

低冲击能量液滴与球面碰撞沉积特性的数值研究

李彦鹏¹, 王焕然²

(1. 长安大学环境科学与工程学院, 710064, 西安; 2. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 将水平集方法与浸没边界法相结合, 发展了一个在固定欧拉网格系统中的直接数值模拟方法, 对韦伯数在 5~100、雷诺数在 10~150 以内的低冲击能量液滴正向撞击球面的过程进行了三维直接数值模拟, 重点研究了液滴的冲击速度与球面曲率半径对液滴沉积行为的影响. 模拟结果表明, 在低冲击能量下, 正向冲击液滴在球面上呈现出铺展、回缩、再铺展、再回缩, 直至沉积在球面上的特征. 在沉积过程中, 液滴的铺展速率与铺展面积随着撞击速度的增大而增大, 液滴的铺展面积随着球面曲率半径的增大而减小. 液滴在沉积过程的首次回缩阶段, 出现中心局部破裂现象. 为了定量研究该现象, 建立了局部破裂与韦伯数以及球面曲率半径之间的关系图谱.

关键词: 液滴; 撞击; 球面; 直接数值模拟

中图分类号: TK124 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)07-0021-04

Numerical Study on Deposition Characteristics of a Droplet Impinging onto Spherical Surface with Low Impact Energy

LI Yanpeng¹, WANG Huanran²

(1. College of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The three-dimensional direct numerical simulation is performed to study the deposition behavior of a liquid droplet with low impact energy impinging on a spherical surface. The numerical approach is presented by the combination of the level set and the immersed boundary method. The pseudo single fluid model is used to compute the flow field within the droplet and the surrounding gas phase. The level set technique is employed to capture the droplet deformation, and the immersed boundary method with a modified direct forcing scheme is proposed to treat the curved solid boundary in fluid with a fixed Cartesian mesh. The effects of impact velocity and curvature radius of spherical surface are investigated on the deposition behavior of a droplet with the Weber number of 5-100 and the Reynolds number of 10-150. The results show that the droplet with low impact energy undergoes spreading, recoiling, weak re-spreading, weak re-recoiling and ultimately depositing on the spherical surface. Moreover, the spreading rate and the spreading area increase with the increase in impact velocity at the early stage of the droplet deposition while the spreading area decreases with the increase in the curvature radius of spherical surface. In addition, a local breakage occurs at the center of the droplet collision with a spherical surface during the first recoiling stage. The breakage regime map of the relation between the local breakage and the curvature radius of spherical surface is also established.

Keywords: droplet; impact; spherical surface; direct numerical simulation

液滴撞击固体表面时的流体动力学特性与许多工业过程的性能密切相关,因此多年来对液滴撞击动力学研究始终受到广泛的关注。Yarin^[1]在总结了前人大量的实验与理论研究后指出,冲击液滴与冷壁面的碰撞行为决定于惯性力、黏性力、表面张力的相对大小和表面性质。当液滴具有较低的冲击能量时,一般会铺展后沉积在固体表面或者反弹起来;当液滴具有很高的冲击能量时,可能会破碎飞溅。

由于过程的复杂性,目前理论预报液滴冲击后的行为模式尚有一定困难。近年来,随着计算机技术的高速发展,出现了许多冲击液滴方面的直接数值模拟。Fukai等^[2]运用自适应网格的有限元法二维模拟了液滴与平板碰撞后的变形行为,分析了碰撞速度与接触角的影响。Bussmann等^[3-4]采用流体体积法先后三维模拟了液滴与平板以及与倾斜平板的碰撞过程,提供了比较详细的碰撞液滴变形的模拟结果。Francois等^[5]采用浸没边界法对单个液滴与平板的碰撞过程进行了三维模拟,讨论了影响液滴铺展与回缩的因素。Tanguy等^[6]利用水平集方法对液滴与平板以及液滴之间的碰撞进行了二维轴对称模拟,给出了碰撞后液滴的各种变形形态。

