

高比強度鈦合金抗彈特性研究

李丕耀

國立台灣海洋大學 材料工程研究所

摘要

本計劃的目的乃在研究鈦合金的抗彈性能，研究方法之進行是先分別對 $(\alpha+\beta)$ 型 Ti-6Al-4V 及 β 型 Ti-15V-3Al-3Cr-3Sn 板材實施各種退火處理，而後量取相關的機械性能及微觀結構，最後再對經不同退火處理的板材進行槍擊試驗，以評估並獲得抗彈性能最佳的鈦合金板材及其相對的熱處理條件，共計針對經八種不同熱處理條件之 3mm 厚鈦合金板進行研究，結果顯示(1)經 954°C/2h,水淬, 593/6h 大氣熱處理之板料，其強度及硬度為 Ti-6Al-4V 板料中最高，但延伸率為 Ti-6Al-4V 中最低；Ti-15V-3Al-3Cr-3Sn 退火材強度比 Ti-6Al-4V 退火板料高，但有相近的抗彈性能，若以成本考量，以 Ti-6Al-4V 佔優勢。(2)介於硬度 HRc 33.7-38.5 之 Ti-6Al-4V 及 Ti-15V-3Al-3Cr-3Sn 鈦合金板之槍擊穿孔皆呈現出口剝裂(rear surface spalling)和放射破裂(radial crack)型態。

Abstract

Although titanium alloys have been well characterized for aerospace uses, they are not well characterized for use in armor systems. In an effort to provide increased information to armored vehicle designers, the effect of heat treatments on the ballistic limit velocity for $(\alpha+\beta)$ type Ti-6Al-4V and β type Ti-15V-3Al-3Cr-3Sn plate was investigated. The ballistic targets made of these titanium alloys had undergone various heat treatments, and collected mechanical and microstructural information. The targets were

then impacted by 7.62 mm armour piercing bullets, which is used for the evaluation of ballistic resistance. The results indicate heat treatment did have an effect on the ballistic limit velocity. The results of the ballistic tests are discussed in conjunction with metallurgical factors and their fracture behaviors.

一、前言

一般而言，抗彈裝甲有兩種型式：被動裝甲與主動裝甲[1]，被動裝甲是防護時純屬被動的吸收或消耗破壞裝甲之反裝甲武器如動能穿甲彈的能量，均質裝甲、中空裝甲、複合裝甲均屬於此種裝甲，而主動裝甲是在金屬基體上具有適當分隔和控制數量的炸藥，當其被反裝甲武器如化學能彈命中引爆時，其爆炸能量能夠反制彈丸、特別是反制穿甲彈噴流的侵切作用。因此，主動裝甲不只是吸收而是具有主動地破壞彈丸能量的功用；在構成主動裝甲或被動裝甲的材料中，鋼板是必備的成份之一，但鋼板因密度高、重量大，故當使用量高時必然會使甲車增重而限制裝甲車輛的移動性、橋樑承載率，最終急遽的降低甲車的機動性；最近美國陸軍在檢討其所執行的巴拿馬、西南亞、索馬利亞、海地和波西尼亞等軍事行動後，認為在未來的戰場上機動性大的小型戰鬥武力將更可符合不同任務的需求，因此甲車重量的減重是必然的趨勢[2]，故乃責成其所轄之陸軍實驗室積極研究以鈦合金置換甲車鋼板的可行性，至於選用鈦合金的原因可由表一得知，表一係鈦合金與目前使用最廣泛的重裝甲

抗彈合金 RHA 鋼板和輕裝甲抗彈材料 5083 鋁合金的性質比較 [3,4]，由表中可看出 Ti-6Al-4V 合金在比強度(specific strength)及代表抗彈功能之 Mass Efficiency 均比此兩種材料好，事實上美軍之 M2 布雷德萊裝甲車上的指揮艙蓋已使用 Ti-6Al-4V 合金製造[5]，重量可節省 35%，另外美國陸軍車輛的主要承製廠商 United Defense Limited Partenership (UDLP) 亦開始研製在 M113 人員裝甲運兵車佈置掛載式鈦合金裝甲的可行性[6]，除此之外，美國陸軍戰汽車指揮部 (U.S Army Tank-Automotive Command, TACOM) 更開始使用鈦合金來進行 M1 艾布蘭戰車裝甲性能的提升[7]，初期工作是在五年內完成 580 輛 M1A2 戰車上鈦合金製造之引擎排氣板和射手主觀測塔的換裝工作，1996 年同時開始進行的計劃尚包括鈦合金砲塔及扭力桿的研製，故由以上美國陸軍在裝甲車輛上換裝工作可知高比強度的鈦合金必然是下一波抗彈材料的主流。

文獻調查顯示美國陸軍早在 1950 年便已開始對鈦合金進行抗彈性能的研究[8]，但早期由於受限於冶煉技術之故，無法將 C.H.O.N 等插入型元素含量降低，此導致碳化物、氮化物等的析出進而使材料變脆並在槍擊試驗後產生脆裂的現象，此現象直到 1964 年時，方由

於 ELI 級(Extra-Low Interstitial) Ti-6Al-4V 合金之問世而獲得改善，槍擊試驗結果顯示因 C.H.O.N 含量降低使得延性增加的 Ti-6Al-4V 合金擁有不錯的抗彈性能[9]，但早期由於鈦合金太過於昂貴，其後在 1970 年代更由於 RHA 鋼板的問世，遂使得鈦合金在抗彈性能的研究因而未受到重視；但最近由於前面所述甲車輕量化及鈦合金成本大量降低兩大因素之出現，使得相關研究人員從新開始研究鈦合金的抗彈性能，然因抗彈裝甲材料的技術、製造、結構設計等在世界各國都列為極機密，相關資訊及技術資料皆不易獲得，故對剛開始進行研發抗彈性能的鈦合金而言，其有關數據資料更是難以取得，此可由連堆置在 Oremet 公司(美國三大鈦合金製造廠之一)廢料場的前蘇聯戰車鈦合金門板都被美國陸軍實驗室人員取回作研究得知其困難之程度[10]；因此本研究的目的乃在研究鈦合金的抗彈性能，研究方法之進行是先分別對($\alpha+\beta$)型 Ti-6Al-4V 及 β 型 Ti-15V-3Al-3Cr-3Sn 板材實施各種退火處理，而後量取相關的機械性能及微觀結構，最後再對經不同退火處理的板材進行槍擊試驗，以評估並獲得抗彈性能最佳的鈦合金板材及其相對的熱處理條件。

Table 1 The properties of armor steel, aluminum alloy and titanium alloy.

