



計畫執行人：徐有璿

指導教授：劉禹辰

摘要

本計畫旨在開發兼具低成本製造與仿生設計之金屬表面纖構技術，以提升零組件摩擦性能與能源效率。全球約 23% 能源消耗與摩擦、磨耗損失相關，微米尺度仿生紋理可藉由儲油與微動壓效應降低摩擦與磨耗。然而，現有雷射纖構技術成本高、加工效率受限，不利大量生產。本研究提出以微粒子轟擊 (MPB) 結合遮罩技術，建立可擴展之低成本仿生多尺度表面製程，並導入機器學習與最佳化演算法，建構「製程參數—表面形貌—摩擦性能」資料驅動模型，進行紋理最佳化與性能預測，形成實驗驗證之閉環設計流程。本計畫整合低成本製程、仿生紋理，使高性能摩擦控制具量產潛力，預期提升金屬零件耐磨性與能源效率，並建立適用於台灣精密機械產業之功能性表面工程技術平台。

前言

本實驗室深耕遮罩式微粒子轟擊技術(SA-MPB)，透過圖案化遮罩控制微粒子作用區域，可在材料表面同步製造功能紋理與強化表層。

相較於雷射表面紋理加工(LST)，SA-MPB 具備低成本、易導入、幾何適應性高等優勢，可拓展至模具、齒輪、軸承等複雜構件表面，加工後更可兼具降低摩擦、提升表面硬度與導入殘留壓應力之效果，提升耐磨耗與疲勞可靠度。

