

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

題目:

氬氣供應之燒磁過程對純鈦-陶瓷結合強度之影響

The effects of argon supplied firing schedules on bond strength
of titanium-ceramic system

NSC 88-2314-B-040-037

執行期限: 87/08/01 至 88/07/31

計畫主持人: 徐啟智

執行機構: 私立中山醫學院 牙醫學系

一、 中文摘要

本研究的目的是探討在陶瓷燒付過程中,不同溫度下供應氬氣對陶瓷與鈦金屬間的撓曲黏結強度之影響。實驗依燒付過程分為 Group A.無排氣過程及 Group B.有排氣過程及 subgroup 1.未供應氬氣, subgroup 2.溫度上升達 750 時供氬, subgroup 3 溫度上升達 700 時供氬, subgroup 4. 全程供應氬氣, 共八組。試片經過三點彎曲測試, 記錄下陶瓷黏結剝離時的荷重。再利用掃描式電子顯微鏡來評估斷裂面及純鈦—陶瓷交界面的顯微結構。實驗結果發現有、無排氣情形下, 對鈦金屬與陶瓷間的撓曲黏結強度並無顯著影響($p>0.05$); 但在有排氣的情形下, 供應氬氣的條件會對鈦金屬與陶瓷間的撓曲黏結強度有顯著影響($p<0.05$), 尤其在有排氣過程中, 溫度上升達 700 時供應氬氣或 750 時供應氬氣可得到較佳的鈦金屬與陶瓷間的撓曲黏結強度($p<0.05$)。而全程供應氬氣的燒付條件並無法提昇鈦金屬與陶瓷間的撓曲黏結強度, 同時還會使陶瓷層由內至外佈滿大大小小的氣泡。因此臨床上, 在陶瓷燒付過程中, 如能適當的供應氬氣, 可以改善鈦金屬與陶瓷間的撓曲黏結強度。

Abstract:

The purpose of this study was to investigate the effect of argon supplied furnace in different firing schedules on the bond strengths of ceramic-titanium system. In total, 120 specimens were divided into two groups as follows: **Group A** -No degassing; **Group B** - Degassing. And then each group was divided into four subgroups for different argon supplied firing schedules as follows: 1) No argon supplied; 2) Argon supplied from 750°C; 3) Argon supplied from 700°C; 4) Argon supplied from the beginning. Fifteen specimens were made in each subgroup. All the specimens were subjected to a three-point bending test, and the load of bond failure were recorded. The

surface of each debonded specimens were examined and photographed to determine the mode of bond failure. A two-way ANOVA followed by a Student-Neuman-Keuls was used to analyze the data. There was no statistically significant difference of flexural bonding strength between degassing and no degassing groups ($p>0.05$). In degassing groups, the flexural bonding strength were statistically significant difference among ceramic firing schedules ($p<0.05$). And argon supplied from 750°C or 700°C showed statistically significant higher flexural bonding strength than that of no argon supplied or argon supplied from the beginning ($p<0.05$). In SEM examination showed that there were more bubbles in ceramic layer nearby the titanium/ceramics junction in the specimens which argon supplied from the beginning. It is concluded that ceramic firing schedule under selected argon supplied could improve the flexural bonding strength on c.p.titanium-ceramic system, especially the firing procedure under degassing.

二、 緣由與目的:

貴金屬合金因價格高及抗彎曲性低等問題, 自 70 年代起, 由於基底金屬合金費用成本的降低與製備技術的進步, 而逐漸取代了貴金屬合金於臨床上的應用。但因基底金屬合金所含之鎳、鈹等元素對人體健康有潛在危險的報告亦時有所聞, 學者們便急欲尋求具有相似物性之金屬合金替代物, 而鈦金屬便是其中之一。鈦金屬集合了貴金屬合金及基底金屬合金的優點, 如高強度、抗腐蝕性佳、優異的生物相容性、重量輕(為金的 1/4) 熱傳導性低、延展性佳、良好的機械性質及在與貴金屬相較下價格較合理等特性皆符合牙科鑲復體製作所需的要求, 因而將其應用於金屬陶瓷鑲復物的領域中^{1,2,3}。純鈦金屬表面會

