

碰撞过程的高速摄影*

王明康 金一铔**

(南京大学气象系)

以往的云滴碰撞过程的模拟实验大致可以分成两种。一种是：先用憎水性表面或细丝支托一个水滴，然后下降或向上投射另一个水滴，用高速摄影法记录碰撞的过程，例如 Magono 和 Nakamura^[1]，Whelpdale 和 List^[2]，Levin 等^[3]。但是，自然界中的云滴决不是静止不动。它在下降的同时可以出现转动、振动和内环流。另一种模拟实验是：仔细调节两根毛细管的相对位置，使流出毛细管的两串水滴在一定位置上发生碰撞，用高速摄影法记录，例如 Gunn^[4]，Brazier-Smith 等^[5]。这种方法的缺点是：(1) 碰撞时两个水滴都未达到末速度，(2) 在每串水滴中，前后两个水滴之间的距离很短，后一水滴往往位于前一水滴的尾流之中。

为了使水滴很快达到末速度，Mctaggart-Cowan 和 List^[6]设计一种水滴加速器。但这种加速器只能加速一个水滴，为了模拟云滴的碰撞，必须使用两个平行的加速器，此外还必须在水平方向吹风。

本文试图在同一个锥形管中悬浮两个水滴，用高速摄影法记录其碰撞过程。

1. 实验方法

图 1 表示模拟研究的实验装置。

用锥形管悬浮水滴。管长约 20 厘米，在管顶其内径约为 6 毫米，在管底其内径收缩到约 1 毫米。空气源源不断地自下而上流过锥形管。空气量可以调节。悬浮于管中的水滴可以自由转动和振荡，并可以出现内环流。

供水滴发生用的注射针头直接置于锥形管之上，其相对位置应仔细调节，以便所发生的水滴恰好悬浮于管内的气流之中，而不与管壁相碰。用蒸馏水、雨水或自来水发生水滴。本文实验中水滴半径变化范围为 0.5—2.0 毫米。改变水滴大小的方法是：选用不同内径的针头，或在通入锥形管之前，使空气先经过氯化钙容器，减少空气中的相对湿度，藉助于蒸发作用减小悬浮水滴的半径。

实验中水滴碰撞速度的变化范围为几个厘米/秒到几个米/秒。当锥形管内同时悬浮两个水滴，若迅速改变管内气流，则碰撞速度仅几个到几十个厘米/秒。为了提高碰撞速度，可在锥形管内先悬浮一个水滴，然后在同一管内下降另一个水滴使其碰撞。

实验中使用一种转镜式光学补偿高速摄影机。当每幅照片面积为 22×16 厘米时最高摄影速率为 2000 幅/秒。拍照时须外加人工光源。

* 本文于 1980 年 6 月 9 日收到，1983 年 2 月 26 日收到修改稿。

** 程克明、王宏杰参加本文工作。

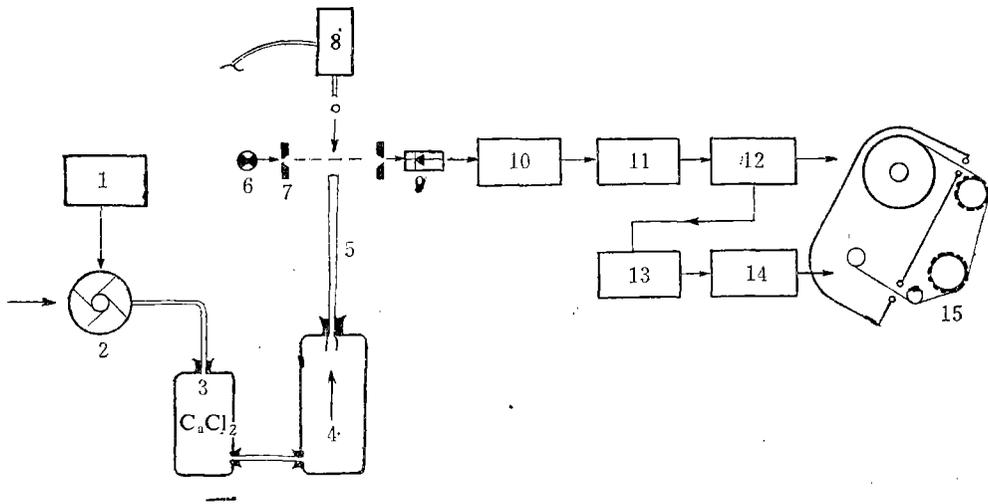
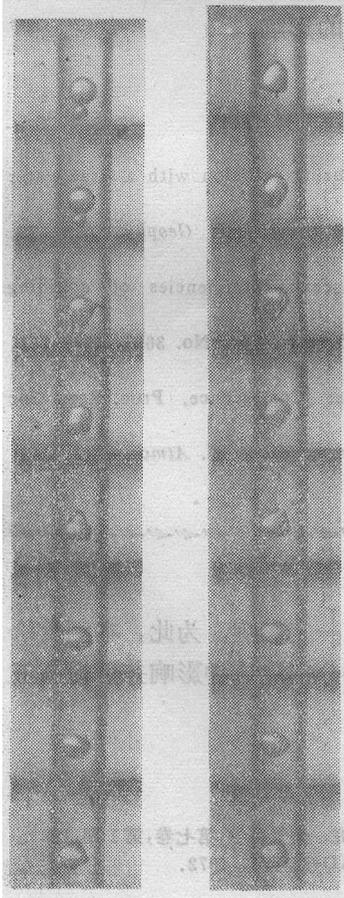


