

管件液壓汽車前副車架模具設計之研究 A Study on Tube-Hydroformed Automotive Front Subframe Die Design

古宇鈞¹、陳冠呈²、陳復國^{3*}
^{1,2,3} 國立台灣大學機械工程學系
*E-mail: fkchen@ntu.edu.tw

摘要

近年來，由於環保意識高漲，節能減碳的概念已成為工業發展中之重要議題。為了節能減碳，輕質結構設計已成為汽車工業的發展趨勢，車廠逐漸採用液壓成形技術取代傳統沖壓技術來製造重量輕、高強度之汽車結構件。然而，在生產液壓件式管件液壓成形前副車架時，模具設計階段可能面臨困難。在前副車架管件液壓成形過程中容易出現缺陷，例如皺摺和夾料等。本研究提出預成型模具設計方式，減少預成形成品之皺摺現象，並採用本研究設計出的預成型模具實際生產出前副車架，且透過對於前副車架成品的實驗數據進行測量，驗證了預成型模具設計方法以及有限元素法分析模型之準確性。

關鍵詞：管件液壓成形、前副車架、成形性、有限元素法

Abstract

In recent years, due to the arising of the environment protection, the concept of energy saving and carbon reduction has become an important issue in industrial development. To achieve the target of energy saving and carbon reduction, the lightweight structure design has been an important task for the automotive industry. It is an effective method to replace traditional stamping technology with hydroforming technology. However, difficulties may be encountered in the stages of tooling design for manufacturing a one-piece tube-hydroformed front subframe. While in the tube-hydroforming process of a front subframe, forming defects are easily presented, such as wrinkles and material exceeding the die. This paper proposed a design of pre-forming die to reduce the wrinkles after pre-forming process. An actual front subframe was produced with the design of pre-forming die proposed in this paper. The effectiveness of the proposed tooling designs as well as the finite element model are validated by the experimental data measured from the actual front subframe.

Keywords: tube hydroforming, front subframe, formability, finite element analysis.

1. 前言

隨著汽車電汽化的聲浪日益提高，車輛結構輕量化技術更顯重要，因此近年來管件液壓成形製程已被大量應用在汽車零組件及結構件上，而隨著技術不斷進步與低成本之需求，液壓件式前副車架也已廣泛用於各級車種上。為了探討前副車架之管件液壓成形製程，需先對前副車架之相關資料進行掌握。預成型道次為液壓成形道次前輔助成形的道次之一，其功用主要為將管材整形使其能順利穩定放入液壓模具模穴中，還有也能夠改變管材在液壓模具中的管料位置分配。Lei 等人[1]利用有限元素法軟體對汽車結構件液壓成形進行完整模擬分

析，除了彎管後的厚度分佈，其中也包括預成形模面設計方式對於載具成形性之影響。Dohmann 和 Hartl[2]以有限元素法軟體分析不同預成形模面設計，並對管材預成形後的皺褶及凹陷程度進行優化，藉以提高液壓成形道次之成形性。

液壓成形道次之成形結果與載具最終成品有著最直接的關係，而其中也有許多成形相關參數值得探討。Wu 等人[3]利用 DYNAFORM 模擬管件液壓成形，並說明模擬參數設定流程。Xu 等人[4]提出隨著摩擦係數提高會增加成品在液壓成形之厚度減薄率。前副車架於液壓成形時，端口處需大量側推補料，壓力與側推量之關係則為此前副車架成形性之主要影響之一。Chen[5]依 2D 塑性變形理論推導出液體壓力於管件液壓成形中之計算公式。Kridli 等人[6]使用 ABAQUS 軟體分析，在 2D 液壓脹形模型中探討壓力與圓角間的關係。本研究將透過有限元素法液壓成形模擬模型，探討以預成形模具設計之方式降低前副車架預成形後皺褶現象之產生。

2. 預成形模具設計

預成形模具使用的空間及模面設計非常彈性，只要能確保管材經預成形後順利放置於液壓模穴，並且於液壓脹形後整體成形性有提高與達到需求，即可隨設計者之想法自由設計。

2.1 管材材料性質

下料管之成形材料為常見之汽車結構鋼材 SAPH400，管材厚度為 2.3mm，對材料進行單軸拉伸試驗取得降伏強度為 319.76MPa，抗拉強度為 410.14MPa，楊氏係數為 206.33GPa，使用取得之應力應變曲線輸入進有限元素分析軟體。

