

参赛队员姓名： 孙尔康 季彦宇 黄陈苏新

中学： 江苏省海安高级中学

省份： 江苏省

国家/地区： 中国

指导教师姓名： 苏俊 王维国

指导教师单位： 江苏省海安高级中学

论文题目： 模拟陨石低速撞击水面与快速自转的星球

## 摘要

宇宙中陨石撞击星球每时每刻都在发生，6600 万年前一颗巨大的陨石撞击地球导致了恐龙的灭绝，在地球的深海中还有许许多多的陨石坑没有被发现。本研究首先结合国外已有实验分析了陨石低速撞击陆地的情形，得出了陨石坑直径与撞击速度的关系。本研究中，我们模拟陨石撞击浅滩和深水的情形，分析了撞击时形成的水膜与撞击所形成的坑、冲击波的大小，分析了其形成的原因与陨石撞击浅滩、深海所带来的不同影响。最后，我们通过小球撞击旋转的沙盘模拟了陨石撞击到高速自转的星球上的情景，研究了陨石撞击速度、星球的角速度、陨石所落的位置对陨石坑形状与大小带来的影响，发现了陨石坑的径向直径大于切向直径且当星球的自传速度较大时，陨石坑会因为地表土壤的坍塌而消失。

本研究的创新之处在于**首次从实验上模拟低速陨石撞击海面及高速自转星球的情景，并初步构建了相应的理论模型。**

**关键词：**陨石，星球，陨石坑，冲击波

## 目录

摘要.....	2
一、研究背景.....	4
二、预实验.....	4
2.1 实验.....	4
2.1.1 实验方案.....	5
2.1.2 实验分析.....	6
2.2 理论分析.....	6
三、模拟陨石撞击水面的研究.....	8
3.1 实验.....	8
3.1.1 实验方案.....	8
3.1.2 小球下落到浅水实验.....	9
3.1.3 小球下落到深水实验.....	12
3.2 理论分析.....	16
四、模拟陨石撞击自转星球的研究.....	18
4.1. 实验.....	18
4.1.1 实验方案.....	18
4.1.2 圆盘转速不同实验.....	19
4.1.3 小球撞击位置不同实验.....	22
4.1.4 小球撞击速度不同实验.....	23
4.2 理论分析.....	24
4.2.1 小球撞击沙面.....	24
4.2.2 沙子塌陷.....	27
五、总结与展望.....	31
参考文献.....	32
附录.....	33
致谢.....	35

## 一、研究背景

“流星透疏木，走月逆行云”，当美丽的流星雨划过天际的时候，便意味着无数的陨石造访了地球。地球上已被发现的陨石坑在 120 个左右，并且大多数是 2 亿年以内形成的。其中有地球上第一个被确认为是陨石撞击形成的巴林杰陨石坑，有最终形成湖泊的彭加卢特陨石坑如图 1-1，也有年轻的隆起园丘陨石坑如图 1-2。



图 1-1



图 1-2

人类在地球上发现的陨石坑并不多，并且大多集中在陆地上。通过观察我们发现这些已发现陨石坑都较为明显，坑的周围也都有相应物质进行佐证，因此也更容易证实他们的陨石坑身份。然而我们猜测地球上存在着更多的陨石坑，但由于地球有百分之七十的面积是海洋，或是地质、环境等因素的影响，这些神秘的陨石坑并没有被人们所发现。另外，当一个星球自转较快时，陨石的撞击坑会有什么不同呢？

海底的陨石坑身处何方？高速自转的星球上的陨石坑什么样子？我们查阅相关资料，鉴于之前没有相关的实验研究，在本研究对这两个问题将进行深入的探究。

## 二、预实验

### 2.1 实验

通过阅读文献，我们发现前人在陨石撞击坑形成的原理已有比较详细的研究[1-4]，于是我们决定设计一组实验来验证前人所得的结论。我们用一个小球从某高度下落撞击铁盒里的沙子，从而模拟陨石低速撞击地面的过程。在查阅文献后我们知道描述撞击可以用 Froude 数  $Fr^{-1} = gd/2v^2$ ，即重力与撞击力的比值[5]。通过计算我们可以得到小球速度较低时  $0.25 \leq Fr^{-1} \leq 0.38$ ，而对于实际行星撞击坑  $10^{-6} \leq Fr^{-1} \leq 10^{-2}$ ，我们的实验与其上限一致。因此这里用低速小球来模拟在 Froude 数上限上是合理的。用高帧率相机拍摄小球下落的过程，并利用视

频分析软件 Tracker 分析小球下落过程[6]。

### 2.1.1 实验方案

本实验用到的器材有：43g 的小球，直径为 0.273m 的铁盒，不同颗粒大小的沙子，高帧率相机（500fps），卷尺，游标卡尺，电子显微镜（用于测量沙子颗粒的大小），如图 2-1 与图 2-2。

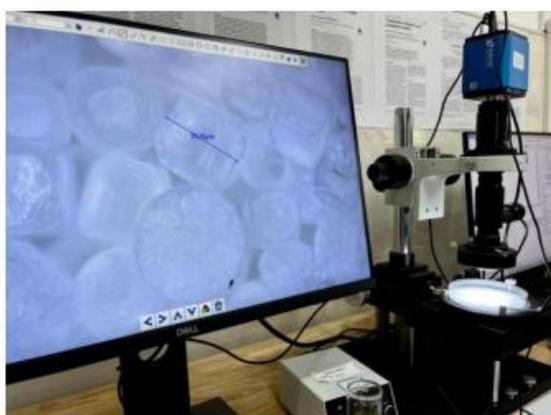


图 2-1



图 2-2

小球从不同高度由静止释放，撞击沙面，测量撞击坑直径。用高帧相机拍摄小球从下落到撞击沙面的过程，通过 Tracker 软件对视频进行分析，得到不同时刻小球的运动状态，实验示意图如图 2-3。

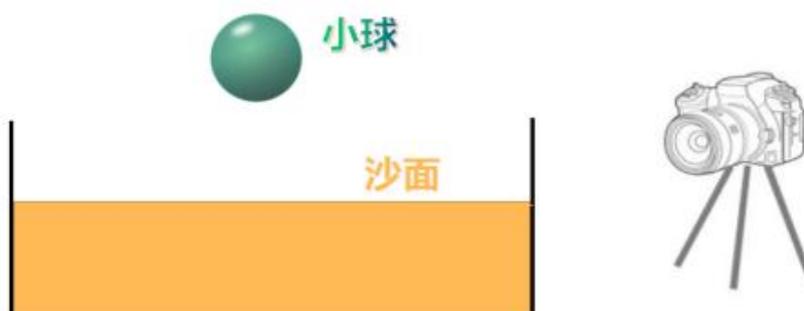


图 2-3

### 2.1.2 实验分析

我们利用高帧相机对小球撞击沙子的过程进行了拍摄，如图 2-4 所示。（如补充视频 1 所示）

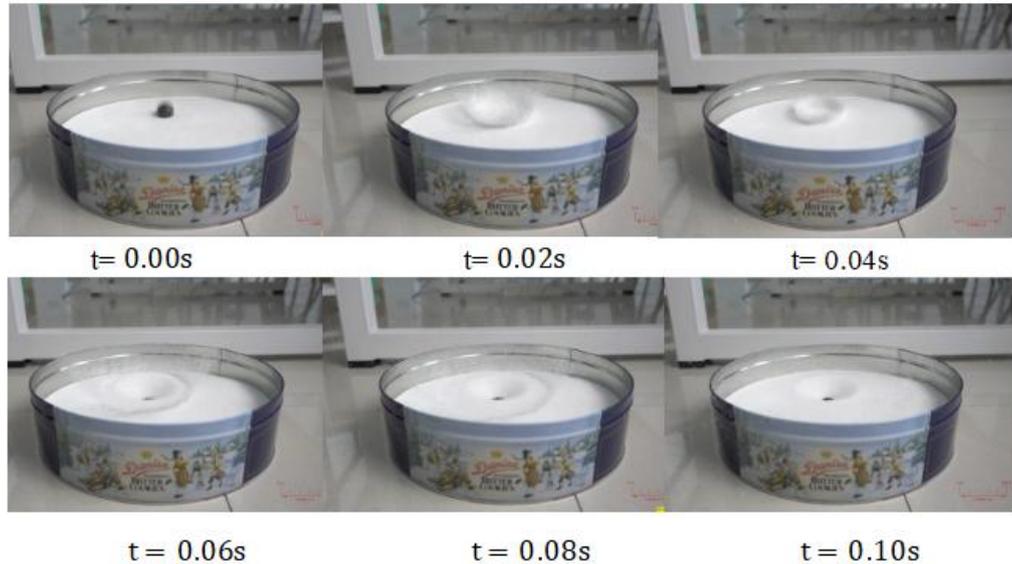


图 2-4

改变小球的下落高度（实验高度范围为 0.1802m~0.269m），高度越高，撞击坑越大。接着我们用 3 种颗粒大小不同的沙子分别进行实验，测出撞击坑大小。

### 2.2 理论分析

实验中有  $D$ 、 $d$ 、 $E_k$ 、 $\rho$ 、 $g$  五个物理量，其中  $D$  是撞击坑的直径， $d$  为小球直径， $E_k$  为小球动能， $\rho$  为沙子的密度， $g$  为重力加速度。根据前人的研究我们可以将其分为两个无量纲组  $D/d$  和  $E_k/\rho g d^4$  [7]。利用 Mathematica 绘制出  $\log_{10}(D/d)$  与  $\log_{10}(E_k/\rho g d^4)$  的图像如图 2-5。蓝色图像是小球撞击粗沙的图像，紫色图像为小球撞击食盐的实验的图像，红色图像是小球撞击细沙的图像。细沙，粗沙，食盐的平均直径分别为  $15\mu\text{m}$ ， $35\mu\text{m}$  和  $26\mu\text{m}$ 。

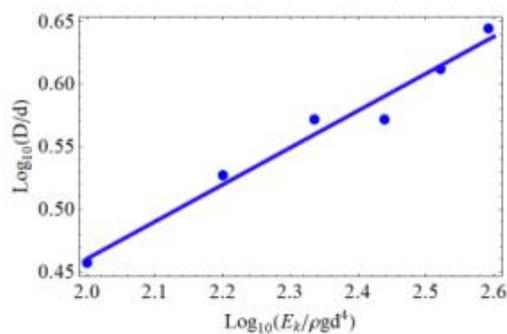


图 2-5-a

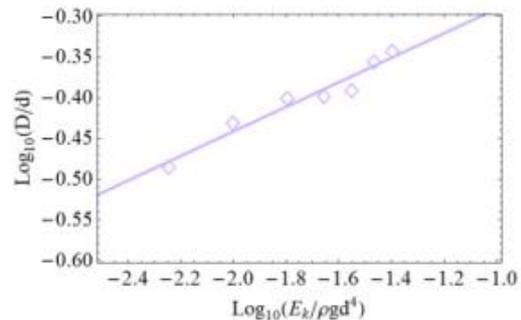


图 2-5-b

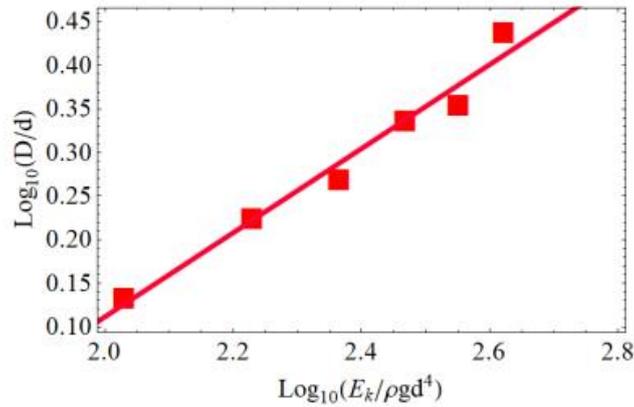


图 2-5-c

对数据进行拟合，我们发现  $\log_{10}(D/d)$  与  $\log_{10}(E_k/\rho g d^4)$  成线性关系。参考前人对陨石撞击坑的研究工作可得[7]：

$$\log_{10}(D/d) = \frac{1}{4} \log_{10}(E_k/\rho g d^4) \quad (1)$$

下图为三组数据与真实撞击坑数据的比较。绿色虚线为斜率为  $\frac{1}{4}$  的拟合直线。绿色“×”标记美国的巴林杰陨石坑（Barringer Meteor Crater）的数据，如图 2-6，我们发现这些数据的趋势与虚线趋势相同。



