

超精密切削加工之氣靜壓主軸技術

徐紹煜 / 林玉莖 / 郭宇傑

工研院機械所 先進製造技術組 精密光電設備部

前言：傳統以微孔節流之氣靜壓主軸有剛性不足與易產生氣槌振動之缺點，不利於超精密加工。工研院機械所在工基「高階製造系統」第一期程計畫以多孔質氣靜壓軸承為核心，建立氣靜壓主軸之設計分析、多孔質材料製作與性能驗證技術。提升氣靜壓主軸之剛性與穩定性，將氣靜壓主軸應用於超精密切削加工。

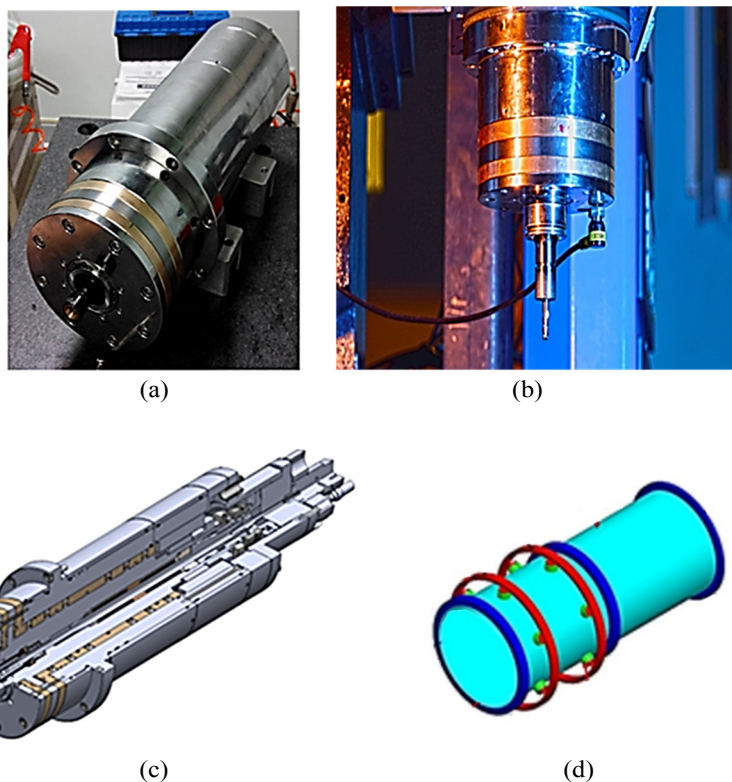
本計畫開發可應用於超精密切削加工機之高剛性氣靜壓主軸，主要的加工工件鎖定在精微模具與光學模仁的超精密高速銑削加工；超精密銑削加工以輕切削為主，要求的是型狀精度與鏡面加工($Ra \leq 0.2\mu m$)，因此主軸的迴轉精度與剛性將影響主軸性能。傳統氣靜壓主軸之氣靜壓軸承大多使用微孔節流，微孔節流之軸承剛性太小，無法滿足於切削加工高剛性之須求，若要提高剛性，微孔節流之氣靜壓軸承則會加入氣袋或溝槽，但在高速運轉時，氣袋與氣隙之壓力差所造成的氣槌振動現象，會影響切削品質與穩定性；為了提高剛性與避免氣槌振動，使氣靜壓主軸可以進行切削加工，世界知名的氣靜壓切削主軸製造廠如 TOSHIBA、NSK 等之氣靜壓軸承皆利用多孔質材料節流；因此本計畫所開發之氣靜壓主軸軸承是以多孔質陶瓷節流，並搭配至高精度 CNC 綜合加工機；氣靜壓主軸之規格與相關技術詳述如下：

- 內藏式馬達-功率：5 kW，最高轉速：30,000 rpm
- 軸頸軸承-軸承內徑： $\phi 60$ mm，6 列多孔質氧化鋁柱塞，每列 8 顆。
- 止推軸承-環狀多孔質氧化鋁柱塞，外徑： $\phi 60$ mm，內徑： $\phi 60$ mm。

