

Ảnh hưởng của tần số đến đáp ứng cơ học chu kỳ của vật liệu polyethylene

- Nguyễn Song Thanh Thảo
- Lê Thị Tuyết Nhung

Trường Đại học Bách khoa, ĐHQG-HCM

(Bài nhận ngày 13 tháng 7 năm 2015, hoàn chỉnh sửa chữa ngày 16 tháng 10 năm 2015)

TÓM TẮT

Một nghiên cứu thực nghiệm về biến dạng ratcheting và vòng trễ ứng suất-biến dạng trong các thí nghiệm mỗi chu kỳ kéo điều khiển ứng suất ở nhiệt độ phòng đã được thực hiện để xem xét ảnh hưởng của tần số tải đến đáp ứng cơ học chu kỳ của high-density polyethylene (HDPE). Nó chỉ ra rằng tần số thay đổi từ 0.01 Hz đến 1 Hz chủ yếu ảnh hưởng đến sự tích lũy biến dạng

trong thời gian ngắn (tức là thời gian của bản thân chu kỳ) và không ảnh hưởng trong thời gian dài (tức là thời gian thí nghiệm). Ngoài ra, tần số càng cao, vòng trễ càng đóng và nghiêng nhiều hơn. Hơn nữa, tần số chỉ ảnh hưởng đến khuynh hướng ổn định của biến dạng ratcheting nhưng không ảnh hưởng đáng kể đến khuynh hướng ổn định của vòng trễ.

Từ khóa: ratcheting, tần số tải, chu kỳ ổn định.

1. GIỚI THIỆU

Phương pháp thiết kế môi dựa trên các tiêu chuẩn môi đòi hỏi các thông số cơ học -ví dụ như ứng suất tương đương, ứng suất lớn nhất hay các thành phần năng lượng- được xác định từ một trạng thái ổn định. Trường hợp kim loại chịu tải môi trong chế độ đàn hồi, các thông số đầu vào của các tiêu chuẩn môi thường được tính toán từ chu kỳ đầu tiên.

Do tính nhớt, việc xác định một chu kỳ ổn định như vậy trong trường hợp của polymer không dễ dàng. Hiệu ứng ratcheting đáng kể được quan sát trong hàng chục hoặc hàng trăm chu kỳ đầu tiên. Ratcheting là hiện tượng tích lũy dần dần biến dạng khi vật liệu chịu tải chu kỳ, đặc biệt là tải điều khiển ứng suất với ứng suất trung bình khác không. Vì vậy, việc định nghĩa và xác định chính xác trạng thái ổn định của polymer chịu tải môi rất cần được xem xét.

Trong hai thập kỷ gần đây, hiện tượng này đang được nghiên cứu rộng rãi trong cả thực nghiệm và mô hình. Ban đầu, các nghiên cứu về ratcheting chủ yếu tập trung đối với kim loại, hợp kim và composite, nhưng gần đây đang rất được quan tâm đối với polymer. Nhiều điều kiện tải phức tạp hơn được xem xét và nhiều đặc tính mới của hiện tượng ratcheting đã được quan sát. Điều này cho phép phát triển các mô hình cấu trúc ngày càng chính xác hơn. Kết quả thực nghiệm chỉ ra các yếu tố chi phối hiện tượng ratcheting gồm ứng suất trung bình, biên độ ứng suất, tốc độ tải, nhiệt độ và lịch sử tải. Nhiều polymer khác nhau đã được nghiên cứu trong điều kiện tải chu kỳ đơn trục kéo [1,2] hoặc nén [3,4] ở nhiệt độ phòng, cũng như ở nhiệt độ cao [5,6]. Ứng xử ratcheting đa trục cũng bắt đầu được nghiên cứu gần đây [7]. Tuy nhiên các nghiên cứu này chỉ mới phân tích sự phát triển của biến dạng ratcheting mà chưa xem xét đến sự ổn định của

nó, cũng như chưa có nhiều nghiên cứu quan tâm đến sự phát triển và ổn định của bản thân vòng trễ ứng suất-biến dạng [8].

