

# 高压共轨喷油器针阀开启与关闭过程规律研究

仇滔<sup>1,2</sup>, 刘天翔<sup>1</sup>, 安晓东<sup>3</sup>, 雷艳<sup>1</sup>, 代贺飞<sup>1</sup>

(1. 北京工业大学 环境与能源工程学院, 北京 100124; 2. 北京电动车辆协同创新中心, 北京 100081;  
3. 北京理工大学 机械与车辆学院, 北京 100081)

**摘要:** 高压共轨喷油器的针阀运动规律直接决定了喷油规律和雾化效果, 决定针阀运动规律的因素对改进喷油器结构以及提升雾化效果有着重要意义。自行搭建了高压共轨喷油器仿真模型; 该计算模型对喷油器的控制油路中进出油节流孔和球阀区域处, 有空化和无空化两个阶段的流量系数进行了优化; 结合喷油器的理论分析与试验验证, 研究了喷油器针阀的运动规律。结果表明: 针阀开启过程分为2个阶段, 第1阶段开启缓慢, 第2阶段开启迅速, 针阀关闭过程只有1个阶段; 导致针阀开启过程出现2个阶段是由于喷油器控制室内泄油过程的节流位置由球阀开启处转到了回油节流孔; 针阀关闭过程为1个阶段是由于球阀与阀座形成的间隙对控制室内回油过程起主要节流作用; 轨压主要对针阀开启第2阶段有影响, 而对针阀开启第1阶段与关闭阶段影响很小; 随着轨压的升高, 针阀开启第2阶段开启速度加快, 当轨压达到一定值时, 针阀开启第2阶段不再变化。

**关键词:** 动力机械工程; 柴油机; 喷油器; 针阀升程; 液力过程

**中图分类号:** TK 421+.42 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1093(2017)10-2069-06

**DOI:** 10.3969/j.issn.1000-1093.2017.10.025

## Research on Movement Characteristics of Needle Valve in Common Rail Injector for Diesel Engine

QIU Tao<sup>1,2</sup>, LIU Tian-xiang<sup>1</sup>, AN Xiao-dong<sup>3</sup>, LEI Yan<sup>1</sup>, DAI He-fei<sup>1</sup>

(1. College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;  
2. Beijing Electric Vehicle Collaborative Innovation Center, Beijing 100081, China;  
3. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** The movement of needle valve in the common rail injector determines the injection and atomization effect directly. The movement rule of needle valve in the common rail injector is important to improve the structure of injector and the atomization effect. A high-pressure common rail injector simulation system was built, and a calculation model was established for optimizing the flow coefficients in two stages of cavitation and non-cavitation at the oil inlet and outlet holes of high pressure common rail injector and in the ball valve area. The movement characteristics of needle valve in the common rail injector are studied through theoretical analysis and experiments. The results show that the opening process of needle valve can be divided into two stages: slow opening stage and fast opening stage. Two opening stages of needle valve are due to the transfer of the throttled position. However, the needle valve is mainly influenced by the throttled position, so the closure of the needle valve is a single-stage. Rail pressure has an effect on the second fast opening stage, but not on the slow opening stage or the closing process. The o-

收稿日期: 2017-03-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(91641106); 北京市自然科学基金项目(3172007)

作者简介: 仇滔(1976—), 男, 副教授。E-mail: qiutao@bjut.edu.cn

pening process speeds up with the rise of the rail pressure. When the rail pressure reaches to a certain value, the fast opening stage of needle valve remains unchanged.

