

油滴与铝合金壁面的碰撞试验

马兴裕, 陈 薄, 周 超

(西南科技大学 制造科学与工程学院

制造过程测试技术教育部重点实验室, 四川 绵阳 621010)

摘 要: 机械零部件喷油或滴油润滑方式下油滴与零件表面碰撞后形成的沉积油膜流动特性决定着零件表面润滑油膜的分布特征和零件的润滑状态,对于这一润滑现象的深入理解需要对油滴与金属固体壁面碰撞及其后沉积油膜的流动铺展行为进行研究。建立了油滴与铝合金壁面碰撞的试验装置,采用高速相机拍摄了油滴与铝合金壁面碰撞及其后沉积油膜的流动铺展与形貌演化过程,分析了碰撞油滴的变形及沉积油膜的铺展与回缩历程,探讨了碰撞条件和润滑油黏度对沉积油膜流动铺展特性的影响。结果表明:与铝合金壁面碰撞后形成的沉积油膜铺展较快而回缩较为缓慢,没有明显的整体回缩现象和振荡过程。较小碰撞角度下,铺展初期油滴与壁面之间存在轻微滑移现象,受重力和铺展能量的作用,铺展后期油膜发生断裂并溅射离开壁面,但没有二次油滴生成。前铺展因子随着碰撞角度的减小和碰撞速度的增加而增大,后铺展因子则随着两者的增大而增大。油滴直径对前、后铺展因子的影响不太明显。

关 键 词: 油滴; 铝合金壁面; 碰撞; 流动铺展; 沉积油膜

中图分类号: V233.4

文献标志码: A

Experiment of oil droplet impacting on aluminium alloy surface

MA Xingyu, CHEN Bo, ZHOU Chao

(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: The lubrication oil film on the surface of mechanical parts under spray or drip lubrication condition was influenced by the deposited film resulted from the impact of oil droplet with part surface. To understand the complex lubrication phenomena, it is necessary to study the impact behavior of oil droplet with metal solid substrate and the spreading process of deposited film. Therefore, an experimental apparatus was built to investigate the impact outcome of single oil droplet with aluminium alloy surface. High-speed photography was used to capture the oil droplet dynamical morphology and the spreading process of the subsequent film. The oil droplet deformation and the histories of spreading and recoiling of the film were analyzed qualitatively, and the effects of experimental condition and oil viscosity were discussed quantitatively. The experimental

收稿日期: 2020-11-19

基金项目: 国家自然科学基金(51475395); 制造过程测试技术教育部重点实验室开放基金(14tdzk04)

作者简介: 马兴裕(1995—),男,硕士生,主要研究方向为航空发动机润滑系统的分析与设计。

通信作者: 陈薄(1978—),男,副教授,博士,主要研究方向为润滑与密封技术、现代机械设计理论与方法等。

E-mail: chenbo@mail.nwpu.edu.cn

引用格式: 马兴裕,陈薄,周超. 油滴与铝合金壁面的碰撞试验[J]. 航空动力学报, 2021, 36(9): 1851-1860. MA Xingyu, CHEN Bo, ZHOU Chao. Experiment of oil droplet impacting on aluminium alloy surface[J]. Journal of Aerospace Power, 2021, 36(9): 1851-1860.

results showed that the deposited film spread outwards quickly, recoiled inwards very slowly, and reached eventually steady state. The whole film retraction and oscillation were not observed in the recoiling process. At lower impact angle, the slight slip between oil droplet and surface was found in the initial spreading stage, and due to the effects of gravity and spreading energy, finally, the film disintegrated without ejection of secondary oil droplets. The front spread factor increased with increasing impact velocity and decreasing impact angle, and the back spread factor increased with the increase of impact velocity and impact angle. The effect of oil droplet diameter on the front and back spread factors was insignificant.

Key words: oil droplet; aluminum alloy surface; impact; spread; deposited film

高速运动机械的关键零部件,例如高速齿轮传动系统和航空发动机主轴轴承,常采用喷油和/或滴油润滑方式进行润滑。从喷嘴流出的润滑油以油线或油滴的形式喷射到零件表面(如齿轮齿面和轴承保持架等),与零件表面碰撞后沉积形成润滑油膜,油膜在零件表面流动铺展过程中不仅对零件起着润滑功能,而且带走其热量。显然,油滴与零件表面的碰撞及其后沉积油膜的流动铺展特性决定着零件表面润滑油膜的分布状态和流动特性,进而影响到零件的润滑状态与散热能力。但遗憾的是,迄今对于油滴与零件表面碰撞后的沉积油膜流动铺展行为认识还非常有限,以至于工程中的润滑分析计算仍主要依赖于设计经验和与实际情况相差甚远的简单试验,由此带来的无法预测的误差甚至错误在很多情况下已极大地影响到机械零件润滑设计的正确性。因此,开展有关油滴与金属固体壁面碰撞特性及其后沉积油膜的流动铺展行为研究,为机械零部件的高效润滑设计与分析提供参考依据已成为润滑工程领域非常重要的基础工作。

有关液滴与固体壁面碰撞问题的研究,较为常见的是非油类液滴与金属或非金属壁面的碰撞,而对于油滴与金属固体壁面的碰撞则较为鲜见。数值模拟分析和试验研究是主要的研究方法。数值模拟分析以多相流体动力学基本理论为基础,采用VOF(volume of fluid)方法和level set方法等界面追踪技术动态追踪空气、液滴与固体壁面三相之间的界面,建立液滴与固体壁面碰撞的数值计算模型,分析和探讨液滴的沉积及其后沉积液膜的流动铺展过程^[1-7]。虽然数值模拟可以较好地反映液滴与固体壁面碰撞的实际情况,但至今仍难以准确描述沉积液膜流动铺展过程中可能出现的破碎、飞溅以及反弹等重要物理现象,以至于对于液滴与固体壁面碰撞行为的深入理解在

