

預測雷射拋光後雷射粉床熔融零件的表面樣態：數值和實驗研究

Predicting the Surface Morphology of Laser Powder Bed Fusion Parts After Laser Polishing: Numerical and Experimental Study

范得福、陳章紅

Dac-Phuc Pham, Hong-Chuong Tran

雷射粉床式熔融 (laser powder bed fusion, LPRF) 過程可以利用雷射光束的熱能逐層熔化金屬粉末層的特定區域以製造具有複雜結構的零件。所構建零件的表面粗糙度是決定最終產品品質的主要因素，而雷射拋光採用雷射輻射熔化金屬的薄層，以獲得更好的表面品質。由於這項技術不需要額外的工具成本並在取代機械拋光方面展示了強大的潛力。若能準確預測應用雷射拋光後的表面結構將會為優化雷射拋光的加工條件奠定基礎。為解決這個問題在本研究中我們開發了一個綜合計算框架，用於預測經過雷射拋光後 LPBF 加工零件的表面形貌，包括表面生成模型、光線追蹤模型、熱傳遞模擬和低通濾波器。本研究發現表面粗糙度的關鍵預測值，包括平均粗糙度 (R_a) 和均方根值 (R_z) 與實驗結果的差異分別不超過 7.7% 和 9.8%。此外，相關長度是用於表示側向高度變化的參數，本研究也將模擬的相關長度 (cl) 與實驗結果進行比較，觀察到的模擬相關長度與實驗結果之間的最大誤差不超過 13.4%。

Laser Powder Bed Fusion (LPBF) process can produce parts with complex structures by using the thermal energy of laser beam to melt specific area of metal powder layers in a layer-by-layer manner. The surface roughness of the as-built parts is one of the major requirements to determine the quality of final products. Laser Polishing employed laser radiation to melt a thin layer of metal to achieve a better surface quality. Accordingly, this technology demonstrated its strong potential in replacing mechanical polishing because of no additional cost for tooling is required. Accurately predicting the surface topology after applying laser polishing will create a foundation for optimizing the processing conditions for Laser Polishing. For solving this issue, in this work, an integrated computational framework including surface generation model, ray-tracing model, heat transfer simulation low pass filter was developed to predict the surface morphology of LPBF processed part after applying laser polishing. It is observed that by using the proposed simulation model, the predicted and measured results of mean roughness (R_a), mean roughness depth (R_z) and correlation length (cl) are in good agreement with error less than 10%.

一、前言

雷射粉床式熔融 (LPBF) 過程利用高密度的雷射光束熔化金屬粉末的特定區域，形成具有特定厚度的固化層。然而當固化層降低一定距離，新的金屬粉末層將會以一定的厚度分佈，並透過控制雷射光束融合下一層。由於 LPBF 能夠在短時間內無需藉由工具和模具製造出複雜的 3D 零件，因此它被廣泛應用在工業界和學術界⁽¹⁾。

有許多加工參數皆會影響所製造零件的品質且與 LPBF 相關的物理現象非常複雜，由於 LPBF 過程的隨機性和眾多加工條件，可能會在過程中引發多種缺陷，如內部孔隙⁽²⁾、比傳統製造過程更高的表面粗糙度參數⁽³⁾。文獻中的作者報告了 LPBF 加工的不銹鋼 316L 零件的表面粗糙度 R_a 為 $16 \mu\text{m}$ ⁽⁴⁾。

因此，找到合適的加工條件以改善 LPBF 加工零件的表面紋理至關重要。例如，透過優化雷射功率、掃描速度和掃描間距，在文獻中的作者^(5,6) 觀察到 LPBF 加工零件表面粗糙度的顯著改善。然而 LPBF 加工零件的粗糙度仍無法滿足行業標準⁽⁷⁾，因此一些研究採用了雷射拋光策略來改善製造零件的表面品質，例如⁽⁸⁾ 的研究使用了相同的策略來提高 LPBF AISi10Mg 零件的密度和表面粗糙度。

在先前的文獻指出，應用雷射拋光改善 LPBF 加工零件的表面紋理具有重要性，然而這些研究通常是透過試誤法來找出最佳參數。很多研究會使用模擬工具預測應用雷射拋光後樣品的表面形態，但在這些研究中卻忽略了初始表面對雷射輻射吸收的影響。

在文獻探討章節中提供了許多關於雷射拋光過程中有關物理現象的見解，當雷射光束照射金屬表面時，部分雷射能量將被吸收而其餘部分則被散射回去⁽⁹⁾。而雷射光束的吸收是熱傳遞模擬模型的重要輸入參數，且吸收的能量也會受到初始表面的影響。然而這些物理現象在先前的研究中被忽略了。

