

# 以計算流體動力模型模擬瀝青膠漿之質流行為

林樹豪

德霖技術學院營建科技系助理教授

## 摘要

對於鋪面材料工程師而言，瀝青和瀝青膠漿，即瀝青—填縫料系統，的高溫質流行為是一重要的工程性質。鋪面材料工程師需要了解填縫料對瀝青黏度的影響，並確保填縫料顆粒能均勻分散於其間。目前工程界普遍使用旋轉式黏度儀來量測瀝青膠漿的高溫質流性質。過去的研究顯示使用旋轉式黏度儀量測時，試驗期間瀝青膠漿的黏度有大量變化的情形。本研究使用計算流體動力模型，對旋轉式黏度儀進行數值模擬。藉由此一強大的數值技術和複雜的質流模式，將瀝青膠漿中假塑性和觸變性等不同的效應予以區隔。除此之外，填縫料顆粒移動的效應也予以界定和模型化。研究顯示使用適當的計算流體動力模型能夠量化和模擬上述這些重要的效應，且旋轉式黏度儀所使用的傳統穩態流黏度方程式並不能適用於含有填縫料的瀝青膠漿。

**關鍵詞：**質流行為、瀝青膠漿、計算流體動力模型、旋轉式黏度儀。

## Computational Fluid Dynamic Modelling of the Rheological Behavior of Asphalt Mastic

Shu-Hao Lin

Assistant Professor, Department of Construction Technology, De Lin Institute of Technology

## Abstract

It is important to the asphalt technologist to understand the effect the fillers have on the viscosity of the hot asphalt and to ensure even distribution of the filler particles within the mastic. One of the instruments used to quantify the high temperature rheological behavior of asphalt and asphalt-filler mixtures is the rotational viscometer. Previous research has identified substantial changes in the viscosity with time of both the pure asphalt and the asphalt-filler mastic when measured by the rotational viscometer. This study uses Computational Fluid Dynamics (CFD) to model behavior of the pure asphalt and asphalt-filler mastic in the viscometer. By means of complex rheological models, the pseudoplastic and thixotropic nature of the asphalt binder is identified and successfully modeled. In addition, the effect of filler drift is identified and modeled. It has been shown that the CFD model can quantify and capture these important effects, and the steady state equations used to calculate viscosity in the viscometer are invalid for asphalt-filler mastic.

**Keywords:** rheological behavior, asphalt-filler mastic, computational fluid dynamic model, rotational viscometer.

## 壹、緒論

瀝青膠泥中添加填縫料的二個主要目的在於能改善瀝青混凝土的力學性質，並且能有效使用廢料以達環保減廢之益。填縫料與瀝青間經過物理化學作用形成瀝青膠漿，其影響層面涵蓋配合設計、鋪築和鋪面成效。瀝青膠漿影響著粒料顆粒的浸潤作用，也因此影響瀝青混凝土的粒料間空隙 (VMA)、壓實特性以及最佳瀝青含量等。在運送和鋪築期間，瀝青膠漿必須具有足夠的勁度以避免發生瀝青滲流的現象。這尤其對開放級配或跳躍級配而言，諸如開放級配摩擦層 (OGFC)、石膠泥瀝青混凝土 (SMA) 和排水鋪面等，甚為重要。長期以來普遍也認為瀝青膠漿會影響瀝青混凝土的鋪面成效 [1, 2]。

對於鋪面材料工程師而言，瀝青和瀝青膠漿，即瀝青－填縫料系統，的高溫質流性質是一重要的工程性質。鋪面材料工程師需要了解填縫料對瀝青黏度的影響，並確保填縫料顆粒能均勻分散於其間。瀝青膠漿的高溫質流性質是決定瀝青混凝土最佳拌合溫度的關鍵。而更為重要的是，瀝青膠漿的高溫質流性質可能做為鋪面成效的預測指標。因此在量測質流性質時，試驗的準確性和再現性就變得極為重要。目前工程界普遍使用旋轉式黏度儀來量測瀝青膠漿的高溫質流性質。過去的研究顯示 [3, 4]，使用旋轉式黏度儀量測時，瀝青膠漿的高溫行為常呈現剪力趨薄 (shear thinning) 的效應。在試驗期間，瀝青膠漿從初始的高黏度逐漸減少，直至黏度達到與剪變率無關的平衡穩態，即牛頓流行為。在試驗過程中，黏度有時甚至減少達一個數量級。

