

中華民國第 62 屆中小學科學展覽會

作品說明書

國中組 物理科

團隊合作獎

030109

「氣蓋山河」 --- 氣壓式流化床餵食器的研究

學校名稱：臺中市立居仁國民中學

作者：	指導老師：
國一 蔣睿恩	潘瑾卿
國一 湯家鈞	蔡明致
國一 梁喬媛	

關鍵詞：流化床(Fluidizedbed)、拱橋堆疊、最密堆積

摘要

本研究應用流化床以迴風使固體顆粒懸浮的流體原理，改良振動式餵食器，分析粒徑 5mm 飼料的阻塞因素，發展降塞策略。研究成果有：

1. 阻塞因素是環狀堆積會縮小出口，並促成最密堆積而不易崩落。
2. 飼料桶漏斗提供內側吹風管及中央迴風圓筒，提供向下出料壓力及向上迴風懸浮力，可達最佳出料速率(4940 顆 BB 彈/秒)。
3. 本研究之最佳結構為：
 - a. 圓柱形料桶：直徑 12cm，高度 30cm，漏斗口直徑 2cm。
 - b. 中央迴風圓筒：直徑 6cm，迴風口距漏斗口 3cm。
 - c. 吹風管：水平角度 45 度、吹口距漏斗口 1cm。
4. 出料動力參數為統內顆粒空間密度 0.22g/cm^3 ，風速 16.7m/s ，堆積壓力 4g/cm^2 (5/8 筒高)時，可達吹風出料，停風停料的效果。

壹、研究動機

觀察到 mark rober 在影片中製作流化床把人沉到沙池中的原理。流化床為透過向上的氣流，等達一定速度時，使顆粒處在懸浮狀態，即稱為最低流化速度，可隨顆粒大小(所需的懸浮力)以及床層的深度(重量壓力)而發生變化。

聯想到如果能夠將該原理應用於定量餵食器，可以透過風壓以及氣流來達到讓在漏斗口阻塞的飼料順利掉落，但是當停止吹風時又能讓飼料再度卡住，於是可以藉此做出能夠定時定量的餵食器，取代現今市面上經常看到在出料時會發生阻塞問題的餵食器。














圖 1-1、流化床 (Mark Rober, 2017)

貳、研究目的

- 一、方形漏斗出口徑倍率對出料速率的影響
- 二、方形漏斗側面角度對出料速率的影響
- 三、圓錐出口徑倍率對出料速率的影響
- 四、圓錐入出面積比對出料速率的影響
- 五、方形漏斗與圓錐漏斗在不同的出口徑倍率比時的卡關百分比比較
- 六、水平吹風角度對出料速率的影響
- 七、柱形中央管高度及中央管寬度對出料速率的比較
- 八、添加吹管高度對出料速率的影響
- 九、拱橋堆積生成種類與產生率的統計
- 十、飼料堆積高度對出料速率的影響

參、研究設備及器材

塑膠瓦楞板	板擦機	漏斗	可變電阻燈座	水桶
				
書架	BB 彈	手機錄影	寶特瓶	PVC 水管
				
水管	膠帶	透明片	Tracker 影像分析軟體	da vinci nano 3D 列印機
				 取自 XYZPRINTING 官 網

肆、研究過程或方法

一、重要名詞解釋

(一)流化床：固體顆粒物質（通常存在於保持容器）在適當的條件下放置，以使固/液混合物以表現為流體。這通常通過顆粒介質引入加壓流體來實現。這導致介質具有許多普通流體的特性，例如在重力作用下自由流動的能力，或使用流體類型技術進行泵送的能力。(維基百科，2021)。

(二)漏斗斜面阻力(摩擦力)：指兩個表面接觸的粗糙物體相對運動或存在相對運動的趨勢時阻礙它們相對運動的力(維基百科，2021)。摩擦力的大小和兩物體接觸面積的大小無關；和接觸面垂直的正向力有關；摩擦力阻止物體的運動，因此方向和物體的運動方向相反；摩擦力與接觸面粗糙程度有關，愈粗造的接觸面，所產生的摩擦力將愈大(王耀輝，2011)。

(三)Dyson 渦流吸力原理：吸塵器也是通過螺旋槳的轉動形成氣流，從而吸入垃圾。吸入的垃圾有兩種收集方法。一種是將垃圾直接吸入過濾器過濾的方式，另一種是使風撞擊內壁形成像龍捲風一樣的氣流，將在離心力作用下分離的垃圾導入集塵器的「旋風式」。戴森的吸塵器是後者，即旋風式，僅將漏吸的一點灰塵收集到後段的過濾器中。為了形成旋流風，會消耗大量電力，但優點是過濾器不會堵。號稱吸力永不減弱的秘密就在於此(Felix，2021)

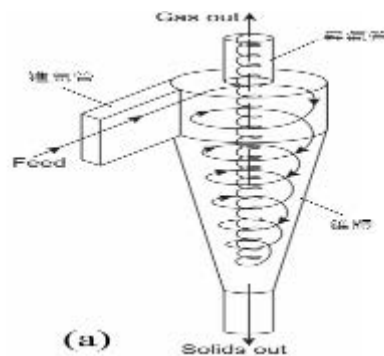


圖 4-1-1 旋風分離器結構說明 (Felix，2021)

(四)拱橋結構：拱橋中央弧形楔形石彼此接合的部分能夠彼此向外擠壓，再由拱橋兩邊的石牆所提供反作用力支撐不向外擴大而崩塌。所以，拱橋靠楔形石彼此的擠壓力跟摩擦力的支撐而形成。

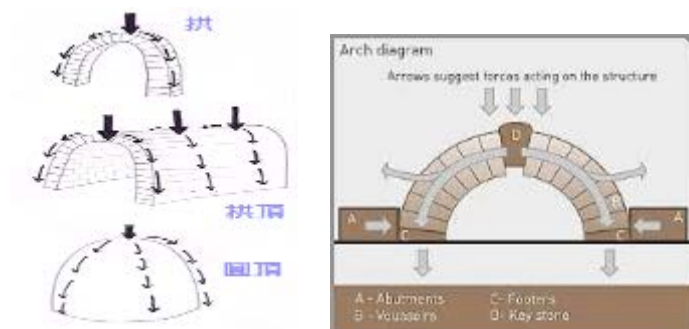


圖 4-1-2 拱橋結構說明 (左圖：小胡桃姊姊，2003；右圖：戴明鳳，2010)

(五)常見的堆積方式及密度關係如下：(維基百科)

堆積方式	六方堆積	面心立方堆積	體心立方堆積	簡單立方堆積	鑽石結構	隨機堆積
密度	74%	74%	68%	52%	34%	59%~64%

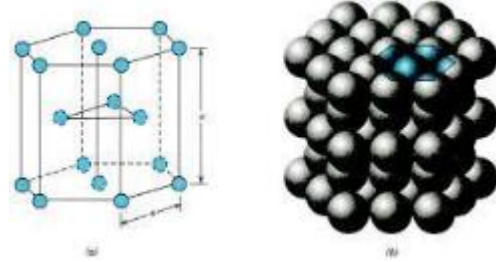


圖 4-1-3 六方最密堆積晶格結構

(六)實驗一-實驗二的裝置與定義: 方形漏斗三視圖如圖 4-1-4，側面角度為由出口延伸出的底線與漏斗側面的夾角。

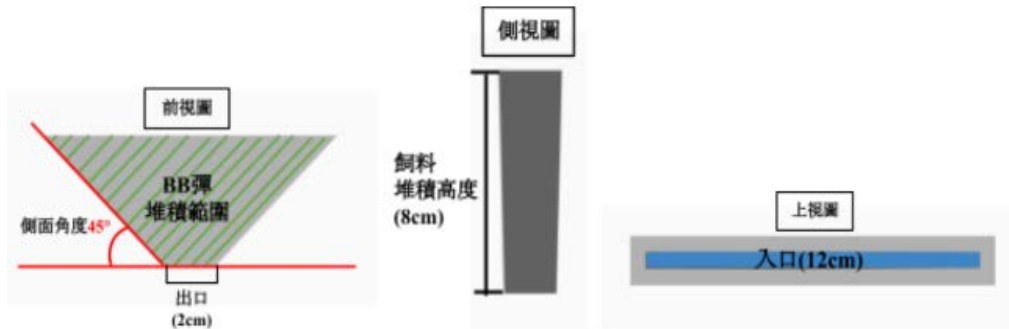


圖 4-1-4 方形漏斗三視圖

(以入口徑 12cm、出口徑 2cm、側面角度 45°、8cm 高的漏斗為例)

(七)實驗三-實驗四的裝置與定義:圓錐漏斗的尺寸與定義如圖 4-1-5。

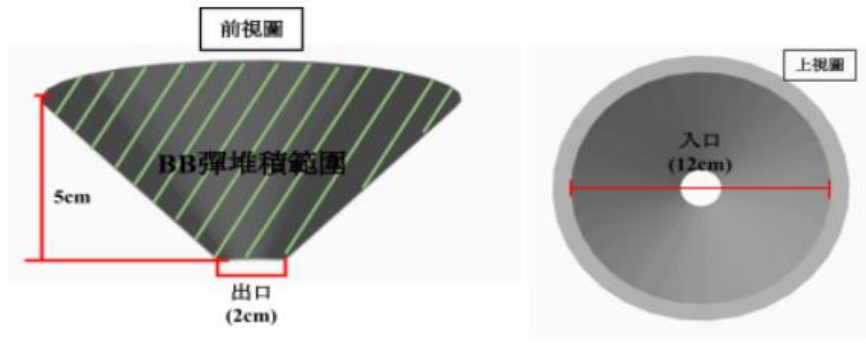


圖 4-1-5 圓錐漏斗

(八)實驗六-實驗十的裝置與定義:如圖 4-1-6，**水平吹風角度**為由吹風管裝入漏斗的**切線與吹風管的夾角**。**中央迴風管高度(=迴風口深度)**為如圖中**中央迴風管底部與出料口的距離**。**吹管高度**為如圖中**吹管的底部與出料口的距離**。飼料堆積高度滿口為 1，圖中為 5/8 堆積圖。

