

臺灣二〇〇三年國際科學展覽會

科 別：環境科學科

作品名稱：『吸凍！』--再造保麗龍的第二個春天

得獎獎項：環境科學科佳作

儲備代表

學 校：國立高雄師範大學附屬高級中學

作 者：鄭玉辰

作者簡介



我叫鄭玉辰，是高雄師大附中高一的學生，一方面因為父母都是高中化學教師，從小便耳濡目染，另一方面，自幼對自然科學就蠻有興趣的，尤其是做實驗時，那種快樂真是難以言喻Y.....。另外，學校提供了很好的實驗環境，先進的設備、充分的支援，使實驗能順利進行。從小六開始，我就開始接觸科展，一直到國三，四年間從未間斷，我想，若不是興趣使然，是無法這麼做下去的！今年希望能更進一步，參加國際科展，使視野更為廣闊。

『吸凍!』---再造保麗龍的第二個春天

將保麗龍再造為離子交換樹脂對處理重金屬廢水之研究

壹、摘要

中文摘要

本實驗先尋求將廢棄保麗龍磺酸化為陽離子交換樹脂(本實驗稱"保麗龍膠")的方法。將保麗龍依：丙酮溶解→硬化→打碎→與濃硫酸共煮三小時→浸於 50%硫酸溶液中→沖洗→以水浸泡的流程，即可達再造的目的；我們測得其磺酸化比例為 62.5%。再利用「碘滴定法」(浸泡式)與「相對電壓檢測法」(流動式)，依次尋求保麗龍膠吸附金屬離子的最佳條件。其中「碘滴定法」可有效測出銅離子濃度，但手續繁瑣；「相對電壓檢測法」最大的好處是知道保麗龍膠何時吸附達飽和必須再生。

目前我們所知，要保麗龍膠達到吸附陽離子的最佳效能，其條件依次為：使用細粒的保麗龍膠；低濃度的金屬離子溶液；質量愈大的保麗龍膠；低溫下較慢的金屬廢水流速及 pH 值約為 4.30 的銅離子廢水；鈉型的保麗龍膠吸附效能優於氫型。保麗龍膠對不同金屬離子亦有吸附力，單位體積所含離子數愈少，初始的相對電壓會愈高；在相同莫耳濃度下，不同離子的吸附力依次為 $\text{Cr}^{3+} > \text{Fe}^{3+} > \text{Ni}^{2+} > \text{Cu}^{2+} > \text{Co}^{2+}$ ；分次吸附確可將金屬離子完全去除；由吸附等溫線觀察得知，可能保麗龍膠為多孔物質，導致 500ppm 以下的吸附模式無法明確判斷，1000ppm 以上則為物理吸附模式；保麗龍膠可以再生也可被覆在砂粒上達到不錯的吸附效能；最後，我們將吸附過金屬離子的保麗龍廢膠與硫酸鈣、紙漿及些許的石灰(質量依序為 13 克、13 克、7 克、0.04 克)混合，可製成類似紙黏土，做成造型磁鐵，廢物利用十分有趣。

Abstract

The Experiment will, first of all, explore the ways to sulfonate expandable polystyrene into cation ion exchange resin (called “polystyrene rubber” hereafter in the experiment). The procedures of treating expandable polystyrene are as follows: acetone dissolve→hardening→smashing→boiling with sulfuric acid for three hours→immersing in 50% sulfuric acid solution→washing→immersing in water so that we may reach the goal of reconstruction. We calculate the sulfonated rate to be 62.5%. Then we make use of “Iodine Titration”(immersion method) and “Opposite Voltage”(floating method) to seek for the best conditions of adsorption the metallic ion through polystyrene rubber. The former can effectively calculate the concentration of copper ion, but the procedures are quite complex. The greatest advantage of the “Opposite Voltage” method is that we may know when the adsorption of polystyrene rubber is saturated and should be regenerated.

As far as we know at present, the conditions of obtaining the best effect that polystyrene may adsorb the cation ion are as follows: fine particles of polystyrene rubber; low concentration metallic solution; polystyrene rubber of which the mass is greater; at lower temperature, slower waste water flow speed and the copper ion waste water with pH 4.30; the adsorption effect of sodium type polystyrene rubber is better than the hydrogen type. Polystyrene rubber also has adsorption effect toward different metallic ion. The less ion per cubic contains, the higher the original opposite voltage. With the same mole concentration, different ion adsorption effects may range as follows: $\text{Cr}^{3+} > \text{Fe}^{3+} > \text{Ni}^{2+} > \text{Cu}^{2+} > \text{Co}^{2+}$. The batch adsorption definitely may erase metallic ion completely. By observing the adsorption isotherm, possibly because the polystyrene rubber is a multi-apertured matter, we find that it is impossible to judge exactly the adsorption model of those metallic ion solutions of which the concentrations are below 500ppm. Those which are over 1,000ppm belong to physical adsorption models. Polystyrene may be regenerated and get an adsorption effect by coating sand particals. In the last analysis, we may make paper clay and magnets of different styles by mixing the adsorbed metallic ion polystyrene rubber with calcium sulfate, paper pulp and a little lime(the mass are respectively 13g, 13g, 7g, and 0.04g). The reuse of waste is really very interesting.

貳、簡介

保麗龍給我們的印象是所謂的『萬年垃圾』，對環境的污染不僅嚴重且時間久遠，二年多前，學校就開始宣導保麗龍對環境的破壞，同時禁用保麗龍餐具，可是街上利用保麗龍當作食具的情況卻屢見不鮮，因此我想有沒有方法可以讓保麗龍搖身一變成爲有用的東西。在與老師討論後，得知保麗龍的成分與濾水器中陽離子交換樹脂的成分接近，再加上實驗室張阿姨對學長學姊們實驗用完的重金屬離子廢水的處理，十分頭疼，於是我們希望能將保麗龍轉變成類似陽離子交換樹脂的東西，用來吸附水中有害的金屬離子。

傳統的離子交換樹脂都是球狀顆粒，沒有從保麗龍再造來製得，二年來，我們成功地將回收的保麗龍再製成可以吸附銅離子的保麗龍膠⁽¹⁾，它的形狀類似半透明、不規則形狀的「仙草蜜」，與市售的離子交換樹脂在外觀上非常的不一樣，但卻一樣可以吸附金屬離子，尤其在微量濃度下，吸附效果更是不錯。

幾年前，高雄縣二仁溪曾爆發過「綠牡蠣事件」，近年來分別在 90 年 9 月屏東的銅木瓜事件與 91 年 2 月的台灣新聞報與中國時報均報導有關銅毒害與實驗室廢水難處理的問題。可見金屬廢水污染問題的嚴重性，因此，我們興起進一步研究與對其他離子吸附的念頭，但是去年利用碘滴定測定吸附能力的方法，非常繁瑣及枯燥，讓我們對這個研究裹足不前，因此今年積極尋找另一個便利且有效的方法，結合電路利用相對電位的變化來檢測銅離子廢水的處理效果。

本研究分爲三大部分，探討廢保麗龍製成離子交換樹脂後，對重金屬離子吸附的最佳條件。

Part A

尋找保麗龍再造的方法一

- (一) 比較陽離子交換樹脂與保麗龍成分上的差異，以確定實驗方向。
- (二) 保麗龍再造方法的確立。
- (三) 尋找印證保麗龍膠可以吸附金屬離子的方法：分別以「碘滴定法(浸泡式)」、「相對電位檢測法(流動式)」加以檢測。
- (四) 保麗龍碎粒處理的方法對吸附能力的比較：分別比較以濃硫酸及 50%的硫酸溶液去煮膠，煮完後的保麗龍膠是否以 50%硫酸溶液浸泡處理；浸泡後的保麗龍膠是否再以水充分泡開等不同方式處理的廢保麗龍，在吸附金屬離子的能力上有何不同。
- (五) 保麗龍碎粒磺酸化的印證：以碘滴定法計算保麗龍磺酸化的比例。

Part B

由於 A 部分的實驗得到了正面的效果，因此挑出在 A 部分有最佳吸附能力的試樣，尋找保麗龍膠最佳的吸附條件一

- (一) 保麗龍膠顆粒大小對吸附效能的比較：先將粗、中、細粒的保麗龍碎粒加以處理後，

分別以「碘滴定法(浸泡式)」、「相對電位檢測法(流動式)」檢測其吸附能力，並作對照。

- (二) **不同濃度的銅離子廢水處理效能的比較**：將不同濃度的 CuSO_4 溶液分別浸泡或流過粗粒(碘滴定法)或細粒(相對電位檢測法)的保麗龍膠，分別以「碘滴定法(浸泡式)」、「相對電位檢測法(流動式)」檢測其吸附能力，並做對照。
- (三) **不同質量的保麗龍膠吸附效能的比較**：將不同質量的粗粒保麗龍膠浸泡在 0.01M 的 CuSO_4 溶液中，以「碘滴定法」檢測其吸附能力。
- (四) **銅離子廢水的流速對廢水處理效能之比較**： CuSO_4 溶液用兩種不同的流速通過細粒的保麗龍膠，以「相對電位檢測法」檢測其吸附能力。
- (五) **廢水的 pH 值對保麗龍膠吸附效能的影響**：在酸性範圍內配製四種不同 pH 值的 CuSO_4 溶液，分別通過細粒保麗龍膠，以「相對電位檢測法」檢測其吸附能力。
- (六) **溫度對保麗龍膠吸附效能的影響**：將 20ppm 的 CuSO_4 溶液控制在三個不同溫度，分別通過細粒保麗龍膠，以「相對電位檢測法」檢測其吸附能力。
- (七) **保麗龍膠陽離子類型對吸附效能的比較**：探討氫型與鈉型的保麗龍膠對金屬離子吸附能力的不同。
- (八) **保麗龍膠對不同價數的金屬離子吸附效能的比較**：以細粒的保麗龍膠分別處理不同種類及價數的金屬離子(Cr^{3+} 、 Fe^{3+} 、 Co^{2+} 、 Ni^{2+} 、 Cu^{2+})，以「相對電位檢測法」檢測其吸附能力。
- (九) **保麗龍膠分次吸附溶液中銅離子的測定**：以浸泡的方法，每十分鐘換入新膠，以「碘滴定法」探討溶液中銅離子濃度的變化。
- (十) **保麗龍膠吸附機制類型的探討**：利用測量「吸附等溫線」嘗試了解保麗龍膠的吸附類型究竟是物理吸附還是化學吸附。

Part C

由於在 B 部分的實驗產生了許多吸附達飽和的廢棄保麗龍膠，以及我們想能夠更像一般離子交換樹脂處理廢水的樣子，因此我們進行了**保麗龍膠的再處理**—

- (一) **保麗龍膠再生能力的探討**：以鈉型的保麗龍膠用飽和食鹽水浸泡，以「碘滴定法」探討一次再生與二次再生的吸附力。
- (二) **廢保麗龍膠做成塑土的試驗**：參考紙黏土的做法，將廢保麗龍膠做成可愛的「造型磁鐵」。
- (三) **將保麗龍膠被覆在砂粒上對處理廢水中銅離子效能的比較**：改變溶解廢保麗龍的溶劑，將砂粒浸泡其中，待充分吸收後以 A 部分的煮膠方式處理，所得產物填入吸附管中，以「相對電位檢測法」檢測其吸附能力。

叁、實驗系統及方法

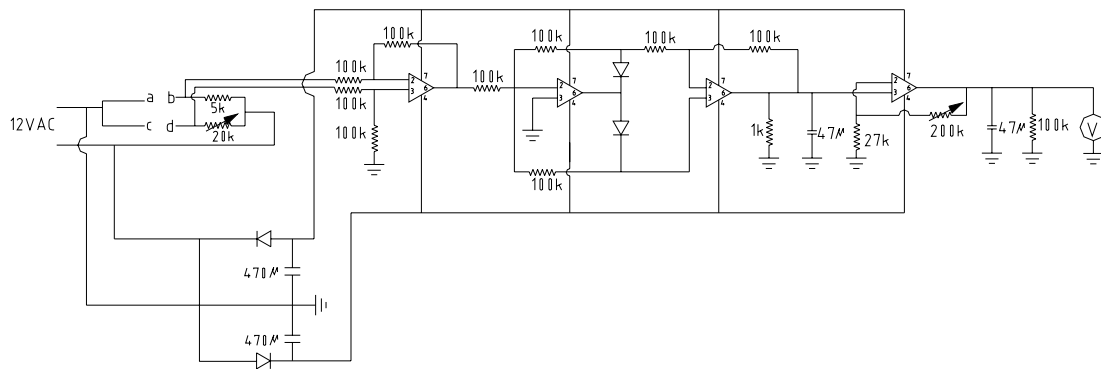
在這一單元中我們分四個小節，分別介紹我們實驗系統、實驗原理、實驗器材與藥品及實驗步驟。

一、實驗系統

圖 3-1 為我們今年所用的實驗系統示意圖，和去年的碘滴定法比起來有兩個特點：第一個是操作簡便；其次是藉由兩微型電解槽的相對電位降到 0，可知保麗龍膠的吸附已達飽和，必須再換入新膠。

我們的實驗系統可分為相對電位檢測器與濃度檢測器兩部分。

1. 相對電位檢測器：包含一個『指示器』電路板、兩個微型電解槽、一個保麗龍膠(吸附劑)儲存槽及一個雙向蠕動幫浦。
2. 『指示器』電路板：電路圖(10)如下----



利用兩微型電解槽 A 及 B，以檢驗金屬廢水進水口與出水口的導電度。如上圖 a、b 及 c、d。

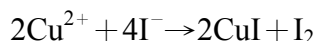
以電阻、可變電阻、二極體、電容器、變壓器、IC741 等零件，組成可放大訊號、消除輸入電極信號雜訊的電位指示器。

3. 運算放大器：主要由四個 IC 晶片(741)組成，利用晶片比較兩電流之電壓值，讀出放大後的電壓，再經比較、放大、比較、放大，直到通過四晶片後的放大值，可利用 15V 的伏特計，讀出正值的電壓數。(電路通電後須保持單向，以方便讀取正值。)
4. 當微型電解槽 A 中裝滿標準液時，伏特計讀數標定為 10；而當微型電解槽 A 與 B 都裝滿標準液時，伏特計讀數標定為 0(此過程我們稱為「校正」)。相對地，在實驗過程中，伏特計讀數愈大，表示 A、B 兩微型電解槽內的離子濃度差愈大，亦即保麗龍膠的吸附效果愈好。
5. 雙向蠕動幫浦：有 10 個刻度的轉速調整，最大流速為 10ml/分，幫浦馬達一轉動，溶液可同時一進一出。我們因為馬達流速不大，所以本實驗只控制在刻度 6(流速 5ml/分)及刻度 10(流速 10ml/分)上操作。
6. 保麗龍膠(吸附劑)儲存槽：以底片盒改裝，上為廢水入口，下為吸附後廢水出口，內襯絲襪以防止保麗龍膠被抽出。
7. 濃度檢測器：這是 SP-870 的光度比色計，我們分別選取有顏色的金屬離子，如： Cr^{3+} (藍綠色)、 Fe^{3+} (黃色)、 Co^{2+} (粉紅色)、 Ni^{2+} (綠色)及 Cu^{2+} (藍色)或添加藥品產生錯離子，如在 Cu^{2+} 溶液中加入過量氨水形成銅氨錯離子(深藍色)以加深度，先選取好各金屬離子的吸

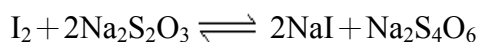
收波長(Cr^{3+} : 415nm、 Fe^{3+} : 360nm、 Co^{2+} : 509nm、 Ni^{2+} : 722nm 及 Cu^{2+} : 581nm)，利用標準液與溶劑設定好儀器，再利用待測液與標準溶液之色差比較出待測液之濃度。

二、碘滴定法之原理⁽¹¹⁾

以「碘滴定法」檢測硫酸銅溶液中銅離子的含量，其原理如下：
在微酸性溶液中，如有過量 I^- 存在，會與 Cu^{2+} 反應：



產生的碘(I_2)用澱粉為指示劑，以 0.1M 硫代硫酸鈉($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$)滴定：



由 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 的消耗量算出參與反應的 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 莫耳數，繼而分別求出 I_2 及 Cu^{2+} 的莫耳數。

本實驗僅以硫代硫酸鈉溶液所消耗的體積來代表溶液中銅離子含量的多寡，硫代硫酸鈉溶液所消耗的體積愈多表溶液中銅離子含量愈多。

三、印證保麗龍是否磺酸化之原理⁽¹²⁾

磺酸化後的保麗龍— $(\text{C}_8\text{H}_8\text{SO}_3)_n$ —，經完全燃燒後，會產生 $\text{CO}_2(\text{g})$ 、 $\text{SO}_2(\text{g})$ 及 $\text{H}_2\text{O}(\text{g})$ 。

為確保乾燥後的保麗龍膠完全燃燒，我們在裝有乾膠的硬試管內通入以雙氧水與二氧化錳製備的氧氣；為確保產生的氣體能完全溶於水中，我們將燃燒產生的氣體導入 0.1M 的 $\text{NaOH}(\text{aq})$ 中，將此溶液以校正過濃度的碘液來滴定。

1. 0.05N 碘標準溶液：

秤量 20gKI 與 6.35g I_2 置於 1,000ml 燒杯中，再加入 100ml 之蒸餾水攪拌數分鐘使其溶解，倒入 1,000ml 定量瓶後，加蒸餾水至標準線，須置於棕色瓶貯存在陰暗處。勿將未溶解之 I_2 固體移入貯瓶中(固體部份須倒掉)，而碘溶液因溶質(碘)是揮發性物質，故必須隔幾天再重新標定。

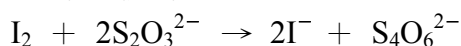
2. 澱粉指示劑：

混合可溶性澱粉 0.5g 於少量冷水中(約 15ml)，倒入 100ml 熱水中，並沸騰 1~2 分鐘，再加入足量之氯化鈉使成飽和溶液後，儲存於冰箱中保存以備滴定試驗所需。

3. 0.05N 碘標準溶液標定：

秤量 0.4~0.5 g 的硫代硫酸鈉($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)放入 250ml 錐形瓶中，再加入 100ml 之蒸餾水及 2ml 之澱粉指示劑，以碘溶液滴定至開始出現淡藍色且維持 30 秒。

其反應方程式如下：



碘當量濃度(N_I)計算如下：

$$N_I = \frac{w}{m \cdot V} \times 1,000$$

V：碘滴定量，ml

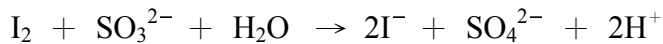
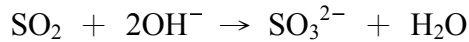
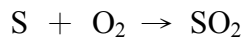
w： $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 重量，g

m： $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 之分子量(248.19g/mole)

4. 碘滴定：

取溶有氣體的氫氧化鈉溶液 100ml 及 2ml 澱粉指示劑，置於錐形瓶中，此時錐形瓶中液體為無色，再直接以標定過的碘溶液滴定製維持淡藍紫色約 30 秒，即達到滴定終點。

其反應方程式如下：



四、實驗藥品及器材

【藥品】

保麗龍	丙酮	乙酸乙酯	濃硫酸	蒸餾水
硫酸銅	碘化鉀	硫代硫酸鈉	硫氰化鉀	澱粉
細砂	硝酸銀	硝酸鎂	硝酸鋁	硝酸鉻
硝酸鐵	硝酸亞鈷	硫酸亞鎳		

【器材】

A. 保麗龍膠的製備部分：

研磨機(台中榮聰鐵工廠)	三頸燒瓶
離心機(KUBOTA 2010)	磁攪拌器
電子秤	濾網(孔隙分別為 2×2mm 與 1×1mm)

B. 指示器部分：

麵包板	二極體	電阻(1K, 5.1K, 27K, 100K)
蠕動馬達(雙向)	接地線	可變電阻(20K, 200K)
變壓器(12V)	IC741	電容器(16V 47 μ 、470 μ)
微型電解槽(自製)	伏特計	

C. 保麗龍膠吸附部分：

pH 儀	SP-870 分光光度計
------	--------------

五、實驗步驟

1. 保麗龍磺酸化：

於一三頸燒瓶中，先插入一溫度計及冷凝管，再倒入 150mL 的濃硫酸，加熱至約 80~90℃時，倒入 20g 保麗龍碎粒，此時溫度會急速上升，維持 100℃，持續加熱三小時。待冷後，取一燒杯內裝入 50%的硫酸溶液約 500mL，將三頸燒瓶中之產物放入，冷卻後，以蒸餾水充分洗淨並浸泡，直至產物完全分散於水中為止。

2. 如何處理保麗龍才具有吸附力：

- (1) 分別取磨碎的保麗龍碎粒 10 克與處理過的保麗龍膠 100 克，各加入 350mL 0.08M 的硫酸銅溶液，每隔 10 分鐘，以碘滴定法檢測溶液中銅離子的含量。
- (2) 以 1.的方法處理保麗龍碎粒，但濃硫酸部分改採濃硫酸與 50%硫酸溶液分別去煮保麗龍碎粒，所得的「保麗龍膠」均取 100 克，同樣倒入 350mL 同濃度的硫酸銅溶液加以浸泡，每隔 10 分鐘採 2 個 25mL 的試樣依碘滴定法檢測。
- (3) 以 1.的步驟將保麗龍碎粒再造，等煮 3 個小時冷卻後，將產物分成兩部分，一部分浸

入 50%的硫酸溶液中，冷卻後，再以蒸餾水充分洗淨並浸泡；另一部分則直接浸於蒸餾水中，期間兩者均不斷換水，兩天後取出瀝乾。

所得的「保麗龍膠」均取 100 克，同樣倒入 350mL 同濃度的硫酸銅溶液加以浸泡，每隔 10 分鐘採 2 個 25mL 的試樣碘滴定法檢測。

(4) 將處理完全的保麗龍膠各稱取 100 克二份，一份先經過烘箱烘乾，將一乾一濕的保麗龍膠倒入 350mL 同濃度的硫酸銅溶液加以浸泡，每隔 10 分鐘採 2 個 25mL 的試樣依碘滴定法檢測。

3. 印證碘滴定法可以檢測溶液中銅離子的含量：

(1) 配製 0.08M 的硫酸銅溶液待用，此為標準液。

(2) 取 25mL 標準液，加入 10mL 6M 醋酸及 3g KI。

(3) 以離心機先將產生的沉澱與上層溶液分離。

(4) 取上層溶液以 0.1M 的硫代硫酸鈉溶液滴定至碘的顏色剛要消失時，加入 1.5mL 澱粉液及 2g KSCN，繼續滴定至藍色消失至少 15 秒鐘，紀錄硫代硫酸鈉的體積。

4. 印證「指示器」可以作為檢測保麗龍膠有否吸附金屬離子效能的工具：

將指示器電路裝配妥當，藉兩個微型電解槽，比較入水口及出水口因離子濃度的差異顯示出的相對電位差。

5. 保麗龍碎粒磺酸化的印證：

(1) 稱取完全乾燥的保麗龍膠 0.021g，置於硬試管中，通入氧氣使其完全燃燒。

(2) 將燃燒所產生的氣體(有 CO_2 、 SO_2 及 H_2O)導入 0.1M 的氫氧化鈉溶液 100ml 中。

(3) 取(2)之溶液，以澱粉溶液為指示劑，用已標定過的碘溶液滴定，紀錄碘液所消耗的體積。

6. 尋找保麗龍膠(吸附劑)最佳吸附條件：

分別以碘滴定法與相對電位檢測法作檢測。

● 碘滴定法一

(1) 取處理過的保麗龍膠 100 克，加入 350mL 0.08M 的硫酸銅溶液。

(2) 每隔 10 分鐘，取 25mL 待測液，加入 10mL 6M 醋酸及 3g KI。

(3) 以離心機先將產生的沉澱與上層溶液分離。

(4) 取上層溶液以 0.1M 的硫代硫酸鈉溶液滴定至碘的顏色剛要消失時，加入 1.5mL 澱粉液及 2g KSCN，繼續滴定至藍色消失至少 15 秒鐘，紀錄硫代硫酸鈉的體積。

