

# 液滴飞溅动力学

郝继光 著

 **北京理工大学出版社**  
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

# 前言

液滴撞击固体表面的现象广泛存在于自然界和一系列工农业应用中，实例包括气溶胶形成、雨滴撞击岩石土壤、超冷大雨滴撞击飞机翼面成冰、喷墨打印、微流体加工、三维打印、液体燃料燃烧、喷涂、冷却、农药喷洒等。液滴撞击固体表面后，可能形成飞溅、沉积或反弹现象。由于液滴撞击表面后形成的现象及其机理并未被充分理解，成为众多基于液滴的应用技术提升的瓶颈，因而液滴撞击表面现象引起了国内外学者的广泛关注。从 Worthington 于 1876 年首次关注该现象以来，学者们已获得大量研究成果。其中，液滴在固体表面的飞溅是一个非常美丽又吸引人的现象，涉及液体、气体和固体三相间的高速动力学，其形成机理迄今尚未形成共识，因此对其开展研究可极大提升对其形成机理的理解，为各种应用下的精细调制提供依据，从而提升相关的各项工农业应用技术。

本书旨在为相关科研人员系统地提供液滴撞击研究的背景和方法，并总结笔者近年来对于液滴飞溅的机理研究，希望起到抛砖引玉并缩短研究周期的作用。全书共分 7 章：

第 1 章，绪论。系统地介绍了液滴撞击研究的背景、国内外研究现状；简述了本书的主要研究内容。

第 2 章，研究方法。介绍了液滴撞击固体表面的实验方法、液滴飞溅的理论分析方法；列出了部分计算液滴最大铺展直径的模型。

第 3 章，表面速度对液滴飞溅的影响。发现了降低环境压强可以抑制液滴上游强化飞溅；测量了一系列条件下的临界参数；解释了液滴非对称飞溅及其

抑制机理；扩展了于2014年提出的液滴对称飞溅临界参数预测模型。

第4章，表面粗糙度对液滴飞溅的影响。发现了与前人共识相悖的现象；测量了系列条件下形成皇冠型飞溅和微液滴飞溅的临界参数；解释了轻微粗糙表面对不同表面张力液滴飞溅的影响。

第5章，表面倾斜角度对液滴飞溅的影响。研究了液滴在不同环境压力下撞击倾斜表面的飞溅；获得了一系列条件下的飞溅临界参数；建立了一个理论模型；发现了液膜前端速度是触发飞溅的关键参数。

第6章，非对称液滴飞溅。发展了一种新的观测方法，并由此发现了三个新现象；测量了飞溅区域随一系列参数的变化；将原有的二维模型扩展到三维空间，进一步确认了液膜前端速度对飞溅形成的关键作用。

第7章，总结与展望。对全书工作进行了总结，对存在的问题进行了分析，对未来需要进一步开展的研究进行了展望。

本书内容在研究过程中，获得了国家自然科学基金委的基金（编号：51406012）支持；同时，笔者得到了北京理工大学宇航学院胡更开教授、加拿大西安大略大学机械与材料工程系 J. M. Floryan 教授、加拿大英属哥伦比亚大学机械工程系 S. I. Green 教授长期的大力支持和帮助，在与他们大量具有启发性的讨论中，笔者受到了极大的鼓舞和启示，从而得以完成这些研究；北京理工大学宇航学院马少鹏教授、田强教授和马沁巍博士无私地为本研究提供了高速摄影设备，若没有这一强力支持，本书所列研究将完全无法开展；研究生吴志鹤、鲁杰、李亚磊和徐龙整理了参考文献列表，研究生鲁杰实施了第5章和第6章的部分实验；在撰写过程中，笔者参考了大量文献，同时得到了有关单位的大力支持和帮助，难以一一列出，谨在此一并表示衷心的感谢。

