

# 中華民國第 60 屆中小學科學展覽會 作品說明書

---

國小組 化學科

第一名

080214

「星」火相傳－星光黏土與自製耐火配方之研究

學校名稱：國立臺中教育大學附設實驗國民小學

作者： 小六 洪浚翔 小六 陳妍榛 小六 歐若妍 小六 王宥捷	指導老師： 黃尚偉 簡辛如
---	---------------------

關鍵詞：星光、耐火黏土、膨脹碳泡沫

# 得獎感言

## 挑戰自己，創造奇蹟

當我們站在台上，聽到第一名是我們的作品時，我們四個的臉上難掩喜悅。「我們居然得到了第一名，這是做夢都想不到的事！」也不禁想起了這一年來，一路上辛苦走來的點點滴滴。

一開始，我們一直找不到適合研究的主題，不斷的迷失和焦慮。到後來好不容易確定實驗方向，卻因為每一次黏土的揉製和測試都要很久，有時還會出現特別的狀況需要研究，因此常常必須在假日時到學校加課完成。一路上從做實驗、寫筆記本到最後的口語問答，每一個階段都是很大的挑戰。但，我們在過程中，學會了在密密麻麻的數據表格中，快速抓到重點，寫出科展筆記本。開始不怕火，開始敢開家中的瓦斯爐。科展帶給我們滿滿的新奇感和挑戰！

除此之外，科展更讓我們深深了解到合作的重要性。一開始，大家都還在磨合期，工作的步調相對比較慢，到了後期，大家的基本工作已經分配好，讓我們的生產線能穩定運作，快速生產各種配方的黏土。大家不斷的切磋，學到在失敗中找答案。例如，有人總是在剖面任務的空檔默默不斷清理碗盤，有人總是耐著火的高溫持續觀察紀錄，有人總是不斷想辦法將各種粉末混合成黏土。只要有實驗裝置受損時，我們又會很有默契地大喊「工程師」，然後就會有同學跳出來修理裝置。過程中，雖然曾經感到疲憊；雖然曾經感到無助，但是，因為堅持！我們成功啦！能完成這份實驗研究，甚至獲得專家的肯定，我們突然感到十分感動。不管之前多累，終於，這一年來的汗水、這一年來的點點滴滴總算是值得了。

我們想告訴學弟妹們，科展是一個挑戰自己、創造奇蹟的機會。不要害怕參加科展，能夠參加科展是一種對自己的肯定，雖然必須要放棄許多遊玩的機會，可是卻能夠充實自己的生活，學到很多東西。

一路走過來，真的非常謝謝科展給我們舞台，讓我們有了一個發揮的空間。每次的體驗都不同，但其中的樂趣是不變的！也感謝老師們的指導與鞭策，像是燈塔一樣，在迷失方向時陪伴我們；更要對一路上一起努力的夥伴好好地說聲「謝謝你們！」，因為有你們的陪伴，我們才能完成實驗。才能一起成就這個難忘的經驗，讓我們在國小生涯畫下完美的句點。



與第 60 屆全國科展告示牌合影留念



參加全國科展，在看板前練習講解。



參加台中市科展縣賽，與科展看板合影留念。

## 摘要

我們從網路看見一位**國外網紅破解了星光配方**，重現星光耐火效果！讓我們對耐火黏土產生興趣，自製檢測裝置進行**耐火黏土配方與原理**探討。

我們分析耐火黏土的基本組成有「**黏土粉、黏膠、膨鬆劑、添加物**」四類材料，測試出最佳耐火配方①黏土粉：玉米粉、②黏膠：白膠雄獅或糯米膠、③膨鬆劑：小蘇打、④添加物：增加軟度—漿糊；降低溫度—明礬、硼砂、滑石粉。歸納出黏土耐火原理是**表面受熱產生膨脹碳泡沫**，**內部產生千層派或多孔洞麵包結構**，小蘇打產生的  $\text{CO}_2$  取代孔隙的空氣，產生耐火效果。

我們調配自製三種耐火黏土配方「**白膠雄獅明礬**」、「**糯米膠硼砂**」、「**糯米膠滑石粉**」，其耐火效果都優於國外網紅配方，且**可塑性更佳**，甚至**誤食對身體無害**。

## 壹、研究動機

有一天，老師給我們看一個影片（見圖 1），影片中是一顆**生雞蛋被包上黏土**，**用噴燈加熱 5 分鐘後**，雞蛋一打開，**裡面竟然是生的！**包上黏土的雞蛋居然可以承受 1500 度的噴燈火焰！

原來這段影片有一段有趣的故事！一位理髮師**莫里斯·沃德**在自己的廚房調配出一種**耐火，不會產生有毒氣體的新材質**，命名為「**星光**」！但，**沃德**沒有把配方告訴任何人，因此這神秘配方隨著**沃德**去世而失傳。

2019 年一位**國外網紅**以廚房的簡單材料，重現了「**星光**」耐火效果（見圖 2、3）！這個影片激起我們研究的興趣！我們在六年級自然課學到小蘇打能夠產生二氧化碳，沒想到國外網紅使用小蘇打讓黏土耐火！我們決定以身邊的材料試著進行混合和加熱，希望能夠挖掘出星光隱藏的科學內容，**傳承失落的星光**，將耐火黏土廣泛應用在生活之中！

## 貳、研究目的

- 一、 分析耐火黏土配方的效果。
- 二、 推論星光黏土耐火的原理。
- 三、 研發自製耐火黏土的配方。



圖 1：1990 年的影片噴燈燒雞蛋沒有事！



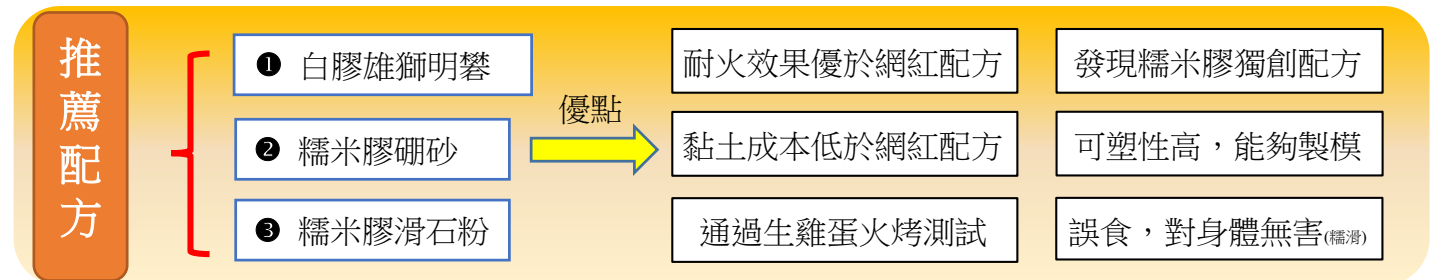
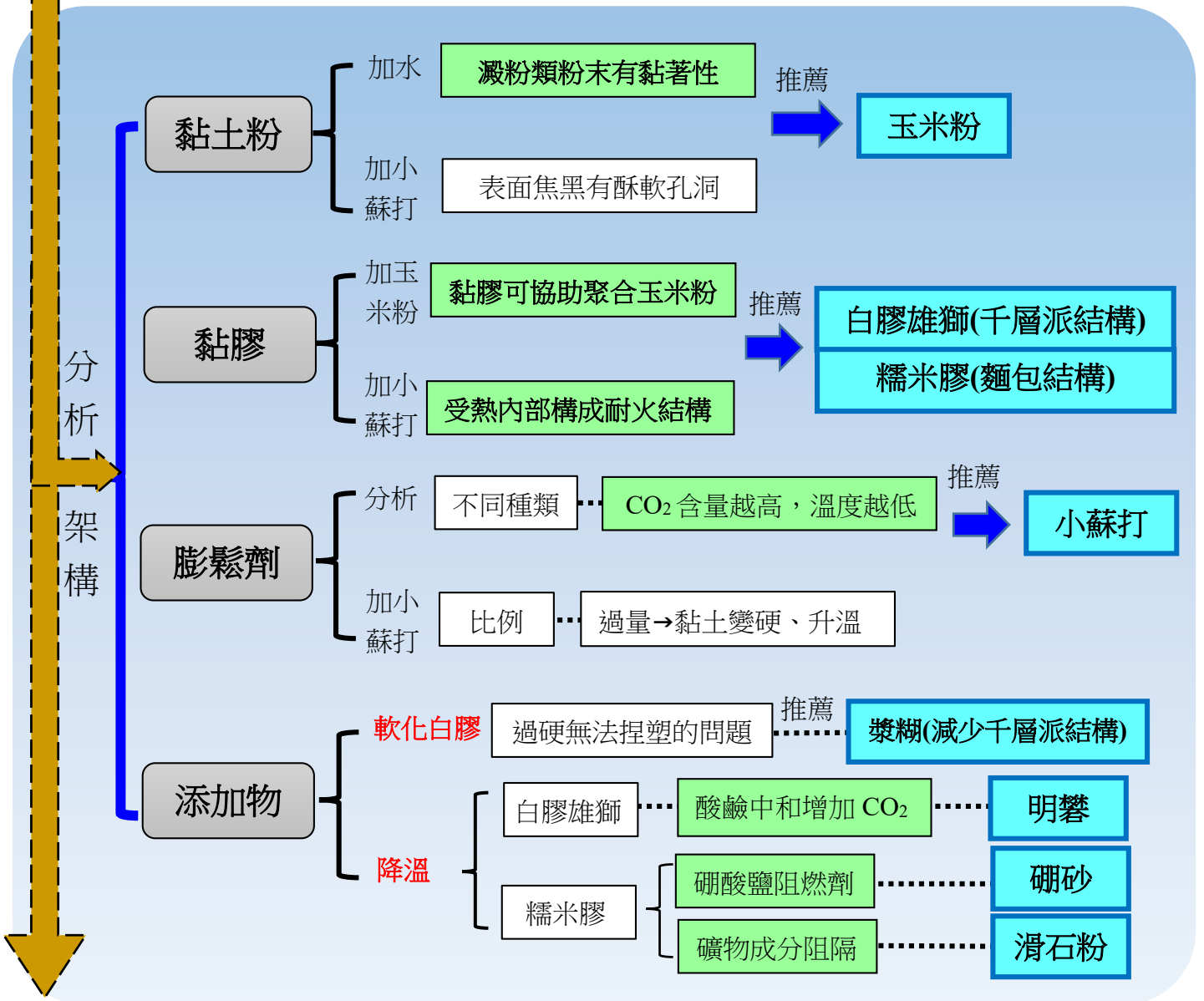
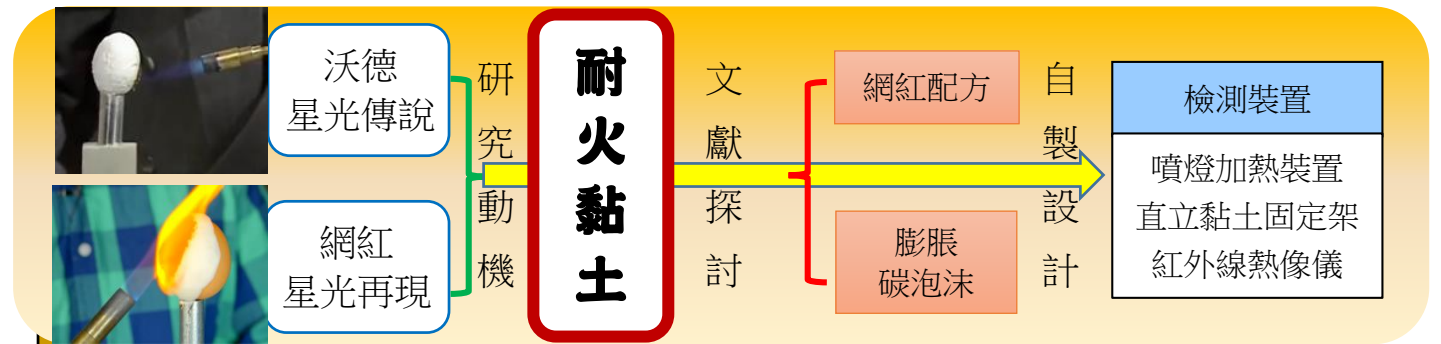
圖 2：國外網紅重現星光的耐火效果！



圖 3：國外網紅重現雞蛋耐火測試！



# 參、概念圖



## 肆、文獻探討

### 一、星光起源與失傳：

1985 年英國曼徹斯特機場發生一場事故，一台飛機在起飛前著火，由於燃燒機身塑料產生的毒煙霧，導致飛機上 55 人在 40 秒內死亡。一位理髮師出身的業餘發明家莫里斯·沃德 (Maurice Ward) 因為這起飛機事故，決定嘗試發明耐火材料！於是在自己的廚房不斷嘗試，最後調配出一種耐火，而且不會產生有毒氣體的新材料「星光」(Starlite)！

1990 年英國《明日世界》電視節目播放了一項實驗。主持人在一顆生雞蛋塗抹上星光材質，使用 1500 度噴燈加熱雞蛋 5 分鐘，結果雞蛋看起來毫髮無傷。接著主持人將雞蛋敲破，生的蛋白和蛋黃從蛋殼中流出來！（詳見參考文獻 1）

這項精彩的科學演示造成大眾對星光的興趣，之後星光似乎還承受過 10000 度的雷射光衝擊和核爆測試，都能安然無恙。但沃德不願意洩漏配方，也找不到合作的買家，星光一直無法商業化應用。2011 年沃德過世，星光的神秘配方隨著沃德的去世而失傳。

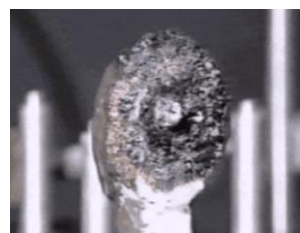


圖 4：莫里斯·沃德在家中發明了星光！

圖 5：《明日世界》播放噴燈燒星光雞蛋。

圖 6：五分鐘後，雞蛋打破還是生的。

圖 7：星光雞蛋經歷核爆測試實驗的樣子

### 二、星光再現：

2018 年 12 月 Youtube 國外網紅 NightHawkInLight 上傳「廚房中可以製成的超級材料(星光?)」影片(參考文獻 2)。影片裡國外網紅將自製的星光壓成薄片敷在手上，並用噴燈加熱星光，手卻沒有任何的受傷。影片中也仿製了雞蛋加熱實驗，加熱後的雞蛋依然是生的！

國外網紅同時在影片中教導如何自製星光「將玉米粉加入一些小蘇打，倒入白膠混合，搓揉成黏土」！網紅觀看沃德的星光實驗影片(被燒的星光會逐漸膨脹)，聯想到黑糖蛇的實驗，藉此思考出製作方法(以玉米粉代替糖)，並推測星光耐火的原因是「膨脹碳泡沫」結構。



圖 8：國外網紅將自製星光壓成薄片放在手上，以噴燈加熱，手卻不會燙！

圖 9：將自製星光放在塑膠杯上加熱，塑膠杯沒有受熱融化。

圖 10：仿拍星光的雞蛋加熱實驗，雞蛋沒有任何受損。

圖 11：將加熱的雞蛋敲破，裡面的蛋白和蛋黃是生的。

### 三、基本材料分析：

國外網紅自製星光使用的成分是「玉米粉、小蘇打、白膠」，我們將這些材料界定成「黏土粉、膨鬆劑、黏膠」，並針對國外網紅的配方搜尋相關的文獻，進行以下分析：

#### 1. 玉米粉（黏土粉）：

國外網紅配方的主要成分是玉米粉。玉米粉是一種澱粉，根據文獻 3，澱粉是一種多醣，分子式為 $(C_6H_{10}O_5)_n$ 。一般澱粉是由「支鏈澱粉約佔 80%、直鏈澱粉約佔 20%」組成。支鏈澱粉是一個具有樹枝形分支結構的多糖(圖 12，引用自文獻 3)，分支末端含有很多氫氧基(OH-)，很容易和水形成鍵結，吸收水分後會使澱粉體積略微膨脹(圖 13)。由於澱粉的支鏈和直鏈結構，加上遇水會膨脹，適合製作成黏土，方便搓揉塑形。而，礦物結晶類的粉末沒有支鏈和直鏈結構，不易做成黏土，不容易塑型。

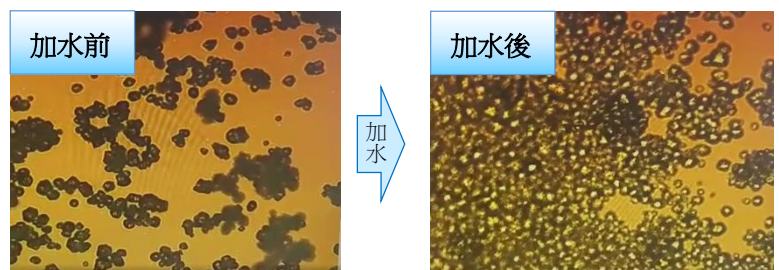
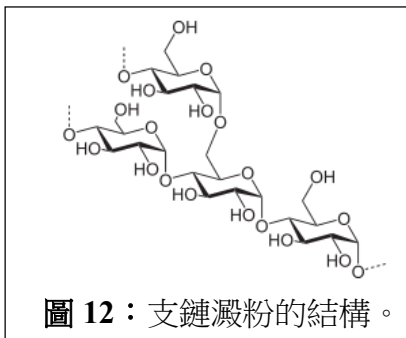


圖 13：太白粉加入水後，會吸水膨脹，並互相聚合。

耐火黏土經過燃燒後，表面會形成焦黑狀態，那是形成了碳化結構。

澱粉經過燃燒後，會完全碳化，方程式為  $(C_6H_{10}O_5)_n \xrightarrow{\Delta} 6nC + 5nH_2O$ 。

澱粉碳化的過程會產生水，能夠幫助黏土降溫。當澱粉燃燒碳化後，

表面會變成無定形的碳結構（如右圖 14），無定形的碳結構有很多空隙，

能夠讓二氧化碳置身在空隙中，造成耐火效果。

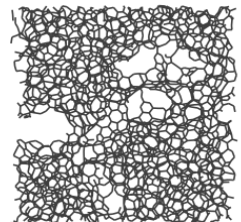


圖 14：無定形的碳結構，有很多空隙。

圖引用自維基「碳同素異形體」

#### 2. 小蘇打（膨鬆劑）：

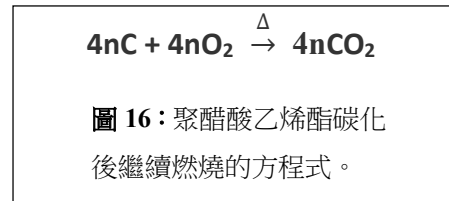
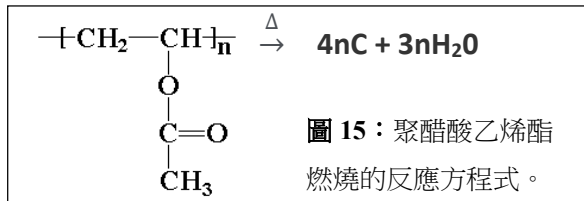
國外網紅的配方中添加小蘇打（膨鬆劑）。小蘇打（碳酸氫鈉），化學式 $(NaHCO_3)$ ，當遇到熱時會產生二氧化碳  $(2NaHCO_3 \xrightarrow{\Delta} Na_2CO_3 + H_2O + CO_2\uparrow)$ 。小蘇打加熱後會產生水和二氧化碳。水能夠幫助黏土降溫。二氧化碳化學式為  $CO_2$ 。二氧化碳的產生，可幫助黏土變得膨大、膨鬆、有孔洞，產生多孔性材料。二氧化碳本身為不助燃、不可燃，雖然無法直接撲滅火焰，但在黏土中產生二氧化碳，二氧化碳會充滿黏土內部與表面，把黏土內的氧氣排除到外面。因為表面也覆蓋了二氧化碳，造成火焰在表面缺少氧氣（助燃物），燃燒的機率會變小，產生耐火效果。



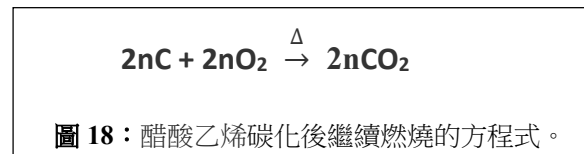
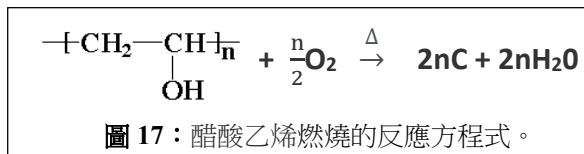
### 3. 白膠（黏膠）：

