

銑削加工參數對工件表面粗糙度之影響

杜鳳棋^{1*} 王慶華²

1：明新科技大學機械工程系 地址：新竹縣 30401 新豐鄉新興路 1 號

2：明新科技大學精密機電工程碩士班 地址：新竹縣 30401 新豐鄉新興路 1 號

摘要

本論文研究採用鎢鋼鋁用銑刀作為切削刀具，藉由改變轉速、進給率、銑削深度、銑削方向等四項參數（控制因子），藉以獲得不同的工件表面粗糙度值。透過田口方法的分析，依據四個控制因子，二個水準（最大值、最小值；正轉、逆轉）製作田口直交表。因子效應為正，代表該因子變化時對表面粗糙度值而言有加大的趨勢；因子效應為負，則有減小的趨勢。當目標為使表面粗糙度減至最小，則找出各因子貢獻最小的組合。從鋁和銅表面粗糙度的因子效應分析，本論文的實驗結果顯示趨勢完全相同，惟鋁材的最小的參數組合卻與分析參數組合不符；銅材的加工則完全吻合。進一步檢討鋁的最小參數組合差異發現，在控制因子之銑削深度與銑削方向並不相同，使用圖形斜率分析出的結果，顯示鋁材在加工時，銑削方向不管是正轉或逆轉，對於表面粗糙度的影響相當微小，而且銑削深度與銑削方向具有較大的交互作用。

關鍵字：轉速，進給率，銑削深度，銑削方向，表面粗糙度

The Effects of Milling Parameters on the Surface Roughness of the Workpiece

Feng-Chyi Duh^{1*} Ching-Hua Wang²

1：Department of Mechanical Engineering, Minghsin University of Science and Technology, Xinfeng Hsinchu, Taiwan (R.O.C.)

2：Institute of Precision Mechatronics Engineering, Minghsin University of Science and Technology, Xinfeng Hsinchu, Taiwan (R.O.C.)

Abstract

This paper is to study the use of tungsten carbide end mill for aluminum as cutting tools, by changing four parameters (control factors) such as rotating speed, feed rate, milling depth, and milling direction to obtain different surface roughness of the workpiece. Through the analysis of Taguchi method, the Taguchi orthogonal array was made based on four control factors and two levels (maximum and minimum; forward and reverse). If the factor effect is positive, it means that the surface roughness has a tendency to increase when the factor changes; if the factor effect is negative, it has a decreasing

* 通訊作者：杜鳳棋（教授） 地址：新竹縣 30401 新豐鄉新興路 1 號 Tel：(03)5593142 轉 2210
E-mail：aedfc@must.edu.tw

trend. When the goal is to minimize the surface roughness, find the combination with the smallest contribution from each factor. From the factor effect analysis of aluminum and copper surface roughness, the experimental results of this paper show that the trends are exactly the same, but the minimum parameter combination of aluminum does not match the analysis parameter combination; the processing of copper is completely consistent. Further review the minimum parameters of aluminum The combination difference found that the milling depth of the control factor is not the same as the milling direction. The results of the graph slope analysis show that the aluminum is processed, whether the milling direction is forward or reverse, and the effect on the surface roughness is quite small, and the milling depth and the milling direction have a greater interaction.

Keywords: Rotating speed, Feed rate, Milling depth, Milling direction, Surface roughness

一、研究動機與目的

(一)研究背景

隨著電腦數值控制(CNC)工具機及自動化機具的蓬勃發展，機械加工之技術已大為精進，電腦數值控制工具機所擔任著日漸著重的角色，提高加工精度、可靠度、具備高耐磨、高抗拉強度，整合許多加工之形式於同一機台，也朝向多軸加工(Multi-axis machining)的方向發展。多軸加工可在機械加工時，有可在四個（或是更多）方向上移動的工具或是刀具，故可節省機器空間、減少加工時間等多項優勢。電腦數值控制工具機（以下簡稱數控工具機）的問世，提供了可以快速加工複雜工件的法；一般的數控工具機可在三個軸進行平移，而多軸加工可在一個軸或是多個軸上旋轉。工業上常用五軸加工工件可以在 X 軸、Y 軸及 Z 軸上移動，而刀具主軸可以在二個額外的軸上旋轉。

