

射出成型用 SK300 與 SK500 雙合金料管之結構組織與硬度性質檢測分析

*陳冠仁、陳則霖

南臺科技大學機械工程系

*kjchen@stust.edu.tw

摘要

本研究針對離心鑄造製得 SK300 及 SK500 雙合金料管之結構特性進行量測。SK300 雙合金料管主要用於 180~200 °C 之尼龍玻纖射出成型，其料管內壁耐磨層採用鎳基合金添加 15 wt.% 鉻金屬之設計；若因應較高溫（350~400 °C）塑料射出成型的需求，則選用鎳基合金添加 10 wt.% 鉻金屬及 15 wt.% 碳化鎢顆粒作為 SK500 雙合金料管內壁耐磨層之組成設計。鎳基合金耐磨層基地以富鎳之 γ -Ni 枝晶組織為主，並含有 Cr_7C_3 、 Ni_3Si 等化合物散佈在基地中。對比 SK300 雙合金料管，SK500 雙合金料管內側批覆層含有碳化鎢顆粒，造成耐磨層硬度提升，亦細化耐磨層組織晶粒尺寸，從而使 SK500 雙合金料管具較佳之磨耗阻抗。SK500 雙合金料管內壁塗層組織之平均硬度略高於 SK300 雙合金料管，基於碳化鎢顆粒的散佈，使得耐磨層硬度值變動性大。值得一提，SK500 雙合金料管內壁塗層聚集較多數量之碳化鎢顆粒，此現象對於批覆塗層之磨耗阻抗有相當大的助益。簡而言之，SK500 雙合金料管對高溫塑料射出成型有相當的應用潛力。

關鍵詞：離心鑄造、雙合金料管、耐磨層、鎳基合金、碳化鎢、磨耗阻抗

Measurements on Microstructures and Hardness Properties of SK300 and SK500 Bimetallic Tubes for Injection Molds

Kuan-Jen Chen, Ze-Lin Chen

Department of Mechanical Engineering, Southern Taiwan University of Science and Technology

Abstract

This study examines the structural properties of SK300 and SK500 bimetallic tubes fabricated by the centrifugal casting. The SK300 bimetallic tube is used for injection molding of glass fiber-filled nylon at 180–200 °C, and its wear-resistant layer on the inside of the tube is designed and composed of a nickel (Ni)-based alloy reinforced with 15 wt.% chromium (Cr). For higher-temperature (350–400 °C) plastic injection molding, a Ni-based alloy reinforced with 10 wt.% Cr and 15 wt.% tungsten carbide (WC) is used to the inside wear-resistant layer for the SK500 bimetallic tube. The microstructures of Ni-based alloy wear-resistant layer is mainly composed of Ni-rich γ -Ni dendrite structure, with Cr_7C_3 , Ni_3Si compounds distributed in the matrix. Unlike the SK300 bimetallic tube, the inner coating layer of the SK500 bimetallic tube contains WC particles, which enhance the hardness of the wear-resistant layer and refine the grain size. Consequently, the SK500 bimetallic tube shows a better wear resistance. The average hardness of the inner coating layer for the SK500 bimetallic tube is slightly higher than that for the SK300 bimetallic tube. The hardness value of the wear-resistant layer for the SK500 bimetallic tube, however, shows a great deal of variability due to the presence of the WC particles. It should be noted that a larger number of WC particles accumulate near the surface of the coating layer in the SK500 bimetallic

Received: May 21, 2024; first revised: Jul. 18, 2024; second revised: Aug. 1, 2024; accepted: Aug. 2024.

Corresponding author: K.J. Chen, Department of Mechanical Engineering, Southern Taiwan University of Science and Technology, Tainan 710301, Taiwan.

tube, contributing significantly to its wear resistance. In summary, the SK500 bimetallic tube displays great potential for application in high-temperature plastic injection molding.

