

# 鋼皮圓筒倉儲存進口玉米通風之探討

## (II). 低通風量時進口玉米之通風阻力

### Aeration of Imported Shelled Corn Stored in Steel Tank

#### (II). Low Airflow Resistance of Imported Shelled Corn

食品工業發展研究所副工程師

國立臺灣大學農機系教授兼主任

鍾 木 華

蕭 介 宗

Mu-Hua Jung

Jai-Tsung Shaw

#### 摘 要

國內外對壓力降之研究，均偏重於高通風量條件下，對於儲存常使用的低通風量之研究不多，尤其在低通風量範圍內，進口玉米因粉塵含量、密度及高度變異時，壓力降變化之資料缺乏。本文探討儲存進口玉米粒在不同密度、高度、粉塵含量及低通風量時，對通風壓力降之影響，並建立統計迴歸式，以預測通風時之壓力降，做為設計通風系統之參考。

在現場穀倉採樣分析玉米粉塵含量，並以小型圓筒倉試驗三種粉塵含量（乾淨、3%及7%粉塵含量）之玉米，兩種裝填方式（鬆填及壓實）、六種通風量（5, 10, 15, 20, 25 及 30NI/min），和四種玉米堆積高度（0.3m, 0.6m, 0.9m 及 1.2m）共計一四四種試驗，並重覆試驗一次。

288組試驗資料經統計迴歸所得，壓力降（P, Pa）與通風量（V,  $m^3/(s \cdot m^2)$ ）、高度（H, m）、密度（D,  $kg/m^3$ ）及粉塵含量（Fm, 小數值）之關係如下：

$$\ln(P) = -32.61 + 1.02\ln(V) + 1.04\ln(H) + 5.92\ln(D) + 10.28\ln(1+Fm)$$

根據上式，通風壓力降隨通風量、高度、密度和粉塵含量之增加而增加。

#### ABSTRACT

As studying the pressure drop, both our domestic and the foreign data emphasize that under the high airflow rate condition, but neglect the often used low airflow rate in storage. Especially within the low airflow rate range, the lack of information of imported corn concerns about the change of pressure as the content of fines, density and height are changed. This context discussed the stored imported shelled corn under different density, height, content of fines and low airflow rate which influences the airflow pressure drop, and established the regression equation to predict the pressure drop for designing an aeration system.

The corn sample taken from the commercial bin was analyzed the content of fines; 144 experiments of shelled corn in a small experimental steel tank were carried out in the combination of three kinds of fines content (clean, 3% and 7% fines), two kinds of filling (loose fill and packed fill), six kinds of airflow rate (5, 10, 15, 20, 25 and 30 nl/min), and four kinds of piling height (0.3m, 0.6m, 0.9m, and 1.2m); repeat the above 144 experiments once.

By the statistical regression method, total 288 experimental data can be fitted the pressure drop (P, Pa) as a function of airflow rate (V, m<sup>3</sup>/s), height (H, m), density (D, kg/m<sup>3</sup>) and fines content (Fm, decimal) as follows:

$$\ln(P) = -32.61 + 1.02\ln(V) + 1.04\ln(H) + 5.92\ln(D) + 10.28\ln(1 + Fm)$$

According to the above equation, the more airflow rate, density, height and fines content increase, the more pressure drop is increased.

## 一、前言

目前，國外業者、學者、專家研究玉米通風時壓力降之資料，大部份偏重在高通風量乾燥作業條件下，乾淨玉米至不同粉塵含量或不同粉塵等級，及對裝填方式皆列入研究範圍內，建立之資料及方程式，可供設計乾燥系統之參考。

然而，對於儲存條件下使用的低通風量之壓力降研究卻不多。尤其，對於低通風量下，不同粉塵含量、裝填方式、密度和高度影響之資料，有待建立。本文研究之目的在探討進口玉米粒在不同填裝方式密度、高度、粉塵含量及低通風量在儲存時對

通風壓力降之影響，做為業者設計玉米通風系統之參考。

## 二、文獻探討

當空氣被迫流經穀層時，即產生氣流阻力，此阻力亦即所謂之壓力降 (Pressure drop)。此項阻力係由於摩擦與擾亂流之存在，發生能量損失所致。空氣流經穀層所產生之壓力降與氣流之速率，穀物之表面與形狀特性，孔隙度大小及形狀，顆粒大小之變異以及穀層之深度等因素有關。

### (一) 通風量對壓力降之影響

根據 Shedd (1953)，圖 1 是不同通風量乾淨

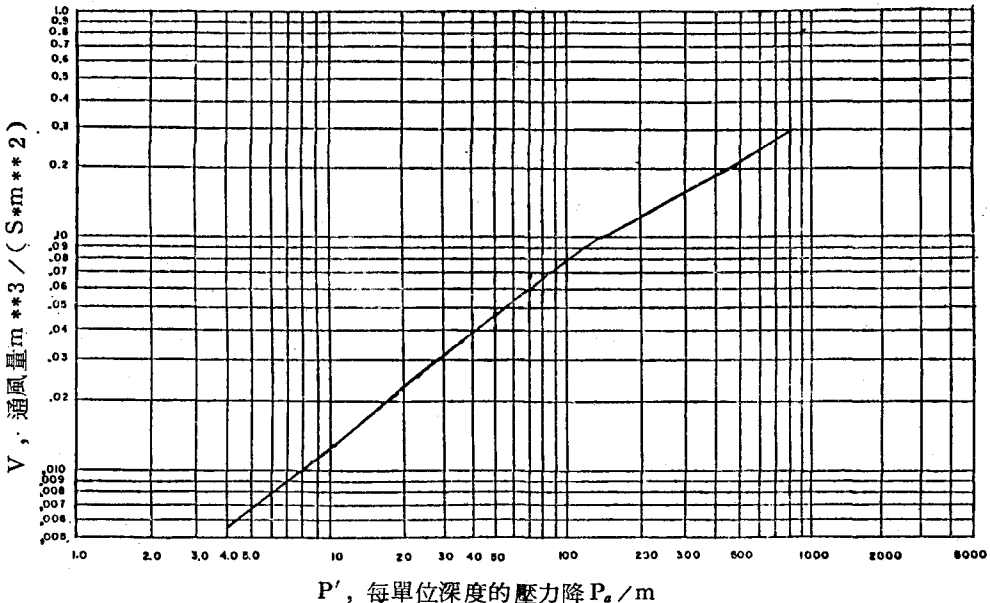


圖 1 乾淨鬆填玉米對氣流之阻力

玉米粒之壓力降變化情形。曲線係由三至四條線段合併組成，每一線段部份之方程式型式如下：

$$V = aP' \cdot b \dots\dots\dots(2.1)$$

在雙對數格紙內，b之常數即為各線段之斜率，在低風量之範圍內，較接近穩定流，其值可能趨近於1.0，因此圖中所示之曲線，在低通風量時可能可以1.0斜率延伸估算其壓力降。另一常數a可由圖中，各直線線段或其延線與P'等於1.0之垂線相交點之V讀出。

