

DOI: 10.7652/xjtub201309004

液滴与水平壁面碰撞力的数值研究

张彬, 韩强, 袁小芳, 李景银

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为探究叶轮机内部液滴与固壁之间碰撞引起的壁面磨损破坏的机理,采用流体体积方法,数值研究液滴直径、碰撞速度和液滴与壁面之间的接触角对液滴与壁面碰撞的瞬态碰撞力发展变化的影响。研究表明,液滴与壁面之间的接触角对液滴碰撞过程中的碰撞力几乎没有影响,但对于不同雷诺数和韦伯数下的液滴,其与静止壁面的碰撞力按液滴直径的 2.118 次方和速度的 1.761 次方正则化后,碰撞力的无量纲时间曲线基本重合,且碰撞力峰值出现的无量纲时刻为 0.26,即同样直径的液滴,碰撞速度越大,到达碰撞力峰值所用时间越短,对同样速度的液滴,液滴直径越大,则液滴到达碰撞力峰值所用时间越长。

关键词: 流体体积方法;碰撞力;数值模拟;碰撞参数

中图分类号: TK05 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)09-0023-05

Simulation of Impact Force of Drop Impacting on Horizontal Plate

ZHANG Bin, HAN Qiang, YUAN Xiaofang, LI Jingyin

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In order to understand the mechanism of surface erosion caused by the impact of liquid drops on the blade in the turbomachinery, the effects of contact angle, drop diameter and impact velocity on the impact force of a drop colliding with a stationary plate were discussed with the VOF method. The results show that the impact force is slightly affected by the variation in contact angle but considerably influenced by the change in the droplet diameter and impact velocity. Moreover, if the impact force is normalized by the product of the 2.118th power of the droplet diameter and the 1.761th power of the droplet impact velocity, the curves of the normalized forces for drops at different Re and We numbers verse dimensionless time almost all collapse into a single curve, and the normalized peak force occurs at the dimensionless time of 0.26. This indicates that the same size drop at a higher velocity experiences its peak impact force at an earlier time while the impact force of a larger drop at the same velocity reaches its peak at a later time.

Keywords: volume of fluid method; impact force; numerical simulation; collision parameter

在工业技术应用领域有许多液滴与固体壁面碰撞、沉积铺展或飞溅的现象,例如喷墨打印、等离子喷涂和涂层、农药喷洒和金属浇铸的退火与淬火等^[1]。国内外学者已经对液滴与静止壁面碰撞过程

的形态和碰撞图谱进行过大量研究^[2-5]。在流体机械内部也经常碰到液滴与叶片的碰撞问题,例如喷雾轴流风机^[6]、离心压气机^[7]、飞机发动机中的轴流压气机^[8-10];此外,该现象也是蒸汽轮机的湿蒸汽级

收稿日期: 2013-01-21。 作者简介: 张彬(1989—),男,博士生;李景银(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51276137);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目。

网络出版时间: 2013-06-17

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20130617.0840.008.html>

设计中的一个关键问题。液滴与叶轮机械的叶片碰撞,一方面会造成气动性能恶化,另外也会造成叶片磨损破坏。以往学者对于液滴与静止壁面碰撞过程的研究以及李景银等人对于液滴与旋转壁面碰撞过程的研究^[11]专注于液滴形态变化,目前对于单个液滴与壁面碰撞的冲击力的文献还极其缺乏。一般而言,液滴与水平静止壁面的碰撞过程可分为4个阶段:运动阶段、铺展阶段、回缩阶段和平衡阶段^[4]。本文重点研究碰撞过程中,液滴与壁面碰撞的最大瞬时碰撞力阶段液滴碰撞力的发展变化过程。通过采用流体体积(VOF)计算模型,分析入射液滴直径、碰撞速度和液滴与壁面之间的接触角对液滴与壁面碰撞力的影响。