(5) 紀錄數據，作圖，。

【註】步驟(1)中的保麗龍膠依次操作粗、中、細不同顆粒大小與不同質量對銅離子吸附能力的比較；硫酸銅溶液濃度則分別有：0.08M、0.04M、0.02M、0.01M。

● 相對電位檢測法一

(1) 將指示器與廢水槽、蠕動馬達、保麗龍膠放置槽如圖 3-1 連接妥當，同時校正指示器。

(2) 將蠕動馬達轉速轉至刻度 10 處(即流速為 10mL/分)。

(3) 保麗龍膠放置槽依次置入已浸泡等量水的 10mL 粗粒、中粒及細粒的保麗龍膠(以

絲襪隔離，以免阻塞水管)，廢水槽置入濃度為 100ppm 的硫酸銅溶液，準備妥當後，打開蠕動馬達開關。

- (4) 當「處理後廢水收集處」一有液體滴下，開始計時，每分鐘取樣，同時加入等體積 3M 的氨水溶液，得到深藍色的溶液，以 SP-870 儀器測廢水濃度。
- (5) 將每分鐘所得之電壓與濃度紀錄於預先設計好的表格中，並作圖。

【註】保麗龍膠放置槽中置入細粒保麗龍膠，依次改變銅離子溶液的濃度、流速、pH 值、溫度、不同價數的其他金屬陽離子溶液，重複步驟操作實驗。

7. 保麗龍膠陽離子的類型：

- (1) 取三份 100g 的保麗龍膠，其中二份分別浸泡飽和食鹽水 10 分鐘及 20 分鐘。
- (2) 將(1)中浸泡過的膠瀝乾後沖洗，然後再用蒸餾水充分泡開。
- (3) 將這三份的保麗龍膠，各加入 0.01M 的硫酸銅溶液 350mL，每隔 10 分鐘各採 2 個 25mL 的試樣依碘滴定法檢測。

8. 分次吸附：

- (1) 取 100 克保麗龍膠加入 350mL 硫酸銅溶液，浸泡 10 分鐘後，將膠完全取出，再取 25mL 溶液，依碘滴定法檢測。
- (2) 剩餘溶液再加入 100 克新的保麗龍膠，浸泡 10 分鐘後，將膠完全取出，再取 25mL 溶液，依碘滴定法檢測；如此重複至膠完全用完為止。

9. 吸附等溫線：

- (1) 分別將 100ppm、200ppm、300ppm、400ppm、500ppm、1000ppm、1500ppm、2000ppm、2500ppm、3000ppm、3500ppm、4000ppm、5000ppm 的硫酸銅溶液各 100ml 置於 250ml 的燒杯中，每一燒杯均置入 10g 的保麗龍膠。
- (2) 將燒杯置於 30°C 的恆溫槽中 24 小時。
- (3) 以 SP-870 先校正(1)中標準液的濃度(C)，再測(2)中每一燒杯中溶液的濃度。
- (4) 計算保麗龍膠的吸附量(Q，mgCu²⁺/g 保麗龍膠)，求 C v.s Q 及 C v.s C/Q 的關係。

10. 保麗龍膠的再生：

- (1) 取 100 克已吸附過的「殘膠」共 6 份，均倒入 200mL 的飽和食鹽水，分別浸泡 10 分~60 分，取出經水沖洗後，浸泡於純水中，隔天將膠取出瀝乾備用。
- (2) 取(1)中製好的再生膠 20 克，加入 70mL 0.0025M 的硫酸銅溶液，浸泡 10 分鐘，各採 2 個 25mL 的試樣依碘滴定法檢測。
- (3) 找出再生效果最好的再生膠後，依照此膠相同的再生步驟，檢測二次再生的效果如何。

11. 廢保麗龍膠作成塑土：

- (1) 我們上網查到一些紙黏土的配方：石粉、紙漿、樹脂；由於保麗龍膠就是樹脂的一種，我們檢驗過市售的紙黏土呈弱酸性，所以石粉我們挑選石膏(容易在文具行買到，同時較石灰(呈強鹼性)安全)，紙漿則是將衛生紙打碎再瀝乾備用。
- (2) 由於保麗龍膠也呈酸性，為避免太酸，我們添加些微的石灰粉(CaO)調成弱酸性，以廣用試紙試驗呈黃色。

- (3) 將吸附過金屬離子的保麗龍廢膠與硫酸鈣、紙漿及些許的石灰，質量依序為 13 克、13 克、7 克、0.04 克混合，壓入模型後取出風乾，塗上無色指甲亮光油，背面黏上磁鐵，就是一塊可愛的「造型磁鐵」啦！

12. 將保麗龍膠被覆在砂粒上：

- (1) 取 20g 保麗龍廢料，改變溶解保麗龍廢料的溶劑為乙酸乙酯 200mL，等到所有的保麗龍都溶解後，加入砂粒吸收所有的乙酸乙酯溶液，然後放置 2 天，盡可能讓乙酸乙酯溶液全被砂粒吸收。
- (2) 將(1)中的砂分兩次置入三頸燒瓶中，採用將保麗龍磺酸化的方法煮膠，將砂粒與濃硫酸共煮 3 小時，之後處理的方法亦同。
- (3) 將處理好的砂粒填裝到兩支塞有玻璃纖維滴定管中，高度依次為 25cm 及 50cm，然後在塞上玻璃纖維，此裝置我們管它叫吸附管。
- (4) 將(3)中的吸附管充分以水濕潤與沖洗備用。
- (5) 重複相對電位檢測法步驟 1~2，但保麗龍膠放置槽改為吸附管。
- (6) 將蠕動馬達轉速轉至刻度 6 處(即流速為 5mL/分)，打開蠕動馬達開關。
- (7) 重複相對電位檢測法步驟 5~7。

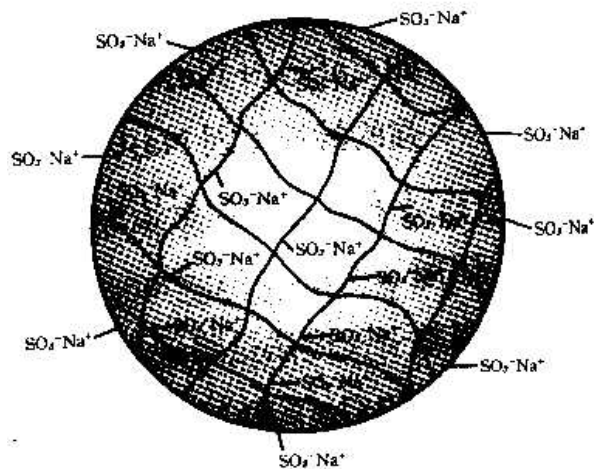
肆、實驗結果及討論

我們想要將令人頭疼的環境殺手——保麗龍廢料，再造成有用的離子交換樹脂，同時協助實驗室的張阿姨減輕重金屬廢水的問題；本節將詳細討論這個實驗三個部分的結果。

Part A 尋找保麗龍再造的方法

一、比較陽離子交換樹脂與保麗龍成分上的差異，以確定實驗方向

作為陽離子交換劑的合成樹脂有很多種，其中有一種叫做「磺酸化聚苯乙烯鈉」，而保麗龍的成分是「聚苯乙烯」，所以我們試著查書，希望能找到方法將保麗龍變成「磺酸化聚苯乙烯」或是「磺酸化聚苯乙烯鈉」。



▲ 磺酸化聚苯乙烯鈉樹脂示意圖

二、保麗龍再造方法的確立

1. 保麗龍一遇到丙酮立刻被溶蝕，體積縮小許多，起先像一團膠狀物，在未硬化前，我們就先把這膠狀物拉成小塊，待乾硬後，用研磨機便可輕易打碎了。甚至可以控制研磨的時間來操控磨碎後的顆粒大小。
2. 以濃硫酸磺酸化保麗龍，當濃硫酸加熱至 $80^{\circ}\text{C}\sim 90^{\circ}\text{C}$ 時，倒入保麗龍，此時反應非常劇烈，縱使不加熱，溫度仍會急速上升，反應過程裡溫度的控制不太容易，且十分濃稠，攪動不易。
3. 再造後的保麗龍色澤黑褐，濃稠，味道不好聞，倒入 50% 的硫酸溶液冷卻後變成一塊，用大量水沖洗後，表面仍然呈現強酸反應，所以我們決定用水加以浸泡二天，期間頻頻換水。
4. 浸泡過水的保麗龍膠，從一大塊又再散成小小一塊一塊的，顏色不再黑褐色，而呈金棕色，所以我們稱它為「保麗龍膠」。
5. 將水盡量瀝乾，所得的保麗龍膠放於燒杯內作為吸附劑用。

三、尋找印證保麗龍可以吸附金屬離子的方法

1. 用碘滴定法可以較客觀且準確的檢測出硫酸銅溶液中銅離子的含量。
2. 由圖 4-1 中看出，最初的 10 分鐘吸附最快，其後吸附速率減緩，到 30 分鐘後吸附量不再增加，似乎保麗龍膠的吸附已達到飽和。
3. 指示器裝置可以達到我們的要求：當微型電解槽 A 中裝滿標準液時，伏特計讀數標定為 10；而當微型電解槽 A 與 B 都裝滿標準液時，伏特計讀數標定為 0。

四、處理過的保麗龍膠真的有吸附能力嗎?

1. 保麗龍膠是取 20 克的保麗龍碎粒以濃硫酸煮成，而 100 克的保麗龍膠是其中的一部份並非全部，所以保麗龍碎粒我們就只取 10 克。
2. 經過濃硫酸煮過的保麗龍膠，由圖 4-2 明顯可知，經過處理後的保麗龍膠，浸泡於硫酸銅中，會使硫酸銅溶液的銅離子含量減少，而未經處理的保麗龍碎粒則沒有這樣的能力。

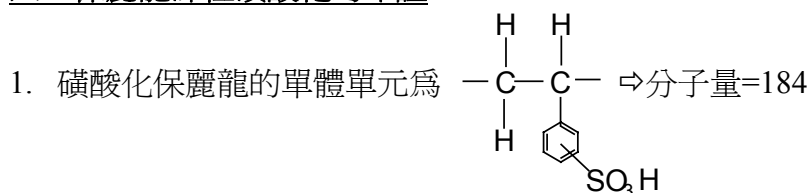
五、保麗龍碎粒處理的方法對吸附能力的比較

1. 以 50% 的硫酸溶液所煮出來的保麗龍膠，在外觀上與原來的保麗龍碎粒沒有不同，只是會結成塊狀，再以 50% 的硫酸溶液及水分別浸泡，也不會有任何變化。
2. 由圖 4-3 可知，保麗龍膠要對銅離子具有吸附力，必須用濃硫酸才行，但究竟是不是只要硫酸溶液中含有水就無法製得保麗龍膠，這點我們將在未來發展中繼續去探究。
3. 由圖 4-4 可知，煮好的保麗龍膠取出後，是否浸泡於 50% 的硫酸溶液中，對溶液中銅離子的吸附似乎影響不大，換言之，在經過 3 小時以濃硫酸煮過後，保麗龍就已經具有吸附銅

離子的能力了，但經過酸處理的保麗龍膠，對銅離子的吸附力較持久，浸泡至 50、60 分鐘後仍可繼續吸附，但未經酸處理的保麗龍膠，在 10 分鐘後即呈現停滯現象，我們推測：在經酸處理時，可能會使保麗龍膠再造更完全，才會有這種現象產生。

4. 在處理保麗龍膠時，我們發現保麗龍膠極易吸收水分，不知道是否吸飽水分的保麗龍膠對銅離子的吸附會不會也有影響，所以我們再進行有無吸水的實驗。
5. 由圖 4-5 可知，保麗龍膠是否先吸水對溶液中銅離子的吸附力影響頗大，我們認為：當保麗龍膠吸飽水以後，利用水分子將保麗龍的纖維撐開，增加保麗龍膠的接觸面積，有利於銅離子進入或碰撞保麗龍膠的表面，然後加以吸附；而乾燥的保麗龍膠因為脫水後，保麗龍的纖維彼此緊貼在一起，只能提供表面或較小的表面積來吸附銅離子，須等到吸收水分，讓纖維再膨脹起來，才可以提供較佳的吸附機會。
6. 吸飽水的保麗龍膠仍和前面幾次的檢測一樣，在前面的 10 分鐘有極強的吸附力，隨後即呈緩慢增強的現象，我們想到：利用水分子撐開保麗龍的纖維，即增加吸附的表面積，對溶液中銅離子的吸附是有利的，因此如果用不同顆粒大小的保麗龍碎粒去製取保麗龍膠，對銅離子的吸附又有何影響？

六、保麗龍碎粒磺酸化的印證



其中 C 佔 $\frac{96}{184}$ \therefore 若 100% 磺酸化，則在 0.039g 的乾膠中，

$$\text{C 有 } 0.039 \times \frac{96}{184} = 0.0203\text{g}$$

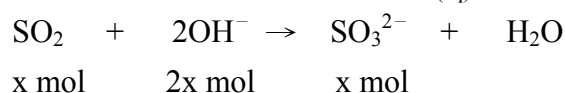
$$\Rightarrow \text{含 C} = \frac{0.0203}{12} = 0.00169\text{mol} \quad \Rightarrow \text{生成 CO}_2 \text{ } 0.00169\text{mol}$$

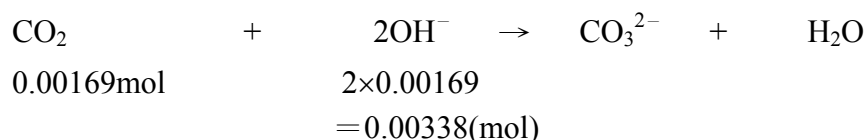
其中 S 佔 $\frac{32}{184}$ \therefore 若 100% 磺酸化，則在 0.039g 的乾膠中，

$$\text{S 有 } 0.039 \times \frac{32}{184} = 0.00678\text{g}$$

$$\Rightarrow \text{含 S} = \frac{0.00678}{32} = 0.000212\text{mol} \quad \Rightarrow \text{生成 SO}_2 \text{ } 0.000212\text{mol}$$

2. 燃燒後，產物溶於 0.1M NaOH_(aq) 100ml 中，設生成 SO₂ x mol，則





【註】：在鹼性溶液中，CO₂ 可視為完全溶於水中。

此時，NaOH_(aq)中只剩下 NaOH=0.1×0.1 - 2x - 0.00338=0.00662 - 2x

3. 碘液會與 NaOH 作用：



∴消耗的碘液 mol 數為 NaOH mol 數的 1/6，

$$\text{即用去 I}_2 \text{ mol} = \frac{0.00662 - 2x}{6} \text{ mol}$$

4. 碘液濃度校正：

秤量 0.4817g 的硫代硫酸鈉(Na₂S₂O₃ · 5H₂O)，放入 250ml 錐形瓶中，再加入 100ml 之蒸餾水及 2ml 之澱粉指示劑，以碘液滴定至開始出現淡藍色且維持 30 秒。碘當量濃度(N_I) 計算如下：

$$M_I = \frac{w}{m} \times \frac{1}{2} \times \frac{1000}{V} \quad (\because \text{I}_2 + 2\text{S}_2\text{O}_3^{2-} \rightarrow 2\text{I}^- + \text{S}_4\text{O}_6^{2-})$$

V：碘滴定量，ml

w：Na₂S₂O₃ · 5H₂O 重量，g

m：Na₂S₂O₃ · 5H₂O 之分子量(248.19g/mol)

碘液濃度校正時消耗碘液分別為 40.2ml 及 40.1ml，平均值為 40.15ml。

$$M_I = \left(\frac{0.4817}{248.19} \times \frac{1}{2} \right) \times \frac{1000}{40.15} = 0.02417\text{M}$$

【註】：碘液因溶質(碘)是揮發性物質，所以必須隔幾天再重新標定。

5. 碘滴定法：(碘液用去 47.8ml)



x mol x mol

6. 碘液在 3.及 5.中共用去： $\text{I}_2 \text{ mol} = x + \frac{0.00662 - 2x}{6} = 0.02417 \times 0.0478 = 0.001155 \text{ (mol)}$

$$6x + 0.00662 - 2x = 0.00693$$

$$4x = 0.00031$$

$$x = 0.0000775 \text{ (mol)}$$

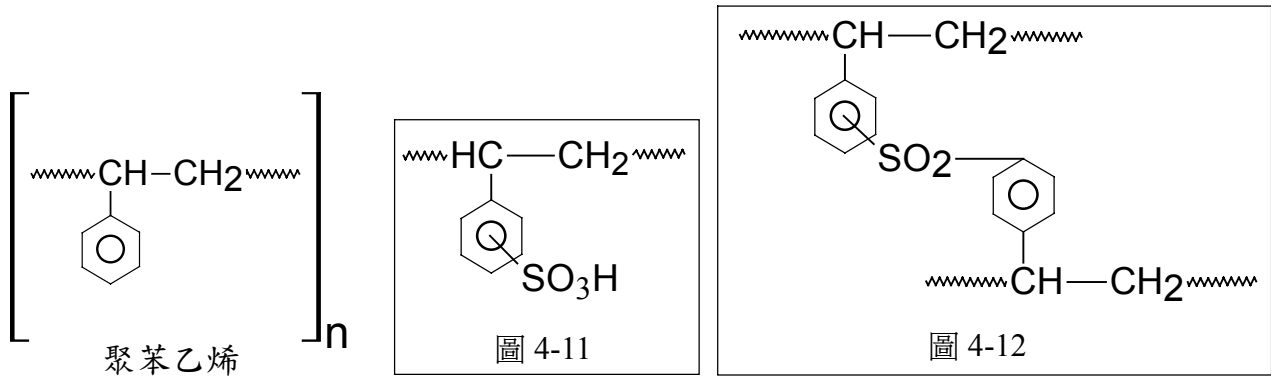
7. 保麗龍磺酸化百分率計算： $\% = \frac{0.0000775}{0.00012} \times 100\% = 64.6\%$

Part B 尋找保麗龍膠(吸附劑)最佳的吸附條件

一、保麗龍膠顆粒大小對吸附能力的比較

1. 三種顆粒大小不同的保麗龍膠，其吸附趨勢仍和前面相似，在前 10 分鐘有最快的吸附力，這樣相似的情況，讓我們想到是否是銅離子的濃度太大，一下子就讓保麗龍膠的吸附達到飽和，所以下面我們考慮不同濃度的硫酸銅溶液對保麗龍膠吸附的影響。
2. 在等質量的物質中，顆粒愈小接觸面積愈大，應可提供最大的吸附面積，吸附銅離子的效果應愈好，但由圖 4-6 可知，這三者吸附銅離子的程度卻呈現粗粒吸附 > 中粒吸附 > 細粒吸附，經過一番討論，我們推測是否因為細粒的接觸面積最大，所以在相同時間裡會吸收最多的水分，使得同樣 100 克的保麗龍膠中，實際上含有膠的部分最少，為了印證這個推論，我們取三個已知質量的小燒杯，各放入 20 克的細、中、粗的保麗龍膠，然後置於烘箱中(相同時間)烘乾，再秤質量，得到結果如右圖 4-7。
3. 由圖 4-7 可知，我們的推測不是沒有道理，所以如果要比較保麗龍膠顆粒大小對銅離子吸附程度的比較，則應讓三種不同顆粒的保麗龍膠吸附等量的水後，再來檢測。
4. 如改用相對電位檢測法，保麗龍膠吸附銅離子廢水一段時間後，逐漸飽和，而漸有銅離子從出水口漏出，伏特計指針漸漸下降，當伏特計電壓降為 0 時，表示保麗龍膠吸附的效果完全消失，亦即保麗龍膠的吸附已達飽和，必須再生。
5. 由圖 4-8 可知，保麗龍膠吸附銅離子必須再生的時間，依顆粒大小由粗粒、中粒、細粒依次為 21 分、50 分及 94 分。
6. 雖然 SP-870 比色計無法準確讀出濃度在 20ppm 以下的銅離子濃度，但由此卻讓我們可以確知：當不規則性震盪情形出現時，銅離子濃度都是相當稀薄的。
7. 在濃度變化上，由圖 4-9 中可知，粗粒保麗龍膠在吸附達 15 分鐘時，濃度開始明顯上升，表示膠的吸附力在下降，到 16 分鐘時，幾乎已喪失吸附的能力了；中粒保麗龍膠在 35 分鐘時濃度明顯上升，到 39 分鐘時幾乎達飽和；細粒保麗龍膠則在 69 分鐘時濃度明顯上升，到 80 分鐘時接近飽和。
8. 以粗粒為例，若以 16~24 分鐘畫一水平線，由 24 分鐘處畫一鉛垂線，剪下此一矩形(面積即代表處理的銅離子總克數)，再沿 15 分鐘及 16 分鐘的濃度曲線往下延伸畫一斜線，左側面積代表被吸附的離子克數，右側面積則代表未被吸附存留在液中的銅離子克數；由於面積較難計算(不見得為規則形狀)，所以我們改採測質量來做比較；粗、中、細粒所測得數據如表 4-1。
9. 由圖 4-8、圖 4-9 及表 4-1、圖 4-10 可知，在吸附能力及吸附持久性的考量上，細粒優於中粒，最差的是粗粒；這樣的結果與我們去年的測定結果不同，卻也與我們當時的預測相符，關於這一點，我們進一步尋找資料，根據書上⁽⁴⁾說保麗龍的成分為聚苯乙烯(如下頁圖)，當我們以濃硫酸煮保麗龍時，會先產生如右圖 4-11 的結構，然後會與原來的聚苯乙烯產生「交架連結」作用，生成如右圖 4-12 的結構，我們從結構上去判斷，認為交架連結後的結構已失去可提供離子交換的 $-SO_3H$ 活性端，因此無法發揮吸附的能力，吸附效

果便會降低；而細粒的保麗龍在用濃硫酸煮時，因接觸面積大，所以大部分的聚苯乙烯很快便生成圖 4-11 的結構，減少產生交架連結的機會，加上細粒的保麗龍膠與廢水接觸面積也較大，自然吸附能力與能吸附的時間就會優於中粒與粗粒了。



二、不同濃度的硫酸銅溶液對保麗龍膠吸附能力的比較

1. 由圖 4-13，我們歸納出一個傾向，濃度愈稀，保麗龍膠吸附達飽和的時間就愈晚，例如：銅離子在吸附呈現定值的時間依次為：0.08M 30 分鐘、0.04M 約 30~40 分鐘、0.02M 則為 40~50 分鐘，而 0.01M 達 60 分鐘時仍未呈現定值，換句話說，此時的保麗龍膠吸附未達飽和，為了一探 0.01M 的銅離子究竟會在何時吸附達飽和，我們決定針對 0.01M 的濃度繼續實驗下去，結果如圖 4-14，在吸附達 60 分鐘後亦呈現定值。
2. 如果我們取吸附力最強的前 10 分鐘，來比較各個濃度之下的吸附百分率，可得圖 4-15：濃度愈稀吸收率愈高。
3. 在一般廢水中，重金屬的含量是以「ppm」(mg/L)來計算的，突顯若拿保麗龍膠來吸附廢水中的重金屬，實有其重要的意義！所以我們決定用相對電位檢測法來檢測保麗龍膠對銅離子的吸附能力。
4. 由圖 4-16 可知，保麗龍膠吸附銅離子必須再生的時間，依濃度大小由 200ppm、100ppm、50ppm 依次為 90 分、110 分及 180 分。
5. 愈低濃度的銅離子廢水，在吸附效果上愈明顯，也就是說相同時間吸附相同量的離子，但在濃度愈稀薄的溶液中，其吸附比例就愈大，所以處於高電壓、低濃度的時間就愈長。
6. 用上一實驗求吸附率的方法，200ppm、100ppm、50ppm 的吸附率依次為 44.44%、44.86%、83.62%。
7. 由以上可知，愈稀薄的銅離子廢水，通過細粒的保麗龍膠時，吸附達飽和的時間愈長，吸附力相較愈強；這樣的結果讓我們想利用這個研究來處理金屬廢水，信心更堅強了！
8. 在得知硫酸銅溶液濃度對保麗龍膠吸附程度的影響後，我們想更進一步了解，保麗龍膠的用量是否也會影響吸附程度。