Hukill 與 Ives (1955)，利用圖1中所示之資料，推演成式(2.2)，適合於0.01至0.02m<sup>3</sup>/s-m<sup>2</sup>之風量變化範圍。根據Brooker (1969)，Kumar 和 Muir (1986)，和馮 (1978) 皆引用式(2.2)討論之。

$$P' = \frac{aV \cdot b}{\ln(1+bV)} \dots\dots\dots(2.2)$$

式(2.2)中之常數a, b，玉米粒分別為0.00065和0.156。

在低流量率時，Ergun (1952) 認為壓力降經過穀堆(Bed)時與流動速度成比例，而在高流量時接近流動速度平方成比例。Sheldon 等 (1960) 及 Farmer 等 (1981) 亦認為在層流區時壓力降與流量可用式(2.3)表示：

$$\log P' = \log a + \log V \dots\dots\dots(2.3)$$

在紊流區時，壓力降與流量可用式(2.4)代表之：

$$\log P' = \log a + 2 \log V \dots\dots\dots(2.4)$$

(一)高度對壓力降之影響

Brooker 等 (1974) 認為根據圖1顯示，穀物每呎之壓力降顯然與穀層之深度無關。嚴格而言，此項假設對於深層穀物之通風狀況並不正確。

Sheldon 等 (1960)，曾對玉米和小麥在低風率下(0.05至4.0cfm/ft<sup>2</sup>)分別對1ft, 2ft, 4ft, 10ft深之穀層量測其壓力降，對不同高度以單位深度下之壓力降做比較，可知在較低通風率時，幾為一致，隨著通風率之增大，較大的玉米粒深度將導致較大容積密度，因此也增加了壓力降。

(二)密度對壓力降之影響：

Shedd (1951, 1953) 認為玉米裝填方式不同可分為鬆填及壓實兩種，而以容積密度(Bulk density)作指標探討因密度(D)改變時，壓力降變

化的情形。

Patterson 等 (1971) 認為穀倉的裝填方法將影響堆積穀物的孔隙度及容積密度。較低的孔隙度(或較高的容積密度)將有較高的壓力降。

Bern 和 Charity (1975) 和 ASAE Standards(1988) 提出單位高度壓力降與玉米容積密度，顆粒密度和通風量之關係如下：

$$\frac{P}{H} = X_1 + X_2 \left( \frac{D}{D_k} \right)^2 V + X_3 \left( \frac{D}{D_k} \right) V^2 \dots\dots\dots(2.5)$$

D由732到799kg/m<sup>3</sup>

V由0.027到0.60m<sup>3</sup>/(s·m<sup>2</sup>)

以最小平方法，式(2.5)之迴歸係數及相關係數(R)如下：

通風量(V)範圍 m <sup>3</sup> /(S·m <sup>2</sup> )	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	R
0.027 ≤ V ≤ 0.13	-0.998	88.8	511	0.996
0.13 < V ≤ 0.27	-10.9	111	349	0.997
0.27 < V ≤ 0.60	-76.5	163	389	0.996

(四)粉塵含量對壓力降之影響

在低通風量下，因粉塵加入對壓力降影響之研究文獻至今猶未發現。

Haque 等 (1978)，粉塵的定義為能通過4.76mm(12/64 in.)圓孔篩網之破碎穀物或其它雜質。

Brooker 等 (1974) 提及 Foster (1970) 曾對細碎雜物與乾淨玉米混合後之空氣阻力加以觀察研究，當細碎雜物在混合物中之比例增加時，其壓力阻力亦隨之增加，約於30至40%時，達到最大值。此項壓力降之最大值約為乾淨玉米之兩倍左右。

Haque (1978) 以面積平均徑方法計算非均勻粒子(粉塵)的相當直徑(equivalent diameter)。

Haque 等 (1978, 1981) 提出壓力降(P')對通風率(V)和粉塵含量(F<sub>m</sub>)迴歸式如下

$$P' = \frac{20529.535V \cdot b}{\ln(1+30.597V)} [1 + (14.5566 - 26.418V)F_m] \dots\dots\dots(2.6)$$

$$P' = C_1V + C_2V^2 + C_3V^3 \cdot (Fm) \dots (2.7)$$

$$C_1 = 436.667$$

$$C_2 = 7363.038$$

$$C_3 = 22525.819$$

式(2.7)優於式(2.6)，其理由為它較簡便及適用範圍較廣，通風量由0.076到0.381m<sup>3</sup>/(s·m<sup>2</sup>)，粉塵含量由0到20%。

### 三、試驗因素、材料、方法與設備

#### (一)試驗因素

一般而言，控制變因愈多，愈能瞭解各試驗因素對壓力降變異之影響。本研究在小型試驗倉之試驗因素，包括乾淨玉米在兩種不同裝填方式、六種通風量及四種堆積高度之重覆試驗，試驗計96次，3%和7%粉塵含量之玉米亦各96次試驗合計288次試驗，如圖2所示。

Fm	D	V	H
粉塵含量 (%)	裝填情況 容積密度 kg/m <sup>3</sup>	通風率 m <sup>3</sup> /(s·m <sup>2</sup> )	高度 m
乾淨 0%	鬆填(747.72)	0.001179	0.3 0.6 0.9 1.2
	壓實(801.12)	0.002358	
3%	鬆填(753.61)	0.003537	
	壓實(801.12)	0.004716	
7%	鬆填(762.16)	0.005895	
	壓實(801.12)	0.007074	

