷射相位可以实现喷射器的单喷、预主喷射和主后喷射策略。在喷孔出口添置流量传感器和积分模块,用于计算喷射器的喷射速率与喷射量。

考虑到AME Sim数据库中缺少液氨的属性定义,通过平台的MPA(Media Property Assistant)工具自定义燃料属性,形成拟合公式及外推进行模型计算,燃料属性来源于依据美国国家标准与技术研究院(National Institute of Standards and Technology, NIST)的氨物性数据[9],包括氨燃料的燃料密度、热容、粘度、导热系数等。

收稿日期:2023-07-29

基金项目:中央高校基本科研项目(3072022QBZ0303)

作者简介:李美斯1(2001-),女,博士生,主要研究方向为动力工程与过程热物理, E-mail:1209293071@qq.com;

礼博2(15040512455), E-mail:libo2022@hrbeu.edu.cn。

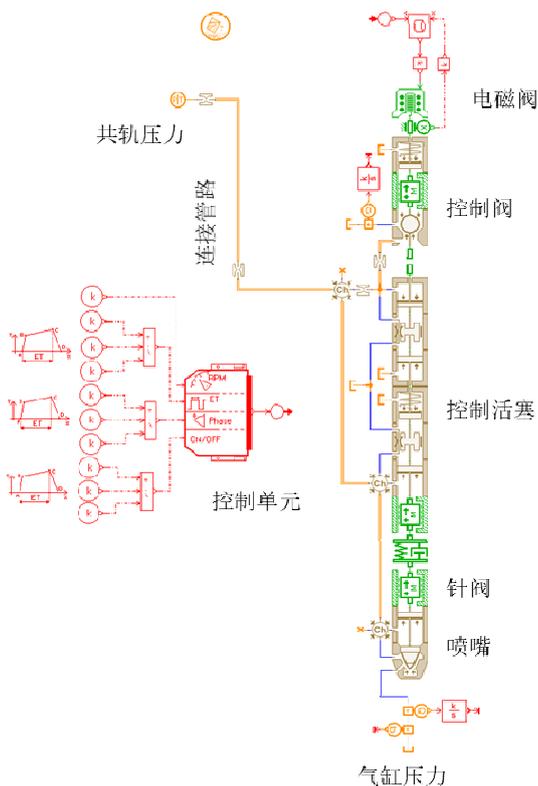


图1 氨燃料喷射器模型

2 氨燃料喷射器结构参数对喷射性能影响研究

在燃料喷射的过程中，能够影响喷射器的喷射性能结构参数众多，并且结构参数的影响程度不同。因此本节以氨燃料喷射器的响应特性、压力特性、循环喷射量特性以及温度特性的衡量指标作为目标，选取典型工况（入口压力=70MPa，喷射控制脉宽=1200 μ s，入口燃料温度=40 $^{\circ}$ C，环境温度=100 $^{\circ}$ C），在该工况喷射过程中燃料属性满足液态喷射，避免了燃料汽化带来的不稳定性对结构参数特性的改变。围绕氨燃料喷射器主要结构参数，选取主要结构参数变化范围，如表1所示。通过分析结构参数对氨燃料喷射性能影响机理，为后续氨燃料喷射器进一步性能优化提供先期的理论基础。

表1 系统参数基准值及变化范围

结构参数	最小值	基准值	最大值
电磁阀预紧力/N/	52	72	82
控制阀杆升程/ μ m/	52	72	82
进油节流孔直径/mm/	0.23	0.24	0.26
回油节流孔直径/mm/	0.25	0.27	0.28
控制活塞直径/mm/	4.1	4.3	4.7
针阀预紧力/N/	24	30	50

