

浸水冷卻對鋁合金壓鑄輪圈性質之影響

Influence of Water Soaked Cooling on Properties of Aluminum Alloy Die-Casted Wheels

莊水旺^{1*}、陳建成²

Shueiwan H. Juang^{1*}, Chien-Cheng Chen²

¹ 國立臺灣海洋大學 先進製造工程研究中心

² 國立臺灣海洋大學 先進製造工程研究中心

*E-mail: shjuang@mail.ntou.edu.tw

摘要

壓鑄製程可分為熔解金屬、充模成形及鑄件取出等三個階段。當鑄件取出後，在剪緣作業前，有時會將鑄件浸入水中冷卻，以利剪緣作業的穩定性。本研究旨在探討鋁合金鑄件在浸水過程對鑄件品質的影響，比較鑄件經浸水冷卻與自然冷卻之機械性質和微觀組織差異，並利用商用軟體分析鑄件浸水冷卻之最佳化時間。本研究之載具係使用ADC10鋁合金製成之輪圈，在鑄件取出後，分別以浸水冷卻和自然空冷方式予以降溫至剪緣溫度，接著從輪圈式樣截取檢驗試片，進行拉伸試驗及金相試驗，比較兩種冷卻方式對鑄件的機械性質及微觀組織的差異。研究結果顯示，使用浸水冷卻的輪圈硬度較自然空冷輪圈提升15%，其抗拉強度和延伸率也較自然空冷輪圈分別提升4%和7%。使用二次晶臂間距（SDAS）量測結果顯示，浸水冷卻輪圈的SDAS值較自然空冷輪圈減少17%。另外，熱傳分析結果顯示，鑄件進水冷卻的最佳化時間為6 sec。本研究結果顯示鑄件經浸水冷卻可有效提升鑄件的機械性質和晶粒細化效果。

關鍵詞：壓鑄件、浸水冷卻、機械性質、晶粒細化、最佳浸水時間

Abstract

The die-casting process can be divided into three stages, namely metal melting, melt filling and forming, and casting ejecting. When the casting is ejected out, the casting is sometimes immersed in water to cool down before the trimming operation, so as to improve the stability of trimming process. This study aims to explore the impact of aluminum alloy castings on the quality of castings applying the water soaking, and compare the mechanical properties and microstructure differences between water soaked cooling and natural air cooling. In addition, a commercial software is used to analyze the optimal water soaked cooling time of castings. The example used in this study is a wheel made of ADC10 aluminum alloy. After the castings are ejected out, which are cooled to the trimming temperature by either water soaked cooling or natural air cooling, respectively. Then, test specimens are taken from the wheel and run both tensile test and metallographic test to compare the difference on the mechanical properties and microstructure of the casting between the two cooling methods. The results showed that the hardness of the wheel using water soaked cooling is 15% higher than that of the natural air-cooled wheel, and its tensile strength and elongation are also 4% and 7% higher than that of the natural air-cooled wheel. Using the method of Secondary Crystal Arm Spacing (SDAS) measurement, the results revealed that the SDAS value of the water-soaked wheel is reduced by 17% compared with the natural air-cooled wheel. In addition, the results of heat transfer analysis showed

that the optimal soaking time for the wheel casting is 6 sec. The results of this study show that water soaked cooling of castings can effectively improve the mechanical properties of the castings and the effect of grain refinement.

Keywords: Die casting, water soaked cooling, mechanical properties, grain refinement, optimal water soaking time

