双壁结构铸件内部缺陷 X 射线检测定位方法研究

王本志 [1,2,3]

（1. 北京百慕航材高科技股份有限公司特检中心，北京 100094；2. 中国航发北京航空材料研究院铸钛中心，北京 100095；3. 北京市先进钛合金精密成型工程技术研究中心，北京 100095）

摘要：通过 X 射线检测对双壁结构铸件内部缺陷准确定位，进而根据透照结果对超标内部缺陷进行清除和修复，是钛合金铸件生产中需解决的技术难题之一。依据 X 射线检测投影规律分析了缺陷的投影特点，通过双壁结构铸件互成 180°透照两次的结果，进行测量、比较内部缺陷到典型结构的距离大小，得出了缺陷的分布位置，进而在该底片上测量缺陷到第二典型结构特征的距离。结果表明，借助二维影像对双壁结构铸件进行缺陷定位，总结了内部缺陷两点定位法，并结合模拟缺陷验证了定位方法的有效性。该方法可操作性强，在某双壁结构铸件内部缺陷定位和清除中得到应用，提高了缺陷检测准确性。

关键词：X 射线检测；双壁结构；内部缺陷；缺陷定位；两点定位法

DOI：10.3969/j.issn.1674-6457.2018.03.023

中图分类号：TG292 **文献标识码：**A **文章编号：**1674-6457(2018)03-0126-05

Defect Locating Method for X-ray Radiography of Double-wall Structure Castings

WANG Ben-zhi[1,2,3]

(1. Baimtec Material, Co. Ltd., Special Inspection Center, Beijing 100094, China;
2. Titanium Casting Center, AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China;
3. Beijing Engineering Research Center of Advanced Titanium Alloy Precision Forming Technology, Beijing 100095, China)

ABSTRACT: It is one of the technical problems to accurately locate internal defects of double-wall structure castings by X-ray detection, and then remove and repair the internal defects according to the result of transmission. This paper, based on projection rules of X-ray radiography, analyzed the projection results of internal defects. Two shots on the double-wall parts on opposite were taken to measure and compare the distance from internal defects to typical structure. The defect distribution was obtained and the distance from the defect to the second typical structure was measured on the negative film. Defects in the double-wall structure casting could be located through two-dimensional image. The two-point defect locating method was summarized. The validity of the locating method was verified in combination with simulation. This method is easy operable and has been applied to locate and remove the defects in a double-wall structure casting effectively.

KEY WORDS: X-ray radiography; double-wall structure; internal defect; defectlocating; two-point locating method

受铸件结构、铸造水平等因素的限制，铸件内部存在缺陷的情况是难以避免的，这些缺陷如果无法准确检测出来，会在后续应用中存在很大隐患，造成铸件的可靠性、疲劳寿命大大降低。随着铸件结构越来越复杂，这个问题越来越突出。如何设计 X 射线检测透照工艺，如何依据底片快速、精确地对铸件内部缺陷进行定位和清除，显得尤为重要。

在 X 射线检测过程中，受铸件结构限制或为减少曝光次数以提高效率等原因，使得双壁（或多壁）透照技术的应用较为普遍。此时，底片上的影像是各层结构投影叠加的结果，若存在缺陷，底片不能准确、有效地反应缺陷的分布位置。因难以确定缺陷在铸件

收稿日期：2018-04-19

作者简介：王本志（1981—），男，硕士，工程师，主要研究方向为无损检测、产品尺寸测量等。

多层结构的位置，在缺陷修复时，易出现定位不准的情况，造成返工，同时对铸件无缺陷位置造成不必要的损伤[1—3]，对无缺陷部位进行打磨、焊接，造成合金力学性能下降，同时增加铸件表面粗糙度。

国内外不少学者对缺陷定位进行了大量研究，并已取得显著成果，建立了各种确定缺陷在厚度方向分布位置的方法，如超声检测法及体视法、视差法、黑度计法等[4—5,9—12]。工业 CT 断层扫描技术是一种采用 X 射线断层成像原理进行高分辨三维成像的方法，具有成像分辨率高，能够直观显示材料及内部缺陷三维形态的特点，同时也可给出了缺陷埋藏深度信息，非常适合小铸件的高分辨率三维成像检测[6—8]，但工业 CT 系统设备投资大，检测耗时长，同时对于累积透照厚度大的大中型复杂结构铸件，需配备较大功率的射线机或加速器设备，在产业化制造过程中应用局限性大。