此種剪力趨薄的現象是由二個常相混淆的效應，即假塑性 (pseudoplastic) 和觸變性 (thixotropic) 所造成的 [5]。假塑性流指的是流體黏度隨著剪變率的增加而減少的行為；而觸變性流則指的是在連續剪力作用下，流體黏度隨著時間增加而減少的行為。這二個效應常因並存於流體中而難以區分。除了剪力趨薄的現象，鋪面材料工程師也關心旋轉式黏度儀所使用的傳統穩態流黏度方程式是否依然能適用於含有高比例填縫料的瀝青膠漿系統。

為了解決上述二個問題，本研究試圖使用計算流體力學模型 (Computational Fluid Dynamic model)，對旋轉式黏度儀進行數值模擬。藉由此一強大的數值技術和複雜的質流模式，將瀝青膠漿中假塑性和觸變性等不同的效應予以區隔，並且考慮含有不同比例之填縫料時對瀝青膠漿高溫質流行為所造成的影響。最後本研究將比較試驗與模擬的結果來加以驗證與分析。

## 貳、研究方法

本研究所有試驗均使用 Brookfield 旋轉式黏度儀進行實際量測。旋轉式黏度儀的基本原理是量測旋轉錘於瀝青試樣中維持一特定旋轉速率或剪變率下所需的扭矩。圖 1 為旋轉式黏度儀試驗槽和旋轉錘之示意圖。如果試驗槽和旋轉錘的尺寸已知，假設試驗槽和旋轉錘間距離各點的剪變率相同，則試樣的黏度可由扭矩和剪變率計算而得。本研究實驗的設計係著眼於造成黏度隨試驗時間遞減的潛在原因，填縫料對瀝青膠漿高溫質流性質的影響，以及試驗槽和旋轉錘間距離間黏度相同的假設是否成立。因此研究中使用針入度 85/100 之直餾瀝青作為基底瀝青，並且另行添加二種不同體積組成比例爐石粉 (10%、30%) 以拌製瀝青膠漿，基底瀝青和爐石粉的比重分別為 1.05 和 2.70，然後在二種試驗溫度和不同的剪變率作用下進行試驗以評估不同溫度和剪變率對瀝青和瀝青膠漿質流行為的影響。其中剪變率的大小是依據黏度儀所能提供的極限扭矩來決定。表 1 為本研究之實驗配置，此處填縫料採用體積比例的原因在於後續擴散理論應用的需要，利用瀝青膠漿各組成材料的重量和比重，得以計算拌製試驗所相應的體積比例。

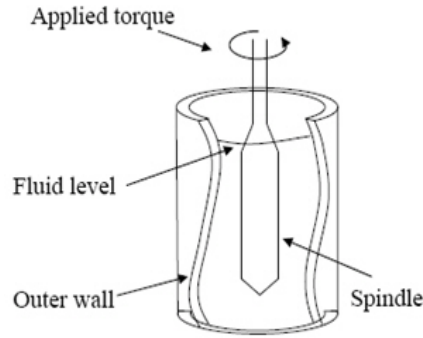


圖 1 旋轉式黏度儀之示意圖

表 1 本研究之實驗配置

| 瀝青或瀝青膠漿                | 體積組成比例<br>( $\phi$ , %) | 剪變率<br>( $\dot{\gamma}$ , 1/s) | 試驗溫度<br>( $^{\circ}\text{C}$ ) |
|------------------------|-------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 針入度 85/100 瀝青          | 0                       | 1.36, 6.8                      | 100                            |
|                        |                         | 51, 102                        | 150                            |
| 針入度 85/100 瀝青<br>+ 爐石粉 | 30                      | 1.36                           | 100                            |
|                        | 10                      | 51, 102                        | 150                            |

