

在南非的鑽石勘探 Prospecting for Diamonds in South Africa

馬克•庫利南 Mark R. Cullinan

CULLINAN DIAMONDS

網址：cullinandiamonds.com

電郵：mark.cullinan@cullinandiamonds.com

中文翻譯：陳逸駿(GIA GG)，GIA臺灣美國寶石研究院校友會理事長

Chinese Translation: Ichun George CHEN, President

GIA Alumni Association Taiwan Chapter



馬克•庫利南
Mark R. Cullinan

The author briefly gives the background history of the mine originally made famous by his family, discussing the geology, sources, prospecting rights, indicator minerals, discovery, mining methods, evaluation resources and reserves, processing methods, liberation and separation and sorting that make up the process of prospecting for diamonds in South Africa.

為什麼要對地質進行勘探？本質上因為人
有志向想要探索，有想“尋寶”的直覺。

馬克•庫利南

地球是個非凡的星球，滿是大自然的傑作，包括美麗的寶石，讓人們想無止盡的去慾望追求。其中最珍貴者莫過於鑽石，其不但是最堅硬的天然礦物，除了奢華裝飾方面之外，還有其他多種優異特徵，和各種用途。鑽石已知的物理特徵非常了不起，能運用在包括於熱能、光學、原子力學、機械、電機、化學、生物科學等多種方面，造福人類。有關鑽石的好處與可應用性，我們目前發現的大概只是冰山一角。光是這個議題就值得用另外一篇文章專門討論。

天然鑽石

研究顯示鑽石的形成超過9.9億年(參考 Kirklye 等多人合著發表，1981年G&G春季刊)。超過9.9億年不是誇大。有些礦區，如南非的庫利南礦區(the Cullinan

Mine)，已發現13至30億年前即形成的物質。想一想真的是很不可思議。我們在訂婚戒指上與每天配戴的珠寶上看到的鑽石，竟然能包含有上億年前有關這個非凡星球存在的資訊。

鑽石真的是超乎我們想像的珍貴。這也是為何人們總是想要去探勘與發現它。鑽石首先被發現並聞名世界的地點，是從16世紀時期印度的高爾康達(Golconda)礦區開始。其中最出名者是塔夫尼耶藍鑽(Tavernier Blue)，一件IIB型、115克拉鑽石，當時被法國國王路易十四買下。高爾康達出產的鑽石，大多屬於IIa型，頂尖品質者包括：光之山鑽石(the Koh-i-Noor)、大臥莫爾鑽石(the Great Mogul)、維特斯巴赫-格拉芙鑽石(Wittelsbach-Graff)、攝政王鑽石(the Regent)、奧羅夫鑽石(the Orlov)、淡粉紅色的光之海鑽石(Daria-i-Noor)與德勒斯登綠鑽(the Dresden Green)。

1869年在南非橘子河(Orange River)畔，首顆南非鑽石被發現，它重達21.25克拉，被命名為尤里卡(Eureka，意為“發現”)。之後在1871年，一件83.5克拉的鑽石被發現於科爾斯堡科普傑(Colesburg Kopje)地區，引發當地的鑽石挖掘狂熱。說是狂熱，可一點也不誇張。1927年3月期間，在南非利赫滕堡(Lichtenburg)附近，有約兩萬五千人前往爭奪採礦權，是當時最大規模的公共採礦紀錄。

地質學方面

鑽石在地表下至少120公里的深處形成。這個地層被叫做鑽石穩定層(diamond stability field)，溫度最高約950°C，壓力約45億帕(4.5 gpa)，是鑽石晶體形成的良好環境。這些晶體隨後經由地質運動，隨著岩漿突破地殼較脆弱的部位，而被運送到地表。

現在的地表地質形態，一般未有明確顯示有火山噴發的可能性。若火山運動發生，便形成了鑽石的原生來源(primary source)。這種原生礦岩名叫做金伯利岩礦脈(Kimberlite pipes)，以南非的金伯利鎮(Kimberley) 而命名；該地是第一個被確認為此種火山噴發的地點，其地質中具有將鑽石帶到地表之的熔融岩漿岩。