形成多種氧化物，如 TiO、TiO₂ 與 Ti₂O₃ 等，其中最穩定且最普遍會生成的氧化物是 TiO₂³。不過，因純鈦金屬在高熔點及在高溫狀態下易與氧、氮、碳、氫產生化學反應⁴，因而造成了純鈦金屬在鑄造方面有其困難性。

鈦金屬除了鑄造困難外，最大的問題即是鈦金屬與陶瓷之不良黏結，而其最主要的因素是過厚的氧化層。在製作金屬陶瓷復體時，影響氧化層厚度之因素包括有陶瓷燒付的時間與溫度，包埋材的種類，金屬表面處理等⁵。一般商業用鈦金屬在低於 800 的溫度下進行氧化反應時，會形成紮實且有黏結性的氧化物，而在較高溫或氧化時間較長的情形下所發現的氧化物剝離現象，可能是因氧化過程中形成的應力所導致⁶。鈦金屬氧化層厚度會隨著陶瓷燒付時間與溫度的增加而增加，但也不是無限制的增加，當其達到飽和狀態時，其增加率會是緩慢且微量的，燒付時所形成的氧化層厚度可由 100 至 1000nm，而氧化層的厚度愈厚，鈦金屬與陶瓷的黏結力就愈薄弱⁵。一般相信鈦金屬的氧化反應是藉著氧不斷地向內擴散，而在金屬與金屬氧化物的交界面形成新的氧化物。高溫時，大量向內生成的氧化物所造成的應力是致使氧化鈦保護作用失敗的原因⁷。

本篇研究的目的是希望瞭解在低熔點陶瓷燒付到鈦金屬表面時，在不同溫度下供應氫氣對沒有經過排氣過程及有經過排氣過程的低熔點陶瓷與鈦金屬間的撓曲黏結強度有何影響。此外也將利用掃描式電子顯微鏡 (SEM) 及 X 光能譜分析儀 (Energy-dispersive X-ray spectrometer, EDS) 來進一步了解撓曲黏結強度測試所得之斷裂面及純鈦—陶瓷之黏結交界面的顯微結構。

三、 材料與方法

金屬試片的製作：

將厚度 0.7 mm 的鑄造用蠟片裁成長度 21 mm，寬度 7 mm 的蠟型片。以鈦金屬專用包埋材 (Titavest CB., J. Morita Co., Osaka, Japan) 依廠商建議的

粉液比 13.5ml/100g 與特殊配方專門液體 (J. Morita Co., Osaka, Japan) 用真空混合機 (J. Morita Co., Osaka, Japan) 調拌一分鐘後，灌注模具中。將包埋好的樣本置於室溫 21-27 下一小時，待其完全凝固硬化。將包有樣本的鑄造環置於冷的鎔爐 (Vulcan3-550, J.M.Ney Co., Bloomfield CT, USA) 中央，加熱速率為 7 /min，加熱至 250 時停留 20 分鐘，然後繼續加熱至 910 時停留 30 分鐘，最後將溫度降至 650 時停留 20 分鐘，全程共需 3 小時 51 分，然後電弧熔化自動鑄造機 (Cyclarc II, J. Morita Co., Osaka, Japan) 進行鑄造。鑄造後將鑄造環放入水中驟冷 20 分鐘，再將包埋材去除。每片切下的樣本，皆用 X 光機照射檢查鑄造出的樣本內是否有氣泡存在，經篩選後將內含氣泡的樣本丟棄。篩選出的樣本用 180grit 碳化矽水砂紙將之修磨成長 21 mm，寬 7 mm 的大小。接著用碳化鎢修磨針以適當的壓力輕輕地將欲與陶瓷黏結的鈦金屬樣本的氧化表面磨除。並使用數位化測量尺規記錄各個樣本長度、寬度及厚度的實際尺寸。