金屬切削是機械加工中最常用到的一種工藝，根據各機械設備上機器零件的大小形狀的不同，我們需要各種不同的方法對其進行切削加工。金屬切削雖然只是加工過程的一步，但是有關製品品質的優劣，以及該製品在操作上的經濟利益，則有甚大的關係。因此，對於金屬切削理論的了解，在整個機械製造過程上是有其絕對的必要性。金屬材料切削加工主要目標即是切削時間及表面粗糙度(Surface roughness)，切削時間即是材料移除率(MRR)為望大特性(the Larger The Better, LTB)。工件表面粗糙度是製造加工業所努力追求的目標，且要能在高效率的時間及符合經濟效益的方法得到最佳的工件表面粗糙度。欲達成此目標，切削刀具、加工材料、加工參數、切削液…等為不可或缺之重點。

(二)研究方法

數控工具機中的刀具挑選是在人機互動(HMI)狀態下完成的，這與一般工具機加工形成鮮明的對照，一起也要求編程人員必須掌握刀具挑選和切削用量確認的基本準則，在編程時充分考慮數控加工的特色能夠正確挑選刀具。機械零件的高精度化、切削技術往高速和高精密趨勢發展、提高生產效率的要求下，對於各種類型高精度刀具要求相當迫切需要。切削刀具是製造工業上非常重要的技術工具，刀具的品質好壞，直接影響刀具的性能、刀口磨損、刀具壽命、切削加工的精度、切削效率及切削表面品質等。而影像量測在目前工業上應用的範圍廣泛，可以量測微小尺寸的工件，符合刀具量測尺寸精度上的需求，量測儀器能有效的量測刀具幾何外形，便能大大提升生產效率以及刀具品質。

數控加工刀具必須習慣數控工具機高速、高效和自動化程度高的特色，一般應包含通用刀具、通用銜接刀柄及少數專用刀柄。刀柄要聯接刀具並裝在工具機動力夾頭上，因而已逐漸規範化和系列化。刀具的挑選是在數控編程的人機互動狀態下進行的，應根據工具機的加工能力、工件資料的性能、加工程序、切削量以及其它相關要素正確選用刀具。刀具挑選總的準則是：裝置調整便利、剛性好、耐用度和精度高。在滿足加工要求的前提下，儘量挑選較短的刀柄，以進步刀具加工的剛性。選取刀具時，要使刀具的尺度與被加工工件的外表尺度互相習慣。由此可見，使用數控工具機時，刀具在不同加工參數的設定，對於表面粗糙度的影響必然相當重大。

二、文獻探討

近年來，五軸側銑被廣泛應用於複雜曲面的加工，運用範疇包括汽車、航太、模具、能源等產業。由於額外的刀具旋轉自由度，五軸側銑提供較佳的成型能力與材料移除率，然而在加工過程中的刀具路徑規劃複雜度高，電腦輔助製造軟體的支援不足，仍無法有效控制加工曲面的誤差，限制五軸加工的應用價值。五軸側銑加工技術重要性日漸增加，已被廣泛應用於複雜零件的加工成型。就規則及不規則曲面的加工而言，不論在加工速率、表面精度及製造成本上，均擁有較多優勢。

陳永正(1999)使用 AL6061-T6 鋁合金(主要元素為鋁，其他元素成分包括矽、鐵、銅、錳、鎂、鉻、鋅、鈦等，其他元素不超過 0.15%，每種最高 0.05%；密度 $\rho=2.70\text{g/cm}^3$) 的加工材料，依不同銑削方式進行實驗，在研究中主要是量測銑削力及表面粗糙度。結

果顯示，不同銑削加工在表面粗糙度限制下，銑削加工條件最佳化的選擇有很大的幫助。

柯凱晉(2003)研究指出，針對模具鋼材料 SKD11(高級冷間、冷作工具鋼)、SKD61(高級熱間、熱作工具鋼)及一般中碳鋼 S45C(中含碳量碳素結構鋼材)之銑削加工。實驗結果發現移除材料所需力量，在低切削速度時高硬度材料所需較低硬度值小，但隨切削速度增加，低硬度材料所需切削力，則會與高硬度材料相當或更低。而在高硬度材料，能夠得到較佳的工件表面粗糙度，且切削速度對表面粗糙度影響不大，但較低硬度工件，切削速度的提升則能有效的降低表面粗糙度。

在 Ozcelik 和 Bayramoglu(2006)的研究指出使用直徑 10mm，具有 45° 螺旋角及 4 刃鍍氮化鋁鈦(TiAlN)端銑刀，由於 TiAlN 薄膜具有 28GPa 的顯微硬度，其工作溫度可以達到 800°C。所以 TiAlN 塗層的刀具可用於高速切削、乾切削以及一些難加工材料。在此研究以實驗設計法加工 AISI D4 工具鋼，分析加工時間、切削深度、切削寬度、主軸轉速及進給率等條件，對工件表面粗糙度的影響之統計模式，其結果顯示，加工參數對加工表面粗糙度主要影響次序為：加工時間→切削深度→切削寬度→主軸轉速→進給率。

