

玻璃瓶於高溫加熱時之重力方向流動性之探討

呂理得^{1*}、范雅棻²

¹黎明技術學院 機械工程系

²黎明技術學院 數位多媒體系

*Email:peter@mail.lit.edu.tw

摘要

本文接續先前之研究，以回收玻璃瓶為主題進行玻璃瓶於高溫加熱時重力變形的實驗，除了探討玻璃瓶的高溫變形機制，同時提倡資源再利用的環保概念，讓更多人認識玻璃材料的高溫變形機制，進而將回收玻璃瓶創作成為文創商品的素材，此外，本研究之實驗數據在產品設計或藝術創作領域中亦可提供工藝參考，擴展設計創作的多樣性，同時可提高玻璃瓶的回收率。

本文首先以溫控電窯控制加熱速率低於每小時攝氏 100 度，將相同樣式的玻璃酒瓶加熱至攝氏 800 度持溫適當時間再緩冷至室溫，使玻璃酒瓶形成近似扁平狀。接著在保溫材的底板中央製作一個直徑 100 mm 的圓孔，將扁平狀玻璃酒瓶平置在圓孔上方進行加熱。

結果顯示，在高溫狀態下，扁平狀的玻璃瓶材料在高溫時會從圓孔懸空處的中央位置開始軟化往重力方向流動，當目標溫度較低時，球形薄殼長度將呈線性變化，目標溫度較高時，球形薄殼長度將呈幾何變化。

關鍵字：回收玻璃瓶、高溫流動、重力方向。

1. 前言

行政院環境保護署在 2005 年公布的廢玻璃容器回收處理情況表示，廢玻璃容器每年回收量約五萬公噸，投入窯爐再利用比例僅約百分之五十，因此每年仍約有超過二萬公噸的有色廢玻璃容器無法有效再生利用，造成廢玻璃瓶回收後的囤積壓力及後續問題。[1]

基於目前玻璃材料功能越來越多樣化、用途也越來越廣泛，玻璃材料在不同空間中的應用及設計展現無比的魅力，開發玻璃應用，包括玻璃製造過程、處理方法、成分設計、製備方式等基礎技術知識，已成為材料科學與工程工作者關注和研究的重點。近年亦有商家開始販售此類生活應用商品，除

此之外，許多藝術家推陳出新各種玻璃技法，創作出經典的玻璃藝術創作，讓人耳目一新。[2-7]

基於解決環境問題的動機，本文朝向 Reduce(減少使用)、Reuse(物盡其用)、Recycle(循環再造)的環保原則，將回收玻璃瓶作為原始材料，利用學校現有的窯燒電爐設備加熱使之變形並探討其高溫變形機制，以期創造出更多的衍生作品，多樣色澤的玻璃瓶及再製商品如圖 1 所示。



圖 1 多樣色澤的玻璃瓶及再製商品

2. 理論分析

玻璃在不同溫度加熱時之流動性受到其黏滯度(viscosities)之變化而影響，如同一般物質，其黏滯度較高比較不容易流動，而黏滯度較低的物質，比較容易流動，普通的液體黏滯度大致在 1~1000 mPa·s，氣體的黏滯度大致在 1~10 μPa·s。

本文所討論的玻璃在常溫之下屬於硬脆材料，幾乎不會發生流動，當玻璃被加熱到軟化溫度，便會開始發生流動現象，其黏滯度之變化巨大而複雜，和普通材料差異甚大，據文獻指出，玻璃大約在攝氏 700 至 800 度時會像麥芽糖一樣流動，本文的目標溫度因此設定在此範圍當中，等分為低、中、高三個溫度之後，分別在攝氏 738、758 以及 788 度的目標溫度探討玻璃的流動現象。[8-9]

3. 實驗方法

以本文使用玻璃酒瓶為例，首先將玻璃酒瓶加熱使之成為扁平狀備用，如圖 2 所示。板狀耐火陶棉中央預先製作一貫穿圓孔，再將扁平狀之玻璃酒瓶平放於板狀之耐火陶棉上方，實驗裝置示意圖如圖 3 所示，實驗過程係在常溫大氣中進行。

當扁平狀之玻璃酒瓶被加熱至高溫狀態，其黏滯度降低便具有膠體性質，貫穿圓孔上方之懸空部分的玻璃因本身的重量便會在重力方向緩慢流動，如圖 4 所示。其外部重力向下拉引使玻璃材料向下緩慢流動，而玻璃材料內部的黏滯力向兩側作用牽引玻璃材料阻止玻璃材料向下流動，因而呈現一塌陷之圓球殼狀。



