

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2017.03.009

基于 DIC 系统的 PE-HD 力学性能^{*}

仇海¹, 袁惠新¹, 郭早阳²

(1. 常州大学机械工程学院, 江苏常州 213000; 2. 北京航空航天大学, 北京 100191)

摘要: 基于数字图像相关法 (DIC) 研究了加载速率和汽油浸泡时间对高密度聚乙烯 (PE-HD) 材料拉伸性能的影响。实验表明, PE-HD 材料的屈服应力随加载速率的增加而增加, 但随加载速率的增大, 其对屈服应力的影响逐渐减小; 断裂伸长率随加载速率的增加明显减小; 屈服应变不随加载速率的改变而改变; 计算出各加载速率下材料的拉伸弹性模量大小。经汽油处理过的 PE-HD 屈服应力和拉伸弹性模量随浸泡时间快速下降随后趋于稳定, 材料的强度降低到一个稳定的值。

关键词: 数字图像相关法; 高密度聚乙烯; 加载速率; 汽油

中图分类号: TQ32 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2017)03-0041-04

Mechanical Properties of PE-HD Materials Based on DIC System

Qiu Hai¹, Yuan Huixin¹, Guo Zaoyang²

(1. School of Mechanical Engineering, Changzhou University, Changzhou 213000, China; 2. Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: The effects of loading rate and gasoline soak time on the tensile properties of high density polyethylene (PE-HD) materials were studied by digital image correlation (DIC) method. Experimental results show that the yield stress increases with the loading rate, but with the increase of loading rate, the influence of the loading rate on the yield stress decreases gradually. The elongation at break decreases with the increase of loading rate, the yield strain have no dependence on the loading rate, the elastic modulus of the material under different loading rates are calculated. The yield stress and elastic modulus of the PE-HD treated by gasoline decrease rapidly with immersion time and then become stable, the strength of the material reduces to a stable value.

Keywords: digital image correlation; high density polyethylene; loading rate; gasoline

减轻车身质量,降低汽车排放,节省能源消耗以及提高车身安全性能已经成为当代汽车设计制造的必然发展方向。而汽车油箱材料直接影响这4个重点的发展方向。目前高密度聚乙烯 (PE-HD) 材料因其质量轻^[1-2],形状自由度大,研发周期短,成本低,耐冲击,耐腐蚀,不爆炸等优点被广泛地应用到汽车塑料油箱材料的设计中。然而国内的高性能汽车油箱的 PE-HD 专用料的研发相对滞后,其中重要的影响因素之一便是对 PE-HD 的力学性能以及使用过程中汽油对其性能的影响缺乏深入的认识。张超^[3]及邵鹏程等^[4]综述了我国 PE-HD 专用树脂现状和发展方向;李娟等^[5]对汽车塑料油箱吹塑成型进行了模拟;J. M. L. Reis 等^[6-7]及 A. Dasari 等^[8]研究了温度和应变率对 PE-HD 力学行为的影响;马赛尔等^[9]通过 Sherwood-Frost 模型对 PE-HD 的力学行为进行了预测;然而这些研究大都是对 PE-HD 单方面的研究,采用的也是传统的拉伸试验机测量方法,塑料在拉伸时会有颈缩和很大的塑性

变形,这就为测量时带来了极大的不便,且传统测量方法操作困难测量误差较大。笔者通过拉伸实验,结合数字图像相关法 (DIC) 应变测量分析系统研究加载速率和汽油浸泡时间对 PE-HD 高分子材料拉伸性能的影响,并对实验结果进行讨论。

1 实验部分

1.1 原材料

PE-HD 板块: 试件形状及尺寸参考 ASTM D638-10 及 BS EN ISO 527:2012 设计并加工,美国福特研究院。

1.2 仪器及设备

微机控制电子万能材料试验机: RGM-6100 型,深圳瑞格尔仪器有限公司;

