

38. 超音波鑲埋機之研發

許坤明 副教授、趙原伯
 虎尾科技大學 電腦輔助工程系
 創意工程與精密科技研究所

摘要

本研究進行超音波鑲埋機設計與製造，並利用 ANSYS 有限元素分析軟體，進行超音波鑲埋之聲學喇叭分析與設計，找出最佳尺寸之聲學喇叭，並與一般市售聲學喇叭進行比較，作為超音波鑲埋機的參考；再以實驗方式進行材料測試分析壓克力材料與嵌鑲螺帽之握裹連結能力，找出最佳的加工參數，使能提升超音波嵌鑲之品質。本計畫之執行成果，能應用在 LCD 產業上，在螺帽嵌鑲部分能得到新的加工方法，並拓展超音波加工應用商機，也把所得到之技術資料將作為超音波加工業降低營運成本及加速生產效率有力依據。

關鍵字：超音波鑲埋、有限元素分析、聲學喇叭、加工參數

1. 前言

超音波鑲埋是將金屬零件封裝於熱塑性材料內之過程。它是一種新發展的加工法，使用這種程序不僅能取代傳統的方法，如射出成型、熱壓或膠接等方法，也能節省製程時間及成本的支出，既簡便又安全、局部熱熔而不會破壞材料本體。目前絕大部分 LCD 是由塑膠外殼支撐再以螺絲固定，現在傾向將螺帽嵌鑲在塑膠機殼中再用螺絲固定，製作方法大都先將螺帽嵌鑲在塑膠外框內以方便組裝，並希望能在 LCD 產業裡的塑膠外框製程上有所應用，以便能創立商機，也能讓超音波加工持續立足於工業中

2. 超音波鑲埋加工機

圖1為超音波鑲埋加工機，主要是由超音波產生器產生每秒約15000次的正負電壓變化，使壓電晶體產生同樣次數的收縮及膨脹，經聲學喇叭傳遞至金屬零件使其上下振動，然後與熱塑性材料發生劇烈摩擦，最後塑膠工件熔化，而使金屬零件逐漸被壓入嵌鑲而完成鑲埋作業。本機器的主要特徵如下：

- 工作電壓：220V AC
- 工作頻率：15kHz
- 工作電流：6A
- 輸出功率：1800W
- 可調節硬化時間：0~9.99 sec
- 可調節熔接時間：0~9.99 sec
- 可調節延遲時間：0~9.99sec
- 可調節硬化時間：0~9.99 sec
- 可調節高度：457 mm
- 可調節衝程：(Max 89 mm)



圖1 超音波鑲埋加工機

3. 聲學喇叭之設計

聲學喇叭的功能是將機械振動的振幅放大，或是將能量集中在較小的截面上進行聚能。一般情形，超音波振動子產生的振幅約4~10 μm，然而，超音波加工有效的振幅必須超過10~100 μm以上才能進行有效的加工[1]，這時振動子的振幅就必須藉由聲學喇叭放大。

3.1 聲學喇叭設計方法

一般傳統的聲學喇叭設計方法是在極小的平衡元素下彈性動作、慣性推動，並融合了喇叭的長度以達到共振[2, 3]。有限元素法是目前應用在科學與科技上多樣性問題最普遍的方法，有限元素法也能適用於任何系統的幾何構造或邊界條件。近年來，開始嘗試應用有限元素法設計出整體非對稱的聲學喇叭[4]。

許多聲學喇叭的形狀是在實際應用時被發現 (Rawson et al, 1987)。[5] 在兩端間之截面於相同面積比的條件下，依振幅的放大率降序排列為階梯形、指數形及錐形。

雖然計算一個錐形形狀的喇叭是很困難，但由於它不僅容易製造，而且還具有跟指數形相同的好振幅，因此錐形的喇叭在工業界被廣大的應用。

3.2 喇叭共振長度的計算

錐形喇叭—圓柱連接錐形大端面的錐形喇叭，如圖2所示，其共振長度被計算方式如下，[6]

$$\tan \alpha_1 = \frac{\alpha_2 (\sqrt{S_1/S_2} - 1)^2 - [\sqrt{S_1/S_2} (\alpha_2)^2 + (\sqrt{S_1/S_2} - 1)] \tan \alpha_2}{\sqrt{S_1/S_2} \cdot \alpha_2 [\alpha_2 + (\sqrt{S_1/S_2} - 1) \tan \alpha_2]}$$