虽然笔者在本书的撰写过程中做了种种努力，力求以更高的质量将本书呈现给读者，然而由于笔者水平有限，同时时间仓促，书中可能存在不足之处，敬请广大读者批评指正。

郝继光

2019年9月

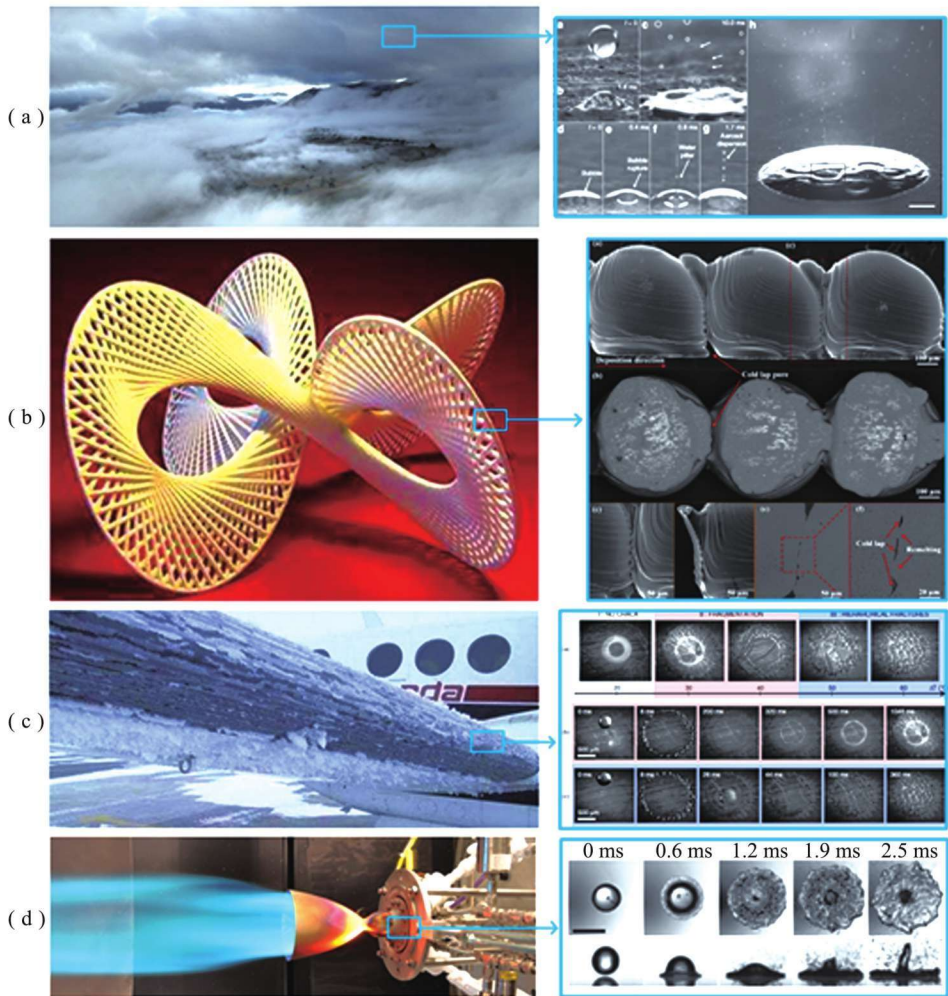


图 1-1 自然界和工农业应用实例（左）及其中的液滴碰撞现象（右）

- (a) 云层及液滴碰撞形成构成云层的气溶胶<sup>[5]</sup>；(b) 三维打印及材料液滴的碰撞<sup>[6]</sup>；  
 (c) 翼面结冰及水滴的成冰过程<sup>[7]</sup>；(d) 液体火箭发动机燃烧及燃烧室内液滴撞过热壁面<sup>[8]</sup>

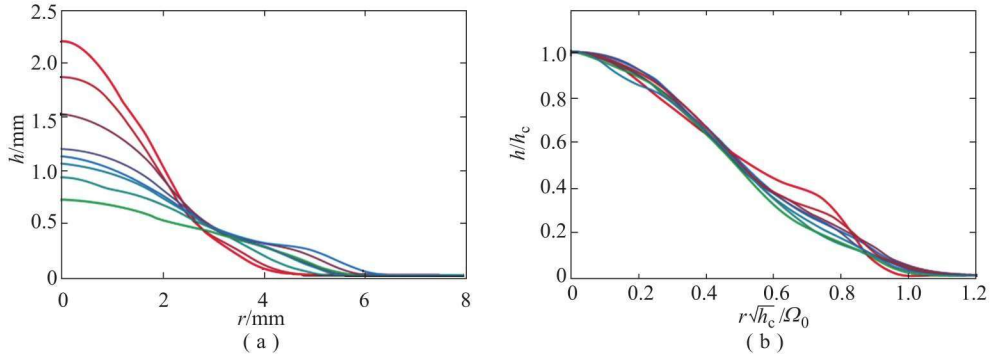


图 1-7 液滴撞击固体表面后中心截面轮廓随时间的变化<sup>[80]</sup>

(a) 实验轮廓; (b) 式 (1-2) 重新校准的轮廓

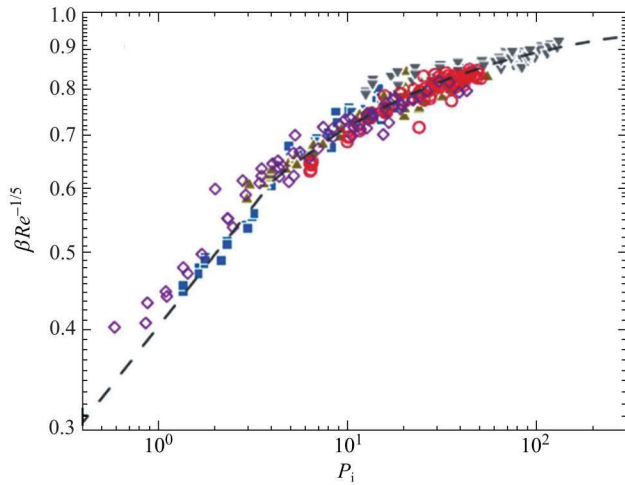


图 1-9 不同液滴以不同速度碰撞实验结果 (符号) 及式 (1-4) 的结果 (虚线)<sup>[72]</sup>

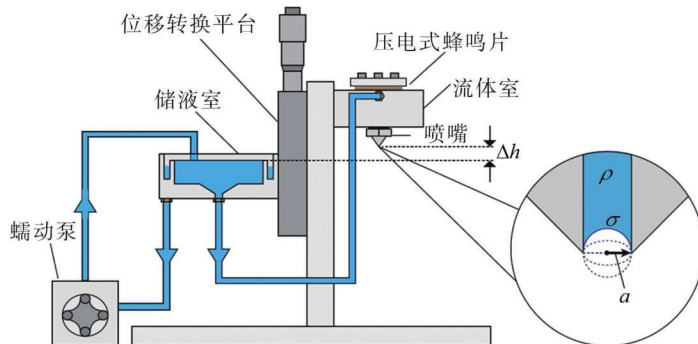


图 2-6 压电式 DOD 装置示意图<sup>[14]</sup>

$\rho$ —液滴密度;  $\sigma$ —液滴表面张力系数;  $a$ —喷嘴出口半径

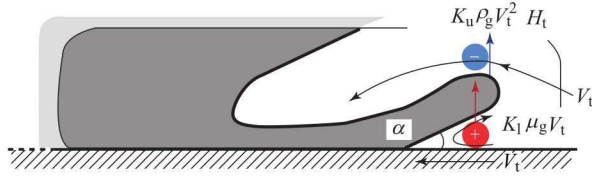


图 2-22 液膜前端作用的气动力示意图<sup>[25]</sup>

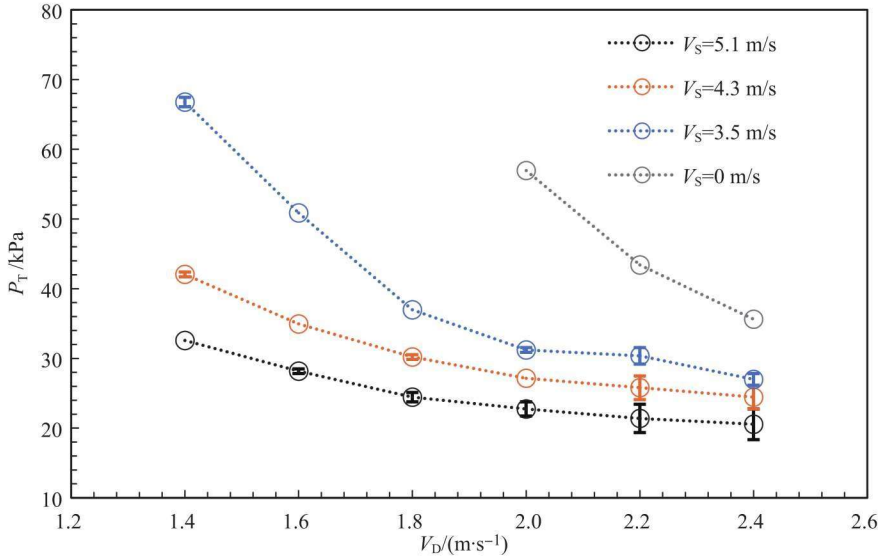


图 3-10 临界压强与液滴撞击速度和表面运动速度的关系曲线 ( $D=3.1$  mm)

