

雙負斜角聚晶鑽石球型研銑刀具開發與精微碳化鎢模仁製作研究

Development of micro BD-PCD ball grinding tool with a dual-negative angle and research of micro tungsten carbide die machining

陳順同*、黃暉仁、羅平

¹ 國立臺灣師範大學 機電工程學系 教授

^{2,3} 國立臺灣師範大學 機電工程學系 研究生

*E-mail: chenst@ntnu.edu.tw

摘要

本研究旨在開發及製造雙負斜角的聚晶鑽石球型研銑刀具，用於微小碳化鎢模仁的研銑加工研究。碳化鎢材料由於高熔點與高硬度，故具耐磨耗特性，適宜玻璃模造的模仁製作。但因它的高硬度，使材料移除加工變得困難。本研究自行設計及製作微型聚晶鑽石球型銑刀，對碳化鎢材料進行加工實驗。聚晶鑽石球型銑刀以跨越銑刀中心線的雙負斜角切刃設計，並採線上線式放電方式(w-EDD)加工成型。線式放電加工除了容易於聚晶鑽石刀具素材上製造出負斜角外，更能在刀具表面創造出無數的小切刃與屑袋。這些小切刃都具有負的斜角，所以 50° 的負斜角及小切刃的負斜角共同形成雙負斜角，對硬脆材料具有很好的壓切效果，可避免碳化鎢工件於切削過程中，發生崩裂問題，並使切屑容易排出。透由自行設計的高剛性精微工具機，以高速快淺研銑技術，可製造出表面粗糙度達 Ra0.11 μm 的微型碳化鎢模仁。實驗證實本研究開發的雙負斜角聚晶鑽石球型研銑刀具能成功應用於模造玻璃模仁的加工製作。

關鍵字：雙負斜角、碳化鎢模仁、高速快淺研銑、線式放電加工

Abstract

The purpose of this paper is to develop a micro BD-PCD ball grinding tool with dual-negative angle to machine a micro tungsten carbide die. Tungsten carbide has a high-melting point and -hardness and abrasion resistant, which is suitable to produce mold cores for molding glass. However, high hardness result in material removal becomes very difficult. In this study, we design and manufacture a micro BD-PCD ball grinding tool to grind tungsten carbide. The BD-PCD ball grinding tool is designed with a negative rake angle of 50° that crosses the center line of the tool, which developed by an in-situ w-EDD technology. By applying w-EDD technique facilities to make a large negative rake angle and create micro discharge craters and protrusive portions as the chip-pockets and cutting-edges on the BD-PCD tool. These micro cutting-edges all have a negative rake angle, implies that the BD-PCD has a dual-negative angle producing excellent press-cut effect on the hard-brittle material. This allows chips to be easily disposal and prevents the tungsten carbide workpiece from cracking during process. High-speed fast shallow grinding of micro tungsten carbide die is conducted on lab-made desktop machine tool, which creates a surface roughness of Ra0.11 μm . Experimental results demonstrate that tungsten carbide die can be machined successfully by using the developed BD-PCD ball grinding tool with a dual-negative angle.

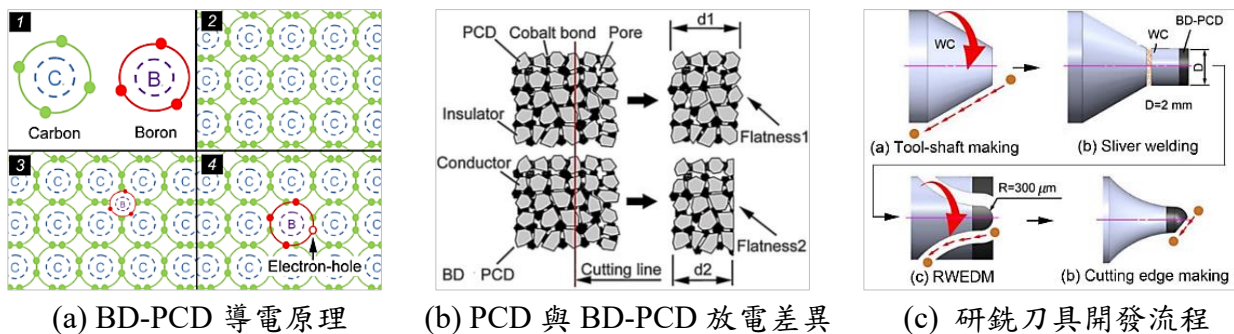
Keyword: dual-negative angle, tungsten carbide die, high-speed fast shallow grinding, w-EDD