圖2 小型試驗倉之試驗因素 (以上因素共試驗兩次)

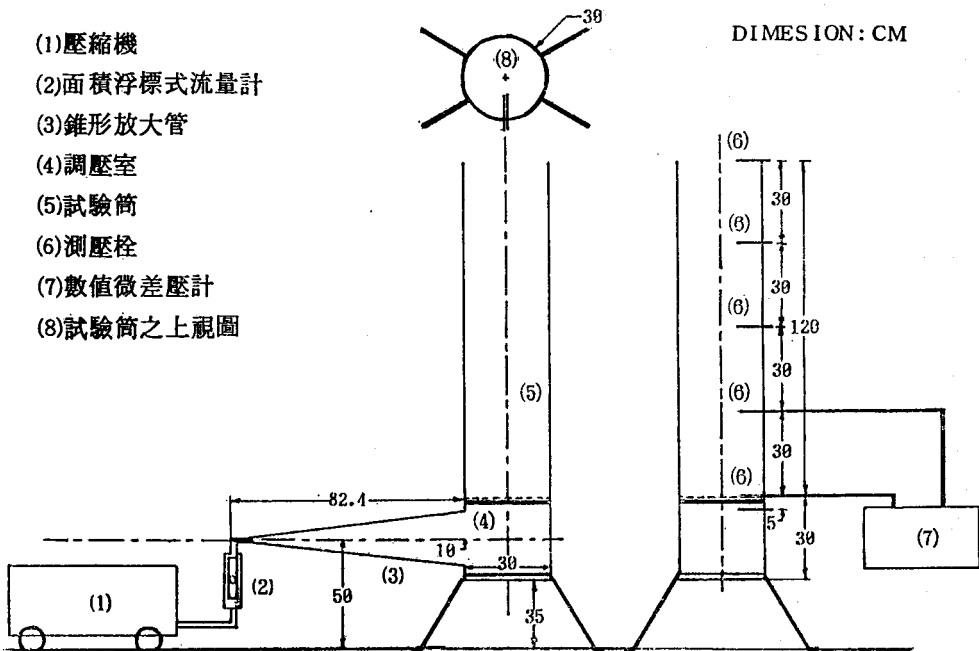


圖3 鐵皮試驗筒尺寸圖及試驗裝置之安排

## (一) 試驗材料

試驗用之玉米粒於1986年10月11日由美國紐奧爾良港啓程於同年11月18日抵達高雄港，原訂購之玉米為二級（3%粉塵含量），進港後經商檢局檢驗後，判定為五級玉米（7%粉塵含量）。

## (二) 試驗方法及設備

### 1. 三種粉塵含量及兩種密度之調製及壓力降之量測

乾淨玉米粒由直徑30cm鐵皮試驗倉筒口自然落下達填滿120cm試驗筒為止，稱為鬆填；若以人為方式，改變其堆積情形，以達較大之容積密度者，稱為壓實。3%及7%粉塵含量之鬆填及壓實定義同上，其差異在於玉米粒由倉筒口落下前，將粉塵與玉米粒按所定（3%或7%）重量比，一起落下混合之。試驗筒尺寸及試驗裝置之安排如圖3所示，由壓縮機(1)送來之空氣，經面積浮標式流量計(2)、錐形放大管(3)、調壓室(4)再經試驗筒(5)內之待通風之玉米粒，從筒頂之篩網排出，完成通風。以軟管接不同高度之測壓栓(6)至數值微差壓計(7)，即可量測不同條件壓力降之值。

### 2. 粉塵粒徑大小分佈及重量測記錄

由於粉塵粒徑大小分佈，亦會影響壓力降之值，在本試驗因素中未加以控制，僅用不同號數篩網篩選，量測記錄留置於各篩網上之破碎穀物或其它雜質重量，以求面積平均徑之值，做為該次試驗粉塵粒徑大小之指標。

### 3. 玉米含水率之量測及記錄

在通風條件不變下，玉米含水率的改變，會使得壓力降之值隨之改變，為瞭解不同通風條件下，其含水率變化情形，含水率之測定及記錄有其必要性。玉米含水率之試驗步驟係根據ASAE S352號標準，即全粒玉米在 $103 \pm 1^\circ\text{C}$ 之烤箱烤72小時，以計算濕基含水率。

### 4. 現場穀倉粉塵含量之採樣分析

現場穀倉內玉米採樣經篩選後，以分析進口玉米所含粉塵含量做為試驗設計之參考，及瞭解實際玉米粉塵在倉內散佈情形。

## 四、結果與討論

(一) 本試驗所得之迴歸式(4.1)與美國式(2.6)之比較將288組試驗資料輸入RATS電腦套裝軟體

作迴歸分析，所得壓力降對通風量、高度、密度及粉塵含量之關係，如下所示：

$$\ln(P) = a + b \ln(V) + c \ln(H) + d \ln(D) + e \ln(1 + F_m) \dots \dots (4.1)$$

P = 壓力降, Pa

V = 通風率,  $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$

H = 高度, m

D = 密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$

F<sub>m</sub> = 粉塵含量, 小數值

R = 相關係數

a = -32.61

b = 1.02

c = 1.04

d = 5.92

e = 10.28

$R^2 = 0.9974$

迴歸分析數據使用範圍：V由0.001179至0.007074  $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ ，D由747.72至801.12  $\text{kg}/\text{m}^3$ ，F<sub>m</sub>由0至0.07（0至7%），H由0至1.2m。

由(4.1)式計算所得之值與試驗值比較可知乾淨玉米、3%及7%粉塵含量之玉米，在鬆填或壓實及不同高度與通風量下，其壓力降之最大相對誤差值為-15.58%（如表1所示，在7%粉塵含量、鬆填、高度0.3m和通風量為0.007074  $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ 處）。由美國(2.6)式計算所得之值與本試驗值比較可知，在乾淨玉米、3%及7%粉塵含量之玉米，其壓力降之最大相對誤差值為-25.89%（如表2所示，在乾淨玉米、高度0.3m和通風量為0.007074  $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ 處）。