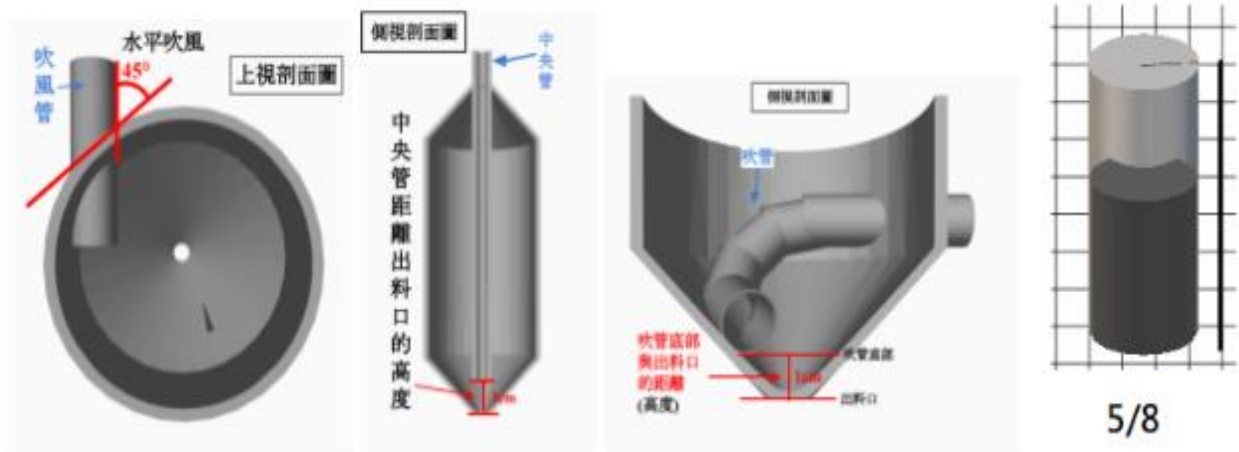


圖 4-1-6 水平吹風角度(45°風吹)上視剖面圖、中央管高度(3cm)側視剖面圖、吹管高度(1cm)側視剖面圖、堆積高度(5/8)前視圖

二、實驗方法

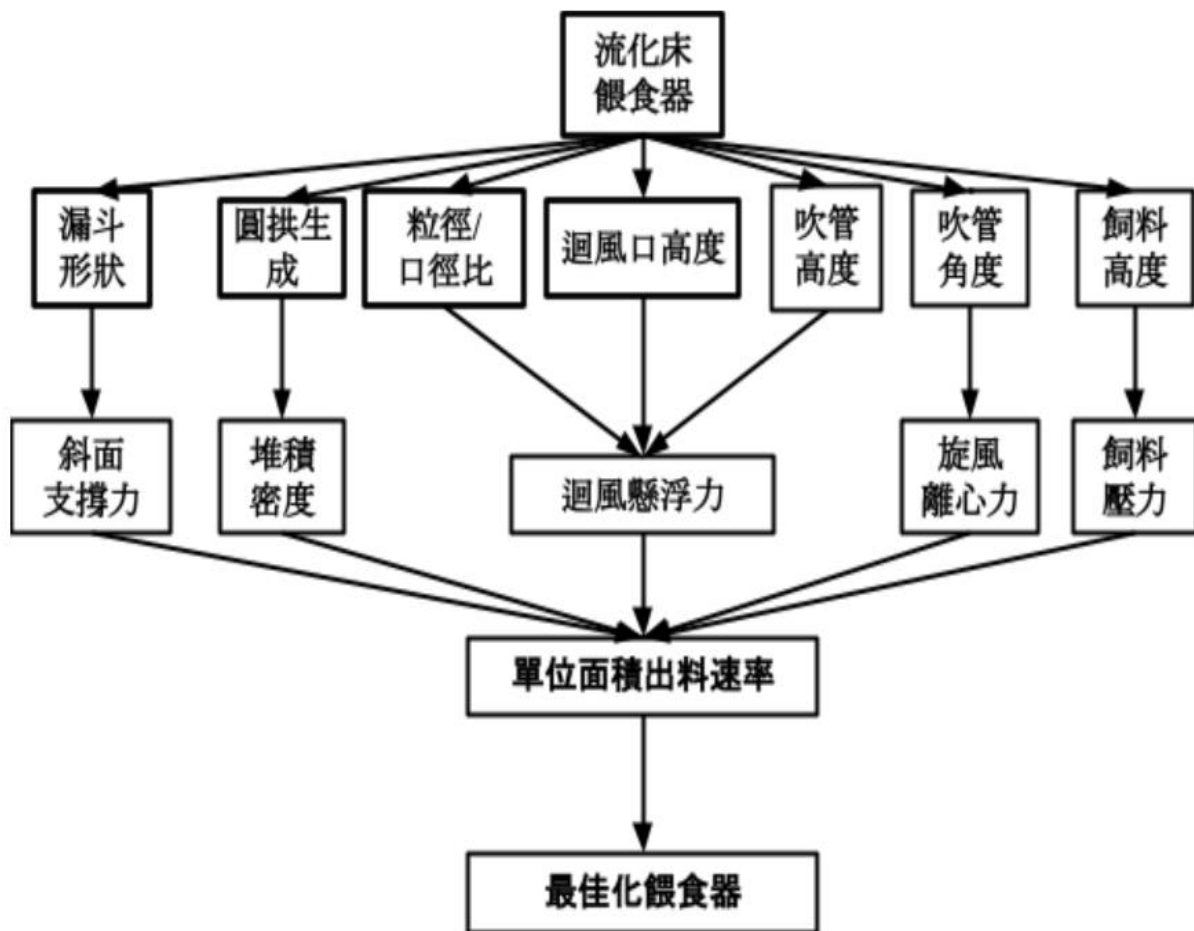


圖 4-2-1 實驗研究架構圖

伍、研究步驟

(一)、方形漏斗出口徑倍率對出料速率的影響

1. 取塑膠瓦楞板製作餵食器漏斗(入口口徑，45 度坡度)。
2. 將漏斗口徑分為五種口徑(2X、3X、4X、5X、6X BB 彈直徑)。
3. 使用固定備料高度(5cm 固定壓力)數量 BB 彈代替飼料進行出料速率的測量。
4. 打開閘門後，紀錄出料量與時間，計算出料速率。
5. 畫出直徑比例對出料速率的統計圖。



圖 5-1-1 方形漏斗漏斗入口直徑(Rin)與出口直徑(Rout)二維示意圖及實際照片

(二)、方形漏斗側面角度對出料速率的影響

1. 取現成方形漏斗(側面角度 40、50、60、70、80、90 度)、書架、BB 彈。
2. 將漏斗分成上述各式角度。
3. 使用以上不同角度的方形漏斗在同樣飼料高度和出口寬度的情況下做實驗。
4. 畫出方形漏斗側面角度對出料速率的統計圖。

(三)、圓錐出口徑倍率對出料速率的影響

1. 取現成漏斗(出口口徑 2、4、6、8、10、12cm，45 度坡度)。
2. 將漏斗用鋸子鋸成以上的直徑公分。
3. 使用固定備料高度(5cm 固定壓力)數量 BB 彈代替飼料進行出料速率的測量。
4. 畫出直徑比例對出料速率的統計圖。

(四)、圓錐入出面積比對出料速率的影響

1. 取現成漏斗(出口口徑 2、4、6、8、10、12cm，45 度坡度)。
2. 將漏斗用鋸子鋸成以上的直徑公分。
3. 使用固定備料高度(5cm 固定壓力)數量 BB 彈代替飼料進行出料速率的測量。
4. 畫出入出面積比對出料速率的統計圖。

(五)、方形漏斗與圓形漏斗在不同出口徑倍率比時的卡關百分比比較

1. 取板擦機、漏斗、紗網、BB 彈。
2. 分析兩種漏斗在不同的顆粒倍率比時的卡關百分比。
3. 畫出入出面積比對出料速率的統計圖。

(六)、**水平吹風角度對出料速率**的影響

1. 取板擦機、漏斗、紗網、BB 彈。
2. 將漏斗開一個 2cm 直徑的孔，再把板擦機的出風孔接上針筒。
3. 使用固定備料高度(7cm 固定壓力)數量 BB 彈代替飼料進行出料速率的測量。
4. 畫出**吹氣水平角度對出料速率**的統計圖。

(七)、柱形**中央迴風管高度及漏斗口寬度對出料速率**的比較

1. 取板擦機、漏斗、紗網、BB 彈、水管(2cm)。
2. 將直徑 2cm 的漏斗插入 2cm 直徑的水管，然後按照不同的深度去做實驗。
3. 使用固定備料高度(7cm 固定壓力)數量 BB 彈代替飼料進行出料速率的測量。
4. 畫出**中央迴風管高度對出料速率**的統計圖。

(八)、添加**吹管高度對出料速率**的影響

1. 取板擦機、漏斗、紗網、BB 彈、水管(2cm)。
2. 將吹風口的管子加長且將其裝上漏斗，然後比較吹風口與出料口的高度去做實驗。
3. 使用固定備料(8cm 固定壓力)數量 BB 彈代替飼料進行出料速率的測量。
4. 畫出**添加底管高度對出料速率**的統計圖。

(九)、**拱橋堆積生成種類與產生率**的統計

1. 取板擦機、漏斗、紗網、BB 彈、水管(2cm)。
2. 將第七個實驗的所有失敗時在漏斗口阻塞的 BB 彈拍照記錄下來。
3. 分析 BB 彈阻塞的類型。
4. 畫出**拱橋堆積生成種類與產生率**的統計圖。



5-1-2 漏斗口阻塞的實際照片

(十)、**飼料堆積高度對出料速率**的影響

1. 取板擦機、圓錐漏斗、紗網、BB 彈、水管(2cm)。
2. 將出料桶分為 10 種高度，每次實驗都使用同樣的風壓和吹風時間，但是裝入不同高度的 BB 彈。
3. 分析各種高度下的出料速率。
4. 畫出**飼料堆積高度對出料速率**的統計圖。

陸、研究結果與討論

一、方形漏斗出口徑倍率對出料速率的影響

(一)、實驗設計

1. 假設：出口徑與飼料直徑比例越大出料速率越快。
2. 操縱變因：出口徑與飼料直徑比例。
 - (1)基本定義：出口徑直徑長除以 BB 彈直徑長。
3. 控制變因：漏斗角度、漏斗側面角度、口徑高、壓力大小。
4. 應變變因：每秒平均出料速率。
5. 實驗結果：

表 6-1-1 方形漏斗出口徑倍率對出料速率的影響

出口徑倍率 Rout/R _b	漏斗入口直徑 Rin	漏斗出口直徑 Rout	入出面積比 Rin ² /Rout ²	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	平均出料速率 (Nbb/t)	總次數	卡住次數	卡關百分比
2	12	1	144.00	0	2	2	3	0	1	5	5	100.00
3	12	1.5	64.00	62	124	104	56	124	94	6	3	50.00
4	12	2	36.00	139	139	139	139	139	139	5	1	20.00
5	12	2.5	23.04	167	167	167	167	167	167	5	0	0.00
6	12	3	16.00	176	176	176	176	176	176	5	0	0.00
7	12	3.5	11.76	200	200	200	200	200	200	18	12	66.67
8	12	4	9.00	230	230	230	230	230	230	7	2	28.57

圖6-1-1 方形漏斗出口徑倍率對出料速率的影響

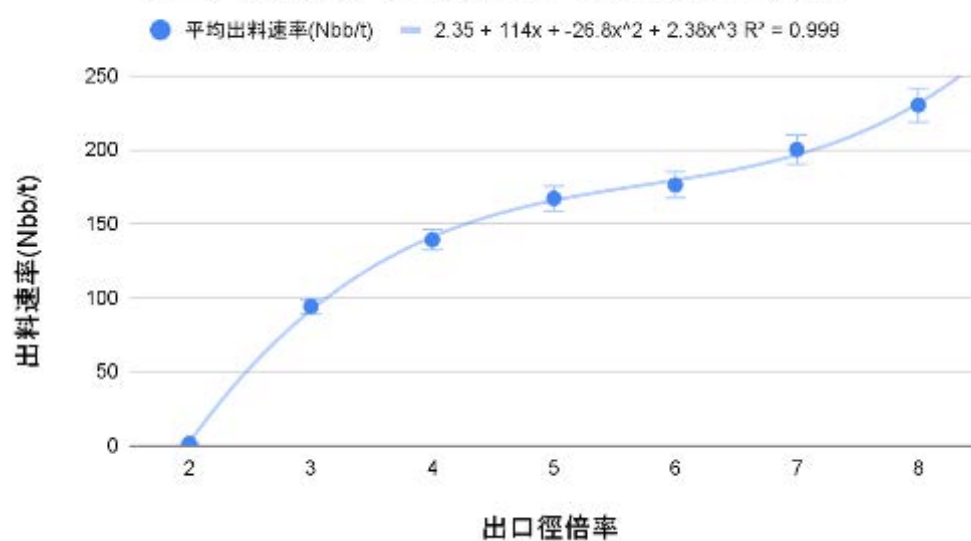


圖 6-1-1 方形漏斗出口徑倍率對出料速率的影響

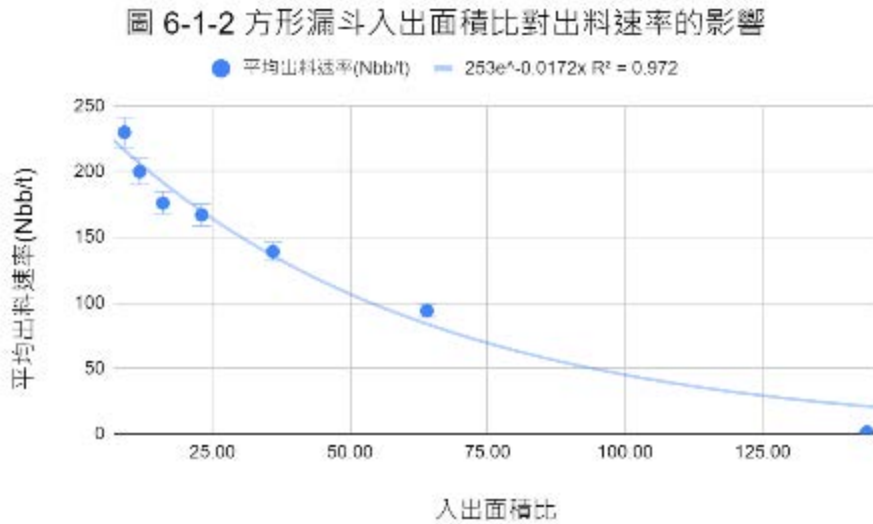


圖 6-1-2 方形漏斗出入面積比對出料速率的影響

(二)、實驗結果與討論

1. **因果關係**：由圖 6-1-1，利用出口倍率三次方與出料速率作圖， $R^2=0.999$ 可知，出料速率最大約在出口直徑大小為 **BB 彈之 6 倍**時發生，出口徑大於 6 時出料速率快也容易卡住，由圖 6-1-2 知道，飼料桶身的出入面積比越小，出料速率越快。
2. **原理解釋**：飼料**順著斜面掉落**時會**產生一定的速度**，出口不夠大(2-4 倍)時，飼料容易被**阻擋在洞口**，但當出口太大時，出料速率加快造成**飼料之間快速的接觸**，滾動不易阻塞洞口。
3. **新發現新應用**：設計餵食器時應**注意飼料的顆粒大小**，設計**適當比例的出口直徑能穩定出料**，桶身設計以**直筒狀為佳**，可使用吹氣與否來解決飼料會塞住出口的問題。

BB 彈 直徑:0.5cm

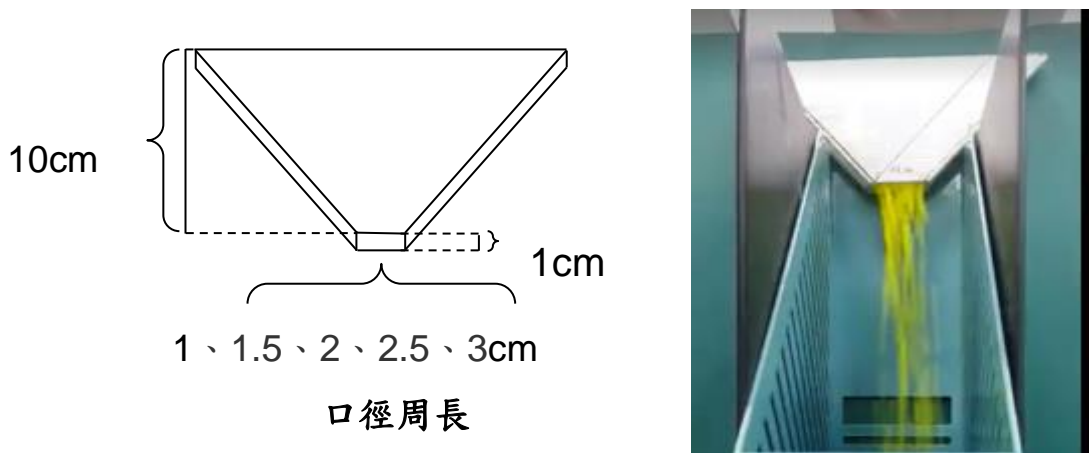


圖 6-1-3 方形漏斗設計圖及實際照片

二、方形漏斗角度對出料速率的影響

(一)、實驗設計

1. 假設:漏斗角度愈大，會因為側面的支撐力愈小而造成出料速率愈快。
2. 操縱變因:漏斗角度
 - (1)基本定義:方形漏斗如圖 4-1-4，若假設任何摩擦力為 0，可得以下分力計算。
 下滑力計算公式為:下滑測壓力=重力*Sin(夾角弧度)。
 橫向支撐力計算公式為:橫向支撐力=下滑力*Cos(夾角弧度)。
3. 控制變因:漏斗出口口徑、BB 彈堆積高度。
4. 應變變因:每秒鐘平均出料速率
5. 實驗結果:

表 6-2-1 方形漏斗側面角度對出料速率的影響

方形漏斗角度	下滑力	橫向支撐力	第一次 (顆)	第一次 (秒)	第二次 (顆)	第二次 (秒)	第三次 (顆)	第三次 (秒)	平均出料量 (顆)	平均時間(秒)	平均出料速率	失敗次數	總顆數
90	1.00	0.00	168	0.165	168	0.198	168	0.231	168	0.198	848	0	168
80	0.98	0.17	292	0.297	292	0.264	292	0.363	292	0.308	948	0	292
70	0.94	0.34	382	0.50	382	0.46	382	0.46	382	0.47	808	0	382
60	0.87	0.50	443	0.99	443	1.056	443	0.99	443	1.01	438	0	443
50	0.77	0.64	665	1.32	665	1.287	665	1.32	665	1.31	508	0	665
40	0.64	0.77	810	2.376	810	2.508	810	1.584	810	2.16	376	1	810

圖1.方形漏斗角度的橫向支撐力對出料速率的影響

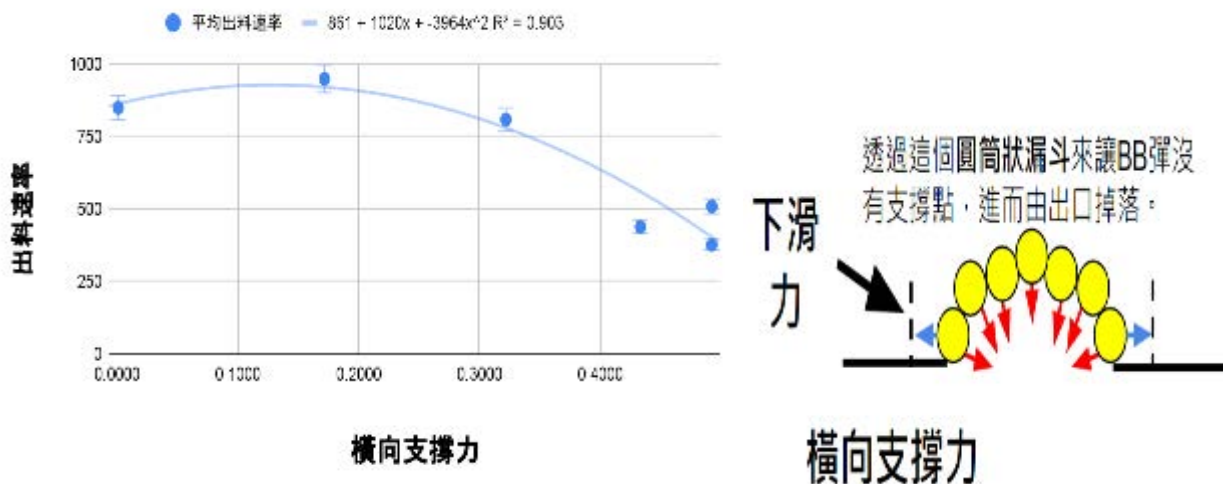


圖 6-2-1 方形漏斗側面角度的橫向支撐力對出料速率的影響

(二)研究結果與討論

1. 因果關係:由圖 6-2-1 可以得知，當側面角度為 80 度也就是阻塞力為 0.1717 時，出料速率最快，而 40 度出料速率最慢。
2. 原理解釋:漏斗角度愈大，使出料速率愈快。由文獻探討中知道，橫向支撐力為拱橋形成的正向要素之一，橫向支撐力愈小，出料速率便快。
3. 新發現新應用:設計餵食器時應注意飼料的顆粒大小，設計適當的漏斗角度就能穩定的快速出料。

三、圓錐出口徑倍率對出料速率的影響

(一)、實驗設計

1. 假設：口徑越大出料速率越快。
2. 操縱變因：口徑直徑的長度。
- (1)基本定義: 如圖 4-1-4，出口徑倍率為出口寬除以 BB 彈的直徑。
3. 控制變因：漏斗角度、漏斗側面角度、口徑高、壓力大小。
4. 應變變因：**每秒鐘平均出料速率**。
5. 實驗結果：

表 6-3-1 圓錐出口徑倍率對出料速率的影響

漏斗出口口徑	出口徑倍率(飼料徑比)	第一次	第一次	第二次	第二次	第三次	第三次	第四次	第四次	第五次	第五次	平均顆數	平均時間	平均出料速率
2	4	142	1.089	484	3.201	F		F		F		313	2.1	146
3	6	1450	1.98	1450	2.079	1450	2.079	1450	2.046	725	2.079	1305	2.1	636
4	8	1750	1.221	1750	1.32	1750	1.287	1750	1.287	F		1750	1.3	1369
5	10	2050	1.584	2050	0.858	2050	0.858	2050	0.858	2050	0.825	2050	1.0	2057
6	12	2300	0.66	2300	0.627	2300	0.594	2300	0.627	2300	0.627	2300	0.6	3668

註: F=失敗

圖6-3-1 圓錐出口徑倍率對出料速率的影響

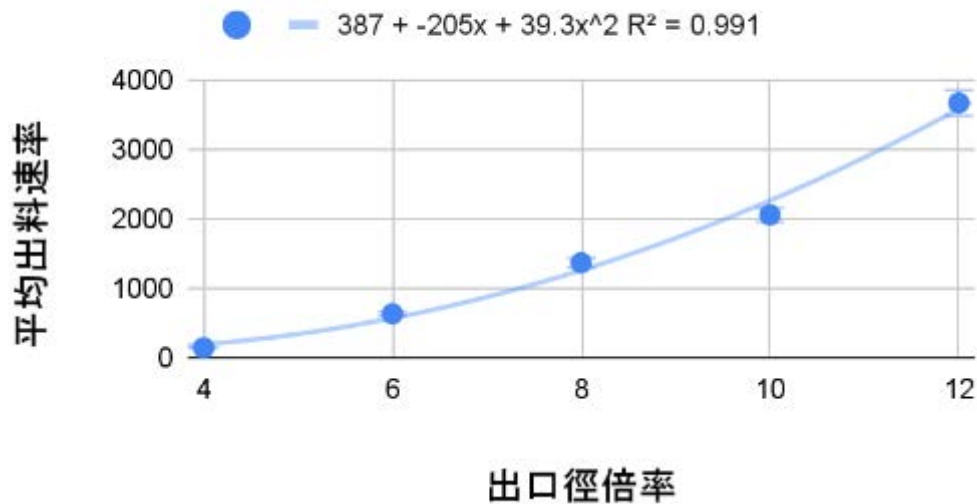


圖 6-3-1 圓錐出口徑倍率對出料速率的影響

(二)、實驗結果與討論

1. **因果關係**：由圖 6-3-1 可知，在圓形漏斗下，出料速率隨出口徑倍率之三次方增大而增大 ($R^2=0.951$)，當出口徑 12 倍時，出料速率最大，每秒鐘高達 2,500 顆左右。並且比較圖 6-1-1 之方形出口之出料速率比較，當方形出口時，最高每秒 250 顆左右，當圓型出口時，出料速率最高約為 2500 顆左右，差約 10 倍速率，所以選用圓形出口下可使出料速率增加。並且出口直徑應為運動球體粒徑 5 倍以上。
2. **原理解釋**：**圓錐出口**的出料筒因為斜面的支撐角度，所以使得各方向的 BB 彈崩落速度相同，而方形出料筒在四邊具有夾角，造成崩落速率不一。由文獻尤真齊、梁芷蘋、黃禎安(2013)指出當出口粒徑為運動球體力徑 5 倍左右時，容易在出口形成拱橋結構造成阻塞，本實驗結果與之相符。

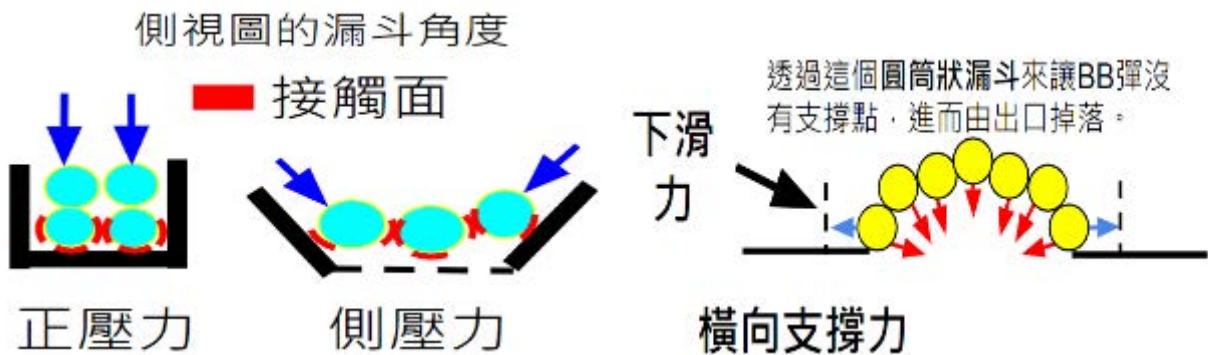


圖 6-3-2 方形漏斗、圓錐漏斗、圓筒漏斗側視圖

3. **新發現新應用**：使用圓形出料裝置可以使出料順利又快速，但出料速度太快可能造成飼料浪費，使用方形容器容易使飼料卡口，比較能控制飼料的釋放速度。

四、圓錐入出面積比對出料速率的影響

(一)、實驗設計

<ol style="list-style-type: none"> 1. 假設：出入面積比越小 (R_{in}^2/R_{out}^2)，出料速率越快 2. 操縱變因：出口徑直徑的長度 3. 基本定義：入出面積比為(入口徑²/出口徑²) 4. 控制變因：漏斗角度、漏斗側面角度(45度)、口徑高、壓力大小 5. 應變變因：每秒鐘平均出料速率 6. 實驗結果： 	<p>入口徑 6cm BB彈 直徑:0.5cm 10 cm 1、1.5、2、2.5、3cm 出口徑</p>
--	---

表 6-4-1 圓錐入出面積比對出料速率的影響

漏斗入口口徑	漏斗出口口徑	入出面積比	第一次	第一次	第二次	第二次	第三次	第三次	第四次	第四次	第五次	第五次	平均顆數	平均時間	平均出料速率
12	2	36.00	142	1.089	484	3.201	F		F		F		313	2.1	146
12	3	16.00	1450	1.98	1450	2.079	1450	2.079	1450	2.046	725	2.079	1305	2.1	636
12	4	9.00	1750	1.221	1750	1.32	1750	1.287	1750	1.287	F		1750	1.3	1369
12	5	5.76	2050	1.584	2050	0.858	2050	0.858	2050	0.858	2050	0.825	2050	1.0	2057
12	6	4.00	2300	0.66	2300	0.627	2300	0.594	2300	0.627	2300	0.627	2300	0.6	3668

註: F=失敗

圖 6-4-1 圓錐入出面積比對出料速率的影響

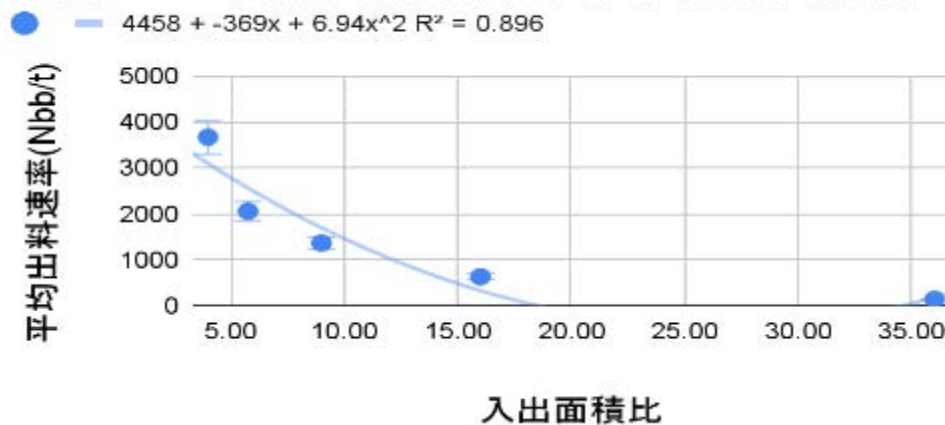


圖 6-4-1 圓錐入出面積比對出料速率的影響

(二)實驗結果與討論

1. **因果關係**：由圖 6-4-1，入出面積與出料速率成平方關係($R^2=0.895$)，出入口的倍率越大，即出口的直徑越小，其出料速率越小。
2. **原理解釋**：在相同斜面角度與相同彈珠高度下，圓筒狀比方形狀的投料桶出料速率快約 10 倍，代表製造 BB 彈間的滾動情況越多，越能引發出料。
3. **新發現新應用**：設計投料裝置時，一律出口徑接近入口徑為最佳，也就是直筒狀造型最佳。出口設計以圓錐造型為佳，如圖 4-1-5。

五、方形漏斗與圓形漏斗在出口徑倍率比時的卡關百分比比較

(一)、卡關百分比設計

1. 假設：圓形漏成功出料機率高，倍率>3 倍粒徑時，出料速率越快。
2. 操縱變因：漏斗形狀，出口徑與飼料的倍率比。
3. 控制變因：漏斗角度、漏斗側面角度、口徑高、壓力大小。
4. 應變變因：**卡關比例**。實驗結果：

