



FOCUS

專題報導

● 作者/Eric Brown and Lauren Paladino ● 譯者/章昌文 ● 審者/黃坤銘

美陸戰隊腐蝕預防之戰

The Marine Corps' War on Corrosion: Prioritizing Maintenance to Prevent Deterioration

取材/2022年5月美國陸戰隊月報(*Marine Corps Gazette*, May/2022)

美陸戰隊裝備腐蝕攸關戰力存續，未來太平洋地區濱海作戰環境嚴苛，如何有效預防腐蝕將是重要課題。

2023年2月1日美陸戰隊濱海作戰團演訓(Marine Littoral Regiment Training Exercise, MLR-TE)期間，第3陸戰師第3陸戰隊濱海團第3濱海防空營汽車運輸技術士官執行定期維保作業。

(Source: USMC/Israel Chincio)





大約25年前，美陸戰隊啟動「腐蝕預防與管制專案」(Corrosion Prevention and Control Program, CPAC Program)，成立宗旨為對抗裝備腐蝕。陸戰隊沒有專屬腐蝕預防或裝備修護資源與程序，再加上多年來不重視單位段預防保養工作，導致地面裝備嚴重腐蝕。實際上，2004年評估發現，前述裝備腐蝕狀況極其普遍，70.6%陸戰隊地面裝備需要野戰段或基地段權責單位執行修護或翻修，方可改善裝備腐蝕情況。

腐蝕本身有多種態樣，諸如螺栓卡死、電子設備失效及砲塔卡死。任務成功植基於裝備妥善，而腐蝕會影響裝備性能，不容小覷。不幸的是，即使裝備腐蝕狀況已有改善，但美陸戰隊依舊為了工程修改提案(Engineering Change Proposal, ECP)與裝備翻修疲於奔命，試圖降低系統故障，減緩腐蝕衝擊。兵力設計(Force Design)有助減少「腐蝕預防與管制專案」所需評估的裝備數量，並避免地面裝備大面積腐蝕。儘管如此，新撥交裝備產生腐蝕，卻造成大面積腐蝕裝備數量增

加，而前述情況也因目前裝備性能需求與籌獲流程而日趨惡化。

根據美國國防部第5000號指令，腐蝕預防與管制在武獲流程初期就已展開。不過，新撥交裝備腐蝕，證實了腐蝕預防與管制並非專案計畫過程中的優先事項。在某些案例中，計畫協調官(Program Manager)並未將腐蝕預防要求納入系統規格，或將腐蝕預防需求納入合約，藉以減低專案成本。此種情況也適用在美陸戰隊共同參與之聯合計畫或美陸軍計畫中，而陸軍和其他軍種與陸戰隊所處之作戰環境不同，且腐蝕預防優序亦有所差異。追根究柢，這些決定導致陸戰隊未考量腐蝕衝擊就斷然撥交地面裝備。前述裝備腐蝕對裝備妥善率與戰備帶來負面影響，大部分會縮短原定裝備壽命，額外接受所費不貲的翻修作業。例如，腐蝕預防與管制計畫曾對撥交不到兩年的裝備進行評估，發現下列問題：

- 緊急制動器失效。
- 發動機快拆門卡死。

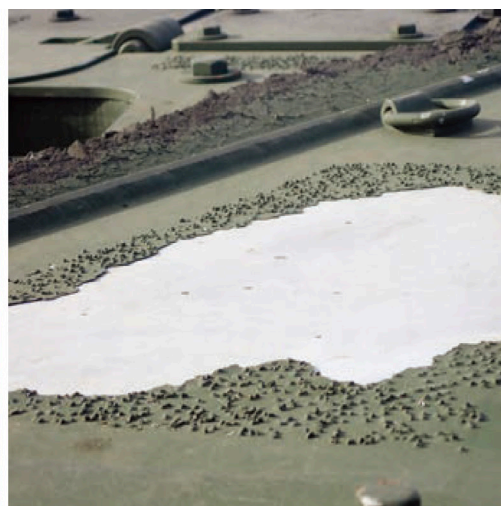


圖1：液壓控制單元與懸吊支架腐蝕、外層油漆脫落，導致內層金屬裸露。(Source: Eric Brown)



圖2：電氣接頭腐蝕與油漆脫落導致裝備腐蝕。(Source: Eric Brown)

