

低密度粉末材料的 DR 图像夹杂检测

陈嘉威^{1,2}, 沈宽^{1,2*}

¹重庆大学光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044;

²重庆大学工业 CT 无损检测教育部工程研究中心, 重庆 400044

摘要 针对单次扫描角度不同引起的夹杂检测误差较大、稳定性低等问题,提出了一种低密度粉末材料的多角度数字化 X 射线摄影(DR)扫描夹杂检测方法。首先对被测对象进行多角度 DR 检测;然后采用尺度不变特征变换(SIFT)特征匹配的方法寻找不同角度下夹杂的图像,自动选取不同角度下夹杂尺寸的最大值作为近似值;最后建立不同角度下夹杂面积和旋转角度的关系,并预测出夹杂的最大面积和旋转角度。实验结果表明,所提方法解决了计算机断层扫描(CT)效率低的问题,相比单次扫描检测方法,进一步提高了检测的准确性和稳定性,并且较小旋转角度下的预测具有较高置信度,能够满足实际生产检测需求。

关键词 图像处理;粉末材料;DR 图像;自动检测;多角度扫描

中图分类号 TP394.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1110002

Inclusion Detection from DR Images of Low-Density Powder Materials

Chen Jiawei^{1,2}, Shen Kuan^{1,2*}

¹Key Laboratory of Optoelectronic Technology & Systems, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

²Engineering Research Center of Industrial CT Nondestructive Testing, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China

Abstract In this study, we propose a method for multi-angle digital radiography (DR) scanning inclusion detection of low-density powder materials considering the problems such as large inclusion detection errors and low stability caused by the usage of different single scanning angles. First, multi-angle DR detection is performed with respect to the measured object. Then, the scale-invariant feature transform (SIFT) feature matching method is used to find the inclusion images at different angles. Further, the maximum size of the inclusions at different angles is automatically selected as approximate value. Finally, a relation between the inclusion area and rotation angle is established under different angles and the maximum inclusion area and rotation angle are predicted. The experimental results prove that the proposed method can solve the problem of low efficiency associated with computed tomography (CT) and can improve the accuracy and stability of detection when compared with the single-scan detection method. A high degree of confidence is associated with the prediction at a small rotation angle, which indicates that the proposed method can meet the demands of inclusion detection in practical applications.

Key words image processing; powder material; DR image; automatic detection; multi-angle scanning

OCIS codes 100.2000; 040.1880; 100.2960

1 引 言

粉末材料是绝大多数材料的原料,其特性在很大程度上影响最终材料的性能。粉末材料在准备和生产过程中可能会引入颗粒状或丝状等杂质缺陷,引起材料的质量和性能问题,因此一般需要对粉末材料进行无损检测。X 射线检测是一种较为常用

的、非接触的无损检测手段,可以避免产品二次污染。同时 X 射线检测相对 γ 射线、中子射线检测等方法更为安全,因此工程应用中普遍采用 X 射线检测^[1-3]手段。

传统 X 射线检测手段使用标尺在底片上对低密度粉末材料中的夹杂进行直接测量,并以此测量值作为缺陷实际大小的值,然后进行级别评定。这

收稿日期: 2019-12-23; 修回日期: 2020-02-12; 录用日期: 2020-03-09

基金项目: 重庆市技术创新与应用发展(cstc2019jscx-msxm0530)、重庆市自然科学基金(cstc2016jcyjA0353)

* E-mail: shenk@cqu.edu.cn

种方法耗时长、效率低,容易受检测人员的经验和疲劳度等影响,同时图像灰度分布不均匀、对比度低等因素也会对检测精度造成影响^[4-5]。

随着图像处理技术和粉末材料行业的发展,国内外对夹杂的自动化检测研究越来越多。Mery等^[6]通过 Kirsch 算子和 Canny 算子的结合来实现表面缺陷的边缘检测,提高了检测的准确性。周艺环等^[7]使用 X 射线成像技术对绝缘全封闭组合电器(GIS)内部的异物缺陷故障进行检测,结果表明该技术能够对零件缺陷和铜金属微粒缺陷进行有效检测,检测精度能达到 1~2 mm,但是使用 X 射线检测 GIS 设备在 X 射线成像系统参数选择上缺乏经验,导致成像的对比度较低。刘艳珍等^[8]使用计算机断层扫描(CT)对树脂基复合材料进行检测,该方法的扫描检测精度比数字化 X 射线摄影(DR)高。Zhang 等^[9]针对弱目标实时检测中成像质量下降的问题,提出了一种基于快速预分类的超分辨模型系统,但该系统是专门用于铜缺陷检测的。Wang 等^[10]提出了一种铝铸件自动检测方法,该方法利用图像序列跟踪假缺陷,但在缺陷较弱的区域会出现漏检的情况。Boaretto 等^[11]提出了一种对双壁双像曝光技术所获取的焊接接头射线图像缺陷进行自动检测和分类的方法。安宗权等^[12]提出了一种基于非线性扩散与图像差分的缺陷检测方法,该方法先使用改进的非线性扩散模型对缺陷区域进行平滑处理,再将平滑后的图像与原始图像进行差分运算,最后通过图像二值化方法提取缺陷区域,实验结果表明该方法能够对金属表面缺陷进行准确的检测。Yu 等^[13]将深度卷积神经网络用于检测铸造缺陷的 X 射线图像,此方法能够降低误识率,实现对缺陷的分类分级,但是该网络仅适用于尺寸为 64 pixel×64 pixel 的神经元和分辨率低,无法检测铸件的小缺陷。

