



逢甲大學學生報告 ePaper

報告題名：利用添加劑與淨水污泥共同燒結之材料性能測試研究

Material function test of utilizing additive and water purification and mud to sinter is studied

作者：周娉慧、花景柔

系級：環境工程與科學學系

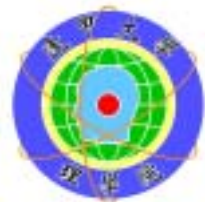
學號：D9165001

開課老師：江康鈺 老師

課程名稱：畢業論文

開課系所：環境工程與科學學系

開課學年：九十四學年度 第二學期



摘要

本研究探討淨水污泥分別與廢玻璃及稻殼共同燒結製成磚材及不規則多孔性材料之可行性。研究結果顯示，燒結溫度低於 1000°C 時，燒結試體內部結構鬆散，緻密化程度不高，內部開放性孔洞較多，燒結試體尚未達到燒結作用，各項試體特性試驗結果不佳。當燒結溫度達到 1000°C 時，試體緻密化現象形成，其中廢玻璃添加配比為 30% 之條件，燒結試體之吸水率及抗壓強度分別為 14.78% 和 233.15 kgf/cm²，均符合 CNS 建築用普通磚之一等磚規範。此外，當燒結溫度達到 1100°C 時，純淨水污泥、廢玻璃添加配比為 20%、30% 及稻殼添加配比為 10% 之試驗條件，燒結試體之吸水率分別為 9.04%、8.50%、0.70%、12.65%，抗壓強度依序為 859.53 kgf/cm²、386.66 kgf/cm²、318.68 kgf/cm²、254.20 kgf/cm²，均符合 CNS 建築用普通磚一等磚之規範。

添加玻璃及稻殼與淨水污泥製成之不規則多孔性材料，不僅為輕質化試體，且內部結構為多孔性構造。另根據密度、洗淨濁度及鹽酸可溶率之材料特性試驗結果可知，在燒結溫度 1100°C 添加玻璃 30% 或添加稻殼 10% 之試驗條件下，不規則多孔性材料之洗淨濁度分別低於 3NTU 及 8NTU，鹽酸可溶率介於 0.21%~0.85%，符合多孔性材料之相關應用規範。並依據視孔隙率及比表面積試驗結果顯示，添加劑分別為廢玻璃及稻殼添加製成多孔性材料其視孔隙率分別為 7.43% 及 47.24%，而比表面積分別為 0.0053 m²/g 及 0.1659 m²/g。另依單一及多重重金屬競爭吸附試驗結果，本試驗之不規則多孔性材料，以添加稻殼之多孔性材料，孔隙多於添加廢玻璃之多孔性材料，成為較佳的吸附材料。並於廢玻璃、稻殼添加製成多孔性材料於混合金屬之競爭吸附下，重金屬吸附量大小分別依序為鉛 > 銅 > 鎘 > 鉻 > 鋅及鉛 > 銅 > 鎘 > 鋅 > 鉻。

關鍵詞：淨水污泥、稻殼、廢玻璃、燒結、吸附

目 錄

摘 要.....	1
目 錄.....	2
圖目錄.....	4
表目錄.....	6
第一章 前言.....	7
第二章 文獻回顧.....	10
2.1 淨水污泥來源與處理現況.....	10
2.2 廢玻璃及稻殼之來源與處理現況.....	13
2.2.1 廢玻璃之來源及現況.....	13
2.2.2 廢玻璃資源化處理.....	14
2.2.3 稻殼之來源及現況.....	15
2.2.4 稻殼之資源化處理.....	16
2.3 燒結操作因素與資源化技術探討.....	17
2.3.1 燒結操作因素與影響.....	18
2.3.2 國內外污泥資源化建材之相關研究.....	19
第三章 實驗材料與方法.....	23
3.1 實驗材料.....	23
3.2 實驗流程.....	23
3.2.1 淨水污泥與添加劑共同燒結之實驗.....	23
3.2.2 不規則多孔性材料之理論吸附試驗.....	26
3.2.3 實驗設備.....	26
3.2.4 實驗項目及分析方法.....	27
第四章 結果與討論.....	31
4.1 實驗材料之基本性質分析.....	31

目 錄(續)

4.1.1 pH 值及三成分.....	31
4.1.2 材料之重金屬總量與毒性溶出試驗分析結果.....	32
4.2 燒結試體磚材之特性分析影響.....	34
4.2.1 燒失量變化.....	34
4.2.2 體積變化率.....	35
4.2.3 吸水率變化.....	40
4.2.4 密度變化.....	44
4.2.5 抗壓強度變化.....	46
4.3 不規則多孔性材料之特性分析.....	51
4.3.1 洗淨濁度.....	51
4.3.2 鹽酸可溶率.....	53
4.4 應用多孔性材料之重金屬吸附試驗分析.....	58
4.4.1 單一金屬吸附.....	58
4.4.2 混合金屬吸附.....	61
4.5 試體內部結構分析.....	62
第五章 結論與建議.....	64
5.1 結論.....	64
5.2 建議.....	65
第六章 參考文獻.....	66
附錄 A 燒結試體之各項特性分析結果.....	69

圖 目 錄

圖 1-1 研究架構圖.....	9
圖 2-1 淨水污泥資源化流程圖.....	11
圖 2-2 廢玻璃再利用於製造紅磚之流程.....	15
圖 3-1 生胚.....	24
圖 3-2 燒結控溫程序.....	25
圖 4-1 不同溫度下添加廢玻璃燒結後試體之燒失量變化.....	35
圖 4-2 不同溫度下添加稻殼燒結後試體之燒失量變化.....	35
圖 4-3 不同溫度下添加廢玻璃燒結後試體之體積變化率.....	37
圖 4-4 不同溫度下添加稻殼燒結後試體之體積變化率.....	38
圖 4-5 頸部成長之 SEM 圖.....	38
圖 4-6 添加廢玻璃 30%之燒結試體及其內部孔隙之 SEM 圖(×1000).....	39
圖 4-7 添加廢玻璃不同配比之燒結試體 SEM 圖(×2000).....	39
圖 4-8 添加稻殼試驗之燒結試體照片.....	40
圖 4-9 添加不同廢玻璃配比之燒結試體吸水率變化趨勢.....	42
圖 4-10 添加不同稻殼配比之燒結試體吸水率變化趨勢.....	43
圖 4-11 燒結試體經吸水率試驗崩裂情形.....	43
圖 4-12 燒結試體之 SEM 圖(×2000).....	44
圖 4-13 添加不同廢玻璃配比之燒結試體密度變化趨勢.....	45
圖 4-14 添加不同稻殼配比之燒結試體密度變化趨勢.....	46
圖 4-15 添加不同廢玻璃配比之燒結試體抗壓強度變化趨勢.....	48
圖 4-16 添加不同稻殼配比之燒結試體抗壓強度變化趨勢.....	48
圖 4-17 添加廢玻璃之多孔性材料洗淨濁度之變化趨勢.....	52
圖 4-18 添加稻殼之多孔性材料洗淨濁度變化之變化趨勢.....	53
圖 4-19 添加廢玻璃之多孔性材料鹽酸可溶率之變化.....	55

圖 目 錄(續)

圖 4-20 添加稻殼之多孔性材料鹽酸可溶率之變化.....	55
圖 4-21 純污泥/800°C 與 10%玻璃/800°C 在鹽酸可溶率之結果.....	56
圖 4-22 廢玻璃添加製成之多孔性材料-單一金屬不同時間下之吸附變化.....	59
圖 4-23 稻殼添加製成之多孔性材料-單一金屬不同時間下之吸附變化.....	60
圖 4-24 廢玻璃添加製成之多孔性材料-混合金屬不同時間下之吸附變化.....	62
圖 4-25 稻殼添加製成之多孔性材料-混合金屬不同時間下之吸附變化.....	62
圖 4-26 燒結試體之視孔隙度、比表面積及 SEM 圖(×2000).....	63

表 目 錄

表 2-1 淨水污泥與黏土之化學組成.....	11
表 2-2 淨水污泥再利用方案綜合評析.....	12
表 3-1 實驗配置表-添加廢玻璃/稻殼.....	25
表 4-1 材料基本性質分析表.....	32
表 4-2 材料金屬特性分析.....	33
表 4-3 建築資材之 CNS 規範—吸水率.....	42
表 4-4 建築資材之 CNS 規範—抗壓強度.....	48
表 4-5 磚材規範.....	50
表 4-6 分別添加廢玻璃及稻殼之燒結試體之磚材分析結果.....	49
表 4-7 不規則多孔性材料規範建議值.....	57
表 4-8 分別添加廢玻璃及稻殼之多孔性材料分析結果.....	57

第一章 前言

台灣地區近年來經濟發展迅速，科技也愈見發達，國民水準也相對的提高，民生用水量因而急遽的增加，根據台灣省自來水公司 94 年之統計，自來水普及率高達 89.9%，設計出水量 2 萬噸以上之淨水場共計 77 處，整體而言，自來水年出水量約達 45 億 7 仟多萬立方公尺[台灣省自來水公司，94 年]。至於淨水場之污泥產量，主要受到原水濁度、色度、混凝劑與助凝劑之種類及劑量、沉澱池之設計、過濾池之反沖洗操作等因素影響。淨水污泥之產量亦將是未來有待進一步處理處置之環境議題。

目前淨水污泥大都是以衛生掩埋為主，然而台灣地區地狹人稠，可利用土地面積有限，因此污泥的處理與處置問題更加的難以執行。此外，近年來玻璃製品之使用與廢棄，致使廢玻璃產量與日俱增，每年廢玻璃產量高達 50 萬公噸，如何妥善處理廢玻璃亦為當務之急的課題。另外，國內每年產生稻米數量為 270 萬公噸，其中稻殼約佔了 48 萬公噸，一般農民大都採取露天燃燒稻殼、棄置掩埋場及堆置於河邊任其腐敗的方式處理，可能造成環境二次污染(許氏，2002)。因此，如何妥善對於淨水污泥、廢玻璃及稻殼進行資源化利用之處理，變為一項推動資源永續利用之重要發展方向。根據過去研究文獻結果可知，淨水污泥中之化學成分與粘土性質相似，可部分取代磚窯業之黏土原料，為一可資利用之資源化材料；廢玻璃中含有大量的 SiO_2 和其他助熔劑成分，在燒結過程中可降低燒結溫度，達到節省能源之目的；稻殼則因其為有機物，於燒結過程可使燒結試體形成具有高孔隙度之特性。本研究嘗試利用廢玻璃與稻殼作為添加劑，與淨水污泥共同燒結製成多孔性材料與磚材，並以材料特性及吸附試驗，進一步評估其燒結材料之應用可行性。研究主要內容包括如下(如圖 1-1)：

1. 研究材料之物化特性分析

針對淨水污泥、廢玻璃及稻殼等材料之基本性質分析，分析項目包括三成分、pH 值、重金屬總量與毒性特性溶出試驗。試驗結果可作為後續試驗內容的參考依據。

2. 共同燒結製成磚材之材料特性分析

針對添加不同配比之廢玻璃及稻殼，於不同燒結溫度下所製成之燒結體，進行以下試驗：燒失量、體積收縮率、吸水率、密度、抗壓強度、SEM 微觀結構探討、重金屬總量分析。藉由試驗結果，探討最適合燒結之溫度及添加配比。

3. 共同燒結之不規則多孔性材料之特性分析

探討不同燒結條件下，粒徑在 5mm~15mm 之不規則多孔性材料之洗淨濁度、鹽酸可溶率試驗、視孔隙度、SEM 及比表面積…等材料性質，以評估其應用可行性。

4. 模擬單一及多重重金屬吸附試驗分析

利用前述之不規則多孔性材料作為吸附劑，分別進行單一金屬(Pb、Cd、Cr、Cu、Zn)吸附及混合金屬競爭吸附試驗，試驗評估分析項目主要為重金屬吸附去除效率。

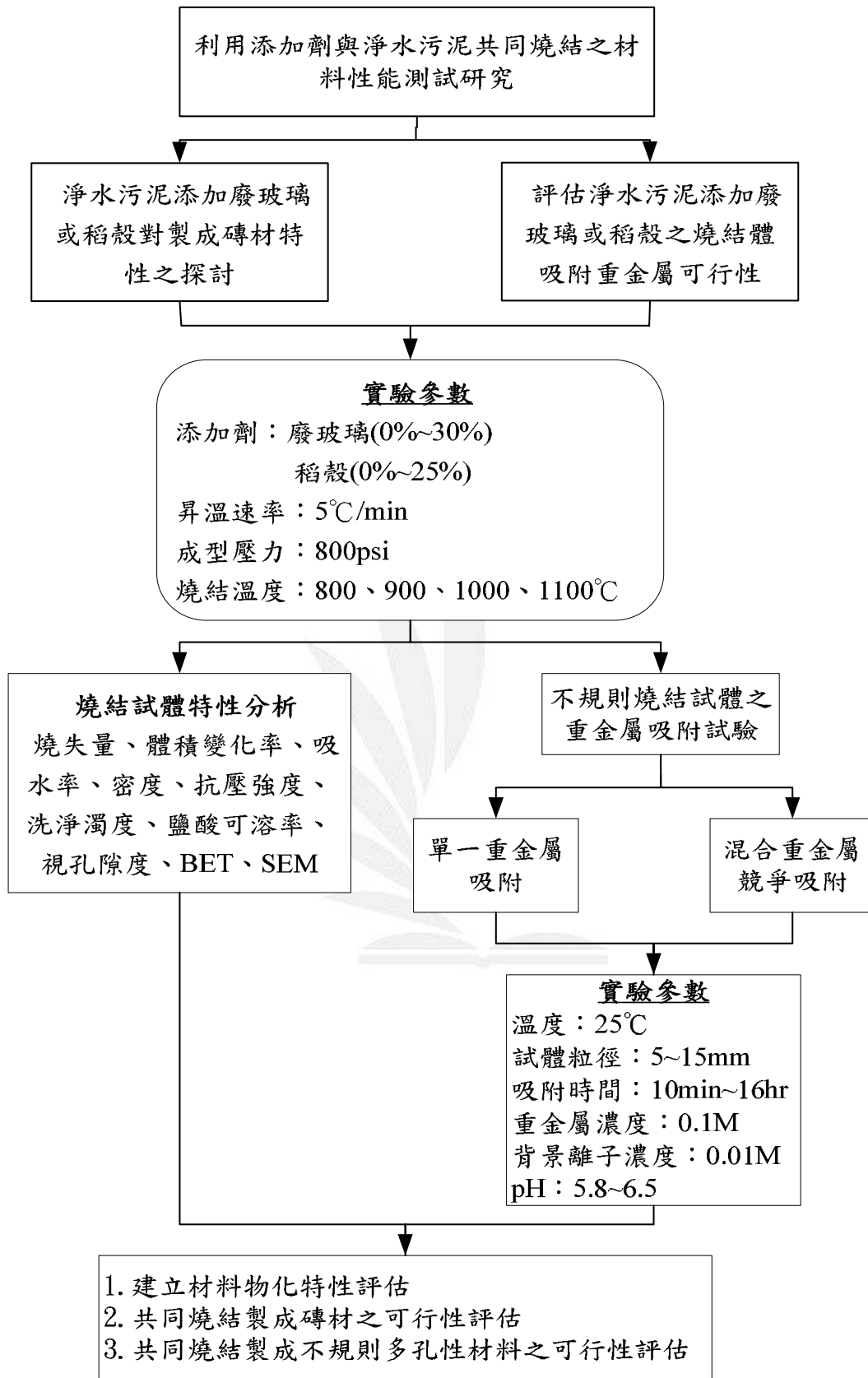


圖 1-1 研究架構圖

第二章 文獻回顧

2.1 淨水污泥來源與處理現況

淨水場於抽取河川水時，會先以初沈池去除水中較大之懸浮顆粒，然後再經淨水處理程序：快混→膠凝→沉澱→過濾→消毒，以去除水中微量有機污染物、微細濁度或懸浮固體，最後脫水便產生污泥，稱之為淨水污泥(鄭氏，2005)。根據台灣省自來水公司統計所屬十二區淨水廠之統計結果，台灣地區每年約產生12萬公噸淨水污泥。淨水場所產生的污泥雖是以無害之無機污泥為主，但台灣地狹人稠，對只能藉由掩埋處理之大量污泥，並不是長久之計(黃氏，2004)。而近年已有掩埋場愈趨於飽和及新的掩埋場所不易取得的情況下，如何使污泥資源再利用，為目前亟待發展之環境課題。

根據淨水污泥之化學組成分析結果顯示，其主要化學組成成分分別包括 SiO_2 (佔約 53.36%)、 Al_2O_3 (約佔 15.28%)、 Fe_2O_3 (約佔 21.01%)及其他成分(如表 2-1)。另由表 2-1 之黏土成分可知，淨水污泥之成分與製磚原料土(黏土)相似，故淨水污泥可取代部分製磚原料，作為資源再利用，圖 2-1 為淨水污泥燒製成磚材製品之資源化流程。

表 2-1 淨水污泥與黏土之化學組成

化學成分	淨水污泥(陳氏, 2004)	黏土(張氏, 2003a)
SiO ₂ (%)	53.36	61.59
Al ₂ O ₃ (%)	15.28	16.95
Fe ₂ O ₃ (%)	21.01	9.27
P ₂ O ₅ (%)	0.83	---
CaO(%)	1.20	---
MgO(%)	---	0.45
K ₂ O(%)	5.41	0.14
Na ₂ O(%)	---	0.02

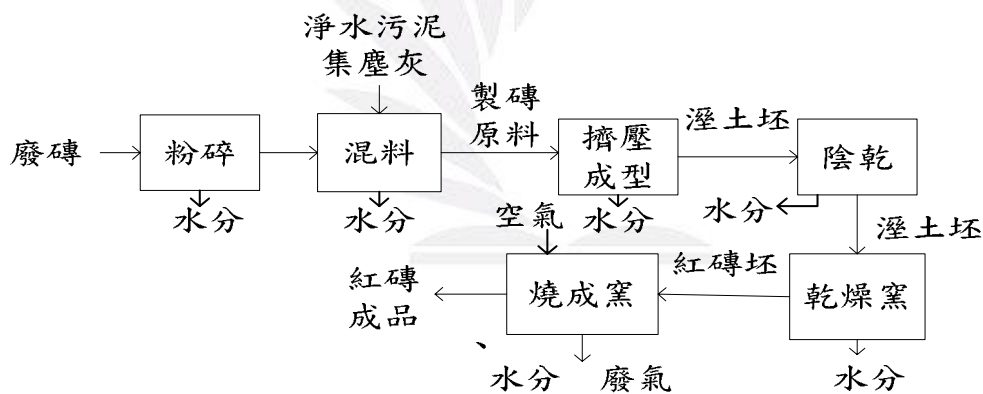


圖 2-1 淨水污泥資源化流程圖(鄭氏, 2005)

林氏等(2003)針對現今淨水污泥在資源化方面應用，歸類有下列技術(如表 2-2)：

- (1) 污泥與有機肥料以特定比例拌合調成園藝植栽培養土之用。
- (2) 污泥與有機調整材經腐熟作用製成堆肥作為有機肥料或土壤良劑。
- (3) 污泥經高溫乾燥或與黏土混合後製磚。

- (4) 污泥經造粒後高溫燒結成輕質骨材。
- (5) 污泥替代水泥原料中之黏土材料燒製成水泥。
- (6) 送交垃圾掩埋場作為覆土或最終處置。

洪氏等(2003)研究利用酸化或加鹼方法處理含鋁之淨水污泥，結果顯示淨水污泥經由酸化或加鹼方式，將鋁從污泥中溶解出來後，選擇適合之固液分離方式(如離心、薄膜分離及離子交換樹脂)加以回收。由於鋁在淨水場污泥重量中約佔 40%，依目前鋁的回收率約 70%至 80%左右，預估可減少 30%左右污泥產量，不僅達到污泥減量效果外，亦符合資源再利用之目標。

表 2-2 淨水污泥再利用方案綜合評析(林氏等，2003)

技術名稱	成品及適用範圍	技術優點	技術缺點
堆肥	有機肥料及土壤改良劑	<ul style="list-style-type: none"> · 技術成熟 · 有實場運作 	<ul style="list-style-type: none"> · 可能造成土壤污染 · 受限於土污法規
園藝用磚	植栽培養土	<ul style="list-style-type: none"> · 技術成熟 · 有實場運作 	<ul style="list-style-type: none"> · 可能造成土壤污染 · 受限於土污法規
製磚	取代紅磚中黏土原料	<ul style="list-style-type: none"> · 技術成熟 · 國內有實場運作 	<ul style="list-style-type: none"> · 紅磚市場式微 · 污泥需經高溫燒結前處理，再利用成本高
輕質骨材	做為輕質骨材原料	<ul style="list-style-type: none"> · 資源化產品具最高附加經濟價值 	<ul style="list-style-type: none"> · 高耗能，技術難度高
水泥原料	水泥生料取黏土	<ul style="list-style-type: none"> · 技術簡單再利用成本低 · 生產有價產品 	<ul style="list-style-type: none"> · 添加比例無法突破 · 清運成本需考量

2.2 廢玻璃及稻殼之來源與處理現況

2.2.1 廢玻璃之來源及現況

廢玻璃的種類相當繁多，依顏色來分，分為透明玻璃和有色玻璃(含綠色玻璃和褐色玻璃)，而依使用用途則可分為玻璃容器、平板玻璃、強化玻璃、廢日光燈管、廢玻璃纖維等，而國內廢玻璃回收以玻璃容器及平板玻璃佔大宗。廢玻璃容器是指填裝調製的食品(含調味品)、飲料、酒、醋、包裝飲用水、調製食用油脂、乳製品、化妝品、清潔劑、塗料、一般及特殊環境用藥、農藥等，經使用後廢棄者稱之。