表 6-5-1 方形漏斗與圓形漏斗在不同出口徑倍率比時的卡關百分比比較

方形口徑倍率	總次數	卡住次數	卡關百分比	圓形出口徑倍率	總次數	卡住次數	卡關百分比
4	5	1	20.00%	4	15.0	15	100%
5	5	0	0.00%	6	6.0	0	0%
6	5	0	0.00%	8	6.0	0	0%
7	18	12	66.67%	10	6.0	0	0%
8	7	2	28.57%	12	6.0	0	0%

圖 6-5-1 方形與圓形漏斗出口徑倍率對卡關次數百分比的影響

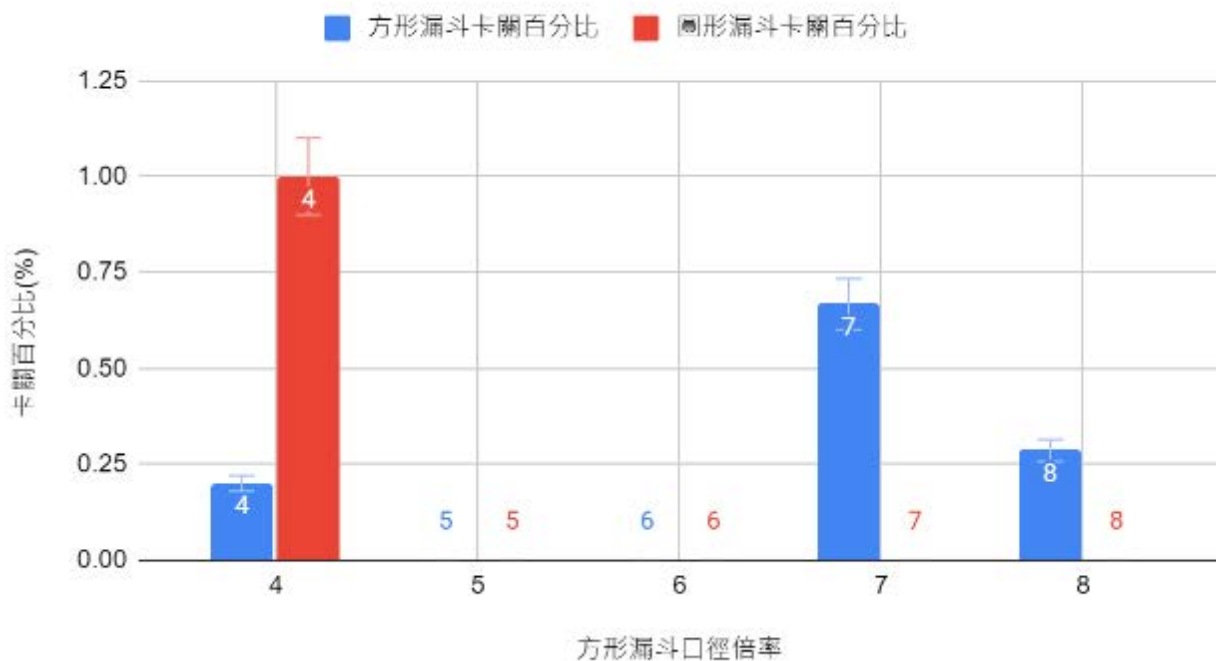


圖 6-5-1 方形與圓形漏斗口徑倍率對卡關次數百分比的影響

(二)、實驗結果與討論

1. 因果關係：由圖 6-5-1 圖 得知，圓形漏斗在口徑倍率為飼料直徑 4 倍之後成功出料，而方形口徑在口徑長為飼料之 5-6 倍時能穩定出料，而方形漏斗設計在出口徑倍率 5-6 倍時出料成功機率最高，達 100%。

2. **原理解釋**：由文獻尤真齊等(2013)可知，以 BB 彈進行顆粒流研究，當圓錐開口直徑約在顆粒直徑 5 倍左右時會形成拱橋堆疊的關鍵，大於 5 倍不易成拱橋堆疊，小於 5 倍成拱橋堆疊。

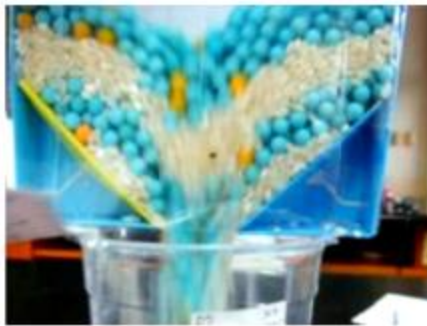


圖 6-5-2 顆粒流流動的情況(尤真齊等，2013)、本研究實驗狀況

3. **新發現新應用**：由實驗一至實驗五的討論可以知道，最能快速出料的飼料桶造型為直筒狀飼料桶與圓錐狀出口，出口徑為顆粒直徑 5 倍以上為佳，考量餵料也有需要停止的狀況，出口徑不宜過大，本研究利用流化床現象，配合通氣製造顆粒滾動，期能增加投料速度並達控制出料的效果，以下採直筒桶身與圓錐出料口結構進行氣流研究。

六、水平吹風角度對出料速率的影響

(一)、實驗設計

1. 假設：水平吹氣角度越大，出料速率越快。
2. 操縱變因：水平吹角角度。
- (1) 基本定義:如圖 4-1-6 設計，吹氣水平角度定義為與圓筒的切線夾角。
3. 控制變因：漏斗角度、漏斗側面角度、口徑高、壓力大小。
4. 應變變因：每分鐘平均出料速率。
5. 實驗結果：

表 6-6-1 水平吹氣角度對出料速率的影響

氣流角度(度)	第一次掉落顆數(千)	第一次掉落時間(秒)	第二次掉落顆數(千)	第二次掉落時間(秒)	第三次掉落顆數(千)	第三次掉落時間(秒)	第四次掉落顆數(千)	第四次掉落時間(秒)	第五次掉落顆數(千)	第五次掉落時間(秒)	平均顆數(千)	平均時間(秒)	平均出料速率(千顆/秒)	失敗次數
90	3	6.8	1	2.3	3	6.3	2.6	5.4	3	6.5	2.5	5.5	0.5	1
75	3	6.2	2.3	4.5	2.3	0.9	3	6.072	3	6.171	2.7	4.8	0.6	1
67.5	3	5.8	3	2.7	3	4.6	3	8.8	3	6.9	3.0	5.8	0.5	0
60	2.3	4.9	2.5	0.6	3	6.3	3	6.2	3	5.9	2.8	4.8	0.6	1

圖6-6-1 水平吹風角度對出料速率的影響

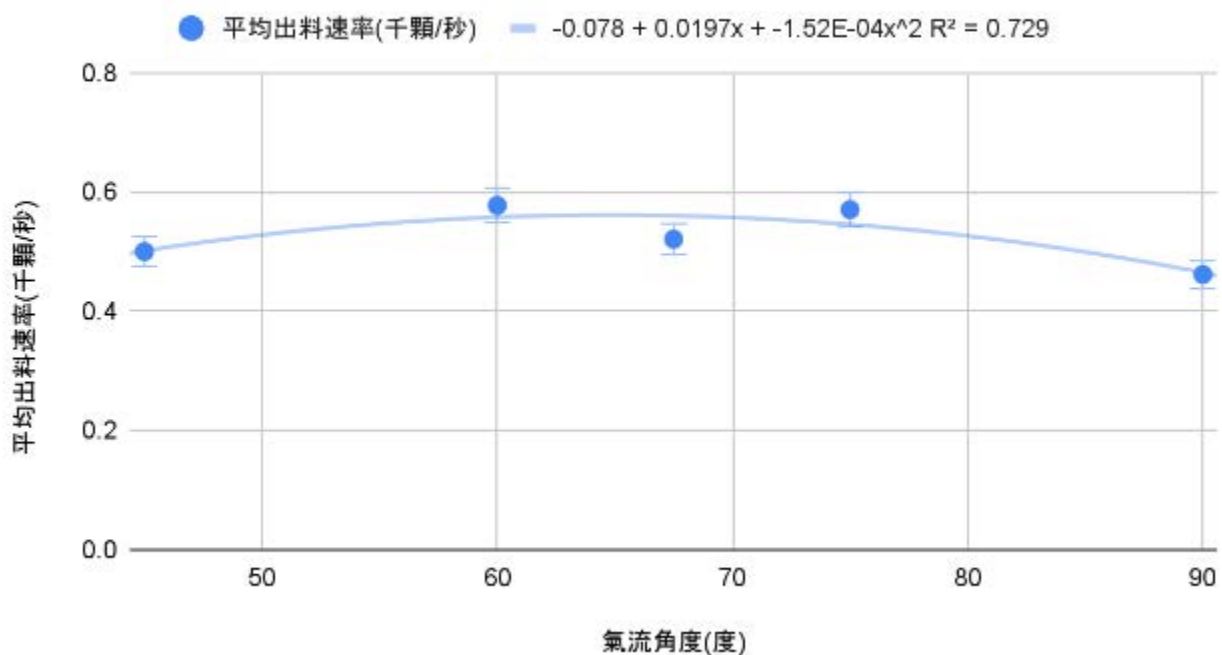


圖 6-6-1 水平吹風角度對出料速率的影響

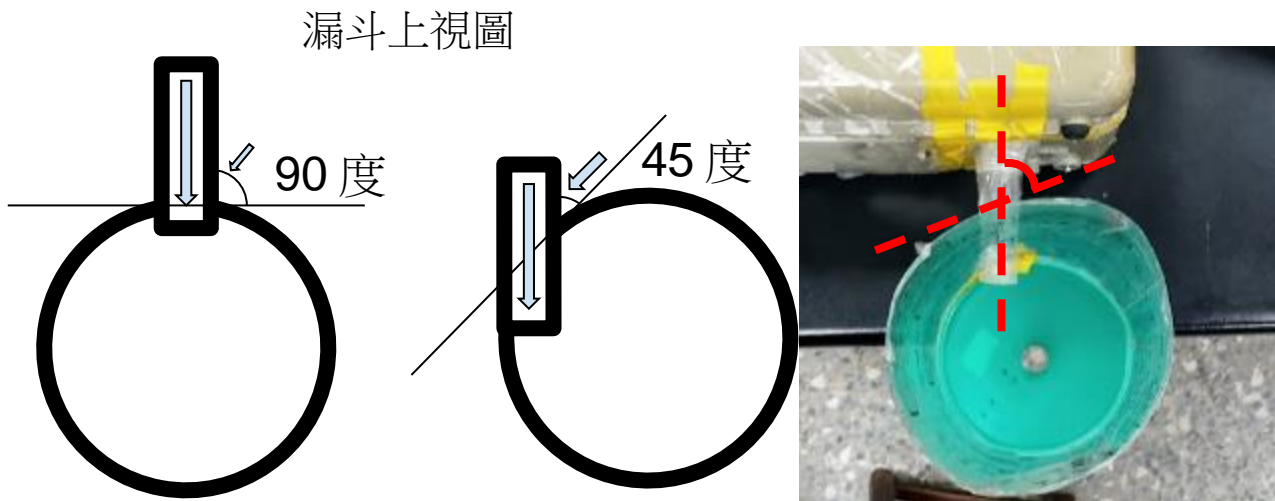


圖 6-6-2 吹氣水平角度的定義解釋和實際俯瞰圖

(二)、實驗結果與討論

1. **因果關係**：由圖 6-6-1 可知，**水平出風角度變化對鉛直向的出料速率影響不大**，但多項式 2 次方關係之 $R^2=0.998$ ，水平出風角度為 45 度到 90 度之間，每秒出料速率為 450 顆左右。
2. **原理解釋**：**本實驗的出氣裝置是改裝板擦機**，實驗設定風速為 18.7m/s，大概等同輕度颱風中心稍外的速度，所以在風速夠大的情況下仍無法改變出料速度，代表水平吹風無法引發滾動，也無法影響鉛直運動。
3. **新發現新應用**：**為了減少能量的消耗，本研究接著不增加風速，而另做假設改變出風口深度:若要使供料下降，供應氣流的方向不能完全水平，提供鉛直風壓可節省投料能量。**

七、柱形中央迴風管管徑與高度對出料速率的比較

(一)實驗設計

1. 假設：中央迴風管高度(與出料口距離)適當且出口寬度越大，出料速率越快。
2. 操縱變因：中央迴風管口寬度(2、3、4、5、6cm)與中央迴風管高度。
(1) 基本定義:如圖 4-1-6，本操縱變因高度差為與出口處相減，改變中央管寬度亦同時改變漏斗出口寬度，如圖 6-7-2 所示。
3. 控制變因：漏斗角度、漏斗側面角度、口徑高。
4. 應變變因：平均出料速率。
5. 實驗結果：

表 6-7-1 柱形中央管高度及漏斗口寬度對出料速率的比較

中央管管徑 (cm)	2			3			4			5			6		
中央管高度	平均顆數	平均時間	平均出料速率	平均顆數	平均時間	平均出料速率	平均顆數	平均時間	平均出料速率	平均顆數	平均時間	平均出料速率	平均顆數	平均時間	平均出料速率
1	3000	7	428	3000	4.6	650	3000	1.5	1951	3000	1.1	2643	3000	0.7	4095
2	3000	7.7	390	3000	2	1478	3000	1.5	2066	3000	1	3051	3000	0.7	4501
3	3000	7	430	3000	1.4	2217	3000	1.6	1910	3000	0.9	3418	3000	0.6	4686
4	3000	7.2	416	3000	1.4	2217	3000	1.6	1934	3000	0.9	3524	3000	0.6	4785
5	3000	7.4	406	3000	1.4	2196	3000	1.6	1902	3000	0.8	3579	3000	0.6	4941
對照組 (=無中管)	2697	6.8	398	3000	2.1	1407	3000	1.4	2196	3000	0.9	3318	3000	0.7	4413