物体不同部位的材质和厚度存在差异,导致不同部位透射射线的衰减程度不同。DR 检测获得的图像是实物的投影图像,由于空间位置的不同,投影出来的夹杂尺寸可能并非实际夹杂的尺寸,特别是当夹杂物与射线方向平行时,无法准确评判出夹杂物的大小,最终导致检测误差较大、精度较低。CT 是将物体进行 360°旋转,探测器从不同角度采集关于所扫描物体截面的射线衰减信息,通过计算机信息处理和图像重建技术得到准确的二维断层图像或三维图像。但是 CT 要对物体进行 360°扫描,图像重建的数据量大,导致检测时间较长,在实际生产检测中效率较低。

针对以上问题,本文提出了一种粉末材料多角度 DR 扫描的检测方法。首先对被测对象进行多个角度的 DR 检测成像,对获得的原始图像进行窗宽窗位调节,再使用中值滤波和限制对比度直方图均衡化(CLAHE)方法对图像进行二次增强;然后采用尺度不变特征变换(SIFT)算法实现不同角度下的夹杂图像的匹配,并通过阈值分割获取夹杂目标;最后选取不同角度下夹杂的尺寸参数的最大值并以其作为夹杂尺寸的近似值,结合不同角度下夹杂的面积与旋转角度的关系,推导出一个最大面积作为夹杂尺寸的检测值。利用 FE II 线型像质计检验了系统的检测精度,分析了夹杂的空间位置对检测精度的影响,同时通过实验验证了所提方法的可靠性。研究成果为低密度粉末材料的夹杂检测提供了实验经验和检测依据。

2 夹杂检测方法

在粉末材料制备中,为了获得更好的材料性能,粉末一定要有合适的粒度分布,因此需要对粉末材料进行筛分。通常采用具有标准网眼的筛子或振动筛进行筛分。经过筛分后,粉末材料中主要的夹杂基本都是金属夹杂,这些夹杂都是网眼的丝状本征夹杂和加工过程带来的金属夹杂,其中金属夹杂严重危害粉末成型产品的性能,因此本文研究的重点就是如何检测粉末材料中的丝状金属夹杂。

夹杂检测方法主要的流程如图 1 所示。第 1 步为图片的采集;第 2~4 步为图像预处理,先使用窗宽/窗位变换调节整个图像的亮度和对比度,接着设置中值滤波器去除随机噪声,再利用 CLAHE 方法进行二次增强^[14];第 5 步利用 SIFT 算法找到不同角度下夹杂的 DR 图像;第 6 步通过阈值分割获得不同角度下的夹杂,然后计算夹杂在不同角度下的尺寸参数;最终选取不同角度下夹杂的尺寸参数的最大值作为夹杂尺寸的近似值,然后对夹杂的最大面积和相应的旋转角度进行预测。在实际应用中,由于粉末材料中夹杂的空间位置是未知的,单一角度下的夹杂 X 射线扫描结果可能与真实参数差异较大,因此需要综合不同角度下的夹杂参数信息来进行更准确的评判。

2.1 预处理

射线检测图像常常存在有随机噪声、对比度低等问题,因此需要对图像进行预处理,如图 2 所示。图 2(a)为面粉的 DR 图像,其中夹杂物为金属丝,可以看到图像整体亮度偏暗,夹杂的灰度分布范围窄。为了提高目标结构细节的显示效果,使用窗宽/窗

位变换来调节图像的对比度和亮度,结果如图 2(b)所示,其中窗宽为 17190,窗位为 9587。接着设置一个半径为 3 的中值滤波器去除随机噪声。部分缺陷尺寸较小,在图像上的对比度仍然

较低。为了增强夹杂与背景的对比度,使夹杂更加明显,采用 CLAHE 进行二次增强,结果如图 2(c)所示,可以看到整个图像动态范围得到增大,夹杂的对比度显著增强。

