

[研究成果報導]

顆粒體物理研究之近年成果

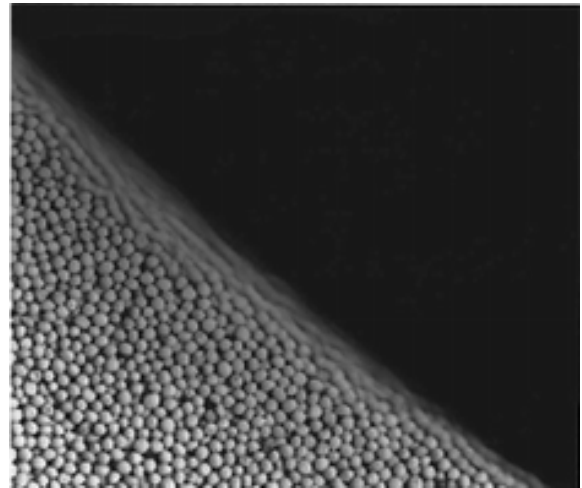
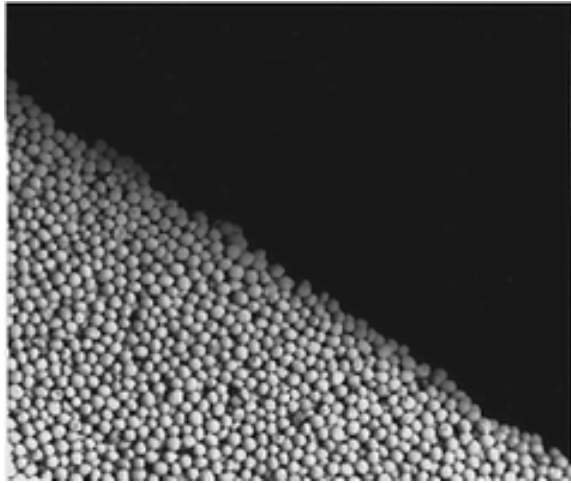
中央大學物理系 黎璧賢

顆粒體材料多年來為工程研究之重要課題之一，其應用頗廣，研究人員跨越土木工程、機械工程、化工、應用力學等領域之學者。在物理界近數年來亦為一熱門之新興研究領域。顆粒體是一個非常有趣而複雜的系統，其基本物理現象非常豐富而獨特，而絕大部份尙未能充份了解。在日常生活中所易見的粉末、土石礫、礦物、砂堆、藥丸乃至公路上的車流、輸送帶上的物流等均在此範圍之內。食品製造等也都屬於顆粒體之應用，諸如穀物、食鹽、糖、咖啡、豆子等。顆粒體的研究在工業上的應用相當多，例如在粉末、藥品的傳輸過程。其他在地質研究，如山崩、雪崩等地質改變。根據一項統計，美國工業界因顆粒、砂土、藥粉、原料等顆粒體物質的儲存或運送裝置設計不當，總共造成百分之六十的損失。化工業約有一半的產品是顆粒型態，一般工業上用到的未加工材料為顆粒型態的更占了四分之三，工廠輸送帶上的瓶瓶罐罐也可視為顆粒體物質。

沙子本身是一個宏觀固體，所以我們可以用牛頓力學來描述它。然而當沙堆崩塌時，我們可以在表層看到如同液體一般流動的現象，卻又想使用流體力學來研究。而類似這樣的物質，我們一般都稱為『顆粒體』(Granular materials)。想像慢慢地在同一個地方傾倒沙子堆積沙堆。沙堆變得越來越陡峭，直到一個表面斜度到達一個臨界的斜率。當表面的斜率走到達臨界角度時，增加一粒沙也能觸發全面性的崩塌。而當崩塌結束時，沙堆的表面將回到它穩定的斜率(安息角)。顆粒體物質在地心吸力下的靜態結構和流動現象是十分有趣的宏觀科學，最早重視到顆粒體不尋常的特性的科學家可以追溯到1773年，當時庫侖在負責蓋一個城堡，而他發現當砂石堆積的角度大於一個特定的角度之後，會由穩定的靜止態，轉換到一個不穩定的流動態。也就是說顆粒體不但可以像固體一樣支撐重量和承受切變，也能像液體一樣流動。

