

飛機結構腐蝕與預防

空軍備役中校 魏楞傑

提要

冷戰結束後，由於東西方的軍事對峙趨緩及全球性經濟不景氣，各國的國防經費皆遭到大幅度縮減，使得大多數國家的軍用飛機都得延長使用年限，如此雖然可節省採購新機的花費，但老飛機結構最令人頭痛的腐蝕，則是延用時必須小心處理的課題。

東西方冷戰時期，西方國家軍機的設計使用年限通常是20年到30年，為了維持對蘇聯的軍事優勢，這些軍機在到達使用年限後皆會被汰除，但自1991年蘇聯瓦解後，雙方的軍事對峙一夕之間驟然消失，維持軍事優勢已無必要性，加上本世紀初的全球性經濟不景氣，許多國家的國防經費遭到大幅度刪減，使得大多數軍機在到達使用年限後仍然得繼續延用。

表一為美國空軍在1998年制定的主要機型使用年限規劃，由表中可看到美國空軍大部分機型的使用年數，都超過了設計使用年限，若再加上後續預定使用年數，許多機型的服役年齡將會高達50年以上，可見美國即使身為全球唯一的超級強國，也不得不繼續使用日漸老舊的機隊。

延長飛機使用年限固然可以省下採購新飛機的經費，但伴隨著飛機使用年歲的增加，飛機結構腐蝕(corrosion)的情況也會一一浮現，而且不論何種機型都完全無法倖免。這些腐蝕的處理，會構成後勤很大的負擔，而如果未能及時發現妥善處置，更將導致結

構強固性(integrity)降低，危及飛行安全。

腐蝕

腐蝕是個存在已久的老問題，台灣地處亞熱帶，高溫潮濕的環境更有利於腐蝕的發生。本質上，腐蝕是個無法避免的過程，只能以適當的處置來延緩它的發生或降低它所帶來的損害，明瞭常見的腐蝕及其預防或處

表一、美國空軍各機型使用年限規劃。

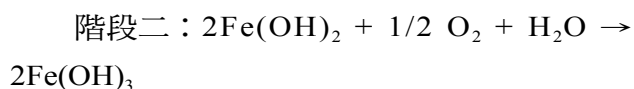
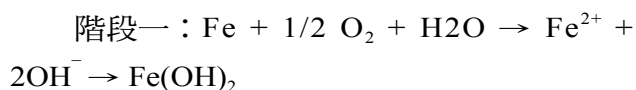
(資料來源：參考文獻2)

	機型	已使用年數	機隊平均機齡	後續預定使用年數
運輸機	C-5A/B	28	18	10-15
	C-130E/H	36	20	5-25
	KC-135	41	35	25+
	C-141B	32	29	8
支援機	E-3	20	16	17-25
	E-8	-	20	15-20
	EC-135	40	35	25+
	EC-130E/H	36	20	15-25
	EF-111	30	29	4-5
	T-37B	38	33	2-12
	T-38	36	29	25+
戰鬥機	A-10A	20	15	25+
	F-15A	23	12	5-20
	F-16A	18	8	10-25
	B-1B	11	9	25+
	B-52H	36	34	25+

置方式，對節省維修經費或飛安，都會有莫大的助益。

根據美國材料測試協會(American Society for Testing and Materials, ASTM)的定義，所謂腐蝕是指：「材料(一般指金屬)與所處環境經化學或電化學反應後，所造成的材料性質退化」。不論是金屬、聚合物(polymer)、或陶瓷(ceramic)…皆難逃於腐蝕的命運。這是因為在自然界裡，材料以礦石中硫化物(sulfide)或氧化物(oxide)型態存在的情況最安定，一旦經由各種精煉過程成為純物質或合成物質的型態，就成為不安定狀態，而腐蝕就是材料回復安定的一種方式。譬如：自然界的鐵是以氧化鐵的形式存在於礦石中，經過提煉之後成為純鐵或合金鋼，但在歲月的侵襲下，它終究會回復到生鏽的氧化鐵。

金屬材料在一般的環境下，會因為和環境周遭中的酸性物質起化學反應，而造成腐蝕。譬如鐵(Fe)放置於空氣一段時間後，就會以二階段的方式，和空氣中的氧氣(O₂)、水氣(H₂O)生成氫氧化鐵(Fe(OH)₃)，其化學反應式為：



此處的氫氧化鐵Fe(OH)₃就是大家很熟悉的黑褐色鐵鏽。

一般人都有個錯誤的觀念，認為腐蝕與空氣濕度有直接的關係，因此潮濕的東南亞地區較容易發生腐蝕，而乾燥的北美或歐洲大陸，則較不會有腐蝕的困擾。事實上，腐

蝕的發生與空氣絕對溼度(Absolute Humidity)關係甚微，與空氣相對濕度(Relative Humidity)則密不可分。此處的空氣絕對溼度就是一般人所認知的空氣濕度，它是指在某一溫度下，空氣中所含的水蒸氣含量；而空氣相對濕度則是指在某一溫度下，空氣中的水蒸氣含量與該溫度下空氣所能容納的水蒸氣最大含量之比值。當空氣相對濕度到達某一門檻值(threshold)時，水蒸氣會在金屬表面形成水膜，促使電化學(electrochemical)反應發生，進而加快腐蝕速率，因此東南亞地區的年平均空氣絕對溼度固然高於北美或歐洲大陸地區，但兩地區的年平均空氣相對濕度則未必一定如此，事實上，全球大部分地區的年平均空氣相對濕度大約都在70%到80%之間，換言之，不論是海島型氣候的台灣或是大陸型氣候的美國，都會遭遇到相同程度的腐蝕問題。只不過台灣除了高溫、高相對濕度的海島型氣候外，還有沿海鹽害及空氣汙染腐蝕因子(硫、氯…等)的危患，所面臨的腐蝕環境要比大陸型氣候國家更為嚴苛。

所謂的電化學反應，是指二種金屬在常溫下置於水或其他電解質間，彼此間因電子的轉移而發生的化學反應。要完成此電子的轉移需具備四個要素：釋放電子的陽極、接收電子的陰極、與電子發生化學反應的電解質、連接陰極和陽極的電路。

以最常用的乾電池為例：乾電池的外殼為鋅(陽極)，正中央為石墨(graphite)碳棒(陰極)，以氯化銨(NH₄Cl)為反應主體的糊狀物電解質，置放於鋅外殼與石墨碳棒間。由於鋅的活性較石墨來得大(見後文)，因此會釋

放電子變成鋅正離子，電子與氯化銨產生化學反應，形成的電子流通過外導線可提供一點五伏特的電壓，而鋅正離子則與電解質中的其他物質形成安定的化合物，故乾電池使用一段時間後，鋅外殼就會逐漸稀薄被「腐蝕」，形成常見的乾電池外殼烏黑生鏽現象。

就金屬腐蝕而言，發生電化學反應不一定需要液狀電解質，只要接觸潮濕的環境，或是表面上有局部的潮濕區域即可；也不一定需要單獨且分離的陽極與陰極，單一金屬件上某些局部區域的異質性(inhomogeneity)，如：晶格邊界區域、冷作加工(cold-working)區域、熱處理不均勻區域…等，會與其他的區域分別形成電化學反應的陽極與陰極；電解質中的異質性，如：離子濃度、溫度、溶解氧氣…等的不均勻，也有同樣的效應。

除了金屬外，其他材料也會發生腐蝕。例如俄羅斯空軍於2008年12月發生二架MiG-29戰機失事，導致全機隊暫時停飛，失事調查發現肇因為垂直尾翼蒙皮因腐蝕導致的疲勞破壞，而蒙皮的材料為碳纖維複合材料。

複合材料的基體(matrix)為聚合物，會和環境交互作用而產生腐蝕現象，只是它的腐蝕機制不同於金屬的電化學反應，而是物理

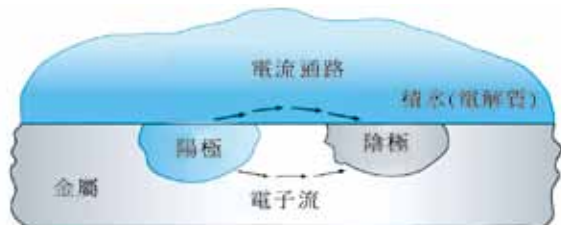
化學(physiochemical)反應，也就是既有化學現象也有物理現象，而且也沒有如金屬般地產生腐蝕生成物，而是一般呈現出強度退化的表象。

