DOI: 10.16236/j.cnki.nrjxb.202504041

高速电磁阀的挤压流动特性

王字满，梁跨越，杨旭超
（北京理工大学机械与车辆学院，北京 100081）

摘要：通过高速挤压流动装置研究了常压下柴油环境中挤压流场演化特性，采用 Fluent 仿真研究了衔铁加速度为 29.9 ~ 67.4 m/s^2 的高速环境下圆形孔、扇形孔等 4 种衔铁结构对电磁阀气隙内挤压流动特性的影响，获得挤压流动特性理想的衔铁结构并在高压供油系统油泵试验台上进行验证. 结果表明：当衔铁加速度从 29.9 m/s^2 增至 67.4 m/s^2 时，衔铁表面流体受挤压后最大压力由 0.12 MPa 增至 0.24 MPa，衔铁边缘和孔边缘射流速度、衔铁侧壁面的涡量随之增大，导流孔处的流动更紊乱；方形衔铁改为圆形衔铁后，隙间流体受挤压后向外流出路径短，高压区面积减少了 6.6%，隙间液体能更快排出；圆形衔铁上扇形孔相比于圆形孔和导流槽，表面流体受挤压后在孔中部的射流相互影响弱，流动顺畅，衔铁表面压力最小，所受阻力最弱，响应速度最快. 在转速为 400 r/min 时，导流槽和扇形孔衔铁关闭延迟时间分别为 0.610 ms 和 0.405 ms，前者较后者延迟了 50.6%. 在转速为 1 250 r/min 时，导流槽和扇形孔衔铁关闭延迟时间分别为 0.850 ms 和 0.720 ms，前者较后者延迟了 18.1%.

关键词：高速电磁阀；高压供油系统；挤压流动；衔铁结构
中图分类号：TK421.4　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1000-0909(2025)04-0357-09

Squeezing flow characteristics of high-speed solenoid valve

Wang Ziman，Liang Kuayue，Yang Xuchao
（School of Mechanical Engineering，Beijing Institute of Technology，Beijing 100081，China）

Abstract：The evolution characteristics of the squeezing flow field in atmospheric diesel fuel were studied using high-speed squeezing flow device. Effects of four kinds of armature structures，including round hole and sector hole，on the squeezing flow characteristics in the gap between solenoid valve and armature under the high-speed condition of 29.9—67.4 m/s^2 were simulated using Fluent software. The armature structure with ideal squeezing flow characteristics was obtained and verified by high-pressure fuel supply system. The results show that when the acceleration of the armature increases from 29.9 m/s^2 to 67.4 m/s^2，the maximum pressure of the fluid on the armature surface increases from 0.12 MPa to 0.24 MPa，the jet velocity at the armature edge，and hole edge and the vorticity at the armature side wall increase，thus the flow at the diversion hole becomes more chaotic. When the square armature is replaced by the round armature，the flow path between the gaps is short，the area of the high-pressure zone is reduced by 6.6%，and the liquid between the gaps can be discharged faster. Compared with round hole and guiding trough，the fan-shaped hole on round armature has weak influence on the jet flow in the middle of the hole，the pressure on the surface of the armature is the least，the resistance is the weakest，and the response speed is the fastest. The experimental results show that the closing delay of guiding trough and sector hole armature is 0.610 ms and 0.405 ms respectively at the speed of 400 r/min，and the former is 50.6% longer. At the speed of 1 250 r/min，the closing delays of the guiding trough and the sector-hole armature are 0.850 ms and 0.720 ms，respectively，and the former is 18.1% longer.

Keywords：high-speed solenoid valve；high-pressure fuel supply system；squeezing flow；armature structure

电磁阀在汽车、船舶及制造业等多个领域均有应用场景，如喷油、燃气和制冷控制等[1-2]. 电磁阀能控制燃油系统高、低压油路的通断，是高压燃油系统的关键部分，高压供油系统向电磁阀总成输入信号，从

收稿日期：2024-09-23；**修回日期**：2025-01-12.
作者简介：王字满，博士，副教授，Ziman.wang@bit.edu.cn.
通信作者：王字满，博士，副教授，Ziman.wang@bit.edu.cn.

而实现对喷油量、喷油压力、喷油速率和喷油定时等的柔性控制，是动力系统向高速化、轻量化以及高强化等方面发展的重要手段[3].

电磁阀工作时衔铁处于柴油环境中，衔铁与电磁铁间存在一层油膜. 衔铁被吸合时，油膜受到挤压，厚度减小，油膜内压力发生变化，产生了抵抗厚度减小的力，使衔铁运动速度变慢，增大了电磁阀关闭延迟. 如何减小甚至消除该缓冲作用，使电磁阀延迟降低，达到供油迅速的效果，是一个亟待解决的问题.

高速电磁阀运动中，电磁铁与衔铁间气隙内的挤压流动可以简化为带孔平板间的挤压流动. 对于二维的挤压流动基础理论，Gupta 等[4]通过计算给出了二维两平板间非定常流动的 Navier-Stokes 方程相似解. Hamdan 等[5]将一小部分粉尘引入两移动圆盘挤压膜中，证明了挤压膜中粉尘的存在并不影响流体速度. 范玉等[6]研究了圆形导流孔位置、大小对电磁阀动态响应的影响，在磁轭间区打孔对电磁特性影响较小. 夏胜枝等[7]运用平行平板间缝隙流动基本理论对存在于电磁阀和方形衔铁之间的阻尼油膜进行简化分析. 范立云等[8]对永磁复合磁路高速电磁阀进行仿真，电磁阀在吸合阶段和复位阶段分别有 25.3% 和 44.1% 的能量转换为涡流损耗. 白云等[9]研究了永磁高速电磁阀的结构、驱动及材料对其涡流分布与损耗的影响.

当前对电磁阀的研究主要集中在开、闭行程中气隙、匝数和孔结构等因素之间对电磁力的影响上，对于圆形衔铁结构，特别是各式孔结构对电磁阀挤压流动特性影响的研究则鲜见报道[10-12]. 笔者使用直动、盘式及高响应电磁铁，主要浸泡在油液中运动. 当线圈通电时，电磁铁在油液中高速运动，挤压油液导致的局部流体压力变化会产生液阻阻碍电磁铁高速运动，从而影响响应. 基于此，笔者通过试验及 Fluent 仿真研究衔铁速度、衔铁结构对衔铁与电磁铁间隙微观流动特性的影响，以期对电控液压制动系统等不同系统的电磁阀设计提供参考.