陶瓷燒付：

將欲與陶瓷黏結的鈦金屬樣本表面以未曾循環使用過的 50μm 氧化鋁進行噴砂處理，噴嘴與樣本相距 10 公分，使用壓力為 3 bar。然後再用蒸氣機 (Jelenko Co., Armonk, NY, USA) 將噴砂處理完成之試片表面清潔乾淨。陶瓷堆築時，以特殊裝置來控制低熔點陶瓷 (Tibond ceramic, Dentsply DeTrey GmbH, Dreieich) 各層的長度、寬度及厚度，使鈦金屬樣本表面的中央留下長寬皆為 7 mm 的正方形區域，在此區域先燒付上薄薄的一層黏結劑 (bonder)，接著分兩次堆築、燒付上厚度為 0.3 mm 的不透光陶瓷 (opaque ceramic)，然後再分兩次堆築、燒付上厚度為 0.7 mm 的體陶瓷 (body ceramic)，使其得到總厚度為 1 mm 的低熔點陶瓷層。燒付過程依照是否有經過排氣 (degassing) 過程，將之分成兩大組，而後再依不同溫度供應氫氣 (argon) 的條件，將各

大組分為四小組，每組共準備 17 個樣本，其中 15 個供撓曲黏結強度測試之用，另 2 個則用來觀察金屬與陶瓷交界面，故總共製作 136 個樣本。分組如下：第一組：無排氣過程、未供應氫氣；第二組：無排氣、溫度上升達 750 時供氫；第三組：無排氣、溫度上升達 700 時供氫；第四組：無排氣過程、全程供應氫氣；第五組：有排氣過程、未供應氫氣；第六組：有排氣、溫度上升達 750 時供氫；第七組：有排氣、溫度上升達 700 時供氫；第八組：有排氣過程、全程供應氫氣。

撓曲黏結強度測試:

每組取 15 個樣本用萬能測試機 (universal testing machine; AG-1000, Shimadzu Co., Kyoto, Japan) 進行三點彎曲測試 (three-point bend test), 施力桿的壓縮速率為 0.5mm/min, 施力持續至應力 - 應變曲線 (stress-strain curve) 驟降 (disruption), 亦即陶瓷黏結失敗 (debond) 而發生剝離現象時, 記錄下此時的荷重。

統計分析:

將八組實驗樣本測試所得撓曲黏結強度之結果, 進行雙因子變異數分析法 (two-way ANOVA) 的統計分析處理, 然後再用杜氏事後檢定 (Tukey test) 對各組平均數做事後比較 (unplanned comparison) 。

斷裂面分析:

每組隨意取出兩個斷裂面樣本, 直接用掃描式電子顯微鏡 (SEM; JSM-35S, Joel5400, Japan) 之二次電子影像 (SEI) 觀察試片表面型態, 再利用背向散射電子影像 (BEI) 觀察表面成分之異同, 並利用 X 光繞射能量散佈分析儀 (EDS) 進行元素定性分析及映像 (mapping) 分析。

微結構分析:

每組另有準備兩個未經三點彎曲測試之完整樣本, 利用樹脂 (Epoxy resin) 將之以橫切面的方式包埋, 待其硬化後, 以碳化矽水砂紙依 180、400、600、800、1000、1200、1500grit 之次序來研磨試片, 再依序以 1、0.5、0.05 μ m 的氧化鋁

