

新竹市第43屆中小學科學展覽會

作品說明書

科 別：生活與應用科(一)

組 別：國中組

作品名稱：熱烈番!玻璃珠裂痕的溫度藝術與物理科學

關 鍵 字：自製加熱爐、溫度變化率、玻璃珠飾品

編 號 :114JA-I002



熱烈番!玻璃珠裂痕的溫度藝術與物理科學

摘要

我們研究發現:只要短時間迅速加熱玻璃珠，例如用噴槍把玻璃珠迅速升溫時會裂外面，整個噴裂炸飛，這樣太危險，因此我們不用噴槍實驗；使用酒精燈加熱玻璃珠60秒，再迅速冷卻於水中10秒，玻璃珠會裂裡面，若是冷卻於油中10秒，玻璃珠並不會裂！探討其原因:水比油有更高的熱導率，快速帶走熱量，導致玻璃珠冷卻時，內外應力相差大而破裂，也嘗試換玻璃棒來控制裂痕，的確和單位時間的溫差有關係。我們還有訪談玻璃工藝者跟比較材料理論值計算，知道我們的玻璃材質得到實證並有信心去控制裂痕的多寡。應用方面，玻璃珠燒裂後照光會十分的光彩奪目，可以用來做成飾品如封面所示的樹盆燈飾，甚至可以做成景觀藝術！也可以把碎玻璃粉末化來噴一般的玻璃，做成霧面玻璃。

壹、前言

一、研究動機

在一次學校社團的老師課程中，老師教我們把玻璃珠變成光彩奪目的寶石!就是先加熱玻璃珠再迅速冷卻。哇嗚!太神奇了!把這燒裂的玻璃珠對著陽光看，十分耀眼!於是我們設計了一些實驗，想探討其中的訣竅奧秘。

二、研究目的

- (一) 研究同一熱源，加熱時間對同種規格玻璃珠(直徑1.6cm)裂痕的影響。
- (二) 研究不同的冷卻時間對玻璃珠裂痕的影響。
- (三) 研究不同的冷卻水量對玻璃珠裂痕的影響。
- (四) 研究不同的冷卻水溫對玻璃珠裂痕的影響。
- (五) 研究不同的冷卻油溫對玻璃珠裂痕的影響。
- (六) 探討玻璃珠透明度對玻璃珠裂縫程度的影響。
- (七) 研究不同玻璃材質：比較硼硅玻璃(玻璃棒)和鈉玻璃(玻璃珠)的裂紋形成機制。

三、文獻探討與研究原理

(一)、紅外線溫度計介紹:

1.紅外線溫度計，常分為固定式測溫儀與手持式測溫槍，是一種使用偵測物體表面的紅外線強度、波長，進而達成溫度測量的溫度計。因為物體溫度越高時，紅外線強度越大，所以可以使用紅外線測量溫度，測量範圍一般在400℃以內，我們實驗的溫度計是使用手持式測溫槍。

2.使用原理：將被測物體輻射出的紅外線由透鏡聚集於檢測器上，經機器計算紅外線的強度與波長，顯示測量到的物體表面溫度。

3.優點：不用直接接觸待測物相對比較安全，可測量高溫，反應時間快，支援多種訊號輸出

4.缺點(使用限制)：

(1)需要針對不同的被測物體設定不同的物體紅外發射率。

(2)容易受到物體表面反射影響。

(3)只能測物體表面溫度，不能測量物體內部溫度。

註：發射率為熱輻射體的輻射出射度與處於相同溫度的全輻射體(黑體)的輻射出射度之比，金屬的發射率為0.1~0.4，玻璃的發射率為0.85，布、塑料為0.95

(二)、玻璃材質介紹:

1.玻璃不具有長程排序性(大於20奈米)，不像晶體那樣重複排列，像拼圖幾塊成一小塊，每一小塊都是重複圖案這樣。玻璃內部組成是短程排序性(5奈米)，像拼圖隨意幾塊拼在一起，圖案沒有一樣，形狀也沒有相同。玻璃就是混合物，內部因為參雜物而性質變化大，我們實驗使用的是鈉玻璃珠、硼硅玻璃棒，主題上明確。

2.玻璃珠內有空氣，根據玻璃工藝者李蓮春老師提供玻璃燒製技巧的經驗，在玻璃工藝品製作過程中會利用手法融入空氣，產生可預期的玻璃裂痕。我們實驗用的玻璃珠中可能含有肉眼所不能見之空氣於其中，於是當溫度急速降溫時，玻璃珠其中的空氣析出膨脹造成玻璃龜裂。下圖一是李老師把我們的玻璃珠用瓦斯氣和氧氣一起燒熔再拉成長條的玻璃，細看真的有許多空氣在裡面。



圖一實驗所用玻璃珠燒熔再拉長有許多空氣在裡面

以下是李蓮春老師提供我們玻璃燒製的資訊:

(1)玻璃的製造是矽砂土加上其他的混合物改變硬度、顏色等。

(2)玻璃的製造煉製像是煉鐵爐一樣製造鐵錠，成為玻璃晶條，再做其它加工製造。

(3)玻璃珠是一截一截裁斷玻璃晶條、折玻璃晶條成圓珠或加熱玻璃晶條繞圈的過程，過程中一定會持續混入接觸空氣，再打磨成玻璃珠。

(4)我們的玻璃珠經由色澤透明度跟加熱後的延展性，顯示是鈉玻璃為原料，李老師說鈉玻璃這種材料要先緩慢加熱，才可以最後用煤火爐加熱到500度以上高溫塑型，直接加熱容易噴發爆裂，跟我們一開始想用噴槍加熱而產生炸裂情形一樣。

貳、研究設備與器材

- 一. **熱源穩定類:** 自製不鏽鋼隔熱箱、酒精燈*2、TATUNG烤箱*2、噴燈
- 二. **冷卻物質:** 蒸餾水、得意的一天葵花油、100mL燒杯*10、2000mL燒杯*4、酒精、量筒
- 三. **加熱材料與相關物品:** 鈉玻璃珠*100顆、矽玻璃棒*6根、陶瓷纖維網、三腳架
- 四. **溫度計種類:** 紅外線溫度計、酒精溫度計、金屬溫度計
- 五. **防護設備:** 布手套、護目鏡、大鉗子
- 六. **其他物品:** 打火機、精密電子秤(準確至0.01g)、直尺、碼表、滴管

