

二氧化碳雷射管之製作與應用

Fabrications and Applications of CO₂ Laser Tube

李建興、黃國政、郭慶祥、余宗儒

Chien-Shing Lee, Kuo-Cheng Huang, Ching-Hsiang Kuo, Jung-Ru Yu

二氧化碳雷射系統可應用於加工之材料非常廣，例如金屬鈹金、陶瓷基片、電路基板及壓克力等。近年來，由於特殊光學玻璃與晶體相關應用產業的快速成長，二氧化碳雷射加工技術已逐漸運用在光電產品上，例如石英切割等。此外，光電產業中液晶面板 (LCD) 的需求大增，為了要提高切削效率與精度，許多產業從業人員已開始研究二氧化碳雷射精密切割技術，可稱為下一代大尺寸面板切割製作的主流。本文將詳細敘明二氧化碳雷射管製作技術，並提出相關加工應用。

The processing objects of the carbon dioxide laser are in great variety: for instance, sheet metal, ceramic substrate, printed circuit board, and PMMA *et al.* Due to the prosperous development in unique optical glass and crystal industrial undertaking, the carbon dioxide laser manufacturing technology has been gradually applied to cutting the optical products such as quartz, crystal, *etc.* Besides, with the increasing demand of LCD panel, many engineers in this field start out to do research on the techniques of carbon dioxide laser, which can be regarded as the mainstream of large-size LCD cutting tool in the next generation. This article presents the principles of carbon dioxide laser emitting and proposes certain relevant designs and applied works of such manufacturing equipment.

一、前言

雷射 (laser) 一字源自 light amplification by stimulated emission of radiation，意指受激發導致光的放大作用。雷射光的生成是由於原子或分子為能更安定存在自然界中，將調整其所存在的能階，而使能量釋放出來，其中包含熱能及光子。若原子或分子不斷受到電子激發，則會持續釋放出光子，即為雷射光激發現象。雷射激發介質主要可區分為氣

體 (如 He-Ne、CO₂)、固體 (Nd:YAG) 及半導體 (GaAs) 等三大類，而二氧化碳雷射屬於氣體雷射的一種，由於出功大，經常被引用來做切割、鑽孔、熔接等加工。

雷射光因具有高亮度、單一方向、同調性佳與單一波長等特性，光電產業常引用於檢測、加工與照明等用途。以雷射加工而言，由於加工效率高，又屬於非接觸式加工，故其加工作品品質相當優良，若配合電腦輔助設計 (CAD) 軟體與精密定位平台

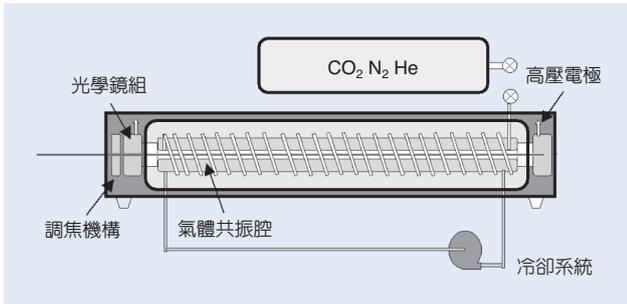


圖 1. 二氧化碳雷射系統。

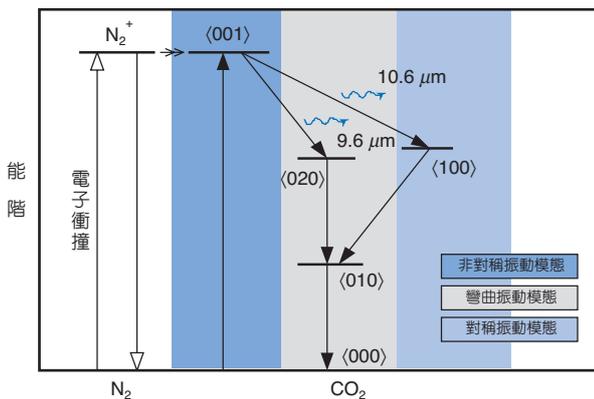


圖 2. 二氧化碳雷射激發過程之能階與振動模態示意圖。

操控，即可應用在目前最熱門的光學玻璃、晶體、陶瓷及液晶 (LCD) 面板等切割，同時，將可為國內光電產值帶來莫大的助益。

Townes 與 Schalow (1958) 最早發現雷射發光原理，但至 1960 年，Maiman 才在 Hughes 實驗室開發出首部可見光之紅寶石雷射系統。開發初期之雷射管不僅功率小且出功的穩定性不佳，並無實用價值。西元 1977 年美國通用 (GM) 公司開發出齒輪箱內面淬火專用之二氧化碳雷射加工設備，才首見產業實用性。當年國內首度引進二氧化碳雷射加工設備，荷商飛利浦 (Philips) 公司使用 50 W 的二氧化碳雷射切割機製作傳統電阻。二十餘年來，二氧化碳雷射已廣泛應用於熔接、鑽孔與切割等加工上。目前國外二氧化碳雷射的發展已很完整，小功率的二氧化碳雷射已全面為密封式，而且穩定度愈來愈好，應用潛力極大，因此國內進口的雷射加工設備裡也發現不少此類低功率二氧化碳雷射，常應

