



iNEMI FoS具經濟效益/迅速/簡易 爬行腐蝕驗證效率大增

李易展

近年來由於人工智慧(AI)、大數據、5G、物聯網(IoT)與邊緣運算的廣泛應用，隨著這些題材的發酵，讓雲端資料處理中心硬體設備的可靠性能力越來越受到重視。而在全球日趨嚴重的空氣污染威脅下，無論是在室內或是室外的空氣品質也都將會直接或間接地影響雲端資料處理中心電子設備的使用壽命。

一般來說，這些電子產品易受到環境中的腐蝕性氣體、水分、汙染物和懸浮微粒的影響，讓敏感性電子元件與印刷電路板產生爬行腐蝕(Creep Corrosion)的失效現象，嚴重恐導致設備電氣短路故障的風險。然而，傳統爬行腐蝕驗證方法「混合流動氣體(Mixed Flowing Gas, MFG)」腐蝕試驗成本昂貴，並非能所有產業鏈的客戶所接受並採用。

針對此一挑戰，國際電子生產商聯盟(International Electronics Manufacturing Initiative, iNEMI)於2018年8月特別針對爬行腐蝕的驗證發表了一份白皮書(圖1)，而電子產品驗證測試實驗室宜特科技與國際系統大廠也共同剖析造成爬行腐蝕的關鍵因子，並研究開發出符合經濟效益、簡便迅速地驗證電子產品

爬行腐蝕失效的測試方法「iNEMI硫磺蒸氣(Flower of Sulfur, FoS)腐蝕試驗，期能協助產業鏈客戶針對爬行腐蝕的失效問題進行預防措施並找出因應之對策。

iNEMI
WHITE PAPER
A Cost-Effective & Convenient Approach to Creep Corrosion Testing
AUGUST 2018

PROJECT LEADERS
Chair: Pradeep Singh, IBM Corporation
Co-Chair: Simon-Lee, One Electronic Materials

PROJECT PARTICIPANTS
Larry Palmer, IBM Corporation
Brahm Rao and Jeffrey Lee, LSI
Integrated Service Technology
Yasuo Sudo and Hiroaki Ueda, Denso (Japan)
United Corporation
Kunfeng Tang, The Dow Chemical Company
Chen Xu, Intel

PROJECT MANAGER
Wenqiang Li, IBM

圖1 國際電子生產商聯盟(International Electronics Manufacturing Initiative, iNEMI)的爬行腐蝕驗證白皮書(White Paper_iNEMI FoS Test)



圖2 導線架封裝元件的爬行腐蝕(受限於導線架鍍層與封裝材料氣密性)

表1 一般常見的金屬腐蝕失效模式與關鍵因子的比較

Corrosion Mode	Sulfur Corrosion	Sulfur Corrosion Creep Corrosion	Dendrite	Conductive Anodic Filament (CAF)
Corrosion Path	Chemical Corrosion		Electrochemical Migration (ECM)	
Structure	Cu/Ag	Cu	Cu/Ag/Pb	Cu
Corrosive Product	Cu ₂ S/Ag ₂ S	Cu ₂ S	Pure Metal	Cu Oxide/hydroxide
Electrical Failure	Short/Open	Short	Short	Short
Humidity/Moisture	No	Not Needed	Yes	Yes
Electrical Bias	No	No	Yes	Yes
Corrosive Gaseous	Yes	Yes (and O ₂ , O ₃)	No	No
Contamination	No	Yes	Yes	No

Feature Photo

- 圖1 宜特 Dr. Gert Wapf, Siemens
- 圖2 宜特 Jerry Shinde, Ph.D. Sanyo Columbus Operations
- 圖3 宜特 Wilson, Martin Standish, Proceedings of EuroCor 2014
- 圖4 宜特 Dekker-Hil, Halogen-Free PCB Reliability Test and Failure Analysis. <http://www.delve.nl/en/voor-Item-251.html>

爬行腐蝕常見於PCB/導線架封裝

爬行腐蝕是屬於硫化腐蝕(Sulfur Corrosion)其中一種的失效機理，典型的案例可由印刷電路板(PCB)與導線架封裝(Leadframe Packages)(圖2)元件最為常見。由於裸露的金屬銅接觸到環境中硫化物的腐蝕性氣體進行反應生成硫化亞銅(Cu₂S)的腐蝕產物，其腐蝕物沿著電路與阻焊層/封裝材料表面遷移生長的過程，導致相鄰焊盤和電路間的電氣短路失效現象，此一現象稱之為爬行腐蝕的失效模式。

