https://doi.org/10.1051/jnwpu/20203830494

冷液滴/热液膜碰撞形态及二次液滴特性研究

方龙, 陈国定

(西北工业大学 机电学院, 陕西 西安 710072)

摘 要:冷液滴/热液膜碰撞现象广泛存在于工业应用中,而液滴与液膜间温度差异会影响到液滴/液膜碰撞形态及其二次液滴的特性。针对先前研究的不足,设计制造了冷液滴/热液膜碰撞试验装置并开展了大量冷液滴/热液膜碰撞试验,基于此获得了冷液滴与热液膜碰撞判断准则,建立了二次液数量、尺寸分布和温度与碰撞参数之间的无量纲关系。结果表明,冷液滴/热液膜碰撞后有碰并、冠状液膜成形及溅射 3 种形态,且 3 种形态可通过文中提出的判断准则辨识;二次液滴数量随着飞溅参数的增加而增加,二次液滴的无量纲直径分布在 0~0.3 的范围内且二次液滴尺寸概率密度分布为威布尔分布,二次液滴温度与液膜温度较为接近,二次液滴的温度均在液膜温度的 90%以上,同时二次液滴的温度随着二次液滴无量纲直径的增加略有减小的趋势。

关 键 词:冷液滴;热液膜;碰撞试验;判断准则;二次液滴;液滴温度

中图分类号:TG156 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-2758(2020)03-0494-07

在工业应用中,冷液滴与热液膜的碰撞是一种较为常见的现象,对于航空发动机而言也存在这一工作现象。如在航空发动机轴承腔中,滑油在对主轴轴承润滑与冷却之后,被轴承套圈甩射出、形成油束并断裂成油滴,润滑油滴以一定的速度撞击轴承腔壁面上的壁面油膜,并以壁面油膜形式流出轴承腔排油口。对于热区部位的轴承腔而言,轴承腔壁面承受热区流体加热而导致壁面油膜具有较油滴更高的温度,使得油滴与油膜的碰撞形成了较为复杂的冷液滴/热液膜碰撞现象。深入研究冷液滴/热液膜碰撞过程中的质量、动量和热量传输机理,不仅对于航空发动机轴承腔润滑与冷却机理研究、提高润滑效率十分有必要,也是促使其他工业领域技术设备性能改善和改进的基础研究工作。

液滴/液膜碰撞研究起源于 Worthington[1] 利用电火花摄影装置观测牛奶液滴/液膜的碰撞现象,此后众多学者通过试验及数值手段对常温状态下的液滴/液膜碰撞这一科学与工程问题展开了研究。Rein 等[2] 通过试验方法研究了常温状态下液滴/液膜的碰撞现象,并将液滴/液膜的碰撞形态划分为“漂浮”、“反弹”、“碰并”、“冠状液膜成形”和“溅射”5 种形态。Cossali 等[3] 在 Rein 研究结论的基础上,将“溅射”形态进一步分类为“即时溅射”和“延时溅射”2 种不同的形态,并提出以“Cossali 飞溅参数”表达的判断液滴/液膜碰撞能否发生飞溅的辨识准则,该辨识准则的有效性得到了后续学者的证实[4-7],并被广泛引用。最近,Ray 等[8] 通过试验及理论相结合的手段将常温状态下液滴/液膜碰撞结果细分为 7 种形态,并将液滴/液膜碰撞形态及其对应工况绘制在横坐标为韦伯数 We、纵坐标为弗劳德数 Fr 的图中,然后基于此提出了判断液滴/液膜碰撞形态的新辨识准则。目前关于液滴/液膜碰撞产生二次液滴的几何物理性质研究仍较为罕见,引用较为广泛的是 Okawa 等[6] 关于液滴/液膜碰撞产生二次液滴数量的研究,Okawa 等通过试验统计得出了二次液滴数量随“Cossali 飞溅参数”数值增加而增加的结论,不过遗憾的是 Okawa 的研究并没有涉及到二次液滴尺寸分布规律的统计分析。近年来,国内有关液滴碰撞研究也有了较为充足的发展,如郭加宏等[9] 通过试验定性观测了常温状态下液滴

