

文章编号 1004-924X(2011)07-1612-08

用扫描白光干涉术检测合金韧窝断口微观三维形貌

邹文栋^{1*}, 黄长辉¹, 郑 琰², 徐周珏², 董 娜²

(1. 南昌航空大学 无损检测技术教育部重点实验室, 南昌 330063;

2. 中航工业江西洪都航空工业集团公司 理化测试中心, 南昌 330024)

摘要:运用扫描白光干涉法对 30CrMnSiA 合金韧窝断口复杂的三维表面微观形貌进行了检测。系统采用 Linnik 干涉结构, 并通过基于扫描空间余弦傅里叶频域分析的算法重建断口表面三维形貌。实验中扫描行程达 120 μm , 纵向检测精度优于 5 nm, 余弦傅里叶分析表现出很强的位相提取和噪声抑制能力, 韧窝断口微观形貌的三维重建效果理想。采用小岛法对获得的三维形貌数据进行分形维数测算, 在 40%~70% 相对切割高度处, 断口表面分形维数为 1.630 4~1.643 2, 平均值为 1.641 7, 标准差为 0.012 0。结果显示, 30CrMnSiA 合金韧窝断口微观形貌具有典型的分形特征。实验表明, 扫描白光干涉术是检测断口微观三维形貌的一种有效方法, 具有纵向精度高, 测程范围大, 重构效率高等特点。

关键词:扫描白光干涉; 合金韧窝断口; 空间频域; 微观三维形貌

中图分类号: O436.1; TP391.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111907.1612

Measurement of microscopic surface topography of alloy dimple fracture by scanning white-light interferometry

ZOU Wen-dong^{1*}, HUANG Chang-hui¹, ZHENG Qiang², XU Zhou-jue², DONG Na²

(1. Key Laboratory of Nondestructive Test of the Ministry of Education, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China;

2. Physical & Chemical Test Center, AVIC Jiangxi Hongdu Aviation Industry Group Co., Ltd., Nanchang, 330024)

* Corresponding author, E-mail: 18979106189@189.cn

Abstract: Scanning White-light Interferometry (SWLI) was proposed to measure the complex microscopic surface topography of a dimple fracture of 30CrMnSiA alloy. The Linnik structure was adopted in the system and the 3D image of the dimple fracture was rebuilt by the cosine Fourier analysis algorithm. Experiments show that the longitudinal measuring accuracy is better than 5 nm for a scan range of 120 μm . The cosine Fourier analysis offers strong abilities of phase extraction and noise suppression, and an ideal 3D reconstruction image of the dimple fracture is obtained. The obtained surface data were tested for fractal dimension by a slit island method. At incised height from 40% to 70%, the fractal dimension values range from 1.630 4 to 1.643 2 with an average of 1.641 7 and the standard

收稿日期: 2010-09-26; 修订日期: 2011-01-24.

基金项目: 航空科学基金资助项目 (No. 20085656018)

deviation of 0.012 0, which indicates that the dimple fracture of 30CrMnSiA has a typical fractal character. In conclusion, the SWLI is an effective way to measure the microscopic 3-D fracture surface topography, and it is characterized by high longitudinal precision, long dynamic measuring range and high reconstruction efficiency.

Key words: scanning white-light interferometry; alloy; dimple fracture; spatial frequency domain; microscopic 3-D profile

