الباب الخامس

خصائص الجريان اللزج
Viscous Flow Properties

(٥,١) مقدمة

سلوك جريان المبلمرات المائعة مهم جدا لفني التشكيل ومول المواد الخام والمستهلك وعلماء المبلمرات. هذا السلوك يحدد إمكانية وقابلية المادة لعمليات التصنيع و ظروف التشكيل المناسبة والإجهادات غير المرغوبة المتبقية وكذلك تصنيف المواد والمساعدة في تطويرها. كما ذكر سابقا، المبلمرات مواد مزجة مما يعني أن لديها كلا من خاصية اللزوجة (مائعة) وخاصية المرونة (صلبة). في الحالة السائلة تتغلب خاصية اللزوجة.

اللزوجة من الخصائص السهلة القياس والشائعة الاستعمال لتوصيف اللدائن الحرارية (Thermoplastics). تعتمد اللزوجة على العوامل الآتية:

١- ظروف الجريان: وهي معدل القص والحرارة والضغط

٢- خواص المادة: وهي التركيب الكيميائي للمبلمر والوزن الجزيئي وتوزيعه وتفرعات السلاسل الطويلة وكذلك طبيعة وتركيز المقسيات والإضافات وغيرها.

سنحاول تقديم شرح موجز عن تأثير كل مما سبق على اللزوجة.

اللزوجة هي خاصية المادة التي تمثل المقاومة للتشوه المتواصل. في اللزوجة، يتعلق الإجهاد بمعدل التشوه أو الانفعال، بينما في المرونة يتغير الإجهاد طردياً مع

التشوه. هذا يعني أن اللزوجة متعلقة بجريان السائل وليست بالمواد الصلبة. أبسط أنواع الجريان تمثل بعلاقة خطية بين التشوه والإجهاد كالآتي :

الإجهاد = اللزوجة *معدل الانفعال

$$\sigma = \eta\dot{\gamma} \qquad (٥,١)$$

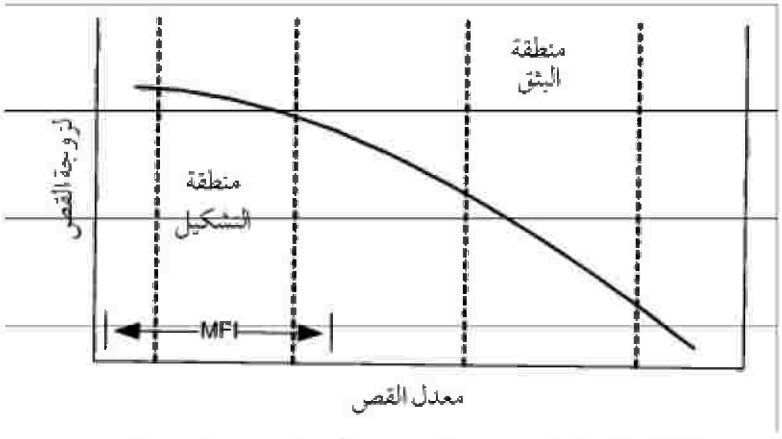
حيث σ الإجهاد و $\dot{\gamma}$ معدل الانفعال و η اللزوجة.

تسمى المادة التي تتبع هذا السلوك مائعاً نيوتونيا. هذه العلاقة صحيحة للمبلمرات ذات الأوزان الجزيئية المنخفضة أو عند معدلات انفعال منخفضة في حالة المبلمرات ذات الأوزان الجزيئية العالية. اللزوجة النيوتونية لكل مادة لا تتغير مع معدل أو مقدار الانفعال ولكنها تعتمد على نوع المادة.

سلوك المبلمرات السائلة ذات الأوزان الجزيئية العالية قد يكون غير نيوتوني عند قص منخفض. في معظم الحالات، معدلات القص العملية تكون في المنطقة غير النيوتونية. في هذه الحالة، يجب تحوير المعادلة (٥,١)، لأن اللزوجة لا يمكن اعتبارها ثابتة بل متغيرة مع معدل الانفعال. الشكل رقم (٥,١) يوضح منحنىً نوعياً للعلاقة بين اللزوجة ومعدل الانفعال. هناك نقطتان مهمتان في هذا الشكل هما :

١- عند معدلات قص منخفضة، تصل اللزوجة إلى قيمة ثابتة تسمى لزوجة القص الصفري. يمكن التعامل مع هذه اللزوجة مثل اللزوجة النيوتونية، حيث تعتمد بقوة على الوزن الجزيئي.

٢- عند معدلات قص أعلى، تتناقص اللزوجة. يسمى هذا السلوك التنحيف القصّي. هذا السلوك يتأثر بتوزيع الوزن الجزيئي. هذا السلوك - أيضاً- يمثل ظروف التشكيل بشكل أفضل.



الشكل رقم (٥,١). منحنى اللزوجة–معدل القص من الاختبار الشعري.

