

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 化學科

050202

誰先喂銅氨纖維—探討不同反應條件對實驗室
製備銅氨纖維的影響

學校名稱： 新北市私立格致高級中學

作者： 高二 林艾潔 高二 林侑誼 高二 黃欣	指導老師： 王振沅
--	------------------

關鍵詞： 銅氨纖維、濕式紡絲

摘要

本研究主要在探討不同反應條件對於銅氨纖維合成的影響，透過改變不同的因素(如：纖維來源、銅來源、銅氨纖維混合液注射方式以及濕式紡絲液濃度等)作為操作變因，模擬在工業操作中各組件的運作過程，探討變因對於銅氨纖維的生成、纖維表面平整度與拉伸強度的變化。本研究顯示纖維素的種類會對銅氨纖維成型造成影響，選用不同的銅原子來源會影響銅氨錯離子的生成進而影響纖維的生成，所使用的濕式紡絲成形液濃度也會對銅氨纖維成型有所影響。

壹、前言

一、研究動機

我們在網路上看到短影片，短影片中將銅箔溶解於氨水中變成藍色的溶液，又將棉花溶解於藍色的溶液中變成藍色黏稠狀液體，最後將溶解後的溶液以針筒擠入稀硫酸中，在水溶液中變成了長條的纖維，讓我們想到課程中學到棉花主要是由纖維素所組成，而銅氨纖維的製作流程使用的主要原料是銅箔、氨水、稀硫酸等物質，製程中採用濕式紡絲法，可讓使用的銅箔以銅離子的形式留存於製程中，而銅離子的還原電位較高，較容易使用電極將其還原回收，對環境造成的影響較低，因此我們不禁思考這種將纖維素再生的纖維是不是對環境較為友善，並且能夠符合聯合國永續發展目標(SDGs)的精神。

二、目的

探討不同的纖維來源、不同的銅來源、不同濕式紡絲方式及不同濃度的紡絲液對於銅氨纖維的成絲效果進行微觀觀察以及拉伸強度測試等方面的影響，以理解銅氨纖維製造過程的機制與原理。

三、文獻回顧

(一)銅氨水錯合物(Schweizer's reagent) [1]

由化學家 Eduard Schweizer 於1857年提出，銅氨錯合物（Schweizer's reagent）是配位化

合物氫氧化四氨二水合銅(II)，化學式為 $[\text{Cu}(\text{NH}_3)_4(\text{H}_2\text{O})_2](\text{OH})_2$ 。可將從硫酸銅的水溶液中加入氫氧化鈉或是氨，使氫氧化銅沈澱，再將沈澱溶於氨水溶液中得到銅氨水錯合物(如圖一、二)溶液，此時的錯合物可溶解纖維素形成藍色的黏稠溶液(如圖1-1、1-2)，本研究選擇以網路影片所演示的黃銅箔為銅氨水錯合物的銅原子來源，並選擇以不同元素銅(銅粉、銅網及銅鋅粉混合)探討不同狀態的銅元素是否能夠順利生成銅氨纖維並測試其性質。



圖1- 1銅氨水錯合物外觀
(本圖片由作者親自拍攝)

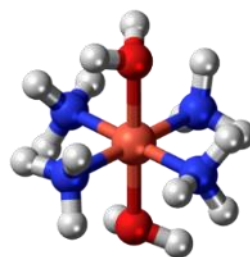


圖1- 2銅氨水錯合物結構式
(本圖片引用自維基百科—銅氨溶液)



圖1- 3纖維素溶於水後形成藍色黏稠溶液
(本圖片由作者親自拍攝)

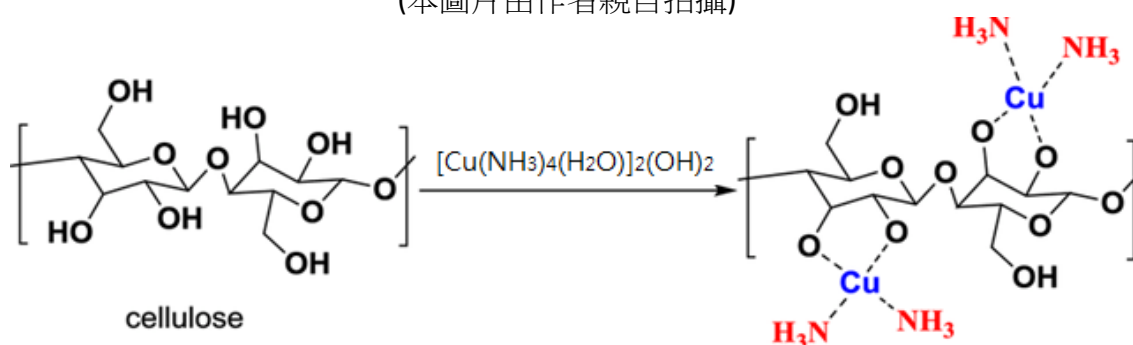


圖1- 4纖維素溶於銅氨錯合物的反應示意圖(本圖片引用自 Hindi, S. S. 2024)

(二)銅氨纖維的製程變因選擇

在參考文獻[2]中，取用廢紙中的纖維素進行銅氨纖維的試驗，參考論文的主要試驗內容我們在研究中選擇衛生紙及脫脂棉花做為不同的纖維素來源、調整黏稠液擠壓

方式作為變因及文獻中所使用的碳酸銅作為最初銅氨水錯合物溶液的銅離子來源，並選擇以不同陰離子的銅來源進行延伸研究(如硫酸銅、硝酸銅、氯化銅、氧化銅及醋酸銅。最終以微觀描述及拉伸強度作為本次研究合成纖維的主要測試方向。

貳、研究設備及器材





一、藥品

			
圖2- 1硫酸(17.34M)	圖2- 2氨水	圖2- 3蒸餾水	圖2- 4碳酸銅
			
圖2- 5銅箔	圖2- 6棉球	圖2- 7氧氣罐	圖2- 8衛生紙
			
圖2- 9硫酸銅	圖2- 10氯化銅	圖2- 11硝酸銅	圖2- 12醋酸銅





(本頁圖片由作者親自拍攝)

			
圖2- 13氧化銅	圖2- 14銅粉	圖2- 15銅網	圖2- 16鋅粉
			
圖2- 17氯化鋅	圖2- 18氫氧化鈉		

二、器材

			
圖2- 19分度吸量管	圖2- 20燒杯	圖2- 21電子天平	圖2- 22針筒組

(本頁圖片由作者親自拍攝)

			
圖2- 23安全吸球	圖2- 24樣品瓶	圖2- 25游標尺 (最小刻度0.1mm)	圖2- 26pH 感測器

參、研究過程或方法

一、研究過程

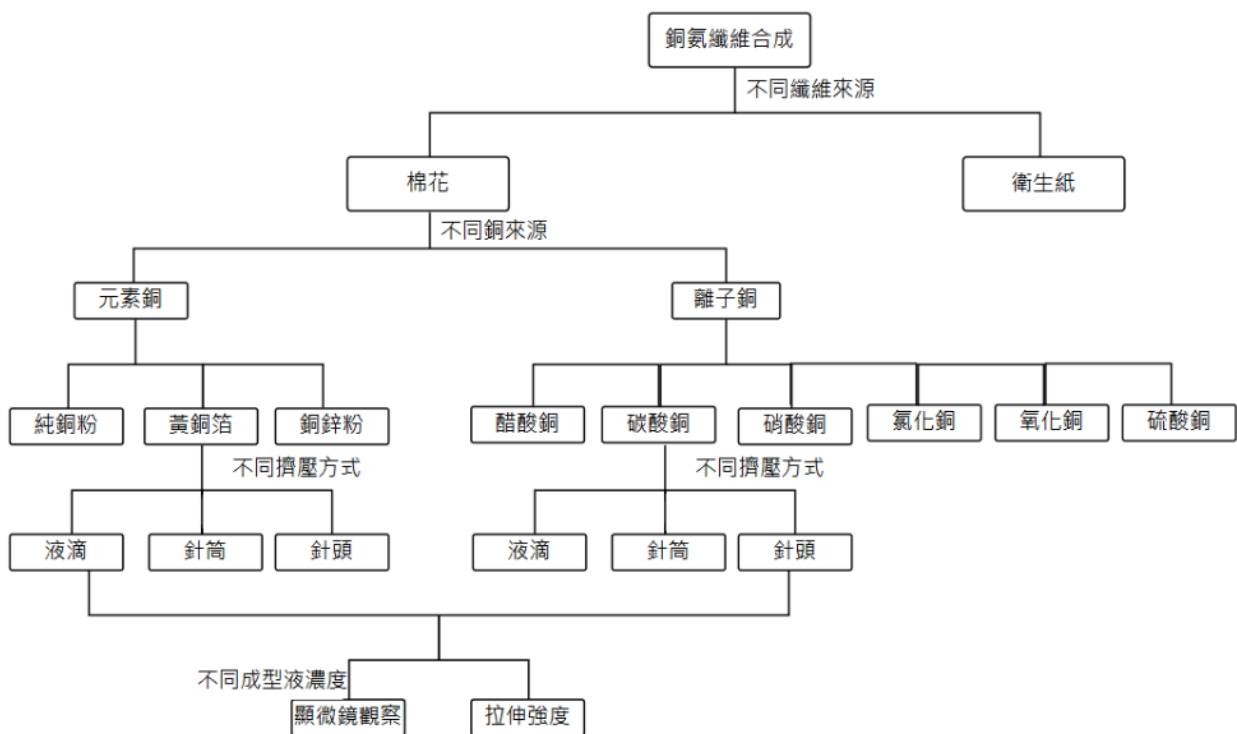


圖3- 1本研究的流程圖(本圖為作者自行繪製)

二、研究方法

(一)探討不同纖維素對銅氨纖維的影響

1.配製銅氨錯合物溶液（Schweizer's reagent）：量取 0.11 克黃銅箔放入燒杯，使用分度吸

(本頁圖片由作者親自拍攝及製作)

量管取 12 毫升濃氨水加入，並通入氧氣搖晃至銅箔完全溶解且無顆粒殘留，此時形成銅氨錯合物溶液（Schweizer's reagent），呈深藍色透明狀(如圖3-2)。

2.配製銅氨纖維溶液：量取 0.13 克棉花及0.13克衛生紙，分三次加入燒杯內，每次加入後搖晃，使棉花及衛生紙完全溶解於溶液中。此時溶液呈深藍色且具有黏稠感(如圖3-3)。

3.配製成型液：取 30 毫升硫酸加入 150 毫升蒸餾水中，攪拌均勻。

4.纖維成型：使用針筒吸取銅氨纖維溶液(如圖3-4)，緩慢擠入硫酸成型液中(如圖3-5)，等待纖維變白後，將其浸泡於蒸餾水(如圖3-6)中，取出乾燥後將樣品存放於夾鏈袋中保存待後續顯微鏡觀察(40x)及拉伸測試。

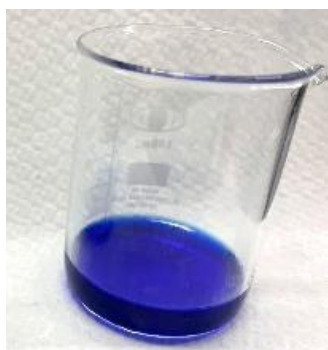


圖3- 2黃銅箔溶解於氨水



圖3- 3溶解纖維素



圖3- 4針筒吸取纖維液



圖3- 5纖維液擠出成型



圖3- 6變白浸泡蒸餾水

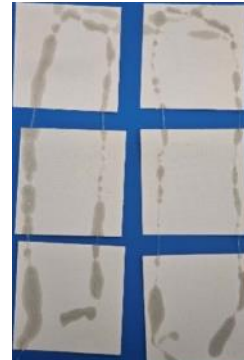



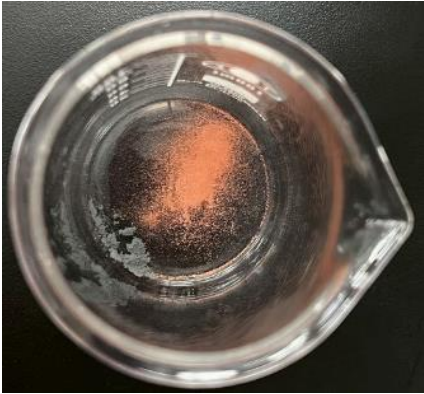


圖3- 7靜置乾燥

(二)探討不同銅來源對銅氨纖維的影響

1. 配製銅氨錯合物溶液（Schweizer's reagent）

(1)元素銅製程：量取 0.11 克元素銅(黃銅箔70%銅30%鋅、銅粉、銅網、銅粉70%鋅粉30%混合、銅粉70%氯化鋅30%)放入燒杯(如圖3-8至圖3-11)，使用分度吸量管取 12 毫升濃氨水加入，並通入氧氣搖晃至元素銅完全溶解且無顆粒殘留。

	
圖3- 8元素銅—黃銅箔	圖3- 9元素銅—銅粉
	
圖3- 10元素銅—銅網	圖3- 11元素銅—銅鋅粉混







(2)離子銅製程：量取相同當量銅(0.014mole，1.5g $\text{CuCO}_3\cdot\text{Cu}(\text{OH})_2$ 、3.39g $\text{CuSO}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 、2.31g $\text{CuCl}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、3.28g $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 、2.71g $\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ 及1.08g CuO)放入燒杯(如圖3-12至圖3-17)，使用分度吸量管取 15 毫升濃氨水加入，並通入氧氣搖晃至碳酸銅完全溶解且無顆粒殘留，並測量 pH 值。

2.配製銅氨纖維溶液：量取 0.13 克棉花，分三次加入燒杯內，每次加入後搖晃，使棉花完全溶解於溶液中，若棉花未能溶解則加入氫氧化鈉顆粒至纖維素能溶解。

3.配製成型液：取 30 毫升硫酸加入 150 毫升蒸餾水中，攪拌均勻。

4.纖維成型：使用針筒吸取銅氨纖維溶液，緩慢擠入硫酸成型液中，等待纖維變白後，將其浸泡於蒸餾水中，並以顯微鏡(40x)觀察。纖維需在蒸餾水中浸泡至少三小時，之後取出，放置於乾淨的擦拭紙上晾乾。乾燥後，將樣品存放於夾鏈袋中保存，待後續顯微鏡觀察(40x)並進行拉伸測試。

(本頁圖片由作者親自拍攝)

		
圖3- 12碳酸銅	圖3- 13硫酸銅	圖3- 14氯化銅
		
圖3- 15硝酸銅	圖3- 16醋酸銅	圖3- 17氧化銅

(三)探討銅氨纖維溶液不同擠壓方式對銅氨纖維的影響

1. 配製銅氨錯合物溶液（Schweizer's reagent）

(1)黃銅箔製程：量取 0.11 克黃銅箔放入燒杯，使用分度吸量管取 12 毫升濃氨水加入，並通入氧氣搖晃至銅箔完全溶解且無顆粒殘留。

(2)碳酸銅製程：量取1.5克碳酸銅放入燒杯，使用分度吸量管取 15 毫升濃氨水加入，並通入氧氣搖晃至碳酸銅完全溶解且無顆粒殘留。

2.配製銅氨纖維溶液：量取 0.13 克棉花，分三次加入燒杯內，每次加入後搖晃，使棉花完全溶解於溶液中。

3.配製成型液：取 30 毫升硫酸加入 150 毫升蒸餾水中，攪拌均勻。

4.纖維成型：

(1)不使用針筒：直接將銅氨纖維溶液用燒杯逐滴加入硫酸成型液中。(如圖3-18)

(2)使用針筒無針頭：使用針筒吸取銅氨纖維溶液，緩慢擠入硫酸成型液中。(如圖3-19)

(本頁圖片由作者親自拍攝)

(3)使用針筒及針頭：使用針筒吸取銅氨纖維溶液，緩慢擠入硫酸成型液中。(如圖3-20)

(4)等待纖維變白後，將其浸泡於蒸餾水中，並以顯微鏡觀察(40x)。纖維需在蒸餾水中浸泡至少三小時，之後取出，放置於乾淨的擦拭紙上晾乾。乾燥後，將樣品存放於夾鏈袋中保存，待後續顯微鏡觀察(40x)並進行拉伸測試。



圖3- 18燒杯滴入硫酸中



圖3- 19針直接擠入硫酸



圖3- 20針頭擠入硫酸

(四)探討不同濃度的硫酸成型液對銅氨纖維的影響

1. 配製銅氨錯合物溶液（Schweizer's reagent）

(1)黃銅箔製程：量取 0.11 克銅箔放入燒杯，使用分度吸量管取 12 毫升濃氨水加入，並通入氧氣搖晃至銅箔完全溶解且無顆粒殘留。

(2)碳酸銅製程：量取1.5克碳酸銅放入燒杯，使用分度吸量管取 15 毫升濃氨水加入，並通入氧氣搖晃至碳酸銅完全溶解且無顆粒殘留。

2.配製銅氨纖維溶液：量取 0.13 克棉花，分三次加入燒杯內，每次加入後搖晃，使棉花完全溶解於溶液中。

3.配製成型液：

(1)取20毫升硫酸(17.34M)，加水至100毫升，配成3.47M 硫酸溶液。

(2)取15毫升硫酸(17.34M)，加水至100毫升，配成2.60M 硫酸溶液。

(3)取10毫升硫酸(17.34M)，加水至100毫升，配成1.73M 硫酸溶液。

(4)取5毫升硫酸(17.34M)，加水至100毫升，配成0.87M 硫酸溶液。

(5)取2.5毫升硫酸(17.34M)，加水至100毫升，配成0.43M 硫酸溶液。

(6)取1毫升硫酸(17.34M)，加水至100毫升，配成0.17M 硫酸溶液。

(7)取100毫升蒸餾水。

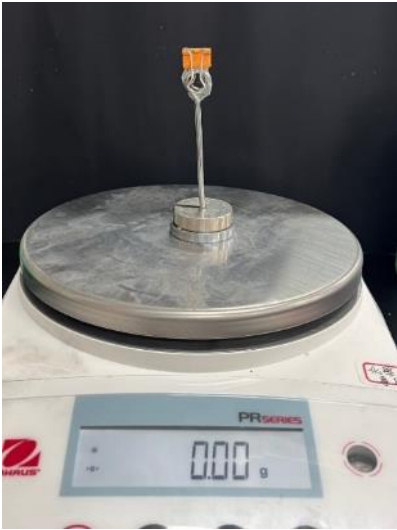
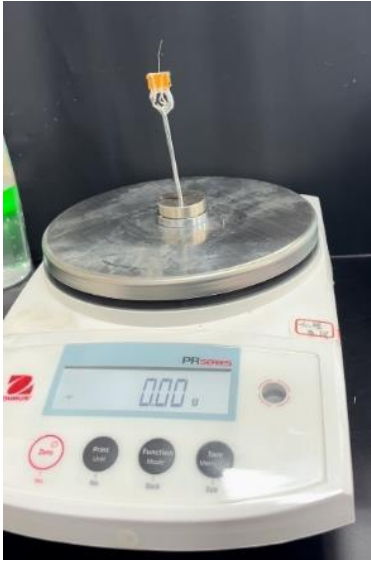

