

微液滴撞擊在乾玻璃表面之數值模擬

陳斌豪¹、莊育賢²、黃聖杰³、許修豪⁴、林政諺⁵

^{1,4,5} 遠東科技大學 能源應用工程學系

E-mail: binhao17@gmail.com

^{2,3} 國立成功大學 機械工程學系

¹ 助理教授、² 研究生、³ 教授、^{4,5} 專題生

摘要

本研究採用計算流體力學中的流體體積法(Volume of Fluid)模型，探討純水及含有不同重量百分比濃度的(水-甘油)液滴以相同的撞擊速度撞擊在乾玻璃表面時，從能量的觀點來瞭解液滴撞擊後的運動行為。研究中，無因次參數韋伯數(We)在 81.05~119.20 之間變化，雷諾數(Re)則在 3.76~4180 範圍內。

模擬結果發現: (1)在撞擊前期，液滴之動能、位能皆快速降低，減少之能量一部份存於變形液滴的表面能；另一部份則用來克服黏滯阻力，因此在變形過程中表面能、消耗能均呈現快速增加。達平衡階段時，能量以表面能為主；黏滯係數越小(雷諾數越大)者，其存留總能量百分比越大。(2)在撞擊初期，純水液滴的表面能呈單調增加的變化，最後趨於定值；然而，含有甘油 50%~100%者，其表面能則呈現先減少，待達到最小值後，表面能會再度增加的變化。隨著含甘油百分比增加(低雷諾數者)，達到最小表面能之時間變長，且其所擁有的最小表面能較小。

關鍵字詞：流體體積法、撞擊液滴、能量

Simulation of Micro-Droplet impinging on dry glass surface

Bin-Hao Chen¹, Yu-Siang Chung², Sheng-Jye Hwang³, Hsiu -Hao Hsu⁴,
Jeng -Yan Lin⁵

^{1,4,5} Department of Energy Application Engineering,
Fareast University

^{2,3} Department of Mechanical Engineering,
National Cheng Kung University

Abstract

This study investigates the temporal evolutions of various kinds of energy for an impinging droplet of various compositions onto dry surface by way of CFD software. The Weber number ranges from 81.05 to 119.20 and Reynolds numbers are from 3.76 to 4180.

Simulation results show that: (1) immediately after impingement, the kinetic energy and potential energy decrease quickly and monotonously. Most part of it is stored as surface energy; the other part is dissipated to overcome the viscous drag force. During the spreading process, the surface and dissipation energy increase substantially. During the equilibrium stage, the stored surface energy becomes dominant. For droplets with high Reynolds numbers, high percentage of energy is stored as the surface energy. (2) During the impacting process, the surface energy increases monotonously for water droplet. However the surface energy first experience a decrease until a local minimum of the surface energy is reached; and then increases substantially. The higher the weight percentage of the glycerin, the smaller value the local minimum; and the longer the time elapse to reach the local minimum .

Keywords: Volume of Fluid、impinging droplet、energy

1. 前言

近年來由於產業已邁入微奈米的時代，使得微型液滴逐漸被廣泛應用在傳統工業、高科技及生技產業當中。在一般傳統工業中，例如噴墨列印技術中噴出液滴尺寸的控制；而噴霧可應用於煉鋼廠與內燃機之冷卻以及電子設備廠的冷卻，或是金屬成形之材料熱處理過程，乃至於引擎之燃料霧化和管路中由於沖/腐而成管壁之薄化現象預測等之研究。在高科技產業方面，高分子有機電激發光顯示器(Polymer Light Emitting Diode, PLED)之製程中，墨滴不均勻化可能降低解析度與使發光均勻度變差，但是可利用噴墨印表法將 PLED 溶液注入蝕刻圖案後，覆被光阻劑 ITO(Indium Tin Oxide)面板來改善上述之缺點。而液晶平面顯示器(Liquid Crystal Display, LCD)技術中之彩色濾光片為必要組件。彩色濾光片為 RGB 三原色細密排列分佈而成之微米級矩陣圖樣，傳統之製程採用旋轉塗佈法(Spin coating)，而以微液滴噴墨技術來製造，則可以免除旋轉塗佈法無法三色同時製造，且大量浪費顏料之缺點。另外，亦可應用於電子封裝製程中之錫錫球配置與導線的焊接製程等。在生技產業方面則運用液滴產生技術加強生物醫學檢測的效率，並降低耗材的使用、檢測的複雜性及改善藥物製作之製程。縱觀上者，我們知道不同的用途其所需要液滴在平板上的表現也不同，故研究液滴撞擊平板的動態特性實為一重要問題。

