

# Al 5052 鋁合金板材溫成形製程研究

## Investigation on Warm Forming Process of Al 5052 Aluminum Alloys Sheets

陳宛伶<sup>1,2\*</sup>、陳逸群<sup>1</sup>、李榮顯<sup>2</sup>

<sup>1</sup>財團法人金屬工業研究發展中心 製程處 成形組

<sup>2</sup>國立成功大學 機械工程所

\*E-mail: [rinal102@mail.mirdc.org.tw](mailto:rinal102@mail.mirdc.org.tw)

### 摘要

近年來電動車的開發已成為全球下個 10 年的發展趨勢，但卻面臨其龐大電力系統造成車重增加使效能受限的問題，因此應用輕量化材料於電動車車體設計已成為全球主要汽車大廠積極發展的方向。鋁合金為輕量化的代表性材料，其中 5XXX 鋁合金已廣泛應用於車體外鈹件，但面臨具複雜曲面外型或深引伸部件時，成形後鈹件仍會面臨到品質不易控制的問題。

本研究針對 5XXX 鋁合金板料冷模溫成形製程進行研究，透過改變溫成形製程中不同的參數探討其對成形後鈹件品質影響，同時考量實際製程實施可行性獲得溫成形製程參數條件，並以一軌道車輛的座椅扶手進行試作。於成形溫度為 250°C 時，溫成形後座椅扶手部件尺寸精度可控制在差±0.7mm 範圍內，且強度損失可控制在 10% 範圍內。

**關鍵詞：**5XXX 鋁板，溫成形，鈹件品質控制，運輸產業

### Abstract

The development of Electric Vehicles has become future trend. However, it faces the difficulties of proving efficiency due to increased weight caused by huge power system. Therefore, the application of lightweight material in body design of EVs turned in to one of important issues for automakers. Aluminum alloy is the most representative lightweight materials. Among them, 5XXX aluminum alloy is widely used in outer panel parts and can be formed by cold stamping, but it still facing problem of poor quality of formed parts with complex appearance or deep drawing parts.

The influence of different parameters in the warm forming process with cold die of 5XXX aluminum alloy sheet on the quality of the formed sheet parts has been discussed in this research. And a seat armrests of rail vehicles was used as samples for trial verification. The results shows that dimensional accuracy of warm formed parts can be controlled in ±0.7mm and strength loss can be controlled in 10% when forming temperature is 250°C.

**Keywords:** 5XXX aluminum alloy, warm forming, quality control, transportation industry

### 1. 前言

因應近年來全球節能減碳政策帶動運輸產業朝向低耗能、低排放、低汙染的方向發展，電動車的開發已成為全球下個10年的發展趨勢，但卻面臨其龐大電力系統造成車重增加使其效能受限的問題，因此應用輕量化材料於電動車車體設計已成為全球主要汽車大廠積極發展的方向。鋁合金和鋼材相比除可顯著減輕重量的外，同時具製造過程中所產生碳排放量少的優勢，因此鋁合金板材應用的應用逐步增加。目前5xxx鋁合金已廣泛用於車體外鈹件，並多以

冷衝成形承製。但鋁合金板料在室溫下成形性有限，面臨具複雜曲面外型或深引伸部件時，成形後鈹件仍有破裂、皺褶、回彈等造成品質不易控制，需依靠反覆修模調整或以多道次成形克服。

利用鋁合金經加熱後成形性提升的特性，似乎能夠解決鋁合金板材在室溫下成形時所面臨的問題。Kim[1]等人以選用AA5754-O鋁合金板料，並以U型部件作為實驗載具在150~250°C溫度範圍內進行加熱模具非等溫成形製程參數對成形後鈹件回彈的影響。研究成果顯示可透過改變板料成形時的壓料力、板料與模具間的摩擦係數以及加熱溫度差，縮小成形後鈹件在厚度方向上的應力差進而降低成形後鈹件的回彈，提升尺寸精度。而加熱模具溫成形製程，在過去的30年間於通用汽車、福特和克萊斯勒等汽車大廠廣泛應用於製造具複雜外型及需深引伸成形之汽車部件上[2][3][4]，但製程中成形模具需加熱，因此需配置模具加熱系統造成生產成本的增加及效率的降低。為提升鋁合金部件生產效率，Nia [4]等人透過模具設計、成形製程CAE分析並參考Kim[5]等人於鋁合金於非等溫成形製程參數的研究成果，成功的在成形溫度區間250°C ± 10°C的範圍內，以成形模具不加熱的非等溫溫成形製程單道次成形深度為144mm之車門內鈹件。