國外網紅配方是添加牛頭牌的白膠，但牛頭牌白膠並沒有標示成分。我們查詢**國內白膠的成分**，主要成分是**聚醋酸乙烯酯**，有些品牌含有**醋酸乙烯**。

**聚醋酸乙烯酯**，化學式為 $(C_4H_6O_2)_n$ ，燃燒後的方程式如下圖 15。碳化後繼續燃燒變成二氧化碳（下圖 16）。**過程中產生的水和二氧化碳，應有降溫效果。**



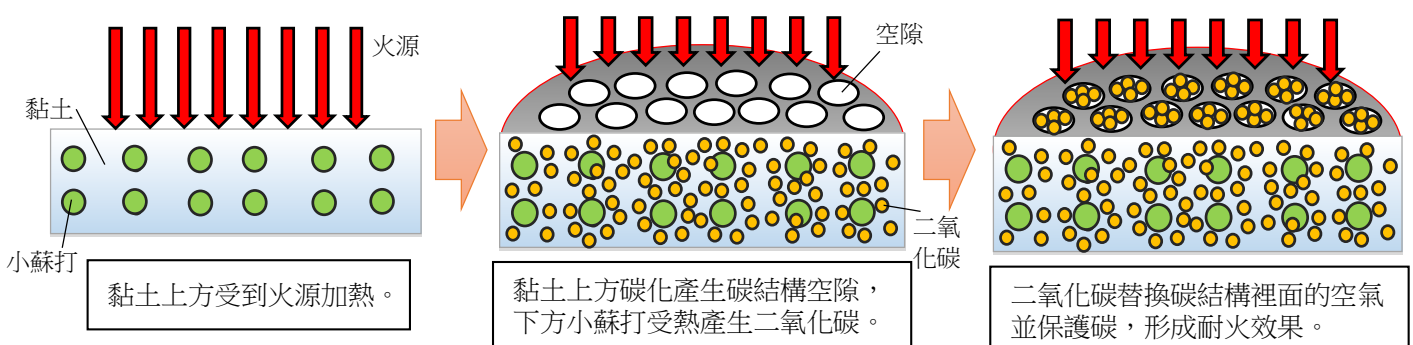
**醋酸乙烯**，化學式為 $(C_2H_4O)_x$ ，燃燒後的方程式如下圖 17。碳化後繼續燃燒，會變成二氧化碳（下圖 18）。**在過程中產生的水和二氧化碳，應有降溫效果。**



由此可知，**白膠的耐火功能，應該不單純只是燃燒碳化**，未來需要藉由實驗繼續探究。

### 四、「膨脹碳泡沫」說明與結構示意圖：

國外網紅 NightHawkInLight 在影片中推測自製星光能夠耐火原因是「**膨脹碳泡沫**」→「**玉米粉不完全燃燒產生碳結構**。小蘇打受熱產生二氧化碳，置換碳結構裡面的空氣並保護碳。因為碳形成二氧化碳積聚在表面之下，將新成形的碳向外推，造成不斷膨脹的泡沫將碳泡沫推出。**這種碳泡沫具有極高的耐熱性**，提升了其他材料的最高熔點。」（參考自文獻 2）



### 五、黑糖蛇：

網紅影片提到黑糖蛇實驗，測試後發現黑糖蛇在火焰產生時能夠耐火。但將**黑糖蛇再次放入火中燒，會燒成灰燼**。推測是一開始黑糖蛇裡充滿 $\text{CO}_2$ 能耐火，但長出來的空隙充滿空氣變成易燃。



圖 19：黑糖蛇從火焰中產生，能夠耐火。



圖 20：黑糖蛇再次拿去燒，燒成了灰燼。



## 伍、實驗裝置設計


為了能**準確測量黏土的耐火能力**，我們思考設計了**噴燈耐火檢測裝置**，制訂出使用噴燈的安全標準實驗流程和量化測量方法。一共花了**二個月不斷修正裝置與重新進行實驗檢測**。

### 一、噴燈加熱裝置

為了持續穩定對黏土加熱，我們尋找**熱源穩定的加熱工具**—酒精燈，但酒精燈容易因燈芯影響火焰大小。後來選擇加熱板！以轉鈕調整溫度的高低，讓加熱溫度維持在 400 度。並在加熱板上鋪烘焙紙，避免黏土沾黏。當我們以 400 度溫度加熱 8 分鐘檢測了幾次實驗後，發現「**加熱板的加熱方式檢測出來的是黏土隔熱能力，不是耐火能力**」。為此我們刪除全部實驗！重新尋找「**能穩定提供明火的加熱工具**」。

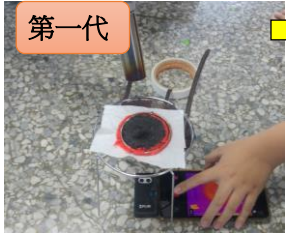
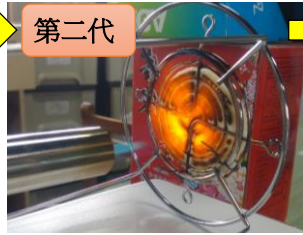


最後我們決定使用噴燈！**噴燈有轉鈕可以固定火焰大小**，且 1200 度的高溫能夠縮短檢測黏土的時間（以 90 秒為基礎）。同時為了降低噴燈的危險，我們設定了**安全措施的 SOP 流程**：

- ①以超輕土製作的**噴燈固定架**，**不需手持噴燈**進行實驗，還能夠固定噴燈的高度和角度。
- ②**噴燈檢查**，並由老師操作使用。
- ③安全環境：準備**滅火器、濕抹布、水在旁邊避免緊急事件**
- ④**遇到未知物第一次檢測**，以**手機、機器錄影、測溫**，**人員退至 3 公尺外進行觀察**。

 <p>第一代</p>	 <p>第二代</p>	 <p>第三代</p>	
酒精燈火源不穩定，無法準確控制加熱。	加熱板沒有明火，是隔熱加熱，不是耐火	噴燈能以固定的明火加熱，且效果快速。	為了固定噴燈，以超輕土製作了固定架。


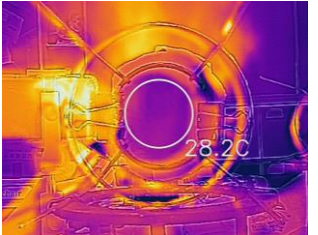
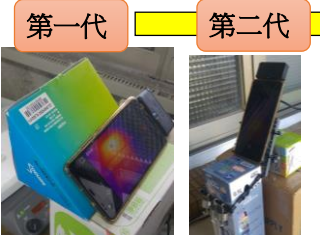
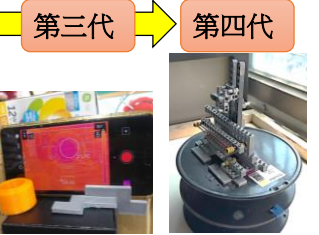
### 二、直立黏土固定架

當確定以噴燈當作加熱工具後，我們卻遇到問題：**噴燈無法從下方加熱**！我們嘗試從黏土上方加熱，熱像儀架在下方，但加熱與檢測溫度都不方便。我們決定**讓黏土垂直立起來**！正面用噴燈加熱，背面以熱像儀檢測溫度。一開始我們嘗試用電腦風扇鐵網當黏土支撐架，但烤完後發現鐵網中間的鐵條會影響實驗結果。表示黏土中間不能有任何支撐物，必須從外側撐住黏土！最後在烘焙店找到烤蛋糕架，以適當大小的鐵環當卡榫。將黏土在烘焙紙上壓製成圓扁狀後，放在烤蛋糕架上，再以**鐵環卡入固定黏土**。為了怕黏土會掉落，兩側再加長尾夾夾住鐵環。烤蛋糕架下方綁三腳架，讓黏土架能夠垂直立起來！我們完成了**直立黏土固定架**！

			
從上方加熱，不容易固定噴燈和測量溫度	使用鐵網直立黏土，中間鐵網會擋住火焰	烤蛋糕架下方綁三腳架，讓黏土直立固定	以鐵環當成卡榫，將黏土卡進烤蛋糕架中

### 三、紅外線熱像儀與手機架

我們需要測量黏土上升的溫度，但溫度計無法測太高溫，也不適合用觸碰測量溫度。因此我們購買了一台**手機型的紅外線熱像儀**！將熱像儀裝在手機上，使用 **FLIR ONE app 軟體**，就能夠**測量並錄影(照相)畫面中的物體溫度**！但手拿手機會晃動，我們開始設計固定手機的手機架，歷經四代改良，最後以樂高積木組裝出可方便拆卸手機，又能將手機穩固的手機架。





			
手機型的紅外線熱像儀，插在手機上使用	FLIR ONE 軟體，中間白圈為溫度測量範圍	為了固定手機位置，用紙盒製作成手機架	改良到第四代，使用樂高積木製作手機架

### 四、黏土壓模塑形方法

因**黏土厚度**會影響實驗結果！我們必須**將黏土製模成相同大小、厚度**。一開始我們以 3D 列印印出外方內圓的模子，將黏土壓在框框中。且在環中綁一條線，用線來割下黏土。但過程中，我們發現即使用力推平黏土，多餘的黏土也無法推出框外，厚度仍不均勻。最後我們以

①**固定厚度**：製作**兩邊厚，中間薄的改良式擀麵棍**！將鐵罐兩側套上 3D 列印印出 2mm 厚度的環，以固定擀麵棍下麵團的厚度。

②**製模**：以**圓形餅乾模切出相同大小的黏土**進行測試。

			
3D 列印的外方內圓模子固定黏土厚度。	圓環中綁一條線，利用線將黏土切離圓環	利用 3D 列印製作兩邊厚、中間薄的擀麵棍	改良式擀麵棍可擀出相同厚度的黏土。



## 五、電子放大鏡



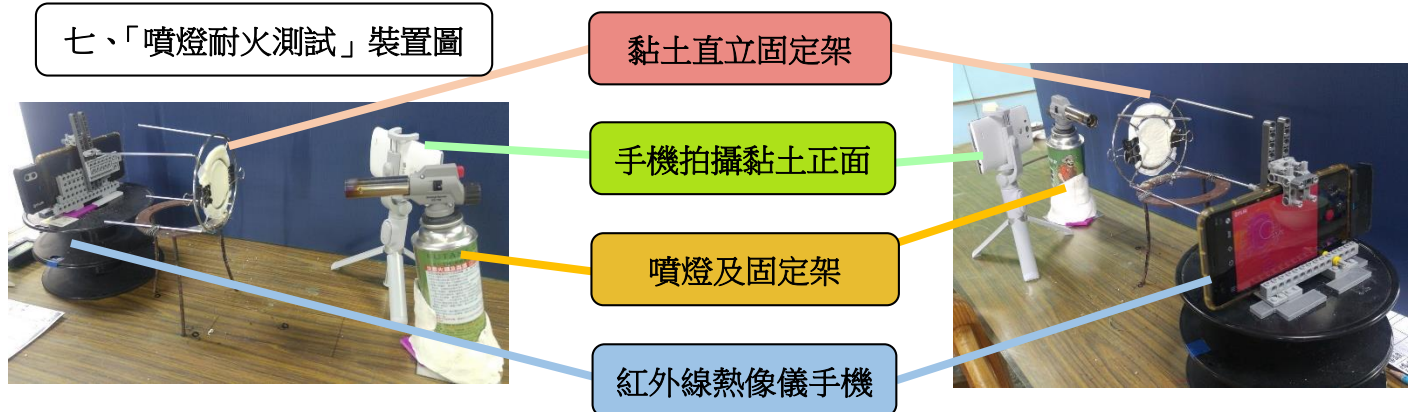
為了觀察黏土表面和剖面的變化，我們使用 電子放大鏡來拍攝黏土，方便觀察與拍照。

## 六、剖面固定器






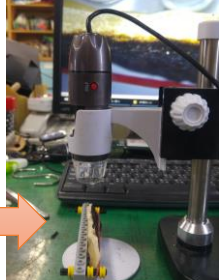
黏土剖面無法直立，不容易拍攝剖面，於是 使用樂高積木做了剖面固定器。

## 七、「噴燈耐火測試」裝置圖



## 八、「噴燈耐火測試」標準檢測流程

- 固定黏土**：以改良式擀麵棍將黏土擀成 2mm 厚度，使用圓形餅乾模切出圓餅狀黏土。將圓餅狀黏土連同背面烘焙紙放在直立黏土固定架，以鐵環和長尾夾固定住黏土，將固定架直立
- 耐火測試**：噴燈在距離黏土 27 公分處以相同的轉鈕刻度（轉 120 度）進行 90 秒加熱。架設手機兩台。<正面>：拍攝黏土正面烤火的變化情況。<背面>：裝熱像儀，拍攝黏土背面溫度，**紀錄加熱 90 秒後上升溫度變化**（備註：上升溫度 = 90 秒最終溫度 - 0 秒起始溫度）。
- 剖面紀錄**：將燃燒後的黏土拆下後，紀錄其表面、剖面層次及內部變化。（剖面狀態是指「將黏土剖半、拉扯」），我們會以剖面固定器，輔以電子放大鏡拍攝其細部變化。

			
<b>固定黏土</b> 將黏土壓薄成 2mm， 固定在直立固定架。	<b>耐火測試（正面）</b> 噴燈加熱 90 秒，記錄 黏土正面影像	<b>耐火測試（背面）</b> 以熱像儀記錄 90 秒後 黏土背面上升溫度	<b>剖面紀錄</b> 在電子放大鏡下紀錄 黏土正面與剖面變化



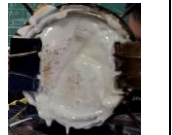








## 陸、研究過程及結果

### 實驗一、市售黏土種類：

#### (一)、研究方法：

為瞭解一般市售黏土遇火會產生的狀況，我們購買了市面上各種黏土，將黏土壓平成 2mm 厚度，放置在直立固定架上，以 1200 度噴燈進行 90 秒加熱，並以熱像儀記錄黏土背面的上升溫度變化（上升溫度=90 秒最終溫度-0 秒起始溫度），再記錄黏土火烤後剖面變化。

#### (二)、實驗數據：「市售黏土種類」噴燈耐火檢測數據：

黏土名稱	培樂多	超輕土	油土	紙黏土	陶土	石塑黏土
成分	麵粉團、食用色素	膨脹樹脂、黏劑、水	合成油脂、碳酸鈣、黏劑、色粉	紙漿、水、黏劑、滑石粉、抗菌劑	苗栗土、油、水	纖維、無機粉、微小中空球樹脂、合成糊材
加熱效果	出現黑點焦黑	全部變成黑色	融化往下滴	小塊碎片噴出	小塊碎片噴出	中間變灰白色
正面圖片						
上升溫度(度)	68.4	105.1	112.1	55.9	65.4	62.1
剖面層次	一層，變成薄狀的黏土	二層，上層黑，下層為黏土	攤掉，變成薄片狀的油土	一層，有絲狀的纖維。	一層，但上面乾，下面較濕	二層，上層硬，下層黏土
剖面圖片			油土變成薄片沒有剖面圖片			

#### (三)、研究結果討論：

- 市售黏土中最適合當做耐火黏土是石塑黏土（上升 62.1 度）與培樂多（上升 68.4 度）。紙黏土和陶土雖然溫度低，但加熱會產生碎片噴出，不適合當作耐火黏土。
- 以粉末為主體的培樂多（麵粉）和石塑黏土（無機粉），效果佳，我們推測粉末類較適合用來做為耐火黏土的基本材料。
- 自製黏土要注意黏土的黏著性，避免像黏著性差的紙黏土和陶土，加熱表面會碎裂噴出。



圖 21：以熱像儀測量石塑黏土的上升溫度。



圖 22：含有礦物粉的黏土火烤不會產生焦黑。



圖 23：紙黏土火烤後，表面會碎裂噴出。

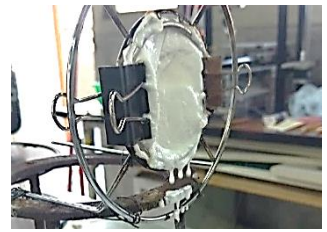


圖 24：油土火烤後，融化往下滴，無法耐火。






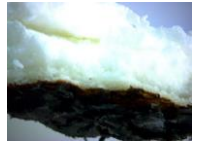














## 實驗二、黏土粉種類加水：

### (一)、研究方法：

我們發現以粉末為主體製作出來的黏土耐火效果較好，因此將**構成黏土主體的粉末稱為「黏土粉」**。我們尋找兩大類的粉末，以 60ml 粉末加水製作成黏土，進行噴燈耐火檢測。

### (二)、實驗數據：「黏土粉種類加水」噴燈耐火檢測數據：

粉末種類	澱粉類			
粉末名稱	麵粉	玉米粉	太白粉	糯米粉
加熱效果	表面焦黑，很硬，用指甲摳會破。	焦黑處有酥軟感(膨很多)，有金屬光澤	焦黑處有酥軟感(一些)，有金屬光澤。	焦黑處有一點點酥軟感，有金屬光澤。
正面圖片				
上升溫度(度)	22.2	22.8	29.0	26.7
剖面層次	二層，上層黑硬，下層軟黏。很硬，無法撕開，剪開裡面黏。	三層，上層黑酥，中層黃黏，下層白軟，容易碎裂。	三層，上層黑酥，中層黃黏，下層白軟。拉開有麻糬絲。	三層，上層黑酥，中層黃黏，下層白軟。拉開有麻糬絲。
剖面圖片				

粉末種類	礦物結晶類				
粉末名稱	皂土	矽藻土	二氧化矽	鹽	糖
加熱效果	表面變白，加熱處會龜裂。	沒有焦黑，但容易碎裂成粉狀。	表面微微焦黑，容易碎裂粉狀。	表面有灰白色的突起，易脆。	加熱後融化，白色半透明糊狀。
正面圖片					
上升溫度(度)	43.6	33.2	40.1	72.1	無法測量
剖面層次	二層，上層白硬，下層軟濕	一層，粉狀無燒焦、容易碎裂	一層，粉狀無燒焦，容易碎裂。	一層，白色結晶，用力會碎掉。	融化成一灘，結晶，黏黏的。
剖面圖片					

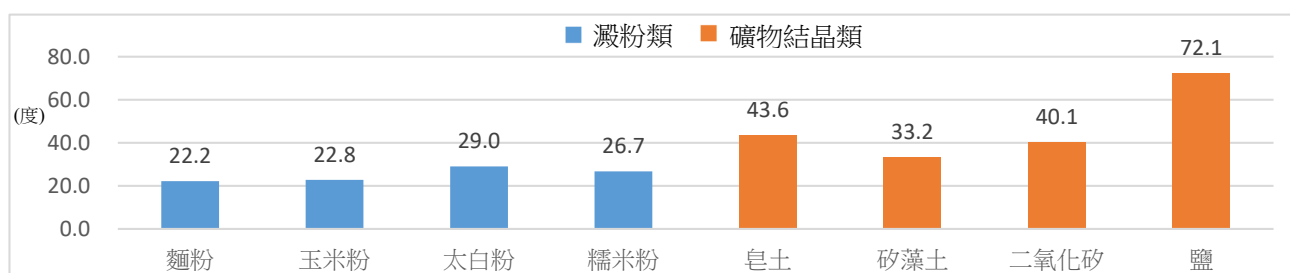






表 1：黏土粉種類加熱 90 秒上升溫度長條圖

### (三)、研究結果討論：

1. **粉末加水效果：**①形成黏土→「**麵粉、糯米粉和皂土**」。②碎裂無法成形→「**矽藻土、二氧化矽、鹽、糖**」(完全無黏著性)。③變成非牛頓流體→「**玉米粉、太白粉**」。
2. **澱粉類粉末的耐火效果優於礦物結晶類** (見表 1，藍色長條圖都低於橘色長條圖)：  
澱粉類會燒焦有分層，適合作為黏土粉，但礦物結晶類沒有燒焦和分層，較不適合。
3. **判別耐火效果依據(一)：黏土產生分層。**  
澱粉類黏土會分層，是因為受熱程度不同。上層的澱粉遇火產生碳化焦黑的現象。下層則因為熱源被上(中)層阻隔，而維持原本黏土的軟濕。
4. **判別耐火效果依據(二)：上層酥軟感覺。**  
上層碳化焦黑的部分如果摸起來酥軟(例如：**玉米粉(最佳)**、太白粉、糯米粉)，表示焦黑部分是含有大量空隙的。而**麵粉上層焦黑的部分則是硬塊，表面沒有空隙存在。**
5. **判別耐火效果依據(三)：中層軟黏層的厚度。**  
只要加熱能煮出水晶餃狀態的粉末，中層的軟黏層拉開會有絲。當中層的軟黏層越厚(例如：太白粉)，表示受熱造成溫度越高，**耐火效果不好**。
6. 非牛頓流體力學的玉米粉和太白粉性質相似，當我們將其加水裝在湯匙中加熱後，皆會形成包餡水晶餃(如下表)，內層則為白色粉末狀。比較後，很明顯**玉米粉隔熱效果較佳**


