

文章编号: 1001-4888(2023)06-0704-08

冰体内气泡缺陷特征的“机器视觉”无损检测方法^{*}

陈鼎圣¹, 刘战伟¹, 于洋^{1,2}

(1. 北京理工大学 宇航学院力学系, 北京 100081; 2. 首都体育学院 体育人工智能研究院, 北京 100191)

摘要: 内部气泡对冰的力学性能影响较大, 为深入了解气泡缺陷特征, 通常采用切片的方式来观察冰体内部气泡分布, 但需从整个冰体中切割取样, 并且观测过程会彻底破坏样品。本文基于光的散射原理, 设计了可控移动片光源倾斜入射和垂直图像采集的光路系统, 发展了冰中缺陷特征的高效率定量无损检测方法。实验利用气泡对光源的散射现象提升了相机对冰体中气泡的辨识度, 根据片光源的移动速度和气泡散射存在时长得到垂直冰面方向上气泡的尺寸, 最终实现了对冰中气泡三维位置信息的准确采集。本文首先通过对透明亚克力材料中已标定形状和三维位置气泡缺陷的实验测量, 验证了方法的可行性。然后对含气泡冰体进行测量, 分析得到了冰体中气泡形状、位置分布、数量以及体积分数等信息。本文实验方法为非接触式测量, 不会对冰体造成破坏, 因而不会对同一冰样的后续使用产生影响。本文所得结果可为冰的力学性能研究以及透明材料的无损检测提供帮助及参考。

关键词: 激光散射; 冰体气泡; 无损检测

中图分类号: TG115.28

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-22-253

0 引言

冰在日常生活中随处可见, 有自然条件下形成的湖冰海冰, 也有用于食用、装饰、娱乐的人造冰。通常情况下水中会溶解一定的空气, 成冰过程中随着气体的溶解度降低便会有气泡析出并被冻结在冰体之中, 这些气泡会对冰的力学性能产生影响。对天然和人工冰中气泡特征检测有助于了解其力学性能, 在冰灾防范、船舶破冰、冰雪运动等诸多领域有着重要意义。李志军等^[1]针对渤海海冰进行研究, 得到了描述单轴压缩强度在不同破坏行为下的统一数学表达式。张邀丹等^[2]采用切片的方式, 通过显微镜观测对黄河内蒙段河冰的气泡形态与分布等情况进行了研究, 发现相较于柱状冰和粒状冰, 冰花冰的冰内气泡含量和等效直径变化范围更大。王庆凯等^[3]对融冰期北极海冰进行了单轴压缩实验, 发现应变速率和孔隙率是影响海冰单轴压缩强度的主要因素, 且孔隙率对柱状冰强度的影响大于对粒状冰强度的影响。在数值模拟方面, 李伟斌等^[4]提出了基于结冰二维图像定量信息的三维微观结构建模方法, 为动态结冰三维刻画、微观特征参数提取和相关微观仿真模拟提供了一种途径。Song 等^[5]对含气泡冰体的动力学性质进行了模拟研究, 结果显示即便在冰中的气泡体积比较低时, 冰的动力学性质也会受到较大的影响, 且此时冰的抗压强度等性质对气泡体积比更为敏感。Zong^[6]建立海冰的孔隙率模型研究预测海冰的力学性能, 发现随孔隙率的增加, 海冰的弹性模量以及强度呈现递增趋势, 而其泊松比则随之递减。为了更深入地研究冰体的力学性能, 理解冰体中气泡的体积、形状、数量和分布等因素对其力

^{*} 收稿日期: 2022-10-06; 修回日期: 2022-12-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(11772052); 科技冬奥专项(2018YFF0300801)

通信作者: 于洋(1979-), 男, 博士, 教授。主要研究领域: 生物仿生力学, 固体表面微/纳米结构与表面特性。Email: yuyang08@bit.edu.cn

学特性的影响显得尤为关键。

在成冰过程中,由于所形成气泡的体积、数量、分布等受到环境温度、液体所含离子情况等众多因素的影响,因此难以精确控制冰中气泡的产生及分布,只能在成冰后观测其中气泡的分布特点。然而绝大部分实验采用取样的方式对冰样进行观测,会导致冰体的破坏。而特定场景下,例如冰雪运动的赛道等不宜对冰体进行破坏取样,因此寻求一种能够用于观测冰中气泡三维分布的无损检测方法是十分必要的。