收稿日期:2019-09-18

作者简介:方龙(1988—),西北工业大学博士研究生,主要从事航空发动机润滑系统设计研究。

通信作者:陈国定(1956—),西北工业大学教授,主要从事润滑密封及机电系统热分析研究。E-mail:gdchen@nwpu.edu.cn

撞击液膜后产生的流动现象;方龙等[10]通过试验方法,研究了冷液滴与热液池碰撞后的温度变化特性;李大树等[11]通过数值方法研究了液滴/液膜碰撞过程中的润湿壁面空气夹带现象。

从上述文献分析中可以发现,迄今有关研究多集中于同温状态下液滴/液膜碰撞研究,有关液滴/液膜温度存差异条件下的液滴/液膜碰撞研究十分鲜见,且二次液滴几何及物理性质的研究较为匮乏,同时相关试验数据不确定性很大[12-13]。与同温液滴/液膜碰撞现象不同,冷液滴与热液膜的碰撞时,液滴与液膜间温度差异会改变碰撞辨识准则,影响碰撞溅射形成的二次液滴尺寸、温度等特性。因此,本文设计制造了冷液滴/热液膜碰撞试验装置,利用该装置开展了大量的冷液滴/热液膜碰撞试验,基于此建立了冷液滴与热液膜碰撞判断准则,并通过试验分析建立了二次液滴尺寸、数量及温度与碰撞参数之间的无量纲关系。本文的研究有助于揭示冷液滴与热液膜间碰撞现象和机理,是促使相关工业工程领域技术设备性能改善和改进的基础研究工作。

1　冷液滴/热液膜的碰撞试验装置

冷液滴/热液膜碰撞试验装置的构成如图 1 所示。冷液滴/热液膜碰撞试验装置主要由液滴产生装置、液膜产生装置、高速摄影装置和红外摄影装置等组成的。试验中先利用液膜产生装置产生具有一定温度和膜厚的热液膜,由液滴产生装置产生的具有一定速度和直径的冷液滴撞击热液膜,由高速摄影装置和红外摄像装置拍摄记录冷液滴/热液膜的碰撞过程,通过分析处理高速摄像及红外摄像图片,获得冷液滴/热液膜碰撞过程中碰撞区域形态变化,二次液滴尺寸、温度特征。

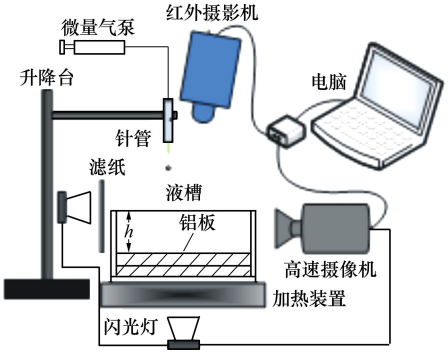


图 1　冷液滴/热液膜碰撞试验装置构成图

在冷液滴/热液膜碰撞试验装置中,液滴产生装置由带针头的针管、升降台和微量气泵等组成。针管固定在升降台上,其内注入温度变化范围为 10~18℃的冷水,针管顶部与微量气泵相连,针管底部连接针头,可以根据试验需求更换不同直径的针头,以便于产生不同直径尺寸的液滴。试验中通过微量气泵输送压力气体挤压针管内液体,促使液体在针头附近产生液滴,试验中所产生的液滴直径范围为 2~4 mm。液滴碰撞速度的改变是通过调整针管在升降台上位置进而改变针头与液槽液面距离实现的,试验中液滴的速度范围为 0.9~4 m/s。液膜产生装置由液槽和加热装置等构成,液槽深度为 6 mm,液槽底部为铝板以利于导热,侧面为透明有机玻璃。液槽放置在加热装置上通过加热以获得需要的液膜温度,本试验中液膜温度在 25~65℃范围内变化。

