



國立高雄大學電機工程學系碩士班

碩士論文

含微量鎳或鍺之錫銀銅錫球接點衝球試驗特性研究

A Study of Ball Impact Test Characteristics of Sn-Ag-Cu

Solder Joints Doped with Nickel or Germanium

研究生：張效銓 撰

指導教授：藍文厚 博士

中華民國 98 年 1 月

國立高雄大學研究生學位論文審定書

本校電機工程學系學系碩士班

研究生張效銓 (學號：K0955105) 所提論文

題目：含微量鎳或鍍之錫銀銅錫球接點衝球試驗特性研究

經本委員會審查並舉行口試，符合碩士學位論文標準。

學位考試委員簽章：

(召集人) 賴逸少

賴逸少

劉德興

藍文厚

張明昌

指導教授 藍文厚

系主任/所長 張效銓

含微量鎳或鍺之錫銀銅錫球接點衝球試驗特性研究

指導教授：藍文厚 博士

國立高雄大學電機工程學系

學生：張效銓

國立高雄大學電機工程學系

摘要

本論文之錫球衝擊試驗可量化錫球接點結構在高速剪力荷載下之結構強度與性質，且與上板掉落衝擊可靠度有相當程度的正相關性。本研究即以錫球衝擊試驗針對不同無鉛錫球成份、表面處理與錫球接點結構狀態進行測試，在 500 釐米/秒之衝擊速度，對其所反應之暫態結構響應進行解析，針對實驗組合的抗掉落衝擊能力與性質進行評估，並利用統計軟體，進行顯著性差異檢定，以取得客觀之結果。本研究針對結構破裂模式、接點結構特性與接點組成成分進行討論。本實驗參雜鎳或鍺之錫球，在化錫表面處理與植球後不迴鍍，其接點結構強度與延性皆有顯著之提升，而在接點組成上，鎳改變介金屬化合物之組成，而鍺則強化錫球本身之機械性質。

關鍵字：錫球，衝球試驗，錫球接點結構，介金屬化合物，顯著性差異檢定。

A Study of Ball Impact Test Characteristics of Sn-Ag-Cu Solder Joints Doped with Nickel or Germanium

Advisor: Dr. Wen-How Lan

Institute of Electrical Engineering

National University of Kaohsiung

Student: Hsiao-Chuan Chang

Institute of Electrical Engineering

National University of Kaohsiung

ABSTRACT

The Ball impact test (BIT) itself stands alone as a unique and novel test methodology in characterizing strengths of solder joints structure under a high-speed shearing load with quantification, and is positive correlations with board level drop reliability. In this study, we present BIT responses and analysis obtained at an impact velocity of 500mm/s on package-level solder joints. The different solder composition joints are bonded on substrate pads of either immersion tin or direct solder on pad surface finishes, through multi-reflow for different solder joint situation. The BIT results are applied with significant difference test for objectivity with statistic confirmation. In this study, the BIT results indicate that better reliability can be achieved by adopting Sn-Ag-Cu solder alloys, Immersion Tin substrate pad finish and no additional reflow. Moreover, the addition of Ni or Ge to the solder alloy provides a large improvement; Ni alters the interfacial IMC structure while Ge enhances the mechanical behavior of the bulk solder.

Keywords: solder ball, ball impact test, solder joint structure, IMC, significant difference test.

致謝

首先由衷感謝指導教授藍文厚博士，與老師不時的討論中，老師廣博務實的知識與對學問的嚴謹態度，更使我獲益匪淺，有了老師的指導，使得本論文能夠更加完整而嚴謹。

感謝口試委員藍文厚教授、施明昌教授、劉德騏教授與、賴逸少博士對本論文之指正與建議。

在兩年的日子中，施明昌教授如同本班的大家長，消除了學生間的隔閡，也成為學生反應的管道，並勉勵同學要好好規劃未來。在課堂上，各位老師上課的認真教學，使我得以一窺光電領域的深奧與吸收實務上之經驗，而下課後，同學間的討論或閒聊，讓我在求學中感覺並不孤單，感謝眾位同學的共同砥礪與陪伴。

感謝日月光半導體股份有限公司提供實驗設備與材料，並感謝賴逸少博士，葉昶麟博士以其專業知識與背景，提供本論文相關協助。另外，同事淑華、盈達、金利、宗岳、秉豐、東鴻、孟鎧、燦賢、英志與姝嫻等，有了你們在實驗上或工作上之協助，使我在兩年的過程中能順利度過。

最後，謹以此文獻給我摯愛的雙親。

目錄

中文摘要.....	i
英文摘要.....	ii
致謝.....	iii
目錄.....	iv
圖目錄.....	vii
表目錄.....	ix
第一章 序論.....	1
1-1 前言.....	1
1-1-1 高密度半導體封裝.....	1
1-1-2 環保政策.....	1
1-1-3 錫球接點.....	2
1-1-4 動態荷載可靠度.....	2
1-1-5 衝球試驗.....	3
1-2 研究動機與目的.....	4
1-2-1 破裂模式分析.....	4
1-2-2 結構特性分析.....	4
1-2-3 結構接點成分分析.....	5
1-3 文獻回顧.....	5
1-4 章節提要.....	6
第二章 衝球試驗系統與分析原理.....	10
2-1 電子構裝簡介.....	10
2-1-1 封裝層級範圍的定義.....	10
2-1-2 封裝的目的.....	11

2-2	球柵陣列封裝簡介	12
2-2-1	BGA 之定義	12
2-2-2	BGA 之分類	13
2-2-3	BGA 之優異性	13
2-3	衝球試驗系統介紹	14
2-3-1	衝球試驗發展背景	14
2-3-2	衝球機制之發展	15
2-3-3	衝球試驗之原理	17
2-3-4	破裂模式之定義與分類	19
2-3-5	結構特性分析之方法	20
2-3-6	結構接點成分分析之方法	20
第三章	衝球試驗	29
3-1	實驗規劃	29
3-1-1	錫球成分	29
3-1-2	鐳墊表面處理	29
3-1-3	封裝後與上版後	30
3-2	實驗試片介紹	30
3-3	實驗步驟與流程	31
3-3-1	前置作業	32
3-3-2	衝球試驗	33
3-3-3	數據分析	34
3-3-4	樣品分析	35
第四章	實驗結果與討論	42
4-1	破裂模式之討論	42
4-2	結構特性之討論	43
4-2-1	錫球成分之討論	44

4-2-2	錫墊表面處理之討論.....	45
4-2-3	封裝後與上板後之討論.....	45
4-3	結構接點成分之討論.....	46
第五章	綜合結論以及未來展望.....	62
5-1	綜合結論.....	62
5-2	未來展望及建議事項.....	63
參考文獻	64
附錄	68



圖目錄

圖 1-1：封裝體演進圖[1].....	8
圖 1-2：半導體製造鏈[1].....	8
圖 1-3：JEDEC 掉落衝擊測試示意圖[1].....	9
圖 1-4：低應變率之延性破裂模式[12].....	9
圖 2-1：封裝層級[1]	21
圖 2-2：推球試驗示意圖[1].....	21
圖 2-3：擺錘衝擊示意圖	22
圖 2-4：Dage 高速推球試驗示意圖.....	22
圖 2-5：Dage 高速拉球試驗示意圖.....	23
圖 2-6：Instron 高速衝球試驗示意圖.....	23
圖 2-7：日月光之衝球試驗裝置.....	24
圖 2-8：日月光高速衝球試驗示意圖.....	24
圖 2-9：Sn-37Pb 在 293°K 時之應力應變圖 [1].....	25
圖 2-10：掉落測試與衝球試驗之應變率[1].....	25
圖 2-11：典型衝擊歷程	26
圖 2-12：衝擊曲線與特徵值定義.....	26
圖 2-13：錫球接點結構.....	27
圖 2-14：破裂模式定義與分類.....	27
圖 2-15：實際破裂模式之衝擊曲線.....	28
圖 3-1：試片外觀(FC BGA 24.5x24.5 692L)	37
圖 3-2：植球流程[1]	37
圖 3-3：迴錫爐[1]	38
圖 3-4：衝擊裝置.....	38

圖 3-5：光學顯微鏡[1].....	39
圖 3-6：撞針與撞針校正裝置.....	39
圖 3-7：衝擊重複性測試	40
圖 3-8：衝擊重複性測試之衝擊曲線	40
圖 3-9：衝球試驗機[1].....	41
圖 3-10：高倍顯微鏡[1].....	41
圖 4-1：結構破裂模式之 SEM 圖	49
圖 4-2：結構破裂模式 Er 與 Tr 之量化分析與檢定	50
圖 4-3：全組別之 Er 的量化分析與檢定.....	51
圖 4-4：全組別之 Er 較高群組的量化分析與檢定	52
圖 4-5：全組別之 Er 較低群組的量化分析與檢定	52
圖 4-6：全組別之 Tr 的量化分析與檢定.....	53
圖 4-7：全組別之 Tr 較高群組的量化分析與檢定.....	54
圖 4-8：全組別之 Tr 較低群組的量化分析與檢定.....	54
圖 4-9：全數據之錫球成分 Er 量化分析與檢定	55
圖 4-10：全數據之錫球成分 Er 較高與較低群組的量化分析與檢定.....	56
圖 4-11：全數據之錫球成分之 Tr 量化分析與檢定.....	57
圖 4-12：全數據之錫球成分之 Tr 較高與較低群組的量化分析與檢定	58
圖 4-13：全數據鉚墊表面處理 Er 與 Tr 之量化分析與檢定.....	59
圖 4-14：全數據迴鉚次數 Er 與 Tr 之量化分析與檢定.....	60
圖 4-15：IT 表面處理之 SJS 橫截面[27].....	61
圖 4-16：DSOP 表面處理之 SJS 橫截面[27].....	61

表目錄

表 1-1：RoHS 之六大限用化學物質	7
表 1-2：歐盟各國訂定之罰則[1]	7
表 3-3：實驗組別	35
表 3-4：衝擊重複性測試結果	36
表 3-5：測試條件	36
表 4-6：結構破裂模式分類表	47
表 4-7：結構破裂模式 E_r 與 T_r 值之範圍	47
表 4-8：第 1~10 組實驗統計結果(植球後不迴錚)	48
表 4-9：第 11~20 組實驗統計結果(植球後迴錚 3 次)	48
表 A-1：第 1 組實驗數據與失效模式分類	68
表 A-2：第 2 組實驗數據與失效模式分類	68
表 A-3：第 3 組實驗數據與失效模式分類	69
表 A-4：第 4 組實驗數據與失效模式分類	69
表 A-5：第 5 組實驗數據與失效模式分類	70
表 A-6：第 6 組實驗數據與失效模式分類	70
表 A-7：第 7 組實驗數據與失效模式分類	71
表 A-8：第 8 組實驗數據與失效模式分類	71
表 A-9：第 9 組實驗數據與失效模式分類	72
表 A-10：第 10 組實驗數據與失效模式分類	72
表 A-11：第 11 組實驗數據與失效模式分類	73
表 A-12：第 12 組實驗數據與失效模式分類	73
表 A-13：第 13 組實驗數據與失效模式分類	74
表 A-14：第 14 組實驗數據與失效模式分類	74

表 A- 15：第 15 組實驗數據與失效模式分類.....	75
表 A- 16：第 16 組實驗數據與失效模式分類.....	75
表 A- 17：第 17 組實驗數據與失效模式分類.....	76
表 A- 18：第 18 組實驗數據與失效模式分類.....	76
表 A- 19：第 19 組實驗數據與失效模式分類.....	77
表 A- 20：第 20 組實驗數據與失效模式分類.....	77



第一章 序論

1-1 前言

近年來，電子產品蓬勃發展，日常生活對於電子產品的普及性與依賴程度也越來越高，以手機為例，現在人手一機早已稀鬆平常。基於消費端之需求，電子產品之發展趨勢朝向高密度半導體封裝(處理速度更快、更多功能、體積更小、重量更輕)。

1-1-1 高密度半導體封裝

為達成高密度半導體封裝，在封裝演進上，如圖 1-1所示，由鐳線(wire bond, W/B)製程技術發展出覆晶(flip chip, FC)製程技術，由傳統導線架(lead frame)的形式發展至球柵陣列(ball grid array, BGA)的封裝技術，以及由通孔式(plated through hole, PTH) 上板到表面黏著技術(surface mount technique, SMT)上板，用以提高訊號傳輸速度與密度。再加上多晶片模組 (multi-chip module, MCM) 技術與三次元封裝 (3 dimensional package) 技術，使其達成處理速度更快、更多功能、體積更小，與重量更輕等需求。由此可知，無論是利用 W/B 或是 FC 製程技術所製成之BGA封裝結構將成為未來之主流。

1-1-2 環保政策

由於環境保護之考量，相關環保法規相繼生效，例如：在2006年7月生效的歐盟危害物質限用指令(restriction of hazardous substances directive, RoHS) 規範電子電機產品，對於六大化學物質加以限制如：鉛(Pb)、鎘(Cr)、汞(Hg)、六價鉻(Cr6+)、聚溴聯苯(PBB) 和聚溴二苯醚(PBDE)，如表1-1所示。而且歐盟各個同盟國也依照

RoHS 指令制定各國的環保法規與罰則，如表1-2所示。因此，在封裝材料成份上，勢必禁止有害物質並以環保物質取代。

1-1-3 錫球接點

在BGA封裝結構上，錫球(solder ball)扮演著連接封裝體與印刷電路板(printed circuit board)之角色。封裝體藉由植球製程將錫球植置於封裝體之基板後，經SMT製程與PCB連接。如圖 1-2所示，在整個積體電路(integrated circuit, IC)生產鏈上，半導體封裝是後端製造之關鍵因素。由於產業分工半導體在封製後，便交由印刷電路板組裝公司將封裝體上板。所以，當產品失效在錫球接點，其原因必須盡速釐清，故需有一快速且明確之檢驗工具。

在錫球成份選擇上，錫鉛合金之錫球是業界使用已久之材料。其導電性佳、抗腐蝕、耐疲勞，以及具有相當之強度與延性(ductile)成為業界長期使用之材料。但由於在環境政策決議下，無鉛錫球勢必逐漸取代含鉛錫球，而目前常用之無鉛錫球成分多為錫銀銅。對BGA型式封裝體而言，當錫球迴錫於錫墊時，界面處將產生包含兩者所含之元素並以此組成介金屬化合物(inter-metallic compound, IMC)。這些IMC通常較構成錫球的錫鉛合金硬且脆，在封裝體承受動態荷載時，易於產生脆性(brittle)破裂[2~3]，因而成為主導電子封裝產品可靠度的關鍵因素[3~4]。因此，對於無鉛錫球之導入將對電子封裝產品可靠度產生之影響，必須在動態荷載可靠度方面加以評估。

1-1-4 動態荷載可靠度

在動態荷載可靠度方面，電子封裝產品在其測試上，掉落測試是所須測試的項目，尤其針對可攜式電子封裝產品而言。其中，上板掉落衝擊可靠度測試(Board-Level Drop Reliability Test)，簡稱掉落測試--例如美國電子元件工程聯合會(Joint Electron Device Engineering Council, JEDEC)所協定的掉落測試規範[5~6]

為最主要之測試規範。其測試方式是將待測試封裝體經SMT植置於測試電路板上，再將完成之試片固定在衝擊試驗機台上，然後將衝擊治具升到一定的高度後以自由落體的方式落下，利用衝擊治具撞擊固定的衝擊平台，以達到所要求的應力波形（包含G值、衝擊作用時間，以及速度變化量），如圖 1-3所示，並重複上述動作直到試片失效為止。在測試中紀錄衝擊循環的次數，並在測試後進行偉伯特特徵壽命分析（Characteristic Life）以及判斷其失效模式（Failure Mode）為何。

此類試片之錫球，在基板端與測試板端皆與錐墊接合，在實際測試時難以控制或預測破裂發生於何處接點界面。若是基板端之界面為測試重點而錫球接點卻在測試板端發生破裂，則所得之試驗數據便無法作為可靠度評估之依據[3]。而且此測試方法所得結果與試片結構極為相關，因此僅能驗證單一產品之可靠度，對於不同產品需個別進行測試，以獲得個別產品之可靠度。由於無法量化其接點之強度，故無法以量化之接點強度預測不同結構之其他產品。除此之外，上板試片的製作與試驗非常昂貴且耗時，通常無法滿足電子封裝業界的研發速度與市場壓力。

1-1-5 衝球試驗

在掉落測試所特有之缺點，若以封裝層級（package-level）試片進行試驗即可獲得有效解決。以封裝BGA試片為例，錫球僅植置於基板而未植置於測試板，因此可節省製作測試板之費用與時間。且此類試片之錫球接點僅在基板端的錐墊上，有一接合界面，在實際試驗上較易分析與觀察破裂之發生。因為僅有單一接合界面以及明確之破裂模式，所以在封裝試片上進行測試可以量化錫球接點結構（solder joint structure, SJS）之特性包含SJS之強度與性質，並可作為快速且明確之檢驗方法。

衝球試驗（package-level ball impact test, BIT）—或稱為高速推球試驗（high-speed ball shear test）—即屬其中一種測試方式。此種試驗可量測SJS在高速

剪力荷載下之暫態結構反應，為一獨特新穎的測試技術。且SJS之強度與掉落測試之特徵壽命有相當程度之正相關性[7~9]，可作為動態荷載可靠度之評估依據。

1-2 研究動機與目的

對於電子產品，由於高密度半導體封裝與環保材料之導入，如何快速並量化SJS之強度與性質，以提供動態荷載可靠度之評估與結構性質之研究，已成為目前研究重點。所以本研究將利用衝球試驗，進行相關之測試。

1-2-1 破裂模式分析

推球試驗 (ball shear test) 為電子封裝業界對於SJS所慣用之機械強度測試方法。然而，傳統推球試驗推球速度均在 1(釐米/秒) 以下，導致應變率過低，使破裂模式絕大部分為錫球接點本身之延性破裂[10~12]，如圖 1-4所示。此試驗無法顯現在錳墊界面處IMC脆性破裂之破裂模式，以反映動態可靠度測試之實際情況。因為推球試驗與掉落衝擊測試所導致的錫球接點破裂模式並不相同，所以此兩者所得之可靠度結果應無相關性。

但掉落測試與衝球試驗有相似之破裂模式。對於掉落測試而言，由於其試驗結果僅能呈現破裂模式之分類與分佈，而無法得知何種破裂模式為SJS強度之決定性關鍵。故本實驗將探討破裂模式所代表之SJS強度與性質，並以掃描式掃描式電子顯微鏡(scanning electron microscope, SEM)觀察與取像。

1-2-2 結構特性分析

影響SJS強度與性質的因素包括：錫球成分、錳墊表面處理、迴錳次數等。在迴錳次數上，本實驗將著重於封裝後與上板後之差異。

在成份功能上，錳錫合金摻雜鎳的主要用途為改善植球後的IMC形貌，進而增加其機械強度[20]；而摻雜鋅則主要作為強化錳錫合金機械性質之用[21]。

本實驗將針對錫銀銅為主之錫球，以五種錫球成分、兩種鍍墊表面處理方式以及兩種層級之SJS狀態，利用衝球試驗，探討各實驗變因對於SJS強度與性質之影響。

1-2-3 結構接點成分分析

本研究亦觀察IMC之組成與變化，探討錫銀銅錫球摻雜鎳或鍍之影響對IMC組成與厚度之影響。將測試試片經研磨拋光處理後，進行接點結構橫截面之觀察，利用SEM對其IMC之組成進行觀察並取像，再以能量散射光譜儀(energy dispersive spectrometer, EDS)進行成分標定。

1-3 文獻回顧

由於材料本身之機械性質會隨應變率變化而改變[13]，若欲以推球試驗機制為基礎，發展評估SJS強度之測試系統，且其測試結果與動態可靠度測試具有相關性，則其推球速度應大幅提昇。

以此為基礎發展之錫球高速衝擊測試系統，根據已發表的相關文獻[7,14~18]，已進行相關研發團隊如：(一)日立金屬公司與加州大學洛杉磯分校、(二)美國七家電子公司聯盟與 Dage 精密工業公司、(三)新加坡及澳洲產學界與 Instron 公司，以及(四)日月光半導體製造股份有限公司(以下簡稱日月光)與國科企業公司等，並已有多種錫球衝擊試驗裝置以及相關研究成果。

由於機構設計與資料擷取系統的問題，大部分裝置試驗結果皆可呈現如動態掉落測試中所顯現之脆性斷裂模式，所以大部分衝擊試驗著重於觀察試驗後錫球接點之破裂模式。而對於SJS量化之量測，需有設計良好之錫球衝擊試驗裝置以及足夠之訊號擷取率，才能直接量測動態衝擊力反應[19]。所以，量化之實驗結果在文獻上並不多，尤其針對含微量鎳或鍍之錫銀銅錫球。

由於為一獨特新穎的測試技術，其測試方法也尚未統一，需建立與規範相關的實驗方法。所以，本研究將以日月光所建立之實驗方法以及與美商Instron 公司合作開發之衝球試驗裝置，進行相關實驗。

1-4 章節提要

本文共分五章。第一章為序論，包含前言、研究動機與目的、文獻回顧以及章節提要。第二章為衝球試驗系統與分析原理，包含電子構裝簡介、球柵陣列封裝簡介以及衝球試驗系統介紹。第三章為衝球試驗，包含實驗規劃、實驗試片介紹以及實驗步驟與流程。第四章為實驗結果與討論，包含破裂模式之討論、結構特性之討論以及結構接點成分之討論。第五章為綜合結論以及未來展望，包含綜合結論以及未來展望及建議事項。



表 1-1：RoHS 之六大限用化學物質

限用化學物質	含量
Pb	小於1000 ppm
Cd	小於100 ppm
Cr6+	小於1000 ppm
Hg	小於1000 ppm
PBB	小於1000 ppm
PBDE	小於1000 ppm

表 1-2：歐盟各國訂定之罰則[1]

國名	罰金(EUR)	監禁	備註
奧地利	360~7,270		
比利時	40~400,000	3 天~3 年	
丹麥	沒有限制	最高 2 年	禁止上市
愛沙尼亞	~3,200		
德國	~50000		
希臘	300~3,000	3 年	行政(地方政府):300~3,000 行政(中央政府):3,000~150,000
盧森堡	62~123,950	8 天~6 個月	兩年內再犯，刑罰加倍
馬爾地	500~5,000 MTL	3 年	再犯:750~10,000MTL 或監禁 4 年
葡萄牙	500~44,800		
斯洛伐克	~5,000,000 SKK		
斯洛維尼亞	2,000~83,000		
瑞典	30xSEK30~ 150xSEK1,000	6 個月~6 年	
西班牙	1,202,000	最高 10 年	

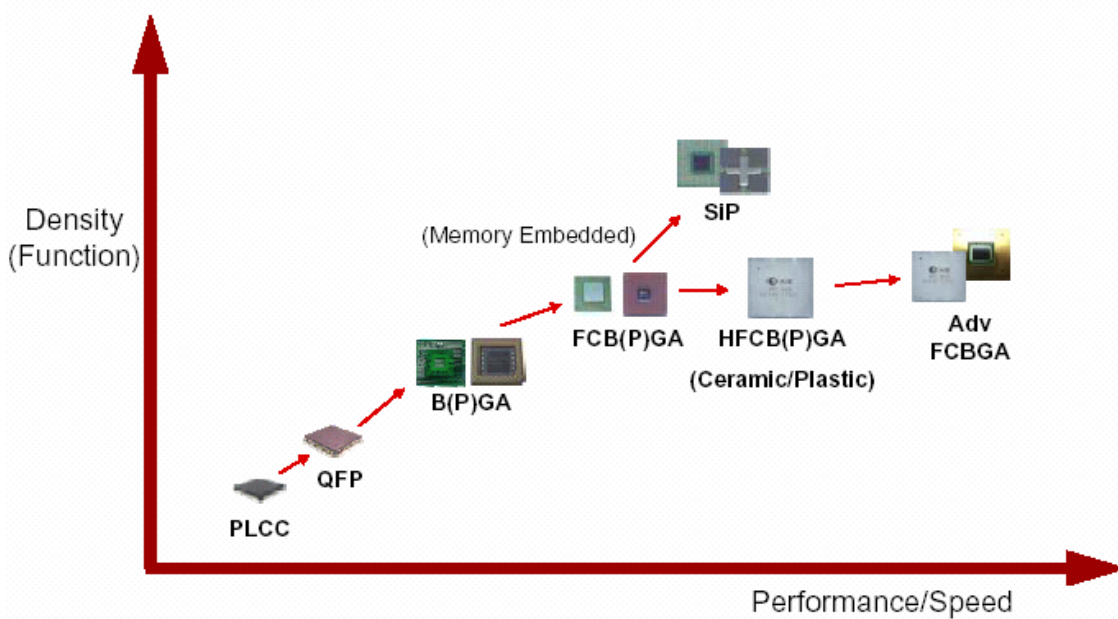


圖 1-1：封裝體演進圖[1]

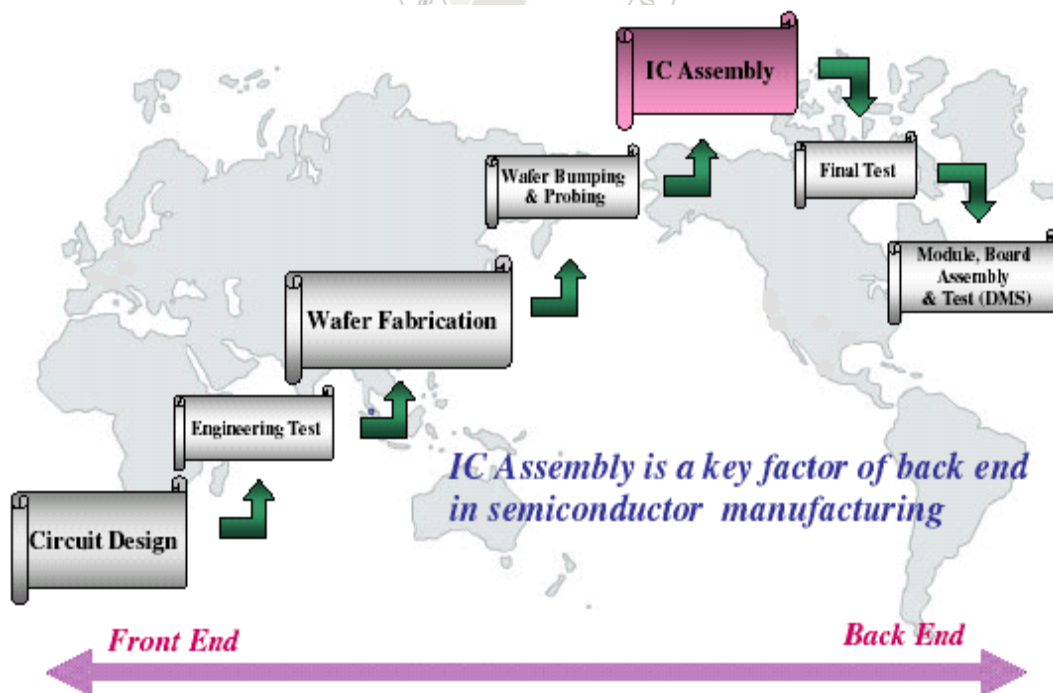


圖 1-2：半導體製造鏈[1]

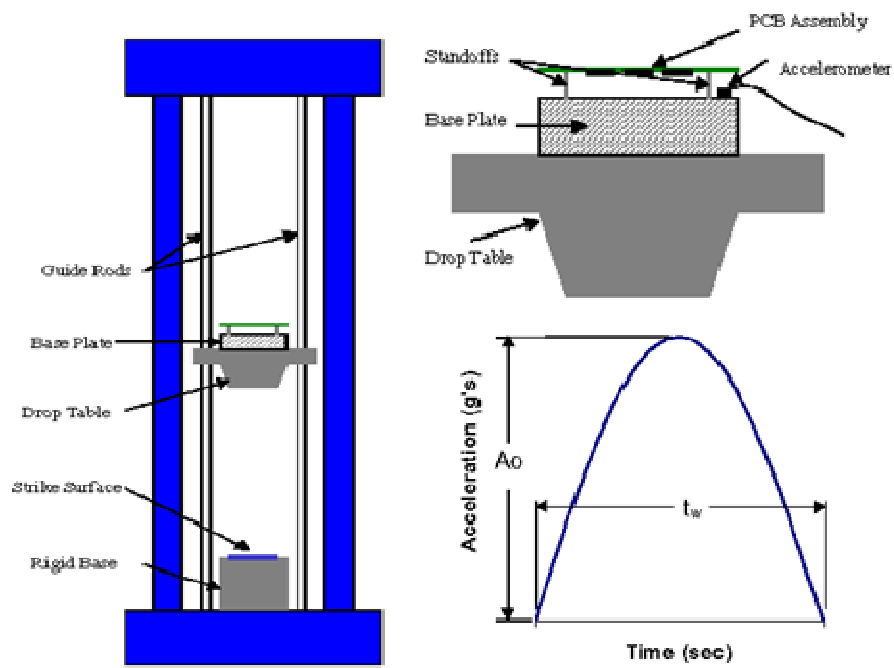


圖 1-3：JEDEC 掉落衝擊測試示意圖[1]