很大程度上仍然依赖于特定条件下的试验工作。

试验研究主要通过观测液滴与固体壁面碰撞及其后沉积液膜的动态流动铺展过程,获得液滴的变形沉积过程以及沉积液膜的流动铺展特征,并建立碰撞条件和液滴物理特性参数等与液膜动力学参数的定性和定量关联^[8-12]。比较典型的研究工作有,Range等^[8]采用CCD(charge coupled device)相机拍摄了水、水-墨汁混合物以及水-甘油混合物三种液滴与铝合金壁面和有机玻璃板的正碰撞过程,分析了表面粗糙度对飞溅/沉积临界特性以及铺展液膜边缘扰动的影响,发现液膜飞溅与液体黏度不存在显著的相关性。Bayer等^[11]采用高速相机拍摄了水滴与不锈钢壁面和涂层聚四氟乙烯硅片的正碰撞过程,探讨了壁面润湿性对液膜铺展的影响,建立了水膜与固体壁面的动态接触角和接触线移动速度的关系,发现水膜在干燥壁面铺展的初始阶段存在接触角滞后现象。Šikalo等^[13-16]采用CCD相机拍摄了水、甘油以及异丙醇等液滴与玻璃和石蜡表面倾斜碰撞后的沉积液膜流动铺展过程,探讨了碰撞角度、碰撞速度以及壁面特性(是否存在初始表面液膜)对沉积液膜铺展过程的影响,建立了液滴与玻璃表面碰撞后反弹/沉积的临界碰撞角与法向碰撞韦伯数的关联,以及液滴反弹率与法向毛细管数的关联,发现液滴与壁面之间的气穴层引起了液滴的反弹。Pan等和Tang等^[17-18]试验研究了水、庚烷以及酒精等液滴与粗糙固体壁面的正碰撞过程,分析了表面粗糙度对液膜铺展和飞溅的影响。结果表明:表面粗糙度延缓了液膜的铺展历程、促进了飞溅,飞溅产生的二次液滴直径分布与碰撞韦伯数无明显关联,仅与液体的性质(黏度、表面张力等)有关。Zhang等^[19]采用高速相机观测了过冷水滴与超疏水壁面的正碰撞过程,重点分析了低温下液体黏附现象的热力学因素,探讨了表面粗糙度、

壁面温度和润湿性对液膜流动铺展的影响。方龙等^[20]通过试验观测了喷射油滴与固体壁面倾斜碰撞过程,定性分析了油滴在固体壁面上的变形及铺展情况。

已有的关于液滴与固体壁面碰撞的研究中,采用的非油类液滴物理特性(如黏度和表面张力系数等)与油类液滴有较大的差异,且非金属壁面的材料结构和表面宏微观特征与金属固体壁面也有很大的不同,这两方面导致沉积液膜的流动铺展和油滴与金属固体壁面碰撞后形成的沉积油膜的流动铺展情况存在很大的差异。此外,相比于正碰撞,倾斜碰撞后沉积油膜的流动铺展行为更为复杂。这些缺失使得已有研究工作对于深入理解油滴与金属固体壁面的碰撞及其后沉积油膜的流动铺展特性贡献较为有限。

本文以机械零件的喷油和/或滴油润滑设计与分析需求为背景,采用高速相机拍摄了润滑油滴与铝合金壁面碰撞及其后沉积油膜的流动铺展与形貌演化过程,分析了典型工况下油滴的变形以及沉积油膜的铺展与回缩历程,探讨了碰撞速度、油滴直径、碰撞角度以及润滑油黏度对沉积油膜流动铺展特性的影响。需要说明的是,因铝合金与机械零件常用的金属材料(如不锈钢等)具有相同的亲油性,且其表面更易于通过抛光处理得到较好的表面形貌,故而研究中选用了铝合金作为壁面材料。研究工作对于揭示润滑油滴或与润滑油具有相似物理特性的液滴和金属固体壁面的碰撞行为物理本质具有重要的意义。

1 试验装置与方法

油滴与铝合金壁面碰撞的试验装置如图 1 所示,主要由微量注射泵(型号:SP-1000,宁波安诺医疗器械科技有限公司)、医用注射器(规格:30 mL)、针头、可以调节角度的铝合金壁面、高速相机、辅助光源、光源散射器,以及进行数据采集与处理的计算机等组成。其中医用注射器安装在微量注射泵上,微量注射泵以恒定的速度推动注射

器针管内的润滑油运动,从而使针尖流出的油液克服表面张力形成油滴。油滴在重力的作用下自由下落,最终与铝合金壁面发生碰撞。试验中,通过调节针头与铝合金壁面之间的高度(针尖与壁面的最大可调节高度为 1.3 m),实现油滴碰撞速度的控制;通过调节铝合金壁面与水平面的夹角,控制油滴与铝合金壁面的碰撞角度;通过采用不同内径的针头,产生不同直径的油滴。

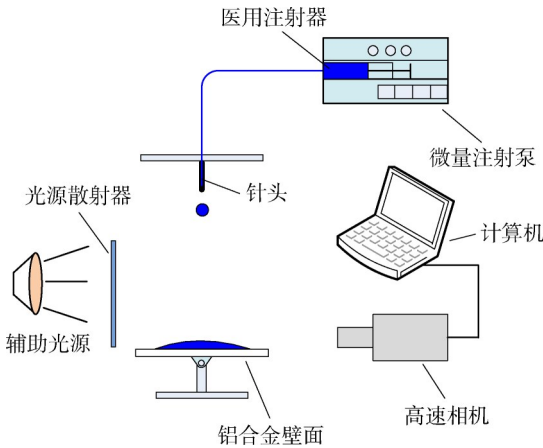


图 1 试验装置示意图

Fig.1 Schematic of experimental apparatus

采用 Photron FASTCAM-APX RS 型高速相机拍摄油滴与铝合金壁面的碰撞及其后沉积油膜的流动铺展情况。为了保证照片质量,将拍摄频率设置为 10 000 帧/s,图像分辨率设置为 512 像素×512 像素。采用背光法拍摄,采用超闪 LED-1500 型数码灯作为辅助光源对拍摄过程进行补光,辅助光源与铝合金壁面之间设置有光源散射器,以提高拍摄区域的光线质量。