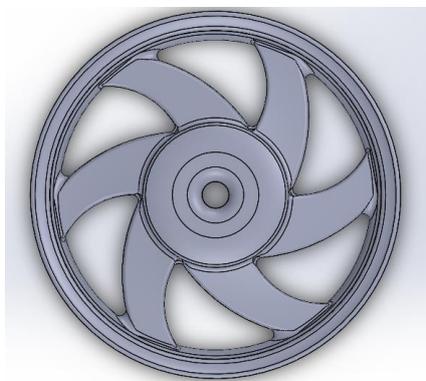
壹、前言

汽機車零組件不僅要追求輕量化，且需要具有強度佳、韌性好的特性。近年來機車以使用壓鑄生產鋁合金輪圈居多，在壓鑄製程中，從熔湯充填模腔到開模取出鑄件(溫度約380°C)期間，鑄件的熱量是透過模具中的冷卻媒介予以導出；待鑄件取出後，鑄件於空氣中繼續冷卻至剪緣溫度(熱沖剪，需在120°C左右)或常溫(冷沖剪)，再施作剪緣作業以去除流道系統和溢流槽等非零部件部分。

若使用熱沖剪方式以去除流道系統，通常在鑄件剪緣前，將鑄件浸入水中冷卻以加快其冷卻速率。雖然鑄件於高溫時直接與水接觸進行冷卻，可大幅縮短鑄件的冷卻時間，但可能對鑄件性質有著不同程度的影響，例如：(a)較高冷卻速率有助於使鑄件表面晶粒細化(grain refinement)，以提升鑄件的機械性能及降低缺陷發生的可能性；(b)減少鑄件的孔隙率及增加冷裂紋發生的可能性；(c)開模時鋁合金鑄件仍處於高溫狀態，可能提高鑄件與冷卻水間發生化學反應，進而改變及影響材料的成分組成。

貳、實驗材料

圖(1)為本研究使用之輪圈鑄件，使用ADC10鋁合金製成，其化學成分及材料性質分別如表(1)及表(2)所示。



圖(1) 本研究使用之輪圈鑄件。

表(1) ADC10鋁合金的化學成分組成 [1]。

合金元素	Al	Cu	Fe	Mg	Mn
wt%	79.6~89.5%	3.0~4.0%	≤2.0%	≤0.1%	≤0.5%
合金元素	Ni	Si	Sn	Zn	Other
wt%	≤0.5%	7.5~9.5%	≤0.35%	≤3.0%	≤0.5%

表(2) ADC10鋁合金之物理與機械性質 [1]。

固態密度 (g/cm ³)	2.76
熱容量 (J/g-K)	0.963
熱傳導率 (W/m-K)	109
熔解範圍 (°C)	538~593
抗拉強度 (MPa)	317
降服強度 (MPa)	159
伸長率 (%)	2.5

參、實驗方法

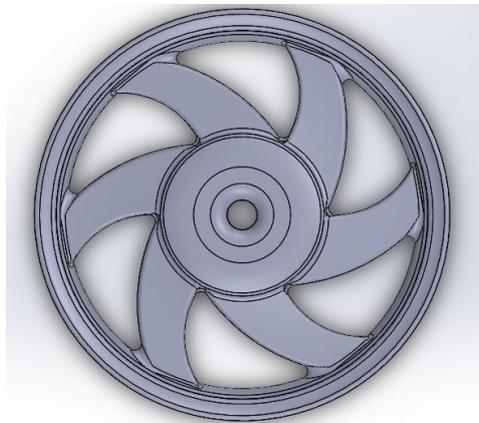
鑄件於開模取出後，直接浸入水中冷卻，以加快鑄件冷卻的速率。本研究旨在探討鑄件於剪緣前泡水對其物理和機械性質之影響，實驗係在壓鑄生產過程中進行，在鑄件取出後，分別以浸入水中和自然空冷兩種方式進行冷卻，並利用商用軟體進行浸水冷卻分析，以得到最佳的浸水冷卻時間。

3.1 鑄件浸水冷卻實驗與檢測

在壓鑄製程中，鑄件於開模取出後仍有一定的溫度，而後續的冷卻速率對鑄件品質可能有影響，例如：縮孔位置的改變、鑄件變形等問題。本研究係將開模取出的鑄件分別浸入水中和置於空氣中冷卻，再分別由這些鑄件上取樣，量測其機械性質，例如表面硬度、抗拉強度、孔隙率、破斷面分析等，分析鑄件以浸水冷卻和自然空冷之機械性質差異。

