

油滴/金属壁面正碰撞的油膜动力学特性

周 超, 古忠涛, 陈 薄, 王博东
(西南科技大学 制造科学与工程学院
制造过程测试技术省部共建教育部重点实验室, 四川 绵阳 621010)

摘 要: 为诠释轴承腔中润滑油滴与腔壁碰撞形成的沉积油膜流动铺展问题,采用流体体积(VOF)方法建立了油滴与金属壁面正碰撞的三维数值分析模型,在试验获得油滴与壁面静态接触角的基础上,通过数值计算,探讨了沉积油膜动态铺展和回缩过程,以及油滴直径和碰撞速度对沉积油膜铺展直径、特征厚度、铺展速度以及碰撞力等油膜动力学特性的影响。结果表明:沉积油膜在最大铺展直径时呈中心微凹的圆盘形状,进入回缩阶段后则蜕变为边缘薄中心厚的圆盘形状;沉积油膜的回缩速度和回缩阶段的碰撞力都非常小,其值接近于 0,并保持基本恒定;随着油滴直径的增大,沉积油膜铺展直径、特征厚度、铺展速度以及碰撞力均增大;随着碰撞速度的增大,油膜铺展直径和碰撞力增大,特征厚度却随之减小。与相关试验结果的对比,验证了提出的数值分析模型的可靠性和正确性。

关 键 词: 油滴; 金属壁面; 正碰撞; 油膜; 动力学特性; 轴承腔

中图分类号: V233.4 **文献标志码:** A

Oil film dynamic characteristics during oil droplet's normal impact onto metallic surface

ZHOU Chao, GU Zhongtao, CHEN Bo, WANG Bodong
(Key Laboratory of Testing Technology for Manufacturing Process, Ministry of Education,
School of Manufacturing Science and Engineering,
Southwest University of Science and Technology, Mianyang Sichuan 621010, China)

Abstract: To explore the spread behavior of the deposited oil film formed by droplet-housing impact in aero-engine bearing chamber, a three-dimensional numerical model was presented using volume of fluid (VOF) method to predict the oil/air two-phase flow during the normal impact of oil droplet onto a smooth stainless steel surface. The static contact angle between droplet and surface was measured by experiment. The dynamic spreading and recoiling process of deposited oil film during the normal impact was analyzed, and the effects of droplet diameter and impact velocity on dynamic characteristics such as spread diameter, nominal film thickness, spread velocity and impact force were discussed. The calculation results showed preliminarily that at maximum spread diameter the film appeared to be a flat disk with slightly concave center, and in the recoiling period, it appeared to be a disk with

收稿日期: 2018-10-11
基金项目: 国家自然科学基金(51475395); 四川省科技厅基础研究基金(2016JY0129);
“制造与自动化”四川省高校重点实验室开放基金(szjj2015-079); 西南科技大学研究生创新基金(17ycx130)
作者简介: 周超(1993—),男,硕士生,主要从事航空发动机轴承腔的润滑分析与设计。
通讯作者: 古忠涛(1970—),男,副教授,博士,主要从事集成制造技术和现代机械设计理念与方法。
E-mail: guzhongtao2005@163.com

引用格式: 周超,古忠涛,陈薄,等. 油滴/金属壁面正碰撞的油膜动力学特性[J]. 航空动力学报,2019,34(7):1607-1614. ZHOU Chao, GU Zhongtao, CHEN Bo, et al. Oil film dynamic characteristics during oil droplet's normal impact onto metallic surface[J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(7): 1607-1614.

thin rim and thick center. The recoiling velocity of film and the impact force in the recoiling period reduced nearly to 0 and remained approximately constant. The oil film spread diameter, nominal film thickness, spread velocity and impact force increased with the increasing droplet diameter. The spreading diameter and impact force increased with the increasing impact velocity of droplet, whereas the nominal film thickness decreased. Finally, the reliability and correctness of the model presented was validated by comparing with relevant experimental data.

Key words: oil droplet; metallic surface; normal impact; oil film; dynamic characteristics; bearing chamber

轴承腔是航空发动机润滑系统中重要的支承和润滑部件,从轴承内圈和保持架等旋转运动件表面流出的润滑油通常以油滴的形式甩入其内,与轴承腔壁面碰撞后沉积形成油膜,油膜沿着腔壁运动带走轴承腔的热量,油膜的流动特性极大的影响着轴承腔的润滑与换热功能。显然,轴承腔壁面形成的润滑油膜可以看作是单个油滴沉积的累积结果。然而,迄今对润滑油滴与轴承腔壁面碰撞后的沉积铺展行为仍缺乏系统的认识,以至于其润滑设计与分析中多以有限的简化试验样本数据为依据,严重制约了润滑设计的准确性和可靠性。因此,开展有关润滑油滴与金属壁面碰撞(包括正碰撞)以及沉积油膜流动铺展特性的相关研究,为轴承腔的润滑设计提供基础数据是十分有意义的基础工作。