腐蝕與飛安

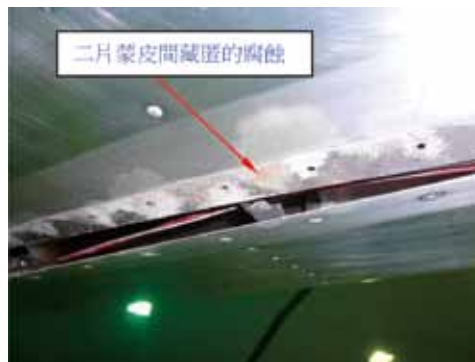
腐蝕會減損材料的承載面積，使結構無法承受原先的設計負載，若未能適時檢出，將會對結構強固性造成嚴重的威脅，進而危及飛安。腐蝕對飛機結構強固性的威脅，至少有下列幾種：

- 承載面積減少，局部應力升高。
- 成為多重位置損傷(Multiple-Site Damage)的起始點。
- 腐蝕生成物形成的枕形膨脹(pillowing)效應，改變結構的應力及力學行為。
- 腐蝕若未依照規定方式完全清除及修復，又不是後續定期檢查重點位置時，將後患無窮成為飛安潛在的重大威脅。

腐蝕最主要的危害來自它的生成物，以鋁合金而言，腐蝕生成物體積是未腐蝕鋁合金體積的6.5倍之多，如果腐蝕是發生在以固定件相互疊接的二片蒙皮之間，此大幅增加的體積會使固定件間的蒙皮膨脹變形，造成



金屬腐蝕的電化學反應。(圖片來源：參考文獻18)



以固定件相互疊接的二片蒙皮間，常藏匿著嚴重的腐蝕。(圖片來源：參考文獻25)

接合點(lap joint)位置應力急遽升高，比起腐蝕所直接造成的承載面積減損，此種蒙皮枕形膨脹所導致的應力增加效應，更為嚴重。研究指出材料面積減損只需達6%，此效應就會使材料承受應力超過其降伏強度(yield strength)，並會把應力最高點轉移到其他位置。

根據一份發表於1984年的研究報告，該報告蒐集了英國民航局(Civil Aviation Authority)所發行的世界民航失事統計(World Airline Accident Summary)、國際民航組織(International Civil Aviation Organization)的失事資料庫、以及航太專業期刊如：航太科技週刊(Aviation Week & Space Technology)、飛行國際(Flight International)、國際直昇機(International Helicopter)…等的數據，統計出由1927年到1981年間，全球共發生定翼機失事1466件，原因為結構疲勞的有449件，其中可歸咎於腐蝕的有46件，佔13%；旋翼機失事419件，原因為結構疲勞的有125件，其中可歸咎於腐蝕的有29件，佔23%，腐蝕對飛安的威脅由此可見一斑。

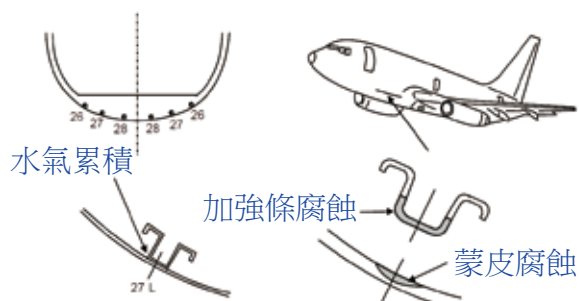
我國民航史中也有數起因飛機結構腐蝕而造成飛機重大失事的案例，如發生於1981年的遠東航空公司(以下簡稱遠航)三義空難，以及2002年的中華航空公司CI611班機澎湖空難，其中尤以三義空難為最典型案例。

1981年8月22日，一架隸屬於遠航編號B-2603的波音737-222型客機，在由台北飛往高雄的103號航班途中飛越三義上空時，於空中解體並墜毀在苗栗縣三義鄉雙湖村大坑地區的山區，機上的機組員6人及旅客104人全

數罹難，事後調查發現失事原因為貨艙結構腐蝕，後機身左側加強條(stringer)S-26L處的機腹蒙皮上，有長約65英吋(1.65公尺)的腐蝕裂紋，該處蒙皮原厚度0.036英吋，因腐蝕僅剩0.01英吋，正常飛行情況下蒙皮的環繞應力(hoop stress)高達每平方英吋55,000磅，已沒有結構強度可言。早年澎湖漁獲大都空運直送松山機場，當年也沒嚴格要求海鮮類的貨品封裝，導致每次載運都有海水溢出，滲漏到貨艙地板下方飛機結構，而海水本身帶有鹽份，對金屬具有強烈的腐蝕性，而腐蝕後的結構自然缺乏足夠的強度。

失事調查中也發現遠航的飛機結構檢修有問題。737飛機在失事前兩個禮拜的8月5日，於飛往高雄時發現艙壓無法建立，這代表著飛機結構有破洞，氣壓會洩漏，當時對環控系統的包裝閥門(pack valve)完成修理。失事當天早上這架飛機排定由台北飛往馬公，但升空後又發現艙壓無法建立，於是飛返松山機場，經過檢修後改排為台北到高雄的班機，但起飛後14分鐘就在空中解體。根據遠航維修紀錄，在失事前二個月的6月22日，飛機剛完成全機細部檢查(D check)，檢查項目中有規定要檢查貨艙內部結構，當時若細心檢查，應該能發現已嚴重腐蝕的蒙皮。

調查人員檢查遠航另一架飛行架次雷同的波音737客機，這架飛機的外表相當乾淨，但拆除貨艙地板後，發現地板下方機腹左側5處相鄰站位上S-26L加強條處隔框(frame)已完全腐蝕。根據遠航的維修紀錄，這些位置曾在九個月前完成腐蝕檢查並塗抹LPS3防腐蝕



遠航三義空難班機的機腹有嚴重腐蝕。(圖片來源：參考文獻23)

劑，但此次拆除地板因為地板鉚釘嚴重腐蝕而耗費整整2天，調查人員不禁懷疑在九個月前是否真有執行貨艙內部結構腐蝕檢查。

腐蝕與經濟損失

腐蝕即便能及時發現，其後續處理也並不便宜。根據美國空軍2012年發布的《國防部及空軍腐蝕研究審查報告》(DoD and USAF Corrosion Research Overview)，美國國防部依據2006年到2009年的資料，估計出該部及美國空軍每年在腐蝕上的直接花費，各約為新台幣6,450億元及1,890億元。

另外，根據美國2000年出版的《珠擊者》(The Shot Peener)專業期刊數據，日本1997年直接花費在腐蝕上的經費，約佔1%的國民生產毛額(Gross National Product, GNP)。我國雖然沒有類似的統計數據，但因與日本皆為海島國家，且空氣污染又較日本嚴重，故腐蝕耗費佔國民生產總額的百分比，應與日本相近且高一些。依我國2017年國防經費新台幣3,217億元，佔國民生產總額的2.11%推算，我國每年因腐蝕所導致的經濟損失，估計將高達新台幣仟億元以上。

要想降低因腐蝕所導致的經濟損失，對飛機而言，一個可行的辦法是實施「飛機結

構腐蝕損傷評估」，也就是把飛機結構目前對腐蝕所採取的「發現後就修理」的方式，改為「儘早發現、評估影響、規劃時程、進行修理」方式。目前不論是民航機或是軍用飛機，絕大部分可能發生腐蝕的區域，都沒有制定定期檢查時距，這是因為目前航空工業所採用的「容許損傷」(Damage Tolerance)設計中，沒有把腐蝕效應考慮在內，也無法掌握腐蝕對結構強度的影響，因此一旦發現腐蝕，通常是立即停飛執行修理，對民航業者而言，只要飛機停在地面上，就代表著營業損失。