註:中央管離開球面 9cm 處，平均出料速率大約 323 顆/秒，大約為實驗組之最差效果(出口寬 2cm，深度 1cm)。

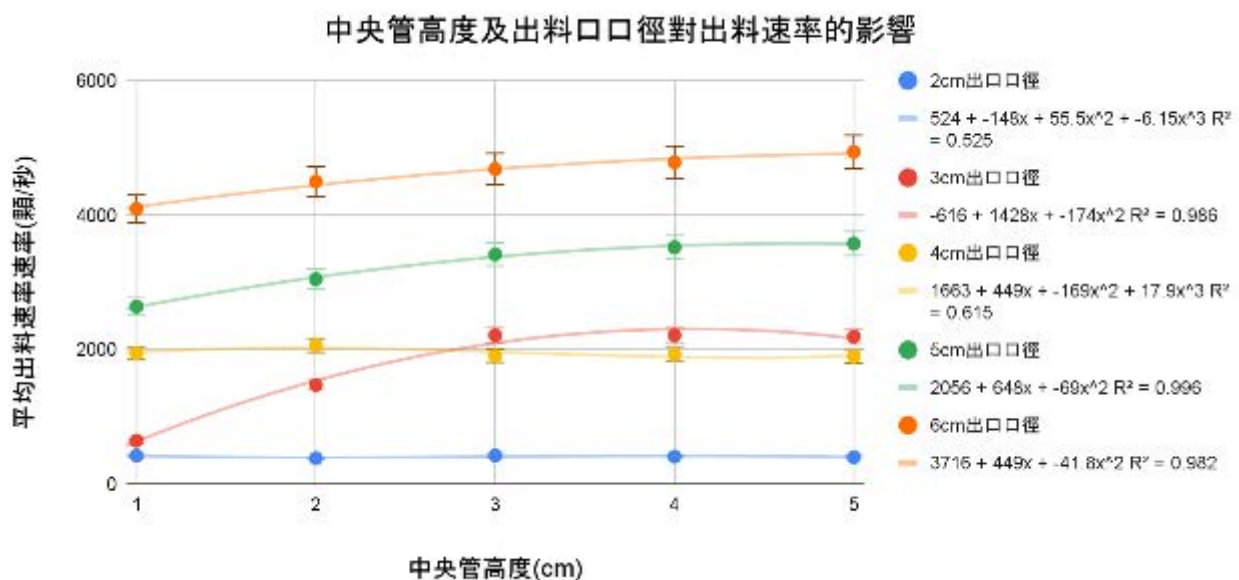


圖 6-7-1 柱形中央管高度及出料口口徑對出料速率的影響

(二)實驗結果

1. **因果關係**：由圖 6-7-1 可以知道，在中央迴風管高度 3cm 以上，不同中央迴風管寬度之出料速率比較為 6cm(4,686 顆/秒)>5cm(3,417 顆/秒)>3cm(2,217 顆/秒)>4cm(1,909 顆/秒)>2cm(429 顆/秒)，中央迴風管寬度 6 公分沒入飼料 5 公分深度下有最佳的出料速率(4940 顆/秒)，在出口寬度 3cm 時，中央迴風管高度 1cm3cm 的出料速率差異大。各個漏斗口徑大小如圖 6-7-2。

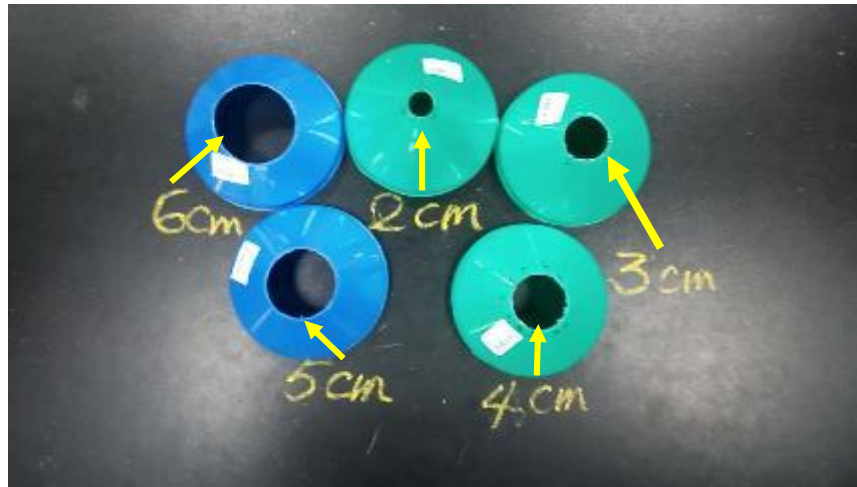


圖 6-7-2 各式漏斗出料口口徑

2. **原理解釋**：因為迴風管深入在 BB 彈之中，可以阻止形成拱橋與最密堆積阻塞出，所以本實驗組的中央迴風管均深入堆料中，漏斗出料口寬度越寬，斜面對阻塞堆積的支撐力越小，迴風所產生的懸浮力越容易破壞阻塞堆積，所以越容易促使出料。

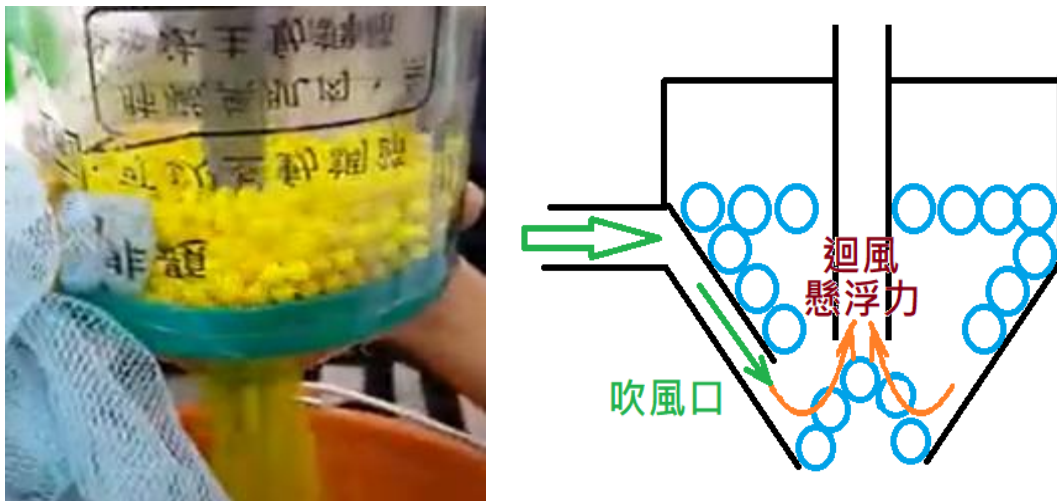


圖 6-7-3 中央迴風管

3. **新發現與應用**：飼料桶可以加裝中央迴風管製造迴風，向上迴風可提供飼料懸浮力，並且風壓的反作用力向下，使飼料出料速率加快，採用中央迴風管沒入飼料並接近出料口產生懸浮力降低阻塞效果最好。

八、添加吹管高度對出料速率的影響

(一)實驗設計

1. 假設：吹管愈深，愈能破壞出料口拱橋效應及堆積最密，進而增加出料速率，並且讓失敗次數降低。
2. 操縱變因：吹管放置高度。
- (1) 基本定義:如圖 4-1-6，本操作變因的距離差均是與漏斗底部的相差值。
3. 控制變因：漏斗角度、漏斗側面角度、口徑高。
4. 應變變因：平均出料速率。
5. 實驗結果：

表 6-8-1 添加吹管高度對出料速率的影響

底管深度	第一次	第一次	第二次	第二次	第三次	第三次	第四次	第四次	第五次	第五次	平均顆數	平均時間	平均出料速率	失敗次數
0cm	3000	19.30	3000	16.37	3000	15.70	3000	17.42	3000	13.49	3000	16.5	182	0
1cm	3000	6.30	3000	6.77	3000	6.86	3000	6.96	3000	7.26	3000	6.8	439	1
2cm	3000	7.72	3000	7.62	3000	7.49	3000	7.49	3000	7.75	3000	7.6	394	5
3cm	3000	7.19	3000	7.29	3000	8.01	3000	6.76	3000	6.73	3000	7.2	417	5

圖6-8-1 添加吹管高度對出料速率的影響

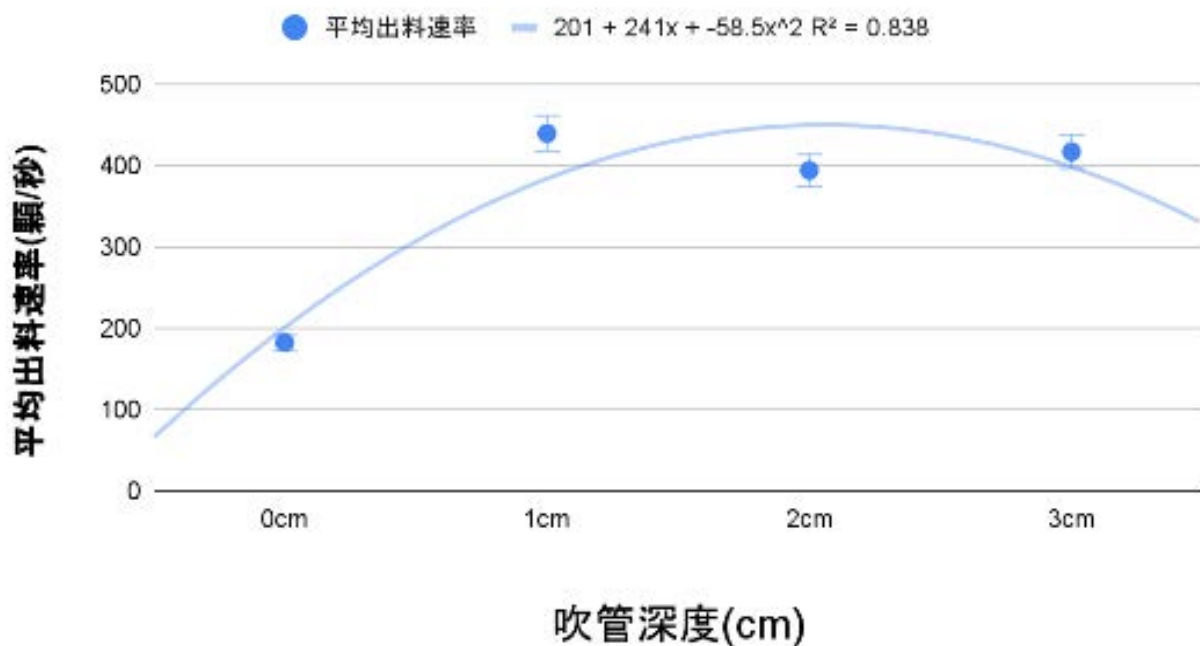


圖 6-8-1 添加吹管高度對出料速率的影響

(二)實驗結果與討論

1. **因果關係**：將**吹風口深入至漏斗底部**，結果在距離漏斗口高 1cm 的實驗是**出料速率最高**(439.2 顆/秒)。而 2cm 和 3cm 的深度雖然出料速率分別是每秒 393.9、416.6 顆，與 1cm 深度的出料速率相差無幾，但是**失敗率都較高**，因此判斷**1cm 深度的漏斗出料速率及失敗次數最好**。
2. **原理解釋**：因為空壓機是直接從漏斗內側出口處吹風讓**側向推力**變大，以便**破壞出料口的拱橋堆積結構**，讓出料速率增快。且在實驗過程中發現，出口處因為顆粒以堆積堆積的情況而發生阻塞。如圖 6-8-2，**參照 BB 彈的直徑約為 0.5cm**，所以**打破出口堆積宜在堆積的第 2 層效果最好**。

此為由 10 顆 BB 彈組成的圓環

此為由 3 顆 BB 彈構成的六方最密(3-6-3)

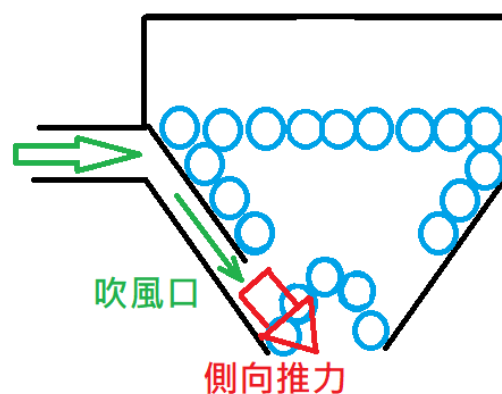


圖 6-8-2 堆積堆積阻塞

3. **新發現與應用**：經由這次實驗我們發現了漏斗口阻塞的原因，漏斗口**周圍有一圈圓拱**，且圓拱**中間還有最密堆積以及其他的堆積方式的支撐**，所以如果想要使漏斗順利出料，就需要**先將外圍圓環打破**。**綜合以上氣流的實驗發現**:吹管與桶身夾 45 度角，吹嘴距離漏斗口 1cm，中央管寬度 6cm 且距離漏斗口 3cm 時，具有最好的結構裝置(本外桶結構為 30cm 高，底部直徑為 12cm 之直筒狀)。

九、拱橋堆積生成種類與產生率的統計

(一)實驗設計

1. 假設：密度越高的堆疊方式越容易在出料口造成阻塞。
2. 操縱變因：底管深度。
3. 控制變因：漏斗口徑、迴風口寬度、風速大小、吹風角度。
4. 應變變因：**拱橋堆疊種類**。
5. 實驗結果：

表 6-9-1 漏斗口**拱橋堆疊種類**對出現阻塞產生率的影響

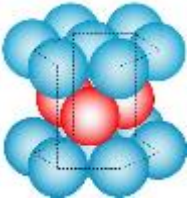



漏斗底生成顆數	最密堆積	非最密堆積
堆積方式	六方最密堆積	體心立方
照片		
堆疊密度	74%	68%
出現次數	14	3
照片		
出現百分比	82.35%	17.65%