由先前研究成果顯示，在模具不加熱的溫成形製程條件下5XXX鋁合金仍有足夠成形性可單道次成形複雜曲面的部件，解決鋁合金冷衝成形的困境，且和原模具加熱溫成形製程相比有更低的製程成本。本研究進一步的針對5XXX鋁合金板料冷模溫成形製程進行研究，探討板料成形製程參數與成形後鈹件關係，掌握製程參數控制關鍵。最後參考Kim[1]等人的研究，在150~250°C的成形溫度區間以一軌道車輛的座椅扶手進行實際試作驗證。

## 2. 中高強度鋁合金溫成形製程參數試驗

### 2.1 材料

研究中選用目前於運輸產業廣泛使用之Al 5052-H32 鋁合金板料作為中高強度鋁合金溫成形製程研究之材料，根據最終目標試驗載具尺寸規格選用厚度為2mm之板料，板料來源為中鋼鋁業。Al 5052-H32 鋁合金板料降伏強度及抗拉強度分別為163MPa及223MPa，延伸率為17%，合金成分則如表1所示。

表1 Al 7075-T6之主要合金成份

元素	Mg	Zn	Cr	Cu	Fe	Mn	Si	Al
wt%	2.2 ~ 2.8	0.10 max	0.15 ~ 0.35	0.10 max	0.40 max	0.10 max	0.25 max	Bal.

### 2.2 中高強度鋁合金溫成形製程參數試驗

#### 2.2.1 不同加熱速率對板料機械性質的影響

選用板料目標加熱溫度為200°C，以一厚度2mm以及長寬分別為110mm和80mm之平板，搭配細速型感溫線及溫度紀錄器，分別透過箱型式加熱爐以加熱至目標溫度時間為20秒、360秒(6分鐘)及1800秒(30分鐘)之試驗條件進行不同加熱速率對板料機械性質影響的試驗。

經不同加熱速率加熱後板料依據ASTM E8規範裁切單軸拉伸試片，並以0.01/s的應變速率進行拉伸試驗得到加熱後板料機械性能，結果如表2所示。試驗結果顯示板料加熱至目標溫度時間控制在360秒以內，可控制加熱後板料強度損失在5%以內，而當板料加熱至目標溫度時間至1800秒後，板料強度損失即超出10%。由於本研究中座椅扶手部件目標強度損失為小於10%，且同時考量板料被加熱至目標溫度時之板料溫度及加熱速率之穩定性，因此後續

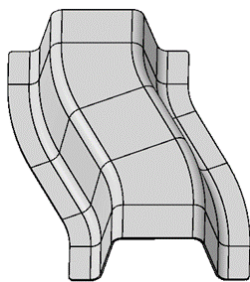
座椅扶手部件試作製程中控制加熱至目標溫度時間為360秒。

表2不同加熱速率加熱後板料之機械性能驗證結果

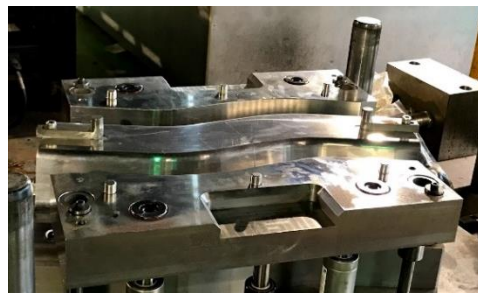
加熱至板料目標溫度時間	板料抗拉強度(MPa)	強度損失(%)
20 秒	216	3.1%
360 秒 (6 分鐘)	213	4.4%
1800 秒 (30 分鐘)	200	10.3%

