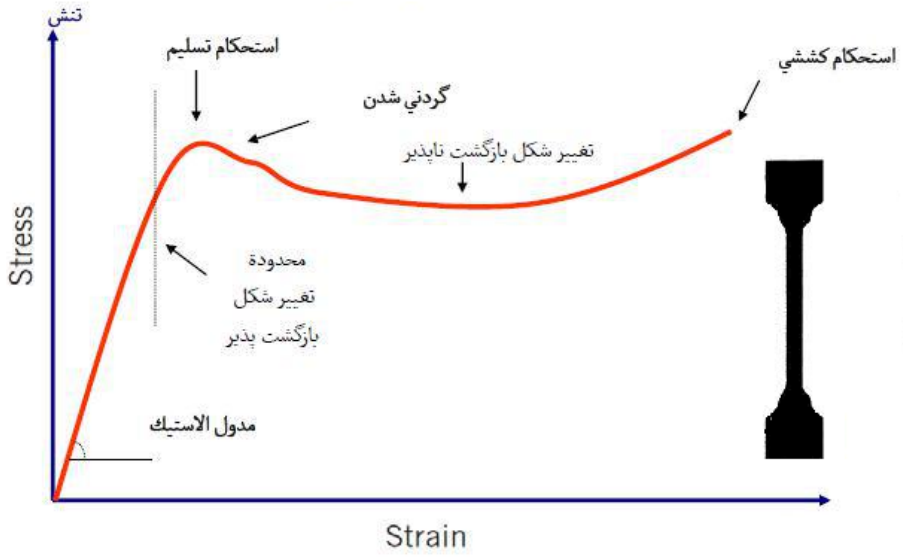
موسسه آموزشی

جهش پلیمر ایران

خواص فیزیکی مکانیکی



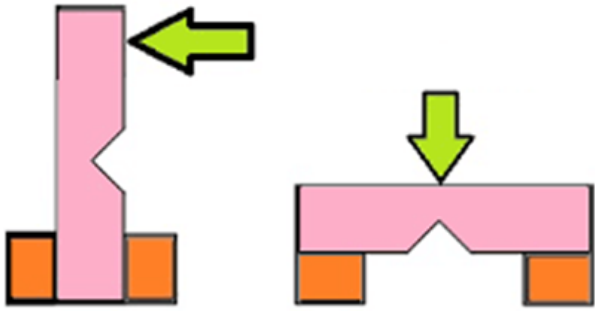
$$\sigma_T = \sigma(1+\varepsilon)$$

$$\varepsilon_T = \ln(1+\varepsilon)$$

Hooke's Law

$$\sigma = E\,\varepsilon$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$



نویسنده و مدرس:

دکتر ایمان صاحبی جویباری

رتبه یک کارشناسی ارشد و دکتری

یادداشت مولف

مجموعه‌ی حاضر شامل DVD و کتابچه است که حاصل بیش از ده سال تلاش اینجانب و چکش کاری‌های بسیار و مباحثه با نخبه‌های کشور و صنعتی در زمینه مهندسی پلیمر بوده است که دستاورد آن رضایت دانشجویان و کسب رتبه‌های تک رقمی و دو رقمی و قبولی در بهترین دانشگاه‌های تهران و ایران می‌باشد؛ به لطف خداوند متعال سعی شده است در تهیه این مجموعه تا جایی که توانستیم از رفرنس‌های لاتین و فارسی کامل استفاده کردیم تا در ابتدا درک عمیق تر و بهتری از مفاهیم داشته باشیم و در ادامه به هدف خود دست یابیم.

معرفی مولف

دکتر ایمان صاحبی جویباری در سه مقطع کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکتری در دانشگاه صنعتی امیرکبیر تحصیل کرده‌اند و در هر سه مقطع دارای معدل الف و جز استعدادهای درخشان آن دانشگاه و بنیاد ملی نخبگان می‌باشند و هم چنین در کنکور ارشد سال ۹۱ و کنکور دکتری سال ۹۳ رتبه یک را کسب کرده و هر ساله بیش از نیمی از رتبه‌های تک رقمی و دو رقمی مهندسی پلیمر در مقطع ارشد و دکتری از دانشجویان ایشان می‌باشند.

توجه فرمایید این کتابچه فقط راهنمایی برای بهتر فهمیدن ویدیوهای تهیه شده است و منبع اصلی ویدیو می‌باشد.

فصل اول

شماره	اسم فایل
۱	مقدمه اولیه پلیمر
۲	دسته بندی اولیه پلیمر
۳	افزودنی ۱
۴	افزودنی ۲
۵	دمای انتقال شیشه ای ۱
۶	دمای انتقال شیشه ای ۲
۷	دمای انتقال شیشه ای ۳
۸	دمای انتقال شیشه ای ۴
۹	مثال قانون فاکس
۱۰	دمای انتقال شیشه ای ۵
۱۱	دمای انتقال شیشه ای ۶
۱۲	آنالیز DSC
۱۳	آنالیز DSC 2
۱۴	اثر سرعت سرد کردن
۱۵	بلورینگی۱
۱۶	بلورینگی۲
۱۷	بلورینگی۳
۱۸	بلورینگی۴
۱۹	بلورینگی۶
۲۰	بلورینگی۸

اهمیت پلیمرها

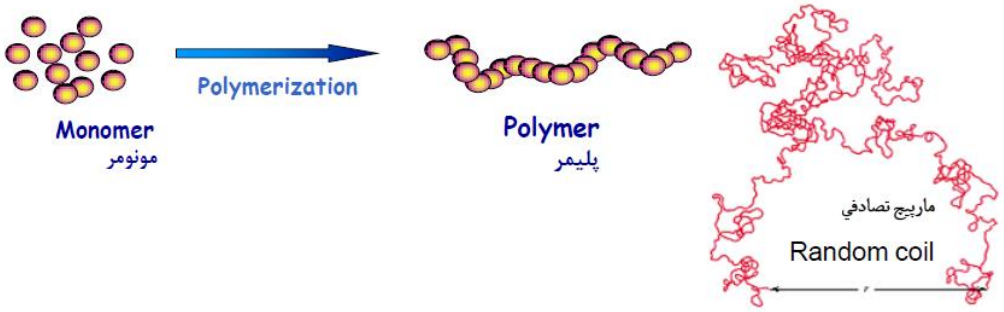
نحوه توسعه تمدن

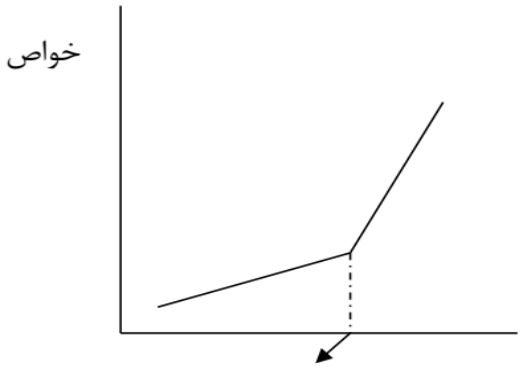
عصر سنگ ← عصر برنز ← عصر آهن ← عصر پلیمرها

- گستردگی کاربری
  - حیات (پروتئین، DNA و ...)
  - غذا (نشاسته، کربوهیدراتهای پیچیده)
  - مسکن (چوب، بتون، لوله و ...)
  - زندگی روزمره (کاغذ، لباس، رنگ، تایر، چسب و ...)
  - صنایع حمل و نقل (زمینی، هوایی و دریایی)
- نیروی کار شاغل
- رشد سالانه
  - نیازهای جدید و نوآوری های دائمی
- تجارت
- اهمیت بین رشته ای
  - شیمی، فیزیک، صنایع غذایی، بیولوژی، مهندسی هوافضا و ...

پلیمرها چگونه ساخته می‌شوند؟

پلیمر: جسمی که از بهم پیوستن واحدهای ساختمانی مشابه (مونومر) ایجاد شده باشد.





جرم مولکولی گره‌خوردگی (M_e)

$(M_e \simeq ۲۵۰۰۰)$

این یک آستانه است که باید این میزان حداقل باشد تا گره‌خوردگی اتفاق بیافتد.

سوال: اندازه‌ی زنجیره پلیمری چقدر است و در یک گرم از ماده چند زنجیره‌ی پلیمری داریم؟ (باید Order را بدانیم!!!)

$$M_n = \frac{\sum N_i M_i}{\sum N_i} \cong \left({}^{gr}/_{mol}\right) \rightarrow \text{متوسط عددی}$$

$$M_w = \frac{\sum N_i M_i^{۲}}{\sum N_i M_i} \cong \left({}^{gr}/_{mol}\right) \rightarrow \text{متوسط وزنی}$$

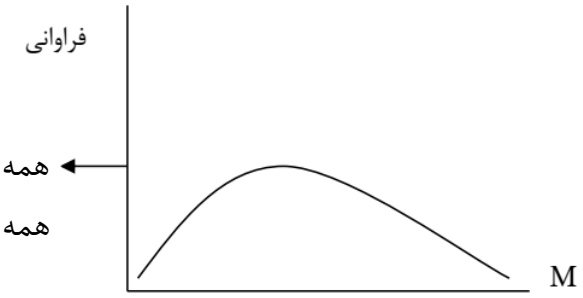
$$PDI = \frac{M_w}{M_n} \geq ۱$$

$(M_n < M_w)$ است پس $(PDI > ۱)$ می‌باشد.

نکته: متوسط گیری عددی، یک میانگین گیری ساده از وزن مولکولی به ما می‌دهد امّا متوسط گیری وزنی تأثیر زنجیره‌های بزرگ تر را بیشتر در نظر می‌گیرد.

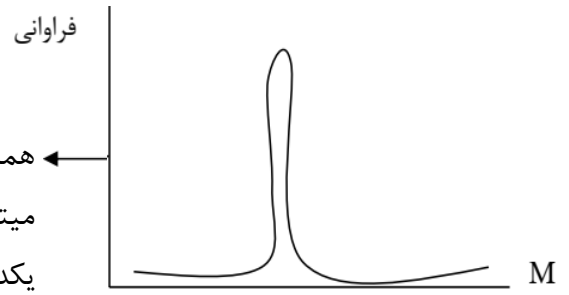
PDI:

۱) پهن:



همه نوع زنجیر داریم، زنجیر از طول‌های کوچک تا طول‌های زیاد، همه را داریم.

۲) باریک:



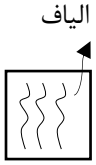
همهٔ زنجیرها یک اندازه هستند، یکدست بودن مطرح است. (همه میتوانند دارای وزن مولکولی کم، متوسط یا زیاد باشند، مهم یکدست بودن است.)

سوال: ویسکوزیته یک ماده با $PDI \simeq 7$ بیشتر است یا با $PDI \simeq 2.1$؟!

حل (نکته!!): با داشتن PDI نمیتوان در مورد ویسکوزیته نظر داد. (باید حجم مولکولی را هم بدانیم)

دسته بندی اولیه پلیمر

- **پلاستیک** ← موادی که هم نرم و سخت هستند و و قابل بازیافت باشند یعنی Tm دارند مثل لیوان pp و ظرف شامپو
- **الاستومر** ← موادی که انعطاف¬پذیر بوده و دارای اتصال عرضی شیمیایی می¬باشند قابل بازیافت نیستند یعنی Tm ندارند مثل کش پول
- **ترموست** ← موادی خیلی سفت و محکم که Tm ندارند و می‌سوزند مثل دسته قابلمه
- **رنگ – رزین** ← موادی با ظاهر ویسکوز مانند که دارای وزن مولکولی کمی هستند $M < 300\ gr$. این مواد شبیه عسل هستند.
- **کامپوزیت** ← هر ماده‌ی پلیمری که با مواد جامد ترکیب شود به آن کامپوزیت می‌گوییم.



- **ترموپلاستیک الاستومر** ← موادی که فرآیند پذیری شبیه پلاستیک دارند ولی خواص شبیه الامستومر دارند **(Tpu)**
- **فوم** ← موادی که ساختار متخلخل دارند و چگالی آن‌ها پایین است.

