

環境管理規劃類

## 快削鋼與中碳鋼於 CNC 加工之能資源耗用差異與減碳效益分析

孫書煌\*、吳致呈\*\*、江宏偉\*\*\*、江智偉\*\*\*\*

### 摘 要

為量化快削鋼與傳統中碳鋼在 CNC 加工階段之能資源耗用差異，本研究從降低加工過程的能耗著手，選定中碳鋼與數種快削鋼，探討其在切削時的耗能差異。

研究結果顯示，加工 1 根艾克姆螺桿，快削鋼 1144、1215、S45CS1 總耗電分別為  $7.97 \times 10^{-2}$ 、 $7.94 \times 10^{-2}$ 、 $7.77 \times 10^{-2}$  kWh，基線 S45C 為  $8.66 \times 10^{-2}$  kWh，其中刀具主軸耗電最大占 40.1%，捲削馬達耗電次之占 17.6%，使用快削鋼節電 7.9~10.3%。快削鋼之刀具磨耗 4.79~8.12 g/根，基線鋼 31.1 g/根，差異顯著。切削油損失，快削鋼 16.2~16.5g/根，基線鋼 16.9 g/根，差異不大。本研究進一步分析鋼材製造、運輸、CNC 加工等搖籃至大門 (Cradle to Gate) 碳足跡，結果顯示以快削鋼 1144、1215、S45CS1 生產 1 根艾克姆螺桿，碳足跡分別為 634.0、595.1、561.9 gCO<sub>2</sub> e/根，基線鋼 S45C 則為 685.9 gCO<sub>2</sub> e/根，快削鋼減碳效益 51.9~124.0 gCO<sub>2</sub> e/根。研究成果能作為 CNC 加工等自動化精密製造產業，評估能資源耗用及碳排參考。

【關鍵字】快削鋼、CNC加工、銑削加工、能資源損耗、減碳效益

---

\* 崑山科技大學機器人工程系

\*\* 中鋼公司綠能與系統整合研究發展處環保技術組

\*\*\* 達奈美克股份有限公司

\*\*\*\* 崑山科技大學機器人工程系

副教授

研究員

總經理

教授

## 一、前言

加工能耗是評價機械加工環境性能的重要指標之一，其中加工對環境的影響 99% 是由於消耗電能引起的。IEA 在 2020 年發表的「鋼鐵技術路徑報告」(IEA 2020 年) 中闡明在供應鏈上採取各種提升材料效率的措施，全球鋼鐵需求在 2050 年可減少 1/5，減碳 40%。國際標準化委員會因此起草了加工機的環境評估標準 (ISO 2012)，將節能減排的理念貫穿於加工機使用等主要耗能階段。產業界也致力於產業外部的減碳，例如國際化學品協會 (ICCA)、日本化學工業協會 (JCIA)、美國節能經濟委員會 (ACEEE) 計算半導體業外部減碳、日本鐵鋼聯盟每年發表鋼鐵業外部減碳績效。

高機能鋼 (High-Functional Steel, HFS) 指的是鋼鐵本身材料性質提升外，更可增進用鋼產品使用時之外部減碳效益，避免僅於生產製造階段低度排碳，卻在產品長期使用階段大幅排碳之情形 (吳致呈、陳俊達 2012)。例如，高強度汽車用鋼可使車體減重而降低能耗、高效率電磁鋼提升馬達效率而省電、免調質鋼讓加工業省下熱處理與噴砂等製程，是幫助產業減碳的最佳利器。

快削鋼係指在普通碳鋼中添加合金元素，例如鉛、硫、磷、碲等，主要分為硫系與鉛系快削鋼，硫系快削鋼會在鋼中形成硫化錳 (MnS)，使切屑細片狀，避免廢屑纏繞，增加自動化加工效率，亦具潤滑效果，增加切削性及加工面表面光度，主要用途在於製成精密儀表零件、螺栓、軸類、插銷、精密零件等 (黃增輝 2003)。整體而言快削鋼具良好加工性、加工速度快、切削表面佳，切削刀具使用壽命長、節省切削油等優點。

本研究目標著眼於從後處理加工過程的能耗降低著手，以實測方式量化 3 種快削鋼與 1 種中碳鋼在 CNC 加工階段之能資源差異，試圖能夠讓鋼材在加工階段使用最少的能耗，亦能產製工業所需之金屬成品，如此也是鋼鐵業在降低能耗的另一個努力的方向。

## 二、文獻分析

欲求得對鋼材進行切削時的能耗其實即等同於在切削此鋼材時工具機所提供的能耗，目前針對不同鋼材切削能耗量測與比較的參考文獻較少，但有很多文獻提出各種量測工具機在進行切削時的能耗量測模型與分析。

### 2.1 歐盟與 ISO 有關工具機能源效率研究

在工具機的耗能方面，主要為許多馬達及輔助元件的能源消耗，尤其在加工時會耗去許多能源，例如在加工時主軸、工作平台的移動軸、及冷卻系統、排屑系統等，都會有能源的消耗，因此由建立工具機的耗能模式，檢查製造過程中各個組成部分的耗能，可算出潛在的節能效益，並可以評估及量測工具機的能源效率提升效益。