陳家輝(2007)曾探討鋁合金在高轉速的銑削過程中，以表面粗糙度為品質特性進行實驗探討，研究係運用田口實驗法(Taguchi experiment methods)規劃製程參數，進而求得表面狀況最佳的製程參數組合與驗證實驗。從研究結果顯示，製程參數中的切削深度、每刃進給量及切削寬度對表面粗糙度的影響較大，而銑削形式與切削速度的影響較小，並獲得表面最佳狀況的製程參數組合，主要為銑削形式是順銑(銑削方向與進給方向同向)、切削速度為 350m/min、切削深度為 0.04mm。

Boujelbene、Moisan、Bouzid 及 Torbaty(2007)探討在五軸加工機以變動的傾角和主軸轉速所造成的曲面紋理，在數據顯示三軸加工存在有低的切削速度，甚至當刀具軸心垂直加工曲面時切削速度為零，此三軸加工模式產生非常差的表面粗糙度。反觀用適當地刀具傾斜角度在五軸加工機上加工，可有效改善曲面的紋理、降低曲面的表面粗糙度並減少拋光的時間。

鄭世恩(2013)對於五軸加工機加工時發現，當離刀具切削靜點表面狀態有明顯變小，並與三軸加工機相比較，所獲得的結論為五軸加工機加工成本及加工時間等，在五軸加工機都可簡單克服。

賴柏辰(2013)經由實驗設計及平面度分析，探討如何在符合板件平面度要求下獲

得最大材料移除率之銑削加工參數。實驗發現製程變異對平面度預測準確性影響甚大，故將製程變異納入模型中，以利實際生產製造中求得最大材料移除率的加工參數。實驗分析結果發現高轉速、低每刃進給以及低軸向切深可得較好的板件平面度，而其中以軸向切深影響平面度最劇烈。最後以所建立之具製程變異的平面度模型，成功獲得符合平面度要求之最大材料移除率的銑削參數。

在 Kiswanto、Azmi、Mandala 及 Ko (2019) 的研究中，使用切削刀具為直徑 1mm、材質 Inconel 718 (一種耐熱鎳超級合金)、塗層 TiAlN 的硬質合金材料。加工過程的主軸速度採用 3,000、7,000、10,000 RPM，進給率選擇 0.5、1、2 mm/s 三種變化，切削深度為 10 μm ，透過加工參數組合研究對表面粗糙度的影響。結果獲知加工參數與表面粗糙度的關係：進給速度越高，產生的表面粗糙度就越高；主軸轉速越高，表面粗糙度越小。

Moayyedian、Mohajer、Kazemian、Mamedov 及 Derakhshandeh (2020) 使用田口優化方法(Taguchi optimization method)，評估不同加工參數對 Hardox 600 硬韌鋼(Hard and tough steel)，在銑削過程中表面粗糙度的影響；研究選定的參數包括進給率、主軸轉速、切削深度和徑向切深(Radial immersion)。結果發現，表面粗糙度主要的影響依序為：徑向切深、切削深度、主軸轉速、進給速度，此結果取決於顯著性水準(Significance level)。

Zaidi、Khan、Jaffery 及 Warsi (2021) 以鋁材做實驗，加工參數包括刀片數量、切削深度、切削速度、進給率和刀具直徑，針對生產率、表面光製(Surface finish)、能源消耗(Energy consumption)和可持續加工(Sustainable machining)的影響進行探討。使用 ANOVA 檢驗表面光製的每個參數的結果，並確定了最重要的參數，同時觀察刀片的數量顯著影響表面光製。

由於刀具切削刃的幾何形狀、幾何參數的原因，未能將被加工表面上的材料層完全乾淨地去除掉，在已加工表面上遺留下未被切去的殘留面積；只有當刀具上帶有刀具的副偏角的修光刃，且進給量小於修光刃寬度時，理論上才不產生殘留面積。殘留面積的高度構成了表面粗糙度。由於刀具切削刃的選擇直接反映在加工表面上，所以刀具切削刃的粗糙度值，應低於加工表面要求的粗糙度值；從以上的參考文獻可知，刀具的選擇直接攸關加工表面要求的粗糙度值。由於數控工具機中的刀具挑選與操作者的經驗具有直接關聯性，因此本研究將針對複雜幾何的五軸側銑，發展一系列創新性的刀具路徑規劃方法。

