

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

銲接與硬銲之雷射複合接合製程研發 研究成果報告(精簡版)

計畫類別：個別型
計畫編號：NSC 95-2221-E-002-110-
執行期間：95年08月01日至96年07月31日
執行單位：國立臺灣大學材料科學與工程學系暨研究所

計畫主持人：陳鈞

計畫參與人員：碩士班研究生-兼任助理：塗俊欽、鍾偉志

處理方式：本計畫可公開查詢

中華民國 96年09月08日

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫 成果報告
 期中進度報告

銲接與硬銲之雷射複合接合製程研發

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫
計畫編號：NSC 95-2221-E-002-110
執行期間：95年08月01日 至 96年07月31日

計畫主持人：陳 鈞 教授
共同主持人：
計畫參與人員：塗俊欽 鍾偉志

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)： 精簡報告 完整報告

本成果報告包括以下應繳交之附件：

- 赴國外出差或研習心得報告一份
- 赴大陸地區出差或研習心得報告一份
- 出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份
- 國際合作研究計畫國外研究報告書一份

處理方式：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究計畫、列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢
 涉及專利或其他智慧財產權， 一年 二年後可公開查詢

執行單位：國立台灣大學材料科學與工程學系

中 華 民 國 96 年 08 月 22 日

銲接與硬銲之雷射複合接合製程研發

Study of Laser-Hybrid Joining for Welding and Brazing

計畫編號：NSC 95-2221-E-002-110

執行期限：95 年 08 月 01 日至 96 年 07 月 31 日

主持人：陳 鈞 台灣大學材料科學與工程學系

計畫參與人員：塗俊欽、鍾偉志 台灣大學材料科學與工程學系

一、中文摘要

本研究係以搭接接合 (Lap joint) 方式，在兩母材板件之間預置填料金屬進行雷射複合銲接，探討硬銲接合區 (Brazed zone, BZ) 之顯微組織及其硬銲接合行為。實驗結果顯示，雷射複合銲件在硬銲接合行為方面有異於傳統硬銲製程，且填料金屬之熔點可較傳統製程為高。在硬銲接合區前端，由於銲道熔池合金與填料混合，使其顯微組織具有成份梯度產生。依照母材與填料金屬的反應程度及硬銲區呈現的顯微組織，大致可將接合模式分為三類。雷射複合銲接製程可藉由適當的冶金組合與接合設計，將接合區 (銲接與硬銲接合) 之長度延長，以達到提高銲件機械性質之目的，及應用於氣密性要求高之組件接合製程上。

關鍵詞：雷射複合銲接、硬銲接合、接合模式、顯微組織

二、緣由與目的

本研究係在母材板件間預置填料金屬箔片，以 Lap joint 的搭接方式，使用高功率雷射進行複合接合製程。藉由銲道熔融金屬的熱量傳遞，使填料金屬熔融，並於凝固後與母材接合，達成硬銲的效果。雷射複合銲接結合了銲接及硬銲的特性，使接合區域的長度得以增加。

實驗過程中除採用單一金屬箔片外，亦使用 Clad metal 做為硬銲填料。對於硬銲製程所使用的 Clad metal 而言，除了填料中主要的基材金屬外，其餘添加的金屬元素多半用於降低基材金屬之熔點，使其可作用於較低之硬銲溫度，因此添加的金屬元素含量以達成相圖之共晶成分或接近共晶成分者為佳 [1]。本研究之主要目的在於觀察雷射複合銲

件之硬銲接合區顯微組織變化，並探討其接合行為，做為提升雷射複合銲件之接合品質與氣密性需求之重要依據。

三、實驗方法

本實驗使用 70 mm×20 mm×2 mm 之 304S.S.與 Ti-6Al-4V 薄板做為母材，填料金屬則為厚度 100 μm 的 Ag 與 Ni 之金屬箔片，以及 60 μm 的 Ti-15Cu-15Ni Clad metal 箔片，並在雷射銲接前先預置於兩母材板件間。此外，母材與填料金屬在雷射銲接前亦需藉由表面酸洗或研磨等方式去除氧化層，再以丙酮於超音波洗清器內震盪洗淨油漬雜質，以防銲道及硬銲區於銲接過程中受到污染。