壹、前言

市面上常見的 3C 製品，如數位相機、投影機等，用於照明等級的非球面透鏡，其成像品質要求高，不僅成像解析度與穩定度要好，更需具微型化特色。使用非球面透鏡，能有效提高透光率，達輕、薄、短、小製品設計的目的。非球面透鏡的模造成形技術中，相較於塑膠鏡片，模造玻璃鏡片有較佳之光學解析度、高透光率且加工精度高。由於玻璃模造過程中，所需玻璃軟化溫度非常高，常達 500°C 以上[1]，故只可採用更高熔點的材料，如碳化鎢、碳化矽等開發模具。若要加工如此高硬度的硬脆材料，過去使用的傳統刀具，如碳化鎢或陶瓷刀具已不敷使用，因此需開發更堅硬的刀具。Chen 等人[2]以放電加工方式開發 BD-PCD 輪刀，刀寬可達 8 μm 以下，並成功應用於模具鋼的微溝研削。研究發現，經由多次研削，BD-PCD 輪刀仍可維持優良的切削性，並成功製出寬度 8 μm, Ra10 nm 以下的陣列微溝。本研究選用 BD-PCD 為開發鑽石銑刀的材料，並以跨越銑刀中心線的雙負斜角切刃設計，避免材料移除過程中，刀尖與模具發生崩裂，且順利排屑。透由加工精微碳化鎢模具，驗證刀具的可行性，期望開發出低成本且高精度的精密模造玻璃模具，用於精密光學或照明元件之製造。

貳、研究方法

Okano 等人[3]利用熱能，使鑽石摻雜硼元素，硼原子會取代碳原子，產生電洞，並提高導電度，如圖 1(a)。透過放電加工，BD-PCD 可用線式放電加工切割出形狀複雜且具高平整度的表面，相較一般的 PCD，僅有微量的鈷可導電，無法被完整地切破，如圖 1(b)。因此，本研究以含硼聚晶鑽石開發低成本且高精度的「雙負斜角聚晶鑽石球型研銑刀具」，如圖 1(c)。



(a) BD-PCD 導電原理

(b) PCD 與 BD-PCD 放電差異

(c) 研銑刀具開發流程

圖 1 研究方法

參、實驗設計

3.1 雙負斜角聚晶鑽石球型研銑刀具的設計與分析

精微聚晶鑽石球型銑刀採雙負斜角設計，且刀頂面跨越銑刀中心線，如圖 2(a)所示，由於碳化鎢屬硬脆材料，以負角切削具良好的壓切效果，可避免切削過程中，發生崩裂問題，並使切屑容易排出。若刀具中心點處高速旋轉時，銑刀直徑及切削速度趨近於 0，由式(1)可知[4]，這使工具中心點變得無任何切削力，為避免刀具與模具在切削過程中發生擠壓，影響表面粗糙度，甚至破壞刀具，斜角面採過中心設計，以避開工具靜點與模具發生擠壓的問題。

$$V = \frac{D}{2} \dot{\theta} \quad (1)$$

其中，V：銑削速度(mm/min)，D：銑刀直徑(m)， $\dot{\theta}$ ：角速度(rad/sec)。由於刀具高速旋轉切削，切刀會有扭矩以及工件給予刀具斜角的正向力。由實驗得知，扭矩 T=0.003 N·m 及正