液滴与固体壁面碰撞问题常见于化工、雾化燃烧和农业生产等领域,研究人员根据其关注的问题围绕非油类液滴与固体壁面的碰撞行为开展了大量的理论分析与试验研究,而对于油滴与固体壁面尤其是金属壁面的碰撞研究工作则较为鲜见。较为典型的研究工作有,Mundo等^[1]试验研究了水、酒精、以及水-蔗糖-酒精混合物三种液滴与不锈钢壁面的碰撞过程,分析了液滴性质和碰撞运动等对碰撞过程的影响,建立了液滴与固体壁面碰撞的飞溅准则。Pasandideh-Fard等^[2]采用改进的 SOLA-VOF (solution of Los Alamos-volume of fluid) 方法建立了水滴与不锈钢壁面正碰撞的三维数值分析模型并开展了相关的试验工作,分析了水滴与不锈钢壁面碰撞后的沉积水膜铺展过程,以及表面张力和接触角对水膜铺展特性的影响,建立了水膜最大铺展直径与碰撞特征参数的关联。Rioboo等^[3-4]试验研究了水、酒精以及甘油等液滴与玻璃、PVC(聚氯乙烯)板和石蜡等壁面正碰撞的沉积液膜铺展过程,分析了液滴直径、碰撞速度和表面张力等对碰撞结果的影

响。Šikalo等^[5]通过试验研究了水、异丙醇和甘油液滴与固体壁面的正碰撞以及液膜沉积铺展的动力学特性,分析了液膜铺展过程中液滴-固体壁面-空气三相界面的运动情况。Xu等^[6]采用高速摄影技术观测了甲醇、乙醇和异丙醇三种液滴与干燥光滑玻璃壁面正碰撞后的冠状飞溅现象,探讨了环境气体压力和可压缩性对液滴飞溅的影响。Diaz等^[7]采用理论分析、试验研究和数值计算相结合的方法,研究了经气体加速的水滴与抛光不锈钢壁面正碰撞后的动态铺展过程,分析了液滴 We 数和气体压力做功对碰撞结果的影响。Tang等^[8]采用高速摄影技术测量了水、癸烷、乙醇和十四烷 4 种液滴与不锈钢壁面的正碰撞过程,重点分析了液滴 We 和固体壁面表面粗糙度对液滴碰撞结果的影响。Zhang等^[9]试验测量了低速液滴(水、乙醇和甘油等)与铝板正碰撞的碰撞力变化,探讨了液滴 We 和 Re 对碰撞力的影响。徐爽等^[10]采用 level set 界面追踪方法,建立了低速水滴与固体壁面正碰撞的二维数值分析模型,定性分析了表面张力对水膜铺展过程的影响。方龙和刘登等^[11-12]建立了油滴与固体壁面倾斜碰撞的二维数值分析模型,分析了油滴直径、碰撞速度和碰撞角度对沉积油膜铺展的影响,并通过试验建立了碰撞油滴粘附和飞溅转捩定性临界条件。

由上述研究现状分析可以看出,液滴与固体壁面碰撞行为的准确描述仍然依赖于特定条件的试验工作,数值计算中常采用的二维简化模型很难真实反映实际的碰撞状态和液膜的沉积铺展过程。另外,油滴与非油类液滴的物理性质(诸如黏度、表面张力系数),以及金属壁面与非金属固体壁面的表面特征均存在很大的差异,导致碰撞后油/液膜的沉积铺展特性也有很大的差异。这些不足造成现有的相关研究工作对于航空发动机轴承腔的润滑分析与设计指导意义非常有限。因此,开展润滑油滴与金属壁面正碰撞后沉积油膜

的动态铺展及动力学特性的三维数值分析,揭示更加接近实际碰撞情况下的沉积油膜动力学特性,无论从工程背景还是学术角度来看都具有显著的意义和价值。

采用 VOF 方法建立了润滑油滴与金属壁面正碰撞的油气两相流动三维数值分析模型,在试验获得油滴与金属壁面碰撞静态接触角基础上,通过数值计算,分析了油滴与金属壁面正碰撞后的沉积油膜动态铺展和回缩过程,探讨了油滴直径和碰撞速度对油膜铺展直径、特征厚度、铺展速度以及碰撞力等油膜动力学特性的影响;通过数值分析结果与相关试验结果的对比,验证了本文提出的油滴与金属壁面正碰撞的油气两相流动三维数值分析模型的可靠性和正确性。

1 数值分析模型

1.1 控制方程

油滴与固体壁面正碰撞及沉积油膜的流动铺展分析属于典型的具有自由界面的气液两相流动问题,采用 VOF 方法进行求解。为简化分析,作如下假设:沉积油膜流动铺展过程为瞬态层流流动;润滑油和空气均为不可压缩的牛顿流体;油滴、空气和壁面三者之间没有热量和能量传递,油滴和空气之间没有质量转移。因此,根据 VOF 方法的基本思想^[13]和流体动力学的基本理论,流动计算的连续性方程和动量方程可以表示为

$$\frac{\partial(\rho)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p +$$

$$\nabla \cdot [\mu(\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T)] + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F}_s$$