### 2.2.2 潤滑劑選用試驗

潤滑劑選用試驗於板料目標加熱溫度為250°C 下進行，並以一具S形特徵之部件作為試驗載具，S形特徵部件設計以及模具分別如圖1(a)(b)所示。



(a)

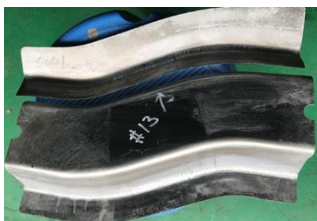


(b)

圖1 (a) S形特徵部件設計圖 (b) S形特徵部件成形模具

選用常用於高溫成形製程中的石墨系潤滑劑進行試驗，而潤滑劑會分別因不同基底調劑以及塗佈方式而影響板料與模具間界面的摩潤狀態，因此分別選用水性及油性溶劑兩種不同基底調劑，以及將潤滑劑分別於模具或板料兩種塗佈方式進行探討。

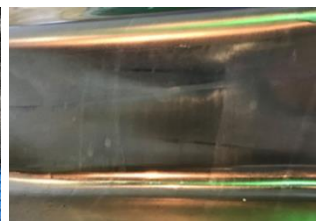
石墨系潤滑劑應用於鋁板溫成形製程中的試驗結果如圖2(a)(b)(c)(d)。可以發現以水性潤滑劑塗佈於成形模具上時，由於模面塗佈保護油造成油水互斥使潤滑劑無法均勻塗佈造成潤滑失效，使鈹件因與模面間潤滑不足有嚴重刮傷甚至破裂現象。反之，選用油性潤滑劑塗佈於模具則可維持板料與模具間良好的潤滑狀態，成形後鈹件表面品質良好，且殘留於成形後鈹件及模具上的潤滑劑易清理。而潤滑劑塗佈於板料上時，基底調劑無論為水性或者油性與板料表面皆有良好的附著性，成形後鈹件表面皆沒有刮傷。但水性潤滑劑易殘留於鈹件上不易清理，進而影響鈹件外觀及焊接性能。而油性潤滑劑塗佈板料上送入加熱爐時，有汙染加熱爐腔體的問題。因此在後續座椅扶手試作製程中，選用油性潤滑劑塗佈於成形模具上。



(a)



(b)



(c)



(d)

圖2 不同潤滑條件下之試驗結果，水性潤滑劑(a)塗佈於模具 (b)塗佈於板料；油性潤滑劑(c)塗佈於模具 (d)塗佈於板料

### 2.2.3 不同成形後持壓時間對成形後鈹件尺寸之影響

不同成形後持壓時間試驗於板料目標成形溫度為 $200^{\circ}\text{C}$ 下進行，分別以成形完成後立即取出以及板料成形後持壓時間5、10及20秒進行試驗，並同樣採用具S形特徵之部件作為試驗載具。成形後鈹件以光學掃描系統(ATOS Compact Scan)對成形後鈹件進行逆向掃描，再將所得結果與目標部件模型進行比對得到兩者間的尺寸差異。

圖3為溫成形製程中成形後不同持壓時間之成形鈹件經藍光掃描比對結果，由比對結果後可以發現板料成形完成後進行持壓可顯著改善成形後鈹件因回彈而造成扭曲的現象，但不同持壓時間對成形後鈹件翹曲影響程度不大。