3.2 鑄件浸水冷卻分析

輪圈浸水冷卻所耗的時間也是生產時間的一部份，當鑄件浸水冷卻取出後，鑄件必須有足夠溫度能夠將其表面殘餘水分予以蒸發，以免鑄件進行後續噴砂或塗裝等後處理時，衍生其它問題。陳炳志[2]等研究指出，鑄件在剪緣前，其表面溫度應冷卻至120°C左右，以利鑄件表面殘餘水分得於完全蒸發。本研究進行實驗使用的輪圈係以ADC10鋁合金生產的壓鑄件，其由委託研究公司依實驗規劃的條件準備，卻因無法於生產過程中直接量測鑄件溫度的冷卻情形，故使用商業軟體模擬鑄件浸水冷卻的過程，圖(2)表示本研究使用的載具，相關設定參數詳列於表(3)。



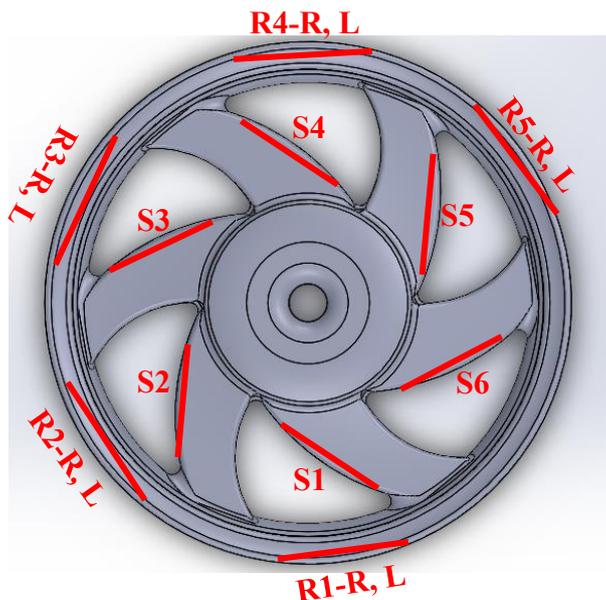
圖(2) 本研究浸水冷卻模擬分析之載具3D圖。

表(3) 浸水冷卻模擬分析之設定參數。

模擬參數	設定數值
鑄件材料	ADC10
冷卻介質	H ₂ O
鑄件溫度 (°C)	165
冷卻水溫度 (°C)	51.8
鑄件浸水速度 (cm/s)	15

肆. 結果與討論

本研究使用之載具為ADC10鋁合金製成之輪圈鑄件，這些鑄件是委辦的壓鑄廠在生產過程中，在鑄件取出後，讓鑄件分別以浸水和自然空冷方式予以冷卻。硬度試驗使用的試片是分別對兩種不同冷卻方式之鑄件進行取樣，每個鑄件有16個取樣位置，如圖(3)所示，其中6個位於輪幅中間外緣處，分別標記為S1-S6；其它10個位於輪緣的兩側(即R側與L側)上，在R側部分標示為R1-R-R5-R，而L側則以R1-L-R5-L標記之。這16個試樣再加工為拉伸試驗的試片，而硬度的檢測位置係選在試片兩端夾持的位置，如圖(4)紅色圈所示的位置。



圖(3) 機械性質檢驗試樣之取樣位置示意圖。



圖(4) 截取的試樣經加工完成之拉伸試片。

4.1 硬度試驗

表(4)分別列出輪圈以自然空冷和浸水的不同冷卻條件下，不同取樣位置之硬度試驗結果。本實驗使用的硬度試驗機為勃式硬度試驗機(HB)，試驗使用的荷重為62.5 kgf，鋼頭直徑是2.5 mm，荷重施加和保持的時間分別為5 s和15 s。圖(4)表示用於量測硬度的試片及其位置，分別量測試片兩端的兩側，每個試片可量測獲得4個硬度值，再取4個硬度值的平均值表示該試片的硬度值。硬度值的量測結果顯示，浸水冷卻過的輪圈，其硬度值明顯較自然空冷輪圈的硬度值為高，約提高15%；同時可觀察到，浸水冷卻過的輪圈在不同位置的硬度值變異度(標準差)也相對較小。

