

# 电子散斑干涉在复合树脂固化收缩测试中的应用

李 斌<sup>1</sup>, 杨国标<sup>1,2</sup>

(1. 同济大学 航空航天与力学学院, 上海 200092; 2. 同济大学 国家力学实验教学示范中心, 上海 200092)

**摘要:** 以光固化复合树脂固化收缩变形导致牙体修复失败这一临床问题为背景, 运用电子散斑干涉法对  $R_1$ ,  $R_2$  两种不同型号光固化复合树脂填充到牙体后的离面收缩量进行了精确测量. 实验得到了复合树脂固化过程中的电子散斑干涉条纹图. 通过对干涉条纹图的处理, 给出了不同情况下  $R_1$ ,  $R_2$  型光固化复合树脂固化时最大离面收缩量与时间的关系, 并且分析了影响复合树脂收缩变形的因素. 研究表明随着牙体上窝洞的宽度的增大, 复合树脂固化后的离面收缩也逐渐增大, 但二者并非线性关系;  $R_1$  型复合树脂收缩量较小, 更加适合临床应用.

**关键词:** 电子散斑干涉法; 非接触测量; 光固化复合树脂; 收缩变形

**中图分类号:** O348.11

**文献标识码:** A

## Electronic Speckle Pattern Interferometry Method Applied to Measurement of Shrinkage Deformation of Light-cured Composite Resin

LI Bin<sup>1</sup>, YANG Guobiao<sup>1,2</sup>

(1. College of Aerospace Engineering and Applied Mechanics, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. The Paradigm Center of Mechanics Laboratory of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Shrinkage deformation of light-cured composite resin is a major cause of the failure of dental restoration. Based on the electronic speckle pattern interferometry method (ESPI), the shrinkage deformation of light-cured composite resins (Type  $R_1$  and Type  $R_2$ ) are measured under the different conditions. The ESPI patterns are obtained during shrinkage of the Type  $R_1$  and Type  $R_2$ . According to these experimental results, the relative curves of the max out-of-plane displacement and time are plotted. The results show that the shrinkage deformation of light-cured composite resin is connected with the width of the hole in the tooth. When the width increase, the shrinkage deformation increase as well,

but there was no linear relation between them. The results also show that Type  $R_1$  is more suitable for clinical application.

**Key words:** electronic speckle pattern interferometry (ESPI); non-contact measurement; light-cured composite resin; shrinkage deformation

光固化复合树脂固化收缩变形是造成牙体修复失败的主要原因. 这种收缩使树脂与牙齿的粘结强度、树脂及牙齿本身的强度均会受到不良影响. 国内外研究显示<sup>[1-4]</sup>, 树脂的固化收缩应力可导致粘结层断裂, 造成微渗漏进而产生继发龋. 严重缺损的牙齿可导致薄弱洞壁的变形甚至局部折裂. 树脂固化收缩应力长时间存在也使树脂本身的抗折强度降低, 在承受咬合力时薄弱部位容易出现材料的断裂. 诸如此类原因都会影响修复材料的使用寿命或者导致牙体修复的最终失败, 所以在临床上迫切需要牙体修复材料聚合收缩的实验数据.

电子散斑干涉法是在 20 世纪 70 年代末发展起来的, 该方法能够精确地测量微小位移, 并且具有测量精度高、实时测量、非接触测量等优点. 该方法主要用于对各种材料、结构的面内、离面位移及位移场的测量以及分析物体的振动模态, 还可以用于材料、结构的无损检测<sup>[5-6]</sup>等.

笔者运用电子散斑干涉测试技术对  $R_1$ ,  $R_2$  两种型号光固化复合树脂填充到牙体后的固化收缩量进行了精确测量. 给出了不同情况下  $R_1$ ,  $R_2$  型光固化复合树脂固化时最大离面收缩量与时间的关系, 并且分析了影响复合树脂收缩变形的因素. 为复合树脂的临床应用提供一定的实验依据, 也为进一步改进复合树脂性能起到一定的指导作用.