摄像法是观测气泡最直接的方法,但是冰体中的气泡往往难以被直接分辨,而通过散射可以使气泡凸显,如图1所示激光照射区域的气泡相较于其他区域有明显的亮度差异。散射理论的研究始于19世纪70年代,最早由瑞利提出瑞利散射定律,后经由Mie^[7]、Hulst等^[8]的完善,如今已建立起较为完备的理论体系。当光传播的介质中存在不均匀性时,例如材料中存在缺陷,就会影响光原有的传播路径而使光向其他方向传播^[9]。刘洋等^[10]利用光散射层析法对蓝宝石进行测试,成功检测出其内部多个微小缺陷,结果也与人工检测结果相符。王磊^[11]结合Davis^[12]关于球形气泡对于光线散射折射光路的相关理论,在特定角度范围内布置相机以获取更强的散射光,成功检测到了水中半径小于1mm的气泡,实现了基于机器视觉的气密性检测。杨飞等^[13]利用CCD散射显微成像技术对激光反射镜表面的瑕疵进行了检测识别。若被观测物体在可见光下不透明时,散射原理依然有用武之地,比如采用红外光源则可对部分不透明晶体进行检测^[14]。结合动态散射光测量原理的动态全场光学相干层析技术更是在生物学和精准医疗等领域有着广阔的应用前景^[15]。综上,散射方法可以用于透明材料中的气泡等缺陷的检测,若将散射原理运用于冰体气泡的无损检测中,便能够在不宜破坏冰体的特殊场景下,对冰体中气泡分布信息的直接测量,从而实现对冰体力学性质的无损评估。本文正是利用了气泡对光的散射,通过对光路的合理布局与图像处理,实现了对冰体中大量气泡三维位置信息的无损检测。

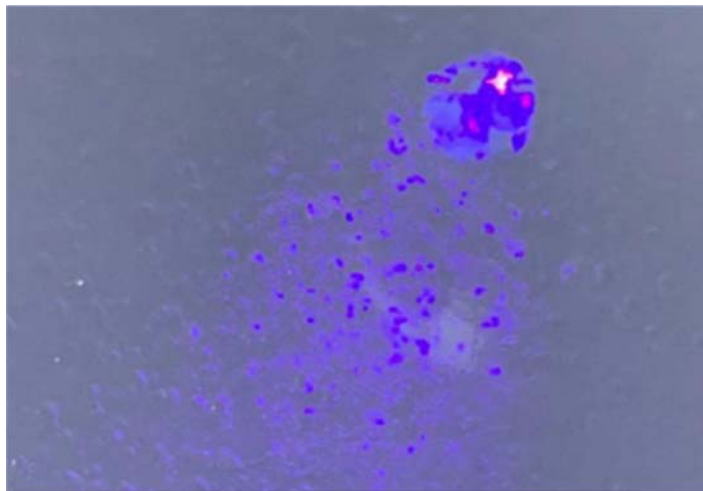


图1 被激光照射的冰面

Fig. 1 Ice surface irradiated by laser

1 气泡特征的检测方法

1.1 实验原理

如图2(a)所示,激光器发出的片状光源与被测物表面相交于一条直线,折射后在被测体内的一个平面上传播,在激光传播路径上的气泡将由于散射激光而被点亮,使得位于被测区域正上方的相机能够拍摄到散射亮点。

取出一个含有气泡的纵切面进行分析,如图2(b)所示,由于相机与样品的相对位置保持不变,并已知激光的运动速度 v 和相机帧率 f ,可计算出2张相邻照片之间激光运动的距离 $\delta s = v/f$ 。当给定初始时刻激光入射样品的位置后,便可得到每一帧图像中激光与被测表面的交点,即每一帧图像中激光入射点O的位置。

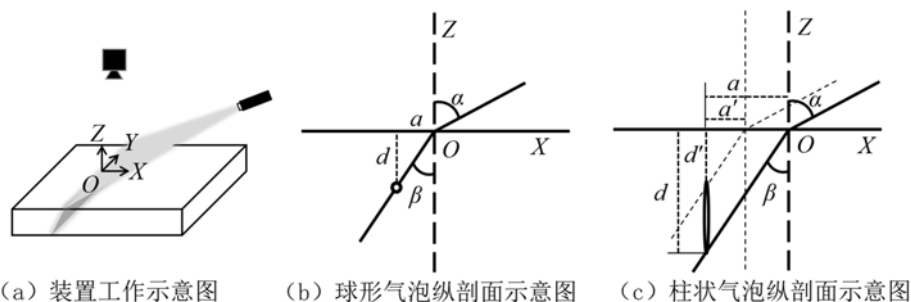


图2 测量气泡三维位置原理示意图:(a)装置工作示意图;(b)球形气泡纵剖面示意图;(c)柱状气泡纵剖面示意图

Fig. 2 Schematic diagram of 3D position measurement of bubbles: (a) schematic of the working device; (b) schematic of a spherical bubble's vertical section; (c) schematic of a columnar bubble's vertical section