如果能以先進的非破壞性檢驗(NDI)儘早發現腐蝕，評估它對飛機強度的影響，規劃合適的修理期程，讓民航公司自行選擇在最適當的時間實施修理，不需立即讓飛機停飛，自然可以降低經濟損失。波音公司在這方面有一套初步性的策略：該公司生產的某些機型，蒙皮接合處若發現腐蝕，只要所減損的厚度不超過原厚度的10%，飛機就仍然可以正常使用，但需搭配較頻繁的定期檢查，以確保厚度損失不超過此限制。

腐蝕種類

飛機金屬結構中最常見的腐蝕有：摩擦腐蝕(fretting corrosion)、麻點腐蝕(pitting corrosion)、縫隙腐蝕(crevice corrosion)、電位腐蝕(galvanic corrosion)、剝落腐蝕(exfoliation)、應力腐蝕(stress corrosion)，各腐蝕的成因及表象會有些許不同，對應的預防或處置方式也會有些微的差異。

摩擦腐蝕

摩擦腐蝕為二緊密接觸的金屬表面間，因外負載導致振動式的時鬆時緊，彼此又有相互滑動磨擦時，所產生的一種表面損傷現象。以肉眼看起來很光滑的金屬表面，在顯微鏡下會發現其實有許多的高低起伏，這樣的二金屬面以固定件相搭接後，彼此的許多高凸部分會互相抵觸，當發生振動式鬆緊運動時，這些高凸部分會因相互滑動磨擦擠壓而扁陷，並產生碎屑。

這些碎屑會因二金屬面的時鬆時緊而被擠壓入某一金屬表面內，造成表面的凹陷及深痕，形成應力集中位置，進而產生疲勞裂紋，即使在很低的應力下，此勞裂紋依然會持續成長，更糟的是即便整體而言，二金屬接觸面的應力並不高，但摩擦腐蝕疲勞裂紋局部位置卻可能有很高的應力，加快了裂紋成長速率，造成結構提早破壞。

結構發生振動式運動的原因很多，譬如發動機對其附近結構造成的機械式諧振，或是飛行中螺旋槳及機翼尾流中的擾流(turbulent flow)，此變異性的氣動力負載吹擊著後機身及尾翼，使得這些結構處的蒙皮與機身隔框間產生振動式運動。根據研究指出，振動式運動產生的位移只需達到奈米級(十億分之一公尺)的大小，就足以造成摩擦

腐蝕，而如此小的位移會使碎屑停留在二金屬面相互摩擦位置，而不是如一般的摩擦損傷，碎屑會立即四散飄逸，這也是摩擦腐蝕與一般的摩擦損傷最明顯的差異。

要降低摩擦腐蝕的發生機會，一般採取的預防方式為：

- 以低黏度的潤滑劑來降低金屬接觸面的摩擦力。
- 以珠擊(shot-peening)或冷作加工增加金屬的表面硬度，提高抵抗摩擦腐蝕的能力。
- 利用彈性襯墊來吸收振動式運動造成的位移。

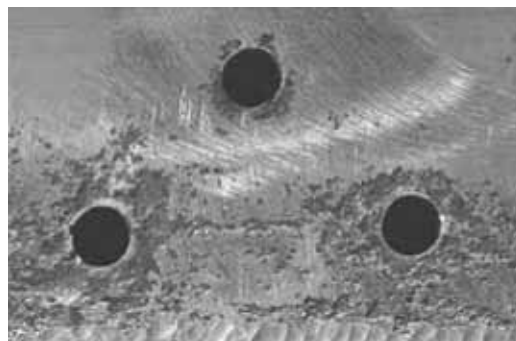
麻點腐蝕

在大氣環境下，某些金屬表面會因與空氣中的氧相互作用，自然形成一層薄薄的氧化膜，因而失去相對的化學活性，也保護了此膜下的金屬免於外界的腐蝕行為，此種現象稱為鈍化(passivity)。一些金屬如：不銹鋼、鋁、鉛、鈦…等合金均具有此特性，麻點腐蝕專發生於具有鈍化膜的金屬表面上，其中以不銹鋼最容易發生。

麻點腐蝕的發生原因是由於環境或金屬表面的性質不均勻(如：表面缺陷、成份不均、漆面破裂…等)，導致環境中的氯離子



金屬表面的摩擦腐蝕。(圖片來源：參考文獻18)



金屬表面的麻點腐蝕。(圖片來源：參考文獻25)



被吸附在金屬表面某些點上，使鈍化膜破壞生成微小的孔洞，孔洞底部因空氣不流通缺氧而形成陽極，孔洞外圍其他外表面則因氧氣充足形成陰極，在陰陽兩極的電化學反應下，金屬表面就發生麻點腐蝕。

麻點腐蝕是一種局部的腐蝕現象，金屬表面呈現多處點狀的銹蝕，直徑可由0.002到0.2公分，深度則是大於直徑，腐蝕方向沿著重力方向垂直向下侵蝕，因此基本上會發生在垂直於重力方向的金屬表面，而不會發生在平行於重力方向的金屬表面；會發生於金屬的上表面，而不會發生在下表面。

麻點腐蝕的形成通常需要一段較長的時間，可能長達幾個月到一年，但一旦形成後，隨著腐蝕深度的增加，孔洞底部的缺氧行為會愈來愈嚴重，在陰極面積遠大於陽極面積的情況下，產生了自我催化(autocatalytic)的腐蝕加速行為，向下腐蝕速度會越來越快。麻點腐蝕的危險性在於其外表特徵微小，且常被腐蝕生成物所掩蓋，以致屢有結構已有嚴重的麻點腐蝕，而維修人員仍難以察覺，成為結構應力集中位置或是

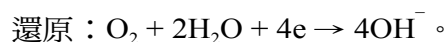
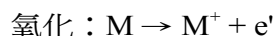
應力腐蝕裂紋的起始點，造成結構因疲勞而提前破壞。研究指出，即便麻點腐蝕的深度僅有0.33毫米(mm)，結構疲勞壽命也會遽減80%以上。

金屬表面的小刮痕或刻痕，很容易導致麻點腐蝕的發生，因此要防止此種腐蝕，金屬表面鏡面處理(mirror polish)是個相當有效的方法；另外在選用不銹鋼時，使用含有鉬(molybdenum)致抗腐蝕較佳的不銹鋼，也是典型的預防方式。

縫隙腐蝕

當某一金屬面與另一金屬面，或是與另一非金屬面非常靠近(典型間隙為0.1到100奈米)時，在環境許可下很容易就發生縫隙腐蝕。

二極端靠近的金屬M，在潮濕的腐蝕環境中會產生下述的氧化及還原反應：



起初，包括縫隙面在內的全部金屬表面，都會均勻地發生上述化學反應：每個由金屬所釋放出的電子，都會被氧的還原反應給消耗掉，並產生一個負電性的氫氧離子(OH^{-})，以和金屬正離子(M^{+})維持電性平衡。過了一段時間之後，縫隙處由於空間緊閉與外界空氣不流通，氧很快消耗殆盡，但由於縫隙面與全部的金屬表面相較下，僅佔很小的一部分，故整個化學反應仍然穩定進行。

但在縫隙面內金屬繼續釋放電子的情況下，由於氧已消耗殆盡，無法進行氧的還原反應，就會有多餘的金屬正離子，不得不由腐蝕環境中的氯負離子(Cl^{-})來進行電性



飛機結構螺栓孔處由於螺栓頭和結構接合面縫隙而產生的縫隙腐蝕。(圖片來源：參考文獻19)

平衡，因此在縫隙面內就引發了化學反應： $M^+ + Cl^- \rightarrow MOH + HCl$ ，形成不溶於水的金屬氫氧化物(MOH，就是腐蝕產生物)及弱酸(HCl)。弱酸會加速金屬的溶解，進而加速氯離子的移動，整個過程有自我催化的效應，使得縫隙腐蝕一發不可收拾。

當縫隙面在加速腐蝕時，剩餘金屬面的氧還原反應也會加速進行，這實質上等於保護這些區域不受腐蝕的侵襲，因此縫隙腐蝕僅會發生在接合緊密的局部區域，其餘位置幾乎不會有腐蝕的情況。

