

行政院所屬各機關因公出國人員出國報告書

(出國類別：國際會議)

參加第九屆三維金屬板材成形數值模擬 國際會議之出國報告

服務機關：國立高雄應用科技大學

姓名職稱：張朝誠 副教授

派赴國家：澳洲

出國期間：103年1月4日至103年1月10日

報告日期：103年3月31日

摘要

第九屆三維金屬板材成形數值模擬國際會議(NUMISHEET2014, The 9th International Conference and Workshop on Numerical Simulation of 3D Sheet Metal Forming Processes), 簡稱 NUMISHEET 2014。此會議源自 1991 年在瑞士舉辦的首屆會議, 約每三年在不同國家舉行, 邀請世界各國從事金屬成形領域之學者發表研究成果, 進行學術交流。本屆於 1 月 6 日至 1 月 10 日在澳洲墨爾本(Melbourne, Australia)舉行, 邀請軟體公司發表新開發的數值模擬技術, 學術論文主題廣泛, 包括板件成形、變形力學、材料特性、測試方法、回彈問題、表面效應、最佳化與數值模擬等主題。本人投稿一篇論文, 題目為「釹鐵硼磁石壓縮變形之粒子方向性預測(Prediction of Particle Orientation in Simple Upsetting Process of NdFeB Magnets)」, 經審稿程序後被接受發表, 並於「產品製造之模擬與製程技術」會議場次進行口頭報告。由論文發表情況顯示, 許多國家, 如日本、中國大陸、韓國與歐洲國家在金屬成形領域的研究主題廣泛, 兼顧理論與實務的發展, 可做為台灣相關人才培育與創新技術研發之參考。

關鍵詞： 金屬成形、釹鐵硼磁石、壓縮變形、粒子方向性預測

目錄

摘要.....	i
一、 目的.....	1
二、 過程.....	2
三、 心得.....	7
四、 建議事項.....	7
五、 攜回資料名稱.....	8
六、 附錄.....	8

一、目的

1.1 緣起

第九屆三維金屬板材成形數值模擬國際會議(NUMISHEET2014, The 9th International Conference and Workshop on Numerical Simulation of 3D Sheet Metal Forming Processes)，簡稱 NUMISHEET 2014，於 1 月 6 日至 1 月 10 日在澳洲墨爾本 (Melbourne, Australia) 之希爾頓飯店(Hilton on the Park)舉行。此會約每三年在不同城市舉辦一次，邀請世界各國從事金屬成形領域之學者發表研究成果，進行學術交流，是一個金屬成形製造領域廣泛受到重視的大型國際研討會。會議網頁 (<http://www.numisheet2014.org/>)提供相關訊息。



圖 1. 第九屆三維金屬板材成形數值模擬國際會議網頁

1.2 主題

本次會議發表的論文主題相當廣泛，包括板件成形(sheet forming)、滾壓(rolling)、變形力學(deformation mechanics)、材料特性(material characteristics)、測試方法(test method)、回彈問題(spring back)、表面效應(surface effect)、摩擦與接觸(friction and contact)與製程模擬(process modeling)等主題。

1.3 目的

參與此會議的主要目的如下：

1. 進行學術交流。
2. 瞭解國際上於金屬成形相關領域研究的現況與趨勢。
3. 提供心得與建議，做為未來研究與教學的參考。

二、 過程

2.1 會議議程

會議於 2014 年 1 月 6 日至 1 月 10 日在澳洲墨爾本(Melbourne, Australia)之希爾頓飯店(Hilton on the Park)舉行。此次會議有約有 200 篇論文發表，議程以多個場次在不同會議室平行進行，每篇論文報告與討論交流時間為 20 分鐘。會議主席團由 Jeong Whan Yoon, John Beynon 及 Peter Hodgson 教授等人所組成，主辦單位是 Deakin University, The University of Adelaide 及 Swinburne University of Technology。

2.2 議場主題

會議主題涵蓋目前金屬板材與塊材成形相關之研究，簡要說明如下：

板件成形(sheet forming)：高張力鋼板的成形技術是目前熱門的研究主題。這類鋼板需要經過加熱提高成形性與降低回彈效應。相關的研究論文包括回彈、模具冷卻系統之設計、彎曲、引伸等主題。其它金屬板材，如鋁合金與鈦合金板材之加工技術也有相關論文發表。