افزودنیها در حین تولید پلیمر یا فرآیند کردن آنها، به منظور ایجاد خواص و کاربردی ویژه مورد استفاده قرار میگیرند. تقسیمبندی افزودنیها بر پایه نقش آنها عبارت است از:

افزودنی ۱ و ۲

نرم کننده (Lubricant)

- **نرم کننده داخلی :** به منظور ایجاد سیالیت بهتر و سریع‌تر در حین عملیات فرآیندی استفاده می‌شود، مانند: استئارات کلسیم، استرهای فتالیک.

- **نرم کننده خارجی :** به منظور کاهش اصطکاک و سهولت جریان یافتن مذاب پلیمری استفاده می‌شود، مانند: واکس پلی‌اتین، واکس پارافین.

پرکننده (Filler)

پایدارکننده حرارتی (Heat Stabilizer)

به منظور ثبات خواص پلیمر در دماهای بالا افزوده می‌شوند. مانند: سولفات بازی سرب، فسفات بازی سرب. (به طور عمده صابون‌های فلزات سنگین یا نمک‌های بازی).پایدار کننده حرارتی برای پلیمرهای حساس به حرارت مانند PVC که امکان سوختن و تخریب زیادی دارد استفاده می‌شود.

پایدارکننده نوری (UV Stabilizer)

به منظور محافظت پلیمر در مقابل نور UV افزوده می‌شود. افزودنی می‌بایست آسان‌تر از پلیمر بتواند نور UV را جذب کند، بدون این‌که دچار تخریب گردد، مانندک کربن بلک.

ضد اکسیداسیون (Antioxidant)

عمده‌ترین عملکرد افزودنی ضد اکسیداسیونی، واکنش با رادیکال آزاد فاز انتشار پلیمریزاسیون و ایجاد محصول غیر فعال می‌باشد. مانند: مشتقات فنل‌ها، آمین‌ها و آروماتیک‌ها.

ضد الکتریسته ساکن (Antistatic Agent)

اکثر پلیمرهای به علت قطبیت کم، قابلیت جذب گرد و غبار دارند و الکتریسیته ساکن روی سطح آن‌ها تجمع می‌کند. به منظور رفع آن ضد الکتریسیته ساکن می‌افزایند که به سطح پلیمر آمده و با ایجاد یک لایه نازک هادی. از تجع الکتریسیته ساکن به شدت می‌کاهد، مانند: پلی اتیلن گلیکول و اسید فسفریک.

ضد تشعشع (Antiradiation Agent)

برای جلوگیری از تخریب پلیمر هنگام مواجه شدن آن با تشعشع رادیواکتیو استفاده می‌شود، مانند: PP که با امواج رادیواکتیو استریلیزه می‌شود. به آن ضد تشعشع می‌زنند تا تخریب نشود.

تأخیر اندازنده اشتعال (Flame Retardant)

مواد هسته‌زا (Nucleating Agent)

به منظور شروع هسته‌گذاری (به عنوان مثال قبل از فرآیند فوم کردن) با مواد هسته‌زا نقاط پر انرژی (hot spots) را درون ماتریس پلیمری ایجاد می‌کنند، تا حباب‌های گاز به درون آن جمع شده و فوم تشکیل شود، مانند: سیلیکای آمورف.

مواد پف کننده (Blowing Agent)

در تولید فوم و به منظور متورم کردن و ایجاد حباب و حفره در ماتریس پلیمری استفاده می‌شود، مانند ADCA.

مواد جفت کننده (Coupling Agent)

برای پیوند زدن موادی به سطح پلیمر مورد استفاده قرار می‌گیرد، مانند: سیلان‌ها و تیتان‌ها.

دمای انتقال شیشه ای ۱

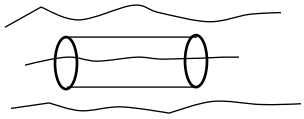
دمای انتقال شیشه‌ای (glass transition) ← دمایی که ماده در آن نرم می‌شود یعنی زنجیرها در حال شروع به حرکت‌اند این دما با T_g شان داده می‌شود.

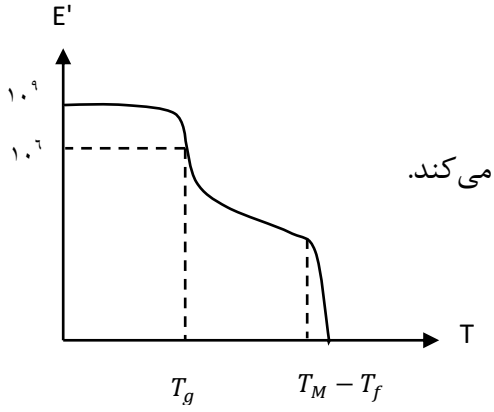
دمای ذوب (T_m) ← زمانی که ساختار بلور (مثل PE) ذوب شده و چکه می‌کند.

دمای جاری شدن (T_f) ← زمانی که ساختار آمورف (مثل PS) ذوب شده و چکه می‌کند.

مفاهیم Conceptual: ← برای T_g

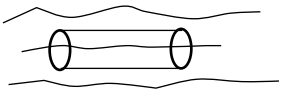
دمای شیشه‌ای (T_g) ← جایی که segment در لوله فرضی دور خودش طناب بزند.



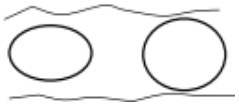


جایی است که chain شروع به حرکت می‌کند و مدول ۱۰۰۰ مرتبه افت می‌کند.

حجم آزاد (Free volume) به دو صورت تعریف می‌شود:



زیر t_g ← حجم آزاد بین مولکولی (Intristical Free volume)



بالای t_g ← حجم آزاد حفره (hole Free)

t_g از بیان حجم آزاد: T_g جایی است که حجم آزاد سیستم ۰/۱ حجم کل گردد.
t_M از بیان حجم آزاد: T_M جایی است که حجم آزاد سیستم ۰/۳ حجم کل گردد.

توجه: حجم آزاد بالای t_g بیشتر از حجم آزاد زیر t_g است.

- تئوری سینتیکی: برای رخداد T_g باید بسته‌ی انرژی گرمایی (KT) و زمان لازم را فراهم کنیم.

دمای انتقال شیشه ای ۲

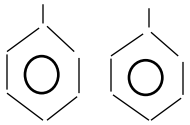
- T_g پلیمرهای مهم: (T_g یک محدوه است و به عوامل زیادی بستگی دارد)

PE $-C-C-C-C-C-C-$ $T_g = -۱۰۰$

PP $-C-\underset{\underset{CH_۳}{|}}{C}-C-\underset{\underset{CH_۳}{|}}{C}-C-$ $T_g = ۰^{\circ}C$

PVC $-C-\underset{\underset{Cl}{|}}{C}-C-\underset{\underset{Cl}{|}}{C}-C-$ $T_g = ۸۵\ ^{\circ}C$

PS $-C-C-C-C-C-$ $T_g = ۱۰۰\ ^{\circ}C$

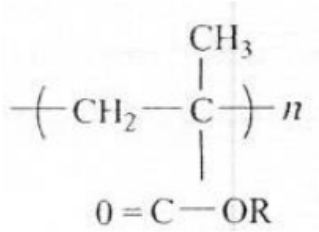


اعداد بالا اعداد پذیرفته شده در فشار اتمسفر هستند.

نکته (بسیار مهـــــم!!!) T_g رخداد = حجم آزاد + t + KT

انعطاف پذیری

با افزایش طول زنجیر گروه فرعی، انعطاف‌پذیری افزایش یافته و در نتیجه Tg کاهش می‌یابد. به عنوان مثال در گروه متاکربلات:



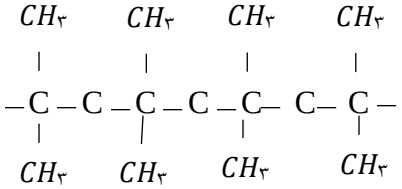
R	CH_3	C_2H_5	$n-C_3H_7$	$n-C_4H_9$	$n-C_6H_{13}$
$-Tg$ (℃)	۱۰۵	۶۵	۳۵	۲۱	-۵

دمای انتقال شیشه‌ای ۳

قطبیت (polarity) گروه‌های قطبی (F,N,O,Cl) با ایجاد قطبیت برهم‌کنش یک زنجیر با زنجیرهای اطراف را بیشتر کرده (حجم آزاد کم شده) پس باید دمای بیشتری برای طناب زدن segment بدهیم یعنی T_g افزایش می‌یابد.

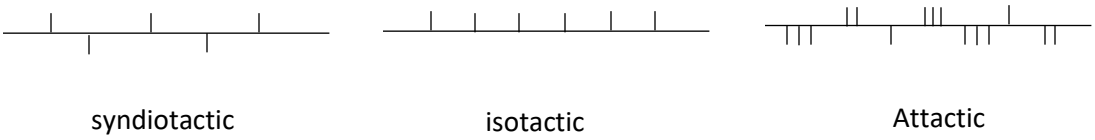
نکته: هر عاملی که حرکت زنجیر را سخت‌تر کند، T_g را افزایش داده است.

تقارن (Symmetry) با ایجاد تقارن زنجیره شبیه الاکلنگ رفتار می‌کند، خیلی راحت‌تر چرخش می‌کند پس T_g کاهش می‌یابد.



دمای انتقال شیشه ای ۴

تاکتیسیته

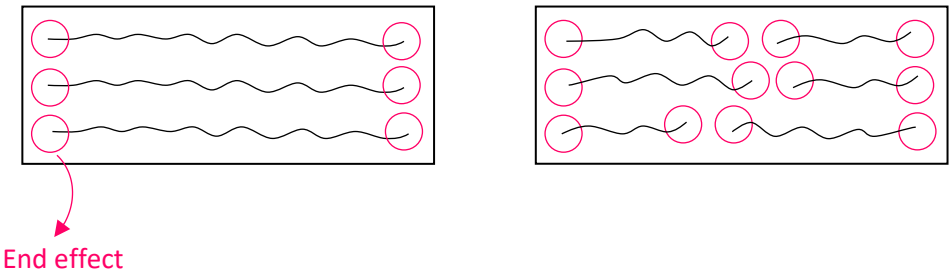


syndiotactic isotactic Attactic

بیشترین T_g را ساختاری syndiotactic دارد زیرا احتمال درهم رفتگی synod از بقیه حالت‌ها بیشتر است و ساختار isotactic کمترین t_g را دارد چون احتمال درهم رفتگی کمی دارد.

ترتیب کاهش T_g ← .....

جرم مولکولی و End effect

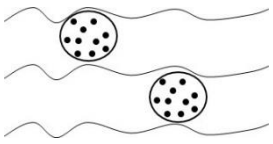


دمای انتقال شیشه ای ۵

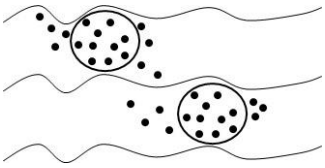
نرم کننده (plasticizer)

یک کوچک مولکول از جنس خود پلیمر

اگر درصد کم استفاده شود: T_g را افزایش می‌دهد چون .....



اگر درصد زیاد استفاده شود: T_g را کاهش می‌دهد چون کوچک ملکول نرم کننده پس .....



