

香蕉插切落梳與刀具力學模型分析

Banana Crown-Cut by Inserting Cut Type and Mechanical Model Analysis of Thick Cutter

華南農業大學
工程學院
教授

南方農業機械與裝備關鍵技術
教育部重點實驗室

楊 洲

Yang Zhou

華南農業大學
工程學院

南方農業機械與裝備關鍵技術
教育部重點實驗室

溫 福 軍*

Wen Fujun

華南農業大學
工程學院

南方農業機械與裝備關鍵技術
教育部重點實驗室

朱 正 波

Zhu Zhengbo

摘 要

香蕉是全球鮮銷量最大的水果，中國香蕉產量位居世界第二。落梳是香蕉採後處理的重要環節，目前都是人工作業，生產效率低、勞動強度大、果實損傷嚴重，機械化落梳是香蕉採後處理機械化的發展瓶頸。本文以機械化落梳為目標，對比分析人工落梳技術特徵，確定機械落梳方式為插切落梳。通過分析插切落梳過程的力學特徵，明確了切割參數與切割阻力之間的相互作用關係，確定了影響落梳切割力的主要因素為法向載荷、摩擦阻力和刀刃阻力，構建了香蕉插切落梳力學模型。試驗表明，以 y 軸方向切割阻力為指標，理論模型與試驗曲線趨勢一致，模型峰值切割力 374.822 N，試驗平均值 363.854 N，峰值誤差 3.01%，顯著性分析表明試驗值與理論值差異不顯著 ($P < 0.05$)，模型構建合理。研究結果可以促進落梳裝備的開發，完善香蕉採後處理全程機械化生產線，提升香蕉商品化處理效率。

關鍵詞：農作物，香蕉，機械化，落梳，力學模型。

ABSTRACT

Banana is the world's number one fruit in terms of sales volume, and the banana yield of China takes the second place in the world. Crown cutting is an important process after harvest. Currently, artificial operation is commonly used, yet this method is inefficient, labor-intensive, and possible to cause serious damage to the fruit. However, mechanized banana crown cutting is an effective way to break the bottleneck for

*通訊作者，華南農業大學工程學院，510642 廣州，wenfujun1@163.com；基金專案：國家自然科學基金專案(51675189)；廣東省自然科學基金專案(2014A030313460)；現代農業產業技術體系建設專項資金(CARS-31)。

processing after picking bananas. Focusing on the mechanization of banana crown cutting, this essay compares the characteristics of manual banana crown cutting with that of mechanized banana crown cutting, then identifies the desirable way to be crown insert cutting. It also finds out the relationship between cutting parameters and cutting resistance, determines the main factors affecting crown cutting force, namely, the normal load, friction resistance and edge resistance, and finally establishes a crown insert cutting mechanics model. According to experiment results, with the cutting resistance in the y direction as an index, the theory model is consistent with the experimental curve trend; the peak cutting force of the model is 374.822 N, with the average value of 363.854 N, and the peak error of 3.01%. In addition, significant analysis shows there is no significant difference between the test value and the theoretical value ($P < 0.05$), and that the model is reasonable. The research results can promote the development of crown cutting equipment, improve the mechanization production line of bananas, and enhance the efficiency of commercialized processing of bananas.

Keywords: Crop; Banana, Mechanization, Crown-cut, Mechanical Model.

引 言

香蕉是世界上鮮銷量最大的水果[1]。資料顯示，2014 年中國的香蕉種植面積占世界總量 7.51%，香蕉產量占世界總量 10.59% [2-3]，中國是世界上第二大香蕉生產國，香蕉已成為熱帶、亞熱帶地區重要的經濟產業之一，對推動區域農業發展、促進農村經濟繁榮具有重要意義[4-5]。

採後處理是香蕉產業中勞動力最密集，勞動強度最大的生產環節之一，該環節密切關係香蕉外觀品質，在一定程度上決定香蕉的收購等級，影響香蕉收購價格[6]。採後處理過程主要包括落梳、清洗、分級、包裝等[7]，其中，落梳是指將蕉梳從蕉穗上分離的過程。目前，國內香蕉採後處理機械化水準比較低，以手工作業方式為主，國外機械化水準較高，基本採用機械作業方式[8-9]。然而，針對香蕉落梳處理，國內外都是人工作業方式，生產效率低、勞動強度大、果實損傷嚴重，落梳已成為香蕉採後處理機械化的發展瓶頸。

農作物莖稈力學特性研究和莖稈切割機理研究可以為刀具插切梳柄過程力學分析提供參考。其中，Chattopadhyay 等研究高粱莖稈的剪

切、壓縮和彎曲力學特性，並對甩刀式高粱收穫機衝擊切割單根高粱莖稈開展研究[10-11]。劉慶庭等試驗研究甘蔗力學特性，建立了甘蔗莖稈單向複合材料模型[12]，Roberto 等開展滑切刀片運動學研究，建立刀片各點運動速度的計算公式，並以甘蔗為試驗材料進行驗證[13]。Phillip 等開展切削角度和切割速度對切斷單根芒草莖稈所需切割功的研究[12]。田昆鵬等研究表明刀片與大麻之間相互作用過程可分為擠壓、切割和切割完畢 3 個階段[15]。施印炎等建立了蘆葦收穫機的切割部件三維實體模型和莖稈的柔性簡化模型[16]。

綜合農作物莖稈切割特性研究，本文開展香蕉插切落梳力學特性研究，建立插切落梳力學模型，並進行試驗驗證，為香蕉落梳裝備研製提供依據。

一、機械落梳方式與裝置

1.1 機械落梳方式

蕉穗結構與落梳刀具運動方式示意圖如圖 1 所示。人工手動落梳方式主要有鋸切式、插切式和斷軸式三種。其中，鋸切式是指刀具沿果軸表面切向鋸切梳柄，實現蕉梳與果軸分離；插切式

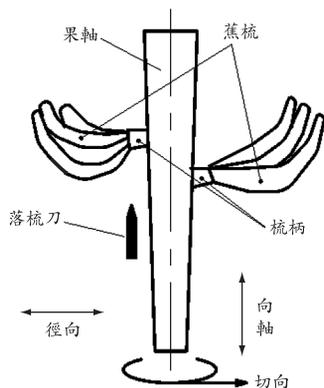
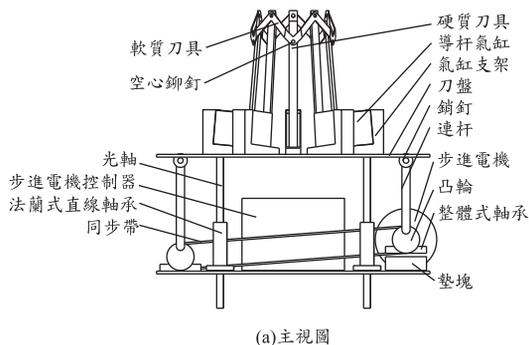


圖 1 蕉穗基本結構與落梳刀具運動方式示意圖。

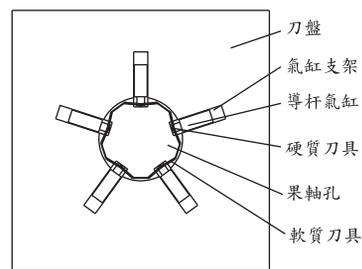
是指刀具沿果軸表面軸向切割梳柄，使得蕉梳與果軸分離；斷軸式是指刀具在梳柄的上下合適位置分別徑向切斷果軸以實現蕉梳與果軸分離，即梳柄帶有部分果軸。由於鋸切式和斷軸式落梳方式對香蕉品種、蕉穗生長情況及梳柄位置判斷要求較高，不宜應用於非智慧化的機械作業模式，而插切式落梳方式具有安全性好，落梳速度快，易於操作、保護蕉梳等優點[17-19]，易於實現機械化，因此確定機械落梳方式為插切式。

