

挤压油膜阻尼器的均匀两相流模型*

西安交通大学 刘 雍* 西北工业大学 薛中擎
西安交通大学 朱 均

【摘要】 在挤压油膜阻尼器内气穴现象实验研究的基础上,对挤压油膜因气穴现象而发生物理特性的变化进行了讨论。气液均相流模型作为挤压油膜的近似描述,导出了上述模型的密度和粘度与油膜压力之间的关系式。定性分析了当挤压油膜采用这一可压缩模型时,其压力分布的描述更能与实际接近,对阻尼器的力学特性的准确预测有重要的参考价值。

主题词: 油膜 阻尼器 可压缩流动 两相混合物

分类号: O 359. 1

1 引 言

SFD 现行的理论模型^[1]认为,在 SFD 运行的过程中,挤压油膜是不可压缩流体并且具有不变的物理特性。但实验现象表明^[2],挤压油膜的气穴区所产生不同类型的气泡数目繁多,运动比较复杂,用现行的理论模型分析 SFD 的力学特性与实验结果出入很大,说明了现行的理论模型已经不能很好地描述 SFD 的动力特性。根据气穴理论^[3],在通常情况下包括润滑油在内的所有液体总是含有一定体积比的空气,这部分空气以空核的形式在润滑油中均匀地分布。空核的气相部分和其周围的液相部分的压力差与液体的表面张力平衡。若记 P_g 和 P 分别为润滑油中气相和液相的压力, σ 是液体的张力, R 为空核的半径,则

$$P_g - P = 2\sigma/R \quad (1)$$

当油膜的压力 P 下降到饱和空气压 P_a 时,为了维持瞬态平衡,润滑油中的空气以气穴的形式析出;当压力 P 下降到饱和蒸汽压 P_v 时,润滑油的状态极不稳定,油膜不能承受张力 ($\sigma = 0$),开始汽化。这在实际的 SFD 中仅是一个瞬间,极少量的润滑油汽化,以蒸汽气穴的形式存在。所以, SFD 中的压力下降是产生气穴的外部因素,润滑油中空核的存在是产生气穴的内部因素。实验还表明, SFD 内的气穴现象要比滑动轴承内的那种位置不变、稳定的指状气穴现象^[4]复杂得多。SFD 内的气穴区一旦形成,它产生的离散气泡有部分是瞬现即灭,另部分既使在高压区也不溶于油内,结果形成了气液混合物组成的两相多泡流,这种可压缩流体具有可变密度和可变粘度的性质。以上现象是现行的理论模型所不能描述的。本文正是基于 SFD 内气穴现象实验研究的基础上,研究了一种更能准确地描述 SFD 力学特性的新模型,即用气液均相流模型作为这类可压缩流体的近似,导出了这种模型的密度和粘度与油膜压力之间的数学表达式,对以后 SFD 的 Reynolds 方程的修改有着重要的参考和利用价值。

2 气液均相流模型的密度压力关系

为了能从理论分析中讨论气穴现象引起的两相多泡流对 SFD 力学特性的影响, 在实验的基础上引入如下假设: (1) 气泡在润滑油中的分布是均匀的。(2) 不计气体从润滑油中逸出和溶入中滞后于压力变化。(3) 气液两相的滑动比等于 1。(4) 气液两相在任何瞬时均能达到相平衡。(5) 以上运动状态是等温过程。采用上述气液均相流模型, 它的物理特性可用每一组份的特性来描述。所以, 气液混合物的密度 ρ_i 可由气相和液相的密度 ρ_g 和 ρ_l 的函数关系式表达, 由密度的定义得气流混合物的平均密度:

$$\rho_i = \alpha \rho_g + (1 - \alpha) \rho_l \quad (i = 1, 2) \quad (2)$$

这里 α 称为气液两相流的体积含气率, i 的取值对应于不同模型。含气率可通过射线吸收法、射线散射法、电学法和光学法等实验手段测出^[5], 这里通过理论推导得出含气率的计算式。在方程 (2) 中, ρ_l 在等温状态过程中是常数, ρ_g 由初始状态的参数确定, 即

$$\rho_g = (P_g/P_{g0}) \rho_{g0} \triangleq (P/P_0) \rho_{g0} \quad (3)$$

式中, P 是与 ρ_g 对应的压力, P_0 和 ρ_{g0} 分别为初始状态下的压力和密度。

在气液混合物中, 气体的质量 m_g 含有空气质量 m_a 和蒸汽质量 m_v 两个组份, 若记 N_a 、 N_v 和 N_l 分别为空气、蒸汽和润滑油的分子数量, M_a 、 M_v 和 M_l 分别为相应的分子量, 又由分压原理得: $N_v = (P_v/P_a) N_a$, $P = P_a + P_v$, P_a 和 P_v 分别对应 N_a 和 N_v 的压力。则气液混合物的含气率 α 由如下方程描述:

$$\alpha = \frac{(\rho_l/\rho_a)(N_a/N_l)[M_a/M_l + P_v/(P - P_v)(M_v/M_l)]}{(\rho_l/\rho_g)(N_a/N_l)[M_a/M_l + P_v/(P - P_v)(M_v/M_l) + 1]} \quad (4)$$

