

聚晶體模型於金屬薄板精微成形之應用

陳啟倫，廖國基*

生物產業機電工程學系
國立臺灣大學

摘要

本研究利用聚晶體模型導入有限元素分析套裝軟體，撰寫使用者副程式針對金屬材料精微製程反應進行研究。探討具備不同初始晶粒優選方位之不鏽鋼薄板，其於精微沖壓製程所呈現之厚度分布，模擬結果並與文獻中相對應實驗進行比較。分析結果顯示具備明顯織構(texture)之分析模型，其薄板成形厚度變化情形大致與量測數據相符。亦指定不同晶粒優選方位置入方式於分析模型，檢視其於薄板成形厚度之差異。

關鍵字：聚晶體模型、精微成形、有限元素分析

ABSTRACT

A Taylor-type crystalline plasticity model, implemented into the commercial finite element analysis software, is coded as a subroutine to investigate the behavior of a stainless steel sheet with a body centered cubic (BCC) structure in the current study. Thickness variations of the sheet are examined under the micro-groove formation procedures. Effects of the spatial distribution of crystallographic orientations on the thickness distribution over the sheet are also demonstrated. Numerical results, based on the sheet with textured orientations, are in good agreement with the associated experimental measurements reported in the literature.

Keywords: crystalline plasticity; sheet metal stamping; finite element analysis

一、緒論

由於市場對於輕薄短小產品需求逐漸提升，精微成形遂成為工業發展重要技術之一。精微成形優點包含具備高生產性，高精度性，與生產品質穩定，並適用於多種材料，其廣泛被應用於各類微尺寸產品，如3C產業，汽車，航空，微感測器，光纖接頭，精密量測儀器，生物晶片，與鏡片等需求元件。然當元件/模具特徵尺寸縮小至微米等級時

，因受所謂尺寸效應(size effect)影響，可能造成材料性質及元件與模具間摩擦特性顯著發生變化[1-3]。

Becker [4]採用二維有限元素模型驗證金屬材料於平面應變壓縮製程之反應，結果顯示織構變化不僅與相鄰晶粒間之優選方位相關，且受晶粒位置影響。Kalidindi

等人[5]展現泰勒型(Taylor-type)聚晶體模型搭配完全隱性時間積分(fully implicit time-integration)方法之良好預測能力，模擬結果顯示 OFHC 銅材於純剪應力與平面應變加工製程下之應力應變反應及織構變化與相對應實驗結果相符。Harewood 與 McHugh [6]利用有限元素分析觀察聚晶體模型於應變率相關(rate-dependent)運算條件下，對於分析準確性之影響。陳述非應變率相關(rate-independent)於金屬加工製程模擬，需較密緻元素以捕捉擬探討區域之場域變化。Zhao 等人[7]利用三種網格分割方式之聚晶體模型，置入亂數產生之初始晶粒優選方位進行平面應變壓縮模擬，比較不同分析模型呈現之織構變化。近來 Li 與 Zabaraz [8]採用聚晶體模型搭配非應變率相關公式進行合金材料單軸拉伸模擬，探討網格切割

方式與網格敏感度對於應力應變關係之影響。檢視分析模型承受不同軸向負荷時，各切面等效應力分布與相對應位置晶粒形貌之關係。進一步改變合金晶粒尺寸，分析顯示晶粒尺寸越小其相對應單軸應力應變響應越高，此模擬結果與實驗觀察一致。

前人應用聚晶體模型探討金屬材料於不同製程條件下之微觀反應，並與相對應實驗量測比對驗證。Beaudoin 等人[9]進行鋁合金板材之織構分析，並應用聚晶體有限元素分析模型進行液壓成形模擬，分析結果顯示預測之耳緣位置與高度與相對應實驗結果相符。Nakamachi 等人[10]應用聚晶體模型搭配動態顯性積分法，將晶粒優選方位置入元素中各積分點，其單軸拉伸模擬結果與相對應實驗比較，驗證數值分析可相對準確預測金屬試片之應變局部化 (strain localization) 現象。Nakamachi 等人[11]分別探討低碳鋼，雙相鋼，與高強度鋼於圓杯引伸製程之成形性，利用 X 光繞射與方位分布函數圖分析材料織構，結果顯示金屬薄板織構對於圓杯引伸成形之應變局部化與耳緣形成具影響性。Chen 等人[12]進行鋁鎂合金於不同退火溫度條件下之織構分析，並利用聚晶體有限元素模型進行引伸成形模擬，分析結果顯示金屬薄板之初始織構對於其塑性行為與成形性極具影響。Peng 等人[13]利用有限元素分析探討各種製程參數，包含如金屬薄板晶粒尺寸，模具尺寸，接觸面間摩擦係數，與軟沖頭材料性質等，對均向性不銹鋼薄板於微溝槽製程之影響。模擬結果顯示較小晶粒尺寸之薄板具備較佳之成形性，橡膠材質之軟沖頭與薄板間潤滑效果對於成形工件之厚度分布影響，較模具與薄板間潤滑效果顯著。