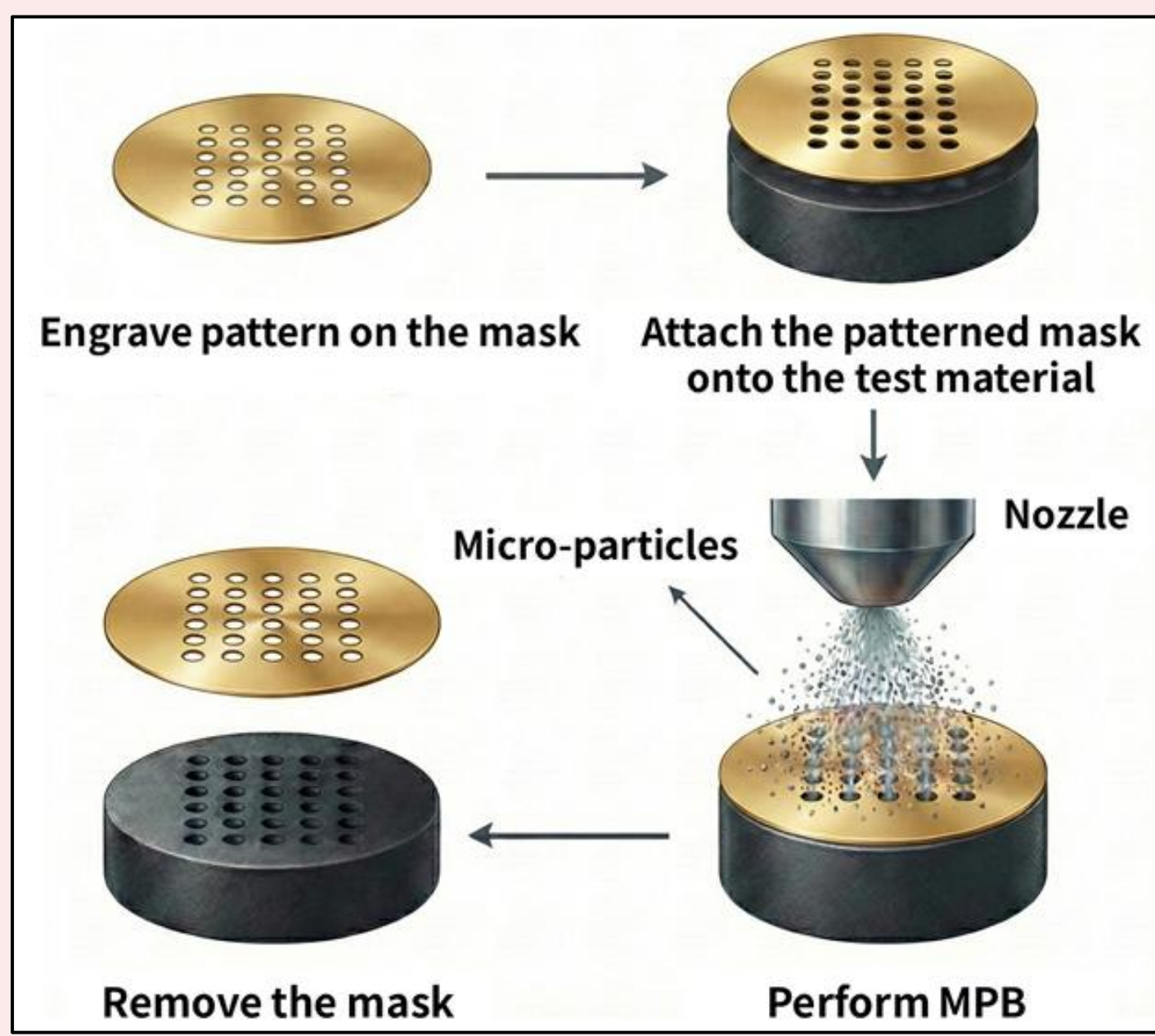
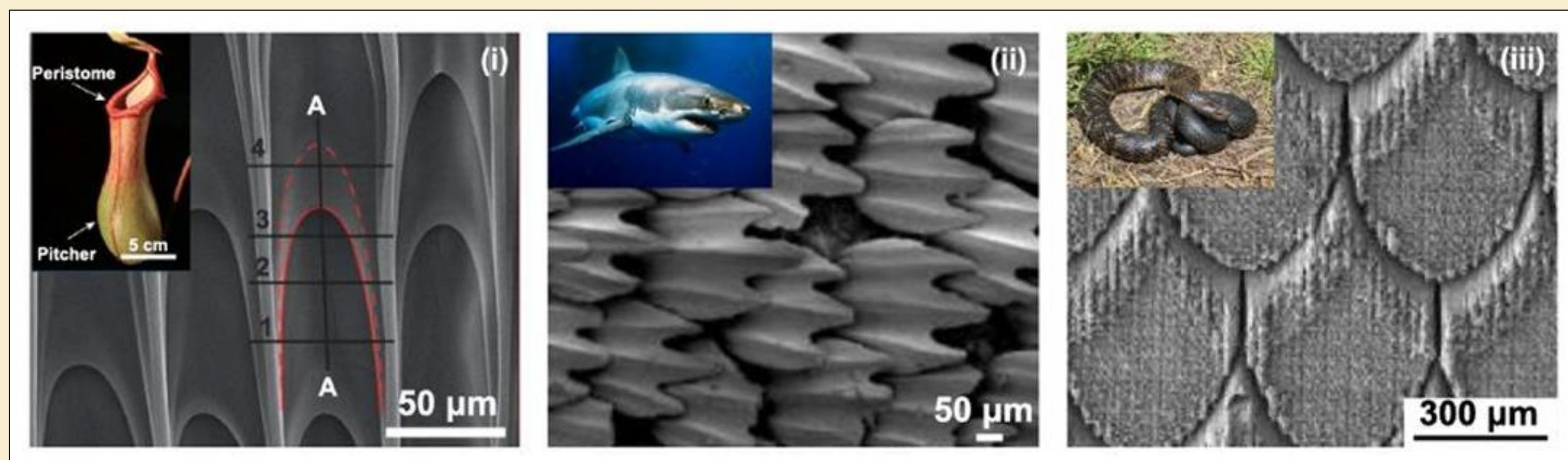


Fig.1 SA-MPB流程圖

實驗設計

Fig.2 仿生表面纖構參照對象 [2]
(i) 豬籠草表皮 (ii) 鯊魚皮 (iii) 蛇皮Table.1 L9(3⁴)直交表之因子與水準

因子	水準		
	1	2	3
時間(Sec)	10	15	20
壓力(MPa)	0.2	0.35	0.5
角度	30°	60°	90°
距離(mm)	50	75	100

Table.2 L9(3⁴)直交表

編號	時間(A)	壓力(B)	角度(C)	距離(D)	表面粗糙度(Ra μm)
1	1	1	1	1	0.16
2	1	2	2	2	0.27
3	1	3	3	3	0.26
4	2	1	2	3	0.20
5	2	2	3	1	0.26
6	2	3	1	2	0.29
7	3	1	3	2	0.19
8	3	2	1	3	0.23
9	3	3	2	1	0.47