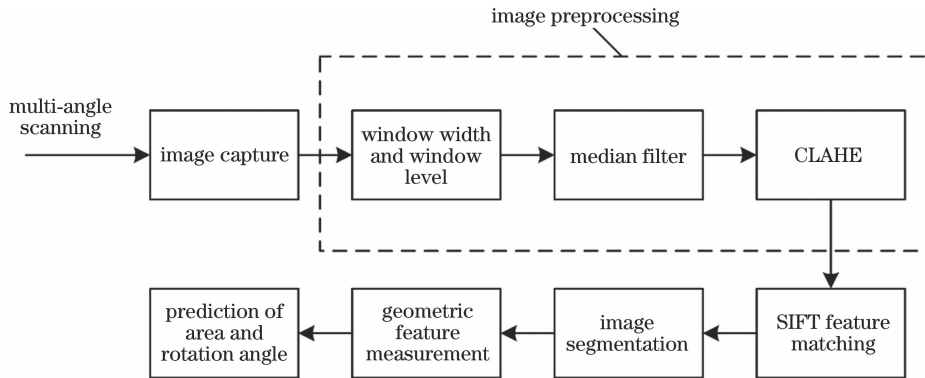


图 1 夹杂检测系统流程图

Fig. 1 Flow chart of inclusion detection system

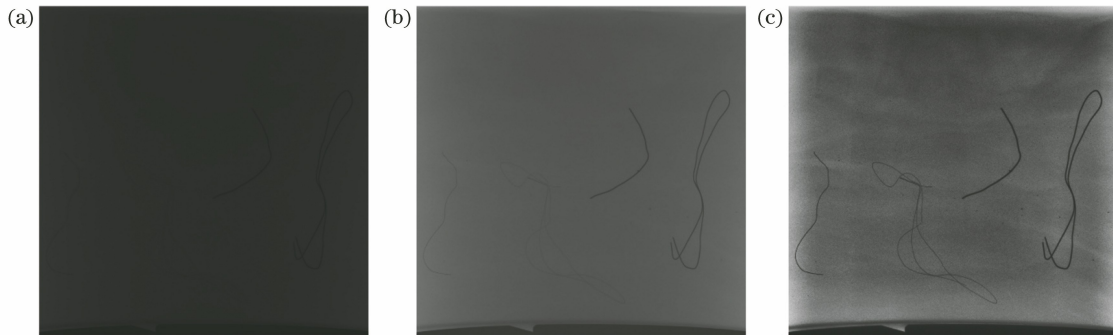


图 2 预处理。(a)原始图像;(b)窗宽/窗位调节结果;(c)二次增强结果

Fig. 2 Preprocessing. (a) Original image; (b) result of window width/window level adjustment;

(c) result of secondary enhancement

2.2 基于 SIFT 特征匹配

使用 SIFT 特征匹配的方法寻找不同角度下的夹杂图像。SIFT 特征匹配算法对旋转、尺度、亮度保持不变,同时对视角、仿射、噪声不敏感,具有较强的匹配能力^[15-16]。虽然 SIFT 能够获得大量的匹配点对,但是受噪声等因素的影响,会产生许多错误的匹配点对,降低匹配的稳定性,最终导致匹配失败。SIFT 特征匹配通常采用关键点的欧氏距离作为相似度,通过对最近邻与次近邻的比值设置阈值来提高匹配的稳定性和准确性。实际检测中,由于旋转角度较小,不同角度下正确匹配的关键点应为同一点,在空间中它们相当于绕着旋转轴旋转了相应角度,因此匹配点对在竖直方向存在一定的位移量。为了进一步提高匹配的准确率,尽量剔除错误的匹配点对,可对匹配点对在 y 方向的位移设置阈值来进一步剔除错误的匹配点对。图 3(a)是扫描左视图,图 3(b)是扫描俯视图,其中点 s 为射线源,点 d

表示探测器,点 o 处的竖直线为旋转轴,射线源到旋转中心的距离为 D_{so} ,射线源到探测器的距离为 D_{sd} , k_2 为某扫描角度下的一个关键点,当物体旋转 β 角度时,关键点 k_2 变化至 k_1 处。

假设点 k_2 距 so 的高度为 h ,到旋转轴的距离为 r ,初始角度为 α ,根据三角形相似原理,得到 k_1 和 k_2 在 y 方向的偏移量为

$$y_2 - y_1 = D_{sd} \times h \left[\frac{1}{D_{so} - r \cos \alpha} - \frac{1}{D_{so} - r \cos(\alpha + \beta)} \right]. \quad (1)$$

当点 k_2 位于探测器与旋转轴之间时,同样可得到

$$y_2 - y_1 = D_{sd} \times h \left[\frac{1}{D_{so} + r \cos(\alpha + \beta)} - \frac{1}{D_{so} + r \cos \alpha} \right]. \quad (2)$$