高速摄像机拍摄频率为 5 000 Hz,图片像素为 1 280 pixels×1 024 pixels。红外摄像机拍摄频率为 5 000 Hz,图片像素为 300 pixels×120 pixels。试验过程中,高速摄像机和红外摄像机拍摄的图像信息可以传送到计算机存储,并在计算机中显示。

2　冷液滴/热液膜碰撞形态辨识准则

根据本文的试验结果,将冷液滴与热液膜的碰撞结果划分为碰并、冠状液膜成形和溅射 3 种形态。

3 种形态的定义如下:

1) 碰并　碰并是指液滴碰撞液面后,液滴与液面迅速融合,对被碰撞液面的影响较小,碰撞区域处的液面没有形成冠状隆起液膜,也没有中心射流[14]的产生,如图 2a)所示。

2) 冠状液膜成形　冠状液膜成形是指液滴碰撞液面后,碰撞液面形成如冠状的隆起液膜,冠状隆起液膜的顶部可能会产生凸起的尖点,如图 2b)所示。

3) 溅射　溅射是指液滴与液膜碰撞过程中产生了二次液滴,如图 2c)所示。



a)　碰并　　b)　冠状液膜成形现象　　c)　飞溅现象

图 2　液滴/液膜碰撞后的碰撞结果示意图

为分析问题的方便，在后续处理冷液滴与热液膜碰撞条件时，参照国内外研究[15]均将冷液滴的直径 D、速度 u 以及与液滴温度相关的液滴物性参数无量纲化为冷液滴的韦伯数 $We=\rho u^2 D/\sigma$，不再分别讨论液滴直径、速度及液滴温度的影响，韦伯数表达式中的 ρ，σ 分别为冷液滴密度和表面张力。

图 3 给出了 3 个韦伯数条件下冷液滴撞击到温度为 40℃、厚度为 6 mm 热液膜过程的高速摄像时序图。在本文中液膜的厚度始终为 6 mm。图 3a）表明，当韦伯数 We 为 15 时（液滴直径为 2.38 mm，速度为 0.66 m/s，温度为 15℃），冷液滴与热液膜的碰撞形态为碰并，发生碰并时冷液滴与热液膜迅速融合，热液膜受到的扰动较小，没有冠状液膜的产生。

图 3b）表明，当韦伯数 We 为 136 时（液滴直径为 2.78 mm，速度为 1.88 m/s，温度为 15℃），冷液滴与热液膜的碰撞形态为冠状液膜成形。可以看出，当碰撞发生 2 ms 后，液膜形成冠状隆起液膜，且在冠状液膜边缘产生尖点。由于液滴碰撞惯性力不够大，尖点迅速回缩到冠状液膜中，未能从液膜中断裂形成二次液滴。

图 3c）表明，当韦伯数 We 为 366 时（液滴直径为 3.25 mm，速度为 2.85 m/s，温度为 15℃），冷液滴与热液膜的碰撞形态为飞溅。可以看出，碰撞 2 ms 后，冠状液膜的边缘开始出现指状凸起的液柱，凸起液柱会随着碰撞时间的增加而继续凸出生长，直至凸起液柱前段的尖点因瑞利-普拉托不稳定性原理而断裂形成尺寸较大的二次液滴。

