



逢甲大學學生報告 ePaper

污泥類廢棄物燒結製成綠色材料之應用評估

作者：顏慧茹

系級：環境工程與科學學系研究所碩士班一年級

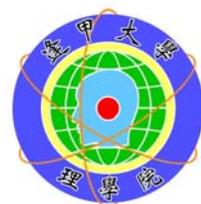
學號：M9701368

開課老師：江康鈺

課程名稱：資源回收與管理

開課系所：碩士班一年級

開課學年：97 學年度 第 2 學期



中文摘要

近年來環境議題日益受到重視，污泥為數量龐大且難以處置之廢棄物，本報告整理有關污泥燒結資源化之文獻，進行污泥及其燒結產品特性之介紹，可發現以淨水污泥燒結製成之玻璃陶瓷可獲得最大之抗壓強度，並且其特性可與商業產品進行比較。淨水污泥與下水污泥，以及黏土與下水污泥燒結製成之陶粒結晶相相似，可獲得最佳燒結溫度為 1000°C ，並且陶粒特性會受到基礎氧化物含量影響，即 Fe_2O_3 含量越高抗壓強度越佳， CaO 含量越高則抗壓強度越差。造紙污泥由於含有高含量之 CaO ，單獨燒結產物會呈現破裂狀，無法進行特性實驗，因此，必須與燃煤飛灰共同燒結，其中以 75% 造紙污泥及 25% 燃煤飛灰之配比獲得之陶瓷特性最佳。Jarosite 為鋅礦濕式冶金產生之污泥廢棄物，利用其製成玻璃陶瓷，於空氣及氮氣環境下，粉末樣品結晶成長活化能約為 300kJ/mol ，Avrami 參數於空氣環境下約為 1，氮氣環境下約為 3，這是由於 Jarosite 含有高比例之 Fe_2O_3 ，因此，熱處理期間 Fe^{2+} 氧化成 Fe^{3+} ，導致結晶化受到抑制、結晶溫度提升，並且改變反應次數。

本報告針對污泥類廢棄物燒結資源化再利用文獻之產物特性及應用進行探討，發現以燒結技術處理污泥廢棄物，不僅可使廢棄物無害化與資源化，亦可降低廢棄物最終處置量及天然資源耗用量，達到永續發展之目標。

關鍵字：污泥、燒結、資源化

目 次

摘要.....	01
目錄.....	02
前言.....	03
污泥特性介紹.....	04
燒結技術介紹.....	05
污泥燒結處理技術之應用.....	06
結論.....	13
參考文獻.....	14



一、前言

目前，國內外越來越重視環境之議題，並且已發展出許多降低或者減少廢棄物最終處置數量的新環境友善技術，例如利用廢棄物製造生產各種產品。而污泥廢棄物的再利用技術亦為增加再利用率的一種方式，其中，以燒結技術處理污泥不僅可使廢棄物資源化，亦可符合政府所推行之零廢棄政策。

根據台灣自來水公司統計資料，自來水供水人口普及率自民國 70 年底之 63.92% 增加至民國 97 年底之 90.70%。近年來，經濟發展快速，國民生活水準相對提升，民生用水量隨之增加，衍生之淨水污泥產量因此俱增，由台灣自來水公司公告資料顯示，目前淨水污泥年產量平均約 12.5 萬公噸，現階段的淨水污泥大多是以衛生掩埋方式進行處置，在國外，如中國，淨水污泥通常是排放至污水下水道，而後流入地表水中，雖然此方法成本及技術要求低，卻較不被環境所接受 (Zou, 2009)，而日本，淨水污泥可用於土壤改良，以及添加至磚與水泥中作為替代原料，然而於東京約有三分之一的淨水污泥仍然未被再利用 (Toya, 2007)。淨水污泥的數量主要取決於水處理的各個操作單元，以及原水的品質。其是由無機混合物組成，含有高量的 SiO_2 與 Al_2O_3 ，並且帶有少量的 Fe_2O_3 ，可作為取代黏土之燒結材料，亦可作為製造玻璃陶瓷之原料。

此外，國內目前亦積極加速推行下水道建設，下水道普及率由民國 91 年之 9.87% 增加至民國 97 年之 17.91% (內政部營建署)，下水污泥產生量亦隨之提昇，由民國 92 年之 18 萬 m^3/day 增加至民國 98 年 40 萬 m^3/day ，未來政府將每年投入 300 億經費建設污水下水道，達到用戶接管普及率每年提升 3% 之目標，因此可預期未來下水污泥產生量將與日俱增。目前，國內外已針對下水污泥燒結進行許多相關研究，包含中國利用下水污泥及黏土生產陶粒，並計劃用於建築原料中 (Zou, 2009)，而國內，陳氏等人利用及下水污泥高有機成分含量之特性，與淨水污泥共同燒結製成輕質磚材。(陳氏, 2009)