電位腐蝕

電位腐蝕的現象可說是電鍍的逆過程，電鍍時兩根金屬棒分別接於直流電源的陽極和陰極，並置於電解液中形成電導通狀態，陽極的金屬棒在電解液中會溶解成金屬正離子和電子，金屬正離子會被陰極金屬棒所吸引，和其電子結合成金屬附著沈積於表面上；電子則在直流電源的驅動下去補充陰極金屬棒所失去的電子。在這個過程中，陽極的金屬棒因持續溶解而逐漸被「腐蝕」。

同樣的道理，當兩種或兩種以上不同的金屬材料搭接成電導通狀態時，因為彼此間的電位(potential，代表它失去電子的難易程度)不同，兩材料間就會有電流通過，加上潮濕的環境有類似電解液的功用，以致其中某一材料會產生坑洞狀的腐蝕，並有硫化物、氯化物(chloride)、氧化物…的沈積。被腐蝕的材料稱為陽性(anodic)或活性(active)材料，未被腐蝕的材料則稱為陰性(cathodic)或惰性(passive)材料。

一般而言，會影響電位腐蝕速率的因素



MB-339戰機鎂合金結構與鋁鉚釘產生的電位腐蝕。
(圖片來源：參考文獻22)

有：

組成成分：不銹鋼表面的鉻(chromium)若和鐵混合成合金狀態，則此不銹鋼成為活性材料；若成氧化鉻的型態，則成為惰性材料。後者也是不銹鋼和鋁合金搭接時，為防止電位腐蝕而實施表面鈍化處理(passivating treatment)的原理。

相對面積：電位腐蝕的速率與惰性對活
表二、常見金屬的電位值。(資料來源：參考文獻10)

元素	電位值(伏特)
金(Gold)	+1.498
鉑(Platinum)	+1.200
銀(Silver)	+0.799
水銀(Mecury)	+0.788
銅(Copper)	+0.340
氫(Hydrogen)	+0.00
鉛(Lead)	-0.126
錫(Tin)	-0.136
鎳(Nickel)	-0.250
鈷(Cobalt)	-0.277
鎘(Cadmium)	-0.403
鐵(Iron)	-0.440
鉻(Chromium)	-0.744
鋅(Zinc)	-0.763
鋁(Aluminum)	-1.662
鎂(Magnesium)	-2.363
鈉(Sodium)	-2.714
鉀(Potassium)	-2.925



性材料的面積比例成正比，若大面積的活性材料和小面積的惰性材料相搭接，則大面積下電流密度會被稀釋，活性材料可能就不會被腐蝕。反過來說，小面積的活性材料和大面積的惰性材料相搭接，則由於電流密度的增加，活性材料很快就會被腐蝕殆盡。

極性改變：在某些情況下，相搭接的金屬極性會改變，使腐蝕的發生位置和預期相反。譬如鐵和鋅搭接，在含有硝酸鹽(nitrate)或重碳酸鹽(bicarbonate)的溶液中，當溫度超過140°F時，電極性會改變，其原因目前仍不清楚，不過一般相信和腐蝕物的導電度有關。最常見的例子是鋁梯中的鋼製螺栓，雖然鋁合金的電位較高，但實際情況是鋼製螺栓腐蝕很快，而鋁梯則沒有什麼影響。

要防止電位腐蝕，相互搭接的各結構零組件得挑選電位相近的材料，注意配對的材料是否有電位腐蝕的顧慮。各種材料彼此間的影響程度是根據相互間的相對電位差而定，差距越大，電位腐蝕越激烈。

表二是一些常見金屬相對於氫元素的電位值，位置越往上的材料，電位值越高，惰性也越大，有免於被腐蝕的保護作用；位置越往下的材料，電位值越低，惰性也越小，容易被腐蝕。

如果一定要使用不同類型的材料，可以用不導電的分隔物把兩材料分開，讓彼此完全絕緣，一般也可以用鉻酸鹽(chromate)或環氧樹脂(epoxy resin)塗裝做阻隔，但前提是這些塗層不會受到機械性的破壞。若實在無法解決，就得先防患未然，將惰性小的零件做得大一些，或是做成容易更換的零件。

在以往飛機工業未使用先進複合材料(Advanced Composite Material)前，所使用的材料主要是鋁和經過鈍化處理的不銹鋼，電位腐蝕較不常見，但隨著對性能及隱密性的要求提高，新一代戰機已廣泛採用此種强度高、重量輕、雷達不易偵測的新材料。我國目前現役的二代戰機就有許多的零組件採用先進複合材料，此材料中的石墨纖維和鋁的電位差很大，兩者交界面有電位腐蝕的顧慮，地面維護人員在平日維修時要特別注意。

剝落腐蝕

顧名思義，剝落腐蝕的外觀會有如魚鱗片般的疊層剝落，屬於發生於晶粒邊界(intergranular)的腐蝕，具有明顯的方向性，通常會平行於滾製(rolled)或射出成形(extruded)的面，侵蝕被拉長的材料晶粒，造成表面結構的脫層(delamination)或形成多層面(stratification)。高強度2xxx及7xxx系列鋁合金對剝落腐蝕特別敏感，因為它們在熱處理的過程中，合金成分中的銅及鋅會沈澱堆積在晶粒邊界處，由於鋁和銅之間有很大的電位差，晶粒邊界處會先行產生局部電位腐蝕，而不溶於水的腐蝕生成物體積，會遠大於原材料未腐蝕前的體積，在腐蝕處形成一



美軍T-37教練機角條剝落腐蝕。
(圖片來源：參考文獻8)

楔型應力(wedging stress)，推動材料內部沿晶粒邊界分離。

剝落腐蝕的發生取決於三個因素：材料微型結構(microstructure)的方向強烈一致性、晶粒邊界的電位差、腐蝕性環境。環境因素是剝落腐蝕發生的主因，譬如環境中有氯化物和溴化物(bromide)離子的存在、高溫、酸性的環境、間歇性的乾和濕…等，後者尤其會產生不可溶解的腐蝕物，加快腐蝕速率。

改變熱處理條件可以增強材料的抗剝落腐蝕能力，譬如過度時效(overage)的7075-T7鋁合金，它的抗剝落腐蝕能力就明顯優於常見的7075-T6鋁合金。在材料表面塗裝底漆及化學保護膜，也可改善剝落腐蝕抵抗力，不過這只能延緩剝落腐蝕發生的時間，無法完全防止，且一旦此保護層被腐蝕，則底下的材料將處於無保護狀態，短時間內就會被腐蝕而破碎。

剝落腐蝕的一般處理原則是磨除腐蝕區域，再加以適當的表面防蝕處理，但必須詳細評估材料磨薄後，應力值升高對結構疲勞壽命的影響。

應力腐蝕

應力腐蝕是材料在化學侵蝕環境下與機械性拉伸應力同時作用下的結果。一般的腐蝕是以材料被剝蝕的型態出現，而應力腐蝕則以裂紋的型態出現，且表面幾乎沒有任何腐蝕物堆積的現象，因此很容易被忽略，形成潛伏的危險因素。造成應力腐蝕的四個基本條件是：敏感性合金(susceptible alloy)、侵蝕環境、施加或殘餘拉伸應力(tensile



美軍F-5前機身上縱樑應力腐蝕裂紋。
(圖片來源：作者)

stress)、以及時間。

應力腐蝕廣見於多種材料及環境中，根據統計，應力腐蝕損壞最常出現於低合金鋼(low alloy steel)、鋯(zirconium)、黃銅(brass)、鎂(magnesium)及鋁合金。這些材料應力腐蝕損壞的外表及行為都不相同，不過一般而言都具有一些共同的特性：

- 大部分破斷面在巨觀下是脆性(brittle)帶有少量的韌性撕裂(ductile tearing)現象，有些材料的破壞模式會介於韌性和脆性之間。

- 一定是拉伸應力和環境同時作用的結果，輪流作用不會產生應力腐蝕，且應力大小沒有絕對的關係。應力大，環境的因素就比較小；應力小，環境的因素就比較大。

- 材料表面的氧化膜受到機械或化學外力的破壞形成小凹窪(pit)，應力腐蝕初始裂紋(initial crack)就由小凹窪的根部開始成長，這段期間應力的影響很小，腐蝕是主要的原動力(driving force)，裂紋方向和主應力(principal stress)方向一致，與一般疲勞裂紋和主應力方向垂直的情況大不相同。

