

回收陶瓷廢料應用於 3D 陶瓷列印漿料之可行性初探
Feasibility of Using Recycled Waste Ceramics in Ceramic 3D Printing Slurry

*翁子馨 Tzu Hsin Weng¹、陳瓊茹 Chiung Ju Chen²、李建佑 Jian You Li³

國立臺灣工藝研究發展中心 技士¹、皇冠工藝設計有限公司 負責人²、國立陽明交通大學
應用藝術研究所 助理教授³

*通訊作者：tzuhsin1118@gmail.com

摘要

陶瓷製品因坯體燒成後之材料不可逆性，無法回收再使用，許多因打樣、試驗或其他因素而造成的陶瓷廢棄材料年年積累，卻囿於臺灣目前尚無產業鏈上陶瓷廢料回收再利用的機制，無法有效消化。陶瓷 3D 列印近年硬體技術已趨成熟，其數位設計特性帶來結構、紋理形成上的表現空間，以及列印過程的自動化，成為新興、有效率的陶瓷物件製程。因此本研究透過粉碎處理回收陶瓷廢料再混入材料漿體進行 3D 列印的實驗，來驗證此一製程對於消化廢料之永續性效益，並探索最佳廢料混合比例，以及廢料對於列印品質之影響。實驗中使用土料與陶瓷廢料為重量比 10：3 之基礎配方，進一步透過調整陶瓷廢料顆粒目數發展延伸配方，透過上機列印同一斜角杯形，以測試不同配方在實際完成列印的最大高度，由此探討加入陶瓷廢料於漿料以及廢料顆粒目數是否如預期影響漿料的造型支撐性。實驗中加入陶瓷廢料之漿料配方，列印最大高度大於對照組的全陶瓷土料配方，實測結果支持陶瓷廢料得提高列印漿料的造型支撐性平均約 2.2 倍。

關鍵字：工藝與科技、陶瓷、3D 陶瓷列印、永續性、回收再利用

Abstract

Because the shape of ceramic items is fixed and irreversible once it has been fired, they cannot be recycled and reused in the sintering process. Much ceramic waste from sample production, experiments, and other uses has accumulated over the years because there is currently no ceramic waste recycling and reuse mechanism in Taiwan's industry chain. In recent years, ceramic 3D printing hardware and technology has matured. Digital design features in this field brought improvements to ceramic structures and texture. The new printing process has become automated, making it more efficient to produce ceramic objects. By grinding waste ceramics and mixing it into 3D printing material, this study proves that this process can sustainably and effectively recycle and reuse waste ceramics. This study also explores the optimal proportion for waste material mixture, as well as the effect of waste material on printing quality. The experiments produced a relatively stable proportion, which is a 10:3 proportion of ceramic clay material to recycled waste material. By adjusting the size of ceramic waste material granules, we developed additional formulas. This study tested the maximum height that can be printed with different formulas by using the printer to print cups with the same angle. This is used to explore whether the addition of waste ceramics in printing paste and the granule size affected the shape support of the paste. The experiment shows that paste formula with added ceramics waste has a higher maximum printing height than the control group's all-ceramic clay formula. The test result shows that ceramic waste material can improve the printing paste's shape support.

Keywords: craft and technology, ceramics, ceramic 3D printing, sustainability, recycling and reuse

一、前言

1-1 研究動機

陶瓷是受人類應用的古老材料，隨著現代科學及工藝製造技術進步，陶瓷也被廣泛地應用於人類生活中，舉凡日用餐具、磁磚、屋瓦、電氣設備、高科技陶瓷、醫用假牙或骨骼等範疇皆可見陶瓷材料的蹤跡，足見人類對陶瓷品項發展蓬勃、需求增長，同時也逐漸引起原料資源消耗及淘汰廢料處理的議題。經由搖籃到搖籃（Cradle to Cradle）的概念，這兩項議題得串聯成解方，將陶瓷廢料視為產業的養分，重新投入製造鏈中循環利用，同時減少產業對自然資源的需求量(McDonough et al., 2003 ; Hossain & Roy, 2020)文獻格式。