مثال قانون فاکس

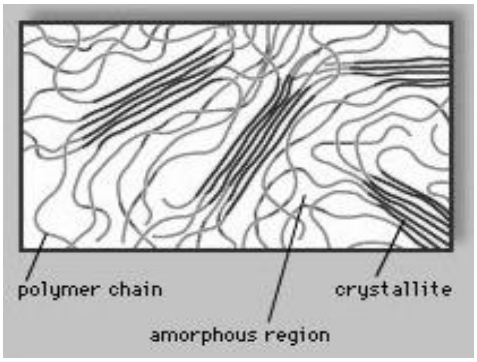
مثال: دی-ان-اتیل هگزیل فتالات (DEHP) و ترکیبات مرتبط معمولاً به عنوان نرم کننده PVC استفاده میشود. یک نرم کننده خوب با پلیمر امتزاج پذیر است، خودش متبلور نمیشود و دارای فشار بخار بسیار کم است. چه کسری از DEHP باید به PVC اضافه شود تا T_g آنرا به کمتر از دمای اتاق منتقل کند؟

T_g DEHP ≈ -86 °C

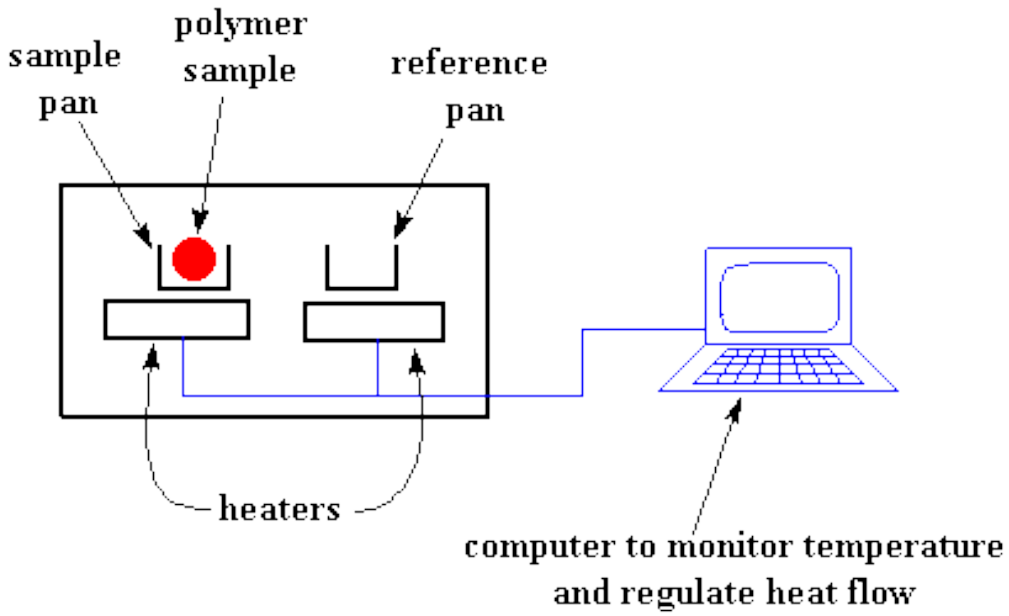
فرض: T_g هدف ۳۰۰ کلوین

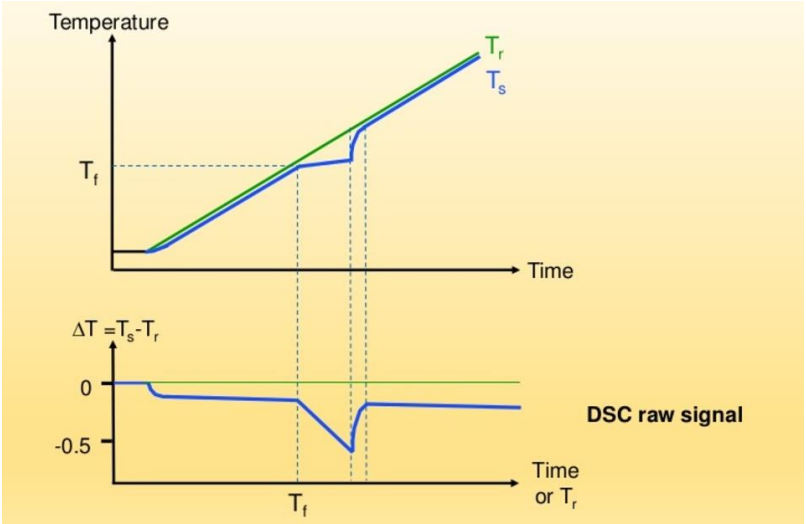
$$\frac{1}{300} = \frac{w_1}{187} + \frac{1-w_1}{360} = w_1\left(\frac{1}{187} - \frac{1}{360}\right) + \frac{1}{360} \quad \Longrightarrow \quad w_1 = 0.22$$

دمای انتقال شیشه ای ۶



آنالیز DSC





اثر سرعت سرد کردن

یادداشت ....

بلورینگی ۱

چرایی بلور شدن:

بلورینگی۲

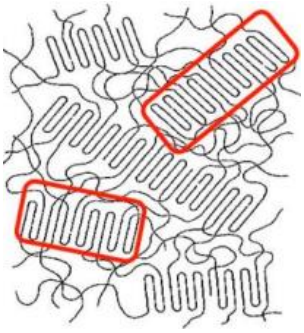
شرط بلورینگی:

بلورینگی هم دما و غیر هم دما

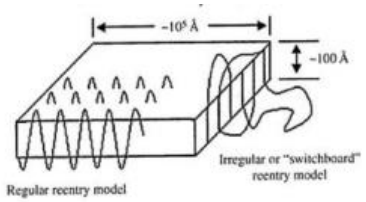
بلورینگی۳

تئوری‌های بلوری شدن

۱) Fringed micelle model



۲) Chain folding model



بلورینگی۴

نمودار سرعت تبلور برحسب دما

نکته: همه‌ی مواد آمورف شفاف‌اند چون نور را از فضاهای خالی عبور می‌دهند. اگر ماده‌ی آمورفی شفاف نبود یعنی افزودنی دارد و معمولاً ماده‌ی بلوری چون بلور نور را عبور نمی‌دهد کدر است.

در نتیجه: در باوری که اندازه بلور ریز است نور به راحتی می‌تواند از فضاهای خالی عبور کند پس بلور شفاف است یعنی بلور ریز شفاف‌تر از بلور درشت است.

بلورینگی۶

اگر پلیمر نیمه بلورین، **دو فازی** در نظر گرفته شود،

$$V = X_t V_c + (1 - X_t) V_a$$

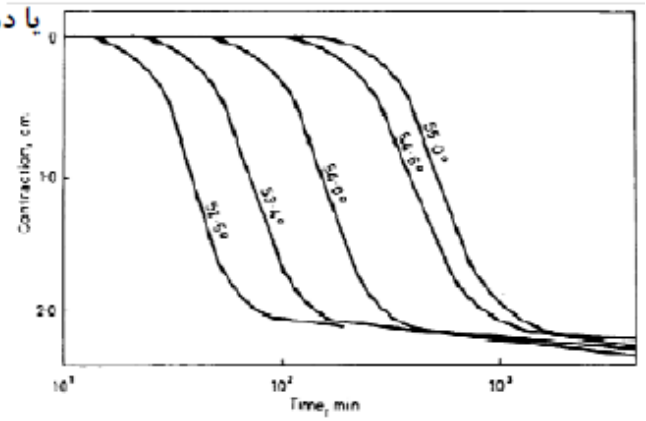
V: total volume
V_a : volume of the amorphous phase
V_c : volume of the crystalline phase

$$1 - X_t = \frac{V - V_c}{V_a - V_c}$$

یا در آزمونهای **حجم سنجی**

$$1 - X_t = \frac{h_0 - h_t}{h_0 - h_\infty}$$

where h_0, h_t, and h_∞ represent capillary dilatometric heights at time zero, time t, and the final dilatometric reading.



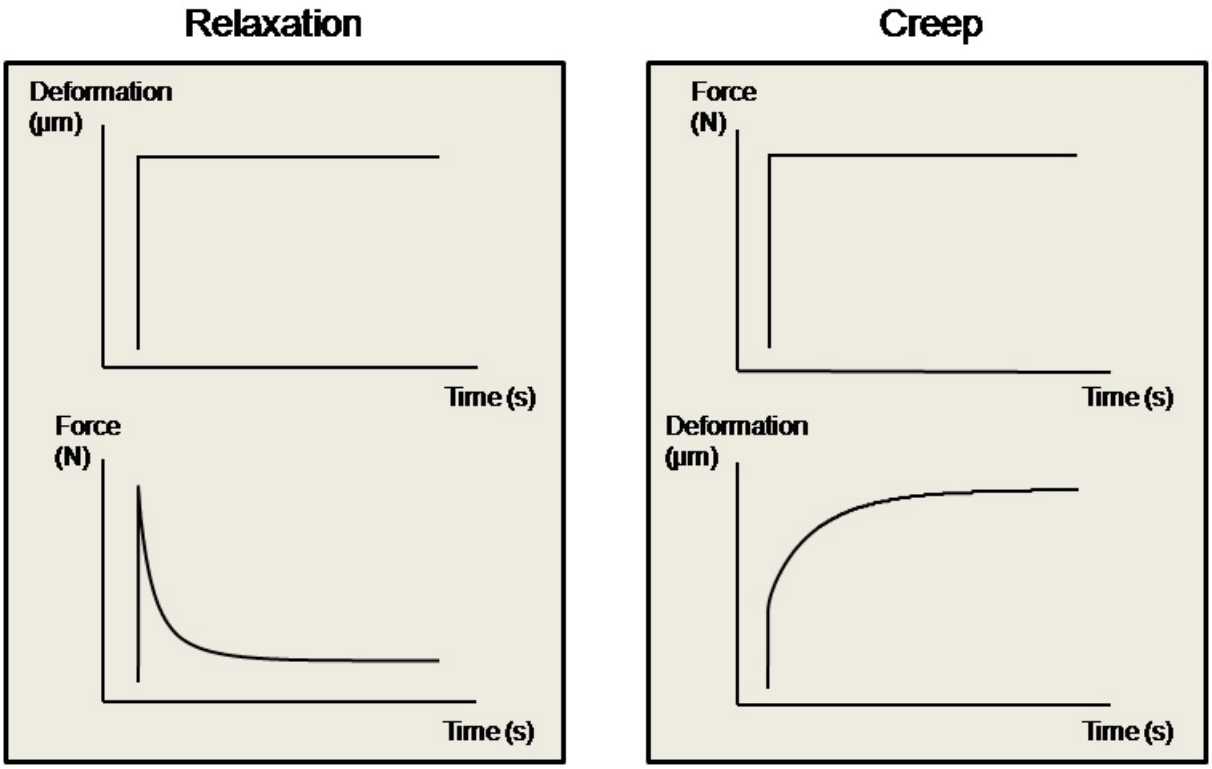
بلورینگی۸

عوامل موثر بر بلورینگی

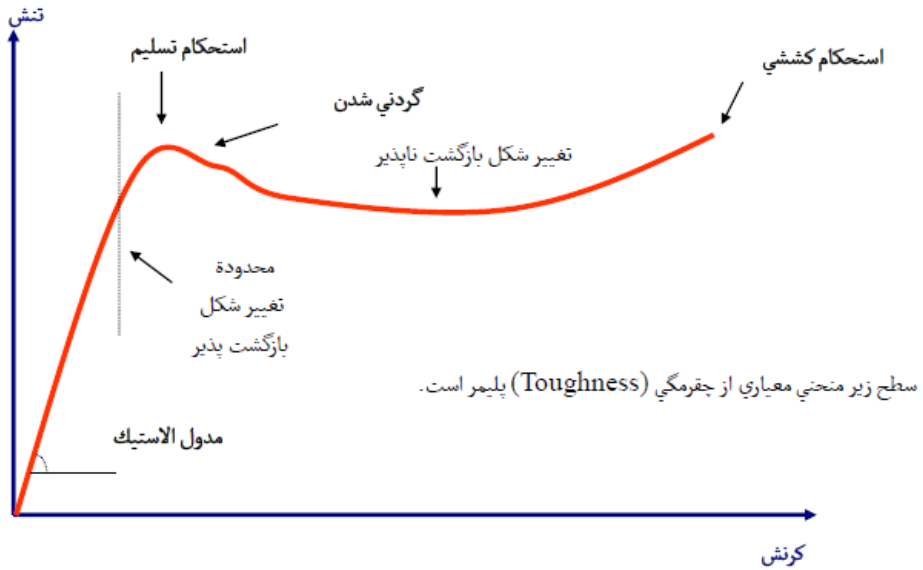
فصل دوم

شماره	اسم فایل
۱	Creep, Stress relaxation
۲	تنش کرنش ۱
۳	تنش کرنش ۲
۴	انواع کرنش و تنش
۵	مثال کرنش و تنش واقعی
۶	حالت تنش
۷	انواع مدول
۸	آزمون‌های دینامیکی
۹	دمای نرم شدگی
۱۰	تست سایش و فتیگ
۱۱	تست سختی
۱۲	تست استحکام ضربه‌ای
۱۳	مکانیسم شکست
۱۴	اثر شعاع ترک
۱۵	اثر دما و جهت گیری بر ضربه
۱۶	اثر رابر و فیلر بر ضربه
۱۷	اثر بلور و نرم کننده بر ضربه
۱۸	مثال تنش کرنش واقعی
۱۹	مثال تنش مهندسی
۲۰	مثال جهندگی