歐盟已於 2010 年 1 月進行工具機能源效率相關研究，由歐洲工具機協會 CECIMO 發起工具機自願同意草案，並已於 2009 年 11 月舉行諮詢會議。另外，Eceee (The European Council for an Energy Efficient Economy) 於 2010 年 6 月第一次與相關工具機業者會議，說明由歐洲產品組織公布關於生態設計 (Ecodesign) 與能源相關產品 (Energy-related Products, ErP) 指令 (Directive 2009/125/EC) (Eceee 2024、Ecotech Machine Tool 2024)，對 ENTR Lot 5 工具機的研究。這個產品組織的研究主要是這些工具機基於 European Commission Methodology for Ecodesign of Energy-using Products (MEEuP) 設計的生命週期使用下，能確定找到和建議能源使用產品對環境性能的改善。經由這項研究的結果將被用來後續研究，包括進行政策選定的影響評估，以及諮詢論壇準備的文件。除歐盟研究外，國際上亦開始探討工具機的耗能模式，例如分析銑床工具機的耗能模式 (Heidenhain 2024)。

國際標準化組織在這方面特別訂定了 ISO 20140-1 (ISO 2019a), ISO 20140-2 (ISO 2018), ISO 20140-3 (ISO 2019b) 及 ISO 20140-5 (ISO 2024)，為離散產品、零件製造行業指定了能源效率和其他環境影響因素評估的通用基礎和方法，使得特定行業的方法能夠應用於特定情況。除此之外，也在 2016 年制定 ISO/DIS 14955-1: Machine tools - Environmental evaluation of machine tools - Part 1: Design methodology for

energy-efficient machine tools，以及 14955-2 ~ 1499-4，合併成 ISO/DIS 14955，並在 2017 年更新 (ISO 2017)，其中分為 4 大部分，主要內容乃針對工具機的環境進行評估。

ISO14955 主要針對數值控制 (NC) 工具機，此標準涉及工具機在使用階段的能源效率，且不考慮環境相關的因素，主要在工具機的設計及研發過程中導入能源效率觀念。

## 2.2 切削工具機的耗能模式分析

工具機加工耗能過程包含：進料、鑽孔、粗加工、切削、磨、精加工等過程，文獻 (Heidenhain 2010) 指出在 CNC 控制的切削過程，進給軸與主軸馬達約消耗總電量的 25 ~ 30%。在 Dietmair (Dietmair 2009) 分析工具機之能源消耗模式中，在整個加工過程中有 20% 的電量是用在加工上。Hu 等人 (Hu 2012) 則建立一套稱為 OEEM (on-line energy monitoring) 的線上工具機能耗監控系統。

## 2.3 工具機切削能源消耗特性模式建立

工具機加工過程之能源效率模式可分為 2 種方式探討，第一種為加工時之比能源消耗模式 (SEC, Specific Energy Consumption Model)，即是以總消耗能源除以切削總體積，此模式主要探討加工時程的能源消耗，而此種模式並沒有考慮附屬設備、切削速度與深度及進料過程所需能源，如 Diaz 等人 (Diaz 2011)、Draganescu 等人 (Draganescu 2003)，以及 Li and Kara (Li 2011) 均各自提出不同的計算。

第二種能源效率模式為加工所需之直接能源 (direct energy requirements in machining)，如 Mori 等人 (Mori 2011)、He 等人 (He 2012)，他們指出在加工過程中刀具與工件的接合與離開過程，這些過程的時間並沒有投入到實際的材料切除，於是模式中之空切時間 (air cutting time) 可以減少高估能源需求的機會，最終還是需要量化整個過程之空切時間，以估計其在總能源需求的影響。Vincent 等人 (Vincent 2013) 則以數學模式及邏輯分析工具機加工過程之直接電力需求。

### 三、研究方法與步驟

#### 3.1 研究方法

本研究之主要目的為：以 S45C 作為基線鋼種，併同 1144、1215、S45CS1 等 3 種快削鋼，探討 4 種不同鋼材從相同尺寸的素材，經過相同的程序加工成工業所需的一個完成品，並量測在加工過程中詳細區分的各個步驟及工具機上各個部件的能源消耗，再加以總和，得出各鋼材從素材到完成品之間的總花費能耗。並以 S45C 為基線鋼種，探討上述 3 種快削鋼相對於 S45C 之能耗差異，達成減碳及降低能耗的目標，作為日後發展快削鋼在切削性研究上的依據。切削實驗所使用的鋼材由中鋼公司提供，尺寸為 25f \* 300 mm 之鋼棒，每種鋼材 40 根。加工成品為愛克姆螺桿。

欲計算工件從素材到成品過程中總共消耗了多少能耗，本研究針對下列項目進行量測，包括：(a) 機台刀具主軸旋轉馬達的電壓及電流值、(b) 工作平台移動軸 (X、Y、Z 軸) 的電壓及電流值、(c) 主軸冷卻馬達的電壓及電流值、(d) 切削液馬達的電壓及電流值、(e) 捲屑馬達的電壓及電流值、(f) 刀具損耗、(g) 切削液損耗。這些項目可以分為 2 大類，第一類是電能的損耗，包括上述項目的第 (a) ~ (e) 等 5 項；第二類為非電能的損耗，包括第 (f) 及 (g) 項。

#### 3.2 實驗設備與材料

計畫中欲量測的資料包括 2 大類，其中第一類的電能損耗包括上述的第 (a) ~ (e) 等 5 項，必須在加工素材的時候即時量得 CNC 加工機上主軸馬達、進給軸馬達、主軸冷卻馬達、切削液供給馬達、切屑排削馬達等的耗用電流。本研究自行製造組裝 1 台銑床加工機，將加工機的控制器連線至外部的電力訊號輸出系統，在加工階段將所需資料擷取出來再進行分析。第二類的 (f) ~ (g) 2 項是非電能的損耗，包括刀具損耗及切削液損耗，此 2 項資料均從其損耗的重量來換算其能耗值。