為了解決上述問題，本研究致力於建立一個計算框架，考慮初始表面對雷射吸收的影響，以預測最終由雷射拋光產生的表面，所提出的模型簡要描述如下。首先，測量 LPBF 加工後的表面形態，從測量數據中提取平均粗糙度 (R_a)、平均粗糙深度 (R_z) 和相關長度 (cl) 等參數，再使用文獻⁽⁹⁾ 所提出的數學模型，基於上述測量結果模擬一維表面輪廓。接著採用雙向反射分佈函數 (BRDF) 數學模型計算雷射吸收係數，並將其轉換為熱傳遞模擬中用於計算雷射光束照射區域的平均熔化時間。最後利用平均熔化時間計算臨界衰減頻率。根據計算得到的 LPBF 加工表面輪廓進行 FFT 算法，將其轉換為頻域，並使用低通濾波器和臨界衰減頻率來過濾原始表面的初始頻譜，最後使用反向 FFT 重建雷射拋光表面的最終輪廓。透過將模擬的輪廓計算得到的 R_a 、 R_z 和 cl 與雷射拋光表面測量得到的數據進行比較，驗證了所提出的框架。

二、研究方法

圖 1 顯示了本研究提出的綜合計算框架中用於模擬雷射拋光引起的表面輪廓的主要步驟。

1. 雷射粉床熔融和雷射拋光

為了進行後續的 LP 處理，本研究在 LPBF 試驗中製備了樣品。在 LPBF 過程中，若選擇不合適的加工條件可能導致樣品頂部表面的粗糙度較差⁽¹⁰⁾。因此在實際操作中，透過實驗和模擬方法⁽¹¹⁾ 初步預測 LPBF 過程的最佳加工條件，並將其用於進行 LPBF 實驗中。透過使用⁽¹¹⁾ 中的方法，本研究中選擇 SUS 420 材料的最佳加工條件以研究零件位置對零件頂

部表面粗糙度的影響，如圖 2 所示的構建板上不同位置製備樣品。此試驗在氮氣濃度低於 2000 ppm 與一臺商用 Tong Tai LPBF 機器 (AMP-160) 的環境中進行。其樣品 (簡單的 3D 立方體) 採用 SUS420 金屬粉末製作而成，其粉末粒徑分佈為 20–60 μm 。每個樣品在每種情況下列印了 20 層，每層厚度為 30 μm 。主要的 LPBF 加工參數總結如表 1 所示。