1 试验装置与模型标定

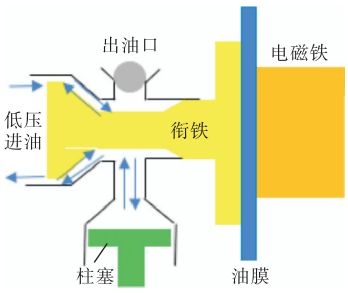
1.1 试验装置

图 1 为电磁阀工作原理. 电磁铁不通电时，柱塞腔与低压油路相通，腔内维持低压，出油口关闭. 电磁铁通电时，腔与低压油路切断，柱塞压缩产生高压，出油口打开，供油系统开始供油.

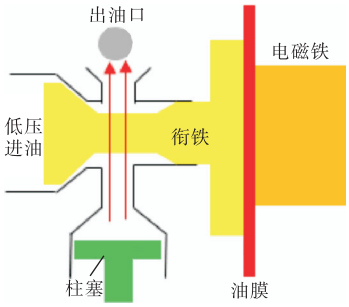
使用电机驱动衔铁模型模拟电磁铁吸合过程，试验装置由流体挤压装置和光学观测装置两部分组成，如图 2 所示. 流体挤压装置通过调节电压控制衔铁运动速度，通过示踪粒子来测量流体速度. 电磁铁通电时，电磁铁推杆推动控制阀向下运动，带动衔铁挤压间隙中的流体，同时高速相机进行拍摄.

对于示踪粒子，在满足化学性质稳定、无毒无害的前提下，综合考虑粒子流动性和成像可见性，结合试验成本，笔者选择聚苯烯颗粒，其直径约为 13 ~ 270 μm. 先将粒子和油液混合均匀，加入油箱，再少量多次加入示踪粒子，在保证进光量的同时，使高速相机能清晰拍摄流动结构.

由于电控单体泵电磁阀部件结构复杂、观察区域小且衔铁运动速度较快，导致高速相机进光量小，无法清晰拍摄气隙内部流体情况. 对于光学观测部分，试验对粒子图像速度测量(PIV)法[13]进行调整. 光源为 1 200 W 镝灯，粘贴一张硫酸纸使灯光分布均匀，采用普通光源代替激光，采用显微镜头替换普通镜头. 实际拍摄过程中，拍摄距离远大于焦距. 景深可



(a) 电磁阀未通电



(b) 电磁阀通电

图 1 电磁阀工作原理

Fig.1 Working principle of solenoid valve

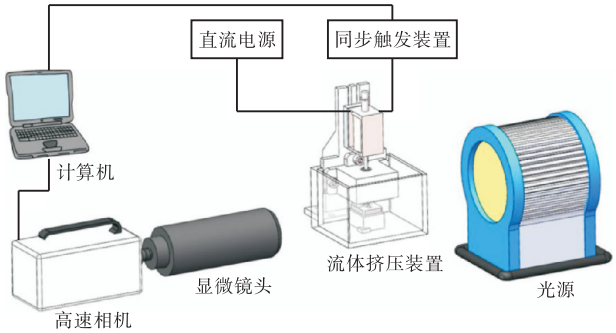


图 2 试验装置示意

Fig.2 Schematic of the experimental set-up

表示为

$$\Delta L \approx 2FL^2 d / f^2 \tag{1}$$

式中：F 为光圈值；L 为拍摄距离；d 为弥散圆直径；f 为焦距.

可知，试验景深较小，故可清晰拍摄的示踪粒子近乎在一个平面. 对于流体挤压部分，试验中笔者简化结构，增大间隙，将电磁阀零件替换为透明有机玻璃. 改进后的流体挤压装置由电磁铁、衔铁及挡块等零件组成，如图 3 所示. 电磁铁为推拉式，衔铁与控制阀为原单体泵零件.

试验相机为 Phantom FASTCAM nova S6，拍摄频率为 4 000 ~ 8 000 Hz，曝光时间为 60 μs，像素为 1 024 × 896，空间分辨率为 2.13 μm/像素. 显微镜镜头工作距离为 15 ~ 35 cm，最大放大倍率为 34 倍.

所得图像采用 Matlab 工具箱 Pivlab 进行后处理. 通过互相关方法确定前、后两帧示踪粒子图像的局部位移矢量，以此计算速度. 选择窗口尺寸时，内部粒子数保持为 5 ~ 25 个，粒子直径占 2 ~ 6 像素，且同一粒子在一个时间间隔前、后仍在窗口内.

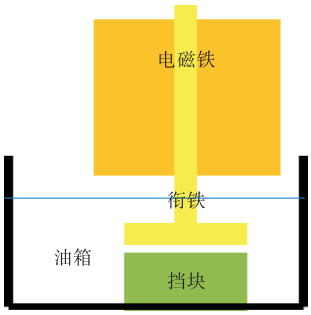
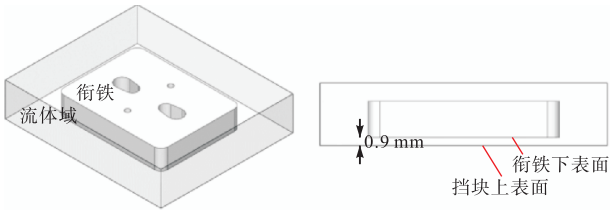


图 3　流体挤压试验装置示意

Fig.3　Schematic of the fluid squeezing experimental set-up

1.2　仿真模型与标定

图 4 为简化后的三维模型，只包含衔铁、挡块上表面和流体域. 衔铁与挡块间隙为 0.9 mm. 图 5 为网格划分. 运用 ICEM 进行网格划分，流域采用八叉树方法划分非结构化网格，全局网格尺寸为 0.50 mm，并对圆孔表面网格进行局部加密，尺寸设为 0.05 ~ 0.10 mm.



（a）斜视　　（b）正视

图 4　简化后三维模型示意

Fig.4　Schematic of 3-D simulation model after simplified

笔者对不同网格数量仿真结果对比，在 z 方向（$z = 0$）进行切片（图 5），图 6 示出 $t = 0.3$ ms、衔铁挡块距离为 0.14 mm 且网格数量为 $1.15 \times 10^6 \sim 8.26 \times 10^6$ 时的最大射流速度和最大压力. 可知，在网格数大于 4.00×10^6 后，最大射流速度基本不变，最大压力变化也小于 5%，网格无关性得到验证.