滾輪成形(roll forming)：主題包括滾輪成形之高強度鋼薄板、成形方法、薄板滾壓特性、及有限元素模擬等主題。

成形性(formability)：成形極限圖之建立方法、溫成形條件下之成形極限、結晶塑性力學之成形極限模型、局部井頸縮變形之預測等。

回彈(springback)：包括回彈補償方法、回彈行為研究、高強度鋼板之回彈等主題。這些主題也包含有限元素模擬與實驗驗證之研究。

摩擦與接觸(friction and contact)：主題包括潤滑、摩擦特性、尺寸效應等。

製程模擬(process modeling)：如何進行金屬成形之製程模擬受到各國重視，有許多相關的論文。主題包括數值問題的討論、考慮溫度的彈塑性模型、破壞理論、測試及製造系統等。另外，對於胚料幾何的預測，也有相關論文發表。

會議議程其它相關之主題還包括增量成形(increment forming)、破裂與損壞(fracture and damage)、表面缺陷(surface defects)及軟體公司發展趨勢之討論。總之，此會議的論文主題豐富，也呈現國際上在金屬板材成形技術蓬勃發展之趨勢。

2.3 個人論文發表

本人投稿一篇學術文章，題目為「釹鐵硼磁石壓縮變形之粒子方向性預測(Prediction of Particle Orientation in Simple Upsetting Process of NdFeB Magnets)」，經審稿程序被接受發表，並於 1 月 9 日上午 8:30 在「產品製造之模擬與製程技術(Modelling, simulation, and processing technology on product manufacture)」場次進行 15 分鐘口頭報告。此場次

同時也是由本人與 D. Green 教授共同主持。論文被收錄於: NUMISHEET 2014: The 9th International Conference and Workshop on Numerical Simulation of 3D Sheet Metal Forming Processes: Part A Benchmark Problems and Results and Part B General Papers, AIP Proceedings, Vol. 1567, 2013, Melville, New York (ISBN 978-0-7354-1195-1)。

2.4 發表內容重點

2.4.1 前言

微結構之方向性是影響釹鐵硼薄帶粉體磁石之磁性性質的關鍵因素。釹鐵硼磁石可經由熱壓成形將其微結構方向由等向性改變為非等向性，其磁性性質也明顯地提升。因此，準確地預測微結構之方向性將有助於磁石元件之研發。然而，釹鐵硼磁石熱壓成形是一個複雜的過程，其變形與微結構方向性之模擬與分析仍缺乏完整之技術。

本研究執行簡單壓縮實驗以獲得應力應變曲線，做為有限元素模擬之基礎。同時，利用金相試驗分析磁石變形前後之微結構，以應力、應變與應變率為變數建立一個預測微結構方向性之模型，並進行擠壓成形之模擬與實驗，驗證所提之預測模型。

釹鐵硼磁石結晶形狀與排列影響其磁性性質。釹鐵硼 MQ 粉所製造之磁石的微觀組成可分為薄帶(ribbon)與晶粒(grain)兩方面來描述。熔融旋淬法製造的釹鐵硼薄帶(melt-spun NdFeB ribbon)由晶粒組成。薄帶大小介於幾十至幾百 μm ，晶粒則介於幾十到幾百 nm。釹鐵硼薄帶經膠結、熱壓、擠壓或鍛造成形而製造磁石，一般分為 MQ1、MQ2 與 MQ3 等三類磁石。釹鐵硼磁石經壓縮後其外形與微結構發生變化。釹鐵硼 MQ1 與 MQ2 磁石之薄帶形狀差異較小，薄帶沒有明顯變形，而 MQ3 磁石之薄帶外形因為擠壓而有明顯地改變。然而，薄帶內的微結構(microstructure)是控制磁石之磁性性質的主要因素。MQ1 磁石薄帶內的晶粒形狀接近等向性球狀結晶(isotropic spheroidal grains)。經進一步熱壓的 MQ2 磁石，其薄帶內的晶粒尺寸稍為增加，仍為等向性球狀結晶。然而，薄帶經過擠壓或鍛造成形製作為 MQ3 磁石，其晶粒明顯地變形為板塊(platelet)形狀。文獻顯示，釹鐵硼磁石經過擠壓或鍛造成形造成晶粒形狀改變，微結構(結晶結構)的方向性與磁性性質有密切關連，其磁性特性由等向性改變為非等向性，明顯地提升 $(BH)_{\text{max}}$ 。