而造紙污泥依來源可分為生物污泥、鹼回收白泥和脫墨污泥。生物污泥的成分一般為細小纖維、木質素及微生物和一些有機物質。脫墨污泥的成分主要是纖維素纖維以及原來紙中的填料和塗料，包含一些短纖維、粗渣和大部分油墨粒子。由於造紙污泥主要組成元素為 Al、Mg、Si 及 Ca，因此可作為陶瓷製造之原料 (Furlani, 2008)。

鋅礦濕式冶金產生之污泥 (Jarosite, 黃鉀鐵石廢棄物) 為富含鐵成分之矽酸鹽物質。由於富含鐵之玻璃組成成分，經高溫熔融後，可獲得具有低黏性及高結晶化之產品，通常具有高抗磨損與抗腐蝕，以及高機械強度之特性，能夠用以製造玻璃陶瓷 (Karamanov, 2000)。

綜合以上文獻，可發現廢棄污泥燒結資源化之潛力，因此，本報告整理有關污泥廢棄物燒結之文獻，探討污泥及其燒結產物之特性，並針對污泥廢棄物再利用製成綠色材料之應用性進行討論。

二、 污泥特性介紹

表 1 為各國之淨水污泥及黏土組成成分。由表可知淨水污泥主要組成為 SiO_2 、 Al_2O_3 及 Fe_2O_3 ，與黏土性質相似，因此淨水污泥可作為陶粒及玻璃陶瓷之天然黏土替代原料。表 2 為下水污泥及工業污泥之組成成分，可發現下水污泥之無機物組成成分較低，這是由於下水污泥多為有機成分，可達 60% 以上(Zou, 2009)；而造紙污泥以 CaO 含量最高，可能導致燒結溫度的提昇，並且於燒結期間產生不利於產品之特性之化合物，進而影響產品之強度；鋅礦濕式冶金產生之廢棄污泥 Jarosite，其含有高量之 Fe_2O_3 (包含 Fe^{2+} 及 Fe^{3+})，將影響熱處理期間，產品之結晶狀況

表 1 淨水污泥及黏土之成分組成(wt.%)

化學組成	中國哈爾濱*1 (淨水污泥)	日本東京*2 (淨水污泥)	台灣*3 (淨水污泥)	巴西*4 (黏土)	保加利亞*5 (黏土)
SiO_2	40.61	53.6	53.6	56.29	59.4
Al_2O_3	27.36	20.9	20.9	27.10	20.3
Fe_2O_3	6.99	6.6	6.6	1.60	4.9
CaO	2.62	0.3	0.3	---	1.2
MgO	1.89	1.9	1.9	---	1.6
P_2O_5	---	---	---	---	---
K_2O	1.28	---	---	0.18	0.6
Na_2O	1.05	---	---	0.09	0.4
TiO_2	---	---	---	0.7	---

*1 : [Zou]

*2 : [Toya,2007]

*3 : [Lin,2006]

*4 : [Karamanova,2009]

*5 : [Menezes,2009]

表 2 下水污泥及工業污泥之成分組成(wt.%)

化學組成	中國哈爾濱*1 (下水污泥)	義大利*6 (造紙污泥)	保加利亞*7 (Jarosite)
SiO ₂	16.28	29.1	3.7
Al ₂ O ₃	6.35	16.45	0.3
Fe ₂ O ₃	5.15	2.45	49.3
CaO	4.10	43.13	0.1
MgO	1.67	2.67	0.2
P ₂ O ₅	1.65	<0.01	---
K ₂ O	1.12	0.05	---
Na ₂ O	---	0.03	---
TiO ₂	---	0.42	---
SrO	---	0.22	---
SnO	---	0.06	---
PbO	---	---	3.6
ZnO	---	---	5.6

*1 : [Zou]

*7 : [Karamanov,2000]

*6 : [Furlani,2008]

三、 燒結技術介紹

燒結為從室溫把成形體加熱，在最高溫度保持一定時間後，冷卻到室溫的工程，在此過程將有以下因子影響到細微結構：(山口, 1993)

- (1) 粒徑大小：一般越細的粉末，燒結體內會有較多的孔隙-固體界面，較有利於表面擴散，頸部成長快，因而提高燒結效率，因此減小顆粒大小會增加燒結的效果。
- (2) 內在組成：內在雜質及添加計的種類及多寡會影響到缺陷的多少。
- (3) 升溫速率：升溫速率主要影響燒結體之緻密性。在燒結過程中，低溫時是以表面擴散為主，而其不會造成收縮，而在高溫下則以體擴散及晶界擴散為主。(圖 1)



圖1 表面擴散(左圖)、體擴散及晶界擴散(右圖)

- (4) 燒結溫度：燒結溫度會影響細微的構造，燒結溫度越高，變化速度越大。(緻密化、粒徑成長…等變化)