2. 文獻回顧

液滴撞擊在乾表面上所發生的現象是有趣且具實用性的。為能更加了解此一現象，前人紛紛從各種不同角度來探索，有的人從實驗觀察量測，而有人則從理論的推導與數值的模擬著手。Gerardo and Julian【1】利用數值方法來描述液滴撞擊在固體表面上的擴張情況。其重要性在於使用數值模擬時，把液滴尺寸、撞擊速度和材料性質等特性考慮進去，進而算出擴張尺寸與時間變化的關係，最後發現所模擬出來的數據與實驗數據相當吻合。Chandra and Avedisian【2】指出在光滑不銹鋼板上，單一氣泡存在於一異丙醇液滴中。對於液滴內氣泡的形成提出二種可能的機制：一是在撞擊期間由固/液介面捲入空氣而形成；另一則是在等溫狀況下，因液體壓力低於其飽和蒸汽壓力而產生之氣穴現象。Fukai et al.【3】主要是將表面張力在擴張過程的影響列入考量，利用理論分析研究液滴撞擊在平板上的變形過程。Yarin and Weiss【4】文中指出當液滴以低速度撞擊在平面上會產生擴張；另外，因為表面張力不

穩定也會造成毛細波(Capillary wave)等現象；相反地，高速撞擊的實驗中，當液滴撞擊動量夠大時，液滴向外擴張太快，致使擴張的液膜將以一環狀液膜濺起而離開撞擊面。Fukai 等人【5】以數值模擬方法以及實驗，探討平板表面潤濕程度(Wettability)對於撞擊變形行為的影響。研究中包括七種不同表面粗糙度之未加熱平板，並將慣性力、黏滯力、重力、表面張力和接觸角的磁滯現象均列入理論模式中計算。Hatta 等人【6】利用數值方法模擬液滴撞擊平面的變形狀況和液滴內部流場情形。Pasandideh 等人【7】藉由添加微量表面活性劑於水滴中來改變液-固界面的接觸角。其研究結果說明添加活性劑並不影響撞擊初期過程的液滴形狀，但是會增加最大的擴張直徑及減少回彈的高度。Mao 等人【8】以水滴進行實驗，文中針對不同的撞擊速度(0.5~6 m/s)，黏滯係數(1~100 mPaS)，液滴尺寸(1.5~3.5 mm)，靜態接觸角(30°~120°)等實驗條件，撞擊在不同材質表面作研究，撞擊平面為不銹鋼板或玻璃板。Zhang and Basaran【9】提到液滴的初始動能隨著變形的過程，部分能量被黏滯力所消耗掉，其他部分則轉變成表面能。Thoroddsen and Sakakibara【10】主要研究液滴撞擊在固體表面上會產生一沿表面迅速擴張的噴射薄膜，而水滴在玻璃表面上的撞擊過程中，薄膜邊緣處有一指狀模樣的發展。Gu and Li【11】使用純水液滴從不同的高度自由落下，撞擊在鍍鋁表面和玻璃表面，並採用數值計算與實驗結果作準確性驗證。Sikalo 等人【12】針對各種參數對液滴撞擊平面的影響進行實驗研究。實驗條件以純水、異丙醇和甘油作為流體，玻璃、石蠟和 PVC 等作為撞擊表面；文中並以前進接觸角及後退接觸角來判別液滴與表面之介面能量。Sikalo 等人【13】以純水及甘油搭配不同的撞擊速度撞擊在玻璃與石蠟兩種表面上。其結果顯示：變形液滴在擴張階段時，其動態接觸角會先減少到一個局部極小值，之後再增加至最大。Son 等人【14】以紫外光/臭氧(UV/ozone)氧化去除模組改變表面的濕潤性或親水性，並利用極微小的液滴撞擊其表面。其結果顯示：最大擴張直徑會隨著液滴與表面的靜態接觸角之增加而減少；反之，中心最大高度會隨之增加。