试验采用的润滑油为工业抗磨液压油,其牌号和主要物理特性参数如表 1 所示。表中同时给出了对应牌号润滑油与铝合金壁面的静态接触角,静态接触角采用座滴法测量获得^[21]。用于试验的铝合金壁面由长和宽均为 80.0 mm、厚度为 3.0 mm 的 2024 铝合金试件经抛光处理制成,其表面粗糙度 R_a 为 0.047 4。

表 1 润滑油的主要物理特性参数

Table 1 Main physical properties of lubrication oil

润滑油牌号	密度/(kg/m ³)	动力黏度/(Pa·s)	表面张力系数/(N/m)	静态接触角/(°)
L-HM32	858.85	0.068	0.032 0	16.65
L-HM46	886.83	0.104	0.034 7	16.90
L-HM68	871.85	0.191	0.034 9	16.17

试验在常温常压下进行,每次试验后采用无水酒精对铝合金壁面进行清洗,待表面完全干燥且温度降至环境温度后进行下一次试验。试验中采用的三种油滴直径 d_0 分别为 (2.74 ± 0.15) mm、 (3.15 ± 0.09) mm和 (3.46 ± 0.15) mm;三种碰撞速度 u_0 分别为 (2.17 ± 0.06) m/s、 (3.01 ± 0.12) m/s和 (3.84 ± 0.15) m/s。油滴直径利用文献[3]中建议的平均值法确定,碰撞速度取油滴与壁面接触前0.3 ms内速度的平均值^[22]。由于油滴的直径远大于铝合金壁面的表面粗糙度,因此可以忽略壁面的表面几何形貌对碰撞结果的影响^[23]。

2 结果与讨论

为了便于结果表达与分析,定义碰撞角 α 为油滴自由下落速度方向与铝合金壁面之间的夹角,即铝合金壁面与竖直方向的夹角,如图2(a)所示。由于倾斜碰撞过程中,沉积油膜沿倾斜壁面的流动铺展是不对称的,因此引入前、后铺展长度 x_f 和 x_b 描述油膜的铺展状态。定义前铺展长度 x_f 为油膜前(下)缘与碰撞点之间的距离,后铺展长度 x_b 为油膜后(上)缘与碰撞点之间的距离,如图2(b)所示,图中同时给出了 Oxy 坐标系的定义。对于正碰撞($\alpha=90^\circ$),沉积油膜流动铺展过程中呈圆盘形结构,因此定义其前、后铺展长度为 $x_f=x_b=d/2$,其中 d 为油膜与壁面接触区域的平均直径。根据上述定义,沉积油膜的前、后铺展因子分别为 x_f/d_0 和 x_b/d_0 。需要说明的是,为了在同一图中对比表达油膜的铺展情况,后续图中将后铺展长度和因子分别表示为 $-x_b$ 和 $-x_b/d_0$ 。另外,结果分析中除特殊说明外,润滑油牌号为L-HM32,油滴直径 $d_0=2.74$ mm,碰撞速度 $u_0=3.84$ m/s。

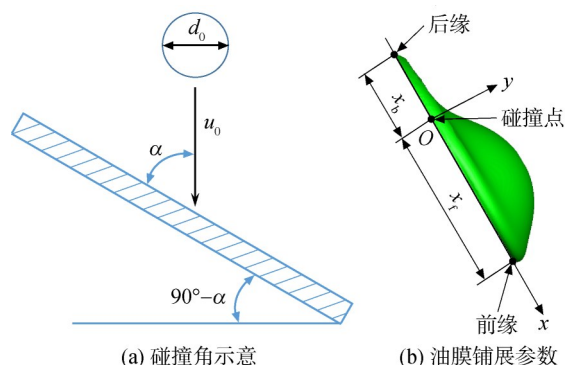


图2 相关参数的定义示意图

Fig.2 Schematic of definition of relevant parameters

2.1 沉积油膜的流动铺展特性

图3给出油滴与铝合金壁面正碰撞($\alpha=90^\circ$)及其后沉积油膜的流动铺展过程(图中对称于壁面的油滴重影是镜面反射效应的结果),图中 t 为铺展时间。从图中可以看出,近似球形的油滴与铝合金壁面接触后,在冲击载荷作用下,以接触点为中心向外铺展。铺展初始阶段,油滴与壁面的接触区域面积较小且远离油滴中心,导致变形集中于油滴下半部分,而上半部分仍然保持近似球形,如图3(a)~图3(c)。随着铺展的进程,油滴持续变形,受油膜内部剪切力、壁面剪切力以及表面张力的阻碍作用,边缘油膜铺展速度逐渐减小,中心区域持续向外快速铺展的润滑油在油膜边缘局部堆积,油膜发展为边缘呈“山脊”状凸起的冠状,如图3(d)~图3(f)。其后,铺展速度继续衰减,冠顶逐渐消失,油膜直径不断增大,继而发展为边缘凸起的平底圆盘形,如图3(g)~图3(i)。随后,在表面张力的作用下,油膜边缘内侧的润滑油开始回缩,外侧则继续铺展,内侧的回缩润滑油与中心区域的铺展润滑油作用形成内层堆积,油膜出现内外两个堆积环,直到达到最大铺展直径,如图3(j)和图4,铺展阶段结束。此后,油膜转入回缩阶段,内外两个润滑油堆积环在表面张力的主导下,缓慢向中心区域回缩流动,润滑油堆积部分逐渐消退,中心的平底区域随之充满油液,最终油膜达到并维持在稳定状态,回缩阶段结束,如图3(k)~图3(o)。值得注意的是,L-HM32润滑油与铝合金壁面的静态接触角为 16.65° ,即铝合金壁面具有较好的亲油性,油膜与壁面的界面黏附力大于油分子间的内聚力,致使油膜没有出现明显的整体回缩现象,而只是边缘堆积的油液在表面张力作用下缓慢回缩并轻微振荡直至稳定状态,稳定状态时油膜的铺展直径与最大铺展直径差异很小。

