Archive of SID

مجله علوم و تکنولوژی پلیمر، سال نوزدهم،
شماره ۴، صفحه ۲۹۰-۲۸۵، ۱۳۸۵
ISSN : 1016-3255

ارزیابی کارایی لوله‌های پلاستیکی تقویت شده در سامانه حدیده چرخان

Evaluation of Reinforced Plastic Pipes Efficiency in Rotating Die System

مهرداد کوکبی[1*]، فاطمه هادی[1]، غلامحسین لیاقت[2]

تهران، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده فنی و مهندسی، ۱ ـ بخش مهندسی شیمی، گروه مهندسی پلیمر

۲ ـ بخش مهندسی مکانیک، گروه مهندسی طراحی کاربردی، صندوق پستی ۱۴۱۱۵/۱۴۳

دریافت: ۸۴/۶/۳۰، پذیرش: ۸۴/۱۲/۹

چکیده

تولید و کاربرد لوله‌های پلیمری همگام با پیشرفت علوم و مهندسی پلیمر، روز به روز در حال گسترش است. تولید لوله با استفاده از اکستروژن و با حدیده ثابت به علت آرایش یافتگی زنجیرهای پلیمری در راستای محوری و بوجود آمدن خط جوش ناشی از وجود بازوهای نگهدارنده کاری غیرعلمی است. لوله‌های تولیدی فاقد استحکام لازم در جهت محیطی هستند. برای کاهش اثر خط جوش و تولید لوله‌های مقاوم در جهت محیطی می‌توان از چرخش حدیده استفاده کرد. در این پژوهش، تغییر خواص مکانیکی لوله‌ها با تغییر دور چرخش حدیده بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد که استحکام در جهت محیطی برای نمونه پلی‌اتیلن سنگین در حدود ۲۰ درصد، برای پلی‌پروپیلن حدود ۲۵ درصد و برای نمونه کامپوزیتی تقویت شده با ۲۰ درصد وزنی الیاف شیشه در حدود ۳۴ درصد، در دور چرخش ۲۰ rpm عضو داخلی، افزایش یافته است. همچنین، نتایج آزمون هیدروستاتیک نشان می‌دهد لوله‌هایی که با سامانه حدیده چرخان تولید شده‌اند، قدرت تحمل بار بیشتر و طول عمر مطلوب دارند. در این حالت، مقدار افزایش خروجی از اکسترودر در دور چرخش ۳۰ rpm عضو داخلی در حدود ۱۳ درصد است. همچنین، برای لوله‌های ساخته شده از پلی‌اتیلن سنگین در دور چرخش ۱۰ rpm و برای لوله‌های پلی‌پروپیلن در دور چرخش ۴ rpm خواص همگن بدست می‌آید. با بررسی نتایج حاصل از تفرق پرتو X مشخص شد که بلورینگی در حدود ۲۰ درصد در دور چرخش ۲۰ rpm عضو داخلی افزایش یافته است. در این سامانه نه تنها پدیده تورم حدیده رخ نمی‌دهد، بلکه پدیده ضدتورم (جمع شدگی) مشاهده می‌شود.

واژه‌های کلیدی

حدیده چرخان،
استحکام محیطی، آرایش یافتگی الیاف،
خط جوش، لوله پلاستیکی،

Key Words

rotating die,
hoop strength, fibers orientation,
weld line, plastic pipe

مقدمه

امروزه تولید و استفاده از لوله های پلیمری بسیار متداول شده است. همگام با پیشرفت در علوم و مهندسی پلیمر، تولید لوله های پلاستیکی روز به روز در حال گسترش است. از سال ۱۹۵۰ تولید این نوع لوله‌ها رو به افزایش است. مهمترین مزایای کاربرد این لوله ها، مقاومت زیاد در برابر ضربه و تنشهای خارجی، مقاومت در برابر زنگ زدگی، سهولت جوشکاری پلاستیک، سهولت نصب، سبکی وزن، حمل و نقل آسان، سهولت شکل پذیری، طول عمر زیاد و ارزانی محصول است. تولید لوله با استفاده از اکستروژن و با حدیده ثابت به دلیل وجود بازوهای