- 通信系統損壞。
- 輪轂腐蝕。
- 裝甲破裂。
- 電氣接頭失效。
- 接點腐蝕。
- 從裡到外都可見到裝備腐蝕的孔隙。
- 多處積水、脫漆及未上漆。

圖1及圖2是美陸戰隊部分新型戰鬥系統裝備腐蝕照片。

裝備防腐之戰

「腐蝕預防與管制專案」如何解決是類難題？「腐蝕預防與管制專案」刻正三管齊下著手解決。首先，在武獲初期，腐蝕預防與管制專案成員就偕同武獲計畫協調官，將腐蝕防護需求納入規劃範疇，在裝備量產前，從設計端修正易腐蝕區域。腐蝕預防與管制可在全系統壽期及最關鍵的規格發展設計階段，為整合製作小組(Integrated Product Team)腐蝕工程師提供技術支援，這包括

判定易腐蝕高風險區、決定底漆、面漆及防腐材料等範疇。目前，「腐蝕預防與管制專案」積極參與超過15項武獲專案，協助減輕腐蝕所帶來之衝擊。與裝備計畫協調官合作是專案執行過程的關鍵，以便透過專案設計解決腐蝕預防，或者是在裝備撥交後，透過性能提升減低腐蝕對裝備性能之影響。在設計階段使用不適當或不相容材料，會導致長期腐蝕，破壞裝備性能。對裝備計畫協調官來說，檢視易腐蝕區域的設計、明確律定建材與程序、要求打底漆和面漆、詳列腐蝕預防塗料使用方式及建立腐蝕品質管制措施等作為，都是「腐蝕預防與管制專案」協助減輕裝備腐蝕的寶貴貢獻。在裝備量產過程中，「腐蝕預防與管制專案」協助檢視裝備原始製造廠(Original Equipment Manufacturer, OEM)製程，並就後續性能提升提供建議。裝備撥交前，「腐蝕預防與管制專案」進行系統評估，擬訂預防保養行動計畫，以減低腐蝕衝擊。如果裝備撥交後產生腐蝕問題，「腐蝕預防與管制專案」將執行腐蝕原因



分析，訂定一套供計畫協調官進行後續檢驗與評估的修正行動計畫。

第二個做法是由單位段腐蝕預防著手。承包商支援的腐蝕預防與管制腐蝕勤務隊(Corrosion Service Team)，旨在彌補美陸戰隊現行單位段保養不足之處，試圖降低裝備腐蝕衝擊，減輕艦隊陸戰隊保養負擔與修護成本。腐蝕勤務隊在抗腐蝕戰爭中具有戰術優勢，在2021會計年度，腐蝕勤務隊維修與評估超過6萬722項裝備，省下超過9萬1,000維修工時，使陸戰隊修護人員更能專注本務工作。腐蝕勤務隊運用腐蝕預防塗料、進行裝備表面防腐蝕處理與小面積補漆，以及使用密封劑，延長地面裝備壽期。前述作業全在現地執行，無須撤收裝備即可進行保養工作。在評估階段，腐蝕勤務隊記錄裝備腐蝕狀況，藉以確任裝備現況，策擬未來裝備保養需求。

第三個做法是裝備腐蝕修護作業。「腐蝕預防與管制專案」在四處美陸戰隊遠征軍駐地內均設置腐蝕修護設施(Corrosion Repair Facilities)，該設施執行諸如板金修護、大面積表面處理，以及上底漆與面漆等防腐蝕作業。2021會計年度，1,416項大面積腐蝕裝備在腐蝕修護設施完成除鏽補漆。在地區腐蝕修理設施內進行前述作業，可以省下舟車勞頓，裝備只要在當地即可進行維修，不必運送到基地庫或裝備原始製造廠。只有腐蝕過於嚴重(第五類)且腐蝕修理設施無法維修該項裝備時，才會運送到基地庫、裝備原始製造廠或逕行報廢。目前，陸戰隊有250餘項達第五類腐蝕的裝備囤儲於廠房。

技術優勢

除了上述三種做法，海軍水面作戰中心(Naval Surface Warfare Center)卡迪洛克(Carderock)分部腐蝕預防與管制工程組仍持續研究，以改善腐蝕相關製程、材料及產品的生產。過去十年間，「腐蝕預防與管制專案」研究數種防腐蝕材料、開發全新製程，並實際應用於實體裝備上。最終在未毀損裝備面漆的前提下，美陸戰隊裝備使用年限從原本三年延長到七年有餘。其中一個做法，就是在使用抗化學戰劑塗料(Chemical Agent Resistant Coating, CARC)前，先將含鋅底漆塗抹於金屬表面以預防腐蝕。