图5和图6分别给出了碰撞角度 α 为 60° 和 45° 条件下,油滴与铝合金壁面倾斜碰撞及其后沉积油膜的流动铺展过程。从图中可以看出,与正碰撞相似,倾斜碰撞后沉积油膜的流动铺展过程同样经历着铺展和回缩直至达到稳定状态两个阶段。铺展过程中油膜边缘仍然存在着润滑油堆积现象,但没有出现内层的堆积环。由于重力和碰撞能量的贡献,润滑油向油膜前缘聚集,边缘的润滑油堆积量从后缘至前缘逐渐增多。与正碰撞情况下铺展油膜以碰撞点为中心循环对称分布不同

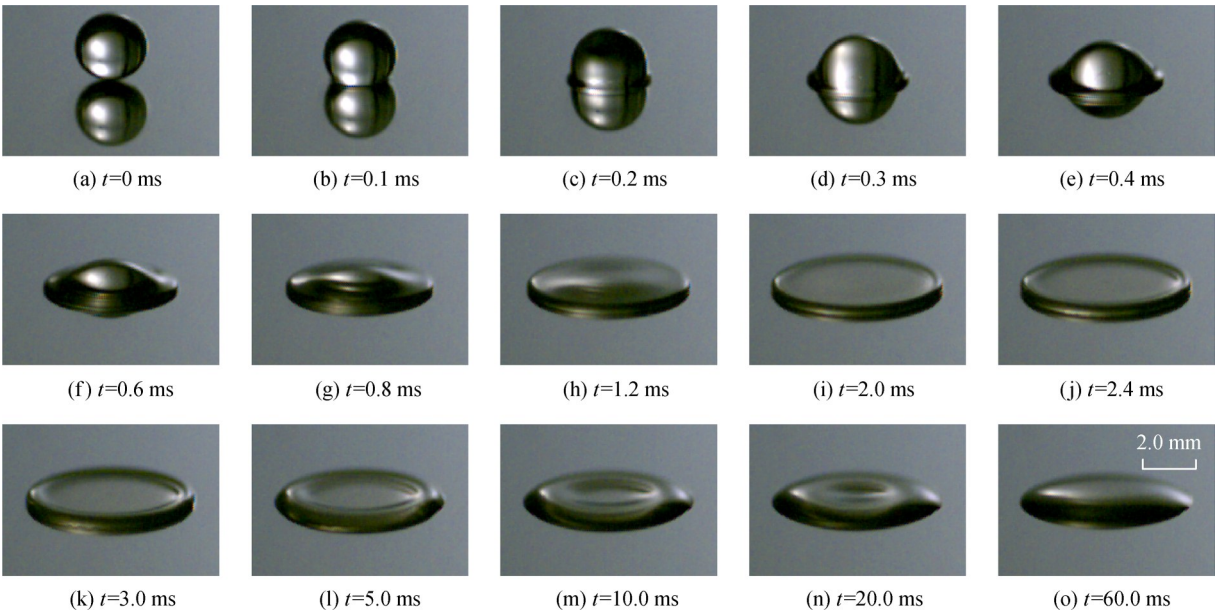


图 3 油滴与铝合金壁面正碰撞的沉积油膜流动铺展过程

Fig.3 Spreading process of deposited film for normal impact of oil droplet with aluminum alloy surface

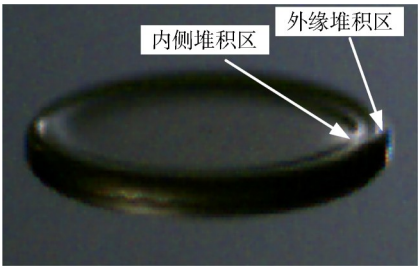


图 4 $t=2.4$ ms 时刻的油膜放大视图

Fig.4 Enlarged image of the film at $t=2.4$ ms

的是,倾斜碰撞时由于油膜重力和碰撞力沿倾斜方向的分量远大于其他方向,对铺展过程起着主导作用,油膜呈现出沿壁面倾斜方向对称分布(对称平面为 Oxy 平面,如图 2(b))的铺展状态。

结合图 5 和图 6 可以看出,随着碰撞角的减小,重力和碰撞力对油膜流动铺展的影响不断增大,油膜前缘润滑油的堆积量也随之增加,伴随油膜铺展进程,前缘顶端积聚的润滑油出现脱离表面张力束缚继而发生飞溅的趋势,如图 6(h)和图 6(i)所示。另外,还可以看出,碰撞角为 60° 时,油膜前缘润滑油聚集量在时间 $t=5.0$ ms 达到最大;而在碰撞角为 45° 时,这一时间为 9.0 ms;即在铺展阶段结束时,油膜前缘的润滑油聚集量达到最大。

对于倾斜碰撞,沉积油膜的流动铺展状态是相似的,但随着碰撞角度的进一步减小,沉积油膜在流动铺展过程中出现飞溅现象,为了更为清楚

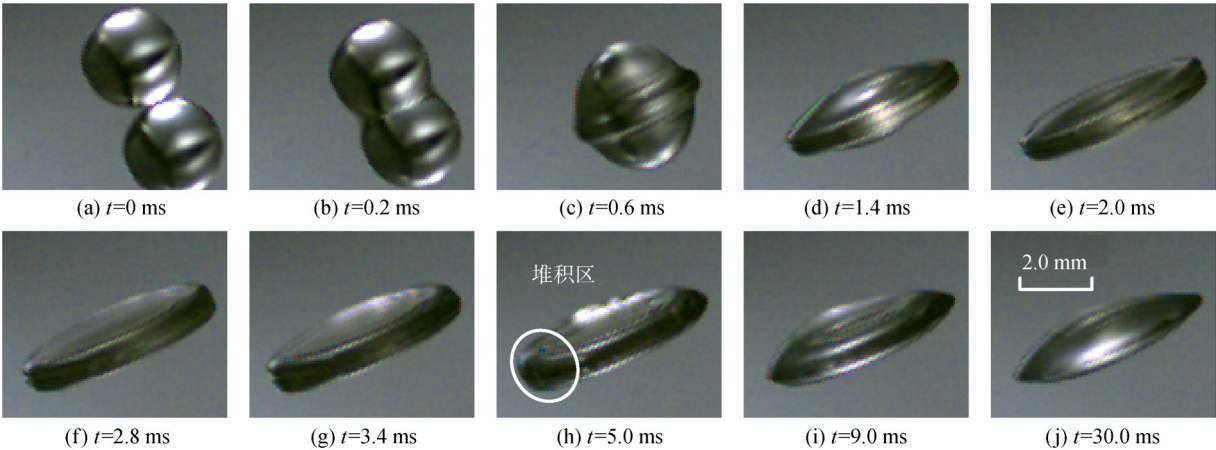


图 5 碰撞角为 60° 的倾斜碰撞沉积油膜流动铺展过程

Fig.5 Spreading process of deposited film for oblique impact at impact angle of 60°