式中 $\mathbf{u}$ 为润滑油和空气的速度矢量; p 为压强; $\mathbf{g}$ 为重力加速度; ρ 和 μ 分别为润滑油与空气的加权平均密度和动力黏度; $\mathbf{F}_s$ 由润滑油表面张力产生的动量源项。

采用 VOF 方法追踪润滑油滴与空气的界面,即通过求解计算域内单元网格中润滑油体积分数方程获得润滑油在网格中的体积分数,进而采用界面重构确定润滑油滴与空气的界面位置。润滑油的体积分数方程为

$$\frac{\partial \rho_1 \alpha_1}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_1 \alpha_1 \mathbf{u}_1) = 0 \tag{3}$$

式中 ρ_1 为润滑油的密度; $\mathbf{u}_1$ 为润滑油的速度矢量; α_1 为润滑油的体积分数。润滑油的体积分数 $\alpha_1=0$ 表示网格单元中全部为空气; $\alpha_1=1$ 表示网

格单元中全部为润滑油; $0 \leq \alpha_1 \leq 1$ 表示网格单元中润滑油与空气并存,即此网格单元是润滑油与空气的界面网格。

润滑油与空气的加权平均密度和动力黏度计算公式分别为

$$\rho = \alpha_1 \rho_1 + (1 - \alpha_1) \rho_g \tag{4}$$

$$\mu = \alpha_1 \mu_1 + (1 - \alpha_1) \mu_g \tag{5}$$

式中 ρ_g 为空气的密度; μ_1 和 μ_g 分别为润滑油和空气的动力黏度。

根据连续表面张力模型(CSF)^[14],动量方程(2)中源项 $\mathbf{F}_s$ 的计算公式为

$$\mathbf{F}_s = 2\sigma \kappa \frac{\rho \nabla \alpha_1}{\rho_1 + \rho_g} \tag{6}$$

式中 σ 为润滑油的表面张力系数; κ 为润滑油与空气的界面表面曲率, $\kappa = \nabla \cdot (\mathbf{n} / |\mathbf{n}|)$,其中, $\mathbf{n}$ 为界面的法向, $\mathbf{n} = \nabla \alpha_1$ 。

与其他位置不同的是,油滴、空气与壁面三相接触线位置的流动受到壁面的影响,采用式(6)计算接触线位置源项时,要综合考虑壁面的表面轮廓和油滴与壁面的接触角影响。因此,常采用下式进行估算^[14]

$$\kappa_w = \nabla \cdot \left(\frac{\mathbf{n}_w}{|\mathbf{n}_w|} \cos \theta + \frac{\mathbf{t}_w}{|\mathbf{t}_w|} \sin \theta \right) \tag{7}$$

式中 $\mathbf{n}_w$ 和 $\mathbf{t}_w$ 分别为接触线位置壁面的法向和切向向量; θ 是润滑油与壁面的接触角。

1.2 油滴与金属壁面的接触角

油滴与金属壁面正碰撞的动力学分析中,确定沉积油膜铺展过程中与壁面的接触角是非常重要的工作。沉积油膜在固体壁面流动铺展过程中的接触角与润滑油的黏度和表面张力系数等物理特征参数,以及固体壁面的亲疏水(油)性和表面粗糙度等固有特性有关,而且在整个流动铺展过程中是动态变化的,要获得较为准确的接触角随铺展时间的动态变化关系极为困难,为简化分析问题,数值计算中将油膜与壁面的动态接触角用静态接触角代替,即接触角采用静态接触角^[15-16]。

本文分析中采用的静态接触角由座滴法测量获得^[17]。测量设备为东莞市晟鼎精密仪器有限公司生产 SDC-350H 型光学接触角测量仪,润滑油为 32# 工业抗磨油,固体壁面由长和宽均为 80 mm、厚度为 3 mm 的 0Cr25Ni20 型不锈钢试件经抛光处理制成,其表面粗糙度 $R_a=0.2$ 。润滑油滴垂直滴定到水平放置的不锈钢试件表面,待油膜流动铺展到静止状态,通过相机拍摄油膜静态形貌,经图像处理得到沉积油膜的静态接触角 θ_s ,

如图 1 所示。为了提高测量结果的可靠性,减小系统误差和外界环境的影响,将多次测量获得的静态接触角求平均值,以平均值作为最终静态接触角。试验测量得到的静态接触角范围为 $24^{\circ} \sim 36^{\circ}$ 。为此,本文数值计算中取静态接触角为 30° 。

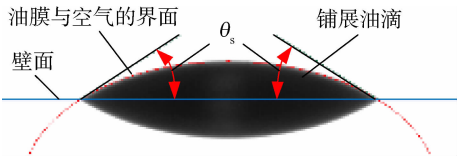


图 1 油滴与不锈钢壁面的静态接触角测量示意
Fig.1 Schematic of static contact angle measurement of oil droplet onto a stainless steel surface

