

溫度變化對玻璃瓶在高溫加熱後自然變形之影響

呂理得^{1*}、陳林宏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

本文以玻璃瓶為主題進行高溫變形的實驗以探討玻璃瓶的高溫變形機制，實驗係以溫控電窯將圓筒狀玻璃瓶加熱至攝氏 600 至 800 度等不同的目標溫度，持溫適當時間後緩冷至室溫後再進行各面向的尺度測量以探討玻璃瓶的高溫變形機制。

結果顯示，圓筒狀的玻璃瓶在高溫時會從瓶口處強度較小的薄壁開始軟化，再者，當玻璃瓶加熱到不同目標溫度時，瓶身軟化坍塌變形到一定程度後便會應力平衡。

以本文使用的透明鈉玻璃瓶為例，吾人測量加熱前後在重力方向的厚度變化並計算其塌陷比率，發現重力方向的厚度塌陷比率在攝氏 800 度時可達 78%。

關鍵字：回收玻璃瓶、高溫變形、資源再利用。

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

玻璃主要結合矽砂與其他化學物質經過加熱熔融而成，玻璃在不同溫度加熱時會發生以下現象。[8-9]

- 攝氏 450 度：徐冷點
- 攝氏 600 度：玻璃有下墜現象
- 攝氏 700 度：可烤彎玻璃會黏在一起
- 攝氏 800 度：熔合像麥牙糖一樣會流動
- 攝氏 850 度：脫蠟鑄造
- 攝氏 900 度：吹製
- 攝氏 1000 度：拉絲
- 攝氏 1150 度：胚心成形
- 攝氏 1300 度：壓模成形接近水一樣柔軟
- 攝氏 1450 度：熔融點沸點起泡

3.實驗方法

本文使用本系之溫控電窯將圓筒狀玻璃瓶加熱至攝氏 600 至 800 度等不同的目標溫度，溫控電窯電容量為 380V、18kW；加熱空間高度約 400cm，寬度約 300cm，深度約 200cm，圓筒狀玻璃瓶高度約



7.7cm，直徑約 4.3cm，厚度約 0.6cm；溫度控制器為雙程式 8 段式之溫度時間設定。

實驗步驟首先將玻璃瓶清洗乾淨，避免標籤及黏著劑造成加熱過程汙染，每次實驗在電爐中央的爐板上相隔 10cm 水平放置 3 個玻璃瓶進行加熱，實驗之後取其加熱變形的平均值進行分析，以減少裝爐位置造成的誤差；玻璃瓶試片與爐體接觸的水平面均需裝置具有保溫隔熱特性的硬質陶棉，讓玻璃瓶試片穩定放置，並且在加熱或冷卻時，玻璃瓶試片的整體溫度可以均勻變化不至於因熱衝擊而破裂。電爐設備外觀以及試片在電爐中的相對位置如圖 2 所示。



圖 2 上圖為電爐設備外觀，
下圖為在試片電爐中的相對位置。

加熱過程係以溫度控制器設定 8 段溫度時間變化，每一段的內容設定加熱溫度、加熱所需時間以及溫度保持時間，升溫曲線示意圖如圖 3 所示。加熱過程中為了避免玻璃材料因熱衝擊而破裂，必須設定階梯式的緩慢升溫讓材料整體溫度均勻變化，升溫大約需要 3 小時。到達目標溫度(示意圖中之黑色箭頭)後，再持溫 3 小時讓玻璃瓶充分變形，最後爐冷至常溫約需 15 小時。

本文評估玻璃瓶的高溫變形係以 0.05mm 精度之游標卡尺測量玻璃瓶試片經過不同溫度加熱之後在各方向的高度變化，由於玻璃瓶係水平放置，所以重力方向的高度變化即為圓筒直徑方向的變化情形，定量評估係以整體的最高點為基準，而定性評估則必須考慮到材料厚度不同造成局部變形量的差異性。