根據表1和表2，不論是乾淨玉米或7%粉塵含量之玉米，壓力降之預估，式(4.1)均優於式(2.6)。其原因乃式(2.6)試驗通風量僅限於(0.076~0.20  $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ )，且因未考慮玉米密度之變化，其預估值與試驗值有較大之相對誤差，乃必然之結果。

## (二) 通風量(V)變化對壓力降之影響

由迴歸得知壓力降P與通風率V之b值為1.02與Ergun(1952), Sheldon等(1960)等文獻接近。

表1 玉米含7%粉塵在鬆填、不同高度及通風量下，試驗值與式(4.1)公式計算壓力降值之比較

高 度 m	通 風 量 m <sup>3</sup> /(s <sup>2</sup> )	試 驗 值 Pa	計 算 值 Pa	相 差 值 Pa	相 對 誤 差 * %
.3	.001179	.44	.4744	-.0344	- 7.83
.3	.002358	.93	.9617	-.0317	- 3.41
.3	.003537	1.42	1.4540	-.0340	- 2.39
.3	.004716	1.96	1.9495	.0105	.54
.3	.005895	2.45	2.4474	.0026	.11
.3	.007074	2.74	2.9473	-.2073	- 7.57
.3	.001179	.44	.4744	-.0344	- 7.83
.3	.002358	.88	.9617	-.0817	- 9.29
.3	.003537	1.32	1.4540	-.1340	- 10.15
.3	.004716	1.86	1.9495	-.0895	- 4.81
.3	.005895	2.25	2.4474	-.1974	- 8.77
.3	.007074	2.55	2.9473	-.3973	- 15.58
.6	.001179	.98	.9767	.0033	.34
.6	.002358	2.06	1.9797	.0803	3.90
.6	.003537	3.04	2.9931	.0469	1.54
.6	.004716	4.21	4.0128	.1972	4.68
.6	.005895	5.24	5.0380	.2020	3.86
.6	.007074	5.88	6.0672	-.1872	- 3.18
.6	.001179	.98	.9767	.0033	.34
.6	.002358	1.96	1.9797	-.0197	- 1.01
.6	.003537	3.04	2.9931	.0469	1.54
.6	.004716	4.16	4.0128	.1472	3.54
.6	.005895	5.24	5.0380	.2020	3.86
.6	.007074	5.83	6.0672	-.2372	- 4.07
.9	.001179	1.47	1.4899	-.0199	- 1.36
.9	.002358	3.04	3.0201	.0199	.65
.9	.003537	4.51	4.5658	-.0558	- 1.24
.9	.004716	6.17	6.1221	.0479	.78
.9	.005895	7.79	7.6860	.1040	1.34
.9	.007074	8.72	9.2553	-.5353	- 6.14
.9	.001179	1.47	1.4899	-0.0199	- 1.36
.9	.002358	2.99	3.0201	-.0301	- 1.01
.9	.003537	4.51	4.5658	-.0558	- 1.24
.9	.004716	6.17	6.1221	.0479	.78
.9	.005895	7.79	7.6860	.1040	1.34
.9	.007074	8.72	9.2553	-.5353	- 6.14
1.2	.001179	2.06	2.0105	.0495	2.40
1.2	.002358	4.26	4.0755	.1845	4.33
1.2	.003537	6.37	6.1614	.2086	3.28
1.2	.004716	8.77	8.2606	.5094	5.81
1.2	.005895	10.98	10.3709	.6091	5.55
1.2	.007074	12.35	12.4896	-.1396	- 1.13
1.2	.001179	2.01	2.0105	-.0005	-.03
1.2	.002358	4.07	4.0755	-.0055	-.14
1.2	.003537	6.08	6.1614	-.0814	- 1.34
1.2	.004716	8.33	8.2606	.0694	.83
1.2	.005895	10.44	10.3709	.0691	.66
1.2	.007074	11.66	12.4896	-.8296	- 7.12

\* 註：相對誤差 = [(試驗值 - 計算值) / 試驗值] \* 100%

表2 乾淨玉米在不同高度、通風量下試驗值與式(2.6)計算壓力降之比較

高度 m	通風量 $m^3/(s \cdot m^2)$	試驗值 Pa	計算值 Pa	相差值 Pa	相對誤差 %*
.3	.001179	.20	.2416	-.0416	-20.80
.3	.002358	.47	.4917	-.0217	-4.61
.3	.003537	.66	.7500	-.0900	-13.64
.3	.004716	.90	1.0165	-.1165	-12.95
.3	.005895	1.13	1.2911	-.1611	-14.26
.3	.007074	1.25	1.5736	-.3236	-25.89
.6	.001179	.39	.4832	-.0932	-23.90
.6	.002358	.90	.9833	-.0833	-9.26
.6	.003537	1.37	1.5000	-.1300	-9.49
.6	.004716	1.84	2.0330	-.1930	-10.49
.6	.005895	2.25	2.5822	-.3322	-14.76
.6	.007074	2.55	3.1472	-.5972	-23.42
.9	.001179	.64	.7248	-.0848	-13.25
.9	.002358	1.35	1.4750	-.1250	-9.26
.9	.003537	1.99	2.2500	-.2600	-13.07
.9	.004716	2.76	3.0496	-.2896	-10.49
.9	.005895	3.41	3.8733	-.4633	-13.59
.9	.007074	3.77	4.7208	-.9508	-25.22
1.2	.001179	.88	.9664	-.0864	-9.82
1.2	.002358	1.84	1.9666	-.1266	-6.88
1.2	.003537	2.76	3.0000	-.2400	-8.70
1.2	.004716	3.80	4.0661	-.2661	-7.00
1.2	.005895	4.68	5.1643	-.4843	-10.35
1.2	.007074	5.24	6.2943	-1.0543	-20.12

註：相對誤差 = [(試驗值 - 計算值) / 試驗值] \* 100%

在各種粉塵含量、密度及高度下以0.001179m<sup>3</sup>/(s·m<sup>2</sup>)為基準通風量(V)由2至6倍增加，其對壓力降增加倍數之情形，可參閱表3所示。由比較可知在不同高度、不同密度、及不同粉塵含量其壓力降均隨通風量(V)之增加而增加。但在2, 3, 4, 5倍基準通風量時，其壓力降之倍數均比通風率倍數大，而在6倍基準通風率時，其壓力降之倍數也在6倍左右(而非完全一致較大)，究其原因，在該通風率下，流量計之量測已達極限，在實驗時就發現內部浮球略呈不穩定跳動現象，雖然力求各觀平均，但結果顯示仍有不穩定現象。