圖6-9-1 拱橋堆積生成種類與產生率的統計

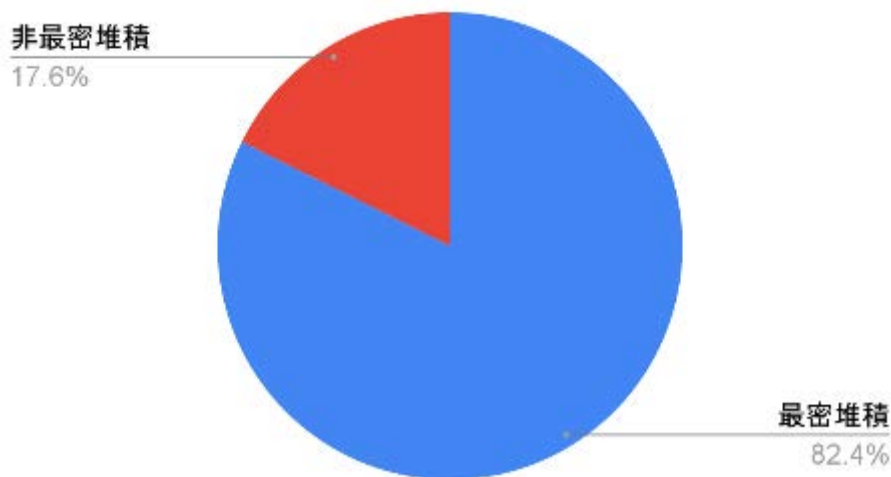


圖 6-9-1 拱橋堆積生成種類與產生率的統計

(二)實驗結果與討論

1. **因果關係**：可從圖 6-9-1 得知出口阻塞種類產生率百分比是：**最密堆積(82.4%)** > 非最密堆積(17.6%)。
2. **原理解釋**：**密度越高的堆疊方式因為結構越密集所以**越容易在出料口造成阻塞。
3. **新發現與應用**：發現**漏斗口內側出現的 1~2 層的環狀堆積可以促成最密堆積的生成**，所以**只要破壞漏斗口內側的環狀堆積**，就可以使 BB 彈順利出料。藉此構想出圖 6-9-3 的多孔數出料口構造，能增加飼料在出口的不同步崩落情況，使堆積阻塞不容易發生，有待後續研究。

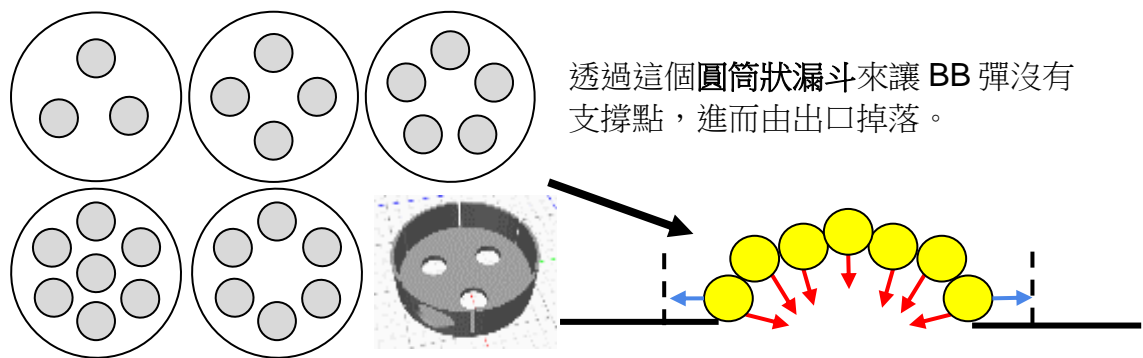


圖 6-9-2 破壞圓環阻塞的圓筒狀漏斗的構想圖

十、飼料堆積高度對出料速率的影響

(一)、實驗設計

1. 假設:當飼料堆積愈高時，壓力愈大，掉落速率愈慢。
2. 操縱變因:飼料堆積高度，0.43g 6mmBB 彈(體積 0.11cm^3 密度 3.9g/cm^3)
(基本定義:如圖 4-1-6 將 30 公分高的出料桶分等分 8 種高度。)
3. 控制變因:出風風速 17.1m/s、出風時間、出口口徑、底管高度、中央管高度。
4. 應變變因:每秒平均出料速率。
5. 實驗結果:

表 6-10-1 飼料堆積高度對出料速率的影響

飼料高度 (等分)	第一次	第二次	第三次	平均出料 速率	失敗次數	實驗總次數	失敗機率(%)
1/8	938	1002	848	929	0	3	0
2/8	919	985	921	942	5	8	62.5
3/8	907	1012	947	955	3	6	50.0
4/8	1031	916	951	966	3	6	50.0
5/8	1087	916	913	972	0	3	0
6/8	970	1026	1006	1001	0	3	0
7/8	1021	1056	1110	1062	0	3	0
1	1188	1033	1068	1096	1	4	25

圖6-10-1 飼料堆積高度對出料速率的影響

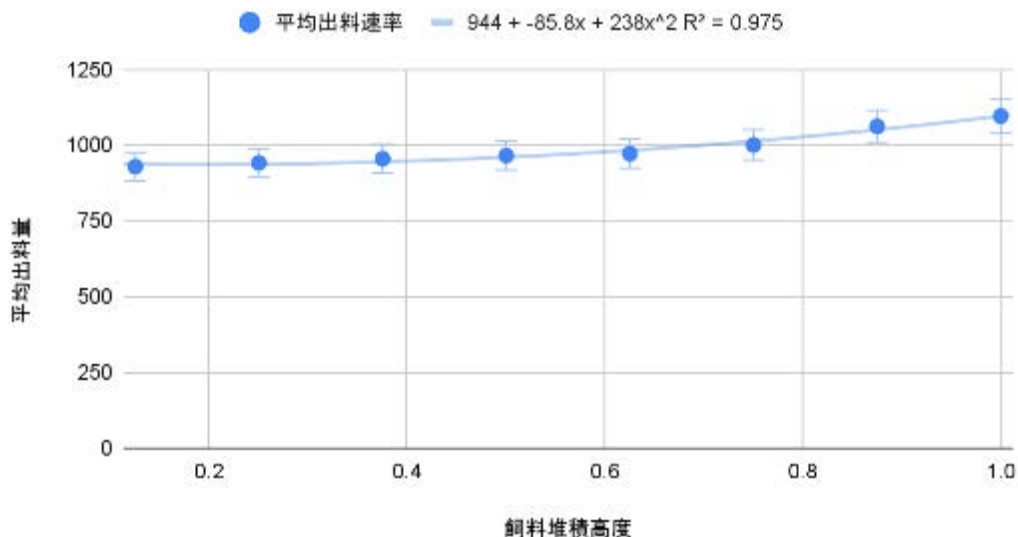


圖 6-10-1 飼料堆積高度對出料量的影響

(二)、實驗結果

1. 因果關係:由圖 6-10-1 可知斜面漏斗在壓力越高的狀況下平均出料速率較快，在高度 5/8 至 1 時每秒出料速率達 972 顆以上。因為 4/8 高度下，發生阻塞現象次數提高，但是 5/8 倍高度出料至 4/8 倍高度間，發生控制停止的機率高。

2. 原理解釋：因為飼料堆積高度越高，壓力越大造成向下壓力越大，進而造成在同樣時間出料量較多的狀況。6mmBB 彈(體積 0.11cm³ 密度 3.9 g/cm³)，30cm 高的最密堆積(佔體積 74%)，飼料壓力 86.58 gw/cm²，但本實驗的吹風風壓最大為 0.035gw/cm²，因此吹風風壓只能造成飼料滾動，進而破壞阻塞出口飼料堆積。但是，風壓的作用力反而可以噴發飼料顆粒加速出料速率。

表 6-10-2 蒲氏風級、風速與風壓換算表

風級	風速 (公尺/秒)	風壓(公斤重/平方公尺)
0	0 至 0.2	0
1	0.3 至 1.5	less than 1
2	1.6 至 3.3	1
3	3.4 至 5.4	1 至 3
4	5.5 至 7.9	3 至 7
5	8.0 至 10.7	7 至 14
6	10.8 to 13.8	14 至 23
7	13.9 至 17.1	23 至 35
8	17.2 至 20.7	35 至 52
9	20.8 至 24.4	52 至 72
10	24.5 至 28.4	72 至 97

3. 新發現新應用:能精確控制定時定量的餵食器，在一開始裝滿飼料桶的狀況下，把吹風時間依次減少也能達到定量餵食的效果或參考研究建議，設計飼料桶並將吹氣 17.6m/s，將投料高度設定於 19cm(5/8 飼料桶高)，有比較大的停止供料機率，每秒約可出料 1/10 桶的飼料。



圖 6-10-2 飼料堆積高度對出料量的影響實驗

柒、結論

一、桶身外觀形狀對出料速率的影響

(一) 出入面積比越小，出料速率越快，所以圓柱形的投料桶最為合適，圓形漏斗比方形漏斗的出料速率高 10 倍(約 2500/約 250)，所以圓柱桶身加上圓錐形出料口為佳。

(二) 圓形漏斗出口徑倍率為 12 的出料速率最快將近 3,700 顆/秒，相當於方形漏斗出料速率最高的約 16 倍，但控制出料而言，出料口徑為飼料口徑 5 倍最佳，圓錐下漏斗下，636 顆/秒。

二、桶身內觀結構設計對出料速率的影響

(一) 吹氣水平角度為 45 度情況下，可以使漏斗內產生氣旋，對於破壞拱橋有一些幫助。

(二) 加吹管深入到距離漏斗口 1cm 的深度效果最好，約為 439/秒。

(三) 出料桶加裝中央管製造迴風，並以風壓向下施力使飼料出料速率加快。在迴風口深度 3cm 以上，中央管出風口寬度 6cm 在深度 5cm 出料速率最好，約為 4,940 顆/秒。

三、阻塞原因分析

(一) 由實驗觀察發現，漏斗口內側出現的環狀堆積可以促成最密堆積的生成，出現百分比依序是最密堆積(堆積密度 74%)>非最密堆積(堆積密度 68%)，機率值分別為 82.35%與 17.65%，尚發現極少數的隨意堆積阻塞。

四、控制出料的動力參數分析

(一) 當顆粒平均密度為 0.22g/cm^3 下，提供與桶身切線 45 度側風進入圓桶狀(風速 16.7m/s)，堆積壓力為 5/8 倍高度時，機率較大能發生吹風出料，停風停料的效果，每秒平均出料全部的 10%。

(二) 能精確控制定時定量的餵食器，在一開始裝滿飼料桶的狀況下，把吹風時間依次減少可能達到定量餵食的效果，此之漸變分析，再有待後續研究。

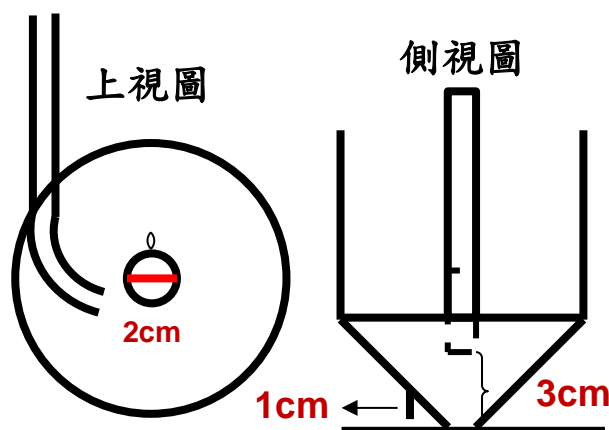


圖 7-1-1 餵食器最佳模型的理想圖

綜上所述，本研究餵食器之最佳模型為出口寬度 2cm 的圓柱形料桶、吹氣水平角度 45 度、中間加水管並且深入 3cm，並把吹管深入至漏斗口 1cm 處為最適當。

捌、參考資料及其他

Felix(2021)。剖析氣旋科技---為什麼 Dyson 吸塵器吸力永不衰減?科技雞湯。20210923 取自：<https://www.techchickensoup.com/technology/dyson-cleaner-design-intro/>

王量、林靖、何岱樺、楊舜雅(2006)。誰來幫我餵魚?—節能自動餵魚器之研究。20210928 取自：<https://www.ntsec.edu.tw/Science-Content.aspx?a=6821&fld=&key=&isd=1&icop=10&p=1&sid=2060>

陳彥禎、顏道瑜、周承儒、陳姿安(2007)。DIY 無電自動餵魚器。20210930 取自：<https://twsf.ntsec.gov.tw/activity/race-1/47/high/030810.pdf>

水世界水族館(2020)。用最少的錢，最簡單的方法製作最強大的生化過濾器——K1 流化床過濾|DIY is the most powerful K1 fluidized bed biochemical filter.20211003 取自：<https://www.youtube.com/watch?v=dJOoi jKgRpY>

王耀輝(2011)減少摩擦力的方法，科學的家庭教師。20211003 取自：https://www.phyworld.idv.tw/Nature/Jun_2/B4_CH6/3002.htm

尤寔齊、梁芷蘋、黃禎安(2013)，分分合合—顆粒流阻塞率，均勻混合漏斗與分類滾筒的探討，臺灣國際科學展覽會研究報告書，取自：<http://dyna.hcc.edu.tw/campus/data/web/845/files/201404211746411.pdf>

空軍之翼(2017)。想不到，一大名鼎鼎的真空吸塵器原理竟然來自直升機的防塵進氣口。20220121 取自：<https://kknews.cc/tech/gbkn6bm.html>

維基百科(2022)渦旋，維基百科。20220121 取自：<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E6%B8%A6%E6%97%8B>

ACS(2015)Advanced Cyclone Systems Institutional Video, Advanced Cyclone Systems。20220121 取自：<https://www.youtube.com/channel/UC4e6MKRiaG47SfHGjtUejyQ>

甫佳電器(2011)三菱 MITSUBISHI 氣旋科技吸塵器設計圖，甫佳電器部落格。20220121 取自：<https://blog.fuchia.tw/?p=2802>