- (5) 燒結時間：燒結時間是只達到燒結溫度後，維持恆溫的時間，燒結溫度與燒結時間有呈反比的關係，通常欲達到相同的燒結狀態，若提高燒結溫度，則可縮短燒結時間，若溫度較低，則延長燒結時間即可。
- (6) 氣氛：若氣氛可與燒結體作用，將直接影響到缺陷的多少以及移動。
- (7) 壓力：若使用加壓燒結，可於較低溫達到緻密化之效果。而在成型壓力方面，成型是指藉由外在壓縮力量而改變粉體的形狀，並增加成型體之密度，成型壓力的大小對成型體的密度有相對大的關係，成型壓力越大，試體填充密度就越高，顆粒間空隙就越小，接觸點相對也就多，燒結後燒結體的強度及密度也就越高。

四、 污泥燒結處理技術之應用

燒結處理是指粉體成型後，為了提高壓胚或鬆散粉末體的強度，在低於主要成分熔點的某一溫度下進行的熱處理。通常燒結會產生緻密化之現象，可獲得較高密度及強度的產品。本報告依不同來源之污泥，整理其燒結技術之應用。

4.1 淨水污泥燒結產物之應用特性—玻璃陶瓷(Toya, 2007)、陶粒(Zou, 2009)

Toya 等人利用 36.4% 淨水污泥、43.3 % CaCO_3 及 20.3% 廢玻璃，以 1300°C 熔融水淬後，獲得粒狀玻璃，再經研磨、篩選與成型，於 700°C - 1000°C 燒結，製成玻璃及玻璃陶瓷樣品，如圖 2 所示，由圖可發現，隨著燒結溫度增加，樣品表面變得光滑，並且形狀趨於圓形。表 3 為 Toya 等人以 1000°C 燒結製造之玻璃陶瓷與其他不同文獻之玻璃陶瓷各種特性比較，可發現 Toya 等人製造之玻璃陶瓷有較高的體密度、抗彎強度及鹼性溶液的化學耐用度，而硬度、熱膨脹係數及酸性溶液的化學耐用度則較差。

整體而言，Toya 等人製造之玻璃陶瓷除酸性溶液化學耐用度之外，其特性皆可與商業 NEOPAIRES 產品進行比較。

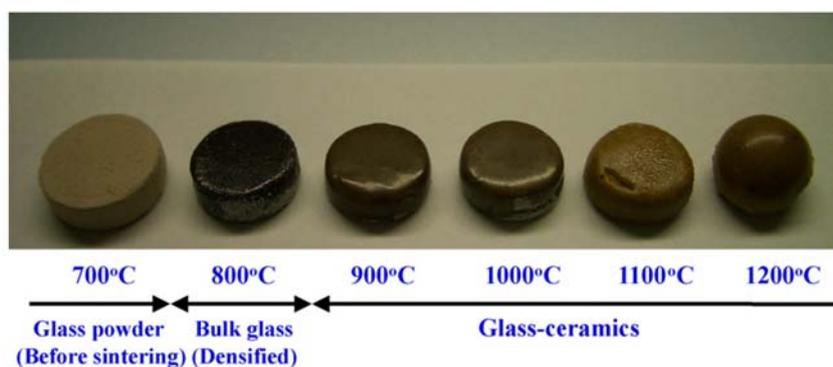


圖 2 不同溫度燒結之玻璃及玻璃陶瓷樣品(Toya, 2007)

表 3 不同文獻之玻璃陶瓷各種特性之比較(Toya, 2007)

項目	玻璃 (700°C)	玻璃陶瓷 (1000°C)	Kira-CaCO ₃	Kira Dolomite	Kira Paper Sludge	NEOPIRES
密度(g/cm ³)	2.83	2.81	2.56	--	2.46-2.50	2.7
抗彎強度(MPa)	70±1.1	99±1.3	81±0.8	73±1.4-130±1.4	63±0.5-66±0.3	50
維氏硬度(GPa)	6.5±0.14	5.5±0.7	6.6±0.3	7.4±0.8-7.6±0.5	6.0±0.1-6.4±0.3	5.2
熱膨脹係數(10 ⁻⁶ /K)	8.5	7.2	5.2	4.7-6.7	6.3-8.1	6.1
酸重量損失 (mg/cm ²)	41±1.3	17.7±2.5	0.31±0.2	0.4-1.3	4.7±0.4-8.4±0.2	3.4
鹼重量損失 (mg/cm ²)	0.91±0.5	0.23±0.5	1.6±0.3	1.4-2.3	0.71±0.2-0.85±0.4	1.3

Zou 等人利用淨水污泥、下水污泥及水玻璃，以燒結溫度 1000°C 製成陶粒，並探討基礎氧化物(Fe₂O₃、CaO 及 MgO)含量對陶粒特性之影響。經初步實驗結果發現，以 1000°C 燒結之陶粒，當 Fe₂O₃、CaO 及 MgO 含量分別為 5-8%、2.75-7% 及 1.6-4% 時，有最佳特性(密度高、孔隙及吸水率低)，如圖 3 所示，故本文獻後續實驗以此參數範圍之基礎氧化物含量進行研究。