1 液滴碰撞数值计算模型和方法

液滴与壁面的碰撞力计算涉及到液体和气体两种流体,并且两者之间没有质量的传递,因此本文的数值模拟采用VOF模型。该模型可通过求解单独的动量方程和穿过区域的每一种流体的体积分数来模拟两相。每个单元上的流体体积分数就是目标流体体积 V_q 和网格总体积 V_{sum} 的比值

$$\alpha = V_q / V_{\text{sum}} \quad (1)$$

当单元体积内充满目标流体时, $\alpha=1$;不含目标流体时 $\alpha=0$,而 $0<\alpha<1$ 的时候表面网格是含有自由表面的网格。

每个网格单元上体积分数的连续性方程为

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \alpha = 0 \quad (2)$$

VOF方法通过求解上述连续性方程,得到每个单元上的体积分数,从而来追踪两相的界面。本文计算中定义第一相为空气,第二相设置为液滴。

在计算中,除了质量和动量方程外,模型中还考虑了表面张力和壁面黏附的作用。表面张力模型以源项的形式在动量方程中定义,壁面黏附作用在表面向量中定义

$$\mathbf{n} = \mathbf{n}_w \cos \theta_w + \mathbf{t}_w \sin \theta_w \quad (3)$$

由于液滴碰撞过程的对称性质,计算采用二维轴对称模型。网格划分如图1所示。计算区域取 $10 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ 的平面,深色区域为液滴的初始位置,网格总数为15 100。求解区域的边界条件为:左边界为对称轴,下边界为壁面,液滴表面为自由表面,其他边界为大气环境。在计算中考虑了重力的影响。在计算的初始时刻,设置液滴与壁面之间有一段距离,以考虑空气的存在对液滴自由面的影响。

压力与速度的耦合算法选用PISO,每个时间步长内的迭代次数选择为20次,计算的时间步长为 $1 \times 10^{-6} \text{ s}$ 。

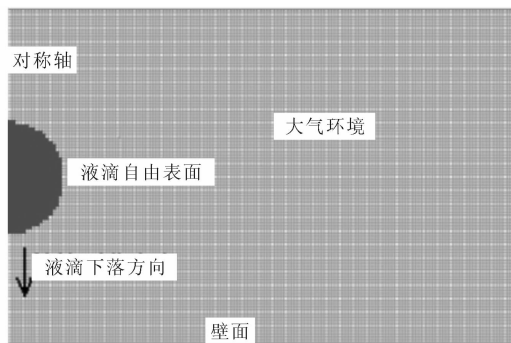
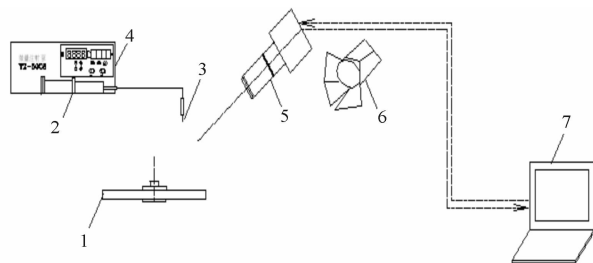


图1 计算区域

2 数值模型的实验验证

为验证数值模型的可靠性,本文将数值模拟所得铺展系数 β 与实验所得数据进行对比分析。 β 定义为液滴与壁面接触区域直径与液滴碰撞初始时刻直径之比。实验采用高速摄像机拍摄液滴与壁面碰撞的过程,用专业图像处理软件对拍摄图像进行采集和数据分析。实验装置的示意图如图2所示。



1:碰撞壁面;2:针筒注射器;3:针头;4:微注射泵;

5:高速摄像机;6:灯光;7:数据采集计算机

图2 实验装置示意图

实验和数值计算采用直径 D 为 3.3 mm 、碰撞速度 U 为 3.13 m/s 的水滴,并对铺展系数随时间的变化进行对比,如图3所示。计算中假设液滴与壁面之间的接触角 γ 为 55° 。从图中可以看到,数值模拟的结果与实验结果比较接近。数值计算结果的铺展系数比实验值偏低,而且到达最大铺展系数的时间比实验值滞后。在回缩阶段,二者的变化趋势一致,差距较小。回缩到最小铺展系数时,二者差距略有增大。到平衡振荡阶段,二者铺展系数之间的差距又逐渐减小,最后趋于一致。液滴碰撞过程中,数值模拟的液滴最大铺展系数为2.64,最小铺展系数为1.51,而实验数据的最大铺展系数为3.07,最小铺展系数为1.69。总的来说,该数值模型可以较