* مسئول مکاتبات، پیام نگار: mehrir@modares.ac.ir

www.SID.ir

Archive of SID

نگهدارنده جریان مذاب پس از عبور از این بازوها به چند جریان تقسیم می‌شود. تعداد این خطوط جریان بستگی به تعداد بازوهای نگهدارنده دارد. این جریانها بعد از طی بازوی نگهدارنده مجدداً به هم می‌رسند، ولی امکان اختلاط کامل و جوش خوردن را در ادامه جریان پیدا نمی‌کنند، به این ترتیب به ازای هر بازوی نگهدارنده خط جوشی روی دیواره در عمق ضخامت لوله تشکیل می‌شود. این خط یا خطوط جوش باعث ایجاد سطح ضعیف در لوله پلیمری وکاهش استحکام محیطی آن به ویژه در مقابل فشار داخلی می‌شود [۳-۱].

برای انتقال سیالات معمولاً از لوله‌هایی با استحکام زیاد استفاده می‌شود. هنگامی که سیال از درون لوله عبور می‌کند، در اثر فشار داخلی، تنش محیطی که بزرگتر از تنش محوری است در لوله ایجاد می‌شود. بنابراین، استحکام محیطی لوله‌ها باید بیشتر از استحکام محوری باشد. از طرف دیگر، در حدیده ثابت چون زنجیرهای پلیمر مذاب در راستای خروج از دستگاه آرایش می‌یابند، مقاومت مکانیکی لوله‌های تولیدی در جهت محوری بیشتر از محیطی است که نقض غرض است. بنابراین، در لوله‌های تولیدی به روش سنتی نمی‌توان از خواص پلیمر در جهت خاص و مطلوب استفاده کرد. امروزه برای برطرف کردن معایب ذکر شده و همین طور افزایش خواص پلیمرها در جهت خاص تلاشهایی انجام شده است که عبارت‌است از: چرخش حدیده، ایجاد اصلاحاتی روی حدیده برای حذف خط جوش و آثار ناشی از آرایش یافتگی ناخواسته، برطرف کردن معایب لوله بعد از پایان فرایند از طریق کشش حدیده و شکل‌دهی جریان و استفاده از حدیده مرتعش [۹-۴].

همان‌طور که ذکر شد یکی از راههای تغییر آرایش یافتگی زنجیرهای پلیمری از جهت محوری به محیطی استفاده از سامانه حدیده چرخان است. مطالعات زیادی روی تولید لوله با استفاده از حدیده چرخان انجام شده است. نتایج مطالعات نشان می‌دهد که با این سامانه کاهش فشار به طور عینی مشهود است و حجم خروجی با افزایش سرعت گردش عضو داخلی افزایش می‌یابد. بدین ترتیب استحکام در جهت محیطی بهبود یافته، خط جوش در مقطع لوله توزیع یا حذف می‌شود. بنابراین، امکان تولید لوله با ضخامت کمتر و استحکامی در حد لوله‌های معمولی، تغییر حالت شکست از حالت بسیار شکننده به حالت ملایمتری نسبت به لوله‌های آرایش نیافته به خصوص برای لوله‌های ساخته شده از uPVC و نیز عدم تورم لوله از مزایای این سامانه است [۵،۸].

در این پژوهش، کارایی لوله‌های پلیمری و کامپوزیتی تولیدی در شرایط سامانه حدیده چرخان(طراحی و ساخته شده) مطالعه، ارزیابی و مقایسه شده است.

تجربی

مواد

در این پژوهش از پلی‌پروپیلن PPR ۲۰۰ (ساخت هیوسانگ کره)، پلی‌اتیلن سنگین با نام تجاری HD ۰۰۳۵ و EX ۳ (ساخت ایران) و پلی‌پروپیلن تقویت شده با ۲۰ درصد وزنی الیاف شیشه به طول ۳/۵ mm (ساخت نیرومند پلیمر) استفاده شده است.