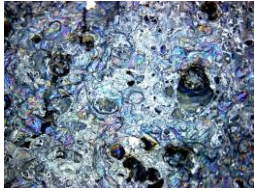
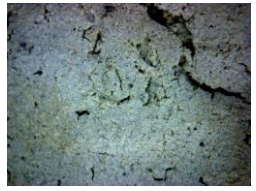
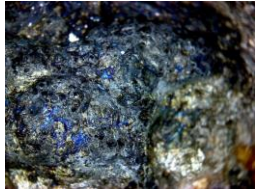



加熱方式	玉米粉噴燈火烤	太白粉噴燈火烤	玉米粉熱水煮	太白粉熱水煮
加熱效果				
說明	上圖為噴燈烤黏土剖面圖，紅色框為軟黏層的厚度。由圖可知 <b>玉米粉的軟黏層比太白粉薄</b> 。熱量會讓黏土變成軟黏層，隔熱越好軟黏層越少。因此玉米粉隔熱效果比太白粉佳！		上圖為熱水加熱 30 秒後效果。熱可讓非牛頓流體變成透明水晶餃。從圖可知 <b>玉米粉隔熱效果好，內層白色清楚且大</b> 。而太白粉隔熱效果差，內層模糊且範圍小	

### 實驗三、黏土粉代表加小蘇打：

#### (一)、研究方法：

從國外網紅的配方得知小蘇打可以幫助耐火，我們從實驗二選出**四種有代表性和效果的黏土粉(麵粉、玉米粉、皂土、糖)**，將粉末 60ml 添加 **10ml 的小蘇打**，加入水揉成黏土，進行耐火檢測。希望找出**最適合製作耐火黏土的粉末**，以便進行接下來的配方測試。

(二)、實驗數據：「黏土粉代表加小蘇打」噴燈耐火數據：

粉末名稱	麵粉	玉米粉	皂土	糖
加熱效果	表面焦黑硬脆，中央大凸起，灰白色孔洞	表面焦黑酥軟，有小孔洞，藍色金屬光澤	表面變灰白色，加熱處會龜裂。	表面酥軟，有層次。小洞、藍色金屬光澤
正面圖片				
上升溫度(度)	20.8	15.5	37.5	47.5
剖面層次	二層，上層黑硬的脆殼，下層軟厚膨麵包	三層，上層酥軟，中層軟黏，下層易崩碎	二層，上層白硬，下層軟濕	二層，上層黑糖蛇掉落，下層很薄鱗片狀
剖面圖片				火烤時上層的黑糖蛇掉落，無法拍剖面。

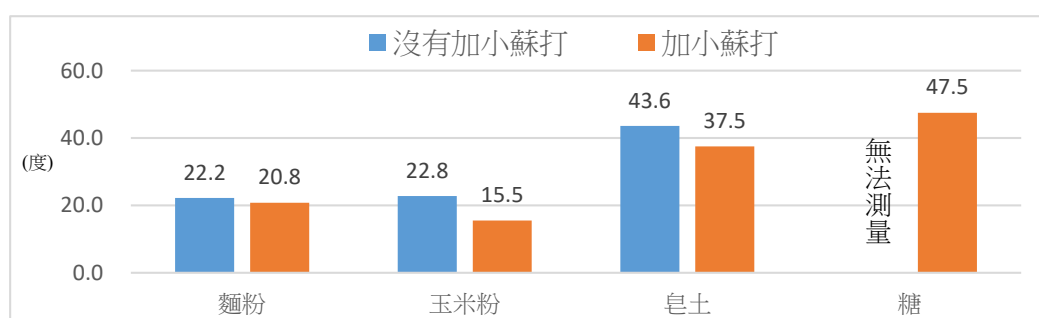


表 2：黏土粉代表加熱 90 秒上升溫度長條圖

(三)、研究結果：

1. **黏土粉主體-玉米粉**：從實驗中我們發現效果最佳的是玉米粉黏土，**它的表面與黑糖蛇很像**，不是燒焦的硬殼狀(麵粉)。但玉米粉加小蘇打後不能塑形，且容易脆裂、斷開，因此，我們思考玉米粉不應該添加「水」，而是**添加「黏膠」來增加黏土黏著性**。
2. 根據表 2，添加小蘇打的粉末黏土加熱後的溫度都會下降（玉米粉 22.8→15.5 度、皂土 43.6→37.5 度、麵粉 22.2→20.8 度），因此加入**小蘇打的確能夠增加耐火效果**。
3. 糖加小蘇打以噴燈加熱後會產生大量黑糖蛇，且過多的黑糖蛇會掉落(圖 28)，導致無法耐火。

(四)、討論：

根據實驗結果，玉米粉的耐火效果優於麵粉。經過文獻 4 得知。麵粉來自於小麥，**麵粉的組成除了 75%的澱粉以外還含有蛋白質、纖維及礦物質**。其中的蛋白質，跟液體結合、揉捏之後會形成「麵筋」。但**玉米粉來自玉米，經過處理後留下 100%純澱粉**，不含任何麩質、筋性。因此當**火燒碳化後，玉米粉形成碳結構的效果優於麵粉**。



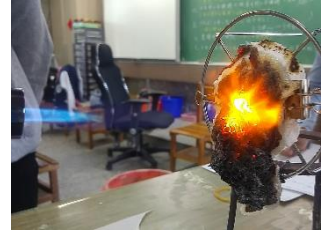


圖 25：麵粉燒焦的表面 圖 26：玉米粉下層脆裂是硬殼，沒有酥軟感。 圖 27：糖火烤會一直產生凸出的黑糖蛇。 圖 28：黑糖蛇凸出太多，沒有黏土的黏著性。 整個掉落到桌面。

#### 實驗四、黏膠種類加玉米粉：

##### (一)、研究方法：

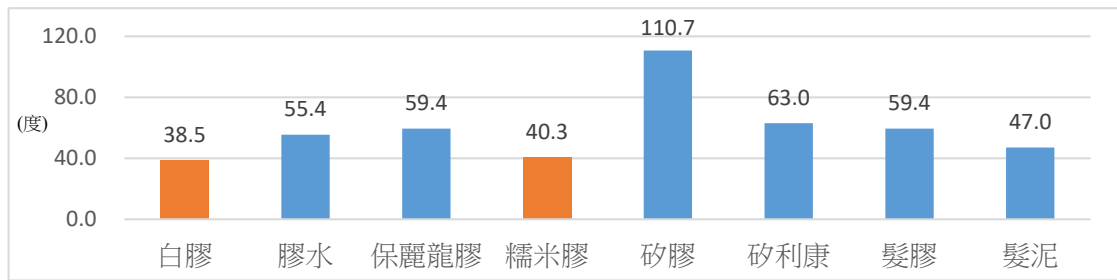
玉米粉加水會變成非牛頓流體，因此我們用黏膠來取代水，利用黏膠讓玉米粉變成黏土，防止底部碎裂。我們以各類不同黏膠，添加在 60ml 玉米粉中揉成黏土，進行耐火檢測。

##### (二)、實驗數據：「黏膠種類加玉米粉」噴燈耐火檢測數據：

黏膠種類	化學膠			植物膠
黏膠名稱	白膠	膠水	保麗龍膠	糯米膠
黏土軟硬	中	硬	硬	軟
加熱效果	表面焦黑酥軟，有小孔洞，有金屬光澤	表面焦黑硬殼。焦黑在同一區，沒有擴散	表面焦黑酥脆，中間凸起，一層一層紋路	表面黑褐色處凸起，摸起來偏硬。
正面圖片				
上升溫度(度)	<b>38.5</b>	55.4	59.4	<b>40.3</b>
剖面層次	三層，上層酥軟，中層軟黏，下層白軟	三層，上層黑硬，中層薄白、下層透明軟	二層，上層酥脆，下層有孔隙的蛋糕狀。	三層，上層黑硬，中層透明軟、下層白軟
剖面圖片				

黏膠種類	矽膠		髮膠	
黏膠名稱	矽膠	矽利康	髮膠	髮泥
黏土軟硬	中	軟	軟	硬
加熱效果	加熱後融化，成糊狀，白灰黑色交雜。	表面焦黑，塊狀白色凸起，易碎，有臭味	表面褐色，有焦黑凸起，酥脆，易掉落	表面焦黑，實驗到一半，焦黑層掉落。
正面圖片				
上升溫度(度)	110.7	63.0	59.4	47.0
剖面層次	無法剖面，為白灰黑色交雜的糊狀。	三層，上層白色凸起，中層焦黑，下層白軟	二層，上層焦黑，下層白軟。	二層，上層焦黑凸起，下層軟。
剖面圖片				





(三)、研究結果討論： 表 3：黏膠種類加熱 90 秒上升溫度長條圖

1. 玉米粉添加各種黏膠大多能做出可塑形黏土。火烤後，黏土背面不會脆裂、斷開。
2. 矽膠類的黏膠耐火效果不佳，且燒完之後會有臭味，不建議當作耐火材料。
3. 「白膠、糯米膠」耐火效果佳，我們嘗試分別加入小蘇打，再進一步測試。

### 實驗五、黏膠代表加小蘇打：

#### (一)、研究方法：

我們將實驗四較佳黏膠代表（白膠、糯米膠），加入 10ml 小蘇打，測試耐火效果。前期實驗，我們使用台灣最容易取得的南寶白膠。但我們懷疑不同品牌白膠會產生差異！

便上網訂購了從國外進口的牛頭牌白膠（有 School 和 All 兩種規格，國外網紅使用的是 All。因為是從國外進口，價格很昂貴！），除此我們同時在台灣的文具店尋找不同成分的白膠，希望能夠使用台灣本地便宜的白膠就能做出進口白膠的效果。

#### (二)、實驗數據：「黏膠代表加小蘇打」噴燈耐火檢測數據：

黏膠代表	白膠南寶	白膠雄獅	白膠牛頭 School	白膠牛頭 All	糯米膠
價錢	300g 53 元	480g 48 元	255ml 270 元	255ml 460 元	1Kg 288 元
成分	聚醋酸乙烯酯、水	聚醋酸乙烯酯、聚 乙烯醇、水	無標示；查不到成 分內容。	無標示；查不到 成分內容。	可食用糯米、高性 能植物
加熱效果	表面焦黑偏硬 易脆。	表面焦黑不硬，有 彈性。	表面焦黑膨高 ，偏硬壓會碎	表面有黑色凸 起，偏硬。	表面焦黑凸起酥 軟。
正面圖片					
上升溫度(度)	36.2 ± 0.9	17.1 ± 2.5	31.5 ± 1.6	42.7 ± 4.0	27.2 ± 1.6
膨脹高度(cm)	1.46	1.49	2.00	1.00	1.53
剖面層次	三層，上層黑，中 層焦黃，硬折不斷 。下層白軟，像糰	二層，上層焦黑， 下層片狀有絲有韌 性。拉開像千層派	三層，上層焦黑，中 層多孔洞麵包，下層 像黏土一樣軟	二層，上層焦黑， 下層像一層一層麵 包，有大空隙。	三層，上層焦黑，中 層多孔洞麵包，下層 軟黏。
剖面圖片					
拉開圖片					

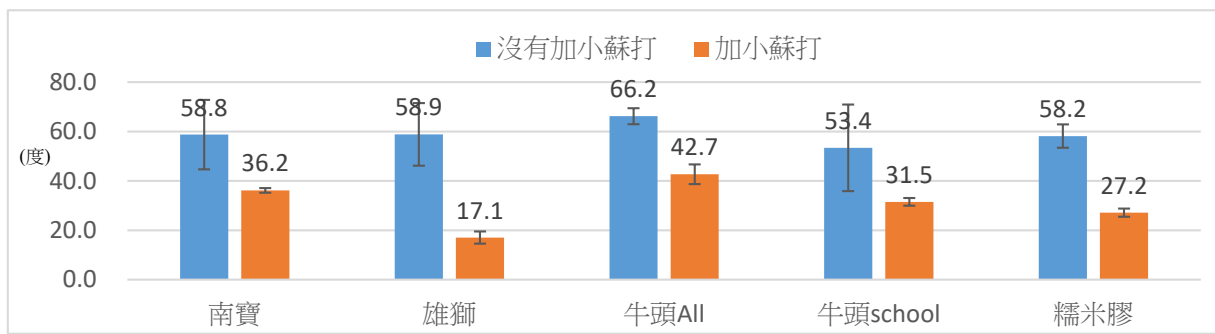


表 4：黏膠代表加熱 90 秒上升溫度長條圖

### (三)、研究結果討論：

1. 從實驗結果，我們將剖面分析出三種類型：

剖面類型	二層 - 千層派	二~三層 - 多孔洞麵包	三層 - 粿
特徵	上層焦黑。下層是一片一片像纖維狀的結構。有韌性，撕開需要花力氣，撕開後會像千層派結構。	上層為焦黑，越往下偏黃褐色。中層為多孔洞的結構，像麵包。下層則像未加熱的黏土，是軟黏狀。	上層焦黑。中層焦褐，下層軟黏濕，像粿。中層很硬和韌。折斷時，中層不容易折斷。
特徵圖片			
黏膠例子 耐火溫度	白膠雄獅 (17.1 度)	糯米膠 (27.2 度) 白膠牛頭 School (31.5 度) 白膠牛頭 All (42.7 度)	白膠南寶 (36.5 度)
優劣討論	溫度低，耐火效果好。千層派分層藏有大量空隙，幫助耐火。但黏土有韌性，不易塑形與壓扁。討論後決定白膠雄獅適合繼續研究。	溫度偏低。耐熱效果好，推測中層有多孔隙麵包結構。黏土越下層受熱越少，在最下層才會維持未加熱黏土的模樣。決定以便宜的糯米膠繼續研究。	溫度偏高，有耐熱效果，但效果沒有其他的好。下層的粿，偏軟、濕、黏。因效果不佳，討論後決定不繼續研究「粿」這個類型。

2. 我們決定接下來的研究以白膠雄獅（千層派結構）和糯米膠（多孔洞麵包結構）當作黏膠的種類，因為耐火效果好、結構特別，且便宜、容易取得。



圖 29：白膠雄獅加小蘇打會產生千層派結構。



圖 30：白膠雄獅千層派有韌性，拉開會有絲。



圖 31：糯米膠火烤會變紅，接著焦黑膨起。



圖 32：白膠牛頭 School 火烤後焦黑膨得很大。

## 實驗六、膨鬆劑種類：

### (一)、研究方法：

根據實驗三結論，添加小蘇打能降低耐火溫度。但除了小蘇打，其他膨鬆劑也會產生二氧化碳，我們決定測試膨鬆劑種類的耐火效果。我們在 60ml 玉米粉添加各種膨鬆劑 10ml，並分別以白膠雄獅、糯米膠做為黏膠製作黏土，進行噴燈耐火檢測。我們發現「金屬光澤、表面酥軟、膨脹高度、剖面類型」是觀察重點，於是將質性的加熱描述改成特徵勾選紀錄。

### (二)、實驗數據：1. 「膨鬆劑種類」噴燈耐火檢測數據：

黏膠種類	白膠雄獅			糯米膠		
	小蘇打	泡打粉	酵母粉	小蘇打	泡打粉	酵母粉
膨鬆劑種類	小蘇打	泡打粉	酵母粉	小蘇打	泡打粉	酵母粉
金屬光澤	×	○	×	○	×	×
表面酥軟	○	×	○	○	○	○
上升溫度(度)	10.9 ± 2.4	21.6 ± 0.5	44.2 ± 0.9	15.3 ± 0.4	37.1 ± 11.0	42.0 ± 7.1
正面圖片						
膨脹高度(cm)	1.49	0.84	0.76	1.53	1.13	0.76
剖面層次	二層，上層焦黑，下層蔥抓餅狀	二層，上層焦黑，下層麵包狀	二層，上層焦黑，下層麵包狀	三層，上層焦黑，中層多孔洞麵包，下層軟黏。	三層，上層焦黑，中層米白軟，下層一層白。	二層，上層焦黑，下層麵包狀
剖面描述	千層派	多孔洞麵包	多孔洞麵包	多孔洞麵包	糰	多孔洞麵包
剖面圖片						

### 2. 「膨鬆劑種類」試管加熱檢測：膨鬆劑加熱後的差異？

我們想知道膨鬆劑加熱後，產生的二氧化碳量的差異。將三種粉末狀膨鬆劑 10ml 放入試管中，以酒精燈加熱。並利用排水集氣法蒐集反應出來的二氧化碳，測量排出二氧化碳的體積（實驗裝置如右圖，結果為表 7）

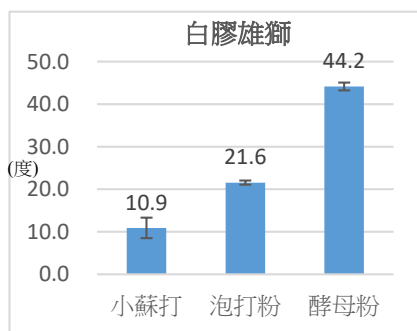
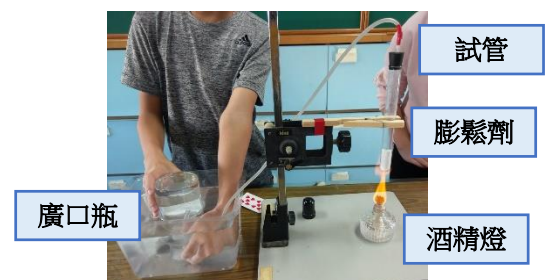


表 5：白膠雄獅上升溫度長條圖

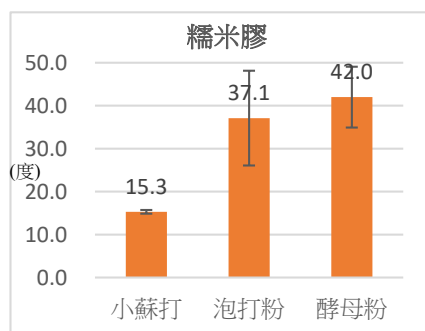


表 6：糯米膠上升溫度長條圖

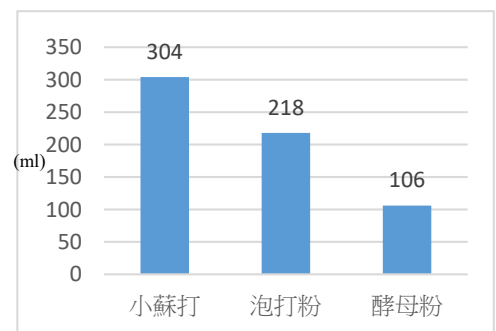


表 7：膨鬆劑種類產生 CO<sub>2</sub> 長條圖



### (三)、研究結果討論：



1. 加入小蘇打後能使白膠、糯米膠產生極佳耐熱效果，因此之後皆以**小蘇打做為膨鬆劑**。
2. 根據表 7，以相同的火源加熱膨鬆劑，**小蘇打產生的二氧化碳量最多**！
3. 比較表 5~表 7 的會發現：添加**二氧化碳產生量越多的膨鬆劑**，耐火效果越佳。

### 實驗七、小蘇打比例：

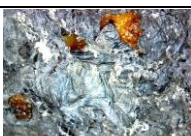
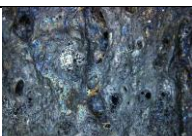
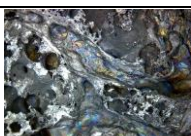




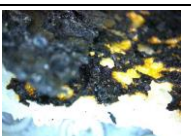
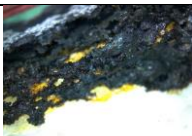

#### (一)、研究方法：

在實驗六，我們知道小蘇打是效果最好的膨鬆劑，但該**使用多少的小蘇打**，耐火溫度**才會最低呢**？我們使用 60ml 的玉米粉（20g），搭配不同小蘇打量，測試噴燈耐火檢測。

#### (二)、實驗數據：1. 「小蘇打比例（白膠雄獅）」噴燈耐火檢測數據：

黏膠種類	白膠雄獅					
	小蘇打比例	0 ml	5 ml	10 ml	15 ml	20 ml
金屬光澤		×	×	×	×	×
表面酥軟		○	○	○	○	○
上升溫度(度)		63.1 ± 3.3	16.7 ± 2.5	<b>12.8 ± 2.9</b>	19.0 ± 0.7	20.8 ± 4.2
正面圖片						
膨脹高度(cm)		1.35	0.98	1.15	1.34	1.19
剖面層次		三層，上層焦黑，中層黃褐，下層白軟	二層，上層焦黑，下層千層派	二層，上層焦黑，下層千層派	二層，上層焦黑，下層千層派	二層，上層焦黑，下層像硬麵包
剖面類型		裸	千層派	千層派	千層派	硬麵包
剖面圖片						