向力 $N=2.4\text{N}$ 時，以 $\alpha=-50^\circ$ 斜角設計，可獲最小形變量 $\delta=0.33\mu\text{m}$ ，如圖 2(b)所示。再使用自行設計的高剛性桌上型工具機進行實驗及驗證，如圖 2(c)所示。

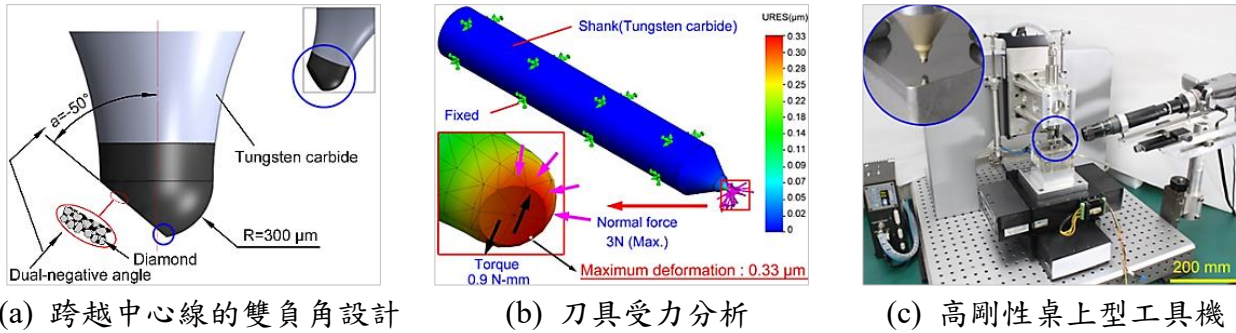


圖 2 大負斜角聚晶鑽石球型研銑刀具的設計與分析

3.2 研銑刀具製作

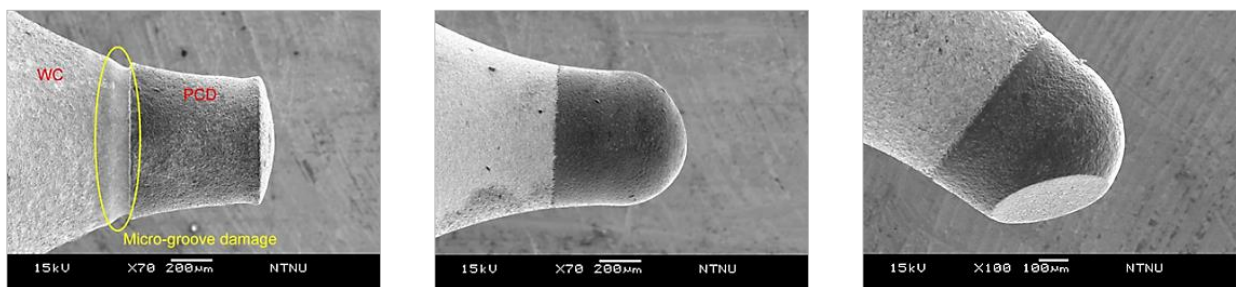
由於 BD-PCD 建構在 WC 基材上，介電常數不同，故兩者導電度差異甚大。本實驗製作球型刀具以正反向路徑做比較，放電條件如表 1 所示。研究發現正向切割會因熔蝕率不同而增加阻抗，使交界處產生微小刻槽，如圖 3(a)所示。以反向加工，材料導電度由小變大，故不會發生熔蝕率降低的現象，如圖 3(b)所示。在精修雙負斜角過程中，延長休止時間，增加絕緣回復時間，熔化的材料有足夠的時間形成微粒殘渣，使冷卻液將放電殘渣帶走，可獲得高品質表面，如圖 3(c)所示。若熱傳導係數為常數，則三維方向熱傳導的通式，如式(2)所示[5]。

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{e}_{gen}}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

