

自來水廠淨水汙泥應用於陶瓷工藝原料之可行性評估

Feasibility Assessment of Water Purification Sludge Used as Raw Material in Ceramic Production Process

文·圖／沈俊良 Shen Jyung-lyang（國立臺灣工藝研究發展中心／鶯歌多媒材研發分館副研究員）

前言

根據臺灣省自來水公司統計資料顯示，臺灣地區到了105年年底自來水普及率已高達92.50%（註1），顯示國人對自來水之需求量與日俱增，故在淨水程序中衍生污泥量也隨之提高。以臺北市自來水事業處為例，民國96年淨水污泥年產量已達125,000公噸（含水率40~85%）（註2），而國內淨水污泥之應用，有針對淨水污泥之再利用技術及用途評估進行研究（註3），也有對於其取代陶瓷原料之可行性研究進行探討（註4），但實務應用上，仍以製成環保磚（註5）、水泥原料（註6）與其複合材料（註7）、人造骨材（註8）、回填材料（註9）等環境工程領域為主，少數則應用在園藝植栽土（註10）。由於自來水廠淨水汙泥主要成份中含有大量自然界常見之鈣、矽、鋁及鐵等氧化物，與陶瓷工藝原料所含礦物組成相似，惟其燒成溫度過低且容易變形，本研究嘗試將自來水廠淨水汙泥經由添加不同比例之陶土、澳門土及蛙目土加以改質，調製成泥漿並以石膏模具製成試片，經乾燥及燒結後測試其吸水率、氣孔率以及微結構，找出最優化之比例，最後製成杯形器皿以進行重金屬溶出試

驗，若證明可行則不但可擴大自來水廠淨水汙泥之再利用範圍，並可提高其附加價值。

實驗方法

1. 解膠試驗

將淨水汙泥、陶土、澳門土以及蛙目土以105°C烘箱烘乾後，秤取約500克後，再加入同等重量之自來水混合，並以攪拌機攪拌均勻至呈黏稠狀，再將解膠液滴入並持續以攪拌機攪拌，同時記錄解膠液滴入量並以黏度計測量黏度。

2. 試片製作

於汙泥中分別添加0、10、20、30、40%的陶土、澳門土以及蛙目土並攪拌均勻，經適度解膠後，灌入試片用石膏模（13×5×1cm）中成型製成生坯，脫模乾燥後以電窯加熱至100°C並持溫約1小時，冷卻後以切割機切成小塊，再以小電窯分別以1180°C及1230°C燒成並持溫10分鐘後，以自然降溫方式降至室溫。

3.吸水率測試

將燒結後之試體，投入盛有超純水的100ml量杯中，靜置24小時取出，以事先擰去多餘水分的濕抹布，將表面水分擦乾後，迅速稱重並記錄為潮濕重量（W）。將所有試體放入烘箱，以105°C烘乾約1小時，充分乾燥並自然冷卻後，取出分別秤重並記錄，為乾燥重量（D）。代入以下公式，分別求得其吸水率，每個配方取3次平均併計算其標準差：吸水率 = $(W-D) / D \times 100\%$ 。

4.SEM電子顯微鏡微結構分析

使用HITACHI-TM3000電子顯微鏡進行分析。將試體以導電碳膠帶黏貼在載臺上，以放大2000倍之倍率觀察試體之微結構狀態。

5.ICP重金屬溶出試驗

採最佳配比燒製茶杯數個（1230°C，不上釉），再以4%冰醋酸溶液浸泡24小時後，使用標準液稀釋成1000以及5000ppb做成檢量線，再測酸液之Pb、Cr、As、Ba、Hg、Se、Cd、Sb等重金屬之濃度。

結果與討論

1.淨水汙泥解膠實驗

圖1為P30、美國仙水與美製分散劑三種解膠液，分別對相同固液比的淨水汙泥泥漿進行解膠液滴定後，隨滴定量增加之黏度變化表。由圖中可看出，美製分散劑在剛開始滴定时，就已經使淨水汙泥泥漿之黏度大

