

# 音色的祕密 小提琴與古琴的材料科學



戴桓青／國立臺灣大學化學系副教授。  
加州理工學院化學博士。研究專長為化  
學生物學、神經化學與阿茲海默症。平時  
喜愛古典音樂與發燒音響。



圖一：1709年史特拉底瓦里小提琴，別名Marie Hall-Viotti。（奇美博物館）

古董樂器，不但是人類的重要文化資產之一，也是許多當今音樂家賴以謀生的工具。在歐洲與中國這兩個文明裡，最珍貴的古董樂器分別是小提琴與古琴，都是木製的弦樂器，這似乎意味著材料的老化與弦樂器的微妙音色有著密切關係，而藉助現代的化學分析，我們越來越

能窺探其中的秘密。在探討老化的奧秘之前，我們將先介紹小提琴與古琴的製作材料。

在歐洲，最具傳奇性的古董樂器是義大利的小提琴。一般認為小提琴是由克里蒙納（Cremona）的阿瑪悌（Andrea Amati）在500年前發明。克里蒙納曾孕育出阿瑪悌、史特拉底瓦里（Antonio Stradivari, 1644~1737）與瓜奈里（Giuseppe Guarneri, "del Gesù", 1698~1744）三大製琴家族，活躍於1550~1750年間。200年來的小提琴大師幾乎都只偏好演奏史特拉底瓦里（圖一）與瓜奈里的作品。為何無數的後代製琴師都無法達到這兩位大師的音色水準？是歐洲音樂史的一大謎題。



圖二：中國古琴，又名七弦琴。（戴桓青攝影）

在中國，文人最珍視的樂器是古琴（圖二）。這項七弦樂器，在四藝（琴棋書畫）之中排行首位（古箏與古琴外型相似但尺寸較大，並有21根弦）。古琴的發明應該屬於周代，已出現於詩經中，早於孔子的年代。晉代傅玄的《琴賦》曾提及中國第一把名琴是齊桓公（卒於643 B.C.）所收藏的「號鐘」。而現存最古老的七弦琴

是唐代的作品，傳世的唐琴仍有十餘張。中國最著名的製琴家族是唐代居住在四川的雷氏家族，現存最著名的唐琴如春雷、九霄環佩與大聖遺音都被認為是雷氏的作品。此外，中國最古老的樂譜，是唐代的《碣石調·幽蘭》，是一首以文字記譜的古琴曲目。今日的琴人仍然能以八世紀的唐琴「太古遺音」來演奏8世紀的唐曲《碣石調·幽蘭》，製作21世紀的數位錄音，所以古琴可謂中國音樂史上的活化石。

### 史特拉底瓦里名琴的特殊材料

在2010年8月份的《科學月刊》中，我們曾經撰寫一篇文章介紹史特拉底瓦里名琴的研究，探討塗漆的配方與結構，以及塗漆對聲音的影響。從19~20世紀，許多專家都認為史特拉底瓦里的秘密在於塗漆秘方。近年來隨著名琴塗漆研究的成果累積，其成分已經大致被闡明，歐美製琴界對於塗漆也產生了新的看法，普遍不再認為史特拉底瓦里的塗漆足以成為特殊音色的關鍵。同時，一種新的假說也孕育而生，認為名琴的秘密在於木材的化學處理。此時正好我們實驗室取得了一系列的名琴木材樣品，來自於破損修復時所刮除的木屑，以及奇美博物館所提供的史特拉底瓦里琴頸（圖三）。