(1-1)

且 $\sqrt{S_1/S_2} = D_1/D_2$ ， S_1 和 S_2 分別為輸入端及輸

出端的面積， D_1 和 D_2 分別為輸入端及輸出端的直徑。 α (波長常數) $= \omega/c$ ， ω (共振角頻率) $= 2\pi f$ ， c 為喇叭材料的聲音傳播速度。喇叭的振幅放大率 M 為：

$$M = \left| \sqrt{S_1/S_2} \cdot \frac{\cos \alpha l_1}{\cos \alpha l_2} \cdot \frac{\alpha l_2}{\alpha l_2 + (\sqrt{S_1/S_2}) \tan \alpha l_2} \right|, \quad [1-2]$$

錐形喇叭－錐形小端面連接圓柱的錐形喇叭，如圖3所示，其共振長度為：

$$\tan \alpha l_2 = \frac{\alpha l_1 (\sqrt{S_1/S_2} - 1)^2 - [\sqrt{S_1/S_2} (\alpha l_1)^2 + (\sqrt{S_1/S_2} - 1)^2] \tan \alpha l_1}{\alpha l_1 [\sqrt{S_1/S_2} \cdot \alpha l_1 - (\sqrt{S_1/S_2} - 1) \tan \alpha l_1]}, \quad [1-3]$$

振幅放大率 M 為：

$$M = \left| \frac{\sqrt{S_1/S_2} \cdot \alpha l_1}{(\sqrt{S_1/S_2} - 1) \cos \alpha l_2 \cdot \sin \alpha l_1 + \alpha l_1 \cdot \cos (l_1 + l_2)} \right|, \quad [1-4]$$

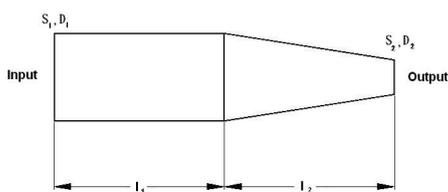


圖2 圓柱連接錐形大端面的錐形喇叭

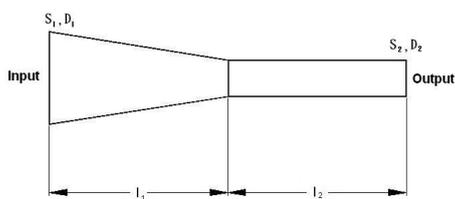


圖3 錐形小端面連接圓柱的錐形喇叭

根據有限元素法分析，喇叭可分為簡單及均質。如圖4所示，由於喇叭是水平對稱的，因此圖中呈現的只有一半的節點。分析採用solid95作為建模元素，為20節點之立方體元素，具有x、y、z三方向的自由度。在不降低計算精度的情況下，可容許不規則的喇叭形狀，也具有很好的變形相容性[7]。

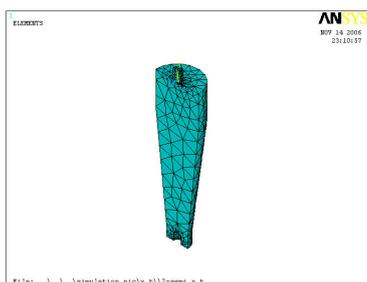


圖4 錐形聲學喇叭之有限元素網格化模型

根據模態分析，可以得到喇叭的自然頻率，通過適當的設計，喇叭將可與機器產生共振，並可減少輸入的能量。由實施的諧和分析，可做出在週期性負荷之下的結構反應，例如激發喇叭的音波波長在15 kHz作動時，振幅放大率可以在計算縱向方向位移產生時找出[8]。

由於超音波所使用的喇叭須要高強度及高穩定性的材料，所以使用A7075-T651鋁合金作為ANSYS分析之焊頭材料，其材料的參數如表1所示。

表1 材料之參數

彈性係數	蒲松比	質量密度 ρ	建模元素
E	ν		素
71.7(GPa)	0.33	2810(kg/m^3)	Solid95

這項分析採用邊界固定的方式，將材料的特性設定好，然後只需設置拘束，不須要給其負載，亦即將喇叭與振動子結合的部份拘束於Ux, Uy, Uz, Rx, Ry, 和 Rz之方向。在執行諧和分析時，拘束連接部份，並設定輸入端為0.01mm的激發位移，其頻率的範圍設定在0~15kHz之間。從固定端到自由端的縱向方向中，在每截面的位移找出振幅放大值。