於此採用泰勒型聚晶體模型模擬 BCC 結構之 SUS304 不銹鋼薄板於微沖壓製程，探討具備近似均向性與明顯織構之晶粒優選方位，及利用不同晶粒優選方位置入方式對於薄板厚度變化之影響，模擬結果並與相對應實驗進行比較。

二、聚晶體模型

以微觀角度而言，於某特定平面特定方向進行滑動係低溫下塑性變形之主要機制。聚晶體模型最主要優點為一旦得知滑動過程之結構參數與材料晶粒優選方位，即可應用組成律模擬工件承受任何負荷路徑下

之反應。

假設金屬為均向線性彈性材料，其四階彈性模數張量 C 可表示為

$$C = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{12} & C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} \end{bmatrix} \quad (1)$$

不銹鋼材料之彈性模數 C_{11} ， C_{12} ，與 C_{44} 分別為 265.2 GPa，113.6 GPa，與 151 GPa [14]。

BCC 晶體結構之滑動系統為 $\{110\}\langle 111 \rangle$ ，其包含六個滑動平面，每個平面具備兩個滑動方向。因晶格滑動導致之塑性變形本質上與應變率相關，因此一旦某滑動平面上相對應剪應力值不為零時，此滑動系統便視為被驅動。採用冪次法則 (power law) 假設下之分解剪應力 $\tau^{(\alpha)}$ 與剪應變率 $\dot{\gamma}^{(\alpha)}$ 於第 α ($\alpha = 1, 12$) 組滑動系統之關係可表示為

$$\dot{\gamma}^{(\alpha)} = \dot{\gamma}_0^{(\alpha)} \left| \frac{\tau^{(\alpha)}}{g^{(\alpha)}} \right|^{1/m} \text{sign}(\tau^{(\alpha)}) \quad (2)$$

其中 $\dot{\gamma}_0^{(\alpha)}$ 係第 α 組之參考剪應變率， m 代表晶粒滑動之應變率敏感度，滑動系統 α 之應變硬化阻抗 $g^{(\alpha)}$ 為所有滑動系統剪應變總和之函數， $\text{sign}(\tau^{(\alpha)})$ 表示取 $\tau^{(\alpha)}$ 之正負符號進行運算。假設所有滑動系統之 $\dot{\gamma}_0^{(\alpha)}$ 值均相同，滑動系統之應變硬化阻抗則可表示為

$$\dot{g}^{(\alpha)} = \sum_{\beta} h_{\alpha\beta} \left| \dot{\gamma}^{(\beta)} \right| \quad (3)$$

其中硬化矩陣 $h_{\alpha\beta}$ 定義為第 α 組滑動系統與第 β 組滑動系統之硬化率關係，於此採用之硬化矩陣可表示為

$$h_{\alpha\beta} = q_{\alpha\beta} h^{(\beta)} \quad (4)$$

$q_{\alpha\beta}$ 為晶粒中主要滑動系統之自身硬化率 (self hardening rate) 與次要滑動系統之潛硬化率 (latent hardening rate) 之比值所組成， $h^{(\beta)}$ 與 $g^{(\beta)}$ 之關係如式(5)所示

$$h^{(\beta)} = h_0 \left[1 - \frac{g^{(\beta)}}{g_s} \right]^a \quad (5)$$

其中 h_0 與 a 為滑動系統之硬化參數，對於所有滑動系統之飽和滑動硬化參數 g_s 假設為一定值，滑動硬化參數 $g^{(\beta)}$ 之初始值以 g_0 代入運算。對具備 BCC 晶體結構之金屬，矩陣 Q 可表示為

