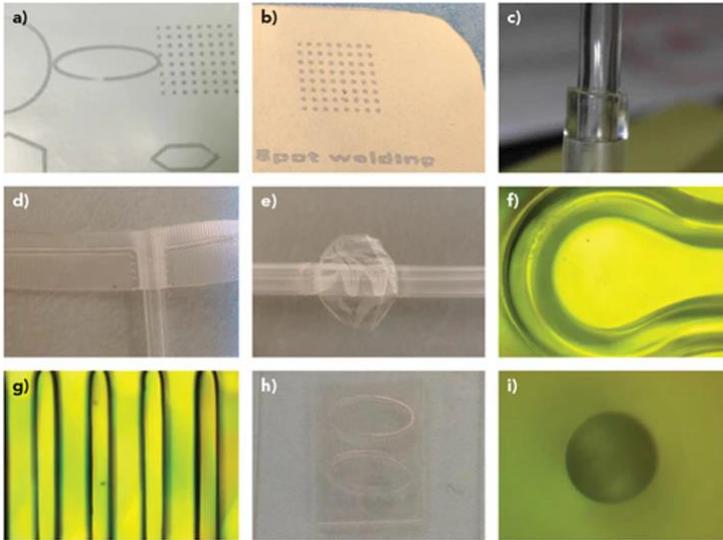


2 μ m 雷射器可實現塑膠的多功能加工

在開發各種中心波長接近 2 微米的摻雜光纖雷射器方面取得了顯著進展。



透明和不透明塑膠可焊接,精度高,效率高

在過去十年中,在開發各種摻雜纖維鐳射器方面取得了重大進展,其中心波長接近 2 μ m[1]。這些較新的 2 μ m 光纖雷射產品範圍從 200W 的平均功率到脈衝模式操作中的 10kW 峰值功率 [3, 4]。製造商還可以根據特定的應用需求定製 2 μ m 激光輸出性能。

現有的 1 μ m 光纖鐳射技術大部分可用於建造工業級 2 μ m 雷射器。可見光和/或 1 μ m 光譜區域中常用的許多二氧化矽和二氧化矽纖維成分也可以部署在 2 μ m 鐳射系統中,只不過其塗層以不同的波長指定。

因此,2 μ m 光纖雷射器的一般性能幾乎可以與 1 μ m 的雷射器一樣堅固,尤其是在緊湊性、效率、穩定性和日常操作的便利性方面,如果它們的生產能夠滿足任何更大規模的潛在應用。

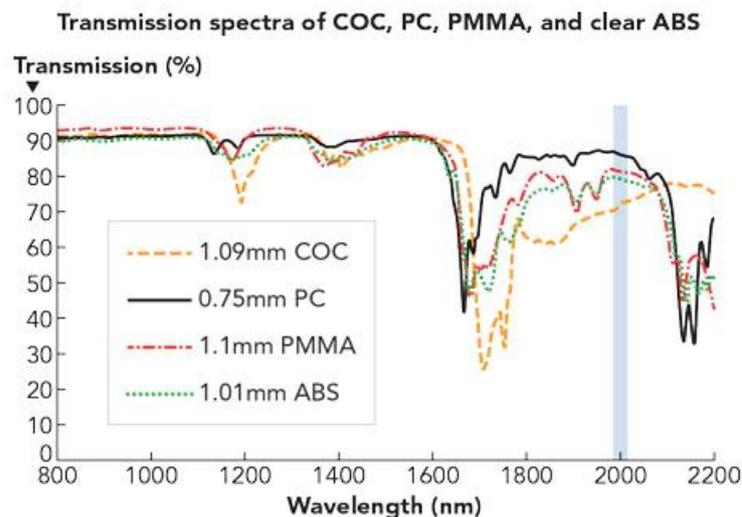
2 μ m 鐳射加工的優勢

考慮到現有的大量工業應用用於其他波長,為什麼、何時以及在這裡需要考慮 2 μ m 鐳射?答案主要在於要加工的材料吸收光譜[5]。對於某些材料,如聚合物,其中 1 或 0.8 μ m 光被吸收得太少,10 μ m 或紫外線(UV)光被吸收太多,2 μ m 可以提供一條合適的光吸收的新途徑。紫外線到 1 μ m 雷射器的一些現有應用也可以用 2 μ m 雷射器實現,更加安全(視網膜安全)。鐳射材料加工