Keywords: Centrifugal casting, Bimetallic tube, Wear-resistant layer, Ni-based alloy, Tungsten Carbide

壹、前言

工程塑膠被廣泛應用於電子電氣、汽車、建築、機械、航空等產業，為賦予工程塑膠更優異的應用性，會在其中添加相當比例的玻璃纖維（glass fiber, GF）、碳纖維（carbon fiber, CF）或防火添加劑[1-3]。玻璃纖維或碳纖維為強化聚合物內最常使用的強化纖維，在尼龍添加裡添加強化纖維不但可展現良好的機械、化學與介電特性，亦可增進熱尺寸穩定性[4-5]。然而滑動摩擦的應用而言，這些強化纖維會明顯延遲摩擦效果，加速塑料射出螺桿套筒的磨耗及腐蝕[6]，導致增加更換料管頻率，並降低整體產能。為提升螺桿套筒的使用壽命，在碳鋼或低合金鋼管內壁塗覆一層鎳基、鈷基合金層的雙合金料管越趨普及，從而提高料管的磨耗阻抗[7-8]。

螺桿套筒內側塗層之披覆技術主要有熱均壓法、離心鑄造法以及感應加熱法等[9-11]，其中離心鑄造法具成本優勢，因此被廣泛應用於雙合金料管之製作[11-12]。因應塑膠產品的需求及射出溫度，不同組成設計之離心鑄造披覆塗層（鎳基合金+15 wt.% Cr、鎳基合金+10 wt.% Cr+15 wt.% WC）用於 SK300 與 SK500 雙合金料管之製作，本研究係建立 SK300 與 SK500 雙合金料管之結構特性，觀察合金料管基地、披覆層及其接合界面之顯微組織，解析雙合金料管之化學組成，系統性調查合金料管至耐磨層硬度變化數據，從而作為塑料射出成型在雙合金料管之應用依據。

貳、實驗步驟

一、材料備製

本研究主要針對離心鑄法製作（澆鑄溫度：1000~1050 °C）之射出成型用雙合金料管（SK300 與 SK500）之組織結構差異性進行探討，解析不同組成之合金耐磨層，調查微觀組織及機械性質等能力。SK300 合金料管素材之外徑與內孔徑分別為 98 mm 及 28mm；而 SK500 合金料管素材之外徑與內孔徑分別為 84 mm 及 18mm（圖 1），合金料管化學組成透過輝光放電分光儀（glow discharge atomic emission spectroscopy, GDS）進行分析，其化學組成如表 1 所示。SK300 料管素材用於射出尼龍（polyamide, PA）添加玻璃纖維或碳纖維之塑料，其料管內側的耐磨層採用鎳基合金添加 15 wt.% 鉻（Cr）；而 SK500 料管素材使用在更嚴苛的塑料（高性能塑料）射出條件，其耐磨層組成採用鎳基合金添加 10 wt.% Cr 與 15 wt.% 碳化鎢（WC）（表 2）。

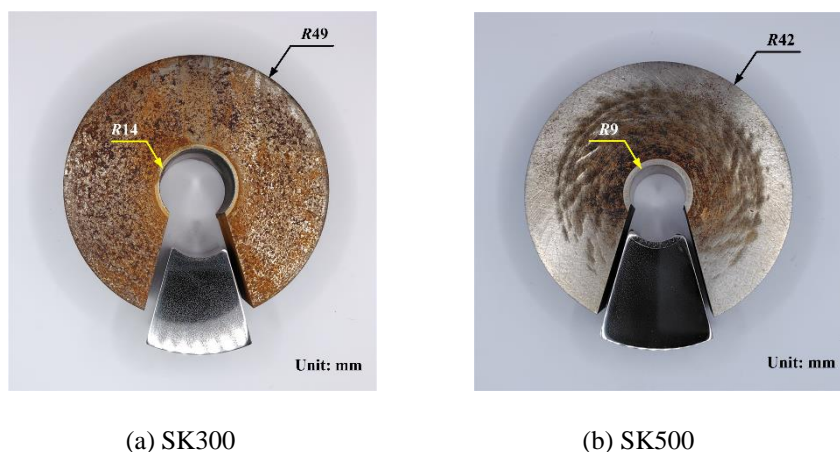


圖 1 雙合金螺管套筒

表 1 SK300 與 SK500 雙合金料管素材組成 (wt.%)