用於穿孔、刻板成型、快速成型及陶瓷基板切割等加工上。

二氧化碳雷射管的製作技術結合了光學設計、玻璃燒製、調焦機構設計、光學鍍膜、電源供應及組件組裝對心校正等技術，其組件包含氣體共振腔、冷卻系統、高壓電極、光學鏡組、模態調整機構等，如圖 1 所示。一般雷射管設計必須先了解其用途，以便確定其規格，例如，利用二氧化碳雷射做玻璃切割，通常使用 50–150 W 的雷射管，出口光束直徑為 6–10 mm，光束發散角小於 3 mrad，振動模態為 TEM₀₀ 及 TEM₀₁ 等規格。

二、二氧化碳雷射工作原理

西元 1964 年 Patel 發展出以氣體分子為激發介質的雷射，其光轉換效率為 10% 左右，振盪波長有 9.6 μm 及 10.6 μm 兩種，因其觸發介質為二氧化碳，故稱為二氧化碳雷射。早期的二氧化碳雷射所使用的混合氣體介質以 He、N₂、CO₂ 三種氣體為主。當加壓放電時，有動能的電子衝撞 N₂ 分子，並將能量傳給 N₂⁺，形成激態 N₂⁺，由於激態 N₂⁺ 的能量與由二氧化碳分子產生「非對稱振動」(asymmetric mode) 之能量相當，一旦激態 N₂⁺ 撞擊二氧化碳分子，同步地激起二氧化碳分子之「非對稱振動」，隨後自然放出光子，再藉由共振腔的來回共振放大後即產生固定波長之雷射光，如圖 2 所示。

1. 共振模態與激發原理

二氧化碳分子由一個碳原子與兩個氧原子組成，其共振的基本模態有「非對稱振動」(asymmetric mode)、「對稱振動」(symmetric mode) 及「彎曲振動」(bending mode) 等三種，如圖 3 所示，分別以

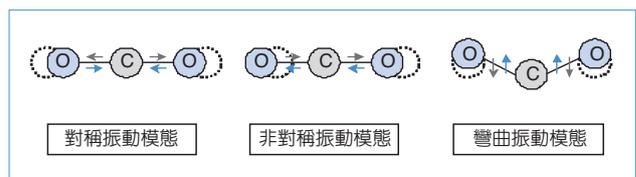
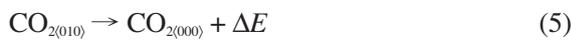
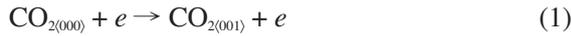


圖 3. 二氧化碳基本共振模態。

下標 $\langle 001 \rangle$ 、 $\langle 100 \rangle$ 及 $\langle 010 \rangle$ 註記。 $\text{CO}_{2(000)}$ 分子透過共振腔放電，產生成 $\text{CO}_{2(001)}$ 能階或是高能階分子，如 $\text{CO}_{2(002)}$ 。 $\text{CO}_{2(001)}$ 分子因雷射放射而降至 $\text{CO}_{2(100)}$ 能階， $\text{CO}_{2(100)}$ 分子再與 $\text{CO}_{2(000)}$ 分子共振碰撞為較低能階的 $\text{CO}_{2(010)}$ 分子。之後， $\text{CO}_{2(010)}$ 分子再與腔壁碰撞產生 $\text{CO}_{2(000)}$ 分子與熱能 ΔE ，可表示為下列各式：



熱能 ΔE 主要由冷卻水帶走，由於 He 的高熱傳導性，亦能協助共振腔散熱。

一般共振腔由兩片反射鏡所組成，例如 Fabry-Perot 共振器，理論上，一反射鏡反射率需 100%，另一反射鏡為部分反射，亦為光的出入口。在共振腔內，光波從左反射鏡到右反射鏡，來回反射，藉由氣體介質反覆激發放大，只要累積增益夠大就能補充光反射、繞射與散射的損失，此時會在腔內形成一定強度的駐波。在兩反射鏡間形成之駐波，其條件為下式：

