

伍、飛機結構修理

三、複合材料修補

講解討論

講解討論時數：4小時

講授內容：

壹、複合材料簡介：

所謂複合材料是將兩種或多種性質不同的材料合在一起變成新材料，互相截長補短，而得到比傳統材料更佳的性能。基本上，複合材料內部有兩個基本相，一為強化材，一為基材，主要用來提供強度，其形式可以是纖維狀、顆粒狀或板狀；而基材是用來將強化材結合在一起，基材除黏結效果外，尚有可能提供一些特別性能，如提供韌性，保護強化材等。複合材料的分類上有兩種方法，一種是以強化材的形狀來分類，如粒子複合材料，纖維複合材料及板狀複合材料。另外一種分類方法是以基材種類來分，有高分子基複合材料，金屬基複合材料及陶瓷基複合材料三大類。

複合材料是一具有低密度、低膨脹、高強度、高剛性、高疲勞強度特性的好材料，尤其是講求重量輕的航空，太空結構材料市場上有莫

大的潛力。若是以單位重量能提供的剛性、強度來看，即比剛性（剛性／密度）、比強度（抗拉強度／密度），複合材料更是沒有其他材料可以比擬。

(一) 強化材：

複合材料所使用的強化材料，主要是一些粒子或纖維。纖維本身的強度要比塊狀材料來得大，一般認為纖維由於尺寸較小，缺陷較少的緣故；而且細長的纖維也有撓曲較容易的優點。再者有很多纖維都具有很高強度與剛性及較低的比重，所以纖維是最常用為結構用複合材料的強化材。以下將介各種強化材。

● 強化粒子

粒子複合材料的主要目的不外乎增加剛性及耐磨性，所以使用的一些粒子，如SiC、 Al_2O_3 、 SiO_2 ；或者如石墨這種又可導電又可潤滑的強化材。

● 玻璃纖維：

玻璃材料屬於脆性材料，對

缺陷非常敏感，但若是剛作成的玻璃，未產生表面缺陷時，則玻璃仍有很大的強度。因此我們可以將玻璃抽成絲立刻將表面保護起來，則得到的玻璃纖維即有很高的強度，因其具有低剛性，所以使用於次結構件且價格低，材料取得容易。

● 硼纖維：

硼本身是一種脆性材料，商用上將硼以氣相蒸鍍於基質上，亦即硼纖維本身是複合結構。由於蒸鍍時需相當高溫，故其基質心線只能限於耐溫的鎢絲或碳絲。其具有高強度及高剛性之特性，因價格貴及不易加工疊層，應用受到限制。

● 碳纖維：

碳為輕元素，比重為 2.27，其結晶構造主要為六方層狀石墨，有極大的異向性。平行層狀的彈性模數可達 1000Gpa；而垂直層狀只有 35Gpa。所以製造碳纖維要儘量將層狀排列在纖維軸向上，以得到最大的強度及剛性。碳纖維可算是種類最多，用途最廣的纖維，主要可分為丙烯晴及瀝青系兩

種。其廣泛應用於主要結構件且具有良好之材料性質價格。

(二) 基材：

複合材料中講求的是質輕而強硬的基材，所以常用的基材都是一些比重較小的陶瓷、高分子或金屬。基材的目的是將強化材黏結起來，能夠將負荷傳給纖維，進而達到複合強化的目的。

● 高分子基材：

高分子是便宜易加工的材料，雖然強度、剛性、耐溫能力均不高；但因低密度及易加工，所以大部份的複合材料是以高分子為基材。高分子複合材料可分為熱固性複合材料及熱塑性複合材料兩種。

1. 熱固性複合材料：

熱固性複合材料，其樹脂膠料是經硬化後不能再經加熱而軟化。熱固性樹脂系之機械及物理性質優、無自燃性幾乎能耐所有化學藥品作用。如環氧樹脂；酚樹脂等。

2. 熱塑性複合材料：

熱塑性樹脂複合材料，其樹脂膠料是經硬化後，能經加

熱而予以軟化。熱塑性樹脂雖然因應需要常用於金屬和塑膠之膠合接著，但是不適合當作結構性膠合使用，尤其需要耐熱性的場合更不適宜。如聚烯烴；聚醯等。

● 金屬基材：

金屬材料本身可藉析出強化，而提高降伏強度或抗拉強度，因為析出物可以阻礙差排移動；但是對於剛性並未明顯增加。要提高金屬材料的剛性還是加入高剛性纖維最為有效，它同時也能提

