

可靠度技術手冊

失效物理分析技術



彭鴻霖 編著

中華民國八十六年十一月三日

目 錄

| | |
|------------------------|----|
| 1 前言 | i |
| 2 失效物理分析概述 | 1 |
| 2.1 失效物理分析之起源1 | 1 |
| 2.2 失效物理分析之功能 | 2 |
| 2.3 失效物理分析方法分類 | 3 |
| 3 失效品破損分析 | 3 |
| 3.1 失效品破損分析方法與程序 | 3 |
| 3.2 非破壞檢測 | 4 |
| 3.2.1 目視檢查 | 4 |
| 3.2.2 渦電流檢測 | 5 |
| 3.2.3 磁粉探傷檢測 | 5 |
| 3.2.4 液滲探傷檢測 | 5 |
| 3.2.5 輻射透視檢測 | 5 |
| 3.2.6 超音波檢測 | 6 |
| 3.3 失效品破損分析工具 | 6 |
| 4 失效機理分析 | 6 |
| 4.1 劣化樣式 | 7 |
| 4.2 失效時間數學模型 | 9 |
| 4.2.1 反應速率理論模型 | 9 |
| 4.2.1.1 阿倫尼爾斯模型 | 9 |
| 4.2.1.2 艾林模型 | 10 |
| 4.2.1.3 活化能 | 11 |
| 4.2.2 應力強度模型 | 12 |
| 4.2.3 累積劣化律與麥納律 | 13 |
| 4.2.4 最弱鏈環模型 | 14 |
| 4.2.5 索束模型 | 15 |
| 4.2.6 衝擊模型 | 15 |
| 5 再現試驗 | 16 |

1 前言

失效物理在失效分析中扮演著極為重要的角色，透過傳統物理與化學的思考和方法，了解零件或材料的失效機理，進而據以消除或減少失效發生原因，使零件或材料具備高可靠度的能力，是追求高品質與可靠度的基礎工作。本報告首先從起源、功能與方法分類等方面探討失效物理分析的基本概念，然後討論失效品破損分析方法與程序，其次探討失效機理分析中的劣化樣式與失效數學模型，最後討論再現試驗技術。根據失效物理分析技術的導入，進一步配合失效統計分析與失效工程分析等技術的推動，可以確實掌握失效的根源以及改正對策，經過這些失效分析技術重複循環的運作，持續進行改善與精進，使研製產品的品質與可靠度達到預定的水準。

2 失效物理分析概述

失效物理分析的目的在于以可靠度技術為理論基礎，導入物理與化學的思考和方法，說明構成產品的零件或材料的失效機理，作為消除或減少失效發生的原因的依據，以提昇零件或材料的可靠度能力。

透過失效品破損分析作業的進行，有助於發現對失效敏感的特性參數，瞭解零件、材料的失效數學模型(failure model)及劣化樣式(degradation pattern)等失效機理資訊，進而建立壽命與應力間關係的數學模型，這些成果應用於材料與零組件層次，可以開發潛在性缺陷的檢測技術，規劃實用的篩選與非破壞檢測方法，開發加速壽命試驗(accelerated life test)、過荷試驗(overstress test)等壽命試驗與量測工作。

2.1 失效物理分析之起源

由於物品的失效行為與失效物理(physics of failure)有著極為密切的關係，而失效分析為可靠度技術的核心工作，因此又有人將失效物理稱為可靠度物理(reliability physics)。要瞭解這層關係，有必要先對失效物理的概念進行瞭解。

失效物理此一名詞起源於何時並沒有詳細的記錄可查，大約是在 1950 年代後期。在 1952~1957 年間，也就是美國國防部進行著名的 AGREE 可靠度活動的階段，其中一項重要的工作就是如何保證電子零件的可靠度，因此電子零件的失效現象的研究成為問題討論的焦點。接著貝爾實驗室成立可靠度規範訂定技術研究小組，就電子零件的可靠度特性 - 失效率 - 進行研討，在假設指數分佈的基礎下，提出如何進行抽樣鑑證的構想，接著引出後續許多以零件為對象的美軍標準與規範。由於可靠度的保證需要大量的數據為基礎，大部份太空裝備與軍用物品的研發與製造過程，在合約中都會明白規定執行抽樣鑑證試驗的要求。為了處理這些試驗的分析結果資料，美國在 1959 年成立 IDEP 數據交換計畫(後來改為 GIDEP 計畫)，並且 1962 年成立 FARADA 及在 1968 年成立 RAC 等以失效數據為主的可靠度資料中心。

這些失效數據，利用統計技術進行分析以確認失效率水準的工作，確有其必要性。但在另一方面，對於零件可靠度並不一定有直接的改善效果。當時正是美蘇進行火箭開發與太空競賽的最激烈階段，在執行可靠度試驗之後，美國國防部與產品研製廠商對於發生許多失效的改善對策問題搞得焦頭爛額，使得如何對許多失效品做進一步觀察與分

析，成為大家關注的焦點。同時這個階段正是半導體電子零件大量被採用、問題重重的時代。為了解決這些問題，著名的美國空軍羅姆航空發展中心(Rome Air Development Center, RADC)在 1961 年，與九家主要的電子公司訂定合作研究計畫，針對電子零件失效機理進行探討並尋求改善對策，並將這方面的努力成果加以推廣，相當成功地應用在阿波羅計畫。第二年(也就是 1962 年)三月舉辦第一屆失效物理研討會(Symposium on Failure Physics)，結果得到非常大的回響，此一研討每年定期舉辦持續至今。

