

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2018.06.020

基于数字敏感梯度法的热残余应力测量

蒲新征^{1,3}, 代祥俊², 原天宇²

(1. 江苏建筑职业技术学院, 江苏徐州 221116; 2. 山东理工大学交通与车辆工程学院, 山东淄博 255049;

3. 中国矿业大学信息与控制学院, 江苏徐州 221116)

摘要:工程塑料在制备、成型过程中或在温度变化较大的环境下工作时不可避免地产生热残余应力,同时引起塑性变形。针对上述问题,根据透明材料本身的物理特性,采用透射式数字敏感梯度法实验研究了该类材料的热残余应力,推导出了面内热残余应力以及与位移的关系,通过数字图像相关方法得到面内位移场,进而计算出热残余应力分布。此外给出了热残余应力随温度的变化规律。实验表明,透射式数字敏感梯度法能获得全场热残余应力,可为塑料制品的热残余应力的测量分析提供一个新思路。

关键词:热残余应力;数字敏感梯度法;透明材料

中图分类号: TN206 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2018)06-0094-04

Thermal Residual Stress Evaluation Based on Digital Gradient Sensing Method

Pu Xinzheng^{1,3}, Dai Xiangjun², Yuan Tianyu²

(1. Jiangsu Vocational Institute of Architectural Technology, Xuzhou 221116, China;

2. School of Transportation and Vehicle Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China;

3. School of Information and Control Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: Thermal residual stresses associated with plastic deformation are inevitable produced during manufacturing process or working under high temperature environments. According to the above problems, the digital gradient sensing (DGS) method was applied to evaluate the thermal residual stress distribution in transparent material. The DGS in transmission mode was used based on the physical characteristics of transparent materials. Full-field sum of in-plane stress distribution was obtained according to the relation between stress and in-plane displacements by digital image correlation. Also, the relationship between thermal residual stress and heating temperature was given. The results indicate that full field thermal residual stress distributions can be obtained by the DGS, which is a new strategy for the measurement on residual stress of plastic plates.

Keywords: thermal residual stress; digital gradient sensing; transparent material

残余应力对结构和零部件的强度、稳定性和耐久性等有着直接和重要的影响。热残余应力是其中常见的一种。工程塑料在制备和成型,或在温度变化较大的环境下工作时,都不可避免地产生热残余应力。

残余应力的检测和分析方法主要分为有损和无损两大类。有损方法采用一定的方法将残余应力局部释放,同时测定出相应的变形,然后应用弹性力学理论进行计算,得到残余应力。钻孔法^[1-2]即为

此类方法的代表。另一类无损方法,不需要损坏材料,利用材料本身的物理特性直接测量或通过相关物理量(如位移、应变等)求解出残余应力。无损方法主要有中子衍射法^[3]、X射线法^[4]、磁测法^[5]、超声波法^[6]和光学方法等。由于具有非接触、高精度和可得到全场信息等优点,光弹法^[7]、电子散斑干涉法(ESPI)^[8-9]、云纹干涉法^[10]、数字图像相关法(DIC)^[11]、相干梯度敏感(CGS)干涉法^[12-13]等光学方法在测量位移和变形时体现出独特的优势。近

基金项目:国家自然科学基金项目(11672167),江苏省高校“青蓝工程”支持项目

通讯作者:代祥俊,博士,副教授,研究方向为现代光测力学测试方法及应用 E-mail: daixiangjun@sdu.edu.cn

收稿日期: 2018-03-27

引用格式:蒲新征,代祥俊,原天宇. 基于数字敏感梯度法的热残余应力测量[J]. 工程塑料应用,2018,46(6):94-97.

Pu Xinzheng, Dai Xiangjun, Yuan Tianyu. Thermal residual stress evaluation based on digital gradient sensing method[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(6):94-97.