玻璃材質的特點是可 100%回收再利用，並適用於原種類玻璃用途，可持續循環使用。但若未經回收處理，不僅將造成掩埋場沉重負擔，也無法被生物所分解，進入焚化爐處理，更可能造成爐體損壞，影響焚化爐及掩埋場的使用壽命及功能[行政院環保署資源回收基管會，2006]。廢玻璃回收不僅可減少污染、節約能源，同時也將節省原料使用，每回收 1 噸廢玻璃，就可節省約 1.2 噸的原料，包括近 700 公斤的砂砂與其他礦石原料的開採等，可維護珍貴的大自然景觀，可節省 135 公升的石油。亦即每回收一支玻璃瓶節省的能源，可點亮一個 100 燭光電燈泡 4 小時，因此更需要做好廢玻璃的回收工作，以節省資源和資源再利用[行政院環保署資源回收基管處，2001]。

近年來廢玻璃瓶回收處理的管道主要仰賴國內玻璃容器製造廠，但回收的廢玻璃容器常摻雜一些陶瓷類廢棄物，難以符合玻璃容器製造廠需求。為了控制品質，製造廠多不願添加過高比例廢玻璃。因此除了少數公司添加廢玻璃容器比例達 50%外，其餘大多僅約添加 30-40%之廢玻璃容器。因添加使用之廢玻璃原料有九成以上屬於透明玻璃容器，故玻璃容器製造廠能夠使用的有色玻璃廢料實在有限，造成每年約有兩萬公噸有色玻

璃容器無法有效再生利用。現今大部分玻璃飲料商品均為有色的玻璃瓶，這將帶給國內處理有色玻璃容器承受莫大壓力。[行政院環保署電子報，2003]。

2.2.2 廢玻璃資源化處理

廢玻璃為百分之百可回收的再生物質，相較於其他材質更具生態特質。由於廢玻璃的物理及化學性質與砂石極為接近，在美國、日本等先進國家對廢玻璃運用於土木建材的經驗很多，技術亦臻至成熟，如瓷磚、地磚、輕量骨材、道路鋪裝、人造大理石等，並進一步將有關技術推廣[行政院環保署資源回收基管會，2000]。以下是相關廢玻璃資源化之應用：

1. 再利用製成玻璃容器

傳統廢玻璃經由回收分類後，可交由玻璃容器製造廠再利用製成容器，但廢玻璃要被投入玻璃窯之前，需將其清洗來防止非玻璃之物質進入玻璃窯內，影響成品品質(張氏，2003)。

2. 再利用於瀝青道路鋪設之表層骨材

蘇氏(2001)研究廢玻璃在瀝青路面上之應用，提出玻璃質地堅硬且耐磨性佳，其物理性質也與河川砂石接近，故可取代砂石作為瀝青凝骨材。再經由路面抗滑試驗檢測證實添加廢玻璃可增加瀝青路面反光強度、透水性及摩擦係數，故廢玻璃應用於瀝青道路上比一般傳統瀝青路面在促進車輛安全與行人注意更有正面效益。

3. 再利用於紅磚

將廢玻璃取代黏土製成紅磚，其處理方式是將廢玻璃研磨成粉，使玻璃粉與磚坯原料混合後進行燒結程序。如此一來，除了可降低紅磚的燒結溫度，也使燒結後玻璃融化與黏土分子緊密結合，進而提高紅磚之抗壓強度(張氏，2003b)(圖 2-2)。

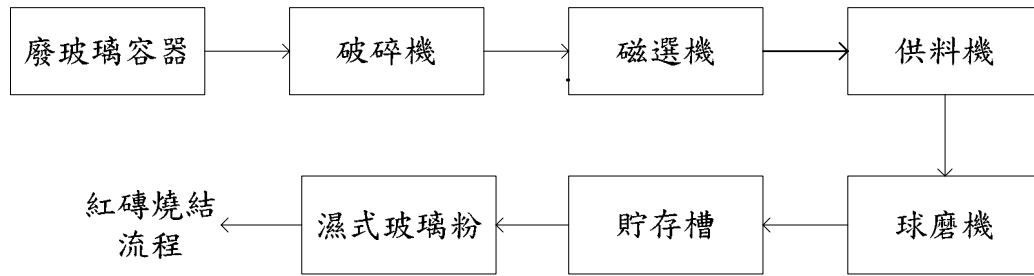


圖 2-2 廢玻璃再利用於製造紅磚之流程(張氏，2003b)

環保署目前已開拓再利用於公共工程建材(瀝青道路)及再利用於再生產品(紅磚)二種途徑。並輔導製造業者將廢玻璃容器磨碎後，製成建築外牆材料及彩色琉璃工藝製品，並推廣作為透水磚、紅磚添加的材料。環保署已成功輔導製磚的業者，以廢玻璃為添加的原料，每年約可處理十萬噸的廢玻璃容器，讓有色玻璃瓶終於有了去處，除了紓解有色廢玻璃容器囤積的壓力，亦可達到資源永續利用的目標[行政院環保署，2003]。

2.2.3 稻殼之來源及現況

台灣是以米糧為主食，因此台灣每年產生稻米之數量約為 270 萬公噸，稻殼就約佔了 48 萬公噸，其主要成分可分為三部分：(一)纖維素($C_5H_{10}O_5$)；(2)木質素($C_7H_{10}O_3$)；(3)半纖維素($C_5H_8O_4$)(許氏等，2002)。稻殼一般俗稱粗糠，是碾米工廠穀粒加工生產的主要副產物，也是農民難以處理的廢棄物。

一般碾米廠、農會及農民大都採取露天燃燒稻殼或傾倒在河川空地的方式處理，易造成環境二次污染。過去稻殼為主要的農家燃料，由於稻殼質硬疏鬆，且矽含量豐富，因此若能直接再施用於耕地，經分解腐爛後，可提供大量有效矽、鉀，供水稻生長利用。目前稻殼僅有少量作為飼料、免洗餐具及建築材料之填充料，極少部份做為果園、花卉及蔬菜之畦面敷蓋。目前偶亦可見鄉村飲食店利用稻殼做為燃料進行烹調，以減少炒菜時之油煙(楊氏，2006)。

2.2.4 稻殼之資源化處理

根據工研院的研究指出，稻殼是一種廉價的燃料，含水量低，每公斤燃燒後可產生 3,600 卡的能量，為省產煙煤的 60%，燃燒後所產生的酸性腐蝕氣體又非常少，是一種很好的燃料。下列是稻殼有關之資源化應用：

1.耐火及保溫材料

因稻殼灰中 90% 以上為二氧化矽成分，經過加工後可做為高經濟價值的耐火及保溫材料。若將國內全年產生的稻殼拿來做燃料，每年可節省五億元的燃料費，而將稻殼灰外銷日本做隔熱材料，每年也會有五千四百萬元的產值(楊氏)。

2.運用於鍋爐燃料

許氏等(2002)利用稻殼混合造紙業廢水污泥來做為鍋爐燃料，結果顯示出稻殼當燃料可節省能源、降低污染，並有降低生產成本及資源再利用之功能。

3.稻殼氣化發電廠

雲林縣農會結合土庫、斗南、北港、大埤、東勢、褒忠等鄉鎮農會及台灣能科公司，共同投資成立的再生能電力公司，計劃籌設稻殼氣化發電廠，即利用稻殼做為發電燃料。雲林稻殼氣化發電廠以稻殼為主要進料，其發電是以缺氧方式，將氣化原物料轉換為合成燃氣後，送入內燃式引擎發電。內燃作用後所剩下之黑灰具有大量二氧化矽、鉀、磷等礦物質，尚可回歸稻田補充地力，或調配成為鋼鐵工業所需之煉鋼保溫劑，經壓縮後還可製成無煙碳，亦可調配成土壤改良劑或鉀肥等用途，是一種極為環保的發電燃料(謝氏，2004)。

2.3 燒結操作因素與資源化技術探討

燒結處理是指將粉末或生胚成型之後，為了提高其強度而以近熔點之高溫加熱，使得原子移動，外在形狀、粉體間的距離及孔隙形狀等發生改變，而形成較緻密，強度較大的結晶體。燒結處理技術包括固相燒結與液相燒結，固相燒結材料輸送的機構為擴散，液相燒結則為黏滯流動、擴散；固相燒結驅動的能量為自由能或化學能的差異，液相燒結則為毛細壓、表面張力。

生胚在燒結過程中無液相出現稱之固相燒結。生胚在燒結時沒有液相存在，此時需藉由固相燒結來使燒結體較緻密，而固相燒結會受燒結溫度、燒結時間、粉末顆粒大小、添加劑不同及外加壓力所影響。燒結體之燒結機構，內部顆粒因燒結而形成一頸部，頸部部分因凹面和凸面同時存在而使得原子可依不同路徑及方式移動，而達成頸部成長。其頸部因原子移動方式及路徑不同會有四種不同機構-(1)氣體蒸發沉降機構：凹面上的蒸氣分壓低於凸面上蒸氣分壓，使原子可由氣體形式從凸面蒸發出來，然後沉降到凹面上而使頸部成長；(2)表面擴散機構：原子經由表面擴散到頸部曲面上；(3)體積擴散機構：原子經由內部擴散到頸部凹面下；(4)晶界擴散機構：二球體接觸因燒結而形成頸部，亦會形成晶粒邊界，原子可藉由晶界而擴散至頸部凹面下(段氏，1991)。

生胚進行燒結時，在燒結過程中有液相出現稱之液相燒結。液相燒結結構可分成三個主要階段-(1)粉末重排：高溫形成液相時，粒子間會互相移動，促使粉末粒子重排，快速地緻密化。(2)溶解再析出：是固相對液相有溶解度時才可能進行，會使接觸點附近固體溶解以互相拉近粒子中心而達到緻密化。(3)粗粒化：是液相燒結最終階段，由於溶解再析出過程還是在進行中，可使晶粒成長，孔隙減小，固相架構逐漸形成(汪氏，1991)。

2.3.1 燒結操作因素與影響

燒結過程中原料的特性和燒結條件的控制，關係到燒結的成功與否。不同的原料特性，有不同的操作條件。原料特性包括粒度及粒度分佈、原料組成成分等；操作條件包括試體成型壓力、燒結溫度、燒結時間、添加劑種類等。以下針對這些因素的影響討論之。

葉氏(1991)在研究粉體特性與生胚結構對燒結影響時，提到生胚緻密化的速率會隨著粒度變小而增加，而燒結所需溫度也會隨著粒度變小而降低，但在粒度變得太細微時，粉體容易形成硬凝團，使得生胚均勻性及燒結性降低。粒度分佈大之粉末，其堆積密度較高，較大之孔隙可能被較細之粉末所填充，故生胚孔隙會較小。而粒度較窄之粉末，缺乏較細粉末來填充顆粒堆積間的孔洞，故堆積密度較低，生胚孔隙會較大。

高氏等(2000)探討焚化底灰再利用於燒製紅磚可行性，原料底灰的組成包含 SiO_2 、 CaO 、 Fe_2O_3 及 Al_2O_3 為主要成分。其中 CaO 可降低燒結試體之燒結溫度，同時因在高溫有液相形成，可使冷卻後粒子間孔隙減小，增加試體抗壓強度； SiO_2 則會影響試體膨脹現象。王氏等(2000)研究下水污泥灰主成分調質對燒成輕質骨材之影響結果，增加污泥灰中 Al_2O_3 量，雖然會增加輕質化發泡操作時間，但也會增加試體之抗壓強度；增加 SiO_2 含量則可降低玻璃相產生之熔點，但過多的添加則會影響試體強度。

葉氏(1991)在研究粉體特性與生胚結構對燒結影響，指出低壓力下形成之生胚，密度低並形成大孔洞，燒結速率會降低，燒結試體密度低。加大壓力下形成之生胚密度提高，內部孔洞數目減少，燒結速率提高，燒結試體密度高。陳氏(2004)利用添加劑提昇淨水污泥燒結之燒結材料品質，在溫度低於 1000°C 時，顆粒尚未達到黏合及頸部成長，整體結構會較鬆散。高於 1000°C 時，燒結試體收縮會明顯增大，緻密化程度高，增加了密

度及抗壓強度。孫氏(2001)探討水庫淤泥及淨水污泥再利用製磚，研究結果在較高溫條件下，燒結水庫淤泥，燒結時間長，會導致試體發生軟化現象，使抗壓強度明顯降低。反之，縮短燒結時間，可使水庫淤泥燒結試體達到鋪路磚要求。謝氏(2001)研究淨水污泥/工業廢水污泥之燒結資源化，研究結果提到燒結時間可彌補燒結溫度之不足，但過長燒結時間會使粉體顆粒異常長晶，會降低燒結試體密度及抗壓強度。王氏等(1997)探討氧化鋁及氧化鈣影響焚化飛灰成形燒結之特性。研究結果指出，燒結體之抗壓強度隨氧化鋁之添加比例上升而增加，惟在添加比例為 15%時，有下降之現象，而添加氧化鈣會稍微降低燒結之抗壓強度。

2.3.2 國內外污泥資源化建材之相關研究

近年來國人對自來水之需求量愈來愈多，故各淨水場每日所產出的污泥也日益增多。而一般污泥最終之處置方法是海洋棄置、土地棄置及衛生掩埋等，但這是把污泥視為廢棄物處理方式。然而，從另一個角度看，污泥是可以經由適當的方式回收再利用。在此利用燒結資源化技術處理淨水污泥，把原本屬於廢棄物之污泥資源化製成建築資材、濾料等，達到資源永續再利用之目的。

最早燒結處理技術是應用於陶瓷工業及材料工程方面，而污泥化學成分與陶瓷材料之成分相似，因此，國外已多應用在資源化處理。以台灣地區為例，燒結處理技術已廣泛應用於污泥或焚化飛灰資源化方面。蔡氏等(2002)做污泥配製磚之可行性研究，針對淨水場污泥及經熱處理之工業污泥進行處理，結果顯示燒結體之重金屬試驗結果符合 TCLP 之溶出標準，且其抗壓強度均大於 150 kgf/cm^2 以上。翁氏等(2000)利用生物污泥製磚；王氏等(2002)對下水污泥灰加壓成形，燒成輕質骨材；王氏等(1994)針對汞污泥進行造粒燒結處理之研究，顯示經由高溫燒結的方法處理後，汞污泥

已由有害事業廢棄物轉換成為一般廢棄物，其燒結體符合 TCLP 之溶出標準，但燒結體之抗壓強度有待進一步處理。

根據文獻顯示淨水污泥中內含大量氧化矽及氧化鋁等黏土物質，經由適當燒結溫度，可製作磚的原料或濾料等，不僅可減少污泥量，亦可減緩國內黏土資源不足的問題。江氏等(2004)以淨水污泥燒製磚材，研究採豐原淨水場污泥餅，經處理燒結後，在 1100°C 溫度之燒結，可得類似建築用磚之產品，抗壓強度高於一級磚標準，而吸水率亦符合一般建築用磚之規範。何氏(2003)研究當粒徑在 1.0~2.0mm 時，淨水污泥/焚化底灰以 98% 時燒結溫度在 1150°C 之抗壓強度最好，有到達 150 kg/cm² 以上。

周氏等(1995)以重金屬污泥與紅磚土混合燒結，燒結溫度在 950°C、970°C、1015°C、1028°C、1060°C，污泥含量達 12wt%，研究結果顯示，燒結體之重金屬溶出遠低於環保標準，其單軸抗壓強度也比紅磚土直接燒結為高，並達廢棄物再利用之單軸抗壓標準(150 kg/cm²)。另外，重金屬溶出量隨燒結溫度升高而減少，單軸抗壓強度隨燒結溫度升高而增加。顯然地，重金屬污泥與紅磚土混合燒結為一理想的廢棄物處理方法。

高氏等(2000)研究焚化底灰燒製紅磚，底灰成分組成大致包含 SiO₂、CaO、Fe₂O₃ 與 Al₂O₃，與陶瓷主要成分相似，因含有部分雜質，而影響燒結體的化學性質。燒結同時也具有把重金屬封存能力，可降低重金屬溶出。張氏等(1999)研究應用燒結技術對焚化底灰進行材料化實驗，為利於燒結進行，底灰粒徑分為小於 1.41mm 及 1.41-4.76mm，經加壓成形後，以 400-1000°C 之溫度燒結。綜合燒失量、體積變化、吸水率、硬度、抗壓強度及容積密度等條件，顯示磁選及去除夾雜物後之底灰，於 400-600°C 之溫度範圍內，可符合中國國家標準透水磚骨材之規格，極具資源化之潛力，結果顯示，燒結體之單軸抗壓強度至少可達 400kg/cm² 以上，而抗壓強度與孔隙率呈現反比關係；唯獨燒結體之吸水率較一般骨材規範值為

高，因此初步認定其可作為透水磚材之用。

Tay(1989)研究分別以添加比例 40%及 50%之焚化灰渣及乾燥污泥與黏土共同燒製磚，研究結果顯示在相同添加比例下，添加污泥焚化灰渣之試體強度較添加乾燥污泥之試體強度為高，且製成之磚可作為建築用。Wiebush(1997)研究德國下水污泥的焚化處理情況、廢水處理及下水污泥處理方式對灰渣性質的影響，利用流體化床燃燒下水污泥產生燒結體作為黏土替代物之分析，並藉由溶出試驗探討礦物固定金屬情況以評估燒結體作為磚體建造之可行性；根據文獻指出燒結體具高吸水性及較多的鈣化合物，灰渣如同“孔隙形成劑”因為愈多的灰渣含量，燒結體吸水性愈高且密度愈小，鈣含量亦是影響因素之一，而灰渣之多孔性也對燒結體之孔隙度產生影響。Xu et al. (2005)研究高比例飛灰取代黏土製磚，結果觀察出增加飛灰取代量，使得飛灰和黏土混合物之可塑性指數有明顯地降低。若適當加入添加劑時，將會提高混合物之可塑性指數。以飛灰高比例的取代，若選用粒徑較小的飛灰將改善燒磚的特性，且使磚材有較高的抗壓強度和較低的吸水率，以達到國家標準磚之規範。

謝氏(2001)利用淨水污泥與工業污泥混合燒結實驗結果顯示，燒結過程操作條件之變化，燒結製品內部將產生許多密閉孔隙結構，其具有低熱傳導率及良好隔音效果等特性，未來可應用於非結構性隔熱或隔音之輕質骨材。Bhatty(1989)研究利用污泥灰渣燒製輕質骨材，結果顯示其可應用於中等強度之混凝土，同時製成之圓球狀骨材，因其形狀、粒徑均勻一致及低吸水率等特性，故其強度高於一般商業骨材製成之中強度混凝土。

王氏(1999)針對下水污泥焚化灰渣進行燒結資源化研究，期能對國內下水污泥以燒結方法作為燒製輕質骨材應用之可行性研究，結果顯示在 1050°C 與 1100°C 燒結時，燒結試體內部孔隙大小及數量可大幅增加使得試體體積急遽膨脹，試體強度降低，在 30 分鐘之燒結條件下，體積膨脹率

分別為 63%及 202.2%，密度分別為 1.07 g/cm^3 及 0.57 g/cm^3 ，有達輕質骨材密度規範。

近年來下水道系統及自來水之普及率愈來愈高，污泥產生量有逐年增加之趨勢。因此，觀察這幾年國內外對污泥及其他廢棄物在資源化上之研究，已由早期之燒結處理主要是以灰渣為主，逐漸轉為下水污泥及淨水污泥之燒結處理研究。本研究主要以淨水污泥與不同配比之廢玻璃及稻殼來共同燒結，在不同燒結溫度條件下，評估燒結試體之磚材特性，並且將燒結試體以人工搗碎成不規則形狀，探討不規則燒結體吸附重金屬之可行性。



第三章 實驗材料與方法

本研究主要在討論淨水污泥與不同配比之廢玻璃及稻殼共同燒結過程，在燒結溫度及添加配比不同條件下，探討燒結試體之相關材料特性，並根據試驗分析結果，評估最佳調配比例。另將最佳配比之燒結試體以人工搗碎方式製成約 0.5~1.5 公分大小之不規則形狀材料，再分別進行單一金屬及金屬競爭吸附實驗，以評估不規則燒結體作為吸附重金屬材料之可行性。各項實驗內容分述如下：

3.1 實驗材料

本研究所使用的淨水污泥取自於豐原淨水場經機械脫水後堆置於曬乾床中之污泥餅，廢玻璃則由苗栗縣某玻璃廠所提供之廢棄玻璃，稻殼為臺南縣農會提供。

3.2 實驗流程

本研究主要分為二個部分，第一部分為淨水污泥與不同配比之廢玻璃及稻殼共同燒結過程，在燒結溫度及添加配比不同條件下之燒結體進行試驗，主要以淨水污泥為主體，添加不同配比之廢玻璃及稻殼在不同溫度下燒結處理後燒結試體之基本材料性質，探討廢玻璃及稻殼對淨水污泥燒結品質之影響，以評估其燒結體是否可做為磚材。第二部分為不規則燒結體之材料試驗，選出最合適之燒結體，將燒結體以人工搗碎成為不規則形狀。藉由理論吸附試驗，測試燒結體對鉛、鎘、鉻、銅、鋅等重金屬之吸附能力。實驗項目分述如下：

3.2.1 淨水污泥與添加劑共同燒結之實驗

- 1.先瞭解污泥、廢玻璃是否含有過量之有毒重金屬，對其作重金屬總量分析與毒性特性溶出試驗。
- 2.淨水污泥、廢玻璃及稻殼先於 105°C 烘箱乾燥至恆重備用，再將原料利

用破碎機破碎後，過篩網，收集原料，作為燒結用之材料。

原料過篩網之尺寸-

淨水污泥：50 mesh ~ 200mesh (粒徑大小約為 74 μ m~300 μ m)

玻璃：50 mesh ~ 200mesh (粒徑大小約為 74 μ m~300 μ m)

稻殼：100 mesh ~ 200mesh (粒徑大小約為 150 μ m~300 μ m)

3.原料與廢玻璃以適當比例混合，並外添加 5 克水在 25 克原料中，來增加原料黏滯性，幫助原料成型。再經油壓成型機擠壓成型，壓力控制為 800psi，成型時間為 2 分鐘，成型後的生胚為直徑 20mm，高 44~65mm 之圓柱體(如圖 3-1)。添加配比及燒結溫度，如表 3-1。

