

中華民國第 65 屆中小學科學展覽會

作品說明書

高級中等學校組 工程學科(二)

團隊合作獎

052407

「環」環相扣：環氧樹脂剪切強度探討

學校名稱： 國立斗六高級中學

作者：	指導老師：
高二 李亞孺	李榕玲
高二 黃翊宸	蕭名雄

關鍵詞： 環氧樹脂、剪切強度、胺類硬化劑

摘要

本研究旨在研究環氧樹脂 AB 膠熱固化反應後形成的網狀交聯結構，結合其黏著用途，探討不同 A 膠與 B 膠的配比與不同固化環境是否會影響剪切強度。更結合不同儀器測量膠水性質，希望達到佐證的效果。在 80°C 時增加固化時間，各比例皆無明顯變化，而在改變溫度到 100°C 及以上，3:1 的配比因環氧樹脂過多產生自聚反應使機械咬合更佳。後續的實驗得知膠水對不同材質的剪切強度與其表面能有關，且在膠水中加入橡膠微粒後，能提高分子可承受的最大拉力。

壹、前言

一、研究動機：

指導老師曾帶我們去鄰近的化學工廠參訪，並在那裡用環氧樹脂製作模具，上網查資料發現熱固性樹脂 AB 膠還在結構黏著和複合材料方面有著廣泛應用。過往研究多僅提及調整比例的可能影響，而缺乏具體的量化數據。因此，我們希望通過調整 A 膩與 B 膩的比例並進行量化測試，獲得具體數據並找出較佳的使用條件。

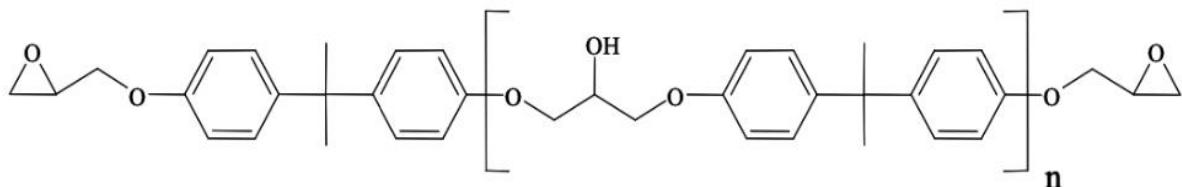
二、研究目的：

- (一) 研究不同**固化時間**下，不同比例環氧樹脂 AB 膩的剪切強度。
- (二) 研究不同**固化溫度**下，不同比例環氧樹脂 AB 膩的剪切強度。
- (三) 研究不同**黏貼材質**下，不同比例環氧樹脂 AB 膩的剪切強度。
- (四) 研究額外**添加物**對環氧樹脂 AB 膩的剪切強度影響。

三、實驗原理：

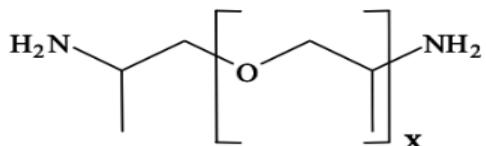
(一) 環氧樹脂及胺類硬化劑的結構和原理

1. 環 氧 樹 脂 (A 膠)



(圖源：永寬化學提供)

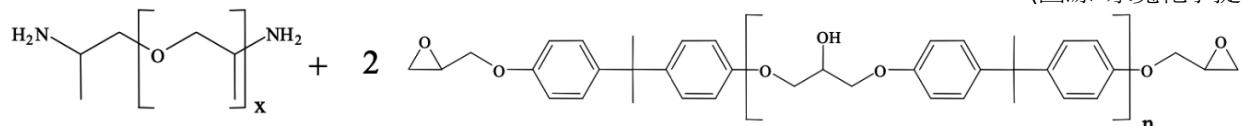
2. 胺 類 硬 化 劑 (B 膠)



(圖源：永寬化學提供)

3. 硬 化 原 理

(圖源：永寬化學提供)



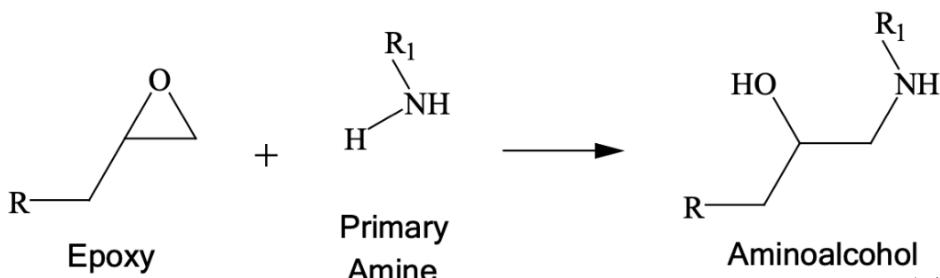
因為一個胺分子可使兩個環氧化基開環，而一個 A 膠分子有兩個環氧化基團，一個 B 膠分子有兩個胺分子，因此 A 膩與 B 膩的反應式係數比為 2 : 1，若要讓 A、B 膩完全反應，則應使 A 膩 : B 膩的分子數為 1 : 2。但我們很難得知其分子量，所以打算取 1 : 1、2 : 1、3 : 1 三種比例來測試，看看是否 2 : 1 真的比較好。

A 膩自聚反應：A 膩分子上的羥基中的氧原子與其他 A 膩分子的環氧化基反應，同樣使得環氧化基開環，氫原子和環氧化基上的氧原子形成新的羥基，而碳原子則和氧原子鍵結，形成交聯結構。

(二) 反應過程

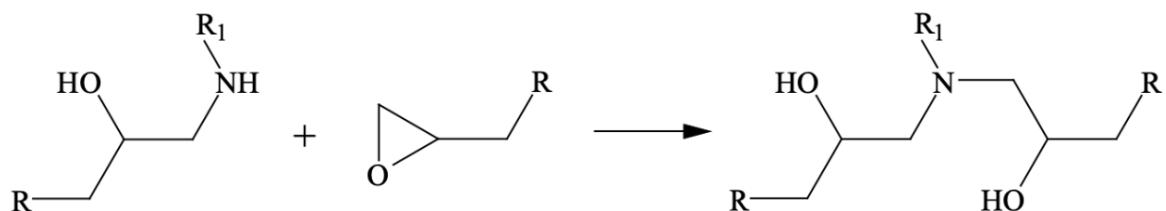
1. 環氧樹脂和胺類硬化劑反應機構：

步驟一：1 級胺(氨分子上的一個氫原子被取代)上的氮原子與環氧基上的碳基反應，使碳基斷裂開環，接著氮原子受帶單電子的氧原子吸引因而與其鍵結形成羥基，而原先的氮原子則和碳原子鍵結，形成胺基醇結構。



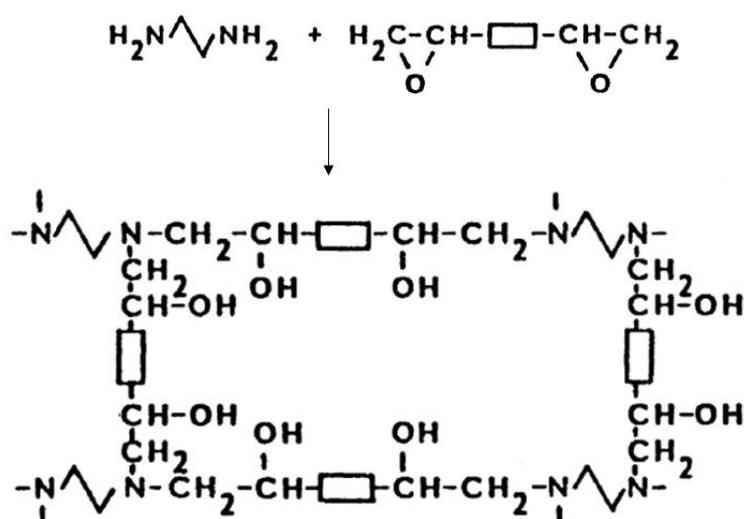
(圖源：永寬化學提供)

步驟二：胺基醇結構上仍有一個氫原子，可使另一個環氧化基開環，形成網狀交聯結構。



(圖源：永寬化學提供)

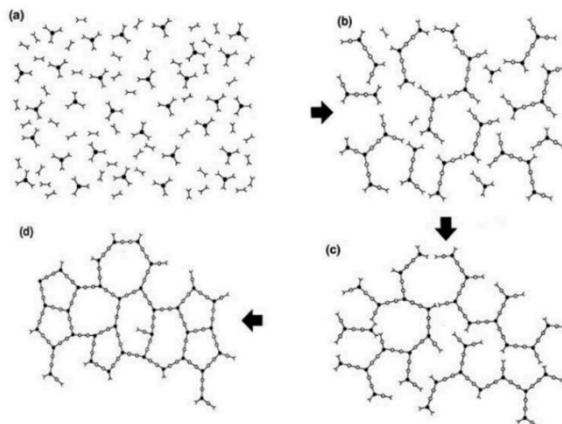
2. 硬化後的網狀結構：



(圖源：永寬化學提供)

(三) 示意圖

1. 逐步反應熱固性模型的示意圖：

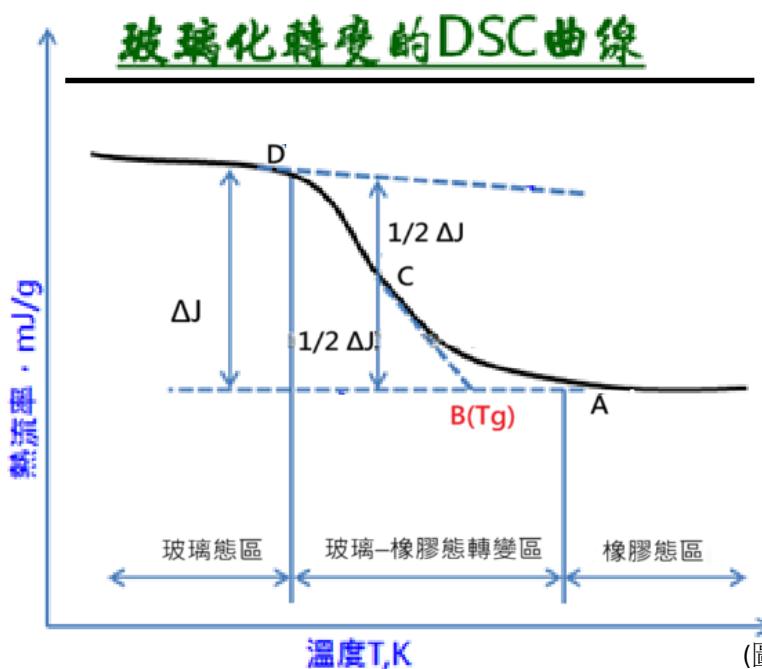


(圖源：永寬化學提供)

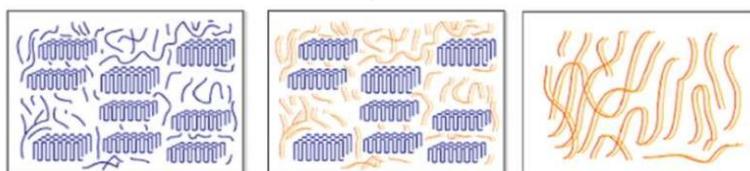
在(a)時是彼此分開的兩個化學結構，官能基反應後逐步交聯，最終形成緻密的網狀結構
(d)，硬化後硬化物具有良好的硬度，耐化性及強度

(四) 其他相關理論

1. 玻璃轉化曲線



(圖源：電子製造，工作狂人)



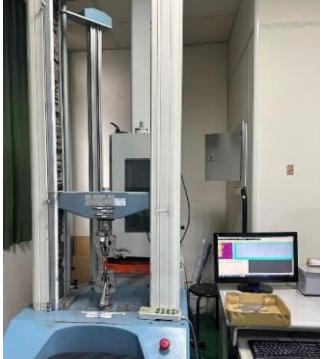
玻璃態(Glass state)
整體完全無法運動
(Cannot move entirely.)

橡膠態或稱黏彈態
(Visco-elastic state
or rubber state)
非結晶區域可以較有
自由度的運動
(Non-crystalline portion
can move comparatively freely.)

熔融態(Melt state)
全區域都可完全運動
(Can move entirely.)

(圖源：模具與成型智慧工廠雜誌)

貳、研究設備與器材

電腦	DSC 試片	攪拌棒	燕尾夾	酒精
奇異筆	uv 膠	電子秤	紙盒	杯子
鋁片		銅片		壓克力片
				
熱循環烘箱		差示掃描量熱儀(DSC)		拉力機與電腦
				
珍珠粉		紫外光燈		熱重分析儀(TGA)
				
橡膠微粒		傅立葉轉換紅外線光譜儀		A 膠與 B 膠
				

(圖源：皆為作者拍攝)

參、實驗過程及實驗方法

一、【實驗一】：研究不同固化時間下，不同比例環氧樹脂 AB 膠的剪切強度

- (一) 準備大小相同(125mm^2)的鋁片(6.9g)並用酒精清潔接觸面。
- (二) 在鋁片上畫線標示黏貼區域(長邊的兩端分別為 0.5cm 與 2cm)。
- (三) 按 1：1、2：1、3：1 的比例混合 A 膠與 B 膠。
- (四) 額外加入 AB 膠總重百分之三的珍珠粉($60\mu\text{m}$)保持黏貼厚度一致，並塗抹在材料接觸面。
- (五) 將兩邊分別黏上鋁片，用燕尾夾固定。
- (六) 放入烘箱(固定溫度 80°C)讓試件固化(時間 60mins、80mins、100mins)，時間到後取出冷卻到室溫。
- (七) 在試件兩端塗上 uv 膠以增加摩擦力，並照射紫外光燈。
- (八) 放上拉伸測試機，測試試件的破壞點力量，重複四次並記錄數據。

二、【實驗二】：研究不同固化溫度下，不同比例環氧樹脂 AB 膩的剪切強度

- (一) 同【實驗一】(一) ~ (五)。
- (二) 放入烘箱(溫度 60°C 、 80°C 、 100°C 、 120°C)讓試件固化(固定時間 60mins)，時間到後取出冷卻到室溫。
- (三) 在試件兩端塗上 uv 膩以增加摩擦力，並照射紫外光燈。
- (四) 放上拉伸測試機，測試試件的破壞點力量，重複四次並記錄數據。

三、【實驗三】：研究不同黏貼材質下，不同比例環氧樹脂 AB 膩的剪切強度

- (一) 準備大小相同(125mm^2)的鋁片(6.9g)、銅片(22.4g)、壓克力片(2.6g)並用酒精清潔接觸面。
- (二) 在鋁片、銅片、壓克力上畫線標示黏貼區域(長邊的兩端分別為 0.5cm 與 2cm)。
- (三) 按 1：1、2：1、3：1 的比例混合 A 膩與 B 膩。
- (四) 額外加入 AB 膩總重百分之三的珍珠粉($60\mu\text{m}$)保持黏貼厚度一致，並塗抹在材料接觸面。
- (五) 黏貼區域兩邊材質分別設置鋁片黏鋁片、銅片黏銅片、壓克力黏壓克力並用燕尾夾固定。
- (六) 放入烘箱(固定溫度 80°C)讓試件固化(固定時間 60mins)，時間到後取出冷卻到室溫。
- (七) 在試件兩端塗上 uv 膩以增加摩擦力，並照射紫外光燈。
- (八) 放上拉伸測試機，測試試件的破壞點力量，重複四次並記錄數據。

四、【實驗四】：額外添加物對環氧樹脂 AB 膠的剪切強度影響

(一) 同【實驗一】(一) ~ (三)。

(四) 額外將 AB 膠總重十分之一的橡膠微粒加入到 AB 膠，攪拌後塗抹在材料接觸面。

(五) 將兩邊分別黏上鋁片，用燕尾夾固定。

(六) 同【實驗三】(六) ~ (八)。

五、【實驗五】：測試不同比例的 AB 膠玻璃轉化溫度

(一) 按 2 : 1、3 : 1 的比例混合 A 膠與 B 膠。

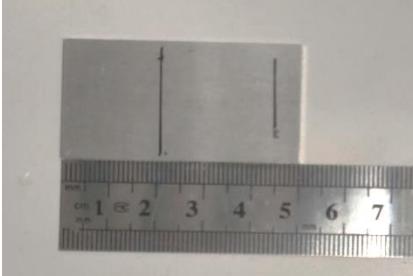
(二) 將混合後的膠水點在貼有離形紙的玻璃上，在兩邊放上 10mm 的墊片以控制試件厚度為 10mm。

(三) 將另一片玻璃以小角度斜著覆蓋上去避免產生氣泡，再將兩端夾上燕尾夾固定。

(四) 放入烘箱，改變時間(60mins、80mins、100mins)及溫度(80°C、100°C、120°C)。

(五) 放入 DSC 測試。

六、實驗過程照片

鋁片畫線示意圖	材料黏貼示意圖	材料黏貼展示
		
塗 uv 膠	未固化的豆子	豆子黏貼展示
		

(圖源：皆為作者拍攝)

肆、實驗數據及實驗結果

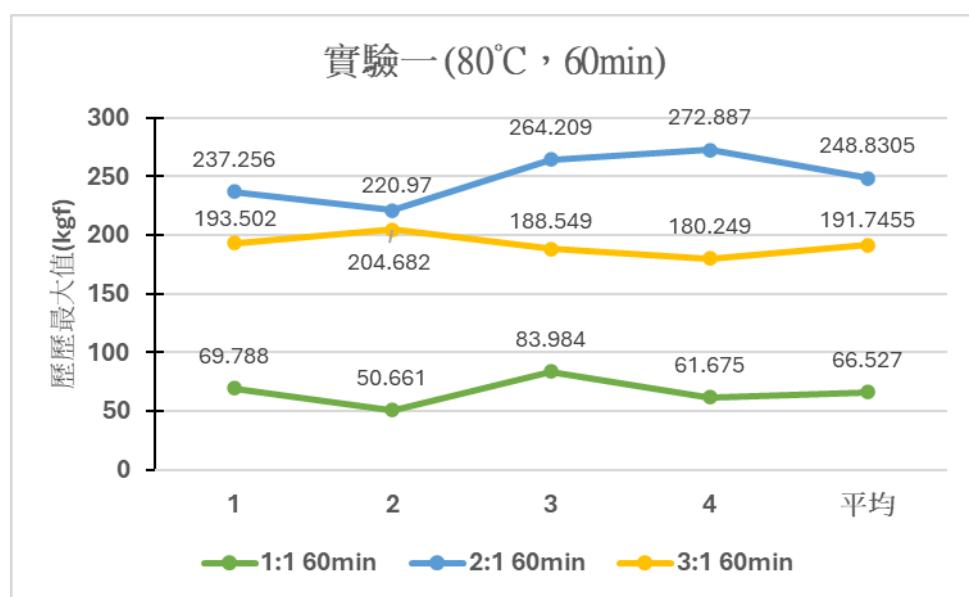
一、【實驗一】：研究不同**固化時間**下，不同比例環氧樹脂 AB 膠的剪切強度

(一) 固化時間 60 分鐘

1. 以拉力機拉伸試片得到力量最大值

試件名稱	力量最大值 kgf	試件面積 mm^2	力量最大值 kgf/cm^2
鋁片 1：1	69.788	125.000	55.830
鋁片 1：1	50.661	125.000	40.529
鋁片 1：1	83.984	125.000	67.187
鋁片 1：1	61.675	125.000	49.340
試件名稱	力量最大值 kgf	試件面積 mm^2	力量最大值 kgf/cm^2
鋁片 2：1	237.256	125.000	189.805
鋁片 2：1	220.970	125.000	176.776
鋁片 2：1	264.209	125.000	211.367
鋁片 2：1	272.887	125.000	218.309
試件名稱	力量最大值 kgf	試件面積 mm^2	力量最大值 kgf/cm^2
鋁片 3：1	193.502	125.000	154.802
鋁片 3：1	204.682	125.000	163.746
鋁片 3：1	188.549	125.000	150.839
鋁片 3：1	180.249	125.000	144.199

2. 以拉力機拉伸試片得到力量最大值折線圖(圖源：作者製作)



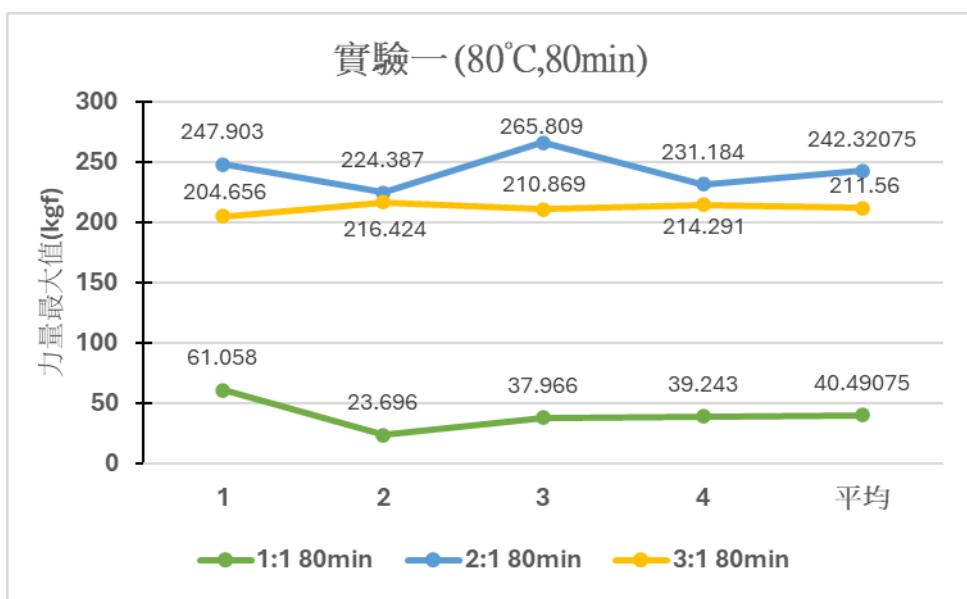
3. 實驗結果分析：從 2. 可以發現在 $80^\circ\text{C}, 60\text{min}$ 的固化環境中，
不同比例 A 膠：B 膠的剪切強度大小為 $2:1 > 3:1 > 1:1$ 。

(二) 固化時間 80 分鐘

1. 以拉力機拉伸試片得到力量最大值

試件名稱	力量最大值 kgf	試件面積 mm^2	力量最大值 kgf/cm^2
鋁片 1 : 1	61.058	125.000	48.846
鋁片 1 : 1	23.696	125.000	18.957
鋁片 1 : 1	37.966	125.000	30.373
鋁片 1 : 1	39.243	125.000	31.394
試件名稱	力量最大值 kgf	試件面積 mm^2	力量最大值 kgf/cm^2
鋁片 2 : 1	247.903	125.000	198.323
鋁片 2 : 1	224.387	125.000	179.510
鋁片 2 : 1	265.809	125.000	212.647
鋁片 2 : 1	231.184	125.000	184.948
試件名稱	力量最大值 kgf	試件面積 mm^2	力量最大值 kgf/cm^2
鋁片 3 : 1	204.656	125.000	163.724
鋁片 3 : 1	216.424	125.000	163.139
鋁片 3 : 1	210.869	125.000	168.695
鋁片 3 : 1	214.291	125.000	171.433

2. 以拉力機拉伸試片得到力量最大值折線圖(圖源：作者製作)