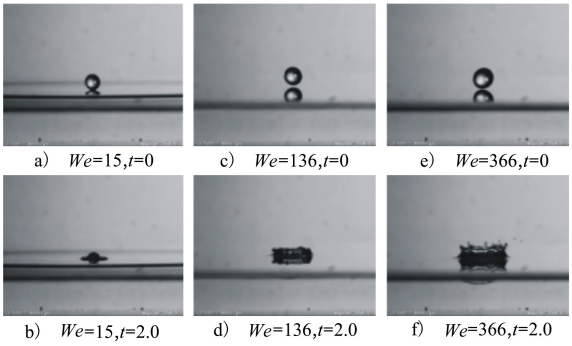


图 3 冷液滴碰撞韦伯数对冷液滴/热液膜碰撞状态的影响

针对液膜温度对碰撞形态的影响，本文也开展了相关试验研究。图 4a）和 4b）给出了温度为 20℃、韦伯数 We 为 69 的液滴分别与温度为 30℃，50℃的液膜碰撞的高速摄像图。从图中可以看出，随着液膜温度升高，冷液滴/液膜碰撞形态逐渐由碰并形态变化为冠状液膜成形形态。图 4c）和 4d）给出了温度为 20℃、韦伯数 We 为 145 的液滴分别与温度为 30℃，50℃的液膜碰撞的高速摄像图。从图中可以看出，液膜温度为 30℃时，冷液滴/热液膜碰撞后未发生飞溅；当液膜温度增加到 50℃时，冷液滴/液膜碰撞后发生飞溅。上述分析表明液膜温度对冷液滴/热液膜的碰撞形态有较大影响。

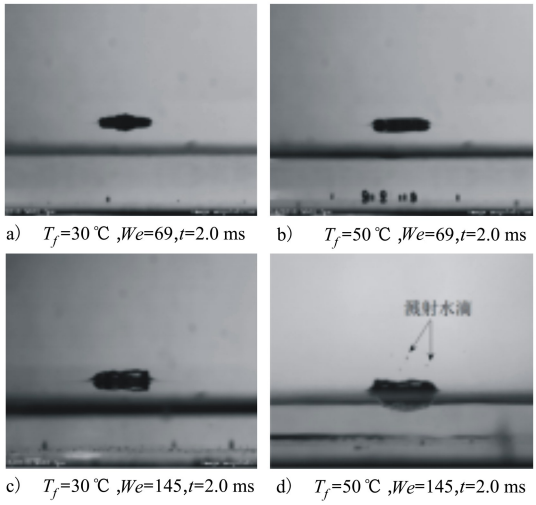


图 4 热液膜温度对冷液滴/热液膜碰撞形态的影响

上述研究工作表明液滴的韦伯数和液膜温度都对冷液滴/热液膜碰撞形态有影响，因此在建立冷液滴/液膜碰撞形态辨识准则时应考虑上述 2 个因素的影响。笔者引入热液膜的奥内佐格数 Oh 以表征热液膜黏性力与惯性力、表面张力的相互关系，并使用液滴韦伯数 We 以表征液滴惯性力与表面张力关系。基于此，笔者将 Oh 与 We 处理为飞溅参数 K，其表达式为

$$K = We_{\text{droplet}} Oh_{\text{film}}^{-0.4} \tag{1}$$

式中：We_{droplet} 为冷液滴的韦伯数，且随着水滴温度变化而变化；Oh_{film} 为热液膜的奥内佐格数；Oh_{film} 的值也随着液膜温度变化而变化。其计算表达式如（2）式所示。

$$Oh_{\text{film}} = \mu_{\text{film}} / \sqrt{\rho_{\text{film}} \sigma_{\text{film}} D} \tag{2}$$

为建立冷液滴/热液膜碰撞形态辨识准则，在较大的工况范围内进行了冷液滴/热液膜碰撞试验，通过分析高速摄像图像，辨别冷液滴/热液膜碰撞出现的碰并、冠状液膜成形及溅射等形态，记录出现各形态时对应的飞溅参数 K 及液膜温度，建立如图 5 所

示的以 K 为纵坐标、液膜温度 T_f 为横坐标的冷液滴/热液膜碰撞形态图。

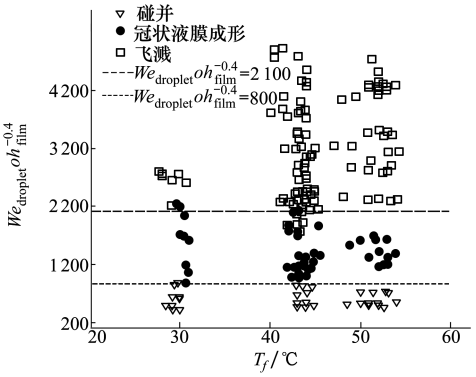


图 5　冷液滴/热液膜碰撞形态及依据本文碰撞形态判断准则的辨识

从图 5 所示的冷液滴/热液膜碰撞形态图中可以看出,碰撞后发生飞溅形态与冠状液膜成形形态之间的临界飞溅参数 K 为 2 100,碰并形态与冠状液膜成形形态之间的临界飞溅参数 K 为 800。

