

# 鈹金折床衝壓製程參數分析與最佳化

楊捷凱、王正賢

E-mail: 9600660@mail.dyu.edu.tw

## 摘要

本文探討之加工方法為目前業界經常使用的折床衝壓成形法(press brake forming)，此類加工設備可用於製造多段折彎與形狀簡單之產品，並可藉由調整衝程深度(Penetration)來生產不同角度之鈹金(Sheet Metal)，以滿足少量多樣之產品需求。因此，本研究之主要目的為推導一有效率之解析解模型，以預測鈹金折床衝壓成形製程中產生之回彈角度(Springback Angle)及其折彎時所需之衝程深度，並探討鈹金製程中之(1)材料類型，(2)鈹金設計角度，(3)鈹金厚度和(4)衝頭半徑等因子與回彈角度的關係。以期能提供操作人員了解各種加工參數對於回彈角度的影響程度，並作為一修正加工參數的參考依據。此外，本文亦將透過有限元素法(Finite Element Method)之商業套裝軟體ANSYS與鈹金折彎實驗來求得模擬與實驗之回彈值，並將所得之結果與解析解模型比較，以驗證此解析解模型之可行性與準確性。其後，更將利用最佳化方法找出不同加工參數下之最佳設計角度與衝程深度，使操作人員能快速且精確地製造出符合欲成形角度之鈹金，以降低手工修整比例，並減少成本與時間的浪費，進而提升鈹金零件之製造能力。