上式中， T 為系統溫度差， t 為時間， \dot{e}_{gen} 係每單位體積所產生的熱能 (W/m^3)， α 為熱擴散率， $\alpha=k/\rho c$ (m^2/s)，而 k , ρ 與 c 分別為材料熱導係數、密度與熱容量， α 值愈大，材料導出熱的速率愈快。以鑽石而言，其熱擴散率與熱傳導率分別高達 $18.5\text{cm}^2/\text{s}$ 及 $33.2\text{W}/(\text{cm}\cdot\text{K})$ [6]，因此，薄化的鑽石受熱後，熱便快速地到達基材表面，由於基材與鑽石的熱膨脹係數不同，介面處發生熱應力，使刀具加工過程產生熱應變與微龜裂，可透過浸泡及沖流雙重冷卻改善。

表 1 雙負斜角聚晶鑽石球型研銑刀具放電成形參數

| 參數 | 條件 | 參數 | 條件 |
|----------------------------|----|----------------------------|------|
| 加工電流工作時間 (μs) | 2 | 輔助電流休止時間 (μs) | 35 |
| 加工電流休止時間 (μs) | 35 | 送線速度 (mm/sec) | 25 |
| 輔助電流工作時間 (μs) | 1 | 送線張力 (g) | 2400 |



(a) 正向研銑刀具切割路徑 (b) 反向研銑刀具切割路徑 (c) 研銑刀具製作成品

圖 3 研銑刀具製作成形

肆、超硬材料之研銑實驗

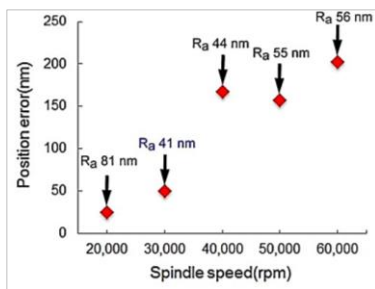
4.1 主軸速度影響

為獲致 BD-PCD 球型研銑刀具的最佳實驗條件，需找出最佳的研銑速度，避免加工時機器發生震動，惡化碳化鎢模仁表面粗糙度。其主軸轉速亦可透由式(3)以研銑速度表示。其中， V ：銑削速度(mm/min)， D ：銑刀直徑(m)， N ：主軸轉速 (rpm)。加工參數如表 2 所示。主軸速度影響比較，如圖 4(a)及(b)所示。實驗結果顯示最佳表面粗糙度如圖 4(c)所示。

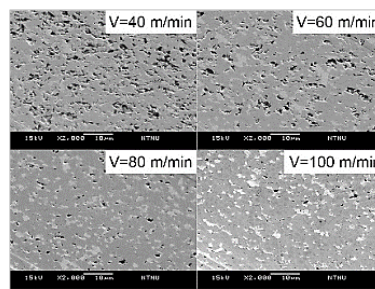
$$V = \frac{\pi DN}{1000} \quad (3)$$

表 2 微細溝槽研銑速度條件選用

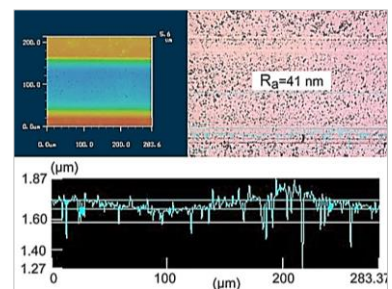
| 參數 | 條件 | 參數 | 條件 |
|------|----------------------------|------|----------------------------|
| 刀具 | BD-PCD (Ø 600 μm) | 研銑深度 | 0.5 μm |
| 模具材料 | Tungsten carbide | 研銑長度 | 1000 μm |
| 研銑速度 | 40, 60, 80, 100, 120 m/min | 冷卻液 | Oil immersion & convection |
| 進給率 | 1 mm/min | | |