一般在爬行腐蝕的誘發過程中是不需要任何電場作用就會發生的失效機理，因此

其腐蝕產物的遷移與生長並無一定的方向性，而通常要促使爬行腐蝕失效機制的發生須具備以下兩個條件：

- 可發生金屬硫化腐蝕的特徵位置，例如裸露的金屬銅或其所接覆的保護層緻密/氣密性不佳。
- 可誘發爬行機理產生的表面環境，例如環境中含有氯氣、臭氧或清潔度較差的表面以及懸浮微粒的汙染都將觸發爬行機理的發生(表1)。

MFG/FoS硫化腐蝕試驗差異之處

通常MFG腐蝕試驗可控制的試驗參數包括溫度、濕度、腐蝕性氣體的種類、濃度與流速等。除此之外，MFG為一流動式腐蝕反應器，其腐蝕性氣體的來源來自於腐蝕氣體鋼瓶並搭配一定的氣體流速1,000或1,500liter/hour不斷地置換反應器內部的腐蝕性氣體。由於其可控制的試驗參數眾多，架設複雜且能持續地提供新鮮的腐蝕性氣體的特性，因此對於實際終端的環境條件具備較高的模擬能力與試驗的應用性，但卻也同時造成試驗成本較高的問題。

而一般FoS腐蝕試驗可控制的試驗參數只包含溫度與濕度，另考量於FoS為一批式腐蝕反應器，其腐蝕性氣體的來源來自於密閉容器中的硫磺粉受溫度提高所釋放出的硫磺蒸氣(S₈)。由於其可控制的試驗參數較少，架設簡易且為單一硫化物腐蝕性氣體的特性，因此使其具備較低的試驗成本，但卻也同時造成試驗應用性較低的問題。

除此之外，因受限於密閉式的實驗設計，其試驗的腐蝕反應速率容易受到調



試樣品在試驗過程中所產生揮發性有機化合物(Volatile Organic Compounds, VOC)的影響而降低。若試驗的溫度越高或在測試樣品數量越多的情況下，腐蝕反應速率受到VOC的影響則會越顯著。因此一般傳統的FoS腐蝕試驗大多都被採用來針對不同的物料清單(Bill Of Material, BOM)在同一試驗環境進行抗硫化腐蝕能力的優劣比較。

一般電子產品的硫化腐蝕失效包含了銅腐蝕與銀腐蝕兩種模式，因這兩種金屬為電子產品廣泛使用的金屬材料，然而兩者的失效機理卻大不相同。以實際量測腐蝕反應速率可發現，目前MFG國際規範的試驗條件對金屬銀的腐蝕反應速率皆不高，但FoS的硫化腐蝕試驗條件對金屬銀則具備較高的腐蝕反應特性。

由於不同的硫化物腐蝕性氣體對金屬銅與金屬銀的反應速率不盡相同，因此若要針對電子產品進行完整的硫化腐蝕驗證，MFG與FoS兩種硫化腐蝕的試驗方法是彼此互補的必要存在(表2)。




iNEMI FoS具備四大差異化

宜特科技實驗室發現，一般傳統的ASTM B809 FoS腐蝕試驗是無法驗證電子產品爬行腐蝕失效的問題。由於其只含單一硫化物腐蝕性氣體是無法誘發表面爬行機理的產生，即便是在高溫度的試驗條件下，也只能觀察到腐蝕產物雖有輕微的遷移生長，但卻只局限於金屬表面的區域而不會有任何爬行腐蝕的特徵現象。一般傳統ASTM B809 FoS試驗方法其主要目的是用來評估金屬鍍層的孔隙度，所以絕

表2 MFG與FoS腐蝕試驗方法之比較

Methods	MFG Test	FoS Test
Corrosive Agents Used	H ₂ S, SO ₂ , NO ₂ , Cl ₂	S ₂ (and Cl ₂ in iNEMI FoS)
Test Parameter Monitoring	H ₂ S, NO ₂ , SO ₂ , Cl ₂ , RH, T, air flow rate	RH, T (and air flow rate in iNEMI FoS)
Test Parameter Control	all parameter can be independently controlled and adjusted	T, RH, S concentration can be controlled
Corrosion Products	sulfide, sulfate, chloride, oxide, nitrate	sulfide, oxide (and chloride in iNEMI FoS)
Equipment & Maintenance Cost	high	low
Equipment Setup	complex	simple
Corrosive Gas Flowing	laminar and uniform	non-laminar (and laminar in iNEMI FoS)
Test Chamber Size	large	Moderate (and large in enlarged iNEMI FoS)
Corrosion Reactivity	Ag: low; Cu: high	Ag: high; Cu: high