三、不同質量的硫酸銅溶液對保麗龍膠吸附能力的比較

1. 由圖 4-18 明顯知道，質量愈大的保麗龍膠其吸附程度愈明顯，但看不出有正比的傾向。
2. 在相同時間裡，保麗龍膠對銅離子的吸附程度都是 $300\text{g} > 200\text{g} > 100\text{g}$ ，顯示保麗龍膠的質量愈大，提供的表面積就愈大，能夠吸附的銅離子就愈多。接觸面積會影響吸附能力，那接觸的時間呢？會不會有影響吸附能力，於是我們進行下面實驗。

四、不同流速的硫酸銅溶液對保麗龍膠吸附能力的比較

1. 我們的蠕動馬達最快轉速為 10ml/分，轉速不大，為產生流速的明顯差異，故僅選用 5ml/分及 10ml/分兩種流速。
2. 由圖 4-19 及圖 4-20 明顯可知，流速較低(5ml/分)者在高電壓、低濃度維持的時間(39 分，圖中綠色點)較長，流速較高(10ml/分)者在高電壓低濃度維持的時間(24 分，圖中橘色點)較短，顯示低流速者保麗龍膠有較好的吸附效能。
3. 流速 10mL/分及 5mL/分的吸附率依次為 70.00%及 74.23%。
4. 我們認為會有這樣的結果，是因為流速低者，硫酸銅溶液在保麗龍膠放置槽有較充裕的時間，與膠進行離子交換，所以吸附效果較好；流速高者，硫酸銅溶液在保麗龍膠放置槽的時間較短暫，與保麗龍膠進行離子交換比例較低。
5. 因為低流速、低濃度的離子廢水對細粒保麗龍膠而言有較好的吸附效能，因此讓我們又想進一步了解溶液的 pH 值及溫度也會影響保麗龍膠的吸附效能嗎？

五、不同 pH 值的硫酸銅溶液對保麗龍膠吸附能力的比較

1. 由圖 4-21 在 $\text{pH}=2.26$ 的環境下，保麗龍膠僅維持 2 分鐘，相對電壓即降到 0，而且第 1 分鐘出水口的相對電壓及廢水濃度分別為 0.6V 及 95.51ppm，處理效果非常差。
2. 在 $\text{pH}=3.55$ 的環境下，保麗龍膠也僅維持 18 分鐘，相對電壓即降到 0，較 $\text{pH}=2.26$ 時情況有改善，但第 1 分鐘出水口的相對電壓及廢水濃度分別為 7.5V 及 50.34ppm，處理效果仍舊不理想；在 $\text{pH}=4.30$ 保麗龍膠就有亮眼的效果。
3. pH 值為 2.26、3.55、4.30 及 5.42 的吸附率依次為 11.32%、23.64%、48.56%及 29.91%。
4. $\text{pH}=5.42$ 的溶液雖然相對電壓較晚降到0，不過， Cu^{2+} 濃度卻較早升高至高濃度；我們覺得當離子濃度高時，保麗龍膠處理廢水的效果就算不好了；而在吸附率上 $\text{pH}=4.30$ 也大於 $\text{pH}=5.42$ ，因此，我們認為在 $\text{pH}=4.30$ 的溶液中保麗龍膠吸附銅離子的效能略優於 $\text{pH}=5.42$ 的溶液。
5. 會有這樣的情形，我們認為保麗龍膠為「氫型」的離子交換樹脂，在pH值愈小的環境中， H^+ 濃度愈大，愈不利銅離子的交換；至於愈鹼的情形則因在鹼中銅離子易生氫氧化銅的沉澱而沒有進一步實驗。

六、在不同溫度下的硫酸銅溶液對保麗龍膠吸附能力的比較

1. 由圖4-23及圖4-24發現：在10°C時，維持在高電壓(約為16V，此時出水口廢水中Cu²⁺濃度檢測為0ppm)的時間有18分鐘，隨後電壓即快速下降，至33分時保麗龍膠吸附達飽和，電壓降為0。
2. 30°C時，維持在高電壓的時間有 22 分鐘，與 10°C時差不多，但隨後電壓的變化較緩，直到 87 分時保麗龍膠吸附才達飽和，電壓降為 0。
3. 50°C時，維持在高電壓的時間有 36 分鐘之久，但期間前 11 分鐘出水口檢測出有帶極微量銅離子的廢水，12~36 分之間，出水口廢水濃度才降為 0；隨後電壓的變化起伏不定，到 131 分時電壓與濃度的變化呈現停滯現象，直到 190 分鐘時，電壓仍然沒有降為 0 的趨勢，所以我們就停止實驗了。
4. 溫度為 10°C、30°C、50°C的吸附率依次為 56.45%及 51.66%、40.55%。
5. 綜合上面的觀察，我們認為：溫度愈高，粒子的動能愈大，受到保麗龍膠的吸引力愈小，金屬離子即使受保麗龍膠吸附，也呈現不穩定狀態，隨時可能脫離，故出水口處出來的溶液尚有部分金屬離子，故電壓與濃度呈現停滯現象，因為保麗龍膠吸附未達飽和，仍有交換能力，因此達飽和時間遲遲未到，相對電位差也在 2.5V 上下震盪，降不下去。
6. 為了印證我們的說法，我們取三杯裝有 100mL、100ppm 的硫酸銅溶液及 10mL 保麗龍膠的燒杯，分別置入 10°C、30°C、50°C的恆溫槽中，每 5 分鐘各取 4mL 用 SP-870 檢測濃度，得圖 4-25。我們發現溫度愈低的情形下，保麗龍膠單位時間吸附金屬離子的能力愈強，濃度下降愈快，所以在 10°C時，保麗龍膠很快就達到飽和。
7. 由此實驗我們認為：從相對電位開始下降到 0(或從濃度開始上升到與原始濃度相同)的時間愈短，亦即圖中曲線愈陡的話，對廢水的處理效果最好；若是電位緩緩下降，即曲線愈緩，時間拉得愈長，就會有一段不算短的時間在出水口出來的廢水中，夾帶有高濃度的金屬離子，因而降低了廢水處理的效能。

七、保麗龍膠陽離子類型對吸附銅離子能力的比較

1. 浸泡過飽和食鹽水的保麗龍膠，需要再用蒸餾水充分泡開，因為把保麗龍膠浸泡在飽和食鹽水時有類似脫水的現象，為了防止吸水的因素來干擾到實驗結果，所以必須再以水充分泡開。
2. 我們認為此時的保麗龍膠，會將再造後的氫置換為鈉，即 R-SO₃H→R-SO₃Na，由圖 4-25 中看出浸泡與未浸泡的保麗龍膠在吸附銅離子的程度上的確有不同。
3. 浸泡過飽和食鹽水的保麗龍膠，我們姑且稱為「鈉型」，不論浸泡 10 分鐘還是 20 分鐘，在吸附銅離子的程度上都比未浸泡(我們姑且稱為「氫型」)的強，但並沒有我們預期的亮眼，而且浸泡 10 分鐘與浸泡 20 分鐘的效果差不了多少，為了探討這一現象，我們設計了以下實驗：先將 100 克的保麗龍膠浸泡於 200mL 純水中(作為對照實驗)，以 pH 值測其酸鹼度，次將 75 克的食鹽加入水中(即飽和食鹽水)，每隔 10 分鐘測一次 pH 值，所得數據

如圖 4-27，由圖中知道原來沒有放入食鹽的泡純水保麗龍膠 pH 值為 2.5，加入食鹽成飽和食鹽水後，pH 值下降，由此可推知，氫離子確實被鈉離子置換出來。另由圖上顯示，此一交換過程應在 10 分鐘左右即完成，所以浸泡 10 分鐘與浸泡 20 分鐘飽和食鹽水的吸附情形差不多。

4. 在此方面，因為浸泡飽和食鹽水會有脫水的現象，所以應有研發的空間。
5. 這結果，與我們知的陽離子交換樹脂中，鈉型較氫型容易置換水中鈣鎂離子的情形符合。

到此為止，我們都將焦點集中在銅離子廢液上，其他金屬離子也有相同的吸附效能嗎？於是我們做了下面的實驗。

八、保麗龍膠對不同金屬離子吸附能力的比較

1. 用 SP-870 檢測金屬離子的濃度，按 Ag^+ 、 Cu^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Al^{3+} 的順序，吸收波長依次為：635nm、581nm、581nm、428nm。
2. 我們使用溶液濃度採用 100ppm，是避免檢測時間過於冗長。
3. 由圖 4-28 及圖 4-29 發現：保麗龍膠對每一種金屬離子都有吸附能力，但對 Ag^+ 離子的吸附，處於高相對電位差(即低濃度)的情形特別持久，這表示保麗龍膠對銀離子的吸附效能特別好嗎？請看我們下面的考量：

$$[\text{Ag}^+] = \frac{100\text{mg}}{1\ell} = \frac{100 \times 10^{-3}\text{g}/108\text{g/mol}}{1\ell} = 0.926 \times 10^{-3} \text{ mol}/\ell$$

$$[\text{Cu}^{2+}] = \frac{100\text{mg}}{1\ell} = \frac{100 \times 10^{-3}\text{g}/64\text{g/mol}}{1\ell} = 1.56 \times 10^{-3} \text{ mol}/\ell$$

$$[\text{Mg}^{2+}] = \frac{100\text{mg}}{1\ell} = \frac{100 \times 10^{-3}\text{g}/24\text{g/mol}}{1\ell} = 4.17 \times 10^{-3} \text{ mol}/\ell$$

$$[\text{Al}^{3+}] = \frac{100\text{mg}}{1\ell} = \frac{100 \times 10^{-3}\text{g}/27\text{g/mol}}{1\ell} = 3.7 \times 10^{-3} \text{ mol}/\ell$$

在相同體積下，銀離子因原子量最大，故所含的離子數最少，這樣的關係就好像濃度高低一樣；其單位體積所含離子數的多寡關係依次為 $\text{Ag}^+ < \text{Cu}^{2+} < \text{Al}^{3+} < \text{Mg}^{2+}$ ，所以初始的相對電位差也以銀離子的衝的最高(約為 16V)，其次分別為 Cu^{2+} (約為 13V)、 Al^{3+} (9.4V)、 Mg^{2+} (7.5V)。

因此，要比較保麗龍膠對不同金屬離子吸附效能的比較，溶液濃度應以容積莫耳濃度來考量較為客觀及準確，且不同金屬離子保麗龍膠最佳的吸附條件，可能不一樣，必須一種一種離子去做分析；這一部分我們將進一步再研究。

九、改以「莫耳濃度」重做保麗龍膠對不同金屬離子吸附能力的比較

1. 在上個實驗中，我們發現無色離子機器較難測量且所挑的離子並非最毒的重金屬離子，所

以當改以莫耳濃度重新操作時，我們順便改用 Cr^{3+} 、 Fe^{3+} 、 Co^{2+} 、 Ni^{2+} 、 Cu^{2+} 離子來做實驗。

2. 用 SP-870 檢測金屬離子的濃度，按 Cr^{3+} 、 Fe^{3+} 、 Co^{2+} 、 Ni^{2+} 、 Cu^{2+} 的順序，吸收波長依次為：415nm、360nm、509nm、722nm、581nm。
3. 由圖 4-31，按 Cr^{3+} 、 Fe^{3+} 、 Co^{2+} 、 Ni^{2+} 、 Cu^{2+} 的順序，保麗龍膠的吸附率依次為 53.38%、45.16%、29.10%、44.74%、39.35%。
4. 以吸附率來看，保麗龍膠對這些離子的吸附力強弱依序為： $\text{Cr}^{3+} > \text{Fe}^{3+} > \text{Ni}^{2+} > \text{Cu}^{2+} > \text{Co}^{2+}$ ，似乎是價數愈高，吸附力愈強。而我們從文獻資料中也得知：在常溫下，低濃度水溶液中，價數愈高的陽離子被交換能力愈大⁽¹³⁾，而對於同為二價的吸附強弱相對關係則為 $\text{Ni}^{2+} > \text{Cu}^{2+} > \text{Co}^{2+}$ ⁽¹⁴⁾，與我們的結果不謀而合呢！

前面幾次實驗中，我們發現保麗龍膠幾乎在吸附 10 分鐘時都有最大吸附力，因此我們想，可否充分利用這一現象，將溶液中之銅離子去除殆盡？而有下一實驗的設計。

十、保麗龍膠分次吸附溶液中銅離子的測定

1. 將保麗龍膠放入硫酸銅溶液中，10 分鐘左右即可達很好的效果，但是繼續浸泡，效果則不明顯。若將保麗龍膠濾出，再以等量的新保麗龍膠加入原硫酸銅溶液中(已吸附過的，我們姑且稱為「殘液」)，新保麗龍膠對剩餘的銅離子吸附效果又非常明顯，可見以每 10 分鐘換新保麗龍膠來吸附殘液中之銅離子的吸附方式，對於銅離子的去除效果是非常好的。
2. 因我們實驗室中所有保麗龍膠都以用完，所以只能做到第 11 次，可是依照圖 4-32 的趨勢來看，我們只要再重複 4~5 次左右的操作，銅離子幾乎就可以完全被吸附出。

十一、保麗龍膠吸附機制類型的探討

1. 本實驗我們僅初步探討 Langmuir 等溫線及 Freundlich 等溫線，我們知道 Langmuir 等溫線其 C/Q 與 C 有線性關係，Freundlich 等溫線其 $\log Q$ 與 $\log C$ 有線性關係，所以我們只要分析這兩種圖形的相關係數(R 或 R^2 值)愈高，即代表愈符合此種吸附模式。
2. 由圖 4-33，在低濃度狀況下，Langmuir 等溫線及 Freundlich 等溫線的曲線相關係數都非常不理想，我們從顯微照片(倍率除圖 4-39 為 $10X \times 4X$ 外其餘均為 $10X \times 10X$)圖 4-36 推測，保麗龍碎粒為多孔且不規則形狀的物質，所以保麗龍膠在未吸附前仍具孔洞(見圖 4-37 上的黑圈部分)；此時銅離子的吸附可能是以凡得瓦力(物理吸附)或形成鍵結(化學吸附)甚或是銅離子直接卡到縫隙中的方式吸附，因為由圖 4-33 中並無明顯顯示較接近哪種等溫線的模式，所以我們無法推測是以何種機制吸附。
3. 在圖 4-34 中，Freundlich 等溫線的相關性($R^2 = 0.93$)遠高於 Langmuir 等溫線，我們推測在這個階段應是進行物理吸附。
4. 由於一般的吸附模式都是先化學吸附再物理吸附或直接是物理吸附，絕無先物理吸附再化

學吸附的情況，所以圖 4-35 中雖然兩吸附等溫線的相關性又不高了，但由圖中 Freundlich 等溫線的相關性($R^2=0.35$)遠高於 Langmuir 等溫線($R^2=0.0084$)來推測應亦是物理吸附。或許若能再測量此一吸附所需的活化能，就能更進一步了解其吸附的機制了。

5. 由圖 4-37、圖 4-38、圖 4-39，我們發現磺酸化後未進行吸附之前的保麗龍膠似乎仍有孔洞且較平滑；在愈濃的硫酸銅溶液中吸附後的保麗龍膠，表面則愈皺、顏色亦愈深，甚至有銅離子被吸附的藍色痕跡。

Part C 保麗龍膠的再處理

一、保麗龍膠再生能力的探討

1. 在 B-10 的分次吸附中面臨膠不夠用(製取一份保麗龍膠大約需 5 天左右，十分耗時)，而廢棄的膠卻很多，使我們興起一個念頭：如果保麗龍膠可以再生，不僅省卻耗時的製膠過程，且可免去保麗龍膠所造成的「二次污染」，真是一舉兩得！
2. 由圖 4-40 可知，未浸泡飽和食鹽水的保麗龍膠(0 分)，吸附力很小，隨著浸泡飽和食鹽水的時間增加，我們發現吸附力也增加，至 60 分時，吸附力已達 36%，與以新膠分次吸附的最高吸附力(第 8 次；36%)差不多，可見保麗龍膠再生效果不錯。
3. 由圖 4-41 可知，浸泡 60 分鐘的保麗龍膠經過吸附後，二次再生膠的吸附能力居然還是與一次再生膠的一樣，可見這樣的再生過程的確可以延長保麗龍膠的使用期限，大大降低了我們處理保麗龍廢膠的困擾。
4. 在再生的過程中，銅離子雖然又再釋放於水中，但我們認為這樣的處理過程可以將未能掌握(或未定域)的水質污染，變成實驗室中所能掌握(或能定域)的情況，同時，這樣的處理過程，也將銅離子的濃度加以濃縮了，所以保麗龍膠的再生是可行的。若考量銅離子再釋出的問題，我們嘗試將吸附金屬離子之後的廢保麗龍膠做成類似紙黏土的「塑土」，做出可愛的造型，挺好玩的，以下是我們的嘗試。

二、廢保麗龍膠作成塑土的試驗

1. 我們上網查到一些紙黏土的配方：石粉、紙漿、樹脂；由於保麗龍膠就是樹脂的一種，我們檢驗過市售的紙黏土呈弱酸性，所以石粉我們挑選石膏(容易在文具行買到，同時較石灰(呈強鹼性)安全)，紙漿則是將衛生紙打碎再瀝乾備用。
2. 由於保麗龍膠也呈酸性，為避免太酸，我們添加些微的石灰粉(CaO)調成弱酸性，以廣用試紙試驗呈黃色。
3. 將吸附過金屬離子的保麗龍廢膠與硫酸鈣、紙漿及些許的石灰，質量依序為 13 克、13 克、7 克、0.04 克混合，壓入模型後取出風乾，塗上無色指甲亮光油，背面黏上磁鐵，就是一塊可愛的「造型磁鐵」啦(見圖 4-43)。
4. 左圖加有紙漿總質量為 9.98 克，右圖沒有紙漿總質量 13.02 克；本來不知道紙黏土裡面為何要加紙漿，現在我們了解，可以減輕許多質量。

實驗至此，我們一直覺得遺憾的是，保麗龍膠不能像一般使用離子交換樹脂處理廢水一樣，裝在吸附管中；幾經討論，我們做了下列嘗試。

三、將保麗龍膠被覆在砂礫上對處理廢水效能的比較

1. 由圖 4-42 可知，砂子亦有些許的吸附力，但「空白」的沙子高度對吸附的影響似不明顯，經過與膠共煮的砂粒(此過程我們稱之為被覆)，較之於空白砂粒，明顯的有較強的吸附力，高度不同，吸附效果也不同，保麗龍膠吸附銅離子必須再生的時間，依有無被覆及高度來看，未被覆高度 25cm 及 50cm 依次為 22 分及 25 分；經被覆後之高度 25cm 及 50cm 依次為 32 分及 49 分。
2. 很明顯的，經被覆的砂粒，因為表面附著有保麗龍膠，所以具有吸附效果，砂粒填充高度愈高，提供吸附的接觸面積也愈大，所以效果愈明顯。其中 50cm 經被覆後的吸附管，在電壓變化上更是四者中較「急劇」的。
3. 因為所選用的硫酸銅溶液濃度為 20ppm，SP-870 未能有效測出濃度，所以濃度捨去不測。

伍、結論

1. 由保麗龍成分結構與陽離子交換樹脂結構相似上找到若能將保麗龍再造，必可再為『萬年垃圾』尋求另一個春天！
2. 將保麗龍依：丙酮溶解→硬化→打碎→與濃硫酸共煮三小時→浸於 50%硫酸溶液中→沖洗→以水浸泡的流程，即可達再造的目的；我們初步驗證此種再造方法，可將磺酸化比例約達 62.5%。
3. 在檢測保麗龍膠對銅離子有否吸附能力的方法上，「碘滴定法」，能獲得客觀有用的數據，至於「相對電壓測定法」最大的好處是知道保麗龍膠何時吸附達飽和，必須再生。
4. 以碘滴定法檢測銅離子含量時，澱粉液因會被酸分解，所以要在接近變色時才加入，以免誤差太大。
5. 經過印證，保麗龍膠確有吸附銅離子的能力；保麗龍碎粒的處理方式不同，所得的銅離子吸附效能也會有不同：
 - ①必須以濃硫酸煮出來的保麗龍膠才具有吸附能力，而用 50%硫酸溶液煮出來的「膠」，不僅稱不上膠，也沒有吸附力。
 - ②保麗龍碎粒利用濃硫酸煮 3 小時之後，再浸泡 50%硫酸溶液，所得的膠對銅離子吸附力有較佳的表現，換句話說，煮完後再浸泡 50%硫酸溶液，可能可使保麗龍再造更完全，所以此步驟是有其必要性的。
 - ③吸飽水的保麗龍膠是比乾燥狀態下的保麗龍膠有較強的吸附力，所以如果要在短時間內達到某個程度的吸附效果，應採用吸過水的保麗龍膠較好。

6. 在保麗龍膠的顆粒大小對銅離子吸附效能的比較上，最初採用的點滴定法，出乎意料之外的是粗粒 > 中粒 > 細粒，經進一步了解，在等質量的膠中實際含膠量是：粗粒 > 中粒 > 細粒，所以要證實細粒的保麗龍膠可以提供最大的吸附面積，達到最好的吸附效果，應該重新設計實驗才行。
7. 經改良採用相對電位測量法，我們有以下心得：
 - ①重金屬廢水處理指示器的製備，在幾經失敗後終於接配妥當，可以如願地顯示 A、B 兩微型電解槽內離子濃度的相對電壓。
 - ②保麗龍膠放置槽也幾經改良，尤其在保麗龍膠的洗滌、去水、水管吸入口常會被保麗龍膠堵住等方面的困擾，我們靈機一動，想到用絲襪當濾網，結果上述困擾全都迎刃而解了，效果還相當好呢。
 - ③不同顆粒大小的保麗龍膠對銅離子廢水的吸附有不同的效能，吸附率由優至劣依次是細粒(75.68%)→中粒(65.96%)→粗粒(53.19%)，這樣的結果恰與去年相反，但也應驗了去年的預測，我們想原因大概有二：(1)今年以定量水泡膠且可以將膠中的水分盡量甩乾；(2)粗粒的保麗龍膠產生交架連結的機會比細粒保麗龍膠要來得大，而失去離子交換的活性端；至於細粒因接觸面積大，所以大部分的聚苯乙烯在反應初期就已經反應為圖 4-11 的結構而少有交架結構。
8. 以碘滴定法檢測，硫酸銅溶液濃度愈稀，保麗龍膠吸附達飽和的時間就愈延後，吸附比例也較大，也就是說保麗龍膠的持久性就愈好，而日常中一般廢水所含的重金屬都是低含量的，所以我們所製作的保麗龍膠，如果用來處理廢水，應有其效用的。
9. 以相對電位檢測低濃度的銅離子廢水，保麗龍膠吸附效能的強弱依次是：50ppm > 100ppm > 200ppm，即銅離子廢水的濃度愈低，吸附效能愈顯著；我們認為同樣吸附 1ppm，在 200ppm 溶液中是 $\frac{1}{200}$ (0.5 %)，在 100ppm 溶液中是 $\frac{1}{100}$ (1 %)，在 50ppm 溶液中是 $\frac{1}{50}$ (2 %)，所以愈低濃度就愈顯出吸附的效能來。
10. 在同濃度、等量的硫酸銅溶液中，加入質量愈大的保麗龍膠，提供的吸附表面積就愈大，能夠吸附的銅離子就愈多。
11. 在銅離子廢水的流速比較上，廢水流速較慢的有較明顯的吸附作用；我們認為：流速慢，提供廢水與保麗龍膠有較長的接觸時間，因此就有較多的離子交換機會，吸附效能自然就會比較好。
12. 保麗龍膠在不同 pH 值的銅離子溶液中，以 pH=4.30 的銅離子溶液有最佳的吸附效能；在 pH=2.26 時，保麗龍膠幾乎無法吸附銅離子。
13. 保麗龍膠在不同溫度的銅離子溶液中，溫度愈高愈無法有效吸附銅離子，低溫時，保麗龍膠單位時間吸附金屬離子的能力愈強；吸附效能為 10°C 優於 30°C，50°C 的吸附效能最差，甚至無法達吸附飽和。
14. 保麗龍再造後陽離子類型對銅離子吸附的能力，以 R-SO₃Na 型優於 R-SO₃H 型，換句話