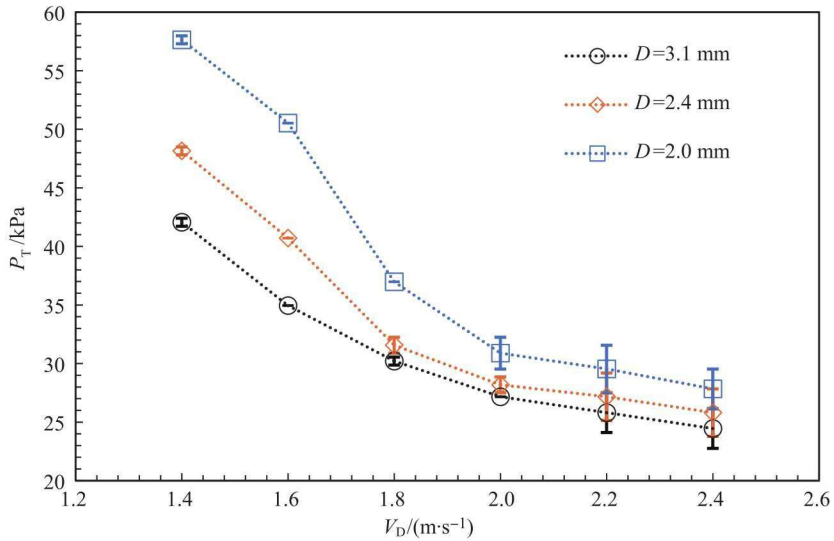


图 3-11 临界压强与液滴撞击速度和液滴直径的关系曲线 ( $V_S = 4.3$  m/s)

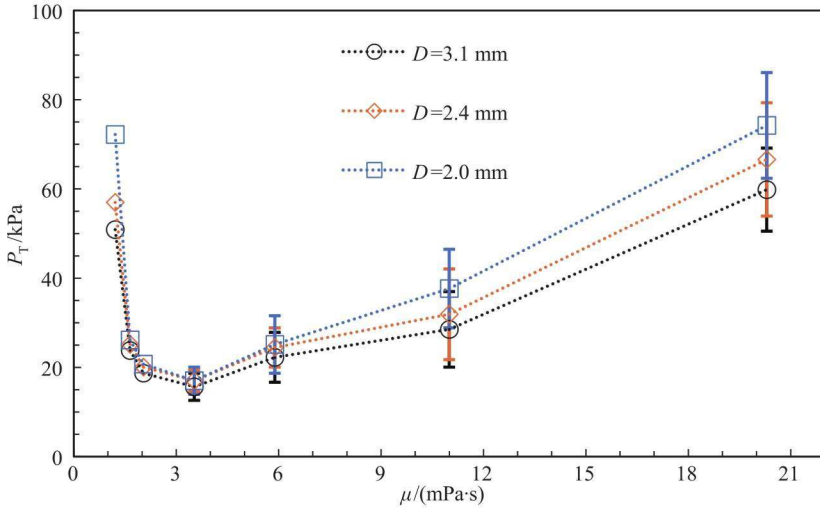


图 3-12 临界压强与液滴黏性和液滴直径的关系曲线 ( $V_D=1.6$  m/s;  $V_S=3.5$  m/s)

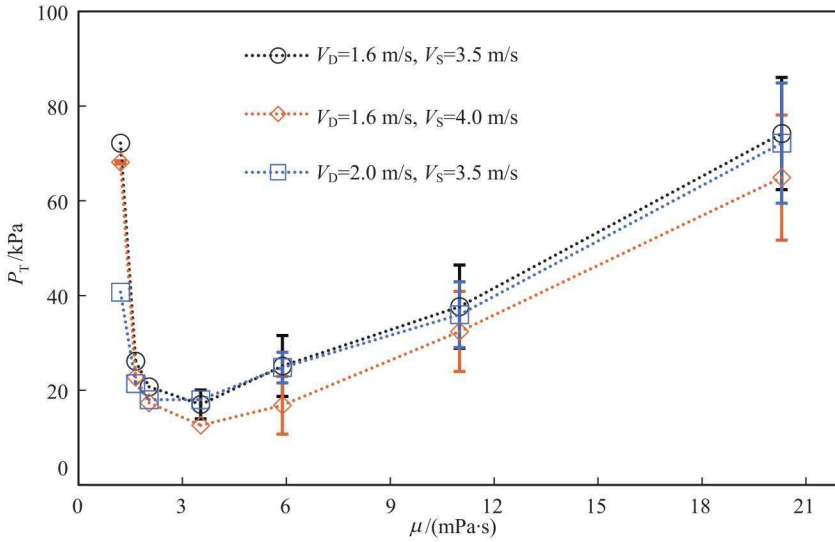


图 3-13 临界压强与液滴黏性、液滴撞击速度和表面运动速度的关系曲线 ( $D=2.0$  mm)