3. 實驗結果分析：從 2. 可以發現在 $80^\circ\text{C}, 80\text{min}$ 的固化環境中，不同比例 A 膠 : B 膠的剪切強度大小為 $2:1 > 3:1 > 1:1$ 。

(三) 固化時間 100 分鐘

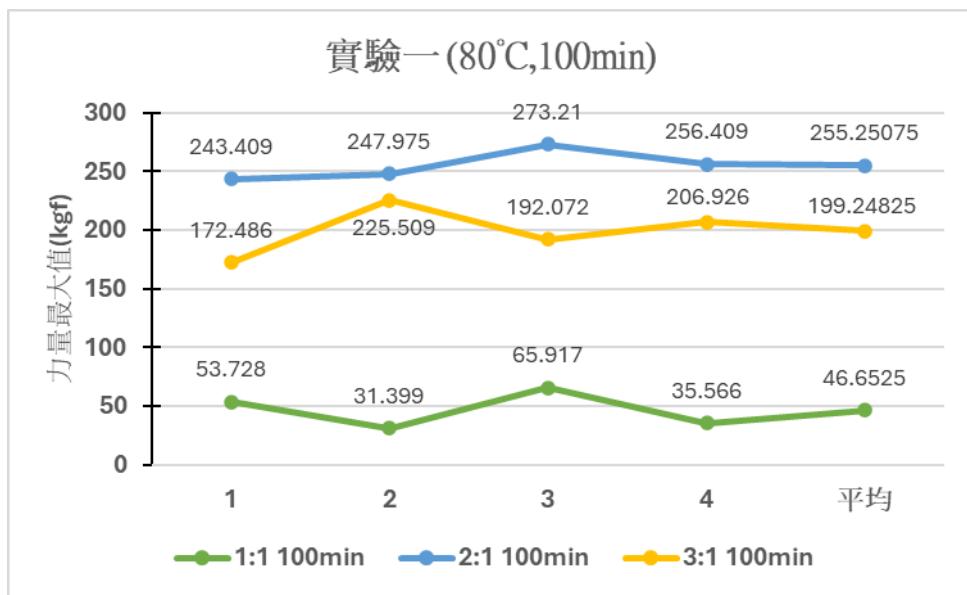
1. 以拉力機拉伸試片得到力量最大值

試件名稱	力量最大值 kgf	試件面積 mm^2	力量最大值 kgf/cm^2
鋁片 1 : 1	53.728	125.000	42.982
鋁片 1 : 1	31.399	125.000	25.120
鋁片 1 : 1	65.917	125.000	52.734
鋁片 1 : 1	35.566	125.000	28.453

試件名稱	力量最大值 kgf	試件面積 mm^2	力量最大值 kgf/cm^2
鋁片 2 : 1	243.409	125.000	194.727
鋁片 2 : 1	247.975	125.000	198.380
鋁片 2 : 1	273.210	125.000	218.568
鋁片 2 : 1	256.409	125.000	205.127

試件名稱	力量最大值 kgf	試件面積 mm^2	力量最大值 kgf/cm^2
鋁片 3 : 1	172.486	125.000	137.988
鋁片 3 : 1	225.509	125.000	180.407
鋁片 3 : 1	192.072	125.000	153.658
鋁片 3 : 1	206.926	125.000	165.540

2. 以拉力機拉伸試片得到力量最大值折線圖(圖源：作者製作)



3. 實驗結果分析分析：從 2.可以發現在 $80^\circ\text{C}, 100\text{min}$ 的固化環境中，不同比例 A 膠 : B 膠的剪切強度大小為 $2:1 > 3:1 > 1:1$ 。

二、【實驗二】：研究不同固化溫度下，不同比例環氧樹脂 AB 膠的剪切強度

(一) 固化溫度 60°C

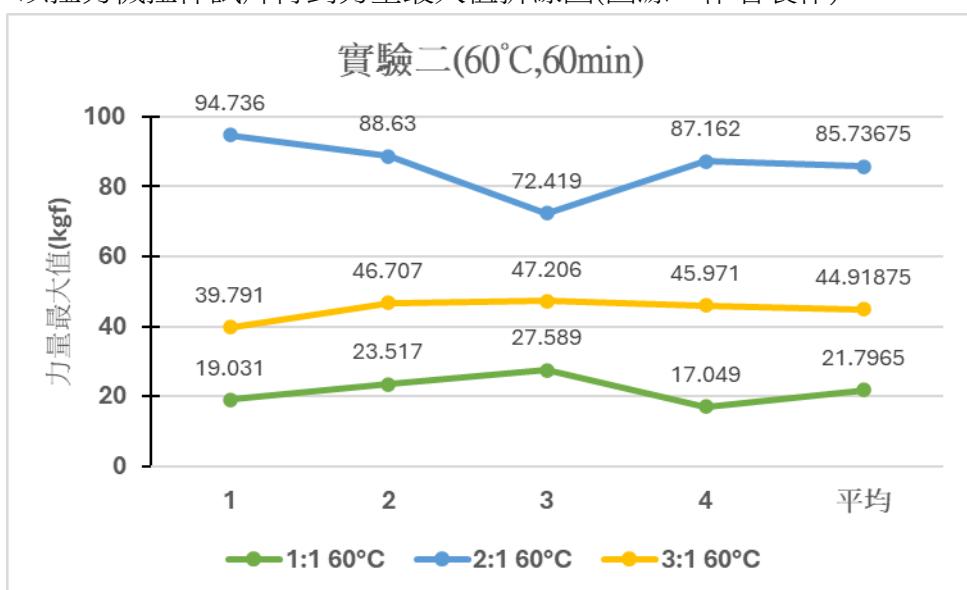
1. 以拉力機拉伸試片得到力量最大值

試件名稱	力量最大值 kgf	試件面積 mm^2	力量最大值 kgf/cm^2
鋁片 1 : 1	19.031	125.000	15.225
鋁片 1 : 1	23.517	125.000	18.813
鋁片 1 : 1	27.589	125.000	22.071
鋁片 1 : 1	17.049	125.000	13.638

試件名稱	力量最大值 kgf	試件面積 mm^2	力量最大值 kgf/cm^2
鋁片 2 : 1	94.736	125.000	75.789
鋁片 2 : 1	88.630	125.000	70.904
鋁片 2 : 1	72.419	125.000	57.935
鋁片 2 : 1	87.162	125.000	69.730

試件名稱	力量最大值 kgf	試件面積 mm^2	力量最大值 kgf/cm^2
鋁片 3 : 1	39.791	125.000	31.832
鋁片 3 : 1	46.707	125.000	37.366
鋁片 3 : 1	47.206	125.000	37.764
鋁片 3 : 1	45.971	125.000	36.777

2. 以拉力機拉伸試片得到力量最大值折線圖(圖源：作者製作)



3. 實驗結果分析：從 2.可以發現在 60°C,60min 的固化環境中，不同比例 A 膠 : B 膠的剪切強度大小為 2 : 1 > 3 : 1 > 1 : 1。

(二) 固化溫度 80°C

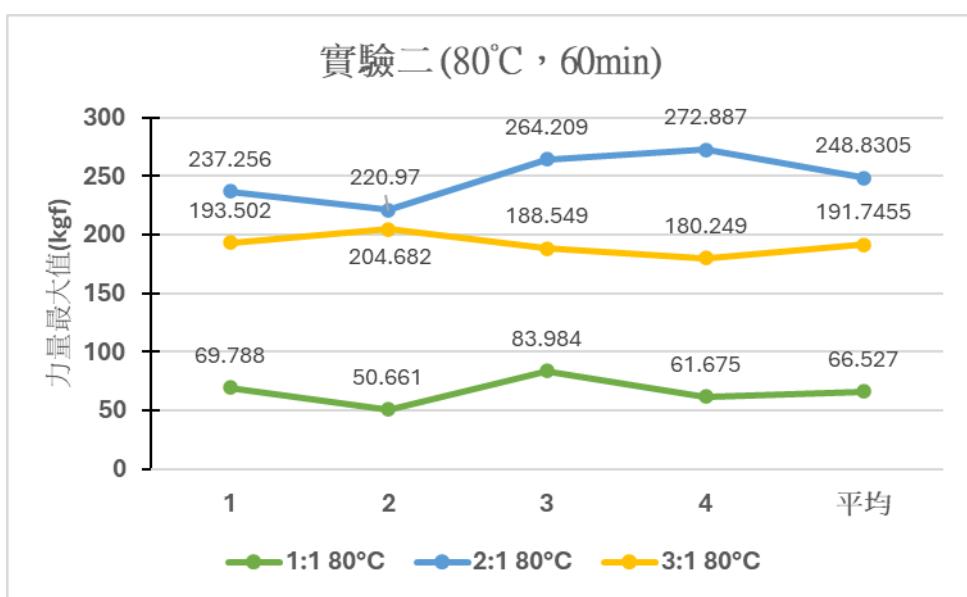
1. 以拉力機拉伸試片得到力量最大值

試件名稱	力量最大值 kgf	試件面積 mm ²	力量最大值 kgf/cm ²
鋁片 1：1	69.788	125.000	55.830
鋁片 1：1	50.661	125.000	40.529
鋁片 1：1	83.984	125.000	67.187
鋁片 1：1	61.675	125.000	49.340

試件名稱	力量最大值 kgf	試件面積 mm ²	力量最大值 kgf/cm ²
鋁片 2：1	237.256	125.000	189.805
鋁片 2：1	220.970	125.000	176.776
鋁片 2：1	264.209	125.000	211.367
鋁片 2：1	272.887	125.000	218.309

試件名稱	力量最大值 kgf	試件面積 mm ²	力量最大值 kgf/cm ²
鋁片 3：1	193.502	125.000	154.802
鋁片 3：1	204.682	125.000	163.746
鋁片 3：1	188.549	125.000	150.839
鋁片 3：1	180.249	125.000	144.199

2. 以拉力機拉伸試片得到力量最大值折線圖(圖源：作者製作)



3. 實驗結果分析：從 2. 可以發現在 80°C,60min 的固化環境中，不同比例 A 膠 : B 膠的剪切強度大小為 2：1 > 3：1 > 1：1。

(三) 固化溫度 100°C

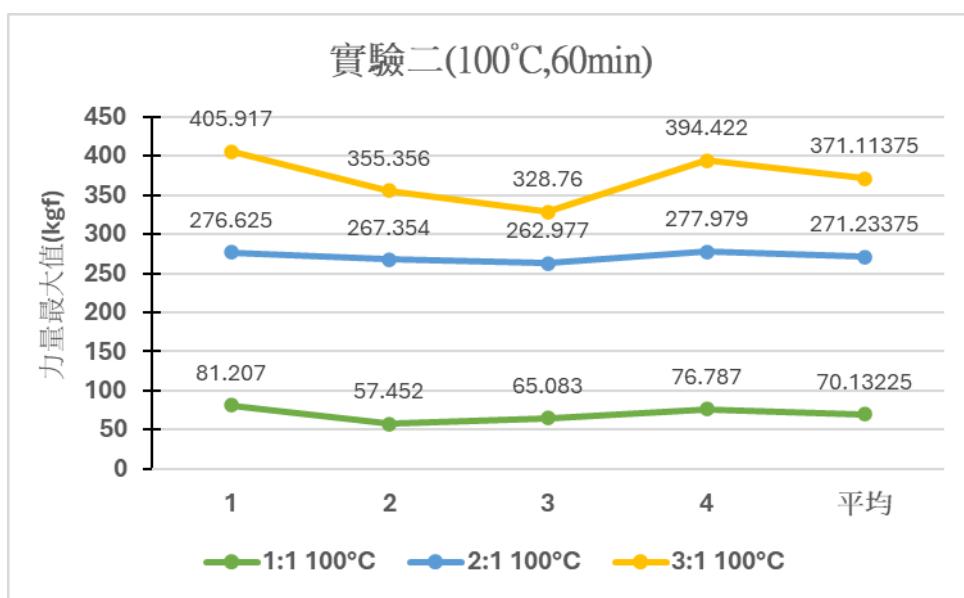
1. 以拉力機拉伸試片得到力量最大值

試件名稱	力量最大值 kgf	試件面積 mm ²	力量最大值 kgf/cm ²
鋁片 1：1	81.207	125.000	64.966
鋁片 1：1	57.452	125.000	45.961
鋁片 1：1	65.083	125.000	52.066
鋁片 1：1	76.787	125.000	61.430

試件名稱	力量最大值 kgf	試件面積 mm ²	力量最大值 kgf/cm ²
鋁片 2：1	276.625	125.000	221.300
鋁片 2：1	267.354	125.000	213.883
鋁片 2：1	262.977	125.000	210.382
鋁片 2：1	277.979	125.000	222.383

試件名稱	力量最大值 kgf	試件面積 mm ²	力量最大值 kgf/cm ²
鋁片 3：1	405.917	125.000	423.734
鋁片 3：1	355.356	125.000	284.585
鋁片 3：1	328.760	125.000	263.008
鋁片 3：1	394.422	125.000	315.538

2. 以拉力機拉伸試片得到力量最大值折線圖(圖源：作者製作)



3. 實驗結果分析：從 2.可以發現在 100°C,60min 的固化環境中，不同比例

A 膠：B 膩的剪切強度大小為 3：1>2：1>1：1。

(四) 固化溫度 120°C

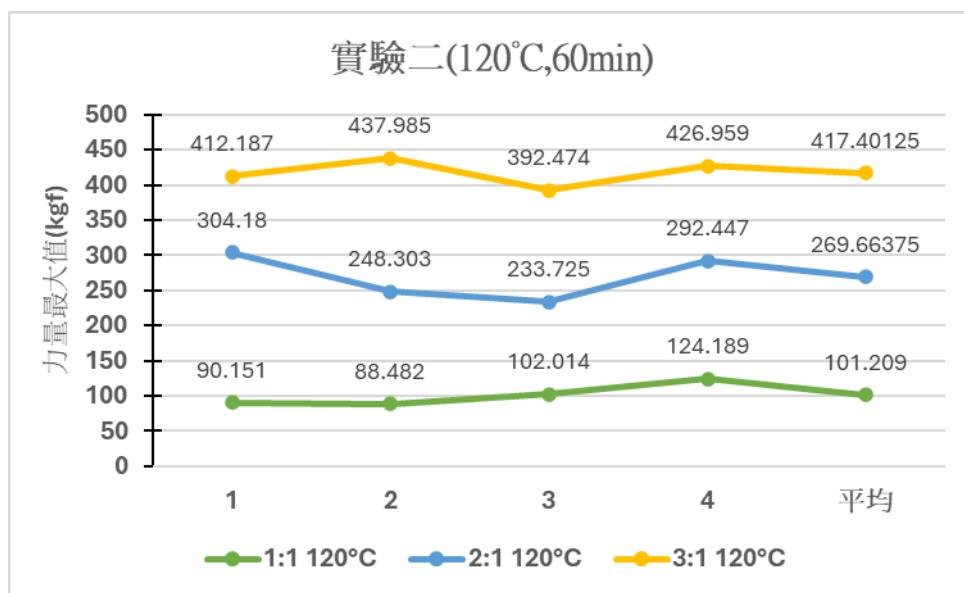
1. 以拉力機拉伸試片得到力量最大值

試件名稱	力量最大值 kgf	試件面積 mm ²	力量最大值 kgf/cm ²
鋁片 1 : 1	90.151	125.000	72.121
鋁片 1 : 1	88.482	125.000	70.786
鋁片 1 : 1	102.014	125.000	81.611
鋁片 1 : 1	124.189	125.000	99.351

試件名稱	力量最大值 kgf	試件面積 mm ²	力量最大值 kgf/cm ²
鋁片 2 : 1	304.180	125.000	243.344
鋁片 2 : 1	248.303	125.000	198.643
鋁片 2 : 1	233.725	125.000	186.980
鋁片 2 : 1	292.447	125.000	233.957

試件名稱	力量最大值 kgf	試件面積 mm ²	力量最大值 kgf/cm ²
鋁片 3 : 1	412.187	125.000	329.750
鋁片 3 : 1	437.985	125.000	350.388
鋁片 3 : 1	392.474	125.000	313.979
鋁片 3 : 1	426.959	125.000	341.567

2. 以拉力機拉伸試片得到力量最大值折線圖(圖源：作者製作)



3. 實驗結果分析：從 2. 可以發現在 120°C,60min 的固化環境中，不同比例

A 膠 : B 膠的剪切強度大小為 3 : 1 > 2 : 1 > 1 : 1。

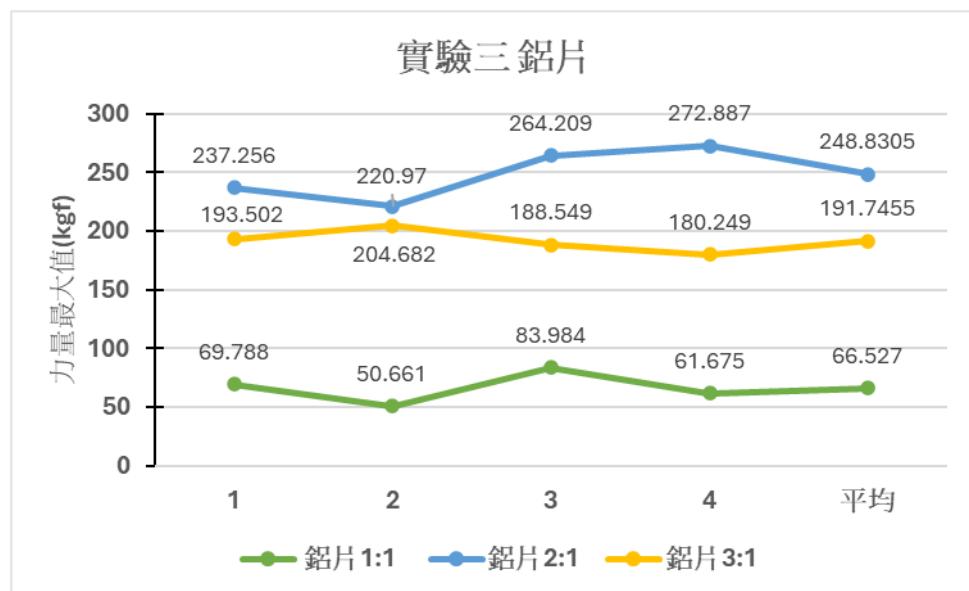
三、【實驗三】：研究不同黏貼材質下，不同比例環氧樹脂 AB 膠的剪切強度

(一) 鋁片

1. 以拉力機拉伸試片得到力量最大值

試件名稱	力量最大值 kgf	試件面積 mm^2	力量最大值 kgf/cm^2
鋁片 1 : 1	69.788	125.000	55.830
鋁片 1 : 1	50.661	125.000	40.529
鋁片 1 : 1	83.984	125.000	67.187
鋁片 1 : 1	61.675	125.000	49.340
試件名稱	力量最大值 kgf	試件面積 mm^2	力量最大值 kgf/cm^2
鋁片 2 : 1	237.256	125.000	189.805
鋁片 2 : 1	220.970	125.000	176.776
鋁片 2 : 1	264.209	125.000	211.367
鋁片 2 : 1	272.887	125.000	218.309
試件名稱	力量最大值 kgf	試件面積 mm^2	力量最大值 kgf/cm^2
鋁片 3 : 1	193.502	125.000	154.802
鋁片 3 : 1	204.682	125.000	163.746
鋁片 3 : 1	188.549	125.000	150.839
鋁片 3 : 1	180.249	125.000	144.199

2. 以拉力機拉伸試片得到力量最大值折線圖(圖源：作者製作)



3. 實驗結果分析：從 2.可以發現接著材料為鋁片且在 $80^\circ\text{C}, 60\text{min}$ 的固化環境中，不同比例 A 膠 : B 膠的剪切強度大小為 2 : 1 > 3 : 1 > 1 : 1。

(二) 銅片

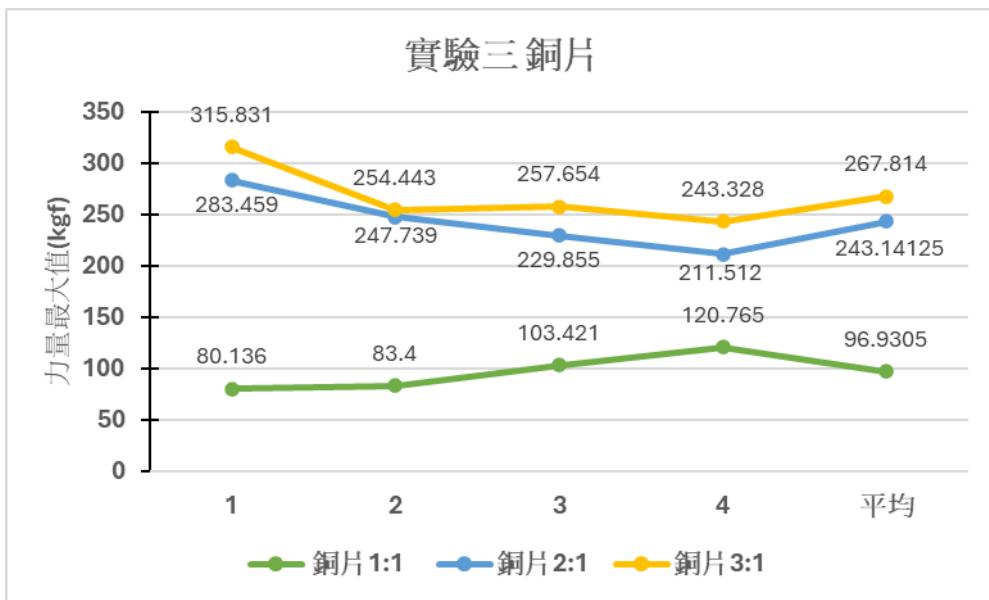
1. 以拉力機拉伸試片得到力量最大值

試件名稱	力量最大值 kgf	試件面積 mm^2	力量最大值 kgf/cm^2
銅片 1 : 1	80.136	125.000	64.109
銅片 1 : 1	83.400	125.000	66.720
銅片 1 : 1	103.421	125.000	82.737
銅片 1 : 1	120.765	125.000	96.612

試件名稱	力量最大值 kgf	試件面積 mm^2	力量最大值 kgf/cm^2
銅片 2 : 1	283.459	125.000	226.767
銅片 2 : 1	247.739	125.000	198.191
銅片 2 : 1	229.855	125.000	183.884
銅片 2 : 1	211.512	125.000	169.209

試件名稱	力量最大值 kgf	試件面積 mm^2	力量最大值 kgf/cm^2
銅片 3 : 1	315.831	125.000	252.665
銅片 3 : 1	254.443	125.000	203.554
銅片 3 : 1	257.654	125.000	206.123
銅片 3 : 1	243.328	125.000	194.662

2. 以拉力機拉伸試片得到力量最大值折線圖(圖源：作者製作)



3. 實驗結果分析：從 2.可以發現接著材料為銅片且在 $80^\circ\text{C}, 60\text{min}$ 的固化環境中，不同比例 A 膠 : B 膠的剪切強度大小為 3 : 1 > 2 : 1 > 1 : 1。