年来,数字梯度敏感法(DGS)^[14-17]被广泛应用于透明材料的应力和变形测量上。该方法基于CGS和二维DIC方法,根据应力导致光线偏转使透明材料表现出的弹光效应来建立面内应力梯度与光线微小偏转量之间的关系。两个方向的偏转角可通过二维DIC获得的面内位移场直接求解出来。由于DGS方法对环境要求低、光路简单、可获得全场变形信息的特点,笔者采用DGS方法中的透射式DGS方法对透明聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)板的热残余应力进行了实验研究。首先介绍了DGS的基本原理,通过透明试件的平整度实验验证了方法的有效性和准确性,推导出了面内热残余应力的计算公式,采用此公式由位移场计算出热残余应力和,最后给出了热残余应力与温度的关系。

1 DGS

透射式DGS实验装置如图1所示,主要包括CCD相机、透明试件、具有随机散斑表面的目标板和两个照明光源。目标板表面的散斑可以是自然纹理也可以是人工制作的散斑。假设 $O(x, y)$, $P(x_0, y_0)$, 分别表示试件坐标系和目标板坐标系,这两个平面坐标系相互平行,CCD光轴与Z轴重合且垂直于试件和目标板坐标系。透明试件的厚度为 B ,折射率为 n 。试件与目标板之间的距离为 Δ , CCD与试件之间的距离为 L ,实验时 $L \gg \Delta$ 。加载前,先拍摄一张图像作为参考图像,此时CCD透过试件上 $O(x, y)$ 点将目标板上的 $P(x_0, y_0)$ 点的信息记录了下来。试件受载后,再拍摄一系列变形图像。此时,由于应力作用导致透明试件的厚度和折射率都发生改变,CCD透过试件上 O 点记录为 P 点附近 $Q(x_0 + \delta_x, y_0 + \delta_y)$ 点的信息(δ_x, δ_y 分别为 PQ 在 x, y 方向上位移的分量,其大小可通过数字图像相关方法计算得到。

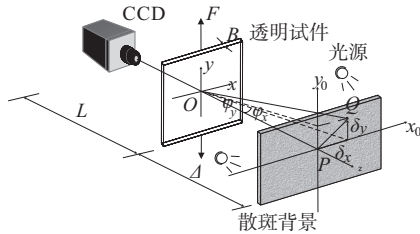


图1 透射式DGS实验装置

通过确定 PQ 和 Δ 便可计算得到相对于光轴的偏转角 φ_x 和 φ_y 。

对透明材料而言,光程差 $\delta S(x, y)$ 主要由应力改变导致的试件折射率变化和泊松效应导致的试件厚

度变化两个因素产生。按照Maxwell Neumann定律和线弹性力学理论,可以得到试件受力变形导致的光程差为:

$$\delta S(x, y) = 2B(n-1) \int_0^{\frac{1}{2}} \varepsilon_{zz} d\left(\frac{z}{B}\right) + \int_0^{\frac{1}{2}} \delta n d\left(\frac{z}{B}\right) \quad (1)$$

式中: ε_{zz} —— z 方向的应变;

z —— z 方向的坐标。

对于光学各向同性且无双折射性质的材料,折射率变化与主应力之间的关系为:

$$\delta n(x, y) = D_1(\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}) \quad (2)$$

式中: $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}$ —— xx, yy, zz 平面的主应力;

D_1 ——应力光学常数。

考虑到 $\varepsilon_{zz} = \frac{1}{E}[\sigma_{zz} - \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})]$,在平面应力状态下,式(1)可简化为:

$$\delta S(x, y) \approx C_\sigma B(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) \quad (3)$$

式(3)中, $C_\sigma = D_1 - (\nu/E)(n-1)$ 为材料的光学常数,其中 ν 为试件材料的泊松比, E 为其弹性模量。

根据图1中的几何关系,可得到透射式DGS的控制方程(偏转角 φ_x, φ_y 和应力梯度的关系):

$$\begin{cases} \varphi_x = \frac{\delta_x}{\Delta} = C_\sigma B \frac{\partial(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})}{\partial x} \\ \varphi_y = \frac{\delta_y}{\Delta} = C_\sigma B \frac{\partial(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})}{\partial y} \end{cases} \quad (4)$$