$$L = n \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (6)$$

其中， n 為節點數， λ 為 $10.6 \mu\text{m}$ 之光波長。因為 n 可為各種共振波數，故有可能存在各種共振模態。

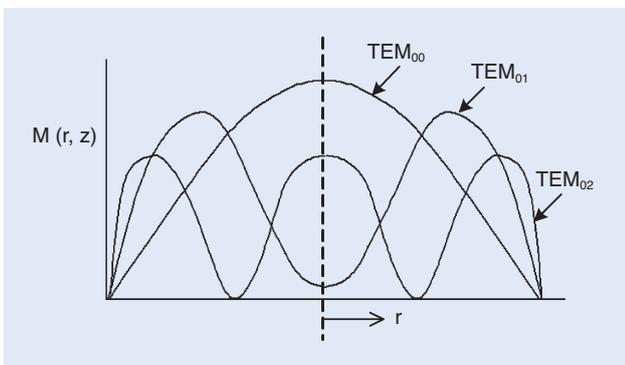


圖 4. 模態振幅 $M(r, z)$ 之 Hermite 函數分布。

G. D. Boyd 與 J. P. Gordon 研究共振模態時，發現當共振腔 Fresnel 數大時，其模態振幅 $M(r, z)$ 分布為一 Hermite 函數的組成，如圖 4 所示，其 Fresnel 數定義為下式：

$$N_F = \frac{R^2}{\lambda L} \quad (7)$$

其中， R 是腔體半徑， L 為鏡面間隔距離。而振動的波形可分為縱波 (longitudinal mode) 與橫波 (transverse mode)，如圖 5 所示。

2. 共振腔型式

一般常見的雷射共振腔常以兩反射鏡的面型來分類，如平行平面型 (Fabry-Parot)、共焦點型、半共焦點型、共心形與其他不安定的型式等如圖 6 所示。二氧化碳雷射多半採用半共焦點型系統。以一共焦點系統而言，Kogelik 和 Li 由幾何關係計算出如果腔體參數若滿足下式，則屬於穩定型共振腔：

$$0 < \left(1 - \frac{L}{R_1}\right) \left(1 - \frac{L}{R_2}\right) < 1 \quad (8)$$

其中， L 為鏡面間隔距離， R_1 、 R_2 分別為左右兩鏡面之曲率半徑。所謂穩定振盪是指光束在腔體內經

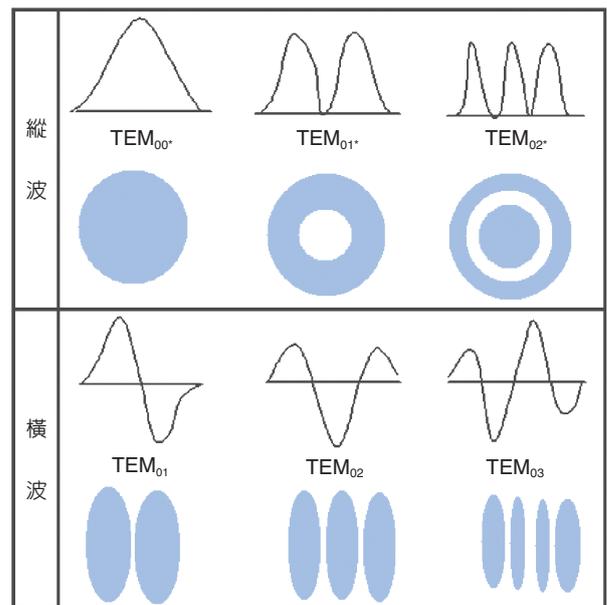


圖 5. 二氧化碳雷射各類振動波形。

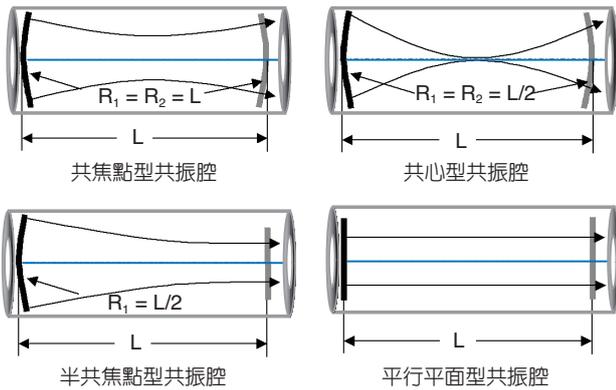


圖 6. 常見四類雷射共振腔型式。

任意的反射皆不會遠離共振腔之意。此外，實用上的雷射管設計還須考量氣體的冷卻與保存效果，因為這與雷射輸出功有直接的關係。二氧化碳雷射的輸出功率與放電管的長度成正比，低速軸流式的氣體流速慢，輸出功率小，約為 50–70 W/m，但其輸出功率穩定，一般用於百瓦級二氧化碳雷射。對於千瓦級的二氧化碳雷射則採用氣體循環速度超過 100 m/s 的高速軸流式雷射系統。以組裝調整的觀點而言，雷射系統又有內鏡式與外鏡式兩種，如圖 7 所示，其中外鏡式系統在光學設計上需加上布魯特視窗 (Brewster window)。

3. 高斯模態之光束分布

雷射光學系統設計上，光束徑的變化、振幅分布與共振腔內兩反射鏡的曲率半徑有極大關係，依據 G. D. Boyd 與 J. P. Gordon 之研究，共焦點型系統之振幅分布 $M(x, y, z)$ 可以用 Hermite 多項式與高斯模態分布之積來表示：

$$\frac{M(x, y, z)}{M_0} = \sum_m \sum_n A_{mn} H_m(Bx) H_n(Cy) e^{-E+if} \quad (9)$$