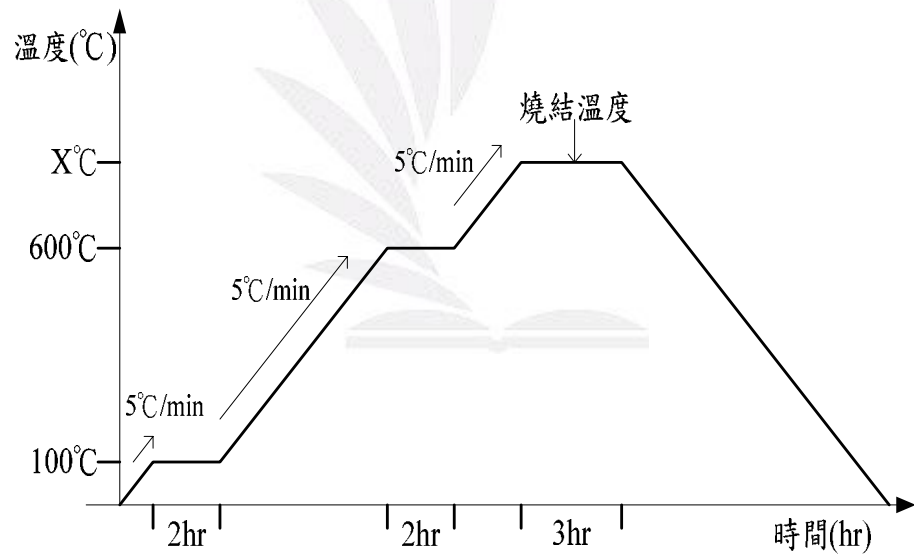


圖 3-1 生胚

表 3-1 實驗配置表-添加廢玻璃/稻殼

Temperature	Cullet				Rice Hull			
	0%	10%	20%	30%	0%	10%	20%	25%
800°C	A1	A2	A3	A4	A1	E2	E3	E4
900°C	B1	B2	B3	B4	B1	F2	F3	F4
1000°C	C1	C2	C3	C4	C1	G2	G3	G4
1100°C	D1	D2	D3	D4	D1	H2	H3	H4

4. 成型後的生胚放入高溫爐中燒結成型，各階段升溫速率控制在 5°C/min。燒結程序如圖 3-2 所示，溫度的控制是由室溫升至 100°C 後，持續 2 小時，為了將成型體內水分烘乾，避免在高溫下，因水分急速蒸發使燒結體內孔隙不均勻；之後將溫度升至 600°C 後，持續 2 小時，為了將淨水污泥中有機物破壞掉，最後將試體在 800~1100°C 不同燒結溫度條件下，持續 3 小時。再慢慢降至室溫。



X = 800、900、1000、1100°C

圖 3-2 燒結控溫程序

5. 分析燒結體之燒失量、體積收縮率、吸水率、密度、抗壓強度、SEM 微觀結構探討、重金屬總量分析。

3.2.2 不規則多孔性材料之理論吸附試驗

針對最合適之燒結試體，搗碎過篩網取粒徑在 5-15mm 之間。在實驗中所使用之藥品為醋酸鉛、醋酸鎘、醋酸鉻、醋酸銅、醋酸鋅及分別加入去離子水配置成 0.1M 之 Pb^{2+} 、 Cd^{2+} 、 Cr^{2+} 、 Cu^{2+} 、與 Zn^{2+} 貯備溶液，並添加 0.01M 之硝酸鈉當作背景離子濃度。本研究將理論吸附試驗分成兩個部分，起先是不規則多孔性材料各別吸附鉛、鎘、鉻、銅、鋅五種金屬，以得知其吸附時間及其吸附飽和量，爾後進行五種金屬之競爭吸附。

1. 單一金屬吸附試驗

- (1) 不規則多孔性材料取約 10 克加入 100mL 單一金屬(Pb、Cd、Cr、Cu、Zn)溶液中，置入水平震盪器中震盪混合，pH 值範圍在 5.8~6.5，震盪頻率約 100rpm，25°C。
- (2) 震盪時間點分別在 10、30、50 分鐘、1、2、4、8、16 小時取樣，將取出之金屬溶液，利用原子吸收光譜儀分析金屬溶液之濃度，以求出吸附飽和量。

2. 金屬競爭吸附試驗

- (1) 不規則多孔性材料取約 10 克加入 100mL 混合(Pb、Cd、Cr、Cu、Zn)金屬溶液中，置入水平震盪器中震盪混合，pH 值範圍在 5.8~6.5，震盪頻率約 100rpm，25°C。
- (2) 震盪時間點分別在 10、30、50 分鐘、1、2、4、8、16 小時取樣，將取出之金屬溶液，利用原子吸收光譜儀分析金屬溶液之濃度，以求出吸附飽和量。

3.2.3 實驗設備

1. pH meter (Suntex SP-2200)：量測淨水污泥、廢玻璃及稻殼之 pH 值。
2. 烘箱：在 105°C 下，可烘乾材料-淨水污泥、廢玻璃及稻殼。

- 3.消化儀器：利用迴流消化方法，增加金屬的溶出濃度。
- 4.毒性溶出程序之旋轉設備：可判別淨水污泥、廢玻璃及稻殼重金屬溶出濃度是否有超出規定標準。
- 5.油壓成型機：可將已混合淨水污泥-廢玻璃及淨水污泥-稻殼壓錠成型，外觀為圓柱狀。
- 6.高溫燒結爐：可將生胚燒結成型。最高溫度可達 1200°C，並可分階段升溫、控制加熱速率及加熱功率。
- 7.火焰式原子吸收光譜儀：測定重金屬總量分析及毒性溶出程序之重金屬濃度。
- 8.抗壓強度試驗機：可測定燒結試體之抗壓強度。
- 9.掃描式電子顯微鏡(SEM)：可觀察燒結試體表面型態及內部結構。

3.2.4 實驗項目及分析方法

1.pH [NIEA R208.03C]

- (1)秤 20.0g 樣品於 250 mL 之燒杯內，加入 100 mL 蒸餾水攪拌 5 分鐘。
- (2)靜置混合液約 15 分鐘，待懸浮物質沉澱。
- (3)取上層澄清液，以 pH 計量測 pH 值。

2.三成分分析-水分、灰分、可燃分 [NIEA R205.01C]

$$\text{水分(\%)} = \frac{(W_1 - W_2)}{W_1} \times 100\%$$

$$\text{灰分(\%)} = \frac{W_3}{W_1} \times 100\%$$

$$\text{可燃分(\%)} = 100(\%) - \text{水分(\%)} - \text{灰分(\%)}$$

W_1 ：置入烘箱前樣品重

W_2 ：經 105°C，至少二天以上之烘乾後樣品重

W_3 ：經 800°C 高溫爐焚化三小時後樣品重

3. 燒失量

試體燒結前後重量差，即為燒失量。

$$\text{燒失量}(\%) = \frac{(W_0 - W_1)}{W_0} \times 100\%$$

W_0 ：燒結前試體的重量

W_1 ：燒結後試體的重量

4. 體積變化 [孫氏，2001]

試體燒結前後體積變化，可能是膨脹或收縮。

$$\text{體積變化率}(\%) = \frac{(V_0 - V_1)}{V_0} \times 100\%$$

V_0 ：試體燒結前體積

V_1 ：試體燒結後體積

5. 吸水率 [CNS 488]

將燒結體放入水中，靜置 24 小時後，用濕布拭乾其表面，量測燒結體重量。

$$\text{吸水率}(\%) = \frac{(W_0 - W_1)}{W_0} \times 100\%$$

W_0 ：烘乾之試體重量

W_1 ：浸溼之試體重量(以濕布拭乾其表面)

6. 密度測定 [CNS 614]

試體燒結後，每一試體在 110°C 乾燥、冷卻、稱量其重量至最近之 5g，並紀錄其重量。將每一試體之長度、厚度及寬度之兩次個別測定值，計算其平均並記錄。體密度計算公式如下：

$$\text{體密度}[\text{kg/m}^3] = \text{重量}[\text{kg}] / (\text{長度} \times \text{寬度} \times \text{厚度}) [\text{均以 m 計算}]$$

7. 抗壓強度 [謝氏，2001]

使用單軸抗壓試驗機，將燒結試體置於抗壓平台上，給予試體加壓至試體破碎最大受力值，將此值除以試體截面積即可得抗壓強度。

$$\text{單軸抗壓強度}(\sigma_c) = \frac{P}{A}$$

P：試體破裂時最大荷重(kg)

A：最大荷重時之橫斷面積(cm³)

8. 重金屬總量分析 [NIEA R353.00C]

重金屬總量分析是以行政院環境保護署所公告「污泥及沉積物中重金屬檢測方法－酸消化法」進行試體之固體消化程序。在以火焰式原子吸收光譜儀測定重金屬濃度，瞭解燒結後材料重金屬濃度變化情形。

9. 毒性特性溶出程序方法(TCLP) [NIEA R201.13C]

毒性特性溶出程序方法是以行政院環境保護署所公告「事業廢棄物毒性特性溶出程序」進行固體材料重金屬溶出實驗。在以火焰式原子吸收光譜儀測定重金屬含量，以瞭解燒結體是否有達到對環境無害化標準。

10. 洗淨濁度 [台灣自來水公司，濾料敷裝規格及施工說明書]

取風乾樣品約 30 公克，放入 500 毫升的共栓玻璃瓶中，加入 300 毫升的蒸餾水後密封。以每分鐘 150~200 次激烈振盪 1 分鐘，靜置 3 分鐘。將上澄液倒出約 100 毫升，依水及廢水檢驗標準法檢驗濁度。

11. 鹽酸可溶率[台灣自來水公司，濾料敷裝規格及施工說明書]

取風乾樣品至少 10 公克，放在 200 毫升的燒杯中，加入蒸餾水 150 毫升，1 分鐘內振盪 150~200 次，將蒸餾水倒掉，去除雜質。然後將樣品放在 105~110°C 的烘箱中烘 1 小時，再移入乾燥器中冷卻、秤重。重覆上述步驟，直至前後兩次重量差小於 0.005g 為止，秤重值以 a 表示。將 40%(體積比)鹽酸倒入，在室溫下經過 1 小時後，將鹽酸倒出，用蒸餾水沖洗直到水呈中性為止，倒出蒸餾水後，放在 105~110°C 的烘箱烘 1 小時，再移入乾燥器中冷卻、秤重。重覆上述步驟，直至前後兩次重量差小於 0.005g 為止，秤重值以 b 表示。依下式計算：

$$\text{鹽酸可溶率}(\%) = \frac{(a-b)}{a} \times 100\%$$

12.視孔隙度 [CNS 619]

樣品置入 105°C 烘箱至恒重之乾燥重量 $W_1(g)$ ，將測定乾燥重量後之試樣浸沒於煮沸裝置內，經 3 小時之煮沸後放冷至室溫，此時，試樣為飽和試樣。利用直徑小於 1mm 之鐵絲將飽和試樣懸浮於水中，測定其重量，扣除鐵絲在水中之重量，即為試樣於水中之重量 $W_2(g)$ 。將飽和試樣取出水中，迅速以濕布擦拭試樣表面以移除附著之水滴，並測定其重量即為水飽和試樣之重量 $W_3(g)$ 。代入下列公式計算視孔隙度(P_0)：

$$P_0(\%) = \frac{W_3 - W_1}{W_3 - W_2} \times 100\%$$



第四章 結果與討論

4.1 實驗材料之基本性質分析

4.1.1 pH 值及三成分

材料之基本性質分析如表 4-1 所示，淨水污泥的 pH 值落於 6.76 ± 0.08 範圍內，是屬中性物質；廢玻璃的 pH 值為 9.71 ± 0.02 ，是屬鹼性物質；稻殼的 pH 值為 5.76 ± 0.12 ，是屬弱酸性物質。在含水率方面，一般經由淨水場調理脫水後之淨水污泥含水率約在 60-70%之間，本研究是採用豐原淨水場之污泥，其含水率為 $35.82 \pm 0.20\%$ ，含水率明顯降低，此係本研究所搜集之淨水場調理脫水並經曬乾床曝曬一星期後之淨水污泥。廢玻璃及稻殼之含水率則偏低，分別為 $0.72 \pm 0.11\%$ 及 $0.32 \pm 0.14\%$ 。

由可燃分及灰分之分析結果顯示淨水污泥及廢玻璃大部分為不易分解之無機成分，可燃分比例不多，因此在燒結處理時，較不會因可燃物質逸散而破壞燒結試體之內部結構，影響試體的抗壓強度。但稻殼之可燃分比例高達 $75.31 \pm 0.31\%$ ，將稻殼與淨水泥共同燒結處理時，可燃物質逸散將增加燒結試體之內部孔隙之大小，進而形成多孔性材料。

表 4-1 材料基本性質分析表

Items	Sludge		Cullet		Rice Hull	
	Mean ^{*1}	S.D. ^{*2}	Mean	S.D.	Mean	S.D.
pH	6.76	0.08	9.71	0.02	5.76	0.12
Moisture content%	35.82	0.20	0.72	0.11	0.32	0.14
Ash content%	61.45	0.24	99.12	0.11	14.37	0.27
Combustible Content%	2.72	0.10	0.20	0.05	75.31	0.31

註：*1 實驗數據為進行三重覆分析之平均結果。

*2 S.D.為標準偏差 $\sqrt{\frac{\sum(X_i - \bar{X})^2}{n-1}}$ 。

4.1.2 材料之重金屬總量與毒性溶出試驗分析結果

重金屬含量是判定廢棄物是否為有害物質的重要指標之一，對於使用淨水污泥與添加劑共同燒製成資源化成品，需分析淨水污泥、廢玻璃及稻殼之重金屬總量及溶出濃度，來確認安全性及燒結處理過程中重金屬總量的變動，是否有符合法定重金屬溶出標準，進而評估能否進一步資源再利用。

由表 4-2 淨水污泥重金屬總量濃度之分析結果可知，淨水污泥之鋅總量濃度為 75.72 ± 3.93 mg/Kg，鉛、銅及鉻之濃度分別為 17.93 ± 1.78 、 19.13 ± 0.89 及 15.53 ± 0.94 mg/Kg，鎘濃度則是低於儀器偵測極限。在添加劑分析結果，除稻殼之鋅濃度有 25.76 ± 2.28 mg/Kg 較高外，其餘重金屬濃度皆不超過 7 mg/Kg，可見試驗添加劑之重金屬濃度均低於淨水污泥之重金屬濃度。因此，將廢玻璃及稻殼分別與淨水污泥共同燒結時，對燒結試體之重金屬濃度影響很小。在 TCLP 分析結果顯示，淨水污泥、廢玻璃及稻殼之鉛、鎘、鉻、銅之溶出濃度都低於儀器之偵測極限，符合 TCLP 溶出濃度法規標準，是屬於一般事業廢棄物，故將其燒結資源化再利用，當可忽略重金屬溶出超過法規認定標準之疑慮，不會造成環境之危害。

表 4-2 材料金屬特性分析

Items	Sludge		Cullet		Rice Hull	
	Mean ^{*1}	S.D. ^{*2}	Mean	S.D.	Mean	S.D.
● 重金屬總量(mg/Kg)						
Zn	75.72	3.93	6.28	1.46	25.76	2.28
Pb	17.93	1.78	1.54	0.001	N.D. ^{*3}	---
Cu	19.13	0.89	3.21	0.37	6.68	0.47
Cr	15.53	0.94	2.69	0.26	N.D.	---
Cd	N.D.	---	N.D.	---	N.D.	---
● TCLP 分析(mg/l)						
Zn	N.D.	---	0.005	0.001	0.02	0.004
Pb	N.D.	---	N.D.	---	N.D.	---
Cu	N.D.	---	N.D.	---	N.D.	---
Cr	N.D.	---	N.D.	---	N.D.	---
Cd	N.D.	---	N.D.	---	N.D.	---

註：*1 實驗數據為進行三重覆分析之平均結果。

*2 S.D.為標準偏差 $\sqrt{\frac{\sum(X_i - \bar{X})^2}{n-1}}$ 。

*3 N.D.表示檢測值低於儀器偵測極限(Zn：0.005 mg/l；Pb：0.009 mg/l；Cu：0.005 mg/l；Cr：0.006 mg/l；Cd：0.008 mg/l)。

4.2 燒結試體磚材之特性分析

4.2.1 燒失量變化

燒失量是指試體燒結前後重量之損失，其損失量主要是受到燒結過程中之水分的蒸發、有機物氧化分解、無機鹽類之分解揮發及少量之重金屬逸散所致。故試體原料成分如果含大量有機物及高溫易分解之無機鹽類時，這些組成成分在燒結過程中會分解產生氣體逸散，使燒結體氣孔增加，進而影響試體之內部細部結構、抗壓強度、吸水率及密度等等。

圖 4-1 為不同溫度下添加玻璃燒結後試體之燒失量變化，由圖中可看到燒結試體之燒失量並不會隨著玻璃添加量增加而有明顯變動，各組燒失量變化在 17-21%之間。有如此燒失量，乃因燒結前之原料摻配混合時，在每一組實驗都加入 16.67%水分來增加試體成型時的黏滯度，故在燒結過程中會有水分蒸發成水蒸氣而逸散。此外，原料中佔少量之有機物及高溫易分解無機鹽類和高溫逸散的重金屬亦增加了些許燒失量。就整組實驗而言，從 800°C 增至 1100°C 之燒失量主要是受水分蒸散之影響，水分貢獻的燒失量就佔了 85%以上，其他可燃分貢獻約 13%；無機鹽類受熱分解約 2%。

圖 4-2 為不同溫度下添加稻殼燒結後試體之燒失量變化，由圖中可看到燒失量會隨著稻殼添加比例增加而增加，試體燒失量變化約在 18-38%。就未添加稻殼之純污泥而言，燒結過程水分蒸散為主要燒失量佔約 85%。而以添加稻殼 10%及燒結溫度在 1100°C 之試驗條件，燒失量為 $26.97 \pm 0.08\%$ ，其中水分貢獻約佔 61.80%，其他可燃分(稻殼)及無機鹽類受熱分解約佔 38.2%，同時因稻殼之可燃分(有機物)較高，故燒結試體之燒失量會隨稻殼添加比例增加而增加。

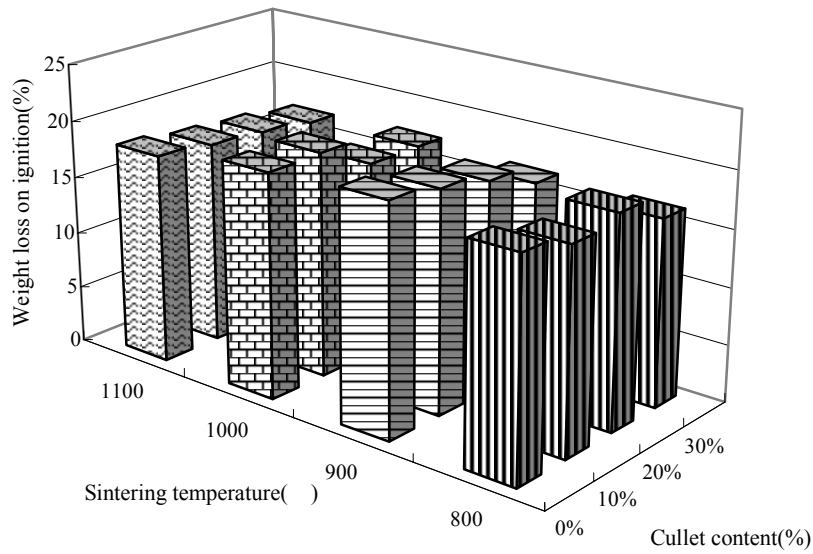


圖 4-1 不同溫度下添加廢玻璃燒結後試體之燒失量變化

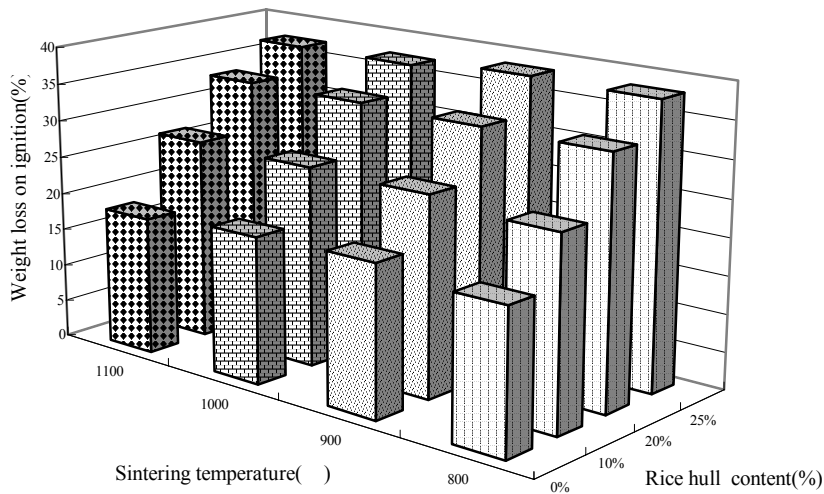


圖 4-2 不同溫度下添加稻殼燒結後試體之燒失量變化

4.2.2 體積變化率

燒結溫度之變化對燒結試體之體積變化而言，其主要影響在於試體膨脹、收縮及開孔或閉孔體積之變化，就純淨水污泥之實驗結果顯示，當溫度升至 1100°C 時，試體體積收縮程度最大(可到達 26.20±0.91%)，歸究其原因主要在於試體進行燒結時，高溫狀態會使試體的體積產生變化，試體

內部顆粒經由高溫熱作用，使顆粒運動、接觸，使顆粒產生黏結作用，使試體內部孔隙率降低，並產生緻密化，緻密化過程會使試體體積呈現收縮情形，造成試體收縮現象。另一方面，影響燒結試體體積收縮，也可能是試體在高溫燒結時，有機物氧化分解、無機鹽類分解及水分蒸散，使試體質量減少，造成體積收縮。此外，實驗材料之物質在高溫時，晶相發生改變，亦會影響試體之體積變化。