2 实验研究

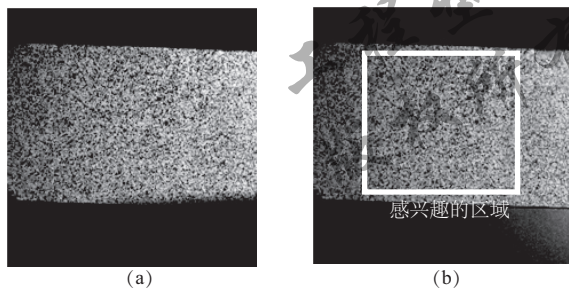
2.1 平整度实验

为了验证方法的有效性,首先采用DGS对厚度均匀的透明PMMA板进行了平整度测定。对于未受载荷作用的透明材料,其厚度和折射率均为常数,位移 δ_x, δ_y ,分别为坐标 x, y 的线性函数,待测区域的偏转角 φ_x, φ_y 在空间上为一光滑斜面。

实验前,先在目标板的表面用哑光漆人工制作好随机分布的散斑。透明试件和目标板均竖直放置,两者间距为40 mm。实验采用的图像采集设备是分辨率为 1280×1024 像素的CCD相机。相机放置于试件前方,相机的光轴与试件表面垂直,且光心与试件中心位于同一高度。相机距离试件600 mm。经标定,清晰成像时CCD相机的放大倍数为13.5像素/mm。采用LED灯作为照明光源。试件尺寸为 $90 \text{ mm} \times 60 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 。

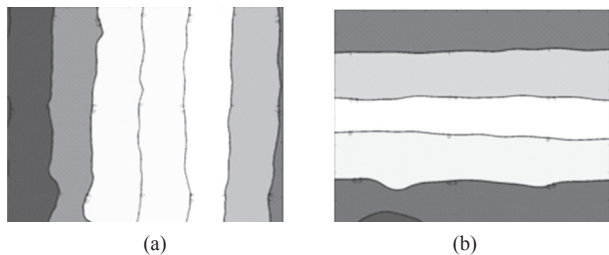
实验时,首先用CCD相机拍摄一张目标板表面的散斑图作为参考图像,在相机和目标板之间放置好透明试件后再拍摄一张标板表面的散斑图作为

测量图像。图2示出未透过试件和透过试件拍摄得到的目标板表面的散斑图,图2b中的白色矩形内的区域为测量区域。接下来即可通过数字图像相关方法计算得到 δ_x , δ_y 。由于采用DGS方法进行测量时仅用了一个相机,因此采用2D-DIC进行计算。计算选用的模板分辨率为 21×21 像素,计算步长为5像素。图3a、图3b显示的分别为采用2D-DIC计算得到的 x, y 两个方向的位移等高线。由图3可以看出, δ_x , δ_y 的等高线基本按等间距分布,位移分别随着点的坐标 x, y 的增加而增加,总体呈现出较好的线性关系。局部的不均匀性产生的原因主要来源于相机的畸变和光照不均等。由式(4)可计算出两个方向的偏转角的三维云图,如图4所示。由图4可以看出,除边缘外其它地方两个方向的偏转角云图都很平滑,这表明试件表面具有较好的平整度。在采用DGS测量的同时也使用了ESPI^[18]对试件的平整度进行了测量。图5为ESPI测量结果。图5a给出的是通过相移法计算得到的解包裹位相图,图5b给出的是表面平整度分布图。图5b的结果证明了DGS的有效性。