次生來源(secondary source)則是鑽石從金伯利岩礦脈中經天然侵蝕作用，尤其是經過河水與冰河運動，被帶離原生岩土，通常被沖刷到古老時期的河床上。在南非，

可能成有高達1公里厚的金伯利岩土，在地表被河流侵蝕，所以基本上當地還會有許多鑽石，可能在次生礦區被發現。

通過地質變化的研究，對輔助探勘出古老河流系統位置有極大幫助。要知道，在古老河流系統中鑽石集中的位置，與當時的熱帶型氣候有關，而不是參考現今非洲南部與印度的乾旱氣候。自盤古大陸(Gondwana)分裂的白堊紀以來，地球的氣候經歷過劇烈變化，有些時期降雨量相當的高，像是在始新世紀(Eocene)與早至中期的中新世紀(Miocene)時代，因此會造成金伯利岩被侵蝕的程度加速，並影響與當時河流系統中鑽石的集中位置。在氣候較乾燥的時期，河水退卻後，部分的地表侵蝕作用加上地殼升高運動，則會改變河流方向，或讓河床逐漸深埋在沙漠之下。於是，若探勘者能找到這些被埋沒的古老河床，就可能發現聚集成鑽石礦的礦土，這是多麼令人雀躍的事！

次生礦土中發現的鑽石原石，其邊角通常呈滾圓的狀態，是長時間被古老的河流或是海水沖刷侵蝕所致。

有趣的是，有些古老河床可能會在山丘頂上被發現，這是一種叫做雙向側向侵蝕作用(twin lateral)造成的現象。當河流兩岸的古老河床，未受到河水長期侵蝕，時間久而久之，反而變成坐落在山谷兩旁的高處地勢。

發現原生礦源

原生礦區與次生礦區的不同，在於原生的金伯利岩，在地表出現的位置沒有一定的規律。所以除了尋找指標礦物(indicator minerals)之外，要發現金伯利岩必須靠地質分析調查來檢測地磁性的異常與地心引力造成的異常，並以雷達蒐集相關數據。

具開採經濟效益的鑽石原生礦，似乎常以所謂的“克里夫法則(Clifford Rule)”為準。克里夫法則是在1966年被T.S.克里夫先生提出；他指出，具開採經濟效益的鑽石金伯利岩脈，會在屬於太古宙克拉通地殼中被發現，形成時間是25到45億年前之間。此概念建立於：在這樣厚度的地層

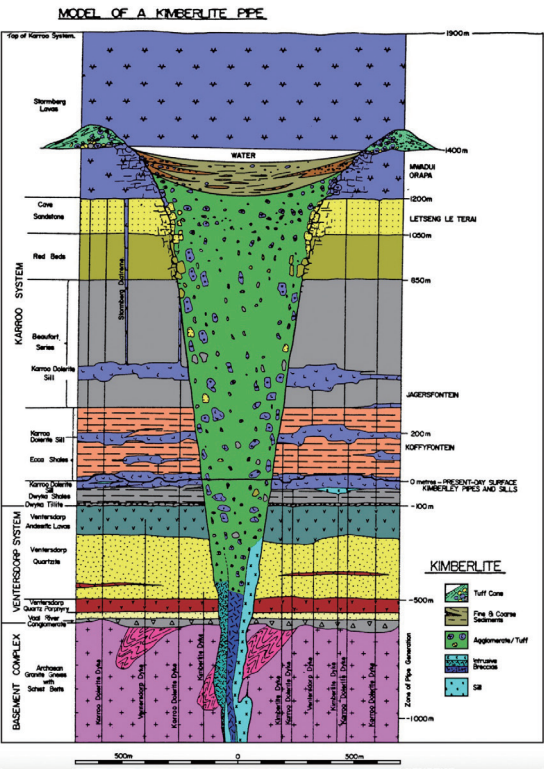


圖1 Hawthorne 1975年著作的金伯利岩管模型
Hawthorne's 1975 model of a kimberlite pipe.
(Hawthorne, 1975)

之中，鑽石才能在其中環境溫度與壓力中保持原狀，其被移動期間不會被轉化成石墨。也有克里夫法則以外的狀況，例如澳洲阿蓋爾(Argyle)礦區，該地的原生礦岩明顯地屬於淺成正長岩(lamproite)，與部分的煌斑岩(lamprophyres)；此地質大概是由於板塊構造隱沒運動(plate tectonic subduction)所造成。