裝備加塗前述含鋅底漆後，更能隔絕空氣與水氣，提升裝備腐蝕防護能力。我們曾為所有裝備塗上更厚的傳統抗化學戰劑塗料底漆，事後證明前述額外的二密耳(Mil，等同千分之一英吋)塗層，讓美軍裝備更能抵禦海上環境，減少腐蝕情況。針對人員與堆高機摩擦頻繁的高磨損區域，更曾設置防鏽片和耐磨塗層以減少磨耗，亦可減少地面與甲板摩擦產生的腐蝕。「腐蝕預防與管制專案」簡化所有陸戰隊腐蝕設施抗化學戰劑塗料流程，確保每次作業都能維持相同品質。「腐蝕預防與管制專案」曾研究另一種業界最佳做法——可攜式真空噴爆清潔法(Portable Vacuum Blast)，而這將成為「腐蝕預防與管制專案」後續作業之關鍵。如此一來，腐蝕勤務隊無須腐蝕修理設施或基地庫內常見的大型噴砂房，就能處理裝備表面腐蝕。借助此項技術，「腐蝕預防與管制專案」腐蝕勤務隊腐蝕維修能力將可大幅提升，亦可在單位駐地執行表面腐蝕處理與補漆作

業。此項能力可提升腐蝕勤務隊作業能量、提升單位裝備妥善率、降低裝備維修頻次，以及降低腐蝕修理設施、基地庫與裝備原始製造廠間之運輸成本。儘管不能完全取代腐蝕修理設施，但此項能力將可大幅提升腐蝕維修效率，成為遠征軍腐蝕維修之關鍵。

勝券在握？

2004年，70.6%的美陸戰隊地面裝備，可能在五年內因腐蝕而無法發揮性能。現在裝備腐蝕比率已經下降成27.4%，而且日益減少。儘管該計畫的各項積極作為已大幅改善地面裝備腐蝕情況，但陸戰隊不能因此自滿，延緩裝備腐蝕還有很長一段路要走，包括單位段人員訓練，以及腐蝕勤務隊到駐地維修裝備時，單位裝備操作手與維護人應該全程陪修。這樣一來，單位人員遠赴海外作戰時，就可以將這些技能學以致用。由於資源短缺，過去三年間，「腐蝕預防與管制專案」必須做出艱難抉擇。共有二支腐蝕勤務隊負責陸戰隊預備役裝備預防保養勤務、現況評估與故障維修。2020會計年度，其中一支勤務隊與一處委外機動腐蝕修理設施遭到裁撤，導致裝備原定預防保養週期延長，損壞車輛也無法及時進行維修。未來，中程國防計畫(Future Years Defense Program)將刪減「腐蝕預防與管制專案」相關預算，可能壓縮至少一支陸戰隊遠征軍腐蝕修理設施的相關預算。

由於美陸戰隊戮力執行《2030年兵力設計》(Force Design 2030)，「腐蝕預防與管制專案」推估未來可能會出現更多、更嚴重的裝備腐蝕，

未來作戰環境(Operating Environment)將使陸戰隊裝備曝露在世界上最易腐蝕的作戰環境下。濱海作戰環境面海傍陸，《2030年兵力設計》作戰戰略中的關鍵武器系統(諸如聯合輕型戰術輪車[Joint Light Tactical Vehicle]及兩棲戰鬥車輛[Amphibious Combat Vehicle])將面臨嚴重腐蝕，腐蝕程度恐比現況高出三倍。展望未來，裝備性能評估、計畫管理辦公室與腐蝕勤務隊間密切整合，將是「腐蝕預防與管制專案」關鍵要務。

未能提供預防性腐蝕維修勤務可能造成關鍵硬體與電子系統功能受損，急遽增加單位段以上修護需求，導致平均故障時隔與裝備妥善率下滑。在競爭環境下，地面裝備維護與腐蝕預防，對前進作戰、遠征前進基地作戰，以及濱海作戰中至關重要。基此，美陸戰隊目前緩減腐蝕之現行做法，可能無法滿足當前需求。

「腐蝕預防與管制專案」賡續創新，透過實務驗證協助美陸戰隊應對今後挑戰。前述專案戮力研究太平洋地區嚴苛作戰環境，評估未來艦隊陸戰隊作戰需求、發掘不足之處及持續研擬策進作為，使陸戰隊能夠抗腐蝕成功。

作者簡介

Eric Brown是腐蝕預防與管制專案產品經理。過去15年，辦理美陸戰隊系統指揮部(Marine Corps Systems Command)和專案執行辦公室地面武器系統(Program Executive Office Land Systems)諸多購案。

Lauren Paladino是艾茲麗技術公司(Eizly Technology Corporation)資深工程師，投身美陸戰隊腐蝕預防與管制專案長達15年。

Reprint from *Marine Corps Gazette* with permission.