Từ các quan sát thực nghiệm, nhiều mô hình đang được phát triển nhằm mô phỏng chính xác hơn ứng xử mỗi chu kỳ của polymer. Trường hợp polymer bán tinh thể, cả hai mô hình biến dạng nhỏ [9] và lớn [10,11] đã được đề nghị. Cách xây dựng mô hình rất đa dạng, từ các mô hình lưu biến [12], đến các mô hình trong nhiệt động lực học các quá trình không thuận nghịch [13] hay các mô hình dựa trên sự quá tải với các luật tái bền động học khác nhau [14,15]. Phần lớn chúng đều dựa trên các tải đơn giản như vài chu kỳ đầu của tải mới, thí nghiệm đảo hay hồi phục. Trong hầu hết các nghiên cứu này, mỗi chu kỳ được sử dụng như là một tải để xác định thông số của các mô hình hơn là nghiên cứu bản chất ứng xử mỗi chu kỳ. Các nghiên cứu ảnh hưởng của mỗi chu kỳ hay hiện tượng ratcheting đến tuổi thọ mỗi thường được giới hạn ở các thí nghiệm điều khiển biến dạng và không dựa trên một trạng thái ổn định [16-19]. Vì vậy cần thêm nhiều nghiên cứu để nắm bắt chính xác quá trình phát triển và ổn định của hiệu ứng ratcheting trong polymer, nhằm cải thiện tính chính xác của việc ước lượng tuổi thọ mỗi dựa trên các tiêu chuẩn mới.

Trong nghiên cứu này, ứng xử mỗi chu kỳ được nghiên cứu thông qua việc xem xét ảnh hưởng của tần số đến sự phát triển và ổn định của biến dạng ratcheting và bản thân vòng trễ ứng suất-biến dạng (nghĩa là sự đóng vòng, diện tích và độ nghiêng của vòng) trong các thí nghiệm điều khiển ứng suất ở tần số thấp và nhiệt độ môi trường, từ đó định nghĩa một trạng thái ổn định cho phép xác định các thông số đầu vào của các tiêu chuẩn mới.

2. THỰC NGHIỆM

Vật liệu được nghiên cứu là high-density polyethylene (HDPE) có nhiệt độ chuyển hóa thủy tinh -120°C và nhiệt độ nóng chảy khoảng

130°C . Mẫu thử kéo bề dày 2mm được gia công theo tiêu chuẩn ISO R527. Kích thước vùng làm việc là 10mm chiều rộng và 60mm chiều dài.

Biến dạng được xác định từ chuyển vị của bốn điểm đánh dấu trên bề mặt mẫu thử nhờ phần mềm Videotraction®. Trong quá trình thí nghiệm, các điểm đánh dấu được theo dõi bằng máy ảnh CCD. Biến dạng dọc trục và biến dạng ngang logarit được tính theo phương trình (1)

$$\begin{aligned}\varepsilon_l &= \ln\left(\frac{L}{L_0}\right) = \ln\left(1 + \frac{\Delta L}{L_0}\right) \\ \varepsilon_t &= \ln\left(\frac{W}{W_0}\right) = \ln\left(1 + \frac{\Delta W}{W_0}\right)\end{aligned}\quad (1)$$

với L và L_0 , W và W_0 lần lượt là khoảng cách hiện tại và ban đầu giữa các điểm đánh dấu dọc trục và ngang trục. Ứng suất dọc trục Cauchy được xác định theo phương trình (2), trong điều kiện đẳng tích và giả định các biến dạng ngang đẳng hướng.

$$\sigma = \frac{F}{S} = \frac{F}{S_0} \frac{1}{\exp(2\varepsilon_t)} \quad (2)$$

với S_0 là tiết diện ngang ban đầu và F là lực dọc trục hiện tại.

Tất cả thí nghiệm được thực hiện theo điều kiện điều khiển ứng suất ở nhiệt độ phòng bằng máy Instron 1195. Việc điều khiển ứng suất Cauchy là rất quan trọng để có được sự phân tích chính xác ứng xử cấu trúc của polymer, đặc biệt là đối với các thí nghiệm thực hiện với ứng suất lớn nhất có giá trị cao như minh họa trong hình 1. Trong hình này, sự phát triển của vòng trễ theo chu kỳ được so sánh giữa hai thí nghiệm: thí nghiệm đầu được thực hiện bằng cách tác dụng tải mới có lực lớn nhất hằng số tương ứng với ứng suất danh nghĩa là 20 MPa, trong khi thí nghiệm thứ hai, lực tác dụng được hiệu chỉnh với sự giảm tiết diện mặt cắt ngang để ứng suất Cauchy lớn nhất luôn là 20 MPa. Trong thí nghiệm điều khiển lực, ứng suất thực tăng theo sự giảm tiết diện mặt

cắt ngang, dẫn đến hiệu ứng ratcheting tăng một cách giả tạo.