釹鐵硼熱壓磁石之製程一般可分為快速冷卻製造粉末 MQ(Melt Quench)粉、熱壓製作磁石(MQ2 磁石)與擠壓或鍛造製作磁石(MQ3 磁石)等三個階段，是一個複雜的成形技術，其製程模擬尚無完整之技術。本研究針對釹鐵硼磁石第三階段之擠壓成形製程，執行簡單壓縮實驗以獲得應力應變曲線，並進行金相試驗，分析釹鐵硼磁石於變形前後之微結構方向(microstructure orientation)之變化。同時，藉由有限元素軟體 DEFORM 模擬成形，搭配流線分析預估薄帶微結構之變化，並與實驗結果比較之。

2.4.2 簡單壓縮

簡單壓縮(Simple Up-setting)實驗之目的包括：(1)獲得鈹鐵硼磁石真實應力應變曲線(true stress-true strain curve)，做為有限元素軟體 DEFORM 模擬擠製成形之基礎；(2)瞭解成形溫度與應變率對鈹鐵硼磁石之可成形性(formability)的影響；(3)藉由金相觀察，瞭解鈹鐵硼磁石經壓縮變形之微結構變化。

簡單壓縮實驗參考 ASTM E9-89 規範執行。鈹鐵硼 MQ2 磁石試片，施以潤滑劑(如石墨或氮化硼)以減少摩擦效應，置放於以鎳基合金製作的平面模具上，於真空環境下以等溫成形(isothermal forming)條件，分別以不同壓縮速度，進行簡單壓縮試驗。利用實驗所擷取之負荷與位移資料，建立真實應力應變曲線。經由檢視變形之試片裂紋與分析真實應力應變曲線，可以瞭解鈹鐵硼磁石於不同應變率與成形溫度之可成形性。另外，不同壓縮量之變形試片將進行金相實驗觀察，以瞭解試片之微結構變化，做為建立微結構方向性預測技術之基礎。

2.4.3 薄帶粒子方向性預測

鈹鐵硼磁石於熱壓成形過程受應力作用變形，其內部的薄帶結構與晶粒形狀的改變使得磁性性質發生變化。文獻回顧顯示，薄帶結構的方向性與晶粒形狀的改變有關，是影響磁石磁性特性的關鍵。因此，微結構方向性的預測技術將有助於預估磁石之磁性性質，其結果可做為磁石元件製造與設計之參考。

晶粒變形可以使用微米與奈米尺度的模擬加以預測。微米尺度的模擬將單一晶粒先以隨機分佈方式決定晶粒尺寸與結晶方向，經考慮尺寸效應(size effects)，利用試片尺寸與晶粒尺寸比，搭配機率密度函數(probability density function)預估胚料中每一個晶粒的應力應變曲線，以有限元素法進行結晶材料變形之模擬。奈米尺度的模擬，可以使用分子動力模擬的技術，直接考慮原子間的交互作用來預測晶粒之變形。然而，這些方法，只適合於微米或奈米尺度下有少數晶粒的變形預測，不適合於巨觀尺度之變形模擬。

本研究使用有限元素軟體 DEFORM 進行鈹鐵硼熱壓成形之模擬，並以電腦繪圖軟體製作鈹鐵硼之初始薄帶結構，結合流線分析，預測薄帶結構之變化。

2.4.4 實驗方法

本研究使用之鈹鐵硼磁石為 Molycorp Magnequench 公司生產的 MQ2 圓柱形磁石(MQ2-16-125)，直徑與長度皆為 10 mm。圖 1(a)與(b)顯示簡單壓縮之示意圖、試片與壓縮結果。實驗設備係採用中國鋼鐵股份有限公司擁有的 Gleeble 1500 物理模擬與熱機測試設備(Gleeble 1500 System, Physical Simulation and Thermal-Mechanical Testing)。