實驗結果發現，Fe₂O₃ 含量增加，會導致在較高的燒結溫度(1000°C)下，有較複雜晶相(ferrosilite magnesian，鎂質斜鐵輝石)形成，並且較高的 Fe₂O₃ 含量，亦可得到產較緻密且孔洞較少之燒結體，而於抗壓強度方面，由於 Fe³⁺ 之作用可能與 Al³⁺ 相似，可替代母體離子 Si⁴⁺，包覆於矽酸鹽結構中，增加結構體強度，因此，抗壓強度將隨著 Fe₂O₃ 含量增加而增加；而 CaO 含量增加，會使得 Na-Ca 長石及無晶相增加，石英及藍晶石減少，並且在微結構方面產生孔洞，進而對抗壓強度造成影響，此外，由於 Si⁴⁺ 被 Al³⁺ 替代，Ca²⁺ 可作為產生電中性之金屬離子，結合於矽酸鹽網絡縫隙中，然而過多的 CaO 會超過電中性所需要之離子，因此造成結構體強度之減弱；MgO 含量增加，由於液-固態相反應，會造成無晶相增加，因此微結構方面可觀察到玻璃狀之塊狀結晶，而抗壓強度方面，Mg²⁺ 可能作為金屬離子取代母體離子(即 Ca²⁺) 包覆於矽酸鹽結構中。由於 +2 母體離子的替代，不會改變電子中性的平衡，因此結構強度不會受到 MgO 含量改變而造成影響。圖 4 為不同含量基礎氧化物之陶粒抗壓強度變化。

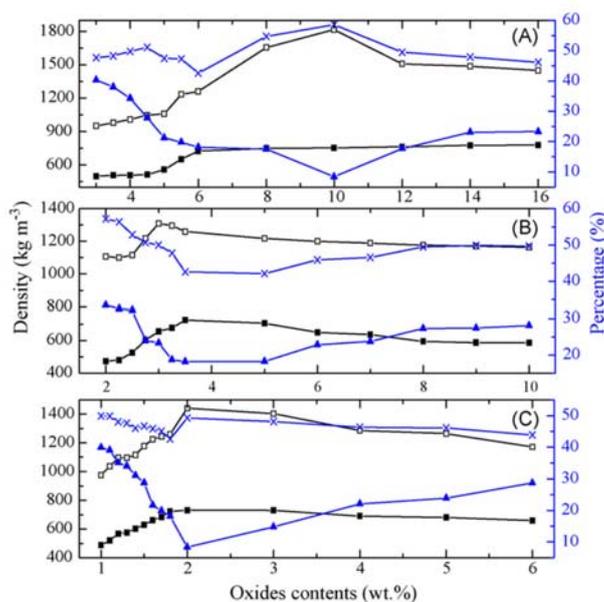


圖 3 基礎氧化物對於陶粒特性之影響(Zou)

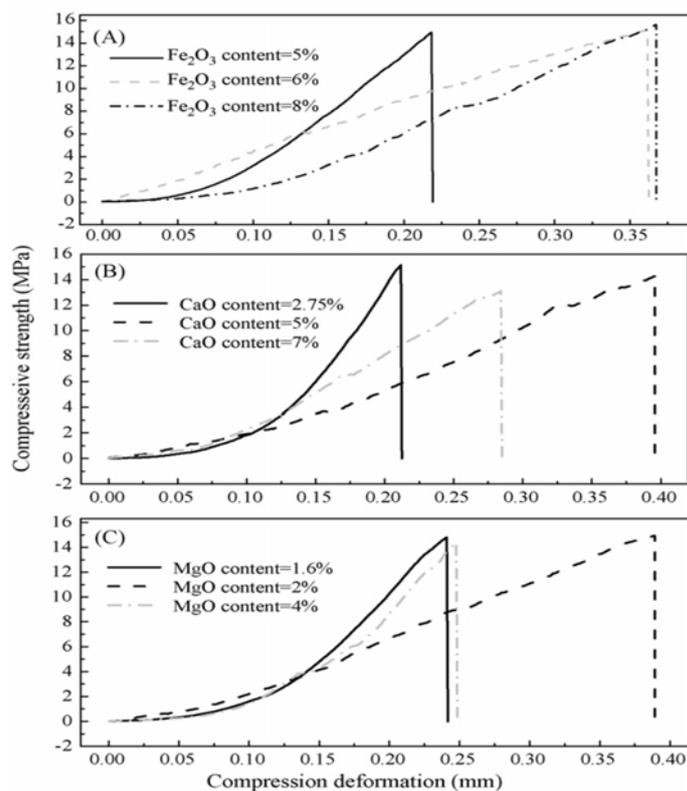


圖 4 陶粒之抗壓強度變化(Zou, 2009)

4.2 下水污泥燒結產物之應用特性—陶粒(Xu, 2008)、磚材(陳氏, 2009)

Xu 等人利用下水污泥、粘土及水玻璃共同燒結製造陶粒，主要目的為探討燒結陶粒之最佳溫度，以污泥/黏土=33wt% 進行混合，燒結溫度為 1000°C 時，陶粒的主要晶相為藍晶石、石英及鈉長石，次要晶相為莫來石與矽線石，發現以 1000°C 與 1100°C 燒結之陶粒晶相無明顯變化，故考慮成本，認為 1000°C 為最佳燒結溫度。圖 5 為以不同燒結溫度所產生之陶粒。表 4 為以不同燒結溫度所產生陶粒之主要及次要晶相。