表(4) 自然空冷及浸水冷卻輪圈硬度試驗結果。

試片編號	自然空冷 (HB)	浸水冷卻 (HB)
R-1 R	61.9	77.5
R-2 R	49.6	72.0
R-3 R	59.0	79.9
R-4 R	77.3	80.1
R-5 R	58.3	76.0
R-1 L	69.6	72.4
R-2 L	64.0	72.8
R-3 L	70.8	68.1
R-4 L	69.1	80.0
R-5 L	76.1	70.9
S 1	52.6	70.9
S 2	60.6	70.5
S 3	52.2	74.5
S 4	57.2	74.0
S 5	53.7	77.4
S 6	52.4	71.9
平均值	61.5	74.3
標準差	8.8	3.8

4.2 拉伸試驗

拉伸試驗使用的試片，其取樣係依委辦公司指定的位置進行取樣，每個鑄件分別取樣 16 個位置，如圖(3)所示。前述已說明各個標記代號的意義，截取的 16 個試樣，須依 ASTM E8 規範加工成拉伸試片，如圖(4)所示。本研究的拉伸試驗速度係以等速率控制，其速度為 0.48 mm/min，延伸計夾持間距為 25 mm。由拉伸試驗可獲得施加負載對試片伸長量的關係，再利用試片的原始長度和截面積分別計算工程應力(σ)對工程應變(ε)的關係，接著從 σ - ε 曲線即可獲得抗拉強度(即最大工程應力值)、降伏強度(0.2%偏位工程應變對應的工程應力值)和伸長率(最大工程應變值)。表(5)分別列出自然空冷及浸水冷卻輪圈之拉伸試驗結果，試驗結果顯示自然空冷和浸水冷卻的輪圈，在 R-1 R 和 R-4 R 兩個位置，其量測的抗拉強度均低於規範值，其延伸率也出現偏低的情況，可能是天側為熔湯充填末端，其高濃度氧化物無法完全排出，使得此區域的鑄件組織緻密度較低所致。反觀其它取樣位置的抗拉強度、降伏強度、及延伸率的平均值皆符合規範要求，實驗結果也清楚指出經浸水冷卻過輪圈的抗拉強度較自然空冷輪圈的強度為高，約提升 4%；另外，延伸率約提升 7%。

表(5) 自然空冷輪圈及浸水冷卻輪圈之機械性質試驗結果。

試片編號	自然空冷			浸水冷卻		
	抗拉強度 (MPa)	降伏強度 (MPa)	伸長率 (%)	抗拉強度 (MPa)	降伏強度 (MPa)	伸長率 (%)
R-1 R	181.876	135.519	3.800	204.408	143.561	4.040
R-2 R	220.695	136.629	5.960	240.410	130.738	7.840
R-3 R	R-1 R	92.526	7.840	255.710	140.312	7.520
R-4 R	207.561	138.490	4.120	207.466	143.067	5.120
R-5 R	251.120	137.629	8.800	250.288	132.639	7.280
R-1 L	237.224	145.024	6.200	269.665	154.840	9.920
R-2 L				255.474	146.037	5.960
R-3 L	271.874	141.971	8.960	282.390	144.277	10.920
R-4 L	230.816	140.826	8.200	246.646	120.227	6.960
R-5 L	262.763	143.571	9.280	243.208	138.516	6.480
S 1	232.206	130.179	6.280	250.897	122.673	9.320
S 2	254.906	123.622	11.440	264.151	128.914	12.440
S 3	249.451	124.537	11.480	260.929	119.369	12.040
S 4	246.249	139.014	9.320	256.162	135.498	9.760
S 5	250.746	140.452	10.360	256.194	125.650	11.520
S 6	237.914	121.915	9.280	261.324	134.492	12.240
平均值	239.160	133.596	8.088	249.802	135.536	8.710
標準差	22.529	13.332	2.376	20.580	10.499	2.596

