

夹杂物干涉效应的实验研究

杨明, 郭荣鑫, 杨邦成, 徐玺, 秦海燕

(昆明理工大学 建筑工程学院, 云南 昆明 650224)

摘要: 利用自主开发的数字全息干涉测量系统针对同类型夹杂物间的干涉效应开展研究. 实验获得了较为满意的数字全息干涉图. 通过对不同构型的圆孔、椭圆孔和裂纹在同样相当距离下发生的干涉情况的分析、比较可以发现: 多夹杂物间均存在不同程度的增强干涉效应或屏蔽干涉效应; 在孔洞之间的增强干涉区存在明显的梯度应变条带; 当距离不是很近时, 裂纹之间的增强干涉效应主要是在裂纹之间形成高应力应变区, 改变裂纹的扩展路径, 推动裂纹之间的串接.

关键词: 数字全息; 夹杂物; 干涉效应; 全息干涉

中图分类号: TN247, O348.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007 - 855X(2007)05 - 0068 - 05

An Experimental Study on the Interference Mechanism of Multi-inclusion

YANG Ming, GUO Rong-xin, YANG Bang-cheng, XU Xi, QING Haiyan

(Faculty of Civil and Architectural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650224, China)

Abstract: The interference among the same kind inclusions has been studied with the help of the digital holographic interferometry system. The satisfactory holographic interferograms are obtained by this system. It can be concluded from the interferograms for the circular holes, elliptical holes and cracks at the same equivalent distance that the different amplification effect or shielding effect are always existent among the different inclusions. There exist gradient strain stripes obviously among the holes. When the distance among cracks is not very close, the amplification effect among cracks will mainly lead to high strain field, vary the propagation path of crack and propel the connection among cracks.

Key words: digital holographic; inclusion; interference; holographic interferometry

0 引言

材料中存在多夹杂物的局部区域总是与多源损伤相联系, 这些区域发生损失及演化的形式更为丰富、机制也更加复杂, 并在固体材料, 尤其是复合材料的失效过程中起着十分重要的作用. 因此, 多夹杂物间的相互作用对材料的性能、损伤演化和在役设备的剩余寿命都有着直接的影响. 对多夹杂物干涉机制的研究在断裂力学中也具有重要的意义. 1980年张宏图等^[1]利用夹杂理论导出了一般形状的单个夹杂所产生的拘束应力场 (本征应力场), 并计算了在单向载荷作用下椭圆夹杂的端部的应力场, 将夹杂理论应用于宏观断裂研究中. 王锐^[2]在 1990年求解了一个圆形夹杂对裂纹尖端应力场的影响, 并以此计算了夹杂物对裂纹应力强度因子的影响. 著名学者 A. Chudnovsky, MARK Kachanov, H. Horii 等^[3-5]研究了一个主裂纹和若干微裂纹之间的相互作用以及异性夹杂物之间的相互作用. 1989年 San - Xia Gong 和 Horii^[6]基于 Horii^[5]的膺力法, 利用复变函数推导出了主裂纹及其前端的若干微裂纹的应力强度因子近似表达式. Stenberg 和 Sadow sky^[7]曾就无限大体中两个球形空洞的情形计算出了精确解. 对于其它的夹杂物问题则目前也都没有精确解. 在本文作者以前的研究工作中, 已经用自己编写的数值计算程序计算了多夹杂物的应力场^[8,9]. 在这个数值计算程序中运用了 J. D. Eshelby 的等效夹杂物方法和线弹性叠加原理. 计算结果

收稿日期: 2007 - 05 - 21. **基金项目:** 国家自然科学基金项目 (项目编号: 10462002); 云南省应用基础计划项目 (项目编号: 2004A0011M, 2006A0002Z, 2005py01 - 38).

第一作者简介: 杨明 (1975. 9 -) 男, 在读硕士研究生. 主要研究方向: 光测力学及复合材料微观损伤.

表明:在相同距离下,裂纹的屏蔽效应强于增强效应.此外,我们还研究无限大弹性体在单向载荷作用下多夹杂物间的相互影响,计算了无限大线弹性体中含有任意方位分布的裂纹、弹性夹杂物和空洞区域的局部应力场.与理论研究和数值计算相比,夹杂物间干涉机制的实验研究成果的报道则明显偏少,张讯等^[10]等曾对垂直于外加应力且相互平行的 3 个裂纹的屏蔽效应进行过光弹实验.熊秉衡等^[11]就雁列式裂缝的干涉进行了传统实时全息实验.实验工作的缺乏使得我们对夹杂物干涉机制的认识缺乏客观的验证,也阻碍了研究工作的持续和深入的开展.