#### 2. 「小蘇打比例（糯米膠）」噴燈耐火檢測數據：

黏膠種類	糯米膠					
	小蘇打比例	0 ml	5 ml	10 ml	15 ml	20 ml
金屬光澤		×	○	○	×	○
表面酥軟		○	○	○	○	○
上升溫度(度)		58.0 ± 0.1	<b>30.5 ± 4.7</b>	52.4 ± 2.2	34.2 ± 2.8	32.9 ± 4.2
正面圖片						
膨脹高度(cm)		1.00	1.44	1.39	1.55	1.80
剖面層次		三層，上層黑硬，中層透明軟、下層白軟	三層，上層黑，中層麵包，下層軟白	三層，上層黑，中層麵包，下層軟白	三層，上層黑，中層麵包，下層白硬變少	三層，上層黑，中層麵包，下層硬皮薄
剖面類型		裸	多孔洞麵包	多孔洞麵包	多孔洞麵包	多孔洞麵包
剖面圖片						



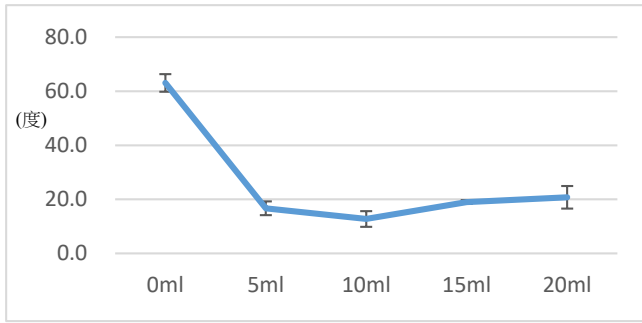


表 8：小蘇打比例（白膠雄獅）加熱 90 秒折線圖

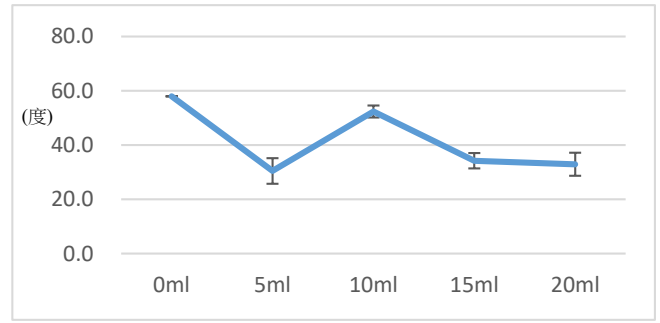


表 9：小蘇打比例（糯米膠）加熱 90 秒折線圖

### (三)、研究結果討論：

1. 添加小蘇打的確會讓溫度降低，但添加太多，溫度反而會上升，且黏土也會變硬。
2. 不同黏膠，搭配的小蘇打比例也不同！以白膠或糯米膠做為黏膠，其小蘇打最佳比例：
  - ① 白膠雄獅 20g + 60ml 玉米粉(20g)+ 10ml 小蘇打粉(10.4g)。
  - ② 糯米膠 20g + 60ml 玉米粉(20g)+ 5ml 小蘇打粉(5.2g)。
3. 金屬光澤是添加小蘇打和水造成。因此糯米膠會出現（水分較多），但白膠雄獅不會。

## 實驗八、添加物—軟化：

### (一)、研究方法：

白膠雄獅的黏土配方耐火效果佳，但白膠雄獅加玉米粉混入小蘇打後，就會出現千層派結構，讓黏土又硬又韌，不易搓揉塑形也容易出水。我們嘗試加入其他添加物軟化白膠雄獅黏土。添加物選擇：①之前實驗中超軟的配方（例如：髮膠）。②添加會讓鼻涕蟲變軟的材料：因白膠加小蘇打變硬很像鼻涕蟲（膠水加硼砂水）效果。操作流程如下：

製作黏土(玉米粉+添加粉 10ml+黏膠+小蘇打粉) → 確認(軟硬) → 耐火測試 → 找最佳比例。

### (二)、實驗數據：1.「軟化添加物」噴燈耐火檢測數據：

添加物種類	無添加	水	矽利康	髮膠	矽膠	漿糊
表面酥軟	○	○	×	○	×	○
上升溫度(度)	18.3	21.8	22.2	30.4	16.0	20.7
黏土硬度	硬	中	軟	硬	中	軟
膨脹高度(cm)	1.15	1.00	1.05	1.03	2.03	1.81
層次數量	2	2	3	2	2	2
剖面類型	千層派	麵包	麵包+千層派	麵包+千層派	千層派	麵包+千層派
剖面圖片						

添加物種類	奶粉	牙膏	洗衣精	糖漿	膠水+水	糯米膠
表面酥軟	×	×	○	○	○	○
上升溫度(度)	20.9	21.7	17.6	16.7	50.0	23.9
黏土硬度	硬	硬	中	硬	中	軟
膨脹高度(cm)	1.59	1.29	1.18	1.62	1.14	1.71
層次數量	2	2	3	2	2	2
剖面類型	千層派	麵包+千層派	麵包+粿	粿+千層派	麵包	麵包
剖面圖片						

**小結**：測試了 11 種添加物，只有「**矽利康、漿糊、糯米膠**」這三種添加物能讓白膠雄獅配方黏土變軟，但矽利康燃燒不完全有臭味，糯米膠與我們另一個配方(糯米膠)太像。因此，我們決定以**漿糊當作白膠雄獅的添加物**，進一步找出能軟化白膠雄獅且耐火較佳的漿糊比例

## 2. 「白膠雄獅與漿糊比例」噴燈耐火檢測數據（玉米粉 20 g、小蘇打 10.4 g）：

白膠雄獅量(g)	20	15	10
漿糊量(g)	0	5	10
出水狀況	有些出水	少量出水	無出水
黏土硬度	硬	偏硬	軟
上升溫度(度)	8.3 ± 1.5	17.6 ± 2.7	19.1 ± 0.9

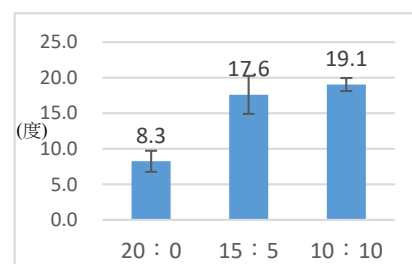


表 10：白膠雄獅與漿糊比例加熱 90 秒上升溫度長條圖

### (三)、研究結果討論：

1. 軟化白膠雄獅配方黏土的方式，以**添加漿糊**效果最佳，不但增加軟度也減少出水狀況。
2. 白膠雄獅與軟化物漿糊的**最佳比例為 15：5**，此時軟度和出水可接受，耐熱效果佳。
3. 漿糊的量越多，黏土軟度越軟、出水越少，但火烤後的溫度也會跟著增加。推測**黏土變硬和出水都是因為白膠雄獅與小蘇打反應造成**。因此，降低白膠雄獅的比例，硬度和出水狀況會改善。但，少了白膠雄獅和小蘇打作用產生的千層派結構，耐火效果也變差。



圖 33：到食品行尋找可以幫助軟化的材料。



圖 34：測試了很多種材料，進行測量和紀錄。



圖 35：矽利康能軟化，但燒完會有臭味。



圖 36：添加漿糊越多，千層派的結構越少。







## 實驗九、添加物—降溫：

### (一)、研究方法：

傳說星光是由 21 種成分組成，表示加入添加物能讓耐火效果更好。我們嘗試在白膠雄獅和糯米膠黏土配方中，加入可能協助降溫的添加物，進行噴燈耐火測試。我們以下面六個降溫的方向，尋找適合的添加物：

- 增加碳化效果**：碳泡沫是由碳化結構產生，我們加入容易碳化的碳水化合物，例如，  
① 活性碳（本身為碳 C）、② 糖粉（ $C_{12}H_{22}O_{11}$ ）、③ 葡萄糖（ $C_6H_{12}O_6$ ），讓黏土產生碳化。
- 增加二氧化碳**：添加「本身加熱會產生  $CO_2$  的成分，或是酸性成分增加  $CO_2$  反應」。例如，  
① 加熱後會產生二氧化碳的碳酸鈣（ $CaCO_3$ ）（ $CaCO_3 \xrightarrow{\Delta} CaO + CO_2 \uparrow$ ）。② 與小蘇打反應會產生二氧化碳的檸檬酸（ $C_6H_8O_7$ ）、明礬（ $KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$ ）（反應方程式如下）。  
（ $3NaHCO_3 + C_6H_8O_7 \rightarrow C_6H_5Na_3O_7 + 3CO_2 \uparrow + 3H_2O$ ）  
（ $2KAl(SO_4)_2 + 6NaHCO_3 \rightarrow 2Al(OH)_3 \downarrow + K_2SO_4 + 3Na_2SO_4 + 6CO_2 \uparrow$ ）
- 礦物成份阻隔**：實驗一的石塑黏土能夠耐火，應該是添加礦物成份阻隔熱量傳遞。我們加入①  $SiO_2$ （石英和二氧化矽）、② 能耐高溫的滑石粉、③ 吸水能膨脹的皂土。
- 增加黏土空隙**：我們添加本身成分就擁有空隙的材料，試著增加黏土中的空隙。例如，  
① 擁有多孔結構能隔熱的氣凝膠（我們向氣凝膠廠商要到粉末樣本，但氣凝膠顆粒小，實驗需全程戴口罩及護目鏡）、具有微孔隙的② 沸石粉 與 ③ 矽藻土。
- 硼酸鹽阻燃劑**：沃德提到星光有硼酸鹽成分，我們添加身邊找得到的硼酸鹽相關粉末。例如，① 硼砂本身含有結晶水，燃燒後會大量吸收熱量，降低溫度（見參考文獻 5）。
- 無機阻燃劑**：網路資料查到氫氧化鋁這類無機化合物含有結晶水，燃燒後會大量吸收熱量，可阻擋溫度升高（見參考文獻 5）。我們加入① 活性氧化鋁、② 氫氧化鋁進行測試。

### (二)、實驗數據：1. 「白膠雄獅」耐火檢測數據（添加物量 = 10ml，若無法成形，則減量）：

添加物種類	無添加	增加碳化效果			增加二氧化碳	
添加物名稱	無添加	糖粉	活性碳	葡萄糖	碳酸鈣	檸檬酸
表面酥軟	○	○	×	◎	○	○
上升溫度(度)	18.6	30.0	18.5	15.4	42.4	28.9
膨脹高度(cm)	1.81	1.10	1.13	1.96	1.40	1.34
層次數量	2	2	3	3	2	3
剖面類型	麵包+千層派	麵包+糰	千層派	麵包+千層派	麵包	麵包
剖面圖片						



添加物種類	增加二氧化碳	礦物成分阻隔				增加黏土空隙
添加物名稱	明礬(2ml)	石英粉	二氧化矽	滑石粉	皂土	沸石粉
表面酥軟	○	○	○	×	○	○
上升溫度(度)	12.3	37.2	20.6	41.4	38.1	52.7
膨脹高度(cm)	1.24	0.63	1.14	0.52	1.84	0.64
層次數量	2	3	2	3	2	2
剖面類型	千層派	麵包	千層派	麵包	麵包+千層派	麵包
剖面圖片						

添加物種類	增加黏土空隙		硼酸鹽阻燃物		無機阻燃物	
添加物名稱	矽藻土	氣凝膠	硼砂 (2ml)	硼酸	氫氧化鋁	活性氧化鋁
表面酥軟	○	×	△	○	○	○
上升溫度(度)	31.4	16.7	13.5	31.7	21.7	21.4
膨脹高度(cm)	0.83	1.14	1.05	1.81	1.20	1.15
層次數量	3	2	3	3	2	2
剖面類型	麵包+千層派	千層派	千層派	麵包	千層派	千層派
剖面圖片						

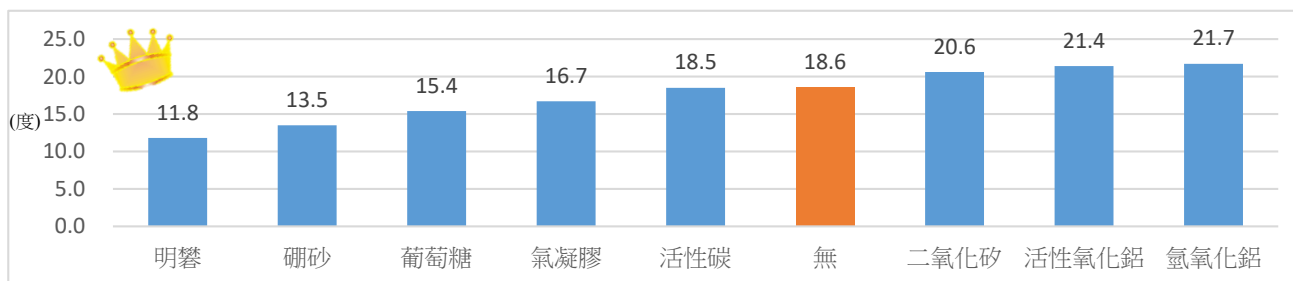


表 11：「白膠雄獅添加物」上升溫度排序，前九名長條圖

## 2. 「糯米膠」噴燈耐火檢測數據 (添加物量 = 10ml, 若無法成形, 則減量):

添加物種類	無添加	增加碳化效果			增加二氧化碳	
添加物名稱	無添加	糖粉	活性碳	葡萄糖	碳酸鈣	檸檬酸
表面酥軟	○	○	○	○	○	△
上升溫度(度)	31.2	34.0	33.7	39.6	27.4	54.3
膨脹高度(cm)	0.73	1.92	1.05	1.18	1.18	0.97
層次數量	2	3	2	3	3	3
剖面類型	麵包	麵包+粿	麵包	麵包+粿	麵包	麵包+粿
剖面圖片						

添加物種類	增加二氧化碳	礦物成分阻隔				增加黏土空隙
	明礬	石英粉	二氧化矽	滑石粉	皂土	沸石粉
表面酥軟	×	○	△	○	×	○
上升溫度(度)	41.7	34.4	32.4	<b>22.3</b>	25.6	30.4
膨脹高度(cm)	0.46	1.03	0.76	1.30	0.69	0.68
層次數量	2	2	2	3	2	2
剖面類型	麵包	麵包	麵包	麵包	麵包	麵包
剖面圖片						

添加物種類	增加黏土空隙		硼酸鹽阻燃物		無機阻燃物	
	矽藻土	氣凝膠	硼砂 (2ml)	硼酸	氫氧化鋁	活性氧化鋁
表面酥軟	○	△	△	◎	○	○
上升溫度(度)	26.1	28.0	<b>16.7</b>	52.7	32.6	33.7
膨脹高度(cm)	0.88	0.80	1.19	0.71	0.96	0.68
層次數量	2	2	3	2	3	3
剖面類型	麵包	麵包	麵包+粿	麵包+粿	麵包+粿	麵包+粿
剖面圖片						

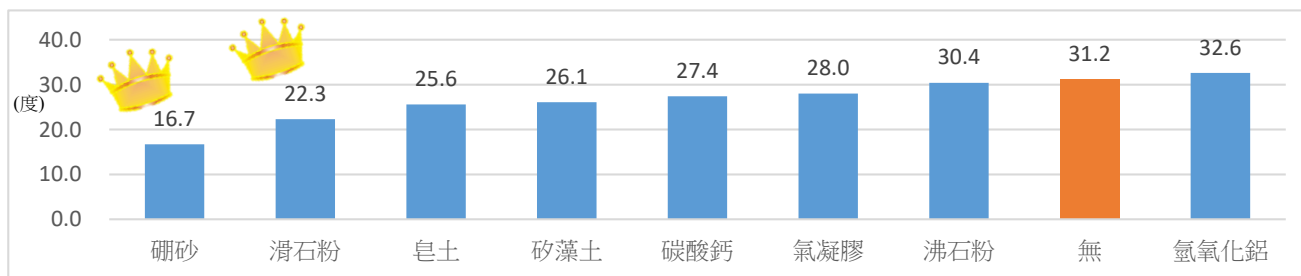


表 12：「糯米膠添加物」上升溫度排序，前九名長條圖

(三)、研究結果討論 (為了方便使用電子秤測量，材料單位從 ml 改成更精確的 g)：

1. 能使白膠雄獅黏土配方降溫的添加物有「明礬、硼砂、葡萄糖、氣凝膠、活性碳」。我們建議使用**明礬**做為添加物，因上升溫度最低(11.8 度)(下降 6.3 度)，且黏土夠軟。  
配方為：白膠雄獅 15g + 漿糊 5 g + 玉米粉 20 g + 小蘇打 10.4 g + 明礬 1.4 g。
2. 能使糯米膠黏土降溫添加物有「硼砂、滑石粉、皂土、矽藻土、碳酸鈣、氣凝膠、沸石粉」。我們建議使用**硼砂**(16.7 度)(下降 14.5 度)、**滑石粉**(22.3 度)(下降 8.9 度)做為添加物。其中，滑石粉雖溫度偏高，但配方中都是**誤食對身體無害**的成分，更加安全。  
配方為：糯米膠 20 g + 玉米粉 20 g + 小蘇打 5.2 g + 硼砂 1.4 g (或滑石粉 7 g)。

3. 添加物的種類會影響不同膠類對剖面**影響效果不同**。白膠雄獅黏土的千層派結構會因**糖或酸性添加物**，干擾千層派的產生，使結構由「千層派→麵包→糝」，黏土會變軟濕，耐溫效果也變差，而糯米膠黏土結構只會從「麵包→糝」。

4. 降溫添加物效果：

①白膠雄獅黏土有效果：「增加碳化、增加二氧化碳、增加黏土空隙、硼酸鹽阻燃物」。

②糯米膠黏土有效果：「礦物成分阻隔、增加黏土空隙、硼酸鹽阻燃物」

六種降溫方式使用在耐火黏土上的分析：(○：代表有降溫效果；X：代表降溫效果差)

種類	碳化效果			二氧化碳↑			礦物成分阻隔				增加空隙			硼酸鹽		無機阻燃劑	
	糖粉	活性炭	葡萄糖	碳酸鈣	檸檬酸	明礬	石英粉	二氧化矽	滑石粉	皂土	沸石粉	矽藻土	氣凝膠	硼砂	硼酸	氫氧化鋁	活性氧化鋁
白膠雄獅	X	X	○	X	X	○	X	X	X	X	X	X	○	○	X	X	X
糯米膠	X	X	X	X	X	X	X	X	○	X	X	X	○	○	X	X	X

- 「增加碳化效果」：只有**葡萄糖會增加白膠雄獅黏土表面酥軟層的厚度**，進而降溫。
- 「增加二氧化碳」：檸檬酸、碳酸鈣在製作過程，就出現反應，消耗掉大量二氧化碳，無法耐火。只有**明礬是反應速度慢的酸性物質**，加熱才反應出大量 CO<sub>2</sub>，耐火效果佳。
- 「礦物成分阻隔」：只有滑石粉對糯米膠有效果-**能降低溫度**（下降 8.9 度）。
- 「增加黏土空隙」：只有氣凝膠能讓白膠雄獅和糯米膠黏土降低溫度(只有下降約 2 度)。但**氣凝膠太過昂貴**，降低的溫度並沒有很多，因此不建議使用氣凝膠當添加物。
- 「硼酸鹽阻燃物」：**硼砂能使白膠雄獅黏土和糯米膠黏土降溫**。其中，糯米膠黏土耐火效果(下降溫度 14.5 度)**優於白膠**(下降溫度 5.1 度)。且硼砂遇到糯米膠不會像遇到白膠讓黏土變硬，推測是**糯米膠成分中沒有聚乙烯醇**！
- 「無機阻燃物」：氫氧化鋁和活性氧化鋁溫度變化皆不大。

**小插曲**：過程中，我們觀察到**小蘇打是使白膠雄獅黏土產生千層派硬化的主因**，加入酸性添加物後會直接耗掉小蘇打，讓黏土變軟。而明礬是慢性的酸性反應劑，黏土不會馬上變軟。



圖 37：氣凝膠顆粒很小，戴護目鏡和口罩做實驗。



圖 38：想找到能降溫的添加物，測試很多材料



圖 39：添加糖粉會讓黏土變得更軟黏。



圖 40：添加酸性物質會消耗小蘇打，黏土變軟。





圖 41：糯米膠沒有聚乙 烯醇，加硼砂不會硬化 (無千層派效果)