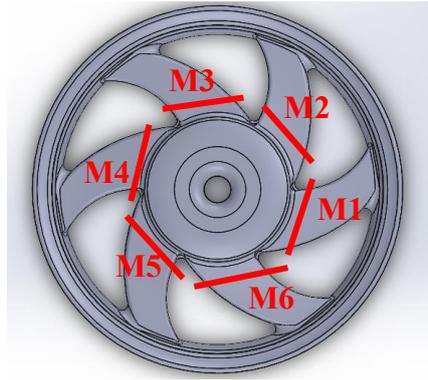
4.3 金相試驗

金相試驗使用的試片是分別從自然空冷和浸水冷卻輪圈的輪轂與輪輻交接處切斷取樣，每個鑄件設定 6 個取樣位置，如圖（5）所示，分別以 M1 - M6 標記之。切斷的試樣經加工、研磨、拋光等製程即為試片，接著需要蝕刻處理。本試驗使用之腐蝕溶液為氫氟酸溶液（0.5% HF + 99.5% H₂O），腐蝕時間設定為 12 秒，待完成腐蝕後，即使用光學顯微鏡（OM）進行觀察。除了觀察顯微組織外，使用二次枝晶臂間距（SDAS）分析其晶粒尺寸及晶粒與晶粒間的距離，如圖（6）所示。量測 SDAS 尺寸係使用金相組織照片，在倍率 200x 下，進行量測 30 次，分別使用方程式（1）計算每次的 SDAS，再取其平均值，表示該試片的 SDAS 值，如表（6）所示。量測結果顯示，浸水冷卻輪圈的 SDAS 值（18.6 μm）較自然空冷輪圈的 SDAS 值（22.6 μm）減少約 17%，且標準差也較小，即表示輪圈在開模取出後直接浸入水中，藉助增加其冷卻速率，可獲得晶粒細化的效果。

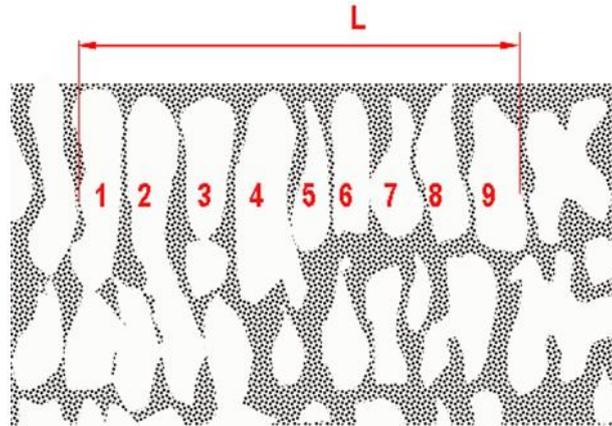
$$SDAS = \frac{L}{n \times m} \quad (1)$$

其中

- SDAS : 二次枝晶臂間距 (μm)
- L : 第一支二次枝晶臂到最後一支二次枝晶臂的距離 (mm)
- n : 再 L 距離內的二次枝晶臂數量
- m : 放大倍率