放眼陶瓷產業發展歷史，在最初物流不繁盛的年代，陶瓷產業尚需依賴原料產地而生，台灣在南投、苗栗、台北、金門等地均有可用的土礦，然而品質不勻、產量不高，並非產業長久的原料來源，其中北投地區因過度開採土料造成水土保持問題，於 1968 年由政府開始實施土礦禁採。(國立臺灣工藝研究所，2007)至今，台灣陶瓷產業所用原料仍仰賴進口，由行政院環保署公開的我國物料進口量累計前 95%統計表

(<https://smmdb.epa.gov.tw/SMM/webpage/CriticalMaterial/table1.aspx>) 顯示，台灣於 2014 年當年度進口的黏土礦物就高達 762,562 公噸。

另一方面，根據行政院環保署統計資料（表 1、表 2），台灣於 2010 年當年度垃圾處理量為 10,081,614 公噸，於 2010 年 12 月公告的當年度處理垃圾性質分析表顯示，陶瓷所屬之其他不燃類項目佔比 0.67%，由此推估當年度全台灣受官方環保局轄下處理之廢棄陶瓷約為 67,546 公噸。然而這些被回收集中的廢棄陶瓷困限於現今資源回收技術與再利用管道的不足，通常被暫時傾倒堆置，或因其無機且高化學穩定的特性被用於地基填埋。

綜上資料顯示，原料資源不足及廢料處理確實為臺灣陶瓷產業現存的議題，現處多元技術世代的我們該如何有效整合出一個新興循環製造模式？在傳統陶藝技術與數位製造間，我們提出了本次研究命題。

在傳統陶藝技法中，本就存在一項技術，在製作大型陶藝創作或雕塑時，創作者會在土料中混入熟料（即燒結土料的碎粒，但熟料的碎粒不含有釉藥），以降低收縮率且可增加質感。而在數位製造技術方面，將陶瓷材料應用於 3D 列印製程的研究案例多樣，技術多元而成熟，且透過數位設計為陶瓷材料開展了結構與紋理表現空間，以及自動化過程帶來的勞力解放(Zhao, 2021)。本研究祈透過粉碎處理回收陶瓷廢料，作為混入列印漿料中進行 3D 列印，假設廢料在列印漿料中得發揮熟料的效果，提高列印支撐性，同時驗證此製程是否對於消化廢料具有永續效益。

縣市別	數值 (公噸)
新北市	1,538,164
臺北市	781,781
桃園市	1,177,311
臺中市	1,143,944
臺南市	981,281
高雄市	1,423,421
宜蘭縣	194,981
新竹縣	222,433
苗栗縣	225,505
彰化縣	600,957
南投縣	182,644
雲林縣	213,676
嘉義縣	197,386
屏東縣	321,089
臺東縣	98,671
花蓮縣	141,593
澎湖縣	48,394
基隆市	211,900
新竹市	205,287
嘉義市	133,008
金門縣	29,505
連江縣	8,683
總計	10,081,614

表 1、2010 年全台灣垃圾處理量統計表
(資料來源：行政院環保署)

公開類		編製機關	行政院環保署
年報	期間終了2個月內編報	報表號	1135-02-01

垃圾性質分析

中華民國109年

	物 理 組 成 (濕 基) (100%)													
	可 燃 物								不 可 燃 物					
	總 計 (%)	紙 類 (%)	纖維 布類 (%)	木竹、 稻草、 落葉類 (%)	廚 餘 類 (%)	塑 膠 類 (%)	皮 革、 橡 膠類 (%)	其 他 (含5mm以 下之雜物) (%)	總 計 (%)	鐵金 屬類 (%)	非 鐵 金屬類 (%)	玻 璃 類 (%)	其 他 不 燃 物 (陶磁、砂 土) (%)	
總計	97.25	34.61	8.55	5.22	21.78	20.20	1.05	5.84	2.75	0.51	0.38	1.19	0.67	

表 2、2021 年全台灣垃圾性質分析表
(資料來源：行政院環保署)