4. 結果與討論

4.1 錐形喇叭分析

一般商用的錐形喇叭不是單純的錐形，它在輸入端和輸出端都是圓柱形，目前只有少數文獻可以找到研究此種類型的喇叭，根據商用喇叭的直徑比導出方程式(1-1)及方程式(1-3)，在此研究中發現了理論尺寸，其尺寸表為表2所示。此外，由模態分析而獲得其自然頻率為表3所示。經過此實驗可以觀察到經過設計的喇叭自然頻率與運作的機械頻率最為接近。因為它可以與機械產生共振頻率，此喇叭將會比商用喇叭更有效能。此外，其硬度也高於商用喇叭。由諧和分析得到兩種喇叭的振幅放大率如表4所示。由表4可發現，ANSYS分析的振幅放大率最接近方程所求得的。另外，經設計後之喇叭振幅放大率，比商用喇叭來的高，且所需的材料體積也較少。

如果在商用型及設計後的喇叭中把l3部分捨去，其自然頻率為表5所示。由計算公式所獲得之喇叭更高於商用喇叭，且自然頻率更接近的工作頻率(15 kHz)。可能的原因應該是此商用喇叭不是方程式所設計集成的，導致兩頻率有顯著的差異，因此，商用喇叭必須調整l3的最大長度。此外，完成諧和分析在對它們的振幅放大率進行比較如表6所示。且發現振幅放大率與方程式計算之間的差額約0.06，商用的喇叭失誤振幅放大率也比較大的，也可能引起特殊振幅放大率的產生。

經過此研究的結果證明，由方程式所設計的喇叭性能會比商用喇叭來的佳，且在分析l3之外部分的振幅放大率誤差上不到1%。結果也證明，由方程式(1-1)及方程式(1-3)所設計出的喇叭性能會優於商用喇叭，且所需的材料體積也較少。

4.2 超音波鑲埋之加工測試

本研究與合作廠商明和超音波公司共同開發 Maxwide MEB-1518-B/L之機器來進行超音波鑲埋測試，把直徑為 $\Phi 6$ mm及高為5.88 mm且外部有紋路包附之黃銅螺帽，如圖5，圖6所示，將其鑲埋至壓克力材料中，並提供0.2 mm干涉和導入的孔洞。在給予固定適當的加工參數，來進行加工測試，鑲埋過程如圖7所示。測試工件如圖8所示。

分析商用喇叭及方程式設計出喇叭的所需的壓力與鑲埋深度之間的關係圖如圖9所示。結果證明，使用分析設計的喇叭與商用喇叭之鑲埋是有所差異的，這些現象解釋如下：在超音波鑲埋過程中進行研究分析，在喇叭的輸出端面會釋放高能量，也就是在經設計出的理論型喇叭輸出端面所產生的振幅會高於一般商用喇叭，在嵌鑲時的效能會比商用的喇叭來的顯著，因而得較佳的加工產品。

5. 結論

本研究完成後，順利的與合作公司研發出超音波鑲埋機之開發，其具有操作簡便、局部熱熔並能快速的進行加工，不僅縮短製程時間及減少不必要的成本花費，並解決了傳統嵌鑲加工時所遇到之問題，如：

1. 包覆射出成形加工時，成本太高，射出模製作不易，螺帽置放過程的危險性。
2. 熱壓方式加工時，塑膠容易受熱變形，降溫不易，操作人員易燙傷。

在製作聲學喇叭方面，經本研究所設計出的喇叭，自然頻率會最接近超音波產生器之自然頻率，且振幅均優於一般市售的商用喇叭，製程上也可以大幅節省喇叭加工及尺寸修正的試誤時間，並能大大的提升喇叭效能。