من الواضح أن قياس اللزوجة يمكن أن يعطي معلومات كثيرة. وقد أخذت قياسات اللزوجة أشكالاً وطرقاً شتى وأهمها من الناحية التطبيقية هي :

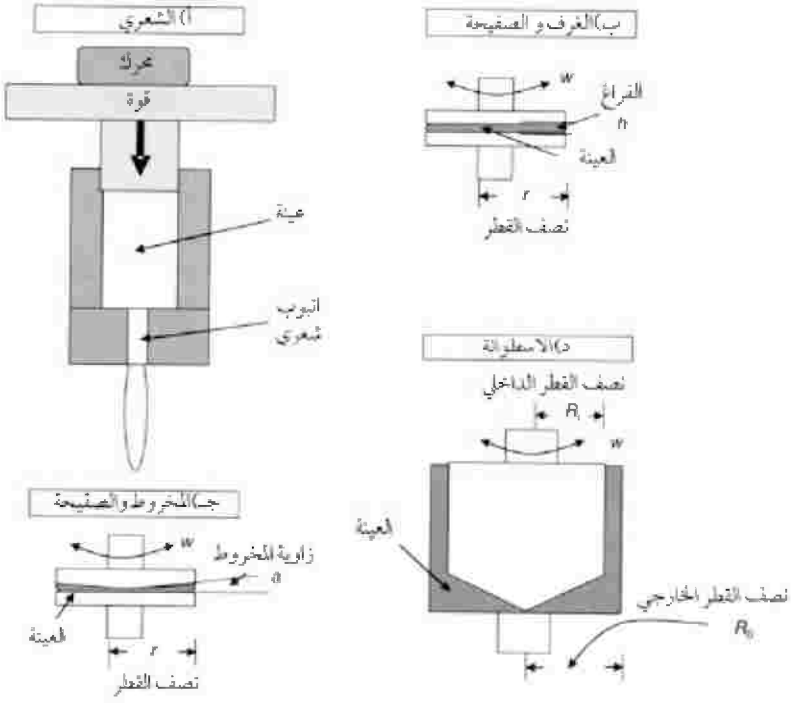
١– الجريان الأنبوبي : كما في الشكل رقم (٥,٢أ). ويعد أكثر الطرق استعمالاً لقياس اللزوجة. يحدث هذا الجريان عندما ينقل السائل من إناء خلال أنبوب أو قناة دائرية ذات قطر أصغر من قطر الإناء. تسمى هذه القناة شعرية.

٢– جريان القرص الموازي : كما في الشكل رقم (٥,٢ب). وهذا جريان عزمي (دائري) يحدث عندما يوضع السائل بين صفيحتين متوازيتين ويقص بتحريك إحدى الصفيحتين بالنسبة للأخرى.

٣– جريان المخروط والصفيحة : كما في الشكل رقم (٥,٣ج). في هذه الحالة، إحدى الصفيحتين مستوية والأخرى مخروطية الشكل. هذا الجريان عزمي أيضا. غير أن مجال الجريان ومجالات الإجهاد متماثلة في هذه الحالة. تعطي هذه الطريقة قياسات أدق وأكثر تفضيلاً عند علماء الموائع.

٤– جريان الأسطوانة المركزية : كما في الشكل رقم(٥,٢د). ويعد هذا جريان سحب بواسطة دوران إحدى الاسطوانتين الداخلية أو الخارجية. ينتج من هذا الجريان

عزم أعلى من الناتج عن طرق الصفائح، ولذلك يستخدم كثيرا للموائع النيوتونية والموائع منخفضة اللزوجة.

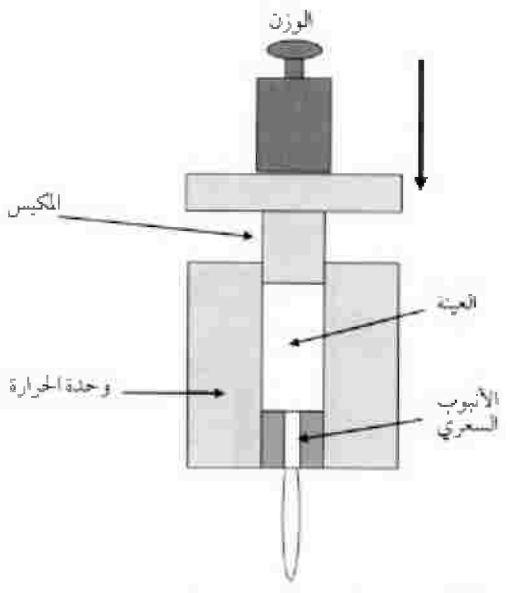


الشكل رقم (٥,٢). أشكال الاختبارات الريولوجية. أ) شعري. ب) قرص وصفيحة ج) مخروط وصفيحة، د) أسطوانة.

وهناك أنواع عديدة مثل الجريان الحلقي، والجريان الملتف، وغيرها مما هو غير مستعمل بكثرة ولن يناقش في هذا الكتاب.

(٥,٢) اختبار مؤشر الانصهار (ASM D1238, ISO 1133)

من أنواع اختبارات الجريان الأنبوبي المألوفة اختبار مؤشر الانصهار (MI, MFI, MFR)، حيث يقيس معدل بثق مادة مائعة خلال ممر ذي طول وقطر معلومين تحت درجة حرارة وثقل محددين كما في الشكل رقم (٥,٣).



الشكل رقم (٥,٣). مؤشر انصهار توضيحي.