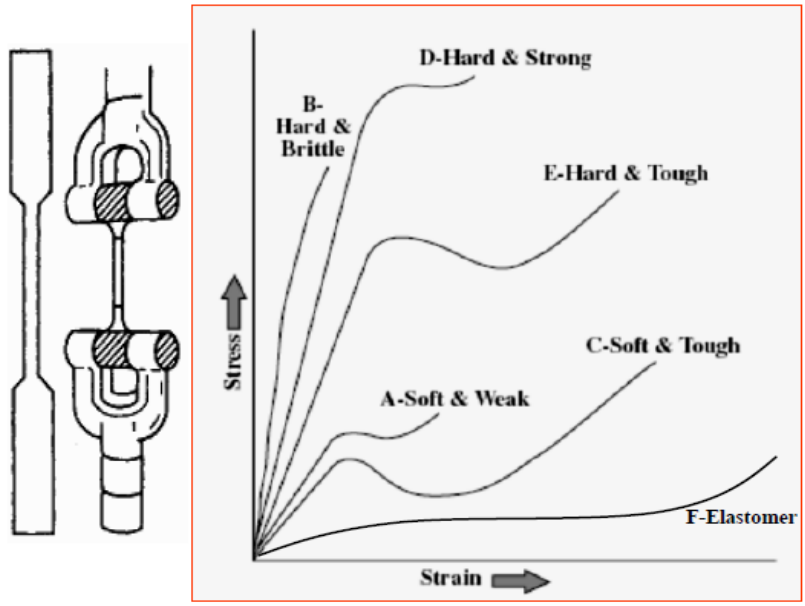
Creep, Stress relaxation



تنش کرنش ۱



تنش کرنش ۲



الف) نرم و ضعیف : پلی (ایزوبوتیلن)

ب) سخت و ترد (شکننده): پلی استایرن

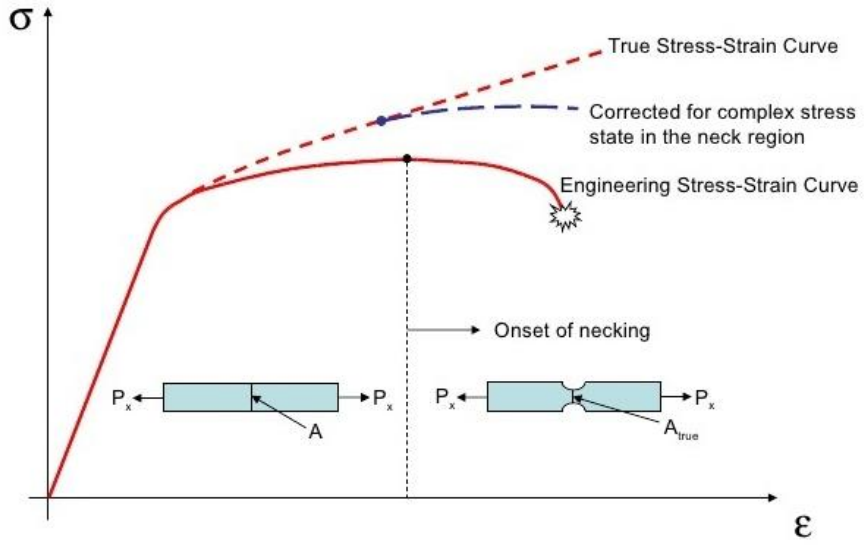
ج) نرم و چقرمه: پی وی سی نرم شده

د) سخت و قوی: پی وی سی نرم نشده

ه) سخت و چقرمه: کوپلیمر ABS

و) الاستومری: پلی بوتادی ان

انواع کرنش و تنش



Definition	Name
$\epsilon = \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0}$	Cauchy (engineering)
$\epsilon = \frac{L - L_0}{L}$	
$\epsilon = \ln \frac{L}{L_0}$	Hencky (true)
$\epsilon = \frac{1}{3}\left[\frac{L}{L_0} - \left(\frac{L_0}{L}\right)^2\right]$	Kinetic theory of rubberlike elasticity
$\epsilon = \frac{1}{2}\left[\left(\frac{L}{L_0}\right)^2 - 1\right]$	Kirchhoff
$\epsilon = \frac{1}{2}\left[1 - \left(\frac{L_0}{L}\right)^2\right]$	Murnaghan
$\epsilon = \left[\left(\frac{L}{L_0}\right)^n - 1\right]$	Seth (n is a variable)

مثال کرنش و تنش واقعی

اگر تغییر حجم یک پلیمر در آزمون کشش به‌صورت $V = (1+b\varepsilon)V_0$ باشد، که در آن V_0 حجم اولیه، b ثابت و ε کرنش مهندسی است، در این‌صورت رابطه تنش مهندسی (σ_e) با تنش واقعی (σ_T) کدام است؟

۱) $\sigma_T = \sigma_e(1+\varepsilon)$

۲) $\sigma_T = \sigma_e(1+b\varepsilon)$

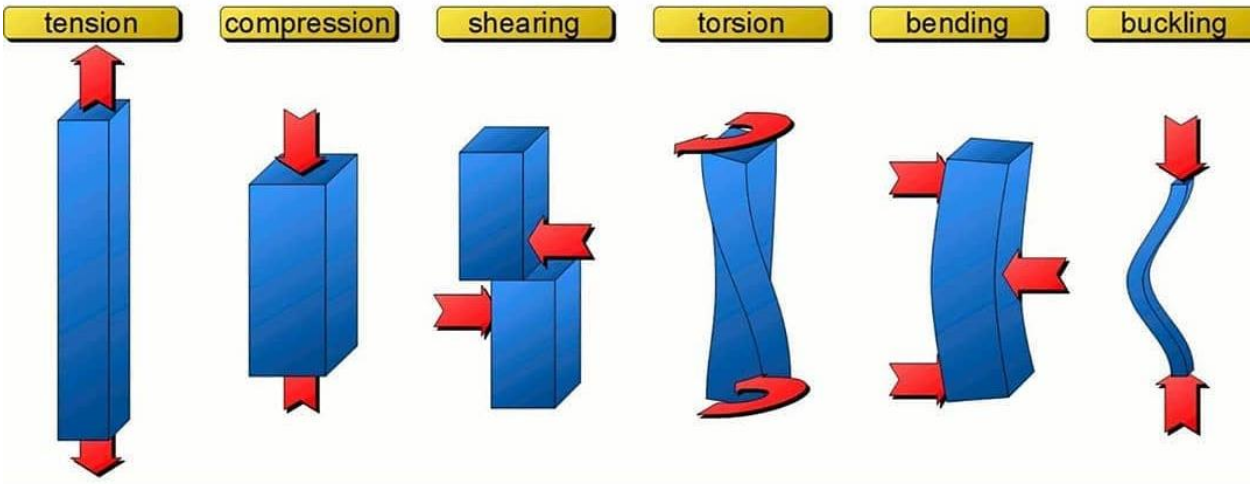
۳) $\sigma_T = \sigma_e\frac{(1+b\varepsilon)}{(1+\varepsilon)}$

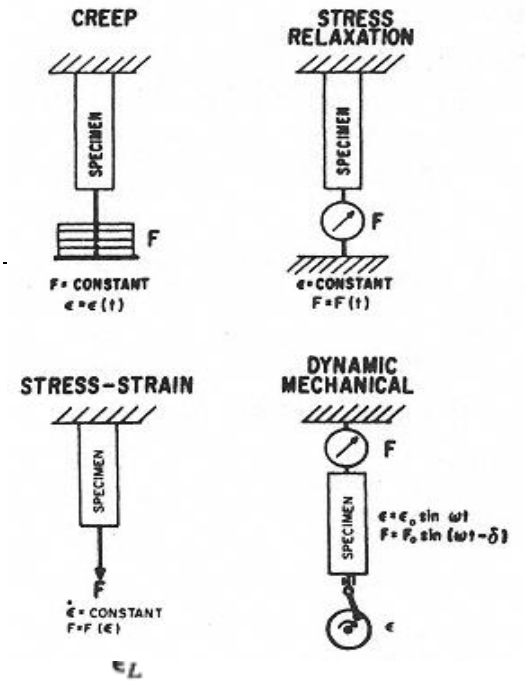
۴) $\sigma_T = \sigma_e\frac{1+\varepsilon}{1+b\varepsilon}$

کرنش در قطعه‌ای رابری را که تحت کرنش قرار گرفته شده با استفاده از kinetic theory of rubber like elasticity. چند درصد است؟ (طول اولیه قطعه رابری ۳۰ cm و طول نهایی آن ۶۰ mm می‌باشد.)

۱) ۲۵ ۲) ۵۰

۳) ۷۵ ۴) ۱۰۰





انواع مدول

۱) مدول یانگ

۲) مدول برشی

۳) مدول توده

$3K(1 - 2\nu)$

آزمون‌های دینامیکی

به منظور بررسی خواص الاستیک ماده پلیمری، می‌بایست حداقل دو ثابت الاستیک معین باشد، بدین ترتیب، دیگر ثابت‌ها قابل محاسبه‌اند. روابط مختلف بین ثابت‌های الاستیک عبارتند از:

E, K, υ $\quad : E = ۳\mathrm{K}\,(۱ - ۲\upsilon)$

E , G , υ : $E = ۲\mathrm{G}\,(۱ + \upsilon)$

E , G , K : $\frac{۱}{E} = \frac{۱}{۹\mathrm{K}} + \frac{۱}{۳\mathrm{G}}$

V , G , K : $V = \frac{۳\mathrm{K} - ۲\mathrm{G}}{۶\mathrm{K} + ۲\mathrm{G}}$

در تست تنش -کرنش از نوع تراکمی، تنش بسیار بالاتر از حالت کششی است، به طوری که:

$(\sigma_B)_C > (\sigma_B)_t$

برای اندازه‌گیری گرمای اتلافی، رابطه زیر مورد استفاده قرار می‌گیرد:

$\boxed{H = \pi G'' \gamma_۰^۲}$

ترم‌های دیگر دینامیک مکانیکی، کامپلیانس ترکیبی، J^* و ویسکوزیته ترکیبی. η^* می‌باشند که روابط آن‌ها به صورت زیر است:

$J^* = J' - iJ''$

$\eta^* = \eta' - i\eta''$

چنانچه فرکانس نوسانات بر حسب رادیان بر ثانیه و با ω نمایش داده شود، روابط بین ترم‌های مختلف عبارت است از:

$G' = \omega\eta''$ & $G'' = \omega\eta'$

$G' = \frac{J'}{J^۲}$ & $J' = \frac{G'}{G^۲}$

$\frac{G''}{G'} = \frac{J''}{J'}$

$G^۲ = G'^۲ + G''^۲$ & $J^۲ = J'^۲ + J''^۲$

نکته: بخش حقیقی ویسکوزیته ترکیبی، η'، بیانگر ترم اتلافی آن است، در حالی که در مدول، بخش موهومی، G" ، معرف ترم اتلافی می‌باشد.

ترم‌های دمپینگ متفاوتی در استفاده‌های معمول تست دینامیک مکانیکی تعریف می‌شود که به شرح زیر می‌باشد:

۱. Logarithmic Decrement, $\Delta = \ln\frac{A_1}{A_2} = \ln\frac{A_2}{A_3} = \cdots = \frac{1}{n}\ln\frac{A_i}{A_{i+n}}$

۲. Q factor = $(\tan\delta)^{-1} = \left(\frac{G''}{G'}\right)^{-1}$

۳. Specific Damping Capacity, $\psi = 2\pi\frac{G''}{G'} = 2\pi\tan\delta = 2\Delta$

۴. Resilience, $R = 1 - 2\Delta = 1 - 2\pi\frac{G''}{G'} = 1 - 2\pi\tan\delta \qquad , R = 1 - \psi$

۵. Decibels of Damping , $dB = 20\log\left(\frac{A_1}{A_2}\right) = \frac{20\Delta}{30.3/2} = \frac{20\pi}{30.3/2}\frac{G''}{G'}$

در مقادیر پایین دمپینگ ($\Delta < 1$)، مقدار Δ از رابطه زیر تقریب زده می‌شود:

$$\Delta = \pi\frac{G''}{G'}$$

دمای نرم شدگی

تست تعیین دمای نرم شوندگی یا HDT (Heat Distortion Temperature) دمایی است که در آن ماده پلیمری تحت بار تغییر شکل می‌گیرد. این دما، دمایی مانند T_g است و برای پلیمرهای نیمه کریستالین بین T_g و T_m قرار می‌گیرد.