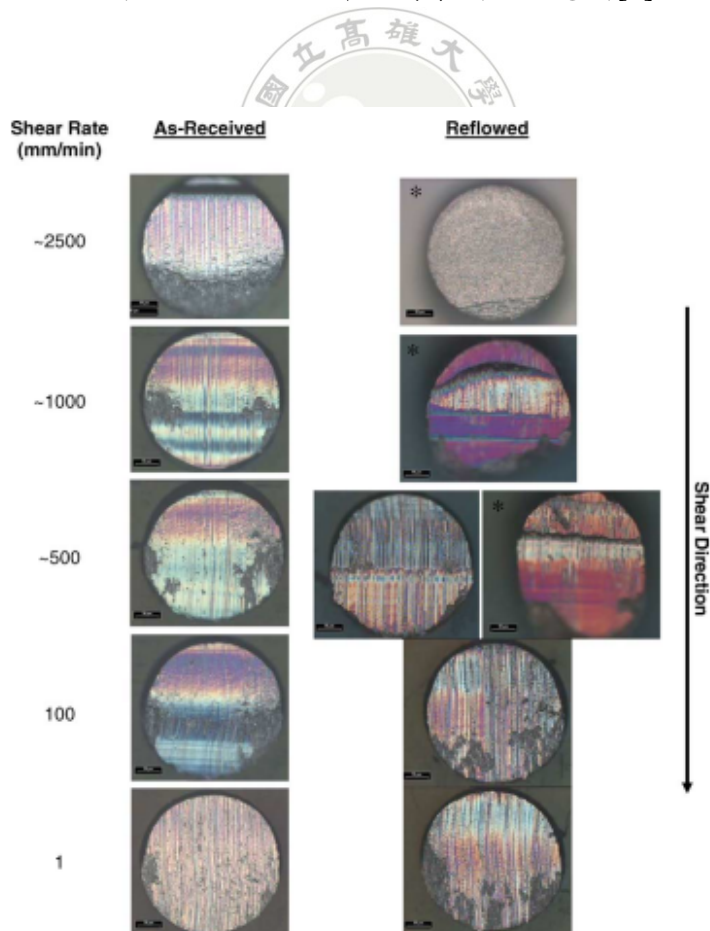


圖 1-4：低應變率之延性破裂模式[12]

第二章 衝球試驗系統與分析原理

本章節主要分為三大部分。一為電子構裝簡介，包含封裝層級範圍的定義以及封裝的目的。二為球柵陣列封裝簡介，包含BGA的定義、BGA之分類以及BGA的優異性。三為衝球試驗系統介紹，包含衝球試驗發展背景、衝球機制之發展、衝球試驗之原理、破裂模式之定義與分類、結構特性分析之方法以及結構接點成分分析之方法。

2-1 電子構裝簡介

電子產品是軟體與硬體的結合，多數硬體內含有IC元件。因為IC元件是由薄膜製程技術，在矽或砷化鎵等晶圓上所製成的故尺寸極為微小，所以結構的強度也很脆弱需藉由封裝保護。而IC封裝也有著許多不同的型態，乃是由產品的電性、熱傳導、可靠度的需求材料、製程技術，及成本價格等因素，來決定應該採用何種材料與製程技術去完成。

2-1-1 封裝層級範圍的定義

封裝是以建立各層級間介面接合（interconnection）為基礎的技術，其製程技術常以五個不同層級（level）區分之，如圖 2-1所示。

(1) 第零層級封裝：又稱晶片層級介面接合。是指IC晶片上的IC電路設計及製造。

(2) 第一層級封裝：又稱為單晶片或多晶片模組。指的是將IC晶片連結於一封裝體內，完成其中的電路連線及密封保護的製程。又常稱為模組（module）或晶片層級封裝（chip-level packages），本文之衝球試驗便屬於此層級之測試。

(3) 第二層級封裝：是指將第一層級完成的元件組合於一電路卡（card）上，例如PCB。依連接方式的不同有分成PTH或SMT。PTH的封裝方式是先在印刷電路板上鑽孔並鍍上一層導電層，再將模組之接腳插入鍍通孔中，然後經波鐸（wave soldering）鐸接而成。SMT則是將模組固定於已塗上錫膏的印刷電路板上，再以迴鐸（reflow）的方式完成連結。由於SMT具有較高的I/O (input/output)密度，整個封裝的體積因而縮小，故逐漸取代了PTH 的地位。本文之掉落測試便屬於此層級之測試。

(4) 第三層級封裝：將數個電路板組合到一主機板（mother board）上使其成為一個次系統的製程。

(5) 第四層級封裝：將數個次系統組合成一完整電子產品的製程。

IC元件可以歸納成朝向多功能、大容量、高速化、高密度以及輕量化等輕、薄、短、小的趨勢發展。傳統的週邊陣列(peripheral array)型態的封裝技術所能提供的功能已經跟不上消費者使用的需求，故新開發的IC封裝技術如：多晶片模組封裝、引線覆蓋晶片（lead-on-chip, LOC）封裝、球柵陣列封裝、覆晶封裝、晶片尺寸（chip scale package, CSP）封裝以及三次元封裝等新的封裝製程技術，已大幅的被業界所採用，以提高IC產品的功能及提供更多的I/O數。

2-1-2 封裝的目的

為防止在取置晶片的過程中因為外力或是環境因素的破裂，避免物理性質的破裂以及化學性質的侵蝕，以確保訊號的傳遞。

整理封裝的目的如下：

(1) 電源傳輸：IC晶片要作動必需有外加電源，經過封裝層內的聯線作業，包含打線接合、捲帶接合（tape automated bonding, TAB）與覆晶接合，以促使IC晶片運作。

(2) 訊號傳遞：IC晶片所產生的訊號或由外界輸入IC的訊號，均需透過封裝層線路的傳送以送達正確的位置。

(3) 散熱功能：藉由封裝體的熱傳設計，提供散熱的途徑並增加IC晶片的散熱能力，如此便可將晶片的熱氣排出，使IC晶片在可工作溫度下通常小於85°C)正常運作。

(4) 保護功能：封裝可將IC晶片密封，防止物理性質的破裂，以及化學性質的侵蝕。

2-2 球柵陣列封裝簡介

早期如需要高I/O數的封裝產品，必須仰賴四方扁平封裝(quad flat pack; QFP)技術，但是需要更進一步提高QFP的I/O數時，便遭遇了困難，這是因為QFP是一種，周邊排列引腳的封裝技術。若要不增加封裝尺寸的大小而增加I/O數，勢必要靠縮小腳距的方式達成，但是如此一來便會面臨了，多腳化聯線技術、微細引腳成型技術、小腳距引腳、電路板銲接技術的克服，以及散熱的問題。為此美國Motorola與日本Citizen公司共同開發了BGA封裝。BGA與傳統單晶片最大的不同處，是採用了基板(substrate)及錫球，取代傳統所使用的導線架。

2-2-1 BGA 之定義

BGA封裝乃是指晶片以打線接合、捲帶接合與覆晶接合的方式與基板連結。訊號傳遞方式是藉由錫球，以面陣列分佈的方式，作為IC元件的I/O端。透過SMT之迴銲作業，將BGA封裝體和下層之電路板作連結。

2-2-2 BGA 之分類

藉由基板所使用的材料不同，可將BGA封裝體作如下分類：

(1) CBGA (ceramic BGA)：是指採用陶瓷基板的BGA封裝體，其優點是耐高溫，而其材料成本較高。

(2) PBGA(plastic BGA)：是指採用有機材料基板，大多使用BT (bismaleimide triazine)基板。其優點是BT 基板價格比陶瓷基板稍微低廉，且電阻較低，但不耐高溫。為最普遍之BGA封裝體，亦是本實驗所用之基板類型。

(3) TBGA (tape BGA)：代表採用薄膜軟性有機材料基板，為可撓式封裝之應用。

(4) MBGA (metal BGA)：是指採用金屬材料之基版，因為I/O數可達1000以上，而且具有低電感，低電容的優良電器特性，但成本較高，故常只用於高傳輸的應用上。

2-2-3 BGA 之優異性

BGA有下列優點：

(1) 小尺寸：由於採用面分佈陣列之錫球界面接合，故有高接合密度以及小腳位面積，加上基材的外部暴露，故有著比QFP封裝形式的封裝體，小30~50%的封裝厚度。

(2) 無引腳：因為BGA採用錫球來代替接腳 (pin) 連接，故能降低因為彎腳，以及對位不準，所造成之產品損失。

(3) 高產能及低成本：由於能與現有的SMT製程相容，且能接受較寬鬆的置放準度，再加上可重複組裝，以及省去導線架從基板到導線架間的接合製程，故能有效的提高產能及降低成本。



(4) 電子特性的改良：因較小的腳位而得到較小的電子路徑，降低了電感、信號延遲。

綜合以上數點，BGA技術與MCM、CSP、FC封裝技術互相結合，便可以進一步的提升封裝密度及產品效能。

2-3 衝球試驗系統介紹

衝球試驗系統為一獨特新穎的測試技術，可評估界面SJS強度與性質，且與動態可靠度測試具有相關性，目前已有產學界投入研發。

2-3-1 衝球試驗發展背景

無鉛錫球之導入，造成電子封裝元件，在動態荷載下的可靠度問題。因環保製程轉換，而成為電子封裝業界之重要課題。對球柵陣列型式封裝體而言，IMC通常較構成錫球的鉛錫合金硬且脆，在封裝體承受動態荷載時，易於產生脆性破裂。目前，針對封裝體錫球接點的動態荷載可靠度測試，諸如掉落衝擊試驗[3~6]，與振動試驗[22]，皆須將封裝體迴錫於測試板，以上板層級試片進行試驗。此類試片的錫球接點，在基板側與測試板側皆與錫墊接合，在實際測試時，難以控制或預測破裂發生於何處界面。若基板側界面為測試重點，而錫球接點卻在測試板側發生破裂，則所得之試驗數據便無法作為可靠度評估之依據。除此之外，上板試片的製作與試驗昂貴且耗時，通常無法滿足電子封裝業界的研發速度與市場壓力。顯而易見的是，前述上板可靠度測試的問題與考量，若以封裝層級試片進行試驗，即可獲得有效紓解。以封裝層級球柵陣列試片為例，錫球僅植於基板而未迴錫於測試板，因此可節省製作測試板的費用與時間，且此類試片錫球接點，僅在基板側錫墊處有一個接合界面，在實際試驗上較易控制破裂的發生。電子封裝業界針對封裝層級試片，其錫球接點的機械強度測試方法，有拉球試驗（ball pull test），

以及推球試驗。拉球試驗可分為冷拔 (cold pull) 與熱拔 (hot pull) 兩種測試方式 [14]。但因錫球接點的尺寸與幾何形狀限制，使拉拔治具設計複雜，且易於造成邊界效應影響結構反應。所以，拉球試驗，通常只限於觀察錫球接點拉拔後的破裂模式。相對而言，推球試驗，如圖 2-2所示，則因測試機構簡易，而廣泛應用於電子封裝業界。

2-3-2 衝球機制之發展

傳統推球試驗推球速度均在1 釐米/秒以下，導致應變率過低，而使破裂模式絕大部分為錫球接點本身延性 (ductile) 斷裂，因此無法重現鐸墊界面處，IMC脆性破裂之破裂模式，以反映動態可靠度測試的實際情況。就直觀而言，因為推球試驗與掉落衝擊測試，所導致的錫球接點破裂模式並不相同，所以此兩者所得之可靠度結果應無相關性。若欲以推球試驗機制為基礎發展，以評估SJS強度與性質，且與動態可靠度測試具有相關性之測試系統，則其推球速度應大幅提昇、具備高取樣率 (sampling rate) 資料擷取系統，以及良好之機構設計應，以避免引發結構共振，而影響衝擊力量測結果。

以推球試驗機制為基礎，發展錫球高速衝擊測試系統，已獲產學界高度重視並投入研發。根據已發表的相關文獻[7,14~18]，已有團隊進行相關研發工作。

整理相關研發團隊及其結果如下：

(1) 日立金屬公司與加州大學洛杉磯分校：利用擺錘衝擊測試 (charpy test) 原理，如圖 2-3所示，製作以錫球接點為待測物之測試系統，亦稱為微衝擊測試 (micro-impact test)。詳細測試系統結構參見 Ou et al. [15]。此系統因無法裝置荷載感應元件，所以無法實際量測衝擊力，而僅能以落錘高度計算衝擊能量，或以加速度量測值反推衝擊力。

(2) 美國電子公司聯盟與 Dage 精密工業公司：改良傳統推球試驗系統，如圖 2-4所示，使其推球速度上限達4(米/秒)，且改換治具後，亦可用以執行高速拉

球試驗，如圖 2-5所示。然而根據其試驗結果[14]，此系統在速度1(米/秒)以上的衝擊力量測尚需改善。

(3) 新加坡及澳洲產學界與 Instron 公司：此衝球試驗系統，如圖 2-6所示，是以電磁與彈力配合之方式，使推球速度上限達1(米/秒)，並提供穩定量化之衝擊起始速度。此系統所量測之衝擊力歷時曲線[23]，明確顯示錫鉛與無鉛錫球接點承受高應變率荷載時，不同的結構反應。

(4) 日月光與國科企業公司：初步於 MTS 858 萬能試驗機上，以治具固定試片，並在驅動機構裝置平頭撞針，以 0.3(米/秒)速度進行衝球試驗。然而由於驅動機構過重，以及資料擷取系統取樣率不足，因此另外發展衝球試驗系統，如圖 2-7所示。此衝球試驗系統中，試片固定於底部治具，以置放於特定高度之衝錘，沿滑軌落下，衝擊撞針施加衝擊力於錫球接點，如圖 2-8所示，並以數位攝影機作為撞針定位之用。衝擊速度可達 3(米/秒)。但由於僅能以落錘高度計算衝擊能量，以及所感應之衝擊，為試片與固定治具之反應，故其精準度不足。

除了測試裝置的發展以外，葉昶麟等[16~17,24~26]亦利用顯式時間積分法 (Explicit Time Integration) 之有限元素分析，結合接觸與侵削 (Eroding) 等數值方法，探討進行衝球試驗時，錫球接點的暫態結構反應與破裂模式。

日月光在開發衝球試驗系統上，驗證衝球試驗之可行性，並發展整個衝球試驗系統，包含實驗步驟流程、結構破裂模式分析、結構特性分析、結構接點成分分析，與有限元素分析模型。

而在測試裝置上，經由上述分析評估，且為求更精準之實驗量測結果，日月光與美商Instron 公司合作，採用電磁與彈力配合之衝球試驗裝置，以提供穩定量化之衝擊起始速度，使量測結果更為精準，本實驗便在此衝球試驗裝置上進行測試。

2-3-3 衝球試驗之原理

相同材料在不同應變率下，其機械性質亦會有所不同。應變率代表單位時間下之應變量與物件受荷載之速率相關，如圖 2-9所示，為Sn-37Pb在293°K時之應力應變圖。在應力應變圖上，當材料受到荷載時，在材料之降伏點前，約成一直線為彈性變形之區間，在降伏點後，為塑性變形之區間，而圖中，應變率由低至高，為 10^{-4} 到 10^{-1} (1/秒)，由圖可知，在相同應變下，應變率愈高應力值愈高，代表應變率愈高機械性質也愈硬。所以，若要呈現與掉落測試相同之破壞現象，則測試方法之應變率必須相近。所以，如圖 2-10所示，衝球試驗以提高衝擊速度之方法達到與掉落測試相近之應變率。

衝球試驗是由撞針高速撞擊錫球，在SJS遭受衝擊時所承受之外力，經由荷載感應元件感應衝擊力並對應時間輸出數值，進而產生衝擊曲線。從SJS遭受衝擊開始，由於結構本身強度的抵抗，所輸出之衝擊力隨時間增加而變大直到結構開始產生破裂，在此時衝擊力達到最大視為衝擊曲線上第一個上升區段。在初始破裂發生後，則會因破裂性質脆性與否而使衝擊力以不同斜率下降，視為衝擊曲線之第一個下降區段，其破裂性質愈是脆性下降斜率愈大。

在衝擊曲線上，理想SJS脆性破裂之衝擊曲線在初始破裂發生後，第一個下降區段所感應之衝擊力應下降為零。但由於SJS上之防銲層以及結構震盪之影響，而造成第一個下降區段之落點，會有所不同。如果破裂面有殘錫之現象時，其第一個下降區段落點會大於零。而一般在結構震盪下，第一個下降區段落點則可能會小於零，如圖 2-11所示。由此可知，SJS破裂後之過程十分複雜，所以，我們將擷取在初始破裂發生後，衝擊曲線上第一個上升區段。因為此區段之結束，代表SJS從開始遭受衝擊，到起始破裂產生時之結構行為，並以此定義為SJS之特徵值，其衝擊曲線、特徵值與相關數值之定義如下，如圖 2-12所示：

(1) F_{\max} ：衝擊力峰值，即表示結構所能承受之最大衝擊力，單位為(牛頓)。由於錫球接點受衝擊後的破裂模式，大多為IMC破裂。就IMC破裂而言，錫球接點為混合正向力與剪力之複合受力結果，因此 F_{\max} 與IMC強度成正比。雖然在直觀上 F_{\max} 可以作為SJS強度之指標，但由於SJS特性除與IMC強度相關外，與結構本身的材料性質也有高度相關。Lai et al. [2]已指出，對不同成份之SJS，直接比較 F_{\max} ，並無太大意義。

(2) Tr ：衝擊特徵值，衝擊曲線上升區段之時間，表示SJS之性質，單位為(毫秒)。如衝球試驗系統機構設計良好， V_i 在衝擊過程中變化不大。因此 Tr 與衝擊行程(ur)約成線性正比，亦即 $ur \cong Vi \times Tr$ 。愈大的 ur 或 Tr 表示錫球接點延性愈大。

(3) Ar ：衝擊力上升段曲線下方面積，與衝擊力上升段衝擊能量(Er)成正比，表示錫球接點的韌度(Toughness)，單位為(牛頓*毫秒)。若 V_i 在衝擊過程中變化不大，則存在 $E \cong Ar \times Vi$ 之關係式。

(4) Sr ：衝擊力上升段斜率，單位為(牛頓/毫秒)。若 V_i 在衝擊過程中變化不大，則 Sr 與錫球接點衝擊力上升段結構勁度(SJS Stiffness) K_r 之間存在 $Sr \cong Ki \times Vi$ 之關係式。

此外 V_i 代表衝擊起始速度，單位為(米/秒)。與應變率相關，衝擊速度愈快，應變率愈高，且當撞針質量不變，相同之 V_i ，代表所施予起始衝擊之能量相同。

Er 代表衝擊特徵值，上升區段之衝擊能量，單位為(毫焦耳)。代表SJS之強度，從SJS開始遭受衝擊，到開始斷裂間所需之能量，若 V_i 在衝擊過程中變化不大，則存在 $E \cong Ar \times Vi$ 之關係式。

綜合上述所言，SJS強度與性質之量化結果，是以 Er 與 Tr 作為其衝擊特徵值，其中 Er 作為判斷SJS強度之衝擊特性指標，而 Tr 作為判斷SJS延性之衝擊特性指標。且根據近年來，針對高速衝球試驗之響應特性，與上板掉落衝擊可靠度間的

關聯性研究發現，其衝擊能量相關的物理量 E_r ，可作為評估掉落衝擊可靠度的指標[7~9]。

2-3-4 破裂模式之定義與分類

在製程上，錫球與基板兩種材料，經由迴錫將錫球與基板錫墊結合。如圖 2-13 所示，其SJS包含錫球、IMC、基板錫墊(pad on substrate)與基板。由於只針對SJS從開始遭受衝擊到起始破裂產生時之結構行為，在結構破裂模式判斷上，亦以結構起始破裂產生位置作為依據。也就是說，結構破裂模式是以結構最先產生破裂之性質作為區分。如圖 2-14所示，本實驗之結構破裂模式如下：

(1) Mode I：IMC破裂模式。起始破裂發生在IMC附近。從基板上觀察，並以SEM取像，其破裂起始位置端之斷面相當平整有銀灰色光澤，之後偶有表面不光滑之殘息現象。

(2) Mode C：錫球本身破裂模式。起始破裂發生在錫球本身，其破裂起始位置端為呈現延性光滑切斷現象，其後呈現表面不光滑之剝離現象。

如圖 2-15所示，為同一組實驗條件，在實際測試後，各種破裂模式之衝擊曲線。圖中曲線從受力開始便有抖動之現象，就抖動之頻率觀察，由於抖動頻率相近(約23000赫茲)，與撞針材料之自然頻率相近，故研判此為結構共振所造成。此外，從此圖中可以發現，各種破裂模式之衝擊曲線，在第一個上升區段曲線皆相同，代表相同性質之SJS。由於只著重第一個上升區段，所以不分析 F_{\max} 後之區段。

在Mode I曲線上，其起始破裂發生在IMC，在第一個下降區段上，曲線有顯著急速下降之現象，此為脆性破裂所造成，而殘錫量之多寡則影響第一個下降區段之落點位置與時間。

在Mode C 曲線上，在第一個上升區段上升，直到 F_{\max} 後，在第一個下降區段上，曲線會緩慢下降，此為延性破裂之現象。

2-3-5 結構特性分析之方法

為求數據上有一明確之判斷，將高速衝擊測試之量測數據，以日月光所提供之專業統計分析軟體-JMP，利用JMP統計軟體中之顯著性檢定(P-value)，針對各個實驗組別之數據，進行實驗變因對於SJS強度與性質之統計檢定，以提供客觀之判斷，顯著水準 α (significance level)設為0.05。

由於 Er 作為判斷SJS強度之衝擊特性指標，而 Tr 作為判斷SJS延性之衝擊特性指標。在分析上，為求SJS強度與性質，利用JMP將全組別之數據，以單一變因進行檢定，以判斷其差異性是否明顯，在確定有明顯差異後，代表其變因為一影響因子。為確認其最高與最低之組別，故將其最高與最低之群組，再進一步進行差異性檢定，以確定其最高與最低組別。

2-3-6 結構接點成分分析之方法

本實驗之錫球成份，是以錫銀銅為主之錫球，依摻雜元素分類為：未參雜、參雜鎳以及參雜鍺。為以快速簡易之方式，探討參雜鎳或鍺之影響，故以各摻雜元素之 Er 平均值，選取其較高者，進行SEM與EDS，以探討摻雜元素，對接點組成成分與厚度之影響。

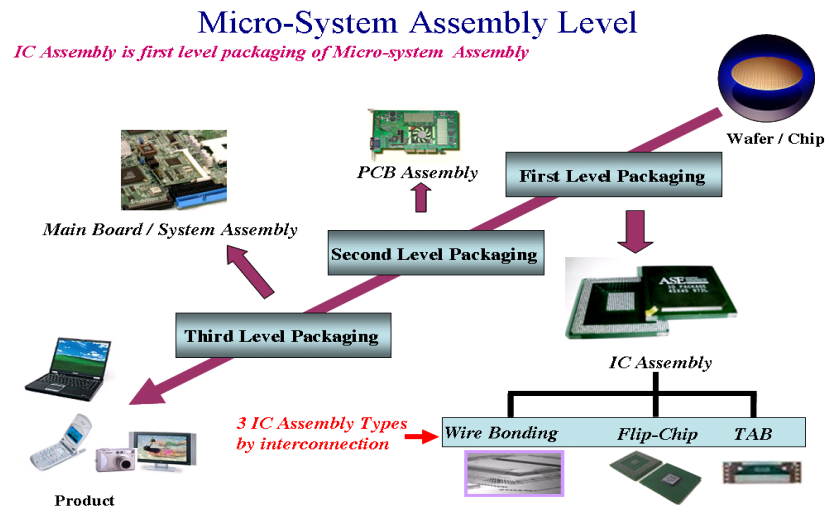


圖 2-1：封裝層級[1]

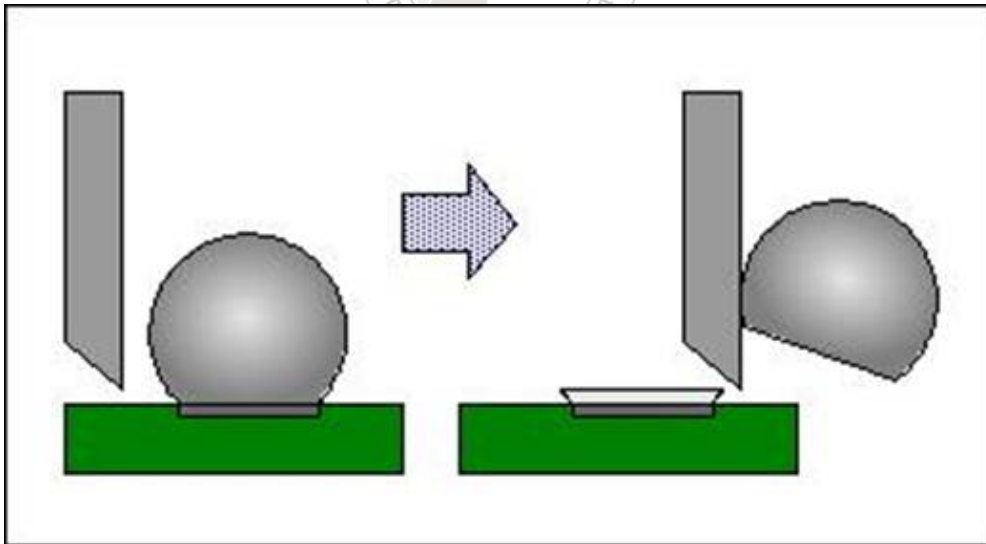


圖 2-2：推球試驗示意圖[1]