- 裂紋走向會在沿著晶粒邊界或穿透晶粒(transgranular)中二選一，全看材料、環

境、應力大小這三者的組合而定。在不銹鋼材裡，裂紋通常會穿透晶粒，且會造成一特別的晶體面(crystallographic)，但在某些介質中，特別是腐蝕性溶液或是高氧化物漂白劑中，裂紋走向會沿著晶粒邊界。在高強度合金鋼中，裂紋走向也會沿著晶粒邊界，鋁合金基本上亦是如此。

- 裂紋成長的過程本身就有自我催化(self-catalyzing)的作用，正在成長中的裂紋尖端局部之成長速率至少為疲勞裂紋的百倍以上，所以一旦發現應力腐蝕裂紋後就得儘快處置。

- 形成裂紋需特定的合金和環境，雖然許多環境都能產生相近的腐蝕生長速率，但不同的合金對應力腐蝕的敏感度差異甚大。

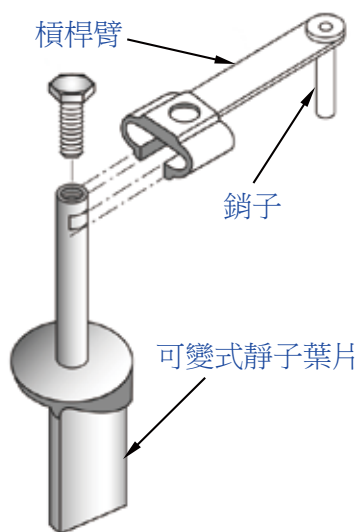
應力腐蝕裂紋必需在腐蝕表面上有拉伸應力，此拉伸應力可以是外加，也可以是殘餘應力(residual stress)，其中殘餘應力更是問題的所在，因為它是隱藏的，在設計時

常會被忽略。殘餘應力的來源可能來自製程，如：冷作加工時變形不均勻、熱處理後退火冷卻速率不同；或是來自裝配時的緊配(interference fit)，鉚釘、螺栓變形…等。

應力腐蝕裂紋危及飛安的案例，不論是軍機或民航機上均屢見不鮮。1970年前後進入美國空軍服役的F-5型戰鬥機，因前機身上縱樑使用材料為對應力腐蝕甚為敏感的7075-T6鋁合金，以致在服役相當時間後發生了應力腐蝕裂紋，美國空軍不得不在1990年代中期進行全機隊結構返廠修改，更換改變熱處理而提昇抗腐蝕能力的7075-T73新製上縱樑。我國空軍的F-5E/F型機隊，後來也因為同樣情況而比照辦理。

1992年2月，荷蘭空軍一架F-16戰機在飛越亨格羅(Hengelo)市住宅區時，因普惠(Pratt & Whitney)F100-PW-220發動機空中解體而墜毀，失事調查時由發動機的殘骸中發現肇因為第5級的可變式靜子葉片(variable stator vane)桿臂(lever arm)上，桿臂尾端的銷子(pin)與桿臂相互接合的位置處因應力腐蝕裂紋而斷裂，造成第5級靜子葉片錯位，第6級轉子壓縮葉片的固定凸耳(blade-retaining lug)在氣流擾動下疲勞破壞，導致此級多片葉片損毀並傷及後面多級葉片，致使發動機空中解體，飛機也因喪失動力而墜毀。

荷蘭空軍立即對全機隊發動機的葉片桿臂銷子進行全面檢查，發現多具發動機上的銷子上也有同樣的應力腐蝕裂紋，發生裂紋的原因是銷子製造時遺留下了殘餘拉伸應力，而銷子使用材料又是對應力腐蝕相當敏感的Nitronic 60不銹鋼，因此發生應力腐蝕裂



荷蘭空軍一架F-16因發動機可變式靜子葉片銷子應力腐蝕裂紋而墜毀。(圖片來源：參考文獻21)

紋也就難以避免。

失事調查結果公布後，F-16戰機原製造廠美國通用動力公司(General Dynamics)立即將銷子使用材料由Nitronic 60改為對應力腐蝕鈍感的Inconel 625鎳基超合金(nickel-base superalloy)，徹底防止同樣事件的再度發生。

民航史上最著名的應力腐蝕裂紋飛安事件，是發生於1988年4月28日的美國阿羅哈(Aloha)航空公司，一架波音737-200機身前段大片上蒙皮於飛行途中脫落，幸賴駕駛員高超的技術而平安落地。飛機失事前，已累積了35,496飛行小時，89,680次起降，是此型飛機全世界起降次數排名第二的飛機，(第一名是同屬阿羅哈航空公司的N73712)。

波音737飛機的經濟服役壽命(economic service life)為20年，51,000飛行小時和75,000次的艙壓週期。根據阿航的飛航記錄，大約每1飛行小時會發生3次的艙壓週期，而波音的經濟壽命預測，是根據每1飛行小時1.5次的艙壓週期，因此阿航的艙壓累積週期數是波音預測的兩倍，而在加艙壓的機身內，艙壓週期是造成疲勞裂紋的最主要因素。失事後的調查結果也發現機身上下蒙皮疊接處多顆鉚釘孔邊，早已各自存在著相當長度的應



美國阿羅哈航空公司一架波音737客機前機身蒙皮因應力腐蝕裂紋而飛脫。(圖片來源：參考文獻9)

力腐蝕裂紋，這些裂紋在失事時的艙壓作用下串連成一條長長的裂紋，毫無阻力地繼續向前延伸，引起艙內失控的洩壓，造成蒙皮撕裂而飛脫。

由於應力腐蝕必需是應力、敏感性合金、以及特定環境下三者同時作用才會產生，故若要防止應力腐蝕，可從改變這些因素來著手。

降低應力：這有好幾種方法，如：增加材料厚度或降低負載都是可行的方式。如果零件因重量關係無法增厚，可在表面上用珠擊或滾壓(surface rolling)的方式加上壓縮殘餘應力(compressive residual stress)。

改變環境：抹去結構表面上沉積的水氣、污物、清潔劑殘痕…等，都是很有有效的預防措施。

更換材料：這是最方便的作法，若無法改變應力和環境，這也是唯一的對策，譬如美國空軍在上世紀末時，就把一些老舊飛機中使用7075-T6的結構件，全數改用以新鋁合金7150-T77511製造的新件。不過一般是改用不同熱處理方式後，抗腐蝕能力增強的同型號材料，但若改用它種材料，如：鋁合金改用鋁鋰(aluminum-lithium)合金，鋼改用鈦合金…等，就得一併考量更改材料後全機重心改變、震動模態(vibration mode)變更、與鄰近材料的電位腐蝕…等相關問題。

表面處理：陽極化(anodize)或陰極化(cathodic)表面處理，都會在材料表面形成一保護膜，降低外界的腐蝕作用，但此種處理會降低鋁合金的疲勞強度，且陰極化處理也不能用在高強度鋼材或是對氫脆化(hydrogen

embrittlement)敏感的材料，因為表面陰極化會增加氫侵入的速度，若表面有裂紋，局部處理的效果也不好。

腐蝕防治

噴漆

要防止金屬材料腐蝕的提早發生，除了對不同的腐蝕類型採取相對應的預防措施外，在材料外表面上噴塗防護噴漆(coating)，也是行之多年相當有效的防護方式。軍用飛機的外表噴漆與汽車、建築物外表噴漆截然不同，軍用飛機噴漆除了防護結構及附屬的固定件、接合件避免腐蝕外，還需具備匿蹤的特殊要求，也就是防止敵方發現我機的目視蹤跡、紅外線蹤跡、雷達蹤跡。

為了滿足上述需求，軍用飛機採用了三層式噴漆，最底層是陽極化表面處理，讓鋁合金表面浸潤於硫酸(sulfuric acid)或鉻酸(chromic acid)溶液中，以在鋁合金表面留下薄薄一層，約10到20奈米的氧化鋁。此薄層會有些氣孔，得澆上滾水或開水予以密封及