三、研究方法

(一)研究背景

本研究以五軸加工機、軟體、刀具、素材為論文主要內涵，研究流程分成 8 個階段進行，依序為：(1)3D 繪圖→(2)治具選擇及架設→(3)素材選擇，(4)刀具選擇、架設及量測→(5)選擇變因參數→(6)CAM 編輯並轉換成 NC data→(7)表面量測與紀錄→(8)分析探討。

(二)設備與材料

1. 五軸工具機：本研究所使用的是工具機機型為五軸搖籃式 Hong-Yee VFS-260 加工機，控制器為 Heidenhain ITNC 640。
2. 粗糙度量測儀：採用三豐(Mitutoyo)出產的 SURFTEST S-3000 表面粗糙度量測儀；此款高精度探針式表面粗糙度測量裝置的測量範圍 100~200mm、解析度 0.05 μ m。
3. 端銑刀：本論文刀具選用鈷鋼鋁用銑刀，刀具規格為 6mm \times 18H \times 3T \times 6D \times 50；此把刀具較佳銑削參數為下；進給量(F)：635mm/min，轉速(N)：7900rpm。
4. 刀桿：本論文選用瑞典生產出廠 HSK 40E SECO-EPB1/10 耐熱鋼材料生產之刀桿，原理是利用刀桿孔徑比刀具柄徑小，且加熱刀桿使膨脹內孔後插入刀具柄部，刀桿冷卻後自動夾緊刀具柄部，達到一種干涉夾持，不需要靠外力來夾持，也是目前業界最精準的刀具夾持方式。
5. 加工路徑軟體：來自德國 OPEN MIND 公司的軟體 HyperMILL 2018.2 軟體，其中文版提供了軟件安裝教程及教程，詳細的圖文教程可供操作參考。
6. 田口方法：田口玄一(Genichi Taguchi)博士 (Bhosale 等人，2018) 利用直交表 (Orthogonal array, OA) 實驗設計與變異數分析，以少量的實驗數據進行分析，有效的提昇產品品質。

四、實驗結果

刀具的切削過程是非常複雜的，影響因素很多。在銑削加工時，刀具材料的性能、刀具類型、刀具幾何參數、切削速度、切削深度和進給量等都影響切削力，從而影響整個工藝系統，最終影響加工精度和質量。在工具機上進行加工，其主軸轉速比普通工具機的主軸轉速一般至少要高 1 到 2 倍，因此，在工具機上進行銑加工，選取刀具時，要

使刀具的尺寸與被加工工件的表面尺寸相適應。

依刀具廠商所提供較佳銑削參數為基礎，其中包括主軸轉速、進給率、切削深度及切削方向等 4 個控制因子。再由田口直交表列出 4 個因子 3 個水準之數據，使用 HyperMiLL 軟體內建自動計算切削速度與進給率，用以完成每道工法所對應之參數。最後，額外加數道參數來測試工具機在最高轉速下，剛性是否穩定以及此刀桿之動平衡是否受力平均。

本論文的三維模型先以 SolidWorks 繪出，再將建好的模型匯入 HyperMiLL 開始規劃刀具路徑（參見圖 1），運行在微軟平台下的 3D 機械 CAD 軟體。同一種參數正銑與逆銑同時完成，避免提刀導致誤差。圖 1 中，綠色線條為刀具所移動路徑，紅色線條為提交路徑。為了解銑床在銑削不同材料時，會存在那些差異的現象，本論文採用鋁材與銅材二種材料。鋁材與銅材實驗完成之成品，部份參數銑削結果已可由肉眼看出明顯刀痕（參見圖 2）。當銑削完成後，工件必須先去油、去汙完成後，才可進行粗糙度量測。