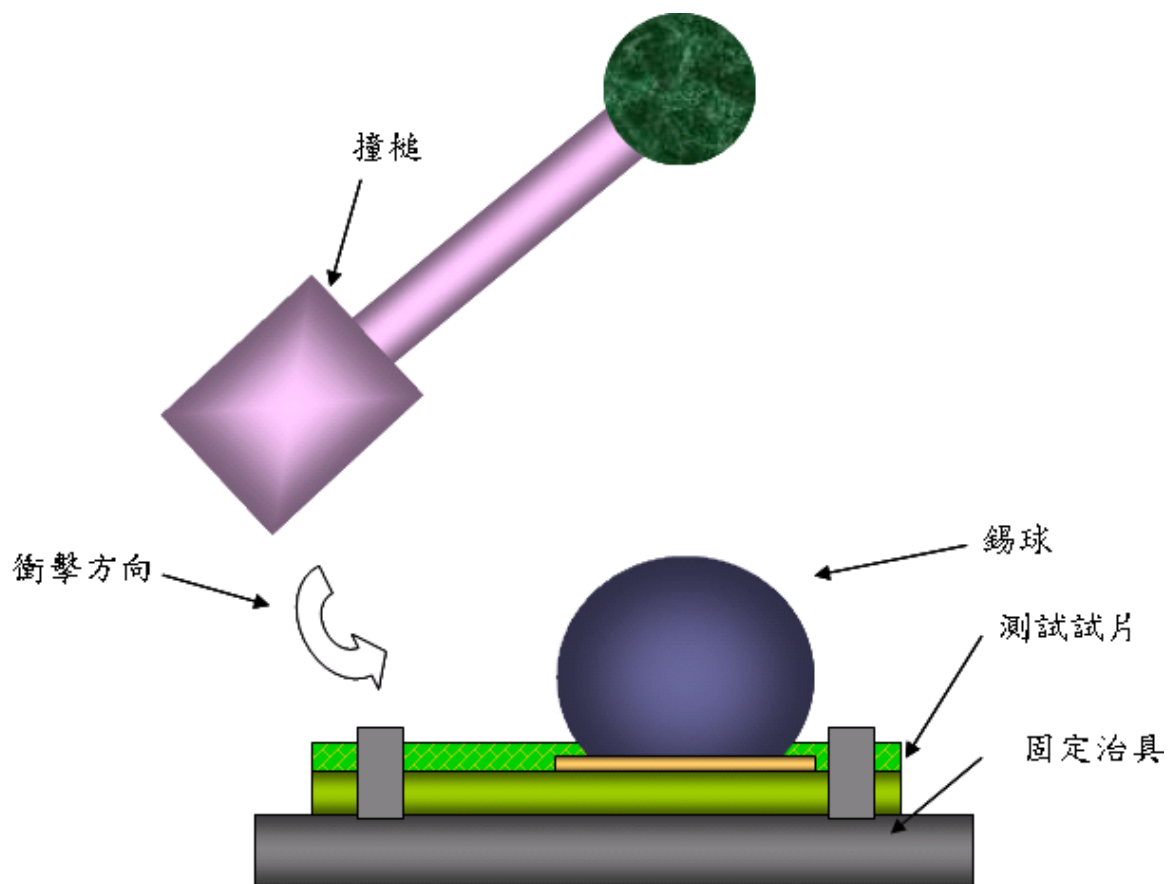


圖 2-3：擺錘衝擊示意圖

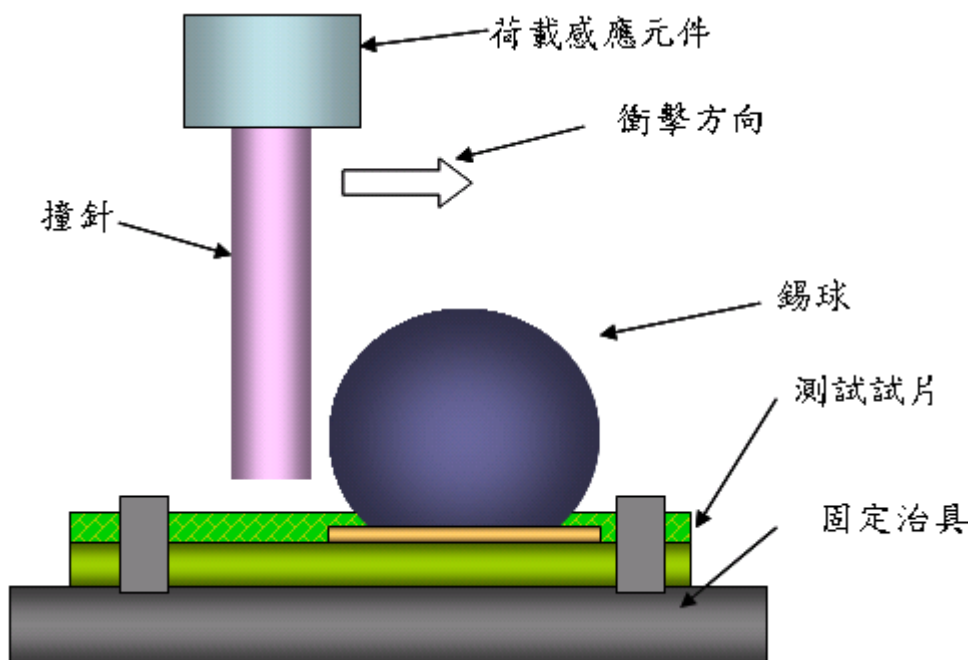


圖 2-4：Dage 高速推球試驗示意圖

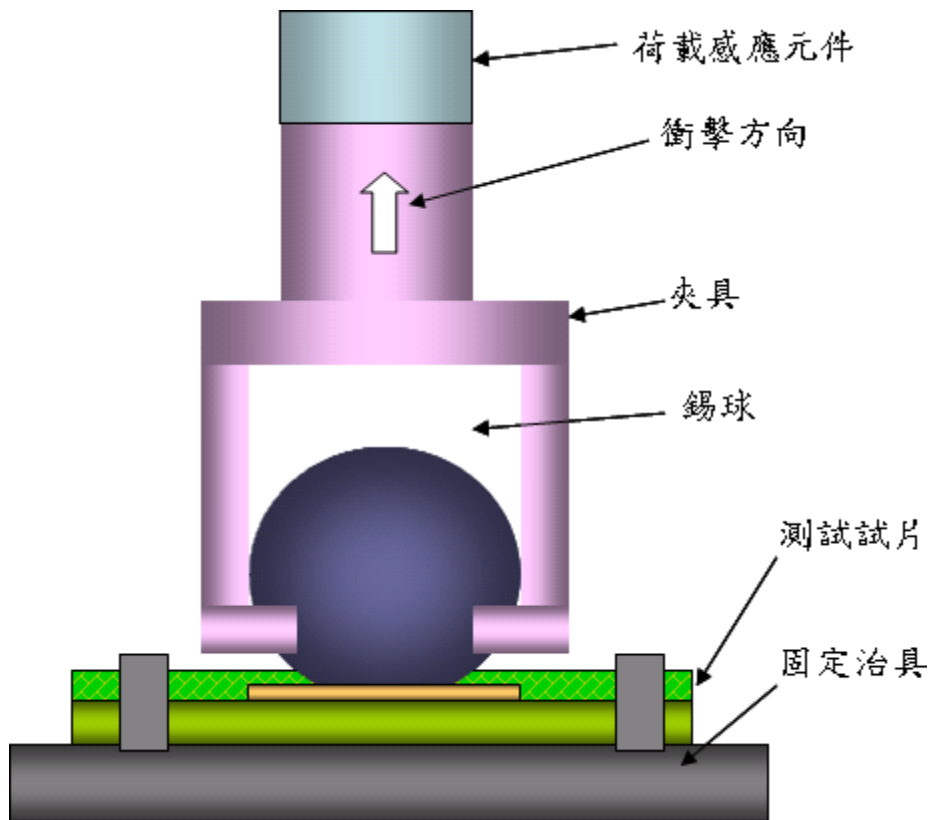


圖 2-5：Dage 高速拉球試驗示意圖

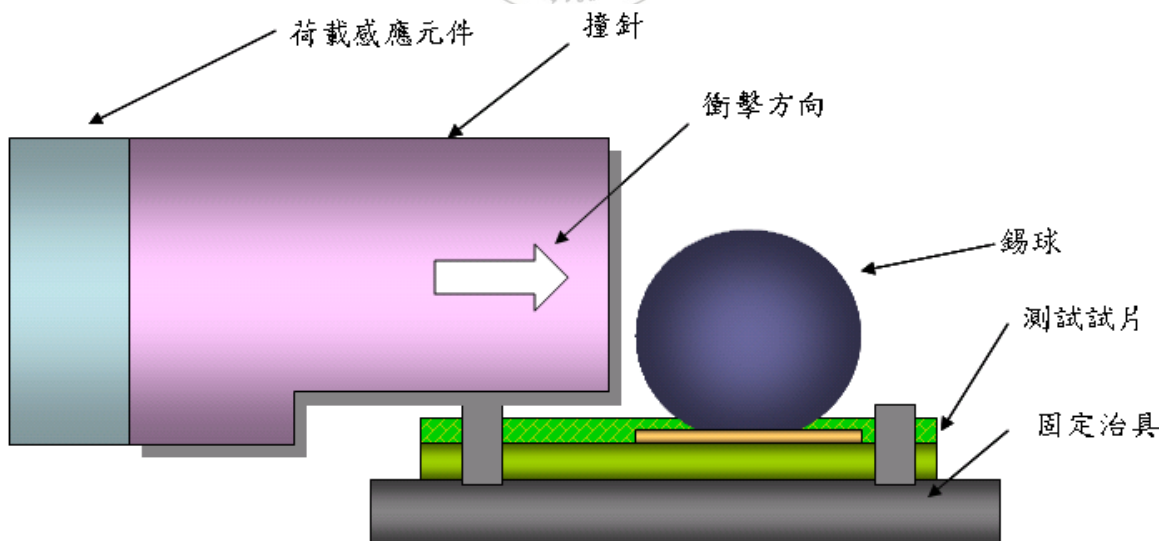


圖 2-6：Instron 高速衝球試驗示意圖

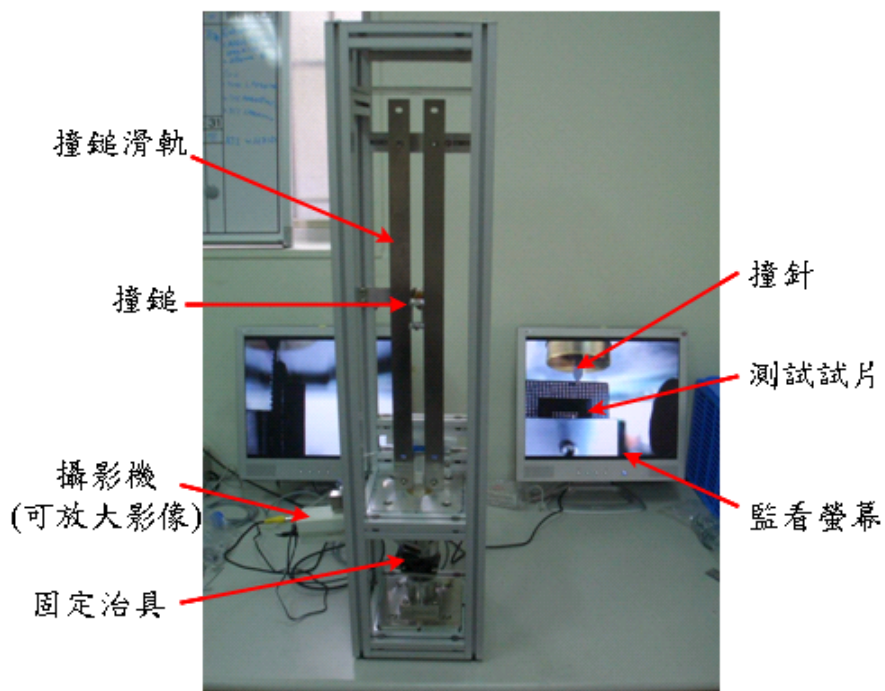


圖 2-7：日月光之衝球試驗裝置

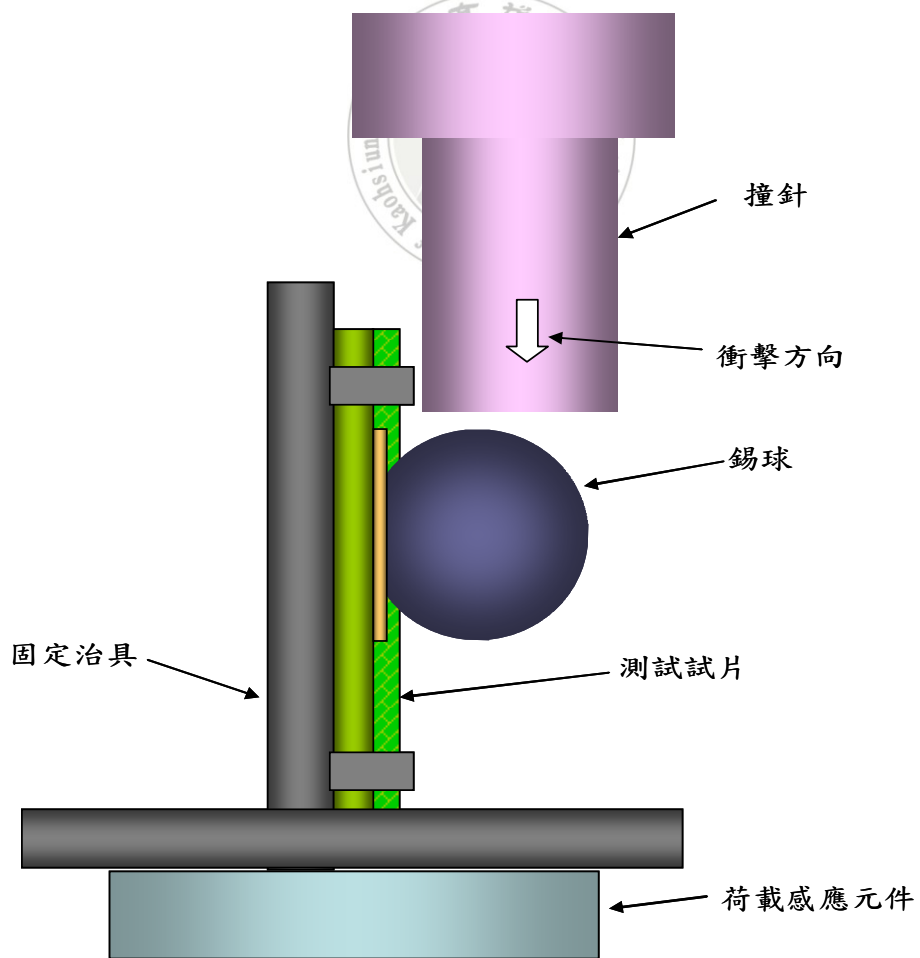


圖 2-8：日月光高速衝球試驗示意圖

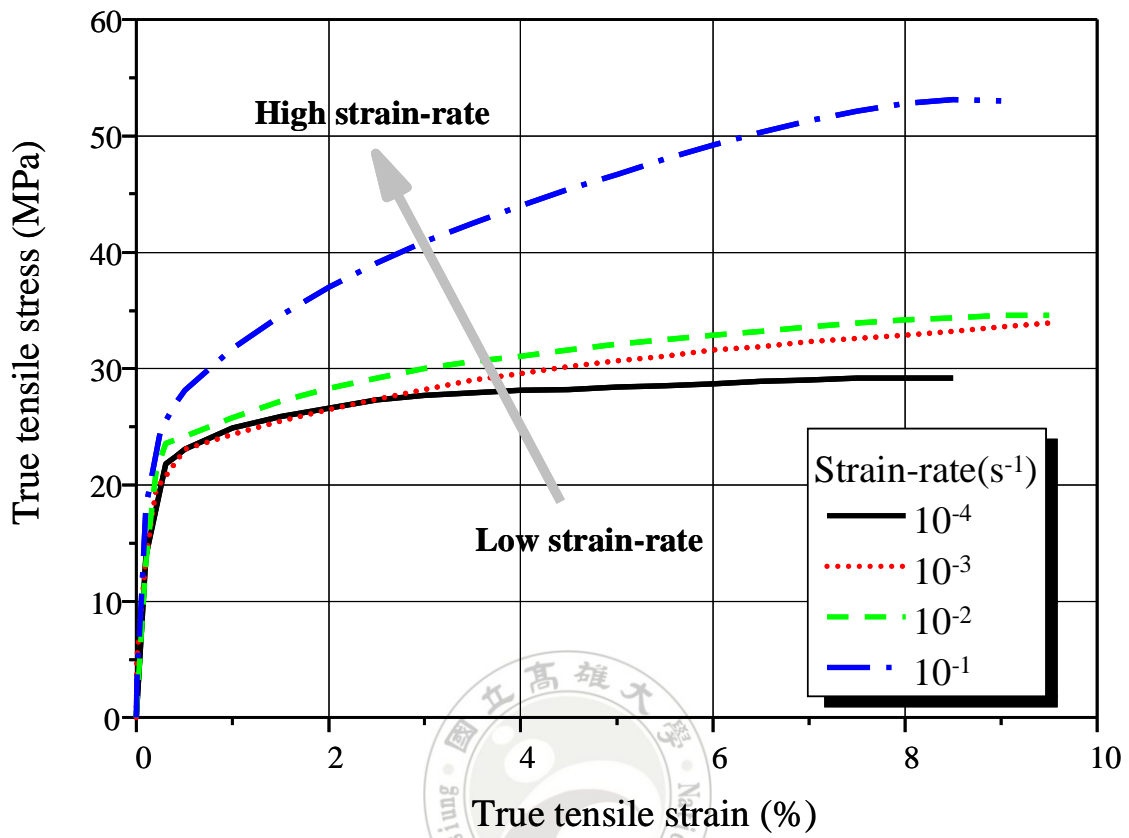
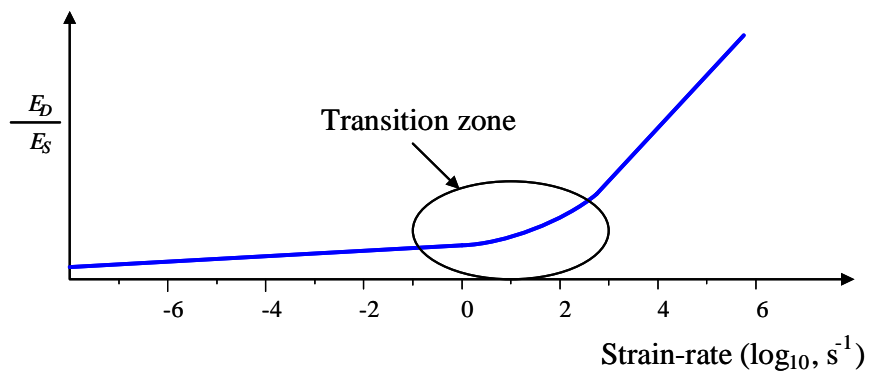


圖 2-9 : Sn-37Pb 在 293°K 時之應力應變圖 [1].



Drop/shock test

Ball impact test

圖 2-10 : 掉落測試與衝球試驗之應變率[1]

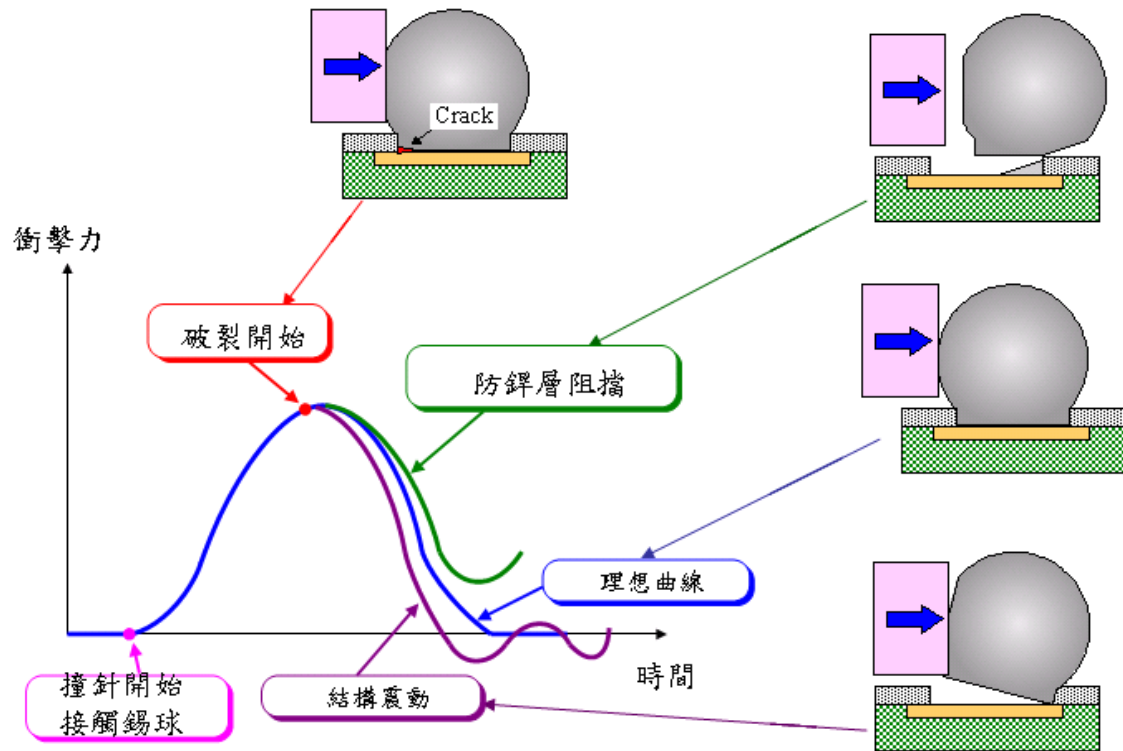


圖 2-11：典型衝擊歷程

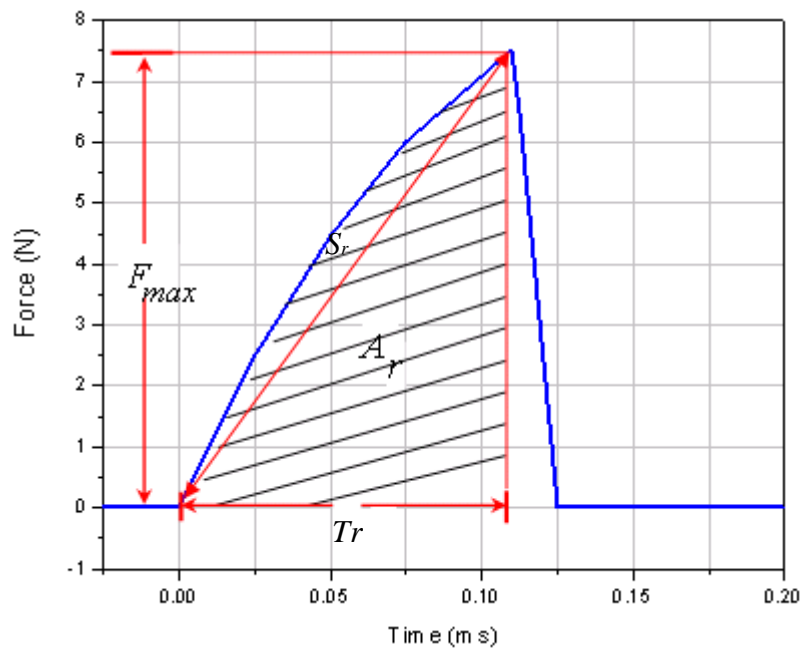


圖 2-12：衝擊曲線與特徵值定義

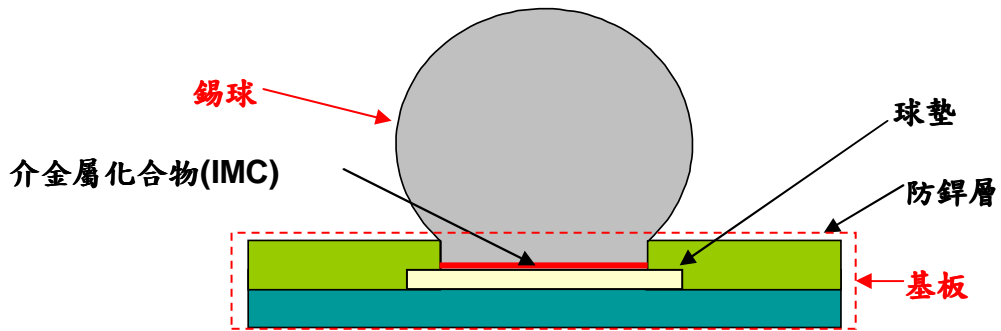


圖 2-13：錫球接點結構

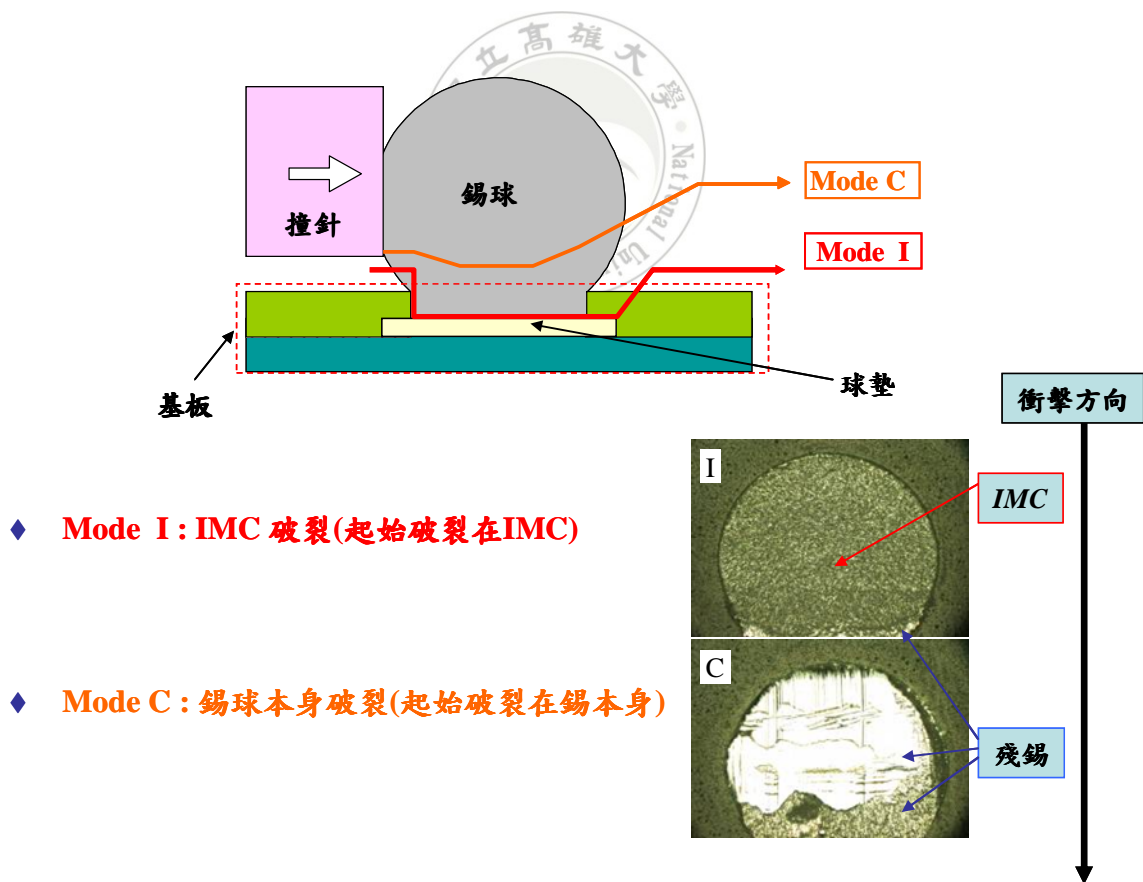


圖 2-14：破裂模式定義與分類

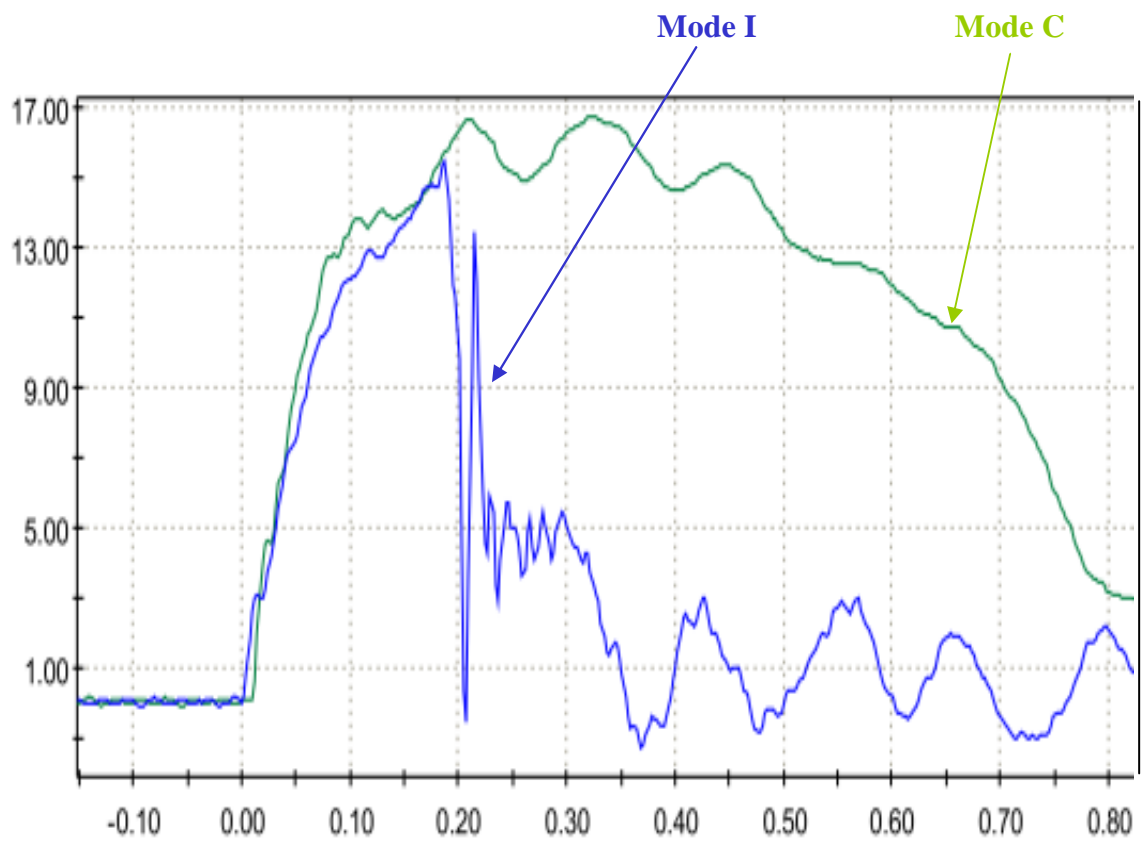


圖 2-15：實際破裂模式之衝擊曲線

第三章 衝球試驗

本章節主要為說明實驗工作，其中包括實驗規劃、實驗試片介紹，以及實驗步驟與流程。

3-1 實驗規劃

本實驗將針對錫銀銅為主之錫球，以五種錫球成分、兩種鐳墊表面處理方式，以及兩種層級之SJS狀態，利用衝球試驗，探討各實驗變因對於SJS強度與性質之影響，如表 3-1所示。