因通風率改變其壓力降變化之圖例，請參閱鍾(1987)之論文。

表3 不同粉塵含量、鬆填及壓實玉米在不同高度下因通風量倍數增加其壓力降倍數變化情形

粉塵含量	裝填情況	高度 m	壓力降 倍數 (1)*	壓力降 倍數 (2)*	壓力降 倍數 (3)*	壓力降 倍數 (4)*	壓力降 倍數 (5)*	
0%	鬆填	0.3	2.35	3.30	4.50	5.65	6.25	
		0.6	2.31	3.51	4.72	5.77	6.54	
		0.9	2.11	3.11	4.31	5.33	5.89	
		1.2	2.09	3.14	4.32	5.32	5.95	
		壓實	0.3	2.38	3.38	4.72	5.76	6.48
	0.6	2.14	3.22	4.44	5.52	6.17		
	0.9	2.10	3.13	4.30	5.38	6.07		
	1.2	2.15	3.23	4.40	5.52	6.16		
	3%	鬆填	0.3	2.21	3.38	4.48	5.59	6.34
			0.6	2.06	3.06	4.19	5.20	5.89
0.9			2.28	3.34	4.53	5.65	6.38	
1.2			2.09	3.09	4.24	5.31	5.94	
壓實			0.3	2.26	3.26	4.51	5.54	6.28
0.6		2.02	3.05	4.16	5.18	5.76		
0.9		2.07	3.04	4.21	5.27	5.90		
1.2		2.11	3.12	4.23	5.31	5.96		
7%		鬆填	0.3	2.05	3.11	4.34	5.34	6.00
			0.6	2.05	3.10	4.27	5.35	5.98
	0.9		2.05	3.07	4.20	5.30	5.93	
	1.2		2.05	3.06	4.21	5.28	5.92	
	壓實		0.3	2.08	3.05	4.20	5.23	5.89
	0.6	2.00	3.00	4.15	5.19	5.81		
	0.9	2.02	3.07	4.15	5.27	5.90		
	1.2	2.01	3.04	4.16	5.24	5.87		

\*註：(1)：2倍基準通風量  
(2)：3倍基準通風量  
(3)：4倍基準通風量  
(4)：5倍基準通風量  
(5)：6倍基準通風量  
(6)：基準通風量為0.001179m<sup>3</sup>/(s·m<sup>2</sup>)

(三)高度(H)變化對壓力降之影響

由資料經迴歸所得H之C值為1.04，而根據Henderson和Perry(1976)在通風量範圍從0.016256至0.6096m<sup>3</sup>/(s·m<sup>2</sup>)，H之C值在1.0至1.1之間，極為相近。

在各種粉塵含量、不同密度及各種通風量下而

言以 0.3m 為基準高度，將其它倍數高度對基準高度作壓力降增加之倍數比較，可參閱表 4 所示，可知壓力降增加倍數較高度增加倍數大，壓力降之值均隨高度之增加而增加。

對於 Shedd (1951, 1953) 研究認為單位深度之壓力降與穀層深度無關或視 C 值為 1 之觀念在淺層通風時應可接受，在現場穀倉而言，例高雄小港糖廠之鐵皮倉，其玉米深為 5.5m 若能考慮高度 H 之 C 值為 1.04 對於壓力降之預估可能相差 7%。

因高度改變其壓力降變化之圖例，請參閱鍾 (1987) 之論文。

表 4 不同粉塵含量、鬆填及壓實玉米在不同通風率下因高度倍數增加其壓力降倍數變化情形

粉塵含量%	密度 kg/m <sup>3</sup> *3	通風率 m <sup>3</sup> /s *3 / (s * m <sup>2</sup> * 2)	壓力降倍數 (1)*	壓力降倍數 (2)*	壓力降倍數 (3)*
0	747.72	.001179	1.95	3.20	4.40
	747.72	.002358	1.91	2.87	3.91
	747.72	.003537	2.08	3.02	4.18
	747.72	.004716	2.04	3.07	4.22
	747.72	.005895	1.99	3.02	4.14
	747.72	.007074	2.04	3.02	4.19
	801.12	.001179	2.21	3.38	4.55
	801.12	.002358	1.99	2.99	4.12
	801.12	.003537	2.10	3.13	4.35
	801.12	.004716	2.07	3.07	4.24
	801.12	.005895	2.11	3.16	4.36
	801.12	.007074	2.10	3.16	4.32
3	753.61	.001179	2.21	3.03	4.38
	753.61	.002358	2.06	3.14	4.14
	753.61	.003537	2.00	3.00	4.00
	753.61	.004716	2.06	3.07	4.15
	753.61	.005895	2.06	3.07	4.16
	753.61	.007074	2.05	3.05	4.10
	801.12	.001179	2.26	3.46	4.51
	801.12	.002358	2.02	3.17	4.23
	801.12	.003537	2.11	3.24	4.32
	801.12	.004716	2.08	3.23	4.23
	801.12	.005895	2.11	3.29	4.32
	801.12	.007074	2.07	3.25	4.28
7	762.16	.001179	2.23	3.34	4.61
	762.16	.002358	2.23	3.34	4.62
	762.16	.003537	2.22	3.29	4.54
	762.16	.004716	2.19	3.23	4.48
	762.16	.005895	2.23	3.31	4.56
	762.16	.007074	2.22	3.30	4.55
	801.12	.001179	2.08	3.12	3.98
	801.12	.002358	2.00	3.04	3.86
	801.12	.003537	2.04	3.14	3.98
	801.12	.004716	2.05	3.09	3.95
	801.12	.005895	2.06	3.14	3.99
	801.12	.007074	2.05	3.12	3.97

\* 註：(1)：2 倍基準高度 (3)：4 倍基準高度  
(2)：3 倍基準高度 (4)：基準高度為 0.3m

#### 四容積密度(D)變化對壓力降之影響

由資料迴歸所得 D 之 d 值為 5.92 可用計算方式估算因密度改變其相差倍。

由表 5 比較知在乾淨玉米壓實較鬆填之壓力降其倍數由 1.45 至 1.64 (平均 1.53) 倍變動，在 3% 塵含量中，其變動由 1.30 至 1.53 倍 (平均 1.38)，在 7% 粉塵含量中，其變動為 1.27 至 1.52 倍 (平均 1.38)。