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & q_c & q_n & q_n & q_n & q_n & q_n & q_n & q_n & q_n & q_n & q_n & q_n & q_n \\ q_c & 1 & q_n & q_n & q_n & q_n & q_n & q_n & q_n & q_n & q_n & q_n & q_n & q_n \\ q_n & q_n & 1 & q_c & q_n & q_n & q_n & q_n & q_n & q_n & q_n & q_n & q_n & q_n \\ q_n & q_n & q_c & 1 & q_n & q_n & q_n & q_n & q_n & q_n & q_n & q_n & q_n & q_n \\ q_n & q_n & q_n & q_n & 1 & q_c & q_n & q_n & q_n & q_n & q_n & q_n & q_n & q_n \\ q_n & q_n & q_n & q_n & q_c & 1 & q_n & q_n & q_n & q_n & q_n & q_n & q_n & q_n \\ q_n & q_n & q_n & q_n & q_n & q_n & 1 & q_c & q_n & q_n & q_n & q_n & q_n & q_n \\ q_n & q_n & q_n & q_n & q_n & q_n & q_n & 1 & q_c & q_n & q_n & q_n & q_n & q_n \\ q_n & q_n & q_n & q_n & q_n & q_n & q_n & q_n & 1 & q_c & q_n & q_n & q_n & q_n \\ q_n & q_n & q_n & q_n & q_n & q_n & q_n & q_n & q_n & 1 & q_c & q_n & q_n & q_n \\ q_n & q_n & q_n & q_n & q_n & q_n & q_n & q_n & q_n & q_n & 1 & q_c & q_n & q_n \\ q_n & q_n & q_n & q_n & q_n & q_n & q_n & q_n & q_n & q_n & q_n & 1 & q_c & q_n \\ q_n & q_n & q_n & q_n & q_n & q_n & q_n & q_n & q_n & q_n & q_n & q_n & 1 & q_c \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中 q_c 為滑動系統中共同滑動平面之潛硬化率常數， q_n 則為滑動系統中不同滑動平面之潛硬化率常數，上述參數可藉由模擬單軸拉伸負荷所得之應力應變曲線，與其相對應實驗數據進行擬合獲得。

採用泛用型機械分析軟體 ABAQUS [15] 搭配內建之使用者副程式 UMAT 進行有限元素分析，藉以描述不鏽鋼之變形機制。為取得 SUS304 不鏽鋼薄板織構，沿厚度方向施以平面應變壓縮負荷於具備亂數晶粒優選方位之分析模型，模擬不鏽鋼材料經滾軋加工過程藉以獲得相對應織構。於此選用具備三種分別為 60%，85%，與 95% 之壓縮應變，將不同壓縮程度織構置入分析模型接續進行單軸拉伸模擬。圖 1 顯示具備不同織構呈現之應力應變關係極為相近，其中具備壓縮應變為 85% 與 95% 模型之反應幾乎一致。模擬選用之滑動系統硬化參數列於表 1

，應用有限元素分析模型模擬金屬薄板承受平面應變壓縮負荷，圖 2 顯示模擬金屬薄板沿厚度方向進行 85% 平面應變壓縮之 {110} 極圖。以此織構置入實體元素模型模擬單軸拉伸實驗，所得應力應變關係與不鏽鋼薄板實驗量測數據 [13] 大致相符，如圖 3 所示，由此可驗證表 1 所列硬化參數之合宜性。

三、數值結果與討論

為因應應用聚晶體模型於數值分析所

需龐大計算資源，本研究採用自行架設之叢集設備節省運算時間。精微製程模擬所需分析模型，係依據圖 4 顯示之微溝槽製程設備詳細尺寸圖 [13] 繪製而成。薄板放置於模具與軟沖頭之間，軟沖頭為橡膠材料，其承受上方硬沖頭力量下壓而變形，並擠壓薄板使其於模具成形。模擬所使用之特徵單位分析模型亦顯示於圖 4，由於薄板沿圖 4 中溝槽切面法線方向(垂直紙面方向)之長度遠大於溝槽間距，因此有限元素分析合理採用平面應變元素進行模擬。利用穆尼-黎弗林 (Mooney-Rivlin) 模型描述軟沖頭行為，其形式為

$$U = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) + \frac{1}{2}K(I_3 - 1)^2 \quad (7)$$