(三) 壓克力片

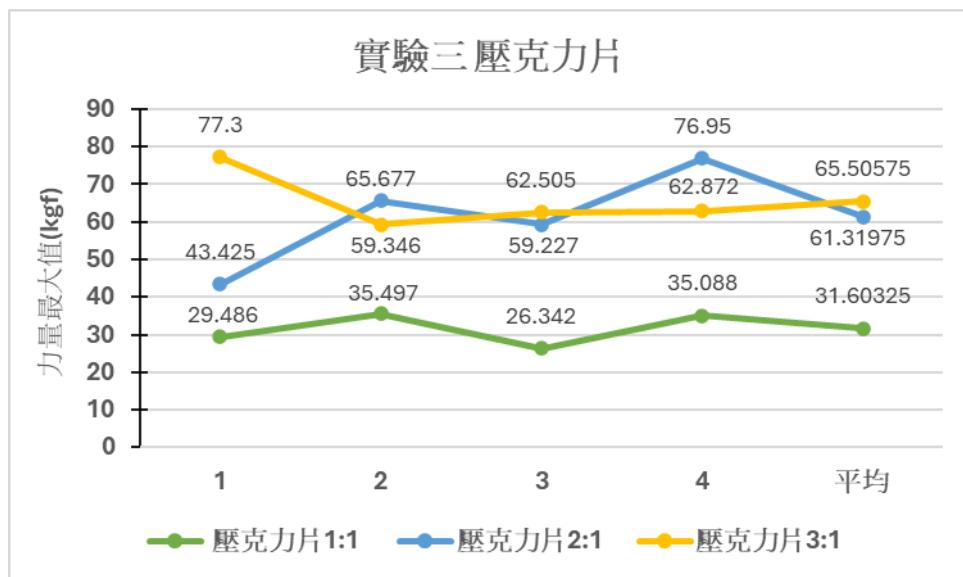
1. 以拉力機拉伸試片得到力量最大值

試件名稱	力量最大值 kgf	試件面積 mm^2	力量最大值 kgf/cm^2
壓克力片 1 : 1	29.486	125.000	23.589
壓克力片 1 : 1	35.497	125.000	28.398
壓克力片 1 : 1	26.342	125.000	21.073
壓克力片 1 : 1	35.088	125.000	28.048

試件名稱	力量最大值 kgf	試件面積 mm^2	力量最大值 kgf/cm^2
壓克力片 2 : 1	43.425	125.000	34.740
壓克力片 2 : 1	65.677	125.000	52.542
壓克力片 2 : 1	59.227	125.000	47.382
壓克力片 2 : 1	76.950	125.000	61.560

試件名稱	力量最大值 kgf	試件面積 mm^2	力量最大值 kgf/cm^2
壓克力片 3 : 1	77.300	125.000	61.840
壓克力片 3 : 1	59.346	125.000	47.477
壓克力片 3 : 1	62.505	125.000	50.004
壓克力片 3 : 1	62.872	125.000	50.297

2. 以拉力機拉伸試片得到力量最大值折線圖(圖源：作者製作)



3. 實驗結果分析：從 2. 中發現在接著材料為壓克力片且在 $80^\circ\text{C}, 60\text{min}$ 的固化環境中，A 膠 : B 膠為 1 : 1 的剪切強度最小，而 2 : 1 和 3 : 1 則沒有明顯區別。

四、【實驗四】：研究額外添加物對環氧樹脂 AB 膠的剪切強度影響

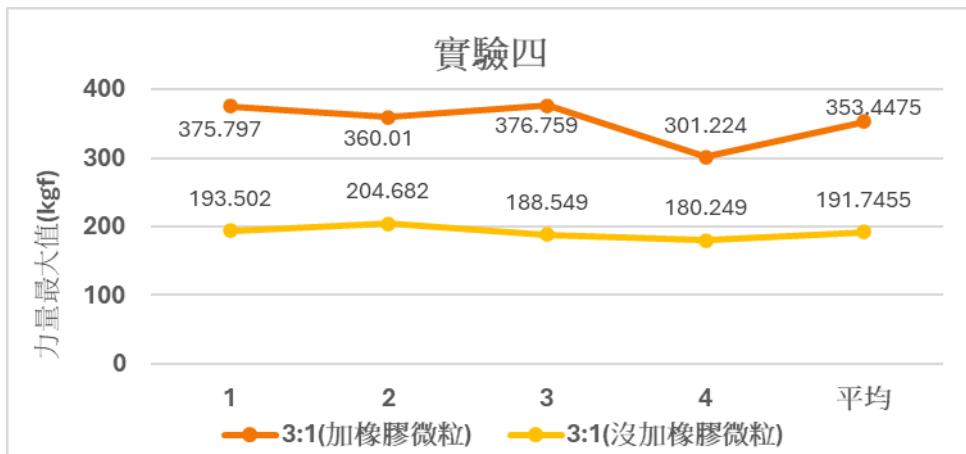
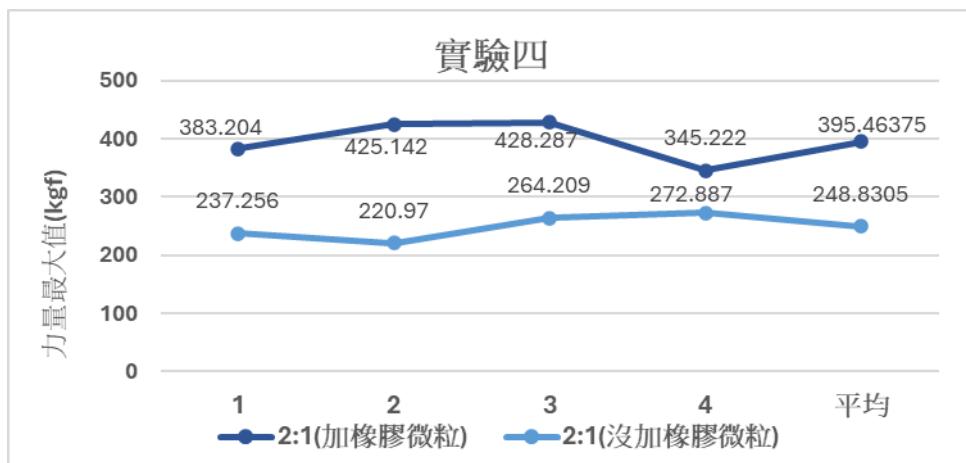
(一) 添加橡膠微粒

1. 以拉力機拉伸試片得到力量最大值

試件名稱	力量最大值 kgf	試件面積 mm^2	力量最大值 kgf/cm^2
鋁片 2 : 1	383.204	125.000	306.563
鋁片 2 : 1	425.142	125.000	340.114
鋁片 2 : 1	428.287	125.000	342.630
鋁片 2 : 1	345.222	125.000	276.177

試件名稱	力量最大值 kgf	試件面積 mm^2	力量最大值 kgf/cm^2
鋁片 3 : 1	375.797	125.000	300.638
鋁片 3 : 1	360.010	125.000	288.008
鋁片 3 : 1	376.759	125.000	301.407
鋁片 3 : 1	301.224	125.000	240.979

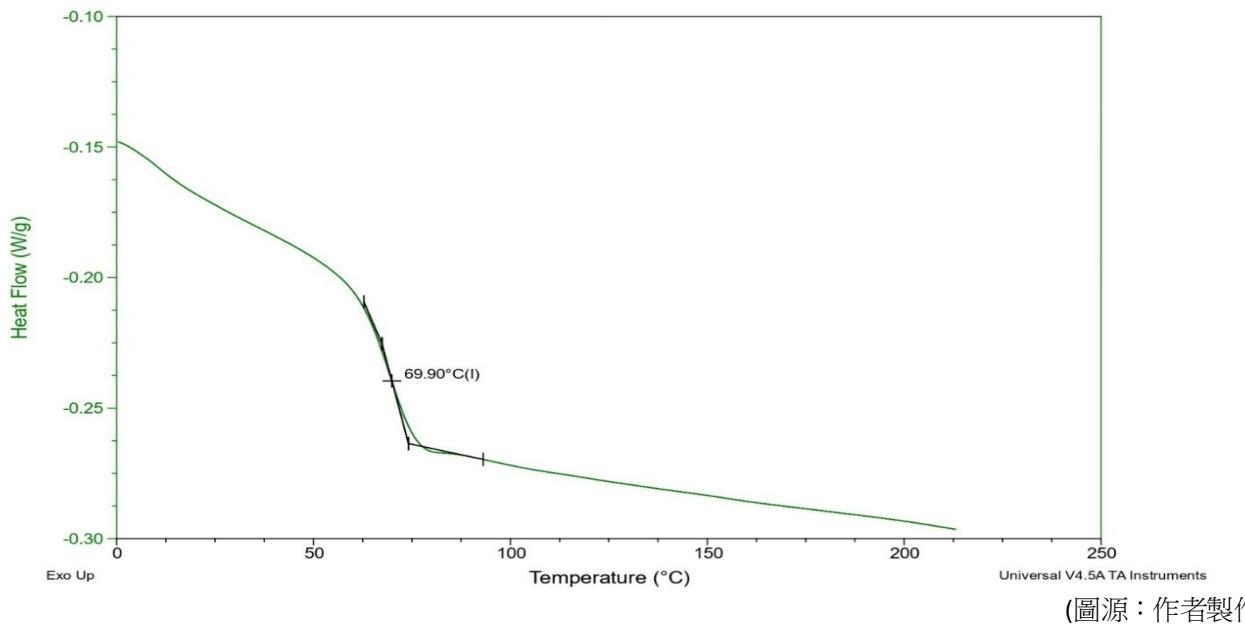
2. 以拉力機拉伸試片得到力量最大值折線圖(圖源：作者製作)



3. 實驗結果分析：由 2. 可發現 A 膠 : B 膠為 2 : 1 和 3 : 1 在添加橡膠微粒後，所能承受的力量最大值較原先均有明顯提升。

五、【實驗五】：利用 DSC 測試各實驗之試片的玻璃轉化溫度

(一) 用 DSC 掃描後得到熱流量對時間的 TG 曲線圖(以 A : B = 2 : 1/80°C, 60min 為例)

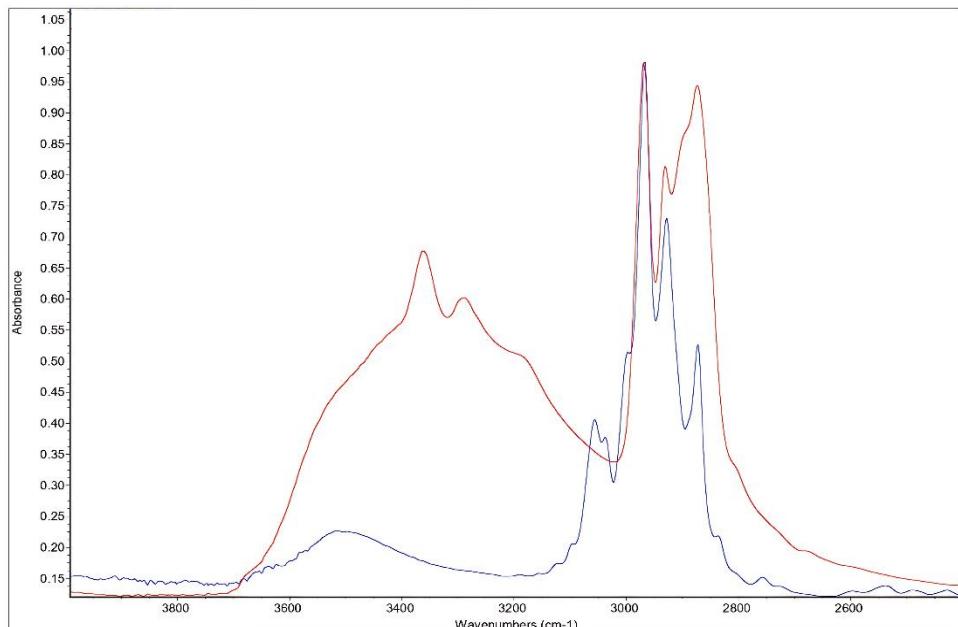


(圖源：作者製作)

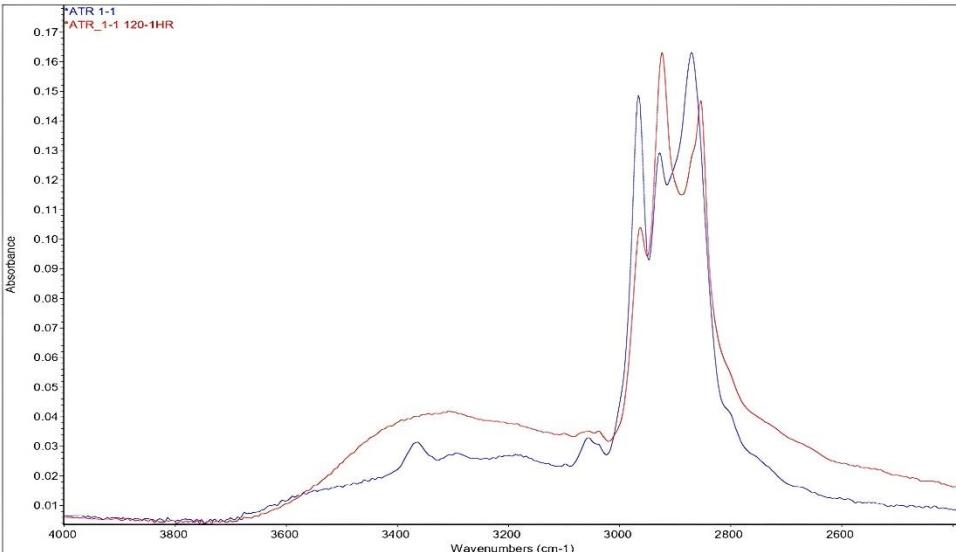
(二) 各實驗之試片測得的玻璃轉化溫度

2:1/80°C,60min	2:1/80°C,80min	2:1/80°C,100min	2:1/100°C,60min	2:1/120°C,60min
69.90°C	70.96°C	70.81°C	71.30°C	71.50°C
3:1/80°C,60min	3:1/80°C,80min	3:1/80°C,100min	3:1/100°C,60min	3:1/120°C,60min
49.26°C	48.70°C	52.99°C	52.76°C	50.76°C

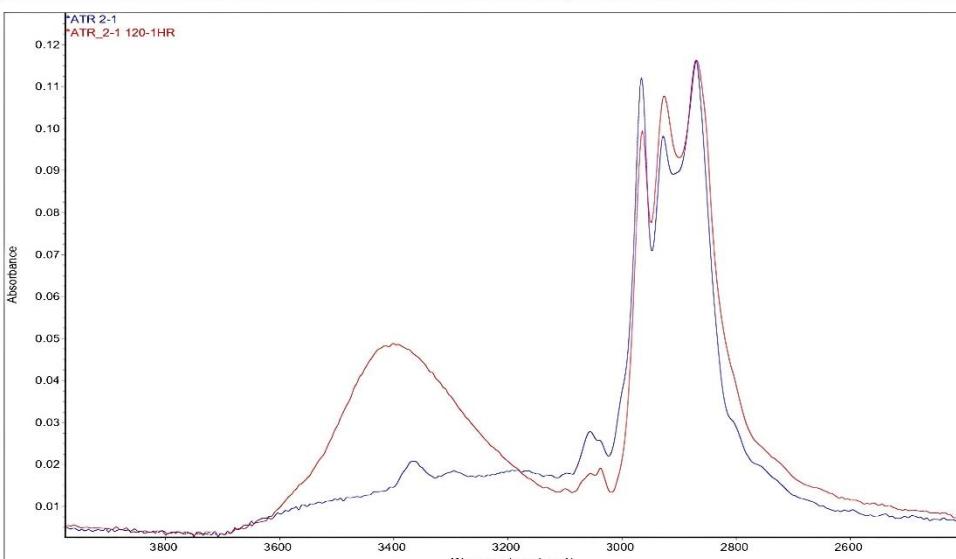
六、用 FT-IR 測得之吸光度(圖源：皆為作者製作)



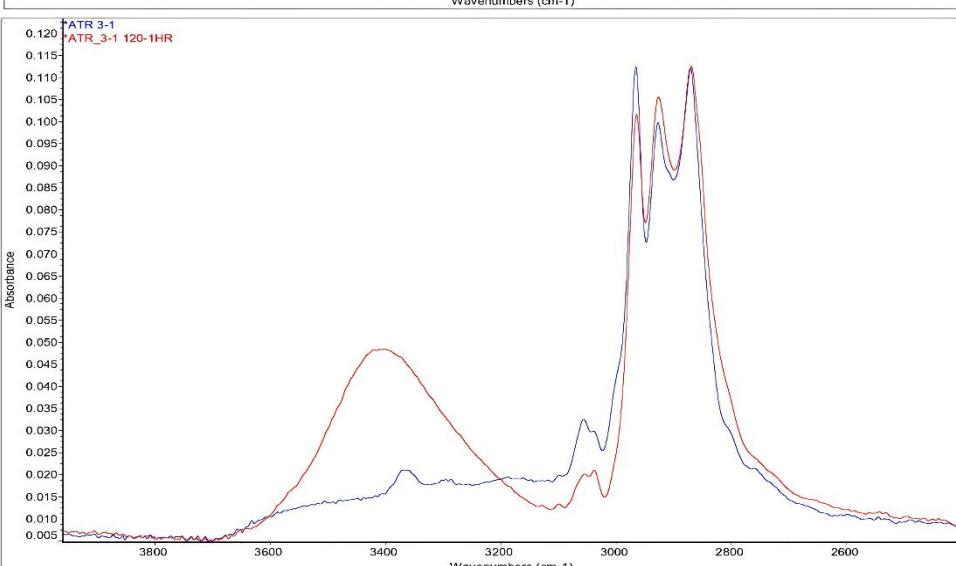
由圖中可見(藍色為 A 膠，紅色為 B 膠)B 膠在波長 3200~3400cm⁻¹ 附近的特徵峰可代表 NH₂，而 OH 基約在 3400~3800 cm⁻¹，隨著 AB 膠反應生成 OH 基此段波長對應的吸光度會逐漸上升。此外 NH₂ 和 OH 基為極性分子，膠水用於黏貼金屬有較好的機械咬合力。



圖一、1：1 固化前後
之吸收峰



圖二、2：1 固化前後
之吸收峰



圖三、3：1 固化前後
之吸收峰

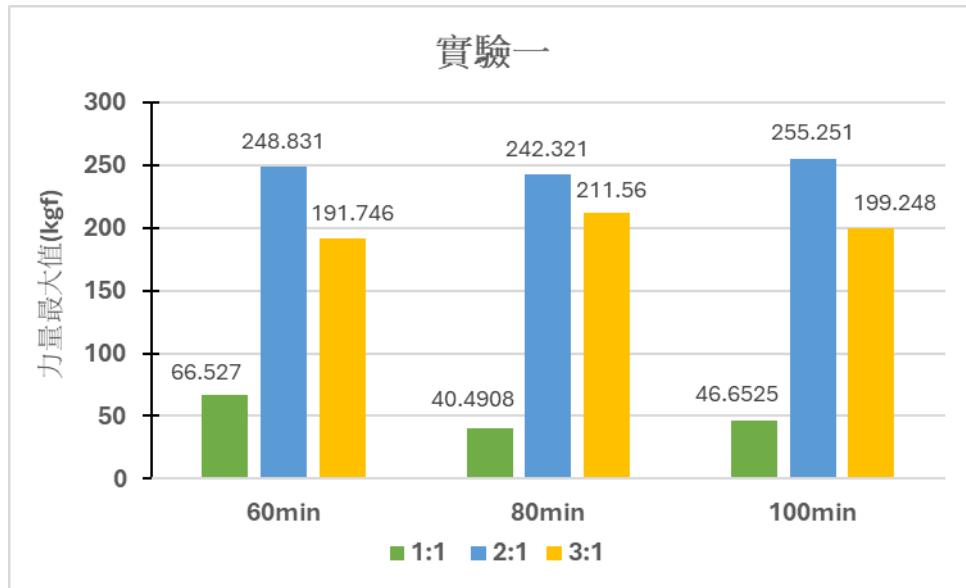
(藍色為固化前，紅色為固化後)

由圖中可見三種比例固化後均在波長 $3400\text{~}3800\text{cm}^{-1}$ 附近有明顯的上升，顯示反應確實發生；且 1：1 反應後的波峰約落在 3400 cm^{-1} ，顯示仍有 B 膠的 NH_2 殘留，而 2：1 和 3：1 的波峰往 3800cm^{-1} ，代表有更多 OH 基生成。

伍、實驗結果討論

一、【實驗一】：研究不同**固化時間**下，不同比例環氧樹脂 AB 膠的剪切強度

(一) 比較**固化時間**對力量最大值(平均值)長條圖(圖源：作者製作)

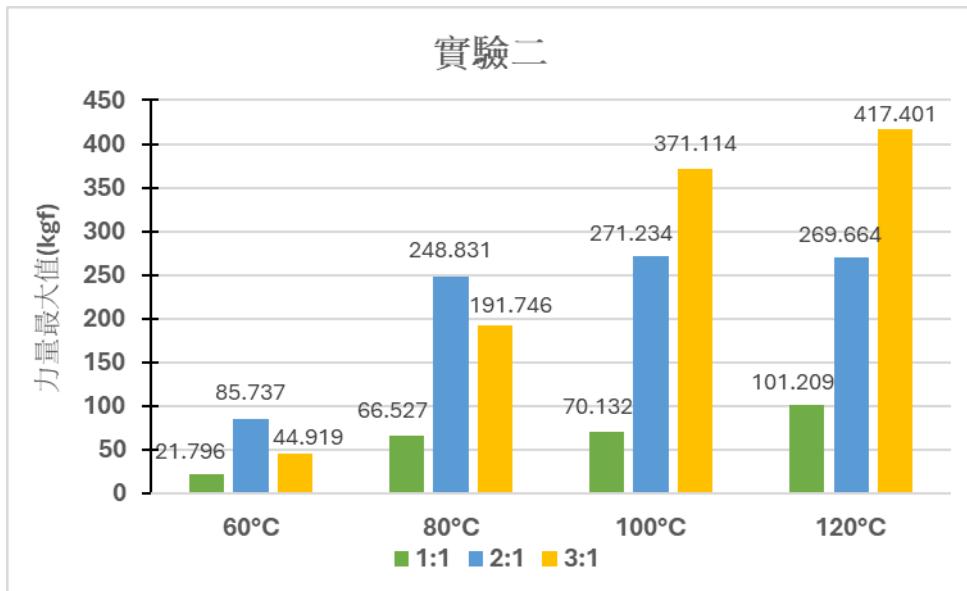


(二) 從圖中可以發現，在 80°C 的溫度下，隨著固化時間以 20 分鐘為一區間提升，
3:1 與 2:1 的拉力數值均無明顯變化，我們推測是因為 A 膠分子有更長的碳鏈，
因此在高溫對其的影響相對較小，所以在短時間內無法觀察到明顯反應。
至於在 1:1 的配比下，隨著固化溫度從 60 分鐘提升到 80 分鐘，拉力數值下降，可能因
為 B 膠分子過量(從 1:1 的 FT-IR 圖可印證)，在高溫下容易發生降解，破壞整體的交聯
結構，進而影響與鋁片的機械咬合作用。

從上方的 FT-IR 圖可發現 1:1 的波較平緩而 2:1 和 3:1 較尖銳，一般而言波峰越
尖銳代表分子排列越整齊，反應較完整，因此可推論 2:1 和 3:1 排列更整齊、反應更
完全，可測得更大的拉力數值。