已知激光入射角 α 以及材料折射率 n , 光点距离激光与材料交点(即 O 点)距离 a , 则可得到亮点的深度 d :

$$d = \frac{\sqrt{1 - \sin^2 \beta}}{\sin \beta} a \quad (1)$$

式中, β 为激光的折射角。

$$\sin \beta = \frac{\sin \alpha}{n} \quad (2)$$

这样通过观测到的二维平面信息和观测设备控制参数, 可计算得到亮点的三维深度信息。首先将每一帧图像中距 O 为 a 且平行于 Y 轴的图像条带(宽度为 δX)截取下来, 本文取条带宽度恰好为 2 张相邻照片之间激光运动的距离, 即 $\delta X = \delta s$, 然后将所有条带图像依次拼接, 得到样品表面下深度为 d 这一层上的气泡图像。改变所截取图像的相对距离 a , 便可得到不同深度的气泡分布图像。最终将不同深度的气泡位置分布信息堆叠起来, 即得到冰体中气泡的三维分布信息。

实际上, 冰中的气泡往往在深度方向上存在较大的纵向尺寸^[16], 甚至比气泡的横向尺寸大很多。对于这种情况, 只要在同一位置找到气泡开始被照亮的时刻以及激光将要离开该气泡重新变暗的时刻, 就可得到气泡位置与入射点间的距离 a 和 a' (图 2(c)), 其中 a 、 d 分别表示激光照射到气泡底部时气泡底部距离激光入射点 O 的水平距离以及气泡底部所在深度; 而 a' 、 d' 则分别表示激光照射至气泡顶部时气泡顶部距离激光入射点 O 的水平距离以及气泡顶部所在深度, 结合式(1)得到

$$h = d - d' = \frac{\sqrt{1 - \sin^2 \beta}}{\sin \beta} (a - a') \quad (3)$$

式中, $a - a'$ 为激光运动的距离。式(3)表示若平面上某亮点在激光移动 $a - a'$ 的过程中一直都被照亮, 那么就可知该点气泡纵向尺寸 $h = d - d'$ 。

1.2 实验装置

实验设备主要由导轨、相机、激光器以及电池构成, 通过电脑控制导轨运动以及相机拍摄, 如图 3 所示。线激光通过柱面凹透镜发散为片状光源。计算机可以控制导轨带动激光以匀速扫过样品, 相机位于样品正上方以固定帧率拍摄, 电源可为导轨供电, 相机则由计算机直接供电, 以保证在户外环境下设备仍可以正常使用。所有部分均位于样品同侧, 激光斜射进入样品, 这意味着无需对被测物进行取样加工就可进行直接测量。

1.3 样品准备

(1) 亚克力板样品

亚克力材料具有良好的透光性, 可以用来模拟透明冰体, 亚克力板有不同厚度可供选择, 并且易于加工。首先对多块亚克力板分别进行刻划以及打孔处理, 划痕的深度尺寸可忽略不计, 对应前文所述球形气泡模型; 对亚克力板打孔加工得到的贯穿孔则对应了图 2(c) 中的柱状气泡模型, 本文以此模拟冰体中的气泡等缺陷。然后将多层已知厚度的亚克力板进行叠放就能得到在确定深度下存在缺陷的测试样品, 从而可以避免冰体中的气泡生成过程难以进行定量控制的问题。利用亚克力板样品进行定量实

