

# LINEAR TO NON-LINEAR RHEOLOGY OF WHEAT FLOUR DOUGH

TREVOR S.K. NG<sup>1</sup>, GARETH H. MCKINLEY<sup>1\*</sup>, MAHESH PADMANABHAN<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Hatsopoulos Microfluids Laboratory, Dept of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA 02139, USA

<sup>2</sup>Kraft Foods Global Inc., 801 Waukegan Road, Glenview, Illinois 60025, USA

\* Email: [gareth@mit.edu](mailto:gareth@mit.edu)

Fax: x1.617.258.8559

Received: 16.8.2006, Final version: 19.9.2006

## ABSTRACT:

We provide an overview of transient extensional rheometry techniques for wheat flour doughs in which the deformation and material response is well defined. The behavior of a range of model doughs was explored with a Filament Stretching Extensional Rheometer (FISER). The measurements were also compared to data obtained with a new wind-up extensional rheometer; the SER universal testing platform. A simple empirical constitutive equation, which allows characterization of the experimental results with a small number of parameters, is presented to describe the resulting measurements. To characterize the relaxation modulus of the doughs, small amplitude shear tests were performed on samples that have been shear-mixed in a mixograph for varying lengths of time. The linear viscoelastic properties were found to exhibit a broad power-law dependence on the imposed oscillatory frequency that is very reminiscent of that exhibited by a critical gel. The critical gel model of Winter and Chambon [1, 2] was used as the basis for constructing a non-linear constitutive equation for the material stress by combining the relaxation modulus for the critical gel with a Lodge rubber-like liquid form for the kinematics. Transient uniaxial extensional data recorded from the FISER and SER instruments were then compared to the predictions of the constitutive equation. The model captures the initial power-law response and subsequent strain-hardening; however additional physics is required to describe the rheological phenomena at very large Hencky strains, including finite extensibility effects and filament rupture in extensional flows.

## ZUSAMMENFASSUNG:

Wir geben eine Übersicht über Techniken der transienten Dehnrheometrie für Weizenmehlteig, bei denen die Deformation und die Antwort des Materials wohl definiert sind. Das Verhalten einer Serie von Weizenmehlteigmodellsubstanzen wurde mit dem sog. Filament Stretching Extensional Rheometer (FISER) untersucht. Die Messungen wurden auch mit Daten verglichen, die mit einem sog. Wind-Up-Rheometer erhalten wurden, der SER Universal Testing Platform. Eine einfache empirische Konstitutivgleichung wurde entwickelt, um die Messresultate zu beschreiben, die die Charakterisierung der experimentellen Resultate mit Hilfe von wenigen Parametern erlaubt. Um den Relaxationsmodul von Weizenmehlteig zu charakterisieren, wurden Oszillationsmessungen bei kleiner Amplitude mit Weizenmehlteig durchgeführt, der bei unterschiedlicher Dauer in einem Mixograph durch Scherung gemischt worden war. Die linear-viskoelastischen Eigenschaften zeigten eine breite Potenzgesetzabhängigkeit als Funktion der Frequenz, die ähnlich dem Verhalten eines kritischen Gels ist. Das Modell des kritischen Gels von Winter und Chambon [1, 2] wurde als Grundlage genutzt, um eine nichtlineare Konstitutivgleichung für die Materialspannung zu erhalten durch die Kombination des Relaxationsmoduls des kritischen Gels mit einer Lodge-Gummi-Flüssigkeit-Gleichung für die Kinematik. Transiente uniaxiale Dehndaten des FISER und des SER wurden dann mit den Vorhersagen der Konstitutivgleichung verglichen. Das Modell beschreibt die anfängliche Potenzgesetz-Antwort und die nachfolgende Dehnverfestigung. Jedoch ist zusätzliche Physik notwendig, um die Phänomene bei grossen Dehnungen zu beschreiben einschliesslich der Effekte basierend auf der endlichen Verstreckbarkeit und des Reissens des Filaments in der Dehnströmung.