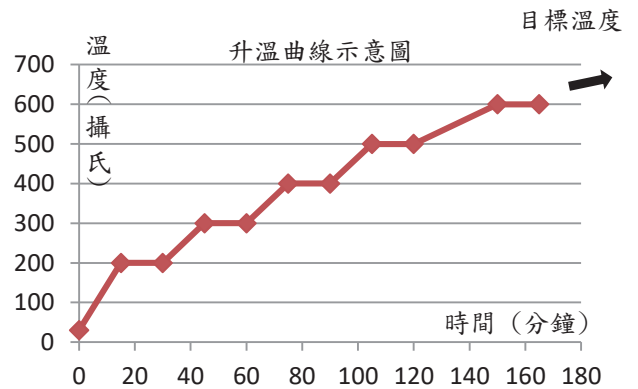


圖 3 升溫曲線示意圖

4. 結果與討論

玻璃瓶試片高溫變形的試驗結果數據如表 1 所示，試驗結果照片如圖 4 至圖 6 所示。

表 1 玻璃瓶試片高溫變形的試驗結果(mm)

組別 溫度 (攝氏度)	變形 方向 縱向尺寸 (變形率)	橫向尺寸 (變形率)	高度尺寸 (變形率)
未加熱	77 (0)	43 (0)	43 (0)
(A)600	78.6 (0.02)	57.7 (0.26)	37.5 (0.12)
(B)650	78.7 (0.02)	62.1 (0.30)	27.4 (0.36)
(C)700	79.5 (0.03)	62.8 (0.31)	19.3 (0.54)
(D)750	81.4 (0.05)	63.7 (0.32)	14.5 (0.66)
(E)775	82.1 (0.06)	64.4 (0.33)	13.0 (0.69)
(F)800	84.9 (0.09)	66.2 (0.35)	9.57 (0.78)



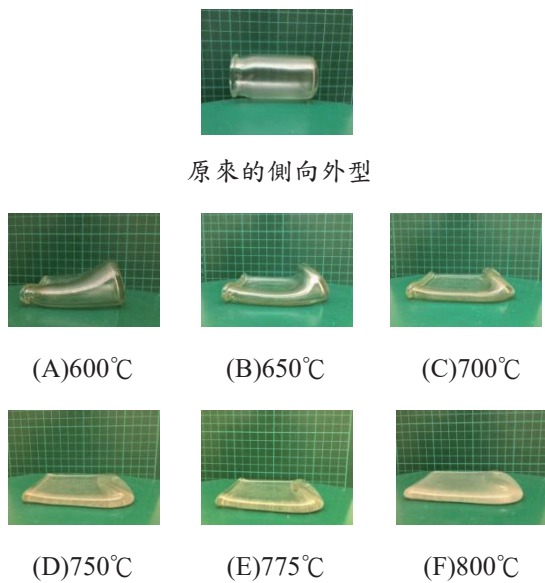


圖 4 玻璃瓶試片高溫變形的試驗結果側向照片

從表 1 的試驗數據可以看出，在攝氏 600 至 800 度的縱向變形率在 2%至 9%之間，橫向變形率在 26%至 35%之間，高度方向的變形率最顯著，在 12%至 78%之間。

配合圖 4 至圖 6 的照片中可以看出，圓筒狀的玻璃瓶在高溫時會從瓶口處強度較小的薄壁開始軟化，而瓶底的支撐強度最大，因此高溫軟化重力坍塌的現象較慢出現。

當玻璃瓶加熱到不同目標溫度時，部分瓶身會開始軟化致使重力坍塌，變形到一定程度後便會應力平衡，亦即，材料本身的支撐強度會與承受軟化材料的坍塌重力達到平衡，因此加熱到目標溫度後，形狀已然成形，持溫時間影響不大。

經過測量玻璃瓶試片在重力方向的厚度變化並計算其塌陷比率，其變形趨勢如圖 7 所示。結果發現，在攝氏 600 度至 700 度之間，條件(A)、(B)、(C)的部分，該比率呈線性變化，而攝氏 750 度至 800 度，條件(D)、(E)、(F)的部分，坍塌逐漸飽和，變形趨於緩和。計算結果顯示，玻璃瓶在攝氏 600 度開始變形，重力方向的厚度塌陷比率只有 12%，在攝氏 800 度時，該比率可以到達 78%。

玻璃瓶試片在橫向寬度以及縱向高度的高溫變形與比率如圖 8 與圖 9 所示，結果發現玻璃瓶塌陷後橫向擴大變形比率很快就達到飽和，大約 30%左右，而縱向高度擴大增加率不超過 10%。