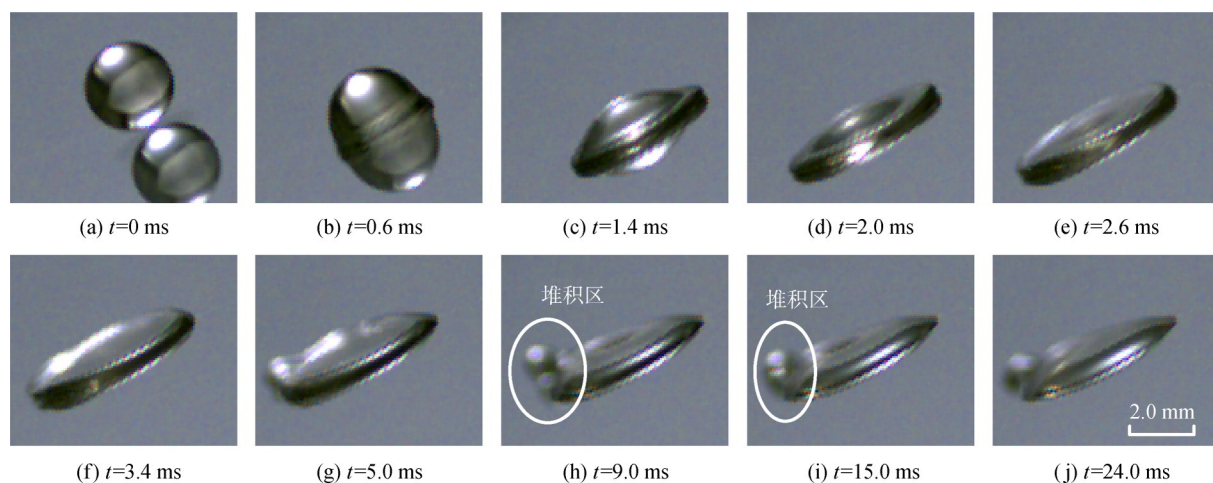


图6 碰撞角为45°的倾斜碰撞沉积油膜流动铺展过程

Fig.6 Spreading process of deposited film for oblique impact at impact angle of 45°

地表达油膜破裂和飞溅情况,下面分析中仅给出了沉积油膜流动铺展过程的侧视图。图7和图8分别给出了碰撞角为30°和15°条件下,油滴与铝合金壁面倾斜碰撞及其后沉积油膜流动铺展过程的侧视图。由图7和图8可知,当碰撞角较小时,如30°和15°,油膜前、后缘润滑油堆积现象变得不明显;而且随着铺展进程,空气“楔入”油膜前缘,在前缘形成“气穴”区,如图7(g)和图8(d);随着流动铺展的继续,“气穴”区不断增大。显然是由于较小碰撞角度下,重力和碰撞力切向分量较大,阻碍了后缘油膜的铺展,促进了油膜向下流动,导致后缘油膜尚未充分铺展就被“拖拽”着沿壁面向下流动,而前缘流动速度较大的油膜不能及时完全排除周围的静止空气,致使空气被卷入油膜前缘与壁面的接触区域,形成“气穴”,随着油膜持续

铺展,卷入的空气越来越多,“气穴”区也随之增大^[4]。油膜铺展阶段的中后期,气穴内压缩空气的持续扰动作用下,油膜中段形成局部颈缩区。因颈缩区下游润滑油提供的牵引力减小,导致其上游油膜的流动速度变缓,上下游油膜流动速度的差异不断增大,油膜被“拉长”,颈缩区随之增大,最后油膜突破表面张力和黏性力的束缚发生断裂(如图7(i)和图8(i)),断裂后的下游油膜在惯性力作用下以油带形式甩离壁面,而黏附在壁面上的油膜,经历缓慢的回缩和轻微的振荡后达到稳定状态,如图7(j)和图8(j)。

结合图3、图5~图8可知,当油滴直径、碰撞速度和碰撞角度等参数、或由这些参数组成的特征参数(如韦伯数 We 、雷诺数 Re)达到某一临界值后,油膜在铺展过程中将出现破碎现象。试验