**Key words:** power machinery engineering; diesel engine; common rail injector; needle lift; hydraulic process

## 0 引言

喷油器是高压共轨系统中连接供油系统与燃烧系统的关键部件,喷油器的针阀升程是柴油机工作指标的重要参数之一。针阀升程决定喷油器喷射雾化效果,精确控制喷油器针阀升程,有助于提高柴油机的燃烧效率,降低油耗,减少尾气排放<sup>[1-2]</sup>。

高压共轨喷油器针阀运动是由喷油器内液力控制来驱动的,针阀升程控制喷油规律以实现更快、更精确地喷射,所以研究针阀升程的影响因素具有重要意义。Payri 等<sup>[3]</sup>通过研究不同针阀升程对燃油雾化效果的影响,发现针阀升程对喷孔上游压力与雾化效果有很大的影响;陈威等<sup>[4]</sup>通过三维动态模拟研究针阀升程对喷孔的质量流量以及空化影响;解方喜等<sup>[5]</sup>通过数值模拟研究针阀运动过程及控制室、蓄压腔内压力变化对喷射雾化的影响。可见研究喷油器针阀升程的重要性,可以提高雾化效果,降低油耗,减少污染。

上述研究都是利用数值模拟研究针阀开启对喷射雾化的影响,但是针阀开启与关闭(简称启闭)过程的控制因素以及针阀启闭规律并非简单地由于压力差而造成的。针阀运动过程是个非常复杂的过程,Lino 等<sup>[6]</sup>、苏海峰等<sup>[7]</sup>几乎认为针阀运动是受喷油器内液力与针阀弹簧共同作用的。因此有必要更清晰地研究喷油器针阀运动过程以及针阀升程规律。本文以德国博世公司生产的高压共轨喷油器为对象,在高压共轨试验台架上通过位移传感器测得喷油器针阀升程规律,着重对比轨压压力 $p_r$ 分别在 60 MPa、100 MPa 和 140 MPa 3 个工况针阀升程的试验结果,分析针阀升程的规律以及影响针阀启闭的因素。

## 1 针阀开启液力分析

高压共轨喷油器主要由电磁阀控制部分、球阀、控制活塞、阀杆以及针阀组成,如图 1 所示。

根据喷油器针阀阀体的受力分析可知,针阀的运动方程表示为

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = p_r A_{Ne} - p_{cc} A_N - k(y + y_0) - G - f \frac{dy}{dt}, \quad (1)$$

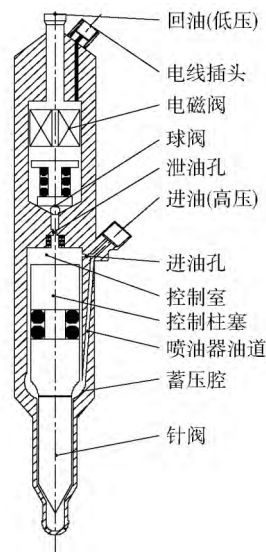


图 1 高压共轨喷油器

Fig. 1 Schematic diagram of solenoid injector

式中:  $m$  为阀杆和针阀总质量;  $p_{cc}$  为控制室内压力;  $k$  为针阀弹簧弹性系数;  $y$  是针阀升程;  $y_0$  为针阀弹簧初始位移;  $G$  为针阀重力;  $f$  为针阀的摩擦系数;  $A_{Ne}$  为针阀在蓄压腔内有效承压面积,  $A_N$  为针阀在控制室内有效承压面积, 而且  $A_{Ne} < A_N$ 。

由针阀运动方程可知, 控制室内压力  $p_{cc}$  变化决定着针阀的运动, 所以喷油器是通过调整控制室内压力变化实现对针阀的运动控制。

高压共轨喷油器控制室工作原理如图 2 所示。图 2(a) 为球阀关闭状态, 其控制室内压力  $p_{cc}$  等于轨压  $p_r$ , 即  $p_r = p_{cc} = p_a$ ,  $p_a$  为出油节流孔处压力。图 2(b) 为球阀开启状态, 当球阀向上开启时, 球阀与阀座之间间隙 c-c 的横截面积  $A_{c-c}$  增大。此时, 球阀与阀座之间间隙 c-c 的横截面积  $A_{c-c}$  小于回油节流孔 a-a 横截面积  $A_{a-a}$ , 即  $A_{c-c} < A_{a-a}$ 。控制室内燃油通过间隙 c-c 流出到回油管, 此时控制室内的压力  $p_{cc}$  降低, 即  $p_r > p_{cc} > p_a > p_c$ ,  $p_c$  为出油间隙处压力。