本项目旨在研究一种 X 射线检测内部缺陷的有效定位方法，通过该方法，在 X 射线检测过程中，采用双壁透照快速、准确、低成本地对缺陷进行定位，可以减少铸件打磨、修补过程中，因缺陷定位不准造成的不必要返工返修和铸件损伤，降低焊接产生缺陷及影响基体力学性能的风险，同时有助于实现缺陷精准定位，提高返修合格率，缩短生产周期。

1　原理

1.1　射线检测的基本原理

当射线束透照物体时，如果物体局部区域存在缺陷或结构存在差异，它将改变物体对射线的衰减，使得不同部位透射射线强度不同，在底片上形成黑度差，就可以判断物体内部的缺陷或物质分布。实际射线检测中，对于宽束射线，考虑宽束连续谱射线的衰减规律，针对实际铸件中的缺陷，缺陷部位的黑度差用下式表达：

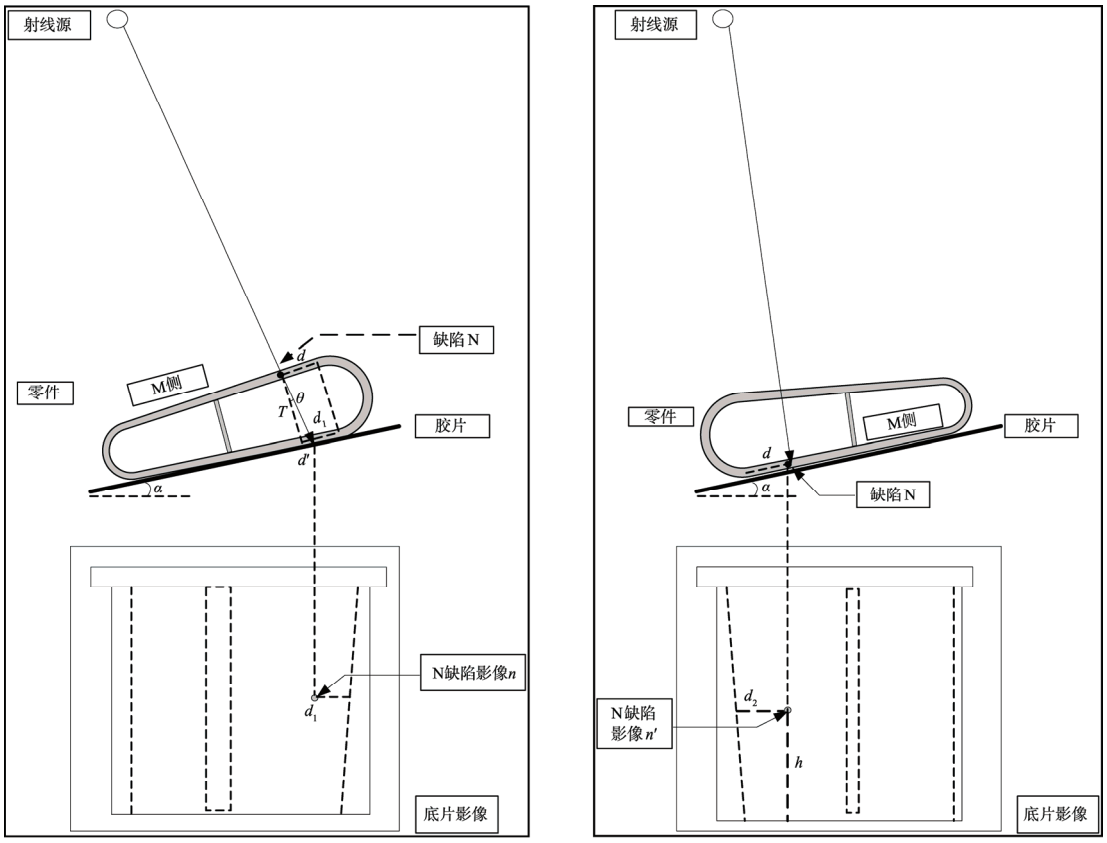
$$\Delta D = -\frac{0.434(\mu - \mu')G\Delta T}{1+n}$$