關鍵詞：折床衝壓成形法；衝程深度；鈹金；回彈角度；有限元素法

## 目錄

封面內頁 簽名頁 博碩士論文暨電子檔案上網授權書.....	iii	中文摘要.....	iv
Abstract.....	v	誌謝.....	vi
目錄.....	x	表目錄.....	xiii
第一章 緒論.....	1	1.1 研究背景與動機.....	1
1.1.1 研究背景與動機.....	1	1.1.2 研究目的.....	2
1.1.2 研究目的.....	2	1.3 折床機之簡介.....	2
1.3 折床機之簡介.....	2	1.4 材料之塑性變形與回彈.....	5
1.4 材料之塑性變形與回彈.....	5	第二章 文獻回顧.....	7
第二章 文獻回顧.....	7	2.1 材料之擬合方程式.....	7
2.1 材料之擬合方程式.....	7	2.2 鈹金回彈之數學模型.....	8
2.2 鈹金回彈之數學模型.....	8	2.3 電腦輔助模擬與分析.....	9
2.3 電腦輔助模擬與分析.....	9	第三章 研究方法.....	10
第三章 研究方法.....	10	3.1 材料性質檢測.....	12
3.1 材料性質檢測.....	12	3.2 非線性材料之擬合方程式.....	15
3.2 非線性材料之擬合方程式.....	15	3.3 衝程深度計算.....	18
3.3 衝程深度計算.....	18	3.4 折床衝壓之回彈預測解析解.....	20
3.4 折床衝壓之回彈預測解析解.....	20	3.4.1 單圓法解析解模型.....	22
3.4.1 單圓法解析解模型.....	22	3.4.2 雙圓法解析解模型.....	32
3.4.2 雙圓法解析解模型.....	32	3.4.3 橢圓法解析解模型.....	38
3.4.3 橢圓法解析解模型.....	38	3.5 電腦輔助模擬與分析.....	46
3.5 電腦輔助模擬與分析.....	46	3.5.1 設定材料特性.....	47
3.5.1 設定材料特性.....	47	3.5.2 實體模型建構.....	48
3.5.2 實體模型建構.....	48	3.5.3 元素設定.....	51
3.5.3 元素設定.....	51	3.5.4 建構有限元素模型.....	51
3.5.4 建構有限元素模型.....	51	3.5.5 邊界條件設定.....	54
3.5.5 邊界條件設定.....	54	3.5.6 折床衝壓加工模擬.....	54
3.5.6 折床衝壓加工模擬.....	54	3.6 實驗方法.....	55
3.6 實驗方法.....	55	3.7 鈹金回彈補償與衝程深度修正.....	57
3.7 鈹金回彈補償與衝程深度修正.....	57	3.8 衝程深度之最佳化設計.....	58
3.8 衝程深度之最佳化設計.....	58	第四章 結果與討論.....	61
第四章 結果與討論.....	61	4.1 材料拉伸與擬合之結果.....	61
4.1 材料拉伸與擬合之結果.....	61	4.2 比較分析與實驗之結果.....	65
4.2 比較分析與實驗之結果.....	65	4.3 鈹金衝壓之分析結果.....	75
4.3 鈹金衝壓之分析結果.....	75	4.3.1 鈹金厚度與回彈角度之關係.....	75
4.3.1 鈹金厚度與回彈角度之關係.....	75	4.3.2 衝頭半徑與回彈角度之關係.....	77
4.3.2 衝頭半徑與回彈角度之關係.....	77	4.3.3 設計角度與回彈角度之關係.....	79
4.3.3 設計角度與回彈角度之關係.....	79	4.4 最佳化之分析結果.....	80
4.4 最佳化之分析結果.....	80	4.5 分析結果之實用成效.....	82
4.5 分析結果之實用成效.....	82	第五章 結論與未來發展方向.....	84
第五章 結論與未來發展方向.....	84	5.1 結論.....	84
5.1 結論.....	84	5.2 未來發展方向.....	85
5.2 未來發展方向.....	85	參考文獻.....	86
參考文獻.....	86	附錄.....	89
附錄.....	89	圖目錄	
圖目錄		圖 1 CNC液壓折床機	3
圖 1 CNC液壓折床機	3	圖 2 折彎時鈹金之放置方式	4
圖 2 折彎時鈹金之放置方式	4	圖 3 折床衝壓之加工過程	4
圖 3 折床衝壓之加工過程	4	圖 4 材料之應力-應變圖與回彈量	5
圖 4 材料之應力-應變圖與回彈量	5	圖 5 折彎成形過程中之回彈現象	6
圖 5 折彎成形過程中之回彈現象	6	圖 6 研究方法之流程圖	11
圖 6 研究方法之流程圖	11	圖 7 MTS TestStar s 控制系統	12
圖 7 MTS TestStar s 控制系統	12	圖 8 MST 810 Material Test System試驗機	13
圖 8 MST 810 Material Test System試驗機	13	圖 9 GW instruNet 網路架構式資料擷取系統	13
圖 9 GW instruNet 網路架構式資料擷取系統	13	圖 10 應變規之示意圖	14
圖 10 應變規之示意圖	14	圖 11 應變規之貼附狀態	14
圖 11 應變規之貼附狀態	14	圖 12 試片之拉伸狀態	15
圖 12 試片之拉伸狀態	15	圖 13 衝程深度之換算模型	19
圖 13 衝程深度之換算模型	19	圖 14 衝頭衝壓時鈹金之彎曲狀態	21
圖 14 衝頭衝壓時鈹金之彎曲狀態	21	圖 15 彎曲時鈹金內部之作用力分布	22
圖 15 彎曲時鈹金內部之作用力分布	22	圖 16 簡化鈹金內部之作用力	22
圖 16 簡化鈹金內部之作用力	22	圖 17 單圓法解析解模型	24
圖 17 單圓法解析解模型	24	圖 18 成形時與回彈後之應力-應變	29
圖 18 成形時與回彈後之應力-應變	29	圖 19 衝壓時鈹金與衝頭間之距離	32
圖 19 衝壓時鈹金與衝頭間之距離	32	圖 20 雙圓法解析解模型	33
圖 20 雙圓法解析解模型	33	圖 21 材料之應力-應變圖	36
圖 21 材料之應力-應變圖	36	圖 22 橢圓法解析解模型	39
圖 22 橢圓法解析解模型	39	圖 23 成形時與回彈後之應力-應變曲線	44
圖 23 成形時與回彈後之應力-應變曲線	44	圖 24 參數化設計之概念模型	48
圖 24 參數化設計之概念模型	48	圖 25 衝頭與母模部份之2D實體模型	49
圖 25 衝頭與母模部份之2D實體模型	49	圖 26 鈹金部分之2D實體模型	50
圖 26 鈹金部分之2D實體模型	50	圖 27 完整之2D實體模型	50
圖 27 完整之2D實體模型	50	圖 28 元素PLANE 42 51	51
圖 28 元素PLANE 42 51	51	圖 29 鈹金部分之網格	52
圖 29 鈹金部分之網格	52	圖 30 元素Target 169與元素Contact 172 53	53
圖 30 元素Target 169與元素Contact 172 53	53	圖 31 Contact Pair元素模型	53
圖 31 Contact Pair元素模型	53	圖 32 模擬折床衝壓過程	55
圖 32 模擬折床衝壓過程	55	圖 33 實驗機台與公母模	56
圖 33 實驗機台與公母模	56	圖 34 試片尺寸與晶粒方向	56
圖 34 試片尺寸與晶粒方向	56	圖 35 應用回彈角修正設計角度	57
圖 35 應用回彈角修正設計角度	57	圖 36 修正衝程深度後之衝壓過程	58
圖 36 修正衝程深度後之衝壓過程	58	圖 37 2024-T3材料性質之應力-應變曲線	62
圖 37 2024-T3材料性質之應力-應變曲線	62	圖 38 7075-T6材料性質之應力-應變曲線	62
圖 38 7075-T6材料性質之應力-應變曲線	62	圖 39 2024-T3材料性質之應力-應變擬合曲線	64
圖 39 2024-T3材料性質之應力-應變擬合曲線	64	圖 40 7075-T6材料性質之應力-應變擬合曲線	64
圖 40 7075-T6材料性質之應力-應變擬合曲線	64	圖 41 2024-T3於設計角90°之ANSYS、解析解與實驗值的誤差	67
圖 41 2024-T3於設計角90°之ANSYS、解析解與實驗值的誤差	67	圖 42 2024-T3於設計角105°之ANSYS、解析解與實驗值的誤差	68
圖 42 2024-T3於設計角105°之ANSYS、解析解與實驗值的誤差	68	圖 43 2024-T3於設計角120°之ANSYS、解析解與實驗值的誤差	70
圖 43 2024-T3於設計角120°之ANSYS、解析解與實驗值的誤差	70	圖 44 7075-T6於設計角90°之ANSYS、解析解與實驗值的誤差	71
圖 44 7075-T6於設計角90°之ANSYS、解析解與實驗值的誤差	71	圖 45 7075-T6於設計角105°之ANSYS、解析解與實驗值的誤差	73
圖 45 7075-T6於設計角105°之ANSYS、解析解與實驗值的誤差	73	圖 46 7075-T6於設計角120°之ANSYS、解析解與實驗值的誤差	74
圖 46 7075-T6於設計角120°之ANSYS、解析解與實驗值的誤差	74	圖 47 ANSYS與解析解所得之2024-T3鈹金	