事實上，對於失效現象的分析，除了從計量統計分析的觀點計算失效率之外，還要從實體驗證的立場追究失效原因，提出本質上的改善方法，也就是說質與量必須相互配合，才有可能達到要求的品質與可靠度水準。事實上，失效物理一詞所涵蓋的內容不只是狹義的物理學，還應包括材料學、冶金學、金相學、物性論、化學、電氣、機械等固有技術領域，以及環境科學、規劃技術、失效破損分析、統技術分析等學科加以整合而成。因此，廣義的失效物理又可稱為失效科學或保證科學。

失效物理的工作，除了應用於電子零件之外，後來也應用至機械零件，進而應用於太空、航空、船舶及工廠的設備維護合理化工作。這種以維護為基礎的工作技術項目，為了強調其意義，又稱為維護度物理(maintainability physics)。

總而言之，失效物理分析是一種探討失效機理的技術，主要是以找出失效的真正原因為目的。其優點大致可歸納成下列四點：

- (1). 可以消除失效原因，從零件本質上進行改善，而不僅是一種治標的改善方法而已。
- (2). 可以在理論上給與加速壽命試驗、環境篩選試驗等可靠度試驗與評價技術提供合理的理論基礎。
- (3). 可以提供有效的設計資訊。
- (4). 可以在組織上對失效負責部門提供對策回饋資料，並且從產品的生命週期觀點，將研究發展、設計製造、安裝使用、維護支援等各個階段的改善對策，從本質上連結整合在一起。

2.2 失效物理分析之功能

失效物理分析不只是著眼於零件、材料等較低的組合層次，也有助於改善系統或裝備的可靠度、維護度與安全性。壽命與應力的關係可應用於可靠度或安全性設計，失效徵候的事前預知方法不只可應用於壽命試驗的規劃與評估，也可用於建立預防保養或預知保養的制度。失效物理分析結果也有助於 FMEA 或 FTA 的應用，可以協助求得零件、材料組合層次的失效模式與系統失效之關係。

失效物理分析奠定宏觀級可靠度技術的基礎，並且說明微觀失效與宏觀失效的關係，以共通的觀念統一處理電子、電氣、機械系統的可靠度問題。諸如艾林模型、累積劣化律模型的應用為其例，這些模型在電子、電氣、機械系統都成立。

檢討可靠度問題時，可利用失效分佈及其參數的統計分析方法，若結合可靠度數據背後的失效物理現象與失效統計分佈的分析結果，可以獲得許多非常有用的可靠度資

訊，例如從韋伯分佈的參數值可以分析失效的原因或檢討加速壽命試驗的適用範圍，也可研究加速試驗結果與現場壽命數據的關係。由此可知，失效物理分析可以銜接統計分析技術與固有技術。

失效物理分析有很多功能與預期成果，為求這些效果的順利進展，需要應用各種分析技術觀測失效現象，找出失效原因。若是不易找出現場失效的真正原因，則即使是再優秀的技術人員也無法對失效現象進行分析工作而採取正確的對策措施。要瞭解微觀的失效機理需要很多專門技術人員的相互合作，仔細觀察失效現象、依照失效模式加以分類、追求可能的失效機理，所有這些作業的需求支持失效物理分析的發展。

2.3 失效物理分析方法分類

失效物理分析的目的在于研究失效發生的原因、過程與機理，常見的分析方法有(1).直接調查失效本身的方法；(2).觀測失效前的應力狀態或失效的誘因，利用非破壞性檢測技術，調查容易發生失效部位的特性與狀態，然後研究這些項目與實際失效的關係。不論是何種方法，都需要應用檢測與分析產品物理和化學狀態的技術，前述的非破壞性檢測有助於失效物理分析的執行，在此敘述直接調查失效本身的方法。

3 失效品破損分析

失效品破損分析實際上即為材料破損過程之回溯。就材料破損過程而言，首先材料遭受各種破損原因(製造錯誤、設計錯誤或使用錯誤)，開始產生破損，破損進行之步驟即為材料之破損機理，經歷此破損步驟即形成破損之材料物件；而材料破損分析工作正是在回溯或反推此一材料破損過程之因果關係，亦即由破損之結果(破損材料物件)，觀察其破損特徵並作必要之破損、成份分析，再藉此推斷其破損之進行機理，而判定造成材料破損之原因。簡單言之，材料破損分析之基本原理即是經由鑑定「何物」及於「何種狀況」下破損？其次推斷「如何」破損？最後判定「為何」破損？

3.1 失效品破損分析方法與程序

失效物理分析的方法與程序因產品及其零件、材料不同而異，為了檢討微觀的失效機理，需要利用各種物理或化學儀器設備做分析。常用的理化分析儀器有電子顯微鏡、光學顯微鏡、X光繞射分析儀、質量分析儀、光譜分析儀、氣相層析儀、Auger分析儀、放射線分析儀等。例如分析電子管的電子放射壽命不良時，以穿透型電子顯微鏡觀察氧化物陰極表面的活性中心，用X光繞射法鑑定陰極中間層化合物，用固體質量分析儀、原子吸光分析儀、離子微分析儀檢測出陰極材料中的不純物，管內異物的分析可用X光微分析儀或發光分光分析儀，管內氣體的分析可用回旋質譜儀(omegatron)或濾質器(mass filter)等儀器常用於改善用於產品的壽命品質。

根據前述之失效物理分析基本原理，對於一般材料破損個案可遵循一個原則性的分析步驟。首先以肉眼檢視破損物件之整體外觀及破損部位形態，並勘驗破損物件之存在系統及現場關係，此階段之檢視及勘驗結果應照相存證，並應視需要對破壞前之歷史進行調查，包括：材料製造及加工歷史、使用操作記錄以及現場人員對破損過程之描述。

其次對破損面進行觀察，亦即利用放大鏡、光學顯微鏡、電子顯微鏡等工具觀察破損面之形態及特徵，並照相存證。觀察應先針對原始破損面，並於已確定完成原始破損面觀察工作及已充分照相存證之後，始可將行原始破損面之雜物、碎片及鏽蝕等清理，進一步觀察此清理後破損面之形態及特徵。