1.3 数值计算模型

已有的试验研究工作表明,与金属壁面正碰撞后的沉积油膜的流动铺展过程具有循环对称性^[2,4]。因此,为简化计算和提高计算效率,数值计算中采用 1/4 碰撞模型,其计算域和网格处理如图 2 所示。定义计算域时考虑到空气流动和油滴铺展的充分性,取 $x \times y \times z = 5d_0 \times 5d_0 \times 4d_0$ (d_0 为油滴的直径)。采用六面体网格类型对计算域进行网格划分(如图 2(a)所示),且整个计算域的初始网格尺寸是相同的。为了提高 VOF 方法对空气与沉积油膜的界面动态追踪计算的精度和可靠性,采用自适应网格加密技术对空气与油膜界面附近进行局部网格加密处理^[18](如图 2(b)、图 2(c)和图 2(d)所示),以单元密度梯度作为标定变量控制加密区域范围。经大量试算和分析,本文采用最大等级为 4 级的自适应加密技术对空气与油膜界面附近网格进行加密。

计算区域的边界条件设置如下:油滴铺展的壁面 1 设为无滑移壁面条件;壁面 2 和 3 设为对称边界条件;其余壁面设为相对压力为零的压力出口边界条件。

油滴与金属壁面正碰撞及其后的油膜流动铺展计算属于瞬态油气两相流动计算,计算初始条件为:油滴区域的润滑油体积分数 $\alpha_l = 1$,空气域的润滑油体积分数 $\alpha_l = 0$ 。数值计算起始于碰撞前,油滴初始速度 u_0 的方向为 z 轴负方向,如图 2(c)所示。另外,数值计算中考虑了重力对油膜铺展的影响,重力加速度方向和油滴初始速度方向相同。

数值计算中,采用 2 阶迎风格式离散动量方程,其中压力项利用 PRESTO! (pressure stag-

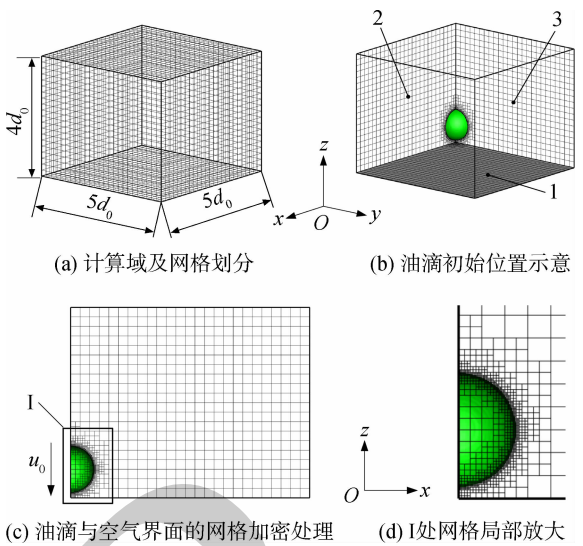


图 2 油滴与金属固体壁面正碰撞数值分析的计算域与网格模型

Fig.2 Computational domain and grid model in the numerical analysis of oil droplet impacting normally onto a solid metallic surface

gering option)算法求解;采用 PISO(pressure implicit split operator)算法耦合求解压力-速度项;体积分数方程采用 Geo-Reconstruct 方法离散;时间采用一阶隐式差分格式离散。综合考虑计算效率和计算精度,设置最大时间步长为 1.0×10^{-4} s,最小时间步长为 1.0×10^{-10} s,最大迭代步数为 30,各物理量迭代收敛的平均残差为 1.0×10^{-5} 。

数值计算中相关流体的物理特征参数有:润滑油密度 $\rho_l = 955 \text{ kg/m}^3$,动力黏度 $\mu_l = 9.55 \times 10^{-3} \text{ kg/(m} \cdot \text{s)}$,表面张力系数 $\sigma = 0.030 \text{ N/m}$;空气密度 $\rho_g = 1.225 \text{ kg/m}^3$,动力黏度 $\mu_g = 1.789 \times 10^{-5} \text{ kg/(m} \cdot \text{s)}$ 。

2 结果与讨论

图 3 给出了油滴直径为 1.0 mm、碰撞速度为 2.0 m/s 条件下,油滴与壁面正碰撞后若干时刻的沉积油膜流动铺展状态。从图中可以看出,球形油滴与光滑壁面正碰撞后,在油滴撞击作用下,与壁面接触的区域受到挤压发生变形,迅速以接触点为圆心向外铺展。在铺展的初始阶段,受挤压的区域远离油滴中心,变形主要集中于油滴的下半部分,其上半部分仍保持球形,如图 3(a)和图 3(b)所示。随着铺展的发展,油滴持续变形且铺展速度逐渐减小,润滑油在油膜边缘局部堆积,油膜发展为边缘呈“山脊”状环形凸起的“草帽”形状(如图 3(c));其后,油膜铺展速度进一步减小,

“草帽顶”逐渐消退,铺展直径不断变大,油膜边缘润滑油持续堆积,形成中心平直、边缘凸起的平底圆盘形油膜(如图 3(d)和图 3(e))。随后,油膜在表面张力作用下出现部分回缩、部分继续铺展的流动状态,形成中心微凹的圆盘形状,油膜达到最大铺展直径(如图 3(f)),铺展阶段结束。与此同时,铺展油膜转入回缩阶段,在表面张力作用下开始回缩,铺展直径逐渐减小,边缘附近的油膜变薄(如图 3(g)和图 3(h))。值得注意的是,因常见金属(包括不锈钢)是亲油性的,导致油滴与其正碰撞后的流动铺展过程和水滴等与疏水性表面的碰撞情况具有很大的差异,出现了铺展过程发展的很快而回缩过程非常缓慢的典型流动现象。