中另一個與波長相關的方面是光束對焦性。在 $2\mu\text{m}$ 時,這些雷射器代表 1 到 $10\mu\text{m}$ 雷射器在給定加工任務的最低對焦點直徑或間距尺寸方面的折衷。

$2\mu\text{m}$ 激光器的應用包括透明塑膠焊接 [6、7]、塑膠面板的嵌入式或多層標記,以及精密的薄聚合物薄膜焊接和切割。請注意,對於嵌入標記,前表面的損壞很小或可以忽略不計。這些獨特的應用可能不容易與其他波長雷射器一起實現。

"透明"是指在可見光譜範圍內清晰,但不一定在其他波長透明。碰巧,許多塑膠材料,在可見度內在透明,也有高傳輸約 $1\mu\text{m}$,但在波長接近 $2\mu\text{m}$ 時沒有。這表現在圖 1 中給出的四種不同類型的透明塑膠的測量傳輸光譜中:聚甲基甲醯酸酯(PMMA)、聚碳酸酯(PC)、環環烯烴共聚物(COC)和丙烯醯丁二烯苯乙烯(ABS)。從圖 1 的光譜軌跡可以估計,四個常見塑膠樣品的吸收係數為 $2\mu\text{m}$, $1.27/\text{釐米}$, $0.81/\text{釐米}$, $2.26/\text{釐米}$, $1.38/\text{釐米}$,而它們在 $1\mu\text{m}$ 處的相應吸收係數要小得多或可以忽略不計。然而,對這些樣品的 $10\mu\text{m}$ 波長的透射進行單獨測量,顯示傳輸小於 0.3%,相當於至少 $58/\text{cm}$ 或更大的估計吸收係數。



1. 測量四個不同透明塑膠樣品的傳輸光譜,所有樣品均具有光滑或光學級表面。

圖 1 所示的光譜軌跡還告訴我們,接近 $2\mu\text{m}$ 的吸收相對平坦,因為 $2\mu\text{m}$ 波長實際上位於兩個主要吸收峰值之間,一個在 1700 nm 左右,另一個位於 2150 nm 左右。根據四種不同透明塑膠的透射測量產生的吸收係數,可以推斷,在波長為 $2\mu\text{m}$ 、COC 吸收率最高的 COC 下,與 ABS、PMMA 和 PC 相比,焊接更容易,而單位長度吸收最低的 PC 樣品則需要更大的焊接功率。所有這些都與我們在實驗中發現的情況一致。

塑膠材料中的光吸收可分為三大類:吸收性強,吸收很少,中間吸收適中。第一類可能導致有效的表面加熱,例如使用 $10\mu\text{m}$ 的 CO_2 雷射器或紫外線雷射器的大多數情況。相反,第二類通常

會導致不加工,除非鐳射功率密度極高,因此缺陷和/或鐳射增強的缺陷變得強烈吸收,從而導致局部溫度急劇上升,然後災難性消融。第三類是聚合物內部傳播的 $2\mu\text{m}$ 激光進入的地方。在這裡,光線穿透樣品的距離相對較長,但同時由於吸收而衰減,從而加熱樣品。

就材料加工的影響而言,第三類吸收一般會產生體積加熱,因此,它還提供了在不同層上標記透明或半透明塑料的機會。在這種情況下,通過選擇聚焦雷射束的適當數位孔徑並正確放置與鐳射對焦相關的工作部件,以及表面冷卻的輔助手段,可以有效地減少甚至避免光束入口的前表面損壞(或不需要的變形)。