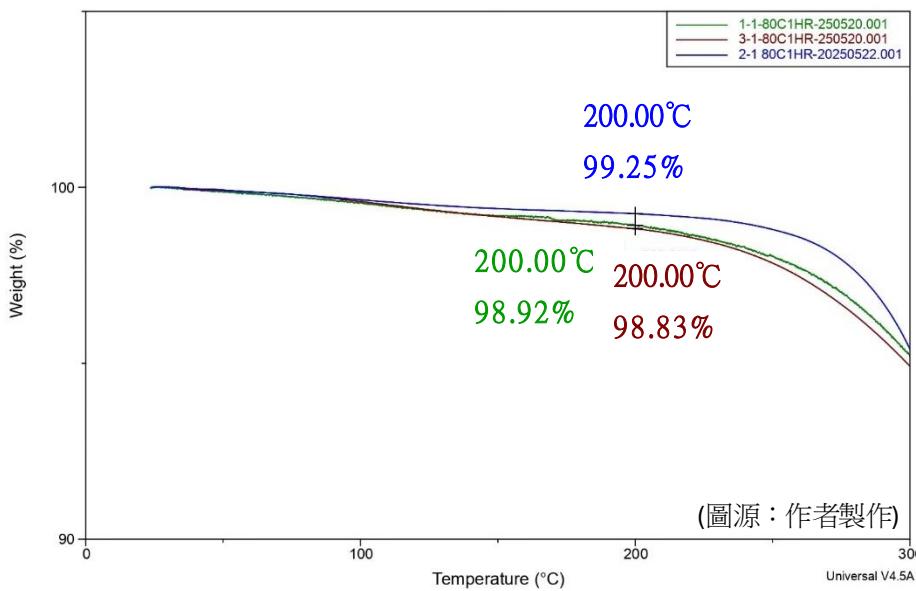
二、【實驗二】：研究不同固化溫度下，不同比例環氧樹脂 AB 膠的剪切強度

(一) 比較固化溫度對力量最大值(平均值)長條圖(圖源：作者製作)



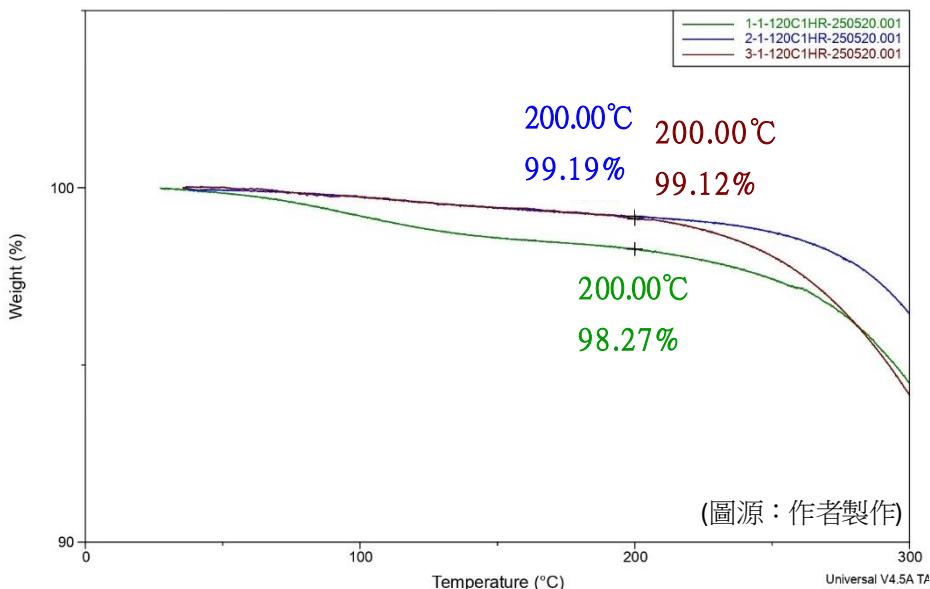
(二) 從圖中可以發現，固化時間同為 60 分鐘，在 60°C 時可能因為溫度沒有高到足以讓 A 膠與 B 膠發生足夠的反應，以至於無法產生足夠的網狀結構，從烘箱拿出來後試件表面都還有點黏黏的現象，也造成三種比例的數值都明顯較低。

而在 80°C 到 120°C 時，整體數值呈現上升趨勢，推測是因為溫度上升讓分子平均動能增加，使更多的 A 膩和 B 膩分子能夠發生反應，產生更多的交聯結構。其中 1:1 的配比略微上升，推測溫度提升可能也會導致 B 膩分子更容易降解，因此對整體結構也會有部分負面影響(但仍以正面影響為多)；2:1 的配比變化極小，可能因為 A 膩與 B 膩的比例讓交聯結構已趨於穩定，因此未有明顯增加。



而 3:1 的配比在 100°C 的數值突然增加，且 120°C 的數值也更加上升，推測此時的溫度已足以使過量的 A 膩分子開始進行前文提到的自聚反應，增加分子之間的穩定度，進而使機械咬合力更強，此現象也可反映 2:1 在 100°C 的數值中略有提升的現象。

圖一 1:1、2:1、3:1(80°C,60min)隨溫度上升的重量損失率



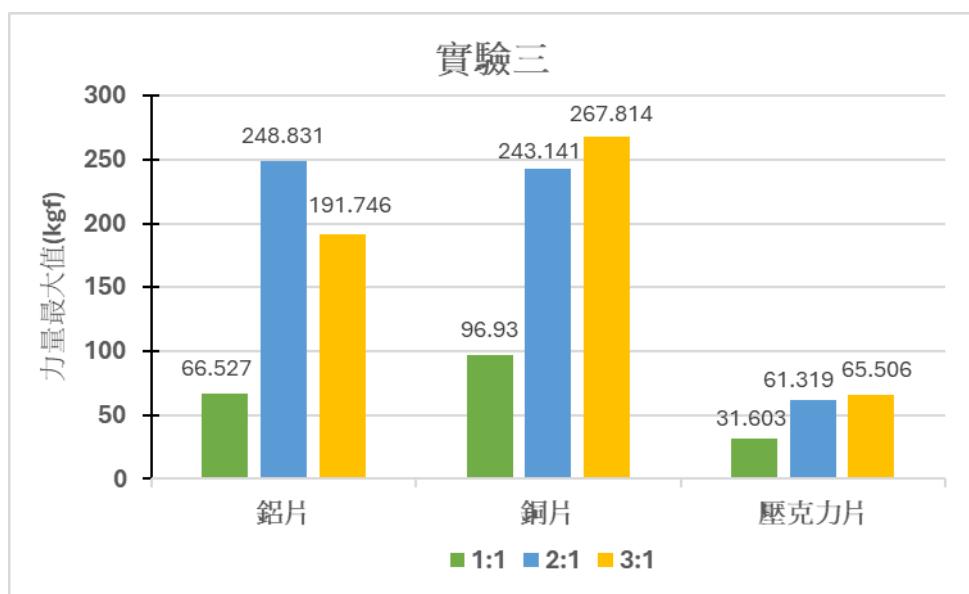
圖二 1：1、2：1、3：1(120°C,60min)隨溫度上升的重量損失率

(1：1 為綠色、2：1 為藍色、3：1 為紅棕色)

從重量損失率的圖中可見，在固化溫度為 80°C 的情況下，損失率由小到大為 2 : 1 < 3 : 1 < 1 : 1，120°C 時則為 2 : 1 < 3 : 1 < 1 : 1；而損失越少代表分子越緊密，交聯結構穩定，此結果可印證 3 : 1 從 80°C 到 120°C 拉力數值的上升。

三、【實驗三】：研究不同黏貼材質下，不同比例環氧樹脂 AB 膠的剪切強度

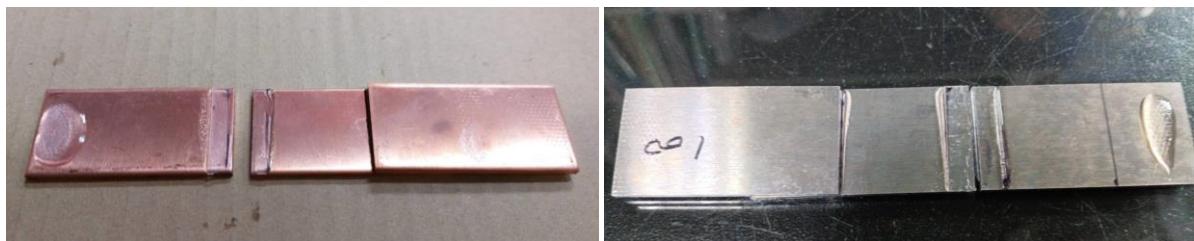
(一) 比較不同接著材料對力量最大值(平均值)長條圖(圖源：作者製作)



(二) 上圖中，鋁片與銅片在 2 : 1 的配比下，數值均差距不大，但在 1 : 1 和 3 : 1 的配比中，銅片明顯優於鋁片，可能的原因推測是銅的表面能(約 1600~1700 mJ/m²)比鋁(約 850~1200 mJ/m²)高，能讓膠水更好的潤濕表面從而得到更好的剪切強度；可能的原因推測是 3 : 1 的 A 膠分子較多，而 A 膠和 B 膠相比有較大的接觸面積因此和材料表面的吸附力較強，所以配比 3 : 1 的拉力數值在銅片上大幅增加，

而 1:1 增加不大。另外 2:1 幾乎沒有變化，推測其因為未固化的 A、B 膠較少，交聯結構相對穩定，因此較不受影響。

而由於壓克力表面能($38\sim42 \text{ mJ/m}^2$)太低，膠水很難完整濕潤表面，難以形成良好的接著面，因此數值在三種配比中均較另兩者低許多，在本實驗中我們將焦點放在另外兩種材質上。



圖一、銅片的破裂面展示(圖源：作者拍攝) 圖二、鋁片的破裂面展示(圖源：作者拍攝)

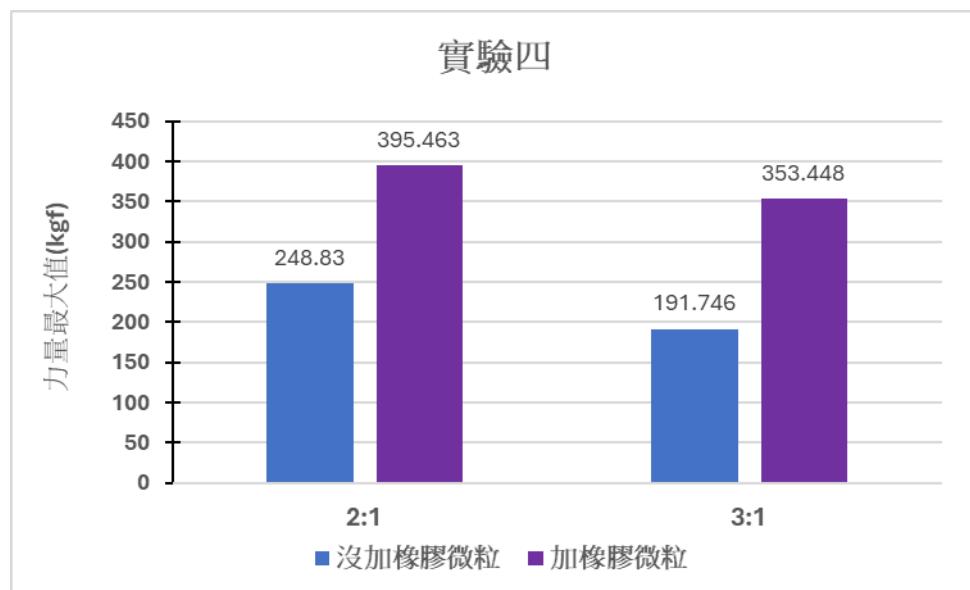


圖三、壓克力片的破裂面展示
(圖源：作者拍攝)

銅和鋁的表面能較高，和膠水黏著效果更好，因此斷裂後可見到黏貼處仍有殘膠，但壓克力則幾乎無殘膠，可印證其和膠水的接著力差。

四、【實驗四】：研究額外添加物對環氧樹脂 AB 膠的剪切強度影響

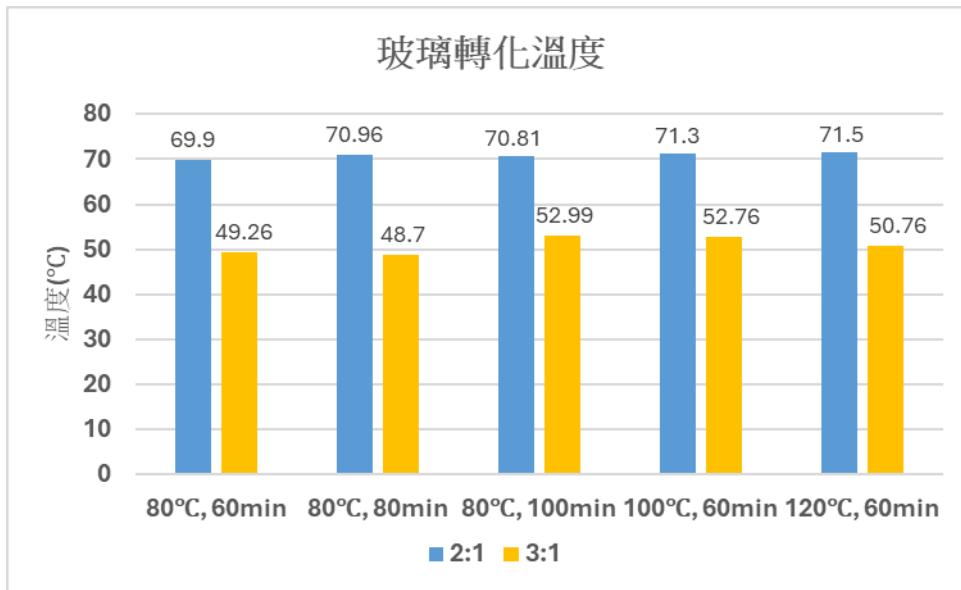
(一) 比較額外添加物對力量最大值(平均值)長條圖(圖源：作者製作)



(二) 由上圖可見配比為 2:1 和 3:1 在添加橡膠微粒後，力量最大值(平均值)均有顯著提升，顯示添加橡膠微粒可以幫助提升環氧樹脂固化後的強度；推測是橡膠微粒本身具有良好的彈性與形變能力，在材料受到應力時可以透過變形吸收能量、將單一方向的應力分散到四周，阻擋裂紋擴展或改變裂紋前進方向；同時，在高度應力下橡膠微粒和環氧樹脂會因為形變率不同而發生脫層形成空隙，並因此消耗能量。這些機制使橡膠微粒放在 AB 膠的交聯結構中可以整體能承受更大的力量拉伸而不破裂。也因為橡膠微粒不會和膠水作用使反應加快或是密度提升，而是利用本身的特性，我們認為橡膠微粒不能加太多，否而反而會降低數值。

五、【實驗五】：利用 DSC 測試各實驗之試片的玻璃轉化溫度

(一) 比較各條件下的玻璃轉化溫度長條圖(圖源：作者製作)



(二) 由圖中可發現，2:1 的 TG 值均大於 3:1，推論是 2:1 的交聯密度較 3:1 高，造成分子鏈較受限制，因此硬度較高，而 3:1 交聯密度較低，相對上就較軟、有韌性。

以前三組數據(實驗一)來看，2:1 的拉力數值均大於 3:1，可見在 80°C 的情況下，2:1 的的硬度較佳且承受拉力的強度也較好，我們推斷此時 3:1 應該尚未(或數量少而難以觀察到)發生自聚反應(和 100°C、120°C 時相比)；而比較第一組和後兩組(實驗二)的數據，在 100°C 和 120°C 的情況下，3:1 的 TG 雖然較低，拉力數值卻遠超 2:1，推論在此溫度下 3:1 應該已開始發生自聚反應，

產生 A 膠分子之間的交聯，此種交聯的硬度應小於 A 膠和 B 膠的反應產生的交聯，因此 TG 仍較低，但較多的 A 膠分子鍵結提供強大的韌性，所以能承受更大的拉力。

陸、結 論

一、在固化溫度為 80°C 的條件下，拉力數值為 2：1>3：1>1：1。隨著固化時間增加，2：1 和 3：1 的拉力數值均無明顯變化，推測因較多的 A 膠提供好的熱穩定性；相較之下，1：1 數值下降，可能與 B 膠分子在高溫下降解有關。

二、固定固化時間為 60min，固化溫度為 60°C 及 80°C 時，拉力數值為

2：1>3：1>1：1；在溫度為 100°C 及 120°C 時，拉力數值為 3：1>2：1>1：1。推測在溫度提升後 3：1 數值超過 2：1 的原因為過多的 A 膠分子在更高溫下發生自聚反應，使整體承受拉力的強度更好。

三、不同黏貼材質中，壓克力的數值最差，而銅片的數值(除了 2：1 幾乎沒有差別)較鋁片優，推測原因為表面能(銅>鋁>壓克力)的差異，造成膠水對表黏貼面潤濕能力有所落差，因而影響受拉力時容易剝離與否。

四、在膠水中額外添加橡膠微粒可以使膠水承受更大的力量，使數值大幅攀升。

五、用 DSC 對不同固化條件下和配比的膠水測試 TG 值，得到 2：1 的 TG 均高於 3：1，顯示 2：1 的交聯密度較高、較硬脆，而 3：1 較軟、有韌性。

柒、未來展望

本實驗從 AB 膠反應之結構式發想，探討 AB 膠反應的最佳配比，且發現在不同比例、固化溫度、固化時間以及黏貼材質下，剪切強度皆有不同差異。首先，未來希望能夠進一步調配在 2：1 與 3：1 之間的配比，以獲得更精確的數據，希望能透過最佳比例大致推測出 A 膠與 B 膠的分子量。再者，本實驗在環氧樹脂中添入橡膠微粒以增加其強度，未來可添加其他種類的增強劑如奈米材料或玻璃纖維，以此提升固化後的環氧樹脂得到更大強度。最後，本實驗以鋁片、銅片、壓克力片作為不同的黏貼材質，未來也可增加更多不同的材料片，另外測試不同表面預處理如噴砂、酸鹼蝕刻對其黏著效果的影響。

捌、參考資料

一、謝峰銘、時國誠(2019)。橡膠彈性體於環氧樹脂增韌技術之發展與應用。

<https://www.materialsnet.com.tw/DocView.aspx?id=40048>

二、科邁斯科技股份有限公司(2022)。熱示差掃描分析儀的原理及應用介紹。

<https://www.techmaxasia.com/knowledge-detail/DSC-20210208/>

三、永寬化學電子報(2014)。熱固性樹脂的破裂機構。

<https://www.everwide.com.tw/post/%E6%B0%B8%E5%AF%AC%E5%8C%96%E5%AD%B8%E9%9B%BB%E5%AD%90%E5%A0%B1-%E7%AC%AC183%E6%9C%9F>

四、電子製造，工作狂人(2016)。何謂玻璃轉化溫度。

<https://www.researchmfg.com/2016/08/tg-glass-transition-temperature/>

五、模具與成型智慧工廠雜誌(2021)。玻璃轉移溫度。

<https://www.smartmolding.com/18-11c03/>

六、A. Trentin, R. Samiee, A.H. Pakseresht , A. Duran, Y. Castro, &D. Galusek(2023). Influence of pre-treatments on adhesion, barrier and mechanical properties of epoxy coatings: A comparison between steel, AA7075 and AA2024. *Applied Surface Science Advances*, 18

七、Feng, Y., Zhang, Z., Yue, D., Victor O.Belko,...&QingguoChen(2024). Recent progress in degradation and recycling of epoxy resin. *Journal of Materials Research and Technology*, 32

八、Kim, J., Hong, K., Choi, Y., Jang, D., Han, J., &Hyungbum Park(2025).Molecular origin of asymmetric yield surface of crosslinked epoxy polymers. *Polymer Testing*, 143

九、Dinç, Z., Öz, Y., Prasad Potluri, William W. Sampson, &Hüseyin Aksel Eren(2025)Influence of thermoplastic fibre-epoxy adhesion on the interlaminar fracture toughness of interleaved polymer composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 189

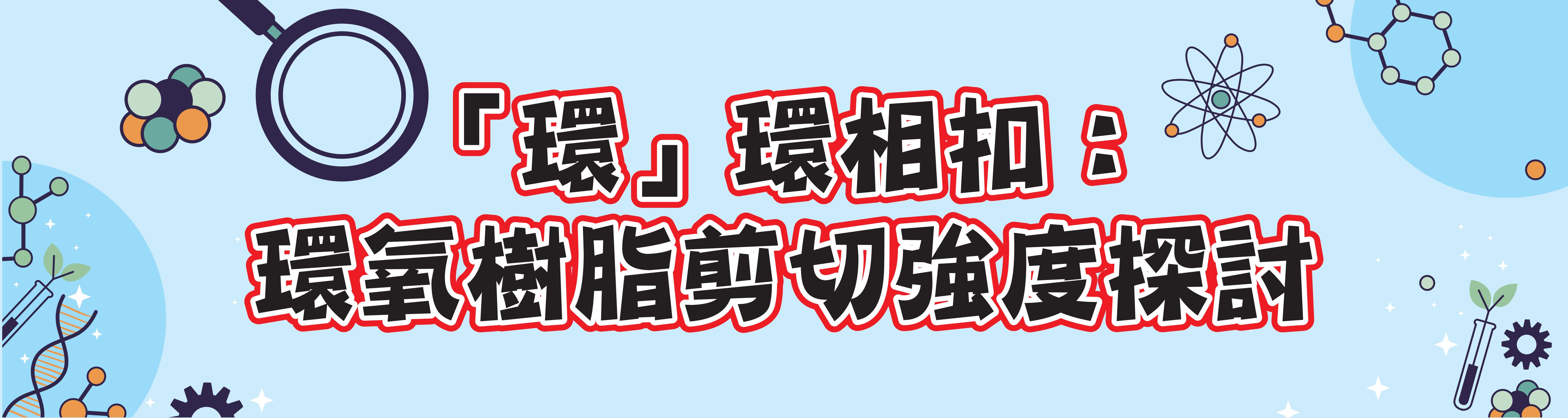
十、Bhaskaranand Bhatt, Umesh Marathe, Navnath Kalel,&Jayashree Bijwe(2025).Efficacy of high-performance epoxy resin as a binder to replace eco-unfriendly phenolic resins in Cu-free brake pads. *Tribology International*, 202

【評語】052407

本研究針對不同環氧樹脂及胺類硬化劑配比與不同固化溫度與時間環境下，藉由分析比較剪切強度之實驗量測結果，進而獲得最佳材料配比與製作條件，發現環氧樹脂與硬化劑最佳配比為 3：1，當固化溫度提高至 100 °C 以上時，加入橡膠微粒後可提高其剪切強度，剪切強度與層板之板材質有關。本研究宜檢核剪切強度試體製作與破壞模式之正確性，加強說明膠水中額外添加橡膠微粒提升剪切強度之力學機制，鋁、銅、壓克力片如何影響膠水對其黏貼面之潤濕能力，進而降低剪切強度。另外，本研究除比較剪切強度之變化外，由於未完全聚合或自聚合之樹脂所得到應力應變圖不同，可針對樹脂聚合程度對拉伸過程中變形區域之差異加以探討。於結果討論中提及，環氧樹脂與硬化劑比例為 3 比 1 時，環氧樹脂會發生自聚反應，建議可透過 FTIR 等儀器分析加以驗證推測。