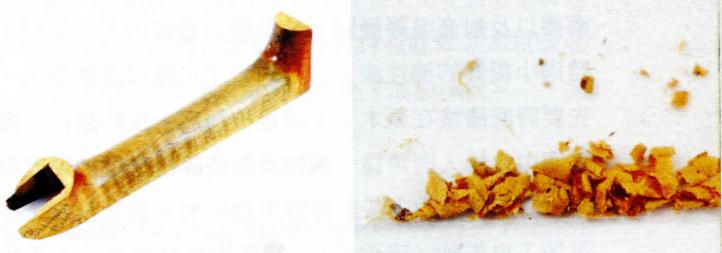
經過多種化學分析，包含固態核磁共振、熱分析、元素分析與同步輻射X光繞射，我們發現史特拉底瓦里的木材先經過了化學處理才被用來製琴，而且300年的老化造成了半纖維素的水解，而小提琴的長期高頻振動則造成纖維分子的重新排列（圖四）。這三個因素的加總，使得史特拉底瓦里名琴上的楓木與現代製琴用的楓木，在性質結構已經變得不同，或許可以解釋為何現代製琴師一直難以複製史特拉底瓦里的音色。我們的名琴木材研究在2016年底刊登於《美國國家科學院院刊》，隨即也獲得如紐約時報、華盛頓郵報、泰晤士報與日本讀賣新聞等百餘家國際媒體的報導。

在克里蒙納製琴的黃金年代（1550~1750年），義大利人並未留下任何有關提琴製作技術的歷史文獻。相較之下，因為古琴是中國文人鍾愛的樂器，因此從唐代以後就有相當多文人寫下關於製琴技術的文獻。在研究小提琴的過程中，不斷參照中國古籍中的古琴知識使我們獲益良多。另一方面，近代西方對於弦樂器的研究非常豐富，可以幫助我們了解古琴製作的技術原理。東西方兩種製琴文化所累積下來的遺產，其實有許多相通之處，而且透過現代的科學分析才更讓我們看清其中的關聯性，互相作為印證。

### 越陳越香的古典樂器

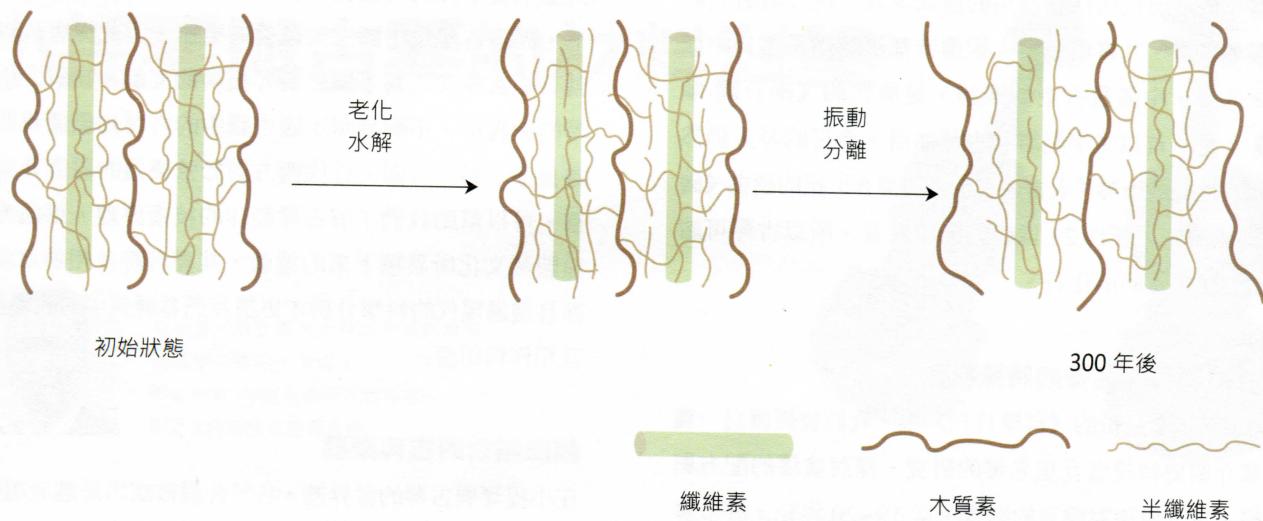
在小提琴與古琴的世界裡，名琴普遍被認為是越老越好。但事實上並不是所有的木製弦樂器，都越老越值錢。以吉他與古箏而言，普遍的認知是其音色會在數十年或是上百年後退化，因此古董樂器並沒有特別高的價值。但小提琴與古琴中的精品則是身價隨著年份水漲船高，史特拉底瓦里與瓜奈里的小提琴曾以1600萬美金拍賣售出，而唐宋古琴也有兩次拍賣超過1億人民幣的紀錄。

