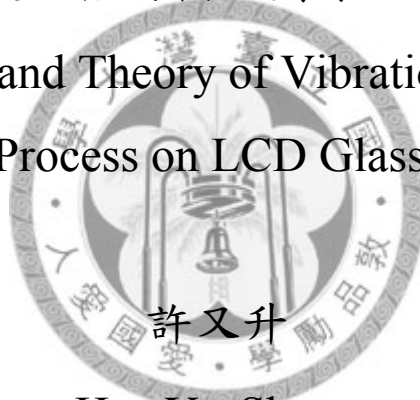


國立臺灣大學工學院機械工程學系
碩士論文

Department of Mechanical Engineering
College of Engineering
National Taiwan University
master thesis

LCD玻璃基板之振動輔助劃線切割技術及原理
Technique and Theory of Vibration Assistant
Scribing Process on LCD Glass Substrate



Hsu Yu-Sheng

指導教授：廖運炫 博士

Advisor: Liao Yunn-Shiuan, Ph.D.

中華民國 97 年 7 月

July 2008

中文摘要

本研究之目的在發展 LCD 玻璃基板之振動輔助劃線切割技術，方法是在控制劃線負載的機構上加裝一個壓電致動器，產生高頻振動，使劃線負載產生週期性的變化。本技術應用於標準型刀輪上，能大幅增加產生的中央裂紋深度達兩倍，並和有齒型刀輪一樣具有使玻璃自動裂開的能力，可以省略裂片程序。本技術可使玻璃切割後的彎曲強度保持標準型刀輪的水準，而避免有齒型刀輪造成玻璃強度不佳的缺點，若以此技術取代有齒刀輪，則可以節省刀輪及劃線設備成本。

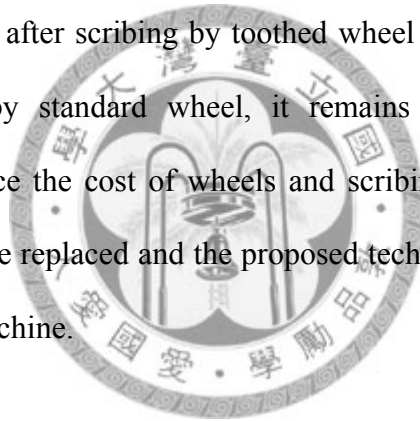
本研究亦提出振動輔助劃線的原理，是屬於負載變動的效應。與一般劃線程序不同的是，變動的負載增加玻璃的彈性變形，而非塑性變形。由彈性變形增加中央裂紋深度避免了過去增加負載與塑性變形所造成的側向裂紋、徑向裂紋等缺陷。最後透過實驗證明振動輔助所增加的中央裂紋深度中具有非常顯著的彈性成分。

關鍵字：振動輔助、劃線切割、LCD 玻璃基板、刀輪、裂片



ABSTRACT

A technique of vibration assisted scribing of LCD glass substrate is developed in this thesis. An additional piezoelectric actuator is implemented on the servo controlled loading mechanism of the scribing machine, and a periodically varying load superposed on the constant load is provided to the standard scribing wheel. It is found that under a proper vibration frequency condition the median crack depth is significantly increased to about twice of that without vibration assisted scribing. As a result, automatic separation of the glass without the need of breaking process similar to the case with the use of toothed wheel (penett) can take place. On the other hand, while the bending strength of the glass panel after scribing by toothed wheel is merely about half of that resulting from scribing by standard wheel, it remains almost unchanged by the developed technique. Hence the cost of wheels and scribing machine can be reduced since toothed wheels can be replaced and the proposed technique can be applied by any commercially available machine.



A fundamental theory of vibration assisted scribing process is also manifested. It is proposed that the rapidly varying periodical scribing load does not lead to as much an increase of the plastic deformation as that due to the servo controlled constant scribing load. Instead it mainly results in an increase of elastic deformation. The increase of median crack depth through elastic deformation can avoid the lateral and radial cracks induced by large plastic deformation which are usually observed under an increasing constant load condition. The noticeable elastic component of the increased median crack depth was confirmed by experiments, and the proposed theory is verified.

Keywords: vibration assisted, scribing, LCD glass substrate, scribing wheel, breaking process.



目錄

	頁次
中文摘要.....	I
英文摘要.....	II
目錄.....	IV
圖目錄.....	VI
表目錄.....	VIII
符號說明.....	IX
第一章、序論.....	1
1.1 研究背景、動機與目的.....	1
1.2 文獻回顧.....	7
1.3 研究方法.....	7
1.4 本文架構.....	8
第二章、基本原理.....	9
2.1 壓痕應力場.....	9
2.2 壓痕破壞理論.....	11
2.3 劃線切割理論.....	17
2.4 振動輔助劃線切割之原理.....	20
第三章、實驗裝置與實驗規劃.....	22
3.1 實驗裝置.....	22
3.1.1 振動輔助裝置設計.....	22
3.1.2 實驗機台.....	23
3.1.3 其他實驗設備與材料.....	26
3.2 振動參數初步測試.....	26
3.3 實驗目的.....	28
3.4 實驗一.....	29
3.5 實驗二.....	31
3.6 實驗三.....	32
3.6.1 實驗方法.....	32



3.6.2	實驗內容.....	35
第四章、	實驗結果與討論.....	37
4.1	實驗一.....	37
4.1.1	實驗結果.....	37
4.1.2	討論.....	43
4.1.3	結論.....	47
4.2	實驗二.....	48
4.2.1	變因與結果.....	48
4.2.2	討論.....	49
4.2.3	結論.....	50
4.3	實驗三.....	51
4.3.1	實驗結果.....	51
4.3.2	討論.....	51
第五章、	總結與未來展望.....	53
5.1	總結.....	53
5.2	未來展望.....	54
參考文獻	55
附錄 A	57
附錄 B	58
附錄 C	59



圖目錄

	頁次
圖 1-1 前三大平面顯示器生產國.....	1
圖 1-2 我國 TFT-LCD 設備需求、產值與自給率.....	1
圖 1-3 劃線程序.....	2
圖 1-4 劃線後玻璃橫斷面的示意圖.....	3
圖 1-5 刀輪外型 SEM 照片.....	4
圖 1-6 有齒型刀輪劃線後玻璃俯視圖.....	5
圖 1-7 振動輔助產生密集壓痕之專利.....	6
圖 2-1 Boussinesq elastic field.....	10
圖 2-2 Hertzian elastic field.....	11
圖 2-3 彈性/塑性應力場模型.....	12
圖 2-4 中央裂紋.....	13
圖 2-5 徑向與側向裂紋系統.....	13
圖 2-6 三種裂紋系統.....	14
圖 2-7 殘留成分的模型.....	15
圖 2-8 裂紋發生時序.....	16
圖 2-9 刀輪作用示意圖.....	17
圖 2-10 Wallner line.....	18
圖 2-11 四點彎曲測試.....	19
圖 2-12 振動與非振動之彈性變形不同.....	21
圖 3-1 自行設計之振動輔助裝置、刀輪夾持機構與固定座.....	23
圖 3-2 Piezomechanik PSt/150/5/20 VS10 壓電致動器.....	23
圖 3-3 振動輔助系統.....	24
圖 3-4 大銀微系統(HIWIN)龍門平台.....	24
圖 3-5 劃線機台.....	25
圖 3-6 彎曲強度測試機實體照.....	25
圖 3-7 美商國家儀器(NATIONAL INSTRUMENT)PCI-7344 運動控制卡(左上).....	26
圖 3-8 觀察中央裂紋試片切割方法.....	28

圖 3-9 側向裂紋辨識.....	29
圖 3-10 實驗三的試片切割方式.....	31
圖 3-11 刀輪最大壓入體積與刀輪壓入截面積.....	32
圖 3-12 刀尖幾何外型示意圖.....	34
圖 3-13 刀輪尖端之 SEM 照片.....	34
圖 3-14 實驗三的劃線方式.....	35
圖 4-1 實驗後玻璃無 Wallner line 的橫斷面.....	38
圖 4-2 從無震動輔助至高頻震動的 Wallner line	44
圖 4-3 刀輪的掃掠面積與中央裂紋波狀起伏.....	44
圖 4-4 125 度刀輪與三種波形搭配之趨勢.....	45
圖 4-5 115 度刀輪與兩種波形搭配之趨勢.....	46



表目錄

	頁次
表 1-1 TFT-LCD 製程.....	2
表 1-2 標準型與(類似)有齒型刀輪技術之比較.....	6
表 3-1 初步測試的控制變因.....	27
表 3-2 初步測試結果.....	28
表 3-3 實驗一的控制變因.....	30
表 3-4 實驗一的操縱變因.....	30
表 3-5 實驗一各組的調變變因.....	30
表 3-6 125 度刀輪幾何外型.....	34
表 3-7 實驗三的控制變因.....	35
表 3-8 實驗三的調變變因.....	35
表 4-1 實驗一第一組結果.....	37
表 4-2 實驗一第二組結果.....	39
表 4-3 實驗一第三組結果.....	40
表 4-4 實驗一第四組結果.....	41
表 4-5 實驗一第五組結果.....	42
表 4-6 實驗一第六組結果.....	43
表 4-7 125 度刀輪選出的編號與彎曲測試結果.....	48
表 4-8 115 度刀輪選出的編號與彎曲測試結果.....	48
表 4-9 有齒型刀輪的控制變因.....	49
表 4-10 有齒型刀輪的測試結果.....	49
表 4-11 刀痕寬度.....	51
表 4-12 刀痕寬度、壓入截面積與裂紋深度.....	52



符號說明

2.1

a	壓痕器的特徵接觸尺寸
H	受壓痕材料的硬度
P	負載
P_0	壓痕器接觸點的平均接觸應力
R	與壓痕接觸點的距離
α	壓痕器外型的無因次係數
σ_{ij}	壓痕應力場內之應力
v	浦松比
φ	壓痕應力場球座標的俯角

2.2

a	壓痕器接觸寬度的一半
b	塑性變形區半徑
c	中央/徑向裂紋深度
E	楊氏係數
$f(\psi)$	刀輪幾何外型的函數
H	硬度
K_c	臨界應力集中因子
K_e	彈性成分之應力集中因子
K_r	殘留成分之應力集中因子
P	負載
φ	壓痕應力場圓座標的俯角
ψ	壓痕器尖端夾角



2.3

b	劃線表面刀痕寬度的一半
c	中央裂紋深度
$C_{\text{elastic,vibration}}$	振動增加的殘留成分的中央裂紋深度
C_{residual}	殘留成分的中央裂紋深度
C_L	中央裂紋深度
E	楊氏係數
$f(\psi)$	刀輪幾何外型的函數
K_{IC}	第一種模式臨界應力集中因子
P	負載
P_{normal}	一般劃線負載
$P_{\text{peak,vibration}}$	振動的負載峰值
R	刀輪半徑
α	體積/裂紋作用係數
δA	刀輪壓入最大截面積

v 浦松比
 ψ 應力場圓座標的俯角

3.6

b 劃線表面刀痕寬度的一半
 C 中央裂紋深度
 C_{elastic} 彈性成分的中央裂紋深度
 C_{residual} 殘留成分的中央裂紋深度
 R 刀輪鼻端半徑
 δA 刀輪最大壓入截面積
 δV 刀輪壓入體積
 θ 刀輪夾角的一半
 ϕ 刀輪鼻端圓心角的一半

4.2

b 刀痕寬的一半
 C 中央裂紋深度
 C_{elastic} 彈性成分中央裂紋深度
 $C_{\text{residual-estimated}}$ 估計的殘留成分中央裂紋
 L 彎曲測試寬的 span
 l 彎曲測試窄的 span
 P 彎曲測試施加的力量
 T 彎曲測試試片厚度
 W 彎曲測試試片寬度
 δA 刀輪最大壓入截面積
 σ 彎曲強度的應力值



第一章、緒論

1.1 研究背景、動機與目的

平面顯示器產業為台灣重點產業，根據工研院IEK ITIS計畫統計數據[11]，2007年產業總產值達新台幣1兆7,501.2億元，超越韓國成為全球第一，所佔比例如圖1-1所示。其中TFT-LCD面板為平面顯示器產業之最主要產品，約佔七成產值。但台灣的TFT-LCD設備卻大多仰賴進口，為擺脫此困境，近年來台灣積極發展TFT-LCD產業之垂直整合，預估2008年設備自給率可達五成，如圖1-2。

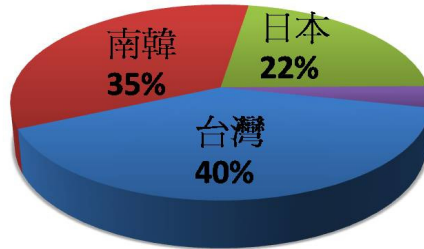


圖 1-1 前三大平面顯示器生產國。

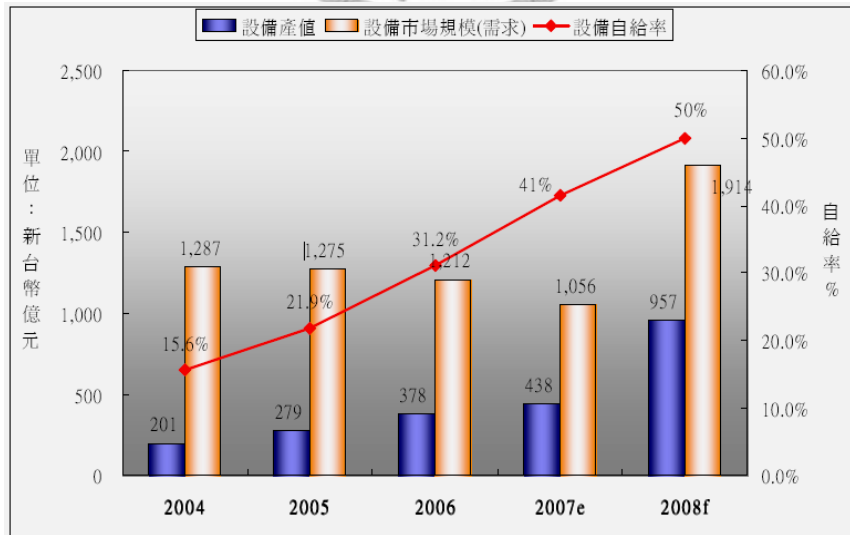


圖 1-2 我國 TFT-LCD 設備需求、產值與自給率[11]。

TFT-LCD 的製程複雜，可分為 Array 段、Cell 段與 Module 段，其流程與所需設備如表 1-1 所示。其中 Array 與 Cell 段製程對產品良率影響重大，但此二段設備自給率卻遠低於 Module 段，因此我國未來於 TFT-LCD 製程設備研發之重點在於此兩段製程。

表 1-1 TFT-LCD 製程[11]。

製程	流程	所需設備
電極陣列 (ARRAY)	玻璃清洗→薄膜形成→洗淨→光阻塗布→預烤→曝光→顯影→蝕刻→光阻剝離→清洗→測試	洗淨設備、濺鍍 (sputtering) 及電漿化學器相沈積 (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition) 設備、光阻塗佈設備、燒成爐、蝕刻設備、光阻剝離設備、檢測設備等。
面板組裝 (CELL)	CF/玻璃清洗→配向膜形成→清洗→框膠→間隔散佈→液晶滴入→對位壓合→切割裂片→偏光板貼付→點燈檢查	清洗設備、配向膜塗佈設備、燒成爐、配向設備、膠框印刷設備、間隔劑散佈設備、組合對位設備、切割裂片設備、液晶滴入/封口設備、偏光板貼付設備及點燈設備等。
模組構裝 (MODULE)	ACF 貼片→TAB-IC 接合→塗膠→背光板框架組裝→環境測試→檢查測試	ACF 貼片設備、TAB 構裝設備、COG 構裝設備、塗膠機及檢查測試設備等。

經過前面多重製程後，在 Cell 段製程中，需將大尺寸之 TFT-LCD 母板分割成個別的面板，每一塊分割出來的尺寸即是最終之面板大小，分割品質直接影響面板最終的成敗，一旦失敗則前功盡棄。TFT-LCD 面板分割主要採用劃線(scribing)與裂片(breaking)兩道程序。如圖 1-3 所示，劃線是利用超硬材料之刀輪(scribing wheel)在玻璃上滾壓出連續的裂紋(crack)，裂片即施加力量在裂紋上使其分離，與傳統上切割窗戶玻璃的原理相同。

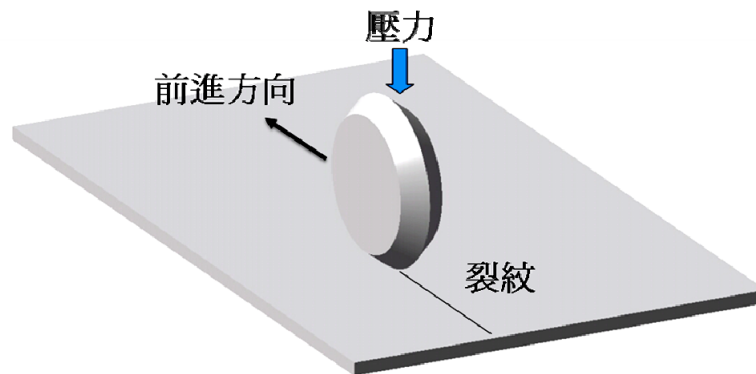


圖 1-3 劃線程序。

劃線裂片程序中，對於分割成敗具有決定性影響的是劃線，劃線會產生各種裂紋及缺陷，其型態如圖 1-4 所示，有垂直方向的中央裂紋(median crack)，在次表面水平延伸的側向裂紋(lateral crack)，側向裂紋延伸至表面造成的邊緣崩落(chipping)等。