厚度與回彈角趨勢圖 76 圖 48 ANSYS與解析解所得之7075-T6鋁金厚度與回彈角趨勢圖 77 圖 49 ANSYS與解析解所得之2024-T3衝頭半徑與回彈角趨勢圖 78 圖 50 ANSYS與解析解所得之7075-T6衝頭半徑與回彈角趨勢圖 78 圖 51 ANSYS與解析解所得之2024-T3設計角度與回彈角趨勢圖 79 圖 52 ANSYS與解析解所得之7075-T6設計角度與回彈角趨勢圖 80 表目錄 表 1 不同材料之擬合方程式 8 表 2 最佳化範例中使用之加工參數 59 表 3 最佳化之範例說明與結果 60 表 4 材料之線性性質 61 表 5 兩種鋁合金於擬合後之結果 63 表 6 鋁金折彎試驗之加工參數 65 表 7 2024-T3於設計角90°之ANSYS、解析解與實驗值的誤差 66 表 8 2024-T3於設計角105°之ANSYS、解析解與實驗值的誤差 68 表 9 2024-T3於設計角120°之ANSYS、解析解與實驗值的誤差 69 表 10 7075-T6於設計角90°之ANSYS、解析解與實驗值的誤差 71 表 11 7075-T6於設計角105°之ANSYS、解析解與實驗值的誤差 72 表 12 7075-T6於設計角120°之ANSYS、解析解與實驗值的誤差 74 表 13 ANSYS與橢圓解析解於2024-T3、設計角度90~120度之最佳化結果比較 81 表 14 ANSYS與橢圓解析解於7075-T6、設計角度90~120度之最佳化結果比較 82 表 15 機台程式與橢圓法解析解於實用上之成效比較 83