根据本文试验分析,作者提出以下冷液滴/热液膜碰撞形态辨识准则:

1) 当 K > 2 100 时,冷液滴/热液膜的碰撞形态为溅射;

2) 当 800 < K < 2 100 时,冷液滴/热液膜的碰撞形态为冠状液膜成形;

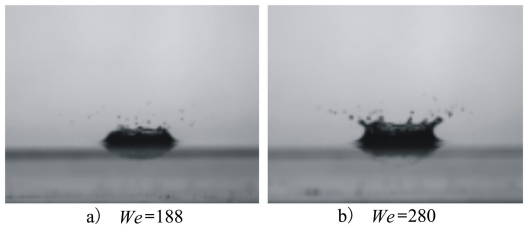
3) 当 K < 800 时,冷液滴/热液膜的碰撞形态为碰并。

3　二次液滴的数量、尺寸分布及温度

图 6 是液滴韦伯数分别为 180(液滴直径为 2.96 mm,速度为 1.31 m/s,温度为 15℃)和 280(液滴直径为 3.66 mm,速度为 2.32 m/s,温度为 15℃)条件下,冷液滴与热液膜(温度为 40℃)在相同时刻的高速摄像图片。

从图中可以看出,在液膜温度及厚度给定的条件下,液滴韦伯数越大则冷液滴与热液膜碰撞越剧烈,并伴随有更多的二次液滴产生。这是因为随着韦伯数的增加,碰撞液滴的惯性力增大,使得液膜受到液滴撞击的动能越高,故而产生更多数量的二次液滴。

图 7 是液滴韦伯数为 145(液滴直径为 2.89 mm,速度为 1.90 m/s,温度为 15℃)、液膜温度



a) We=188　　b) We=280

图 6　液滴韦伯数对二次液滴数量的影响

分别为 50℃ 和 65℃ 条件下,冷液滴与热液膜在相同碰撞时刻的高速摄像图片。从图中可以看出,在液滴韦伯数恒定的条件下,液膜温度越高则碰撞越剧烈,并产生了更多的二次液滴。这是因为随着液膜温度升高,液膜粘性力下降,使得液膜受到碰撞后二次液滴更容易从液膜中脱裂,产生了数量更多的二次液滴。



a) T_f=50°　　b) T_f=65°

图 7　液膜温度对二次液滴数量的影响

为了获得飞溅参数与二次液滴数量之间的无量纲关系,在较大工况范围内通过统计冷液滴/热液膜碰撞试验结果,记录下二次液滴数量 N_s 与飞溅参数的数值,分析试验数据并最终给出了如图 8 所示的飞溅参数与二次液滴数量之间的关系,并提出飞溅参数与二次液滴数量之间的关系为