應該補充的是,不僅透明度,但有時出現在可見光譜範圍內的黑暗(或黑色),在 $2\mu\text{m}$ 或其他不可見波長下可能有所不同。如圖 2 所示,鐳射焊接兩塊 PMMA 板 (一個透明 (5.32 毫米厚) 和一個黑色 (5.62 毫米厚) - 可以通過黑色 PMMA 的 $2\mu\text{m}$ 鐳射束實現,而不是像我們通常期望的那樣相反。實際上,在這種情況下,從透明件發射鐳射不能產生牢固的粘接,這對應於三個淺焊接標記(一個在左邊,兩個在黑色焊接軌道的右側)。



圖 2.透明(頂部)和黑色(底部)PMMA 板通過鐳射產生的焊接軌道(樣品左側的暗線)粘在一起。在這種情況下,CW $2\mu\text{m}$ 鐳射束實際上從黑色部分輸入樣品,而不是從透明部分輸入樣品。

對此有何解釋?黑色在 $2\mu\text{m}$ 時根本不是黑色!使用相同的鐳射參數,讓 $2\mu\text{m}$ 光束從清晰的 PMMA 進入,可能導致良好焊接或強粘合的透明 PMMA 件的相應最大厚度約為 4.8mm。這顯然不如通過黑色件焊接獲得的。

$2\mu\text{m}$ 光碟處理的參數視窗

對於給定的處理作業,使用 $2\mu\text{m}$ 鐳射查找最佳處理參數視窗與其他波長雷射器基本相同。它通常包括雷射功率或脈衝能量的選擇、工件表面的雷射束直徑、掃描速度和雷射束的相對運

動模式的試驗和誤差。由於脈衝持續時間和脈衝重複率通常由鐳射製造商預設,上述常見變數代表鐳射加工工程師最重要的可調參數。在使用 $2\mu\text{m}$ 雷射器時也不例外。

對於雷射功率選擇,應在最小值(閾值)和最大(過度曝光)之間尋求優化值。在某些處理情況下,大功率、光束移動速度較大或功率較低且速度較低(處理時間較長)的組合將起作用。但是,如果處理品質令人滿意,選擇大功率選項可以盡可能提高整體處理速度,則可能更可取。

除了處理現場的鐳射功率/脈衝能量和光束尺寸外,光束掃描速度還直接影響給定時間段內任何給定位置的有效鐳射劑量。這是脈衝重複率起重要作用的地方。選擇光束掃描速度后,較高的重複率意味著與任何相鄰脈衝相關的鐳射-材料相互作用點之間的空間重疊更大,從而產生更高的有效脈衝數,從而在給定位置擊中脈衝。

有時焊接中的基本問題是應該使用脈衝鐳射還是 CW 鐳射。圖 3 顯示了 PMMA 焊接的橫截面與相應的 CW 和脈衝 $2\mu\text{m}$ 雷射器在類似處理條件下的比較。可見,對於右側的脈衝鐳射焊接結果,焊接接頭上不存在可觀察到的前(頂部)表面損傷和間隙。但對於 CW 鐳射焊接,存在明顯的頂面變形和不完全焊接,以及明顯較大的熱影響區 (HAZ)。因此,可以得出結論,對於精密的透明塑膠焊接,可以首選具有適當規格的脈衝 $2\mu\text{m}$ 鐳射,因為它可以導致更小的焊接功能,平均功率更低,焊接品質更好。