世界上的金伯利岩大約只有百分之十蘊藏有鑽石，而在考慮到挖掘之高成本後，其中又只有大約4%有鑽石含量，具有足夠開採的經濟效益。也就是說，全世界的金伯利岩脈中只有千分之四具有開採效益的鑽石礦——這個機率真的非常微小。

一般來說，原生與次生礦區都會有伴隨鑽石從深處一起到達地表的指標礦物。這些礦物包括鎂鋁榴石(pyrope)、鉻透輝石(chrome diopside)、橄欖岩(olivine)與富含鎂的鈦鐵礦(picrolilmenite)。

當我的曾祖父在1902年發現第一礦區——普里米爾鑽石礦區(Premier Mine)-即是那3106克拉的庫利南鑽石(Cullinan Diamond)出土地點的時候，因科技尚未被發展，勘探者未能靠地磁與地心引力異常分析資料來尋找鑽石。所以庫利南鑽石這件偏藍的無色鑽石，是在一處名叫伊蘭茲方騰(Elandsfontein)農場的圍欄旁直接被發現；因此我的曾祖父認為在那裡附近有個原生礦脈。



圖2 湯馬斯·庫利南爵士(1862-1936)，作者的曾祖父，是非洲名聞世界的普里米爾鑽石礦區（現已改名為庫利南礦區）的原始礦主，推動南非工業化的重要人物。

Sir Thomas Cullinan (1862-1936), the author's great-grandfather, was the original owner of the Premier Diamond Mine (now renamed the Cullinan Mine). He played a key role in the industrialisation of Africa.

Photos: courtesy of the author

勘探執照

在從前，礦區土地的使用權包括地面上與當中的礦物。但是現在大多數的國家規定，礦物的擁有權屬於政府，而勘探者必須要申請土地租用來進行勘探。

而現在，要申請勘探執照，一般來說需要提供完整的勘探計畫，以及針對水資源的使用，和在勘探工作完成之後之土地與植被復原計畫等環境保護相關的許可證。政府也通常會要求勘探者提供財務上的保證，才能被允許取得勘探執照。

指標礦物

要了解指標礦物，我們需要了解地質形成的過程，是如何將它們帶到地表。這是一個十分複雜的話題，內容牽連到地熱與地磁活動。

開普敦(Cape town)礦物服務部門的約翰·葛尼(John Gurney)與他的團隊，是最前線的指標礦物研究工作者。他的研究項目包含如何利用石榴石(又名：柘榴石)來判斷出具經濟效益的金伯利岩開採活動，主要靠分析其中的鈣與鉻含量，並初步發現G9與G10類型石榴石與具經濟效益的橄欖岩類型金伯利岩息息相關(圖二)。鎂鋁榴石是石榴石家族中，唯一固定具有紅色色調的品種。

除了化學顯微分析之外，石榴石的外觀對探勘者來說也相當有幫助。因為它可協助推測礦物與原生礦區來源的距離。而晶體上侵蝕作用越嚴重，代表與來源距離越遠。石榴石表面硬度比鑽石還低，在移動較遠距離後很少不會裂開，所以用這個原理可鎖定，在完整指標礦物晶體的兩公里內可能會有原生礦。所以，土地與河床沖積岩土樣本中取得的指標礦物，會送至實驗室進行化驗及外觀特徵分析。

