

高压油管中燃油压力波传递速度的研究

殷子嘉

(动力机械工程系)

摘要 本文介绍了柴油机高压油管中燃油压力波的物理概念,并在高压喷射条件下对高压油管中燃油压力波的传递速度(即当地音速)进行了实验测定。结果表明,高压油管中燃油具有两相性,其压力波速度明显低于单相液质中的数值,这对喷射系统的理论研究和应用实践均有实际意义。

关键词 柴油机, 燃油喷射系统, 压力波, 传递速度

0 引言

柴油机高压油管中燃油是否具有两相性以及其压力波传递速度的大小,一直是喷射系统研究中极为关注的问题。在单相液质中压力波传递速度早有成熟资料可以借鉴,而在高压喷射的特定条件下,高压油管中燃油压力波传递速度值的选用,以往国内外一直沿用单相液质中的数值。自80年代始随着喷射过程模拟计算的发展,个别学者开始对燃油压力波传递速度进行研究,但涉及的影响因素较多。作者认为既然是喷射的特定条件下,燃油的温度、密度等因素可以忽略,唯空隙率是主要的影响因素。只要用本文所介绍的方法确定空隙率,就能较精确地确定压力波的传递速度值。这在工程应用上已有足够的精度,且对喷射过程模拟计算精度的提高是很有意义的。

1 物理概念

喷射系统的示意图置于表1的上方,当上一循环的喷射结束后,高压油管中的残余压力为 p_0 ,后一循环的喷射初始、出油阀开启的瞬时,燃油进入高压油管,则在高压油管的泵端造成燃油的瞬时“堆积”,形成压力脉冲 p_f 。这个瞬时的局部压力增量 p_f 以当地高速 a 向嘴端传递,此时泵端压力为 $p_0 + p_f$ 。假定油泵凸轮是等速供油,则后继的泵端压力脉冲都是 p_f 。在前进波所到之处,管中压力均上升为 $p_0 + p_f$,未到之处仍为 p_0 ,如表1中($0 < t < L/a$)相位所示。当第一个压力波经过 $(L/a)s$ 后到达嘴端,若这个压力波不足以升起针阀,则喷嘴仍然关闭(即为闭端),前进波全部被反射回来(忽略阻力),反射波 p_{r1} 在数值上等于前进波 p_f ,且仍以当地音速向泵端传递。若上述前进波大于起喷压力,则针阀升起,喷油开始。由于喷孔面积总是远小于油管截面积,燃油流经喷孔时截面突然收缩,视为局

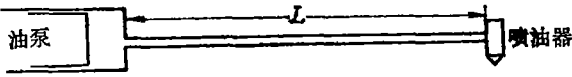
本文1990年4月10日收到。

部闭端, 这时压力波的一部分仍然被反射回来, 称为局部反射, 反射波 p_{r1} 小于前进波 p_f , 此时嘴端压力变为 $p_0 + p_f + p_{r1}$. 当反射波 p_{r1} 向泵端传递时, 油管中的压力状态如表 1 中 ($L/a < t < 2L/a$) 相位所示. 经过 $2(L/a)s$ 后, p_{r1} 到达泵端 (视为闭端), 则压力波 p_{r1} 又被全部反射、向嘴端传递, 此时泵端压力变为 $p_0 + p_f + p_{r1}$. 待至 $3(L/a)s$ 时, 泵端反射波 p_{r1} 到达嘴端又被局部反射为 p_{r3} , 此时嘴端压力变为 $p_0 + p_f + p_{r1} + p_{r1} + p_{r3}$. 再经 $4(L/a)s$ 后 p_{r3} 到达泵端又被全反射为 p_{r3} , 则泵端压力为 $p_0 + p_f + p_{r1} + p_{r1} + p_{r3} + p_{r3}$. 如此反复反射下去, 直到油泵柱塞斜槽揭开回油孔, 管中压力骤减, 针阀落座, 停止供油为止. 上述过程见表 1.

