

探索物質在極限環境之研究—大體積壓力機簡介

Studying Materials under Extreme Conditions—Introduction of Large Volume High Pressure Apparatus

花柏榕、簡淑櫻、龔慧貞、王雁賓

Po-Jung Florian Hua, Su-Ying Chien, Jennifer Kung, Yanbin Wang

大體積壓力機 (large volume press) 已被廣泛應用於不同科學領域及工業用途，例如行星科學、材料科學與開發新材料及超硬材料，是研究物質於極端環境下行為的利器。目前國內已有大體積壓力機，然而其相關簡介與技術要點仍未被詳細介紹，因此本文旨在介紹大體積壓力機的運作原理及實驗技術要點，且說明目前高壓研究與各領域的連結應用。

High pressure devices have provided another dimension in the working conditions, “pressure”, and have broadly employed in different research area and industrial applications, for example, planetary sciences, material sciences, and synthesis of novel materials and super-hard materials. In this article, we will introduce one of high pressure devices—large volume press, which couple of them have been installed in different research institutes in Taiwan lately. The details of large volume presses will be presented, including their mechanical geometries and the principles of experimental techniques. The high pressure research implications also are illustrated.

一、前言

天體是由大量物質凝集而成，因重力以及本身具有之放射性元素的作用，其內部處於一極高溫高壓的環境。對於生活在常溫常壓下 (0–50 °C、一大氣壓) 的人類而言，很難想像天體內物質在這種極端環境下的物理、化學狀態。譬如我們在地表常見的矽酸鹽礦物 (如橄欖石、輝石、石榴子石等) 在地下深處是否保有在地表時一樣的性質？又如地

球之地核，大量地震學與地球化學資訊指出地核的主要成分是鐵合金。然而該處的壓力遠超過一百萬個大氣壓，溫度高達數千度，鐵合金在此環境會以何種狀態存在？不僅是地球，在太陽系中，類木行星 (在小行星帶以外之四顆行星，意指類似木星的行星) 之組成成分以氫、氦為主，在這些巨大的星體 (如木星、土星) 內部，氫與氦究竟會變成什麼狀態？這些都是科學家所想要知道的。為了研究這些議題，高壓實驗已成為主要之研究方法。

大體積壓力機以及鑽石高壓砧為高壓實驗研究兩種主要的設備。鑽石高壓砧已在科學月刊 172 期介紹過。相對於相當手掌大小的鑽石高壓砧，大體積壓力機的大小可至公尺以上，但其樣品容量也相對的至少可多上一千倍。其中一種大體積壓力機—活塞鋼圈高壓儀 (piston-cylinder) 的實驗最高壓力範圍可達 3.5 萬個大氣壓 (3.5 GPa，約為地底下 100 km 處，此文以下將以 1 GPa 代表 1 萬個大氣壓力)，此種設備已在科學月刊 261 期介紹過。本篇文章將介紹另外一種壓力可高於活塞鋼圈高壓儀的大體積壓力機設計—多面體幾何結構高壓模組。

二、大體積壓力機簡介

大體積壓力機之原始機型是由哈佛物理學布立基曼教授 (Percy Williams Bridgman) 研發用來進行高壓物理性質的研究，他也因此而獲得 1946 年之諾貝爾物理獎。1954 年聖誕前夕，奇異公司 (GE) 以其改良型壓力機成功合成人造鑽石。大約同時期高溫高壓技術也被引進地球科學領域，使得研究的範疇可以延伸至地函、地核的深度。

大體積壓力機主要由兩個部分組成：(1) 油壓機 (hydraulic system) 以及溫度和壓力控制系統；(2) 產生壓力的模組 (module)。前者提供液壓以及實驗環境的控制，後者則是對樣品腔產生高壓。這種大體積壓力機的設計，是由油壓機提供單軸方向的壓力，作用在以不同幾何形狀設計之模組，使其單軸施力被均勻分解為三軸的荷載作用於固態之傳壓介質，進而在樣品腔產生接近靜水壓之環境。

目前在大部分使用大體積壓力機之高壓實驗室所採用之多面頂高壓模組的幾何設計有三種；分割

球形模組、分割圓柱模組與立方體模組。這類多面頂模組源自 1960 至 1970 年代日本科學家所設計，且日本在當時是帶領此種高壓實驗研究的國家。80 年代後期美國地球科學界引進高壓設備，並在 90 年代加以改良，因而帶動了美國的高壓研究，包括地球科學以及材料科學，自此美國迎頭趕上日本在此學門的成就。