3-1-1 錫球成分

目前常用之無鉛錫球，成分大多為錫銀銅三元素所組成，而在文獻上，低銀比高銀之錫銀銅錫球有較高之動態荷載可靠度[3]。在合金之成份功能上，摻雜鎳與鍍可增加其機械強度。所以，為進一步提升SJS之強度，本實驗將以高銀與低銀之錫銀銅錫球作為對照，以探討摻雜鎳或鍍之錫銀銅錫球SJS之強度與性質。

3-1-2 鐳墊表面處理

浸鍍錫 (Immersion Tin, IT)，為常見之鐳墊表面處理方法，乃是利用浸鍍製程，將鐳墊上之銅溶解，用以錫之沉積置換。而預鍍鐳錫(direct solder on pad, DSOP)，是以Sn-3Ag-0.5Cu之成份，預鍍於銅鐳墊上，為另一種鐳墊表面處理之方法。本實驗將探討IT與DSOP對SJS強度與性質之影響。

3-1-3 封裝後與上版後

在元件封裝完成後，錫球已植置於基板上，而在上板製程中，會經過多次迴錫。故將植球後不迴錫(代表封裝後之狀態)，以及植球後迴錫3次(代表上板後之狀態)。所以，封裝後與上板後，對其SJS強度與性質之影響為何，亦會在本實驗中討論。

此次實驗，皆在相同之結構尺寸與測試條件下進行測試，每組測試取20筆數據，以符合統計取樣數。

3-2 實驗試片介紹

本實驗所用之試片，為 日月光 所提供之 FCBGA 24.5x24.5 692L 封裝體。由於在固定試片時，原封裝體上之晶片與被動元件會使試片無法完全貼平治具，在高速衝擊測試時，試片懸空之部份會產生一力矩而影響實驗準確度，故此試片上不放置晶片與被動元件。此試片上，植有692個錫球 (Solder Ball)，每個錫球的中心點間距 (Pitch) 為800(微米)，錫球球徑為0.5(釐米)，錫墊開口為防焊綠漆界定(solder mask-defined, SMD)，如圖 3-1所示。

其錫球成份為：

(1) 95.5Sn/4Ag/0.5Cu：錫 (Sn) 重量百分比為95.5%；銀 (Ag) 重量百分比為 4.0%；銅 (Cu) 含量為0.5%，以SAC 405表示。

(2) 98.5Sn/1Ag/0.5Cu：錫 (Sn) 重量百分比為98.5%；銀 (Ag) 重量百分比為 1.0%；銅 (Cu) 重量百分比為0.5%，以SAC 105表示。

(3) 98.3Sn/1.2Ag/0.5Cu/0.05Ni：錫 (Sn) 重量百分比為98.3%；銀 (Ag) 重量百分比為 1.2%；銅 (Cu) 重量百分比為0.5%；微量元素鎳(Ni) 重量百分比為 0.05%，以SACN 1205表示。

(4) 98.5Sn/1Ag/0.5Cu /0.05Ni：錫 (Sn) 重量百分比為98.5%；銀 (Ag) 重量百分比為 1.0%；銅 (Cu) 重量百分比為0.5%；微量元素鎳(Ni)重量百分比為0.05%，以SACN 105表示。

(5) 98.5Sn/1Ag/0.5Cu /0.05Ge：錫 (Sn) 重量百分比為98.5%；銀 (Ag) 重量百分比1.0%；銅 (Cu) 重量百分比為0.5%；微量元素鍺(Ge)重量百分比0.05%，以SACG 1205表示。

基板鐳墊表面處理：

- (1) 浸鍍錫(IT)：利用浸鍍製程，將鐳墊上之銅溶解，而以錫沉積置換。
- (2) 預鍍鐳錫(DSOP)：以Sn-3Ag- 0.5Cu之成份，預鍍於銅鐳墊上。

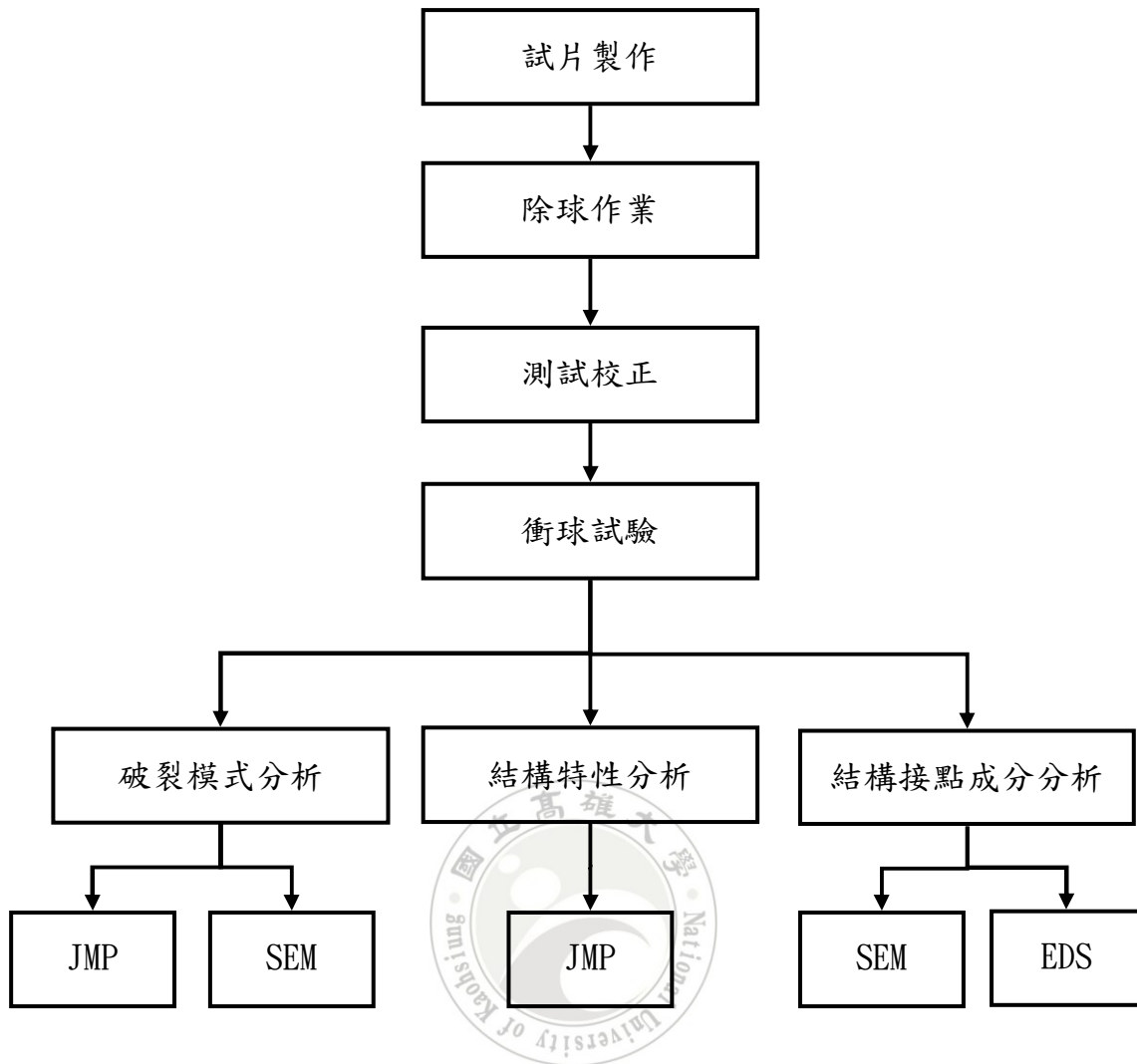
封裝與上板後之SJS狀態：

- (1) 封裝後：以植球後不迴鐳，代表SJS在封裝後之狀態。
- (2) 上板後：以植球後迴鐳3次，代表SJS在封裝後之狀態。

3-3 實驗步驟與流程

本實驗主要步驟有：(1) 前置作業；(2) 衝球試驗；(3) 數據分析；(4) 樣品分析。實驗流程如下：





3-3-1 前置作業

(1) 實驗試片製作：

實驗試片製作為將錫球植置於基板鉲墊上。基板種類有兩種，為 IT 與 DSOP 表面處理，並搭配五種不同成分與比例之錫球，利用植球機將錫球質至於基板上後，經過迴鉲爐，以設定之迴鉲溫度曲線，使錫球熔融並與鉲墊結合。其錫球植置流程，如圖 3-2 所示，在基板方面，先將基板固定後，將助鉲劑(flux)塗佈一金屬表面，配合基板鉲墊大小與相對位置，以移印之方式使助鉲劑移印至基板上，而在錫球方面，以配合錫球大小，與相對位置之模具上將錫球撥入，再以相對應之模具將錫球吸取，最後將錫球放在塗上助鉲劑之鉲墊上後，送進迴鉲爐，如圖 3-3

所示，經升溫、持溫熔融與降溫冷卻，以完成錫球植置，其迴錫爐溫度曲線為升溫速率為 $0.8^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 、降溫速率為 $1.9^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 、在 260°C 峰值時持溫4秒。最後將需迴錫3次以之組別，以相同之迴錫爐溫度曲線，進行反覆迴錫。

(2) 試片除球作業：

為避免錫球在受衝擊時，碰撞後方錫球而影響實驗數據，所以利用除球裝置，如圖 3-4所示，將目標錫球後方三排錫球清除。將試片固定於平台上並以壓桿固定，調整位置後，再將除球刀推出，進行除球，一次將三排錫球去除，同時以氣槍將除球後之錫球吹除，完成後，將試片放置於光學顯微鏡下，如圖 3-5所示，以細針將錫墊表面進行細部整平。

3-3-2 衝球試驗

(1) 裝置測試校正：

為確保撞針以正確之角度衝擊SJS，以避免衝擊角度之影響，在撞針設計上，如圖 3-6所示，採直角設計，並在兩側加工一平行面，並利用撞針校正裝置，如圖 3-6所示，以及水平規校正固定試片之平台。先將水平規置放於平台上，再調整平台上之水平旋鈕，將水平規上之氣泡調整至水平規之中心，之後，將撞針裝上但不旋緊，固定校正裝置於平台上，調整位置始撞針裝置，使其進入校正裝置缺口內，將校正螺絲旋出，並頂住緊撞針後，撞針旋緊固定，以完成衝擊角度校正。

在衝擊重複性方面，以彈性之橡膠標準件，固定於平台上，如圖 3-7所示，設定速度為 $1\text{m}/\text{s}$ ，以進行重複性測試。經由反覆衝擊標準件，檢視衝擊曲線是否有明顯差異，如圖3-8所示，如果有明顯差異，便須確認各部機件是否異常。反覆衝擊後，收集50筆數據，檢視衝擊過程中之起始衝擊速度、最大衝擊力、上升區段之衝擊能量、上升區段之衝擊行程，以及上升區段之衝擊時間，其標準差對平均值之百分率，代表該分析之標準誤差百分比(coefficient of variation, Coef. of Var.)，必須小於2，如表 3-2所示。

(2) 衝球試驗：

本實驗所使用之裝置，為美商Instron 公司開發之衝球試驗機。經由上述之校正，其衝擊速度與撞針已調整完成，再將試片固定於平台上，由上視監視器，如圖 3-9所示，監看以調整撞針位置，使撞針距待測錫球約0.5(釐米)，並以側視監視器，如圖 3-9所示，調整衝擊高度為，距離基板0.05(釐米)，最後，啟動軟體，設定擷取率為1.17(百萬赫茲)後，進行測試，並反覆測試直到每組20筆數據為止。測試條件如表 3-3所示。

衝球試驗中，經由荷載感應元件，量測並記錄SJS之衝擊歷程。所需紀錄之項目，為衝擊起始速度(V_i)、最大衝擊力(F_{max})、衝擊曲線上升區段之時間(Tr)。

在測試後，數據收集整理，再將量測結果轉換為衝擊能量(Er)，以進行結構特性分析。

3-3-3 數據分析

(1) 結構破裂模式分析：

將測試後之試片，利用高倍顯微鏡，如圖 3-3.9所示，藉由已定義之結構破裂模式(Mode I與Mode C)，將其進行分類、記錄與統計，如附件一所示，並藉由SEM，進行細部觀察與取像。

(2) 結構動態強度分析：

將全組別之數據，針對各實驗變因，以JMP統計軟體進行分析，以單一變因進行檢定，以判斷其差異性是否明顯，在確定有明顯差異後，代表其變因為一影響因子。為確認其最高與最低之組別，故將其最高與最低之群組，再以進行進一步之差異性檢定，以確定其最高與最低組別。以 Er 作為判斷SJS強度之衝擊特性指標，而 Tr 作為判斷SJS延性之衝擊特性指標。



3-3-4 樣品分析

結構接點成分分析：

將所需之試片，經研磨拋光處理後，進行接點結構橫截面之觀察，將利用SEM對其IMC之組成觀察並取像，再以EDS進行成分標定，以比對參雜之差異。

表 3-3：實驗組別

鉀墊表面處理 取樣數(筆)	IT				
	20	20	20	20	20
錫球成分	95.5Sn/4Ag/0.5Cu	98.5Sn/1Ag/0.5Cu	98.3Sn/1.2Ag/0.5Cu/0.05Ni	98.5Sn/1Ag/0.5Cu/0.05Ni	98.5Sn/1Ag/0.5Cu/0.05Ge
封裝後 (植球後不回鉀)	Cell 01	Cell 02	Cell 03	Cell 04	Cell 05
上板後 (植球後回鉀3次)	Cell 11	Cell 12	Cell 13	Cell 14	Cell 15
鉀墊表面處理 取樣數(筆)	DSOP				
	20	20	20	20	20
錫球成分	95.5Sn/4Ag/0.5Cu	98.5Sn/1Ag/0.5Cu	98.3Sn/1.2Ag/0.5Cu/0.05Ni	98.5Sn/1Ag/0.5Cu/0.05Ni	98.5Sn/1Ag/0.5Cu/0.05Ge
封裝後 (植球後不回鉀)	Cell 06	Cell 07	Cell 08	Cell 09	Cell 10
上板後 (植球後回鉀3次)	Cell 16	Cell 17	Cell 18	Cell 19	Cell 20

表 3-4：衝擊重複性測試結果

	Vi (米/秒)	Fmax (N)	Er (毫焦耳)	Tr (毫秒)
平均值	1.0289	12.5373	79.3948	1.7782
中位數值	1.0294	12.509	79.4779	1.7761
最小值	1.012	12.3338	76.8054	1.7603
最大值	1.0367	13.2534	80.6007	1.8384
標準誤差百分比	0.4966	1.3292	0.9897	0.7081
標準誤差	0.0051	0.1666	0.7858	0.0126



表 3-5：測試條件

參數	Value	Unit
機台型號	Microimpacter	Model
衝擊速度	500	釐米/秒
資料擷取率	1.17	百萬赫茲
撞擊高度	0.05	釐米

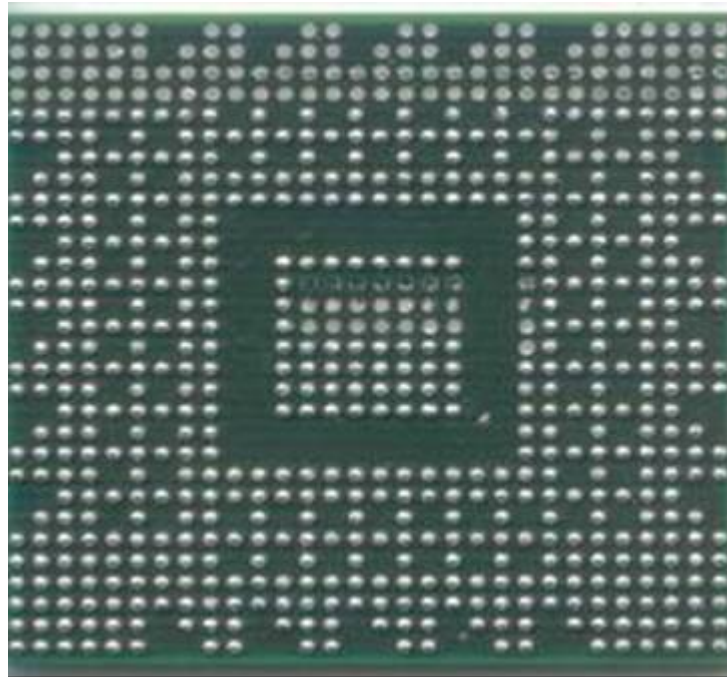


圖 3-1：試片外觀(FC BGA 24.5x24.5 692L)

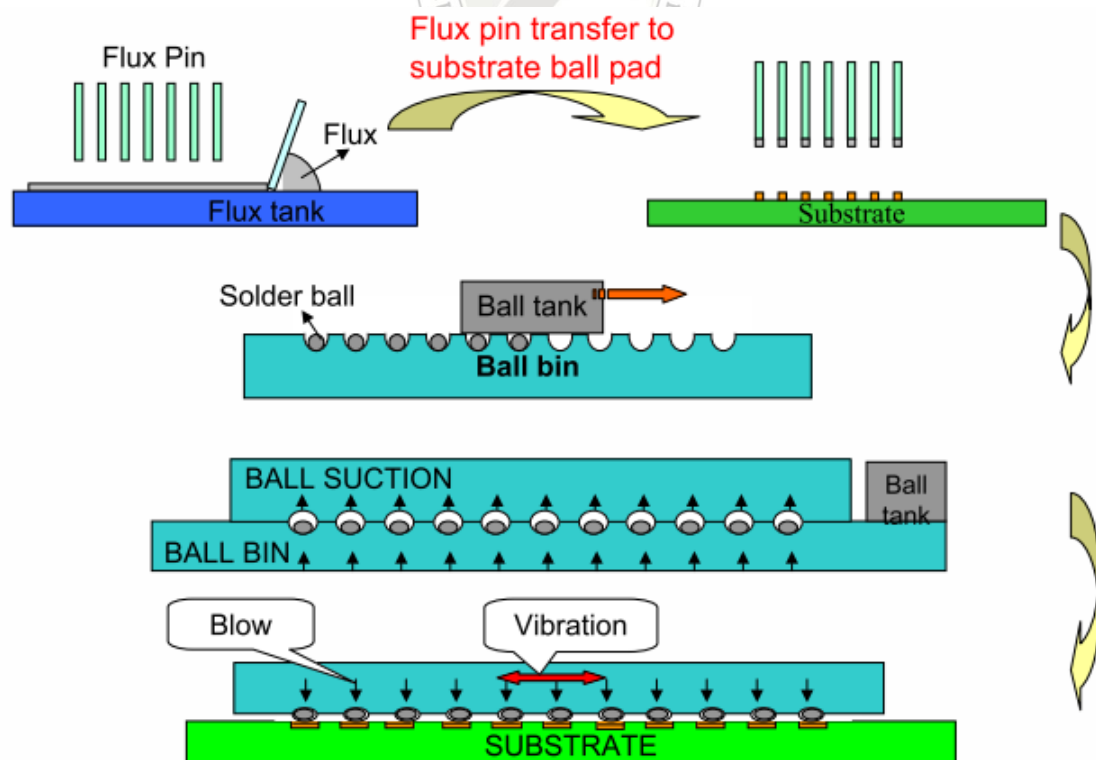


圖 3-2：植球流程[1]



圖 3-3：迴錘爐[1]

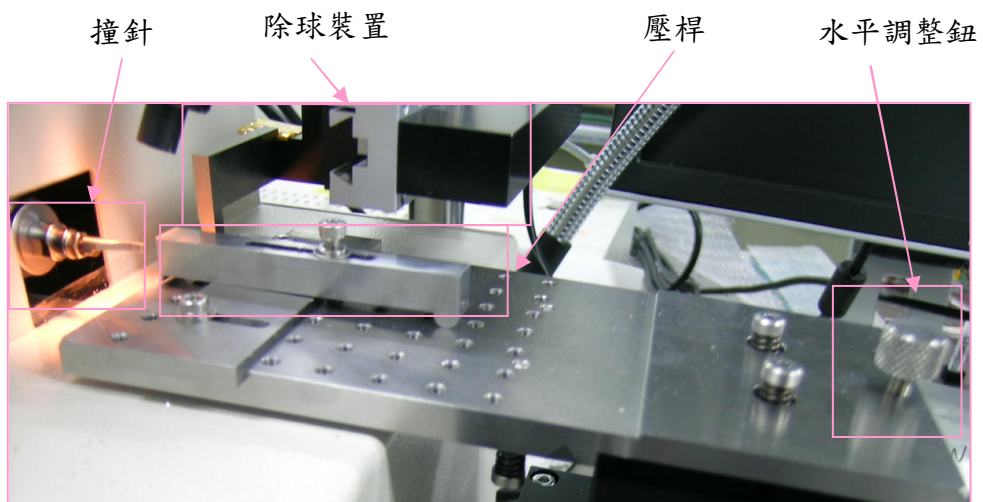


圖 3-4：衝擊裝置



圖 3-5：光學顯微鏡[1]



撞針

撞針校正裝置

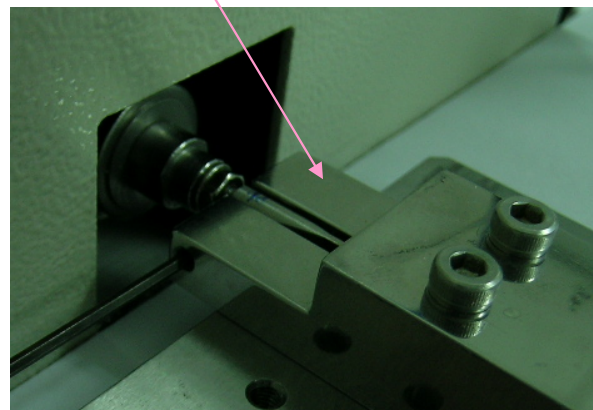


圖 3-6：撞針與撞針校正裝置

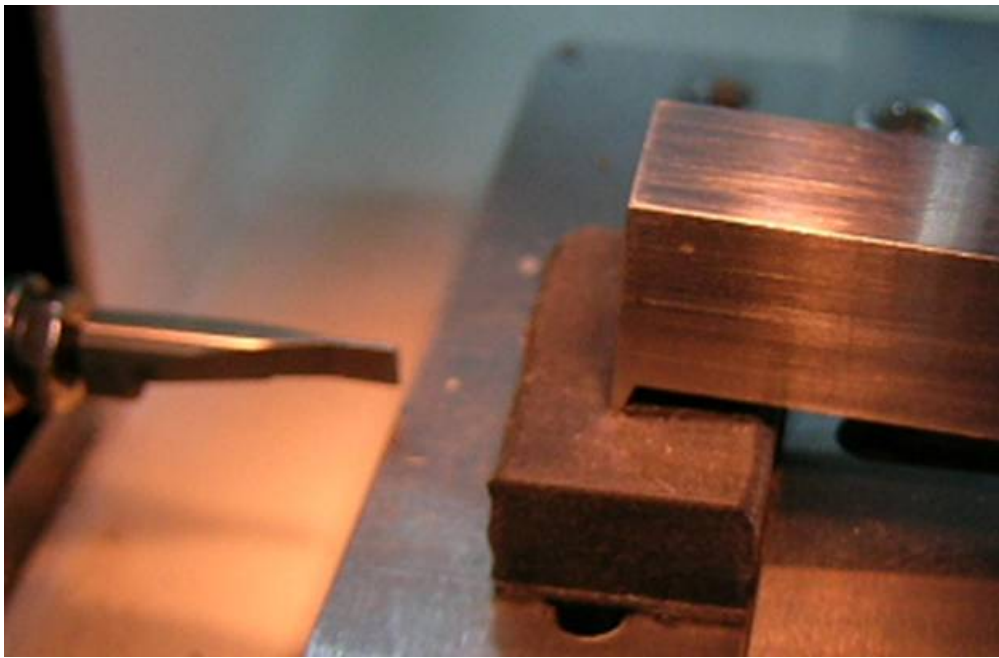


圖 3-7：衝擊重複性測試

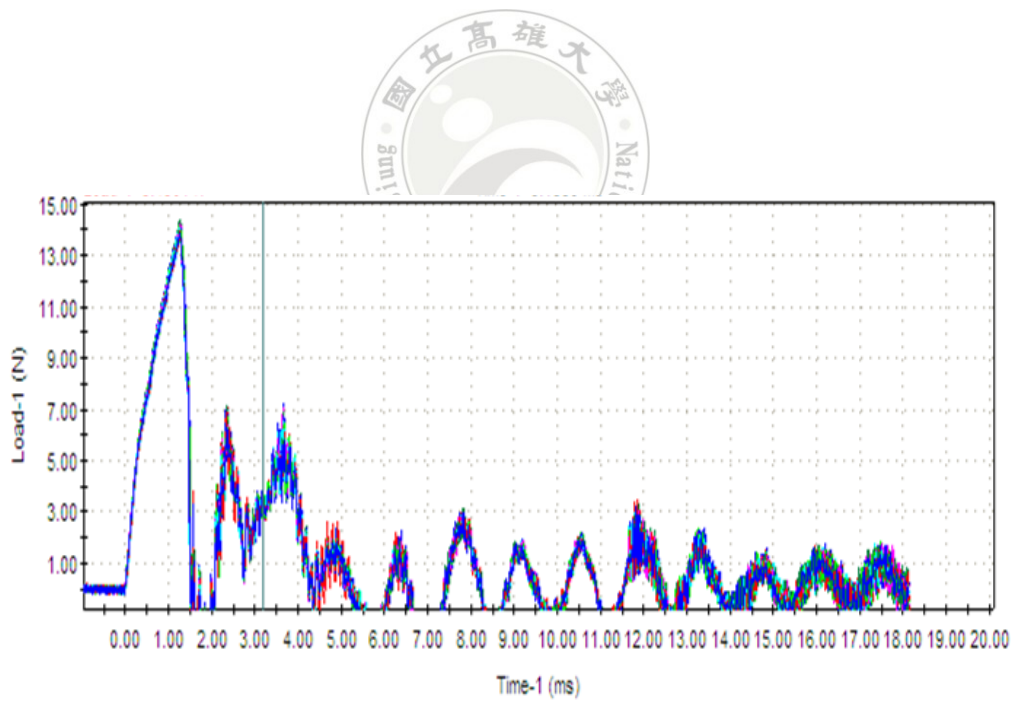


圖 3-8：衝擊重複性測試之衝擊曲線

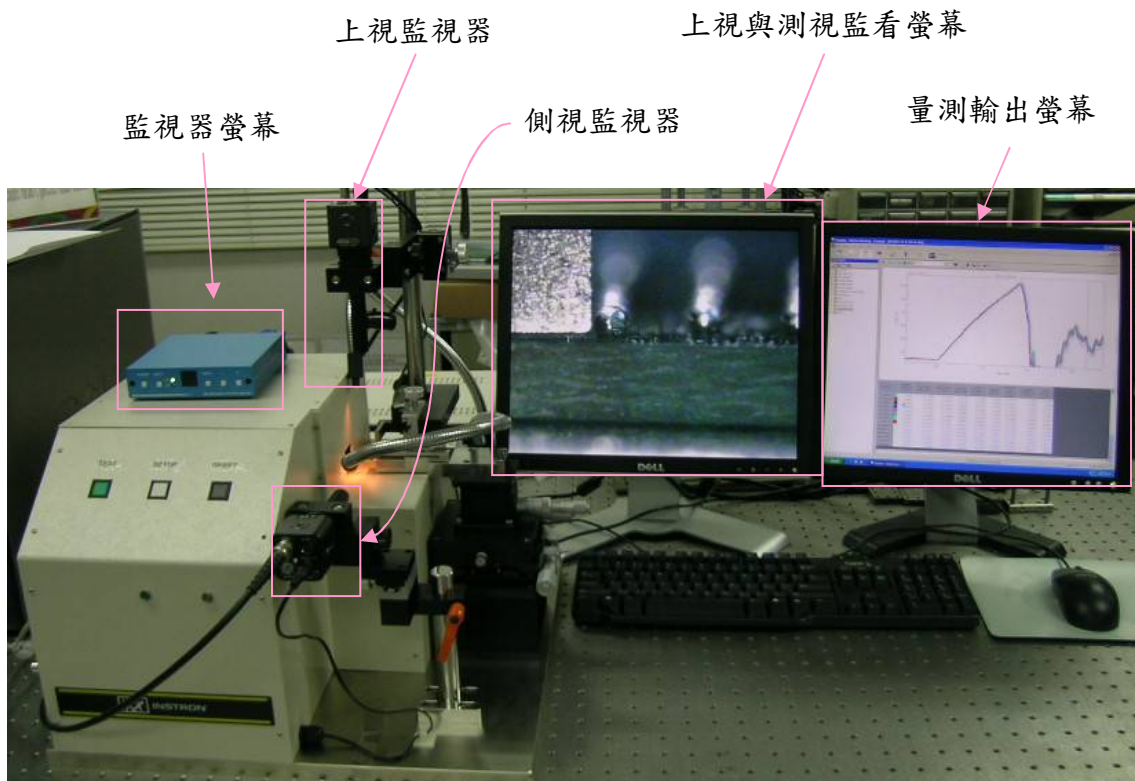


圖 3-9：衝球試驗機[1]