說，在交換廢水中陽離子的活性上，接 Na 的大於接 H 的；本實驗因有脫水現象且效果不明顯，所以有再進一步研究的必要。

15. 保麗龍膠對不同金屬離子吸附的效能，因為在相同 ppm 濃度下的金屬離子數目不一樣多，所以較無法客觀比較，僅知單位體積所含離子數愈少的，初始的相對電位差會愈高。
16. 在相同莫耳濃度下，常溫時低濃度水溶液中，價數愈高的陽離子被交換能力愈大，其結果為 $\text{Cr}^{3+} > \text{Fe}^{3+} > \text{Ni}^{2+} > \text{Cu}^{2+} > \text{Co}^{2+}$ ，與文獻記載相符。
17. 在前面利用碘滴定法的實驗中，我們均發現，在最初的 10 分鐘內，保麗龍膠有最佳的吸附速率，之後即呈現極為緩慢的吸附能力，所以如果要廣泛、有效的利用保麗龍膠來吸附陽離子，可善用浸泡開始的前 10 分鐘。
18. 分次吸附以每 10 分鐘換新保麗龍膠來吸附殘液中之銅離子的吸附方式，對於銅離子的去除效果是非常好的，只要多做幾次即可將銅離子完全去除。
19. 保麗龍膠吸附的機制約略判斷應較近似於 Freundlich 等溫線，即物理吸附，因保麗龍膠可能像類似分子篩的東西，所以吸附的機制可能不像我們想像的簡單，必須再進一步探討才能作判斷。
20. 保麗龍膠在再生的過程中，應有將銅離子大量釋出，使得吸附力與分次吸附情形的最高吸附力差不多，且二次再生的吸附能力與一次再生的吸附能力相同，因而延長了保麗龍膠的使用期限，這樣的結果，讓我們這個研究在『環保』意念上更向前邁進了一大步！意義叫人振奮。
21. 將吸附過金屬離子的保麗龍廢膠可以與硫酸鈣、紙漿及些許的石灰，質量依序為 13 克、13 克、7 克、0.04 克混合，製入模型中取出風乾，背面黏上磁鐵，就是一塊可愛的「造型磁鐵」，有趣好用。有加紙漿的質量會較不加紙漿的質量輕許多。
22. 用我們設計的方法是可以將保麗龍膠被覆在砂粒上，雖然效果或許沒有很好，但在低濃度的吸附上，可以見到明顯的差異：有被覆的砂粒吸附效果較沒被覆的明顯；有被覆的砂粒填充高度愈高吸附效能也愈明顯。

陸、致謝

實驗的過程是艱辛孤寂的，如果沒有旁人的支持、幫忙與鼓勵，我想，我是無法完成的……，首先謝謝高雄師範大學化學系的楊慶成教授、鄭寶樹教授、陳榮輝教授，借我們儀器及實驗中的指導與討論；其次謝謝中山大學物理系嚴祖強教授及學校技工賴建廷先生在電路方面的指導；感謝實驗室的張惠珠阿姨，每次幫我們準備好所有的實驗器材，連假日也不例外，讓我在長達二年多的研究過程中方便不少；感謝曾協助我實驗的夥伴---林瑞怡、楊喆光、荆溪瓏及我的弟弟鄭玉希，一起操作、一起討論、一起分析結果，陪著我憂，也陪著我喜，他們是我努力的原動力，也是我能堅持到現在的主要支撐力哦！

最後，我要感謝我的指導老師，也是我的父母，在實驗過程中，陪著我，指導我操作儀器、觀察結果、克服困難.....。若不是這麼多人的協助與鼓勵，我無法完成實驗，謝謝您們，當然還包括其他在這期間為我加油的同學朋友們，謝謝！

柒、參考資料

1. 中華民國第四十一屆中小學科學展覽會“你抓不住我，我抓得住你”國中組 化學科作品說明書。
2. <http://www.ptepb.gov.tw/unit91/polilone/life.htm>
3. 閻路、楊寶旺、梁家鳳編譯 MORRISON & BOYD 原著 有機化學第二冊 二版 台北 台灣東華書局 p.436~p.437 民 67。
4. 莊和達、李明哲編譯 George Odian 聚合反應原理(下) 初版 台南 復文書局 p.872~p.873 民 78。
5. 黃定加、陳慧英(1996) 吸附與離子交換 化工 第 43 卷 第 5 期 p.19~p.52
6. <http://w3.ev.ncu.edu.tw/w3backup/Accomplishment/paper/six/6.htm>
7. http://www.ev.nchu.edu.tw/L610/TLHUANG/ling_master/chap2.htm
8. 曹簡禹、黃定加 物理化學實驗學 十八版 台北 國立編譯館 p.329~p.338 民 70。
9. 高文弘、周賢孟譯著 Lloyd I. Osipow 原著 界面化學 初版 新竹市 黎明書局 p.51~p.56 民 69。
10. 楊木火(1997) 離子交換指示儀應用於銅離子廢水之測試研究 高苑學報 第六卷 第一期 p.165~p.172。
11. 陽思廉 工業定量分析 修訂板 台北 五洲出版社 p.98~p.99 民 68。
12. 吳柏青、郭曉怡(2001) 應用直接碘滴定法在金針乾製品二氧化硫殘留量快速檢測 宜蘭技術學報 第七期 p.17~p.26。
13. 染化資訊網 染色處理用-水與媒 <http://www.dfmfg.com.tw/dasp/dfa04-1/wa04-2.htm>。
14. 一般水處理方法與原理 <http://www.biocozy.com.tw/watertre.htm>。