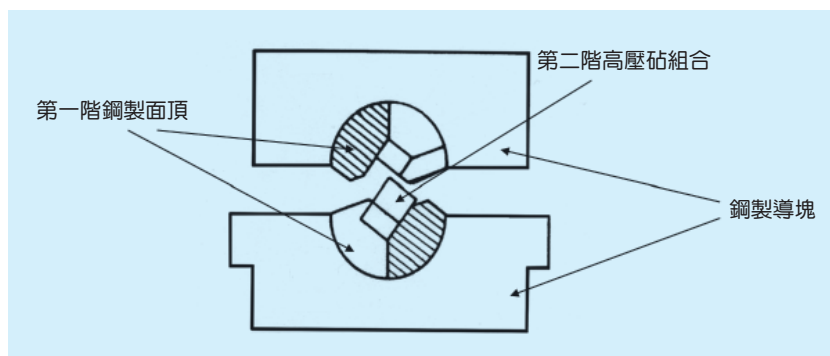
1. 分割球形模組 (Split-Sphere)

這種壓力模組是一種二階式傳壓設計，如圖 1 所示。第一階外部是一個被切成 6 塊的強化鋼圓球所組成，每一塊內側的端頂都截切成四方形。當這六塊鋼製面頂合起來時，在內部形成一立方體空間，其立方體的頂點對角線方向則平行油壓機單軸的施力方向。此立方體空間再由 8 個立方體碳化鎢構成的第二階高壓砧模組占據。這 8 個立方體高壓砧的頂點都被截切成正三角形截面，使高壓砧組合後在中心構成一個等邊長的八面體空間 (octahedral)，即為樣品腔放置的空間。其中第二階高壓砧與樣品腔的組合又稱為河井式元件 (Kawai cell)，如圖 2 所示。這種元件被廣泛運用在各種類型的模組中，是大體積壓力機發展中極為重要的一部分。

2. 分割圓柱模組 (Split-Cylinder)

此類壓力模組和分割球型模組類似，但將原本固定於鋼製導塊上的球型鋼製面頂組合外形改為圓柱狀，而中間位置仍放置河井氏元件 (Kawai cell)。此種設計最早由川田氏 (Kawada) 提出⁽³⁾，並由大谷 (Ohtani)⁽⁴⁾ 製造使用。爾後沃克氏 (Walker)⁽⁵⁾ 以相似的概念將分割圓柱體縮小，置入可裝卸

圖 1. 分割球形模組之幾何設計。分割球形模組之第一階鋼製面頂是固定於鋼製導塊上的分割球體。第二階是由八個小立方體高壓砧組成之立方體。在此設計第一階鋼製面頂以膠固定於鋼製導塊上，所以於高壓實驗中此六鋼製面頂不會有位移。



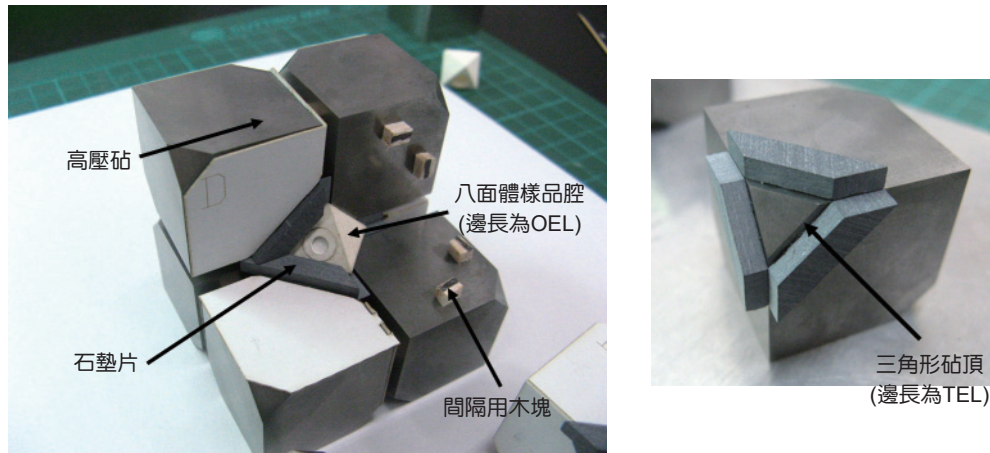


圖 2. 河井氏元件中高壓砧與樣品腔配置關係。河井氏元件由八個立方體高壓砧組成，每個立方體高壓砧都有一頂點被截切成三角形 (右圖)。八個立方體高壓砧組合後在中心形成一八面體空間，此八面體空間便是樣本腔放置位置 (圖中八面體樣品腔位置)。間格用木塊用於隔離高壓砧，避免高壓砧之間接觸。葉臘石墊片除了可以分隔高壓砧以外，在加壓時也有助於防止傳壓介質沿高壓砧間縫隙流出，增加產壓效能。