	Al	C	Cr	Co	Fe	Mn	Mo	Ni	P	Si	S	V
SK300	0.036	0.411	0.409	0.265	96.5	1.61	0.315	0.02	0.015	0.281	0.019	0.236
SK500	0.029	0.428	0.459	0.261	96.4	1.58	0.310	--	0.025	0.311	0.022	0.246

表 2 SK300 與 SK500 合金料管應用範圍

	SK300	SK500
料管溫度 (°C)	180~200	350~400
射出塑料種類	尼龍玻纖(PA+GF) 尼龍碳纖 PA+CF	高溫尼龍、PA6T、PA9T、 PA+GF+防火材
雙合金耐磨層組成 (wt.%)	鎳基合金+15Cr	鎳基合金+10Cr+15WC

二、分析方法

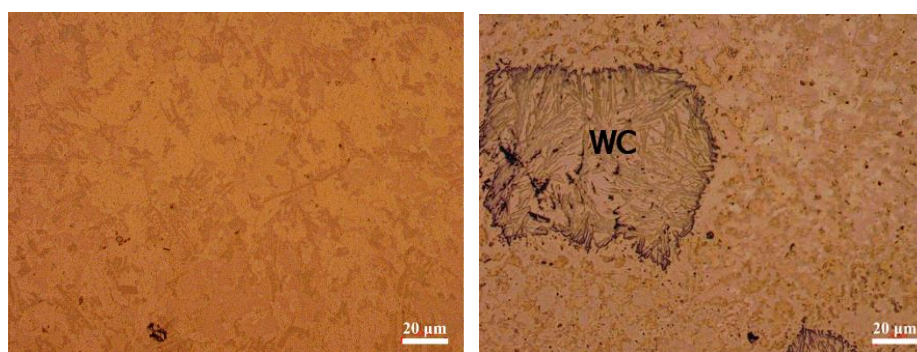
為瞭解射出塑料種類對應其使用合金料管素材之耐磨層特性，本研究將針對 SK300 與 SK500 合金料管素材內側之耐磨層組織進行分析。將合金料管適當裁切，砂紙號數依序由#200 至#2000 研磨料管截面，樣品截面經拋光後進行腐蝕處理。為了解 SK300 與 SK500 料管耐磨層的結構特性，進行耐磨層微觀組織、相組成鑑定等分析，以獲得各合金料管對應的耐磨層組織特性差異。

為了解鎳基合金添加 Cr 與 WC 對料管內側耐磨層之硬化程度，各組試片經研磨處理後，以維克氏硬度計試驗機 (vickers hardness test) 進行硬度測試，確認耐磨層至料管基地之硬度分布情形。另外，料管耐磨層組成與磨耗阻抗的量測有其關聯性，藉由多功能環境場發掃描式電子顯微鏡 (multi-function environmental field emission scanning electron microscope, EFE-SEM) 附屬之能量散射 X 射線光譜儀 (energy-dispersive X-ray spectroscopy, EDS) 進行測定，蒐集各料管磨耗層之化學組成，此硬質層結構特性數據亦與合金料管耐久性關係密切。

參、結果與討論

一、組織特徵

SK300 與 SK500 料管內側之耐磨層顯微組織如圖 2 所示，離心鑄造之鎳基合金+15 wt.% Cr 耐磨層基地組織呈現出細小且均勻的晶粒結構 (圖 2(a))，其結構主要為 γ -Ni 枝晶組織和共晶組織 [13]。富鎳相之枝晶結構散佈於合金基地中，有別於傳統鑄造製程，由離心鑄造製成之耐磨層大幅減少氣孔或夾雜物等缺陷[14]。圖 2(b)為鎳基合金+10 wt.% Cr+15 wt.% WC 顯微組織，WC 顆粒 (平均直徑約 50-100 μm) 添加使得基地相晶粒組織尺寸改變，枝晶結構尺寸變小，形貌亦隨著變化，透過細化晶粒的基地組織與 WC 硬質顆粒之耐磨層有助於提升合金料管高溫磨耗阻抗。