## 1 电子散斑原理介绍<sup>[7-9]</sup>

当一束激光照射在光学粗糙表面时,由于漫反射表面散射光的干涉而产生许多随机分布的亮暗斑点,即散斑.物体变形前像面上任一点 $(x,y)$ 的光强 $I_1(x,y)$ 可以表示为

$$I_1(x,y) = I_A + I_B + 2\sqrt{I_A I_B} \cos\varphi \quad (1)$$

式中: $I_A$ 和 $I_B$ 分别为物光强度和参考光强度; $\varphi$ 为随机散斑相位.物体某点 $(x,y)$ 沿与像平面垂直方向发生离面 $dz$ 的变形后,将引起相位 $\varphi$ 改变

$$\Delta\varphi = 2\pi\lambda^{-1} dz\pi \quad (2)$$

式中: $\lambda$ 为光波波长; $dz$ 为离面变形量.这时,像平面上的点 $(x,y)$ 的光强 $I_2(x,y)$ 为

$$I_2(x,y) = I_A + I_B + 2\sqrt{I_A I_B} \cos(\varphi + \Delta\varphi) \quad (3)$$

在散斑图像处理方式中,条纹的形成方式有减模式、加模式、相关模式,本文使用的电子散斑干涉系统用减模式形成条纹.在减模式运算中,变形前的散斑干涉场图像与变形后的散斑干涉场图像相减并取绝对值,此时

$$I(x,y) = |I_1 - I_2| = 4\sqrt{I_A I_B} \cdot |\sin((2\varphi + \Delta\varphi)/2)| \times |\sin(\Delta\varphi/2)| \quad (4)$$

实际情况中, $\Delta\varphi$ 变化比 $\varphi$ 变化慢得多,由式(4)可看到它有2个相互调制的函数项,第1项频率高,表示散斑,第2项变化频率低,表示散斑条纹.当 $\sin(\Delta\varphi/2) = 0$ ,即 $\Delta\varphi = 2k\pi$ , $k = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ 时,出现暗条纹.当 $|\sin(\Delta\varphi/2)| = 1$ ,即 $\Delta\varphi = (2k+1)\pi$ , $k = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ 时,出现亮条纹.

设物体沿与物面垂直方向有位移 $\omega$ ,则变形前后散斑的位相变化为

$$\Delta\varphi = 2\pi\lambda^{-1} [\omega(1 + \cos\theta)] \quad (5)$$

式中, $\theta$ 为照射物面激光束的入射角,在本系统中 $\theta = 0$ .当 $\Delta\varphi = 2N\pi$ 时,变化前后的散斑图像完全相同,通过电子散斑干涉系统实时地将变形前散斑图与变形后的散斑图相减,便得到黑条纹位置.其中 $N$ 为整数级条纹级数.这样,由式(5)可以导出物体离面位移

$$\omega = N\lambda/2 \quad (6)$$

## 2 试验及结果

### 2.1 试验设备

本次试验主要采用对离面位移敏感的电子散斑

干涉系统.图1为该系统的示意图,主要包括 He-Ne 激光器(其发射波长为 632.8 nm,是高方向性、高单色性、高亮度、高相干性的红色激光光束)、反射镜(可将 90% 以上的光能量反射,减少吸收,防止色差的产生)、扩束镜(用于改变激光光束直径和发散角)、分光系统(由 2 个三棱镜构成的六面体棱镜)、ZOOM(变焦距镜头)、CCD(charge-coupled device, 电荷耦合元件,能够把光学影像转化为数字信号,实现图像的获取、存储、传输和处理)、计算机(用于实验数据的采集和存储).图2为本次实验用到的实验仪器.