3. 理論基礎與模擬條件

3.1 基本假設

本研究的基本假設與條件如下：

1. 暫態流場(unsteady state)。

2. 不可壓縮流體(incompressible flow)。
3. 兩種工作流體不互溶，也不起化學反應，並且皆為牛頓流體(Newtonian fluid)。
4. 流體在固體邊界上滿足無滑移邊界條件(no-slip condition)。
5. 假設表面張力與黏滯係數等流體性質為常數。
6. 忽略磁場、電場、溫度場等效應。
7. 液滴在撞擊表面的瞬間，其形狀為正球形，並且液滴中每點位置的速度都一致。
8. 流體為連續體。
9. 撞擊環境為一大氣壓。
10. 流場為軸對稱。

3.2 統御方程式

3.2.1 連續方程式

$$\nabla \cdot \bar{V} = 0 \quad \dots\dots\dots(1-1)$$

其中 \bar{V} 是速度向量。

3.2.2 Navier-Stokes 方程式

$$\rho \left[\frac{\partial \bar{V}}{\partial t} + (\bar{V} \cdot \nabla) \bar{V} \right] = -\nabla P + \mu \nabla^2 \bar{V} + \rho \bar{g} + \bar{F} \quad \dots\dots\dots(1-2)$$

其中 \bar{V} 是速度向量， ρ 是密度， \bar{g} 是重力加速度， μ 是動力黏滯係數， P 是壓力， \bar{F} 是體積力。

3.3 Volume of Fluid (VOF) Model

所謂 VOF 模型是一種追蹤界面的方法，當需要得到多種互不相溶流體間的界面時可以採用這種模型。在 VOF 模型中，互不相溶的不同流體成分共用著動量方程式，計算過程將流場的每個計算單元內的流體成分所佔有的體積分率紀錄下來。各網格單元裡的所有不同相流體的體積分率(volume fraction)的總和為 1。其表示式如下：

$$\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1 \quad \dots\dots\dots(1-3)$$

在任何計算單元之內，只要每一相流體的容積比率已知，則在任何網格單元內的物理量及其特性均可取決於體積分率。換句話說，在各單元中如果

第 q 相流體的容積比率記為 α_q ，那麼會出現以

下三種情形：

(1) $\alpha_q = 0$: 第 q 相流體在網格單元中是空的，亦即沒有此相流體的存在。

(2) $\alpha_q = 1$: 第 q 相流體在網格單元中是充滿的，亦即只有該相流體存在而已。

(3) $0 < \alpha_q < 1$: 代表在網格單元中包含了第 q 相流體和一相或者其它多相流體。

3.4 表面張力的處理

CSF(Continuum Surface Force Model)連續表面張力模式為在流體體積法中當要處理表面張力時所使用，藉由此法將使得給定交界面邊界條件的難度簡單許多。連續表面張力的基本概念為將二流體的交界面視為一有限厚度的漸變區域，而不是沒有厚度之薄膜，而表面張力的影響為在此漸變區域上連續體力(Body Force)分佈，在動量方程式中為一源頭項(Source term)。藉由使用連續表面張力模式，因為已在動量方程式中處理，使得我們不必給定明確的交界面條件。

3.5 體積分率方程(The Volume Fraction Equation)

要追蹤各相之間的介面，必須求解一相或多相流體的體積分率的連續方程。對於第 q 相而言，其方程式如下：

$$\frac{\partial \alpha_q}{\partial t} + \bar{v} \cdot \nabla \alpha_q = \frac{S_{\alpha_q}}{\rho_q} \quad \dots\dots\dots(1-4)$$