小提琴與古琴的設計，都採用圓弧形的面板，而且有防止撞擊後大幅破裂的設計：大部分的小提琴有鑲線，而



圖三：研究史特拉底瓦里名琴所採樣的楓木樣品：左為1725年的小提琴頸（奇美博物館提供），右為1731大提琴背板（Brigitte Brandmair提供）。（戴桓青拍攝）

史特拉底瓦底小提琴的化學處理



圖四：史特拉底瓦里小提琴的木材性質變化示意圖。

部分古琴則以麻布包覆。相較之下，吉他的平面音板設計容易隨著溫溼度的變化而變形。古箏的梧桐面板則無法長期承受沉重的壓力，又無塗漆保護，音色往往在 20 年內衰退，所以古人有「易見千年琴、難聞百年箏」的說法。

### 中國大漆與歐洲油性漆

古琴的塗漆，是中國漆樹 (*Toxicodendron vernicifluum*) 所分泌的大漆，它具有防腐蝕、抗酸鹼、防潮防水、耐磨擦以及耐高溫等優點，是保護力最強的天然塗料，遠勝過小提琴的油性漆。古琴的塗漆可能厚達數釐米，首先要將底漆塗在原木上，這也被稱為上灰的動作，因為底漆中會摻入鹿角霜、礦物或陶瓷碎粉來增加硬度與體積。底漆之上的表漆若需要黑色可加入氫氧化鐵，紅色可加入朱砂（硫化汞），褐色則為其原色。大漆的乾燥原理是漆酶（laccase）這種酵素所催化的氧化聚合反應，需在高濕度與溫暖的環境下進行，聚合後的化學穩

定性與堅韌程度可保護古琴千年不壞。歐洲傳統的油性漆則是乾性油（drying oil）加上樹脂（例如亞麻仁油加松香），再加入顏料成分即成為小提琴的紅色塗漆。其乾燥原理是自由基聚合反應，可以紫外光或金屬（鉛、鐵、錳）催化。小提琴的塗漆可能只有數十微米的厚度，以維持高透明度來呈現木紋之美為原則。史特拉底瓦里的塗漆在楓木上特別可以增強木紋反射的感覺（圖五），後代製琴師花了 200 年都無法達成類似的效果，也是一個未解之謎。

在 17 與 18 世紀，中國的漆器傢俱透過海上絲路進入歐洲後，在上流社會大為流行。但是因為歐洲沒有原生的漆樹無法生產大漆，大漆也無法長途輸送至歐洲，所以催生出了許多山寨版的中國漆（Chinese varnish）或日本漆（Japanese lacquer），到後來被證明都是假配方。歐洲人模仿大漆的主要方法，是將源自印度的蟲膠（shellac）溶於酒精形成一種快乾漆。這種酒精漆在傢



圖五：1709 年史特拉底瓦里小提琴，別名 Marie Hall-Viotti，其背板與側板的楓木呈現明顯的虎背條紋。（奇美博物館）

俱業流行之後，也被應用到小提琴上，比起需要曬太陽才會逐漸硬化的油性漆更容易使用，於是在 18 世紀逐漸淘汰了傳統的油性漆，也造成了克里蒙納引以為傲的油性漆配方到了 18 世紀末期就完全失傳而不可考。在史特拉底瓦里與瓜奈里過世的年代，酒精漆已經在克里蒙納流行，而將油性漆淘汰了。到了 1747 年，甚至有克里蒙納的仕紳誤以為歐洲傳統的油性漆是來自土耳其的配方。因此山寨模仿中國的大漆的風潮，間接地造成了克里蒙納的油性漆的失傳，到現在使用各種化學分析方法都還無法還原其完整配方。