的圓筒狀金屬圈 (containment ring)，減少模組製造成本且裝卸較為方便，如圖 3 所示。此種由沃克氏提出的改良設計通稱為沃克氏模組 (Walker module)。沃克氏模組的第一階鋼製導塊是組合式的，因此在加壓時可適度地微調增加相對活動的自由度，但也因為內部摩擦力的增加使得最高壓力較固定式的分割圓柱模組低。

3. 立方體模組 (DIA 模組)

相較於 6-8 型模組，立方體模組的幾何設計相對簡單。此模組是由上下兩具導塊以及四個滑動於 45 度斜面上的鋼製楔形體組成。六個帶有四方形截面的高壓砧安裝在導塊以及楔形體上，中間形成一立方體空間，如圖 4 所示。此立方體空間就是放置樣品的位置 (圖 4，圖右棕色部分即為樣品腔)。當模組受液壓機壓縮時，上下方導塊壓縮的同時也導引側面的四個楔形體向內擠壓，形成一準靜水壓環境。這種模組又稱為 DIA 模組，因為早期用來合成鑽石 (一說 DIA 為鑽石 (diamond) 在日文之簡稱)。傳統的 DIA 模組受限於材料屈服強度的限制，很難產生超過 20 GPa 的壓力。為了提升壓力，日本科學家將河井氏元件與 DIA 模組結合，如圖 5 所示，可以產生高達 100 GPa 的壓力，也是目前大體積壓力機能產生的最高壓力。

4. D-DIA 模組

6-8 型與 DIA 型模組皆以產生準靜水壓為主要目的。但地球內部的較淺層區域如上部地函 (淺於 670 公里的區域) 並不是處於很好的靜水壓環境，

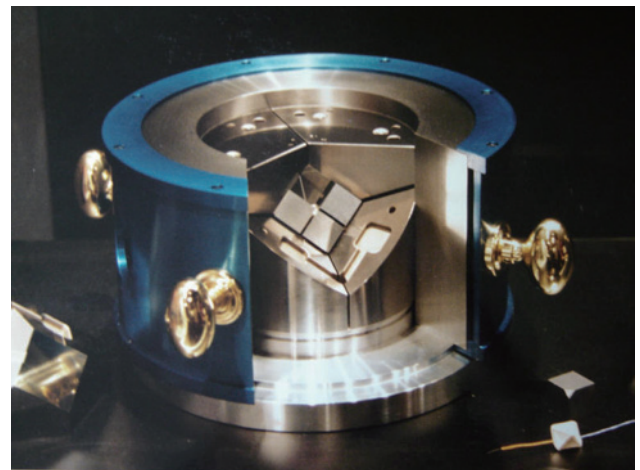


圖 3. 渥克氏模組剖面圖。圖中被剖開的圓形金屬環為圓筒狀金屬圈，內部即為第一階鋼製面頂。在第一階鋼製面頂中間可見由碳化鎢高壓砧組成的立方體第二階高壓模組。相對於前者分割球形模組 (圖 1)，渥克氏模組的第一階鋼製面頂在高壓時可有限的調整位移。(由 Rockland 公司提供)

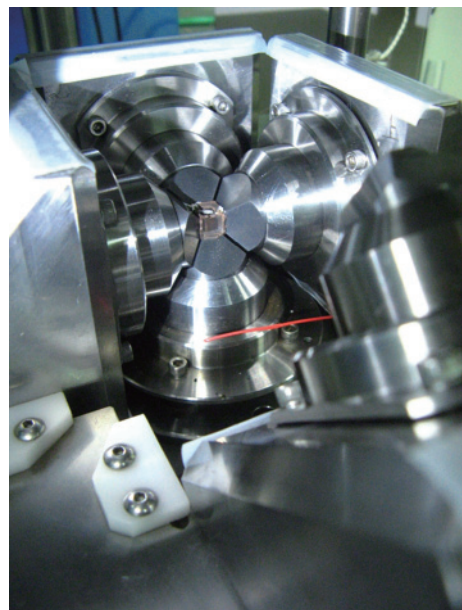
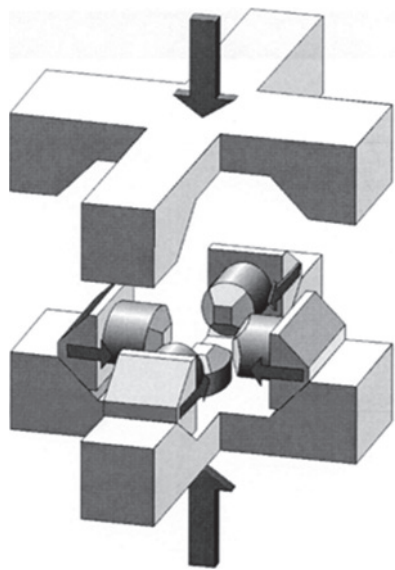


圖 4.