دستگاهها

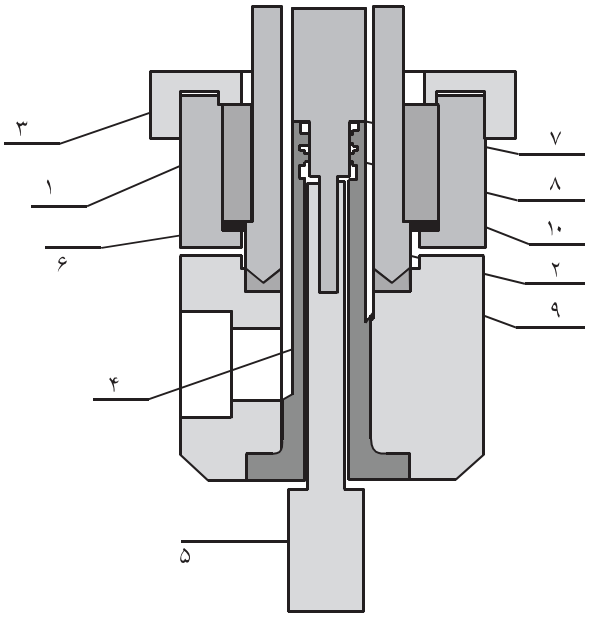
اکسترودر مورد استفاده در این پژوهش، اکسترودری تک‌پیچ (قطر خارجی ۶۷ mm و طول ۹۰ cm) با سر متقاطع به انضمام اندازه‌کننده مجهز به حمام خلأ و قسمت کشنده است. قطر قسمت اندازه‌کننده با قطر خارجی حدیده برابر است. برای تماس بهتر پلیمر مذاب و اندازه‌کننده، هوای فشرده با فشار ۱۲ Psi داخل لوله دمیده می‌شود. سرعت واحد کشنده متناسب با سرعت پیچ تنظیم می‌شود. ابعاد حدیده مورد استفاده R_i = ۲۰ mmm، R_o = ۲۲/۵ mm و L = ۲۴۵ mm است. اکسترودر از سه ناحیه و حدیده از دو ناحیه گرمایی تشکیل شده است. دمای هر ناحیه به طور دقیق کنترل می‌شود. حدیده ساخته شده به شکل استوانه با عضو داخلی و خارجی چرخان است، که عضو داخلی در خلاف جهت عقربه ساعت و عضو خارجی در جهت عقربه ساعت می‌چرخد. شکل ۱ نمایی از این حدیده را نشان می‌دهد. آزمون XRD با دستگاه تفرق‌سنج مدل XPD-X Petr ساخت شرکت Philips انجام شد.

روشها

آزمون کشش برای حداقل ۴ نمونه با دستگاه کشش ساخت شرکت پارس پیگیر، مطابق با استاندارد ASTM D ۶۳۸ برای اندازه‌گیری استحکام محوری انجام شد، میانگین نتایج به عنوان نتیجه نهایی گزارش شد. برای تهیه نمونه‌های دمبلی شکل ابتدا قطعه‌ای از لوله بریده و از وسط به دونیم می‌شود، سپس با دستگاه برش مناسبی که می‌تواند کاملاً منطبق با انحنای لوله قرار گیرد در جهت محوری بریده می‌شود. آزمون فشار ترکیدن طبق استاندارد ASTM D ۱۵۹۹ برای حداقل ۴ نمونه در شرکت PFP اصفهان انجام شد. در این آزمون استحکام پارگی لوله (استحکام محیطی) در فشار به مدت ۴۰ تا ۶۰ s معین شد. طول لوله مورد استفاده در این آزمون ۵۰۰ mm و دمای آب نیز ۲۰°C انتخاب شد. آزمون فشار هیدروستاتیک قابل تحمل برای حداقل ۳ نمونه طبق استاندارد ASTM D ۱۵۹۸ انجام شد. آزمون XRD با دستگاه تفرق‌سنج به منظور بررسی اثر چرخش حدیده روی ساختار بلوری پلیمر انجام شد.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۱ نمایی از حدیده چرخان: (۱) بخش اصلی بدنه حدیده، (۲) استوانه خارجی چرخان، (۳) مهره انتهایی حدیده، (۴) منحرف کننده جریان، (۵) محور گرداننده استوانه داخلی، (۶) بوش برنزی، (۷) استوانه داخلی، (۸) رولر برینگ، (۹) آب بند برنزی استوانه خارجی و (۱۰) بوش استوانه داخلی.