	RHA MIL-A-12560	Aluminum 5083 MIL-A-46026	Ti-6Al-4V MIL-A-46077
Tensile Strength (Mpa)	1,170	350	970
Density (g/ cm ³)	7.86	2.7	4.5
Hardness(BHN)	241-331	-	321-364**
Specific Strength* (Mpa-cm ³ /g)	150	130	220
Mass Efficiency (E _m) ⁺	1(by definition)	1.0-1.2	1.5

* Specific strength-tensile strength divided by density.
⁺ Mass Efficiency (E_m)-the weight per unit area of RHA required to defeat a given ballistic threat divided by the weight per unit area of the subject material.
**MIL-T-9046J.

二、實驗方法與步驟：

本研究主要在探討($\alpha+\beta$)型 Ti-6Al-4V 及 β 型 Ti-15V-3Al-3Cr-3Sn 兩種合金經不同熱處理後的抗彈性能，因此研究方法將以熱處理及槍擊試驗為主軸進行，詳細之實驗步驟：

2-1 熱處理：

利用一真空度達 10^{-6} Torr 的自製高真空熱處理對鈦合金進行不同條件的熱處理工作，熱處理完之試片將配合槍擊及機械性質和顯微結構分析兩項的測試步驟以了解熱處理條件對鈦合金之結晶構造，顯微組織及抗彈性能的影響。共有八種不同條件之 3mm 厚鈦合金試片進行研究：(1) Ti-15V-3Al-3Cr-3Sn 原材 (2) Ti-15V-3Al-3Cr-3Sn 經 $538^{\circ}\text{C}/8\text{h}$ 真空退火 (3) Ti-15V-3Al-3Cr-3Sn 經 $496^{\circ}\text{C}/8\text{h}$ 真空退火 (4)Ti-6Al-4V 原材(5) Ti-6Al-4V 經 $954^{\circ}\text{C}/2\text{h}$ 真空固溶化處理，氬氣氣冷，然後 $593^{\circ}\text{C}/6\text{h}$ 真空時效，爐冷 (6) Ti-6Al-4V 經 $816^{\circ}\text{C}/2\text{h}$ 真空退火 (7) Ti-6Al-4V 經 $954^{\circ}\text{C}/2\text{h}$ 大氣固溶化處理，水淬，然後 $593^{\circ}\text{C}/6\text{h}$ 大氣時效，空冷(8) Ti-6Al-4V 經 $816^{\circ}\text{C}/2\text{h}$ 大氣退火，空冷。

2-2 槍擊試驗：

(a) 以口徑為 0.30 吋，重量為 44grains(1 grain = 1/7000 lb)，HRc = 30 之破片模擬彈頭，射擊靶板，依據美軍測試規範 MIL-STD-662E 之規定，應於一片靶板上射擊十發以上，而取樣區間之大小為 125 呎/秒，於此區間內應有五發貫穿與五發未貫穿，取此十發的速度平均值 V_{p50} 。

(b) 使用儀器械彈：

- a. 德製 Drello Bal-318 型電子計時器一具
- b. 德制 Drello LS-19 型光電測速閘兩具及電源供應器
- c. 國造五七式 7.62 厘米步槍
- d. Precisa 600C 型精密電子天平

- e. 壓彈機
- f. 銅殼收口機
- g. 可調式槍架
- h. 可調式靶架
- i. 破片模擬彈頭
- j. 球狀發射藥
- k. 7.62 公厘步槍彈銅殼
- l. 雷射彈著指示器
- m. 擺角測定卡

2-3 機械性質與顯微結構分析：

(a) 硬度測定

試片經砂紙研磨至 300 號，維持一定的平坦度及去除大氣熱處理所生成的 α 相氧化層，以 Wilson 硬度試驗機測定五點，求平均值。

(b) 金相組織

砂紙研磨至 1200 號，再以 1-0.3 和 $0.05\mu\text{m}$ 氧化鋁粉拋光至鏡面，以 Kroll's reagent: 3ml HF, 5ml HNO_3 , 100ml H_2O 腐蝕液進行腐蝕，觀察板材之立體三面金相圖；分 LT, LS, ST 三面，並觀察 α -case 氧化鈦層厚度。

(c) 抗拉試驗

測定八種不同條件的板材之抗拉、降伏強度及延伸率。每一板材分 L(longitudinal direction)及 T(long transverse direction)兩方向之機械性質測定。而大氣處理之板材表面保留其 α case 氧化鈦層，進行抗拉試驗。在大氣室溫下，依據 ASTM E8-99 規範，在 ZWICK 1475 UTM 試驗機進行試驗。

(d) 破壞分析

分別應用光學(OM)與 Hitachi S-4100 掃描電子顯微鏡(SEM)，觀察射穿彈孔外觀面及抗拉破斷面之破壞型態。

三、結果與討論

3-1 成分分析

表 2 為 Ti-6Al-4V 和 Ti-15V-3Al-3Cr-3Sn

Table 2 Composition of titanium.