a—未透过试件观察; b—透过未变形的透明试件观察

图2 目标板表面的散斑图



a— δ_x ; b— δ_y

图3 测得的等高线图

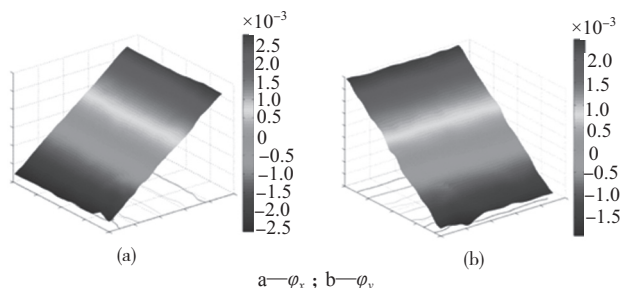
2.2 热残余应力的测定

根据数值积分理论,可由式(4)得到:

$$\sigma_{xx} + \sigma_{yy} = \frac{1}{C_\sigma B \Delta} \left[\int_0^x \delta_x(x, 0) dx + \int_0^y \delta_y(y, 0) dy \right] + F \quad (5)$$

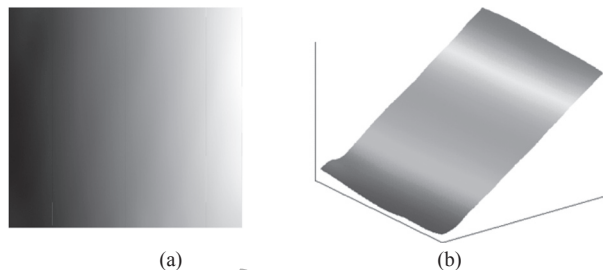
式中: F ——积分常数,可根据边界条件确定;

因此若给定 C_σ 和 B ,即可通过式(5)求得应



a— ϕ_x ; b— ϕ_y

图4 两个方向的偏转角



a—位相分布图; b—表面平整度

图5 ESPI测量结果

力和。

热残余应力测量的对象是一块尺寸为 $100 \text{ mm} \times 80 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 的透明PMMA板,光学常数 C_σ 大小为 $-9 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{N}$ 。采用酒精喷灯对PMMA板进行加热,当试件待测区域表面温度达到实验预定温度后停止加热,让其自然冷却至室温。由于温度的变化导致热应力的产生,同时也会引起试件局部区域的厚度和折射率发生改变。这里采用DGS对加热区域进行测量,利用前面介绍的应力和厚度、折射率等的关系计算出热残余应力。

进行热残余应力测量时仍采用图1所示的透射式DGS实验装置,与验证实验不同的是这里先采集试件变形前的散斑图作为参考图像,再采集含有热残余应力的散斑图作为变形图像。对变形前后的图像进行相关计算可得相应的面内位移 δ_x 和 δ_y 分布规律,除以距离 Δ 可得两个方向的偏转角 ϕ_x 和 ϕ_y ,再根据式(5)可计算出应力和。

图6示出根据面内位移计算得到的温度为 80°C 时两个方向的偏转角三维图。通过图6a,图6b可以很明显分辨出加热区域的位置位于图像中心,形状近似一个圆形,该圆形是由于不均匀温度场导致不均匀塑性变形引起的。离加热区域越远,两个方向的偏转角越接近于零,这表明温度场影响导致的塑性变形随着距离的增大而减小。两幅偏转角三维云图可以相互印证。 x 方向的偏转角 ϕ_x 变化范围 $-1.24 \times 10^{-4} \sim -1.22 \times 10^{-4} \text{ rad}$, y 方向的偏转角 ϕ_y 变化范围 $-3.20 \times 10^{-4} \sim 3.18 \times 10^{-4} \text{ rad}$ 。图7示出通过

数值积分计算得到的应力和云图。从图7可以看出,热残余应力大小与位置的关系,距离加热点越远应力和云图表现得越平缓即应力和越小,应力和最大值位于图像中心即加热点处,大小为6.71 MPa。图8示出应力和随温度的变化规律,由图8可以看出,随着温度的增加残余应力和呈现增大的趋势,温度越高产生的塑性变形越大。