针阀升程/ μ m/	200	250	300
喷孔直径/mm/	0.14	0.15	0.17

2.1 电磁阀弹簧预紧力对喷射特性的影响

电磁阀弹簧预紧力指的是电磁阀在未通电工作时其复位弹簧预先压缩产生的弹簧力，电磁阀控制阀杆抬起与复位过程受电磁阀弹簧预紧力的直接影响。由图2可知，电磁阀预紧力与开启响应时间呈正相关，与关闭响应时间相关。电磁阀弹簧预紧力由52N增加至82N时，开启响应由0.388ms增加至0.460ms，关闭响应由0.492ms减少至0.396ms。针阀开启响应时间的增加是由于在控制阀杆抬起时电磁阀预紧力为阻力，电磁阀预紧力的增大会导致抬起所需的电磁力增大，同时也会降低抬起加速度，控制腔中泄压推迟，针阀被抬起的时间延长致使开启响应时间变长，喷射量减少。而在针阀关闭时，控制阀杆落座关闭球阀，此时与抬起过程相反，电磁阀预紧力越大，对球阀向下的作用力越大落座时间缩短，控制腔提前建压，针阀落座时间缩短使得关闭响应减小，减少了关闭时的喷射量。由图2(b)、(c)、(d)可知电磁阀弹簧预紧力由52N增加至82N时，盛油腔平均温度由78.618 $^{\circ}$ C增加至80.184 $^{\circ}$ C，喷射压力波动由167.717barA增加至199.938barA，电磁阀弹簧预紧力的变化并不对盛油腔内的燃油波动变化造成直接影响，因此对盛油腔温度和压力波动影响显著性较低。

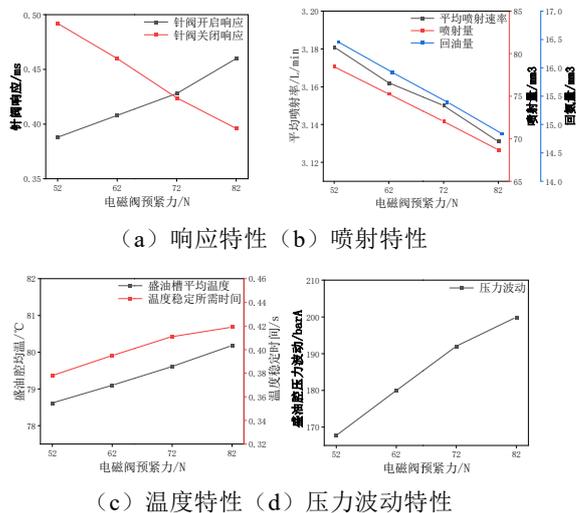


图2 不同电磁阀预紧力下的喷射器特性

2.2 控制阀杆升程对喷射特性的影响

图3为控制阀杆升程对喷射器喷射特性的影响。由图3(a)可知，由52 μ m增加至82 μ m时，开启响应无明显变化，关闭响应由0.372ms增加至0.464ms。

控制阀杆升程的增大即相当于增大了电磁铁和衔铁之间的距离,控制阀杆提升的时间长短几乎与泄油速率无关,因此控制阀杆升程对针阀开启响应无影响;针阀开始关闭时,控制阀杆带动出油球阀落座时间较长从而导致针阀关闭响应滞后,最终增加了喷射持续期,增大了喷射量。另外,针阀关闭速度是在球阀落座之后由控制腔的建压速度决定的,因此控制阀杆升程不影响针阀关闭速度。控制阀杆升程由 $52\mu\text{m}$ 增加至 $82\mu\text{m}$ 时,盛油腔平均温度降低,但变化在 1°C 内,喷射压力波动由 198.647barA 减少至 184.320barA ,这是因为控制阀杆升程增大,喷射速率增大,燃料在盛油腔中停留时间短,同时在喷射周期内盛油腔内低温燃油占据时间更短,因此盛油腔中温度更高。