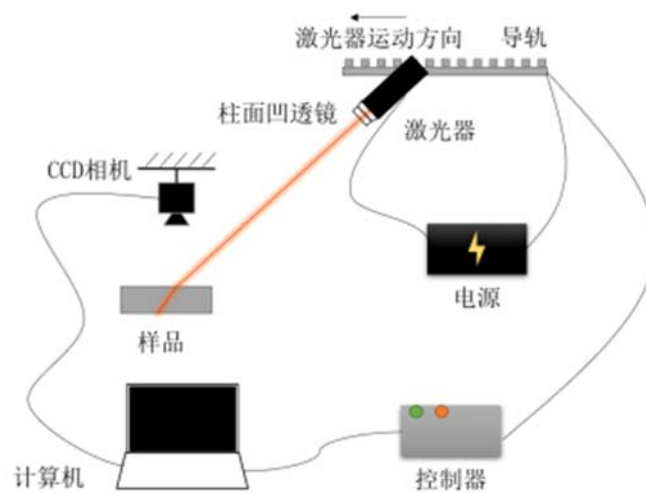


图3 基于光散射原理无损测量冰中气泡实验装置示意图

Fig. 3 Schematic of the ice bubbles testing device based on scattering theory

验,对实验结果进行误差分析,就能够验证本文测试方法的准确性。

一号亚克力板:使用钻床在透明亚克力板上钻出形状不一的3个小孔洞,间距分别为14.40mm、14.76mm,左侧圆孔直径1.18mm,得到如图4(a)所示实验样品。

二号亚克力板:如图4(b)所示,在3片透明亚克力板上用针尖刻出2~4个刻痕,具体位置分别为第一片上表面4个刻痕,第二片上表面2个刻痕,以及第三片下表面3个刻痕。每片亚克力板的厚度为0.80mm,将3层亚克力板叠放在一起,便得到在确定深度下存在缺陷的实验样品。

三号亚克力板:将厚度分别为0.98mm、1.02mm的2块亚克力板分别穿孔,孔洞直径均为1.20mm,如图4(c)所示,当2块板叠放在一起时,二者下方的孔会重合,从而形成一个深度方向上尺寸2倍于其他孔的贯穿孔,由此便产生了3个起始深度与结束深度都不尽相同的孔洞。

(2) 含气泡的冰样品

向容器中加入去离子水,采用平面冷源由下向上进行制冷成冰,便可得到如图4(d)所示的分布着球状和圆柱状气泡的冰样品。

2 结果与讨论

利用本文搭建的实验系统对一号亚克力板进行实验测量,结果如图5(a)所示,图像中缺陷的轮廓形状清晰可见,尺寸也与被测样本尺寸一致。图像中测得相邻2个孔的间距分别为14.18mm、14.30mm,与样品实际值相符,最大误差约为3%。由于激光在孔洞处发生散射后导致缺陷轮廓有明暗过渡区域,因而图像中孔洞直径偏大而孔间距偏小。实验结果表明本文实验方法能够准确地测量出被测物体中缺陷在二维水平平面内的轮廓,并能准确反映缺陷间距等信息。

图5(b)中用3层透明薄片分别标记出第一片亚克力板上表面、第二片上表面以及第三片下表面所在位置,其深度分别为0.00mm、0.80mm以及2.40mm。将亚克力板折射率 $n=1.49$,激光入射角 $\alpha=50^\circ$,代入式(1)并将实验结果由图像像素换算为深度坐标,结果显示第一层4点(灰色)的深度分布在0.00mm到0.21mm之间,第二层2点(黑色)的深度分布在0.73mm到0.83mm之间,第三层3点(灰色)的深度分布在2.29mm到2.35mm之间,实验结果与实际相符,反映了本文实验方法能够准确反映出缺陷所在的深度信息。

在深度方向上系统存在最小分辨率,可由公式 $v/(f \cdot \tan\beta)$ 计算得出,最小分辨率表示相邻两张照片之间激光入射的深度变化,其中 β 为激光折射角(参见图2(b)), f 为相机帧率, v 为激光移动速率,本文实验中最小分辨率数值为0.0803mm。