Ba thí nghiệm môi điều khiển ứng suất được thực hiện ở cùng tỉ số tải $R = 0.1$ và ứng suất lớn nhất $\sigma_{max} = 5\text{MPa}$ với các tần số khác nhau để xem xét sự ảnh hưởng của tần số đến ứng xử chu kỳ của polymer. Tỉ số tải được định nghĩa là tỉ số giữa ứng suất nhỏ nhất và ứng suất lớn nhất. Để tránh sự tự gia nhiệt đáng kể, tần số được thay đổi từ 0.01Hz đến 1Hz. Nhiệt độ bề mặt của mẫu thử được theo dõi bởi một cặp nhiệt điện; sự tăng nhiệt độ tối đa ít hơn 1°C trong toàn bộ điều kiện thí nghiệm. Bên cạnh đó, để không vượt quá vùng biến dạng nhỏ ở tần số thấp nhất 0.01Hz, ứng suất lớn nhất được giới hạn ở 5MPa. Để tránh hiện tượng oằn, các thí nghiệm được thực hiện với tỉ số tải dương. Để tốc độ tải ứng suất không đổi trong quá trình thí nghiệm, tín hiệu sóng tam giác

được sử dụng. Điều kiện tải được liệt kê trong bảng 1.

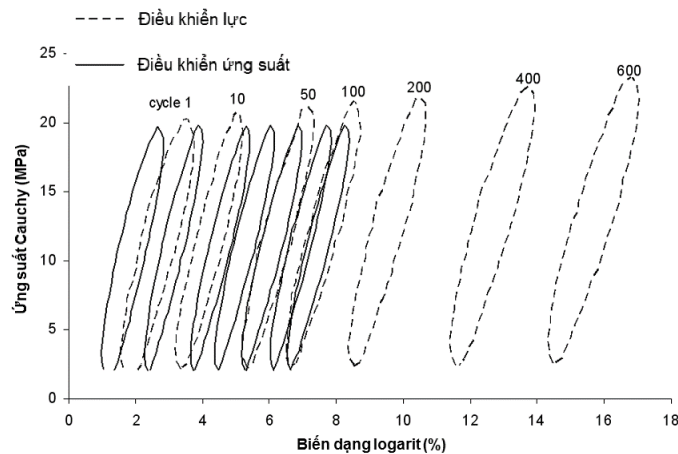
3. ỨNG XỬ CỦA HDPE CHỊU TẢI MÔI

Trong phần này, ứng xử tổng quát của HDPE chịu tải môi chu kỳ được mô tả. Hình 2(a) đưa ra một ví dụ về hiệu ứng ratcheting và minh họa ba thông số cho phép phân tích sự tiến triển của các vòng trễ ứng suất-biến dạng:

- Biến dạng ratcheting ε_r , được định nghĩa là trung bình của biến dạng ban đầu và biến dạng tối đa của vòng trễ;

- Diện tích vòng trễ A , được tích phân bằng phương pháp hình thang;

- Mô đun cắt E_d , được định nghĩa là độ dốc của đường thẳng nối điểm ban đầu của vòng trễ với điểm biến dạng cực đại.



Hình 1. Sự phát triển của vòng trễ trong thí nghiệm kéo điều khiển ứng suất và điều khiển lực với $R = 0.1$, $f = 0.1\text{Hz}$ và ứng suất lớn nhất ban đầu 20MPa

Bảng 1. Điều kiện tải

Mẫu thử	Ứng suất lớn nhất σ_{max} (MPa)	Tỉ số tải R	Tần số f (Hz)	Tốc độ tải $\dot{\sigma}$ (MPa/s)	Số chu kỳ
TF001	5	0.1	0.01	0.0045	1000
TF01	5	0.1	0.1	0.045	1000
TF1	5	0.1	1	0.45	1000

