

# 液滴撞击固体表面时的流体动力特性 实验研究

毛靖儒 施红辉 俞茂铮 蔡颐年  
(西安交通大学能源与动力工程学院, 西安 710049)

**摘要** 采用高速摄影机及胶片图像分析, 系统研究了水滴撞击光滑固体平表面及锯齿状固体表面时的流体动力特性. 试验结果表明, 水滴撞击平表面时的流体动力过程可分为相互力学作用及压缩波传播和流体散流和破裂两个阶段; 水滴撞击锯齿状表面时与撞击平表面时的流体动力现象有较大差别.

**关键词** 液固撞击, 流体动力特性, 高速摄影技术

## 1 引言

液滴与固体表面的碰撞现象在许多工程领域及自然界广泛存在<sup>[1]</sup>. 例如湿蒸汽汽轮机中水滴与动叶片的撞击, 喷雾流与固体表面的碰撞等. 液滴撞击固体表面时产生的撞击应力及撞击时发生的液体变形与散流不但会引起固体材料的侵蚀, 而且对有关的工艺及生产过程也会产生直接影响<sup>[2]</sup>. 由于液滴撞击固体表面时产生的变形、散流及破裂等流体动力现象的物理机制甚为复杂, 而且撞击过程极为短促, 因此作者试图利用高速摄影及图象分析技术研究流体动力过程特点, 从而为力学分析模型的建立及材料侵蚀机理的阐释提供一定依据. 本文介绍水滴撞击固体平表面及粗糙表面时的流体动力特性实验结果.

## 2 实验结果与讨论

实验装置及方法已在文[2]中详述. 图1给出了水滴撞击光滑平表面时的流动过程图象. 实验测得的水滴直径为4mm, 水滴对表面的撞击初速度为3.85m/s, 摄影速度为16000张/s(fps). 由于边缘侧向射流的厚度很薄, 一般难以观察到, 所以我们调整玻璃平板与背景光光轴之间有一夹角, 以充分利用背景光衬托射流, 并增加射流在成像面上的投影. 照片上显示的射流厚度约0.15mm, 而实际的厚度要小于这个数值. 玻璃板上的亮线显示了玻璃平板在背景光光轴方向上倾斜的高度, 该夹角远小于照片上的玻璃平板的15°的倾斜角.

在开始几幅照片中, 玻璃表面上的影子是底光源照出的假像, 水滴与表面的实际接触线可根据后

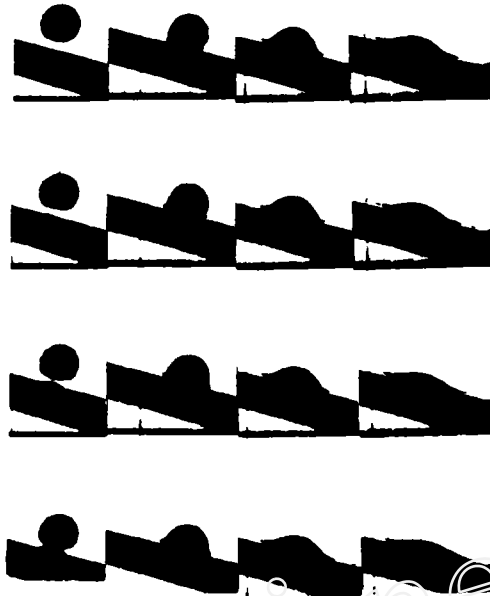


图1 水滴撞击光滑固体表面过程

来拍摄到的射流所处的位置来决定, 在开始的几幅中, 水滴的底部被处在另一端(靠近背景光源)的玻璃毛边所遮挡, 水滴与表面的接触位置可用延长圆弧线来确定.

从照片上可以看出, 水滴撞击固体表面的过程可分为两个阶段: 1) 水滴与表面接触后, 仿佛被削去了部分球冠, 而其余部分仍保持球面形状. 此时液固接触区为非流动区. 边缘侧向射流还未发生; 2) 边缘射流突然发生, 液固接触区随着扩展. 图2中的L曲线表示了液固接触区宽度随时间的变化过程; 另外两条为接触边缘扩展速度随时间而逐渐降低的情况. 射流产生时, 向右的射流速度为12m/s, 向左的射流速度约为14m/s, 远超过水滴的撞击速度3.85m/s. 这一事实说明, 在撞击的第一阶段完成之时, 在液固接触区边缘必然形成了高压, 然后才会有第二阶段开始时的速度很高的边缘侧向射流.