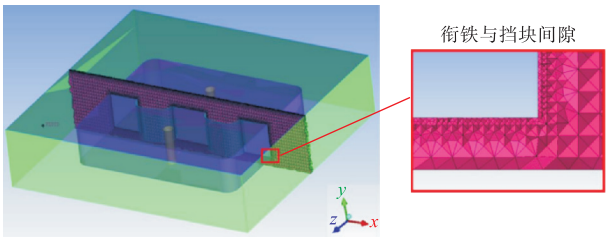


图 5　网格划分示意

Fig.5　Schematic of mesh set-up

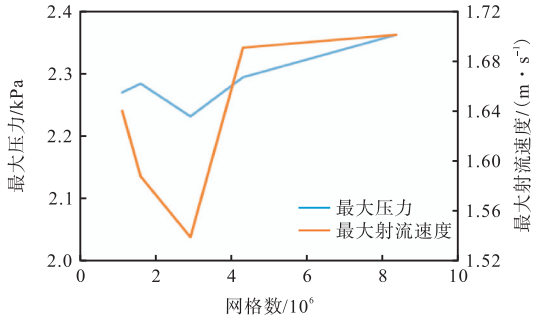
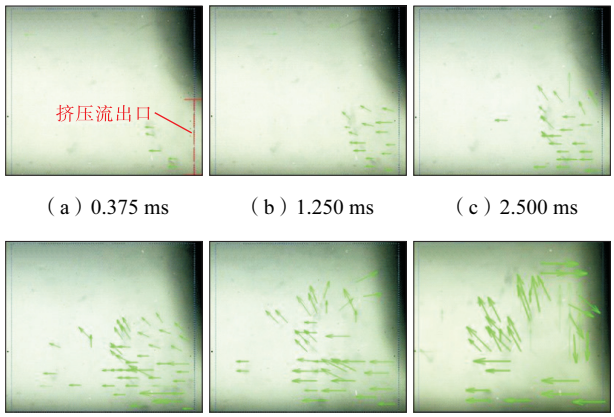


图 6　网格无关性验证

Fig.6　Verification of mesh independence

图 7 为处理后衔铁的挤压流动速度. 衔铁向下运动时，隙间柴油受挤压向外流动，在衔铁边缘处，即挤压出口处产生射流. 当 $t = 5.625$ ms 时，衔铁运动至下止点，衔铁侧壁面流体产生旋涡，较为复杂，但挤压出口流动稳定，射流方向为水平，因而笔者选取挤压流动出口水平速度进行仿真标定.

湍流模型主要为标准 κ-ε 模型、RNG κ-ε 模型和



（a）0.375 ms　（b）1.250 ms　（c）2.500 ms

（d）3.750 ms　（e）5.000 ms　（f）5.625 ms

图 7　衔铁的挤压流动速度

Fig.7　Squeezing flow velocity of armature

Realizable κ-ε 模型共 3 种. 在 Fluent 仿真中，将衔铁外壁面设置为运动壁面，将测算的衔铁速度定义为运动壁面的速度，其余壁面全部静止. 模型中无压力或速度进/出口，无热量交换，流体为 0 号柴油. 使用 3 种湍流模型进行仿真，图 8 为挤压流动出口的水平速度试验值和仿真值对比，可知 RNG κ-ε 湍流模型的仿真结果较好，速度误差小于 10%.

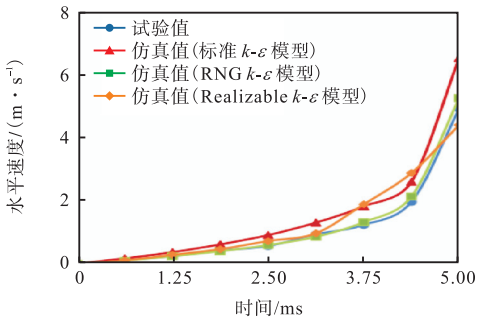


图 8 挤压流动出口的水平速度试验值及仿真值

Fig.8 Experimental and simulation results of outlet horizontal velocity of squeezing flow

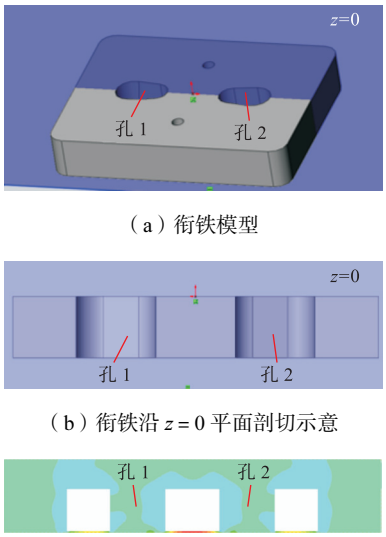
2 高速电磁阀的挤压流动特性

2.1 隙间液体挤压流动特性

笔者在直流电压为 12 V 下，经高速摄影得到衔铁位移曲线，拟合得衔铁加速度为 54.9 m/s^2，因而在加速度为 54.9 m/s^2 时对衔铁进行仿真以探究挤压流动特性.

图 9 为衔铁模型、剖切面和压力云图对应关系. 图 9(a) 中，衔铁为方形衔铁，上方分布两个扇形和圆形通孔. 对 z 方向($z=0$)平面进行切片(图 9(b))，其仿真对应的压力云图见图 9(c).

图 10 为 0.5 ~ 5.0 ms 时的挤压流动过程. 整个流域中，最高压力位于衔铁中心，最低压力位于衔铁中心两侧孔边缘区域. 这是因为衔铁向下运动时，柴油受挤压后从衔铁边缘以及孔边缘流出，形成射流. 射流区域与挡块表面存在速度梯度，从而产生压力梯度. 在 3.5 ms 时压力梯度足够大，边界层分离形成旋流. 在 5.0 ms 时旋流数足够大，在衔铁外侧壁面及内孔侧壁面边缘处形成漩涡.