4.纖維成型：使用針筒吸取銅氨纖維溶液，分別擠入不同濃度硫酸成型液中，等待纖維變白後，將其浸泡於蒸餾水中，並以顯微鏡(40x)觀察。纖維需在蒸餾水中浸泡至少三小時，之後取出，放置於乾淨的擦拭紙上晾乾。乾燥後，將樣品存放於夾鏈袋中保存。

(五)不同製程的銅氨纖維對於拉伸強度的影響

- 1.設計自製裝置：將長尾夾內部黏上塑膠墊，以增加摩擦力，並將長尾夾固定於砝碼上，使長尾夾能夠向上夾住合成的銅氨纖維(如圖3-21)。
- 2.測量方式：取20mm 的樣品測量寬度後夾於長尾夾上，並將電子天平歸零(如圖3-22)，取另一長尾夾夾住樣品後向上提起，過程中將電子天平讀數全程錄影，樣品斷裂時的讀數即為樣品的拉伸強度(如圖3-23)。
- 3.拉伸率計算：將斷裂後的樣品已游標尺測量斷片的長度後加總，和原本的長度進行比較。

$$\text{拉伸率}(\%) = (\text{樣品斷片總長度} / \text{樣品原長度}) \times 100\%$$

式一、拉伸率計算方式

		
圖3- 21自製拉伸測試裝置	圖3- 22夾上樣品後歸零	圖3- 23紀錄瞬間最大讀數

(本頁圖片由作者親自拍攝)

肆、研究結果

一、纖維來源不同對銅氨纖維的影響

(一)纖維外觀

以棉花製成的纖維外觀較長，以鑷子夾取不易斷(如圖4-1)；以衛生紙製成的纖維的連續長度較短，從蒸餾水中移除的時候易斷裂(如圖4-2)。







圖4- 2棉花製成纖維外觀



圖4- 1衛生紙製成纖維外觀

(二)纖維微觀表現

以衛生紙製成的乾纖維外觀(如圖4-3)較棉花製成的乾纖維(如圖4-4)外觀平整；但在纖維碰到水的情況下，可以發現衛生紙製成的纖維在碰到水後纖維變得紊亂(如圖4-5)，但以棉花製成的纖維在碰到水的情況下仍維持外觀的平整性(如圖4-6)。

 A microscopic image showing a single, relatively smooth and straight fiber. A 1mm scale bar is at the bottom.	 A microscopic image showing a single, slightly irregular and textured fiber. A 1mm scale bar is at the bottom.	 A microscopic image showing a single, highly irregular and tangled fiber. A 1mm scale bar is at the bottom.	 A microscopic image showing a single, smooth and straight fiber, maintaining its shape. A 1mm scale bar is at the bottom.
圖4- 3顯微鏡衛生紙製成銅氨纖維(乾)	圖4- 4顯微鏡棉花製成銅氨纖維(乾)	圖4- 5顯微鏡衛生紙製成銅氨纖維(濕)	圖4- 6顯微鏡棉花製成銅氨纖維(濕)

(本頁圖片由作者親自拍攝)

(三)衛生紙製成纖維和棉花製成纖維有較低的產率以及較低的拉伸強度，如表一。

樣品	拉伸強度(gw)	纖維寬度(mm)	拉伸率(%)
黃銅箔+衛生紙	42.28	0.48	101.38
黃銅箔+棉花	80.15	0.36	103.5

表一、棉花與衛生紙製成纖維的產率、拉伸強度、纖維寬度及拉伸率

(本表格由作者及指導老師製作整理)

二、銅離子來源不同對銅氨纖維的影響

(一)元素銅製程

- 1.黃銅箔及可溶解於氨水中形成銅氨錯合物溶液，纖維素加入後能夠溶解形成纖維溶液，並順利於成型液中形成銅氨纖維。
- 2.純銅粉可溶解於氨水中形成銅氨錯合物溶液，但純銅粉的錯合物溶液顏色明顯較黃銅箔淡，纖維素加入後雖可溶解，但纖維到成型液中就散開來，增加銅粉的初始質量至0.77g 後可用針筒擠出纖維，但纖維一夾就斷。
- 3.銅箔網無法溶解於氨水中形成銅氨錯合物(如圖4-7)。
- 4.銅粉與鋅粉混合狀態的銅無法溶解於氨水中形成錯合物，將鋅粉比例降低後溶液呈淡藍色，大部份銅粉未能溶解(如圖4-8)，結果整理如表二。



圖4- 8銅網無法溶於氨水中



圖4- 7銅鋅粉混合物僅微溶於氨水

(本頁圖片由作者親自拍攝)

	加入氨水	加入纖維
黃銅箔	可形成錯合物	可溶解
銅粉	可形成錯合物	增加當量後可溶解
銅網	無法形成錯合物	-
銅粉7鋅粉3	無法形成錯合物	-
銅粉12鋅粉1	少量形成錯合物	無法溶解
銅粉+氯化鋅	可形成錯合物	增加當量後可溶解

表二、不同元素銅在銅氨纖維的合成情形

(本表格由作者製作整理)

(二)離子銅製程

1.除氧化銅外，碳酸銅、硫酸銅、硝酸銅、氯化銅、醋酸銅皆可溶於氨水中形成銅氨錯合物，其中僅有碳酸銅可直接溶解纖維素，在加入氫氧化鈉顆粒調整 pH 值後硫酸銅、硝酸銅、氯化銅皆可溶解纖維素，醋酸銅則無法，整理如下表三。

2.氧化銅在少量硫酸作用下可溶解於氨水中，相對需要更多的氫氧化鈉顆粒才能溶解纖維素。

	加入氨水	pH 值	加入纖維素	加入氫氧化鈉後 pH	纖維素狀況
碳酸銅	可形成錯合物	13.34	可溶	-	-
硫酸銅	可形成錯合物	12.02	不可溶	13.47	可溶
硝酸銅	可形成錯合物	11.7	不可溶	12.37	可溶
氯化銅	可形成錯合物	11.85	不可溶	12.26	可溶
醋酸銅	可形成錯合物	11.94	不可溶	13.01	不可溶
氧化銅	無法形成錯合物	12.49	-	-	-

表三、不同銅鹽在銅氨纖維合成的情形

(本表格由作者製作整理)

(三)纖維外觀

- 1.元素銅製程中以黃銅箔所製成的纖維有較長的外觀(如圖4-9)； 7倍當量的銅粉雖可製成纖維，但纖維易斷裂(如圖4-10)；銅粉與氯化鋅纖維需要從針筒擠出後在成型液中浸泡較長的時間才可移除纖維中的銅離子(如圖4-11)。



圖4- 9銅箔製成纖維外觀



圖4- 10銅粉製成纖維外觀



圖4- 11銅+氯化鋅纖維外觀

- 2.離子銅製程中以碳酸銅所製成的纖維有較長的外觀(如圖4-12)，而硫酸銅、硝酸銅與氯化銅在銅氨錯合物溶液中加入氫氧化鈉後可溶解纖維素並可用針筒擠出成型，擠出纖維的連續長度較短(如圖4-13~4-15)。



圖4- 12碳酸銅纖維

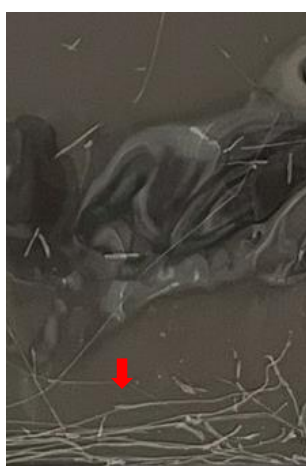


圖4- 13硫酸銅纖維圖



4- 14硝酸銅纖維圖


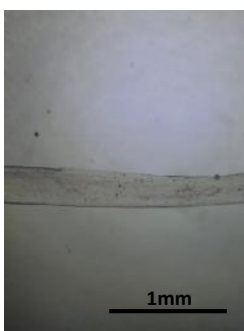


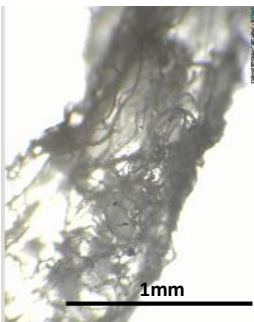
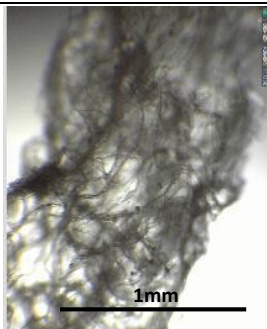


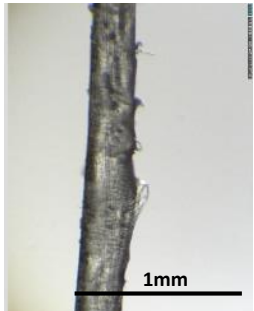
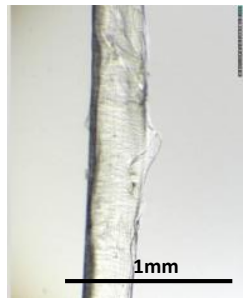

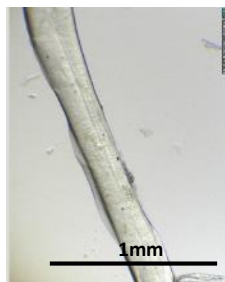




4- 15氯化銅纖維

(四)纖維微觀表現

元素銅製程以黃銅箔製程的乾纖維外觀較具完整性(如圖4-16、4-18、4-20)，銅粉纖維與銅粉氯化鋅纖維在加水的情況下外表出現明顯的膨潤現象(如圖4-19、4-21)，而黃銅箔纖維在加水後仍能維持外觀完整性(如圖4-17)。離子銅製程的乾纖維外觀皆平整(如圖4-22、4-24、4-26、4-28)，且纖維碰到水後皆能維持外觀的完整性(如圖4-25、4-27、4-29)，但以

碳酸銅製成的纖維內部有較大的氣泡(如圖4-22、4-23)。

			
圖4- 16黃銅箔纖維 乾	圖4- 17黃銅箔纖維 濕	圖4- 18銅粉纖維乾	圖4- 19銅粉纖維濕
			
圖4- 20銅粉+氯化鋅 纖維乾	圖4- 21銅粉+氯化鋅 纖維濕	圖4- 22碳酸銅纖維 乾	圖4- 23碳酸銅纖維 濕
			
圖4- 24硫酸銅纖維 乾	圖4- 25硫酸銅纖維 濕	圖4- 26硝酸銅纖維 乾	圖4- 27硝酸銅纖維 濕
			
圖4- 28氧化銅纖維 乾	圖4- 29氧化銅纖維 濕		

(五)元素銅製程中以黃銅箔製成的纖維有最高的拉伸強度；離子銅製程中以碳酸銅製成
(本頁圖片由作者親自拍攝)

的纖維有最高的拉伸強度，而碳酸銅和銅箔製成纖維相比有略低的拉伸強度，如表四。

樣品	拉伸強度(gw)	纖維寬度(mm)	拉伸率(%)
元素銅製程			
黃銅箔	80.15	0.36	103.5
銅粉	ND	ND	ND
銅粉+氯化鋅	10.17	1.20	96.9
離子銅製程			
碳酸銅	70.35	0.38	97.8
硫酸銅	27.01	0.35	105.8
硝酸銅	5.79	0.45	96.2
氯化銅	21.61	0.50	105.1

(本表格由作者製作整理)※ND 表樣品一夾就斷無法測量

表四、元素銅與離子銅製程的拉伸強度、纖維寬度及拉伸率比較

三、纖維液擠壓方式不同對銅氨纖維的影響

(一)纖維外觀

直接用燒杯滴下的纖維液在成型液中可以看到會形成一顆顆的液胞，撈出後的纖維成顆粒狀，放置晾乾一段時間後可以按壓抹開，樣品內部呈膏狀；不使用針頭擠出的纖維液在成型液中會呈現較粗的條狀，需要等候較久的時間才完全變白，此時的纖維一夾就斷，乾燥後的纖維成條狀但易斷裂；使用針頭擠出的纖維在成型液中成細絲狀，很快就變成白色纖維，纖維連續長度也較長(如圖4-30)。

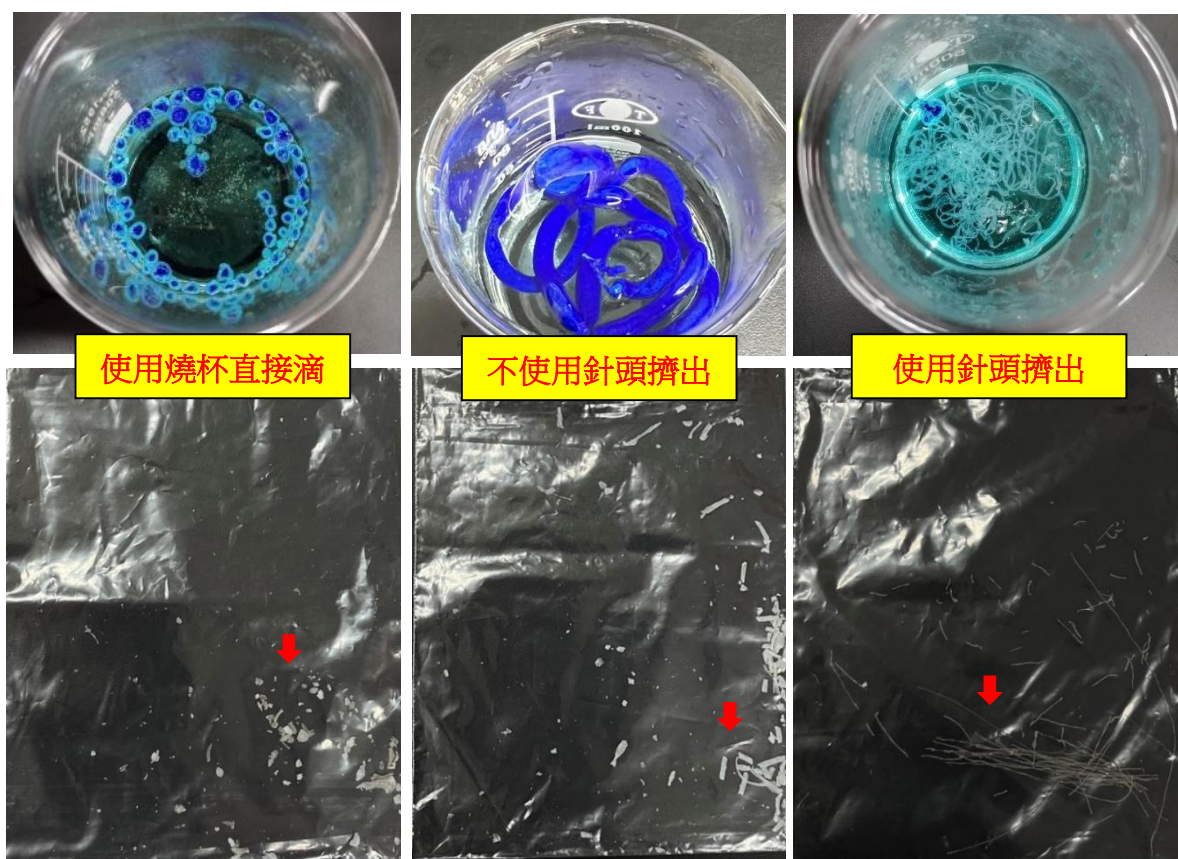
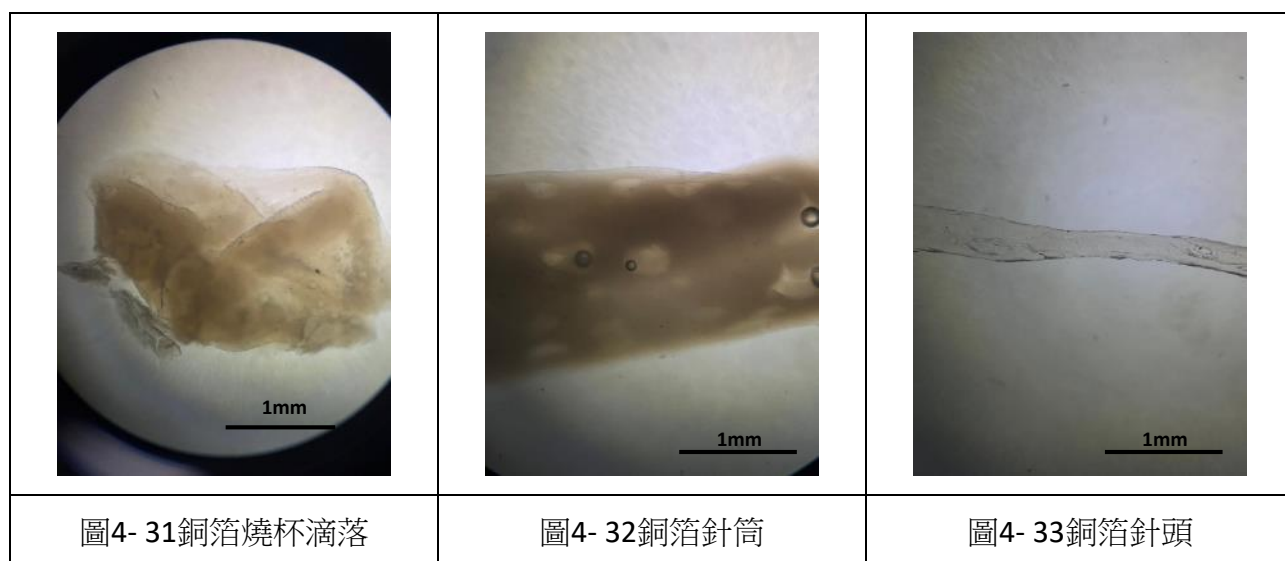