作品海報

「環」環相扣 「環」氣樹脂剪切強度探討



摘要

本研究旨在研究環氧樹脂AB膠熱固化反應後形成的網狀交聯結構，結合其黏著用途，探討不同A膠與B膠的配比與不同固化環境是否會影響剪切強度。更結合不同儀器測量膠水性質，希望達到佐證的效果。在80°C時增加固化時間，各比例皆無明顯變化，而在改變溫度到100°C及以上，3:1的配比因環氧樹脂過多產生自聚反應使機械咬合更佳。後續的實驗得知膠水對不同材質的剪切強度與其表面能有關，且在膠水中加入橡膠微粒後，能提高分子可承受的最大拉力。

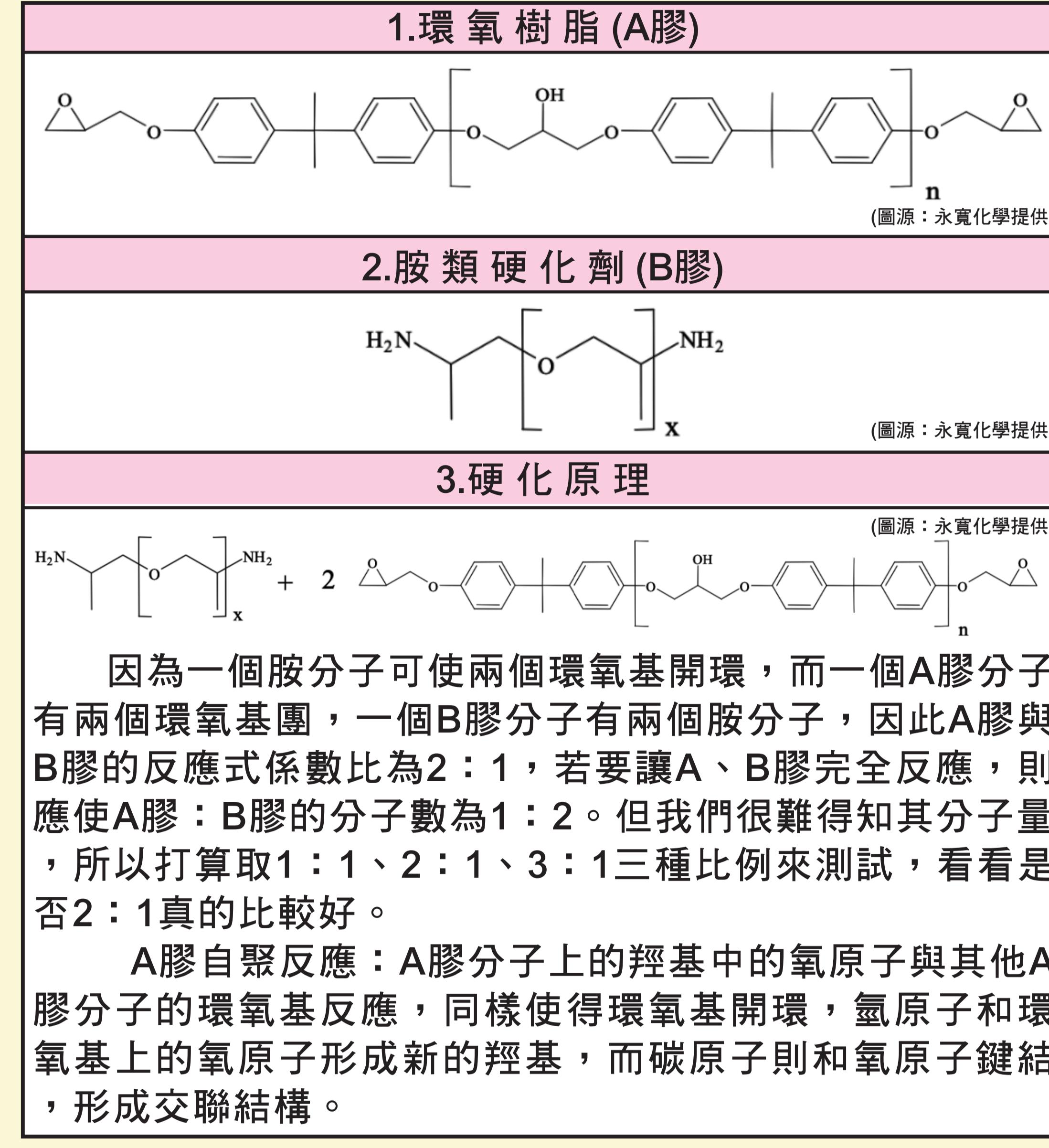
壹、前言

一、研究動機：

指導老師曾帶我們去鄰近的化學工廠參訪，並在那裡用環氧樹脂製作模具，上網查資料發現熱固性樹脂AB膠還在結構黏著和複合材料方面有著廣泛應用。過往研究多僅提及調整比例的可能影響，而缺乏具體的量化數據。因此，我們希望通過調整A膠與B膠的比例並進行量化測試，獲得具體數據並找出較佳的使用條件。

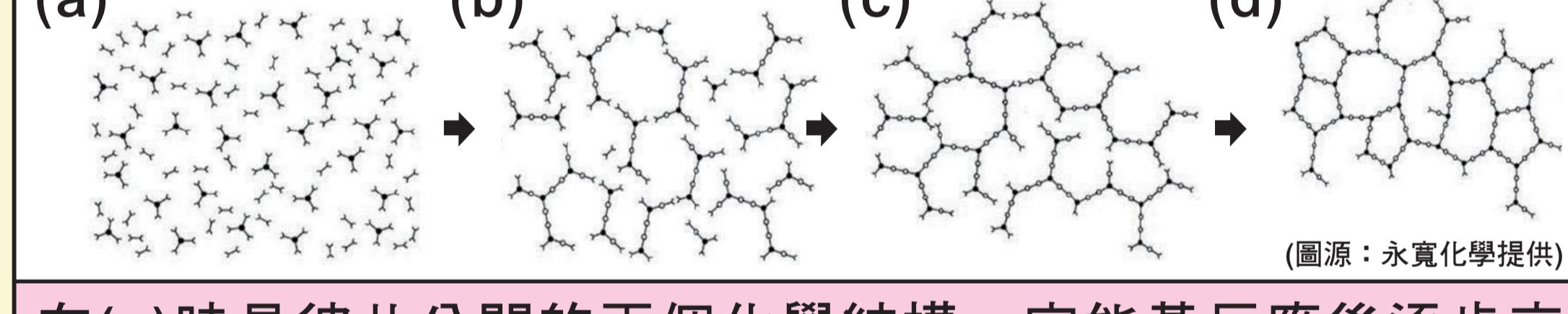
二、實驗原理：

(一) 環氧樹脂及胺類硬化劑的結構和原理



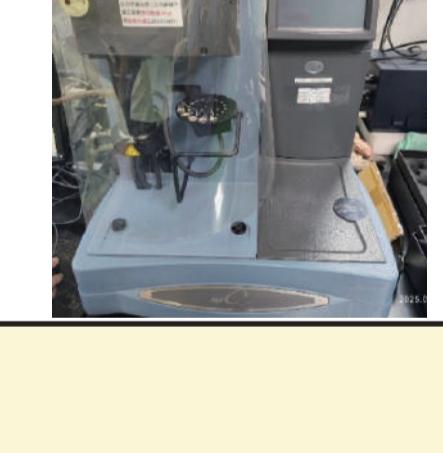
(三) 示意圖

1. 逐步反應熱固性模型的示意圖：

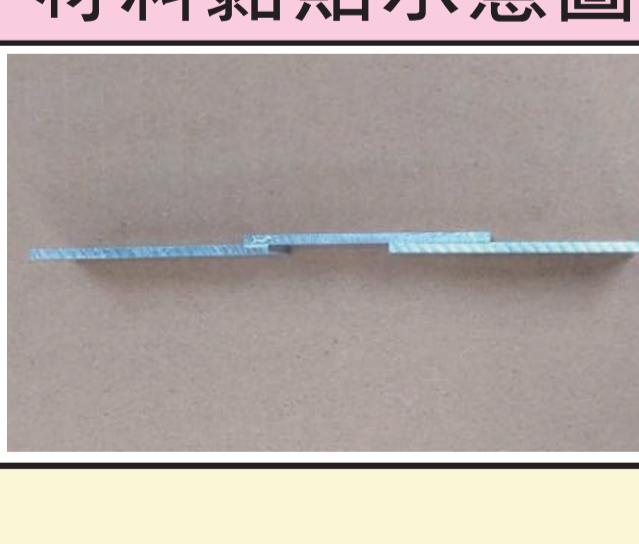


在(a)時是彼此分開的兩個化學結構，官能基反應後逐步交聯，最終形成緻密的網狀結構(d)，硬化後硬化物具有良好的硬度，耐化性及強度

貳、研究設備與器材

電腦	DSC試片	攪拌棒	燕尾夾	酒精	A膠與B膠	拉力機與電腦	差示掃描量熱儀(DSC)
紙盒	UV膠	電子秤	奇異筆	杯子			
鋁片	壓克力片	橡膠微粒					
							
銅片	珍珠粉	紫外光燈	熱循環烘箱	熱重分析儀(TGA)	傅立葉轉換紅外線光譜儀		
							

實驗過程照片

鋁片畫線示意圖	材料黏貼示意圖	塗uv膠	未固化的豆子	材料黏貼展示	豆子黏貼展示
					

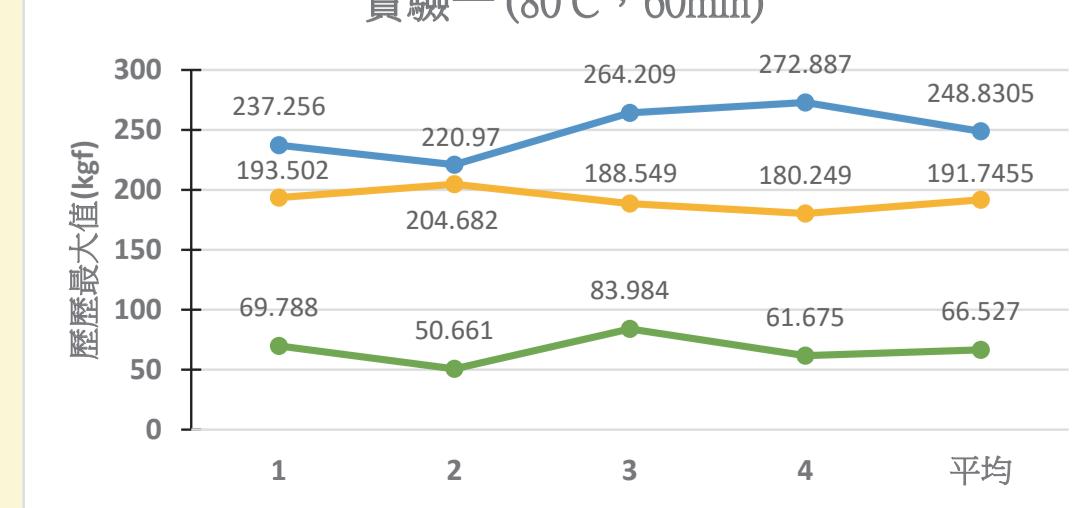
(圖源：皆為作者拍攝)

參、實驗數據及實驗結果

一、【實驗一】：研究不同固化時間下，不同比例環氧樹脂AB膠的剪切強度 (圖源：作者製作)

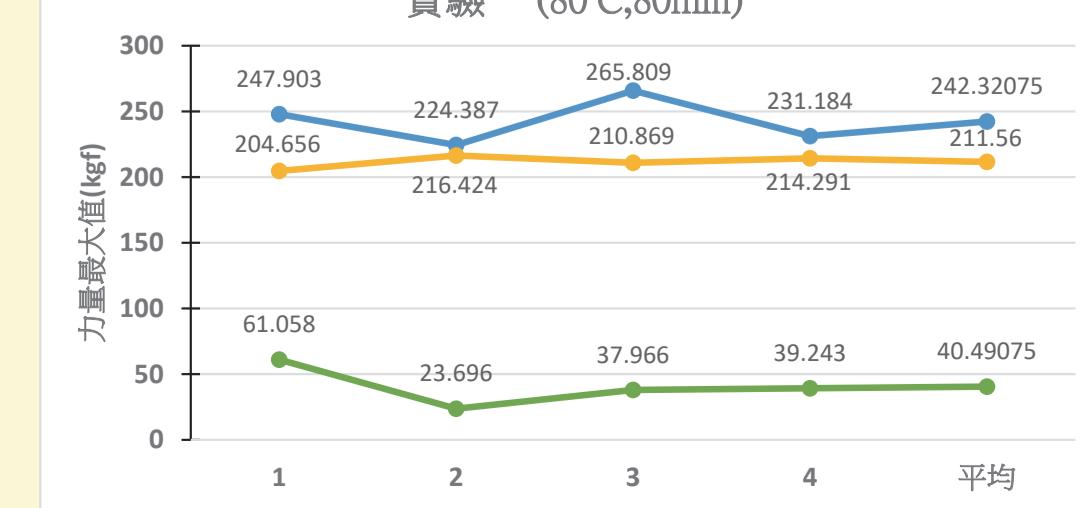
(一) 固化時間60分鐘

1. 以拉力機拉伸試片得到力量最大值折線圖



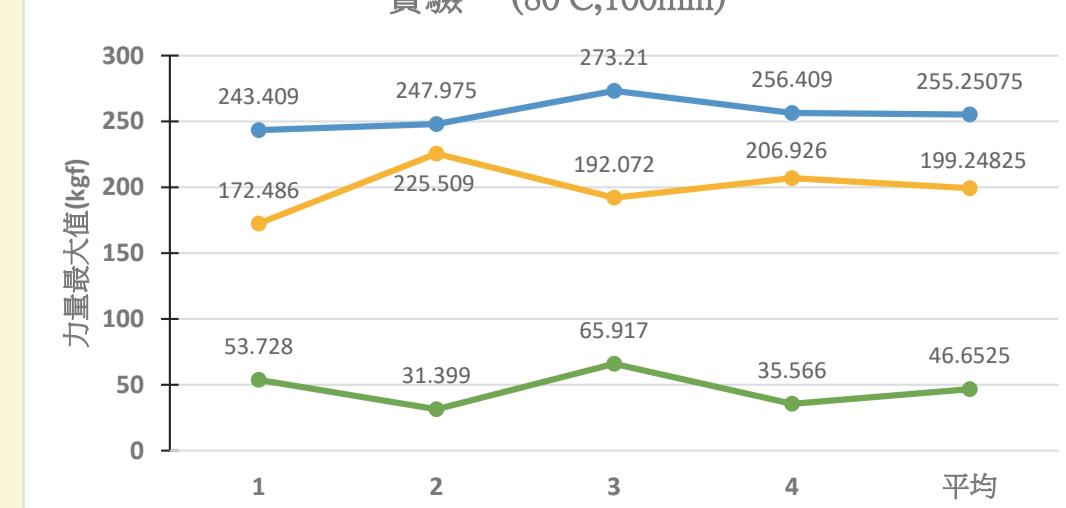
(二) 固化時間80分鐘

1. 以拉力機拉伸試片得到力量最大值折線圖



(三) 固化時間100分鐘

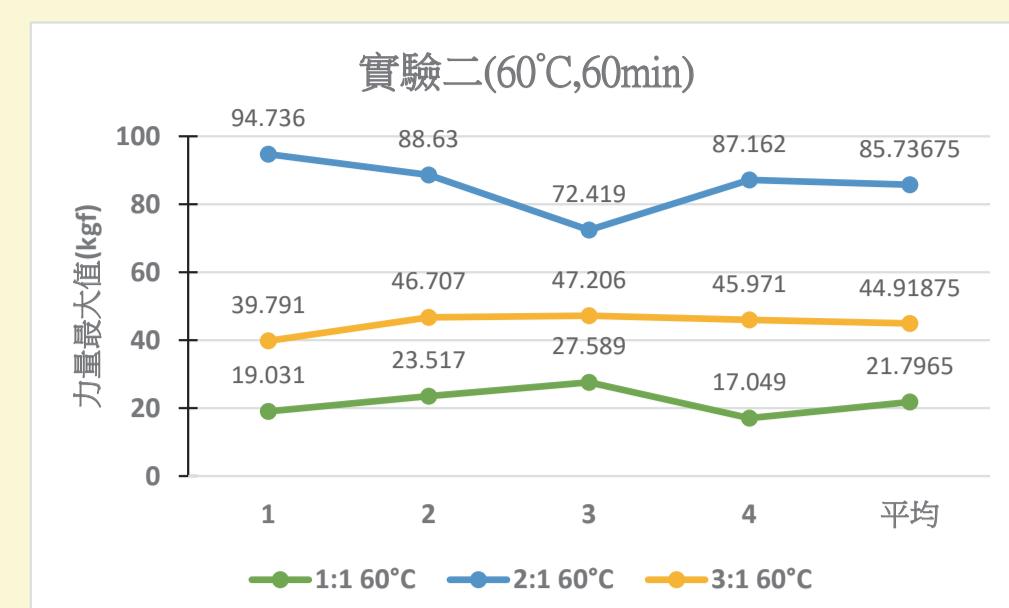
1. 以拉力機拉伸試片得到力量最大值折線圖



二、【實驗二】：研究不同固化溫度下，不同比例環氧樹脂AB膠的剪切強度 (圖源：作者製作)

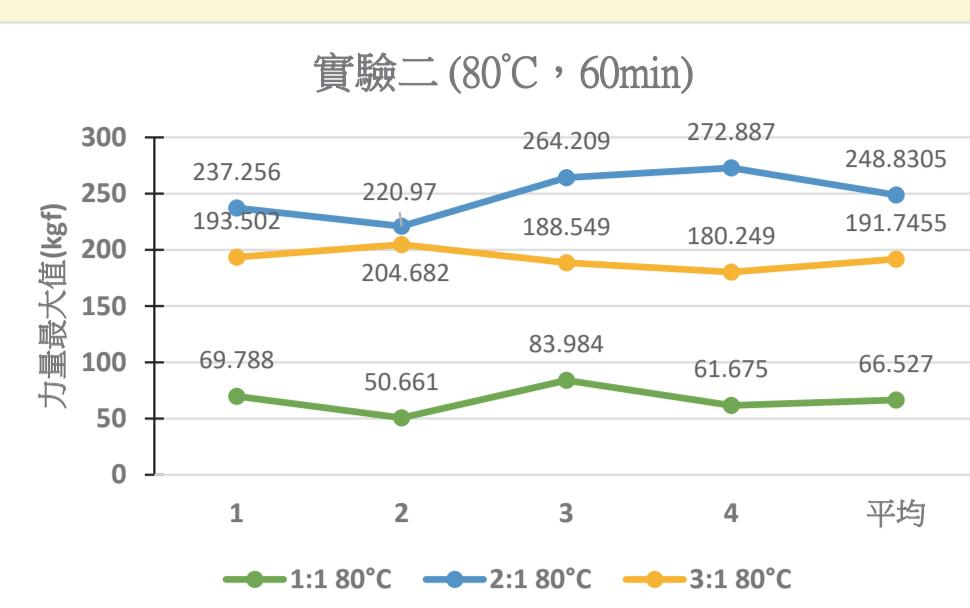
(一) 固化溫度60°C

1.以拉力機拉伸試片得到力量
最大值折線圖



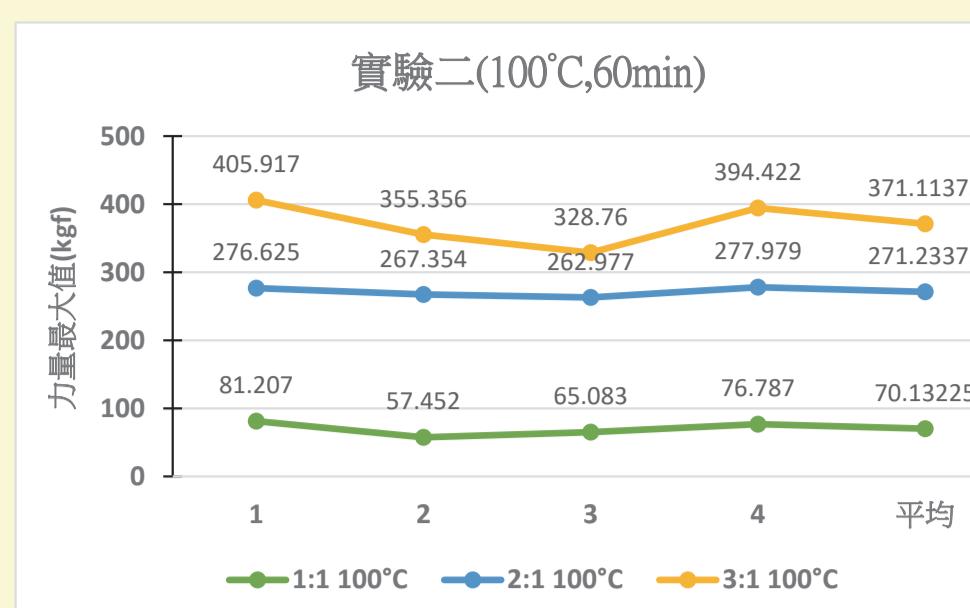
(二) 固化溫度80°C

1.以拉力機拉伸試片得到力量
最大值折線圖



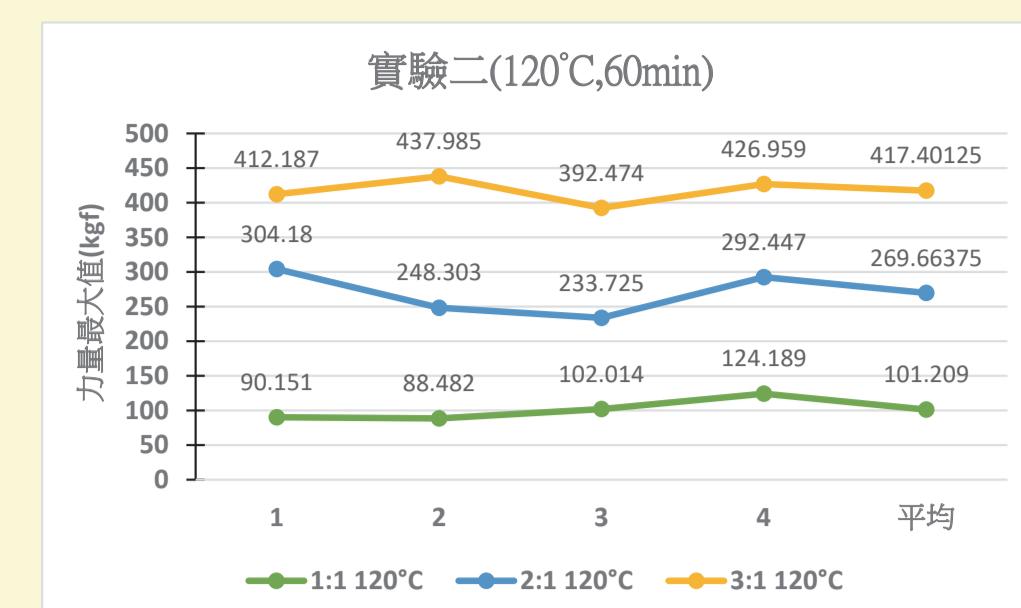
(三) 固化溫度100°C

1.以拉力機拉伸試片得到力量
最大值折線圖



(四) 固化溫度120°C

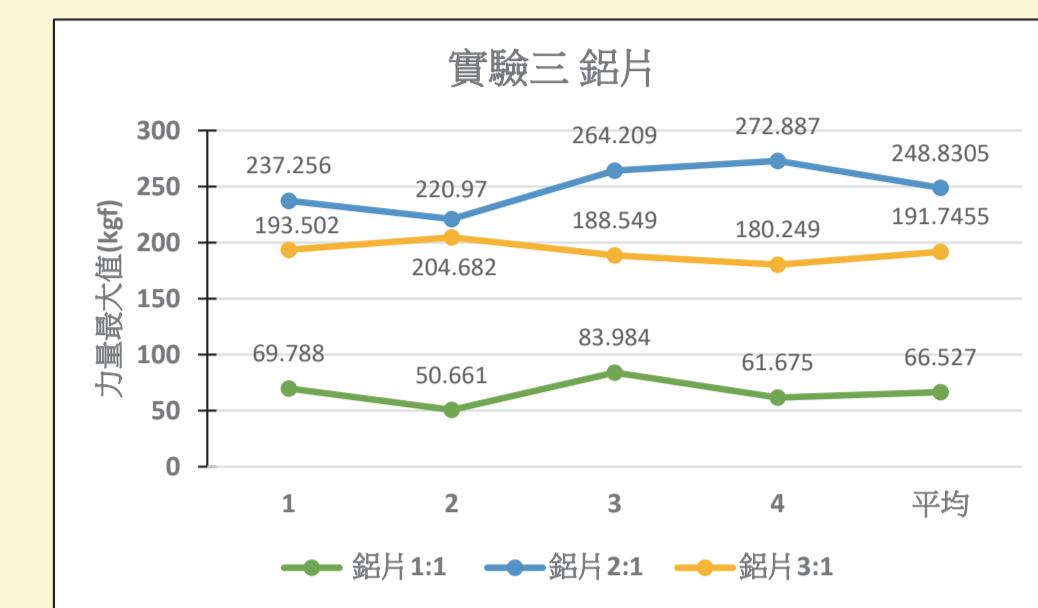
1.以拉力機拉伸試片得到力量
最大值折線圖



三、【實驗三】：研究不同黏貼材質下，不同比例環氧樹脂AB膠的剪切強度 (圖源：作者製作)