(a) 鎳基合金+15 wt.% Cr

(b) 鎳基合金+10 wt.% Cr+15 wt.% WC

圖 2 耐磨層顯微組織

為了瞭解經離心鑄造形成料管耐磨層之凝固行為，進行觀察合金基地至耐磨層間之顯微組織(圖3)。SK300料管耐磨層厚度約1200 μm ，鑄件層內部出現疏鬆、夾渣等缺陷，此缺陷的生成與較低的離心轉速有關[15]。此外，Prayoga 等人指出離心鑄造的熔合時間太短，會導致合金粉末無法充分融解，亦會形成較大的孔洞缺陷。然而，延長加熱時間，可確保合金粉末的充分熔解，降低鑄層組織孔洞缺陷的生成，但會影響料管基材中的 Fe 元素熱擴散至磨層，從而影響磨層的硬化能力[15]。SK500料管耐磨層厚度約1600 μm ，大部分的碳化鎢顆粒聚集在鑄件層表面，硬質碳化顆粒有助於提升鑄件層之耐磨耗性。SK500料管亦發現些許缺陷分佈在離心鑄件層，相較於SK300料管之鑄件層，鑄件缺陷數量明顯較少。此外，兩種合金料管與耐磨層界面區域皆無夾雜物、氣孔等缺陷，此結果表示熔融披覆層與基地組織相互溶解擴散，形成了緊密的冶金結合。綜合上述，SK500料管之耐磨層確實具有較優異的磨耗阻抗，符合SK500料管在較嚴苛的塑料射出條件。