1 引言

材料断口表面微观形貌对研究断裂的产生及扩展过程具有重要价值,已愈来愈受到学者们的高度重视。断口微观形貌通常采用扫描电镜(Scanning Electron Microscope, SEM)来获取,一般为二维图像数据;但二维图像缺少纵向高度信息,近年来人们考虑断口形貌具有复杂的三维特征,已逐渐转向采用三维方式来获取断口的微观形貌^[1-2]。目前,获取断口表面三维形貌主要采用基于图像的计算机三维重建技术、激光扫描测量术和分层切片方法等^[3-5]。基于图像的计算机三维重建分为基于单幅图像的三维重建和基于多幅图像的三维重建,其中单幅图像的三维重建包括阴影恢复形状法、纹理恢复形状法、手动交互操作法等;基于多幅图像的三维重建方法包括立体视觉法、运动图像序列法、光度立体学方法等。当今,立体视觉法是金属断口三维重建中采用较多的一种,它主要是由断口的 SEM 立体对图像来恢复其三维几何形貌,该方法的难点是匹配问题,处理不当易造成重建误差。激光扫描测量技术主要采用聚焦显微成像或激光三角法重构三维形貌,通常用于岩石、混凝土等材料的断口特性检测分析。分层切片法是用金相砂纸按一定厚度分层打磨断口侧表面,每层磨削后采集轮廓图像,最后由计算机完成三维重建,该方法对样品表面有损伤,一般适合于断口宏观形貌的获取。

针对合金韧窝断口复杂的三维形貌,本文提出采用扫描白光干涉方法进行测量并实现三维重建。由于该方法基于光的干涉效应,更多地依据物理三维数据,重建算法计算量相对较少,可以实现快速三维重建,并且检测过程对样品无损伤。另外,从理论上讲,该方法不受光学系统景深的限制,因而具有纵向精度高、测程大等特点。然而需

要指出的是这里的断口表面不同于一般的光学表面和机械加工表面,其光学条件差、干涉条纹可见度极低,轮廓存在突变,高度纵深大,这些是目前国内外白光干涉技术未能实际应用于断口表面微观形貌检测的具体原因,本文针对这些问题进行了研究和讨论。

2 基于扫描白光干涉的合金断口三维形貌检测

2.1 实验装置

白光干涉术克服了相位模糊问题,具有测程范围大、精度高等特点,因此适用于复杂轮廓表面的检测。针对韧窝断口表面微观形貌十分复杂的特点,系统采用 Linnik 结构^[6]来提高实验的可控和操作性,如图 1 所示。光学显微放大倍率为 10,光源为大功率发光二极管(Light-emitting Diode, LED),干涉图像采用数字电荷耦合器件 CCD(Charge-Coupled Device)面阵来采集,纵向空间定位扫描由压电陶瓷驱动。由于断口表面的高度起伏大,需要系统有大的扫描行程,最好要达到几百个微米(一般的白光干涉粗糙度检测的扫

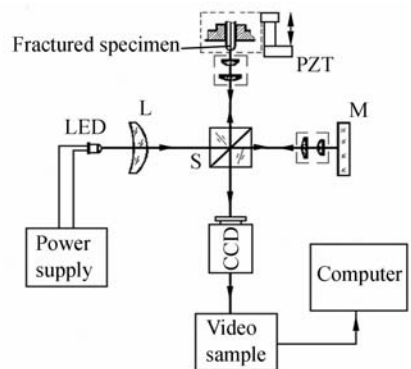


图 1 扫描白光干涉检测装置

Fig. 1 SWLI testing setup

描行程在几至几十微米),同时还要保证微纳米级的线性精度,为此,这里运用模糊 PID(Fuzzy-PID)控制算法来实现压电陶瓷驱动的闭环控制。另外,采用鉴频和循环缓冲方法解决数据采集的冗余问题。实验中,扫描步长为 20 nm,最大测程可达 120 μm 。根据系统光谱分布和采样定律,计算出所需纵向采样周期应小于 120 nm,实际扫描步长符合要求。