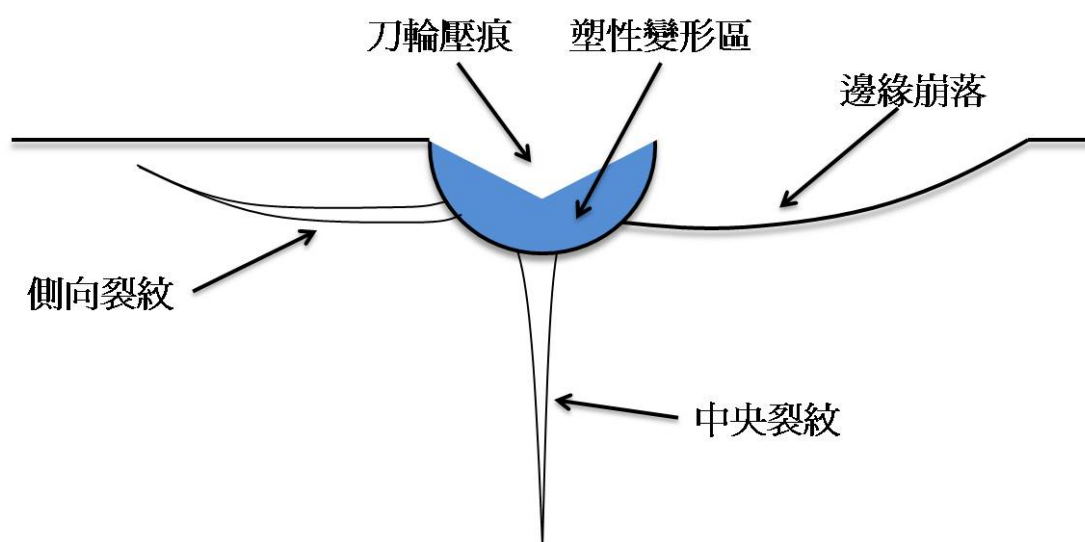


圖 1-4 劃線後玻璃橫斷面的示意圖。

劃線的良莠與否有三項重要指標，第一是中央裂紋(median crack)深度，中央裂紋越深，裂片程序越容易成功，一般來說要順利裂片中央裂紋最少要為玻璃厚度的十分之一以上才算足夠[14]。若中央裂紋夠深，也可以省略裂片程序，玻璃基板會因自重斷裂。

第二是側向裂紋有無發生，側向裂紋嚴重時會引起劃線邊緣崩落(chipping)，崩落的細小玻璃屑在切割平台上會影響後續劃線工作，且增加面板邊緣打磨的時間，因此應避免側向裂紋產生。

第三是切割後邊緣的彎曲強度，切割完之玻璃除了光學顯微鏡可辨之缺陷外，仍可能有無法觀察到之缺陷存在，並影響邊緣的抗彎曲強度，可能在運送過程中或在惡劣之使用環境中由邊緣向內部裂開，因此必須做彎曲強度測試保證其品質。

影響以上三點最重要的是刀輪，目前國內 TFT-LCD 面板大廠多從日本進口。刀輪有不同的直徑、夾角等，刀邊又可分為標準型與有齒型，如圖 1-5 所示。

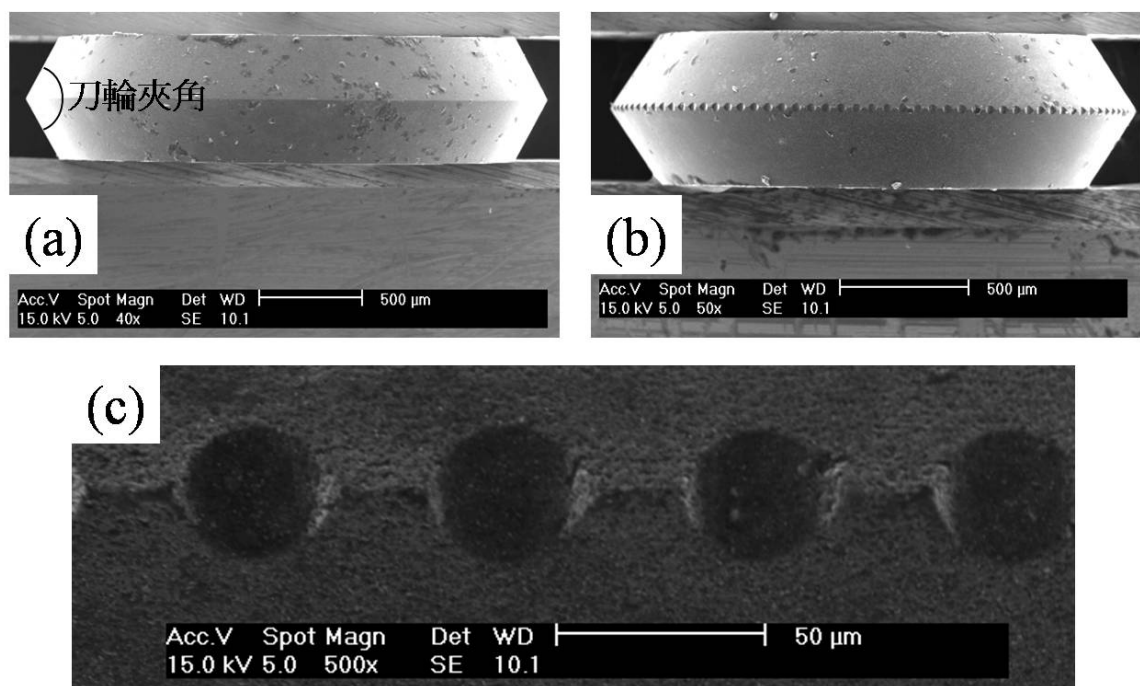


圖 1-5 刀輪外型 SEM 照片，(a)標準型刀輪 (b)有齒型刀輪 (c)齒的放大圖。標示的角度為刀輪夾角。

有齒型刀輪(penett)是日商三星鑽石工業 MDI (Mitsuboshi Diamond Industrial Co., LTD.)之專利[12,13]，其特色是能使劃線後的玻璃自動裂開，不需多加裂片程序，而標準型刀輪產生的中央裂紋深度會受限於側向裂紋的產生而無法持續增加，所以必須於劃線完後裂片。有齒型刀輪以此優越的特性獲得眾多廠商的青睞，

但其單價相對而言比標準型高很多，且必須搭配劃線機台販售，國內廠商因受制於專利權較無切入點。另外有齒型刀輪並非沒有缺點，其最大缺點是會產生一種徑向裂紋使玻璃的彎曲強度大幅降低[8]，如圖 1-6。

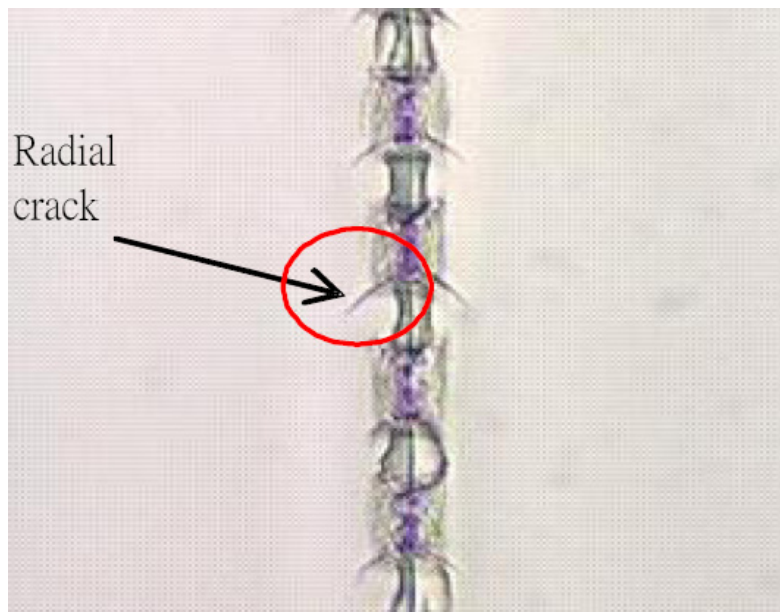


圖 1-6 有齒型刀輪劃線後玻璃俯視圖[8]。

有齒型刀輪的齒與標準型刀輪一樣都具有鋒利的刃，但溝槽部分卻刻意的將刃邊去除，所以劃線產生的痕跡並非連續，而是斷斷續續的壓痕。有齒刀輪在滾動中隨時都有齒和溝槽與玻璃接觸，齒的部分刺入玻璃表面形成裂紋，溝槽的部分則是改變齒周圍的應力狀態。以傳統計算中央裂紋的方法，有齒型刀輪產生的中央裂紋並不特別深，但卻可以讓玻璃完全裂開，所以要超越標準型刀輪中央裂紋深度的瓶頸，改變應力分佈是一個方向，其中一種方法，是利用機台振動的輔助，改變刀輪下的應力分佈，例如日商 THK Co., Ltd 和 Beldex Corporation 擁有之振動輔助切割技術之專利[15,16,17,18]，雖然該公司之設備使用角錐狀壓痕器搭配振動以產生密集壓痕之方式切割，並非刀輪劃線，但實際上是仿效有齒型刀輪的效果，如圖 1-7。雖然有此振動輔助之技術存在，但台灣目前並未有針對刀輪劃線之振動輔助技術。

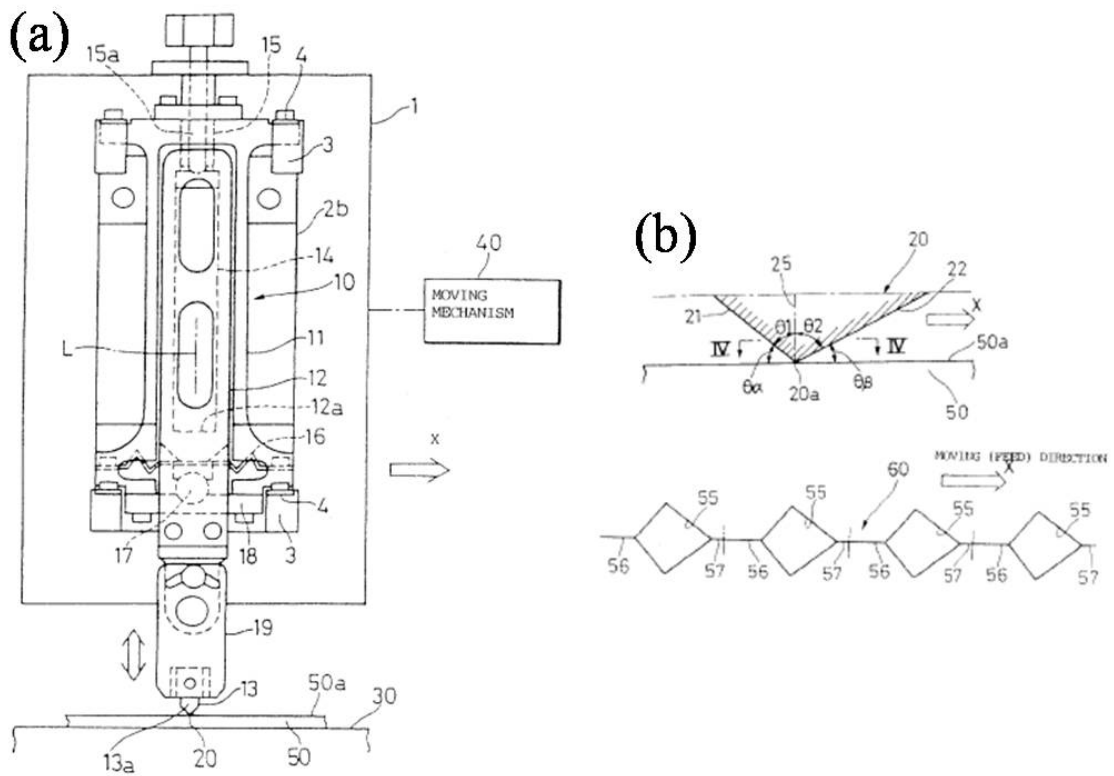


圖 1-7 振動輔助產生密集壓痕之專利 (a)機構示意圖
(b)壓痕器外型(上)與壓痕(下)[17]。

綜合現有之技術，包括標準型刀輪與(類似)有齒型刀輪之優缺點比較如表 1-2 所示。

表 1-2 標準型與(類似)有齒型刀輪技術之比較。

刀輪種類	中央裂紋	側向裂紋	徑向裂紋	最大彎曲強度	成本
標準型	隨負載增加速度越來越慢	隨負載增加就會發生	較不易發生	強	高，需要裂片程序與設備
(類似)有齒型	可直接貫穿玻璃厚度	在玻璃貫穿前都不會發生	容易發生	只有標準型一半	刀輪單價高，須搭配機台販售

在瞭解習知技術的優缺點後，興起自行開發振動輔助劃線切割技術的構想，希望能結合標準型與類似有齒型刀輪的優點，並排除缺點。故本研究之目的在於開發振動輔助標準型刀輪的劃線技術，研究的具體目標是利用振動輔助在不產生側向裂紋與降低彎曲強度的前提下，提升中央裂紋的深度，且達到有齒型刀輪不需裂片的效果，並探究此技術之原理。

1.2 文獻回顧

劃線切割之研究承襲於硬脆材料之壓痕破壞理論(indentation fracture mechanism of brittle material)，後者又自單點壓痕應力場(point indentation stress field)的純物理問題發展而來。最早由 Boussinesq(1885)推導 Boussinesq elastic field[1]，以及 Hertz (1881)推導 Hertzian elastic field[2]。至 Lawn 等人數十年之研究後(1960~1990)，壓痕破壞跳脫純物理之問題成為材料基礎及應用之理論，壓痕器外型、負載(load)、材料特性、裂紋深度及型態之間的關係被廣泛的研究，並建立起數學模型[3,4]，之後有 Ono 等人(2004)發展劃線切割之理論，研究刀輪外型、負載與裂紋深度的關係[5]，Liao 等人(2008)並將刀輪外型的影響推廣至切割玻璃實務上邊緣強度的研究[6]。

1.3 研究方法

本研究的目的是在於開發振動輔助劃線技術應用於一般型刀輪，並希望能達到有齒型刀輪的效果，因此將以標準型及有齒型刀輪作為對照組，觀察裂紋深度、裂紋型態、及邊緣強度等，以振動輔助為實驗組，觀察是否達到研究目的。

實驗組首先將以一種標準型刀輪加上振動輔助，測試可能可用之頻率、振幅與波型，再使用不同夾角的標準型刀輪進行實驗。操縱變因包括刀輪夾角、頻率及波型等，觀察之應變變因為中央裂紋深度、自動裂片及側向裂紋是否發生。對照組則以同樣條件但不加振動輔助進行。

然後選擇不發生側向裂紋情況下中央裂紋深且可自動裂片之變因組合，切割試片進行彎曲強度測試，與同樣條件切割但不加振動輔助以及使用有齒刀輪不加振動輔助的對照組相比較，以驗證本技術之可行性。除此之外亦設計實驗驗證振動輔助原理的合理性。

1.4 本文架構

本論文共六章，第一章序論，簡短介紹本研究之背景、動機與目的，文獻回顧及研究方法。第二章基本原理，從單點壓痕應力場為起點，概略介紹從壓痕破壞理論到劃線切割理論的演進，並闡述振動輔助劃線切割的原理與設計。第三章實驗設計與規劃，介紹本實驗預定進行的實驗項目與實驗方法。第四章實驗結果與討論，呈現各實驗之結果並分別做討論。第五章總結與未來展望，說明本研究所得結果與未來可能的發展。



第二章、基本原理

本章 2.1 至 2.3 節將先介紹有關劃線切割的理論與發展，最後於 2.4 節介紹本研究假設的振動輔助劃線原理。

2.1 壓痕應力場

劃線切割之基本原理源自硬脆材料之壓痕破壞理論，硬脆材料之壓痕破壞理論則發展自更早期的壓痕應力場分析 (indentation stress field analysis)。Boussinesq(1885)提出 Boussinesq elastic field[1]，假設一單點壓痕器對無限大之平面施以正向力，其應力分佈可以方程式來表示：

$$\sigma_{ij} = \left(\frac{P}{\pi R^2} \right) [f_{ij}(\varphi, \nu)] \quad (2-1)$$

其中 P 是正向力負載，R 是與接觸點的距離， f_{ij} 是位置與浦松比 ν 的函數。考量到 $R=0$ 時在接觸點產生無限大之應力，假設一個平均接觸應力為

$$P_0 = \frac{P}{\alpha \pi a^2} \approx H \quad (2-2)$$

其中 a 是特徵接觸尺寸(characteristic contact dimension)，代表與壓痕器接觸尺寸數量級， α 是壓痕器幾何外型的無因次係數，當壓痕器為軸對稱外型時 $\alpha=1$ ，H 是受壓材料的硬度，因為此平均接觸應力的概念與硬度相似。其應力在如圖 2-1(a) 之球座標系統上，主應力方向 1 是切線方向，2 是徑向，3 是軸向，應力分佈等高線如圖 2-1(b)、(c)、(d)、(e) 般。