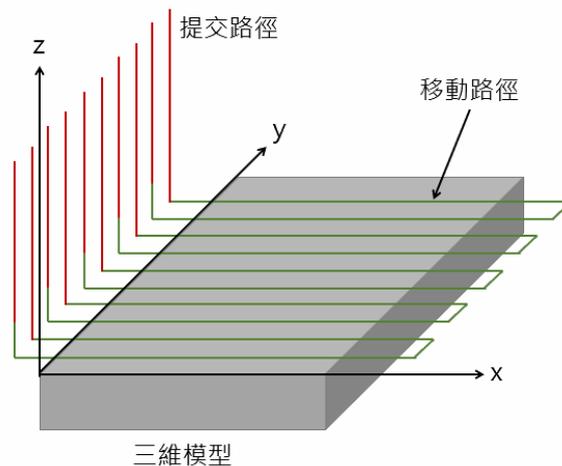


圖 1. 三維模型及刀具路徑

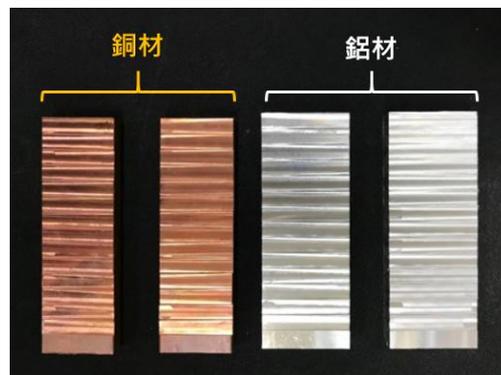


圖 2. 銅材與鋁材完成品

五、結果與討論

本論文加工參數：轉速（8,000rpm、16,000rpm、24,000rpm、30,000rpm）、進給率（400mm/min、600mm/min、800mm/min）、銑削深度（0.2mm、0.4mm、0.6mm）、銑削方向（正、逆）與使用表面粗糙度量測儀所量測出來的粗糙度數據，經過統整與分類後，如表 1 所列。

表 1. 表面粗糙度量測結果

| 轉速 (rpm) | 進給率 (mm/min) | 銑削深度 (mm) | 銑削方向 | 鋁材粗糙度 (μm) | 銅材粗糙度 (μm) |
|-------------|-----------------|--------------|------|----------------------------|----------------------------|
| 8,000 | 400 | 0.2 | 正 | 0.327 | 0.218 |
| | | | 逆 | 0.237 | 0.129 |
| 8,000 | 400 | 0.6 | 正 | 0.134 | 0.106 |
| | | | 逆 | 0.137 | 0.100 |
| 8,000 | 600 | 0.4 | 正 | 0.331 | 0.184 |
| | | | 逆 | 0.270 | 0.153 |
| 8,000 | 800 | 0.2 | 正 | 0.217 | 0.269 |
| | | | 逆 | 0.137 | 0.121 |
| 8,000 | 800 | 0.6 | 正 | 0.388 | 0.431 |
| | | | 逆 | 0.467 | 0.437 |
| 16,000 | 400 | 0.4 | 正 | 0.141 | 0.082 |
| | | | 逆 | 0.099 | 0.089 |
| 16,000 | 600 | 0.6 | 正 | 0.137 | 0.099 |
| | | | 逆 | 0.128 | 0.117 |
| 16,000 | 800 | 0.2 | 正 | 0.224 | 0.173 |
| | | | 逆 | 0.216 | 0.119 |
| 24,000 | 400 | 0.6 | 正 | 0.254 | 0.272 |
| | | | 逆 | 0.195 | 0.192 |
| 24,000 | 600 | 0.2 | 正 | 0.166 | 0.105 |
| | | | 逆 | 0.103 | 0.072 |
| 24,000 | 800 | 0.4 | 正 | 0.122 | 0.300 |
| | | | 逆 | 0.124 | 0.141 |
| 30,000 | 400 | 0.2 | 正 | 0.128 | 0.101 |
| | | | 逆 | 0.127 | 0.071 |
| 30,000 | 400 | 0.4 | 正 | 0.078 | 0.084 |
| | | | 逆 | 0.070 | 0.078 |
| 30,000 | 400 | 0.6 | 正 | 0.108 | 0.076 |
| | | | 逆 | 0.109 | 0.088 |
| 30,000 | 600 | 0.2 | 正 | 0.114 | 0.087 |
| | | | 逆 | 0.113 | 0.073 |
| 30,000 | 800 | 0.2 | 正 | 0.140 | 0.100 |
| | | | 逆 | 0.135 | 0.075 |
| 30,000 | 800 | 0.6 | 正 | 0.090 | 0.182 |
| | | | 逆 | 0.080 | 0.171 |

所有因子水準(Factor level)的組合均在實驗中出現，因子或水準愈多所需的實驗愈多，花費的時間、精力或成本也愈多，可行性也就會愈低。本論文研究包括有 4 個控制因子（轉速、進給率、銑削深度、銑削方向），分別具有 2 水準（最大值、最小值；正轉、逆轉），參見表 2。

表 2. 控制因子與水準的設定

| 水準 \ 控制因子 | A 轉速 (rpm) | B 進給率 (mm/min) | C 銑削深度 (mm) | D 銑削方向 |
|-----------|------------------|----------------------|-------------------|-----------|
| Level 1 | 8,000 | 400 | 0.2 | 正轉 |
| Level 2 | 30,000 | 800 | 0.6 | 逆轉 |