2.2 預成形設計

目前於管件液壓成形製程中，較常見的預成形設計方式為單一作動的高擋牆預成形，然而對於前副車架這種 U 字型的部件而言，其特徵造型及彎角處多而複雜，尺寸也較其他汽車部件龐大，可能根據管材之材料性質及厚度等，而導致預成形過程中，管材施加予模具之反力過大造成損壞，抑或是預成形時使管材產生嚴重皺摺缺陷或夾料風險等問題存在，可以透過有限元素法模擬分析管材成形過程中的變化，若如圖 1 中產生嚴重的夾料及皺褶，預成形模具設計則須採用 CAM 模方式。利用側向 CAM 模作動的預成形設計，如圖 2 所示，整體的模面設計以及成形優化靈活性與彈性較為高，像是可以透過優化側向 CAM 模推動距離與各模面之間的合模順序，不僅能有效避免預成形合模後造成皺摺與夾料風險，更可以降低材料減薄率與降低最大貼模距離，提升產品品質。綜合以上，本論文對於前副車架成形工法之預成形階段，將以利用側向 CAM 模作動的預成形設計方式為主。

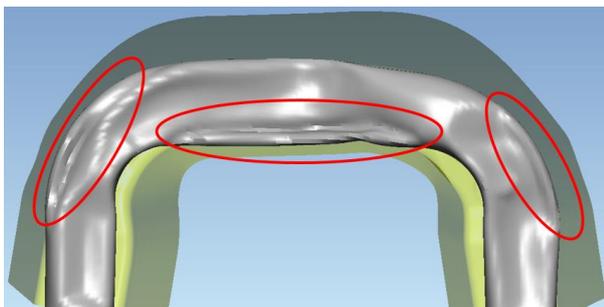


圖1 模擬中高擋牆預成形產生夾料及皺摺

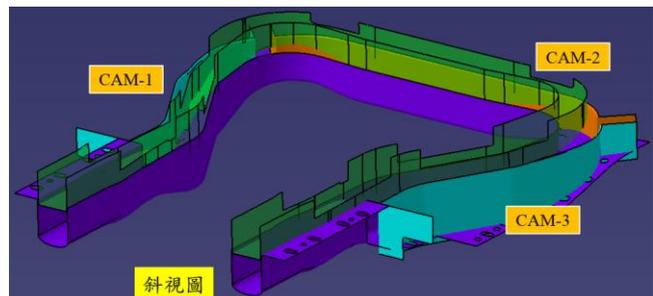


圖2 側向CAM模預成形設計

2.3 預成形端口模面設計

由於在液壓脹形時管材端口處與側推補料有最直接之關聯性，管材端口位置於預成形後之形狀以及側推油封形狀之設計，將直接影響側推補料時管料流動的順暢性。以本研究載具之而言，倘若以圓形作為油封的設計形狀去順接成品端口，由於形狀差異過大，圓形造型端口與成品端口順化較為急遽，可能會導致如圖 3 中合模後端口產生凹陷的情形。但若以橢圓造型之端口形狀，如圖 4 所示，在相同過度區長度之下去順接成品端口以完成此區域之上下模面設計，順化程度則較為平整，流料較順暢，並且也不易導致前面所敘述之管材產生過大凹陷。

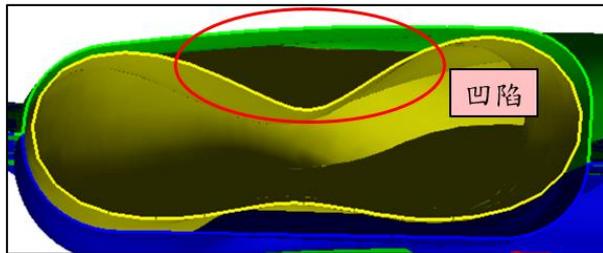


圖3 合模後端口產生凹陷的情形

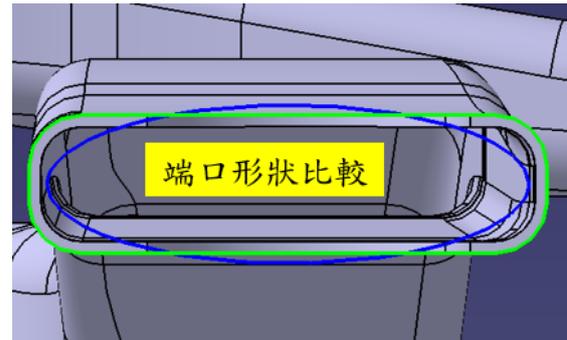


圖4 橢圓造型之端口形狀設計

3. 實體載具驗證

本研究使用前面介紹之前副車架預成形模具設計，實際生產出一套預成形模具，如圖 5 與圖 6 所示，並進行液壓成形製造出圖 7 中實體前副車架。本章節藉由比較研究載具有限元素分析及實際開模產品厚度分佈驗證模擬之準確性，利用超音波測厚儀量測該截面之厚度分佈，將量測相對應位置之數據與有限元素法模擬數值進行比較。厚度驗證方式為標示中間 C-C 段右方為觀察點編號 1，沿著彎角外緣標示九個點如圖 7 所示。圖 8 為厚度驗證比較圖，由結果顯示模擬結果與實際量測結果相近，其最大誤差值為 6.11%。