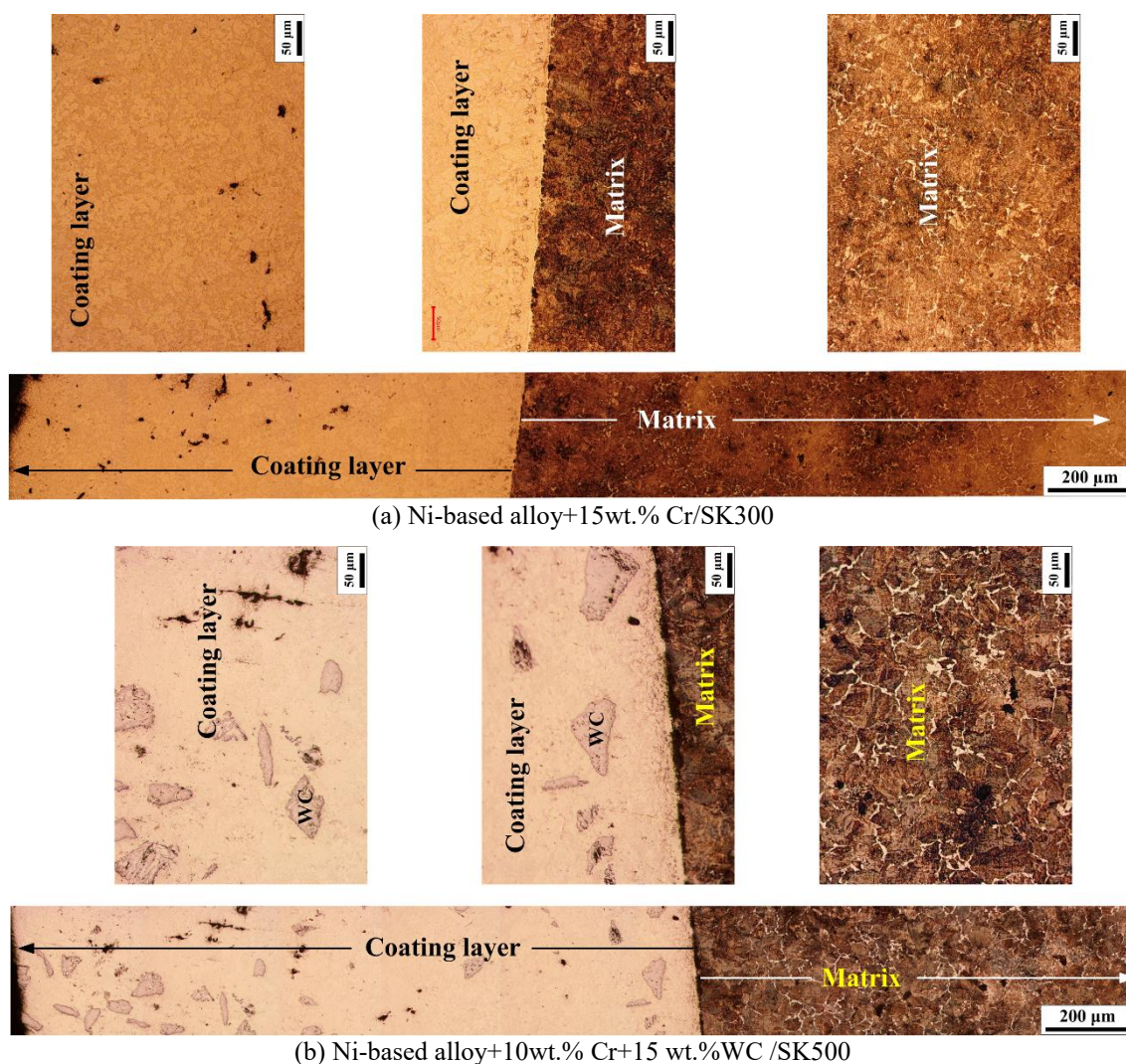


圖3 合金料管素材至耐磨層顯微組織

二、結構分析

為確認合金料管之耐磨層組成是否與離心鑄造設計參數一致，各耐磨層以場發掃描式電子顯微鏡之EDS行進元素組成面分析(圖4(a)(c))。檢測結果顯示(表3)，兩合金料管之耐磨層具有高含量的Ni, Cr元素，耐磨層組織為富鎳且固溶了Fe和Si元素之 γ 相。此外，從局部區域的化學組成分析中發現(表4)，大量的 Cr_7C_3 碳化物(①)散佈於耐磨層基地中，亦在耐磨層組織中(②)偵測到 Ni_3Si 化合物存在(表4)，

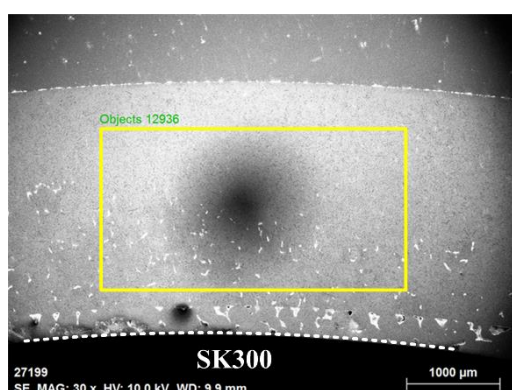
這些化合物的存在有助於提高耐磨層之高溫磨耗及腐蝕阻抗特性[16]。SK500 合金料管之耐磨層中的 W 元素約含有 6 wt.% (表 3)，相較於離心鑄造製程中 WC 設計之添加含量 (15 wt.%)，WC 含量有相當程度的差距，此結果與耐磨層組織中 WC 顆粒分佈行為有關，從而影響面分析數據 (表 3) 與設計添加量之差異性。再者，不同 WC 顆粒硬質材含量的添加除了會改變耐磨層之磨耗阻抗特性，亦影響耐磨層原料成本。

表 3 合金料管耐磨層之化學組成 (wt.%)

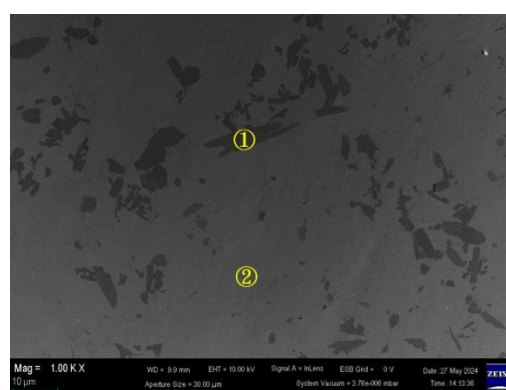
	C	Si	Cr	Fe	Co	Ni	W
鎳基合金+15Cr	3.73	4.88	19.52	5.39	1.23	66.25	--
鎳基合金+10Cr+15WC	3.36	5.12	16.57	4.30	1.21	59.71	5.84