## 參考文獻

- [1] Ludwik, P., "Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure," Vol. 71, 1927, pp. 1532-1538.
- [2] Hollomon, J. H., "Tensile Deformation," AIME Transactions, 1945, pp. 162-268.
- [3] Voce, E., "The Relationship between Stress and Strain for Homogeneous Deformation," Journal of the Institute of Metals, Vol. 74, 1948, pp. 537-62,760-71.
- [4] Swift, H. W., "Plastic Instability under Plane Stress," Journal of Mechanics and Physics of Solids, Vol. 1:1, 1952.
- [5] Carden, W. D., Geng, L. M., Matlock, D. K., and Wagoner, R. H., "Measurement of Springback," International Journal of Mechanical Sciences, 2002, pp. 79-101.
- [6] Reklaitis, G. V., Ravindran, A., and Ragsdell, K. M., Engineering Optimization-Methods and Applications, New York : Wiley, c1983.
- [7] Jasbir, S. A., Introduction to Optimum Design, McGraw Hill international Editions, 1989.
- [8] Nelder, J., Mead, R., "A Simplex Method for Function Minimization," Computer Journal, Vol. 7, 1965, pp. 308-313.
- [9] Wang, J. S., Lo, C. Y., "Simulation of Springback for Hydraulic Forming Processes by Finite Element Method," 航空機械工程學術研討會, 台灣 高雄, Oct 2004, pp. 95-103.
- [10] Wang, J. S., Lo, C. Y., "Analysis of Springback by Straight Line Bending with Equal Angle for Sheet Metal Hydraulic Forming Processes," 93年度中華民國力學學會年會暨第二十八屆全國力學會議, 台灣 台北, Dec 2004, pp. 2639-2653.
- [11] Zhang, L. C., Lin, Z., "An Analytical Solution to Springback of Sheet Metals Stamped by a Rigid Punch and an Elastic Die," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 63, 1997, pp. 49-54.
- [12] Xue, P., Yu, T. X., Chu, E., "Theoretical Prediction of the Springback of Metal Sheets after a Double-Curvature Forming Operation," Journal of Materials Processing Technology, 1999.
- [13] Asnafi, N., "Springback and Fracture in V-die Air Bending of Thick Stainless Steel Sheets," Journal of Materials and Design, Vol. 21, 2000, pp. 217-236.
- [14] Tekiner, Z., "An Experimental Study on the Examination of Springback of Sheet Metals with Several Thicknesses and Properties in Bending Dies," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 145, 2004, pp. 109-117.
- [15] Tekaslan, O., Seker, U., Ozdemir, A., "Determining Springback amount of Steel Sheet Metal Has 0.5 mm Thickness in Bending Dies," Journal of Materials and Design, Vol. 27, 2006, pp. 251-258.
- [16] Makinouchi, A., "Sheet Metal Forming Simulation in Industry," Journal of Materials Processing Technology, 1996, pp. 19-26.
- [17] Hsu, T. C., Shien, I. R., "Finite Element Modeling of Sheet Forming Process with Bending Effects," Journal of Materials Processing Technology, 1997, pp. 733-737.
- [18] Keum, Y. T., and Lee, K. B., "Sectional Finite Element Analysis of Forming Processes for Aluminum-ally Sheet Metals," International Journal of Mechanical Sciences, 2000, pp. 1911-1933.
- [19] Chou, I. N., and Hung, C., "Finite Element Analysis and Optimization on Springback Reduction," International Journal of Machine Tools & Manufacture, 1999, pp. 517-537.
- [20] 王正賢、蕭尊賀、陳奕安、陳正忠、施義舜, "板金件液壓加工回彈之預測與分析," 90年度中華民國力學學會年會暨第二十五屆全國力學會議, 台灣 台中, Dec 2001, pp. 15-16.
- [21] 王正賢、蕭尊賀、陳正忠、施義舜, "ANSYS於板金件加工回彈模擬之應用," ANSYS Taiwan User's Conference, 台北 台灣, Nov 2001, pp. 26-27.
- [22] 王正賢、鄭彩華, "鋁金液壓加工回彈模擬與補償角之計算," 91年度中華民國力學學會年會暨第二十六屆全國力學會議, 台灣 虎尾, Dec 2002, (NSC 90-2212-E-212-009).
- [23] 電腦輔助軟體ANSYS-9.0, Online-Help