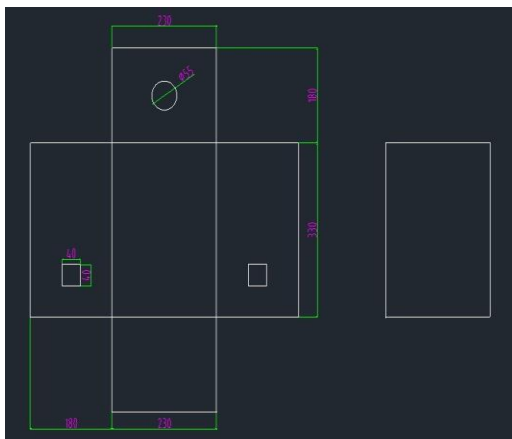


圖二 使用器材與藥品

參、研究過程與方法

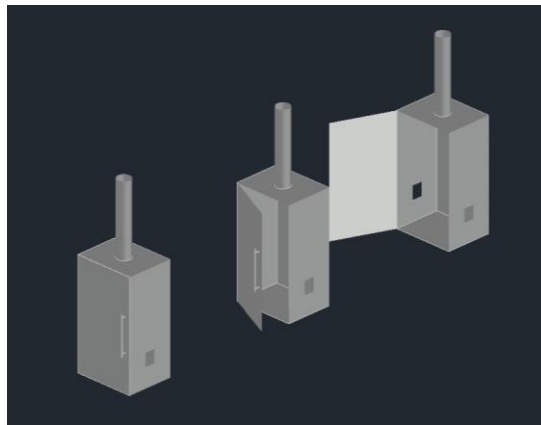


圖三 自製有煙囪的隔風不鏽鋼箱
(上方設計有煙囪，兩側面的下方有進氣口)



圖四 不鏽鋼箱的平面展開圖。

軟體:AutoCad



圖五 不鏽鋼箱的3D設計圖。

軟體:AutoCad

為了擁有穩定的熱源，我們嘗試了好久，從最初的用餐防疫隔板，酒精燈火焰一直飄，接著改良成紙箱加煙囪，兩側挖進氣口，酒精燈火焰進一步穩定了，但是實驗加熱久了，感覺紙箱快軟塌變形了。最後我們使用**最新自製有煙囪的隔風不鏽鋼箱**，兩側底部有進氣口，空氣從此處補充注入，燃燒後熱氣從煙囪排出，裡面放酒精燈，從此，我們擁有穩定加熱的熱源，如圖三。

註：圖四為不鏽鋼箱的平面展開圖，圖五為不鏽鋼箱的3D設計圖，繪圖軟體為AutoCad

一、流程:

實驗一至實驗六均用此方法，但一次只改變一個變因

(一)在自製有煙囪的隔風不鏽鋼箱裡點燃酒精燈，預熱。

(二)把玻璃珠纏繞鐵絲固定並固定在鐵架上，如圖六。

(三)把玻璃珠放在火焰的正上方，並同時按下碼表計時(開始計時加熱時間)

(四)加熱時間一到立刻移開並用紅外線溫度計測量彈珠的溫度如圖七，每次測量距離皆相同

(五)把玻璃珠迅速放入冷卻水中冷卻10秒。

(六)拿出玻璃珠立即測量彈珠的溫度(使用紅外線溫度計)和水溫(使用酒精溫度計)



圖六



圖七

二、實驗步驟:

實驗(一)探討同一熱源，**加熱時間**對同種規格玻璃珠(直徑1.6cm)裂痕的影響。

操縱的變因:同酒精燈對同種同規格大小玻璃珠的加熱時間(每次實驗增加10秒)

控制的變因:同酒精燈、同加熱位置、同冷卻水水溫和水量、冷卻時間皆10s、同環境

實驗(二) 不同的**冷卻時間**對玻璃珠裂痕的影響

操縱的變因:酒精燈對玻璃珠加熱後放入水中的冷卻時間

控制的變因:同酒精燈、同加熱位置、同加熱時間60秒、同樣的冷卻水水溫和水量、同種同規格大小玻璃珠、同環境

實驗(三) 研究不同的**冷卻水量**對玻璃珠裂痕的影響

操縱的變因:酒精燈對玻璃珠加熱後放入水中的水量

控制的變因:同酒精燈、同加熱位置、同加熱時間60秒、同樣的冷卻水水溫和冷卻時間、同種同規格大小玻璃珠、同環境

實驗(四)研究不同的**冷卻水溫**對玻璃珠裂痕的影響

操縱的變因:酒精燈對玻璃珠加熱後放入水中的水溫

控制的變因:同酒精燈、同加熱位置、同加熱時間60秒、同樣的冷卻水水量和冷卻時間、同種同規格大小玻璃珠、同環境

實驗(五)研究不同的**冷卻油溫**對玻璃珠裂痕的影響

操縱的變因:酒精燈對玻璃珠加熱後放入油中的油溫

控制的變因:同酒精燈、同加熱位置、同加熱時間60秒、同樣的冷卻油的質量和冷卻時間、同種同規格大小玻璃珠、同環境。

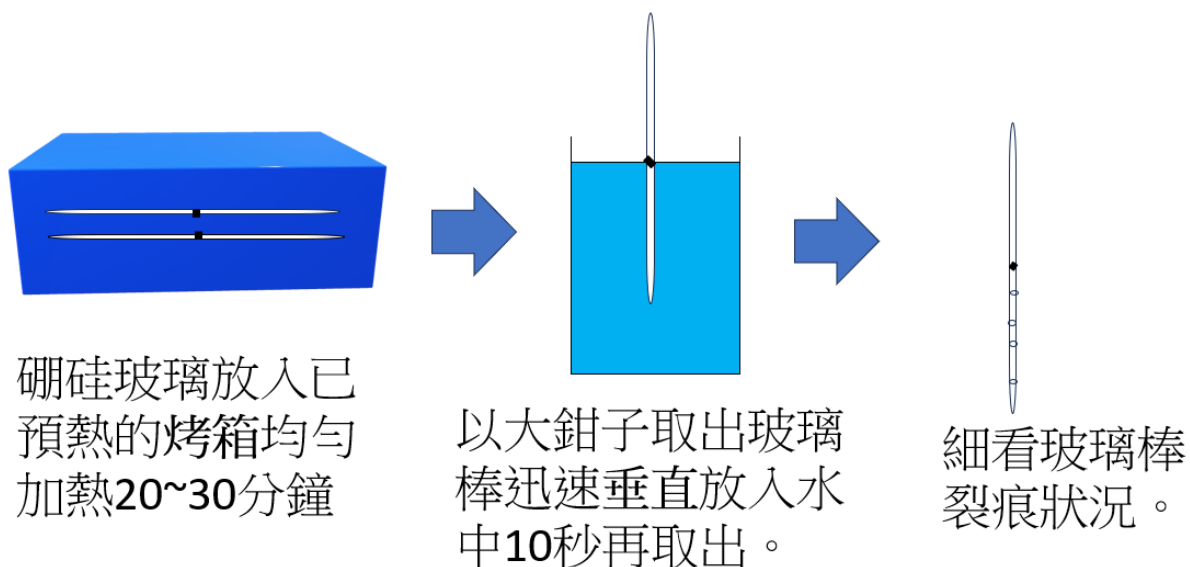
實驗(六)探討**玻璃珠透明度**對玻璃珠裂縫程度的影響

操縱的變因:酒精燈對相同大小但不同透明度的玻璃珠

控制的變因:同酒精燈、同加熱位置、同加熱時間60秒、同樣的冷卻水水量、水溫和冷卻時間、同種同規格大小玻璃珠、同環境

實驗(七)研究不同玻璃材質：比較**硼硅玻璃(玻璃棒)**和**鈉玻璃(玻璃珠)**的裂紋形成機制。

1.流程示意圖:















2.實驗方法:在全新硼硅玻璃(玻璃棒)的正中間用奇異筆畫一圈做標記，再放入已預熱200℃的**烤箱**均勻加熱20~30分鐘，以大鉗子取出玻璃棒再迅速**垂直**放入裝有2000mL水的大燒杯中，標記處與水面對齊，即**一半在水中一半在空氣中**，觀察單位時間的溫差對裂紋的影響。

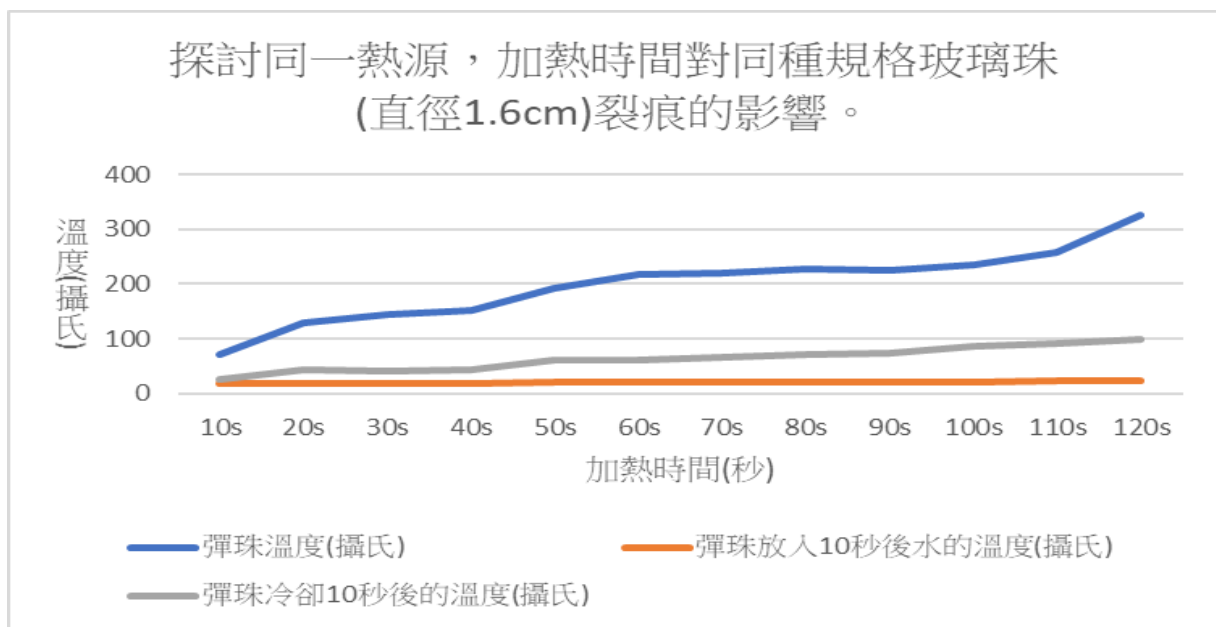
操縱的變因：玻璃棒和水的**溫差**。

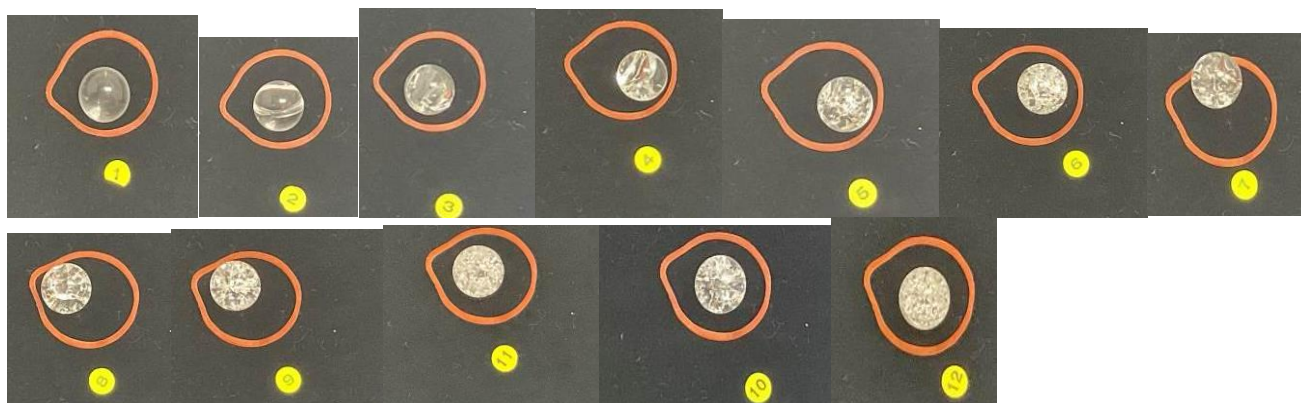
控制的變因：同一烤箱、同加熱時間、冷卻水的質量2000mL、冷卻時間10s、相同大小玻璃棒、相同環境條件。

肆、實驗結果與討論

實驗(一) 探討同一熱源 加熱時間對同種規格玻璃珠(直徑1.6cm)裂痕的影響。
 氣溫:16℃ 冷卻水的水溫:16℃ 濕度:52% 水量:50mL 冷卻時間:10s 氣壓:1013.112百帕

彈珠編號	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
加熱時間(S)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
彈珠溫度(℃)	71.9	129.0	143.1	151.2	192.3	216.6	220.3	228.1	224.4	234.0	256.9	325.4
彈珠放入10秒後水的溫度(℃)	17	17.5	17.9	18.5	19.5	20.1	20.5	20.4	21.0	21.4	22.1	22.4
彈珠冷卻10秒後的溫度(℃)	25.4	42.9	41.8	44.1	60.8	61.8	65.0	71.3	73.2	86.1	89.9	97.4
裂痕數量(條)	0	1-3	1-3	1-3	8-10	8-10	8-10	8-10	15-18	15-18	15-18	15-18
照片												













