

膨發米之機械性質測試分析

The Study on Texture of Puffed Rice Particles

國立宜蘭農工專科學校農業機械工程科副教授

吳 柏 青

Po-Ching Wu

摘 要

粒狀膨發穀類食品個別之機械性質分析在技術上是可行的，但實際上卻十分困難且耗時。本試驗研究之目的在利用食品物性分析儀與自製之探頭以測試粒狀膨發米食之機械性質，測試膨發米之含水率對機械性質之影響。膨發米機械性質分析曲線中鋸齒狀之壓縮力量變化顯示空洞結構隨樣品變形量與壓縮力量增加而逐漸破壞之，而此鋸齒狀之壓力變化亦可作為一機械性質分析指標。此外，採用統計分析方法以評估機械性質分析試驗中各參數與膨發米食機械性質（脆度與硬度）之相關性，以建立一標準機械性質分析方法與指標作為粒狀膨發米食產品生產之品質管制參考。相關性統計分析結果顯示含水率與壓縮能量、最大壓縮力、鬆弛壓力、鬆弛指數、壓力變化平均值、壓力變化標準差呈負相關性，其中以第二次壓縮之鬆弛指數與含水率之相關性最高。因此可以壓縮能量與最大壓縮力量代表食品之硬度；因脆度隨含水率增加而降低，脆度可以鬆弛指數代表之。

關鍵詞：穀類，膨發米，機械性質分析。

ABSTRACT

The physical properties of puffed rice particles can be analyzed technically, but it is very difficult and time-consuming to proceed the tests. this study was to evaluate the physical properties of puffed rice particles by using texture analyzer and a homemade Plexiglas crushing probe. Based on the compression force-deformation curve, the standard deviation of compression force fluctuation can be used as an index of crispiness of puffed rice materials. The results of this study can be used in the quality control of puffed food products and the development of new puffed food products. The analysis of correlation indicated that moisture content of puffed rice samples correlated with compression energy, maximum compression force, force of relaxation, index of relaxation, force fluctuation (average, standard deviation, coefficient of variation). At second compression, index of relaxation significantly correlated with moisture content. Therefore, the compression energy and maximum compression force

can be used to indicate the hardness of samples, index of relaxation can be used to indicate crispiness due to change of moisture content.

Keywords : Cereal, Puffed rice, Physical properties.

一、前言

一般膨發食品之物理性質是以其個別樣品之內部結構及機械性質與幾何形狀量測之。雖然粒狀膨發穀類食品個別之機械性質分析 (texture analysis) 在技術上是可行的，但實際上卻十分困難且耗時。由於試驗樣品之體積較小，不易固定以進行機械性質量測，其形狀與大小不均一，且不易量化定義之。此外，單粒膨發樣品之機械性質測試力量較小，不僅不易偵測，且因輸出訊號較弱，易受雜訊干擾。因此，為求得有統計意義之機械性質量測，則必須測試大量的樣品。此外，一般消費者並不食用單粒膨發穀類食品，測試單粒膨發穀類食品並不具太大物理意義。因此，將多粒膨發穀類食品聚集後同時進行機械性質分析，可有效解決量測技術與統計分析方面之問題。

口感對膨發食品品質是重要之條件，不僅影響消費者之接受程度 (consumer acceptance)，並直接影響產品之銷售。一般膨發食品 (如餅乾—cookie, cracker) 之口感測定皆以官能品評 (sensor evaluation) 測定之，其過程不但繁雜冗長、耗費人力、實驗設計不易、且易受外界其他因素影響。食品科學家一直在尋求一較客觀、簡易、快速之測定方法來測試產品之口感，以配合生產線上之品質管制 (quality control) 需求。然而，“口感”一詞本身即是一較主觀之名詞，一般口感測定常以脆度 (crispiness, brittleness) 或硬度 (hardness) 代表之。通常將硬度定義為固定變形下所需之力量，而脆度則定義為樣品破碎所需之力量或產生明顯破裂時之變形量。

以儀器分析法測定口感之相關技術可分為探頭測驗 (probe testing) 及折斷測試 (snapping technique) 兩種 (gaines, et al., 1992a,b)。依據測試之產品與穿透程度 (degree of penetration) 探頭測試技術又