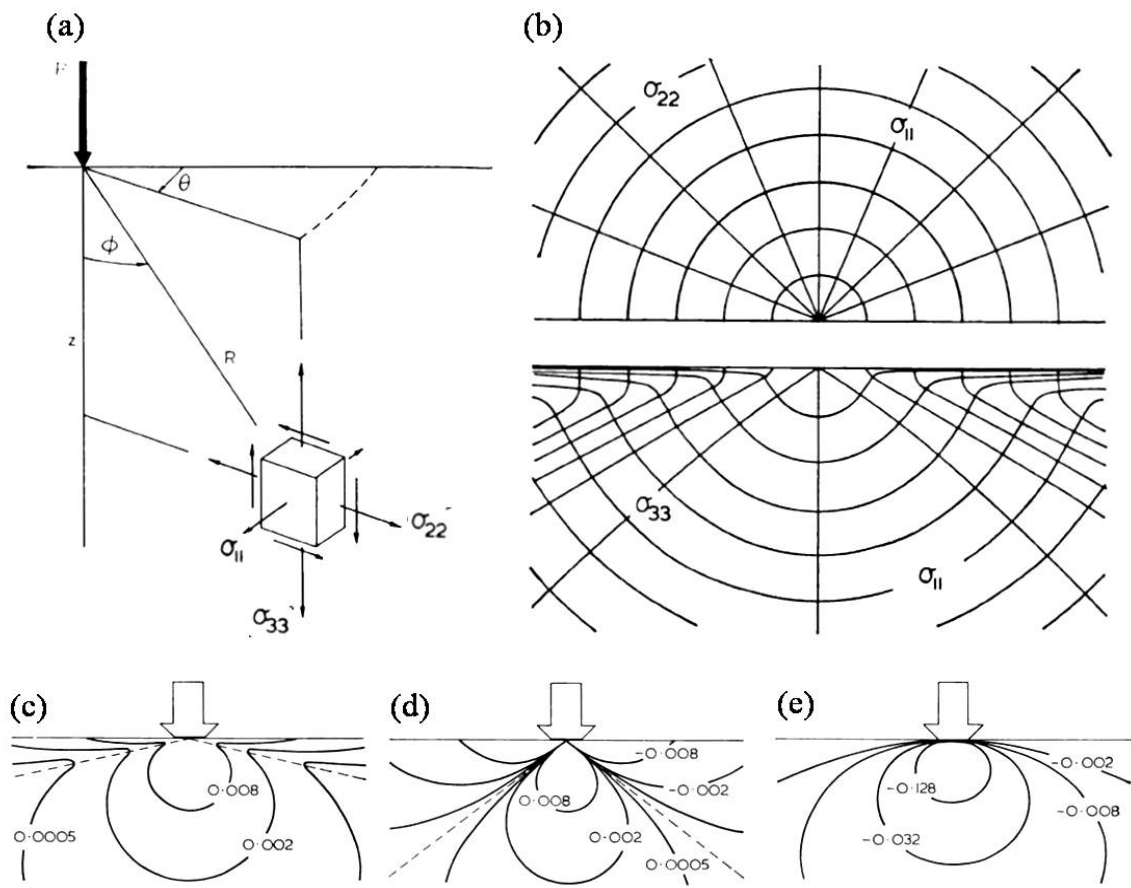


圖 2-1 Boussinesq elastic field (a) 壓痕應力場的球座標系統 (b) 三個方向應力等高線分佈俯視與側視圖 (c) 切線方向應力等高線側視圖 (d) 徑向應力等高線側視圖 (e) 軸向應力等高線側視圖。描繪於 $\nu=0.25$ ，應力單位是 P_0 ，接觸直徑是 $2a\sqrt{\alpha}$ [7]。

再將式 2-2 帶入式 2-1 中，可以得到

$$\sigma_{ij} = P_0 \alpha \left(\frac{a}{R}\right)^2 [f_{ij}(\varphi, \nu)] \quad (2.3)$$

當非常靠近接觸點時 $R \approx a$ ，應力大小就近似於平均接觸應力，為一材料常數，根據聖維南原理 (Saint-Venant's principle) 此假設並不會對遠處的應力場造成影響。在 Boussinesq elastic field 中有一須特別注意之處在於接觸點周圍的切線方向及正下方的徑向都是拉應力，拉應力是造成材料破壞的主因。

另外有 Hertz(1881)分析一理想(剛體)球面與無限大平面接觸之應力分佈，如圖 2-2 所示，在約當接觸直徑的深度以內，徑向與切線方向的拉應力受到了壓抑變成壓應力，而真實壓痕器都不可能是單點，因此類似此球面接觸的情形將會在壓痕實驗中發生，只要觀察的尺度合適的話。

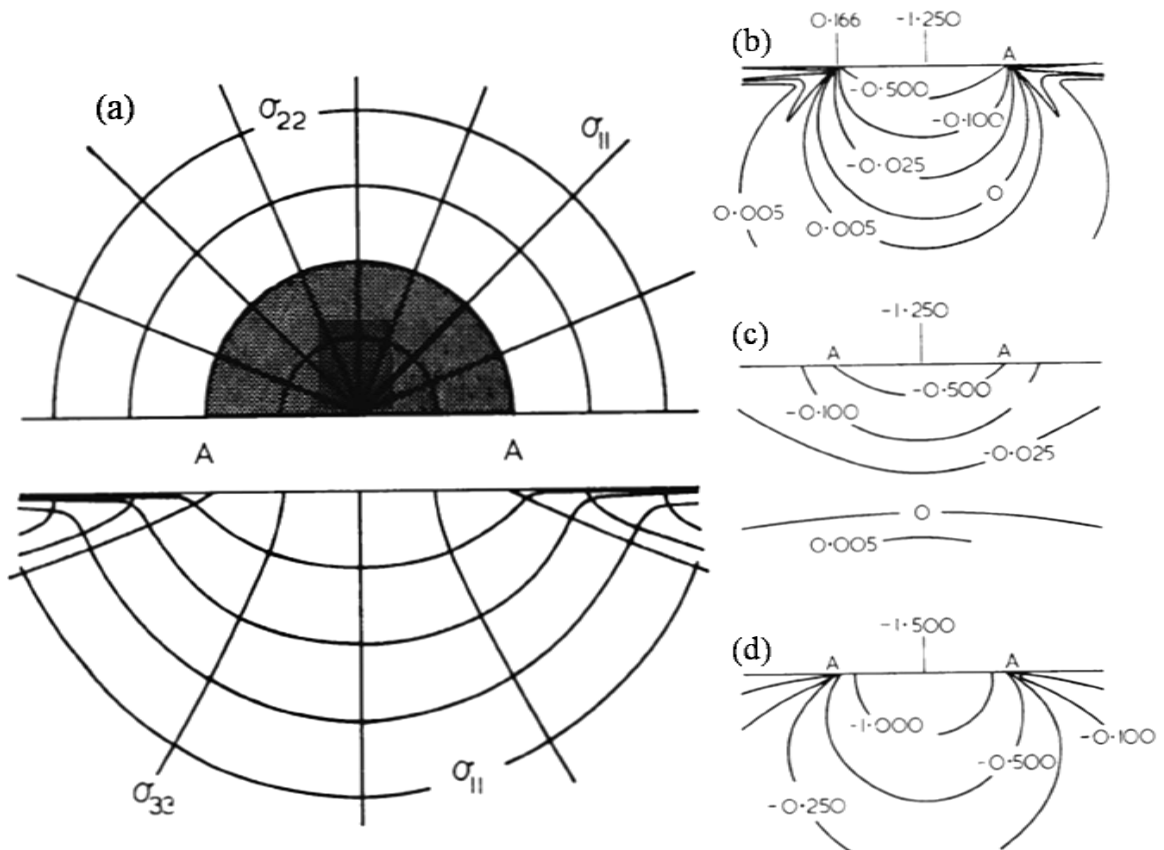


圖 2-2 Hertzian elastic field(a)三個方向應力等高線分佈俯視與側視圖(b)切線方向應力等高線側視圖 (c)徑向應力等高線側視圖 (d)軸向應力等高線側視圖。AA 標示出接觸直徑，描繪於 $\nu=0.33$ ，應力單位是 P_0 [7]。

2.2 壓痕破壞理論

在前述的時期都還是應力分析，直到壓痕破壞理論的發展。壓痕破壞的研究主要針對脆性材料，是由壓痕硬度測試所衍生，壓痕器主要有圓球(Brinell) 與金字

塔 (Vickers or Knoop)等形狀。Boussinesq 與 Hertz 的理論完全基於彈性應力場的分析，真實壓痕器則會造成受試材料局部塑性變形，形成包圍在壓痕器周圍的塑性變形區(plastic zone)，塑性變形區之外則是熟知的彈性變形區[7]。此模型稱為彈性/塑性應力場(elastic/plastic stress field)，如圖 2-3 所示。

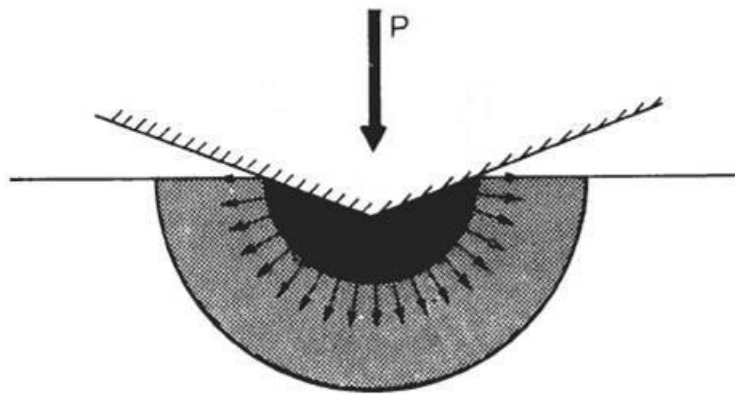


圖 2-3 彈性/塑性應力場模型。黑色區域是液靜壓核心，外層陰影區是塑性變形區，最外層是彈性應變區[7]。

基本假設是塑性變形區中還有液靜壓核心(hydrostatic core)直接與壓痕器接觸，壓痕器的正向力透過液靜壓核心的傳遞，成為球對稱均勻向外的壓力(故名液靜壓)，此壓力透過球對稱的塑性變形區再傳至彈性變形區，使彈性變形區具有與 Boussinesq 彈性應力場相似的應力分佈。

壓痕破壞源自拉應力，當拉應力超過降服強度就會在拉應力的垂直面上產生破裂面，稱為裂紋，徑向與切線方向的拉應力分別造成不同的裂紋系統[7]，徑向拉應力形成的中央裂紋系統(median crack system)分佈於塑性變形區正下方，且發展完全的裂紋形狀近似圓形(penny-like)，如圖 2-4 所示，切線向拉應力形成的徑向裂紋系統(radial crack system)分佈於表面，如圖 2-5 所示，因為具有圓對稱的應力分佈，裂紋也呈現圓對稱分佈，中央裂紋與徑向裂紋發生在壓痕器負載由零逐漸增加時，當壓痕器由最高負載開始卸載(unloading)減少正向力，會出現側向裂紋，分佈於材料次表面(圖 2-6)，從塑性變形區水平延伸，最終至表面造成材料崩落[7]。

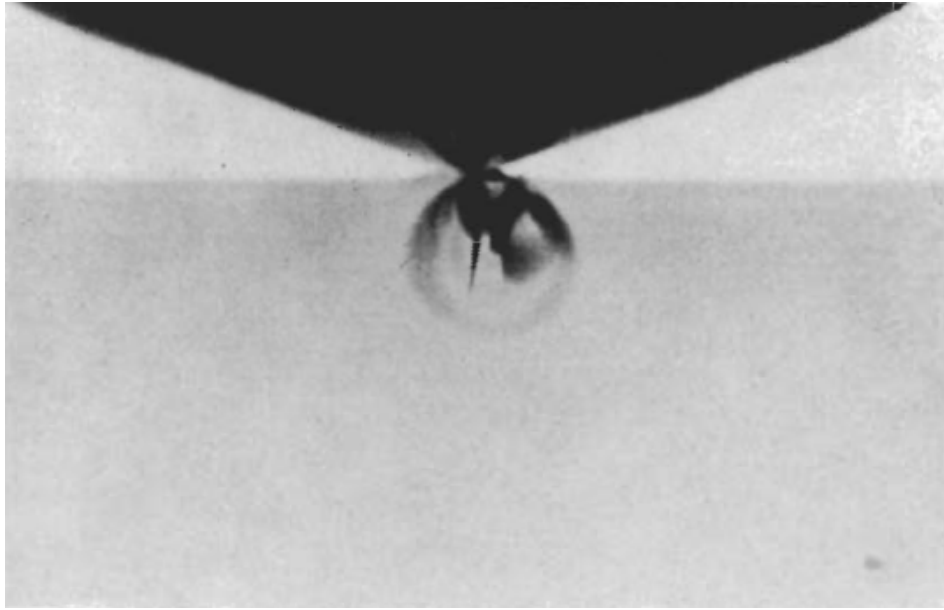


圖 2-4 中央裂紋。位於壓痕器正下方，且呈現圓形，使用 Vickers 壓痕器於 soda-lime 玻璃，負載 250N，視野寬度 11mm[7]。

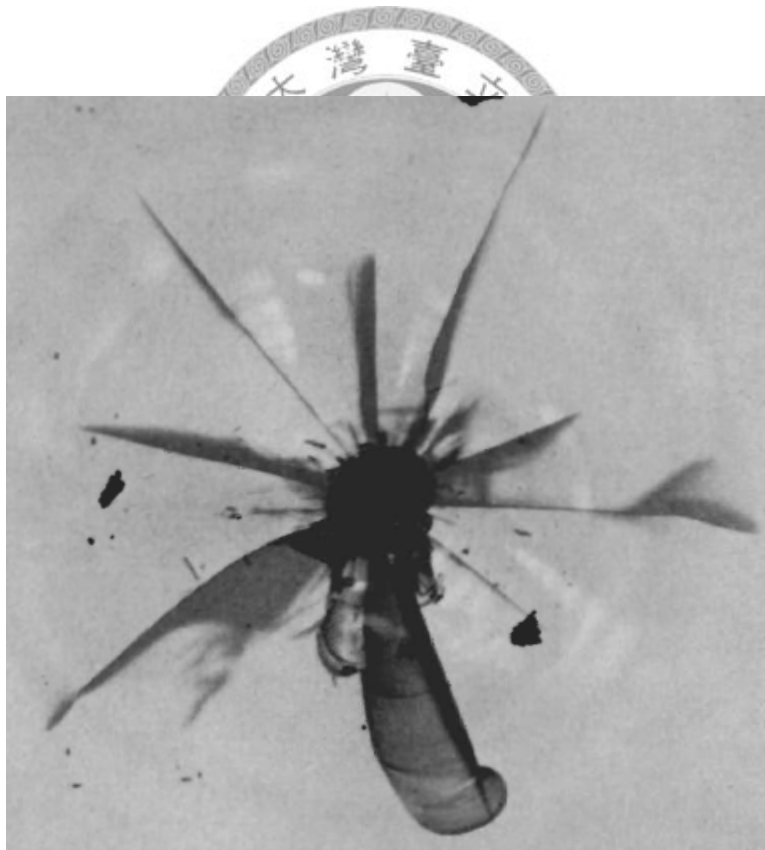


圖 2-5 徑向與側向裂紋系統。徑向裂紋位於材料表面，成星狀排列，側向裂紋由次表面延伸至表面造成材料崩落，使用圓錐狀壓痕器 (120°) 於 soda-lime 玻璃，負載 160N，視野寬度約 2mm[7]。

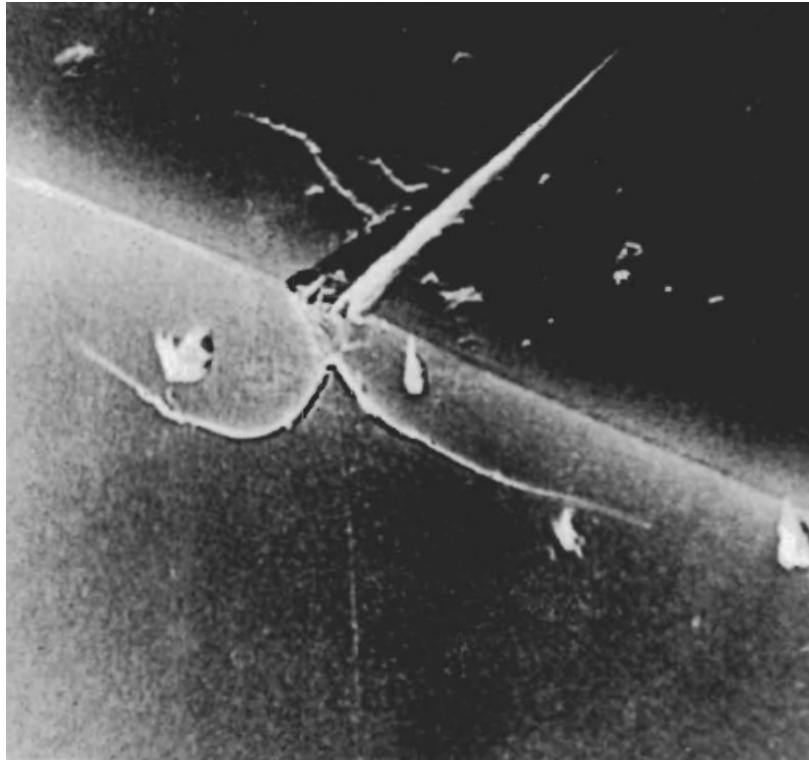


圖 2-6 三種裂紋系統。三種裂紋系統同時出現，圖片右上為受壓痕之表面，左下是與表面垂直之橫切面，表面上可見壓痕器之痕跡與旁邊延伸出的徑向裂紋，橫切面可見垂直向下的中央裂紋與平行於表面的側向裂紋，使用 Knoop 壓痕器在石英(0001)面，負載 2N，視野寬度 100 μ m，以 SEM 拍攝[7]。

Lawn 和 Swain 是最早以數學公式建立起中央/徑向裂紋深度、負載大小及材料特性之關係者[7]。後來 Lawn 和 Evans 使用應力集中因子(stress intensity factor)連結了中央/徑向裂紋深度、負載大小、硬度和楊氏係數等材料特性，建立起可以廣泛運用於各種脆性材料的數學模型[3,4]。以往皆認為中央/徑向裂紋的驅使力量是直接由壓痕器的負載所致，但 Lawn 和 Evans 假設受試材料內的應力有殘留成分(residual component)與彈性成分(elastic component)兩種。當壓痕器的正向力漸增，會造成周圍的塑性變形區向外膨脹，這種塑性膨脹無法復原，即使壓痕器離開依然會保持膨脹的體積，所以會推擠周圍的材料並留下殘留應力。雖然殘留應力也會造成彈性變形，但殘留一詞意指負載卸除後無法復原的部分。相對的，彈性成分是當壓痕器與受試材料接觸時，整個材料所形成可復原的彈性變形，當壓痕器離開，彈性成分就傾向於復原。因此殘留與彈性成分完全是以卸載時應變是否能

復原來區分，與塑性、彈性變形的定義不同，在玻璃沿裂紋完全裂開後，殘留成分就會復原。

Lawn 和 Evans 推論驅使中央/徑向裂紋的主要力量是殘留成分，膨脹的塑性應變區產生拉應力，在裂紋發生過程中，此拉應力施加在裂紋口上，因此屬於第一種模式的應力集中問題(mode I)，其數學式為

$$K_r = f(\varphi) \left(\frac{a}{b}\right) \left(\frac{E}{H}\right) \cot\psi \frac{P}{c^{\frac{3}{2}}} \quad (2-4)$$