2.2 基于扫描空间余弦 Fourier 分析的三维重建算法

白光干涉检测三维重建通常是基于条纹对比度峰值检测,方法有多种。由于检测光路中介质色散可能破坏系统对色散的补偿平衡,从而因高阶色散造成条纹对比度包络畸变,导致条纹对比度法检测精度的下降。特别是在本检测实验中,合金断口表面光学条件极差,主要原因是:(1)材料断口表面氧化使其呈现深色,反射光线极弱;(2)材料中的夹杂物以及断口形成过程中的局部腐蚀造成一些区域的反射率更低;(3)韧窝断口表面以大量的韧窝分布为特征,这些不同形状和深度的凹坑,导致光线在坑内多次反射,造成大部分光线很难沿原路返回形成干涉,既使能反射回来,其强度也进一步大幅度衰减,并且迭加有严重的位相噪声。因此,韧窝断口表面干涉条纹的可见度特别低,并且有十分严重的随机噪声起伏。如图 2 为一个实测的合金韧窝断口表面单像素点干涉光强随空间扫描的变化,曲线出现严重变形和起伏,条纹对比度约为 0.04,与如图 3 所示的规整光学表面典型白光干涉曲线相差甚远^[7],从而使条纹对比度识别检测异常困难,极易造成严重的重建误差。实际上,韧窝断口表面的基本特征模型是 V 型槽面,由于多次散射,V 型槽面的白光干涉检测通常存在误差,如图 4 是采用商业化白光干涉仪测得深度达 138 μm 的 V 形硅槽的重建断面轮廓,从图中可以看出槽面存在十分严重的重建噪声,误差达 100 μm ^[8]。为此,本文提出通过扫描空间频率域分析提取表面形貌,从而避开对比度包络畸变问题,并能够有效地去除包括振动在内的各类噪声的影响,大大改善信噪比^[9]。同时,光源光谱分布变化,也可以通过频率域分析加以补偿。

频率域分析方法由 Peter de Groot 等在 1993 年首先提出^[10],该方法主要通过对于干涉光强

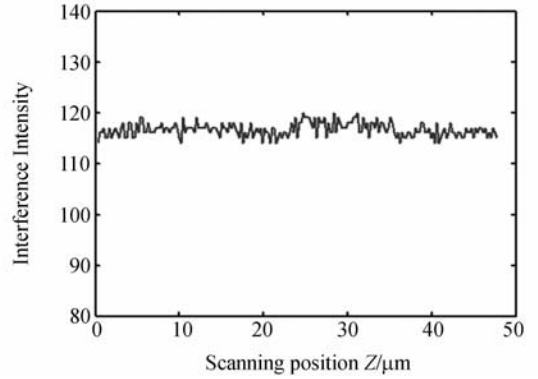


图 2 断口单像素点实际干涉图

Fig. 2 Actual interferogram for a single pixel on fracture surface

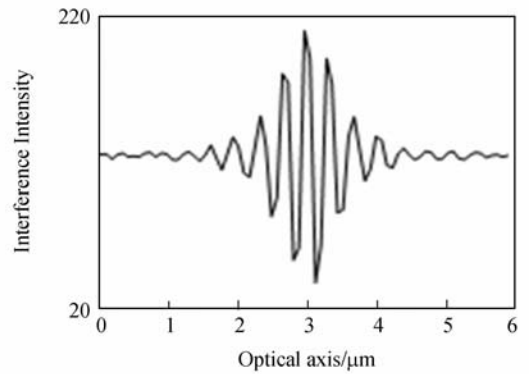


图 3 典型干涉光强沿光轴变化情况^[7]

Fig. 3 Typical interference intensity along optical axis^[7]

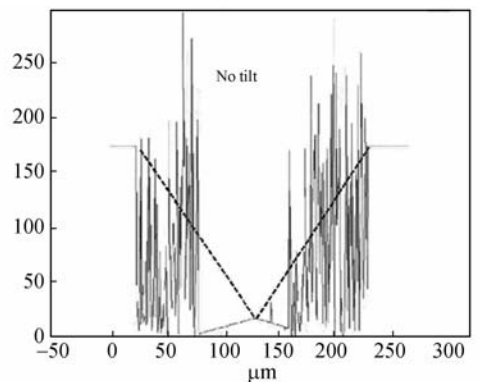


图 4 V 形硅槽的白光干涉重建形貌^[8]

Fig. 4 Surface profile of silicon V-groove measured by SWLI^[8]