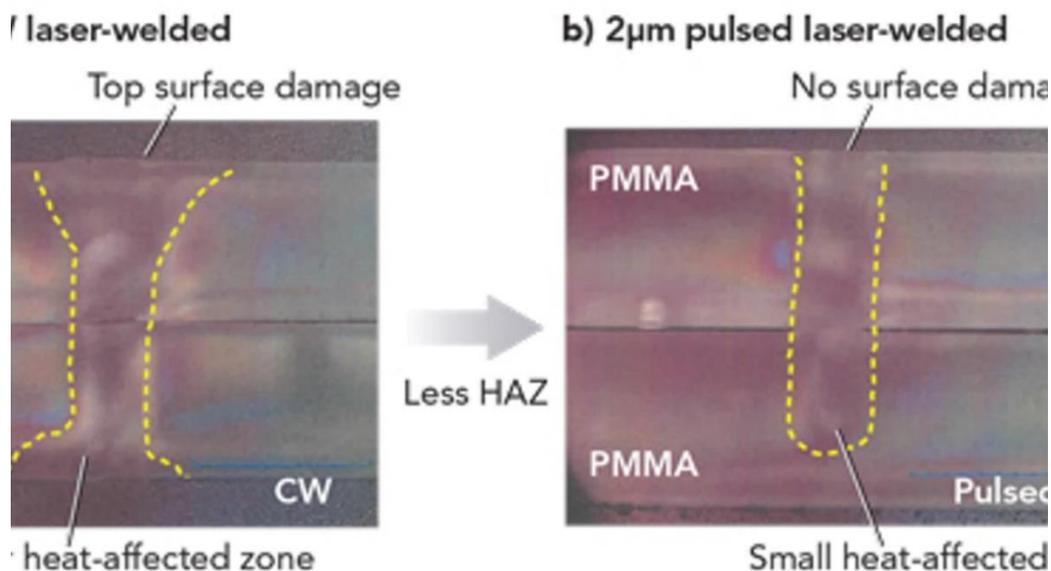


圖 3.帶 CW (a) 和脈衝 (b) $2\mu\text{m}$ 雷射器的 2.6mm 透明 PMMA 板的圈焊截面。

塑膠加工範例

圖 4 顯示了一些薄透明或半透明的塑膠樣品,這些樣品採用商用 20 kHz、180 ns、 $2\mu\text{m}$ 鐳射處理,最大平均功率為 10W。在 FIGURES 4a 和 4b 中點焊的點分離為 $\pm 1.5\text{ mm}$,讓我們瞭解

了這些微焊的刻度。通常,除非損壞樣品,否則這些焊接部件不易剝離。如圖 4b 中的鐳射書寫的"點焊"所示,高度本地化的熔體(以及隨後的凝固)也為這些薄塑膠材料打上標記提供了有效的方法。換句話說,對於某些透明聚合物,可以使用相同的 $2\mu\text{m}$ 脈衝鐳射實現焊接和標記。