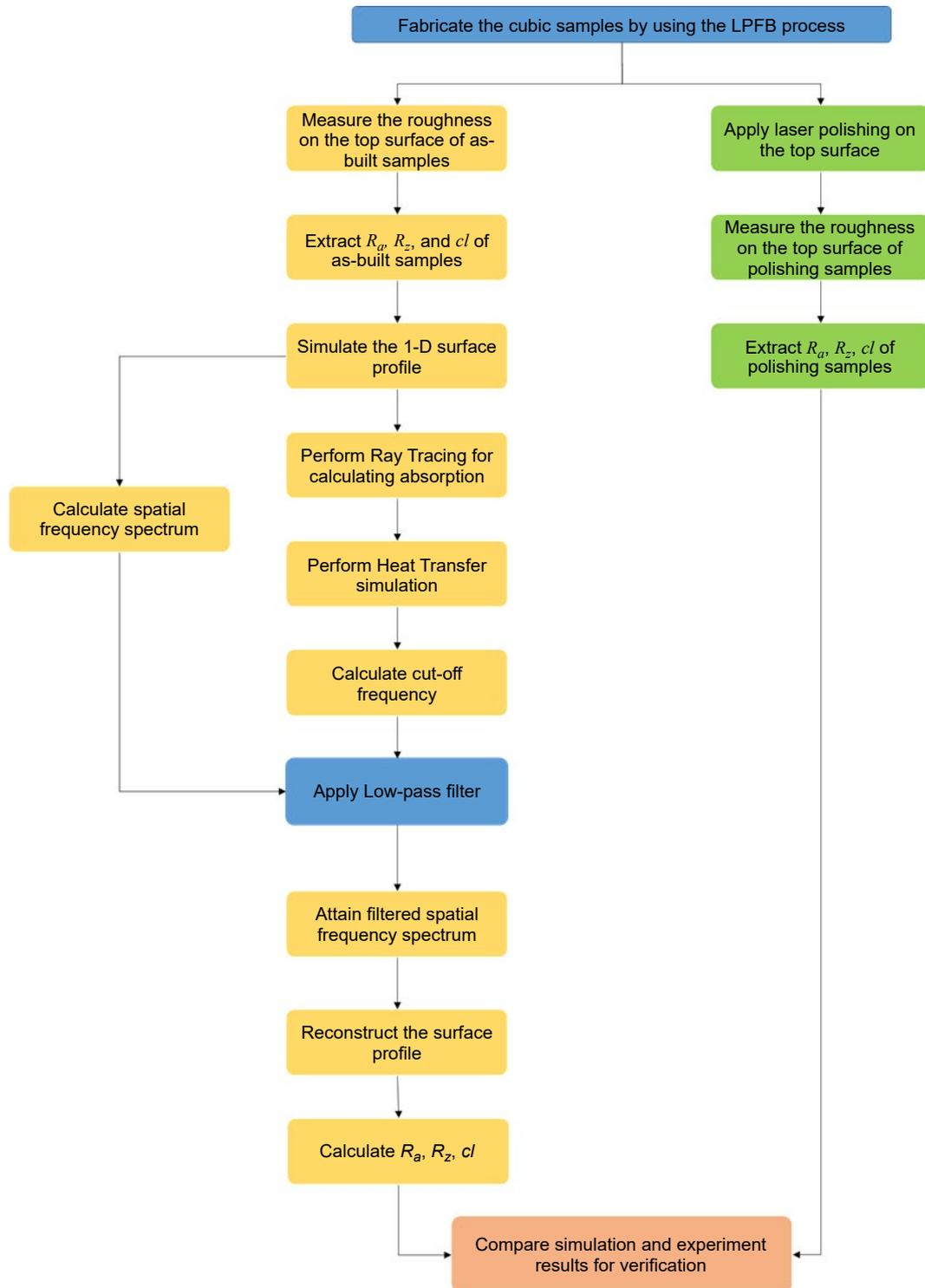


圖 1. 本研究提出的綜合計算框架中的主要步驟流程圖。

表 1. LPBF 過程的實驗參數。

參數	數值
雷射粉末	270 (W)
掃描速度	600 (mm/s)
掃描間距	140 (μm)
層厚	30 (μm)
相鄰層之間的旋轉角度	67°
雷射點尺寸	100 μm
雷射類型	Nd:Yag laser wavelength 1064 nm

在列印過程完成後，將樣品從試驗環境中取出並測量其頂部表面的粗糙度，再將樣品放回 LPBF 機器進行 LP 處理。為確保雷射光束的焦平面正確定位在樣品的頂部表面上，LP 過程中基板的 z 座標設定為 LPBF 過程結束時基板的最終位置。根據文獻⁽¹²⁾ 的實驗結果得知，當雷射照射金屬時，熔池的形成可以根據傳導熔化或穿孔熔化模式。在傳導熔化模式中，熱傳輸和流體流動是形成熔池的主要因素。相反地，在穿孔熔化模式中，反衝壓力將顯著影響熔池幾何形狀的形成。因此在 LP 實驗中設計調查模擬模型在預測傳導和穿孔模式下的表面粗糙度方面的能力，當固定試驗空間並在雷射功率和掃描速度中變動，使得得到的能量密度 (J/mm) 可以同時涵蓋傳導和穿孔模式。表 2 顯示了應用於每個樣品的雷射拋光條件。此外，本研究僅對每個零件的頂部表面的一半進行了拋光處理以進行比較 (參見圖 2 中右側的示意圖)。

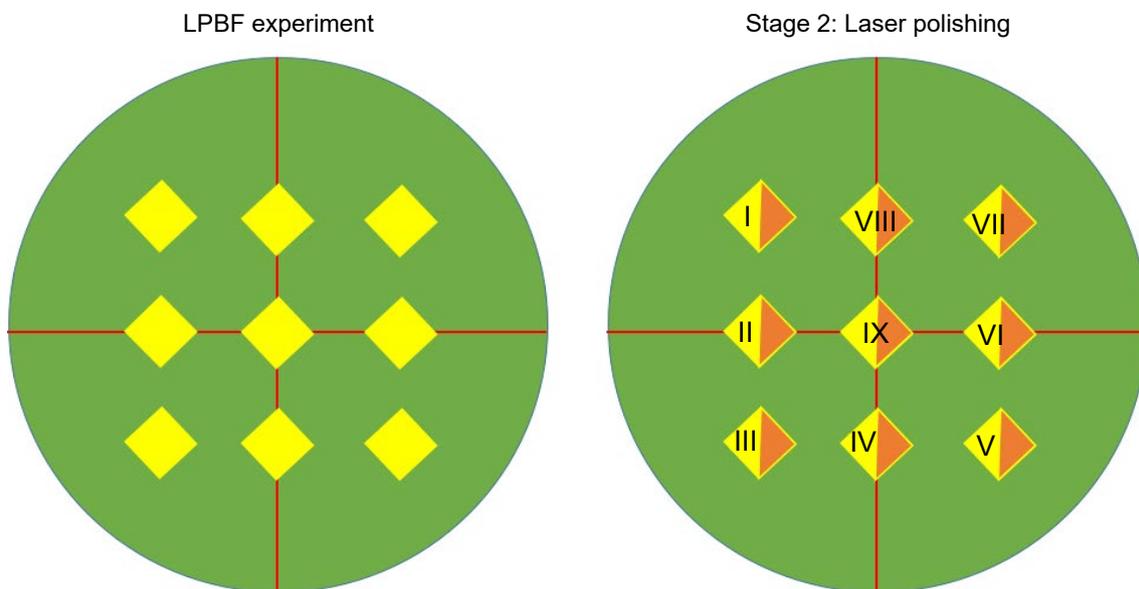


圖 2. LPBF 實驗和雷射拋光實驗的概念。

表 2. LP 過程的實驗參數。

案例	功率 (W)	掃描速度 (mm/s)	掃描間距 (μm)
I	200	1000	100
II	200	800	100
III	220	550	100
IV	220	800	100
V	240	500	100
VI	240	750	100
VII	170	1100	100
VIII	170	600	100
IX	170	1300	100