傅里叶变换的泰勒分析来完成,结果与数据质量有关。考虑到断口白光干涉数据可见度太低,并且干涉光强随光程 $\delta(=2nz)$ 变化函数 $I(\delta)$ 的傅里叶逆变换展开:

$$I(\delta) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} P(k) \exp(ik\delta) dk = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} |P(k)| \cos[k\delta - \phi(k)] dk, \quad (1)$$

式中 $P(k)$ 为 $I(\delta)$ 的傅里叶变换, 是一个复变量, 且为偶函数, $\phi(k)$ 是它的复位相角:

$$\phi(k) = -\arctan(\text{Im}\{P(k)\}/\text{Re}\{P(k)\}). \quad (2)$$

又由于白光干涉条纹是各波长单色光干涉条纹的非线性迭加, 若实变函数 $i(k)$ 表示系统中波数为 k 的单色光强, 则不同波长的干涉条纹非相干迭加可以写成:

$$I(\Delta) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} i(k) [1 + \gamma \cos(k\Delta)] dk, \quad (3)$$

式中 γ 为条纹可见度, Δ 为两臂的干涉光程差, 它与被测表面高度 h 有关:

$$\Delta = 2n(z-h) = \delta - 2nh, \quad (4)$$

式中 n 为介质折射率, 比较式(1)、(3) 具有相似的余弦傅里叶变换形式, 并根据式(4)可得:

$$\phi(k) = 2knh, \quad (5)$$

上式对 k 进行求导:

$$\frac{d\phi}{dk} = 2h(n+k \frac{dn}{dk}) = 2n_G h, \quad (6)$$

式中 n_G 是群折射率, 所以, 表面任意点的相对高度为:

$$h = \frac{1}{2n_G} \frac{d\phi}{dk}. \quad (7)$$

不难看出, 以上是一种基于直接余弦傅里叶分析的三维重建方法, 由于不需要泰勒分析, 因此简捷高效。

2.3 实验及数据结果

2.3.1 30CrMnSiA 材料

30CrMnSiA 属中碳调质钢, 强度高, 调质后有很高的强度和足够的韧性, 淬透性也好。30CrMnSiA 具有良好的加工性, 加工变形微小, 抗疲劳性能相当好, 通常用于汽车、航空飞行器中各种特殊耐磨零配件中。

2.3.2 样品的制备过程

退火状态的 30CrMnSiA 钢棒, 经机械加工成冲击试样, 经热处理(规范: 淬火 880 °C, 油冷; 回火 540 °C, 油冷)后, 用冲击试验机打断, 取得试验断口。

2.3.3 检测及重构

图 5 所示为采用 VEGA XMU 扫描电镜采集 30CrMnSiA 合金样品韧窝断口得到的 SEM

图像, 从图中可以观测出明显的大、小韧窝, 但韧窝内部观测不清, 尤其是缺少纵向高度信息数据。为此, 对 30CrMnSiA 合金构件断口形貌进行白光干涉检测, 获得了干涉图序列。如图 6 为其中一幅表面干涉图像, 图像为 400 pixel × 400 pixel 点阵列。对空间扫描干涉数据做离散余弦傅里叶变换, 得到不同空间角频率成分的强度和位相大小, 如图 7, 8 所示。对位相进行逐点递推以消除 2π 相位模糊, 并用最小二乘法对数据对 (ϕ_i, k_j) 做线性拟合, 最后由式(7)算出表面各点的相对高度。实验中, 取 $n_G = n = 1$, 对三维数据做进一步的滤波, 去除噪声, 如图 10 为表面第 200 行的二维轮廓线。二维轮廓图非常清楚地显示出表面的起伏和韧窝内部剖面形状, 所显示韧窝深度在 40 μm 左右。断口三维形貌如图 11 所示, 三维重建图清晰、直观。比较实际检测重构结果, 证明本文所设计的算法表现出很强的位相提取和噪声抑制能力, 使得信噪比大大改善。从检测分辨率来看, 正如 Lee 和 Strand^[11] 所述, 白光干涉比传统光学显微镜能改善横向光学分辨率, 清晰地显现出辉纹, 具有一定的电镜效果; 另外, 亦如 Peter de Groot 的研究^[12], 即使在较低的采样频率下, 频率域分析重建算法仍可获得较理想的纵向检测分辨率, 显示了该方法的另一显著优点。标准台阶测试证明, 本系统的纵向检测精度优于 5 nm。而在纵向测程方面, 扫描白光干涉能够实现 100 μm 以上的大范围纵向测量, 并且分辨率不会下降, 也不受光学系统景深的限制。