控制室内的压力  $p_{cc}$  变化由控制室内的燃油体积流量  $q$  决定, 其表达式为

$$q = C_d A_{c-c} \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}} = C_d A_{c-c} \sqrt{\frac{(p_{cc} - p_{re})}{\rho}}, \quad (2)$$

式中:  $C_d$  是流量系数;  $\rho$  是燃油密度;  $p_{re}$  为回油管内

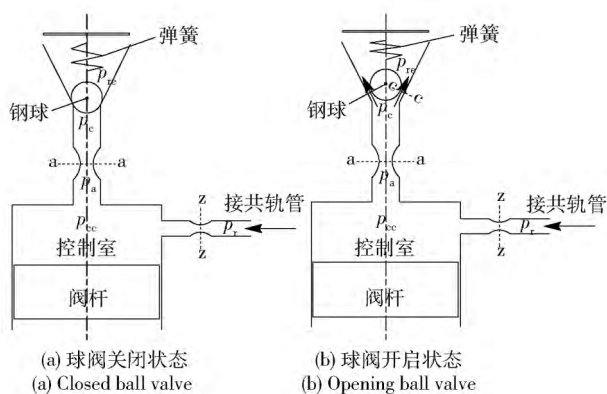


图 2 高压共轨喷油器控制室结构原理图

Fig. 2 Structure diagram of control chamber

压力;  $\Delta p$  为回油管内压力与控制室内压力之间的差。

由于控制室内的压力  $p_{cc}$  等于轨压  $p_r$ , 远大于回油管内压力  $p_{re}$ , 控制室内与回油管形成的巨大压力差, 在很小的间隙  $c-c$  处会使流体产生空化现象, 空化对流体流量与流动特性有很大的影响。通过作者之前的研究中发现, 较大的压力差使流体通过较小的截面时有空化现象的产生<sup>[8]</sup>。研究结果表明, 在没有空化产生时流量系数  $C_d$  是常数, 其大小由流通截面的结构与面积决定; 如果空化发生, 其流量系数是随着入口压力的增加而减小的。因此 (2) 式中的流量系数  $C_d$  并不是常数, 而是随着控制室内压力变化与流体流动特性而变化的。

空化的产生会对燃油流量系数产生的影响, 应研究控制室内的流动状态。因此, 通过流量系数公式、连续性方程以及伯努利方程, 流量系数  $C_d$  表达式为

$$C_d = C_c \left( \frac{p_i - p_v}{p_i - p_b} \right)^{1/2}, \quad (3)$$

式中:  $C_c$  是间隙  $c-c$  出口的收缩系数;  $p_i$  是入口压力;  $p_b$  是出口压力, 即背压;  $p_v$  是流体的饱和蒸汽压。

将 (3) 式带入到 (2) 式, 得

$$q = C_c A_{c-c} \sqrt{\frac{p_i - p_v}{p_i - p_b}} \sqrt{\frac{(p_{cc} - p_{re})}{\rho}}. \quad (4)$$

在球阀打开过程中,  $A_{c-c}$  逐渐增大, 当  $A_{c-c}$  小于  $A_{a-a}$  时, 控制室的体积流量  $q$  取决于  $A_{c-c}$ , 当  $A_{c-c}$  大于  $A_{a-a}$  时, 则控制室的体积流量  $q$  取决于  $A_{a-a}$ , 所以喷油器控制室内的质量守恒方程为

$$A_p \frac{dx}{dt} - \frac{V_{cc0}}{\beta} \frac{dp_{cc}}{dt} =$$

$$\begin{cases} C_{dz} A_{z-z} \sqrt{\frac{2(p_r - p_{cc})}{\rho}} - C_{dc} A_{c-c} \sqrt{\frac{2(p_{cc} - p_{re})}{\rho}}, \\ A_{c-c} < A_{a-a}; \\ C_{dz} A_{z-z} \sqrt{\frac{2(p_r - p_{cc})}{\rho}} - C_{da} A_{a-a} \sqrt{\frac{2(p_{cc} - p_{re})}{\rho}}, \\ A_{c-c} \geq A_{a-a}. \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $A_p$  是顶杆的上端面积;  $A_{z-z}$  为进油节流孔  $z-z$  的横截面积;  $C_{dz}$  为进油节流孔  $z-z$  的流量系数;  $C_{dc}$  为间隙  $c-c$  的流量系数;  $C_{da}$  为回油节流孔  $a-a$  的流量系数;  $V_{cc0}$  是控制室初始体积;  $\beta$  为燃油体积弹性模量。