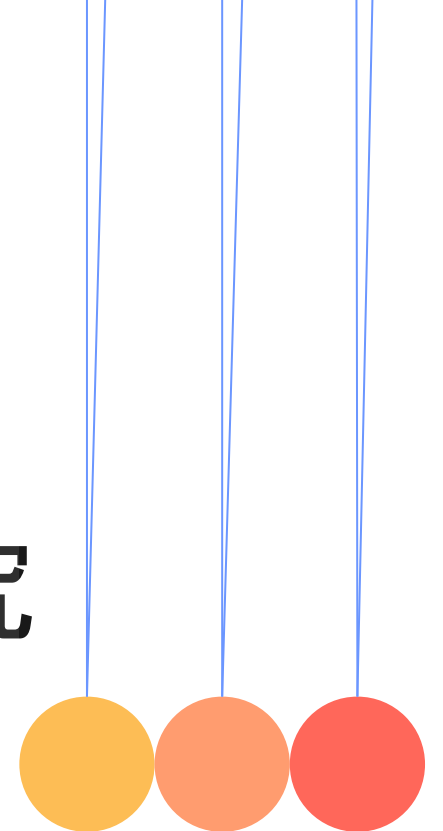
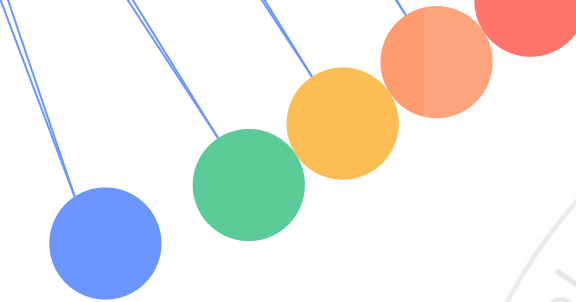
戴明鳳(2010)Roman Arch，清華大學物理系及跨領域科學教育中心。20220121 取自：<http://www.phys.nthu.edu.tw/~gplab/file/04%20Demonstrations%20A/Roman%20Arch%20Bridge.pdf>

小胡桃姊姊(2003)雞蛋與拱橋，科學小芽子。20220121 取自：<http://www.bud.org.tw/notebook.htm>

【評語】 030109

本研究主要研究漏斗阻塞率。在了解機制後透過吹氣疏通阻塞達到投放料(餵食器)的應用。是一個有趣的想法，值得鼓勵。

作品簡報



「氣蓋山河」—— 氣壓式流化床餵食器的研究

流化床、拱橋堆疊、最密堆積

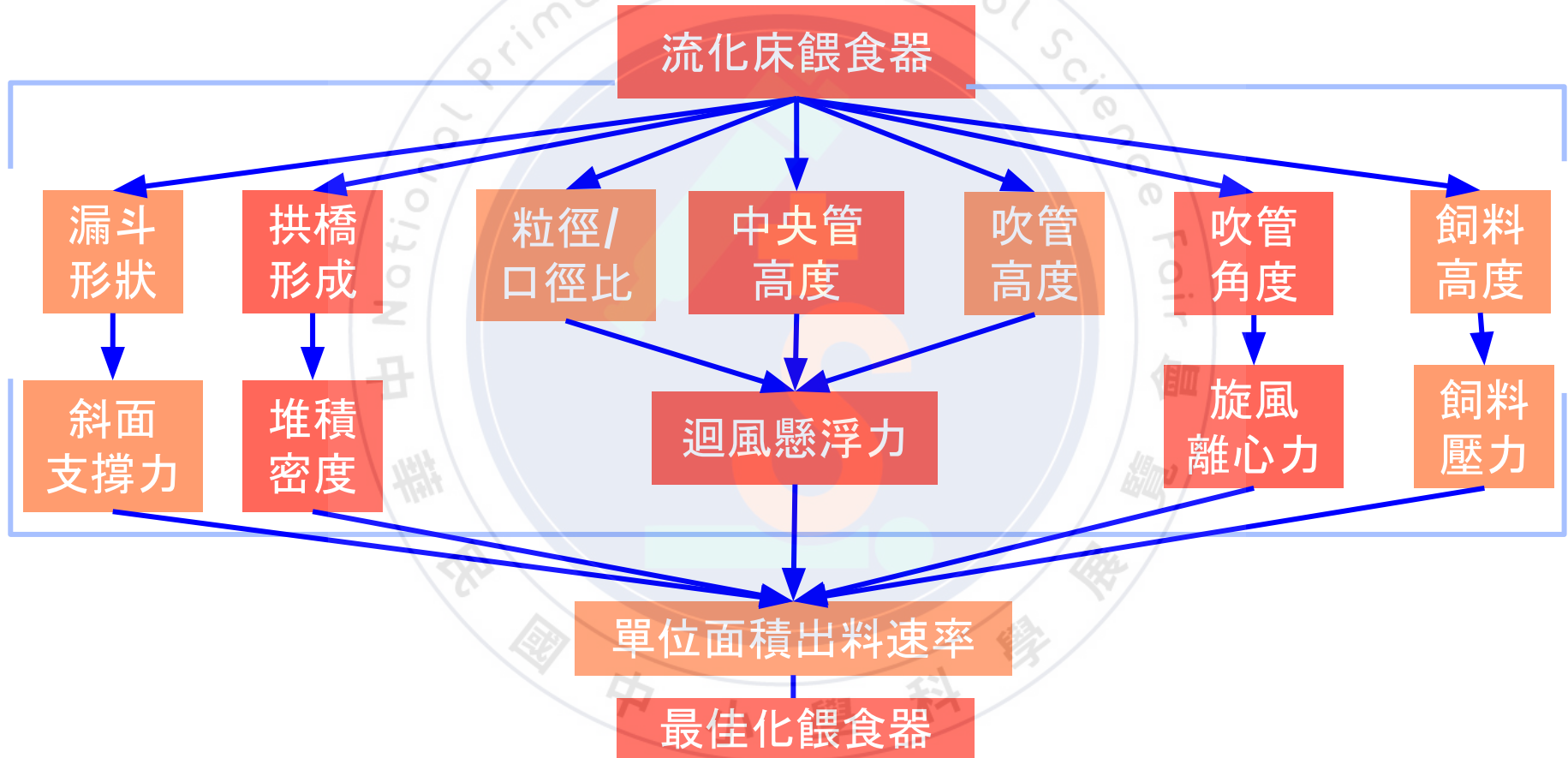


壹、研究動機

- **MARK ROBER**製作**流化床**把人沉到沙池中。
- **流化床原理**:透過**向上氣流**,當達到一定速度時,顆粒處於**懸浮狀態**,稱為**最低流化速度**,此時就可以使其達到流體的效果,就出現風壓可以支撐沙子,但不能支撐人的現象。
- 最小風壓隨**顆粒大小(所需懸浮力)**及**床層深度(重量壓力)**而變化。
- 流化床原理運用在**定量餵食器**,做出定時定量的餵食器。



貳、研究目的及研究方法



參、主要研究結果與討論

實驗一、方形漏斗角度對出料速率的影響

因果

1. 側面角度為80度，出料速率最快
2. 側面角度為40度，出料速率最慢

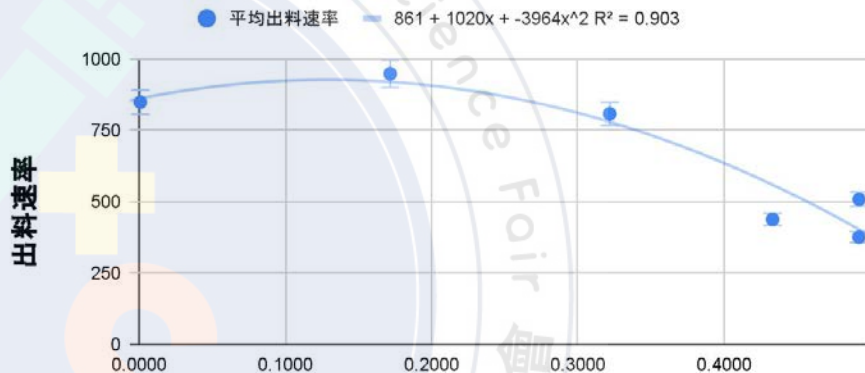
原理

1. **橫向支撐力的定義**
=下滑力* $\cos(\text{夾角弧度})$ 。
2. 方形漏斗水平夾角角度越大 → 斜面**橫向支撐力**越小。
3. 飼料在鉛直圓筒漏斗中，**側邊**沒有壓力支撐使其不易形成阻塞。

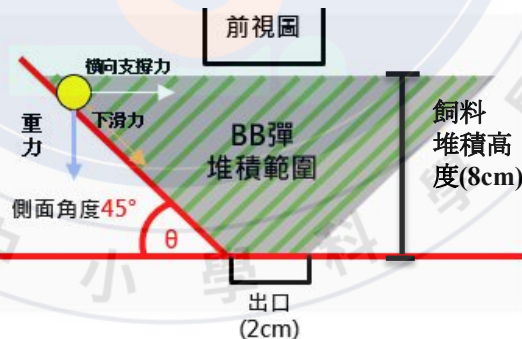
發現

推測圓筒形出料桶裝置應該比方形出料桶出料順利快速。

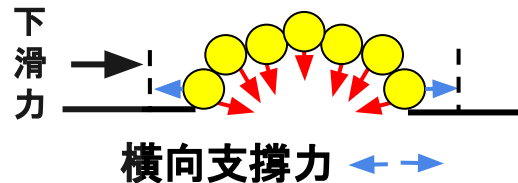
方形漏斗角度的橫向支撐力對出料速率的影響



橫向支撐力



透過這個圓筒狀漏斗來讓BB彈沒有支撐點，進而由出口掉落。



參、主要研究結果與討論

實驗二、圓形漏斗口徑及入/出口面積比對出料速率的影響

因果

1. 出口徑倍率越大, 入口與出口面積比越靠近1, 出料速率越快, 可使出料速率增加。
2. 出口直徑應為運動球體粒徑5倍以上, 可使出料速率激增。

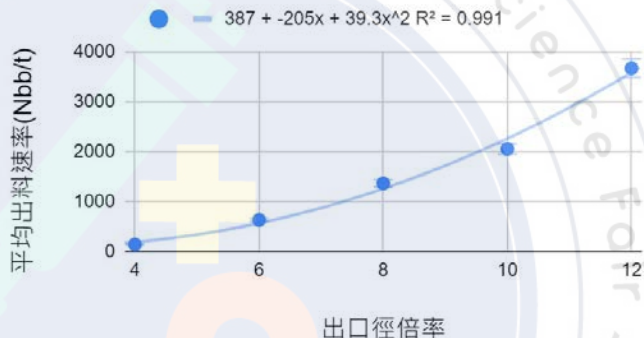
原理

製造 BB 彈間的滾動情況越多, 越能引發出料。

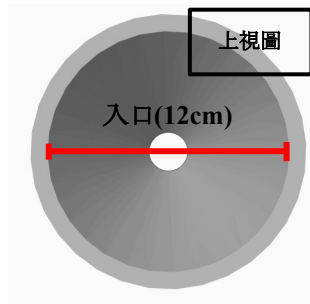
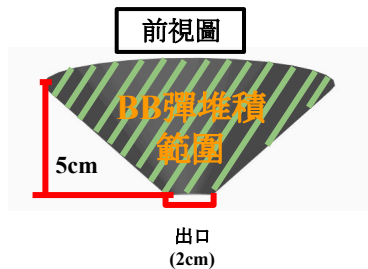
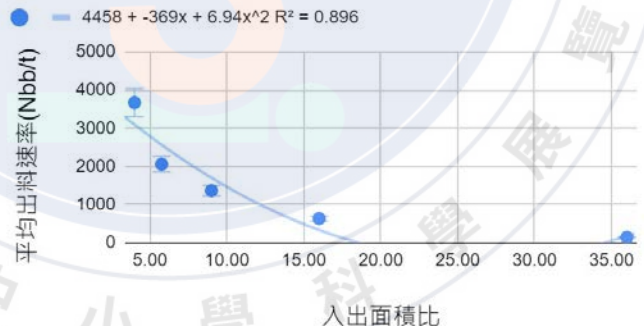
發現

1. 直筒桶身與出口徑倍率5倍以上為佳, 考量餵料也有需要停止的狀況, 出口倍徑不宜過大。
2. 加入流化床原理製造顆粒滾動, 能增加投料速度並達控制出料的效果。

圓錐出口徑倍率對出料速率的影響



圓錐入出面積比對出料速率的影響



參、主要研究結果與討論

實驗三、出料口圓拱生成的堆積種類

因果

出口阻塞種類產生率百分比是：
最密堆積(82.4%)>非最密堆積(17.6%)

原理

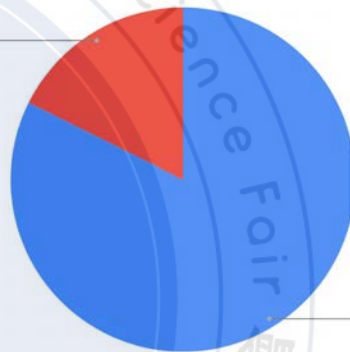
堆積密度愈高的情況，可能結構越穩固，機率越高造成出料口阻塞。

發現





1. 漏斗口內側1~2層環狀堆積生成最密堆積的生成，所以若要順利出料就需破壞環狀堆積。
2. 推測多孔數出料口構造，能增加飼料在出口的不同步崩落情況，使堆積阻塞不容易發生。