به عنوان مثال، پلی اتیلن پلیمری کریستالین است و با این که دارای $T_g = -100\ ^\circ C$ می‌باشد، در دمای اتاق ($T = 25\ ^\circ C$) جامد بوده و نرم نیست (کاربردی است) در واقع HDT بین T_g و T_m آن قرار دارد.

روش‌های متداول اندازه‌گیری T_g عبارتند از:

تست سایش و فتیگ

در تست خستگی (Fatigue)، به نمونه تنش سیکلی وارد می‌شود تا به نقطه پارگی برسد، بدین ترتیب تعداد دفعاتی که نمونه تنش را تحمل می‌کند تا به نقطه پارگی می‌رسد، میزان مقاومت خستگی نمونه می‌باشد. منحنی تست خستگی که به منحنی S-N معروف است، میزان تنش ماکزیمم وارده بر حسب تعداد دفعاتی که نمونه به پارگی می‌رسد را نشان می‌دهد.

نمودار

رابطه عمر پارگی برای پلیمرهای سخت به صورت زیر می‌باشد:

$$\log N = A + \frac{B}{T}$$

در این رابطه A و B ثابت هستند و T، دمای مطلق می‌باشد.

تست سایش

تست سایش (Abrasion)، مقاومت ماده در برابر سایش را نشان می‌دهد. در این تست نمونه توسط دستگاهی دارای غلتک با زبری مشخص سائیده می‌شود و نمونه در طول غلتک در حال حرکت می‌باشد. هر چه نمونه پلیمری سخت‌تر و نیروهای بین مولکولی قوی‌تری باشد، میزان سایش کمتر خواهد بود.

تست‌های Abrasion، Wear و Scratch Resistance مشابه و با اصطکاک ارتباط دارند. رابطه محاسبه میزان سایش عبارت است از:

$$Abrasion\ loss = KWVT$$

K، ثابت و وابسته به خواص پلیمر است، W، نیروی عمودی به ازای سطح می‌باشد که نمونه پلیمری را به غلتک سمباده می‌فشارد، v، سرعت حرکت نمونه بر روی غلتک و t، زمان سایش می‌باشد

تست سختی

محاسبات:

برای تعیین مدول یانگ نمونه هایی که توسط آزمایش shore A بدست آمده اند، از رابطه زیر استفاده می کنیم:

$$h=\left[\frac{3}{4}\left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1}+\frac{1-\nu_2^2}{E_2}\right)\right]^{\frac{2}{3}} F^{\frac{2}{3}} R^{\frac{-1}{3}}$$

در این رابطه E_1 مدول فولاد بوده و برای آنکه این مقدار زیاد می باشد می توان از $\frac{1-\nu_1^2}{E_1}$ صرفه نظر کرد. پس خواهیم داشت:

$$h=\left[\frac{3}{4}\left(\frac{1-\nu_2^2}{E_2}\right)\right]^{\frac{2}{3}} F^{\frac{2}{3}} R^{\frac{-1}{3}}$$

که در این رابطه اطلاعات زیر را داریم:

ν_2=0.5 R=0.1mm F=49.03N

مقدار h هم از رابطه ی $h=\frac{100-ShoreD}{40}$ تعیین می گردد که ShoreD مقداری است که توسط آزمون بدست آمده است.

تست سختی (Hardness) توانایی یک ماده را در تحمل ماده‌ای دیگر در لایه بین سطحی، نشان می‌دهد. این تست را می‌توان به سه دسته تقسیم نمود:

۱- تست سختی از طریق اندازه‌گیری میزان مقاومت مواد به فرورفتگی توسط یک سوزن؛

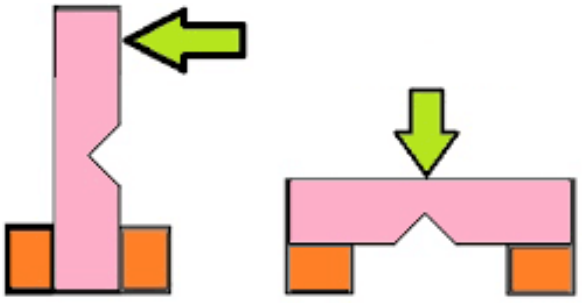
مانند تست‌های Brinell hardness، Vick and knop indenters، Barcol hardness، Shore durometer، ISO durometer

در دو مورد ISO durometer و Shore میزان فرورفتگی با اعمال نیرو تعیین شده و منجر به اندازه‌گیری کامپلیانس می‌شود.

۲- تست سختی از طریق اندازه‌گیری میزان مقاومت ماده به خراشیده شدن توسط ماده‌ای دیگر توسط یک جسم نوک تیز؛ مانند تست‌های Bierbaum hardness و Moh hardness

۳- تست سختی از طریق اندازه‌گیری میزان برگشت‌پذیری یا جهندگی؛ مانند Rockwell hardness

تست استحکام ضربه‌ای



(a) Izod Test (b) Charpy Test

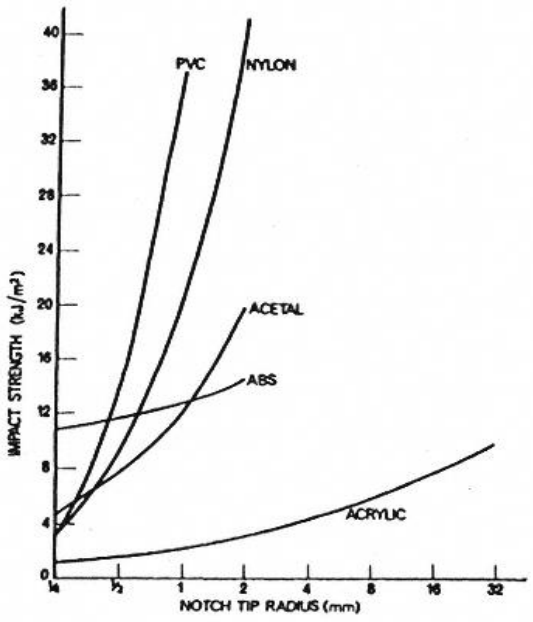
مکانیسم شکست

۱) ایجاد ترک

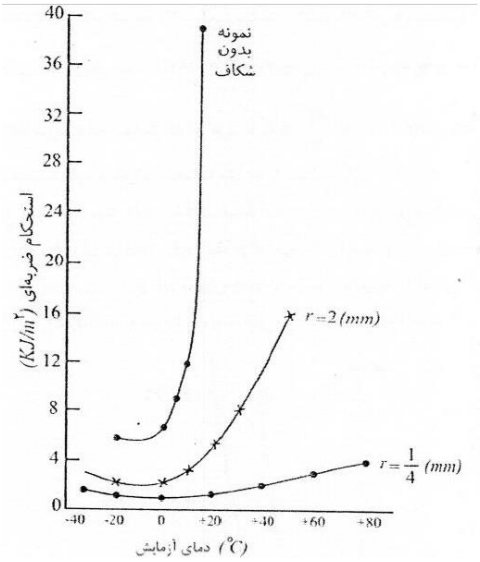
۲) رشد ترک

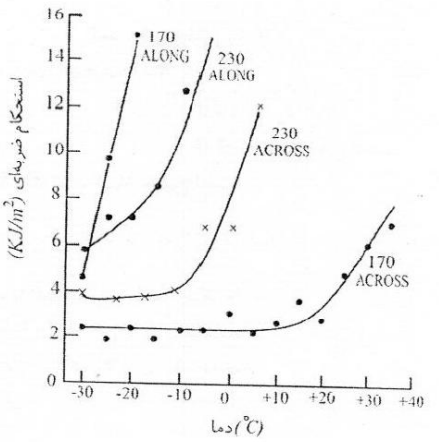
نکته) عوامل موثر بر هرکدام

اثر شعاع ترک



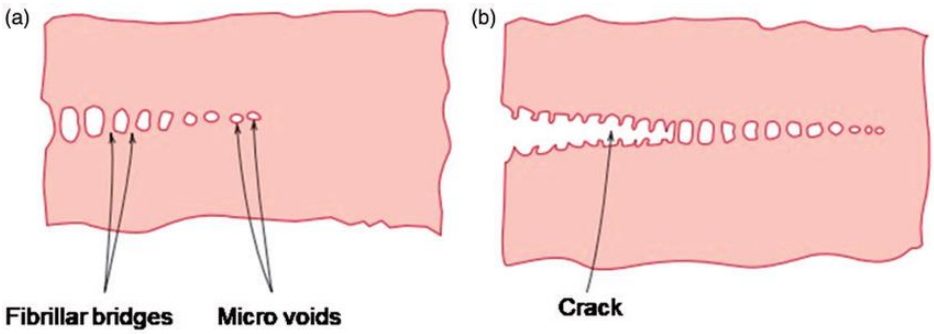
اثر دما وجهت گیری بر ضربه





تأثیر جهت‌گیری مولکولی بر استحکام ضربه‌ای ABS

اثر رابر و فیلر بر ضربه



اثر بلور و نرم کننده بر ضربه

....

مثال تنش کرنش واقعی

در آزمون کشش که بر روی ماده‌ای شکننده مانند پلی متیل متاکریلات (PMMA) در دمای $40^{\circ}C$ و سرعت کشش $5\,mm/\min$ انجام شده است کرنش ۲ درصد و تنش مهندسی ۳۵ مگاپاسکال در نقطه شکست گزارش شده است. تنش واقعی ماده را در نقطه شکست محاسبه کنید؟

۱) ۱۷۵۰ پاسکال ۲) ۳/۶۲ مگاپاسکال ۳) ۳۴/۳ مگا پاسکال ۴) ۳۵/۷ مگا پاسکال

میله‌ای پلاستیکی به طول ۲۰۰ میلی‌متر که دارای قطر ۱۰ میلی‌متر است به مدت ۱۰۰ ثانیه در معرض نیروی ثابت کششی ۴۰۰ نیوتن قرار گرفته است. پس از برداشتن نیرو (۱۰۰ ثانیه) طول نمونه برای ۲۰۰/۵ میلی‌متر است. مقدار کامپلیانس خزش را پس از ۱۰۰ ثانیه محاسبه کنید.