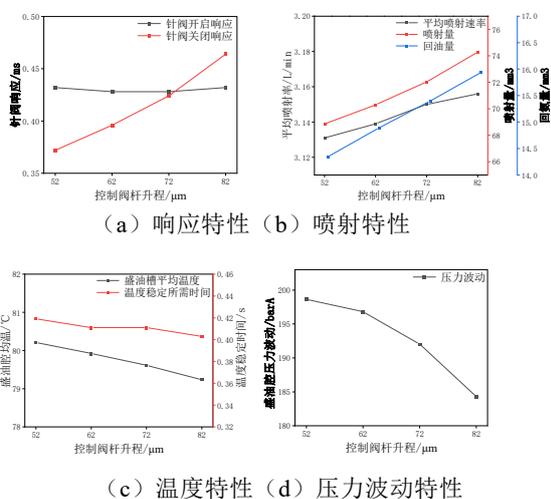


图3不同控制杆升程下的喷射器特性

2.3 柱塞直径对喷射特性的影响

柱塞直径直接决定着控制腔可变容积的大小,柱塞上表面的液压波动通过对柱塞的作用力从而对针阀的运动特性产生影响。图4示为柱塞直径对喷射器动态响应的影响。柱塞直径由 4.1mm 变化至 4.7mm 时,针阀开启响应由 0.416ms 增大至 0.472ms 。针阀关闭响应由 0.556ms 减小至 0.356ms ,柱塞直径的改变对针阀关闭响应比针阀开启响应影响程度更大,喷氨量由 79.291mm^3 减小到 66.644mm^3 。柱塞直径越大,柱塞上表面的液力对柱塞的作用面积增加,导致针阀所受向下的力增加。针阀抬起过程中所需克服的阻力也就越大,导致关闭阶段喷氨时间变长;泄油孔关闭后,柱塞直径越大,控制腔中对柱塞的作用力越大,针阀落座就越迅速。控制腔中充油时间的增加使建压速度降低,导致回油量减少,但是燃料的建压时间很短,所以影响较小。当柱塞直径为 4.1mm 时,针阀关闭所受阻力过大导致

无法快速关闭;当柱塞直径为 4.7mm 时,针阀开启延迟时间过长从而影响喷射量。考虑到极端情况,柱塞直径过大时,控制腔对柱塞产生的液力过大会导致针阀无法离开阀座锥面导致无法正常抬起;柱塞直径处于较小水平时,控制腔内燃料对柱塞产生的向下的力小于盛油腔内的燃料对其产生的向上的液压力,已开启的针阀无法正常落座,因此柱塞直径大小需选择合适的值。柱塞直径的增大会使通往盛油腔油道中的流体流速减慢,从壁面吸热增加,从而流至盛油腔时温度更高。

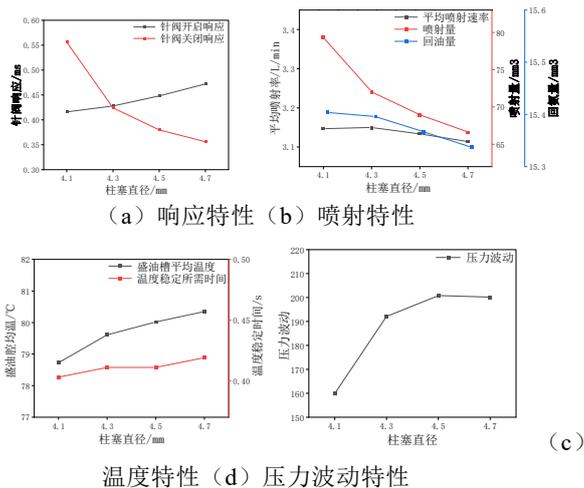
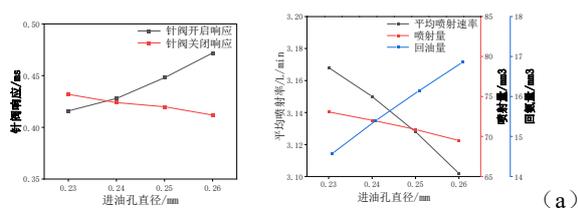


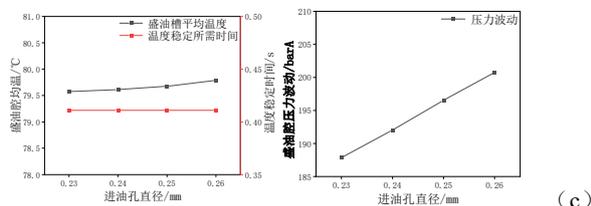
图4不同柱塞直径下的喷射器特性

2.4 进油孔直径对喷射特性的影响

进油孔作为控制腔高压燃料的入口,其孔径大小通过影响控制腔内燃料的液压特性,进而影响控制活塞的运动状态和运动特性。图5为进油孔直径对喷射器喷射特性的影响。由图可知,适当减小进油孔直径可以改善针阀开启响应,进油孔孔径对针阀关闭响应影响不明显。进油孔直径由 0.23mm 变化至 0.26mm 时,针阀开启响应时间由 0.416ms 增大至 0.472ms 。当进油孔孔径增大时,进入控制腔的燃料量增大从而导致控制腔中的液压力增大,针阀开启过程所受阻力变大,进而导致喷射器针阀开启响应时间变长,尽管回油量也因控制腔中压力的增大而增加,但是相比于进油量的增加,回油量过小,盛油腔中的压力还是随着进油孔的增大而增加。针阀关闭时,出油孔关闭,进油孔孔径增大时,控制腔内建压速度更快,控制腔的压力增大加速针阀落座。进油孔直径的增大对盛油槽温度无明显影响,但会增大盛油腔的压力波动,这是因为随着进油孔的增大,进入盛油腔中的燃油量减小,使得压力波动更大。



