

一個應用微波處理材料的新工具

◎作者：朱國瑞¹、柏賴德²、張存續³、張宏宜⁴、姜惟元⁵、戴伶潔⁵、余青芳⁶、寇崇善¹、鄭世裕⁴

現職：國立清華大學物理系¹教授、³助理教授、⁵博士班研究生、⁶碩士班研究生
工研院材料所⁴陶瓷精密工程實驗室正研究員、²顧問

本文探討一種新型微波作用腔，系統的主體為一近光學共振腔，其主要應用為材料加熱處理，特色為將電磁波聚焦於小區域，藉二維掃描方式快速而均勻地處理大面積材料。由於近光學共振腔具有高Q值（品質因子）特性與聚焦能力，在聚焦區可以產生極高的場強，故其加熱速率遠大於現在通用的封閉式作用腔。此作用腔的另一創新優點為樣品可在鏡面間的開放空間連續通過，故面積不受限於共振腔的大小。此外，藉由二維掃描方式處理樣品，亦可取得高於封閉作用腔所能達到的均勻度。

關鍵詞：微波加熱、近光學作用腔、材料處理、大面積、二維掃描、電腦模擬、實驗印證

前言

微波加熱和傳統高溫爐加熱相較，具有即時穿透、加熱速度快、作用時間短及節省能源等優點。現行的微波作用腔形式各異，但系統的主體均採用封閉的共振腔結構，在其中的多模式駐波場中加熱材料⁽¹⁾。封閉共振腔的使用受到以下三項限制：①材料尺寸受限於共振腔體的大小；②駐波場的不均勻性導致不均勻的材料處理；③場強分佈於整個腔體，致使加熱速率受限。這些限制不能滿足許多新興材料科技的需求，例如植入可扭曲電子模組的紡織品(Electronic Textile)，是未來科技的發展重點之一⁽²⁾，這種產品不僅面積大，而且製程中需要快速局部加熱一個強吸波層，使功能層與低熔點的底層(Substrate)材料結合。本發明的動機與目標

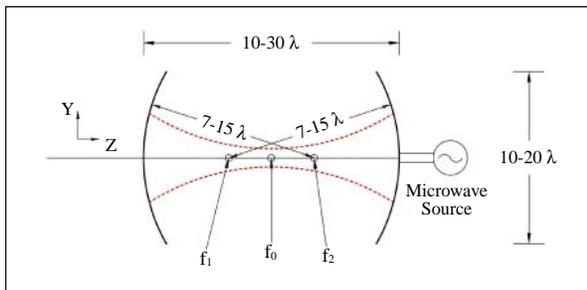
是藉由掃描式近光學作用腔來完全排除上述之限制。近光學共振腔是由兩個或多個鏡面組成，將電磁波侷限其間，並聚焦至最小直徑（約一個波長），因而取得最大場強。由於近光學共振腔的Q值遠高於封閉共振腔，注入同一功率，其內之場強會隨Q值之增加比例而提高。用以處理多層組合材料時，可在需要高溫緻密的細粒表面或需要高溫融合的界面上，噴塗高吸波係數的材質，以快速完成緻密或融合，低熔點的各層，則仍然處於熔點以下。透過鏡面間的開放空間，可將材料置於機動平台傳送至高強度的電磁輻射聚焦區。由於材料的每一部分係以同樣的方式先後暴露於相同的聚焦區，經過處理的材料將具有極高的均勻度，並且任意大小的表面都可藉由二維掃描方式連續處理。

近光學共振腔簡介

一般應用於雷射的光學共振腔係由兩個球面鏡或一個球面鏡與一個平面鏡組成⁽³⁾，其尺寸約為波長的數十萬倍。微波段的近光學共振腔，結構及原理相同，但由於波長遠大於光波，腔體尺寸只有波長的十數倍或數十倍，因此稱為近光學共振腔。

圖一為兩個相同的球面鏡組成的近光學共振腔，腔體尺寸以波長表示。微波被侷限於鏡面之間，其電磁場垂直於橫軸（z 軸），在縱向（x-y 方向）呈高斯分佈。被束縛的微波束在中間（ f_0 ）處聚焦，直徑最小，場強最大。鏡面處場強相對弱了很多，總場能相同情況下，鏡面的歐姆損耗遠低於封閉共振腔的牆面，系統的 Q 值因此極高，是一般封閉共振腔的 10~1000 倍。

當兩個球面鏡的球心 f_1 和 f_2 重合時，中央聚焦區的直徑最小（約一個波長），鏡面接近時，聚焦區的直徑增加。鏡面分離時，微波束則變得不穩定。藉調整鏡面間距，可將聚焦直徑控制在約略一個波長至接近鏡面的大小。因此，在同一作用腔內可依材料之不同特性來調整加熱面積，



▲圖一 兩個相同球面鏡組成的近光學共振腔。 f_1 及 f_2 分別為右鏡及左鏡的球心，聚焦面的位置（ f_0 ）在兩鏡面的正中間一腔體及半徑尺寸以波長（ λ ）為單位