在數值模擬的部份，本研究使用計算流體動力商業軟體－FLUENT [6]。計算流體動力學 (Computational Fluid Dynamics, 簡稱 CFD) 是流體力學領域的重要技術之一，使用數值方法在電腦中對流體動力學的控制方程進行求解，從而可預測流場的流動。CFD 最基本的考慮是如何把連續流體在電腦上用離散的方式處理。方法之一是把空間區域離散化以形成一個立體網格，然後基於對流動粘滯流體的質量和動量守恆的假設以求解 Navier-Stokes 運動方程組 [7]。質量守恆可由下列微分方程所描述：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (1)$$

其中  $\rho$  是流體密度， $\mathbf{v}$  是流體速度。同樣地，動量守恆可由式 2 之微分方程所描述：

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \mathbf{v}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot \bar{\tau} \quad (2)$$

$$\bar{\tau} = \mu \left[ (\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \mathbf{v} \mathbf{I} \right] \quad (3)$$

其中  $p$  是壓力、 $\bar{\tau}$  是應力張量、 $\mu$  是動黏度、 $\mathbf{I}$  是單位張量。式 1、式 2 皆係卡氏座標。

由於旋轉式黏度儀為一軸對稱系統，因此使用適當的方法我們能將模型從三維簡化為二維軸對稱之旋轉系統。式 1、式 2 的簡化形式和細節可參考 FLUENT 使用手冊 [6]。式 3 等式右邊第二項代表流體之體積膨脹，此在本研究中可以忽略不計。因此對於不可壓縮之牛頓流體，剪應力與變形張量率 ( $\mathbf{D}$ ) 呈正比。變形張量率 ( $\mathbf{D}$ )，即式 3 等式右邊第一項，如式 4：

$$\mathbf{D} = \nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T \quad (4)$$

剪變率被定義為變形張量率的第二不變量：

$$\dot{\gamma} = \sqrt{\mathbf{D} : \mathbf{D}} \quad (5)$$

因此對於牛頓流體，剪應力和剪變率的關係即可表示為常見之型式，如式 6。

$$\tau = \mu \dot{\gamma} \quad (6)$$

然而過去使用旋轉式黏度儀量測之經驗顯示，瀝青膠漿的高溫行為常存在非牛頓流的行為，是以上述模型需要進一步的修正。首先假設瀝青初始的高黏度是因為觸變性所造成的。基於先前 Modigell 和 Koke 的研究成果 [8]，本研究使用 FLUENT 的使用者自訂函數 (UDFs) 增加一觸變性模型。雖然 Modigell 和 Koke 的研究是針對半固體合金之質流行為，但仍適用於本研究所探討的情況。本研究嘗試導入一個結構參數 ( $\kappa$ ) 來描述瀝青內部的結構特性。此結構參數的動力特徵可以如式 7 之一階反應式來表示。其中  $C$  是反應速率，並假設為一常數； $\kappa_e$  是已知剪變率下結構參數的平衡當量值。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\kappa) + \nabla \cdot (\mathbf{v}\kappa) = C \cdot (\kappa_e - \kappa) \quad (7)$$

為了計算瀝青的假塑性行為，黏度使用冪次方模式，即：

$$\eta = k \dot{\gamma}^{n-1} \kappa \quad (8)$$

其中  $k$  是稠度指標 (consistency index)； $n$  是決定流體行為的材料參數。

舉例來說， $n=1$  表示流體為牛頓流，而  $n<1$  則為一假塑性流體。在整個模擬過程中，結構參數從初始值  $\kappa_0$  逐漸減小至平衡當量值  $\kappa_e$ 。平衡當量值  $\kappa_e$  通常視為一剪變率的函數，如式 9。考慮使用旋轉式黏度儀量測瀝青黏度，當達到平衡狀態時，最終穩態黏度與剪變率無關，因此式 9 中的  $m$  應等於  $1-n$ 。