好地模拟液滴碰撞过程,因此采用该数值模型对液滴与壁面的碰撞力和压强的变化规律进行研究。该碰撞力方向定义为沿碰撞接触面法线方向。

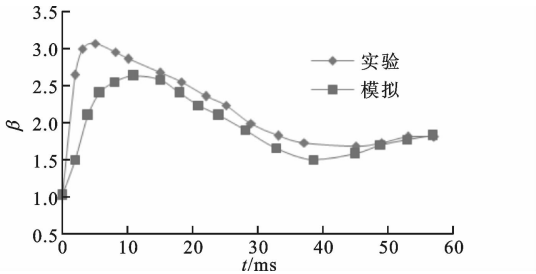


图 3 实验和模拟铺展系数随时间变化对比

3 液滴碰撞力计算结果与分析

3.1 碰撞速度的影响

为了分析不同的液滴碰撞速度对碰撞力 F 的影响,保持液滴直径不变,改变液滴的碰撞速度。计算中设液滴直径为 3.57 mm,碰撞速度分别为 2.96、2.78、2.41、1.96 和 1.38 m/s,接触角为 90° 。不同速度下碰撞力随时间的变化规律如图 4 所示。

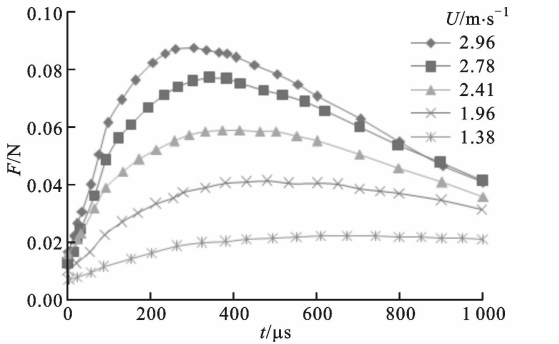


图 4 不同速度下液滴碰撞力随时间的变化

由图 4 可知,随着液滴碰撞速度的增大,液滴碰撞力的峰值 $F_{\max}$ 增大。另外,速度为 2.96、2.78、2.41、1.96 和 1.38 m/s 时,液滴碰撞力从初值到峰值之间分别经历了 300、340、410、580 和 670 μs ,即碰撞速度越大,达到碰撞力峰值所用时间越短,且同一速度下,碰撞力上升段所用时间要比下降段所用时间短。在 0 时刻,计算的碰撞力具有一个较小的初值,原因在于液滴从初始位置下落的过程中,其对壁面附近的空气冲击使得液滴与壁面之间空气压强增大,造成壁面处压力非 0。

图 5 为碰撞力峰值随速度平方的变化规律。从图中可以看出,碰撞力的峰值随着速度平方的增加基本呈线性增加。

图 6 为碰撞接触面中心点处的最大压强 $p_{\max}$ 随速度平方的变化规律。在碰撞速度分别为 2.96、

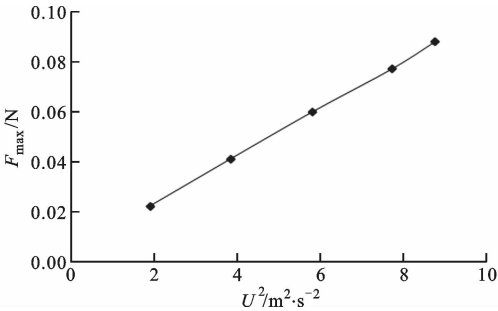


图 5 不同速度下碰撞力的峰值

2.78、2.41、1.96 和 1.38 m/s 时,碰撞接触面中心点处的最大压强分别为 15 835、14 381、11 022、7 096 和 3 800 Pa,可以看出该点的最大压强随着碰撞速度平方的增加也基本呈线性增加。