图 2-6-a 巴林杰陨石坑

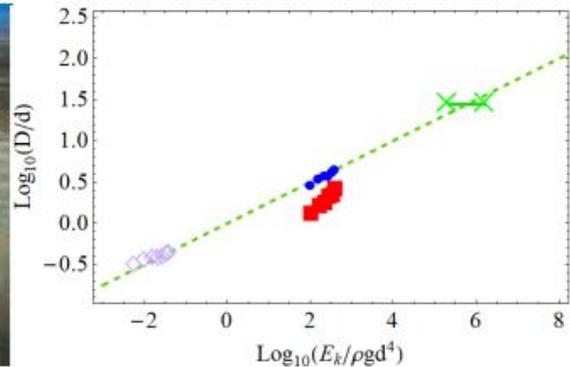


图 2-6-b

### 三、模拟陨石撞击水面的研究

#### 3.1 实验

6600 万年前，一颗巨大的陨石撞击在如今的墨西哥的希克苏鲁伯湾，导致了恐龙的灭绝；地球的表面有 70% 是海洋，一旦陨石撞击了地球，有很大的几率是撞击海洋的。因此，我们设计了实验来模拟陨石低速撞击浅滩及深海时的情形。我们用一个小铁球来模拟陨石，亚克力盒内下层为沙子、上面为水，以此来模拟陨石撞击海面。用高帧相机拍摄小球下落过程，运用 Tracker 分析小球撞击水面及沙子的过程，并测量出小球撞击出的沙坑的直径  $D$  进行分析。

##### 3.1.1 实验方案

以下是本实验使用的器材：43g 小铁球；30.5cm×30.5cm 亚克力透明盒；颗粒平均直径为 35 $\mu\text{m}$  的粗沙；托盘天平；卷尺；磁铁；游标卡尺；高帧相机(500fps)，如图 3-1，图 3-2。



图 3-1



图 3-2

我们利用磁铁取出撞击后的金属小球，以此保证不会破坏坑的形态；使用透明的亚克力盒，从侧面拍摄小球下落撞击的全过程，方便使用 Tracker 跟踪小球的运动以及水膜的形态；游标卡尺可以测量出小球撞击形成的沙坑直径。

在本实验中，我们还研究了小球撞击水面时形成的水膜以及水波的形态，通过研究这两者，我们可以初步地分析小球撞击水面时所具有的能量，也可以简单分析撞击产生的水波对地球表面所带的影响。

##### 3.1.2 小球下落到浅水实验

将小球从不同高度由静止释放，撞击覆盖浅水（水的深度  $h=0.6\text{cm}$ ）的沙子，以此来模拟小球撞击浅海时的情形。我们利用高帧相机拍摄了物体撞击水面与沙

子的全过程，观察小球溅起的水膜的形态，通过 Tracker 对其中两种情况进行详细分析。

当释放高度较低 ( $H=0.875\text{m}$ ) 时，撞击过程如图 3-3 (如补充视频 2)：



图 3-3

在此过程中，小球运动共分为三个阶段：1. 小球撞击水面形成向上的水膜；2. 水膜向两侧扩散，形成皇冠形；3. 水膜在两侧竖直下落形成水波。由于小球下落的高度较小，撞击水面时的速度较小，溅起来的水膜是皇冠形的，中间不会闭合，也没有呈现出向中间闭合的趋势。

当高度较大 ( $H=2.482\text{m}$ ) 时，撞击过程如图 3-4：

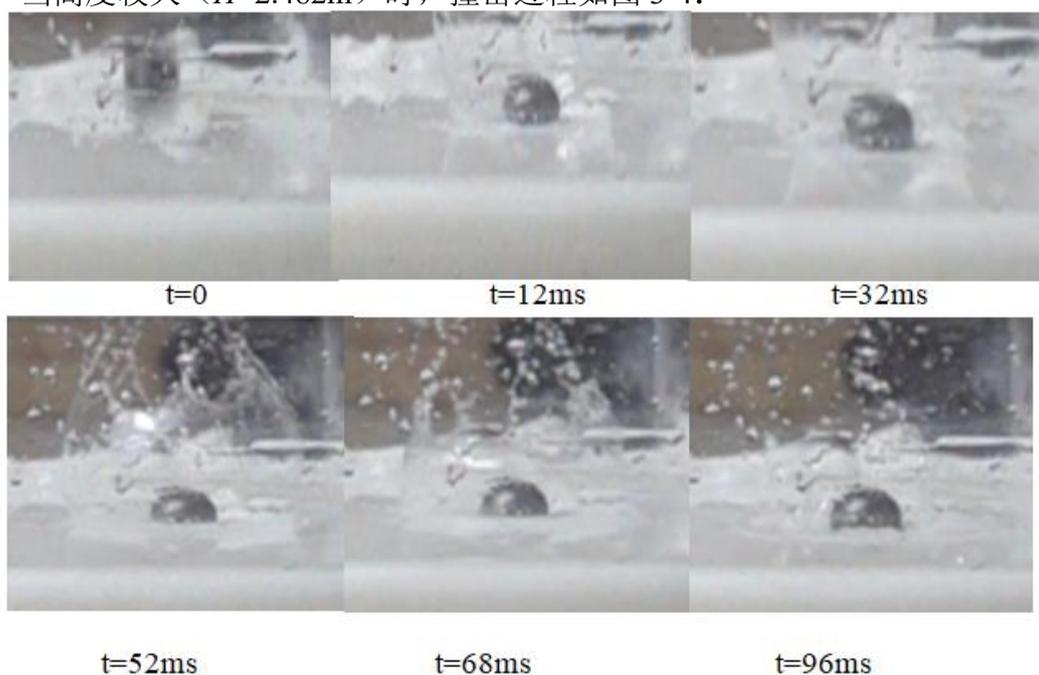


图 3-4

在此过程中，小球运动共分为四个阶段：1. 小球撞击水面形成向上的柱形水膜以及水波；2. 水膜向中间闭合，形成球状；3. 水膜上升到最高点后，并未完全闭合；4. 水膜竖直下落形成水波。在这一组实验中，虽然小球的下落高度相较于前一组已经高了，撞击水面的速度增大了许多，但溅起的水膜仍未能闭合，

不过已经不是皇冠形的了，而是呈现出向中间闭合的趋势。

在水深  $h=0.6\text{cm}$  的时候，沙子上的水量较少，所以即使小球的速度已经相对较大时，溅起来的水膜是非常有限的，这导致了溅起来的水正对长度比较小，表面张力不足以使两侧的水膜闭合，只能使水膜呈现出将要闭合的趋势。

然后，我们对小球撞击沙子形成的坑的直径进行了测量，并用 Mathematica 对数据进行了拟合，得到了如图 3-5 所示的关系：

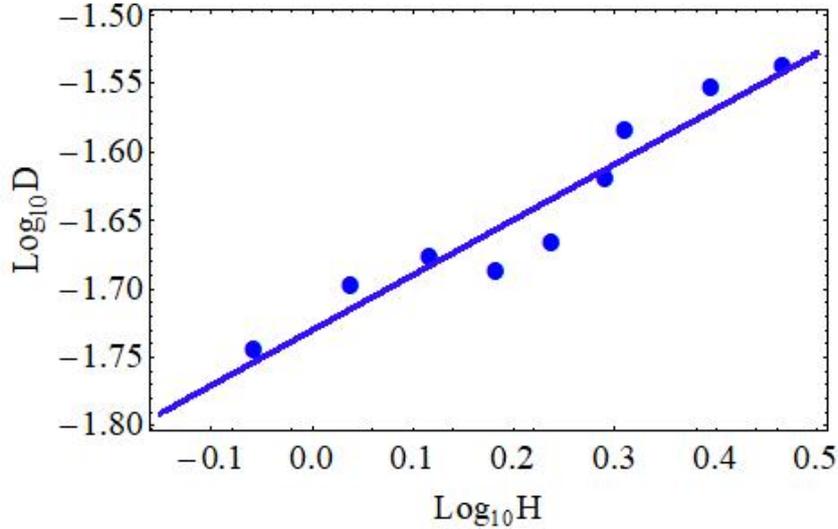


图 3-5

其中  $D$  为沙坑的直径， $H$  为小球由静止下落的高度，从图中可以看出  $\log_{10} H$  与  $\log_{10} D$  是呈线性关系的，其斜率约为 0.40。

在实验中，当高度达到一个相对较大的值时，我们还在坑的周围观察到了一圈类似于冲击波的形态。对冲击波的直径  $D_w$  进行测量，将其与小球下落高度  $H$ 、小球砸出坑的直径  $D$  一起进行分析，得到了如图 3-6 与图 3-7 的情形：

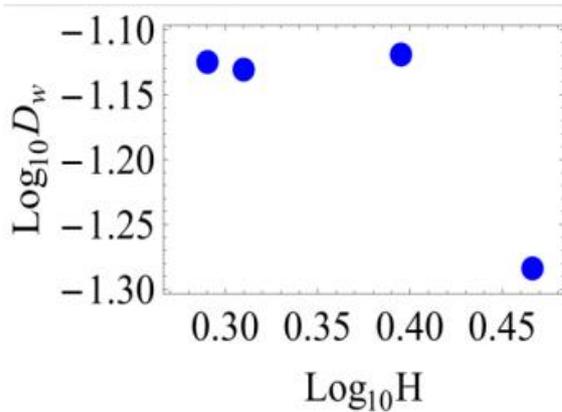


图 3-6

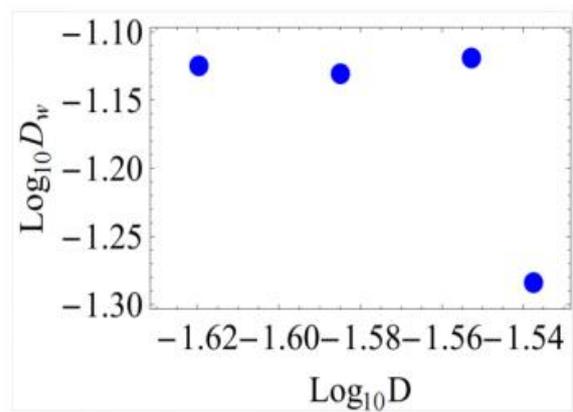


图 3-7

我们用高帧相机从上方拍摄了可以形成冲击波时的小球撞击过程，如图 3-8（如补充视频 3）：

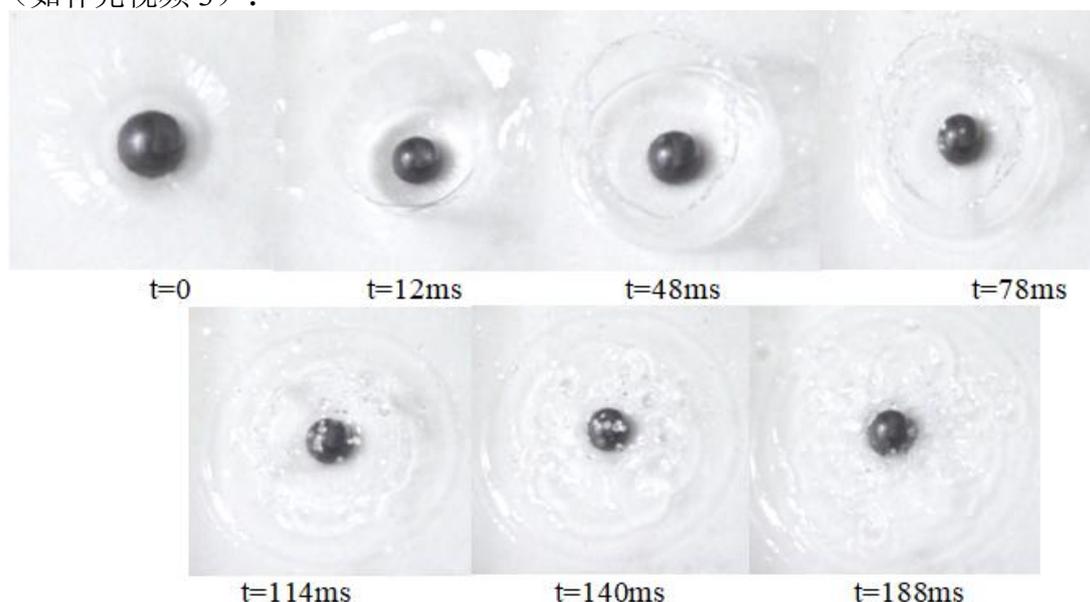


图 3-8a

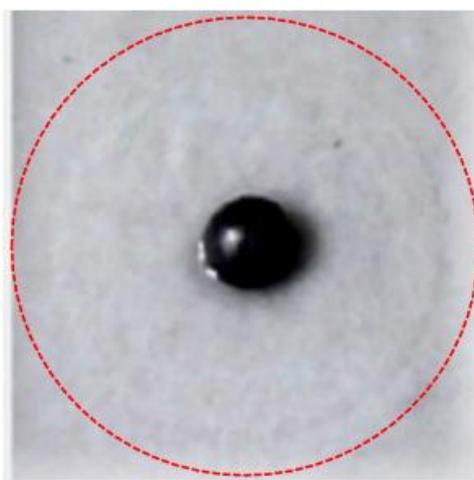


图 3-8b 形成冲击波

分析小球撞击水面形成水波的情形与沙子形成的冲击波，我们将几幅图对比可以看到，小球最后形成的冲击波的位置是小球撞击水面后形成的圆柱形水膜的位置。我们就可以理解为，小球撞击形成的冲击波是由水膜带着沙子向外扩散，由沙子沉积形成的。