該方程式是質量守恆的一般形式，它適用於可壓

縮流體與不可壓縮流體。其中 α_q 為第 q 相體積

分率、 ρ_q 為第 q 相密度， \bar{V} 為速度向量， S_{α_q} 為

第 q 相的源項加入到體積分率的方程中(例如液滴

的蒸發)。本文中由於沒有液滴的蒸發，因此將

S_{α_q} 設定為零。

3.6 物理特性(Properties)之計算

每個網格單元的各項物理特性都須由該網格單元的各相共同決定。例如一個二相流，其每一個網格單元的密度可表示為：

$$\rho = \alpha_2 \rho_2 + (1 - \alpha_2) \rho_1 \dots\dots\dots(1-5)$$

同理，若具有 n 相系統的多相流，可用以下通式代表：

$$\rho = \sum \alpha_q \rho_q \dots\dots\dots(1-6)$$

3-7 模型的建立

本文所建立的模型為一 $120 \times 240 \text{mm}^2$ 等間距分佈的正方形網格，每一網格大小為 $0.05 \times 0.05 \text{mm}^2$ 之正方形(如圖 1-1 所示)。採用正方形網格主要是考慮使用 VOF 物質接受法(donor-acceptor)較適用於四邊形或六面體網格。此外，因為軸對稱之故，只需要計算對稱軸的一邊，再使用映射原理即可得到另一半模型的資料。模型中有一個邊界假設為撞擊平板的壁面(wall)，另有兩個邊假設為壓力出口(pressure outlet)，剩下的一個邊(亦即中心軸)則假設為對稱軸(axis)。模擬的各項物理量如表一所示。

4. 結果與討論

4-1 撞擊過程的接觸角變化

觀察純水液滴撞擊在玻璃表面之接觸角時序變化圖(圖 1-2)，發現在撞擊初期，如 1-2(a)所示，因為液滴剛接觸平板表面，因此接觸角呈現鈍角。隨著時間經過，因慣性力的作用在接觸表面會產生甚薄的水膜(lamella)，並立即附著於平板表面，此時接觸角則以銳角型態呈現如，1-2(b)所示。隨著擴張直徑的增加，接觸角便開始先增加而後減少，如 1-2(e)所示。隨變形液膜持續向外擴張，接觸角繼續增加，在 $T^*=0.47$ 時，動態接觸角達到最大值，約 90 度，如 1-2(d)所示。隨後，液膜上表面便開始回縮，故接觸角度

開始減少。含有 100%甘油的液滴撞擊在玻璃表面之接觸角時序變化圖(圖 1-3)。其接觸角型態變化與含有 90%甘油的液滴類似，在最後型態之角度會比含有 90%甘油的液滴大。

4-2 變形液滴各項能量的變化

純水液滴在未撞擊前($T < 0 \text{ms}$)，本身擁有的能量主要為動能(K.E.)、位能(P.E.)、表面能(S.E.)。圖 1-4 中顯示:撞擊初期由於慣性力的作用使液滴撞擊時所具備的初始動能快速消耗。撞擊初期在液滴下方之流體受到擠壓促使液滴內部壓力快速提高，進而沿著表面作徑向的流動，因此液膜快速往外擴張。隨著液膜直徑擴張，其與玻璃接觸面積增大，故表面能迅速增大。液滴擴張過程中，所有之能量主要用於建立液滴表面能及克服黏滯阻力。

含有甘油 100%之液滴，其各項能量的時序變化如圖 1-5 所示。其中具有 50%~100%甘油之液滴，其動能與時間關係與純水液滴的趨勢一致。換言之：在撞擊前液滴皆擁有初始的最大動能，在撞擊過程中動能迅速消耗。圖中也顯示:其位能與時間關係也與純水液滴類似；而且和中心高度之變化趨勢一致的。換言之：在撞擊玻璃平板的瞬間($T^*=0$)，液滴皆擁有一初始位能，隨著液滴的持續擴張逐漸減少，直到液滴的中心高度為最小值時，此時位能為一最小值。此後由於液膜沒有明顯的回縮使得液滴的位能僅作微幅變化，最後趨近於一定值。至於其表面能與時間之變化關係則與純水趨勢明顯不同。具有甘油 50%~100%之液滴，在撞擊初期，液滴僅在接觸面有變形，液滴外形大致仍維持截頭球狀，此時液滴與玻璃平板的接觸面積增加，但是液滴與氣體的接觸面積減小，因此，在撞擊初期，液滴所擁有的表面能先降低，直到液滴擁有最小的表面能。之後截頭球狀的液滴快速擴張，導致液滴與氣、固體的接觸面積同步大幅增加，因此液滴的表面能呈大幅增加。當液滴擴張到最大直徑時，液滴擁有最大的表面能也逐漸趨近於一定值。在撞擊初期，與純水液滴的表面能變化最大不同之處在於：含有甘油 50%~100%的液滴擁