兩顆顆粒之間之主要相互作用其實不算複雜，乃空間排斥力(excluded volume interaction)及耗散性之摩擦力。但大量顆粒體的整體行為卻非常不簡單，雖然它是一個宏觀的古典力學系統。其整體共同之多體效應不易為平衡態統計力學或流體力學所能描述，主要原因是因為宏觀的顆粒在地心重力下幾乎完全沒有熱能效應，其狀態是取決在外加之力量或能量，一旦外力消失系統便凍結在當時之狀態。就算一直對系統輸入能量達至穩定態，顆粒系統往往會出現有很強的空間不均勻性，導致不遵守能量均分定律。此外，由於顆粒體之離散特性，往往令使用連續方程未必適用。以上種種，再加上摩擦力在顆粒系統在不同狀態有很不一樣的行為，令傳統理論分析及基本機制之了解困難重重。

顆粒體之運動主要受到流體力學和摩擦力的行為所左右。顆粒體的有趣現象產生主要是因為摩擦力造成顆粒之間的碰撞是非彈性的碰撞。也就是說在考慮完全彈性碰撞的狀況下，顆粒體有趣的現象大部分將不會出現。此外，更重要的是當考慮在地心引力下的顆粒體時，溫度在這個系統中是不重要的。而摩擦力使得這個宏觀的系統中形成了一個具有很強耗散性的系統。當一大群顆粒體聚集起來所產生的現象就變成十分複雜而有趣。他們的物理的行為並不能用一般的固體來理解，同樣的也不能用一般的流體氣體理論來解釋。由於這樣的系統擁有十分複雜，具有非線性的性質，充滿著不穩定性，也使得要去瞭解顆粒體比正常流體還要複雜而困難。所以直到目前物理學家仍然沒有一個很有效的理論可以去描述顆粒體的性質。然而我們仍然可以利用統計物理及多體問題的一些方法來研究這些複雜的問題。例如標度的概念，自發性臨界現象，相變等等，都被用來瞭解顆粒體物理。以下我與合作者近年來在顆粒體物理的一些具體成果，簡單敘述如下：



顆粒體物質的穩定靜止態和流動態

(一) 顆粒體的混合與分離 在工業上是一個十分重要的過程。顆粒體的分離是一複雜並且不完全地被理解的現象。物理學家在最近的年裡開始對分離現象變得感興趣。要去瞭解顆粒體分離的物理機制，是一個十分困難的工作。除了利用振動床來分離顆粒之外，工業上也利用一個旋轉的柱體或圓盤來混和或分離不同的顆粒。在二維圓盤的研究上，一般都是考慮不同的大小和不同的密度。並沒有人真正瞭解摩擦力在顆粒的分離現象中扮演了什麼樣的角色。所以為了瞭解顆粒分離現象的物理機制，1997年我和賈魯強及陳志強建立了一個二維的沙堆模型，考慮兩種大小重量都相同的顆粒：一種顆粒比較平滑，摩擦係數較小；另外一個則比較粗糙，摩擦係數較大。我們發現當圓盤的轉速超過了一個臨界的轉速，顆粒將會產生分離。這個由混和態轉變到分離態過程可以使用統計物理中的相變理論來分析。我們提出之廣義沙堆模型，成功解釋顆粒混合物因摩擦力不同之分離機制。後來亦有其它學者把此模型延伸到三維的旋轉圓柱中，成功的看到當轉速較慢時，顆粒是徑向分離的，而當旋轉速度是足夠快的時，軸分離也將產生。這代表了再顆粒體的分離現象中，摩擦力扮演了十分重要的角色。

(二) 顆粒子在垂直振動下堆聚現象之實驗研究顯示，顆粒由一個平面慢慢堆積成一個小山丘。通常山丘發生在容器中心的部分。在振動強度較低的狀況，會有堆積現象，產生穩定的山形結構。1998年 Aoki 等人在實驗中發現如果逐漸增加振動加速度，對流的方向改沿著管壁向上，而在中間部分向下流動。如此反向的對流，造成