圖 4-3 及圖 4-4 為不同溫度下個別添加廢玻璃及稻殼，試體燒結後之體積收縮率變化，就純淨水污泥方面，燒結溫度在 $800^{\circ}\text{C}\sim 900^{\circ}\text{C}$ 之間，試體並沒有明顯收縮，可見內部頸部成長作用(如圖 4-5)尚未完全，結構較為鬆散。但在燒結溫度達 1000°C 時，處在高溫狀態的粒子，被提供更高頸部成長動力，使顆粒間黏結作用加快，造成試體明顯收縮，體積收縮率為 $10.23 \pm 0.57\%$ 。後續燒結溫度更高達到 1100°C 時，純污泥之體積收縮更明顯，有 $26.20 \pm 0.91\%$ 之收縮率，可見燒結溫度能影響試體體積之收縮率。

在添加廢玻璃後，燒結溫度在 $800^{\circ}\text{C}\sim 1000^{\circ}\text{C}$ 之間，體積收縮率並沒有因廢玻璃加入量的多寡而明顯變化。但燒結溫度在 1100°C 時，體積收縮率跟隨著廢玻璃添加量的增加而下降，顯示出添加廢玻璃會產生體積膨脹現象。有如此現象，推估可能是在高溫燒結時，因廢玻璃的加入，產生大量之黏滯性非結晶玻璃快速形成於試體外部，造成內部氣體釋放而無法穿透玻璃層(圖 4-6)，致使試體內部孔洞變大(圖 4-6)，試體有發泡現象，使收縮體積減少。由圖 4-7(a)(b)相較於(c)(d)觀察出 900°C 之試體內部孔隙過多，結構鬆散，在 1100°C 則因高溫燒結而產生黏滯性玻璃相物質，因而達到更緻密化的現象。

對於添加稻殼對燒結試體之體積變化如圖 4-4，觀察出 $800^{\circ}\text{C}\sim 1000^{\circ}\text{C}$ 時，隨著稻殼添加量增加，體積收縮率有減少的趨勢。推估可能是 $800^{\circ}\text{C}\sim 1000^{\circ}\text{C}$ 燒結體內部頸部成長作用並未完成，內部結構仍是鬆散，而

在燒結過程，隨著稻殼可燃分比例提高，可能因劇烈氧化後，造成大量氣體產生，因此撐開試體，如圖 4-8(a)及(b)比較，圖 4-8(b)很明顯由外觀看出試體已有些地方崩解掉落於邊緣，可見結構相當鬆散。

在燒結溫度 $1000^{\circ}\text{C}\sim 1100^{\circ}\text{C}$ 時，因高溫使粒子獲得較高頸部成長動力，使顆粒間黏結作用加快，導致試體收縮，此時，可燃分氧化產生的氣體也會造成影響，由圖 4-8(c)及(d)比較，看出圖 4-8(d)有明顯小裂痕，推估可能是因為可燃分氧化產生之氣體會撐開試體，但在 1100°C 下，粒子會有收縮能量，二力作用下，造成試體產生裂痕。

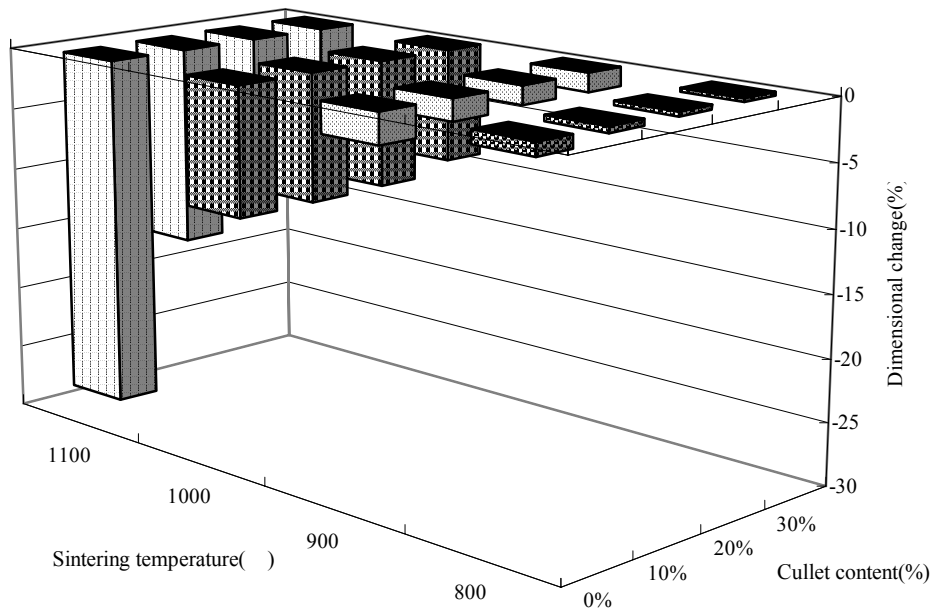


圖 4-3 不同溫度下添加廢玻璃燒結後試體之體積變化率

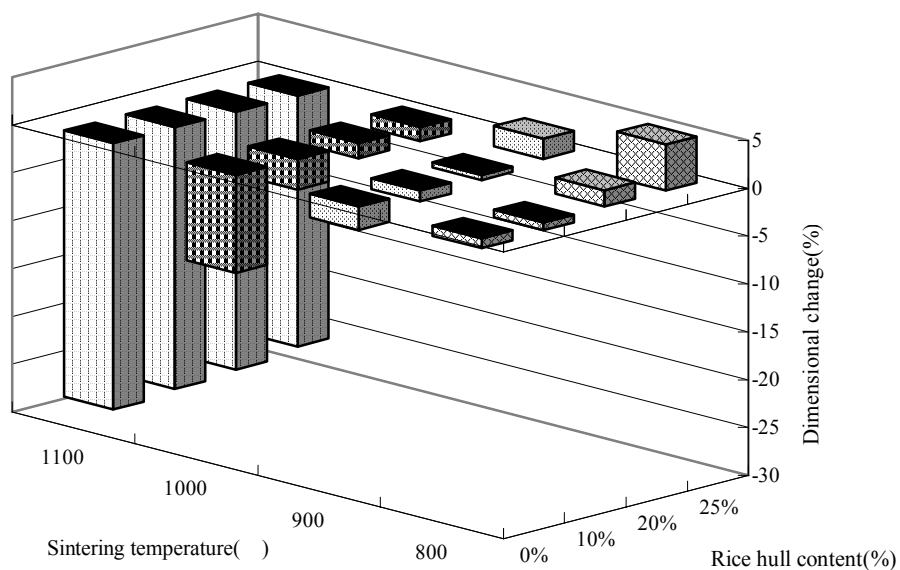


圖 4-4 不同溫度下添加稻殼燒結後試體之體積變化率

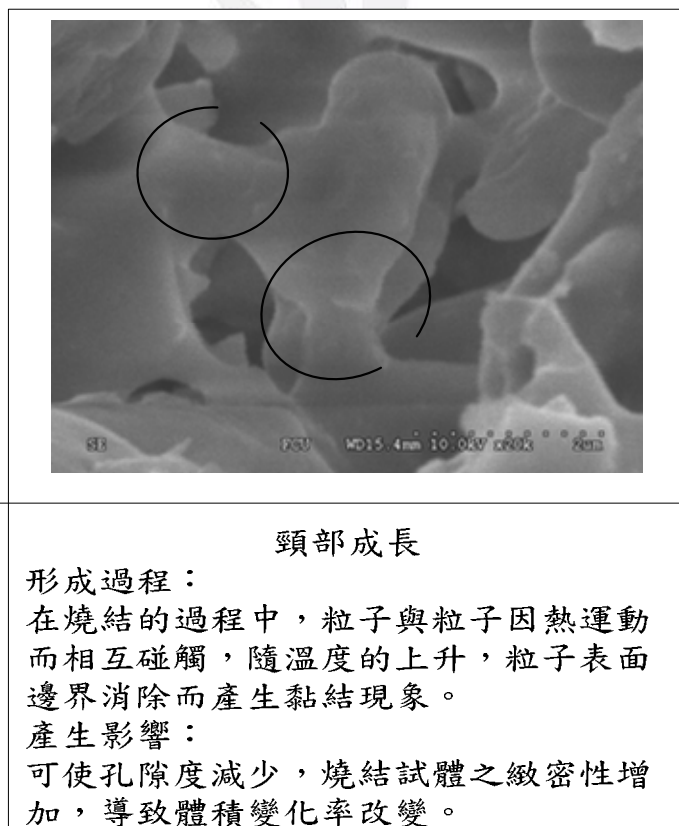


圖 4-5 頸部成長之 SEM 圖[30%玻璃/1000°C(×20k)]

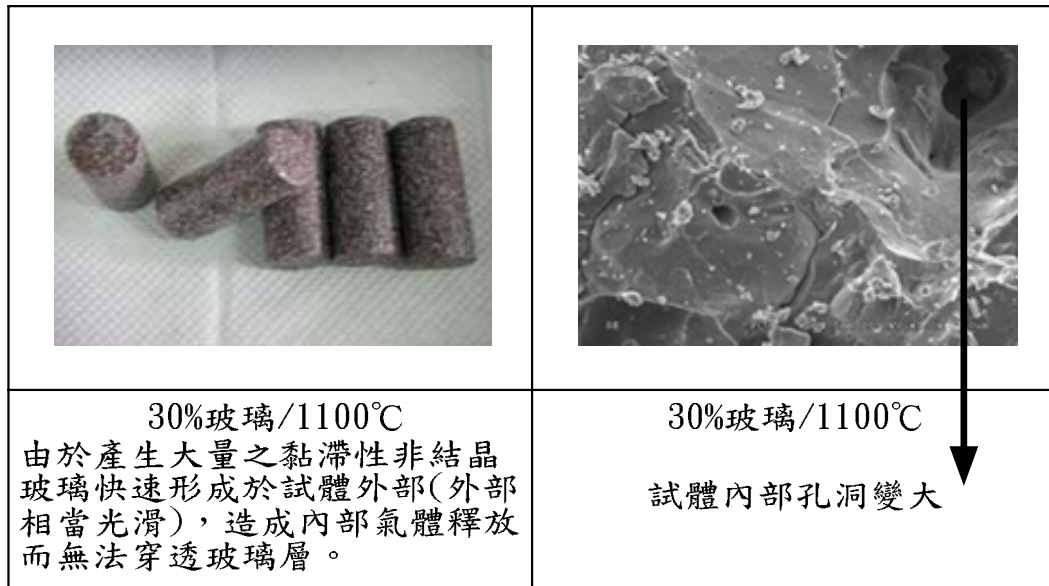


圖 4-6 添加廢玻璃 30%之燒結試體及其內部孔隙之 SEM 圖(×1000)

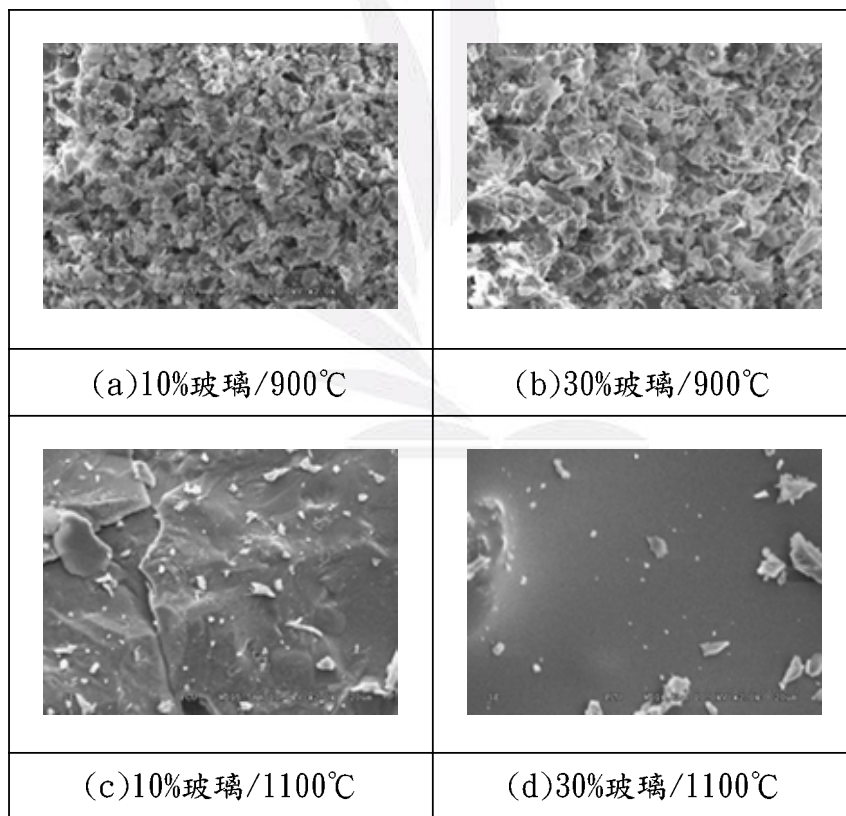


圖 4-7 添加廢玻璃不同配比之燒結試體 SEM 圖(×2000)



圖 4-8 添加稻殼試驗之燒結試體照片

4.2.3 吸水率變化

燒結試體的孔隙可分為開孔和閉孔兩種，開孔是指孔洞之出口連到試體表面，而閉孔則是在燒結體之內部形成一封閉孔洞。一般而言，燒結體之吸水率主要與開孔有關。燒結試體之吸水率是指進入試體開放孔隙中的水重與試體重之比值，故吸水率與試體開放孔隙的多寡具有相關性，一般來說，透過吸水率的變化，可瞭解燒結試體內部孔隙的多寡，當試體開放孔隙愈多，吸水率就愈高，而體積收縮率愈高時試體較緻密，代表著孔隙率減少，相對的吸水率會跟著減少。然而，吸水率會直接影響試體的抗壓強度與試體密度，在建築磚材應用上吸水率為相當重要的指標之一，通常用來評定磚材緻密化程度，不同之磚材對吸水率的標準也有所不同，根據中國國家標準(CNS)之規範，一般建築用磚一等磚之吸水率必須小於 15%，鋪路用高壓地磚之 A 級磚吸水率則必須小於 5%(如表 4-3 所示)。

試體燒結的溫度為影響試體吸水率的主要因素，根據圖 4-9 及圖 4-10 結果顯示，不論添加劑種類為何，隨著燒結溫度愈高，燒結試體之吸水率有明顯下降的趨勢，其中在 800~900°C 時，因為燒結溫度尚未達緻密化時的溫度，燒結試體表面摸起來尚有粉末的感覺，其構造屬於較鬆散的狀態，內部開放性的孔洞較多，故吸水率呈現較高的趨勢。當燒結溫度達 1000°C 時，已達緻密化時的溫度，內部結構較緻密、試體孔隙率下降，且試體內之粒子，受熱力反應之影響，封閉試體內大部分的開孔體積，造成試體吸水率偏低。根據圖 4-9 結果可知，在玻璃添加比例為 20~30%，吸水率均在 19% 以下，可符合 CNS 中建築用磚之二等磚規範。此外，在玻璃添加比例為 0~20%，燒結溫度 1100°C 時，其吸水率均在 15% 以下，可符合 CNS 中建築用磚之一等磚規範，至於 30% 玻璃配比條件，吸水率接近於 0，則符合高壓鋪路地磚 A 級磚之標準，可應用於重型車道鋪面。當廢玻璃添加比例愈高時，燒結試體吸水率愈低，於 1100°C、玻璃配比 30% 時，燒結試體外部為黏滯性的非結晶玻璃相，將整個試體包覆住，故吸水率又更加的下降。然而，稻殼添加物，因有機物含量較高，故在高溫時揮發，因此添加的配比愈多，試體結構愈鬆散，造成試體中的開放性孔隙多，體積收縮率小，故吸水率明顯增加。

根據圖 4-10 結果顯示，燒結溫度在 900°C 及 1000°C 條件下，稻殼添加比例為 10%、20% 及 25% 時，燒結試體吸水率由 22.74% 增加至 59.96%，均無法符合中國國家標準磚(CNS)之規範，唯有燒結溫度 1100°C，稻殼添加比例 10% 時，其燒結試體吸水率為 12.65%，符合 CNS 中建築用磚之二等磚規範，然隨稻殼添加量增加，其吸水率亦明顯增加。此外，根據圖 4-11 之照片顯示，燒結溫度在 800°C 及 900°C 條件下，稻殼添加比為 20% 及 25% 時，燒結試體經吸水率測試後，外部呈現崩裂的現象，無法測得吸水率。圖 4-12 顯示燒結溫度 1100°C 試體內部結構之緻密化程度，明顯較燒結溫

度 1000°C 為佳，因此燒結溫度 1100°C 之燒結試體。

表 4-3 建築資材之 CNS 規範—吸水率

中國國家標準(CNS)					
項目	建築用普通磚		高壓鋪路地磚		
	(CNS 382)		(CNS 13295)		
	一等	二等	A 級	B 級	C 級
吸水率(%)	<15	<19	<5	<6	<7