其中， A 、 B 、 C 、 E 、 F 、 M_0 為計算參數， H 為 Hermite 多項式。令 $m = n = 0$ ，其 $H_0 = 1$ ， $M(x, y, z) / M_0$ 則呈現高斯模態分布 (TEM₀₀)，其幅度為 $1/e$ 、強度則為 $1/e^2$ ，若定義此點徑為 $2r$ ，則光束徑的變化 $r(z)$ 可表示成下式：

$$r(z) = r_0 \left[1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi r_0^2} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (10)$$

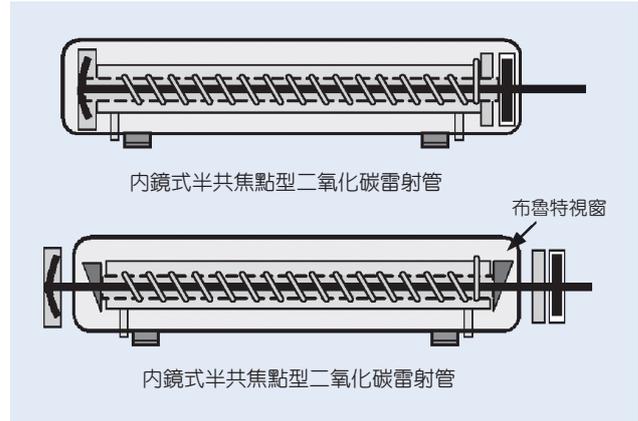


圖 7. 內鏡式與外鏡式二氧化碳雷射系統。

另外，如圖 8 所示 $r(z)$ 漸擴線與 z 軸夾角為 θ ：

$$\theta = \frac{\lambda}{\pi r_0} \quad (11)$$

其中， λ 為雷射光波長。在共焦點或半共焦點型之共振腔中，點束徑最小之處稱為束腰 (beam waist)。光束波前在束腰處成為平行波，當光束傳遞到 z 時，光束波前則形成球面波，其曲率半徑 $R(z)$ 可表示為：

$$R(z) = z \left[1 + \left(\frac{\pi r_0^2}{\lambda z} \right)^2 \right] \quad (12)$$

二氧化碳雷射加工是以光束能量做為分析的標準，而非以聚焦影像品質為依據，故在進行雷射光學設計前需要先了解雷射光束強度分布、點徑、 $F/\#$ 數及焦深等，方能決定光學元件參數，一般應

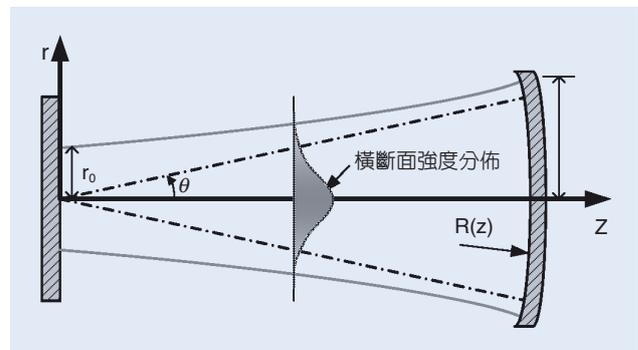


圖 8. 二氧化碳雷射共振腔內雷射光束分布。

用束徑為 D 的光束做加工時，為不在物件造成不良結果，通常會將傳遞此光束的透鏡直徑設計為 $e^2 D$ 。

另外，焦點附近的光束直徑多半會定義焦深為能量密度為 0.9 之處，以高斯模態而言，焦深可表示成下式：

$$D_n = \frac{0.64\pi r^2}{\lambda} \quad (13)$$

其中， r 為聚焦點半徑。至於 $F/\#$ 數或焦距長度 f 對能量密度與束徑也有極大的影響，如果使用無球差之理想光學系統，其聚焦點半徑 r (TEM_{00}) 與 f 的關係為：

$$r = \frac{f\lambda}{\pi D} \quad (14)$$

以束徑 D 雷射光入射一焦長為 f 的透鏡，由上式可知聚焦點半徑為 r ，若改用焦長為 $f/2$ 之透鏡聚焦，則點半徑為 $r/2$ ，其能量密度變為 4 倍，但光束焦深變淺，故只適合薄板切割或微細加工；相反地，若用焦長為 $2f$ 之透鏡聚焦，則能量密度降為 25%，光束焦深變大，則適合開深孔、厚板切割等。

三、二氧化碳雷射管設計

二氧化碳雷射系統設計首重系統主要規格，例如功率 100 W，雷射光束直徑 D 等，其次是反射鏡的材質、曲率半徑、電壓源、冷卻管路及供氣系統等設計，最後再決定調焦機構及模態。如此才是完整的雷射系統設計。以下針對各次系統功能設計加以描述。