由上述理论分析可知: 控制室内压力  $p_{cc}$  变化是由于控制室内燃油流量的变化导致, 而控制室内燃油流量由流经控制室内的体积流量  $q$  决定; 控制室的体积流量  $q$  取决于回油油路最低有效流动截面, 即间隙  $c-c$  的横截面积  $A_{c-c}$  与回油节流孔  $a-a$  横截面积  $A_{a-a}$ 。在球阀打开过程中,  $A_{c-c}$  逐渐增大, 当  $A_{c-c}$  小于  $A_{a-a}$  时, 控制室的体积流量  $q$  取决于  $A_{c-c}$ ; 当  $A_{c-c}$  等于或者大于  $A_{a-a}$  时, 控制室的体积流量  $q$  取决于  $A_{a-a}$ 。

## 2 试验装置

如图 3 所示, 为高压共轨喷油器针阀升程试验测试装置流程图。压力传感器测量喷油器入口压力, 电流位移传感器测量针阀升程位移。高压油泵以不同的转速运行以提供不同的轨压。试验装置如表 1 所示。

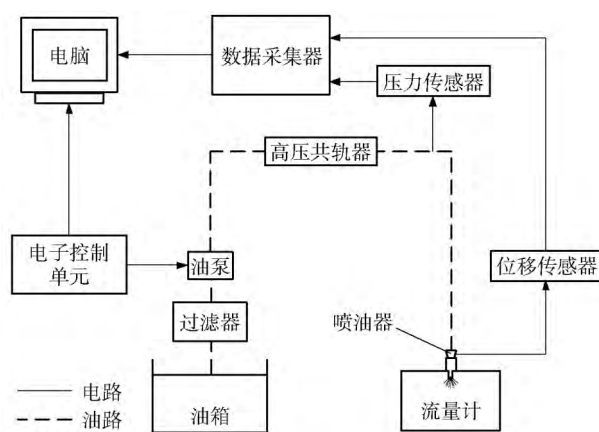


图 3 试验装置流程示意图

Fig. 3 Schematic diagram of CR test apparatus

在试验过程中, 高压油泵保持一个恒定的转速, 通过调节阀调节以维持稳定的压力。调节油泵转速以保持不同轨压压力, 轨压压力  $p_r$  在 60 MPa、100 MPa 和 140 MPa 进行试验以测试喷油器工作过程中针阀升程。在试验过程中, 燃油温度维持一个

恒定的温度(25℃)。对于每一个稳定的试验条件,高压油泵需要持续运行3分钟,喷油器针阀升程测试3次并采用平均值。

表 1 试验装置

Tab. 1 Test apparatus

名称	型号	参数	数值
压力 传感器	Kistler 4067C3000	测量范围/MPa	0~300
		灵敏度/ (mV·MPa <sup>-1</sup> )	33.3
		精度/%	<±0.5(满刻度输出)
		频率/Hz	>200
		工作温度/℃	0~120
		工作温度/℃	-50~175
电流位移 传感器	HZ898	探头直径/mm	11
		线性量程/mm	4
		非线性误差/%	±1

### 3 模型建立及验证

根据针阀液力过程分析的公式和测得的高压喷油器特性数据在 Matlab/Simulink 中建立高压共轨喷油器的仿真模型,模型主要参数如表 2 所示。

表 2 模型主要参数

Tab. 2 Key model parameters

参数	数值
电磁阀最大升程/mm	0.4
电磁阀弹簧预紧力/N	40
电磁阀质量/g	11.5
小球直径/mm	1.3
阀杆上端直径/mm	4.3
针阀直径/mm	3.2
针阀质量/g	27
针阀弹簧预紧力/N	50
针阀最大升程/mm	0.3
喷孔数	8
喷孔直径/mm	0.173