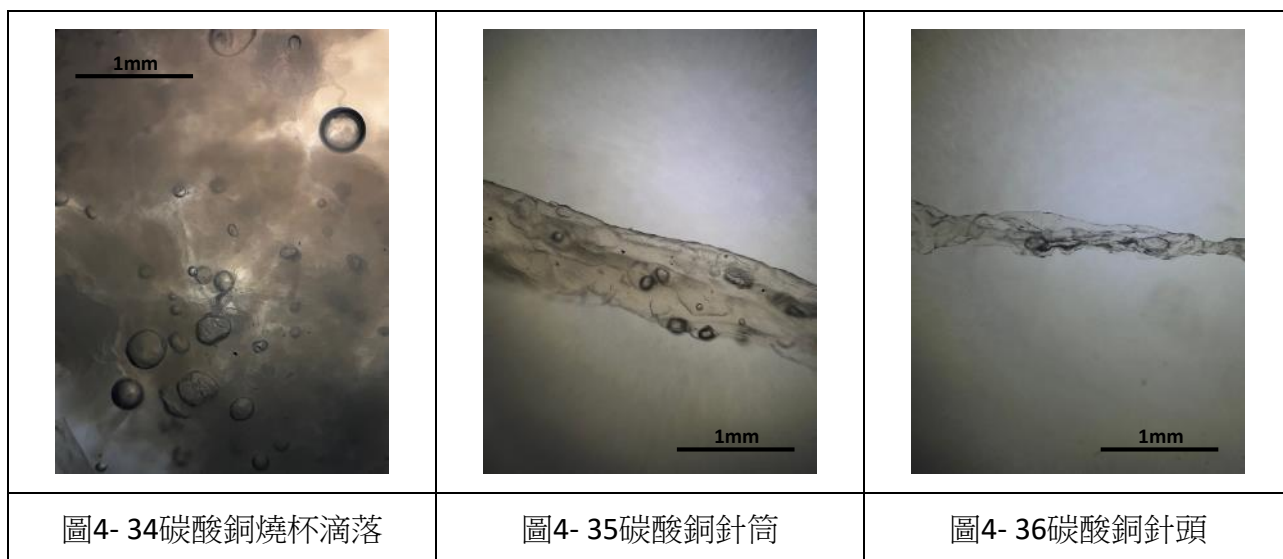
圖4- 30不同擠出方式對銅氨纖維的影響

(二)纖維微觀表現

可以看見不管是什麼銅來源，用燒杯滴落的纖維顆粒在顯微鏡下成團狀(如圖4-31、4-34)；若使用針筒無針頭可以看見銅箔製程的纖維仍能呈條狀分布，但纖維本身分布不均勻(如圖4-32)，若是碳酸銅製程可以看見纖維表面結構不平整且帶有氣泡(如圖4-35)；若使用針頭與針筒可以得到較細的纖維，銅箔製程的內部均勻(如圖4-33)而碳酸銅製程的纖維內部充滿氣泡且表面不均勻(如圖4-36)。



(本頁圖片由作者親自拍攝)



不使用針頭的樣品結構鬆散無法分析，即使剪下樣品進行拉伸測試也是一碰即斷，可以發現針筒擠出的纖維寬度越寬其拉伸強度就越低。(如表五)

樣品	拉伸強度(gw)	纖維寬度(mm)	拉伸率(%)
銅箔棉花無針筒	無法分析	無法分析	無法分析
銅箔棉花無針頭	ND	1.05	86.5
銅箔棉花有針頭	80.15	0.42	97.9
碳酸銅棉花無針筒	無法分析	無法分析	無法分析
碳酸銅棉花無針頭	無法分析	無法分析	無法分析
碳酸銅棉花有針頭	70.35	0.68	96.0

※ND 表樣品一夾就斷無法測量；無法分析表成型纖維破碎無法取得2cm 樣品

(本表格由作者製作整理)

表五、銅箔與碳酸銅製成纖維的拉伸強度、纖維寬度及拉伸率

四、不同成型液濃度對銅氨纖維的影響

(一)纖維外觀可以看出濃度越低的成型液在纖維與蒸餾水的邊界看起來越來越模糊，在蒸餾水中的銅氨纖維液仍維持棉花的外觀。(如圖4-37、4-38)

(本頁圖片由作者親自拍攝)



圖4- 37不同濃度成型液對銅箔製程纖維的外觀
(由左至右依序為蒸餾水、3.47、2.6M、1.73M、0.87M、0.43M、0.17M 硫酸溶液)



圖4- 38不同濃度成型液對碳酸銅製程纖維的影響
(由左至右依序為3.47、2.6M、1.73M、0.87M、0.43M、0.17M、蒸餾水)

(二)纖維微觀表現隨著濃度的降低，纖維表面的平整性下降，先是纖維內部出現紊亂的光影，在濃度維0.43M 的成型液中已無法維持纖維的表面，開始出現類似纖維素的結(如圖4-39、4-40)

(本頁圖片由作者親自拍攝)

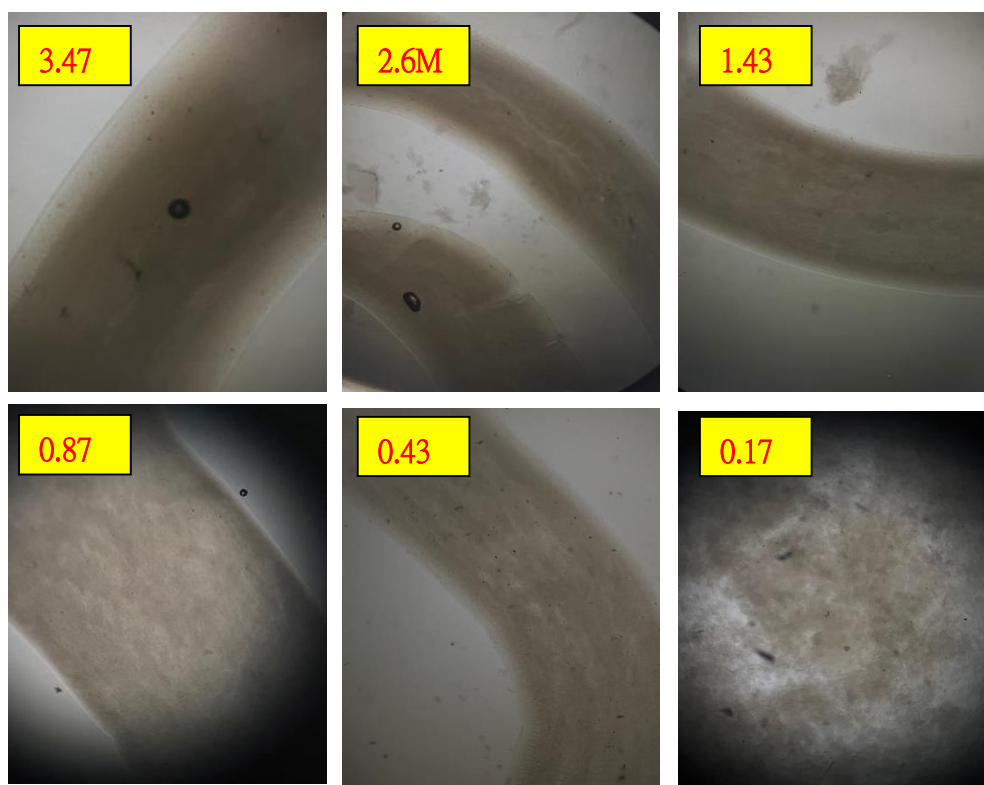


圖4- 39不同濃度定型液對碳酸銅製程纖維在顯微鏡下的表現

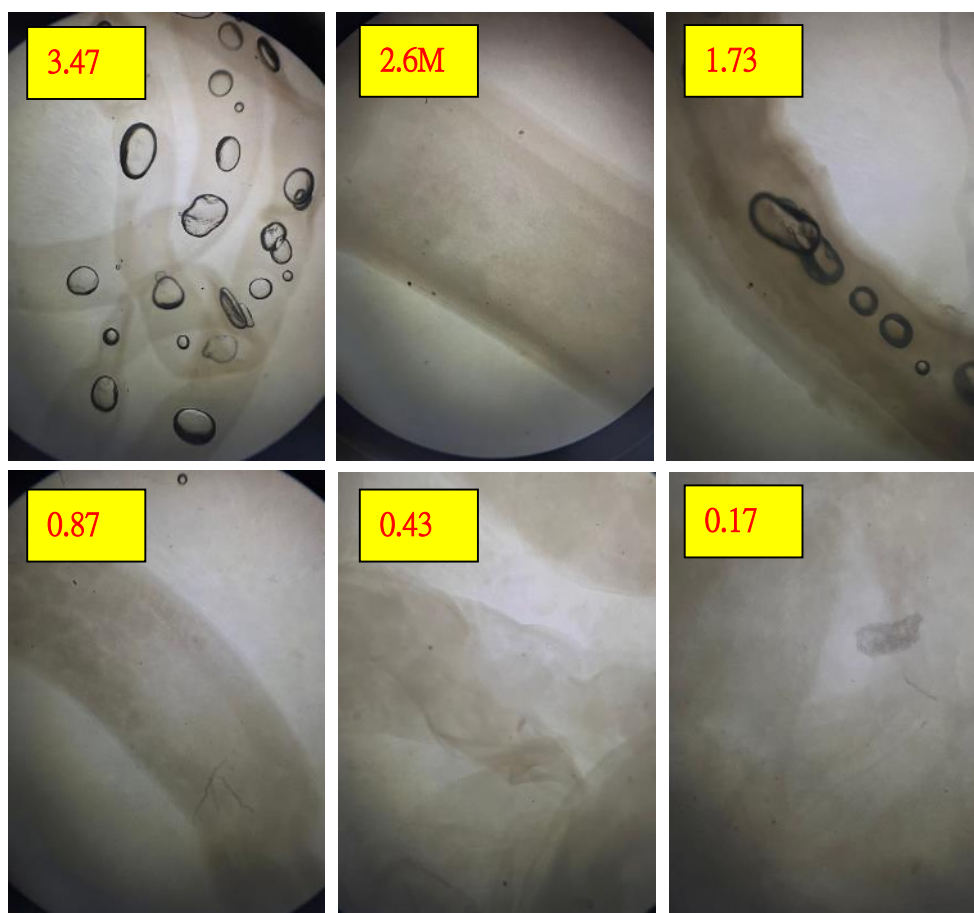


圖4- 40不同濃度定型液對銅箔製程纖維在顯微鏡下的表現

(本頁圖片由作者親自拍攝繪製)

伍、討論

一、影響纖維溶解於銅氨錯合物的因素

(一)元素銅活性大小

研究剛開始根據網路上的短影片進行操作，使用了黃銅箔進行銅氨纖維的研究，因此設計以純銅粉、純銅網、銅粉鋅粉混合物進行試驗，結果與討論如下：

1.元素銅接觸面積

銅氨錯合物的生成初期依賴銅氧化與氨的配位速率，在選擇的銅網中其有效表面積遠低於銅粉，因此銅粉在形成銅氨錯合物的效率較高。

2.合金與費米能階

黃銅箔僅需0.11g 即可形成銅氨纖維，若採取相同比例的銅粉/鋅粉混合物，則無法形成銅氨錯合物推測主要因為鋅粉優先與通入的氧氣發生反應，因此銅粉無法順利氧化進而形成銅氨錯合物，若降低了鋅粉的比例則氨水溶液呈淡藍色僅少量形成錯合物。

但若使用銅粉進行銅氨纖維的合成在一倍當量(0.11克銅)時雖可以形成錯合物但無法溶解纖維素，逐次增加銅粉的使用量至七倍當量點時，錯合物才可溶解纖維素，推測主要因為黃銅合金的形成提高了銅原子與氧氣的反應性，並且提供比銅粉還要多的銅離子(Cu^{2+})。

這一現象可由費米能級(Fermi level)與分子軌域(molecular orbital)來解釋[3]：當固態材料費米能級超過氧化劑最低未占分子軌域(LUMO)時即可發生電子的轉移(如圖5-1)，而因為合金有 synergetic effect，所以在黃銅合金形成的時候會使鋅原子的費米能級下降而銅原子的費米能級上升，此時銅原子的費米能級上升到超過氧氣分子的 LUMO，進而讓銅原子的電子更容易發生轉移，促使銅原子較純銅更易被氧化為 Cu^{2+} ，進而形成四氨銅錯合物 $[\text{Cu}(\text{NH}_3)_4]^{2+}$ 。

其證據為銅粉與鋅粉未形成合金無法透過 synergetic effect 提高銅原子的費米能級，使銅粉無法順利氧化形成錯合物(如圖5-2所示)，這種電子結構的變化使黃銅中銅原子的活性提升，能在較少金屬量下釋放出足夠的 Cu^{2+} 以與氨形成穩定錯合

物，並達到有效溶解纖維素的條件。而純銅粉因費米能階較高，較難被氧化，需要大量銅粉才能產生足夠的錯合物來完成纖維素的溶解。

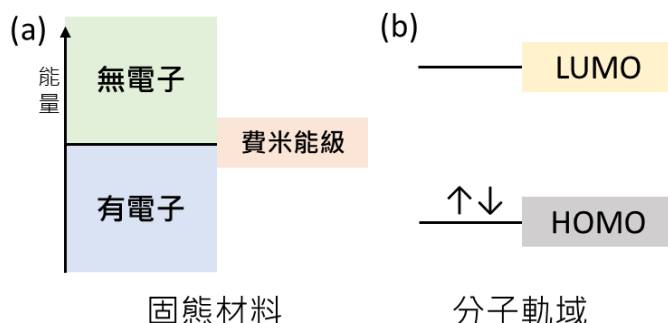


圖5- 1(a)固態材料的費米能階(b)分子軌域的 HOMO 與 LUMO

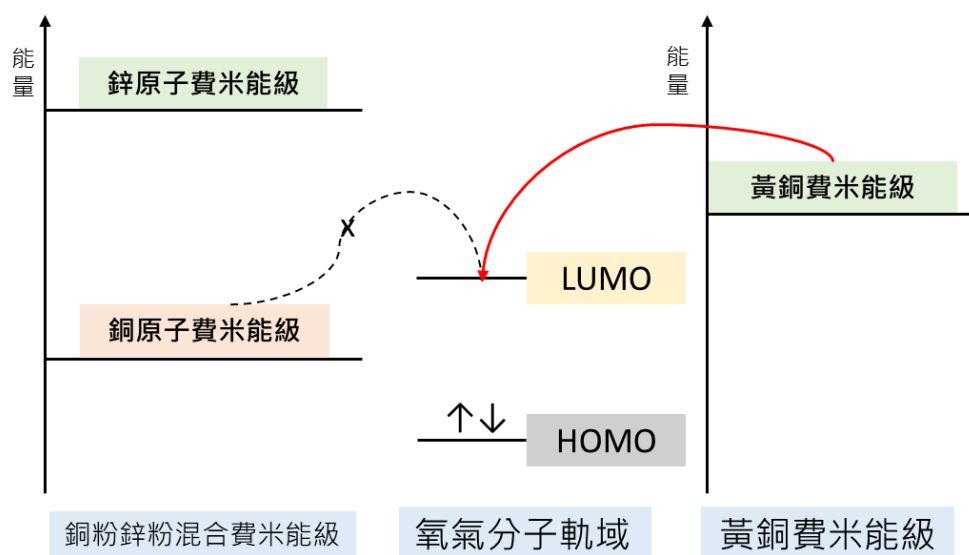


圖5- 2黃銅與銅鋅粉混合費米能級示意圖

(二)陰離子對銅氨纖維的影響

纖維素分子中有很多的羥基(—OH)，而纖維素溶解的機制在於羥基(—OH)上 H^+ 的解離形成 —O^- ，並與足夠多的銅氨錯合物進行配位的過程。

1. 酸鹼性影響

碳酸銅($\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu(OH)}_2$)所形成的錯合物溶液鹼性較強有助於羥基(—OH)上 H^+ 的解離形成 —O^- ，而硫酸銅、硝酸銅及氯化銅所形成的錯合物溶液鹼性較弱，需要額外加入氫氧化鈉幫助纖維素上的羥基解離，方能使纖維素形成足夠多的配位基進而

(本頁圖片由指導老師用 power point 協助繪製)

使纖維素溶解於其中。

2. 氫鍵作用力影響

因醋酸銅晶體形成銅氨錯合物後即使加入氫氧化鈉仍無法溶解纖維素，因此設計了**碳酸銅纖維溶液加入醋酸鈉**的實驗，結果發現原本溶解進去碳酸銅錯合物的纖維素析出，顯示醋酸根與纖維素或銅離子之間形成了新的作用力，**降低了纖維在錯合物溶液中的溶解度**。

醋酸根上具有一個羰基氧原子($C=O$)和一個負電荷，可作為配位基或者與羥基上的氫形成氫鍵，但醋酸根作為配位基的能力遠不如氨水，因此推測**醋酸根可與纖維素形成 $-OH\cdots O=C-$ 型的氫鍵**，類似醋酸在水溶液中形成二聚體的形式。

因為纖維素與碳酸根形成新的氫鍵結構，降低了纖維素羥基解離形成 O^- 的能力，從而**降低了纖維素與銅錯離子配位的機率**，造成纖維素無法溶解於錯合物溶液的狀況，且因醋酸根已與羥基形成穩定氫鍵，正好解釋了加入氫氧化鈉之後仍無法溶解纖維素的現象。(如圖5-3) (本圖片由指導老師用 chemdraw 協助繪製)

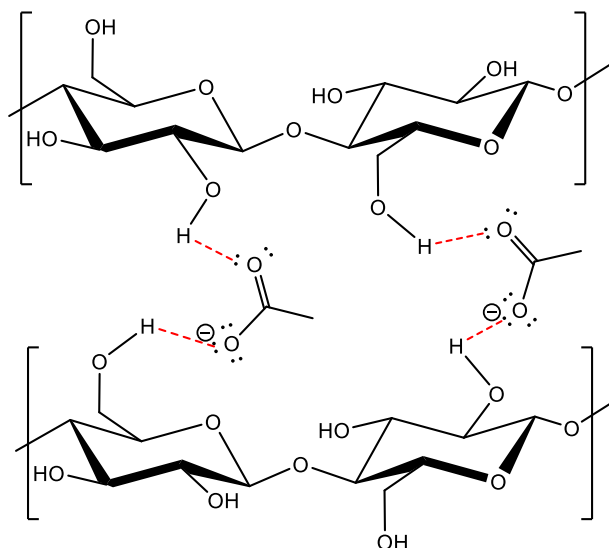


圖5-3 纖維素與醋酸根形成氫鍵作用力的示意圖

二、影響拉伸強度的因素

(一) 纖維素分子長度

衛生紙使用短纖維（約1~5毫米），而棉花纖維屬於長纖維（約10~40毫米）[4]，衛生紙紙張，在參考文獻[5]中提到：短鏈分子黏度較低容易流動，而長鏈分子黏度大幅提升，並

出現非牛頓行為，易產生分子纏結（Entanglement）[6]如圖5-4所示。研究過程中在形成銅氨錯離子溶液時仍保持藍色透明狀，加入纖維後呈現藍色黏稠溶液，而因衛生紙的分子鏈較短，因此在纖維成型階段的分子纏結程度較低，雖然容易擠入水中形成長條狀，但所形成的纖維有較低的拉伸強度。

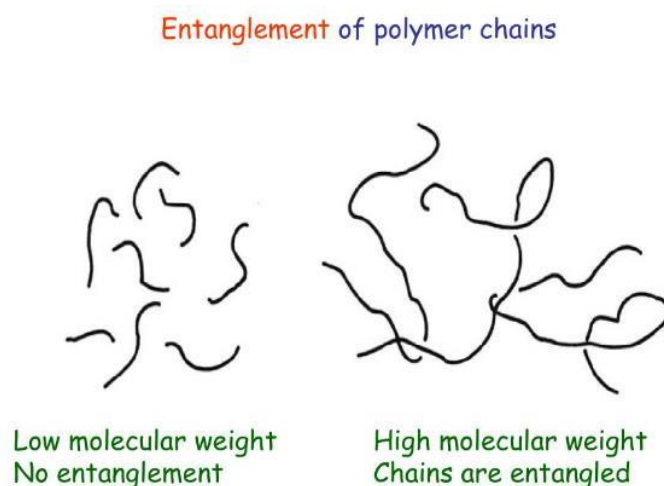


圖5- 4不同分子量的分子纏結(Entanglement)行為示意圖[6]

(本圖片引用自 Dillan. (2014, October 5) *Part 1. Introduction to Polymer Science*. SlideServe.)