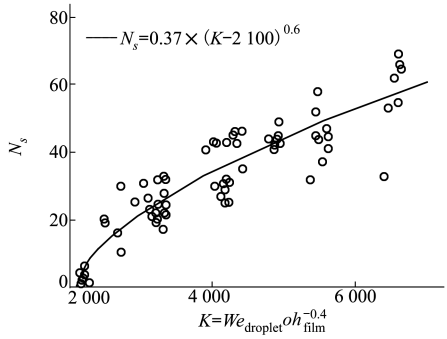


图 8　二次液滴数量与飞溅参数的对应关系

$$N_s = a_K \times (K - 2\,100)^{b_K} (2\,100 < K < 7\,000) \tag{3}$$

式中:a_K 和 b_K 为常数,根据大量试验数据,拟合出常

数 a_K,b_K 的数值分别为 0.37,0.6。

为了分析问题的方便,将二次液滴直径无量纲处理为

$$D_{sd}^{*} = D_{sd}/D \tag{4}$$

式中:D_{sd}^{*} 为无量纲化的二次液滴直径;D_{sd} 为二次液滴直径,D 是碰撞液滴直径。

图 9 是飞溅参数分别为 6 600,4 870 时,液滴撞击热液膜后产生的二次液滴的无量纲直径概率分布直方图。从图中可以看出,二次液滴的无量纲直径分布在 0~0.3 的范围内,且飞溅参数越大,二次液滴的无量纲直径分布的正向偏度越大,亦即随着飞溅参数增加,二次液滴直径有增大趋势。图 9 所示的二次液滴无量纲直径概率分布大致符合威布尔分布,其概率密度分布可表示为

$$P_{DF_s} = a \times b \times D_{sd}^{*\,b-1} e^{-a \times D_{sd}^{*\,b}} \tag{5}$$

式中:P_{DF_s} 为二次液滴无量纲直径的概率密度;a,b 为威布尔分布中的系数。

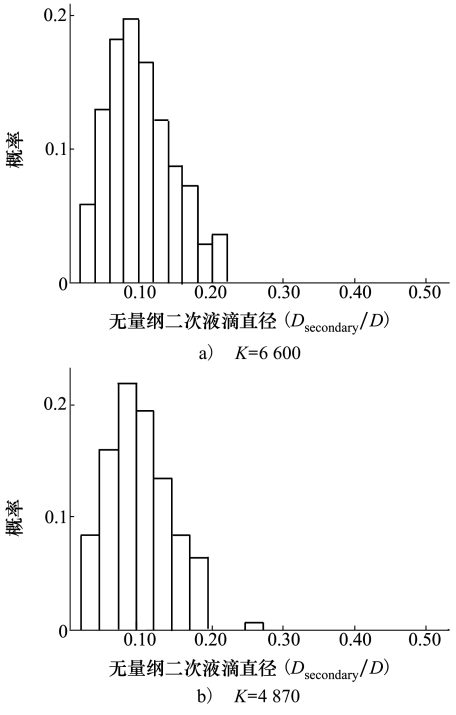


图 9 二次液滴无量纲直径的概率分布图

在较大工况范围内进行大量的冷液滴/热液膜碰撞试验,通过统计分析建立了不同飞溅参数条件下二次液滴的无量纲直径概率分布直方图,基于此计算出对应不同飞溅参数下的 a 和 b 数值,它们之间的关系如图 10 所示。根据图 10 拟合出 a 和 b 与飞溅参数之间的关系分别为