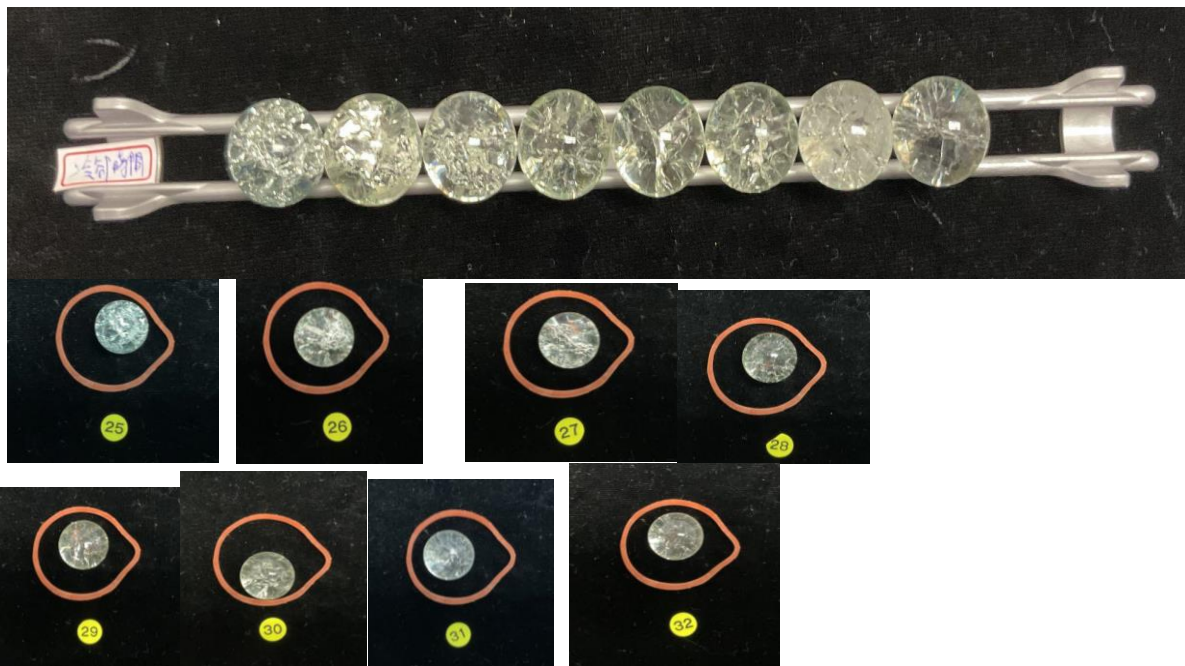
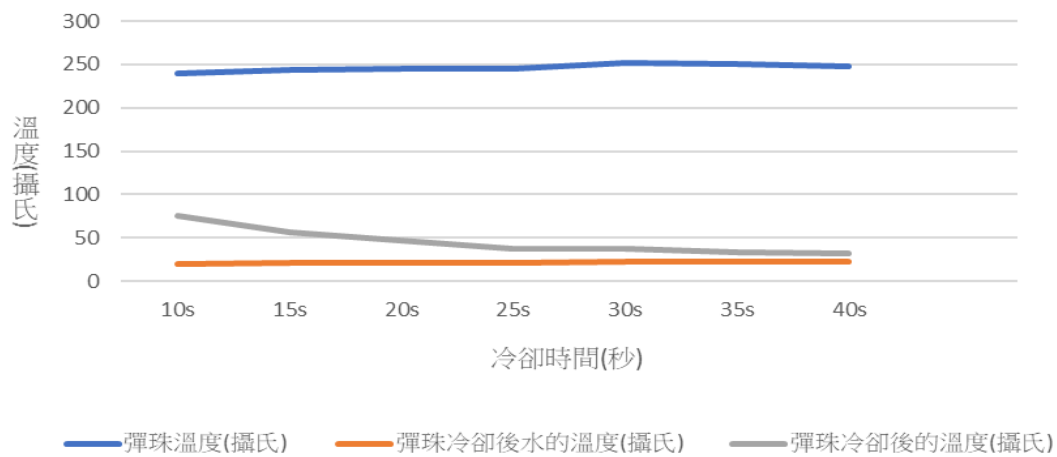
- 1.加熱時間越長，玻璃珠溫度越高，迅速放入水中水的溫度也越高。
- 2.加熱時間10s(彈珠編號1)並無裂痕。
- 3.加熱時間20s、30s、40s(彈珠編號2、3、4)只有些許裂痕，**裂痕有1~3條**。
- 4.加熱時間50s、60s、70s、80s(彈珠編號5、6、7、8)裂痕平均分布玻璃珠，**裂痕有8~10條**。
- 5.加熱時間90s、100s、110s、120s(彈珠編號9、10、11、12)玻璃珠裂痕非常密集，分布整顆彈珠，**裂痕有15~18條**。
- 6.加熱時間越短，玻璃珠溫度低，和水的溫差小，裂痕少。加熱時間越長，玻璃珠溫度越高，和水的溫差越大，裂痕就越多，但加熱時間到90s時裂痕就已密集且分布整顆玻璃珠，再繼續燒也不會有明顯變化。
- 7.加熱時間從60s~100s，對直徑1.6cm的玻璃珠溫度差異不大。因此以下實驗酒精燈加熱時間均訂為60s。
- 8.由於水的熱導率高，快速帶走熱量，導致玻璃珠冷卻時內外應力相差大而破裂。
- 9.當加熱時間60s左右 或彈珠溫度200℃以上，放入水中的瞬間有少許的水氣化。
- 10.鈉玻璃珠在加熱到高溫一段時間後於水中降溫會產生很多龜裂裂痕，為這批實驗鈉玻璃珠，降溫時內外溫度造成空氣壓力大向外擠出，內外冷熱膨脹也造成玻璃晶體排列不均勻分布更明顯，會產生大量的裂痕，更高的溫度也沒有改變一開始鈉玻璃珠中的空氣分布跟晶體排列，造成加熱到一定溫度後的裂痕並沒有明顯再更多。

實驗(二) 不同的冷卻時間對玻璃珠裂痕的影響

氣溫:16℃ 濕度:52% 水量:50mL 氣壓:1013.112百 冷卻水的水溫:16℃ 加熱時間:60S

彈珠編號	(25)	(26)	(27)	(28)	(29)	(30)	(31)	(32)
冷卻時間(S)	5	10	15	20	25	30	35	40
彈珠溫度(℃)	238.7	239.6	244.3	244.8	245.1	251.4	250.3	247.3
彈珠冷卻後水的溫度(℃)	19.2	20.5	21.1	21.2	21.7	22.1	22.5	23.2
彈珠冷卻後的溫度(℃)	96.0	75.3	55.9	47.1	38.1	38.0	33.4	32.3
彈珠 照片								
裂痕數量(條)	15-18	15-18	10-13	10-13	8-10	8-10	8-10	8-10