本實驗使用 Rofin-Sinar 850 5kW 連續式二氧化碳雷射，以 Lap joint 之搭接方式，將母材與填料疊合後進行雷射複合銲接。為了防止銲件於銲接過程中因凝固收縮而產生變形，需在平台上以夾具固定；此外，由於雷射銲接在大氣中進行，因此在夾具設計上可由底部通入保護性氣體，藉以防止銲件氧化，並提升銲件品質。

由於本實驗欲比較相同熱輸入量下，雷射複合銲接之接合機構，故每組試片皆使用相同之雷射銲接參數 (雷射功率為 3 kW，銲接走速為 600 mm / min，氬氣與氫氣之氣體流量均為 15 lpm)。後續的顯微組織觀察則使用 LEO 1530 型場發射掃描式電子顯微鏡，並搭配 EDS 進行成分分析。

四、結果與討論

4.1 硬銲區之接合特性

圖 1 為本實驗之銲件示意圖。在銲接過程中，兩板材間預置的填料箔片可提升至硬

鐸溫度以上，形成一硬鐸接合區域，使工件同時具有鐸接接合及硬鐸接合的效果[2,3]。硬鐸區之接合長度與熱影響區的溫度梯度大小有關(即硬鐸溫度隨距離的增加而遞減)。硬鐸接合的效果則視選用之母材及填料金屬的種類而定。

一般而言，由於靠近熔池邊界處之硬鐸區在硬鐸過程中有較高之溫度及熔池合金的流入，故硬鐸接合之效果較佳；對距離熔池較遠的硬鐸區而言，則因硬鐸溫度較低，可能在母材與填料之間產生不連續的狹縫，使接合效果趨於弱化。對於硬鐸接合區最前端(即熔融區邊界處)至連續狹縫生成之距離，可將其定義為「硬鐸接合長度」。

雷射複合鐸接之硬鐸區，由於接合溫度較傳統硬鐸製程高，加上持溫時間極短，故其接合型態、產生之缺陷均與傳統硬鐸製程略有不同。依照母材與填料金屬間的反應型態，大致可將雷射複合鐸接之接合型態分為三種模式：

(1) Type I：

母材與填料金屬間之固溶度極低，且填料金屬升溫熔融時，兩者亦不會有互溶的現象，因此在本模式中，硬鐸區並無介金屬相生成，而是由熔融填料潤濕母材達成接合的效果。此外，硬鐸區會因鐸道熔池合金的流入，使其前端之厚度產生縮減的現象。

(2) Type II：

母材與填料金屬間具有一定程度的固溶度，且當填料熔融後，會與母材金屬產生互溶的現象，並於降溫後生成介金屬相。此現象在硬鐸區前端較明顯，但母材與填料金屬間之反應會隨距離的增加而逐漸趨向兩側之介面接合處，生成之介金屬相含量亦隨之遞減。

(3) Type III：

母材與填料金屬在高溫下會有互溶及擴散的現象，且鐸道熔池合金的混入會使填料達到共晶成分，進而使其熔點大幅降低而熔融，因此本模式之硬鐸區在降溫後皆會伴隨介金屬相的生成。由於硬鐸區前端之溫度梯度較高，具共晶成分之熔融填料可溶解周圍的母材金屬，故硬鐸區之厚度有增厚的現象；但隨著距離的增加，母材與填料的反應會逐漸趨向兩者之介面接合處。

4.2 304S.S.與填料金屬 Ag

以 304S.S.與填料 Ag 進行雷射複合鐸接，其硬鐸區巨觀如圖 2(a)所示。由 Ag-Fe 二元相圖[4]可知，Fe 和 Ag 之間並不會有互溶的現象，亦不會有介金屬相生成，故本鐸件應屬於 Type I 之接合模式，硬鐸區則藉由毛細現象使母材與熔融填料 Ag 產生接合反應。圖 2(b)顯示其接合介面非常平直，並未發現有明顯的擴散層及介金屬相生成。此外，填料 Ag 對氧的活性極低，不易氧化；唯 Fe、Cr 及 Ni 對 Ag 之溶解度極低，故本鐸件於鐸道表面及內部均有 Ag 之偏析。