拱橋堆積生成種類與產生率的統計

非最密堆積
17.6%



最密堆積
82.4%

	堆積方式	堆積密度	出現機率	圖示
最密堆積	六方最密 	74%	82.35%	
非最密堆積	體心立方 	68%	17.65%	

參、主要研究結果與討論

實驗四、水平吹氣角度對出料速率的影響

因果

水平出風角度對鉛直向的出料速率影響不大，但60~75度之間的出料速率稍快。

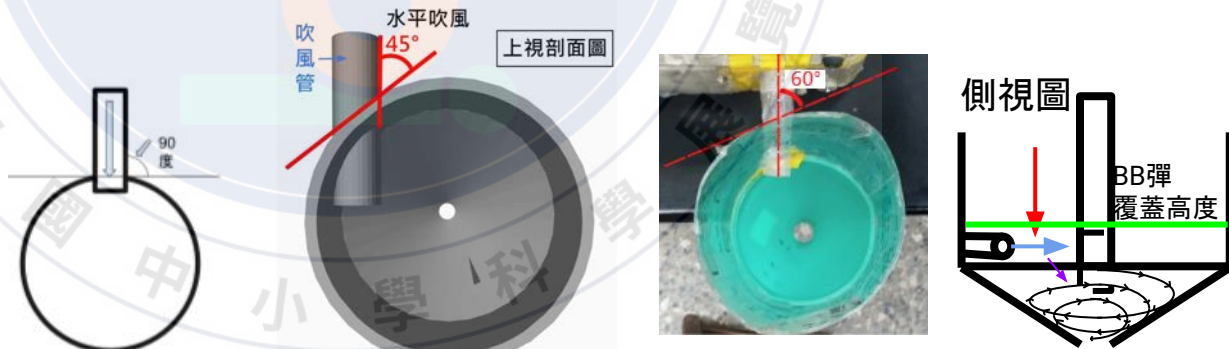
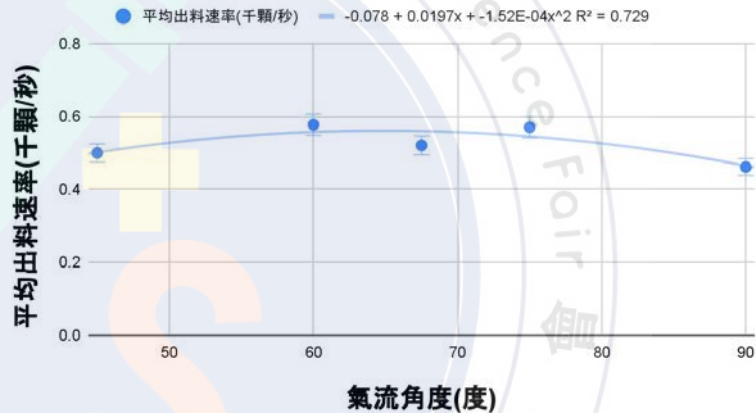
原理

本實驗風速夠大的情況下，仍不影響出料速率，所以水平吹氣若能引發鉛直向的風壓，才可能加速出料。

發現

1. 另作假設改變出風口距離出口的距離與添加中央迴風管。
2. 提供鉛直風壓可節省投料能量。

水平吹風角度對出料速率的影響



參、主要研究結果與討論

實驗五、柱形中央迴風管高度及漏斗出口口徑對出料速率的比較

因果

1. 迴風高度3cm時，不同漏斗口徑的出料速率為**6>5>3>4>2cm**。
2. 中央迴風管寬度6公分沒入飼料5公分深度下有最佳的出料速率為**4940 顆/秒**。
3. 在漏斗口徑**3cm**時，即**BB彈粒徑6倍**時，出料速率變化最大。

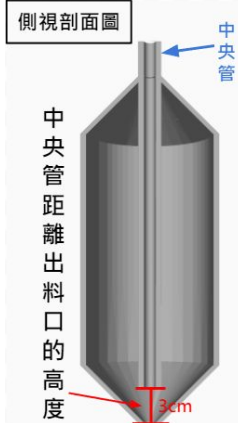
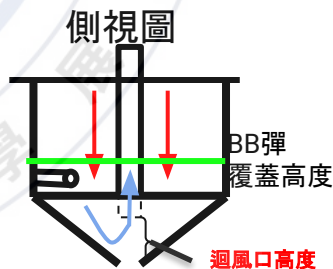
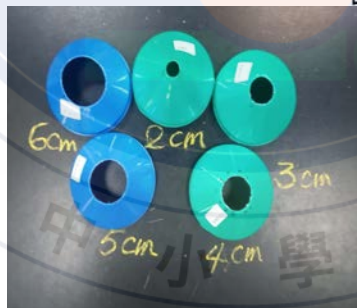
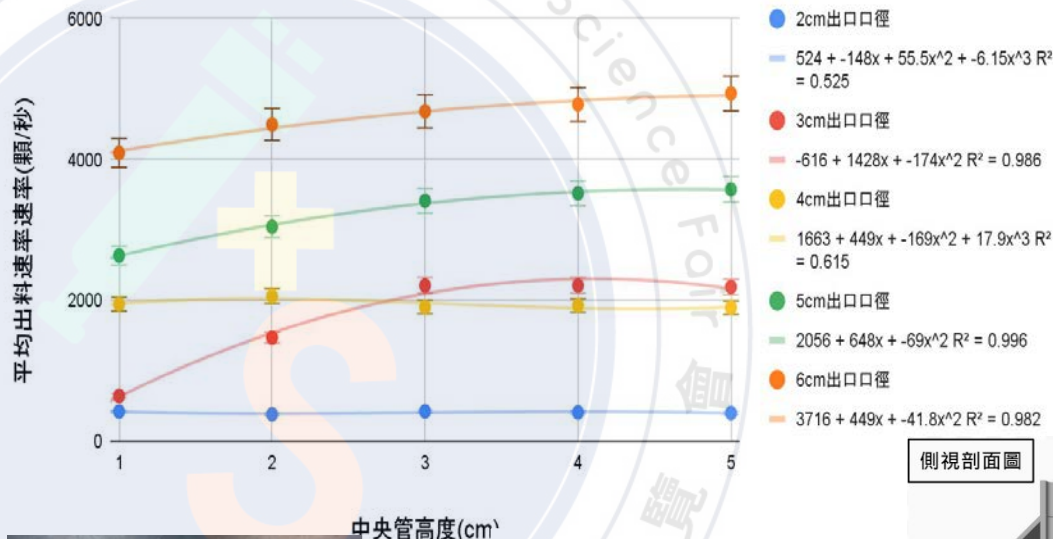
原理

因為迴風口插在**BB彈**中提供向上迴風推力而懸浮，破壞拱橋堆積阻塞及通風降低顆粒間的摩擦力。

發現

在飼料桶中加裝**中央管迴風高度**及出口口徑為**6倍粒徑**造成迴風使出料速率變得很快。

柱形中央迴風管高度及漏斗出口口徑對出料速率的影響



參、主要研究結果與討論

實驗六、吹管高度對出料速率的影響

因果

將吹風管口深入漏斗底部距出料口約**1cm(2倍粒徑)**高度出料速率最佳。

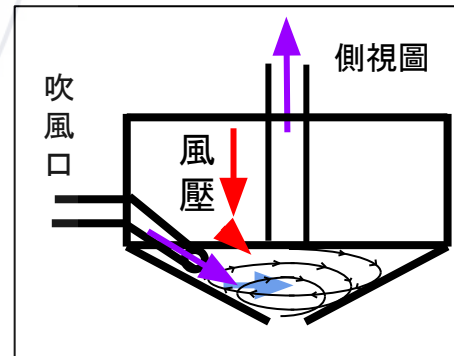
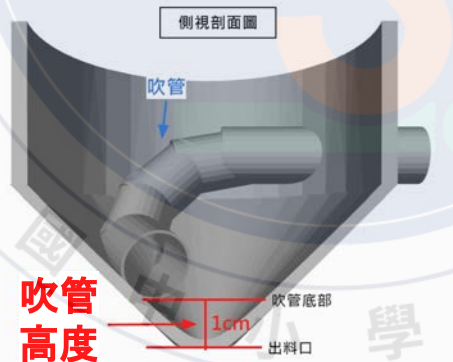
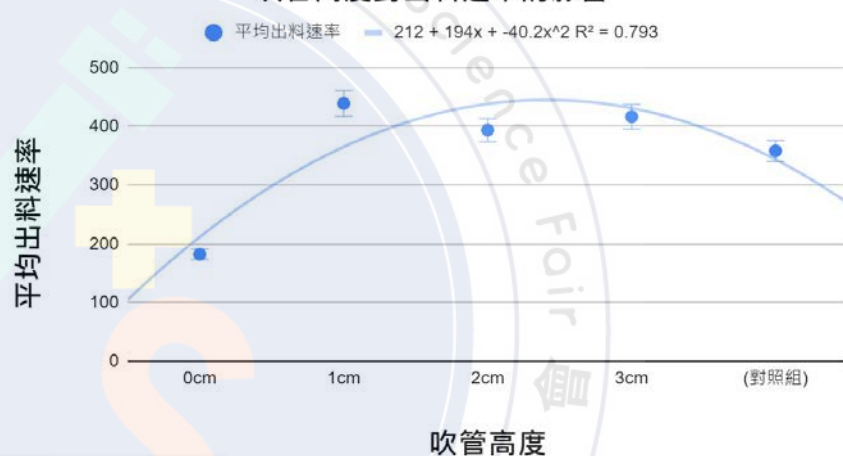
原理

吹風管口朝漏斗口旋轉吹風更容易破壞漏斗口的**阻塞拱橋及圓環**。

發現

漏斗口周圍有一圈圓拱且圓拱中間還有最密堆積及其他堆積方式的支撐，所以若**想順利出料**就需破壞外圍的圓環。

吹管高度對出料速率的影響



參、主要研究結果與討論

實驗七、飼料堆積高度對出料速率的影響

因果

1. 在相同的時間，飼料堆積高度為 1/1時出料量最多，為 1096顆/秒。
2. 飼料堆積高度 5/8~7/8以及 1/8失敗機率最低。

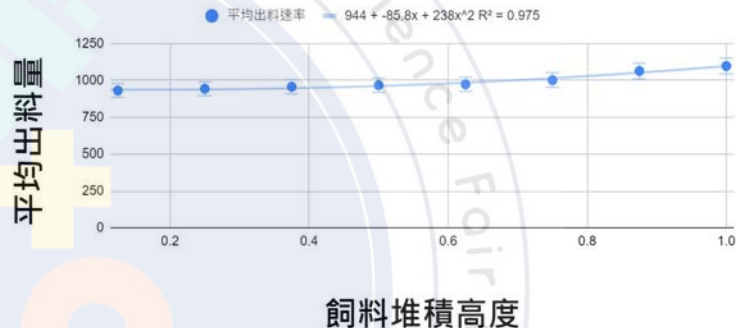
原理

1. 堆積高度最低 12.5%時，顆粒充分流化，不阻塞。
2. 堆積壓力 62.5%以上時，壓力愈大越易出料，配合本實驗流化風速 17.6m/s與當堆積壓力 62.5%-50%之間有控制現象發生。

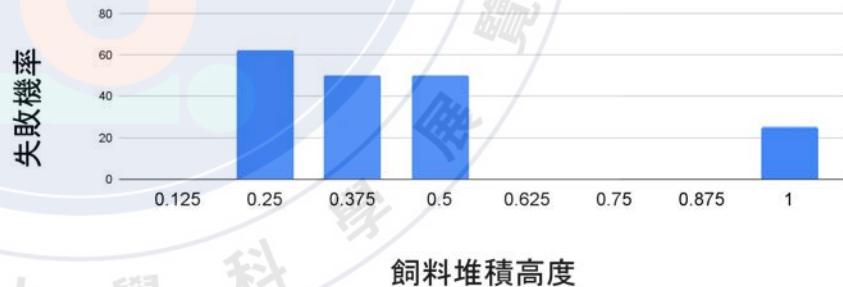
發現

1. 將吹風時間隨著飼料堆積高度降低依次增加即可達到定量餵食。
2. 配置適當流化速度與堆積壓力能做到控制出料的結果。

飼料堆積高度對出料速率的影響



飼料堆積高度對失敗機率的影響



肆、結論

一、桶身外觀形狀對出料速率的影響

1. 圓柱形的投料桶加上圓錐形出料口為佳。
2. 出料口徑為飼料口徑5倍最佳。

二、桶身內觀結構設計對出料速率的影響

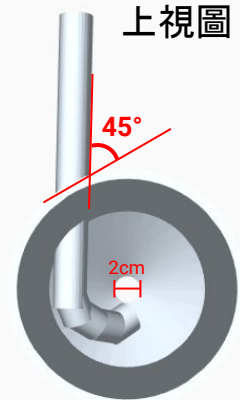
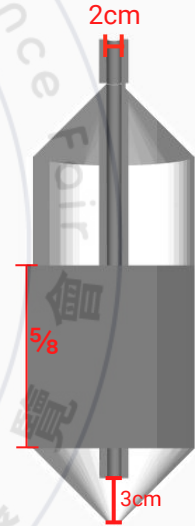
吹管深入並加裝中央管製造迴風，在迴風口深度3cm以上，中央管出風口寬度6cm在深度5cm出料速率最好，約為4,940顆/秒，為本實驗最佳效果。

三、阻塞原因分析

最密堆積為主因，機率值為82.35%。

四、控制出料的動力參數分析

1. 當顆粒平均密度為 0.22g/cm^3 下，提供與桶身切線 45° 側風進入圓桶狀(風速 16.7m/s)，堆積壓力 4g/cm^2 倍高度時，機率較大能發生吹風出料，停風停料的效果，每秒平均出料全部的10%。
2. 能精確控制定時定量的餵食器，在一開始裝滿飼料桶的狀況下，把吹風時間依次增加可能達到定量餵食的效果。



伍、參考文獻

- 尤寅齊、梁芷蘋、黃禎安(2013), 分分合合--顆粒流阻塞率, 均勻混合漏斗與分類滾筒的探討, 臺灣國際科學展覽會 研究報告書, 2013年國際科學展覽會。
- 王量、林靖、何岱樺、楊舜雅(2006)。誰來幫我餵魚？一節能自動餵魚器之研究, 第46屆中小學科學展覽會。
- 戴明鳳(2010)Roman Arch, 清華大學物理系及跨領域科學教育中心。

簡報結束。謝謝聆聽