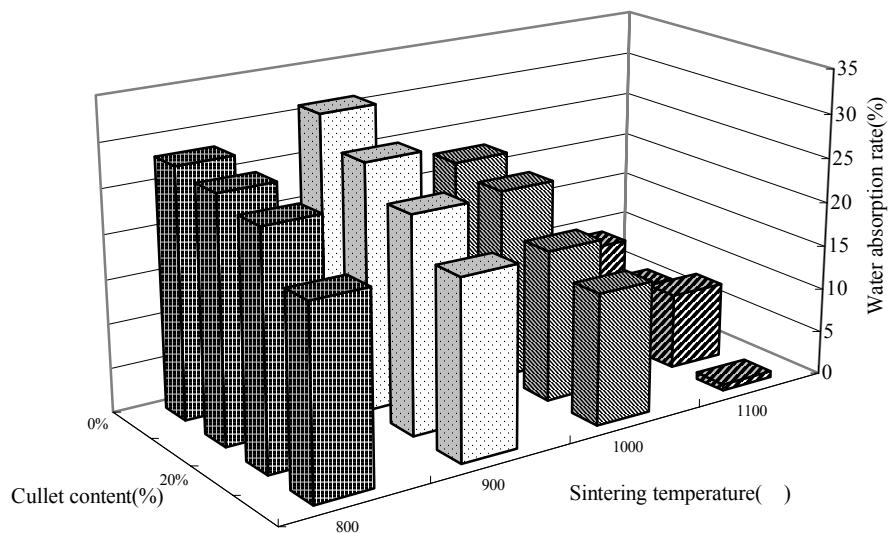


圖 4-9 添加不同廢玻璃配比之燒結試體吸水率變化趨勢

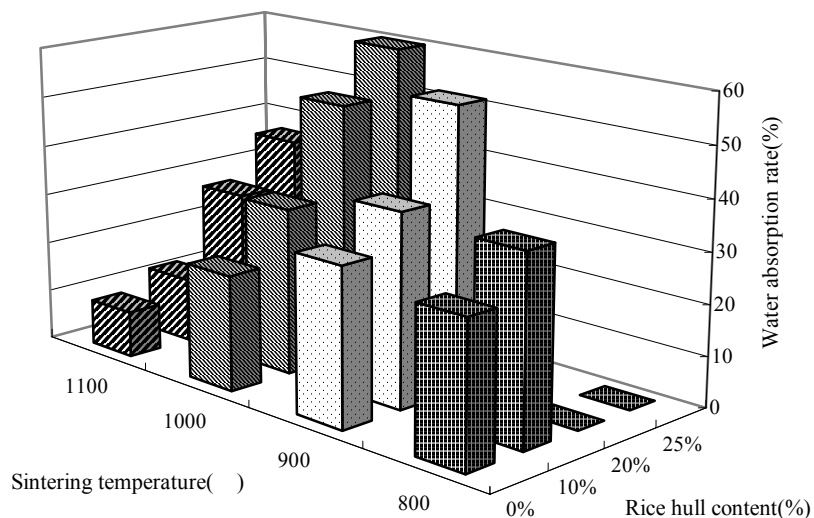


圖 4-10 添加不同稻殼配比之燒結試體吸水率變化趨勢

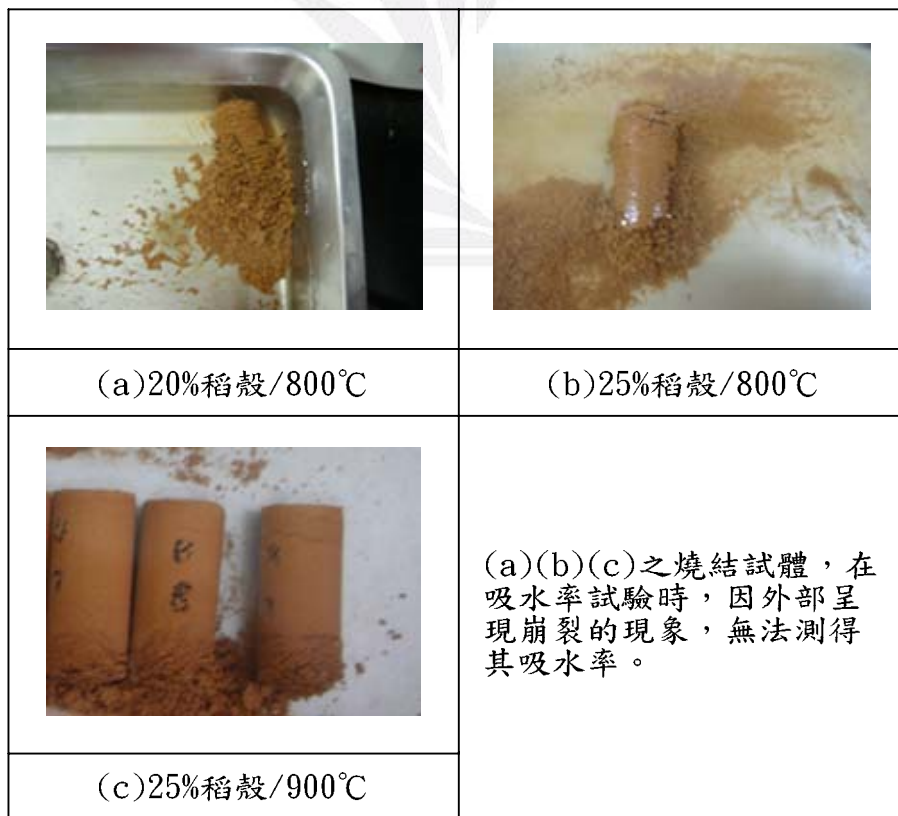


圖 4-11 燒結試體經吸水率試驗崩裂情形

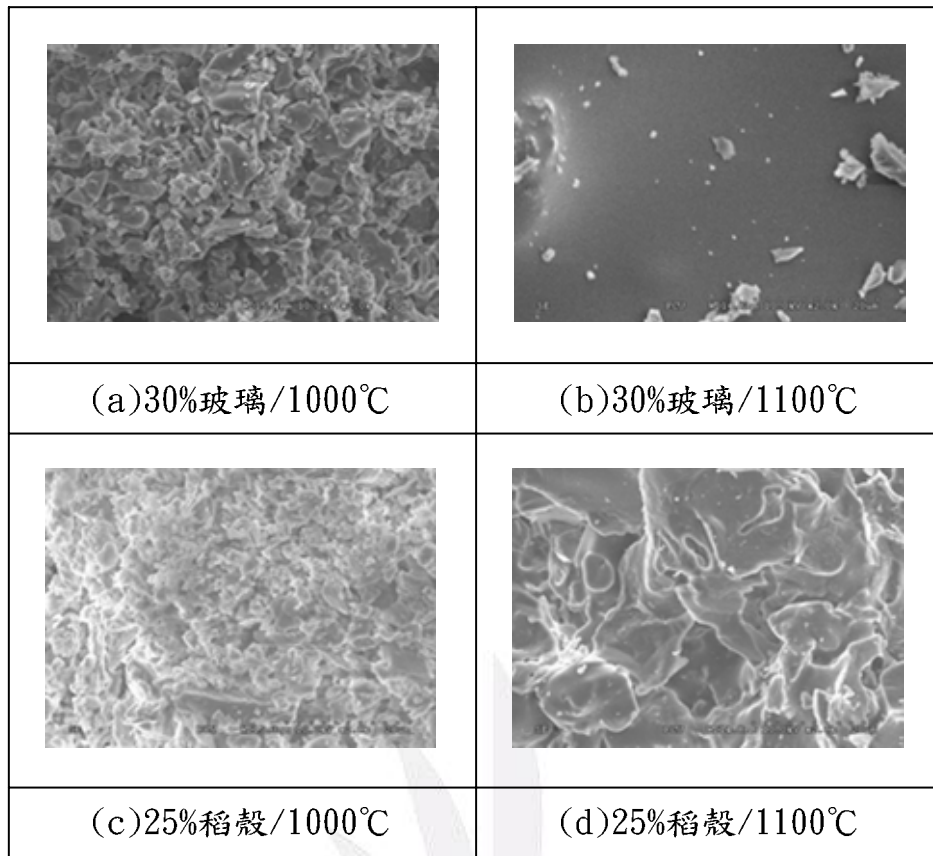


圖 4-12 燒結試體之 SEM 圖(×2000)

4.2.4 密度變化

在燒結反應過程緻密化的程度是決定燒結效率重要的指標之一，燒結試體之密度變化為表示緻密化程度之最佳指標。溫度對燒結試體本身密度影響為一相當重要之參數，隨著燒結溫度愈高，頸部成長作用完全，粒子與粒子間緊密黏結，故燒結試體之密度愈大。圖 4-13，結果顯示，就純淨水污泥而言(未添加任何添加劑試驗)，發現隨著燒結溫度愈高，試體之密度由 1.45 g/cm^3 增加至 2.10 g/cm^3 。添加 10% 廢玻璃之試體也隨燒結溫度升高，試體之密度由 1.51 g/cm^3 增加至 1.84 g/cm^3 。然而 20% 和 30% 在 1100°C 時密度是呈現下降的趨勢，是因為試體內部氣體增加會造成試體內部孔隙變大，然而試體外部之玻璃因呈現融熔狀態而將試體包覆住，試體內部密閉性孔隙變多，緻密性不佳，因此造成燒結試體密度在 1100°C 隨玻璃量的添加，由 2.10 g/cm^3 降至 1.72 g/cm^3 (圖 4-13)。圖 4-14 為不同溫度

下添加不同配比的稻殼燒結後試體之密度變化趨勢，添加稻殼之試體隨著試體燒結溫度升高，燒結試體密度增加，但就固定溫度而言，燒結試體隨稻殼添加比例變多，試體密度卻是下降的趨勢，以燒結溫度 1100°C 而言，添加稻殼比例由 0% 增加至 25%，其燒結試體密度由 2.10 g/cm³ 降至 1.23 g/cm³，此係稻殼所含之大量有機物，在高溫燒結揮發後，造成試體內部孔隙過多，緻密化程度不佳，故密度也就隨著下降。

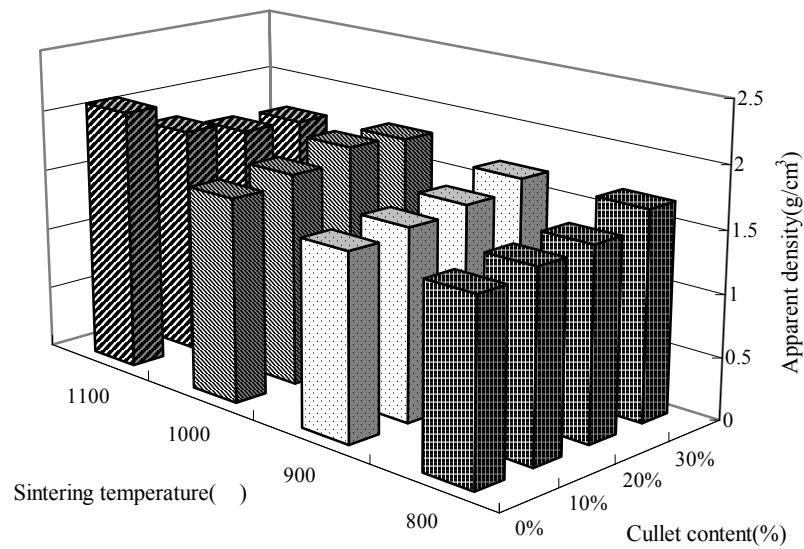


圖 4-13 添加不同廢玻璃配比之燒結試體密度變化趨勢

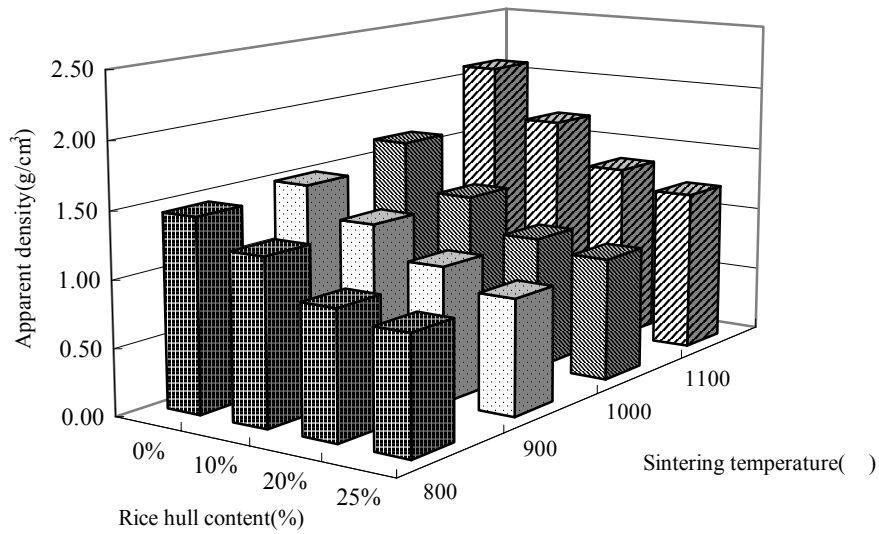


圖 4-14 添加不同稻殼配比之燒結試體密度變化趨勢

4.2.5 抗壓強度變化

抗壓強度為試體經過成形燒結後，單位斷面積所能承受的重量，此可作為試體燒結與否及再資源可行性之參考指標，燒結溫度愈高，燒結試體內部緻密化程度增加，相對的提高試體的抗壓強度，且燒結試體的抗壓強度與其組成成分之物種晶相具有相關性，影響燒結試體之抗壓強度因子很複雜，例如試體的孔隙度，礦物結晶種類與形態等交互作用的影響。試體抗壓強度與吸水率之關係顯示，試體吸水率愈低，則抗壓強度會愈大，因試體體積收縮率高，孔隙度下降，吸水率低，試體內部達緻密化，故試體抗壓強度會提高。

圖 4-15，就純淨水污泥(未添加任何添加劑試驗)而言，發現隨著燒結溫度愈高，試體之抗壓強度也隨之變大，燒結溫度的提高對於抗壓強度在 1000°C 左右有很明顯的區別，800~900°C 時由於燒結未完全，試體尚未達緻密化的程度，結構鬆散，故抗壓強度不佳，在 1000°C 下燒結試體之抗壓

強度明顯提高，試體內部結構由於受到熱力影響而趨於緻密，進而增加試體之抗壓強度，故推測在燒結溫度到達 1000°C 左右為燒結體迅速緻密化的起點。此外，在 1100°C 之燒結溫度下，其抗壓強度到達 859.53 ± 151.37 kgf/cm²，已可作為 A 級高壓鋪路地磚材料之應用。就玻璃添加配比之影響結果顯示，在燒結溫度介於 800~900°C 條件，燒結試體抗壓強度會隨廢玻璃添加(10~30%)增加而增加；在燒結溫度為 1000°C，玻璃添加配比由 10% 增加至 30%，其燒結試體抗壓強度由 153.27 kgf/cm² 增加至 233.15 kgf/cm²，抗壓強度均在 150kgf/cm² 以上，可符合 CNS 中建築用磚之一等磚之規範標準(如表 4-4)；然當燒結溫度達 1100°C 下，燒結試體抗壓強度會隨廢玻璃的添加由 10% 增加至 30% 時，燒結試體抗壓強度由 574.07 kgf/cm² 降至 318.68 kgf/cm²，此與前述燒結試體在相同條件下，試體之密度下降有關。

在添加不同稻殼配比之燒結試體抗壓強度變化趨勢，圖 4-16 所示，就稻殼配比而言，燒結溫度在 800°C 至 900°C 時，燒結試體抗壓強度隨稻殼添加比例增加而下降，均介於 1.27 kgf/cm² 至 5.79 kgf/cm² 之間。在燒結溫度為 1000°C，稻殼添加配比由 10% 增加至 30%，其燒結試體抗壓強度由 24.66 kgf/cm² 降至 2.60 kgf/cm²；在燒結溫度為 1100°C，稻殼添加配比由 10% 增加至 30%，其燒結試體抗壓強度由 254.20 kgf/cm² 降至 25.34 kgf/cm²；試體抗壓強度均隨稻殼添加比例增加而下降，因稻殼添加物為有機物，在高溫時已被燒製殆盡，故添加的配比愈多，試體結構愈鬆散，造成試體中的開放性孔隙多，因此試體抗壓強度隨稻殼添加比例增加而下降。

表 4-4 建築資材之 CNS 規範—抗壓強度

中國國家標準(CNS)					
項目	建築用普通磚(CNS 382)		高壓鋪路地磚(CNS 13295)		
	一等	二等	A 級	B 級	C 級
抗壓強度 kgf/cm ²	> 150	> 100	> 650	> 500	> 450

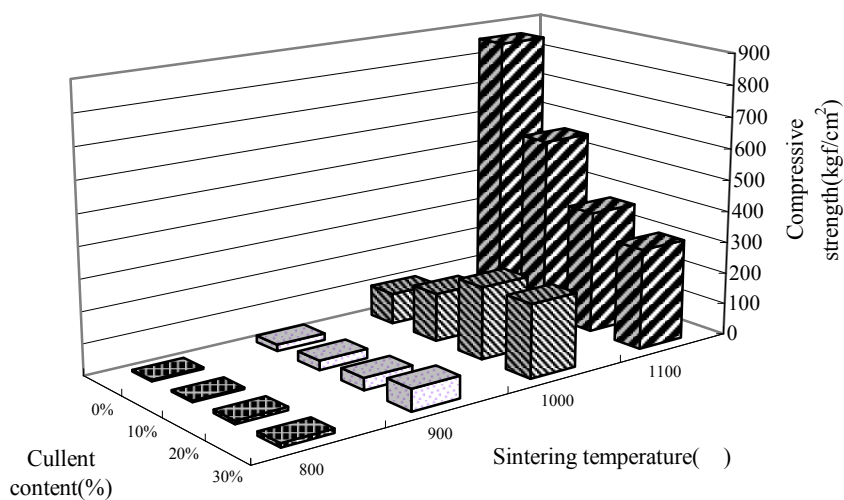


圖 4-15 添加不同廢玻璃配比之燒結試體抗壓強度變化趨勢

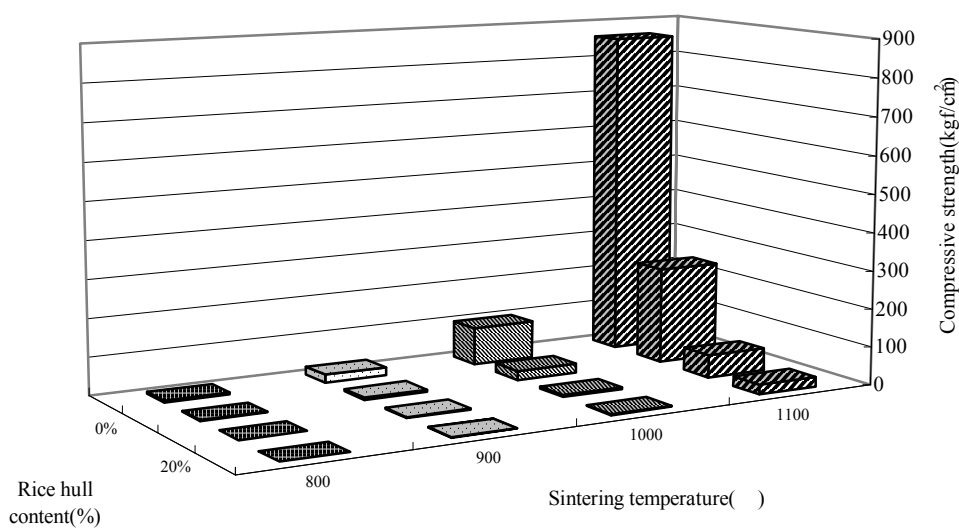


圖 4-16 添加不同稻殼配比之燒結試體抗壓強度變化趨勢

綜合磚材特性中之吸水率與抗壓強度，由表 4-5 和表 4-6 可觀察出隨燒結溫度升高，對燒結試體之材料品質有提升效果。在添加廢玻璃方面，隨著廢玻璃添加量增加，對燒結體緻密化有助益，反之，添加稻殼則因有機物成分較高，造成高溫時揮發，使試體結構鬆散。依據磚材規範(表 4-5)，相較表 4-8 燒結試體吸水率與抗壓強度試驗結果，當添加廢玻璃之燒結體於添加配比 30%在燒結溫度 1000℃及添加配比 10%~30%在燒結溫度 1100℃，可符合建築用普通磚一等磚。另外，當添加稻殼之燒結體於添加配比 10%在燒結溫度 1100℃亦符合建築用普通磚一等磚。



表 4-5 磚材規範

項目	建築用普通磚(CNS 382)		高壓鋪路地磚(CNS 13295)		
	一等	二等	A 級	B 級	C 級
吸水率(%)	<15	<19	<5	<6	<7
抗壓強度(kgf/cm ²)	>150	>100	>650	>500	>450

表 4-6 分別添加廢玻璃及稻殼之燒結試體之磚材分析結果

項目	燒結溫度(°C)	800		900		1000		1100	
		吸水率 (%) ^{*1}	抗壓強度 (kgf/cm ²) ^{*2}	吸水率 (%)	抗壓強度 (kgf/cm ²)	吸水率 (%)	抗壓強度 (kgf/cm ²)	吸水率 (%)	抗壓強度 (kgf/cm ²)
純污泥		28.14	5.18	31.04	21.19	22.74	98.95	9.04	859.53
添加廢玻璃比例	10%	27.41	5.22	27.73	30.01	21.56	153.27	6.62	574.07
	20%	26.25	10.54	24.32	38.46	<u>17.03</u> ^{*4}	<u>229.67</u>	8.50	386.66
	30%	21.27	12.78	20.10	68.89	14.78 ^{*5}	233.15	0.70	318.68
添加稻殼比例	10%	36.72	2.46	38.01	5.79	32.82	24.66	12.65	254.20
	20%	N.D. ^{*3}	1.27	55.46	2.15	50.76	5.47	27.43	59.30
	25%	N.D.	N.D.	N.D.	1.27	59.96	2.60	36.28	25.34

註：*1 吸水率之實驗數據為進行三重覆分析之平均結果。

*2 抗壓強度之實驗數據為進行三重覆分析之平均結果。

*3 N.D.表示燒結試體無法成型或崩裂，無法測得吸水率與抗壓強度。

*4 數值有底線者，該試體符合建築用普通磚之二等磚規範。

*5 數值粗黑體者，該試體符合建築用普通磚之一等磚規範。

4.3 不規則多孔性材料之特性分析

本實驗將各種不同燒結條件下之燒結試體搗碎成不規則多孔性材料，並將搗碎後之試體過篩，取粒徑範圍在 5mm~15mm 間作為實驗之不規則多孔性材料。為進一步判定材料應用之可行性，本研究初步依據台灣省自來水公司「濾料敷裝規格及施工說明書」之相關規範作為基準，進行洗淨濁度與鹽酸可溶率之不規則多孔性材料特性分析，並配合前述之吸水率、密度、抗壓強度及內部結構現象，作為後續吸附實驗燒結配比選擇依據。

4.3.1 洗淨濁度

洗淨濁度為判別濾料表面是否黏附過多之砂土、灰塵等不潔物之重要指標，依據台灣省自來水公司「濾料敷裝規格及施工說明書」之濾石洗淨濁度規範需小於 30NTU。圖 4-17 及圖 4-18 為不同溫度下分別添加廢玻璃及稻殼燒結多孔性材料洗淨濁度之變化，就純淨水污泥燒結多孔性材料而言，於燒結溫度 800~900°C 燒結體的洗淨濁度較 1000°C~1100°C 燒結體高，顯示在此溫度下燒結作用尚未完全，試體內部顆粒黏結力弱，結構鬆散且緻密化程度差，故不規則材料於水中劇烈震盪後，微細粉末大量剝落，造成水中濁度偏高；相較於燒結溫度 1000°C 時，顆粒間由於具有較高之能量，粒子與粒子間黏結作用增快，導致燒結試體之洗淨濁度急遽下降之現象，而在燒結溫度 1100°C 洗淨濁度降至 2.33 ± 0.49 NTU，試驗結果符合洗淨濁度之規範標準(30NTU) (如圖 4-18)。

根據圖 4-17 分析結果可知在相同溫度下，洗淨濁度則隨廢玻璃添加量的增加，洗淨濁度有下降的趨勢，推測應為廢玻璃中的 Na_2O 及 MgO 具有助熔的效果，使在高溫下的試體內部顆粒間擴散速率加快產生液相黏性流動，可填補內部顆粒間孔隙，使結構更為緊密，因此，洗淨濁度隨添加廢

玻璃量增加而下降，整體而言，在燒結溫度 1100°C 條件下，廢玻璃添加比例由 0% 增加至 30% 時，洗淨濁度皆小於 1NTU。另根據圖 4-18 不同溫度下添加稻殼之燒結多孔性材料之洗淨濁度變化，結果可知洗淨濁度隨溫度提高有下降趨勢，然在相同燒結溫度下，洗淨濁度則隨稻殼添加量的增加，洗淨濁度有上升的趨勢，推測因稻殼添加量增加，會使內部產生多孔性結構，使緻密化程度變差，結構較鬆散，因此，洗淨濁度隨添加稻殼量增加而增加。整體而言，在燒結溫度 1100°C 條件下，稻殼添加比例由 0% 增加至 25% 時，洗淨濁度由 $2.33 \pm 0.49\text{NTU}$ 增加至 $7.68 \pm 0.53\text{NTU}$ 。