4.3 Ti-6Al-4V 與填料金屬 Ag

以 Ti-6Al-4V 與填料 Ag 進行雷射複合鐸接，其硬鐸區巨觀如圖 3(a)所示。由 Ag-Ti 二元相圖[4]可知，填料 Ag 在熔融狀態下可溶解母材大量的 Ti 元素，當溫度下降至 1020 °C 時，介金屬相 TiAg 會先在母材與填料間之介面生成，並以樹枝狀晶的成長方式朝填料內部成長；當溫度持續下降至 960 °C (TiAg 與 Ag 的共晶溫度) 時，其餘未固化之液體則會凝固生成 Ag 與少量的 TiAg，此處之顯微組織如圖 3(b)所示。

由於 Ti 元素在熔融 Ag 中的溶解度會隨距離增加(即溫度梯度下降)而減少，故 TiAg 之樹枝狀晶的生成亦隨之減少，母材與填料的反應區域也逐漸趨向兩者之介面，因此在硬鐸區之中、後段僅形成厚度非常薄的介金屬相反應層，如圖 3(c)所示。故本鐸件屬於 Type II 的接合模式。

4.4 Ti-6Al-4V 與填料金屬 Ni

以 Ti-6Al-4V 與填料 Ni 進行雷射複合鐸接，其硬鐸區巨觀如圖 4(a)所示。本鐸件屬於 Type III 的接合模式，由 Ni-Ti 二元相圖[4]及 EDS 分析結果，可將硬鐸區依顯微組織的不同分為四個區域：

對接鄰鐸道的區域 I 而言，由於溫度梯度較高，填料 Ni 可藉由擴散及固溶的方式與母材充分反應，故本區域硬鐸層厚度可達到原填料厚度的數倍。此外，由於鐸道熔池合金的混入提高了硬鐸區的 Ti 含量，因此 β -Ti 在冷卻過程中會先固化，並以樹枝狀晶的成長方式朝填料內側成長。在溫度降至 942 °C (Ti 與 Ti_2Ni 之共晶溫度) 時，剩餘的液體

部分則會發生 $\text{Liquid} \rightarrow \beta\text{-Ti} + \text{Ti}_2\text{Ni}$ 之共晶反應，因此本區域硬鉲層之顯微組織為 Ti 與 Ti_2Ni 之共晶組織 (Ti-rich)，如圖 4(b) 所示。

區域 II 與區域 I 的不同之處在於前者的溫度梯度較低，且沒有熔融鉲道的混入，故本區域之 Ti 含量較區域 I 為低，硬鉲區厚度也較薄。區域 II 在硬鉲層的冷卻過程中，會先產生 $\text{Liquid} \rightarrow \beta\text{-Ti} + \text{Ti}_2\text{Ni}$ 的共晶反應。由於此時生成之 $\beta\text{-Ti}$ 含有過飽和的 Ni (相較於常溫之固溶度)，因此在後續冷卻過程中，部分 $\beta\text{-Ti}$ 會引發 $\beta\text{-Ti} \rightarrow \alpha\text{-Ti} + \text{Ti}_2\text{Ni}$ 的共析反應。上述結果顯示，本區域硬鉲層之顯微組織為 Ti 與 Ti_2Ni 之共晶組織 (Ti_2Ni -rich)，如圖 4(c) 所示。

區域 III 及區域 IV 之硬鉲區由於溫度梯度更低，因此硬鉲區寬度有逐漸減少的現象，且硬鉲區兩側之顯微組織雖與區域 II 相同 ($\text{Ti} + \text{Ti}_2\text{Ni}$ 的共晶組織)，但中央開始出現填料與母材反應不完全的現象出現。EDS 分析結果顯示，區域 III 中央之顯微組織為 TiNi ，區域 IV 中央為未與母材反應的 Ni 以及約 $1 \mu\text{m}$ 厚的 TiNi 。當填料與母材間完全無介金屬相產生時，會於介面處形成狹縫 (即兩者之間沒有接合)，此為硬鉲接合之終點。

