

空心叶片残留型芯影像的射线照相对比度

郭广平^{1,2}, 凌海军¹, 刘庆珍², 任吉林¹

(1. 南昌航空大学 无损检测技术教育部重点实验室, 南昌 330063; 2. 北京航空材料研究院, 北京 100095)

摘要:从型芯影像射线照相对比度的角度分析了残芯在叶片中的可检性。通过推导的残芯影像对比度公式, 分析了影像对比度的各种影响因素, 并在理论上进行了计算。从试验与理论计算相比较的结果表明, 通过改善梯度和散射能有效地提高型芯影像的对比度。得出型芯在叶片材料上的最小可检厚度。

关键词:空心叶片; 残留型芯; 射线检测; 影像对比度; 散射比

中图分类号: TG115. 28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2009)07-0544-04

The Radiographic Image Contrast of Residual Ceramic Cores in Hollow Blades

GUO Guang-Ping^{1,2}, LING Hai-Jun¹, LIU Qing-Zhen², REN Ji-Lin¹

(1. Ministry of Education Key Laboratory on Nondestructive Test, Nanchang HangKong University, Nanchang 330063, China; 2. Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

Abstract: The paper aimed to evaluate whether the residual ceramic core in a hollow blade could be found through analyzing the residual ceramic core's image of radiographic contrast. Moreover, it analyzed some important influence factors of imaging contrast which could be deduced from the formula of image's radiographic contrast. Furthermore, some values under certain energy were also calculated through the formula. In addition, through comparing the results of experiment with the calculating results according to the formula, it was shown that the image contrast could be increased efficiently by improving the grads of film and the scattering ratio of X-ray. Finally, the minimum ceramic core's thickness which could be tested on the material of blades was also acquired.

Keywords: Hollow blade; Residual ceramic core; Radiographic testing; Image contrast; Scattering ratio

随着国内外熔模铸造技术的发展, 铸造叶片从最初的实心叶片发展为空心叶片, 有加工余量叶片发展为无余量叶片, 以及定向、单晶空心无余量叶片。叶片的外形和内腔越来越复杂, 对叶片的质量要求不断提高^[1]。

制造空心叶片包括制芯、制模、制壳、浇注和脱芯等工序。叶片脱芯后, 经常会在叶片的型腔上发现有型芯材料(陶瓷)残留物, 这必然会阻碍冷却空气的畅通, 降低冷却效果, 极易造成重大事故。所以, 很有必要对叶片进行残芯检查^[2]。

利用 X 射线照相检测残芯是目前应用较广泛的方法, 笔者从残芯在底片上所成影像对比度的角度作了分析和试验。

1 理论分析^[3]

射线检测空心叶片中的残芯, 可以将残芯放在特定厚度、用叶片材料制成的试块上进行模拟。其所成的影像对比度即是其与空气在底片上所成黑度的反差, 原理图如图 1 所示。

1.1 衰减系数

衰减系数 μ 是射线衰减规律中的一个很重要的参数, 因此在讨论影像对比度之前, 有必要先对型芯、空气和叶片三者的衰减系数作一个计算。

以单晶叶片和其中的氧化铝陶瓷型芯为例, 查阅相关元素衰减特性手册和资料^[4], 计算出氧化铝

收稿日期: 2008-10-07

作者简介:郭广平(1969—), 男, 博士, 研究员, 主要从事无损检测和力学性能测试研究。研究方向包括复合材料和精密铸件的无损检测, 以及材料力学性能测试。在光学、红外、超声 C 扫描等检测技术领域进行了深入的研究。

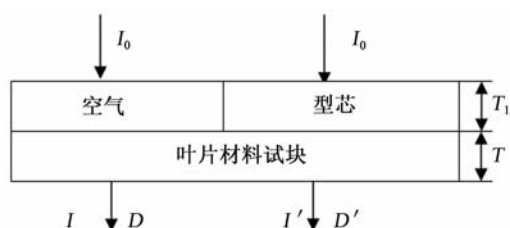


图1 型芯、空气和叶片三者的射线透照原理图

表1 型芯、空气和 DD6 叶片在不同射线能量下的衰减系数

射线 能量/ $\times 10^{13} \text{ J}$	$\frac{\mu}{\rho} / (\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1})$			μ / cm^{-1}		
	型芯	空气	叶片	型芯	空气	叶片
0.096	0.232	0.186	1.569	0.552	0.240×10^{-3}	13.772
0.128	0.184	0.166	1.709	0.438	0.215×10^{-3}	15.006
0.160	0.163	0.155	0.996	0.388	0.200×10^{-3}	8.748
0.240	0.138	0.136	0.401	0.328	0.176×10^{-3}	3.517
0.320	0.123	0.123	0.238	0.293	0.159×10^{-3}	2.094
0.480	0.105	0.107	0.140	0.250	0.138×10^{-3}	1.227

注: $\rho_{\text{空气}} = 1.29 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$; $\rho_{\text{型芯}} = 2.38 \text{ g/cm}^3$; $\rho_{\text{DD6}} = 8.78 \text{ g/cm}^3$ 。

型芯、空气和 DD6 叶片三者的衰减系数(表1)。

1.2 影像对比度

由图1推得型芯影像的黑度差 ΔD 为^[3]:

$$\Delta D = -\frac{0.434 \times (\mu_{\text{型}} - \mu_{\text{空}}) G T_1}{1 + n}$$