مؤشر الانصهار عادة ما يكون ذا علاقة عكسية مع الوزن الجزيئي للمادة. المواد ذات الأوزان الجزيئية العالية لها مؤشر انصهار منخفض والعكس بالعكس. المبلمرات المعدة للبثق والتشكيل الحراري والقولبة بالنفخ لها – عادة– مؤشرات انصهار منخفضة، بينما تلك المعدة للقولبة بالحقن والألياف لها مؤشرات انصهار عالية.

$$MI = K\pi D_c^3 \frac{1}{\rho}\frac{dg}{dt} \qquad (٥,٣أ)$$

حيث K=75/4، D_c هي قطر الأنبوب الشعري، ρ هي كثافة المادة (المصهور)، dg/dt هي معدل االجريان الكتلي.

أو

$$MI = (426L\rho)t \qquad (٥,٣ ب)$$

حيث L هي مسافة تحرك المكبس و t هي الزمن

أو

١٠ x وزن العينة بعد بثق لمدة دقيقة (جـ ٥,٣)

تستخدم مؤشرات الانصهار لتصميم أنواع مختلفة من المواد. يعبر عن مؤشرات الانصهار بعدد الجرامات المبثوقة خلال عشر دقائق أو الديسيجرام للدقيقة.

الاختبار ASTM D1238 يجدول الأثقال ودرجات الحرارة المعينة لكل مادة معطاة. على سبيل المثال، البولي بروبلين يحتاج درجة حرارة ٢٣٠ درجة مئوية وثقل ٢,١٦ كجم بينما يحتاج البولي كربونات إلى ٣٠٠ درجة مئوية وثقل ١,٢ كجم. تختار الظروف للحصول على معدلات قص منخفضة نسبياً. يجب أن يكون معدل القص منخفضاً بشكل معقول ليتأثر بالوزن الجزيئي بقوة وبقدر أقل بتوزيع الوزن الجزيئي. لذلك، يستخدم مؤشر الانصهار–عادة– لتصنيف المواد حسب أوزانها الجزيئية.

(٥,٣) الريوميتر الشعري

هذه التقنية شبيهة باختبار مؤشر الانصهار إلا أن المكبس يضغط بواسطة مولد. معدلات القص يمكن اختيارها لتكون متوافقة مع المعدلات الحقيقية خلال التشكيل. ولهذا، فإن نتائج الريوميتر الشعري تستخدم كثيراً لتصميم أنظمة تشكيل المبلمرات. شركات تصميم مسامير التشكيل ومهندسو المحاكاة الآلية للعمليات يعتمدون كثيراً على نتائج الريوميتر الشعري.

في الاختبار الشعري توضع المادة المصهورة في وحدة مسخنة. المكبس يضغط على المادة المصهورة لتخرج من الغرفة خلال أنبوب دائري ذي قطر أصغر كثيراً من قطر الوحدة. هذه العملية تتسبب في تشوه قص للمادة. سرعة البثق خلال الممر ترتبط بمعدل القص الظاهري ويعبر عنها بالعلاقة الآتية :

$$\gamma_a = \frac{4Q}{\pi R^3} \qquad (٥,٤)$$

حيث Q هو المعدل الحجمي للجريان و R هو نصف قطر الأنبوب الشعري.

الإجهاد يعتمد على قوة المكبس المؤثرة على المصهور في الغرفة. عادة يقاس بدلالة الضغط عن طريق العلاقة الآتية :

$$\sigma = \frac{R}{2}\frac{P}{L} \qquad (٥,٥)$$

حيث P هو الضغط وL هو طول الأنبوب الشعري.

لاحظ أن التحليل للعلاقتين (٥,٤) و (٥,٥) مستقل عن الخصائص المائعية للمائع ولهذا فإنها تظل صحيحة للموائع النيوتونية وغير النيوتونية. وبناءً على هذا يمكن تطبيق معادلة اللزوجة (٥,٢) في هذه الحالة لتصبح :

$$\eta_a = \frac{\sigma}{\gamma_a} = \frac{\pi R^4 P}{8QL} \qquad (٥,٦)$$

إذا أعطى منحنى الإجهاد مع معدل القص خطاً مستقيماً على المقياس اللوغارثمي فإن المائع يعد نيوتونيا. ميلان الخط هو اللزوجة. إذا كانت العلاقة بين معدل القص والإجهاد غير خطية – كما هو الغالب في الاختبار الشعري– فإن اللزوجة تسمى بالزوجة الظاهرية.

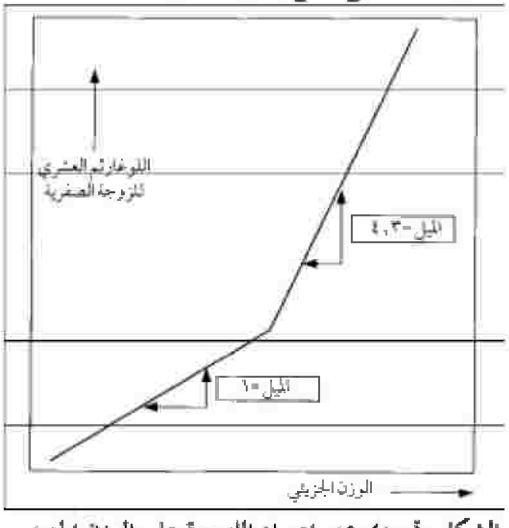
بالنظر مرة أخرى إلى الشكل رقم (٥,١) الذي يوضح العلاقة بين اللزوجة ومعدل القص، نلاحظ أن اللزوجة عالية وتصل إلى قيمة ثابتة عند معدلات القص المنخفضة. إذا وصلت اللزوجة إلى قيمة ثابتة عند معدلات قص منخفضة جداً فإنها تسمى لزوجة القص الصفري وهي شبيهة باللزوجة النيوتونية للمادة. مع زيادة معدل القص تنخفض اللزوجة بحدة. هذا هو التنحيف القصّي كما ذكر سابقاً في هذا الباب.