式中：ΔD 为缺陷位置缺陷与基体本身的黑度差；μ 基体的线衰减系数；μ'缺陷的线衰减系数；G 为底片的梯度；ΔT 缺陷的厚度差；n 与射线机相关的常数。

缺陷能否在底片上形成足够的黑度差，跟以上众多因素有关[13]，也是射线检测内部缺陷的基本原理。

1.2　射线成像特点

射线检测底片上的图像是铸件沿厚度方向所有信息投影叠加后的结果，铸件内部缺陷在厚度方向上的位置信息和缺陷在厚度方向的尺寸，在底片上没有得到有效、清晰地反映。如图 1 所示为铸件互成 180°



a 透照布置及底片影像　　b 图a中铸件翻转180° 的结果

图 1　某双壁结构铸件透照及投影

Fig.1 A diagram detection and projection of a double-wall casting

透照两次的示意图。示意图中某双壁结构铸件的 M 侧有缺陷 N，两次透照后得到的底片上，缺陷形成的影像分别为 n 和 n'。设铸件厚度为 T，缺陷 D 距铸件某边界结构的距离为 d。

在图 1a 中，测得影像 n 距边界结构(垂直方向)的距离为 d_1，则 $d=d_1+d'$，其中 d' 可以近似的表达为 $d'=T\cdot\tan\theta$。即 $d=d_1+T\cdot\tan\theta$，其中，当对于某一确定缺陷，在本透照布置下，θ 为常量。

在图 1b 中，测得影像 n' 距边界结构的距离为 d_2。此时，铸件旋转 180°，缺陷 N 位于的 M 侧紧贴底片，$d=d_2$。

即在双壁结构中，按图 1 方式进行透照时，当缺陷位于 M 面时，则有 $d_2>d_1$，反之亦成立，即若在底片上测得 $d_2>d_1$，则缺陷在铸件的 M 面，此时测量缺陷至口部边界(水平方向)的距离 h，此时缺陷的位置可以用(d_2, h)表示，这种通过测量 d_2 和 h 进行缺陷定位的方法称为两点定位法。在铸件 M 面，距边界结构距离为 d_2，距口部边界距离为 h 的点具有唯一性，这样实现了缺陷的准确定位，为缺陷的打磨、补焊等后续修复奠定了基础。

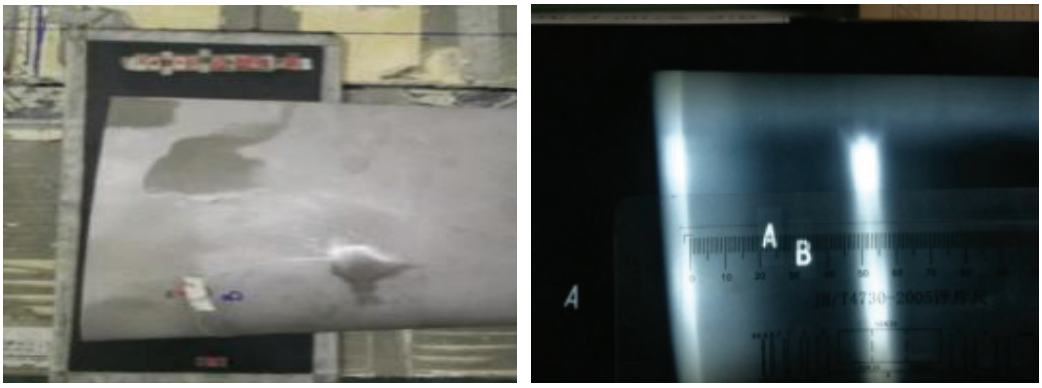
2 试验验证

为验证上述结论，进行模拟实验，A 面缺陷用铅字 A 模拟，B 面缺陷用铅字 B 模拟，透照示意图及底片影像见图 2，其中图 2a 中，缺陷 A 紧贴胶片，图 2b 中铸件翻转 180°，缺陷 B 紧贴胶片。