由于相机图像分辨率不足,或相机帧率过高,又或导轨移动速度过慢等原因而导致连续2帧之间激

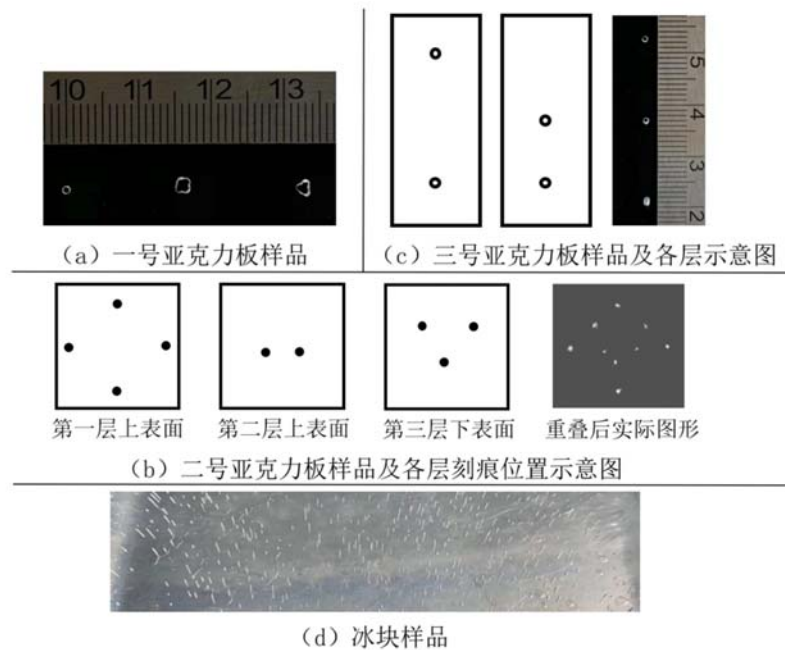


图 4 亚克力板样品以及冰块样品:(a)一号亚克力板样品;(b)二号亚克力板样品及各层刻痕位置示意图;
(c)三号亚克力板及各层示意图;(d)冰块样品

Fig. 4 PMMA (Polymethyl Methacrylate) samples and ice sample: (a)PMMA sample No. 1;
(b)PMMA sample No. 2 and schematic of notches on each layer; (c)PMMA sample No. 3 and
schematic of each layer; (d)ice sample

光的位移不足一个最小像素单位,那么深度方向上的误差将由相机分辨率主导,可表示为 $p/\tan\beta$,其中 p 为一个像素对应的真实长度。本文中实验激光每帧位移超过 3 像素点,因此深度方向的分辨率不受相机的分辨率决定。

对缺陷纵向尺寸较大的三号亚克力板样品进行实验测量,实验结果分别以侧视图与俯视图进行展示(图 5(c)),结果显示左侧的孔位于上层亚克力板,中间的孔位于下层亚克力板,右侧的孔则贯穿了双层亚克力板,并且孔的纵向长度分别约为 0.964mm、1.044mm 和 1.927mm,误差分别为 1.6%、2.4% 和 3.7%,与实际情况相符,由此可见本文实验方法能够测量出被测物体中散射体在深度方向上的尺寸。将所钻孔视作圆柱体,计算孔洞实际体积分别为 1.108mm^3 、 1.154mm^3 、 2.262mm^3 ,通过对图像统计,分别将 3 个孔的每一层层析图像上的像素点相加,根据比例换算出实际尺寸,再乘以每一层层析图像之间的间距,得到孔洞体积分别为 1.0918mm^3 、 1.213mm^3 、 2.405mm^3 ,最大误差为 6.32%,误差产生的原因可能是散射体的轮廓边缘增大使体积相较实际偏大所致,但本文实验方法能够在可接受的误差范围内测量出材料中孔洞的体积。

除此以外,在水平方向上材料的折射效应会导致结果产生一定误差。固定相机与刻度尺的相对距离,改变刻度尺上覆盖的亚克力板的厚度,相机视野内拍摄到的尺的刻度范围会随之发生变化,以此可计算出亚克力板的折射效应带来的误差。当相机距离拍摄物高度为 20.0cm,视野宽度约为 4.3cm 时,图像边缘处水平误差会随着亚克力板的厚度增加而线性增加,亚克力板厚度每增加 1mm 约会产生 0.18% 的水平方向误差,这部分误差相对深度方向的误差是微小的。同样的,当相机分辨率过低时,该部分误差也会被 p 值取代。

综上所述,测试效率受到硬件以及算法等多方面因素影响,如果相机帧率以及分辨率越高,导轨移动越慢,那么测试精度就越高,但所得到的数据量也越大,这将增加图像处理所需时间。而导轨移动速度越快,则扫描效率就越高,但测试精度随之降低。

由上述 3 种不同缺陷的亚克力板样品测量结果可反映出本文设计的无损检测方法能够很好地测量出透明样品中缺陷的投影大小、形状、所在深度位置以及缺陷体的纵向尺寸,从而充分验证了本文实验