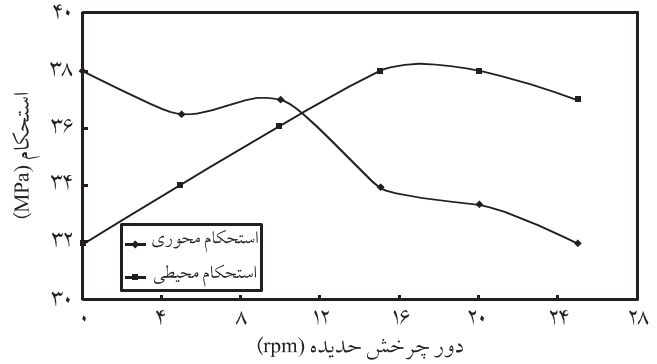
نتایج و بحث

برای بررسی اثر چرخش حدیده بر خواص مکانیکی نمونه ها در جهت محوری، آزمون کشش روی نمونه های خالص و کامپوزیتی انجام شد که نتایج آن در شکلهای ۲ تا ۵ آورده شده است. چنانچه مشاهده می‌شود با افزایش دور چرخش حدیده، مقاومت محوری لوله های تولیدی کاهش می‌یابد. این کاهش در مورد نمونه کامپوزیتی بارزتر است. علت کاهش خواص نیز آرایش یافتگی زنجیرهای پلیمری و الیاف در جهت محیطی است. برای بررسی اثر چرخش حدیده بر خواص مکانیکی نمونه ها در جهت محیطی، آزمون فشار ترکیدن روی نمونه های خالص و کامپوزیتی انجام و تنش محیطی در لوله به کمک معادله (۱) محاسبه شد:

$$\sigma_h = \frac{PD_o}{2t} \qquad (1)$$

دراین معادله D_o قطر خارجی لوله، P فشار داخلی هنگام شکست و t ضخامت لوله است.

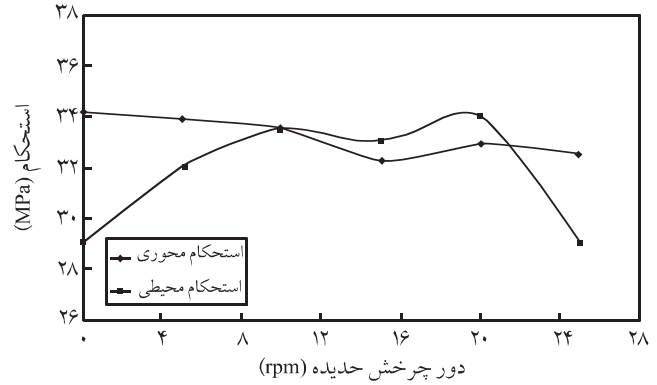
از مقایسه نتایج استحکام محیطی و محوری در شکلهای ۲ تا ۵



شکل۲ نمودار تغییر استحکام محیطی و محوری در لوله های HD ۰۰۳۵ تولید شده با حدیده چرخان.