上述数值研究都是针对冲击液滴与平面的碰撞,均未涉及与曲面的碰撞。同样,目前对液滴冲击曲面的实验研究也很少,因此人们对于曲面如何影响液滴行为的认识也就十分有限。数值处理液滴与曲面碰撞问题的关键,除了要解决活动界面(液滴)的位置与形状等特性,还要解决曲面固体边界的存在以及流固相互作用问题。因此,寻找一种简单的直接模拟液滴与曲面固体碰撞的方法是十分必要的。在上述背景下,本文发展了一个在固定欧拉网格系统中的直接数值模拟方法,对单个液滴正向撞击冷球面进行三维模拟,重点研究在低冲击能量下液滴的撞击速度与球面尺寸对液滴撞击行为的影响。

1 数值模型

考虑在固定欧拉网格体系中,一个初始直径为 D_0 的液滴以速度 U 正向撞击曲率半径为 R_s 的固

定球面,假设液滴内外和球体外部均为不可压缩流体。为了模拟这样的撞击问题,本文采用文献[7]的直接数值模拟方法,模型及其验证可参见文献[7]。另外,关于计算网格的选取,数值测试表明,当液滴半径所覆盖的网格数 $N_{\text{CPR}} \geq 16$ 时,可以得到与网格尺寸无关的模拟结果。因此,本文均采用 $N_{\text{CPR}} = 16$ 所对应的网格尺寸进行计算。关于接触角 α ,Francois等人^[5]的实验表明,液滴在铺展和回缩过程中,接触角在较小范围变化。因此,本文采用静态接触角模型,即假设接触角为常量,这里取 $\alpha = 90^\circ$ 。

2 模拟结果与讨论

2.1 撞击速度对液滴行为的影响

液滴的冲击能量可以由韦伯数($We = \rho_l U^2 D_0 / \sigma$)和雷诺数($Re = \rho_l U D_0 / \mu$)共同表征。为了研究低冲击能量下撞击速度对液滴行为的影响,本文对初始直径为0.48 cm的液滴,以19.1、33.1、46.8和85.5 cm/s的不同速度(对应的 We 为5、15、30和100,对应的 Re 为27、47、66和140)与一个曲率半径为0.64 cm的球面的撞击过程进行了三维直接数值模拟。气液两相的物性参数如下:液相的密度 ρ_l 、黏性系数 μ_l 、表面张力系数 σ 分别为 $1\,064\text{ kg/m}^3$ 、 $3.63 \times 10^{-2}\text{ Pa} \cdot \text{s}$ 、 0.717 N/m ;气相的密度 ρ_g 和黏性系数 μ_g 分别为 1.1 kg/m^3 和 $1.8 \times 10^{-5}\text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。

图1绘出了撞击速度为46.8 cm/s时液滴形状变化的三维模拟结果。从图中可见,在所采用的低冲击能量下液滴的变形经历了一个振荡过程:液滴在接触到球面后会形成一个圆盘状薄膜,在惯性力的驱动下液膜在球面上铺展;随着初始动能完全转换为液滴的变形势能及黏性耗散掉,液滴在球面上的铺展面积达到最大;此后,液滴在表面张力的作用下开始回缩,与球面的接触面积变小;由于初始能量较低,回缩的液滴未出现反弹,而是再铺展、再回缩,最终沉积于球面上。