在許多較單純或經常性之破損個案，或者對於一個經驗極為豐富之材料破損分析人員，往往由破損形態之觀察及破損特徵之歸納即可判定其破損機理，並尋找出破損之肇因；然而，對一些較複雜之個案，破損面之觀察仍不足以作為判定破損機理之證據，此時常須在借助破損成份分析及其他相關檢測，其中破損成份分析一般以破損面成份分析(表面分析、次表面分析)為主，由此可確認形成破損之化學機理(例如：偏析、析出或各種腐蝕及氧化反應)以及導致破損之化學因子(例如：偏析元素、析出物或腐蝕及氧化物質)；在少數情況，須對材料本體成份進行分析，以確認材料之選用有無錯誤，以及材料之製程及後處理有無缺失，針對環境因素所造成之材料破損，則常須分析環境中之可能破壞因子(例如：曝露於大氣或化學環境中材料之腐蝕主要決定於環境中之鹽物、硫份、硝酸及其他懸浮化學物質)。

如果經由破損面觀察及破損成份分析仍無法確認破損之機理時，可再輔以其他相關檢測技術，此包括：金相檢測(晶粒尺寸、熱處理組織、微結構變化等)、機械性質檢測(硬度、強度、衝擊值及破壞韌性等)、非破壞性檢測(材料表面及內部之破損裂紋及其他與破損有關之材料缺陷)、應力分析(包括使用時之負荷大小與分佈狀況，以及製造加工過程所殘留之內應力，此處之應力分析亦包括理論之應力計算及實驗之應力量測)、模擬測試(包括受力狀況之靜態與動態模擬以及環境之模擬)。

綜合破損面觀察、破損成份分析及其他相關檢測所獲得之資料，即可推溯破損之進展過程，亦即推斷破損之機理(機械力破損、化學力破損、高溫破損及此三大類破損下細分之各種破損類型及其進行之機理)，最後根據所推斷之破損機理，判定破損之肇因導源於材料製造加工錯誤？設計錯誤？亦或操作使用之錯誤？並由此追究破損之責任及尋求避免破損再度發生之改善措施。

3.2 非破壞檢測

有時為了整體觀察材料表面或內部破壞裂紋及其他缺陷之大小、形狀、位置及方向，須借助各種非破壞性檢驗(NDT)工具，包括：目視檢測(visual test, VT)、渦電流檢測(eddy current test, ET)、磁粉探傷檢測(magnetic particle test, MT)、液滲檢測(penetration test, PT)、輻射透視檢測(radiographic test, RT)、超音波檢測(ultrasonic test, UT)、音洩檢測(acoustic emission, AE)等。

因為非破壞檢測是在完全不傷及裝備與結構物的情況下，對於材料及熔接部位的表面與內部作檢測，根據所得到的數據進行評估，是獲得可靠度資訊極為重要的檢測方法。

3.2.1 目視檢查

目視檢查(visual test, VT)包含了以肉眼、內視鏡、電視、放大鏡等來測試，主要的共同特徵為都是以眼睛為探知器或計測器，然後再根據光的影像或色差來探知異常部位，

進而判斷是否有缺點的存在。目視檢查具有將表面缺陷以定量的方式加予掌握的特殊優點。但是相反的，可以檢測出來的也僅是表面缺陷而已，而且測試結果很容易受到測試時的環境條件及測試人員的眼睛機能的影響。

3.2.2 渦電流檢測

渦電流檢測(eddy current test, ET)乃是在有導電性的待測體中加上交流磁場，待測體會感應產生渦電流，檢測待測體是否存在缺陷的一種檢測方法。假使待測體中存在著缺陷，則在該部位的渦電流會產生變化，利用檢測出來的變化曲線，可以測定出缺陷。根據渦電流可以獲得缺陷的資訊，但是對於缺陷的形狀及尺寸資料的定量測定，則有困難。由於待測體的材料及形狀變化會直接影響到測試的結果，因此 ET 比較適合於材質均一、形狀簡單的待測體。另外，由於測試結果可以電的輸出直接獲得，因此容易加以自動化，而且檢測時與待測體採非接觸的方式進行，檢測前適度地加以規劃可以增加測試速度。

3.2.3 磁粉探傷檢測

磁粉探傷檢測(magnetic particle test, MT)乃是對待測體輸入直流電或直接通上磁束，然後散灑磁粉在待測體上，以檢測是否有缺陷存在的檢測方法。假如待測體表面或表面附近有缺陷，則會產生漏洩磁場，將灑上的磁粉吸住，因而顯現出缺陷，然後利用目視檢查的方式觀察顯現在待測體表面的缺陷模樣，根據其形狀來推測缺陷的種類。此種檢測方法對於表面有開口的缺陷，以及雖不是開口但是在表面附近的缺陷相當有效；其缺點為待測體必須是強磁性材料，而且無法獲得有關缺陷深度方面的資訊。

3.2.4 液滲探傷檢測

液滲探傷檢測(penetrate test, PT)是利用液體的浸潤性，檢測待測體表面缺陷的一種檢測方法。首先在表面發生開口缺陷的待測體注入含有顯示作用的液體，然後在表面塗上顯條劑皮膜，將滲入缺陷中的液體吸出形成缺陷模樣，以目視檢查此一皮膜的方式來觀察表面缺陷。PT 的適用範圍非常廣，除了對探傷劑的化學成份會發生作用以及無吸水性或吸濕性的待測體之外，其缺點也是僅限於在表面上有開口缺陷的待測體，而且透過顯像劑皮膜來顯示，容易發生失真現象。不過，若運用得當，則可顯現出缺陷的尺寸、形狀等資料。