1. 雷射腔體

雷射腔體是由一雷射專用的玻璃管及兩端用以真空密封的法蘭 (flange) 所組成。其中玻璃管內有混合氣管、冷卻水管、混合氣補充管及保護管等，如圖 9 所示。混合氣管內含二氧化碳雷射激發所需固定體積比率的混合氣體為 80% 氦、15% 氮及 5% 二氧化碳。玻璃管的選擇是以低熱膨脹係數的材料

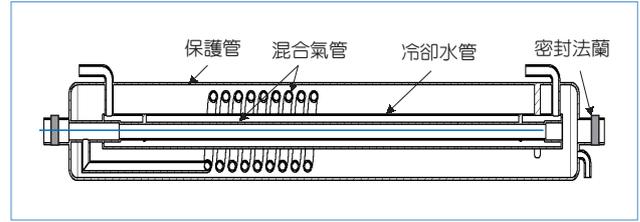


圖 9. 二氧化碳雷射管內氣液管路示意圖。

為原則，如 Pyrex7740 或 fused-silica 等，目前在成本的考量下，多半引用 Pyrex7740 的玻璃管，一般管厚為 1—2 mm 左右。由於二氧化碳混合氣體會經由管壁向外逃逸，故混合氣管常延伸纏繞在冷卻水管上，除可補充混合氣體外，同時對保護管亦有固定的作用。共振管內之混合亦可採用外氣瓶供應的方式。

真空密封法蘭可採用標準件，但由於一端和玻璃管銜接，故必須改採與 Pyrex7740 玻璃之熱膨脹相近的材質，例如鎢、鉬、Invar 合金及 Kovar 合金等，其中以鎢為最合適，但基於成本的考量，目前多半使用 Kovar 合金居多。Kovar 合金為 28% 矽、17% 鈷與 54% 鐵之合金，其外端與不鏽鋼標準真空法蘭間，可使用無氧銅或紫銅做為密封材，並以專用螺絲固鎖。

2. 冷卻系統

二氧化碳雷射能量效率約為 5—20%，以一 100 W 的二氧化碳雷射而言，大約有 200—500 W 的電能將轉變為熱能，很難以氣冷方式藉由玻璃管壁散熱，所以多半混合氣管外包覆一水冷卻管用以排熱。基本上水冷排熱是利用泵浦將水輸入及輸出冷卻水管，水流速約 0.5—1.0 L/min 左右，進出歧管在雷射管下方，排熱效果較理想。

3. 高壓電源

高壓電源主要供應激發雷射用途，常見的電壓規格約 1—5 kV，電流規格約 10—50 mA。電源的供應方式有直流及射頻兩種，但由於射頻的位移電流會在玻璃管產生不必要的熱，致使放電管不穩定，一般還是採用直流電源供應器。另外，電極分為陽極 (anode) 與陰極 (cathode)，陽極為接地端，

可使用鎳或鎢線，陰極為高壓端，放電時，放電管內會產生大量的氧離子及一氧化碳離子，故陰極不適合使用易氧化的材料，如鎢、鎳、鋁或不鏽鋼等。目前陰極的材料多半使用鈦、高熱鎢 (heated tungsten) 或經氧化處理的鋁 (2024-T351)。

4. 光學系統

雷射管的光學系統是指管內的全反射鏡 (high reflectance mirror, HR mirror) 及部份反射鏡 (output coupler, OC mirror) 而言，包括 HR 及 OC 鏡曲率半徑與形狀精度的決定與 OC 反射率的分配等。若欲設計一雷射光束口徑 8 mm、有效放電長度為 1500 mm 之 HR 及 OC 反射鏡，若取平面 OC 反射鏡，則依 (10)、(12) 式可知 HR 反射鏡的曲率半徑為 16.476 m、外徑需大於 8.391 mm。

一般 HR 鏡採用銅或矽基材上鍍銀或金，使之對二氧化碳雷射有 99.5% 以上的反射率，而 OC 鏡是在砷化鎵或鍺等基材上鍍成具有 5–35% 反射率的部分反射鏡。

5. 模態微調機構

二氧化碳雷射加工模態可藉由 HR 及 OC 兩反射鏡間距調整以調出 TEM_{00} 、 TEM_{01} 或更高階的模態，由各模態之間的相位差小於 $\lambda/4$ ，間距差只有 1–2 μm 左右，故模態調整機構中，反射鏡所需之調整量極小且固持需相當穩定，以讓雷射出功保持誤差小於 1%。HR 及 OC 反射鏡的固定方式是採用真空專用的硬膠。多數的雷射管為節省成本，以