在全因子實驗(Full-factorial experiments)中，因為實驗考慮到所有可能的排列組合，故可從實驗組中挑出最佳的降溫水準組合。相對於全因子實驗而言，田口方法直交表係透過有系統、有效率的變動控制因子方式，利用因子反應分析獲得足夠的資料，能用較少實驗次數實現最佳的降溫水準組合。由於田口方法直交表並非全因子實驗，故所有水準組合不見得會出現在表中，此意味最佳降溫水準組合，並不一定會在直交表的實驗組中。為有效率且有系統的變動 4 個控制因子，本論文採用田口方法(Taguchi method)中的直交表分析，分別針對鋁材（表 3）與銅材（表 4）各有 $2^4=16$ 個實驗組合，目標為欲使 y （表面粗糙度）最小。

表 3. 鋁材表面粗糙度的因子效應

| 實驗編號 | 控制因子 | | | | 表面粗糙度(μm) |
|--------------------|--------|-------|-------|--------|------------------------|
| | A | B | C | D | |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0.327 |
| 2 | 1 | 1 | 1 | 2 | 0.237 |
| 3 | 1 | 2 | 2 | 1 | 0.388 |
| 4 | 1 | 2 | 2 | 2 | 0.467 |
| 5 | 1 | 1 | 2 | 1 | 0.134 |
| 6 | 1 | 1 | 2 | 2 | 0.137 |
| 7 | 1 | 2 | 1 | 1 | 0.217 |
| 8 | 1 | 2 | 1 | 2 | 0.137 |
| 9 | 2 | 1 | 1 | 1 | 0.128 |
| 10 | 2 | 1 | 1 | 2 | 0.127 |
| 11 | 2 | 1 | 2 | 1 | 0.108 |
| 12 | 2 | 1 | 2 | 2 | 0.109 |
| 13 | 2 | 2 | 1 | 1 | 0.140 |
| 14 | 2 | 2 | 1 | 2 | 0.135 |
| 15 | 2 | 2 | 2 | 1 | 0.090 |
| 16 | 2 | 2 | 2 | 2 | 0.080 |
| Level 1 | 0.256 | 0.163 | 0.181 | 0.192 | 0.185 |
| Level 2 | 0.115 | 0.207 | 0.189 | 0.179 | |
| Effect E_A^{1-2} | -0.141 | 0.043 | 0.008 | -0.013 | |

表 4. 銅材表面粗糙度的因子效應

| 實驗編號 | 控制因子 | | | | 表面粗糙度 y(μm) |
|--------------------------------|--------|-------|-------|--------|-----------------------------|
| | A | B | C | D | |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0.218 |
| 2 | 1 | 1 | 1 | 2 | 0.129 |
| 3 | 1 | 2 | 2 | 1 | 0.431 |
| 4 | 1 | 2 | 2 | 2 | 0.437 |
| 5 | 1 | 1 | 2 | 1 | 0.106 |
| 6 | 1 | 1 | 2 | 2 | 0.100 |
| 7 | 1 | 2 | 1 | 1 | 0.269 |
| 8 | 1 | 2 | 1 | 2 | 0.121 |
| 9 | 2 | 1 | 1 | 1 | 0.101 |
| 10 | 2 | 1 | 1 | 2 | 0.071 |
| 11 | 2 | 1 | 2 | 1 | 0.076 |
| 12 | 2 | 1 | 2 | 2 | 0.088 |
| 13 | 2 | 2 | 1 | 1 | 0.100 |
| 14 | 2 | 2 | 1 | 2 | 0.075 |
| 15 | 2 | 2 | 2 | 1 | 0.182 |
| 16 | 2 | 2 | 2 | 2 | 0.171 |
| Level 1 | 0.226 | 0.111 | 0.136 | 0.185 | 0.167 |
| Level 2 | 0.108 | 0.223 | 0.199 | 0.149 | |
| Effect $E_A^{1 \rightarrow 2}$ | -0.118 | 0.112 | 0.063 | -0.036 | |

因子效應(Factor effect)為正,代表該因子變化時對表面粗糙度值而言有加大的趨勢;因子效應為負,則有減小的趨勢。當目標為使表面粗糙度減至最小,則應找出各因子貢獻最小的組合。從表 3 (鋁材)和 4 (銅材)表面粗糙度的因子效應來看,二實驗結果的趨勢完全相同(參見圖 3);當目標為使表面粗糙度減至最小,則各因子貢獻最小的參數組合為:A2-B1-C1-D2。經由因子效應所推估的最小的參數組合為:A2-B1-C1-D2;實際上,此組合在原先 16 個實驗中已出現,但鋁材的最小的參數組合卻為 A2-B1-C2-D1);銅材的加工則完全吻合。