在实际应用中,检测物的 h 和 r 都是已知的,经求导后得到,当 $\alpha + \beta = \pi/2$ 时, $y_2 - y_1$ 取到极大值,

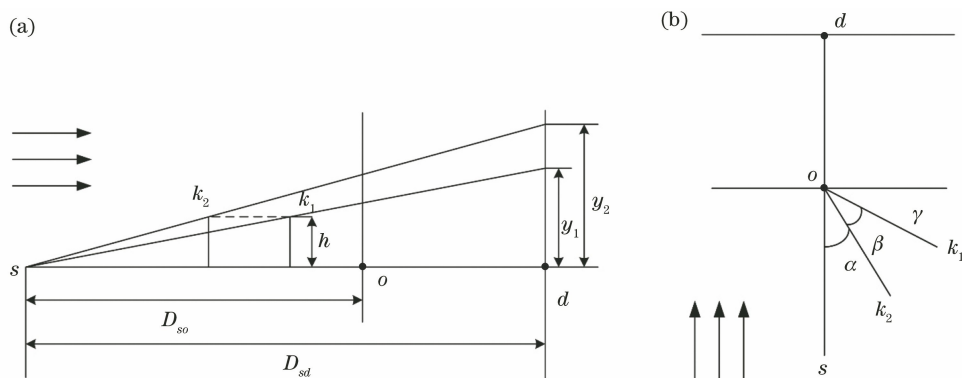


图 3 不同角度下的扫描图。(a)左视图;(b)俯视图

Fig. 3 Scanograms at different angles. (a) Left view; (b) top view

进而得到匹配点对在 y 方向的最大偏移量,取(1)式和(2)式中绝对值的最大值作为最大偏移量的阈值。图 4 为优化和未优化的匹配效果图。其中图 4(a)、(b)均为增强后的 DR 图像,两者旋转角相差 15° 。图 4(d)为未优化的匹配图,最近邻与次近邻的比值为 2.5,最终的匹配点对数量为 157,图 4(e)为优化后的匹配图,其中最终的匹配点对数量为 52,图 4(c)是两者匹配后的重叠图。可以看到,经处理

后,错误的点对得到进一步的剔除,匹配的稳定性 and 准确性得到提高,最终得到了较好的匹配效果。

2.3 图像分割

在 X 射线图像中,夹杂信息只占图像的小部分。首先将夹杂所在大致区域提取出来,对其进行单独处理,这样不仅减少了图像处理分析的工作量,而且减少了处理时间;然后通过阈值分割将夹杂目标提取出来。分割效果如图 5 所示。

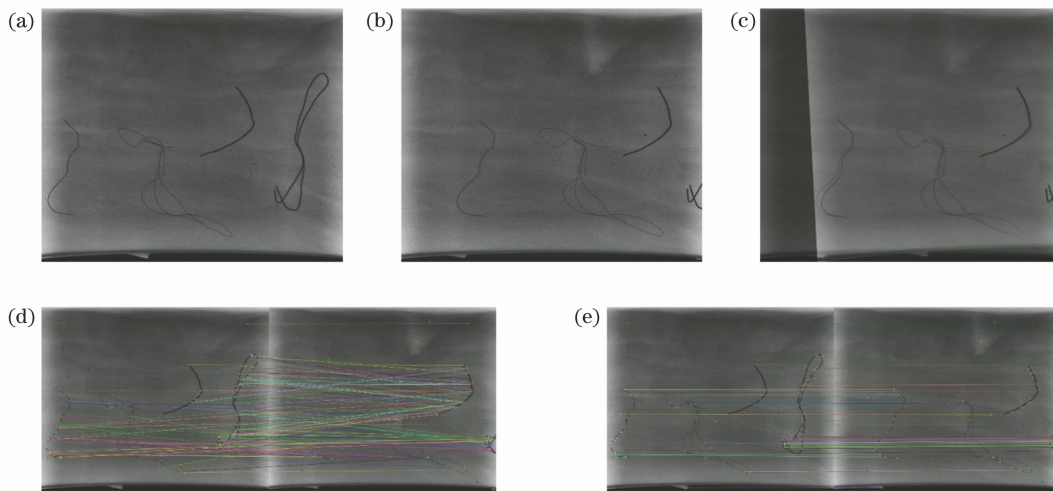


图 4 匹配效果图。(a)原始图像;(b)旋转 15° 的原始图像;(c)匹配后的重叠图像;(d)未处理前的匹配图像;(e)处理后的匹配图像

Fig. 4 Matching effect. (a) Original image; (b) original image with rotation of 15° ; (c) matched overlapping image; (d) matched graph before processing; (e) matched graph after processing

2.4 夹杂面积和旋转角度的预测

在不同扫描角度下检测时,因为夹杂的空间位置发生了变化,所以夹杂的扫描面积的大小可能存在不同程度上的差异。选取不同角度下的最大值作为尺寸的近似值来判定夹杂最终的尺寸。对夹杂面积进行评判时,利用夹杂在不同角度下的面积与旋转角度的关系,推导出一个最大面积作为夹杂的检测值,进一步提高了检测的准确性。图 6 为不同角