其中 K_r 為殘留成分之應力集中因子， P 是負載， c 是中央/徑向裂紋深度， $f(\varphi)$ 是角度(方位)的函數， a 是壓痕器接觸寬度的一半， b 是塑性變形區的半徑， ψ 是壓痕器的尖端夾角(tip angle)， E 和 H 是分別是楊氏係數和硬度，圖 2-7 表示符號所代表意義。

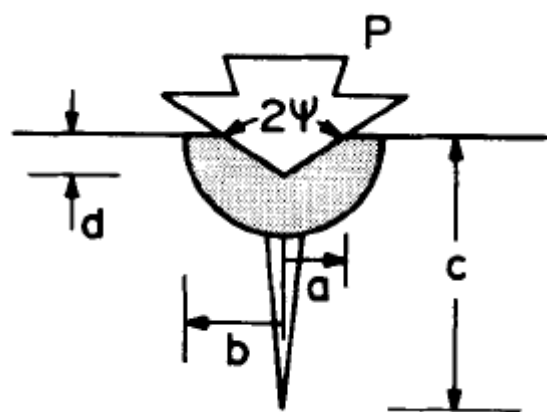


圖 2-7 殘留成分的模型。a 是壓痕器接觸寬度的一半，
b 是塑性變形區半徑，c 是裂紋深度，d 是壓痕器穿透深度，
P 是負載， 2ψ 是壓痕器夾角[3]。

此外，彈性成分也有對應之應力集中因子 K_e ，當 K_r+K_e 等於臨界應力集中

因子 K_c 時，裂紋就會產生，但如前所述， K_r 才是主要的成分，故可用 $K_r=K_c$ 。 K_c 是材料特性的常數，而其他條件也已知，故可求出裂紋深度 c 。

Marshall 和 Lawn 之後又研究了成因不同的側向裂紋系統[4]，側向裂紋也是因殘留成分而產生，但發生在卸載的階段，原因是卸載時彈性應變逐漸恢復，卻被殘留成分卡住，因此在塑性變形區兩側產生拉應力而裂開。中央裂紋與側向裂紋發生時間和負載的關係如圖 2-8 所示。

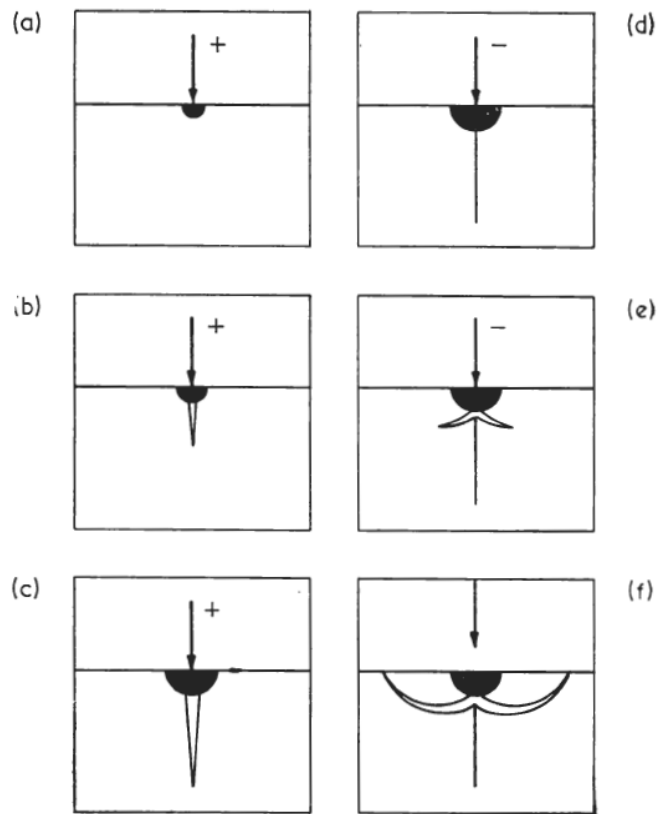


圖 2-8 裂紋發生時序。“+”號代表負載增加，“-”號代表負載減少，中央裂紋在負載增加時形成，側向裂紋在負載減少時產生[7]。

因為所有裂紋系統的發生都是由殘留成分決定，所以在負載以外的條件固定的狀況下，欲增加中央裂紋必定要增加負載，負載增加到某一程度側向裂紋就會發生，此原理應用到劃線時也一樣，因此透過增加負載加深中央裂紋深度有其限制。

2.3 劃線切割理論

壓痕器一次只能形成一個點的脆性破壞，如果使用具有尖端的刀輪，如圖 2-9 所示，就能不間斷的形成連續的中央裂紋。又因為中央/徑向裂紋會偏向發生於壓痕器較長的軸向(例如使用 knops indenter)及壓痕器外表的稜線上[7]，因此可以避免垂直於刀輪滾動方向的徑向裂紋產生。

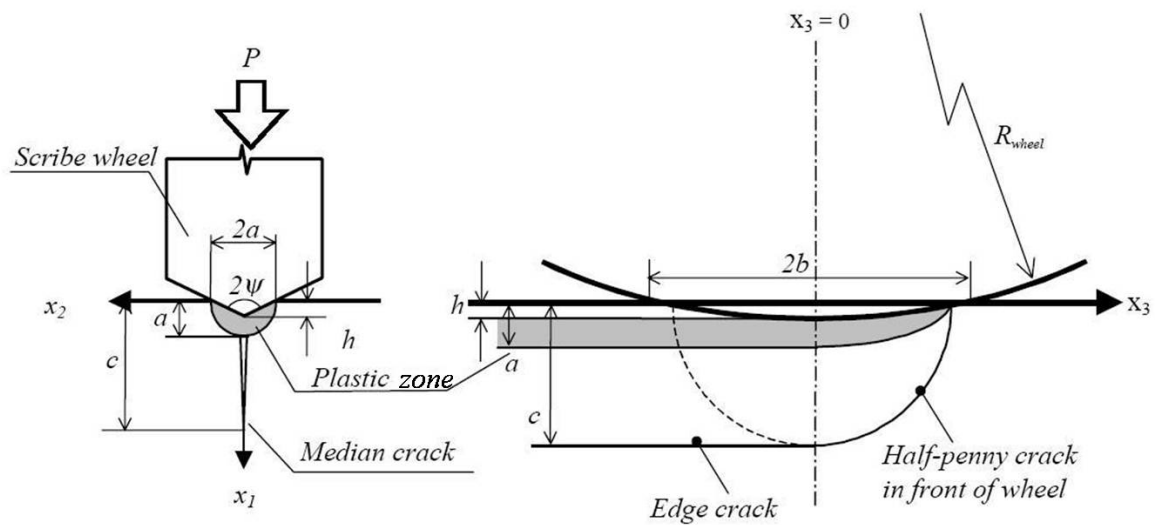


圖 2-9 刀輪作用示意圖。刀輪滾動為連續的壓痕作用，產生連續的中央裂紋， a 是接觸寬度的一半，也是塑性變形區深度， $2b$ 是接觸長度， c 是中央裂紋深度， h 是刀輪穿透深度， 2ψ 是刀輪夾角， R_{wheel} 是刀輪半徑[5]。

Ono 和 Tanaka 推導出刀輪產生裂紋的數學模型[5]

$$C_L = \left(\frac{\sqrt{2}+1}{2}\right)^2 f(\psi) \left[\frac{EP^2}{(1-\nu^2)K_{IC}^3 R}\right]^{\frac{2}{3}} \quad (2-5)$$

C_L 是中央裂紋深度， E 是楊氏係數， $f(\psi)$ 是刀輪幾何外型的函數， K_{IC} 是第一種模式臨界應力集中因子， P 是負載， R 是刀輪半徑， ν 是浦松比。

劃線時的中央裂紋與壓痕實驗時樣子略有不同，因為連續的中央裂紋會產生波浪狀的條紋，稱為 Wallner line，如圖 2-10 所示一般判斷中央裂紋的深度係從材料表面至 Wallner line 的下界。

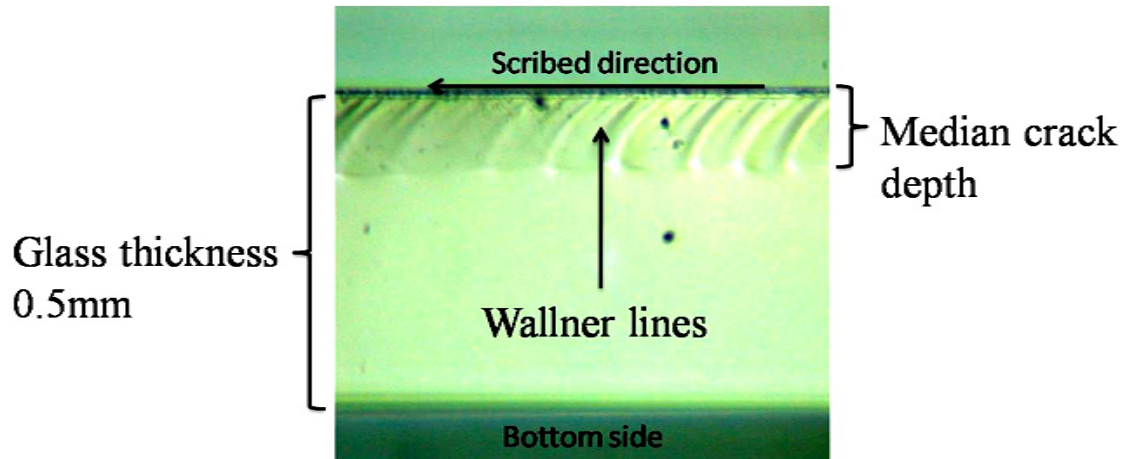


圖 2-10 Wallner line。玻璃切割後之側視圖，顯示代表中央裂紋深度的 Wallner line。

Ono 和 Tanaka 研究了部分刀輪外型對中央裂紋的影響[5]，指出刀輪夾角在 $110^{\circ} \sim 130^{\circ}$ 之間角度越小中央裂紋越深，刀輪直徑在 2.5~4mm 之間，直徑越小中央裂紋越深。另外 Ono 和 Tanaka 也指出，基本上中央裂紋越深所需要裂片的力量越小，但在不同刀輪的情況下不一定正確，因為殘留應力會減小裂片所需的力量，側向裂紋會釋放殘留應力，而不同刀輪產生的殘留應力及側向裂紋各有差異。夾角角度小的刀輪產生的中央裂紋較深，但是側向裂紋發生得早，角度大則反之[9]。

Liao 等人更進一步研究刀輪外型[6]，包括刀輪夾角、鼻端半徑大小、表面研磨程度如何影響中央裂紋與切割出的邊緣強度。刀輪外型對裂紋是隱性的透過膨脹的塑性變形區產生作用，因此定義一個評價刀輪外型好壞的係數，稱為體積/裂紋作用係數(volume/crack effective coefficient)

$$\alpha = \frac{c^{\frac{3}{2}}}{\delta Ab} \quad (2-6)$$

其中 δA 是刀輪壓入玻璃部分的最大截面積， b 是劃線表面刀痕寬度的一半， c 是中央裂紋深度。特別注意的是 δA 的計算包含了實際測量鼻端半徑，不同於早先的研究使用公式估計鼻端半徑的影響[5]。 α 越大代表刀輪的外型條件使塑性變形區膨脹轉變成中央裂紋的效率越高，透過此係數可對刀輪外型條件對中央裂紋及邊緣強度的影響做估算。

劃線切割完後邊緣強度的測量一般都使用四點彎曲強度測試(four point bending test)[6][10]，如圖 2-11，以欲研究之參數切割出固定大小試片後，伺服機台彎曲試片至破壞並記錄最大力量。影響劃線切割後邊緣強度的因素至今未有理論出現，可能與徑向、側向裂紋有關，但尚未發現一定的趨勢，實務上側向裂紋剛開始發生時邊緣強度可能下降，但側向裂紋嚴重導致剝落時強度反而會再度上升，因此有關邊緣強度的研究仍在實驗觀察階段，但劃線切割的基本理論至此已大致發展完成。

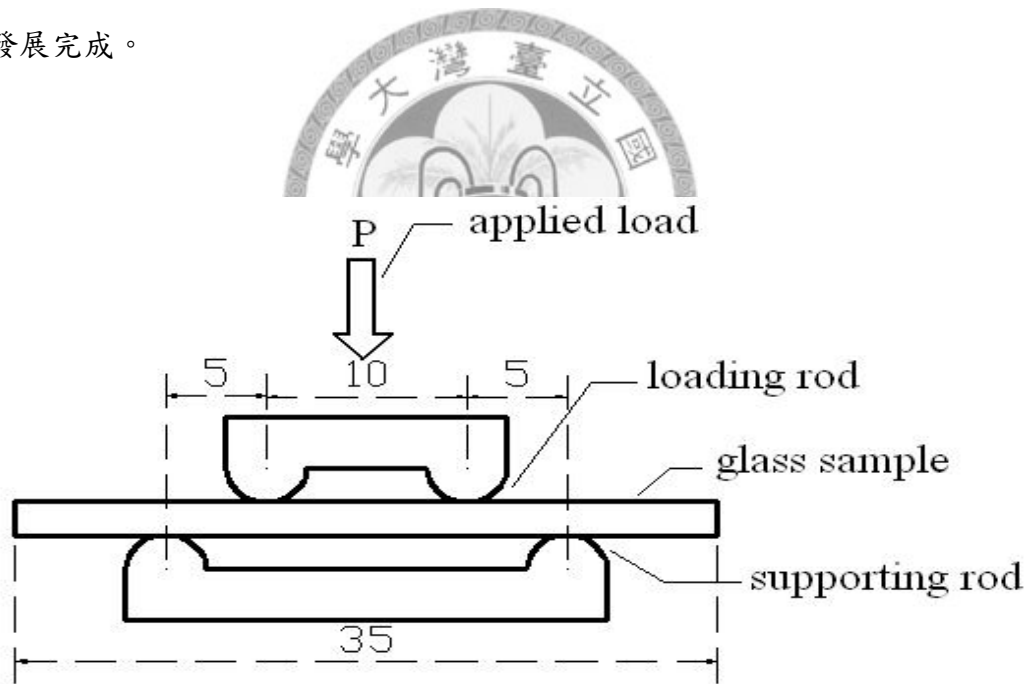


圖 2-11 四點彎曲測試。此為標準四點彎曲強度測試機構，load span 10mm，support span 20mm[6]。

2.4 振動輔助劃線切割之原理

不論是增加負載或是改變標準型刀輪的角度等，在增加中央裂紋深度上都遇到了瓶頸，因為不管如何變化，都跳脫不出前文所述的模型，在中央裂紋深度貫穿整片玻璃厚度前，側向裂紋就已經出現。但有齒型刀輪的成功，啟發了加深中央裂紋的新方向。有齒型刀輪透過間隔的溝槽改變玻璃內的應力分佈，可能是在齒的部分造成中央裂紋時，溝槽部分造成彈性變形起了推波助瀾的功效。

本研究推測振動輔助劃線也能改變熟知的模型中應力分佈的模式，使用彈性變形的成分增加中央裂紋深度。雖然 Lawn 和 Evans 的研究說明彈性成分相對於殘留成分來說，對裂紋深度的影響是次要的[3]，但這是基於系統處於準靜態(quasistatic)的條件[7]，就是壓痕器與受試材料的接觸速度遠低於彈性波在玻璃內的傳遞速度($10^3 \sim 10^4 \text{m/s}$)。

對於快速變動的負載來說，雖不能超過彈性波的傳遞速度，但有可能超過塑性變形區變形的速度，一旦接觸速度超過塑性變形區變形的速度，有部分變形將跳過塑性變形區由材料的彈性變形承受，因此增加了彈性的成分，如果此彈性成分的增加顯著，透過裂紋的成長而釋放，則可以不增加塑性變形區的膨脹量就能使裂紋深度增加。

如圖 2-12，振動輔助會使負載的峰值大於恆定的負載，透過高速的接觸避免增加負載時也增加殘留成分，反而增加彈性成分，本來彈性成分對中央裂紋深度無足輕重，但刻意增加的彈性成分就有可能影響裂紋深度。

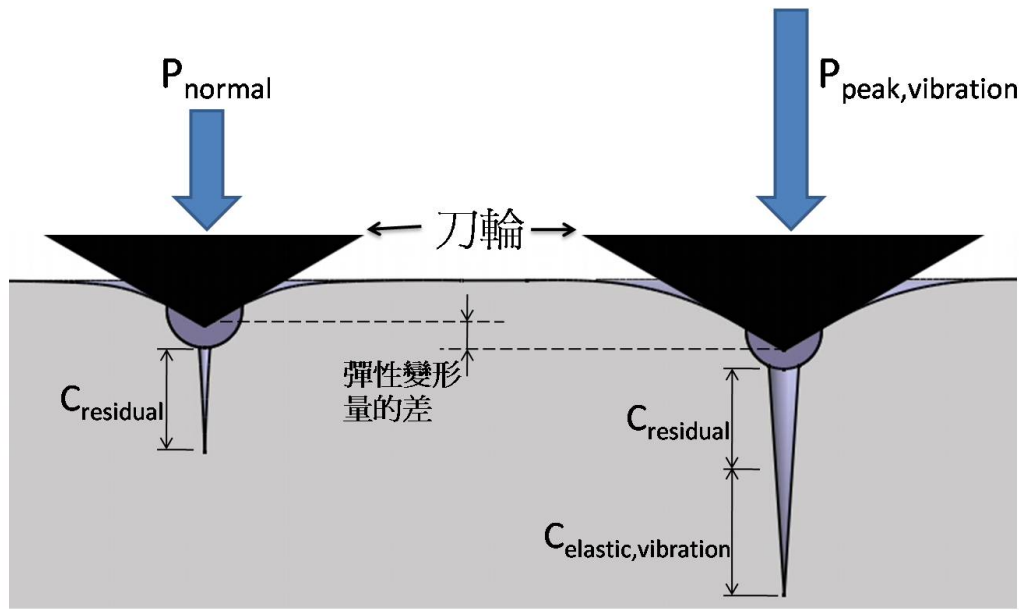


圖 2-12 振動與非振動之彈性變形不同。一般劃線與振動輔助劃線，振動輔助的最大負載較大，但塑性變形區並未等量增加，振動輔助得到的中央裂紋深度包含殘留成分與彈性成分，為使讀者易於瞭解，圖中誇大了玻璃的彈性變形量。