有比初始表面能更小之表面能，而純水液滴則無此一現象發生。究其原因則為純水液滴黏滯係數較小，當撞擊玻璃表面時其擴張速度非常迅速，因此沒有發現液滴與玻璃平板的接觸面積比液滴與氣體的接觸面積大的情形。另外；含有甘油百分比比較低者，其所擁有之最小表面能比含有高百分比者來得高。究其原因則為含有較高甘油百分比者其黏滯係數比較大，因黏滯力的作用使得液滴與玻璃面之接觸的流體不易沿著表面快速流動，因此液體與固體的接觸面積不易快速增加，但是液滴與氣體之表面積已經減少，使得表面能減少較多，故其最小表面能愈低。

5. 結論

本研究使用純水以及含有不同重量百分比的甘油等七種液滴，以相同的速度撞擊在乾玻璃表面，探討液滴撞擊後之運動特性及能量之變化，其對應的韋伯數(We)及雷諾數(Re)分別在81.05~119.20及3.76~4180等範圍內。模擬結果所作之結論如下:(1)具有不同雷諾數的液滴撞擊玻璃乾表面時，在撞擊初期，其接觸角皆為一鈍角，此一特性與液滴的重量百分組成無關。(2)在撞擊初期，液滴之初始動能、位能皆快速消耗，此消耗之能量一部份存於變形液滴的表面能；另一部份則用來克服黏滯阻力，因此在變形過程中，表面能、消耗能均呈現快速增加。液滴達到最後平衡時，液滴所擁有的主要能量以表面能為主；而液滴黏滯係數越小(雷諾數越大)者，平衡時擁有之總能量百分比越大。(3)液滴在達最大擴張直徑時，液滴的中心高度早已經達到最低值。就能量而言，此時動能及位能均達到最小值，但此時表面能則達到最大值。(4)在撞擊初期，純水液滴的表面能呈迅速增加的變化，最後趨於定值；然而，含有甘油50%~100%者，其表面能呈現先減少的變化，待達到最小值後，表面能會再度增加。隨著含有甘油百分比增加(低雷諾數者)，達到最小表面能之時間變長，且其所擁有的最小表面能較小。表面能量先減後增之趨勢應和變形液滴擴張速率的急劇變化有關。