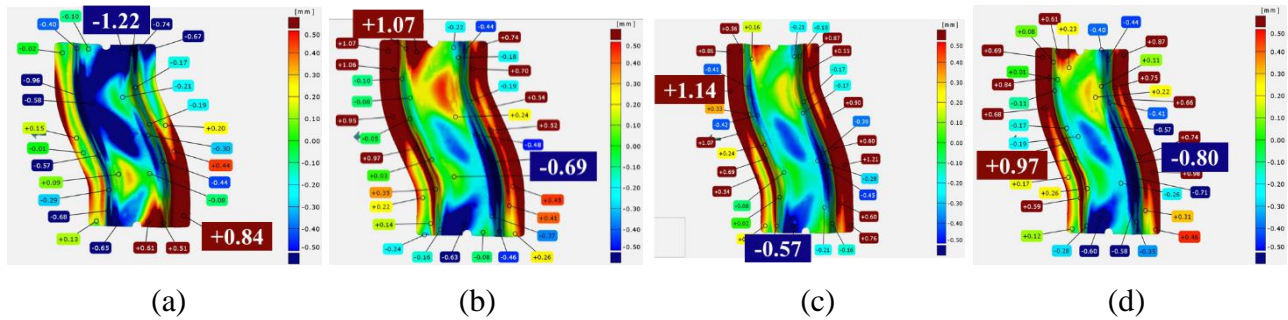


圖3 不同成形後持壓時間鈹件光學掃描比對結果 (a) 立即取出 (b) 持壓5秒 (c) 持壓10秒 (d) 持壓20秒

Kim[1]等人之研究成果顯示成形後鈹件內外表面應力分佈為造成成形後鈹件回彈的主要原因，因此進一步透過CAE分析觀察不同成形後持壓時間對鈹件內外表面應力分佈之影響。由鈹件相同截面位置CAE分析結果中可看出板料成形完成後進行持壓可顯著縮小鈹件內外表面應力差，但不同時間同樣對成形後鈹件表面內外應力差影響程度不大，與鈹件尺寸比對結果有相同趨勢，不同持壓時間之成形後鈹件內外表面應力差CAE分析結果如表3所示。為縮短製程時間，在後續座椅扶手試作製程中，選擇板料成形後持壓時間為5秒。

表3 不同持壓時間之成形後鈹件內外表面應力差CAE分析結果(單位: MPa)



量測位置	不持壓		持壓5s		持壓10秒		持壓20秒	
	左	右	左	右	左	右	左	右
a	0.063	-0.112	0.036	-0.002	0.003	-0.026	0.033	-0.048
b	0.263	0.313	0.042	0.008	0.048	0.084	0.036	0.069
c	0.249	0.336	0.032	0.125	0.066	0.147	0.073	0.112
d	0.329	0.322	0.065	0.067	0.067	0.077	0.064	0.085

### 3. 軌道車輛座椅扶手溫成形製程試作驗證

在完成Al 5052-H32鋁合金溫成形製程參數試驗取得適合之成形製程參數後，本研究以一外型長寬高尺寸分別為500mm、70mm及50mm，厚度為2mm軌道車輛座椅扶手部件在為 $150\sim 250^{\circ}\text{C}$ 溫度區間進行溫成形製程實際試作驗證，座椅扶手溫成形模具以及實際試作成果如圖4所示。由實際試作結果可以發現冷衝成形後鈹件在局部不易成形之圓形特徵處因嚴重減薄進而發生破裂現象導致成形失效，而以溫成形承製之座椅扶手部件在相同不易成形之圓形特徵處則無破裂現象發生，且鈹件減薄現象獲得大幅改善。