圖 42：糯米膠黏土添 加滑石粉，配方誤食 對身體無害。



圖 43：兩種糯米膠黏 土配方都很軟，能夠 塑形和壓模。



圖 44：白膠雄獅黏土若 添加過量明礬，黏土乾 掉後表面會產生結晶。

### 實驗十、自製耐火黏土成效測試：

#### (一)、研究方法：

我們自製了三種耐火黏土配方，試著和國外網紅配方進行以下耐火效果測試的比較：

1. 長時間 **10 分鐘** 噴燈耐火測試 (將黏土壓成 2mm 薄片，以噴燈加熱 10 分鐘)
2. **雞蛋** 耐火 5 分鐘測試 (將生雞蛋包上 2mm 黏土，以噴燈加熱 5 分鐘)

#### (二)、實驗數據與分析比較 (以國外網紅配方做為對照組)：

黏土配方	白膠雄獅+明礬	糯米膠+硼砂	糯米膠+滑石粉	國外網紅配方
表面酥軟	△ (很硬)	○	○	○
90 秒上升溫度(度)	<b>11.1</b> ± 4.9	23.3 ± 5.7	31.0 ± 7.1	39.8 ± 0.8
10 分鐘上升溫度(度)	<b>37.5</b> ± 7.5	57.4 ± 1.3	54.3 ± 3.5	79.0 ± 7.8
膨脹高度(cm)	1.2	1.5	2.3	0.4
正面圖片				
剖面層次	二層，上層焦黑很厚，下層千層結構很薄	二層，上層焦黑，下層白硬很厚。	三層，上層膨高鬆軟 中層黑硬，下層有孔洞	二層，很薄，上層黑硬，下層白硬
剖面圖片				
5 分鐘雞蛋耐火	還是生的雞蛋	還是生的雞蛋	還是生的雞蛋	
5 分鐘雞蛋 耐火圖片				
黏土成本(元)	<b>7.4</b>	<b>8.9</b>	<b>9.1</b>	57.4
優缺點	最終溫度低，但黏土韌，不易塑形。	可塑形、最終溫度低，但硼砂有毒。	可塑形、誤食無害，但最終溫度較高。	可塑形，但成本高，最終溫度高。

#### (三)、研究結果討論：

三種自製配方經過十分鐘加熱，上升溫度都能低於 60 度以下，效果優於國外網紅配方。

將三種配方包雞蛋，經過五分鐘加熱後，**雞蛋都還是生的！**我們成功複製星光的雞蛋演示！



圖 45：燒十分鐘的糯米膠滑石粉膨的非常高。



圖 46：將自製黏土包在蛋上，噴燈加熱 5 分鐘



圖 47：白膠雄獅明礬被噴燈燒僅些許焦黑。



圖 48：糯米膠滑石粉燒後會焦黑凸起膨大。



圖 49：燒完後只有微溫，能用手觸摸，不會受傷。



圖 50：黏土膨脹後與蛋之間產生空隙（箭頭）



圖 51：將燒過的蛋打破，裡面還是生的！



圖 52：蛋殼裡面沒有受到噴燈加熱的影響。

## 柒、討論

### 一、自製耐火黏土的配方原理分析：

我們將自製耐火黏土配方以「黏土粉、黏膠、膨鬆劑、添加物」四個方向進行原理分析：

1. **黏土粉—玉米粉**：主要功能**形成黏土主體及內部孔隙、產生表面碳化結構、增加隔熱**。

「實驗二、粉末種類加水」中我們測試了兩種類型粉末，發現礦物結晶類無法聚合成黏土，以澱粉類較適合製作黏土。在「實驗三、粉末代表加小蘇打」中發現玉米粉加小蘇打烤完後表面膨鬆酥軟，而麵粉則是黑硬脆殼。顯示**玉米粉表面較容易形成有空隙的碳結構**。推測玉米粉成分 100% 是澱粉，碳化效果好（麵粉只有 75% 成分是澱粉）。在「實驗五、黏膠代表加小蘇打」發現**玉米粉可由不同黏膠在內部形成「千層派或多孔麵包」的空隙結構**！因此玉米粉最適合製作耐火黏土的原料。

玉米粉、太白粉和地瓜粉都是遇水能形成非牛頓流體的粉末。我們嘗試將三種粉末加水後放置在湯匙中，在熱水煮 30 秒，測試結果如下表：

粉末種類	玉米粉	地瓜粉	太白粉
加熱圖片			
圖片說明	隔熱效果好，內層清楚且較大	隔熱效果差，內層模糊不清楚	隔熱效果差，內層清楚但太小




我們發現還是玉米粉的耐熱效果最好，建議以**玉米粉**做為製作耐火黏土的主體原料。



玉米粉是澱粉組成，且在  $80^{\circ}\text{C}$  下加水澱粉的熱傳導係數是  $0.388 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ (文獻 6)。對照鐵 ( $80 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ )和水( $0.6 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ )的熱傳導係數可知玉米粉組成的黏土，熱傳導係數低，隔熱效果佳。且如果黏土表面與內部孔隙能充滿二氧化碳(熱傳導係數  $0.0162 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ )，隔熱效果就更好。如同雞蛋耐火測試中，包上自製耐火黏土的生雞蛋，烤完五分鐘後表面溫度僅  $40.7$  度(未加熱前溫度為  $29.7$  度)，蛋摸起來冷冷的，表示熱被黏土有效阻隔了！





2. **黏膠—白膠雄獅、糯米膠**：主要功能是**聚合玉米粉**和**協助內部形成孔隙結構**。

在「實驗三、粉末代表加小蘇打」發現玉米粉會形成非牛頓流體，無法塑形。火烤後雖然表面酥軟，但下層容易脆裂、斷開，無法使用。在「實驗四、黏膠種類加玉米粉」「實驗五、黏膠代表加小蘇打」發現黏膠能聚合玉米粉變成可塑形的黏土，若再加小蘇打粉，黏土**內部會形成有孔隙結構**，協助耐火。

黏膠種類	水	白膠雄獅	糯米膠
剖面圖片			
圖片說明	紮實粉狀結構，沒有空隙	千層派結構，有橫向空隙	麵包結構，有孔狀空隙

3. **膨鬆劑—小蘇打**：主要是**產生  $\text{CO}_2$** ，來**替換孔隙空氣**和**協助內部形成孔隙結構**。

在「實驗五、黏膠代表加小蘇打」發現加入小蘇打，能夠產生孔隙結構。

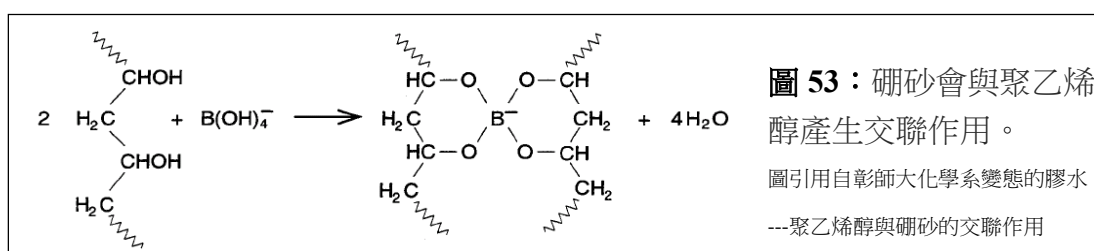
成分	白膠雄獅	白膠雄獅加小蘇打	糯米膠	糯米膠加小蘇打
剖面圖片				
圖片說明	紮實軟黏	千層派孔隙	很薄，紮實軟黏	變厚，麵包狀孔隙

小蘇打產生的二氧化碳，除了幫助黏土產生空隙外，還會將表面空隙內的空氣替換成二氧化碳，讓表面碳泡沫結構不容易被燒掉。在「文獻探討」中，我們將**放置一陣子的黑糖蛇再拿到火中烤，卻發現黑糖蛇被燒成灰燼！**黑糖蛇從火焰產生，卻怕火燒。我們推測放置一陣子的黑糖蛇，**空隙裡原有的二氧化碳被空氣替換，所以才會變成可以燃燒。**而玉米粉配方的耐火黏土，表面焦黑的酥軟感、藍色金屬光澤和黑糖蛇是相同的，可以類推**耐火黏土的小蘇打反應後，將碳泡沫結構裡的空氣替換成二氧化碳。**



在「實驗五、黏膠代表加小蘇打」發現白膠雄獅、玉米粉、小蘇打，能產生千層派結構。白膠雄獅成分含有聚乙稀醇，碰到小蘇打會產生脫水的增稠現象（PVA 的氫氧基原本以氫鍵和水結合，但小蘇打的碳酸氫根取代水的位置），所以硬化分層產生千層派結構。糯米膠成分沒有聚乙稀醇，遇到小蘇打並不會硬化！因此「實驗七、小蘇打比例」白膠雄獅(10ml)使用的小蘇打量比糯米膠(5ml)多，因為一部份的小蘇打與白膠雄獅反應產生硬化分層！

4. **添加物—硼砂**：在「實驗九、添加物—降溫」發現添加硼砂能有效降溫（糯米膠黏土降低 14.5 度、白膠雄獅黏土降低 5.1 度）。維基百科（參考文獻 8）提到**星光的 21 種配方中包含硼酸鹽！**參考文獻 5 也提到**硼酸鹽阻燃劑**是阻燃劑的其中一類！表示**沃德在 1990 年就發現硼酸鹽可當阻燃劑！**經我們實驗證實，硼砂確實可降低耐火黏土溫度。硼砂(或稱四硼酸鈉)，分子式  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 。因為**硼砂本身含有結晶水，燃燒後會大量吸收熱量，降低溫度。**反應方程式為  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O} \xrightarrow{\Delta} \text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 + 10\text{H}_2\text{O}$ 。同時硼砂會與聚乙稀醇產生交聯作用（如下圖 50），使得白膠雄獅配方加入硼砂後會使黏土更硬！使用時，硼砂只能少量。



5. **添加物—明礬**：在「實驗九、添加物—降溫」發現添加明礬讓白膠雄獅黏土降溫 6.3 度。參考文獻 9 提到「燒餅古代作法是添加小蘇打和明礬，因為**明礬是反應速度慢的酸性反應劑**，跟小蘇打中和產生二氧化碳，高溫時幫助油條在最後階段炸的膨大酥脆」。

反應方程式： $(2\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 + 6\text{NaHCO}_3 \rightarrow 2\text{Al}(\text{OH})_3\downarrow + \text{K}_2\text{SO}_4 + 3\text{Na}_2\text{SO}_4 + 6\text{CO}_2\uparrow)$

因此，實驗時若添加反應快的酸性物質（檸檬酸、硼酸），製作過程中，酸早就和小蘇打反應，以至於耐火測試時，二氧化碳量減少很多。但，添加明礬時，**黏土製作過程化學反應沒有那麼劇烈**，自然保留較多二氧化碳。因此**明礬是適合添加在耐火黏土裡的酸性物質！**

為測試明礬當酸性反應劑的效果，我們以「實驗六、膨鬆劑種類」試管加熱實驗進行比較。發現：「10ml 小蘇打」以酒精燈加熱 30 秒，產生 304ml 二氧化碳。但「10ml 小蘇打 + 5ml 明礬」則會產生 610ml 二氧化碳。因此**明礬混入小蘇打能增加二氧化碳產生的速度。**

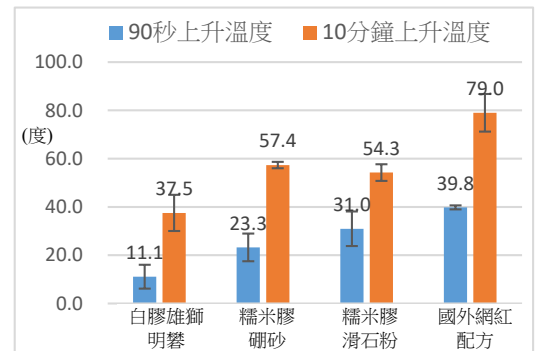
6. **添加物—滑石粉**：滑石粉是天然礦石，分子式  $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ 。**滑石是熱電不良導體（熱傳導係數為 2.09 W/m·K）**，因此能夠有效的阻隔熱的傳遞。礦物類粉末中，我們還測試了石英粉和二氧化矽，因為  $\text{SiO}_2$  的熱傳導係數為 7.6 W/m·K，因此隔熱的效果不好。

## 二、自製耐火黏土的突破：

我們的研究源自於國外網紅 NightHawkInLight 的影片內容，以下為我們研究上的突破：

### 1. 耐火溫度低於國外網紅黏土：

我們找到國外網紅製作的材料與品牌：鐵鎚牌小蘇打（Arm & Hammer）、牛頭牌白膠（Elme Glue-All Glue）、香港鷹粟粉（Kingsford's）（代替買不到的 Spartan 品牌）製作成國外網紅黏土，與自製三種配方比較如右表：



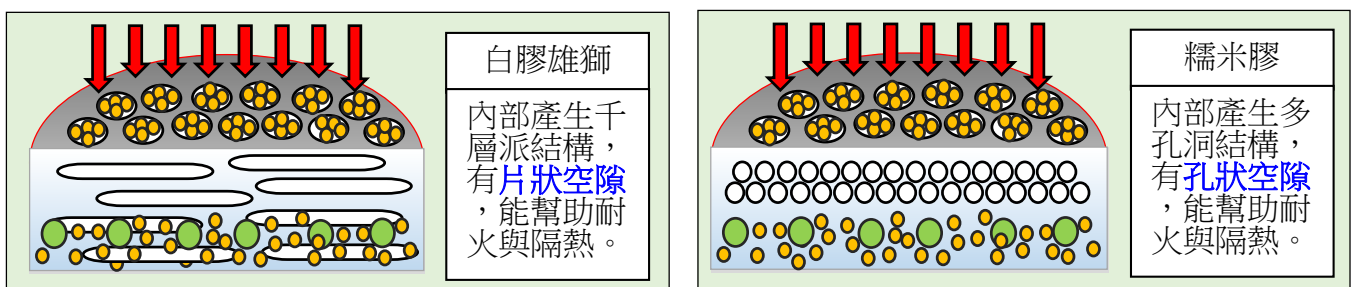
我們自製的三種配方溫度都遠低於國外網紅黏土，耐火效果更佳！表 13：各種配方加熱比較

### 2. 找到誤食無害的黏土版本：

國外網紅黏土用的白膠，是不適合食用的化學材料。維基百科提到『沃德最小女兒：「**星光是天然和可食用的，餵給狗和馬吃沒有不良影響。**」』（參考文獻 8）因此真正的星光不是使用白膠。我們的研究找到了**以糯米膠替代白膠作為黏膠，添加物使用滑石粉，都是誤食不會造成傷害的配方！**更接近星光的條件！

### 3. 探究黏土內部的耐火原因：

國外網紅影片認為黏土表面的「膨脹碳泡沫」是星光能夠耐火的原因。我們除了證實**表面的酥軟結構能夠耐火**外，還發現**黏土內部構造也會影響耐火**。藉由剖面觀察，我們發現白膠雄獅與小蘇打反應產生千層派結構；糯米膠與小蘇打反應產生多孔洞麵包結構。**黏土內部產生孔隙結構，使空隙充滿二氧化碳**，更能有效的耐火和減少熱的傳遞！



### 4. 找到容易購買且價錢便宜的配方：

國外網紅影片使用的材料和品牌，在台灣不易購買且昂貴，**做出一團掌心大黏土成本要 57.4 元**。我們以台灣找得到的材料製作，經過不斷的測試，找到最適合、易購買又便宜的品牌。**配方製作成本皆低於 10 元**（表 14），**製作成本只要國外網紅配方的 1/6 費用**。

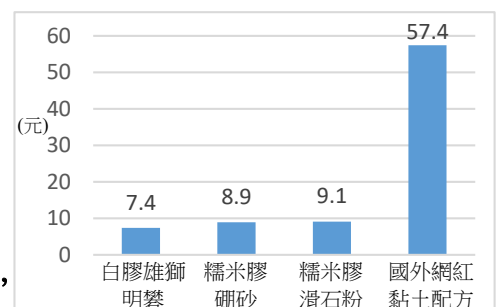


表 14：各種配方成本比較

## 捌、結論

### 一、自製耐火黏土配方分析：

- 耐火黏土的基本組成爲「黏土粉、黏膠、膨鬆劑、添加物」四類材料，分析功能如下：
  - 黏土粉：形成黏土主體及內部孔隙、產生表面碳化結構、增加隔熱
  - 黏膠：聚合玉米粉、協助內部形成孔隙結構。
  - 膨鬆劑：形成二氧化碳、替換孔隙空氣、協助內部形成孔隙結構。
  - 添加物：改變黏土的性質或效果，例如：降低溫度、軟化黏土。
- 黏土粉以澱粉類粉末最佳，因為做出的黏土有黏著性，且耐火效果優於礦物結晶類。玉米粉最適合當黏土粉，因為表面的碳化是酥軟焦黑有空隙，且耐火優於其他澱粉粉末。
- 黏膠必要性高，因水無法聚合玉米粉，要靠黏膠將玉米粉聚合成的黏土。優良的黏膠可協助內部形成孔隙結構，例如：白膠雄獅形成千層派結構、糯米膠形成多孔洞麵包結構。
- 膨鬆劑種類不同，產生二氧化碳的量不同。二氧化碳量產生越多的膨鬆劑，耐火效果越佳，其中以小蘇打產生最多二氧化碳。二氧化碳的產生能幫助黏土內部形成孔隙結構，甚至小蘇打、白膠雄獅與玉米粉作用，還會產生千層派結構，這些結構都能增加耐火和隔熱效果。但，若小蘇打過多，會造成黏土變硬與耐火溫度升高。
- 添加物中，加入漿糊讓白膠雄獅黏土變軟，但添加越多，溫度越高。降溫添加物：白膠雄獅推薦明礬(增加二氧化碳)。糯米膠推薦硼砂(硼酸鹽阻燃物)、滑石粉(礦物成分阻隔)。

### 二、星光黏土能耐火的原理：

- 表面產生膨脹碳泡沫，玉米粉不完全燃燒產生碳結構，小蘇打受熱產生二氧化碳，替換了孔隙的空氣，因此無法燃燒。裡層的碳會不斷生成耐火的碳泡沫往外推，產生耐火。
- 內部產生千層派或多孔洞麵包孔隙，空隙裡充滿二氧化碳，增加耐火、阻隔熱的傳遞。

### 三、自製耐火黏土配方與比例（推薦順序由數字小到大）：

我們自製出三種耐火黏土配方，耐火溫度皆低於國外網紅黏土配方，且成本便宜很多。這三種配方都能通過包覆生雞蛋耐火測試，其中糯米膠是我們獨創配方，誤食對身體無害！

- 白膠雄獅明礬：上升溫度最少，但黏土韌，不易塑形。配方為「玉米澱粉 20 g + 小蘇打 10.4 g + 白膠雄獅 15g + 漿糊 5 g + 明礬 1.4 g」。
- 糯米膠硼砂：可塑形高、上升溫度低，但硼砂有毒。配方為「玉米澱粉 20 g + 小蘇打 5.2 g + 糯米膠 20 g + 硼砂 1.4 g」。
- 糯米膠滑石粉：可塑形高、上升溫度低、誤食對身體無害！配方為「玉米澱粉 20 g + 小蘇打 5.2 g + 糯米膠 20 g + 滑石粉 7 g」。



## 玖、心得

六年級得知被選上做科展，心情開心的像中樂透頭獎一樣！但科展比想像中還要累很多很多，因為要一直試配方、揉黏土、做實驗，只要實驗方法調整、數據有誤或配方調錯，就要全部重來！桌上總是有成堆成山的鐵碗和量杯等著清洗，永遠清不完的髒亂桌面，以及白茫茫一片的褲子。隨著交件日期越來越接近，心中的焦慮也越來越大，實驗主題還沒有確定？進度會不會來不及？為了寫科展筆記本耗掉了六、日和寒假的出遊時間，甚至在半夜傳簡訊跟同伴求救。幸好同伴總是會立即伸出援手！但是看到自己辛苦研發出來的黏土，包上雞蛋，畫上臉蛋，在五分鐘的噴燈火烤後，能夠安全的倖免於難！成就感真是無法取代！做科展會覺得很累和帶來很多麻煩，但到最後會覺得之前的累都是值得的，帶給我很多收穫，也讓我與同伴產生「革命情感」！

科展過程讓我學會分工合作的重要性，每個人負責一個重要任務，讓我們的生產線能穩定運作，快速生產各種配方的黏土。大家不斷的切磋，學到在失敗中找答案。學會了在密密麻麻的數據表格中，快速抓到重點，寫出科展筆記本。開始不怕火，開始敢開家中的瓦斯爐。科展帶給我滿滿的新奇感和挑戰！最後感謝老師及同伴的陪伴，因為大家一起努力才能完成這次的研究，也希望能夠努力珍惜把握科展研究最後的相處時光。