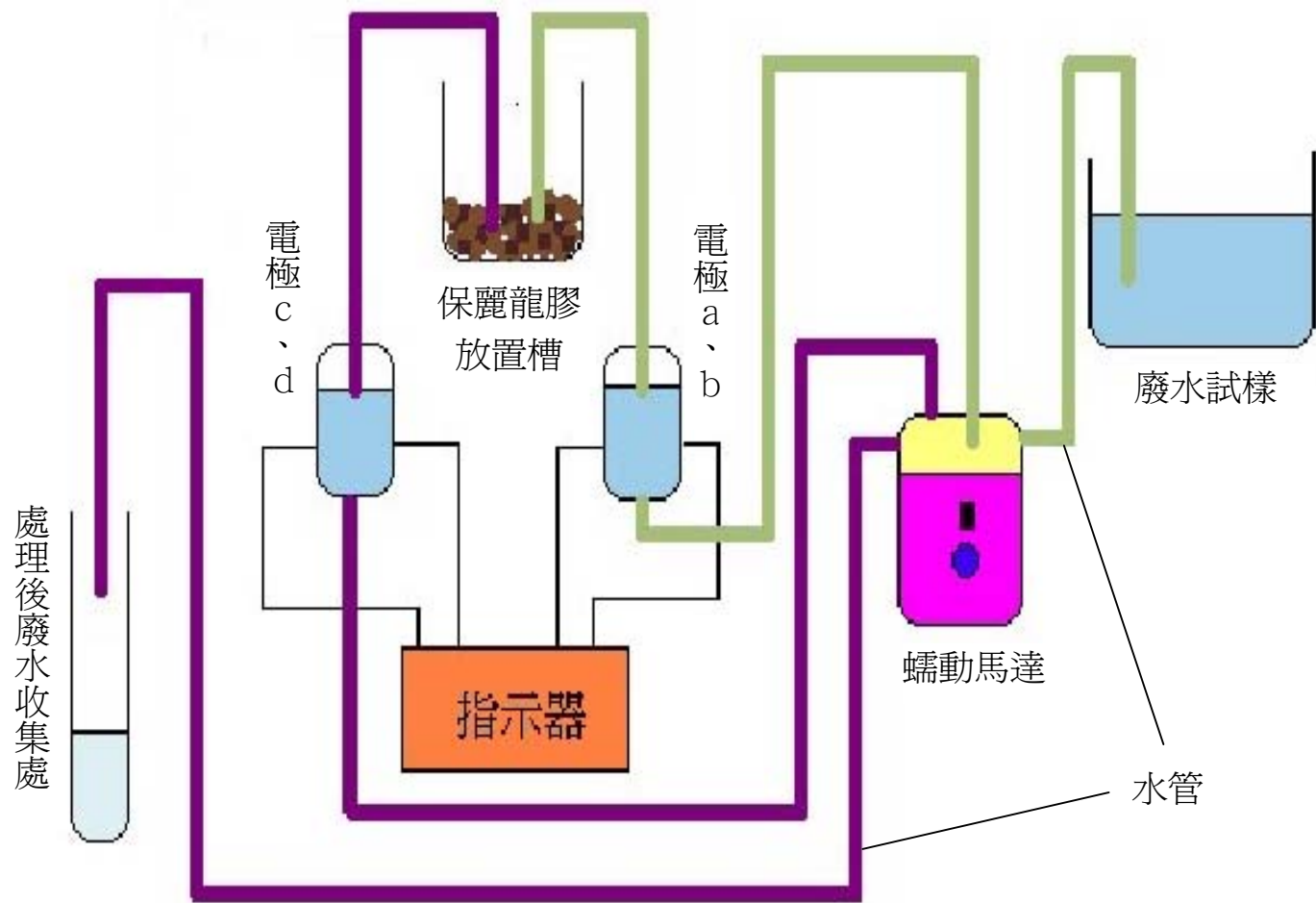


圖 3-1 「相對電位檢測法」系統裝置圖

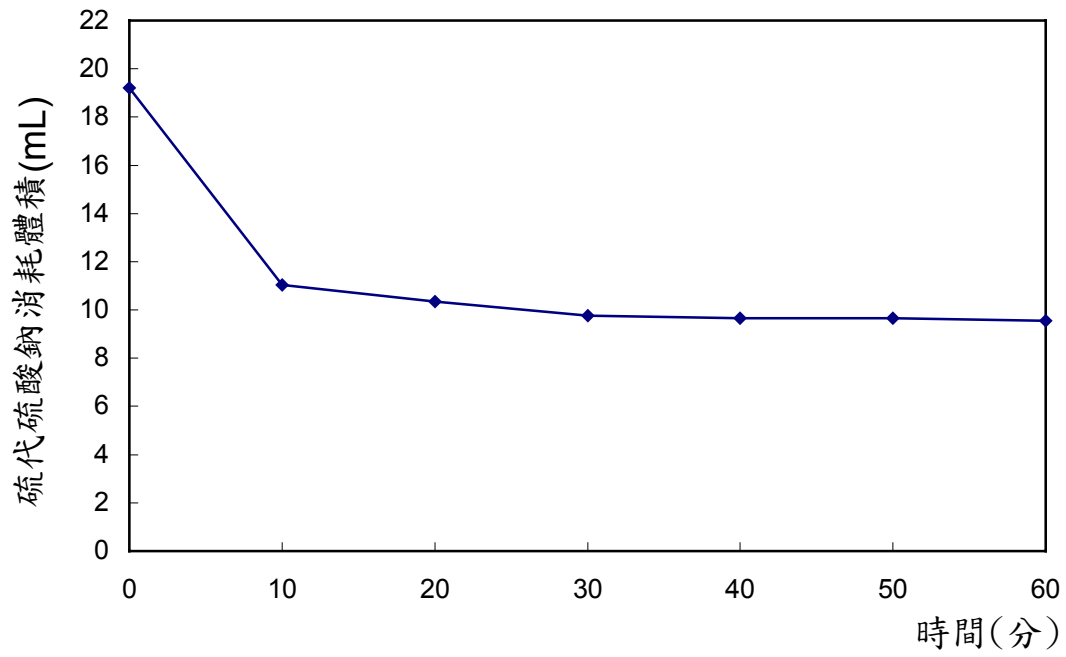


圖 4-1 銅離子含量檢測

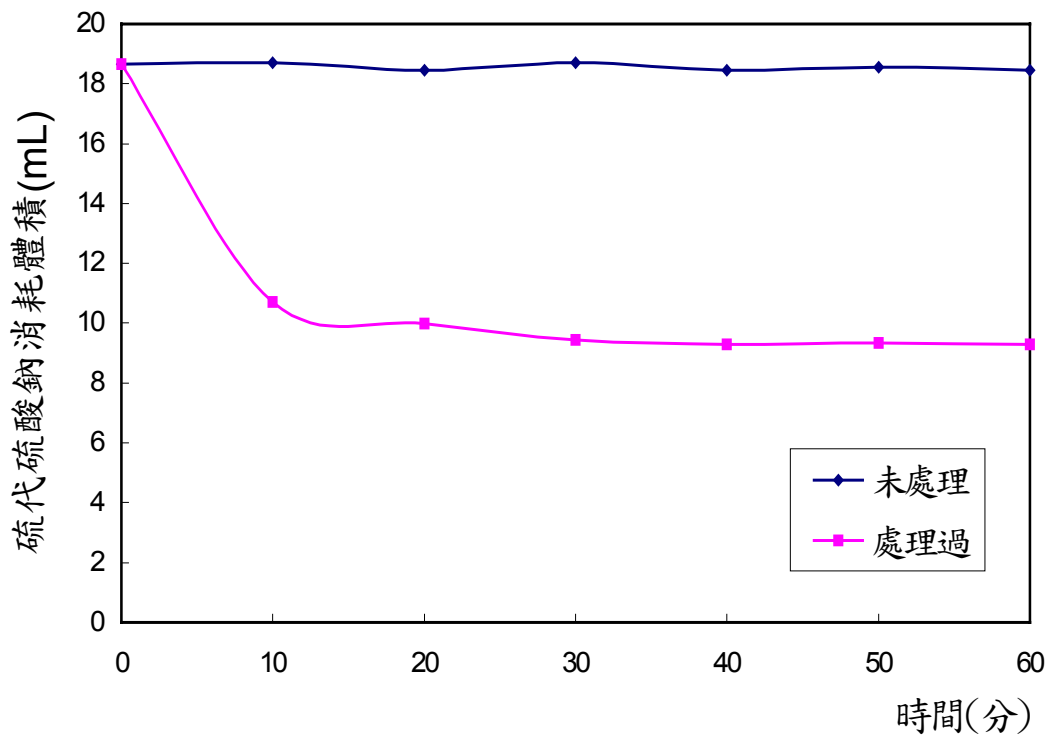


圖 4-2 保麗龍膠吸附能力印證

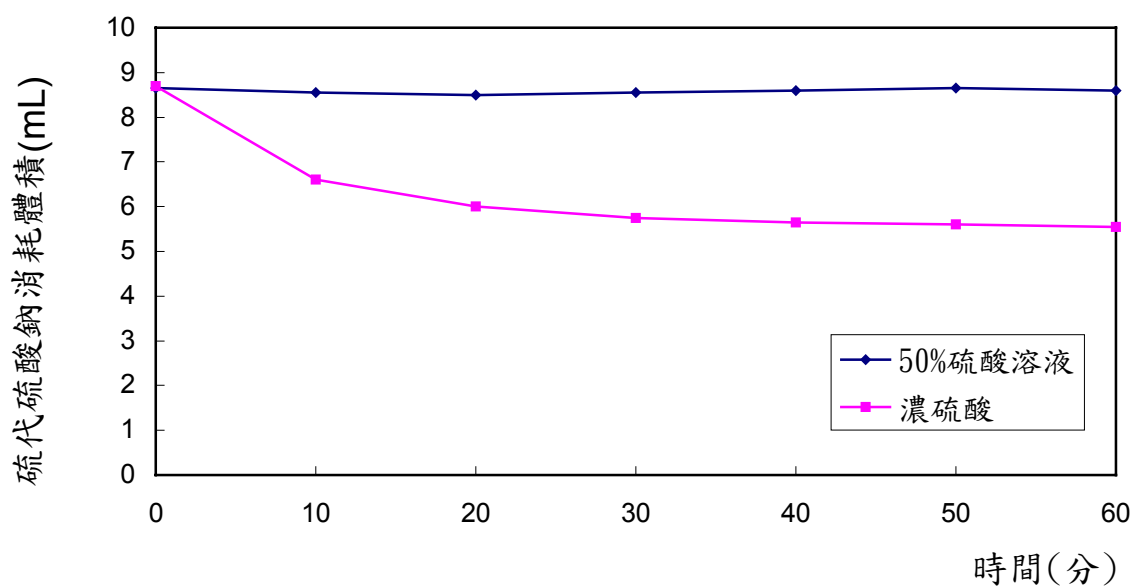


圖 4-3 硫酸濃度對保麗龍膠吸附能力的影響

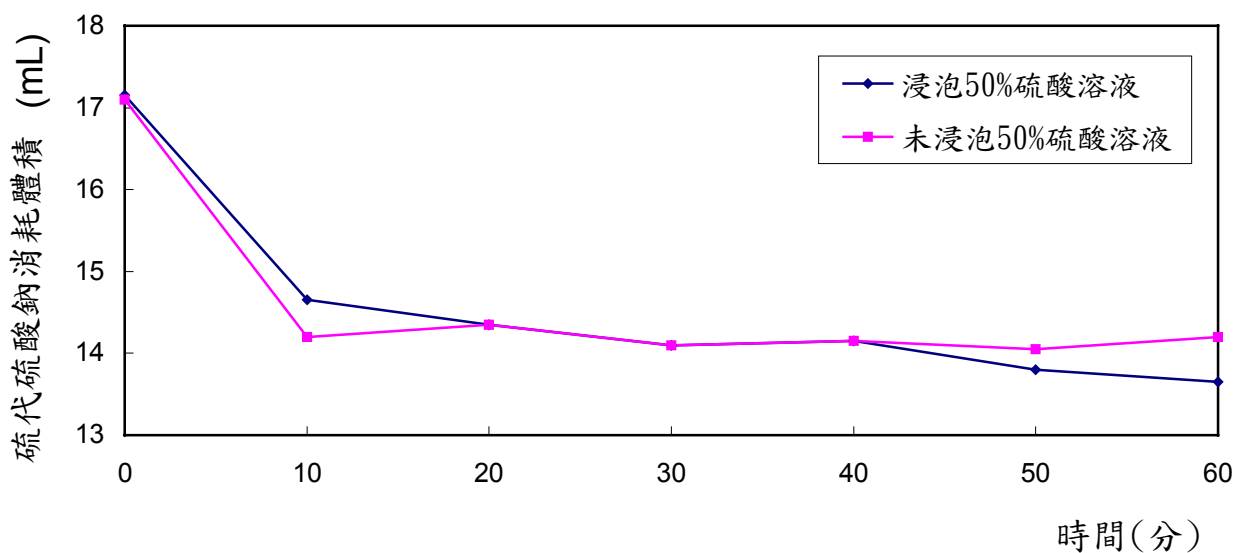


圖 4-4 浸泡 50%硫酸溶液對保麗龍膠吸附能力的影響

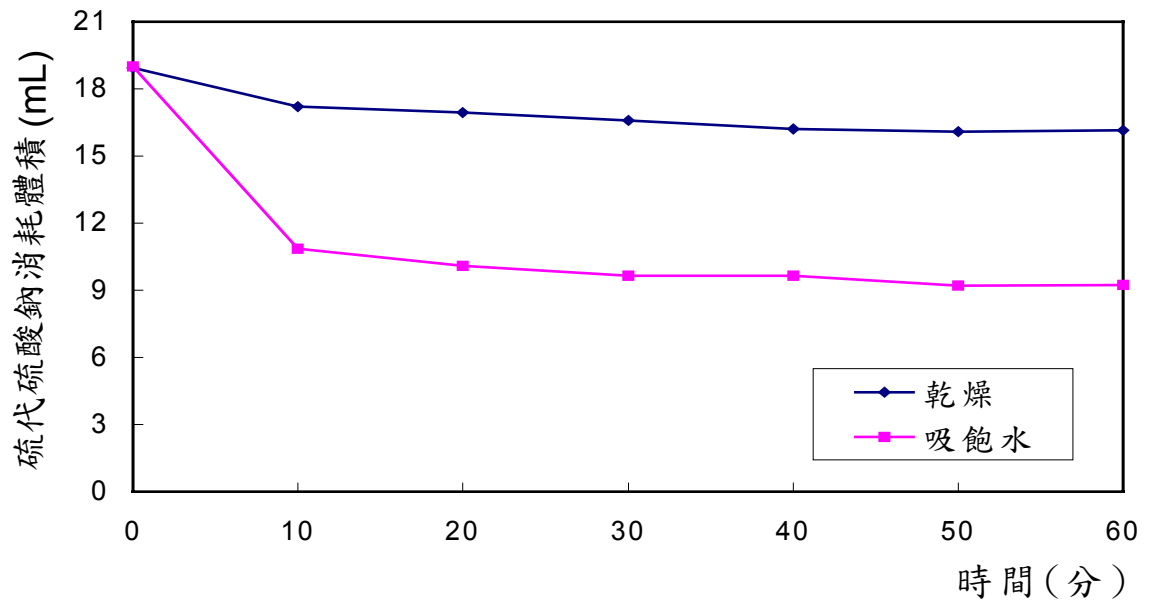


圖 4-5 保麗龍膠是否吸水對銅離子吸附能力的影響

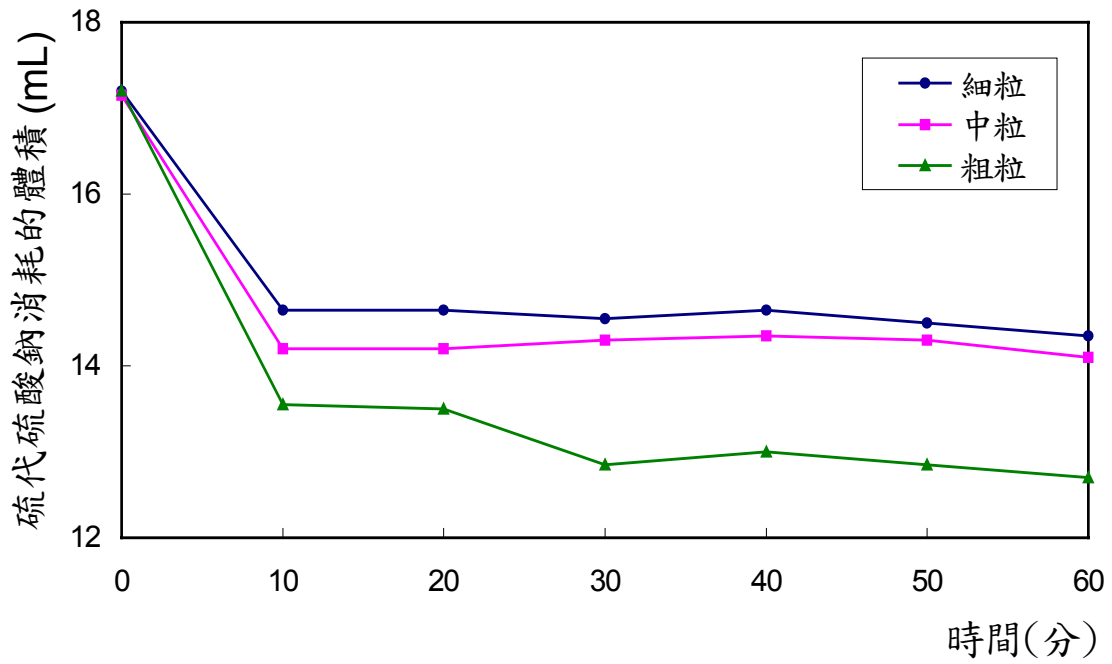


圖 4-6 保麗龍膠顆粒大小對銅離子吸附能力的比較

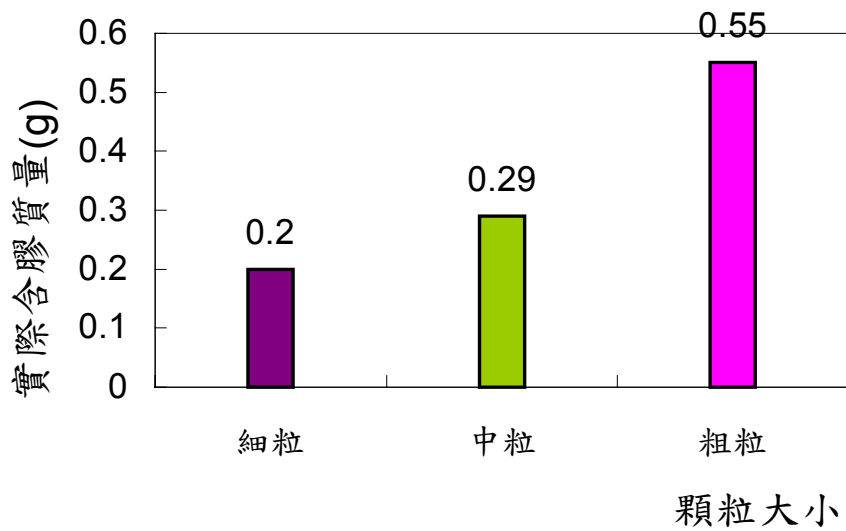


圖 4-7 20 克膠中實際含膠量比較

保麗龍膠顆粒大小對吸附的影響

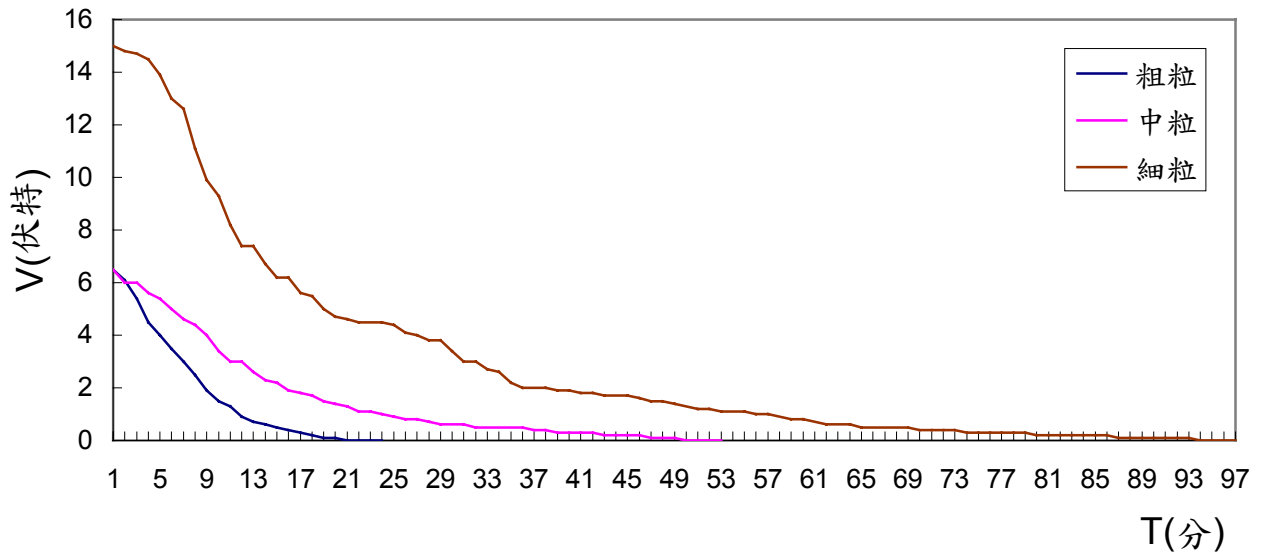


圖4-8 指示器之電位大小對操作時間之關係

銅離子溶液濃度：100ppm

銅離子溶液流速：10ml/分

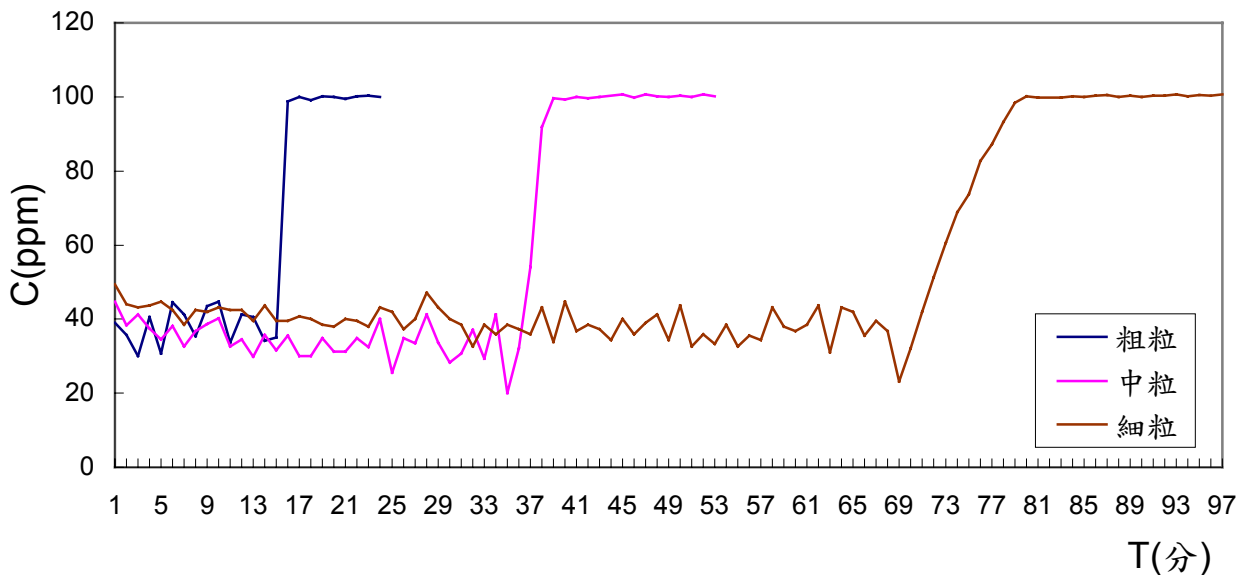


圖4-9 廢水濃度對操作時間之關係

銅離子溶液濃度：100ppm

銅離子溶液流速：10ml/分

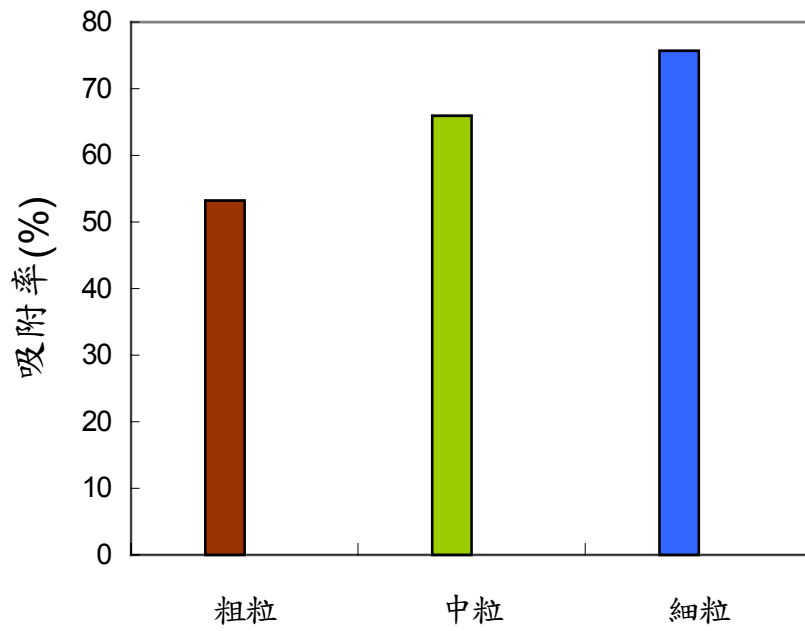


圖4-10 顆粒大小對吸附率的比較

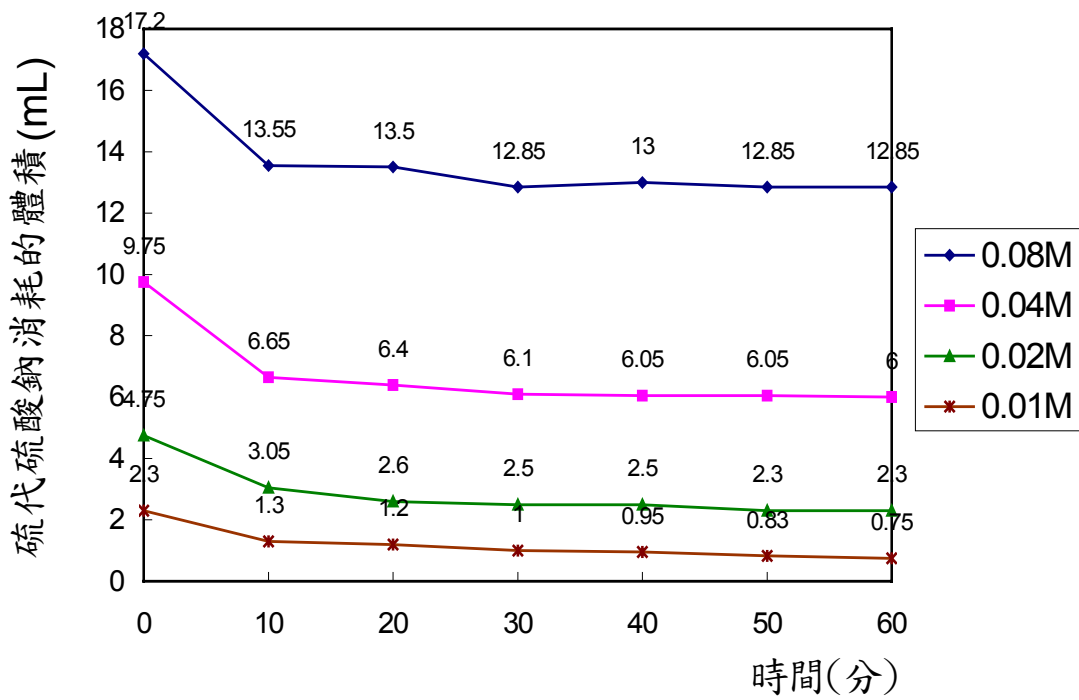


圖 4-13 不同濃度硫酸銅對保麗龍膠吸附銅離子的比較

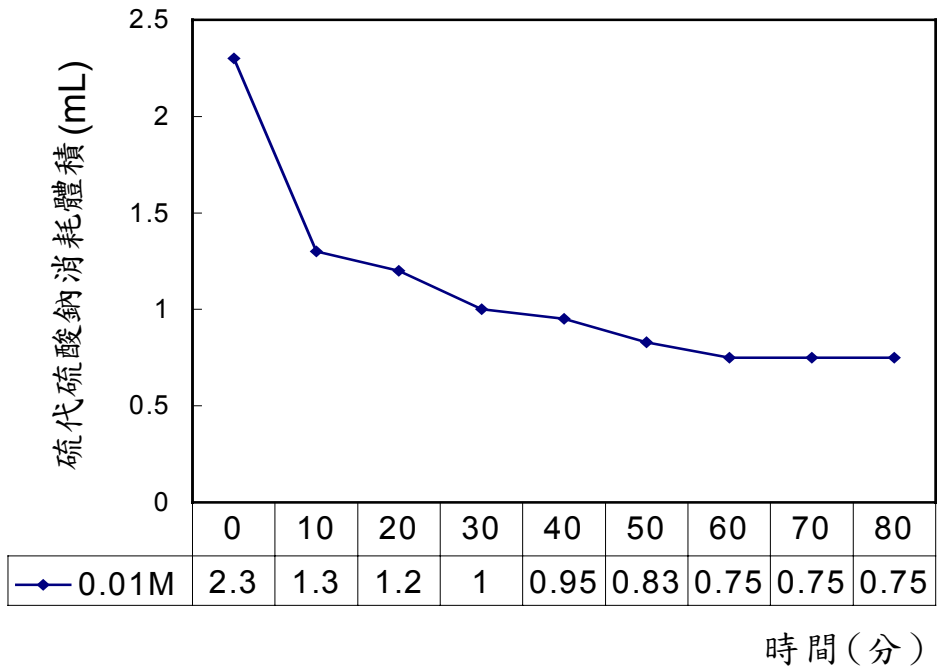


圖 4-14 0.01M 銅離子吸附達飽和之臨界時間