3.2.5 輻射透視檢測

輻射線透視檢測(radiograph test, RT)乃是利用 X、伽瑪或中子等射線來照射待測體，以檢測缺陷的方法。當放射性射線穿透待測體後，若內部有缺陷，就會顯現在底片上，然後以目視或電子儀器來檢測缺陷的資訊。由於檢測時所使用的是具有放射性的物質，因此在進行測試時要注意工作人員保護問題，避免遭受到放射性傷害。由於檢測時放射線的照射與底片的安置，因此這種檢測方法僅限於兩邊有空間的待測體，因此適用的對象有限。但是根據缺陷的投影資料，可以測得缺陷的種類、尺寸等，因此比較上是屬於定量的檢測方法，不過仍然無法獲得深度方面的信息。

3.2.6 超音波檢測

超音波檢測(ultrasonic test, UT)乃是一種將 500 kHz 到 10 MHz 的超音波傳入待測體(uut)中，來自待測體內部所存在的缺陷會產生反射波，利用感知器將量測得的信號顯示在示波器(crt)上，根據信號的位置與高度即可獲得缺陷的位置與大略大小等資訊。由於 UT 只是以回音的指示來掌握缺陷，無法知道缺陷的形狀，因此要分辨缺陷的種類相當困難。另外，超音波信號常常會受到有缺陷材料以外的其他材料性質的影響，引起超音波信號散亂或減弱的現象，進而使雜訊比(SN)下降，使信號研判困難。目前的技術開發已致力於此類缺陷的排除，甚至於以影像畫面來顯現缺陷，未來可望能夠以定量的方式來評估缺陷。

3.3 失效品破損分析工具

「工欲善其事，必先利其器」是大家都很熟悉的道理，對於材料破損分析工作，由前述「破損分析原理」與「破損分析程序」的說明，很明顯的可以看出：正確而有效的使用各種破損分析工具，是破損分析成功的最基本條件。由於「材料破損分析」主要由兩方面著手：(1).破損形態觀察(fracto-graphy)，(2).破損成份分析(fracture chemistry)，有關破損分析工具亦可由這兩方面加以說明。

破損形態觀察可分為(1).宏觀破損形態(放大倍率小於 15 倍)，(2).微觀破損形態(放大倍率小於 2,000 倍)，(3).電子束觀察破損形態(放大倍率小於 200,000 倍)，針對這些觀察所使用之工具包括一般常用的低倍率放大鏡、光學顯微鏡(LM)、掃描式電子顯微鏡(SEM)及穿透式電子顯微鏡(TEM)。

破壞成份分析則是利用一些「表面分析」工具，例如：歐傑光譜儀(AES)、光電子化學分析儀(ESCA)、二次離子質譜儀(SIMS)及離子散射光譜儀(ISS)；以及一些「次表面分析」工具，例如：電子微探分析儀(EPMA)、X 射線螢光分析儀(XRF)、X 射線繞射儀(XRD)及拉塞福背向散射儀(RBS)，近年來，雷射的應用，更使得雷射拉曼光譜儀(LRS)成為一極具潛力之破壞成份分析工具，比起以上各種分析儀器，雷射拉曼光譜儀是唯一能進行臨場(in-site)直接分析之工具。

4 失效機理分析

失效物理分析主要是從物理化學的觀點，討論物品固有的強度對於外來應力的影響過程，進而建立兩者之間的關係。就固定任務產品而言，其所受的應力並不會隨時間而變化。一般而言，材料或物品的強度由一些特性所決定，這些特性會隨時間而劣化，其劣化趨勢因物品不同而異，隨時間的增加，物品強度逐漸減弱，當應力超過強度時即發生失效。但是這種失效的機理(mechanism)相當複雜，需要仔細觀察失效現象，依照特定的失效模式加以分類，然後追究失效機理，依據這些失效物理分析的結果，探討應力與產品特性參數之時間變化(劣化樣式)的關係，以及應力與失效模式或失效機理的關係，並且建立適切的失效模型，此即失效物理的方法，這些工作需要應用固態物理或材料科學等物理化學研究的成果。

4.1 劣化樣式

一般物品的特性可用一些參數 μ (如電阻值、洩漏電流、雜訊強度等)來表示，亦即物品的特性為參數的函數， $\xi = g(\mu)$ 。一般而言，特性參數會隨時間而變化，因此，物品特性也會隨時間而劣化。假設在 t 時間的特性參數為 $\mu = \mu(t)$ ，得到物品特性的時間關係式：

$$\xi = g(\mu) = f(t) \quad (1)$$

此一劣化反應趨勢稱為劣化樣式。

例如：氧化、腐蝕之類的劣化機理，特性反應速率不會隨時間而變化，亦即

$$\frac{dg(\mu)}{dt} = k \quad (2)$$

上式對時間 t 積分之後，得：

$$(g_0 - g(\mu)) = kt \quad (3)$$

式中 g_0 為初期值。

其它像蒸發之類失效機理，基體物質的濃度與反應速率成正比，其關係為：

$$\ln\left(\frac{\mu_0}{\mu}\right) = kt \quad (4)$$

而擴散之類的失效機理，基體物質的濃度梯度與反應速率成正比，其關係為：

$$(\mu_0 - \mu) = k\sqrt{t} \quad (5)$$

根據實驗證實，許多物品的劣化樣式可以用下列線性式表示：

$$f(t) = kt \quad (6)$$

式中 k 為反應速率係數，與物品所遭受到的應力項目與水準有關。

假設物品失效時的特性參數值為 μ_F ，則當 μ 變成 μ_F 時所累積的時間 L 即為物品的壽命，亦即：

$$g(\mu_F) = kL \quad (7)$$

由上式可知，只要知道反應速率係數 k 與應力的關係，即可求得壽命與應力的關係。另外， $g(\mu)$ 只是 μ 的函數，因此，特性參數隨時間的劣化趨勢也是掌握物品劣化性質必備的資訊。典型的劣化樣式(degradation pattern)如圖 1 所示。