### 共鳴取決於好的音箱

在音箱木材的選擇上，小提琴與古琴也依循著相似的原理。琴最重要共振部分是琴弦那一側的前板，需要又直又輕但夠強韌的木材。在歐洲，提琴家族、魯特琴、與吉他的前板，都是挪威雲杉所製（Norway spruce, *Picea abies*），鋼琴的音板也是。在中國，古琴、古箏與琵琶的前板最常見的是梧桐木（*Firmiana simplex*）。由此可見歐洲最適合的發聲的木材是雲杉，而中國則是梧桐。古琴也可以用泡桐（*Paulownia sp.*）或杉木（*Cunninghamia lanceolata*）做前板，尤其近年來適合製作古琴的梧桐老樹已經逐漸稀少。

不論是提琴或古琴，背板的木材似乎比前板有更多種選擇空間。背板的木材需要較硬、密度較高的木材，才能將震動的能量反射回來。宋代《洞天清祿集》明確指出：「琴底須以梓木為之，面以取聲，底能匱聲，底木不堅，聲必散逸」，就已經說明了背板要堅硬才能有良好共鳴（匱同櫃，藏物之器），這與現代對於小提琴共鳴的理解是一致的。小提琴的背板幾乎都是楓木（maple, *Acer sp.*），但是中提琴與大提琴也可以採用楊木（poplar）或柳木（willow）的背板。古琴的背板傳統是梓木（*Catalpa ovata*），但是也有人嘗試漆木、紫檀、楠木、杉木、松木、花梨木、楓木等等。《詩經·定之方中》記載：「椅桐梓漆，爰伐琴瑟」（描述 659 B.C. 衛文公定都楚丘），就已經提到製琴所用的桐木、梓木與漆樹，歷經 2700 年仍然沿用至今。

克里蒙納的大師作品，根據年輪鑑定的結果，經常使用剛砍下來風乾 10 年以內的新木材製作。但古琴製作則非常強調老木材的重要性，而老的定義不是樹齡，而是砍伐以後才開始計算老化的進程，古書常說要 500~1000 年為最佳。北宋的石汝歷在《碧落子斷琴法》中引用雷氏的說法：「選材良，用意深，五百年，有正音」，可見對於木材老化的重視程度，而唐代雷氏所看到的 500 年老木材或老琴，回溯上去已是東漢末年的諸葛亮、周渝年代。

### 延伸閱讀

- 戴桓青，〈價值兩千萬美金的祕密—從分析化學看義大利名琴塗漆〉，《科學月刊》第 41 卷第 584 期，2010 年。
- Tai, H.C. et al., Chemical distinctions between Stradivari's maple and modern tonewood, *Proc. Natl. Acad. Sci.*, Vol. 114: 27-32, 2017.
- Nagyvary, I. et al., Wood used by Stradivari and Guarneri, *Nature*, Vol.444: 565, 2006.