۱) $0/49\times10^{-3}\ \frac{mm^2}{N}$ ۲) $0/62\times10^{5}\ \frac{mm^2}{N}$

۳) $0/62\times10^{-5}\ \frac{mm^2}{N}$ ۴) $2/036\times10^{3}\ \frac{mm^2}{N}$

میزان جهندگی برای پلیمری در کرنش ۵ درصد و حداکثر تنش ۳۰ MPa، کدام است؟

۱) ۷۵٪ ۲) ۱/۵

۳) ۷۵ ۴) ۱۵۰

کمپلیانس (compliance) برای پلیمری در تنش ۳MPa و کرنش ۱۵ درصد، کدام است؟

۱) ۰/۰۵٪ ۲) ۲٪

۳) ۰/۵ ۴) ۲

دو جسم الاستیک و ایزوتروپ A و B که ابعاد یکسانی دارند، تحت کرنش مساوی کمی کشیده می‌شوند. اگر نسبت پواسون جسم A برابر ۰/۲۵ و نسبت پواسون جسم B برابر ۰/۴ باشد، نسبت تغییر حجم جسم A به جسم B، کدام است؟

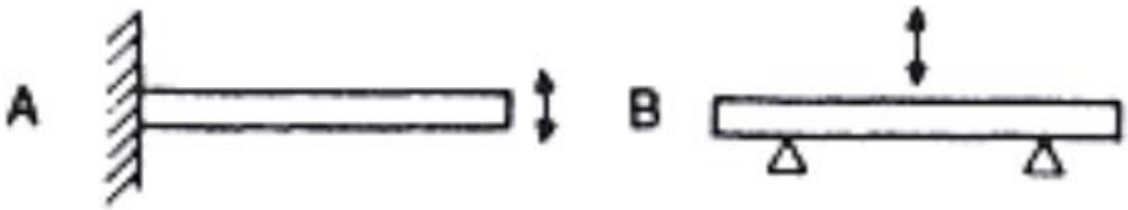
۱) ۰/۸۳ ۲) ۰/۴

۳) ۱/۲ ۴) ۲/۵

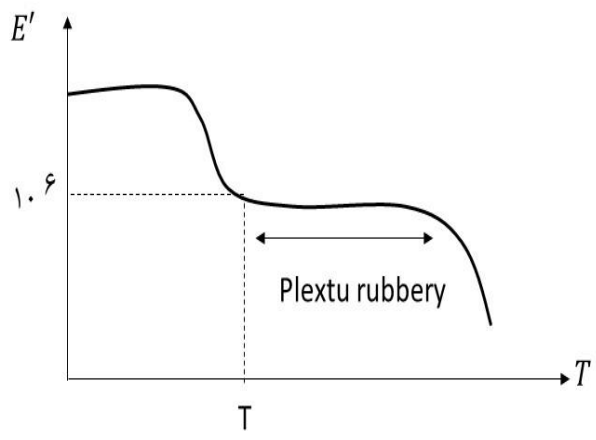
فصل سوم

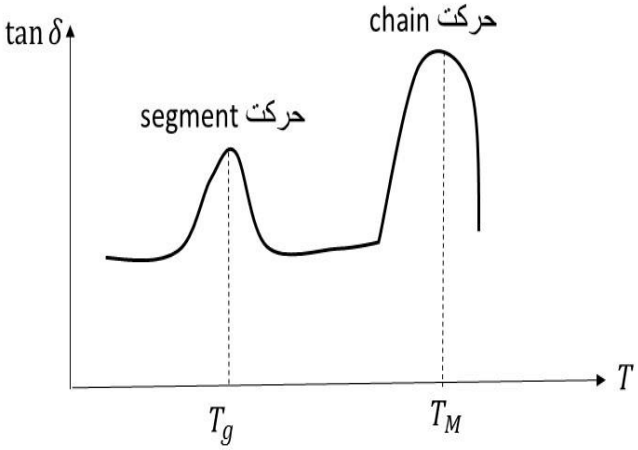
شماره	اسم فایل
۱	راه‌های ارزیابی مدول الاستیک
۲	نواحی مدول بر حسب دما
۳	اثر وزن مولکولی و نرم کننده
۴	بلورینگی و اتصال عرضی
۵	آلیاژ و فیلر

راه‌های ارزیابی مدول الاستیک

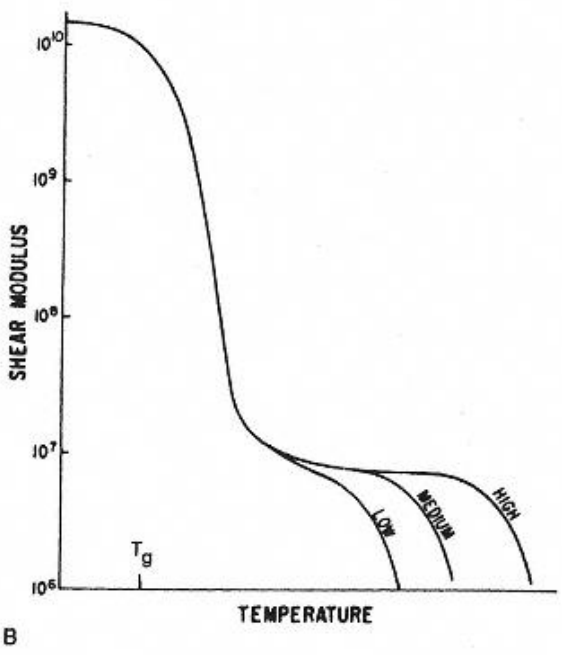


نواحی مدول بر حسب دما

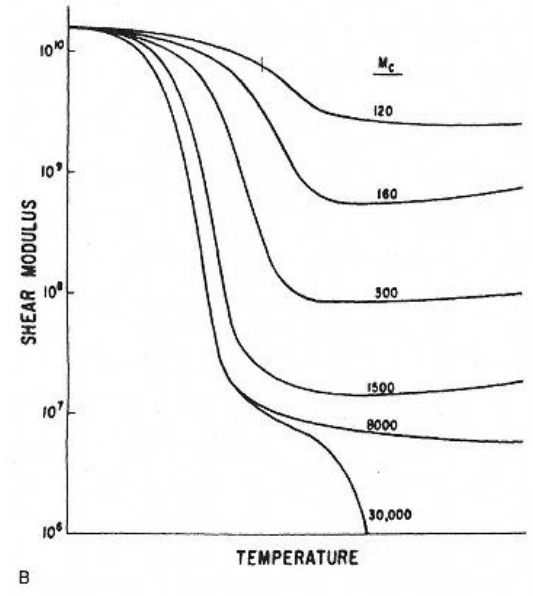




اثر وزن مولکولی و نرم کننده



بلورینگی و اتصال عرضی



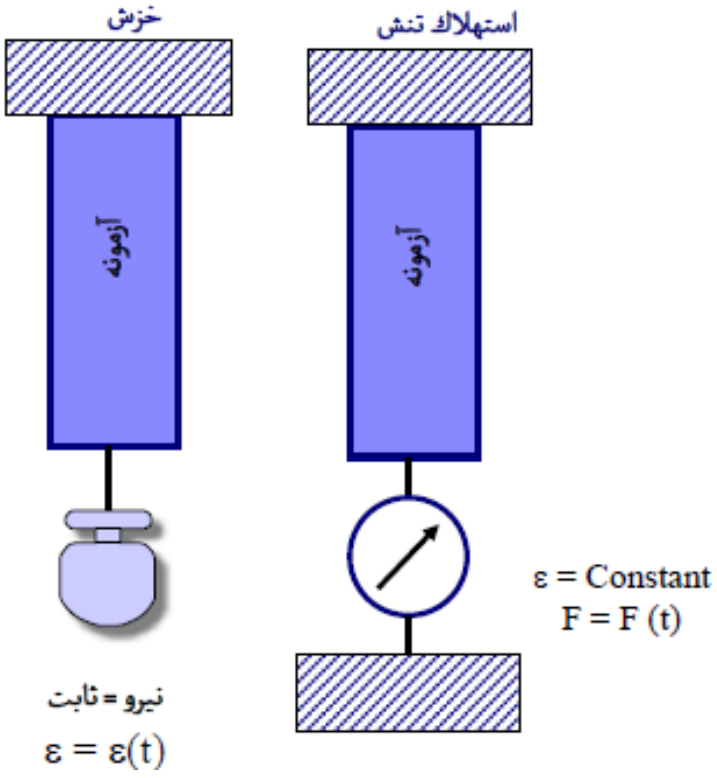
آلیاژ و فیلر

یادداشت ....

خیلی مهم:

فصل چهارم

شماره	اسم فایل
۱	مدل ماکسول
۲	مدل کلوین
۳	مدل چهار المانی
۴	اصل انطباق پذیری بولتزمن
۵	اصل انطباق
۶	اصل انطباق زمان دما
۷	اثر محیطی بر خزش
۸	اثر عوامل ساختاری بر خزش
۹	تابع توزیع زمان آسایش
۱۰	مثالWLF



Creep due to Voigt

$$\sigma = E\cdot\varepsilon + \eta\frac{d\varepsilon}{dt}$$

$$\eta\frac{d\varepsilon}{dt} = -E\cdot\varepsilon + \sigma$$

The solution of this differential equation is:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma}{E}\left[1 - \exp(-t/\tau)\right]$$

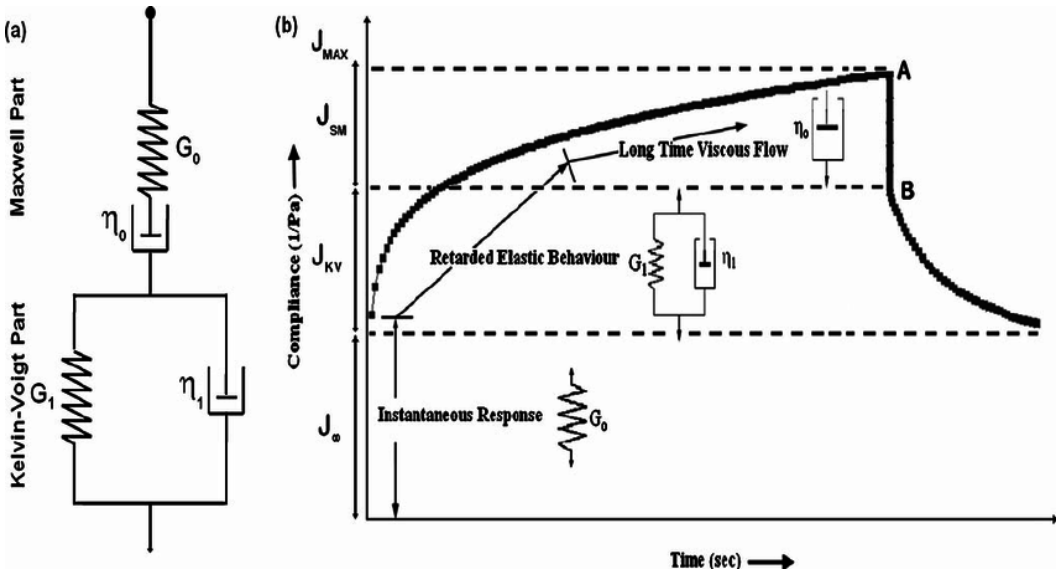
with $\tau = \eta/E$.

Relaxation

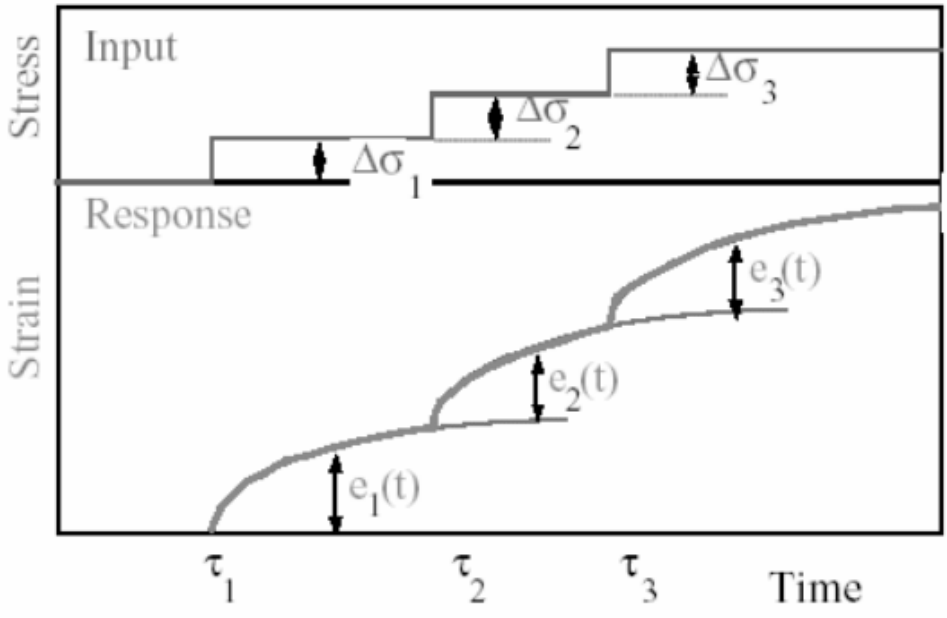
$$\sigma = 0 = E\cdot\varepsilon + \eta\frac{d\varepsilon}{dt}$$