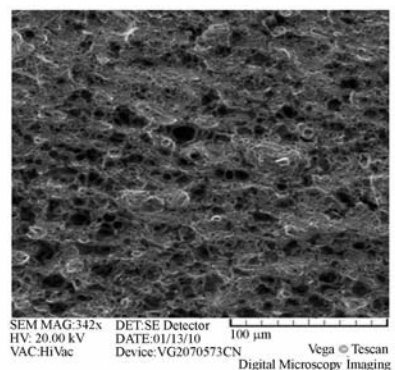


图 5 30CrMnSiA 韧窝断口的 SEM 图像

Fig. 5 SEM image of 30CrMnSiA dimple fracture

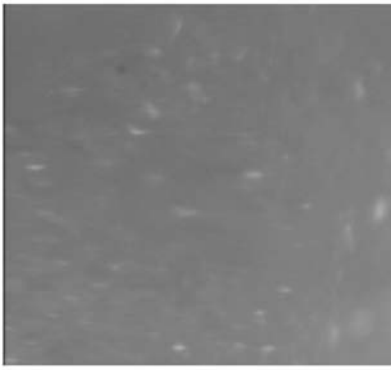


图 6 单幅白光干涉图像

Fig. 6 A frame of white-light interference pattern

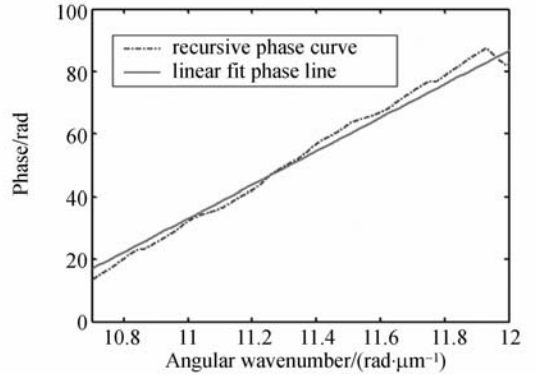


图 9 线性位相拟合分析

Fig. 9 Linear phase fit analysis

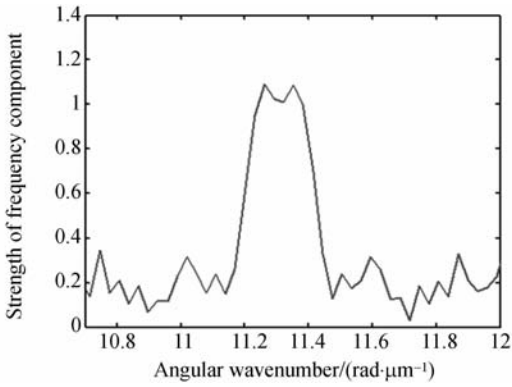


图 7 干涉图各频谱分量强度

Fig. 7 Strengths of various spatial frequency components of interferogram

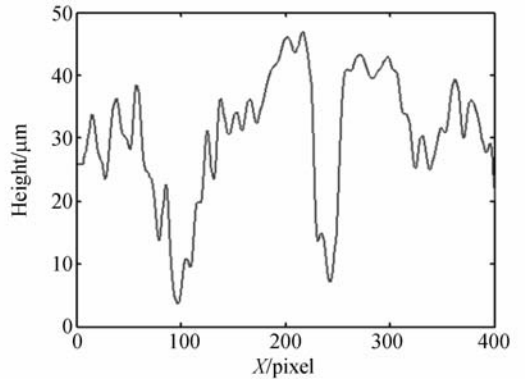


图 10 第 200 行的二维轮廓线

Fig. 10 Two dimensional profile at horizontal row 200

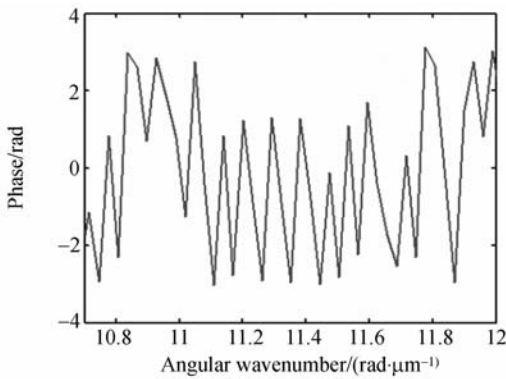


图 8 干涉图各频谱分量位相

Fig. 8 Phases of various spatial frequency components of interferogram

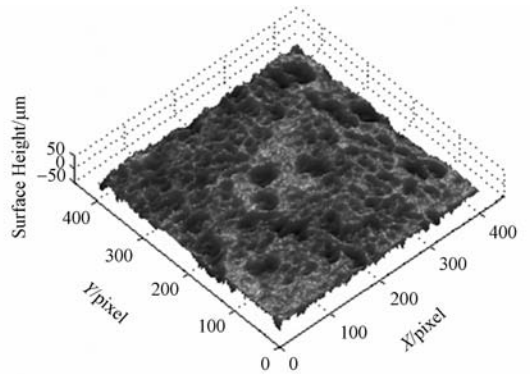


图 11 30CrMnSiA 韧窝断口表面三维形貌

Fig. 11 Three dimensional image of 30CrMnSiA dimple fracture surface