(二)有效銅離子濃度

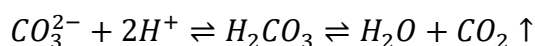
到達一定的銅離子濃度後便能將纖維素溶解於錯氨銅溶液中，但若要讓纖維成型需要濃度較高的銅離子，否則即使纖維能夠溶解於錯合物溶液中，在擠入硫酸成型液時被銅離子錯合的纖維又會散開，降低了纖維素分子間的作用力。

元素銅中黃銅箔在 synergetic effect 的作用之下產生了比銅粉更高的銅離子生成效果，因此在元素銅中以黃銅箔製成的纖維有較高的拉伸強度；離子銅製程中除了碳酸銅外其餘硫酸銅、硝酸銅及氯化銅本身均帶有結晶水，且過程中仍須加入氫氧化鈉才能使纖維素溶解於其中，雖使用相同當量的銅離子，但在結晶水與額外添加的氫氧化鈉作用下，降低了能夠產生纖維錯合物的有效銅離子濃度，因此在離子銅製程中以碳酸銅有較高的拉伸強度。

(三)陰離子反應

而碳酸銅與黃銅箔相比之下，碳酸銅製程纖維有略低一點的拉伸強度，推測可能的原因是碳酸銅製程在將銅氨纖維液擠入硫酸溶液中，其中的碳酸根遇到酸會產生二氧化碳(如式二)，這些充斥在纖維中的二氧化碳顆粒會降低纖維的分子纏結，使部份纖維分子無

法凝聚，因此產率較銅箔製程的低。



式二、碳酸根離子遇酸產生二氧化碳反應式

(四)不同擠出方式

以高中物理的觀點來看，將纖維分子想像成彈簧，彈簧的並聯應會使拉伸強度提高，但從實驗結果可以發現擠出的纖維寬度較高時，會很容易斷裂甚至無法成型，推測可能的原因為因針頭的口徑較窄小但擠壓針頭的動作可以增加高分子重疊比率[7](如圖5-2)，使纖維分子擠出前已進行部分有序排列，增加了纖維的分子纏結，雖然擠壓較困難，但因此形成的纖維有較高的拉伸強度，然而僅使用針筒的分子因開口較大，分子在擠出過程中高分子重疊比率較低，所形成的纖維束分子纏結較少，因此拉伸強度低。(數據整理如表六)

不同纖維來源拉伸強度(gw)	棉花	衛生紙		
	80.15	42.88		
不同銅離子來源拉伸強度(gw)	黃銅箔	純銅粉	銅粉+氯化鋅	
	80.15	無法測量	10.17	
	碳酸銅	硫酸銅	硝酸銅	氯化銅
	70.35	27.07	5.79	21.61
不同擠出方式(銅箔) 拉伸強度(gw)	針頭	針筒無針頭	燒杯滴落	
	80.15	ND	無法測量	
不同擠出方式(碳酸銅) 拉伸強度(gw)	碳酸銅針頭	碳酸銅針筒	碳酸銅燒杯	
	70.35	無法測量	無法測量	

※ND 表樣品一夾就斷無法測量；無法測量表成型纖維破碎無法取得2cm 樣品
(本表格由作者製作整理)

表六、不同實驗的拉伸強度比較

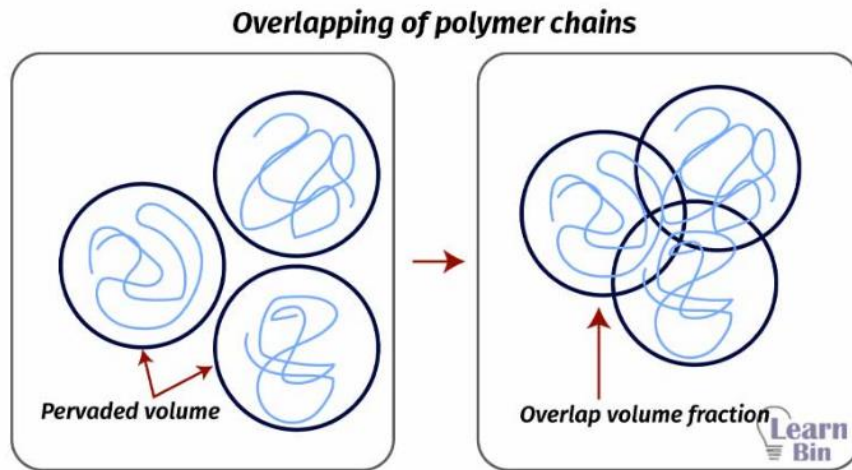


圖5- 5重疊比率與分子纏結關係[7]

(本圖片引用自 Madubhashini, S. (2022, December 21). *Dynamics of entangled polymers*.)

三、影響微觀影像的因素

(一)不同纖維來源

使用衛生紙製程的銅氨纖維在水中出現較紊亂的外觀，可能的原因為分子鏈的長度較短，單位長度中的纖維分子較多，銅氨纖維的**結晶度較低**，因此在外觀上出現較不平整的現象。

(二)不同的銅離子來源

在顯微鏡影像中可以看到銅粉、銅粉加氯化鋅因有效銅離子的濃度較低，因此纖維素較難成束，導致進入成型液後就分散開來恢復成原本棉花纖維的樣子，使用**碳酸銅製程的銅氨纖維較容易有氣泡**。

(三)不同擠壓方式

使用針頭的銅氨纖維在顯微鏡影像中較為平整，若是不使用針頭或使用燒杯直接滴落的顯微鏡影像可以看出影像纖維較不平整，是因為**缺乏擠壓力量使纖維素分子無法形成結晶區**所導致的結果。

(四)不同成型液濃度

硫酸成型液在本實驗中的作用主要為中和氨水、析出纖維素並固化成型以及去除多餘銅離子等，若是**成型液的濃度過低會導致原本被錯氨銅離子抓住纖維脫離銅離子的速度太慢**，導致水分與離子進入纖維素與纖維素分子間隙，降低了纖維素結晶區的比例，外觀的紊亂程度越高，甚至較難形成銅氨纖維。

陸、結論

本研究探討了影響銅氨錯合物纖維反應機制、拉伸強度及微觀結構的多種因素。研究結果顯示，纖維種類、元素銅來源、銅離子鹽種類、擠出方式以及成型液的濃度都在不同程度上影響纖維的產率和性能，根據我們的實驗結果得出以下結論：

結論一：纖維素分子鏈長度影響纖維中的分子纏結數量進而影響纖維外觀及拉伸強度。

結論二：銅原子與鋅原子形成合金結構後費米能級有助於銅離子的生成進而提供較高濃度的有效銅離子，使銅氨纖維的合成過程能使用更少的原料達到更好的效果。

結論三：銅離子製程中銅離子鹽類的選擇應以偏鹼性為主，鹼性環境有助於羥基上的氫離子解離，因此在銅離子鹽類中，碳酸銅最適合做為銅氨纖維反應的前驅物，不須額外添加鹼性物質即可形成銅氨纖維溶液。

結論四：過低的硫酸成型液濃度會使銅氨纖維在成型的過程中讓水分介入纖維素之間形成氫鍵，降低了生成銅氨纖維的結晶度，使銅氨纖維生成效果不佳。

我們由以上的結論可以得知，使用不同長度的纖維素可賦予銅氨纖維不同的性質，透過本次的研究我們可以將纖維素在適當的條件再生，賦予材料不同的功能，選擇合適的製程可以降低生產過程對環境造成的危害，為產品的生產盡一份心力。

柒、參考文獻資料

- [1]Schweizer, E. (1857). Das Kupferoxyd-Ammoniak, ein Auflösungsmittel für die Pflanzenfaser. *Journal für Praktische Chemie*, 72(1), 109–111.
- [2]Hindi, S. S. (2024). Wastepaper-Based Cuprammonium Rayon Regenerated Using Novel Gaseous–Ammoniation Injection Process. *Polymers*, 16(17), 2431.
- [3] Smith, S. (n.d.). Lecture 2: Introduction to electrochemistry. University of Edinburgh.
https://www.homepages.ed.ac.uk/ssmith13/course/lecture2_files/Lecture%20%20-%20Notes.pdf
- [4]王毓麟. (2013). 紡織材料學. 東華大學出版社
- [5]胡文浩、王莉. (2016). 高分子材料流變學. 科學出版社。
- [6]Dillan. (2014, October 5). Part 1. Introduction to Polymer Science. SlideServe.
<https://www.slideserve.com/dillan/part-1-introduction-to-polymer-science>
- [7]Madubhashini, S. (2022, December 21). Dynamics of entangled polymers. Learnbin.
<https://learnbin.net/dynamics-of-entangled-polymers/>

【評語】 050202

- 一、本研究探討不同反應條件對銅氨纖維合成的影響，結果顯示纖維素來源、銅來源、銅離子鹽類及濕式紡絲液濃度等因素均影響纖維的生成、表面平整度及拉伸強度。研究結論：1. 纖維素分子鏈長度影響纖維的外觀及拉伸強度，纖維素的選擇對纖維效能很重要；2. 銅與鋅合金結構有助於提高銅離子的濃度，從而提高合成效率；3. 選擇偏鹼性的銅離子鹽類（如碳酸銅）可有效促進銅氨纖維的生成；4. 過低的硫酸成型液濃度會降低纖維的結晶度與生成效果。
- 二、研究團隊能適當引用文獻討論實驗數據。
- 三、研究結果提供合成銅氨纖維的知識，也為環保材料的生產提供實用的方法，降低生產過程對環境的影響。

作品海報

誰先喂銅氨纖維——

探討不同反應條件對實驗室製備銅氨纖維的影響

摘要

本研究主要在探討不同反應條件對於銅氨纖維合成的影響,透過改變不同的因素(如:纖維來源、銅來源、銅氨纖維混合液注射方式以及濕式紡絲液濃度等)作為操作變因,模擬在工業操作中各組件的運作過程,探討變因對於銅氨纖維的生成、纖維表面平整度與拉伸強度的變化。本研究顯示**纖維素的種類會對銅氨纖維成型造成影響**,選用**不同的銅原子來源會影響銅氨錯離子的生成進而影響纖維的生成**,所使用的**濕式紡絲成形液濃度也會對銅氨纖維成型有所影響**,實驗發現使用**黃銅箔的用量較少**,成品**拉伸強度也較高**。

壹、前言

一、研究動機

我們在網路上看到短影片,影片內容如下:將銅箔溶解於氨水中變成藍色的溶液,再將棉花溶解變成藍色黏稠狀液體,最後將溶液以針筒擠入稀硫酸中,形成了銅氨纖維,銅氨纖維的製作流程使用的主要原料是銅箔、氨水、稀硫酸等物質,製程中採用**濕式紡絲法**,可讓使用的銅箔以銅離子的形式留存於製程中,而**銅離子的還原電位較高,較易使用電極將其還原並回收**,對環境造成的影響比較低,因此我們認為銅氨纖維的製程對環境較為友善,且**符合聯合國永續發展目標(SDGs)的精神**。

二、目的

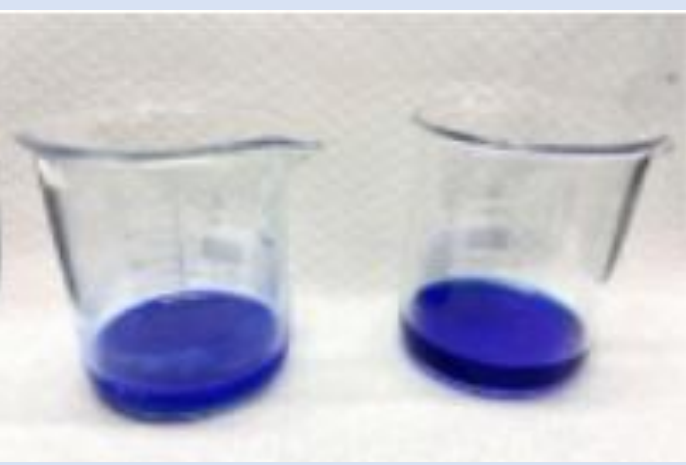
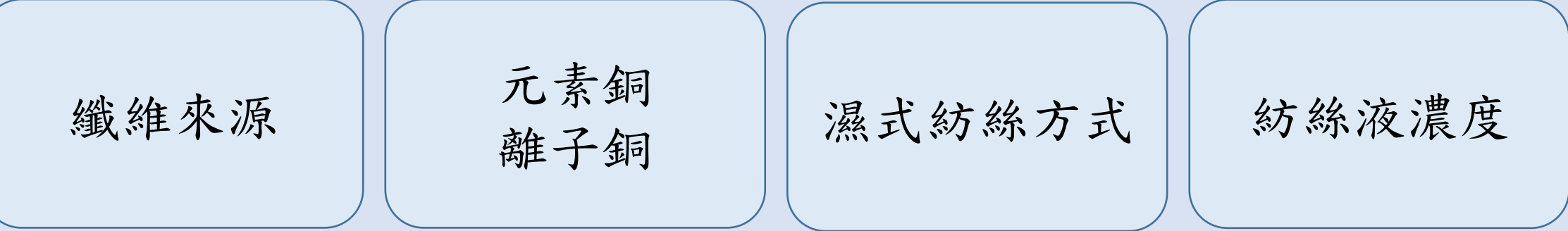


圖1-1銅氨水錯合物外觀
(本圖片由作者親自拍攝)

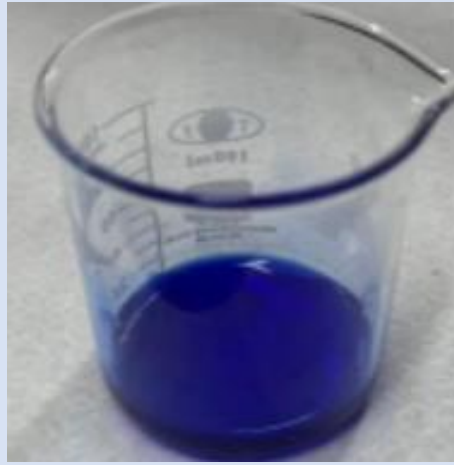


圖1-2纖維素溶於水後形成藍色黏稠溶液
(本圖片由作者親自拍攝)



圖1-3銅氨水錯合物結構式
(本圖片引用自維基百科—銅氨溶液)

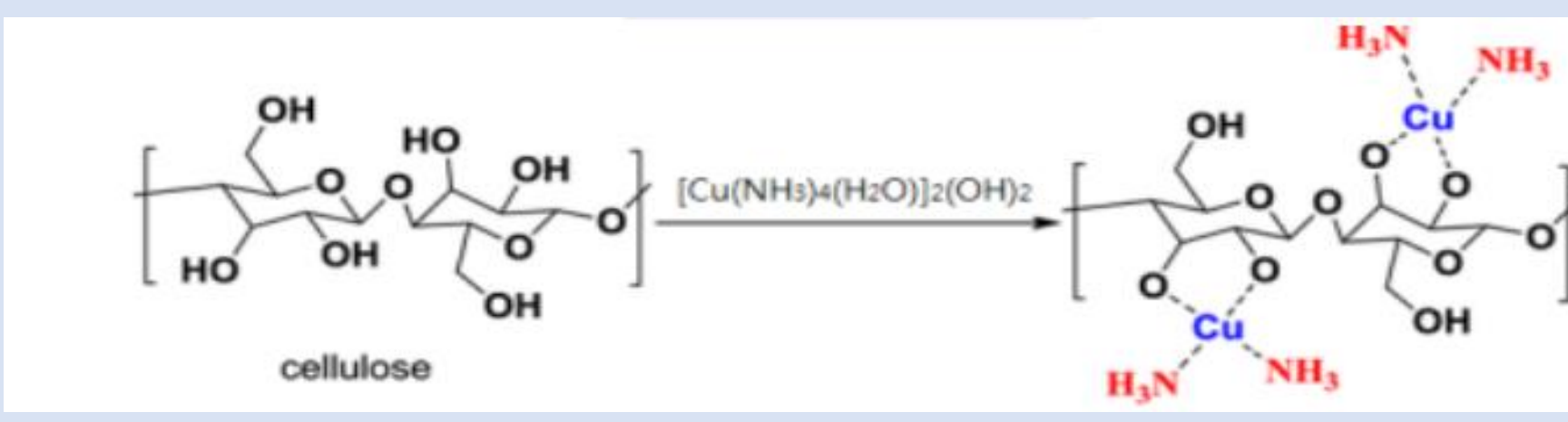


圖1-4纖維素溶於銅氨錯合物的反應示意圖
(本圖片引用自Hindi, S. S. 2024)