其中 U 代表應變能 (strain energy)， I_1 ， I_2 ，與 I_3 則係應變不變量 (strain invariant)， K 為材料之體積模數 (bulk modulus)，調整 C_{10} 與 C_{01} 兩項參數藉以描述超彈性橡膠材料之行為，於此採用列於 Peng 等人 [13] 所列之超彈性材料參數。沖頭與模具皆視為剛體，金屬薄板之元素總數為 400 個二階平面應變四邊形元素，其厚度為 0.1 mm。薄板與軟沖頭接觸面，及薄板與模具之接觸面間之庫倫 (Coulomb's) 摩擦係數於此均假設為 0.2

。圖 4 亦包含設定之邊界條件，保持穩定之沖頭力量 F 透過軟橡膠壓擠薄板，特徵單位分析模型之左右兩側施予對稱條件，同時固定下方模具。

本研究主要探討薄板之晶粒優選方位對其成形厚度分布之影響性，模擬主要分為兩部份。(1) 不同晶粒優選方位：薄板分別置入亂數與具有明顯織構之晶粒優選方位，亂數晶粒優選方位某種程度即可代表為均向性材料，於此稱為 RO 模型。然具有明顯織構之晶粒優選方位係選用由相同網格分析模型沿厚度方向進行 85% 平面應變壓縮所取得，於此稱為 TO 模型。(2) 不同晶粒優選方位置入方式：有別於上述每個元素置入不同之晶粒優選方位，進一步嘗試藉由兩種不同晶粒優選方位置入方式，檢視不同晶粒尺寸對於成形品質之影響。分析模型分別係圖 5(a) 顯示每個元素置入 10 組相對應之晶粒優選方位，於此稱為 1E10O 模型，與圖 5(b) 顯示每 10 個元素置入同一組之晶粒優選方位，於此稱為 10E1O 模型，圖中圈

選處為每 10 個元素之選取位置，由右至左以此類推。薄板之初始晶粒優選方位皆係由個別相同網格模型進行平面應變壓縮模擬所取得，其厚度方向之壓縮應變亦為 85%。圖 6 為薄板具備不同壓縮程度織構，其分析所得之薄板成形厚度變化，厚度量測距離係由特徵單位模型左側至溝槽中心點共 1.3 mm，具備不同壓縮程度織構之薄板於量測範圍之厚度變化差異不大。圖 7 顯示薄板之特徵單位溝槽分析模型，於成形過程之等效應力分布。圖 8 顯示模擬結果，文獻模擬結果[13]，與實驗量測[13]之薄板厚度分布，模擬與實驗結果均顯示薄板厚度最薄處發生於圖 7 等效應力較大之區域。圖 8 顯示 TO 模型展現之薄板最薄厚度，與實驗量測數據相近。然薄板於承受等效應力較大區域，RO 模型預測之厚度變化則遠低於相對應實驗數據。

四、結論

應用聚晶體模型於精微製程之模擬，數值結果顯示其晶粒優選方位明顯影響金屬薄板之厚度變化。模擬滾軋加工過程具備 60%，85%，與 95% 壓縮應變織構之薄板，其展現相似之機械性質。於模擬置入明顯織構之晶粒優選方位，其金屬薄板之厚度變化大致與相對應之實驗數據一致。接續觀察應用不同晶粒優選方位置入方式對於薄板成形厚度之影響性，每個元素置入多組晶粒優選方位之模型於微溝槽邊緣，展現之厚度變化較接近實驗數據，然於微溝槽中心之厚度值與實驗量測數據差距則相對較大。多個元素置入同組晶粒優選方位之模型於微溝槽邊緣，所預測薄板之厚度遠低於不同置入方式之模型分析結果與實驗量測值。此結果某種程度可視為因模型之晶粒尺寸設定不同，影響其相對應材料機械性質，導致薄板成形厚度產生差異。

五、參考書目

[1] M. Geiger, M. Kleiner, R. Eckstein, N. Tiesier, and U. Engel, *Microforming*, vol. 2. Ann. CIRP, 2001, pp. 445.

[2] T. A. Kals and R. Eckstein, "Miniaturization in sheet metal working," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 103, pp. 95-101, 2000.