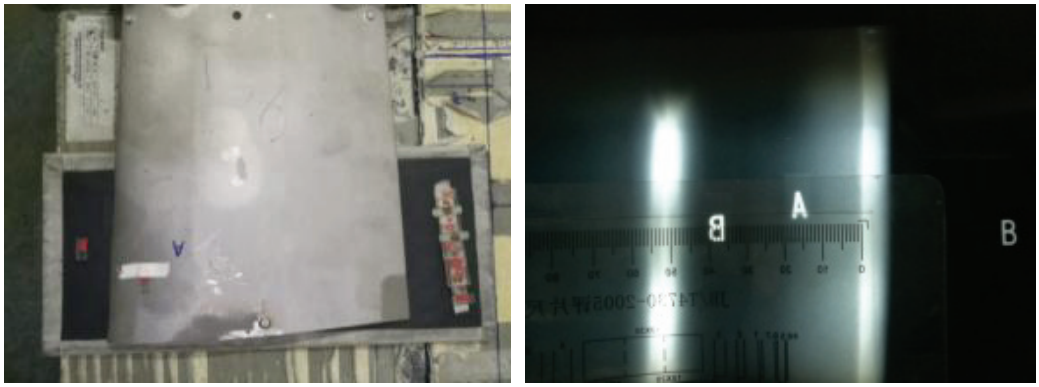
对缺陷 A，图 2a 中距垂直方向边界距离 a_A=20 mm，图 2b 中距垂直边界距离 a_B=13 mm，$a_A>a_B$，缺陷 A 在双壁铸件的 A 侧。

对缺陷 B，图 2a 中距垂直方向边界距离 b_A=30 mm，图 2b 中距垂直边界距离 b_B=35 mm，$b_A<b_B$，缺陷 B 在双壁铸件的 B 侧。

判定结果与模拟缺陷 A 和 B 的位置一致，验证了本方法的正确性。



a 透照布置及底片影像



b 图 a 中铸件翻转 180°的结果

图 2 模拟实验透照布置及透照结果

Fig.2 Simulation detected method and inspection result

3 双壁结构铸件射线检测两点定位法具体实施步骤

判断双壁结构铸件缺陷在厚度方向的位置和尺寸，对缺陷的修补工艺制定和判定缺陷的危害性等方面是很有必要的，即可有效地减少修补工作量，又能很好地保证修补质量[5]。结合本研究中射线检测中缺陷定位的两点定位方法，结合某型号产品（具有典型双壁结构）的 X 射线检测结果，说明两点定位法实施步骤，示意图见图 3。