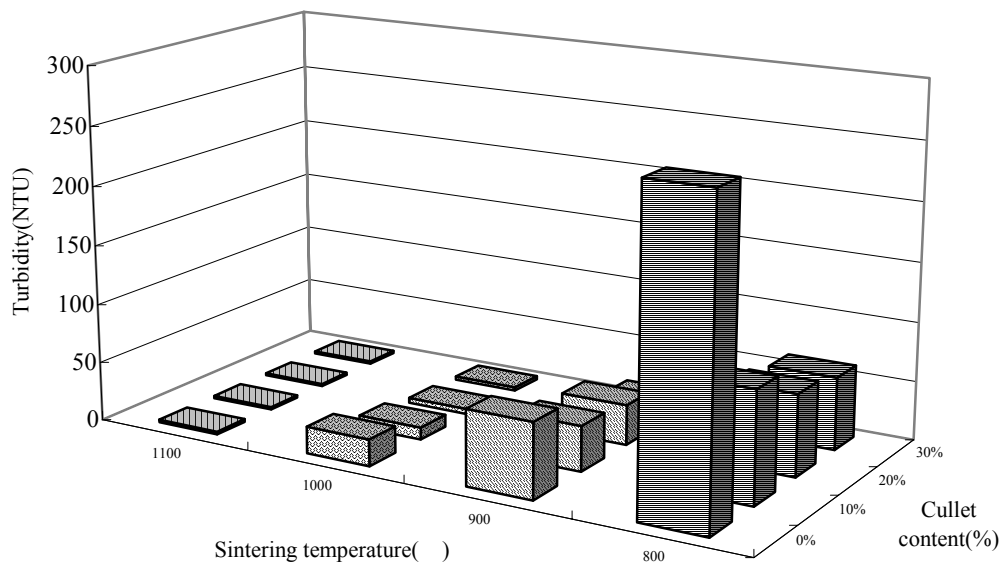


圖 4-17 添加廢玻璃之多孔性材料洗淨濁度之變化趨勢

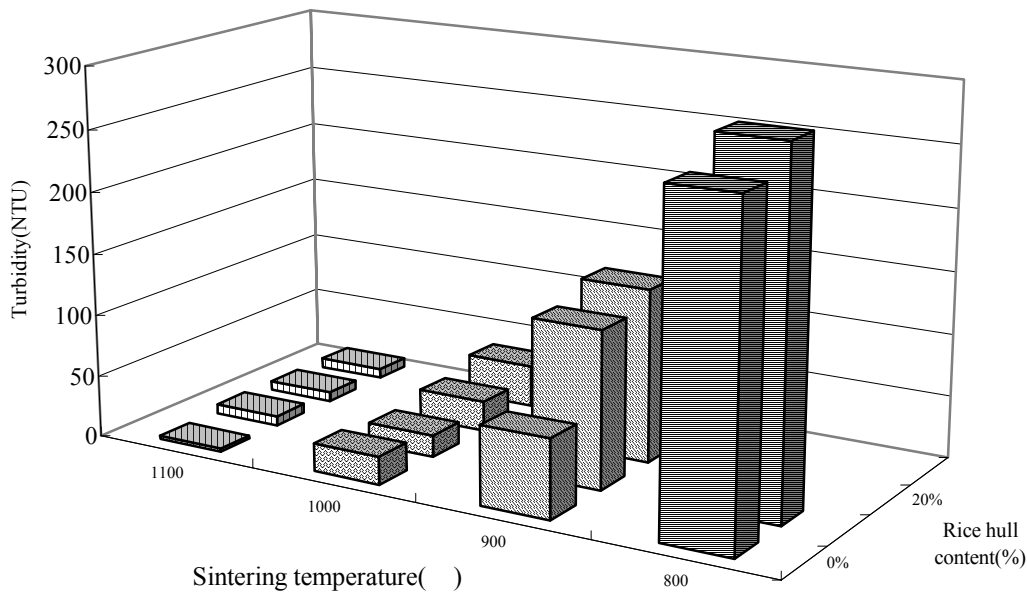


圖 4-18 添加稻殼之多孔性材料洗淨濁度之變化趨勢

4.3.2 鹽酸可溶率

依據台灣省自來水公司「濾料敷裝規格及施工說明書」規範，粒徑介於 2.36~25.4mm 之濾石，鹽酸可溶率不得超出 17.5%，本研究所採用之不規則多孔性材料，其粒徑範圍為 5~15mm，故本研究燒結多孔性材料，鹽酸可溶率應符合小於 17.5% 之規範。圖 4-19 及圖 4-20 為分別添加廢玻璃及稻殼之燒結多孔性材料鹽酸可溶率變化結果，就純淨水污泥燒結多孔性材料而言，隨著溫度的升高，鹽酸可溶率有明顯下降之趨勢，推測燒結溫度在 800~900°C 時，燒結試體並未達到完全緻密化現象，其內外仍有粉屑掉落且結構呈現鬆散，故經由鹽酸浸泡後會產生溶解之現象(圖 4-21)。相較燒結溫度達 1000°C 時，是燒結體迅速緻密化開始，可使試體內部顆粒原子動能變大，移動性強，粒子與粒子間碰撞劇烈而黏結在一起，致使燒結試體內部的孔隙減少而愈為緻密化，故試體之抗酸性強且不易被酸所溶解，所以純淨水污泥燒結多孔性材料之鹽酸可溶率下降。而在 1100°C 酸可溶率下降降至 $0.22 \pm 0.69\%$ ，試驗結果已符合鹽酸可溶率之規範(<17.5%)。

根據圖 4-19 與圖 4-20 為分別添加廢玻璃及稻殼燒結多孔性材料鹽酸可溶率之變化結果可知，鹽酸可溶率隨溫度提高有下降趨勢，尤其在溫度達 1000°C，更是燒結體迅速緻密化開始，故鹽酸可溶率有更明顯下降。根據圖 4-19 分析結果可知，在相同溫度下，鹽酸可溶率則是隨著添加廢玻璃量增加，鹽酸可溶率會下降，推測原因是廢玻璃中之 Na₂O 及 MgO 助熔效果的關係。Na₂O 及 MgO 在高溫下試體內部產生液相燒結，使在高溫下的試體內部顆粒間擴散速率加快產生液相黏性流動，可填補內部顆粒間孔隙，使結構更為緊密。整體而言，在燒結溫度 1100°C 條件下，廢玻璃添加比例由 0% 增加至 30% 時，鹽酸可溶率介於 0.51~0.21% 間。另根據圖 4-20 添加稻殼燒結多孔性材料鹽酸可溶率之變化，結果可知鹽酸可溶率隨溫度提高有下降趨勢，然在相同溫度下，鹽酸可溶率則隨稻殼添加量的增加有上升的趨勢，推測因稻殼添加量增加，會使內部產生較多孔性結構，使緻密化程度變差，結構較鬆散，經震盪與鹽酸浸泡後，有較高的溶解。因此，鹽酸可溶率隨添加稻殼量增加而增加。整體而言，在燒結溫度 1100°C 條件下，稻殼添加比例由 0% 增加至 25% 時，鹽酸可溶率由 0.51% 增至 2.13%，亦符合「濾料敷裝規格及施工說明書」規範之鹽酸可溶率標準。

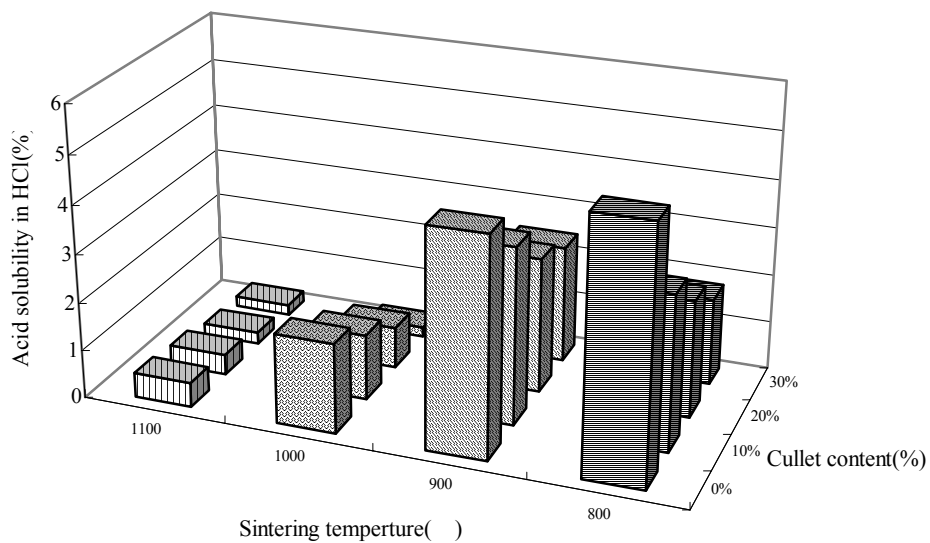


圖 4-19 添加廢玻璃之多孔性材料鹽酸可溶率之變化

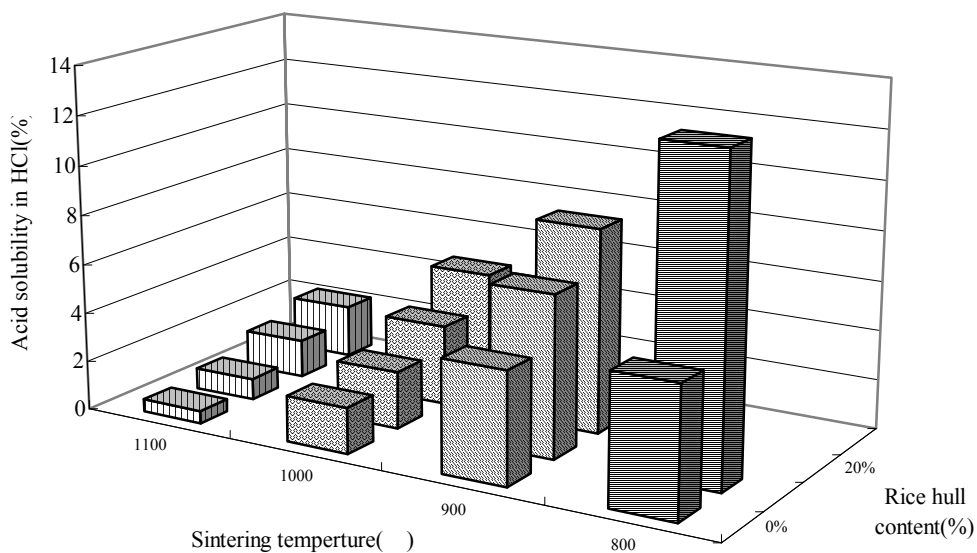


圖 4-20 添加稻殼之多孔性材料鹽酸可溶率之變化

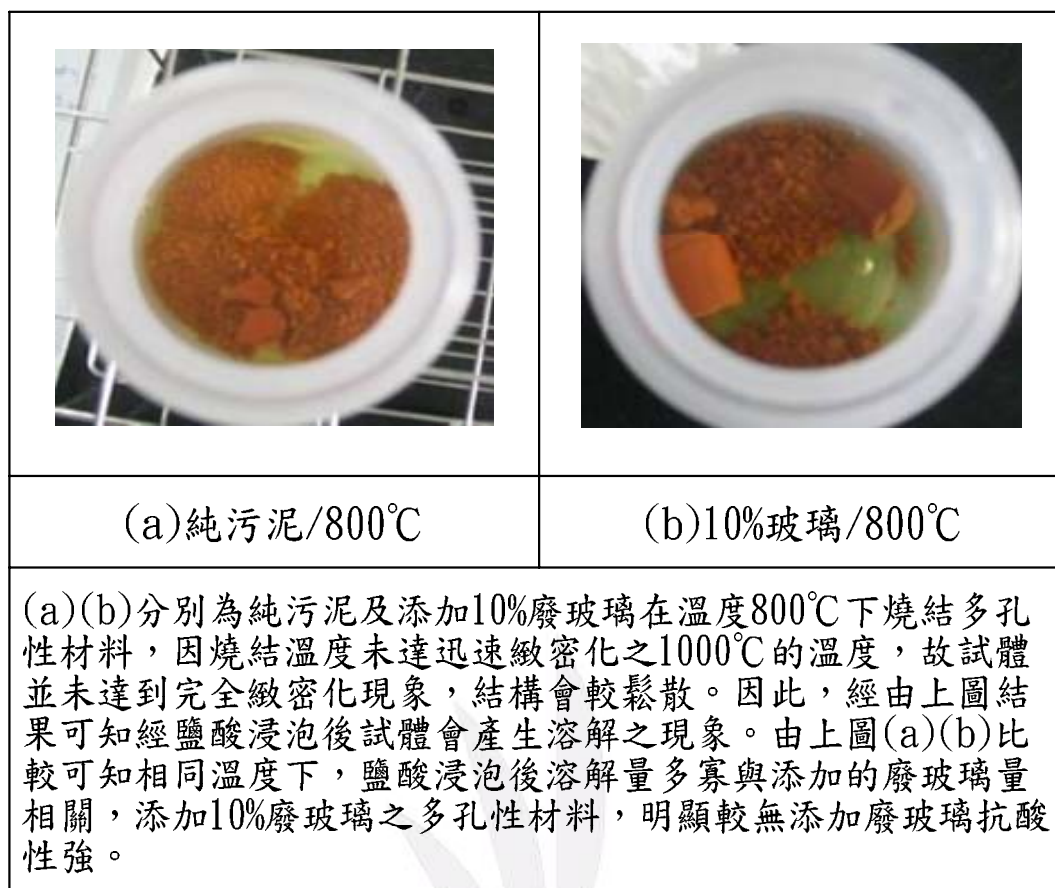


圖 4-21 純污泥/800°C 與 10%廢玻璃/800°C 經鹽酸可溶率試驗後之結果

一般而言，不規則多孔性材料應用在吸附材料之選擇依據，主要考慮本身為輕質化試體，並且具有多孔性之表面及內部構造，如此才能有吸附能力。依據不規則多孔性材料規範建議值(表 4-7)，相較表 4-8 多孔性材料密度、洗淨濁度及鹽酸可溶率試驗結果，當添加廢玻璃之多孔性材料添加配比 10%在燒結溫度 900°C 及添加配比 10%~30%在燒結溫度 1000°C~1100°C，可符合不規則多孔性材料規範建議值。另外，當添加稻殼之多孔性材料於添加配比 10%~20%在燒結溫度 1000°C 及添加配比 10%~25%在燒結溫度 1100°C 亦符合不規則多孔性材料規範建議值。本研究分別挑選出添加玻璃 30%及添加稻殼 10%於溫度 1100°C 條件下之燒結多孔性材料，作為後續吸附試驗之材料。

表 4-7 不規則多孔性材料規範建議值

項目	規範建議值
洗淨濁度(NTU)	<30
鹽酸可溶率(%)	<17.5
密度(g/cm ³)	>1

表 4-8 分別添加廢玻璃及稻殼之多孔性材料分析結果

燒結溫度(°C)		800			900			1000			1100		
項目	洗淨濁度(NTU) ^{*1}	鹽酸可溶率(%) ^{*2}	密度(g/cm ³) ^{*3}	洗淨濁度(NTU)	鹽酸可溶率(%)	密度(g/cm ³)	洗淨濁度(NTU)	鹽酸可溶率(%)	密度(g/cm ³)	洗淨濁度(NTU)	鹽酸可溶率(%)	密度(g/cm ³)	
純污泥	267.07	5.19	1.45	63.23	4.5	1.49	23.36^{*5}	1.85	1.64	2.33	0.51	2.10	
添加廢玻璃比	10%	93.22	3.2	1.51	38.07	3.65	1.54	10.33	1.35	1.71	1.99	0.42	1.84
	20%	68.57	2.42	1.54	33.07	2.8	1.59	4.53	0.85	1.82	1.86	0.24	1.74
例	30%	61.13	1.81	1.68	13.49	2.43	1.68	2.96	0.2	1.78	2.09	0.22	1.72
添加稻殼比例	10%	286.58	12.9	1.24	126.12	6.5	1.26	17.57	2.3	1.27	7.76	0.85	1.70
	20%	N.D. ^{*4}	N.D.	0.96	138.96	8.23	1.02	24.39	3.24	1.01	7.56	1.54	1.37
	25%	N.D.	N.D.	0.88	N.D.	N.D.	0.87	34.08	4.56	0.93	7.68	2.13	1.23

- 註：*1 洗淨濁度之實驗數據為進行三重覆分析之平均結果。
 *2 鹽酸可溶率之實驗數據為進行三重覆分析之平均結果。
 *3 密度之實驗數據為進行三重覆分析之平均結果。
 *4 N.D.表示燒結試體無法成型或崩裂，無法測得洗淨濁度與鹽酸可溶率。
 *5 數值粗黑體者，該不規則多孔性材料符合規範建議值。

4.4 應用多孔性材料之重金屬吸附試驗分析

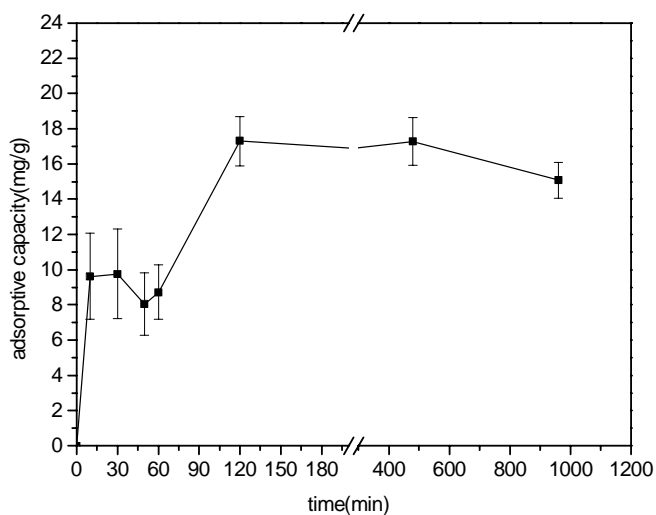
影響不規則多孔性材料吸附量多寡的因素包括不規則多孔性材料之總表面積與金屬之水和半徑。不規則多孔性材料本身之內部孔隙量若多則代表總表面積大，表面積大則能吸附金屬的量就多；相對的不規則多孔性材料本身內部孔隙量若少，則代表總表面積小能吸附金屬的量就少。重金屬吸附量之多寡可決定於金屬之水合半徑。水合半徑為金屬在水中解離後，與水結合之半徑。水合半徑越小則表示可以進入越小之孔隙中。本研究目的在於探討淨水污泥各別添加廢玻璃、稻殼共同燒結後之不規則多孔性材料對於重金屬 Pb、Cd、Cr、Cu、Zn 是否具有吸附能力。

4.4.1 單一金屬吸附

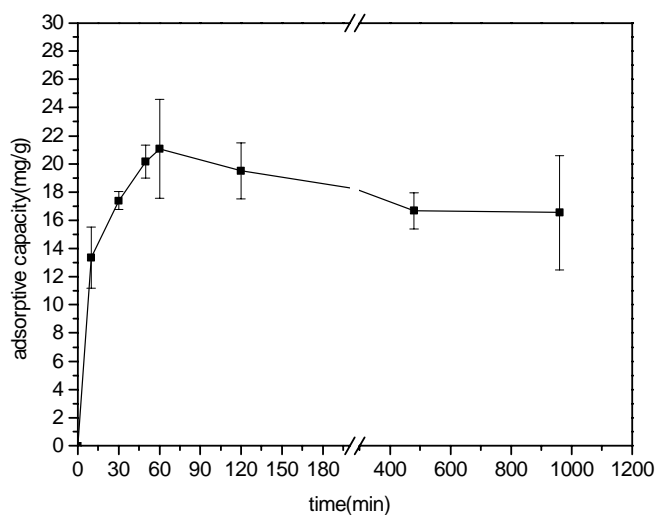
圖 4-22 為廢玻璃添加製成之多孔性材料單一金屬吸附變化，可觀察出金屬鉻之吸附量為最大，其吸附量介於 38.41 mg/g~84.19 mg/g；其他金屬鉛、鎘、銅、鋅之吸附值均介於 8.02 mg/g~21.05 mg/g。此外，金屬鎘、銅於吸附時間為 10 分鐘時，其吸附量分別為 13.36 mg/g 和 10.57 mg/g；金屬鉻、鋅吸附時間為 30 分鐘時，其吸附值分別為 78.69 mg/g 和 10.06 mg/g；金屬鉛於吸附時間 60 分鐘時，吸附量為 8.72 mg/g。

圖 4-23 稻殼添加製成之多孔性材料單一金屬吸附變化，顯示出金屬鎘、銅於吸附時間為 10 分鐘時，其吸附量分別為 16.39 mg/g 和 27.57mg/g；金屬鉻、鋅吸附時間為 30 分鐘時，其吸附值分別為 48.47 mg/g 和 14.08 mg/g；金屬鉛於吸附時間 60 分鐘時，吸附量為 42.76 mg/g。

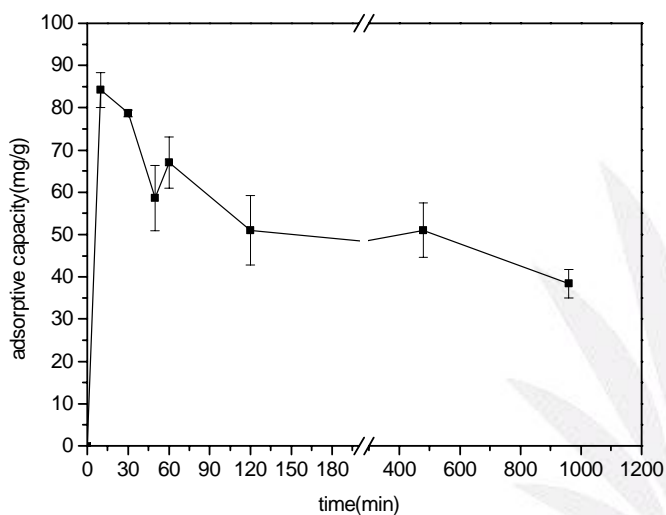
由圖 4-22 及圖 4-23 顯示，添加劑分別為廢玻璃、稻殼製成之多孔性材料單一金屬吸附，吸附值分別介於 8.02 mg/g~21.05 mg/g 10.06 mg/g~48.47 mg/g，稻殼添加之吸附量均大於廢玻璃添加之吸附量，因稻殼為有機物於燒結溫度時會氧化分解成為多孔性之材料，故可推測出稻殼添加之多孔性材料，孔隙多於廢玻璃添加之多孔性材料，可作為較佳的吸附劑。