[3] X. Yao, S. Zajac, and B. Hutchinson, "Estimation of compression flow stress from

post-deformation hardness in Al-Mg alloys," *Script. Mater.*, vol. 41(3), pp. 95-101, 1999.

- [4] R. Becker, "Analysis of texture evolution in channel die compression - I. Effect of grain interaction," *Acta Metal. Mater.*, vol. 39, pp.1211-1230, 1991.
- [5] S. R. Kalidindi, C. A. Bronkhorst, and L. Anand, "Crystallographic texture evolution in bulk deformation processing of fcc metal," *J. Mech. Phys. Solids.*, vol. 40, pp. 537-569, 1992.
- [6] F. J. Harewood and P. E. MaHugh, "Investigation of finite element mesh independence in rate dependent materials," *Comput. Mater. Sci.*, vol. 37, pp.442-453, 2006.
- [7] Z. Zhao, S. Kuchnicki, R. Radovitzky, and A. Cuitino, "Influence of in-grain mesh resolution on the prediction of deformation textures in fcc polycrystals by crystal plasticity FEM," *Acta Mater.*, vol.55, pp.2361-2373, 2007.
- [8] W. Li and N. Zabaras, "A virtual environment for the interrogation of 3D polycrystalline microstructures including grain size effects," *Comput. Mater. Sci.*, vol. 44, pp. 1163-1177, 2009.
- [9] A. J. Beaudoin, P. R. Dawson, K. K. Mathur, U. F. Kocks, and D. A. Korzekwa, "Application of polycrystal plasticity to sheet forming," *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, vol. 117, pp. 49-70, 1994.
- [10] E. Nakamachi, K. Hiraiwa, H. Morimoto, and M. Harimoto, "Elastic/crystalline viscoplastic finite element analyses of single and poly-crystal sheet deformations and their experimental verification," *Int. J. Plast.*, vol. 16, pp. 1419-1441, 2000.
- [11] E. Nakamachi, C. L. Xie, and M. Harimoto, "Drawability assessment of bcc steel sheet by using elastic/crystalline viscoplastic finite element analyses," *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 43, pp.631-652, 2000.
- [12] Y. P. Chen, W. B. Lee, and S. To, "Influence of initial texture on formability of aluminum sheet metal by crystal plasticity FE simulation," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 192-193, pp.397-403, 2007.
- [13] L. Peng, P. Hu, X. Lai, D. Mei, and J. Ni, "Investigation of micro/ meso sheet soft punch stamping process- simulation and experiments," *Materials and design*, vol.30, pp.783-790, 2009.
- [14] American Society for Metals, *Source book on stainless steels*, Metals Park: Ohio, 1976, pp. 14.

[15] H. D. Hibbitt, B. I. Karlsson, and E. P. Sorensen, ABAQUS User Manual, Version 6.8, USA, 2008.

六、表格

表 1 滑動系統硬化參數表

$\dot{\gamma}_0^{(a)}$	m	$h_0(\text{MPa})$	a	$g_s(\text{MPa})$	$g_0(\text{MPa})$	q_c	q_n
0.001	0.012	500	3.2	440	60	1.2	1.4