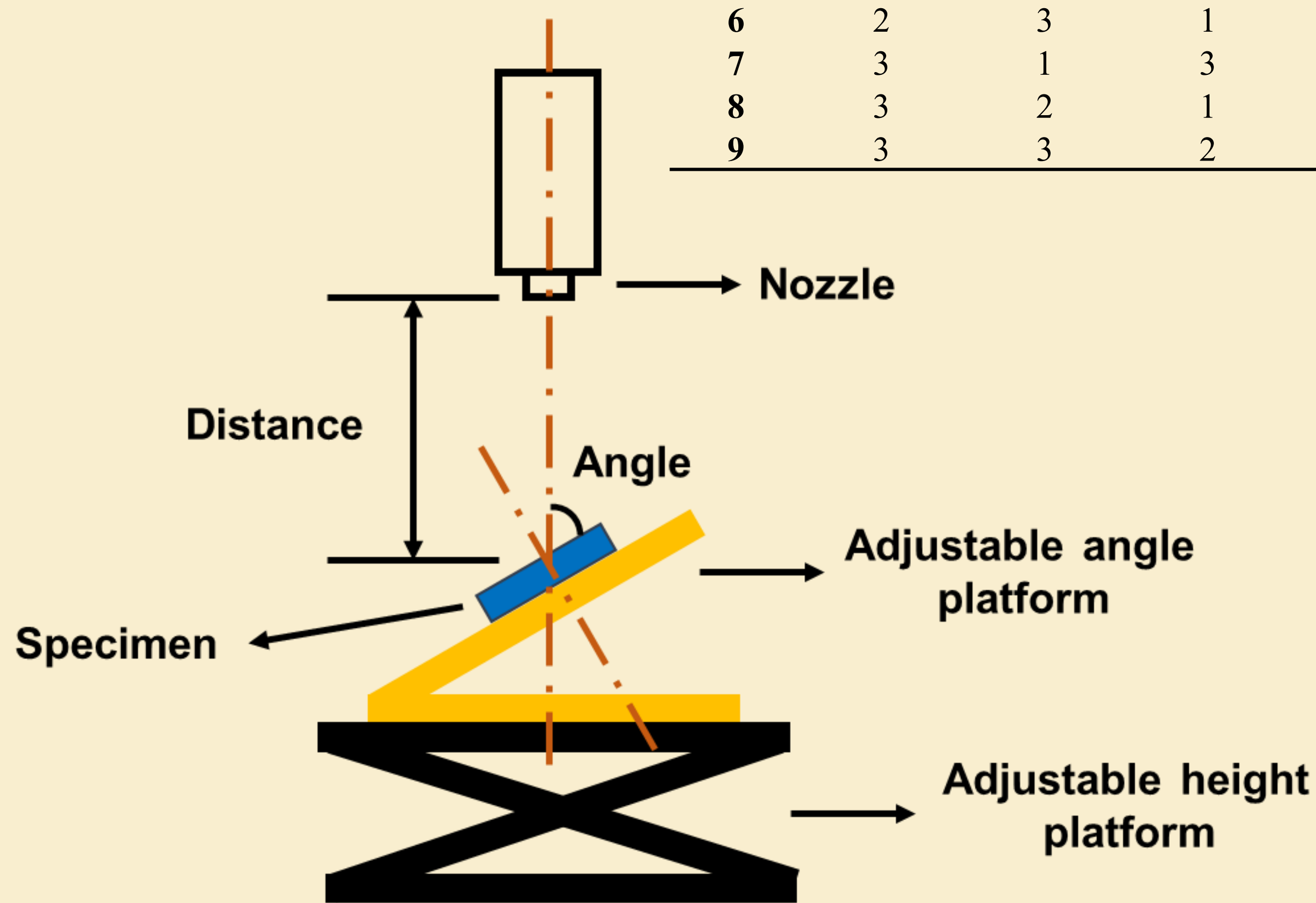


Fig.3 微粒子轟擊實驗示意圖

實驗結果

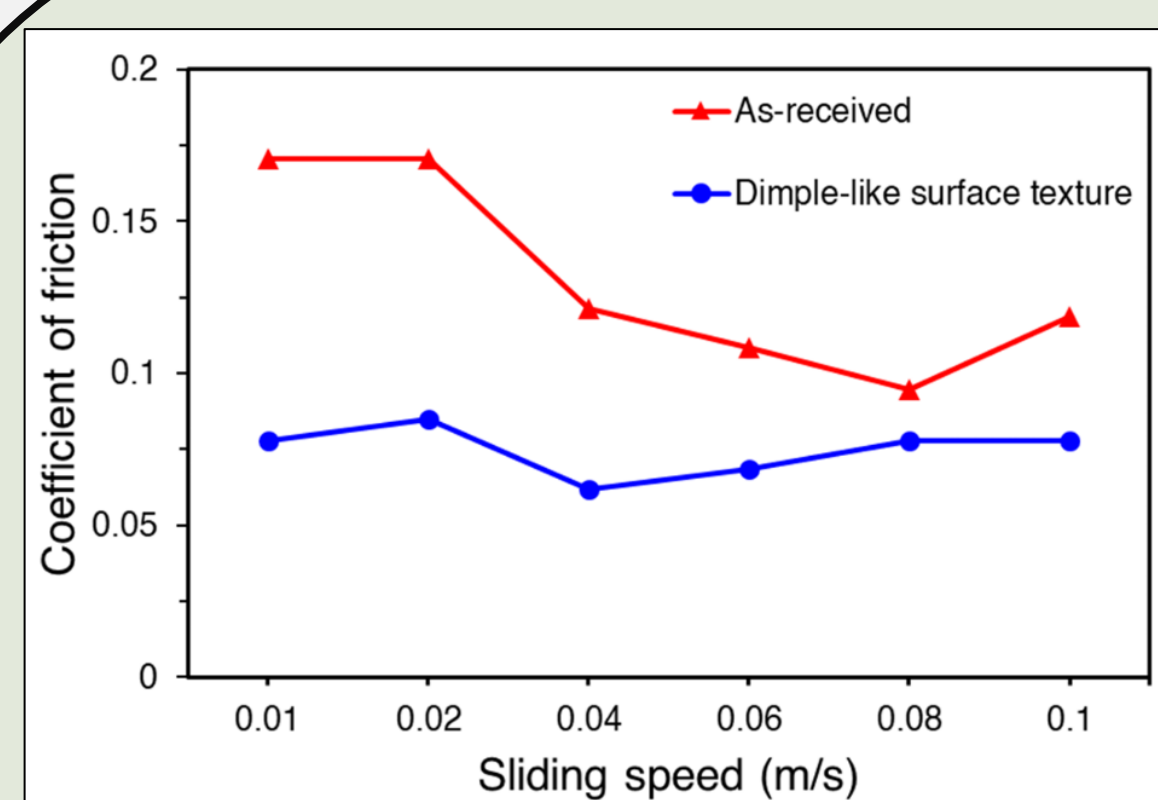


Fig.4 SA-MPB對比LST之摩擦係數比較

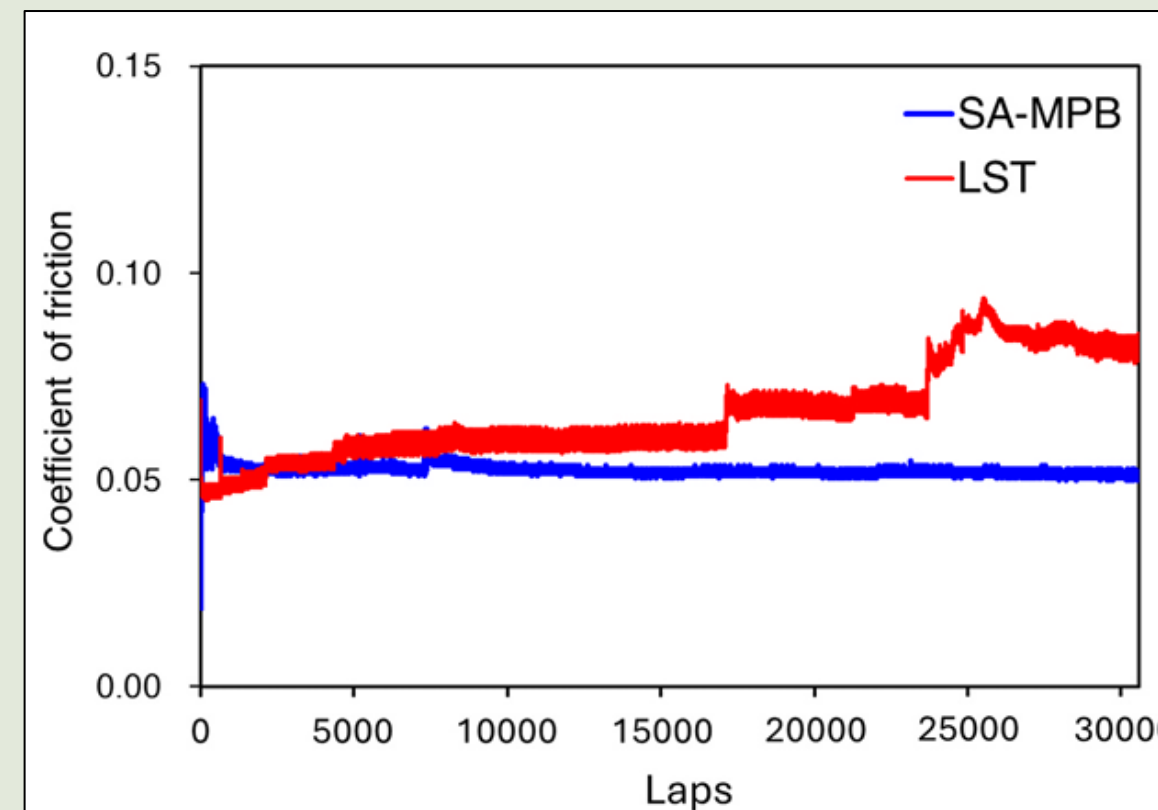


Fig.5 SA-MPB對比LST之耐磨耗度比較