密實，密封過程中產生的鉻酸鹽(chrome salt)會溶入氧化鋁層內，不但能遏止此層下方鋁合金的氧化，還能改變局部位置的酸鹼值，遏止發生腐蝕反應，進一步防止金屬結構免於腐蝕的侵襲。此種表面處理程序已實施超過50年，用於鋁合金上極其有效。

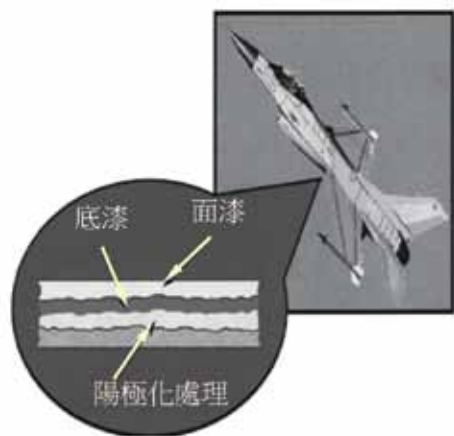
接著是施塗以環氧樹脂(epoxy)或聚亞胺脂(polyurethane)為基材的底漆(primer)，提供材料多一層的腐蝕防護，並提供後續要施塗的面漆(topcoat)附著面。大多數的底漆都含有可強化防止腐蝕性的鉻酸鹽，它為水溶性，可隨著底漆樹脂中小量的水分，流到發生損傷的陽極化表面位置，提供自我修護性(self-healing)的腐蝕防護。

最外層為面漆，它是材料面對腐蝕性環境的第一道防線，但它的首要作用是偽裝，因此通常是低光澤的暗灰色。要讓面漆表現出低光澤，面漆的基材內需有著高百分比的無機顏料，以在材料外表形成粗糙面，散射所反射的光線，降低陽光照射下產生的光眩，避免被肉眼輕易發現。

預防

飛機結構的腐蝕預防，始於飛機開始設計時，終於飛機除役之日，因此當啟動飛機設計時，就得開始規劃它的腐蝕預防。美國空軍任何飛機都要符合軍用規範MIL-F-7179，Type II要求，制定一腐蝕控制計畫(Corrosion Control Program)，規定此機型在設計製造及服役階段，製造廠商及使用單位需完成的各項工作。

在設計製造階段，通常會由美國空軍、武器系統計畫室(System Project Office)、飛



軍用飛機結構外表面的三層式塗層。
(圖片來源：參考文獻4)

機製造商…等單位代表人員，組成一腐蝕防治顧問委員會(Corrosion Prevention Advisory Board)，制定一系列有關材料選用、表面處理、完工處理、噴漆…等有助於防治飛機腐蝕的規範，交由製造商遵循實施。

飛機出廠交付使用單位後，使用單位根據飛機製造廠商制定的腐蝕防治計畫(Corrosion Prevention Plan)，實施各種防腐作為。由於腐蝕是材料性質隨著使用時間歷程而逐漸退化的一種現象，故此階段的實施成效決定了飛機後續服役期間能否免於腐蝕的提早侵襲，也是維持飛安的關鍵。

軍用飛機服役階段典型的腐蝕預防工作主要為定期清潔飛機、發現及清除腐蝕、以及塗抹防腐蝕藥劑，各工作重點說明如下：

● 定期清潔飛機

清潔飛機的主要目的有二：一、清除會導致腐蝕的污染物；二、提供乾淨的表面，以便於檢查腐蝕。

根據澳洲空軍1998年發表的一份研究報告，即便只是以清水清洗，都能將飛機的表面腐蝕現象降低一半，清潔飛機的重要性由此可見。清潔頻率則取決於服役環境，譬如服役於乾燥、無污染地區的飛機，清潔頻率就可較服役於濕熱、近海岸線地區的來得低。沙漠地區雖然很乾燥，但它們古早以前大都是海床，沙子含有大量的鹽分，飛機暴露於這種環境下，會有不期而至的腐蝕隱憂。

有些單位忽略了清潔飛機的複雜程度，將此項工作交給未受過訓練的一般人員，如此所產生的最大問題是這些人員會使用調

配錯誤的清潔溶液，造成飛機極大的傷害。譬如斯多德爾溶劑(Stoddard solution)或是他種溶劑型清潔劑，若調配比例錯誤，或是使用後未完全洗淨，會損害絕大多數的橡膠製品。強鹼性清潔劑會腐蝕鋁合金，蝕刻機體表面防護塗層。

飛機的清潔場所不必很精緻，但必須全年度有效工作。它可以是水泥高地，也可以是現代化裝備的精美室內清洗場，但不論是哪一種，都得符合最基本的清潔設施需求。

若清潔場地內沒有固定式高台，則清潔場地的空間要夠大，讓活動式高台可以完全圍繞著機體移動。不論是活動式或固定式高台，其高度得讓清潔人員輕易接觸飛機全部外表面；若是在夜間清潔飛機，燈光明照要夠亮，飛機表面只能有最少的陰影。

洗淨機體時所需的水量大小，較水壓來得重要。一般而言，若是站在地面的清潔人員，能將清水送到垂直尾的最高點，這樣的



定期清潔飛機可以有效預防腐蝕的提早發生。注意清潔人員身上綁著高空作業安全繩索。(圖片來源：參考文獻12)



水壓就合格。水量則要能讓洗淨機體的水四處自由流動，這大約需要每分鐘提供8加侖的水。

清潔與洗淨飛機所用的水質也很重要，有些地區的水質硬度不適合用來清潔飛機。水質硬度是用來表示水中礦物質(主要是碳酸鈣 CaCO_3)的含量，用於洗淨飛機的水，其總硬度不能超過420ppm。另外，礦物質總含量不能超過500ppm，其中硫酸鹽不能超過107ppm，二氧化碳不能超過50ppm。若水質低於上述標準，需以化學方式處理降低到限制範圍內，才能用來洗淨飛機。

- 機體外部清潔要領

在洗淨飛機時一般常用的工具有：非金屬毛刷、化學菜瓜布、水桶…等，以及安全護具如：面罩、橡膠手套、魚池衣…等。下述為一些工具運用的小秘訣，可協助有效完成機體腐蝕預防，也讓飛機清潔更為簡易。

- 要由接縫或間隙中清除水氣及污塵，乾濕兩用型吸塵器可以勝任。

- 沖洗機體外部時，最好能使用泡沫機，它會在垂直尾翼兩翼面及水平尾翼下翼面處，產生一層吸附的清潔溶液泡沫，讓這些翼面獲得良好的清潔效果，且能在機體表面上停留較久。

- 雖然可用手工方式調配清潔溶液，但可能會發生清潔劑和水的比例錯誤，使用比例混合機可以避免這種失誤。此裝備分別與水源及濃縮式清潔劑槽相連，清潔人員轉動一閥門到所需的比例位置處，啟動機器，就可將比例正確的清潔溶液噴到機體上。

- 除非清潔場所已有內建的儲藏室及幫



較高的飛機結構部位，需有高台讓清潔人員能完全接觸外表面。(圖片來源：參考文獻12)

浦，將清潔用化學物品運送到混合槽內時，要使用氣動式桶型幫浦。

- 根據美國空軍的研究，使用溫度 100°F 到 150°F 的熱水，可增加清潔及洗淨程度，且最多可以省下20%的人力工時。若熱水有限，宜用來混合清潔溶液，機體洗淨時則用冷水。

在清潔機體外部時，毛刷、抹布…等不能放在地上，否則會黏附沙塵而傷害漆面。另外，高壓水柱也不能直接噴向輪軸承、潤滑點、或薄蒙皮蜂巢板。飛機表面洗淨完畢未乾透前，對難以洗淨的區域，以及會被尿水噴濺到的區域，抹上一層薄薄的污垢阻絕劑，如Cee-Bee A6、Eldorado PC-1020或同級品。這些區域典型位置為：引擎排氣路徑、機腹、貨物斜坡道蒙皮。