مشخص است که با افزایش دور چرخش حدیده تا rpm ۲۰، استحکام محیطی افزایش می‌یابد، چون زنجیرهای پلیمری و الیاف در جهت محیطی آرایش یافته‌اند. اما، از rpm ۲۰ به بعد استحکام محیطی کاهش می‌یابد، چون در اثر نیروی برشی زیادی که در اثر چرخش حدیده به زنجیرهای مولکولی وارد می‌شود گره‌های زنجیری بین مولکولها پاره شده استحکام کاهش می‌یابد. سرعت زیاد چرخش حدیده(بیشتر از rpm ۳۰) باعث می شود محصول شکل نهایی خود را از دست بدهد.

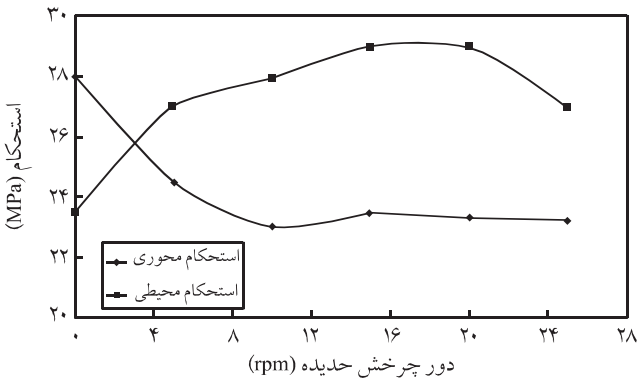
از شکلهای ۲ و۳ مشخص است در دور چرخش rpm ۱۰ لوله‌ای همسانگرد که خواص آن در دو جهت یکسان است، قابل تولید است. همچنین، در شکلهای ۴ و ۵ برای لوله پلی پروپیلن و کامپوزیتی خواص در rpm ۴ همگن می شود. بدین ترتیب در لوله HD ۰۰۳۵، ۱۵ درصد، در HDEX ۳، ۲۲ درصد، در PP ۲۵ درصد و در نمونه کامپوزیتی ۳۴ درصد افزایش خواص در جهت محیطی ایجاد شده است. افزون بر این، در آزمون فشار تمام نمونه ها رفتار شکننده نشان داده‌اند.



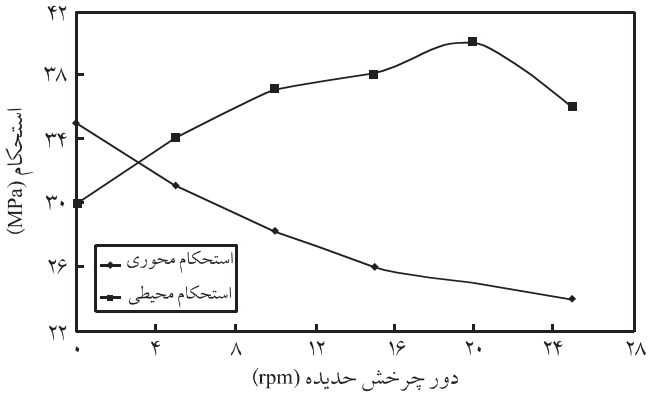
شکل۳ نمودار تغییر استحکام محیطی و محوری در لوله های HDEX ۳ تولید شده با حدیده چرخان.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۴ نمودار تغییر استحکام محیطی و محوری در لوله‌های PPR ۲۰۰ تولید شده با حدیده چرخان.



شکل ۵ نمودار تغییر استحکام محیطی و محوری در لوله‌های کامپوزیتی تولید شده با حدیده چرخان.

برای تعیین عمر خستگی، لوله‌های تولید شده در شرایط مختلف در فشارهای متفاوت هیدروستاتیک قرار گرفتند.

مطابق استاندارد ایران تمام نمونه‌های تولیدی فشار ۲۲ atm را به مدت ۶۰ min در دمای ۲۰°C تحمل کردند، هیچ نقص یا تورم و ساقط شدگی مشاهده نشد. بنابراین، برای مقایسه و تعیین عمر خستگی، آزمون تا زمان ساقط شدگی و با فشارهای متفاوت ادامه یافت که نتایج آن در شکل ۶ آمده است.