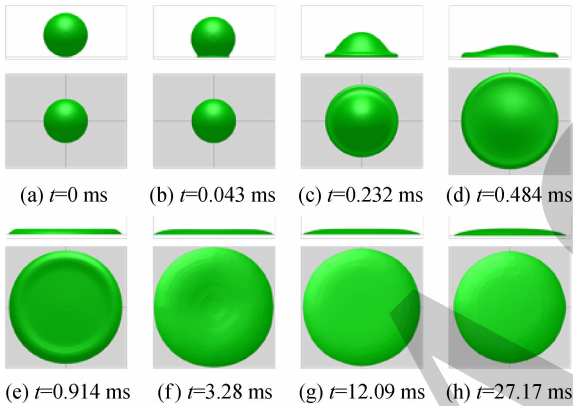


图 3 油滴与金属固体壁面正碰撞后的流动铺展过程
Fig. 3 Flowing and spreading process of oil droplet after impacting onto a solid metallic surface

图 4 给出了碰撞速度为 4.0 m/s 条件下,油滴直径对沉积油膜铺展直径和特征厚度(铺展直径 d 为油膜与壁面接触区域的平均直径,特征厚度 h 为油膜表面最高位置至壁面的距离, t 为沉积油膜的流动铺展时间)的影响。从图中可以看出,沉积油膜铺展直径随着油滴直径的增加而增大。其原因在于,直径较大的油滴质量和体积较大,具有较大的碰撞能量,致使油膜获得的铺展能量较大,加速了油膜的流动铺展。图中还可以看出,沉积油膜特征厚度随着油滴直径的增加呈现出略微增大,显然是大直径油滴较大铺展直径引起的油膜变薄小于体积增加对油膜厚度增大的贡献所致。

此外,图 4 中有两个现象值得注意,其一是铺展的初始阶段,沉积油膜铺展直径急剧增加,特征厚度随之急剧减小,其后很快进入缓慢的铺展和回缩阶段,油膜铺展直径和特征厚度均不再明显变化;其二是铺展的中后期和回缩阶段,油膜铺展

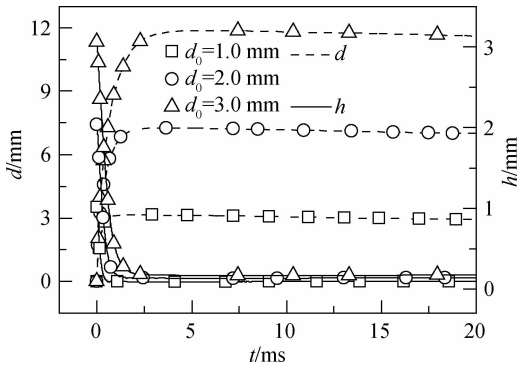


图 4 油滴直径对沉积油膜铺展直径和特征厚度的影响
Fig. 4 Effects of oil droplet diameter on the spread diameter and nominal thickness of deposited oil film

直径与特征厚度之间存在一个数量级以上的数值差异。这两个现象均反映出金属固体壁面具有较强的亲油特性,油膜的铺展流动具有典型的液滴与亲水(油)壁面碰撞后的流动特征。

图 5 给出了油滴直径为 2.0 mm 条件下,碰撞速度对沉积油膜铺展直径和特征厚度的影响。从图中可以看出,沉积油膜铺展直径随着碰撞速度的增加而增大,与之相反,特征厚度随着碰撞速度增加而减小。其原因可以理解为,高速度的油滴具有更大的能量,碰撞后转移给油膜的铺展能量也更大,油膜流动更快且向外铺展的距离更远,则与之对应的油膜厚度变得更薄。

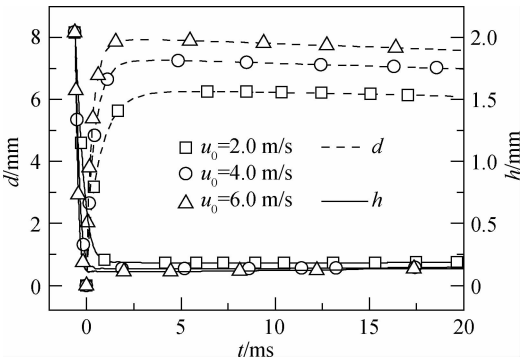


图 5 碰撞速度对沉积油膜铺展直径和特征厚度的影响
Fig. 5 Effects of impact velocity on the spread diameter and nominal thickness of deposited oil film

图 6 给出了碰撞速度为 4.0 m/s 条件下,油滴直径对沉积油膜铺展速度(铺展速度 u 为空气、壁面与沉积油膜三相的接触线在壁面上的运动速度)的影响。从图中可以看出,沉积油膜铺展速度以近似指数函数关系递减,并最终在铺展的后期和回缩阶段趋于平稳。图中还表明,铺展的初始