Titanium Element (wt%)	Ti-6Al-4V	Timetal 15-3
C	0.1 max.	0.05 max.
Al	6.0	2.5-3.5
V	4.0	14-16
Cr	-	2.5-3.5
Sn	-	2.5-3.5
Fe	0.30 max.	0.3 max.
H	0.0125 max.	0.015 max.
O	0.20 max.	0.13 max.
N	0.05 max.	0.03 max.
Ti	Balance	Balance
Density (g cm ⁻³)	4.45	4.76

之成分範圍，基本上 β 型 Ti-15V-3Al-3Cr-3Sn 因其合金成分較高，故材料成本亦較高且密度

也較大。但文獻指出其強度較高，故以其與價格較便宜而密度較輕且最廣泛使用於航太材料的 Ti64 比較在裝甲材料應用上之優劣性。

3-2 金相顯微結構

3-2-1 β 型 Ti-15V-3Al-3Cr-3Sn

圖 1-(a) 為 Ti-15V-3Al-3Cr-3Sn 原材之立體金相圖。其為完全退火未經時效之組織；為一 β 相基地組織呈現略近等軸晶分布，其滾軋方向之擇優組織不是很明顯；但亦有條紋狀組織出現。圖 1-(b) 為 Ti-15V-3Al-3Cr-3Sn 經 538°C/8h 真空時效，由 β 基地生成灰黑色的 α 相，僅留少部分白色 β 相，時效愈久顏色愈深；即 α 析出密度愈大。由圖 2-(a) 中可見白色 β 晶粒內有灰黑色針狀的 α 相析出。圖 1-(c) 為經 496°C/8h 時效後之組織，呈現均勻的灰色 α 相分布整個基地，如圖 2-(b) 所示，僅有極少部分白色 β 晶殘留。

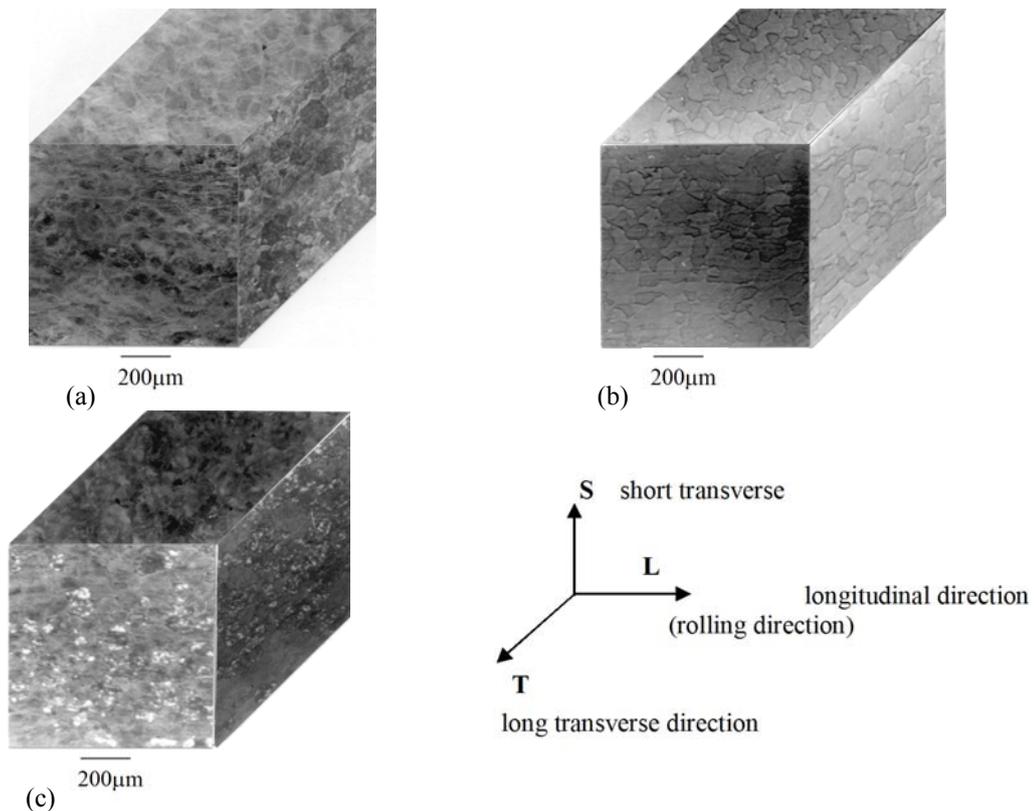
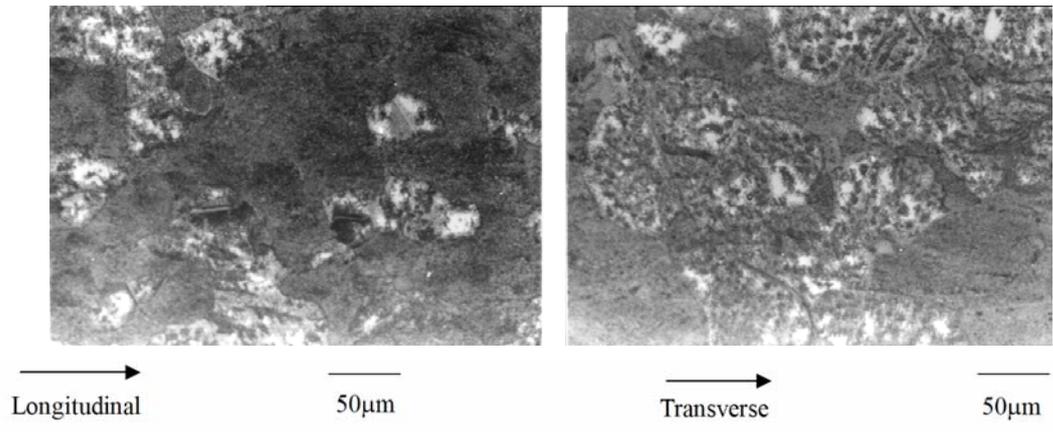
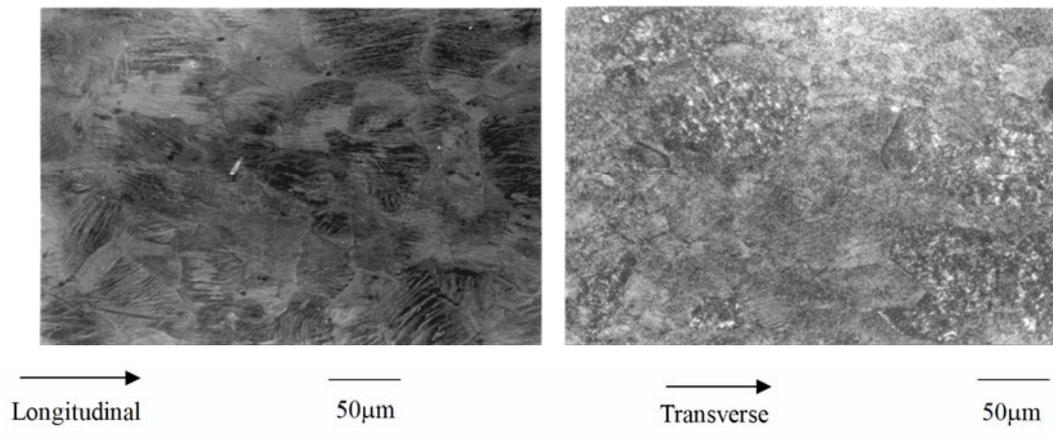