كما ذكر سابقا، اللزوجة النيوتونية هي ثابت لكل مادة وتعتمداً اعتماداً قوياً

على الوزن الجزيئي. الشكل رقم (٥,٤) هو رسم توضيحي لعلاقة لزوجة القص الصفري بالوزن الجزيئي. يلاحظ أن الميلان في البداية هو واحد ، وعند وزن جزيئي حرج يزداد الميلان إلى ٣,٤ ، مظهراً علاقة أقوى بين لزوجة القص الصفري والوزن الجزيئي.

التنحيف القصّي هو نتيجة لكون جزيئات المبلمر أكثر اعتدالاً وانتظاماً في الأنبوب الشعري وهذا يجعلها أقل مقاومة للجريان. الجزيئات ذات الوزن الجزيئي المنخفض أسهل انتظاما ولذلك هي أسهل جرياناً. إذا كان المصهور محتوياً على عدد كبير من الجزيئات ذات الوزن الجزيئي المنخفض فإن التنحيف القصّي سيتأثر أكثر من مصهور ذي عدد أقل من الجزيئات ذات الوزن الجزيئي المنخفض. لذلك يمكن الافتراض بثقة أن التنحيف القصّي يعتمد على توزيع الوزن الجزيئي.

يمكن معرفة نوعية التنحيف القصّي بحساب ميلان منحنى إجهاد القص مع معدل القص عند معدلات القص العالية. هذا الميلان يسمى مؤشر قانون القوة (power law index) ، ويسمى المائع مائع قانون القوة (power law fluid).



الشكل رقم (٥,٤). اعتماد اللزوجة على الوزن الجزيئي.

معدل القص في المعادلة رقم (٥,٦) هو معدل قص ظاهري وليس معدل القص الحقيقي للنظام. للحصول على معدل القص الفعلي لابد من تحديد الميلان عند عدد من معدلات القص ثم إعمال معامل للتصحيح. معامل التصحيح يسمى تصحيح رابينوفيتش (Rabinowitch Correction). يسمح هذا المعامل بحساب معدلات القص الحقيقية على الجدار. يمكن تحقيق ذلك بإجراء اختبارات عند عدد من معدلات الجريان وأطوال الأنابيب وأقطارها ثم رسم معدل القص الظاهري (المعادلة ٥,٤) مع إجهاد القص (٥,٥) على مقياس لوغارثمي. ميلان الخط ذو ارتباط بمعدل القص عند الجدار. يعبر عن تصحيح رابينوفتش بالآتي:

$$\gamma_w = \frac{3+b}{4}\gamma_a \qquad (٥,٤\text{ أ})$$

حيث:

$$b = \frac{d(\log \gamma_a)}{d(\log \sigma_w)} \qquad (٥,٤\text{ ب})$$

تصحيح آخر مفيد في الاختبار الشعري هو تصحيح باقلي (Bagley Correction). يأخذ هذا التصحيح بعين الاعتبار تأثير مدخل الأنبوب الشعري. يمكن حساب معامل باقلي عن طريق قياس خصائص الجريان للمادة عند أطوال مختلفة للأنبوب الشعري. يرسم الضغط ونسبة طول الأنبوب إلى نصف قطره لكل تجربة، ثم يمد الخط إلى قيمة الضغط عندما تكون نسبة طول الأنبوب إلى نصف قطره تساوي صفراً، ويحسب معامل باقلي عند نقطة التقاطع (e) مع إحداثي الضغط. يصبح الإجهاد الحقيقي عند الجدار كالآتي:

$$\sigma_w = \frac{P}{2}\frac{L}{R+e} \qquad (٥,٤ \text{ جـ})$$

بدون هذه التصحيحات يمكن أن تصل نسبة الخطأ في النتائج إلى ٢٠٪. غير أنه يمكن استخدام النتائج الظاهرية غير المصححة في حالات مقارنة كميات مختلفة لنفس المنتج، كما هي الحال في مراقبة الجودة الصناعية.

