

穿透现象和液滴形状的关系

蔡一坤

(北京大学物理系, 北京 100871)

摘要 拍摄了下落水滴周期性形变的照片, 穿透现象(指水滴和水面碰撞后变成环状, 穿入水中, 直到池底)是在水滴为扁椭球形状或接近扁椭球形状时和水面碰撞发生的, 表面张力是改变水滴形状的手段

关键词 水滴, 碰撞, 穿透, 周期性

引言

1989 年我们发表了用水滴和水面碰撞模拟超高速弹击金属板的实验^[1]。意外发现在碰击速度较低时有规律的穿透现象, 郑哲敏先生用液滴自由振动的理论计算了振动周期与穿透现象的关系^[2]。这个计算结果对于合理的整理实验数据, 揭示这种现象的规律性起着指导作用。我们重新进行了实验测定和数据整理, 结果证实液滴形状的自由振动和穿透现象有密切的关系, 特别是在滴径较大时穿透现象的周期和液滴形变周期十分接近。而在液滴较小、碰撞速度较大时, 穿透现象的周期和液滴形变周期之间的偏离就大一些。

1 液滴离开嘴口自由下落的形状变化

液滴是水中加 0.25% 百里酚蓝, 呈深橙色, 在目前实验环境中(23℃)测得其表面张力为 $\sigma = 51.2 \times 10^{-3} \text{ N/m}$ 。池液是在水中加 0.1% 碳酸钠, 池液是无色透明的, 表面张力、密度、粘性都没有变化。两种液体接触后呈深蓝色。嘴口直径为 4.5 mm, 液滴呈球形, 其直径为 $d = 5.0 \text{ mm}$ 。液滴离开嘴口时被重力和嘴口的附着力拉成长椭球, 过一瞬间就变成扁椭球, 然后又变成长椭球。如图 1 所示。

2 液滴形状变化与自由振动周期之间的关系

液滴完全和嘴口分离处作为自由下落的起点($h = 0$), 下落距离用 h 表示。根据自由落体算出的下落时间用 t 表示

$$t = (2h/g)^{1/2} \quad (1)$$

液滴自由振动周期用 T 表示^[3]

$$T = \pi(\rho d^3/\sigma)^{1/2}/4 \quad (2)$$

其中, ρ 为液滴密度 $\rho = 1.00 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, d 为液滴球形直径, σ 为液滴的表面张力。测量和算出结果如表 1 所示。

从表 1 可以看出: 从第一次呈扁椭球至第二次呈扁椭球的时间为 0.039s, 从第二次呈长椭球至第三次呈长椭球的时间为 0.038s。即测得液滴形变平均周期为 0.039s, 与公式(2)计算的周期(0.040s)基本相同, 但是, 第一次呈长椭球至第二次呈长椭球的时间为 0.045s,