响应特性 (b) 喷射特性

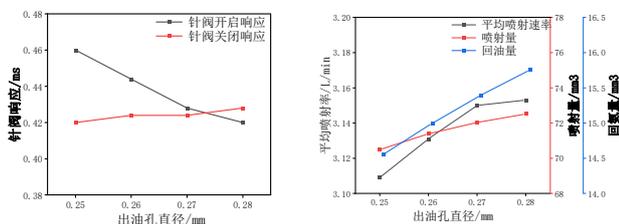


温度特性 (d) 压力波动特性

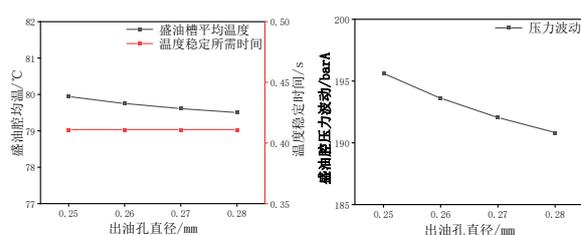
图 5 不同进油孔直径的喷射器特性

2.5 出油孔直径对喷射特性的影响

图 6 为出油孔孔径对喷射器动态特性的影响。由图可知，出油孔孔径的增加有利于改善针阀开启响应性能，而对针阀关闭响应无显著效果。由图 6 (b)、(c)、(d) 可知，出油孔直径由 0.25mm 变化至 0.28mm，出油孔直径的增大使喷氨量由 70.485mm³ 增大至 72.516mm³，同时回氨量增大。这是因为出油孔孔径直接影响控制腔内的燃料泄压速度与泄压量，出油孔孔径越大，在针阀开启时控制腔泄压越快，针阀更易抬起使针阀开启时间变短，增加了喷射时间与喷射速率使喷氨量增加。出油孔孔径决定着泄氨的流通面积，因此所列参数中对回氨量的影响也最为显著；建压时控制腔不进行泄油，出油孔孔径的大小对针阀关闭过程不产生影响。出油孔直径的大小对盛油槽温度无明显影响，这是因为控制腔离盛油腔较远，盛油腔的温度主要还是来源于接近喷嘴端的传热。由于回油孔的增大有利于减小控制腔的压力波动，从而也减小了盛油腔的压力波动。



(a) 响应特性 (b) 喷射特性

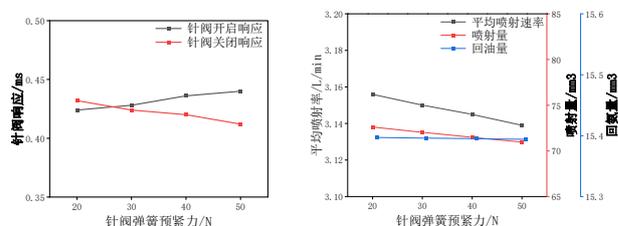


(c) 温度特性 (d) 压力波动特性

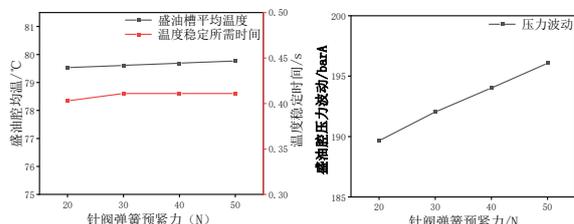
图 6 不同出油孔直径的喷射器特性

2.6 针阀弹簧预紧力对喷射特性的影响

图 7 为针阀弹簧预紧力对喷射器动态特性的影响。由图可知针阀弹簧预紧力对针阀响应特性影响较小。针阀的运动主要受控制腔向下的液压力、针阀弹簧预紧力和盛油腔向上的液压力三个力作用，在针阀开启时，针阀弹簧预紧力的增大使针阀受到的开启阻力变大，开启响应时间变长；在控制阀关闭后，针阀弹簧预紧力的增大使得控制腔的压力回复更快，针阀落座更快，缩短了针阀关闭时间。这也使得喷氨时间减少，喷氨量由 72.610mm³ 减小到 70.962mm³；针阀弹簧预紧力的变化对盛油槽温度及温度稳定时间影响较小，针阀弹簧预紧力 20N-50N 的变换范围内对喷射过程的影响不大；针阀弹簧预紧力的增大使得流道中需要积蓄更大的压力打开针阀，同时落座时对内流的液击更大，从而盛油腔的压力波动增大，从 189.653barA 增大至 196.076barA。