貳、研究設備及器材

- 一、藥品:** 氨水、氧氣罐、硫酸(17.34M)、蒸餾水、棉球、衛生紙、黃銅箔、銅粉、鋅粉、銅網、碳酸銅、硫酸銅、氯化銅、硝酸銅、氧化銅、醋酸銅、氯化鋅、氫氧化鈉
- 二、器材:** 分度吸量管、燒杯、電子天平、針筒組、安全吸球、樣品瓶、游標尺(最小刻度0.1mm)、pH 感測器

參、研究過程、方法及結果

一、流程圖

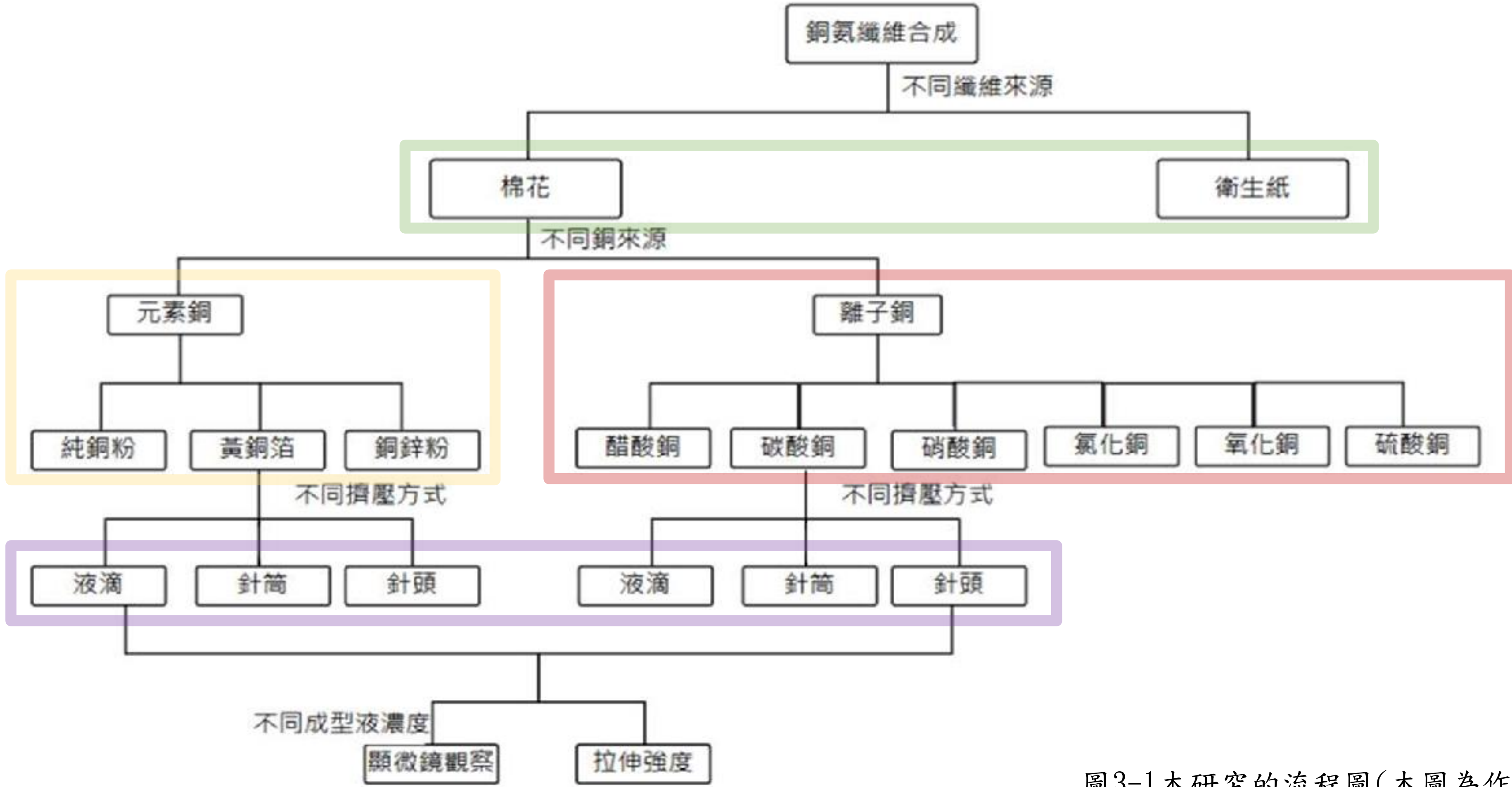


圖3-1本研究的流程圖(本圖為作者自行繪製)

實驗一、探討不同纖維素對銅氨纖維的影響

(一)實驗步驟

- 配製銅氨錯合物:取黃銅箔加入濃氨水,通入氧氣搖晃至溶解(如圖3-2a)。
- 配製銅氨纖維溶液:取棉花及衛生紙,搖晃至完全溶解(如圖3-2b)。
- 配製成型液:取硫酸加入蒸餾水中。
- 纖維成型:用針筒吸取纖維溶液(如圖3-2c),擠入成型液中(如圖3-2d)。
- 纖維變白後浸泡於蒸餾水中,最後取出乾燥後再將樣品保存。

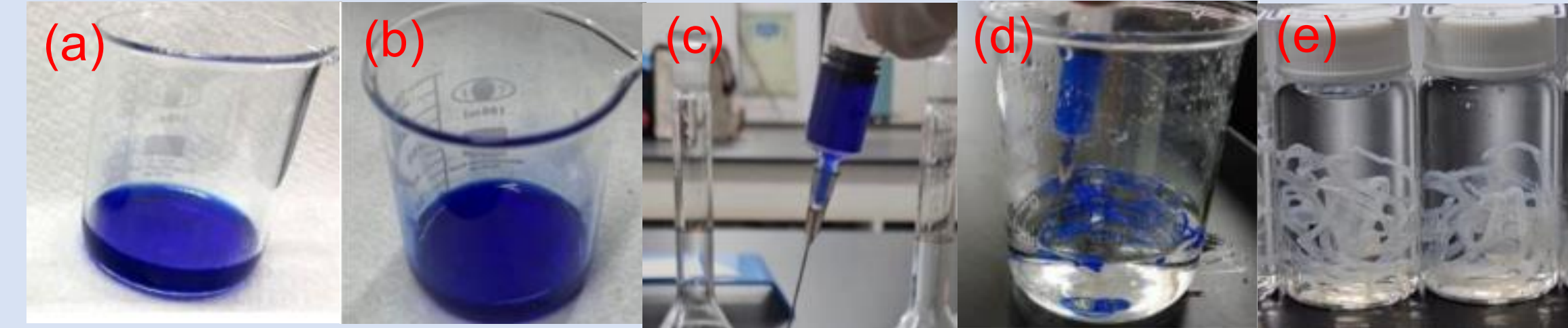


圖3-2(a)黃銅箔溶解於氨水(b)溶解纖維素(c)針筒吸取纖維液(d)纖維液擠出成型(e)變白浸泡蒸餾水

(二)纖維微觀

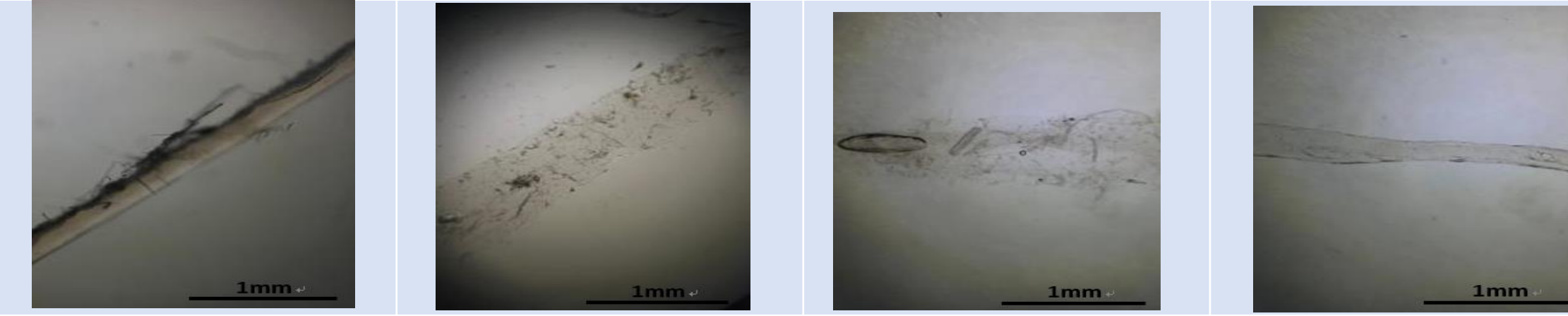


圖3-5
衛生紙纖維(乾)

圖3-6
棉花纖維(乾)

圖3-7
衛生紙纖維(濕)

圖3-8
棉花纖維(濕)

實驗一結果:

- 使用**棉花**製成纖維**連續長度較長**且**夾取時不容易斷裂**,**成型效果最好**
- 使用**衛生紙**製成纖維**連續長度較短**而且夾取**容易斷裂**
- 衛生紙**製成的纖維在微觀表現上**碰水後變得紊亂**(如圖3-7)
- 棉花**製成的纖維則仍維持原本的**平整性**(如圖3-8)

(本實驗圖片為作者親自拍攝)

實驗二、探討不同銅來源(元素銅)對銅氨纖維的影響

(一)不同元素銅

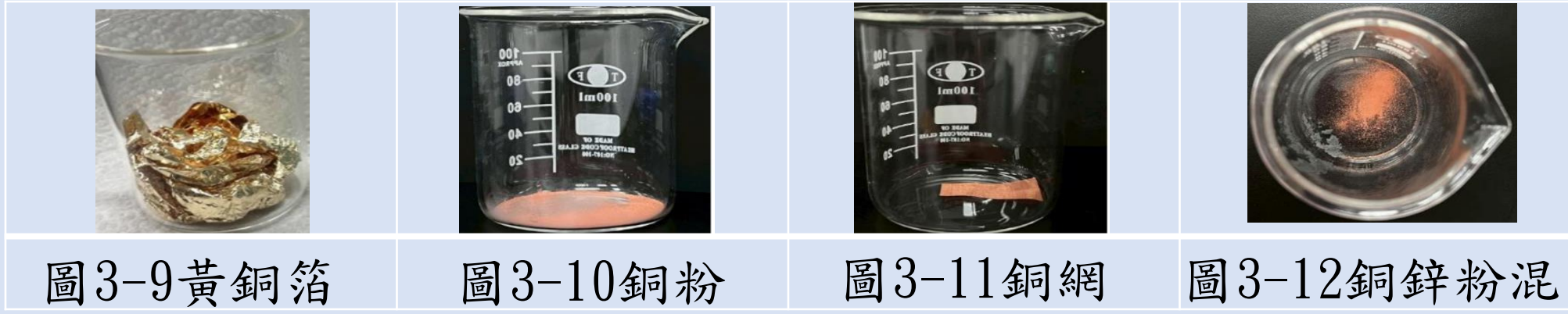


圖3-9黃銅箔

圖3-10銅粉

圖3-11銅網

圖3-12銅鋅粉混

(二)元素銅製程結果

表3-1、不同元素銅在銅氨纖維的合成情形

	加入氨水	加入纖維
黃銅箔	可形成錯合物	可溶解
銅粉	可形成錯合物	增加當量後可溶解
銅網	無法形成錯合物	-
銅粉7鋅粉3	無法形成錯合物	-
銅粉12鋅粉1	少量形成錯合物	無法溶解
銅粉+氯化鋅	可形成錯合物	增加當量後可溶解

(四)纖維外觀

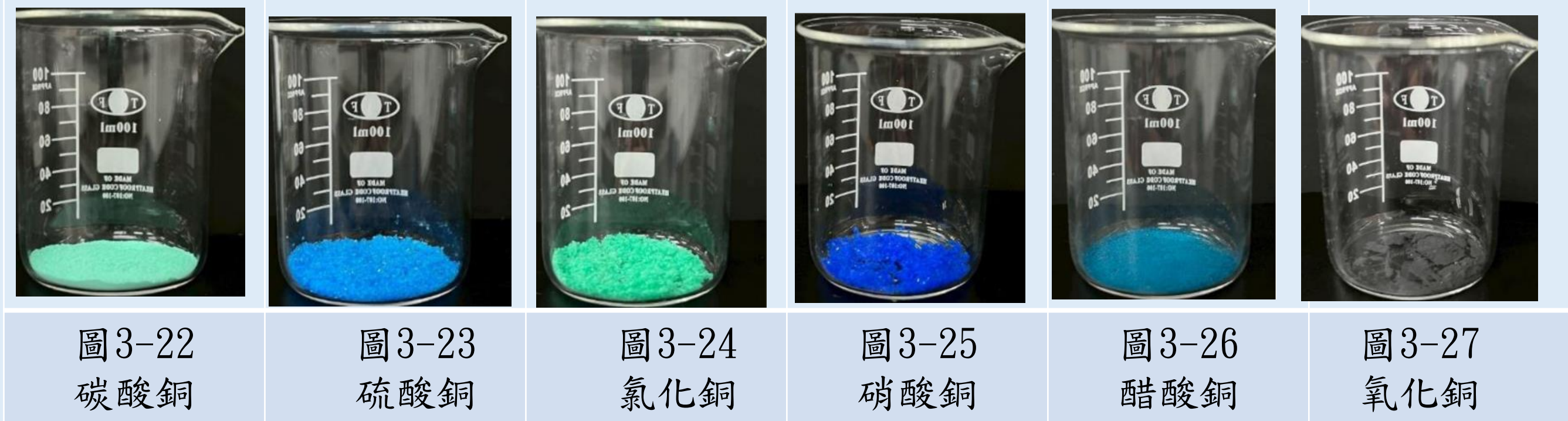


圖3-22(a)棉花纖維(b)衛生紙纖維(c)黃銅箔纖維(d)增加當量的銅粉纖維(e)銅+氯化鋅纖維(f)碳酸銅纖維(g)硫酸銅纖維(h)硝酸銅纖維(i)氯化銅纖維

(本實驗圖片為作者親自拍攝)

實驗二、探討不同銅來源(離子銅)對銅氨纖維的影響

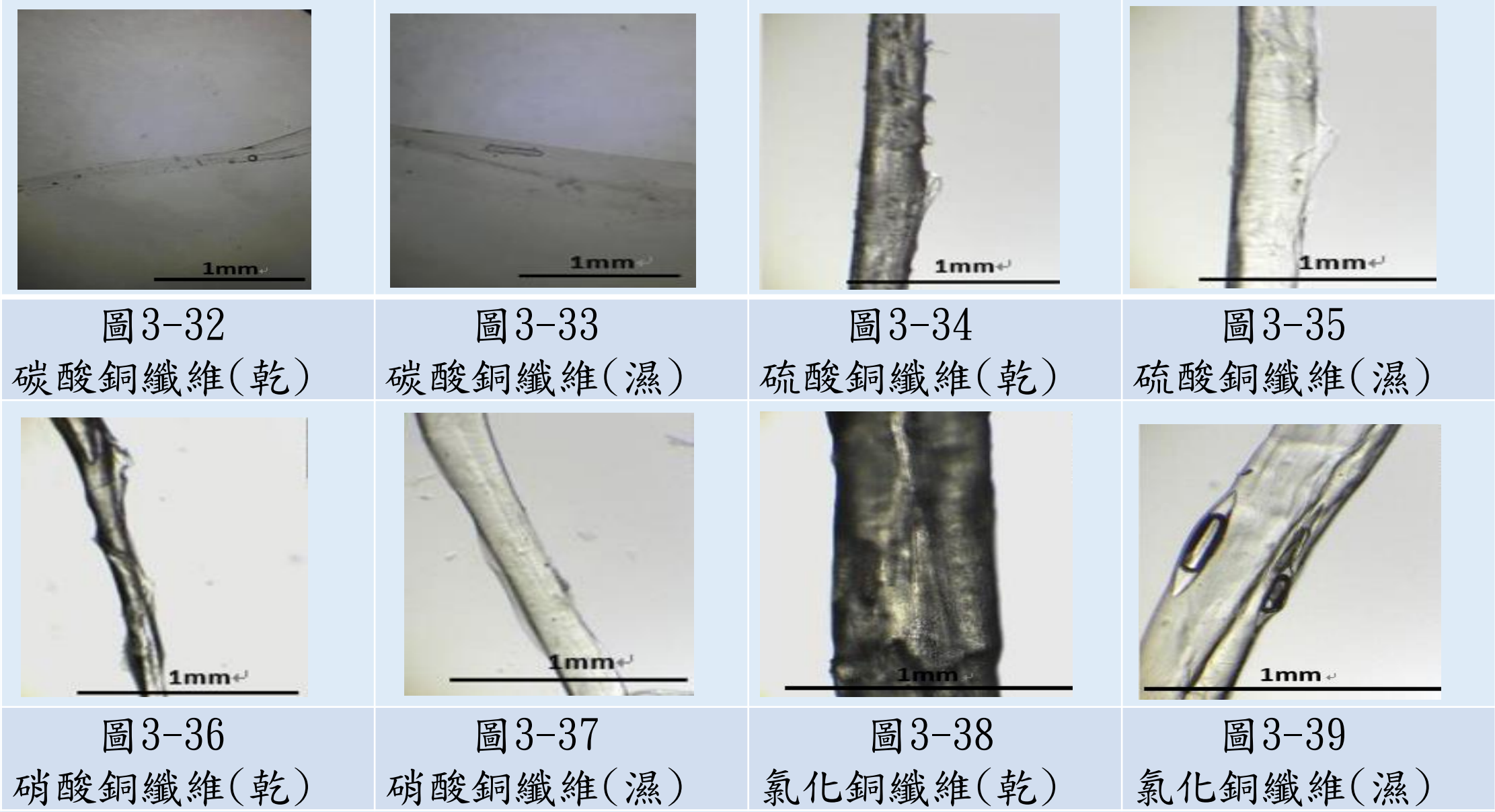
(一)不同離子銅



(二)離子銅製程結果

表3-2不同銅鹽在銅氨纖維合成的情形

	加入氨水	pH值	加入纖維素	加入氫氧化鈉後pH	纖維素狀況
碳酸銅	可形成錯合物	13.34	可溶	-	-
硫酸銅	可形成錯合物	12.02	不可溶	13.47	可溶
硝酸銅	可形成錯合物	11.7	不可溶	12.37	可溶
氯化銅	可形成錯合物	11.85	不可溶	12.26	可溶
醋酸銅	可形成錯合物	11.94	不可溶	13.01	不可溶
氧化銅	無法形成錯合物	12.49	-	-	-