阶段,不同直径的油滴均以较高的速度铺展为油膜,铺展速度与油滴直径的关系不明显,其原因在于,碰撞时球形油滴与壁面接触面积很小,而碰撞转移给接触区域油膜的动量均较大,导致其产生的初始加速度较大,从而造成初始铺展速度较高。随着铺展的发展,油膜铺展速度随着油滴直径的增大而增大,其原因在于,质量较大的大直径油滴与壁面碰撞后转移给油膜的铺展能量较大,使得油膜向外流动铺展的速度更大一些。其后,铺展油膜按油滴直径从小到大的顺序依次进入回缩阶段(局部放大图中铺展速度和零线的交点,负的铺展速度即为回缩速度),以较小的速度回缩。进入回缩阶段的先后关系可以理解为直径较大的油滴具有的铺展能量较大,流动铺展的距离更远,达到最大铺展直径经历的时间更长,而回缩速度较小则可以归因于金属壁面的亲油特性。

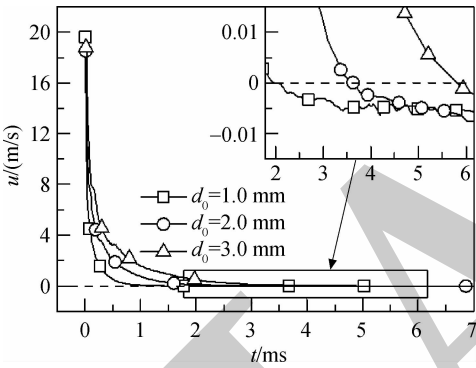


图 6 油滴直径对沉积油膜铺展速度的影响
Fig. 6 Effects of oil droplet diameter on spread velocity of deposited oil film

图 7 给出了油滴直径为 2.0 mm 条件下,碰撞速度对沉积油膜铺展速度的影响。从图中可以看出,碰撞速度对沉积油膜铺展速度的影响主要集中在铺展的初始阶段和铺展与回缩转换阶段。对于铺展的初始阶段沉积油膜铺展速度随着碰撞速度的增大而增大,可以理解为较高速度的油滴具有较大的动量,碰撞后转移给油膜的动量更大,造成油膜沿壁面的流动速度分量较大的结果。铺展与回缩转换阶段(局部放大图)铺展油膜按碰撞速度从大到小的顺列依次进入回缩阶段,其原因同样可以归结为高速度油滴的碰撞能量较大,造成铺展速度较快,缩短了铺展时间所致。

图 8 给出了碰撞速度为 4.0 m/s 条件下,油滴直径对碰撞力(碰撞力 F 为油膜与壁面的接触区域压力积分)的影响。由图可知,在油膜的铺展阶段,碰撞力随着油滴直径的增大而增大,进入回

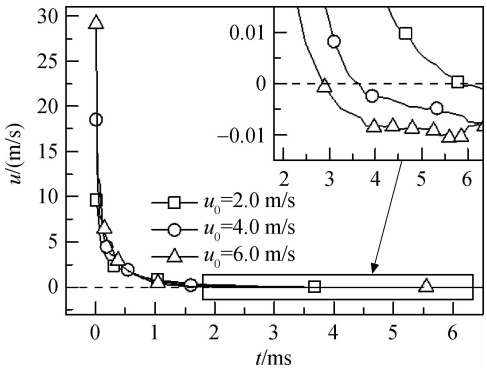


图 7 碰撞速度对沉积油膜铺展速度的影响
Fig. 7 Effects of impact velocity on spread velocity of deposited oil film

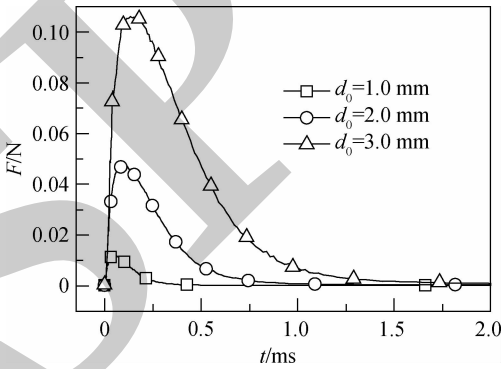


图 8 油滴直径对碰撞力的影响
Fig. 8 Effects of oil droplet diameter on impact force

缩阶段后受油滴直径的影响变得不明显,其值递减到接近于零并保持恒定。显然,前者的原因在于,质量较大的大直径油滴具有较大初始动量,使得碰撞后传递给油膜的动量也较大,故而增大了油膜对壁面的作用力的结果;后者出现的原因则可以理解为,回缩油膜作用于壁面的作用力主要来源于自身重力所致。图中还可以看出,油滴与壁面碰撞后,碰撞力快速上升,达到最大值后随着铺展的发展逐渐减小,直至进入回缩阶段,反应出油膜铺展过程复杂的流体动力学行为。此外,对于图中大直径油滴的最大碰撞力更大,显然应归功于大直径油滴具有的较大初始动量。