(a) 研銑速度影響比較圖



(b) 最佳研銑速度結果比較圖

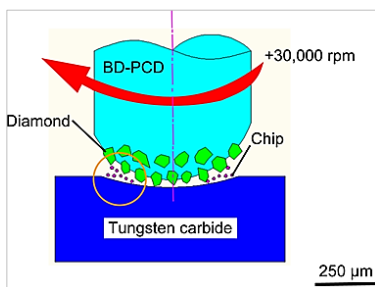


(c) 表面粗糙度量測

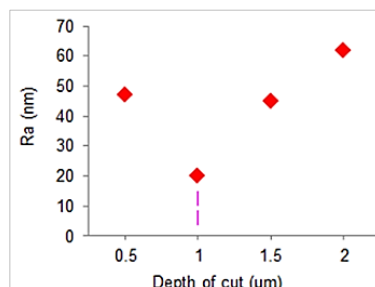
圖 4 主軸速度影響

4.2 研銑深度及進給率決定

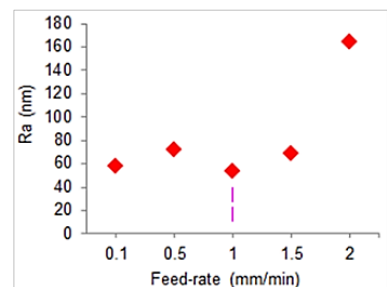
研銑加工是指刀具以具有負斜角的切刀(參考圖 2(a))，進行銑削的同時，切刃上的磨粒也以負斜角進行磨削加工，如圖 5(a)所示。研銑過程中，研銑深度將左右磨屑顆粒的大小，微粒磨屑在模穴中不停擠壓，造成模穴邊緣表面破壞，研銑深度愈深，表面破壞愈嚴重，影響碳化鎢模具的表面粗糙度。實驗結果如圖 5(b)所示，以 1 μm 的高速快淺研銑深度能創造出 Ra20 nm 的表面粗糙度。而刀具以高研銑進給率可提高加工效率，但也容易發生滑移與犁切，甚至振動而造成脆性破壞。如圖 5(c)所示，在進給率 $F=1$ mm/min 時，可獲致最佳的表面粗糙度。



(a) 研銑加工示意圖



(b) 研銑深度對表粗的影響



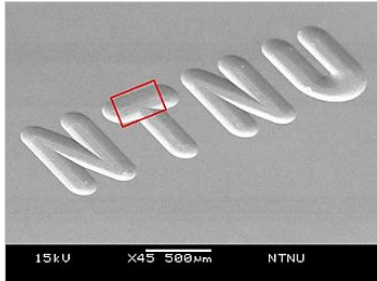
(c) 進給率對表粗的影響

圖 5 研銑深度及進給率決定

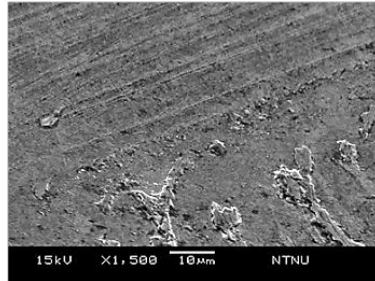
伍、實驗驗證

5.1 微細溝槽研銑驗證

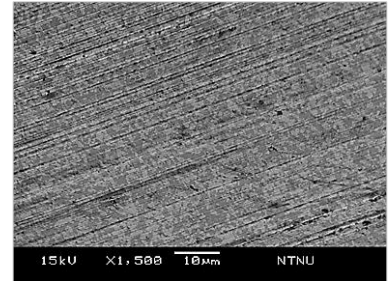
以開發的雙負斜角球型研銑刀具進行微溝槽加工驗證。路徑為「NTUT」字樣，成果如圖 6(a)所示。每道研銑的分層深度為 10 及 1 $\mu\text{m}/\text{stroke}$ 作比較，如圖 6(b)及(c)所示。很明顯的，1 $\mu\text{m}/\text{stroke}$ 的研銑深度之脆性破壞較少，且具平坦化，表面粗糙度可達 Ra 0.11 μm 。