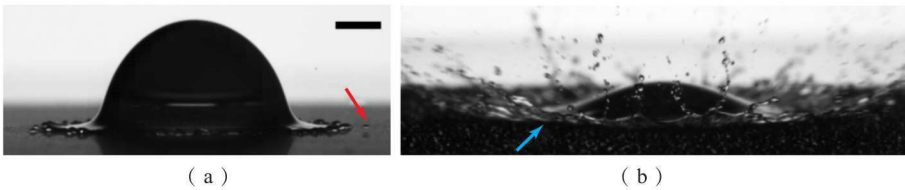


图 4-3 水液滴撞击粗糙表面形成的两种典型飞溅

(a) 微液滴飞溅; (b) 皇冠型飞溅

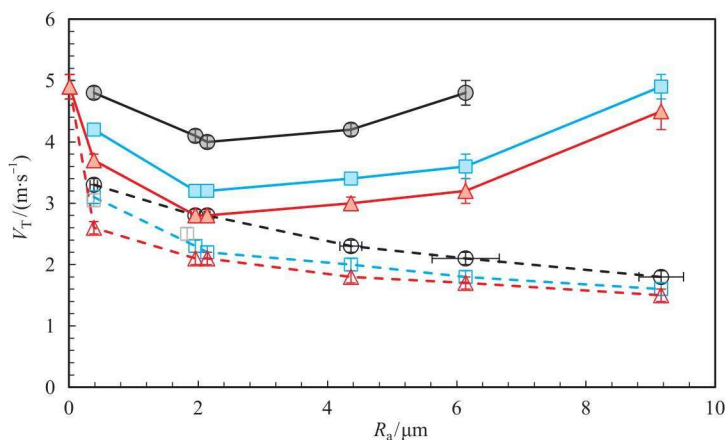


图 4-21 不同直径水液滴的临界速度随表面粗糙度变化的曲线

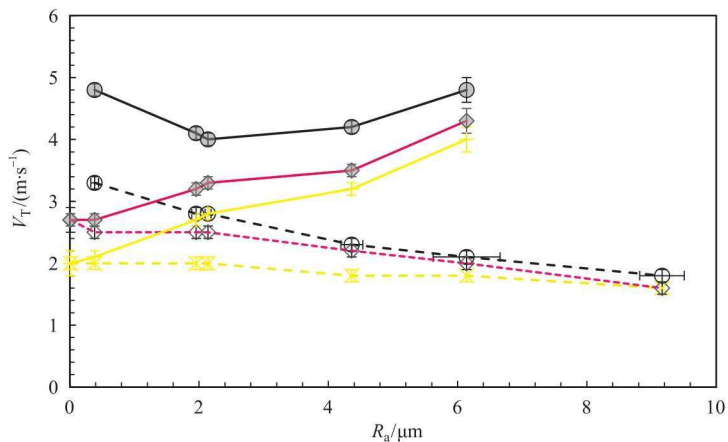


图 4-22 不同表面张力系数液滴的临界速度随表面粗糙度变化的曲线

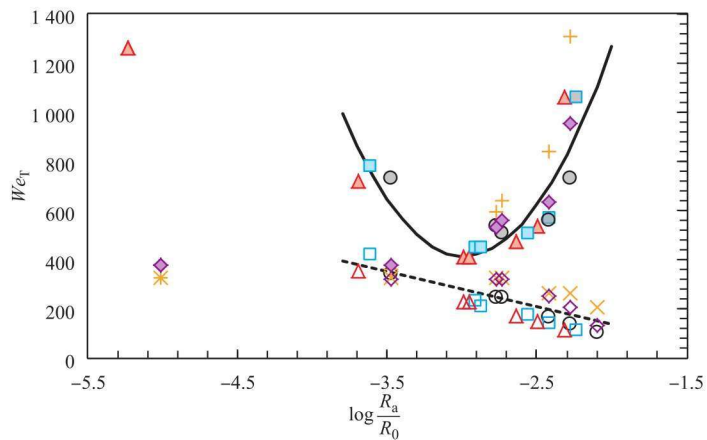


图 4-25 仅对不同直径水液滴  $V_{T2}$  计算出的  $We_T$  拟合的曲线

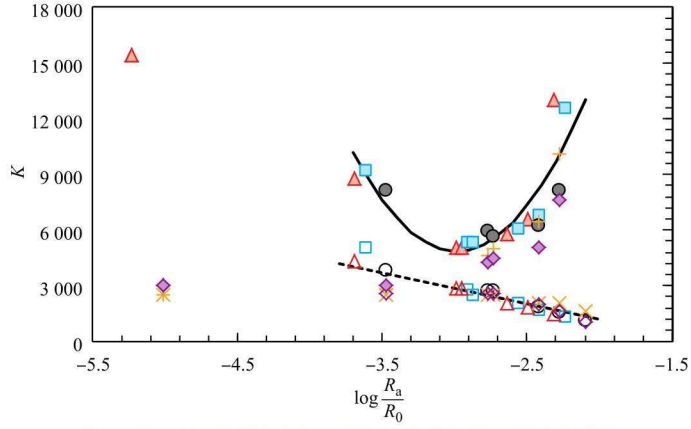


图 4-26 仅对不同直径水液滴  $V_{T2}$  计算出的  $K$  拟合的曲线

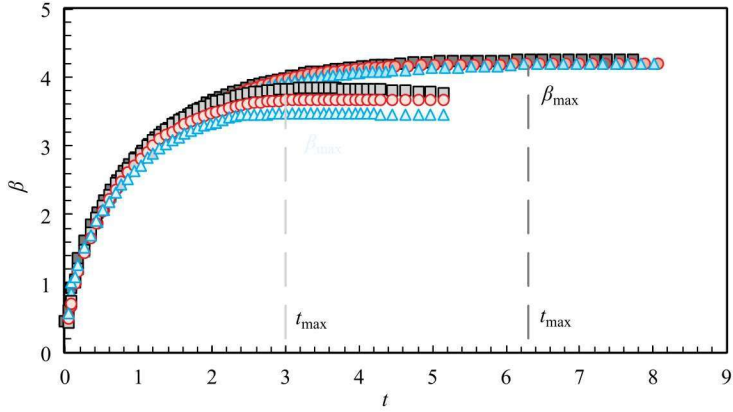