2. 表面粗糙度的測量

在完成 LPBF 和雷射拋光實驗後，使用 KEYENCE VK-X250 共焦雷射掃描顯微鏡對樣本頂部表面的表面形態進行了測量。圖 3(a) 顯示了典型的測量表面紋理，圖 3(b) 展示了相應的平均表面輪廓。根據文獻中指定的公式，獲得了代表表面型態的三個基本參數 R_a 、 R_z 和 cl 。

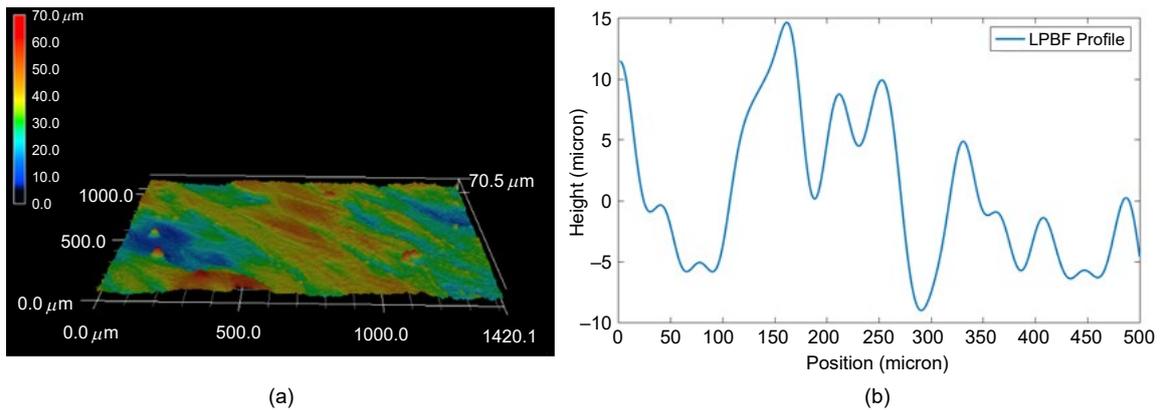


圖 3. (a) 測量的表面形貌；(b) 平均表面輪廓。

三、模型描述

1. 表面生成和光線追蹤模型

使用 Bergstrom 等人提出的數學模型⁽⁹⁾ 來為每個測得的 R_a 、 R_z 和 cl 模型構建一維表面輪廓。此數學模型指出，一般而言一維隨機粗糙度 $y = \zeta(x)$ 可以透過使用兩個分布函數來進行統計描述。第一個函數模擬了從平均參考值 ($\zeta(x) = 0$) 的高度波動，而後一個函數則控制了這些高度在橫向方向上的波動。高斯高度函數可以描述為：

$$p(\xi) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\xi^2/2\sigma^2} \quad (1)$$

其中， σ 是模擬表面的平均粗糙深度 (R_z)。
自相關函數也符合高斯分布，如下所示：

$$C(\tau) = \langle \xi(x_1)\xi(x_2) \rangle = \sigma^2 \exp\left(-\frac{|x_1 - x_2|^2}{\tau^2}\right) \quad (2)$$

其中， x_1 和 x_2 是位於表面上兩個不同點的坐標， τ 是相關長度。圖 4 顯示了從實驗中提取的建造表面的平均輪廓以及由當前模擬模型模擬的相應輪廓，圖中可以看出從實驗中測得的 R_a 、 R_z 和 cl 值分別為 4.9 ± 0.8 、 7.5 ± 1.2 、 24.16 ± 1.3 ，而從模擬輪廓中得到的 R_a 、 R_z 和 cl 值分別為 5.01、6.33、24.11。整體而言，可以看出模擬模型能夠模擬 LPBF 處理輪廓的一般特徵。