高強度。再者纖維本身的比重通常都比金屬來得低，所以比強度、比剛性方面，提高能力更是明顯。

用在複合材料的金屬基材，以鋁合金為主，因為熔點低、密度低；另外鈦合金也逐漸受到重視，因為鈦合金可說是比強度最大的金屬。在特殊用途上，則不鏽鋼及鎳合金常使用在耐高溫的用途上。表5-3-1也列出一些金屬基材的性質。

● 陶瓷基材：

基材	抗拉強度 MPa	彈性模數 Gpa	降伏強度 MPa	斷裂韌性 MPa√m	膨脹係數 10 ⁻⁶ K ⁻¹	密度 g/cm ³	耐溫能力 °C
聚合體							
聚酯	40-90	2-4.5	--	--	100-200	1.2-1.5	50-120
環氧樹脂	35-100	3-6	--	--	80-110	1.1-1.4	120-250
聚醯亞胺	120	4	--	--	90	1.46	260-425
PEEK	92	--	--	--	--	1.30	310
聚	75	--	--	--	94-100	1.25	175-190
金屬材料							
鋁合金	250-480	70	100-380	23-40	--	2.3-2.9	300
Ti-6Al-4V	1000	110	900	120	--	~4.5	450
純鋁	200	70	40	100	22.5	2.7	300
純鎳	400	210	70	350	--	8.91	1000
不鏽鋼(304)	365	195	240	200	--	--	~500
陶瓷材料							
硼矽酸玻璃	100	60	--	--	3.5	2.3	~400
LAS 玻璃陶瓷	100-150	100	--	--	1.5	2.0	--
Al ₂ O ₃	250-300	360-400	--	--	98.5	3.9-4.0	--
SiC	310	400-440	--	--	4.8	3.2	--
Si ₃ N ₄	410	310	--	--	2.25-2.87	3.2	--

表 5-3-1 一些基材的性質

陶瓷材料的基本缺點是韌性不足及對缺陷敏感，而造成其零件可靠度不佳。但陶瓷具有高剛性、低密度、耐高溫等諸多優點。因此，若能克服陶瓷韌性不足的缺點，則高溫使用時（如 1000°C 以上），非陶瓷莫屬！因此韌性陶瓷的研究發展乃為下世代的研究主流之一，其中的一個方法就是以纖維來強化陶瓷。

眾多陶瓷材料中，最常用來作複合材料的有 Sic、 Al_2O_3 、 Si_3N_4 、MgO及硼矽酸玻璃、鋰鋁矽玻璃陶瓷等。

貳、積層板製作：

複合材料積層板是由多層預浸材料逐一依特定纖維方向（疊序）疊製膠合而成，其性質與每一層之纖維排列方向有關，如圖 5-3-1 所示。一般複合材料成形方式如表 5-3-2 所示。

一、手積層製程簡介：

(一) 不織布或纖維蓆以液態樹脂含浸後，一層層疊貼於模具上，或於疊貼同時，一層乾補強材塗佈一層樹脂，直至達到所需厚度或層數為止。為最早亦最為普遍之複合材料成形方式。