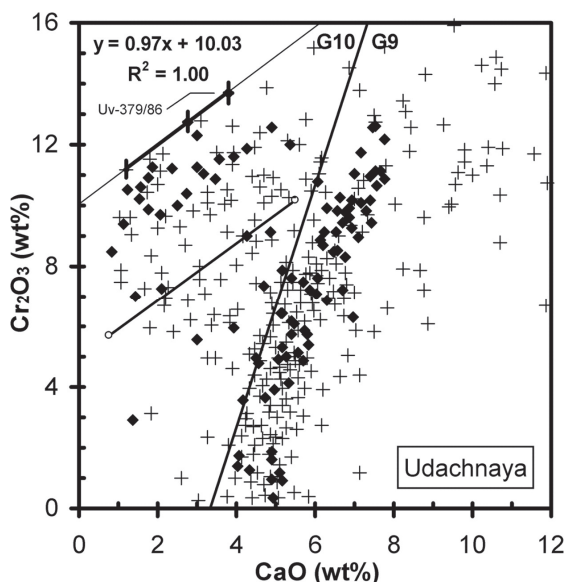
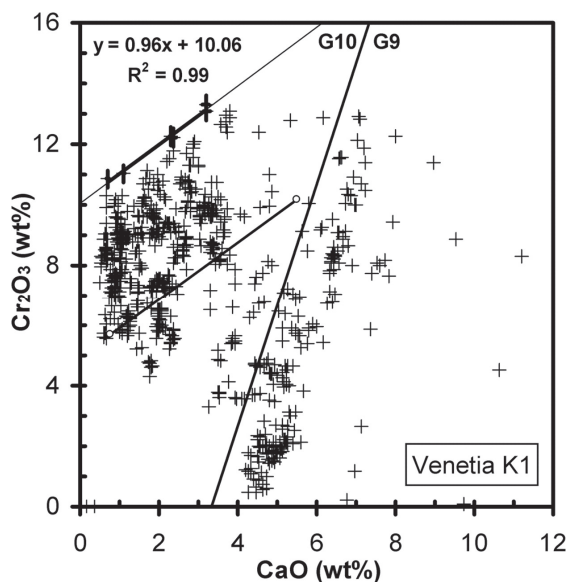


圖3 韋內齊亞和烏達奇內的G9和G10的石榴石(又名：柘榴石)和氧化鉻比例圖
Calcium Chromium plot of G9 and G10 Garnets at Venetia and Udachnaya.
(Grutter, Latti, Menzies, 2006)

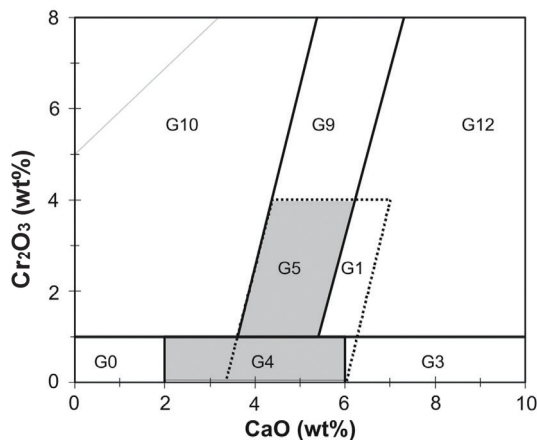


圖4 石榴石(柘榴石)指示的圖形分析
Graphic analysis of garnet indicator classes.
(Grutter H., et al, 2004)

目前已證實G9、G10和G12類型石榴石，會跟分別與橄欖岩類型金伯利岩的位置(富含鎂與鉻元素)，及斜輝橄欖岩(harzburgite)、二輝橄欖岩(lherzolite)、粒黑柱石(wehrlite)等岩石的存在相關。G3類型石榴石富有鈣跟鐵元素，則與榴輝岩(eclogite)的位置有關。最具交代變質作用(metasomatised)的榴輝岩，被認為是含有鑽石(參考開普敦大學地質系於2016年發表文獻)於其中。

在地表下240公里之處，鐵與鎳元素能以不同形態存在，所以鑽石可能會具有金屬內含物和鎂鐵榴石(majorite)-一種含高量矽元素的石榴石品種。目前有一群約一千多人的世界級科學家，正在研究“深層

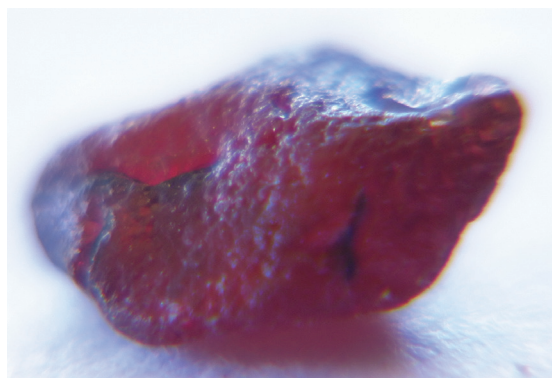


圖5 G9帶有“橘皮狀”皮殼的石(柘)榴石(左)，其形成與橄欖岩金伯利岩有關，並與該地區的鑽石(右)一起被發現
G9 garnet with 'orange peel' skin (L) associated with payable peridotitic kimberlites and found with the diamond (R) shown here.