$$a = 0.03 \times K - 55 \quad (2\,200 < K < 7\,000) \tag{6}$$

$$b = 0.225 \times (K/1\,000) + 0.8 \quad (2\,200 < K < 7\,000) \tag{7}$$

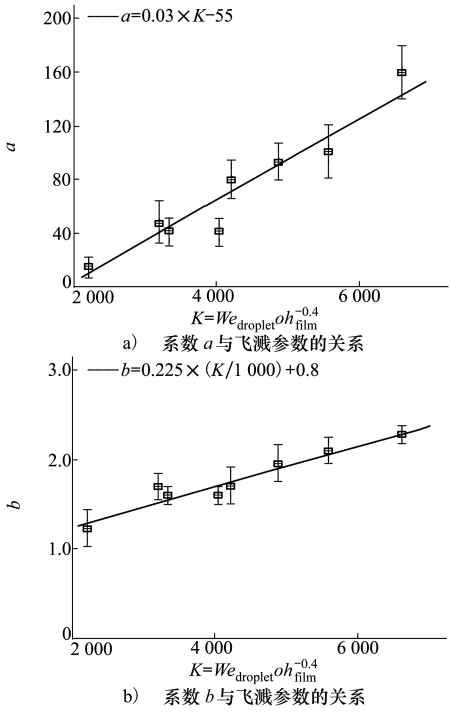


图 10 系数 a,b 与飞溅参数之间的关系

为获得二次液滴的温度,对冷液滴/热液膜试验中红外摄像机拍摄的图像进行处理分析,获取二次液滴温度 T_{sd} 并将其无量纲化为

$$T_{sd}^{*} = \frac{T_{sd} - T_d}{T_f - T_d} \tag{8}$$

式中:T_{sd}^{*} 为无量纲化二次液滴温度;T_d 为冷液滴温度;T_f 为液膜温度。当无量纲二次液滴温度 T_{sd}^{*} 数值为 1 时,说明二次液滴温度与液膜温度一致;当无量纲二次液滴温度 T_{sd}^{*} 数值为 0 时,说明二次液滴温度与碰撞液滴温度一致。

对较大工况范围试验结果中的二次液滴温度及直径进行统计并做无量纲处理,给出图 11 所示的无量纲二次液滴温度与无量纲直径之间的关系。从图中可以看出,无量纲二次液滴温度均在 0.9 以上,表明二次液滴的温度与液膜的温度较为接近,尤其当二次液滴的无量纲直径小于 0.1 时,大多数二次液滴温度与热液膜温度一致;另外,当二次液滴的无量纲直径大于 0.1 时,无量纲二次液滴温度随着无量纲直径增加略有减小。结合上述分析及图 11,笔者提出无量纲二次液滴温度计算公式为

$$\begin{cases} T_{sd}^* = 1 \ (D_{sd}^* \leqslant 0.1) \\ T_{sd}^* = -D_{sd}^* + 1.1 \ (0.1 \leqslant D_{sd}^* \leqslant 0.2) \\ T_{sd}^* = 0.9 \ (0.2 < D_{sd}^* \leqslant 0.3) \end{cases} \quad (9)$$

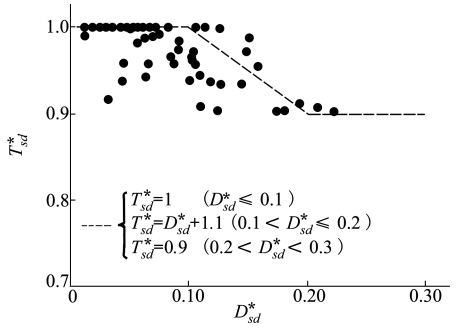


图 11　二次液滴无量纲温度与二次液滴无量纲直径之间的关系

4　结　论

本文设计制作了冷液滴/热液膜碰撞试验装置,并开展了冷液滴/热液膜试验,通过分析试验结果提出了冷液滴/热液膜碰撞形态辨识准则,建立了冷液滴/热液膜碰撞后产生二次液滴的数量、尺寸和二次液滴温度与工况条件的无量纲关系。本文的具体研究结论如下:

1) 冷液滴/热液膜碰撞后有碰并、冠状液膜成形及溅射 3 种形态,本文基于大量试验工作提出的冷液滴/热液膜碰撞形态辨识准则为:当 $K>2\ 100$ 时,冷液滴/热液膜的碰撞形态为溅射;当 $800<K<2\ 100$时,冷液滴/热液膜的碰撞形态为冠状液膜成形;当 $K<800$ 时,冷液滴/热液膜的碰撞形态为碰并。

2) 二次液滴数量随着飞溅参数的增加而增加;二次液滴的无量纲直径分布在 0~0.3 的范围内,二次液滴无量纲直径概率密度分布符合威布尔分布,其概率密度分布函数中的系数仅取决于飞溅参数。

3) 二次液滴的温度与液膜的温度较为接近,且二次液滴的无量纲温度均在 0.9 以上。

参考文献:

[1] WORTHINGTON A. On the Forms Assumed by Drops of Liquids Falling Vertically on a Horizontal Plate[J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1876, 25: 261-272

[2] REIN M. Phenomena of Liquid Drop Impact on Solid and Liquid Surfaces[J]. Fluid Dynamics Research, 1993, 12(2): 61-93