胚料預先於側面電焊一個 K-type 熱電偶，經夾持於平面模具後，連接熱電偶至設備接點做為胚料溫度之感測。經抽真空與充填氬氣後，以每秒 10 °C 之加熱速率至所需實驗溫度後，持溫 60 秒，進行壓縮試驗，完成後約經 4 分鐘冷卻至 150 °C 左右後取出，置於空氣中冷卻至室溫。

2.4.5 結果與討論

擷取之負荷與行程資料經計算獲得真實應力應變曲線。圖 1(c)為不同應變率之應力應變曲線。曲線特性接近剛性完全塑性模型，應變率降低使強度明顯下降。

透過模擬分析軟體 DEFROM，預測薄帶之方向性(薄帶高寬比)與簡單壓縮實驗之薄帶結構做比較。圖 2 顯示模擬預測粒子變形之結果。圖 3 為壓縮成品之金相圖。粒子扁平方向變形之模擬預測與金相圖之平均誤差約 25%左右，可能原因為每個試片之薄帶結構不同，為隨機排列，無法與描繪之薄帶形狀完全相同造成此誤差；將簡單壓縮實驗之金相圖與方向性預測兩者與簡單壓縮模擬等效應變圖比較，發現應變值越高之部分(試片中心部位)其高寬比越低，兩者趨勢相近。未來可透過此預測方式，連結薄帶結構方向性與磁性之關係。