همان‌طور که از شکل ۶ مشخص است کاهش اندک مقدار بارگذاری باعث افزایش قابل توجه طول عمر لوله می‌شود. بهترین طول عمر مربوط به لوله‌های ساخته شده با دور چرخش ۲۰ rpm است.

چنانچه به نمونه‌هایی که در اثر فشار داخلی شکسته شده‌اند، دقت شود. مشاهده می‌شود که زاویه خط شکست نسبت به محور لوله در نمونه‌های تولیدی با تغییر دور چرخش استوانه داخلی تغییر می‌کند، به طوری که در حدیده معمولی زاویه شکست در راستای محور لوله است و با افزایش سرعت چرخش به طور نسبی افزایش می‌یابد تا اینکه در دور ۲۰ rpm به تقریباً زاویه ۱۵ می‌رسد. این مطلب دلیلی بر تغییر زاویه خط جوش در اثر گردش عضو داخلی حدیده از راستای محوری به جهت محیطی است.

برای اندازه‌گیری قطر لوله‌های خروجی از اکسترودر، بعد از اینکه لوله تولید شده کاملاً سرد شد قطر خارجی لوله به کمک کولیس اندازه‌گیری شد. نتایج در جدول ۱ آمده است.

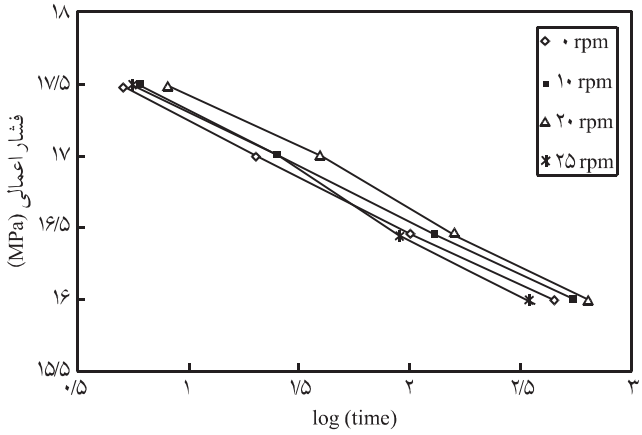
با افزایش دور چرخش حدیده قطر لوله‌های خروجی از اکسترودر کاهش یافته که این کاهش در دور ۲۵ rpm به حداکثر می‌رسد. در این حالت قطر لوله‌های تولیدی به مقدار ۱۲ درصد نسبت به حالت حدیده ثابت کاهش داشته است. عموماً وقتی پلیمر از میان حدیده عبور می‌کند، قطر پلیمر خروجی از آن با قطر حدیده تفاوت دارد. هنگامی که پلیمر در حدیده حرکت می‌کند به دلیل خاصیت ویسکوالاستیک پلیمر مقداری از انرژی کرنشی پلیمر که در اثر حرکت لایه‌های مختلف سیال ایجاد شده تلف و مقداری از آن ذخیره می‌شود. این انرژی ذخیره شده در هنگام خروج سیال از حدیده به شکل تورم آزاد می‌شود. هر چه مقدار بیشتری از انرژی کرنشی تلف شود در نتیجه تورم کمتر خواهد بود. هنگامی که حدیده ثابت است تنشهای عمودی ایجاد شده در مذاب

جدول ۱ قطر خارجی لوله‌های تولید شده (mm) در دورهای متفاوت چرخش عضو داخلی.

دور چرخش (rpm)	قطر خارجی لوله HDEX ۳	قطر خارجی لوله HD ۰۰۳۵	قطر خارجی لوله PP
۰	۴۶	۴۷/۵	۴۷
۵	۴۴	۴۴	۴۵
۱۰	۴۳	۴۳	۴۳/۵
۱۵	۴۳/۵	۴۳/۵	۴۲/۵
۲۰	۴۳	۴۳	۴۲
۲۵	۴۲	۴۲	۴۱