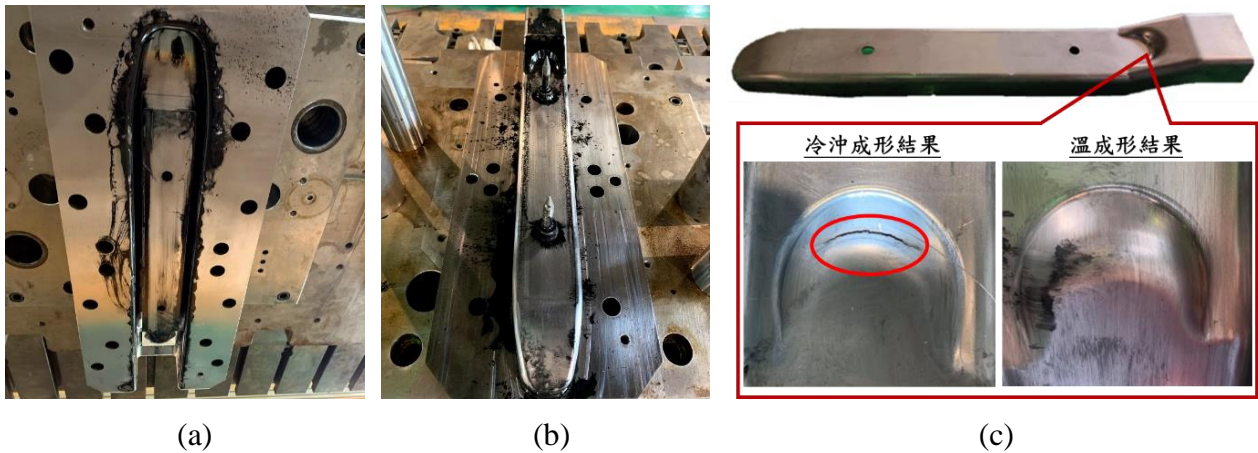
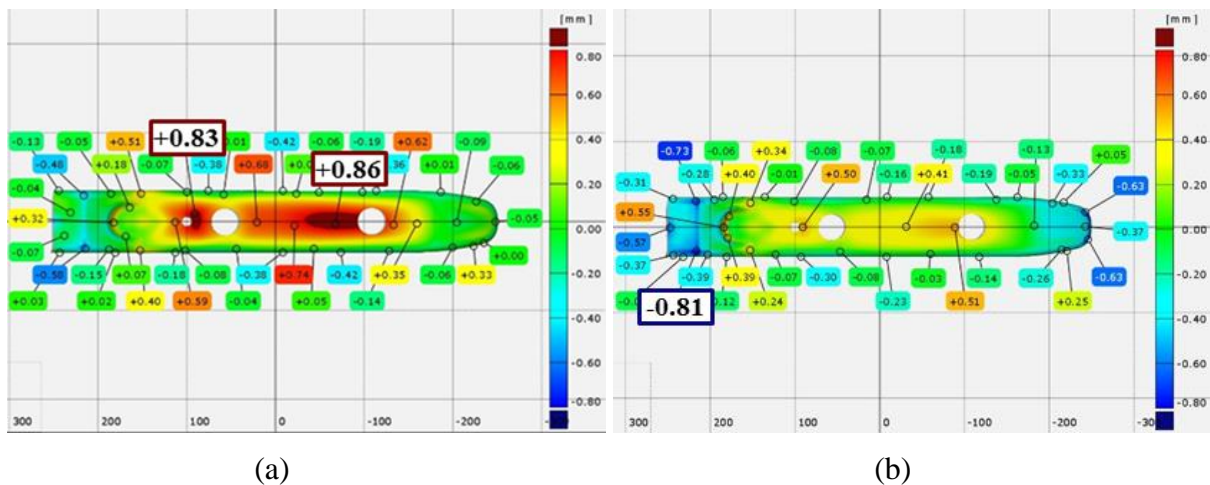


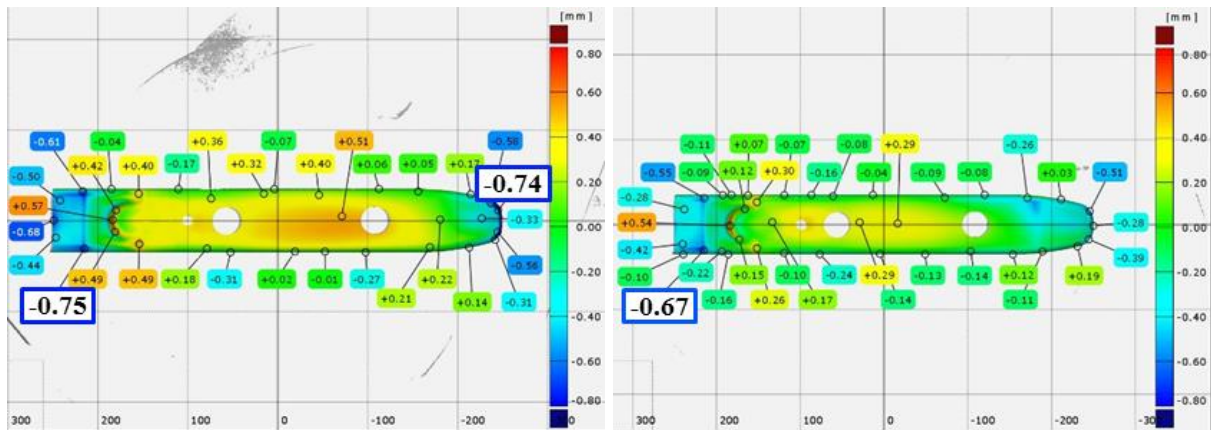
圖4 座椅扶手溫成形(a)下模具 (b)上模具 (c) 實際試作結果(冷衝成形及溫成形)