以應用於不同吸波係數及不同面（體）積的材料。波的極化方向亦可用複合式的鏡面組合予以控制。

光學共振器最常使用球面鏡，但非球面鏡也有其優點，優化鏡面曲度，可以產生較均勻的縱向場強，有利於工業應用，例如處理特定尺寸的晶片。至於小樣品的研發，球面鏡仍是最佳的選擇。以功率一仟瓦、頻率 35 GHz 的微波為例，當聚焦直徑調至最小時，材料吸收的最高功率可達每平方公分一仟瓦，此功率接近純銅的熱傳能力。將聚焦直徑在 2 至 10 公分之間調整，材料所吸收的功率可控制在每平方公分 250 至 10 瓦之間。這是加熱低吸波係數材料或快速加熱高吸波係數材料的理想範圍。

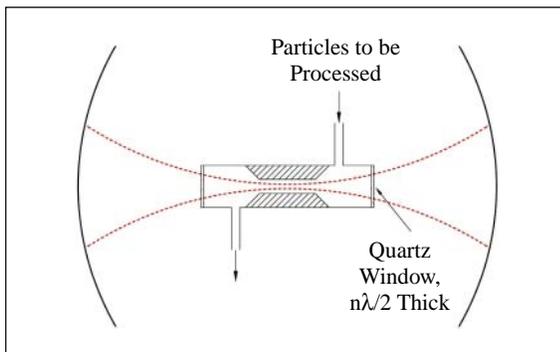
近光學微波作用腔基本結構及操作方式

圖二所示之近光學作用腔為兩個相同球面鏡組合而成，中央配置封閉容器，適用於加熱懸浮於氣體中的材料顆粒。容器兩端的微波出入窗 (Microwave Window) 置於低場強處，以減少熱損耗。容器的寬度恰好配合微波束的外圍邊界，以迫使材料顆粒流過聚焦區。出入窗可使用低吸波係數的石英，但若窗口遠離高場強區，亦可使用其他材料，如陶瓷或鐵氟龍。窗材厚度為半波長的整數倍，以防止反射。

圖三所示為一個球面鏡及一個平面鏡組成的近光學作用腔，聚焦區落在平面導體上，歐姆損耗比兩個球面鏡的共振腔大，但 Q 值仍然很高。此幾何結構適用於平面材料的處理。操作時，將平面材料懸

置於聚焦區，藉球面鏡高度的調整以控制聚焦區的直徑，樣品則可在水平方向作二維移動以含括整個材料。整體裝置的外圍覆蓋電磁波屏蔽以防輻射外洩。由於微波束外的場強很低，屏蔽的工程設計並不困難，屏蔽上並可裝置窗口以利觀察。此結構的缺點為每次更換樣品時需要移開屏蔽。材料可以不同方式放置在共振腔內任何位置，以取得最佳效率的能量吸收。聚焦區的電場方向和鏡面平行，故純介電質平面材料適合與平面鏡同向擺置，附著於金屬基板的介電材料，則適合垂直於平面鏡擺置。

圖四的近光學作用腔亦為一個球面鏡及一個平面鏡組成，其特色為在共振腔外配備機動掃描平台，利用鏡面間的開放空間，輸送樣品至聚焦區，適用於大面（體）積材料處理。所示之屏蔽為空心透明塑膠或玻璃結構，其內充滿水或鹽水，以取得較高的微波衰減效果。其他屏蔽裝置亦可適用，例如貼上固體吸波材料的金屬罩。平面材料經由屏蔽底緣和金屬板間的縫隙連續通過，當材料於 Y 軸方向前後



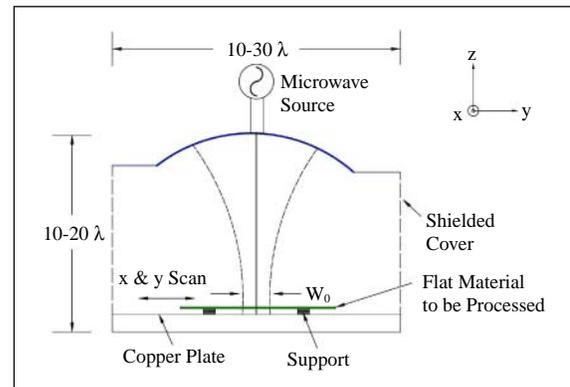
▲圖二 雙球面近光學作用腔，適用於處理連續流經中央容器的懸浮材料顆粒

步進時，亦可在 X 軸方向左右移動，樣品面積因此不受限制。

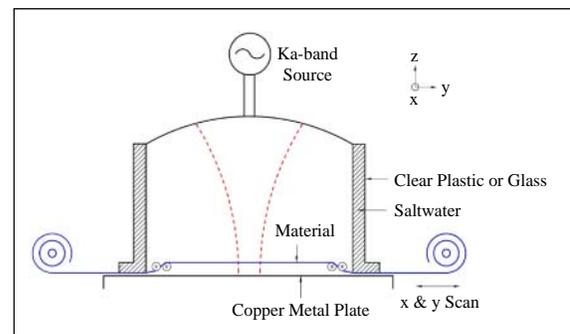
以上列舉的是幾種近光學作用腔的基本結構，實際應用時，可依需要加入其他平面或曲面鏡，組成更高功能的近光學作用腔，以控制功率的均勻度、電場的極化度以及材料表面散熱率等。