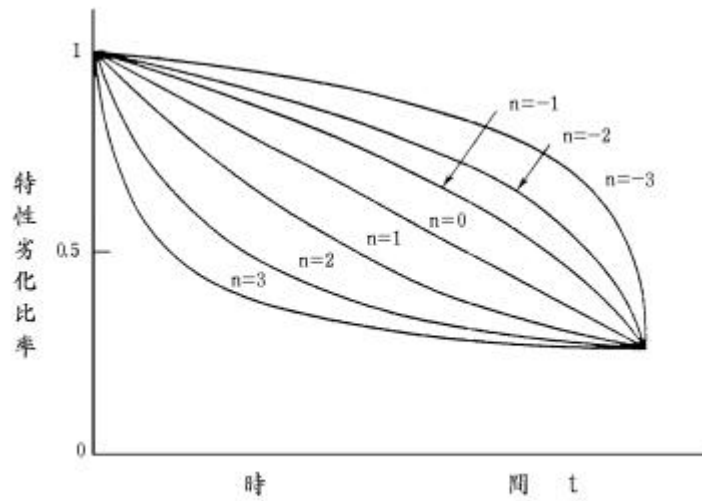


圖 1: 典型的劣化樣式曲線

表 1 為部份電子零件的失效機理與劣化樣式之案例，可見線性劣化樣式適用於描述很多零件的劣化失效現象。

表 1: 電子零件失效機理與劣化樣式、應力之關係

| 電子零件 | 特性參數 | 失效機理 | 劣化樣式 | 應力依存性 | |
|-----------|-------------|----------|---|---------------------------------------|--------------|
| | | | | 溫度, T | 電壓, V |
| 薄膜電阻 | 電阻值, R | 氧化 | $R = kt$ | $\exp\left(-\frac{E_a}{k_b T}\right)$ | |
| | | | $R = k\sqrt{t}$ | $\exp\left(-\frac{E_a}{k_b T}\right)$ | |
| 複合電阻 | 電阻值, R | 氧化 | $R = k\sqrt{t}$ | $\exp\left(-\frac{E_a}{k_b T}\right)$ | |
| 二極體 | 逆向電流, I_g | 表面離子移動 | $I_g = k\left[1 - \exp\left(-\frac{t}{t_0}\right)\right]$ | $\exp\left(-\frac{E_a}{k_b T}\right)$ | KV |
| | 接面電容, C | 離子擴散 | $C = C_0 + A\sqrt{t}$ | $\exp\left(-\frac{E_a}{k_b T}\right)$ | $\exp(-B/V)$ |
| 電晶體 | 逆向電流, I_g | 不純物擴散 | $I_g = kt$ | $\exp\left(-\frac{E_a}{k_b T}\right)$ | |
| | 飽和電壓, V | 金屬擴散 | $V = V_0 + k\sqrt{t}$ | $\exp\left(-\frac{E_a}{k_b T}\right)$ | |
| 薄膜場效應積體電路 | 閘值電壓, V_g | 蒸發 | $V_g = V_{g\infty} - (V_{g\infty} - V_{g0}) e^{-kt}$ | $\exp\left(-\frac{E_a}{k_b T}\right)$ | |
| 電子管 | 相互電導, g_m | 生成中間層化合物 | $g_m = g_{m0} e^{-kt}$ | $\exp\left(-\frac{E_a}{k_b T}\right)$ | |
| | 電子放射, I | 活性物質蒸發 | $I = I_0 e^{-kt}$ | $\exp\left(-\frac{E_a}{k_b T}\right)$ | |

4.2 失效時間數學模型

人們很早就開始研究物品失效時間或壽命與應力的關係，並將其研究成果應用於加速壽命試驗，其中以經驗和實驗求得者居多，但也有從理論的立場檢討各種失效數學模型者，反應速率理論模型即為其中在實際應用上最廣泛的典型代表。

為瞭解失效的脈絡，建立失效機理的數學模型是很有用的，失效模型的作成有根據現象論掌握失效的宏觀方法，和以原子、分子論掌握失效的微觀方法，代表性的失效數學模型概要說明如后。

4.2.1 反應速率理論模型

有些物品的失效模式，是由於某些關鍵零件或材料發生了蒸發、擴散、氧化、吸著、腐蝕、移位、再結晶等失效機理所引致得。這些失效機理起因於零件或材料中的基體物質產生分子、原子等微觀級的化學與物理變化。由於基體物質的反應，使物品的特性參數逐漸劣化，終於超越界限而失效。這種失效現象的發生，取決於基體物質的反應速率，因此稱之為反應速率理論模型(reaction rate theory model)。反應速率理論本是以熱力學和機率理論為基礎來探討掌握物質化學變化的數學模型，阿倫尼爾斯(Arrhenius)與艾林(Eyring)等人利用此一模型來研究上述失效機理中反應速率與應力的依存性，結果推導出關鍵零件、材料劣化反應與電壓、溫度、濕度等應力參數的關係，以及特性參數(如電阻值、洩漏電流、雜訊強度等)的劣化樣式。

4.2.1.1 阿倫尼爾斯模型

在阿倫尼爾斯(Arrhenius)反應速率理論模型，反應速率係數 k 與接面溫度 T 間有如下之關係：

$$k = C_0 \exp\left(-\frac{E_a}{k_b T}\right) = C_0 \exp\left(-\frac{A}{T}\right) \quad (8)$$