度下夹杂扫描的俯视图,其中 n 平面平行于探测器,假设夹杂初始扫描面积为 S_1 ,控制旋转台旋转 α 角度,夹杂的扫描面积为 S_2 ,当旋转 β 角度后面积达到最大值 S_{max} 。由于旋转角度较小,夹杂在不同角度下的扫描面积近似于夹杂在 n 平面上的投影的扫描面积,夹杂在 n 平面的投影角度可近似于旋转角度。综上所述,通过两次扫描,夹杂的面积和旋转角度与最大面积的关系式为

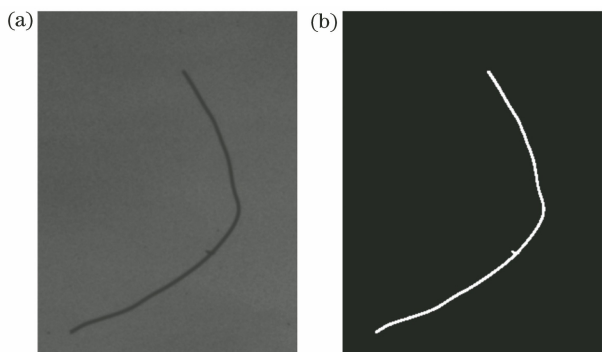


图 5 分割效果图。(a)夹杂在感兴趣区域的图像；
(b)阈值分割结果

Fig. 5 Segmentation effect. (a) Inclusion image of region-of-interest; (b) threshold segmentation result

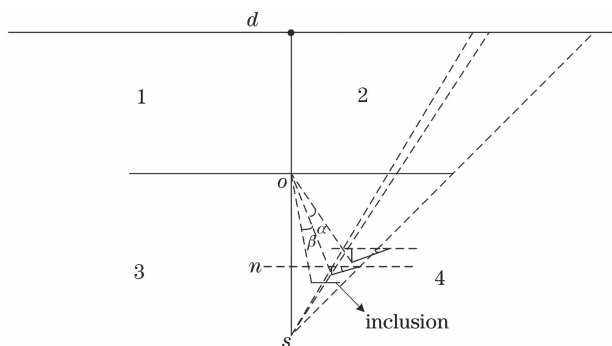


图 6 扫描俯视图

Fig. 6 Scanned top view

$$S_{\max} \times \cos \beta \approx S_2, \quad (3)$$

$$S_{\max} \times \cos(\alpha + \beta) \approx S_1. \quad (4)$$

(3)式除以(4)式,得到

$$\beta \approx \arctan\left(\frac{S_2 \cos \alpha - S_1}{S_2 \sin \alpha}\right). \quad (5)$$

根据角度 β , 可以计算得到 S_{\max} 。以上推论只适用于图 6 中区域 1、2、3 及 4 中的单独一个区域空间, 若旋转至其他区域, 夹杂的空间位置变化较大, 那么扫描结果可能受放大倍数影响, 导致预测结果不准确。相对单次扫描的 X 射线检测来说, 所提方法只需要多两次扫描就可以提高测量准确性, 同时保持较高的效率。

3 实验结果与分析

采用重庆真测科技股份有限公司的 CD-350BX/uCT 微焦点工业 CT 系统, 系统的检测精度为 $65 \mu\text{m}$ 。低密度粉末材料为面粉(密度约为 0.52 g/mL), 夹杂为铁质材料。

3.1 系统检测精度

采用 FE II 线型像质计代替夹杂来检验检测精度, 将面粉放置于长方体盒子中。首先将像质计放置于与探测器相平行的方向进行扫描, 结果如图 7(a)所示, 此时的扫描角度记为 0° 。分别计算像质计的周长、长度、宽度、面积等参数, 同时与像质计的标准尺寸作比较, 计算长度和宽度的相对误差, 通过参数的误差来检验检测系统的精度。表 1 是 0° 下的像质计尺寸信息列表。从表 1 可以看到: 对标准宽度为 0.25 mm 的像质计来说, 由于厚度太小, 在图像上形成的强度差较小, 对边缘的提取可能存在较大偏差, 因此检测宽度时误差较大; 但是检测的长度与标准长度相差很小, 在 1 mm 以内, 相对误差在 1% 之内, 宽度的相对误差基本都在 10% 以内。这说明本检测系统对标准宽度为 0.25 mm 以上的夹杂计算具有较高的准确性和可靠性。