1-2 文獻探討

1-2.1 3D 列印技術類型

3D 列印是種積層製造 (Additive Manufacturing, AM) 技術(Praveena, 2021), 時至今日發展成熟多元, 然而每個技術種類因其原理與使用材料的特性不同, 使其列印的尺寸、結構複雜

度、表面精緻度、後處理製程等都有各自配合的需求與差異。其中最普遍應用發展的主要有以下三種技術類型：

- (1) 粉床熔融技術：使用能量光來融合和熔化粉末顆粒以構建 3D 物件之技術，材料主要為塑膠、金屬、陶瓷之複合粉末，如選擇性雷射燒結（Selective Laser Sintering, SLS）。然而，其高成本與技術要求，也使其通常被用於工業或研究目的，而非個人或微型單位試驗開發用。
- (2) 光聚合技術：光聚合是一種利用紫外線雷射光固化光敏聚合物，利用多層斷面路徑照射固化光敏樹脂製造 3D 物件的列印技術。常見的有雷射光固化成型（Stereolithography, SLA）。
- (3) 材料擠出技術：這是一種使用顆粒、線材或膏狀原料擠出細條的列印原型技術，由噴頭隨預定路徑行走而逐層成型。熔融沈積成型技術（Fused Deposition Modelling, FDM）是應用最為廣泛而普遍的擠出技術，FDM 透過熱塑性材料加熱熔化後由噴嘴擠出至成型平台，擠出後的聚合物隨環境溫度自然冷卻固化。雖與粉床熔融技術及光聚合技術的產出成品相比，其成品表面印痕明顯，且常須額外建構支撐材維持成型過程的平穩；然而也因其原理簡明易懂、製程快速，易於使用與改裝，使其受各領域廣泛研發試驗新材料應用。

1-2.2 基於材料擠出技術進行的陶瓷列印

在多數情況下，陶瓷的生產需經過兩個主要的工序：首先，透過各種塑型手法使陶土成型；接著，將完全乾燥的成型土坯進行高溫燒結，藉此材料將達成堅硬緻密的狀態。陶瓷材料隨應用生產的目的不同，有著多樣化的成型手法與製造產線，尤其是在涉及 AM 概念的應用方面開闢了一種全新的成型方法。(Boyer, 2021 ; Chen, 2019)

比起成本與技術門檻較高的粉床熔融技術及光聚合技術，基於材料擠出技術進行的列印方式更適合陶土材料形態及印製較大尺寸。列印上有兩種主要方法，首先，是以 FDM 為基礎的應用。由於傳統 FDM 適用材料以柔韌的熱塑性聚合物為主，對於燒結後的陶瓷材料而言其高硬度與高脆性限制了列印原料處理的方式，因此多將陶瓷磨成粉末與熱塑性基質複合，藉此完成傳統 FDM 製程的列印型態，最終透過去除熱塑性基質與燒結工序達到陶瓷緻密(Zhang, 2019)。另一種，則是捨去 FDM 熱熔的步驟，直接使用陶瓷漿體進行擠出，然而此種方式需有額外的壓力輔助，如氣動設備或擠出用螺桿(Godoi, 2016)。

1-2.3 小結

本研究透過文獻探討初步瞭解使用陶瓷材料進行 3D 列印的技術應用脈絡，並因研究成本與效益考量，鎖定基於材料擠出技術進行的列印方式作為實作技術、進行試驗。

二、研究方法

陶瓷產業中使用熟料的技術，是為了在大型創作品中降低塑形與燒成過程中，因收縮造成的變形與拉裂，同時增加材料支撐性；然若混入熟料過多，反而易使土料因黏性與塑性過低無法成形，因此在產業中通常會以重量比 10:3（土料：熟料）的比例為原則進行施作。本研究於第一階段參考上述陶瓷工藝業界摻拌熟料技法(黃吉正, 2015；廖瑞章, 2007)，延伸使用重量比 10:3（土料：陶瓷廢料）之基礎列出 14 道不同配方並製成試片燒結，目的是確認不同土質生料與不同陶瓷廢料搭配之燒成效果，於其中選擇能展現廢料特色的樣本，進入第二階段實務