了中間向下的山谷形狀 (Upward Heap)。為了瞭解對流的機制，物理學家嘗試了許多不同的動力學理論去試圖描述顆粒。在這些理論中，垂直的振動主要是增加了顆粒間的空隙的產生。空隙的存在也使得顆粒間可以重新整理，並且因此產生了對流。然而，以往這些理論通常是十分複雜的，並且多數並不是十分成功，不能成功地解釋顆粒堆積形成的機制。1999年我和賈魯強及陳志強對大量顆粒體在垂直振動下會堆聚成山 (Heaping) 之成因及相關對流機進行研究，我們為了瞭解山形結構的物理機制，做了一連串的模擬和理論分析。由於在山形結構形成及對流的過程中，空隙扮演了一個很重要的角色。所以在我們的模型中，我們加入了空隙的效應，如此我們成功地建立了運動方程來描述顆粒的山形結構，建立廣義沙堆模型及理論模型，能合乎實驗數據，同時亦能解釋當振動加強時堆聚從山型變化為山谷狀堆聚之形成。研究方法是以前統計物理概念來建構含空洞的沙堆模型來作電腦模擬。同時亦提出嶄新之非線性堆聚方程作分析研究。此項研究對顆粒體系之流動及堆聚之基本成因，結構及動力提供一個清晰的基礎理解。

(三) 顆粒材料時之堵塞 對工業界而言，由於大部份工業原料及成品乃顆粒體，在大量處理及以漏斗導出顆粒材料時之堵塞會造成極大困擾及經濟損失，故此對顆粒流堵塞之基本了解將對各工業界有廣泛裨益。去年我和杜其永博士及韓國釜山大學朴赫圭教授針對顆粒流擁塞的基礎原因以實驗與理論方式進行深入探討。其擁塞現象為諸系統中所常見的重要問題，但其形成機制並未

得到科學界的瞭解。此項研究工作利用一簡單的裝置進行實驗，發現當顆粒流流過一漏斗狀漸狹通道，由五粒顆粒所形成的拱弧為造成堵塞的最重要原因。當漏斗咀部直徑大於顆粒直徑約五倍時，堵塞機率變得很低。並以統計物理的概念，建立理論，配合簡單電腦計算對擁塞的規律性與機制提出很好的模型與解釋，且能十分精確地符合實驗測量之數據，是一項極為重要的研究。實際可能之應用包括二維的物流運輸及改進顆粒漏斗的設計以協助工業界減少損失。從學術觀點而言，此研究對顆粒體系之流動到堵塞之基本成因首次提供一個清晰而漂亮的基礎理解，同時亦帶領此提供新的定量科研方向。由於上述堵塞現象之研究，除對工業界處理及運輸顆粒子有很大貢獻在價值外，亦對液體份子在低溫時堵塞在一起形成玻璃態提供相關之基本理解，故此特別引起科研界重視。

以上之研究都只局限於乾顆粒子，其主要相互作用乃空間排斥力及耗散性之摩擦力，如外加上濕度或液體，顆粒子間的等效相互作用更為複雜，其低濕度靜態力學有很強的聚合力，而其高濕度高動能流動性質會有助對了解土石流的基本物理。這些都是困難但很具挑戰性的研究。

參考文獻

- [1] H. M. Jaeger, S. Nagel, and R. P. Behringer, *Rev. Mod. Phys.* 68, 1259 (1996); *Phys. Today* 49(4), 32 (1996).
- [2] P. G. de Gennes, *Rev. Mod. Phys.* 71, S374 (1999).
- [3] L. P. Kadanoff, *Rev. Mod. Phys.* 71, 435 (1999).
- [4] Pik-Yin Lai, L.-C. Jia and C. K. Chan, "Friction Induced Segregation of a Granular Binary Mixture in a Rotating Drum", *Phys. Rev. Lett.* 79, p.4994-4997 (1997).
- [5] L.-C. Jia, Pik-Yin Lai and C. K. Chan, "Segregation of a Granular Binary Mixture in a Rotating Drum: A Critical Phenomenon", *Chin. J. Phys.* 36, p.659-666 (1998)
- [6] L.-C. Jia, Pik-Yin Lai and C. K. Chan, "Empty site models for heap formation in vertically vibrating grains", *Phys. Rev. Lett.* 83, p. 3832-3835 (1999).
- [7] Pik-Yin Lai, L.-C. Jia and C. K. Chan, "Symmetric Heaping in Grains: a Phenomenological Model", *Phys. Rev. E* 61, p.5593-5599 (2000).
- [8] S. Liu and Pik-Yin Lai, "Heaping of Granular Materials in a Cylindrical Vibrating Bed", *J. Phys. A* 33, p.8241-8249 (2000).
- [9] K. To, Pik-Yin Lai and H. K. Pak, "Jamming of granular flow in a two-dimensional hopper", *Phys. Rev. Lett.* 85, p.71-74 (2001).