

# 活塞表面仿生非光滑微坑贮油润滑机理的 任意拉格朗日-欧拉法有限元模拟

杨洪秀<sup>1</sup>, 左文杰<sup>2</sup>, 李亦文<sup>2</sup>, 任露泉<sup>1</sup>

(1. 吉林大学 地面机械仿生技术教育部重点实验室, 长春 130022; 2. 吉林大学 机械科学与工程学院, 长春 130022)

**摘要:** 针对活塞表面仿生非光滑微坑贮油润滑问题, 采用 ALE(Arbitrary Lagrange-Euler) 有限元法建立了追踪润滑油晃动的数学模型。利用非线性有限元求解器 LS-DYNA 仿真了润滑油晃动的自由液面形状与压力云图, 直观地显示了非光滑微坑中润滑油晃动的整个动态过程。对半球形、圆锥形与楔形非光滑贮油微坑的润滑能力进行了对比数值模拟。结果表明, 楔形微坑的润滑效果最好, 与实验结果吻合。

**关键词:** 工程仿生学; 仿生非光滑; 活塞润滑; 任意的拉格朗日-欧拉法有限元法

**中图分类号:** TB17      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1671-5497(2008)03-0591-04

## ALE finite element simulation of oil storage lubrication mechanism on bionic nonsmooth micro-pits in piston surface

Yang Hong-xiu<sup>1</sup>, Zuo Wen-jie<sup>2</sup>, Li Yi-wen<sup>2</sup>, Ren Lu-quan<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory for Terrain-Machine Bionics of Engineering, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130022, China; 2. College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China)

**Abstract:** An arbitrary Lagrange-Euler (ALE) finite element method was introduced to build a mathematical model to trace the sloshing of the lubricating oil in the micro-pits on the piston surface to help understanding the oil storage mechanism of the bionic nonsmooth surface. The free surface profile and the pressure cloud diagram of the lubricating oil sloshing were simulated by the nonlinear finite element solver LS-DYNA, demonstrating intuitively the whole dynamic process of the lubricating oil sloshing in the nonsmooth micro-pit. The lubricating capability of the hemisphere, taper, and cuniform oil storage micro-pits were simulated comparatively and the result showed that the lubricating capability of the cuniform micro-pit is the best, being in agreement with the experiment.

**Key words:** engineering bionics; bionic nonsmooth; piston lubrication; arbitrary Lagrange-Euler (ALE) finite element method

**收稿日期:** 2007-08-27.

**基金项目:** “十五”国家科技攻关计划引导项目(2005BA429C); 吉林省科技发展计划重点项目(20051111); 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20050183018).

**作者简介:** 杨洪秀(1974-), 男, 博士研究生. 研究方向: 工程仿生学. E-mail: yhongxiu@yahoo.com.cn

**通讯联系人:** 左文杰(1981-), 男, 博士研究生. 研究方向: 计算力学. E-mail: zuowj2008@qq.com

改善活塞与缸套摩擦副耐磨性能的传统方法主要是提高材料硬度和进行表面涂层。虽然对新材料和新工艺的研究取得了较大成效,但进一步提高耐磨性有很大难度。上世纪 80 年代起,任露泉等通过对蛻螂等动物非光滑体表的研究,提出了生物非光滑脱附、耐磨以及减粘降阻理论并成功应用在犁壁的脱附<sup>[1]</sup>、轧辊的耐磨<sup>[2]</sup>以及推土板的减粘降阻<sup>[3]</sup>等应用技术上。近年来,受蚯蚓、钻土泥鳅等动物靠体表非光滑表皮细胞储存与分泌黏液来降低体表与土壤之间的摩擦阻力这一现象<sup>[4]</sup>的启发,任露泉等发明了内燃机非光滑活塞与缸套摩擦副的贮油润滑技术<sup>[5]</sup>。通过实验证实活塞表面的非光滑微坑有较强储存润滑油以及形成油膜的能力<sup>[6]</sup>。活塞依靠其周期性惯性力的作用来晃动存贮在非光滑微坑里的润滑油,从而使润滑油飞溅到气缸套壁面。由于摩擦副润滑的特殊性,在试验中观察不到微坑中润滑油的流动状态,同时非光滑微坑的形状、活塞运动对贮油润滑性能的影响尚未研究清楚,所以有必要从理论上建立合理的数学模型,并对其贮油润滑机理进行定量研究。