图 9 给出了油滴直径为 2.0 mm 条件下,碰撞速度对碰撞力的影响。从图中可以看出,碰撞力随着碰撞速度的增加而增大。其原因同样可以归结为,具有更大初始动量的高速度油滴增大了油膜对壁面作用力的结果。

图 10 给出了 3 种直径油滴的沉积油膜最大铺展直径随碰撞速度的变化。从图中可以看出,油滴直径和碰撞速度对油膜最大铺展直径的影响

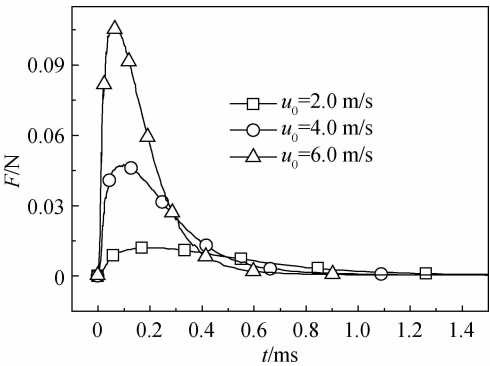


图 9 碰撞速度对碰撞力的影响

Fig. 9 Effects of impact velocity on impact force

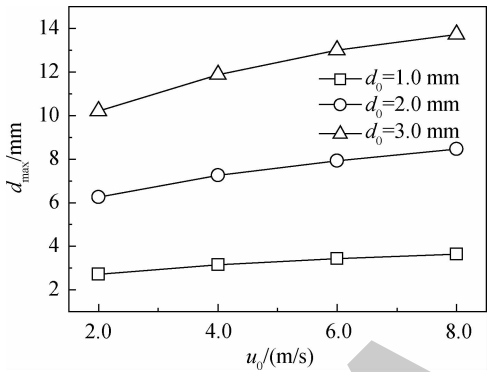


图 10 油滴直径对油膜最大铺展直径的影响

Fig. 10 Effects of oil droplet diameter on maximum spread diameter of deposited oil film

是相同的,油膜最大铺展直径随着油滴直径或碰撞速度的增大而增大,原因在于,较大直径的油滴和较高的碰撞速度均会增大其碰撞能量,导致碰撞后转移给油膜的铺展能量增大,促进了油膜的流动铺展,故而油膜的最大铺展直径会更大一些。

3 数值分析模型的验证

迄今,有关油滴与金属壁面正碰撞的试验研究仍较为少见,因此,本文利用文献[4]中水滴与固态蜡表面的正碰撞试验研究工作对提出的数值分析模型进行验证。

采用本文提出的数值分析模型对直径为 2.75 mm、碰撞速度为 1.18 m/s 的水滴与固态蜡表面的正碰撞进行数值计算,水膜流动铺展过程的数值计算结果与试验结果的对比如图 11 所示。数值计算中采用的水滴与固态蜡表面的静态接触角为 100°,是试验测得的前进接触角和后退接触角的平均值。从图中可以看出,采用本文数值计算模型获得的各时刻计算结果与试验结果均具有较好的吻合性,一定程度上证明了提出的数值分

析模型的可靠性和正确性。对于结果比较中对应时刻的微小差异,与数值计算和试验测量初始时刻误差,以及数值计算方法的误差有关。

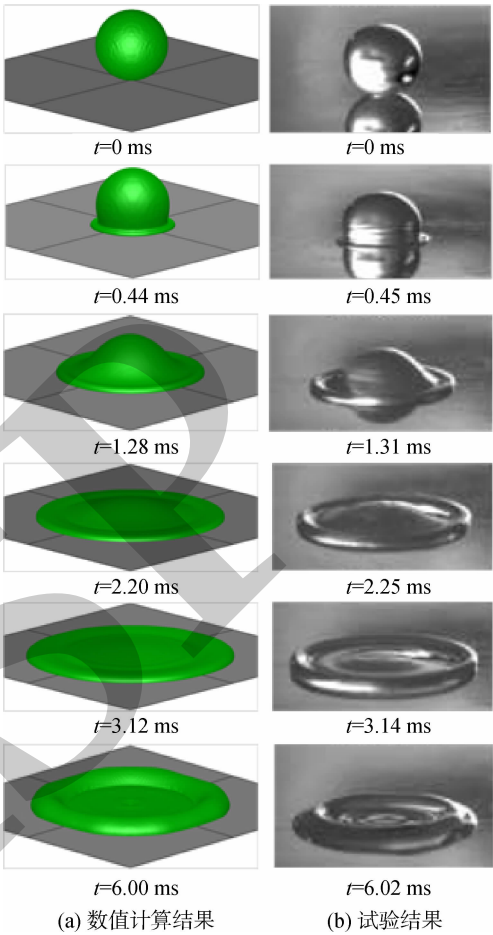


图 11 数值计算结果与试验结果的对比

Fig. 11 Comparison of numerical calculation results with experimental data

4 结 论

1) 与金属固体壁面正碰撞后的油滴以碰撞点为中心向外流动铺展,从初始状态的球形逐渐发展为边缘呈“山脊”状环形凸起的“草帽”形状;随着铺展的继续,在达到最大铺展直径时油膜进一步发展为边缘微凹的圆盘形状;进入回缩阶段后,油膜在表面张力的作用下形成边缘较薄而中心较厚的圆盘形回缩流动形状。