# 從古籍中的材料知識探究琴中科學



戴桓青／國立臺灣大學化學系副教授、  
加州理工學院化學博士。研究專長為化  
學生物學、神經化學與阿茲海默症。平時  
喜愛古典音樂與發燒音響。

西方有小提琴流傳，而中國則是有古琴的問世，兩者在設計與製作上有許多相似之處，這次將討論中國古籍自宋代以來所提到的製琴木材知識，如何以現代的科學角度來詮釋。

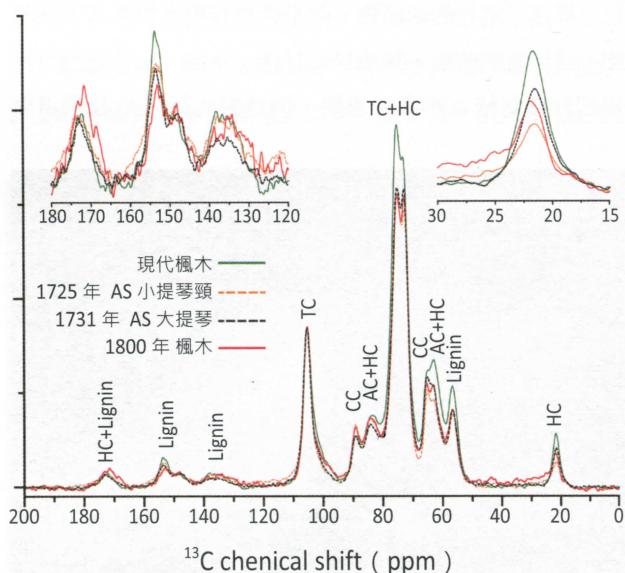
## 古琴的選材

關於古琴木材的自然老化與加工老化，南宋皇室成員的趙希鵠所著的《洞天清祿集》中有幾項非常有趣的敘述：

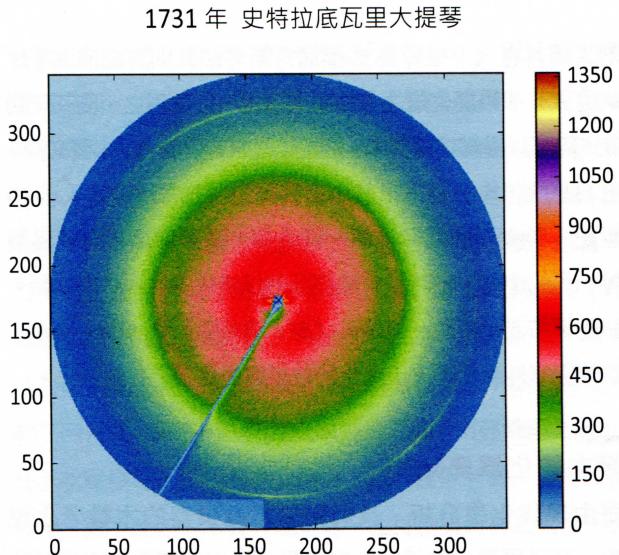
- 一、大抵桐材既堅而又歷千餘年，木液已盡。
- 二、樑柱恐爲重物壓損紋理。
- 三、惟木魚鼓腔晨夕近鐘鼓，爲金聲所入，最爲良材。  
然亦有敲損之患。
- 四、古人以桐梓久浸水中，又取以懸竈上，或吹曝以風日。百種用意，終不如自然者。

從第一項來看，木液要千年才能去除，由現代觀點來看，第一個可能性是木材越來越乾燥，吸附的水分減少；第二個可能性是木材細胞壁內的抽提物（extractives）

與樹液（sap）內的有機小分子逐漸分解。在小提琴界，製琴與製弓的師傅也經常認為木材老化會越來越乾燥。木材細胞壁的主要纖維成分有3種：纖維素、半纖維素與木質素，會從空氣中吸附水氣進而達到平衡，其中半纖維素的吸水能力最強。所以，充分乾燥的木材（風



圖一：名琴楓木的 $^{13}\text{C}$ 固態核磁共振圖譜，老化的木材的半纖維素呈現降解現象。HC 代表半纖維素、Lignin 木質素、AC 非結晶性纖維素、CC 結晶性纖維素、TC 全部纖維素。（作者提供）