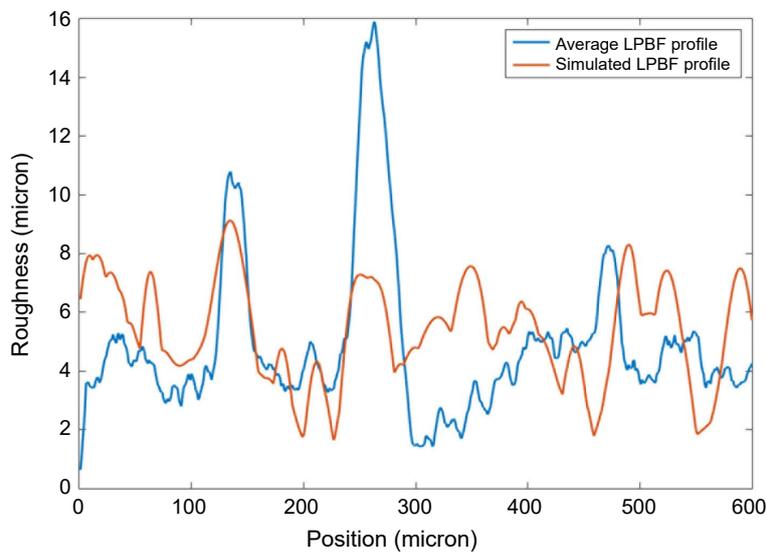


圖 4. 實驗中的平均輪廓和模擬的表面輪廓。

在雷射光束重新熔化過程中，雷射光束照射在固化金屬零件的表面，部分能量被金屬顆粒吸收，剩餘能量則被散射回來。Bergström 等人的研究表明⁽⁹⁾，吸收的雷射能量很大程度上取決於粉末層的表面粗糙度和金屬顆粒的光學特性。尤其在粗糙的表面上，雷射光束與表面形貌之間的相互作用程度大大增加，進而導致粉末層吸收的雷射能量增加。因此本模型採用雙向反射分佈函數 (bidirectional reflectance distribution function, BRDF) 算法來考慮表面形貌對雷射吸收的影響。BRDF 計算如下⁽⁹⁾：

$$\rho_{\lambda}''(\Omega_s, \Omega_i) = \frac{\pi}{c \cos(\theta_s)} \left(\frac{\frac{d\phi_s}{d\Omega_s}}{\frac{d\phi_i}{d\Omega_i}} \right) \quad (3)$$

其中， θ_s 是散射光的角度； ϕ_i 和 ϕ_s 分別是入射和散射輻射功率； Ω_i 和 Ω_s 分別是入射和散射的立體角。

將方程式 (3) 進行積分，可以得到以下定向半球反射率的表達式：

$$\rho_{\lambda}''(\Omega_i) = \frac{1}{\pi} \int_{2\pi} \rho_{\lambda}''(\Omega_s, \Omega_i) \cos(\theta_s) d\Omega_s \quad (4)$$

金屬表面的吸收函數可以表示為：

$$A_{\lambda}'(\Omega_i) = 1 - \rho_{\lambda}'(\Omega_i) \quad (5)$$

2. 熱傳導模型

將前一節計算得到的吸收率放至熱傳導模型中，用於計算雷射光束照射材料的熔化時間。

熱傳導模型的數學式表示如下⁽¹⁰⁾：

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = q(x, y, z, t) + \frac{\partial}{\partial x} \left(k_{xx} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_{yy} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_{zz} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (6)$$

其中， ρ 是材料密度 (kg/m^3)、 c 是比熱 (J/kgK)、 T 是溫度 (K)、 t 是熱源的作用時間 (s)、 k 是熱傳導率 ($\text{W/(m}\cdot\text{K)}$)，而 $q(x, y, z, t)$ 則是單位體積的熱發生率 (W/m^3)。根據實驗設定，初始條件為 293K。

應用在計算定義域頂部表面的雷射熱通量表示如下⁽¹³⁾：

$$q(x, y, t) = \frac{2AP}{\pi R_0^2} \exp \left[-\frac{2((x-vt)^2 + y^2)}{r_0^2} \right] \quad (7)$$

其中 A 是在第 3.2 節中所獲得的吸收係數， P 是雷射功率， r_0 是雷射半徑， v 是雷射光束的掃描速度，而 x 、 y 則是計算定義域頂部表面上的坐標。

本模擬模型也考慮了由對流冷卻和輻射冷卻引起的熱損失，表示為^(14, 15)

$$Q_{rad} = -\sigma \epsilon (T^4 - T_a^4) \quad (8)$$

$$Q_{conv} = -h_c (T - T_a) \quad (9)$$

其中， T 是工件的溫度， T_a 是環境溫度， σ 是史帝芬常數 ($5.669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$)， ϵ 是發射率 (固態為 0.4、熔融材料為 0.1)，而 h_c 是熱傳導係數 ($h_c = 100 \text{ W/m}^2\text{K}$)。圖 5 顯示了數值模型中的初始和邊界條件設定，以及雷射拋光過程中雷射光束的軌跡。

3. 使用低通濾波器模擬的拋光表面輪廓

當雷射光束照射在粗糙表面上時，雷射能量會被金屬表面吸收 (參見第 3.2 節)。當吸收的能量足以熔化粗糙的金屬表面，熔融金屬將引起表面張力，這也是導致初始表面輪廓平滑效果的主要因素之一。換句話說，可以透過假設初始粗糙表面的最高頻率衰減來模擬拋光表