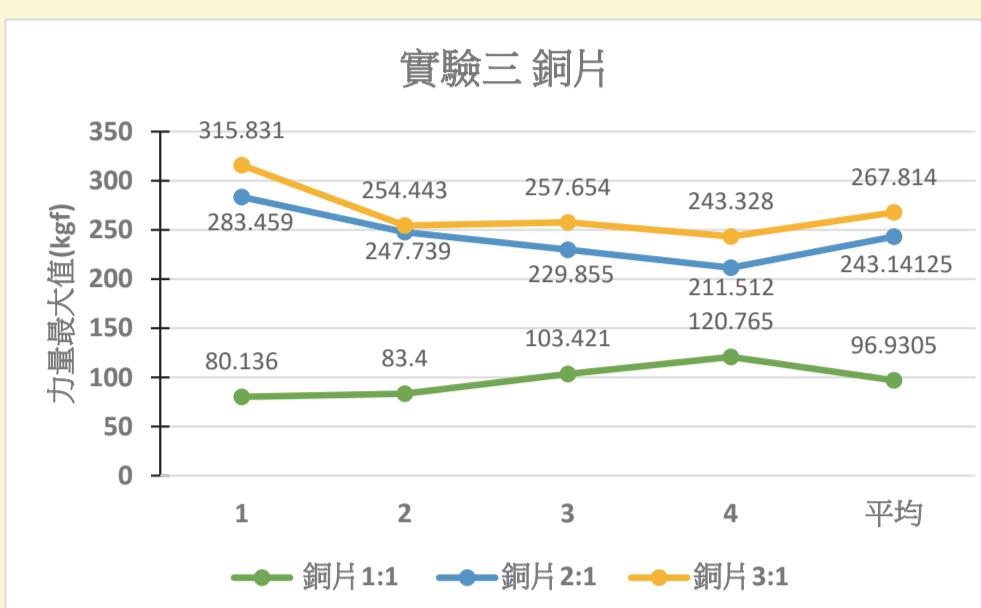
(一) 鋁片

1.以拉力機拉伸試片得到力量最大值折線圖



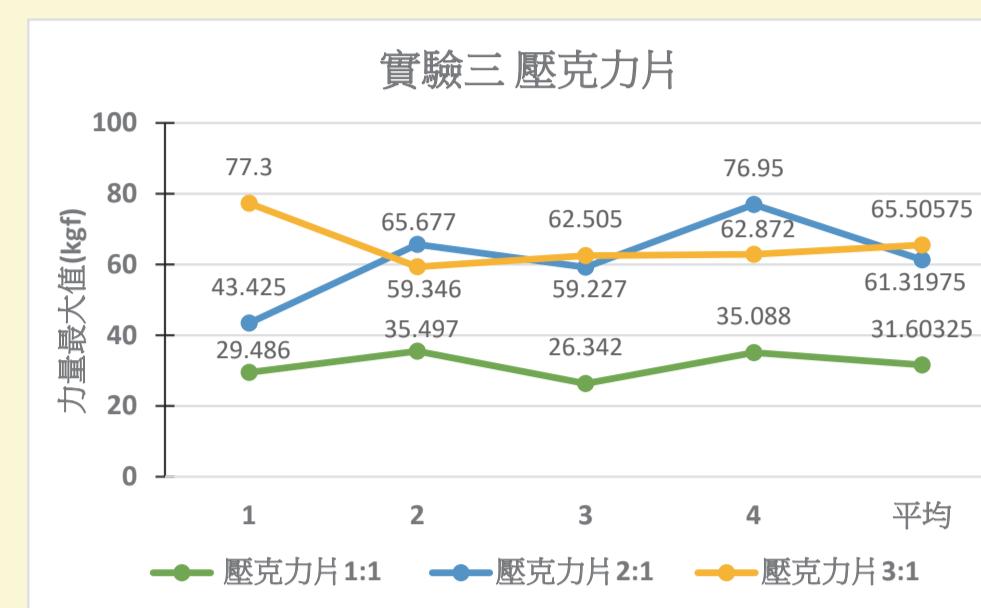
(二) 銅片

1.以拉力機拉伸試片得到力量最大值折線圖



(三) 壓克力片

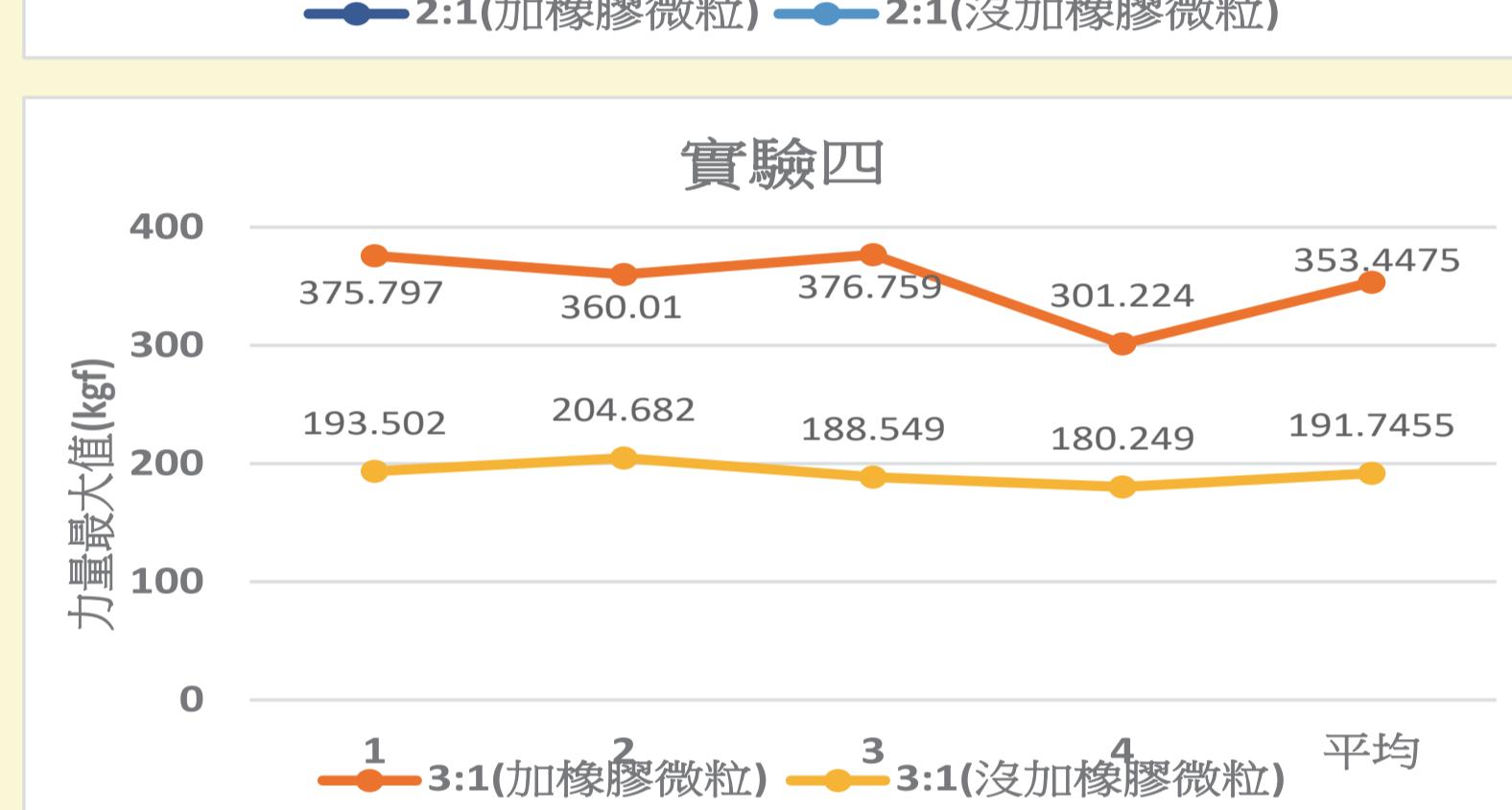
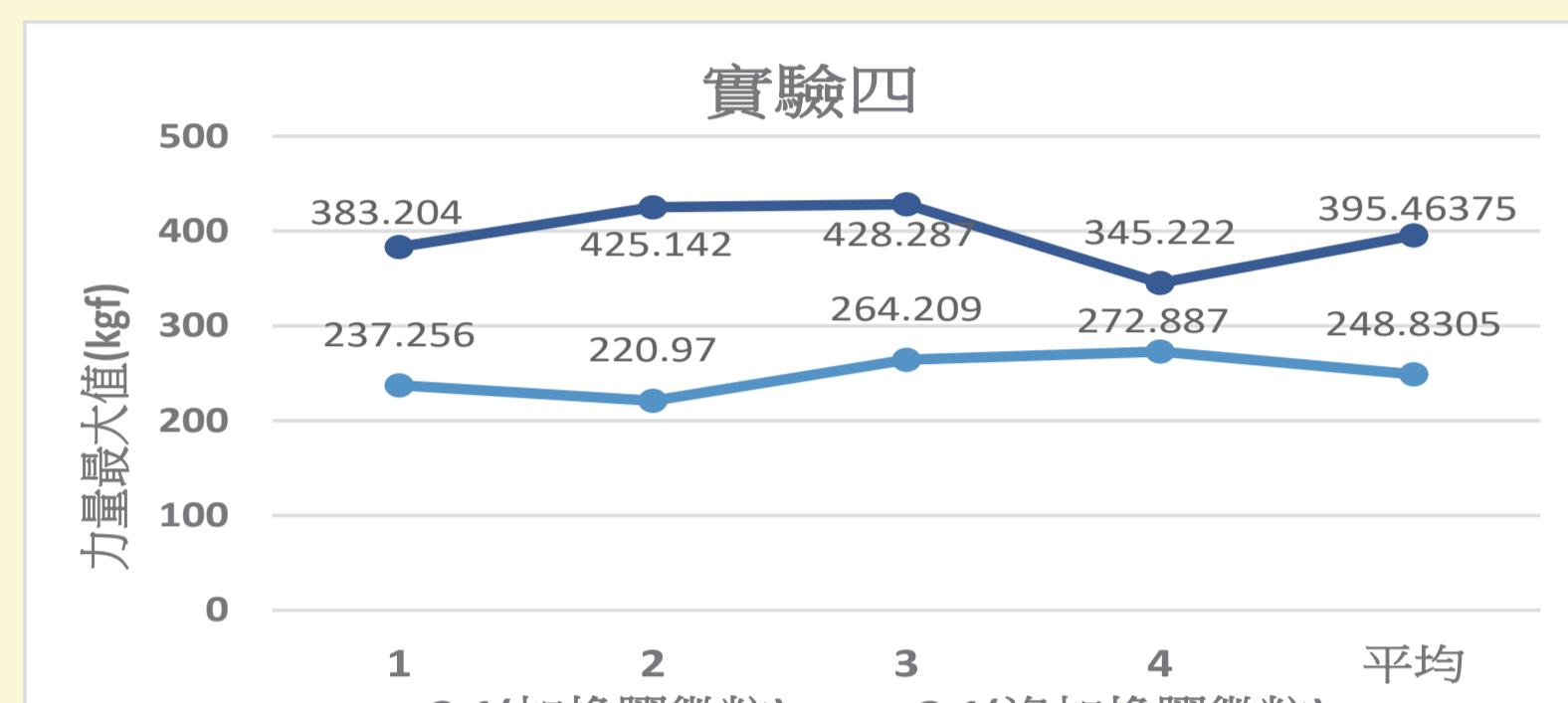
1.以拉力機拉伸試片得到力量最大值折線圖



四、【實驗四】：研究額外添加物對環氧樹脂AB膠的剪切強度影響 (圖源：作者製作)

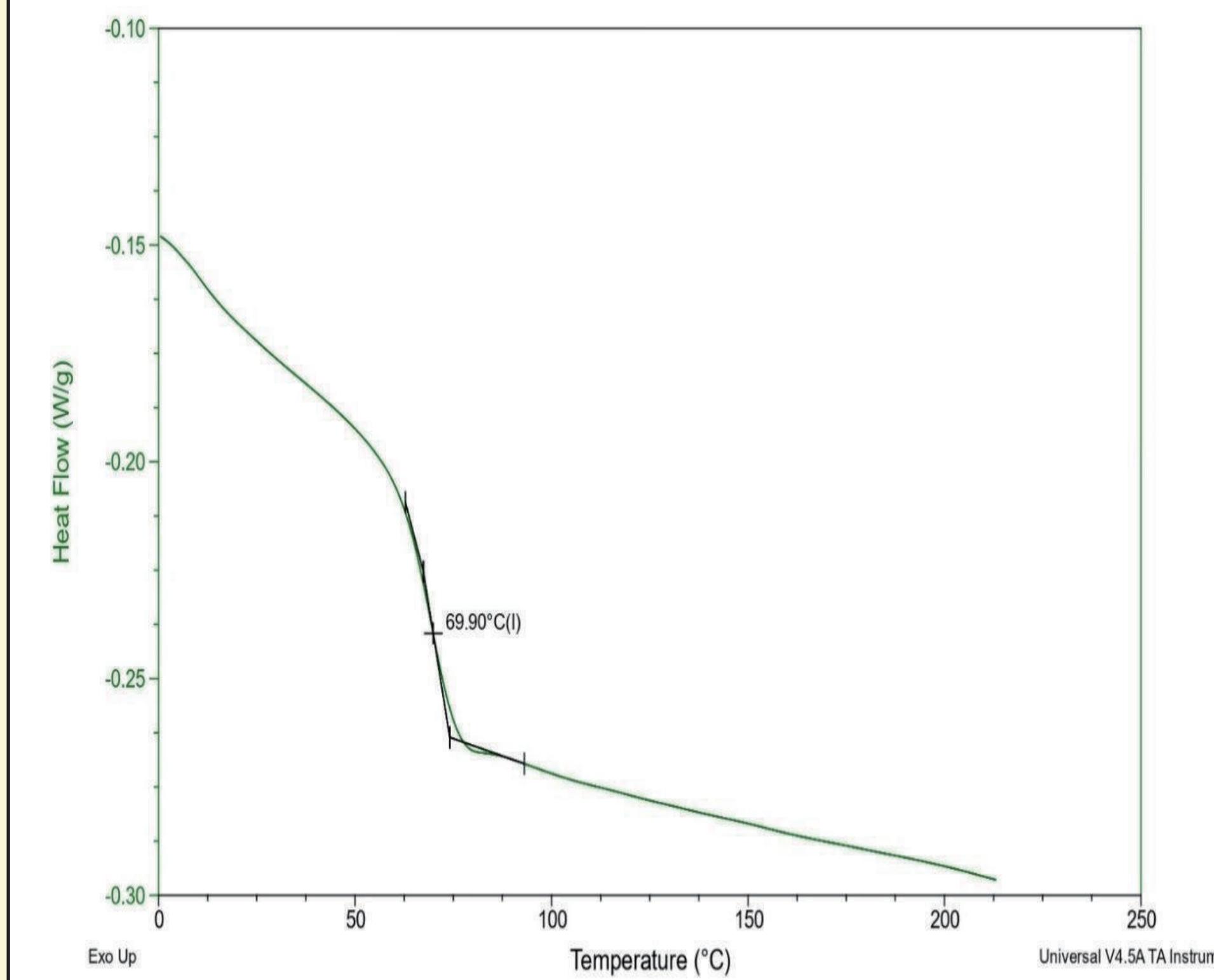
(一) 添加橡膠微粒

1.以拉力機拉伸試片得到力量最大值折線圖



五、【實驗五】：利用DSC測試各實驗之試片的玻璃轉化溫度 (圖源：作者製作)

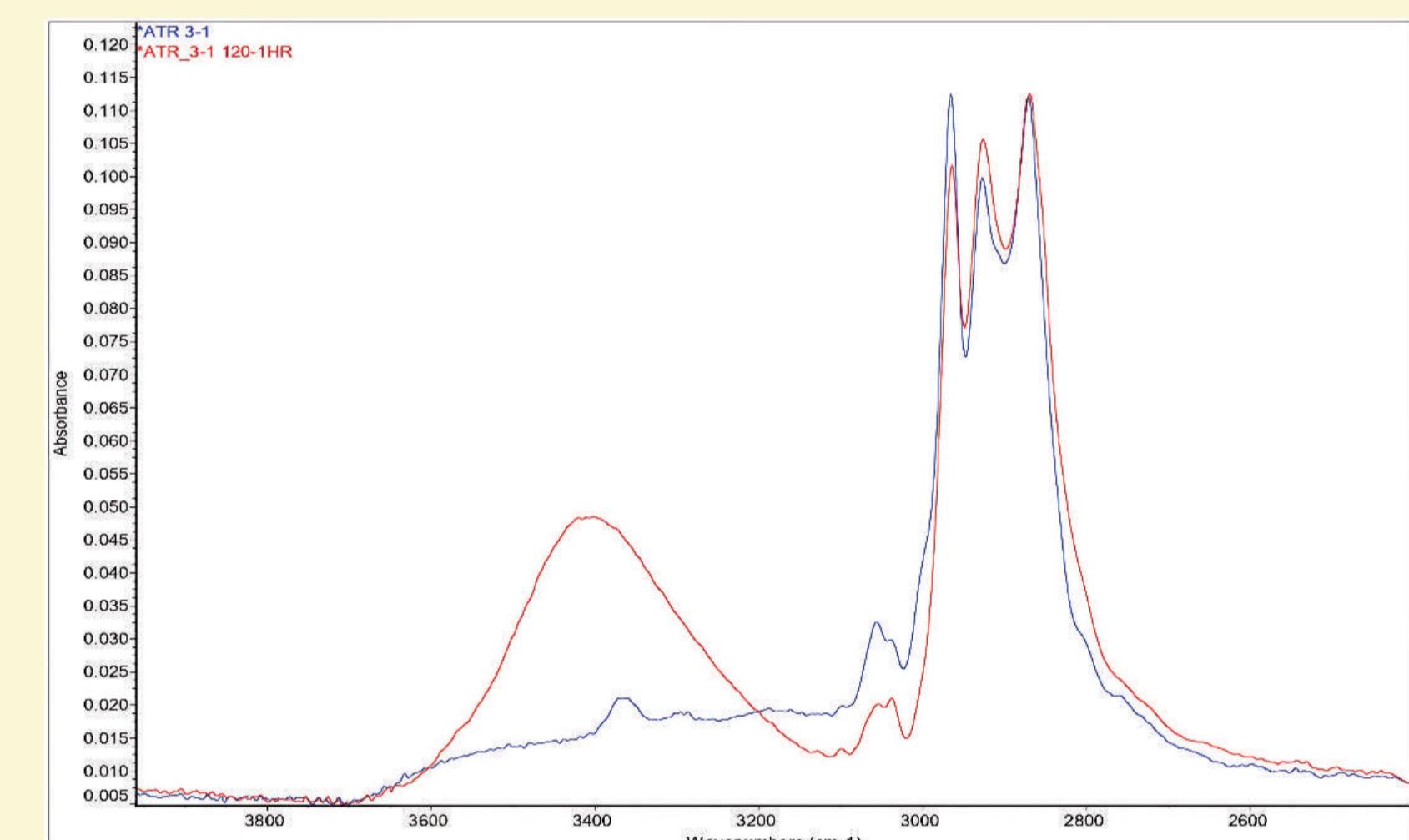
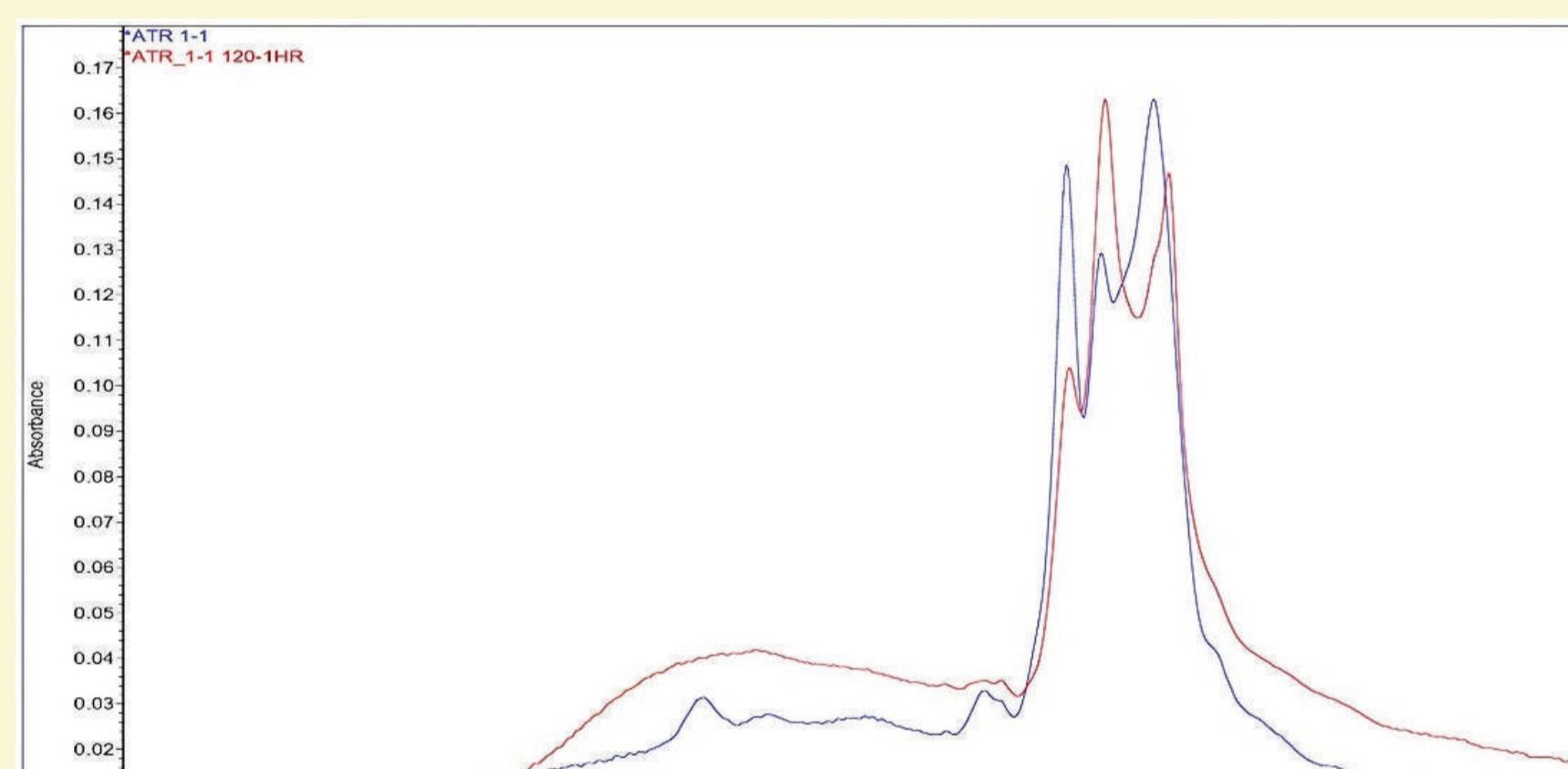
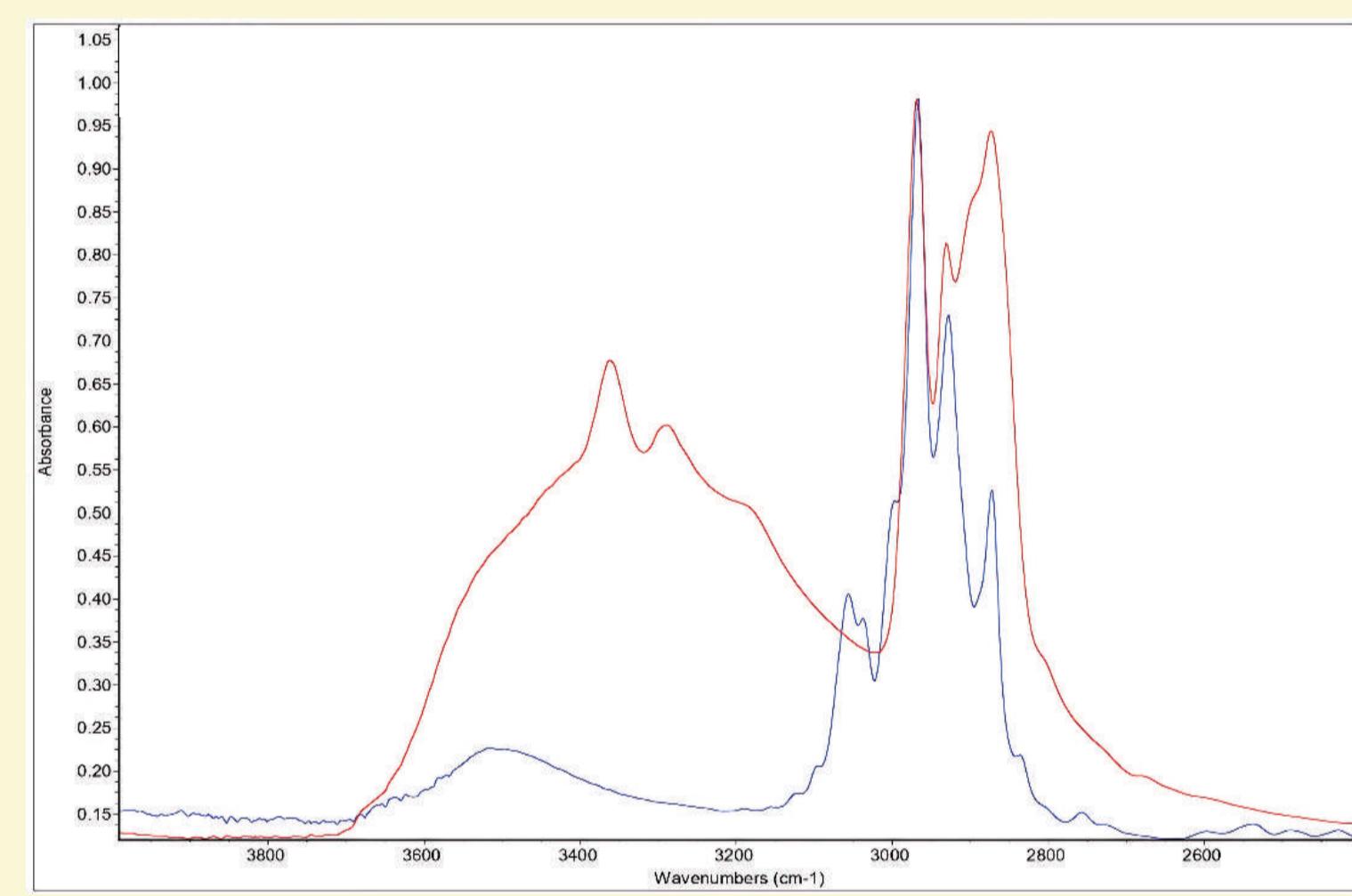
(一) 用DSC掃描後得到熱流量對時間的TG曲線圖 (以A : B = 2 : 1/80°C, 60min為例)