### 1 物理模型

文献[7]通过仿真计算以及实验验证得出活塞和缸套之间油膜厚度的平均值为 20 μm,在此尺度下润滑油的流动性极差,同时文献[8]通过摩擦实验得出非光滑微坑之间的最佳孔距为 5 mm,所以可以完全忽略非光滑贮油微坑之间的相互影响,为此只取一个微坑作为研究对象。通常非光滑微坑由激光加工成半球形、圆锥形或楔形,本文仅给出半球形贮油微坑(见图 1)中润滑油晃动的详细数值模拟过程。该微坑贮油晃动物理模型由活塞、缸套、空气、润滑油四部分组成,  $D=2.4$ ,  $d=2$ ,  $h=0.5$

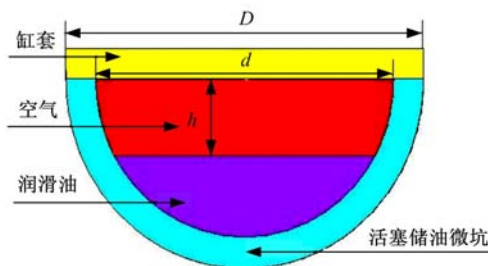


图 1 半球状贮油微坑几何模型

Fig. 1 Geometric model of hemispheric oil storage micro-pit

### 2 微坑贮油晃动润滑数学模型

通常采用任意拉格朗日-欧拉 (Arbitrary Lagrange-Eulerian, ALE) 方法求解自由液面问题。ALE 方法引入一个可以任意运动的参考标架,以实现网格的不断更新而不致发生网格畸变<sup>[9]</sup>。

ALE 法的随体导数可写为

$$f = \frac{\partial f}{\partial t} \Big|_x + \frac{\partial f}{\partial x_i} c_i = \frac{df}{dt} + c \nabla f \quad (1)$$

式中:  $f$  为任意物理量;  $c_i = u_i - \omega_i$  为 ALE 描述下的对流速度,  $u_i$  为流体质点的速度,  $\omega_i$  为参考坐标系下的网格速度。

由此推导出 ALE 法的黏性流体 Navier-Stokes 方程为

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{du_i}{dt} + c_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + f_i \quad (3)$$

$$\sigma_{ij} = -\frac{p}{\rho} \delta_{ij} + \nu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (4)$$

式中:  $u, \rho, p$  和  $\nu$  分别为流体的速度、密度、压力和运动黏性系数;  $f$  为体积力。

根据运动学关系可以得到自由液面上网格点速度的唯一约束条件为

$$u_i n_i = \omega_i n_i \quad (5)$$

式中:  $n_i$  为外边界外法向矢量分量。

边界条件:

$$u_i = \bar{u}_i \text{ (在壁面上)}$$

$$\sigma_{ij} n_j = \bar{\sigma}_i \text{ (在自由液面上)}$$

采用分步格式进行时间域上的数值离散,运用 Galerkin 加权余量法推导对应的有限元数值离散方程。本文中采用非线性有限元求解器 LS-DANY 对该晃动问题进行数值模拟。

### 3 ALE 有限元求解与分析

#### 3.1 材料特性与网格划分

相对于润滑油的大变形,活塞和缸套的变形可以忽略,所以将活塞和缸套视作刚体。刚体的材料特性为:密度 7850 kg/m<sup>3</sup>;弹性模量 2.1 × 10<sup>11</sup> Pa;泊松比 0.3。润滑油的材料特性为:密度 900 kg/m<sup>3</sup>;动力黏性系数 0.44 kg/(s · m);体积模量 0.02 × 10<sup>11</sup> Pa。空气的材料特性为:密度 1 kg/m<sup>3</sup>,忽略空气的黏性。采用六面体 SOLID164

实体单元划分网格,空气和润滑油的单元算法采用单点积分。使用 ANSYS 做前处理,网格划分如图 2 所示。

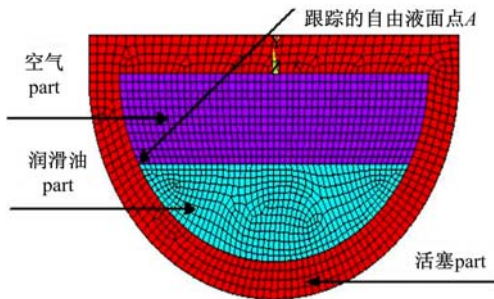


图 2 贮油微坑的有限元模型

Fig. 2 Finite element model of oil storage micro-pit

在模型的网格划分上,使流体和刚体共节点,即使流体网格与结构网格在两交界处有相同的密度、节点数。该算法简捷易行,无需定义流体与结构之间的耦合或接触。

### 3.2 计算结果与分析

本算例选取的活塞运动学参数与文献[5]一致,在刚体 part 施加活塞往复运动位移载荷。采用 LS-PREPOST 软件进行后处理,模拟结果示于图 3 和图 4。