$$\kappa_e = \dot{\gamma}^m \quad (9)$$

從過往經驗與本研究試驗結果可知，瀝青－填縫料膠漿明顯擁有較高的黏度和較長的遞減時間，上述模式由於並未考慮填縫料的影響，因此可能無法適切地描述瀝青－填縫料膠漿系統。依據 Leighton 和 Acrivos 所提出的由剪力引起的擴散理論 [9, 10]，得以描述固體懸浮粒在流體中顆粒局部集中的變化情形。擴散過程包含二種作用：第一種作用是顆粒因為彼此經歷較多的碰撞而自高度集中區域擴散開來，此外顆粒將從高剪力區域向低剪力區域移動。這二種效應能以式 10 來表示。其中  $K_c$  為一常數， $d$  是顆粒平均直徑 (m)， $\phi$  是顆粒之體積組成比例。

$$J_c = -K_c d^2 \phi \nabla (\dot{\gamma} \phi) \quad (10)$$

第二種作用是顆粒將從高黏度區域向低黏度區域移動：

$$J_\eta = -K_\eta d^2 \frac{\dot{\gamma} \phi^2}{\eta} \nabla \eta \quad (11)$$

其中  $K_\eta$  亦為一常數。顆粒體積組成比例之傳播方程式，如式 12 所示：

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \cdot \left( \mathbf{v} + K_c d^2 \nabla \dot{\gamma} \right) \phi + d^2 \nabla \cdot \left( K_c \phi \dot{\gamma} + K_\eta \frac{\dot{\gamma} \phi^2}{\eta} \frac{d\eta}{d\phi} \right) \nabla \phi = 0 \quad (12)$$

考慮顆粒的影響，式 8 將修正為式 13，其中  $B$  為一常數。而若僅模擬純瀝青的情況，則  $\phi_0$ 、 $B$ 、 $K_c$ 、 $K_\eta$  和  $d$  均視為 0。

$$\eta = k \dot{\gamma}^{n-1} \kappa e^{B\phi} \quad (13)$$

### 參、試驗和模擬結果

CFD 模擬須要建立網格，本研究採用以旋轉錘中心為軸之二維軸對稱型式，如圖 2 所示。內部、外部和底部邊界均為束制邊界，其中內部邊界面乃為與旋轉錘的接觸面，所以設定施加一角速度以呈現試驗狀況下以固定剪變率旋轉錘的旋轉。

圖 3 為 Brookfield 旋轉式黏度儀於 100°C 的試驗結果。值得注意的是，無論是純瀝青膠泥或瀝青－填縫料的瀝青膠漿均顯示出黏度隨時間漸減的結果。此外純瀝青膠泥於低剪變率作用下 ( $ssr = 1.36 \text{ s}^{-1}$ )，其黏度漸減的程度大於在高剪變率作用者 ( $ssr = 6.8 \text{ s}^{-1}$ )。於低剪變率作用下純瀝青膠泥的初始黏度亦大於高剪變率作用者，不過二者的黏度均於約 15 分鐘後達到穩定。比較相同剪變率作用下 ( $ssr = 1.36 \text{ s}^{-1}$ )，純瀝青膠泥和瀝青－填縫料膠漿可知，純瀝青膠泥的黏度隨時間減少之比例大於瀝青－填縫料膠漿，且達穩定後瀝青－填縫料膠漿的黏度約為純瀝青膠泥黏度的 12 倍。這些現象皆顯示填縫料明顯提供瀝青的加勁效果。