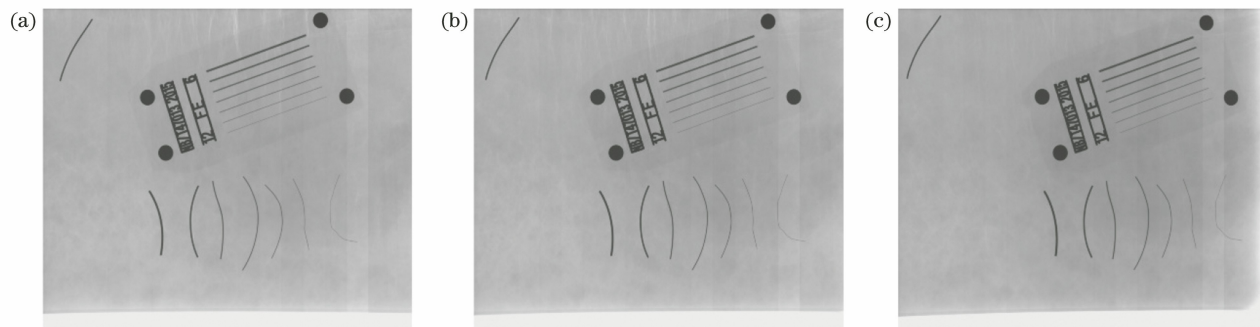


图 7 不同扫描角度下的像质计检测图。(a) 0° ; (b) 7.5° ; (c) 15°

Fig. 7 Detection diagrams of image quality indicator at different scanning angles. (a) 0° ; (b) 7.5° ; (c) 15°

为了检验不同扫描角度对检测精度的影响, 分别将样品逆时针旋转至 7.5° 和 15° 处, 图 7(b)、(c) 为相应角度下的 DR 检测图像, 表 2 和表 3 分别是 7.5° 和 15° 下像质计的尺寸信息。通过不同角度下

像质计的长度和周长的变化可以看出, 不同角度下像质计的空间位置不同, 导致检测误差不同, 说明不同的扫描角度会导致检测精度不同, 检测的稳定性也会降低。因为像质计近似于圆柱体, 所以扫描角

表 1 0°下的像质计尺寸信息列表

Table 1 List of size information of image quality indicator at 0°

Silk No.	Standard length / mm	Standard width / mm	Perimeter / mm	Area / mm ²	Length		Width	
					Measured value /mm	Fractional error /%	Measured value /mm	Fractional error /%
6	50	1.00	110.481	56.9824	50.3847	0.7694	0.9620	3.800
7	50	0.80	110.092	47.1213	50.3319	0.6638	0.7450	6.874
8	50	0.63	109.522	38.9471	50.3035	0.6070	0.5828	7.498
9	50	0.50	108.944	31.6081	50.1033	0.2066	0.4541	9.172
10	50	0.40	109.038	25.5238	50.2557	0.5114	0.4364	9.098
11	50	0.32	108.118	20.5672	49.8720	0.2461	0.2914	8.943
12	50	0.25	107.453	14.9086	49.6170	0.7660	0.2060	17.580

表 2 7.5°下的像质计尺寸信息列表

Table 2 List of size information of image quality indicator at 7.5°

Silk No.	Standard length / mm	Standard width / mm	Perimeter / mm	Area / mm ²	Length		Width	
					Measured value /mm	Fractional error /%	Measured value /mm	Fractional error /%
6	50	1.00	108.488	55.6466	49.4907	1.0186	0.9437	5.631
7	50	0.80	107.918	45.6847	49.3862	1.2276	0.7649	4.390
8	50	0.63	107.273	38.0013	49.2336	1.5328	0.5869	6.832
9	50	0.50	106.675	30.6656	49.0835	1.8330	0.4341	13.164
10	50	0.40	106.856	24.6040	49.1832	1.6336	0.3605	9.858
11	50	0.32	105.802	19.8099	48.8023	2.3954	0.2937	8.221
12	50	0.25	105.043	14.0408	48.5208	2.9584	0.2176	12.952

表 3 15°下的像质计尺寸信息列表

Table 3 List of size information of image quality indicator at 15°

Silk No.	Standard length / mm	Standard width / mm	Perimeter / mm	Area / mm ²	Length		Width	
					Measured value /mm	Fractional error /%	Measured value /mm	Fractional error /%
6	50	1.00	104.701	55.1851	47.7327	4.5346	1.0333	3.333
7	50	0.80	104.083	45.6100	47.5802	4.8396	0.8417	5.219
8	50	0.63	103.210	38.1865	47.3488	5.3024	0.6648	5.532
9	50	0.50	102.605	31.0816	47.1243	5.7514	0.5484	9.688
10	50	0.40	102.491	25.0395	47.2003	5.5994	0.4341	8.544
11	50	0.32	101.617	20.2422	46.8423	6.3154	0.3324	3.883
12	50	0.25	101.020	15.0257	46.5655	6.8690	0.2176	12.952