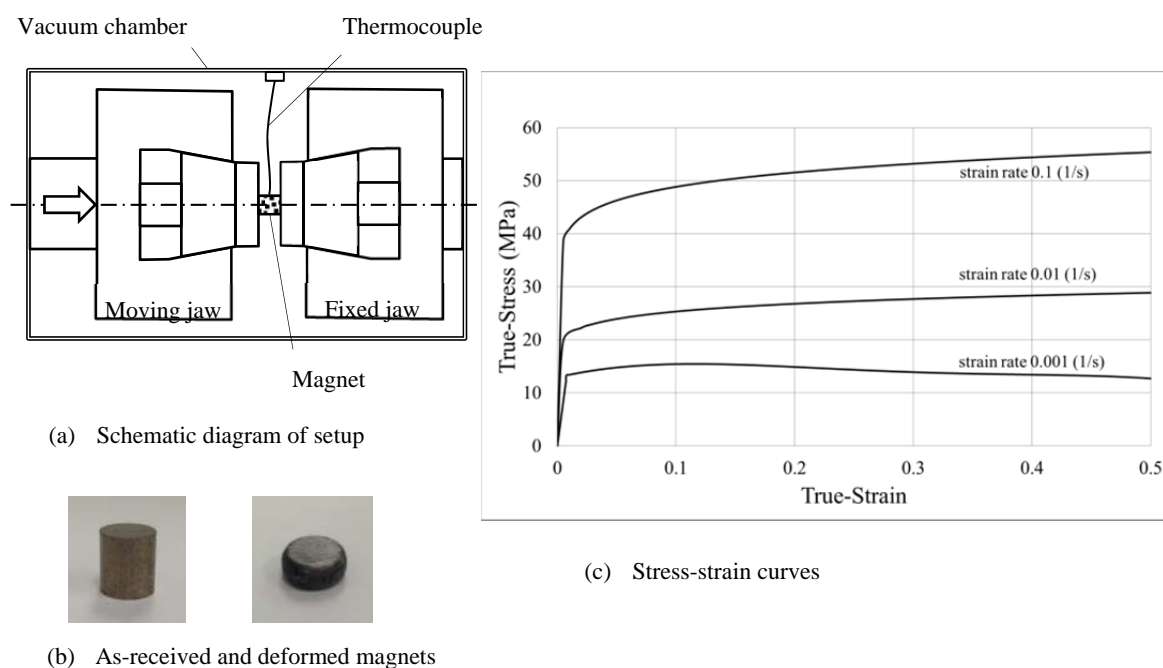


圖 1. 成形裝置示意圖、壓縮成品與應力應變曲線

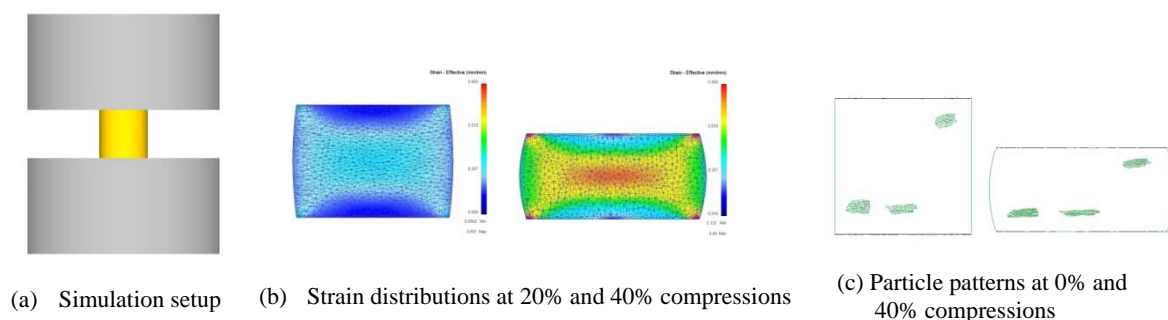
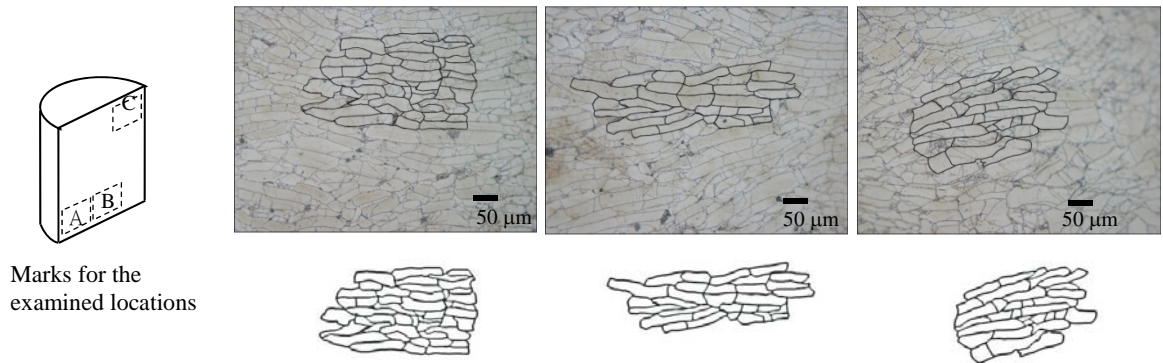
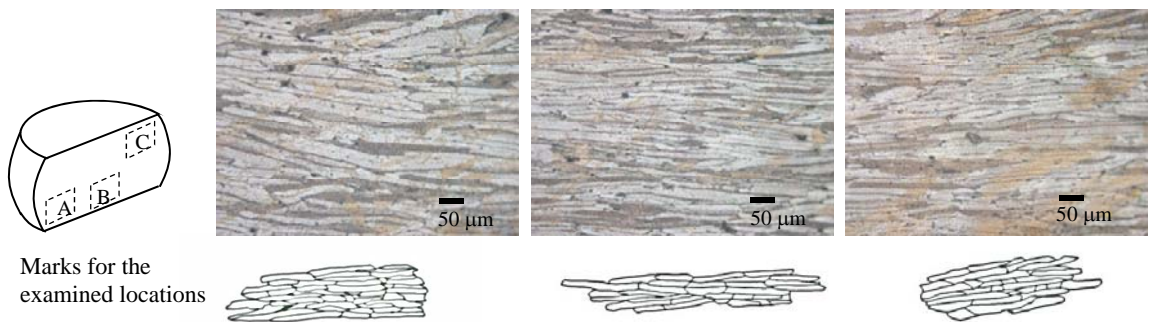


圖 2. 成形裝置示意圖、壓縮成品與應力應變曲線



(a) Micrographs and sketched patterns before compression at different locations, A, B and C (from left to right). The sketched patterns for the flow net analysis are presented in the micrographs and on the lower row.



(b) Micrographs and particle patterns of 40% compression at different locations, A, B and C (from left to right). The predicted patterns from the flow net analysis are presented on the lower row.