4.5 Ti-6Al-4V 與填料 Ti-15Cu-15Ni

以 Ti-6Al-4V 與填料 Ti-15Cu-15Ni 進行雷射複合鉲接，其硬鉲區之反應與使用填料 Ni 之結果相似，均屬於 Type III 的接合模式，硬鉲區之顯微組織須藉由 Cu-Ni-Ti 之三元相圖 [5] (圖 5) 進行分析。本鉲件之硬鉲區巨觀及母材與填料之鉲前疊合示意圖分別如圖 6(a)、(b) 所示，其硬鉲區可依顯微組織的不同，分為三個區域：

區域 I 鄰近熔融區邊界，其硬鉲溫度較高，填料兩側之 Cu 和 Ni 容易向周圍的母材擴散，使硬鉲區產生變寬的現象。與使用 Ni 做為填料的鉲件相比，本鉲件填料中的 Cu 及 Ni 含量較少，故寬度的增加量也較小。此外，由於鉲道熔池合金的混入提高了 Ti 的含量，因此硬鉲區在冷卻時會先生成 $\beta\text{-Ti}$ ，其中部分 $\beta\text{-Ti}$ 會於後續冷卻過程中發生 $\beta\text{-Ti} \rightarrow \alpha\text{-Ti} + \gamma$ 的共析反應 (其中 γ 定義為 $\text{Ti}_2\text{Cu} + \text{Ti}_2\text{Ni}$ 的介金屬混合相)，使本區域呈現相當細小且分布均勻的共析組織，如圖 6(c) 所示。

區域 II 之硬鉲區顯微組織如圖 6(d)、(e) 所示。本區域的 Cu、Ni 含量較區域 I 高，故本區域之硬鉲層在固化時會先發生 $\text{Liquid} \rightarrow \beta\text{-Ti} + \gamma$ 的共晶反應，此時生成之 γ 為顆粒較粗大的 Primary phase。在後續的冷卻過程中，部分 $\beta\text{-Ti}$ 亦會發生共析反應而變態為 $\alpha\text{-Ti}$ 及 γ (此時為 Secondary phase，即圖 6(e) 中細小的長條狀組織)。

在區域 III 中，由於溫度梯度較低，填料中的 Cu、Ni 擴散程度已遠不及前兩個區域，故此處硬鉲區之寬度並無明顯變寬的現象，且本區域生成之介金屬相主要集中在硬鉲層兩側，為共晶反應 ($\text{Liquid} \rightarrow \beta\text{-Ti} + \gamma$) 及共析反應 ($\beta\text{-Ti} \rightarrow \alpha\text{-Ti} + \gamma$) 所得之產物，如圖 6(f)、(g) 所示。本區硬鉲層之中央處由於 Cu 及 Ni 的含量較低，可完全固溶於 $\beta\text{-Ti}$ 中，故本區域並無 Ti_2Cu 與 Ti_2Ni 等介金屬相的產生，顯微組織呈現鈦合金的 $\alpha + \beta$ 雙相組織，如圖 6(h) 所示。

此外，若將 SP-700 鈦合金 (Ti-4.5Al-3V-2Mo-2Fe) 與填料 Ti-15Cu-15Ni 置於紅外線真空爐進行 $1000^\circ\text{C} / 5 \text{ min}$ 之傳統硬鉲製程，亦會有與雷射複合鉲件硬鉲區相同的介金屬混合相 γ 生成。圖 7 為硬鉲層 γ 之 TEM 照片及其繞射圖譜，結果顯示 γ 由面心立方 (FCC) 的 Ti_2Ni 及體心正方 (BCT) 的 Ti_2Cu 兩種介金屬相所組成，而非 $\text{Ti}_2(\text{Cu}, \text{Ni})$ 的單一相。

4.6 304S.S. 與填料金屬 Ni

以 304S.S. 與填料 Ni 進行雷射複合鉲接，此為雷射複合鉲接之特例，其硬鉲區巨觀如圖 8 所示。由 Fe-Ni 二元相圖 [4] 可知，Ni 之熔點為 1455°C ，Fe-Ni 液相線最低處為 1425°C ，此溫度均與母材 304S.S. 之熔融溫度 (約介於 $1400^\circ\text{C} \sim 1450^\circ\text{C}$ 間) 相當，因此一般傳統硬鉲製程中，不可能使用 Ni 做為硬鉲 304S.S. 的填料。