图 4-27 水液滴和乙醇液滴撞击不同粗糙表面后  $\beta$  随  $t$  变化的曲线

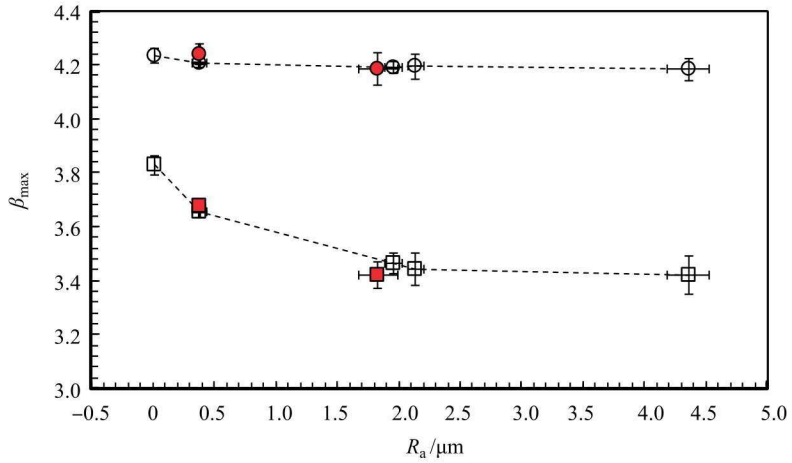


图 4-28 液滴最大铺展比例  $\beta_{\max}$  随表面粗糙度变化的曲线

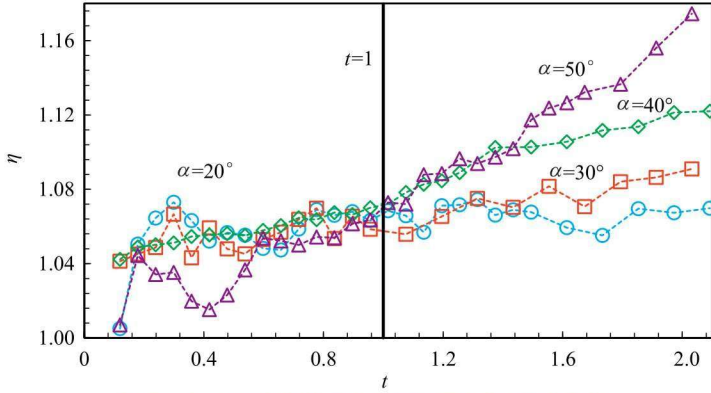


图 6-11 液滴铺展直径比随无量纲时间的变化曲线

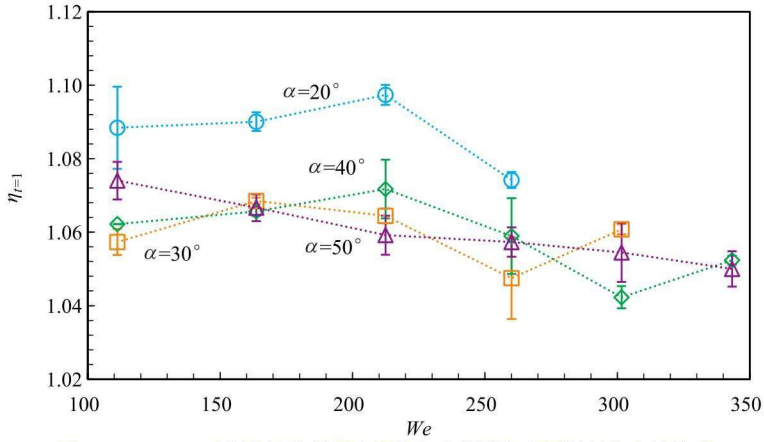


图 6-12  $t=1$  时刻的液滴铺展直径比与韦伯数和表面倾斜角度的关系

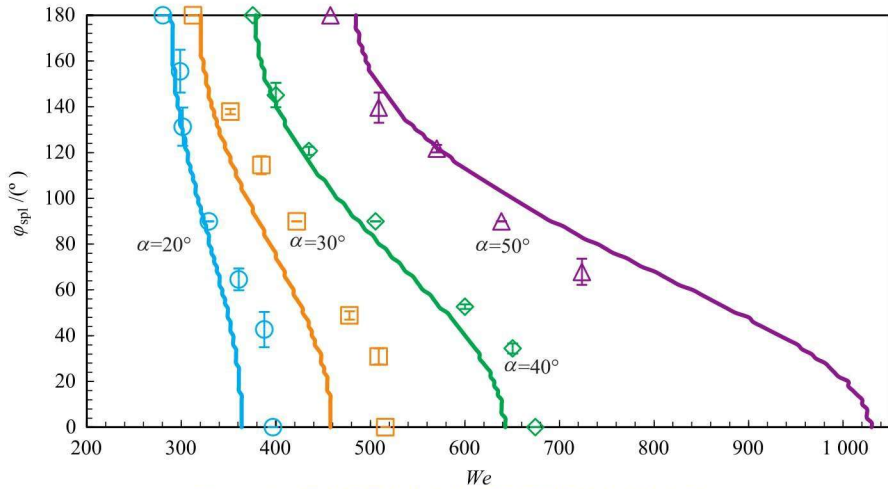


图 6-13 径向飞溅角与韦伯数及表面倾斜角度的关系

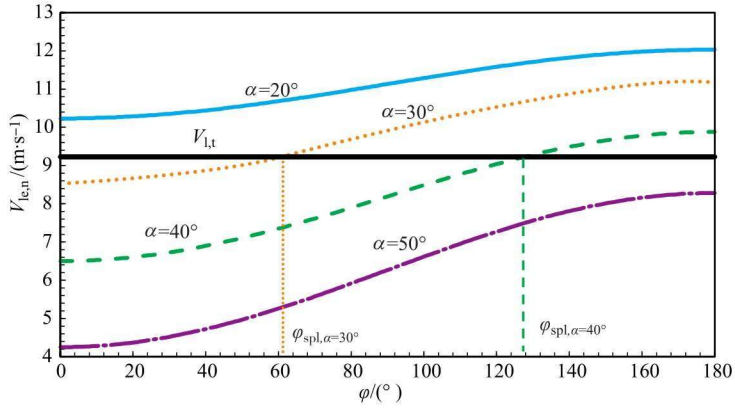


图 6-14 液膜前端速度与径向角、表面倾斜角度的关系

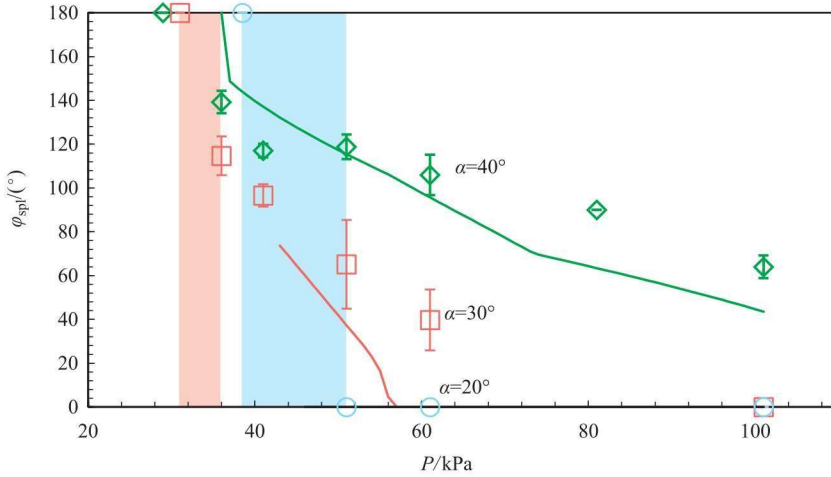