## 拾、參考資料

	參考資料內容	參考資料出處
1	1990 年的明日世界影片，演示星光。	Maurice on Tomorrows World (Youtube) <a href="https://www.youtube.com/watch?v=W4nnLP--uTI">https://www.youtube.com/watch?v=W4nnLP--uTI</a>
2	國外網紅破解星光，教導製作方法。	A Super-Material That Can Be Made In The Kitchen (Starlite?) (Youtube) <a href="https://www.youtube.com/watch?v=aqR4_UoBIzY&amp;has_verified=1">https://www.youtube.com/watch?v=aqR4_UoBIzY&amp;has_verified=1</a>
3	玉米澱粉的構造	Starch (Wikipedia) <a href="https://zh.wikipedia.org/wiki/%E6%B7%80%E7%B2%89">https://zh.wikipedia.org/wiki/%E6%B7%80%E7%B2%89</a>
4	玉米粉與麵粉的差異	增稠劑選擇：玉米粉可以取代麵粉嗎？用料理科學分析玉米粉與麵粉優缺點比較 <a href="https://ciao.kitchen/substitute-flour-for-cornstarch/">https://ciao.kitchen/substitute-flour-for-cornstarch/</a>
5	硼酸鹽阻燃劑和無機阻燃劑介紹	讓高分子材料有阻燃性 (科學發展期刊) <a href="https://ejournal.stpi.narl.org.tw/sd/download?source=10901-11.pdf&amp;vllId=7f0cad1493a14d9fa7e754d394adffaa&amp;nd=1&amp;ds=1">https://ejournal.stpi.narl.org.tw/sd/download?source=10901-11.pdf&amp;vllId=7f0cad1493a14d9fa7e754d394adffaa&amp;nd=1&amp;ds=1</a>
6	澱粉的熱傳導係數	<a href="https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0260877497000435">https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0260877497000435</a>
7	各種物品熱傳導係數	<a href="https://zh.wikipedia.org/wiki/%E7%86%B1%E5%B0%8E%E7%8E%87">https://zh.wikipedia.org/wiki/%E7%86%B1%E5%B0%8E%E7%8E%87</a>
8	介紹星光可能的配方。	Starlite (Wikipedia) <a href="https://en.wikipedia.org/wiki/Starlite">https://en.wikipedia.org/wiki/Starlite</a>
9	油條會添加小蘇打與明礬(酸性反應劑)	明礬撞蘇打 酥脆油條全靠「化學」反應！(中時電子報) <a href="https://www.chinatimes.com/tube/20131104004179-261402?chdtv">https://www.chinatimes.com/tube/20131104004179-261402?chdtv</a>

## 【評語】 080214

本作品題材新鮮有趣，實驗設計架構清楚極具系統性。黏土跟黑糖蛇之類的作品很常見，但是將兩者混在一起的耐火黏土則是一大突破，靈感來自網路上的影片，從中改良配方，用無毒、便宜材料製作隔熱效果更好的黏土，火燒後的黏土也分析了剖面結構，並歸納出何種結構的隔熱效果最好，進而解釋隔熱黏土的背後因素，作品完整度高，題材新穎，具有高度利用價值。實驗日誌記錄清楚，學生能清晰表達實驗目的、過程及相關原理，表現亮眼值得讚許。



# 摘要

我們從網路看見一位國外網紅破解了星光配方，重現星光耐火效果！讓我們對耐火黏土產生興趣，自製檢測裝置進行耐火黏土配方與原理探討。我們分析耐火黏土的基本組成有「黏土粉、黏膠、膨鬆劑、添加物」四類材料，測試出最佳耐火配方①黏土粉：玉米粉、②黏膠：白膠雄獅或糯米膠、③膨鬆劑：小蘇打、④添加物：增加軟度—漿糊；降低溫度—明礬、硼砂、滑石粉。歸納出黏土耐火原理是表面受熱產生膨脹碳泡沫，內部產生千層派或多孔洞麵包結構，小蘇打產生的CO<sub>2</sub>取代孔隙的空氣，產生耐火效果。

我們調配自製三種耐火黏土配方「白膠雄獅明礬」、「糯米膠硼砂」、「糯米膠滑石粉」，其耐火效果都優於國外網紅配方，且可塑性更佳，甚至誤食對身體無害。

## 壹、研究動機

理髮師莫里斯·沃德調配出一種可耐1500度高溫，且不會產生有毒氣體的新材質「星光」！但，這神秘的配方隨著沃德去世而失傳。

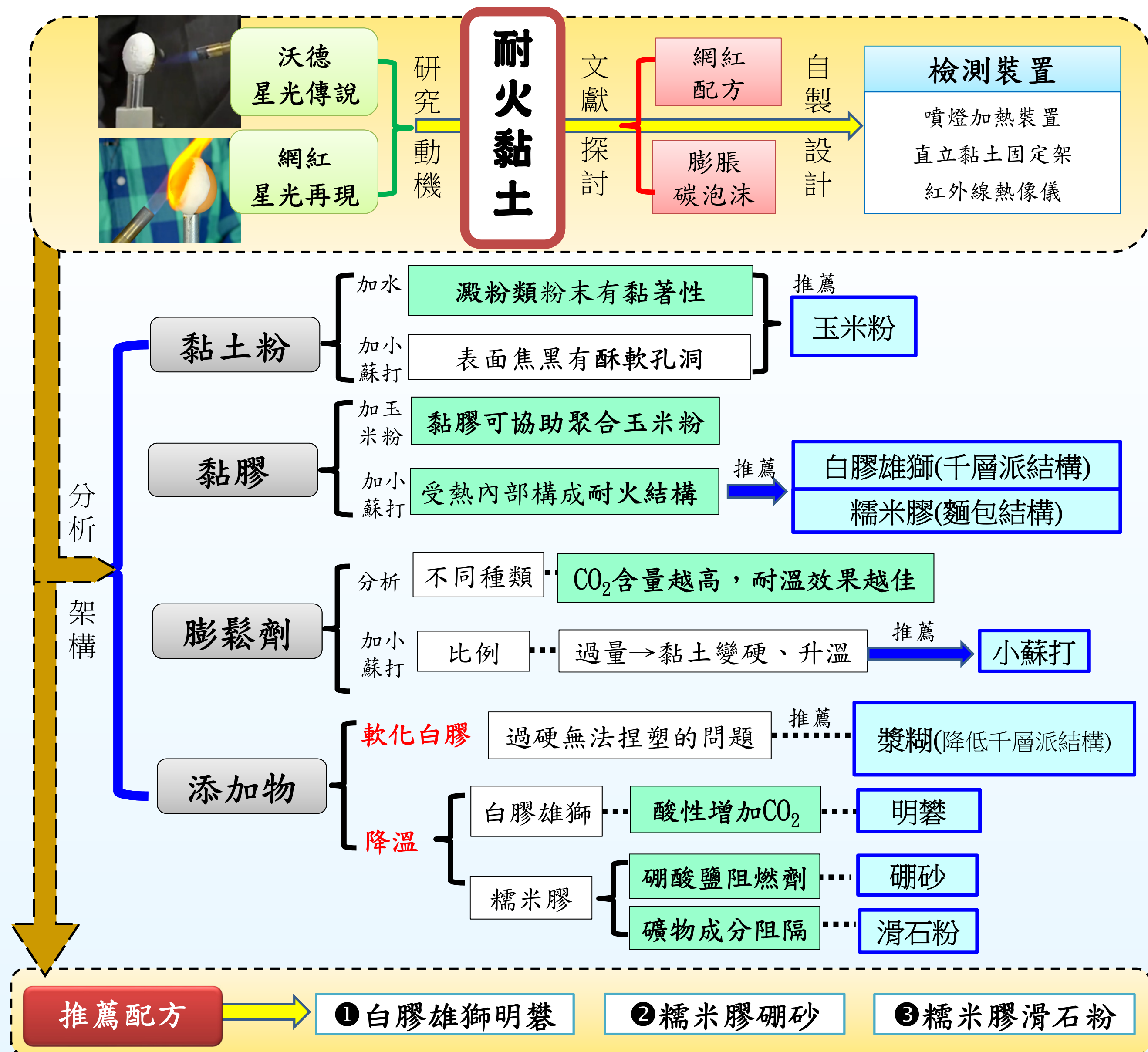
2019年一位國外網紅以簡單材料，重現了「星光」耐火效果！這個影片激起我們研究的興趣！我們在六年級自然課學到熱的傳遞與小蘇打產生二氧化碳滅火的原理，沒想到國外網紅能使用小蘇打讓黏土耐火！

我們決定以身邊的材料進行混合和加熱，希望能夠挖掘出星光隱藏的科學內容，傳承失落的星光，將耐火黏土廣泛應用在生活之中！

## 貳、研究目的

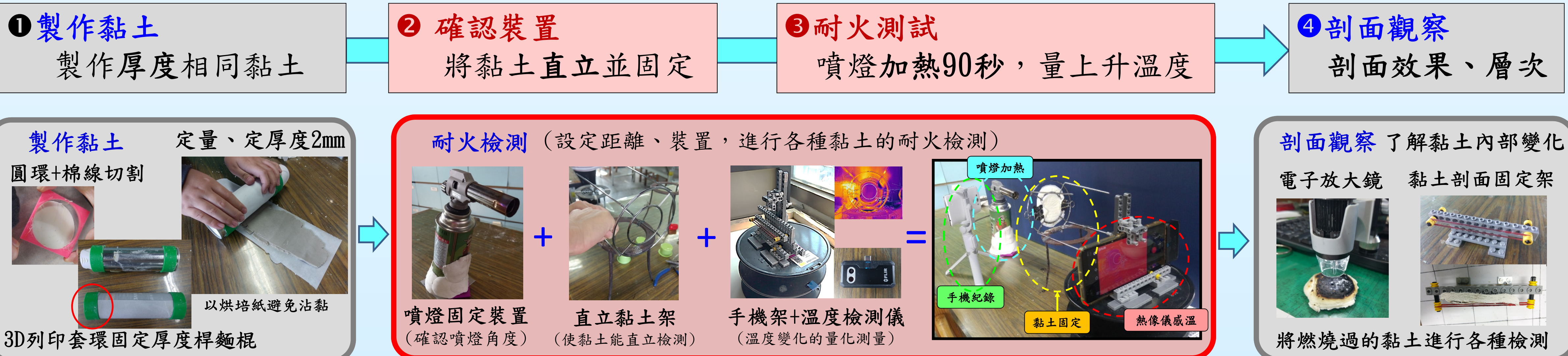
- 分析耐火黏土配方的效果。
- 推論星光黏土耐火的原理。
- 研發自製耐火黏土的配方。

## 參、研究流程概念圖



## 肆、檢測裝置與流程

### 一、檢測流程及裝置：



## 伍、研究過程及結果

### 一、市售黏土的耐火狀態：

**研究原因：**星光是一種黏土，目前坊間黏土有耐火效果嗎？

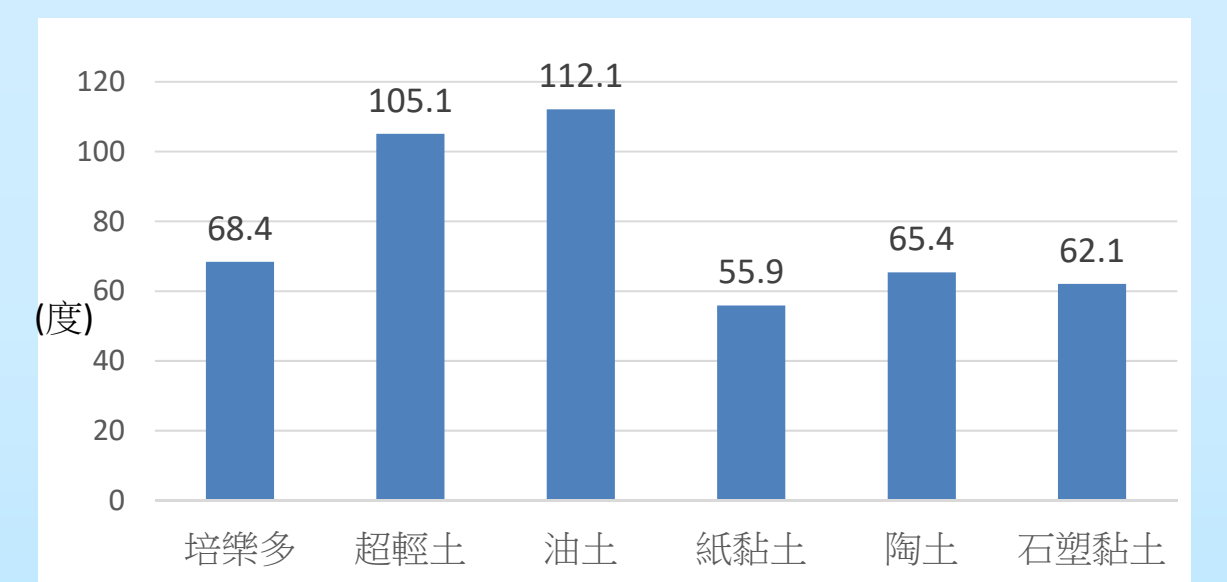
**研究方法：**我們選擇「培樂多、超輕土、油土、紙黏土、陶土、石塑黏土」，進行噴燈90秒加熱，測量上升溫度

**實驗記錄：**六種黏土遇熱溫度及狀態變化：

**研究結果：**

- 黏土以粉末為主體效果較佳(培樂多、石塑黏土)
- 需考慮黏土的黏著性，避免遇熱噴飛。

黏土	培樂多	超輕土	油土	紙黏土	陶土	石塑黏土
主要成分	麵粉.色素	膨脹樹脂.黏劑	碳酸鈣.油脂.色粉	紙漿.水.黏劑.滑石粉	土.水	纖維.無機粉.中空樹脂.
正面						
剖面			油土融化滴下			



市售黏土種類上升溫度長條圖

### 二、黏土粉差異的影響：

**研究原因：**哪一種粉末適合做耐火黏土的主體粉末？

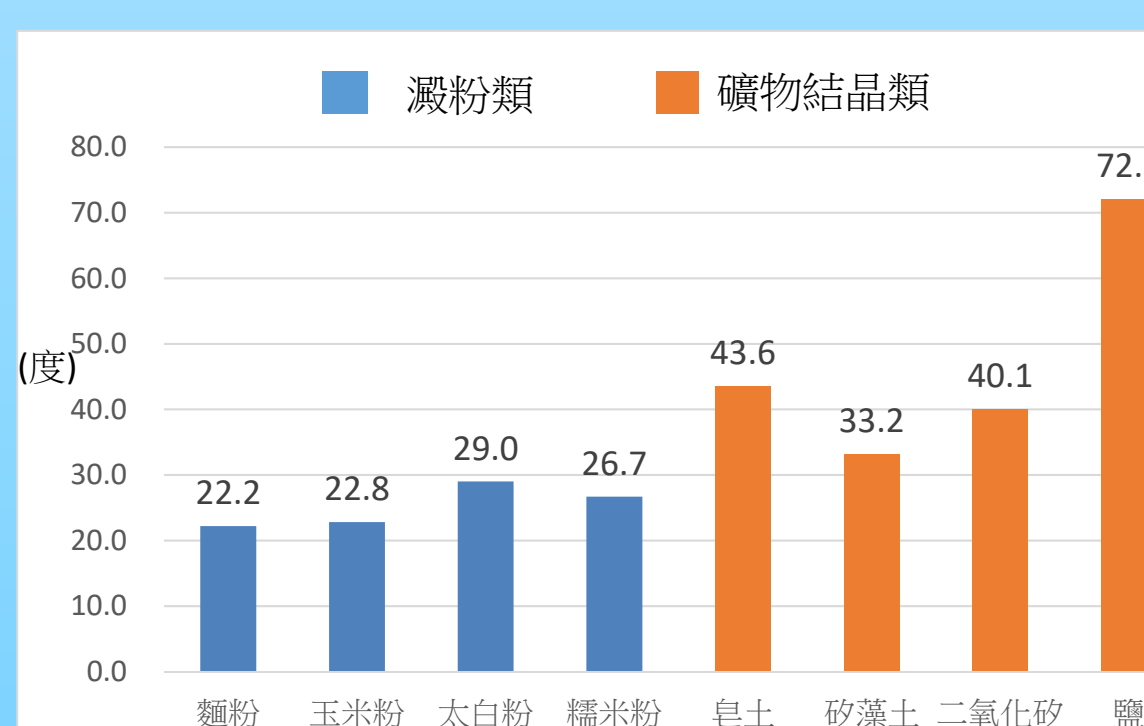
**研究方法及結果：**①黏土粉單獨加水、②較佳黏土粉再加入小蘇打，進行噴燈耐火測試！

#### (一)黏土粉 + 水：

**研究方法：**我們以兩大類的粉末(澱粉類、礦物結晶類)，加水後製作成黏土，進行噴燈耐火測試：

**實驗結果：**1. 不同粉末加水後的耐火效果

粉末	澱粉類				礦物結晶類				
	麵粉	玉米粉	太白粉	糯米粉	皂土	矽藻土	二氧化矽	鹽	糖
加水效果	黏土	非牛頓流體	黏土	黏土	完全沒有黏著性(無法成為黏土)				
上升溫度(度)	22.2	22.8	29.0	26.7	43.6	33.2	40.1	72.1	X(融化)
剖面									X
表面	焦黑硬	焦黑酥軟	焦黑酥軟	白硬	無焦黑	白色結晶	融化		
內部	黃硬	拉開有麻糬絲	拉開有麻糬絲	濕軟	易碎裂				



黏土粉種類上升溫度長條圖 (藍色為澱粉類、橘色為礦物結晶類)

#### 插曲：玉米粉與太白粉

加熱	玉米粉噴燈	太白粉噴燈
加熱效果		
說明	玉米粉軟黏層較薄。表示隔熱比太白粉佳	
加熱	玉米粉熱水	太白粉熱水
加熱效果		
說明	玉米粉變透明水晶餃的狀態較少。	

### 研究結果：

- 澱粉類耐火效果 > 礦物結晶類。
- 較佳耐火效果的判別依據：(1)黏土有分層、(2)上層酥軟、(3)中層軟黏層厚度。

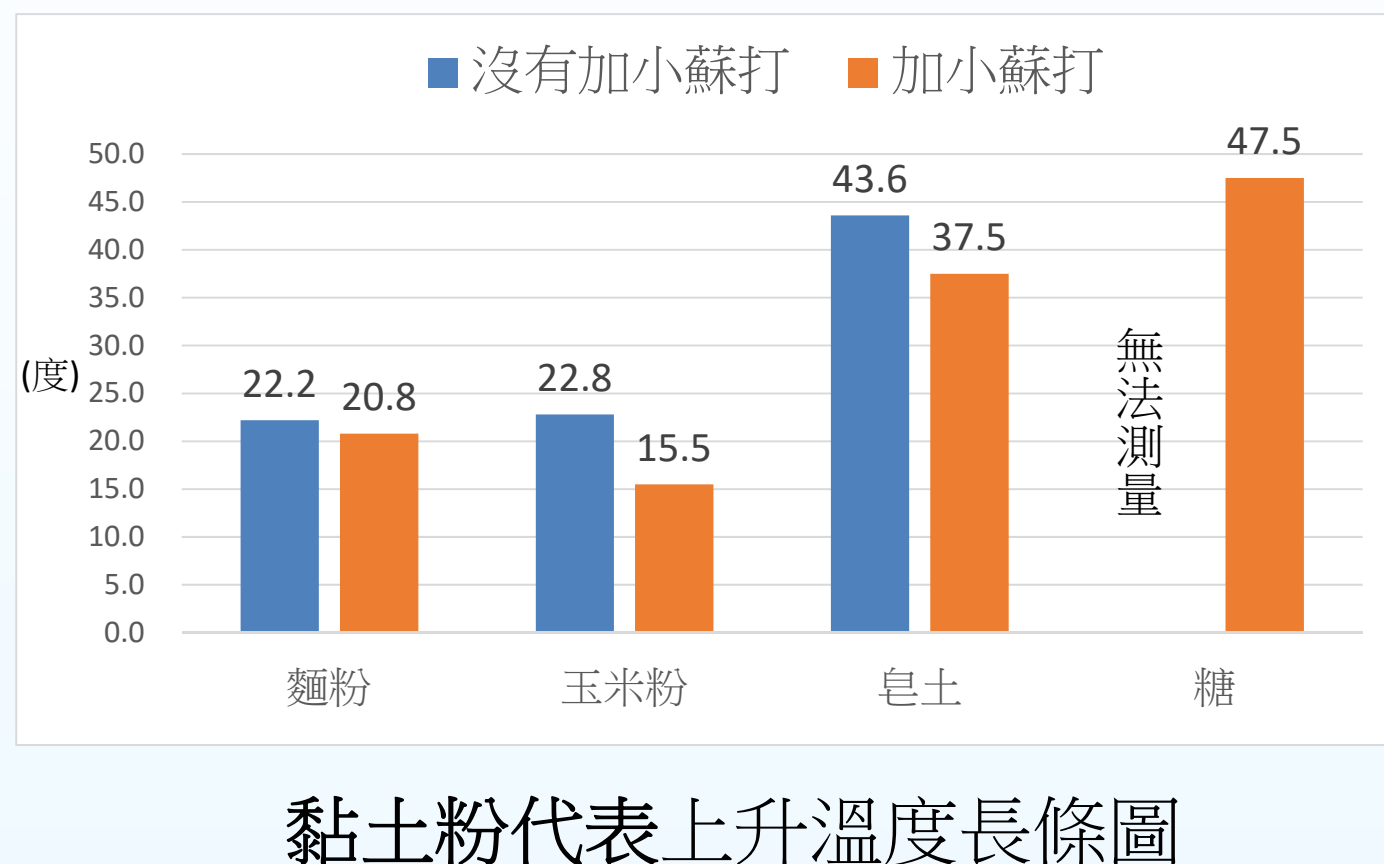


## (二) 較佳黏土粉代表 + 水 + 小蘇打粉

**研究方法：**我們挑選四種較具代表性的黏土粉(60ml) (①麵粉②玉米粉③皂土④糖)，多添加入小蘇打粉(10ml)，進行測試。

**實驗記錄：**1. 黏土粉代表+小蘇打粉的耐火效果：

粉末	麵粉	玉米粉	皂土	糖
上升溫度(度)	20.8	15.5	37.5	47.5
剖面層次	上: 硬殼 --- 下: 麵包鬆軟	上: 酥軟 中: 軟黏 下: 會崩裂	上: 白硬 --- 下: 濕軟	上: 黑糖蛇(掉落) 下: 鱗片狀
剖面				