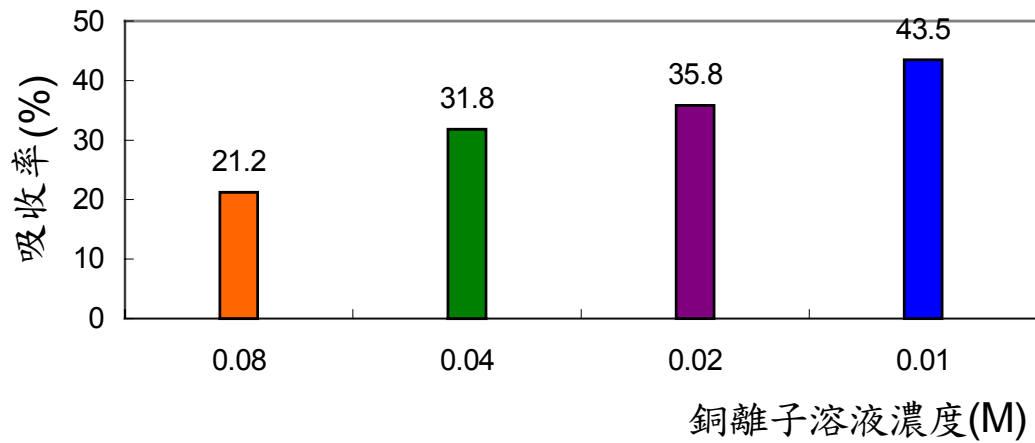


圖 4-15 保麗龍膠對各濃度最初 10 分鐘之吸附百分率

硫酸銅濃度對吸附的影響

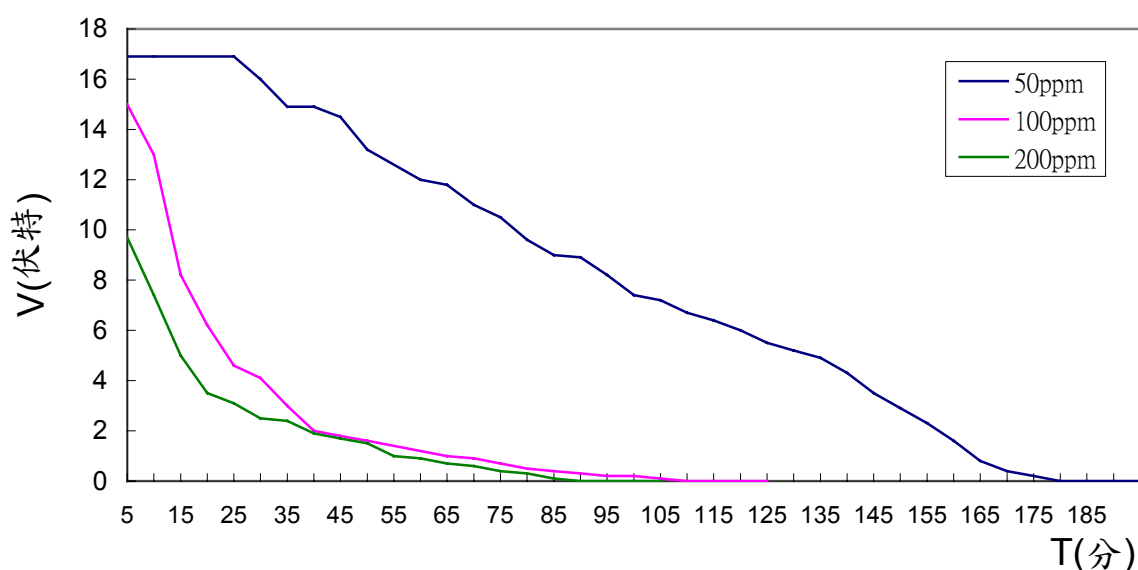


圖 4-16 不同濃度之電位大小對操作時間之關係
 保麗龍膠顆粒：細粒
 銅離子溶液流速：10ml/分

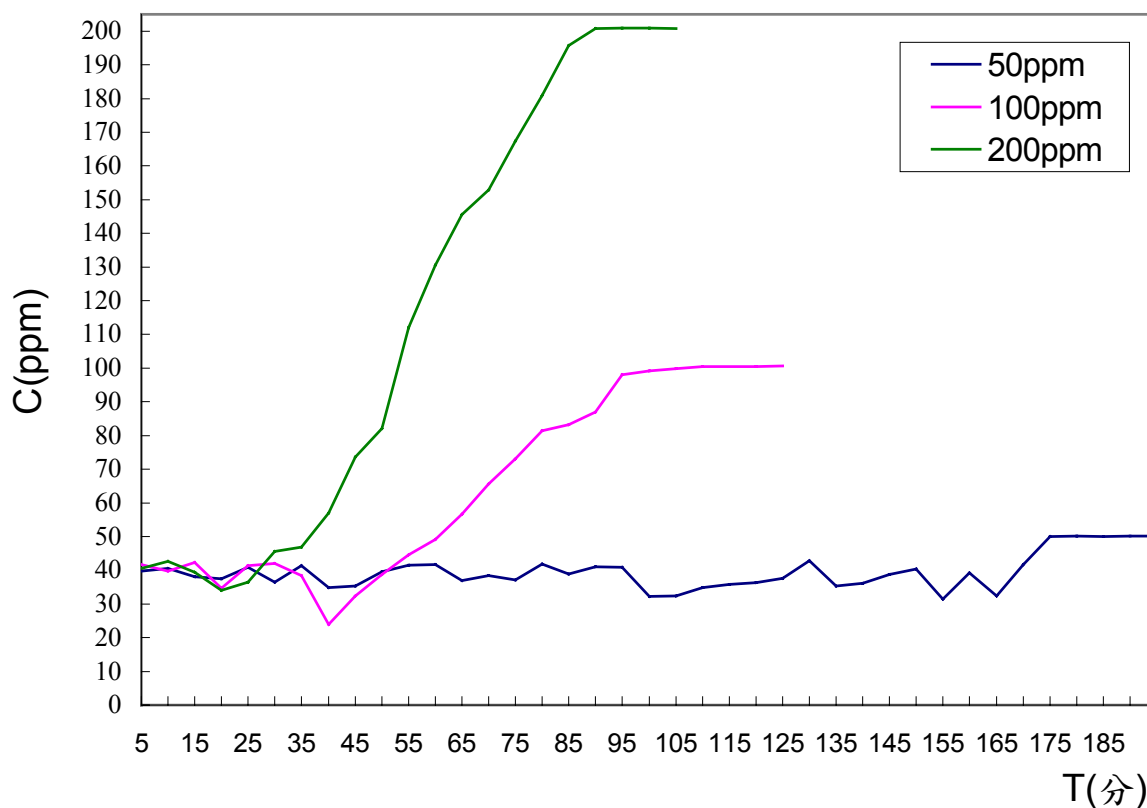


圖 4-17 不同濃度之銅離子處理後之濃度對操作時間之關係
 保麗龍膠顆粒：細粒
 銅離子溶液流速：10ml/分

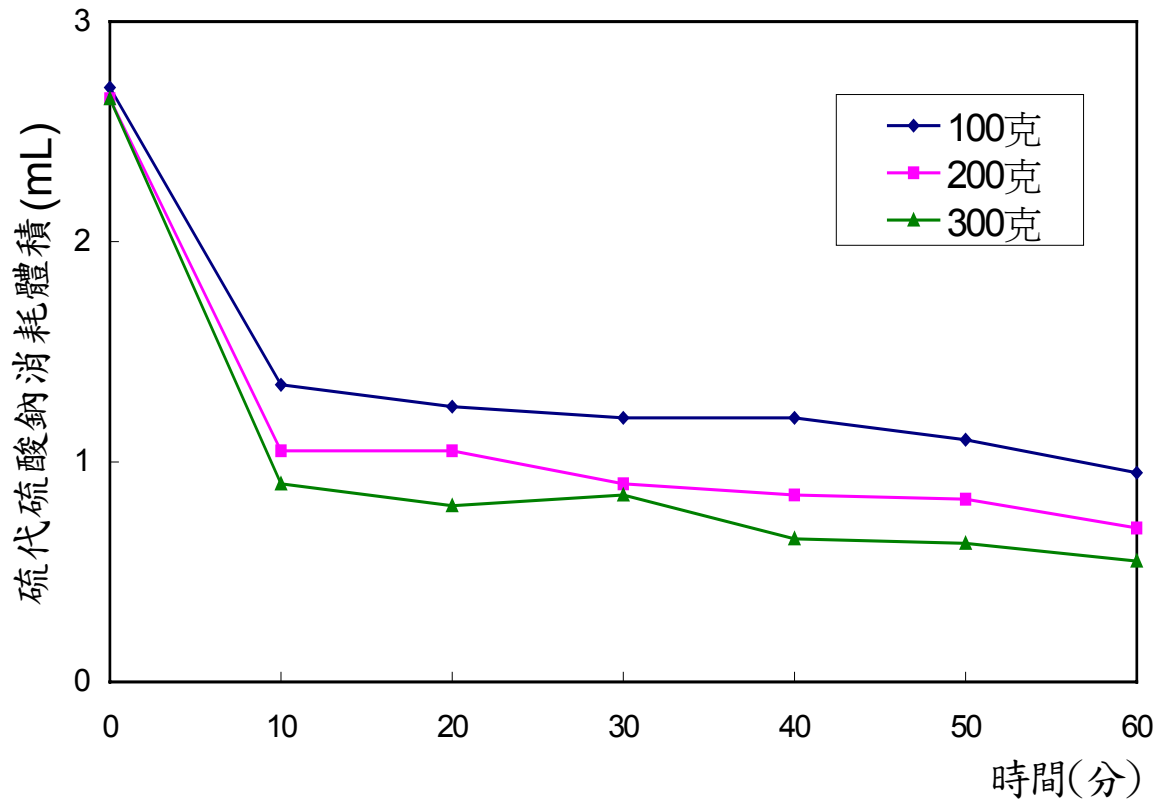


圖4-18 不同質量的保麗龍膠吸附程度的比較

硫酸銅溶液流速對吸附的影響

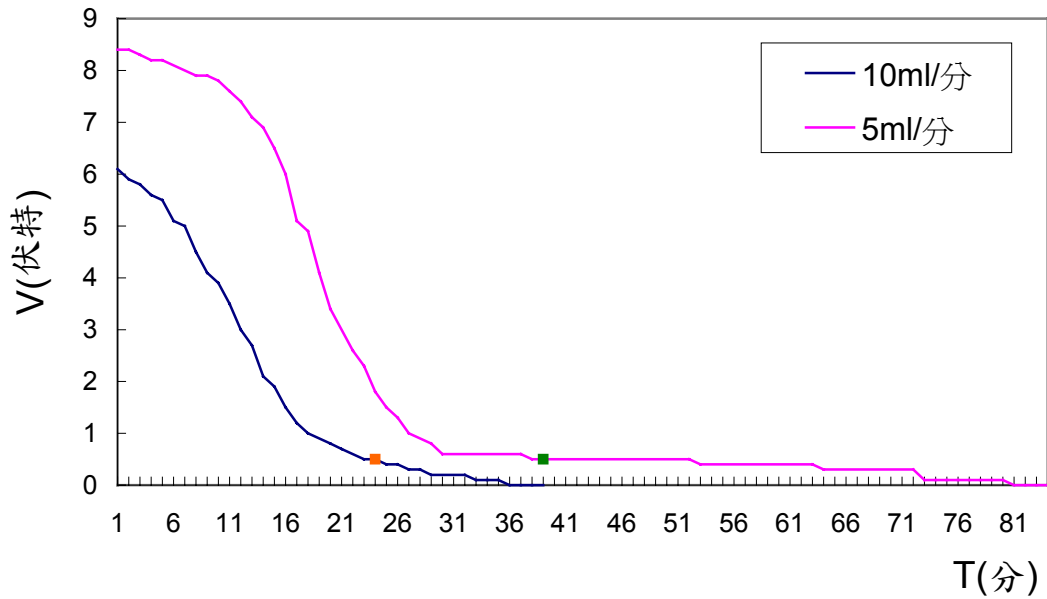


圖 4-19 不同流速之電位大小對操作時間之關係

保麗龍膠顆粒：細粒

銅離子溶液濃度：100ppm

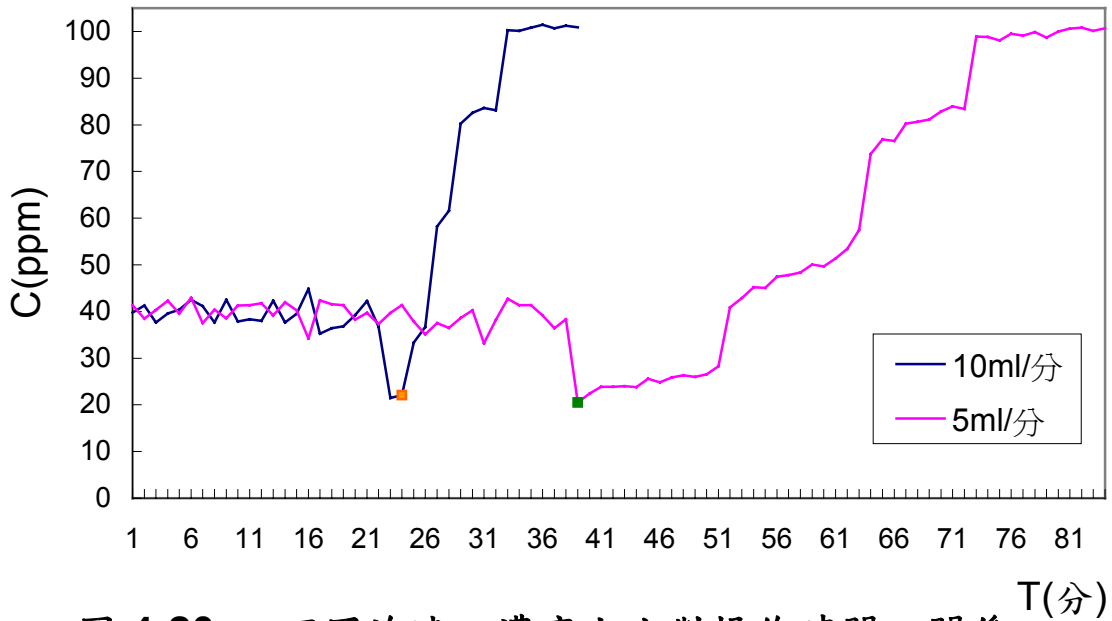


圖 4-20 不同流速之濃度大小對操作時間之關係

保麗龍膠顆粒：細粒

銅離子溶液濃度：100ppm

不同 pH 值的硫酸銅溶液對吸附的影響

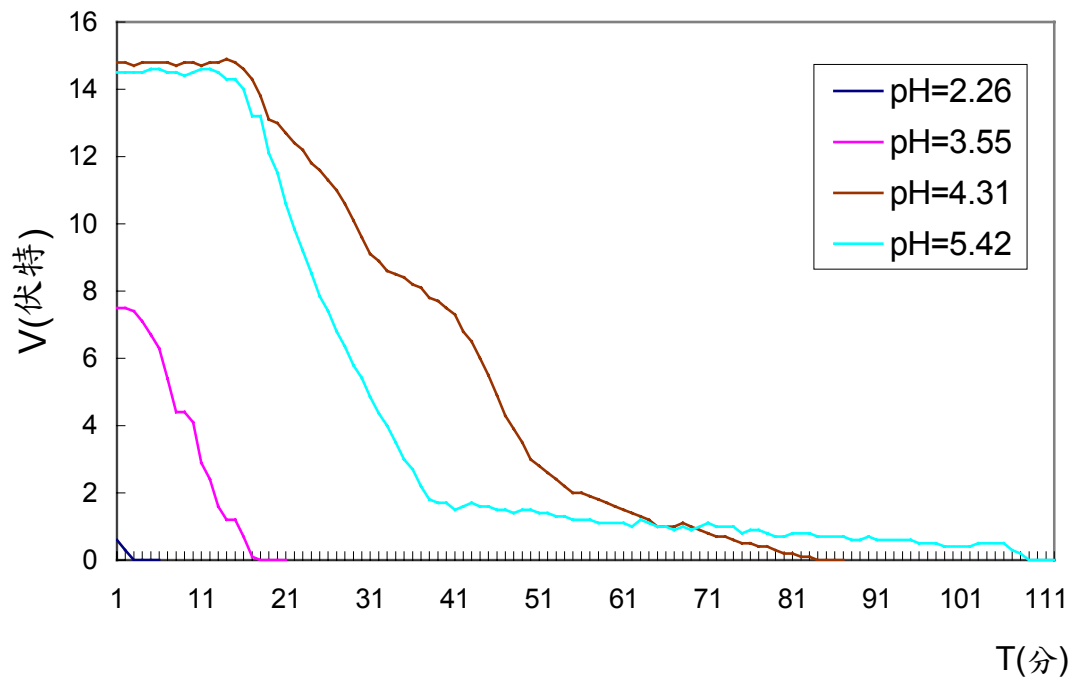


圖 4-21 不同 pH 值之電位大小對操作時間之關係

保麗龍膠顆粒：細粒

銅離子溶液流速：5ml/分

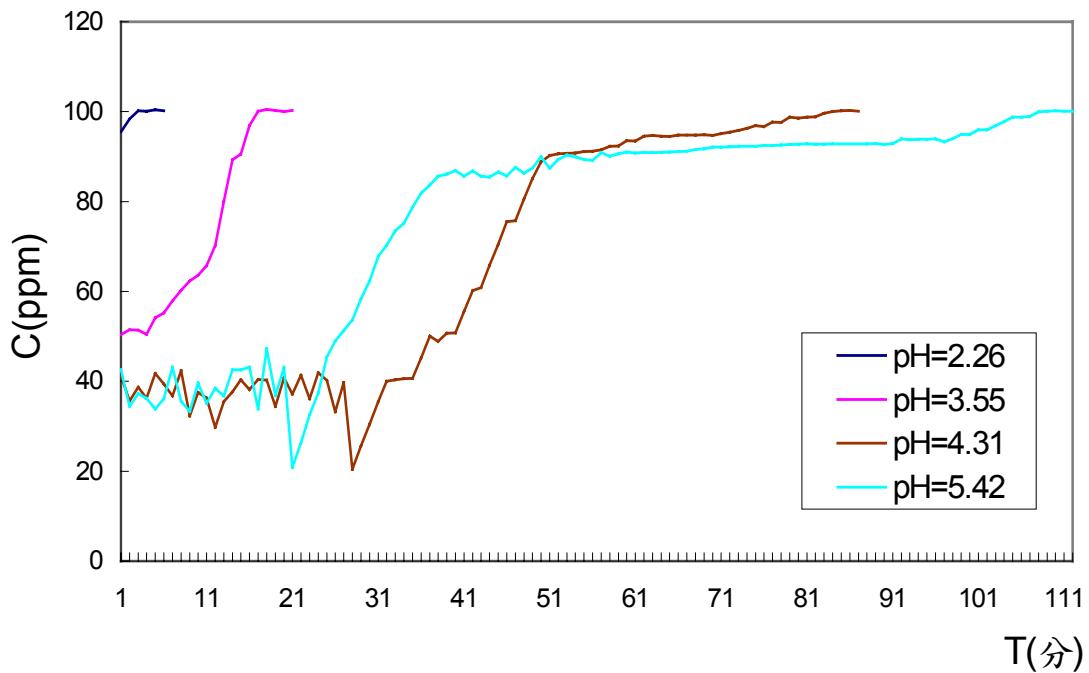


圖 4-22 不同 pH 值之濃度大小對操作時間之關係

保麗龍膠顆粒：細粒

銅離子溶液流速：5ml/分

不同溫度的硫酸銅溶液對吸附的影響

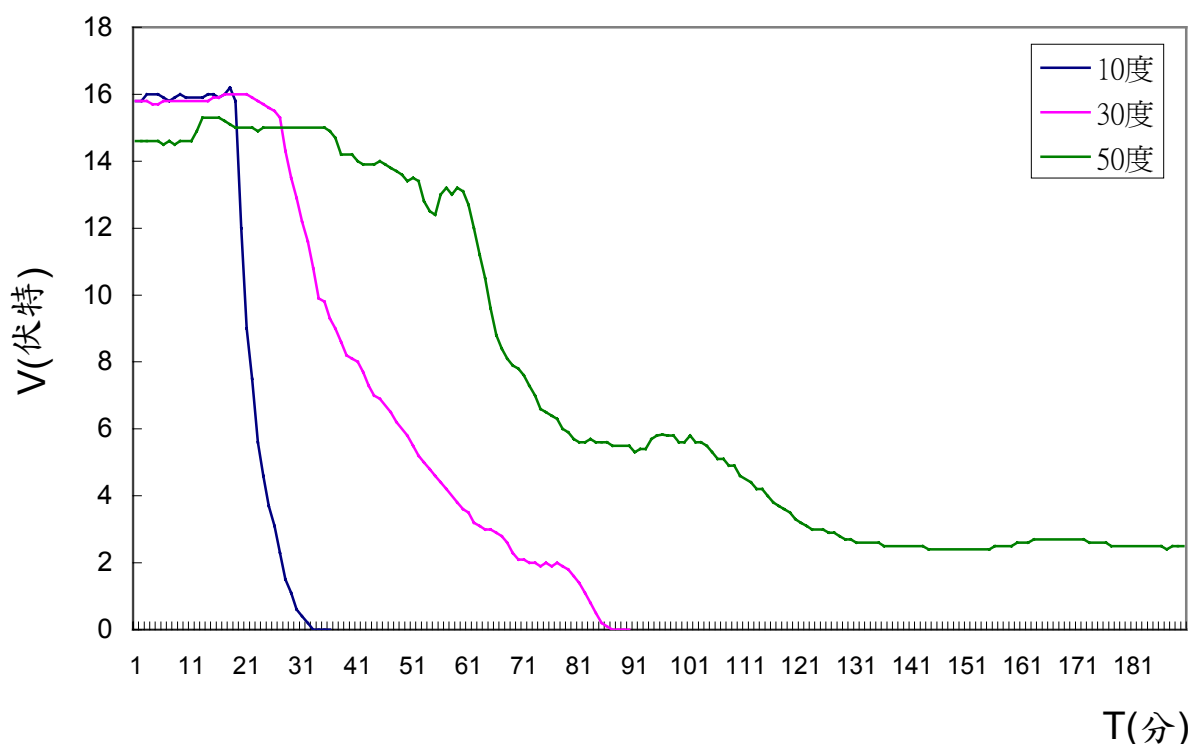


圖 4-23 不同溫度之電位大小對操作時間之關係

保麗龍膠顆粒：細粒

銅離子溶液濃度：100ppm

銅離子溶液流速：5ml/分

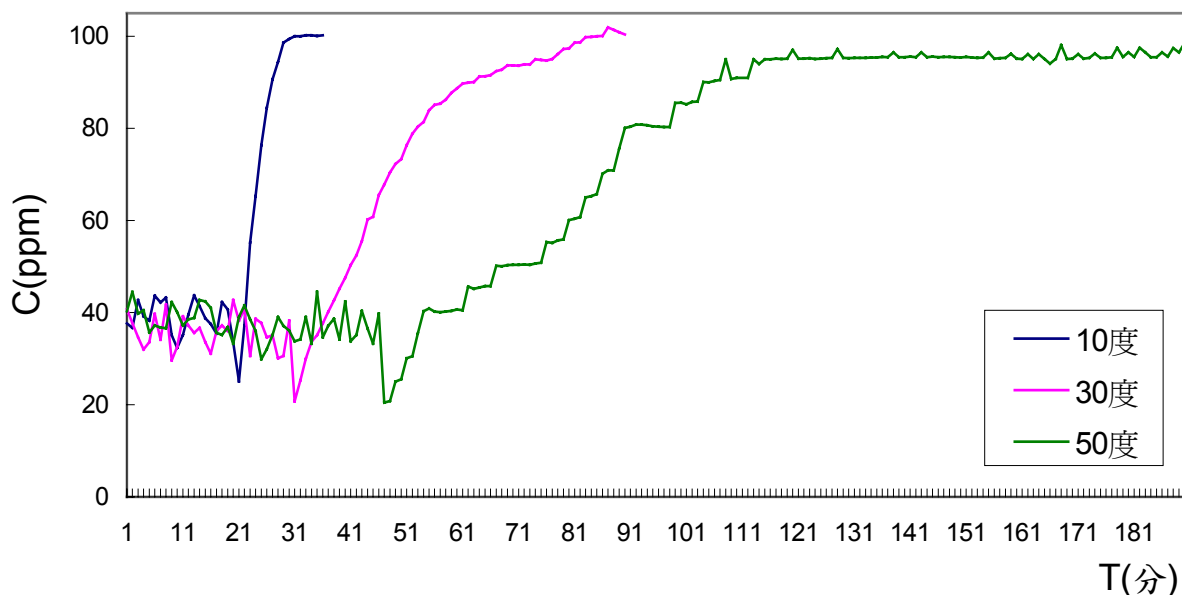


圖 4-24 不同溫度之濃度大小對操作時間之關係

保麗龍膠顆粒：細粒