$$\eta\frac{d\varepsilon}{dt} = -E\cdot\varepsilon:$$

$$\varepsilon = \varepsilon_1 \exp(-t/\tau)$$



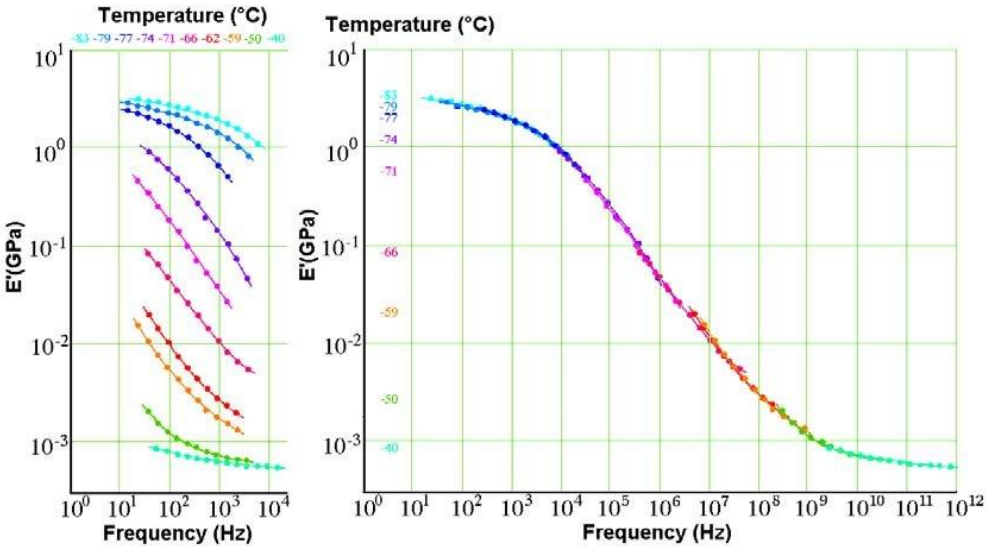
اصل انطباق پذیری بولتزمن



اصل انطباق

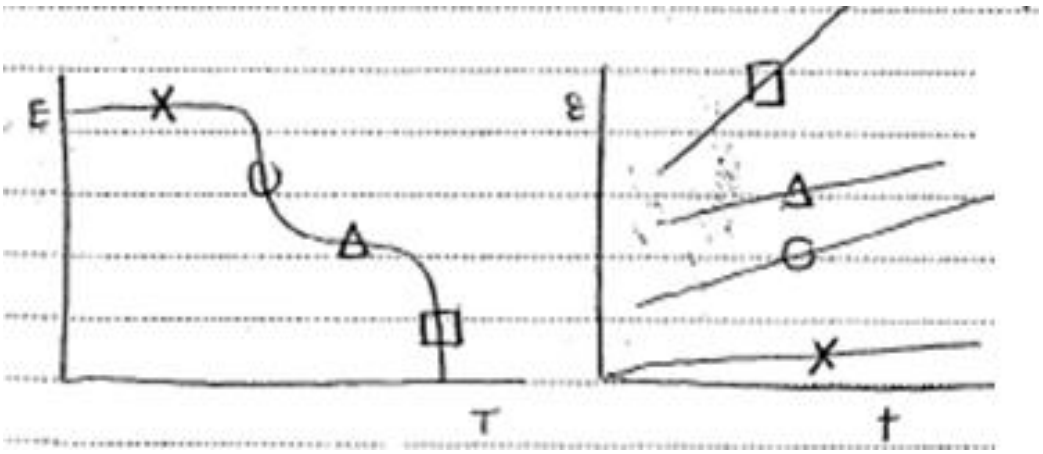
یادداشت ...

اصل انطباق زمان دما



$$\log a_T = \frac{-C_1^g\left(T - T_g\right)}{C_2^g + T - T_g}$$

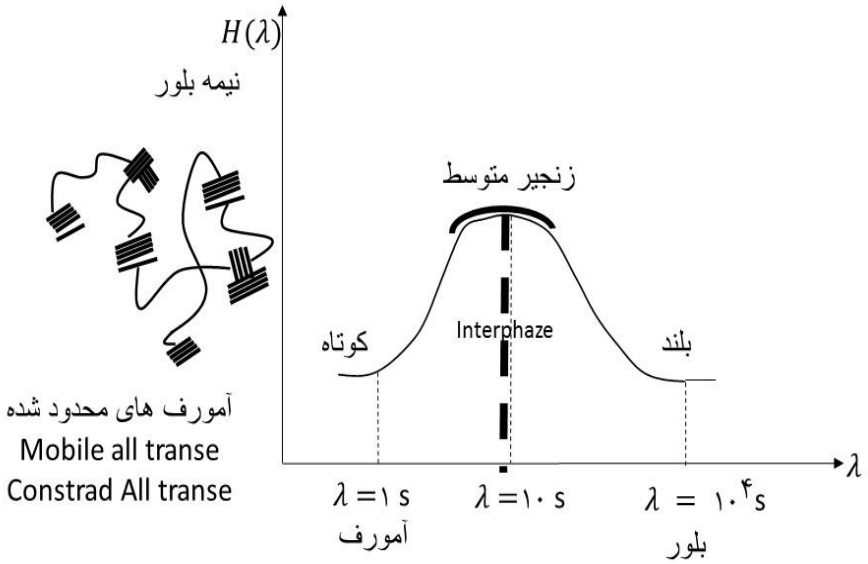
اثر محیطی بر خزش



اثر عوامل ساختاری بر خزش

بلورینگی و اتصال عرضی و جهت گیری و...

تابع توزیع زمان آسایش



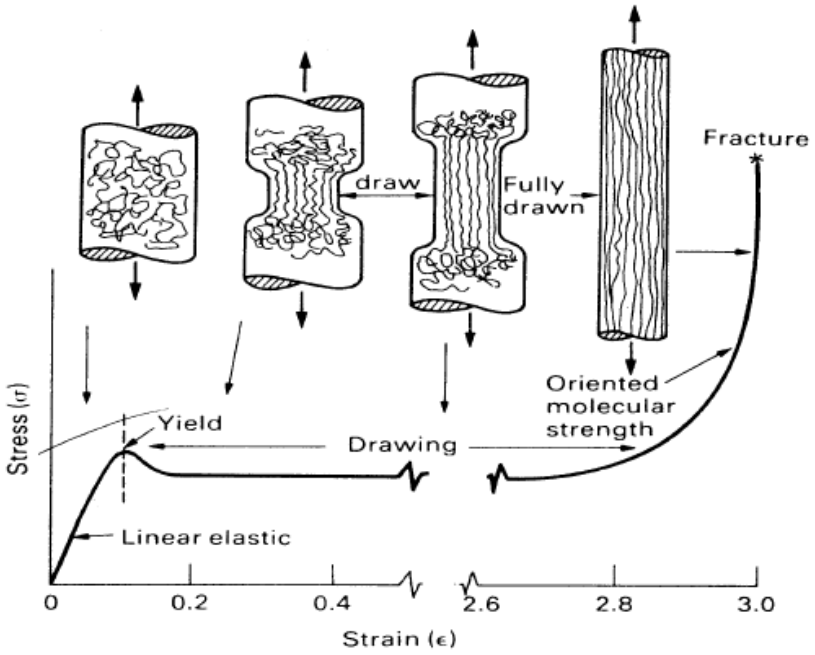
مثال WLF

مثال مهم ...

فصل پنجم

شماره	اسم فایل
۱	Cold drawing
۲	مکانیسم و تئوری شکست
۳	ترک و Void
۴	اثر جهت گیری بر تنش کرنش
۵	اثر آلیاژ بر تنش کرنش
۶	تنش کرنش کوپلیمر بلوکی
۷	اثر نرم کننده و فیلر بر تنش کرنش
۸	اثر دما بر تنش کرنش
۹	اثر سرعت و... بر تنش کرنش

Cold drawing

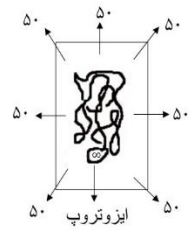


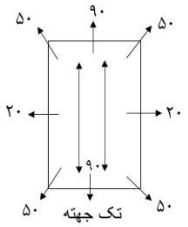
مکانیسم و تئوری شکست

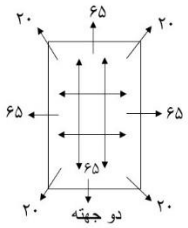
Void و ترک

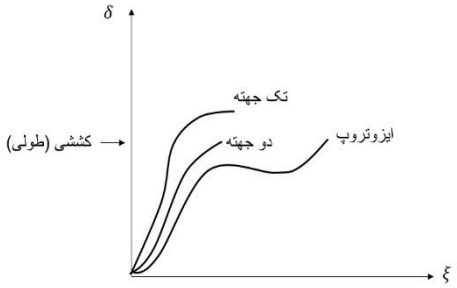
یادداشت ...

