

行政院國家科學委員會專題研究計畫 期中進度報告

磁流變體之介觀理論研究(1/2)

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC91-2211-E-002-080-

執行期間：91年08月01日至92年07月31日

執行單位：國立臺灣大學土木工程學系暨研究所

計畫主持人：葉超雄

共同主持人：陳國慶

報告類型：精簡報告

報告附件：出席國際會議研究心得報告及發表論文

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 92 年 6 月 3 日

行政院國家科學委員會專題研究計畫期中報告

磁流變流體之介觀理論研究(1/2)

Research on Mesoscopic Theory of Magnetorheological Fluids

計畫編號：NSC 91-2211-E-002-080-

計畫期限：91年8月1日至92年7月31日

主持人：葉超雄 教授 台灣大學土木工程學系
陳國慶 副教授 暨南國際大學土木工程學系

一、 中文摘要

近年來隨著科技的日新月異，面對材料介尺度的問題已不可避免。另一方面，磁流變流體的應用研究隨著其性能的提升而受到眾人的注目。為了進一步了解磁流變流體在磁場下之力學行為，以做為爾後在土木工程領域上應用的依據，此外並期望能進入介尺度的研究領域而不與科技進展相脫節，本研究計畫之主要目的在採用介觀理論探討磁流變流體的行為。

磁流變流體與液晶材料或超導體具有極密切之相似性，三者皆具有內部之結構，而超導體乃最先為研究人員利用介尺度所探討之材料，其在介尺度下之特有表徵為表面效應、小尺寸效應和宏觀量子效應。磁流變流體與液晶材料亦可利用介觀理論以探討其行為。由現有文獻可知液晶材料之介觀理論可統合各種液晶材料之宏觀理論，因此利用介觀理論可擴展磁流變流體的宏觀理論，並為其找到力學基礎。

建構宏觀與微觀之橋樑為研究人員之長遠目標，磁流變流體的三種尺度之研究可做為分析其他新型材料之範例，亦為了解力學體系運作之途徑。其研究成果預期將為工程界與學界提供有用之資訊與思維方法，並可做為進一步努力的方向與準則。

關鍵詞：介觀理論、磁流變流體、微觀理論

Abstract

Recently, with the progress of technology, we will inevitably face some problems of materials on the mesoscopic scale. On the other hand, with the promotion of performance of magnetorheological (MR) fluids, the researches for application of these kinds of fluids have attracted much attention. To get a further understanding of how the MR fluids respond in the presence of a magnetic field, to

provide a direction to which leads the application of these fluids in the field of civil engineering, and to enter the research realm of mesoscopic scale, we will adopt the mesoscopic concept to deal with the mechanics of MR fluids.

MR fluids have a close resemblance with liquid crystals and superconductors in that they all possess internal microstructures. Superconductors have been studied on the mesoscopic scale whose representations include the surface, small scale, and macroscopic quantum effects. MR fluids and liquid crystals can also be analyzed by the mesoscopic approach. It is well known that the different macroscopic theories of liquid crystals can be deduced from the mesoscopic theory. Therefore, we can expand the development of macroscopic theories and find the mechanical base of macroscopic approach by the use of mesoscopic concept.

Constructing the bridge between the microscopic and macroscopic theories is a long-term goal for researchers. The three scales of studies in MR fluids can serve as a paradigm of studying new sorts of materials and as a tool of understanding the operations of mechanics system. We expect that this research will provide related science and the engineering realm with useful information and thoughts and with a further way for advance studies.

Keywords: Mesoscopic Theory, Magnetorheological Fluids, Microscopic Theory

二、目的

本研究計畫是接續之前探討結構工程上，具未來應用潛力做為智慧型構件之磁流變流體的研究，並更進一步發展磁流變流體的介觀(mesoscopic)理論，此介觀乃意指介於宏觀(macroscopic)與微觀(microscopic)之間。

隨著現代科技之進步，奈米材料為現今研究之重點。奈米粒子稱為超微顆粒，一般是指尺寸在1~100nm間的粒子，是處在原子簇和宏觀物體交界的過渡區域，從通常關於微觀和宏觀的觀點看，這樣的系統既非典型的微觀系統，亦非典型的宏觀系統，是一種典型的介觀系統，它具有表面效應、小尺寸效應和宏觀量子隧道效應。在過去十年左右，半導體及金屬材料的微製造過程已進步到奈米尺度。空間度上的壓縮可製造量子井(quantum well)、量子線(quantum wire)與量子點(quantum dot)，各種維度的半導體材料。排列上的規則度則發展出各種宏觀尺度之間，稱之介尺度(mesoscale)。然而介尺度物理卻讓人們十分驚訝，具有許多新現象。當電子被限制在一個足夠小尺度之半導體運動時，它碰撞參雜物的機率很小時，量子同相(quantum coherence)效果會出現。此時，它的動力現象與宏觀材料中的不同。當許多小的量子點經分子導線聯結成超晶格結構時，它的電子物理行為將會是全新的。若材料是磁性的，則其介尺度行為也與宏觀磁性材料不同。此時各別顆粒就是一整個磁區域而會展現量子穿隧效應與超順磁現象。若介