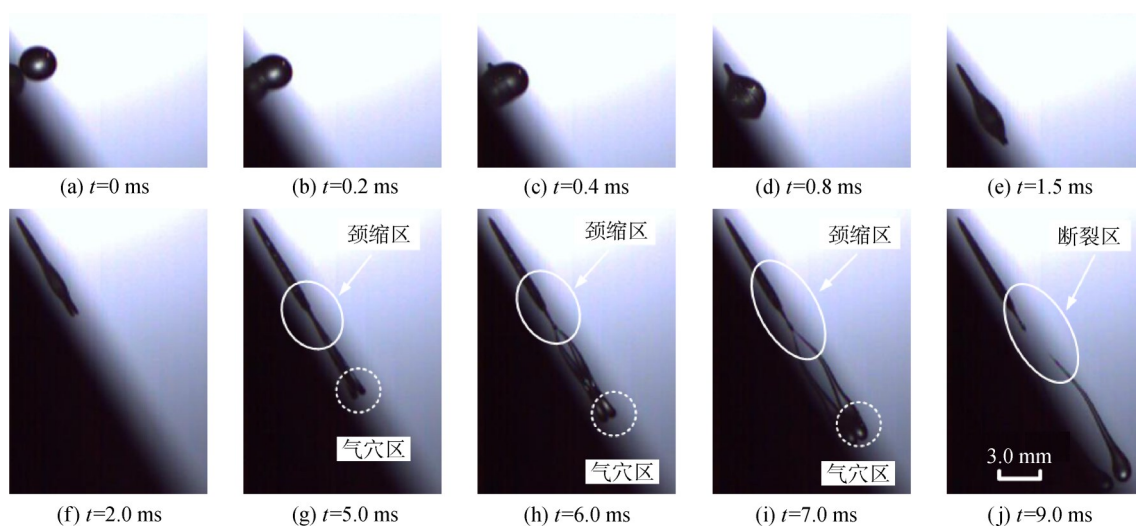


图7 碰撞度为30°的倾斜碰撞沉积油膜流动铺展过程

Fig.7 Spreading process of deposited film for oblique impact at impact angle of 30°

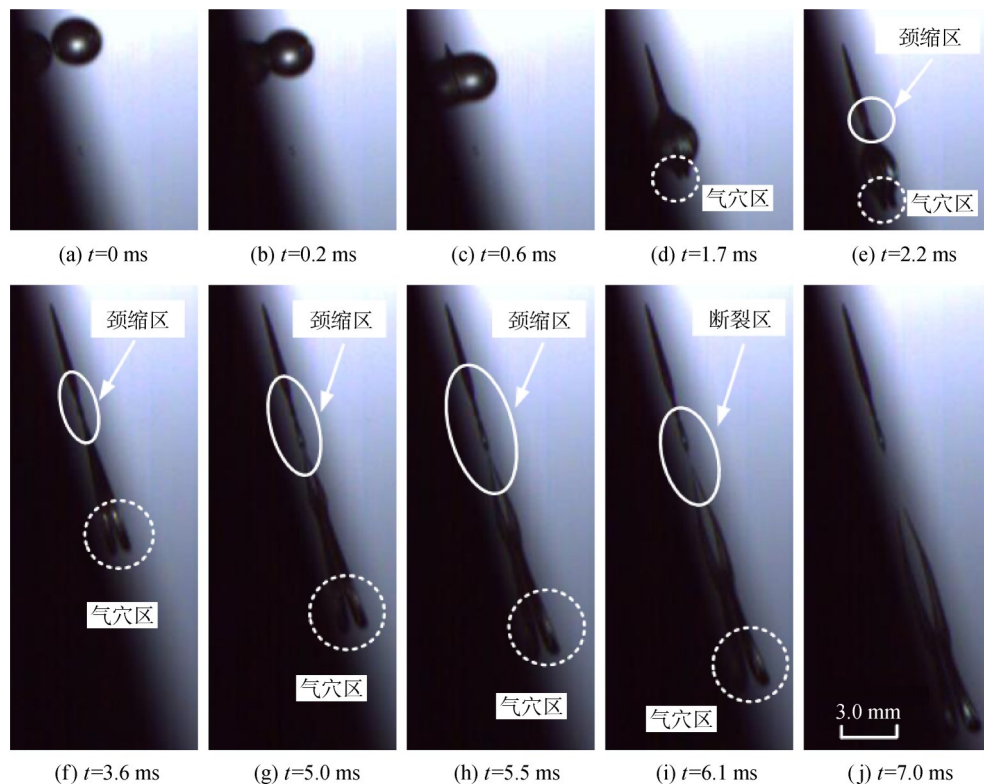


图8 碰撞角为15°的倾斜碰撞沉积油膜流动铺展过程

Fig.8 Spreading process of deposited film for oblique impact at impact angle of 15°

中没有发生油膜飞溅(瞬时飞溅、冠状飞溅)和油膜边缘破碎生成二次油滴等现象,仅仅在碰撞角度较小时出现了油膜断裂,这可能与润滑油的黏度有关,因为液体黏度会抑制液膜边缘破碎以及二次液滴生成^[24]。

2.2 试验条件对沉积油膜流动铺展特性的影响

油滴直径、碰撞速度和碰撞角度等试验条件对沉积油膜流动铺展的影响主要集中于油膜的铺展阶段,因此下述分析中仅给出了此阶段的试验结果。

图9给出了碰撞速度为3.84 m/s、碰撞角度为60°条件下,油滴直径对沉积油膜流动铺展特性的影响。其中,图9(a)为铺展长度的试验结果,图9(b)为无量纲的铺展因子。由图9(a)可以看出,前、后铺展长度均随着油滴直径的增大而增大。其原因在于,大直径的油滴质量和体积较大,碰撞后转移给油膜的铺展能量也较大,故而在相同的铺展时刻沉积油膜的铺展长度要大些。此外,还可以看出,后铺展长度随着铺展时间先增大,达到最大值后保持恒定不变。显然是向后铺展的油膜在重力、油膜剪切力和表面张力的阻滞作用下达到最大铺展距离后,反向沿壁面向下流动的结果。另外,需要说明的是,此碰撞角度下,

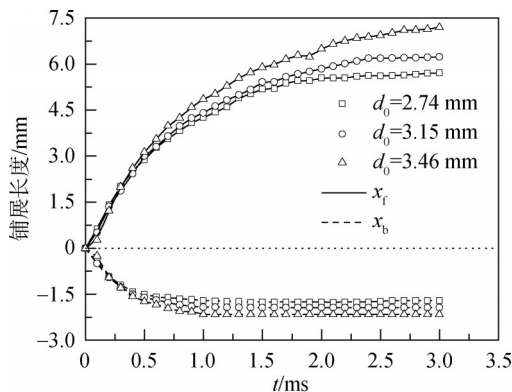
没有发生油膜断裂和喷射现象。

图9(b)为图9(a)无量纲化处理的结果,其中无量纲时间 $t^*=u_0t/d_0$, t 为铺展时间。由图可以看出,无量纲化处理后得到的沉积油膜前、后铺展因子几乎不受油滴直径的影响。根据试验数据拟合得到沉积油膜(铺展阶段)的前、后铺展因子与无量纲时间的关系为