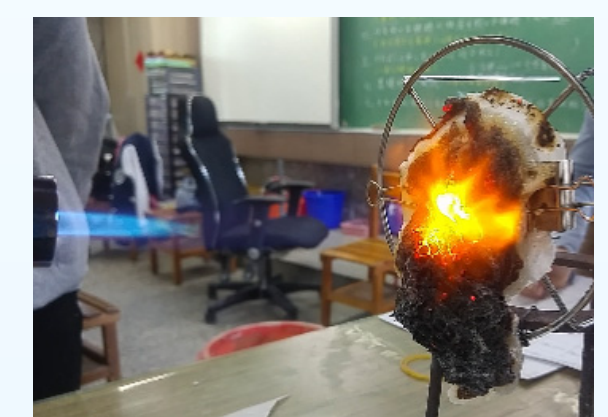


### 研究結果：

- 黏土粉多添加小蘇打粉，耐火效果會變好。
- 「玉米粉+水+小蘇打」的耐火效果佳，僅15.5度。
- 玉米粉黏土難塑性易碎裂。我們嘗試以「黏膠」來凝聚玉米粉。



玉米粉沒黏著性易碎。



黑糖蛇凸出太多，掉落到桌面。

## 三、黏膠差異的影響：

**研究原因：**經過測試後，我們決定以「玉米粉」做為黏土粉。並測試不同黏膠凝聚玉米粉的效果。

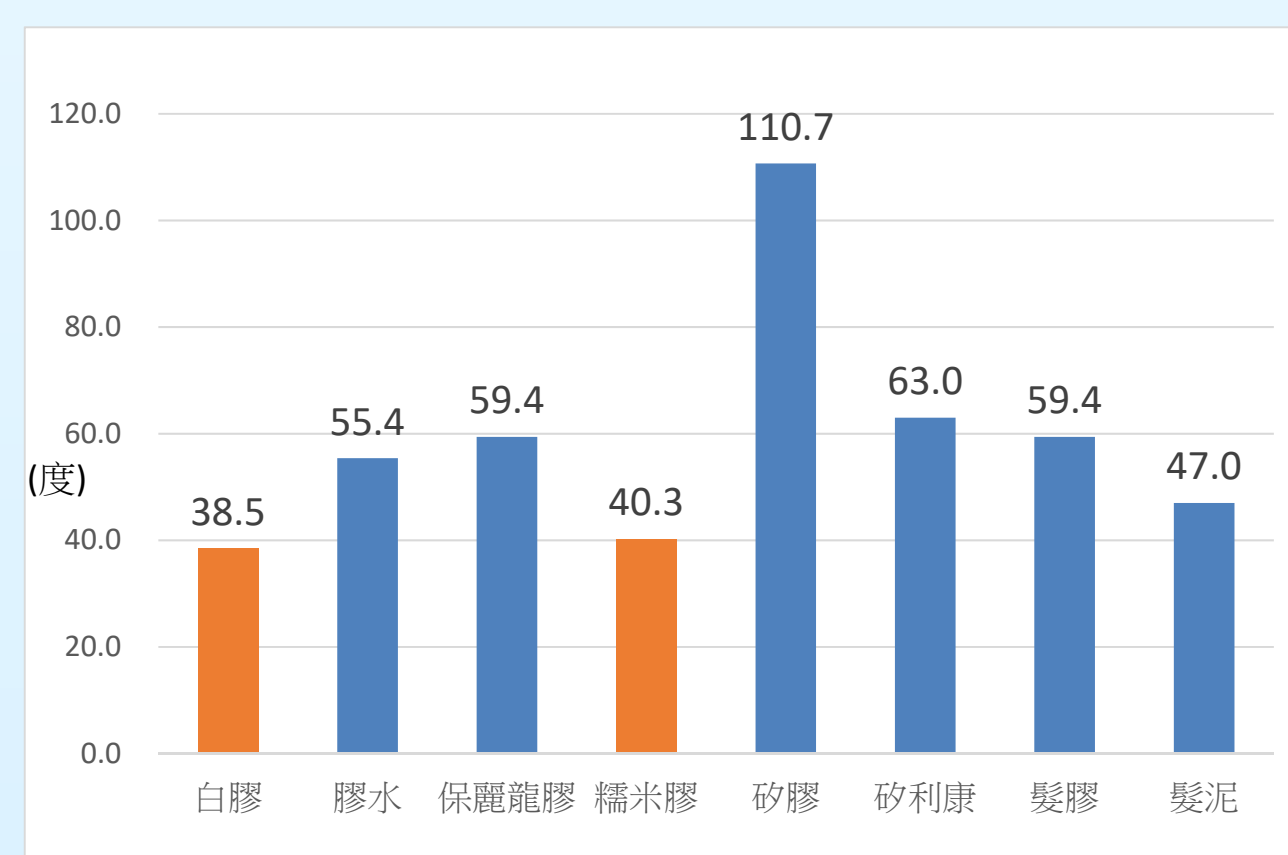
**研究方法及結果：**我們進行以下兩種測試：①玉米粉+各種黏膠效果測試、②挑選最佳黏膠與玉米粉+小蘇打粉測試。

### (一)「不同黏膠種類 + 玉米粉」的噴燈測試：

**研究方法：**我們挑選了四種類型膠類(①化學膠、②植物膠、③矽膠、④髮膠)，取代水，與玉米粉進行黏土的製作。

**實驗記錄：**

類型	化學膠			植物膠	矽膠		髮膠	
名稱	白膠	膠水	保麗龍膠	糯米膠	矽膠	矽利康	髮膠	髮泥
黏土軟硬	中	硬	硬	軟	中	軟	軟	硬
上升溫度(度)	38.5	55.4	59.4	40.3	110.7	63.0	59.4	47.0
層次狀態	上: 酥 中: 軟黏 下: 軟	上: 黑硬 中: 薄 下: 透明軟	上: 酥 下: 孔洞蛋糕	上: 黑硬 中: 透明軟 下: 軟白	無 加熱後融化!	上: 白色突起 中: 焦黑 下: 軟白	上: 焦黑 --- 下: 軟白	上: 焦黑突起 --- 下: 軟白
剖面照片								



### 研究結果：

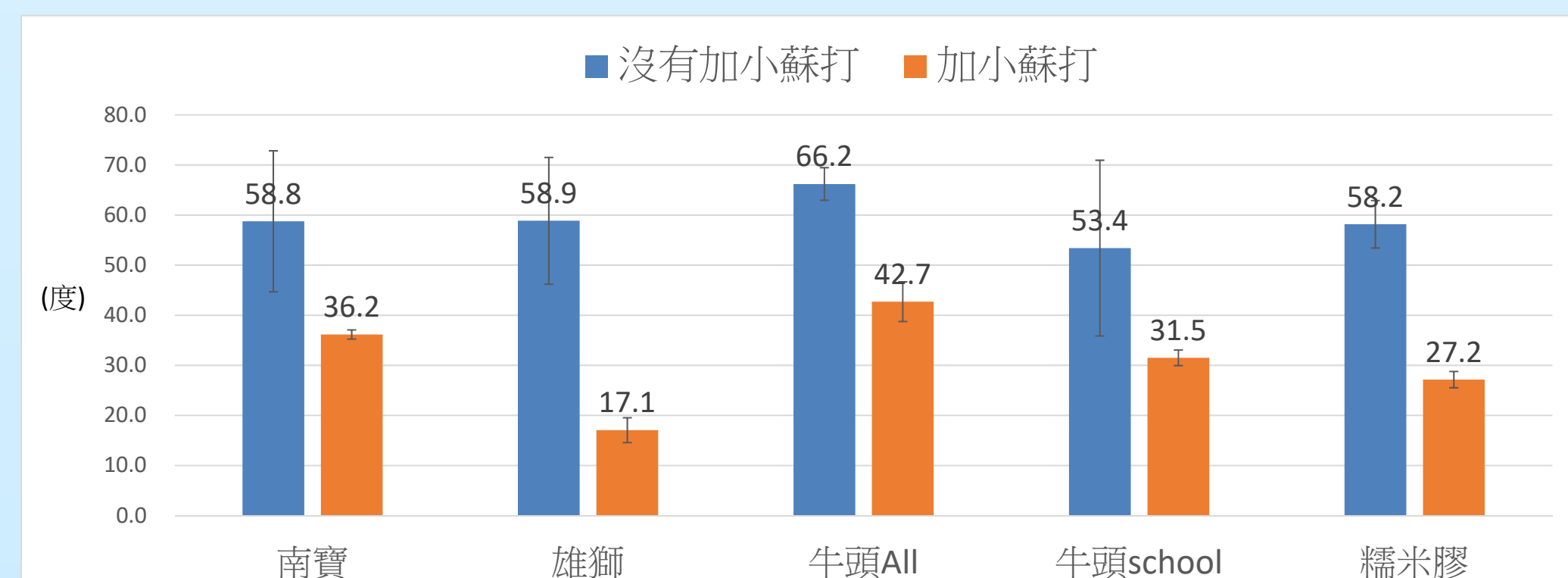
- 白膠、糯米膠耐火效果佳。
- 矽膠類耐火效果不佳且有異味。
- 黏膠能幫助凝聚玉米粉，不會裂開，且能成形。

## (二) 玉米粉 + 最佳黏膠代表 + 小蘇打粉

**研究方法：**我們將耐火效果較好的黏膠類型及品牌 (①白膠②糯米膠)與玉米粉混合，額外多加入小蘇打粉(10ml)，進行測試。

**實驗記錄：**1. 玉米粉 + 黏膠代表 + 小蘇打粉黏土的耐火效果：

黏膠類型	白膠				糯米膠
黏膠品牌	南寶	雄獅	牛頭 School	牛頭 All	
價格	300g 53元	480g 48元	255ml 270元	255ml 460元	1Kg 288元
成份	聚醋酸乙烯酯、水	聚乙烯醇、水、聚醋酸乙烯酯	無標示	無標示	可食用糯米、高性能植物
上升溫度(度)	36.2 ± 0.9	17.1 ± 2.5	31.5 ± 1.6	42.7 ± 4.0	27.2 ± 1.6
膨脹(cm)	1.46	1.49	2.00	1.00	1.53
層次狀態	上: 黑 中: 焦黃有韌性 下: 白軟，像糰	上: 焦黑 --- 下: 像千層派	上: 焦黑 中: 多孔洞麵包 下: 黏土一樣軟	上層: 焦黑 --- 下層: 空洞麵包	上: 焦黑 中: 多孔洞麵包 下: 軟黏的黏土
剖面照片					



黏膠代表上升溫度長條圖

### 2. 剖面類型：

類型	千層派	多孔洞麵包	糰
特徵圖片			
黏膠/耐火溫度	白膠雄獅 (17.1度)	糯米膠 (27.2度) 白膠牛頭School (31.5度) 白膠牛頭All (42.7度)	白膠南寶 (36.5度)
分析	白膠雄獅：溫度低，耐火效果極佳。	糯米膠：溫度偏低。耐熱效果好。	有耐熱效果，但溫度偏高，不適合。

### 研究結果：

- 黏土燃燒後的剖面可分三種：①千層派(最耐熱)、②多孔洞麵包、③糰。
- 我們接下來研究的黏膠以：

①白膠雄獅(千層派結構)和②糯米膠(多孔洞麵包結構)為主。因為它們耐火效果好、結構特別、便宜且容易取得。

## 四、膨鬆劑的影響：

**研究原因：**添加小蘇打能增加黏土的耐火效果，但，我們想知道除了小蘇打，其他能產生二氧化碳的膨鬆劑效果如何？

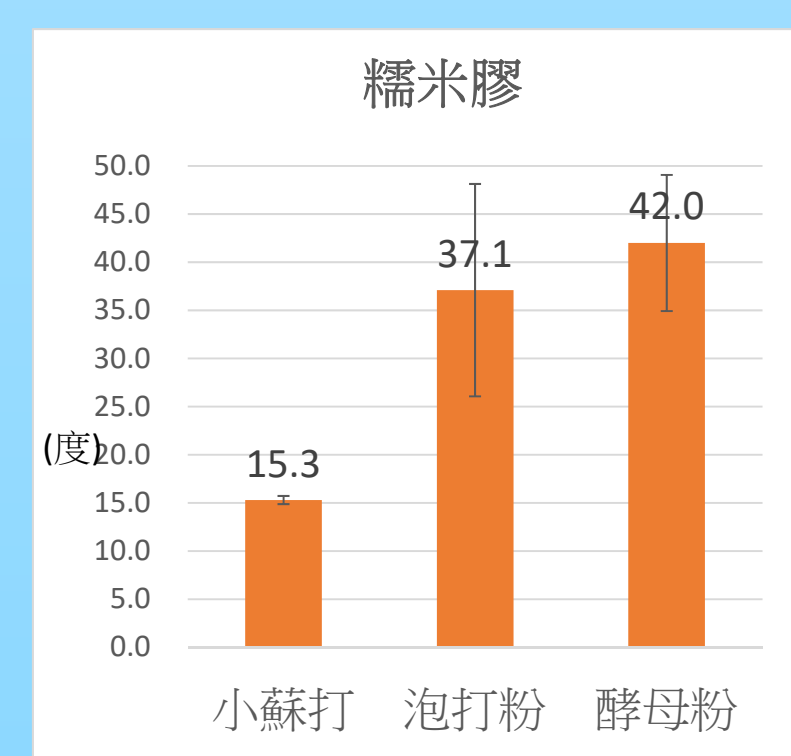
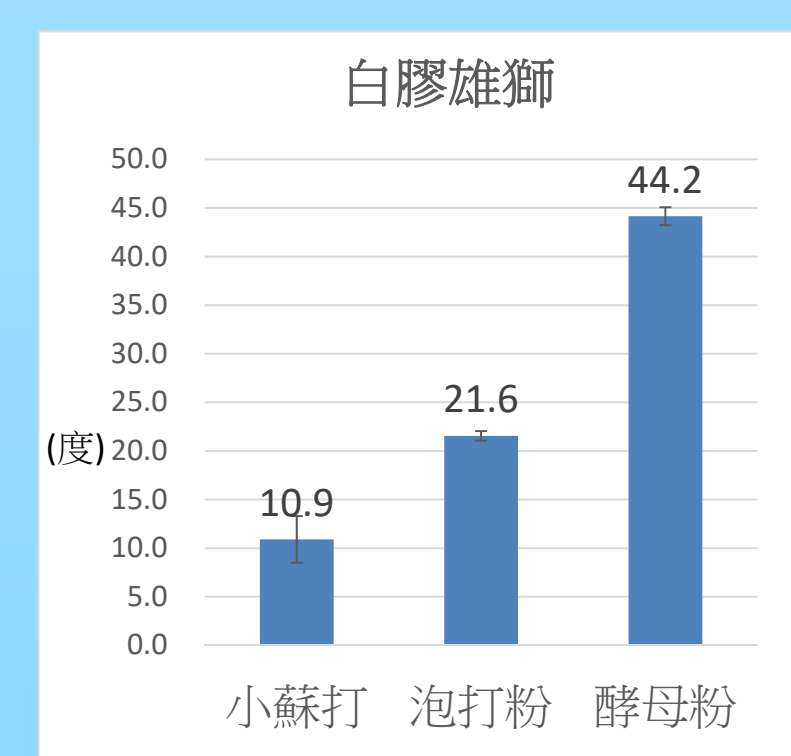
**研究方法及結果：**選三種膨鬆劑(小蘇打、泡打粉、酵母粉)，分別使用雄獅白膠及糯米膠測試其效果。

### (一)「玉米粉+雄獅白膠+不同膨鬆劑」

黏膠	白膠雄獅		
膨鬆劑	小蘇打	泡打粉	酵母粉
上升溫度(度)	10.9 ± 2.4	21.6 ± 0.5	44.2 ± 0.9
膨脹(cm)	1.49	0.84	0.76
剖面	千層派	多孔洞麵包	多孔洞麵包
剖面圖片			

### (二)「玉米粉+糯米膠+不同膨鬆劑」

黏膠	糯米膠		
膨鬆劑	小蘇打	泡打粉	酵母粉
上升溫度(度)	15.3 ± 0.4	37.1 ± 11.0	42.0 ± 7.1
膨脹(cm)	1.53	1.13	0.76
剖面	多孔洞麵包	糰	多孔洞麵包
剖面圖片			