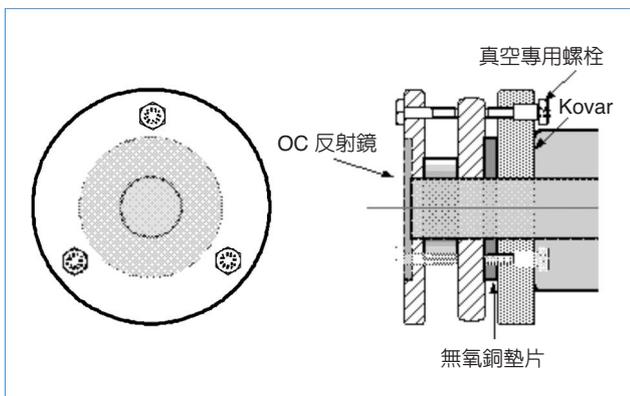


圖 10. 二氧化碳雷射管模態調整機構示意圖。

三顆螺絲做偏心及間距調整，如圖 10 所示。調整機構類似一般的不鏽鋼法蘭，但於中段部分精車一凹槽為懸臂樑機制供間距微調用。

6. 系統對心校正

二氧化碳雷射系統組裝完成後，必須再經過光路中心的校正方能正常運作，這個步驟即為雷射系統對心與調整。除了 HR 反射鏡及二氧化碳混合氣體的比例外，系統是否對心直接影響到出功大小，而且也會影響光束的擴散角，故雷射管在組裝完成後，首重對心調整。常用的對心方式是利用一小型的 He-Ne 雷射當成光源，使入射於二氧化碳雷射管內再經由 HR 反射鏡反射，並讓入射光與反射光投射至螢幕上，即可得知所須調整的偏心量，使用模態調整機構一直調整至入射光點與反射光點重疊為止 (如圖 11)。

四、二氧化碳雷射加工應用—聚焦設計

單純的二氧化碳雷射束無法對工件做有效的加工，必須將雷射束加以集束以控制加工精度。一般在進行雷射加工之光學集束機構設計時，主要有三個步驟。第一是確認光學元件的組成，由系統需求確認聚焦點，藉由元件的調配可變化聚焦點之長寬等尺寸值，以切割各種不同光學材料。第二是設計出一套或多套之可調變曲率半徑，以符合顧客要求。最後是將所設計出來的光學元件，依調變的功能，提供使用者正確操作程序。