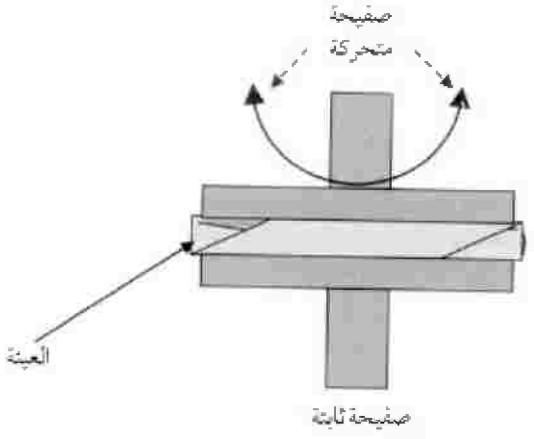
(٥,٤) الريوميتر التدويري (ASTM D4440)

أصبح الاختبار التدويري (أو القرص والصفيحة) أكثر شيوعاً ومهماً جداً في السنوات الأخيرة. في البداية كانت الأجهزة المصممة لهذه الاختبارات غالية وصعبة التشغيل. تحليل وتفسير النتائج كان صعباً ومعقداً. التطورات الأخيرة في الأجهزة وبرامج الحاسب جعلت هذا الاختبار سهلاً ومناسباً لمعامل التحكم بالجودة.

في اختبارات القرص والصفيحة تبقى إحدى الصفيحتين ثابتة وتدار الأخرى. هذا التدوير يسبب نوعا من القص للعينة كما في الشكل رقم (٥,٥). هناك نوعان من الحركة هما:

اختبار الحالة المستقرة: تدور الصفيحة بثبات باتجاه عقارب الساعة. كان هذا الاختبار مفضلا في البداية بسبب الإمكانات المحدودة للأجهزة. أما الآن فهو يستخدم في دراسات الزحف الثابت (steady state creep). سنعود إلى هذا الموضوع فيما بعد في هذا الباب.

الاختبار الحركي أو المتذبذب: كسب هذا الاختبار التفضيل وأصبح أوسع التقنيات استعمالاً بسبب مرونته وكمية المعلومات الممكن الحصول عليها من اختبار واحد. يعطي هذا الاختبار معلومات عن اللزوجة والمرونة في آن واحد. يمكن دراسة تأثير كل من معدل الاختبار (التردد) ودرجة الحرارة والزمن متفرقة أو مجتمعة.



الشكل رقم (٥,٥). ريوميتر تدويري.

في الفصل (٣,٤) طورنا تعبيرات للمعيار المرن واللزج لعينة صلبة ومستطيلة. لحسن الحظ، يمكن استخدام المعادلات نفسها ماعدا الاختلاف في شكل العينة. العينة هنا قرص مستو بدلا من المستطيل. غير أننا نحتاج هنا إلى تحسين معادلة المعيار لأننا نتعامل مع مواد مائعة وليست مع مواد صلبة. سندخل اللزوجة المتغيرة (المتحركة) (Dynamic Viscosity).

المعادلات (٣,١٣) و (٣,١٤) للمعيار المرن واللزج هي:

$$G' = \left(\frac{\sigma_0}{\gamma_0}\right)\cos\phi \qquad (٥,٧)$$

$$G'' = \left(\frac{\sigma_0}{\gamma_0}\right)\sin\phi \qquad (٥,٨)$$

نتذكر أن اللزوجة مرتبطة بمعدل تغير القص للمادة. لذلك، إذا أدخلنا السرعة إلى المعادلات، سنستطيع اشتقاق تعبير مقبول للزوجة. بسبب تذبذب العينة عند تردد معين، فإنها تتعرض لسرعة زاوية. السرعة الزاوية هي:

$$\omega = 2\pi f \qquad (٥,٩)$$

حيث f هي التردد.

بقسمة المعادلات (٥,٧) و (٥,٨) على المعادلة (٥,٩) نحصل على دالتين للمادة، $\eta'(\omega)$ (اللزوجة المتحركة) و $\eta''(\omega)$ ، وكلتاهما لها وحدة اللزوجة.

$$\eta'(\omega)=\frac{G''}{\omega} \qquad (٥,١٠)$$

و

$$\eta''(\omega)=\frac{G'}{\omega} \qquad (٥,١١)$$

وهناك أيضا اللزوجة المركبة:

$$\dot{\eta}=\sqrt{\left(\eta'^2+\eta''^2\right)} \qquad (٥,١٢)$$

للمواد المائعة، η' أكبر كثيرا من η'' ولذلك يمكن القول إن $\dot{\eta}$ تساوي تقريبا η'. لذا فإننا سنستخدم η' دائما وبشكل تقريبي عند مناقشة اللزوجة من الاختبارات المتحركة. η' يمكن التعامل معها بنفس طريقة التعامل مع اللزوجة الظاهرية. وفي الحقيقة هما متساويتان عندما يتم رسمها على نفس الشكل. أول من قرر أن اللزوجة من الاختبارات الشعرية متماثلة هما كوكس ومرتز. ولذا سميت هذه العلاقة قاعدة كوكس- مرتز (Cox-Mertz Rule). من الواضح أن تأثيرات اللزوجة المركبة على سلوك وتركيب المادة هي نفس تأثيرات اللزوجة الحركية. الاختلاف الأساسي بين اللزوجتين هو أن اللزوجة الحركية تقاس عادة عند معدلات أقل انخفاضاً من اللزوجة الظاهرية.

هناك نوعان من النماذج الشكلية لاختبارات قياس اللزوجة المتحركة. أحدهما شكل الصفائح المتوازية والثاني شكل المخروط والصفيحة. كلاهما سيناقش في الفصول القادمة.