## RÉSUMÉ:

Nous offrons une vue d'ensemble des techniques de rhéométrie extensionnelle transitoire pour les pâtes de farine de blé pour lesquelles la déformation et la réponse du matériau sont bien définies. Le comportement d'une série de pâtes modèles a été exploré à l'aide du rhéomètre extensionnel d'éirement de filament (FISER). Les mesures ont également été comparées avec des données obtenues à l'aide d'un rhéomètre à enroulement, la plateforme universelle de tests SER. Une simple équation constitutive empirique, qui permet la caractérisation des résultats expérimentaux avec un petit nombre de paramètres, est présentée afin de décrire les mesures obtenues. Pour caractériser le module de relaxation des pâtes, des tests oscillatoires de petite amplitude ont été réalisés sur des pâtes qui ont été cisailées-mixées dans un mixographe durant diverses périodes de temps. Les propriétés viscoélastiques linéaires exhibent une vaste dépendance avec la fréquence oscillatoire imposée, qui est très ressemblante avec les propriétés présentées par un gel critique. Le modèle de gel critique de Winter et Chambon [1, 2] a été utilisé comme base pour construire une équation constitutive non linéaire de la contrainte du matériau, en combinant le module de relaxation du gel critique avec un modèle liquide caoutchouteux de type Lodge pour la description cinématique. Les données en extension uniaxiale transitoire mesurées avec le FISER et le SER ont été comparées aux prédictions de l'équation constitutive. Le modèle capture la réponse initiale de type loi de puissance ainsi que le comportement rhéo-durcissant qui s'en suit ; toutefois, la description du comportement à très grandes déformations requiert de la physique supplémentaire, qui inclut des effets d'extensibilité finie et de la rupture de filament dans les écoulements extensionnels.

**Key words:** Extensional rheology, filament stretching, strain-hardening, damping function, gel equation

© Appl. Rheol. 16 (2006) 265–274

This is an extract of the complete reprint-pdf, available at the Applied Rheology website  
<http://www.appliedrheology.org>

This is an extract of the complete reprint-pdf, available at the Applied Rheology website  
<http://www.appliedrheology.org>