1 实验的原理与方法

1.1 实验原理

夹杂物的形状各异、分布也十分复杂,我们在有机玻璃板上分别加工了不同构型的圆孔、椭圆孔和裂纹,用于模拟几种特殊类型的夹杂物及其分布情况.圆孔和椭圆孔直接由激光加工,裂纹则在激光加工裂缝以后,由 MTS 疲劳实验机预制获得.试件经冷热时效处理释放激光加工引起的残余应力后,采用实时激光全息干涉法测量多夹杂物的应变场,以研究平面应力情况下夹杂物间的相互影响.

全息干涉度量术用来进行透明物体的应变分析时,在物体处于受力状态的情况下,由于模型的厚度发生了变化以及模型的折射率是应力状态的函数(应力-光学效应),因此,光通过物体的光程要发生变化.本实验采用的有机玻璃是一种低应力-光学灵敏度材料,可视为力学性能和光学性能均为各向同性,试件受载后产生的应力变化不会引起试件内不同应力区域折射率的差异,从而可以认为光程的改变仅是由试件厚度变化引起.因此,干涉条纹是只与试件的横向应变有关的等位相线.通过观察干涉条纹的数量、形状、分布、密度及加载过程中干涉条纹的衍生与消失变化,即可定性地看出试样中的横向变形的分布和变形程度.与此同时,通过对不同试样以及同一试样中不同区域的干涉条纹的比较,也就可以定性地分析夹杂物间的干涉情况.

实验中,我们根据每个试样的情况,估算试样的强度,设计试样的线弹性范围内加载,并在每个试样测试结束后卸载至拍摄光栅空场时的初载,观察是否有残余干涉条纹的存在,确保试样是在线弹性范围内加载.由于在线弹性范围内横向应变与轴向应变成线性关系,因此,干涉条纹也就直接显示了试样的轴向应变情况.我们在本文中对应变的讨论和分析也是针对试样的轴向应变场.

1.2 实验方法

在全息检测研究中,使用传统全息感光板的单次曝光法实时干涉全息是一种非常精密的检测技术.然而,传统实时全息干涉实验需要进行感光板的化学湿处理,条件苛刻,难度大、较为费时,在实际应用中多有不便.近年来,随着 CCD 及计算机技术的进步,数字全息干涉技术成为光测力学的一个研究热点领域.我们基于二次曝光数字全息的原理,设计了一个数字实时全息检测系统,为适应于实际测量物体尺寸的变化,我们在传统的 4f 系统中插入一面负透镜,通过各透镜位置的适当调节,便能形成横向放大率可调整的等效 4f 系统,该系统能够实时测量投影尺寸明显大于 CCD 面阵的物体,而且可以适应于物体投影尺寸的变化.当我们将一种消零级衍射光技术用于数据处理后,可以获得图像质量接近传统实时全息的干涉图.在本文的研究工作中,我们同时采用了传统全息干涉和数字全息干涉(图 1)2 种方法进行检测.

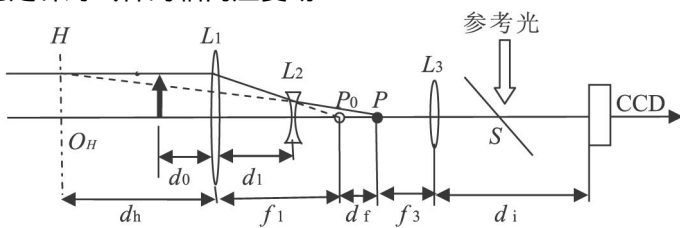


图1 数字实时全息干涉系统原理图

Fig.1 Schematic diagram of digital real-time holographic interferometry

2 实验结果

本研究所加工试样的尺寸为 400 mm ×100 mm ×3 mm.用一专用的加力架由砝码逐级施加单向拉伸载荷(图中垂直方向).各图的干涉条纹均是在外力为 490 N 时获得的.