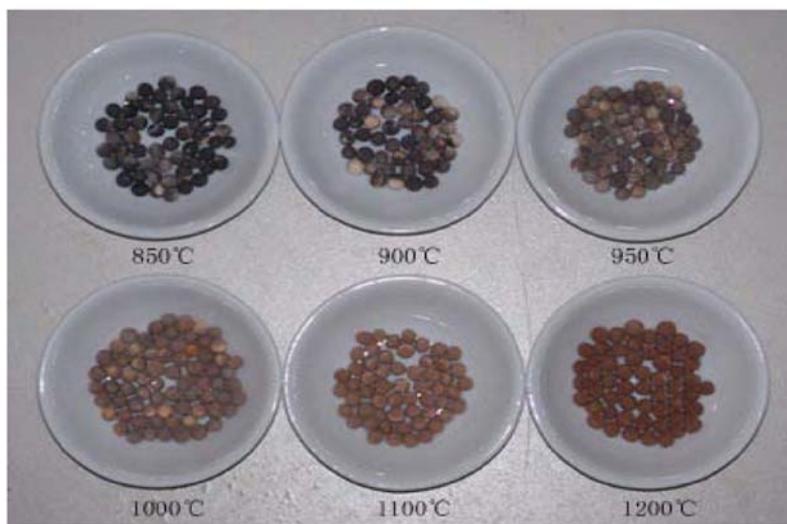


圖 5 不同燒結溫度所產生之陶粒(Xu, 2008)

表 4 不同燒結溫度所產生陶粒之主要及次要晶相(Xu, 2008)

燒結溫度(°C)	主要晶相	次要晶相
850	石英(SiO ₂) 藍晶石(Al ₂ SiO ₅)	歪長石((Na,K)AlSi ₃ O ₈)
900	石英(SiO ₂) 藍晶石(Al ₂ SiO ₅) 矽酸鈉(Na ₂ Si ₂ O ₅)	鈉長石(NaAlSi ₃ O ₈)
950	石英(SiO ₂) 藍晶石(Al ₂ SiO ₅)	莫來石(Al ₂ O ₃ .SiO ₂)
1000	藍晶石(Al ₂ SiO ₅) 石英(SiO ₂) 鈉長石(NaAlSi ₃ O ₈)	莫來石(Al ₂ O ₃ .SiO ₂) 矽線石(Al ₂ SiO ₅)
1100	藍晶石(Al ₂ SiO ₅) 鈉長石(NaAlSi ₃ O ₈) 石英(SiO ₂)	莫來石(Al ₂ O ₃ .SiO ₂)
1200	莫來石(Al ₂ O ₃ .SiO ₂) 石英(SiO ₂) 藍晶石(Al ₂ SiO ₅)	鈉長石(NaAlSi ₃ O ₈) 矽線石(Al ₂ SiO ₅)

國內陳氏等人利用下水污泥與淨水污泥作為原料製造磚材。圖 6 及圖 7 分別為以 1050°C 燒結，未添加及添加 50% 下水污泥之產物 SEM 圖，可發現由於下水污泥含有高比例之有機成分，在高溫燒結過程中，有機物分解產生氣體釋放，造成多孔性結構產生，進而獲得輕質化磚材。其中以 1080°C 及 1100°C，各別添加下水污泥 40~60% 及 60~70% 試體，密度及強度皆符合輕質化磚材之應用規範。並且所有燒結產品經 TCLP 試驗，燒結產物之重金屬溶出濃度，皆符合法規標準。

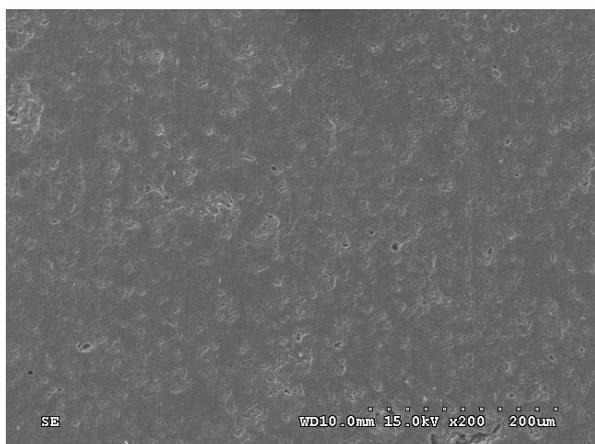


圖 6 未添加下水污泥之燒結產物 SEM 圖

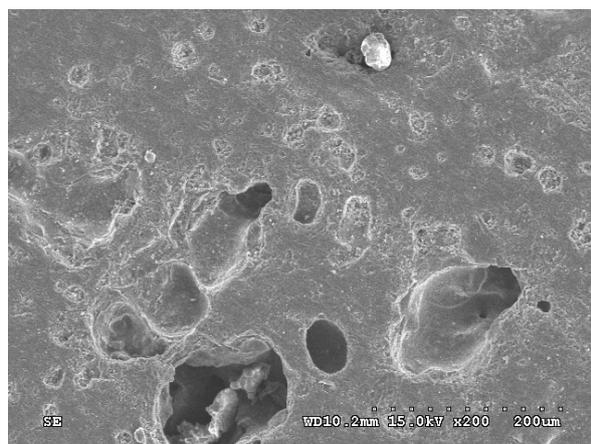


圖 7 添加 50% 下水污泥燒結產物 SEM 圖

4.3 造紙污泥燒結產物之應用特性—陶瓷(Furlani, 2008)