3 分形维数的测量

金属材料断口在一定范围内具有自相似性——分形特征,并且断口分形维数与力学性能有相关性。断口三维形貌数据的获得,使得断口表

面的三维定量分形表征分析变得十分方便,可以在不物理损坏样品的情况下,非常容易地虚拟任意高度的横向磨平或任何位置方向的纵剖,因此,本文采用小岛法来测算断口分维数。

对于形状不规则的几何图形,在一定的测量码尺 δ 下,其周长 P 与面积 A 之间存在如下关系:

$$P^{1/D} = \alpha A^{1/2}, \quad (8)$$

式中 α 为常数, D 为分形维数,对上式两边取对数,得出:

$$\log P = (D/2)\log A + \text{const}. \quad (9)$$

测量一系列大小不同的具有自相似性图像的周长和面积,通过 $\log P$ 与 $\log A$ 的关系,即可求得图形的分形维数。

根据以上原理,本文对韧窝断口三维形貌进行虚拟横向磨平操作,并对磨口做二值化处理,图 12 为在 50% 高度处所做的切割面二值图,其中白色代表小岛。选择单位像素间距作为测量码尺,求出各小岛周长与面积,并由所有数据对做出 $\log P \sim \log A$ 关系图,再用最小二乘法做线性回归处理,如图 13 所示。回归线方程为:

$$Y = 0.8176X + 0.5169, \quad (10)$$

式中斜率为 0.8176,所以该韧窝断口表面的分形维数 $D = 2 \times 0.8176 = 1.6352$ 。从图中可看到 $\log P$ 与 $\log A$ 之间相关系数 $R^2 = 0.9697$,说明实验点线性很好。用同样步骤还分别对 40%, 60%, 70% 三个高度所做的切割面进行了分形维数测定,结果见表 1。