或

$$\ln(k) = \ln(C_0) - \frac{A}{T} \quad (9)$$

上式中 $A = \frac{E_a}{k_b}$ ； E_a 為基體物質的反應活化能，隨物質不同而異； k_b 為波茲曼(Boltzmann)常數 $k_b = 8.617 \times 10^{-5} \text{ eV}/^\circ\text{K}$ ； T 為以絕對溫度($^\circ\text{K}$)表示之接面溫度， $T(^{\circ}\text{K}) = T(^{\circ}\text{C}) + 273$ ； C_0 表示比例常數。

由上式可求得壽命 L 與溫度 T 的關係，亦即：

$$\ln(L) = B + \frac{A}{T} \quad (10)$$

其中 $B = \ln[g(\mu_F)] - \ln(C_0)$ ，此即為有名之阿倫尼爾斯關係式，在很多零件、材料都成立，已實驗證明電子管的陰極溫度、半導體的接面溫度、電阻或電容器的表面溫度、馬達的絕緣材料溫度等與壽命之間存在阿倫尼爾斯模型，可應用於這些零件的加速壽命試驗。

假設額定狀態的壽命、反應速率常數及溫度分別為 L_R 、 k_R 及 T_R ，則當阿倫尼爾斯模型成立時的壽命加速係數 A_L 為：

$$A_L = \frac{L_R}{L} = \frac{k}{k_R} = \exp\left[-A\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_R}\right)\right] \quad (11)$$

同樣，假設失效率為 λ ，失效率加速係數為 A_λ ，則下述關係式恒成立：

$$\ln(\lambda) = B - \frac{A}{T} \quad (11)$$

$$A_\lambda = \frac{\lambda}{\lambda_R} = \exp\left[-A\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_R}\right)\right] \quad (12)$$

4.2.1.2 艾林模型

艾林模型(Eyring model)是由艾林先生根據阿倫尼爾斯的反應速率理論加以一般化而發展出來的模型，艾林模型考慮溫度以外的濕度、電壓、機械應力等應力的效應，其反應速率係數 k 與各項應力之關係為：

$$k = C \left(\frac{k_b T}{h}\right) \exp\left[f(S)\left(c + \frac{d}{T}\right)\right] \exp\left(-\frac{E_a}{k_b T}\right) \quad (13)$$

式中 k_b 為波茲曼常數(Boltzmann constant)、 h 為蒲朗克常數(Planck constant)、 S 為溫度 T 以外的應力， $f(S)$ 為 S 的函數， E_a 為活化能， C 、 c 及 d 為常數。

假設 $f(S) = \ln(S)$ ， $\left(c + \frac{d}{T}\right) = n$ ，則上式可簡化為：

$$k = CS^n \left(\frac{k_b T}{h}\right) \exp\left(-\frac{E_a}{k_b T}\right) \quad (14a)$$

$$k \approx C_0 S^n \exp\left(-\frac{E_a}{k_b T}\right) \quad (14b)$$

因而，壽命 L 和加速係數 A_L 與應力之間的關係分別為：

$$\ln(L) = B - n \ln(S) + \frac{A}{T} \quad (15)$$

$$A_L = \left(\frac{S}{S_R}\right)^n \exp\left[-A\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_R}\right)\right] \quad (16)$$

當溫度一定時，壽命與應力的 n 次方成反比。此外，燈泡、液晶顯示元件、電容器、電氣機器的絕緣材料的壽命與電壓的關係，樹脂封裝半導體或液晶顯示元件的壽命與濕度的關係，機械材料反覆應力(S)與疲勞壽命(N)之間的 S - N 曲線關係，也都適用艾林模型。

艾林模型也可應用於複合應力的加速壽命試驗，半導體元件的導線腐蝕容易發生在高溫高濕條件下，空氣中的水份凝結後附著在晶圓上與不純物作用，引起電化學反應而造成導線腐蝕，其壽命可以下示艾林模型表示：

$$L = C_1 B V^{-n} \exp\left(-\frac{E_a}{k_b T}\right) \exp(-\alpha RH) \quad (17)$$

式中 T 為溫度， RH 為相對濕度， V 為電壓， E_a 為反應的活化能， C_1 、 B 、及 n 為常數。

4.2.1.3 活化能

活化能在反應速率理論模型中扮演著極為重要的角色，其值依物質的反應特性而定。

根據實驗資料，鋁(Al)本身的擴散反應，其活化能為 1.4 eV；矽本身穴孔的擴散反應，其活化能為 4.8 eV；鋁的離子電子轉移反應，其活化能為 0.48~0.84 eV，薄膜的粒子越大，活化能值越大；金(Au)與鋁(Al)金屬化合物的活化能則介於 0.87 eV 與 1.1 eV 之間。

活化能一般是選取相當的試件，在不同溫度下執行加速壽命試驗，所獲得的數據經過迴歸分析，可以得到壽命與溫度的關係，根據此一關係即可推算活化能，各種常用電子技術、材料、與零件之活化能值彙整如表 2 所示。