Furlani 等人利用以 800°C 鍛燒 2hr 後之造紙污泥灰與燃煤飛灰製造陶瓷，圖 8 為不同配比之燒結陶瓷之外觀變化，最右邊之樣品為單獨使用造紙污泥灰燒結之樣品，可發現樣品表面呈現破裂狀，這是由於造紙污泥灰含有大量高熔點之組成成份，尤其 CaO 達 43.13%，高量的 CaO 會與 SiO₂ 於燒結期間反應形成 2CaO · SiO₂，此物質於冷卻時體積會產生改變，引起燒結體延續的碎裂，因此無法單獨使用造紙污泥灰燒結製造陶瓷。故加入燃煤飛灰與造紙污泥共同燒結，實驗結果如表 5 所示，可發現 75%造紙污泥與 25%之配比，於燒結溫度 1190°C，可獲得最佳特性之產物，即軸向收縮 15.6%、徑向收縮 14.6%、密度 2.51g/cm³、維氏硬度 6.3±0.3GPa、破裂強度 67±3MPa，以及破壞韌性 2.1±0.1MPa/m。



圖 8 不同配比之燒結陶瓷之外觀變化(Furlani, 2008)

表 5 不同配比的造紙污泥與燃煤飛灰共同燒結之產品特性(Furlani, 2008)

燒結成分	燒結溫度 (°C)	軸向收縮 (%)	徑向收縮 (%)	密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	破裂強度 (MPa)	維氏硬度 (GPa)	破壞韌性 (MPa/m)
煤灰	1130	12.8	12.7	1.94	1.8	58±7	3.7±0.1	0.9±0.1
75%煤灰	1160	16.7	15.4	2.58	5.4	53±4	4.6±0.25	1.7±0.25
50%煤灰	1168	14.2	13.1	2.16	6.2	49±6	5.1±0.3	2.9±0.3
25%煤灰	1190	15.6	14.6	2.51	2.3	67±3	6.3±0.3	2.1±0.1
造紙污泥	1350	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.

N.D.=data not determined

4.4 鋅礦濕式冶金污泥燒結產物特性—玻璃陶瓷(Karamanov, 2000)

Karamanov 等人利用鋅礦濕式冶金產生之 Jarosite 廢棄物製造玻璃陶瓷。Jarosite 先以 800°C 鍛燒 2h，用以去除揮發份，所獲得之 Jarosite 與碎玻璃及碎花崗岩進行 1390°C-1450°C 熔融。由於 Jarosite 為富含鐵之廢棄物，因此 Karamanov 等人主要係針對富含鐵物質於熱處理期間之結晶化情形進行研究，計算結晶活化能 Ec 及結晶行為之 Avrami 參數，其中活化能是以 Kissinger 方程式獲得，Avrami 參數則是以 Ozawa 及 Augis-Bennet 方程式計算。研究結果顯示，針對不同環境下 (即氮氣及空氣) 之結晶化行為進行研究，可發現在空氣中之粉末樣品的結晶溫度較高，且活化能為 321 kJ/mol⁻¹，Avrami 參數約為 1，與二维拋物線或單方向的結晶成長有關，而空氣中塊狀樣品及氮氣中粉末樣品有相似的結晶化行為，活化能約為 300~321 kJ/mol⁻¹，Avrami 參數約為 3，與固定晶核上三維的結晶成長有關，

表示鐵氧化將限制玻璃粉末的結晶化，並改變反應狀態。圖 9 及圖 10 分別為不同樣品之活化能及 Avrami 參數，其中 P-air、B-air 及 P-N₂ 分別為粉末空氣中樣品、塊狀空氣中樣品及粉末氮氣中樣品。

最後，表6為以上污泥燒結資源化產品之統整。可發現利用淨水污泥和下水污泥燒結之陶粒，與利用黏土及下水污泥燒結之陶粒有相似的結晶相。而經過融熔後燒結之玻璃陶瓷有最佳之抗壓強度，達99MPa。