我们可以知道的是，当小球下落高度  $H$  较低时，小球具有的动能较小，不足以将水底下受水压力的沙子溅起，从而无法形成冲击波。只有当下落高度达到一定的值，小球具有的动能才足以溅起沙子，从而导致沙子被水膜携带，形成冲击波。这也就进一步说明了，如果陨石撞击地球时撞击的是浅滩，那么很显然的

是，随着小球的速度越大，撞击所形成的坑也就越大，且当小球达到一定的速度后，陨石掀起的水膜带动地上的沙子运动从而会在陆地上形成一圈冲击波，改变了地表形态。

### 3.1.3 小球下落到深水实验

接下来，我们将水深增加到  $h=1.0\text{cm}$ ，小球从不同高度由静止释放撞击覆盖水的沙子。我们利用高帧相机拍摄了物体撞击水面与沙子的全过程，观察小球溅起的水膜的形态，通过 Tracker 对其中两种情况进行详细分析。

当释放高度较低时，如图 3-9 为  $H=0.88\text{m}$  时的小球撞击水面过程：

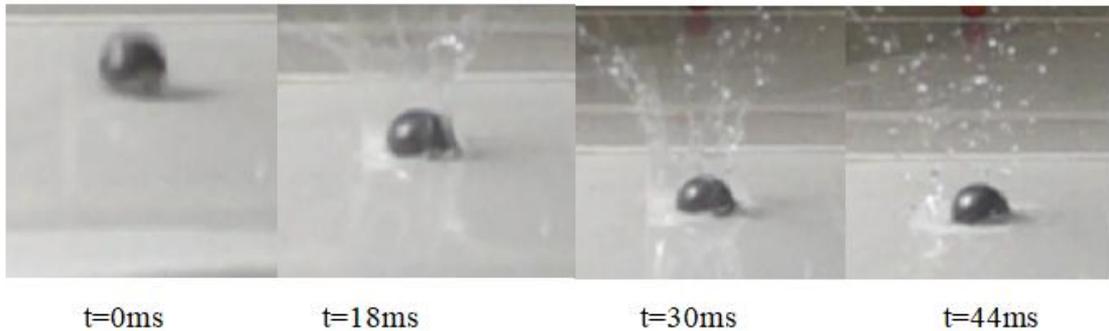


图 3-9

在此过程中，小球的运动可大致分为 4 个阶段：1. 小球砸入水中，溅起的水形成一道水柱；2. 水柱在空中呈皇冠状；3. 水柱落在水面上并向四周扩散；4. 水柱完全落下，形成水波。由于水柱中有表面张力作用，水膜会呈闭合趋势。但小球的初速度较小，导致水膜来不及闭合，最终在空中呈皇冠状。

当释放高度为  $H=1.64\text{m}$  时，如图 3-10 为小球撞击水面过程：

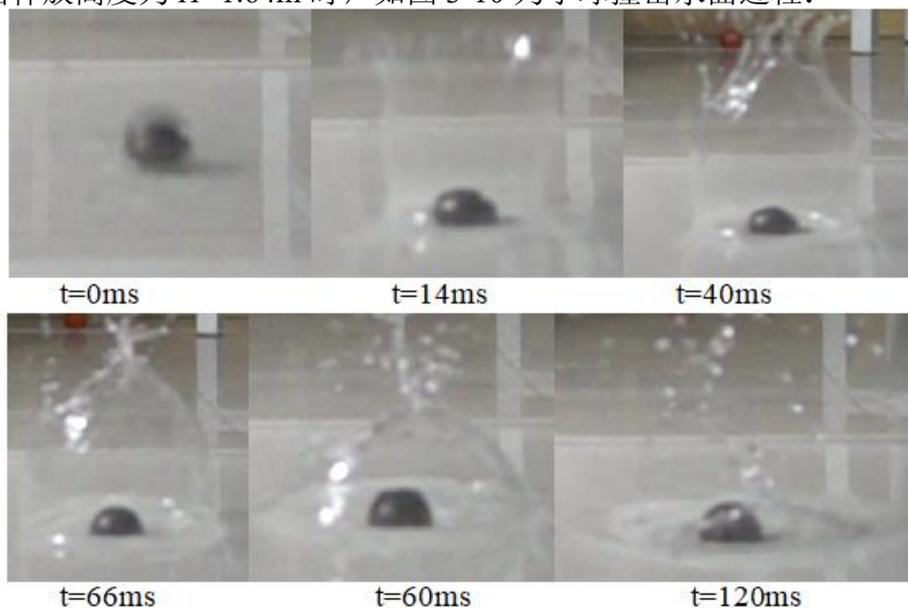


图 3-10

小球的运动过程与上述 4 个阶段大体一致，但水膜刚好出现闭合。

我们使用 tracker 软件分析了水膜从溅起到闭合的时间，发现这一时间与小球下落的高度无关，近似为 34ms，如图 3-11。

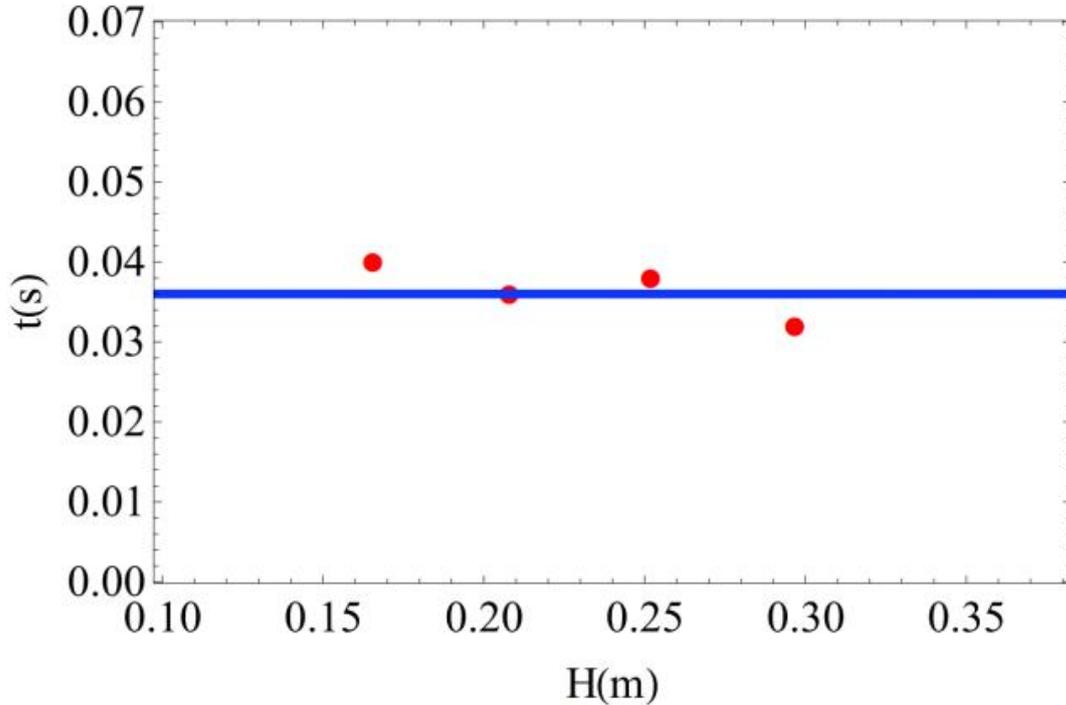


图 3-11

参考前人的资料[8]，我们发现了特征时间这一定义，即 $t_c = k\sqrt{\rho r_d^3/\gamma}$ 。其中特征时间  $t_c$  指的是水膜从溅起到闭合所需要的时间， $k$  是常数， $\rho$  是水的密度，本实验中取 $10^3\text{kg/m}^3$ ， $r_d$  是水膜的厚度， $\gamma$  是水的表面张力系数，本实验中取 $0.07\text{N/m}$ 。通过计算，我们得到本次实验中的常数  $k$  近似等于 3.5。

由于高度增加，小球的初动能增大，砸出的水柱更高，水柱的正对长度更大，水的表面张力作用时间较长，水膜闭合也越明显，这一关系也与先前的实验大致相同。从此高度开始，我们也观察到坑的周围产生了与先前现象相同的一圈的冲击波。

当释放高度更高  $H=2.967\text{m}$  时，如图 3-12 为小球撞击水面过程（如补充视频 4）：

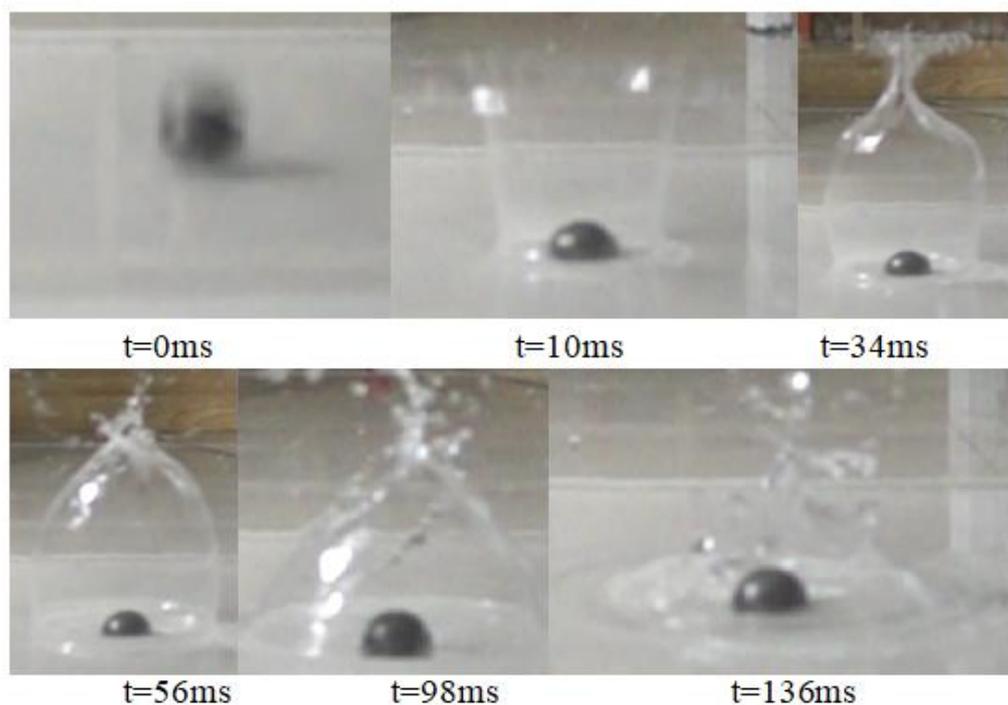


图 3-12

此时由于小球下落的高度很高，其撞击水面时的速度也就较大，所形成的水柱更高，并且因为小球所能溅起来的水较多，水柱上表面的正对长度也就大很多，水的表面张力作用时间长，因此在空中完全闭合，落下时形成锥状，水波向外扩散得更远，坑的直径也更大。