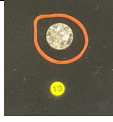
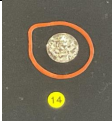


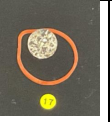


不同的冷卻時間對玻璃珠裂痕的影響

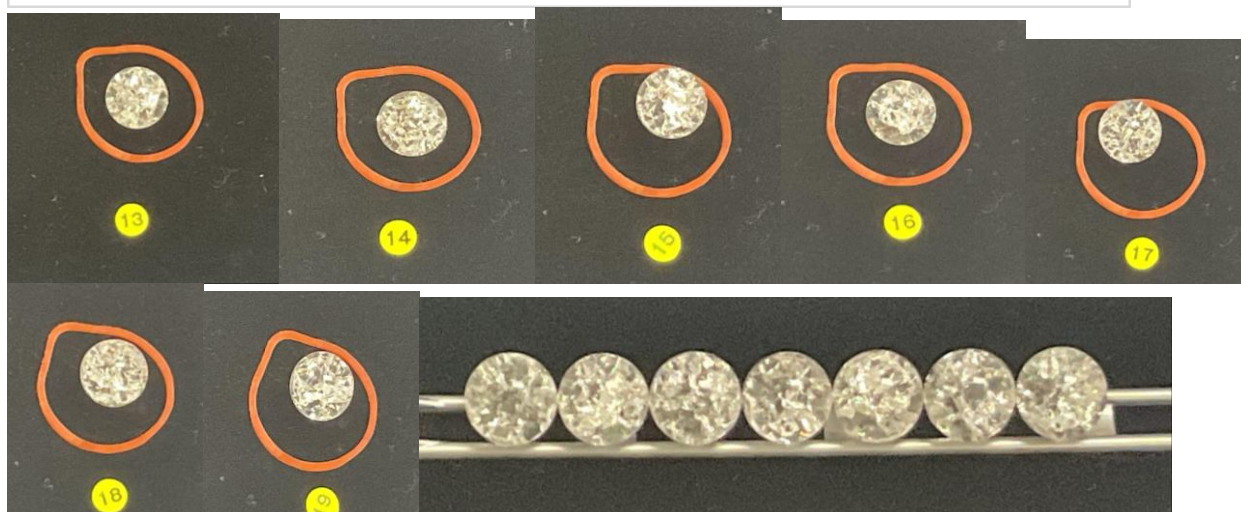
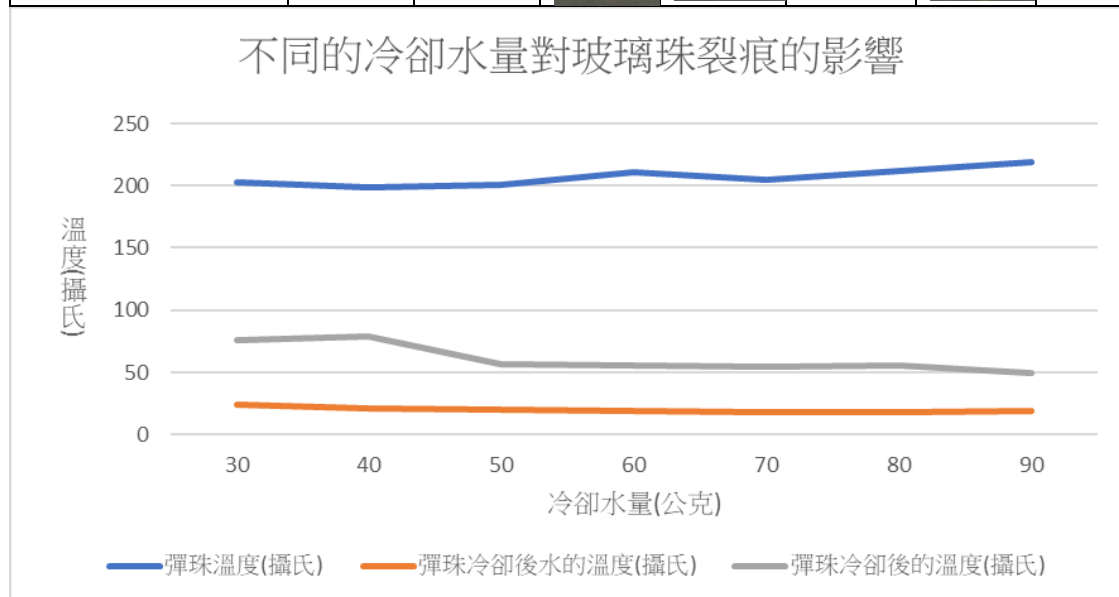


1. 冷卻時間5s、10s(圖25、26)裂痕最多，且分布整個玻璃珠。
2. 冷卻時間15s、20s(圖27、28)裂痕分布玻璃珠，但較圖25、26少
3. 冷卻時間25s、30s、35s、40s(圖29、30、31、32)裂痕少且較不平均。
4. 冷卻時間越短，玻璃珠溫度急速下降，所以裂痕多。
5. 冷卻時間越長，玻璃珠溫度越低。冷卻時間越短，玻璃珠溫度越高。
6. 冷卻時間越長，玻璃珠的熱能比較有時間傳遞出去(給水)，因此裂痕越少。

實驗(三) 研究不同的冷卻水量對玻璃珠裂痕的影響

氣溫:16℃ 冷卻水的水溫:16℃ 濕度:52% 氣壓:1013.112百帕 加熱時間:60S

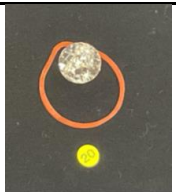

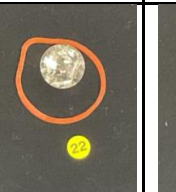
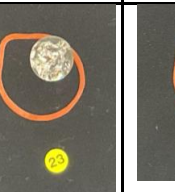
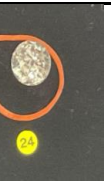
彈珠編號	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)	(18)	(19)
冷卻水的質量(g)	30	40	50	60	70	80	90
彈珠溫度(℃)	203.2	198.9	200.3	211.1	205.1	212.3	218.8
彈珠冷卻後水的溫度(℃)	24.0	21.2	20.3	19.0	18.2	17.8	18.5
彈珠冷卻後的溫度(℃)	75.6	78.9	56.3	55.6	54.8	55.1	49.4
裂痕數量(條)	15~18	15~18	15~18	15~18	15~18	15~18	15~18
照片							