第三章、實驗裝置與實驗規劃

3.1 實驗裝置

3.1.1 振動輔助裝置設計

實現振動輔助劃線切割的方法，只要使原本由伺服控制恆定的負載，疊加上一個週期性變化成分，就成為能增加接觸速度的振動輔助裝置。產生負載週期性變化至少有兩種方式，一種是由原本施加負載的馬達產生微幅振動，一種是在刀座上加裝另一個致動器，必須由需要的振幅、頻率來決定何種方法適用。

振動輔助是模擬有齒型刀輪的效果，因此振幅、頻率的數量級可以有齒型刀輪的齒間距與高低差來推算。有齒型刀輪所造成的週期性應力變化，直徑 2mm 的刀輪在劃線速度 100mm/s 下，換算成轉速為 $100/2\pi$ (rad/s)，最密之 360 齒刀輪每轉有 360 次應力變化(360/rad)，應力變化頻率是 $36000/2\pi$ (/s)，約為 5.7KHz，因此頻率的數量級為千赫茲，且隨劃線速度越快頻率也線性增加。以 360 齒刀輪的齒距當成槽的直徑來看，齒與槽的高低差約為 8、9 μm ，因此振幅的數量級為 μm 。

因為需要高振動頻率與小振幅，所以適合使用壓電致動器。週期性變動的負載須浮動疊加於恆定負載之上，因此壓電致動器必須裝在原本伺服控制負載的機構與刀輪之間。為避免振動影響太多條件造成分析不易，振動方向與負載方向完全相同，因此壓電致動器為垂直安裝，圖 3-1 為振動輔助裝置的設計圖。

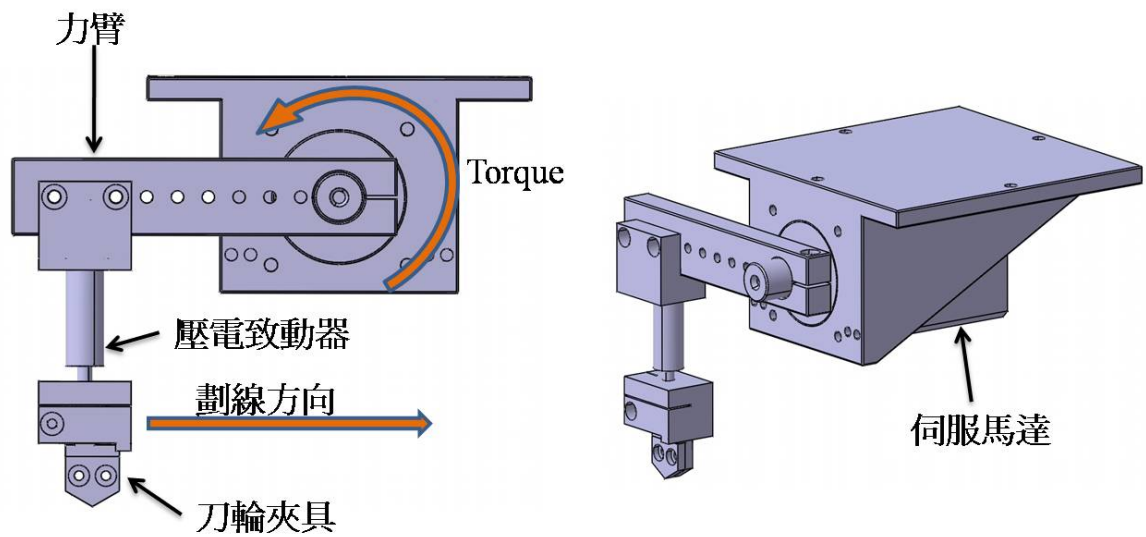


圖 3-1 自行設計之振動輔助裝置、刀輪夾持機構與固定座。
 恆定負載由伺服馬達產生，振動由垂直安裝之壓電致動器產生。

3.1.2 實驗機台

3.1.1 節所述之壓電致動器，使用 Piezomechanik PSt/150/5/20 VS10，如圖 3-2。
 負載伺服馬達使用三菱 HC-KFS053 伺服馬達搭配 APEX DYNAMICS AF0421 減速機，以三菱 MR-J2 SUPER 10A 馬達驅動器驅動。

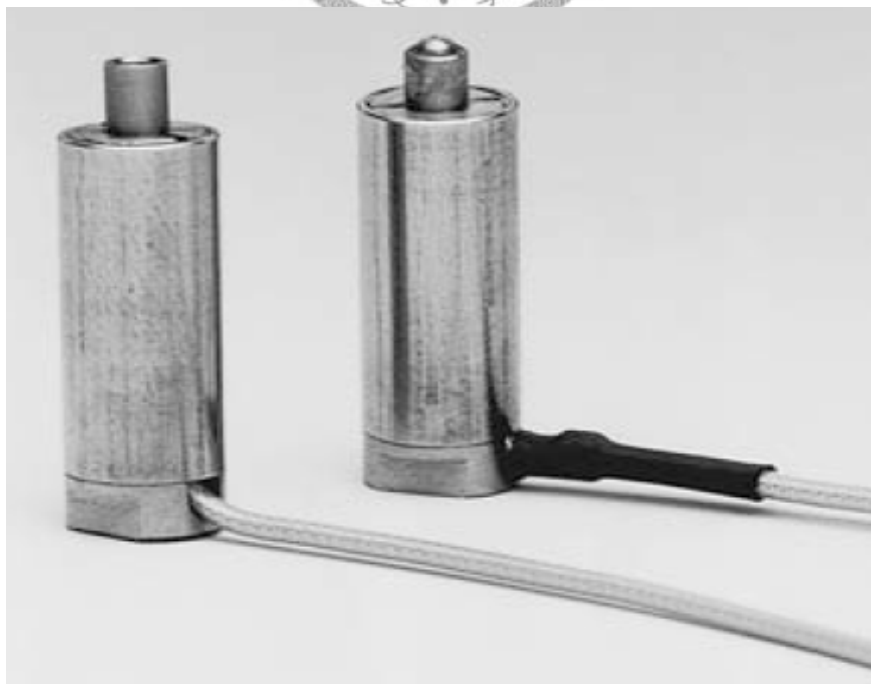


圖 3-2 Piezomechanik PSt/150/5/20 VS10 壓電致動器(左)。

自行設計之振動輔助裝置還需要壓電驅動器與波形產生器配合，壓電驅動器採用 A.A. LAB SYSTEM A-303，波形產生器為 Tektronix AFG320，其連接方式如圖 3-3 所示。

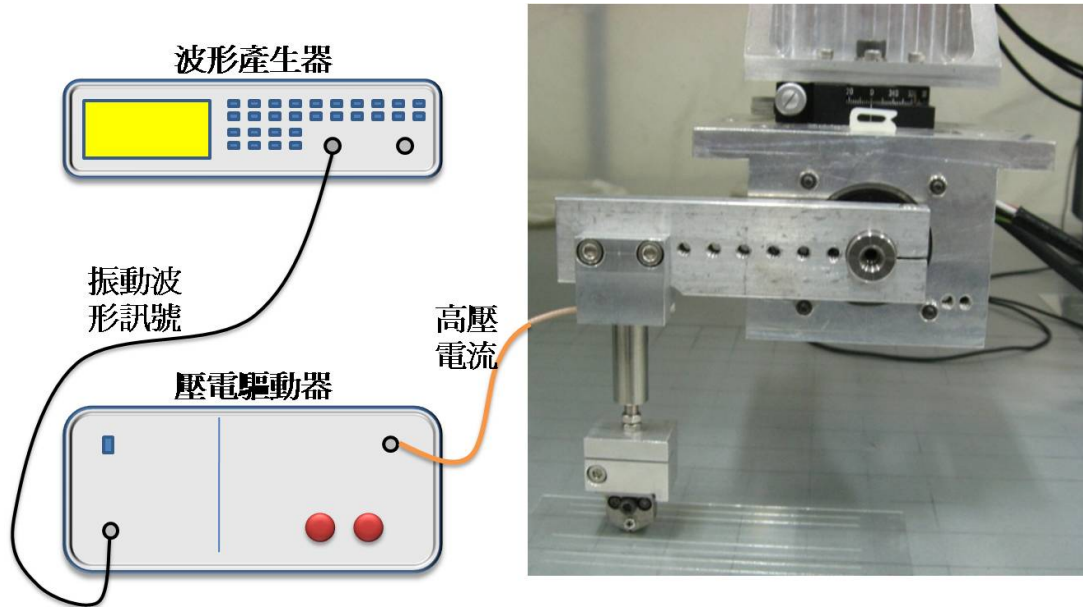


圖 3-3 振動輔助系統。

前述自行設計之振動輔助裝置裝載於大銀微系統(HIWIN)之線性馬達龍門平台，如圖 3-4，詳細規格見附錄 A。機台之 X、Y 軸以 Copley Motion 馬達驅動器驅動，Z 軸為三菱 HC-KFS13 伺服馬達，搭配 MR-J2 SUPER 10A 馬達驅動器。

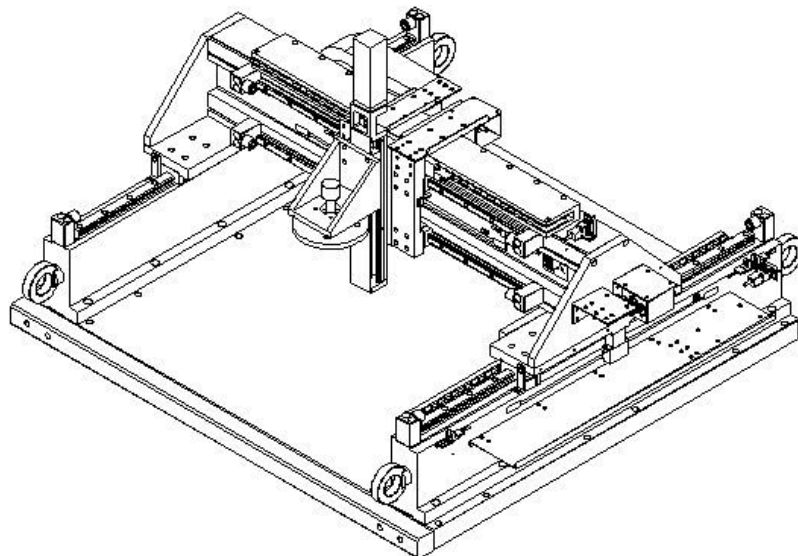


圖 3-4 大銀微系統(HIWIN)龍門平台。

為隔絕振動，機台置於花崗岩平台之上，如圖 3-5。



圖 3-5 劃線機台置於花崗石平台上。

本研究欲量測切割完後玻璃之彎曲強度，需要微型強度測試伺服機台，因此利用劃線機台的 Z 軸，加裝彎曲強度治具，中間再以荷重元(load cell)量測負載力量，裝置實體如圖 3-6 所示。本荷重元、放大電路與顯示器為煜昕科技(JIHSENSE) S-35 荷重元與 JS-2000 數位顯示器(內建放大器)。

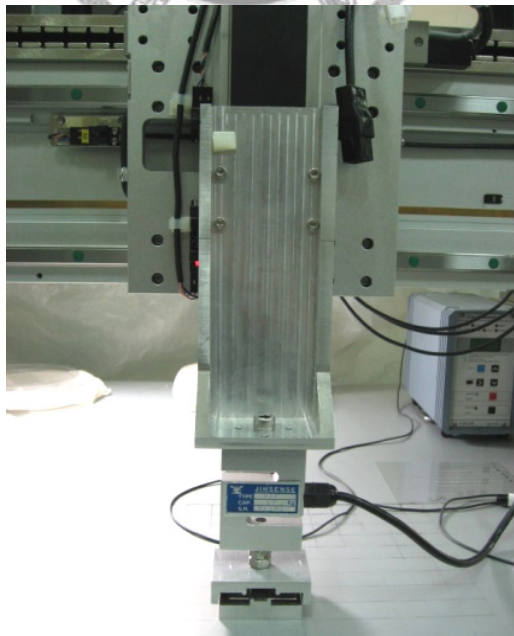


圖 3-6 彎曲強度測試機實體照。

本實驗所有運動軸皆由 PC 搭配運動控制卡加以控制，控制卡採用美商國家儀器(NATIONAL INSTRUMENT)之 PCI-7344 運動控制卡，如圖 3-7。



圖 3-7 美商國家儀器(NATIONAL INSTRUMENT)PCI-7344 運動控制卡(左上)

本實驗所有控制接線包括三個運動軸、負載伺服馬達、振動輔助系統等皆為自行接線，所有驅動器與控制器之設定與校調也是自行完成。



3.1.3 其他實驗設備與材料

1. 三星(MDI)標準型鑽石刀輪(PCD)、輪軸(尺寸如附錄B)與有齒型刀輪(penett)、MDI 刀輪夾持機構。
2. 康寧(CORNING) EAGLE²⁰⁰⁰ LCD 專用玻璃，厚度 0.5mm(規格見附錄 C)。

3.2 振動參數初步測試

振動的可變參數至少有波形、頻率與振幅三種。從波形產生器可產生方波、三角波、正弦波三種基本波形，頻率與振幅依實驗室現有壓電致動器的限制最大可達數十 KHz 及 10 μ m。振動可以控制的變因太多太廣，不適合全面做交叉實驗，

所以必須選擇主要的操縱變因。依前一章所述的振動輔助原理，振動是否能增加中央裂紋，接觸速度是主要因素，因此主要的操縱變因是頻率和波形。振幅大小影響的是負載的峰值，理論上在不產生側向裂紋的前提下應盡量使用較大的振幅，使得到的中央裂紋深度最大化。

為初步瞭解適合的頻率與振幅，需選用某些控制變因做測試，表 3-1 是測試時所使用的控制變因，選用 125 度刀輪的原因是在一般劃線時，大角度刀輪較不易產生側向裂紋，選用的速度是在一般常用的範圍內，負載則是依經驗選擇搭配 125 度刀輪時中央裂紋深度較深且邊緣強度又好的數值。壓電致動器行程 20 μm ，欲使用較大振幅並避免遇到行程末端，故使用其中的 16 μm ($\pm 8\mu\text{m}$)。頻率範圍是在壓電致動器可工作的範圍內每隔一個數量級選取幾個頻率。

表 3-1 初步測試的控制變因。

夾角 ($^{\circ}$)	速度 (mm/s)	負載 (g)	波形	振幅 (μm)
125	100	1500	正弦	± 8

劃線的方法如圖 3-8 所示，在一塊寬 100mm 之玻璃基板上，以不同操縱變因劃平行線，每條平行線間隔 10mm，劃線完成再從垂直方向劃兩條線，間隔 30mm。為了讓殘留成分的作用完全，劃線一天後才裂片，取之前所劃平行線的中央段作為觀察的試片。觀察時將試片 90 度直立，以光學顯微鏡及手動平台配合光學尺，隨機取八個相距 3mm 的點做量測。判斷中央裂紋深度基本上遵循傳統的方式以 Wallner line 下界為準，若無 Wallner line 但有發現裂紋停止線(arrest line)亦可以裂紋停止線作為判斷中央裂紋深度的依據。

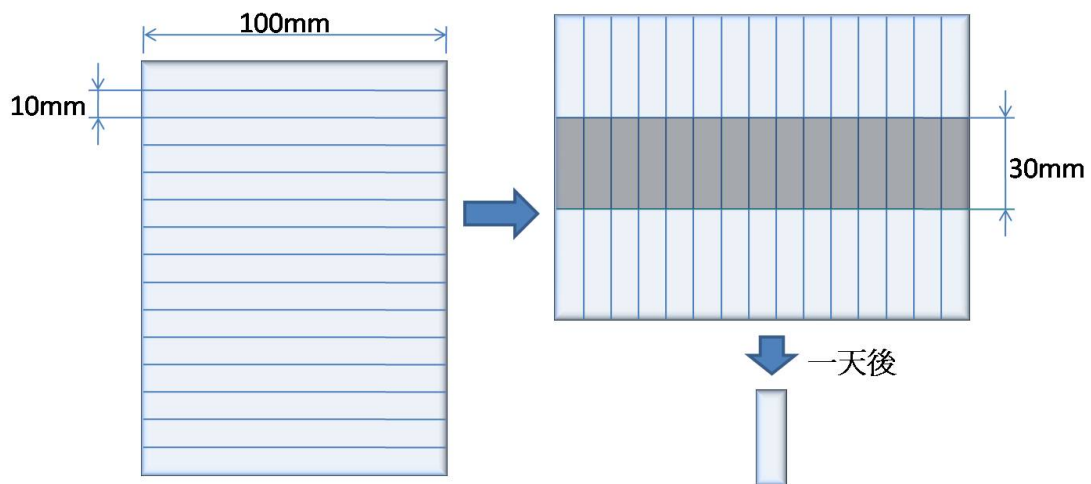


圖 3-8 觀察中央裂紋試片切割方法。

表 3-2 是初步測試得到的結果，發現加上振動輔助後中央裂紋深度會顯著增加，最高可達一般劃線的兩倍。另外 1KHz 以上的頻率所產生的噪音已使人耳感到稍有負擔，2KHz 以上則非常刺耳，加上 2KHz 以下的中央裂紋增加比較明顯，考量到實用性與實驗安全性，本研究只針對 2KHz 以下頻率開發技術。

表 3-2 初步測試結果，操縱變因是頻率，從 200 到 20KHz。

頻率 (Hz)	0	200	400	800	1K	2K	4K	8K	10K	20K
中央裂紋深度 (μm)	80	83	110	174	143	131	95	95	93	102

3.3 實驗目的

依目的不同共有三項實驗，實驗一的目的在比較各種條件下振動輔助與未加振動輔助形成中央裂紋深度的差異，以及振動輔助是否能達到有齒刀輪自動裂片的效果，前提是不能有側向裂紋。

實驗二的目的則是以實驗一中，中央裂紋有顯著增加或能自動裂片的組合，與未加振動輔助的標準型刀輪及有齒型刀輪比較彎曲強度，以證明振動輔助可以取代未加振動的標準型刀輪及有齒型刀輪。