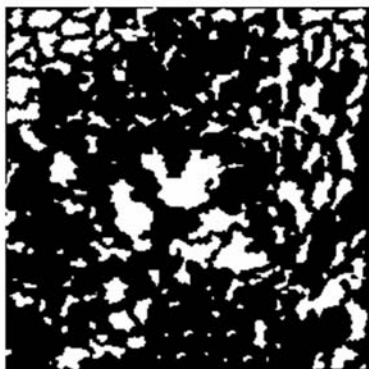


图 12 50% 高度处的切割剖面二值图

Fig. 12 Binary image of section at 50% incised height

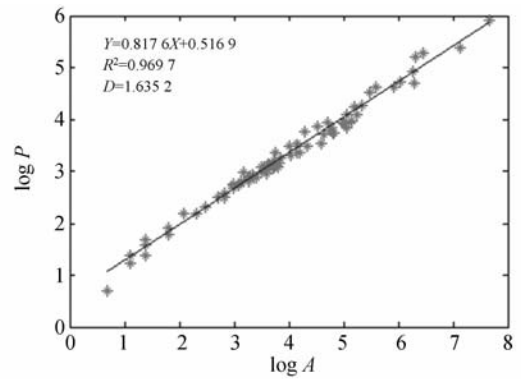


图 13 $\log P \sim \log A$ 散点图及其回归直线

Fig. 13 $\log P \sim \log A$ scatter map and its regression line

表 1 不同切割高度下的断口分维测试

Tab. 1 Fractal dimension test at different incised heights

relative height of different incised planes/%	regression line equation	fractal dimension	correlation coefficient
40	$Y = 0.8152X + 0.5268$	1.6304	0.9795
50	$Y = 0.8176X + 0.5169$	1.6352	0.9697
60	$Y = 0.8289X + 0.5315$	1.6578	0.9682
70	$Y = 0.8216X + 0.5298$	1.6432	0.9786

从上表中还可以算出其中平均值及标准差。

$$\text{平均值} \quad E = \sum_{i=1}^4 D_i = 1.6417, \quad (11)$$

$$\text{标准差} \quad \delta(D) = \sqrt{E[D - E(D)]^2} = 0.0120. \quad (12)$$

结果表明,在 40%~70% 高度,运用小岛法测出周长-面积在双对数图上显示很好的线性,因此,30CrMnSiA 合金韧窝断口具有良好的分形特征,并且可以用分形维数 D 来表征。实验测得的分形维数平均值为 1.6417,也说明该断口的三维形貌很复杂。

4 结 论

本文首次采用扫描白光干涉法对 30CrMnSiA 合金韧窝断口微观形貌进行检测。针对合金材料表面形貌复杂,干涉信号微弱,检测难度大,实验中系统采用 Linnik 结构,并通过基于扫描空间余弦傅里叶分析算法进行三维形貌重

建。虽然干涉条纹可见度极低,但余弦傅里叶分析算法重建精度高,噪声去除效果好,实验中扫描行程达 $120\ \mu\text{m}$,纵向检测精度优于 $5\ \text{nm}$ 。最后,采用小岛法对重建出的断口形貌数据进行了分形维数测算,结果表明 30CrMnSiA 合金韧窝断口微观形貌具有良好的三维分形特征。本文从实验上探索了扫描白光干涉术用于材料断口微观

形貌检测与重建的可行性,是不同于传统计算机图像技术、体视学法、激光扫描轮廓术和分层切片法的一条新途径,纵向检测精度高,纵向测程范围大,不受光学系统景深的限制,并且重建效率高。本文工作对进一步研究材料断口三维形貌与力学性能之间的关系、断裂机理,乃至断口特征的定量检测反推和实现自动识别分析都具有实际意义。

参考文献:

- [1] AZEVEDO C R F, MARQUES E R. Three-dimensional analysis of fracture, corrosion and wear surfaces[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2010,17: 286-300.
- [2] VENKATESH B, CHEN D L, BHOLE S D. Three-dimensional fractal analysis of fracture surfaces in a titanium alloy for biomedical applications[J]. *Scripta Materialia*, 2008,59:391-394.
- [3] STAMP J, SCHERER S, GRUBER M, *et al.*. Reconstruction of surface topographies by scanning electron microscopy for application in fracture research[J]. *J. Appl. Phys.*, 1996,63:341-346.
- [4] NICHOLS A B, LANGE D A. 3D surface image analysis for fracture modeling of cement-based materials[J]. *Cement and Concrete Research*, 2006,36: 1098-1107.
- [5] HOROVISTIZ A L, FRADE J R, HEIN L R O. Comparison of fracture surface and plane section analysis for ceramic grain size characterization[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2004, 24:619-626.
- [6] ZOU W D, DU N, XIAO H R, *et al.*. A white-light system for inspecting and measuring endface topography of fiber connector[C]. *Proceedings of*
- ISTM 2005, Volume 1: 983-986.
- [7] FABIEN S, PAUL C M, DENIS M, *et al.*. Teager-Kaiser energy and higher-order operators in white-light interference microscopy for surface shape measurement [J]. *EURASIP Journal on Applied Signal Processing*, 2005,17:2804-2815.
- [8] JEREMY C, JON P, FENG G, *et al.*. *Limitations of white light interferometry* [R]. <http://www.npl.co.uk/engineering/the-limitations-of-white-light-interferometry>.
- [9] ZOU W D, DU N, FU Y J, *et al.*. A fast-fourier-transform algorithm for surface profiler based on scanning white-light interferometry [C]. *Proceedings of ICO-20*, 2005:0403-0416.
- [10] PETER D G, LESLIE D. Surface profiling by analysis of white-light interferograms in the spatial frequency domain[J]. *J. mod. Opt.*, 1995,42(2): 389-401.
- [11] LEE B S, STRAND T C. Profilometry with a coherence scanning microscope [J]. 1990, *Appl. Opt.*, 29:3784-3788.
- [12] PETER D G, LESLIE D. Three-dimensional imaging by sub-Nyquist sampling of white-light interferograms[J]. *Optics Letters*, 1993,18(17):1462-1464.

作者简介:



邹文栋(1965—),男,浙江余姚人,教授,硕士研究生导师,1986年于浙江大学获学士学位,主要研究方向为微纳光子学及应用。E-mail: 18979106189@189.cn



黄长辉(1985—),男,江西临川人,硕士研究生,主要方向为微纳检测。E-mail: huangchanghui_hl@163.com



郑 瑜(1974—),男,江西上饶人,硕士,高级工程师,1995年于合肥工业大学获学士学位,主要研究方向为失效分析。E-mail:zhengq666@126.com



董 娜(1977—),女,河南温县人,工程师,2001年于哈尔滨工程大学获学士学位,主要从事金相热处理方面的研究。E-mail: dongna99@gmail.com



徐周珏(1983—),男,江西广丰人,工程师,2006年于南昌航空大学获学士学位,主要从事金相热处理方面的研究。E-mail: suex.jue@139.com

●下期预告

球面旋涂光刻胶的工艺理论

刘小涵^{1,2},冯晓国¹,赵晶丽¹,高劲松¹,张红胜¹,程志峰¹

(1.中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 中国科学院光学系统先进制造技术重点实验室,吉林 长春 130033;2.中国科学院 研究生院 北京 100039)

为了在凹球面内表面涂布厚度均匀的光刻胶,进行了离心式涂胶工艺理论研究。首先,讨论了影响膜厚均匀性的主要因素;接着,用流体力学理论分析了离心式开口向下球面涂胶过程中胶液的受力流动状态,推导出胶膜厚度与离心机转速、胶液粘度、旋涂时间等参数变化规律的数学模型,最后为了验证理论的正确性,在口径120 mm,凹球面半径300 mm,矢高12.5 mm的K9玻璃试验件内表面开展涂胶工艺实验。试验测试结果表明,该理论分析模型与实际情况是相符的,根据理论分析采用主轴与工件旋转轴偏心的装夹方法,在整个球面内表面可以得到厚度均匀的胶膜。当光刻胶黏度为0.11~0.19 Pa·s,主轴转速为3 000~6 000 r/min,在凹球面上可以涂布厚度为0.5~1 μm的均匀胶膜。