(a) 响应特性 (b) 喷射特性



(c) 温度特性 (d) 压力波动特性

图 7 不同针阀弹簧预紧力下的喷射器特性

2.7 针阀最大升程对喷射特性的影响

图 8 为不同针阀最大升程下的喷射器动态特性，由图可知，开启响应时间随针阀最大升程的增大而增加；针阀最大升程越大，针阀落座时间越长。最

大升程由 0.22mm 变化至 0.30mm 时, 针阀开启响应时间由 0.42ms 增大至 0.444ms, 针阀关闭响应时间由 0.412ms 增大到 0.448ms。由于针阀在达到受临界压力被抬起前, 控制腔等结构参数不改变的条件下, 控制腔和盛油腔压力波动是相同的, 因此针阀开启速度不随针阀最大升程改变, 由于针阀最大升程的增加增加了针阀抬起的位移, 针阀与阀座之间的节流效应减弱, 喷射器喷射速率增加从而增加喷射量。对于关闭响应, 当针阀升程较小时, 针阀与阀座的初始距离较小, 针阀落座时间会更短。尽管在针阀开启阶段, 针阀最大升程增大时, 控制腔容积会跟着减少, 但是减少容积相比于控制腔容积来说过小, 导致回油量变化小; 喷射速率的增加也强化了内流的对流换热从而使盛油腔温度降低, 但总体上对盛油腔温度及温度稳定时间影响较小。

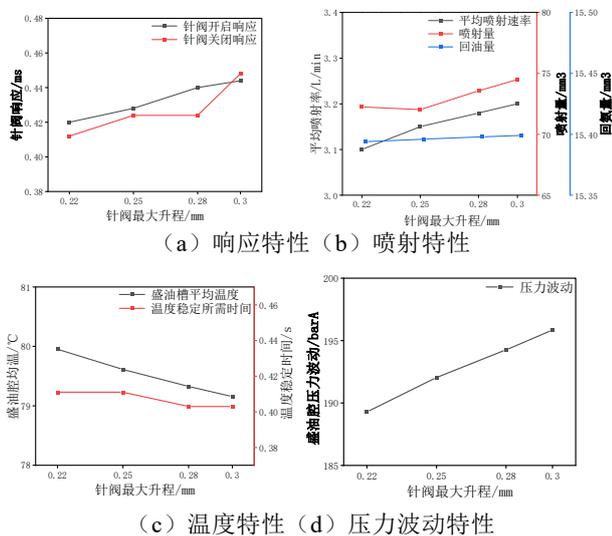


图 8 不同针阀最大升程下的喷射器特性

2.8 喷孔直径对喷射特性影响

喷嘴结构有助于改善燃烧过程, 实现混合物的充分混合并减少废弃物的排放。而喷嘴结构中, 喷孔孔径将显著影响混合物的形成。由图 9 可知, 喷孔直径的变化主要影响喷射器喷射速率和喷射量, 对针阀响应与回油量无明显影响。这是由于控制腔参数才是针阀响应与回油量的主导因素, 喷孔直径与针阀结构并非直接连接。由图 9 (b) (c) (d) 可知, 喷孔直径越大, 喷射速率和喷射量越大。喷孔直径由 0.14mm 变化到 0.17mm 时, 喷油量由 64.204mm³ 增大到 87.329mm³, 盛油槽温度由 81.276℃ 减小到 76.67℃, 温度稳定时间由 0.427s 减小至 0.387s。喷孔直径决定着燃料向气缸内喷射的流通面积, 对喷射量的影响最为显著, 喷孔直径变大导致喷射速率加快, 盛油腔中热交换越快