圖(5) 金相試驗取樣之切割面位置。



圖(6) 量測 SDAS 值之示意圖。

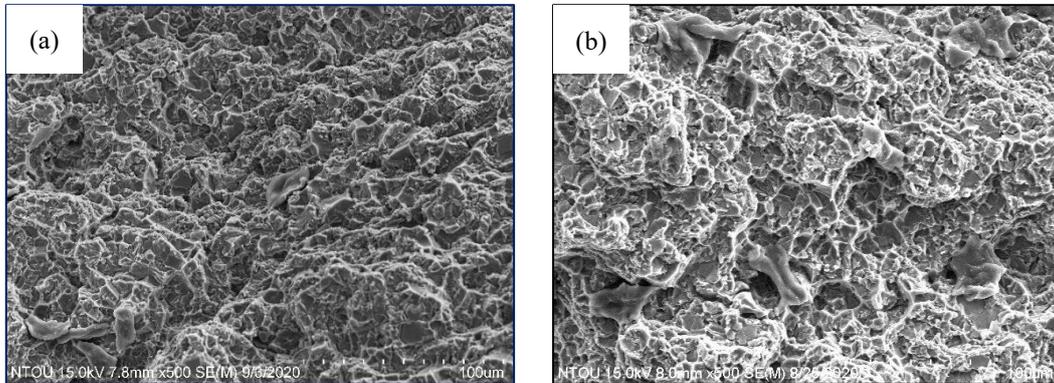
表(6) 二次晶臂間距(SDAS)值得量測結果。

試片編號	自然空冷 (μm)	浸水冷卻 (μm)
M1	24.3	18.6
M2	24.3	19.9
M3	22.9	19.2
M4	20.9	19.3
M5	21.1	16.4
M6	21.9	18.3
平均值	22.6	18.6
標準差	1.51	1.22

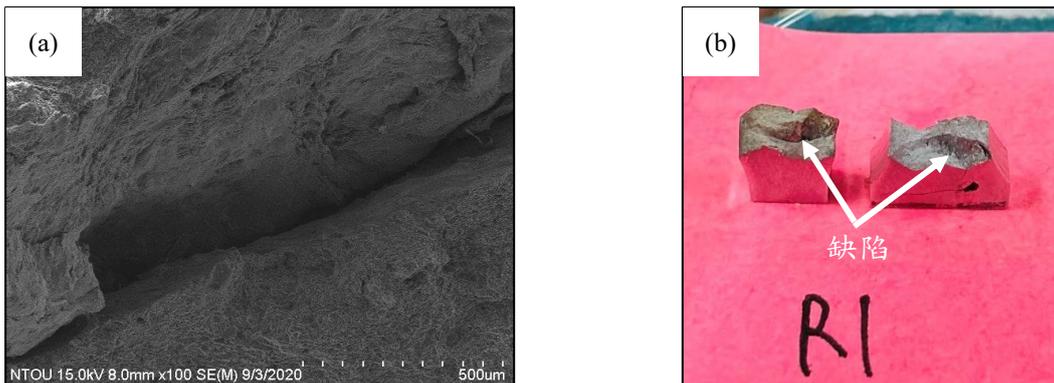
4.4 破斷面分析

針對自然空冷輪圈和浸水冷卻輪圈之拉伸試片的破斷面，使用掃描電子顯微鏡 (SEM) 進行觀察。觀察破斷面的試片不論選自破斷位置位於標距長度內的試片 (如 R2-R、R3-R、R1-L、S1 和 S2)，或破斷位置位於標距長度外的試片 (如 R1-R、R4-R)，所有觀察試片的破斷面清楚顯示，顯微組織皆為韌窩組織。圖 (7) 表示拉伸試片 R1-R 的破斷面 SEM 照片，其中圖

(7.a) 和圖 (7.b) 分別表示自然空冷和浸水冷卻試片的 SEM 照片，可清楚觀察到延性破壞模式。雖然 SEM 的微觀顯示大部分區域為韌窩組織，但在巨觀觀察下，其破斷面卻呈現很大的高低落差，如圖 (8) 所示，其中圖 (8.a) 和圖 (8.b) 分別表示自然空冷和浸水冷卻試片的巨觀斷面照片。此可能是該處存在鑄造缺陷，導致抗拉強度與延伸率低下。