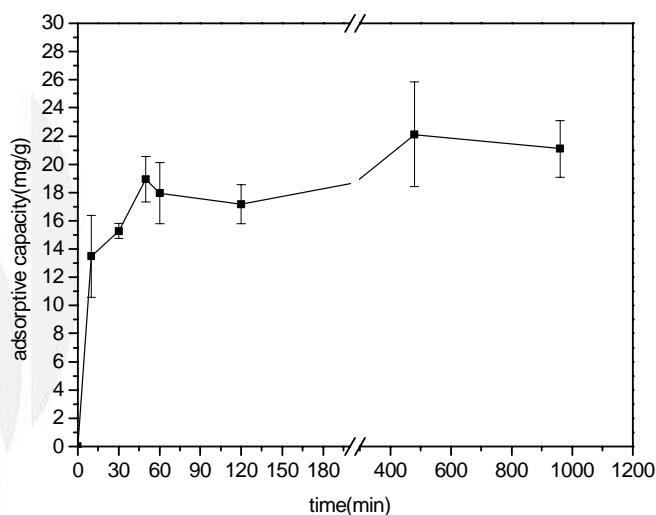
(a)Pb 吸附變化



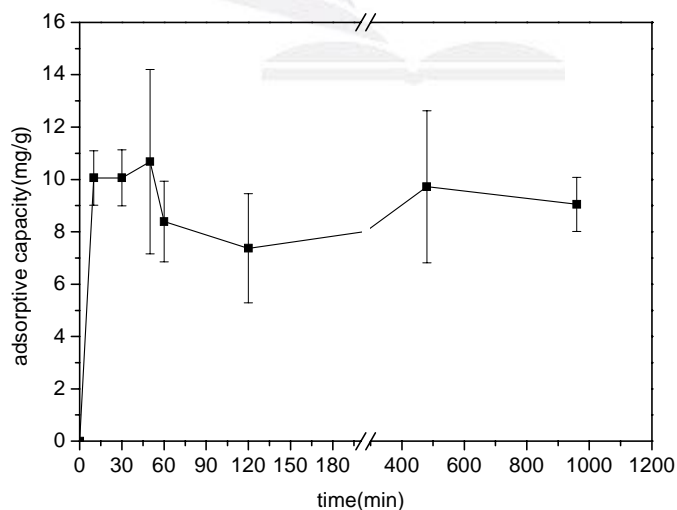
(b)Cd 吸附變化



(c)Cr 吸附變化



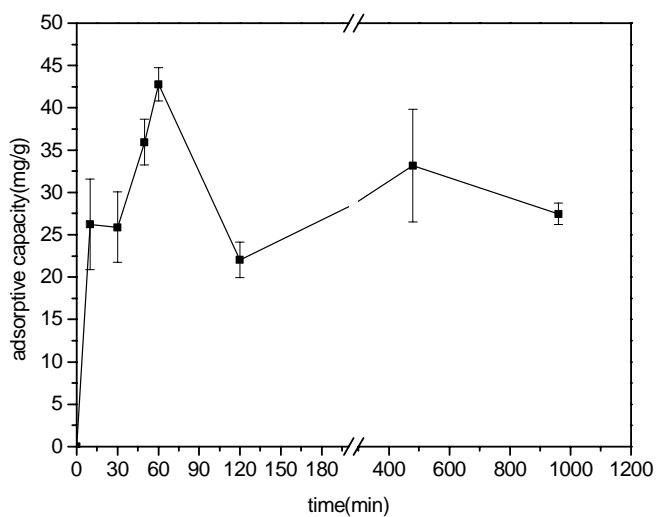
(d)Cu 吸附變化



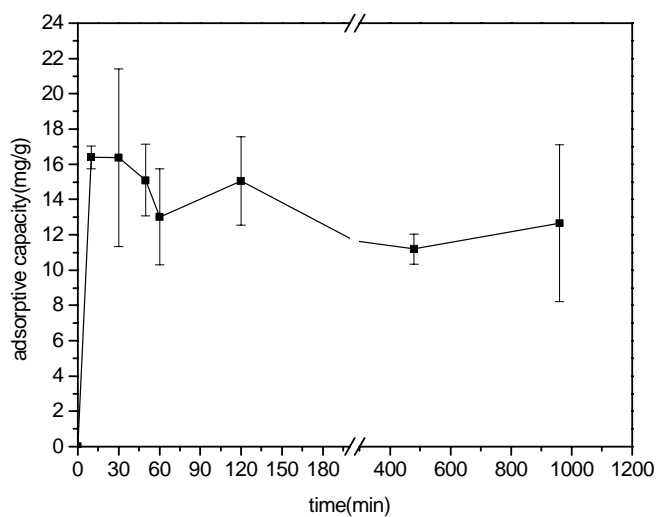
(e) Zn 吸附變化

圖 4-22 廢玻璃添加製成之多孔性材料-(a)(b)(c)(d)(e)為單一金屬

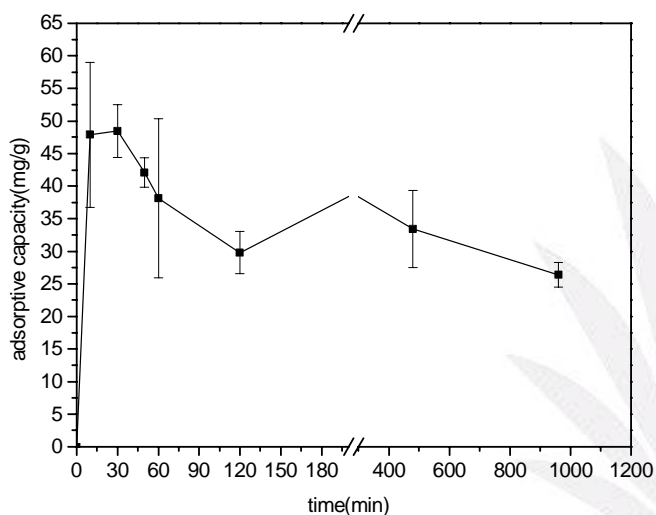
不同時間下之吸附變化



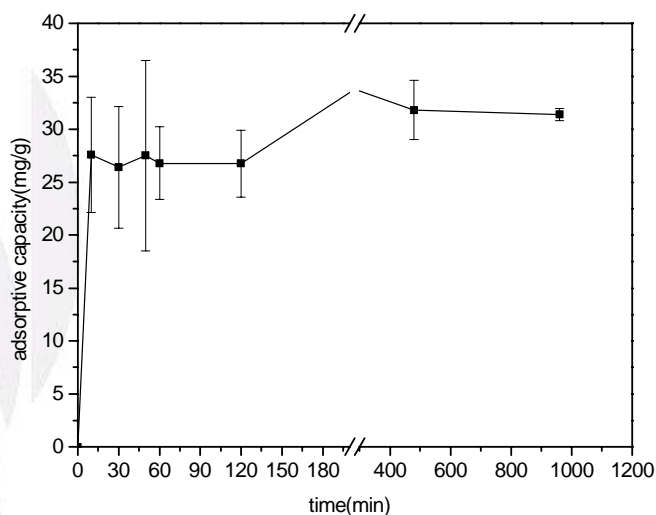
(a)Pb 吸附變化



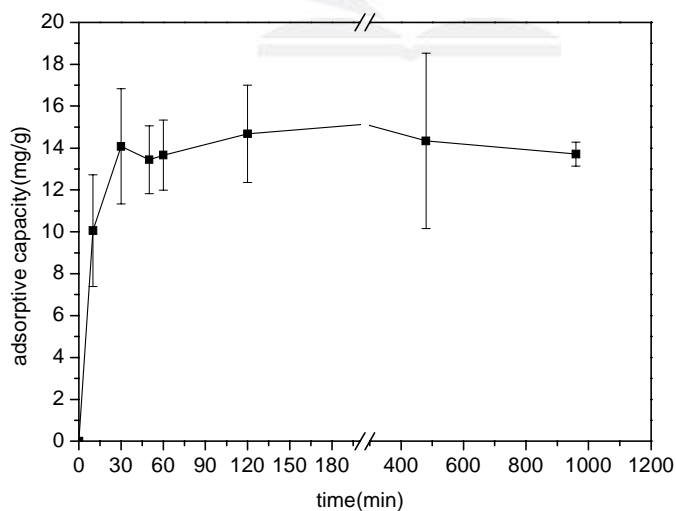
(b)Cd 吸附變化



(c)Cr 吸附變化



(d)Cu 吸附變化



(e) Zn 吸附變化

圖 4-23 稻殼添加製成之多孔性材料-(a)(b)(c)(d)(e)為單一金屬不同時間下之吸附變化

4.4.2 混合金屬吸附

圖 4-24 廢玻璃添加製成之多孔性材料混合金屬競爭吸附變化，可觀察出金屬鉛、鎘、鉻、銅、鋅對廢玻璃添加製成之多孔性材料，持續吸附直到吸附時間為 120 分鐘時吸附量趨於平緩，其吸附量分別為 37.60 mg/g、17.12 mg/g、10.07 mg/g、25.19 mg/g、4.37 mg/g。廢玻璃添加製成之多孔性材料之總吸附量介於 82.73 mg/g~111.85 mg/g。

圖 4-25 稻殼添加製成之多孔性材料混合金屬競爭吸附變化，實驗結果顯示出金屬鉛、鎘、鉻、銅、鋅對稻殼添加製成之多孔性材料，持續吸附直到吸附時間為 240 分鐘時吸附量趨於平緩，其吸附量分別為 48.70 mg/g、15.81 mg/g、5.38 mg/g、35.67 mg/g、6.07 mg/g。稻殼添加製成之多孔性材料之總吸附量介於 102.67 mg/g~121.85 mg/g。

綜合上述結果，可知廢玻璃添加燒結之多孔性材料對混合金屬鉛、鎘、鉻、銅、鋅在混合金屬競爭吸附環境之下，其吸附量大小依序為鉛>銅>鎘>鉻>鋅。稻殼添加燒結之多孔性材料對混合金屬鉛、鎘、鉻、銅、鋅在混合金屬競爭吸附環境之下，其吸附量大小依序為鉛>銅>鎘>鋅>鉻。混合金屬於廢玻璃添加製成之多孔性總吸附量小於稻殼添加製成之多孔性材料。故可推測添加稻殼之多孔性材料，孔隙多於添加廢玻璃之多孔性材料，成為較佳的吸附材料。且金屬鉛吸附值為五個金屬當中吸附量最大的，符合 Budinova(1994)研究指出金屬離子會與酸性官能基反應，陰離子會與鹼性官能基反應，而鉛為兩性之特質，才使不規則多孔性材料可大量吸附金屬鉛之情況。

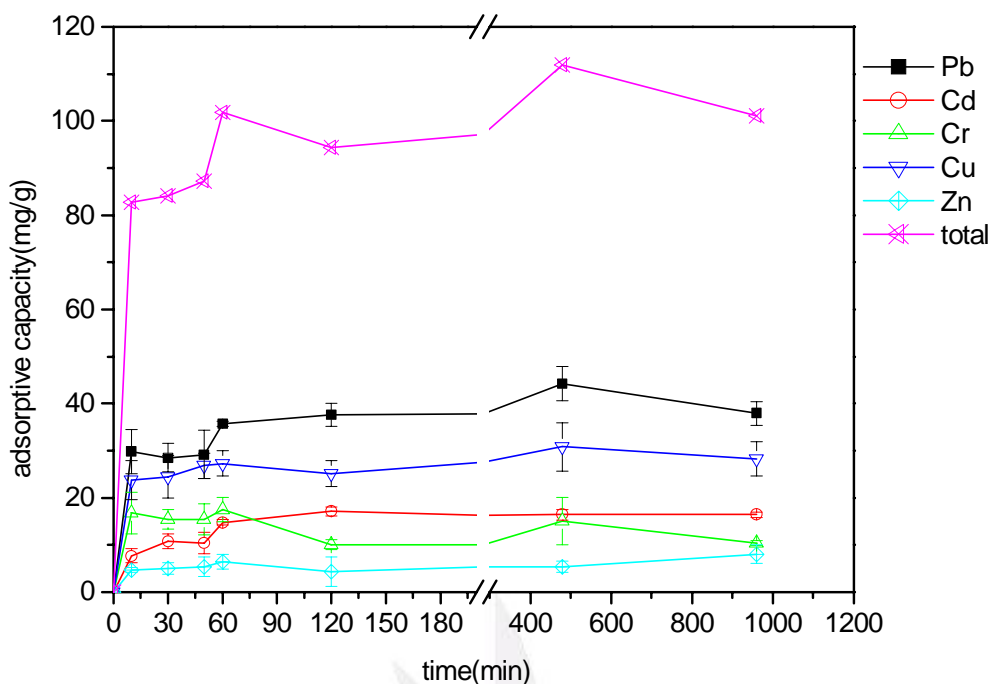


圖 4-24 廢玻璃添加製成之多孔性材料-混合金屬不同時間下之吸附變化

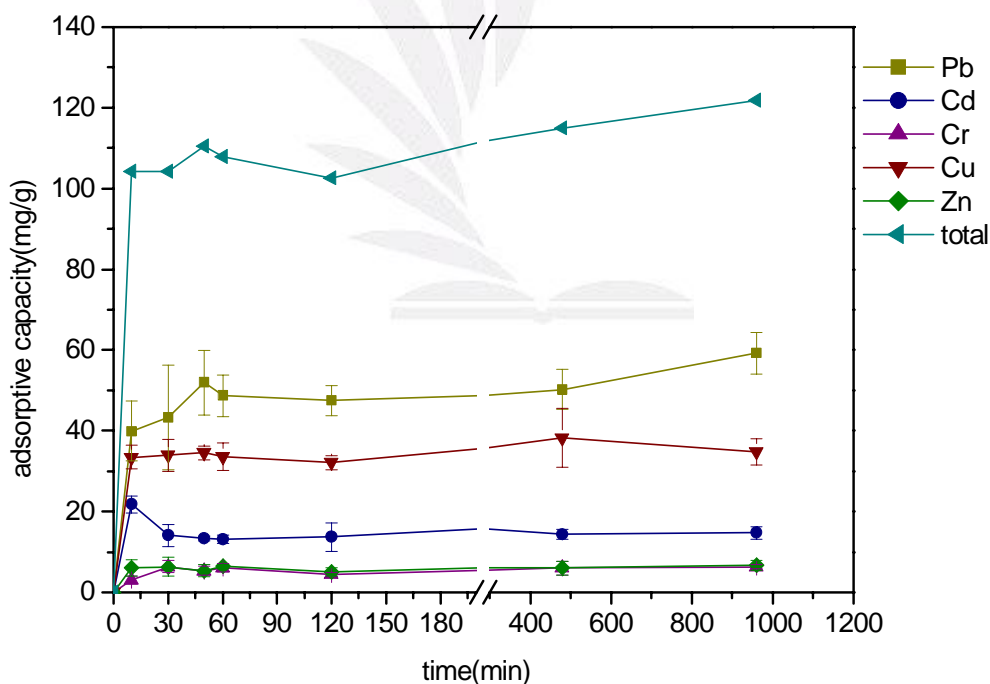
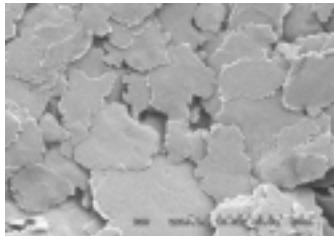
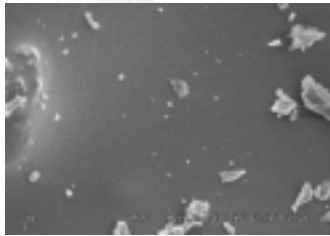
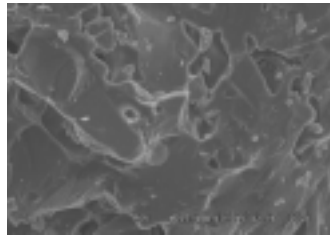


圖 4-25 稻殼添加製成之多孔性材料-混合金屬不同時間下之吸附變化

根據前述 4.4 節應用多孔性材料之重金屬吸附試驗分析之吸附結果，可推測出添加稻殼之多孔性材料，孔隙多於添加廢玻璃之多孔性材料。另外，本研究亦藉由燒結試體之內部微細結構(SEM)、視孔隙度及比表面積變化分析結果說明，添加稻殼之多孔性材料內部孔隙與吸附表面積較多。圖 4-26 為燒結試體之視孔隙度、比表面積及 SEM 分析結果，根據 SEM 圖，(c)為添加 10%稻殼之燒結試體，可觀察出致密化程度為(b)>(a)>(c)。

對於視孔隙度方面，其為推測開孔多寡的方法，孔洞之多寡與致密化程度亦有相關性。圖 4-26(c)添加 10%稻殼之燒結試體視孔隙度為 47.24%，相較(a)純污泥/1100°C之視孔隙度 24.57%與(b)30%廢玻璃/1100°C之視孔隙度 7.43%，分別要高出 2 倍與 6 倍，可見添加 10%稻殼之燒結試體內部孔隙最高，相對致密化程度為最低。此外，為了進一步瞭解吸附表面積多寡，圖 4-26(c)添加 10%稻殼之燒結試體比表面積為 0.1659m²/g 要比(a)純污泥/1100°C與(b)30%廢玻璃/1100 要高上 40 倍，故有最多的吸附表面積。綜合上述結果，添加 10%稻殼之多孔性材料孔隙與吸附表面積多於添加 30%廢玻璃之多孔性材料，可作為較佳的吸附材料。

		
(a)純污泥/1100°C	(b)30%廢玻璃/1100°C	(c)10%稻殼/1100°C
視孔隙度*1：24.57% 比表面積：0.0035m ² /g	視孔隙度：7.43% 比表面積：0.0053m ² /g	視孔隙度：47.24% 比表面積：0.1659m ² /g

註：*1 視孔隙度之實驗數據為進行三重覆分析之平均結果。

圖 4-26 燒結試體之視孔隙度、比表面積及 SEM 圖(×2000)

第五章 結論與建議

5.1 結論

1. 廢玻璃添加試體和稻殼添加試體於 800°C、900°C，由於溫度尚未達燒結之溫度，結構較鬆散，緻密化程度不高，內部開放性孔洞較多，故各項試體特性試驗結果不佳。
2. 當燒結溫度為 1000°C 時，燒結體體積變化率明顯增大，緻密化程度高，吸水率偏低、抗壓強度較高之現象，推測 1000°C 左右為燒結體迅速緻密化之起點。
3. 試體添加稻殼燒失量普遍比試體添加廢玻璃量來的要高，是因為稻殼為有機物，其可燃分比廢玻璃量來的高。
4. 在燒結溫度 1000°C 下，廢玻璃添加配比為 30%，吸水率及抗壓強度分別為 14.78% 和 233.15 kgf/cm²，均符合 CNS 建築用普通磚之一等磚規範。燒結溫度 1100°C，純淨水污泥、廢玻璃添加配比為 20%、30% 及稻殼添加配比為 10%，吸水率分別為 9.04%、8.50%、0.70%、12.65%，抗壓強度依序為 859.53 kgf/cm²、386.66 kgf/cm²、318.68 kgf/cm²、254.20 kgf/cm²，均符合 CNS 建築用普通磚一等磚之規範。
5. 就抗壓強度而言，1000°C、1100°C-添加廢玻璃 0%、10%、20%、30% 之配比，明顯比 800°C、900°C 高出許多。但其抗壓強度分佈情形，1000°C 燒結試體抗壓強度隨廢玻璃量增加而提升，1100°C 隨添加廢玻璃量增加而遞減，因為 1100°C 試體呈現膨脹之現象，黏滯性玻璃相物質增加，但此類物質為不規則非結晶玻璃，對試體抗壓強度有負面的影響，且試體內部氣體增加會造成試體內部孔隙變大，然而試體外部之玻璃因呈現融熔狀態而將試體包覆，試體內部密閉性孔隙變多，因此造成燒結試體抗壓強度隨廢玻璃量的添加增加而減小。
6. 在溫度 1100°C 下燒結多孔性材料試驗結果，當分別添加 30% 廢玻璃及

10%稻殼燒結之多孔性材料，洗淨濁度分別 3NTU 及 8NTU 以下，鹽酸可溶率介於 0.21%~0.85%，均符合相關材料之規範。

7. 在單一金屬吸附試驗結果得知廢玻璃添加製成之多孔性材料吸附量小於稻殼添加製成之多孔性材料吸附量，故稻殼添加製成之多孔性材料，孔隙多於廢玻璃添加製成之多孔性材料，成為較佳的吸附材料。
8. 添加劑廢玻璃製成之多孔性材料於混合金屬之競爭吸附下，重金屬吸附量大小依序為鉛>銅>鎘>鉻>鋅。添加劑稻殼製成之多孔性材料於混合金屬之競爭吸附下，重金屬吸附量大小依序為鉛>銅>鎘>鋅>鉻。
9. 在視孔隙度及比表面積試驗結果得知，稻殼添加製成之多孔性材料視孔隙度(47.24%)及比表面積(0.1659 m²/g)，明顯比廢玻璃添加製成之多孔性材料視孔隙度(7.43%)及比表面積(0.0053 m²/g)多，因此稻殼添加製成之多孔性材料可做為較佳的吸附材料。

5.2 建議

1. 燒結溫度與添加劑配比量選擇要仔細，例如：燒結溫度 1100°C 添加玻璃量太高的話，則會造成試體變形。
2. 燒結過程材料粒徑大小會影響其燒結試體緻密程度，例如：稻殼在粒徑為 74μm~300μm，在 800°C 燒結時，無法成型。但在 150μm~300μm，即可成型，可見粒徑大小會有一定影響。
3. 可利用較小粒徑之不規則多孔性材料進行吸附試驗。因較小粒徑之比表面積相對較大，可作為較佳的吸附材料。