圖 2 扁平狀之玻璃酒瓶

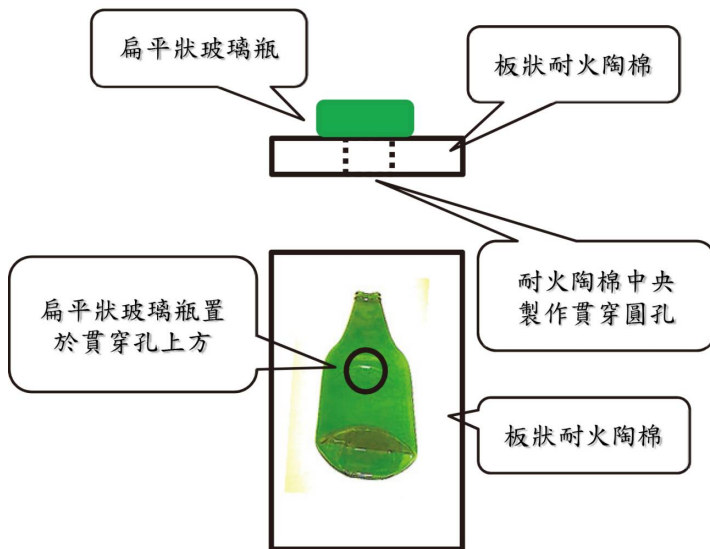


圖 3 扁平狀玻璃酒瓶與板狀耐火陶棉放置示意圖

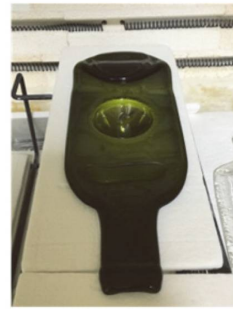


圖 4 懸空之玻璃酒瓶呈現塌陷之圓球殼狀

在特定溫度區間之可控制條件之下，黏滯力與重力達到靜態平衡，將會在懸空的空孔處朝重力方向緩慢流動而形成薄殼球面，並且與溫度高低呈現正比例關係，意味溫度越高，玻璃材料向下流動形成的薄殼球面形狀越長。如圖 5 所示。



圖 5 可控制條件下之圓球殼狀

直到加熱溫度超過此特定溫度區間，進入不可控制的狀態，黏滯力與重力無法達到靜態平衡，在此條件之下，玻璃材料內部的黏滯力無法牽引住膠狀的玻璃材料，玻璃材料將會一直向下流動而形成長形漏斗的形狀，如圖 6 所示。



圖 6 不可控制條件下之漏斗形狀



4. 結果與討論

吾人使用之前緩慢升溫的原則，設計目標溫度分別為攝氏 738、758 以及 788 度，持溫時間分別為 2.5 小時、5 小時以及 8 小時，升溫示意圖如圖 7 所示。不同目標溫度持溫時間 5 小時之薄殼球面形狀如圖 8 所示。而不同目標溫度於不同持溫時間之薄殼球面長度變化情形如圖 9 所示。

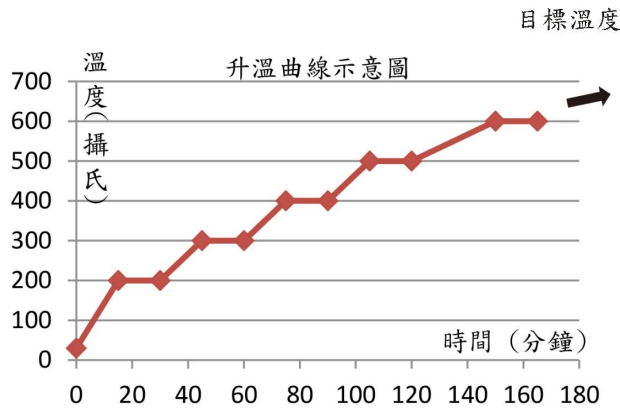


圖 7 升溫示意圖

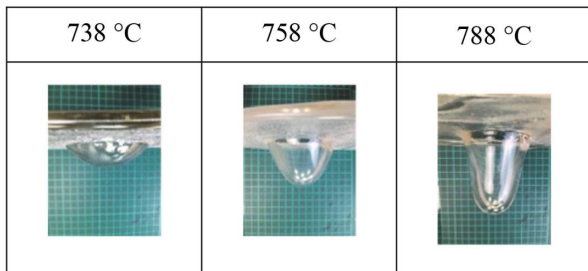


圖 8 不同目標溫度持溫時間 5 小時之薄殼球面形狀

結果顯示，目標溫度較低時，球形薄殼長度將隨著持溫時間呈線性變化，目標溫度較高時，球形薄殼長度將隨著持溫時間呈幾何變化。

若以 8 小時的持溫時間作分析，球形薄殼長度亦與三種目標溫度呈幾何變化，依序溫度高低分別為 6.1 mm、9.2 mm、18 mm，呈近似幾何變化。

在高溫狀態下，玻璃瓶之懸空部分會開始軟化成膠狀，進而在重力方向漸漸流動，因著表面張力及黏性變化的緣故，往下流動的玻璃將會慢慢形成圓球形之薄殼狀，並且當加熱到目標溫度時，玻璃瓶材料本身的黏滯力會與重力吸引達到平衡，此球形薄殼的長度與目標溫度以及持溫時間皆呈正比例的關係。若加熱超過目標溫度，玻璃瓶材料的黏