(a) DIA 模組幾何關係圖及 (b) 實際 DIA 模組中樣品與高壓砧關係。此圖為實驗後取出側面高壓砧後所視。

(a)

(b)

這可從通過地球深部的地震波資料得知⁽⁶⁾。為了研究地球物質在此深度之非靜水壓條件下之流變學性質 (rhology)，美國芝加哥大學高等放射源中心王雁賓博士 (本文作者之一) 與其高壓界同仁於 2000 年初將 DIA 模組加以改良成 D-DIA 型模組⁽⁷⁾ (第一個字母 D 為 deformation，代表形變)，如圖 6 所示。其基本設計和一般的立方體模組類似，但是在上、下導塊加裝了獨立的油壓控制系統。在實驗進行中，這獨立的油壓系統可分別在驅動上、下導塊上的高壓砧，產生一個可以控制的差應力。D-DIA 是目前唯一可以以油壓控制系統控制軸向差應力條件的高壓模組。這對於了解許多物質性質有重大幫助，例如非均向性 (anisotropic) 以及變形行為 (deformation behaviors) 等。

三、樣品腔的結構

樣品腔在 6-8 型與立方體之高壓模組的組合形狀分別為正八面體或立方體，其二者除了幾何形狀不同外，他們包含的零件及內部配置大同小異。整個樣品腔是由一預鑄之正八面體或立方體形狀的傳壓介質所充填。而樣品及一些必需之零件則置於傳壓介質加工出的圓柱形空腔，由外至內包含了陶瓷套管、電阻加熱管、實驗樣品以及熱電偶。這裡我

們使用正八面體樣品腔為例概略介紹，如圖 7 所示。

常用的傳壓介質通常為高孔隙率陶瓷材料，須具備相當壓縮性又不能太軟，在高溫高壓環境為穩定物質 (例如不易分解、不會有結構改變) 為最好。常用的材質有氧化鎂 (MgO)、莫來石 (mullite)、氧化鋯 (ZrO₂) 等。內部的陶瓷套管材質和傳壓介質類似，但同時還需兼備絕熱的特性以減少熱傳遞，降低加溫時的功率耗損。實驗產生高溫的原理是利用電流通過物質因其電阻所產生的高