6. 參考文獻

1. Gerardo, T. and Julian, S., Mathematical Modeling of the Isothermal Impingement of Liquid Droplets in Spraying Processes. *Met. Trans. B*, 1991. 22B, pp. 901-914.
2. Chandra, S. and Avedisian, C. T., On The Collision of A Droplet With A Solid Surface. *Proc. R. Soc. London Ser. A*, 1991. 432, pp. 13-41.
3. Fukai, J., et al., Modeling of the Deformation of a Liquid Droplet Impinging Upon a Flat Surface. *Phys. Fluids A*, 1993. 5(11), pp. 2588-2599.
4. Yarin, A. L. and Weiss, D. A., Impact of Drops on Solid Surfaces: Self-Similar Capillary Waves and Splashing as a new type of Kinematic Discontinuity. *J. Fluid Mech*, 1995. 283, pp. 141-173.
5. Fukai, J., Shiiba, Y., Yamamoto, T. and Miyatake, O., Wetting Effects on the Spreading of a Liquid Droplet Colliding With a Flat Surface: Experiment and Modeling. *Phys. Fluids*, 1995. 7(2), pp. 236-247.
6. Hatta, N., Fujimoto, H., and Takuda, H., Deformation Process of A Water Droplet Impinging on a Solid Surface. *Trans. of the ASME*, 1995. 117, pp. 394-401.
7. Pasandideh-Fard, M., Qiao, Y. M., Chandra, S. and Mostaghimi, J., Capillary Effects during Droplet Impact on A Solid Surface. *Phys. Fluids*, 1996. 8(3), pp. 650-659.
8. Mao, T., Kuhn, D. C. S., and Tran, H., Spread and Rebound of Liquid Droplets upon Impact on Flat Surfaces. *AIChE J*, 1997. 43(9), pp. 2169-2179.
9. Zhang, X. and Basaran, O. A., Dynamic Surface Tension Effects in Impact of a Drop with a Solid Surface. *J. Colloid Interface Sci*, 1997. 187, pp. 166-178.
10. Thoroddsen, S. T. and Sakakibara, J., Evolution Of The Fingering Pattern Of An Impacting Drop. *Phys. Fluid*, 1998. 10, pp. 1359-1374.
11. Gu, Y. and Li, D., Liquid Drop Spreading On Solid Surfaces At Low Impact Speeds. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2000. 163, pp. 239-245.
12. Sikalo, S., Marengo, M., and Tropea, C., Analysis Of Impact Of Droplets On Horizontal Surfaces. *Exp. Fluids*, 2002. 25, pp. 503-510.
13. Sikalo, S., Wilhelm, H., Roisman, I., Jakirlic, S. and Tropea, C., Dynamic Contact Angle of Spreading Droplets: Experiments and Simulations. *Phys Fluids*, 2005. 17, pp. 062103.

14. Son, Y., Kim, C., Yang, D. H. and Ahn, D. J., Spreading of An Inkjet Droplet On A Solid Surface with A Controlled Contact Angle at Low Weber and Reynolds Numbers. Langmuir, 2008. 24, pp. 2900-2907.