由 Patterson 等 (1971) 及 Shedd (1951) 之結果與表 5 結果比較，可發現因密度不同，將導致壓力降對壓實與鬆填之相差異。

因容積密度改變其壓力降變化之圖例，請參閱鍾 (1987) 之論文。

表 5 不同高度、通風率在不同粉塵含量，壓實對鬆填玉米壓力降倍數變化情形

高度 m	通風率 m <sup>3</sup> /s *3 / (s * m <sup>2</sup> * 2)	壓力降倍數 (1)*	壓力降倍數 (2)*	壓力降倍數 (3)*
.3	.001179	1.45	1.34	1.50
.3	.002358	1.47	1.38	1.52
.3	.003537	1.48	1.30	1.47
.3	.004716	1.52	1.35	1.45
.3	.005895	1.48	1.33	1.47
.3	.007074	1.50	1.33	1.47
.6	.001179	1.64	1.38	1.40
.6	.002358	1.52	1.35	1.36
.6	.003537	1.50	1.37	1.35
.6	.004716	1.54	1.37	1.36
.6	.005895	1.57	1.37	1.36
.6	.007074	1.55	1.34	1.36
.9	.001179	1.53	1.53	1.40
.9	.002358	1.53	1.39	1.38
.9	.003537	1.54	1.40	1.40
.9	.004716	1.53	1.42	1.39
.9	.005895	1.55	1.43	1.39
.9	.007074	1.58	1.42	1.39
1.2	.001179	1.50	1.39	1.30
1.2	.002358	1.54	1.40	1.27
1.2	.003537	1.54	1.40	1.28
1.2	.004716	1.53	1.38	1.28
1.2	.005895	1.56	1.39	1.29
1.2	.007074	1.55	1.39	1.28
平均 值		1.53	1.38	1.38

\* 註：(1)：乾淨玉米壓實對乾淨玉米鬆填  
(2)：3% 粉塵含量壓實對 3% 粉塵含量鬆填  
(3)：7% 粉塵含量壓實對 7% 粉塵含量鬆填



(戊)粉塵含量 (Fm) 變化對壓力降之影響

由資料迴歸所得  $(1 + Fm)$  之  $e$  值為 10.28 可用計算方式估算因粉塵含量改變其壓力降相差倍數。

例如 7% 粉塵含量鬆填較 3% 粉塵含量壓力降增加倍數可如下所示：

$$\frac{((1 + 0.07)/(1 + 0.03))^{10.28}}{(762.16/753.61)^{10.28}} = 1.581$$

由表 6 比較知在鬆填時，3% 粉塵含量之玉米壓力降之最小倍數為 1.36 倍，最大為 1.64 倍，平均為 1.46 倍；7% 粉塵含量之玉米壓力降之最小倍數為 1.91 倍，最大為 2.51 倍，平均為 2.24 倍；7% 粉塵含量較 3% 粉塵含量玉米壓力降之最小倍數為 1.40 倍，最大為 1.67 倍，平均為 1.54 倍。

由表 7 在壓實時，3% 粉塵含量較乾淨玉米壓力降之最小倍數為 1.28 倍，最大為 1.38 倍，平均為 1.31 倍；7% 粉塵含量較乾淨玉米壓力降之最小倍數為 1.86 倍，最大為 2.28 倍，平均為 2.02 倍；7% 粉塵含量較 3% 粉塵含量壓力降之最小倍數為 1.42 倍，最大為 1.69 倍，平均為 1.53 倍。

由乾淨玉米鬆填與 7% 粉塵含量之玉米壓實之比較可知兩者壓力降之倍數如表 8 最小為 2.88 倍 ( $H=1.2m, V=0.002358m^3/(s \cdot m^2)$ )，最大為 3.51 倍 ( $H=0.6m, V=0.001179m^3/(s \cdot m^2)$ )。可知玉米因粉塵含量增加至 7% 及壓實將導致壓力降倍數之差異極大。

在本研究中 3% 與 7% 粉塵含量之玉米之容積密度 (或孔隙度) 相同，但因粉塵含量的增加，導致全部平均粒徑的減少，進而使壓力降增大與 Patterson 等 (1971) 作高通風量之乾淨玉米，2% 及 5% 粉塵含量之玉米之研究結果相符。

因玉米粉塵含量改變其壓力降變化之圖例，請參閱鍾 (1987) 之論文。

(己)含水率 (濕基) 在低風量下對壓力降之影響

由試驗資料知道在通風前玉米平均含水率為 14.44%，連續通風 30 小時後玉米平均含水率為 13.93%，乾淨玉米鬆填及壓實通風後玉米平均含水率為 13.98%、3% 粉塵含量之玉米鬆填及壓實通風後玉米平均含水率為 13.83%，及 7% 粉塵含量之玉米鬆填及壓實通風後玉米平均含水率為 14.01%。其含水率變化僅在通風前與連續通風 30 小時後，差異 0.51%。而在乾淨玉米鬆填及壓實通

風後，3% 粉塵含量之玉米鬆填及壓實通風後及 7% 粉塵含量之玉米鬆填及壓實通風後變化極微。

玉米在試驗時對應之相對濕度約為 70%，根據 ASAE Standards (1988) 相對濕度超過 85% 會有影響。

Akritidis 和 Siatrad (1979) 在低風量下 ( $10m^3/(min \cdot m^2)$  以下) 南瓜種子鬆填情況下含水率的改變對壓力降之影響極微。