上述撞击过程两个阶段的形成和产生可用图3所示的物理模型来解释. 图中曲线1、2、3分别

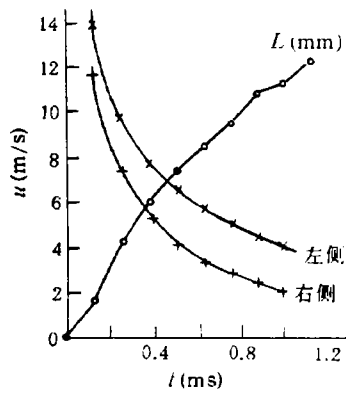


图2 水滴撞击光滑平表面时的扩展特性

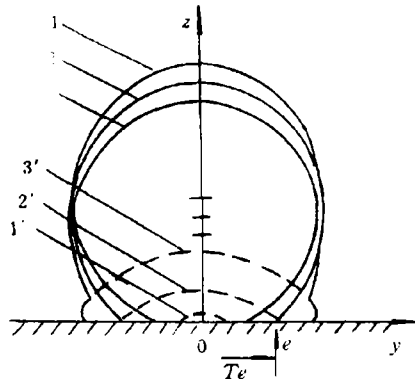


图3 水滴撞击固体表面的物理过程

1—— $t_0$ 时刻, 2—— $t$ 时刻, 3—— $t_3$ 时刻,  
1'、2'、3'——对应3个时刻下的压缩波波前

表示水滴撞上固体表面后不同时刻的水滴外形, 曲线1'、2'、3'分别表示对应这3个时刻的压缩波波前. 水滴撞上表面后, 水滴内部产生压缩波, 将水滴分为低压区和高压区(压缩波波前与固体表面包围的区域). 在初始阶段, 水滴与固体表面的接触区扩展得比压缩波波前快, 如在 $t_0$ 时刻, 压缩波波前尚未赶上接触边缘. 但是到了 $t$ 时刻, 压缩波波前赶上接触边缘. 随后压缩波脱体, 边缘附近流体的高压已使得自由面不能再维持原来的位置, 于是速度很高的边缘射流就产生了. 到了 $t_3$ 时刻, 压缩波波前已脱体较远, 水滴亦发生较大的变形. 上述过程的力学模型、撞击压力分布及验证详见文[3].

在许多生产实际场合, 液滴撞击的是粗糙固体表面. 例如材料经受液滴长期撞击被侵蚀剥落后, 表面即成为凸凹不平的粗糙表面. 实验时采用一锯齿形的金属表面作为粗糙固体表面, 齿高约为0.73mm, 图4为水滴撞击粗糙表面的照片, 图5为扩展特性曲线. 水滴接触锯齿形表面后, 前半部逐

渐陷入齿槽, 但未见撞击平表面时的那样的侧向射流发生, 当大半液体在齿槽中散流后, 可以看出有倾斜向上的液体散流出现, 随后还有细微水滴分离出来. 刚开始散流时的液体边缘速度约6m/s左右, 比水滴与平表面撞击时的侧向射流速度小得多. 这说明, 液滴撞击粗糙表面时由于表面凸出部分起对液体分流作用会降低撞击压力, 防止高速侧向射流发生, 因而可以减弱水滴撞击材料的侵蚀作用. 这可能是材料受水滴撞击严重侵蚀后侵蚀速度会趋于平缓的原因之一.

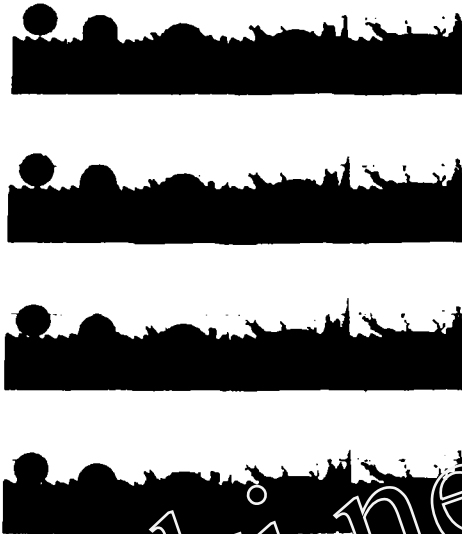


图4 水滴撞击粗糙固体平表面时的流动过程

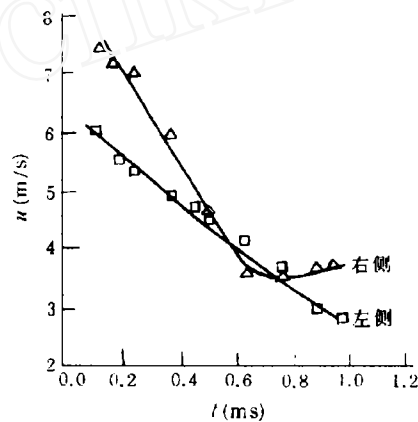


图5 水滴撞击粗糙平表面时的扩展特性

### 3 结论

液滴撞击固体表面时产生的撞击压力及压缩波的传播会引起复杂的流体动力现象, 对于液滴与固体平表面撞击的情况, 可以将碰撞过程区分为两个阶段进行力学和理论分析. 第一阶段的主要物理