圖 1 Ti-15V-3Al-3Cr-3Sn(a)原材組織，(b) 538°C/8hr 真空退火，(c) 538°C/8hr 真空退火。



(a) 538°C/8h, furnace cool, in vacuum.



(b) 496°C/8h, furnace cool, in vacuum.

圖 2 Ti-15V-3Al-3Cr-3Sn 真空退火組織 (a) 538°C , (b) 496°C.

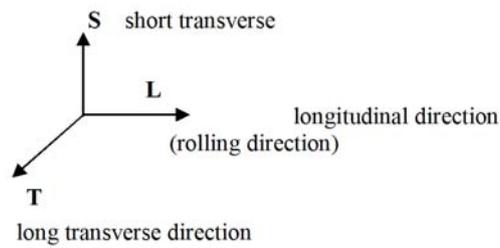
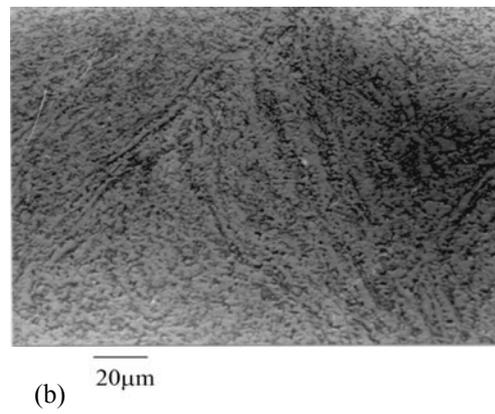
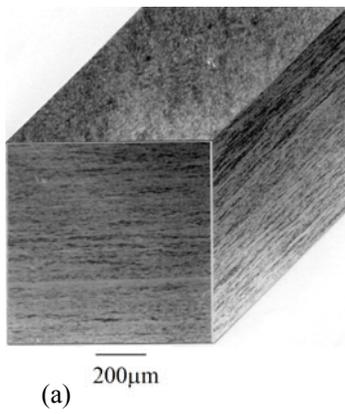


圖 3 Ti-6Al-4V(a)原材組織 , (b)TL plane 組織。

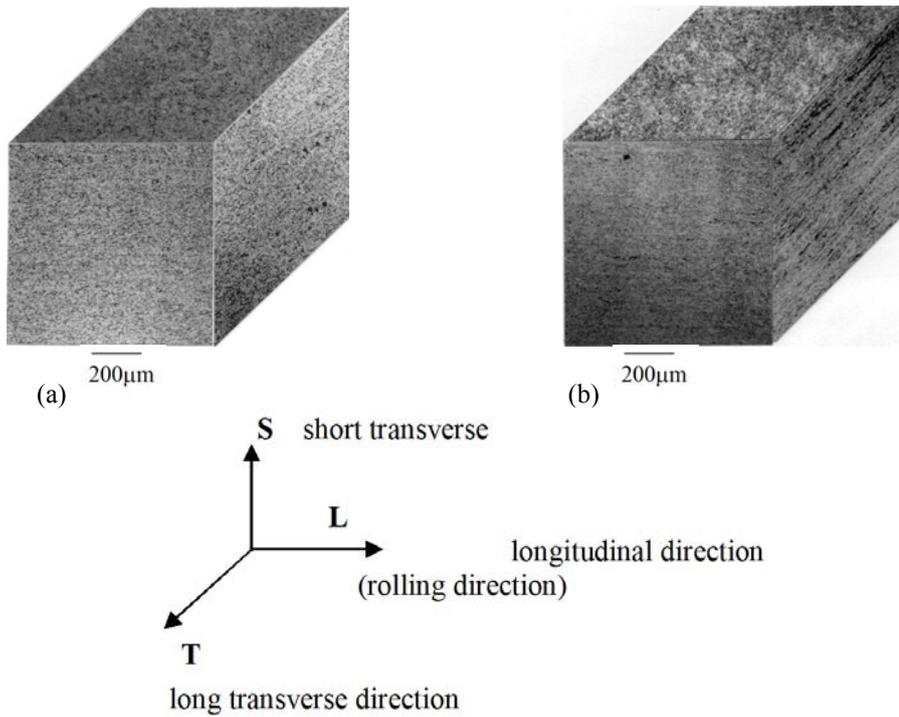


圖 4 Ti-6Al-4V 經(a)954°C/2h 固溶化處理,真空爐中 Ar 氣冷, 593°C/6h 時效處理,真空爐冷, (b) 大氣中 954°C/2h 固溶化處理,水淬, 593°C/6h 時效處理,大氣空冷後組織。

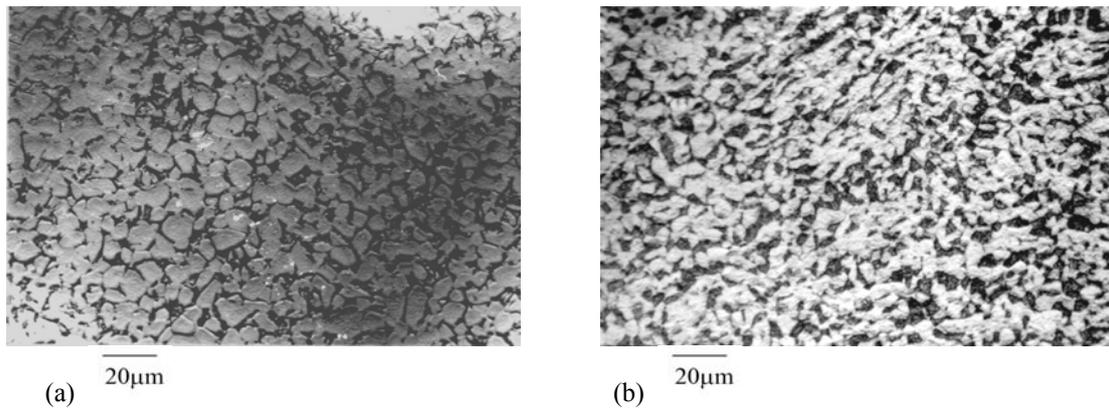


圖 5 Ti-6Al-4V 固溶時效處理後組織(a)真空中熱處理,氣冷(b)大氣中熱處理,水淬 (TL plane)