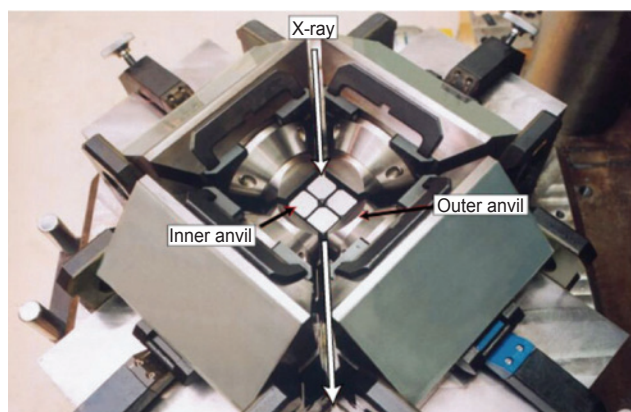


圖 5. 河井氏-DIA 複合模組。DIA 模組中放置河井氏原件，此種組合可使壓力上升至 100 GPa，是目前大體積壓力機產壓的極限。

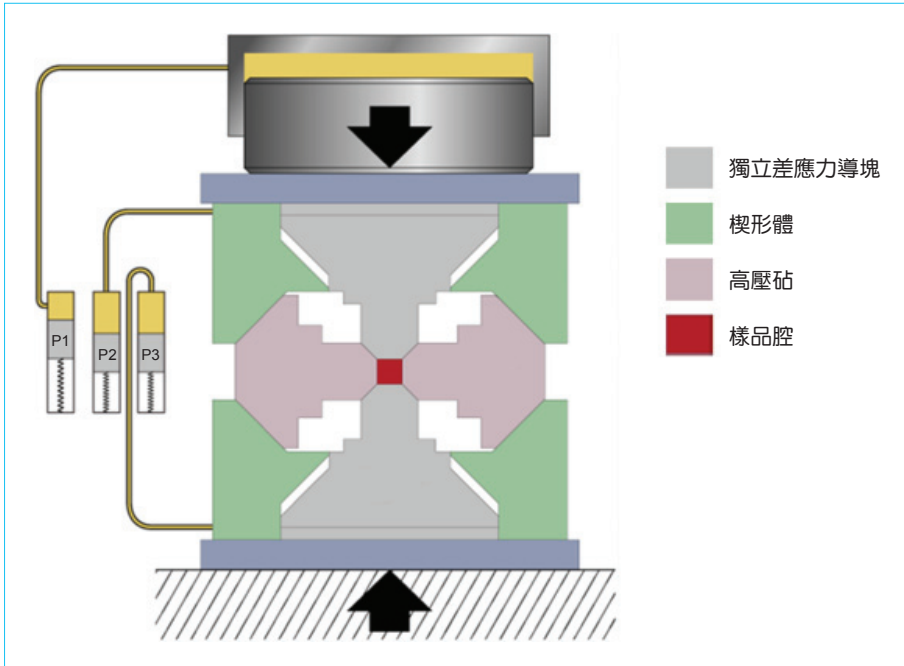


圖 6. D-DIA 模組之差壓控制系統。P1 是主油壓系統，P2 及 P3 為上、下導塊獨立油壓系統的油壓幫浦。(原圖為 Sabrina Fletcher 所繪，此圖為重繪。)

溫。在高壓實驗中經常使用的材質包含了碳、鉻酸鏽 (LaCrO_3)，以及金屬如銻與鉑。為了避免實驗樣品與樣品腔零件產生化學反應，實驗樣品常以惰性金屬包裹。常用的材質有金、鉑、銻等。若實驗需要控制其氧化還原氣氛，也可能採用碳、鐵、鎳等物質包裹樣品。

高溫實驗中，溫度則以熱電偶 (thermocouple) 測量。所謂的熱電偶是由一對成分比例不同的合金組成。其測溫原理如下：在固定溫度時，不同材質合金的自發電動勢是不同的，所以當兩種合金接觸

則會在這接頭處形成一電動勢差。由於不同材質合金在不同溫度時的自發電動勢改變量不一樣，所以造成其電動勢差會隨著溫度的不同而有變化，這種現象稱為席貝克效應 (Seebeck effect)。因此我們可藉由測量熱電偶的電動勢差值得知溫度。目前較常使用的熱電偶有幾種，例如 K 型、R 型及 C 型。C 型是高壓實驗中最常使用的一種。C 型熱電偶由一對不同比例的鎢銻合金組成，是常用熱電偶中可測量溫度最高的一種 (高達 2320°C)。

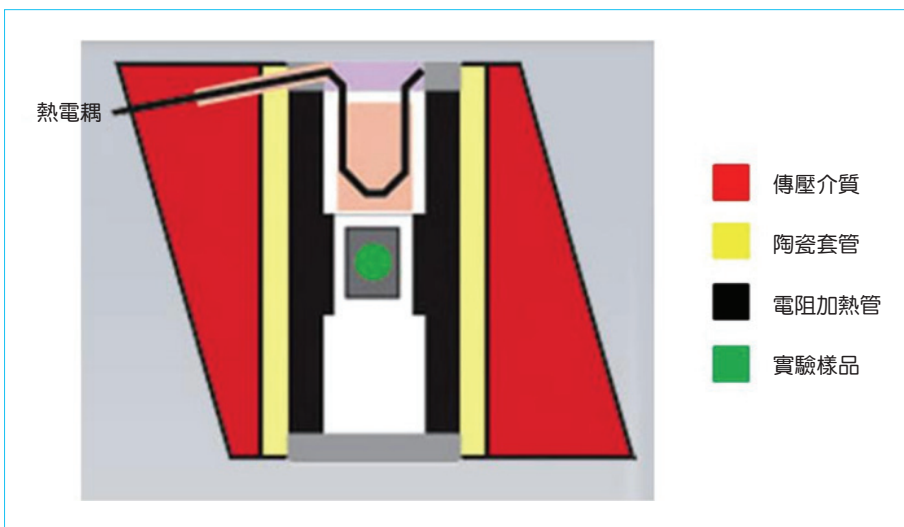


圖 7. 樣品腔內零件配置關係圖。以 6-8 面模組使用之 8 面體樣品腔為例。由外至內依序是傳壓介質、陶瓷套管、電阻加熱管、實驗樣品。

四、產壓效能

對於相同幾何形貌的多面頂高壓砧來說，壓力的高低受到高壓砧的截面積大小影響，理論上截面積越小可以產生越高的壓力環境（壓力 = 施加力量 / 單位面積）。在此以 6-8 面模組第二階的高壓砧配置比為例，當碳化鎢砧體的截面邊長為 11 釐米 (mm)，稱成 TEL，八面體樣品腔的邊長為 18 釐米時，稱成 OEL，(通常以 18/11 表示) 如圖 2 所示，可達到 19 GPa 的壓力。當碳化鎢砧體的截面邊長縮小為 8 釐米，而八面體樣品腔的邊長仍維持 18 釐米時 (通常以 18/8 表示)，壓力可達到 23 GPa，如圖 8 所示。當高壓砧邊長由 11 釐米減少為 8 釐米，在同樣油壓機施力條件下，可產生更高的樣品腔壓力。雖然高壓砧截面積越小可達到的壓力範圍更高，但同時相對也減少了實驗樣本量。因此需根據實驗目的的不同，選擇合適的配置關係。