从而降低盛油腔中的温度, 同时盛油腔中的压力波动也越大。

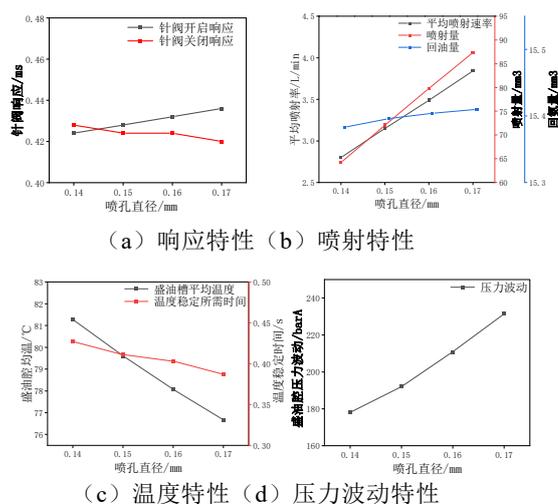


图 9 不同喷孔直径下的特性

3 氨燃料喷射器结构参数影响因素量化分析

量化分析方法是指利用百分比进行参数的量化分析, 得到量化指标衡量影响参数对目标响应特性的影响显著程度的分析方法。用百分比可得到不同特性参数的关键影响结构参数, 也称为权重分析。这有助于筛选出影响权重较大的结构因素进行关键参数的优化设计, 为氨燃料喷射器结构设计提供理论参考。其主要步骤为: 针对在影响研究过程中各参数影响程度和参数选取范围不一致等问题, 统一以无量纲化手段开展影响参数对目标的影响因子计算, 以求得不同影响参数影响因子占影响因子总值的百分比, 即可获取各影响参数对目标的影响权重。其中, 影响因子的计算公式如下所示:

$$B_A = \frac{\Delta B / \Delta A}{B_{ref} / A_{ref}}$$

式中: B_A 为影响参数对目标的影响因子;
 A_{ref} 为影响参数的基准值;
 B_{ref} 为影响参数为基准值下对应目标值;
 ΔA 为影响参数的变化范围;
 ΔB 为影响参数变化导致的目标变化量。

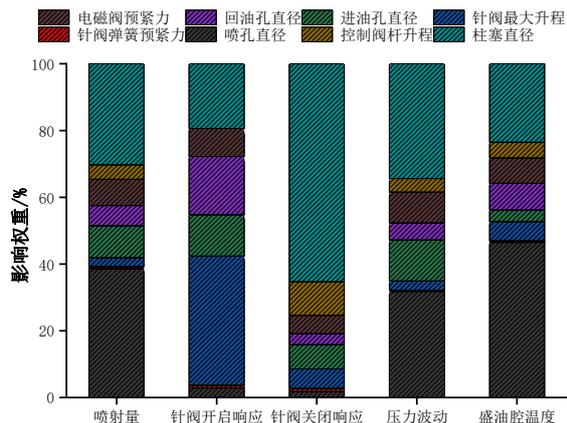


图 10 结构参数影响权重

由图 10 可知，对于喷射量，喷孔直径、柱塞直径、进油孔的影响权重分别为 38.6%、30.3%、9.6%。喷孔直径直接决定着燃料喷射的流通面积，因此对喷射量的影响最为直接也最为显著。柱塞直径同样导致进氨速率明显变化，柱塞直径的增加使进入喷射系统的燃料量呈平方增加，从而增加喷射量。进油孔直径通过改变进氨流通面积影响控制腔内压力的泄放和建立速度进而引起喷射量波动；

对于针阀开启响应，针阀最大升程、柱塞直径、回油孔的影响权重分别为 38.7%、19.4%、17.4%，其中电磁阀升程不影响控制腔的泄压速度，对开启响应无影响，而电磁阀弹簧预紧力直接作用于电磁阀的开启与控制腔的卸压过程，因此对开启响应有一定影响。针阀预紧力对于针阀开启起到阻力作用，对针阀落座起到助力作用，从而引起针阀加速度变化；但是针阀的运动是由燃油压力起主导作用，弹簧预紧力大小与控制腔的高压燃油压力相比过小，其影响程度可以忽略；对于针阀关闭响应，柱塞直径、进油孔直径、针阀最大升程的影响权重分别为 65.3%、7.3%、5.9%，针阀关闭响应影响权重显著因素与针阀关闭响应相同；