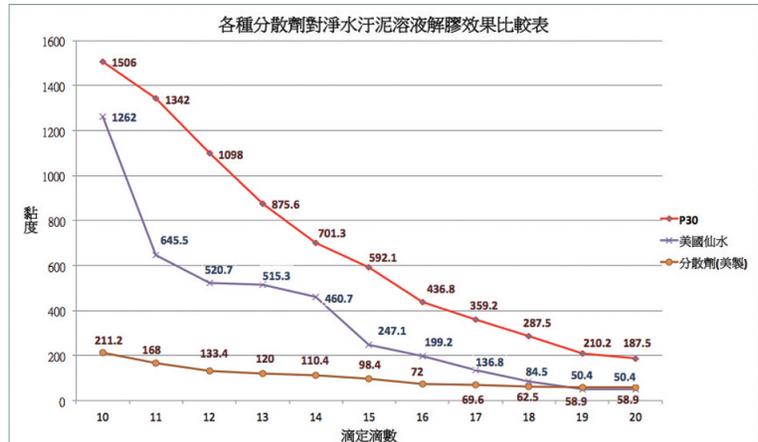


圖1·各種解膠劑對淨水汙泥泥漿之黏度變化趨勢圖

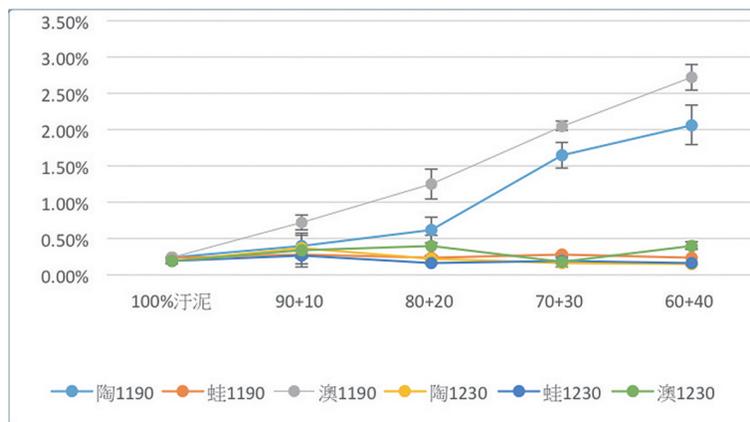


圖2·淨水汙泥添加3種原料土分別於1180°C以及1230°C燒結後所測得之吸水率結果。

幅下降至211.2，且目測已呈可流動狀態。隨著滴定量增加，黏度也再逐步降至58.9附近。P30與美國仙水在初滴定时，淨水汙泥泥漿之黏度分別仍有1506及1262，且目測仍呈現不易流動之黏稠狀，隨滴定量增加，才逐步分別下降至187.5及50.4附近，並呈現可流動之狀態。由此可知，以美製分散劑之效果最佳。

2. 吸水率測試

陶瓷燒結後之吸水率與坯體中之氣孔數量成正比關係。當燒結溫度增加時，將產生更多流動性的玻璃相將孔隙填滿，致使燒結物吸水率隨氣孔率減少而降低。圖2為淨水污泥添加3種原料土分別於1180°C及1230°C燒結後所測得之吸水率。於1180°C試片結果可知，添加陶土及澳門土比例越高，吸水率增加。由進一步分析得知：澳門土及陶土之平均粒徑較高，大顆粒粒子也比較多，於坯體中容易形成分布不均勻的大孔洞，即使提高燒結溫度也不容易將所有孔洞填滿；添加蛙目土結果則相當穩定。當溫度提高到1230°C時，陶土與蛙目土配方之吸水率與兩者之添加量成反比之趨勢，其中添加20%蛙目土之吸水率可達到最低的0.16%；澳門土則呈現不規則之趨勢，研判也是不均勻的孔洞所造成。

3. SEM電子顯微鏡微結構分析

圖3為淨水污泥添加20%之蛙目土之試片，並分別於1180°C及1230°C燒結後之SEM微結構圖，放大倍率皆為2000倍。由圖可知，1180°C時尚可觀察到顆粒狀態，隨著溫度升高玻璃相增加，將孔隙填滿且晶界消失，形成緻密陶瓷體如1230°C之圖所示。

4. 重金屬溶出試驗

右頁表1為淨水污泥杯無上釉，以1230°C燒成後，再用ICP測得之8種重金屬溶出試驗結果。所測出重金屬溶出值結果顯示Cr僅有0.65 ppb以及Ba為3.26 ppb，其餘皆低於背景值，故標示為未檢出。本結果同時也符合CNS3725-R164鉛（7ppm）鎘（0.5ppm）溶出標準以及飲用水標準（1ppm=1000ppb），故即使製成食用器皿也無問題。