成形後鈹件同樣以光學掃描系統(ATOS Compact Scan)進行尺寸量測，依據ASTM E8規範裁切單軸拉伸試片，並以0.01/s的速率進行拉伸測試得到加熱後板料之抗拉強度量測，成形後鈹件機械性能驗證及尺寸量測比對結果分別如表4及圖5所示。由尺寸量測比對結果顯示，以溫成形製程可顯著改善成形後鈹件尺寸精度，而當成形溫度升高至250°C時，成形後鈹件尺寸精度可更進一步控制在汽車鋁合金部件裝配之允收誤差±0.7mm範圍內。同時，由機械性能驗證結果顯示，在250°C成形後鈹件抗拉強度達211MPa，強度損失仍可控制在10%內。

表4 成形後鈹件機械性能驗證結果

鈹件目標成形溫度	鈹件抗拉強度(MPa)	鈹件強度損失(%)
室溫	225	-
150°C	218	2.2%
200°C	215	3.6%
250°C	211	5.4%





(c) (d)  
圖5 成形後鋁件光學掃描比對結果 (a) 冷衝成形 (b) 150°C (c) 200°C (d) 250°C

#### 4. 結論

本研究針對5XXX鋁合金板料冷模溫成形製程進行研究，透過改變溫成形製程中不同的參數探討其對成形後鋁件品質影響，依據製程實施可行性獲得溫成形製程參數條件，並實際以一軌道車輛的座椅扶手在150~250°C的成形溫度區間進行實際開模試作，初步得到以下結論：

1. 當板料加熱至目標溫度時間控制在360秒以內，可控制加熱後板料強度損失在5%以內，且加熱速率對強度損失的影響不顯著。
2. 選用油性石墨潤滑劑塗佈於模具時，可維持板料與模具間良好的潤滑狀態，顯著地降低板料沾黏於模具的情況，得到表面品質良好之部件。
3. 板料成形完成後進行持壓可顯著減少鋁件內外表面應力差進而改善回彈現象，但不同持壓時間對成形後鋁件翹曲影響程度不大。
4. 以溫度250°C溫成形後鋁件尺寸精度可控制在汽車鋁合金部件裝配之允收誤差 $\pm 0.7\text{mm}$ 範圍內，且鋁件強度損失仍可控制在10%範圍內。

#### 6. 參考文獻

1. H.S. Kim, and M. Koç, 2008. Numerical investigations on springback characteristics of aluminum sheet metal alloys in warm forming condition, Journal of materials processing technology, vol. 204, pp.370–383.
2. L.R. Morris, and R.A. George, 1977. Warm Forming High-Strength Aluminum Automotive Parts, SAE Technical Paper 770206.
3. R.A. Ayres, H.W. Lanning, B. Taylor, R. Heimbuch, and W.G. Brazier, 1978. Warm Forming the GM V-6 Oil Pan in Aluminum, SAE Technical Paper 780180.
4. P.E. Krajewski, and J.G. Schroth, 2011. Quick plastic forming of aluminium alloys, Superplastic Forming of Advanced Metallic Materials, pp. 272-303..
5. H.S. Kim, Muammer Koç, and J. Ni, 2006. Determination of proper temperature distribution for warm forming of aluminum sheet Materials, Journal of Manufacturing Science and Engineering, vol. 128, pp.622–633.