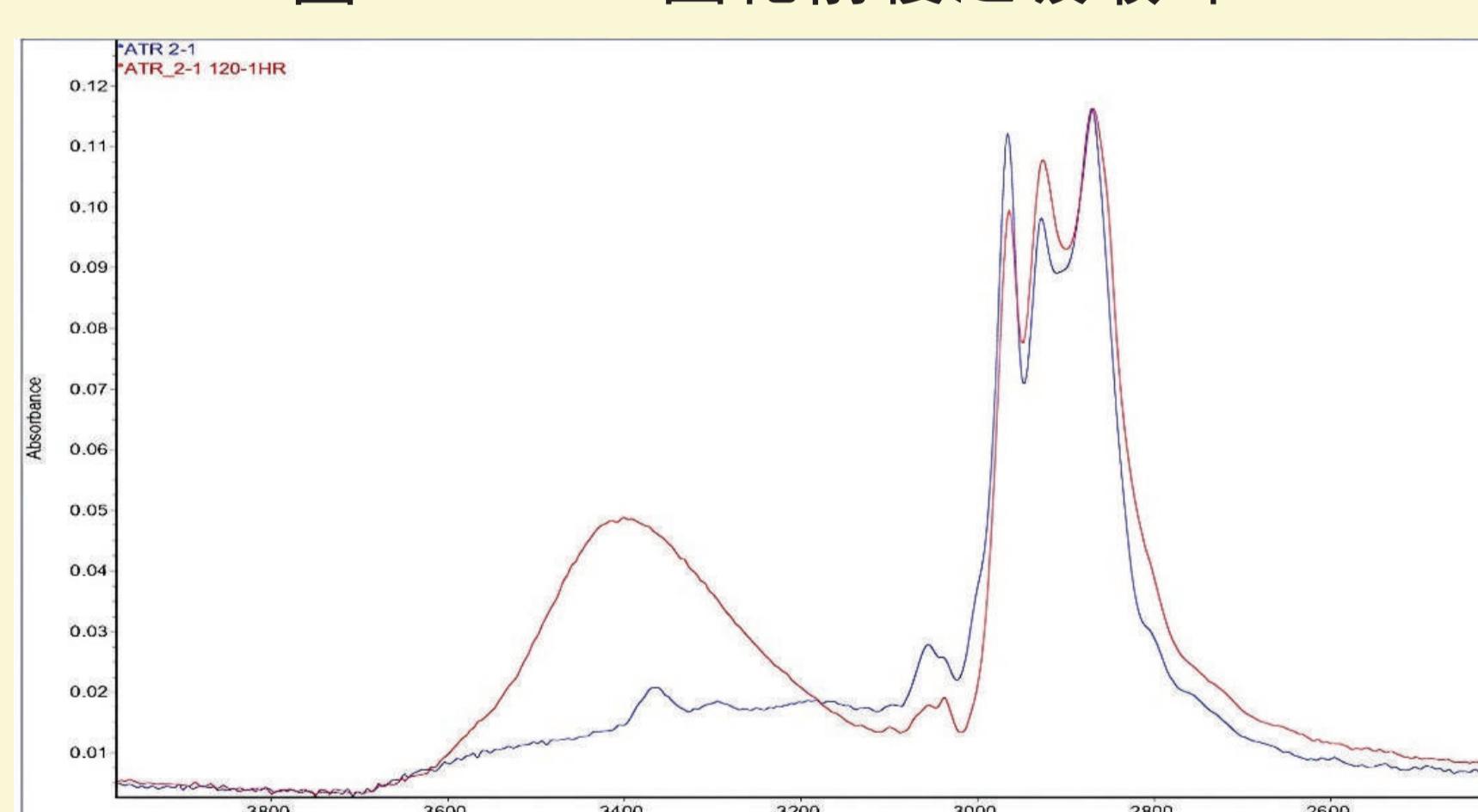
(二) 各實驗之試片測得的 玻璃轉化溫度

2:1/80°C,60min	3:1/80°C,60min
69.90°C	49.26°C
2:1/80°C,80min	3:1/80°C,80min
70.96°C	48.70°C
2:1/80°C,100min	3:1/80°C,100min
70.81°C	52.99°C
2:1/100°C,60min	3:1/100°C,60min
71.30°C	52.76°C
2:1/120°C,60min	3:1/120°C,60min
71.50°C	50.76°C

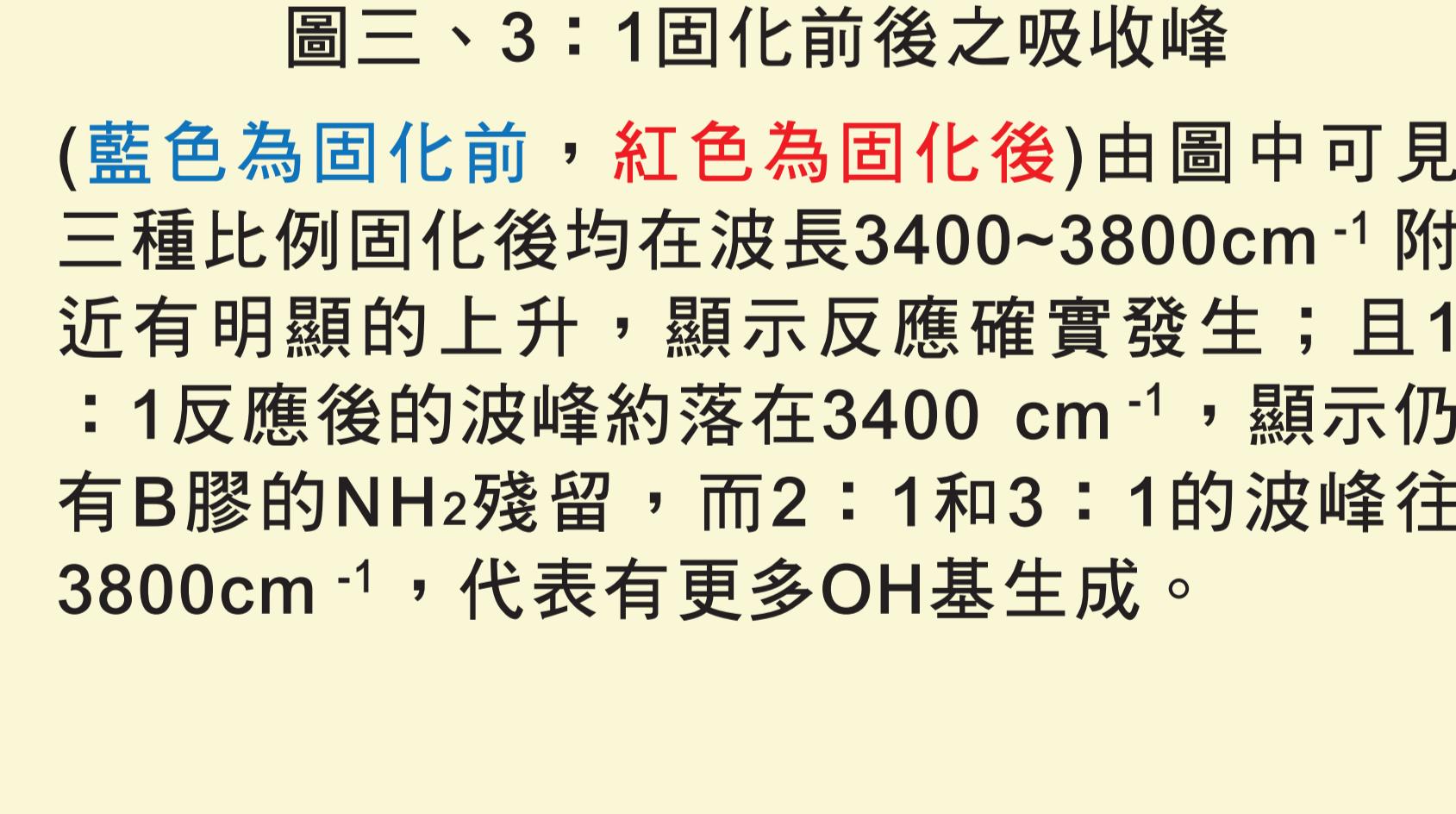
六、用FT-IR測得之吸光度 (圖源：作者製作)



圖一、1:1固化前後之吸收峰



圖二、2:1固化前後之吸收峰

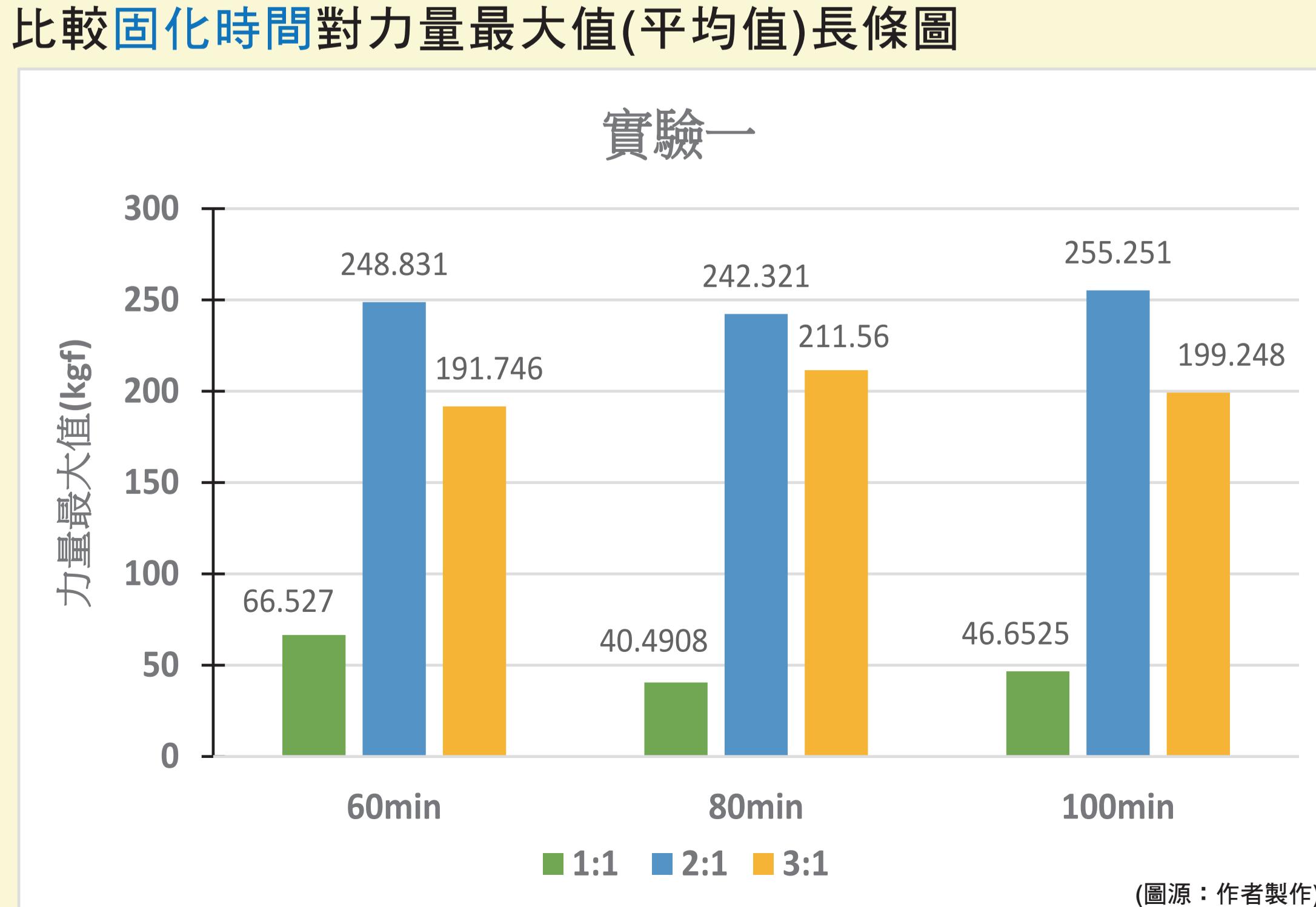


(藍色為固化前，紅色為固化後)由圖中可見三種比例固化後均在波長3400~3800cm⁻¹附近有明顯的上升，顯示反應確實發生；且1:1反應後的波峰約落在3400 cm⁻¹，顯示仍有B膠的NH₂殘留，而2:1和3:1的波峰往3800cm⁻¹，代表有更多OH基生成。

肆、實驗結果討論

一、【實驗一】：研究不同固化時間下，不同比例環氧樹脂AB膠的剪切強度

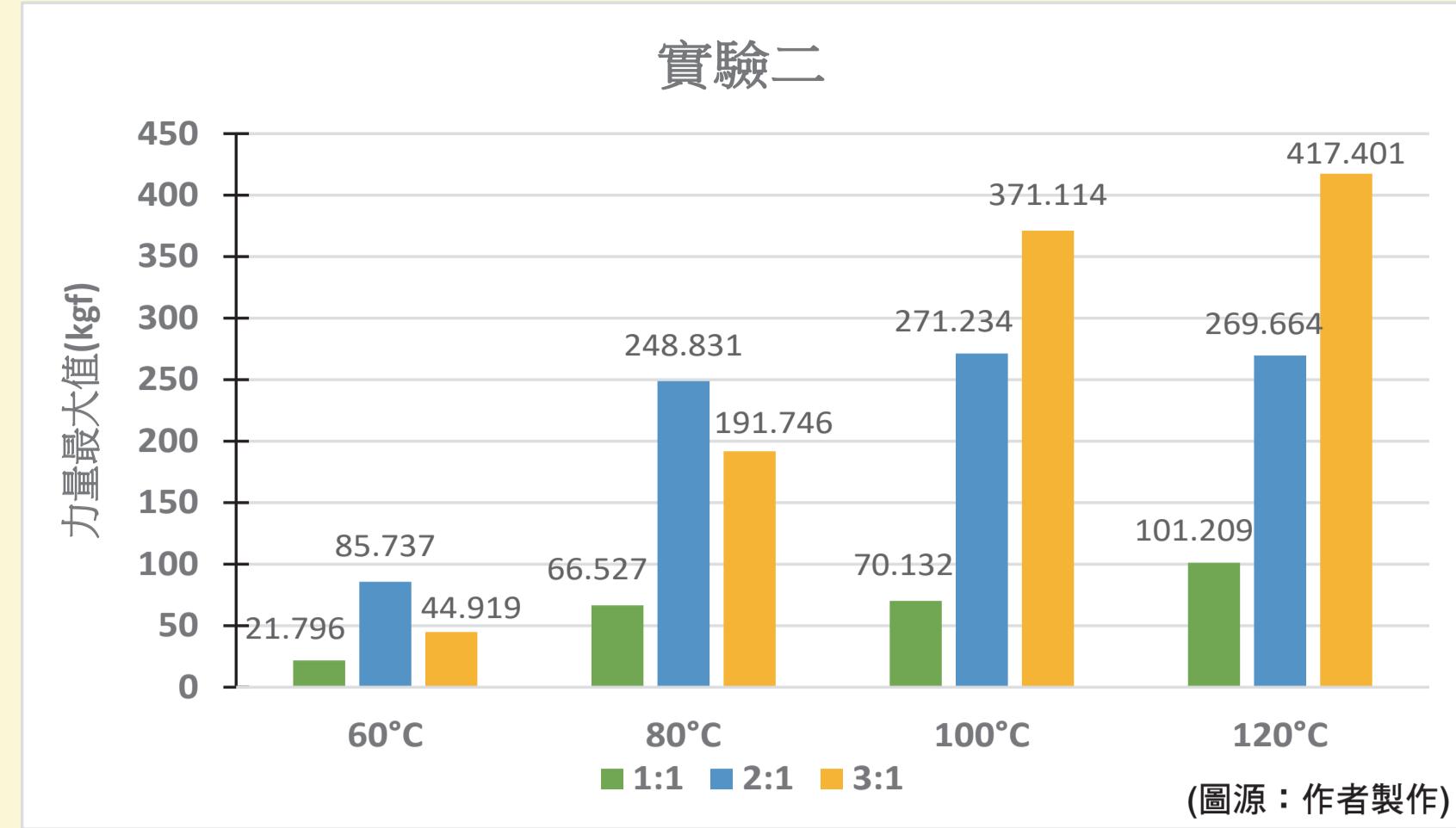
(一) 比較固化時間對力量最大值(平均值)長條圖



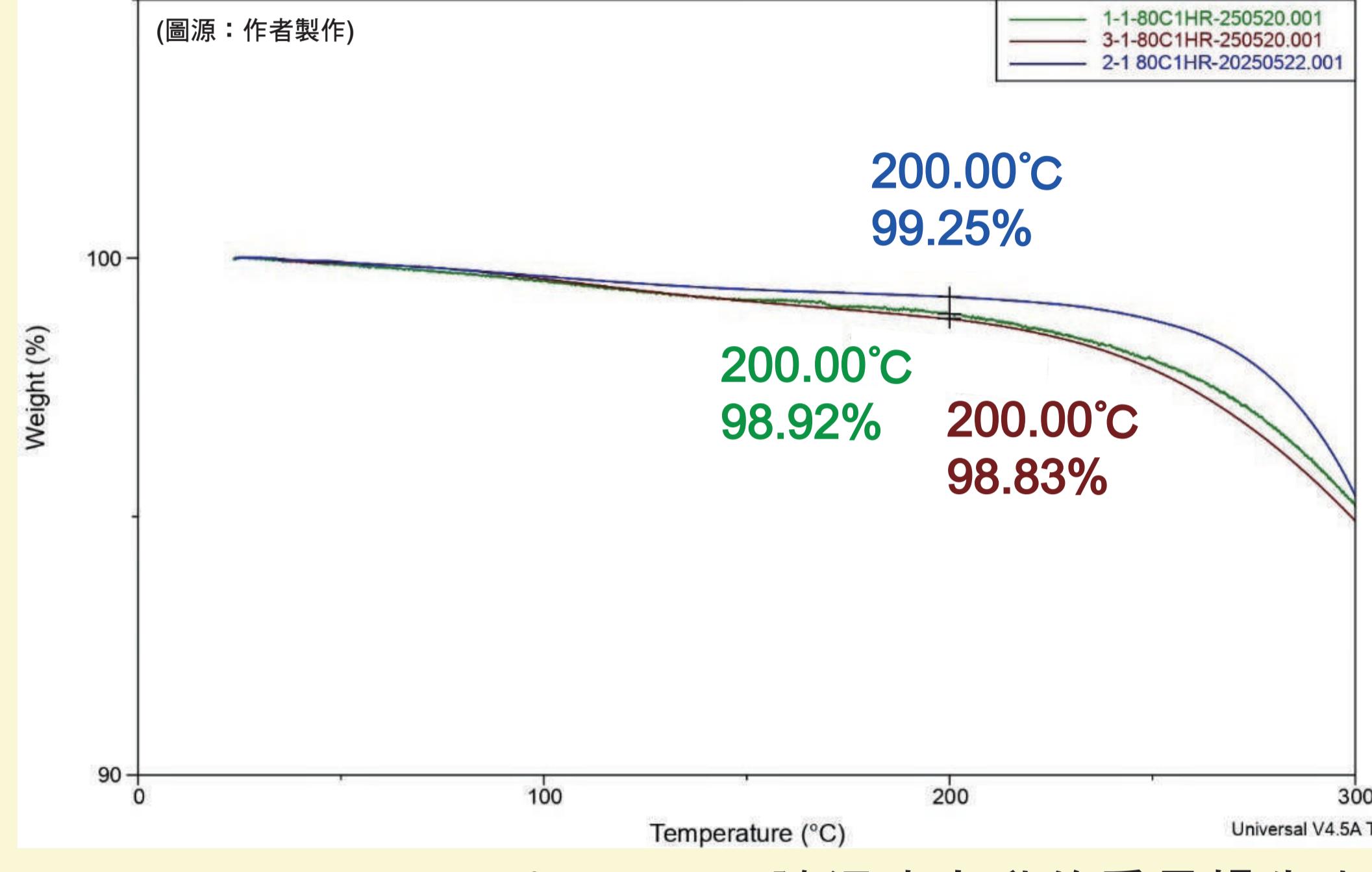
(二) 在80°C下，隨著固化時間提升，3:1與2:1的數值均無明顯變化，推測是A膠分子有更長的碳鏈，因此受高溫影響較小，短時間內無明顯反應。至於1:1隨著固化時間提升，拉力數值下降，可能因為B膠分子過量(從1:1的FT-IR 圖可印證)，在高溫下易發生降解，影響與鋁片的機械咬合作用。從上方的FT-IR 圖可發現 1:1 的波較平緩而 2:1 和 3:1 較尖銳，一般而言波峰越尖銳代表分子排列越整齊，反應較完整，因此可推論2:1 和 3:1 排列更整齊、反應更完全，可測得更大的拉力數值。