所以高压油管中任意时刻任意地点的总压力为

$$p_s = p_r (\text{反射波}) + p_f (\text{前进波}) + p_0 (\text{残余压力})$$

表 1 高压油管中压力波传递过程

			
时间 $t(s)$	泵端压力	嘴端压力	备 注
$t=0$	p_0	p_0	残余压力
$0 < t < L/a$	$p_0 + p_f$	p_0	初始压力波 p_f 向嘴端传递
$t=L/a$	$p_0 + p_f$	$p_0 + p_f + p_{r1}$	针伐升起, 部分反射
$L/a < t < 2L/a$	$p_0 + p_f$	$p_0 + p_f + p_{r1}$	反射波 p_{r1} 向泵端传递
$t=2L/a$	$p_0 + p_f + p_{r1} + p_{r1}$	$p_0 + p_f + p_{r1}$	泵端闭端, 全反射
$2L/a < t < 3L/a$	$p_0 + p_f + p_{r1} + p_{r1}$	$p_0 + p_f + p_{r1}$	反射波 p_{r1} 向嘴端传递
$t=3L/a$	$p_0 + p_f + p_{r1} + p_{r1}$	$p_0 + p_f + p_{r1} + p_{r1} + p_{r3}$	嘴端部分反射
$3L/a < t < 4L/a$	$p_0 + p_f + p_{r1} + p_{r1}$	$p_0 + p_f + p_{r1} + p_{r1} + p_{r3}$	反射波 p_{r3} 向泵端传递
$t=4L/a$	$p_0 + p_f + p_{r1} + p_{r1} + p_{r3} + p_{r3}$	$p_0 + p_f + p_{r1} + p_{r1} + p_{r3}$	泵端闭端, 全反射
\vdots	\vdots	\vdots	

2 压力波传递速度的测定

在柴油机喷射过程中, 高压油管中的燃油实际具有两相性 (液相和气相)。这是因为喷射系统中局部压力低于燃油中轻馏份的饱和蒸汽压时, 就开始出现燃油蒸汽泡, 而在压力尚未降到燃油饱和蒸汽压以前, 溶解在燃油中的空气即先行析出。当压力重新升高时, 上述过程正好相反。蒸汽泡的破坏过程进行得很快, 空气重新溶解的时间较长。喷射系统中等容卸载出油阀的存在, 给形成上述过程创造了条件, 这就意味着高压系统中, 即使在高压状态下亦可能保留一部分来不及重新溶解的微小空气泡。因此高压油管中燃油是具有一定空隙率的两相介质, 不能直接沿用单相液体中压力波传递速度的数值, 必须对高压油管在喷射特定条件下的压力波传递速度进行实际测定。

考虑到高压喷射的特定条件, 影响压力波传递速度的温度、密度等因素可以不计, 影响两相介质中音速的最主要因素是空隙率。这里以出油阀卸载容积 V_E 与系统总容积 V_s 之比近似代表空隙率 α , 即 $\alpha = V_E/V_s$ 。取用不同长度的高压油管, 可以得到不同的空隙率组合,

计有 6 组示于表 2 中。 $\alpha=0$ 的条件是将等容卸载出油阀上的减压带磨穿, 不起减压作用。

试验测定是在油泵试验台上进行的, 其装置如图 1 所示。高压油泵(2 缸、B 型泵)分别连接不同长度的高压油管 3, 油管的泵端和嘴端分别装了压力传感器 5 和 6, 压力信号经放大器 7 和 8 而输入示波器 9, 在示波器荧光屏上可以摄下每组的示波图。

以第 5 组为例, 高压油管长度为 340 mm, 卸载容积为 56.5 mm^3 , 系统总容积 1548.5 mm^3 , 则 $\alpha=V_E/V_S=3.65 \times 10^{-2}$, 录取的示波图如图 2, 时标每格为 0.5 ms, 泵端压力 1 的建立与嘴端压力 2 的建立之时差为 0.72 格, 则: $\Delta t=0.5 \times 0.72=0.36 \text{ ms}$, 音速 $a=L/\Delta t=340 \times 10^{-3}/0.36 \times 10^{-3}=944.44 \text{ m/s}$ 。