图2显示了不同撞击速度下液滴铺展系数随时间的变化关系。铺展系数 D_s/D_0 定义为液滴与球面接触的圆膜直径 D_s 与液滴初始直径之比。图中曲

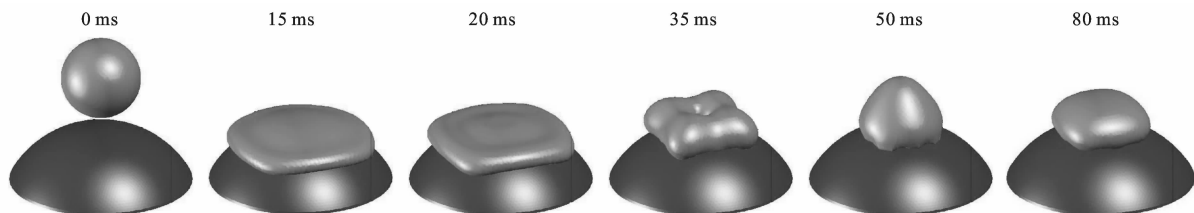


图1 液滴以46.8 cm/s的速度撞击球面的三维形状变化过程($We = 30, R_s = 0.63\text{ cm}$)

线的峰值表示液滴的最大铺展直径. 从图 2 可以看到,当液滴铺展到最大时,其直径可以达到初始直径的 1.5~2.2 倍. 随着撞击速度的增加,液滴的最大铺展直径也增加,液滴达到最大铺展所需要的时间减少. 从图 2 也可以清楚地看到液滴的振荡行为,当液滴首次回缩之后(50~60 ms 左右),所有曲线都呈现脉动特征,这正对应着液滴的再铺展、再回缩过程,只不过其程度明显弱于首次的铺展与回缩,当液滴能量耗尽之时,液滴的振荡趋于平衡(100 ms 之后),这意味着液滴最终沉积于球面上.

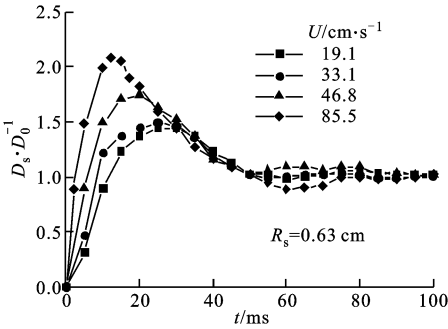


图 2 不同撞击速度下液滴铺展系数的变化

2.2 球面曲率半径对液滴行为的影响

为了研究曲率半径对液滴撞击行为的影响,本文还数值模拟了初始直径为 0.48 cm 的液滴以 46.8 cm/s 的速度撞击不同曲率半径($R_s=0.63, 1.5, 50$ cm)球面的过程. 计算用到的物性参数同上. 模拟得到的液滴形状变化及中心纵截面上的流场分布如图 3 所示. 与不同撞击速度的模拟结果类似,不

同曲率半径下液滴的变形也经历了大体相似的振荡过程:铺展、回缩、再铺展、再回缩,直至沉积于曲面上. 二维图像更加形象地展示了液滴在固体曲面上进行的铺展和回缩过程,这也证明了本文数值方法对球面的模拟是成功的. 液滴在铺展过程中,其内部流体朝向液膜外缘流动(如图 3a 的 20 ms 图),致使流体质量在这里积聚,形成了一个环状突起的结构;在回缩过程中,存在朝向液滴中心的流动(如图 3a 的 28 ms 图和图 3b、3c 的 20 ms 图),这证实了液滴的回缩是由表面张力驱动的. 另外,液滴在 $R_s=0.63$ cm 的球面上的首次回缩阶段出现了局部破裂现象,造成其中心有一小孔(如图 3a 的 35 ms 图),Ge 等^[8]最近也发现了这一现象,而该现象在另两种大曲率半径球面上则没有出现.

为了定量研究这种局部破裂现象,本文在 We 为 5~100、 Re 为 10~150 的范围计算得到如图 4 所示的液滴局部破裂结构图谱. 图中曲线上方区域表示碰撞后首次回缩阶段不会出现局部破裂、下方的区域对应于碰撞后首次回缩阶段出现局部破裂现象的参数范围.