1995-10-26 收到第一稿, 1996-01-22 收到修改稿

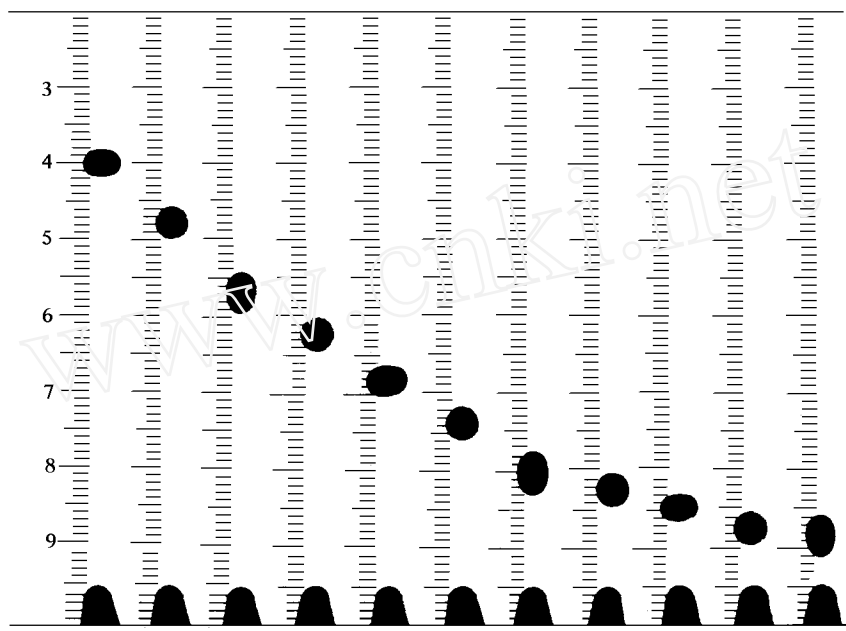


图 1 液滴下落时形状变化和高度关系

Fig. 1 Dependence of the shape of a falling water drop on the falling height

注: 此图是用摄像机拍摄后, 由计算机取出的 11 帧图片组成. 由于摄像机每秒帧数有限, 所以图示的长椭圆和圆球, 可能其位置、形状略有偏离

note: The pictures are taken by video camera and treated by computer. Since the speed of camera is limited, the shape of the long ellipse, flat ellipse and sphere and their position in Fig. 1 maybe deviate a little bit from the exact ones

表 1 液滴自由振动周期和下落时间关系

Table 1 Comparison between falling time and the period of free vibration of a falling drop

shape	long ellipse	flat ellipse	long ellipse	flat ellipse	long ellipse
h^*/mm	0 (h_{L1})	3.5 (h_{F1})	10.0 (h_{L2})	21.0 (h_{F2})	33.5 (h_{L3})
t/s	0	0.027	0.045	0.066	0.083
T/s	0	$T/2 = 0.020$	$T = 0.040$	$3T/2 = 0.060$	$2T = 0.080$

* b 数据为许多数据的平均值 (Values of h in Table 1 are averages of a lot of measured data.)

比液滴平均形变周期多 0.006s. 我们设想这是由于液滴刚刚和嘴口分离时, 嘴口对液滴的扰动还没有完全消失, 即液滴和嘴口的粘连状态过渡到自由振动的状态需要一段时间, 假设这段过渡时间为 0.006s. 则下落时间和自由振动周期基本相符.

3 液滴穿透现象和液滴形状的关系

3.1 液滴穿透液体的下落高度

在第一段中所描述的条件下, 球径 $d = 5.0\text{ mm}$ 的液滴能产生穿透的第一个下落高度 h_1 为 6~8 mm. 产生穿透的第二个下落高度 h_2 为 24~27 mm.

3.2 产生穿透现象的液滴形状

从表 1 可看出产生第一次穿透现象的下落高度在第一次扁椭圆向长椭圆过渡的阶段中 (即 $h_{F1} = 3.5\text{ mm}$ 到 $h_{L2} = 10.0\text{ mm}$ 的范围里). 产生第二次穿透现象的下落高度是在第二次扁椭圆向长椭圆过渡的阶段中 (即 $h_{F2} = 21.0\text{ mm}$ 到 $h_{L3} = 33.5\text{ mm}$ 的范围内).

3 3 1989 年的测量中^[1], 没有测出液滴形状的变化, 按当时的液体表面张力, 球的直径, 算出其自由振动的周期, 用 T 表示 由于下落时间为 $T/2$ 的偶数倍时液滴为长椭球, 并由此算出其下落高度, 第一次为长椭球的下落高度用 h_{L1} 表示, 第二次变成长椭球的高度用 h_{L2} 表示 如此类推, 下落时间为 $T/2$ 的奇数倍时, 液滴为扁椭球, 其相应的下落高度用 h_{F1} , h_{F2} , ... 表示 下落时间为 $T/4$ 的奇数倍时, 液滴变成圆球 液滴呈圆球时的下落高度用 h_{r1} , h_{r2} , ... 和 h_{R1} , h_{R2} , ... 表示 h_{r1} 是表示第一次由长椭球变成圆球时的下落高度, 而 h_{R1} 表示第一次由扁椭球变为圆球时的下落高度, 如此类推 实验测出的, 液滴发生穿透现象的下落高度在表 2 中所处的位置用圆点标志, 以便看出七种大小的液滴, 呈什么形状时和液面碰撞会发生穿透现象 圆点所表示的下落高度的数值已载于文献[1]