(٥,٤,١) المخروط والصفيحة

هذا النظام هو المثالي في حالات كثيرة. وهو نظام سهل التنظيف، ويحتاج إلى عينة صغيرة الحجم نسبياً. كما أنه – مع قليل من الانتباه – يمكن أن يستخدم مع مواد ذات لزوجة منخفضة تصل إلى عشرة أضعاف لزوجة الماء فقط (١٠ مل باسكال. ثانية) أو ربما أقل.

تعرف أنظمة المخروط والصفيحة بالقطر وزاوية المخروط. وفي الغالب فإن الجزء المخروطي يكون غير مكتمل. يوضع الجزء المخروطي بحيث يلامس رأس المخروط النظري (لو كان مكتملا) الصفيحة السفلى. إزالة رأس المخروط تعطي جهاز قياس ممتاز ؛ انظر الشكل رقم (٥,٢ج).

وحيث أن حسابات الانفعال ومعدل القص تعتمد على الإزاحة الزاوية والفجوة بين المخروط والصفيحة، فإن صغر زاوية المخروط يزيد من الخطأ في ضبط الفجوة ومن ثم في النتائج. إن استخدام زاوية كبيرة نسبياً (٤° أو ٥°) يسهل عملية استعادة ضبط الفجوة. وكلما كبرت زاوية المخروط كلما زاد التباين في معدل القص على طول الفجوة. لذا فإنه يتعين الانتباه إلى زاوية المخروط عند استخدام تقنية المخروط والصفيحة في الاختبارات. إذا كانت زاوية المخروط ٤°، فإن معدل القص على طول الفجوة سيتباين بنسبة أقل من ٠,٥٪ وسيعطي نتائج بخطأ ٠,٣ ٪ تقريباً. وعند استخدام زاوية أصغر يصل الخطأ في ضبط الفجوة إلى ٥٪ بين مشغل و آخر حتى وإن كانوا ذوي خبرة، على الرغم من بقاء الخطأ في توزيع القص في الفجوة صغيرا. لذا، فإن الزاوية الكبرى تعطي خطأ أكثر قبولاً لكونه خطأ تكراريا. لحسن الحظ، يقوم المصنعون للريومترات التدويرية باختيار مسبق للزاوية المناسبة ويوصون باستخدام زاوية مناسبة للزوجة المادة المراد اختبارها.

لأهمية التثبيت الصحيح للمخروط (أو ما يسمى غالباً ضبط الفجوة) فلا يوصى باستخدام نظام المخروط والصفيحة في حالات تبدلات الحرارة إلا إذا كان الريوميتر مزوداً بنظام آلي لتعويض التمدد الحراري.

يجب – أيضاً– تجنب هذا النظام عند اختبار عينات تحتوي على جسيمات كبيرة نسبيا. إذا لم يكن متوسط قطر هذه الجسيمات أصغر من الفجوة بخمس إلى عشر مرات فإنها قد تزدحم عند قمة المخروط مسببة تذبذباً عالياً في النتائج.

يجب – أيضاً– تجنب هذا النظام مع المواد ذات التراكيز العالية من المواد الصلبة ؛ حيث تتعرض تلك الجسيمات الصلبة للطرد من خلال الفجوة تحت معدلات القص العالية.

في اختبارات المخروط والصفيحة، حسابات إجهاد القص ومعدل القص واللزوجة هي حسابات مباشرة ومرتبة كما يلي :

$$\tau = \frac{3}{2\pi r^3} M \qquad (٥,١٣)$$

$$\dot{\gamma} = \frac{1}{\theta} \omega \qquad (٥,١٤)$$

$$\mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \qquad (٥,١٥)$$

حيث r هو نصف قطر المخروط، و M هو عزم الدوران، و θ هي زاوية المخروط، و ω هي السرعة الزاوية.

(٥,٤,٢) الصفائح المتوازية

نظام الصفائح المتوازية، مثل نظام الصفيحة والمخروط ، نظام سهل التنظيف ويحتاج إلى عينات صغيرة الحجم. كما أنه يتميز بإمكانية استخدام عينات مسبقة التشكيل، مما يجعله مفيدا خاصة للمبلمرات. وهو أيضا غير حساس لضبط الفجوة لأن الفجوة بين الصفائح (والمقاسة بالملم) مأخوذة في الاعتبار في الحسابات (انظر الشكل رقم ٥,٢ب). هذا النوع من الأنظمة ملائم لاختبار العينات باستخدام التدرج الحراري، بسبب إمكانية التحكم بالمسافة بين الصفائح.

العيب الأساسي في هذا النظام هو التباين في معدل القص بالنسبة لعرض (سمك)

العينة. في هذه الحالة، يستخدم متوسط معدل التغير.

يجب – أيضاً– ملاحظة أن زيادة الفجوة بين الصفائح يزيد من إمكانية وجود تدرج حراري على سمك العينة . لذا فمن المهم إحاطة النظام والعينة بنوع من الغطاء الحراري أو وضعها في فرن.

تعرف أنظمة الصفائح المتوازية بقطر الصفيحة العليا. أما الصفيحة السفلى فقد تكون أكبر من الصفيحة العليا أو مماثلة لها.

لا يوصى باستخدام الصفائح المتوازية عند اختبار عينات عند معدل قص ثابت لغرض المقارنة.