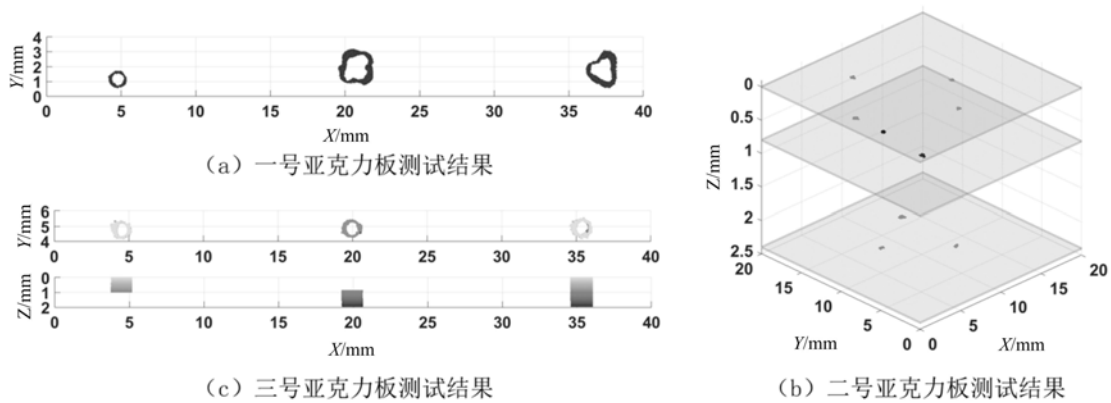


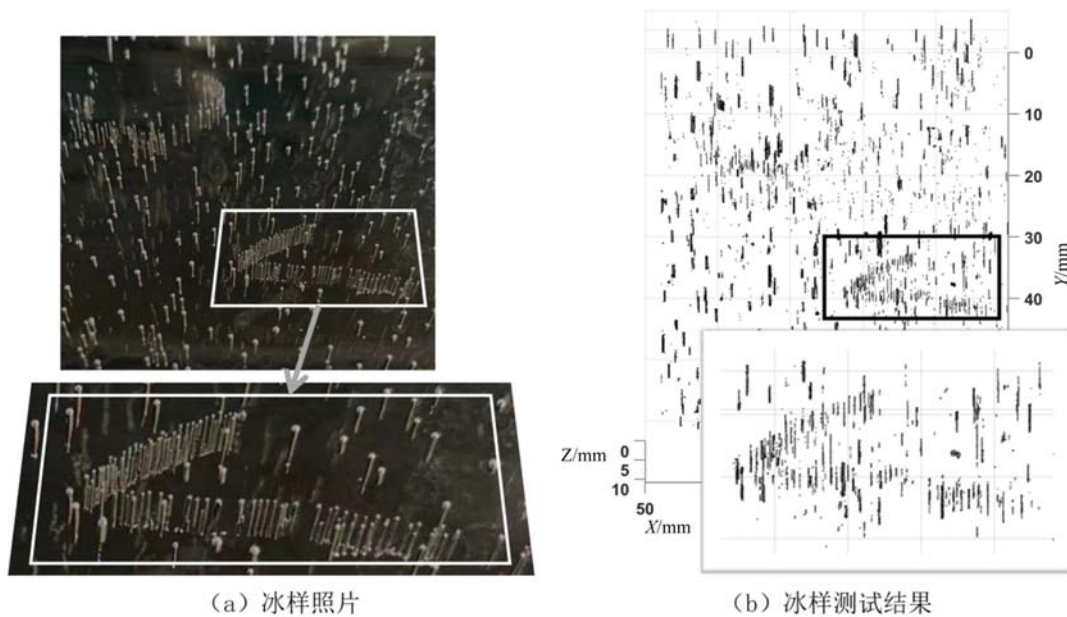
图 5 亚克力板测试结果：(a)一号亚克力板测试结果；(b)二号亚克力板测试结果；(c)三号亚克力板测试结果

Fig. 5 Testing results of PMMA samples: (a) testing result of PMMA sample No. 1;