圖 3. 粒子變形之預測與實驗結果比較

2.5 現場報告或討論交流情形

本人投稿之論文發表於「產品製造之模擬與製程技術」場次。此會議場次主要包含金屬成形之製程技術、模擬與實驗等研究結果進行討論。參與此場次的論文有板件成形、電磁成形、鍛造成形等技術，皆包括模擬與實驗方法。

本人投稿的研究為磁石成形，是特別的研究主題。一同主持會議的加拿大 D. Green 教授對本人發表論文的內容非常感興趣(他的研究主題是板件電磁成形技術)，也對研究結果表示肯定。另外，他在各種場合接觸台灣的論文發表，對於台灣科技的蓬勃發展印象深刻。

法國的 Transvalor 公司開發的 FORGE 軟體是知名的金屬成形模擬軟體。這次與會也與主要的開發者 Etienne Perchat 進行交流。其中關於滾製成形的模擬相當耗時問題，目前似乎沒有好的方法可以克服。目前，金屬成形模擬軟體，包括 FORGE 軟體，也將熱處理模組加入其中，期望可以對於成形後之微結構變化進行預測。

三、心得

澳洲工業原本以礦業為主，但現在的研發擴展至成品製造領域，可以預期未來金屬產品製造業將在澳洲有更進一步的發展。

金屬成形模擬軟體研發公司也參與此會議，發表新的數值模擬技術。應用數值模擬輔助模具設計與製程開發，已是常用的產品研發手段。然而，要有效地運用模擬技術輔助產品開發，需要瞭解軟體開發的基礎，如金屬成形理論與數值技術。因此，理論與模擬能力的強化，也是台灣產業升級的重點。

歐洲國家，如法國與德國的模擬軟體、德國與日本的金屬成形技術，都是居於領先地位。大陸近年的研究論文產出甚多，質量也不斷提升，可以看見在金屬成形領域，已逐漸俱有舉足輕重的地位。

澳洲墨爾本市各方面的硬體設施，如交通設施、道路規劃，都非常完善。特別是電車捷運的整體規劃與建設，也值得台灣參考。畢竟，資源有限的情形下，台灣應該以更嚴謹的設計建構我們的軟硬體設施。唯有細心縝密與務實地規劃屬於我們的環境，確實認真地建構一個現代化的工作與生活的環境，我們的優勢與競爭力才能維持。

金屬成形是工業的重要基礎，可應用於交通器材、電子產品乃至醫療器材，都可以發現金屬成形技術製造的產品。台灣應該持續努力，結合企業與政府資源，在學術研究與產業技術的發展上建構完整的金屬成形技術基礎，不斷提昇板材與塊材成形技術，藉由培育高級設計研發與實作人才，提高金屬成形產業的技術水準與競爭力。

四、建議事項

金屬板材成形技術不斷創新。此次韓國學者參加人數近三十位，於理論與實務研究的主題豐富，顯見投入的人力與資源甚多。大陸研究人員參與此類研討會的人數、質與量也逐年提升。金屬成形是製造業的重要基礎，不管是板材或塊材的成形技術，台灣都應投入更多的研發與人才的培育。如此，不僅可以提升金屬產業的技術，亦可增加國家整體的競爭力。個人此次參與會議之建議如下：

1. 持續金屬成形技術之研究與人才的培育。
2. 結合產業的資源與人力，落實理論與實務結合的技術研發與人才培育。
3. 尋找國內金屬成形技術之特色，強化高值化金屬產品的研發。

五、 攜回資料名稱

本次會議論文集一冊，名稱為 NUMISHEET 2014: The 9th International Conference and Workshop on Numerical Simulation of 3D Sheet Metal Forming Processes: Part A Benchmark Problems and Results and Part B General Papers, AIP Proceedings, Vol. 1567, 2013, Melville, New York (ISBN 978-0-7354-1195-1)。

六、 附錄

參與會議所發表的論文

Chao-Cheng Chang, Po-Jen Hsiao, Jr-Shiang You, Yen-Ju Chen, and Can-Xun Chang, Prediction of Particle Orientation in Simple Upsetting Process of NdFeB Magnets, NUMISHEET 2014, AIP Conf. Proc. 1567, 1119-1122 (2013); doi: 10.1063/1.4850167.