在雷射複合鉲件的硬鉲區前端，由於高溫下 Fe 和 Ni 幾乎可完全互溶，因此鉲道熔池合金的混入可溶解周圍填料，並於降溫後引發 ($\gamma\text{-Fe, Ni}$) $\rightarrow \alpha\text{-Fe} + \text{FeNi}_3$ 的共析反應，因此本鉲件硬鉲區的顯微組織應為 $\alpha\text{-Fe}$ 與 FeNi_3 的共析組織。雖然鉲道熔池合金可溶解之填料量相當有限，使硬鉲區侷限於鄰近熔融區邊界之處，且硬鉲長度非常短 (少

於 100 μm)，但仍具有提高鉚件氣密性的功能。

五、結論

- (1) 雷射複合鉚接製程可藉由適當的冶金組合與接合設計，將接合區（鉚接與硬鉚接合）之長度延長，以達到提高鉚件機械性質之目的，及做為氣密性要求高之組件的接合製程。
- (2) 雷射複合鉚接在硬鉚接合方面異於傳統硬鉚接合之介面反應，鉚道熔池會進入硬鉚區與填料金屬反應，產生偏析組織或介金屬相。硬鉚區之接合長度跟填料熔點及熱影響區之溫度梯度大小有關，接合效果則因選用之母材及填料金屬的種類而異。
- (3) 在 Type I 的接合模式中，由於母材及填料金屬並不會互溶，因此並不會有介金屬相產生，其硬鉚區需藉由毛細現象使母材與熔融填料產生接合反應，因此在填料的選擇上，使用低熔點及對母材潤濕性佳的金屬箔片，可提升接合效果，並延長鉚件之接合長度。
- (4) 對 Type II 的接合模式而言，母材與填料會反應生成介金屬相，但其反應程度會溫度梯度的下降（即距離的增加）而減弱，並逐漸趨向填料與母材之介面。介面處介金屬相的生成可提高鉚件之氣密性，而選用低熔點的填料金屬亦具有延長鉚件之接合長度的效果。
- (5) 若以 Clad metal 做為填料金屬，則選用之合金成分須以接近低溫共晶點之成分為佳（此成分同時具有低熔點及縮短固、液相共存之溫度區間等優點）。Type III 的接合模式即藉由共晶成分的特性，使填料熔點大幅降低，進而達到硬鉚接合之結果。由於共晶反應及後續可能伴隨之共析反應的發生，使硬鉚區有大量介金屬相產生，顯微組織也較為複雜。
- (6) 雷射複合鉚接製程所選用之填料金屬熔點可較傳統硬鉚製程為高，304S.S.與填料金屬 Ni 之雷射複合鉚件即為此例。流入硬鉚區的鉚道熔池合金可溶解周圍之填料金屬而產生硬鉚接合的效果，即使硬鉚區的接合長度較短，但仍具有提高

鉚件氣密性的效果。

六、參考文獻

1. M. Schwartz, "Brazing: For the Engineering Technologist", Chapman & Hall Inc., New York, 1995
2. J. C. Ion, A. Salminen, and Z. Sun, "Welding Journal", Vol. 75, No.7, July, 1996, p.225-232
3. Mel M. Schwartz, "Brazing", ASM Int., Metals Park, Ohio, 1987
4. "ASM Handbook, 9th ed., Vol.14: Alloy Phase Diagrams", ASM Int., Metals Park, Ohio, 1992
5. P. Villars, A. Prince, H. Okamoto, "Handbook of Ternary Alloy Phase Diagrams", ASM Int., Materials Parks, 1995

七、計畫成果自評

雷射製程上結合鉚接與硬鉚之混合製程，稱為「雷射複合接合製程」。複合接合製程之硬鉚接合區，視填料金屬之種類，可較鉚接區大上許多。在雷射複合接合製程中，填料金屬箔片預置於兩工件間，除鉚接接合外，並藉由熱傳造成熔融區兩旁的硬鉚接合。此接合製程中，母材與填料的熱性質對於接合品質有相當的影響，而使用具高雷射光反射率或高熔點之填料，在此製程中均可適用。雷射鉚接板件之 Lap joint 為一重要的接合方式，但其鉚道狹窄，使接合區域不易承受過大的剪應力。雷射複合接合製程可藉由適當的冶金組合與接合設計，將接合區（鉚接與硬鉚接合區域）之長度延長，以達到提高鉚件機械性質或保證氣密性之目的。