實驗三的目的是以實驗驗證振動輔助劃線原理的正確性，證明彈性成分造成的中央裂紋深度的確存在，且就是振動輔助能增加中央裂紋深度的原因。

3.4 實驗一

實驗一的目的為觀察劃線後之中央裂紋深度、自動裂片及側向裂紋等，因此劃線方式與圖 3-7 相同。劃線完成後先記錄自動裂片的組別，自動裂片的定義是不需特別施力，只要拿起玻璃或劃線完尚未接觸玻璃就自行裂開者。之後等待一天時間，再將需要裂片的試片進行裂片，隨後以光學顯微鏡進行觀察，方式與 3.2 節所述相同，除記錄中央裂紋深度之外也要從玻璃正面觀察有無側向裂紋，判斷側向裂紋的方法如圖 3-9 所示。

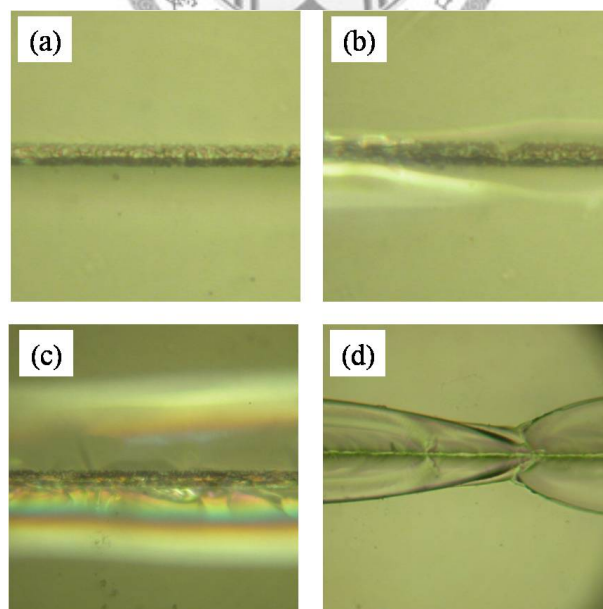


圖 3-9 側向裂紋辨識 (a)無側向裂紋 (c)至(d)側向裂紋程度由輕至重。

本實驗的控制變因如表 3-3 所示，與 3.1 節初步測試的速度和振幅相同。

表 3-3 實驗一的控制變因。

速度 (mm/s)	振幅 (μm)
100	±8

操縱變因如表 3-4 及 3-5，計有刀輪夾角、波形與頻率。標準型刀輪夾角從 100 度以上至 130 度都有，本實驗使用夾角 115 與 125 度刀輪是因為中、大角度的刀輪較不容易產生側向裂紋。負載則是搭配刀輪夾角，選用一般劃線實驗常用的數值，所產生的中央裂紋較深，但不產生側向裂紋。實驗共分六組，前三組與後三組分別是 125 度刀輪與 115 度刀輪搭配三種波形，每組的調變變因是頻率，從 200Hz 至 2KHz 計有十種頻率。

表 3-4 實驗一的操縱變因。

		刀輪夾角	
		125(搭配 1500g 負載)	115(搭配 1200g 負載)
振動 波形	正弦波	第 1 組	第 4 組
	三角波	第 2 組	第 5 組
	方波	第 3 組	第 6 組

表 3-5 實驗一各組的調變變因。

編號	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
頻率 (Hz)	0	200	400	800	1K	2K	4K	8K	10K	20K

3.5 實驗二

本實驗將挑選出實驗一中表現較佳的幾個變因組合，挑選的條件是中央裂紋深度有明顯增加或玻璃自動裂片，前提是不能產生側向裂紋。按照圖 3-10 的方式，在一塊寬 140mm 的玻璃基板上，間隔 30mm 及 10mm 劃平行線，間隔 30mm 的兩條線為同一劃線條件，再從垂直方向劃三條線四等分。等待一天時間再裂片，得到 35mm×30mm 的試片，同一組條件切出來的試片有四片。

每一片試片都經由伺服機台測試其彎曲強度，測試的治具如圖 2-11 所示，但 load span 與 support span 的數值互換，此舉是為了測試時讓試片劃線的面向上方便作業。彎曲伺服機台由上往下以固定 0.03mm/s 速度推動 load span 並同時由 load cell 記錄最大力量。

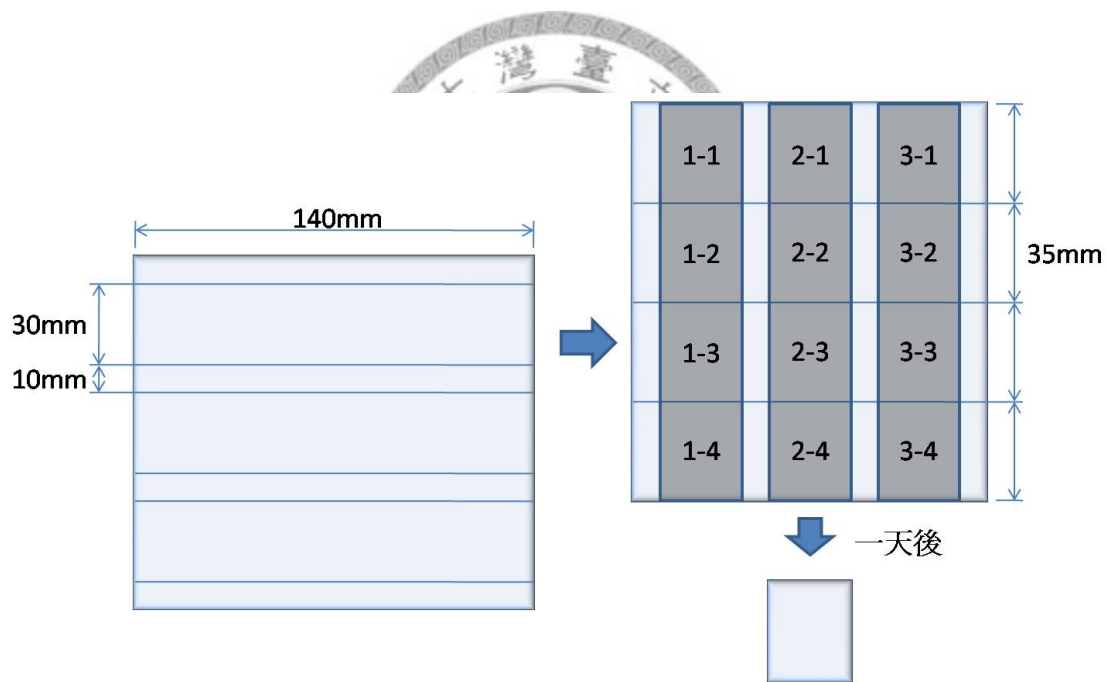


圖 3-10 實驗三的試片切割方式。切割每四片為一組之試片，相鄰 30mm 的兩條線使用相同變因組合。

3.6 實驗三

3.6.1 實驗方法

根據 Lawn 和 Evans 的理論，造成中央裂紋的主要原因是殘留成分，就是塑性變形區體積的膨脹量也就是刀輪壓入玻璃的體積[3]。又根據 Liao 等人的研究，刀輪壓入體積可以從刀痕寬度及刀輪幾何外型計算[6]。在劃線方向上的微小單位長度內，刀輪壓入玻璃的最大體積正比於刀輪壓入的截面積，如圖 3-11 所示，因此計算刀輪壓入截面積可以代表刀輪壓入體積。

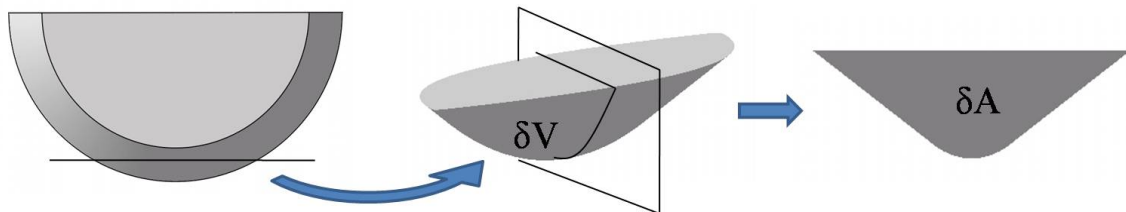


圖 3-11 刀輪最大壓入體積與刀輪壓入截面積。

殘留成分形成的中央裂紋深度與壓入截面積有以下的關係[6]

$$C_{\text{residual}} = [\alpha \delta A b]^{\frac{2}{3}} \quad (3-1)$$

其中 C_{residual} 是殘留成分造成的中央裂紋深度， δA 是壓入截面積， b 是刀痕寬度的一半， α 是第 2.3 節所述的體積/裂紋作用係數。同樣負載下 α 為定值，故此處暫時假設 α 為定值，因此式 3-1 簡化成

$$C_{\text{residual}} \propto (\delta A b)^{\frac{2}{3}} \quad (3-2)$$

本實驗目的是為了證明彈性成分的中央裂紋存在，可能造成中央裂紋的不外乎殘留與彈性兩種成分，所以如果算出有振動輔助時的 $C_{residual}$ 小於觀察到的中央裂紋深度 C ，即證明本研究所假設中央裂紋可藉由振動輔助增加彈性變形而增加的理論正確。

假設狀況 1 是無振動輔助，2 是有振動輔助，無振動輔助的中央裂紋深度完全是殘留成分造成，即 $C_1 = C_{residual,1}$ ，若已知 $C_{residual,1}$ 、 δA_1 、 b_1 ，又知 δA_2 、 b_2 ，則有振動輔助之殘留成分中央裂紋為

$$C_{residual,2} = C_{residual,1} \times (\delta A_2 b_2) \div (\delta A_1 b_1) \quad (3-3)$$

但振動輔助的中央裂紋深度則同時有殘留與彈性成分，如式 3-4



$C = C_{residual} + C_{elastic}$

$$C = C_{residual} + C_{elastic} \quad (3-4)$$

故有振動輔助的彈性成分中央裂紋為

$$C_{elastic,2} = C_2 - C_{residual,2} \quad (3-5)$$

以上述方式可推算有振動輔助時的殘留成分 $C_{residual,2}$ 與彈性成分 $C_{elastic,2}$ ，但必須知道無振動與有振動輔助的中央裂紋深度 C 、有振動與無振動輔助下的最大壓入面積 δA 與半刀痕寬 b 等條件。

計算時所需的數值 b 由本實驗觀察而來， δA 則必須由 b 及其他刀輪及尺寸計算。如圖 3-12 所示，以刀痕寬度 $2b$ 刀輪夾角 2θ 、刀輪鼻端半徑 R 與圓心角 2ϕ 可以計算出 δA 。

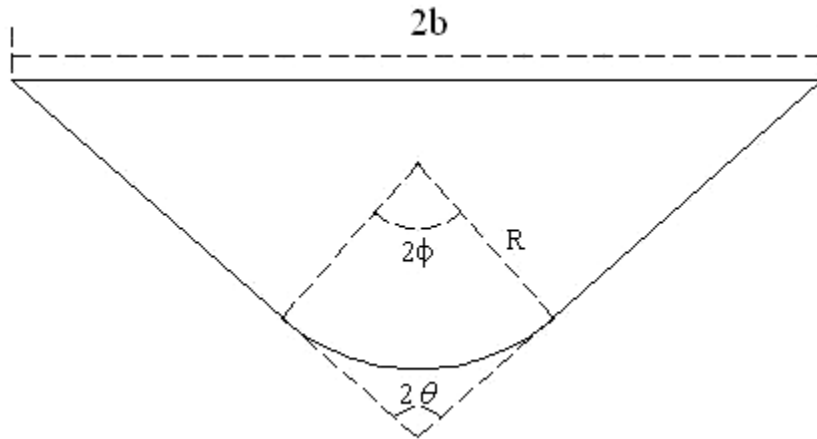


圖 3-12 刀尖幾何外型示意圖。

125 度刀輪的幾何外型如表 3-6 所示，是由刀輪 SEM 照片的輪廓 curve fitting 求得，SEM 照片如圖 3-13。

表 3-6 125 度刀輪幾何外型。

鼻端半徑(μm)	圓心角($^\circ$)
5.4	58



圖 3-13 刀輪尖端之 SEM 照片。

3.6.2 實驗內容

為證明本理論在振動裝置能產生的各種頻率都適用，使用本章 3.1 節的初步測試所用之變因進行劃線，如表 3-7 與表 3-8。

表 3-7 實驗三的控制變因。

夾角 ($^{\circ}$)	速度 (mm/s)	負載 (g)	波形	振幅 (μm)
125	100	1500	正弦	± 8

表 3-8 實驗三的調變變因。

頻率 (Hz)	0	200	400	800	1K	2K	4K	8K	10K	20K
---------	---	-----	-----	-----	----	----	----	----	-----	-----

實驗方式與實驗一稍有不同，為避免自動裂片後無法觀察到刀痕，因此如圖 3-14，劃線時不橫跨整個試片，使玻璃劃線完依然完整不分離。

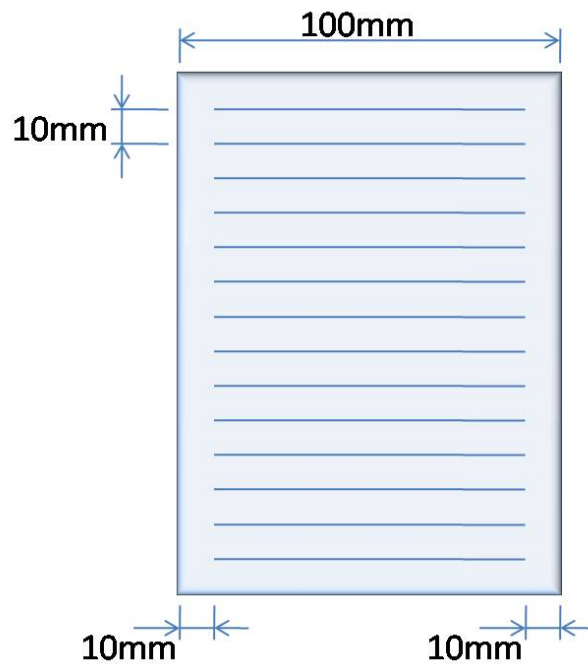


圖 3-14 實驗三的劃線方式。

劃線之後隔一天，在光學顯微鏡底下以光學尺量測刀痕寬度，取樣觀察時與實驗一類似，在每條線正中央 30mm 寬範圍內，隨機每隔 3mm 量測一次，共取八個點。量測完後以 3.6.1 節所述之方法計算 C_{elastic} 。



第四章、實驗結果與討論

4.1 實驗一

4.1.1 實驗結果

實驗一的控制變因是劃線速度 100mm/s，振幅 $\pm 8\mu\text{m}$ 。第一組是 125 度刀輪搭配正弦波，負載是 1500g，調變變因是頻率，從 200Hz~2KHz 分為十組，表 4-1 為實驗結果，其中“-“代表無法經由 Wallner line 或 arrest line 判斷裝裂紋深度者。

表 4-1 實驗一第一組結果。

編號	頻率(Hz)	中央裂紋(μm)	標準差	裂片情況	側向裂紋
1-1	0	80	7		
1-2	200	83	2		
1-3	400	110	4		
1-4	600	-	-		
1-5	800	174	33	自動	
1-6	1000	143	13	自動	
1-7	1200	120	10		
1-8	1400	115	17		
1-9	1600	89	11		
1-10	1800	111	7		
1-11	2000	131	15		

第一組與第 3.1 節所做的初步測試條件相近，但本實驗頻率間隔較小，故發現 600Hz 裂片後無法觀察到 Wallner line，只見如圖 4-1 的不規則裂紋。

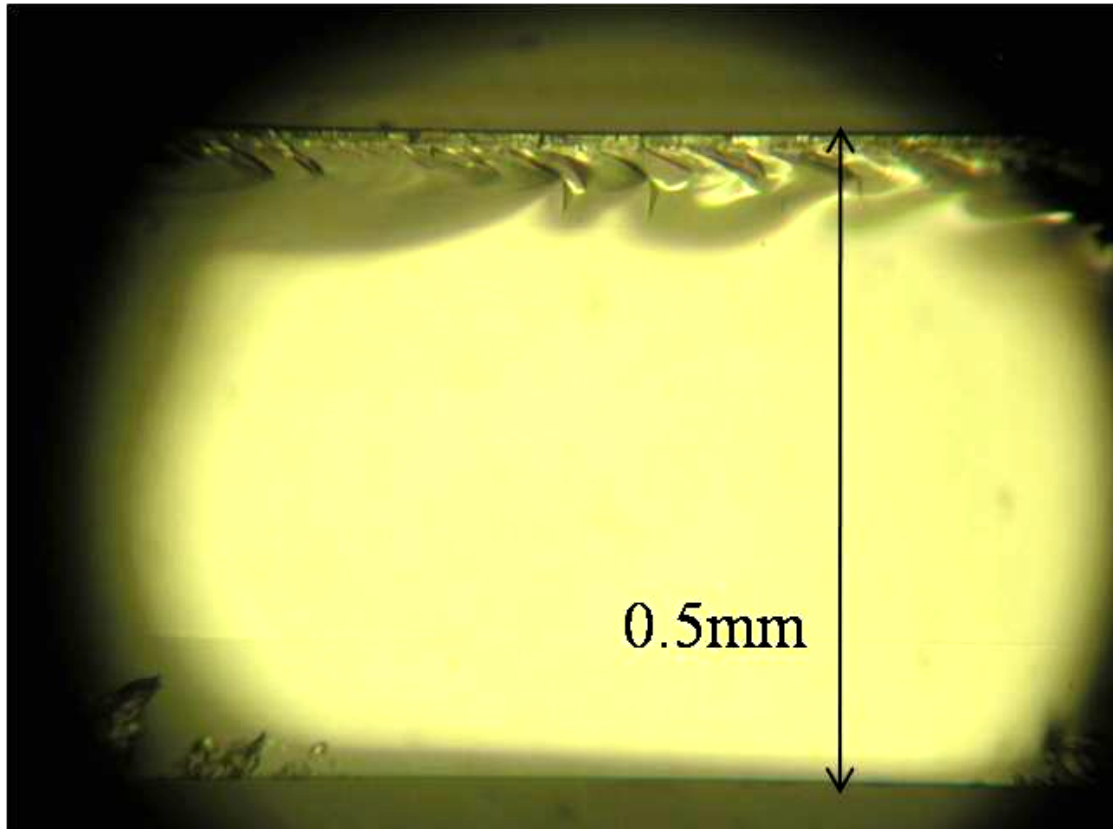


圖 4-1 實驗後玻璃無 Wallner line 的橫斷面。第一組振動頻率為 600Hz。

除 600Hz 之外幾乎所有頻率都產生更深的中央裂紋，其中最顯著的是 800Hz，中央裂紋深度是無振動輔助的兩倍有餘。劃線完後自動裂片的有 800Hz 與 1KHz。所有頻率都沒有側向裂紋產生。