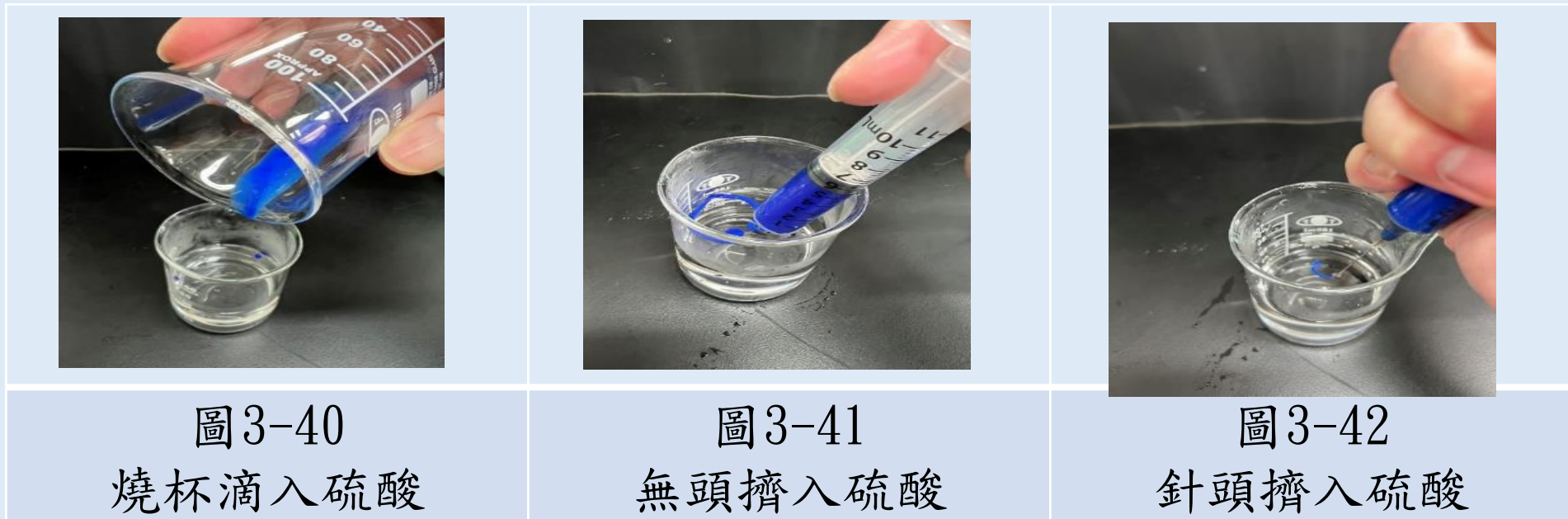


實驗二結果：

- 氧化銅無法溶於氨水中形成銅氨錯合物
- 醋酸銅可溶於氨水中形成銅氨錯合物，但無法溶解纖維素
- 硫酸銅、硝酸銅與氯化銅需加入氫氧化鈉後才可溶解纖維素，擠出纖維的較短
- 離子銅中碳酸銅所製成的纖維外觀較長
- 離子銅製成的乾纖維外觀皆平整，且纖維碰水後皆能維持外觀的完整性
- 碳酸銅製成的纖維內部有較大的氣泡

實驗三、探討不同擠壓方式對銅氨纖維影響

(一)纖維成型



(二)纖維外觀

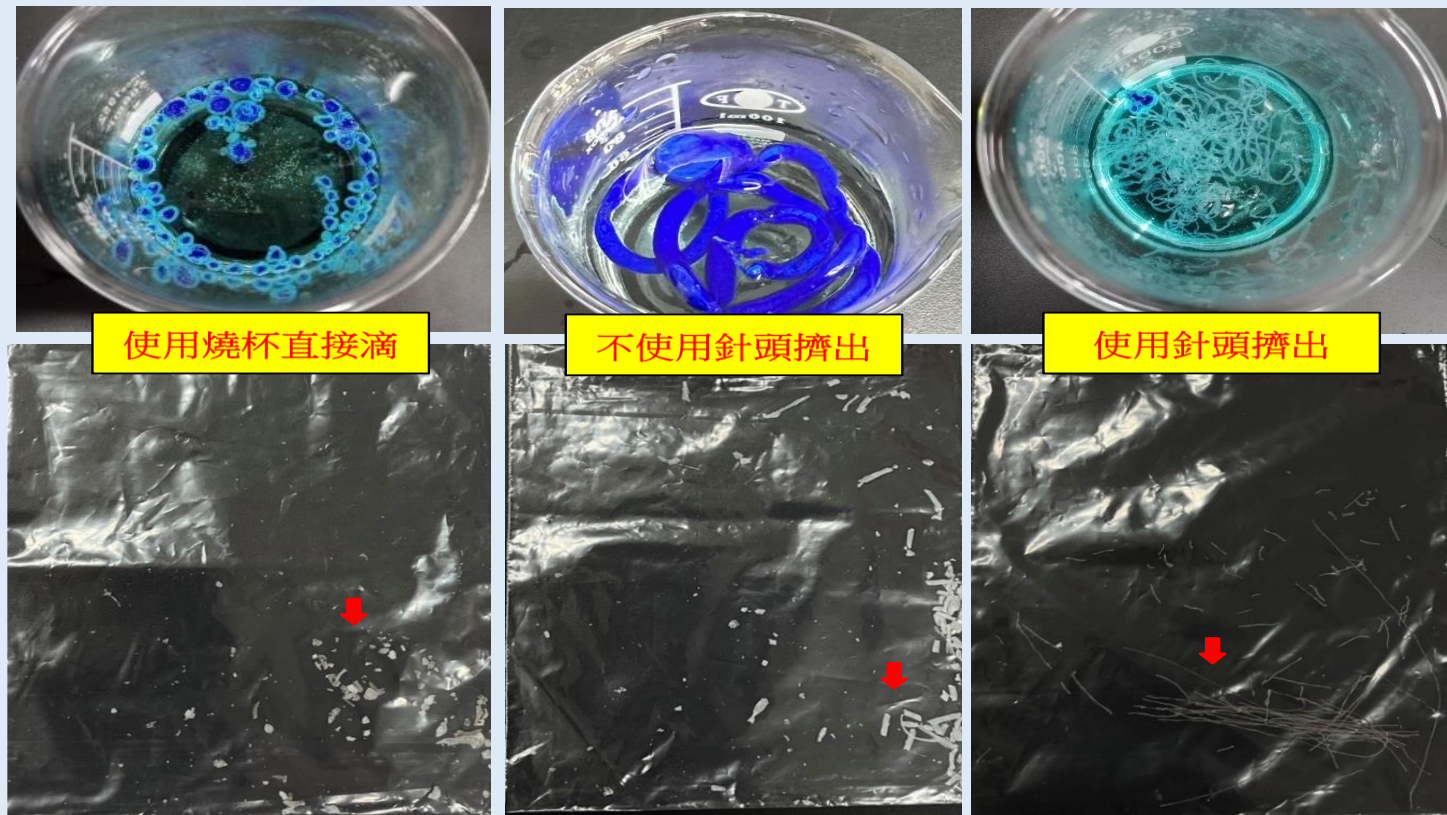
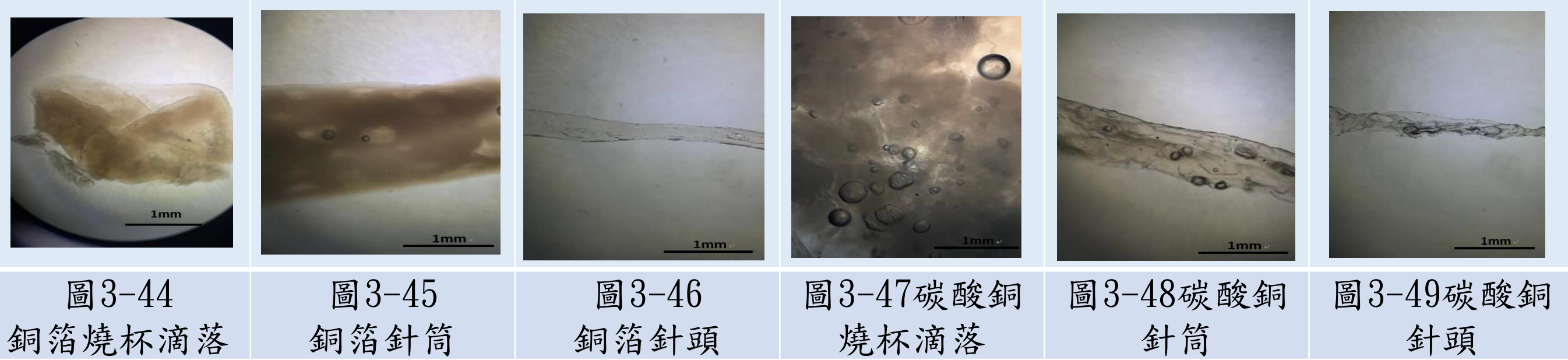


圖3-43不同擠出方式對銅氨纖維的影響



實驗三結果：

- 燒杯滴落：顆粒狀；內部呈膏狀；顯微鏡下成團狀
- 無針頭：纖維呈現較粗的條狀，所需較久變白，易斷裂；顯微鏡下銅箔製程的纖維呈條狀分布，纖維分布不均勻；碳酸銅製程的纖維表面結構不平整且帶有氣泡
- 有針頭：纖維呈現細絲狀，很快變白，連續長度較長；顯微鏡下銅箔製程的內部均勻；碳酸銅製程的纖維有氣泡且表面不均勻

實驗四、探討不同濃度的成型液對銅氨纖維的影響

(一)纖維外觀



圖3-50不同濃度成型液對碳酸銅製程纖維的影響

(由左至右依序為3.47、2.6M、1.73M、0.87M、0.43M、0.17M、蒸餾水)

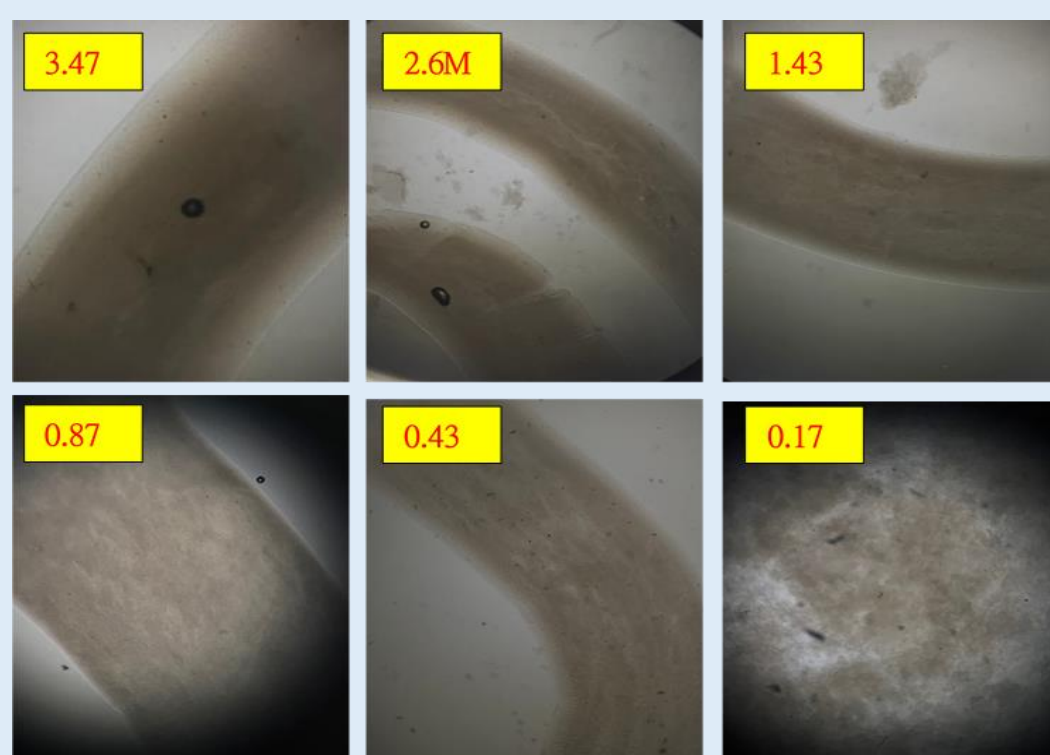
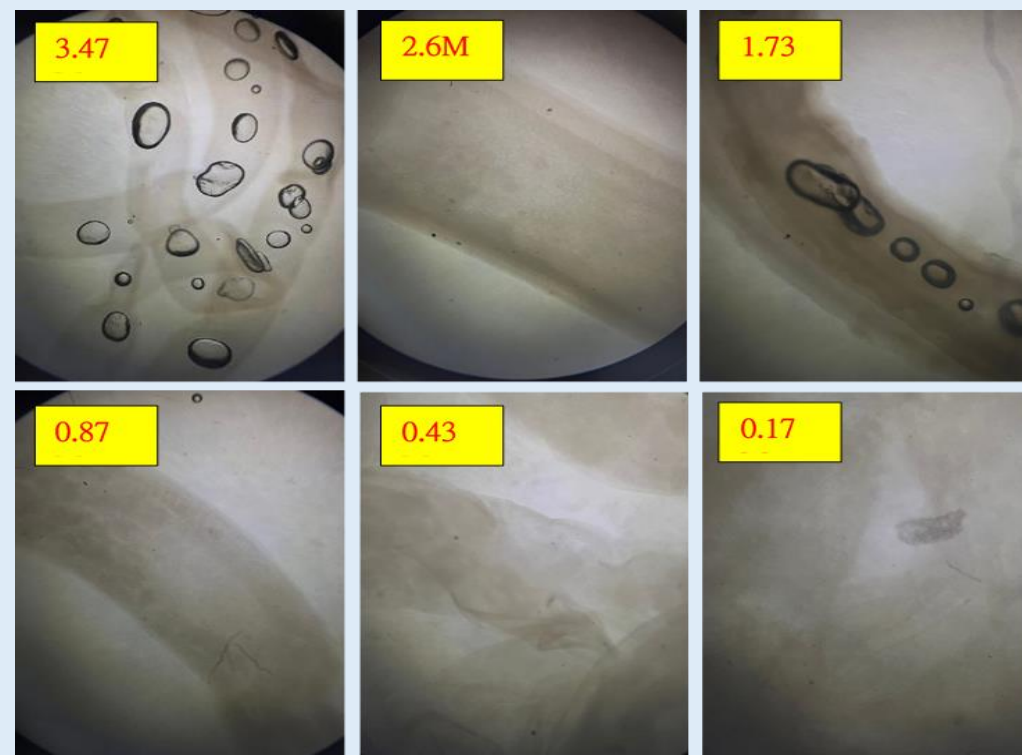


圖3-51不同濃度定型液對銅箔圖製程纖維在顯微鏡下的表現



3-52不同濃度定型液對碳酸銅製程纖維在顯微鏡下的表現

實驗四結果：

- 外觀：濃度越低的成型液在纖維與蒸餾水的邊界看起來越模糊
- 微觀：纖維微觀表現隨著濃度降低，纖維表面平整性下降，內部出現紊亂的光影

實驗五、不同製程的銅氨纖維對於拉伸強度的影響

(一)實驗步驟

1. 設計自製裝置：長尾夾內部黏上塑膠墊，並將長尾夾固定於砝碼上，使長尾夾能夠向上夾住銅氨纖維。
2. 測量方式：取20mm的樣品夾於長尾夾上，並將電子天平歸零，取另一長尾夾夾住樣品後向上提起，過程中將電子天平讀數全程錄影，樣品斷裂時的讀數即為樣品的拉伸強度。
拉伸率(%) = (樣品斷片總長度/樣品原長度) × 100%