粉來進行拋光 (polish)。將試片表面以超音波震盪清洗乾淨, 待其乾燥後置入真空鍍膜機內鍍金, 之後直接利用掃描式電子顯微鏡之二次電子影像觀察試片界面型態。

四、實驗結果

撓曲黏結強度

由 two-way ANOVA 整體考驗 (表格 1) 的分析結果顯示出, 單純考慮有無排氣過程對鈦金屬與陶瓷間的撓曲黏結強度的影響時, 沒有顯著差異存在 ($F=0.05, p>0.05$); 單純考慮氫氣的供應情形對鈦金屬與陶瓷間的撓曲黏結強度的影響時, 有顯著差異存在 ($F=12.65, p<0.05$); 而且有無排氣過程與氫氣的供應情形兩者間的交互作用亦達顯著水準 ($F=9.66, p<0.05$), 亦即, 排氣過程的有無是否會對鈦金屬與陶瓷間的撓曲黏結強度產生影響, 必須視氫氣的供應情形而定。由單因子在另一因子各水準之單純主要效果考驗的分析結果顯示 (表格 2, 3, 4) 出, 在未供應氫氣及溫度上升達 700 時供應氫氣的情況時, 排氣過程的有無對鈦金屬與陶瓷間的撓曲黏結強度會造成顯著差異, 不過, 在未供應氫氣的情況時, 排氣過程會造成鈦金屬與陶瓷間的撓曲黏結強度顯著降低 ($F=12.26, p<0.05$)。在有排氣過程時, 氫氣的供應情形對鈦金屬與陶瓷間的撓曲黏結強度亦會造成顯著差異 ($F=28.76, p<0.05$)。未供應氫氣及全程供應氫氣對鈦金屬與陶瓷間的撓曲黏結強度亦不會造成顯著差異 ($p>0.05$); 不過, 溫度上升達 700 時供應氫氣或溫度上升達 750 時供應氫氣相對於未供應氫氣或全程供應氫氣的組別來說, 會造成鈦金屬與陶瓷間的撓曲黏結強度顯著增強 ($p<0.05$)。

斷裂面分析

由撓曲黏結強度之斷裂面發現, 有排氣過程、未供應氫氣及有排氣過程、全程供應氫氣的條件下所有樣本都呈現脆性的斷裂形態; 有排氣過程、溫度上升達 700 時供應氫氣的條件下有 33 %

樣本呈現低度延性的斷裂形態；有排氣過程、溫度上升達 750 時供應氫氣的條件下有 40 % 樣本呈現低度延性的斷裂形態；其餘的燒付條件下只有少於 20 % 樣本呈現低度延性的斷裂形態。

由 SEM 分析所得的 SEI 與 BEI 的對照結果中發現，在有排氣過程、溫度上升達 700 時供應氫氣及有排氣過程、溫度上升達 750 時供應氫氣的條件下，鈦金屬側的斷裂面上有明顯的陶瓷碎片存在；其餘燒付條件的鈦金屬側的斷裂面上則沒有明顯的陶瓷碎片殘餘。

綜合以上所得可知，不管是在何種燒付條件下，鈦金屬與陶瓷間的斷裂型態是屬於合併 cohesive/adhesive 的情形。

界面微結構分析

由 SEM 的分析中可發現，不管是在何種燒付條件下，純鈦與陶瓷的結合界面都相當平整，並無明顯的錨點存在。再者，SEM 所見到的陶瓷內部氣泡的分佈情形則是，不論在無排氣過程或有排氣過程的情形下，全程供應氫氣的條件會使陶瓷層由內至外佈滿大大小小的氣泡；溫度上升達 750 時供應氫氣及未供應氫氣的條件則不會造成陶瓷內含有氣泡的結果。此外，不論在何種氫氣供應的情形下，有排氣過程的條件會使純鈦與陶瓷的結合界面出現明顯的灰色帶狀區，此灰色帶狀區可能是厚度稍厚的氧化層；無排氣過程的條件則不見此灰色帶狀區。