根據蕉穗擺放特徵，人工插切落梳分為倒立落梳和懸掛落梳兩種。其中，倒立落梳方式中蕉穗倒立，果軸初始端與地面接觸，蕉穗以操作者腿部為支撐，作業人員從果軸末端向初始端逐梳落梳，該落梳方式應用於田間和批發市場，機械化水準低，人力勞動集中，勞動強度大；懸掛落梳中蕉穗初始端懸掛在軌道上，果軸初始端朝上，作業人員從果軸初始端向末端逐梳落梳，該落梳方式應用於香蕉採收機械化處理生產線，雖然人力勞動集中，但勞動強度較小。一般情況下，倒立落梳方式香蕉成熟度為 1-4 級，懸掛落梳方式香蕉成熟度為 1 級[20]。

進行香蕉機械落梳時，宜採用懸掛落梳方式。由於香蕉成熟度為 1 級，香蕉果指末端與果軸間距較小，為避免造成蕉梳機械損傷，落梳刀具切割方向必須為從果軸末端向初始端方向切割。在落梳過程中，刀具必須包絡果軸表面且自我調整果軸直徑變化，以保證落梳效果滿足農藝



(a)主視圖



(b) Top view

圖 2 插切落梳裝置結構示意圖。

要求。落梳農藝要求具體表現為三個方面：第一，落梳過程不得對蕉梳造成機械損傷；第二，梳柄切口應光滑平整，不得切散蕉梳，不得切入果軸；第三，梳柄切口距香蕉果柄分叉口距離合適，能有效避免蕉梳運移過程受振動作用而散裂。

1.2 機械落梳裝置

插切式機械落梳裝置結構示意圖如圖 2 所示，實物圖如圖 3 所示。落梳裝置主要由硬質刀具、導杆氣缸、氣缸支架、移動平臺、銷釘、連杆、步進電機、凸輪、整體式軸承、墊塊、同步帶、法蘭式直線軸承、步進電機控制器、光軸、空心鉚釘、軟質刀具和落梳孔等零件組成。落梳裝置整體尺寸為：長×寬×高 = 300×300×500 mm。

插切落梳裝置動力部分由步進電機 (110BYG350C，汕頭市鴻寶達機電有限公司)提供，通過同步帶機構將動力傳遞給凸輪機構，凸輪機構在光軸和直線法蘭軸承的作用下帶動刀

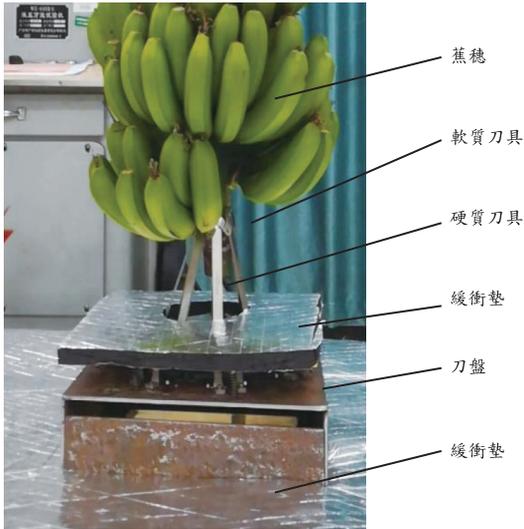


圖 3 插切式機械落梳裝置實物圖。

盤豎直上下運動。刀盤上環形固定多組落梳刀具，每組刀具由一個硬質刀具和兩個軟質刀具組成，構成落梳刀組，硬質刀具和軟質刀具通過空心鉚釘相互連接，落梳刀組相互連接構成環形包絡結構，該結構在導杆氣缸的控制下能夠調節包絡圓直徑。落梳作業過程中，蕉穗軸向向下移動，香蕉果軸處於包絡結構內部，穿過果軸孔，當香蕉梳柄觸碰包絡結構時，環形刀具在電機帶動下向上運動以插切梳柄，實現香蕉落梳，落梳結束後電機反轉，帶動刀具回到初始位置，當下一個梳柄觸碰包絡結構時，刀具運動方式也是先切割再回到初始位置，如此往復，隨著蕉穗不斷下移，刀具重複落梳作業即可實現整串蕉穗的逐梳去軸落梳。在落梳過程中，包絡結構內部直徑由環形佈置的導杆氣缸調節以適應果軸直徑的變化，同時控制步進電機的轉速可以調節刀具插切速度。

二、插切落梳力學分析

分析插切落梳過程的力學特徵，有利於明確切割參數與切割阻力之間的相互作用關係，有利於優化刀具參數，有利於完善香蕉插切落梳機械裝置。在插切落梳裝置中，環抱結構所受到的切

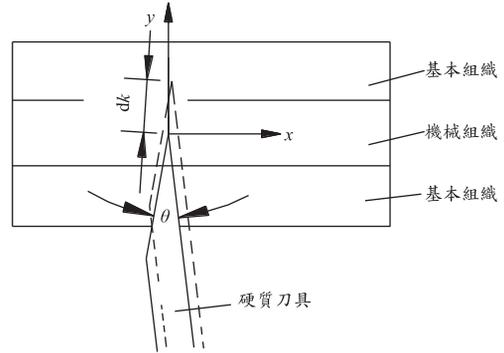


圖 4 硬質刀具插切梳柄過程力學分析。

割阻力主要分為硬質刀具阻力和軟質刀具阻力，由於軟質刀具刀片切割過程中阻力較小，因此研究硬質刀具切割阻力具有現實意義。

插切落梳過程中刀具先切入梳柄下層基本組織，而後切入梳柄機械組織，最後再切入梳柄上層基本組織直至切斷梳柄。一般情況下，梳柄下層基本組織厚度約為 3~10 mm，機械組織厚度約為 3~12 mm，上層基本組織厚度約為 4~14 mm。簡化硬質刀具插切梳柄過程力學分析如圖 4 所示。其中， θ 為刀刃角， γ 為刀具傾角。規定 θ 與 γ 之間的刀具表面為前刀面，與前刀面構成 θ 的刀具表面為後刀面，與前刀面、後刀面相鄰的面為側刀面，與前刀面、側刀面相鄰的面為正刀面。

則有：

$$F_x = N_a \cos(\theta - \gamma) - F_a \sin(\theta - \gamma) + F_b \sin \gamma \dots (1)$$

$$- N_b \cos \gamma$$

$$F_y = P + F_a \cos(\theta - \gamma) + F_b \cos \gamma + N_a \sin(\theta - \gamma) \dots (2)$$

$$+ N_b \sin \gamma$$

$$F_a = f N_a \dots (3)$$

$$F_b = f N_b \dots (4)$$

式中， F_x 為硬質刀具受到的沿 x 軸方向阻力之和， N ； F_y 為硬質刀具受到的 y 軸方向阻力之和， N ； P 為刀刃阻力， N ； N_a 為前刀面法向載荷， N ； N_b 為後刀面法向載荷， N ； F_a 為前刀面摩擦阻力， N ； F_b 為後刀面摩擦阻力， N ； f 為硬質刀具與梳柄間的摩擦係數。

