

A390鋁合金汽車活塞之鑄造製程最佳化解析

陳柏辰、胡瑞峰

E-mail: 9314769@mail.dyu.edu.tw

摘要

本研究主要目的係在探討電腦輔助模擬A390鋁合金汽車活塞鑄造方案設計對鑄造充模過程中凝固及流動現象之影響，同時並研究如何獲得此類鑄件之較佳鑄造方案設計，並以CO₂模造模之實際鑄件澆注驗證電腦模擬的可靠性。研究結果顯示，圓柱形橫流道之非壓力式澆流道系統可具有較平穩的鋁液流動情形，較其它形式之澆流道系統可有效降低紊流之產生，而活塞鑄件之較佳進模口位置應設置在活塞裙部的側邊。經由電腦模擬和實際驗證之分析，活塞若只採用頂冒口之設計，補充收縮效果會最佳。關於冷鐵設計之模擬，活塞若未設冒口則無法解決收縮缺陷。但同時設有冷鐵和頂冒口的活塞鑄件，卻也無法獲得良好補充的鑄件。而同時設有冷鐵和側冒口的活塞鑄件，收縮缺陷會由活塞之頂部移往活塞插銷附近之近進模口處，亦仍無法獲得良好補充的鑄件。汽車活塞之頂冒口經由最佳化模擬，成品率由原先的78%提高為91%，而最佳化分析之結果可發現，採用圓柱形橫流道之非壓力式澆流道系統加入頂冒口之設計，其成品率之提高比率相較於其他澆流道系統高。故，電腦輔助工程(CAE)分析模擬確實可資以評估和設計汽車活塞鑄件之鑄造方案設計。

關鍵詞：A390鋁合金；凝固；流動；澆流道系統；電腦輔助工程

目錄

目錄 封面內頁 簽名頁 授權書.....	iii	中文摘要.....	iii	
.....v	英文摘要.....	.....vi	誌謝.....	vi
.....vii	目錄.....	.....viii	圖目錄.....	viii
.....xi	表目錄.....	.....xv	符號說明.....	xv
.....xvi	第一章 前言.....	.....1	第二章 文獻探討.....	1
.....3	2.1 合金與造模.....	.....3	2.1.1 A390鋁合金簡介.....	3
.....3	2.1.2 CO ₂ 模法簡介.....	.....3	2.2 相關活塞之文獻.....	3
.....4	2.3 澆流道系統.....	.....4	2.3.1 豎澆道.....	4
.....5	2.3.2 橫流道.....	.....5	2.3.3 進模口.....	5
.....6	2.3.4 澆口比.....	.....7	2.3.5 冒口.....	7
.....9	2.3.6 冷鐵.....	.....10	2.4 鑄造過程之數值模擬分析發展.....	10
.....11	2.4.1 有限差分法及有限元素法.....	.....12	2.4.2 電腦輔助工程分析軟體的發展.....	12
.....12	2.4.3 AFS Solid 3D軟體.....	.....14	第三章 實驗方法及步驟.....	14
.....25	3.1 實驗設計.....	.....25	3.1.1 模型的建立.....	25
.....25	3.1.2 模擬參數設定.....	.....27	3.2 造模及熔煉.....	27
.....29	3.3 缺陷觀察與分析.....	.....30	第四章 結果與討論.....	30
.....42	4.1 鑄件凝固分析.....	.....42	4.2 澆口比與橫流道設計對鋁液流動之影響.....	42
.....46	4.3 進模口之影響.....	.....52	4.4 冒口對凝固之影響.....	52
.....53	4.4.1 未設冒口鑄件之凝固模擬.....	.....53	4.4.2 設有冒口鑄件之凝固模擬.....	53
.....53	4.5 冷鐵對凝固之影響.....	.....55	4.6 同時設有冒口及冷鐵對凝固之影響.....	55
.....55	4.7 冒口之最佳化設計.....	.....55	4.8 澆冒口系統之最佳化設計.....	55
.....56	第五章 結論.....	.....95	參考文獻.....	95
.....97	圖目錄 圖2.1一般鋁合金在鑄造過程中所形成的造成各種缺陷.....	.....20	圖2.2Bernoulli定理應用於澆流道系統設計.....	20
.....20	圖2.3進模口速度和鑄件厚度之關係.....	.....20	圖2.3進模口速度和鑄件厚度之關係.....	20
.....21	圖2.4冒口設計可使鑄件產生方向性凝固.....	.....21	圖2.5冒口頸的設計尺寸計算例子.....	21
.....22	圖2.6各種不同形式冷鐵及其設置位置.....	.....22	圖2.7標記顆粒法(MAC法).....	22
.....23	圖2.8流體體積法(VOF法).....	.....23	圖2.9利用有限元素法(FEM)和有限差分法(FDM)所劃分的網格形狀.....	23
.....24	圖3.1實驗設計流程.....	.....33	圖3.2調整分割的三角形網格.....	33
.....34	圖3.3單位之設定.....	.....34	圖3.4活塞鑄件模型和其橫流道之設計.....	34
.....35	圖3.5實際的汽車活塞.....	.....36	圖3.6Pro/E輸入活塞.....	36