可分為穿透 (penetration)、穿刺 (puncturing)、穿孔 (punching) 等。然而，依據不同產品之測試結果又衍生出許多有關口感之名詞，例如：強度 (firmness)、韌度 (toughness)、柔軟度 (tenderness)、熟度 (ripeness)、硬度。一般探頭測試技術是量測一探頭穿入或穿透樣品之最大力量，通常則將穿透深度視為硬度值。

折斷測試技術又稱三點斷裂試驗 (three-point brekc)，可量測食品之硬度及脆度。將折斷測試結果繪成一應力—應變曲線後，其斜率與尖峰 (peak force) 可用以估計產品之硬度及脆度，而其斜率亦即楊式係數 (Yough's modulus)。除了一些較脆之產品，若斷裂以前之變形量越小，則產品之脆度越大。對於大部份形狀之餅乾產品，其斷裂所需力量與兩支撐軸之距離呈反比，與產品寬度呈正比，而與產品厚度之平方呈正比 (Bourne, 1982)。

由於膨發穀類之體積較小，且其個別差異性較大，機械性質分析試驗不易進行。Nuebel and Peleg(1993) 以自製之機械性質分析探頭進行膨發米 (puffed rice) 與膨發玉米早餐食品 (corn cereal) 之機械性質分析。其應力應變曲線 (stress-strain) 可以四變數之數學模式描述之。此外，應力應變曲線之平滑度 (smoothness) 與樣品之含水率有關。曲線之鋸齒度 (degree of jaggedness) 可以 Apparent Fractal Dimension 或 FFT (Fast Fourier Transform) 所計算之，但是相關之數學運算較複雜繁瑣，對於食品品質管測試與生產線上品質監測之實際應用性較低。

本試驗研究之目的在利用食品物性分析儀與自製之探頭以測試粒狀膨發米食之含水率對機械性質之影響。此外，採用統計分析方法以評估機械性質分析試驗中各參數 (含水率、壓縮能量、最大壓縮力量、鬆弛力量、鬆弛指數、平均壓力變化、壓力變化標準差、壓力變化變異係數等) 之相關性，以建立一標準機械性質分析方法與指標作為粒狀膨發米食產品生產之品質管制參考。

二、材料與方法

試驗材料

試驗材料採用蓬萊米，其初含水率為 15 %，膨發前先以 Mesh#10 之篩網篩選。膨發過程採用 5 公斤量之膨發鍋，膨發之樣品重量為 1 公斤，並以液化瓦斯為燃料加熱。膨發試驗步驟依照吳柏青 (1995) 所敘述之膨發過程進行之，膨發壓力為 150-psig(1,034kPa)。

將膨發後之膨發米樣品 (含水率 11.4 %) 各 20 公克分別置於六個密封之塑膠容器 (25 °C) 中，內盛硫酸鋅 ($ZnSO_4$)、氯化鈉 (NaCl)、溴化鈉 (NaBr)、碳酸鈉 ($NaCO_3$)、醋酸鉀 ($KC_2H_3O_2$)、氫氧化鈉 (NaOH) 等之飽和溶液，所採用之飽和溶液所產生之相對溼度分別為 89 %、76 %、58 %、43 %、23 %、9 %。待存放一週後，膨發米樣品之平衡含水率分別為 17.0 %、13.2 %、11.0 %、10.7 %、8.9 %、6.8 %。另取一膨發米樣品置於乾燥矽膠箱中，使其含水率降至 2.8 %。膨發米樣品之含水率測定方法是依據 AOAC Method 14.004 與 ASAE Standards: S352.1，取 5 公克樣品，置於精密烘箱 (130 ± 3 °C) 中乾燥 1 小時後測量計算其含水量，每一樣品量測三次，求其平均值。

膨發米機械性質分析試驗

含水率之高低明顯影響膨發米樣品之機械性質 (例如：脆度、硬度…等)。膨發米樣品之機械性質分析採用食品物性分析儀 (texture analyzer-Stable Micro Systems, model TA-HD，如圖 1 所示)，使用 50 公斤荷重元 (load cell)，資料擷取速度 (sampling rate) 為 12.5point/sec。此外，以自製之壓克力試驗探頭 (直徑 38-mm，高度 100-mm，截面積 1349-mm^2) 及樣品槽 (crushing cell，內徑 38.5-mm，外徑 60-mm，高度 50-mm) 進行機械性質分析試驗。