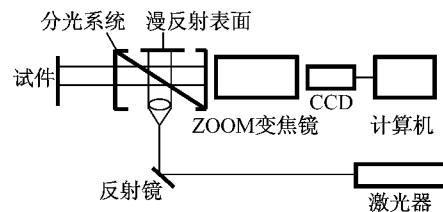


图1 电子散斑干涉系统示意

Fig.1 Schematic for ESPI system



图2 实验仪器

Fig.2 Experimental set-up

### 2.2 试件的制备

试验前收集 8 颗新鲜拔除的成人下颌第 3 磨牙,要求牙齿完整、大小相似、无龋坏、无裂纹、无磨损、根尖发育完全,并用超声波洁牙器去除表面牙石和色素.将牙齿试件用生理盐水洗净后,用裂钻在牙冠面中央制备长方体窝洞(伴随大量生理盐水冲洗),试件 $H_1$ 宽、长、深为 2.54, 5.55, 2.00 mm,试件 $H_2$ 相应尺寸为 3.39, 5.55, 2.00 mm.最后将牙齿的下端固定于方形石膏块体中(图3).

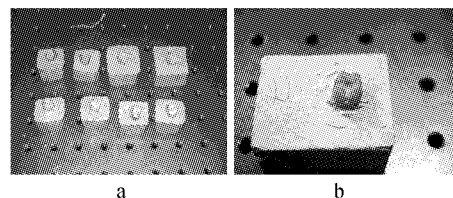


图3 试件固定

Fig.3 Specimen

试验分别对 2 种型号复合树脂材料( $R_1$ 型和 $R_2$

型)的2种洞宽( $H_1$ 和 $H_2$ )进行实验,每组进行2次平行试验.采用光固化灯进行固化照射,其单位面积功率为 $400\text{ mW}\cdot\text{cm}^{-2}$ ,固化照射时间为40 s.

### 2.3 试验过程

将被测牙齿用夹板固定于隔振台上,调整其与CCD之间的距离,使其在计算机上能够呈现清晰的像.调整激光入射角度使其照射牙齿表面时能形成均匀的散斑图像.实验采用直接修复法用复合树脂填充牙齿窝洞,并在填充完成后使用专用哑光漆对

其表面进行喷涂,以提高散斑的质量和均匀性.然后用光固化灯对牙体填充部位进行固化照射40 s.此后填充的复合树脂开始收缩,即可进行实验数据采集.图像采集的频率为每秒1帧,直到条纹图变化趋于停滞结束采集.此时,复合树脂固化收缩基本结束.

### 2.4 试验结果

图4为试验中用到的复合树脂固化过程中的电子散斑干涉条纹图.