2.1 孔洞夹杂物间的干涉

图 2到图 4显示了 2个孔洞间的干涉情况. 其中圆的直径为 10 mm, 圆心距离为 15 mm. 椭圆的长轴为 10 mm, 短轴为 5 mm. 圆心距离为 15 mm. 从图 2到图 4显示的干涉条纹数量、分布及加载时条纹的衍生变化可以看出与单个孔相比, 双孔存在明显的干涉现象. 其中, 当圆心连线垂直于载荷方向时, 两个圆孔间的区域出现应变增强干涉, 而当圆心连线与载荷方向相同或在圆心连线垂直于载荷的双孔上下方存在另一孔洞(图 5)时, 2个圆孔间的区域出现应变屏蔽(减弱)干涉. 这与我们先前的数值计算的结果是一致的. 圆孔与椭圆孔相比, 当椭圆孔的长半轴垂直于外力且椭圆孔的相当距离(圆心距离/半轴)与圆孔的相同时, 从干涉条纹的数量、形状和分布看, 椭圆间的增强干涉效应及应变的程度均没有圆孔那样强. 在图 6中 2个斜椭圆的长轴与水平椭圆的长轴成 45 夹角, 此时, 在 2个斜椭圆间的纵向区域也存在明显的屏蔽干涉效应, 发生屏蔽干涉效应的区域也更大; 在 2个斜椭圆于水平椭圆间则存在增强干涉效应, 而且椭圆孔间形成若干等应变条状带, 各条带之间存在应变梯度.

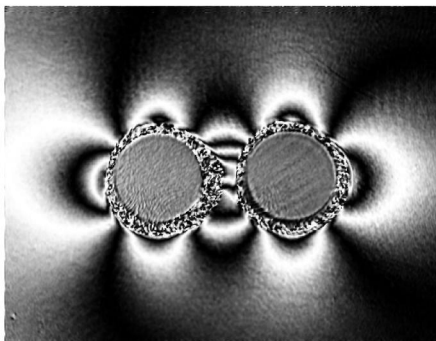


图2 圆心连线垂直于载荷方向的2个圆孔
Fig.2 Two circular holes perpendicular to applied load

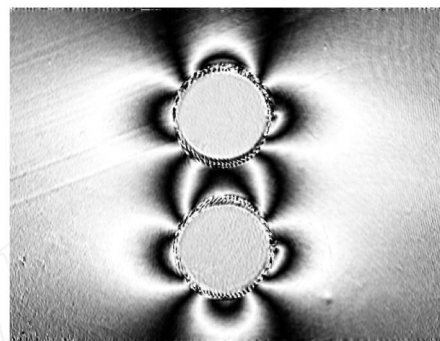


图3 圆心连线沿载荷方向的2个圆孔
Fig.3 Two circular holes parallel to applied load

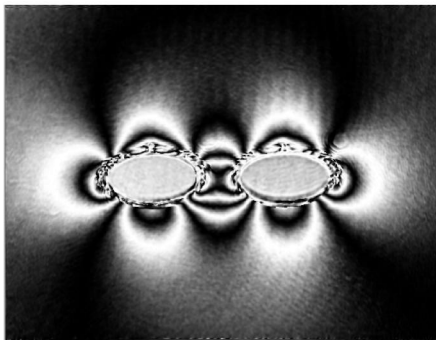


图4 圆心连线垂直于载荷方向的2个椭圆孔
Fig.4 Two elliptical holes parallel to applied load

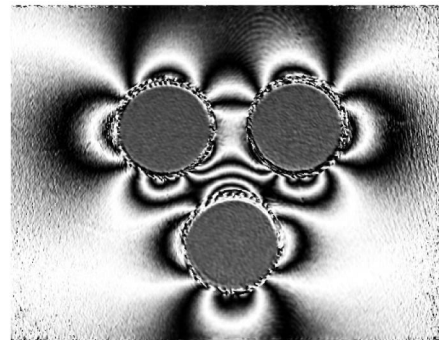


图5 等边三角形分布的圆孔
Fig.5 Circular holes distributed in equilateral triangle

2.2 裂纹夹杂物间的干涉

与孔洞夹杂不同, 不论水平方向裂纹还是 45 方向的斜裂纹, 加载后裂纹尖端都会在垂直于外力的方向上出现一黑斑, 这就是焦散斑, 它与裂纹尖端的应变集中程度密切相关, 是由裂纹尖端环状区域的高梯度变形带产生的透镜效应形成的. 当然, 焦散斑的出现实际上是因为全息干版的分辨率有限, 无法显示该区域高密度的黑白相间干涉条纹. 对于采用 CCD 记录干涉图像的数字全息而言, 由于 CCD 的分辨率比全息干版低得多, 加之数字图像处理技术的不完善, 因此, 我们现在观察到的实验干涉图甚至还无法清晰显示焦散斑的形状和大小. 下列实验图像中, 在裂纹尖端存在一由黑色条纹包围, 内有粗糙颗粒的圆形区域, 它们与裂纹面的粗糙颗粒区不同, 后者是由光通过裂纹面时的衍射产生的. 经过与传统全息图的比较, 我们认为这个圆形的粗糙颗粒区近似显示了传统全息干涉图中的焦散斑. 不论水平方向裂纹还是 45 方向的斜裂纹, 加载后焦散斑都是出现在垂直于外力的方向上, 对于有机玻璃这种具有粘弹性的脆性材料而言, 这一现象寓意着随着外力的增加, 裂纹将在启裂后将沿水

平方向扩展.在试样裂纹的疲劳预制和试样拉断后形成的断面已经证实了这点,同时也证实裂纹尖端的黑斑是与裂纹尖端应力应变场密切相关的焦散斑.