根据所测得的数据（小球释放高度  $H$ ，坑的半径  $D$ ），我们绘出了  $\log_{10}H$  与  $\log_{10}D$  图像（如图 3-13）。

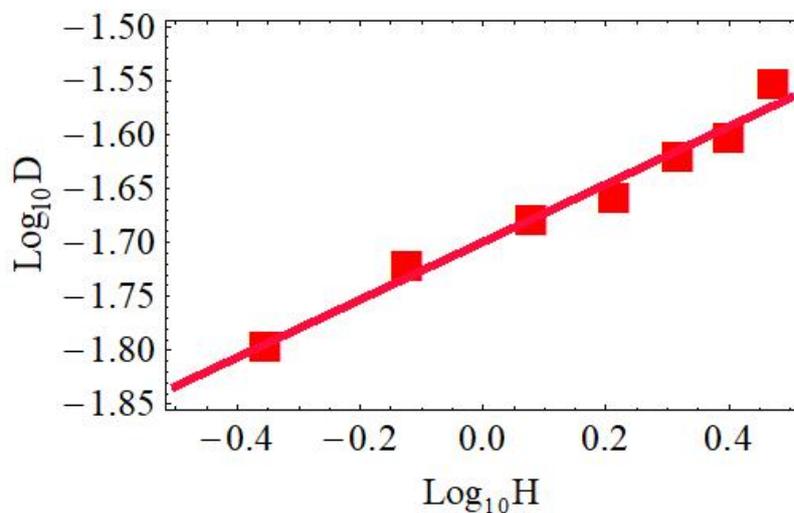


图 3-13

通过将数据点进行拟合，我们发现 $\log_{10}H$ 与 $\log_{10}D$ 大致呈线性关系，斜率为0.26。由图像可知，坑的直径  $D$  与小球下落释放的高度  $H$  呈指数关系。

对冲击波的直径  $D_w$  进行测量，将其与小球下落高度  $H$ 、小球砸出坑的直径  $D$  一起进行分析，得到了如图 3-14 与图 3-15 的情形：

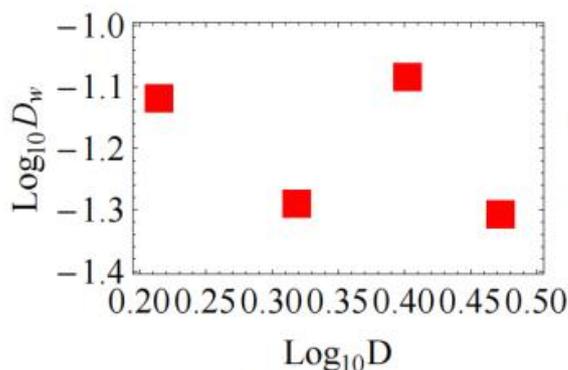


图 3-14

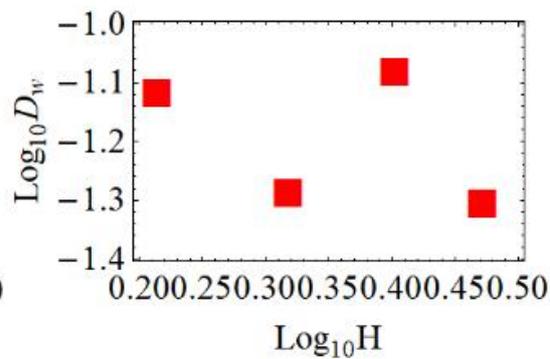


图 3-15

结合小球撞击浅水和深水的实验，我们可以总结得到小球撞击水面有以下几个规律：1.初撞水面时会砸出一道圆柱状水柱；2.水柱在空中受表面张力作用呈闭合趋势，根据高度的不同可形成皇冠状或完全闭合；3.水柱落下形成的水波会向外扩散，当小球的动能足够大时，便会溅起沙子，沙子在水波的裹挟下向外扩散并堆积；4.随着小球下落的高度增加，即小球撞击水面时的速度增大，小球撞击沙子所形成的坑也就越大；5.当小球达到一定的速度时，无论是在浅水还是在深水都会有冲击波的形成。

我们再次对比小球分别下落到浅水与深水的实验，深水相较于浅水，沙子上的水层增厚了，小球所能溅起来的水变多了，所能形成的水膜变大了。但由于水的阻力，小球的动能被吸收了一部分，所以小球在撞击沙子时的速度没有浅水时的大了，所形成的坑的也就变小了，并且由于水压的作用，被击起的沙子无法像在浅水时一样扬起四散，这也导致了撞击后形成的冲击波没有浅水的时候大了。

进一步地，我们可以得到，当陨石撞击地球时，落入浅滩与落入深海的情形是不一样的，但撞击形成的坑的大小都随陨石时撞击的速度的增大而增大。陨石落入浅滩时，形成的撞击坑与冲击波都较大而掀起的水膜较少，也就是说，陨石能更多地改变地表形态而形成较小的海啸；陨石落入深海时，形成的撞击坑与冲击波都较小而掀起的水膜较多，也就是说，陨石能形成破坏力更大的海啸而更微小地改变地表形态。

### 3.2 理论分析

在小球下落到浅水的实验中，由于小球在水中运动的时间较短，我们可以忽略水的静压对小球运动的影响。在此过程中，有多个状态会进行重叠，所以我们可以粗略地把小球运动的过程分为四个部分，首先是小球撞击水面；其次是小球在水中接触到沙子之前的运动，拖曳系数是  $c_1$ ；接着是小球撞击沙子；最后是小球接触到沙子后的运动，拖曳系数是  $c_2$ 。对于第一部分，因为小球的质量相对于体积较大，所以我们可以忽略小球的空气阻力，当小球从一定高度下落，小球的势能转化为动能可得：

$$E_0 = m_0gh = \frac{1}{2}m_0v^2 \quad (2)$$

$m_0$  为小球的质量， $E_0$  为小球撞击水面前的能量，显然小球撞击水面时的能量与小球下落的高度呈正相关。

在小球撞击水面时，其能量必定会有损耗，我们将小球能量的变化比设为  $e_1$ ，所以水获得的总能量  $E_1$  有方程：

$$E_1 = (1 - e_1) E_0 = M_1 gH_m + U_1 \quad (3)$$

$M_1$  为溅起水膜的总质量， $H_m$  为水膜能够溅起来的最大高度，此时水的动能为 0， $U_1$  是撞击后水膜所具有的内能。所以当小球下落的高度越高时，水所获得能量也就越高，能溅起来的水膜的量以及高度就越大，这与实验中的现象是一致的。

接着我们对小球在水中的运动来进行分析，根据牛顿第二定律与能量守恒定律，可得方程：

$$\frac{1}{2}c_1\rho_1S \left(\frac{dx}{dt}\right)^2 - mg = m \frac{d^2x}{dt^2} \quad (4)$$

$$e_1E_0 = \int_0^H \left[\frac{1}{2}c_1\rho_1S \left(\frac{dx}{dt}\right)^2 - mg\right] dx + E_2 \quad (5)$$

$S$  为小球的横截面积， $\rho_1$  为水的密度， $x$  是小球从接触水面起运动的位移， $c_1$  为水的拖曳系数， $E_2$  为小球撞击沙子前所具有的能量，其中  $S = \pi[R^2 - (R - x)^2]$ ，代入式中化简得：

$$\frac{1}{2}c_1\rho_1\pi(2Rx - x^2)\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 - mg = m \frac{d^2x}{dt^2} \quad (6)$$

$$e_1 E_0 = \int_0^H \left[ \frac{1}{2} c_1 \rho_1 \pi (2Rx - x^2) \left( \frac{dx}{dt} \right)^2 - mg \right] dx + E_2 \quad (7)$$

由于相较于小球下落的高度  $H$ ，水的深度  $h$  较小，所以在分析小球碰撞水面及沙子的过程中，我们可以不考虑水的静压对小球运动的影响， $E_2$  为小球在碰撞沙子前的动能。

最后是小球撞击沙子以及小球在撞击沙子以后的运动，这两部分我们可以看作是同时发生的。与撞击水面、在水中一样，我们也可以得到式子：

$$E_3 = (1 - e_2) E_2 = \frac{1}{2} M_2 v_m^2 + U_2 \quad (8)$$

$$e_2 E_2 = \int_0^D (f - mg) dx \quad (9)$$

$$f - mg = m \frac{d^2 x}{dt^2} \quad (10)$$

其中， $e_2$  为撞击沙子时小球的能量变化比， $E_3$  为沙子获得的总能量， $v_m$  为沙子所获得的最大速度， $c_2$ 、 $\rho_2$  分别为沙子的拖曳系数与密度， $D$  为小球撞击形成的坑的深度， $U_2$  为撞击后沙子所获得的内能，根据前人通过实验所推得的经验公式可知[9]，小球在沙子中所受到的阻力与小球陷入沙子的深度  $x$  还有一定的关系，即  $f = \frac{1}{2} c_2 \rho_2 \pi (2Rx - x^2) \left( \frac{dx}{dt} \right)^2 + kx$ 。

对于 (8) 式，我们可以看到，由于水和沙子对小球的阻力较大，使得  $E_1$  较小，这导致了当小球下落的高度较小时（即  $E_2$  较小时），沙子获得能量  $E_2$  较小，从而不足将沙子溅起向四周扩散形成冲击波；对于 (10) 式， $D$  是随  $E_2$  的增大而增大的，当水的深度  $H$  一定时，小球下落的高度  $h$  越大， $E_2$  越大，所以坑的深度越大、坑的直径越大，但由于小球在经历一系列的过程之后能量损失极大， $e_1$ 、 $e_2$  都比较小，再加上沙子还会受到水的压强的作用，因此撞击坑的规模是明显比小球直接撞击陆地要小很多的。这与实验中的现象也是一致的。

我们再来看小球下落到深水的实验，在小球运动的过程中，其所经历的过程与小球下落到浅水的实验，只是在小球在水中运动的过程中，我们需要考虑水的静压的作用。同样根据牛顿第二定律与能量守恒定律，并将  $S = \pi[R^2 - (R - x)^2]$  代入，我们可得方程：

$$\rho_1 \pi (2Rx - x^2) \left[ \frac{1}{2} c_1 \left( \frac{dx}{dt} \right)^2 + gx \right] - mg = m \frac{d^2 x}{dt^2} \quad (11)$$

$$e_1 E_0 = \int_0^H \left( \rho_1 \pi (2Rx - x^2) \left( \frac{1}{2} c_1 \left( \frac{dx}{dt} \right)^2 + gx \right) - mg \right) dx + E_2 \quad (12)$$

对比(6)式、(7)式与(11)式、(12)式,我们便可以发现,在小球下落到深水中时,水的静压对小球能量损耗还是起到很大影响并且小球克服水的阻力做功比在浅水中多,这些因素也就导致了在深水中小球撞击沙子时所具有的能量 $E_2$ 相较于浅水时较小,从而引起了实验中所呈现的深水中的冲击波比浅水中的冲击波小的现象。

其实,在小球下落到浅水时,撞击水面、在水中运动、撞击沙子、在沙子中运动这四个过程在时间上是会有重叠的,这也就导致了小球撞击水时会同时撞击沙子,这在小球下落到深水的时候是不会发生的。所以说,对于在浅水中,(3)式可能会有所不同:

$$E_1 = (1 - e_1) E_0 - E' = M_1 g H_m + U_3 \quad (13)$$

$E'$ 为与小球撞击水面同时进行的撞击沙子产生的能量, $U_3$ 为这种情形下水所得到的内能。所以说,在下落高度相同时,小球下落到浅水中水能上升的高度 $H_m$ 是比深水小的,这与实验的现象一致。

这一系列的理论分析也就进一步的证明了我们在实验部分的猜想是正确的。当陨石落到浅滩的时候能更多地改变地表形态,引起地质变化,引发地震、火山喷发等地质灾害;当陨石落到深海时,便能引起大规模的海啸。

#### 四、模拟陨石低速撞击具有自转速度星球的研究

##### 4.1 实验

在实际情况中,一些星球的自转角速度比较大,由于惯性力与科里奥利力的影响,我们猜测可能会对陨石坑的形状造成一定的影响,使得坑的形状不完全对称,因此我们决定探究角速度对陨石撞击效果的影响。