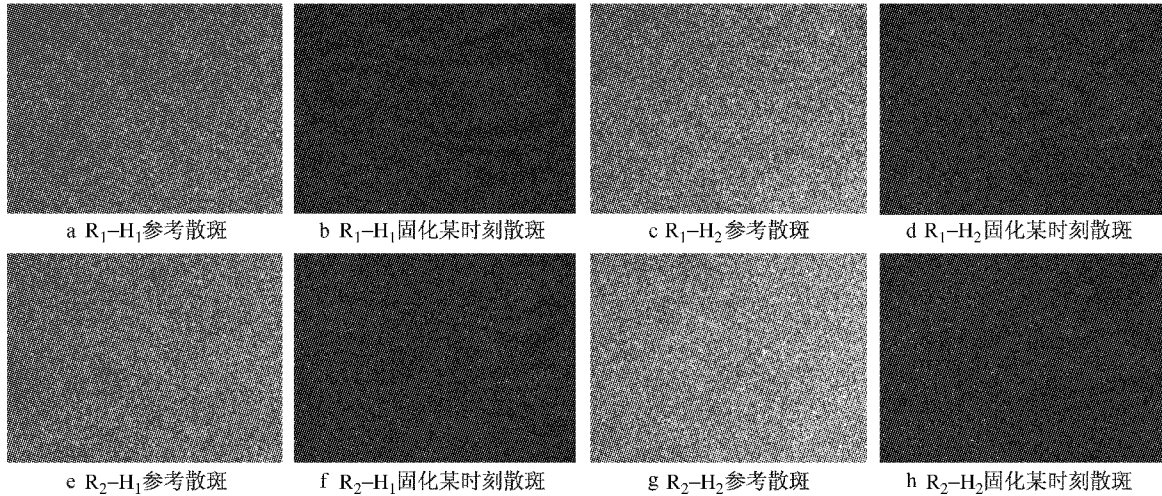


图4 电子散斑干涉条纹

Fig.4 The electronic speckle pattern interferometry patterns

通过采集到的散斑干涉条纹发现:各组试验在开始300 s以后电子散斑干涉条纹图趋于停滞,即复合树脂固化收缩结束.利用电子散斑干涉系统的图像处理软件对采集到的复合树脂固化各时刻处理散斑干涉条纹图进行处理,得到各时刻的最大条纹级数,再根据式(6)即可得到复合树脂固化各时刻的最大收缩量.表1中列出了以30 s为间隔30~330 s的试验数据.在零时刻时,最大条纹级数为零级,相应

表1 试验数据

Tab. 1 Test data

时间/s	$R_1-H_1$	$R_1-H_2$	$R_2-H_1$	$R_2-H_2$
30	6,1.90	6,1.90	6,1.90	7,2.21
60	9,2.85	9,2.85	9,2.85	10,3.16
90	10,3.16	11,3.48	10,3.16	12,3.80
120	11,3.48	12,3.80	11,3.48	13,4.11
150	12,3.80	13,4.11	12,3.80	14,4.43
180	13,4.11	14,4.43	13,4.11	15,4.75
210	13,4.11	15,4.75	14,4.43	15,4.75
240	14,4.43	15,4.75	15,4.75	16,5.06
270	14,4.43	16,5.06	15,4.75	16,5.06
300	14,4.43	17,5.38	16,5.06	17,5.38
330	14,4.43	17,5.38	16,5.06	17,5.38

注:逗号前为最大条纹级数,逗号后为最大离面收缩量, $\mu\text{m}$ 。

的最大离面收缩量也为零.表中条纹级数为2次平行试验的平均值.

## 3 分析与结论

通过实验结果发现:当采用同种树脂进行实验时,窝洞尺寸对光固化复合树脂的收缩变形有一定的影响.窝洞的宽度越大,复合树脂固化后的离面收缩就越大,即光固化复合树脂的收缩变形就越大,如图5a,5b所示.当采用同样的窝洞尺寸时,复合树脂种类不同其收缩变形也有一定的差异. $R_2$ 型复合树脂固化时的最大离面收缩量大于 $R_1$ 型复合树脂固化时的最大离面收缩量,如图5c,5d所示.这表明, $R_1$ 型复合树脂更加适合临床应用.

复合树脂充填牙窝洞中聚合固化后,其体积发生了变化,原因主要来自两方面:①单体聚合转化成大分子化合物后产生的不同程度的聚合体收缩;②热膨胀系数与牙齿不一样,当口腔温度随温度发生变化时,填充牙体中的复合树脂将与牙体发生不一致的体积变化.本文主要研究第①种情况.树脂聚合时,单体分子间产生聚合反应,形成共价键连接的