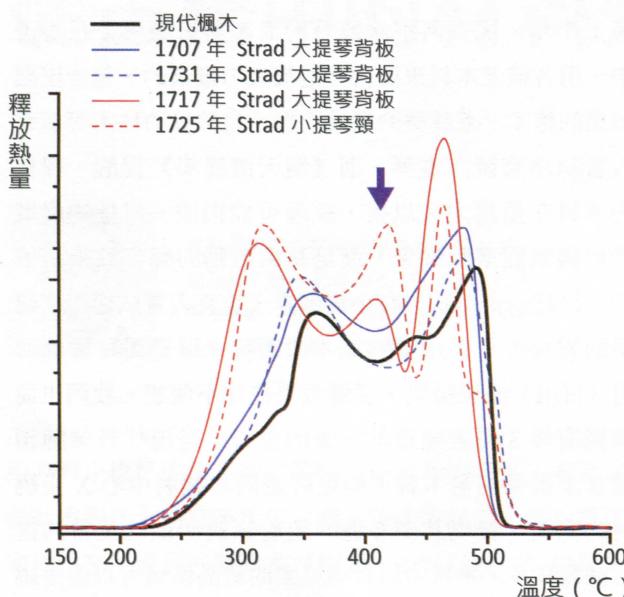
圖二：名琴楓木的 X 光繞射條紋。（作者提供）

乾 3~10 年) 的含水量是由空氣濕度決定。以我們所發表的研究為例，以固態核磁共振光譜來定量義大利名琴木材內的纖維成分(圖一)，發現半纖維素隨著時間緩慢水解的半衰期大約 400 多年，而提琴經過 300 年後，半纖維素大約已經分解了 1/3，所吸附的水分則減少了 1/4，這相當符合《洞天清祿集》所說的千年之後木液已盡。

宋代的《太古遺音》也認為「琴不必桐梓，惟木液既竭，濁性去盡，皆可選用」。從實驗中發現，藉助熱重分析儀中精準度達到 0.1 微克的天平，只要將幾毫克的木材加熱至 150°C，其重量的減少程度就等於逸失的水分，用極少的歷史木材樣品就能測出其吸濕程度。木材所吸附的水分，會造成振動時的內部摩擦力，因此含水量較少的木材，振動比較自由，發聲比較容易。許多小提琴家認為臺灣的氣候比歐美潮濕，不利於小提琴的發聲，當年留學時購買的提琴回到臺灣往往音色變差，這或許也是木材吸收較多水分的結果。

第二項敘述，如果木材的自然老化，需要 1、200 年甚至上千年，那為何不拿既有的老木材來製琴？在古書中，用各種老木材來製古琴是被大力推崇的，包含挖掘出來的棺木、老建築的樑柱門板、自然界的枯木等都有人嘗試拿來製作古琴。而《洞天清祿集》提醒，樑柱的木材在重壓太久以後，紋理可能損壞。這樣的損壞是用肉眼觀察所察覺，還是藉由振動的聲音效果來偵測，已經不得而知。在小提琴界，也有人嘗試使用老建築的雲杉或是舊傢俱的楓木來製琴，但是提琴權威海爾 (Hill) 家族指出，音響效果往往不理想。我們也從歐洲取得 3 塊老建築拆下來的雲杉，是現代製琴師預備拿來製琴的老木材，但是經過同步輻射中心 X 光繞射的測量，發現其中 2 塊的繞射條紋明顯比正常的雲杉減弱許多。木材中只有纖維素的結晶區域可以產生繞射條紋，而這 2 塊雲杉雖然外觀木紋看起來正常，但是纖維素的分子結構因為外部長期施壓的影響，已經從結晶性轉為非結晶性，結構強度大幅下降，已經不適合製琴，振動效果也不會理想。因此，《洞天清祿集》所說的木材紋理受損，可能不只是肉眼就看得出來的現象，也可能是分子層次的損壞。所幸的是，在檢視過十餘個義大利名琴的雲杉與楓木樣品的 X 光繞射條紋後，我們發現纖維素的結晶性都還完好如初(圖二)，沒有因為長期振動而受損。