我们将沙子倒入转动的铁盒中,并将小球从一定的高度由静止下落撞到沙子中,利用高帧相机对小球从撞击沙面开始进行拍摄,在测量记录下小球撞击坑在切向方向的直径 $x$ 与径向方向的直径 $y$ 。

##### 4.1.1 实验方案

以下是本次实验使用的器材:直径26.2cm的圆形铁盒;质量43g、直径2.20cm的小铁球;卷尺;游标卡尺;颗粒直径 $35\mu\text{m}$ 的粗沙;高帧率相机(500fps);可调速转台,如图4-1,4-2。我们用胶枪将饼干盒固定在转台上,从而保证沙子的转速与圆盘一致。



图 4-1



图 4-2

#### 4.1.2 圆盘转速不同实验

改变圆盘转速，小球从一定高度由静止释放，撞入圆盘同一位置。当角速度  $\omega = 7\text{rad/s}$  时，我们用高帧相机从上方拍摄了小球撞击的全过程，如图 4-3（如补充视频 5）：

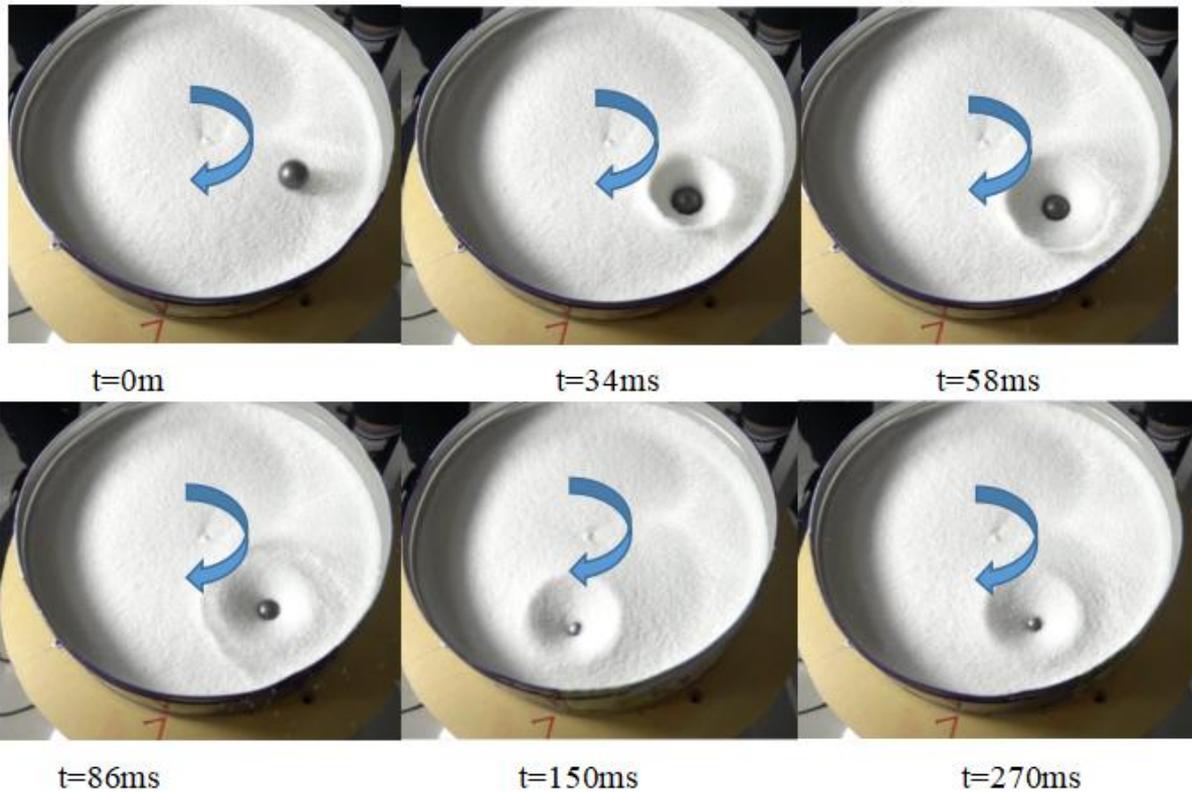


图 4-3

在此过程中，一旦小球接触沙面就会受到沙子切向方向的力使得小球在此后的过程中随圆盘一起作圆周运动，与此同时小球会继续往沙子中运动，但最终小球并不会完全浸没于沙子中，形成的坑近乎是一个圆。

当  $\omega = 9\text{rad/s}$  时，小球撞击的全过程与形成的坑如图 4-4：

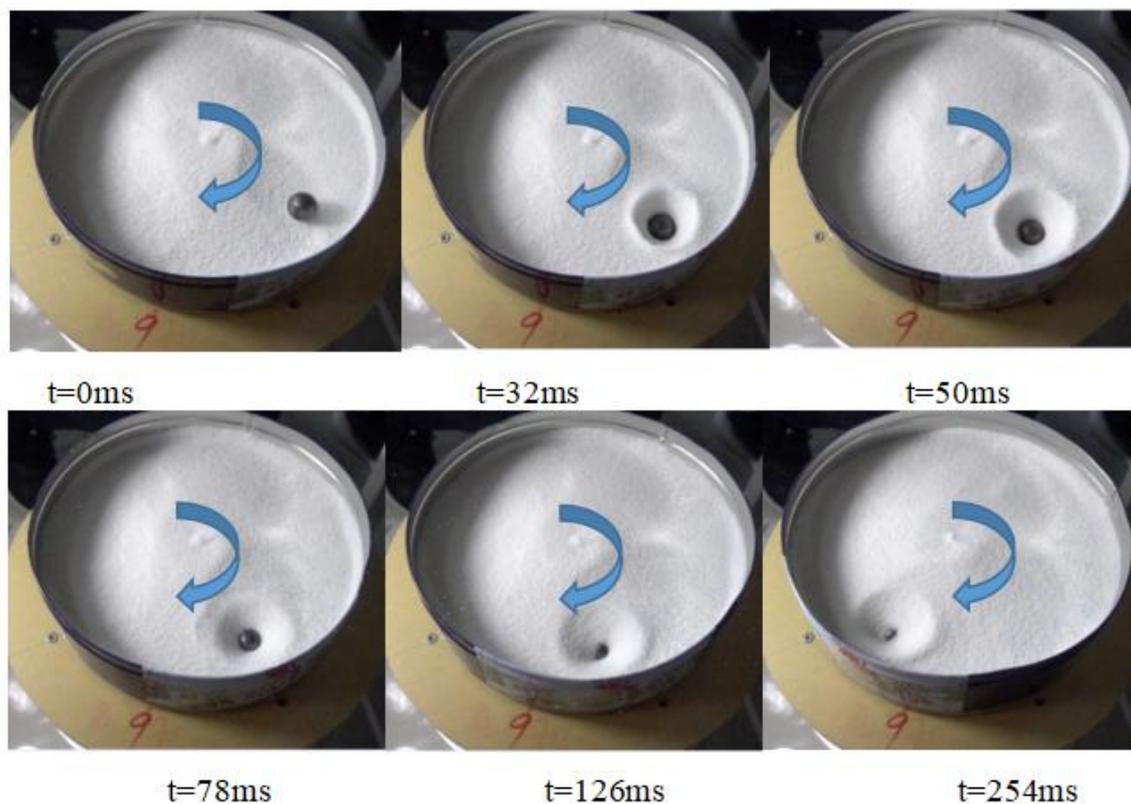


图 4-4

在此过程中，由于圆盘转动的角速度还相对较小，其运动的情形与角速度  $\omega = 7\text{rad/s}$  时的运动情形相似，小球最终也未浸没于沙子中，形成的坑也相似。

即使上述两种情形圆盘转动的角速度不同，但测量出来的  $x$  与  $y$  都分别近乎相等，也就是说，纵使改变了圆盘的角速度，小球撞击沙子形成的坑的大小几乎是没有改变的。

当我们进一步调大圆盘的转速达到  $\omega=12\text{rad/s}$  时, 小球运动的情形就会发生一些新奇的变化, 如图 4-5 (如补充视频 6) :

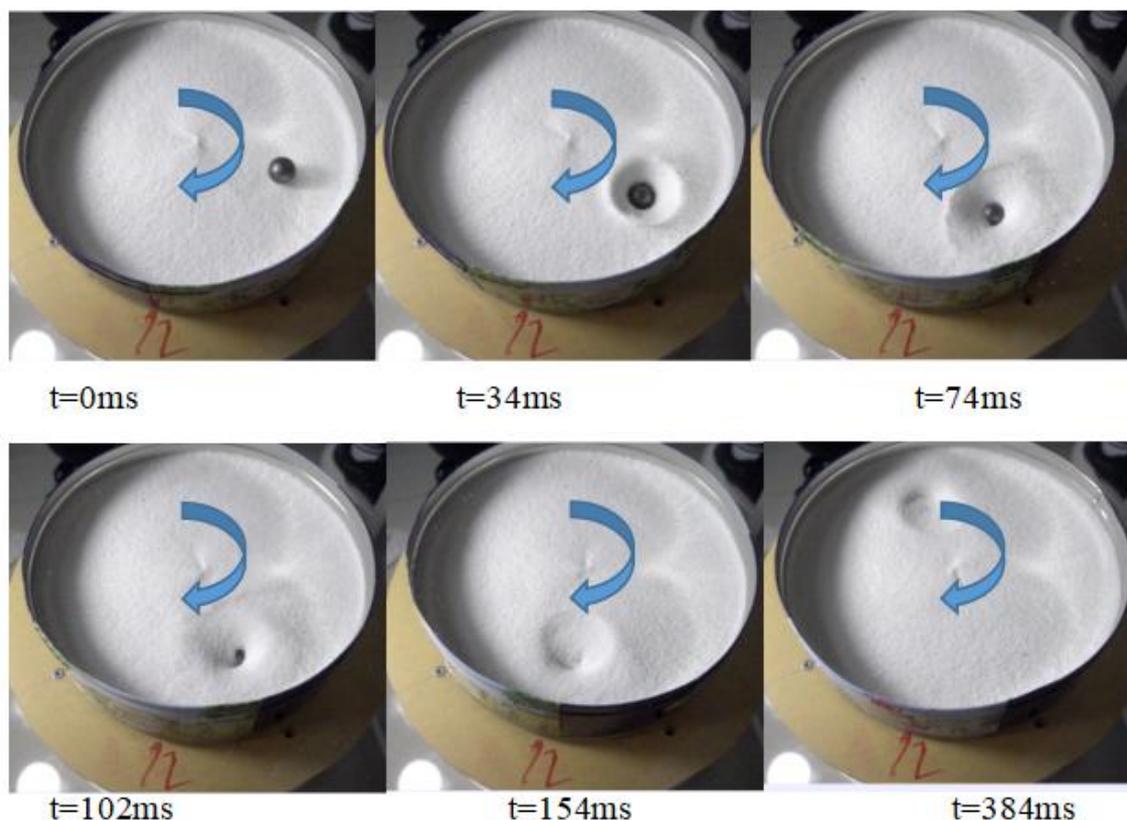


图 4-5

在此过程中, 小球接触沙面时其仍会受到一个切向的力使其随圆盘一同做圆周运动, 但在小球不断下落的过程中, 小球撞击出来的坑周围的沙子会因为圆盘转动的角速度太大而坍塌, 最终将小球完全浸没在沙子中。测量  $x$ 、 $y$  的大小, 我们发现此时的坑径向上的直径明显大于切向上的直径, 且与之前的实验相比,  $x$ 、 $y$  的大小都明显减小。通过观测坑的形状, 我们发现, 小球径向两侧的沙子呈现不同形态: 小球内侧的坑壁较缓, 外侧的坑壁较陡, 且坑从整体上是向圆心方向拉伸的。回看视频, 我们发现此类现象是由于内侧沙子塌陷更快导致的。根据所测沙坑的  $x$ 、 $y$  分别关于  $\omega$  的数据, 我们绘制了如图 4-6、图 4-7 的图像。