表 6 鬆填、不同高度及通風量因粉塵含量增加玉米壓力降倍數變化情形

高度 m	通風量 $m^3/(s \cdot m^2)$	壓力降 倍數 (1)*	壓力降 倍數 (2)*	壓力降 倍數 (3)*
.3	.001179	1.45	2.20	1.52
.3	.002358	1.36	1.91	1.41
.3	.003537	1.48	2.08	1.40
.3	.004716	1.44	2.12	1.47
.3	.005895	1.43	2.08	1.45
.3	.007074	1.47	2.11	1.43
.6	.001179	1.64	2.51	1.53
.6	.002358	1.47	2.23	1.52
.6	.003537	1.43	2.22	1.55
.6	.004716	1.46	2.27	1.56
.6	.005895	1.48	2.33	1.57
.6	.007074	1.48	2.30	1.55
.9	.001179	1.38	2.30	1.67
.9	.002358	1.49	2.23	1.50
.9	.003537	1.48	2.27	1.53
.9	.004716	1.45	2.24	1.55
.9	.005895	1.46	2.28	1.57
.9	.007074	1.49	2.31	1.55
1.2	.001179	1.44	2.31	1.60
1.2	.002358	1.44	2.26	1.57
1.2	.003537	1.42	2.25	1.59
1.2	.004716	1.42	2.25	1.59
1.2	.005895	1.44	2.29	1.59
1.2	.007074	1.44	2.29	1.59
平均	值	1.46	2.24	1.54

\*註：(1)：3% 粉塵含量之玉米對乾淨玉米  
(2)：7% 粉塵含量之玉米對乾淨玉米  
(3)：7% 粉塵含量對 3% 粉塵含量之玉米

表7 壓實、不同高度及通風量因粉塵含量增加玉米壓力降倍數變化情形

高度 m	通風量 $m^3/s$ ( $s \cdot m^2$ )	壓力降 倍數 (1)*	壓力降 倍數 (2)*	壓力降 倍數 (3)*
.3	.001179	1.34	2.28	1.69
.3	.002358	1.28	1.99	1.56
.3	.003537	1.30	2.05	1.58
.3	.004716	1.28	2.02	1.57
.3	.005895	1.29	2.07	1.60
.3	.007074	1.30	2.07	1.59
.6	.001179	1.38	2.14	1.56
.6	.002358	1.30	2.00	1.54
.6	.003537	1.30	2.00	1.53
.6	.004716	1.29	2.00	1.55
.6	.005895	1.29	2.01	1.56
.6	.007074	1.28	2.02	1.57
.9	.001179	1.38	2.10	1.53
.9	.002358	1.35	2.02	1.49
.9	.003537	1.34	2.06	1.54
.9	.004716	1.35	2.03	1.51
.9	.005895	1.35	2.06	1.53
.9	.007074	1.34	2.04	1.52
1.2	.001179	1.33	1.99	1.49
1.2	.002358	1.31	1.86	1.42
1.2	.003537	1.29	1.88	1.46
1.2	.004716	1.28	1.88	1.47
1.2	.005895	1.28	1.89	1.47
1.2	.007074	1.29	1.90	1.47
平 均 值		1.31	2.02	1.53

\*註：(1)：3%粉塵含量之玉米對乾淨玉米  
 (2)：7%粉塵含量之玉米對乾淨玉米  
 (3)：7%粉塵含量對3%粉塵含量之玉米

表8 7%粉塵含量之玉米壓實對乾淨玉米鬆填其壓力降倍數變化情形

高度 m	通風量 $m^3/s$ ( $s \cdot m^2$ )	乾淨鬆填 壓力降 Pa	7%粉塵 壓實壓力 降 Pa	倍 數
.3	.001179	.20	.66	3.30
.3	.002358	.47	1.37	2.91
.3	.003537	.66	2.01	3.05
.3	.004716	.90	2.77	3.08
.3	.005895	1.13	3.45	3.05
.3	.007074	1.25	3.89	3.11
.6	.001179	.39	1.37	3.51
.6	.002358	.90	2.74	3.04
.6	.003537	1.37	4.11	3.00
.6	.004716	1.84	5.68	3.09
.6	.005895	2.25	7.11	3.16
.6	.007074	2.55	7.96	3.12
.9	.001179	.64	2.06	3.22
.9	.002358	1.35	4.16	3.08
.9	.003537	1.99	6.32	3.18
.9	.004716	2.76	8.55	3.10
.9	.005895	3.41	10.85	3.18
.9	.007074	3.77	12.15	3.22
1.2	.001179	.88	2.63	2.99
1.2	.002358	1.84	5.29	2.88
1.2	.003537	2.76	7.99	2.89
1.2	.004716	3.80	10.95	2.88
1.2	.005895	4.68	13.77	2.94
1.2	.007074	5.24	15.43	2.94

因此，在本試驗可不考慮因含水率微小變化因素，所引起壓力降之差異。

(c)現場玉米粉塵含量與國外起岸港後玉米粉塵含量之比較

因現場穀倉在進倉時曾用5號篩網過濾粉塵，因進料速度快，只過濾0.9%之粉塵含量，其各位

置之平均介於4.61%與6.95%之間。加上因過濾器篩除的0.9%，進口玉米之粉塵含量約介於 5.51%到7.85%之間。根據陳(1985)，國外起岸港後全部船隻平均之粉塵含量 7%比較相差不多，所以在探討進口玉米粉塵含量 7%時，對壓力降之影響有其必要性。

(f)粉塵面積平均徑之結果

由於粉塵粒徑大小會影響壓力降之值，但本文未列入試驗變動因素內，只在粉塵含量 3%及 7%之玉米試驗時，抽取兩樣本，以面積平均徑之分析，作為該粉塵粒徑大小之指標。樣本之粒徑大小介於0.7442至0.8733mm之間。

五、結 論

(一)濕基含水率在 14.44 與 13.83%之間的美國進口玉米粒在通風量介於 0.001179 至0.007074m \* 3/(s \* m \* \* 2)，密度介於747.72 至 801.12 kg/m \* \* 3，堆積高度介於0.3 至 1.2m，玉米之粉塵含量介於 0 至 7%，粉塵面積平均粒徑從 0.7442mm至0.8733mm，對通風壓力降可由下式表示之：

$$\ln(P) = a + b \ln(V) + c \ln(H) + d \ln(D) + e \ln(1 + F_m) \dots \dots \dots (4.1)$$