而第三項敘述為宋代有人認為長期振動可以改變木材性質，但過猶不及，也可因為振動過度遭到破壞。小提琴家也普遍認為，新的小提琴光是靜置老化不夠，需要經常演奏數十年，才能發展出成熟的聲音。長期振動對聲音或振動的影響不易直接測量，但我們卻意外地在研究史特拉底瓦里名琴時發現，小提琴與大提琴因為振動頻率不同，300 年後出現不一樣的木材性質。將名琴木屑逐漸加溫使其氧化燃燒並測量放熱曲線，正常的楓木與史特拉底瓦里大提琴都呈現 2 個波峰，只有史特拉底瓦里小提琴具有 3



圖三：名琴楓木升溫燃燒時的放熱曲線圖，史特拉底瓦里的小提琴在箭頭處呈現獨特的波峰，但大提琴卻沒有。（作者提供）

個波峰（圖三），類似被蕈類侵蝕過的木材。由此推測長期振動已經使得小提琴楓木內的纖維分子重新排列。

最後，《洞天清祿集》的第四項，宋代的琴人已經累積了長久的經驗，知道材料老化的重要性，也試著對木材做人工老化處理。對於古琴的選材，從漢代到清代的文獻，反覆出現 2 項指導原則。第一是梧桐不要選主幹，要選孫枝（側生的樹枝）來製琴。漢代應劭的《風俗通》說：「梧桐生於嶧山陽巖石之上，採東南孫枝為琴，聲甚清雅。」蘇軾也在《雜書琴事》裡寫道「琴貴桐孫」，只有樹齡很高的梧桐的孫枝才有可能達到製琴所需的寬度。

另外，古人認為梧桐經加熱處理可以增進音色，這可能源自於《後漢書·蔡邕列傳》所記載的：「吳人有燒桐以爨者，邕聞火烈之聲，知其良木，因請而裁為琴，果有美音，而其尾猶焦，故時人名曰『焦尾琴』焉。」到了宋代，會彈琴的

僧人居月在《永樂琴書集·僧居月斲琴法》則詳細描述了烘烤方式：「以炭火焙之，熱竈土竈也。近壁為之，高三尺闊狹，隨時以橫鐵扶置其木，翻覆焙之。若燒糠火，木聲必濁。五日以上，十日以下，其木自有煙色。」當歐洲進入了 19 世紀，義大利的製琴技藝已經失傳，法國取而代之成為製琴、弓的中心。當時就有法國師傅以烘烤過的木材來製琴，試圖模仿老琴音色。但是，《洞天清祿集》也評斷，浸水、烘烤與室外風化等人工老化的效果還是比不上自然老化。

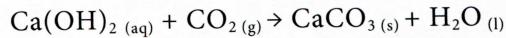
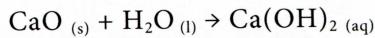
### 琴中的化學奧秘

藉由現代化學分析，我們對於古老樂器的木材老化現象，有了更深入的了解。但這仍不足以解釋為何克里蒙納（Cremona）大師的作品，勝過同一時期在其他城市與國家製作的古董提琴。我們發現史特拉底瓦里（Antonio Stradivari）使用了多種礦物質溶液進行木材處理，可能對於木材產生以下 5 種影響：

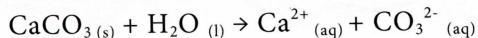
- 一、藉由浸泡的過程移除殘存的樹液成分與木材中的抽提物、例如脂肪酸、樹脂酸、酚類化合物。
- 二、以含氫氧化鉀（木灰水）或氫氧化鈣（石灰水）等鹼性溶液浸泡，分解半纖維素。
- 三、使吸濕性的鹽類如氯化鈉進入木材中，防止冬天乾冷時木材失去水分過度收縮而破裂。
- 四、利用硫酸銅、硫酸鋅、硼砂等成分抑制黴菌與蛀蟲的生長。
- 五、加入鋁離子、銅離子、鐵離子、鋅離子與硼酸，可能在木材的纖維分子之間形成可逆的化學鍵，產生化學交聯，穩定老木材的分子結構。