DIC 仪器及软件: 西安交通大学。

^{*}NSFC 面上 2015 项目 (11572020), 北京航空航天大学科技立项项目

联系人: 仇海, 硕士生, 研究固体力学

收稿日期: 2016-12-19

1.3 DIC 应变测量分析系统

DIC 技术^[10]是一种前沿的光学测量技术因其全场测量,非接触,数据采集简单,测量环境要求低,测量精度高,适用范围广等优点而深受广大科研人员的青睐,笔者研究的材料在拉伸过程中具有变形大的特点,因此传统的应变测试技术(应变片、引伸计等)已不能满足笔者所涉及实验的要求,采用 DIC 测试技术能很好地解决大变形下的应变测量问题。

1.4 试样制备

在数字图像相关法中,由于试样的变形信息需要通过处理试样表面的数字图像来反映,因此试样的成像表面必须具有能够承载变形信息的随机灰度分布(即随机散斑图),笔者所涉及的实验通过人工在试样表面随机喷涂黑白哑光漆制得散斑试样,在每个散斑点不重叠和最小散斑大小为 3 个像素的约束条件下尽可能地使散斑密度最大化。

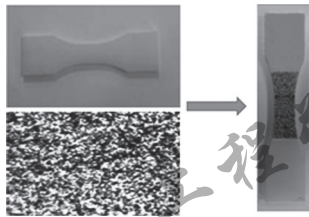


图 1 散斑试样

1.5 实验方法

(1) 拉伸实验。

图 1 为散斑试样。所有拉伸实验均在室温(约 25℃)下进行。在试验机上以不同的加载速率进行拉伸实验^[12-13],同时记录载荷-位移曲线。实验试件分为未经汽油浸泡过的试件和浸泡过汽油的试件,所用汽油为 93# 汽油。

未浸泡汽油实验:试验机的加载速率分别为 0.06, 0.6, 6, 60, 300 mm/min。每个速率选取 3 个试样,以试样相应参数的平均值作为实验结果。

浸泡汽油实验:选取加载速率为 6 mm/min,浸泡汽油时间分别为 1, 3, 5 d 及 1, 2, 3 周,每个时间段选取 4 个试样,以试样相应参数的平均值作为实验的结果。

(2) 加载前后图像的采集。

图 2 是 DIC 测量系统的示意图,该系统由 2 个相机组成测头,LED 照明光源和计算机(包括测试分析软件)组成,实验之前需要根据试件的尺寸来确定两个相机之间的距离及相机与试件被测表面的

距离,同时保证摄像机的光轴与试件表面法线之间的偏差在 5°之内,然后利用八步标定法^[11]对相机进行标定,获得应变分析计算所需的相机内外参数。

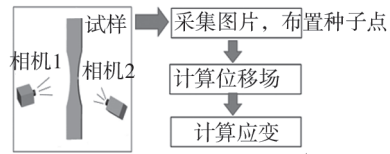


图 2 DIC 系统

(3) 位移及应变的计算。

DIC 系统的原理^[14-15]是采用双目视觉技术,通过对其所采集的试样变形过程的图像表面进行三维重构,利用相关判据对变形前后状态的图像子区的灰度值进行匹配,通过图像子区中心点坐标相对参考图像子区中心点坐标的变化来反映该图像子区的位移,然后通过相邻图像子区中心点之间距离的变化来计算该区域的应变,一个图像子区就相当于一个很小的应变片,将所有图像子区的变形信息进行组合就可以得到该变形状态下所选计算区域的位移场和应变场。图 3 的初始状态反映了对试件表面所划的图像子区和设置的种子点,图 3 中开始颈缩反映了变形过程中刚开始出现颈缩时试件的形貌,中间区域明显出现凹陷现象。图 3 颈缩扩散表示颈缩继续扩大。