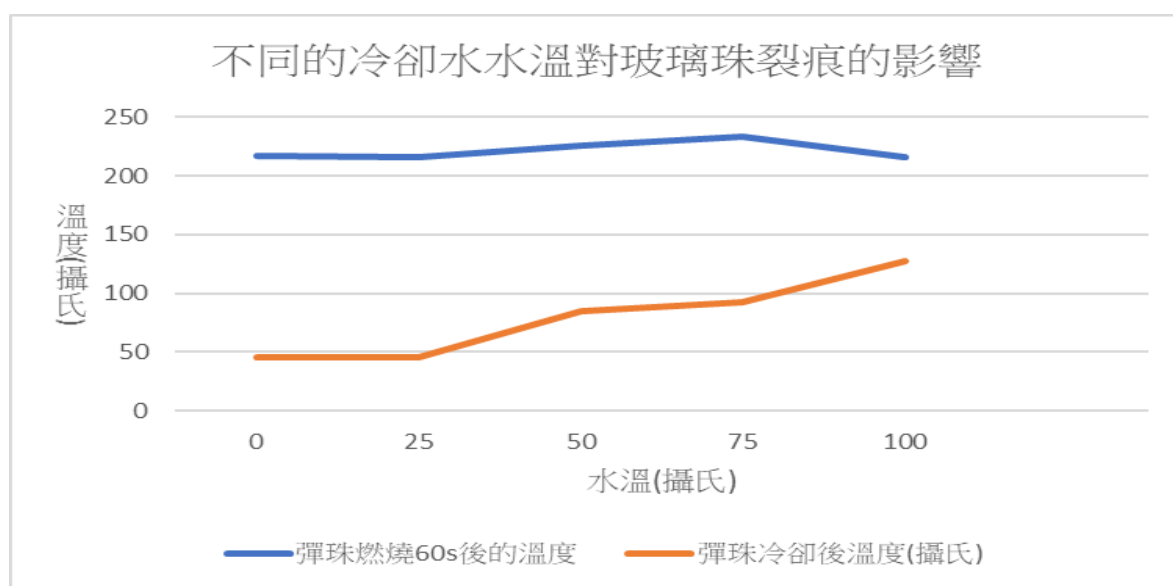


- 1.冷卻水的體積越大，實驗後量測玻璃球溫度不易被影響。
- 2.在冷卻時間相同的情況下，冷卻水的質量大小影響玻璃珠溫度的高低不明顯。
- 3.冷卻水的體積大小，玻璃珠與水的溫差影響不明顯，影響玻璃珠的裂痕情況也不明顯。

實驗(四)不同的冷卻水水溫對玻璃珠裂痕的影響

氣溫:16°C 濕度:52% 冷卻時間:10S 氣壓:1013.112百帕 水量:50mL 加熱時間:60S 冷卻時間:10s





彈珠編號	(20)	(21)	(22)	(23)	(24)
冷卻水的水溫(°C)	0	25	50°C	75°C	100°C
彈珠加熱後的溫度(°C)	216.9	215.9	225.9	233.5	216.6
彈珠冷卻後溫度(°C)	45.5	45.7	84.8	92.8	127.8
彈珠照片					
裂痕數量(條)	21-25	15-18	10-13	10-13	8-10



1. 水溫越低，因為玻璃珠單位時間內溫度下降越多，裂痕密集；水溫越高，因為玻璃珠溫度單位時間內變化較小，裂痕較稀疏。

實驗(五)研究不同的冷卻油溫對玻璃珠裂痕的影響

冷卻油的質量50.00g、冷卻時間10S、同種同規格大小玻璃珠、同環境
氣溫:14℃ 濕度:55% 氣壓:1013.112百帕 加熱時間:60S

玻璃珠編號	(39)	(40)	(41)	(42)
冷卻的油溫(℃)	5	100	150	200
燃燒60s後彈珠溫度(℃)	156.3	135.3	128.9	194.2
彈珠冷卻後溫度(℃)	90.3	126.5	163.1	155.3
彈珠照片				
裂痕數量(條)	0	0	0	0



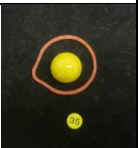

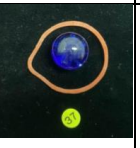
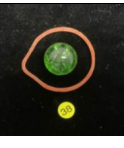
1.因為油比水的沸點高，因此我們選擇使用油來繼續之前冷卻物質的溫度影響玻璃珠裂痕的實驗，並且比較兩種冷卻物質的差異，然而實驗結果放入油中的玻璃珠皆不會裂，推測因為油的導熱率0.2較水的導熱率0.6差，導致玻璃珠不會有劇烈的熱脹冷縮情況。

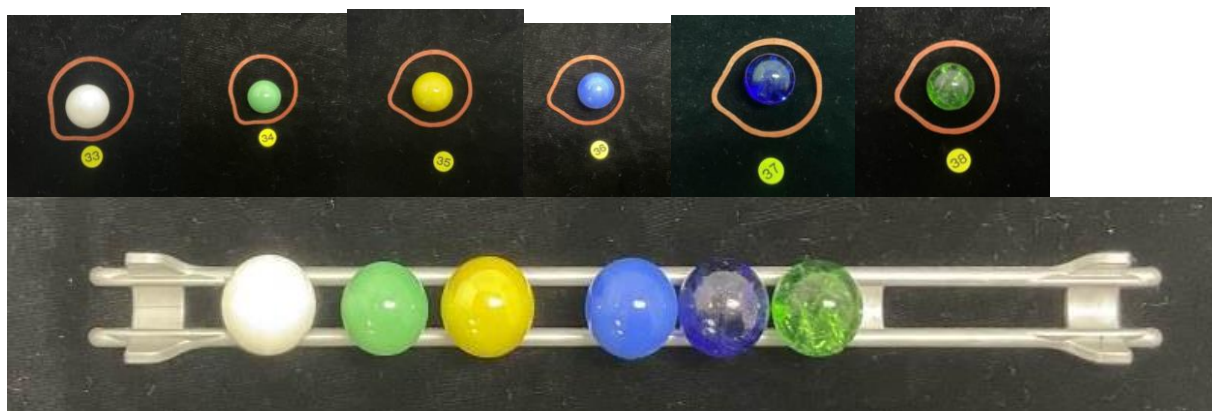
2.用油冷卻之後的玻璃珠，冷卻之後沒有像泡水之後的玻璃珠一樣，溫度驟降、裂痕明顯，反而是降溫不多，也完全沒有裂痕，證實油導熱率比水低的特性。



實驗(六)探討玻璃珠透明度(不同顏色)對玻璃珠裂縫程度的影響

氣溫:17.5℃ 濕度:60% 冷卻時間:10S 水溫:16℃ 氣壓:1013.569百帕 水量:50毫升
 燃燒時間:60S 冷卻時間:10S

彈珠品種	白色 不透明	綠色 不透光	黃色 不透光	藍色 不透光	綠色 透明	藍色 透明
彈珠編號	33	34	35	36	37	38
彈珠燃燒60s後的溫度(℃)	221.6	193.3	207.1	205.6	181.6	162.3
彈珠冷卻10s後的溫度(℃)	65.2	61.8	60.1	52.9	45.6	50.8
彈珠冷卻後水的溫度(℃)	20.1	19.2	19.0	19.4	19.1	19.0
彈珠照片						
裂痕數量(條)	0	0	0	0	8-10	8-10