عند استخدام الصفائح المتوازية، يمكن استخدام المعادلات الآتية لحسابات إجهاد ومعدل القص واللزوجة مرتبة كما يلي:

$$\tau = \frac{3}{2\pi r^3} M \qquad (٥,١٦)$$

$$\dot{\gamma} = \frac{3r}{4h} \omega \qquad (٥,١٧)$$

$$\mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \qquad (٥,١٨)$$

حيث r نصف قطر الصفيحة، M عزم الدوران، ω هي السرعة الزاوية، و h المسافة (الفجوة) بين الصفيحتين.

(٥,٤,٣) الاسطوانة المتراكزة

أنظمة الأسطوانة المتراكزة للقياس لها أنواع مختلفة مثل الأسطوانة أحادية المحور، والفجوة المضاعفة، وخلية موني وغيرها كما في الشكل رقم (٥,٢د). الأسطوانات أحادية المحور المعيارية تعرف بقطر الكوب الداخلي.

تحتاج هذه الطريقة إلى عينات كبيرة نسبياً وهي أصعب في التنظيف. لذا فإنه

وبسبب وزنها وقصورها الذاتي العاليين يمكن أن تسبب بعض المشاكل عند إجراء قياسات عالية التردد.

أهم ميزات هذا النظام هي القدرة على العمل مع مواد منخفضة اللزوجة والمعلقات المتنقلة. المساحة الكبيرة لهذه الأنظمة تكسبها حساسية عالية ولذلك تعطي قراءات جيدة عند معدلات قص ولزوجات منخفضة.

يتميز نظام الفجوة المضاعفة بأكبر مساحة سطحية، ولذا فهو مثالي للزوجة ومعدلات القص المنخفضة. يجب ملاحظة أن القصور الذاتي في بعض أنظمة الفجوة المضاعفة قد يقيد بشدة الحد الأعلى للتردد في الاختبارات التذبذبية.

لحساب اللزوجة من نتائج الأسطوانة المتراكزة، تستخدم المعادلات الآتية:

$$\tau = \frac{1}{2\pi r_a^2 H} M \qquad (٥,١٩)$$

$$\dot{\gamma} = \frac{2r_i^2 r_o^2}{r_a^2\left(r_o^2 - r_i^2\right)}\omega \qquad (٥,٢٠)$$

$$\mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \qquad (٥,٢١)$$

حيث:

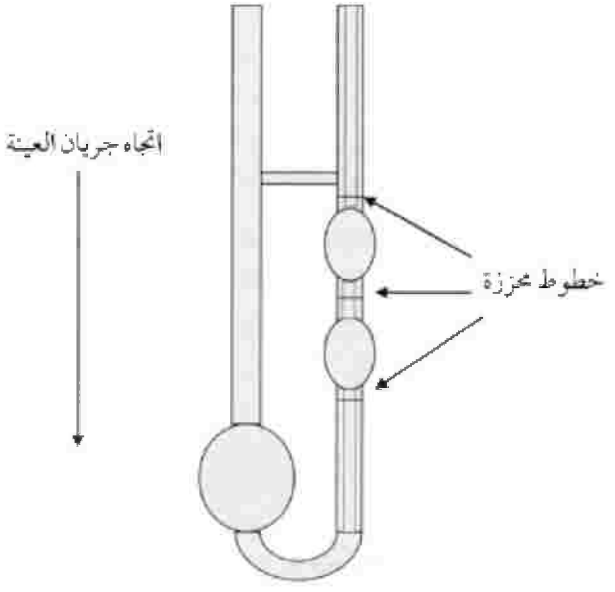
$$r_a = \frac{r_i + r_o}{2}$$

r_i هو نصف القطر الداخلي، و r_o نصف القطر الخارجي، و H هي ارتفاع الأسطوانة.

(٥,٥) ريوميتر المخاليل (ASTM 2857, ISO 1628)

اختبار المخاليل الخفيفة كانت الطريقة الأولى لقياس الخصائص الجزيئية للمبلمرات. من الشائع استخدام هذه التقنية لتقريب متوسط الوزن الجزيئي للمبلمرات

في محاليل مخففة. تجرى القياسات باستخدام ملزاج (مقياس اللزوجة) كما في الشكل رقم (٥,٦). لزوجة المائع تحدد بقياس الوقت بالثواني اللازم لحجم معين من المائع كي يقطع مسافة معينة . تجرى القياسات باستخدام محاليل أخف كل مرة. تحسب اللزوجة لكل تركيز.



الشكل رقم (٥,٦). ملزاج شعري شائع لحساب لزوجة المحاليل.