- 機體內部清潔要領

飛機內部清潔不建議使用水管，因為這會造成電子裝備損壞，而水或清潔溶液若進入並殘留於無法進手的區域，也會造成腐

蝕。最好是用碎布或海綿在機內各處抹上清潔溶液，再用一柔軟的毛刷擦拭，然後以乾淨的碎布或海綿清除污垢及清潔溶液，並以清水洗清多次後，以乾濕兩用吸塵器或乾燥的碎布或海綿，抹除多餘的水分。

另外要注意運送的物品，任何時候當完成腐蝕性貨品，如：水泥、肥料、動物、動物屍體…等的運送後，飛機內部就得徹底清潔。若貨品有向外噴濺，地板下方也得徹底清潔。

- 滅火劑清潔

大多數的滅火劑都具有腐蝕性，且會迅速造成機體結構強烈腐蝕，最有名的代表性產品為溴二氯甲烷(Bromochloromethane)泡沫滅火劑。一些常見的乾粉滅火劑，如碳酸氫鉀(potassium bicarbonate, PKP)，腐蝕性較溫和，但它的殘餘物若暴露於高溫下，就會變成強腐蝕性的氫氧化鉀(potassium hydroxide)。更糟的是這二種滅火劑都會吸附水氣，在飛機表面形成一層腐蝕性的糊狀物。

另外，飛機起火後產生的黑煙裡，含有多種物體燃燒後的碳化合物，它們和乾粉滅

火劑一樣會吸附水氣且具腐蝕性。飛機若已遭滅火劑及黑煙污染，就得儘快清洗。不論使用了哪種滅火劑，儘快把污染區域用清水完成洗淨，以把腐蝕可能性降到最低。

● 發現及清除腐蝕

飛機結構腐蝕可由一些常見的表象而發現，如：接合處漏塗的密封膠、水接觸機體表面後留下的濕潤表面或水痕、碎裂或褪色的噴漆表面…等。發現腐蝕後得予以去除，若不影響飛行安全，可留待稍後再予以處理，但切記腐蝕程度會與日俱進，所以去除腐蝕不能耽擱太久。

去除腐蝕一般有二種方式：化學方式或機械方式。由於環保及安全考量，化學方式較不普遍，它的去除速度較機械方式來得慢，且若化學藥劑流入結構接合處，將會難以清除並造成腐蝕的顧慮，另外還有人員安全及毒性廢棄物處理的問題。

絕大部分的腐蝕都得以機械方式清除，譬如用砂紙或噴砂機(abrasive blasting)。要用哪種工具，取決於金屬材料種類、腐蝕位置、腐蝕型態、進手性、損傷程度…等。

典型的腐蝕清除步驟如下：

1. 保護腐蝕區附近的結構，不會因清除腐蝕而受損。
2. 清除腐蝕區的污垢、油漬…等。
3. 清除腐蝕。為避免產生應力集中位置，腐蝕清除後的表面應為圓盤狀，沒有銳邊。確認所有腐蝕完全清除後，實施表面光滑處理。
4. 以深度計量取並記錄腐蝕清除後的凹面深度。



垂直尾翼及水平尾翼下翼面，以泡沫式清潔劑沖洗效果較好。(圖片來源：參考文獻12)



5. 必要時，以珠擊清除腐蝕區域。

6. 在鋁合金的腐蝕清除面上塗抹轉化塗層(即：陽極化處理)，根據技令實施噴漆前的其他表面處理。

7. 朝上的飛機表面下凹處，施塗防腐蝕密封膠，防止形成水坑。

8. 重新噴漆。

● 防腐蝕藥劑塗抹

- 密封膠

密封膠是保護飛機免於腐蝕的最有效武器，它可隔絕潮濕與水氣。飛機外表面的接合處及縫隙，都會填入密封膠，以防止水氣及化學物品的侵入。除了隔絕環境外，密封膠也用來濕裝固定件或是形成氣動力平滑面。

有些密封膠適用於特殊區域的腐蝕預防，如：高壓區、燃油區、電子裝備區。一般而言，密封膠應該只能用於既定的用途，不過在必要時，某些密封膠也可做為他種密封膠的替代品。目前軍機上常用的密封膠有：

MIL-S-38249：用於防火牆密封，適用溫度-65到400°F，可承受溫度2000°F的火焰達15分鐘。另外有一種以矽為基材，由D Aircraft Products產製的Dapco 2100不需底漆防火牆高溫密封膠，符合規範AMS 3374。

STM 40-114：為聚硫化物(polysulfide)防腐蝕密封膠，內含有鋁顆粒以提供導電性，適用溫度-65到250°F，用於密封需防患腐蝕又需具導電性的接合面，譬如：天線下方結構。此密封膠由PRC-DeSoto International公司產製，商用版名稱為Pro-Seal 872。

MIL-S-8784：為低黏性聚硫化物密封膠，用於活動式門板的密封，分為用刷子塗抹的A類(Class A)及可用噴槍噴塗的B類(Class B)，不能用於永久性密封。雖然此密封膠的拉扯強度(peel strength)低，但要施塗此膠時，建議門板上先塗抹Valspar-Garden公司產製的MR225或Plastilease 334脫膠劑，以後要清除此密封膠時會較為簡易。

AMS-S-8802：用於油箱的角落及固定件頭部的聚硫化物密封膠，也可用在飛機外表面，以滿足氣動力平滑的需求，適用溫度-65到250°F，在不得已的情況下，可取代MIL-PRF-81733用於接合面密封及固定件濕裝。

MIL-PRF-81733：分為兩類及四種型態。第一類是以橡膠為基材的聚硫化物密封膠，第二類是以橡膠為基材的聚硫醚(polythioether)密封膠，這兩類都含有防腐蝕劑，主要用在永久式固定件濕裝、永久式搭接結構的接合面密封及修理，適用溫度-65到250°F。第一型用刷子塗抹，第二型用抹刀或用噴槍塗抹，第三型為噴霧式，第四型用於組裝時間較久的情況。

- 密封膠使用須知

任何密封膠都有使用期限，也就是它可維持其膠結強度的儲存及使用時限，要達到最久的使用期限，密封膠需保存於涼爽、乾燥的處所。任何情況下，儲存的環境溫度不能高於80°F，由於全球大部分地區(尤其在夏天時)的環境溫度都高於80°F，因此建議把密封膠儲存於冰箱中。

有些密封膠即使已經過期，仍可偶爾使用，但必須十分謹慎，避免結構組裝完畢

後，才發現密封膠沒有熟化。先調配少量的密封膠並注意它的熟化時間，如果基材平順且未結成塊狀，硬化劑沒有乾硬的情況，熟化時間在規格時間內，此密封膠就依然可用。

調配及使用密封膠時，有三點需要注意：一、當密封膠未能熟化，或熟化時間太久時，表示密封膠催化過度或催化不足，有時可能是密封膠過期了。使用精密度為一克的磅秤，精確量取基材及催化劑，以保證每次都有正確的混合比例。二、調配的密封膠出現大理石紋路時，表示調配比例不正確，紋路處的基材或催化劑將不會熟化。三、塗膠面得非常乾淨，才能有良好的膠結，否則濕氣會藉由毛細現象侵入結構與膠之間的界面，形成腐蝕潛伏。

溫度與濕度會大幅度影響密封膠的熟化，密封膠的典型熟化時間是以溫度77°F及50%相對濕度為標準環境，溫度每上升15°F，熟化時間就減半，故較高的溫度可以縮短密封膠的熟化時間，但不宜超過140°F。施塗密封膠時，確認在它完全熟化前，結構溫度不可低於40°F。

- 防腐蝕劑

防腐蝕劑的型態很多，各有不同的化學及物理性質，傳統的防腐蝕劑分為二大類：排水性(water displacing)及容水性(non-water displacing)，較新的防腐蝕劑則結合了這二類的優點。