Ta có thể thấy rằng các vòng trễ tồn tại và phát triển theo chu kỳ mỗi bằng cách đóng lại và nghiêng đi. Các vòng đầu tiên là "mở", có nghĩa là biến dạng cuối của vòng sau khi giảm tải khác nhiều so với biến dạng ban đầu của vòng, nhưng vòng trễ "đóng lại" sau khoảng 10 chu kỳ. Trong trường hợp các vòng "mở", cần chắc chắn diện tích vòng trễ không bao gồm miền bên dưới ứng suất nhỏ nhất, để có thể so sánh với các diện tích bên trong vòng trễ sau khi đóng. Ví dụ, diện tích của vòng mở ABC trong hình 2(b) được tính bằng phương trình (3)

$$S_{ABC} = S_{ABFD} - S_{BCEF} - S_{ACED} \quad (3)$$

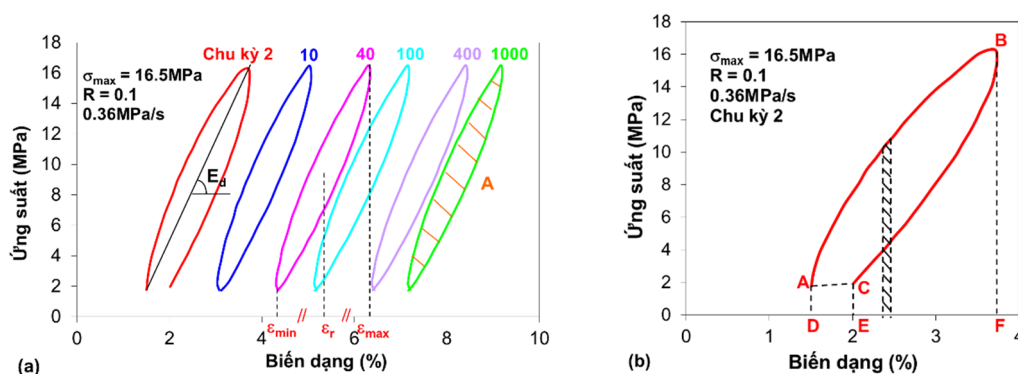
trong đó S_{ABFD} và S_{BCEF} được tính bằng tích phân từ A đến B và từ C đến B của hàm $\sigma(\varepsilon)$ bằng phương pháp hình thang.

Độ chính xác của ba thông số được tính toán phụ thuộc vào tần số thu tín hiệu và độ chính xác

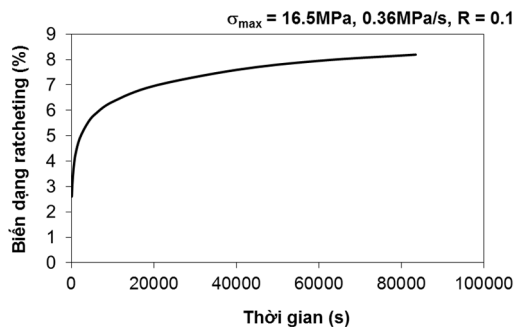
của việc thu được các điểm cực trị của vòng trễ. Trong nghiên cứu này, tần số thu tín hiệu được điều chỉnh để thu được khoảng 40 điểm tích phân trong mỗi chu kỳ, dẫn đến sai số chấp nhận được khoảng 5%.

Một ví dụ về tiến triển của biến dạng ratcheting nhỏ theo hàm của thời gian được thể hiện trong hình 3. Rõ ràng là biến dạng ratcheting tăng một cách phi tuyến: sau khi tăng nhanh trong suốt hàng chục chu kỳ đầu tiên, sự tăng của biến dạng ratcheting chậm lại và có xu hướng ổn định. Trong nghiên cứu này, sự ổn định của tham số α được xác định từ sự gia tăng tương đối giữa hai chu kỳ kế tiếp nhau: vòng trễ ổn định khi $\frac{1}{\alpha} \frac{d\alpha}{dN}$

có giá trị khoảng 10^{-4} .



Hình 2. Định nghĩa các tham số vòng trễ trong thí nghiệm mỗi chu kỳ 0.36 MPa.s^{-1} , $\sigma_{\max} = 16.5 \text{ MPa}$ và $R = 0.1$: (a) biến dạng ratcheting ε_r , diện tích vòng trễ A, mô đun cắt E_d và (b) diện tích vòng trễ A tích phân bằng phương pháp hình thang



Hình 3. Phát triển và ổn định của biến dạng ratcheting trong thí nghiệm mỗi chu kỳ 0.36MPa.s-1, $\sigma_{max} = 16.5\text{MPa}$ và $R = 0.1$