試驗；在第二階段利用改變配方中陶瓷廢料的顆粒目數，實測列印同樣傾角 75 度原型物件所能列印之最高高度，以分析陶瓷廢料對列印支撐性的影響趨勢。以下為本實驗研究的詳細說明：

2-1 列印設備

本研究所用 3D 列印設備因成本考量並非使用市售機型，而為參考 RepRap 3D 列印機開源資料，以現成零件組裝一具 XYZ 三軸 3D 列印機，設備可列印範圍為以(X,Y,Z)=(0,0,0)為圓心、半徑 250mm 的四分之一圓，陶土材料裝填於 200ml 之針筒，利用行程 300mm、推力速度 7mm/s 的步進馬達驅動之推桿提供擠壓推力，而噴嘴尺寸有 2mm 與 3mm 兩種可供更換。



圖 1、研究所用設備

2-2 材料處理

研究中所使用的材料主要有瓷土粉、陶廢粉，以及自來水。各別材料處理方式分項說明如下：

- (1) 瓷土粉：採用 26 號日本瓷土，經完全乾燥後敲成小塊狀放入粉碎機（桌上型粉碎機 RT-13，凌廣工業股份有限公司）打成土粉，再以不鏽鋼篩網過篩，取小於 60 目之土粉。
- (2) 陶土粉：採用自然燒工陶藝坊(位於新北勢鶯歌區)配製之 301 號陶土，經完全乾燥後以粉碎機（桌上型粉碎機 RT-13，凌廣工業）打成土粉，再以不鏽鋼篩網過篩，取小於 60 目之土粉。
- (3) 瓷廢粉：由東享瓷器有限公司（位於新北市鶯歌區）提供，該批廢料為素燒坯破片，以鑫發實業股份有限公司(位於新北市鶯歌區)銷售之編號 815 號瓷土製成。瓷廢料蒐集後，以粉碎機（桌上型粉碎機 RT-13，凌廣工業）打成粉末，再經由各種目數的不鏽鋼篩網取得不同目數之材料。
- (4) 陶廢粉：由皇冠工藝設計有限公司（本研究序位二作者所屬，該公司位於南投縣竹山鎮）提供，該批廢料使用玉禮實業股份有限公司（位於桃園市龍潭區）編號 203 號陶土製成並經攝氏 1250 度燒結；坯體外側有施釉，然而該批陶廢料所用釉料種類隨訂單需求

有所不同、非單一種類，難以回溯紀實紀錄。廢料蒐集後先敲擊成小於 1 平方公分之碎塊，再以粉碎機（小型粉碎機 RT-34 SUS，凌廣工業）打成粉末。接著經由各種目數的不鏽鋼篩網取得不同目數的材料。

2-3 試驗樣本與執行紀錄

2-3.1 第一階段

本研究借助於傳統陶藝相似的技术經驗，以重量比 10:3（土料：陶瓷廢料）作為基礎配方，並在實際上機確定該比例得順利出土列印成型後，逕展開後續試驗行動。在第一階段中，試驗目的為試驗不同土料與不同陶瓷廢料之間的搭配燒成效果，共列出 14 道配方製成試片燒結。如表 3 所示，以選用瓷土粉為土料之 A 大項及選用陶土粉之 B 大項分列，大項下各有 8 之配方。其中每一大項下配方編號 1-3 為搭配 80-100 目區間之瓷廢粉，擬測試以該大項土粉基底搭配不同目數瓷廢粉之效果，並由編號 3 測試廢料是否得藉由水洗去除雜質而具不同燒成效果。而每一大項下配方編號 4-6 為搭配 100-270 目區間之陶廢粉，欲測試以該項土粉基底搭配不同目數陶土粉之效果。而另以每一大項下配方編號 7 測試加入色料(購自松江實業有限公司，色號 20106)之效果。