2.1 法向載荷

法向載荷主要受梳柄順紋抗壓強度和刀具進入梳柄組織內部的面積影響。由於側刀面與刀具運動方向一致，所以側刀面受到的正壓力和摩擦力非常小，可以忽略。同時，由於 γ 的存在，正刀面切入梳柄後，正壓力與摩擦力比較小，忽略不計。則有：

$$N_b = \begin{cases} \int_0^k \frac{\sigma_{s1} m}{\cos \gamma} dk, & k \leq h_1; \\ \int_0^{h_1} \frac{\sigma_{s1} m}{\cos \gamma} dk + \int_{h_1}^k \frac{\sigma_{s2} m}{\cos \gamma} dk, & h_1 \leq k \leq h_2; \\ \int_0^{h_1} \frac{\sigma_{s1} m}{\cos \gamma} dk + \int_{h_2}^k \frac{\sigma_{s1} m}{\cos \gamma} dk + \int_{h_1}^{h_2} \frac{\sigma_{s2} m}{\cos \gamma} dk, & h_2 \leq k \leq h_3; \end{cases} \dots\dots\dots(5)$$

N_a 值受刀具正刀面長度影響，主要分為以下四種情況：

(1) 當 $l \cos(\theta - \gamma) \leq h_1$ 時，

$$N_a = \begin{cases} \int_0^k \frac{\sigma_{s1} m}{\cos(\theta - \gamma)} dk, & k \leq h_1 \text{ 且 } k - l \cos(\theta - \gamma) \leq 0; \\ \int_{k-l \cos(\theta - \gamma)}^k \frac{\sigma_{s1} m}{\cos(\theta - \gamma)} dk, & k \leq h_1 \text{ 且 } k - l \cos(\theta - \gamma) \geq 0; \\ \int_{k-l \cos(\theta - \gamma)}^{h_1} \frac{\sigma_{s1} m}{\cos(\theta - \gamma)} dk + \int_{h_1}^k \frac{\sigma_{s2} m}{\cos(\theta - \gamma)} dk, & h_1 \leq k \leq h_2 \text{ 且 } k - l \cos(\theta - \gamma) \leq h_1; \\ \int_{h_1}^k \frac{\sigma_{s2} m}{\cos(\theta - \gamma)} dk, & h_1 \leq k \leq h_2 \text{ 且 } k - l \cos(\theta - \gamma) \geq h_1; \\ \int_{k-l \cos(\theta - \gamma)}^{h_1} \frac{\sigma_{s1} m}{\cos(\theta - \gamma)} dk + \int_{h_2}^k \frac{\sigma_{s1} m}{\cos(\theta - \gamma)} dk + \int_{h_1}^{h_2} \frac{\sigma_{s2} m}{\cos(\theta - \gamma)} dk, & h_2 \leq k \leq h_3 \text{ 且 } k - l \cos(\theta - \gamma) \leq h_1; \\ \int_{h_2}^k \frac{\sigma_{s1} m}{\cos(\theta - \gamma)} dk + \int_{h_1}^{h_2} \frac{\sigma_{s2} m}{\cos(\theta - \gamma)} dk, & h_2 \leq k \leq h_3 \text{ 且 } h_1 \leq k - l \cos(\theta - \gamma) \leq h_2; \\ \int_{k-l \cos(\theta - \gamma)}^k \frac{\sigma_{s1} m}{\cos(\theta - \gamma)} dk, & h_2 \leq k \leq h_3 \text{ 且 } h_2 \leq k - l \cos(\theta - \gamma) \leq h_3 \end{cases} \dots\dots\dots(6)$$

(2) 當 $h_1 \leq l \cos(\theta - \gamma) \leq h_2$ 時，

$$N_a = \begin{cases} \int_0^k \frac{\sigma_{s1} m}{\cos(\theta - \gamma)} dk, & k \leq h_1; \\ \int_0^{h_1} \frac{\sigma_{s1} m}{\cos(\theta - \gamma)} dk + \int_{h_1}^k \frac{\sigma_{s2} m}{\cos(\theta - \gamma)} dk, & h_1 \leq k \leq h_2 \text{ 且 } k - l \cos(\theta - \gamma) \leq 0; \\ \int_{k-l \cos(\theta - \gamma)}^{h_1} \frac{\sigma_{s1} m}{\cos(\theta - \gamma)} dk + \int_{h_1}^k \frac{\sigma_{s2} m}{\cos(\theta - \gamma)} dk, & h_1 \leq k \leq h_2 \text{ 且 } 0 \leq k - l \cos(\theta - \gamma) \leq h_1; \\ \int_{h_1}^k \frac{\sigma_{s2} m}{\cos(\theta - \gamma)} dk, & h_1 \leq k \leq h_2 \text{ 且 } h_1 \leq k - l \cos(\theta - \gamma); \\ \int_{k-l \cos(\theta - \gamma)}^{h_1} \frac{\sigma_{s1} m}{\cos(\theta - \gamma)} dk + \int_{h_2}^k \frac{\sigma_{s1} m}{\cos(\theta - \gamma)} dk + \int_{h_1}^{h_2} \frac{\sigma_{s2} m}{\cos(\theta - \gamma)} dk, & h_2 \leq k \leq h_3 \text{ 且 } k - l \cos(\theta - \gamma) \leq h_1; \\ \int_{h_2}^k \frac{\sigma_{s1} m}{\cos(\theta - \gamma)} dk + \int_{h_1}^{h_2} \frac{\sigma_{s2} m}{\cos(\theta - \gamma)} dk, & h_2 \leq k \leq h_3 \text{ 且 } h_1 \leq k - l \cos(\theta - \gamma) \leq h_2; \\ \int_{k-l \cos(\theta - \gamma)}^k \frac{\sigma_{s1} m}{\cos(\theta - \gamma)} dk, & h_2 \leq k \leq h_3 \text{ 且 } h_2 \leq k - l \cos(\theta - \gamma) \leq h_3; \end{cases} \dots\dots\dots(7)$$

(3)當 $h_2 \leq l \cos(\theta - \gamma) \leq h_3$ 時，

$$N_a = \begin{cases} \int_0^k \frac{\sigma_{s1} m}{\cos(\theta - \gamma)} dk, & k \leq h_1; \\ \int_0^{h_1} \frac{\sigma_{s1} m}{\cos(\theta - \gamma)} dk + \int_{h_1}^k \frac{\sigma_{s2} m}{\cos(\theta - \gamma)} dk, & h_1 \leq k \leq h_2; \\ \int_0^{h_1} \frac{\sigma_{s1} m}{\cos(\theta - \gamma)} dk + \int_{h_2}^k \frac{\sigma_{s1} m}{\cos(\theta - \gamma)} dk + \int_{h_1}^{h_2} \frac{\sigma_{s2} m}{\cos(\theta - \gamma)} dk, & h_2 \leq k \leq h_3 \text{ 且 } k - l \cos(\theta - \gamma) \leq 0; \\ \int_{k-l \cos(\theta - \gamma)}^{h_1} \frac{\sigma_{s1} m}{\cos(\theta - \gamma)} dk + \int_{h_2}^k \frac{\sigma_{s1} m}{\cos(\theta - \gamma)} dk + \int_{h_1}^{h_2} \frac{\sigma_{s2} m}{\cos(\theta - \gamma)} dk, & h_2 \leq k \leq h_3 \text{ 且 } 0 \leq k - l \cos(\theta - \gamma) \leq h_1; \\ \int_{h_2}^k \frac{\sigma_{s1} m}{\cos(\theta - \gamma)} dk + \int_{h_1}^{h_2} \frac{\sigma_{s2} m}{\cos(\theta - \gamma)} dk, & h_2 \leq k \leq h_3 \text{ 且 } h_1 \leq k - l \cos(\theta - \gamma) \leq h_2; \\ \int_{k-l \cos(\theta - \gamma)}^k \frac{\sigma_{s1} m}{\cos(\theta - \gamma)} dk, & h_2 \leq k \leq h_3 \text{ 且 } h_2 \leq k - l \cos(\theta - \gamma) \leq h_3 \end{cases} \dots\dots\dots(8)$$