式一、拉伸率計算方式

(二)拉伸強度圖表

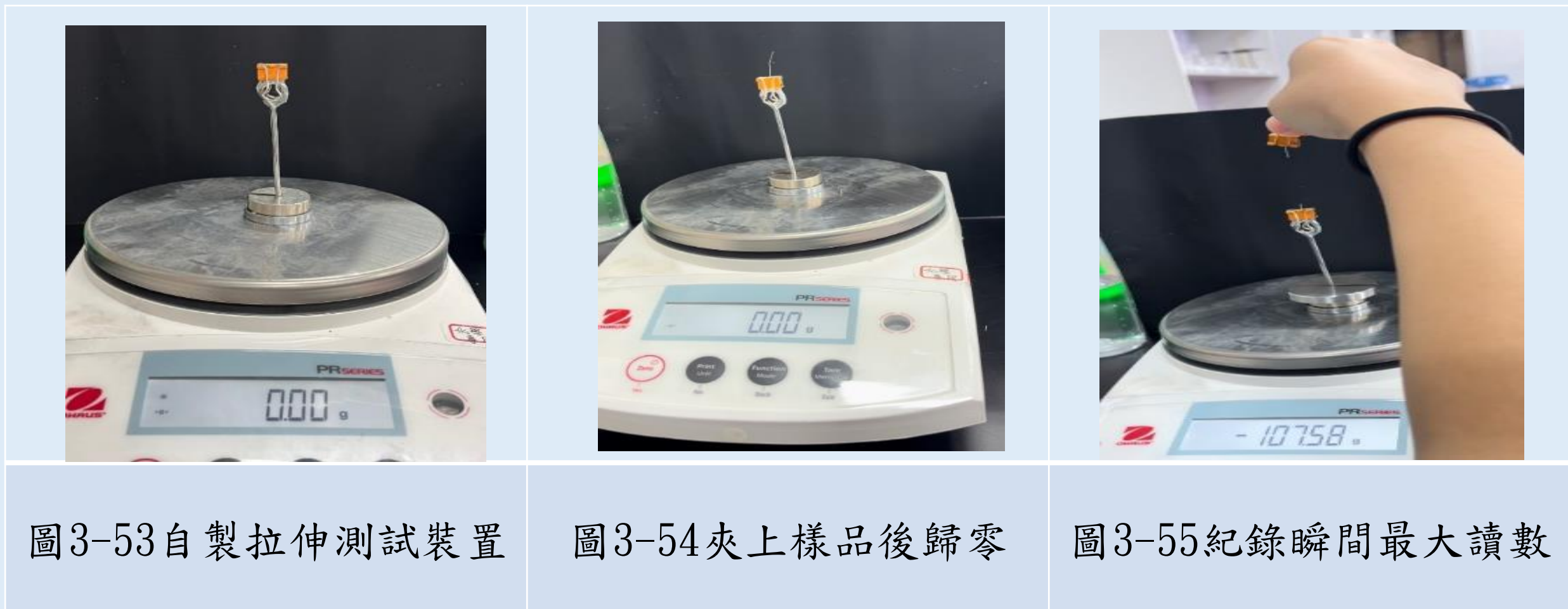


圖3-53自製拉伸測試裝置

圖3-54夾上樣品後歸零

圖3-55紀錄瞬間最大讀數

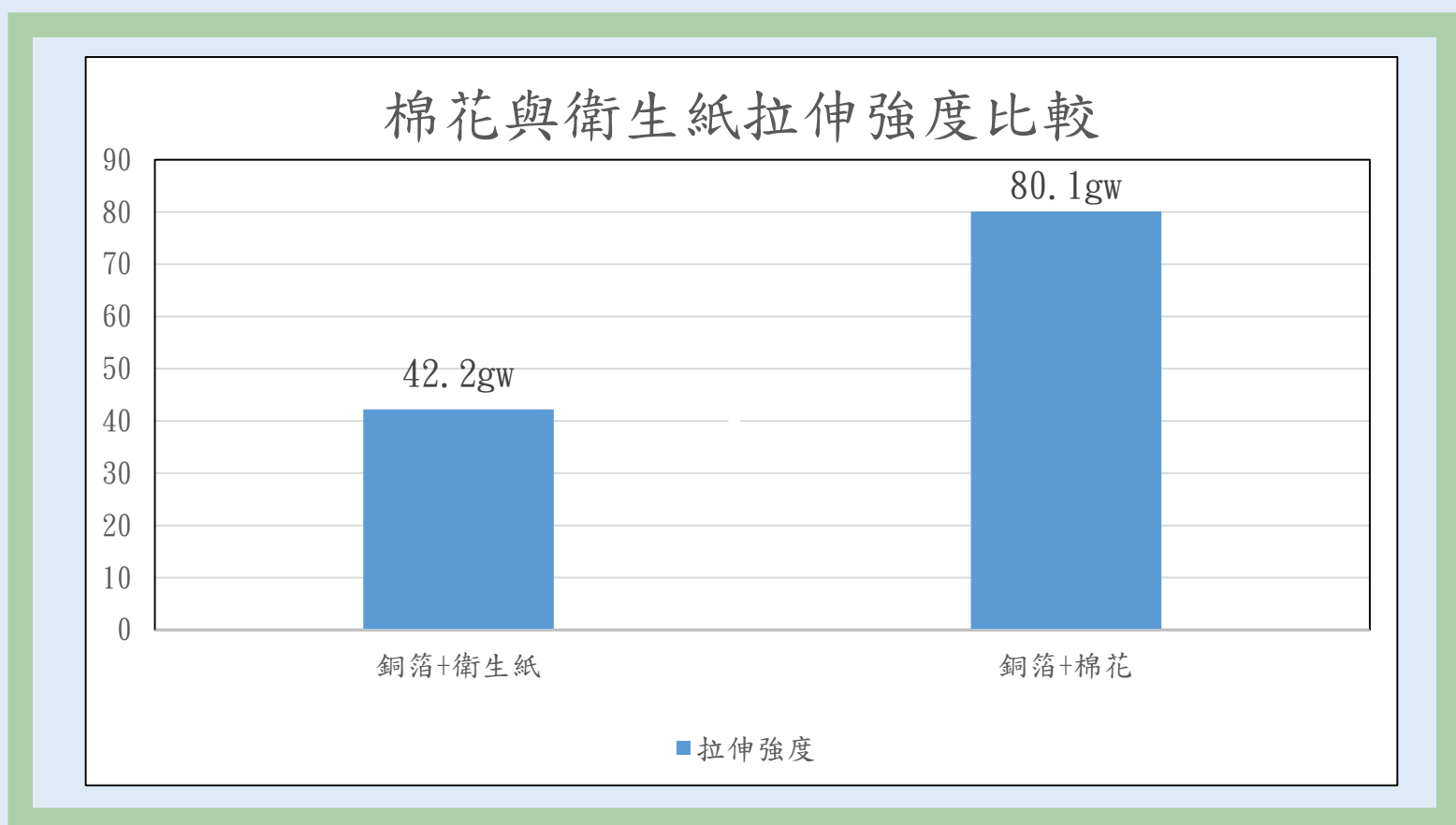


圖3-56棉花與衛生紙拉伸強度比較

- 棉花製成纖維有較高的拉伸強度

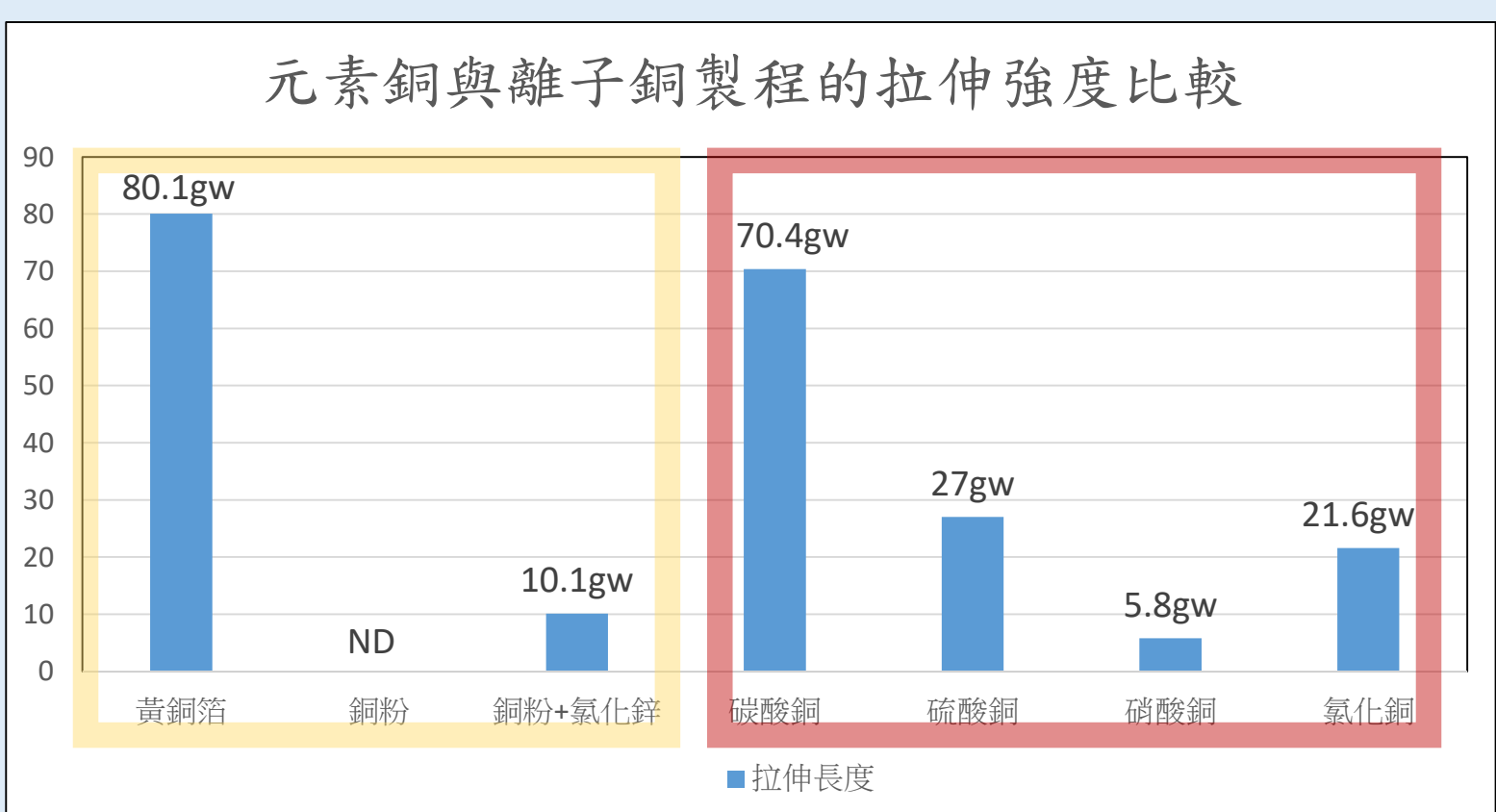


圖3-57元素銅與離子銅製程的拉伸強度比較

- 元素銅：黃銅箔製成的纖維有最高的拉伸強度
- 離子銅：碳酸銅製成的纖維有最高的拉伸強度

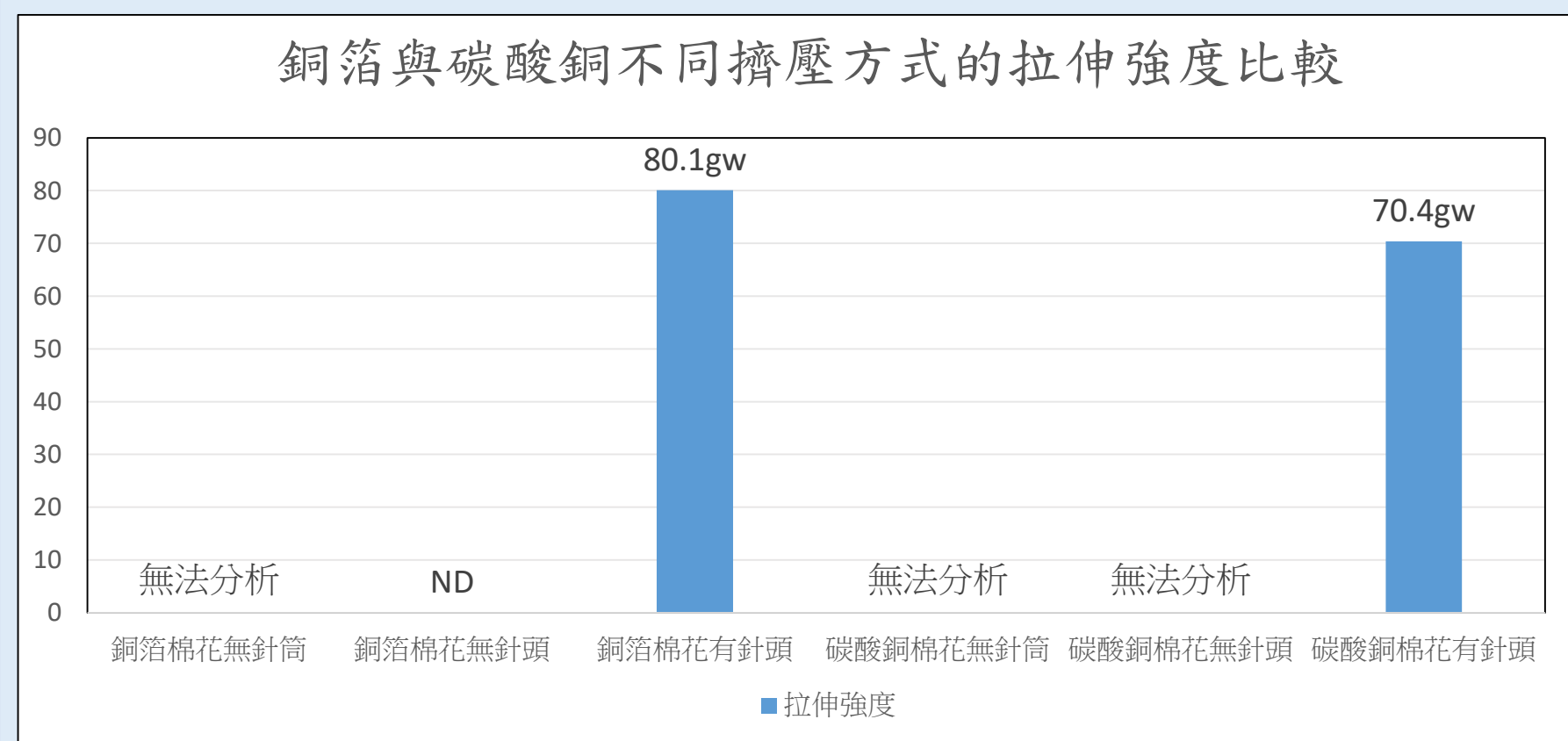


圖3-58銅箔與碳酸銅不同擠壓方式的拉伸強度比較

- 無針頭的樣品結構鬆散無法分析一碰即斷，可以發現針筒擠出的纖維寬度越寬其拉伸強度就越低

一、影響纖維溶解於銅氨錯合物的因素

(一)元素銅活性大小

- 元素銅接觸面積
- 合金與費米能級

銅粉的使用量至黃銅箔七倍時，錯合物才可溶解纖維素，推測主要原因為黃銅合金的形成提高了銅原子與氧氣的反應性。

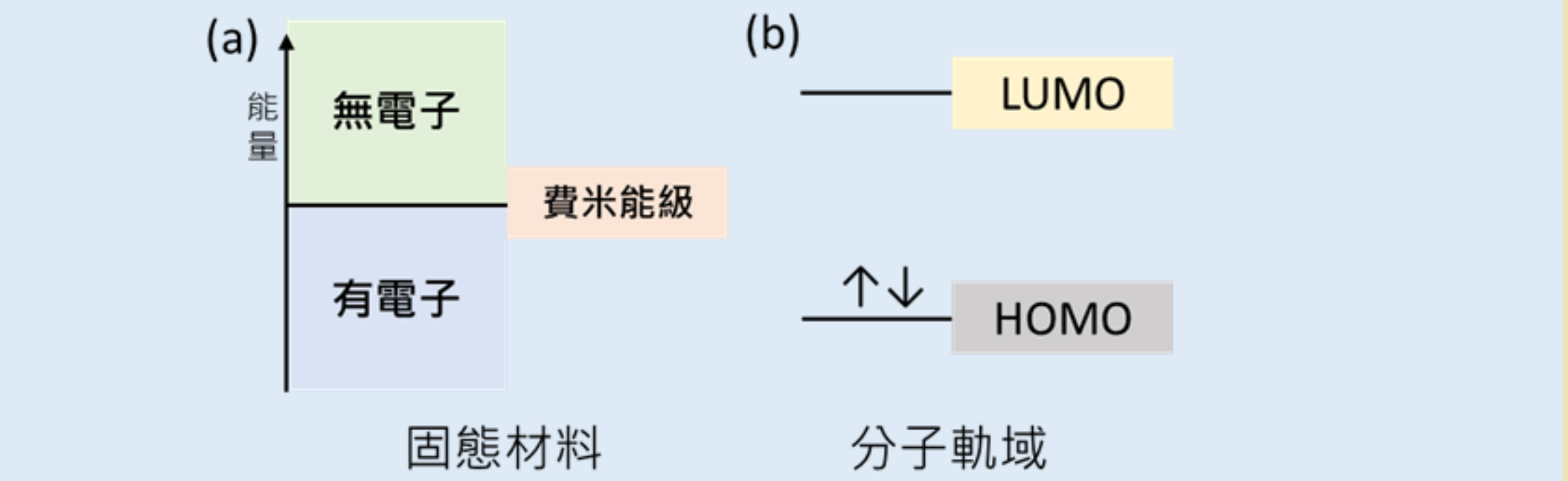


圖4-1 (a)固態材料的費米能級 (b)分子軌域的最高已占分子軌域(HOMO)與最低未占分子軌域(LUMO)

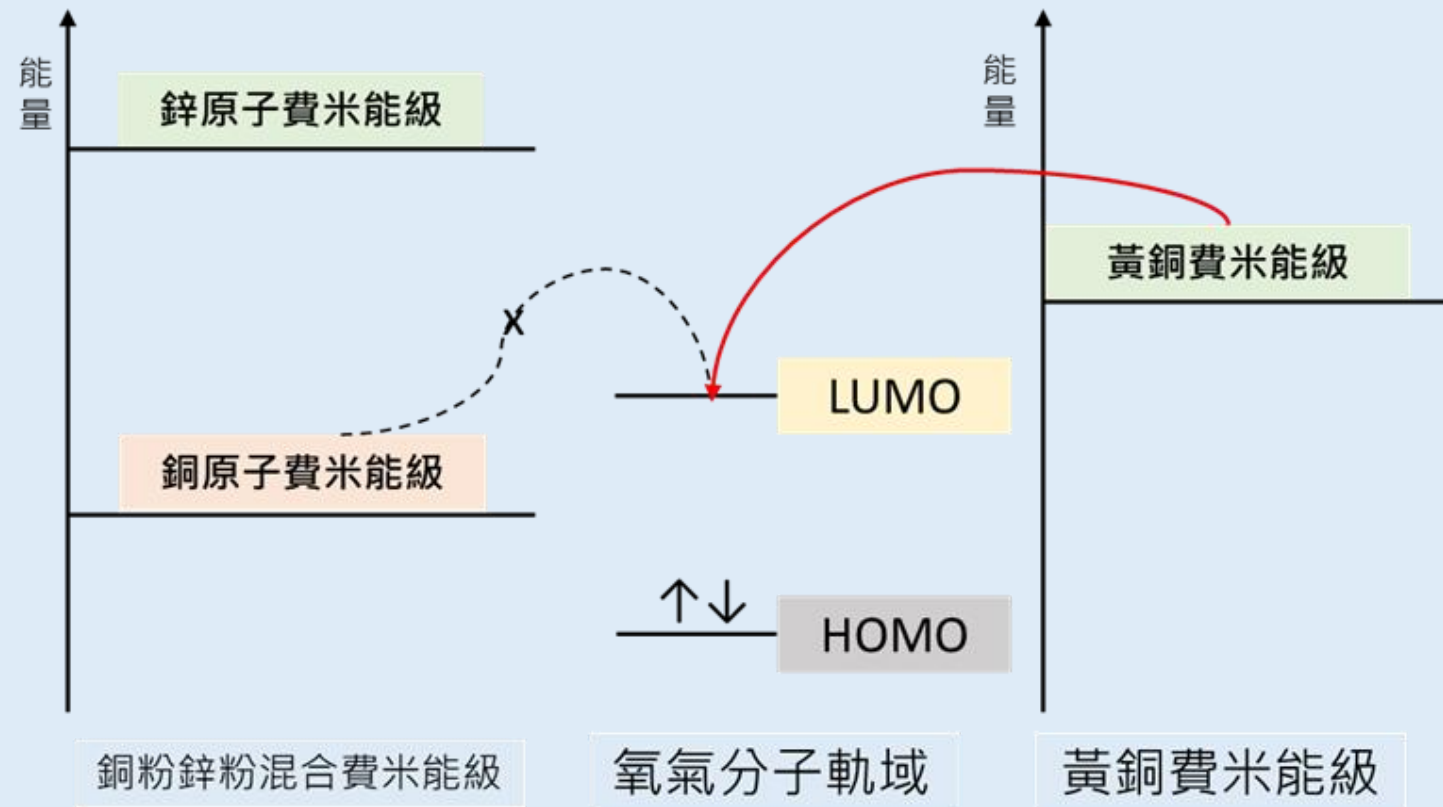


圖4-2 黃銅與銅鋅粉混合費米能級示意圖 (圖片由指導老師用power point協助繪製)