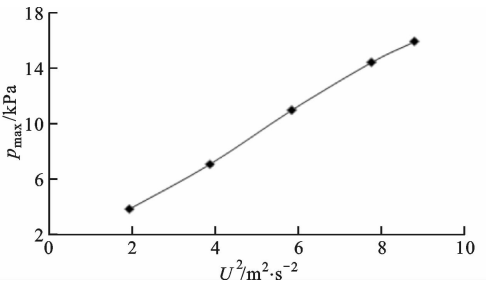


图 6 碰撞接触面中心点处最大压强随速度的变化

3.2 液滴直径的影响

为了分析液滴直径的变化对碰撞力的影响,保持碰撞速度为 2.96 m/s 不变,对直径分别为 2.18、2.78、3.16 和 3.57 mm 的液滴与壁面的碰撞力进行了数值模拟。液滴的接触角均设置为 90° 。

不同直径液滴的碰撞力随时间的变化如图 7 所示。直径大的液滴,与壁面碰撞力的峰值大。液滴直径为 3.57、3.16、2.78 和 2.18 mm 时,碰撞力从 0 时刻到峰值分别经历了 300、280、240 和 190 μs 。即直径小的液滴,到达碰撞力峰值的时间短,同时碰撞力下降速率慢,比如直径为 2.18 mm 的液滴,碰撞力下降的过程明显缓慢。

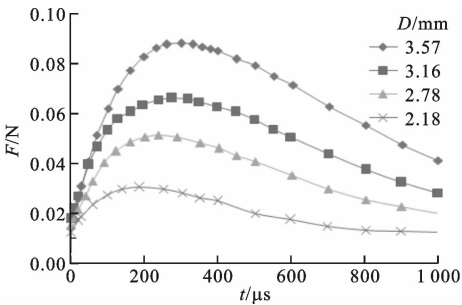


图 7 不同直径液滴的碰撞力随时间的变化

图 8 为不同直径液滴的碰撞力峰值随直径平方的变化。对于直径分别为 2.18、2.78、3.16 和 3.57 mm 的液滴,碰撞力的峰值分别为 0.031、0.051、0.066 和 0.088 N,即碰撞力峰值随着液滴直径平方的增加呈近似线性变化。

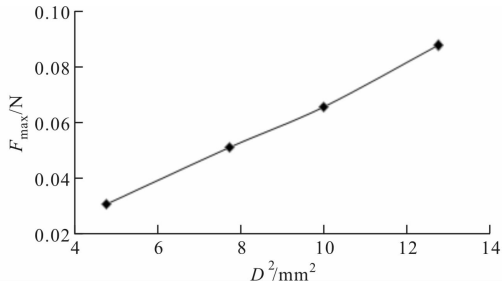


图 8 不同直径液滴的碰撞力峰值

图 9 为碰撞接触面中心点处的最大压强随直径平方的变化规律。从图中可以得到,液滴直径为 2.18、2.78、3.16 和 3.57 mm 时,碰撞接触面中心点处的最大压强分别为 129 101、14 277、14 836 和 15 835 Pa,随着碰撞液滴直径平方的增加,该处最大压强也不断增大,呈近似线性变化规律。

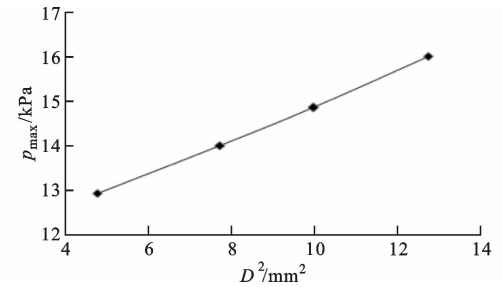


图 9 碰撞接触面中心点处最大压强随直径的变化

3.3 不同接触角的影响

为了验证液滴与壁面接触角的变化对碰撞力的影响,本节分别计算了接触角为 60°、90°和 120°时,碰撞速度为 2.96 m/s、直径为 3.57 mm 的液滴与壁面的碰撞力,结果见图 10。