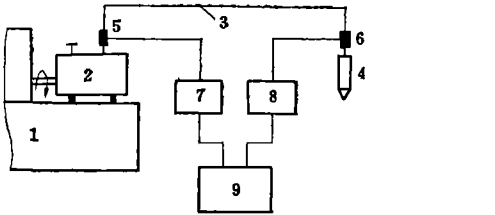


图 1 测量音速的装置

1. 油泵试验台 2. 高压油泵
3. 高压油管 4. 喷油器
5. 6. 压力传感器 7. 8 电荷放大器
9. 示波器

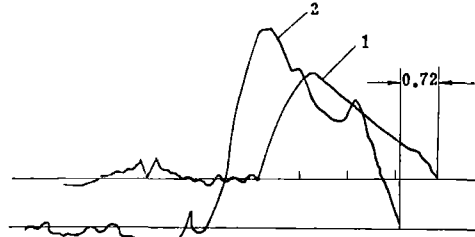


图 2 压力示波图

1. 泵端压力 2. 嘴端压力

表 2 不同空隙率下的音速值

$\alpha=V_E/V_S$	0	0.5×10^{-2}	1.23×10^{-2}	2.16×10^{-2}	3.65×10^{-2}	4×10^{-2}
音速 $a(\text{m/s})$	1 271.10	1 219.20	1 068.38	993.70	944.44	942.20

将所列 6 组分别进行测定, 每组测定 3 次, 取其平均值, 将测定计算结果列于表 2 中, 并作出如图 3 所示的曲线图。

根据试验测定的数据, 经过数学演绎, 可得下列的拟合函数:

$$a=f(V_E/V_S)$$

即

$$a=1.26978 \times 10^3 + 7.96378(V_E/V_S) - 3.46194 \times 10^6(V_E/V_S)^2 + 2.42730 \times 10^8(V_E/V_S)^3 - 6.53398 \times 10^9(V_E/V_S)^4 + 6.25918 \times 10^8(V_E/V_S)^5 \quad (\text{M/s})$$

当 $V_E/V_S > 0.035$ 时, $a=f(V_E/V_S)$ 用直线表示, 即

$$a=-1818.182(V_E/V_S-0.035)+946$$

实际应用时, 根据具体空隙率 α 值按曲线或 $a=f(\alpha)$ 拟合函数选取音速数值, 在工程应用上已有足够的精度。

一般在单相液体中音速的经典数据为 $(1200 \sim 1600) \text{ m/s}$, 而在高压油管中燃油压力波传递速度小于此值范围, 它是空隙率的函数, 随着空隙率的增大, 当地音速呈减小的趋势。同时也表明, 不同的喷射系统, 高压油管中燃油压力波传递速度是不同的。

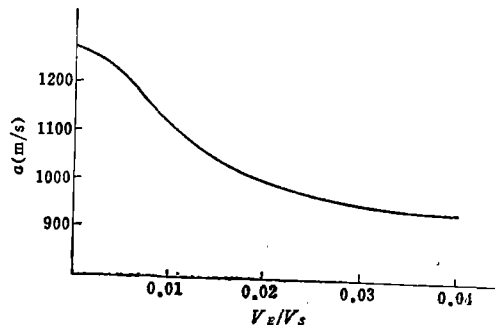


图 3 音速与空隙率的关系

3 应用举例——提高喷射过程模拟计算的精度

燃油的喷射过程可用下列一元不稳定流动方程来描述:

$$\begin{cases} \frac{\partial p}{\partial x} + \rho \frac{\partial u}{\partial t} + 2\rho K u = 0 \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{a^2 \rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial t} = 0 \end{cases}$$

式中: p 为油管中燃油压力; u 为流速; ρ 为燃油密度; a 为压力波传递速度(当地音速); K 为燃油粘性系数; x 为距离坐标; t 为时间坐标。

经过数学演绎, 运用电子计算机可以对方程进行数值解, 求出高压油管中任意时刻任意地点的速度和压力。研究表明, 输入数据中, 压力波传递速度的选取是否得当, 是影响计算精度的重要因素。若用单相液体中的音速经典数据(1200~1600)m/s 作为原始数据, 不仅数值偏大, 而且数值的选取带有盲目性, 大量计算表明, a 的取值偏差 1%, 则喷射压力偏差 1.2%。如对某台高速柴油机喷射过程进行模拟计算, 音速分别取 1200 m/s、1300 m/s、1400 m/s, 则得出偏差较大的压力波形, 示于图 4。