## 4 结果与分析

### 4.1 针阀运动的规律

如图 4 所示,喷油器针阀升程曲线有 5 个转折点,依次命名为 A、B、C、D 和 E,其中 A 点对应针阀开启时刻, B 点为针阀开启过程中的转折点,将针阀

开启过程分为 2 个阶段, C 点对应针阀开启到最大时刻, D 点对应针阀开始关闭时刻, E 点对应针阀完全关闭时刻,喷油器停止喷射燃油。

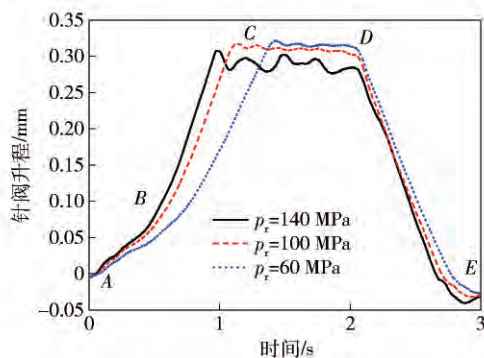


图 4 在不同压力下试验针阀升程曲线图

Fig. 4 Experimental needle lifts at different rail pressures

因此,针阀升程曲线可分为 4 段,即 AB、BC、CD 与 DE 段。AC 段是针阀开启过程,开启时间大约为 1 ms,其中:AB 段为针阀开启初始阶段,BC 段为针阀快速开启阶段,AB 段与 BC 段的斜率不相同;CD 段是针阀持续开启阶段,即升程开启到最大值;DE 段是针阀关闭阶段。

在  $p_r$  为 140 MPa 工况下,喷油器针阀升程试验结果表明:针阀开启过程分为 2 个阶段,针阀开启初始段曲线的斜率较小,快速开启段曲线的斜率较大;针阀关闭段只有 1 个阶段。

图 4 为在  $p_r$  为 60 MPa、100 MPa 和 140 MPa 3 个工况下的试验针阀升程曲线图。从图 4 中可以看出:不同工况下,针阀的开启过程都为 2 个阶段,而关闭过程只有 1 个阶段。同时,随着轨压压力的升高,只有 B 点与 C 点位置变化, A 点、D 点与 E 点基本保持不变。

图 5 为不同工况下针阀开启过程两个阶段 AB、BC 段与关闭阶段 DE 段曲线的斜率,其中 AB 与 DE 段曲线的斜率随轨压压力增大几乎保持不变,而 BC 段曲线的斜率随轨压压力增大而增大。

因此,轨压压力的变化影响针阀快速开启段(BC 段),随着轨压压力升高,BC 段曲线斜率逐渐增大,即 BC 段开启时间逐渐减小;而轨压压力的变化不影响针阀开启初始段(AB 段)以及针阀关闭段(DE 段)。