表 4 合金料管耐磨層組織中之不同化合物之化學組成 (at.%)

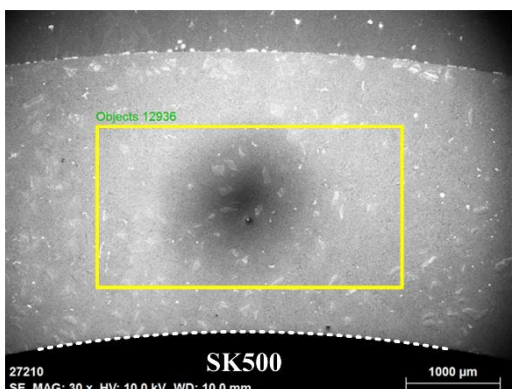
		C	Si	V	Cr	Fe	Co	Ni	W
鎳基合金+15Cr	①	40.91	0.26	--	55.05	0.45	0.22	3.11	--
	②	8.43	12.72	--	4.54	7.46	1.44	65.42	--
鎳基合金+10Cr+15WC	①	38.92	0.70	--	51.58	0.71	0.29	7.13	0.67
	②	12.41	9.27	--	10.08	3.82	0.92	61.39	2.11
	③	48.29	3.49	0.80	1.15	2.62	0.74	1.20	41.70



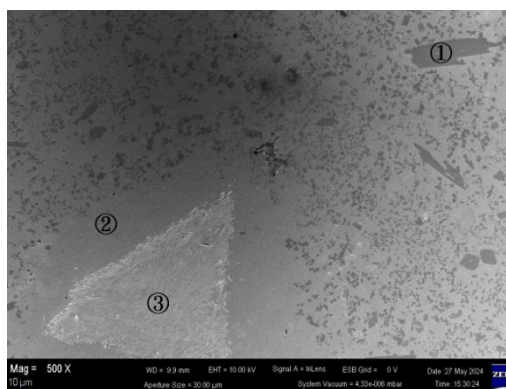
(a) 鎳基合金+15 wt.% Cr 面分析



(b) 鎳基合金+15 wt.% Cr 點分析



(c) 鎳基合金+10 wt.% Cr+15 wt.% WC 面分析



(d) 鎳基合金+10 wt.% Cr+15 wt.% WC 點分析

圖 4 合金料管之耐磨層組成檢測

為了解不同 Cr 及 WC 合金添加量對耐磨層硬度之影響，針對耐磨層橫截面進行硬度量測（圖 5）。SK300 合金料管基地組織硬度分布情形如圖 5(a)所示，其組織平均硬度約 HV 320（~HRC 32），而耐磨層（鎳基合金+15 wt.% Cr）之平均硬度約 HV 842（~HRC 84），此耐磨層表面具較低的硬度值（~HV 715），耐磨層硬度隨著耐磨層深度增加而逐漸提高，此現象推測與鎳基合金組織在離心鑄造製程之凝固速率有關 [17];SK500 合金料管基地組織之平均硬度（~HV 347）略高於 SK300 合金料管，其耐磨層（鎳基合金+10 wt.% Cr+15wt.% WC）含有 15wt.% WC，但此耐磨層組織之平均硬度（~HV 860）僅有些微提升。從耐磨層組織之縱深硬度分佈數據可知（圖 5(b)），不同深度之硬度值分佈具相當程度的差異，最高硬度值可達 HV 1120，此量測結果表示硬度計之壓痕器接觸到 WC 顆粒，使得硬度值大幅提升。此外，觀察耐磨層截面金相組織發現，WC 顆粒隨機散佈於耐磨層組織中，造成耐磨層截面硬度量測數據的變動性較大。再者，靠近耐磨層組織表面具有較多數量之 WC 顆粒，合金料管內壁除了承受旋轉螺桿之磨擦壓力，熔融塑料亦與料管內壁側接觸前進，因此聚集在耐磨層表面（料管內壁）的 WC 顆粒提供相當程度之磨耗阻抗。綜合上述，SK500 合金料管內側之耐磨層組織具較佳之磨耗阻抗，可延長合金料管之使用壽命，對高性能塑料（高溫尼龍、PA9T 等）之射出具相當應用潛力。