表3 FoS腐蝕試驗方法之比較

Standards	ASTM B809 FoS	EA-877 FoS	iNEMI FoS
Temperature	50°C	60°C/55°C	50°C
Humidity	82%	-	55%-95%
Corrosive Gas	S ₂	S ₂	S ₂ + Cl ₂
Gas Flowing	X	X	O
Major Mode	Cu ₂ S	Ag ₂ S	Cu ₂ S
Corrosion Mode	Pitting/Creep Corrosion (Limited Metal Area)	Sulfur Corrosion	Creep Corrosion
Feature	 圖3-1 蝕蝕+宜特科技	 圖3-2 蝕蝕+宜特科技	 圖3-3 蝕蝕+宜特科技
Pre-Treatment	X	X	O
Industry	Porosity of Metal Coating	Passive, Switch	PCB/PCBA, IC Leadframe Package

大部分所觀測到腐蝕現象是屬於孔隙腐蝕(Pitting/Pore Corrosion)而非所謂的爬行腐蝕。

iNEMI FoS為符合經濟效益、簡便迅速地驗證電子產品爬行腐蝕失效的測試方法，因此實驗設計有別於傳統的ASTM B809 FoS試驗方法，其的主要差異如以下所示：

- 溫度控制：區分三階段的溫度試驗(低、中、高)，更能有效地呈現各種材料對溫度的敏感性。

- 氣體流速：引用氣體流速來增加試驗樣品與腐蝕性氣體的碰撞頻率，亦能有效地提高腐蝕反應速率並減少試驗週期與條件平衡所需的時間。

- 導入氫氣：由於氫氣的因子使其可誘發腐蝕產物爬行機理的產生，因此可以有效地複製爬行腐蝕失效的現象。

- 試驗前樣品的預處理：藉由樣品的預處理，更能有效地降低VOC對試驗腐蝕反應速率的影響。

除此之外，相較於MFG國際規範的試驗條件中，其氫氣的濃度普遍偏低(≤50ppb)，由於iNEMI FoS試驗條件具備較高濃度的氫氣(≥100ppb)，因此更能有效地驗證電子產品爬行腐蝕失效的問題(表3)。

iNEMI FoS爬行腐蝕失效驗證流程與判定標準

一般採用iNEMI FoS Test來進行電子產品爬行腐蝕失效的驗證，其測試樣品應先在100°C下在流動的氫氣中預烘烤24小時，以除去測試樣品所含大部分的VOC，然後將測試樣品陪同銀與銅的

金屬標準試片放置於一搭配特定治具(硫粉-濕氣-氫氣設計)的iNEMI FoS試驗箱中，其試驗溫度為50°C，氣體流速為20RPM並連續於3個不同相對溫度水平的條件下曝露5天的運行時間，如以下所示：

- 在第1個5天使用MgCl₂飽和鹽溶液，相對溫度為33-40%
- 在第2個5天使用NaNO₂飽和鹽溶液，相對溫度為55-59%
- 在第3個5天使用KCl飽和鹽溶液，相對溫度為75-81%






測試樣品在每1個5天試驗過程後需觀測有無爬行腐蝕的特徵現象並使用光學顯微鏡進行拍照紀錄。除此之外，針對每1個5天試驗過程後銀與銅的金屬標準試片使用庫侖還原(Coulometric Reduction)技術測量其腐蝕產物的厚度，其銀與銅的腐蝕反應速率應分別以Å/day記錄以證實此次試驗的有效性。

在腐蝕試驗結果的判定標準可區分為外觀檢測與功能性/電性量測，一般皆以功能性量測的結果為最終試驗結果的判定依據，但唯有爬行腐蝕的失效試驗，可以直接藉由外觀檢測的結果來進行最終試驗結果的判定，其外觀檢測的判定標準如表4所示。

針對驗證需求，宜特科技提供各種抗硫化測試的服務，並且結合ANSI/ISA-71.04-2013標準在試驗過程中評估此加速試驗在G2或G3環境腐蝕等級的模擬年限；亦可結合實際終端環境的腐蝕程度並採以客製化的實驗設計協助評估產品抗硫化腐蝕的壽命驗證服務。

(本文作者為宜特科技國際工程發展處技術副理)

表4 腐蝕結果外觀檢測判定標準

Ranking	Rank 0	Rank 1	Rank 2	Rank 3	Rank 4
Mode	No Corrosion	Ped/Pipe Corrosion	Light Creep Corrosion (H77 pad)	Light Creep Corrosion (H77 pad)	Heavy Creep Corrosion (Bridge)
Features Photo (photo by NITE PHOT)					
Description	Oxidation or tarnishing by DC	Corrosion limited to pads or holes only, not spread	Corrosion spreading from pads or holes, but not bridging between features	Corrosion spreading from pads or holes, has potential bridging risk between features	Severe corrosion, bridging between features already
Results	Passed	Passed	Passed	Failed	Failed