由於快削鋼由於擁有很好的切削性，使得切削時對刀具的損耗非常微小因此在本研究中特別加大進給率執行重切削，使刀具承受較重的負載以加速其磨耗。另外在切削液損耗的量測是以稱重的方式進行，在完成多件素材的加工後，再利用切削液損失

的重量除以加工素材的數目，求得平均加工單一支素材的切削液重量損失。

各種鋼材進行切削之次數依主軸開始產生顫振現象為一個循環，然後更換刀具，重新開始另一個循環，至於每種鋼材各加工多少根素材為一個循環，及各進行多少循環則以取得的切削數據多寡而決定。其中 S45C 鋼材因材質較硬，不易切削，在加工第 6 支素材時主軸開始產生顫震，加工第 15 支素材時刀具即毀損，為取得更多數據，因此總共進行 3 個循環實驗，另外 1215 鋼材加工 2 個循環、其餘 1144 及 S45CS1 則都只加工 1 個循環，如下所示，合計 4 種鋼材總共加工素材 224 支，各鋼種加工數量不同之原因將於後述詳細說明。

- (1) S45C：每 15 支為 1 個循環，加工 3 個循環，共 45 支
- (2) S45CS1：加工 1 個循環，共 77 支
- (3) 1215：第 1 個循環加工 35 支，第 2 個循環加工 33 支，共 68 支
- (4) 1144：加工 1 個循環，共 34 支

而加工機 DMARK\_CNC650 機器的各項硬體參數及切削實驗加工參數為：X、Y、Z 三軸的 100% 能耗值均為 1.5 kW，加工主軸的 100% 能耗值為 4.5 kW，切削液馬達、切屑排削馬達、主軸油冷馬達均為 750W。加工參數部分，主軸轉速為 2,500 rpm、切削速度為 100 mm/min。

## 四、研究結果與討論

### 4.1 資料擷取

本研究在加工的同時藉由控制箱與筆電間的連線，以每秒擷取 1 筆資料的頻率將主軸馬達負載功率百分比、X Y Z 軸馬達負載功率百分比、切削液馬達電流值、切屑捲削馬達電流值、主軸冷卻馬達電流值、機台總電流值等共 8 項數值即時儲存於電腦內。每支素材之加工時間為 142 秒，故總共可獲得 142 筆資料。其中第 1 秒～第 6 秒為下刀行程，第 7 秒～第 135 秒進行加工，第 136 秒～第 142 秒為退刀行程，故每次加工資料均取其第 7 秒～第 135 秒的數值，共 129 筆，也代表每支素材的加工時間為 129 秒。

前面述及 S45C 鋼材共加工 3 個循環，若將檔案中主軸馬達電流值轉換為能耗值，再將加工每支素材的主軸馬達能耗值 vs 素材編號繪製曲線，可得如圖 1 所示之曲線圖。前面也述及 S45C 鋼材在加工到第 6 支素材時主軸開始產生顫震，由圖中確實可以看出在第 1 個和第 3 個循環中，在加工第 6 支素材後主軸能耗值即急遽升高，此現象代表刀具已有損耗，切削力降低，為達到要求之切削量，CNC 須提供更大的功率給主軸馬達，就會導致主軸能耗值的急遽升高，因此判斷在第 7 支以後已屬不正常之加工，故本研究在計算 S45C 單支素材之加工能耗時乃採每一個循環中的第 1 ~ 6 支素材加工數據，作為加工 1 支 S45C 素材時 CNC 加工機各部位能耗值。

加工其他 3 種鋼材時也有類似的情況出現，但是因為各種鋼材的軟硬度不一樣，刀具開始出現顫振的時間點也不一樣，S45CS1 的材質比較軟，從曲線中發現在加工第 39 支素材後才出現主軸能耗值急遽升高的現象，因此 S45CS1 只加工 1 個循環，並採用第 1 ~ 39 支數據之平均值作為加工 1 支 S45CS1 素材時 CNC 加工機各部位能耗值。

加工 1215 時在完成第 1 個循環時發現在主軸能耗值曲線圖上沒有很明顯的轉折點，因此加做第 2 個循環實驗，在加工第 23 支素材後主軸能耗值急遽升高，因此計算 1215 時乃採第 2 個循環的第 1 ~ 23 支數據之平均值，作為加工 1 支 1215 素材時 CNC 加工機各部位能耗值。