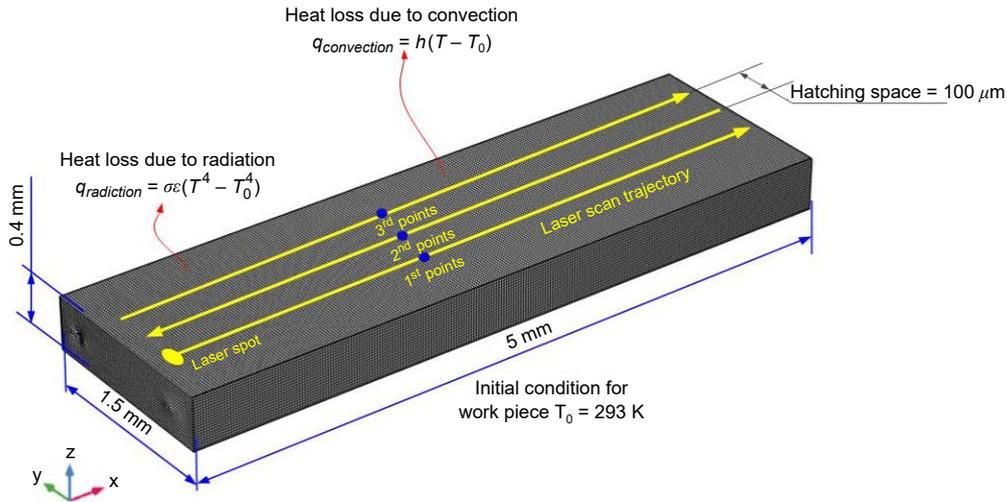


圖 5. 目前模擬模型的初始和邊界條件概念圖。

面⁽¹⁶⁾。可以根據文獻提出的方式，可以把衰減原始表面較高頻率表示為⁽¹⁶⁾。

$$f_{cr} = \left(\frac{\rho}{8\pi^2 \mu t_m} \right)^{1/2} \quad (10)$$

其中， $f_{cr}(1/mm)$ 代表臨界頻率， $\mu (Ns/m^2)$ 為動態黏度， $\rho (kg/m^3)$ 為密度，而 $t_m (s)$ 代表平均熔化時間。需要注意的是，平均熔化時間是透過對位於圖 5 中雷射光束中心的節點上的所有熔化時間進行平均計算得到的。

四、結果與討論

對於 LPBF 加工所產生的每個表面形貌情況 (見第 3.1 節)，驗證過的表面生成模型被用來重構表面形貌。接著模擬的輪廓被導入光線追蹤模型計算雷射光束的吸收率。對應不同表面粗糙度情況的計算吸收值輸入到第 3.2 節描述的驗證過的熱傳導模型中計算熔化時間。圖 6 顯示了圖 5 中所示的 3 個點的歷史溫度。對於圖 5 所示的雷射掃描軌跡中心的每個節點計算了對應的熔化時間，並將平均熔化持續時間取平均值，再使用公式 (10) 確定模擬雷射拋光輪廓的截止頻率。

為了展示建立的模型在預測雷射拋光後樣品表面形貌的能力，我們在案例 VIII 中比較了平均拋光剖面 and 模擬拋光剖面，結果如圖 7 所示。從結果可以看出建立的類比模型能夠捕捉到實驗得到的拋光表面結構。特別是，實驗中鐳射拋光剖面的 R_a 、 R_z 和 cl 分別為 4.01 微米、4.94 μm 和 9.2 μm ，而模擬剖面得到的結果為 $R_a = 4.14 \mu m$ ， $R_z = 5.17 \mu m$ ， $cl = 9.82 \mu m$ 。

為了進一步驗證模擬模型在預測雷射拋光後金屬表面拓撲的能力，我們提取了拋光表面的 R_a 、 R_z 和 cl 參數，並將其與在不同加工條件下的模擬模型預測結果進行比較，如表 2 所示，比較結果顯示在圖 8(a)、(b)、(c) 中。觀察雷射拋光後表面參數的實驗和模擬結果，可