雷射複合製程在硬鉚接合方面，由於接合作用時間非常短暫，故有異於傳統硬鉚接合之介面反應，且鉚道熔池合金會進入硬鉚區之填料金屬中，生成各種非平衡組織，在報告中有較詳細的說明。雷射複合接合製程為一低熱輸量與低變形量的製程，可考慮做為增加接合強度的精密接合方式。本研究在工程應用上具有可行性，特別是在氣密性要求高的組件接合製程上。本研究已達成原先預期效應，唯缺乏接合件之機械性質測試數據，目前亦在積極進行補強中，使本研就更具實用價值。

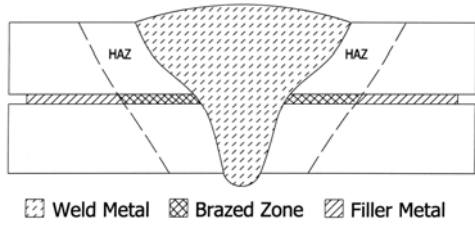


圖 1 雷射複合銲接銲件示意圖。

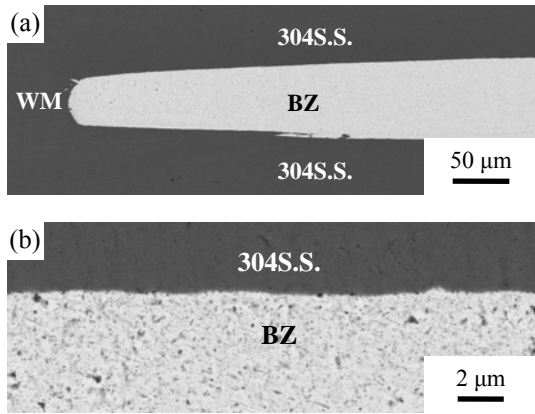


圖 2 以 304S.S.及填料 Ag 進行雷射複合銲接之銲件硬銲區：(a) 硬銲區巨觀；與 (b) 介面處顯微組織。

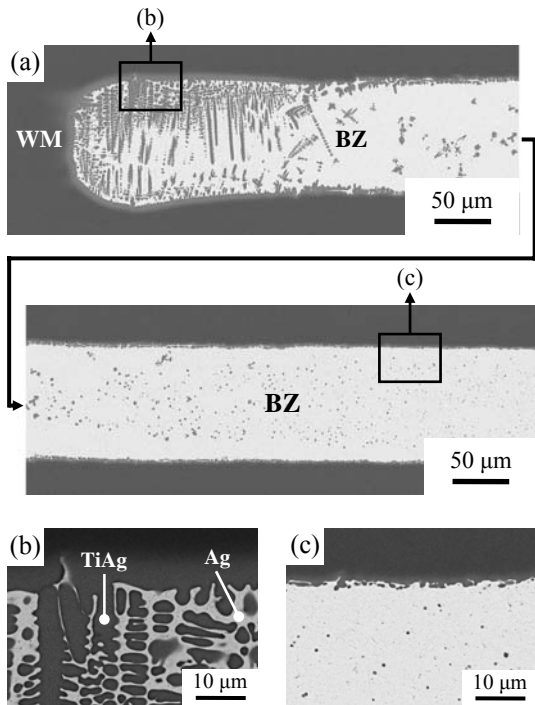


圖 3 以 Ti-6Al-4V 及填料 Ag 進行雷射複合銲接之銲件硬銲區：(a) 硬銲區巨觀；(b) 硬銲區前端之顯微組織；與 (c) 硬銲區後段之顯微組織。