- 1.不透光的玻璃珠觀察不到裂痕，如上圖。
- 2.不透光的玻璃珠，是由玻璃混合其他物質所產生，不透光玻璃物質的熱導率會提升，造成在加熱相同的時間下，最終溫度比較高，我們的實驗數據有此趨勢。
- 3.透明(光)的玻璃珠，因為可以透光(能量)，所以紅外線溫度計量到的溫度較低。

實驗(七)、研究不同玻璃材質：比較**硼硅玻璃**和**鈉玻璃**的裂紋形成機制。

操縱的變因:玻璃棒和水溫差。

控制的變因:同型號烤箱兩台、冷卻水質量2000mL、冷卻時間10s、全新玻璃棒、同環境。

玻璃棒編號	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
烤箱溫度設定(°C)	200	250	250	250	250
加熱時間(分)	10	20	30	30	30
冷卻水水溫(°C)	19	19	9.2	86	50
溫差(°C)	181	231	240.8	164	200
<p>右圖是實驗照片 下圖是示意圖</p> 					
裂痕數量	3 (最底部)	12	11	8	9

實驗結果與討論:

1. 硼硅玻璃棒和的鈉玻璃珠成分、形狀不同: 鈉玻璃珠為三維球形空間，硼硅玻璃棒則是一維線形空間，考量這因素，玻璃棒加熱後的裂痕狀態也會不同；但我們試著研究一維線形玻璃棒的裂痕，再回推三維球形的狀況。
2. 如同鈉玻璃珠，硼硅玻璃棒加熱時間愈久後放入相同水溫後裂痕會愈多，如編號1和2
3. 冷卻水溫愈低，硼硅玻璃棒加熱後如與水溫差更大，裂痕也會越多，整合前面實驗步驟有嘗試用油降溫，可以推論**玻璃裂痕的產生跟使用的冷卻液體有關**。
4. 將玻璃棒的下半部放入水中冷卻，只有放進水中的部分有裂，接近水和空氣交界處裂痕較多，至於空氣中的另一半則沒有裂痕產生。
5. 玻璃棒的裂痕為**環狀**碎裂，一層一層沒有交叉，層次分明，和鈉玻璃珠錯綜複雜的裂痕不一樣，有一定規律，因此我們推測，同樣身為玻璃製品的玻璃棒，雖然維度不同，但是有規則的碎裂，以**溫度變化最劇烈的方向產生裂痕**，即環狀的裂痕和玻璃棒呈現垂直，並依材質有其裂痕形狀。
6. 玻璃棒產生裂痕後，比玻璃珠易碎散，只要外力稍微碰撞就斷裂，推測玻璃珠是球形，當受到外力時較能平均分散力量，且相互嵌合較不易碎散；但是玻璃棒是柱狀，受到外力後不易分散力量，在同一點受力後造成原本的裂痕整個斷面碎裂，柱身分截，如編號5玻璃棒。
7. 硼硅玻璃10秒內和水的溫差150度C以上會裂；鈉玻璃珠10秒內和水的溫差100度C以上會裂，可見，硼硅玻璃的性質較鈉玻璃珠穩定，可承受較高的環境溫差變化影響。
8. 鈉玻璃球的裂痕是放射交織狀。

伍、結論

一、利用我們自行設計的設備如圖三~自製有煙囪的隔風不鏽鋼箱，上方設計有煙囪，兩側面的下方有進氣口，可以防止火焰晃動；酒精燈加熱鈉玻璃珠，熱源溫度限制大約250℃。在急速冷卻時間10秒內，**烤鈉玻璃珠與冷卻水溫差越大，裂痕也越多，加熱60s後裂痕平均分布玻璃珠**，加熱時間90s以上，玻璃珠裂痕非常密集，分布整顆玻璃珠，會更容易碎裂，但繼續燒也不會有明顯變化。

二、更改**冷卻液體為沙拉油**後，用先前實驗條件來測試，鈉玻璃珠**不會裂開**，我們證實與**熱導率**有關。

三、鈉玻璃珠跟冷卻水溫差足夠大時，冷卻時間短，裂痕多，是因為鈉玻璃珠溫度急速下降，降溫時內外溫度造成空氣壓力大向外擠出，內外冷熱膨脹也造成玻璃晶體排列不均勻分布更明顯，會產生大量的裂痕；冷卻時間長，裂痕較少，因為鈉玻璃珠的熱有時間可以傳遞出去給水。

四、在冷卻時間相同的情況下，冷卻水的水量多寡在我們實驗冷卻時間(10秒)下，並不明顯影響彈珠溫度的高低，冷卻水接觸玻璃珠後的水溫提升較明顯。

五、硼硅玻璃棒裂痕是分層，以**溫度變化最劇烈的方向產生裂痕**，裂開後容易斷裂數截，而鈉玻璃球的裂痕是放射交織狀。

六、不透光的玻璃珠很難觀察到裂痕。

七、經由訪談玻璃工藝者、我們的實驗觀察跟理論推算(如附件一)，我們可以說經由實驗瞭解到探討的玻璃特性，並控制裂痕數目。先從**外型色澤**推估材質、經由一小批樣本抓到樣本**質量大小的裂痕溫度區間**(如實驗鈉玻璃珠加熱到129度以上產生少數裂痕、216度以上裂痕幾乎不變多)、**裂痕形狀**由水跟玻璃之間的溫差變化最劇烈的方向產生，並依**玻璃材質**還會有**裂痕差異**。所以我們有信心初步測試後，可以**掌握拿到未知玻璃時，控制裂痕的方式**。

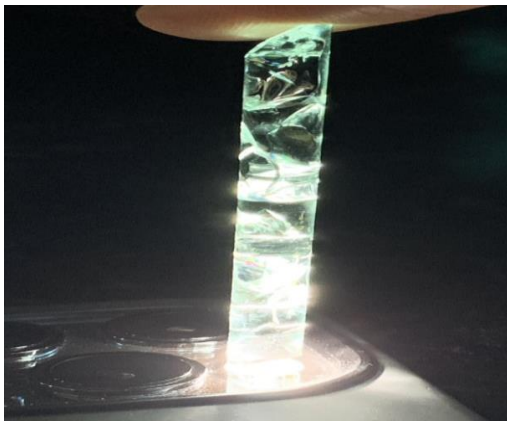
陸、未來展望

一、我們研究燒烤鈉玻璃珠或硼硅玻璃棒再急速冷卻於水中的實驗，可以解釋自然界的岩石風化現象，都是短時間內溫度變化大造成的。近日日夜溫差大，或是一會兒艷陽高照一會兒又是冷鋒來到下雨、氣溫驟降，大樓外牆磁磚剝落砸傷人，或是舊大樓雨遮外牆掉落砸到車子，時有耳聞，我們的實驗也可以解釋這些現象。