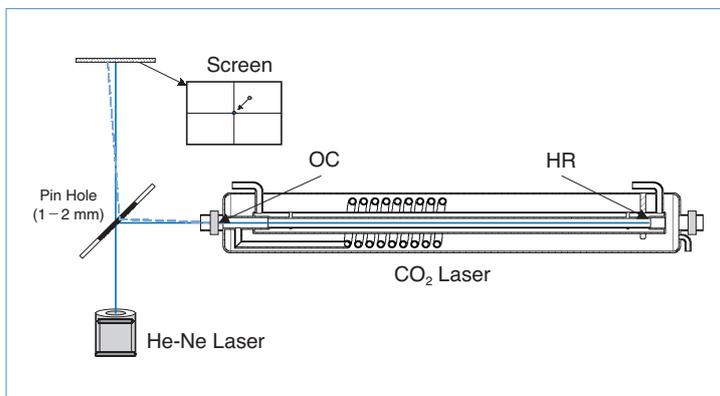


圖 11. 二氧化碳雷射管對心示意圖。

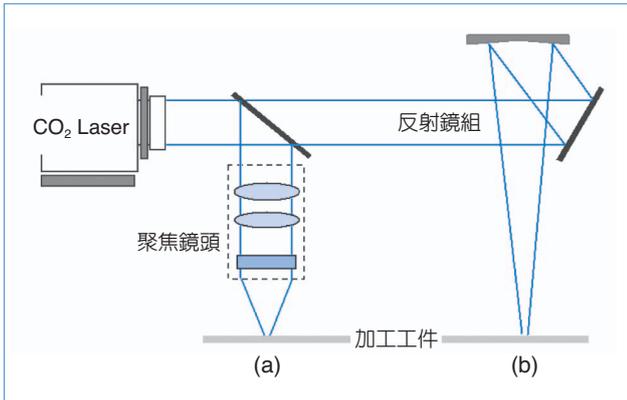


圖 12. (a) 折射式集束方式示意圖，(b) 反射式集束方式示意圖。

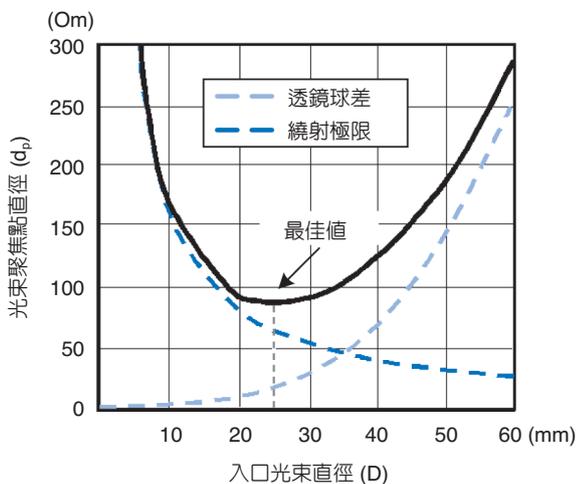


圖 13. 雷射光束聚焦光點直徑與入口光束關係曲線 (ZnSe, $f = 125$ mm)。

1. 聚焦型式

在進行雷射加工時，通常須使離開共振腔的雷射束偏向或集束方有加工效果，一般常見的集束方式有折射與反射式兩種，如圖 12 所示。

目前市面上的光學材料能讓二氧化碳雷射單一波長光束通過且穿透率超過 70% 的材料有砷化鎵、碲化鎘、硒化鋅、氯化鉀、氯化鈉等 (表 1)。由於砷化鎵、碲化鎘材料加工不易且昂貴，故目前市場以硒化鋅為透鏡材質，而氯化鉀、氯化鈉因易潮解作為保護視窗。反射鏡則以銅、金、銀、鋁、鎢、鉬 (表 2) 等金屬做成，其製作方式有二，一是直接加工素材至鏡面；二是在鏡面上加鍍一具較高反射率之薄膜。

表 1. 二氧化碳雷射透鏡材料特性表。

材料	硬度 (kg/m ²)	折射率	吸收係數 (cm ⁻¹)	熱膨脹係數 (10 ⁻⁶ °C ⁻¹)	潮解
Ge	692	4.02	0.045	5.7	否
GaAs	750	3.3	0.015	5.7	否
ZnSe	150	2.41	0.005	8.5	否
CdTe	45	2.67	0.006	5.9	否
NaCl	18.2	1.46	0.005	4.4	可
KCl	9.3	1.49	0.003	3.6	可

表 2. 二氧化碳雷射反射鏡材料特性表。

材料	鍍膜 (%)	反射率	吸收係數 (cm ⁻¹)	熱膨脹係數 (10 ⁻⁶ °C ⁻¹)
Al	—	< 90	0.0198	23
Cu	—	99	0.0097	16.7
Cu	Au	99.6	0.01	14
Mo	Ag	99	0.0062	19
Mo	—	98	0.0072	5.4
W	—	96	0.0204	5.4

2. 聚焦鏡頭

在二氧化碳雷射加工系統中，鏡頭聚焦品質要求並不若相機或投影機，但雷射光束聚焦光點大小需另外考量光束繞射的效果。當雷射光束經由一平凸透鏡後所聚焦的光點大小是光束繞射極限誤差與透鏡球差之貢獻，引用幾何光學的計算，可得光點直徑 d_p 為：

$$d_p = \frac{kD^3}{f^2} + \frac{4f\lambda M^2}{\pi D} \quad (15)$$

(15) 式中第一項為透鏡球差，第二項為繞射極限誤差， k 為折射係數， D 為入口光束直徑， f 為透鏡焦距， λ 為雷射光波長， M^2 為共振模態參數。上式若以高斯模態入射 (TEM₀₀)，則 $M^2 = 1$ 。

以一焦距 125 mm 的 ZnSe 之平凸透鏡做為雷射光束的聚焦系統，並以高斯模態光束入射，則可將 (15) 式之光束聚焦光點大小相對於不同直徑之入口光束繪製，如圖 13 所示。其中，若入口光束

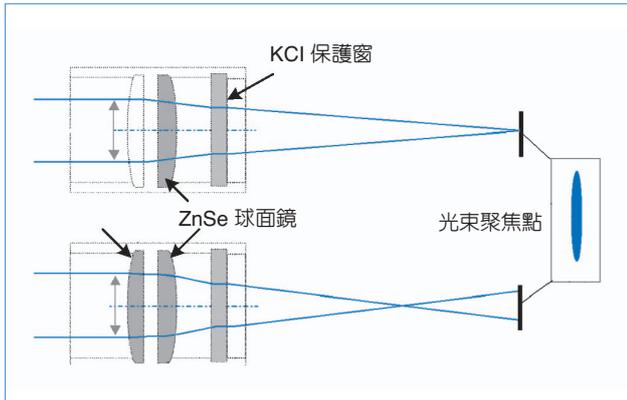


圖 14. 雷射加工聚焦鏡頭柱面鏡單向擴束示意圖。

小於 20 mm 時，透鏡球差的影響可略去不考慮，且最佳入口光束為 25 mm。

一般雷射加工用的聚焦鏡頭，除了反射式的聚焦方式可以直接引用 (15) 式得到聚焦光點的大小外，至於以折射聚焦或欲改變光點型式時，則必須先計算等效的焦長後，方可得知光點的大小。另外，若使用「貓眼」式的雷射光點來做加工，則光點的大小長寬不同，如圖 14 所示。「貓眼」光點的形成通常是在聚焦機構上選用一球面鏡與一柱面鏡，以球面鏡聚焦，並以柱面鏡單向擴束而成。在計算光點長寬時，可將聚焦系統視成兩種聚焦的組合，分別計算光點的長度與寬度，先求得等效焦距，再代入 (15) 式即可得之。