之密度.....	36	圖3.7Pro/E估算活塞鑄件的表面積與體積.....	37	圖3.8模擬軟
體中A390鋁合金之熱物性質.....	37	圖3.9A390鋁合金的冷卻曲線及收縮曲線.....	38	
圖3.10CO2砂模的熱物性質.....	38	圖3.11澆流道設計精靈.....		
.....	39	圖3.12汽車活塞鑄件的網格化劃分.....	39	圖3.13砂模的網格化劃分.....
.....	40	圖3.14快速模擬與完全模擬的設定.....	40	圖3.15最佳化模擬的設定.....
.....	41	圖3.16除氣過程與除氣設備.....	41	圖4.1活塞鑄件在未設澆流道系統之
電腦模擬結果.....	61	圖4.2凝固後活塞鑄件之電腦模擬.....	62	圖4.3活塞鑄件之漸進式凝
固的電腦模擬分析.....	63	圖4.4活塞鑄件之方向性凝固的電腦模擬分析.....	64	圖4.5活塞鑄件之
溫度梯度的電腦模擬分析.....	65	圖4.6活塞鑄件電腦模擬缺陷之分析.....	66	圖4.7活
塞鑄件電腦模擬縮孔之分析.....	67	圖4.8活塞鑄件之電腦模擬微縮孔之分析.....		
...68		圖4.9活塞鑄件之電腦模擬熱點分析.....	69	圖4.10活塞鑄件之電腦模擬微縮孔分析.....
.....	70	圖4.11圓柱形橫流道之壓力式澆流道系統的速度、壓力和溫度分布.....		
.....	71	圖4.12圓柱形橫流道之非壓力式澆流道系統的速度、壓力和溫度分布.....		
.....	72	圖4.13矩形橫流道之壓力式澆流道系統的速度、壓力和溫度分布.....		
.....	73	圖4.14矩形橫流道之非壓力式澆流道系統的速度、壓力和溫度分布.....		
.....	74	圖4.15三角形橫流道之壓力式澆流道系統的速度、壓力和溫度分布.....		
.....	75	圖4.16三角形橫流道之非壓力式澆流道系統的速度、壓力和溫度分布.....		
.....	76	圖4.17未設冒口之電腦模擬結果與實際活塞鑄件.....	77	圖4.18澆
流道系統模擬與實作.....	78	圖4.19活塞鑄件在有設澆流道系統之電腦模擬分析.....		
...79		圖4.20活塞鑄件將採用不同準則之電腦模擬分析.....	80	圖4.21活塞鑄件之進模口設在不同位置之電腦模擬
分析.....	81	圖4.22模數為1.2倍於活塞之頂冒口模擬結果與實作.....	82	圖4.23模數1.07倍於活塞的頂冒口模擬
與實作驗證.....	82	圖4.24模數為1.2倍於活塞之側冒口模擬結果與實作.....	83	圖4.25模數為1.07倍於活塞
之側冒口模擬結果與實作.....	83	圖4.26模數為1.2和1.07倍於活塞之側冒口變換冒口頸位置的模擬結果.....		
.....	84	圖4.27活塞鑄件單獨加入冷鐵之模擬缺陷結果.....	84	圖4.28同
時設有冷鐵及頂冒口圓柱形橫流道之非壓力式澆流道系統的凝固模擬分析.....	85			