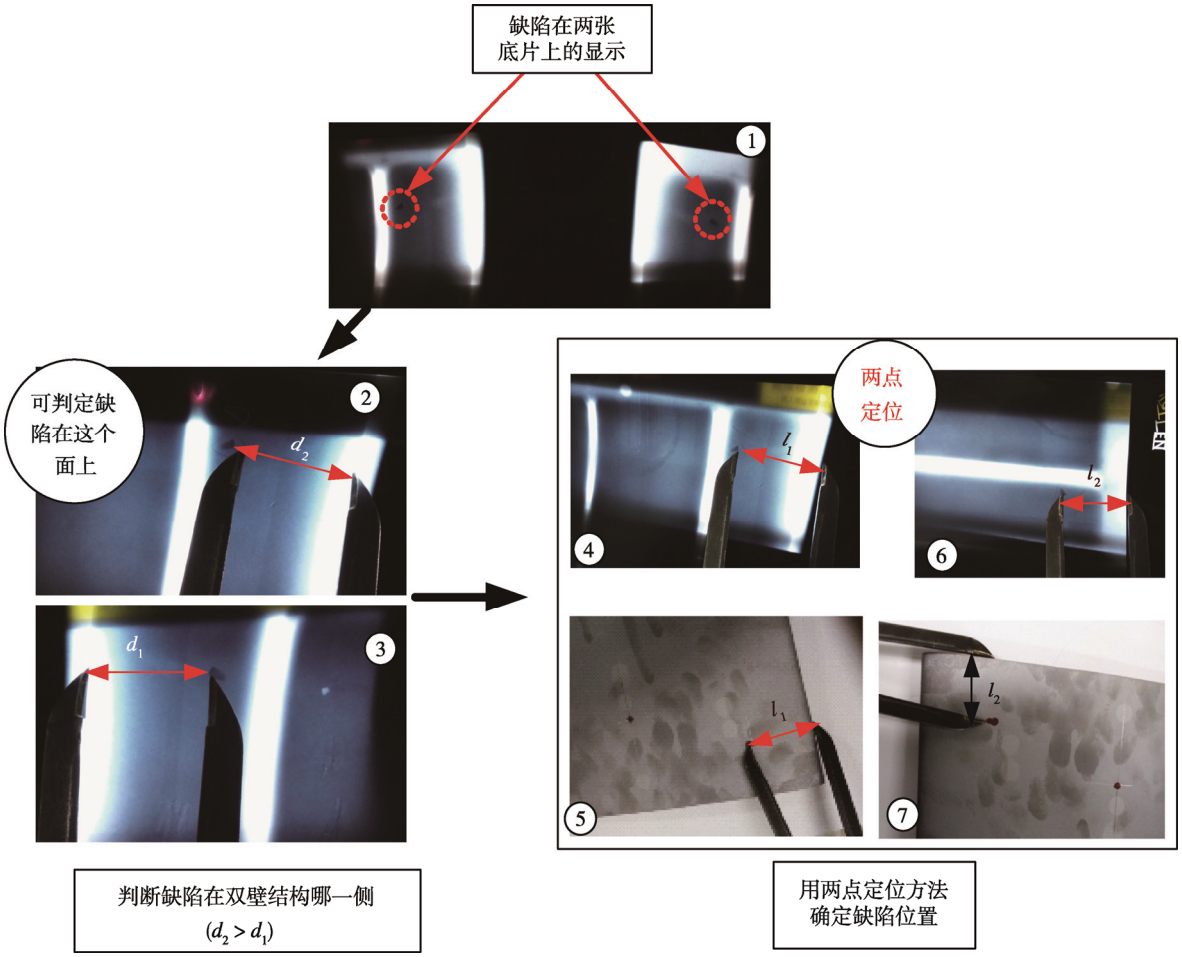


图 3　双壁结构内部缺陷的两点定位

Fig.3 Two-point locating method of double-wall structure

两点定位法详细步骤：

1) 对铸件的双壁部位互成 180°进行两次透照，获得图中①所示的两张底片 1#和 2#，发现缺陷在两张底片上均有显示。

2) 使用画规在 1#底片上测量缺陷到图像边界(垂直方向)的距离 d_1。

3) 在底片 2#中测量缺陷到图像特征边界(垂直方向)的距离 d_2，比较 d_1 和 d_2 的大小（缺陷在距离大的一侧，即若 $d_1 > d_2$，则缺陷在双壁结构中铸件紧贴底片 1#的一侧，后续测量时使用 1#底片，反之则缺陷在双壁结构中铸件紧贴 2#底片的一侧，后续测量时应使用 2#底片。下文中为便于描述，假设通过前述步骤，已确定缺陷在双壁结构中铸件紧贴 1#底片的一侧）。使用图像特征边界的目的在于减小射线检测中“边蚀效应”带来的误差。

4) 在 1#底片上测量缺陷到铸件图像外边界(垂直方向)边沿的距离 l_1。测量 l_1 时使用铸件图像外边界，目的在于该尺寸可以从底片转移到铸件上。

5) 保持画规处于锁紧状态，以画规 l_1 的长度在双壁结构中铸件紧贴 1#底片的一侧划线。

6) 在 1#底片上测量缺陷到铸件口部边界(水平方向)的距离 l_2。

7) 保持画规处于锁紧状态，以画规 l_2 的长度从口部边界划线。

8) 通过上述步骤得到两条线的交点，就是通过两点定位法得到的缺陷准确位置，对该位置实施打磨、补焊等后续工作即可。

4　结论

文中通过两次不同方向透照，采用简便测量的方法，建立了双壁结构铸件内部缺陷 X 射线检测方法定位方法——两点定位法。该方法应用到双壁结构铸件内部缺陷定位、打磨及修复中，缺陷定位准确、效率高、可操作性强，缺陷定位准确率达到 98%以上。

参考文献：

[1]　张军辉. 钛合金焊接结构缺陷检测与定位方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
ZHANG Jun-hui. Defects Detection and Localization of Titanium Alloys Weldment[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008.