機械性質分析過程將壓縮試驗 (compression) 與應力鬆弛試驗 (stress relaxation) 合併進行。將膨發米樣品 (約 5 公克) 倒入樣品槽後，輕輕敲擊二十下使膨發米樣品排列緊密，再倒入少許膨發米樣品以填滿樣品槽。先以變形量 (deformation) 10-mm、變形速度 (deformation rate) 0.1 mm/sec 進行壓縮試驗，當變形量達 10-mm 後，停止試驗探頭之

運動繼續進行 120sec 之應力鬆弛試驗，試驗總時間為 220sec。每個樣品測試三重覆，取其平均值記錄之。

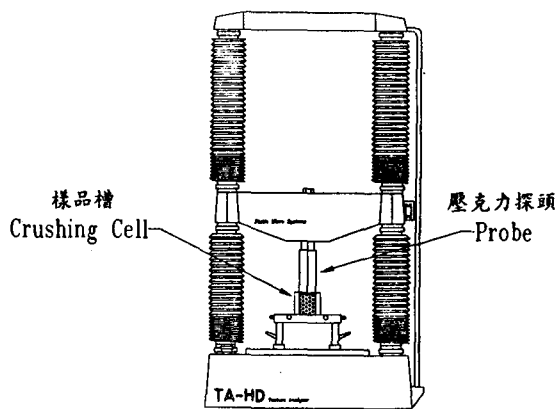


圖 1. 膨發米食機械性質試驗所採用之物性分析儀 (SMS TA-HD Texture Analyser) 與試驗配置

由於樣品排列之緊密度會影響試驗結果，因此每件樣品皆進行兩次壓縮試驗與應力鬆弛試驗。在第一次之壓縮試驗與應力鬆弛試驗中，可將樣品緊密壓實。由於試驗探頭及樣品槽之材質皆為壓克力，其表面非常光滑，因此壓縮試驗過程中試驗探頭與樣品槽間、樣品與試驗探頭及樣品槽間之摩擦力可忽略不計。

機械性質分析試驗後，以機械性質分析軟體為 XT.RA Dimension (Version 3.7A) 分別計算以下之參數：

1. 壓縮能量 (compression energy) 為壓縮試驗過程中所需能量 (erg)

$$E = \int_0^{10} F \cdot dx \dots\dots\dots (1)$$

2. 最大壓縮力 (maximum compression force) 為最大變形量 10-mm 時所需之壓縮力。
3. 鬆弛壓力 (Force of Relaxation) 為維持最大變形量達 120 sec 後之壓力。
4. 鬆弛指數 (index of relaxation) 為鬆弛壓力與最大壓縮力之比值。

$$\text{鬆弛指數} = \frac{\text{鬆弛壓力}}{\text{最大壓縮力}} \dots\dots\dots (2)$$

5. 壓力變化 (force fluctuation) 為壓縮試驗中壓縮力之變化量，並計算其平均值、標準差 (standard

表 1. 膨發米機械性質分析(第一次壓縮)之各項試驗參數

含水率 (%)	壓縮能量 (erg)	最大壓縮力 (N)	鬆弛壓力 (N)	鬆弛指數	壓力變化平均值 (N)	壓力變化標準差 (N)	壓力變化變異係數
2.81	14.90	302.9	249.6	0.82	1.9	2.8	1.43
6.81	17.25	368.8	286.8	0.78	2.4	2.0	0.84
8.85	15.17	352.4	266.8	0.76	2.3	1.6	0.72
10.74	13.52	298.3	220.0	0.74	1.9	1.9	0.97
10.97	14.70	310.8	230.0	0.74	2.0	2.1	1.05
13.21	10.50	234.9	152.2	0.65	1.5	1.6	1.04
16.95	7.84	166.2	96.2	0.58	1.1	1.0	0.99