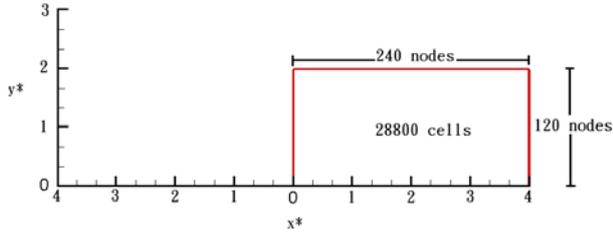


圖 1-1 模型中網格數分佈，格點係均勻分佈

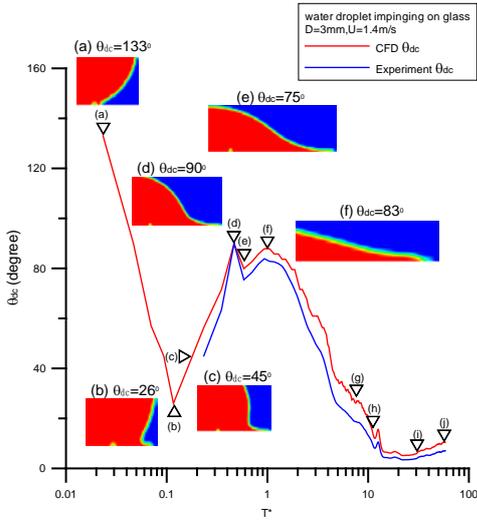


圖 1-2 純水液滴撞擊在玻璃表面之接觸角時序變化圖

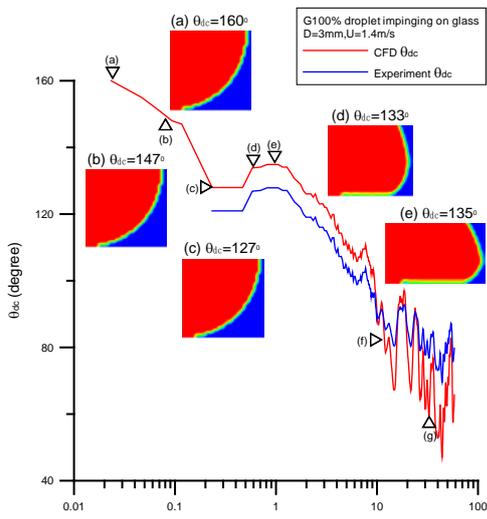


圖 1-3 含有甘油 100%液滴撞擊在玻璃表面之動態接觸角時序變化圖

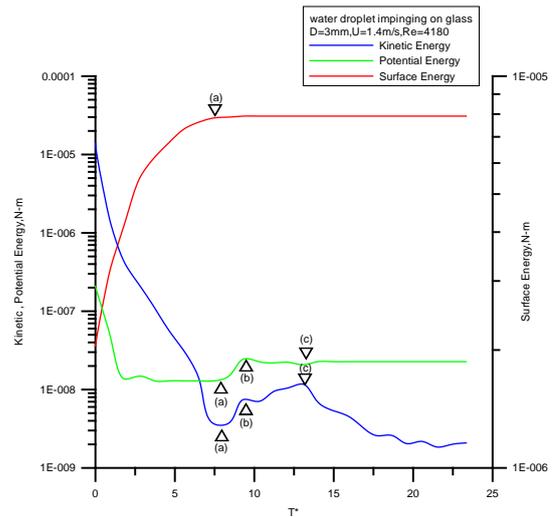


圖 1-4 純水液滴撞擊在玻璃表面之能量時序變化圖

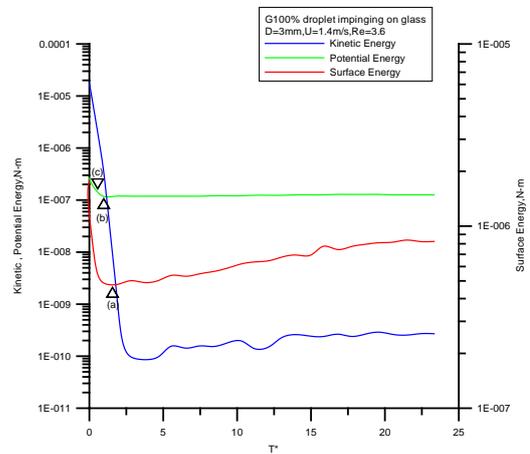


圖 1-5 含有甘油 100%液滴撞擊在玻璃表面之能量時序變化圖

液體種類 ^o	密度 ^o (kg/m ³) ^o	黏滯係數 ^o (kg/m·s) ^o	表面張力 ^o (N/m) ^o	液滴直徑 ^o (m) ^o	撞擊速度 ^o (m/s) ^o	雷諾數 ^o Re ^o	韋伯數 ^o We ^o	歐氏數 ^o Oh ^o
純水 ^o	998 ^o	1.00e-03 ^o	7.24e-02 ^o	0.003 ^o	1.4 ^o	4180 ^o	81.0530 ^o	0.002125 ^o
甘油 50% ^o	1126 ^o	6.00e-03 ^o	7.00e-02 ^o	0.003 ^o	1.4 ^o	788 ^o	94.5840 ^o	0.012339 ^o
甘油 60% ^o	1154 ^o	1.08e-02 ^o	6.87e-02 ^o	0.003 ^o	1.4 ^o	449 ^o	98.7703 ^o	0.022145 ^o
甘油 70% ^o	1181 ^o	2.25e-02 ^o	6.76e-02 ^o	0.003 ^o	1.4 ^o	220 ^o	102.726 ^o	0.045975 ^o
甘油 80% ^o	1209 ^o	6.01e-02 ^o	6.61e-02 ^o	0.003 ^o	1.4 ^o	84.5 ^o	107.548 ^o	0.122744 ^o
甘油 90% ^o	1235 ^o	2.19e-01 ^o	6.48e-02 ^o	0.003 ^o	1.4 ^o	23.7 ^o	112.0648 ^o	0.446954 ^o
甘油 100% ^o	1261 ^o	1.41e+00 ^o	6.22e-02 ^o	0.003 ^o	1.4 ^o	3.76 ^o	119.2071 ^o	2.906737 ^o

表 1 液滴種類