圖 3-10：高倍顯微鏡[1]

第四章 實驗結果與討論

本章共分為破裂模式之討論、結構特性之討論與結構接點成分之討論。

4-1 破裂模式之討論

在破裂模式上，將以分佈狀況、破裂面之型態以及破裂模式之SJS強度與性質進行討論。

(1) 分佈狀況：

分佈狀況與統計值對照，如表 4-1所示。SJS在衝球試驗後，僅出現Mode I(IMC破裂)與Mode C(錫球本身破裂)。對所有實驗組合而言，Mode I為衝球試驗主要破壞模式。而Cell 03、04、與05之組別有部份破壞模式為Mode C，此錫球本身破裂之模式，僅發生在摻雜鎳或鍍的錫銀銅錫球，接合於化錫表面處理鉍墊之實驗組：Cell 04(SACN 105)佔40%、Cell03(SACN 1205)與Cell 05(SACG 105)各佔5%，且Mode C所佔比例比低於Mode I。

對SAC 405而言，其結構破裂模式為IMC破裂，代表SJS最為脆弱之處為IMC附近，此現象與掉落測試之文獻上，SAC 405以IMC破裂為主之現象相符[3]，且在衝球試驗之文獻上，與其他高速衝擊裝置相比，其SAC 405之破裂模式，也以IMC破裂為主之現象相符[2]。對SAC 105而言，結構破裂模式為IMC破裂，不同於文獻[3]，推論由於本實驗之表面處理成分為錫或Sn-3Ag- 0.5Cu，造成IMC生成受表面處理之影響，導致其破裂模式為IMC破裂。

(2) 破裂面之型態：

結構破裂模式之SEM，如圖 4-1所示，其IMC破裂之表面在受衝擊端呈現IMC破裂，而在遠離衝擊端有殘錫之現象，與文獻上其他高速衝擊裝置所觀察之現象

相同[2,4]。而錫球本身破裂之表面在受衝擊端表面呈剪切狀，而在遠離衝擊端有玻璃之殘錫現象，與文獻上，其他高速衝擊裝置所觀察之現象相同[2]。

(3) 破裂模式之SJS強度與性質：

如表 4-2所示，Mode C E_r 之範圍為，1.1006~2.1357 (微焦耳)。 T_r 之範圍為，0.2026~0.3394 (微秒)；Mode I E_r 之範圍為，0.1674~1.3853 (微焦耳)。 T_r 之範圍為，0.0537~0.3052 (微秒)。 E_r 與 T_r 在統計檢定之結果，Mode C均高於Mode I。如圖 4-2所示。代表Mode C在SJS之強度與延性性質上均高於Mode I。由於結構之破裂模式代表結構最脆弱處，所以本實驗之SJS強度由其IMC強度(Mode I)決定。

也就是說，錫球接點結構強度，由其IMC強度(Mode I)決定，且為主要之破裂模式。當IMC強度足以抵抗衝擊荷載時，Mode C 才有可能發生，且Mode C 破壞較為延性。這表示當IMC強度足以抵抗衝擊荷載時，Mode C才有可能發生，且Mode C 破壞較為延性。



4-2 結構特性之討論

量化並比較本實驗組別，如附件一所示，取其SJS之強度與性質，其最高與最低，並以統計檢定之方式，針對 E_r 與 T_r 進行討論：

(1) E_r 之平均值最高與最低，分別為Cell 03 與Cell 16。而 E_r 之檢定結果，如圖 4-3所示，在差異性檢定上有明顯差異。其差異性群組有8組(A~H)，其中數值最高之群組為A群組，其平均值由高至低為，Cell 03、04、05與08(上方方框)，代表此群組間之各組別，對整體而言，彼此差異性不顯著。故僅針對A群組，再進行差異性檢定，其結果顯示，無明顯差異，如圖 4-4所示。代表此群組之在SJS之強度上，可視為同一級別。而在數值最低之群組為，H群組，其平均值由高至低為，以Cell 18、20、12、07、11、06、17與16最低之群組(下方方框) 如圖 4-3所示。進

一步檢定後，最低之群組縮小至Cell 17與16(方框)，再進一步檢定後，確認Cell 16為SJS強度最低之組別，如圖 4-5所示。

如表 4-3~4所示，其SJS之強度，對於最高之群組，其 E_r 之範圍為，0.3979~2.1357(微焦耳)，對於最低之群組，其 E_r 之範圍為，0.1674~0.3855(微焦耳)。

強度最強組別為摻雜鎳或鍍且植球後不迴鍍之組別，而最弱之組別為SAC 405、DSOP鍍墊表面處理與植球後迴鍍3次。

(2) Tr 之平均值最高與最低，分別為Cell 04與C16。 Tr 之檢定結果，如上述之手法可以得知，如圖 4-6~8所示，其差異性群組有10組(A~J)，其值最高(最為延性)之群組為Cell 03、04與05，而其值最低(最為脆性)之群組Cell 16。以下文章討論均採此方式。

如表 4-3~4所示，其SJS之性質，對於最高之群組，其 Tr 之範圍為，0.1147~0.3394(微秒)，對於最低之群組，其 Tr 之範圍為，0.0537~0.0854(微秒)。

所以，由上述結果可知，延性強之結構，其強度也較強。故推論，提升SJS在動態荷載之延性，有助於強度之提升。

以下將個別討論各實驗變因，對SJS之強度與性質有何影響。

4-2-1 錫球成分之討論

(1) E_r 之結果(SJS之強度)，以Cell 03(SACN 1205)、Cell 04(SACN 105)與Cell 05(SACG 105)為最強，而以Cell 16SAC 405與SAC 105為最弱，如圖 4-9所示。進一步分析之結果，其中SACN 1205、SACN 105與SACG 105，在SJS強度之統計檢定上，可視為同一級別。而SAC 405與SAC 105，在SJS之強度上，可視為同一級別，如圖 4-10所示。

(2) Tr 之結果(SJS之延性性質)，以SACN 1205、SACN 105與SACG 105為最為延性，且為同一級別，而以SAC 405為最脆性，如圖 4-11~12所示。

由上述結果可知，錫球成分會影響SJS強度與性質，在錫球成分選用上，SACN 1205、SACN 105與SACG 105為較佳之選擇。

文獻上，低銀錫球之強度比高銀錫球強[3]，而在SAC 405與SAC 105之SJS強度上，雖然SAC 105 之平均值略高於SAC 405，但其檢定結果為不顯著。由於本實驗SAC 405與SAC 105之破裂模式，皆為IMC破裂，而其表面處理之成分為錫或Sn-3Ag- 0.5Cu。故推論，對於SAC 405與SAC 105而言，IMC生成條件之差異變小，所以SJS強度之差異性亦變小，導致其檢定結果為不顯著。而SJS之延性，並不全由IMC生成條件而取決，故其其檢定結果仍為顯著。

4-2-2 鐳墊表面處理之討論

Er (SJS之強度)與 Tr (SJS之延性性質)之結果，其檢定結果皆為顯著，IT表面處理均高於DSOP表面處理，如圖 4-13所示。

由上述結果可知，鐳墊表面處理會影響SJS強度與性質。在鐳墊表面處理方法上，IT 與 DSOP 相比，IT 為較佳之選擇。

4-2-3 封裝後與上板後之討論

Er (SJS之強度)與 Tr (SJS之延性性質)之結果，其檢定結果皆為顯著，植球後不迴鐳均高於植球後迴鐳3次，如圖 4-14所示。

由上述結果可知，迴鐳次數會影響SJS強度與性質。迴鐳會降低結構強度與延性，且此趨勢與文獻相同[12]，故在製程上應盡量避免多餘之迴鐳。

綜合上述之討論，較佳之組合為，摻雜鎳或鍍的錫銀銅錫球，植球後未迴鐳，並接合於化錫(IT)表面處理之鐳墊。

4-3 結構接點成分之討論

由圖 4-9可知，有摻雜鎳或鍺之組別有較高之 Er 值，本節將針對未摻雜、摻雜鎳與摻雜鍺，並取其之 Er 平均值較高者(SAC 105、SACN1025，以及SACG 105)，進行SEM與EDS，並針對IMC組成與IMC厚度進行討論。其詳細之微結構分析，請參考本研究之延伸分析[27]。

(1) IMC成分：

如圖 4-15 ~16所示，摻雜鎳之錫銀銅錫球的IMC成分組成為 $(Cu, Ni)_6Sn_5$ ，由於鎳參與反應而生成三元化合物，而摻雜鍺之錫銀銅錫球的IMC成分組成為 Cu_6Sn_5 與錫銀銅錫球之IMC成分組成相同。[27]

與未摻雜之SAC 405與SAC 105對照比較，有摻雜之組別在強度與延性皆有明顯之提升，鎳的摻雜改變原有錫銀銅錫球之IMC成分組成，而摻雜鍺之錫銀銅錫球卻無此現象，故推論摻雜鎳的主要用途為改善植球後的IMC形貌，進而增加其機械強度[20]。而摻雜鍺之組別，摻雜之鍺散佈於錫球合金內部[27]，推論其主要作為強化錫合金機械性質之用[21]。

(2) IMC生成厚度：

如圖 4-15 ~16所示，在迴鍍三次後，摻雜鎳之 $(Cu, Ni)_6Sn_5$ IMC厚度並無明顯增加。而摻雜鍺與未摻雜之 Cu_6Sn_5 IMC厚度則明顯增加。故推論鎳的摻雜有助於抑制IMC厚度成長，由於過厚之IMC影響因此推論在高溫老化條件下，摻雜鎳的之錫球應有較高之強度。

表 4-6：結構破裂模式分類表

Statistics	I	C
Cell 01	100%	0%
Cell 02	100%	0%
Cell 03	95%	5%
Cell 04	60%	40%
Cell 05	95%	5%
Cell 06	100%	0%
Cell 07	100%	0%
Cell 08	100%	0%
Cell 09	100%	0%
Cell 10	100%	0%
Cell 11	100%	0%
Cell 12	100%	0%
Cell 13	100%	0%
Cell 14	100%	0%
Cell 15	100%	0%
Cell 16	100%	0%
Cell 17	100%	0%
Cell 18	100%	0%
Cell 19	100%	0%
Cell 20	100%	0%

表 4-7：結構破裂模式 E_r 與 T_r 值之範圍

Mode		E_r (mJ)	T_r (ms)
C	Max.	2.1357	0.3394
	Min.	1.1006	0.2026
I	Max.	1.3853	0.3052
	Min.	0.1674	0.0537

表 4-8：第 1~10 組實驗統計結果(植球後不迴錚)

Cell No.	Statistics	Impact velocity-1 (m/s)	Rising Energy (mJ)	Peak Force(N)	Rising Time (ms)	Cell No.	Statistics	Impact velocity-1 (m/s)	Rising Energy (mJ)	Peak Force(N)	Rising Time (ms)
Cell 01	Average	0.5010	0.5374	15.7516	0.1071	Cell 06	Average	0.5013	0.3400	13.6789	0.0833
	Median	0.5014	0.5088	15.6399	0.1013		Median	0.5018	0.3280	13.8008	0.0879
	Minimum	0.4915	0.3997	12.0857	0.0903		Minimum	0.4932	0.2091	11.6040	0.0537
	Maximum	0.5083	0.6838	17.4863	0.1318		Maximum	0.5069	0.4822	15.7640	0.1025
	Coef. of Var.	0.7928	17.7180	7.8819	12.0508		Coef. of Var.	0.6961	25.7689	9.7792	18.0499
Std. Dev.	0.0040	0.0952	1.2415	0.0129	Std. Dev.	0.0035	0.0876	1.3377	0.0150		
Cell 02	Average	0.5059	0.5606	12.6411	0.1320	Cell 07	Average	0.5023	0.3774	11.7004	0.1058
	Median	0.5062	0.5022	13.0126	0.1208		Median	0.5020	0.3610	11.6916	0.1013
	Minimum	0.4995	0.3189	10.9180	0.0952		Minimum	0.4970	0.2886	9.6481	0.0830
	Maximum	0.5101	0.9407	13.6475	0.2026		Maximum	0.5084	0.5214	14.0854	0.1440
	Coef. of Var.	0.4954	32.9473	6.6708	23.4293		Coef. of Var.	0.6296	16.6633	9.7008	13.9672
Std. Dev.	0.0025	0.1847	0.8433	0.0309	Std. Dev.	0.0032	0.0629	1.1350	0.0148		
Cell 03	Average	0.5057	1.0528	14.7656	0.2012	Cell 08	Average	0.5035	0.8282	13.8672	0.1670
	Median	0.5059	1.0161	14.8006	0.1978		Median	0.5026	0.8905	13.7935	0.1770
	Minimum	0.4989	0.5825	12.1733	0.1270		Minimum	0.4999	0.4027	11.6186	0.0977
	Maximum	0.5094	2.1357	16.7565	0.3223		Maximum	0.5088	1.1593	16.0559	0.2100
	Coef. of Var.	0.5214	29.1184	8.8679	18.9586		Coef. of Var.	0.5680	30.3812	8.5107	22.7452
Std. Dev.	0.0026	0.3066	1.3094	0.0381	Std. Dev.	0.0029	0.2516	1.1802	0.0380		
Cell 04	Average	0.5063	1.0328	13.5395	0.2203	Cell 09	Average	0.5030	0.5943	10.4181	0.1708
	Median	0.5067	1.0254	12.5966	0.2026		Median	0.5024	0.5922	10.0495	0.1770
	Minimum	0.4973	0.3975	8.9621	0.1245		Minimum	0.4952	0.2708	8.7140	0.0977
	Maximum	0.5102	2.1263	18.1724	0.3223		Maximum	0.5107	1.0038	15.4137	0.2295
	Coef. of Var.	0.5624	41.1989	21.9277	22.3924		Coef. of Var.	0.7625	28.0666	14.7060	18.4335
Std. Dev.	0.0028	0.4255	2.9689	0.0493	Std. Dev.	0.0038	0.1668	1.5321	0.0315		
Cell 05	Average	0.5053	0.9538	14.4737	0.1946	Cell 10	Average	0.5039	0.7176	13.3746	0.1528
	Median	0.5051	0.9812	15.0633	0.2026		Median	0.5039	0.7024	13.3994	0.1526
	Minimum	0.5016	0.4235	11.5602	0.1147		Minimum	0.4984	0.3331	11.1807	0.0952
	Maximum	0.5091	2.0987	16.8149	0.3394		Maximum	0.5076	1.1570	16.0851	0.2051
	Coef. of Var.	0.4052	38.2004	11.5633	25.7206		Coef. of Var.	0.5523	33.3190	11.3888	22.8772
Std. Dev.	0.0020	0.3644	1.6736	0.0500	Std. Dev.	0.0028	0.2391	1.5232	0.0350		

表 4-9：第 11~20 組實驗統計結果(植球後迴錚 3 次)

Cell No.	Statistics	Impact velocity-1 (m/s)	Rising Energy (mJ)	Peak Force(N)	Rising Time (ms)	Cell No.	Statistics	Impact velocity-1 (m/s)	Rising Energy (mJ)	Peak Force(N)	Rising Time (ms)
Cell 11	Average	0.5062	0.3656	13.5366	0.0956	Cell 16	Average	0.5019	0.2397	12.0091	0.0667
	Median	0.5061	0.3417	13.2680	0.0928		Median	0.5021	0.2194	11.9689	0.0635
	Minimum	0.5007	0.2010	10.7283	0.0684		Minimum	0.4959	0.1674	10.2904	0.0537
	Maximum	0.5111	0.6270	17.3842	0.1440		Maximum	0.5079	0.3855	14.8298	0.0854
	Coef. of Var.	0.6451	26.8383	11.9357	17.9523		Coef. of Var.	0.5474	23.7912	9.9997	14.2662
Std. Dev.	0.0033	0.0981	1.6157	0.0172	Std. Dev.	0.0027	0.0570	1.2009	0.0095		
Cell 12	Average	0.5045	0.4286	11.2880	0.1182	Cell 17	Average	0.5051	0.2858	11.2238	0.0887
	Median	0.5043	0.4364	11.3778	0.1172		Median	0.5061	0.2784	10.9910	0.0903
	Minimum	0.4985	0.3067	9.5314	0.0952		Minimum	0.4925	0.2136	8.9913	0.0708
	Maximum	0.5096	0.5596	12.7717	0.1489		Maximum	0.5097	0.3590	13.3264	0.1099
	Coef. of Var.	0.5837	16.4141	7.2713	10.3935		Coef. of Var.	0.8044	16.2884	9.9930	12.1818
Std. Dev.	0.0029	0.0704	0.8208	0.0123	Std. Dev.	0.0041	0.0466	1.1216	0.0108		
Cell 13	Average	0.4994	0.6471	12.3441	0.1503	Cell 18	Average	0.5028	0.4688	10.9092	0.1304
	Median	0.5000	0.6069	12.5017	0.1501		Median	0.5022	0.4619	11.0713	0.1257
	Minimum	0.4888	0.3811	9.5897	0.0977		Minimum	0.4954	0.2750	9.1227	0.0952
	Maximum	0.5066	1.0750	14.6547	0.2051		Maximum	0.5100	0.7154	12.2171	0.2002
	Coef. of Var.	1.0286	34.1620	10.1730	22.1671		Coef. of Var.	0.7970	25.5188	8.1335	21.3378
Std. Dev.	0.0051	0.2210	1.2558	0.0333	Std. Dev.	0.0040	0.1196	0.8873	0.0278		
Cell 14	Average	0.4980	0.7124	13.8485	0.1504	Cell 19	Average	0.5024	0.5903	13.7438	0.1316
	Median	0.4973	0.7209	13.9832	0.1550		Median	0.5023	0.5680	13.7205	0.1233
	Minimum	0.4927	0.3385	11.4289	0.0977		Minimum	0.4970	0.3821	12.2901	0.0977
	Maximum	0.5038	1.0150	15.5742	0.1978		Maximum	0.5075	1.0415	14.9028	0.1831
	Coef. of Var.	0.5770	29.6252	7.1559	18.9051		Coef. of Var.	0.5144	31.7212	5.4952	21.4841
Std. Dev.	0.0029	0.2110	0.9910	0.0284	Std. Dev.	0.0026	0.1873	0.7553	0.0283		
Cell 15	Average	0.5035	0.7296	12.5958	0.1685	Cell 20	Average	0.5043	0.4382	11.7974	0.1174
	Median	0.5038	0.6812	12.2609	0.1746		Median	0.5040	0.3950	11.6624	0.1074
	Minimum	0.4996	0.4046	10.0130	0.1099		Minimum	0.5010	0.3092	9.9984	0.0928
	Maximum	0.5085	1.1639	15.6180	0.2197		Maximum	0.5093	0.8321	14.0562	0.1904
	Coef. of Var.	0.4751	27.9643	13.0020	17.3977		Coef. of Var.	0.4686	30.9037	7.4485	22.6129
Std. Dev.	0.0024	0.2040	1.6377	0.0293	Std. Dev.	0.0024	0.1354	0.8787	0.0266		

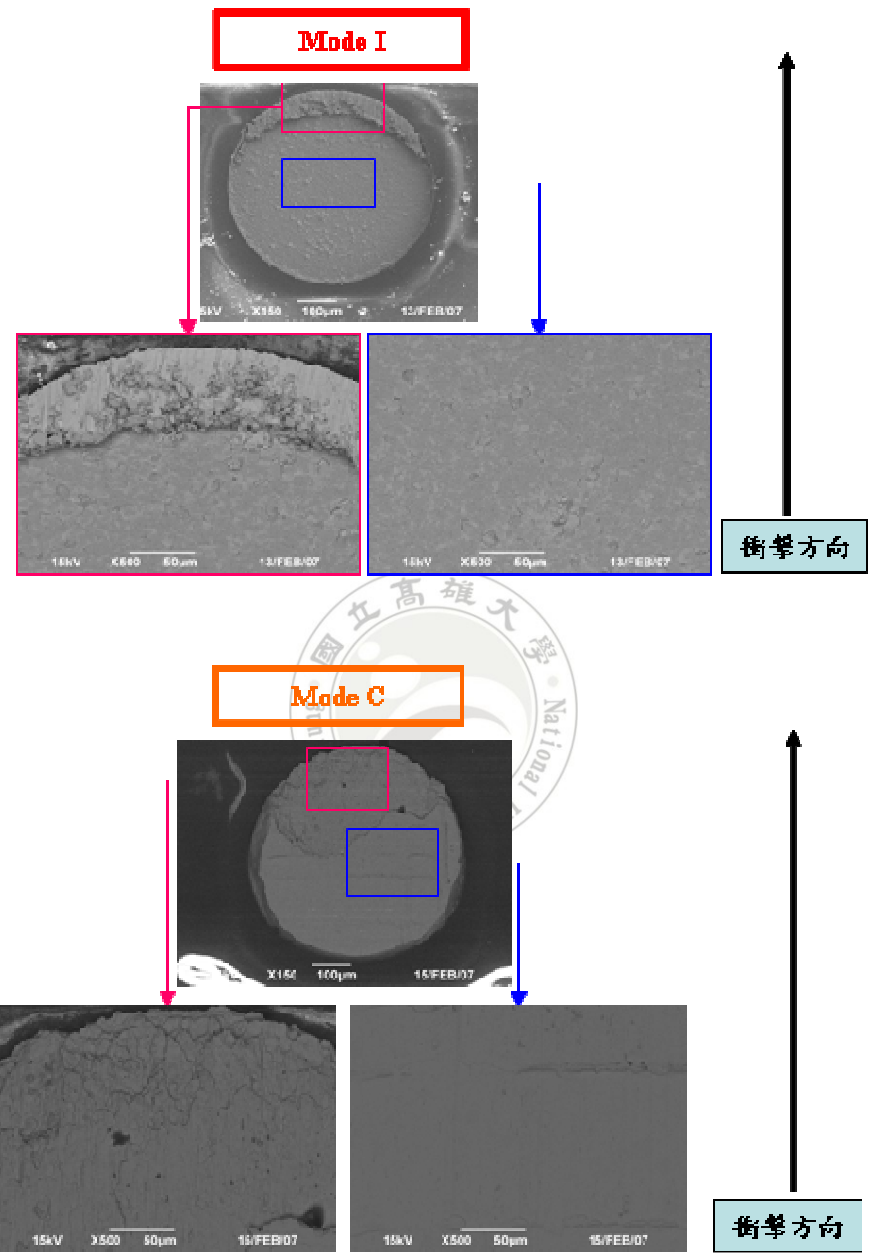
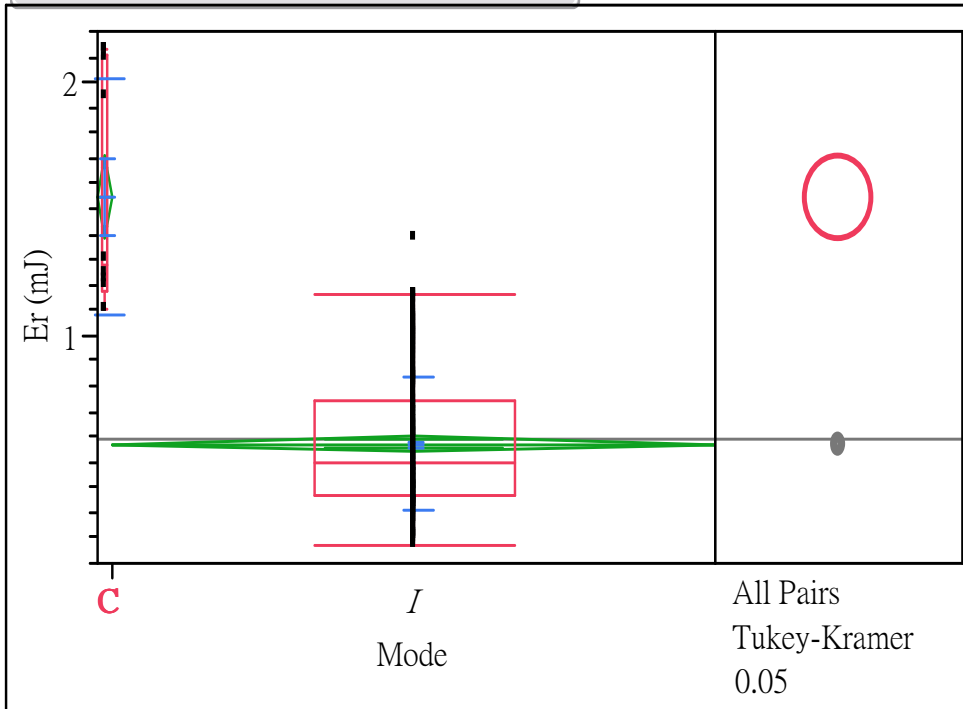


圖 4-1：結構破裂模式之 SEM 圖

Oneway Analysis of E_r (mJ) By Mode



Oneway Analysis of T_r (ms) By Mode

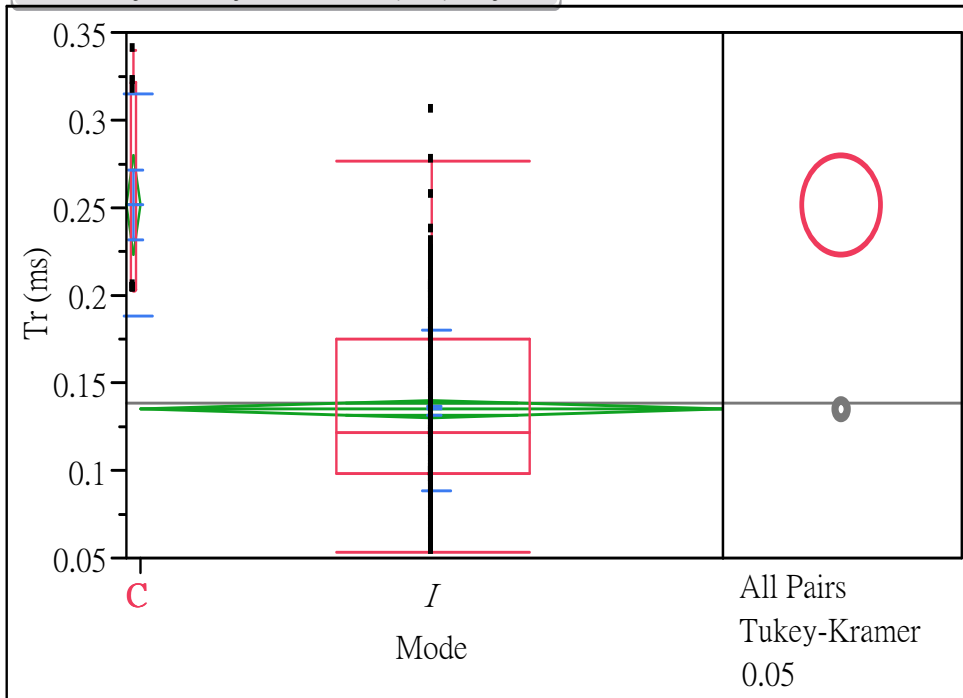
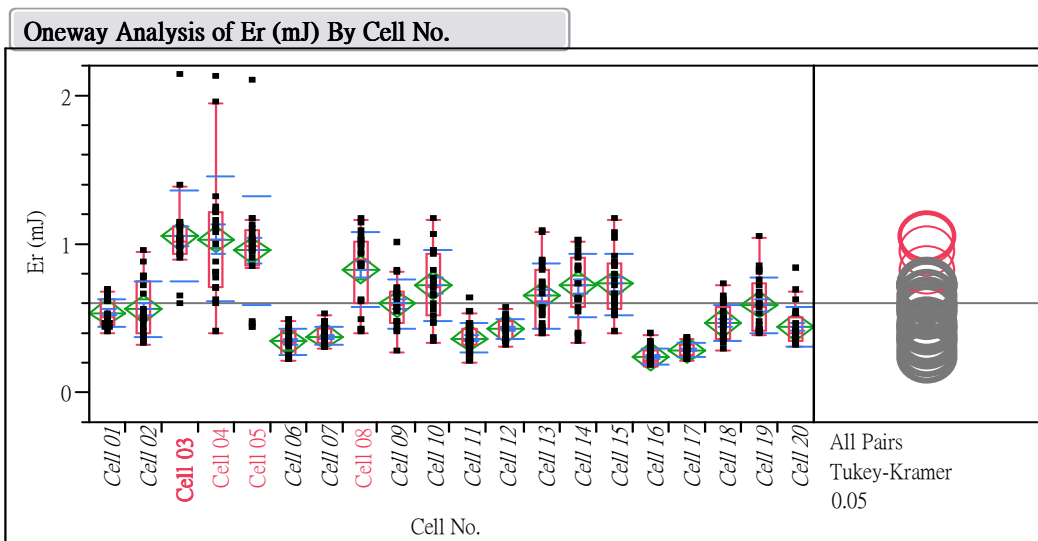


圖 4-2：結構破裂模式 E_r 與 T_r 之量化分析與檢定



Comparisons for all pairs using Tukey-Kramer HSD

Level	Mean
Cell 03 A	1.0528350
Cell 04 A	1.0328300
Cell 05 A B	0.9538450
Cell 08 A B C	0.8282250
Cell 15 B C D	0.7296250
Cell 10 C D	0.7176300
Cell 14 C D	0.7172750
Cell 13 C D E	0.6470450
Cell 09 D E F	0.5943450
Cell 19 D E F	0.5903400
Cell 02 D E F G	0.5606100
Cell 01 D E F G	0.5374100
Cell 18 E F G H	0.4688250
Cell 20 E F G H	0.4381950
Cell 12 E F G H	0.4285950
Cell 07 F G H	0.3773700
Cell 11 F G H	0.3655500
Cell 06 G H	0.3400250
Cell 17 H	0.2858150
Cell 16 H	0.2397200

Levels not connected by same letter are significantly different.