www.SID.ir

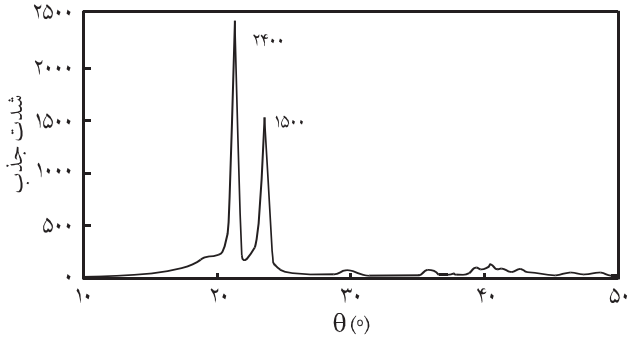
Archive of SID



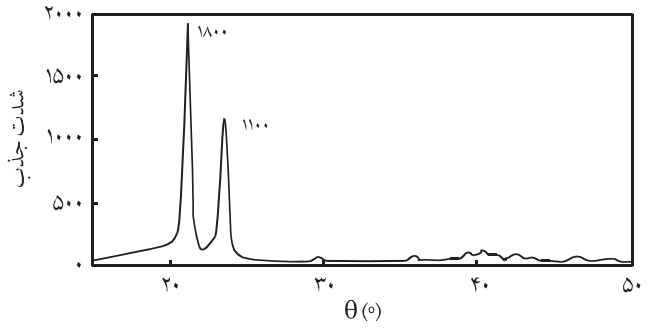
شکل ۶ مقایسه طول عمر لوله‌های تولیدی در دورهای چرخشی متفاوت.

جهتشان به سمت بیرون است و هنگامی که پلیمر از حدیده خارج می‌شود متورم می‌شود. اما، هنگامی که حدیده می‌چرخد تنشهای عمودی ایجاد می‌شود که جهت آن به سمت داخل است. بنابراین، پلیمر خارج شده از حدیده دو تنش با جهت مخالف را تحمل می‌کند. بسته به جهت برایند تنشها، قطر ماده خارج شده کمتر یا بیشتر خواهد شد. در این حالت چون قطر ماده خارج شده کمتر از قطر حدیده است، بنظر می‌رسد که تنشهای عمودی ایجاد شده به سمت داخل است و باعث کاهش قطر ماده خارج شده از حدیده خواهد شد.

آزمون XRD به منظور بررسی اثر چرخش حدیده بر ساختار بلوری پلیمر انجام شد. نتایج حاصل از آن در شکلهای ۷ و ۸ ارائه شده است. در اینجا تنها از سطح داخلی لوله طیف گرفته شده است. افزایش ارتفاع پیکها به طور کیفی نشان می‌دهند که چرخش حدیده منجر به افزایش درصد بلورینگی می‌شود. در اثر چرخش حدیده نیروی برشی که روی مذاب اعمال می‌شود باعث تشکیل بلورهایی می‌شود که با دور شدن از



شکل ۷ طیف XRD نمونه HD ۰۰۳۵ در حالت چرخش عضو داخلی با دور rpm ۲۰.



شکل ۸ طیف XRD نمونه HD ۰۰۳۵ در حالت بدون چرخش.

سطح چرخنده، نیروی برشی اعمالی روی مذاب کاهش می‌یابد. بنابراین، ساختار بلوری یا آرایش یافتگی نیز کاهش می‌یابد. این ساختار ممکن است ساختار شیش کباب به شکل زنجیرهای کشیده بلوری باشد که در اثر نیروی برشی حاصل شده‌اند. با توجه به سطح زیر پیکها بلورینگی در حالت حدیده متحرک با دور rpm ۲۰ در حدود ۲۰ درصد نسبت به حدیده ساکن افزایش یافته است.

نتیجه‌گیری

با افزایش دور چرخش حدیده قطر لوله‌های خروجی از اکسترودر کاهش یافته که این کاهش در دور rpm ۲۵ به حداکثر رسیده است. در این حالت قطر لوله‌های تولیدی به مقدار ۱۲ درصد نسبت به حالت حدیده ثابت کاهش داشته است.