二、應用：產生裂痕的玻璃珠可以做成燈飾品，如家居情境擺飾(如下圖所示)、室外路墩車擋(如下圖所示)、項鍊的墜子等等，也可以把燒裂玻璃珠的碎玻璃粉末化來噴一般玻璃，做成霧面玻璃。



燈飾



示意圖／shutterstock 達志影像



網路照片

柒、參考資料

1. 紅外線溫度計原理<https://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E7%B4%85%E5%A4%96%E7%B7%9A%E6%BA%AB%E5%BA%A6%E8%A8%88>
2. 發射率https://www.google.com/search?q=%E7%99%BC%E5%B0%84%E7%8E%87&oq=%E7%99%BC%E5%B0%84%E7%8E%87&gs_lcrp=EgZjaHJvbWUyCQgAEEUYORiABDIGCAEQABgeMgYIAhAAGB4yBggDEAAYHjIICAQQABgFGB4yCAGFEAAYBRgeMggIBhAAGAUYHjIICAcQABgFGB4yCAGIEAAYBRgeMggICRAAGAUYHgCALACAA&sourceid=chrome&ie=UTF-8&safe=active&ssui=on
3. 國中康版自然B3Ch5熱對物質的影響、熱平衡。
4. 熱脹冷縮 維基百科<https://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E7%83%AD%E8%83%80%E5%86%B7%E7%BC%A9>
5. 玻璃的藝術與科技：玻璃 – 排列不規則的固體<https://scitechvista.nat.gov.tw/Article/C000003/detail?ID=65dd1546-d4fb-4ac6-ad33-3c83632eba9f>

附件一：鈉玻璃珠與硼硅玻璃棒進入不同液溫中理論推算

1. 理論推算目的

1. 研究 鈉玻璃珠 與 硼硅玻璃棒（派熱克斯玻璃） 在高溫後浸入不同水溫中的冷卻行為。
2. 比較兩者的熱應力、裂紋分佈及影響因素。
3. 探討如何降低玻璃因熱衝擊產生裂紋的風險。

2. 材料性質對比

性質	鈉玻璃	硼硅玻璃
熱膨脹係數 (10^{-6} /K)	9 - 10	3.3
楊氏模量 (GPa)	50 - 70	64 - 67
抗拉強度 (MPa)	30 - 50	33 - 55
導熱率 (W/m·K)	0.8 - 1.0	1.1 - 1.4
比熱容 (J/kg·K)	750 - 840	750 - 850

耐熱衝擊溫差 (°C)	60 - 100	150 - 200
玻璃結構	無定形短程排列	短程規則排列，含硼氧結構

3. 冷卻情形假設

理論推算使用變數：

1. 玻璃材料：鈉玻璃珠（直徑 0.016 m）、硼硅玻璃棒（直徑 0.06 m）。
2. 加熱條件：玻璃加熱至 180°C - 250°C。
3. 冷卻介質：50mL - 2000mL 的水，水溫 0°C - 100°C，每 25°C 為一組。
4. 冷卻時間：5 - 40 秒，間隔 5 秒取樣。

理論推算方法：

1. 玻璃珠與玻璃棒均加熱至設定溫度（如 240°C）。
 2. 迅速垂直浸入不同溫度的水中，測量玻璃表面與水溫變化。
 3. 觀察裂紋情況，記錄裂紋數量、方向與嚴重程度。
-

4. 分析假設和熱應力計算

(1) 鈉玻璃珠理論分析

1. 裂紋類型：
 - 放射狀裂紋：裂紋從中心向外擴展。
 - 裂紋數量隨冷卻速率增加（1 - 17 條）。
2. 影響因素：
 - 高熱膨脹係數 → 溫度變化時體積變化大，產生高熱應力。
 - 玻璃內部的微小氣泡 可能作為應力集中點。
 - 水溫低（0 - 50°C）時裂紋最嚴重。
3. 熱應力計算：
 - 假設 鈉玻璃珠 250°C → 50°C（ $\Delta T = 200^\circ\text{C}$ ）
 - 熱應力公式：
 - 遠超鈉玻璃抗拉強度（30 - 50 MPa）→ 玻璃必碎。

(2) 硼硅玻璃棒理論分析

1. 裂紋類型：
 - 水平裂紋，沿水面平行。
 - 水溫較低（4°C）時裂紋明顯，高水溫（86°C 以上）時裂紋消失。
2. 影響因素：
 - 低熱膨脹係數降低熱應力，但仍受表面溫差影響。
 - 玻璃部分浸入水中，水面處溫度梯度大，導致局部應力集中。
3. 熱應力計算：

- 假設 派熱克斯玻璃棒 $250^{\circ}\text{C} \rightarrow 50^{\circ}\text{C}$ ($\Delta T = 200^{\circ}\text{C}$)
- 熱應力公式：
- 低於部分派熱克斯玻璃的抗拉強度（可達 55 MPa） \rightarrow 可能不碎，但局部有裂紋。

5. 理論比較材料裂紋的因素

影響因素	鈉玻璃珠影響	硼硅玻璃棒影響
熱膨脹係數	高，裂紋較多	低，裂紋較少
水溫	低溫（0 - 50°C ）裂紋多，高溫水減少裂紋	低溫（ 4°C ）時水平裂紋明顯，高溫水裂紋減少
玻璃內部應力	內含氣泡易導致應力集中	玻璃較均勻，內應力較低
玻璃形狀	小球狀，裂紋呈放射狀	棒狀，裂紋沿水面方向發展
水的擾動	快速浸水導致更大熱衝擊	緩慢浸水可減少裂紋

6. 理論推論結果建議

(1) 鈉玻璃珠

1. 極易破裂，尤其在低溫水（0 - 50°C ）中冷卻。
2. 裂紋放射狀，來自於玻璃內外的溫度差異。
3. 緩慢降溫，或使用高溫液體（如 100°C 油）進行冷卻，會減少裂紋。

(2) 硼硅玻璃棒

1. 低溫水（ 4°C ）時裂紋嚴重，高溫水（ 86°C 以上）裂紋減少。
2. 裂紋集中於水面處，因為水面的溫度梯度最大。
3. 使用熱水（如 80°C 以上）或逐步降溫，會減少裂紋。

綜合來看，硼硅玻璃的耐熱衝擊能力遠優於鈉玻璃，但若冷卻過程不均勻，仍可能產生裂紋。合理控制冷卻速度與環境，可控制玻璃破裂情形。