$$x_f/d_0 = 2.133(1 - e^{-0.978t^*}) \quad (1)$$

$$x_b/d_0 = -0.635(1 - e^{-2.798t^*}) \quad (2)$$

图10给出了油滴直径为2.74 mm、碰撞速度为3.84 m/s条件下,碰撞角度 α 对沉积油膜前、后铺展因子的影响。由图10(a)可以看出,前铺展



(a) 铺展长度

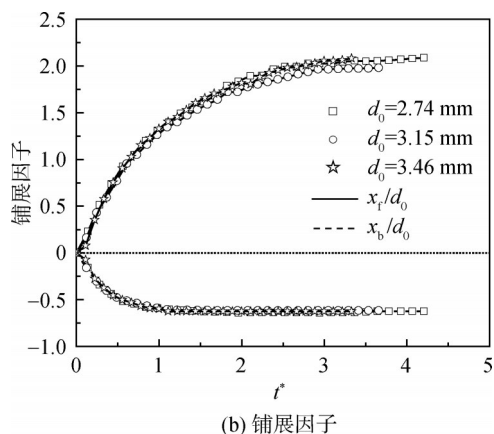


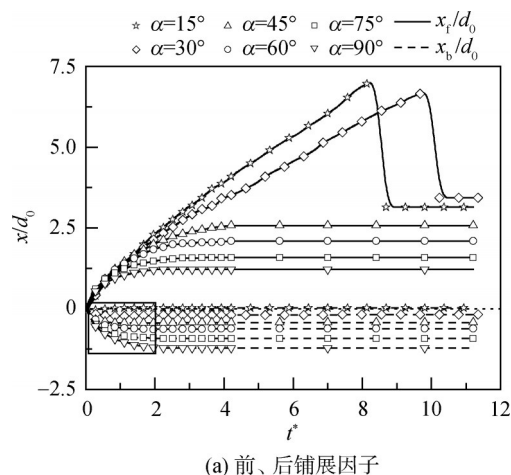
图9 油滴直径对沉积油膜流动铺展的影响

Fig.9 Effect of oil droplet diameter on the spreading process of deposited film

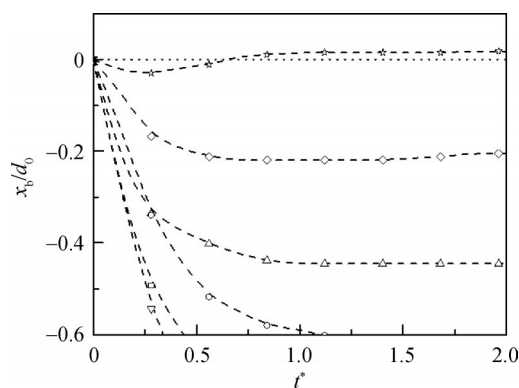
因子(油膜断裂前)随着碰撞角度的增加而减小,后铺展因子则随之增大。其原因在于较小碰撞角度下,油膜获得的铺展动量和重力沿壁面的切向分量较大,使得油膜克服剪切力和表面张力沿壁面向下流动的速度加快,加速了油膜的铺展进程,然而这对于向后铺展的油膜来说,重力与铺展动量的作用方向相反,重力影响的增大,必然使得油膜流动的阻力增大,进而使得油膜铺展变得更为困难,因此后铺展长度更短。对于图10中碰撞角度 $\alpha \geq 45^\circ$ (没有发生油膜断裂的情况)、无量纲时间 $t^* \geq 4.0$ 之后,前铺展因子变化非常小,表明沉积油膜在亲油性的铝合金壁面铺展过程中没有明显的油膜整体回缩历程,且从回缩到稳定的过程较为缓慢。对于图10中碰撞角度 $\alpha \leq 30^\circ$ 时,油膜在铺展过程中发生了断裂,断裂之前,前铺展因子随着无量纲铺展时间的增加而持续增大,是因为油膜处于断裂前的快速铺展阶段;油膜断裂之后,前铺展因子突然减小,其后进入无明显变化阶段,这是油膜发生断裂,断裂后黏附于壁面的油膜快速进入缓慢铺展阶段的结果。

图10(b)中有一个非常重要的现象,在碰撞角度 $\alpha = 15^\circ$ 时,后铺展因子在铺展初期由负值变为正值并保持基本不变,表明油滴与铝合金壁面接触后出现了滑移,这是小碰撞角度下特有的现象。

图11给出了油滴直径为2.74 mm、碰撞角度为 60° 条件下,碰撞速度 u_0 对沉积油膜前、后铺展因子的影响。由图可以看出,随着碰撞速度的增大,沉积油膜的前、后铺展因子增加。显然是高碰撞速度油滴具有更大的碰撞能量,碰撞后转移给