電腦模擬及實驗印證

圖五所示為圖三及圖四結構中微波束



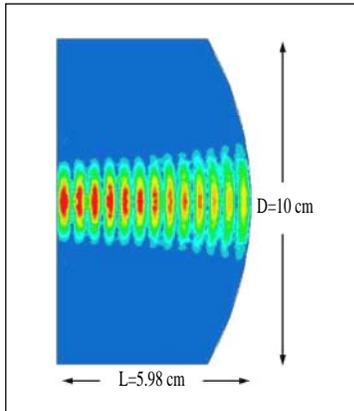
▲圖三 由一個平面鏡與一個球面鏡組成的近光學作用腔。聚焦區的位置靠近平面鏡，適用於處理平面材料（例如附著於金屬基板上的介電材料）。材料置於最大場強處，可移動材料，作水平方向二維掃描



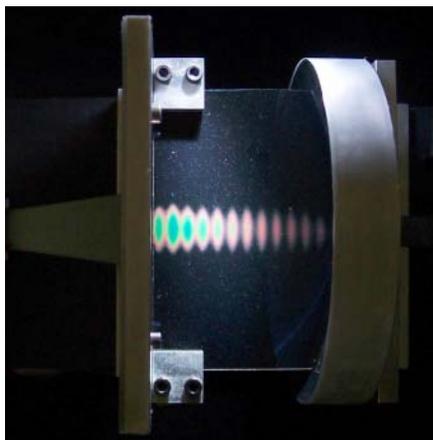
▲圖四 近光學作用腔的另一種形式。可藉由機動掃描平台連續處理大面（體）積的樣品。當材料在 Y 軸上前後步進時，同時亦在 X 軸做左右掃描

之電腦模擬場形。球面鏡的曲率半徑為 10 公分，鏡體直徑亦為 10 公分。圖上顯示的為 $TEM_{0,0,13}$ 模之場形，頻率為 34.6 GHz，雖然共振腔尺寸偏小，Q 值依然高達 25,439。場形圖顯示微波束在平面鏡上聚焦，尖峰場強之間距約為波長的一半。

圖六所示為依圖五尺寸製作完成的近光學共振腔實體照片。測試場形時，先將診斷用的液晶薄片置於中央處，再以低功率微波在共振腔中激發出頻率為 34.6 GHz 的 $TEM_{0,0,13}$ 模，液晶片在不同場強中，加熱至不同溫度，因而產生不同的顏色變化，顯示出場形。如圖六所示，偵測出的場形



◀ 圖五
一個球面鏡及一個平面鏡組成的近光學共振腔的電腦模擬場形。所示為頻率 34.6 GHz 的 $TEM_{0,0,13}$ 模



◀ 圖六
依據圖五所製的近光學共振腔的實體照片。液晶片上顯示的場形與圖五所模擬的 $TEM_{0,0,13}$ 模場形吻合

與圖五的模擬場形一致（在靠近球面鏡處，因場弱而無法顯現細微的顏色變化）。

近光學共振腔的加熱效應亦已獲得實驗印證。測試所使用的是一個含輻射屏蔽的芎型 34.6 GHz 近光學作用腔，其結構如圖三，由一個球面鏡及一個平面鏡組成，球面鏡的曲率半徑及鏡體直徑(D)分別為 14.1 公分及 20 公分，鏡距(L)為 13.8 公分。測試時，將材料樣品置於接近平面鏡的最大場強處，只需輸入 50 瓦的微波功率便能明顯看見加熱效果。此功率約是一般用於封閉作用腔功率的百分之一，以此推算，使用 5 仟瓦、2.45 GHz 的微波源，將可同時處理數十平方公分的樣品面積，達到量產的需求。

結 論

以上所述之近光學微波作用腔為清大及材料所團隊在工業技術研究院前瞻性計畫支援下的一項發明，我們正努力將它發展成為微波材料處理的一個核心工具，期能應用於新興及先進材料的研發。由於此類型作用腔在國內外尚屬首次使用，預期它將為材料研發工作，帶來許多新的方向及可能性。◻

參考資料

1. G. Link, L. Feher, M. Thumm, H. J. Ritzhaupt-Kleissl, R. Bohme, and A. Weisenburger, "Sintering of advanced ceramics using a 30-GHz, 10-kW, CW industrial gyrotron," *IEEE Trans. Plasma Sci.* 27, 547-554 (1999).
2. R.F. Service, "Electronic textiles charge ahead," *Science* 301, 909-911 (2003).
3. A. E. Siegman, "Lasers," University Science Books (Sausalito, California), 1986.