(b) testing result of PMMA sample No. 2; (c) testing result of PMMA sample No. 3

方法的准确性。

为了使冰样品中的气泡分布具有明显特征,我们在成冰过程中对冰表面人为进行刻划,这样水中的气体会更倾向于在划痕处成核^[17],如此便能在一定程度上控制冰中气泡的形成位置。在成冰过程中于固液界面进行“<”形刻划,就能得到如图 6(a)所示冰样,在该冰样中可以明显观察到其中由大量气泡构成的“<”形特征区域。图 6(b)所示为对冰样测量的三维展示结果,原冰样中的“<”形特征区域被充分展现出来。利用后处理程序还可对扫描后得到的实验结果进行统计,图 6(b)所示的 48mm×64mm 被测区域内的气泡数量约为 3184 个,气泡的体积分数约为 0.064%。此外,测试结果还包含了每一气泡的截面积、深度、纵向尺寸等信息,本文对图 6(a)所示冰样的测试中,气泡的平均横截面积为 0.0106mm²,若将截面近似视作圆形,其等效平均截面直径为 0.12mm,平均纵向尺寸为 0.68mm,纵向尺寸大于该平均值的气泡数量占 23.8%。可见本文所采用的实验方法具有通过一次扫描测量就可给出一定区域内大量气泡数量、尺寸、深度等分布信息的优点。



(a) 冰样照片

(b) 冰样测试结果

图 6 冰样及其测试结果：(a)冰样照片；(b)冰样测试结果

Fig. 6 Ice sample and testing result: (a) ice sample; (b) testing result

3 结论与展望

本文基于激光在气泡缺陷处的散射原理,设计了缺陷特征的“机器视觉”检测方法,并搭建了缺陷特征检测装置系统。通过对含有3种不同特征缺陷的透明亚克力材料进行测量,以及将实验结果与已知缺陷的轮廓、深度、尺寸等信息对比,显示本文实验测量方法可准确测量出透明材料中孔洞或气泡缺陷的轮廓、深度以及纵向尺寸等特征。含气泡冰样本测量的实验结果显示,本文的实验测量方法可通过一次扫描得到全场气泡的分布、数量、体积分数等众多信息。在实际的工程应用中,由于光源与相机布置于样品同侧以及采用了非接触式测量方式,因而测试过程中无需破坏冰面以制作实验样品,也省去了切片观测的过程,从而可以适应更多特殊的应用场景并提高了观测效率。比如对冰场冰面进行实地测试时,只需将装置置于冰面上,在结束拍摄、图像处理等流程后,即可得出所测区域内冰体气泡的分布情况。该过程中,摄像头保持静止,仅有滑轨带动激光进行扫描测试,以此保证在对某一区域进行测量时所拍摄的每一张图片相对位置不发生变化,从而可消除图像处理中对一系列图像进行拼接时产生的误差。当对另外一块区域进行测量时,需要整体移动装置进行新一轮测量。本文实验测量方法能够为冰体中气泡如何影响冰体力学性能的研究提供帮助,同时在透明材料的无损检测领域中也具有潜在的应用价值。

参考文献:

- [1] 李志军, 张丽敏, 卢鹏, 等. 渤海海冰孔隙率对单轴压缩强度影响的实验研究[J]. 中国科学: 技术科学, 2011, 41(10):1329-1335 (LI Zhijun, ZHANG Liming, LU Peng, et al. Experimental study on the effect of porosity on the uniaxial compressive strength of sea ice in Bohai Sea[J]. SCIENTIA SINICA Technologica, 2011, 41(10): 1329-1335 (in Chinese))
- [2] 张邀丹, 李志军, 李春江, 等. 黄河内蒙段河冰微结构特性及影响因素分析[J]. 水利学报, 2021, 52(12):1418-1429 (ZHANG Yaodan, LI Zhijun, LI Chunjiang, et al. Microstructure characteristics of river ice in Inner Mongolia section of the Yellow River and its influencing factors[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(12):1418-1429 (in Chinese))
- [3] 王庆凯, 雷瑞波, 李志军. 融冰期北极海冰单轴压缩强度的试验研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2018, 39(10):1589-1597 (WANG Qingkai, LEI Ruibo, LI Zhijun. Experimental study on the uniaxial compressive strength of the Arctic sea ice during melt season[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2018, 39(10):1589-1597 (in Chinese))
- [4] 李伟斌, 宋超, 易贤, 等. 动态结冰孔隙结构三维建模方法[J]. 化工学报, 2020, 71(3):1009-1017 (LI Weibin, SONG Chao, YI Xian, et al. 3-D modeling method of porous structure for dynamic icing[J]. CIESC Journal, 2020, 71(3):1009-1017 (in Chinese))
- [5] Song Z, Hou L, Whisler D, et al. Mesoscopic numerical investigation of dynamic mechanical properties of ice with entrapped air bubbles based on a stochastic sparse distribution mechanism[J]. Composite Structures, 2020, 236: 111834.
- [6] Zong Z. A random pore model of sea ice for predicting its mechanical properties[J]. Cold Regions Science and Technology, 2022, 195:103473.
- [7] Mie G. Optical characteristics of turbid tubes, especially colloidal metal solutions[J]. Annalen der Physik, 1908, 3(25):377-445.
- [8] Hulst V D, Twersky V. Light scattering by small particles[J]. Physics Today, 1957, 10(12):28-30.
- [9] 陈军, 尤政. 激光散射理论及其在计量测试中的应用[J]. 激光技术, 1996, 20(6):40-46 (CHEN Jun, YOU Zheng. Light scattering theory and its application in measurement[J]. Laser Technology, 1996, 20(6):40-46 (in Chinese))
- [10] 刘洋, 徐文东, 赵成强, 等. 基于激光光散射层貌术的蓝宝石内部缺陷检测系统[J]. 中国激光, 2014, 41(9):44-48 (LIU Yang, XU Wendong, ZHAO Chengqiang, et al. A detecting system of sapphire internal defects based on laser light scattering tomography[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(9):44-48 (in Chinese))
- [11] 王磊. 基于光散射成像的气泡探测系统设计与实验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009 (WANG Lei. Design