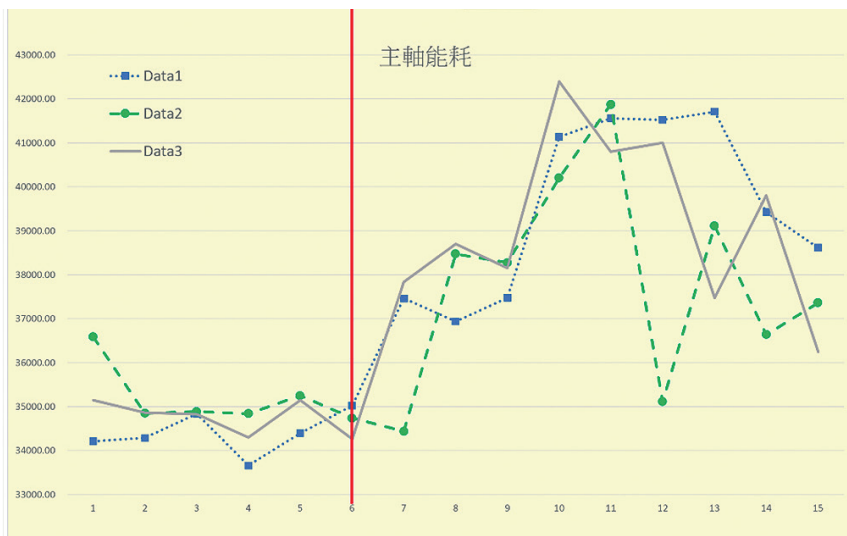


圖 1 加工 3 組 S45C 素材時主軸馬達能耗值曲線圖



1144 鋼材也只加工 1 個循環，在加工第 24 支素材後主軸能耗值急遽升高，故計算 1144 時乃採第 1 ~ 24 支數據之平均值作為加工 1 支 1144 素材時 CNC 加工機各部位能耗值。

由於加工單一支素材所損耗的切削液量太小，無法正確量測，因此切削液損耗的量測必須在經過若干支素材的加工後再進行損耗量測，然後再除以素材支數，以求取單一素材加工的切削液損耗。基於相同的實驗基礎，本研究在切削液損耗的量測上，4 種鋼材均以加工 15 支素材為基準，在每一種鋼種均於加工 15 支後進行損耗量測，再求取單一平均值。

在每種鋼材加工完 15 支後進行 1 次切削液損耗的量測，此量測數據單位為 cc，再乘上切削液密度 0.975 g/cc 可得到切削液之損耗重量。

加工後的量測結果，加工 1 支 S45C、S45CS1、1215、1144 素材分別損失切削液 16.90 g、16.25 g、16.25 g、16.57 g。

在加工刀具損耗量測部分，本研究所使用之刀具為威力 (WEENIX) 牌愛克姆螺牙粗銑成型刀，刀具外徑為 f25 mm，厚度為 5mm，經過秤重量得一把刀具的重量為 186.9 g。

因為各種鋼材軟硬度不一，因此在加工時對刀具的損耗程度亦不相同，在加工 S45C、S45CS1、1215、1144 時，分別在加工 6 支、39 支、23 支、24 支素材後刀具已經產生磨耗所致，因此以此數據做為刀具損耗計算之依據，加工後的量測結果，加工 1 支 S45C、S45CS1、1215、1144 素材刀具磨耗重量分別為 31.15 g、4.792 g、8.126 g、7.788 g。

## 4.2 電能耗損分析

平均加工 1 支 S45C 鋼材時加工機各部位的能耗值，如表 1 的第 1 列資料所示，然後扣除總電項目以外，其餘 7 項中各取每一單項占此 7 個項目總和的百分比則可得到各單項百分比值，如表 1 的第 2 列資料所示。另外在第 2 列資料最右一欄的數字 103.83 % 代表由 CNC 加工機擷取的總電數據換算為能耗值後，其值約為各分項的量

#### 44 快削鋼與中碳鋼於 CNC 加工之能資源耗用差異與減碳效益分析

測數據總和換算為能耗值之後的 1.038 倍，代表 CNC 加工機的總能耗約比吾人所量得的各分項能耗總和稍微高，為 3.83 %，此高出的數值可推測為加工機中，除了吾人所量測的這些分項項目以外，另有一些能量由機器本身以磨耗、熱能等方式而逸散掉。

**表 1 單支 S45C 加工時 CNC 加工機各部位能耗值及百分比分配 ( $10^6$  kWh)**

項目	X	Y	Z	S	切削液	排屑	主軸油冷	總電
平均能耗值	5,915.51	5,109.03	7,812.96	34,784.72	6,695.06	15,290.34	7,877.90	86,680.00
占全部百分比	7.09%	6.12%	9.36%	41.67%	8.02%	18.31%	9.44%	103.83%

觀察表中數據可以看出各部位中以切削主軸耗能最高，占全部能耗的 41.67%，其次則為切屑排削馬達，為 18.31%。

依照相同方式可求得其他 3 種鋼材，加工 1 支 S45CS1、1215、1144 鋼材時 CNC 各部位的能耗平均值如表 2 ~ 表 4 所示。在加工機各分項能耗的百分比值比較上，4 種鋼材都有相同的趨勢，都是以切削主軸耗能最高，其次則為切屑排削馬達

**表 2 單支 S45CS1 加工時 CNC 加工機各部位能耗值及百分比分配 ( $10^6$  kWh)**

項目	X	Y	Z	S	切削液	排屑	主軸油冷	總電
平均能耗值	4,376.50	4,604.27	8,436.00	28,988.14	6,383.45	14,176.68	7,573.70	77,739.60
占全部百分比	5.87%	6.18%	11.32%	38.89%	8.56%	19.02%	10.16%	104.29%

**表 3 單支 1215 加工時 CNC 加工機各部位能耗值及百分比分配 ( $10^6$  kWh)**

項目	X	Y	Z	S	切削液	排屑	主軸油冷	總電
平均能耗值	5,065.04	5,254.53	9,098.01	30,129.89	6,308.53	13,808.72	7,428.45	79,410.70
占全部百分比	6.57%	6.82%	11.80%	39.08%	8.18%	17.91%	9.64%	103.01%