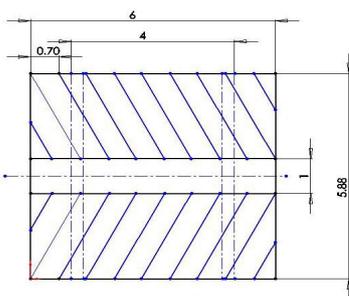


圖5 黃銅螺帽之側視圖



圖6 黃銅螺帽之本體

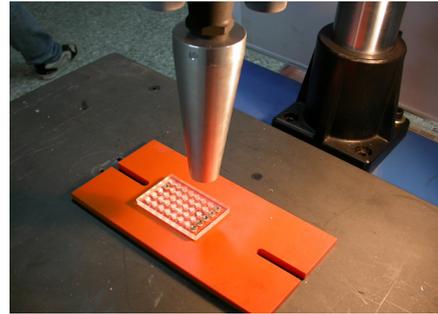


圖7 鑲埋之過程

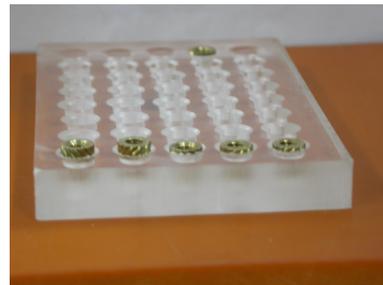


圖8 經測試後之工件

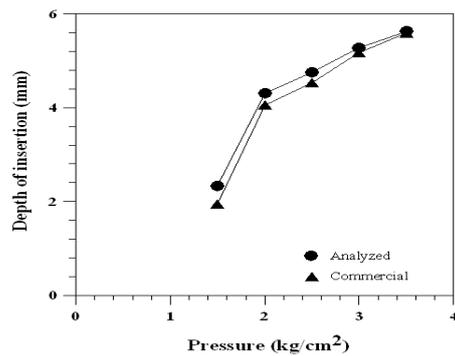


圖9 壓力與鑲埋深度之間的關係圖

表2 錐形喇叭模型尺寸

單位 (mm)	商用	理論分析模型
D1	60	60
D2	30	30
L1	45	17.3
L2	133	162.2
L3	15	4

表3 錐形喇叭模型之自然頻率 (Hz)

喇叭 模態數目	商用模型	理論分析模型
第一模態	234.75	254.58
第二模態	4098.8	4244.4
第三模態	4617.1	4859.6
第四模態	8607	9122
第五模態	13575	14183

表4 錐形喇叭於振幅放大比之誤差比較

喇叭 性質	商用模型	理論分析模型		
D ₁ /D ₂	2:1	2:1		
總長(mm)	193	183.5		
操作頻率(kHz)	15	15		
振幅 放大比M	分析方式			
	ANSYS	理論值	ANSYS	理論值
	2.23	2.58	2.03	2.01

表5 捨去輸出端 l_3 後的錐形喇叭模型之自然頻率(Hz)

喇叭 模態數目	商用模型	理論分析模型
第一模態	251.72	258.55
第二模態	4675.9	4366
第三模態	4710.8	4885
第四模態	9532.2	9319.4
第五模態		14544

表6 捨去輸出端 l_3 錐形喇叭於振幅放大比之誤差比較

喇叭 性質	商用模型	理論分析模型		
D ₁ /D ₂	2:1	2:1		
總長(mm)	178	179.5		
操作頻率(kHz)	15	15		
振幅 放大比M	分析方式			
	ANSYS	理論值	ANSYS	理論值
	17.3	2.58	1.97	2.01

參考文獻

1. Amin, S. G., M. Ahmed, H. M., and Youssef, H. A., Computer-aided design of acoustic horns for ultrasonic machining using finite-element analysis, Journal of Material Processing Technology, Vol. 55, No.3-4, pp. 254-260(1995).
2. Pandey, P. C. and Shan, H. S., Modern machining processes' Tata, McGraw-Hill, New York, 1980.
3. Satyanarayana, A. and Reddy, B. G. K., Design of velocity transformers for ultrasonic machining, Electrical India, Vol. 24, pp. 11-20(1984).
4. Coffignal, G. and Touratier, M. "A computer aided design program for the tuning of ultrasonic machining tools using the Finite element method," Proc.5th Int. Modal Analysis Conf., England(1987).
5. Youssef, H. A., Design of conical acoustic horns necessary for ultrasonic equipment, Full. Fac. Eng., Alexandria University, Vol. 4(1971).
6. Simakawa, M., The Principles and Practices of Ultrasonic Engineering (in Chinese), Fu Han Co., Taipei, pp. 77(2001).
7. Chao, L., The dynamic analysis and design of horns used in ultrasonic machining based on FEM, T China(2005).
8. ANSYS verification manual, Houston, PA: Swanson Analysis Systems, Inc., 1994.