3-2-2 ($\alpha+\beta$)型 Ti-6Al-4V

圖 3-(a)為 Ti-6Al-4V 原材立體金相組織，為一細緻 $\alpha+\beta$ 兩相共存組織具明顯的帶狀方向組織。如圖 3-(b)所示，大部分淺色 α 長軸晶，深色 β 晶分布於 α 晶界處。

圖 4-(a)為 Ti-6Al-4V 經 954°C/2h 真空固溶化處理，氬氣氣冷，然後 593°C/6h 真空時效後之立體金相組織，圖 4-(b)為在大氣中相同溫度時間固溶，經水淬及時效之組織。皆為一 $\alpha+\beta$ 兩相共存組織，其帶狀現象皆較原材不明顯。

如圖 5 所示，在真空爐固溶及氬氣氣冷處理後之組織淺色 α 晶呈較等軸且粗大狀，深色 β 晶粒體積百分比水淬處理組織較少。

圖 6 分別為 Ti-6Al-4V 經 816°C/2h 真空和大氣熱處理之立體金相圖。兩者皆仍具明顯的帶狀組織但晶粒較原材粗大。如圖 7 所示，皆大部分為一略近等軸淺色 α 晶分布及深色 β 晶分布於 α 晶界處。與原材比，僅是一應力消除熱處理效果。

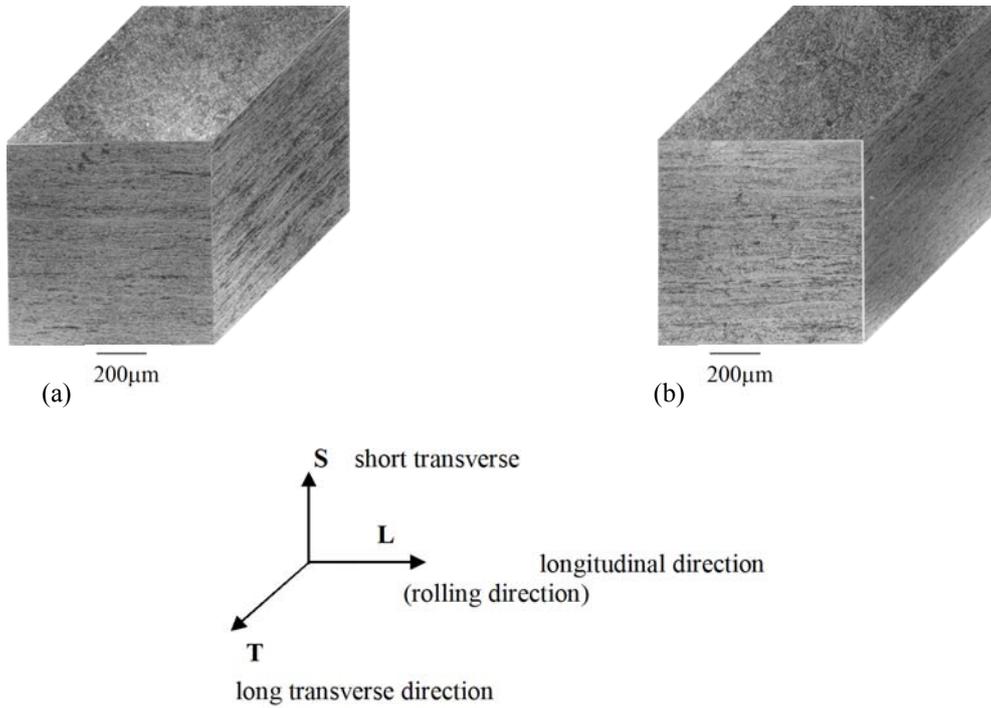


圖 6 Ti-6Al-4V 經 816°C/2h 真空退火(a)爐冷，(b) 空冷之組織。

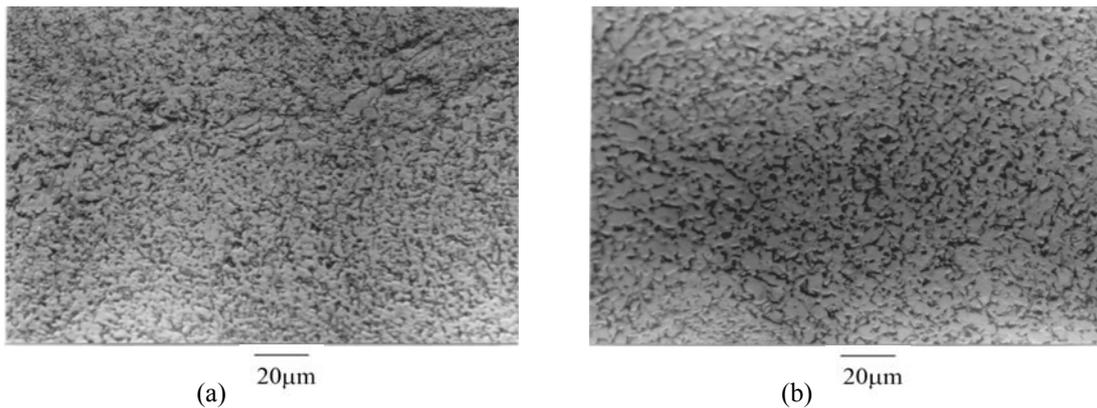


圖 7 Ti-6Al-4V 經 816°C/2h(a)真空退火 (b)大氣中退火之組織 (TL plane).