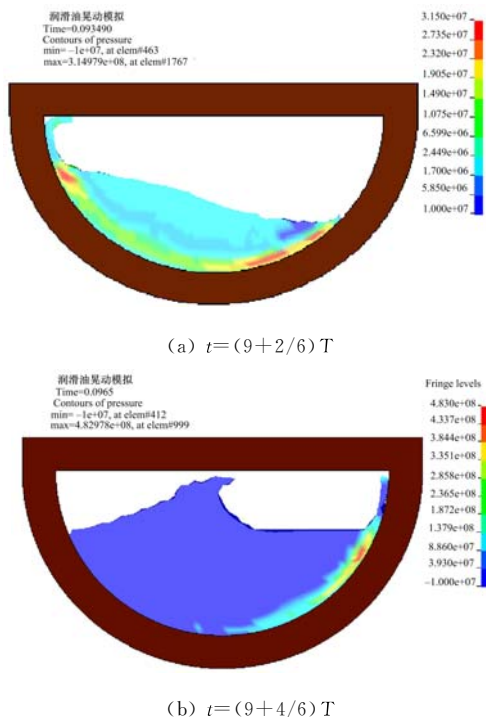


图 3 横向激励下第 9 个周期内半球形微坑润滑油晃动自由液面形状及压力云图

Fig. 3 Free surface profile and pressure level of lubricating oil sloshing during the ninth cycle by transverse excitation

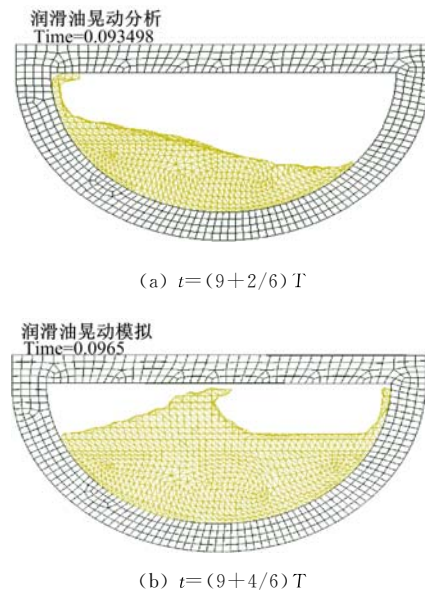


图 4 横向激励下第 9 个周期内润滑油晃动网格更新时间历程

Fig. 4 Mesh regeneration of lubricating oil sloshing during the ninth cycle by transverse excitation

图 3 和图 4 表明:①在该周期内润滑油晃动的自由液面已经抵达缸套表面,起到了晃动润滑的效果;②润滑油压力最大之处都在微坑壁面附近,此时润滑油流速低,因此压强较大;③润滑油在如此大幅晃动下,网格不存在缠绕和畸变,网格更新较好,说明了 ALE 追踪自由液面的优越性。

除了对半球形微坑的润滑能力进行模拟外,还对圆锥形和楔形微坑进行了模拟。微坑的尺寸参数见参考文献[6]。本文只给出这三种微坑中润滑油液面与刚体左壁面交界点 A 在 10 个周期内波高变化的时间历程(见图 5)。半球状微坑的波高跟踪点 A 见图 2。

由图 5 可知:①楔形微坑对应的波峰和波谷不对称,这是由于楔形微坑的几何结构不对称造成的,而半球形和圆锥形微坑对应的波峰和波谷是对称的;②算例中三种贮油微坑的坑高为 1 mm,液高为 0.5 mm,在第 5 个周期时楔形微坑中的润滑油晃动波高已超过 0.7 mm,而活塞-缸套的间隙最大为 0.105 mm,液深与波高之和已大于微坑深度与活塞-缸套最大间隙之和,即  $0.7 + 0.5 > 1 + 0.105$ ,这说明润滑油已飞溅到缸套表面,在此之前发生的都是干摩擦。半球形与圆锥形微坑贮存的润滑油则分别第 6 个周期和第 9 个周期飞溅到缸套表面;③三种贮油微坑中楔形微坑最先使活塞由干摩擦进入晃动润滑状态,半球形微坑次之,而圆锥形微坑的晃动润滑能力最