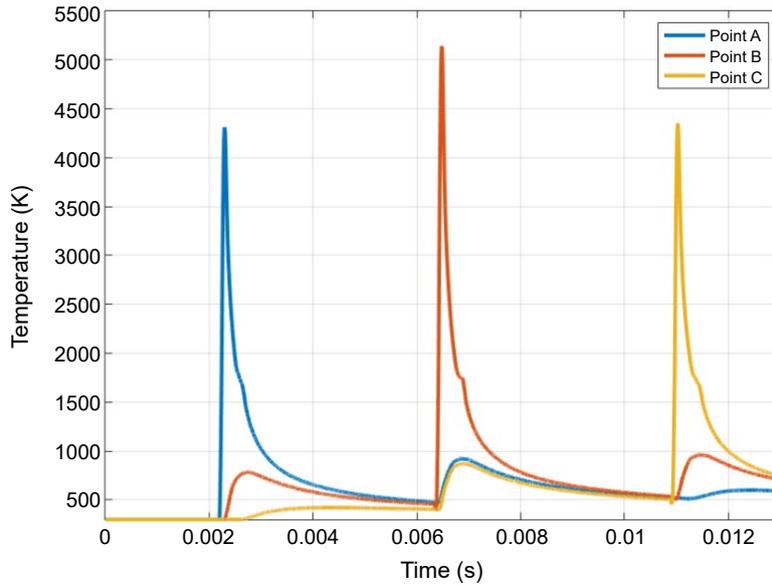


圖 6. 圖 5 中所示的三個點的溫度曲線。

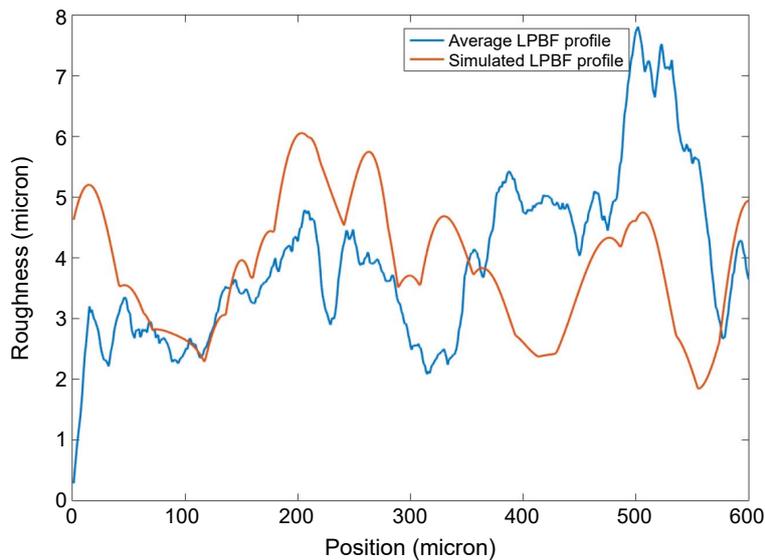


圖 7. 雷射拋光的平均測量剖面與模擬剖面比較。

以看出在能量密度從 $0.13-0.3 \text{ J/mm}$ 變化的情況下，模擬的 R_a 、 R_z 和 cl 結果與實驗結果非常吻合，特別是模擬結果與實驗結果之間的誤差為： R_a 小於 5.5%、 R_z 小於 6.7%、 cl 小於 15%。然而在能量密度為 0.28 J/mm 的案例 VIII 中，模擬結果略高於實驗結果。

五、結論

本研究提出了一個計算框架，包括表面生成演算法、光線追蹤模擬、熱傳導和空間頻率濾波演算法，用於預測雷射拋光後 LPBF 加工表面的拓撲。本研究的主要貢獻可以總結如下：