3-2-3 Oxygen-stabilized α case

圖 8-(a)&(b)分別為 Ti-6Al-4V 經 954°C/2h, 593/6h 真空和大氣熱處理之表面處組織，如圖在大氣處理的表面約有 50µm 厚之白色氧化鈦硬層，且數道裂痕存在此硬層中。

圖 9-(a)&(b)分別為 Ti-6Al-4V 經 816°C/2h 之真空和大氣退火熱處理之表面處組織，如圖，在大氣處理的表面約有 16µm 厚之白色氧化鈦硬層，且數道裂痕存在此硬層中。

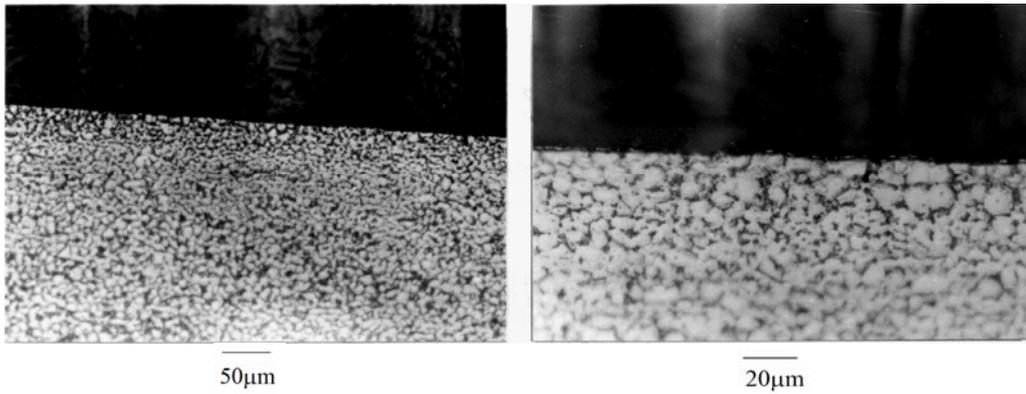
3-3 機械性質及抗彈性能

3-3-1 抗拉強度及延伸率

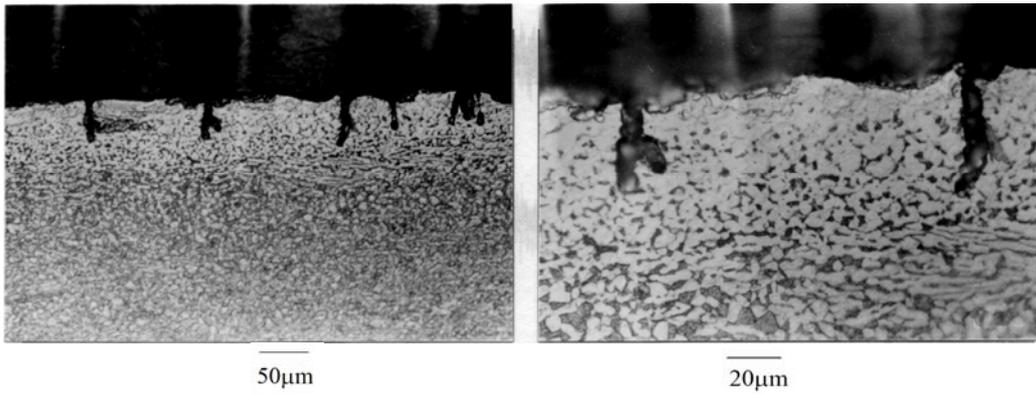
表 3 和圖 10 為八種板材之機械性質和槍擊性能數值。除了 Ti-15V-3Al-3Cr-3Sn 原材外

其餘七種板材硬度接近皆在 HRc33.7-38.5 之間；Ti-6Al-4V 原材即有不錯的強度及槍擊性能。表 3 中，板材滾軋方向與其橫方向 (transverse) 之機械性質差異不大。由圖 10 中抗拉強度與硬度之關係可知，硬度愈高強度愈高，延伸率愈低。

而在 816°C 大氣和真空熱處理兩者強度相近，而大氣處理者因表面之硬化層，造成延伸率明顯地降低(15%降至 8%)。經 954°C/2h, 水淬, 593/6h 大氣熱處理板料，因快速冷卻使有時效硬化的效果，由其金相組織具相當數量 β 晶分布於 α 晶界處達到強化的效果，其強度及硬度為 Ti-64 板材中最高，但延伸率為 Ti-6Al-4V 中最低。

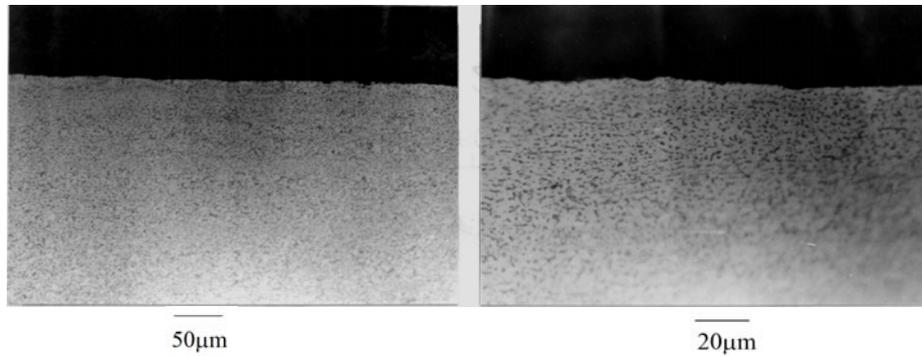


(a) 954°C/8h, Ar gas purging, 593°C/6h, furnace cool, in vacuum

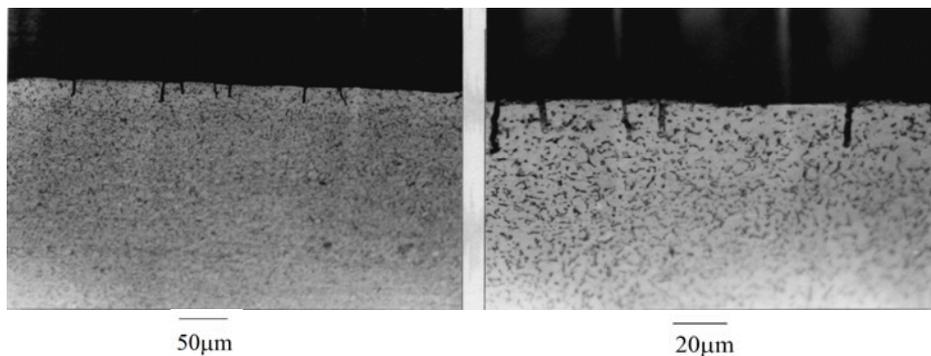


(b) 954°C/8h, water quenching, 593°C/6h, air cool, in air.