(4)當 $l \cos(\theta - \gamma) \geq h_3$ 時，

$$N_a = \begin{cases} \int_0^k \frac{\sigma_{s1} m}{\cos(\theta - \gamma)} dk, & k \leq h_1; \\ \int_0^{h_1} \frac{\sigma_{s1} m}{\cos(\theta - \gamma)} dk + \int_{h_1}^k \frac{\sigma_{s2} m}{\cos(\theta - \gamma)} dk, & h_1 \leq k \leq h_2; \\ \int_0^{h_1} \frac{\sigma_{s1} m}{\cos(\theta - \gamma)} dk + \int_{h_2}^k \frac{\sigma_{s1} m}{\cos(\theta - \gamma)} dk + \int_{h_1}^{h_2} \frac{\sigma_{s2} m}{\cos(\theta - \gamma)} dk, & h_2 \leq k \leq h_3; \end{cases} \dots\dots\dots(9)$$

式中， l 為刀具前刀面長度，mm； m 為刀具寬度，mm； h 為刀具厚度，mm； k 為刀具切入深度，mm； h_1 為第一層梳柄基本組織厚度，mm； h_2 為第一層梳柄基本組織與第二層梳柄機械組織厚度之和，mm； h_3 為梳柄總厚度，mm； σ_{s1} 為梳柄基本組織的順紋抗壓強度，MPa； σ_{s2} 為梳柄機械組織的順紋抗壓強度，MPa。

分析表明，法向載荷與梳柄順紋抗壓強度、刀具寬度、切入深度成正比，與刀具前刀面和安裝傾角差值的余弦成反比。

2.2 摩擦阻力

香蕉是一種含水率很高的草本植物，梳柄的含水率高達 92.3% ~ 94.5%，因此梳柄在受力變形過程中有類似於木材的粘彈性滯後現象 [21]。梳柄的彈性行為服從虎克定律，其粘性近似服從牛頓定律，即應力正比於應變速率 [22-23]。刀具插切梳柄過程中產生的摩擦力主要

包括接觸區域的粘性阻力和梳柄變形區域的滯後損失阻力兩部分。因此該摩擦力可表示為：

$$F = F_A + F_D \dots\dots\dots(10)$$

式中， F 為刀具與梳柄間的摩擦力； F_A 為克服介面粘著所需的切向力； F_D 為梳柄滯後損失決定的切向力。

研究表明 F_A 主要和梳柄的截紋抗剪強度 τ_h 及真實接觸面積 S 有關， F_D 與儲存彈性率 E' 、損耗角正切 $\tan \delta$ 等參數有關 [24]。式(10)可表示為：

$$F = S\tau_h + 3E'^{-1/3} \tan \delta \dots\dots\dots(11)$$

根據摩擦理論，

$$S = N / \sigma_s \dots\dots\dots(12)$$

式中， N 為法向載荷； σ_s 為梳柄的順紋抗壓強度；綜合式(10)–(12)，則梳柄與刀具間的摩擦係數 f 可表示為：

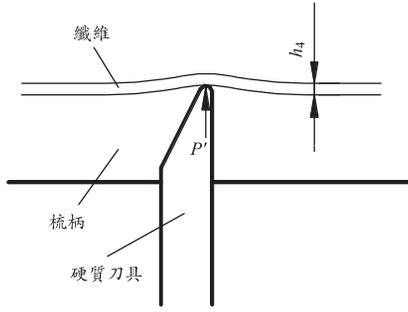


圖 5 梳柄纖維受力變形示意圖。

$$f = \frac{F}{N} = f_A + f_D = \frac{\tau_h}{\sigma_s} + \frac{3 \tan \delta}{E^{1/3} N} \quad \text{.....(13)}$$

考慮到梳柄基本組織和機械組織力學特性不同，式(13)可以表示為：

$$f_1 = \frac{F}{N} = f_A + f_D = \frac{\tau_{h1}}{\sigma_{s1}} + \frac{3 \tan \delta}{E_1^{1/3} N} \quad \text{.....(14)}$$

$$f_2 = \frac{F}{N} = f_A + f_D = \frac{\tau_{h2}}{\sigma_{s2}} + \frac{3 \tan \delta}{E_2^{1/3} N} \quad \text{.....(15)}$$

式中， f_1 為梳柄基本組織與刀具間的摩擦係數； τ_{h1} 為梳柄基本組織截紋抗剪強度，MPa； E_1 為梳柄基本組織儲存彈性率； f_2 為梳柄機械組織與刀具間的摩擦係數； τ_{h2} 為梳柄機械組織截紋抗剪強度，MPa； E_2 為梳柄機械組織儲存彈性率。

分析表明，梳柄切口與刀具之間的摩擦係數與梳柄截紋抗剪強度、損耗角正切成正比，與梳柄順紋抗壓強度、儲存彈性率、法向載荷成反比。

2.3 刀刃阻力

彈性基礎梁理論適用於以連續的彈性體為基礎的結構計算，適用於板材等植物體[25-26]。根據該理論，硬質刀具插切梳柄過程中梳柄內部纖維在刀刃的擠壓下發生變形直至拉斷，刀具切割梳柄過程纖維受力變形示意圖如圖 5 所示。

其中 h_4 為刀刃處纖維的厚度，mm； P' 為刀刃對纖維的擠壓力，N；刀刃阻力 P 與 P' 是一對作用力與反作用力。根據彈性基礎梁理論，梁上方梳柄組織為連續的彈性體，故可將梁 2 簡化為以梁 2 上方梳柄組織為基礎的彈性基礎梁，由有限長彈性地基理論，可得：

$$\varepsilon = 1.055 \times \frac{P\beta}{2\lambda} \quad \text{.....(16)}$$

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{\lambda}{4E_h I'}} \quad \text{.....(17)}$$

$$I' = \frac{m h_4^3}{12} \quad \text{.....(18)}$$

$$I'' = \frac{m h_4^3}{12} \quad \text{.....(19)}$$

式中， ε 為刀刃位置梳柄纖維的應變； λ 為梁 2 上方梳柄組織的地基反力係數， $N \cdot m^{-2}$ ； β 為特徵係數， m^{-1} ； E_h 為梳柄橫紋抗壓彈性模量，MPa； I' 為梁 2 的截面慣性矩， m^4 ； m 為刀刃寬度，mm； σ_o 為梳柄的順紋抗拉強度，MPa。研究表明 λ 可以用下式計算[20]：

$$\lambda = 0.645 \frac{m}{h_4} E_h \left(\frac{E_h}{E''} \right)^{1/3} \quad \text{.....(20)}$$

式中， $h_4 = 0.076$ mm， E'' 為梳柄順紋抗彎彈性模量，MPa； $\frac{E_h}{E''}$ 的值一般取 0.08 ~ 0.1，本文取 0.08。綜合式(16)–(20)，刀刃阻力 P 可以表示為：

$$P = 0.151 \sigma_o m \quad \text{.....(21)}$$

考慮到梳柄基本組織和機械組織力學特性不同，式(21)可以表示為：

$$P_1 = 0.151 \sigma_{o1} m \quad \text{.....(22)}$$

$$P_2 = 0.151 \sigma_{o2} m \quad \text{.....(23)}$$

式中， σ_{o1} 為梳柄基本組織的順紋抗拉強度，MPa； σ_{o2} 為梳柄機械組織的順紋抗拉強度，MPa； P_1 為刀刃切入梳柄基本組織時受到的刀刃的阻力，N； P_2 為刀刃切入梳柄機械組織時受到的刀刃的阻力，N。