### 4.2 导致针阀开启过程两段原因分析

由第 1 节针阀开启液力的理论分析可知,针阀打开过程是因为控制室内的压力降低,而控制室内压力的降低是由回油节流孔横截面积和球阀开启的

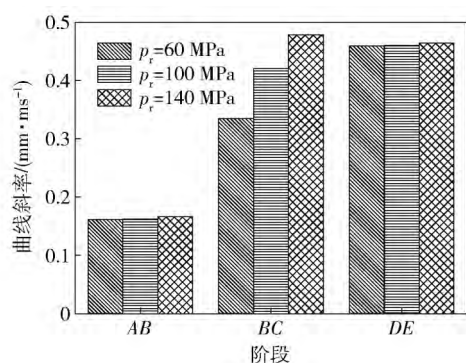


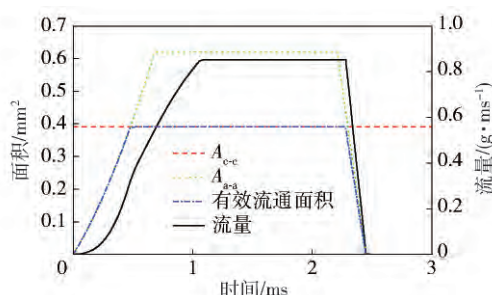
图5 不同工况针阀升程各段斜率图

Fig. 5 Slopes of the needle lifts at different rail pressures

面积共同决定的。

在喷油器针阀开启整个过程,  $A_{a-a}$  和  $A_{z-z}$  保持不变, 但  $A_{c-c}$  是随着球阀开启在变化, 如图 2(b) 所示。由(5)式可知, 控制室回油有效流通横截面积由  $A_{c-c}$  和  $A_{a-a}$  共同决定。在 0 ms 到 0.5 ms 的针阀开启初始阶段, 控制室回油有效流通横截面积由  $A_{c-c}$  决定,  $A_{c-c}$  是随球阀的开启而增加; 当球阀开启到一定时刻 (B 点时刻),  $A_{c-c}$  等于  $A_{a-a}$ , 则 B 点时刻以后控制室回油的有效流通面积由  $A_{a-a}$  决定。

如图 6 所示, 在  $p_r$  为 140 MPa 状态高压共轨喷油器仿真模型计算得到的回油质量流量与有效流通面积图可以看出: 针阀在开启过程中, 回油有效流通面积曲线在 0 ms 到 0.5 ms 时刻 (B 点时刻), 有效流通面积与  $A_{c-c}$  相等, 在 0.5 ms 到 1 ms 时刻, 有效面积等于  $A_{a-a}$ 。同时回油的质量流量曲线在 0.5 ms 时刻 (B 点时刻) 出现明显转折点, 而流量变化是由有效流通横截面积决定的, 因此仿真数据很好地验证了上述理论分析。

图6  $p_r$  为 140 MPa 工况仿真质量流量与有效流通横截面积Fig. 6 Effective sectional areas and mass flow rate ( $p_r = 140$  MPa)

因此, 针阀开启过程两个阶段是由回油节流孔有效流通横截面积决定的: 针阀开启初始段的回油

节流孔有效流通横截面积为  $A_{c-c}$ ; 针阀快速开启段的回油节流孔有效流通横截面积为  $A_{a-a}$ 。

### 4.3 导致针阀关闭过程一段原因分析

针阀升程曲线图 4 中, DE 段是针阀关闭过程, 其过程只有 1 个阶段, 斜率保持不变。

由第 1 节针阀开启液力的理论分析可知, 针阀关闭是因为控制室内压力升高, 针阀所受到压力差逐渐减小为 0, 针阀弹簧作用针阀使其落座; 控制室内压力升高主要由  $A_{c-c}$  决定 (即  $A_{c-c}$  小于  $A_{z-z}$ ), 其控制室内的质量守恒方程为

$$A_p \frac{dx}{dt} - \frac{V_{cc0}}{\beta} \frac{dp_{cc}}{dt} = C_{dz} A_{z-z} \sqrt{\frac{2(p_r - p_{cc})}{\rho}} - C_{da} A_{c-c} \sqrt{\frac{2(p_{cc} - p_{re})}{\rho}} \quad (6)$$

由(6)式可知, 在针阀关闭过程中当  $A_{c-c}$  小于  $A_{z-z}$  时, 球阀与阀座间隙 c-c 的流通能力在针阀关闭过程中起主要作用, 控制室内压力  $p_{cc}$  逐渐变大, 针阀蓄压腔压力作用力与控制室内压力作用力相互作用; 随着控制室内压力  $p_{cc}$  逐渐增加, 又由(1)式可知, 当针阀上下无压力差作用时, 针阀关闭过程主要受针阀弹簧力以及重力; 由于针阀弹簧力与重力保持不变, 针阀落座。

如图 6 所示, 在  $p_r$  为 140 MPa 状态高压共轨喷油器仿真模型计算得到的回油质量流量与有效截面图中看出, 关闭过程的质量流量曲线没有明显转折点; 而图 6 中流量曲线与有效面积曲线可以看出: 当有效面积为  $A_{c-c}$  时, 流量开始下降, 当有效面积变为 0 时, 流量也变为 0。