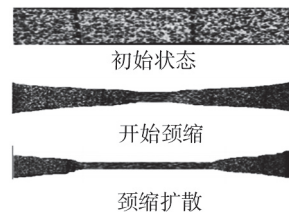


图 3 散斑试件变形前后图

2 结果与讨论

2.1 未浸泡汽油情况下,不同加载速率对 PE-HD 拉伸性能的影响

通过 DIC 系统的计算方法,得到了不同加载速率下每组 PE-HD 的拉伸弹性模量大小以及每组的平均值和方差,见表 1。

试样组	表 1 PE-HD 的拉伸弹性模量 MPa				
	加载速率/(mm·min ⁻¹)				
	0.06	0.6	6	60	300
第一组	792.8	863.1	1050.8	1255.4	2334.9
第二组	794.7	838.9	1211.5	1218.4	2139.3
第三组	770.7	879.5	1249.1	1413.4	2212.2
平均值	786.1	860.5	1170.5	1295.8	2228.8
方差	+10.9	+16.6	+85.9	+84.5	+80.7

由表 1 数据很明显看出,拉伸弹性模量随加载

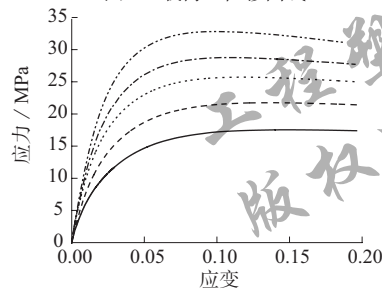
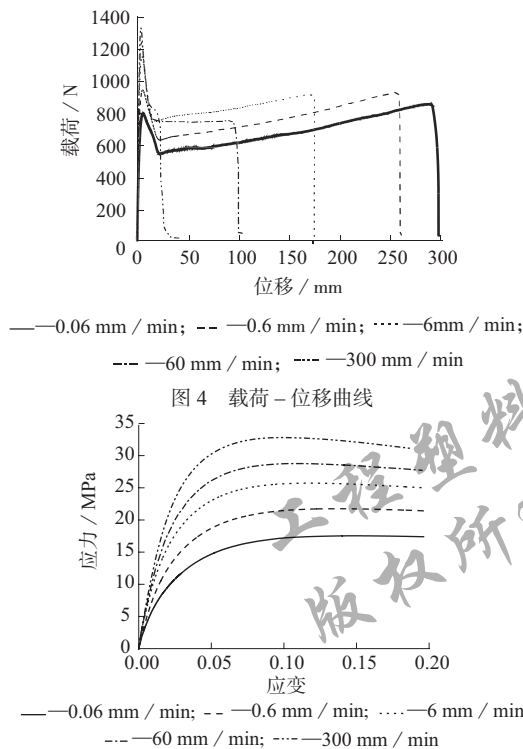
速率的增大而增大。