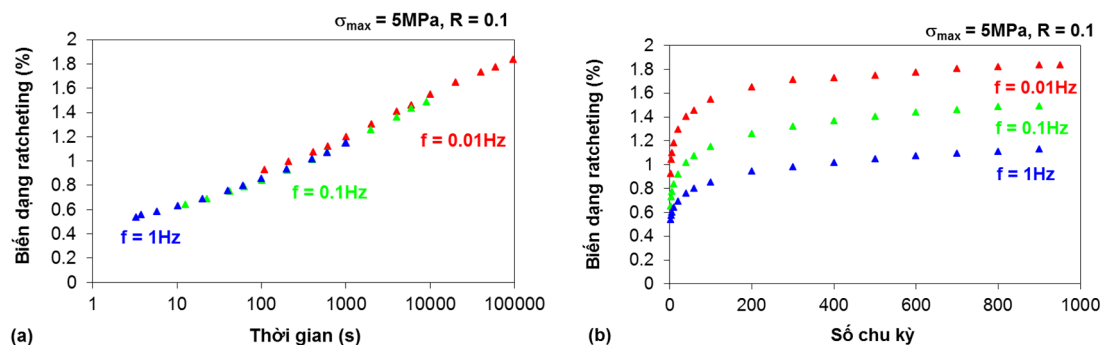
4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Trong nghiên cứu về kim loại, biến dạng ratcheting thường được vẽ theo hàm của số chu kỳ. Trong trường hợp polymer, chúng ta xem xét thêm sự tiến triển của nó theo thời gian. Ảnh hưởng của tần số đến sự phát triển của biến dạng ratcheting theo thời gian và theo số chu kỳ được thể hiện trong hình 4.

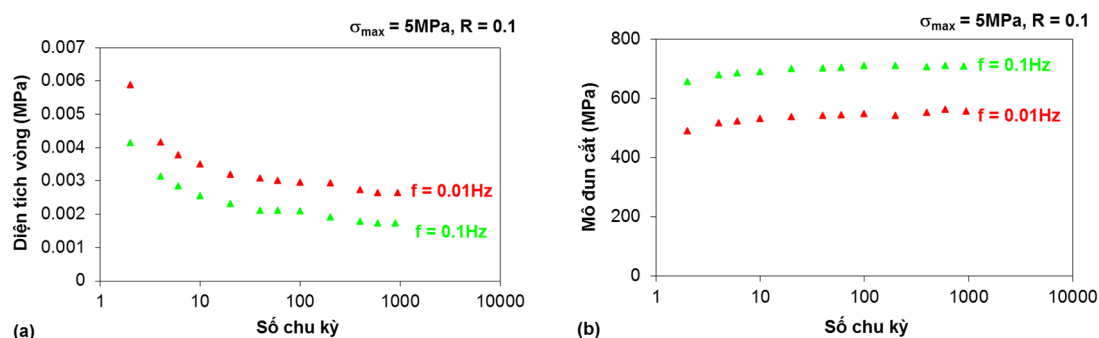
Sự phát triển của biến dạng ratcheting ở ba tần số khác nhau theo hàm thời gian cũng như theo số chu kỳ tương tự như trong hình 3. Khi vẽ theo hàm của thời gian (hình 4(a)), các đường cong biến dạng ratcheting ở tất cả các tần số chồng khít lên nhau. Như vậy khuynh hướng động học của biến dạng ratcheting trong ứng xử dài hạn (theo thời gian tải) độc lập với tần số trong khoảng thời gian thử nghiệm đã chọn. Mặt khác, sự tăng của tần số làm giảm sự tích lũy của biến dạng sau mỗi chu kỳ (hình 4(b)). Thật vậy,

độ nhót của HDPE giảm khi tốc độ tải tăng: các quá trình nghỉ cần ít thời gian hơn, vì vậy sự đóng góp của độ nhót đến biến dạng ratcheting ít hơn. Mặc dù tốc độ tích lũy biến dạng lúc ban đầu khác nhau ở ba tần số nhưng các đường cong biến dạng gần như song song sau khoảng 200 chu kỳ. Sự ổn định của biến dạng ratcheting ở các tần số khác nhau xuất hiện ở cùng số chu kỳ (ở đây sau 1000 chu kỳ theo tiêu chuẩn $(1/\epsilon_R) \cdot (d\epsilon_R/dN)$ có bậc độ lớn 10^{-4}). Do đó có thể kết luận rằng các tần số khác nhau từ 0.01 Hz đến 1 Hz chủ yếu ảnh hưởng đến biến dạng ratcheting trong thời gian ngắn (tức là thời gian của bản thân chu kỳ) và không ảnh hưởng trong thời gian dài (tức là thời gian thí nghiệm).