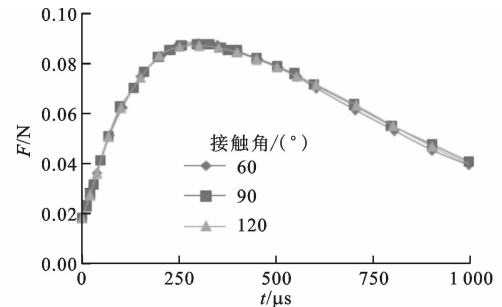


图 10 不同接触角液滴的碰撞力随时间的变化

由图 10 可知,不同接触角的液滴从碰撞开始到碰撞力峰值都经历了 300 μs,接触角为 60°、90°和

120°时的碰撞力峰值差别不大,分别为 0.088 5、0.088 1 和 0.087 6 N,而且碰撞力随时间的变化也基本保持一致,说明接触角的变化对碰撞力以及碰撞过程中运动阶段影响很小。

4 碰撞力无量纲分析

采用无量纲参数可以更好地探究液滴与壁面碰撞过程中碰撞力的变化规律。本节采用雷诺数 $Re = \rho U D / \mu$ 和韦伯数 $We = \rho U^2 D / \sigma$ 进行分析,其中 ρ 为液滴密度, μ 为液滴黏性系数, σ 为液滴表面张力系数。不同速度下碰撞过程的 Re 和 We 如表 1 所示,不同直径液滴的 Re 和 We 如表 2 所示。

表 1 不同速度的液滴碰撞过程的 Re 和 We

$U/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	2.96	2.78	2.41	1.96	1.38
Re	10 536	9 895	8 578	6 976	4 912
We	430	379	285	188	93

表 2 不同直径的液滴碰撞过程的 Re 和 We

D/mm	3.57	3.16	2.78	2.18
Re	10 536	9 861	8 675	6 803
We	430	425	374	293

将碰撞力随时间变化过程中的时间无量纲化

$$t^* = tU/D$$

不同 Re 下碰撞力随无量纲时间的变化规律如图 11 所示。从图中可以得出,不同 Re 下碰撞力峰值出现的无量纲时间是相同的,近似为 0.26。文献[4]中指出,碰撞过程的运动阶段发生在 $t^* = 0 \sim 0.1$ 的过程中,而图 11 中碰撞力峰值出现在 0.26 时刻,即碰撞力峰值发生在运动阶段之后。在本文算例中,碰撞力峰值均发生在液滴的铺展初始阶段。

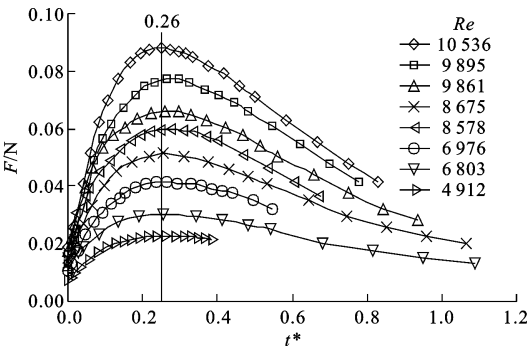


图 11 不同 Re 下 F 随 t^* 的变化

在时间无量纲化的基础上将碰撞力作如下处理

$$F^* = F / (D^{2.118} U^{1.761})$$

不同 Re 下,无量纲碰撞力 F^* 与 t^* 的关系如图 12

所示,可见不同 Re 下的无量纲碰撞力时间曲线高度重合,特别是在 F^* 峰值附近。曲线两端重合度较低是因为 $F^* = F/(D^{2.118} U^{1.761})$ 中的指数 2.118 和 1.761 是以碰撞力峰值为基础与直径和速度进行关联所得。对于弹性体而言,由 $\int F dt = \Delta m U$ 得知, F 正比于 $\Delta m U / \Delta t$,按弹性体小变形假设, F 正比于 $D^3 U$ 。由图 12 可看出,本文计算的 F 与 $D^{2.118} U^{1.761}$ 的线性度符合更好。这说明液滴与壁面碰撞表现出强烈的塑性体特性,液滴在碰撞过程中变形较大,导致与弹性体碰撞规律差别明显。由于本文研究的液滴碰撞速度和直径变化范围有限,碰撞力与液滴碰撞速度和直径的关系值得进一步研究。