在金屬燒付上陶瓷的過程中，針對金屬表面所進行的排氣（degassing）處理及瓷爐內真空（vacuum）環境的控制，是影響金屬與陶瓷間黏結的兩個關鍵因素。

五、 討論

在金屬燒付上陶瓷之前進行金屬表面排氣處理的最主要目的有兩個：第一是希望藉著高溫將金屬表面因鑄造或磨光時沾上的濕氣、污染物、及雜質等排除，以避免在燒付過程中造成金屬與陶瓷間交界面上有氣泡或不完全黏結的區域；第二是希望能將金屬內部應力釋放，以避免金屬內部

殘餘應力在燒付過程中造成金屬變形而進一步導致陶瓷的破裂。除此之外，排氣過程會造成另一個附加作用，即利用高溫擴散原理加強金屬表面的氧化程度^{8,9,10}。由本實驗結果中可見，在無排氣過程的情形下，不同的氫氣供應條件不會造成鈦金屬與陶瓷間的撓曲黏結強度有明顯差異（ $p>0.05$ ）。在有排氣過程的情形下，不同的氫氣供應條件會造成鈦金屬與陶瓷間的撓曲黏結強度有明顯差異（ $p<0.05$ ），其中以溫度上升達 700 時供應氫氣及溫度上升達 750 時供應氫氣的情況可得到較佳的撓曲黏結強度，而未供應氫氣及全程供應氫氣的情況則得到較差的撓曲黏結強度，所以，在有排氣過程的情形下，適度的氫氣供應是必須的。

此外，不管是無排氣過程或有排氣過程的情況時，全程供應氫氣的燒付條件並無法提昇鈦金屬與陶瓷間的撓曲黏結強度，同時因為沒有經過充分抽真空的程序，以致陶瓷層由內至外全佈滿大大小小的氣泡，反而使得到的金屬陶瓷燒結狀況不適合於床上使用。

還有，在未供應氫氣的情況時，排氣過程確實會造成鈦金屬與陶瓷間的氧化層增厚，撓曲黏結強度顯著降低。由撓曲黏結強度測試發現，在有排氣過程、溫度上升達 700 時供應氫氣及有排氣過程、溫度上升達 750 時供應氫氣的條件下，可得到較佳的鈦金屬與陶瓷間的撓曲黏結強度；同時在撓曲黏結強度之斷裂曲線圖中，前者有 33 % 的樣本呈現低度延性的斷裂形態，而後者有 40 % 的樣本呈現低度延性的斷裂形態，此比例比其他燒付條件所得的要高，亦可進一步證實在此兩種燒付條件下，鈦金屬與陶瓷間的黏結強度較其他燒付條件為強；再者，在 SEM 下唯有此兩種燒付條件樣本的鈦金屬側的斷裂面上有明顯的陶瓷碎片存在，證實其斷裂型態是屬於合併有 cohesive/adhesive 的情形。

另外，不管是無排氣過程或有排氣過程的情況時，在溫度上升達 700 時供應氫氣的條件可能因為未能達到充分抽真空的程序中所提供的負

壓效果,或者氬氣供應的時機比陶瓷粉末達到可完全互相熔合燒結的狀態要過早了些,以致使陶瓷層近結合界面的地方有少許氣泡存在,這種氣泡存在的現象並不見於未供應氬氣及溫度上升達 750 時供應氬氣的樣本中。所以,雖然有排氣過程、溫度上升達 700 時供應氬氣的燒付條件可得到相當好的初期撓曲黏結強度,不過,氣泡的存在可能會造成日後在口內經過反覆地溫度變化及咀嚼應力後產生陶瓷破裂的狀況,使得到的金屬陶瓷覆物於臨床上使用時有其潛在的問題,此點亦需進一步由冷熱循環的實驗來證明之。