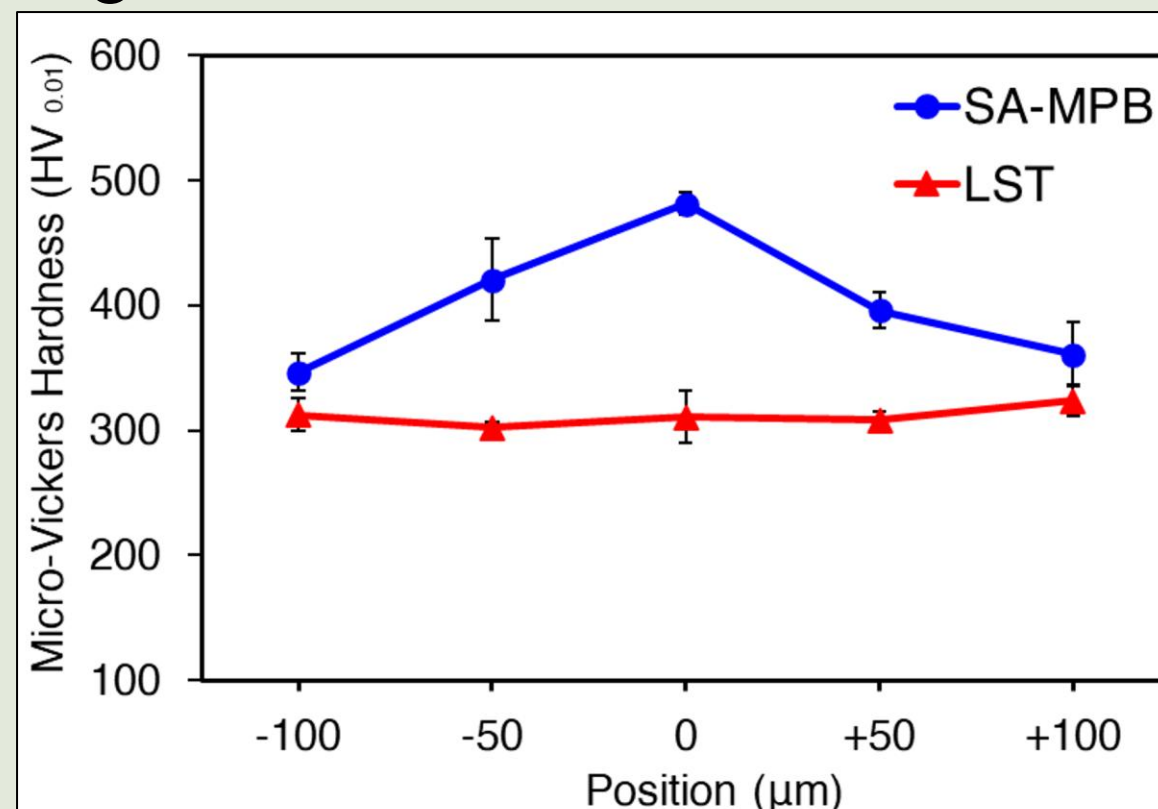


Fig.6 SA-MPB對比LST之表面硬度比較

SA-MPB 微凹坑紋理可有效降低摩擦係數，於 0.01 m/s 下最高降低約 54%，展現良好的減摩效果。

SA-MPB 經 30,000 圈磨耗後仍維持約 0.05 的穩定摩擦係數，顯示其長期耐磨穩定性優於 LST。

SA-MPB 可使表面硬度最高提升約 39%，而 LST 無明顯強化效果，證實 SA-MPB 可兼具紋理製造與表面強化。