表 2. 膨發米機械性質分析(第二次壓縮)之各項試驗參數

含水率 (%)	壓縮能量 (erg)	最大壓縮力 (N)	鬆弛壓力 (N)	鬆弛指數	壓力變化平均值 (N)	壓力變化標準差 (N)	壓力變化變異係數
2.81	30.81	494.6	414.2	0.84	3.1	6.4	2.03
6.81	25.02	516.8	401.2	0.78	3.3	4.1	1.23
8.85	26.62	532.0	403.2	0.76	3.4	2.7	0.80
10.74	23.27	454.1	336.6	0.74	2.9	2.6	0.90
10.97	28.19	486.7	355.0	0.73	3.1	3.2	1.03
13.21	25.38	394.6	256.1	0.65	2.3	2.9	1.15
16.95	19.03	275.1	155.5	0.57	1.8	2.3	1.31

deviation) 與變異係數 (coefficient of variation) 以作為壓力變化量大小之依據。

將以上各參數以統計分析軟體 (STATPAK) 進行相關係數矩陣 (correlation matrix) 分析, 以評估各參數間之相關性, 進而瞭解何者可作為膨發米機械性質之重要指標。

三、結果與討論

機械性質分析試驗顯示第二次壓縮較第一次壓縮需較高之力量, 圖 2 為兩次壓縮試驗之機械性質分析曲線。第一次壓縮試驗時, 機械性質分析曲線呈線性逐漸增加, 由於膨發米樣品之排列緊密度較低, 壓縮過程中僅上層之膨發米壓縮變

形, 而下層之膨發米則未變形。而在第一次壓縮後, 膨發米樣品之排列緊密度增加, 因此需要較高之壓縮力量。第二次壓縮曲線之模式亦不同於第一次壓縮, 其曲線有一轉折點存在。轉折點之前, 曲線之斜率較大, 亦即單位變形量所需壓縮力量較大, 且曲線較平滑; 而轉折點之後, 曲線之斜率變小, 且曲線較不平滑, 呈鋸齒狀變化。由此曲線判斷, 轉折點之前膨發米內部孔洞為非破壞性彈性壓縮變形, 而在轉折點之後孔洞結構逐漸破壞, 以致壓縮力量遞減, 影響曲線之斜率。表 1 與表 2 詳列第一次與第二次壓縮試驗中膨發米機械性質分析之各項試驗參數。鬆弛指數隨樣品含水率增加而降低, 且在兩次壓縮試驗中鬆

弛指數相當一致。

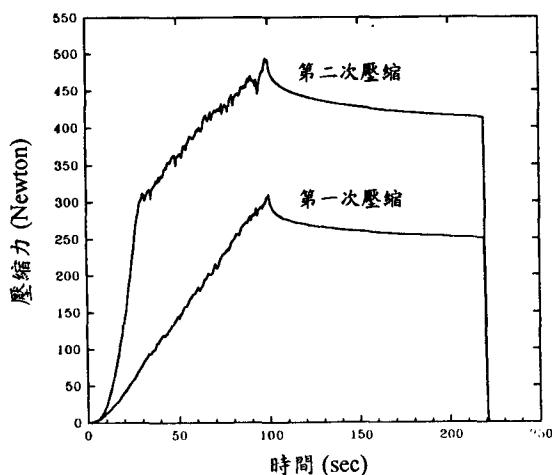


圖 2. 膨發米之機械性質分析曲線

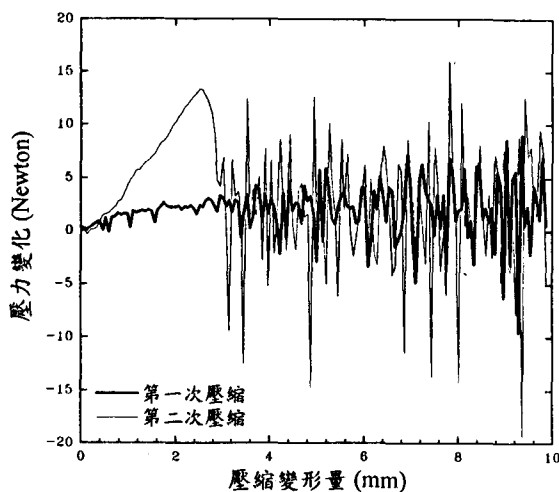


圖 3. 比較膨發米之機械性質分析中第一次壓縮試驗與第二次壓縮試驗之壓力變化 (Force Fluctuation)