分析表明，刀刃阻力與梳柄順紋抗拉強度成正比，與刀具寬度成正比。

三、力學模型與試驗分析

3.1 切割力模型建立

根據式(1)–(9)，以及(14)、(15)、(22)和(23)，根據刀正面長度 l 值的不同， F_y 的計算公式主要分為以下四種類型：

(1) 當 $l \cos(\theta - \gamma) \leq h_1$ 時：

$$-F_y = \begin{cases} 0.151\sigma_{o1}m + 2mk\tau_{h1} + \sigma_{s1}mk[\tan(\theta - \gamma) + \tan\gamma] + \frac{3 \tan \delta}{E^{1/3}}[\cos(\theta - \gamma) + \cos\gamma], \\ \quad k \leq h_1 \text{ 且 } k - l \cos(\theta - \gamma) \leq 0; \\ 0.151\sigma_{o1}m + m\tau_{h1}[l \cos(\theta - \gamma) + k] + \sigma_{s1}m[l \sin(\theta - \gamma) + k \tan\gamma] + \frac{3 \tan \delta}{E^{1/3}}[\cos(\theta - \gamma) + \cos\gamma], \\ \quad k \leq h_1 \text{ 且 } k - l \cos(\theta - \gamma) \geq 0; \\ \frac{3 \tan \delta}{E^{1/3}}[\cos(\theta - \gamma) + \cos\gamma] + m\{[2h_1 + l \cos(\theta - \gamma) - k]\tau_{h1} + 2(k - h_1)\tau_{h2}\} \\ \quad + \sigma_{s2}m(k - h_1)[\tan(\theta - \gamma) + \tan\gamma] + \sigma_{s1}m\{[h_1 + l \cos(\theta - \gamma) - k]\tan(\theta - \gamma) + h_1 \tan\gamma\} \\ \quad + 0.151\sigma_{o2}m, \quad h_1 \leq k \leq h_2 \text{ 且 } k - l \cos(\theta - \gamma) \leq h_1; \\ 0.151\sigma_{o2}m + m[h_1\tau_{h1} + 2(k - h_1)\tau_{h2}] + m\{[(\sigma_{s1}h_1 + 1)\tan\gamma + \sigma_{s2}(k - h_1)\tan(\theta - \gamma)]\} \\ \quad + \frac{3 \tan \delta}{E^{1/3}}[\cos(\theta - \gamma) + \cos\gamma], \quad h_1 \leq k \leq h_2 \text{ 且 } k - l \cos(\theta - \gamma) \geq h_1; \\ \frac{3 \tan \delta}{E^{1/3}}[\cos(\theta - \gamma) + \cos\gamma] + m\{[2h_1 + l \cos(\theta - \gamma) - 2h_2 + k]\tau_{h1} + 2(h_2 - h_1)\tau_{h2}\} \\ \quad + \sigma_{s2}m(h_2 - h_1)[\tan(\theta - \gamma) + \tan\gamma] + \sigma_{s1}m\{[h_1 + l \cos(\theta - \gamma) - h_2]\tan(\theta - \gamma) \\ \quad + (h_1 + k - h_2)\tan\gamma\} + 0.151\sigma_{o1}m, \quad h_2 \leq k \leq h_3 \text{ 且 } k - l \cos(\theta - \gamma) \leq h_1; \\ 0.151\sigma_{o1}m + m[h_1 + 2k - 2h_2]\tau_{h1} + 2(h_2 - h_1)\tau_{h2} + \sigma_{s1}m[(k - h_2)\tan(\theta - \gamma) + (h_1 + k - h_2)\tan\gamma] \\ \quad + \sigma_{s2}m(h_2 - h_1)[\tan(\theta - \gamma) + \tan\gamma] + \frac{3 \tan \delta}{E^{1/3}}[\cos(\theta - \gamma) + \cos\gamma], \\ \quad h_2 \leq k \leq h_3 \text{ 且 } h_1 \leq k - l \cos(\theta - \gamma) \leq h_2; \\ 0.151\sigma_{o1}m + m[l \cos(\theta - \gamma) + h_1 + k - h_2]\tau_{h1} + m(h_2 - h_1)\tau_{h2} + \sigma_{s1}m[l \sin(\theta - \gamma) + (h_1 + k - h_2)\tan\gamma] \\ \quad + \sigma_{s2}m(h_2 - h_1)\tan\gamma + \frac{3 \tan \delta}{E^{1/3}}[\cos(\theta - \gamma) + \cos\gamma], \quad h_2 \leq k \leq h_3 \text{ 且 } h_2 \leq k - l \cos(\theta - \gamma) \leq h_3; \end{cases} \quad (24)$$

(2) 當 $h_1 \leq l \cos(\theta - \gamma) \leq h_2$ 時，

$$\begin{aligned}
 -F_y = & \left\{ \begin{aligned}
 & 0.151\sigma_{o1}m + 2mk\tau_{h1} + \sigma_{s1}mk [\tan(\theta - \gamma) + \tan \gamma] + \frac{3 \tan \delta}{E^{n/3}} [\cos(\theta - \gamma) + \cos \gamma], \quad k \leq h_1; \\
 & 0.151\sigma_{o2}m + m[2h_1\tau_{h1} + 2(k - h_1)\tau_{h2}] + m[\tan(\theta - \gamma) + \tan \gamma][\sigma_{s1}h_1 + \sigma_{s2}(k - h_1)] \\
 & \quad + \frac{3 \tan \delta}{E^{n/3}} [\cos(\theta - \gamma) + \cos \gamma], \quad h_1 \leq k \leq h_2 \text{ 且 } k - l \cos(\theta - \gamma) \leq 0; \\
 & \frac{3 \tan \delta}{E^{n/3}} [\cos(\theta - \gamma) + \cos \gamma] + m\{[2h_1 + l \cos(\theta - \gamma) - k]\tau_{h1} + 2(k - h_1)\tau_{h2}\} \\
 & \quad + \sigma_{s2}m(k - h_1)[\tan(\theta - \gamma) + \tan \gamma] + \sigma_{s1}m\{[h_1 + l \cos(\theta - \gamma) - k]\tan(\theta - \gamma) + h_1 \tan \gamma\} \\
 & \quad + 0.151\sigma_{o2}m, \quad h_1 \leq k \leq h_2 \text{ 且 } 0 \leq k - l \cos(\theta - \gamma) \leq h_1; \\
 & 0.151\sigma_{o2}m + m[h_1\tau_{h1} + 2(k - h_1)\tau_{h2}] + m\{[(\sigma_{s1}h_1 + 1)\tan \gamma + \sigma_{s2}(k - h_1)\tan(\theta - \gamma)]\} \\
 & \quad + \frac{3 \tan \delta}{E^{n/3}} [\cos(\theta - \gamma) + \cos \gamma], \quad h_1 \leq k \leq h_2 \text{ 且 } k - l \cos(\theta - \gamma) \geq h_1; \\
 & \frac{3 \tan \delta}{E^{n/3}} [\cos(\theta - \gamma) + \cos \gamma] + m\{[2h_1 + l \cos(\theta - \gamma) - 2h_2 + k]\tau_{h1} + 2(h_2 - h_1)\tau_{h2}\} \\
 & \quad + \sigma_{s2}m(h_2 - h_1)[\tan(\theta - \gamma) + \tan \gamma] + \sigma_{s1}m\{[h_1 + l \cos(\theta - \gamma) - h_2]\tan(\theta - \gamma) \\
 & \quad + (h_1 + k - h_2)\tan \gamma\} + 0.151\sigma_{o1}m, \quad h_2 \leq k \leq h_3 \text{ 且 } k - l \cos(\theta - \gamma) \leq h_1; \\
 & 0.151\sigma_{o1}m + m[h_1 + 2k - 2h_2]\tau_{h1} + 2(h_2 - h_1)\tau_{h2} + \sigma_{s1}m[(k - h_2)\tan(\theta - \gamma) + (h_1 + k - h_2)\tan \gamma] \\
 & \quad + \sigma_{s2}m(h_2 - h_1)[\tan(\theta - \gamma) + \tan \gamma] + \frac{3 \tan \delta}{E^{n/3}} [\cos(\theta - \gamma) + \cos \gamma], \\
 & \quad h_2 \leq k \leq h_3 \text{ 且 } h_1 \leq k - l \cos(\theta - \gamma) \leq h_2; \\
 & 0.151\sigma_{o1}m + m[l \cos(\theta - \gamma) + h_1 + k - h_2]\tau_{h1} + m(h_2 - h_1)\tau_{h2} \\
 & \quad + \sigma_{s1}m[l \sin(\theta - \gamma) + (h_1 + k - h_2)\tan \gamma] + \sigma_{s2}m(h_2 - h_1)\tan \gamma \\
 & \quad + \frac{3 \tan \delta}{E^{n/3}} [\cos(\theta - \gamma) + \cos \gamma], \quad h_2 \leq k \leq h_3 \text{ 且 } h_2 \leq k - l \cos(\theta - \gamma) \leq h_3;
 \end{aligned} \right. \dots\dots\dots(25)
 \end{aligned}$$