表 2 是求得的不同加载速率下屈服应变的具体数值,由表 2 可以看出,屈服应变几乎没有明显的变化,说明加载速率对屈服应变没有明显的影响。

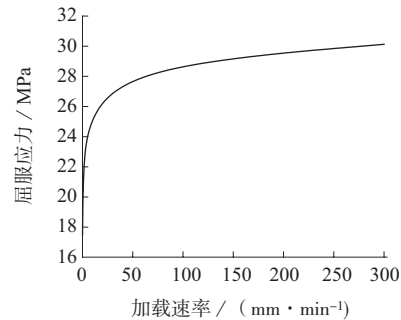
表 2 不同加载速率下屈服应变的数值 %

加载速率 / (mm · min ⁻¹)	0.06	0.6	6	60	300
屈服应变	0.079	0.079	0.078	0.078	0.078

图 4 是载荷-位移曲线。图 5 是不同加载速率下的应力-应变曲线。



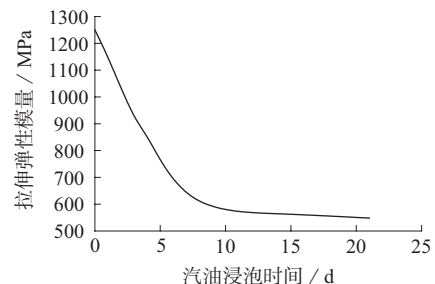
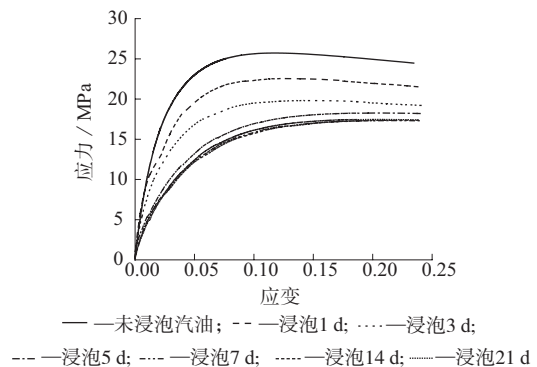
由图 5 可知,加载速率对屈服应力和屈服载荷具有明显的影响,随着加载速率的增加,相应的屈服载荷和屈服应力也在增大。然而这种变化并不是无限制的,随着加载速率的不断增大加载速率对屈服应力的影响也在不断减小见图 6。由图 6 可以看出,加载速率在 0~50 mm/min 之间屈服应力的变化幅度较大,这说明在这个加载速率区间内速率对材料的屈服应力影响较大,表明该 PE-HD 是速率相关材料,这与高分子材料的黏弹性变形特征紧密相关。由图 5 可知,材料的断裂伸长率随加载速率的增大而减小。在加载速率较小时,材料的断裂伸长率较大,塑性变形性能很好,说明 PE-HD 在低速拉伸的情况下具有较好的延展性。由应力-应变曲线结合屈服应变具体的数值可以进一步验证,不同加载速率下的屈服应变几乎相同,说明屈服应变与加



载速率没有明显的关系。

2.2 汽油浸泡实验结果分析

图 7 为经汽油浸泡过的 PE-HD 试件拉伸应力-应变曲线,加载速率为 6 mm/min,浸泡的时间分别为 1,3,5,7,14,21 d。通过和未经汽油处理试件的应力-应变曲线的对比可知,在汽油短期浸泡的过程中 PE-HD 材料的屈服应力随着浸泡时间的增加而降低,但是随着浸泡时间的不断地增加材料的应力-应变曲线却没有明显的变化。通过对相应试样拉伸弹性模量的计算,验证材料力学性能的变化,图 8 示出 PE-HD 的拉伸弹性模量随浸泡时间变化的曲线。



当浸泡时间小于 7 d 时,曲线变化得较快,大于 7 d 时曲线变化趋于平缓,由此可知,汽油对 PE-HD 试件的拉伸弹性模量的影响在前期变化剧烈,随着时间的增长逐渐稳定。综上所述,经汽油浸泡后材料的屈服应力明显降低,这说明该复合材料

在汽油浸泡后存在一定程度的软化,这是在汽车油箱设计过程中必须考虑的因素。

3 结论

基于 DIC 系统得到的实验结果可以看出,未经汽油处理后 PE-HD 试样的屈服应力随加载速率的增加而增加,但其对屈服应力的影响随着加载速率的增加不断地减小;断裂伸长率随加载速率的增加而减少;屈服应变与加载速率没有明显的关系。通过计算得到了各加载速率下材料的拉伸弹性模量。经汽油浸泡后 PE-HD 的屈服应力和拉伸弹性模量短期内随浸泡时间急剧下降随后变化趋于稳定,说明汽油渗透对 PE-HD 材料具有软化作用,但渗透速率随时间的增加而降低,且达到一应程度时会趋于饱和。