碳”的來源，目標是了解地球暖化的原因。

在2016年科學雜誌(*Science Magazine*)中的一篇文章(*Smith*等多人合著發表)，對深層碳議題的了解，有著如分水嶺般的影響。這篇文章中他們提出，由深層碳元素形成的鑽石，被叫做“CLIPPIR 克里皮爾”鑽石。這英文縮寫“像庫利南鑽石(*Cullinan-Like*)、內含物少(*Inclusion-Poor*)、純淨(*Pure*)、形狀不規則(*Irregular-Shaped*)、表面經溶蝕(*Resorbed*)”可用來形容此類極高品質的鑽石。這些鑽石被認為是在含碳玄武岩和其他有機礦岩中形成，並經過板塊隱沒帶地質運動後，隨著榴輝岩來到地球表面。這個論述指出，這些深層碳類型鑽石是來自最深可達800公里之地球深處，尺寸可能特別的大。



圖6 典型的“Rooikoppie沖積礫石”
Typical “Rooikoppie alluvial gravels”.
Photo: courtesy of the author, August 2016



鑽孔、開坑、挖溝

無論是在次生礦區或是金伯利岩脈，勘探者透過鑽孔取樣，來判斷該處是否具有鑽石。衝擊鑽井(*percussion*)、逆循環鑽孔(*reverse-circulation*)、螺旋鑽(*Auger drill*)等技巧各有優點，也都會被使用。鑽洞地點的位置與其間距，取決於當地的地質特徵；但也不能距離太遠，否則會錯過發現古老地層或是古時河流轉彎的沖積處。在位置固定的金伯利岩礦筒中鑽孔，是相對精準的方法，但對次生礦區來說，要確定地表之下的環境，相當困難，所以靠開坑挖掘(*pitting*)或是挖溝(*trenching*)的方式，才能協助確認是否有可開採鑽石的潛能。

評估

當發現了有潛質的鑽石礦區後，勘探者的下一個挑戰就是要過濾足夠的礦土，來確認礦區的平均等級(*average grade*)。礦區的潛在開採效益(*payability/economic viability*)，可由礦土品質等級乘以克拉單價計算出來。

• 分等級

等級是每單位礦土(通常是100公噸)中能出產之鑽石克拉數的測量。次生礦區中，鑽石等級可能比較高，因為較差等級的鑽石在河水沖刷過程中，可能就會碎裂。如果鑽石品質高，礦土等級則如能有0.5 cpht (*carats per hundred tonnes*，即每一百公噸克拉產量)，那麼這個礦區就可算是具有經濟效益。



圖7 榴輝岩層(左)及榴輝岩薄片(右)
Eclogite (L) and thin section of an eclogite (R), “Messengers from the Mantle” exhibition, 35IGC, 2016.
Photos: courtesy of the author, August 2016

在原生礦區中，等級則必須要在約60 cpht。在高等級的礦區中，此數字可能高達180 cpht。

● 每克拉單價

在低等級的礦區，克拉單價必須要高，才能達到可開採經濟效益的水準。較反常的案例有位於賴索託(Lesotho)的雷森鑽石礦筒(Letseng)跟波茲瓦那(Botswana)的卡羅威(Karowe)AK6礦脈。他們的等級都很低，約只有2 cpht。不過這兩個礦區的盈收都很高，因為他們有很高的機率能產出非常大的鑽石，大幅拉高每克拉的單價。鑽石的體積越大，每克拉的單價會以倍數增加。

為了要取得等級與克拉單價之條件數據，大量的礦土樣本需要被採集分析。次生礦區需至少要分析五萬到十萬噸的礦土，或至少採集到五千至一萬克拉鑽石的數量，才足以進行完整評估。要成立一間上市採礦公司，必須要通過嚴格的條件審核；所需提供出產自次生礦區的樣本，要求至少是礦區產量的百分之十。