(3) 當 $h_2 \leq l \cos(\theta - \gamma) \leq h_3$ 時 :

$$\begin{aligned}
 -F_y = & \left\{ \begin{aligned}
 & 0.151\sigma_{o1}m + 2mk\tau_{h1} + \sigma_{s1}mk \left[\tan(\theta - \gamma) + \tan\gamma \right] + \frac{3 \tan \delta}{E^{n/3}} \left[\cos(\theta - \gamma) + \cos\gamma \right], \quad k \leq h_1; \\
 & 0.151\sigma_{o2}m + m \left[2h_1\tau_{h1} + 2(k - h_1)\tau_{h2} \right] + m \left[\tan(\theta - \gamma) + \tan\gamma \right] \left[\sigma_{s1}h_1 + \sigma_{s2}(k - h_1) \right] \\
 & \quad + \frac{3 \tan \delta}{E^{n/3}} \left[\cos(\theta - \gamma) + \cos\gamma \right], \quad h_1 \leq k \leq h_2; \\
 & 0.151\sigma_{o1}m + 2m \left[(k + h_1 - h_2)\tau_{h1} + (h_2 - h_1)\tau_{h2} \right] + m \left[\tan(\theta - \gamma) + \tan\gamma \right] \\
 & \quad \left[(k + h_1 - h_2)\sigma_{s1} + (h_2 - h_1)\sigma_{s2} \right] + \frac{3 \tan \delta}{E^{n/3}} \left[\cos(\theta - \gamma) + \cos\gamma \right], \\
 & \quad h_2 \leq k \leq h_3 \text{ 且 } k - l \cos(\theta - \gamma) \leq 0; \\
 & \frac{3 \tan \delta}{E^{n/3}} \left[\cos(\theta - \gamma) + \cos\gamma \right] + m \left\{ \left[2h_1 + l \cos(\theta - \gamma) - 2h_2 + k \right] \tau_{h1} + 2(h_2 - h_1)\tau_{h2} \right\} \\
 & \quad + \sigma_{s2}m(h_2 - h_1) \left[\tan(\theta - \gamma) + \tan\gamma \right] + \sigma_{s1}m \left\{ \left[h_1 + l \cos(\theta - \gamma) - h_2 \right] \tan(\theta - \gamma) \right. \\
 & \quad \left. + (h_1 + k - h_2) \tan\gamma \right\} + 0.151\sigma_{o1}m, \quad h_2 \leq k \leq h_3 \text{ 且 } 0 \leq k - l \cos(\theta - \gamma) \leq h_1; \\
 & 0.151\sigma_{o1}m + m \left[h_1 + 2k - 2h_2 \right] \tau_{h1} + 2(h_2 - h_1)\tau_{h2} + \sigma_{s1}m \left[(k - h_2) \tan(\theta - \gamma) + \right. \\
 & \quad \left. (h_1 + k - h_2) \tan\gamma \right] + \sigma_{s2}m(h_2 - h_1) \left[\tan(\theta - \gamma) + \tan\gamma \right] \\
 & \quad + \frac{3 \tan \delta}{E^{n/3}} \left[\cos(\theta - \gamma) + \cos\gamma \right], \quad h_2 \leq k \leq h_3 \text{ 且 } h_1 \leq k - l \cos(\theta - \gamma) \leq h_2; \\
 & 0.151\sigma_{o1}m + m \left[l \cos(\theta - \gamma) + h_1 + k - h_2 \right] \tau_{h1} + m(h_2 - h_1)\tau_{h2} \\
 & \quad + \sigma_{s1}m \left[l \sin(\theta - \gamma) + (h_1 + k - h_2) \tan\gamma \right] + \sigma_{s2}m(h_2 - h_1) \tan\gamma \\
 & \quad + \frac{3 \tan \delta}{E^{n/3}} \left[\cos(\theta - \gamma) + \cos\gamma \right], \quad h_2 \leq k \leq h_3 \text{ 且 } h_2 \leq k - l \cos(\theta - \gamma) \leq h_3;
 \end{aligned} \right. \dots\dots\dots(26)
 \end{aligned}$$

(4) 當 $h_3 \leq l \cos(\theta - \gamma)$ 時 :

$$\begin{aligned}
 -F_y = & \left\{ \begin{aligned}
 & 0.151\sigma_{o1}m + 2mk\tau_{h1} + \sigma_{s1}mk \left[\tan(\theta - \gamma) + \tan\gamma \right] + \frac{3 \tan \delta}{E^{n/3}} \left[\cos(\theta - \gamma) + \cos\gamma \right], \quad k \leq h_1; \\
 & 0.151\sigma_{o2}m + m \left[2h_1\tau_{h1} + 2(k - h_1)\tau_{h2} \right] + m \left[\tan(\theta - \gamma) + \tan\gamma \right] \left[\sigma_{s1}h_1 + \sigma_{s2}(k - h_1) \right] \\
 & \quad + \frac{3 \tan \delta}{E^{n/3}} \left[\cos(\theta - \gamma) + \cos\gamma \right], \quad h_1 \leq k \leq h_2; \\
 & 0.151\sigma_{o1}m + 2m \left[(k + h_1 - h_2)\tau_{h1} + (h_2 - h_1)\tau_{h2} \right] + m \left[\tan(\theta - \gamma) + \tan\gamma \right] \\
 & \quad \left[(k + h_1 - h_2)\sigma_{s1} + (h_2 - h_1)\sigma_{s2} \right] + \frac{3 \tan \delta}{E^{n/3}} \left[\cos(\theta - \gamma) + \cos\gamma \right], \quad h_2 \leq k \leq h_3;
 \end{aligned} \right. \dots\dots\dots(27)
 \end{aligned}$$