實驗一第二組是 125 度刀輪搭配三角波，負載是 1500g，調變變因是頻率，從 200Hz~2KHz 分為十組，表 4-2 是第二組的實驗結果，其中”x”為無法裂片因此中央裂紋深度無法得知者。

表 4-2 實驗一第二組結果。

編號	頻率(Hz)	中央裂紋(μm)	標準差	裂片情況	側向裂紋
2-1	0	80	7		
2-2	200	84	4		
2-3	400	x	x	無法裂片	
2-4	600	108	12		
2-5	800	160	24	自動	
2-6	1000	156	16	自動	
2-7	1200	123	19		
2-8	1400	-	-		
2-9	1600	121	10		
2-10	1800	126	13		
2-11	2000	156	22	自動	

三角波與正弦波的結果相差不大，相對於正弦波無法產生 Wallner line 的 600Hz，三角波在 400Hz 發生無法裂片的情況，1400Hz 則是無 Wallner line 產生，其餘的頻率中央裂紋都有增加，增加最顯著的頻率依然是 800Hz，另外 1K、2KHz 也很突出。會自動裂片的也是 800、1K 與 2KHz，沒有側向裂紋產生。

實驗一第三組是 125 度刀輪搭配方波，負載是 1500g，調變變因是頻率，從 200Hz~2KHz 分為十組，表 4-3 是第三組的實驗結果。

表 4-3 實驗一第三組結果。

編號	頻率(Hz)	中央裂紋(μm)	標準差	裂片情況	側向裂紋
3-1	0	80	7		
3-2	200	116	16		
3-3	400	125	12		
3-4	600	-	-		
3-5	800	167	3	自動	
3-6	1000	152	22	自動	
3-7	1200	-	-		
3-8	1400	-	-		
3-9	1600	136	19		
3-10	1800	131	12		
3-11	2000	149	9	自動	

方波所得到的結果也大同小異，無 Wallner line 的頻率發生在 600Hz、1200 及 1400Hz，最大的中央裂紋依然是在 800Hz。會自動裂片的頻率也是 800、1K 與 2KHz，沒有側向裂紋發生。一、二、三組實驗顯示對 125 度刀輪而言，雖然波形不同，但中央裂紋深度的趨勢大同小異，最大值也都落在無振動輔助的兩倍左右，只有劃線失敗(無 Wallner line 或裂片失敗)的頻率稍有不同而已。

實驗一第四組是 115 度刀輪搭配正弦波，負載是 1200g，調變變因是頻率，從 200Hz~2KHz 分為十組，表 4-4 是第四組的實驗結果。

表 4-4 實驗一第四組結果。

編號	頻率(Hz)	中央裂紋(μm)	標準差	裂片情況	側向裂紋
4-1	0	88	6		
4-2	200	76	5		
4-3	400	98	9		
4-4	600	142	22	自動	
4-5	800	121	18		有
4-6	1000	110	12		有
4-7	1200	134	16		有
4-8	1400	106	5		有
4-9	1600	111	14		有
4-10	1800	97	1		有
4-11	2000	186	53	自動	有

本組是目前為止第一次發現側向裂紋產生，在 800Hz 以後出現。在不產生側向裂紋的前提下，600Hz 的中央裂紋最深，約增加百分之七十五，而且也可以自動裂片。115 度刀輪與 125 度刀輪不同之處在於，雖然會產生側向裂紋，但沒有不產生 Wallner line 或無法裂片的頻率，中央裂紋深度呈現相對較緩和的趨勢。

實驗一第五組是 115 度刀輪搭配三角波，負載是 1200g，調變變因是頻率，從 200Hz~2KHz 分為十組，表 4-5 是第五組的實驗結果。

表 4-5 實驗一第五組結果。

編號	頻率(Hz)	中央裂紋(μm)	標準差	裂片情況	側向裂紋
5-1	0	88	6		
5-2	200	80	2		
5-3	400	113	13		
5-4	600	118	15		
5-5	800	120	16		
5-6	1000	127	9		
5-7	1200	140	14	自動	有
5-8	1400	115	9		有
5-9	1600	139	23	自動	有
5-10	1800	121	28		有
5-11	2000	165	20	自動	有

第五組實驗發生側向裂紋的頻率比第四組延後一點，在 1KHz 時發生。在不發生側向裂紋的前提下，中央裂紋深度大約增加百分之五十。但在側向裂紋發生之前沒有發生自動裂片的情形。

實驗一第六組是 115 度刀輪搭配方波，負載是 1200g，調變變因是頻率，從 200Hz~2KHz 分為十組，表 4-6 是第六組的實驗結果。

表 4-6 實驗一第六組結果。

編號	頻率(Hz)	中央裂紋(μm)	標準差	裂片情況	側向裂紋
6-1	0	88	6		有
6-2	200	105	10		有
6-3	400	102	6		有
6-4	600	122	18		有
6-5	800	98	8		有
6-6	1000	110	11		有
6-7	1200	93	4		有
6-8	1400	94	6		有
6-9	1600	89	7		有
6-10	1800	121	24		有
6-11	2000				有

第六組實驗全部都產生側向裂紋，因此本組將排除於後續的實驗之外。

4.1.2 討論

從玻璃斷裂面觀察 Wallner line 時發現一件值得注意的現象，Wallner line 的下界本來是平緩的直線，如圖 4-2(a)一般，加上振動輔助後會產生半波狀起伏，如圖 4-2(b)，隨頻率增加，波會互相重疊成為魚鱗狀，如圖 4-2(c)、(d)，重疊的程度還會隨頻率不斷提高。

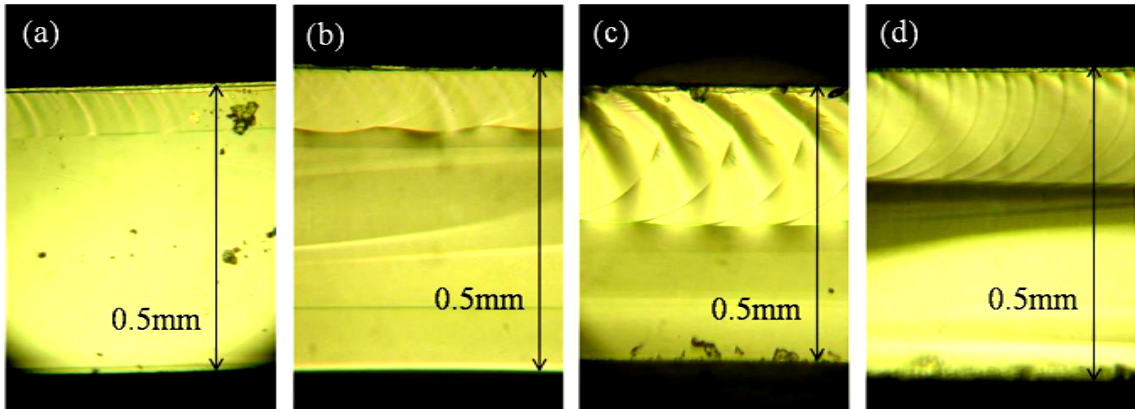


圖 4-2 從無震動輔助至高頻震動的 Wallner line (a)無震動 (b)400Hz (c)800Hz (d)2KHz。劃線於 125 度刀輪，正弦波。

由此現象可以知道每一次正向的振動都造成中央裂紋深度局部的增加，負向則沒有影響，因此振動對劃線的作用方式應如假設般是屬於週期性的負載變化。進一步推想刀輪在玻璃中的行為，如圖 4-3 所示，實際上刀輪與玻璃接觸是前下四分之一圓周，此段圓周掃掠的面積才是真正玻璃受到壓痕而變形的範圍，因此所見的中央裂紋深度變化只有正半波互相重疊，並未如輸入的振動波形有負方向的變化。此種壓痕深度或是負載的變化很類似有齒型刀輪形成的壓痕，但不同之處是振動輔助不需要犧牲鋒利的刀邊的來換取自動裂片的效果。

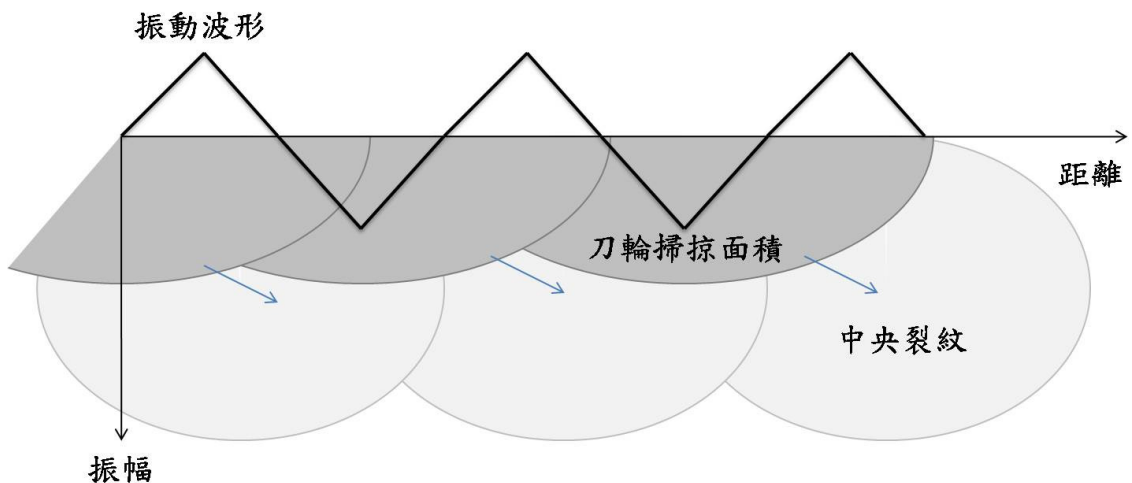


圖 4-3 刀輪的掃掠面積與中央裂紋波狀起伏。
箭頭表示對應之刀輪位置與中央裂紋。

有些頻率無法產生 Wallner line 甚至無法裂片，可能是因為整個振動的系統的共振或吸收頻率所造成，因為 Wallner line 是每一個圓形裂紋前進時與彈性波的交點連線，故彈性波的型態、位置與頻率受震動輔助改變後可能使得 Wallner line 消失。本研究目的並不在建立振動的數學模型，而是實用性的技術研發及定性的解釋現象，因此這部分將會是未來繼續研究的方向之一。

為方便比較中央裂紋的趨勢，將一至三組數據繪製成中央裂紋深度對頻率的趨勢如圖 4-4 所示。

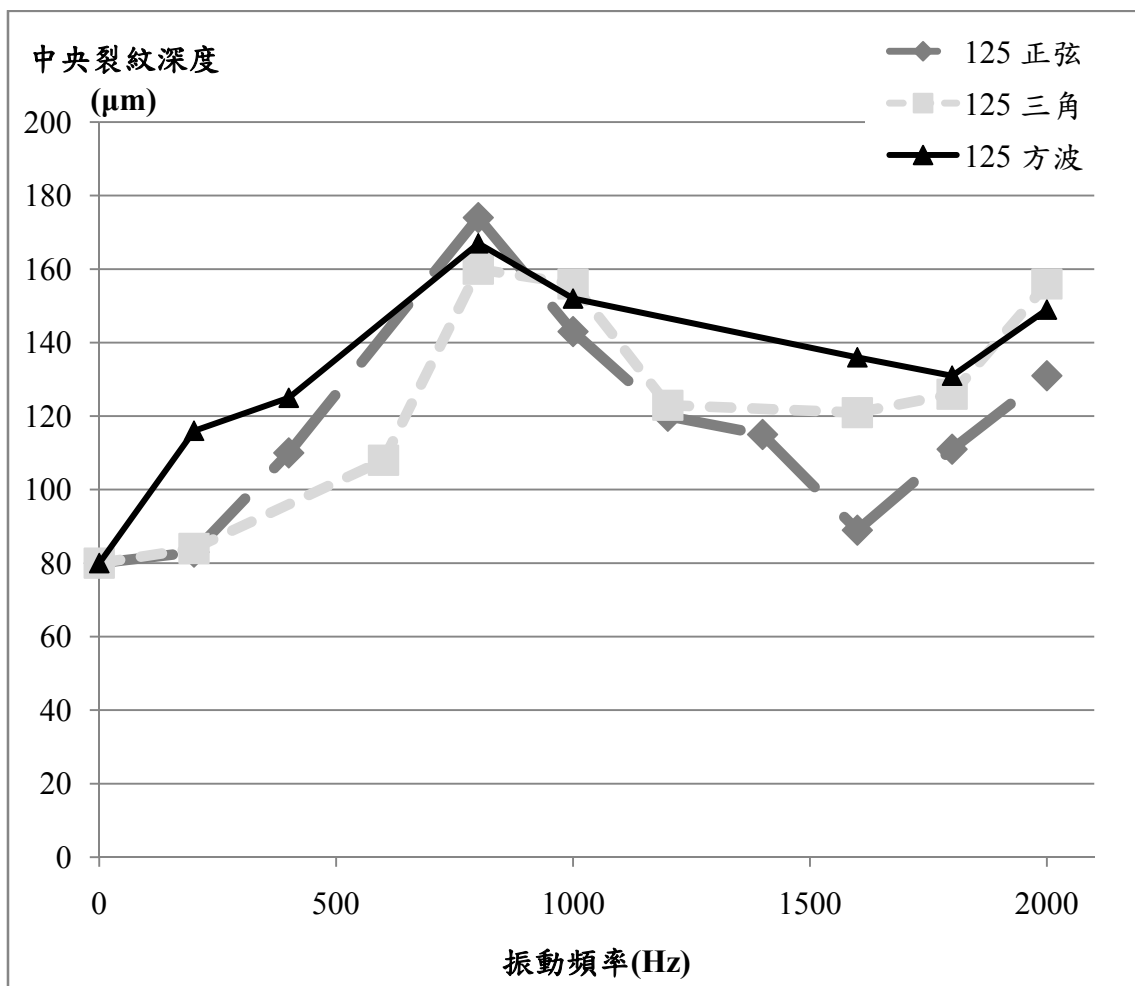


圖 4-4 125 度刀輪與三種波形搭配之趨勢。
橫座標代表振動頻率，縱座標代表中央裂紋深度。

圖 4-4 中已將無法觀察到 Wallner line 的數據剔除，由圖中可知 125 度刀輪的趨勢大致相同，都是先升後降，最大中央裂紋深度也差不多，因此不同波形對 125 度刀輪的影響較不顯著。

將四、五、六組數據繪製成中央裂紋深度對頻率的趨勢如圖 4-5 所示，發生側向裂紋的數據以虛線表示。

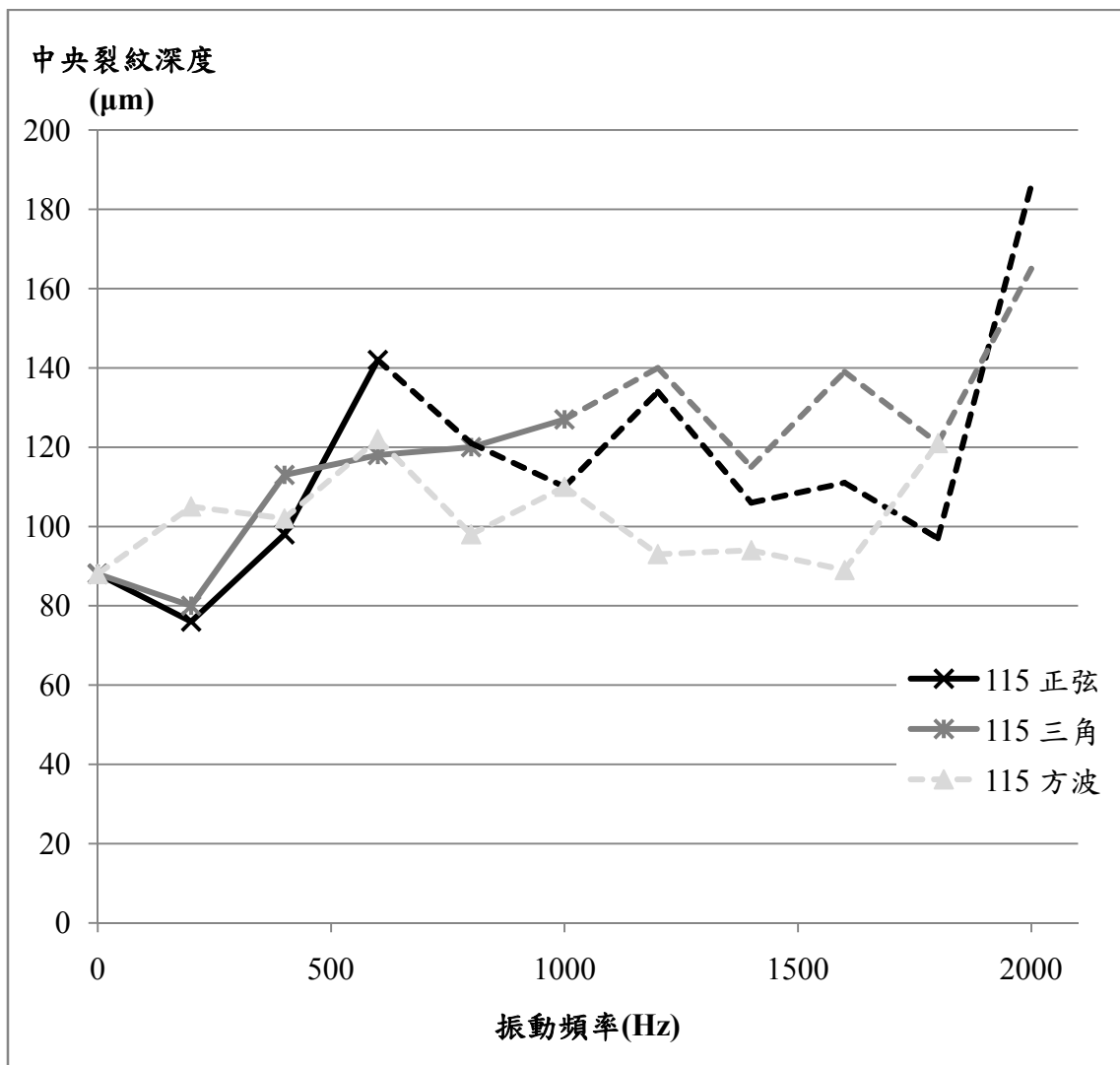


圖 4-5 115 度刀輪與兩種波形搭配之趨勢。橫座標表示振動頻率，縱座標表示中央裂紋深度。虛線表示發生側向裂紋後的趨勢。

115 度刀輪各組的趨勢看不出關連性，曲線中間有許多小波動，但並未出現無 Wallner line 或無法裂片的情況。其原因可能是，振動若如前述為週期性變動的負載效應，則不是產生塑性變形就是產生彈性變形，115 度刀輪的外型較尖銳容易刺入玻璃內，故振動造成的塑性變形多，彈性變形少，因此振動系統的共振與吸收頻率效應顯現不出來。從 115 度這三組實驗都因振動輔助而發生側向裂紋來看，振動增加了塑性變形區的膨脹量，如同恆定負載的量增加，這意味著 115 度這三組的中央裂紋深度增加大部分肇因於殘留成分增加，而非彈性成分。殘留成分增加對於中央裂紋深度的影響較為緩慢，這也是 115 度刀輪的趨勢變化較不劇烈的原因。至於 125 度刀輪因為沒有產生側向裂紋，無法判斷是殘留成分或彈性成分增加，或是兩者皆有，所以必須留待實驗三做進一步驗證。