在歐洲的古老文獻中，並無明確記載製琴的木材曾經使用化學處理，以致 200 年來無人知道化學處理程序在克里蒙納製琴中的重要性，成為絕響。在中國文獻中，清代祝鳳喈的《與古齋琴譜》則明確提出使用石灰水處理梧桐木的方法：「故桐液，使之乾燥則易，使之去盡則難。液若未盡，其音必濁滯而不清亮。去液之法 … 置於紙料池中 [ 凡做紙必以竹浸石灰池中 ]，令其浸一二月，得其灰氣，將木液去盡。復取起，投之清流之中，或瀑布之下，漂去灰氣，約三四月久。再取出，懸諸炎風烈日之衝 [ 須要避雨之處 ]，任其吹曬極乾。日擊其木而驗之，待其鏗然有聲，然後裁製成器。雖不能如古木舊材之奇妙，亦可稍盡新材之美矣。」

以現代觀點來看，鹼性的石灰水的確有助於移除樹液殘存的酸性分子與木材中的酸性抽提物，可能可能會加速半纖維素的水解來模擬老化，降低木材的吸水能力。石灰（氧化鈣）溶於水中會形成氫氧化鈣，古人將此鹼性物質稱灰氣。浸泡石灰水的過程中會產生下列的化學反應：



沉澱在木材中的碳酸鈣也被古人稱灰氣，認為會干擾音色。但碳酸鈣在水中的溶解度很低，想要移除並不是泡清水幾次就可以達成，需以大量的清水持續沖洗，將鈣離子從木材深處慢慢移除，這種做法符合化學中的勒沙特列原理（化學平衡其實是動態平衡，如果改變影響平衡的一個因素，平衡就向能夠減弱這種改變的方向移動，以抗衡該改變）：



### 結語

雖然古代琴匠缺乏現代的化學與物理知識，但是藉由敏銳的觀察與反覆的實驗，仍然得出了符合現代科學原理的經驗法則。事實上，現代科學對於木材的分子結構、木材老化、塗漆老化、複雜音箱的振動和演奏音色的判斷等極度複雜的研究課題，都還處於相當原始的理解境界。因此，東西方製琴師傅所累積的心得，很多仍難以用科學觀點來印證或詮釋。近年來，小提琴研究能有所突破其實源自於修復時所移除的木材與塗漆樣品。透過化學分析，才能深入了解木材與塗漆的組成與性質，還有老化的影響。同樣的研究也可應用於古琴，但前提是科學家必須與修復專家合作，先取得木材與塗漆的樣品。

許多的歷史古物研究，重點在於保存。但是提琴與古琴的研究，不只是為了保存古董，還是為了再現古董名琴的獨特音色。木製樂器，隨著時間與使用必然逐漸破損，木材內部的分解也是不可阻擋的，終究有壽命的限制。在歐洲，在史特拉底瓦里與瓜奈里（Guarneri）過世後，製琴的水平有所下降，250 年後仍未恢復。在中國，製琴工藝的巔峰在唐宋，明代還能出產許多名琴，但是，到了清代因為不明原因造成製琴水準大幅下降，傳統製琴工藝的許多秘訣已經失傳 400 年，需要從古書與現代研究中重新尋覓失傳的技法。在古董名琴逐漸破損凋零後，2、300 年後的聽眾也許越來越難欣賞到它們美妙的音色。為了音樂文化的傳承，現代製琴師的工藝是否能媲美古人甚至超越，是一個重要的課題，而科學研究在其中可能會扮演關鍵的引導角色。

#### 延伸閱讀

1. Hill, W. H., Hill, A. F., and Hill, A. E., Antonio Stradivari: His Life and Work (1644-1737), Dover Pubns, 1963.
2. Tai, H. C. et al., Chemical distinctions between Stradivari's maple and modern tonewood, *PNAS*, Vol. 114: 27-32, 2017.
3. Tai, H. C., Secrets in the Wood, *The Strad*, Vol. 128: 48-53, 2017.