图 1 实验装置

- (1. 调压器, 2. 空气压缩机, 3. 干燥瓶, 4. 稳流瓶, 5. 锥形管, 6. 光源, 7. 光栅, 8. 压力控制的水滴发生器, 9. 光敏二极管, 10. 同步讯号发生器, 11. 微分电路, 12. 单稳态振荡器, 13. 延迟电路, 15. 高速摄影机)



由于摄影的全过程应在零点几秒内完成, 摄影机的启动与水滴碰撞瞬间的同步问题显得十分重要。实验中采用光电的同步方法, 可参考图 1。水滴在进入锥形管之前的下降途中, 切断来自点光源的光束, 在光敏二极管上产生相应的电流变化。放大和整形后提供矩形波, 再由微分电路把矩形波的前沿变成尖脉冲, 继而由单稳态电路产生负脉冲, 它一方面输入摄影机使其启动, 另一方面触发延时电路, 延迟一定时间(取决于摄影所需的时间)后自动关闭摄影机。

从拍摄的照片可测定以下各种参量供分析用:

(1) 水滴半径, 在焦点平面上, 在锥形管附近设置一个标尺, 由照片中的标尺测定水滴大小, 再根据照片中标尺相对于实际标尺的放大倍数推算水滴的长短轴。由公式 $\frac{d_m}{d_0} = 0.973 + 0.027 d_0$ 计算等效的球状水滴的直径(d_0)。式中 d_m 为长轴直径, d_m 和 d_0 都以毫米为单位。

(2) 碰撞速度, 根据标尺可以求出水滴在拍摄时移动的距离, 既然摄影速率以及在此时间内的拍摄幅数为已知不难推算水滴的碰撞速度。

图 2 碰撞后合并

(3) 碰撞角,由照片直接用量角器求得。

2. 实 验 结 果

在实验中观测到水滴碰撞后可以出现三种情况:合并、反跳和破碎。

图 2 是碰撞后合并的一例。大、小水滴的直径分别是 2 和 1 毫米,碰撞速度为 5 厘米/秒,碰撞角为 6° ,摄影速率为 757 幅/秒。从照片可以看到:

- (1) 两个水滴不是一碰就并;
- (2) 在合并开始时,一种环状结构把大、小两个水滴联结在一起;
- (3) 在未合并成一个水滴之前,大、小水滴分别地继续向下和向上运动;
- (4) 合并后的水滴处于振荡状态中。其能量系来源于碰撞水滴的相对动能。一般经过 50—70 毫秒后由于粘滞作用振荡才停止。

实验中观察到碰撞后反跳的现象。当碰撞速度比较小而碰撞角又比较大时,碰撞后反跳的概率大于并合。反跳的原因是:碰撞的相对动能太小,不足以排除两个水滴之间的空气薄层。

随着碰撞速度的增大,碰撞后水滴破碎的可能性也相应地增大。碰撞破碎作用对于暖云降水机制和雨滴谱理论都具有重要意义。

管壁的存在使碰撞水滴周围的流场结构发生变化,管径越小,这种影响越大。下一步的工作是设计一种悬浮管,其管径可扩大到 2 厘米,减小管壁的影响。

参 考 文 献

- [1] Magono C. & Nakamura T, On the Behavior of Water Droplets during collision with a large water drop, *J. Met. Soc. Japan*, **37**, No. 4, 124—127, 1959.
- [2] Whelpdale, D. M. & List, R, The coalescence process in raindrop growth, *J. Geophys. Res*, **76**, No. 12, 2836—2854, 1971.
- [3] Levin, Z & Machnes, B, Experimental evaluation of the coalescence efficiencies of colliding waterdrops, *Pure and Appl. Geophys*, **115**, No. 4, 845—867, 1977.
- [4] Gunn, R, Collision characteristics of freely falling water drops, *Science*, **150**, No. 3697, 695—701, 1965.
- [5] Brazier-Smith, P. R. et al, The Interaction of falling water drops: Coalescence, *Proc. Roy. Soc London A* **326**, No 1566, 393—408, 1972.
- [6] McTaggart-Cowan, J. D. & R. List, An acceleration system for water drops. *J. Atmos. Sci*, **32**, No. 7, 1395—1400, 1975.

(上接121页)

顺序实现,这样,大气中的一些时间起伏因子会对测量结果有一定影响。为此,本测量给出的是多次测量的平均结果。如果使用两只 CO 激光器可部分消除这种影响并可提高工作效率。

参 考 文 献

- [1] 孔琴心, 张文, 王庚辰, 选支 CO 激光 86 条发射谱线大气透过率的研究, 大气科学, 第七卷, 第 1 期, 1983.
- [2] McClatchey, R. A, et al, Optical Properties of the atmosphere, AD-753075, 1972.