图 6-15 径向飞溅角  $\varphi_{spl}$  随环境压强  $P$  和表面倾斜角度  $\alpha$  的变化

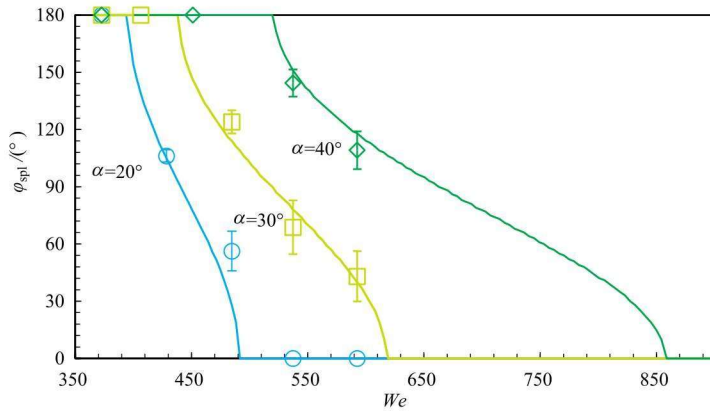


图 6-16 径向飞溅角  $\varphi_{spl}$  随韦伯数  $We$  和表面倾斜角度  $\alpha$  的变化

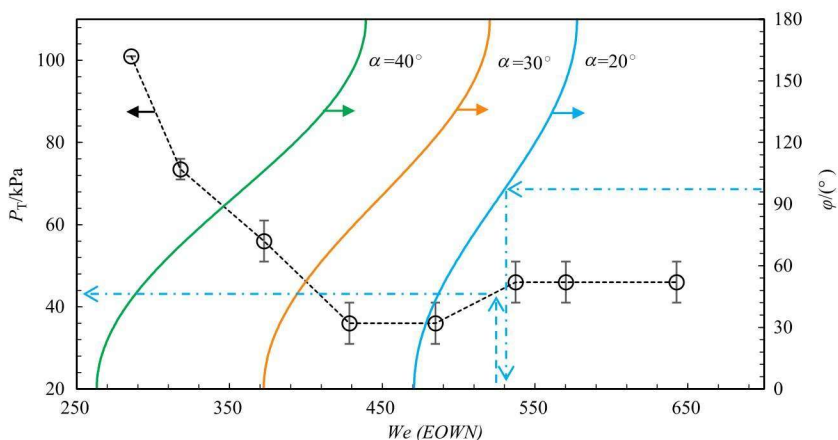


图 6-17 垂直撞击的临界压强  $P_T$  及当地等效垂直撞击韦伯数 ( $EOWN$ )

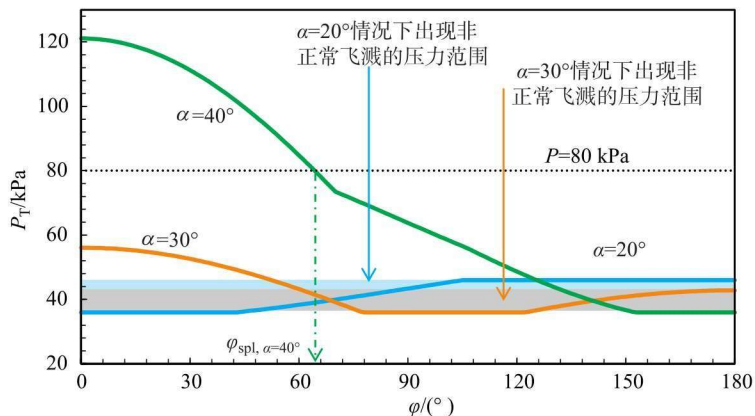


图 6-19 理论临界压强与径向角的关系曲线

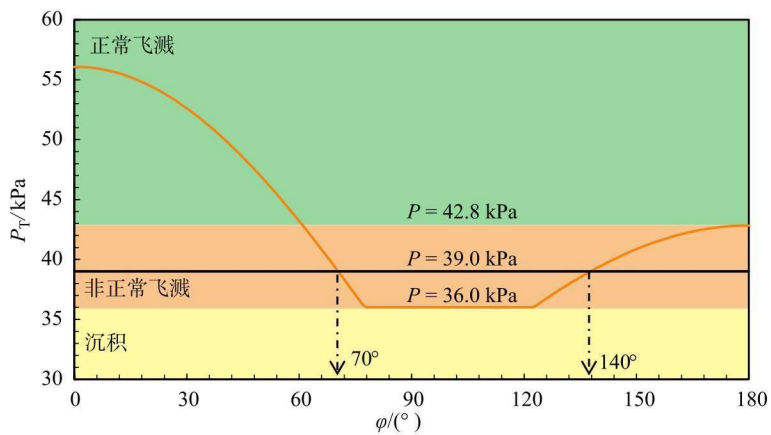


图 6-20 理论临界压强与径向角的关系曲线 ( $\alpha = 30^\circ$ )

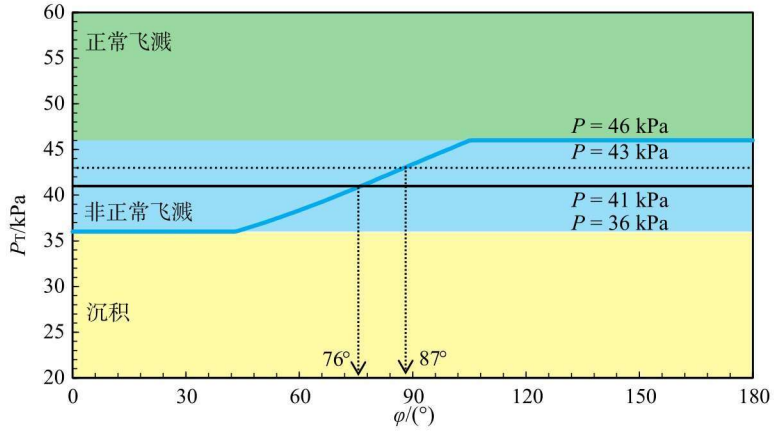


图 6-21 理论临界压强与径向角的关系曲线 ( $\alpha=20^\circ$ )