(a) 細微溝槽研銑



(b) 研銑深度 10 $\mu\text{m}/\text{stroke}$

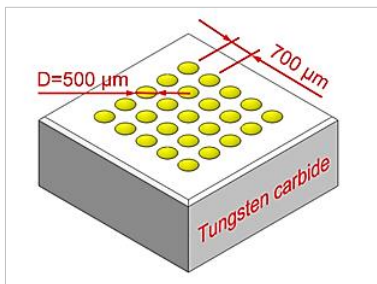


(c) 研銑深度 1 $\mu\text{m}/\text{stroke}$

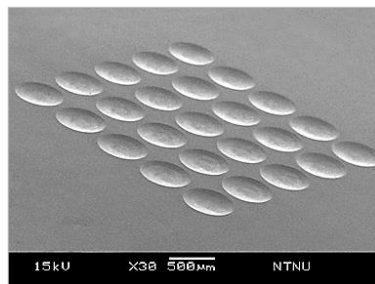
圖 6 微細溝槽研銑深度的影響

5.2 非球面陣列模仁研銑驗證

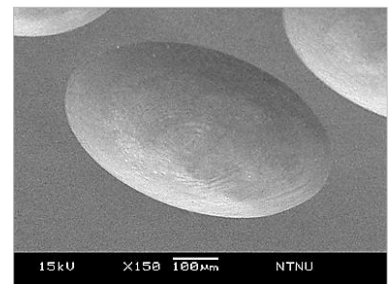
驗證的非球面陣列模仁如圖 7(a)所示。透過前述實驗的最佳參數，於微小碳化鎢模仁上加工非球面陣列模穴，成果如圖 7(b)及(c)所示，量測後之最大輪廓精度為 3 μm 。



(a) 非球面陣列模仁設計



(b) 非球面陣列模仁



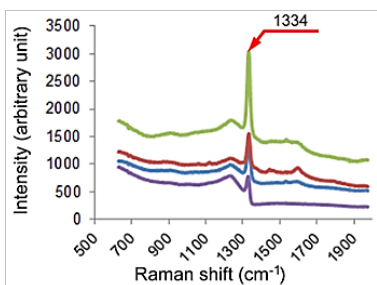
(c) 非球面模仁

圖 7 非球面陣列模仁成形實驗

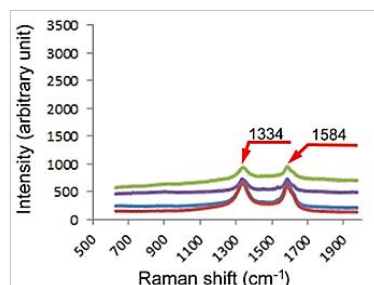
陸、討論

6.1 BD-PCD 的變質層探討

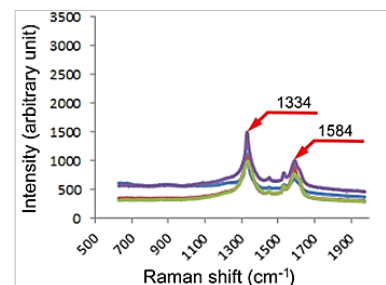
為探求放電後刀具石墨化現象，本實驗利用拉曼光譜進行分析，鑽石在 1134 cm^{-1} 位置會有峰值出現；石墨在 1584 cm^{-1} 位置會有峰值出現[6]。圖 8(a)(b)可看出放電前後，在 1584 cm^{-1} 位置呈石墨化現象，這是由於放電高溫會將鑽石逆催化成石墨化結構。由圖 8(c)可看出，BD-PCD 研銑加工後，受到摩擦阻抗的效應，將石墨化磨除，使得鑽石重新裸露出來。