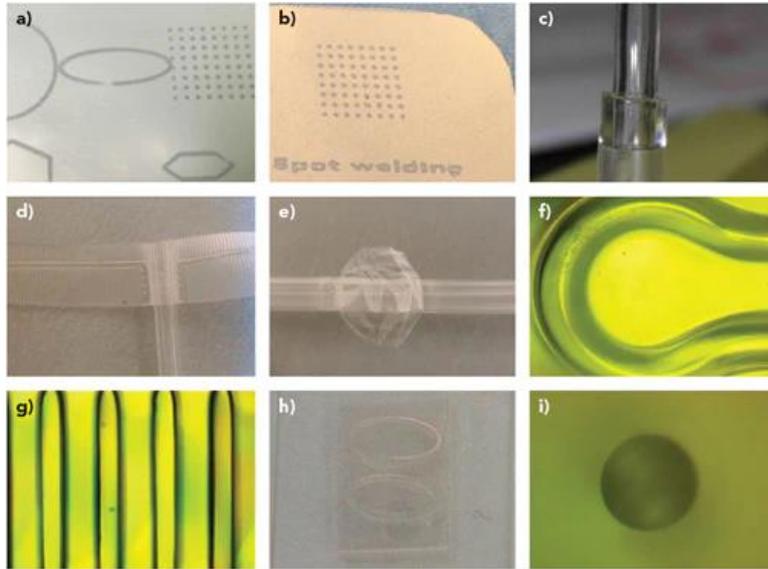


圖 4.透明/半透明薄塑膠薄膜或用 $2\mu\text{m}$ 鐳射處理的板材示例,包括半透明 $30\mu\text{m}$ 厚的尼龍 66,在 $90\mu\text{m}$ 厚的尼龍 66 上通過拉網線焊接和點焊(a) 粘合在一起; 0.23mm 厚的 PC 薄膜圈焊在一起 (b);鐳射粘結 PVC 管,IV 袋的一部分,和內部固定氣球(c-e);具有彎曲焊接線(寬度 $+400\mu\text{m}$)的 PMMA 板上典型焊接軌道的頂視圖,以密封微通道入口/出口和直線(寬度 $180\mu\text{m}$),置於微通道(f) g; 0.25mm 厚的透明聚乙炔二苯 二甲酸酯(PET)焊接在一塊 1.85 毫米厚的 PMMA 板(h)上;以及一個直徑為 $40\mu\text{m}$ 的熔融和重新凝固點的微觀圖像(在 PMMA(i) 中)。

使用 $2\mu\text{m}$ 鐳射焊接絕不僅限於透明或半透明的熱塑性塑膠。彩色或白色塑膠和一些熱彈性材料也可以使用 $2\mu\text{m}$ 鐳射以足夠的強度粘合。後者在生物醫學應用方面將有很大的潛力。薄聚硫酮串、聚氯乙烯(PVC)管、IV 袋和聚氨酯氣球的精確 $2\mu\text{m}$ 鐳射焊接產生了可喜的效果,而從 4c 到 4e 的鐳射焊接 PVC 管、IV 袋的一部分和內部保持氣球的例子都顯示了這一點。除了化妝品方面,所有這些焊接工作都需要良好的密封液在一定的壓力下。

微通道器件或生物晶元的粘接是包含 $2\mu\text{m}$ 雷射器的另一個領域,人們對這種應用的興趣正在增加。與傳統的熱板粘接方法相比,使用 $2\mu\text{m}$ 鐳射焊接和密封微通道設備(包括所有通道路徑及其進出埠)在精度、能效和靈活性方面具有優勢,這也有助於顯著縮短原型設計時間。圖 4f 和 4g 使用脈衝 $2\mu\text{m}$ 鐳射在 PMMA 樣品上顯示具有代表性的微焊接軌跡。根據微通道器件的設計,這些細焊線的寬度可以輕易控制。雖然這些焊接線的寬度通常在 0.3 到 0.5mm 之間,但更薄的焊接軌道是可能的。

圖 5 顯示了使用脈衝 2 μm 鐳射對 PC 樣品的表面標記結果。如左圖所示,鐳射照射量不同,鐳射加工區域的黑暗可以以控制良好的方式逐漸改變。特別是,可以實現黑色和清晰的標記(圖 5,右側)。值得一提的是,用 2 μm 激光標記透明塑膠可以基於兩種截然不同的物理機制,即消融和再凝固熔化。對於後者,如果溫度達到所選塑膠材料的熔點以外,則後期過程中溫度升高可能導致這些標記消失。相反,消融產生的標記通常能經由增強的加熱期后存活。然而,基於消融的標記,往往伴隨著不需要的裂縫和晶元,可能與材料的一些更嚴重的結構損壞有關,這也不會是首選。因此,需要尋求一個微妙的標記方案,幾乎不損壞周邊地區或只有最小的 HAZ,同時,在嚴重加熱期間也生存,至少需要尋求一些具體的應用。我國實驗室成功開發出一種特殊處理方法,解決了這一問題。