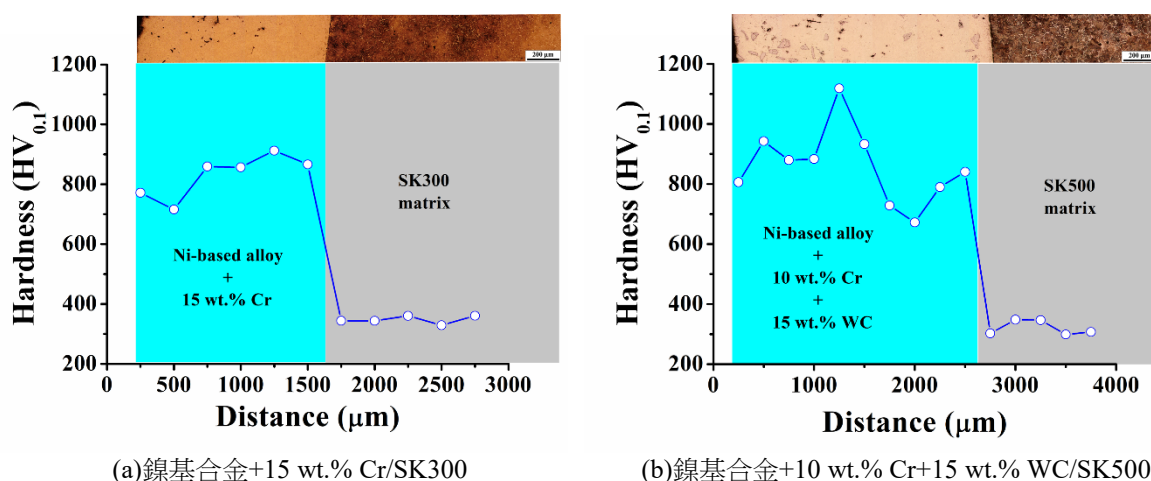


圖 5 耐磨層橫截面之硬度分佈量測

肆、結論

- 一、塑膠射出專用之螺桿合金套筒（料管）內壁依射出塑料類型而披覆不同性能之耐磨耗層，本研究針對 SK300 及 SK500 兩種合金料管進行結構組織、耐磨層組成與抵抗外力變形能力進行解析。檢測結果可知，兩合金料管硬度差異不大，但 SK500 合金料管內壁磨層組織含有 15wt.% WC 顆粒，從而具較優異的磨耗阻抗。
- 二、在離心鑄造製程中，旋轉之離心力促使 WC 顆粒硬質顆粒聚集在塗層表面，有助於提升 SK500 合金料管披覆塗層之磨耗阻抗；而孔洞缺陷多散佈於披覆層組織中，披覆層表面之磨耗阻抗不受影響。
- 三、SK300 合金料管內壁磨層組織為富鎳固溶 Fe 和 Si 元素之 γ 相，基地組織含有 Cr_7C_3 、 Ni_3Si 等化合物，使得磨層組織具有高硬度；相較於 SK300 合金料管，SK500 合金料管之磨層組織較細緻，且有 WC 顆粒散佈於基地組織中，是 SK500 合金料管適合用於高溫塑料射出成形的關鍵。
- 四、WC 硬質顆粒的添加不僅改善披覆層基地之硬度，其散佈於披覆塗層表面亦有助於提升磨耗阻抗，從而減緩合金料管披覆塗層之磨耗損失。

參考文獻

- [1] Yang, Z.J., Xu, C., & Li, G.C. (2024) Behavior of GFRP tube confided hollow high-strength concrete short