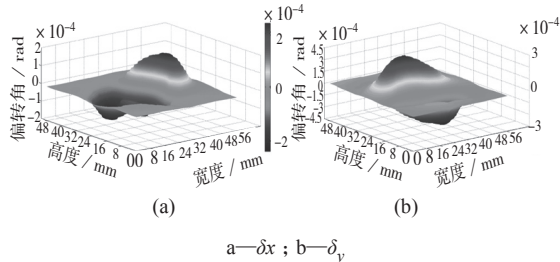


图6 温度为80℃时两个方向的偏转角

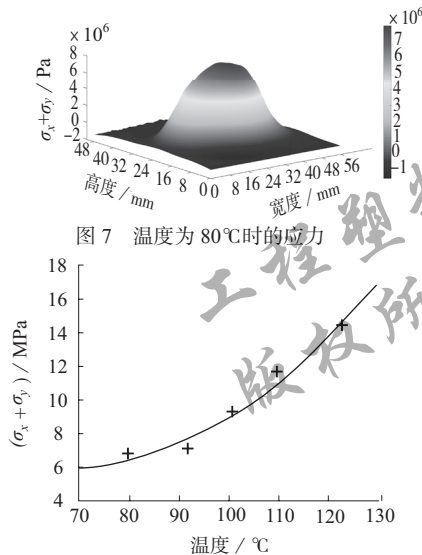


图7 温度为80℃时的应力

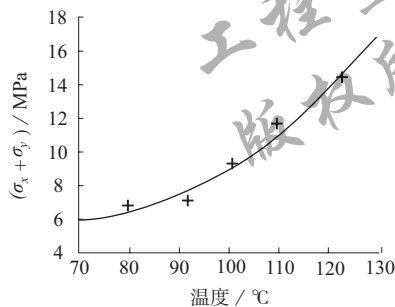


图8 应力和随温度变化规律

3 结论

介绍了数字敏感梯度方法的基本原理,推导出了面内热残余应力和与位移的关系。通过表面平整度实验验证了方法的有效性,采用该方法对透明材料在温度场作用下产生的热残余应力进行了测量,得到了面内热残余应力和,同时给出了残余应力和随温度的变化规律。该方法能获得全场热残余应力,可为塑料制品热残余应力的测量分析提供一个新思路。