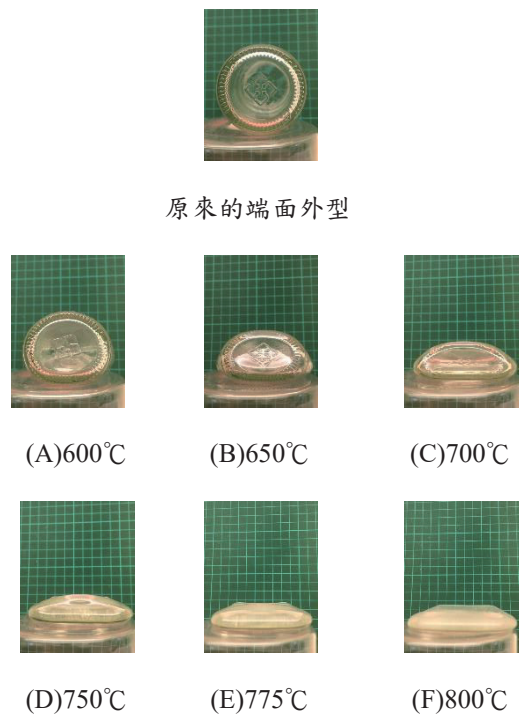


圖 5 玻璃瓶試片高溫變形的試驗結果端面照片

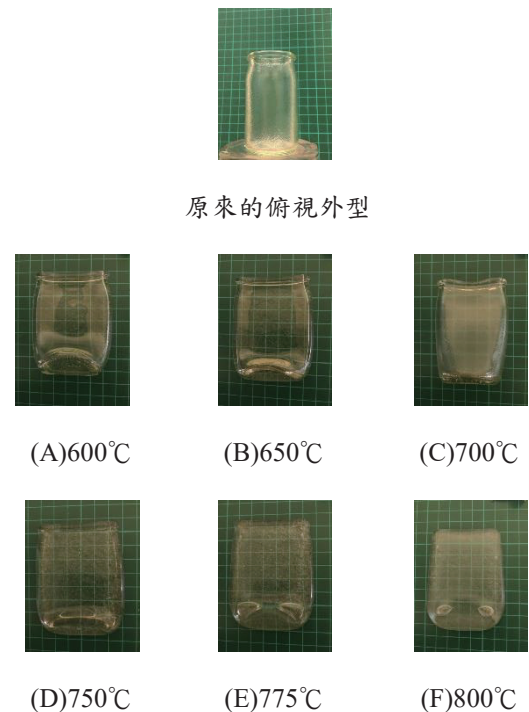
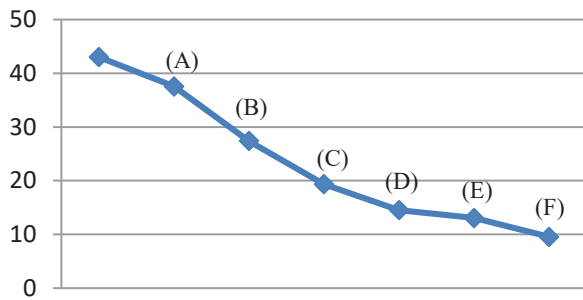
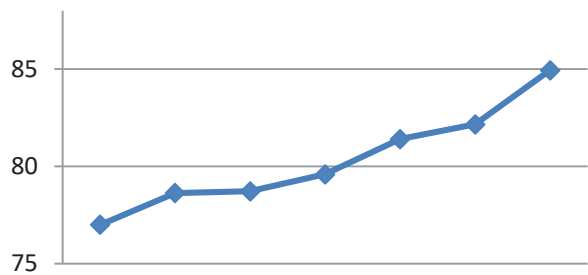


圖 6 玻璃瓶試片高溫變形的試驗結果俯視照片

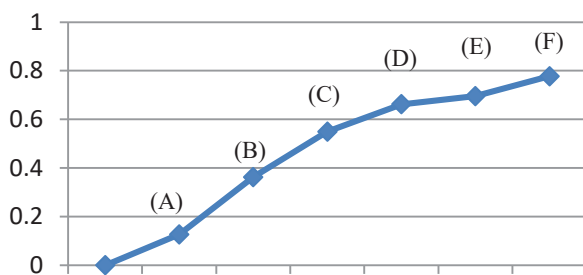
重力方向塌陷變形結果(mm)



縱向擴大變形結果(mm)