第六章 參考文獻

- Bhatty, J.I., J, R. Kenneth, "Lightweight Aggregates from Incinerated Sludge Ash", Waste Management and Research, Vol.7, pp.363-376,1989.
- Budinova, T.K., Gergova, K.M., Petrov, N.V., Minkova, V.N., "Removal of Metal Ions from Aqueous Solution by Activated Carbons Obtained from Raw Material", J Chem. Tech. Biotechnol., Vol.60, pp.117-182,1994.
- Xu, L.L., Guo, W., Wang, T., Yang, N.R., "Study on Fired Bricks with Replacing Clay by Fly Ash in High Volume Ratio", Construction and Building Materials, Vol.19, pp.243-247, 2005.
- Tay, J. H., Yip W. K., "Sludge Ash as Lightweight Concrete Material", ASCE ,J. of Environmental Engineering, Vol.115, No.1, pp.59-64,1989.
- Wiebush, B., Seyfried, C.F. "Utilization of Sewage Sludge Ashes in the Brick and Tile Industry", Wat. Sci. Tech., Vol.36, No.11, pp.251-258, 1997.
- 王鯤生，吳坤龍，江康鈺，"汞污泥造粒燒結之物化特性研究"，第九屆廢棄物處理技術研討會論文集，台中，pp.329-335，1994。
- 王鯤生，劉愷，孫常榮，劉宗諭，江康鈺，"氧化鋁及氧化鈣對焚化飛灰燒結特性之影響"，第十二屆廢棄物處理技術研討會論文集，台中，pp.177-182，1997。
- 王鯤生，張毓舜，林凱隆，黃尊謙，"下水污泥灰焚化灰渣燒製輕質骨材之研究"，第十四屆廢棄物處理技術研討會論文集，台中，pp.5-45-5-52，1999。
- 王鯤生，余岳峰，蔡振球，楊志政，董旻叡，"下水污泥灰主成分調質對燒成輕質骨材之影響探討"，第十五屆廢棄物處理技術研討會論文集，雲林，pp.5-7-5-13，2000。
- 王鯤生，胡趙原，蔡振球，張孟弘，"下水污泥灰加壓成形對燒成輕質化微

- 結構變化之探討”，第十七屆廢棄物處理技術研討會論文集，台南，pp.2-13-2-17，2002。
- 台灣省自水公司網站，網頁資料，網址：<http://www.water.gov.tw>，2004。
- 行政院環保署資源回收基管會，網址：<http://recycle.epa.gov.tw/>，2006。
- 江康鈺，陳宜晶，簡光勵，“淨水污泥燒製磚材之材料特性研究”，自來水會刊，第二十三卷第三期，pp.38-47，2004。
- 汪建民，“液相燒結理論及應用”，粉末冶金，pp.165-182，1991。
- 何秀美，“污泥與底灰資源化為透水磚之研究”，碩士論文，國立台灣大學環境工程學研究所，2003。
- 周欽隆，謝樹木，“重金屬污泥與紅磚土混合燒成之探討”第十屆廢棄物處理技術研討會論文集，台南，pp.479-484，1995。
- 林凱隆，王鯤生，林忠逸，林家宏，“利用廢棄污泥燒製環保水泥之資材化研究”，產業環保工程實務研討會論文集，台北，2003。
- 段維新，“固態燒結理論”，粉末冶金(汪建民，朱秋龍編著)，中華民國粉末冶金協會，苗栗，pp.145-163，1991。
- 洪仁陽，張敏超，邵信，張王冠，“淨水場之污泥減量技術”，自來水會刊，第22卷，pp.61-65，2003。
- 翁誌煌，林登峰，曾志晏，邱玫韶，“生物污泥製磚資源化之可行性研究”，第十五屆廢棄物處理技術研討會論文集，雲林，pp.1-144-1-150，2000。
- 高懷思，王鯤生，謝政峰，吳慶龍，“焚化底灰再利用於燒製紅磚可行性之探討”第十五屆廢棄物處理技術研討會論文集，雲林，pp.1-129-1-131，2000。
- 孫國鼎，“水庫淤泥及淨水污泥再利用製磚之研究”，碩士論文，國立交通大學環境工程研究所，2001。
- 張祉祥，蔡振球，孫常榮，余岳峰，王鯤生，“廢棄物焚化底灰燒結材料化之可行性研究”，第十四屆廢棄物處理技術研討會論文集，台中，

pp.1-88-1-95, 1999。

許鎮龍，潘志明，彭康祐，江國威，”稻殼及造紙廠廢水污泥運用於鍋爐燃料之可行性探討”，聯合學報，pp.189-194，2002。

張孟弘，”利用水庫淤泥造粒燒製濾料之研究”，碩士論文，國立中央大學環境工程研究所，2003a。

張添晉，鄭啓璞，連奕偉，”廢玻璃資源回收管理與再利用技術”，永續產業發展雙月刊，pp.67-74，2003b。

陳宜晶，”利用添加劑提昇淨水污泥燒結之材料品質研究”，碩士論文，逢甲大學環境工程與科學研究所，2004。

黃志彬，”淨水污泥混合營建廢棄土製磚與燒結人造骨材的研究”，工程科技通訊，第七十三期，pp.125-129，2004。

葉宗壽，”粉體與生胚特性對燒結之影響”，粉末冶金(汪建民，朱秋龍編著)，中華民國粉末冶金協會，苗栗，pp.183-201，1991。

楊紹榮，”農業廢棄物處理與再利用”，台南區農業改良場，網址：

<http://www.tndais.gov.tw/Soil/b1.htm>，2006。

蔡啟明，賴重光，黃家明，黃珖玲，鄧瑞琴，”污泥滲配製磚之可行性研究”，第十七屆廢棄物處理技術研討會論文集，台南，pp.2-142-2-153，2002。

鄭智和，”淨水污泥再利用”，經濟部工業局資源化產業資訊，2005。

謝寅雲，”淨水污泥/工業廢水污泥之燒結資源化研究”，碩士論文，國立台灣大學環境工程研究所，2001。

簡光勵、黃淑貞，”水庫污泥應用燒結技術製成建築用磚之可行性研究”，學士論文，逢甲大學環境工程與科學系，2003。

謝惠子，”黃金稻田的秘密—雲林稻殼氣化發電廠”，能源報導，pp.8-10，2004。

蘇南，陳金獅，”廢玻璃在瀝青路面之應用”，港灣報導，pp.36-39，2001。

附錄 A

燒結試體之各項特性分析 結果



附表 1-1 添加廢玻璃燒結後試體之燒失量(%)

溫度 (°C)	800°C		900°C		1000°C		1100°C	
	Mean ^{*1}	S.D ^{*2}	Mean	S.D	Mean	S.D	Mean	S.D
0%	18.88	0.33	20.07	0.29	19.59	0.41	18.34	0.49
10%	17.78	0.39	16.57	0.32	19.71	0.67	17.80	0.14
20%	16.35	0.31	18.36	0.21	17.19	0.48	16.85	0.45
30%	18.54	0.31	19.35	0.13	17.18	0.33	17.45	0.26

註：*1 實驗數據為進行三重覆分析之平均結果。

*2 S.D.為標準偏差 $\sqrt{\frac{\sum(X_i - \bar{X})^2}{n-1}}$ 。

附表 1-2 添加稻殼燒結後試體之燒失量(%)

溫度(°C)	800°C		900°C		1000°C		1100°C	
	Mean ^{*1}	S.D ^{*2}	Mean	S.D	Mean	S.D	Mean	S.D
0%	18.88	0.33	20.07	0.29	19.59	0.41	18.34	0.49
10%	25.44	0.35	26.57	0.20	26.77	0.37	26.97	0.08
20%	33.36	0.97	33.38	0.96	33.60	0.30	33.56	0.26
25%	38.06	1.03	38.26	1.30	37.15	0.25	37.13	0.61

註：*1 實驗數據為進行三重覆分析之平均結果。

*2 S.D.為標準偏差 $\sqrt{\frac{\sum(X_i - \bar{X})^2}{n-1}}$ 。

附表 1-3 添加廢玻璃燒結後試體之體積收縮率(%)

溫度(°C)	800°C		900°C		1000°C		1100°C	
	Mean ^{*1}	S.D ^{*2}	Mean	S.D	Mean	S.D	Mean	S.D
0%	-1.05	0.13	-2.45	0.50	-10.23	0.57	-26.20	0.91
10%	-0.48	0.09	-1.77	0.28	-10.19	0.46	-15.77	1.65
20%	-0.34	0.09	-1.53	0.38	-10.05	0.51	-5.90	1.24
30%	-0.29	0.08	-1.50	0.24	-9.07	0.47	-3.68	0.82

註：*1 實驗數據為進行三重覆分析之平均結果。

*2 S.D.為標準偏差 $\sqrt{\frac{\sum(X_i - \bar{X})^2}{n-1}}$ 。

附表 1-4 添加稻殼燒結後試體之體積收縮率(%)

溫度(°C)	800°C		900°C		1000°C		1100°C	
	Mean ^{*1}	S.D ^{*2}	Mean	S.D	Mean	S.D	Mean	S.D
0%	-1.05	0.13	-2.45	0.50	-10.23	0.57	-26.20	0.91
10%	-0.82	0.23	-1.14	0.25	-3.20	0.35	-27.36	0.47
20%	1.72	0.47	-0.55	0.14	-1.58	0.28	-26.97	0.71
25%	4.84	1.09	2.12	0.56	-1.46	0.40	-26.23	0.75

註：*1 實驗數據為進行三重覆分析之平均結果。

*2 S.D.為標準偏差 $\sqrt{\frac{\sum(X_i - \bar{X})^2}{n-1}}$ 。

附表 1-5 添加廢玻璃燒結後試體之吸水率(%)

溫度(°C)	800°C		900°C		1000°C		1100°C	
	Mean ^{*1}	S.D ^{*2}	Mean	S.D	Mean	S.D	Mean	S.D
0%	28.14	2.30	31.04	0.14	22.74	2.91	9.04	0.08
10%	27.41	0.31	27.73	0.07	21.56	0.45	6.62	0.06
20%	26.25	0.84	24.32	0.11	17.03	0.26	8.50	0.16
30%	21.27	1.10	20.10	0.38	14.78	0.23	0.70	0.11

註：*1 實驗數據為進行三重覆分析之平均結果。

*2 S.D.為標準偏差 $\sqrt{\frac{\sum(X_i - \bar{X})^2}{n-1}}$ 。

附表 1-6 添加稻殼燒結後試體之吸水率(%)

溫度(°C)	800°C		900°C		1000°C		1100°C	
	Mean ^{*1}	S.D ^{*2}	Mean	S.D	Mean	S.D	Mean	S.D
0%	28.14	2.30	31.04	0.14	22.74	2.91	9.04	0.08
10%	36.72	0.79	38.01	0.21	32.82	0.28	12.65	0.30
20%	N.D. ^{*3}	N.D.	55.46	0.50	50.76	0.08	27.43	0.96
25%	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	59.96	0.99	36.28	0.19

註：*1 實驗數據為進行三重覆分析之平均結果。

*2 S.D.為標準偏差 $\sqrt{\frac{\sum(X_i - \bar{X})^2}{n-1}}$ 。

*3 N.D.表示燒結試體無法成型或崩裂，無法測得吸水率。

附表 1-7 添加廢玻璃燒結後試體之抗壓強度(kgf/cm²)

溫度(°C)	800°C		900°C		1000°C		1100°C	
	Mean ^{*1}	S.D ^{*2}	Mean	S.D	Mean	S.D	Mean	S.D
0%	5.18	1.19	21.19	0.87	98.95	1.00	859.53	151.37
10%	5.22	0.69	30.01	1.00	153.27	8.34	574.07	83.00
20%	10.54	1.34	38.46	6.63	229.67	19.39	386.66	110.79
30%	12.78	1.72	68.89	2.13	233.15	56.76	318.68	30.83

註：*1 實驗數據為進行三重覆分析之平均結果。

*2 S.D.為標準偏差 $\sqrt{\frac{\sum(X_i - \bar{X})^2}{n-1}}$ 。

附表 1-8 添加稻殼燒結後試體之抗壓強度(kgf/cm²)

溫度(°C)	800°C		900°C		1000°C		1100°C	
	Mean ^{*1}	S.D ^{*2}	Mean	S.D	Mean	S.D	Mean	S.D
0%	5.18	1.19	21.19	0.87	98.95	1.00	859.53	151.37
10%	2.46	0.20	5.79	0.32	24.66	1.13	254.20	18.11
20%	1.27	0.03	2.15	0.21	5.47	0.32	59.30	6.49
25%	N.D. ^{*3}	N.D.	1.27	0.00	2.60	0.31	25.34	1.49

註：*1 實驗數據為進行三重覆分析之平均結果。

*2 S.D.為標準偏差 $\sqrt{\frac{\sum(X_i - \bar{X})^2}{n-1}}$ 。

*3 N.D.表示燒結試體無法成型，無法測得抗壓強度。

附表 1-9 添加廢玻璃燒結後試體之密度(g/cm³)

溫度(°C)	800°C		900°C		1000°C		1100°C	
	Mean ^{*1}	S.D ^{*2}	Mean	S.D	Mean	S.D	Mean	S.D
0%	1.45	0.04	1.49	0.01	1.64	0.02	2.10	0.01
10%	1.51	0.02	1.54	0.01	1.71	0.02	1.84	0.04
20%	1.54	0.02	1.59	0.01	1.82	0.02	1.74	0.02
30%	1.68	0.01	1.68	0.05	1.78	0.02	1.72	0.02

註：*1 實驗數據為進行三重覆分析之平均結果。

*2 S.D.為標準偏差 $\sqrt{\frac{\sum(X_i - \bar{X})^2}{n-1}}$ 。

附表 1-10 添加稻殼燒結後試體之密度(g/cm³)

溫度(°C)	800°C		900°C		1000°C		1100°C	
	Mean ^{*1}	S.D ^{*2}	Mean	S.D	Mean	S.D	Mean	S.D
0%	1.45	0.04	1.49	0.01	1.64	0.02	2.10	0.01
10%	1.24	0.01	1.26	0.00	1.27	0.01	1.70	0.02
20%	0.96	0.01	1.02	0.01	1.01	0.01	1.37	0.01
25%	0.88	0.02	0.87	0.02	0.93	0.01	1.23	0.01

註：*1 實驗數據為進行三重覆分析之平均結果。

*2 S.D.為標準偏差 $\sqrt{\frac{\sum(X_i - \bar{X})^2}{n-1}}$ 。

附表 1-11 添加廢玻璃燒結後試體之洗淨濁度(NTU)

溫度(°C)	800°C		900°C		1000°C		1100°C	
	Mean ^{*1}	S.D ^{*2}	Mean	S.D	Mean	S.D	Mean	S.D
0%	267.07	15.21	63.23	6.48	23.36	3.40	2.33	0.49
10%	93.22	14.21	38.07	7.70	10.33	1.76	1.99	0.44
20%	68.57	10.54	33.07	6.46	4.53	0.90	1.86	0.28
30%	61.13	9.74	13.49	3.35	2.96	0.55	2.09	0.12

註：*1 實驗數據為進行三重覆分析之平均結果。

*2 S.D.為標準偏差 $\sqrt{\frac{\sum(X_i - \bar{X})^2}{n-1}}$ 。

附表 1-12 添加稻殼燒結後試體之洗淨濁度(NTU)

溫度(°C)	800°C		900°C		1000°C		1100°C	
	Mean ^{*1}	S.D ^{*2}	Mean	S.D	Mean	S.D	Mean	S.D
0%	267.07	15.21	63.23	6.48	23.36	3.4	2.33	0.49
10%	286.58	19.20	126.12	11.31	17.57	2.08	7.76	0.77
20%	N.D. ^{*3}	N.D.	138.96	13.08	24.39	2.66	7.56	0.59
25%	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	34.08	4.19	7.68	0.53

註：*1 實驗數據為進行三重覆分析之平均結果。

*2 S.D.為標準偏差 $\sqrt{\frac{\sum(X_i - \bar{X})^2}{n-1}}$ 。

*3 N.D.表示燒結試體無法成型或崩裂，無法測得洗淨濁度。

附表 1-13 添加廢玻璃燒結後試體之鹽酸可溶率(%)

溫度(°C)	800°C		900°C		1000°C		1100°C	
	Mean ^{*1}	S.D ^{*2}	Mean	S.D	Mean	S.D	Mean	S.D
0%	5.19	0.11	4.5	0.68	1.85	0.11	0.51	0.09
10%	3.2	0.40	3.65	0.29	1.35	0.49	0.42	0.05
20%	2.42	0.30	2.8	0.56	0.85	0.13	0.24	0.01
30%	1.81	0.31	2.43	0.41	0.2	0.03	0.22	0.02

註：*1 實驗數據為進行三重覆分析之平均結果。

*2 S.D.為標準偏差 $\sqrt{\frac{\sum(X_i - \bar{X})^2}{n-1}}$ 。

附表 1-14 添加稻殼燒結後試體之鹽酸可溶率(%)

溫度(°C)	800°C		900°C		1000°C		1100°C	
	Mean ^{*1}	S.D ^{*2}	Mean	S.D	Mean	S.D	Mean	S.D
0%	5.19	0.11	4.5	0.68	1.85	0.11	0.51	0.09
10%	12.9	0.94	6.5	0.47	2.3	0.14	0.85	0.23
20%	N.D. ^{*3}	N.D.	8.23	0.17	3.24	0.43	1.54	0.25
25%	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	4.56	0.38	2.13	0.21

註：*1 實驗數據為進行三重覆分析之平均結果。

*2 S.D.為標準偏差 $\sqrt{\frac{\sum(X_i - \bar{X})^2}{n-1}}$ 。

*3 N.D.表示燒結試體無法成型或崩裂，無法測得鹽酸可溶率。

附表 1-15 添加廢玻璃製成之多孔性材料-單一金屬不同時間下之吸附變化(mg/g)

分鐘 (min)	10		30		50		60		120		240		480		960	
	Mean ^{*1}	S.D. ^{*2}	Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.
Pb	9.62	2.45	9.76	2.54	8.05	1.77	8.72	1.53	17.29	1.40	16.89	3.61	17.27	1.35	15.07	1.02
Cd	13.36	2.17	17.39	0.63	20.14	1.17	21.05	3.51	19.51	1.98	18.26	2.48	16.67	1.28	16.54	4.07
Cr	84.19	4.06	78.69	0.84	58.61	7.68	67.02	6.05	51.04	8.22	48.36	2.36	51.05	6.45	38.41	3.41
Cu	10.57	2.91	14.72	0.56	17.34	1.60	15.77	2.17	15.77	1.40	15.68	2.99	18.41	3.72	19.09	2.01
Zn	10.06	1.04	10.06	1.07	10.68	3.52	8.39	1.54	7.37	2.09	8.02	2.05	9.72	2.90	9.05	1.03

註：*1 實驗數據為進行三重覆分析之平均結果。

*2 S.D.為標準偏差 $\sqrt{\frac{\sum(X_i - \bar{X})^2}{n-1}}$ 。

附表 1-16 添加稻殼製成之多孔性材料-單一金屬不同時間下之吸附變化(mg/g)

分鐘 (min)	10		30		50		60		120		240		480		960	
	Mean ^{*1}	S.D. ^{*2}	Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.
Pb	26.21	5.33	25.89	4.14	35.93	2.69	42.76	1.93	22.05	2.10	28.58	5.85	33.17	6.64	27.49	1.27
Cd	16.39	0.65	16.37	5.02	15.09	2.03	13.02	2.72	15.05	2.50	11.67	3.17	11.19	0.86	12.67	4.44
Cr	47.90	11.13	48.47	4.01	42.04	2.25	38.13	12.19	29.80	3.24	38.81	0.45	33.42	5.94	26.40	1.91
Cu	27.57	5.42	26.39	5.73	27.49	9.00	26.79	3.42	26.74	3.13	33.78	3.11	31.81	2.81	31.37	0.58
Zn	10.06	2.67	14.08	2.75	13.44	1.62	13.66	1.67	14.68	2.33	15.13	3.03	14.34	4.19	13.71	0.57

註：*1 實驗數據為進行三重覆分析之平均結果。

*2 S.D.為標準偏差 $\sqrt{\frac{\sum(X_i - \bar{X})^2}{n-1}}$ 。

附表 1-17 添加廢玻璃製成之多孔性材料-混合金屬不同時間下之吸附變化(mg/g)

分鐘 (min)	10		30		50		60		120		240		480		960	
	Mean ^{*1}	S.D. ^{*2}	Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.
Pb	29.82	4.62	28.47	3.02	29.21	5.16	35.71	0.57	37.60	2.39	37.76	9.79	44.20	3.66	37.94	2.55
Cd	7.71	1.55	10.72	1.52	10.39	2.26	14.82	0.59	17.12	0.92	16.38	1.58	16.41	1.14	16.45	0.60
Cr	16.75	4.49	15.41	2.13	15.44	3.27	17.52	2.56	10.07	1.00	10.04	2.31	15.07	5.05	10.41	0.59
Cu	23.81	4.17	24.44	4.47	26.85	2.66	27.29	2.70	25.19	2.75	27.61	4.36	30.81	5.09	28.20	3.63
Zn	4.69	0.56	5.03	1.14	5.37	2.09	6.40	1.55	4.37	3.09	5.35	1.52	5.36	1.17	8.05	1.99

註：*1 實驗數據為進行三重覆分析之平均結果

*2 S.D.為標準偏差 $\sqrt{\frac{\sum(X_i - \bar{X})^2}{n-1}}$

附表 1-18 添加稻殼製成之多孔性材料-混合金屬不同時間下之吸附變化(mg/g)

分鐘 (min)	10		30		50		60		120		240		480		960	
	Mean ^{*1}	S.D. ^{*2}	Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.
Pb	39.86	7.38	43.27	12.97	51.93	7.99	48.70	5.21	47.49	3.76	48.70	13.27	50.21	4.95	59.25	5.17
Cd	21.77	2.11	14.10	2.69	13.40	0.58	13.10	0.97	13.71	3.50	15.81	2.04	14.39	1.16	14.73	1.51
Cr	3.02	1.01	6.37	1.52	5.36	1.16	6.04	1.00	4.35	0.58	5.38	0.55	6.02	1.73	6.36	0.57
Cu	33.48	2.98	33.91	3.91	34.50	1.67	33.59	3.35	32.10	1.67	35.67	2.11	38.17	7.31	34.82	3.27
Zn	6.03	2.03	6.37	2.31	5.36	1.54	6.38	0.57	5.02	1.00	6.07	1.09	6.03	1.75	6.69	1.15

註：*1 實驗數據為進行三重覆分析之平均結果。

*2 S.D.為標準偏差 $\sqrt{\frac{\sum(X_i - \bar{X})^2}{n-1}}$ 。