参考文献

- [1] 徐晓菱,陈祝年. 钻孔法测量残余应力中几个问题的探讨[J]. 实验力学,1989,4(2):209-215.
Xu Xiaoling, Chen Zhunian. Discussion on several problems for residual stresses measuring by hole drilling method[J]. Journal of Experimental Mechanics, 1989, 4(2):209-215.
- [2] Schajer G S. Advances in hole-drilling residual stress measurements[J]. Experimental Mechanics, 2010, 50(2):159-168.
- [3] Allen A J, Bourke M A, Dawes S, et al. The analysis of internal strains measured by neutron diffraction in Al / SiC metal matrix composites[J]. Acta Metallurgica et Materialia, 1992, 40(9):40-44.
- [4] Pagliaro P, Prime M B, Robinson J S, et al. Measuring inaccessible residual stresses using multiple methods and superposition[J]. Experimental Mechanics, 2011, 51(7):1 123-1 134.
- [5] Roskosz M, Bieniek M. Analysis of the universality of the residual stress evaluation method based on residual magnetic field measurements[J]. NDT & E International, 2013, 54(3):63-68.
- [6] Leon-Salamanca T, Bray D F. Residual stress measurement in steel plates and welds using critically refracted longitudinal (LCR) waves[J]. Research in Nondestructive Evaluation, 1996, 7(4):169-184.
- [7] Yun Hai, Lei Zhenkun, Yun Dazhen. Numerical simulation of isopachic parameter determined by phase-stepping interferometric photoelasticity: Errata[J]. Chinese Optics Letters, 2006, 4(3):682-682.
- [8] Huang Xianfu, Liu Zhanwei, Xie Huimin. Recent progress in residual stress measurement techniques[J]. Acta Mechanica Sinica, 2013, 26(6):570-583.
- [9] 杨吟飞, 万云, 何宁, 等. 基于电子散斑干涉技术的微变形场测量及残余应力分析[J]. 机械制造与自动化, 2014(2):144-146.
Yang Yinfei, Wan Yun, He Ning, et al. Micro-deformation field and residual stress measurement based on electronic speckle pattern interferometry[J]. Machine Building & Automation, 2014(2):144-146.
- [10] 戴福隆, 亚敏, 谢惠民, 等. 云纹干涉与钻孔法测量残余应力的实验方法与系统[J]. 实验力学, 2003, 18(3):313-318.
Dai Fulong, Ya Min, Xie Huimin, et al. An experimental method and system for residual stress measurement with moire interferometry and hole drilling[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2003, 18(3):313-318.
- [11] Winiarski B, Withers P J. Micron-scale residual stress measurement by micro-hole drilling and digital image correlation[J]. Experimental Mechanics, 2012, 52(4):417-428.
- [12] 姚学锋, 许蔚, 刘栋梁, 等. 相干梯度敏感 (CGS) 干涉测量技术及其应用研究[J]. 实验力学, 2006, 21(5):559-566.
Yao Xuefeng, Xu Wei, Liu Dongliang, et al. Coherent gradient sensing interferometry technology and its application[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2006, 21(5):559-566.
- [13] Dong X, Feng X, Hwang K C, et al. Full-field measurement of nonuniform stresses of thin films at high temperature[J]. Optics Express, 2011, 19(14):13 201-13 208.
- [14] Periasamy C, Tippur H V. Full-field digital gradient sensing method for evaluating stress gradients in transparent solids[J]. NDT & E International, 2012, 51(12):2 088-2 097.

粉末老化。

(2) 胺类抗氧剂 HD498P4 是对 PA6 粉末力学性能保护最好的抗氧剂,铜盐类的抗氧剂 H3373 次之,受阻酚类 1098 和亚磷酸酯类 2921T 复配抗氧剂力学性能保护效果最差。