圖5 前副車架預成形實際開模之上模具



圖6 前副車架預成形實際開模之上模具

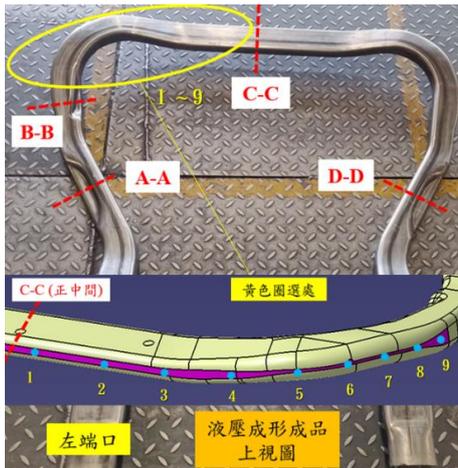


圖 7 實體量測位置示意圖

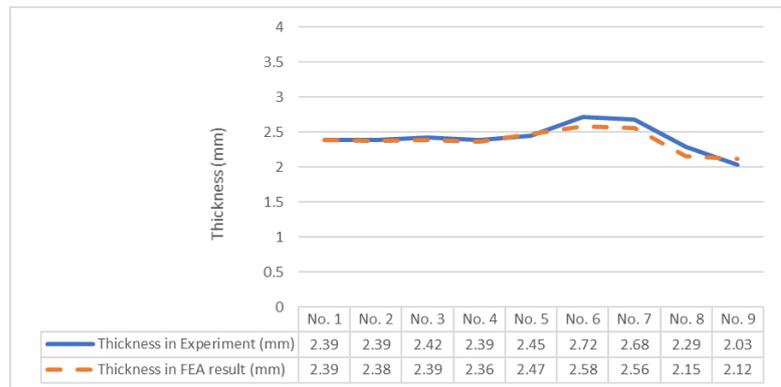


圖 8 厚度驗證比較圖

4. 結論

本研究提出預成形模面之設計方式，藉由側向CAM模作動之預成形模具設計，避免掉使用高擋牆預成形模具可能產生的皺褶與夾料缺陷。端口造型也經過優化改善，管材端口不會因預成形道次後嚴重變形而無法於液壓成形道次中順利塞入油封，亦可以增加液壓道次側推補料的順暢度而降低成形減薄率。最後，以本研究提出之預成形模面設計概念進行管件液壓製程之模具設計生產本論文之研究載具，以實體樣件與有限元素分析之結果進行比較，確定模擬之準確性。

5. 誌謝

本論文為科技部計畫編號MOST105-2221-E002-030-MY3之計畫，由於科技部的支持，使本計畫得以順利進行，特此致上感謝之意。

6. 參考文獻

1. L.P. Lei, J. Kim and S.J. Kang, 2003. Rigid-plastic finite element analysis of hydroforming process and its applications, Journal of Materials Processing Technology, vol.139, pp.187-194.
2. F. Dohmann and C. Hartl, 2004. Hydroforming-applications of coherent FE-simulations to the development of products and processes, Journal of Materials Processing Technology, vol.150, pp.18-24.
3. L. Wu and J. Xiang, 2012. Application of software DYNIFORM to the tube forming process with multi-stages, Advanced Materials Research, vol.399-401, pp.1663-1666.
4. X. Xu, S. Li, W. Zhang and Z. Lin, 2009. Analysis of thickness distribution of square-sectional hydroformed parts, Journal of Materials Processing Technology, vol.209, pp.158-164.
5. F.K. Chen, 2003. Formability analysis of tube hydroforming process, Applied Mechanics and Engineering, vol.4, pp.149-169.
6. G.T. Kridli, L. Bao, P.K. Mallick and Y. Tian, 2003. Investigation of thickness variation and corner filling in tube hydroforming, Journal of Materials Processing Technology, vol.133, pp.287-296.