表 2: 各種技術材料與零件之活化能

| Technology, Material or Part | Ea | Technology, Material or Part | Ea |
|--|------|--|------|
| TTL, ASTTL, CML, HTTL, FTTL, DTL, ECL, ALSTTL | 0.40 | F, LTTL, STTL | 0.45 |
| BiCMOS, LSTTL | 0.50 | III, I ³ L, ISL | 0.60 |
| Digital Gate/Logic Arrays, Programmable Logic Arrays | 0.40 | Floating Gate Prorammmable Logic Arrays | 0.35 |
| Digital MOS, Digital Gate Logic Arrays, VHSIC CMOS, | 0.35 | Linear (Bipolar & MOS), Linear Gate Logic Arrays | 0.65 |
| Bipolar Microprocessors | 0.40 | MOS Microprocessor | 0.35 |
| MOS ROM, EEPROM, EAPROM, DRAM, SRAM Memories | 0.60 | Bipolar ROM, PROM, SRAM Memories | 0.60 |
| GaAs MMIC active device | 1.50 | GaAs Digital active device | 1.40 |
| Control and Detection Structure of Magnetic Bubble Memories | 0.80 | Memory Storage Area of Magnetic Bubble Memories | 0.55 |
| General Purpose Analog Diode, Switching Diode, Fast Recovery Diode, Power Rectifier Diode, Transient Suppressor(Varistor) | 0.27 | Voltage Regulator, Voltage Reference, Current Regulator | 0.17 |
| Gunn/Bulk Effect Diode, Tunnel and Back (inc. Mixers, Detectors), PIN, Schottky Barrier (inc. Detectors) and Point Contact, Varactor and Step Recovery | 0.18 | Si IMPATT HF Diodes | 0.45 |
| Bipolar Low Frequency Transistors | 0.18 | N-Channel and P-Channel Si FET | 0.17 |
| Unijunction Transistor | 0.21 | Bipolar, Microwave RF Transistor | 0.18 |
| Power, Microwave, RF Bipolar Transistors - Gold Metallization | 0.25 | Power, Microwave, RF Bipolar Transistor - Aluminum Metallization | 0.50 |
| GaAs Low Noise, Driver and Power FETs | 0.39 | High Frequency Si FET | 0.17 |
| Thyristors and SCRs | 0.27 | Photodetectors, Opto-isolators, Emitters | 0.24 |
| Alphanumeric Display | 0.24 | Laser Diodes with Optical Flux Densities | 0.40 |
| Fixed, Film Network Resistors | 0.35 | | |

資料來源：MIL-HDBK-217F, Reliability Prediction of Electronic Equipment, 10 July, 1992

4.2.2 應力強度模型

當物品受到外力機械負載之後，受力經過結構放大，最後在材料產生內部應力。物品所承受的工作應力與物品構成材料的強度，可靠度設計與分析工作即在如何有效地控制應力與強度之間的關係，首先當然必須瞭解負載應力與材料強度的特性。一般而言，無論是應力或是強度都是含有相當程度的不確定性，因此必須以機率函數來加以描述。一般物品失效是發生在需要的應力(L)超過供應的強度(C)時，此即應力強度干涉模型(stress-strength interference model, SSI model)，圖 2 為應力與強度的干涉關係。

考慮強度的分佈 $[C(\mu_C, \sigma_C)]$ 與應力的分佈 $[L(\mu_L, \sigma_L)]$ ，由兩者的重合干涉情形即可求得失效機率：

$$\begin{aligned}
 F &= \Pr(C < L) \\
 &= \int_{-\infty}^{+\infty} f_L(l) \left[\int_{-\infty}^{+\infty} f_C(c) dc \right] dl \\
 &= \int_{-\infty}^{+\infty} f_C(c) \left[\int_C^{+\infty} f_L(l) dl \right] dc
 \end{aligned}$$

事實上，應力 L 與強度 C 均為正值，故上式 $-\infty$ 到 0 的積分部份並不存在，實際的積分範圍為由 0 到 $+\infty$ 。

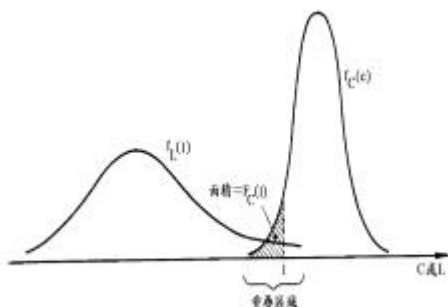


圖 2: 應力與強度干涉關係

機械系統把強度與應力的比值稱為安全係數(safety factor)，一般而言，應力強度干涉模型可用以衡量可靠度、規劃過荷試驗或極限試驗(limit test)。不過有些物品即使在初始時應力與強度之間預估有充分的安全裕度(safety margin)，但是其強度會隨時間增加的經過，逐漸劣化而減弱，終至使強度分佈與應力分佈重合，當應力超過強度時即發生失效，如圖 3 所示，此時需要有關強度劣化樣式的知識。

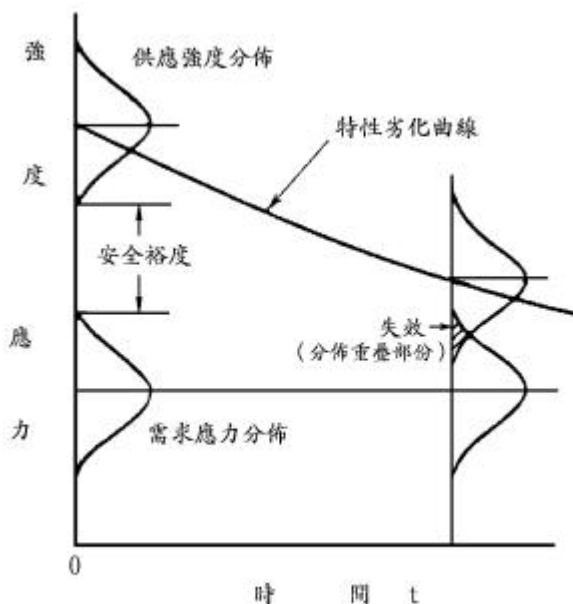


圖 3: 強度與應力隨時間劣化趨勢

4.2.3 累積劣化律與麥納律

此模型的觀念是材料或零件受到應力即為產生相當程度的損傷，當受到一系列的應力作用會產生疲勞損傷或劣化，疲勞損傷或劣化會累積，當超過材料強度的某一門檻值後即發展成為破壞失效，其代表為機械材料疲勞壽命的線性損壞累積律(linear damage

cumulation law)和麥納律(Miner's law)。麥納律說明材料承受應力 S 與破壞循環次數 N 間之關係為 $S^b N = A$ ， A 為材料特性。此一模型不但在機械、電子系統成立，同時也可以應用於尋求階梯應力試驗與固定應力試驗的關係。