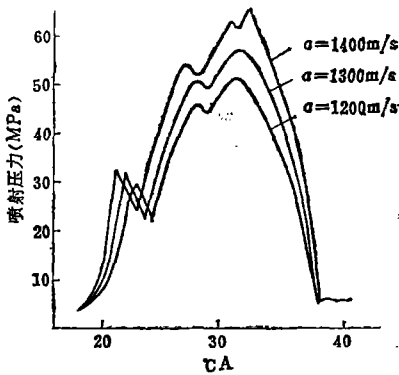


图 4 音速的影响

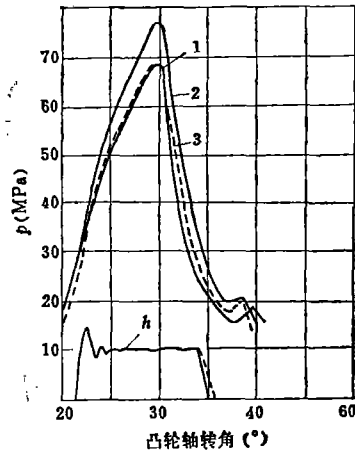


图 5 6260柴油机喷射压力波
1. 实测值, 2. 原法计算值,
3. 新法计算值。

又如, 6260 中速柴油机, 450 r/min, 440 kW, 出油阀不具有减压带, $V_E=0$, $V_E/V_S=0$, 喷射过程模拟计算结果示于图 5。图中曲线 1 为实测结果, 曲线 2 为取单相液体中音速平均值 1400 m/s 时计算结果, 曲线 3 为本文介绍的方法, 由于 $\alpha=0$, 得 $a=1270$ m/s 时的计算结果, 可见按本文介绍的方法确定音速, 计算结果与实测有较好的吻合。

再如, 6250 中速柴油机, 600 r/min, 470 kW, $V_E/V_S=0.02$, 按本文方法确定 $a=1000$ m/s, 计算结果与实测相当吻合(见图 6)。

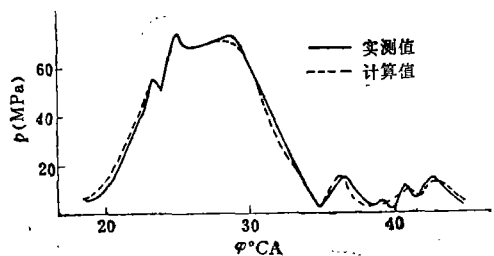


图 6 6250柴油机计算结果

4 结 论

(1) 高压油管中的燃油并非单相液体, 而是具有一定空隙率的两相介质, 即液相和气相。

(2) 在高压喷射条件下高压油管中压力波传递速度较纯液相条件下为低, 它是空隙率的函数, 随着空隙率的增大, 压力波传递速度减小。

(3) 高压油管中压力波传递速度的精确测定, 对喷射过程模拟计算精度的提高有很大的意义。

参 考 文 献

- [1] 顾宏中. 柴油机工作过程. 北京: 国防工业出版社, 1987
- [2] 殷子嘉. 喷射系统结构因素对喷射性能的影响. 上海: 内燃机工程, 1987; 8(1): 44
- [3] 高宗英. 根据高压油管实测压力计算柴油机喷射过程的一种新方法. 天津: 内燃机学报, 1983; 1(3): 73

A Study of the Propagation Velocity of Pressure Wave in Fuel Pipe

Yin Zijia

Abstract The physical concept of pressure wave in the fuel pipe is presented in this paper, and on a test rig the propagation velocity of pressure wave is measured at the injection. Experimental results show that the propagation velocity of pressure wave in fuel pipe is evidently lower than the normal value. A general conclusion has been reached and it is applicable to the theoretical investigation and the applied practice in a injection system.

Key words fuel injection system, diesel engine pressure wave, propagation velocity