表 4 單支 1144 加工時 CNC 加工機各部位能耗值及百分比分配 (10<sup>6</sup> kWh)

項目	X	Y	Z	S	切削液	排屑	主軸油冷	總電
平均能耗值	5,228.65	5,410.94	9,168.58	30,814.58	6,288.59	13,746.69	7,504.70	79,777.25
占全部百分比	6.69%	6.92%	11.73%	39.42%	8.05%	17.59%	9.60%	102.07%

接下來進行 4 種不同鋼材的比較，將 S45C、S45CS1、1215、1144 的的總電能耗值，以及其平均值繪製曲線，可得如圖 2 所示之曲線圖，其中分段曲線為每支素材的實際值，直線為其平均值。由圖上的平均值可以得知，若以 S45C 當作比較標準 (設為 100%)，可以得出其他 3 種快削鋼相對於 S45C 的總電能耗百分比值，其中 S45CS1 為 S45C 的 89.69%，1215 為 S45C 的 91.61%，1144 為 S45C 的 92.04%。

除了總電能耗值數據分析之外，由於在加工不同鋼材時，對鋼材的是否易於切削最敏感項目，當屬須克服材料移除時會產生負載的切削主軸能耗，因此再依相同方式單獨只對切削主軸的能耗做比較，可得如圖 3 所示之曲線圖，一樣若以 S45C 當作比較標準 (設為 100%)，可以得出其他 3 種快削鋼相對於 S45C 的切削主軸能耗百分比值，其中 S45CS1 為 S45C 的 83.34%，1215 為 S45C 的 86.62%，1144 為 S45C 的 88.59%。

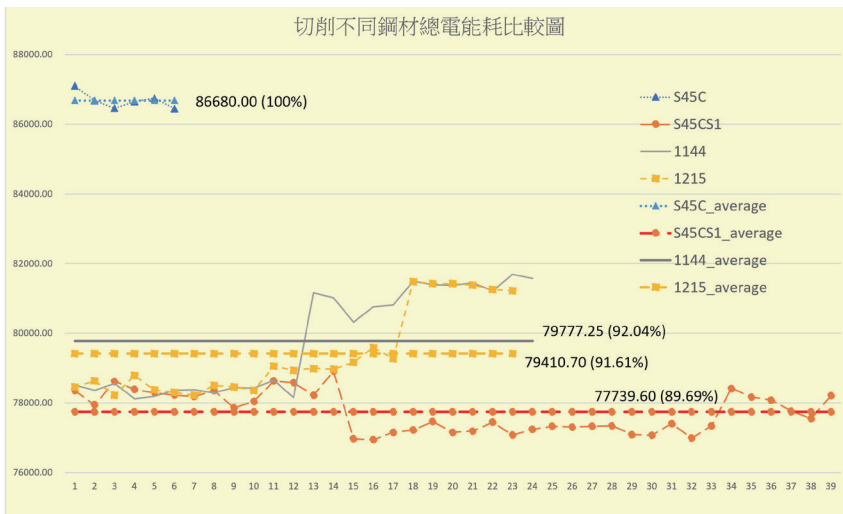


圖 2 切削不同鋼材時總電能耗比較圖

46 快削鋼與中碳鋼於 CNC 加工之能資源耗用差異與減碳效益分析

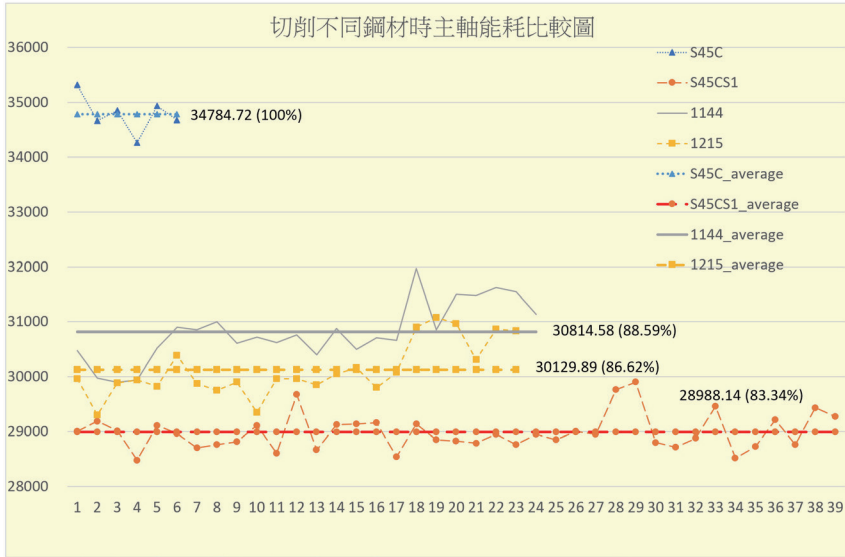


圖 3 切削不同鋼材時切削主軸能耗比較圖

4.3 非電能耗損分析

在非電流值的切削液及刀具能耗的分析部分，中鋼公司曾經透過其他計畫獲得切削刀具及切削液的損耗與碳排放值之間的轉換係數，如表 5 所示，此表可作為在計算切削刀具及切削液損耗的碳排放值時的轉換依據。