銅離子溶液濃度：100ppm

銅離子溶液流速：5ml/分

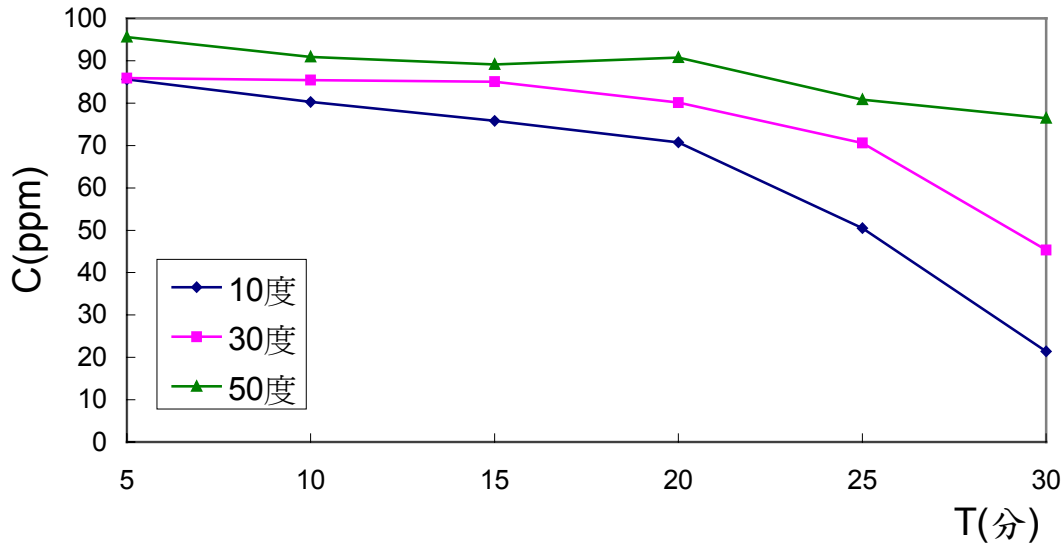


圖 4-25 不同溫度下浸泡時間對保麗龍膠吸附的影響

保麗龍膠顆粒：細粒

銅離子溶液濃度：100ppm

銅離子溶液流速：5mL/分

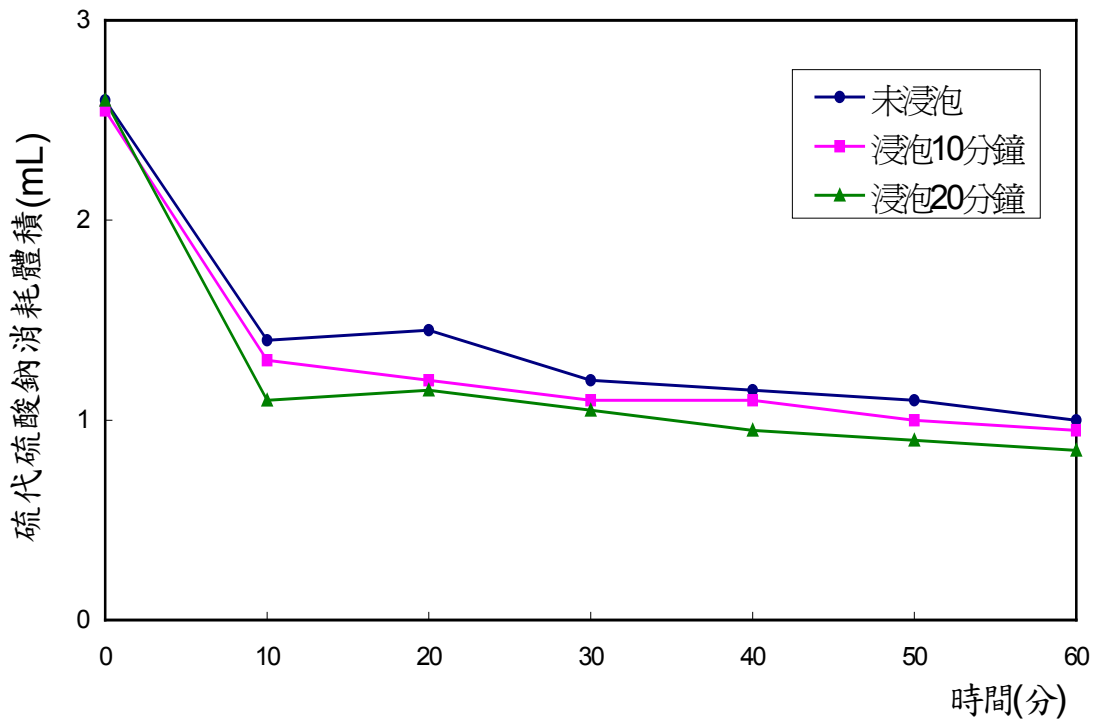


圖 4-26 保麗龍膠陽離子類型對吸附程度的比較

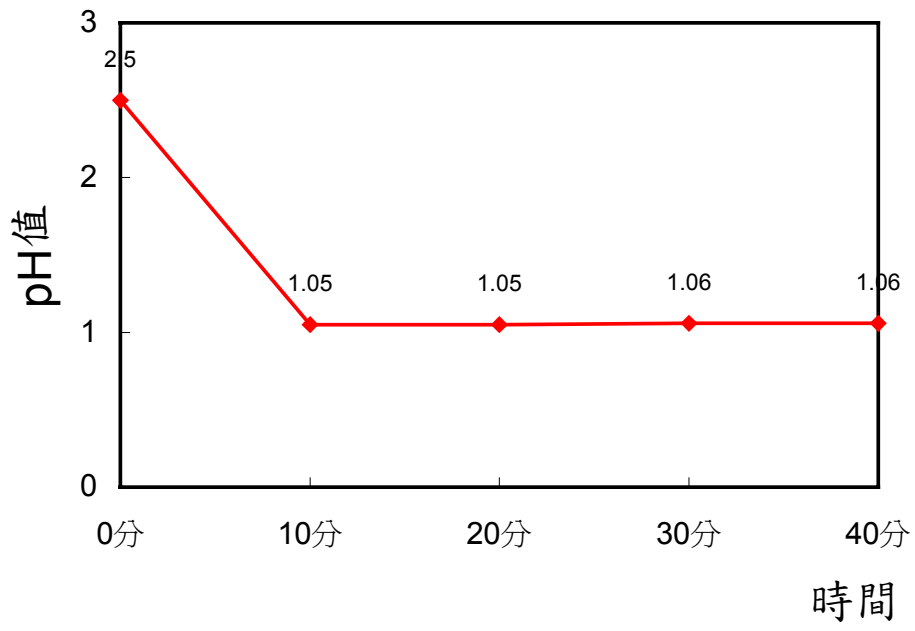


圖 4-27 保麗龍膠轉變為鈉型之印證

離子種類對吸附的影響

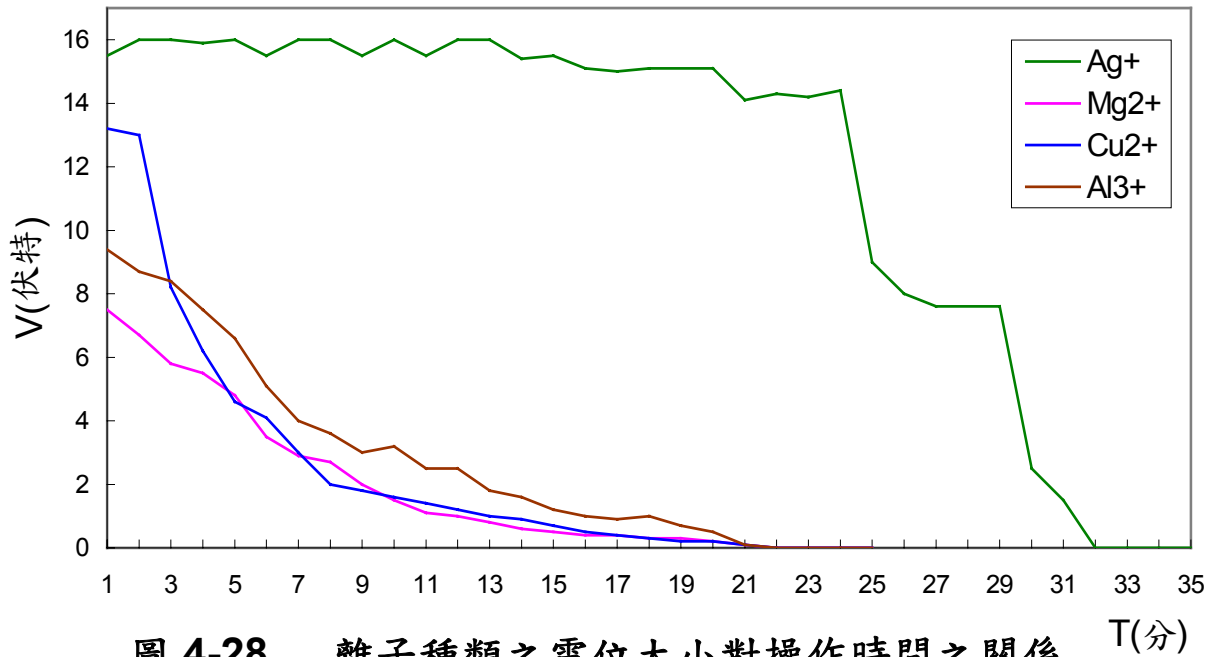


圖 4-28 離子種類之電位大小對操作時間之關係

保麗龍膠顆粒：細粒
 離子溶液濃度：100ppm
 離子溶液流速：5ml/分

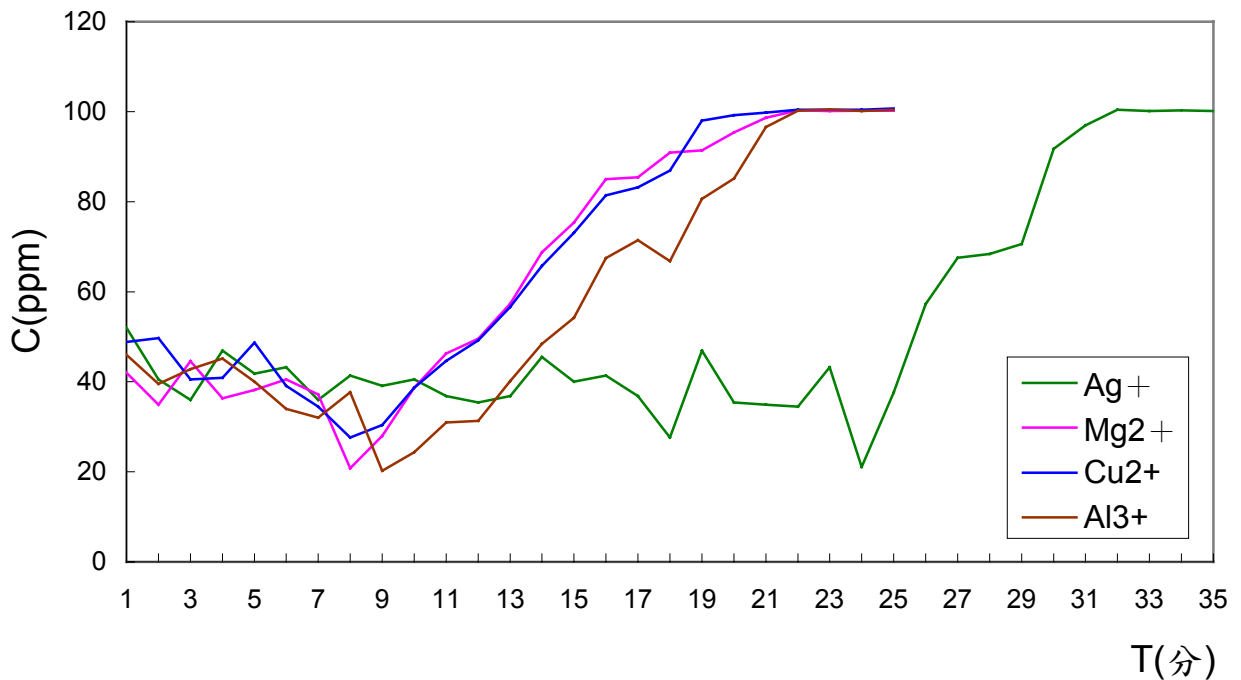


圖 4-29 離子種類之濃度大小對操作時間之關係

保麗龍膠顆粒：細粒
 離子溶液濃度：100ppm
 離子溶液流速：5ml/分

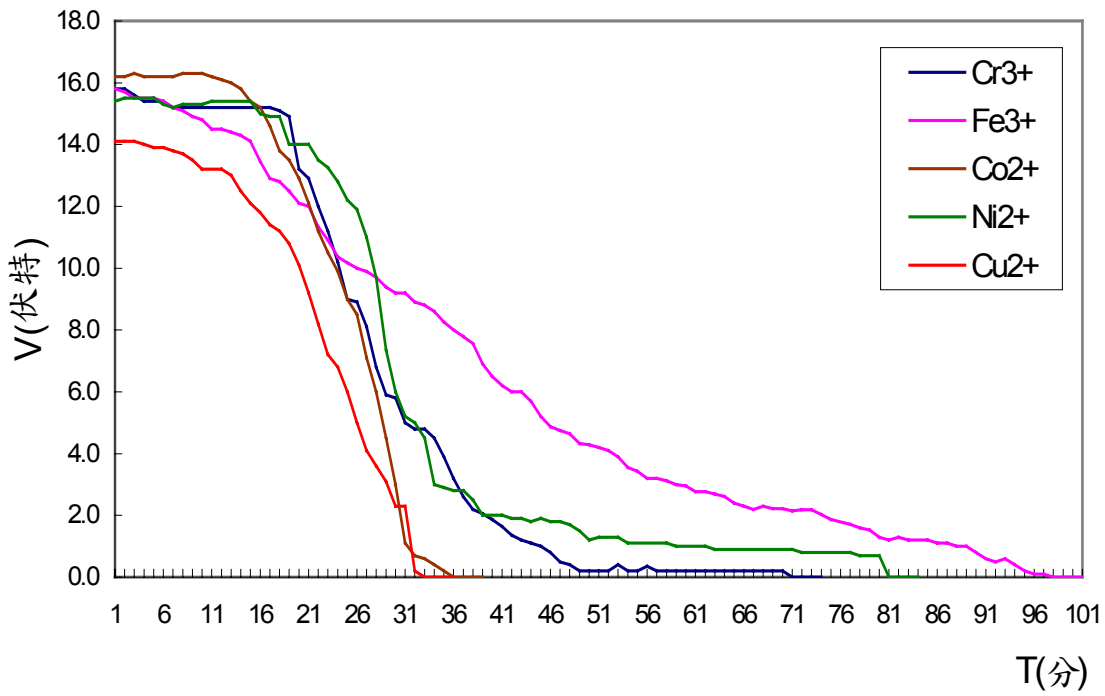


圖 4-30 不同價數陽離子吸附能力電位的比較

保麗龍膠顆粒：中粒
 離子溶液濃度：0.001M
 離子溶液流速：5mL/分

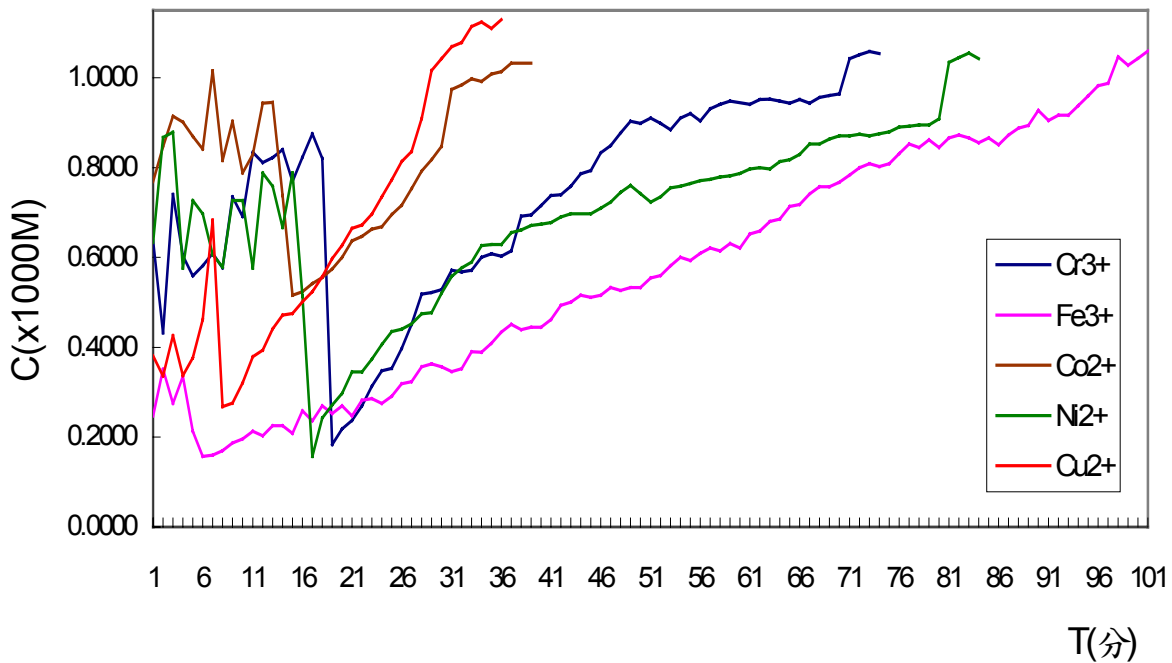


圖 4-31 不同價數陽離子吸附能力濃度的比較

保麗龍膠顆粒：中粒
 離子溶液濃度：0.001M
 離子溶液流速：5mL/分

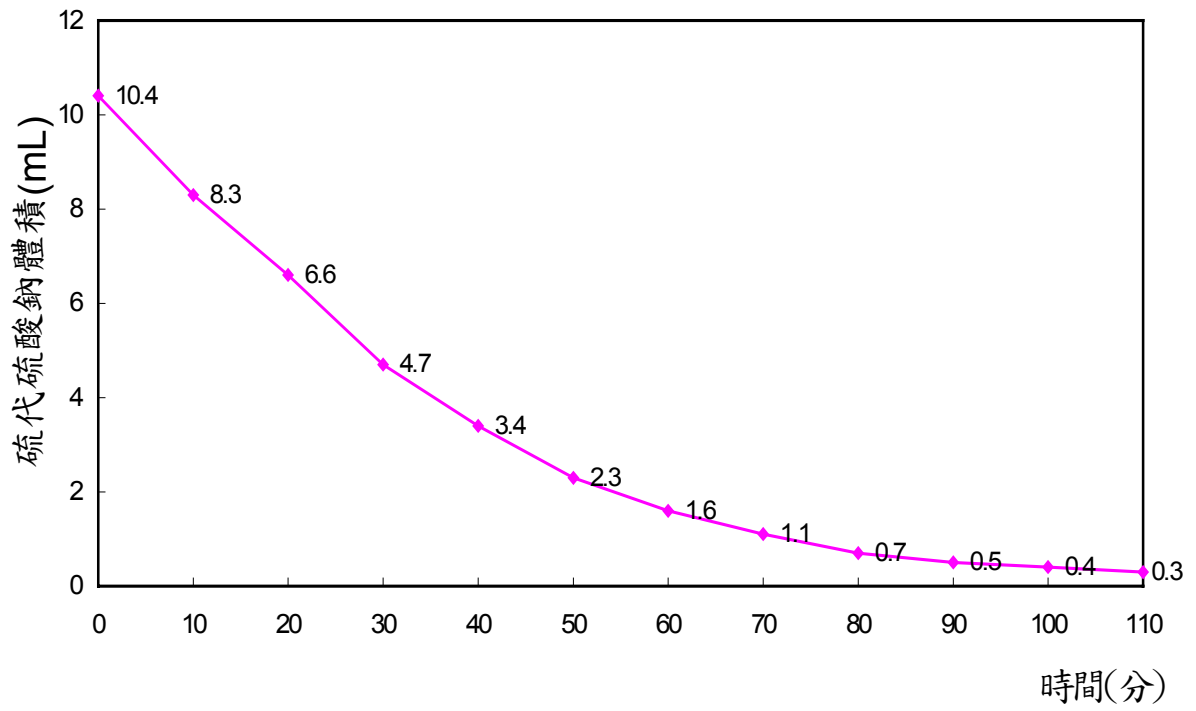


圖 4-32 保麗龍膠分次吸附溶液中銅離子的測定

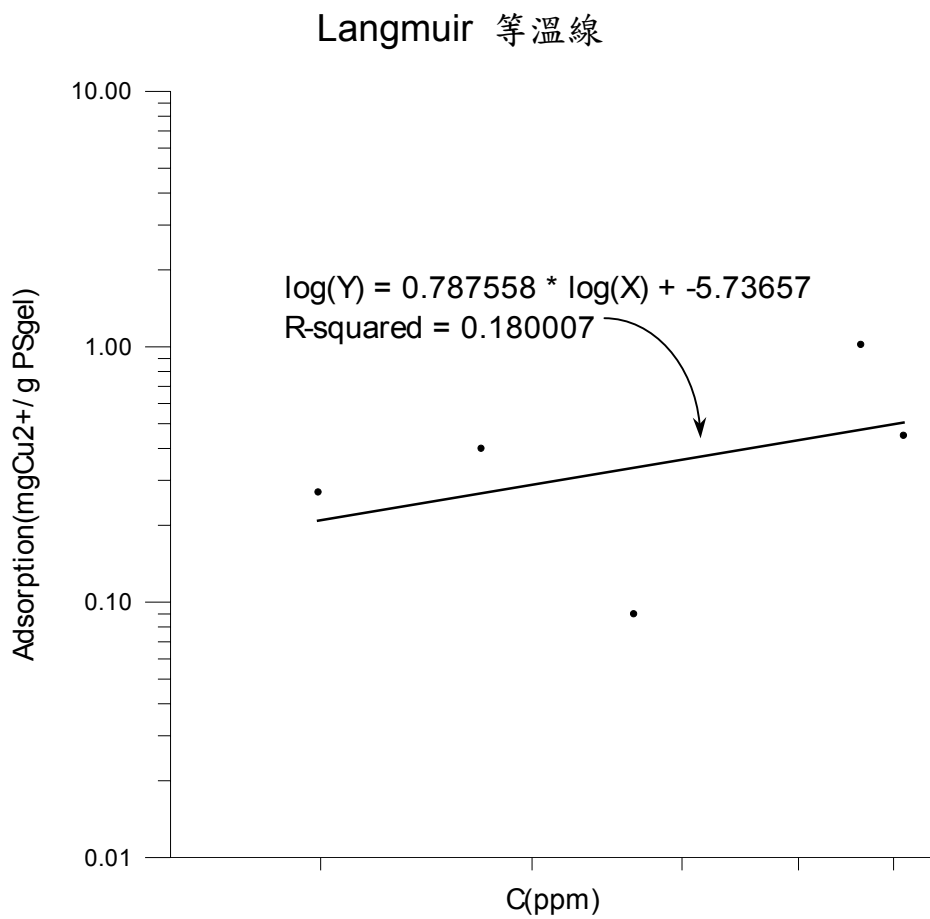
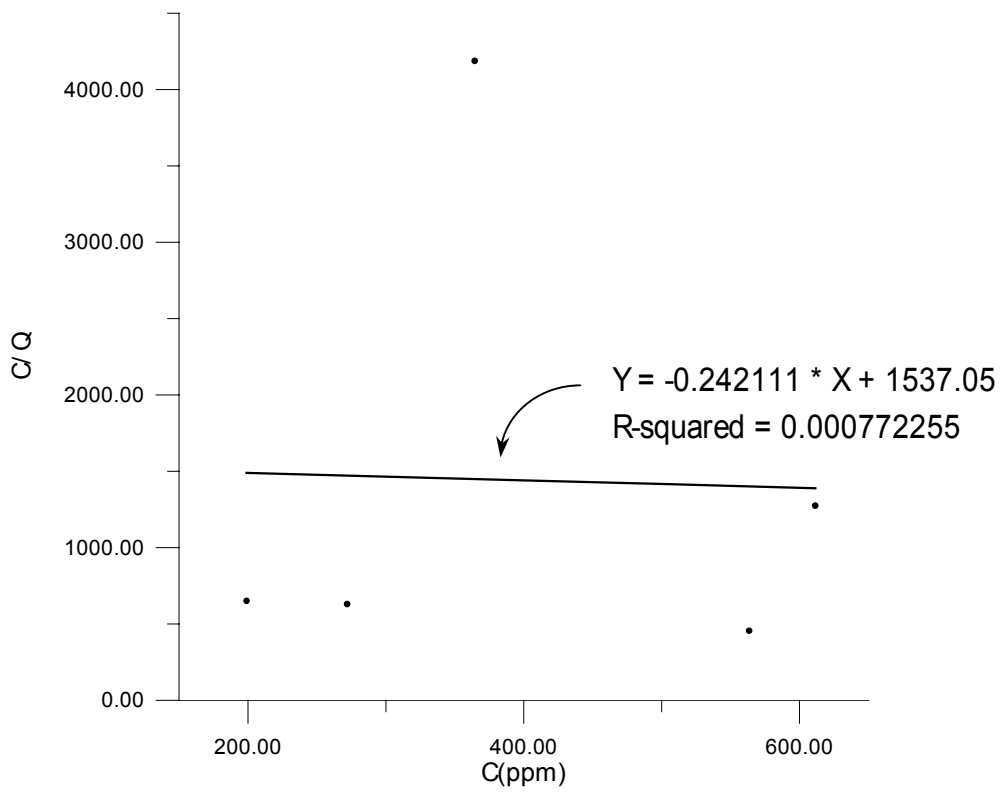
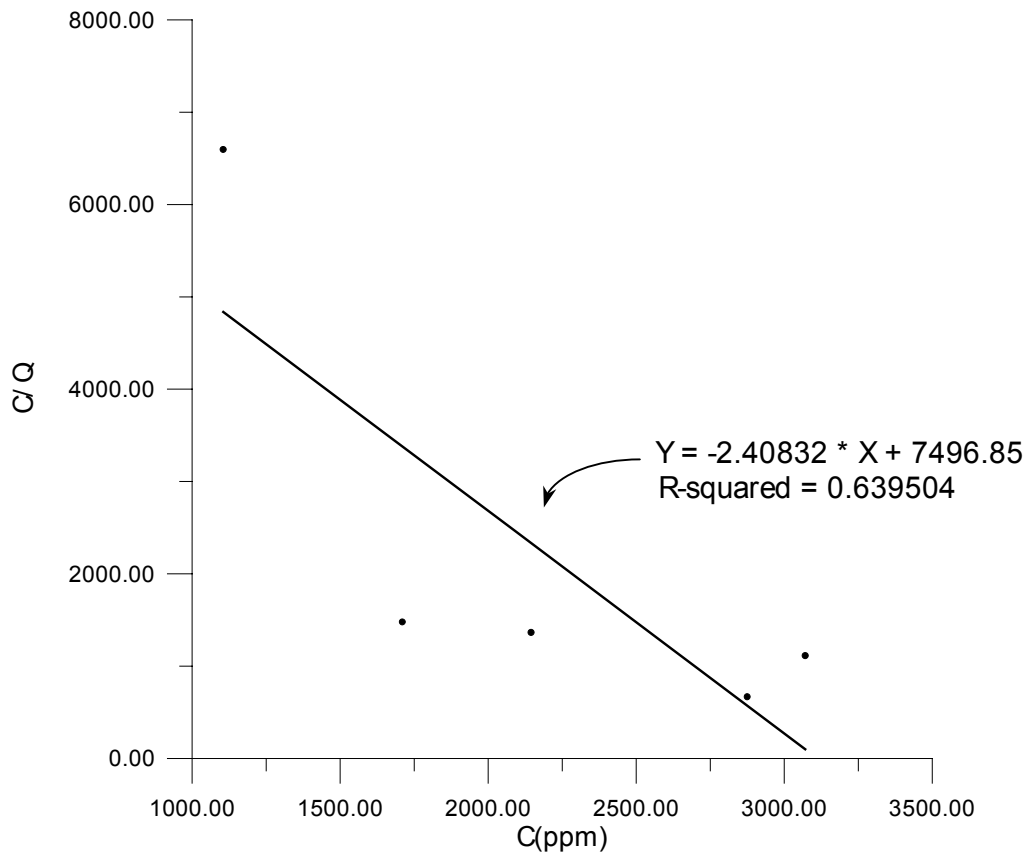
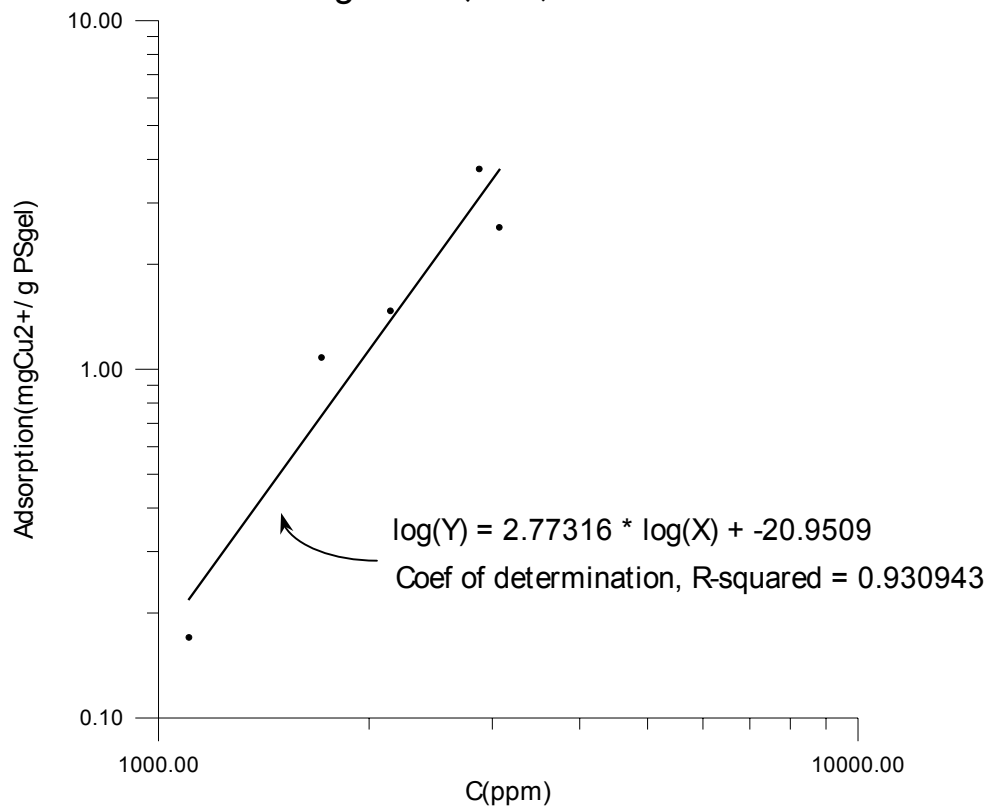