因此, 球阀与阀座间隙 c-c 的流通能力在针阀关闭过程中起主要作用, 所以针阀关闭段只有 1 个阶段。

## 5 结论

本文通过高压共轨试验研究了喷油器针阀升程规律, 得出以下结论:

1) 喷油器针阀在开启过程中分为 2 个阶段; 针阀快速开启段比针阀开启初始段曲线斜率大, 即针阀快速开启段开启速度大于针阀开启初始段开启速度。

2) 轨压对喷油器针阀开启初始段和关闭段几乎无影响, 但对针阀快速开启段有明显影响, 随着轨压的增大, 针阀快速开启段时间减少。

3) 针阀开启过程中出现两段开启阶段主要是由回油过程中的横截面积  $A_{c-c}$  和  $A_{a-a}$  决定的, 即回油

的有效流通面积。针阀刚开启时,燃油流通的有效面积为  $A_{c-e}$ ;随着球阀开启,其燃油流通有效横截面积变为  $A_{a-a}$ 。针阀关闭段只有 1 个阶段,主要由  $A_{c-e}$  决定。

4) 通过对针阀升程的研究,发现喷油器针阀升程不是简单的机械运动,而针阀运动主要由喷油器内部燃油流动决定,其升程规律由喷油器内部压力变化决定。

### 参考文献(References)

- [1] 杨永平. 发动机台架实验中喷油器针阀升程的调节方法及应用[J]. 小型内燃机与摩托车, 2006, 35(3): 8-10.  
YANG Yong-ping. Method and application of adjusting the needle valve lift in engine performance test[J]. Small Internal Combustion Engine and Motorcycle, 2006, 35(3): 8-10. (in Chinese)
- [2] 夏尚飞, 王会明, 侯加林. 喷油器针阀升程自动测试系统的研究[J]. 拖拉机与农用运输车, 2007, 34(5): 73-75, 77.  
XIA Shang-fei, WANG Hui-ming, HOU Jia-lin. Research on automatic testing system of injector nozzle body[J]. Tractor & Farm Transporter, 2007, 34(5): 73-75, 77. (in Chinese)
- [3] Payri R, Gimeno J, Viera J P, et al. Needle lift profile influence on the vapor phase penetration for a prototype diesel direct acting piezoelectric injector[J]. Fuel, 2013, 113(2): 257-265.
- [4] 陈威, 袁留杰, 胡以怀. 伞喷嘴针阀升程对燃油流动及空化的影响[J]. 内燃机工程, 2016, 37(4): 206-213.  
CHEN Wei, YUAN Liu-jie, HU Yi-huai. Investigation of influence of needle lift on internal flow and cavitation phenomenon in a conical-spray nozzle[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2016, 37(4): 206-213. (in Chinese)
- [5] 解方喜, 姚卓彤, 胡雪松, 等. 针阀运动和油压波动对燃油喷雾特性的影响[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2013, 43(4): 897-902.  
XIE Fang-xi, YAO Zhuo-tong, HU Xue-song, et al. Influence of dynamic change of needle and hydraulic pressure in diesel injection nozzle on fuel spray characteristic[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2013, 43(4): 897-902. (in Chinese)
- [6] Lino P, Maione G, Saponaro F, et al. Evolutionary optimization of model parameters for electro-injectors in common rail diesel engines[J]. Journal of Dynamic Systems Measurement and Control, 2016, 138(4): 041001-1-041001-8.
- [7] 苏海峰, 张幽彤, 王尚勇, 等. 高压共轨喷油器喷射特性试验与仿真[J]. 农业机械学报, 2011, 42(1): 22-26, 30.  
SU Hai-feng, ZHANG You-tong, WANG Shang-yong, et al. Numerical-experimental investigation of injection characteristics of high pressure common rail injector[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(1): 22-26, 30. (in Chinese)
- [8] Qiu T, Song X, Lei Y, et al. Influence of inlet pressure on cavitation flow in diesel nozzle[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 109: 364-372.