二、【實驗二】：研究不同固化溫度下，不同比例環氧樹脂AB膠的剪切強度

(一) 比較固化溫度對力量最大值(平均值)長條圖



而3:1的配比在100°C的數值突然增加，且120°C的數值也上升更多，推測此時的溫度已能使過量的A膠分子開始進行前文提到的自聚反應，增加分子之間的穩定度，進而使機械咬合力更強，此現象也可反映2:1在100°C的數值中略微提升的現象。

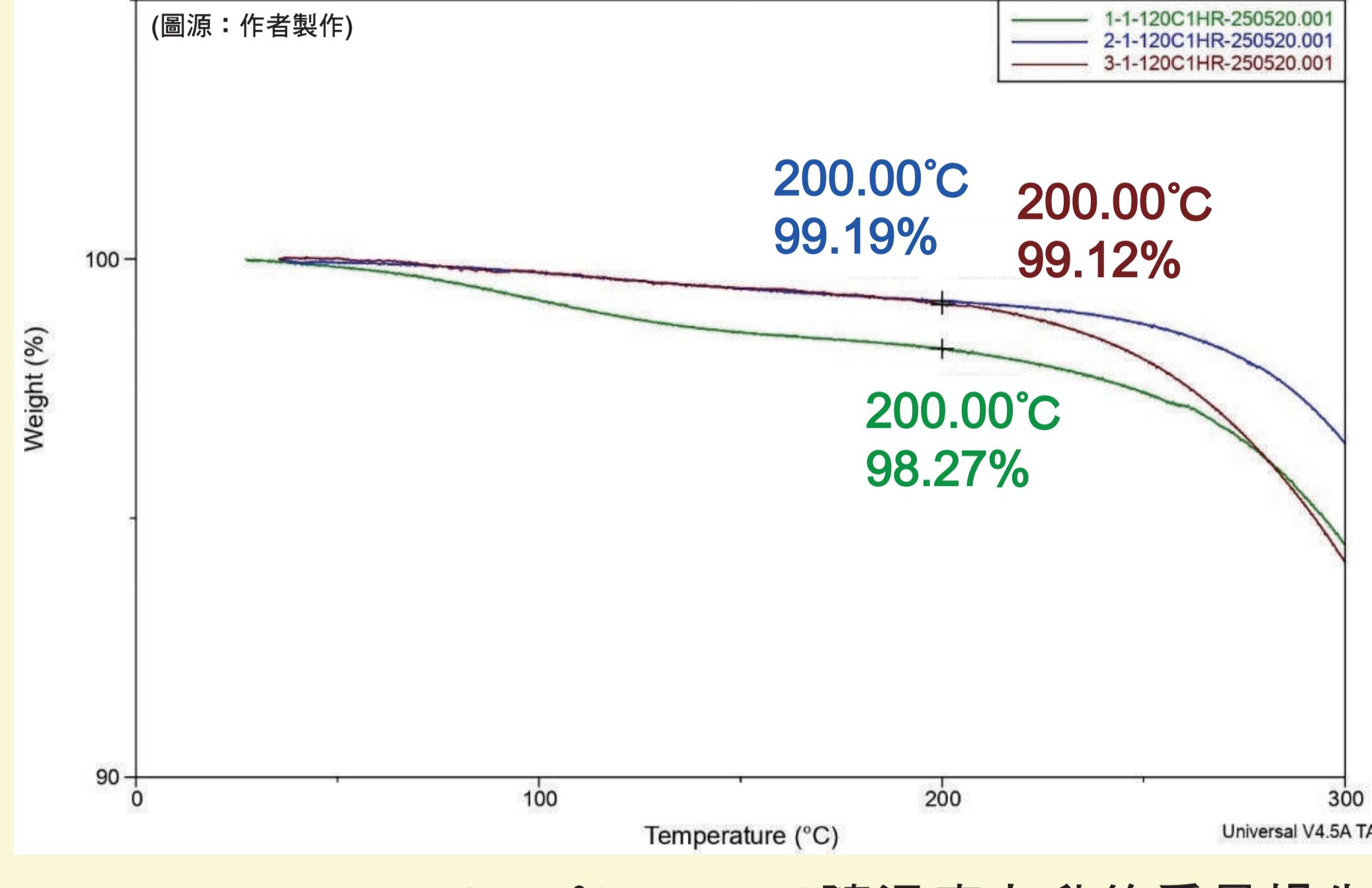


1:1、2:1、3:1(80°C,60min)隨溫度上升的重量損失率
(1:1為綠色、2:1為藍色、3:1為紅棕色)

(二) 固化時間相同，在60°C下反應不夠完全，造成三種比例的數值都明顯較低。

而在80°C到100°C，可能因溫度上升使高能量粒子數目增加，且數值上升。但高溫也會導致B膠分子容易降解，故1:1的配比僅略微上升；2:1的配比變化極小，可能因為A膠與B膠的比例已趨穩定。

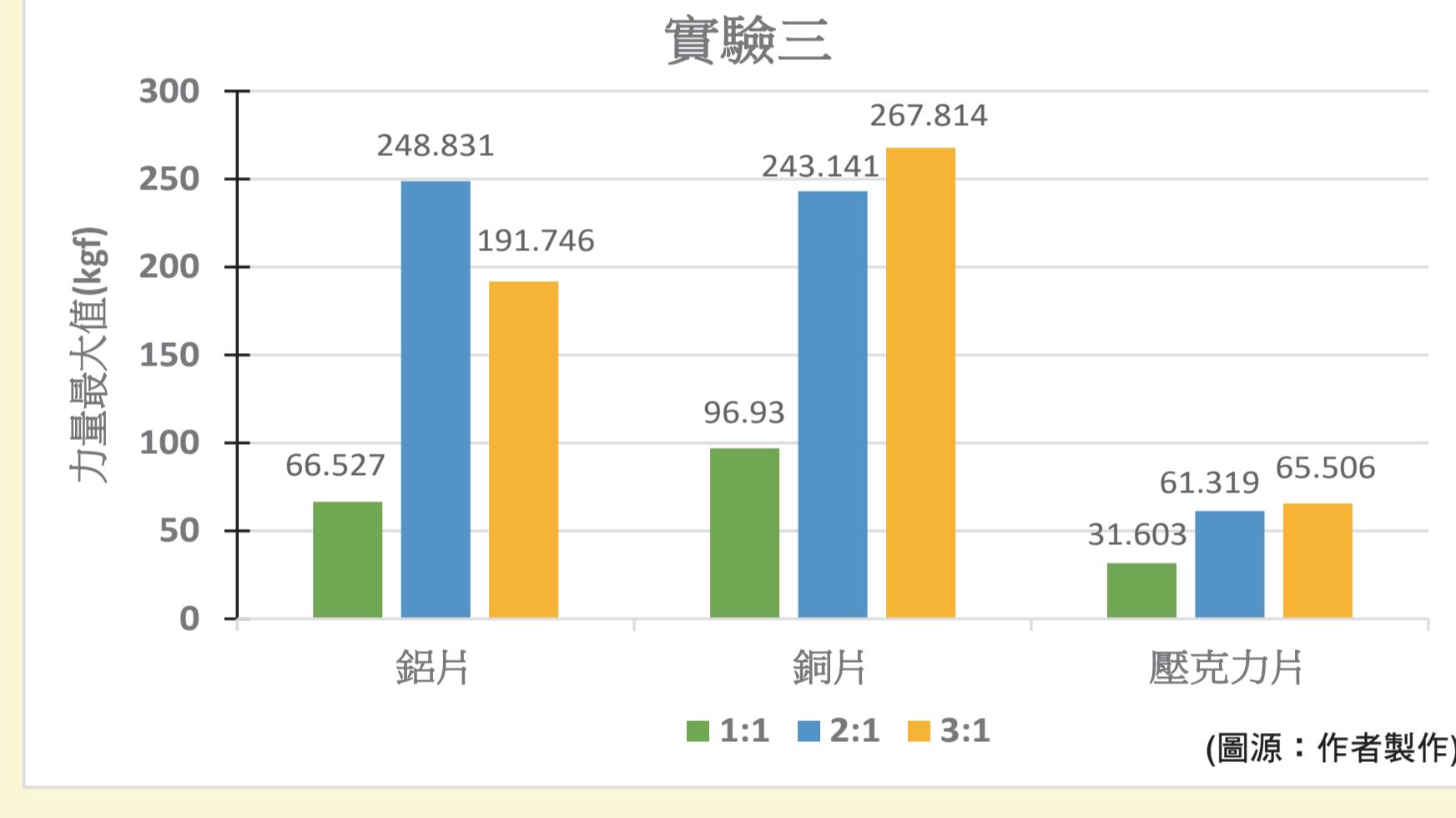
重量損失率的圖中可見，在固化溫度為80°C的情況下，損失率由小到大為2:1<3:1<1:1，120°C時則為2:1<3:1<1:1；而損失越少代表分子越緊密，交聯結構穩定，此結果可印證3:1從80°C到120°C拉力數值的上升。



1:1、2:1、3:1(120°C,60min)隨溫度上升的重量損失率

三、【實驗三】：研究不同黏貼材質下，不同比例環氧樹脂AB膠的剪切強度

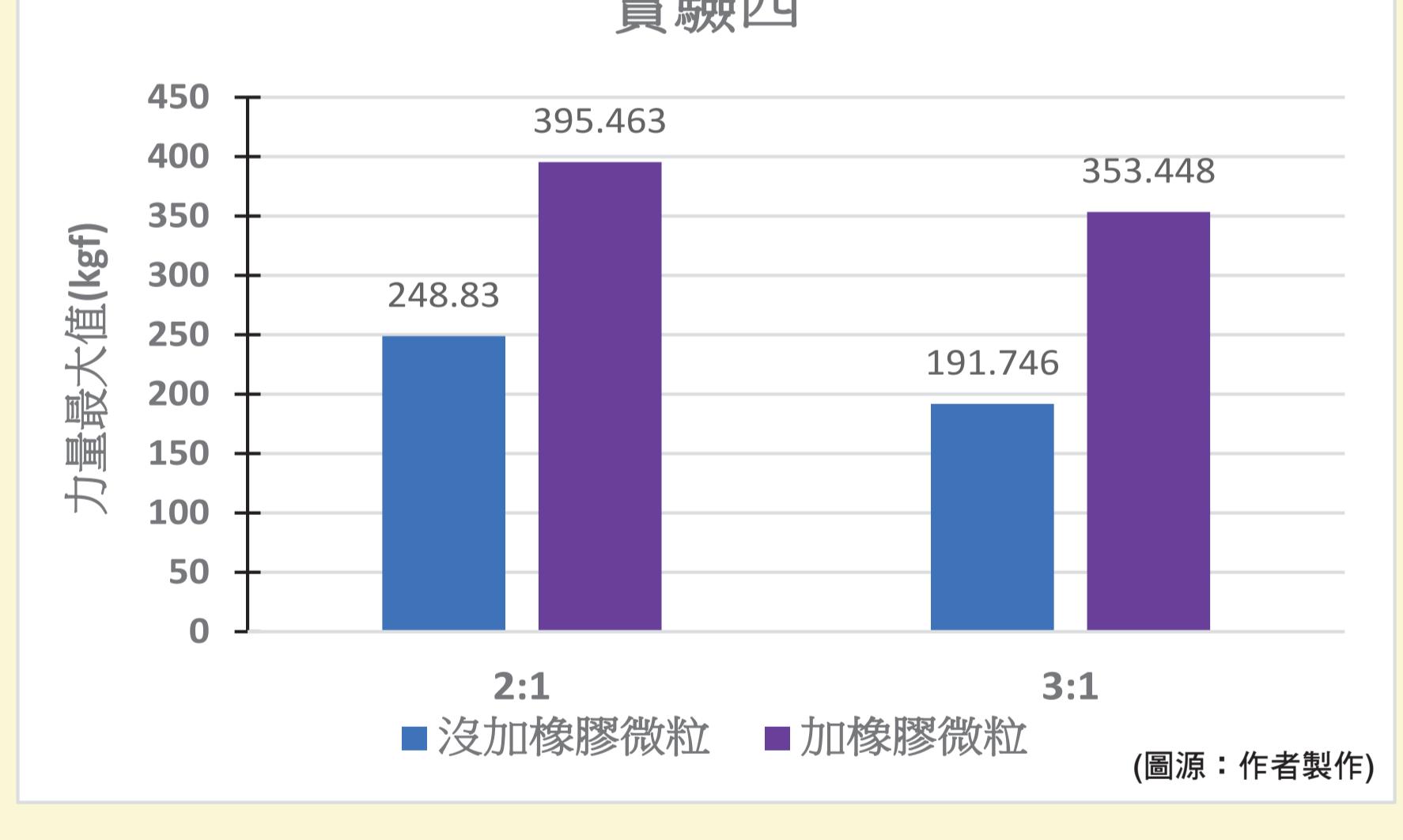
(一) 比較不同接著材料對力量最大值(平均值)長條圖



(二) 上圖中，鋁片與銅片在2:1的配比下，數值均差距不大，但在1:1和3:1的配比中，銅片明顯優於鋁片，可能的原因推測是銅的表面能比鋁高，能讓膠水更好的潤濕表面從而得到更好的剪切強度；而3:1的A膠分子較多，且A膠和B膠相比有較大的接觸面積，因此和材料表面的吸附力較強，所以配比3:1的拉力數值在銅片上大幅增加，而1:1增加不大。另外2:1幾乎沒有變化，推測其因為未固化的A、B膠較少，交聯結構相對穩定，因此較不受影響。而由於壓克力表面能太低，膠水很難完整濕潤表面，難以形成良好的接著面，因此數值在三種配比中均較另兩者低許多。

四、【實驗四】：研究額外添加物對環氧樹脂AB膠的剪切強度影響

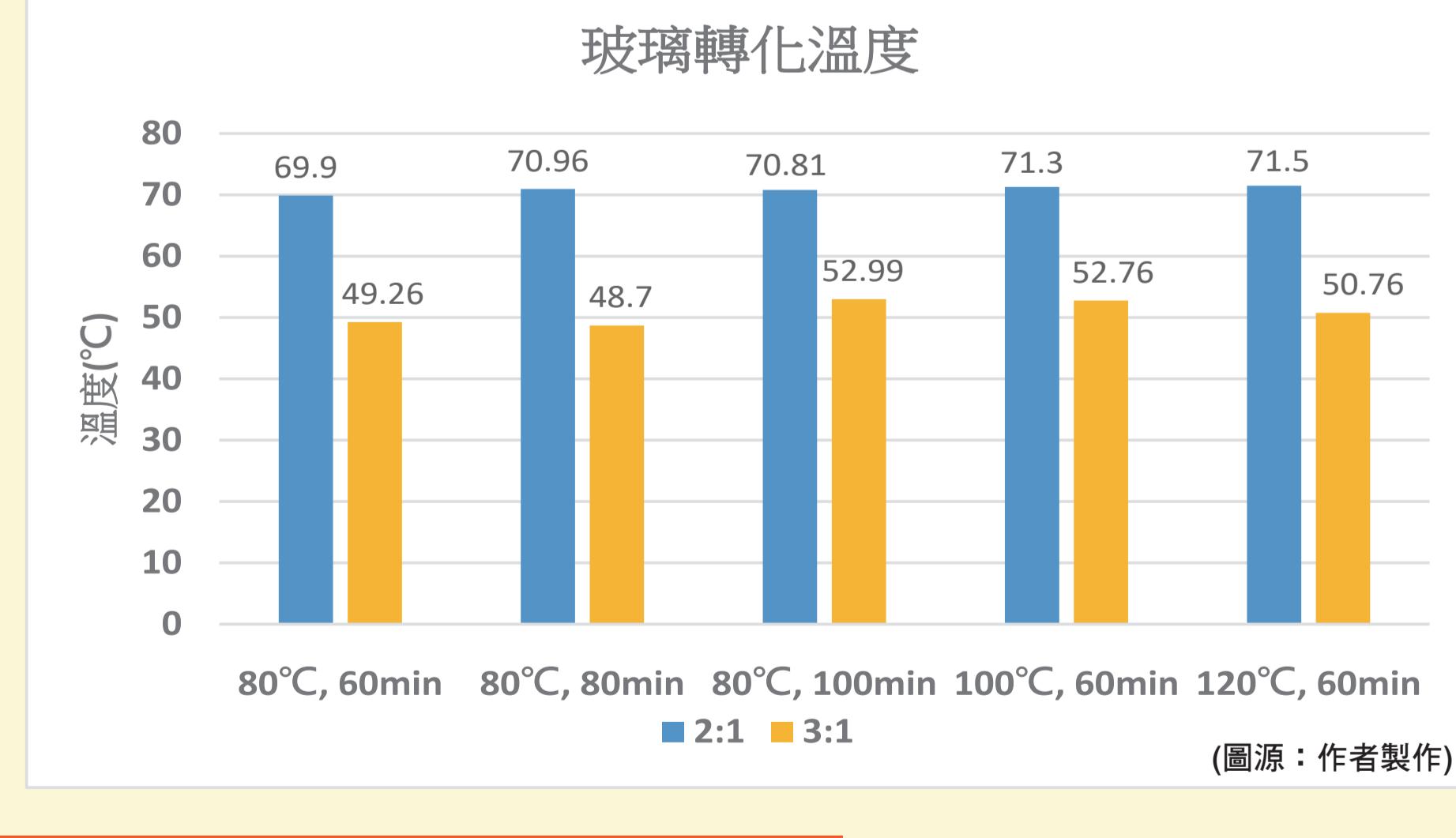
(一) 比較額外添加物對力量最大值(平均值)長條圖



(二) 由上圖可見2:1和3:1在添加橡膠微粒後，數值均有顯著提升，推測因為橡膠微粒有良好的彈性與形變能力，可藉此吸收能量並分散應力；同時，在高度應力下橡膠微粒和環氧樹脂會因為形變率不同而發生脫層形成空隙，並因此消耗能量。這些機制使橡膠微粒放在AB膠的交聯結構中可以整體能承受更大的力量拉伸而不破裂。也因為橡膠微粒不會和膠水作用使反應加快或是密度提升，而是利用本身的特性，我們認為橡膠微粒不能加太多，否而反而會降低數值。

五、【實驗五】：利用 DSC 測試各實驗之試片的玻璃轉化溫度

(一) 比較各條件下的玻璃轉化溫度長條圖



(二) 由圖中可發現，2:1的TG值均大於3:1，推論是2:1的交聯密度較高，造成分子鏈較受限制，因此硬度較高，而3:1交聯密度較低，相對上就較軟、有韌性。以前三組數據(實驗一)來看，2:1的拉力數值均大於3:1，可見在80°C下，2:1的硬度較佳且承受拉力的強度也較好，推斷此時3:1幾乎沒有發生自聚反應；而比較第一組和後兩組(實驗二)的數據，在100°C和120°C下，3:1的TG雖然較低，拉力數值卻遠超2:1，推論在此溫度下3:1應已開始發生自聚反應，產生A膠分子之間的交聯，此種交聯硬度應小於A膠和B膠的交聯，因此TG仍較低，但較多的A膠分子鍵結提供強大的韌性，所以能承受更大的拉力。

伍、結論

- 在固化溫度為80°C的條件下，拉力數值為2:1>3:1>1:1。隨著固化時間增加，2:1和3:1的拉力數值均無明顯變化，推測因較多的A膠提供好的熱穩定性；相較之下，1:1數值下降，可能與B膠分子在高溫下降解有關。
- 固定固化時間為60min，固化溫度為60°C及80°C時，拉力數值為2:1>3:1>1:1；在溫度為100°C及120°C時，拉力數值為3:1>2:1>1:1。推測在溫度提升後3:1數值超過2:1的原因為過多的A膠分子在更高溫下發生自聚反應，使整體承受拉力的強度更好。
- 不同黏貼材質中，壓克力的數值最差，而銅片的數值(除了2:1幾乎沒有差別)較鋁片優，推測原因為表面能(銅>鋁>壓克力)的差異，造成膠水對表黏貼面潤濕能力有所落差，因而影響受拉力時容易剝離與否。
- 在膠水中額外添加橡膠微粒可以使膠水承受更大的力量，使數值大幅攀升。
- 用DSC對不同固化條件下和配比的膠水測試TG值，得到2:1的TG均高於3:1，顯示2:1的交聯密度較高、較硬脆，而3:1較軟、有韌性。