圖 4-33 100~500ppm 等溫線分析圖



Langmuir 等溫線



Freundlich 等溫線

圖 4-34 1000~3000ppm 等溫線分析圖

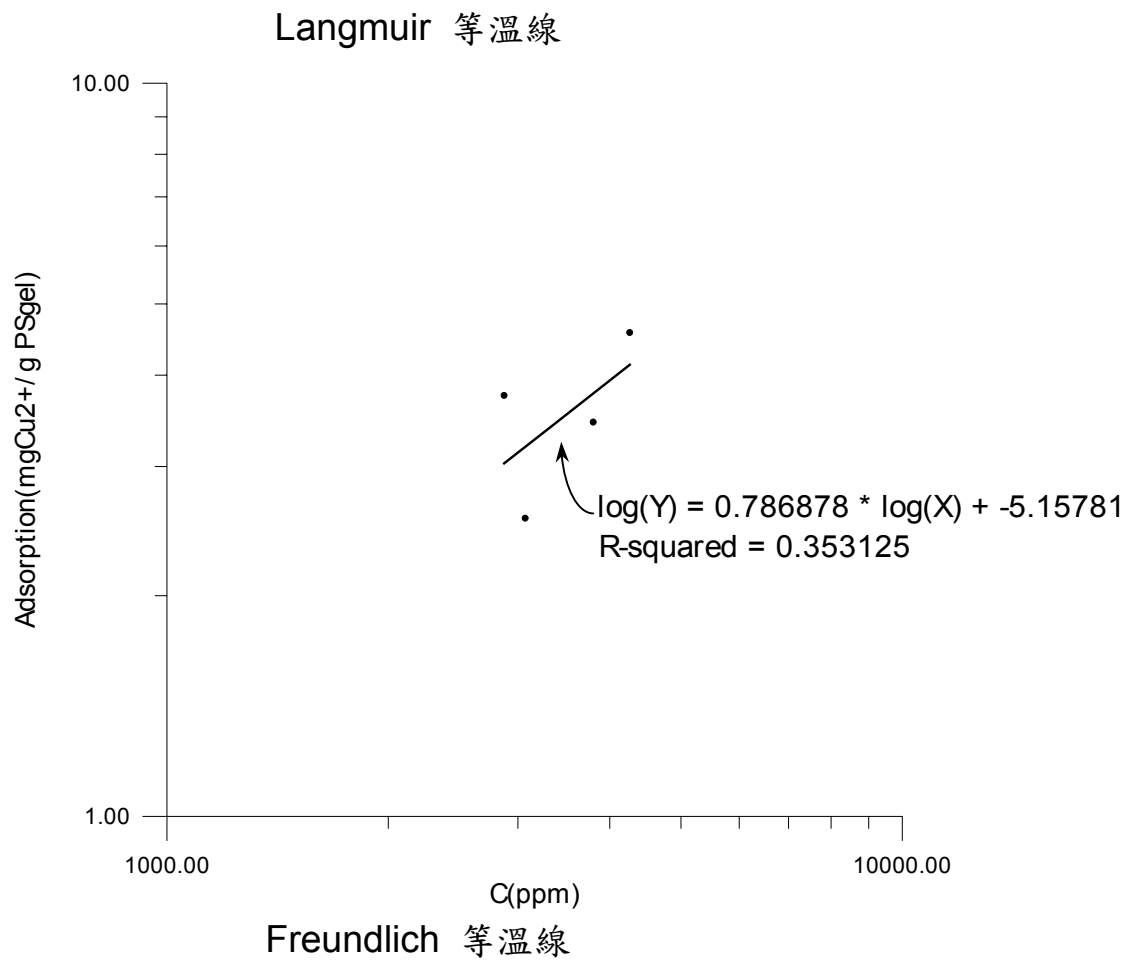
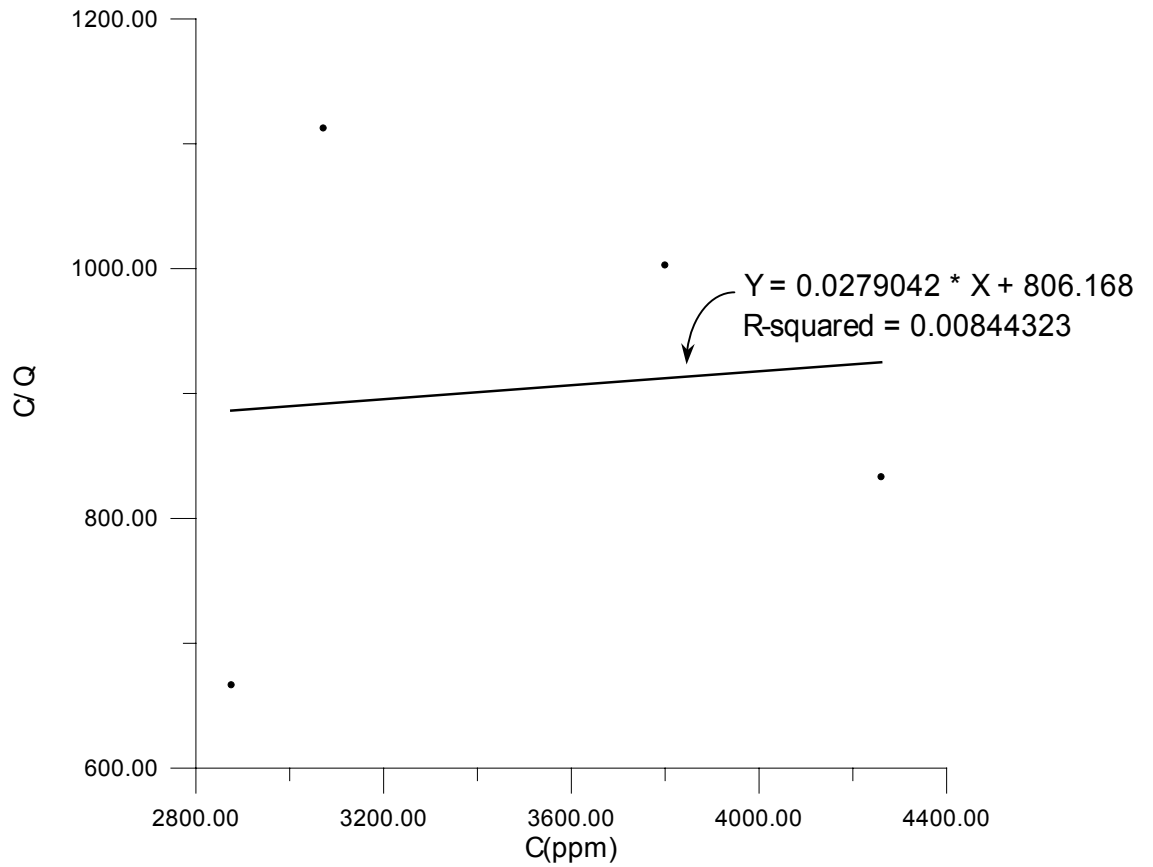


圖 4-35 2500~4000ppm 等溫線分析圖



圖 4-36 保麗龍碎粒(未磺酸化前)

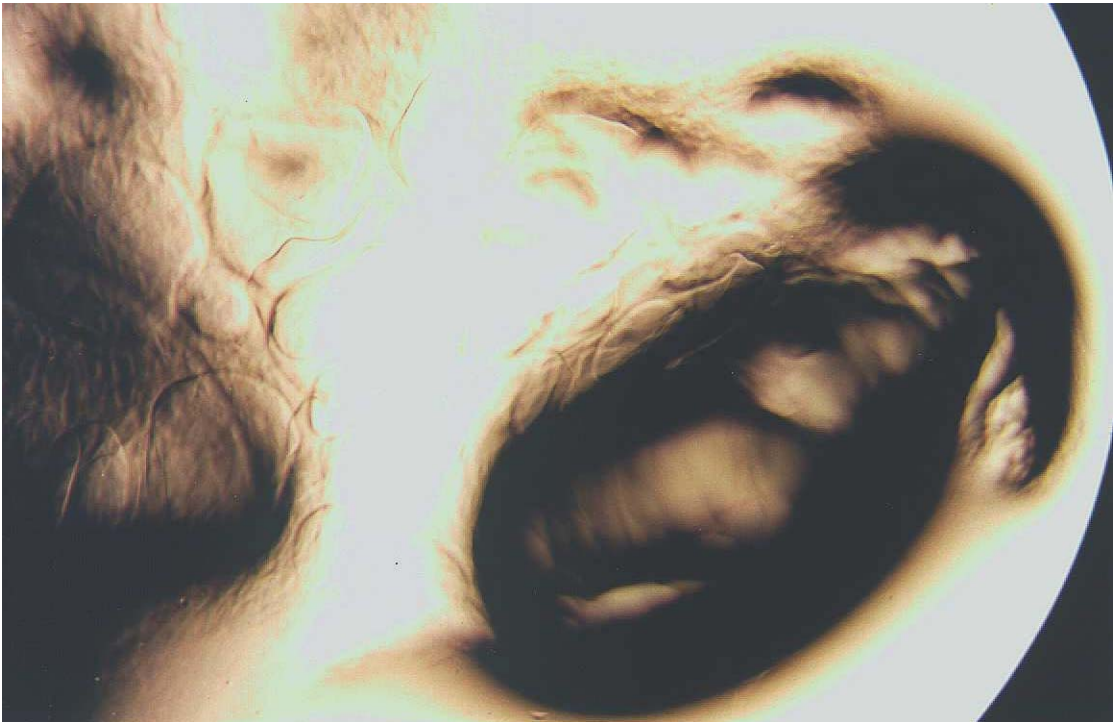


圖 4-37 作為吸附劑的保麗龍膠(未吸附前)

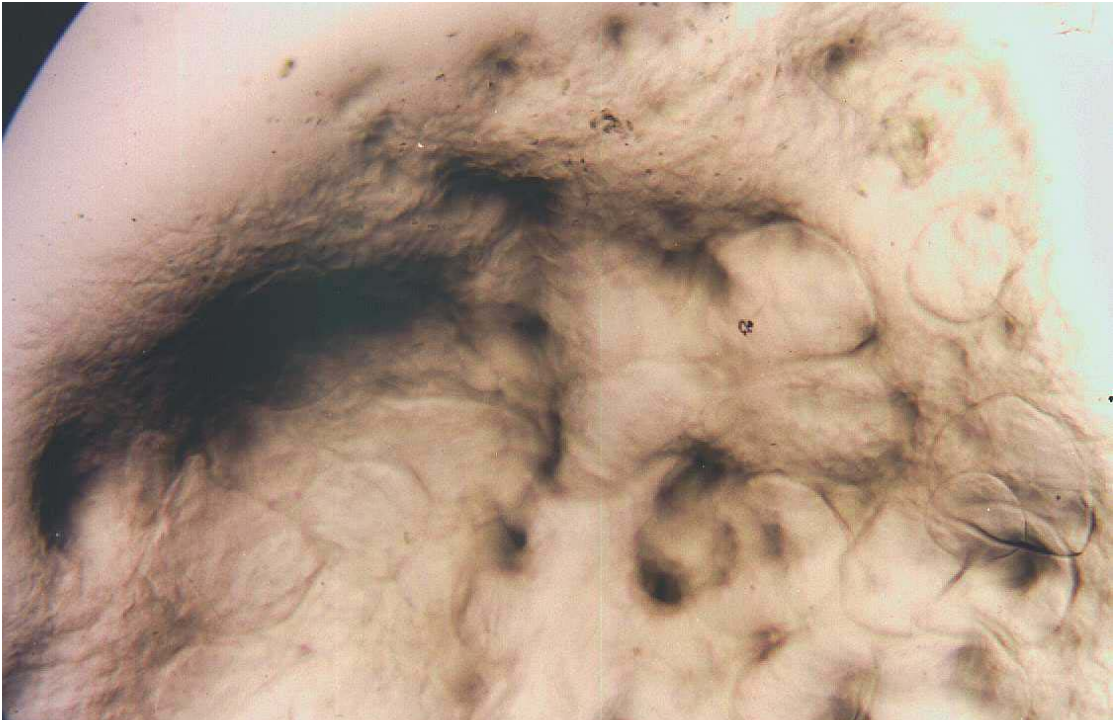


圖 4-38 在低濃度(200ppm)下吸附後之保麗龍膠

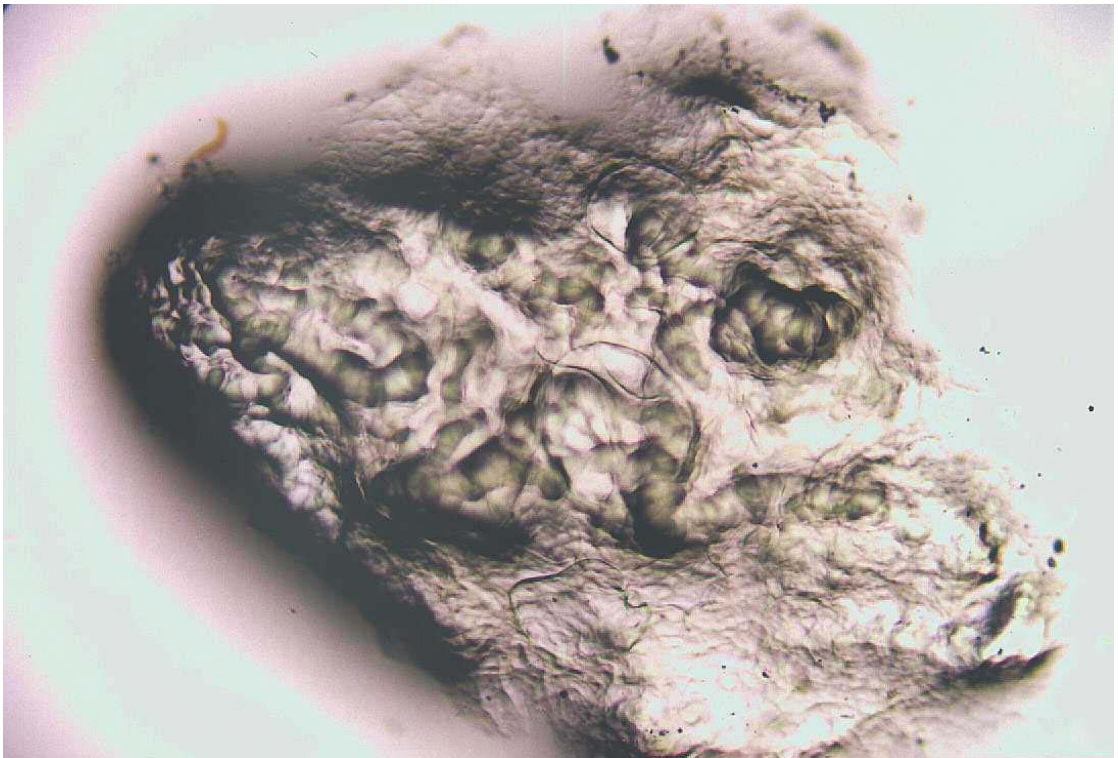


圖 4-39 在高濃度(5000ppm)下吸附後之保麗龍膠

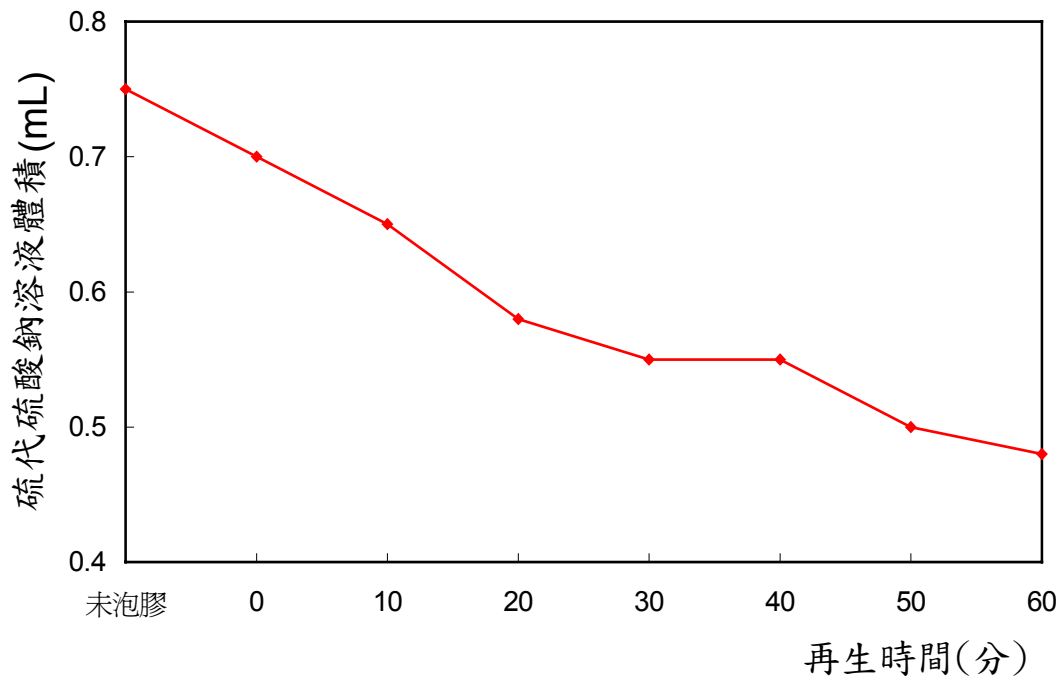


圖 4-40 保麗龍膠的再生

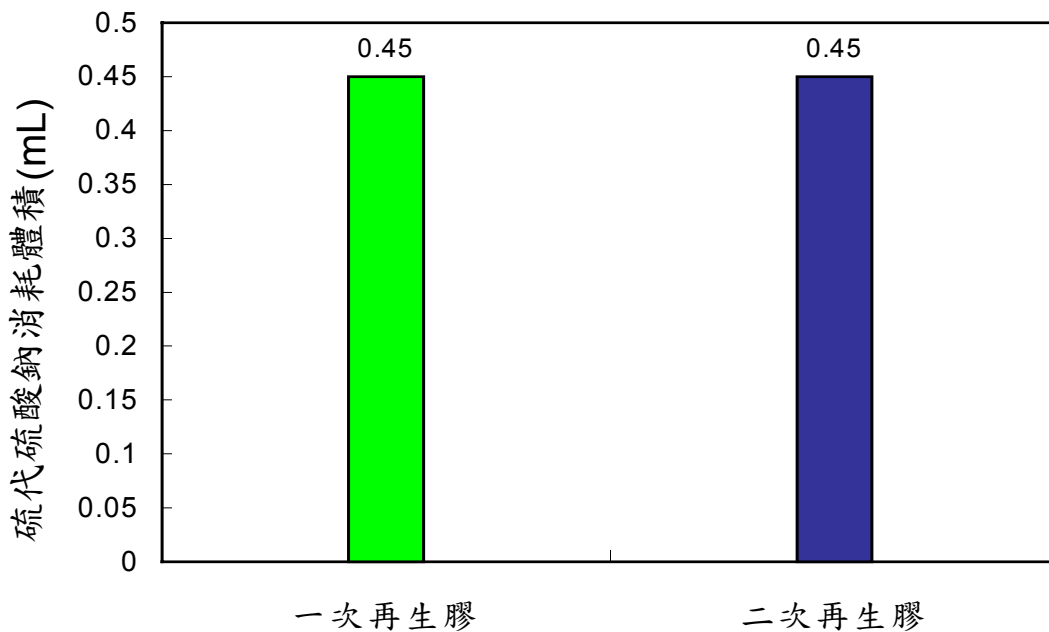


圖 4-41 保麗龍膠二次再生的吸附效果比較
被覆對銅離子吸附的影響

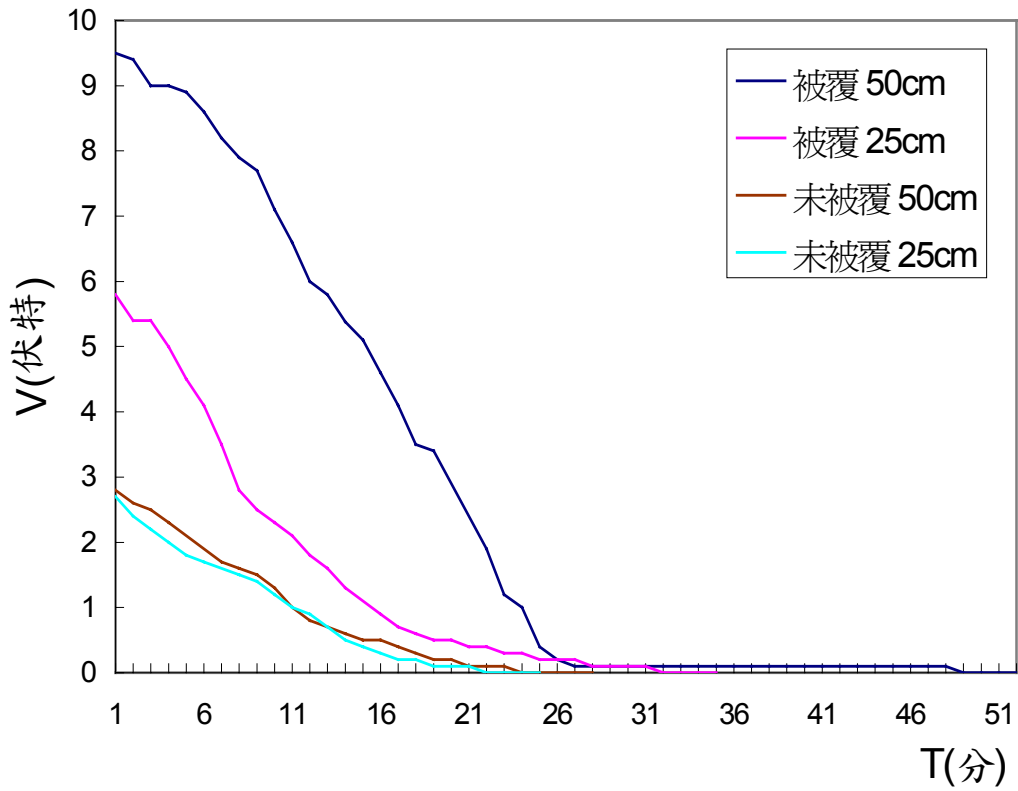


圖 4-42 電壓大小對操作時間之關係

銅離子溶液濃度：20ppm

銅離子溶液流速：5mL/分

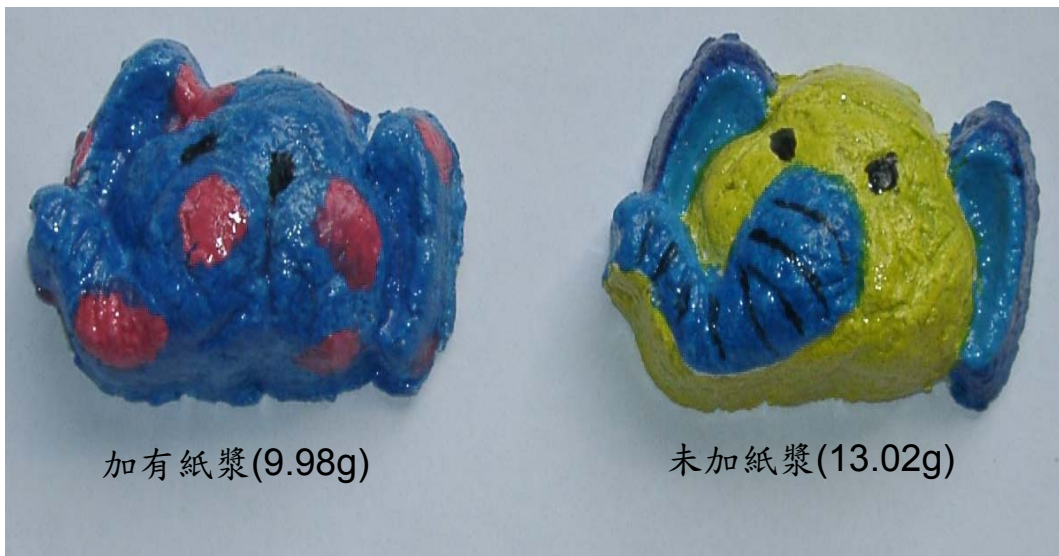


圖 4-43 利用廢膠自製之造型磁鐵

表 4-1 保麗龍膠顆粒大小吸附率的比較

	廢水中銅離子總量(g)	被吸附量(g)	吸附率(%)
粗粒	0.094	0.05	53.19
中粒	0.188	0.124	65.96
細粒	0.333	0.252	75.68

評語

能主動研究保麗龍之再利用，動機值得肯定。保麗龍之改質和吸收之機制研究均做得很完整（技術之效應譬如容積上之改變可以做為進一步研究之方向）。