在有排氣過程、溫度上升達 700 時供應氬氣的樣本,鈦金屬與陶瓷交界面的瓷粉在氬氣尚未加入前,隨著抽真空狀態時溫度的上升,已使粒子間含有足夠或接近足夠的熱能,使陶瓷內的成分達到將可互相熔合燒結的狀態,此時加入氬氣,雖無法控制鈦金屬與陶瓷交界面的氧化層形成,但會使熱能傳遞至鈦金屬與陶瓷交界面的速度減緩,進而使經過排氣過程的鈦金屬表面與陶瓷間的黏結形式產生一定程度的變化,才提昇了兩者間的鍵結能力,所以能造成鈦金屬與陶瓷間的撓曲黏結強度顯著增加。再者,與溫度上升達 700 時供應氬氣的樣本所得的鍵結能力相較下,溫度上升達 750 時才供應氬氣有使鍵結能力降低的趨勢,所以與鍵結有關之反應機制可能發生在 700 至 750 之間。不過,究竟在此時鈦金屬表面與陶瓷間的黏結形式產生了怎樣的變化,則需要再更進一步的實驗來探討。

雖然,有排氣過程、溫度上升達 700 時供應氬氣可得到最好的初期撓曲黏結強度,而有排氣過程、溫度上升達 750 時供應氬氣的條件得到次之的初期撓曲黏結強度,不過,是否可能在有排氣過程、700 至 750 之間的某一個溫度的條件下,可得到更好的初期撓曲黏結強度且又沒有陶瓷層有氣泡存在的問題,是值得我們繼續深究的。

六、 結論

1. 在無排氣過程的情形下,氬氣的供應對鈦金屬與陶瓷間的撓曲黏結強度並無幫助;在有排氣過程的情形下,供應氬氣的條件會對鈦金屬與陶瓷間的撓曲黏結強度有顯著影響,顯示適度的氬氣供應是必須的。
2. 全程供應氬氣的燒付條件並無法提昇鈦金屬與陶瓷間的撓曲黏結強度,同時還會使陶瓷層由內至外佈滿大大小小的氣泡。
3. 在有排氣過程、溫度上升達 700 時供應氬氣及有排氣過程、溫度上升達 750 時供應氬氣的條件下可得到較佳的鈦金屬與陶瓷間的撓曲黏結強度;在撓曲黏結強度之斷裂曲線圖中 > 33 % 的樣本呈現低度延性的斷裂形態;在 SEM 下其斷裂型態是屬於合併 cohesive/adhesive 的情形。
4. 在 SEM 下純鈦與陶瓷的結合界面相當平整;溫度上升達 700 時供應氬氣的條件會使陶瓷層近結合界面的地方有少許氣泡存在,不過,溫度上升達 750 時供應氬氣的條件卻不會有氣泡存在的問題。

七、 參考文獻

1. Lautenschlager EP., Monaghan P. *Titanium and titanium alloys as dental materials*. Int Dent J, 43(3):245-53, 1993.
2. Roggensack M., Walter MH, Boning KW. *Studies on laser and plasma welded titanium*. Dent Mater, 9:104-7, 1993.
3. Wang RR., Fenton A. *Titanium for prosthodontic applications: a review of the literature*. Quintessence Int, 27(6):401-8, 1996.
4. Kimura H., Horng CJ., Okazaki M. et al. *Oxidation effects on porcelain titanium interface reactions and bond strength*. Dent Mater J, 9(1):91-9, 1990.
5. Hautaniemi JA., Hero H., Juhanoja JT. *On the bonding of porcelain on titanium*. J Mat Science

- Materials in Medicine, 3:180-91, 1992.
6. Jenkins AE. *The oxidation of titanium at high temperatures in an atmosphere of pure oxygen.* J of the Institute of Metallurgy, 82:213-221, 1954
 7. Bertrand G., Jarraya K., Chaix JM. *Morphology of oxide scale formed on titanium.* Oxidation of Metals, 21:1-19, 1983.
 8. Craig RG. *Restorative Dental Materials.* Mosby-Year Book, Inc., 9th ed., 1993.
 9. 鍾國雄 牙科材料學 合記圖書出版社 1993.
 10. Makoto Yamamoto *Metal-Ceramics* Quintessence Publishing Co., Inc., 1988.