表 5 切削刀具及切削液對碳排放的轉換係數

項目	係數	單位	係數來源	數據建置日期
切削刀具	4.52	kgCO <sub>2</sub> /kg	工研院 DoItPro 18603	2011
切削液	1.02	kgCO <sub>2</sub> /kg	環境部 / 工研院	2019
台灣自來水	2.99x10 <sup>-4</sup>	kgCO <sub>2</sub> /kg	環境部產品碳足跡資訊網	2017
稀釋切削液	6.40 x10 <sup>-2</sup>	kgCO <sub>2</sub> /kg	加權計算	切削液：自來水 =1:15

由此表可得知切削液 1 g 的損耗等同於 6.40 x10<sup>-2</sup> g 的碳排放量，切削 1 支 S45C、S45CS1、1215、1144 鋼材分別會消耗 16.9 g、16.25 g、16.25 g、16.575 g 的

切削液。因此可求得切削各鋼材時的切削液消耗碳排放量，若以 S45C 減去 3 種快削鋼的切削液消耗碳排值，可得出以 S45C 為基準，切削 1 支其他快削鋼素材比 S45C 的減碳效益。將上述數值除以 1 支鋼材加工段的重量 0.1804 kg，即可求得 3 種快削鋼每公斤素材對 S45C 的單位鋼材減碳效益，再將減碳效益計算值各除以鋼材實際移除量 0.0737 kg，即可求得 3 種快削鋼每公斤素材對 S45C 的單位移除量減碳效益。所有數據整理如表 6 所示。

表 6 切削液損耗之碳排數據及減碳效益

鋼材	切削 1 支素材 切削液損失 (g)	切削液消耗碳排 (g CO <sub>2</sub> )	減碳效益 (g CO <sub>2</sub> )	單位鋼材 減碳效益 (g CO <sub>2</sub> /kg)	單位移除 量減碳效益 (g CO <sub>2</sub> /kg)
S45C	16.9	1.0816	--	--	--
S45CS1	16.25	1.04	4.16E-02	0.2305	0.5629
1215	16.25	1.04	4.16E-02	0.2305	0.5629
1144	16.575	1.0608	2.08E-02	0.1153	0.2815

另外由前一節所獲得的刀具損耗重量數據，由表 5 得知切削刀具 1 g 的損耗等同於 4.52 g 的碳排放量，切削 1 支 S45C、S45CS1、1215、1144 鋼材分別會消耗 31.15 g、4.792 g、8.126 g、7.788 g 的刀具，依據與切削液消耗碳排值相同的計算方式，可得到在加工各種鋼材時，切削刀具損耗之碳排數據及減碳效益，如表 7 所示。

表 7 切削刀具損耗之碳排數據及減碳效益

鋼材	切削 1 支素材 刀具損耗 (g)	刀具損耗碳排 (g CO <sub>2</sub> )	減碳效益 (g CO <sub>2</sub> )	單位鋼材 減碳效益 (g CO <sub>2</sub> /kg)	單位移除 量減碳效益 (g CO <sub>2</sub> /kg)
S45C	31.15	140.798	--	--	--
S45CS1	4.792	21.661	119.137	660.404	1,612.135
1215	8.126	36.73	104.068	576.871	1,408.228
1144	7.788	35.2	105.59	585.355	1,428.938

#### 4.4 減碳效益分析

依據經濟部公布全國電力資源供需報告中，110 年度電力排碳係數為 0.509 公斤 CO<sub>2</sub> e/度，依據此數值和前述加工 4 種不同鋼材時總電的能耗值（圖 2），可計算出切削 1 支鋼材可獲得總電之碳排數據及減碳效益如表 8 所示。

其中電功率碳排是將總電 kWh 值乘以 0.509 之後換算單位為 g 而得，減碳效益 (g CO<sub>2</sub>) 是以 S45C 的電功率碳排減去 3 種快削鋼的電功率碳排而得，單位鋼材減碳效益 (g CO<sub>2</sub>/kg) 是以減碳效益 (g CO<sub>2</sub>) 除以 1 支鋼材加工段的重量 0.1804 kg 而得，單位移除量減碳效益 (g CO<sub>2</sub>/kg) 是以減碳效益 (g CO<sub>2</sub>) 除以鋼材實際移除量 0.0737 kg 而得。

表 8 總電的碳排數據及減碳效益

鋼材	總電 (kWh, 度)	電功率碳排 (g CO <sub>2</sub> )	減碳效益 (g CO <sub>2</sub> )	單位鋼材 減碳效益 (g CO <sub>2</sub> /kg)	單位移除 量減碳效益 (g CO <sub>2</sub> /kg)
S45C	0.0867	44.120	--	--	--
S45CS1	0.0777	39.569	4.551	25.225	61.579
1215	0.0794	40.420	3.700	20.510	50.069
1144	0.0798	40.607	3.514	19.476	47.544

為探究鋼材在整個加工過程中的能耗情況，本研究在加工過程中進行了屬於電能方面的 7 項能耗數值分析及非電能方面的 2 項能耗數值分析，接下來即進行這 2 種電能與非電能能耗的總和比較。表 9 彙整了 4 種鋼材加工時各分項及總電的能耗數據，並增加計算各分項的合計值列於右邊第二欄，並將這些能耗數值轉換為碳排數值如表 10 所示。