資源與蘊藏量

每一個具開採潛能的礦區的“資源(resources)”首先必先賦予定義，才能預估可能產出的鑽石尺寸、類型、數量及成本。資源與蘊藏量(resources & reserves)這兩個名詞的不同在於，蘊藏量數據可進一步被歸類至“可能(probable)”或“經確認(proven)”，是比資源代表的預測數據來的精準。隨著地質資訊越完整，作業的信心增加，資源數據則可再被歸類成“推斷(inferred)”、“指示(indicated)”、“測量(measured)”。

處理方式

為了要將鑽石從母岩中取出，母岩礦土必須被壓碎、沖洗和篩選。次生礦區採礦方式，除非礦土是困於較硬的岩石當中，較不需要進行壓碎的處理流程。沖洗通常是要靠一平行於地面的旋轉滾筒，並靠石塊彼此撞擊來碎開礦土。下一步驟則是以

尺寸大小為依據，篩選出不同的類別。除非是經過嚴重侵蝕，否則金柏利岩是頗為堅硬的，要壓碎它需下點功夫。輾壓機的入口寬度必須要仔細的測量，太窄的話，較大的鑽石可能因而受損；又不能太寬，不然小顆鑽石可能就會流失於碎石當中。



圖8 作者和他的同事Baxter攝於處理機械前
Mark and his colleague Baxter with the pan plant in the background. Photo: courtesy of Mike de Witt.

取選與分離

接下來可利用鑽石的比重，先分離礦土中的較輕物質，以降低需處理的礦土量及營運成本。這個過程之後，礦土已被篩檢成精華。鑽石的比重3.52是屬於較重的物質，固可用淘金濾盤的方法，讓較輕的物質先浮起來後再沖去。最重的礦物包括鑽石則會留在盤底，方便採集(次生礦區最常見的盤子是14吋轉盤)。另一種方式叫做密集分離處理法(Dense Media Separation，簡稱DMS)，常用在金伯利岩原生礦區，透過加入矽化鐵(ferrosilicon)粉末於壓碎的礦石與水之中，先將較鑽石輕的物質先行浮起過濾，之後再將較重的精華礦土運用旋轉方法，以離心力的力量來完成篩選。有些礦區會具有許多金屬類岩石像是鐵石，更可以用磁吸方式過濾。

分類

經過篩選處理過的礦土，需再利用鑽石其他的特徵來將石胚其挑出。在實地勘探過程中，最古老式的方法——手工分類還是最常被用上。



圖9 作者和他的同事Baxter正在人工篩選從機械所結集的石料

The author and his colleague, Baxter, sorting concentrate manually. Kimberley prospect, 2008.
Photo: courtesy of Neil Cullinan.

許多分類的工廠用某種形式的X光儀器進行分類。在精華礦土中，可透過鑽石的螢光反應來偵測出鑽石。大部分的鑽石都會有某種程度的螢光反應，但其中有主要是IIb型鑽石之屬於價值較高的藍色鑽石，則不會有螢光反應，因此有些工廠還是會用比較老派的方法，用“油脂平臺”來作第二步驟的分類過程。這是運用鑽石特有的特性——不黏著於水但會黏在油質上，這一直都是相當有效率的分類方法。但這不是最安全的方式，因為容易遭到偷竊；所以監控油脂平臺作業過程，是很重要的全天候工作！



圖10 油脂平臺篩選鑽石

Grease table sorting Photo: the author, August 2016

最近則有另一種形式的X光科技可被運用，叫做XRT，或是X光透射科技。這主要是由一家叫做湯姆拉(Tomra)的挪威籍公司生產製造的機器。此機具價值高達



圖11 X-射線篩選儀器

X-ray Sortex Machine (note the locks for security!).
Photo: the author, 2016

一百萬美元，而其他篩選鑽石機器像是Sortex則只要約五十萬美元。無論用什麼方法，只要能夠避免漏掉一件重要、有價值的鑽石，那麼更貴的機器都值得。XRT機器用的原理，是使用X光能透射碳元素，而不會透視過其他的物質，因此鑽石能夠在篩檢過程中被檢測隔離出，並透過高壓空氣槍將鑽石從礦土中彈射出。近年來，有一些大顆鑽石，就是透過XRT方式被發現，所以這可算是非常令人振奮的科技發展。