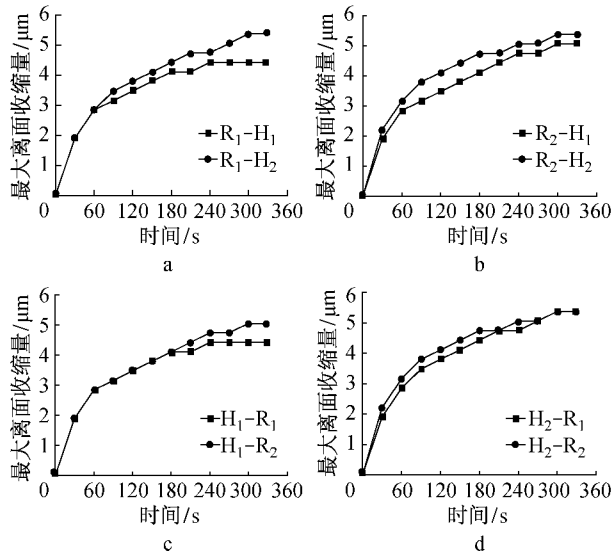


图5 最大离面收缩量与时间的关系

Fig. 5 Relations between the max out-of-plane displacement and time

网状大分子,分子间距离缩小导致体积收缩,多数树脂材料体积收缩幅度在1.5%至3.0%之间甚至更小<sup>[10]</sup>.实验结果显示电子散斑技术能够很好地应用于测量牙体修复材料的收缩变形.此外,电子散斑干涉技术还显示出巨大的优势,即非接触测量物体变形,该方法避免了传统接触测量方法带来误差,极大提高了测量精度.本文采用电子散斑干涉法确定复合树脂收缩变形的影响因素,为临床治疗提供一定的实验依据,也为进一步改进、提高光固化复合树脂性能起到一定的指导作用.

#### 参考文献:

- [1] 胡晓刚,王琳,顾晓宇.口腔修复材料——光固化复合树脂的研究进展[J].材料导报,2006,20(5):44.  
HU Xiaogang, WANG Lin, GU Xiaoyu. Research progress of a new type light-cured composite used as dental restorative materials[J]. Materials Review, 2006, 20(5): 44.
- [2] 谭彦妮,刘咏,向其军.牙科光固化复合树脂材料的性能与展望[J].粉末冶金材料科学与工程,2007,12(3):139.

- TAN Yanni, LIU Yong, XIANG Qijun. Properties and prospect of light-cured dental composite resins[J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2007, 12(3): 139.
- [3] 林艺娜,王可,贾芳.二芳基碘鎓盐对光固化复合树脂性能的影响[J].四川大学学报,2009,40(4):700.  
LIN Yina, WANG Ke, JIA Fang. Effects of diaryliodonium on the properties of light-curing composite Resin[J]. Journal of Sichuan University: Medical Science Edition, 2009, 40(4): 700.
- [4] 陈祥宝,张宝艳,邢丽英.先进树脂基复合材料技术发展及应用现状[J].中国材料进展,2009,28(6):2.  
CHEN Xiangbao, ZHANG Baoyan, XING Liying. Application and development of advanced polymer matrix composites [J]. Materials China, 2009, 28(6): 2.
- [5] 张巧芬,石志伟,王昆.基于CCD的电子散斑干涉系统中离面位移的测定[J].广东工业大学学报,2008,25(4):49.  
ZHANG Qiaofen, SHI Zhiwei, WANG Kun. A study of the measurement of lengthways displacement applying ESPI[J]. Journal of Guangdong University of Technology, 2008, 25(4): 49.
- [6] 孙平,王海峰,张熹.三维电子散斑干涉技术及其应用研究[J].光学学报,2003,23(7):840.  
SUN Ping, WANG Haifeng, ZHANG Xi. Study on three-dimensional ESPI and its application[J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(7): 840.
- [7] 金雪峰,饶芮菱,鲁怀伟.电子散斑干涉条纹的计算机自动处理[J].光学与光电技术,2007,5(1):64.  
JIN Xuefeng, RAO Renlin, LU Huaiwei. Computer automatic processing for electronic speckle image [J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2007, 5(1): 64.
- [8] 冯其波.光学测量技术与应用[M].北京:清华大学出版社,2008.  
FENG Qibo. Optical measurement technique and its applications[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008.
- [9] 金观昌.计算机辅助光学测量[M].北京:清华大学出版社,2007.  
JIN Guanchang. Computer aided optical measurement[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007.
- [10] 封纯真,赵守亮,凌伟.复合树脂收缩应力的有限元分析[D].西安:第四军医大学口腔医学院,2006.  
FENG Chunzhen, ZHAO Shouliang, LIN Wei. Resin composite shrinkage stress distribution of mandibular molar using 3D finite element analysis[D]. Xi'an: The Fourth Military Medical University, College of Stomatology, 2006.