在假设 (4) 下, 则 Henry 定理可表达为: $dN_g/N_l = -dP/K$ 。对其积分并由初始条件确定积分常数, 得:

$$N_g/N_l = N_{g0}/N_{l0} + (P_0 - P)/K \quad (5)$$

式中 K 为 Henry 常数, 右端第一项表示初始状态下均质两相流的气相和液相分子数之比值。

设当 $N_g/N_l = 0$ 时的气体压力为 P^* , 则由方程 (5) 得:

$$P^* = (N_{g0}/N_{l0})K + P_0$$

为了确定稳态两相流的两相构成, 在实验观察的基础上讨论两种极端情况的模型。其一是当 $P_v < P \leq P^*$ 时, $N_g/N_l \leq 0$, 全部气泡均溶于润滑油内, 这一种气液两相流称为气泡全溶型模型; 其二是当 $P > P_v$ 时, SFD 内气穴内产生的气泡来不及在正压区溶于油内, 这一种气液两相流称为气泡不溶型模型, 由于这种模型的气泡与压力无关, 方程 (5) 变为如下形式:

$$N_g/N_l = N_{g0}/N_{l0} + P_0/K \quad (6)$$

还有一种情况是当 $P \leq P_v$ 时, 经适当时间, 润滑油将全部汽化, 这时的挤压油膜处于极不稳定状态, 过程相当短暂。

对气泡全溶型模型, 由方程 (5) 得:

$$N_a/N_l = (N_a/N_g)(N_g/N_l) = (N_a/N_g)[N_{g0}/N_{l0} + (P_0 - P)/K] \quad (7)$$

经整理得气泡全溶型模型的含气率 α_i 及这种模型的平均密度分别为:

$$\alpha_i = \frac{(\rho_l/\rho_{g0})[P_0(P - P_v)/P^2]A}{(\rho_l/\rho_{g0})[P_0(P - P_v)/P^2]A + 1} \quad (8)$$

$$\rho_i = \frac{[(P - P_v)/P]A + 1}{(1/\rho_{g0})[P_0(P - P_v)/P^2]A + (1/\rho_l)} \quad (9)$$

式中 $A = [N_{g0}/N_{i0} + (P_0 - P)/K] \{M_a/M_i + [P_v/(P - P_v)] (M_a/M_i)\}$ 。

对气泡不溶型模型, 可认为这类不溶解的气泡为空气气泡。因此方程 (8) 和 (9) 分别成为:

$$\alpha_0 = \frac{(\rho_l/\rho_{a0})(P_0/P)B}{(\rho_l/\rho_{a0})(P_0/P)B + 1}, \quad \rho_2 = \frac{B + 1}{(1/\rho_{a0})(P_0/P)B + (1/\rho_l)} \quad (10)$$

式中 $B = (N_{a0}/N_{i0} + P_0/K) M_a/M_i$, N_{a0} 和 ρ_{a0} 分别为空气在初始状态下的分子数和密度。在方程 (10) 中, 主要由与空气和润滑油有关的参数来描述气泡不溶型模型。在实际中, SFD 内挤压油膜一般为气泡不全溶型多泡流的平均密度 ρ_m 应为 ρ_1 和 ρ_2 的加权平均值。

3 气体均相流模型的粘度压力关系

气液均相流的粘度一般根据实验结果而采用经验公式, 经验公式的形式也比较多^[6]。这里采用 Hayward 的实验结果^[7], 气液均相流粘度公式为:

$$\eta = (1 + 0.015\beta_i)\eta_i \quad (i = 1, 2) \quad (11)$$

式中, η 为润滑油的粘度, β 为空气气体百分比, i 的意义与方程 (2) 中的 i 相同。

对气泡全溶型模型的粘度, 利用方程 (8), 省略不计 P_v 求出 β_1 :

$$\beta_1 = [V_a/(V_a + V_l)] \times 100 = [D/(D + 1)] \times 100 \quad (12)$$

把上式代入方程 (11) 得这种模型的粘度关系:

$$\eta_1 = \{1 + 1.5[D/(D + 1)]\}\eta_i \quad (13)$$

对于气泡不溶型模型, 同样地利用方程 (10), 求得:

$$\beta_2 = [C/(C + 1)] \times 100, \quad \eta_2 = \{1 + 1.5[C/(C + 1)]\}\eta_i \quad (14)$$

式中 $C = (\rho_l/\rho_{a0})(P_0/P)(N_{a0}/N_{i0} + P_0/K)(M_a/M_i)$, $D = (\rho_l/\rho_{a0})(P_0/P)[N_{a0}/N_{i0} + (P_0 - P)/K](M_a/M_i)$ 。实际的气泡不全溶型多泡流的粘度 η_m 应为 η_1 和 η_2 的加权平均值。