表 9 各分項與總電的能耗

能耗 (10 <sup>-6</sup> kWh)	X	Y	Z	S	切削液 馬達	排削 馬達	主軸 油冷	分項 合計	總電
S45C	5,915.509	5,109.028	7,812.963	34,784.722	6,695.062	15,290.340	7,877.901	83,485.53	86,680.0
S45CS1	4,376.496	4,604.274	8,436.004	28,988.141	6,383.447	14,176.681	7,573.704	74,538.75	77,739.6
1215	5,065.036	5,254.529	9,098.007	30,129.891	6,308.527	13,808.720	7,428.454	77,093.16	79,410.7
1144	5,228.646	5,410.938	9,168.576	30,814.583	6,288.588	13,746.690	7,504.699	78,162.72	79,777.2

表 10 各分項與總電的減碳效益

碳排 (g CO <sub>2</sub> )	分項合計	總電	切削液	刀具	分項與非電能 項目之總和	總電與非電能 項目之總和
S45C	42.494	44.120	1.082	140.798	184.374	186.000
S45CS1	37.940	39.569	1.040	21.661	60.641	62.270
1215	39.240	40.420	1.040	36.730	77.010	78.190
1144	39.785	40.607	1.061	35.200	76.046	76.868

將上述 2 個表格內的數據進行單位鋼材減碳效益與單位移除量減碳效益的計算可得總電與非電能項目總和之減碳效益，如表 11 所示，由表中可到以下數據：3 種快削鋼相對於 S45C 減碳 58.0 ~ 66.5%，單位鋼材減碳效益 (單位為 g CO<sub>2</sub>/kg) S45CS1 為 685.8、1215 為 597.6、1144 為 604.9，平均減碳 629 g CO<sub>2</sub>/kg，單位移除量減碳效益 S45CS1 為 1,674.2、1215 為 1,458.8、1144 為 1,476.75，平均減碳 1,537g CO<sub>2</sub>/kg。

表 11 總電與非電能項目總和之減碳效益

鋼材	總電與非電能 項目總和之碳排 (g CO <sub>2</sub> )	減碳效益 (g CO <sub>2</sub> )	較 S45C 減碳百分比	單位鋼材 減碳效益 (g CO <sub>2</sub> /kg)	單位移除量 減碳效益 (g CO <sub>2</sub> /kg)
S45C	186.000	--	--	--	--
S45CS1	62.270	123.7297	66.5%	685.8647	1,674.29
1215	78.190	107.8101	58.0%	597.6164	1,458.863
1144	76.868	109.1325	58.7%	604.9446	1,476.752

#### 4.5 碳足跡分析

進一步整合中鋼公司分析鋼材製造、運輸、CNC 加工等搖籃至大門碳足跡，結果如表 12 所示，顯示以快削鋼 1144、1215、S45CS 生產 1 根艾克姆螺桿，碳足跡分別為 634.0、595.1、561.9 g CO<sub>2</sub> e/ 根，基線鋼 S45C 則為 685.9 g CO<sub>2</sub> e/ 根，快削鋼減碳效益 51.9~124.0 g CO<sub>2</sub> e/ 根。研究成果能作為 CNC 加工等自動化製造產業，評估能資源耗用及碳排參考。

表 12 搖籃至大門各階段碳足跡

艾克姆螺桿各製造階段碳排	中碳鋼 ( 基線 )	快削鋼		
單位：g CO <sub>2</sub> e/ 個 (0.1804kg/ 個)	S45C	1144	1215	S45CS1
中鋼鋼材製造	460.2	482.3	477.2	459.9
中鋼運輸至晉椿	9.3	9.3	9.3	9.3
晉椿拋光矯直或熱處理	9.7	44.7	9.7	9.7
晉椿運輸至 CNC 加工廠	20.7	20.7	20.7	20.7
CNC 電力使用	44.1	40.6	40.4	39.6
CNC 切削液耗損	1.1	1.1	1.0	1.0
CNC 刀具磨耗	140.8	35.2	36.7	21.7
合計	685.9	634.0	595.1	561.9
快削鋼艾克姆螺桿較基線減碳量 (g CO <sub>2</sub> e/ 個)	51.9	90.8	124.0	
每公噸快削鋼較基線鋼減碳量 (kg CO <sub>2</sub> e/t- 快削鋼)	287.9	503.4	687.4	

本研究執行期間舉辦過多次專家諮詢會議，依專家建議分析 4 種情境進行減碳效益分析：(1) 切刀未耗損 - 全電、(2) 切刀未耗損 - 分電加總、(3) 加工 15 根 - 全電、(4) 加工 15 根 - 分電加總。結果如表 13 所示，顯示加工 15 根之減碳效益雖稍高，但考量切刀品質一致性及全電代表供電側電耗，因此建議以“切刀未耗損 - 全電”之減碳效益為主。

表 13 每移除 1 公噸快削鋼各情境之減碳效益 ( 單位：g CO<sub>2</sub> )

每移除 1 公噸 快削鋼	切刀未耗損 全電	切刀未耗損 分電加總	加工 15 支 全電	加工 15 支 分電加總
1144	702.75	691.87	732.57	722.96
1215	1,228.89	1,222.85	1,257.79	1,253.91
S45CS1	1,678.20	1,678.25	1,698.28	1,706.10