Sự phát triển của diện tích A và mô đun cắt Ed theo số chu kỳ lần lượt được biểu diễn trong hình 5(a) và 5(b), cho các thí nghiệm với $\sigma_{max} = 5\text{MPa}$ và $R = 0.1$ ở các tần số khác nhau. Với bất kỳ tần số nào, diện tích vòng trễ giảm đáng kể trong 40 chu kỳ đầu tiên và có khuynh hướng ổn định sau khoảng 400 chu kỳ, trong khi mô đun cắt tăng nhẹ lúc ban đầu và ổn định sớm sau khoảng 10 chu kỳ. Tần số càng cao, vòng trễ càng đóng và nghiêng nhiều hơn. Điều này có thể được giải thích theo cách tương tự như đối với biến dạng ratcheting: khi tăng tốc độ tải, độ nhót ít ảnh hưởng hơn nên ít sự trễ hơn và biên độ biến dạng cũng nhỏ hơn. Có thể quan sát thấy tốc độ đóng của các vòng trễ và sự tái bền của mô đun cắt là độc lập với tần số.



Hình 4. Phát triển của biến dạng ratcheting (a) theo thời gian và (b) theo số chu kỳ trong thí nghiệm mỗi chu kỳ ở ba tần số khác nhau ($\sigma_{max} = 5\text{MPa}$ và $R = 0.1$)



Hình 5. Phát triển của (a) diện tích vòng trễ A và (b) mô đun cắt E_d theo số chu kỳ trong thí nghiệm mỗi chu kỳ ở các tần số khác nhau ($\sigma_{max} = 5\text{MPa}$ và $R = 0.1$)

5. KẾT LUẬN

Các thí nghiệm mỗi chu kỳ kéo điều khiển ứng suất ở nhiệt độ phòng được thực hiện với HDPE để nghiên cứu sự ảnh hưởng của tần số đến ứng xử chu kỳ, cụ thể là sự phát triển và ổn định của biến dạng ratcheting và bản thân vòng trễ.

Biến dạng ratcheting theo thời gian thí nghiệm độc lập với tần số trong khoảng từ 0.01Hz đến 1Hz. Ngược lại, theo hàm của số chu kỳ, sự tích lũy biến dạng tăng khi tần số giảm.

Sự tăng của tần số làm cho các vòng trễ đóng hơn và nghiêng hơn nhưng không ảnh hưởng đến tốc độ đóng và tái bền của các vòng trễ.

Từ quan sát thực nghiệm, có thể thấy rằng tần số chỉ ảnh hưởng đến khuynh hướng ổn định

của biến dạng ratcheting nhưng không ảnh hưởng đáng kể đến khuynh hướng ổn định của vòng trễ. Các vòng trễ ổn định sớm, sau khoảng vài chục chu kỳ. Như vậy, trong thiết kế môi dựa trên đầu vào là biến dạng, cần phải xem xét đặc tính tải và thực hiện thí nghiệm môi nhiều chu kỳ (hơn 1000 chu kỳ) để có được trạng thái biến dạng ổn định. Ngược lại, khi thiết kế môi dựa trên đầu vào là đặc tính vòng trễ, chỉ cần thực hiện vài chục chu kỳ để có được vòng trễ ổn định.

Nghiên cứu này được tài trợ bởi trường Đại học Bách Khoa trong khuôn khổ đề tài mã số T-KTGT-2015-40

The effect of loading frequency on the cyclic mechanical behavior of polyethylene

- **Nguyen Song Thanh Thao**
- **Le Thi Tuyet Nhung**

Ho Chi Minh city University of Technology, VNU-HCM

ABSTRACT

An experimental investigation into ratcheting strain and stress-strain hysteresis loop in stress-controlled cyclic tensile tests at room temperature was performed to determine the effect of loading frequency on the cyclic mechanical behavior of high-density polyethylene (HDPE). It was found that frequencies ranging from 0.01 Hz up to 1 Hz mostly affects the accumulated strain

over related time scales (i.e that of the cycle itself) and not over long time scale (i.e. during the full test). In addition, the higher the frequency is, the more closed and vertical the loops are. Furthermore, the frequency affects only on the kinetics of stabilization of ratcheting strain but not on one of hysteresis loop.