4 数值计算与分析

在数值计算中, 取 $K = 4.217 \times 10^6$ kPa, $P_0 = 98.07$ kPa, $\rho_{a0} = 1.2$ kg/m³, $\rho_l = 900$ kg/m³, $M = M_a/M_i = 0.126$ 和 $P_v = 0.09807$ kPa。气泡全溶型模型和不溶型模型的密度 ρ_1/ρ_l 和 ρ_2/ρ_l 对压力 P 变化曲线如图 1 和图 2 所示。若初始值 M_{a0}/M_{i0} 越大, 气液混和物的密度越小。取油

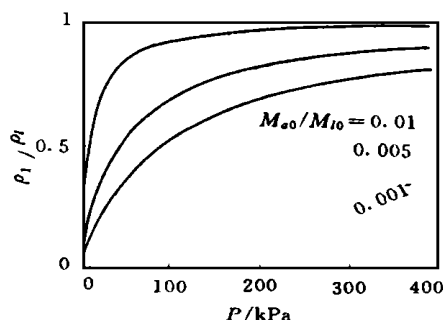


图 1 全溶型模型密度压力关系

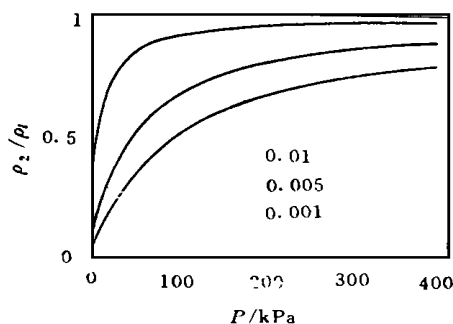


图 2 不溶型模型密度压力关系

的粘度 $\eta = 0.0675$ Pa·s, 两类型多泡流粘度 η_1/η 和 η_2/η 对压力变化曲线如图 3 和图 4 (图 1-图 4 中参数 M_{a0}/M_{i0} 为初始空气在油内的溶解度, 为无量纲单位) 所示。若 M_{a0}/M_{i0} 越大, 粘度就越大。

SFD 的现行理论模型和本文模型的主要参数有如下量的关系:

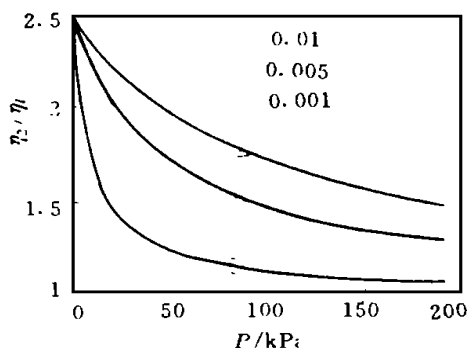


图3 全溶型模型粘度压力关系

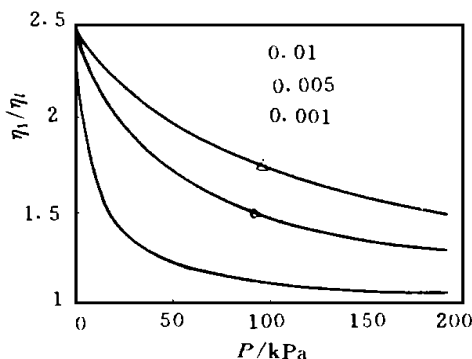


图4 不溶型模型粘度压力关系

$$\eta \leq \eta_m, \quad \rho_i \geq \rho_m \quad (15)$$

根据变密度和变粘度的 SFD 的 Reynolds 方程得知, 本文模型的压力分布值比相应的理论模型值要小, 其幅值根据初始空气在油内的溶解度来变化, 即后来在气穴区产生气泡的多少而变化, 这和先前的实验结果是一致的。

5 结 论

(1) SFD 内的气液均相流模型考虑了气泡不同类型等因素, 给出了气泡全溶型和不溶型模型, 气液均相流模型应介于两者之间, 是和实际比较符合的一类可压缩油膜模型。(2) 根据两类多泡流模型的物理特性, 导出密度、粘度与压力变化的关系式。计算表明, 参数的变化与初始条件 M_{a0}/M_{i0} 值有很大关系。(3) 本文模型比现行理论模型更能描述 SFD 的力学特性。

参 考 文 献

- 1 顾家柳等编著 转子动力学 国防工业出版社, 1985
- 2 刘雍, 薛中擎, 朱均 挤压油膜阻尼器结构参数对气穴现象影响的实验研究 航空动力学报, 1995, 10 (4)
- 3 Hammit G. Cavitation and Multiphase Flow Phenomena New York, McGraw-Hill, 1980
- 4 Floberg L. Cavitation in Lubricating Oil Film, from Cavitation in Real Liquids Edited by Robert Davies New York, Elsevier, 1964: 122-139
- 5 李青海等编著 两相流参数检测及应用 浙江大学出版社, 1991
- 6 Feng N S, Hahn E J. Density and Viscosity Models for Two-Phase Homogeneous Hydrodynamic Damper Fluids ASLE Trans 1986, 29 (3): 361-369
- 7 Hayward A T J. Viscosity of Bubbly Oil, Fluids Report National Engineering Lab., 1961, (99)

(责任编辑 魏星禄)