膨鬆劑種類上升溫度長條圖

### 插曲：這些膨鬆劑遇熱會產生什麼不同效果？

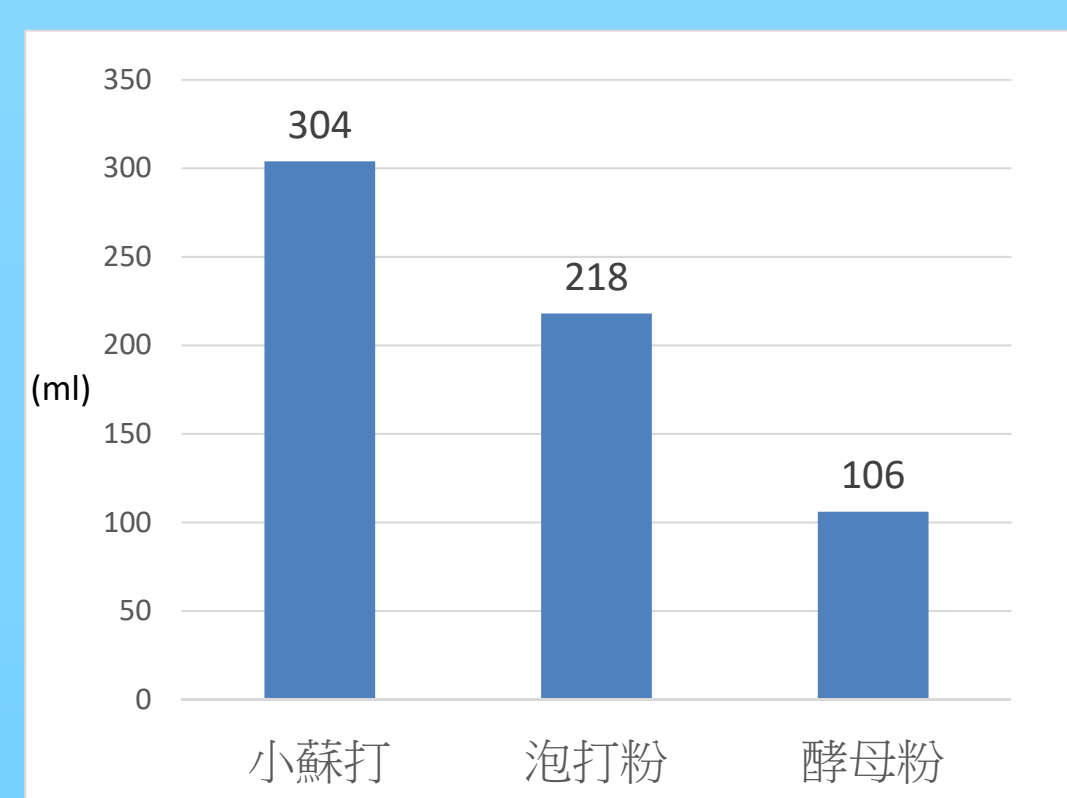
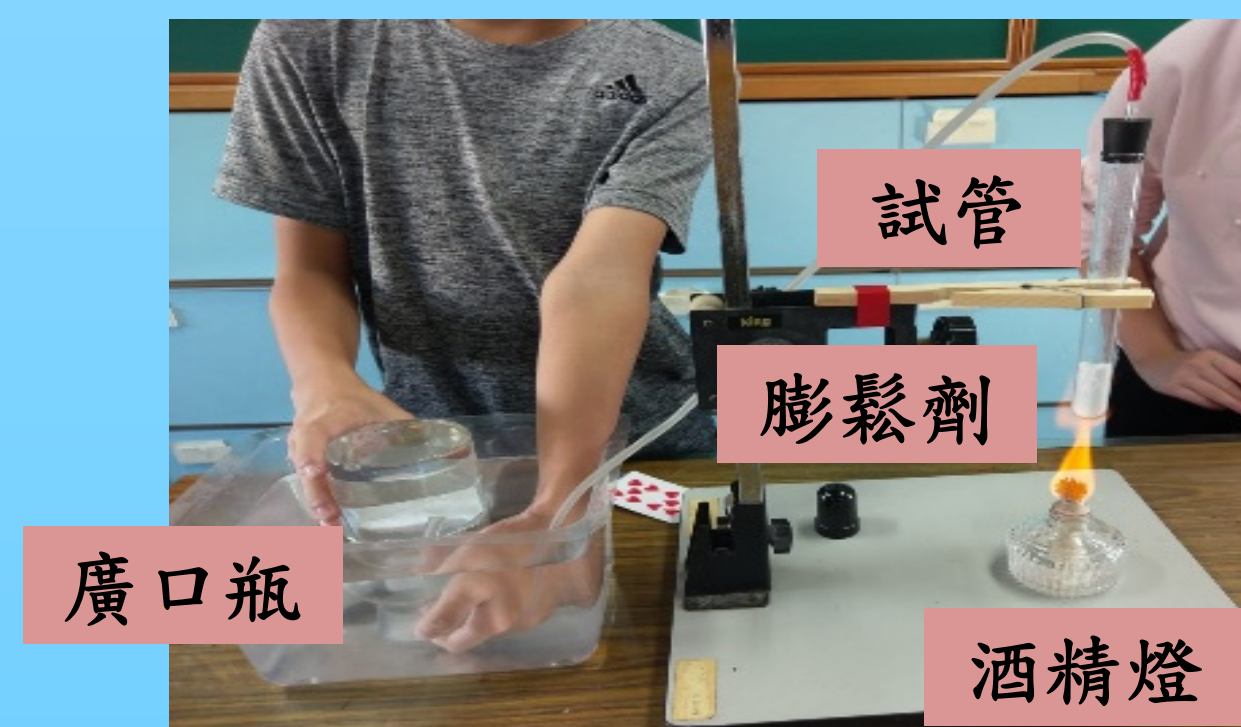
我們想瞭解膨鬆劑遇熱產生二氧化碳量的差異，因此：

- 將三種粉末狀膨鬆劑10ml放入試管中，以酒精燈加熱。
- 以排水集氣法蒐集這三種粉末遇熱後排出二氧化碳的體積

### 研究結果：

- 小蘇打遇熱後產生的二氧化碳量最多，同時也是具有最佳耐火效果的膨鬆劑。
- 黏土的耐熱效果，與膨鬆劑產生的二氧化碳量一致(二氧化碳量越多，耐熱效果越佳)。
- 黏膠含水量會對不同類型膨鬆劑產生不同效果(例:酵母菌需水慢慢反應，產生的二氧化碳量很慢又少)。

排水集氣法



膨鬆劑種類產生CO<sub>2</sub>長條圖

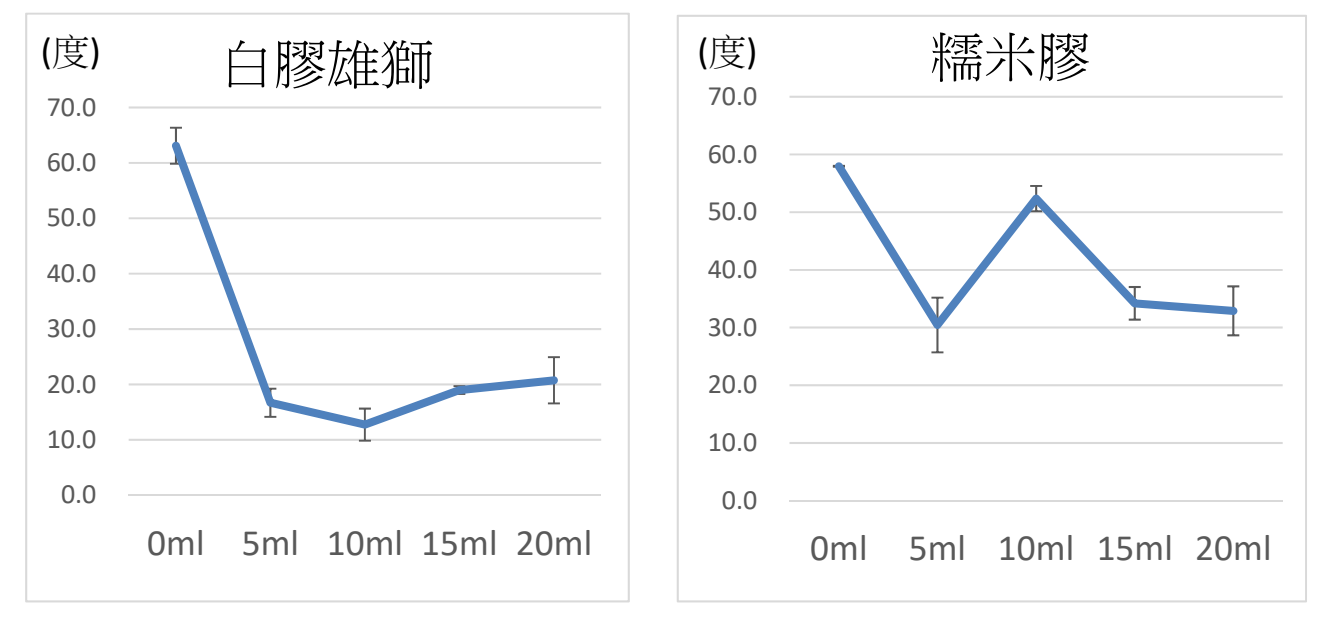


## 五、膨鬆劑—小蘇打比例

**研究原因及方法：**小蘇打加多少最能耐火呢？我們在黏土中分別加入0、5、10、15、20ml的小蘇打，測試效果。

**實驗記錄：**(一)玉米粉 + 白膠雄獅/糯米膠 + 小蘇打：

黏膠種類	白膠雄獅					黏膠	糯米膠				
	小蘇打	0 ml	5 ml	10 ml	15 ml		20 ml	小蘇打	0 ml	5 ml	10 ml
上升溫度(度)	63.1	16.7	<b>12.8</b>	19.0	20.8	58.0	58.0	<b>30.5</b>	52.4	34.2	32.9
膨脹(cm)	1.35	0.98	1.15	1.34	1.19	1.00	1.44	1.39	1.55	1.80	
剖面類型	裸	千層派	千層派	千層派	硬麵包	裸	多孔麵包	多孔麵包	多孔麵包	多孔麵包	
剖面圖片											



小蘇打比例上升溫度折線圖

- 研究結果：**
1. 添加小蘇打會讓溫度降低，但添加太多，溫度反而會上升，且黏土也會變硬。
  2. 不同黏膠，搭配的小蘇打比例也不同！最佳比例：**①60ml玉米粉+白膠雄獅+10ml小蘇打粉(10.4g)**  
**②60ml玉米粉+糯米膠 + 5ml小蘇打粉(5.2g)**

## 六、添加物

(一)目的→軟化黏土(白膠雄獅)：

**研究原因：**白膠雄獅黏土耐火效果最佳，但黏土卻變得又硬又難塑形，我們嘗試加入**添加物軟化**它。

**研究方法：**選擇不同配方製作黏土(玉米粉+添加粉10ml+黏膠+小蘇打)→確認軟硬→耐火測試→找最佳比例。

**實驗記錄：**1. 「軟化」添加物的噴燈耐火檢測數據

2. 漿糊軟化白膠雄獅黏土最佳比例

添加物	無添加	水	矽利康	髮膠	矽膠	漿糊	奶粉	牙膏	洗衣精	糖漿	膠水+水	糯米膠
上升溫度(度)	18.3	21.8	22.2	30.4	16.0	20.7	20.9	21.7	17.6	16.7	50.0	23.9
硬度	硬	中	軟(臭味)	硬	中	<b>軟</b>	硬	硬	中	硬	中	軟
剖面圖片												

白膠(g)	20	15	10
漿糊(g)	0	5	10
出水	有些出水	少量出水	無出水
硬度	硬	偏硬	軟
溫度	8.3 ± 1.5	17.6 ± 2.7	19.1 ± 0.9

**研究結果：**

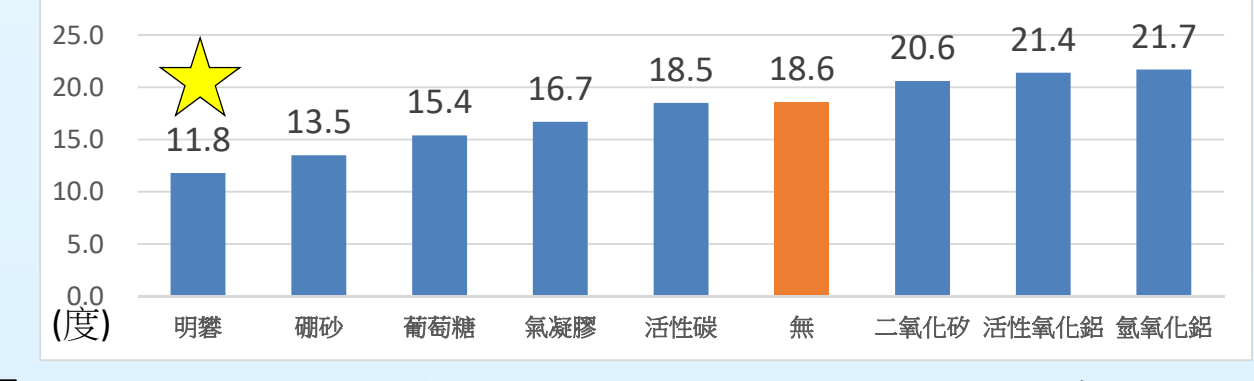
1. 添加軟化物中只有「矽利康、漿糊、糯米膠」能讓白膠雄獅黏土變軟。我們選擇漿糊來軟化白膠雄獅黏土。
2. 最佳軟化比例『**白膠雄獅：漿糊 = 15g：5g**』，此時雖仍有一些硬度但可塑型，且耐溫效果佳！

(二)目的→降溫(增加耐火效果)：

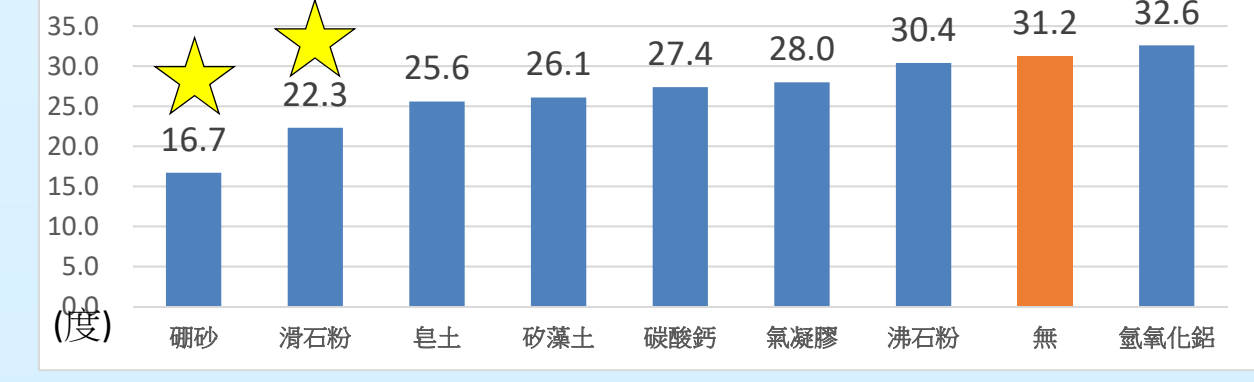
**研究原因及方法：**傳說星光是由21種成分組成，因此我們嘗試以白膠雄獅黏土、糯米膠黏土為主體，以六種降溫方向，添加材料(①增加碳化、②增加二氧化碳、③礦物阻隔、④增加空隙、⑤硼酸鹽阻燃、⑥無機物阻燃)。

**實驗記錄：**1. 「降溫」添加物噴燈耐火檢測數據及最佳效果前九名長條圖分析：

種類	名稱	無添加	增加碳化效果			增加二氧化碳			礦物成分阻隔			增加黏土空隙			硼酸鹽		無機類		
			糖粉	活性碳	葡萄糖	碳酸鈣	檸檬酸	明礬(2ml)	石英粉	二氧化矽	滑石粉	皂土	沸石粉	矽藻土	氣凝膠	硼砂(2ml)	硼酸	氫氧化鋁	活性氧化鋁
雄獅白膠+漿糊	上升溫度(度)	18.6	30.0	18.5	15.4	42.4	28.9	<b>12.3</b>	37.2	20.6	41.4	38.1	52.7	31.4	16.7	<b>13.5</b>	31.7	21.7	21.4
	剖面	麵包千層派	麵包裸	千層派	麵包千層派	麵包	麵包	千層派	麵包	千層派	麵包	麵包	麵包	麵包	千層派	千層派	麵包	千層派	千層派
糯米膠	上升溫度(度)	31.2	34.0	33.7	39.6	27.4	54.3	41.7	34.4	32.4	<b>22.3</b>	25.6	30.4	26.1	28.0	<b>16.7</b>	52.7	32.6	33.7
	剖面	麵包	麵包裸	麵包	麵包裸	麵包	麵包裸	麵包	麵包	麵包	麵包	麵包	麵包	麵包	麵包	麵包	麵包裸	麵包裸	麵包裸



「白膠雄獅添加物」最佳耐火效果前九名長條圖



「糯米膠添加物」最佳耐火效果前九名長條圖

**研究結果：**不同添加物，對不同膠類的剖面會產生不同影響！

1. 白膠雄獅對添加物反應大，原來的千層派結構遇到**糖**或**酸**的添加物會使結構從「千層派→麵包→裸」較不耐火。
  2. 白膠雄獅黏土的降溫方式以**增加碳化、二氧化碳、黏土空隙與硼酸鹽阻燃劑**效果佳。
- 糯米膠降溫方式則為**礦物阻隔、黏土空隙與硼酸鹽阻燃劑**。

## 七、應用-重現星光

**研究原因：**最佳配方與網紅配方比較！

**實驗記錄：**

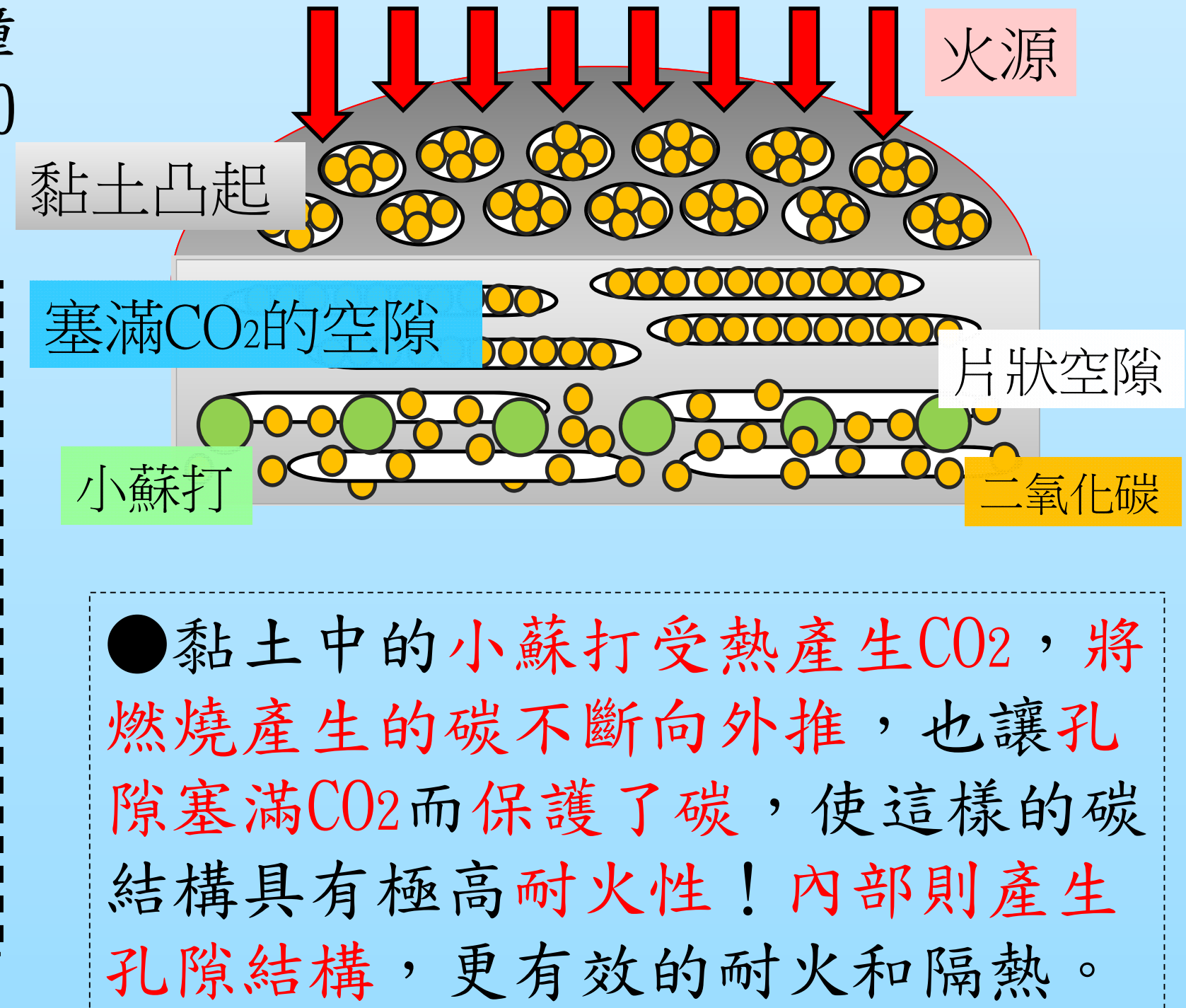
黏土配方	白膠雄獅+漿糊+明礬	糯米膠+硼砂	糯米膠+滑石粉	國外網紅配方
加熱90秒(度)	<b>11.1</b> ± 4.9	23.3 ± 5.7	31.0 ± 7.1	39.8 ± 0.8
加熱10分鐘(度)	<b>37.5</b> ± 7.5	57.4 ± 1.3	54.3 ± 3.5	79.0 ± 7.8
剖面				
膨脹(cm)	1.2	1.5	2.3	0.4
5分鐘烤蛋	生雞蛋	生雞蛋	生雞蛋	
黏土成本(元)	<b>7.4</b>	8.9	9.1	<b>57.4(貴)</b>
問題	不易塑型	硼砂有毒	溫度略高	成本、溫度高

**研究結果：**

我們的三種自製配方在十分鐘噴燈加熱後上升溫度都低於60度，效果優於國外網紅配方。



## 陸、原理分析



## 柒、結論

一、分析配方中耐火材料的原理：

	功能
<b>黏土粉</b> 推薦:玉米粉	①形成黏土主體 ②製作出有空隙的結構
<b>黏膠</b> 白膠.糯米膠	①聚合玉米粉 ②強化孔隙結構
<b>膨鬆劑</b> 推薦:小蘇打	①產生二氧化碳 ②與白膠能出現千層派結構
<b>添加物</b> 漿糊 明礬.硼砂.滑石	①改變性質或效果 軟化白膠(漿糊)降溫(明礬.硼砂.滑石)

二、我們找到並量化三種最佳耐火黏土配方：

	黏土粉	黏膠	膨鬆劑	添加物
1	玉米粉 20g	白膠雄獅15g+漿糊5g	小蘇打10.4g	明礬1.4g
2		糯米膠20g	小蘇打5.2g	硼砂1.4g
3				滑石粉7g

三、耐火黏土的突破：

