

雷射清潔技術與應用

Laser Cleaning Technology and Its Applications

楊映暉^{1*}、李姿儀¹、曹宏熙²

¹ 工研院 雷射中心 積層製造技術組 關鍵模組部 副工程師

² 工研院 雷射中心 積層製造技術組 關鍵模組部 經理

摘要：雷射清潔有著非接觸性、選擇性移除、穩定快速與低環境污染的優勢，在工業製造、金屬加工、建築與文物古蹟修護都具備廣泛應用前景。透過雷射對金屬材料表面髒汙與氧化層的作用，可快速移除表面疏松孔洞與氧化層，降低表面粗糙度。本文將針對清潔技術的發展、雷射清潔研究現況與應用進行介紹，作為國內產業發展方向的參考。

Abstract : Advantages of laser cleaning include: it is a non-contact process; it has selective removal capability; it is a fast, stable and environment-friendly process. Laser cleaning is widely used with application covers industrial manufacturing, metal parts processing, construction structures, historic buildings and cultural heritage objects. Laser cleaning is capable of fast removal of contamination and oxide layer on the material's surface, as well as to reduce surface roughness. In this article, worldwide current development and application status of laser cleaning technology will be introduced which may be provided as references for future development in domestic related industries.

關鍵詞：雷射清潔技術、氧化層、粗糙度物

Keywords : Laser cleaning technology, Oxide layer, Roughness

前言

從 1953 年第一台 MASER(雷射的前身)以來，至今已將近 70 個年頭，其應用也從科研、雕刻、切割、焊接..等，迅速擴展至各領域。1969 年，S. M. Bedair 與 Harold P. Smith 首次提出以紅寶石脈衝雷射 (Ruby Laser)[1] 清潔的概念。1987 年，俄國 Yu. N. Petrov 發表氬離子雷射 (Argon Laser) 於半導體材料的表面微粒清潔之研究 [2]。1988 年，由 IBM 工司的德國研發部提出第一篇的雷射清潔專利 EP0297506A[3]，並於 1989 年於歐洲專利局公布。1995 年，成功於 2 kW 二氧化碳雷射於飛機機體，進行表層除漆應用。進入 21 世紀，美國更將雷射清潔技術分別應用在 F-16 戰機尾翼，海軍 H-53、H-56 直升機的螺旋槳葉..等重要軍用載具 [4]。隨者雷射產業成熟與價格的下降，奧迪汽

車 TT 系列採用 Adapt Laser 公司的 500 W 光纖雷射，移除表面氧化物與油汙層，其它如德國福斯汽車、空中巴士、英國 Rolls-Royce 均導入雷射清潔技術。

髒汙、氧化層與漆體移除需求存在於各行各業，因此如何有效地清潔、除漆成為一重要議題。前述議題可見於如輪胎製造用模具，生產過程產生的汙染沉積物；壓鑄製造用模仁，表面累積的鏽斑、雜質或殘料；金屬焊接面的油汙與氧化層；建築鋼材的塗裝前處理；甚至古蹟與文物表面汙染物..等。雷射清潔技術具有環保、高效率的優勢，透過乾式清潔方式將材料表層髒汙、鏽蝕物質移除，於一般大氣環境下，即可以雷射光束的高能特性，瞬間膨脹汽化，甚至產生衝擊波震碎表層汙染物，達到除汙之成效。

依據文獻資料，雷射清潔所採用的雷射從

準分子雷射 (波長 248 nm)、綠光雷射 (波長 532 nm)、Nd:YAG 雷射 / 光纖雷射 (波長 1064 nm)，甚至到二氧化碳雷射 (波長 10600 nm) 都曾被採用，但金屬材料清潔與除漆之應用，還是以波長 1064 nm 之雷射為主。從市場角度來看，矽晶圓、玻璃材料較偏向高科技產業，鋼、鋁材與複合金屬之需求則適用產業較廣泛，近紅外光波段 (如 Nd:YAG 雷射、光纖雷射) 與遠紅外波段 (二氧化碳雷射) 較能符合其需求，其中二氧化碳雷射因不適用光纖導光，大大降低操作便利性，因此雷射清潔技術目前皆以近紅外光波段的 Nd:YAG 雷射或光纖雷射為主流。目前市面雷射清潔所採用之平均雷射功率介於 12 W~1,000 W 之間，其中 100 W 以下多為短脈衝式雷射，100 W 以上則分別有長脈衝式或連續波式雷射產品。本文以下將針對雷射清潔方法與組成架構，以及應用材料與成效進行介紹。