A 大項							
土料		項下配方編號	廢料		其他材料		水
瓷土粉	100g	a1	瓷廢粉，80 目	30g	-	-	25g
		a2	瓷廢粉，100 目	30g	-	-	25g
		a3	瓷廢粉，100 目並經水洗	30g	-	-	25g
		a4	陶廢粉，100 目	30g	-	-	20g
		a5	陶廢粉，100-270 目	30g	-	-	20g
		a6	陶廢粉，270 目	30g	-	-	20g
		a7	瓷廢粉，100 目	30g	色料	15g	28g
B 大項							
土料		項下配方編號	廢料		其他材料		水
陶土粉	100g	b1	瓷廢粉，80 目	30g	-	-	25g
		b2	瓷廢粉，100 目	30g	-	-	25g
		b3	瓷廢粉，100 目並經水洗	30g	-	-	25g
		b4	陶廢粉，100 目	30g	-	-	20g
		b5	陶廢粉，100-270 目	30g	-	-	25g
		b6	陶廢粉，270 目	30g	-	-	20g
		b7	陶廢粉，100 目	30g	色料	15g	28g

表 3. 第一階段配方表

2-3.2 第二階段

經第一階段試驗，在 14 道配方樣本中由研究者共同判斷，以配方編號 a5 之瓷土較可凸顯混入廢料後的材料特色與表現，推測原因可能為該配方以淺色瓷土為基底搭配深色陶瓷廢料，兩者有顏色對比效果，而陶瓷廢料顆粒目數（100-270 目）相較其他配方樣本展現之視覺比例效果亦較平衡。如圖 2。



圖 2. 第一階段配方試片樣本

由此，在確定陶瓷廢料混入列印土料中之視覺質感表現後，第二階段便進一步展開對假說「加入陶瓷廢料之土料可增加列印支撐性」之試驗。方法為實測各項材料實際上機列印測試原型(如表 5)時，可列印的最大高度（以列印時，非外力造成之自然坍塌前最大高度）。而第二階段配方樣本，如表 4，由第一階段配方編號 a5 為測試起點，在廢料顆粒尺寸 60-100 目區間分列配方編號 c1 與 c2，欲藉此測試當廢料顆粒目數變大是否影響材料可列印之最大高度。並以完全無廢料加入之配方編號 c3 作為此階段假說之主要對照組。

配方編號	土料		廢料		水
a5	瓷土粉	250g	陶廢粉，100-270 目	75g	120ml
c1	瓷土粉	250g	陶廢粉，80-100 目	75g	120ml
c2	瓷土粉	250g	陶廢粉，60-80 目	75g	120ml
c3	瓷土粉	300g	-	-	138ml

表 4. 第二階段配方表

測試原型工程圖 (尺寸為 mm)	列印程式條件	
	噴嘴尺寸	2mm
	層高 Layer high	1.2mm
	切片分辨率 Slice resolution	1.33mm
	擠出量 Flow	0.0025mm/s
	擠出速度 Speed	15mm/s

表 5. 列印測試原型及列印程式條件

三、結果分析

本研究藉由試驗實測了將陶瓷廢料回收再利用於 3D 列印製程的可行性、列印成型表現，並評估製程是否具循環效益。在第一階段試驗中，本研究以重量比 10:3（土料：陶瓷廢料）為基礎配方，藉由置換土料與陶瓷廢料不同搭配方式完成 14 道配方樣本的試片燒製，且在其中選擇較得展現陶瓷廢料質感者配方編號 a5 續行第二階段試驗。

第二階段試驗目的在於驗證假說「加入陶瓷廢料對列印材料是否具有優化支撐性之影響」，經試驗結果分析（如表 6），配方中混入陶廢粉的編號 b5、c1、c2 之可列印最大高度明顯比配方中未混入陶廢粉之編號 c3 較大，因此，實測結果支持第二階段試驗假說，即廢料在列印材料中確實具有優化支撐性之影響，得發揮如傳統陶瓷工藝技法中在材料中混入熟料的效果，與此同時，亦驗證本研究模擬的陶瓷廢料應用於 3D 列印製程對於消化廢料具有永續效益。