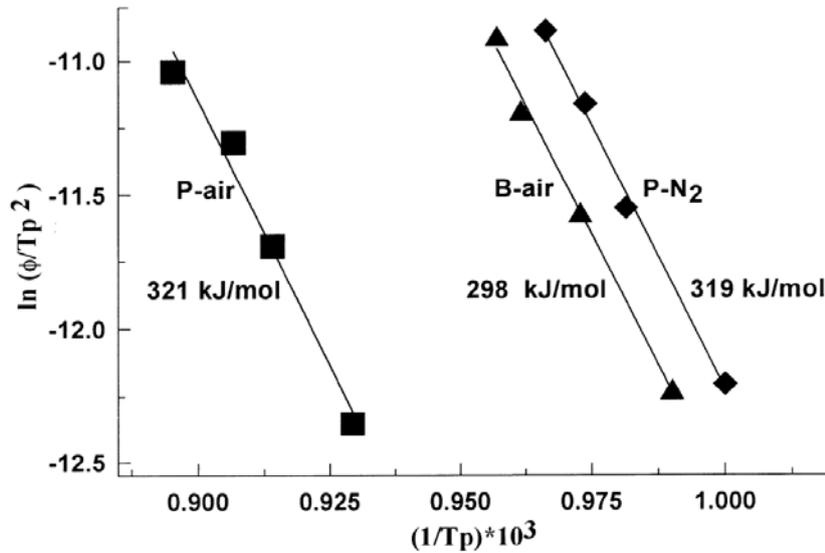


圖9 不同樣品之活化能(Karamanov, 2000)

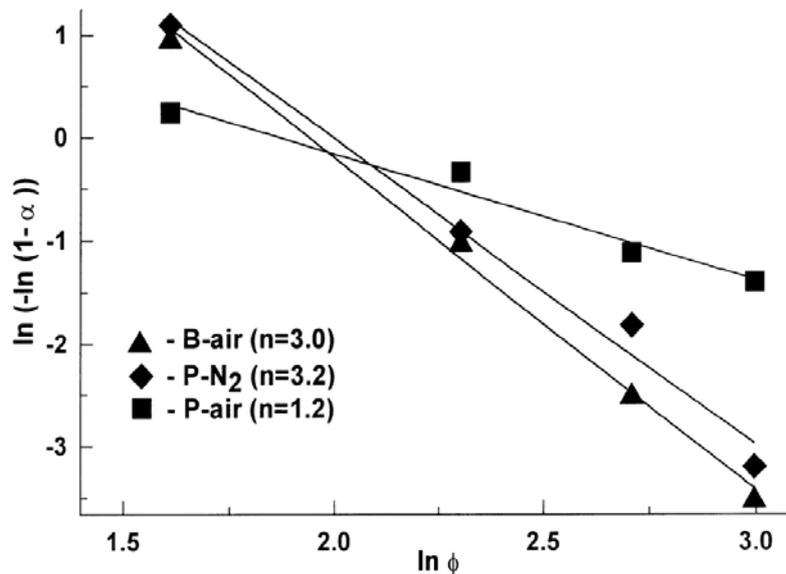


圖10 不同樣品之Avrami參數(Karamanov, 2000)

表 6 各文獻之污泥燒結產物之統整表

文獻	Toya, 2007	Zou	Xu, 2008	Furlani	Karamanov, 2000	陳氏
原料	淨水污泥	淨水污泥 下水污泥	下水污泥 黏土	造紙污泥	Jarosite	淨水污泥 下水污泥
產品	玻璃陶瓷	陶粒	陶粒	陶瓷	玻璃陶瓷	磚材
燒結溫度(°C)	1000	1000	1000	1190	---	1050、1080 1100
主要晶相	gehlenite、 wollastonite	quartz、 albite-anorthite、 kyanite	kyanite、quartz、 albite	gehlenite	pyroxene、 magnetite	quartz
吸水率(%)	---	10-40	---	2.3	---	1.13-37
密度(g/cm ³)	2.81	0.5-0.7	---	2.51	---	2.40-1.32
軸向收縮率(%)	---	---	---	15.6	---	---
徑向收縮率(%)	---	---	---	14.6	---	---
孔隙率(%)	---	45-60	---	---	---	2.72-48.66
抗壓強度(MPa)	99	13.13-15.67	---	67±3	---	190.30-4.46
破壞韌性(MPa/m)	---	---	---	2.1±0.1	---	---
硬度(GPa)	5.2	---	---	6.3±0.3	---	---
酸性溶液耐用度(mg/cm ²)	17.7	---	---	---	---	---
鹼性溶液耐用度(mg/cm ²)	0.23	---	---	---	---	---
活化能(kJ/mol ⁻¹)	---	---	---	---	300	---
Avrami參數	---	---	---	---	3	---



五、 結論

本報告整理有關污泥燒結資源化之文獻。污泥種類依其來源而有所異，本篇以淨水廠產生之淨水污泥、一般污水處理廠產生之下水污泥，以及工業製程產生之造紙污泥與鋅礦濕式冶金污泥進行討論，可得以下結論：