机制是液固碰撞的相互力学作用及压缩波的传播。第二阶段基本上是压差引起的流体散流与破裂过程。在液滴与粗糙固体平面碰撞时, 固体表面凸起部分形状及深度会对液体的流体动力特性产生重要影响。

### 参 考 文 献

1 Engel O G. Water drop collision with solid surfaces. *J Res Nat Bur Stand*, 1955,54:281

2 施红辉, 毛靖儒, 俞茂铮, 蔡颐年. 研究水滴撞击固体表面时的流体动力学过程的实验技术. 见: 高等学校第三届工程热物理全国学术会议论文集. 西安: 西安交通大学出版社, 1990

3 施红辉, 俞茂铮, 蔡颐年. 一个新的关于液滴与固体表面高速碰撞的力学模型. 见: 多相流与传热论文集. 北京: 原子能出版社, 1989:98-105

(本文于 1994 年 8 月 16 日收到)

## 湿润剂提高煤层注水效果的机理研究

张 延 松

(煤炭科学研究总院重庆分院, 重庆 630037)

**摘要** 从煤层注水湿润煤体的机理出发, 论述了用湿润剂溶液注入煤体, 提高煤层注水效果的机理. 分析了煤层的结构及渗透介质模型; 从沟通大裂隙孔隙到死端孔隙及微孔隙, 依次建立了数学模型. 煤层注水试验和现场测试验证了湿润剂提高煤层注水效果的机理.

**关键词** 湿润剂, 煤层注水, 渗透介质

### 1 引 言

煤层注水是治理煤矿井下灾害的综合性措施. 广泛应用注水防治冲击地压、软化煤体降低切割能量. 在放顶煤开采中, 软化顶煤减少大块煤量, 提高回采率和工效. 现在应用最广泛的是煤层注水预湿煤体, 增加煤体水分, 降低煤体的产尘能力. 起到改善作业环境条件, 减少粉尘危害之目的.

目前国内外对煤层注水湿润煤体的机理研究较少. 本文通过实验室和现场实际煤层注水的研究, 系统探讨了湿润剂溶液提高煤层注水效果的机理, 为实际煤层注水提供了理论基础.

### 2 煤层的结构及渗透介质模型

#### 2.1 煤层结构

煤层大体可以认为是孔隙介质组成的煤块群和裂隙系统所组成的孔隙-裂隙结构<sup>[2]</sup>. 孔隙结构是煤在成型过程中, 排出的气体和液体形成的许多微小气孔所组成; 裂隙系统是由煤层的层理、节理和裂隙所组成, 它也是在成煤过程中形成的. 特别

是在地质构造活动的过程中, 煤层被强大的构造应力所挤压, 错动而被破碎, 形成了裂隙系统. 根据水在煤层孔隙中的流动特性将煤层中孔隙分成微孔、过渡孔、半大孔、大孔、可见孔五类(见表 1)<sup>[3]</sup>.

表 1 煤中孔隙的分类

名称	孔径 (m)	孔隙中水的流动特性
微孔	$< 10^{-8}$	扩散运动
过渡孔	$10^{-8} \sim 10^{-7}$	可以产生扩散和毛细运动
半大孔	$10^{-7} \sim 10^{-6}$	毛细运动或缓慢的层流运动
大孔	$10^{-6} \sim 10^{-4}$	强烈层流区域
可见孔	$> 10^{-4}$	层流或紊流区

#### 2.2 渗透介质模型

把裂隙和孔隙块组成的裂隙-孔隙介质看成二重结构. 即认为在空间上, 裂隙将煤层分成许多小的煤块, 每一小煤块上又有许多更微小的孔隙. 因此把煤层看成为裂隙-孔隙介质.

在裂隙中, 水为渗透层流运动; 而在小煤块的微孔隙中, 是毛细运动和扩散运动, 并且两者之间有强烈的质量传递. 由于被裂隙分割的小煤块与渗透带的尺寸相比很小, 因此在空间上可看作是连续分布的, 可用连续介质的方法来处理. 即可用沿裂隙的渗透与裂隙和多孔煤块间的液体传递的规律来描述这种介质. 由煤层的结构, 可以看出这种裂隙-孔隙介质作为研究水在煤层中的渗透是较合理的. 裂隙和孔隙煤块介质模型的特性不完全是煤层中任