(a) 拉曼光譜-放電前



(b) 拉曼光譜-放電後

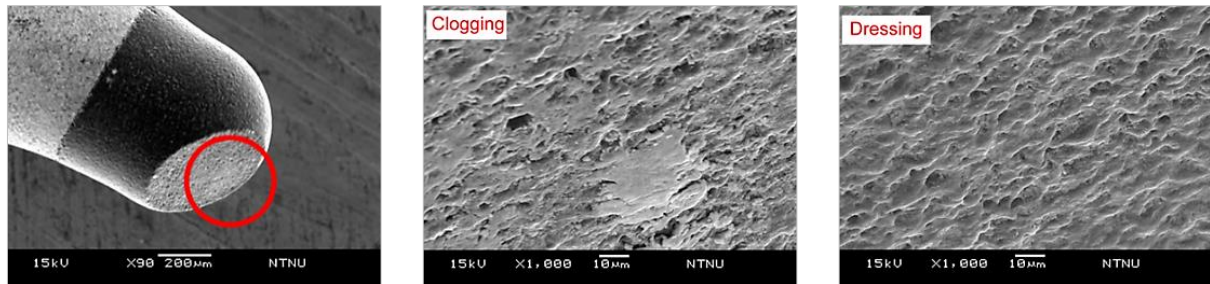


(b) 拉曼光譜-研銑後

圖 8 BD-PCD 的變質層探討

6.2 BD-PCD 之填塞與銳化

研銑過程，切屑可能填塞於放電坑中(圖 9(a)及(b))，而鈍化刀具，降低壽命。為此，本研究使用氧化鐵溶液浸泡，以達蝕除切屑效果，使原鑽石切刃重新裸露及銳化(圖 9(c))。



(a) 研銑刀具填塞與銳化區

(b) 研銑刀具填塞放大面

(c) 研銑刀具銳化放大面

圖 9 BD-PCD 之填塞與銳化

柒、結論

本研究採用含硼聚晶鑽石材料，以低成本成功開發出雙負斜角精微聚晶鑽石球銑刀，能成功應用於精微非球面模造玻璃碳化鎢模仁的製作，研究結果分析如下：

- (1). 含硼聚晶鑽石具微弱導電特性，適合開發幾何形狀複雜的負角精微銑刀刀具。
- (2). 碳化鎢屬硬脆材料需以負角切削，小切刃具有的負斜角及 -50° 斜角之雙負斜角精微聚晶鑽石球銑刀設計，對硬脆材料具有很好的壓切效果。
- (3). 負斜角以跨越銑刀中心線設計，可避免切削過程中發生崩裂問題，並使切屑容易排出。
- (4). 透由非球面模具的製造，證實所開發的精微聚晶鑽石球銑刀能實現 $Ra0.11 \mu\text{m}$ 的表粗。

致謝

本研究感謝國科會計畫(NSC 99-2221-E-003-002-MY2)經費支援以及江信有限公司所提供之含硼聚晶鑽石，使研究得以順利完成，在此致上最高的謝意。

參考文獻

1. T. Zhou, J. Yan, J. Masuda, T. Kuriyagawa, 2009, Investigation on the viscoelasticity of optical glass in ultraprecision lens molding process, Journal of Materials Processing Technology, 209, 4484-4489.
2. 張智賢, 2011, 桌上型雙主軸超精微 CNC 工具機開發與細胞鏡檢模仁製作研究, 國立臺灣師範大學機電科技學系碩士論文, 112-115.
3. K. Okano, Y. Akiba, T. Kurosu, M. Iida, T. Nakamura, 1990, Synthesis of B-doped diamond film, Journal of Crystal Growth, 99, 1192-1195.
4. J.L. Meriam, L.G. Kraige, 2003, Engineering mechanics dynamics, 5th edition, 56-58.
5. T.R. Anthony, W.F. Banholzer, J.F. Fleischer, L. Wei, P.K. Kuo, R.L. Thomas, and R.W. Pryor, 1990, Thermal diffusivity of isotopically enriched ^{12}C diamond, PHYSICAL REVIEW B, 42, No.2, 1104-1111.
6. Y.A. Cengel, Heat and mass transfer, a practical approach, 3rd, McGraw-Hill, pp.74-77, 2006
7. S.A. Catledge, Y.K. Vohra, R. Ladi, G. Rai, 1996, Micro-Raman stress investigations and X-ray diffraction analysis of polycrystalline diamond (PCD) tools, Diamond and Related Materials, 5, 1159-1165.