- در اثر چرخش حدیده نیروی برشی که روی مذاب اعمال می‌شود باعث تشکیل بلورهایی می‌شود که با دور شدن از سطح چرخنده نیروی برشی که روی مذاب اعمال می‌شود کاهش می‌یابد. بنابراین، ساختار بلوری یا آرایش یافتگی نیز کاهش می‌یابد. با استفاده از نتایج XRD مشخص شده که با افزایش دور چرخش حدیده تا حدود rpm ۲۰ بلورینگی حدود ۲۰ درصد نسبت به حدیده ساکن افزایش یافته است.

- نتایج بدست آمده از آزمایشهای خواص مکانیکی مبین آن است که با افزایش دور چرخش حدیده مقاومت محیطی در لوله HD۰۰۳۵، ۱۵ درصد، در لوله HDEX ۳، ۲۲ درصد، در لوله PP ۲۵ درصد و در لوله کامپوزیتی ۳۴ درصد افزایش می‌یابد.

- برای پلی‌اتیلن سنگین در دور چرخش rpm ۱۰ لوله‌ای همسانگرد که خواص در دو جهت یکسان است، ایجاد شده است. همچنین، برای لوله پلی‌پروپیلن و کامپوزیتی خواص در rpm ۴ همگن می‌شود.

- افزایش مقاومت محیطی همزمان با افزایش دور چرخش حدیده باعث

www.SID.ir

Archive of SID

کاهش خواص در جهت محوری می‌شود.

- با توجه به آزمون فشار هیدروستاتیک مشخص شد که بهترین طول عمر مربوط به لوله‌هایی است که با دور ۲۰ rpm تولید شده‌اند.
- با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان لوله‌هایی مستحکم در حد استاندارد با ضخامت کمتر تولید کرد.

قدردانی

از شرکت پژوهش و فناوری پتروشیمی ایران به دلیل حمایت مالی در اجرای این طرح پژوهشی قدردانی می‌شود.

مراجع

1. Saheban M., *Design and Manufacture of Die with Rotating Member to Produce High Performance Pipe*, MSc Thesis, Polymer Engineering Group, Tarbiat Modares University, Iran, 1994.
2. Bakhtiari M.R., *Extrusion Production of Weld-less High Performance Pipe by Rotating Die System and Investigation of Mechanical Properties*, MSc Thesis, Polymer Engineering Group, Tarbiat Modares University, Iran, 1996.
3. Baradaran Ajili S., *Manufacture of High Performance Polymeric Pipe Using Rotating Die System,* MSc Thesis, Polymer Engineering Group, Tarbiat Modares University, Iran, 1997.
4. Bilgin S., *Extrusion of Pipe Using a Rotating Die System*, MSc Thesis, Mechanical Department, University of Manchester, UK, 1981.
5. long J., Kaizh S. and Guan Q., A Mandrel Rotating Die to Produce High-hoop Strength HDPE Pipe by Self-reinforcement, *J. Appl. Polym. Sci*., **69**, 323-328, 1998.
6. Lee K.S., Lai M.O. and Chen C.M., Flow-forming of Super-tough Polypropylene Pipes Using a Twin Motor-driven Rollers Setup, *J. Mater. Proc. Technol*., **65**, 228-236, 1997.
7. Ward I.M., Morath C.C., Taraiya A.K. and Richardson A., The Developement of Continuous Large-scale Die Drawing for the Production of Oriented Polymer Rods and Tubes, *Plast. Rubber Compos. Proc. Applicat*., **19**, 55-62, 1993.
8. Kwon J.A. and Truss R.W., The Work of Fracture in Uniaxial and Biaxial Oriented Unplasticised PVC Pipes, *J. Eng. Fract. Mech*., **69**, 605-616, 2002.
9. Huang Y., GentleU C.R., Lacey M. and Prentice P., Analysis and Improvement of Die Design for the Processing of Extruded Plastic Pipes, *Mater. Des*., **21**, 465-475, 2000.

Archive

www.SID.ir