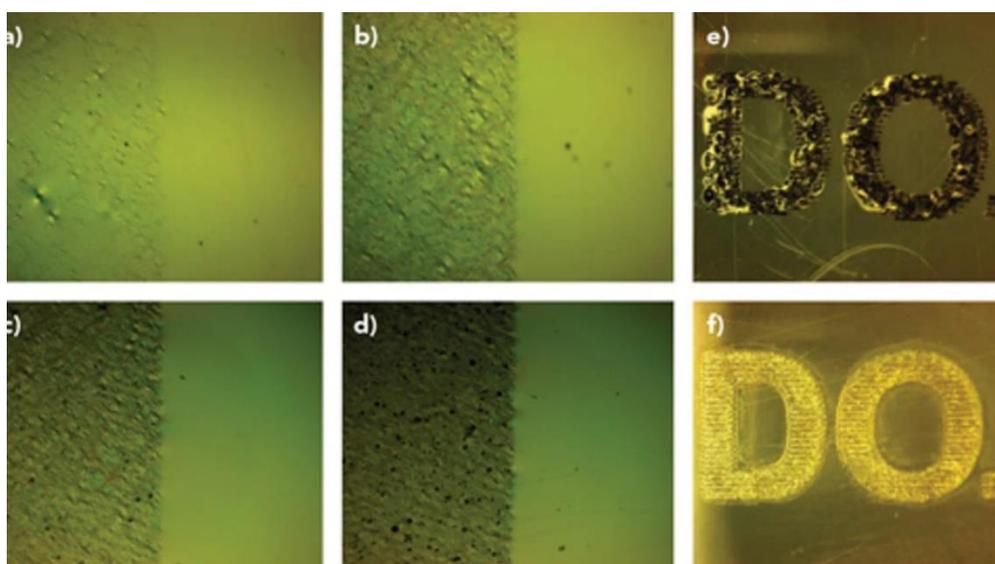


圖 5.用 30kHz、30ns、2 μm 鐳射將透明 PC 板標記到不同黑暗中的示例包括 4.6W (a)、5.9 W (b)、7.5 W (c) 和 8.9 W (d) 平均功率(柵格速度:1000mm/s、線路分離:40 μm 和每個情況重複三次掃描)的柵格掃描(見左側區域)。(e) 和 (f) 顯示通過雷射參數控制在同一樣品上留下深色或明顯標記的可能性。每張圖片測量大約 2.0 \times 1.7mm²。

使用脈衝 2 μm 激光可實現透明塑膠的地下標記。這通常需要很好地控制鐳射束對焦位置。圖 6a 顯示了 1mm 厚的半透明聚丙烯 (PP) 樣品中嵌入或地下標記的示例。在這種情況下,樣品的正面和背面都完好無

損。

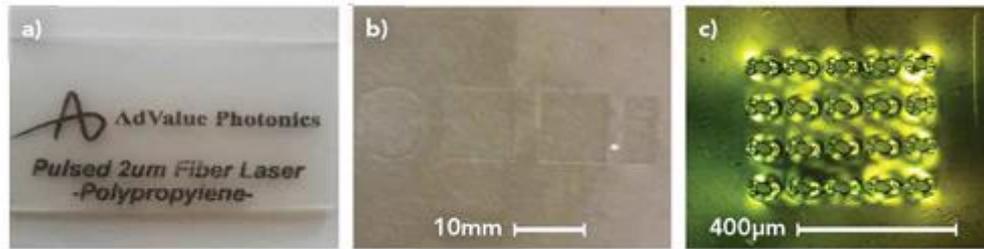


圖 6.1 毫米厚的半透明 PP(a)、鐳射切割、30µm 厚的 LDPE 薄膜(b)的地下標記,以及鑽在 10µm 厚食品包裝膜(c)中的微孔陣列,全部使用 180ns、20kHz、2µm 鐳射。

使用脈衝 2µm 雷射器也可以精細切割或鑽孔塑膠、織物和各種紙張。圖 6b 和 6c 在 10µm 厚的食品包裝膜上顯示鐳射切割/鑽孔 30µm 厚的低密度聚乙烯 (LDPE) 薄膜和直徑為 50µm 的基質。

總之,圍繞 2µm 波長對許多塑膠材料的光學吸收提供了多功能性,在某些情況下,也是該光譜區域鐳射加工的獨特機會。使用 2µm 雷射器可以高精度、高效率地焊接透明、不透明的塑膠或彈性體材料,無需或帶吸收添加劑。通過優化 2µm 激光處理參數,可以進行薄塑膠薄膜的地下/多層標記和切割/鑽孔。

隨著更多高功率和健壯的 2µm 光纖雷射器及其集成系統上市,可在 2µm 光譜視窗周圍開發各種新的應用和加工方案,從更廣泛的意義上講,這些應用和加工方案可能涵蓋整個現有鐳射材料加工領域探索較少的 1.6-2.4µm 光譜區域。