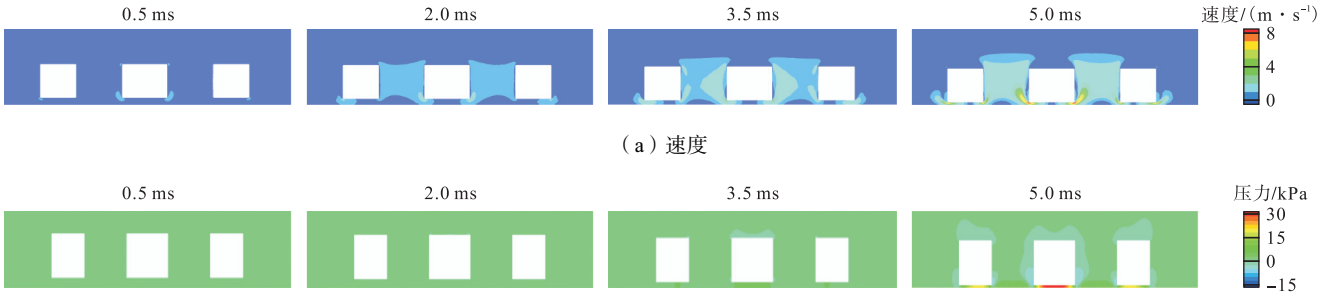
(a) 衔铁模型

(b) 衔铁沿 $z=0$ 平面剖切示意

(c) $z=0$ 平面的压力云图

图 9 衔铁模型、剖切和压力云图对应关系

Fig.9 Corresponding relationship of armature model, sectional view and pressure contour



(a) 速度

(b) 压力

图 10 衔铁加速度为 54.9 m/s^2 时的速度、压力变化云图

Fig.10 Contour of variation of velocity and pressure with armature acceleration of 54.9 m/s^2

图 11 示出衔铁加速度为 54.9 m/s^2 时的压力与速度变化. 对靠近衔铁中心的孔边缘进行分析，假设挤压出口油液只有水平方向流动，在油液中取矩形微元 S，则被挤压油液流量[14]为

$$q_s = -S\frac{\partial \delta}{\partial t} \tag{2}$$

式中：q_s 为流量；δ为间隙大小；t 为时间.

加速度一定，衔铁速度 $\partial\delta/\partial t$ 与运动时间 t 呈正比. 由式(2)可知，挤压油液流量 q_s 与衔铁速度 $\partial\delta/\partial t$ 呈正比，又由于挤压流速度与流量呈正比，与挤压出口面积呈反比，故衔铁向下运动时，衔铁速度增加和挤压出口面积减小导致挤压流出口速度(射流合速度)增加且增量越来越大，符合图 11 中射流合速度增大的趋势.

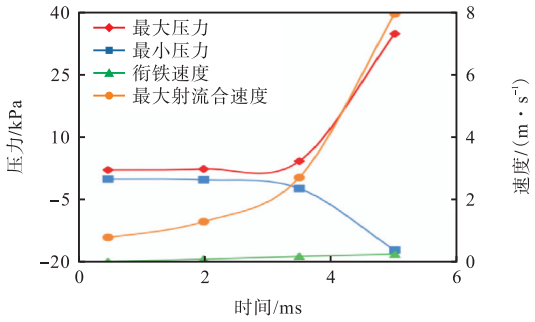


图 11　衔铁加速度为 54.9 m/s² 时的压力与速度变化

Fig.11　Variation of pressure and velocity with armature acceleration of 54.9 m/s²

隙间油液压力 p 可表示为

$$p = p_0 + \frac{6\mu}{\delta^3}\left(\frac{l^2}{4} - x^2\right)\frac{\partial \delta}{\partial t} \tag{3}$$

式中：p_0 为初始压力，仿真中初始表面压力为 0；x 为该位置与衔铁中心水平距离；μ 为柴油动力黏度；l 为衔铁宽度.

由式(3)可知，当衔铁速度 $\partial\delta/\partial t$ 一定时，隙间流体的压力与 δ 的 3 次方呈反比，当间隙被挤压得越来越小时，隙间的压力增量也越来越大，符合图 11 中最大压力发展的趋势.

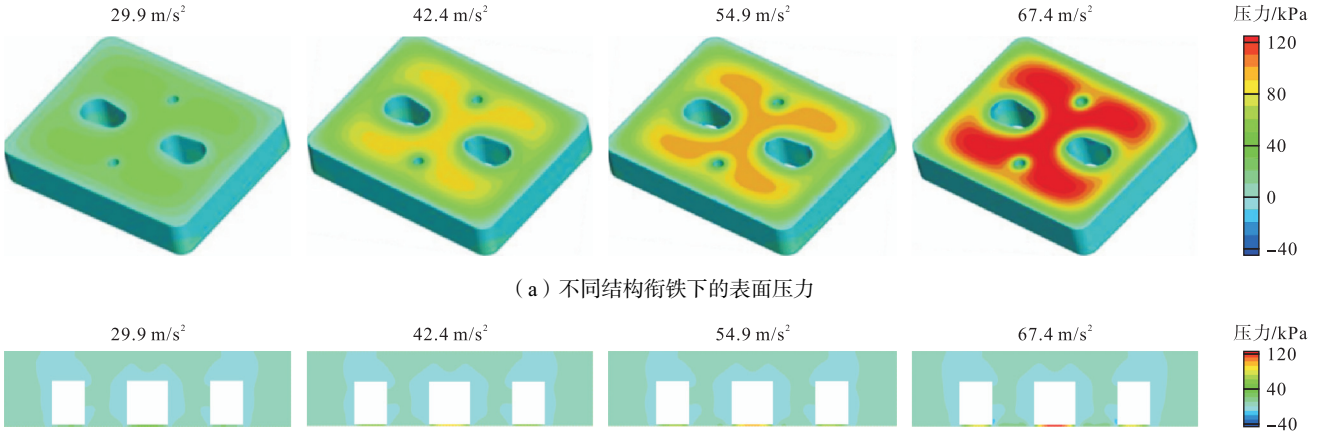
由图 11 可知，在 0.5 ~ 2.0 ms 时衔铁速度小于 0.11 m/s，此时孔处流动为层流，柴油从衔铁边缘和孔中顺畅流出，整个流域压力梯度小. 在 2.0 ~ 3.5 ms 时，衔铁速度增大至 0.2 m/s，衔铁下表面边缘及孔边缘处出现旋流，同时衔铁孔中部出现湍流. 这是由于孔边缘处产生的斜向上射流在孔中部撞击形成混乱流动区域. 衔铁上表面中心最先出现负压，衔铁下表面压力增大，衔铁中心压力最大，为 5 kPa. 在 5.0 ms 时，衔铁速度增加至 0.27 m/s，衔铁下表面边缘、孔上表面和下表面边缘处形成漩涡，压力梯度增大，衔铁中心的漩涡处压力为区域内最低压力(−17 kPa). 衔铁下表面孔边缘射流在孔中部相互干扰，造成孔处流动不畅，隙间柴油不能从孔处及时排出，压力迅速增大至 35 kPa.