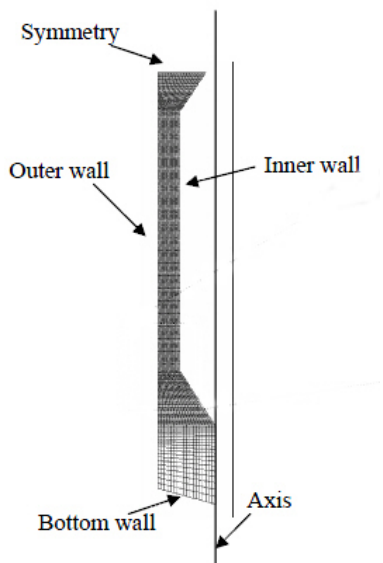


圖 2 本研究 CFD 為二維軸對稱網格

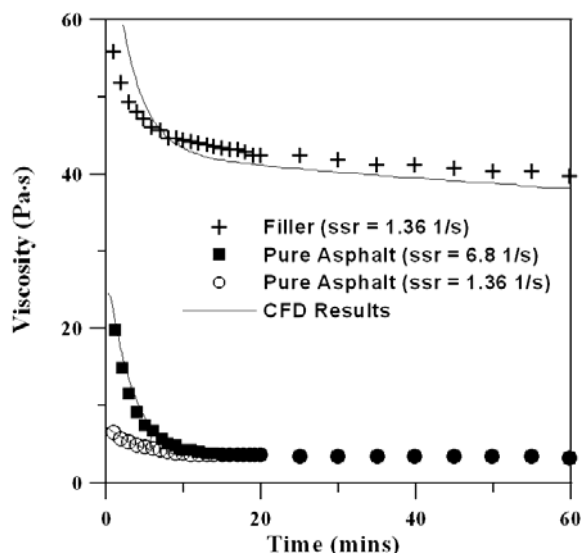


圖 3 Brookfield 旋轉式黏度儀於 100°C 的試驗結果

CFD 模擬所使用的各項參數，如表 2 所式。藉由式 9，當達到平衡狀態時黏度與剪變率無關，從圖 3 中純瀝青膠泥之最終穩態黏度可求得  $m$ 、 $n$ 。然後經由已知的  $m$ 、 $n$  和式 8 可得與剪變率無關的初始值  $\kappa_0$ 。至於常數  $B$ 、 $K_c$  和  $K_n$  亦可由擬合圖 3 瀝青－填縫料膠漿的黏度數據而得。如同圖 3 中純瀝青膠泥的黏度所呈現的，在不同剪變率作用下，以 CFD 模型模擬 20 分鐘的結果和實驗結果相當一致。相形之下，CFD 模擬瀝青－填縫料膠漿黏度漸減的效果就明顯不如預測純瀝青膠泥者，但是 CFD 模型仍然能掌握瀝青膠漿剪力趨薄的質流行為。

表 2 CFD 模擬使用的各項參數

|                         | 純瀝青膠泥                  | 瀝青-填縫料膠漿               |
|-------------------------|------------------------|------------------------|
| 稠度指標 ( $k$ )            | 3.672                  | 3.672                  |
| 材料參數 ( $n$ )            | 0.814                  | 0.814                  |
| 材料參數 ( $m$ )            | 0.168                  | 0.168                  |
| 反應速率 ( $C$ )            | $0.006 \text{ s}^{-1}$ | $0.006 \text{ s}^{-1}$ |
| 初始結構參數 ( $\kappa_0$ )   | 7.0                    | 1.7                    |
| 初始顆粒體積組成比例 ( $\phi_0$ ) | 0.0                    | 0.3                    |
| 常數 ( $B$ )              | —                      | 8.5                    |
| 常數 ( $K_c$ )            | —                      | 1.0                    |
| 常數 ( $K_\eta$ )         | —                      | 1.0                    |
| 填縫料平均粒徑 ( $d$ )         | —                      | $20 \mu\text{m}$       |

圖 4 為 Brookfield 旋轉式黏度儀於  $150^\circ\text{C}$  的試驗結果。與圖 3 比較，純瀝青膠泥或瀝青-填縫料的瀝青膠漿在試驗溫度  $150^\circ\text{C}$  下黏度隨時間漸減的比例均大於試驗溫度  $100^\circ\text{C}$  的試驗結果。此外另一與試驗溫度  $100^\circ\text{C}$  的試驗結果相異之處是，在不同的剪變率作用下，瀝青黏度隨時間漸減的程度並無明顯的差異。這意味著瀝青的假塑性行為似與溫度相關，較高的試驗溫度將減少假塑性對瀝青黏度漸減的影響。而和圖 3 相同的是，純瀝青膠泥的黏度約在 15 分鐘後達到穩定，但瀝青-填縫料膠漿的黏度則在 15 分鐘後仍持續緩慢減少，至試驗結束時仍未達穩定，這也顯示傳統的穩態流黏度方程式並不能適用於含有填縫料的瀝青膠漿系統。