圖4.29同時設有冷鐵及側冒口圓柱形橫流道之非壓力式澆流道系統的凝固模擬分析.....	85			
.....	86	圖4.30使用OPTICast模組最佳化冒口之設計.....	86	圖4.31單獨頂冒口最佳化後高度縮減為0.7093倍
.....	87	圖4.32單獨頂冒口最佳化後直徑縮減為0.7145倍.....	87	圖4.33單獨頂冒口最佳化後使得成品
率由原先78%變為91%.....	87	圖4.34圓柱形橫流道之非壓力式澆流道系統加入頂冒口之最佳化分析.....		
.....	88	圖4.35圓柱形橫流道之非壓力式澆流道系統加入頂冒口之最佳化後冒口高度縮減		
為0.6949倍.....	89	圖4.36圓柱形橫流道之非壓力式澆流道系統加入頂冒口之最佳化後直徑		
縮減為0.9075倍.....	89	圖4.37圓柱形橫流道之非壓力式澆流道系統加入頂冒口之最佳		
化後充模時間變為4.1224秒.....	90	圖4.38圓柱形橫流道之非壓力式澆流道系統加入頂冒		
口之最佳化後使得成品率由原先0.4763變為0.5257.....	90	圖4.39圓柱形橫流道之非壓力式澆流道系統		
加入側冒口之最佳化分析.....	91	圖4.40圓柱形橫流道之非壓力式澆流		
道系統加入側冒口之最佳化後冒口高度縮減為0.9640倍.....	92	圖4.41圓柱形橫流道之非壓		
力式澆流道系統加入側冒口之最佳化後直徑縮減為0.7957倍.....	92	圖4.42圓柱形橫流		
道之非壓力式澆流道系統加入側冒口之最佳化後充模時間仍為6秒.....	93	圖4.43		
圓柱形橫流道之非壓力式澆流道系統加入側冒口之最佳化後使得成品率由原先0.4584變為0.4932.....	93	圖4.44圓柱形橫流道之非壓力式澆流道系統加入頂冒口之最佳化後實際澆鑄.....		
.....	94	表目錄 表2.1A390鋁合金化學成分規格.....	17	表2.2不同金屬之凝固收縮量...
.....	17	表2.3各種金屬的澆口比.....	18	表2.4三種形式之
冒口頸尺寸計算公式.....	18	表2.5各種鑄造模流分析軟體的特性.....	19	
表3.1Pro/E軟體估算之汽車活塞資料.....	31	表3.2水平澆流道設計幾何尺寸.....		
.....	31	表3.3汽車活塞之冒口尺寸設計.....	32	表3.4汽車活塞之冷鐵尺寸設計.....
.....	32	表3.5手冊建議的臨界固相分率值和Niyama值.....	32	表4.1在充模時間之1.66秒
瞬間，六組澆流道系統的進模口速度...58		表4.2圓柱形橫流道之非壓力式澆流道系統加入冒口的模擬分析...58		表4.3設有冷
鐵及冒口之模擬分析.....	59	表4.4活塞僅具有之頂冒口的最佳化分析.....		
...59		表4.5圓柱形橫流道之非壓力式澆流道系統加入頂冒口之最佳化分析.....		
.....	60	表4.6圓柱形橫流道之非壓力式澆流道系統加入側冒口之最佳化分析.....		
.....	60			