2.2　不同衔铁加速度下的挤压流动特性

试验通过调节电压来控制衔铁运动的加速度. 笔者对各加速度下衔铁进行仿真以探究挤压流动特性.

图 12 为模型压力分布. 图 12(a)中，受挤压后流体能通过衔铁边缘和孔排出，故这两处压力小. 流体不能及时排出的区域形成“工”字型高压区. 衔铁速度增大时，高压区压力增大，面积也增大. 图 12(b)中，隙间液体受挤压后，衔铁下表面孔边缘产生射流，此处流速大，故压力低. 可知不同衔铁速度的压力分布只在间隙区域有所不同，衔铁速度对衔铁上表面流动情况影响小.

运动至间隙为 0.14 mm 时，加速度为 29.9、42.4、54.9 和 67.4 m/s² 对应的衔铁速度分别为 0.21、0.25、0.29 和 0.32 m/s. 图 13 示出间隙为 0.14 mm 时不同加速度下的流速. 当加速度为 29.9 m/s² 时，下表面边缘及孔边缘处射流合速度小于 8.00 m/s，压力梯度小，只在孔边缘处形成涡量小的旋涡. 射流在孔中部



(a) 不同结构衔铁下的表面压力

(b) 不同结构衔铁整个流域内压力

图 12　模型的压力分布

Fig.12　Distribution of pressure of the model

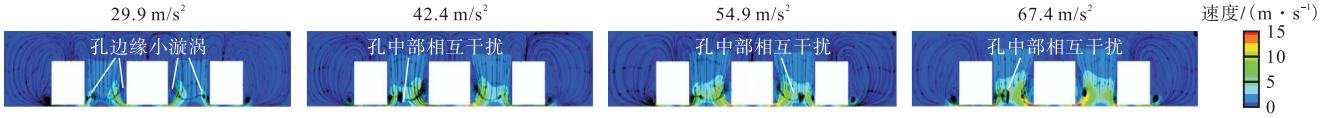
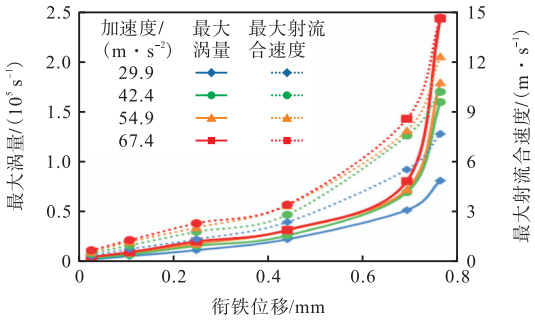


图 13　不同衔铁加速度下速度

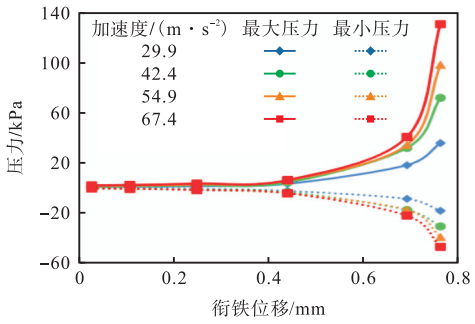
Fig.13　Velocity of different armature acceleration

的相互影响较小，孔处通畅. 随着衔铁加速度的增加，射流合速度增加，流体速度梯度增大，压力梯度增加，孔边缘射流在孔中部的相互影响逐渐强烈，造成开口处流体流动紊乱，流出不畅.

图 14 为不同衔铁加速度对应的压力、最大射流合速度和最大涡量随衔铁位移变化. 速度梯度引起压力梯度. 速度梯度越大，孔隙处涡量也越大，结合图 13 可知，最大压力和最大涡量随着衔铁位移变化的趋势基本一致.



（a）最大涡量和射流最大合速度



（b）压力

图 14 不同加速度下衔铁最大涡量、最大射流合速度和压力

Fig.14 Maximum vorticity , maximum jet velocity and pressure of armature at different acceleration

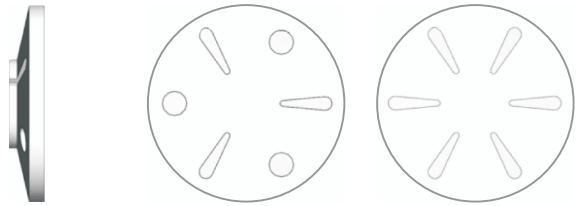
衔铁位移为 0 ~ 0.45 mm 时，各加速度下衔铁速度均较小，速度梯度小，此时流动多为层流，隙间液体扰动小，不同衔铁加速度下的射流合速度、涡量及压力分布均相近. 衔铁位移为 0.46 ~ 0.70 mm 时，衔铁孔边缘处射流合速度与涡量曲线变陡，加速度为 29.9 m/s^2 的曲线脱离了另外 3 条曲线，出现分离. 衔铁位移为 0.76 mm 时，射流合速度、压力急剧变陡，最大涡量曲线变陡，孔中部扰动严重.

故降低衔铁孔间射流速度，减小射流相互干扰，使气隙内油液快速流出是降低延迟的关键.

2.3 不同衔铁结构

图 15 为不同结构的衔铁. 将方形电磁铁改为下表面为锥状的圆形衔铁(图 15(a)).

将圆形衔铁打上扇形孔、圆形孔及导流槽 3 种结构，形成 4 种衔铁，依次如图 15(b) ~ 15(e)所示，分别记为 1 ~ 4 号圆形衔铁. 孔槽参数如表 1 所示. 计算得圆形孔面积为 4.91 mm^2，扇形孔面积为 4.93 mm^2，开孔面积相同. 笔者在相同面积下比较各衔铁孔结构影响，流体采用 0 号柴油，衔铁运动加速度为 54.9 m/s^2，对 1 ~ 4 号圆形衔铁进行仿真，以探究不同结构对挤压流动特性的影响.