- 剛性：徑向 ≥ 50 N/ μm ，軸向 ≥ 90 N/ μm (供氣壓力：4 bar，氣隙約 10 μm)。
- 迴轉精度 ≤ 0.5 μm 。
- 刀把形式：HSK-40E
- 自動拉鬆刀系統
- 冷卻位置：軸頸軸承外套/止推軸承端面/馬達定子座。
- 感應裝置：溫度-熱電偶、振動-加速規。

多孔質材料製作技術：多孔質氣靜壓軸承之規格需求為孔洞直徑 ≤ 1 μm ，孔隙率 $\leq 30\%$ ，透氣率 $\leq 10^{-14}$ m^2 ，多孔質材料選擇氧化鋁與石墨，粉體材料製備，透過粉體高速研磨分散技術，將粉體粒徑微細化 ≤ 500 nm，以適當之結合劑將粉體結合並產生孔洞等向性，以冷均壓成型技術成型後進行高溫燒結，最後以精密切削加工氣靜壓軸承表面。

氣靜壓軸承性能分析：以商用套裝軟體 FLUENT 為分析工具，利用有限體積法分析多孔質氣靜壓軸承之負荷能力、壓力分布與氣隙之關係，決定節流器之尺寸參數、個數與配置，以做為主軸軸承模組設計之參考。多孔質邊界條件以 Darcy condition 設定，邊界條件中之透氣率以實驗裝置進行修正。目前模擬分析與實證結果誤差約為 10%。



超精密氣靜壓切削主軸之實品與分析模型：(a)氣靜壓切削主軸實品，(b)氣靜壓切削主軸振動監測，(c)氣靜壓切削主軸三維內部構造，(d)主軸徑向流場分析模型

氣靜壓主軸系統設計：導入虛擬氣靜壓主軸之觀念，依據高精度銑削之切削特性，計算切削力與切削動態特性，進行主軸之構型設計，結合有限元素分析與計算流體分析，針對氣靜壓主軸之軸承剛性與配置、軸承跨距、動態與溫升熱變形等進行分析，以求得氣靜壓主軸之最佳設計。

自動拉鬆刀系統：開發適用於氣靜壓主軸之自動拉鬆刀系統，以高速螺旋彈簧取代盤型彈簧，減少不平衡所造成之迴轉精度誤差；為了避免打刀時之衝擊力使心軸與止推盤碰撞，在打刀缸處設計特殊的反扣機構，避免打刀力傳至止推軸承處，以提高止推盤上多孔質陶瓷之可靠度與壽命。

研磨加工技術：為精準的控制氣靜壓軸承之氣隙與減少表面粗度所產生之紊流，利用全液靜壓磨床與化學拋技術將心軸與軸承之金屬加工成鏡面($Ra \leq 0.1 \mu m$)；而軸承座金屬與多孔質陶瓷的平面斷差，也會產生紊流，造成氣流不穩定，

利用異種材料(陶瓷與金屬)研磨製程，以確保異種材料之同平面。

系統組裝驗證技術：因為氣靜壓主軸之高速、高精度等要求，裝配時將開發間隙調整、軸承拋光與主軸拆卸等夾治具輔助，並訂定氣靜壓主軸拆裝標準作業程序；性能驗證包含高速線上動平衡、迴轉精度量測、熱變型量測與氣靜壓主軸剛性量測。

目前氣靜壓切削主軸已完成功能驗證，並裝設於 CNC 工具機進行切削驗證，持續進行性能改善。未來為因應智慧化須求，主軸將內建感應器進行主軸溫升熱變形與振動監控，將主軸系統運轉狀況建立資料庫；另外提升氣靜壓主軸可靠度，將建立失效模式分析表與關鍵項目清單，進行關鍵零件的可靠度試驗與可靠度模型預估，建立關鍵零件相關設計資料與維修更換時間。 ■