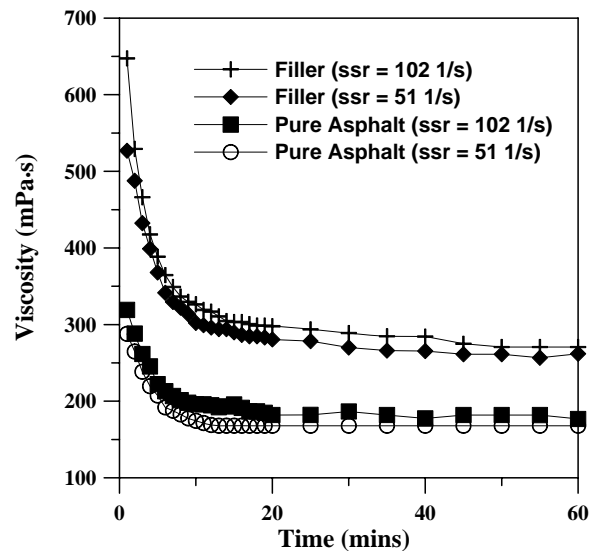
圖 4 Brookfield 旋轉式黏度儀於  $150^\circ\text{C}$  的試驗結果

圖 5 和圖 6 為在試驗溫度 100°C 下，旋轉式黏度儀試驗槽內瀝青膠漿之 CFD 模擬結果。其中內部邊界面乃為與旋轉錘的接觸面，外部邊界面則是指試驗樣品槽之邊緣壁面，如圖 2 所示。對照圖 5 和圖 6 可知，填縫料的顆粒移動對於黏度儀內部至外部邊界的黏度變異具有顯著的影響。對於瀝青－填縫料膠漿，如圖 5，黏度儀內的黏度並非為一定值，所謂固定的黏度僅是一項假設。同樣的，也能從圖 6 觀察到顆粒之體積組成比例 ( $\phi$ ) 自試驗槽內部至外部邊界逐漸提高，即填縫料顆粒在受剪作用下向外部移動。這也說明了圖 3 中瀝青－填縫料膠漿在前 10 分鐘初始黏度的快速減少是由於瀝青流體之觸變性所造成的，而後黏度的持續減少主要是來自於瀝青內填縫料的移動，此時觸變性效應已不再發揮明顯的作用。