圖 4-3：全組別之 *Er* 的量化分析與檢定

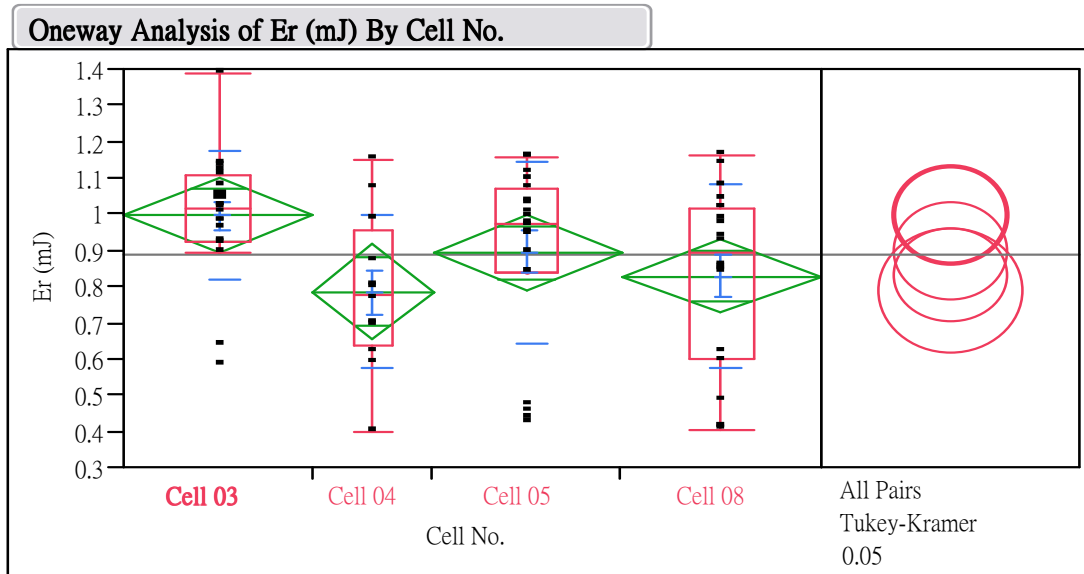


圖 4-4：全組別之 Er 較高群組的量化分析與檢定

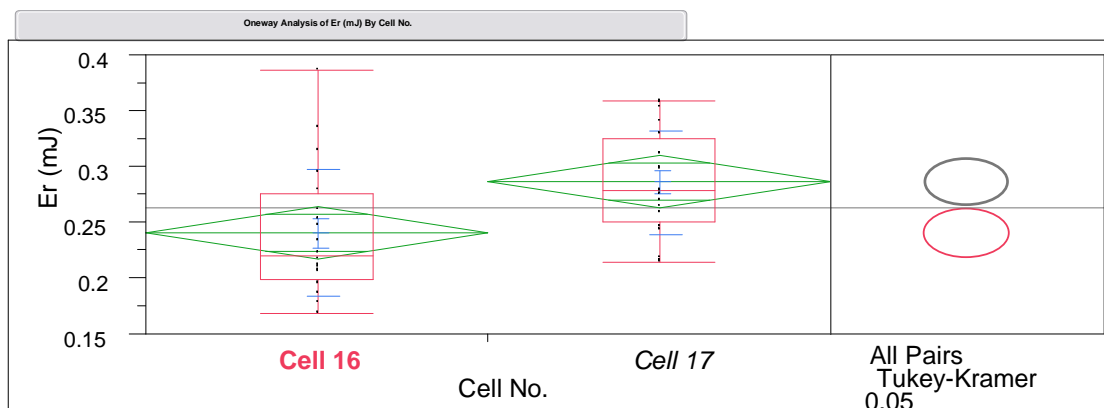
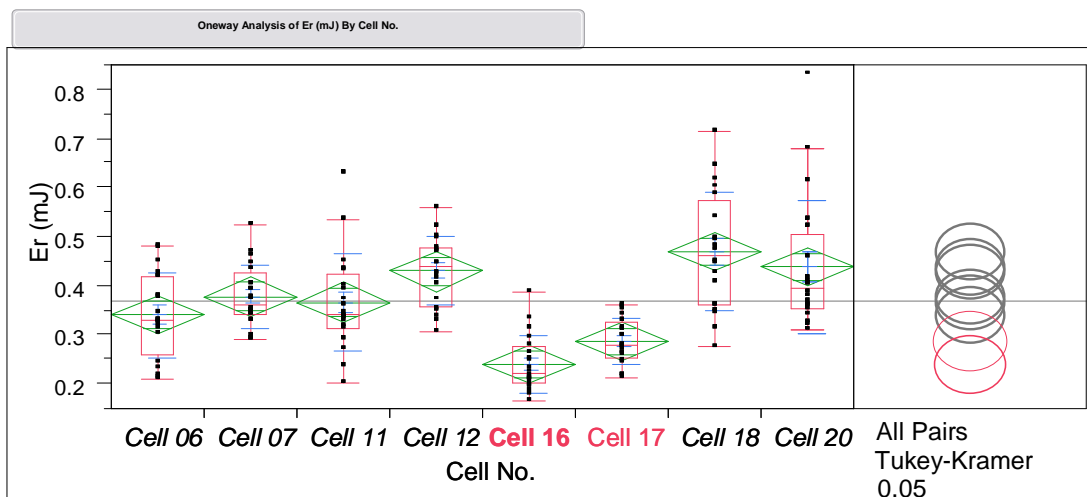
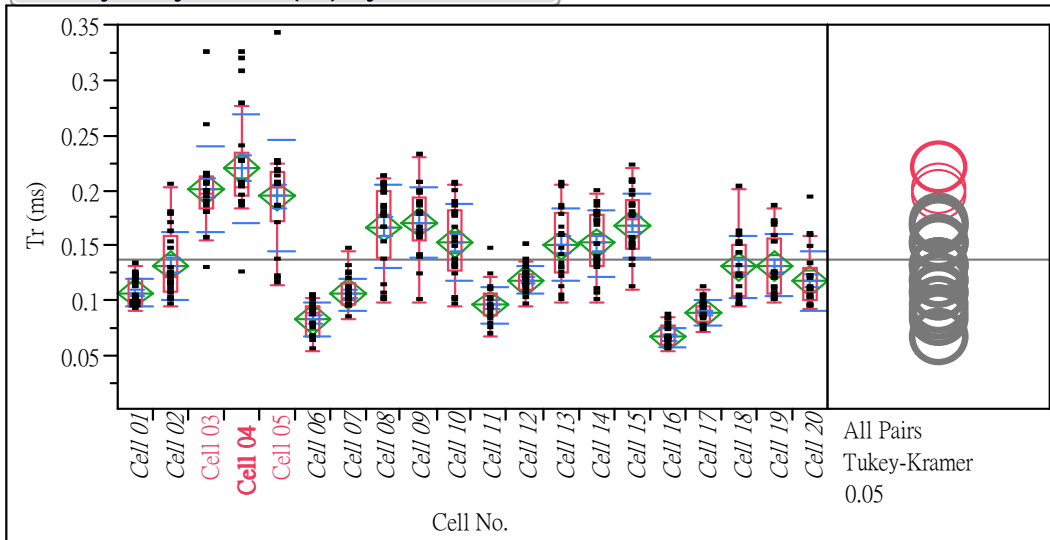


圖 4-5：全組別之 Er 較低群組的量化分析與檢定

Oneway Analysis of Tr (ms) By Cell No.



Comparisons for all pairs using Tukey-Kramer HSD

Level	Mean
Cell 04 A	0.22033500
Cell 03 A B	0.20118000
Cell 05 A B C	0.19458000
Cell 09 B C D	0.17078500
Cell 15 B C D	0.16845500
Cell 08 C D	0.16700500
Cell 10 D E	0.15284000
Cell 14 D E	0.15185500
Cell 13 D E F	0.15028000
Cell 02 E F G	0.13195500
Cell 19 E F G	0.13160500
Cell 18 E F G	0.13037000
Cell 12 F G H	0.11817000
Cell 20 F G H	0.11743000
Cell 01 G H I	0.10705500
Cell 07 G H I	0.10584000
Cell 11 H I J	0.09558000
Cell 17 H I J	0.08873500
Cell 06 I J	0.08323500
Cell 16 J	0.06665000

圖 4-6：全組別之 *Tr* 的量化分析與檢定

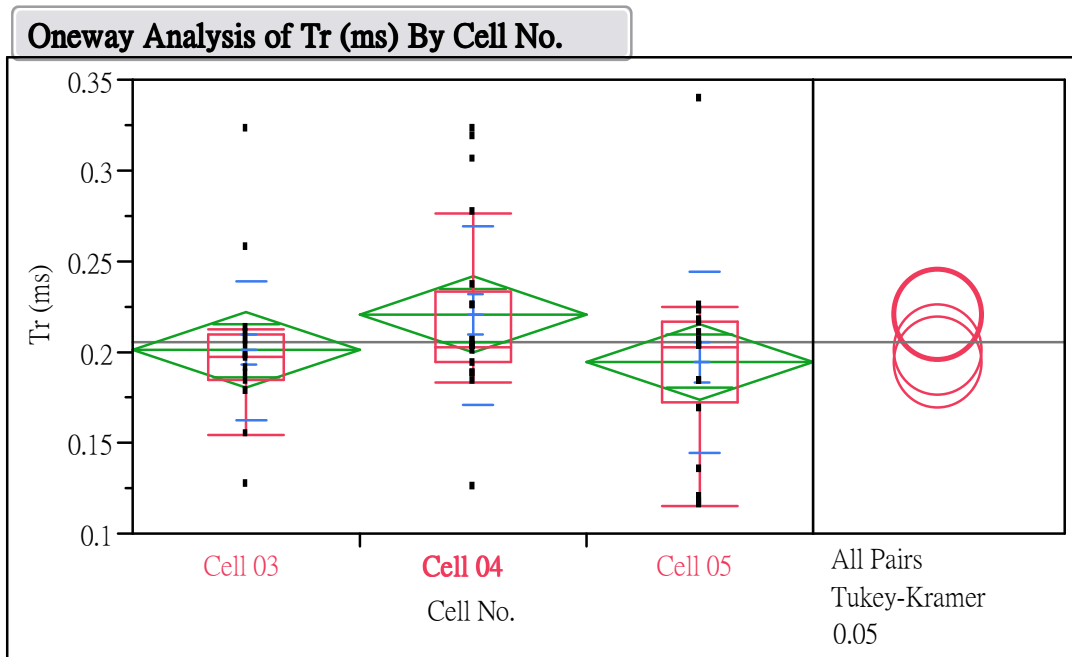


圖 4-7：全組別之 Tr 較高群組的量化分析與檢定

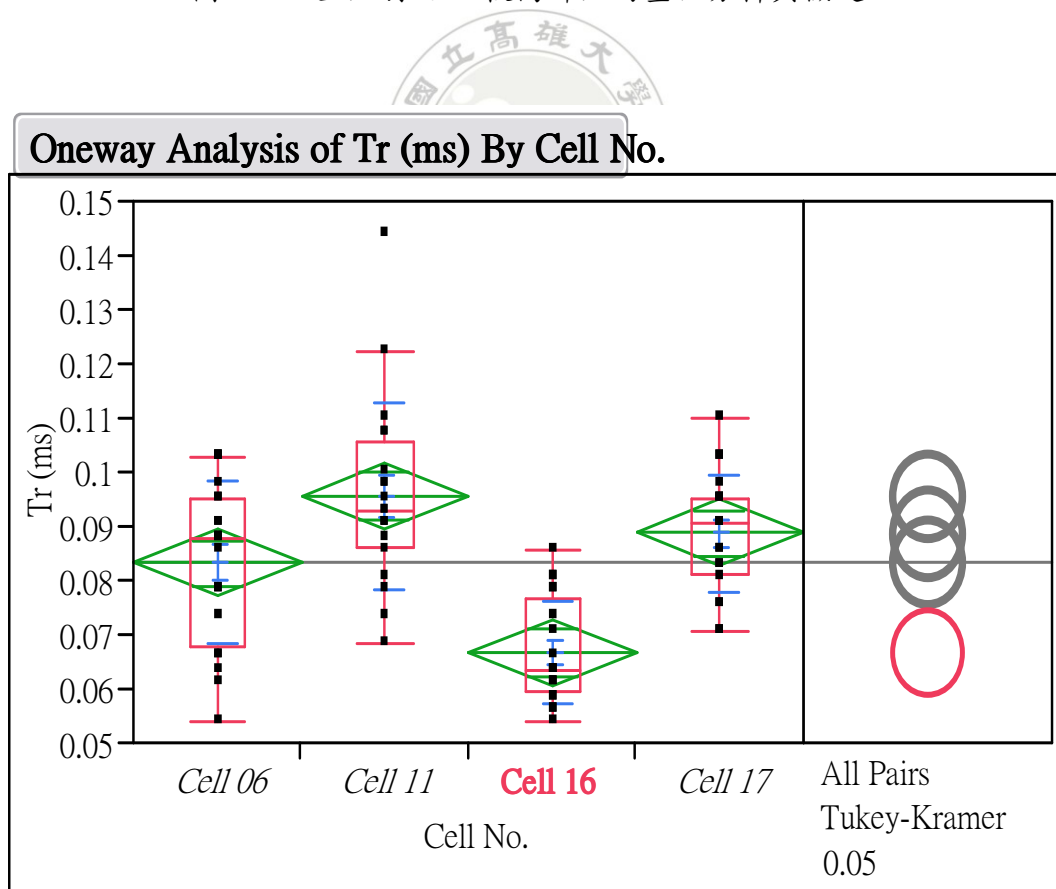
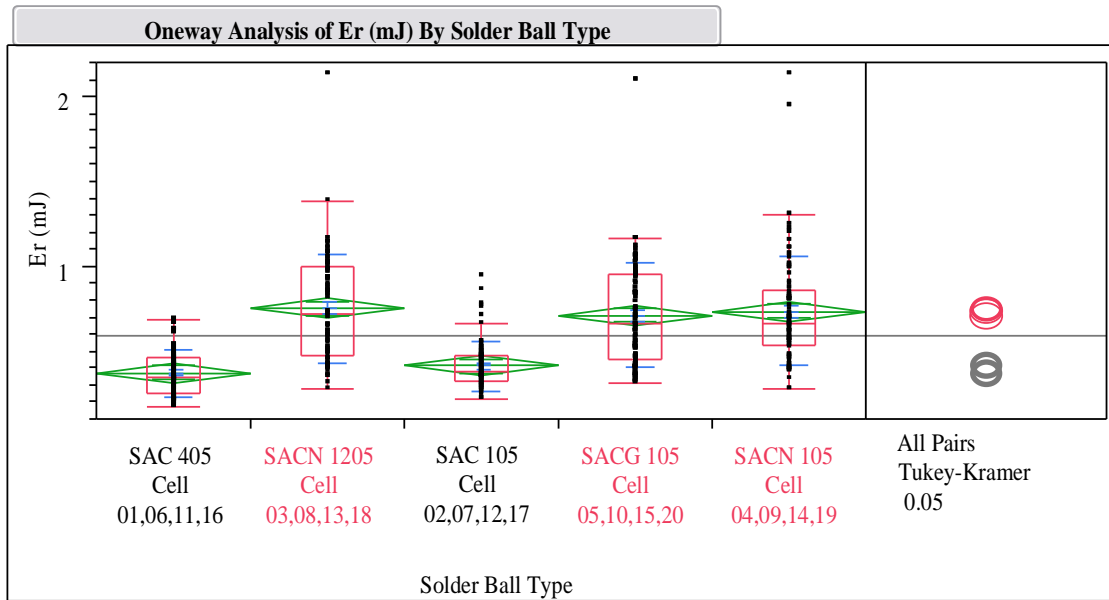


圖 4-8：全組別之 Tr 較低群組的量化分析與檢定



Comparisons for all pairs using Tukey-Kramer HSD

Level		Mean
SACN 1205	A	0.74923250
SACN 105	A	0.73369750
SACG 105	A	0.70982375
SAC 105	B	0.41309750
SAC 405	B	0.37067625

圖 4-9：全數據之錫球成分 *Er* 量化分析與檢定

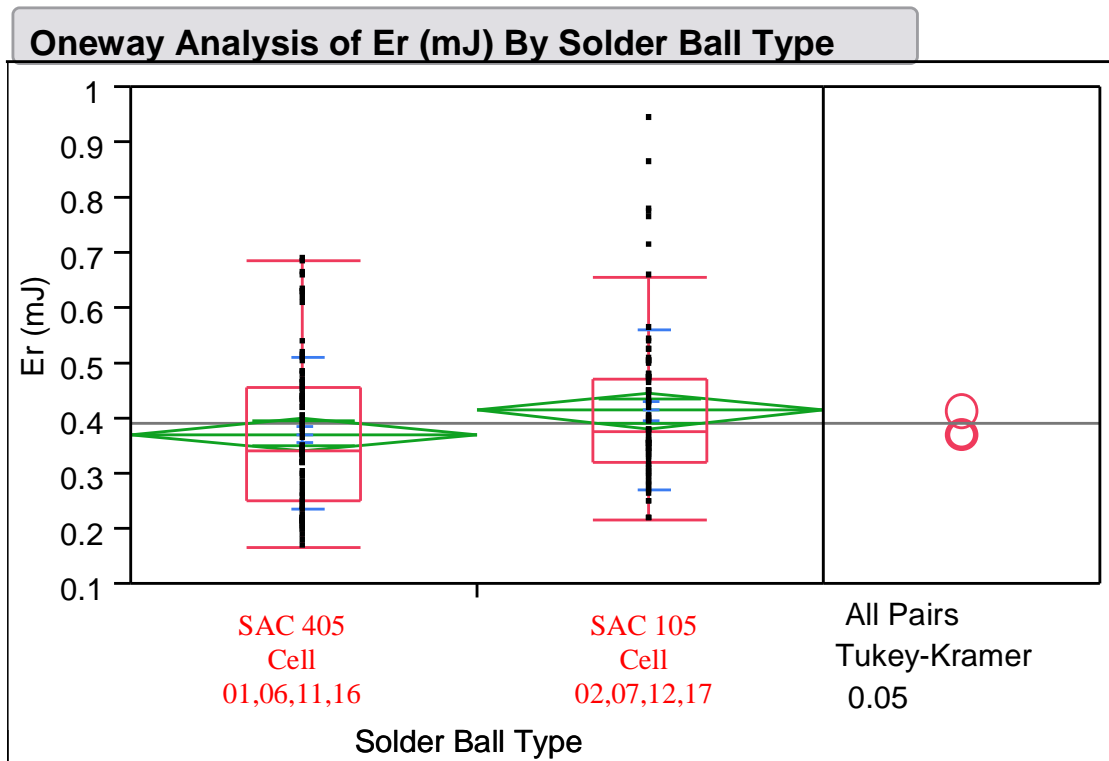
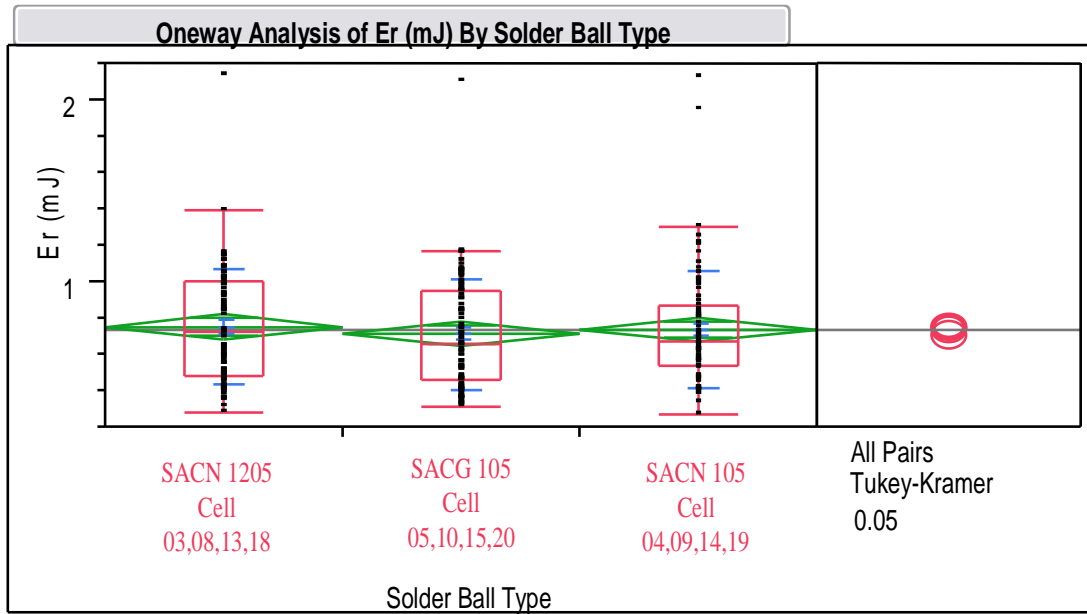
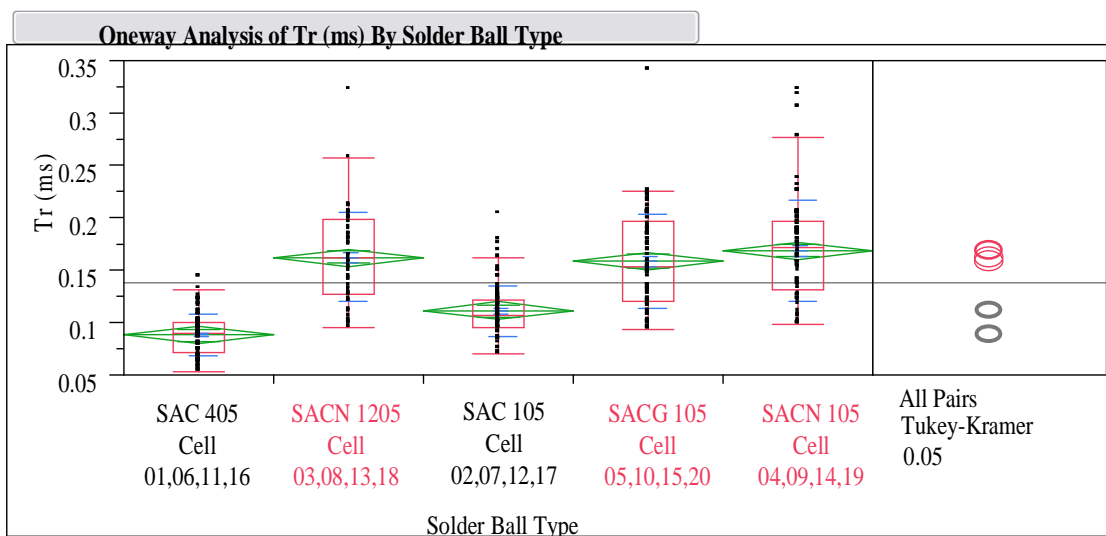


圖 4-10：全數據之錫球成分 Er 較高與較低群組的量化分析與檢定



Comparisons for all pairs using Tukey-Kramer HSD

Level		Mean
SACN 105	A	0.16864500
SACN 1205	A	0.16220875
SACG 105	A	0.15832625
SAC 105	B	0.11117500
SAC 405	C	0.08813000