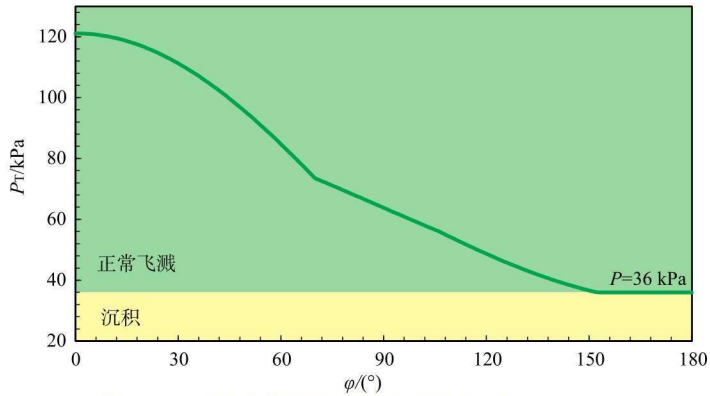


图 6-22 理论临界压强与径向角的关系曲线 ( $\alpha=40^\circ$ )

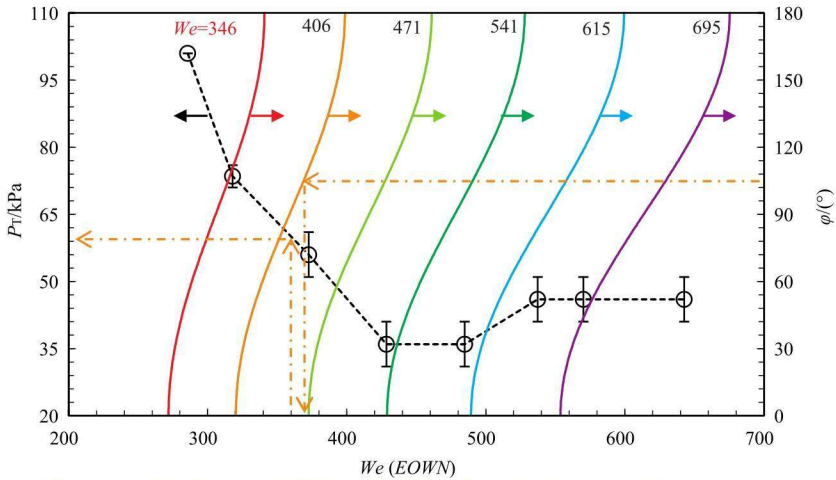


图 6-23 垂直撞击的临界压强  $P_r$  及当地等效垂直撞击韦伯数  $EOWN$  ( $\alpha=20^\circ$ )

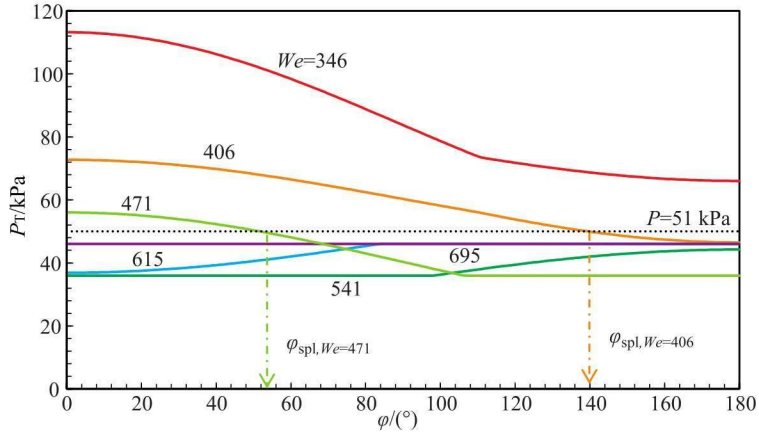


图 6-24 理论临界压强与径向角的关系曲线 ( $\alpha = 20^\circ$ )

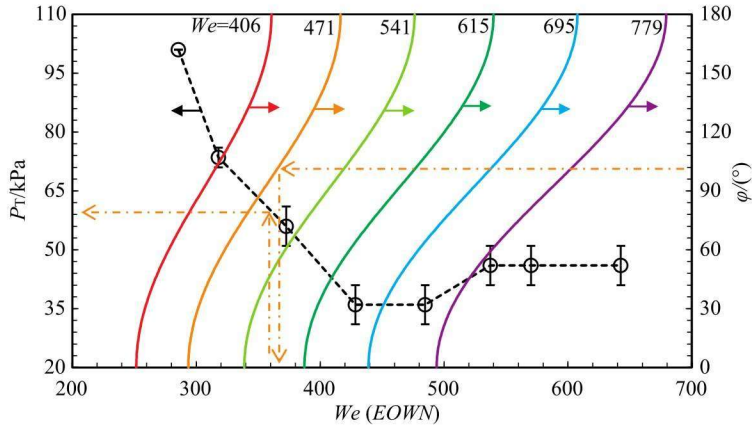


图 6-25 垂直撞击的临界压强  $P_r$  及当地等效垂直撞击韦伯数  $EOWN$  ( $\alpha = 30^\circ$ )

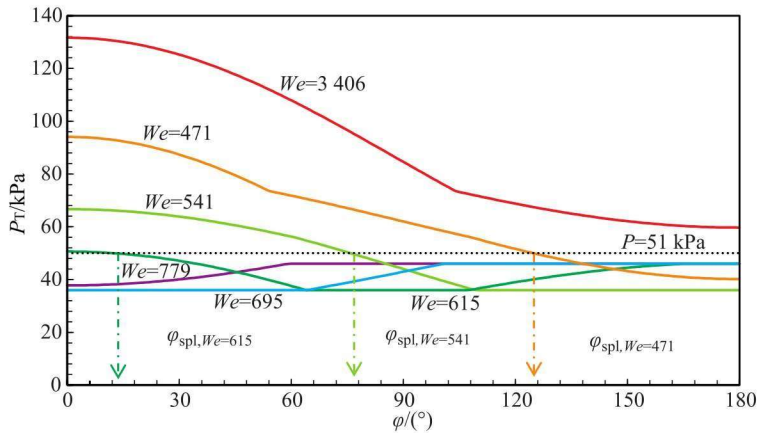


图 6-26 理论临界压强与径向角的关系曲线 ( $\alpha = 30^\circ$ )