2) 沉积油膜铺展过程的动力学特性较为复杂,铺展直径随着铺展进程先急剧增加,达到最大铺展直径后保持基本恒定,特征厚度的变化趋势则与之相反;沉积油膜铺展速度以近似指数函数关系递减,进入缓慢回缩阶段后最终趋于平稳;碰撞力先增大到最大值,然后逐渐减小,进入回缩阶

段后减小至接近于 0。

3) 随着油滴直径的增加,沉积油膜铺展直径、特征厚度、铺展速度以及碰撞力都是增加的;随着碰撞速度的增加,油膜铺展直径和碰撞力是增加,特征厚度却随之减小。

参考文献:

[1] MUNDO C,SOMMERFELD M,TROPEA C. Droplet-wall collisions; experimental studies of the deformation and breakup process[J]. *International Journal of Multiphase Flow*,1995,21(2):151-173.

[2] PASANDIDEH-FARD M,QIAO Y M,CHANDRA S,et al. Capillary effects during droplet impact on a solid surface[J]. *Physics of Fluids*,1996,8(3):650-659.

[3] RIOBOO R,TROPEA C,MARENGO M. Outcomes from a drop impact on solid surfaces[J]. *Atomization and Sprays*,2001,11(2):155-165.

[4] RIOBOO R,MARENGO M,TROPEA C. Time evolution of liquid drop impact onto solid, dry surfaces[J]. *Experiments in Fluids*,2002,33(1):112-124.

[5] ŠIKALO Š,MARENGO M,TROPEA C,et al. Analysis of impact of droplets on horizontal surfaces[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*,2002,25(7):503-510.

[6] XU L,ZHANG W W,NAGEL S R. Drop splashing on a dry smooth surface[J]. *Physical Review Letters*,2005,94(18):184505. 1-184505. 4.

[7] DIAZ A J,ORTEGA A. Gas-assisted droplet impact on a solid surface[J]. *Journal of Fluids Engineering*,2016,138(8):081104. 1-081104. 9.

[8] TANG C L,QIN M X,WENG X Y,et al. Dynamics of droplet impact on solid surface with different roughness[J]. *International Journal of Multiphase Flow*,2017,96:56-69.

[9] ZHANG B,LI J Y,GUO P H,et al. Experimental studies on the effect of Reynolds and Weber numbers on the impact forces of low-speed droplets colliding with a solid surface[J]. *Experiments in Fluids*,2017,58(9):125. 1-125. 12.

[10] 徐爽,赵宁,王春武,等. 低速下水滴撞击固体表面运动模拟[J]. *航空动力学报*,2013,28(3):695-700.

XU Shuang,ZHAO Ning,WANG Chunwu,et al. Simulation of droplets impacting on solid surface at low velocity[J]. *Journal of Aerospace Power*,2013,28(3):695-700. (in Chinese)

[11] 方龙,陈国定,刘登. 喷射油滴沉积油膜的流动铺展特性研究[J]. *机械工程学报*,2016,52(23):160-167.

FANG Long,CHEN Guoding,LIU Deng. Study on flow characteristics of deposited oil film formed by sprayed oil droplets[J]. *Journal of Mechanical Engineering*,2016,52(23):160-167. (in Chinese)

[12] 刘登,陈国定,方龙,等. 运动油滴/固体壁面斜碰撞的状态辨识及特征分析[J]. *航空学报*,2015,36(4):1359-1366.

LIU Deng,CHEN Guoding,FANG Long,et al. State identification and characteristics analysis of oil droplet's oblique impact onto solid wall[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*,2015,36(4):1359-1366. (in Chinese)

[13] HIRT C W,NICHOLS B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries[J]. *Journal of Computational Physics*,1981,39(1):201-225.

[14] BRACKBILL J U,KOTHE D B,ZEMACH C. A continuum method for modeling surface tension[J]. *Journal of Computational Physics*,1992,100(2):335-354.

[15] CAVIEZEL D,NARAYANAN C,LAKEHAL D. Adherence and bouncing of liquid droplets impacting on dry surfaces[J]. *Microfluidics and Nanofluidics*,2008,5(4):469-478.

[16] WANG Y,GRATADEIX A,DO-QUANG M,et al. Events and conditions in droplet impact: A phase field prediction[J]. *International Journal of Multiphase Flow*,2016,87:54-65.

[17] 钱健行. 湿润角测定装置设计及其应用研究[D]. 沈阳:东北大学,2014.

QIAN Jianxing. Design and application of wetting angle measuring device[D]. Shenyang:Northeastern University,2014. (in Chinese)

[18] THEODORAKAKOS A,BERGELES G. Simulation of sharp gas-liquid interface using VOF method and adaptive grid local refinement around the interface[J]. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*,2004,45(4):421-439.

(编辑:李岩梅、张雪)