表 2 各种大小液滴产生穿透现象的形状

Table 2 Shape of various drops with which penetration maybe occurs

D/mm	5 2	4 9	4 3	3 9	3 6	3 4	3 1
T/ms	42 5	39 1	32 3	27 9	24 5	22 4	19 5
h_{F2}/mm	19 91	16 86	11 50	8 58	6 62	5 53	4 19
h_{R2}/mm	27 10	22 94	15 66	11 68	9 01	7 53	5 71
	•	•	•	•			
h_{L3}/mm	35 40	29 96	20 45	15 26	11 79	9 83	7 45
h_{r3}/mm	44 81	37 92	25 88	19 31	14 89	12 45	9 43
h_{F3}/mm	55 32	46 82	31 95	23 84	18 38	15 37	11 65
				•	•	•	
	•	•	•				
h_{R3}/mm	66 93	55 65	38 66	28 84	22 24	18 59	14 09
h_{L4}/mm	79 66	67 42	46 00	34 33	26 47	22 13	16 77
h_{r4}/mm	93 48	79 13	53 99	40 28	31 07	25 97	19 68
				•	•	•	•
h_{F4}/mm	108 42	91 77	62 62	46 72	36 03	30 12	22 82
		•					
h_{R4}/mm	124 46	105 34	71 89	53 64	41 36	34 57	26 20
h_{L5}/mm	141 61	121 71	81 79	61 03	47 06	39 33	29 81
					•		
h_{r5}/mm	159 86	135 31	92 34	68 89	53 13	44 41	33 65
						•	•
h_{F5}/mm	179 23	151 70	103 52	77 24	59 56	49 79	37 73

* 如郑哲敏先生的文章中指出的: 在此表 h_{F1} 附近应有产生穿透现象的下落高度 h , 但 1989 年的实验中没有观察到, 这次实验观测证实了这点, 如文中 3 1 中所述 (As pointed by Prof. Cheng, there should be some falling height h near h_{F1} in Table 2 where penetration maybe occur. We didn't measured these h in 1989. But now we have observed them as described 3 1.)

从表 2 中可以看出, 液滴和液面碰撞能产生穿透现象是在:

- 1) 液滴的形状为椭球状或接近椭球状时
- 2) 对较大的水液 ($D > 4.0\text{ mm}$) 其形状多在扁椭球变为圆球的范围内
- 3) 对较小的水滴 ($D < 4.0\text{ mm}$) 其形状多在圆球变为扁椭球的范围内
- 4) 随着下落高度的增加, 表 2 中“•”有向上方偏移的倾向, 例如直径 5.2 mm 的水滴



第一次产生穿透现象是在水滴已从扁椭球变成圆球时(下落高度 $h \geq 27.1 \text{ mm}$), 第二次产生穿透现象的下落高度是在水滴尚未变成圆球时(下落高度 $h \geq 66.93 \text{ mm}$). “•”向上方的偏移, 也表示产生穿透现象的周期, 比水滴自由振动的周期短一些

我们设想水滴以某种形状(例如扁椭球状)和水面碰撞就能产生穿透现象, 那么在这种理想的碰撞产生穿透现象的周期就应该和水滴自由振动的周期一样, 但是随着水滴速度增加(下落高度增加)空气阻力增加, 必定对水滴形状、碰撞过程产生干扰, 这种干扰使上述理想的碰撞过程产生了偏差. 速度再大一些, 这种干扰就使得穿透现象不能产生.

水滴变小, 则自由能密度增加(随 $1/D$ 增加)也对理想的碰撞过程产生干扰, 这就使得在小水滴($D < 4.0 \text{ mm}$)下落高度较小(动能也小)时穿透现象不能产生, 这也可能是产生穿透现象的小水滴的形状和大水滴形状有明显不同的原因.

这些问题都还有待进一步的理论计算和实验观察.

感谢郑哲敏教授和黄敦教授对本工作的支持和受益匪浅的讨论.

参 考 文 献

- 1 蔡一坤 液滴与液面碰撞 力学学报, 1989, 21(3): 273~ 279
- 2 郑哲敏 液滴与液面碰撞发生环形穿入的条件 力学学报, 1990, 22(3): 337~ 340
- 3 Rayleigh Theory of Sound, Vol II. New York: Dover publication, 1945. 373

RELATIONSHIP BETWEEN PENETRATION AND SHAPE OF FALLING DROP

Cai Yikun

(Department of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract Photos of falling drops in process of periodical deformation are presented. The penetration (it means the falling drop becomes a ring after colliding with surface of water and then it penetrates into water until the bottom is reached) happens after the drop with the shape of flat ellipse or its resemblance collides with the surface of water. Surface tension of drop water acts to deform the shape of falling drop.

Key words drop, collision, penetration, periodicity