尺度材料作周期性排列，則其光學性質可能會產生例如半導體行為，有些頻率不能穿透，稱之為光晶材料(photonic band material)，這方面的研究方興未艾。

這些介尺度的物理，已形成最近十年凝態物理研究的新方向。它不但源自電子蝕刻技術發展，也將對未來光電材料技術有長遠的影響，是二十一世紀重要核心技術。尤有興趣的是，介尺度物裡並不只是技術問題而言，它有許多重要的物理問題尚未解決。材料的微小化已經是一個不可逆轉的趨勢，奈米材料科學的研究，也就是順應這種趨勢而發展出來的，可預期在二十一世紀，我們日常週遭生活中，都將充滿著微小化的元件。

對於有微小顆粒或特異電磁性質而具微結構之材料，如液晶材料、超導材料或磁流變流體等，採取介尺度之描述，將較宏觀尺度描述更為精準，亦較微觀尺度描述更容易處理。本研究乃嘗試利用介觀尺度描述磁流變流體的行為，而具有類似微結構之液晶材料與超導材的介觀研究方法，將成為本研究所遵循之參考方向。此外對於磁流變流體所組成之智慧型結構的後續實驗研究，尤以波傳性質之先驅性研究，亦將於本計畫內做進一步之探討。

三、結果與討論

本研究所依循之工具為連體力學或更為廣義之說法乃為熱力學。熱力學並非為一發展成熟之科學，事實上，學界對於熱力學所提供在不可逆過程中之資訊是相當不滿意的，因為吾人需要許多假設的前題(如準平衡、局部平衡等)才可處理此類課題。當然對於平衡態熱力學而言，前人已累積了許多豐富的研究成果可讓後人依循，如宏觀之平衡態熱力學與微觀之統計力學。在平衡態之下，所有物理量皆具清楚之定義，如溫度與內能等。藉由平衡態之明確定義，我們可以探討非平衡時之可逆過程，即假設可逆過程為許許多多之平衡態所組成。近年來，我們更發現了可逆過程中物理量之演化具備了 Hamilton 結構，因此熱力學中的可逆過程之探討與古典力學中之質點動力學之討論具備了相同之基礎。此基礎之顯現在於兩者具有 Poisson-bracket 之架構，其特徵為 Poisson-bracket 的反對稱性、雙線性與滿足 Jacobi 恆等式。而對於不同問題之 Poisson bracket 的表示式，本研究團隊發展了座標轉換法或可稱為 Lagrangian-Eulerian 轉換法，可清楚地由物理概念得到許多材料之 bracket 表示式。現在所留下之問題乃在於如何系統地描述非可逆過程，此乃熱力學至今最大之挑戰，許多研究學者最近認為由微觀角度去探討此課題似乎為一可行之途徑。

對於磁流變流體介觀尺度之研究上，我們採用了不可逆熱力學的方法，將磁流變流體內磁性顆粒之微結構利用一類似於宏觀內變數向量之介觀向量來描述，而介觀平衡方程式可以下式表示

$$\begin{aligned}
& (\partial/\partial t)\{ \dots(\bullet)[w(\bullet)v(\bullet) + \ddot{Q}(\bullet)] \} \\
& + \nabla_x \cdot \{ \dots(\bullet)v(\bullet)[w(\bullet)v(\bullet) + \ddot{Q}(\bullet)] \} \\
& + \nabla_n \cdot \{ \dots(\bullet)u(\bullet)[w(\bullet)v(\bullet) + \ddot{Q}(\bullet)] \} \\
& = \dots(\bullet)K(\bullet) + \nabla_x \cdot S(\bullet)
\end{aligned}$$

若為質量守恆，則

$$w(\bullet) = 0, \ddot{O} = 1, K(\bullet) = 0, S(\bullet) = 0$$

若為動量守恆，則

$$w(\bullet) = 1, \ddot{O} = 0,$$

$$K(\bullet) = k(\bullet) = \text{external accelation},$$

$$S(\bullet) = T^T(\bullet) = \text{transpose stress tensor}$$

若為角動量守恆，則

$$w(\bullet) = x \times, \ddot{O} = I n \times u(\bullet),$$

$$K(\bullet) = x \times k(\bullet) + n \times g(\bullet),$$

$$S(\bullet) = [x \times T(\bullet)]^T + n \times \delta(\bullet)$$

若為能量守恆，則

$$w(\bullet) = (1/2)v(\bullet),$$

$$\ddot{O} = (1/2)I[n \times u(\bullet)]^2 + \nu(\bullet),$$

$$K(\bullet) = k(\bullet) \cdot v(\bullet) + g(\bullet) \cdot u(\bullet) + r(\bullet), \quad \text{若為方向自旋守恆，則}$$

$$S(\bullet) = v(\bullet) \cdot T(\bullet) + u(\bullet) \cdot \delta(\bullet) - q(\bullet)$$

$$(\partial/\partial t)[\dots(\bullet)s(\bullet)]$$

$$+ \nabla_x \cdot [\dots(\bullet)v(\bullet)s(\bullet) - (n \times \delta(\bullet))^T]$$