有氣泡存在的問題,以及在各個陶瓷燒附條件下氧化層的定量 定性分析及其與初期撓曲黏結強度的關係並未做進一步研究,是值得我們繼續做進一步探討。

八、研究成果自評

由文獻報告得知,在製作金屬陶瓷鑲復體時,影響氧化層厚度之因素包括有陶瓷燒付的時間與溫度,包埋材的種類,金屬表面處理等⁵。而一般商業用鈦金屬在低於800 的溫度下進行氧化反應時,會形成紮實且有黏結性的氧化物,而在較高溫或氧化時間較長的情形下會有氧化物剝離現象。由實驗結果發現在陶瓷燒付過程中,如燒付溫度不高於 750° C,氫氣的供應對鈦金屬與陶瓷間的撓曲黏結強度並無幫助且反而會因氫氣的供應不當而使陶瓷充滿大小氣泡因而影響陶瓷本身強度;但當燒付溫度高於 800° C時或在有排氣過程的情形下燒付陶瓷,適當的供應氫氣,使熱能傳遞至鈦金屬與陶瓷交界面的速度減緩,可能有助於減少鈦金屬高溫下氧化層的產生,並改善鈦金屬與陶瓷間的撓曲黏結強度。實驗結果顯示,臨床上鈦金屬陶瓷燒附過程中,尤其在高溫下燒磁,適度的氫氣供應,是必須的。本實驗結果提供了臨床醫師或技工在使用鈦金屬與陶瓷系統時另一個改善鈦金屬與陶瓷間黏結強度的方式。不過,是否可能在有排氣過程、700 至 750 之間的某一個溫度的條件下,可得到更好的初期撓曲黏結強度且又沒有陶瓷層

表格 1：雙因子之整體考驗

Source	SS	Df	MS	F
有無排氣過程	0.02	1	0.02	0.05
氫氣供應情形	12.94	3	4.31	12.65 *
交互作用	9.88	3	3.29	9.66 *
誤差	38.19	112	0.34	
整體	61.03	119		

* $p < 0.05$

表格 2：各組平均數及標準差

	未供應氫氣 (Mean \pm SD)	溫度上升達 750 時供氫 (Mean \pm SD)	溫度上升達 700 時供氫 (Mean \pm SD)	全程供應氫氣 (Mean \pm SD)
無排氣過程 (Kgf) (n=15)	2.94 \pm 0.60	3.15 \pm 0.68	2.62 \pm 0.47	2.60 \pm 0.48
有排氣過程 (Kgf) (n=15)	2.19 \pm 0.74	3.34 \pm 0.54	3.41 \pm 0.60	2.27 \pm 0.50

表格 3：單因子在另一因子各水準之單純主要效果考驗

Source		SS	df	MS	F
有無排氣過程	未供應氫氣	4.18	1	4.18	12.26 *
	溫度上升達	0.28	1	0.28	0.81
	750 時供氫				
	溫度上升達	4.63	1	4.63	13.58 *
	700 時供氫				
	全程供應氫氣	0.81	1	0.81	2.39
氫氣供應情形	無排氣過程	0.33	2	0.16	0.48
	有排氣過程	19.61	2	9.81	28.76 *

* $p < 0.05$

表格 4：杜氏事後檢定

燒付條件	平均數		Tukey Grouping
	(Kgf)	(MPa)	
有排氣過程、溫度上升達 700 時供氫	3.4087	26.8323	A
有排氣過程、溫度上升達 750 時供氫	3.3385	26.2797	A
無排氣過程、溫度上升達 750 時供氫	3.1466	24.7692	A B
無排氣過程、未供應氫氣	2.9386	23.1318	A B
無排氣過程、溫度上升達 700 時供氫	2.6229	20.6467	BC
無排氣過程、全程供應氫氣	2.5979	20.4499	BC
有排氣過程、全程供應氫氣	2.2684	17.8562	C
有排氣過程、未供應氫氣	2.1920	17.2548	C