圖 8 Ti-6Al-4V 經真空和大氣中固溶時效處理後之近表面之白色氧化鈦組織.



(a) 816°C/2h, in vacuum, furnace cool.



(b) 816°C/2h, in air, air cool.

圖 9 Ti-6Al-4V 真空和大氣退火之氧化鈦組織比較.

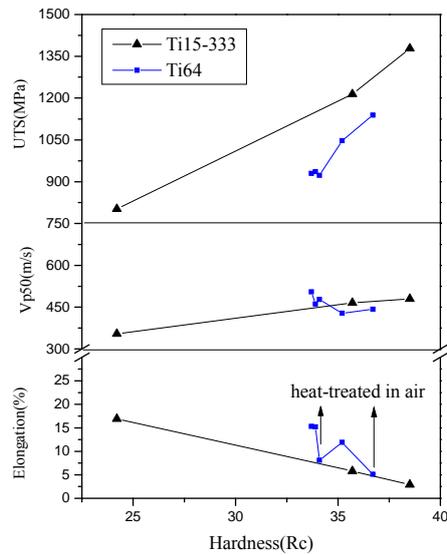


圖 10 Ti-6Al-4V 和 Ti-15V-3Al-3Cr-3Sn 抗彈性能與機械性質之關係。

Table 3 The ballistic performance vs. 7.62mm FSP and mechanical properties of 3mm thick Ti-6Al-4V and Ti-15V-3Al-3Cr-3Sn.

Material	heat treatment	Vp50(m/s)	Hardness HRc	UTS/YS MPa	Elongation %
Ti-15-3-3-3	as received	354.6	24.2	802/774(L)* 762/733(T)*	16.9 20.7
Ti-15-3-3-3	538°C/8hr, in vacuum, furnace cool	465.4	35.7	1214/1116(L) 1153/1040(T)	5.8 8.5
Ti-15-3-3-3	496°C/8hr, in vacuum, furnace cool	479.4	38.5	1378/1321(L) 1292/1217(T)	2.9 4.1
Ti-64	As-received	428	35.2	1047/981(L) 1025/925(T)	11.9 12.3
Ti-64	954°C/2hr, Ar gas purging, 593°C/6hr, furnace cool, in vacuum	504.8	33.7	930/876(L) 926/885(T)	15.3 10
Ti-64	954°C/2hr, water quenching, 593°C/6hr, air cool, in air	442.5	36.7	1139/1085(L) 1121/1073(T)	5.1 4.7
Ti-64	816°C/2hr, air cool, in vacuum	461.4	33.9	936/913(L) 929/908(T)	15.2 12.4
Ti-64	816°C/2hr, air cool, in air	477.2	34.1	923/891(L) 909/881(T)	8.1 9.3

* L is specified for rolling-direction specimen; T is specified for long-transverse-direction specimen.

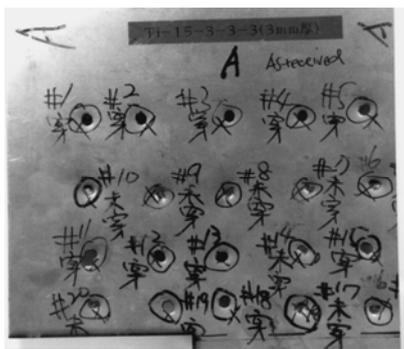
3-3-2 槍擊極限速度(Vp50)

而槍擊極限速度 (Vp50) 方面，Ti-15V-3Al-3Cr-3Sn 板材隨著硬度愈高 Vp50 值愈高。Ti-6Al-4V 硬度介於 HRc33.7-36.7 之間，槍擊極限速度變化趨勢不明顯且相接近，而以較低硬度 HRc33.7 之真空固溶及退火處理板材，具最高的 Vp50 值。依 Vp50 值大小，依序為 Ti-15V-3Al-3Cr-3Sn/496°C 退火 (HRc38.5)、Ti-64/816°C 大氣退火 (HRc34.1)、Ti-15V-3Al-3Cr-3Sn/538°C 退火 (HRc35.7)、Ti-64/816°C 真空退火 (HRc 33.9)、Ti-64/大氣固溶和時效硬化板材 (HRc 36.7)、Ti-64 原材 (HRc35.2)、最低 Vp50 值為 Ti-15V-3-Al-3Cr-3Sn 原材 (HRc24.2)。其中 Ti-64/大氣固溶和時效硬化板材為 Ti-64 各板材中強度最高但抗彈性能次低。由上所述，Ti-15V-3Al-3Cr-3Sn 退火材強度比 Ti-64 退火板材高，但有相近的抗彈性能，若以成本考量，以 Ti-6Al-4V 佔優勢。

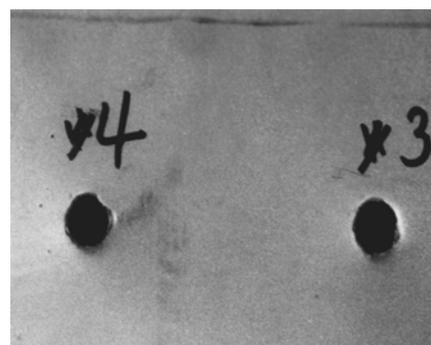
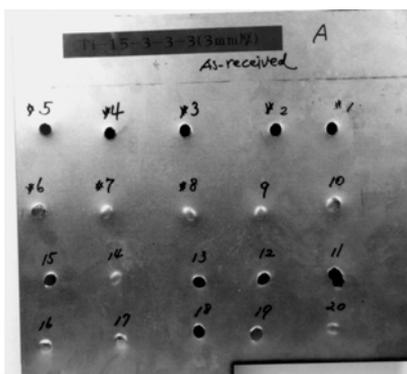
3-3-3 槍擊破壞型態