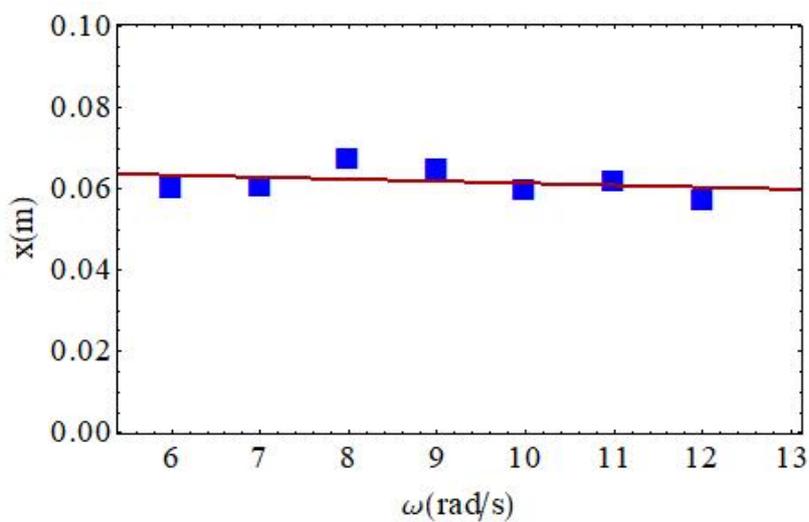


图 4-6

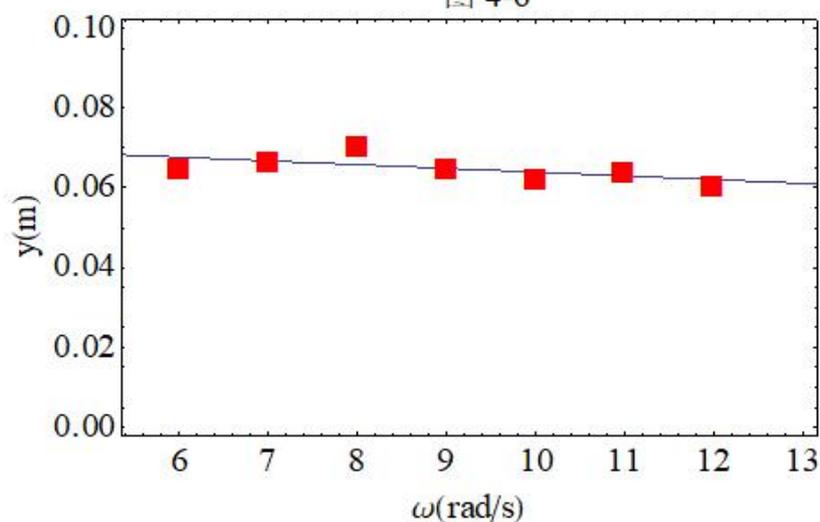


图 4-7

由图像可以发现，随 $\omega$ 的增大，径向上沙子的塌陷越来越明显，使得坑的径向直径略大于切向直径；而当 $\omega$ 过大时，沙子塌陷过多，使得坑的直径反而变小，因此实验图像在总体上呈现下降趋势。

#### 4.1.3 小球撞击位置不同实验

改变小球释放的位置，小球从一定高度由静止释放，撞入以相同角速度转动的沙子中。我们改变小球的落点到圆盘圆心的距离，记作  $r$ ，记录了不同的  $r$  对应坑的径向直径  $y$  的大小，取不同的圆盘转速  $\omega$  完成了 4 组实验，并绘制了如图 4-8 所示的图像。

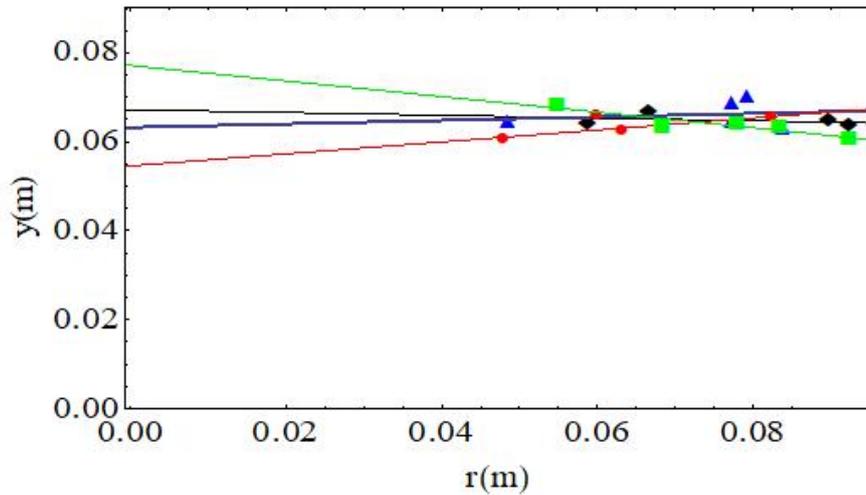


图 4-8

其中，拟合曲线由上到下分别是 $\omega=8\text{rad/s}$ 、 $\omega=9\text{rad/s}$ 、 $\omega=10\text{rad/s}$ 和 $\omega=12\text{rad/s}$ 时得到的函数图像，我们不难发现，在 $\omega < 9\text{rad/s}$ 时， $y$ 随 $r$ 的增大呈减小趋势；而 $\omega=9\text{rad/s}$ 时， $y$ 几乎不随 $r$ 的变化而变化；当 $\omega > 9\text{rad/s}$ 时， $y$ 却随 $r$ 的增大呈增大趋势。实验发现，落点到转轴的距离 $r$ 可能会对坑的直径造成一定的影响。

#### 4.1.4 小球撞击速度不同实验

改变小球释放的高度，从同一位置撞入同一转速的沙子中。我们控制小球的落点到转轴的距离相等，从不同的高度由静止释放小球，撞入相同转速的沙子中，并记录了坑的切向直径 $x$ 与径向直径 $y$ 。取不同的 $\omega$ 完成了3组实验。绘制的图像如图4-9和图4-10所示。

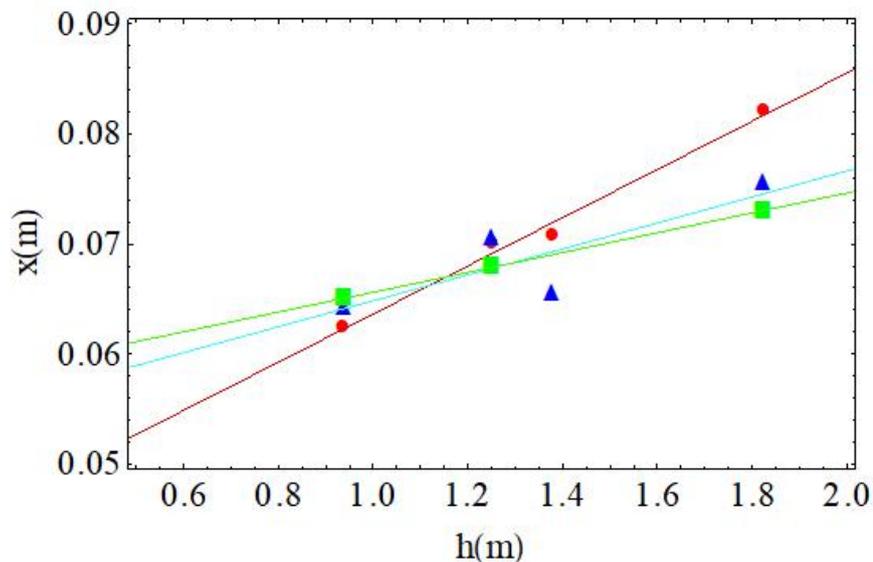


图 4-9

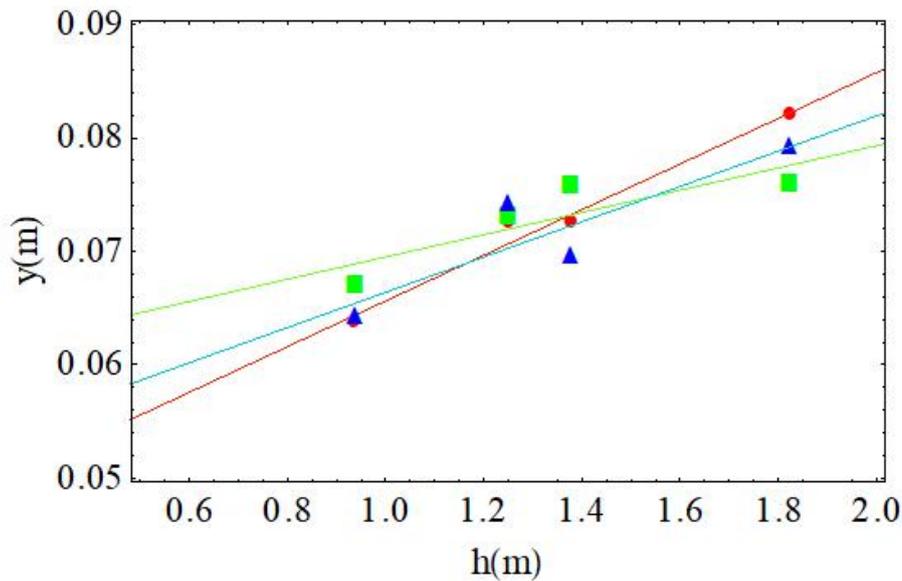


图 4-10

其中，图 4-9、图 4-10 的拟合曲线从上到下分别是  $\omega=12\text{rad/s}$ 、 $\omega=6\text{rad/s}$ 、 $\omega=9\text{rad/s}$  时得到的函数图像。从两个图像可以发现下落高度确实与坑的直径呈正相关的关系，但影响程度不一，其中当  $\omega=9\text{rad/s}$  时，高度  $h$  对  $x$  和  $y$  的影响都是最大的。而当我们比较  $x$  与  $y$  随  $h$  的增长情况不难发现： $y$  的增长率在总体上大于  $x$ ，这也从一个侧面证明了我们之前的猜想：在存在角速度的情况下， $y$  的变化总是大于  $x$  的变化。

从以上对三个不同影响因素的探究中，我们初步总结出以下几点：1. 小球下落高度  $h$  越大，坑的直径越大；2. 沙子受角速度的影响塌陷，且径向内侧的沙子塌陷现象更明显，导致坑的径向直径  $y$  往往大于切向直径  $x$ ，且坑的形状向圆心处拉伸；3. 角速度越大，沙子的塌陷速度越快，角速度过大时，由于沙子塌陷过快，导致坑的形状会变小。

## 4.2 理论分析

我们可将上述过程分为两部分来分析：小球撞击沙面与沙子塌陷的过程。

### 4.2.1 小球撞击沙面

针对小球撞击沙面的过程，我们以小球为研究对象，探究小球的运动情况。以圆盘的圆心为原点，落点的切向线速度方向为  $x$  轴正方向，落点上远离半径方向为  $y$  轴正方向，竖直向上方向为  $z$  轴正方向，建立如图 4-11 所示的空间直角

坐标系（非惯性系）。

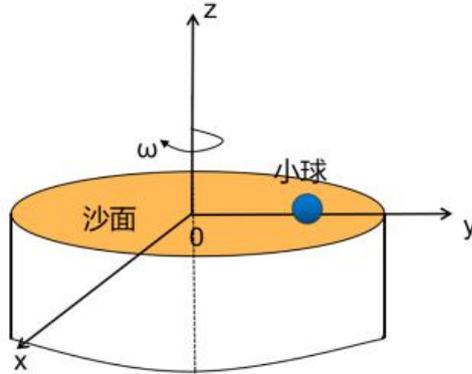


图 4-11

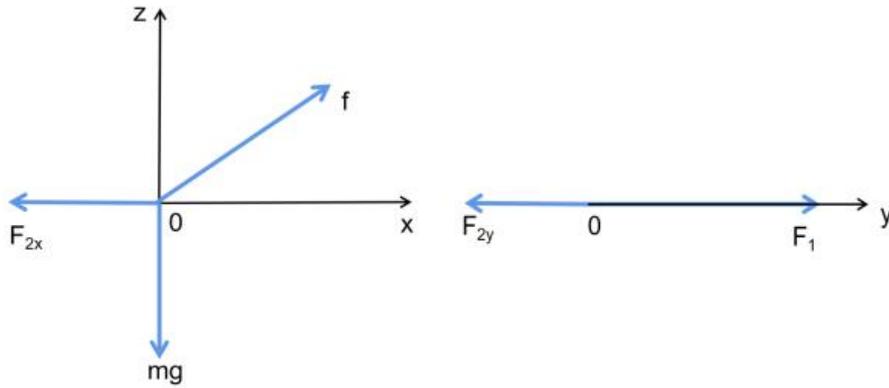


图 4-12

图 4-13

设小球的质量为  $m$ ，圆盘的角速度为  $\omega$ ，记小球在沙子中受到的阻力为  $f$ ，受到的惯性离心力为  $F_1$ ，科里奥利力为  $F_2$ ，在  $x$  方向和在  $y$  方向的分量分别为  $F_{2x}$ 、 $F_{2y}$ 。当小球刚下落到圆盘处时，记小球相对于圆盘的速度为  $v$ ，在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向上的分量分别是  $v_x$ 、 $v_y$ 、 $v_z$ 。分别在三个方向上对小球进行受力分析，侧视图与  $y$  方向的受力分析分别如图 4-12 和图 4-13 所示。