排水性防腐蝕劑為類油性藥劑，可排開水分而滲入接合面的空洞處、裂紋、固定件頭部周圍，提供薄薄一層厚約0.025公釐的濕

潤、不揮發防護塗層。它的外觀明亮，但無法提供長時間的防護，對水會大量溢流的區域，防護效果也較差。

容水性防腐蝕劑為油性藥劑，提供長時間的防護，它形成一厚約0.075公釐的防護塗層，小部分形成黏滯性蠟狀，大部分會乾燥成一耐久、強固、不沾黏的塗層，外觀呈現淺的藍、棕、粉紅色，以提供目視辨認是否已施塗此藥劑。容水性防腐蝕劑通常無法順利穿透接合面，因此有時會塗抹在排水性防腐蝕劑的外表面，提供額外的防護。

較新的防腐蝕劑結合了前述二類防腐蝕劑的優點，可如同排水性防腐蝕劑般迅速滲入空洞、裂紋、接合面，排除水氣，且在短時間之後，形成一強固、不沾黏的屏障式塗層。

防腐蝕劑無法長久性保護結構免於腐蝕，必須定期重新塗抹，雖然它們都含有油份，但潤滑性很差，不能用在滑動接合處。另外，液態氧系統或裝備的附近，也不能使用防腐蝕劑，否則可能會引起火災。一般軍用的防腐蝕劑有：

MIL-C-16173：此防腐蝕劑分成5個等級(grade)，從非常黏、蠟狀、到非常稀薄。飛機上常用的是等級3和4，前者為排水性，後者為容水性。

MIL-C-81309：分為二、三型及一、二類，全都是排水性。第一類為大桶裝，第二類為噴霧罐裝。第二型用於金屬結構，第三型為空電等級，可安全地用於電氣接頭或裝備。

MIL-C-85054：在塗抹的表面上形成一



亮麗、乾燥、彈性的薄膜，可用溶劑清除，不可用於緊配的接頭或是運動、滑動的零件上，特別適用於碎裂的漆面，可提供暫時性的防護。

- 防腐蝕劑使用通則

稀薄的排水性防腐蝕劑，如MIL-C-81309或等級3的MIL-C-16173，很容易被水沖洗掉，一般每隔30天就得重新塗抹，以保持防腐蝕性。由於它們很容易被水洗掉，因此不適用於機體外部或是水會溢流的區域。

軟質呈蠟狀的防腐蝕劑，如等級2、4、5的MIL-C-16173，會吸附污塵、殘屑、外物、煙塵…等，不宜用於機體外部、輪艙區、貨物區，否則很可能會在防腐蝕劑的表面形成摩擦傷痕，破壞外觀。不過，這種防腐蝕劑通常具有自我治療的特性，若其表面有局部刮痕或傷痕，可自行流動過去予以修補，因而可提供長時間的防腐蝕保護，特別適用於空氣污染很少的封閉式區域內。

硬殼式薄膜防腐蝕劑，如MIL-C-85054及等級1的MIL-C-16173，提供耐久的屏障式保護膜，便於目視檢查。它們的耐久性不如底漆或面漆，也不含抗紫外線的穩定劑，不宜用於機體的上表面，更不能用來取代機體的噴漆。不過，當噴漆面碎裂時，可用來做漆面修補，此種防腐蝕劑碰到液壓油會變軟，因此不宜用在液壓油可能會滲漏的區域。

結語

由於冷戰結束後世界情勢的改變，加上經濟因素的考量，軍機延長服役年限已是全

球不可避免的趨勢，如何維持這些老舊飛機的飛安，也成為一個嚴肅的課題。老舊飛機皆已經過長時間的服役生涯，影響其飛安的最大因素自然來自疲勞與腐蝕。疲勞是外力長期作用下的結果，因此常發生於服役時間較久的飛機上，比較容易掌握；而腐蝕則是來自材料的天性與環境的交互影響，不但終究無法避免，而且發生時間難以預料。

譬如美國空軍的F-22於2005年才正式服役，但2007年就在全機隊的三分之二飛機上，發現機身進手門板嚴重的腐蝕，位於機身上方的四個門板尤其嚴重。腐蝕發生原因是為了機身匿蹤，各門板間隙間必須填入橡膠材質密封膠，但它與門板間產生了電化學反應。美國空軍為了解決此問題，將門板的使用材料由鋁合金換為鈦合金，不過，這會增加戰機重量和生產成本，更糟糕的是它還會提高F-22的雷達波反射率，影響飛機的匿蹤效果。

自中共進入聯合國後，我國即長期處於艱困的國際環境中，導致空軍的機隊往往未能及時換裝，許多機型在到達服役年限後，仍得繼續服役擔負戰備任務，而機體結構上經常發現的腐蝕常讓飛行員有飛安疑慮，維修人員也有修理無窮無盡的感嘆，其實若能瞭解結構腐蝕的特性，進而採取適當的預防及處置措施，將可以把這些困擾降低到最小的程度。

參考文獻

- 一、"A Survey of Serious Aircraft Accidents Involving Fatigue Fracture," International

- Journal of Fatigue, January 1984
- 二、"Going Gray," Air Force Magazine, February 1998
 - 三、"Effect of Aircraft Washing on the Life of Corrosion Prevention Compounds," University College, Australian Defence Force Academy, 1998
 - 四、"An Advanced Aircraft Coating Capability Requirement for Military Aircraft," The AMPTIAC Newsletter, winter 2001
 - 五、"Preventing Aircraft Corrosion," Service News, Vol. 29, No. 1, 2004, Lockheed Martin
 - 六、"Mechanical Behavior of Materials", William F. Hosford, Cambridge University Press 2005
 - 七、"The cost of corrosion," The Shot Peener, Spring 2006
 - 八、T-37B Teardown Analysis Program Results and Fleet Impact, USAF ASIP Conference, 2007
 - 九、"Error Management," Aerosafety World, February 2009
 - 十、"Materials Science", S. L. Kakani and Amit Kakani, New Age International (P) Ltd., Publishers, 2004
 - 十一、"Corrosion Comes in Different Forms", Power Engineering, Mar 2011
 - 十二、"Wash Rack Keeps F-16s clean," August 8, 2012, 20th Fighter Wing Public Affairs
 - 十三、"DoD and USAF Corrosion Research Overview," Headquarters U.S. Air Force, 20 September 2012
 - 十四、"Impact of Corrosion on Cost and Availability to DoD," Maintenance Symposium, November 14, 2012
 - 十五、"Northrop Grumman (Northrop) T-38 Talon", Jane's Aircraft Upgrades, February 28, 2013
 - 十六、"Exfoliation Corrosion and Pitting Corrosion and Their Role in Fatigue Predictive Modeling: State-of-the-Art Review," International Journal of Aerospace Engineering, 2012
 - 十七、"Standard Terminology and Acronyms Relating to Corrosion," NACE/ASTM G193—12d, NACE International/ASTM International 2013
 - 十八、"Chapter 6: Aircraft Cleaning & Corrosion Control", FAA-8083-30
 - 十九、"Development of Improved Accelerated Corrosion Qualification Test Methodology for Aerospace Materials," Air Force Research Laboratory, 18-20 Nov 2014
 - 二十、"Failure Investigation: Analysis Procedure and Some Notable Aircraft and Aeroengine Service Failures," 2015
 - 廿一、"Stress corrosion cracking in aerospace vehicles," NLR-TP-2010-538, National Aerospace Laboratory NLR
 - 廿二、"Occurrence of Corrosion in Airframes," Aging Aircraft Fleets: Structural and Other Subsystem Aspects, RTO-EN-015, North Atlantic Treaty Organization



Crevice corrosion

廿三、"Threats to Aircraft Structural Safety, Including a Compendium of Selected Structural Accidents / Incidents," USAF ASC-TR-2010-5002, March 2010

廿四、"Design Flaw Puts Fighter Jets in Shop for Repairs," October 21, 2007, The Salt Lake Tribune

廿五、"Ageing Aircraft Management Plan Stage 2 Industry Feedback & Awareness," Australian Government Civil Aviation

Safety Authority

廿六、"Fatigue of Structures and Materials," Kluwer Academic Publishers, 2004

廿七、國防經費微增 林全：軍購可編特別預算，自由時報，105/08/19

廿八、遠東航空103號班機空難，維基百科。

作者簡介

魏楞傑先生，空軍備役中校，現任職於中科院第一研究所助理研究員。



P-51野馬式戰鬥機漫畫版(照片提供：葉大明)