- and research of bubble detection system based on light scattering imaging[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2009 (in Chinese))
- [12] Davis G E. Scattering of light by an air bubble in water[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1955, 45(7):572–572.
- [13] 杨飞, 高爱华, 刘卫国, 等. 高反射镜表面疵病激光散射显微成像检测[J]. *电子测量技术*, 2019, 42(4):110–116 (YANG Fei, GAO Aihua, LIU Weiguo, et al. High reflection mirror surface defects of laser scattering imaging detection[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2019, 42(4):110–116 (in Chinese))
- [14] Nango N, Ogawa T, Irisawa T. Minimum size of oxygen precipitates in czochralski silicon wafers detected by improved light scattering tomography[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2005, 44(8):5898–5902.
- [15] 田浩颖, 汤丰锐, 高万荣, 等. 动态散射光测量在全场光学相干层析技术中的应用[J]. *中国激光*, 2022, 49(5):114–127 (TIAN Haoying, TANG Fengrui, GAO Wanrong, et al. Review on dynamic scattered light measurement in full-field optical coherence tomography[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(5):114–127 (in Chinese))
- [16] Yoshimura K, Inada T, Koyama S. Growth of spherical and cylindrical oxygen bubbles at an ice water interface [J]. *Crystal Growth & Design*, 2008, 8(7):2108–2115.
- [17] 杨国伟. 低压气相生长金刚石薄膜系统中衬底表面凹缺陷成核机制研究[J]. *高压物理学报*, 1994(3):229–236 (YANG Guowei. The nucleation mechanism of substrates surface defects in low pressure vapor deposition of diamond thin films[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 1994(3):229–236 (in Chinese))

“Machine vision” nondestructive testing method for the defect characteristics of bubbles in ice

CHEN Dingsheng¹, LIU Zhanwei¹, YU Yang^{1,2}

(1. School of Aerospace Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Institute of Artificial Intelligence in Sports, Capital University of Physical Education and Sports, Beijing 100191, China)

Abstract: The mechanical property of ice can be influenced by its bubbles inside. In order to further understand the defect characteristics of bubbles, the conventional way to detect ice bubbles is to cut the ice sample into slices. In this way, the sample preparation has to separate from the ice. This paper developed an efficient quantitative identification method based on laser scattering theory to detect ice bubbles, which included a movable slant laser sheet and a camera perpendicular to the testing sample. The laser can highlight the bubbles inside and improve measurement accuracy. Starting from refraction theorem, 3D position of the bubbles can be easily acquired by a single camera. The deep dimension was determined according to the duration of bubbles being illuminated by the laser with uniform velocity. A series of experiments on transparent PMMA (polymethyl methacrylate) with certain holes or notches were conducted to verify the feasibility of this method. The shape, distribution, quantity, and volume fraction of ice bubbles were obtained by further experiments on ice samples. This method causes no damage to ice, which ensures further experiment on the same sample. This method has application potential in the study of ice mechanical properties and the nondestructive testing field of transparent material.

Keywords: laser scattering; ice bubble; nondestructive testing