由於膨發食品內部組織為多孔洞結構 (porous structure)，當壓縮力量呈鋸齒狀變化時，顯示孔洞結構逐漸破壞。當壓縮力量逐漸增加時，孔洞結構受壓縮而逐漸變形，一旦壓縮力量超過孔洞結構之降伏強度 (yielding strength) 時，孔洞結構因此而被破壞。當孔洞破壞的一瞬間，壓縮力量亦隨

之降低，然後隨變形量繼續增加而使壓縮力量逐漸提高。鋸齒狀之壓縮力量變化顯示孔洞結構隨樣品變形量與壓縮力量增加而逐漸破壞之，而此鋸齒狀之壓力變化亦可作為一機械性質分析指標。但是鋸齒狀之壓力變化不易量化，若以 Nuebel and Peleg(1993) 所採用之分析方法則稍嫌繁瑣。

圖 3 為含水率 2.8% 之膨發米樣品在兩次壓縮試驗中壓力變化曲線，結果顯示壓力變化量呈現巨幅震盪情形，且低含水率樣品之曲線震盪幅度較大 (如圖 4)。此外第二次壓縮時之壓力變化量較第一次壓縮時為高，可以壓力變化量之標準差為一參考指標，藉此判斷其壓力變化量之大小。圖中壓力變化之標準差由 2.8N(Newton) 升高至 6.4 N。比較含水率不同之膨發米產品時，含水率高低明顯影響其壓力變化量大小。圖 4 及圖 5 顯示在兩次壓縮試驗中低含水率樣品 (即較脆之樣品) 之壓力變化量較高含水率樣品為高，且二者之壓力變化量差異在第二次壓縮時特別明顯，在第一次壓縮試驗時，高低含水率樣品壓力變化之標準差分別為 1.0N 與 2.8N；而在第二次壓縮試驗時，兩樣品壓力變化之標準差分別為 2.3N 與 6.4N。比較二圖可發現，在第二次壓縮試驗時樣品之機械性質差異明顯增加，有助於樣品品質之判別依據。

將含水率、壓縮能量、最大壓縮力、鬆弛壓力、鬆弛指數、壓力變化平均值、壓力變化標準差、壓力變化變異係數等試驗參數進行相關性統計分析，兩次壓縮試驗結果之相關係數矩陣詳列於表 3 與表 4 中。在 98% 信賴度下 (即相關係數之絕對值大於 0.5 時)，二參數明顯相關。含水率明顯與壓縮能量、最大壓縮力、鬆弛壓力、鬆弛指數、壓力變化平均值、壓力變化標準差等參數呈負相關性，其中以第二次壓縮之鬆弛指數與含水率之相關係數 ($r = 0.9604$) 最高。

壓縮能量與最大壓縮力之相關性，以第一次壓縮時之相關性最高，其相關係數為 0.9686。由於在第二次壓縮時之機械性質分析曲線有轉折點存在，且其前後之斜率變化甚明顯，因此其相關性較差。此外，壓力變化平均值與標準差之相關性非常低，但明顯與壓縮能量與最大壓縮力相關。壓力變化之標準差與含水率明顯呈現負相關

表 3. 膨發米機械性質分析(第一次壓縮)之各項試驗參數相關係數矩陣

	含水率	壓縮能量	最大 壓縮力	鬆弛壓力	鬆弛指數	壓力變化 平均值	壓力變化 標準差	壓力變化 變異係數
含水率	1.0000	-0.7738	-0.7308	-0.8251	-0.9456	-0.7225	-0.8044	-0.3324
壓縮能量		1.0000	0.9686	0.9726	0.8490	0.9674	0.7111	-0.0354
最大壓縮力			1.0000	0.9854	0.8309	0.9988	0.5794	-0.2169
鬆弛力量				1.0000	0.9071	0.9836	0.6601	-0.0997
鬆弛指數					1.0000	0.8278	0.7753	0.2004
壓力變化平均值						1.0000	0.5765	-0.2222
壓力變化標準差							1.0000	0.6621
壓力變化變異係數								1.0000