(二) 所使用之材料可為乾強化材

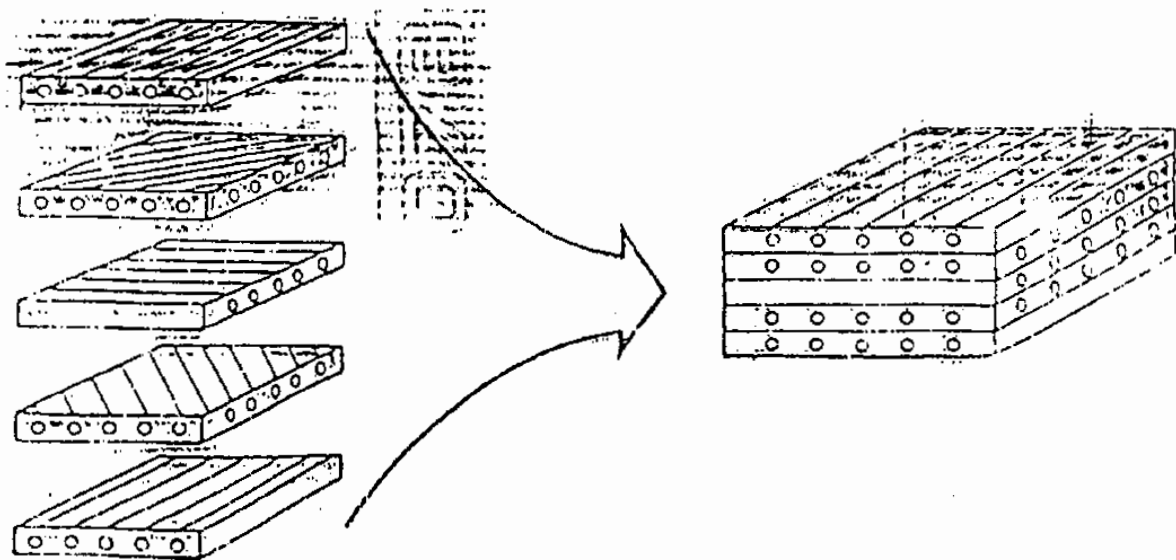


圖 5-3-1

一般複合材料成形方式

· 熱固性複合材料	· 熱塑性複合材料
——濕積層	——隔膜成形
——噴佈成形	——纏繞成形
——預浸布積層	——熱壓成形
——真空壓力釜成形	——壓印成形
——樹脂轉注成形	——拉擠成形
——纏繞成形	——射出成形
——SMC/BMC 模造成形	
——拉擠成形	

表 5-3-2

及樹脂，稱為積濕層，或已先含浸且已成化至不粘手之預浸布。

- (三) 纖維之方向可依據結構受力情況加以調整，以得到最佳物理及機械性質之積層板。
- (四) 疊層完成之積層板需加以成化，成化溫度隨樹脂不同可分為室溫成化及高溫成化，一般而言，高溫成化可提供材料性質或加速成化速率。

二、噴佈成形簡介：

- (一) 本法與濕積層相似，但使用纖維束，經線上截斷成短纖維，與樹脂同時噴佈於模具上，直至所需之厚度為止。
- (二) 可以滾筒滾壓，除去多餘之樹脂及氣泡。
- (三) 本法比積層快速，但需要較多之施工技巧，成化與濕積層類似。

三、真空壓力釜成形法：

- (一) 為高級複合材料之成形方式。
- (二) 積層以真空袋包裝，並在積層間抽真空以除去疊層時之空氣，真空袋外則施以壓力，使積層更為緊密並除去多餘之樹脂。
- (三) 真空壓力釜可控制成化之溫度、壓力、以程式控制進行成化週期，使產品品質更為穩定。
- (四) 以空氣熱對流方式加熱，昇溫速率與模具設計相關。壓力亦為氣壓方式，可提供各部位之均壓，而模具則在最小受力狀況。

四、預浸布積層法：

- (一) 最常用來作高性能高分子基複合材料的方法是預浸布積層法，如圖5-3-2所示，將內含單向纖維排列，部份成化厚度約1毫米的預浸板（表面通常有一層保護膜，使用時撕掉），一層層累積後再置於壓熱器中加熱成化。
- (二) 預浸布纖維方向平行成品較長的方向稱0°積層；夾角為θ則為θ積層，圖5-3-2積層順序為[0/90/-45/+45/+45/-45/90]T，也可寫成[0/90/-45/45]S，其中T代表全部之層

碼，S 代表是對稱積層層碼。各積層的角度視情況而定，要避免扭轉或彎曲，並得到各方向所需的強度為原則，此法可得到很高的纖維含量。

五、纏繞成形法：

(一) 將纖維束浸漬後纏繞在模襯上，模襯可以是靜止或轉動；纏繞方式也可以是極向或螺旋，如圖 5-3-3(a)及(b)所示，一層層繞到所需厚度後，再高溫將樹脂成化，然後將模襯除去。