滯力與重力吸引力將失去平衡，則會使玻璃材料形成一下垂的漏斗狀薄殼。

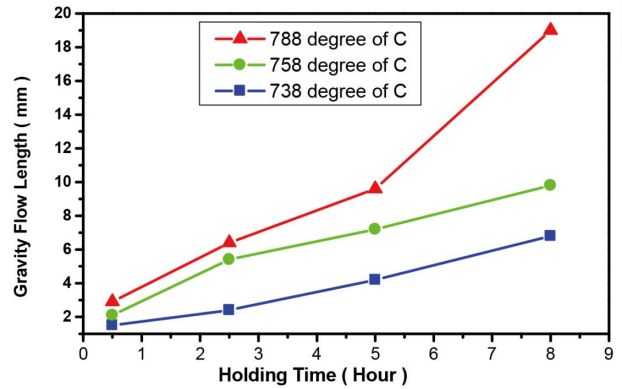


圖 9 不同目標溫度於不同持溫時間之薄殼球面長度變化情形

5. 結論

由以上的實驗及討論，可以得到下列結論：

1. 根據本文的實驗顯示，高溫狀態下之玻璃懸空部分會開始軟化成膠狀，進而在重力方向漸漸流動，因著表面張力及黏性變化的緣故，往下流動的玻璃將會慢慢形成圓球形之薄殼狀，
2. 根據本文的實驗結果顯示，目標溫度較低時，球形薄殼長度將隨著持溫時間呈線性變化，目標溫度較高時，球形薄殼長度將隨著持溫時間呈幾何變化。
3. 根據本文的實驗結果顯示，若加熱超過目標溫度，玻璃瓶材料的黏滯力與重力吸引力將失去平衡，則會使玻璃材料形成一下垂的漏斗狀薄殼。

6. 參考文獻

1. 行政院環境保護署回收基管會，<http://recycle.epa.gov.tw>
2. 美國彭蘭德手工藝術學校，玻璃，上海科學技術出版社，2017。
3. 張銳，陳德良，楊道媛，玻璃製造技術基礎，化學工業出版社，2009。
4. 廖志堅，玻陶洵湧 2015：雙新玻璃陶瓷藝術聯展-新竹市玻璃藝術，新竹市立玻璃工

- 藝博物館，2015。
5. 李文福，*玻光璃彩：李文福玻璃創作展*，新竹市立玻璃工藝博物館，2019。
 6. 新竹市文化局，*初心 出新：2020 新竹市玻璃藝術家聯展*，新竹市立玻璃工藝博物館，2020。
 7. Flat Wine Bottle Art 瓶瓶禮，<https://www.pinkoi.com>。
 8. 玻璃的黏度，<http://www.51crystal.com/news/show.php?itemid=704>。
 9. 玻璃熔融之電腦模擬，*科學發展雜誌*，2006年10月，406期，38~45頁。

Discussion on the Gravity Direction Fluidity of Glass Bottles when Heated at High Temperature

Li-Te Lu^{1*}, Ya-Fen Fan²

¹ Lee-Ming Institute of Technology,
Department of Mechanical Engineering.

² Lee-Ming Institute of Technology,
Department of Digital Multimedia.

*Email: peter@mail.lit.edu.tw

Abstract

This paper continues the previous research, with the theme of recycling glass bottles to carry out the experiment of gravity deformation of glass bottles when heated at high temperature, in addition to discussing the high-temperature deformation mechanism of glass bottles, while advocating the environmental protection concept of resource reuse, so that more people can understand the high-temperature deformation mechanism of glass materials, and then create recycled glass bottles as materials for cultural and creative products. In this paper, the heating rate is controlled by a temperature-controlled electric kiln below 100 degrees Celsius per hour, and the glass bottles of the same style are heated to 800 degrees Celsius for an appropriate time, and then slowly cooled to room temperature, so that the glass bottles form an approximate flat shape. Next, a 100 mm diameter round hole is made in the center of the base plate of the insulation, and the flat glass bottle is heated by placing it flat above the round hole. The results show that at high temperature, the flat glass bottle material will soften from the center of the round hole suspension and flow in the direction of gravity at high temperature, and if the insulation material is used as a bottom plate support under the glass bottle, there will be no flow. The spherical shell length will change linearly when the target temperature is low, and geometrically when the target temperature is high.

Keywords: recycling of glass bottles, high temperature flow, gravity direction.