对于  $x$  轴上的受力情况，有

$$m \frac{dv_x}{dt} = f - F_{2x} \quad (14)$$

其中  $f = cSv^\alpha + kz$  将  $f$  在  $x$  方向上的分量  $f = (cSv^\alpha + kz) \cos \theta$ ， $F_2$  在  $x$  方向上的分量  $F_{2x} = -2mv_y\omega$  代入得

$$m \frac{dv_x}{dt} = (cSv^\alpha + kz) \cos \theta - 2mv_y\omega \quad (15)$$

对于  $z$  轴上的受力情况, 有

$$m \frac{dv_z}{dt} = mg - (cSv^\alpha + kz) \sin \theta \quad (16)$$

在上述 (15) 式、(16) 式中  $\theta$  为小球所受阻力  $f$  与  $x$  方向的夹角,  $c$  为小球在沙子中的拖曳系数,  $S$  为小球在沙中运动时速度方向上的横截面积。前人实验测得沙子对小球的阻力和速度的平方近似成正比, 所以  $\alpha$  取 2。

对  $y$  轴上的受力情况, 有

$$m \frac{dv_y}{dt} = F_1 + F_{2y} \quad (17)$$

将  $F_{1y} = m\omega^2 r$ ,  $F_{2y} = -2mv_x\omega$  代入得

$$m \frac{dv_y}{dt} = m\omega^2 r - 2mv_x\omega \quad (18)$$

其中,  $r$  是小球的落点相对于原点的位矢。由于在实际运动情况中  $y$  方向小球的运动速度较小, 相对于  $v_x$ 、 $v_z$  可忽略不计, 所以沙子提供的阻力  $f$  在  $y$  方向, 圆盘转动的科里奥力  $F_2$  在  $x$  方向上的分量可忽略不计, 即 (15) 式中的  $v_y$  取 0。由于  $y$  方向上小球的位移相对于  $r$  较小, 所以整个过程中  $r$  的变化近似不变。

从小球下落到小球撞击沙面的一瞬间的过程中, 小球受重力和空气阻力的作用, 由于小球体积较小, 空气阻力远小于小球所受重力, 即有

$$mgh = \frac{1}{2}mv_z^2 \quad (19)$$

所以

$$v_z = \sqrt{2gh} \quad (20)$$

小球落点相对于原点的位矢为  $r$ , 所以小球落点处沙子的线速度  $v'$  满足:

$$v' = v_x = -\omega r \quad (21)$$

又因为阻力  $f$  与小球相对于圆盘的运动速度  $v_2$  近似成正比, 由于小球撞击沙面的时间极短, 所以设小球所受阻力  $f$  与  $x$  方向的夹角  $\theta$  近似不变, 则  $\theta$  满足:

$$\tan \theta = \left( \frac{v_z}{v_x} \right)^2 = \frac{2gh}{(\omega r)^2} \quad (22)$$

在此处我们将  $S$  取为小球截面积, 设小球半径为  $R$ , 即

$$S = \pi R^2 \quad (23)$$

将 (19) ~ (22) 式代入 (14)、(15)、(17) 式，并联立，得到以下方程组

$$\begin{cases} m \frac{dv_x}{dt} = [c\pi R^2(v_z^2 + v_x^2) + kz] \frac{(\omega r)^2}{\sqrt{(\omega r)^4 + (2gh)^2}} \\ m \frac{dv_y}{dt} = m\omega^2 r - 2mv_x\omega \\ m \frac{dv_z}{dt} = mg - [c\pi R^2(v_z^2 + v_x^2) + kz] \frac{(2gh)^2}{\sqrt{(\omega r)^4 + (2gh)^2}} \end{cases} \quad (24)$$

#### 4.2.2 沙子塌陷

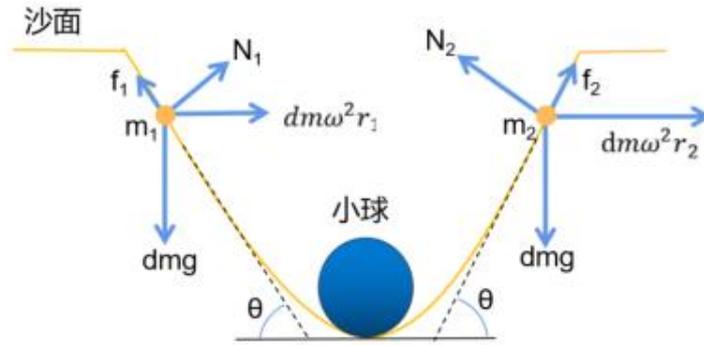


图 4-16

接着我们对沙子塌陷的过程进行了分析，各取小球径向内外侧坑壁上的一段质点  $m_1$ 、 $m_2$ ，设质量都为  $dm$ ，对两段质点进行受力分析，如图 4-16 所示。设内侧与外侧质点到转轴的距离分别为  $r_1$ 、 $r_2$  ( $r_2 > r_1$ )，圆盘角速度为  $\omega$ ，内侧质点受到的支持力与摩擦力分别为  $N_1$ 、 $f_1$ ，外侧质点受到的支持力与摩擦力分别为  $N_2$ 、 $f_2$ 。

由 4.2.1 的分析我们可得小球刚撞击沙面时，对径向内侧与径向外侧的沙子的作用效果基本相同。因此内侧与外侧的沙子和水平面的夹角相等，设所取的质点与水平面的夹角为  $\theta$ ，且  $\theta$  为整段坑壁与水平面的最大夹角，因此有

$$N_1 = dm g \cos \theta - dm \omega^2 r_1 \quad (25)$$

$$N_2 = dm g \cos \theta + dm \omega^2 r_2 \quad (26)$$

因此有  $N_1 < N_2$ 。设沙子间的摩擦系数为  $\mu$ ，则  $f_1$ 、 $f_2$  的最大值分别为  $\mu N_1$ 、 $\mu N_2$ 。  
当质点未下滑时，有

$$\mu N_1 \geq dm g \sin \theta + dm \omega^2 r_1 \cos \theta \quad (27)$$

$$\mu N_2 \geq dm g \sin \theta - dm \omega^2 r_2 \cos \theta \quad (28)$$

将 (25) 式代入 (27) 式，(26) 式代入 (28) 式，可分别得到内侧与外侧沙子发生相对滑动的临界角速度  $\omega_1$ 、 $\omega_2$ ，即

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{(\mu \cos \theta - \sin \theta)g}{(\mu + \cos \theta)r_1}} \quad (29)$$

$$\omega_2 = \sqrt{\frac{(\sin \theta - \mu \cos \theta)g}{(\mu + \cos \theta)r_2}} \quad (30)$$

忽略沙子在自然情况下塌陷的影响，可看作沙子是在自然塌陷达到稳定后在惯性离心力的作用下继续塌陷，即

$$\mu \cos \theta \geq \sin \theta \quad (31)$$

所以外侧的沙子不可能在惯性离心力的作用下向下塌陷，坑的形状的改变是由内侧沙子塌陷导致的。

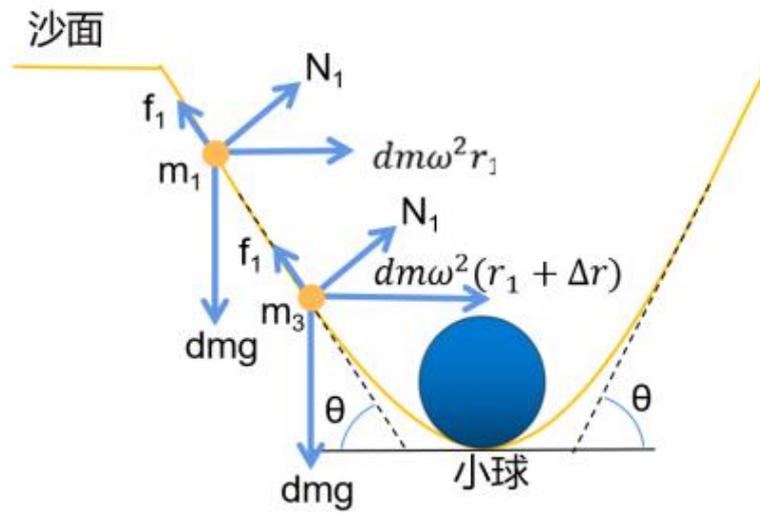


图 4-17

对于内侧坑壁上坑顶和坑底的两个质点  $m_1$ 、 $m_3$ ，其到转轴的距离不同，设  $m_3$  到转轴的距离为  $r_1 + \Delta r$ ，因此，对  $m_3$  进行受力分析，若质点不发生相对滑动，则有

$$\mu[dm g \cos \theta - dm \omega^2 (r_1 + \Delta r)] \geq dm g \sin \theta + dm \omega^2 (r_1 + \Delta r) \cos \theta \quad (32)$$

则 $m_3$ 的临界角速度为

$$\omega_3 = \sqrt{\frac{(\mu \cos \theta - \sin \theta)g}{(\mu + \cos \theta)(r_1 + \Delta r)}} \quad (33)$$

所以 $\omega_3 < \omega_1$ ，也就是说，随着沙子转动的角速度 $\omega$ 的逐渐增大，坑底的沙子先发生相对滑动，当 $\omega > \omega_1$ 时，小球内侧的沙子会发生完全坍塌。

接下来，我们讨论为什么坑的直径会随 $\omega$ 的增大先增大后减小。

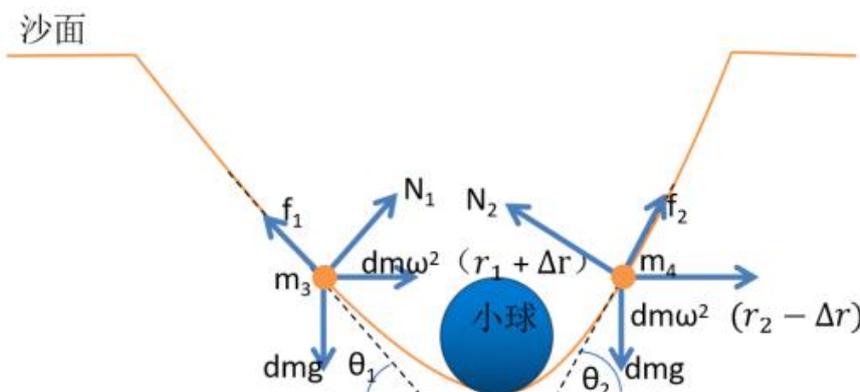


图 4-18

设平衡后小球内侧和外侧的坑壁与水平面的夹角分别为 $\theta_1$ 、 $\theta_2$ ，则此时有 $\theta_1 < \theta$ ， $\theta_2 > \theta$ ，如图 4-18 所示。

在内外侧坑底上各取一个质点 $m_3$ 、 $m_4$ ，由于小球在随转盘一起转动的过程中，相对于转盘的位置并未发生改变，因此，可忽略 $m_3$ 、 $m_4$ 到转轴距离的改变。由于在自然塌陷情况下，坑径向的内外侧近似对称，因此设 $m_3$ 、 $m_4$ 到转轴的距离分别为 $r_1 + \Delta r$ ， $r_2 - \Delta r$ 。因为沙子塌陷后，小球内侧的沙子恰好平衡，所以：

$$\mu[dmg \cos \theta_1 - dm\omega^2(r_1 + \Delta r)] = dmg \sin \theta_1 + dm\omega^2(r_1 + \Delta r) \cos \theta_1 \quad (34)$$