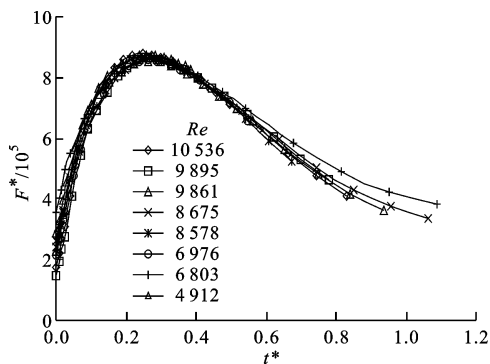


图 12 不同 Re 下 F^* 随 t^* 的变化

5 结 论

本文采用 VOF 计算模型,研究了不同碰撞参数对液滴与壁面碰撞力的影响,得出以下结论。

(1)将碰撞力按直径的 2.118 次方和速度的 1.761 次方正则化,则不同 Re 和 We 下碰撞力的无量纲时间曲线基本重合。

(2)相同直径的液滴,碰撞速度越大,碰撞力越大,且碰撞力达到峰值的时间越短。碰撞力与速度的平方呈近似线性关系。

(3)随着碰撞液滴直径的增大,达到液滴对壁面碰撞力峰值的时间越长,且碰撞力随之增大。碰撞力与直径的平方呈近似线性关系。

(4)液滴与壁面的接触角对碰撞力几乎没有影响,液滴的碰撞力几乎不随接触角的改变而改变。

(5)碰撞力峰值出现在液滴碰撞过程的铺展阶段;不同 Re 下碰撞力峰值出现的无量纲时间相同,大约为 0.26。

参考文献:

[1] REIN M. Phenomena of liquid drop impact on solid

and liquid surface [J]. Fluid Dynamics Research, 1993, 12(2): 61-93.

[2] BOT C L, VINCIEN T S, ARQUIS E. Impact and solidification of indium droplets on a cold substrate [J]. International Journal of Thermal Science, 2005, 44 (3): 219-233.

[3] ESCURE C, VARDELLE M, FAUCHAIS P. Experimental and theoretical study of the impact of alumina droplets on cold and hot substrates [J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2003, 23(2): 185-221.

[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] LI J Y, HAN Q, ZHAO Y J, et al. Deposition process of droplets impacting on a horizontal surface [J]. Advanced Materials Research, 2012, 354/355: 579-584.

[6] 胡炎楷. 新型喷雾风机在空调中的应用的节能 [J]. 现代节能, 1994(1): 19-21.

HU Yankai. Energy-saving by applying a new type of spraying fan in air conditioner [J]. Modern Energy Conservation, 1994(1): 19-21.

[7] 李淑云, 魏青政, 王云辉, 等. 模拟舰船燃机压气机级间流场的喷水雾化实验研究 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2002, 23(2): 13-16.

LI Shuyun, WEI Qingzheng, WANG Yunhui, et al. Spraying water over simulated compressor inter-stage flow field of marine gas turbine [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2002, 23(2): 13-16.

[8] SUN L X, ZHENG Q, LUO M G, et al. On the behavior of water droplets when moving onto blades surface in a wet compression transonic compressor [J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2011, 133: 082001.

[9] 刘波, 曹志鹏, 高嵩, 等. 来流含水对航空发动机风扇/压气机特性的影响 [J]. 航空动力学报, 2005, 20 (6): 1041-1047.

LIU Bo, CAO Zhipeng, GAO Song, et al. Influence of inlet water ingestion on aero-engine fan-compressor performance [J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 20(6): 1041-1047.

[10] DAY I, WILLIAMS J, FREEMAN C. Rain ingestion in axial flow compressor at part speed [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2008, 130: 011024.

[11] LI J Y, YUAN X F, HAN Q. Time evolutions of water drops impacting on a rotating disk [J]. Advanced Materials Research, 2012, 354/355: 609-614.

(编辑 荆树蓉)