与孔洞夹杂物间的干涉效应相比较,在相当距离(裂纹中心距离/裂纹半长)与圆孔相同(本文均为 3)的情况下,对于 45° 的斜裂纹,裂纹间存在大面积的屏蔽干涉效应(如图 11 的右边区域).裂纹间的增强干涉效应则弱于孔洞间的增强干涉效应.在图 8 到图 11 的全息干涉图中,不论是斜裂纹还是水平裂纹,在裂纹外端干涉条纹的数量与裂纹间区域干涉条纹的数量相同,这意味着裂纹外侧与内侧的应变强度基本相同.当然,在应变的分布方面,裂纹外侧与内侧则有很大的差别,裂纹内侧的高应变区域明显大而且相互直接连通.这样的干涉效应会导致裂纹群区域存在大范围的高应变区,从而使得该区域内更易产生微裂纹、微孔洞、滑移带等细观损失.一般地,裂纹群的存在不会对其中单个裂纹的启裂产生大的影响(裂纹非常靠近的情形除外),但裂纹的扩张路径将会受到其它裂纹的显著影响.

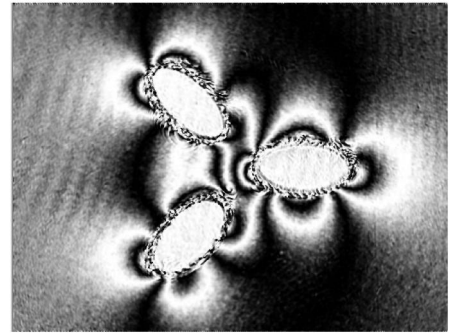


图6 等边三角形分布的椭圆孔
Fig.6 Elliptical holes distributed in equilateral triangle

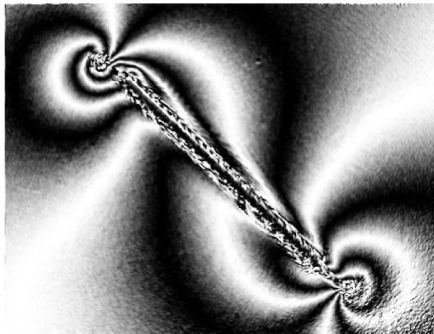


图7 45° 的斜裂纹
Fig.7 Oblique crack with 45 degrees

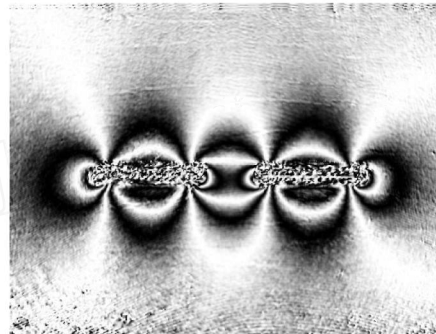


图8 2个水平裂纹
Fig.8 Two horizontal cracks



图9 2个45° 的斜裂纹
Fig.9 Two Oblique cracks with 45 degrees



图10 水平裂纹与单个45° 的斜裂纹
Fig.10 A horizontal crack and a Oblique crack with 45 degrees

3 讨论

本文通过一系列同类夹杂物在不同构型下的数字全息实验,研究了多夹杂物间的干涉现象,从我们观测到的全息干涉图来分析,可以初步得出以下结论:

- 1)在一定距离内,不同形式的夹杂物由于其相互位置的不同,夹杂物间都存在增强干涉效应或屏蔽干涉效应;
- 2)孔洞之间的增强干涉效应要强于裂纹之间的增强干涉效应;
- 3)在孔洞之间的增强干涉区存在明显的梯度应变条带;

4)当距离不是很近时,裂纹之间的增强干涉效应不会使裂纹尖端的局部应力应变场明显增强,裂纹的启裂动力主要来自单个裂纹自身的应力强度因子,而干涉效应主要是在裂纹之间形成高应力应变区,改变裂纹的扩展路径,推动裂纹之间的串接。