图 5 给出了 $We=30$ 时不同曲率半径下液滴铺展系数随时间的变化关系,可以看到在所示的 4 种曲率半径上,最大铺展直径可以达到液滴初始直径的 1.6~1.75 倍,随着曲率半径的增加,液滴的最大铺展面积反而减小. 同时观察到,在 $R_s=0.63$ cm 的球面上,20 ms 左右液滴铺展面积达到最大,而同时刻,在 $R_s=50$ cm 的球面上液滴已回缩. 这表明随着曲率半径的增大,液滴的铺展速率增大,液滴达到最

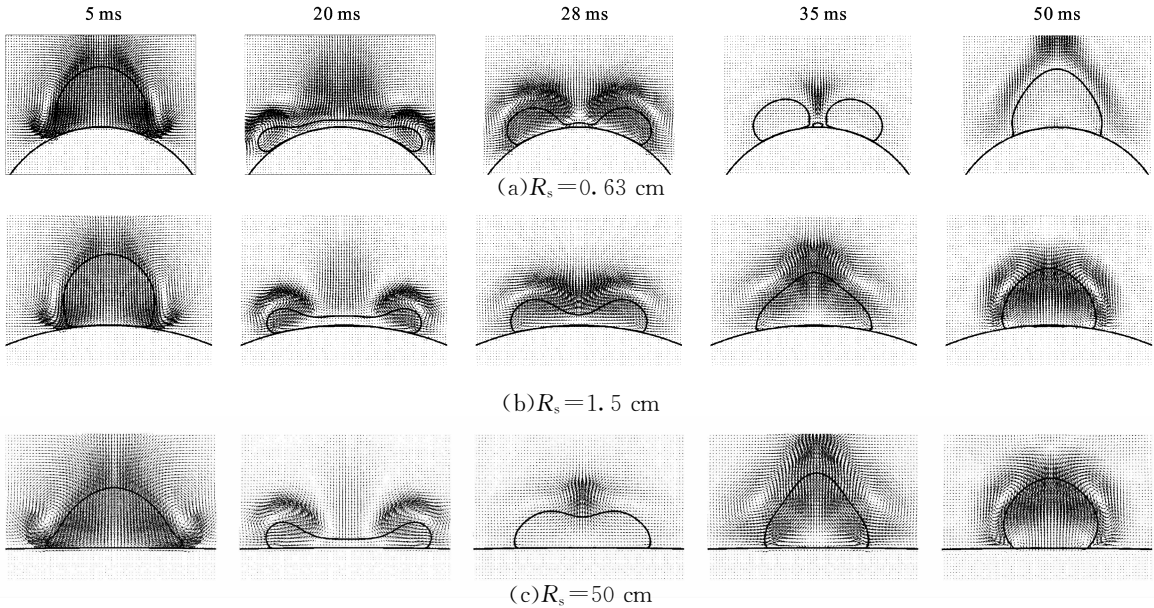


图 3 不同曲率半径下液滴撞击曲面的形状变化过程($We=30$)

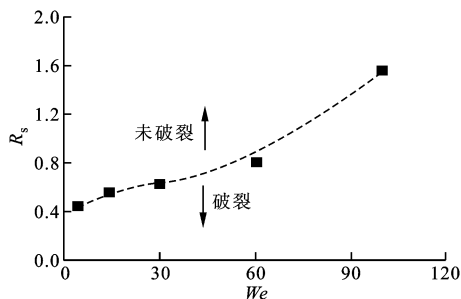


图4 液滴局部破裂与 We 和 R_s 之间的关系

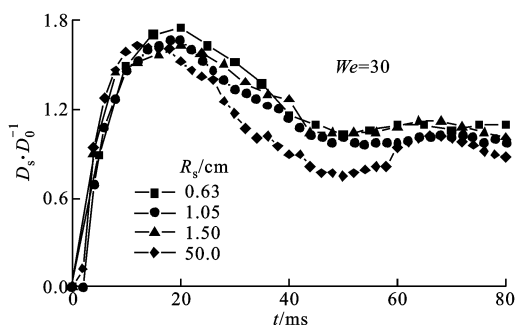


图5 不同曲率半径下液滴铺展系数随时间的变化

大铺展所需要的时间减少。

图6描述了液滴最大铺展系数与 We 和 R_s 之间的关系。图中再次表明随着 We 的增大,液滴最大铺展半径增大,随着曲率半径的增大,液滴最大铺展半径减小。只不过在 We 较小时,最大铺展系数在不同曲率半径下的差别不大,但是当 We 较大时,这种差别明显增大。