表 4. 膨發米機械性質分析(第二次壓縮)之各項試驗參數相關係數矩陣

	含水率	壓縮能量	最大 壓縮力	鬆弛力量	鬆弛指數	壓力變化 平均值	壓力變化 標準差	壓力變化 變異係數
含水率	1.0000	-0.7500	-0.7849	-0.8870	-0.9604	-0.7803	-0.7719	-0.4558
壓縮能量		1.0000	0.7648	0.7861	0.7569	0.7612	0.7267	0.3981
最大壓縮力			1.0000	0.9788	0.8710	0.9994	0.4699	-0.0237
鬆弛力量				1.0000	0.9468	0.9769	0.5873	0.1264
鬆弛指數					1.0000	0.8678	0.6507	0.2655
壓力變化平均值						1.0000	0.4587	-0.0362
壓力變化標準差							1.0000	0.8678
壓力變化變異係數								1.0000

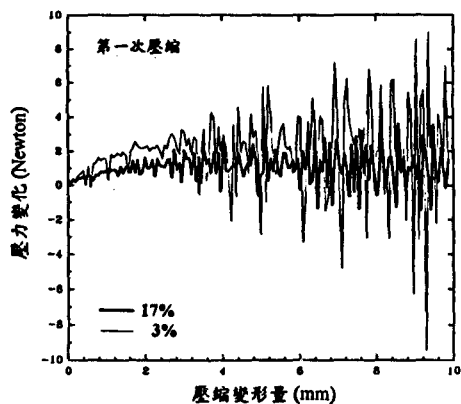


圖 4. 不同含水率(脆度)膨發米樣品之機械性質分析曲線中在第一次壓縮試中之壓力變化 (Force Fluctuation)

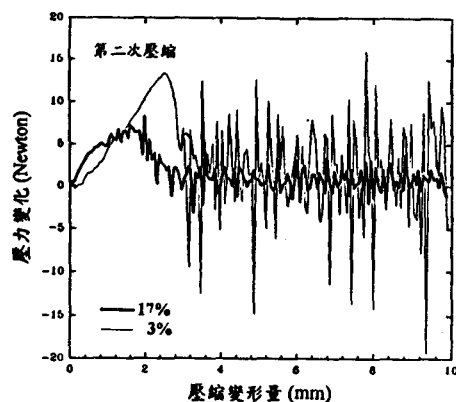


圖 5. 不同含水率(脆度)膨發米樣品之機械性質分析曲線中在第二次壓縮試驗中之壓力變化 (Force Fluctuation)

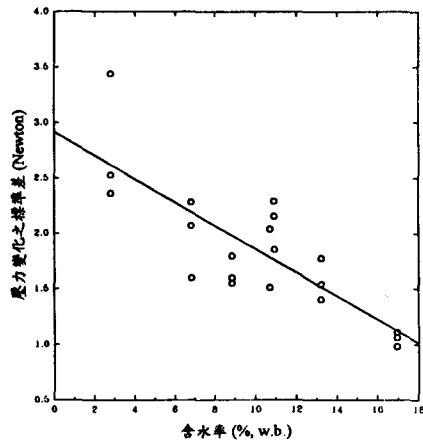


圖 6. 不同含水率(脆度)膨發米樣品之機械性質分析曲線中在第一次壓縮試中之壓力變化 (Force Fluctuation)