（a）锥状圆形衔铁 （b）1 号(扇形孔+圆形孔） （c）2 号(扇形孔)



（d）3 号(导流槽） （e）4 号(扇形孔+导流槽)

图 15 衔铁结构模型示意

Fig.15 Schematic of structure model of armature

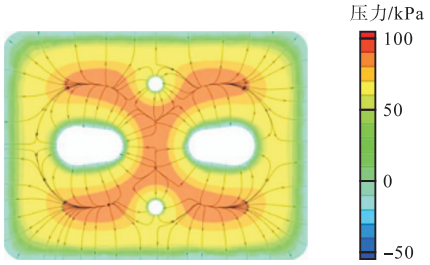
表 1 3种孔的参数

Tab.1 Parameters of the three kinds of holes

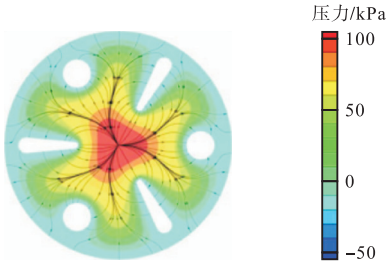
孔结构	参数	数值
扇形孔	大圆直径/mm	1.4
	小圆直径/mm	0.6
	大、小圆距离/mm	4.0
圆形孔	直径/mm	2.5
导流槽	宽度/mm	1.5
	斜度	65∶2

图 16 为方形衔铁和 1 号圆形衔铁下表面流线和压力分布. 圆形衔铁高压面积占总面积的 10.2%，较方形衔铁减少 6.6%. 由流线得方形衔铁的隙间柴油流出路径长，流体无法快速排出，故高压区面积大，而圆形衔铁中心流动对称性较好，故高压区面积小，且圆形衔铁可避免长短边弯矩不同造成的变形. 圆形衔铁中心压力较方形衔铁高，但整体压力比方形衔铁低，故可通过优化表面孔结构来进一步降低中心区域压力. 可知，圆形衔铁挤压流动特性优于方形衔铁.

在 t = 5.25 ms、间隙为 0.14 mm 时，沿 z = 0 切片，4 种衔铁的挤压流动如图 17 所示. 1 号圆形衔铁隙间流体多从孔处流出，故衔铁边缘射流速度小，压力梯度小，附近壁面处产生旋涡. 扇形孔处流量大，加之衔铁中心压力最高，因而此处产生射流与旋涡. 在



（a）方形衔铁



（b）圆形衔铁

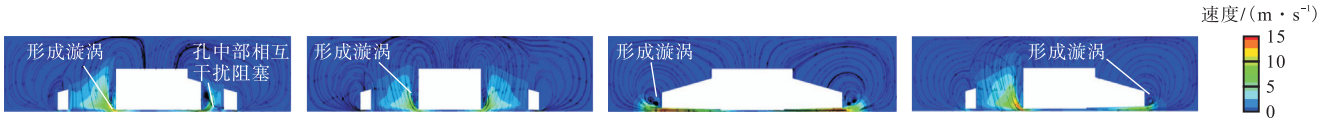
图 16　不同衔铁的表面压力与流线分布

Fig.16　Distribution of pressure and streamline of different armatures

扇形孔边缘远离衔铁中心的区域未产生射流，故孔中部未出现射流相互影响，流体流出顺畅. 在圆形孔下表面靠近衔铁中心区域产生射流，射流速度比扇形孔处略小. 虽旋涡尺寸与扇形孔处基本相同，但占圆孔直径的 1/2，因而孔中流出阻塞.

2 号圆形衔铁 6 个沿圆周均匀分布的扇形孔极大优化了隙间流体的流出情况，只在靠近衔铁中心的壁面产生较小的旋涡，流体出流顺畅. 3 号圆形衔铁流体受挤压后沿导流槽从衔铁边缘流出. 与其他开孔衔铁相比，3 号圆形衔铁在衔铁边缘的射流合速度最大. 4 号圆形衔铁由于衔铁中心流体不能从导向槽及时排出，流体多从扇形孔流出，并在边缘处形成射流，故扇形孔处射流合速度大于 1 号、2 号的，导流槽在衔铁边缘处射流速度小于 3 号.

图 18 为各衔铁结构最大射流合速度和最大涡量随时间变化. 在 4 ms 前各衔铁结构最大射流合速度缓慢增加. 合速度为 1 号＞4 号＞2 号＞3 号衔铁. 因为 4 ms 前间隙大，3 号圆形衔铁无导流孔，隙间流体



（a）1 号(扇形孔+圆形孔)　（b）2 号(扇形孔)　（c）3 号(导流槽)　（d）4 号(扇形孔+导流槽)

图 17　不同衔铁结构的挤压流动示意

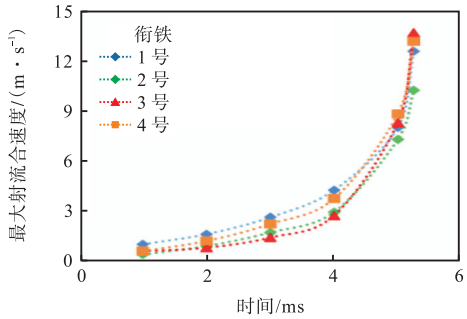
Fig.17　Schematic of squeezing flow of different armature structures

受挤压后沿导流槽朝四周流出，中心流体未到边缘，流出流量较其他衔铁少，故合速度低.

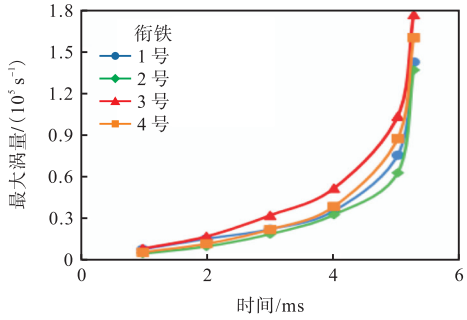
4 ms 后间隙变小，射流合速度迅速上升，最终最大射流合速度为 3 号＞4 号＞1 号＞2 号. 因为间隙变小，3 号、4 号隙间积攒流体被瞬间挤出，衔铁边缘流量激增，最大射流合速度迅速增加. 图 18(b)中，最大涡量变化与最大射流合速度趋势相同，具有导流槽的 3 号和 4 号在导流槽靠近衔铁边缘处最大射流合速度大，产生旋涡的涡量大. 1 号衔铁在圆形孔处最大射流合速度比 2 号衔铁扇形孔处大，因而最大涡量更大.