[2] 杨飞. X 射线数字成像中的缺陷定位检测技术研究[D]. 太原: 华北工学院, 2003.
YANG Fei. Study on Locating Defects by Digital Radiography[D]. Taiyuan: North University of China, 2003.

[3] 贾庆龙, 苏志军, 成曙, 等. 固体火箭发动机射线照相缺陷定位法[J]. 无损检测, 2014, 36(2): 14—16.
JIA Qing-long, SU Zhi-jun, CHENG Shu, et al. Locating Defects Method in SRM[J]. Nondestructive Testing, 2014, 36(2): 14—16.

[4] BRICAULTI, MONGA O. From Volume Medical Image to Quadratic Surface Patches[J]. Computer Vision and Image Understanding, 1995, 67(1): 23—38.

[5] 李衍, 屠耀元, 郑世才. 射线照相检验中的缺陷定量[J]. 无损检测, 1992, 14(9): 262—266.
LI Yan, TU Yao-yuan, ZHENG Shi-cai. Quantitative Research on Defects in X-ray Radiography[J]. Nondestructive Testing, 1992, 14(9): 262—266.

[6] 卢长勋. 射线检验缺陷深度定位新方法[C]. 2002 年晋冀鲁豫鄂蒙川沪云贵甘十一省市区机械工程学会学术年会, 2002: 198—199.
LU Chang-xun. New Method of Locating Defects in X-ray Radiography[C]. Academic Annual Meeting of the Mechanical Engineering Society, 2002: 198—199.

[7] 喻程, 吴圣川, 胡雅楠, 等. 铝合金熔焊微气孔的三维同步辐射 X 射线成像[J]. 金属学报, 2015, 51(2): 159—168.
YU Cheng, WU Sheng-chuan, HU Ya-nan, et al. Three-dimensionalimaging of Gas Pores in Fusion Welded Al Alloys by Synchrotron Radiation X-ray Microtomography[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2015, 51(2): 159—168.

[8] 敖波, 王乃波, 何深远, 等. 小管路焊缝内部缺陷的三维 X 射线成像[J]. 焊接学报, 2016, 37(5): 11—14.
AO Bo, WANG Nai-bo, HE Shen-yuan, et al. Three Dimensional Imaging of Internal Defects in Small Diameter Pipe Welding Seam by X ray Microtomography[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37(5): 11—14.

[9] 迟大钊, 李孙珏, 孙昌立, 等. 基于双目视觉的缺陷深度测量方法[J]. 焊接学报, 2016, 37(11): 7—10.
CHI Da-zhao, LI Sun-ju, SUN Chang-li, et al. Binocular Visual Based Defect Buried Depth Testing Method[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37(11): 7—10.

[10] 阳雷. 联箱盖与管板焊缝 X 射线检测缺陷定位技术研究[J]. 中国核动力研究设计院科学技术年报, 2014: 366—367.
YANG Lei. Research on Locating Defects Method in Couplet Cover and Plate-pipe Welds[J]. Annual Report of Science and Technology of NPIC, 2014: 366—367.

[11] 梁德群, 沈杉, 杨海军. 基于点光源 X 射线焊缝缺陷深度尺寸的测量[J]. 焊接学报, 2000, 21(3): 5—8.
LIANG De-qun, SHEN Shan, YANG Hai-jun. Three Dimensional Imaging of Internal Defects in Small Diameter Pipe Welding Seam by X ray Microtomography[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2000, 21(3): 5—8.

[12] 任明照, 高岩. 基于视差法的焊接缺陷深度定位技术[J]. 焊接技术, 2003, 32(6): 49—50.
REN Ming-zhao, GAO Yan. Depth Location Technology of Welding Defects Based on Parallax Method[J]. Welding Technology, 2003, 32(6): 49—50.

[13] 郑世才. 射线检测[M]. 北京: 中国机械工业出版社, 2008.
ZHENG Shi-cai. X-ray Radiography[M]. Beijing: China Machine Press, 2008.