所以有：

$$\theta_1 = \arcsin \frac{-\mu\omega^2(r_1 + \Delta r)}{\sqrt{(1 + \mu^2)g^2 + \omega^4(r_1 + \Delta r)^2 - 2\mu g \omega^2(r_1 + \Delta r)}} - \arctan \frac{\omega^2(r_1 + \Delta r) - \mu g}{g} \quad (35)$$

因为小球外侧的沙子在惯性力离心力作用下有向外移动的趋势，因此外侧坑壁上沙子的堆积会更加紧密，即沙子间的摩擦系数增大，设为 $\mu_1$  ( $\mu_1 > \mu$ ) 由于小球会阻挡内侧的沙子向外侧流动，稳定后外侧的沙子也应受力平衡，即

$$\mu_1(dmg \cos \theta_2 + dm\omega^2 r_2) = dmg \sin \theta_2 - dm\omega^2 r_2 \cos \theta_2 \quad (36)$$

所以

$$\theta_2 = \arcsin \frac{\mu_1 \omega^2 (r_2 + \Delta r)}{\sqrt{(1 + \mu_1^2) g^2 + \omega^4 (r_2 + \Delta r)^2 + 2 \mu_1 g \omega^2 (r_2 + \Delta r)}} + \arctan \frac{\omega^2 (r_2 + \Delta r) + \mu_1 g}{g} \quad (37)$$

设单位面积内的沙子的量为  $n$ ，塌陷前坑的深度为  $h$ ，则横截面上的沙子向下塌陷的量为：

$$N = \left( \frac{h^2}{\tan \theta} - \frac{h^2}{\tan \theta_1} \right) n \quad (38)$$

坑的直径变化为：

$$D = \frac{h}{\tan \theta_1} + \frac{h}{\tan \theta_2} \quad (39)$$

原坑的直径为  $D_0 = \frac{2h}{\tan \theta}$ ，由于  $\tan \theta_1 > \tan \theta > \tan \theta_2$ ，且有沙子的损失，所以有  $D > D_0$ ，但随着  $\omega$  的增大， $\theta_1$  会逐渐减小，所以横截面上沙子向下坍塌的量会逐渐增多，当  $\omega$  过大时，向下坍塌的沙子的量足以将原有的坑覆盖，最终使得坑的直径变小。

由上述理论分析可以证明我们的猜想，即径向内侧的沙子受到角速度的影响往往会向下坍塌，且随着角速度的增大，径向直径会呈现先增大后减小到最后坑完全消失的现象，最终形成坑的形状与小球下落高度、小球质量、地质松软以及落点到转轴的距离都有关联。鉴于本实验只局限于低速陨石状态的模拟，且并没有考虑陨石初速度的方向，因此现实情况下自转星体上的陨石坑可能与我们的实验模拟有所出入。但通过对上述现象的研究，我们可以推测：现实情况下，自转较快的星体上的陨石坑往往较浅甚至很容易消失。

## 五、总结与展望

本研究首先结合国外对陆地上陨石坑的研究分析了陨石撞击陆地的情形，模拟了陨石撞击浅滩、深水与自转速度较大的星球的情景，并对三种情景做了定量分析，研究了陨石撞击不同地带引起的不同结果。

我们通过模拟小球撞击不同深度的水，得出了随小球下落高度的增大，小球所能溅起的水膜与撞击沙子所形成的坑也随之增大的结论。特别地，当速度达到一定值后，沙面会形成一圈冲击波，而当水的深度越深时，小球所能溅起的水膜越大，形成的冲击波与坑的直径越小。因此，当陨石落到浅滩的时候产生的冲击波能更多地改变地表形态，引起地质变化；而落在深海时由于能量损耗，冲击波较小，对地貌的影响也随之减小。进而，目前对于深海陨石的搜寻比浅滩陨石要困难许多。

接着，我们通过模拟小球撞击自转角速度不同的沙盘，但由于沙子受惯性离心力的作用且沙子的离散程度较大，导致了随角速度的增大，沙子会在径向发生坍塌从而导致了沙子的撞击坑径向直径往往大于切向直径，径向直径的变化快于切向的变化，而且当角速度很大时，沙子会完全地坍塌将小球掩埋，从而导致撞击坑的消失。进一步地，我们便可以得出，当陨石撞击自转速度不同的星球时，会形成径向直径大于切向直径的撞击坑，且在自转速度较大的星球上，撞击坑可能会由于地质原因而消失。

我们对一系列情形的陨石撞击进行模拟对于研究陨石撞击引起的地质变化、寻找未发现的陨石坑、以及对高速自转的系外行星陨石撞击坑与环形山的深入研究的方面都可能具有一定的参考价值。

### 参考文献:

- [1] Pacheco-Vazquez, Felipe, Anya Tacuma, and J. O. Marston. "Craters produced by explosions in a granular medium." *Physical Review E* 96.3 (2017): 032904.
- [2] Amato, Joseph C., and Roger E. Williams. "Crater formation in the laboratory: An introductory experiment in error analysis." *American Journal of Physics* 66.2 (1998): 141-143.
- [3] Uehara, J. S., et al. "Low-speed impact craters in loose granular media." *Physical Review Letters* 90.19 (2003): 194301.
- [4] Pacheco-Vázquez, F., and J. C. Ruiz-Suárez. "Impact craters in granular media: grains against grains." *Physical review letters* 107.21 (2011): 218001.
- [5] Walsh, Amanda M., et al. "Morphology and scaling of impact craters in granular media." *Physical review letters* 91.10 (2003): 104301.
- [6] Tracker 是一款通过分析视频中物体运动来提取相关物理信息的软件，官网 <https://tracker.physlets.org>
- [7] Dowling, David R., and Thomas R. Dowling. "Scaling of impact craters in unconsolidated granular materials." *American journal of physics* 81.11 (2013): 875-878.
- [8] Parmentier, Justine, Vincent Terrapon, and Tristan Gilet. "Drop impact on thin film: Mixing, thickness variations, and ejections." *Physical Review Fluids* 8.5 (2023): 053603.
- [9] Katsuragi, Hiroaki, and Douglas J. Durian. "Unified force law for granular impact cratering." *Nature physics* 3.6 (2007): 420-423.

## 附录

### 研究历程

2023.02

本小组经讨论，在老师指导下寻找研究方向，经过讨论，本小组开始研究有关陨石撞击坑的问题，并购买了各类有关器材，开始了初步的研究。然后本小组开始着手于设计预实验来验证已有文献资料中所提到的撞击坑直径和深度与小球直径和高度的关系是否正确。在实验过程中我们发现由于坑的底部到沙面的距离，我们无法准确地测出坑的深度，因此我们在探究小球高度与坑的深度的实验中所得出的数据毫无规律，因此我们决定放弃研究小球下落的高度与撞击坑深度的关系。

2023.03-04

本小组开始分析坑的深度与小球释放高度实验的数据，由于撞击坑的边缘较为模糊，我们也没有非常精确的测量工具，因此我们不能准确地测量出坑的直径，在对数据进行分析之后，我们发现所得到的结果与已有的文献有一些差距，但由于误差较小所以我们认为偏差是由测量误差所引起的。之后我们引入了已有的陨石坑数据，发现所绘出的函数图像与其能够吻合因此此实验较为成功。

2023.05

联想到地球表面百分之七十都是海洋，所以我们认为大部分的陨石都落在了海洋里，于是本小组决定用小球撞击带水的沙面来模拟陨石撞击海洋的情形。我们将小球从不同的高度释放来模拟不同速度的小球撞击的情形。我们首先研究了小球撞击水面时产生的水膜的形状，接着我们用 Tracker 对所拍的视频进行了分析，得到了水膜的最大半径与小球下落高度的关系。本小组开始研究小球撞击水面后的坑的大小，却发现在高度较低的情况下，根本无法形成撞击坑，所以这个实验完全失败。再请教老师后我们发现，在真实情况中陨石相对于地球的速度极快，并且地球上的海域有浅有深，于是我们决定分两个实验来探究此问题。

2023.06

由于前一次实验的失败，我们对实验进行了改进，我们将细沙换成粗沙，因为我们认为地球海洋中沙子颗粒较大，接着我们保证了水相对于沙子是饱和的，接着我们分为了两个实验，一个为深水一个为浅水。在浅水的实验中，通过计算我们

控制水平面在沙子平面之上 0.6cm，在深水实验中，我们控制水面在沙子平面的 1cm 之上。我们发现在深水中可以形成一个完整的水膜而在浅水中不行。我们对沙坑的直径进行了分析，我们对小球下落高度与坑的直径等数据进行了分析，得到了  $\log_{10}H$  与  $\log_{10}D$  是呈线性关系的，但由于误差影响，实验数据无法全部分布在直线上，我们认为误差是由于沙子的松紧程度不同引起的。

### 2023.7

考虑到地球自身具有一定的自转速度，且宇宙中不同的星球自转的速度也不同，本小组认为星球的自转对陨石撞击具有一定的影响，于是本小组利用一个可调节角速度的旋转器，套上装有沙子的铁盒来模拟转动的星球，其间如何让铁盒平稳地转动是一个极大的难点，由于铁盒是不透明的，我们在钻孔时是很难把空完美地打在铁盒底部的圆心，在经过历次的尝试后，铁盒才平稳地在旋转器上转动，然后，我们才能开始实验。实验过程中，我们分为了三个部分：一个是让小球撞击不同的位置即距圆心的  $R$  不同，模拟陨石撞击同一自转速度星球的不同位置；一个是让小球下落的高度不同，模拟不同速度的陨石撞击同一自转速度星球同一位置的情形；一个是沙盘的角速度不同，让小球从同一高度下落，模拟的是相同速度的陨石撞击不同转速的星球。然后我们对实验所得数据进行处理并加以理论分析，起初本小组所推出的理论分析与实验结果相反，再进行不断的更正后，最终才推出了与实验结果一致的理论。

## 致谢

本项目源自我们在网络上看到的墨西哥希克苏鲁伯湾陨石坑，以及天文科普书籍中对有关陨石撞击等的讨论，再联想到人们所发现的陨石坑数量并不多，由此我们猜想海洋中是否存在大量的陨石坑，陆地上的陨石坑是否会消失。我们对这些问题背后的物理知识感到好奇，查阅资料后，关于陨石撞击坑的形成规律在国外已有了广泛的研究，但是关于海洋中的陨石坑和陨石坑是否会消失方面的研究却有所欠缺，于是我们开始了有关“陨石撞地球”的研究。

我们三人在研究过程中团结合作，共同完成了研究工作。黄陈苏新负责了预实验部分的论文撰写，季彦宇负责了模拟陨石撞击海面部分的论文撰写，孙尔康负责了模拟陨石低速撞击具有自转速度星球部分的论文撰写。三人共同进行了实验的研究和数据的分析处理。

我们要向始终给予我们耐心指导的苏俊老师表达真挚的感谢，他对我们实验课题的确定、实验方案的设计、实验原理的分析以及最终论文的撰写等方面给予了很多帮助，非常感谢王维国老师在基础物理知识的学习方面为我们提供帮助。感谢江苏省海安高级中学实验室的老师们提供实验场地。感谢家长的理解和支持。

姓名：孙尔康

性别：男

学校：江苏省海安高级中学

年级：高二

简介：全面发展各科成绩，对物理有浓厚的兴趣，有较强的组织能力和团队意识，能够协调好组内的各项工作，严于律己，在学习生活中刻苦钻研，积极思考，并具有较强的语言表达能力。

姓名：季彦宇

性别：男

学校：江苏省海安高级中学

年级：高二

简介：学习成绩优异，认真观察生活中的各种物理现象，并进行深入的思考研究，各项学习活动均积极参加。具备极强的创新精神和团队责任感，在团队内有较强的观察能力，具有精益求精、持之以恒的态度。

姓名：黄陈苏新

性别：男

学校：江苏省海安高级中学

年级：高二

简介：学习成绩优异，各门学科都能做到均衡发展，对物理和数学的学习有较大兴趣。富有好奇心，课余时间经常钻研一些难题，并乐于分享讨论，动手能力较强。