P = 壓力降, Pa

a = -32.61

V = 通風量, m \* 3/(s \* m \* \* 2)

b = 1.02

H = 高度, m

c = 1.04

D = 密度, kg/m \* \* 3

d = 5.92

F<sub>m</sub> = 粉塵含量, 小數值

e = 10.28

R = 相關係數

R \* \* 2 = 0.9974

(二)不同通風量、高度、粉塵含量及裝填情況，代入式(4.1) 其結果與試驗值作比較，其最大相對誤差為15.58%，試驗值與 ASAE 所附壓力降與通風量及粉塵含量方程式 (2.6) 外插計算值作比較，其最大相對誤差為 25.89%。因此，利用式 (4.1) 做為預估通風壓力降，至少增加16%之裕度，而利用式 (2.6) 做為預估通風壓力降，至少增

加26%之裕度。

(三)壓力降隨通風量之增大而增大。在低通風量下 (0.001179 至 0.007074m \* 3/(s \* m \* \* 2))，因接近穩定流，故 b 值為1.02。

(四)壓力降隨堆積高度之增加而增加。若視壓力降與單位穀層無關，將會低估實際壓力降之值，在實用上應考慮H之 c 值為1.04。

(五)壓力降隨玉米容積密度增加而增加，其增加倍數非線性的。其D之 d 值為5.92。

(六)壓力降隨玉米粉塵含量增加而增加，其 (1 + F<sub>m</sub>) 之 e 值為 10.28，以增加 7%粉塵含量而言，其壓力降將為乾淨玉米之 2 倍左右。

(七)進口美國二級玉米之夾雜物和粉塵含量 (3%) 經過運送到臺灣加工廠，其粉塵含量增加到5.51%至7.85%。約為啓程港二級玉米之1.8至2.6倍。

符 號 說 明

a : 穀物常數

b : 通風率常數, (冪數)

c : 高度常數, (冪數)

d : 密度常數, (冪數)

e : 粉塵含量常數, (冪數)

D : 玉米粒容積密度 (kg/m \* \* 3, lb/ft \* \* 3)

D<sub>k</sub> : 玉米粒顆粒密度 (kg/m \* \* 3, lb/ft \* \* 3)

F<sub>m</sub> : 粉塵含量 (小數值)

H : 穀物高 (m, ft)

P : 壓力降 (Pa, in. water)

P' : 壓力降 每呎穀物之英吋 水柱高  
壓力降 每公尺穀物之 Pa

R \* \* 2 : 相關係數之平方

V : 通風量 (m \* 3/(s \* m \* \* 2), cfm/ft \* \* 2)

六、誌 謝

臺灣區雜糧發展基金會之研究經費支持，陳世銘博士與李允中博士提供資料處理的寶貴意見，劉教授鸞釧與翟教授毓萍提供迴歸軟體的應用與分析，在此一併致謝。

七、參 考 文 獻

1. 陳新友, 1985. 美國穀物的集運與等級檢驗、穀物儲運系列專輯之一、臺灣區雜糧發展基金會。

2. 馮丁樹譯, 1978, 穀物乾燥, 徐氏基金會出版。
3. 鍾木華, 1987, 玉米粒之密度、高度、粉塵含量及低通風量對壓力降之影響, 臺大農工所碩士論文, 臺大農機系。
4. Akritidis, C. B. and A.J. Siatrad, 1979, Resistance of Pumpkin Seeds to Air Flow. TRANSACTIONS of the ASAE 22(6): 1414-1416.
5. ASAE Standards, 1988, Resistance to Airflow of Grains, Seeds, other Agricultural Products and Perforated Metal Sheets (ASAE D272. 2) :335-340, American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, MI 49085-9659, USA
6. Bern, C. J. and L. F. Charity, 1975, Airflow Resistance Characteristics of Corn as Influenced by Bulk Density. ASAE PAPER NO. 75-3510:1-7.
7. Brooker, D. B., 1969. Computing Air Pressure and Velocity Distribution when Air Flows Through a Porous Medium and Non-linear Velocity-Pressure Relationships Exist. TRANSACTIONS of the ASAE 12(1):118-120.
8. Brooker, D. B., F. W. Bakker-Arkema and C. W. Hall, 1974, Drying Cereal Grains. AVI Publishing Co., Westport, Conn., USA.
9. Ergun, S. 1952. Fluid Flow Through Packed Columns. Chem. Engng. Prog. 48(2):89-94.
10. Farmer, G.S., G.H. Brusewitz, and R.W. Whitney, 1981, Resistance to Airflow of Bluestem Grass Seed. TRANSACTIONS of the ASAE 24(2): 480-483.
11. Foster, G. H. 1970 Personal Communication, West Lafayette, Ind. USA.
12. Haque, E., G. H. Foster, D. S. Chung and F. S. Lai, 1978, Static Pressure Drop Across a Bed of Corn Mixed with Fines. TRANSACTIONS of the ASAE 21(5):997-1000.
13. Haque, E., D. S. Chung, and G. H. Foster, 1981, Pressure and Velocity Field in Airflow Through Packed Bed of Corn Mixed with Fines Under Non-Darcy Flow Conditions. TRANSACTIONS of the ASAE 24 (6):1595-1599, 1604.
14. Henderson, S.M. and R.L. Perry, 1976, Agricultural Procecs Engineering. AVI Publishing Co., Westport, Conn., USA.
15. Hukill, W. V. and N. C. Ives, 1955, Radial Airflow Resistance of Grain. AGRICULTURAL ENGINEERING 36 (5):332-335.
16. Kumar A. and W. E. Muir, 1986, Airflow Resistance of Wheat and Barley Affected by Air Flow Direction, Filling Method and Dockage. TRANSACTIONS of the ASAE 29(5):1423-1426.
17. Patterson, R.J., F. W. Bakker-Arkema, and W.G. Bickert, 1971, Static Pressure Airflow Relationships in Packed Beds of Granular Biological Materials such as Grain. II. TRANSACTIONS of the ASAE 14(1): 172-174, 178.
18. Shedd, C. K. 1951, Some New Data on Resistance of Grains to Air Flow. AGRICULTURAL ENGINEERING 32(9): 493-495, 520.
19. Shedd, C.K. 1953, Resistance of Grains and Seeds to Air Flow. AGRICULTURAL ENGINEERING 34(9):616-618.
20. Sheldon, W. H., C.W. Hall and J. K. Wang, 1960, Resistance of Shelled Corn and Wheat to Low Air Flows TRANSACTIONS of the ASAE 3(2):92-94.