对于压力波动，柱塞直径、喷孔孔径、进油孔孔径影响权重分别为 34.4%、31.8%、9.2%，因此控制腔参数对压力波动具有显著影响，其中柱塞直径直接影响容积腔中的压力波动。控制腔容积过小时，针阀开启延迟时间减小使得喷射过程前期喷射速率过急，也会加剧控制腔中的压力波动。通过对针阀的作用也会影响盛油腔中的压力波动，喷射器的主要节流作用发生在喷孔处，因此喷孔的孔径对盛油腔压力波动影响显著；

对于盛油腔温度，喷孔孔径、柱塞直径、电磁阀预紧力影响权重分别为 46.5%、23.5%、7.6%。喷射孔径的大小直接决定喷射速率，从而决定盛油

腔中的流体流速影响盛油腔中温度，柱塞直径影响喷射流路的分配情况从而影响盛油腔中温度。

4 总结

本文对氨燃料喷射器性能影响因素展开研究，分别分析了电磁阀预紧力、控制阀杆升程、进出油孔直径、控制活塞直径、针阀弹簧预紧力和喷孔直径等关键参数对喷射特性的影响。采用权重分析方法，在不同工况下获取影响喷氨量特性、响应特性、温度特性、压力特性的关键参数，得出以下结论：

(1) 对于喷射量，喷孔直径、柱塞直径、进油孔的影响权重分别为 38.6%、30.3%、9.6%，均与喷射量成正相关。喷孔直径与喷射速率呈正相关，柱塞直径、进油孔与喷射速率呈负相关。

(2) 对于针阀开启响应，针阀最大升程，柱塞直径，回油孔直径的影响权重分别为 38.7%、19.4%、17.4%。针阀最大升程、柱塞直径与针阀开启响应时间呈正相关，回油孔直径与针阀开启响应时间呈负相关。

(3) 对于针阀关闭响应，柱塞直径影响权重最大，占 65.3%，其次是进油孔直径、针阀最大升程分别为 7.3%、5.9%。柱塞直径与针阀关闭响应呈负相关。

(4) 对于压力波动，对于压力波动，柱塞直径、喷孔孔径、进油孔孔径影响权重分别为 34.4%、31.8%、9.2%。喷孔孔径、进油孔孔径与压力波动呈正相关。

(5) 对于盛油腔温度，喷孔孔径、柱塞直径、电磁阀预紧力影响权重最大，分别为 46.5%、23.5%、7.6%。喷孔孔径、电磁阀预紧力与盛油腔温度及稳定时间呈负相关，柱塞直径与盛油腔温度及稳定时间呈正相关。

参考文献:

- [1] The World Bank. New world bank research finds major opportunities in decarbonizing maritime transport [EB/OL]. 2021-04-15.
- [2] 帅石金, 王志, 马骁, 徐宏明, 何鑫, 王建昕. 碳中和背景下内燃机低碳和零碳技术路径及关键技术[J]. 汽车安全与节能学报, 2021, 12(04): 417-439.
- [3] Kojima Y, Yamaguchi M. Ammonia as a hydrogen energy carrier. Int J Hydrogen Energy 2022;47(54):22832-9

-
- [4] Shiyan Li and Tie Li and Ning Wang and Xinyi Zhou and Run Chen and P. Yi. An investigation on near-field and far-field characteristics of superheated ammonia spray. *Fuel*, 2022
- [5] Stephanie Frankl , Stephan Gleis, Stephan Karman, Maximilian, et al. Investigation of ammonia and hydrogen as CO₂-free fuels for heavy duty engines using a high pressure dual fuel combustion process. *International Journal of Engine Research*, 2020, 22, 3196 – 3208
- [6] Zhang Z, Long W, Dong P, Tian H, Tian J, Li Bo, et al. Performance characteristics of a two-stroke low speed engine applying ammonia/diesel dual direct injection strategy. *Fuel* 2023;332.
- [7] Jisoo Shin a, Sungwook Park, et al. Numerical analysis for optimizing combustion strategy in an ammonia-diesel dual-fuel engine. *Energy Conversion and Management*. Volume 284, 15 May 2023, 116980
- [8] Yongxiang Zhang, Wei Zhou, Yueying Liang, et al. An experimental and detailed kinetic modeling study of the auto-ignition of NH/diesel mixtures: Part 1- NH substitution ratio from 20% to 90%. *Combustion and Flame* , Volume 251, May 2023, 112391
- [9] The NIST Chemistry WebBook:
<https://www.nist.gov/chemistry/>