(a) 前、后铺展因子



(b) 后铺展因子局部放大图

图10 碰撞角度对沉积油膜铺展因子的影响

Fig.10 Effect of impact angle on the spread factor of deposited film

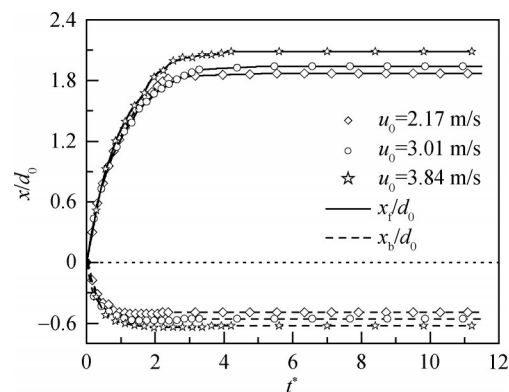


图11 碰撞速度对沉积油膜铺展因子的影响

Fig.11 Effect of impact velocity on the spread factor of deposited film

油膜的铺展能量也更大,使得油膜流动得更快铺展得更远。

图12给出了油滴直径为2.74 mm、碰撞速度为3.84 m/s、碰撞角度为 45° 条件下,润滑油黏度 μ 对沉积油膜前、后铺展因子的影响。由图可以看

出,前、后铺展因子均随着润滑油黏度的减小而增大。其原因在于,高黏度的润滑油流动阻力较大,抑制了油膜的流动铺展。

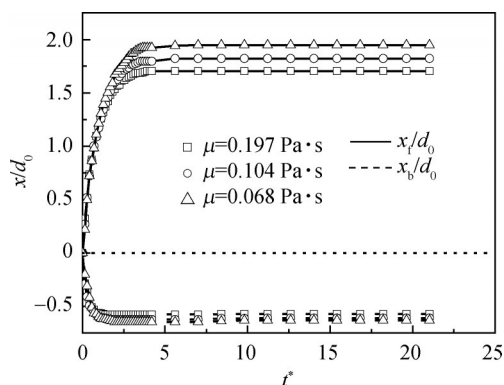


图12 润滑油黏度对沉积油膜铺展因子的影响
Fig.12 Effects of oil viscosity on the spread factor of deposited film

3 结 论

1) 相对于油滴直径和碰撞速度,碰撞角对沉积油膜的流动铺展影响更大。随着碰撞角的减小,重力和碰撞能量对沉积油膜铺展的贡献增大,沉积油膜流动铺展得更快。较小碰撞角度下,铺展油膜会发生断裂,前缘流动铺展较快的油膜喷射离开壁面,没有二次油滴生成。铺展阶段,沉积油膜的前铺展因子随着碰撞角度的减小而增大,但后铺展因子的变化趋势却与之相反。

2) 润滑油的黏度较大而表面张力较小,与亲油性的铝合金壁面碰撞后,沉积油膜铺展较快而回缩较慢,且没有明显的整体回缩现象和振荡过程,经历缓慢的回缩阶段后油膜达到并保持在稳定的铺展状态。

3) 油滴直径、碰撞速度和润滑油黏度对沉积油膜的铺展影响是不相同的。沉积油膜的铺展长度随着油滴直径的增加而增大,但铺展因子受其影响却不明显。沉积油膜的前、后铺展因子随着碰撞速度的增加而增大,随着润滑油黏度的增加而减小。

参考文献:

- [1] GUNJAL P R, RANADE V V, CHAUDHARI R V. Dynamics of drop impact on solid surface: experiments and VOF simulations[J]. American Institute of Chemical Engineers Journal, 2005, 51(1): 59-78.
- [2] 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.
- [3] DIAZ A J, ORTEGA A. Gas-assisted droplet impact on a solid surface[J]. Journal of Fluids Engineering, 2016, 138(8): 1-9.
- [4] PATIL N D, GADA V H, SHARMA A, et al. On dual-grid level-set method for contact line modeling during impact of a droplet on hydrophobic and superhydrophobic surfaces[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2016, 81: 54-66.
- [5] JIANG Mengcheng, ZHOU Biao, WANG Xichen. Comparisons and validations of contact angle models[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2018, 43(12): 6364-6378.
- [6] 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. (in Chinese)
- [7] GANESAN S. Simulations of impinging droplets with surfactant-dependent dynamic contact angle[J]. Journal of Computational Physics, 2015, 301: 178-200.
- [8] RANGE K, FEUILLEBOIS F. Influence of surface roughness on liquid drop impact[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 1998, 203(1): 16-30.
- [9] RIOBOO R, TROPEA C, MARENGO M. Outcomes from a drop impact on solid surfaces[J]. Atomization and Sprays, 2001, 11(2): 155-165.
- [10] 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.
- [11] BAYER I S, MEGARIDIS C M. Contact angle dynamics in droplets impacting on flat surfaces with different wetting characteristics[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2006, 558(7): 415-449.
- [12] CROOKS R, COOPER-WHITEZ J, BOGER D V. The role of dynamic surface tension and elasticity on the dynamics of drop impact[J]. Chemical Engineering Science, 2001, 56(19): 5575-5592.
- [13] 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.
- [14] ŠIKALO Š, TROPEA C, GANIĆ E N. Impact of droplets onto inclined surfaces[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2005, 286(2): 661-669.
- [15] ŠIKALO Š, TROPEA C, GANIĆ E N. Dynamic wetting angle of a spreading droplet[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2005, 29(7): 795-802.
- [16] ŠIKALO Š, GANIĆ E N. Phenomena of droplet-surface interactions[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2006, 31(2): 97-110.
- [17] PAN K L, TSENG K C, WANG C H. Breakup of a droplet at high velocity impacting a solid surface[J]. Experiments in Fluids, 2010, 48(1): 143-156.
- [18] TANG Chenglong, QIN Mengxiao, WENG Xinyan, et al.

- Dynamics of droplet impact on solid surface with different roughness[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2017, 96:56-69.
- [19] ZHANG Rui, HAO Pengfei, ZHANG Xiwen, et al. Super-cooled water droplet impact on superhydrophobic surfaces with various roughness and temperature[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 122:395-402.
- [20] 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)
- [21] RIOS-LOPEZ I, EVGENIDIS S, KOSTOGLIOU M, et al. Effect of initial droplet shape on the tangential force required for spreading and sliding along a solid surface[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2018, 549:164-173.
- [22] 梁刚涛, 沈胜强, 郭亚丽, 等. 实验观测液滴撞击倾斜表面液膜的特殊现象[J]. 物理学报, 2013, 62(8):084707.1-084707.7.
LIANG Gangtao, SHEN Shengqiang, GUO Yali, et al. Special phenomena of droplet on an inclined wetted surface with experimental observation[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(8):084707.1-084707.7. (in Chinese)
- [23] FUJIMOTO H, DIO R, TAKUDA H. An experimental study on the oblique collisions of water droplets with a smooth hot solid[J]. Journal of Fluids Engineering, 2012, 134(7):071301.1-071301.12.
- [24] PALACIOS J, HERNÁNDEZ J, GÓMEZ P, et al. Experimental study of splashing patterns and the splashing/deposition threshold in drop impacts onto dry smooth solid surfaces[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2013, 44: 571-582.

(编辑:陈 越)