圖 11-12 為槍擊破壞外觀。除了硬度 HRc24.2 之 Ti-15V-3Al-3Cr-3Sn 原材(圖 11)呈現大部分延性孔洞成長(ductile hole growth)和塞形破壞(plugging)型態，破壞孔徑大小與彈徑相近且呈近圓形。其餘介於硬度 HRc 33.7-38.5 之 Ti-6Al-4V 及 Ti-15V-3Al-3Cr-3Sn 皆呈現出口剝裂(rear surface spalling)和放射破裂(radial crack)型態，及其破壞口徑較彈徑大且呈不規則形狀穿孔。其中延伸率較低之 Ti-15-3-3-3 退火材(延伸率 2.9-5.8%)或 Ti-6Al-4V 大氣固溶、水淬和時效硬化材(延伸率 5.1%)，槍擊後之靶材並沒有產生明顯脆裂破壞，仍以剝裂破壞型態為主。

大氣熱處理所造成之表面硬化層僅有 16-50 μ m，對硬度 HRc32 之模擬彈頭沒有明顯抵擋效果，一經彈擊馬上就脆裂剝落；如圖 12-(f)&(g)所示槍擊彈孔附近呈反白的硬層剝落區域。



(a)

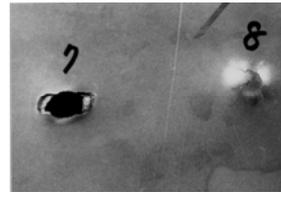


(b)

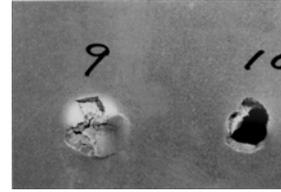
圖 11 The top views of ballistic impact failure for as-received Ti-15V-3Al-3Cr-3Sn, (a) front and (b) rear view at #3 and #4 shot.



(a) Ti-15V-3Al-3Cr-3Sn annealed at 538°C .



(b) Ti-15V-3Al-3Cr-3Sn annealed at 496°C .



(c) as-received Ti-6Al-4V.



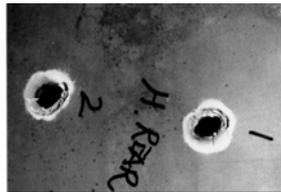
(d) Ti-6Al-4V solution treatment at 954°C and aged at 593°C in vacuum.



(e) Ti-6Al-4V annealed at 816°C in vacuum.



(f) Ti-6Al-4V solution treatment at 954°C, water quench and aged at 593°C in air.



(g) Ti-6Al-4V annealed at 816°C in air

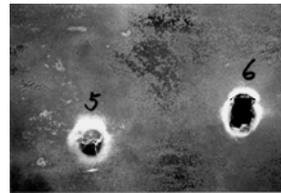


圖 12. The top views of ballistic impact failure for Ti-15V-3Al-3Cr-3Sn and Ti-6Al-4V heat treated under different condition.

四、結論

1. Ti-6Al-4V經954°C/2h, 593/6h大氣熱處理之表面，約有50μm厚之白色氧化鈦硬層。Ti-6Al-4V經816°C/2h大氣退火熱處理之表面約有16μm厚之白色氧化鈦硬層。
2. 板材滾軋方向與其橫方向(transverse)之機械性質差異不大。硬度愈高強度愈高，延伸率愈低。
3. 經954°C/2h,水淬, 593/6h大氣熱處理板料，其強度及硬度為Ti-6Al-4V中最高，但延伸率為Ti-6Al-4V中最低。
4. Ti-15V-3Al-3Cr-3Sn退火材強度比Ti-6Al-4V退火板料高，但有相近的抗彈性能，若以成本考量，以Ti-6Al-4V佔優勢。
5. 介於硬度HRc 33.7-38.5之Ti-6Al-4V及Ti-15V-3Al-3Cr-3Sn皆呈現出口剝裂(rear surface spalling)和輻射破裂(radial crack)型態。
6. 大氣熱處理所造成之表面硬化層僅有16-50μm，對硬度HRc32之模擬彈頭沒有明顯抵擋效果。

五、參考文獻

- [1] R. M. Ogorkiewicz, Int. Def. Review, 24(1991)349.
- [2] MG R.H. Scales and J. A. Parmentola, Army RD & A, May-June (1998)2.
- [3] U.S. Department of Defense, "Armor Plate, Steel, Wrought, Homogeneous", MIL-A-12560, Washington, D.C.
- [4] E.L. Rooy : in " Properties and Selection : Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, ASM Handbook, Vol.2, ASM International, Materials Park, Ohio,1990,p.92.
- [5] R.G. Broadwell and J. R. Palitsch, Proceedings of 40th Sagamore Army Materials Research, ed. M.G.H. Wells et al. (Washington D.C.,U.S. Government Printing Office, 1994), p.265.
- [6] P. Allen, Advanced Material & Processes, 149(1996) 35.
- [7] G.Campbell, "Titanium Applications for the Abrams Main Battle Tank" (Paper presented at the 1996 International Titanium Association Meeting, Las Vegas, NV,1996).
- [8] Pitler, R. and A. Hurlich. " Some Mechanical and Ballistic Properties of Titanium and Titanium Alloy " WAL-TR-401/17, Watertown Arsenal Laboratory, MA, March 1950.
- [9] Sliney, J. " Status and Potential of Titanium Armor" Proceedings of the Metallurgical Advisory Committee on Rolled Armor. AMRA S 64-04,

USAMRA, January 1964.

- [10] M. G. H. Wells, B. Roopchand and O.N. Senkov, " Evaluation of a Russian Titanium Tank Door" (Paper presented at the 1998 TMS Annual Meeting, San Antonio, TX,1998).