圖(7) 拉伸試片 R1-R 的破斷面 SEM 照片，(a)自然冷卻；(b)浸水冷卻。

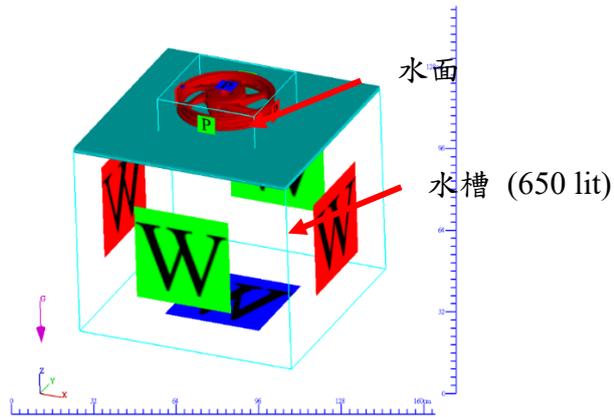


圖(8) 浸水冷卻拉伸試片 R1-R 的破斷面，(a) SEM 100x 照片；(b)巨觀照片。

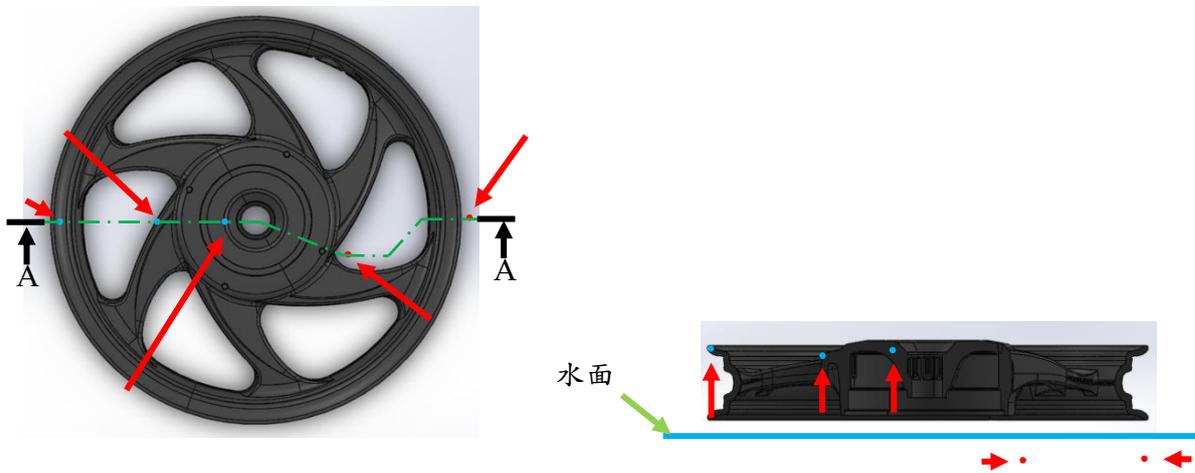
4.5 浸水時間的最佳化分析

最佳化的浸水冷卻時間係指輪圈在浸水作業中，當其表面溫度下降至設定的熱沖剪溫度（如 120°C）所需的最佳化時間，作為管理輪圈於浸水冷卻的合適時間。本研究使用商用軟體模擬輪圈的浸水冷卻過程，觀察輪圈溫度隨時間的變化。圖 (9) 表示模擬分析的場域，包含水槽、冷卻水和水輪圈，其中水槽和水場域是固定的，而輪圈則是可移動的物體。在分析過程中，分別在輪緣、輪輻和近輪轂等三個位置觀察輪圈溫度變化；另外，在近輪轂和近輪緣處兩個點觀察水的溫變化，如圖 (10) 所示。