- columns under axial compression. *Structures*, 61, 106017.
- [2] Abbasi, M., Khalkhali, A., & Sackmann, J. (2024) A Novel systematic approach for robust numerical simulation of carbon fiber-reinforced circular tubes: Utilizing machine-learning techniques for calibration and validation. *J. Compos. Mater.*, 12, 1501–1520.
- [3] Ma, K.Z., Wang, Q.X., Lin, G.R., & Xing, G.H. (2024) Axial compression performance of high-temperature-exposed concrete-filled steel tubular columns repaired with carbon fiber reinforced polymer, *Journal of Constructional Steel Research*, 213, 108400.
- [4] Bednarowski, D., Bazan, P., & Kuciel, S. (2023) Enhancing strength and sustainability: Evaluating glass and basalt fiber-reinforced biopolyamide as alternatives for petroleum-based polyamide composite. *Polymers*, 15, 3400.
- [5] Yu, Z.X., Bai, Y., Li, Y.C., Wang, X.Y., Wang, W., & Liu, J.Y. (2018) Fiber length distribution and thermal, mechanical and morphological properties of thermally conductive polycarbonate/chopped carbon fiber composites. *Polym. Int.*, 67, 1137–1144.
- [6] Silva, F.J.G., Martinho, R.P., Alexandre, R.J.D., & Baptista, A.P.M. (2011) Increasing the wear resistance of molds for injection of glass fiber reinforced plastics. *Wear*, 271, 2494–2499.
- [7] Park, S.Y., Rhee, G.H., Nam, Y.H., & Lyu, M.Y. (2015) Structural stability study using thermal and structural analysis of a bimetal cylinder in an injection molding machine. *Polym. Korea*, 39, 775–781.
- [8] Gholami, M., Khiavi, S.G., Dehghani, A., Akbarifar, M., & Divandari, M. (2024) Microstructure and mechanical properties of the interface of aluminum-brass bimetals produced via vertical centrifugal casting (VCC). *Int. J. Met.*, 18, 1204–1216.
- [9] Cai, Q.S., Liu, W.S., Ma, Y.Z., Zhu, W.T., & Pang, X.K. (2018) Effect of joining temperature on the microstructure and strength of W-steel HIP joints with Ti/Cu composite interlayer. *J. Nucl. Mater.*, 507, 198–207.
- [10] Sarvari, M., Khiavi, S.G., Divandari, M., & Saghaian, H. (2023) Dissimilar joining of Al/Mg light metals by centrifugal compound casting process. *Int. J. Met.*, 17, 998–1007.
- [11] 謝榮淵、李志隆、陳俊達及江連桂 (2006)。以高速熔合技術開發射出成型用雙合金料管及其應用。中國礦冶工程學會會刊，50 (4)，32–41。
- [12] Sarvari, M., Divandari, M., Saghaian, H., & Khiavi, S.G. (2023) Effect of melt-to-solid volume ratio and preheating temperature on Mg/Al bimetals interface by centrifugal casting. *China Foundry*, 20, 234–240.
- [13] Saji, V.S., & Choe, H.C. (2010). Preferential dissolution behaviour in Ni–Cr dental cast alloy. *Bull. Mater. Sci.*, 33 (4), 463–468.
- [14] Chirita, G., Soares, D., & Silivam F.S. (2008) Advantages of the centrifugal casting technique for the production of structural components with Al-Si alloys. *Materials & Design*, 29, 20–27.
- [15] Prayoga, B.T., Dharmastiti, R., Akbar, F., Suyitno. (2018) Microstructural characterization. Defect and hardness of titanium femoral knee joint produced using vertical centrifugal investment casting. *J. Mech. Sci. Technol.*, 32, 149–156.
- [16] 劉宗熹、周兆民及李至隆 (2003)。熔解溫度對 Ni-Cr-Si 硬面合金顯微組織的影響 (碩士論文)。義守大學，高雄市。
- [17] Luo, Z.Q., Zhang, W.W., Xin, B.L., & Lin, Y. Y. (2011) Control of equiaxed grains in a complicated Cu-Ni based alloy prepared by centrifugal casting. *China Foundry*, 8, 141–144.