近來，在高壓實驗為保有相當的樣品腔大小，不改變高壓砧大小而改變高壓砧材質的方法已廣泛使用。例如將原有的碳化鎢高壓砧改為燒結超硬氮化硼 (立方晶系) 或燒結鑽石做為高壓砧，可以大幅提升產壓效能。此外，由於氮化硼和鑽石對 X 光的吸收很小，因此有利於高壓實驗和同步輻射光源的結合，從事許多先進的實驗來探討物質在極限環境下的行為。

五、壓力標定

在高壓實驗中我們只能在壓力控制系統讀取油壓機的輸出液壓，但這並不能代表樣品腔位置真正所承受的壓力。實際上樣品腔承受的壓力會受到許多因素影響，包括高壓模組的幾何設計、樣品腔的設計、樣品腔零件的材料性質等等。因此，每個實驗室都需要對其使用的樣品腔以及壓力模組做壓力標定。

在大壓力機中之壓力標定依是否有 X 光源輔助而有所不同。如果大壓力機安置在同步輻射光源中心，研究人員可置入一已知狀態方程式 (equation of state, 即其晶胞體積與壓力溫度之變化關係) 之物質於樣品腔，利用 X 光測量其物質晶

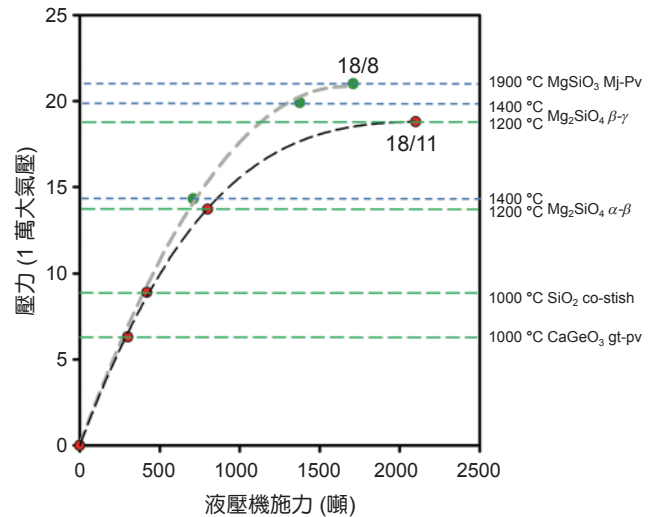


圖 8. 高溫時產壓效能與高壓砧砧面邊長關係圖。圖中橫軸為液壓機施力，縱軸為樣品腔壓力。當液壓機施壓同為 1800 噸且樣品腔大小一樣時，使用邊長 8 釐米之高壓砧可以在樣品腔產生 23 GPa 的壓力；使用邊長 11 釐米之高壓砧只能產生約 19 GPa 的壓力。CaGeO₃ (鎳酸鈣)：gt (石榴子石結構)，pv (鈣鈦礦結構)。SiO₂ (二氧化矽)：co (柯砂石)，stish (施石英)。Mg₂SiO₄ (鎂橄欖石)：α (橄欖石結構)，β (似尖晶石結構)，γ (尖晶石結構)。MgSiO₃ (頑火輝石)：Mj (鈣榴石結構)，Pv (鈣鈦礦結構)⁽¹⁾。

胞體積在不同液壓與溫度之變化，然後標定樣品腔內部壓力與不同溫度的關係。在無 X 光源輔助時，則是以已知物質之相變壓力來標定。所謂的相變，即物質會因壓力與溫度不同，而其結晶結構改變 (例如石墨在高溫高壓下，會轉變為鑽石) 甚至分解。這種相變的測量又可分為即時監測與實驗後測量。室溫下的壓力標定是使用現地測量，其測量方法是監測物質相變時所發生之物理性質改變，如電阻。最常用來標定室溫壓力的有鉍 (Bi, 在 2.55 GPa 時由相 I 相變為相 III, 7.7 GPa 時由相 III 相變為相 V)，銻化鋅 (ZnTe, 9.6 GPa 與 12 GPa)，硫化鋅 (ZnS, 15.5 GPa 時由閃鋅礦結構相變為岩鹽結構)。以上物質皆會因相變而產生明顯的電阻變