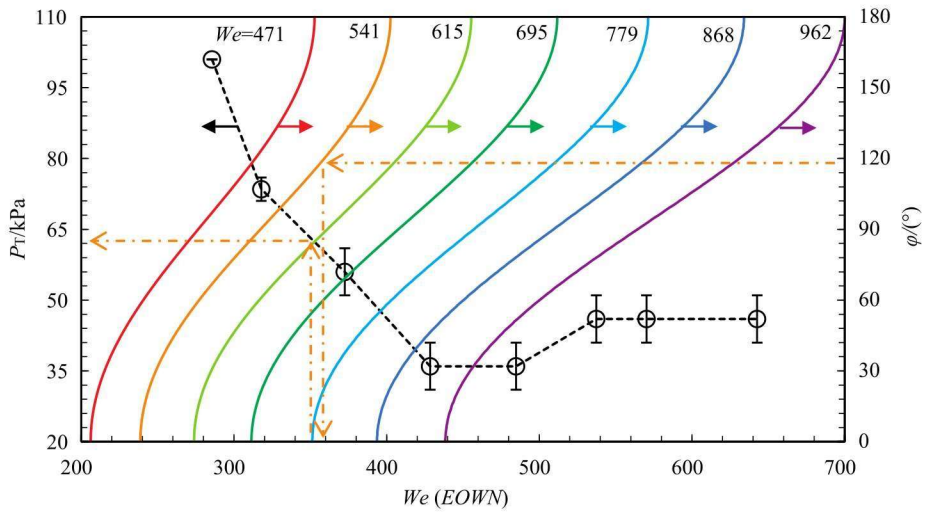


图 6-27 垂直撞击的临界压强  $P_T$  及当地等效垂直撞击韦伯数  $EOWN$  ( $\alpha = 40^\circ$ )

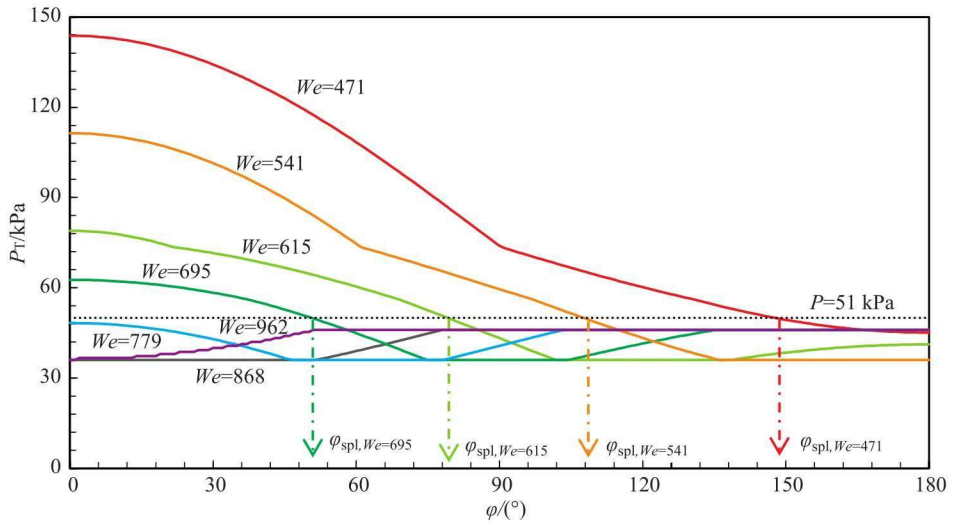


图 6-28 理论临界压强与径向角的关系曲线 ( $\alpha = 40^\circ$ )

# 目 录

第 1 章 绪论 .....	001
1.1 研究背景与意义 .....	002
1.2 国内外研究现状 .....	005
1.2.1 液滴飞溅 .....	005
1.2.2 液滴铺展 .....	009
1.3 研究内容 .....	013
参考文献 .....	014
第 2 章 研究方法 .....	021
2.1 液滴撞击实验方法 .....	022
2.1.1 液滴产生方法 .....	022
2.1.2 液滴撞击速度建立方法 .....	028
2.1.3 常用液体及其属性 .....	029
2.1.4 改变环境气体属性的实验方法 .....	031
2.1.5 表面属性处理的方法 .....	034
2.1.6 实验观测方法 .....	042
2.2 液滴撞击理论分析方法 .....	045
2.2.1 基于惯性力学的飞溅参数模型 .....	046
2.2.2 基于 Kelvin - Helmholtz 不稳定性的液滴飞溅理论 .....	046
2.2.3 基于液膜底部气体薄层动力学的飞溅理论 .....	047

## 液滴飞溅动力学

2.2.4	基于液膜受到的空气动力的飞溅理论 .....	049
2.2.5	计算最大铺展直径的模型 .....	051
2.3	小结 .....	053
	参考文献 .....	053
<b>第3章</b>	<b>表面速度对液滴飞溅的影响</b> .....	<b>061</b>
3.1	研究概况 .....	062
3.2	实验设置 .....	064
3.3	实验现象 .....	066
3.3.1	通过复现前人实验结果来验证本实验设置的正确性 .....	067
3.3.2	不同环境压强对液滴碰撞结果的影响 .....	067
3.3.3	不同撞击速度对液滴碰撞结果的影响 .....	069
3.3.4	不同液滴直径对液滴碰撞结果的影响 .....	070
3.3.5	不同黏性对液滴碰撞结果的影响 .....	071
3.4	定量研究 .....	072
3.4.1	乙醇液滴撞击静止表面 .....	072
3.4.2	乙醇液滴撞击运动表面 .....	073
3.4.3	乙醇甘油混合溶液液滴撞击运动表面 .....	074
3.5	机理分析 .....	075
3.6	小结 .....	080
	参考文献 .....	081
<b>第4章</b>	<b>表面粗糙度对液滴飞溅的影响</b> .....	<b>085</b>
4.1	研究概况 .....	086
4.2	实验设置 .....	091
4.3	实验现象 .....	094
4.3.1	表面粗糙度对高速水液滴撞击结果的影响 .....	094
4.3.2	撞击速度对水液滴撞击结果的影响 .....	095
4.3.3	表面张力系数对液滴撞击结果的影响 .....	100
4.3.4	撞击速度对乙醇液滴撞击结果的影响 .....	105
4.4	临界撞击速度 .....	109
4.4.1	测试方法说明 .....	109
4.4.2	测试结果 .....	110
4.4.3	结果分析 .....	114
4.5	液滴在不同粗糙表面的铺展 .....	117