[3] COSSALI G E , COGHE A , MARENGO M . The Impact of a Single Drop on a Wetted Solid Surface[J]. Experiments in Fluids, 1997, 22(6): 463-472

[4] TROPEA C, MARENGO M. The Impact of Drops on Walls and Films[J]. Multiphase Science Technology, 1999, 11(1): 1-20

[5] RIOBOO R , BAUTHIER C , CONTI J , et al. Experimental Investigation of Splash and Crown Formation during Single Drop Impact on Wetted Surfaces[J]. Experiments in Fluids, 2003, 35(6): 648-652

[6] OKAWA T , SHIRAISHI T , MORI T . Production of Secondary drops During the Single Water Drop Impact onto a Plane Water Surface[J]. Experiments in Fluids, 2006, 41(6): 965-974

[7] ALGHOUL S K, EASTWICK C N, HANN D B. Normal Droplet Impact on Horizontal Moving Films: an Investigation of Impact Behaviour and Regimes[J]. Experiments in Fluids, 2011, 50(5): 1305-1316

[8] RAY B, BISWAS G, SHARMA A. Regimes during Liquid Drop Impact on a Liquid Pool[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2015, 768: 492-523

[9] 郭加宏,戴世强,代钦. 液滴冲击液膜过程实验研究[J]. 物理学报,2010,59(4): 2601-2609
GUO Jiahong, DAI Shiqiang, DAI Qin. Experimental Research on the Droplet Impacting on the Liquid Film[J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(4): 2601-2609 (in Chinese)

[10] 方龙,陈国定. 冷液滴/热液池碰撞混合及温度特性研究[J]. 物理学报,2019,68(23): 1-14
FANG Long, CHEN Guoding. The Temperature Charateristics of Droplet Impacting on Static Hot Pool[J]. Acta Physica Sinica, 2019,68(23): 1-14 (in Chinese)

[11] 李大树,仇性启,郑志伟. 液滴碰撞液膜润湿壁面空气夹带数值分析[J]. 物理学报,2015,64(22): 343-351
LI Dashu, QIU Xiqin, ZHENG Zhiwei. Numerical Analysis on Air Entrapment during Droplet Impacting on a Wetted Surface [J]. Acta Physica Sinica ,2015,64(22): 343-351 (in Chinese)

[12] LENG L, JONG L. Splash Formation by Spherical Drops[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2001, 427: 73-105

[13] BISIGHINI A, COSSALI G E, TROPEA, et al. Crater Evolution after the Impact of a Drop onto a Semi-Infinite Liquid Target [J]. Physical Review E, 2010, 82(3): 036319

[14] AGBAGLAH G, THORAVAL M J, THORODDSEN S T, et al. Drop Impact into a Deep Pool: Vortex Shedding and Jet Formation[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2015, 764: R1

[15] HANN D B, CHERDANTSEV A V, MITCHELL A, et al. A Study of Droplet Impact on Static Films Using the BB-LIF Technique[J]. Experiments in Fluids, 2016, 57(4): 46

Study of Morphology and Secondary Droplet Behaviors during Droplets Impacting on Static Hot Film

FANG Long, CHEN Guoding

(School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The phenomenon of droplet impacting on hot film exists widely in nature and engineering applications. Considering limitations in current researches, an experimental setup to record the process of droplets impacting on hot film was built in this paper. Lots of experiments have been done and then the transitional threshold was established to determine impingement outcomes. The number of secondary droplets and the temperature of the secondary droplet are investigated based on the experimental results. The results show that impingement outcomes can be determined by the splashing parameter provided in this paper. The number of secondary droplets increases with the splash parameter, the probability distribution function of secondary droplet diameters follows the Weibull distribution. The temperature of secondary droplets is close to the hot film and almost all secondary droplets' temperature is above 90% of the hot film.

Keywords: droplet; hot film; experiment; transitional threshold; secondary droplet; temperature; Weibull

© 2019 Journal of Northwestern Polytechnical University.

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.