重力方向厚度塌陷比率



縱向高度擴大增加率

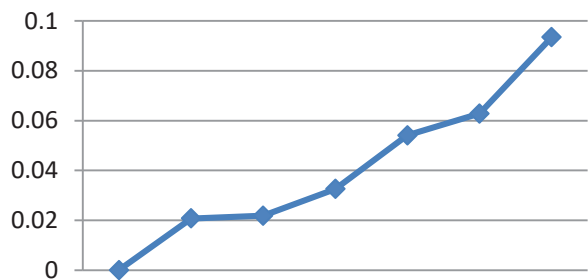
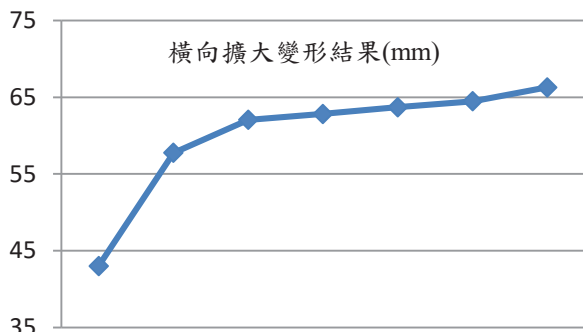


圖 7 玻璃瓶試片在高度方向的高溫變形趨勢，從左至右順序(A)至(F)之加熱條件同圖四。

圖 9 玻璃瓶試片縱向高度的高溫變形趨勢，從左至右順序(A)至(F)之加熱條件同圖四。

橫向擴大變形結果(mm)



橫向寬度擴大增加率

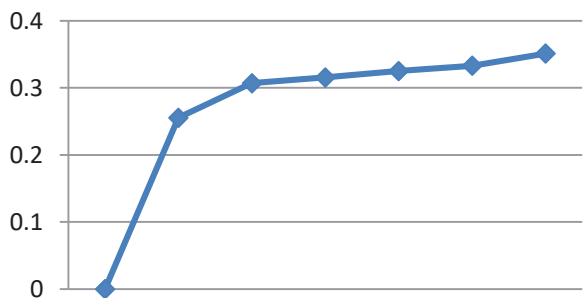


圖 8 玻璃瓶試片橫向寬度的高溫變形趨勢，從左至右順序(A)至(F)之加熱條件同圖四。

5. 結論

由以上的實驗及討論，可以得到下列結論：

1. 根據本文的實驗結果顯示，圓筒狀的玻璃瓶在高溫時會從瓶口處強度較小的薄壁開始軟化，而瓶底的支撐強度最大，因此高溫軟化重力坍塌的現象較慢出現。
2. 當玻璃瓶加熱到不同目標溫度時，部分瓶身會開始軟化致使重力坍塌，變形到一定程度後便會應力平衡，亦即，材料本身的支撐強度會與承受軟化材料的坍塌重力達到平衡，因此加熱到目標溫度後，形狀已然成形，持溫時間反而影響不大。
3. 以本文使用的透明鈉玻璃瓶為例，吾人測量加熱前後在重力方向的厚度變化並計算其塌陷比率，發現在攝氏 600 度至 700 度之間該比率呈線性變化，而攝氏 750 度至 800 度坍塌逐漸飽和，變形趨緩。計算結果顯示，玻璃瓶在攝氏 600 度開始變形，重力方向的厚度塌陷比率只有 12%，在攝氏 800 度時，該比率可以到達 78%。



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，玻璃洵湧·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，波光瑣彩：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. 玻璃的基本認知，
<https://blog.xuite.net/tsai.mc39/IN/346070740>。
9. 玻璃的知識介紹，
<https://blog.xuite.net/tsai.mc39/IN/346071498>。

The results showed that the cylinder-shaped glass bottle began to soften from the thin wall with less strength at the top of the bottle at high temperature. When the glass bottle is heated to different target temperatures, the bottle body will be stress-balanced when softened and deformed to a certain shape.

Taking the transparent sodium glass bottle used in this paper, we measured the scale change in the direction of gravity before and after heating and calculated its collapse rate. We found that the thickness collapse rate in the direction of gravity could reach 78% at 800 degrees Celsius.

Keywords: recycling glass bottles, high temperature deformation, resource reuse.

The Influences of High Temperature Variation on the Natural Transformation of Glass Bottle

Li-Te Lu^{1*}, Lin-Hung Chen¹, 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

In this paper, the experiment about the high temperature deformation of glass bottle was explored. This experiment heated the cylinder-shaped glass bottle to different target temperatures, such as 600 to 800 degrees Celsius by an electrical temperature controller in a slowly heating rate, and then with furnace cooling to room temperature. At last, we measured the deformations of different conditions to explore the high temperature deformation mechanism of glass bottle.