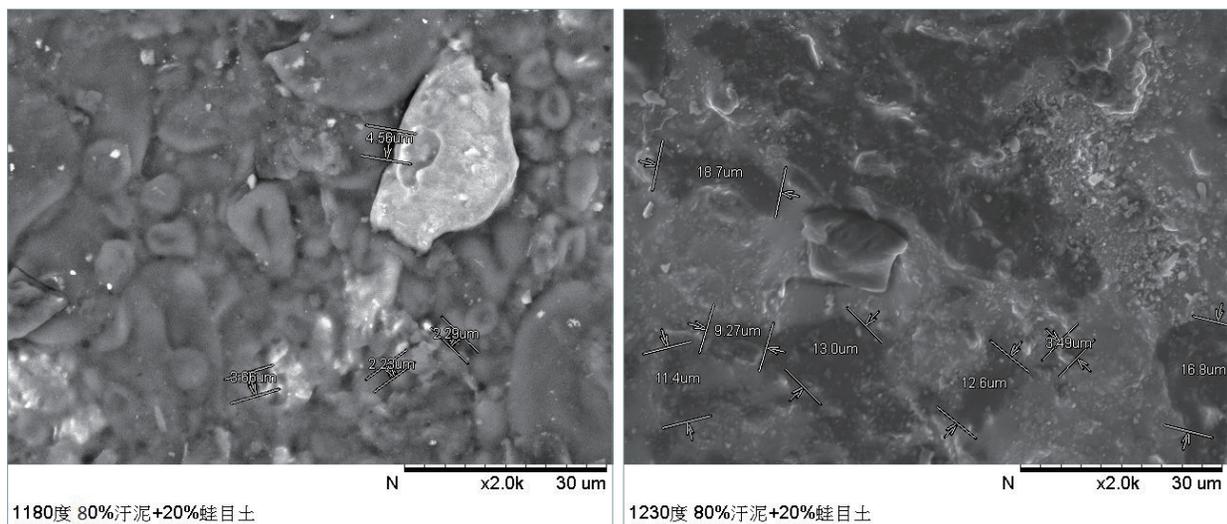


圖3·淨水污泥添加20%蛙目土之試片，並分別於1180°C及1230°C燒結後之SEM微結構圖。

結論

1.於淨水汙泥中添加陶土及澳門土並於1180°C燒成之試片測試結果顯示，其吸水率與兩者之添加量成正比，而添加蛙目土者則相對穩定；當燒結溫度提高到1230°C時，添加陶土配方與添加蛙目土配方之吸水率則呈現下降趨勢，澳門土則呈現不規則之趨勢。當燒結溫度增加時，燒結物吸水率隨氣孔量減少而降低。

2.由SEM微結構分析可得知1180°C燒結時尚可觀察到顆粒狀態，溫度達1230°C燒結之試片表面較為緻密平整，且顆粒狀態皆消失。

3.於淨水汙泥添加20%蛙目土，並以美國解膠劑解膠為本研究最佳工

作條件，於1230°C燒成後之吸水率可達到最低的0.16%。

4.採用ICP分析以上比例混合土所燒結成之陶杯之重金屬溶出濃度，結果顯示Cr為0.65ppb以及Ba為3.26 ppb，其餘重金屬元素皆未檢出，故符合CNS鉛（5ppm）鎘（0.5ppm）溶出標準以及飲用水標準。

5.經本研究之評估後證明自來水廠汙泥可添加改質土後解膠調製成泥漿，汙泥使用率達八成以上，並以可量化模具之方式生產，能有效率地回收再利用於陶瓷工藝產業，這將有助於日後規劃高附加價值化之生產作業流程。🌱

表1·淨水汙泥杯無上釉1230°C燒成後重金屬溶出試驗

元素	Pb	Cr	As	Ba	Hg	Se	Cd	Sb
溶出ppb	未檢出	0.65	未檢出	3.26	未檢出	未檢出	未檢出	未檢出

註釋

- 註1 臺灣自來水公司2016年統計年報，《表7供水人口普及率》，臺灣自來水公司，2017。
- 註2 袁如馨、黃志彬，《自來水公司淨水場淨水汙泥自資源化之研究》，經濟部國營事業委員會、國立中興大學生物科技發展中心，2008。
- 註3 王靜逸、黃志彬，《淨水廠汙泥再利用技術及用途評估之研究》，國立交通大學環境工程系所，2008。
- 註4 江康鈺、蓉袖、家芳、簡光、顏慧茹，《應用淨水汙泥作為取代陶瓷材料之可行性研究》，中華民國環境工程學會2010年廢棄物處理技術研討會，2010。
- 註5 林鴻章、敏信，《以淨水汙泥燒製環保磚之研究》，朝陽科技大學環境工程學系，2014。
- 註6 林志鴻，《淨水汙泥再利用於水泥生料》，中央大學環境工程研究所，2010。
- 註7 蔡鐘洲、黃然，《淨水汙泥應用於水泥基複合材料之研究》，國立臺灣海洋大學河海工程學系，2010。
- 註8 劉世翊、陳豪吉，《淨水汙泥再製輕質骨材可行性研究》，中興大學土木工程學系所，2011。
- 註9 高偉傑、康世芳，《淨水汙泥餅再利用於CLSM回填材料之研究》，淡江大學水資源及環境工程學系碩士班，2011。
- 註10 賴文、廖少威、邱俊彥、邱珮綺、何曉蓉，《有機肥料與淨水廠汙泥摻配製作植栽土之可行性評估》，大仁科技大學環境管理研究所綠色能源科技中心，2008。