图 19 为 4 种衔铁结构下表面压力分布. 图 20 为不同衔铁结构的压力分布. 可知，压力最大区域仍在衔铁下表面中心. 高压区中心对称分布. 通过周向比较可知，压力梯度为导流槽大于圆形孔、大于扇形孔.

4 ms 前各结构衔铁间隙大，速度梯度小，压力变化小，故最大、最小压力接近，隙间无阻塞. 4 ms 后各结构最大压力迅速上升，2 号衔铁中心压力低，仅为 7 kPa，衔铁边缘压力差小，隙间流体从扇形孔排出效果好，高压面积仅占下表面总面积的 5%. 结合图



（a）最大射流合速度

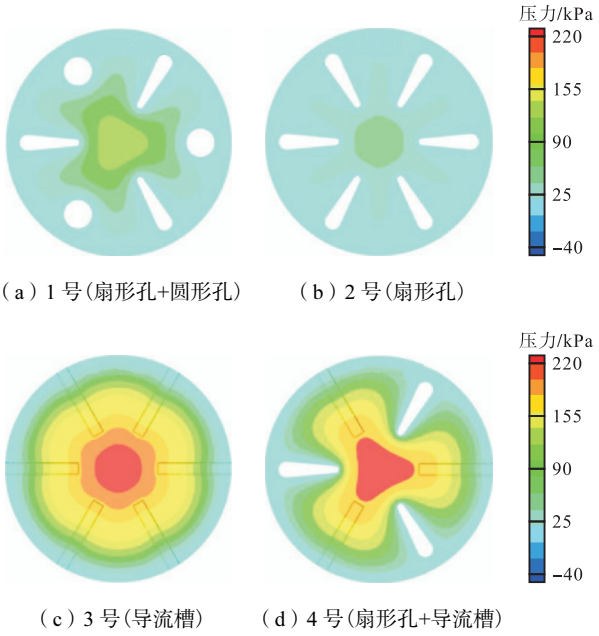


（b）最大涡量

图 18　不同衔铁结构的最大射流合速度与最大涡量

Fig.18　Maximum jet velocity and maximum vorticity of different armature structures

17 可得，圆形孔尺寸小易产生阻塞，故 1 号衔铁最高压力仅比 2 号衔铁高 11 kPa，高压面积占下表面总面积 4.8%．对于 3 号、4 号衔铁，中心压力高，超过 20 kPa．因为导流槽排出流体少，故下表面射流合速度大，导致孔中部容易产生阻塞．



（a）1 号（扇形孔+圆形孔）　（b）2 号（扇形孔）

（c）3 号（导流槽）　（d）4 号（扇形孔+导流槽）

图 19　不同衔铁结构下的表面压力分布

Fig.19　Distribution of surface pressure with different armature structures

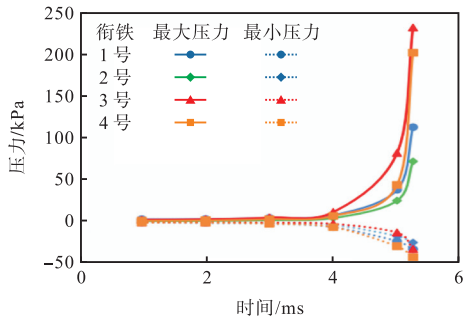


图 20　不同衔铁结构的压力分布

Fig.20　Distribution of pressure of different armature structures

可知，各结构对隙间挤压流动改善效果排序为：扇形孔＞圆形孔＞导流槽．因为扇形孔射流合速度增速缓，孔内流动受旋涡干扰小，利于隙间流体受挤压后顺畅流出．圆形孔尺寸小，同面积下涡流占孔比例大，易阻塞．

2.4　试验验证

由于孔结构对隙间挤压流动改善效果为扇形孔＞圆形孔＞导流槽．将 4 种结构衔铁装入相同单体泵，以相同驱动在高压供油系统油泵台上进行供油试验．从轨压曲线来描述各结构对电磁阀关闭延迟的影响，从而论证其对挤压流动特性的影响．

图 21 为油管压力曲线．柱塞上行加压，腔内压力上升．a—b 段电磁铁未吸合，腔与低压油路相通，压力涨幅小．b 点电磁铁吸合上升，节流作用显现，压力涨幅大．c—e 段衔铁落座后碰撞反弹导致油压多次轻微下降．e—f 段针阀开启，开始喷油，压力下降．因压力测点位于单体泵与喷油器相连的油管上，压力波传递存在一定延迟，故轨压存在一定滞后，但差值一定，可从轨压曲线计算关闭延迟．电磁铁为常开式．电流为 0～2 A 的时间短，且 2 A 易识别，故定义电流到达 2 A 时刻为开始吸合时刻．试验所用机械喷油器在发动机上开启的动态压力为 40 MPa，故定义电流为 2 A、压力为 40 MPa 时刻为响应时间，即关闭延迟时间．