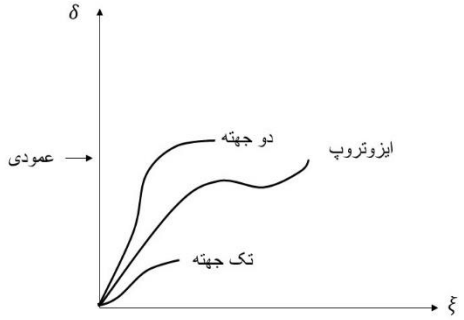
اثر جهت گیری بر تنش کرنش





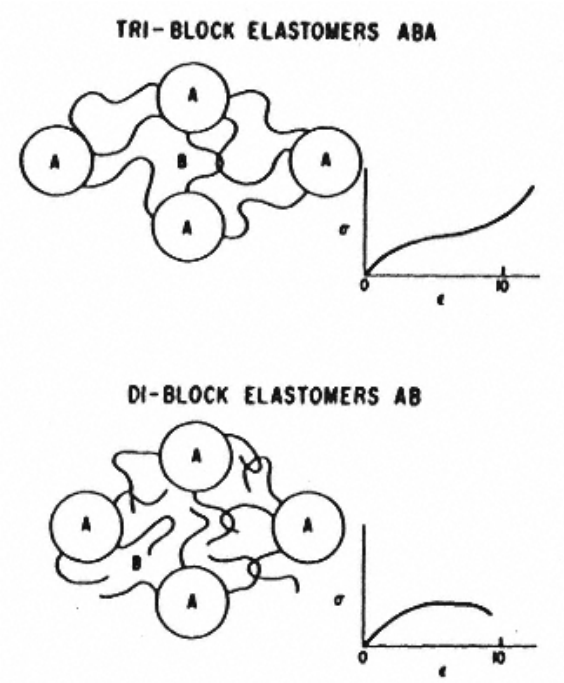






اثر آلیاژ بر تنش کرنش

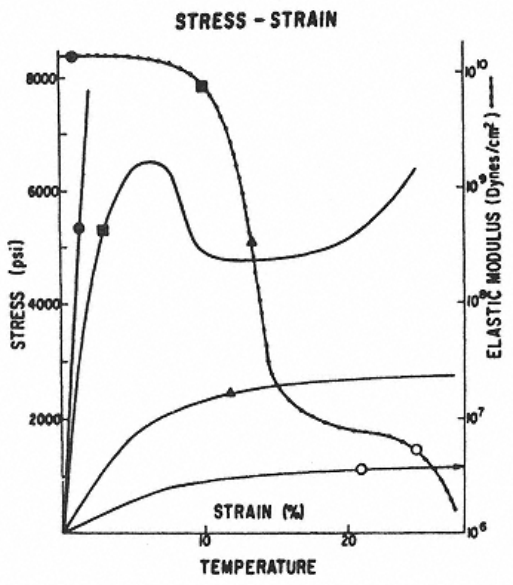
تنش کرنش کوپلیمر بلوکی

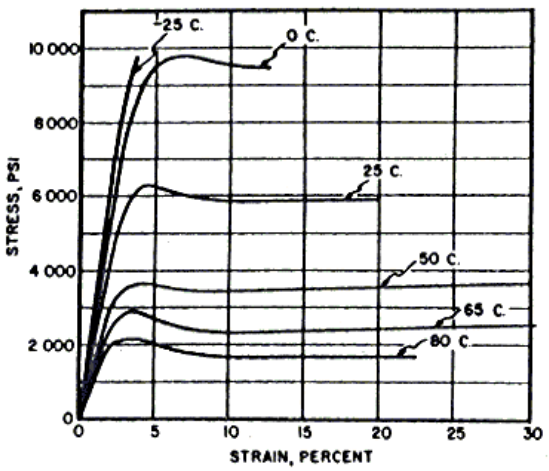


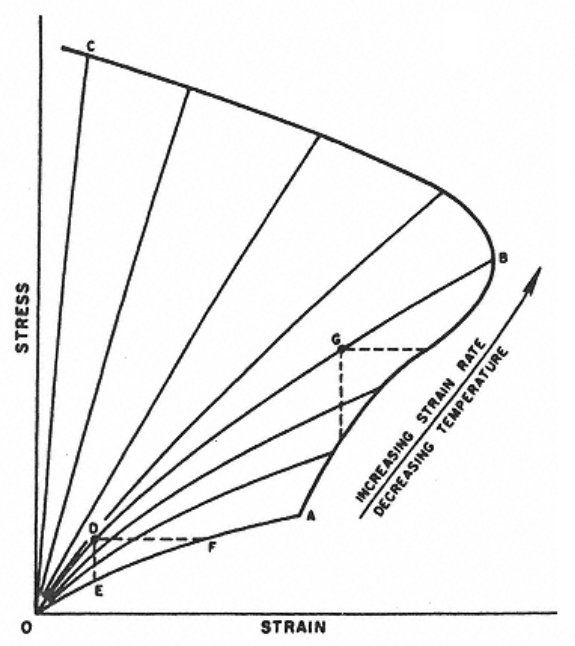
اثر نرم کننده و فیلر بر تنش کرنش

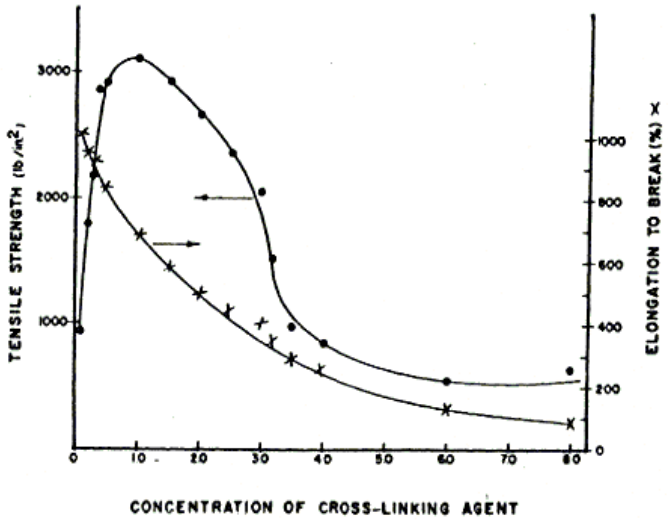
یادداشت.....

اثر دما بر تنش کرنش






C
B
G
A
D
F
E
O
STRESS
STRAIN
INCREASING STRAIN RATE
DECREASING TEMPERATURE


TENSILE STRENGTH (lb/in²)
ELONGATION TO BREAK (%)
3000
2000
1000
1000
800
600
400
200
0
0
10
20
30
40
50
60
70
80
CONCENTRATION OF CROSS-LINKING AGENT

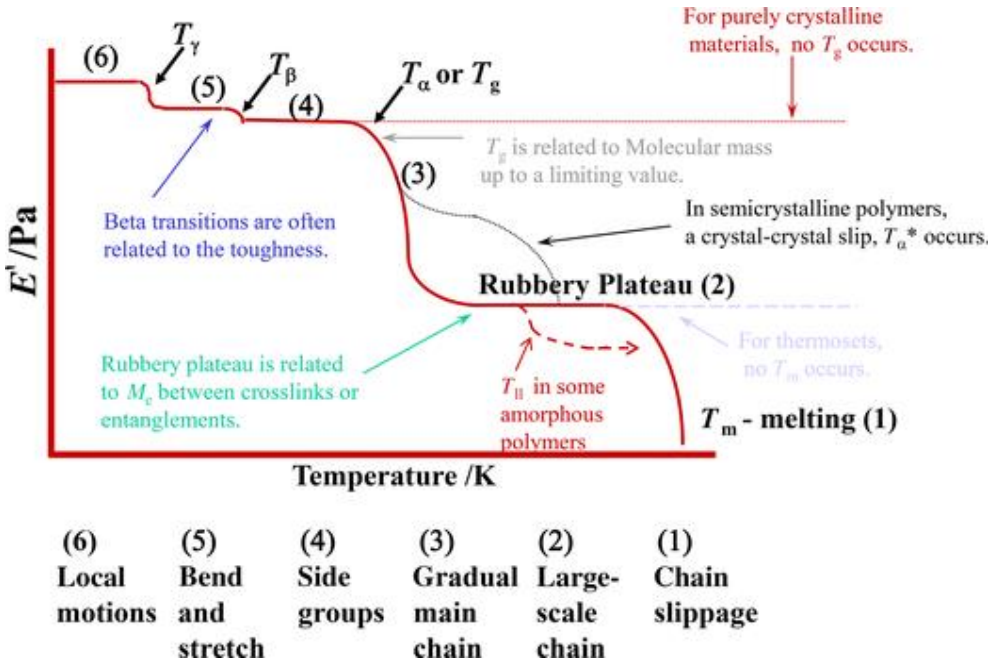
فصل ششم

شماره	اسم فایل
۱	پاسخ به رفتار ویسکوالاستیک
۲	منحنی DMTA
۳	منحنی دمپینگ جامع
۴	اثر فرکانس بر منحنی دمپ
۵	اثر دما و وزن مولکولی بر منحنی دمپ
۶	اثر فیلر و اتصال عرضی ... بر دمپ
۷	انتقالات دمایی به غیر انتقال شیشه‌ای
۸	مقایسه مدل چهار المانی با دمپینگ
۹	اثر حضور یک کوچک مولکول بر انتقالات
۱۰	سوختن و ضریب اصطحکاک
۱۱	مثال قشنگ
۱۲	معرفی آنالیزهای متداول

پاسخ به رفتار ویسکوالاستیک

الاستیک کامل	ویسکوز کامل	پلیمری: ویسکوالاستیک
$\xi = \xi_. \sin \omega t$	$\xi = \xi_. \sin \omega t$	$\xi = \xi_. \sin \omega t$
هوکین $\delta = E . \xi$	ویسکوز $\delta = \eta \frac{d\xi}{dt}$	$\delta = E \xi_. \sin(\omega t + \theta)$
خروجی $\delta = E \xi_. \sin \omega t$	خروجی $\delta = \eta \xi_. \omega \cos \omega t$	$0 < \theta < \frac{\pi}{2}$
اختلاف فاز $\theta = 0$ خروجی و ورودی	اختلاف فازی $\theta = \frac{\pi}{2}$ خروجی و ورودی	$E' = \frac{\delta_.}{\xi_.} \cos \theta$ $E'' = \frac{\delta_.}{\xi_.} \sin \theta$ $\tan \theta = \frac{E''}{E'}$

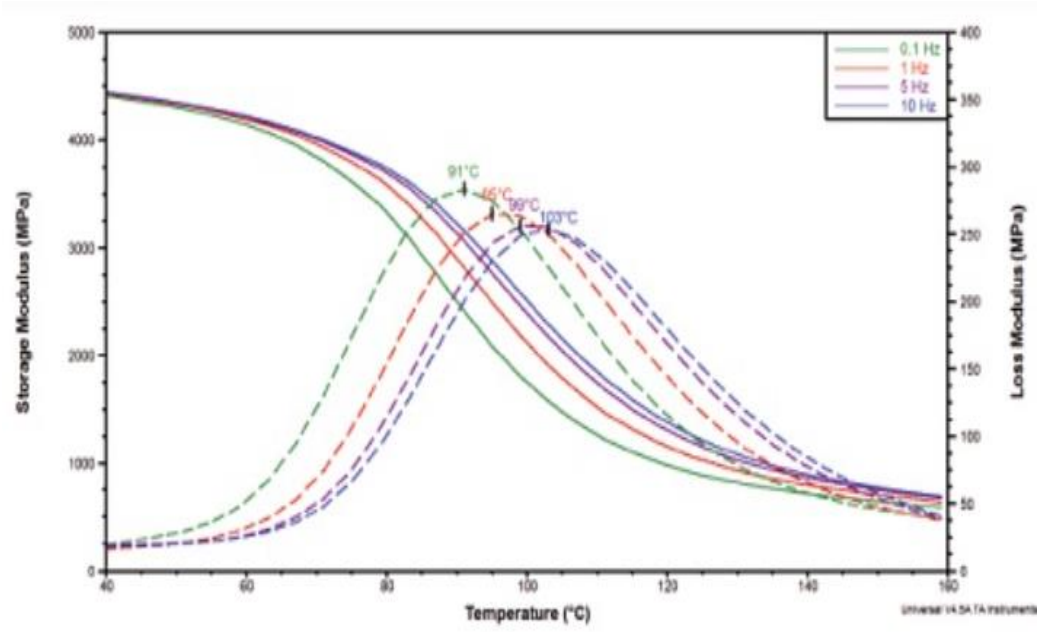
منحنی DMTA



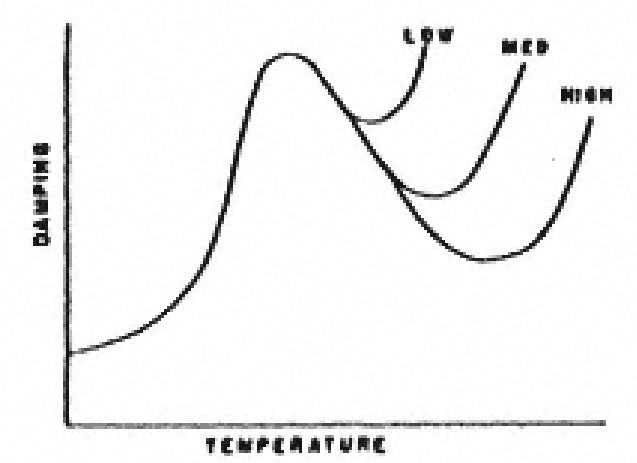
منحنی دمپینگ جامع

۶ نمودار دمپ مختلف ...

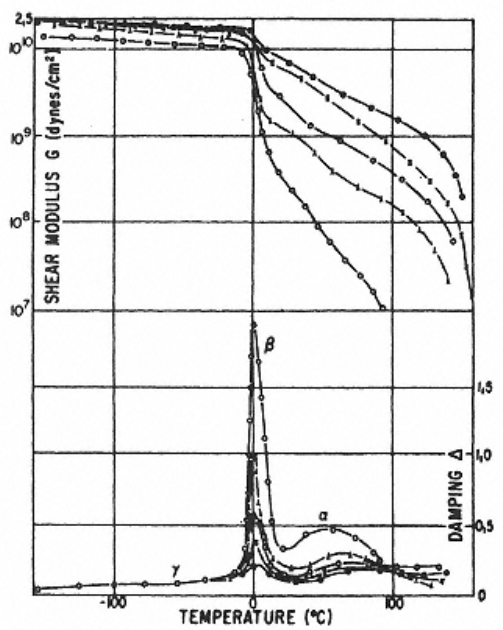
اثر فرکانس بر منحنی دمپ



اثر دما و وزن مولکولی بر منحنی دمپ

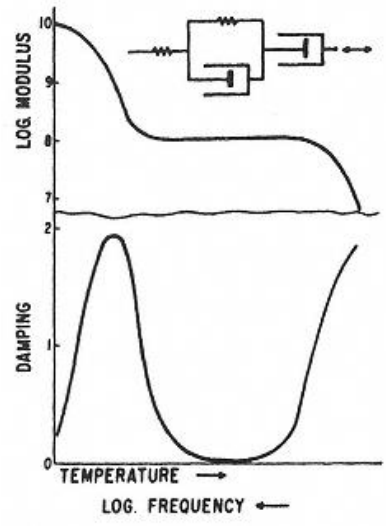


اثر فیلر و اتصال عرضی ... بر دمپ



انتقالات دمایی به غیر انتقال شیشه‌ای

مقایسه مدل چهار المانی با دمپینگ



اثر حضور یک کوچک مولکول بر انتقالات

یادداشت ...

سوختن و ضریب اصطحکاک

یادداشت. ...

مثال قشنگ

دو مثال ....

معرفی آنالیزهای متداول

دید کلی به همه آنالیزها و دسته بندی ....