很多零件或材料的特性參數 μ 當遭受應力時會隨時間而劣化，劣化程度由零件或材料本身反應速率的劣化情形所控制，其數學模型符合下列關係式：

$$f(\mu) = kt \quad (18)$$

亦即特性 μ 的劣化程度只取決於表示應力效果的反應速率係數 k 與時間 t 之乘積，而與應力的施加法無關。當 kt 值一定時，其劣化量也成一定。因而，像階梯應力試驗之類，其施加應力值隨時間改變，其特性劣化量取決於 kt 的一次累積和 $\sum k_i t_i$ 或積分值 $\int k(t) dt$ ，此稱為累積劣化律(cumulative degradation law)。

$$k_1 t_1 + k_2 t_2 + \dots + k_n t_n = f(\mu_F) \quad (19)$$

對於符合累積劣化律的物品，當其疲勞或劣化的程度累積到超過某一門檻值時，表示壽命已經終了，此一理論適合於一般機械材料的疲勞壽命，但是，若失效機理隨應力而變化，或者出現過渡效應、時效效應等現象時，則累積劣化律就不成立。設定 k_i 之壽命為 L_i ，則：

$$k_1 L_1 = k_2 L_2 = \dots = k_n L_n = f(\mu_F) \quad (20)$$

比較上(19)(20)兩式，可得

$$\frac{t_1}{L_1} + \frac{t_2}{L_2} + \dots + \frac{t_n}{L_n} = D \quad (21)$$

此一關係式稱為線性破壞律或麥納律，一般假設 $D = 1$ 。對於機械或結構材料，假設反覆應力 S_i ($i = 1, 2, \dots, n$) 之循環次數為 n_i ，當 $i=m$ 破壞，則

$$\sum_{i=0}^m \frac{n_i}{N_i} = D \quad (22)$$

式中 N_i 表應力為 S_i 時之壽命循環次數。

4.2.4 最弱鏈環模型

最弱鏈環模型(weakest link model)認為物品的失效發生於構成組件中的最弱處，稱之為最弱鏈環(weakest link)。此觀念與可靠度的串聯模型(series model)相同，最弱鏈環模型的可靠度值(R_S)可由構成組件個別可靠度值(R_i)的乘積計算得，亦即：

$$R_S = \prod_{i=1}^n R_i$$

若每一鏈環的可靠度均相等，亦即 $R_i = R_e$ 時，則：

$$R_S = \prod_{i=1}^n R_i = R_e^n$$

若每一鏈環的失效時間為指數分佈，則可以失效率表示可靠度，其模型為：

$$\lambda_S = \sum_{i=1}^n \lambda_i$$

最弱鏈環模型適用於熱點(熱集中)所致的電子零件劣化、電場集中所致的電介質絕緣破壞、應力集中所致的金屬材料裂紋成長與破壞等失效觀念。

4.2.5 索束模型

多線組成的電線或索束在所有的線都切斷時才切斷，索束模型(bundle model)為依據此觀念所建立的失效模型，認為物品的壽命取決於構成成份或組件中的最強者，相當於系統可靠度模式中的並聯模型(parallel model)或 n 中取 k 複聯模型(k out of n redundancy model)。這種模型也適用於因為施加多次應力，使累積的能量超過某種限度時而發生的失效，並且可用於評價一般傳統材料或複合材料的破壞。

4.2.6 衝擊模型

若物品受到隨機發生的的衝擊負荷應力，而且衝擊負荷發生的時間間隔為指數分佈，則在一定時間內發生的次數為波桑分佈。假設物品承受隨機發生的衝擊負荷在累積 k 次以上時，才會發生失效，若單位時間內衝擊負荷的發生機率為 λ ，則失效機率為：

$$F = P_f = 1 - \sum_{r=0}^{k-1} \frac{(\lambda t)^r e^{-\lambda t}}{r!}$$

將上式對時間 t 微分，即可得到失效時間或壽命的機率密度函數：

$$f(t) = \frac{\lambda}{(k-1)!} (\lambda t)^{k-1} e^{-\lambda t}$$

此為伽瑪分佈(gamma distribution)，其中 λ 為尺度參數、 k 為形狀參數。

5 再現試驗

再現試驗乃是以假設的失效現象與機理為基礎，使失效現象再現的一連串試驗活動。在研發階段，對於一些原因不明的失效現象與機理，進行各種現場調查或失效品的調查等失效分析工作，明確地掌握其失效過程和條件，以便採取適當的對策。在這失效分析過程中，當失效機理確定後，將進行一些試驗工作，藉以為進一步瞭解及確認失效的過程與條件。

執行再現試驗需要實驗設備、方法與組織活動等三種要素，由於持續研究與知識的累積，目前的再現試驗技術已有很大的進步。要使再現試驗成功達到週期的目標，此項活動必須有全員參與的組織配合，亦即包括從設計、製造、試驗、檢驗、品管等各部門，甚至於材料或零件供應商在內，透過組織全體的分工合作，才能在最短時間內達到最大的效果。

再現試驗的主要目的是迅速地找出失效原因，採取對策及防止失效再發生，因此必須應用迅速而確實有效的方法。

事前調查與分析工作的準備對再現試驗規劃是很重要的，因此要充分蒐集資訊、進行現場調查、失效品解析，經過過濾後確定可能要因，假設可能失效機理。這些準備工作的好壞，影響試驗結果的成果甚重。