另外，若將發生側向裂紋的頻率由低到高排列，分別是方波、正弦波、三角波，因此側向裂紋發生的先後與波形有關。這是因為如前所述刀輪掃掠面積才是真正作用的波形，而輸入波形對應的刀輪掃掠面積由大到小是方波、正弦波、三角波。在 115 度刀輪，掃掠面積越大塑性變形越多，越容易發生側向裂紋。

4.1.3 結論

從實驗一可知，加上振動輔助除了中央裂紋深度大幅增加以外，也具有和有齒型刀輪一樣讓玻璃自動裂片的效果，自動裂片大約發生於中央裂紋深度超過 140 μm 以後。振動輔助的原理是變動的負載或正半波形狀的刀輪掃掠面積，與有齒型刀輪的機制相似。

4.2 實驗二

4.2.1 變因與結果

根據實驗一的結果，挑選每組實驗中，中央裂紋較深、可自動裂片且無側向裂紋的頻率進行彎曲強度測試。選出的實驗一編號與結果列於表 4-7 與表 4-8。

表 4-7 125 度刀輪選出的編號與彎曲測試結果。

編號	波形	頻率(Hz)	Bending Force(kg)	標準差
1-1	無	0	11.8	0.9
1-5	正弦	800	8.9	0.7
1-6	正弦	1K	11.5	2.6
2-5	三角	800	7.8	3.1
2-6	三角	1K	11.4	1.5
2-11	三角	2K	9.3	2.2
3-5	方波	800	7.1	2.9
3-6	方波	1K	8.5	1.6
3-11	方波	2K	10.2	0.3

表 4-8 115 度刀輪選出的編號與彎曲測試結果。

編號	波形	頻率(Hz)	Bending Force(kg)	標準差
4-1	無	0	13.3	0.2
4-3	正弦	400	9.3	1.1
4-4	正弦	600	6	1.2
5-4	三角	600	8.9	1.7
5-5	三角	800	13.6	3.8
5-6	三角	1K	5.3	1.2

最後是有齒型刀輪的彎曲強度測試，其實驗條件與結果分別如表 4-9 及表 4-10 所示。

表 4-9 有齒型刀輪的控制變因。

刀輪種類	角度 (°)	速度 (mm/s)
有齒型	110	100

表 4-10 有齒型刀輪的測試結果。

負載(g)	Bending Force(kg)	標準差
1200	5.3	0.5
900	4.9	0.1
700	5.2	0.2

4.2.2 討論

彎曲強度計算公式為



$$\sigma = \frac{3P(L-l)}{2wt^2} \quad (4-1)$$

其中 σ 是強度的應力值，P 是施加的力量，L 與 l 分別是寬與窄的 span，w 與 t 是試片寬度與厚度。因為從 load cell 量測到的力直接正比於強度，所以在此不另換算，直接以力作為強度比較。

因為實驗一決定控制變因時已依經驗選擇能使無振動輔助劃線達到最高的

彎曲強度，故表 4-7 編號 1-1 無振動輔助的彎曲強度 11.8kg 是 125 度刀輪的最佳強度。加上振動輔助的編號有些會降低彎曲強度，但使用正弦波與三角波在 1KHz 時彎曲強度與無振動輔助不相上下，這可能是因為 125 度刀輪搭配振動輔助並沒有增加殘留成分，因此玻璃塑性變形區周圍的微小缺陷沒有比無振動輔助時增加。

表 4-8 是 115 度刀輪選出的編號，編號 4-1 是無振動輔助，所得的彎曲強度也是 115 度刀輪無振動輔助的最大值。由結果可以看出 115 度搭配振動輔助造成彎曲強度下降的情形比 125 度明顯，這是因為如實驗一之結果，振動輔助對 115 度的影響有增加塑性變形的效果，而塑性變形增加造成周圍微小缺陷多，使彎曲強度降低，也因此強度隨頻率升高而下降。唯一例外的是三角波 800Hz 得到的彎曲強度異常的高，甚至稍微超越無振動輔助的強度，以目前對振動輔助的瞭解尚無法解釋。

以振動輔助的彎曲強度與有齒型刀輪比較，發現有齒型刀輪的彎曲強度只有一半左右，有齒型刀輪造成彎曲強度偏低的情況在 Ono 等人的研究中亦有發現[10]。其原因可能是齒在玻璃上造成的壓痕引起徑向裂紋[11]，是以齒取代完整刀邊的缺點，振動輔助便沒有這種問題。

4.2.3 結論

本實驗數據顯示透過參數調整，振動輔助技術確實可以大幅加深中央裂紋深度、達成自動裂片而不降低玻璃邊緣的強度，且 125 度搭配振動輔助無論在中央裂紋深度、自動裂片與彎曲強度上都較 115 度好。有齒型刀輪雖然有自動裂片的效果，但邊緣強度卻很差，只有標準型刀輪一半不到，因此振動輔助劃線也可以取代有齒型刀輪。

4.3 實驗三

4.3.1 實驗結果

以第三章的初步測試同樣條件進行本實驗，量得刀痕寬度如表 4-11 所示

表 4-11 刀痕寬度。

頻率	刀痕寬 (μm)	標準差
0	14.8	0.3
200	14.4	0.8
400	15.5	0.9
800	17.7	2
1000	16.2	0.9
2000	16	1.1
4000	15.4	1.1
8000	15.7	0.3
10000	14.9	0.1
20000	15.2	1.4

4.3.2 討論

根據刀輪的幾何外型將刀痕寬換算成刀輪壓入玻璃的體積，並利用無振動劃線得到的中央裂紋深度，推算殘留成分及彈性成分的中央裂紋深度，如表 4-12 所示。

表 4-12 刀痕寬度、壓入截面積與裂紋深度。利用刀輪幾何外型 and 刀痕寬計算出壓入截面積、殘留成分與彈性成分的中央裂紋深度。

頻率 (Hz)	2b (μm)	δA (μm^2)	C (μm)	$C_{\text{residual-estimated}}$ (μm)	C_{elastic} (μm)
0	14.8	27.1	80		0
200	14.4	25.6	83	75.6	7.4
400	15.5	29.8	110	87.9	22.1
800	17.7	39.4	174	115.7	58.3
1K	16.2	32.7	143	96.3	46.7
2K	16	31.9	131	93.9	37.1
4K	15.4	29.4	95	86.7	8.3
8K	15.7	30.7	95	90.4	4.6
10K	14.9	27.5	93	81.1	11.9
20K	15.2	28.6	102	84.4	17.6

表 4-12 中，b 是刀痕寬的一半， δA 是最大壓入截面積，C 是初步實驗量得的中央裂紋深度， $C_{\text{residual-estimated}}$ 是計算出來的殘留成分中央裂紋， C_{elastic} 是彈性成分的中央裂紋深度。表中顯示 C_{elastic} 全部都是正的，且數值非常顯著，證明彈性成分的中央裂紋深度的確存在。表 4-13 的計算尚未考慮負載越大時， C_{residual} 隨負載增加成長越小的效率問題[6]，因為振動有增加負載的效應，若考慮此因素，則 C_{elastic} 將會更加顯著。

第五章、總結與未來展望

5.1 總結

本研究成功研發出 LCD 玻璃基板的振動輔助刀輪劃線技術，以本技術輔助標準型刀輪，可以增加大幅增加中央裂紋，達到有齒型刀輪使玻璃自動裂片的結果，並使切割後玻璃保持良好的彎曲強度，具體結論如下所述。

1. 本技術使用一壓電致動器加裝於普通劃線機台上，透過與劃線負載同向的振動，加深中央裂紋的深度，可應用於標準型 125 度、115 度刀輪，在不產生側向裂紋與崩落的前提下，其中中央裂紋最高可達標準型刀輪兩倍以上。
2. 本技術可達到有齒型刀輪的效果，在劃線完後使玻璃自動裂片，因此在 LCD 母板分割的製程上可以省略裂片程序，加上不需使用特殊刀輪，可以大幅節省成本。
3. 在玻璃分割後邊緣的彎曲強度上，振動輔助劃線技術可以大幅超越有齒型刀輪一倍以上，達到標準型刀輪的最高邊緣強度，因此本技術可應用於因特殊用途特別要求彎曲強度的面板，例如行動裝置與軍規品。

本研究亦提出振動輔助劃線切割之原理，並證明振動輔助屬於負載變化的效應，能增加彈性變形，並經由彈性成分增加中央裂紋深度，具體結論如下。

1. 本研究提出振動輔助劃線理論，認為振動對劃線的影響類似於恆定的劃線負載加上一個週期性的變動，並從劃線後橫斷面之 Wallner line 紋理得到證實。
2. 本研究推論中央裂紋的驅動力量不止是 Lawn 與 Evans 所述的殘留成分[3]，彈性成分也有可能驅使裂紋成長。在負載變動速度超過塑性變形區變形速度之後，負載變化的一部份會由彈性變形區承擔，此彈性變形可能形成額外的中央裂紋深度。本研究也同時證實了這個推論，在形成的中央裂紋中同時發現殘留成分與彈性成分。

5.2 未來展望

本研究雖已完成了具實用性的成果，但仍有許多地方可以深入研究，茲列舉如下。

1. 裂紋深度隨頻率改變的趨勢非常明顯，僅用負載的效果解釋振動輔助原理尚有不足之處，因此頻率在振動輔助中的角色有待進一步研究。
2. 不同刀輪隨頻率變化所展現的趨勢不同，且有些頻率出現無 Wallner line 或無法裂片的情形。其原因可能是刀輪本身的幾何外型或整個振動系統的模態不同所致。
3. 彎曲強度的趨勢隨頻率而改變，影響彎曲強度的因素本來尚無定論，加上振動輔助後更加複雜，需要大量觀察劃線後造成的缺陷才能定性描述。
4. 若希望增加劃線速度，振動頻率也須等比例增加，但振動輔助所使用的頻率若在 2KHz 以上，將對操作者的聽力造成威脅，如能有效降低最佳中央裂紋深度與彎曲強度的頻率，將更有利於本技術之應用。
5. 振動輔助劃線的目標市場為配置於行動裝置之 TFT-LCD 面板，隨著行動裝置體積重量不斷縮小，面板也將越趨輕薄，所使用之玻璃基板會朝 0.3、0.2mm 以下發展，但薄板玻璃無法承受切割厚板時同樣大的負載，故中央裂紋的瓶頸依舊存在，因此振動輔助劃線技術也需朝這種玻璃基板的應用上發展。

參考文獻

1. J. Bousinesq, "Application des Potentiels a l'Etude de l'Equilibre et du Mouvement des Solides Elastiques" (Gauthier-Villars, Paris, 1885). Discussed in S. P. Timoshenko and J. N. Goodier, "Theory of Elasticity," McGraw-Hill, New York (1970), pp. 398-402.
2. H. Hertz, J. Reine Angew. Math., 92 (1881), 156; Verhandlungen des Vereins zur Beförderung des Gewerebe Fleisses, 61 (1882), 449. Reprinted, in English, in "Hertz's Miscellaneous Papers," Macmillan, London (1896), Chs. 5, 6.
3. B. R. Lawn, A. G. Evans and D. B. Marshall, "Elastic/Plastic Indentation Damage in Ceramics: The Median/Radial Crack System," Journal of the American Ceramic Society, Vol. 63 (1980), No. 9-10, pp. 574-581.
4. D. B. Marshall, B. R. Lawn and A. G. Evans, "Elastic/Plastic Indentation Damage in Ceramics: The Lateral Crack System," Journal of the American Ceramic Society, Vol. 65 (1982), No. 11, pp. 561-566.
5. T. Ono and K. Tanaka, "Effect of Scribing Wheel Dimensions on the Cutting of LCD Glass Substrates," SID Symposium Digest of Technical Papers, 31(2000), pp. 156-163.
6. 廖運炫, LCD 玻璃基板劃線切割技術研究計畫 期末研究報告, 友達光電股份有限公司委託計畫, 台灣大學機械工程學研究所(2008).
7. B. R. Lawn and R. Wilshaw, "Review Indentation Fracture: Principles and Applications," Journal of Material Science, Vol. 10 (1975), pp.1049-1081.
8. S. C. Wang, L. Y. Yeh, C. C. Lin, M. S. Chen and F. Y. Gan, "Glass-strength Dependence of Cutting Conditions in Thin Laminated TFT-LCD," IDW '07 the 14th International Display Workshops (2007), FMCp-1.

9. T. Ono and Y. Ishida, "Cuttability of AMLCD Glass Substrates," Technical Information Paper, Corning (2004), TIP304.
10. T. Ono, O. Teng and G. Pai, "Breakless Cutting of EAGLE XG™ Using Standard Scoring Wheel," IDW '07 the 14th International Display Workshops (2007), Fmc2-2, pp.133-136.
11. 盧素涵, "我國 LCD 製程設備產業形貌(上)," ITIS (2008).
12. Mitsubishi Diamond Industrial Co., Ltd., United States Patent, US 5,836,229.
13. Mitsubishi Diamond Industrial Co., Ltd., United States Patent, US 6,796,212 B2.
14. Corning Incorporated, Technical Information Paper, TIP 305.
15. THK Co., Ltd and Beldex Corporation, United States Patent, US 6,832,439 B2.
16. THK Co., Ltd and Beldex Corporation, United States Patent, US 6,536,121 B1.
17. THK Co., Ltd and Beldex Corporation, United States Patent, US 6,478,206 B2.
18. THK Co., Ltd and Beldex Corporation, United States Patent, US 6,460,257 B1.

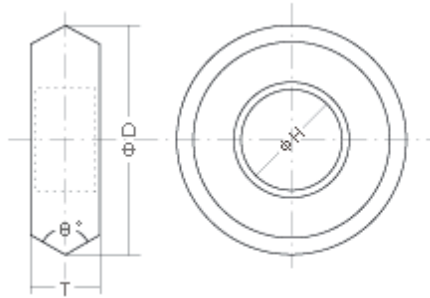


附錄 B MDI 刀輪、刀軸

Glass Scribing Wheel

Glass Scribing Wheel in Mitsubishi Diamond Industrial Co.,Ltd includes many sorts such as Sintered Diamond as well as carbide material which fitted to the use of glass cutting. The group of all-purpose products whose sharpness is guaranteed is offered.

Wheel Size(mm)		
D	T	H
2.50	0.65	0.8
2.00	0.65	0.8



Axle

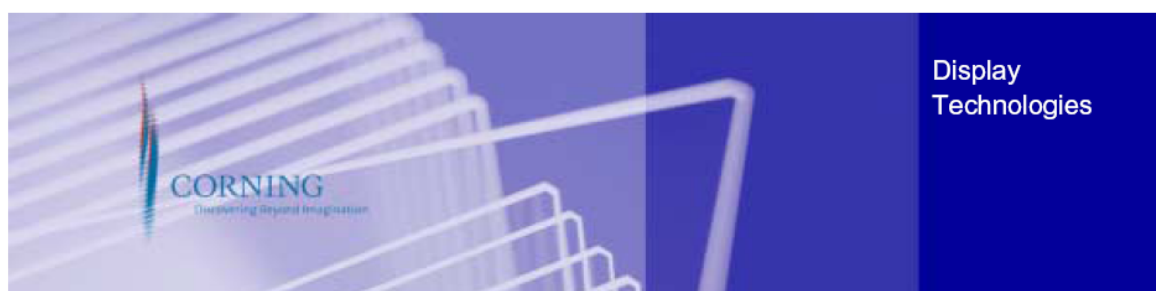
Axle offers its material and size fitted to standard cutter.
Material: Tungsten Carbide, Sintered Diamond

Dimensions	
D	L
0.8	6.0



資料來源 <http://www.mitsuboshidiamond.com/e/product/tool/>

Corning® EAGLE²⁰⁰⁰™ AMLCD Glass Substrates Material Information



MIE 201
Issued: August 2002

Glass Type – Alkaline Earth Boro-Aluminosilicate
Forms Available – Fusion drawn sheet
Principal Uses – Substrates for Active Matrix flat panel displays

Properties

Where applicable, units are stated in Metric and English

Mechanical

	Metric	English
Density (20°C, 68°F)	2.37 g/cm ³	147.9 lb/ft ³
Young's Modulus	70.9 GPa	10.3 Mpsi
Poisson's Ratio	0.23	0.23
Shear Modulus	28.9 GPa	4.2 Mpsi

Vickers Hardness 642
(200 gm load, 25 sec dwell)

資料來源 Corning Incorporated.