本文的研究主要是针对同类夹杂物在同样的相当距离下的干涉效应进行的。实验研究的结果与本文作者及其他人以前的数值计算结果基本吻合,有些方面,如孔洞之间的增强干涉区存在的梯度应变条带,则是在以前的数值计算中没有发现的。目前,我们正在进行不同类型夹杂之间的干涉效应以及夹杂物间的距离对干涉效应的影响等方面的实验研究工作,这些研究对于我们进一步理解夹杂物间的干涉效应,分析材料的失效机理、改进材料的加工工艺也是十分重要的。

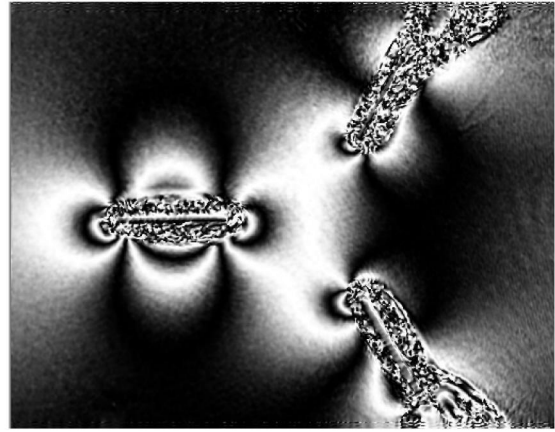


图11 水平裂纹与2个45°的斜裂纹

Fig.11 A horizontal crack and two Oblique cracks with 45 degrees

参考文献:

- [1] 张宏图,折晓黎. 夹杂理论及其在断裂研究中的应用[J]. 物理学报, 1981, 30(6): 761 - 774
- [2] 王锐. 裂纹与夹杂物的相互作用[J]. 物理学报, 1990, 39(12): 1908 - 1914.
- [3] Chudnovsky A, KACHANOV M. Interaction of a Crack with a field of microcracks[J]. Int J Engng Sci, 1983 21, 1009 - 1018.
- [4] MARK KACHANOV, ERIC MONTAGUT. Interaction of a Crack with Certain Microcrack Arrays[J]. Engng Fracture Mech, 1986, 25, 625 - 636
- [5] Horii H, Nemat - Nasser S. Elastic Fields of Interaction inhomogeneities[J]. Int J Solids Structures, 1985, 21: 731 - 745
- [6] San - Xia Gong, H. Horii. General solutions to the problems of microcracks near the tip of a main crack[J]. J Mech Phys Solids, 1989, 37: 27 - 46
- [7] Stenberg E, Sadowsky M A. On the Axisymmetric Problem of the Theory of Elasticity for an Infinite Region Containing Two Spherical Cavities[J]. J Appl Mech 1952, 19: 19 - 27.
- [8] 郭荣鑫, Gerard LORMAND, 李俊昌. 夹杂物问题应力场的数值计算[J]. 昆明理工大学学报:理工版. 2004, 30(3): 51 - 55
- [9] GUO Rongxin, Li Junchang Gerard LORMAND, Interaction of multiple inhomogeneities, Environment Effects on Fracture and Damage (Proceeding of the EM2004), G C. Sih, S T. Tu [R], Zhejiang University Press Hangzhou, China, 2004: 131 - 136
- [10] 张讯, 李金瀛. 裂纹群干扰效应的光弹性法测定[J]. 华北电力学院学报, 1995, 22(4): 75 - 79.
- [11] Xiong B Wang Z, Lu X, et al. Application of Real - time Holographic Method to the Micro - Crack Nucleation Process Study [R], Proceedings of the SPIE, 2000, 4221: 326 - 330.

(上接第 60 页)

3) Logistic - Verhulst 模型克服了传统的围岩位移的预测和稳定性评判方法中根据经验判定参数以及因为不确定因素过多而难以操作的缺陷,使本方法更为科学可靠,更具有操作性与实用性。

参考文献:

- [1] 杨会军,胡春林,谌文武,等. 断层及其破碎带隧道信息化施工[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(22): 3917 - 3922
- [2] 徐林生. 公路隧道施工围岩稳定性监测预报系统与隧道工程数值模拟研究: [博士论文][D]. 上海: 同济大学, 2001.
- [3] 郝哲. 公路隧道岩体分级、位移预测及其反分析方法研究: [博士论文][D]. 沈阳: 东北大学, 2003.
- [4] 叶荣裕. 皮尔曲线模型的推广及其应用[J]. 数学的实践与认识, 2004, 34(11): 72 - 75.
- [5] 邓聚龙. 灰色系统工程[M]. 武汉: 华中工学院出版社, 1990.
- [6] 谢全敏, 夏元友, 程康. 岩体变形监测时序分析与动态建模[J]. 工程地质学报, 2001, 9(3): 308 - 311