圖 4-11：全數據之錫球成分之 Tr 量化分析與檢定

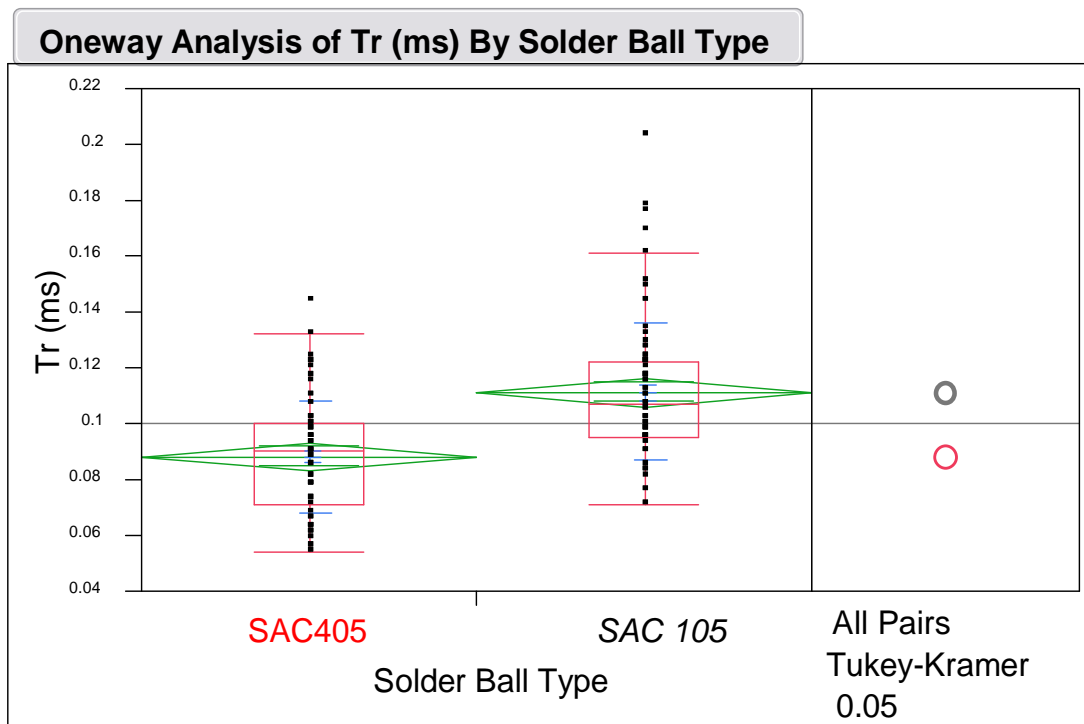
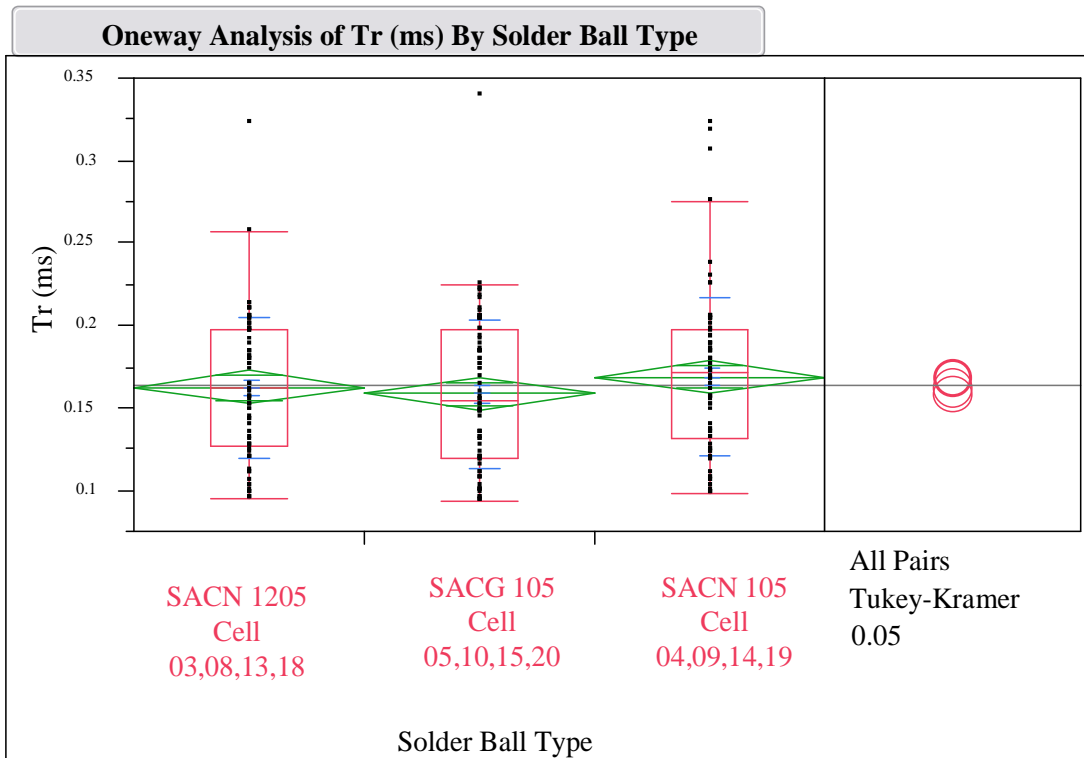


圖 4-12：全數據之錫球成分之 Tr 較高與較低群組的量化分析與檢定

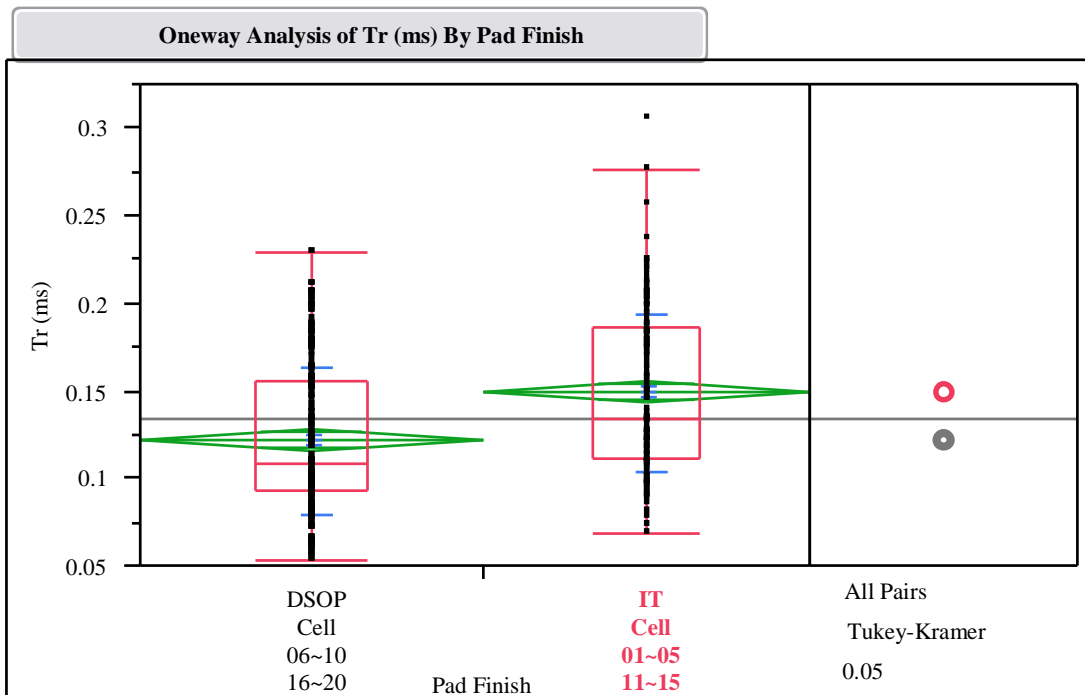
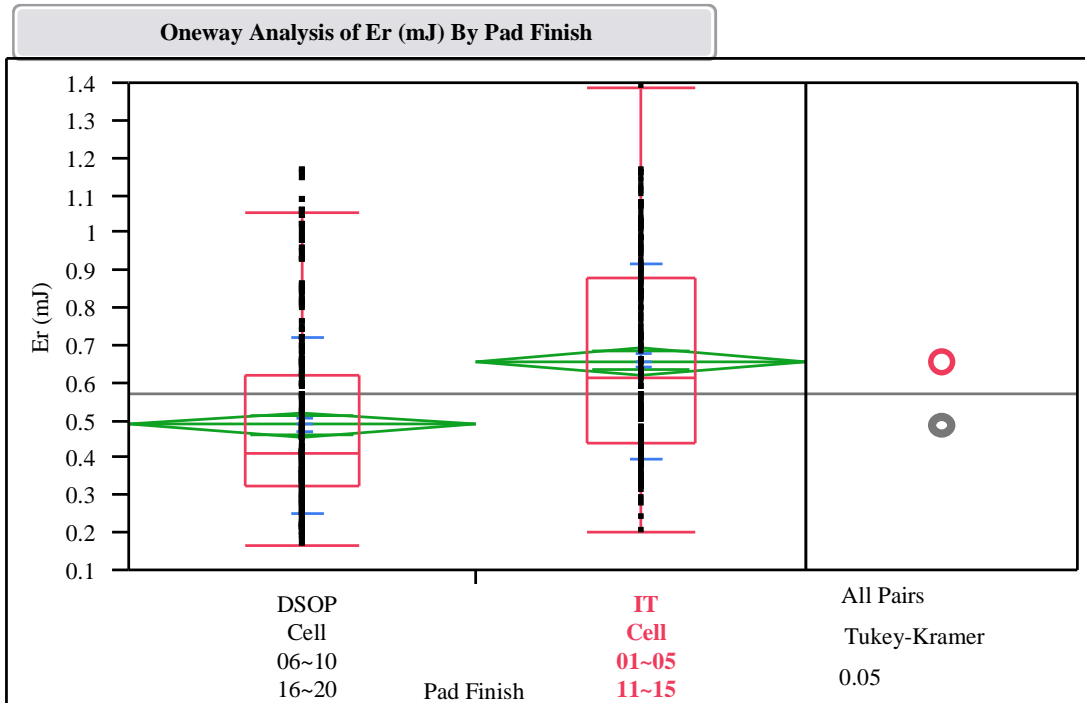


圖 4-13：全數據鐳墊表面處理 Er 與 Tr 之量化分析與檢定

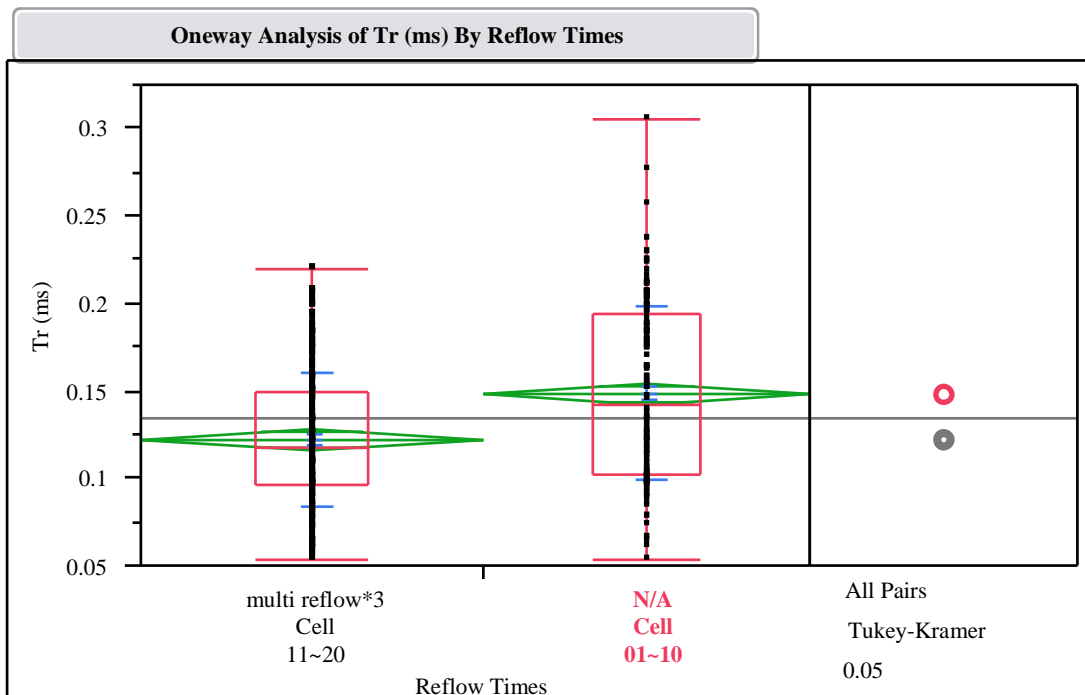
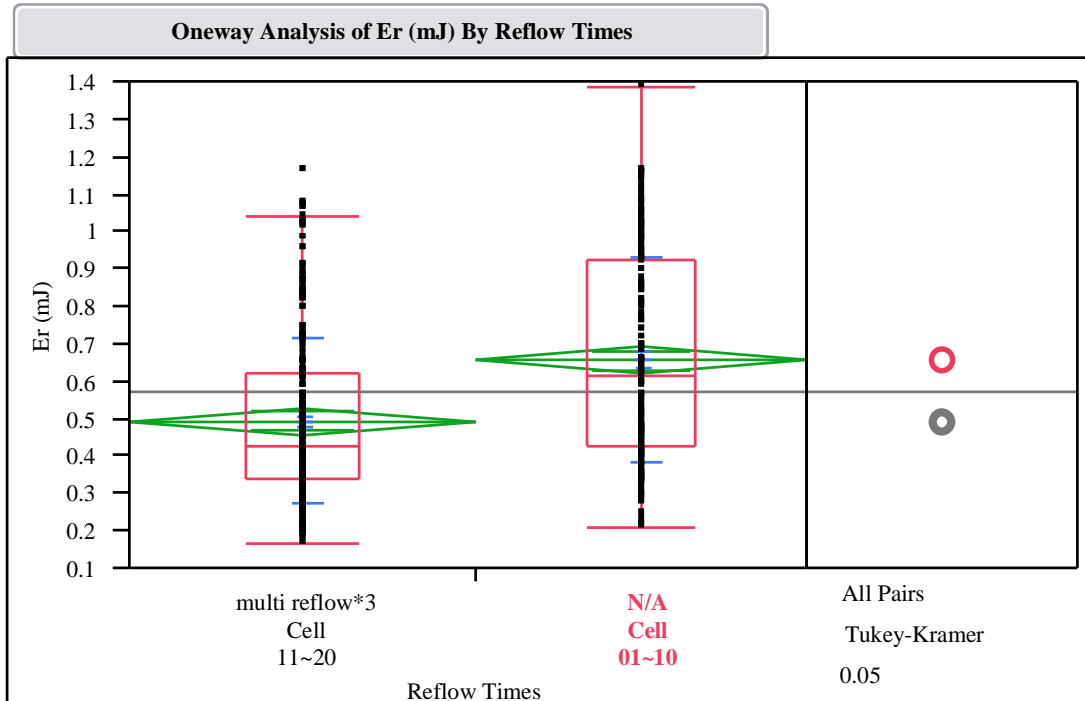


圖 4-14：全數據迴鉸次數 Er 與 Tr 之量化分析與檢定

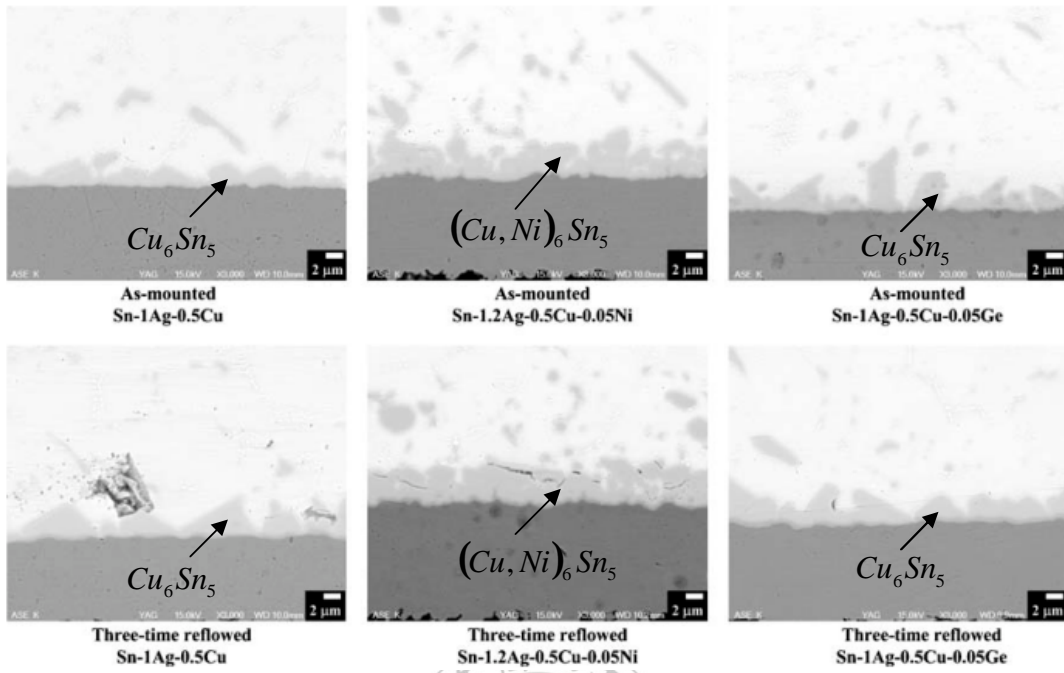


圖 4-15：IT 表面處理之 SJS 橫截面[27]

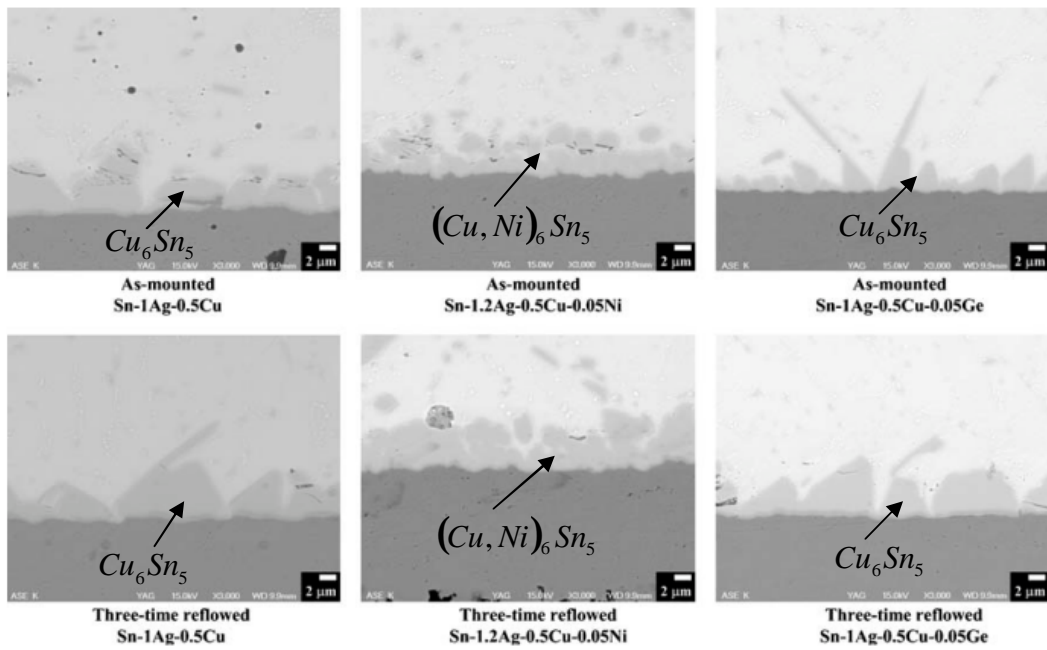


圖 4-16：DSOP 表面處理之 SJS 橫截面[27]

第五章 綜合結論以及未來展望

5-1 綜合結論

本研究之結論歸納如下：

(1) 對SAC 405而言，其結構破裂模式皆為IMC破裂，與掉落測試之文獻上SAC 405 IMC破裂為主之現象相符[3]，且在衝球試驗之文獻上與其他高速衝擊裝置相比，其SAC 405之破裂模式也以IMC破裂為主之現象相符[4]。另外IMC破裂之表面，與文獻上其他高速衝擊裝置所觀察之現象相同[2,4]。而錫球本身破裂之表面，與文獻上其他高速衝擊裝置所觀察之現象相同。

(2) SJS強度，由IMC強度(Mode I)決定且為主要之破裂模式。當IMC強度足以抵抗衝擊荷載時，Mode C 才有可能發生且Mode C 破壞較為延性。

(3) 本研究在衝球試驗下，針對SACN 1205，SAC 105與SACG 105成功量化其SJS之強度與性質。且延性強之結構其強度也較強。故推論提升SJS在動態荷載之延性有助於強度之提升。

(4) 鐸墊表面處理會影響SJS強度與性質。在鐸墊表面處理方法上，IT 與DSOP 相比，IT 為較佳之選擇。

(5) 迴鐸次數會影響SJS強度與性質。迴鐸會降低結構強度與延性且此趨勢與文獻相同[12]，故在製程上應盡量避免多餘之迴鐸。

(6) 較佳之組合為植球後未迴鐸，摻雜鎳或鍍的錫銀銅錫球，並接合於化錫(IT)表面處理之鐸墊。

(7) 與未摻雜之SAC 405與SAC 105對照比較，有摻雜之組別，在強度與延性皆有明顯之提升。鎳的摻雜改變原有錫銀銅錫球之IMC成分組成，而摻雜鍍的錫銀銅錫球卻無此現象，故推論其的主要用途為改善植球後的IMC形貌，進而增加其機

械強度[20]。而摻雜鍺之組別，摻雜之鍺散佈於錫球本身[27]，推論其主要作為強化鉛錫合金機械性質之用[21]。

(8) 在迴鉛三次後摻雜鎳之IMC厚度並無明顯增加，而摻雜鍺與未摻雜之IMC其厚度則明顯增加。故推論鎳的摻雜有助於抑制IMC厚度成長，所以在高溫老化條件下，摻雜鎳的之錫球應有較高之強度。

5-2 未來展望及建議事項

(1) 在動態可靠度上，衝球試驗為一快速低成本之測試方式可提供量化之數據供分析與判斷，在評估新錫球接點結構組成上，可作為一評估依據。並可利用量化之數據，轉化為有限元素模型之參數。

(2) 評估動態可靠度之檢驗標準上，可利用通過掉落衝擊測試之SJS，在相同結構尺寸與組成下，可以取其最小SJS強度，作檢驗標準下限，以節省時間與成本。

(3) 目前衝球試驗與動態可靠度之關連性上，有其正相關性，但如何取得其關聯性函數，並歸納為模組，仍需進一步研究。

(4) 實驗過程中發現，衝擊曲線上，曲線從受力開始便有抖動之現象，就抖動之頻率研判，此為結構共振所造成，所以在設計裝置時，結構共振應詳加考量，尤其在撞針部份。

參考文獻

- [1] Advanced Semiconductor Engineering, Inc.
- [2] Lai, Y.-S., Chang, H.-C., Yeh, C.-L., “*Evaluation of Solder Joint Strengths Under Ball Impact Test*”, *Microelectronics Reliability*, Vol. 47, pp. 2179–2187, 2007.
- [3] Lai, Y.-S., Yang, P.-F., Yeh, C.-L., “*Experimental Studies of Board-level Reliability of Chip-scale Packages Subjected to JEDEC Drop Test Condition*”, *Microelectronics Reliability*, Vol. 46, pp. 645-650, 2006.
- [4] Lai, Y.-S., Yang, P.-C., Yeh, C.-L., “*Effects of Different Drop Test Conditions on Board-level Reliability of Chip-scale Packages*”, *Microelectronics Reliability*, Vol. 48, pp. 274–281, 2008.
- [5] “*Subassembly Mechanical Shock*”, JESD22-B110, JEDEC Solid State Technology Association , March 2001.
- [6] “*Board Level Drop Test Method of Components for Handheld Elec-ronic Products*”, JESD22-B111, JEDEC Solid State Technology Association , July 2003.
- [7] Wong, E. H., Rajoo, R., Mai, Y. W., Seah, S. K. W., Tsai, K. T., Yap, L. M., “*Drop Impact: Fundamentals and Impact Characterisation of Solder Joints*”, *Proc. 55th Electron. Comp. Technol. Conf.*, Lake Buena Vista, FL, pp. 1202-1209, 2005.
- [8] Yeh, C.-L., Lai, Y.-S., Chang, H.-C., Chen, T.-H., “*Empirical Correlation Between Package-level Ball Impact Test and Board-level Drop Reliability*”, *Microelectronics Reliability*, Vol. 47, pp. 1127- 1134, 2007.

- [9] Wong, E.H., Rajoo, R., Seah, S.K.W., Selvanayagam, C.S., Driel, W.D.van, Caers, J.F.J.M., Zhao X.J., Owens, N., Tan, L.C., Leoni, M., Eu, P.L., Lai, Y.-S., Yeh, C.-L. “*Correlation studies for component level ball impact shear test and board level drop test*”, *Microelectronics Reliability*, Vol. 48, 1069–1078, 2008.
- [10] Huang, X., Lee, S.-W. R., Yuan, C. C. and Hui, S., “*Characterization and analysis on the solder ball shear testing condition*”, *Proc. 51st Electr. Comp. Technol. Conf.*, Orlando, FL, USA, pp. 1065-1071, 2001.
- [11] Canumalla, S., Yang, H.-D., Viswanadham, P. and Reinikainen, T. O., “*Package to board interconnection shear strength (PBISS): effect of surface finish, PWB build-up layer and chip scale package structure*”, *IEEE Trans. Comp. Pack. Technol.*, Vol. 27, No. 1, pp. 182-190, 2004.
- [12] Chia, J. Y. H. , Cotterell, B. , Chai, T. C. “*The mechanics of the solder ball shear test and the effect of shear rate*”, *Materials Science and Engineering*, Vol. A 417 pp. 259–274, 2006.
- [13] Wong, E.H., Selvanayagam, C.S., Seah, S.K.W., Driel, W.D. van, Caers, J.F.J.M., Zhao, X.J., Owens, N., Tan, L.C., Frear, D.R., Leoni, M., Lai, Y.-S., Yeh, C.-L. “*Stress–strain characteristics of tin-based solder alloys at medium strain rate*”, *Materials Letters*, Vol. 62, pp. 3031–3034, 2008.
- [14] Newman, K., “*BGA brittle fracture – alternative solder joint integrity test methods*”, *Proc. 55th Electr. Comp. Technol. Conf.*, Lake Buena Vista, FL, pp. 1194-1201, 2005.
- [15] 15. Ou, S., Xu, Y., Tu, K. N., Alam, M. O., Chan, Y. C., “*Micro-impact test on lead-free BGA balls on Au/Electrolytic Ni/Cu bond pad*”, *Proc. 55th Electr. Comp. Technol. Conf.*, Lake Buena Vista, FL, pp. 467-471, 2005.

- [16] Yeh, C.-L., Lai, Y.-S., Yang, P.-F., “*Transient deformation and fracturing of solder joints subjected to impact loads*”, *Proc. 9th IMAPS Topical Workshop Flip Chip Technol.*”, Austin, TX, USA, 2004.
- [17] Yeh, C.-L., Lai, Y.-S., ” *Transient simulation of solder joint fracturing under impact test*”, *Proc. 6th Electr. Pack. Technol. Conf.*, pp. 689-694, Singapore, 2004.
- [18] Date, M., Shoji, T., Fujiyoshi, M., Sato, K., Tu, K. N., “*Ductile-to-Brittle Transition in Sn-Zn Solder Joints Measured by Impact Test*”. *Scripta Mater.*, Vol. 51, pp. 641-645, 2004.
- [19] Yeh, C.-L. and Lai, Y.-S., “*Design Guideline for Ball Impact Test Apparatus*”, *J. Electron. Packag.*, Vol. 129, No. 1, pp. 98-104, 2007.
- [20] Chuang, C.-M., Lin, K.-L., “*Effect of Microelements Addition on the Interfacial Reaction Between Sn-Ag-Cu Solders and the Cu Substrate*”, *J. Electron. Mater.*, Vol. 32, No. 12, pp. 1426-1431, 2003.
- [21] Habu, K., Takeda, N., Watanabe, H., Ooki, H., Abe, J., Saito, T., Taniguchi, Y., Takayama, K., “*Development of Lead-free Solder Alloys of the Ge Doped Sn-Ag-Bi system*”, *Proc. EcoDesign: 1st Int. Symp. Environ. Conscious Design Inverse Manuf.*, Tokyo, Japan, pp. 606-609, 1999.
- [22] Wang, H., Zhao, M. and Guo, Q., “*Vibration fatigue experiments of SMT solder joint*”, *Microelectronics Reliability*, Vol. 44, No. 7, pp. 1143-1156, 2004.
- [23] Wong, E. H., Mai, Y.-W., Rajoo, R., Tsai, K. T., Liu, F., Seah, S. K. W., Yeh, C.-L., “*Micro Impact Characterisation of Solder Joint for Drop Impact Application*”, *Proc. 56th Electr. Comp. Technol. Conf.*, San Diego, CA, pp. 64-71, 2006.