Keyword: ratcheting, loading frequency, cyclic stabilization.

REFERENCES

- [1]. Gang Tao, Zihui Xia, Ratcheting behavior of an epoxy polymer and its effect on fatigue life, *Polymer Testing* 26, 451–460 (2007).
- [2]. Guozheng Kang, Yujie Liu, Yanfeng Wang, Zhuowei Chen, Wei Xu, Uniaxial ratcheting of polymer and polymer matrix composites: Time-dependent experimental observations, *Materials Science & Engineering A* 523, 13–20 (2009).
- [3]. Xu Chen, Shucui Hui, Ratcheting behavior of PTFE under cyclic compression, *Polymer Testing* 24, 829–833 (2005).
- [4]. Dou-Xing Pan, Guo-Zheng Kang, Zhi-Wu Zhu, Yu-Jie Liu, Experimental study on uniaxial time-dependent ratcheting of a polyetherimide polymer, *Journal of Zhejiang University-Science A (Applied Physics & Engineering)* 11, 804–810 (2010).
- [5]. Wei Liu, Zongzhan Gao, Zhufeng Yue, Steady ratcheting strains accumulation in varying temperature fatigue tests of PMMA, *Materials Science and Engineering A* 492, 102–109 (2008).
- [6]. Zhe Zhang, Xu Chen, Yanping Wang, Uniaxial ratcheting behavior of polytetrafluoroethylene at elevated temperature, *Polymer Testing* 29, 352–357 (2010).
- [7]. Zhe Zhang, Xu Chen, Multiaxial ratcheting behavior of PTFE at room temperature, *Polymer Testing* 28, 288–295 (2009).
- [8]. Song Thanh Thao Nguyen, Sylvie Castagnet, Jean-Claude Grandidier, Nonlinear viscoelastic contribution to the cyclic accommodation of high density polyethylene in tension: experiments and

- modeling, *International journal of fatigue* 55, 166-177 (2013).
- [9]. S. Nikolov, I. Doghri, O. Pierard, L. Zealouk, A. Goldberg, Multi-scale constitutive modeling of the small deformations of semi-crystalline polymers, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 50, 2275–2302 (2002).
- [10]. B. J. Lee, D. M. Parks, S. Ahzi, Micromechanical modeling of large plastic deformation and texture evolution in semi-crystalline polymers, *J. Mech. Phys. Solids* 41, 1651–1687 (1993).
- [11]. J.A.W. van Dommelen, D.M. Parks, M.C. Boyce, W.A.M. Brekelmans, F.P.T. Baaijens, Micromechanical modeling of the elasto-viscoplastic behavior of semi-crystalline polymers, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 51, 519–541 (2003).
- [12]. F.J. Rubio-Hernández, A.I. Gómez-Merino, Time dependent mechanical behavior: the viscoelastic loop, *Mech Time-Depend Mater* 12, 357–364 (2008).
- [13]. Elhem Ghorbel, A viscoplastic constitutive model for polymeric materials, *International Journal of Plasticity* 24, 2032–2058 (2008).
- [14]. Ozgen U. Colak, Modeling deformation behavior of polymers with viscoplasticity theory based on overstress, *International Journal of Plasticity* 21, 145–160 (2005).
- [15]. Ozgen U. Colak, Kerem Asmaz, Tasnim Hassan, Mechanical Characterization and Modeling of Cyclic Behavior of Ultra High Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE), *Advanced Materials Research* 445, 877–882 (2012).
- [16]. Mahmoud Shariati, H. Hatami, Hossein Yarahmadi, Hamid Reza Eipakchi, An experimental study on the ratcheting and fatigue behavior of polyacetal under uniaxial cyclic loading, *Materials and Design* 34, 302–312 (2011).
- [17]. Gang Tao, Zihui Xia, Mean stress/strain effect on fatigue behavior of an epoxy resin, *International Journal of Fatigue* 29, 2180–2190 (2007).
- [18]. Gang Tao, Zihui Xia, Fatigue behavior of an epoxy polymer subjected to cyclic shear loading, *Materials Science and Engineering A* 486, 38–44 (2008).
- [19]. Gang Tao, Zihui Xia, Biaxial fatigue behavior of an epoxy polymer with mean stress effect, *International Journal of Fatigue* 31, 678–685 (2009).