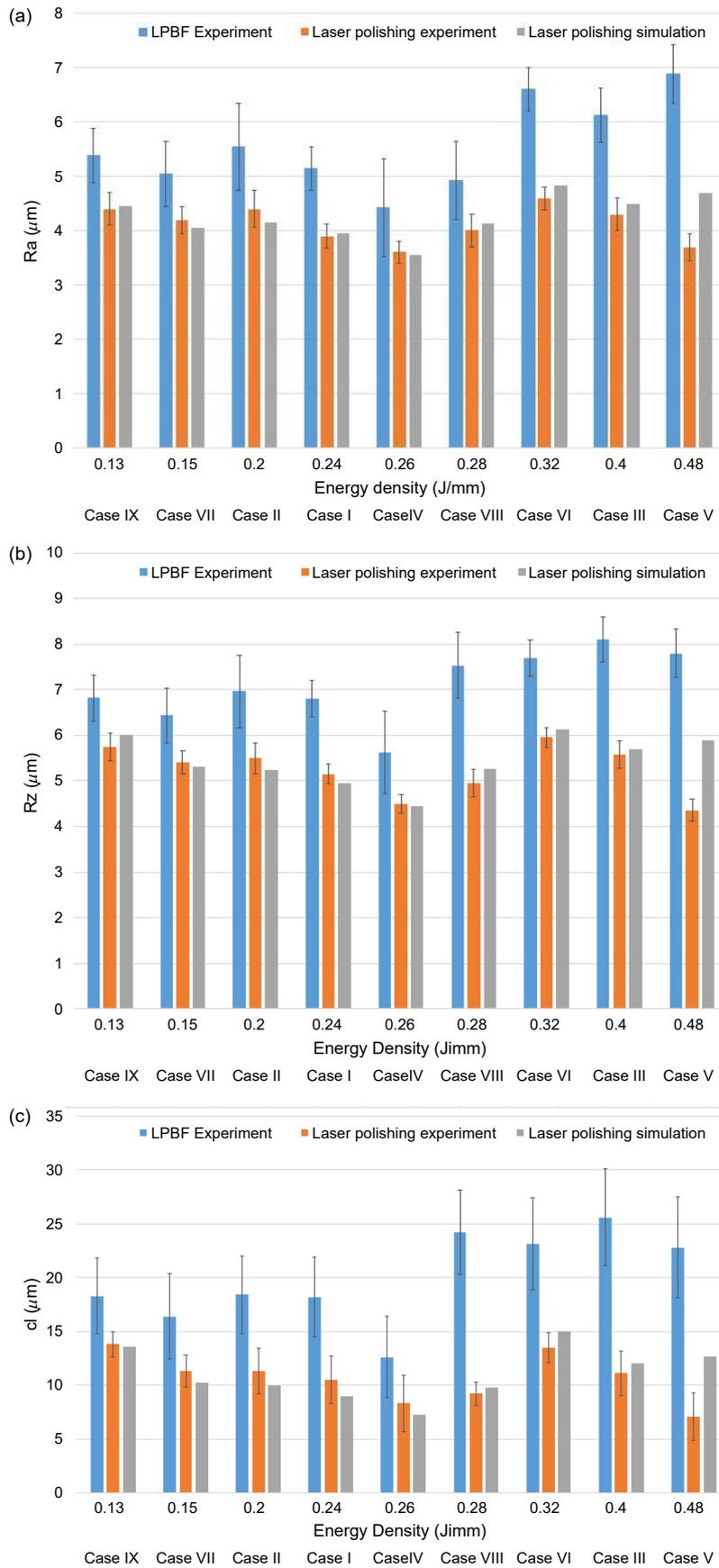


圖 8. LPBF 加工樣品、雷射拋光樣品和模擬雷射拋光樣品的表面參數。

- 表面粗糙度模型可以模擬具有與 LPBF 加工過程相同的 R_a 、 R_z 和 cl 參數的表面。
- 光線追蹤演算法可用於計算與不同表面拓撲相對應的吸收率。研究發現，粗糙的表面能夠吸收更多的雷射能量。此外，計算得到的吸收率對預測的表面形貌具有顯著影響。
- 集成以上兩個模型與熱傳導模型和空間頻率濾波演算法，可以用於模擬雷射拋光後的表面拓撲。

總體而言，建立的模型為預測雷射拋光後 LPBF 加工表面的形貌提供了有效的工具。在未來的研究中將開發一個更複雜的模擬模型，考慮使用蒸汽反衝壓力與熔融金屬的氣液介面之間的隨機相互作用效應，以全面模擬該區域的表面輪廓形成。

誌謝

本研究受到國家科學及技術委員會 NSTC 110-2222-E-218-002-MY2 的經費資助。

參考文獻

1. Lan Chen, Brodan Richter, Xinzhou Zhang, Xudong Ren, Frank E. Pfefferkorn, *Additive Manufacturing*, **32**, 101013 (2020).
2. Zackary Snow, Abdalla R. Nassar, Edward W. Reutzel, *Additive Manufacturing*, **36**, 101457 (2020).
3. Evren Yasa and Jean-Pierre Kruth, *Advances in Production engineering and Management*, **6**, 259 (2011).
4. Wakshum M. Tucho, Vidar H. Lysne, Håkon Austbo, Atle Sjolyst-Kverneland, Vidar Hansen, *Journal of Alloys and Compounds*, **740**, 910 (2018).
5. Jacob C. Snyder, Karen A. Thole, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, **142**, 071003, (2020).
6. Longchao Cao, Jingchang Li, Jiexiang Hu, Huaping Liu, Yuda Wu, Qi Zhou, *Optimization of s Laser Technology*, **142**, 107246 (2021).
7. T. Deng, J. Li, and Z. Zheng, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **148**, 103472 (2020).
8. W. Yu, S. L. Sing, C. K. Chua, and X. Tian, *Journal of Alloys and Compounds*, **792**, 574 (2019).
9. D. Bergström, J. Powell, and A. Kaplan, *Journal of applied physics*, **101**, 113504 (2007).
10. B. Richter, N. Blanke, C. Werner, F. Vollertsen, and F. Pfefferkorn, *Jom*, **71**, 912 (2019).
11. H.-C. Tran and Y.-L. Lo, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **105**, 4443 (2019).
12. D. Hann, J. Iammi, and J. Folkes, *Journal of Physics D: Applied Physics*, **44**, 445401 (2011).
13. H.-C. Tran and Y.-L. Lo, *Journal of Materials Processing Technology*, **255**, 411 (2018).
14. H. Wang, Y. Kawahito, R. Yoshida, Y. Nakashima, and K. Shiokawa, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **118**, 562 (2018).
15. C. Multiphysics and C. Module, *Version: COMSOL Multiphysics*, **3**, (2014).
16. E. Ukar, A. Lamikiz, S. Martínez, I. Tabernero, L.N. López de Lacalle, *Journal of Materials Processing Technology*, **212**, 1305 (2012).

作者簡介

范得福現為南臺科技大學機械工程學系博士生。

Dac-Phuc Pham is currently a Ph.D. student in the Department of Mechanical Engineering at Southern Taiwan University of Science and Technology.

陳章紅為臺南成功大學機械工程學系獲得博士學位，現為南臺科技大學機械工程系助理教授。

Hong-Chuong Tran received his Ph.D. in the Department of Mechanical Engineering from National Cheng Kung University. He is currently an Assistant Professor in the Department of Mechanical Engineering at Southern Taiwan University of Science and Technology.