(二)陰離子對銅氨纖維的影響

- 酸鹼性影響

碳酸銅所形成的錯合物溶液鹼性較強，而其他錯合物溶液鹼性較弱，需要額外加入氫氧化鈉才能形成足夠多的配位基使纖維素溶解於其中。

- 氫鍵作用力影響

推測醋酸根可與纖維素形成—OH...O=C—型的氫鍵，造成纖維素無法溶解於錯合物溶液的狀況，解釋了加入氫氧化鈉之後仍無法溶解纖維素的現象。(如圖4-3)

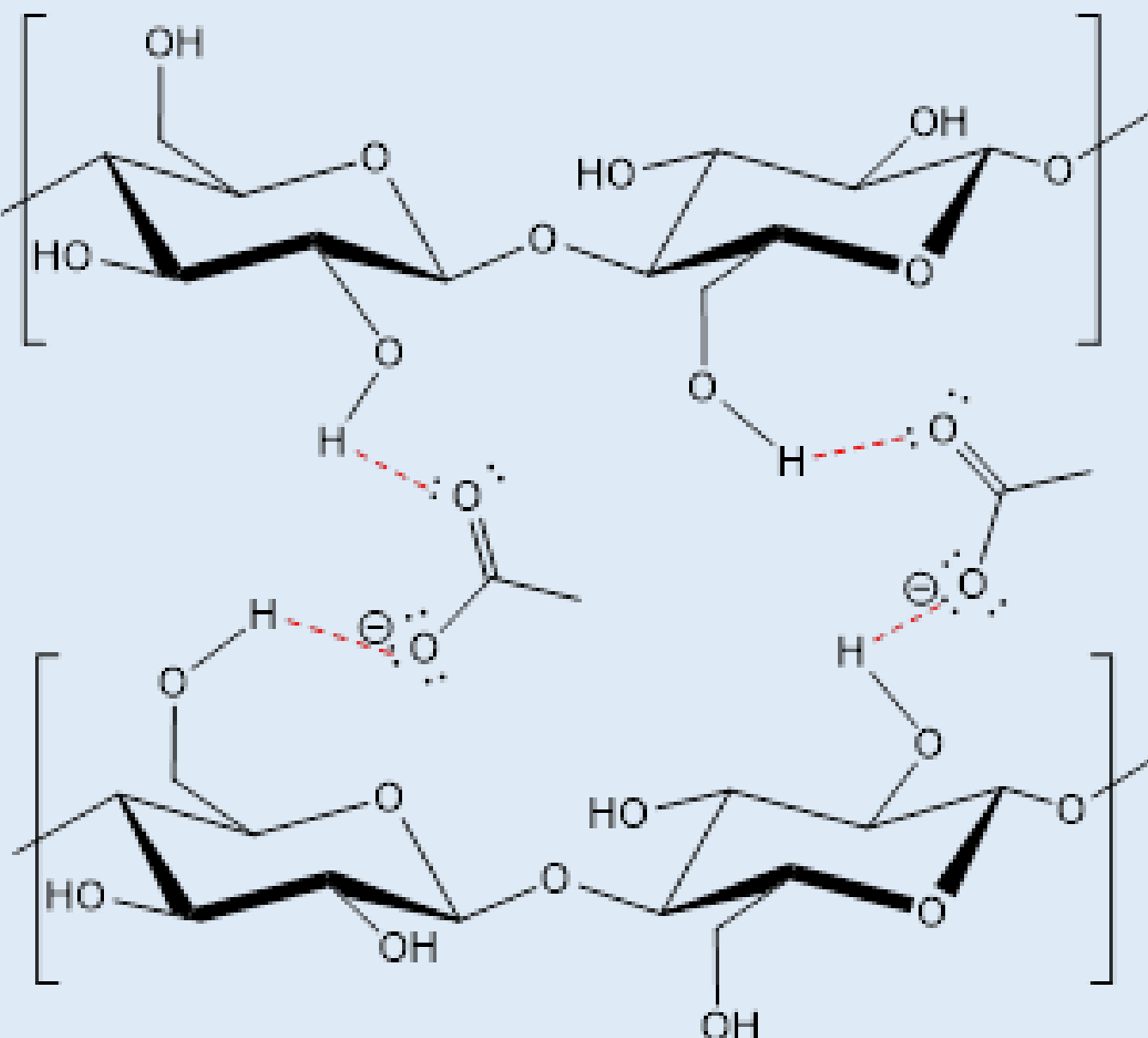


圖4-3 纖維素與醋酸根形成氫鍵作用力的示意圖 (圖片由指導老師用chemdraw協助繪製)

二、影響拉伸強度的因素

(一)纖維素分子長度

短鏈分子黏度較低容易流動[5]，而長鏈分子黏度大幅提升，並出現非牛頓行為，易產生分子纏結(Entanglement)[6](如圖4-4)所示，纖維的分子纏結程度較低，拉伸強度較低。

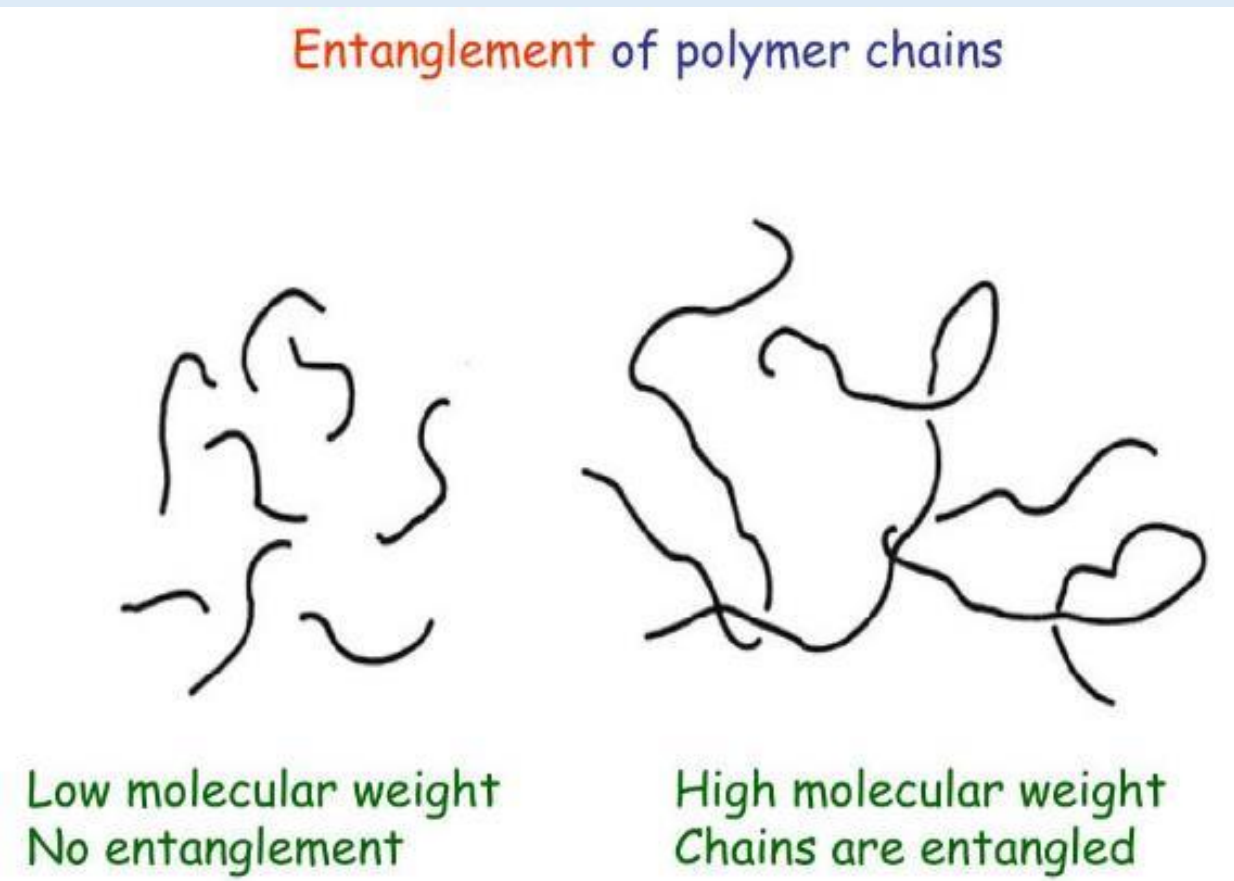


圖4-4 不同分子量的分子纏結(Entanglement)行為示意圖[6]

(本圖片引用自Dillan. (2014, October 5) Part 1. Introduction to Polymer Science. SlideServe.)

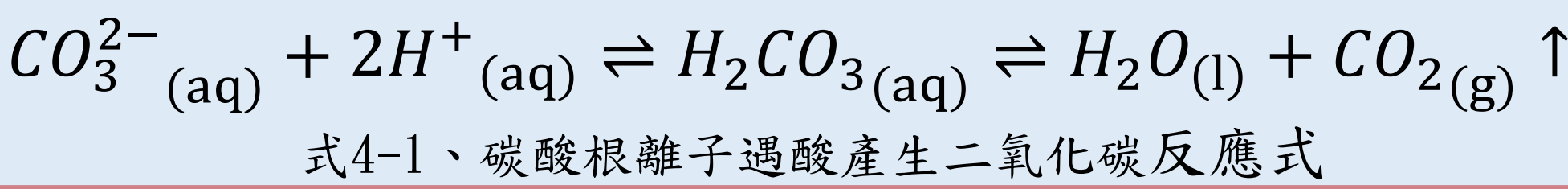
(二)有效銅離子濃度

- 元素銅中黃銅箔在協同效應(synergetic effect)的作用之下，銅離子釋出效率優於銅粉，因此製成的纖維有較高的拉伸強度。

- 離子銅製程中碳酸銅因無結晶水，Cu²⁺濃度高，因此製成的纖維有較高的拉伸強度。

(三)陰離子反應

碳酸銅製程在將銅氨纖維液擠入硫酸成型液時，其中的碳酸根遇到酸會產生二氧化碳(如式4-1)，纖維中的二氧化碳顆粒會降低纖維的分子纏結，因此拉伸強度較黃銅箔低。



(四)不同擠壓方式

- 針頭口徑若較窄小，擠壓針頭動作會增加高分子重疊比率[7](如圖4-5)，形成的纖維有較高的拉伸強度。
- 針筒開口較大，分子在擠出過程中高分子重疊比率較低，所形成的纖維束分子纏結較少，因此拉伸強度低。

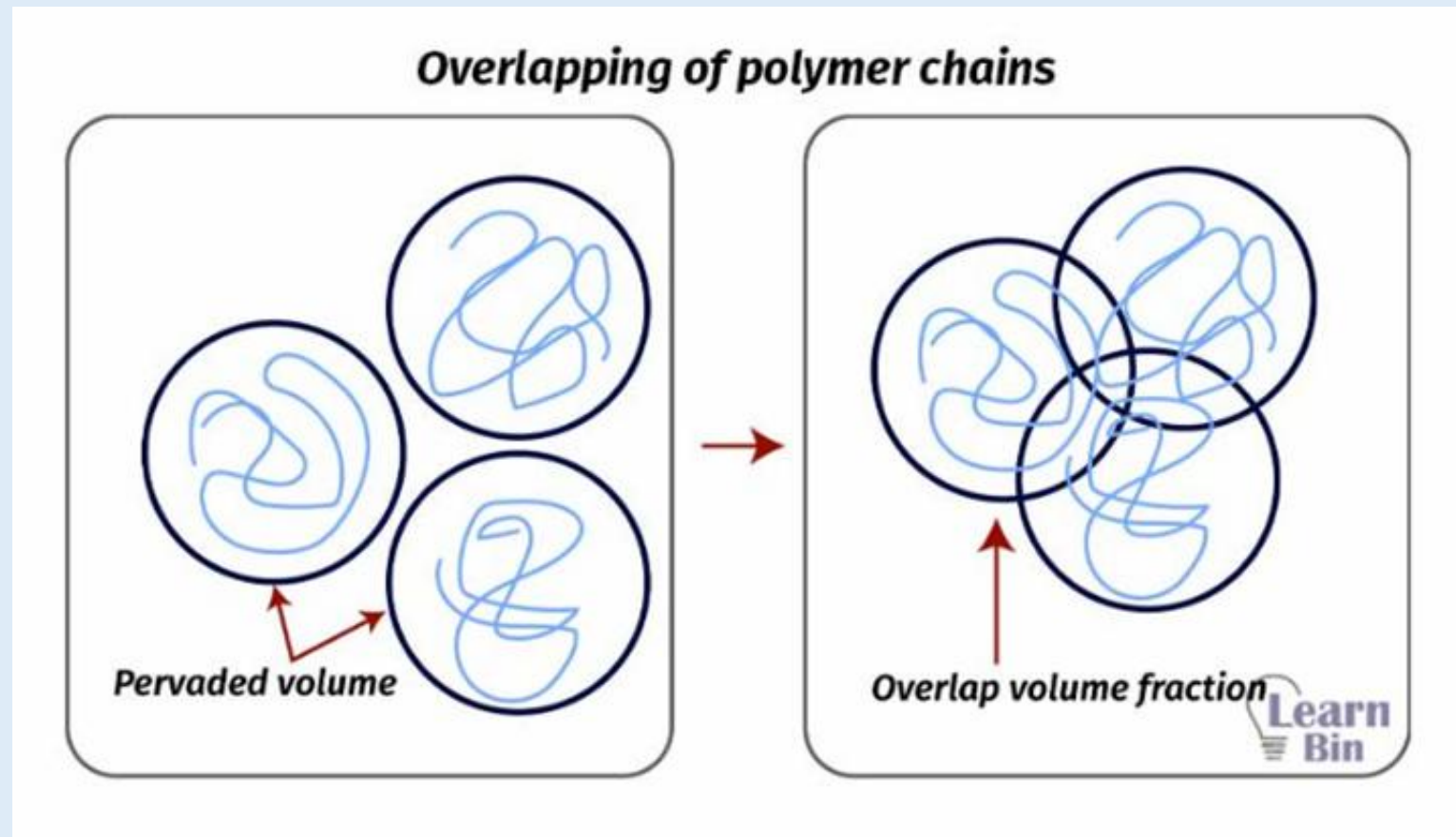


圖4-5 重疊比率與分子纏結關係[7]

(本圖片引用自Madubhashini, S. (2022, December 21). Dynamics of entangled polymers.)

三、影響微觀影像的因素

(一)不同纖維來源

使用衛生紙製程的銅氨纖維在水中出現較紊亂的外觀，可能的原因為分子鏈的長度較短，銅氨纖維的結晶度較低，因此在外觀上出現較不平整的現象。

(二)不同銅離子來源

在顯微鏡影像中可以看到銅粉、銅粉加氯化鋅因有效銅離子的濃度較低，因此纖維素較難成束，導致進入成型液後就分散開來恢復成原本棉花纖維的樣子，使用碳酸銅製程的銅氨纖維較容易有氣泡。

(三)不同擠壓方式

使用針頭的銅氨纖維在顯微鏡影像中較為平整，若是不使用針頭或使用燒杯直接滴落的顯微鏡影像可以看出影像纖維較不平整，是因為缺乏擠壓力量使纖維素分子無法形成結晶區所導致的結果。

(四)不同成型液濃度

硫酸成型液的濃度過低時，會導致被錯氨銅離子抓住纖維脫離銅離子的速度太慢，使水分與其他離子滲入纖維間隙，降低了纖維素結晶區的比例，外觀的紊亂程度越高，甚至較難形成銅氨纖維。

伍、結論

一、纖維素長短影響纖維外觀及拉伸強度。

二、銅原子與鋅原子形成合金結構，在的合成過程能使用更少的銅原料達到較高的拉伸強度。

三、銅離子製程中銅鹽選擇應偏鹼性，碳酸銅最適合做為銅氨纖維反應的前驅物。

四、過低的硫酸成型液濃度會使銅氨纖維生成效果不佳。

陸、參考文獻資料

[1]Schweizer, E. (1857). Das Kupferoxyd-Ammoniak, ein Auflösungsmittel für die Pflanzenfaser. *Journal für Praktische Chemie*, 72(1), 109–111.

[2]Hindi, S. S. (2024). Wastepaper-Based Cuprammonium Rayon Regenerated Using Novel Gaseous–Ammoniation Injection Process. *Polymers*, 16(17), 2431.

[3] Smith, S. (n.d.). Lecture 2: Introduction to electrochemistry. University of Edinburgh. https://www.homepages.ed.ac.uk/ssmith13/course/lecture2_files/Lecture%20%20-%20Notes.pdf

[4]王毓麟. (2013). 紡織材料學. 東華大學出版社

[5]胡文浩、王莉. (2016). 高分子材料流變學. 科學出版社

[6]Dillan. (2014, October 5). Part 1. Introduction to Polymer Science. SlideServe. <https://www.slideserve.com/dillan/part-1-introduction-to-polymer-science>

[7]Madubhashini, S. (2022, December 21). Dynamics of entangled polymers. Learnbin. <https://learnbin.net/dynamics-of-entangled-polymers/>