七、圖片

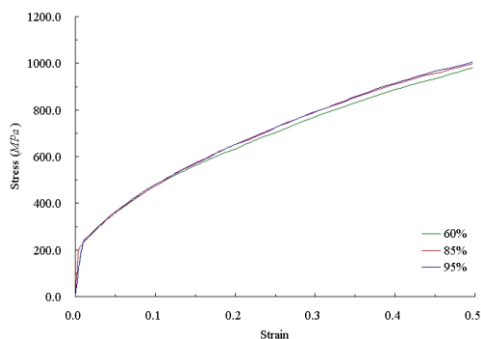


圖 1 不同壓縮程度織構之應力應變關係

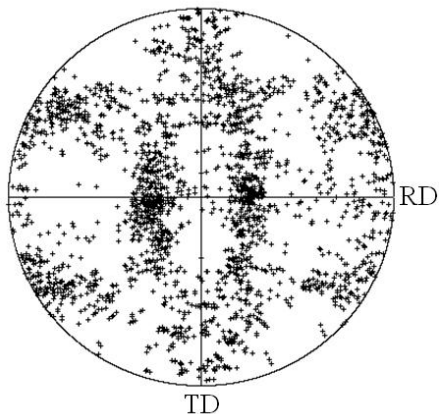


圖 2 模擬分析取得之{110}極圖

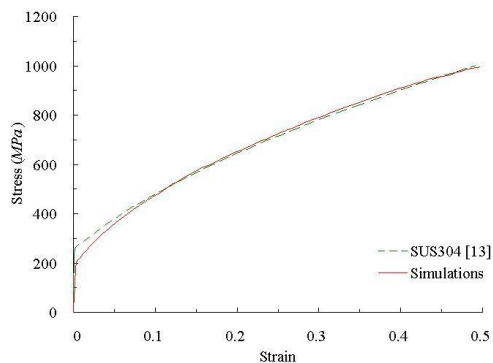


圖 3 有限元素分析與 SUS304 不銹鋼薄板拉伸實驗所得之應力應變關係

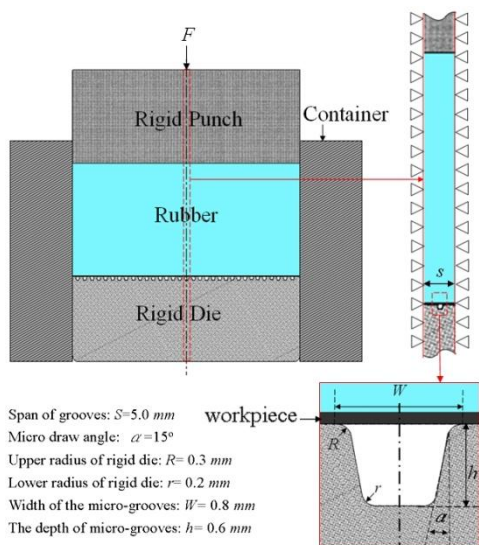


圖 4 微溝槽製程設備尺寸與邊界條件設定圖

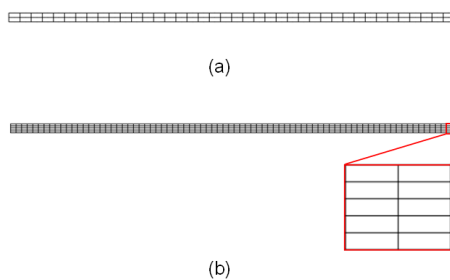


圖 5 兩種不同晶粒優選方位置入方式：(a) 每個元素置入 10 組不同之晶粒優選方位；(b) 10 個元素置入同一組之晶粒優選方位

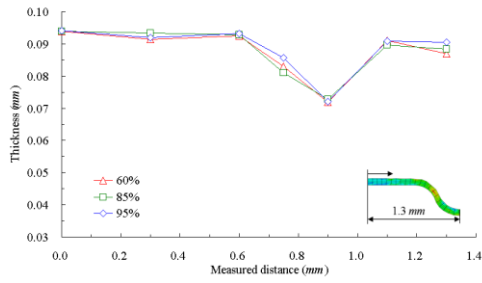


圖 6 不同壓縮程度織構之薄板成形厚度變化比較圖

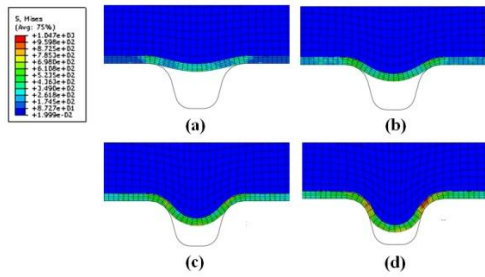


圖 7 薄板於 (a) 25% (b) 50% (c) 75% (d)100% 成形過程之等效應力分布圖

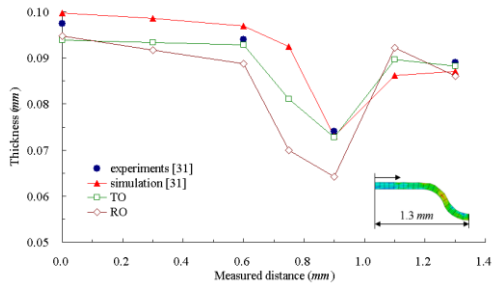


圖 8 TO 與 RO 模型模擬結果，文獻模擬結果[13]，與實驗量測[13]之成形厚度分布