參考文獻 [1]W. S. Miller, L. Zhuang, J. Bottema, A.J. Wittebrood, P. D. Smet, A. Haszler and A. Vieregge, "Recent Development in Aluminum Alloys for the Automotive Industry", *Materials Science and Engineering A280*, 2002, pp.37-49 [2]D. Carle and G. Blount, "The Suitability of Aluminum As An Alternative Material for Car Bodies", *Materials and Design* 20, 1999, pp.267-272 [3]Giuseppe Sala, "Technology-Driven Design of MMC Squeeze Casting Connecting Rod", *Science and Technology of Advanced Material* 3, 2002, pp.45-57 [4]S. M. Sapuan, M. S. Jacob, F. Mustapha and N. Ismail, "A Prototype Knowledge-Based System for Material Selection of Ceramic Matrix Composites of Automotive Engine Components", *Materials and Design* 23, 2002, pp.701-708 [5]G. W. Malaczynski, A. H. Hamdi, A. A. Elmoursi and X. Qiu, "Diamond-Like Carbon Coating for Aluminum 390 Alloy Automotive Applications", *Surface and Coatings Technology* 93, 1977, pp.280-286 [6]P. J. Ok, K. K. Jun and K. D. Young, "An Experimental Study on the Optimization of Powder Forging Process Parameters for An Aluminum Alloy Piston", *Journal of Materials Processing Technology* 113, 2001, pp.486-492 [7]賴耿陽譯, 特殊鑄模, 日本鑄造技術講座編輯委員會編, 民國87年 [8]P. Kapranos, D. H. Kirkwood, H. V. Atkinson, J. T. Rheinlander, J. J. Bentzen, P. T. Toft, C. P. Debel, G. Laslaz, L. Maenner, S. Blais, J. M. Rodriguez-Ibabe, L. Lasa, P. Giordano, G. Chiarmetta and A. Giese, "Thixoforming of An Automotive Part in A390 Hypereutectic Al-Si Alloy", *Journal of Materials Processing Technology* 135, 2003, pp.271-277 [9]M. M. Haque and A. Sharif, "Study on Wear Properties of Aluminum Silicon Piston Alloy", *Journal of Materials Processing Technology* 118, 2001, pp.69-73 [10]Y. Wang, K. Broganb and S. C. Tung, "Wear and Scuffing Characteristics of Composite Polymer and Nickel/Ceramic Composite Coated Piston Skirts Against Aluminum and Cast Iron Cylinder Bores", *Wear* 250, 2001, pp.706-717 [11]S. V. Shepel and S. Paolucci, "Numerical Simulation of Filling and Solidification of Permanent Mold Castings", *Applied Thermal Engineering* 22, 2002, pp.229-248 [12]K. Serope, *Manufacturing Engineering and Technology*, Addison Wesley, 2002 [13]A. Du, "Aluminum: The Corrosion Resistant Automotive Material", The Aluminum Association Inc., Publication AT7, 2001 [14]P. Rohatgi, "Cast Metal Matrix Composites: Past, Present and Future", *AFS Trans.*, Vol.109, 2001, pp.1-25 [15]N. Wukovich, G. Metevelis, "The Foundryman's Dilemma, or Fifty Year of Data and Still Asking How?", *AFS Trans.*, Vol.97, 1989, pp. 285-301 [16]C. S. Li and Y. K. Shen, "Optimum Design of Runner System Balancing in Injection Molding", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol.22, No.2, 1995, pp.179-188 [17]S. Shamsuddin and T. CheeKeen, "Flow Analysis Along the Runner and Gating System of A Casting Process", *Journal of Materials Processing Technology* 63, 1997, pp.690-695 [18]M. R. Barone and D. A. Caulk, "Analysis of Liquid Metal Flow in Die Casting", *International Journal of Engineering Science* 38, 2000, pp.1279-1302 [19]X. Dai, X. Yang, J. Campbell and J. Wood, "Effects of Runner System Design on the Mechanical Strength of Al-7Si- Mg Alloy Castings", *Materials Science and Engineering*, 2003, pp.315-325 [20]J. Ranyoro, S. M. Boutorabi and J. Campbell, "Critical Gate Velocities for Film-Forming Casting Alloys: A Basis for Process Specification", *AFS Trans.