五、結論

本文著重在二氧化碳雷射管製作技術的研究，內容包含光學設計、氣體共振腔玻璃燒製、模態調焦機構、光學鍍膜、高壓電源供應及各組件組裝對心校正等技術。在加工應用方面，另提出之雷射加工系統聚焦鏡頭設計，可由一個球面鏡與一個柱面鏡形成，亦可為單一片透鏡，一面是球面，另一面是柱面，經由光學設計軟體先行模擬其聚焦點位置及聚焦面特徵，如圖 15 所示，各項數據利用程式控制器經系統控制機構來達成精準定位與聚焦加工的目的。

國內二氧化碳雷射加工機製造業者主要從事系統組裝，由國外進口雷射本體及 CNC 控制器，加

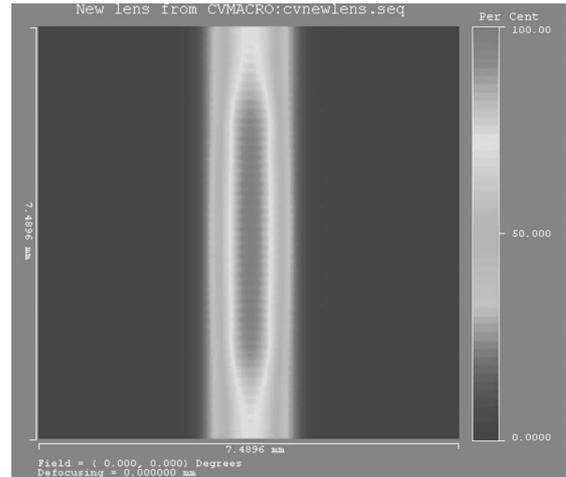


圖 15. 光學軟體模擬雷射加工聚焦「貓眼」光點 (球面鏡 $R_s = 75$ mm，柱面鏡 $R_c = 35$ mm)。

上我國自製的機床台及周邊設備，組合成雷射加工系統。由於核心技術的缺乏，加上關鍵零組件維修不易，致使國內目前雷射加工產業發展只有放在特殊應用或特殊加工要求所設計的專用雷射加工機上，發展並不容易。事實上，往後國內進行相關產業之開發時，若能建立雷射加工技術之核心科技自主性，將不致處處受制於人，並可將開發產品及技術進一步推向國際市場。

參考文獻

1. 賴耿陽, 雷射光工學, 復文出版社 (1994).
2. 蘇品書, 雷射加工技術, 復漢出版社 (1985).
3. R. E. Fischer and B. Tadic-Galeb, *Optical System Design*, McGraw-Hill (2000).
4. D. Knapp, *Plan for a Sealed CO₂ Laser*.
5. Laser/Electro-Optics Technology Series, *CORD, On-Line Introduction to Laser*.
6. S. M. Goldwasser, *A Practical Guide to Lasers for Experimenters and Hobbyists*, Copyright 1994-2003.
7. K. Iga, *Fundamentals of Laser Optics*, New York: Plenum Press (1994).
8. B. A. Lengyel, *Lasers, Generation of Light by Stimulated Emission*, New York: Wiley (1962).
9. B. A. Lengyel, *Introduction to Laser Physics*, New York: Wiley (1966).
10. M. D. Levinson and S. S. Kano, *Introduction to Nonlinear Laser Spectroscopy*, New York: Academic Press (1988).
11. D. C. O'Shea, W. R. Callen, and W. T. Rhodes, *Introduction to*

Lasers and Their Applications, Reading, Mass: Addison-Wesley (1977).

12. B. E. A. Saleh and M. C. Teich, *Fundamentals of Photonics*, New York: Wiley (1991).
13. A. L. Schawlow, *Intr., Lasers and Light; Readings from Scientific American*, San Francisco: Freeman (1969).

-
- 李建興先生為國立成功大學機械工程碩士，現任國科會精密儀器發展中心助理研究員。
 - 黃國政先生為國立台灣大學機械工程博士，現任國科會精密儀器發展中心工程師。
 - 郭慶祥先生為大葉大學機械工程碩士，現任國科會精密儀器發展中心助理研究員。
 - 余宗儒先生為國立台灣海洋大學機械工程碩士，現任國科會精密儀器發展中心助理研究員。

- Chien-Shing Lee received his M.S. in mechanical engineering from National Cheng Kung University. He is currently an assistant researcher at Precision Instrument Development Center, National Science Council.
- Kuo-Cheng Huang received his Ph.D. in mechanical engineering from National Taiwan University. He is currently an engineer at Precision Instrument Development Center, National Science Council.
- Ching-Hsiang Kuo received his M.S. in mechanical engineering from Da Yeh University. He is currently an assistant researcher at Precision Instrument Development Center, National Science Council.
- Jung-Ru Yu received his M.S. in mechanical engineering from National Taiwan Ocean University. He is currently an assistant researcher at Precision Instrument Development Center, National Science Council.