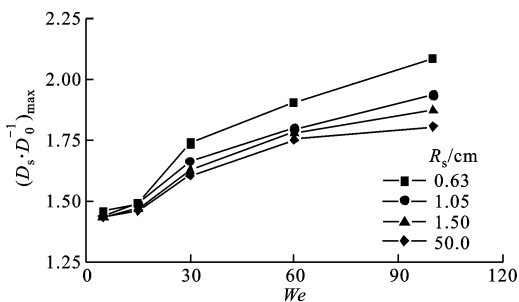


图6 液滴最大铺展系数与 We 和 R_s 的关系

3 结 论

(1)将水平集方法与浸没边界方法相结合,发展了一个在固定欧拉网格体系下描述液滴与球面固体碰撞过程的直接数值模拟方法。数值计算成功地给出了液滴正向撞击球面过程中液滴的变形与液滴内外流场的详细信息,同时也简单有效地模拟出固体

曲面边界的存在。

(2)模拟结果表明,在 $We=5\sim 100$ 、 $Re=10\sim 150$ 的低冲击能量下,冲击液滴与冷球面正向碰撞时均呈现出铺展、回缩、再铺展、再回缩,直至沉积于球面上的行为。

(3)在低冲击能量下,撞击速度与碰撞表面的曲率半径对液滴的沉积行为有显著的影响。随撞击速度增加,液滴的铺展速率增大,液滴的铺展面积增大。随着碰撞表面的曲率半径增大,液滴的铺展速率增大,液滴的铺展面积减小。

(4)在低冲击能量下,当 We 和球面曲率半径一定时,液滴在球面上的首次回缩阶段会出现中心局部破裂现象。

参考文献:

- [1] YARIN A L. Drop impact dynamics: splashing, spreading, receding, bouncing [J]. Annu Rev Fluid Mech, 2006, 38(1): 159-192.
- [2] FUKAI J, SHIIBA Y, YAMAMOTO T, et al. Wetting effects on the spreading of a liquid droplet colliding with a flat surface: experiment and modeling [J]. Phys Fluids, 1995, 7(2): 236-247.
- [3] BUSSMANN M, MOSTAGHIMI J, CHANDRA S. On a three-dimensional volume tracking model of droplet impact [J]. Phys Fluids, 1999, 11(6): 1406-1417.
- [4] BUSSMANN M, CHANDRA S, MOSTAGHIMI J. Modeling the splash of a droplet impacting a solid surface [J]. Phys Fluids, 2000, 12(12): 3121-3132.
- [5] FRANCOIS M, SHYY W. Computations of drop dynamics with the immersed boundary method, Part 2: drop impact and heat transfer [J]. Numer Heat Transfer: B, 2003, 44(2): 119-143.
- [6] TANGUY S, BERLEMONT A. Application of a level set method for simulation of droplet collisions [J]. Int J Multiphase Flow, 2005, 31(9): 1015-1035.
- [7] 李彦鹏,王焕然. 带内嵌固体的不可压缩气液两相界面流数值模拟方法 [J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(9): 1151-1155.
- [8] LI Yanpeng, WANG Huanran. Numerical simulation method for incompressible gas-liquid two-phase interfacial flows with immersed solid boundaries [J]. J of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42(9): 1151-1155.
- [8] GE Y, FAN L S. Droplet-particle collision mechanics with film-boiling evaporation [J]. J Fluid Mech, 2007, 573(2): 311-337.

(编辑 荆树蓉)