## 五、結論

本研究以實測方式量化 3 種快削鋼與 1 種中碳鋼在 CNC 加工階段之能資源差異，彙整研究結果可以得到如下之總結：

本研究經由訪廠調查與實測，鑑別 CNC 加工使用快削鋼替代中碳鋼，可以節省切削時間、電力消耗、延長刀具壽命、減少切削油耗用。

各種不同材料加工時，在加工機各部位的能耗比較上皆以切削主軸能耗為最高，占整體能耗 40%。刀具磨耗差異明顯，切削液損耗差異不大。

搖籃至大門碳足跡以快削鋼 1144、1215、S45CS1 生產 1 根愛克姆螺桿分別為 634.0、595.1、561.9 g CO<sub>2</sub>e/ 根，基線鋼 S45C 為 685.9 g CO<sub>2</sub>e/ 根，若以百分比顯示，減碳效益分別為 7.57%、13.24%、18.08%。

快削鋼 1144、1215、S45CS1 用於 CNC 加工之生命週期減碳係數為 287.9、503.4、687.4 kg CO<sub>2</sub>e/t，不同快削鋼之減碳差異大。以 111 年快削鋼銷售 51,130 公噸計算，減碳效益為 20,230 t CO<sub>2</sub>e。

研究成果能作為 CNC 加工產業評估應用快削鋼減碳效益參考，未來發展 CNC 加工智能化計算 CFP 及降低 GHG 排放。

## 誌謝

本研究感謝晉椿公司、台達電公司、工研院綠能與環境研究所能源政策及推動組、工研院綠能與環境研究所永續環境技術組的協助。

## 參考文獻

- Diaz, N., Redelsheimer, E., Dornfeld, D. (2011a), Energy consumption characterization and reduction strategies for milling machine tool use. Hesselbach, J., Herrmann, C. (Eds.), Globalized Solutions for Sustainability in Manufacturing. Proceedings of the 18th CIRP international conference of life engineering, May 2nd – 4th, pp. 263-267.
- Dietmair A., Verl A., (2009), “Energy Consumption Forecasting and Optimisation for tool Machines” , Institute for control engineering of machine tools and manufacturing units (ISW), Universität Stuttgart, Germany, March 2009, pp. 62-67
- Draganescu, F., Gheorghe, M., Doicin, C.V., (2003), “Models of machine tool efficiency and specific consumed energy” . J. Mater. Process. Tech. vol.141 (1), pp. 9-15.
- Eceee (2017), ENTR Lot 5: Machine tools (<https://www.eceee.org/ecodesign/products/machine-tools/>)
- Eco Machine Tools (2024), (<https://ecomachinetools.com/>)
- He, Y., Liu, F., Wu, T., Zhong, F.P., Peng, B., (2012), “Analysis and estimation of energy consumption for numerical control machining” , Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf, Vol.226 (2), 255-266.
- Heidenhain (2010), Aspects of Energy Efficiency in Machine Tools. ([https://www.heidenhain.de/fileadmin/pdf/en/01\\_Products/Technische\\_Dokumentation/TI\\_Energy\\_Efficiency\\_in\\_Machine\\_Tools\\_ID751261\\_en.pdf](https://www.heidenhain.de/fileadmin/pdf/en/01_Products/Technische_Dokumentation/TI_Energy_Efficiency_in_Machine_Tools_ID751261_en.pdf))
- Heidenhain (2024) (<http://www.heidenhain.com/>)
- Hu S., Liu F., He Y., Hu T., (2012), ” An on-line approach for energy efficiency monitoring of machine tools” , Journal of Cleaner Production, vol. 27 pp.133-140.

- IEA, (2020), Iron and Steel Technology Roadmap-Towards more sustainable steelmaking. (<https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap>)
- ISO (2017), ISO/DIS 14955-1:2017 Machine tools - Environmental evaluation of machine tools - Part 1: Design methodology for energy-efficient machine tools (<https://www.iso.org/standard/70035.html>)
- ISO (2019a), ISO 20140-1: Automation systems and integration — Evaluating energy efficiency and other factors of manufacturing systems that influence the environment. Part 1: Overview and general principles. (<https://www.iso.org/standard/69358.html>)
- ISO (2018), ISO 20140-2: Automation systems and integration — Evaluating energy efficiency and other factors of manufacturing systems that influence the environment. Part 2: Environmental performance evaluation process. (<https://www.iso.org/standard/64673.html>)
- ISO (2019b), ISO 20140-3: Automation systems and integration — Evaluating energy efficiency and other factors of manufacturing systems that influence the environment. Part 3: Environmental performance evaluation data aggregation process (<https://www.iso.org/standard/64674.html>)
- ISO (2024), ISO 20140-5: Automation systems and integration — Evaluating energy efficiency and other factors of manufacturing systems that influence the environment. Part 5: Environmental performance evaluation data. (<https://www.iso.org/standard/82978.html>)
- Li, W., Kara, S., (2011), “An empirical model for predicting energy consumption of manufacturing processes: a case of turning process” , Proc. Inst. Mech. Eng. Part B, J. Eng. Manuf. vol.225 (9), pp.1636-1646.
- Mori, M., Fujishima, M., Inamasu, Y., Oda, Y., (2011), ” A study on energy efficiency improvement for machine tools” , CIRP Ann. Manuf. Tech. vol.60 (1), 145-148.

Vincent Aizebeoje Balogun and Paul Tarisai Mativenga, (2013), " Modelling of direct energy requirements in mechanical machining processes" , Journal of Cleaner Production, vol. 41, pp. 179-186.

吳致呈、陳俊達，(2012)，綠色鋼材在生命週期之減碳效益，永續產業發展期刊，Vol. 61, pp. 55-61.

黃增輝，(2003)，鋼材切削性質評估指標之研究，國立成功大學材料科學及工程學系碩士論文