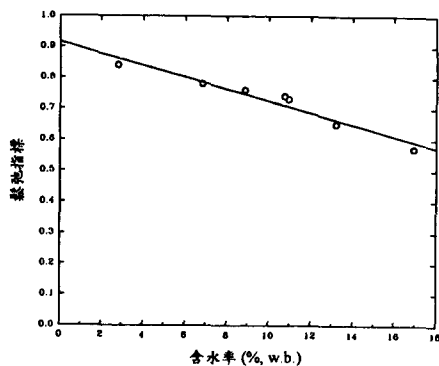


圖 7. 在第二次壓縮試驗之機械性質分析曲線中不同含水率(脆度)對鬆弛指數 (Index of Relaxation) 之影響

性，隨含水率增加而逐漸降低(如圖6所示)。相較於其他試驗參數，壓力變化之變異係數與含水率之相關性最差。

若以食品質流學(Food Rheology)黏彈性質(Visco-elastic Property)解釋，則彈性固體之鬆弛指數為1；黏性流體之鬆弛指數則為0。具黏彈性食品之鬆弛指數與其含水率呈反比，即含水率越高則鬆弛指數遞減(如圖7)。一般食品之硬度為固定變形量所需之力量或壓力，因此可以壓縮能量與最大壓縮力量代表之。然而，脆度隨含水率增加而降低，因此可以鬆弛指數代表其脆度。若能配

合官能品評(Sensor Evaluation)，則能進一步證實脆度與鬆弛指數之相關性。

四、結 論

粒狀膨發米之機械性質分析結果顯示以自製之壓克力探頭進行壓縮與應力鬆弛試驗，經進一步之資料分析可以鬆弛指數或標準差作為膨發米食之脆度指標。機械性質分析曲線中鋸齒狀之壓縮力量變化顯示孔洞結構隨樣品變形量與壓縮力量增加而逐漸破壞之，而此鋸齒狀之壓力變化亦可作為一機械性質分析指標。機械性質分析試驗顯示第二次壓縮較第一次壓縮需較高之力量。在兩次壓縮試驗中低含水率樣品(即較脆之樣品)之壓力變化之標準差較高含水率樣品為高，且二者之壓力變化量差異在第二次壓縮時特別明顯。

將兩次壓縮試驗結果進行相關性統計分析，顯示含水率與壓縮能量、最大壓縮力、鬆弛壓力、鬆弛指數、壓力變化平均值、壓力變化標準差呈負相關性，其中以第二次壓縮之鬆弛指數與含水率之相關性最高。因此可以壓縮能量與最大壓縮力量代表食品之硬度；因脆度隨含水率增加而降低，脆度可以鬆弛指數代表之。

五、誌 謝

本研究承國科會(NSC83-0409-C-197-004)計劃之經費補助；研究助理劉素秋小姐及陳以青、陳威志、蔡世豪等三位同學協助試驗之進行，謹此致謝。

六、參考文獻

1. 吳柏青，1995，穀類食品膨發加工過程之研究，行政院國家科學委員會專題研究計劃成果報告，計劃編號：NSC83-0409-B-197-004。
2. AOAC, 1984. Official Methods of the Association of Official Analytical Chemists. Association of Official Analytical Chemists, Washington, DC, U.S.A
3. ASAE Standards, 1985. ASAE Standards, 32nd edition. American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, Michigan, U.S.A.
4. Ashby, M.F., 1983. The Mechanical Properties of Cellular Solids. Metallurgical Transaction A of AIME

- 14A:1755-1769.
5. Barrett, A.H. and M. Peleg, 1992. Extrudate Cell Structure-Texture Relationships. *Journal of Food Science* 57(5):1253-1257.
6. Bourne, M.C., 1982. *Food Texture and Viscosity: Concept and Measurement*. Academic Press, New York.
7. Gaines, C.S., A. Kassuba, and P.L. Finney, 1992. Instrumental Measurement of Cookie Hardness. I. Assessment of Methods. *Cereal Chemistry* 69(2):115-119.
8. Gaines, C.S., A. Kassuba, and P.L. Finney, 1992. Instrumental Measurement of Cookie Hardness. II. Application to Product Quality Variables. *Cereal Chemistry* 69(2):120-125.
9. Nuebel, C. and M. Peleg, 1993. Compressive Stress-Strain Relationships of Two Puffed Cereals in Bulk. *Journal of Food Science* 58(6):1356-1360, 1374.

收稿日期：民國 85 年 1 月 10 日
 修正日期：民國 85 年 5 月 1 日
 接受日期：民國 85 年 5 月 15 日

專營土木、水利、建築等工程

元發營造股份有限公司

地 址：雲林縣北港鎮文昌路8號7F之5
 電 話：(05)2320967