化，因而可用在高壓實驗中做為即時監測的良好材料。在高溫壓力標定，則必須實驗後藉由不同的分析方法(如 X 光繞射，拉曼光譜)觀察晶體結構是否改變。常用的物質有二氧化矽 (SiO_2 ，石英 → 柯石英，柯石英 → 施石英)， MgSiO_4 (橄欖石結構 (α) → 似尖晶石結構 (β) → 尖晶石結構 (γ)) 鍺酸鈣 (CaGeO_3 ，石榴子石結構 → 鈣鈦礦結構)，如圖 8 所示。

六、大體積壓力機的應用與發展

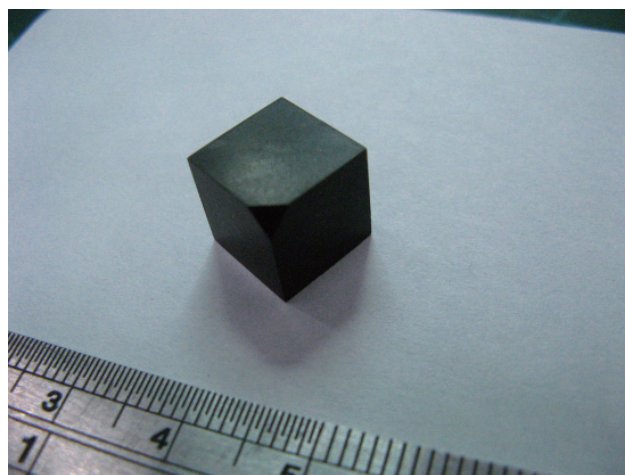
大體積壓力機最大的優勢在於可容納較大體積的樣品，所以很適合用在研究多成分的系統，如天然岩石(多種礦物相的組合)。今日，大體積壓力機已和許多的現地測量技術結合，使得研究領域更加廣泛，諸如岩石中的礦物間反應、岩石及礦物熱力學及固液相反應等研究、物質之物理性質(彈性係數、導電/熱性、黏滯性)探討、高壓相樣本合成。除此之外也不限制在地球科學領域，新穎材料的開發研究，都是大體積壓力機研究的重要方向。以下就以超硬鑽石合成為例。

大體積壓力機最廣為人知的用途便是合成鑽石，自從 GE 公司成功合成鑽石以來，其已大量應用於工業切割、研磨用途。鑽石是目前自然界中已知最硬的物質，近年來科學家不斷研究其他材料，希望開發出硬度可以媲美鑽石的超硬材料。日本愛媛大學的入船徹男教授所領的研究團隊使用 6000 噸大體積壓力機，成功製造出公分級多晶質(polycrystalline)鑽石塊材，如圖 9(a) 所示。此種鑽石是由許多小單晶集合而成的塊材，其硬度比天然鑽石高，是目前已知最硬的物質。更重要的是，不同於傳統不透光的燒結鑽石，如圖 9(b) 所示，此種鑽石塊材是透可見光的，這使得合成鑽石的用途不僅僅侷限在研磨切割，亦可應用於高精度光學元件。此種超硬鑽石的製造，表示大體積壓力機的技术開發不只侷限於研究領域，更可廣泛應用於尖端工業。

自 1990 年代，大體積壓力機也和同步輻射光源(X 光或中子光源)結合，使其能從事的實驗擴



(a)



(b)

圖 9. (a) 多晶質鑽石塊材，此種鑽石是使用大體積壓力機合成，是目前已知硬度最高的物質，且可透光，可用於高精度光學元件。目前已可合成直徑 1.5 公分的鑽石塊材，配合雷射切割技術可製成各種外形利於應用(照片由日本愛媛大學入船徹男教授提供)。(b) 傳統燒結鑽石，傳統燒結鑽石如圖中所示為不透可見光，其硬度仍不及天然鑽石。不透光原因是因為內含微量雜質。

大到更廣的範圍而發現許多新現象或提供證據，使過去無法解釋之現象得到解答。更多的技術、設備會持續的發展，藉由大體積壓力機的輔助，相信在不久未來，科學家對於地球內部組成物質特性，或對物質之基本物理化學性質以及新穎材料的性質測量與合成等，都能有突破性的發展。