(二) 大型的筒狀或球形容器常以此法製作，所用材料多為玻璃、碳、醃胺纖維強化聚酯、環氧樹脂或乙烯酯。

六、拉擠成形法：

(一) 若產品的截面為固定形狀，如 I、T、O 型，則常用拉擠成形法如圖 5-3-4 所示。

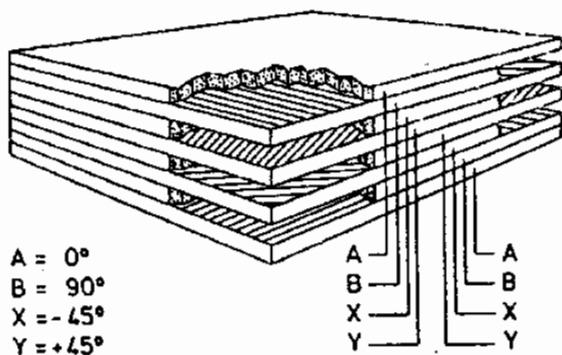
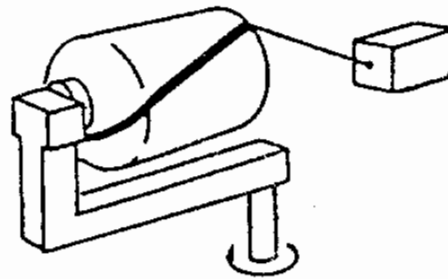
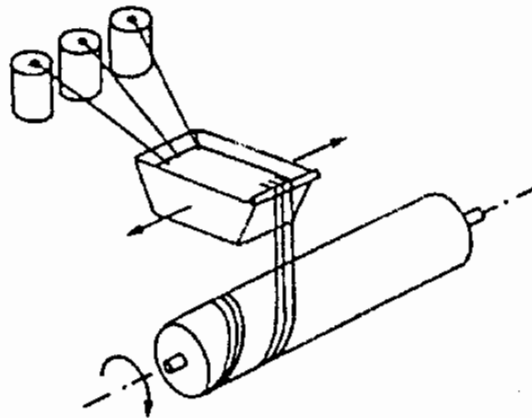


圖 5-3-2 預浸布積層法



(a) 極向纏繞



(b) 螺旋纏繞

圖 5-3-3 纏絲法製造高分子基複合材

(二) 通常將纖維已預浸樹脂的預浸布直接拿來排列，經預型模產生初步形狀後；進入內含拉擠成形模的成化爐中，圖上是以微波加熱成化的方式；成化後拉出爐外，再切斷即成成品。算是快速連續製造方法，可大量生產。拉速為每分鐘數公分到數公尺之間。

(三) 複材修補：

飛機結構在製造及使用過程

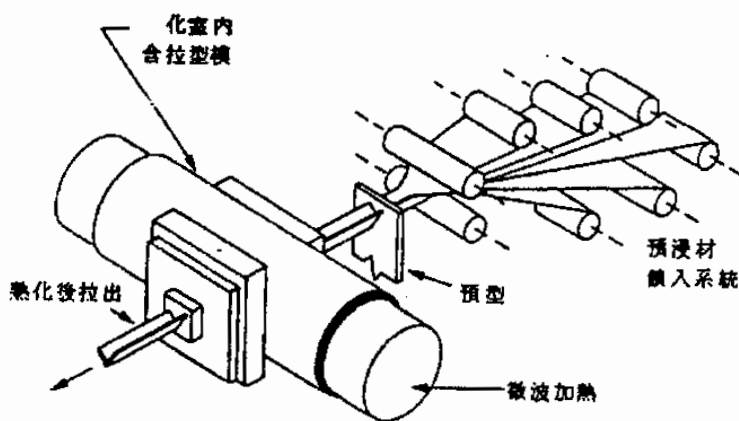


圖 5-3-4 拉型法製造高分子基複合材料

中，常因施工過程疏失或意外的撞擊，及環境和疲勞等因素，而造成各類損傷。不僅影響飛機原有的性能及安全，且降低飛機的使用率。為了減少待件及拆裝時間，必須使用結構修補的技術，以迅速修護受損區域，複材補片修補技術具有下列的修補需求：

- 恢復原有結構的強度及勁度。
- 滿足氣動平滑性。
- 最少重量的增加。
- 環境的適用性。
- 耐疲勞性。
- 施工的便利性。

● 結構損傷之類別：

傳統上，飛機結構所用的材料大部分為以金屬為主，但

由於材料科學的不斷研發，複合材料已有大量引用之趨勢。由於複合材料的高比強度及剛硬性的優點，為了提高飛機性能及增加續航力，已大量應用於飛機結構上；但因複合材料具有方向性的特質，順著纖維方向（0度）強度最強，而與纖維方向垂直的強度小，與金屬的等方向性性質不同，所具有的損傷類別亦不同，而複材結構之損傷分類如下：