Applied Rheology  
Volume 16 · Issue 5

265

- of wheat flour dough and baking quality. *Journal of Cereal Science* 39 (2004) 231-245.
- [12] Sliwinski EL, Kolster P, Prins A, van Vliet T: On the relationship between gluten protein composition of wheat flours and large-deformation properties of their doughs. *Journal of Cereal Science* 39 (2004) 247-264.
- [13] Uthayakumaran S, Newberry M, Phan-Thien N, Tanner R: Small and large strain rheology of wheat gluten. *Rheologica Acta* 41 (2002) 162-172.
- [14] Tschoegl NW, Rinde JA, Smith TL: Rheological Properties of Wheat Flour Doughs I. *J. Sci. Food Agric.* 21 (1970) 65-70.
- [15] Tschoegl NW, Rinde JA, Smith TL: Rheological Properties of Wheat Flour Doughs II. *Rheol. Acta* 9 (1970) 223-238.
- [16] Dobraszczyk BJ, Morgenstern MP: Rheology and the breadmaking process. *Journal of Cereal Science* 38 (2003) 229-245.
- [17] Kokelaar JJ, van Vliet T, Prins A: Strain Hardening Properties and Extensibility of Flour and Gluten Doughs in Relation to Breadmaking Performance. *Journal of Cereal Science* 24 (1996) 199-214.
- [18] Sliwinski EL, Kolster P, van Vliet T: Large-deformation properties of wheat dough in uni- and biaxial extension. Part I. Flour dough. *Rheologica Acta* 43 (2004) 306-320.
- [19] Sliwinski EL, van der Hoef F, Kolster P, van Vliet T: Large-deformation properties of wheat dough in uni- and biaxial extension. Part II. Gluten dough. *Rheologica Acta* 43 (2004) 321-332.
- [20] Huang HM, Kokini J: Measurement of Biaxial Extensional Viscosity of Wheat-Flour Doughs. *Journal of Rheology* 37 (1993) 879-891.
- [21] Bagley EB, Dintzis FR, Chakrabarti S: Experimental and conceptual problems in the rheological characterization of wheat flour doughs. *Rheologica Acta* 37 (1998) 556-565.
- [22] Hibberd GE: Dynamic viscoelastic behaviour of wheat flour doughs. Part II effects of water content on the linear region. *Rheologica Acta* 9 (1970) 497-500.
- [23] Hibberd GE: Dynamic viscoelastic behaviour of wheat flour doughs. Part III: The influence of starch granules. *Rheologica Acta* 9 (1970) 501-505.
- [24] Hibberd GE, Parker NS: Dynamic Viscoelastic Behavior Of Wheat-Flour Doughs. Part IV: Non-linear Behavior. *Rheologica Acta* 14 (1975) 151-157.
- [25] Hibberd GE, Wallace WJ: Dynamic Viscoelastic Behaviour of Wheat Flour Doughs. Part I. Linear aspects. *Rheologica Acta* 5 (1966) 193-198.
- [26] McKinley GH, Sridhar T: Filament stretching rheometry of complex fluids. *Annual Review Of Fluid Mechanics* 34 (2002) 375-415.
- [27] Szabo P: Transient filament stretching rheometer. 1. Force balance analysis. *Rheologica Acta* 36 (1997) 277-284.
- [28] Szabo P, McKinley GH: Filament stretching rheometer: Inertia compensation revisited. *Rheologica Acta* 42 (2003) 269-272.
- [29] Anna SL, McKinley GH, Nguyen DA, Sridhar T, Muller SJ, Huang J, James DF: An interlaboratory comparison of measurements from filament-stretching rheometers using common test fluids. *Journal of Rheology* 45 (2001) 83-114.
- [30] Sentmanat M, Muliawan EB, Hatzikiriakos SG: Fingerprinting the processing behavior of polyethylenes from transient extensional flow and peel experiments in the melt state. *Rheologica Acta* 43 (2004) 1-15.
- [31] Sentmanat ML, Wang BN, McKinley GH: Measuring the transient extensional rheology of polyethylene melts using the SER universal testing platform. *Journal of Rheology* 49 (2005) 585-606.
- [32] Sentmanat ML: Miniature universal testing platform: from extensional melt rheology to solid-state deformation behavior. *Rheologica Acta* 43 (2004) 657-669.
- [33] Schulze JS, Lodge TP, Macosko CW, Hepperle J, Muenstedt H, Bastian H, Ferri D, Groves DJ, Kim YH, Lyon M, Schweizer T, Virkler T, Wassner E, Zoetelief W: A comparison of extensional viscosity measurements from various RME rheometers. *Rheologica Acta* 40 (2001) 457-466.
- [34] Li W, Dobraszczyk BJ, Schofield DJ: Stress relaxation behavior of wheat dough, gluten, and gluten protein fractions. *Cereal Chemistry* 80 (2003) 333-338.
- [35] Phan-Thien N, Safari-Ardi M, Morales-Patino A: Oscillatory and simple shear flows of a flour-water dough: A constitutive model. *Rheologica Acta* 36 (1997) 38-48.
- [36] Phan-Thien N, Safari-Ardi M: Linear viscoelastic properties of flour-water doughs at different water concentrations. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics* 74 (1998) 137.
- [37] Gabriele D, de Cindio B, D'Antona P: A weak gel model for foods. *Rheologica Acta* 40 (2001) 120.
- [38] Bird RB, Armstrong RC, Hassager O: Dynamics of polymeric liquids - Fluid Mechanics. Vol. 1, New York, Wiley (1987).
- [39] Barnes HA: The yield stress - a review or 'παντα ρει' - everything flows? *Journal Of Non-Newtonian Fluid Mechanics* 81 (1999) 133-178.

- [40] Boger DV: The Diabolical Case of the Recurring Yield Stress. *Applied Rheology* 14 (2004) 40-45.
- [41] Hutchinson JW, Obrecht H: Tensile Instabilities in Strain-Rate Dependent Materials. in *Advances in research on the Strength and fracture of materials / Fourth International Conference on Fracture*. Waterloo, Canada (1977).
- [42] McKinley GH, Hassager O: The Considered condition and rapid stretching of linear and branched polymer melts. *Journal of Rheology* 43 (1999) 1195-1212.
- [43] Letang C, Piau M, Verdier C: Characterization of wheat flour-water doughs. Part I: Rheometry and microstructure. *Journal Of Food Engineering* 41 (1999) 121-132.
- [44] Belton PS: On the elasticity of wheat gluten. *Journal Of Cereal Science* 29 (1999) 103-107.
- [45] Ewart JAD: Hypothesis for how linear glutenin holds gas in dough. *Food Chemistry* 32 (1989) 135-150.
- [46] Singh H, MacRitchie F: Mini review: Application of Polymer Science to Properties of Gluten. *Journal of Cereal Science* 33 (2001) 231.