参考文献

- [1] 李清玲,张晓文,裴鑫杰,等. 高密度聚乙烯的拉伸性能影响因素分析[J]. 炼油与化工,2012(1):16-18.
Li Qingling, Zhang Xiaowen, Pei Xinjie, et al. Factors affecting tensile property of HDPE[J]. Refining and Chemical Industry, 2012(1):16-18.
- [2] 熊成,戚嵘嵘. HDPE/木粉复合材料的性能研究[J]. 工程塑料应用,2008(5):22-25.
Xiong Cheng, Qi Rongrong. Study on properties of high density polyethylene/wood flour composites[J]. Engineering Plastics Application, 2008(5):22-25.
- [3] 张超. HDPE 汽车燃油箱专用树脂现状及发展方向[J]. 塑料包装, 2009(6):21-23.
Zhang Chao. Present situation and development direction of special resin for automobile fuel tank[J]. Plastic Packaging, 2009(6):21-23.
- [4] 邵鹏程,王雁玉,李渤,杜新胜,张霖. 高密度聚乙烯的研究及应用[J]. 塑料制造,2011,04:98-100.
Shao Pengcheng, Wang Yanyu, Li Bo, et al. Research and application of high-density polyethylene[J]. Plastic Manufacturing, 2011(4):98-100.
- [5] 李娟,刘悦卫,汪昌盛,等. 汽车燃油箱轻量化技术及其验证研究[C]//中国汽车工程学会年会论文集. 长春:中国汽车工程学会, 2015:18-21.
Li Juan, Liu Yuewei, Wang Changsheng, et al. Study and validation on lightweight of automotive fuel tanks[C]// Proceedings of the annual meeting of China Automotive Engineering Society. Changchun: Society of Automotive Engineering of China, 2015:18-21.
- [6] Reis J M L, Pacheco L J, da Costa Mattos H S. Influence of the temperature and strain rate on the tensile behavior of post-consumer recycled high-density polyethylene[J]. Polymer Testing, 2013, 32:1 576-1 581.
- [7] Reis J M L, Pacheco L J, da Costa Mattos H S. Temperature and variable strain rate sensitivity in recycled HDPE[J]. Polymer Testing, 2014, 39:30-35.
- [8] Dasari A, Misra R D K. On the strain rate sensitivity of high density polyethylene and polypropylenes[J]. Materials Science and Engineering: A, 2003, 358:356-371.
- [9] 马赛尔,许进升,童心,等. 高密度聚乙烯单轴拉伸力学性能及本构关系研究[J]. 中国塑料,2016(4):88-92.
Ma Saier, Xu Jinsheng, Tong Xin, et al. Research on uniaxially tensile mechanical properties and constitutive model of high density polyethylene[J]. China Plastic, 2016(4):88-92.
- [10] 陈盼,王彦晓,黄小霞. 数字图像相关方法在测量材料力学性能中的应用[J]. 电子世界,2013(14):86-87.
Chen Pan, Wang Yanxiao, Huang Xiaofen. Application of digital image correlation method in measuring mechanical properties of materials[J]. Electronic World, 2013(14):86-87.
- [11] 潘兵,谢惠民,李艳杰. 用于物体表面形貌和变形测量的三维数字图像相关方法[J]. 实验力学,2007(6):556-567.
Pan Bing, Xie Huimin, Li Yanjie. Three-dimensional digital image correlation method for shape and deformation measurement of an object surface[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2007(6):556-567.
- [12] Ayoub G, Zaïri F, Naït-Abdelaziz M, et al. Modelling large deformation behaviour under loading-unloading of semicrystalline polymers: Application to a high density polyethylene[J]. International Journal of Plasticity, 2010, 26:329-347.
- [13] Ognedal A S, Clausen A H, Polanco-Loria M, et al. Experimental and numerical study on the behaviour of PVC and HDPE in biaxial tension[J]. Mechanics of Materials, 2012, 54:18-31.
- [14] Tan Yiqiu, Zhang Lei, Guo Meng, et al. Investigation of the deformation properties of asphalt mixtures with DIC technique[J]. Construction and Building Materials, 2012, 37:581-590.
- [15] Malesa M, Kujawski M, Malowany K, et al. Application of multi-camera DIC system for measurements of industrial structures[J]. Procedia Engineering, 2015, 114:453-460.

本刊声明

近期有不法网站和个人假借本刊名义向广大读者征稿,同时收取高额注册费、审稿费、版面费。本刊特此声明:《工程塑料应用》为中国兵器工业集团第五三研究所(山东非金属材料研究所)主办,杂志社所在地为山东省济南市,本刊唯一合法投稿网址为 www.epa1973.com,本刊未委托任何机构和个人从事征稿和组稿业务。请广大作者牢记本刊投稿网址,辨别来电属地,不要给个人账户汇款,防止受骗。本刊保留对相关网站和个人追究法律责任的权利。

(工程塑料应用杂志社)