1. 表面缺陷。
2. 脫層（纖維層與纖維層之脫離）。
3. 破孔。
4. 脫膠（纖維複材與結構另件之脫離）。
5. 承壓破壞。

6. 孔隙。

● 修補的流程：

1. 破損偵測（非破壞性檢測）：

以目視檢測、尺碼檢測及超音波或 X-射線等之方法檢測之。

2. 損傷鑑定：

(1) 了解損傷區域的結構型態、系統安置狀況及特殊限制。

(2) 判定處置措施：

可忽略損傷（粉飾修補）：可修補損傷；不可修補損傷。

3. 補片的選用：

依結構設計的需求，用等勁度或恢復原有厚度的方法，決定補片的層數及疊序（依據損傷類別確按修護程序指示行之），若為複材結構則以原有疊層為考量。再依修補區的限制，選定補片的材質及種類。

4. 修補施工：

(1) 損傷區的打磨及挖除。

(2) 損傷區的情況。

(3) 補片預配。

(4) 施以膠合或鉚合。

(5) 修補後檢測：所用之方與修補前之破損檢測相同。

● 碳纖維複合材料修理：

碳纖維複合材料由於性脆，耐撞擊性差，在使用及維修

時極易受外物或工具撞擊損傷，且其修補方法異於一般金屬件，工作人員於執行修補時應熟練修補技術，確保修護品質；茲依據損傷分類提供以下修理方法，以為參考。

1. 表面處理：

工件表面經由打磨、拭淨及乾燥處理，以提供噴漆或膠合之準備。但切勿在打磨時以空氣噴槍噴除，應使用吸塵器吸除殘屑、粉末等，以確保工作安全。

2. 凹坑補平：

依照表面處理程序清潔修補區，再依粉飾原則補膠，再經成化、打磨完成。

3. 脫膠修補：

依非破壞性檢驗測知脫膠範圍，再將膠料注入膠合脫膠部分；若需作鉚合補強，則趁膠料尚未凝結，選擇適當鉚釘鉚合補強之。

4. 脫層修補：

依非破壞性檢驗脫層狀況，茲分為下列幾種修補情形：

(1) 灌膠修補：

在脫層部分至少鑽二孔以上（視脫層情形），將膠料注入孔洞直至另一孔膠料溢出，

再予以抽真空成化，以確保膠合效果。

(2) 碳纖維預浸帶高溫成化修補：

- ①將脫層區切除。
- ②依表面處理程序處理修補區。
- ③預製補片並行預配。
- ④袋裝、抽真空、加溫、成化。
- ⑤修整、打磨。

5. 複材蜂巢結構穿孔修補：

(1) 單穿孔：

- ①依目視及非破壞性檢測得知損傷情況。
- ②挖除損傷複材。
- ③修整蜂巢。
- ④灌注結構膠於蜂巢內，直至突出複材表面，再予成化、打磨。
- ⑤預製補片並預配之。
- ⑥將補片膠合於損傷區域再予袋裝、抽真空，加溫、成化。
- ⑦修整、打磨。

(2) 貫穿孔：

- ①依非破壞性檢測得知損傷情況。
- ②評估修理範圍是否會影響結構強度，若超出修理範圍，則應更換工件不得修

護。

- ③挖除複材及蜂巢心，並修整孔洞。
- ④切取適當蜂巢心，並予預配。
- ⑤兩面灌注結構膠於蜂巢內，直至突出複材表面，再予成化、打磨。
- ⑥預製兩塊補片並預配之。
- ⑦將補片膠合於修補區域再予袋裝、抽真空、加溫、成化。
- ⑧修整、打磨。

以上所述五種修補常見之方法，如有必要，應在於修補完成後再予以非破壞性檢測，以確保修補後之效果。如發現不良，則應重新製作修補；且必須在修補另件累計修補範圍。複材修補技術，乃利用複材之特性，依修補需求疊製補片，並考量各施工要素，採用鉚合或膠合方法，使其恢復結構原有的性能，保持原有的效益。