為了檢討鋁材最小的參數組合差異,主要是在控制因子 C (銑削深度)與控制因子 D (銑削方向)並不相同。而從圖 3 可見,對於鋁材(圓圈符號)而言,C1-C2 與 D1-D2 間的斜率並不大,也意味著因子效應並不明顯。因此,我們將探討因子間交互作用的影響,結果如圖 4 所示。通常,若某一因子的效應依另一因子的設定水準有所不同,則兩個因子間存在著交互作用的關係。最明顯的是在交互作用圖中(參見圖 4),若兩直線平行則不存在交互作用;反之,若兩直線不平行則存在著交互作用,不平行的程度越大,代表交互作用越大。從圖中顯示 C1 與 2C 二直線並不平行,這也說明兩個因子間存在著交互作用的關係;其中從圖 4a 可看出斜率較小,也就是鋁材在加工時,銑削方向不管是正轉或逆轉,對於表面粗糙度的影響相當相當微小。從圖 4b 可看出 D1 與 D2 二直線的斜率較大且相交,這也就是隱喻銑削深度與銑削方向具有較大的交互作用。

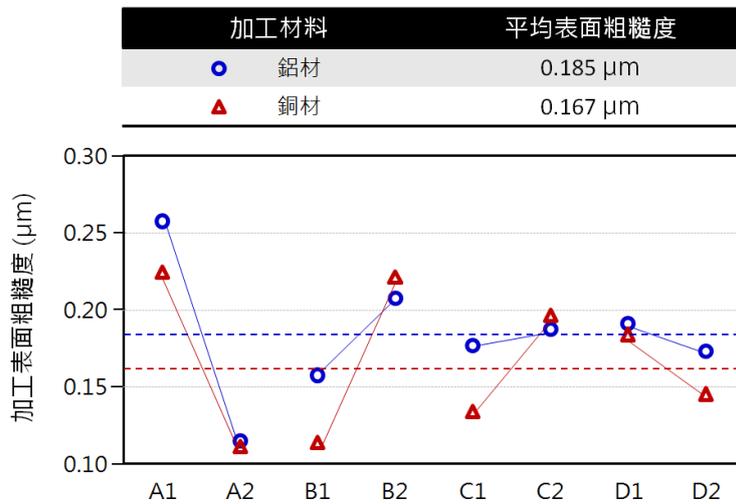


圖 3 本研究之因子效應圖

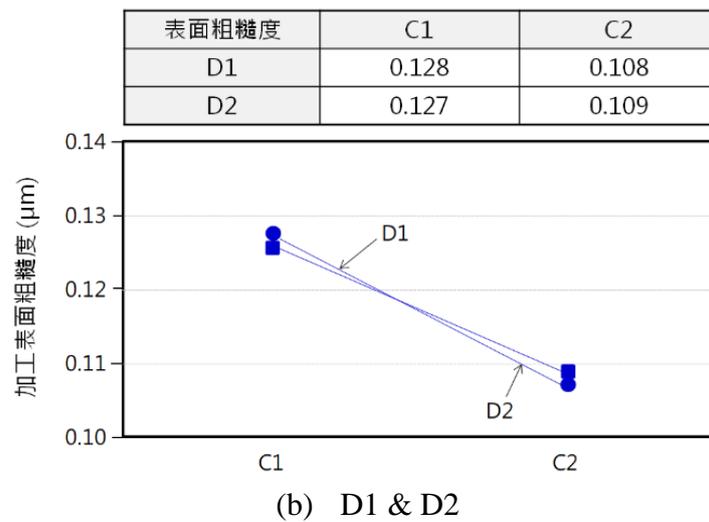
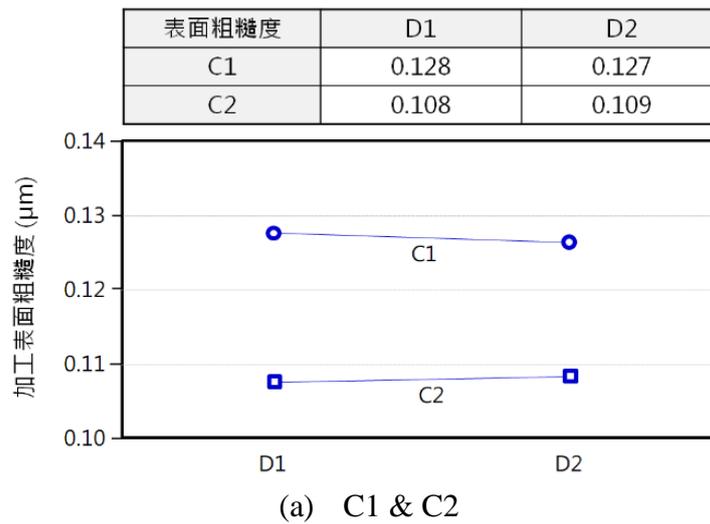