1. 淨水污泥主要組成爲 SiO_2 、 Al_2O_3 及 Fe_2O_3 ，與黏土性質相似，可作為陶粒及玻璃陶瓷之天然黏土替代原料。下水污泥大多為有機物質，可達 60% 以上；造紙污泥含有高量之 CaO ，達 43.13%；礦濕式冶金產生之廢棄污泥 Jarosite，其含有高量之 Fe_2O_3 (包含 Fe^{2+} 及 Fe^{3+})。
2. 燒結產品之特性會受到粒徑大小、內在組成、升溫速率、燒結溫度、燒結時間、氣氛及壓力之影響。
3. 利用淨水污泥燒結製成玻璃陶瓷，除酸性溶液耐用度外，其他特性皆可與商業玻璃陶瓷產品進行比較。而利用淨水污泥與下水污泥共同燒結製成陶粒，並探討其基礎氧化物對產品之影響，結果發現陶粒之抗壓強度隨 Fe_2O_3 含量增加而增加，隨 CaO 含量增加而減少，而 MgO 含量則對陶粒抗壓強度無明顯影響。
4. 利用下水污泥和粘土共同燒結製成陶粒，探討其最佳燒結溫度，發現燒結溫度為 1000°C 時，陶粒的主要晶相為藍晶石、石英及鈉長石，次要晶相為莫來石與矽線石，超過 1000°C 晶相無明顯變化，故認為 1000°C 為最佳燒結溫度。並且由於下水污泥為高有機含量之物質，有機物於燒結過程中，會產生氣體釋放，形成孔隙，因此使用下水污泥與淨水污泥共同燒結，可獲得密度及強度皆符合標準之輕質化磚材。
5. 利用造紙污泥燒結製成陶瓷之文獻，結果發現造紙污泥無法單獨製程陶瓷，必須與燃煤飛灰共同燒結，配比為 75% 造紙污泥與 25% 之樣品，於燒結溫度 1190°C ，具有最佳特性，即軸向收縮 15.6%、徑向收縮 14.6%、密度 $2.51\text{g}/\text{cm}^3$ 、維氏硬度 $6.3\pm 0.3\text{GPa}$ 、破裂強度 $67\pm 3\text{MPa}$ ，以及破壞韌性 $2.1\pm 0.1\text{GPa}$ 。
6. 利用濕式冶金過程產生之污泥(黃鉀鐵石廢棄物)製成玻璃陶瓷進行晶相形成之研究，由於黃鉀鐵石為富含鐵的物質，結晶化行為受到表面 Fe^{2+} 氧化變成 Fe^{3+} 的影響，使得結晶化溫度提升，並改變反應次數。
7. 綜合以上結論，可發現以燒結技術處理污泥類廢棄物，會受到不同污泥特性之影響。淨水污泥特性與粘土相似，可增加燒結產物之機械強度；下水污泥有機成分含量高，可做為輕質化產品之原料；造紙污泥 CaO 含量高，必須與其他物質共同燒結，才可獲得機械特性符合標準之綠色材料；鋅礦濕式冶金產生之 Jarosite 污泥，含有高比例之 Fe_2O_3 ，於空氣中燒結，氧化行為將影響產物之結晶化。因此以適當的原料組成及參數條件，燒結處理污泥類廢棄物，可獲得不同特性之燒結產物，進而使污泥廢棄物資源化，減少廢棄物最終處置量及天然資源耗用量。

參考文獻

Furlani, E., Brückner, S., Minichelli, D., Maschio, S., 2008. Synthesis and characterization of ceramics from coal fly ash and incinerated paper mill sludge, *Ceramics International*. 34, 2137-2142.

Karamanov, A., Piscicella, P., Pelino, M., 2000 . The crystallisation kinetics of iron rich glass in different atmospheres, *Journal of the European Ceramic Society* . 20 , 2233-2237.

Karamanova, E., Karamanov, A., 2009. Glass-ceramic frits from fly ash in terracotta production, *Waste Management & Research* . 27, 87-92.

Lin, C.F., Wu, C.H., Ho, H.M., 2006. Recovery of municipal waste incineration bottom ash and water treatment sludge to water permeable pavement materials, *Waste Management*. 26, 970-978.

Menezes, R. R., Farias, F. F., Oliveira, M. F., Santana, L. N. L., Neves, G. A., Lira, H. L., Ferreira, H. C., 2009. Kaolin processing waste applied in the manufacturing of ceramic tiles and mullite bodies *Waste Management & Research* . 27, 78-86

Toya, T., Nakamura, A., Kameshima, Y., Nakajima, Akira., Okada, K., 2007. Glass-ceramics prepared from sludge generated by a water purification plant, *Ceramics International*. 33, 573-577.

Xu, G. R., Zou, J.L., Li, G. B., 2008. Effect of sintering temperature on the characteristics of sludge ceramsite, *Journal of Hazardous Materials*. 150, 394- 400

Zou, J. L., Xu, G. R., Li, G. B., Ceramsite obtained from water and wastewater sludge and its characteristics affected by Fe₂O₃, CaO, MgO, *Journal of Hazardous Materials*

山口喬、水谷惟恭、木村敏夫、尾崎義治，工業陶瓷製程，1993，136-144。

陳冠憶、張靖芬，淨水污泥與下水污泥共同燒結製成輕質材料之可行性研究，2009，逢甲大學環境工程與科學學系學士論文。