肆、複材檢測：

飛機結構組件中採用合金材料或複合材料者，一旦評估需使用複材積

層板修理，即相當於局部製作獨立之複材成形件。必需依照製造廠家規範，測試該成形件之品質，同時另以適當檢測方法測試成形件與待修件間接合（黏結）情況。因此本節乃針對複合材料機械性質測試及非破壞性檢測做概要介紹：

一、機械性質測試：

於相同環境下以同一批原料製作與複材積層板成形件同質之試片，利用萬能試驗機、硬度試驗機等。測試其抗拉強度、抗彎強度、硬度、耐候性…等性質，以確保該批成形件具有可靠合格之機械性質。

二、非破壞性檢測(一)：

針對該成形件採用超音波探傷儀及 X-光射線照相設備，檢測其中是否夾含有超過安全限制之氣泡或膠合不良之區域，對成形件之品質進行嚴密的監測。

三、非破壞性檢測(二)：

於成形件黏貼於待修結構件表面後，必須採用超音波探傷儀檢測，檢測其膠合層是否夾含有超過安全限度之氣泡或膠合不良區域，以確保補強材料能完美地承接待修結構件之力流，達到修補之目的。

四、以目視、超音波檢測法及 X-

射線照相檢測之檢測程序與方法，將在下一章節中介紹，在此不重複說明。

在材料的製程中，經過不同的加工作業，常因控制條件或設備的缺失而產生內部或表面缺陷。飛機在飛行過程中，由於受到各種外應力的作用，由疲勞或應力集中使結構發生破壞，尤其是內部或表面上肉眼無法察覺的缺陷，常是飛機失事的主要原因。有鑑於此，我們能利用平日的例行性檢查，同時發現疑慮時以非破壞性檢測監測，以確保飛機結構及另組件之妥善，維護飛安。而我們一般常用的非破壞性檢測方法有多種，如超音波檢測方法、射線照相法、目視法……等，將在下一章節中介紹。

(五) 安全守則：

修理碳纖維射件所需之材料通常具揮發性，並可能含有劇毒，所以請遵守以下所列之安全規範。

● 工場：

工場必須清潔及通風良好，並保持室溫於 20 至 30℃ 之間，相對濕度也絕對不能超過 75%。

—— 建議使用效率良好之通

風系統。

——請勿使用電動工具執行打磨作業。

——務必使用吸塵器吸除粉塵，嚴禁以高壓噴氣清除粉塵。

● 人員安全：

執行打磨、鑽製及切割作業會產生許多微細及刺激皮膚的粉末。執行上述作業時，務必配帶安全護具。

——執行上述作業時，要配帶口罩，並提防吸入有毒蒸氣，必要時最好穿著工作服，離開時將工作服置放現場。

——配製膠料時，請帶手套及護目鏡，以避免直接接觸皮膚及眼睛。

——工作前後、休息前或工作暫停時，請立即以清水及肥皂洗淨雙手並徹底清除指甲縫內之殘留污物。

——絕勿以任何溶劑洗手。

——使用過後之髒布需立即丟棄或移走。

——人員不得在工作現場抽。

——建議於工作後即進食之前，再次清潔雙手徹底

清除指甲縫內之殘留污物。

● 使用消耗材之注意事項：

嚴禁使用三氯乙烯及稀釋劑清潔碳纖維附件。也絕對不使用過期之修護器材(膠類、織布)等。

——處理碳纖維布時建議配戴乾淨之白色棉質手套。

——碳纖維布須儲存於乾淨無塵之處所，並避免陽光直射或任何紫外線光源，如霓虹燈等。

——REDUX 312 L膠膜儲存於-18℃之冷藏庫可保存一年，在室溫中只能保存一個月。使用前需將其從冷藏庫拿出置於室溫中一天，方可使用。

——STRUCTIL EA 9394膠可在室溫中保存一年。

——調配膠類時請使用乾淨、無油脂之容器。

——請勿使用未經許可之溶劑稀釋膠類。

——當已調配妥之膠料壽命短於修理所需時間時，請分數批次調配。

——由於複材型式及膠料已發展很多，本文未提及之複材及膠料，請參照各製造廠家之使用及存儲規範。

習題：

- 一、何謂複合材料？有何優點？
- 二、一般複合材料成形之方式有那幾種？請簡述之。
- 三、複材結構之損傷有那幾種？
- 四、複材修理之安全守則為何？