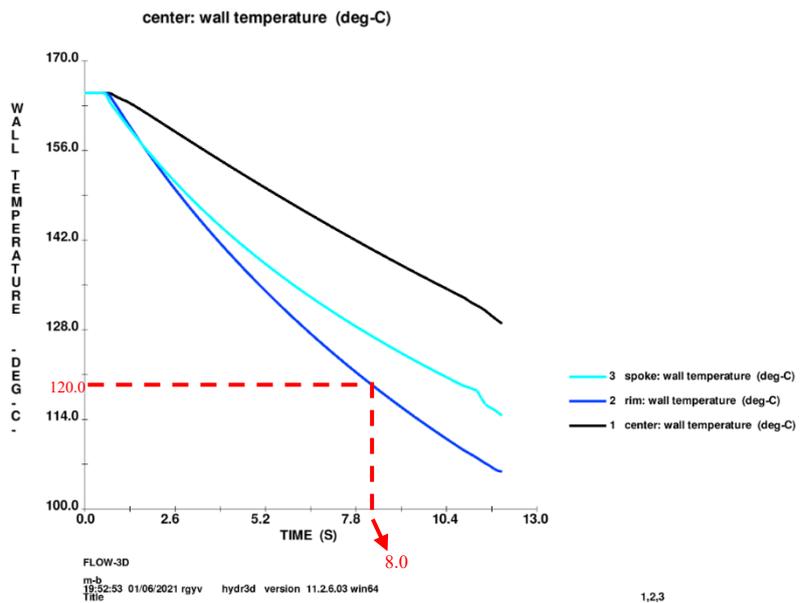
依指定的浸水速度，從輪圈開始浸水到指定位置及在水中停留，整個分析時間設定為 10s。圖 (11) 表示浸水冷卻過程輪圈不同位置的溫度隨時間變化情形，分析結果顯示輪圈的溫度隨時間呈近乎線性變化。考慮輪圈於浸水結束時，其溫度應落於熱沖剪的溫度範圍，藉著輪圈本身的熱量讓其表面殘餘的水分得於完全蒸發。因此，最佳化浸水時間係以最早達到剪緣溫度 120°C 的輪緣溫度為依據。本研究的分析結果指出輪緣溫度在 8s 時，其溫度降至 120°C，扣除輪圈進、出水所需時間各 1s，表示輪圈浸水冷卻的最佳化時間 6s。



圖(9) 模擬分析的場域示意圖。



圖(10) 模擬溫度變化的觀察點位置，(a)上視圖、A-A 剖面；(b)前視圖。



圖(11) 輪圈不同位置的溫度-時間的變化。

5. 結論

本研究獲致的結論摘要如下。

1. 浸水冷卻輪圈的硬度值皆符合產品規範，其平均硬度有明顯的提升，相較於自然空冷輪圈，其硬度值提升約15%。
2. 自然空冷與浸水冷卻輪圈的拉伸試驗結果皆符合規範要求，包括抗拉強度、降伏強度、延伸率。對抗拉強度而言，浸水冷卻輪圈較自然空冷輪圈提升約4%；其延伸率也提升約7%。
3. 觀察金相試驗的顯微組織顯示，浸水冷卻輪圈及自然空冷輪圈的顯微組織並無明顯的差異，但透過SDAS值的實際量測，浸水冷卻輪圈的SDAS值低於自然空冷的SDAS，約降低17%，此表示輪圈於剪緣前施作浸水冷卻，可使輪圈獲得快速地冷卻，此過程對晶粒細化卻使發揮效果。
4. 觀察拉伸試片的破斷面發現，浸水冷卻輪圈及自然空冷輪圈的破斷面皆為韌窩組織，是一種延性破壞模式。從巨觀觀察斷面發現，試片破斷面出現高低落差很大，此可能是鑄件內部有缺陷，導致延伸率較低，且從缺陷處開始破壞，造成破斷位置出現很大的落差。
5. 最佳化的浸水冷卻時間係當輪圈表面溫度降至熱沖剪溫度所需的時間，以利輪圈表面殘餘的水分得於完全蒸發，經模擬浸水冷卻過程發現，最佳化的浸水時間為6s，輪圈表面最低溫度及可降至熱剪緣溫度120°C。

6. 誌謝

本次投稿文章使用的模型係某公司委託分析之案例，並做些許的幾何修改，特此向該公司表示誠摯感謝之意。

7. 參考文獻

- [1] <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=568dd76f95094ab2ad63726be36ce1dd&ckck=1>
- [2] 陳炳志，壓鑄件自模具取出後快速冷卻機制之研究，國立臺灣海洋大學碩士論文，2004。