清潔方法比較

雷射清潔方法因具備高效能與環保優勢，受到工業應用關注，如常見的鋼、鈦合金、鋁合金與鐵材等，產業涵蓋軍事、車用、海運、航空與核電與其周邊產業。舉例來說，輪胎業的模具污染來自硫化過程，橡膠、配合劑與脫模劑的混和物沈積，污染組成包含硫化物、無機氧化物、矽油、炭黑等，且污染物會在反覆生產過程引起模具輪紋的阻塞、變形，加上模具之紋路複雜多變，傳統清潔方式不易，也衍伸生產輪胎的品質不良與模具壽命縮減的困擾。壓鑄或射出產業，模仁於經常性的拆換與反覆生產的流程中，表面鏽斑或生產過程的累積殘料都直接影響品質，需定期清潔保持表面的平滑。建築產業的鋼鐵材，暴露於室外多變的環境中，表面局部鏽蝕、髒汙或遭人惡意塗鴉在所難免，其中局部鏽蝕與塗鴉可藉由選擇性清潔機制去除，髒汙部分則可經由雷射高溫汽化機制清潔。金屬焊接引起的表面色澤不均，源於過程中溫度變化，局部區域的氧化物生成，氧化物將影響焊件的抗腐蝕能力 [5] 文物

與古蹟建築體則因暴露於大環境中，表面受到各式污染與氧化威脅，導致外觀劣化、損壞或被污染物覆蓋原貌等問題，有鑑於歷史價值與珍貴性，清潔不適合破壞性方式，避免污染物與清潔過程中對文物造成無法回復之損傷 [6][7]。

1. 傳統清潔方法

表面髒汙、油垢、氧化銹蝕與殘料沾黏，通常還會與粉塵、其他顆粒混合，因此清潔被視為產業共同的重大議題。習知方式包括機械清潔法、化學清潔法與乾冰清潔法。

機械清潔法通常透過砂布或鋼絲等，以刮、擦、刷物理研磨手段，去除表面髒汙，屬於一種成熟的技術。此方法操作容易且靈活性高，但過程中的噪音嚴重且會破壞原材料表面粗糙度與工件精度，在許多產業有應用上的限制。以模具射出產業為例，機械清洗對模具會造成機械損傷，縮短模具壽命，且污染物於過程中容易堵塞模具的排氣孔或細緻凹縫，造成二次污染。通常清潔後，還需另外疏通排氣孔與細緻凹縫，導致多餘的勞動工作量。

化學清潔法有著使用便利，費用低廉優勢，一般採用酸洗液、鹼洗液與除銹液進行，清洗過程的時間與溫度控制均相當重要，控制不當時甚至會產生“氫脆”問題。而清潔油膜、微粒污染時，會用到含氟氯碳化合物，如三氯乙烯。長期使用會導致模具腐蝕，影響成產的外觀和品質；同時這些藥劑原料會引發環境荷爾蒙的危害，有毒化學物質不只造成短期毒害，更會影響生物的荷爾蒙系統，造成隱微卻深遠的危害。

乾冰清潔為業界普遍的除汙手法，以壓縮空氣將乾冰微粒以超過 150 m/s 高速噴出，對表層進行輕微的爆破，同時以 -79 °C 的低溫乾冰，冷凝汙染物質並形成脆裂、剝離，作為清潔的機制。此方式對大面積或外形平滑模具清潔有相當優勢，但對細微結構模具清或淺層鏽蝕，結構表面凹凸形貌與角度，會有清潔成效不彰的問題。乾冰清潔流程除了在細微結構模具會遭遇問題外，操作過程還需面臨前置作業時間、凍傷、環境二氧化

更完整的內容

詳見 ■ 機械工業雜誌 ■ · 431 期 · 108 年 2 月號

機械工業雜誌 · 每期 **220** 元 · 一年 12 期 **2200** 元

劃撥帳號：07188562 工業技術研究院機械所

匯款帳號：兆豐國際商業銀行新竹分行(代號 017)，帳號/ 203-07-02288-0

訂書專線：03-591-9339

傳 真：03-582-2011

機械工業雜誌 · 官方網站：www.automan.tw

機械工業雜誌 · 信箱：jmi@itri.org.tw