其中， $s(\bullet)$:介觀自旋密度， $\delta(\bullet)$:偶應力，

$$+ \nabla_n \cdot [\dots(\bullet)u(\bullet)s(\bullet)] = \dot{a}:T(\bullet) + \dots(\bullet)n \times g(\bullet)$$

$T(\bullet)$:介觀應力張量， $g(\bullet)$:偶力。我們藉由此平衡方程式可以容易地得到磁流變流體之介觀平衡方程式。為了得到總體之行為表現，組成方程式亦不可或缺，然此研究亦於進行中。

之後第二年之研究除了探討組成方程式外，我們將對於介觀尺度之 Hamilton 結構與變分原理進行深入之分析。值得一提的是此變分原理乃為最近與另一研究群所共同提出之理論架構，此方法不同於現有之變分原理，且與熱力學第一與第二定律相容，由此變分原理可分析離散之質點系統、連續體之剛體系統與連續體之可變形體系統。我們相信其將為連體物理發展歷史中一重要之成就。然其與其它熱力學理論之關連性亦待後續之努力。

四、成果自評

本計畫已執行一年，目前本研究團隊已成功地由理論上推導完成基本之磁流變流體介觀理論平衡方程式。在此研究中，我們首先提出不同於液晶材料中之

五維分佈函數而已另一六維分佈函數所取代，主要原因在於描述磁流變流體中之磁性顆粒的分佈除了與三維座標有關外，亦與顆粒間平均距離與方向有關。其在衍生之研究課題甚多，新的物理現象、研究方法與其應用層面急需探索。現有之研究成果將再予以擴充並將著文投稿於國際期刊，並期待此研究能成為學術界一重要貢獻。

五、參考文獻

- (1) Blenk, S., Ehrentraut, H., Muschik, W. (1992) Macroscopic constitutive equations for liquid crystals induced by their mesoscopic orientation distribution, *Int. J. Engng Sci.* 30, 1127-1143
- (2) Blenk, S., Muschik, W. (1991) Orientational balance for nematic liquid crystals, *J. Non-Equilib Thermodyn.* 16, 67-87
- (3) Chen, K.C., Yeh, C.S. (2001) Extended irreversible thermodynamics approach to magnetorheological fluids, *J. Non-Equilib. Thermodyn.* 26, 355-372
- (4) Chen, K.C., Yeh, C.S. (2002) Description of magnetorheological behavior with the internal variable theory, *Int. J. Engng. Sci.* 40, 461-482
- (5) Chen, K.C., Yeh, C.S. (2002) A mixture model for magnetorheological materials. *Continuum Mech. Thermodyn.* 15, 495-510
- (6) Eringen, A.C. (1966) Theory of micropolar fluids, *J. Math. Mech.* 16, 1-18
- (7) Eringen, A.C. (1980) Theory of anisotropic micropolar fluids, *Int. J. Engng. Sci.* 18, 5-17
- (8) Eringen, A.C. (1991) Continuum theory of dense rigid suspensions, *Rheologica Acta.* 30, 23-32
- (9) Eringen, A.C. (2000) A unified continuum theory for electrodynamics of polymeric liquid crystals, *Int. J. Engng. Sci.* 38, 959-987
- (10) Müller, I., Ruggeri, T. (1993) *Extended thermodynamics*, Springer-Verlag
- (11) Muschik, W., Kaufmann, M. (1994) Quantum-thermodynamical description of discrete non-equilibrium systems, *J. Non-Equilib Thermodyn.* 19, 76-94
- (12) Muschik, W., Ehrentraut, H., Papenfuss, C., Blenk, S. (1996) Structural roots of different phenomenological theories of liquid crystals, *ZAMM* 76, S4 129-131
- (13) Muschik, W., Ehrentraut, H., Papenfuss, C. (1997) Mesoscopically derived orientation dynamics of liquid crystals, *J. Non-Equilib Thermodyn.* 22, 285-298
- (14) Muschik, W., Su, B. (1997) Mesoscopic interpretation of Fokker-Plank equation describing time behavior of liquid crystal orientation, *J. Chem. Phys.* 107, 580-584
- (15) Papenfuss, C., Muschik, W. (1997) Evolution criterion in nonequilibrium and a variational principle for equilibrium states of free-standing liquid crystalline films, *Phys. Rev. E.* 56, 4275-4281
- (16) Yeh, C.S., Chen, K.C. (1997) A thermodynamic model for magnetorheological fluids, *Continuum Mech. Thermodyn.* 9, 273-291