*, Vol.100, 1992, pp.225-234 [21]W. B. Lee, H. Y. Lu and Y. B. Lui, "A Computer Simulation of the Effect of Wall Thickness on the Metal Flow in Diecasting Dies", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.52, pp.248-269 [22]B. H. Hu, K. K. Tong, X. P. Niu and I. Pinwill, "Design and Optimization of Runner and Gating Systems for the Die Casting of Thin-Wall Magnesium Telecommunication Parts Through Numerical Simulation", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.105, 2000, pp.128-133 [23]R. W. Heine, C. R. Loper Jr. and P. C. Rosenthal, *Principles of Metal Casting*, 1965, p 101 [24]X. Xue, S. F. Hansen and P. N. Hansen, "Water Analog Study of Effects of Gating Designs on Inclusion Separation and Mold Filling Control", *AFS Trans.*, Vol.101, 1993, pp.199- 302 [25]C. Beckermann, "Development of New Feeding Distance Rules Using Casting Simulation: Part I. Methodology", *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2002, pp.731- 740 [26]K. D. Carlson, S. OU, R. A. Hardin, C. Beckermann, "Development of New Feeding Distance Rules Using Casting Simulation: Part II. The New Rules", *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2002, pp.741- 753 [27]W.S. Hwang and A. Stoehr, "Computer Simulation for the Filling of Castings", *AFS Trans.*, Vol.95, 1987, pp.87-141 [28]C. W. Hirt and B. D. Nichols, "Volume of Fluid (VOF) Method the Dynamics of Free Boundaries", *Journal of Computational Physics* 39, 1981, pp.201-225 [29]H. M. Si, C. Cho and S. Y. Kwahk, "A Hybrid Method for Casting Process Simulation by Combining FDM and FEM with An Efficient Data Conversion Algorithm", *Journal of Materials Processing Technology* 133, 2003, pp.311-321 [30]C. Jordan, J. L. Hill and T. S. Piwonka, "Computer Designed Gating Systems : Promises and Problems", *AFS Trans.*, Vol.96, 1988, pp.603 -610 [31]L. Estirn, "A Deeper Look at Casting Solidification", *Modern Casting*, Vo1.84, 1994, pp.20-23 [32]林惠娟, "鑄造灌模過程中流體流動及熱傳導現象之解析", 國立成功大學礦冶及材料科學研究所博士論文, 民國78年 [33]鐘尚浩, "鑄造灌模及凝固解析模式之改良及其相關實驗研究技術之研究發展", 國立成功大學礦冶及材料科學研究所博士論文, 民國81年 [34]翁政茂, "流路之最佳化設計", 國立中央大學機械工程研究所碩士論文, 中華民國85年 [35]F. J. Bradley, J. A. Hoopes, S. Kannan and S. Heinemann, "A Hydraulics-Based Model of Fluid Flow in Horizontal Gating System", *AFS Trans.*, Vol.100, 1992, pp.917-923 [36]Y. F. Chen, R. C. Chen and W. S. Hwang, "Mold-Filling Study in the EPC Process-Mathematical Model and Flow Characteristics", *AFS Trans.*, Vol.105, 1997, p 459 [37]P. Cleary, J. Ha, V. Alguine and T. Nguyen, "Flow Modeling in Casting Processes", *Applied Mathematical Modeling* 26, 2002, pp. 171-190 [38]SOLIDCast Handbook, Finite Solution Inc., 2002 [39]陳向詠, "CAE應用於高品質矽喃樹脂模灰鑄鐵件冒口設計之研究", 逢甲大學機械工程研究所碩士論文, 民國92年 [40]蔡俊彥, "砂模鑄造鋁基碳化矽複合材料流動性之探討", 大葉大學 機械工程研究所碩士論文, 民國90年 [41]R. Wlodawer著, 鑄鋼件凝固原理及澆冒口設計, 中華民國鑄造學會編, 民國65年 [42]胡瑞峰, "鋁-矽(鎂)系合金及鋁-矽-銅系合金流動性之研究", 國立台灣大學機械工程研究所博士論文, 民國86年 [43]謝世俊, 鑄件的澆口系統與冒口, 民國60年