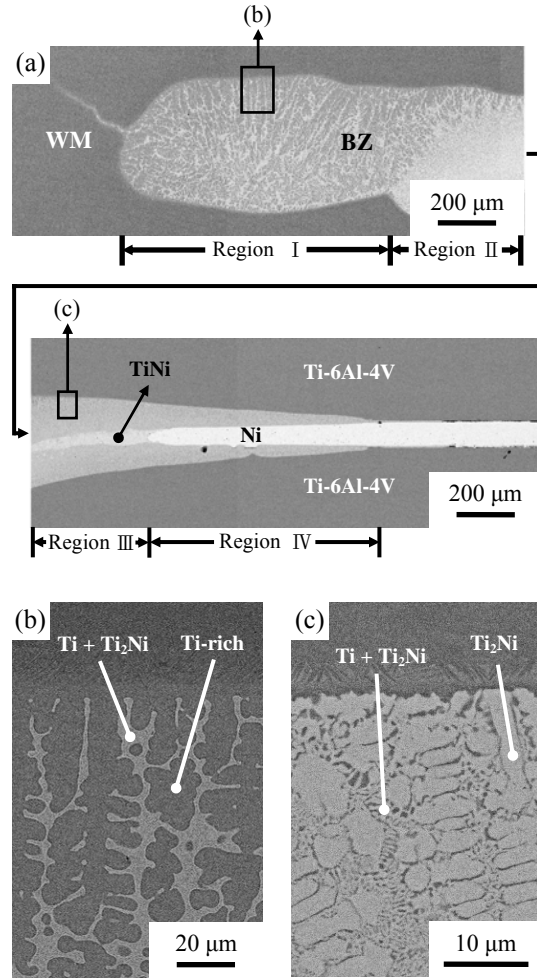


圖 4 以 Ti-6Al-4V 及填料 Ni 進行雷射複合銲接之銲件硬銲區：(a) 硬銲區巨觀；(b) 區域 I 之顯微組織；與 (c) 區域 II 之顯微組織。

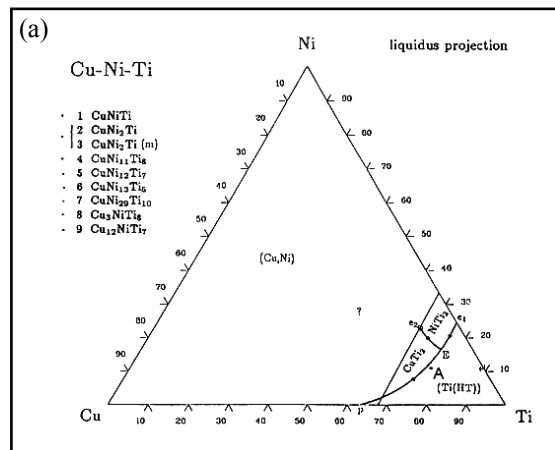


圖 5 Cu-Ni-Ti 三元平衡相圖：(a) 液相線投影 (liquidus projection) 與 (b) 位於 900°C 之投影。

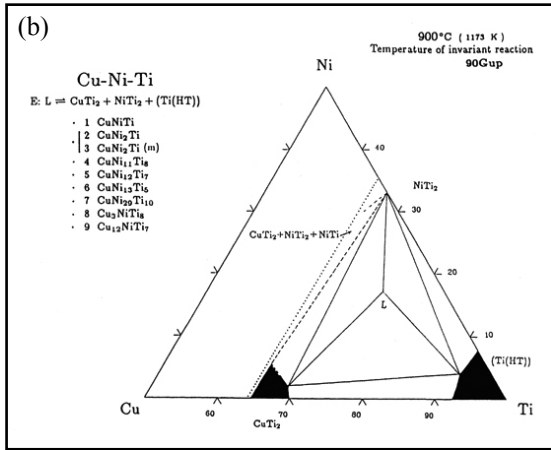


圖 5 (續)。

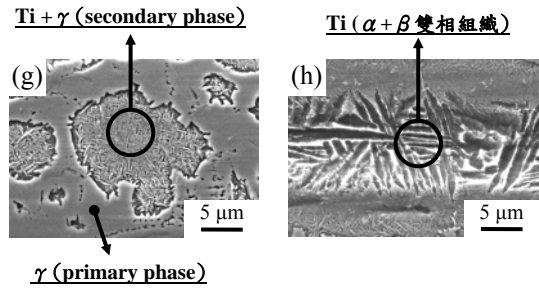


圖 6 以 Ti-6Al-4V 與填料 Ti-15Cu-15Ni 進行複合銲接之銲件硬銲區：(a) 硬銲區巨觀；(b) 母材與填料銲前之疊合示意圖；(c) 區域 I 之顯微組織；(d)、(e) 區域 II 之顯微組織；與(f)、(g)、(h) 區域 III 之顯微組織。