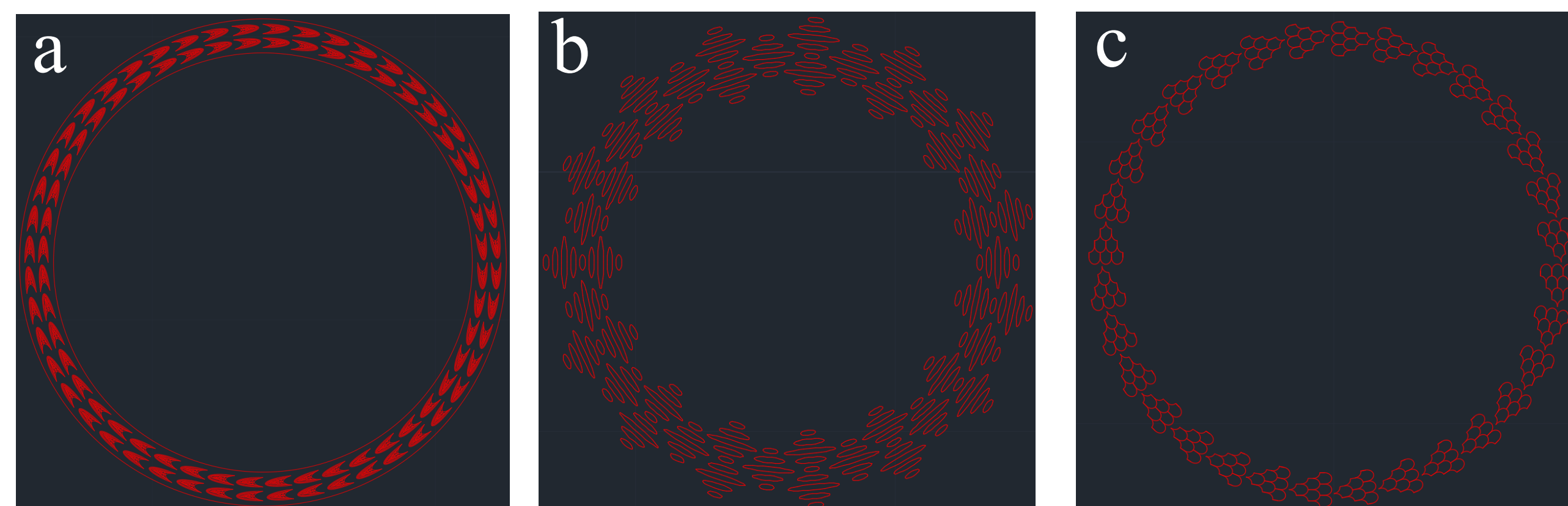


Fig.7 仿生紋路設計圖 (a) 豬籠草皮 (b) 鯊魚皮 (c) 蛇皮

After SA-MPB

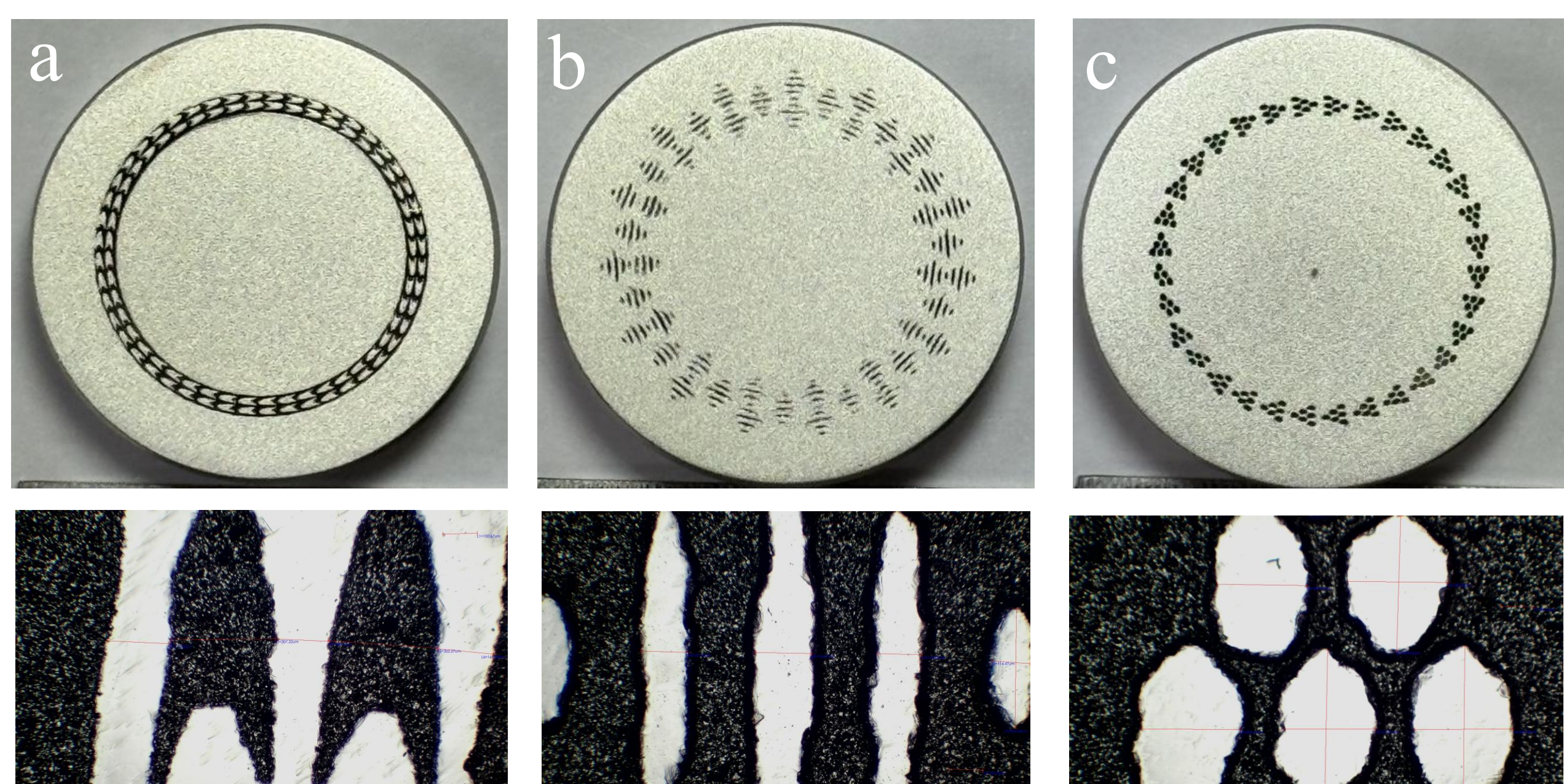


Fig.8 表面仿生纖構實驗試片與表面狀態

結論

- 相較於雷射表面紋理技術 (LST)，SA-MPB 具更佳的耐磨耗與長期摩擦穩定性，並可同步提升表面硬度，展現「紋理製造+表面強化」之優勢。
- 透過遮罩圖樣設計與 SA-MPB 製程，可成功將不同仿生幾何紋路轉印至金屬表面，驗證本技術具備製作複雜仿生表面紋理之可行性。
- 本研究證實 SA-MPB 兼具低成本、製程彈性與功能性紋理製造能力，具應用於機械零組件表面工程之潛力。

參考文獻

- [1] Chen W-Y, Liu Y-C. Feasibility study of a surface texturing technique based on selective-area micro-particle bombardment. Tribology Int. 2026;221:111996.
- [2] Xiao, Q., et al., Beyond smoothness: the art of surface texturing battling against friction. International Journal of Extreme Manufacturing, 2024. 7(2).