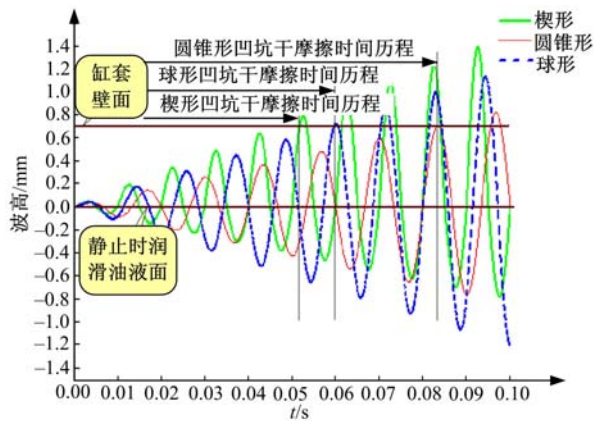


图 5 横向激励下三种非光滑贮油微坑 A 观察点 10 个周期内的波高变化时间历程

Fig. 5 Time history record of wave height change for observation point A of three types nonsmooth oil storage micro-pits during the 10 cycles by transverse excitation

差。这与文献[6]的实验中这三种非光滑微坑在混合润滑状态的润滑能力相吻合。

#### 4 结束语

通过 ALE 有限元模拟,真实地显示了非光滑微坑中贮存的润滑油的晃动行为,求得了润滑油的晃动波高以及压力分布,解释了非光滑微坑贮油润滑这一物理现象。针对选取的三种微坑形状,计算了各自的贮油润滑能力:楔形微坑的润滑效果最好,半球状的次之,圆锥形的最差。这与实验结果吻合得较好。用此方法可对各种形状的非光滑贮油微坑进行晃动润滑的仿真模拟,进而缩短非光滑活塞的设计周期。

#### 参考文献:

[ 1 ] 韩志武, 任露泉, 刘祖斌. 激光织构仿生非光滑表面抗磨性能研究[J]. 摩擦学学报, 2004, 24(4): 289-293.  
Han Zhi-wu, Ren Lu-quan, Liu Zu-bing. Investigation on anti-wear ability of bionic non-smooth surfaces made by laser texturing[J]. Tribology, 2004, 24(4): 289-293.

[ 2 ] Tong Jin, Ma Yun-hai, Ren Lu-quan, et al. Terminological characteristics of pangolin scales in dry sliding[J]. Journal of Materials Science Letters,

2000, 19(5): 529-532.

[ 3 ] 王国林, 陈秉聪, 任露泉. 波纹型推土阻力的有限元分析[J]. 农业工程学报, 1994, 22(3): 34-39.  
Wang Guo-lin, Chen Bing-cong, Ren Lu-quan. Finite element analysis for bulldozing resistance of wave surface blade[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 1994, 22(3): 34-39.

[ 4 ] 李安琪, 任露泉, 陈秉聪. 蚯蚓体表液的组成及其减粘脱附理论分析[J]. 农业工程学报, 1990, 6(3): 8-14.  
Li An-qi, Ren Lu-quan, Chen Bing-cong. Constitution and mechanism analysis of reducing soil adhesion for the body surface liquid of earthworms[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 1990, 6(3): 8-14.

[ 5 ] 邓宝清. 内燃机活塞缸套系统非光滑效应的仿生研究[D]. 长春: 吉林大学汽车工程学院, 2005.

[ 6 ] 邓宝清, 任露泉, 苏岩, 等. 模拟活塞缸套摩擦副的仿生非光滑表面的摩擦学研究[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2004, 34(1): 79-84.  
Deng Bao-qing, Ren Lu-quan, Su Yan, et al. Tribological study on bionically unsmoothed surface model in piston-cylinder friction pair[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2004, 34(1): 79-84.

[ 7 ] 杨俊伟, 于旭东, 王成焘, 等. 活塞裙部润滑油膜厚度的计算及试验研究[J]. 内燃机学报, 2001, 19(5): 485-488.  
Yang Jun-wei, Yu Xu-dong, Wang Cheng-tao, et al. Research on the oil film thickness on piston skirt by simulation and experiment [J]. Transactions of CSICE, 2001, 19(5): 485-488.

[ 8 ] 丛茜, 金敬福, 张宏涛, 等. 仿生非光滑表面在混合润滑状态下的摩擦性能[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2006, 36(3): 363-366.  
Cong Qian, Jin Jing-fu, Zhang Hong-tao, et al. Friction performance of bionic non-smooth surfaces with mixing lubrication[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2006, 36(3): 363-366.

[ 9 ] Souli M, Zolesio J P. Arbitrary Lagrangian-Eulerian and free surface methods in fluid mechanics [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2001, 191(3-5): 451-466.