(3) HD498P4 的加入可以保护 PA6 粉末在老化时形貌的完整程度,是相对适合 PA6 粉末的抗氧剂。

参考文献

- [1] Daneshmand S, Adelnia R, Aghanajafi S. Design and production of wind tunnel testing models with selective laser sintering technology using glass-reinforced nylon[J]. Materials Science Forum, 2006, 532-533:653-656.
- [2] 袁春霞,汪艳. 选择性激光烧结用尼龙 12 粉末的回收利用[J]. 工程塑料应用, 2017, 45(10):108-112.
Yuan Chunxia, Wang Yan. Recovery and utilization of nylon 12 powders for selective laser sintering[J]. Engineering Plastics Application, 2017, 45(10):108-112.
- [3] 夏雷. 尼龙 6 及其纳米复合材料的热氧稳定性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
Xia Lei. The thermal-oxidative stability of nylon6 and its nanocomposites[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [4] Bauer I, Habicher W D, Korner S, et al. Antioxidant interaction between organic phosphites and hindered amine light stabilizers: effects during photooxidation of polypropylene—H[J]. Polymer Degradation & Stability, 1997, 55(2):217-224.
- [5] Thomason J L, Ali J Z, Anderson J. The thermo-mechanical performance of glass-fibre reinforced polyamide 66 during glycol-water hydrolysis conditioning[J]. Composites Part A Applied Science & Manufacturing, 2010, 41(7):820-826.
- [6] Chionna D, Puglisi C, Samperi F, et al. Thermal oxidation products of nylon 6 determined by maldi-tof mass spectrometry[J]. Macromolecular Rapid Communications, 2001, 22(7):524-529.
- [7] 王义亮. 耐高温尼龙的抗老化研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2013.
Wang Yiliang. The study on anti-aging property of high-temperature nylon[D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2013.
- [8] 武海花,李迎春,蔡智奇. 抗老化助剂对尼龙 6 耐老化性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2017, 45(7):124-128.
Wu Haihua, Li Yingchun, Cai Zhiqi. Effects of anti-aging additives on anti-aging resistance of PA6[J]. Engineering Plastics Application, 2017, 45(7):124-128.
- [9] Levchik S V, Weil E D, Lewin M. Thermal decomposition of aliphatic nylons[J]. Polymer International, 2015, 48(7):532-557.
- [10] 李荣福,胡兴洲. 聚酰胺热氧化降解机理[J]. 高分子学报, 2000(2):136-141.
Li Rongfu, Hu Xingzhou. Mechanism of thermo-oxidative degradation of polyamide[J]. Acta Polymerica Sinica, 2000(2):136-141.
- [11] 肖利群,周雷,李福顺,等. 抗氧剂对 PA6 / GF 热氧老化性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2016, 44(10):106-111.
Xiao Liqun, Zhou Lei, Li Fushun, et al. Influence of antioxidant on thermal oxidative aging properties of PA6 / GF[J]. Engineering Plastics Application, 2016, 44(10):106-111.
- [12] Zinke H, Lorenz H J, Linhart H. Stabilization systems from triarylphosphites and phenols: US4290941[P]. 1981-09-22.
- [13] 李兰艳,李光吉,李超,等. 尼龙 6 在热氧老化中的性能与结构变化[J]. 塑料科技, 2009, 37(12):36-41.
Li Lanyan, Li Guangji, Li Chao, et al. Changes in the properties and structures of PA6 during the course of thermal oxidative aging[J]. Plastics Science and Technology, 2009, 37(12):36-41.
- [14] 赵万金,蒋汉雄,陶静,等. 受阻胺抗氧剂对 PA6 工业丝热氧老化性能的影响[J]. 合成纤维工业, 2011, 34(1):1-4.
Zhao Wanjin, Jiang Hanxiong, Tao Jing, et al. Influence of hindered amine antioxidant on thermal-oxidative aging properties of PA6 industrial yarn[J]. China Synthetic Fiber Industry, 2011, 34(1):1-4.
- [15] 郑立,汪艳. 抗氧剂对选择性激光烧结尼龙 12 热稳定性的研究[J]. 合成材料老化与应用, 2015, 44(3):20-22.
Zheng Li, Wang Yan. Study on the antioxidants to thermal stability of nylon 12 for selective laser sintering[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2015, 44(3):20-22.
- [16] Zhang C, Qu Z, Fang X, et al. Digital gradient sensing method to evaluate thermal stress at elevated temperatures[J]. Experimental Mechanics, 2016, 56(6):1123-1132.
- [17] Dai Xiangjun, Yun Hai, Shao Xinxing, et al. Thermal residual stress evaluation based on phase-shift lateral shearing interferometry[J]. Optics & Lasers in Engineering, 2018, 105:182-187.
- [18] Dai Xiangjun, Shao Xinxiang, Yang Fujun, et al. Determination of thickness uniformity of a transparent film based on in-plane ESPI and radial basis function[J]. Optics Communications, 2016, 369:18-27.

(上接第 97 页)

- [15] 俞海,郭荣鑫,夏海廷,等. 数字梯度敏感法在静态断裂力学实验中的应用[J]. 激光技术, 2014, 38(5):627-631.
Yu Hai, Guo Rongxin, Xia Haiting, et al. Digital gradient sensing measurement applied in static fracture mechanics experiments[J]. Laser Technology, 2014, 38(5):627-631.
- [16] Zhang C, Qu Z, Fang X, et al. Digital gradient sensing method to evaluate thermal stress at elevated temperatures[J]. Experimental Mechanics, 2016, 56(6):1123-1132.