هناك عدة أنواع من اللزوجة يمكن تحديدها كما يلي :

اللزوجة النسبية = لزوجة المحلول/ لزوجة المذيب (٥,٢٢)

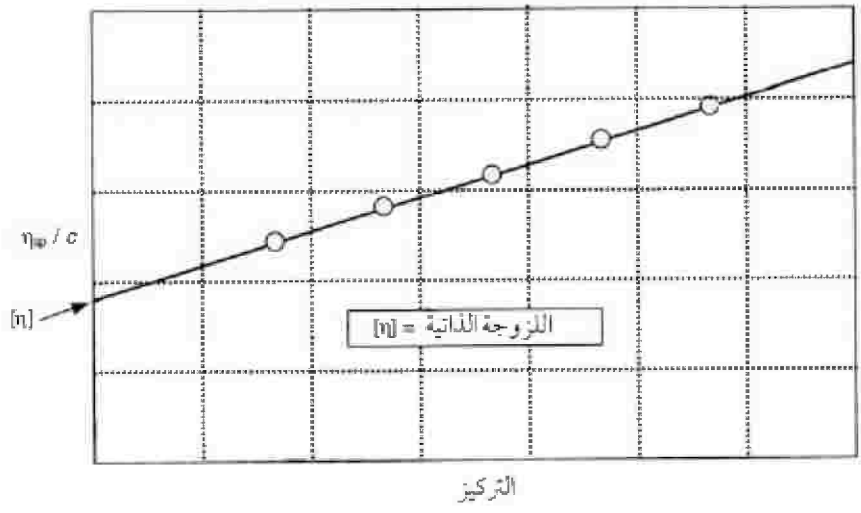
اللزوجة النوعية = اللزوجة النسبية — ١ (٥,٢٣)

اللزوجة المختزلة = اللزوجة النوعية/التركيز (٥,٢٤)

اللزوجة الأصلية = لو(اللزوجة المختزلة)/التركيز (٥,٢٥)

اللزوجة الذاتية = اللزوجة المختزلة عند التركيز الصفري = اللزوجة الأصلية عند التركيز الصفري (٥,٢٦)

الشكل رقم (٥,٧) يمثل اللزوجة المختزلة و/أو اللزوجة الأصلية مع التركيز، مع تمديد المنحنى إلى التركيز الصفري. النقطة التي يتقاطع فيها الخط مع إحداثي اللزوجة (التركيز الصفري) تسمى اللزوجة الذاتية. اللزوجة الذاتية لها علاقة مباشرة مع المتوسط الوزني للوزن الجزيئي؛ والذي يستخدم لتصنيف المواد للتطبيقات التجارية.



الشكل رقم (٥,٧). رسم توضيحي لبيانات لزوجة محلول– اللزوجة النوعية دالة في التركيز.

(٥,٦) اختبار الزحف للمبلمرات المصهورة

اختبار الزحف هو إجهاد للمادة وملاحظة التغير في الشكل مع الزمن. يمكن حساب الآتي من اختبارات الزحف:

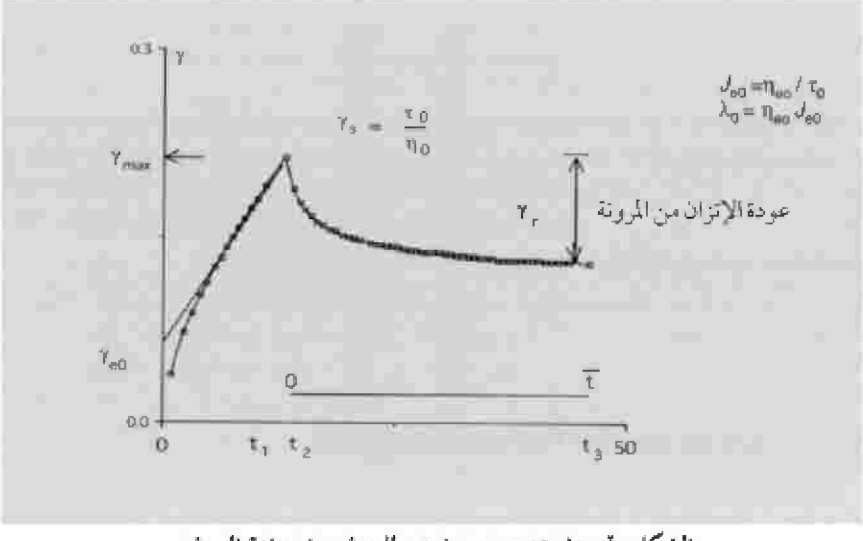
$$\eta_o = \frac{\tau}{d\gamma/dt} \qquad (٥,٢٧)$$

$$J_r = \frac{\gamma_r}{\tau} \qquad (٥,٢٨)$$

$$J_{e_o} = \frac{\gamma_{eo}}{\tau\lambda_o} = \eta_0 Je_0 \qquad (٥,٢٩)$$

حيث η_o اللزوجة، و J_r الاذعان المسترد، و Je_0 إذعان القص عند الاتزان، و λ_0 زمن الاسترخاء، و γ_r الانفعال المسترد، γ_{e0} التشوه المرن.

عند حالة الثبات (معدل التشوه ثابت) فإن معدل التغير في الانفعال مع الزمن يسمى معدل الانفعال، $d\gamma/dt$. نسبة معدل الانفعال إلى الإجهاد هي اللزوجة. التشوه المرن يمكن الحصول عليه بمد الجزء المستقيم من منحنى الزحف إلى الزمن الصفري. عند الإزالة اللحظية للإجهاد يمكن ملاحظة مقدار الانفعال المستعاد والمقدار المستمر من الانفعال. الانفعال المستعاد مرتبط بالجزء المرن من الانفعال. الشكل رقم (٥,٨) يوضح رسماً توضيحياً لمنحنى زحف نوعي يبين العلاقات والمتغيرات المذكورة أعلاه.



الشكل رقم (٥,٨). منحنى نوعي للزحف واستعادة الزحف.