七、台灣之大體積壓力機

目前在國內噸數最高的壓力機 (1000 噸) 安裝於國立成功大學地球科學系，並裝置一套 D-DIA 模組與一套沃克氏模組。D-DIA 模組在 1000 °C 均壓實驗中至少可達 6 GPa (約為地下 200 公里深)，其主要應用包含差應力實驗以及較低壓的實驗。沃克氏模組配合適當設置則可產生至少 20 GPa 的壓力與 1500 °C 的高溫，未來將用於合成大體積高壓相塊材或現地測量。結合此兩套模組，使我們可以在廣泛的壓力範圍內進行各種研究。目前進行中的研究包含高壓合成、研究物質在高溫高壓相變行為及行星科學之應用。除了應用於地球科學的研究，各類新穎材料的開發與性質測量亦為未來的研究與應用方向。未來期望此設備能與更多研究領域結合，增進我們對於高壓環境下物質行為的瞭解，進一步應用於材料研發及發現新科學。

參考文獻

1. D. J. Frost, B. T. Poe, et al., *Physics of The Earth and Planetary Interiors*, **143-144**, 507 (2004).
2. N. Kawai and S. Endo, *Review of Scientific Instruments*, **41**, 1178 (1970).
3. K. Kawada, K. The system $Mg_2SiO_4-Fe_2SiO_4$ at high pressures and temperatures and the earth's interior, Ph.D. thesis, 187 pp., University of Tokyo (1997).
4. E. Ohtani, T. Irifune, W. O. Hibberson, and A. E. Ringwood, *High Temperature-High Pressure*, **19**, 523 (1987).
5. D. Walker, M. A. Carpenter, et al., *American Mineralogist*, **75**, 1020 (1990).
6. Y. Gung, B. Romanowicz, et al., *Nature*, **422**, 707 (2003).
7. Y. Wang, W. B. Durham, et al., *Review of Scientific Instruments*, **74** (6), 3002 (2003).

關於沃克模組發明的小故事

沃克 (David A. Walker) 早年在哈佛大學做博士後研究時，是以活塞鋼圈高壓儀的實驗為主。當他受聘進入哥倫比亞大學建立實驗岩石學實驗室時，他也開始注意日本發展的多面體高壓砧且產生興趣。但身為一個剛開始教職的「菜鳥」教授，當時並沒有任何國家補助機構要贊助這種尚未在美國

發展的學門。雖然如此，沃克看到這種設備將來在研究領域有很高的發展性，因此在建立自己的實驗室時 (以活塞鋼圈高壓儀為主)，特別裝置了一噸數超過當時設計所需一倍的油壓系統，目的就是希望將來能有擴充空間。於此同時，他也不斷思索如何設計一套與日本相似的多面頂高壓砧模組。

在這 1987 年度，也正好是沃克擁有學術休假一年的時間。由於沃克的妻子是英國人，她對沃克表示，學術休假一年期間他可以選擇到任何地方—只要這個地方在英國。所以他決定將這次學術休假期用於改良多面頂高壓砧，並在幾間可能的英國學術機構中他選擇至劍橋大學，與曾在哈佛時同為博士後研究的同事一起工作。他們達成了協議—劍橋大學地球科學系的機械工廠會幫助沃克製造他的新設計高壓模組，若是工作成功那麼此套系統留在劍橋，而工廠會幫沃克建造另一套讓他帶回美國使用。就在劍橋大學同事的協助下，英國皇家學會也批准了沃克的計畫經費。這讓沃克大感意外—皇家學院竟會願意批准一個在英國休假一年的外籍教授申請的計畫！在這些資源的幫助下，沃克模組終於問世，而沃克很快的也帶著他的第二套高壓模組回到哥倫比亞大學工作。關於沃克模組這邊還有一個小插曲，注意本文中的圖 3 照片，沃克模組的圓筒狀金屬圈上有金色把手，這些把手設計其實是源自於劍橋大學地科系廁所的門把！(此描述為作者龔慧貞與沃克本人通訊整理之片段。)



花柏榕先生現為國立成功大學地球科學系碩士學生。

Po-Jung Florian Hua is currently a master student in the Department of Earth Sciences at National Cheng Kung

University.



簡淑櫻小姐為國立成功大學地球科學系碩士，現就讀於英國劍橋大學地球科學系博士。

Su-Ying Chien received her M.S. in earth science from National Cheng Kung University. She is currently a Ph.D. student in the Department of Earth Sciences at University of Cambridge, UK.



龔慧貞小姐為澳洲國立大學地球科學系博士，現任國立成功大學地球科學系助理教授。

Jennifer Kung received her Ph.D in earth science from Australian National University. She is currently an assistant professor in the Department of Earth Sciences at National Cheng Kung University.



王雁賓先生為美國紐約州大學石溪分校礦物物理學博士，現任美國芝加哥大學高等放射源中心高等研究員。

Yanbin Wang received his Ph.D in mineral physics from State University of New York, Stony Brook, USA. He is currently a research fellow in the Center of Advance Radiation Sources at the University of Chicago, USA.