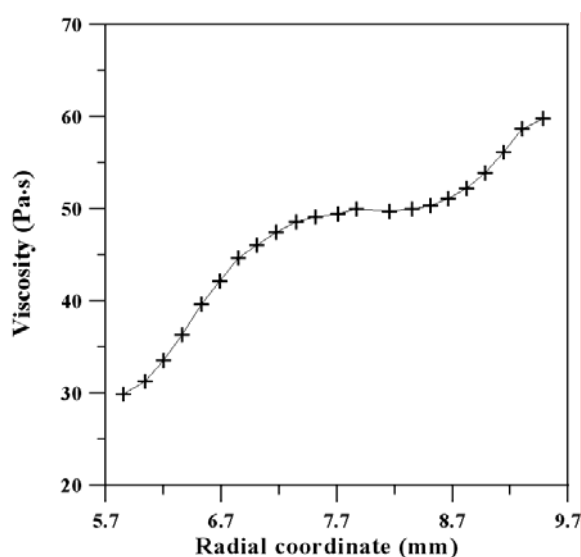


圖 5 黏度儀內部至外部邊界的黏度變異

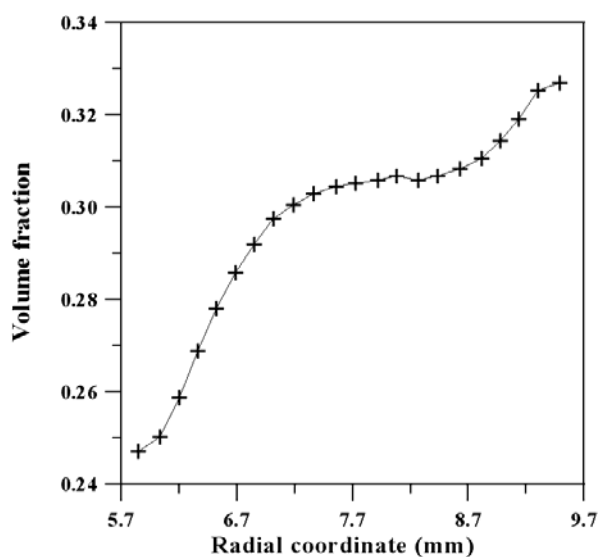


圖 6 黏度儀內部至外部邊界顆粒之體積組成比例之變異



## 肆、結論

本研究顯示瀝青在旋轉式黏度儀中的高溫質流行為本身極為複雜，尤其是添加填縫料後更是如此。藉由 CFD 模型可知，純瀝青膠泥具剪力趨薄的行為，此行為乃是由假塑性和觸變性之聯合效應所造成的，而當達到穩態狀態時，即呈現牛頓流行為。在未達到穩態流之前，由於二種效應的參與，將不易預測瀝青的暫態黏度。但整體而言，在不同剪變率作用下，CFD 模擬純瀝青膠泥的黏度和實驗結果相當一致。

一旦添加填縫料，顆粒的存在會干擾瀝青原有的質流行為，瀝青－填縫料膠漿的黏度持續緩慢減少，至試驗結束時仍未達穩定，這也顯示傳統的穩態流黏度方程式並不能適用於含有填縫料的瀝青膠漿系統。雖然 CFD 模擬瀝青－填縫料膠漿黏度漸減的效果明顯不如預測純瀝青膠泥者，但是 CFD 模型仍然能掌握瀝青膠漿質流行為中剪力趨薄的特性。瀝青膠漿中填縫料顆粒的移動明顯長時間持續影響瀝青黏度的漸減，且顆粒移動對於黏度儀內部至外部邊界的黏度變異亦具有顯著的影響。對照實際試驗結果可知，使用適當的 CFD 模型能夠量化和模擬這些效應。

比較二種不同溫度的試驗結果可知，試驗溫度 150°C 時在不同的剪變率作用下，瀝青黏度隨時間漸減的程度並無明顯的差異。這顯示瀝青的假塑性行為似與溫度相關，較高的試驗溫度將減少假塑性對瀝青黏度漸減的影響。

## 參考文獻

1. Buttlar, W.G., Bozkurt, D., Al-Khateeb, G.G. and Waldhoff, A.S. (1999). Understanding asphalt mastic behavior through micromechanics. *Journal of the Transportation Research Board*, 1681, 157-166.
2. Craus, J., Ishai, I., and Sides, A. (1976). Some physiochemical aspect of the effect and role of the filler in bituminous paving mixtures. *Proc. Association of Asphalt Paving technologists, AAPT*, 45, 558-588.
3. Airey, G. and Westwood, D. (2004). High temperature viscosity of polymer and filler modified binder systems. *Proceedings of the 3rd Eurasphalt and Eurobitume Congress*, 2, 1599-1608.
4. 蕭志銘，林樹豪 (1997)。老化作用對瀝青質流性質之影響。 *土木水利季刊*，23 (4)，7-25。
5. Khayat, K.H., Saric-Coric, M. and Liotta, F. (2002). Influence of thixotropy on stability characteristics of cement grout and concrete. *ACI Materials Journal*, 99 (3), 234-241.
6. Fluent Inc (2003). *Fluent user's guide*. USA, NH: Lebanon.
7. Ferziger, J. and Peric, M. (1997). *Computational methods for fluid dynamics*. Berlin: Springe-Verlag.
8. Modigell, M. and Koke, J. (1999). Time-dependent rheological properties of semi-solid metal alloys. *Mechanics of Time-Dependent Materials*, 3, 15-30.
9. Leighton, D. and Acrivos, A. (1987). The shear-induced migration of particles in concentrated suspensions. *Journal of the Fluid Mechanics*, 181, 415-439.
10. Wallevik, J.E. (2005). Thixotropic investigation on cement paste: Experimental and numerical approach. *Journal Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 132, 86 - 99.