度对像质计宽度的检测影响非常小。

3.2 不同扫描角度对夹杂参数的影响

将像质计放置于与探测器相平行的方向进

行扫描,并以扫描角度 0°为基准,通过使旋转台顺时针或逆时针旋转不同角度,可以得出夹杂的空间位置对夹杂参数的影响。表 4 是不同角度

下的扫描结果,可以看出,由于旋转后像质计的空间位置发生了变化,不同角度下的夹杂参数存在一定的偏差。受空间位置和夹杂形态的影响,不同角度下夹杂参数偏差的大小是不确定的,可以说明单次扫描稳定性较低,检测的准确性也会

受到影响。在实际检测中,夹杂在被测样品中的空间位置和形态都是未知的,因此单次扫描结果存在很多随机性。在这种情况下,选取其中的最大值作为尺寸的近似值,以尽量降低夹杂空间位置的影响。

表 4 不同角度下的夹杂尺寸信息

Table 4 Size information of inclusion at different angles

Silk No.	0°		15°		-15°		-30°	
	Area value / mm ²	Length / mm	Area value / mm ²	Length / mm	Area value / mm ²	Length / mm	Area value / mm ²	Length / mm
6	56.9824	50.3847	55.1851	47.7327	54.9738	49.4280	50.6998	45.0163
7	47.1213	50.3319	45.6100	47.5802	45.0965	49.4577	41.4497	45.0454
8	38.9471	50.3035	38.1865	47.3488	37.3870	49.5539	34.8388	45.2485

3.3 夹杂面积与旋转角度的预测分析

为了检验预测的准确性,将 6~8 号的像质计竖直放置于材料中,并与探测器保持平行。此时初始扫描角度为 0°,扫描面积为最大值。然后分别旋转至 7.5°、15°、-7.5°、-15°处进行扫描,扫描时像质计都处于图 6 中的区域 4。利用 3.2 中的结论可以得到不同角度下的扫描面积,该面积近似于 0°下的面积与旋转角度的余弦值的乘

积。表 5 为不同角度下的面积信息,为了便于比较,将表 5 中不同角度下扫描得到的面积都转换为相应的最大面积,并与 0°下的最大面积进行对比。从表 5 可以看到,在较小的转动角度下,像质计的最大面积的相对误差都在 4% 以内,验证了预测的可行性,也进一步说明在较小的转动角度下,所提方法对面积和旋转角度的预测具有较高的可靠性。

表 5 不同角度下面积信息列表

Table 5 List of area information at different angles

Silk No.	0°		7.5°		15°		-7.5°		-15°	
	Area value / mm ²	Area value / mm ²	Fractional error / %	Area value / mm ²	Fractional error / %	Area value / mm ²	Fractional error / %	Area value / mm ²	Fractional error / %	
6	59.5468	59.1742	0.626	59.5729	0.044	59.3345	0.356	59.7224	0.295	
7	48.1782	47.6563	1.083	47.5001	1.407	47.9150	0.546	47.9748	0.422	
8	39.8153	38.7589	2.653	38.2444	3.945	38.9514	2.170	39.2421	1.439	

3.4 实际检测效果分析

使用不同直径的金属丝来检验实际生产检测的效果,图 8 为金属丝夹杂的检测图,表 6 是对金属丝直径的检测结果。从检测结果可以看到,对于较小的尺寸,检测误差往往较大。因为本系统中探测器的像素尺寸为 127 μm,而最小的金属丝尺寸为 0.20 mm,探测器像素尺寸和金属丝尺寸都影响着图像相关显示可识别的最小细节尺寸,所以物体尺寸越小,量化误差越大。而直径为 0.30~1.00 mm 的检测误差相对较小,基本都在 10% 以内,实际检测结果与系统检测精度相符,说明实际检测效果能够满足实际生产检测的需求。

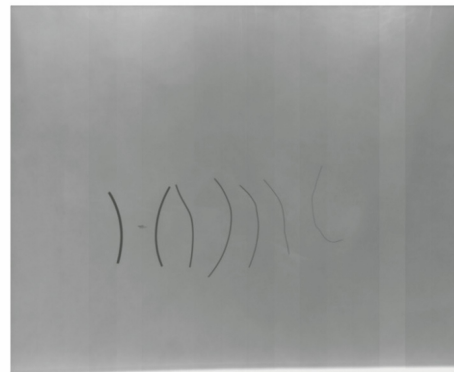


图 8 实物扫描俯视图

Fig. 8 Scanned top view of real products

表6 金属丝直径信息列表
Table 6 List of wire diameter information

Wire No.	Standard diameter /mm	Measured diameter /mm	Fractional error /%
1	1.00	1.0444	4.435
2	0.80	0.7740	3.250
3	0.60	0.5841	2.654
4	0.50	0.4858	2.840
5	0.40	0.4283	7.071
6	0.30	0.3289	9.629
7	0.20	0.2580	29