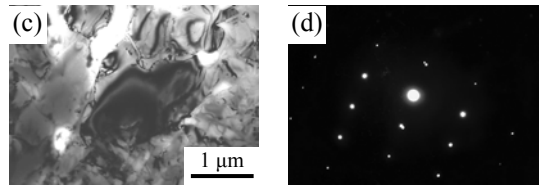
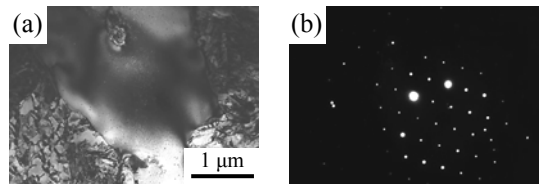
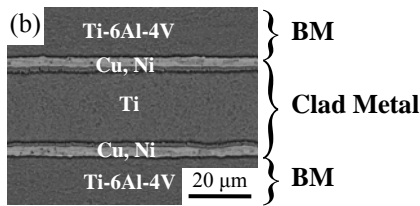
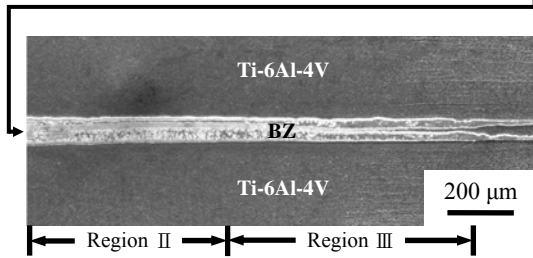
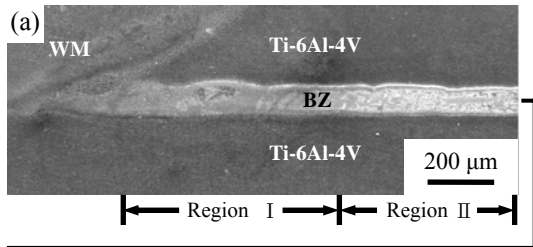


圖 7 以 SP-700 鈦合金與填料 Ti-15Cu-15Ni 進行傳統硬銲製程所得的 Ti_2Cu 與 Ti_2Ni 之 TEM 影像及繞射圖譜：(a) Ti_2Ni 之影像；(b) Ti_2Ni 的繞射圖譜 (Zone axis 為 $[\bar{1}14]$)；(c) Ti_2Cu 之影像；與 (d) Ti_2Ni 的繞射圖譜 (Zone axis 為 $[301]$)。

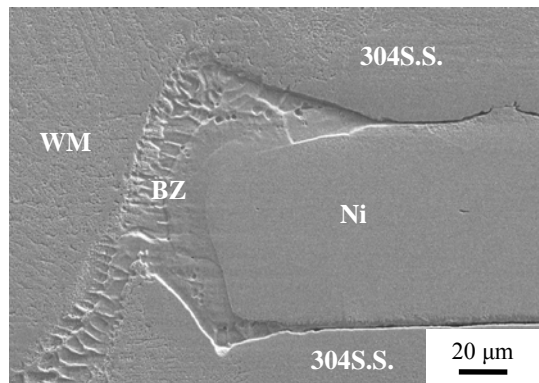
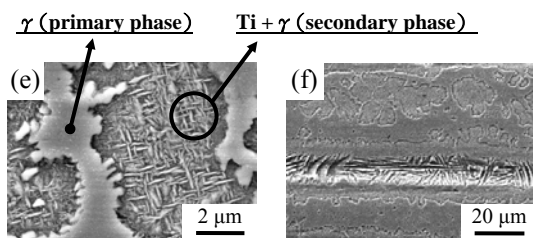
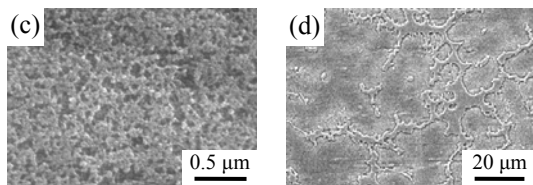


圖 8 以 304S.S.與填料 Ni 進行雷射複合銲接之銲件硬銲區巨觀。