圖 4. 本研究之因子效應圖

六、結論

本論文研究主要目的為研究刀具相同加工參數在不同材料之表面狀況及精度，在研究同時也測試工具機在極限轉速下之剛性及刀桿的動平衡狀態。研究過程中發現虎鉗及快速定位系統安裝並不完整，在銑削深度超過 0.5mm 以上，即會發生明顯共振聲音，因此會有明顯的銑削刀痕，也間接影響了表面粗糙度值。在眾多參數組合中，鋁材之最佳表現為轉速 30,000rpm，進給率 400mm/min，銑削深度 0.4mm，銑削方向逆銑，表面粗糙度 0.070 μm 。銅材之最佳表現為轉速 30,000rpm，進給率 400mm/min，銑削深度 0.2mm，銑削方向逆銑，表面粗糙度 0.071 μm 。鋁材部分實驗結果與田口方法分析之組合並不相同，故檢討其原因，發現影響鋁材表面粗糙度之趨勢為銑削深度與銑削方向，而銅材部分實驗結果與田口方法分析之組合完全符合。

本論文研究中，鋁材和銅材均考慮有 4 個控制因子（轉速、進給率、銑削深度、銑削方向），實驗結果獲得最佳的參數組合狀態如表 5 所列。

表 5. 銅材表面粗糙度的因子效應

| 控制因控 | 轉速 (rpm) | 進給率 (mm/min) | 銑削深度 (mm) | 銑削方向 |
|------|-------------|-----------------|--------------|------|
| 參數組合 | 高 | 低 | 低 | 逆轉 |

參考文獻

- 柯凱晉 (2003)。不同硬度與切速對於模具鋼銑削特性影響之研究。國立成功大學機械工程系碩士論文，<https://hdl.handle.net/11296/5468px>。
- 陳永正 (1999)。6061 鋁合金之高速銑削行為與實驗探討。國立中興大學機械工程系碩士論文，<http://hdl.handle.net/11455/2768>。
- 陳家輝 (2007)。6061-T6 鋁合金高轉速銑削加工參數探討。國立中興大學機械工程系碩士論文，DOI:10.6845/NCHU.2007.00554。
- 賴柏辰 (2013)。平面度限制下最大銑削材料移除率之研究。國立成功大學機械工程系碩士論文，<http://ir.lib.ncku.edu.tw/retrieve/188510/3010217001-000005.pdf>。
- 鄭世恩 (2013)。鋁合金五軸切削曲面靜點效應之研究。國立屏東科技大學機械工程系碩士論文，<https://hdl.handle.net/11296/u3j464>。
- Bhosale, K. K., Patil, V. P., Chavan, R. R., Mane, V. V., Sakharkar, A. R., Pawar, C., K., Bhole, A. R., & Shinde, S. S. (2018). Parameters Optimization of CNC Machining using Taguchi

- Methodology, *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology*, 6(4), 4594-4598. DOI:10.22214/ijraset.2018.4753
- Boujelbene, M., Moisan, A., Bouzid, W., & Torbaty, S. (2007). Variation cutting speed on the five axis milling. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 21(2), 7-14. http://jamme.acmsse.h2.pl/papers_vol21_2/1553S.pdf
- Kiswanto, G., Azmi, M., Mandala, A., & Ko, T. J. (2019). The effect of machining parameters to the surface roughness in low speed machining micro-milling Inconel 718. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 654, 012014. DOI:10.1088/1757-899X/654/1/012014
- Moayyedian, M., Mohajer, A., Kazemian, M. G., Mamedov, A., & Derakhshandeh, J. F. (2020). Surface roughness analysis in milling machining using design of experiment. *SN Applied Sciences*, 2:1698. DOI:10.1007/s42452-020-03485-5
- Ozcelik, B., & M. Bayramoglu, M. (2006). The statistical modeling of surface roughness in high-speed flat end milling. *International Journal of Machine Tool & Manufacture*, 46(12-13), 1395-1402. DOI:10.1016/j.ijmachtools.2005.10.005
- Zaidi, S. R., Khan, M., Jaffery, S. H. I., & Warsi, S. (2021). Effect of machining parameters on surface roughness during milling operation. *Advances in Manufacturing Technology*, XXXIV, 175-180. DOI:10.3233/ATDE210033