4 结 论

针对扫描角度变化导致夹杂信息检测不准确的问题,提出了一种对低密度材料进行多角度扫描的检测方法。标准像质计的检测实验说明检测系统能够达到较高的检测精度。同时分析了夹杂在不同空间位置下的扫描结果,发现单次扫描检测存在不稳定性。而所提方法通过综合多个角度下的夹杂信息对夹杂参数进行最终评定,降低了扫描角度的影响,在较小的旋转角下所提方法对夹杂最大面积和旋转角度的预测具有较高的可靠性。在实际应用中,所提方法比CT扫描检测方法更高效,同时也能保持较高的准确性,能达到较好的检测效果。

参 考 文 献

- [1] Zhou D M, Guo Y B, Liang S L. X-ray digital imaging detection technology in the application of graphite materials[J]. Carbon, 2016(2): 28-31.
周冬梅, 郭忆滨, 梁世林. X射线数字成像检测技术在石墨材料中的应用[J]. 炭素, 2016(2): 28-31.
- [2] Liu Y, Zhou Y W, Xu L, et al. Application of X-ray digital imaging technology in GIS detection [J]. Jiangxi Electric Power, 2014, 38(6): 72-74.
刘衍, 周友武, 徐鹏, 等. X射线数字成像技术在GIS检测中的应用研究[J]. 江西电力, 2014, 38(6): 72-74.
- [3] Xi Q, Li Q S, Yang X F, et al. Application of digital X-ray flaw detection technology in ceramic parts detection[J]. Nondestructive Inspection, 2015, 39(5): 46-48.
奚清, 李启寿, 杨晓峰, 等. 数字式X射线探伤技术在陶瓷零件检测中的应用[J]. 无损探伤, 2015, 39(5): 46-48.
- [4] Xi Q, Chen H, Li Q, et al. Measurement of product defects based on the X ray real time imaging detection [J]. Nondestructive Testing, 2017, 39(2): 61-63, 66.
奚清, 陈慧, 李强, 等. 基于X射线实时成像技术的产品缺陷检测[J]. 无损检测, 2017, 39(2): 61-63, 66.
- [5] Zhang L X. X-ray film digitizer and weld image defect detection and identification system in non-destructive testing[J]. Journal of Xi'an Technological University, 2019, 39(3): 335.
张立新. 无损检测中焊缝X射线底片数字化仪及焊缝图像缺陷检测识别系统[J]. 西安工业大学学报, 2019, 39(3): 335.
- [6] Mery D, Filbert D. Automated flaw detection in aluminum castings based on the tracking of potential defects in a radioscopic image sequence [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2002, 18(6): 890-901.
- [7] Zhou Y H, Wang J C, Wang Y N, et al. X-ray detection for foreign body defect in GIS [J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(1): 41-46, 53.
周艺环, 王嘉琛, 王亚楠, 等. GIS设备异物缺陷X射线检测研究[J]. 高压电器, 2019, 55(1): 41-46, 53.
- [8] Liu Y Z, Wang Y. Application of industrial CT in defect detection of resin matrix composites [J]. Shandong Industrial Technology, 2018(13): 29.
刘艳珍, 王燕. 工业CT在树脂基复合材料缺陷检测中的应用[J]. 山东工业技术, 2018(13): 29.
- [9] Zhang Z, Fan X N, Zhang X W. A fast learning-based super-resolution method for copper strip defect image[J]. Modern Physics Letters B, 2017, 31(19/20/21): 1740042.
- [10] Wang T, Chen Y, Qiao M N, et al. A fast and robust convolutional neural network-based defect detection model in product quality control [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 94(9/10/11/12): 3465-3471.
- [11] Boaretto N, Centeno T M. Automated detection of welding defects in pipelines from radiographic images DWDI[J]. NDT & E International, 2017, 86: 7-13.
- [12] An Z Q, Wang Y. A metal surface defect detection method based on nonlinear diffusion and image difference[J]. Surface Technology, 2018, 47(6): 277-283.
安宗权, 王匀. 一种非线性扩散与图像差分的金属表面缺陷检测方法[J]. 表面技术, 2018, 47(6): 277-283.
- [13] Yu Y W, Du L Q, Zeng C L, et al. Automatic localization method of small casting defect based on deep learning feature[J]. Chinese Journal of Scientific

- Instrument, 2016, 37(6): 1364-1370.
- 余永维, 杜柳青, 曾翠兰, 等. 基于深度学习特征匹配的铸件微小缺陷自动定位方法[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(6): 1364-1370.
- [14] Zuiderveld K. Contrast limited adaptive histogram equalization[M]//Heckbert P S. Graphics gems IV. Amsterdam: Elsevier, 1994: 474-485.
- [15] Lowe D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints [J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2): 91-110.
- [16] Zhang Q, Hao K, Li H B. Research on scale invariant feature transform feature matching based on underwater curve constraint[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(2): 0215003.
- 张强, 郝凯, 李海滨. 水下环境中基于曲线约束的SIFT特征匹配算法研究[J]. 光学学报, 2014, 34(2): 0215003.