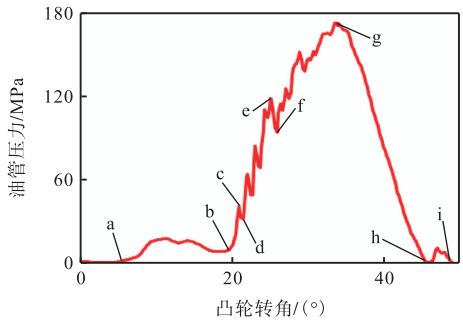


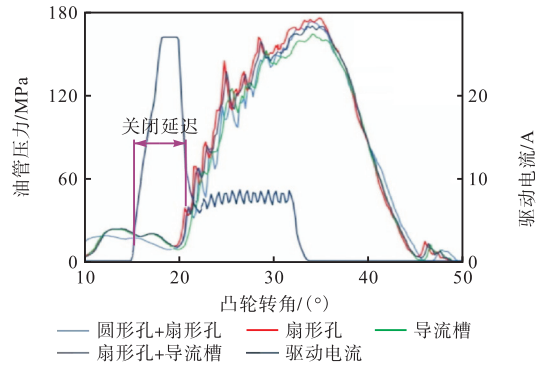
图 21　油管内压力曲线

Fig.21　Pressure curve in tube

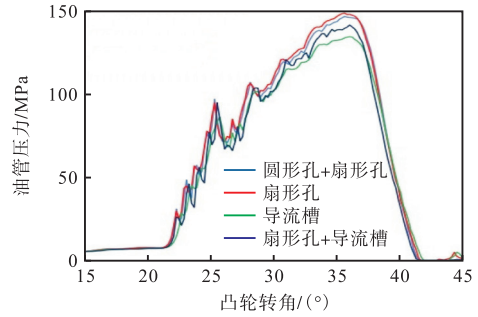
在试验台中进行单体泵供油测试．图 22 为油管压力和驱动电流．由驱动电流与油管压力曲线得各结构电磁阀关闭延迟时间随转速变化，如图 23 所示．图 22 中，不同转速下，最大油管压力均为导流槽＜扇形孔＋导流槽＜圆形孔＋扇形孔＜扇形孔，其由关闭延迟时间导致．驱动信号相同，关闭延迟时间越小，开始建立压力的时刻越早，建立压力的时间越长．

图 23 中，高转速时整体关闭延迟时间大，由于通电频率高，电磁延迟占主导．转速为 400 r/min 时通电频率小，涡流损耗小，电磁延迟小，同时电磁力大，衔铁速度大，液力延迟占主导．有扇形孔的衔铁关闭延迟时间较只有导流槽缩短了 30.0%，证明了扇形孔使隙间流体快速流出，利于减少阻力、提高响应．

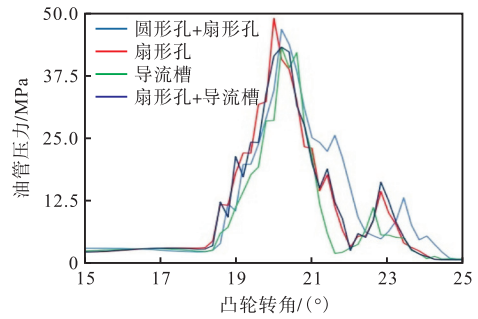
试验显示，转速为 400 r/min 时导流槽和扇形孔关闭延迟时间分别为 0.610 ms 和 0.405 ms，前者较后者延迟了 50.6%．转速为 1 250 r/min 时导流槽和扇形孔衔铁关闭延迟时间分别为 0.850 ms 和 0.720 ms，前者较后者延迟了 18.1%．4 种衔铁结构中，所有转速下均为扇形孔关闭延迟时间最低，导流槽关闭延迟时间最长．



（a）1 250 r/min



（b）900 r/min



（c）400 r/min

图 22　油管压力和驱动电流

Fig.22　Pressure in tube and driving current

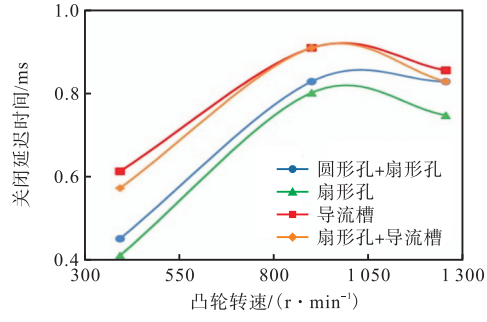


图 23　电磁阀关闭延迟时间

Fig.23　Closing delay time of solenoid valve

3　结　论

（1）衔铁隙间流体受挤压后射流从边缘或孔中排出；间隙相同时，隙间压力与衔铁速度呈正相关，孔隙内射流相互干扰导致流出阻塞对隙间液体影响较大.

（2）电磁铁结构圆形较方形中心对称性好，流动性强，高压区面积较方形减少 6.6%；3 种开孔结构对隙间改善效果为：扇形孔＞圆形孔＞导流槽；圆形孔与扇形孔面积相同，但圆形孔内产生射流相互干扰阻塞，其涡流较圆形孔尺寸大，阻塞隙间流体流出；扇形孔衔铁结构减小了电磁阀隙间挤压流的影响；扇形孔衔铁的关闭延迟时间较导流槽衔铁缩短了 30.0%，最大喷油压力增加了 5.0%.

参考文献：

[1] Ding J F，Yang X，Long Z Q. Structure and control design of levitation electromagnet for electromagnetic suspension medium-speed maglev train[J]. Journal of Vibration and Control，2019，25(6)：1179-1193.

[2] 徐建中，周国海，姜星星. 基于 Maxwell 的电磁阀仿真分析[J]. 造船技术，2015(1)：97-100.

[3] 胡若. 多电磁阀控制燃油系统凸轮参数化设计与供油特性研究[D]. 北京：北京理工大学机械与车辆学院，2018.

[4] Gupta P S，Gupta A S. Squeezing flow between parallel plates[J]. Wear，1977，45(2)：177-185.

[5] Hamdan M H，Barron R M. Analysis of the squeezing flow of dusty fluids[J]. Applied Scientific Research，1992，49(4)：345-354.

[6] 范玉，杨建国，贺玉海. 衔铁打孔对高速电磁阀动态响应的影响[J]. 内燃机学报，2021，39(5)：472-479.

[7] 夏胜枝，欧阳明高，周明，等. 电控单体泵电磁阀内阻尼油膜的挤压流动分析[J]. 清华大学学报(自然科学版)，2003，43(5)：693-697.

[8] 范立云，魏云鹏，普东方，等. 新型永磁高速电磁阀能量转换特性[J]. 内燃机学报，2020，38(6)：545-552.

[9] 白云，陈希，刘鹏. 一种永磁高速电磁阀的涡流损耗研究[J]. 内燃机学报，2022，40(2)：179-185.

[10] 李京骏，郭世永，王翔宇. 基于 Maxwell 电磁阀的开关动态响应研究[J]. 液压与气动，2021，45(4)：123-129.

[11] 赵建辉，格列霍夫·雷奥尼德，王章峻，等. 共轨喷油器高速电磁阀电磁力影响因素分析[J]. 哈尔滨工程大学学报，2018，39(4)：703-708.

[12] 范玉，靳博瑞，杨建国，等. 新型环形多极柱电磁阀衔铁的结构优化[J]. 内燃机工程，2022，43(6)：91-98.

[13] Perret L. PIV investigation of the shear layer vortices in the near wake of a circular cylinder[J]. Experiments in Fluids，2009，47(4-5)：789-800.

[14] 盛敬超. 液压流体力学[M]. 北京：机械工业出版社，1980：200-202.