香蕉落梳切割力理論公式的局限性分析 [27]：

- (1) 公式推導簡化了很多條件。將梳柄基本組織和機械組織擬定為均質的各向同性材料，忽略前刀面、後刀面以外的刀具表面對切割力的影響，同時簡化雙梁模型理論，與實際情況差別較大。
- (2) 公式中涉及的材料某些物理性能難以測定，參考相關研究成果與實際情況有一定出入。同時，未考慮含水率對梳柄內各組織彈性模量的影響，未考慮刀刃變鈍對刀刃阻力及摩擦係數等的影響，未考慮插切速度、蕉梳重量、梳柄塑性變形等對切割阻力的影響。

3.2 切割力模型試驗分析

在實際落梳過程中 F_y 值可通過拉壓力感測器測得，因此，可以通過比較實際 F_y 值與理論值的函數關係，來分析理論公式的準確性。

(1) 試驗材料

採樣地點為廣東省東莞市香蕉園，品種為巴西蕉，試樣為新鮮採摘的無病蟲害的蕉穗，成熟度為 1 級 [20]，從蕉穗的相鄰梳柄中間位置截斷果軸，使得每節果軸上留有完整蕉梳一梳，共制取試樣 7 梳，取中間 3 梳為試驗材料，實測梳柄含水率平均為 93.4%。

(2) 設備與方法

試驗設備與工具主要有精密微控電子式萬能材料試驗機(WD-E 型，廣州市廣材試驗儀器有限公司)、遊標卡尺(FS-0601，香港五羊工具(國際)有限公司)，鐵質硬質刀具，自製滑軌式刀具支座等。

香蕉插切落梳力學模型驗證試驗如圖 6 所示。試驗時先將滑軌固定在試驗機底座上，滑軌上固定刀具支座，刀具支座上固定落梳刀，落梳刀寬度為 14.00 mm，厚度為 3 mm，刀刃角為 20° 刀具傾角為 5°，試驗機活動橫樑下固定有拉壓力感測器，感測器下方固定蕉梳的果軸部分。安裝後調節刀具位置，使得刀具插切位置為蕉梳中部區域，參考人工落梳速度，確定插切速度為 500



圖 6 香蕉插切落梳力學模型驗證試驗。

mm/min。

(3) 結果與分析

測得試樣的 h_1 平均值為 9.82 mm， h_2 平均值為 21.76 mm， h_3 平均值為 34.78 mm。則有：

$$l = 3 / \tan(20^\circ) = 8.24 \text{ mm} \dots\dots\dots (28)$$

因為 $l \cos(20^\circ - 5^\circ) = 7.96 \text{ mm} < h_1 = 9.82 \text{ mm}$ ，參考木材基本力學參數試驗方法 [28-29]，測得果軸基本組織順紋抗壓強度平均值為 0.572 MPa，標準差為 0.058 MPa；機械組織順紋抗壓強度平均值為 0.696 MPa，標準差為 0.040 MPa；順紋抗拉強度平均值為 1.86 MPa，標準差為 0.027 MPa；抗剪強度平均值為 0.261 MPa，標準差為 0.022 MPa，梳柄與刀具之間摩擦係數平均值為 0.71，標準差為 0.09。根據公式(2)、(5)、(6)、(24)，有：

$$-F_y = \begin{cases} 3.932 + 14.2179k, & k \leq 7.96; \\ 66.2684 + 6.3867k, & 7.96 \leq k \leq 9.82; \\ 47.4327 + 8.5243k, & 9.82 \leq k \leq 17.18; \\ -91.8061 + 16.3556k, & 17.18 \leq k \leq 21.76; \\ -47.4465 + 14.2178k, & 21.76 \leq k \leq 29.72; \\ 77.7336 + 6.3867k, & 29.72 \leq k \leq 34.78; \\ \dots\dots\dots \end{cases} \dots\dots\dots (29)$$

根據式(29)繪製刀具切割阻力 y 軸方向分力

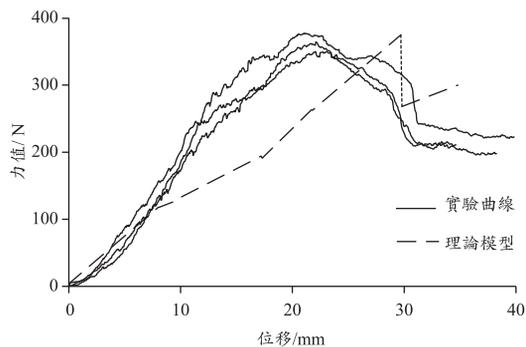


圖 7 香蕉插切落梳力值—位移曲線與理論模型。

模型如圖 7 所示。結果顯示落梳阻力 y 軸方向分力先增大後減小，最後趨於平穩，主要原因是隨著刀具插切深度的增加，刀具前刀面和後刀面的正壓力與摩擦力逐漸增大，使得落梳阻力 y 軸方向分力逐漸增大至峰值，當刀具前刀面完全切入上層基本組織後，由於基本組織順紋抗壓強度小於機械組織順紋抗壓強度，使得切割阻力 y 軸方向分力減小並趨於平穩直至落梳結束。理論分析表明，模型峰值切割力為 374.822 N。

香蕉插切落梳試驗力值—位移曲線如圖 7 所示。試驗表明切割阻力先增大再緩慢減小最後趨於平穩，主要原因是隨著刀具插切深度的增加，刀具前刀面和後刀面的正壓力與摩擦力逐漸增大，使得落梳阻力 y 軸方向分力逐漸增大至峰值，當刀具切入上層基本組織後，受蕉梳重力、梳柄發生塑性變形等因素影響，刀具前刀面和後刀面所受正壓力、摩擦阻力緩慢降低，同時，由於基本組織順紋抗壓強度小於機械組織順紋抗壓強度，使得切割阻力 y 軸方向分力減小並趨於平穩直至落梳結束。試驗表明，切割阻力 y 軸方向分力平均值為 363.854 N，標準差為 13.721 N。

以峰值切割力為指標，試驗值與理論模型誤差為 3.01%，誤差較小，顯著性分析表明二者無顯著性差異 ($P < 0.05$)。理論模型峰值出現位置位移為 29.7 mm，試驗值峰值出現位置位移為 21.1 ~ 23.1 mm，峰值出現位置差異較大主要受蕉梳重力、梳柄塑性變形和各層組織厚度均勻性等因素影響。

結果表明在落梳過程中前刀面區域梳柄發生壓潰變形，且正刀面也會接觸梳柄組織，並對梳柄組織產生正壓力。因此刀具切割軌跡方向分為三個階段，第一階段是刀具前刀面未完全切入梳柄組織中，在此過程中刀具落梳阻力沿 x 軸負方向存在分力，刀具沿 x 軸負方向運動，運動方向與 y 軸夾角為 δ_1 ；第二階段是刀具前刀面完全切入梳柄組織中，但刀具前刀面沿 x 軸方向阻力較小，梳柄組織未發生塑性變形，刀具正刀面不接觸梳柄組織，運動方向與 y 軸夾角逐漸增大，為 δ_2 ；第三階段是刀具前刀面完全切入梳柄組織中，且梳柄組織發生塑性變形，刀具正刀面接觸梳柄組織，運動方向與 y 軸夾角逐漸增大，為 δ_3 ， $\delta_3 = \gamma$ 。由以上分析可知：

$$y = \begin{cases} 30.2766x^{1/2}, & 0 \leq -x \leq 0.070; \\ (228.4618x - 12)^{1/2} + 6, & 0.070 \leq -x \leq 0.489; \\ 11.4286x + 10.4069, & 0.489 \leq -x \leq 34.78; \end{cases} \quad \dots\dots\dots (30)$$