配方編號	廢料目數	水	濕度	可列印最大高度
b5	陶廢粉，100-270 目	120ml	27.5%	10.67
c1	陶廢粉，80-100 目	120ml	28.1%	9.03cm
c2	陶廢粉，60-80 目	120ml	27.8%	11.4cm
c3	-	138ml	31.5%	4.64cm

表 6. 第二階段配方上機列印結果記錄

四、總結

綜合上論所述，藉由本研究結果可驗證：

- (1) 回收陶瓷廢料再利用於 3D 列印製程係具有可行性且得發揮材料循環效益
- (2) 回收陶瓷廢料作為 3D 列印漿料，每 130g 漿料可消耗 30g 陶瓷廢料。
- (3) 使用回收陶瓷廢料混入配製的漿料，可提高列印製程中的支撐性。
- (4) 依據試驗結果，有加入廢料的列印材料相較沒有加入的可平均提高約 2.2 倍支撐性。

本研究雖在研究範疇中完成了假說驗證，然而在整體架構上仍存在幾項限制與延伸發現，可成為未來延續研究的面向：

- (1) 本項研究所回收之陶瓷廢料，並未探討至陶廢上固有釉料對配方之影響。

- (2) 研究中第一階段以業界慣用比例啟動，然而此比例由業界經驗積累、代代口傳，在客觀科學實驗方面仍有待填補的知識空白，可再衍生探究比例問題。而第一階段試驗中總計 14 道配方，在本研究中以燒成後是試片的視覺效果最得表現陶廢質感與特色為條件，擇編號 b5 進入第二階段續行試驗；然而未被擇選的其餘編號配方並非不得進行列印施作，亦有延續探討的空間。
- (3) 在表 6 中可判讀，當編號 b5、c1、c2 配方的水毫升數固定時，濕度測量結果不同，顯示出在配方中影響濕度尚有其它因素。

五、參考文獻

1. 國立臺灣工藝研究所 (2007)。台灣地方陶瓷發展史 (一) 台灣陶瓷的領航員—北投陶瓷發展史。國立臺灣工藝研究所，南投縣。
2. 黃吉正 (2015)。空間·對話-黃吉正陶藝創作研究。(未出版之碩士論文)。國立台中教育大學，台中市。
3. 廖瑞章 (2007)。形變與衍生: 廖瑞章有機抽象陶塑論述 (60 頁)。嘉義市: 紅豆。
4. Boyer, S. A. E., Jandet, L., & Burr, A. (2021). 3D-Extrusion Manufacturing of a Kaolinite Dough Taken in Its Pristine State. *Frontiers in Materials*, 8.
5. Chen, Z., Li, Z., Li, J., Liu, C., Lao, C., Fu, Y., Liu, C., Li, Y., Wang, P., & He, Y. (2019). 3D printing of ceramics: A review. *Journal of the European Ceramic Society*, 39(4), 661–687.
6. Godoi, F. C., Prakash, S., & Bhandari, B. R. (2016). 3d printing technologies applied for food design: Status and prospects. *Journal of Food Engineering*, 179, 44–54.
7. Hossain, S. S., & Roy, P. (2020). Sustainable ceramics derived from solid wastes: a review. *Journal of Asian Ceramic Societies*, 8(4), 984–1009.
8. McDonough, W., Braungart, M., Anastas, P. T., & Zimmerman, J. B. (2003). Peer Reviewed: Applying the Principles of Green Engineering to Cradle-to-Cradle Design. *Environmental Science & Technology*, 37(23), 434A-441A.
9. Praveena B. A., Lokesh N., Abdulrajak Buradi, Santhosh N, Praveena B. L., Vignesh R. (2021) . A comprehensive review of emerging additive manufacturing (3D printing technology): Methods, materials, applications, challenges, trends and future potential. *Materials Today: Proceedings*, In Press, Corrected Proof, 21-42.
10. Zhao, B. (2021c). Research on The Application of Ceramic 3D Printing Technology. *Journal of Physics: Conference Series*, 1827(1), 012057.