- [24] Yeh, C.-L., Lai, Y.-S., “*Transient analysis of impact fracturing of solder joints*”, Proc. EuroSimE, pp. 503-509, Berlin, Germany, 2005.
- [25] Yeh, C.-L., Li, B.-Y., Lai, Y.-S., Jen, M.-H. R., “*Numerical investigations of displacement-controlled impact loads on solder joints*”, Proc. IMAPS Taiwan Tech. Symp., pp. 44-49, Taipei, Taiwan, 2005.
- [26] Yeh, C.-L., Lai, Y.-S., “*Transient fracturing of solder joints subjected to displacement-controlled impact loads*”, Microelectronics Reliability, Vol. 46 pp. 885–895, 2006.
- [27] Lai, Y.-S., Song, J.-M., Chang, H.-C., Chiu, Y.-T., “*Ball Impact Responses of Ni- or Ge-Doped Sn-Ag-Cu Solder Joints*”, Journal of Electronic Materials, Vol. 37 pp.201-209, 2008



附錄

表 A-1：第 1 組實驗數據與失效模式分類

Cell No.	Test no	Mode	V_i (m/s)	E_r (mJ)	F_{max} (N)	T_r (ms)
Cell 01	1	I	0.5060	0.5175	16.9025	0.0928
	2	I	0.5022	0.4587	15.0779	0.0928
	3	I	0.5009	0.4744	16.2748	0.0952
	4	I	0.5049	0.5110	16.1873	0.1001
	5	I	0.4985	0.4991	16.9901	0.1001
	6	I	0.4995	0.4593	15.3991	0.1025
	7	I	0.5022	0.4665	17.1360	0.0903
	8	I	0.5017	0.6278	15.4283	0.1221
	9	I	0.5083	0.6149	15.6764	0.1172
	10	I	0.4951	0.6795	14.4941	0.1318
	11	I	0.5029	0.4267	15.3553	0.1099
	12	I	0.5011	0.6044	14.8590	0.1172
	13	I	0.4986	0.4365	14.8298	0.0977
	14	I	0.4975	0.5065	17.4571	0.0952
	15	I	0.5040	0.6546	16.1581	0.1221
	16	I	0.4915	0.6594	17.4863	0.1147
	17	I	0.4994	0.6838	16.2748	0.1245
	18	I	0.4970	0.4415	15.3553	0.0952
	19	I	0.5053	0.6264	15.6034	0.1196
	20	I	0.5024	0.3997	12.0857	0.1001

表 A-2：第 2 組實驗數據與失效模式分類

Cell No.	Test no	Mode	V_i (m/s)	E_r (mJ)	F_{max} (N)	T_r (ms)
Cell 02	1	I	0.5094	0.3189	11.4873	0.1050
	2	I	0.5063	0.6542	12.5966	0.1440
	3	I	0.5074	0.4980	13.0783	0.1245
	4	I	0.5046	0.4769	13.0491	0.1172
	5	I	0.5039	0.7119	13.0053	0.1514
	6	I	0.4995	0.5064	13.0199	0.1221
	7	I	0.5083	0.4954	13.3264	0.1147
	8	I	0.5045	0.3665	11.9106	0.0977
	9	I	0.5062	0.3393	10.9180	0.1074
	10	I	0.5075	0.3949	11.1224	0.1123
	11	I	0.5049	0.7589	11.6186	0.1782
	12	I	0.5101	0.5409	13.2972	0.1270
	13	I	0.5056	0.8617	13.5745	0.1758
	14	I	0.5061	0.4265	13.2242	0.1001
	15	I	0.5053	0.3772	12.3338	0.0952
	16	I	0.5073	0.4634	12.0419	0.1196
	17	I	0.5034	0.7759	13.6475	0.1611
	18	I	0.5022	0.5363	13.5599	0.1147
	19	I	0.5083	0.9407	13.0345	0.2026
	20	I	0.5070	0.7683	12.9761	0.1685

表 A-3：第 3 組實驗數據與失效模式分類

Cell No.	Test no	Mode	V_i (m/s)	E_r (mJ)	F_{max} (N)	T_r (ms)
Cell 03	1	I	0.5090	1.0197	14.9028	0.2051
	2	I	0.5064	0.6374	12.1733	0.1538
	3	I	0.5086	1.1163	15.7786	0.2100
	4	I	0.5039	1.1073	16.0559	0.2124
	5	I	0.5046	1.0126	14.6984	0.2100
	6	I	0.5071	0.9592	13.2388	0.1953
	7	I	0.5059	1.0042	13.8519	0.1978
	8	I	0.5048	1.0228	15.9245	0.1831
	9	C	0.5051	2.1357	16.7565	0.3223
	10	I	0.5072	0.5825	13.3848	0.1270
	11	I	0.5025	1.1372	15.3407	0.1904
	12	I	0.5056	1.1331	13.8665	0.2124
	13	I	0.5083	0.9155	14.1584	0.1782
	14	I	0.4989	1.0742	15.9245	0.2051
	15	I	0.5061	0.9217	12.4068	0.1978
	16	I	0.5018	0.8914	14.5817	0.1782
	17	I	0.5086	1.0426	15.7494	0.1978
	18	I	0.5047	0.9784	15.4283	0.1880
	19	I	0.5059	0.9796	14.6255	0.2026
	20	I	0.5094	1.3853	16.4646	0.2563

表 A-4：第 4 組實驗數據與失效模式分類

Cell No.	Test no	Mode	V_i (m/s)	E_r (mJ)	F_{max} (N)	T_r (ms)
Cell 04	1	C	0.5064	1.3037	17.5593	0.2026
	2	C	0.5053	2.1263	17.1798	0.3174
	3	C	0.5064	1.1020	15.8224	0.2026
	4	C	0.5080	1.1989	17.5885	0.2026
	5	C	0.4973	1.2458	17.0484	0.2026
	6	C	0.5057	1.2143	18.1724	0.2026
	7	C	0.5075	1.1006	15.4720	0.2051
	8	I	0.5102	0.3975	10.0568	0.1245
	9	I	0.5045	0.7998	12.8301	0.1929
	10	I	0.5074	0.8711	11.9689	0.2246
	11	I	0.5092	0.6932	11.2829	0.1880
	12	I	0.5044	0.7947	12.3630	0.2051
	13	I	0.5054	0.6958	10.7720	0.2002
	14	I	0.5079	0.6157	10.6261	0.1831
	15	I	0.5086	0.5890	8.9621	0.1880
	16	I	0.5031	1.1522	13.8810	0.2368
	17	C	0.5078	1.9412	15.3261	0.3223
	18	I	0.5093	0.7641	10.4947	0.2246
	19	I	0.5070	0.9825	11.0348	0.2759
	20	I	0.5040	1.0682	12.3484	0.3052

表 A-5：第 5 組實驗數據與失效模式分類

Cell No.	Test no	Mode	V_i (m/s)	E_r (mJ)	F_{max} (N)	Tr (ms)
Cell 05	1	I	0.5072	1.0300	15.2239	0.2173
	2	I	0.5044	0.8948	14.3919	0.1831
	3	I	0.5077	0.9889	15.2531	0.2051
	4	C	0.5034	2.0987	16.8149	0.3394
	5	I	0.5049	0.4726	11.6332	0.1172
	6	I	0.5073	0.4319	11.5602	0.1196
	7	I	0.5083	0.4235	11.7062	0.1147
	8	I	0.5026	0.9467	13.9248	0.2026
	9	I	0.5047	1.0306	15.2823	0.2026
	10	I	0.5058	0.9649	14.9028	0.1831
	11	I	0.5054	1.1561	16.1143	0.2222
	12	I	0.5062	0.8353	13.7789	0.1685
	13	I	0.5091	1.0027	14.8736	0.2100
	14	I	0.5064	1.1563	15.5742	0.2246
	15	I	0.5044	1.0715	15.5888	0.2026
	16	I	0.5042	1.1135	15.5888	0.2222
	17	I	0.5064	0.9393	15.4137	0.2148
	18	I	0.5016	0.9735	13.7205	0.2051
	19	I	0.5033	1.0942	16.5522	0.2026
	20	I	0.5026	0.4519	11.5748	0.1343

表 A-6：第 6 組實驗數據與失效模式分類

Cell No.	Test no	Mode	V_i (m/s)	E_r (mJ)	F_{max} (N)	Tr (ms)
Cell 06	1	I	0.4972	0.3282	13.5745	0.0903
	2	I	0.5027	0.3130	14.3481	0.0781
	3	I	0.5018	0.4276	15.7640	0.0879
	4	I	0.4932	0.2091	12.0565	0.0659
	5	I	0.5011	0.4489	14.3919	0.0952
	6	I	0.4978	0.4175	14.3919	0.0952
	7	I	0.5018	0.4776	15.6618	0.0903
	8	I	0.4976	0.4822	15.6764	0.1025
	9	I	0.5037	0.2444	12.5236	0.0635
	10	I	0.4976	0.2325	13.8519	0.0610
	11	I	0.5069	0.2998	14.6255	0.0732
	12	I	0.5036	0.3278	14.5671	0.0854
	13	I	0.4995	0.2130	13.3410	0.0537
	14	I	0.5067	0.4175	13.4140	0.1025
	15	I	0.5027	0.3768	14.3335	0.0879
	16	I	0.4993	0.2171	11.7354	0.0659
	17	I	0.5042	0.3778	11.7354	0.1025
	18	I	0.5038	0.3207	13.7497	0.0781
	19	I	0.5046	0.3454	11.6040	0.0977
	20	I	0.5004	0.3236	12.2317	0.0879

表 A-7：第 7 組實驗數據與失效模式分類

Cell No.	Test no	Mode	V_i (m/s)	E_r (mJ)	F_{max} (N)	Tr (ms)
Cell 07	1	I	0.4997	0.4343	10.9910	0.1221
	2	I	0.4983	0.3307	11.5019	0.0928
	3	I	0.5019	0.4618	11.5019	0.1294
	4	I	0.5064	0.3412	11.9689	0.0952
	5	I	0.4986	0.5214	11.2245	0.1440
	6	I	0.4992	0.2892	9.6481	0.1025
	7	I	0.5034	0.3496	11.9397	0.0977
	8	I	0.5023	0.4017	10.7866	0.1099
	9	I	0.5004	0.4685	13.3702	0.1074
	10	I	0.5078	0.3709	12.7863	0.0977
	11	I	0.5018	0.2886	11.9689	0.0830
	12	I	0.5020	0.3925	14.0854	0.1050
	13	I	0.5055	0.3762	13.3994	0.0977
	14	I	0.5057	0.3908	9.8671	0.1172
	15	I	0.5013	0.2978	10.8012	0.1001
	16	I	0.4970	0.3396	12.2901	0.0928
	17	I	0.5084	0.3510	10.9472	0.0952
	18	I	0.5021	0.4453	10.9326	0.1245
	19	I	0.5027	0.3477	12.1149	0.1001
	20	I	0.5005	0.3486	11.8814	0.1025

表 A-8：第 8 組實驗數據與失效模式分類

Cell No.	Test no	Mode	V_i (m/s)	E_r (mJ)	F_{max} (N)	Tr (ms)
Cell 08	1	I	0.5006	0.8480	15.3261	0.1636
	2	I	0.4999	1.1394	16.0559	0.1978
	3	I	0.5010	0.8348	14.4065	0.1636
	4	I	0.5015	1.0787	13.4578	0.2100
	5	I	0.5023	0.8419	14.1584	0.1758
	6	I	0.5006	0.9865	14.6109	0.2002
	7	I	0.5004	1.1593	15.8953	0.2051
	8	I	0.5029	0.8574	12.9323	0.1807
	9	I	0.5088	0.9739	14.3335	0.1733
	10	I	0.5044	1.0144	14.5671	0.1831
	11	I	0.5055	0.9326	13.9248	0.1782
	12	I	0.5005	0.4027	12.4944	0.1050
	13	I	0.5059	0.4072	13.2972	0.1001
	14	I	0.5084	0.4843	12.7571	0.1123
	15	I	0.5017	0.4102	12.6404	0.0977
	16	I	0.5052	1.0412	13.6621	0.2026
	17	I	0.5071	0.6181	11.6186	0.1514
	18	I	0.5055	0.5937	12.7571	0.1343
	19	I	0.5058	0.9236	13.4432	0.1953
	20	I	0.5017	1.0166	15.0050	0.2100

表 A-9：第 9 組實驗數據與失效模式分類

Cell No.	Test no	Mode	V_i (m/s)	E_r (mJ)	F_{max} (N)	Tr (ms)
Cell 09	1	I	0.4975	1.0038	15.4137	0.1855
	2	I	0.4952	0.4501	12.0857	0.1221
	3	I	0.5018	0.2708	9.5022	0.0977
	4	I	0.4989	0.6918	11.4289	0.1831
	5	I	0.5018	0.5635	10.5531	0.1563
	6	I	0.5023	0.6357	9.8087	0.1782
	7	I	0.5000	0.4120	9.5752	0.1392
	8	I	0.5025	0.6578	8.9329	0.2051
	9	I	0.5015	0.4729	8.8891	0.1538
	10	I	0.5072	0.5282	9.2832	0.1636
	11	I	0.5029	0.5509	10.2758	0.1611
	12	I	0.5075	0.5658	9.8233	0.1758
	13	I	0.5061	0.6793	11.2099	0.1978
	14	I	0.5107	0.8033	10.7429	0.2295
	15	I	0.5043	0.6596	10.7283	0.1953
	16	I	0.5004	0.8136	11.8960	0.2051
	17	I	0.5080	0.4637	9.2248	0.1563
	18	I	0.5011	0.3939	8.7140	0.1367
	19	I	0.5062	0.6515	10.4509	0.1855
	20	I	0.5044	0.6187	9.8233	0.1880

表 A-10：第 10 組實驗數據與失效模式分類

Cell No.	Test no	Mode	V_i (m/s)	E_r (mJ)	F_{max} (N)	Tr (ms)
Cell 10	1	I	0.4984	0.9529	14.5233	0.1978
	2	I	0.4994	0.8092	13.3556	0.1782
	3	I	0.5071	1.1570	15.5304	0.2051
	4	I	0.5029	0.7386	13.7935	0.1538
	5	I	0.5028	0.6912	14.7130	0.1318
	6	I	0.5066	0.6482	13.0491	0.1514
	7	I	0.5055	1.0548	14.7130	0.1831
	8	I	0.5039	1.0555	13.9978	0.2026
	9	I	0.5043	0.6394	13.1804	0.1343
	10	I	0.5050	0.5109	11.5602	0.1294
	11	I	0.5025	0.3602	12.3484	0.0977
	12	I	0.5031	0.9449	15.3991	0.1880
	13	I	0.5073	0.4697	16.0851	0.0952
	14	I	0.5036	0.5521	14.1000	0.1270
	15	I	0.5064	0.9229	13.4432	0.1758
	16	I	0.4995	0.7579	12.1733	0.1733
	17	I	0.5040	0.3331	11.1807	0.1001
	18	I	0.5009	0.4529	11.5165	0.1221
	19	I	0.5071	0.7135	11.6478	0.1636
	20	I	0.5076	0.5877	11.1807	0.1465

表 A- 11：第 11 組實驗數據與失效模式分類

Cell No.	Test no	Mode	V_i (m/s)	E_r (mJ)	F_{max} (N)	Tr (ms)
Cell 11	1	I	0.5106	0.2367	12.9761	0.0732
	2	I	0.5086	0.3331	12.8301	0.0903
	3	I	0.5045	0.3378	14.6401	0.0903
	4	I	0.5060	0.4281	15.0488	0.1001
	5	I	0.5028	0.3614	13.2534	0.0977
	6	I	0.5066	0.2904	13.8519	0.0781
	7	I	0.5111	0.4499	17.3842	0.0879
	8	I	0.5055	0.3455	15.8515	0.0806
	9	I	0.5015	0.3718	13.0053	0.0952
	10	I	0.5107	0.3164	13.2826	0.0854
	11	I	0.5009	0.2010	10.7574	0.0684
	12	I	0.5062	0.3379	13.7205	0.0903
	13	I	0.5058	0.4342	14.3043	0.1074
	14	I	0.5007	0.5363	13.8956	0.1221
	15	I	0.5025	0.3912	15.1801	0.0928
	16	I	0.5095	0.2704	10.7283	0.0977
	17	I	0.5092	0.3287	11.7500	0.1074
	18	I	0.5077	0.3989	12.8739	0.1099
	19	I	0.5060	0.6270	13.1950	0.1440
	20	I	0.5070	0.3143	12.2025	0.0928

表 A- 12：第 12 組實驗數據與失效模式分類

Cell No.	Test no	Mode	V_i (m/s)	E_r (mJ)	F_{max} (N)	Tr (ms)
Cell 12	1	I	0.5021	0.3731	12.1587	0.1001
	2	I	0.5046	0.5013	11.6186	0.1270
	3	I	0.5079	0.4472	11.8230	0.1172
	4	I	0.5090	0.4694	12.7133	0.1172
	5	I	0.5045	0.5209	11.4873	0.1318
	6	I	0.5052	0.4155	11.1661	0.1172
	7	I	0.5088	0.4979	11.7500	0.1221
	8	I	0.5012	0.4721	12.7717	0.1221
	9	I	0.5030	0.4696	11.8960	0.1221
	10	I	0.4985	0.4455	11.3705	0.1221
	11	I	0.5048	0.4775	11.4289	0.1245
	12	I	0.5019	0.3476	10.5677	0.1074
	13	I	0.5047	0.4233	10.4363	0.1343
	14	I	0.5040	0.3275	11.3851	0.1050
	15	I	0.5081	0.4019	10.4363	0.1123
	16	I	0.5031	0.5596	11.2537	0.1489
	17	I	0.5096	0.3372	10.4801	0.1099
	18	I	0.5016	0.4272	11.2099	0.1147
	19	I	0.5027	0.3509	9.5314	0.1123
	20	I	0.5041	0.3067	10.2758	0.0952

表 A-13：第 13 組實驗數據與失效模式分類

Cell No.	Test no	Mode	V_i (m/s)	E_r (mJ)	F_{max} (N)	T_r (ms)
Cell 13	1	I	0.5054	0.4206	13.0637	0.0977
	2	I	0.5066	0.5500	12.7863	0.1270
	3	I	0.5048	0.7313	12.4214	0.1563
	4	I	0.5042	0.5640	13.1804	0.1270
	5	I	0.5025	0.3811	12.4944	0.1025
	6	I	0.5043	1.0690	13.9978	0.2002
	7	I	0.5034	0.8357	11.1370	0.2026
	8	I	0.4998	1.0750	14.6547	0.2051
	9	I	0.5029	0.8678	13.3264	0.1758
	10	I	0.5043	0.5105	12.5090	0.1196
	11	I	0.4977	0.7199	13.1220	0.1563
	12	I	0.4947	0.8794	13.0199	0.1831
	13	I	0.4935	0.3932	12.1733	0.1099
	14	I	0.4965	0.8116	12.6696	0.1807
	15	I	0.4936	0.5148	11.4435	0.1392
	16	I	0.5002	0.6497	11.9397	0.1587
	17	I	0.4888	0.6904	12.3192	0.1636
	18	I	0.4975	0.4553	9.6335	0.1440
	19	I	0.4936	0.4009	9.5897	0.1318
	20	I	0.4945	0.4207	11.3997	0.1245

表 A-14：第 14 組實驗數據與失效模式分類

Cell No.	Test no	Mode	V_i (m/s)	E_r (mJ)	F_{max} (N)	T_r (ms)
Cell 14	1	I	0.5017	0.6187	13.0637	0.1318
	2	I	0.5003	0.7150	14.0854	0.1489
	3	I	0.5002	0.8386	14.7130	0.1660
	4	I	0.4951	0.3811	13.0491	0.1074
	5	I	0.4962	0.8256	13.9832	0.1782
	6	I	0.4956	0.8197	13.7935	0.1733
	7	I	0.4966	0.7223	13.2096	0.1709
	8	I	0.4927	1.0150	14.9174	0.1880
	9	I	0.4974	0.9843	15.5742	0.1831
	10	I	0.4954	0.8877	14.0708	0.1709
	11	I	0.4951	0.3385	12.1295	0.0977
	12	I	0.5003	0.9092	15.0196	0.1758
	13	I	0.4956	0.5307	13.0929	0.1343
	14	I	0.4957	0.6145	14.2168	0.1367
	15	I	0.4962	1.0074	14.7276	0.1978
	16	I	0.5003	0.3781	12.8885	0.1050
	17	I	0.5007	0.9531	15.0925	0.1782
	18	I	0.4955	0.5654	14.0124	0.1343
	19	I	0.4957	0.6218	13.9832	0.1318
	20	I	0.4971	0.6188	13.9540	0.1270

表 A-15：第 15 組實驗數據與失效模式分類

Cell No.	Test no	Mode	V_i (m/s)	E_r (mJ)	F_{max} (N)	T_r (ms)
Cell 15	1	I	0.5026	0.8688	14.9028	0.1733
	2	I	0.5041	0.8359	13.7643	0.1831
	3	I	0.5048	0.9032	14.5817	0.1831
	4	I	0.4997	0.7412	12.1879	0.1758
	5	I	0.5004	0.5168	12.2317	0.1294
	6	I	0.5066	0.6091	13.3118	0.1343
	7	I	0.5055	0.5546	11.1078	0.1489
	8	I	0.5033	0.5840	11.7354	0.1514
	9	I	0.5041	0.6524	12.0127	0.1440
	10	I	0.5040	1.0245	14.3043	0.2051
	11	I	0.5053	0.8492	13.4578	0.1929
	12	I	0.5066	0.6567	12.5820	0.1538
	13	I	0.5085	1.0601	14.5233	0.2075
	14	I	0.5047	0.5300	10.8304	0.1465
	15	I	0.5012	1.1639	15.6180	0.2197
	16	I	0.5028	0.7932	11.0932	0.1978
	17	I	0.5019	0.4046	12.2901	0.1099
	18	I	0.5014	0.7057	11.0494	0.1855
	19	I	0.5035	0.5130	10.0130	0.1489
	20	I	0.4996	0.6256	10.3196	0.1782

表 A-16：第 16 組實驗數據與失效模式分類

Cell No.	Test no	Mode	V_i (m/s)	E_r (mJ)	F_{max} (N)	T_r (ms)
Cell 16	1	I	0.5021	0.1773	10.2904	0.0562
	2	I	0.5011	0.3855	14.8298	0.0854
	3	I	0.4959	0.2466	11.9835	0.0781
	4	I	0.4989	0.2798	12.5820	0.0806
	5	I	0.4967	0.2225	12.3047	0.0635
	6	I	0.5035	0.2938	10.7429	0.0781
	7	I	0.5021	0.2528	13.6621	0.0610
	8	I	0.5015	0.2617	11.9543	0.0708
	9	I	0.5052	0.2327	12.5528	0.0635
	10	I	0.5037	0.2066	11.8376	0.0586
	11	I	0.5045	0.1674	10.4509	0.0537
	12	I	0.5017	0.2057	10.6553	0.0659
	13	I	0.4992	0.3344	13.0637	0.0806
	14	I	0.5031	0.1864	11.9835	0.0635
	15	I	0.5023	0.1939	11.3559	0.0586
	16	I	0.5014	0.3142	13.7497	0.0732
	17	I	0.5017	0.2105	11.6478	0.0635
	18	I	0.5028	0.2162	12.5236	0.0610
	19	I	0.5079	0.1965	11.2975	0.0562
	20	I	0.5024	0.2099	10.7137	0.0610

表 A-17：第 17 組實驗數據與失效模式分類

Cell No.	Test no	Mode	V_i (m/s)	E_r (mJ)	F_{max} (N)	T_r (ms)
Cell 17	1	I	0.5075	0.2789	12.0857	0.0830
	2	I	0.5058	0.3532	10.5385	0.1025
	3	I	0.5007	0.2749	10.1736	0.0952
	4	I	0.5050	0.3590	11.4581	0.1025
	5	I	0.5077	0.2636	11.0202	0.0854
	6	I	0.5075	0.3397	10.9472	0.0977
	7	I	0.5072	0.2982	12.8301	0.0806
	8	I	0.5013	0.2159	11.4873	0.0708
	9	I	0.5026	0.2136	10.6699	0.0708
	10	I	0.5064	0.2692	10.2028	0.0830
	11	I	0.5090	0.2174	10.7429	0.0757
	12	I	0.5053	0.3574	12.5820	0.0952
	13	I	0.5090	0.3117	10.9618	0.0952
	14	I	0.5075	0.2778	13.3264	0.0757
	15	I	0.5050	0.2970	10.6991	0.1099
	16	I	0.5015	0.3112	11.5894	0.0952
	17	I	0.5088	0.3287	12.2171	0.0903
	18	I	0.5097	0.2465	8.9913	0.0903
	19	I	0.5026	0.2588	12.4506	0.0903
	20	I	0.4925	0.2436	9.5022	0.0854

表 A-18：第 18 組實驗數據與失效模式分類

Cell No.	Test no	Mode	V_i (m/s)	E_r (mJ)	F_{max} (N)	T_r (ms)
Cell 18	1	I	0.5001	0.4441	12.2171	0.1099
	2	I	0.5018	0.6022	11.0640	0.1514
	3	I	0.5021	0.6440	12.1295	0.1489
	4	I	0.4983	0.3457	11.9981	0.0952
	5	I	0.5050	0.3152	10.4801	0.0952
	6	I	0.5001	0.5393	11.3121	0.1416
	7	I	0.4954	0.4737	12.0127	0.1196
	8	I	0.5002	0.4816	9.4438	0.1514
	9	I	0.5046	0.3606	11.8668	0.0977
	10	I	0.5078	0.4962	10.2758	0.1416
	11	I	0.5023	0.4502	11.0786	0.1221
	12	I	0.5003	0.4062	10.5239	0.1196
	13	I	0.5051	0.6161	11.1515	0.1563
	14	I	0.5067	0.3484	11.1661	0.1025
	15	I	0.5087	0.7154	10.5677	0.2002
	16	I	0.5023	0.4266	11.1078	0.1196
	17	I	0.4987	0.2750	9.9255	0.0952
	18	I	0.5100	0.4914	9.9693	0.1489
	19	I	0.5076	0.3597	9.1227	0.1294
	20	I	0.4982	0.5849	10.7720	0.1611

表 A-19：第 19 組實驗數據與失效模式分類

Cell No.	Test no	Mode	V_i (m/s)	E_r (mJ)	F_{max} (N)	Tr (ms)
Cell 19	1	I	0.4985	0.6465	13.0929	0.1514
	2	I	0.4996	0.4706	12.2901	0.1196
	3	I	0.5008	0.7946	13.7935	0.1685
	4	I	0.4970	0.6691	12.8301	0.1563
	5	I	0.5022	0.8422	14.5963	0.1660
	6	I	0.5023	0.3821	13.1220	0.1025
	7	I	0.5024	0.8128	14.7714	0.1563
	8	I	0.5054	0.5180	13.8227	0.1172
	9	I	0.5030	0.5814	14.3773	0.1245
	10	I	0.5075	1.0415	13.9832	0.1831
	11	I	0.5028	0.4083	13.5891	0.0977
	12	I	0.5022	0.4438	14.3919	0.1050
	13	I	0.5060	0.3972	13.6475	0.0977
	14	I	0.5042	0.4108	14.4357	0.1099
	15	I	0.5017	0.3950	13.1658	0.1001
	16	I	0.5033	0.5894	14.9028	0.1245
	17	I	0.5023	0.5547	14.7422	0.1221
	18	I	0.5048	0.7062	13.0637	0.1514
	19	I	0.4989	0.4010	13.1804	0.1074
	20	I	0.5021	0.7416	13.0783	0.1709

表 A-20：第 20 組實驗數據與失效模式分類

Cell No.	Test no	Mode	V_i (m/s)	E_r (mJ)	F_{max} (N)	Tr (ms)
Cell 20	1	I	0.5048	0.3503	10.9034	0.1001
	2	I	0.5010	0.3242	11.3121	0.1025
	3	I	0.5032	0.3582	12.2025	0.1074
	4	I	0.5059	0.3092	11.4289	0.0928
	5	I	0.5012	0.4014	10.8450	0.1196
	6	I	0.5020	0.6779	12.5966	0.1563
	7	I	0.5083	0.3885	12.7133	0.0928
	8	I	0.5022	0.4024	14.0562	0.1001
	9	I	0.5093	0.6147	11.4873	0.1465
	10	I	0.5026	0.3802	12.3922	0.1099
	11	I	0.5025	0.3610	12.5674	0.1001
	12	I	0.5053	0.5210	11.8084	0.1318
	13	I	0.5061	0.3417	11.2683	0.0952
	14	I	0.5057	0.3215	11.6332	0.0928
	15	I	0.5031	0.3670	11.5602	0.1074
	16	I	0.5069	0.4569	11.6916	0.1196
	17	I	0.5014	0.4062	11.9397	0.1074
	18	I	0.5035	0.8321	12.5382	0.1904
	19	I	0.5055	0.4130	11.0056	0.1172
	20	I	0.5046	0.5365	9.9984	0.1587