結論

所以說，為了要尋找並確認具有開採效益的鑽石來源，勘探地質時需要考量到成本及風險，還有其他相關過程，並運用鑽石其他特殊物理特徵，來判斷設立採礦作業的可能性。不過，這些挑戰縱然艱鉅，卻從未曾阻止最熱情的勘探者，去追逐夢想，去翻山越嶺，尋找榮耀與財富！

本文之英文原稿刊於香港寶石學協會年刊2019 • Volume XL，並可於http://www.gahk.org/en/journal_2019.asp下載；中文翻譯版原刊於GIA臺灣美國寶石研究院校友會本年之春季(3-4月)年刊及GIA“2020 Gemologist & Jeweller (2020專業珠寶家)”。

作者馬克·庫利南的曾祖父湯瑪斯·庫利男爵士(Sir Thomas Cullinan)在南非開採鑽石，在殖民地時期衝突中協助締造和平。馬克延續了家族鑽石事業，並曾從事天然鑽石探勘工作長達十多年之久。

參考文獻

- 9th International Kimberlite Conference, Abstracts. Frankfurt 2008
- 35th International Geological Conference, Cape Town. August 2016
- Adamantia: Lindley, Captain A. F. The Truth About the South African Diamond Fields, W. H. & L. Collingridge, Aldersgate St. London 1973
- Doughty O. Early Diamond Days - The Opening of the Diamond Fields of South Africa. First Edition, Longmans, Green & Co. Ltd. 1963
- Grutter H., Latti D., Menzies A. Cr-saturation arrays in concentrate garnet composition from kimberlite and their use in mantle barometry. Journal of Petrology, Vol.47, Issue 4. April 2006, pp 801-820
- Grutter H., Gurney J., Menzies A., Winter F. An updated classification scheme for mantle-derived garnet for use by diamond explorers. Lithos, Vol.77, Issue 1-4. September 2004, pp 841-851
- Hart, C. "Diamonds - Source to Use" Colloquium, SA Institute of Mining and Metallurgy, October 2003, Published by South African Institute of Mining and Metallurgy 113(7), December 2012
- Hawthorne J.B. Model of a kimberlite pipe. Physics and Chemistry of the Earth, Vol.9, 1975, pp 1-10, IN1, 11-15
- Janse A.J.A. (Bram). A history of diamond sources in Africa, Gems & Gemology, Part I, Winter 1995, Vol.31, No.4, pp 228-255. Part II, Spring 1996, Vol.32, No.1, pp 2-30
- Cullinan Mark R. Prospecting for diamonds in South Africa. The Annual Journal of The Gemmological Association of Hong Kong, 2019 · Vol. XL
- McNish, J.T. The Road to Eldorado, Struik, South Africa, 1968
- "Messengers from the Mantle, University of Cape Town, Geological Department, 35IGC Cape Town, 2016
- Smith E.M., Shirey S.B. et al. Large gem diamonds from metallic liquid in earth's deep mantle. Science Magazine December 2016, Vol.354, Issue 6318, pp 1403-1405
- Tolansky S. The Strategic Diamond, Oliver & Boyd, 1968
- Tomra - Mining Sorting Equipment. www.tomra.com
- Williams A.F. Some Dreams Come True. Howard B. Timmins, Cape Town, 1948.



香港浸會大學持續教育學院
SCHOOL OF CONTINUING EDUCATION
HONG KONG BAPTIST UNIVERSITY

45 Years of Excellence

珠寶首飾設計文憑



珠寶首飾設計及製作證書



鑽石專業證書

寶石學入門課程

「英國寶石學會」寶石學備試課程



課程或部份科目已加入「持續進修基金可獲發還款項課程」名單內

查詢

☎ 3411 1959

✉ gspddga@hkbu.edu.hk

🌐 hkbusce.hk/and202g

報名期
每年1、5、9月



* 設有其他寶石學及藝術設計短期課程，詳情請瀏覽本院網頁