結合繪製刀具切割軌跡與 y 軸夾角模型如圖 8 所示，繪製切割軌跡曲線模型如圖 9 所示。

四、結論與討論

- (1) 對比分析人工落梳技術特徵，確定機械落梳方式為插切式。
- (2) 分析插切落梳過程的力學特徵，明確了切割參數與切割阻力之間的相互作用關係，確定了影響落梳切割力的主要因素為法向載荷、摩擦阻力和刀刃阻力，構建了香蕉插切落梳力學模型。
- (3) 試驗表明，以 y 軸方向切割阻力為指標，理論模型與試驗曲線趨勢一致，模型峰值切割力 374.822 N，試驗平均值 363.854 N，峰值誤差 3.01%，顯著性分析表明試驗值與理論值差異不顯著 ($P < 0.05$)。

進一步研究內容：明確蕉梳重力、梳柄塑性變形和各層組織厚度均勻性等因素對落梳阻力的影響機理，開展香蕉落梳插切軌跡與刀具參數的關係研究。

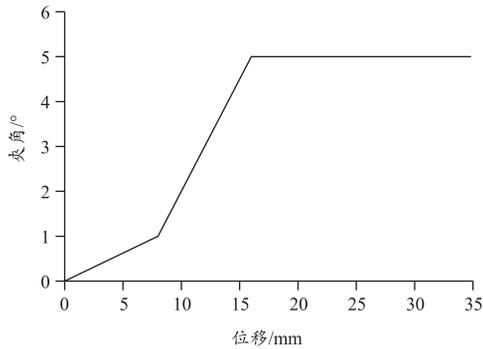


圖 8 刀具切割軌跡與 y 軸夾角模型。

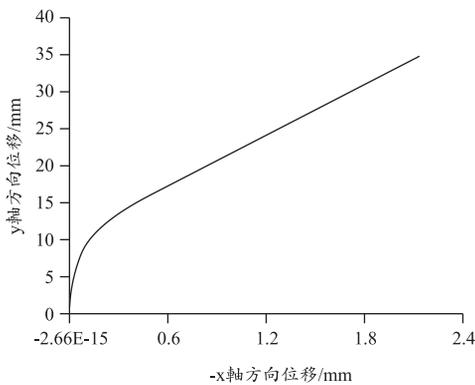


圖 9 切割軌跡曲線模型。

參考文獻

- 謝建華、龐傑，香蕉採後生理與保鮮技術研究進展[J]，保鮮與加工，2010，10(6)：37-42。
- 中華人民共和國國家統計局網站，[EB/OL]，[2017-03-02]，<http://data.stats.gov.cn>。
- Food and Agriculture Organization of the United Nations [EB/OL]，[2016-08-28]，http://faostat3.fao.org/browse/R/*E。
- 柯佑鵬、過建春、夏勇開等，2013-2014 年中國香蕉產銷形勢分析與預測[J]，廣東農業科學，2014，(15)：184-188。
- 徐貞貞、孫潔、趙靚等，香蕉產地初加工技術分類及集成[J]，農業工程學報，2015，31(增刊 1)：332-336。
- 孫立紅、周昆華，香蕉果實綜合護理及採收包裝的應用研究[J]，雲南農業科技，2007，(6)：18-21。
- 樊剛倫，香蕉無傷採收及採後商品處理技術[J]，農業與技術，2012，32(11)：104。
- 李君、楊洲、汪劉一等，香蕉生產機械化研究與應用[J]，安徽農業科學，2011，39(3)：1836-1838。
- 周昆華、楊建輝，淺談香蕉生產機械化管理[J]，熱帶農業科技，2010，33(1)：24-25。
- Chattopadhyay P. S. and Pandey K. P., "Mechanical Properties of Sorghum Stalk in relation to Quasi-static Deformation [J]," Journal of Agricultural Engineering Research, 1999, 73(2): 199-206.
- Chattopadhyay P. S. and Pandey K. P., "Impact Cutting Behaviour of Sorghum using a Flail-Cutter-a Mathematical Model and its Experimental Verification [J]," Journal of Agricultural Engineering Research, 2001, 78(4): 369-376.
- 劉慶庭、區穎剛、卿上樂等，甘蔗莖杆在扭轉、壓縮、拉伸荷載下的破壞試驗[J]，農業工程學報，2006，22(6)：201-204。
- Roberto C. and Harry H., "Angle and serrated blades reduce damage, force and energy for a harvester Basecutter [C]," Proceedings of Australia Society SugarCane Technology, 2001, 23: 1212-1218.
- Phillip C. J., Clairmont L. C. and Sunil K. M., *et al.*, "Cutting energy characteristics of Miscanthus x giganteus stems with varying oblique angle and cutting speed [J]," Biosystems Engineering, 2012, 112(1): 42-48.
- 田昆鵬、李顯旺、沈成等，天牛仿生大麻收割機切割刀片設計與試驗[J]，農業工程學報，2017，33(5)：56-61. doi：10.11975/j.issn.1002-6819.2017.05.008 <http://www.tcsae.org>。
- 施印炎、陳滿、汪小昂等，蘆蒿有序收穫機切割器動力學模擬與試驗[J]，農業機械學報，2017，48(2)：110-116。

17. 段潔利、楊洲、朱正波，可自我調整香蕉穗杆直徑的插切式變直徑香蕉去軸落梳刀[P]，中國專利，ZL201310548281.X，2013-31-06。
18. 段潔利、朱正波、楊洲，一種變徑衝擊插切式環形香蕉落梳裝置[P]，中國專利：ZL201410314515.9，2014-07-02。
19. 朱正波，香蕉機械落梳方法與裝置研究[D]，廣州：華南農業大學，2014：45-54。
20. Von Loesecke, H.W. Bananas [M], New York: Interscience Publishers, 1950: 52-66.
21. Atack D. and Tabor D., "The friction of wood [C], Proceedings of the Royal Society of London," London, UK, 1958: 539-555.
22. Garoff N. and Zauscher S., "The Influence of Fatty Acids and Humidity on Friction and adhesion of Hydrophilic Polymer Surfaces[J]," Langmuir, 2002, 18(18): 6921-6927.
23. Bui Q. V. and Ponthot J. P., "Estimation of rubber sliding friction from asperity interaction modeling [J]," Wear, 2002, 252: 150-160.
24. 於占昌，關於橡膠摩擦與磨耗研究的進展[J]，世界橡膠工業，2011，38(4): 8-15。
25. 黃義、何芳社，彈性地基上的梁、板、殼[M]，北京：科學出版社，2005：8-24。
26. 南京林產工業學院，木材切削原理與刀具[M]，北京：中國林業出版社，1983：17-36。
27. 肖正福、劉淑琴、胡宜萱，木材切削刀具學[M]，哈爾濱：東北林業大學出版社，1992：39-42。
28. 馬麗娜，木材構造與聲振性質的關係研究[D]，合肥：安徽農業大學，2005：26-33。
29. 塗道伍、邵卓平，木材密度對聲振動特性參數的影響[J]，安徽農業大學學報，2012，39(3): 361-364。

收稿日期：民國 106 年 10 月 26 日

修正日期：民國 106 年 12 月 8 日

接受日期：民國 106 年 12 月 13 日