式中 T_1 为型芯厚度; n 为散射比。从表1可见, $\mu_{\text{空}} \ll \mu_{\text{型}}$ 。因此,型芯影像对比度可近似为:

$$\Delta D = -\frac{0.434 \mu_{\text{型}} G T_1}{1 + n} \quad (1)$$

由式(1)可见,空心叶片中型芯影像的射线照相对比度主要取决于型芯的线衰减系数、型芯厚度以及胶片梯度和散射的控制。以下将对主要因素作进一步的分析。

1.2.1 线衰减系数

从表1可以看出,型芯的线衰减系数数值不是

很大,且改变也很小。因此型芯的线衰减系数对于型芯影像对比度的影响有限。

1.2.2 胶片梯度

胶片梯度与影像对比度成正比例关系,采用梯度更高的胶片以及通过提高底片黑度的方法来获得更高梯度都将有利于提高影像对比度。由图2(a)和(b)可算出,在200~220 kV时,AA400胶片的平均梯度 $\bar{G}=4.6$,MX125胶片的平均梯度 $\bar{G}=5.3$ 。图3中非增感型胶片梯度随黑度的增加持续增加(见曲线A和B,可延续到12~16)。黑度为4.0时的梯度是2.0时梯度的2倍。可见黑度的增加能有效地提高影像对比度。

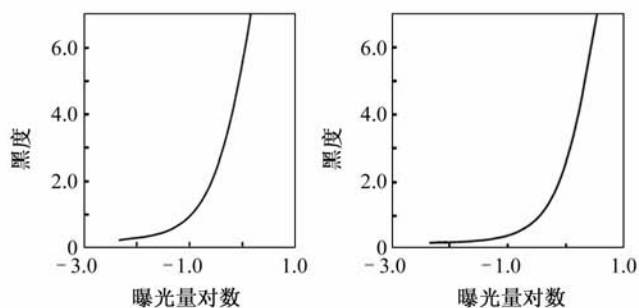
1.2.3 散射比

散射线对影像质量可产生重要的影响,主要表现在两个方面:降低影像的对比度和产生“边蚀”^[3]。影响散射比的因素有很多,它与射线的能量、物体的材料、厚度和面积都相关^[3]。在工业射线照相应用范围内,散射比随射线能量增大而变小,而在相同射线能量下,散射比随厚度增大而增大。相关文献中介绍了钢材中散射比与钢板厚度关系(图4)的试验^[5-6],由于DD6材料密度与钢的密度相差不大,因此笔者将参考该试验数据,作为DD6材料的散射比与板厚关系。

根据型芯影像对比度公式,以及已算得的残芯的线衰减系数、梯度和散射比,可近似计算出在200~220 kV电压下($\mu=0.293$, $\bar{G}_{\text{AA400}}=4.6$, $\bar{G}_{\text{MX125}}=5.3$, $n_{T=10 \text{ mm}} \approx 1$),不同厚度的残芯影像对比度(表2)。

表2 200~220 kV电压下不同厚度残芯的影像对比度

残芯厚度/mm	ΔD_{AA400}	ΔD_{MX125}	残芯厚度/cm	ΔD_{AA400}	ΔD_{MX125}
0.10	0.003	0.003	0.198	0.058	0.067
0.56	0.016	0.019	0.250	0.073	0.084
1.08	0.032	0.036	0.300	0.088	0.101
1.46	0.043	0.049			



(a) AA 400

(b) MX 125

图2 胶片特性曲线

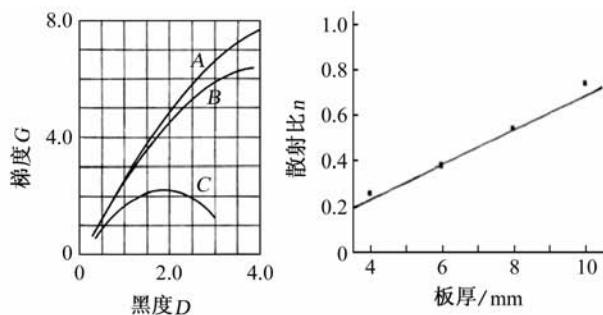


图3 胶片的梯度与黑度关系

图4 板厚与散射比关系图

可见,理论上 10 mm 厚的 DD6 试块上能够大概分辨出 0.5 mm 厚的残芯(较大点状影像对比度大于 0.006 时可识别^[3])。

2 试验

2.1 试验器材

(1) 根据叶片的最大厚度,制作了一块厚 12 mm 的 DD6 试块(长 100 mm,宽 25 mm)以及厚度在 0.5~5 mm 范围内(长约 100 mm,宽 5 mm)的氧化钨陶瓷型芯试片。

(2) X 射线机为 GE ISOVOLT 320/13。

(3) 胶片为 KODAK,AA 400/MX 125。

(4) 显影和定影液为中科院感光所 DS-II 和 KODAK INDUSTREX。

(5) 密度计为 DM2011,标称值 0~5 D,不确定度 0.05。

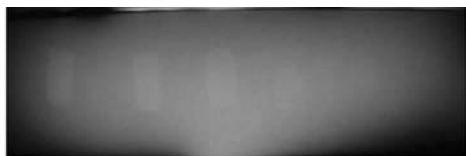
2.2 试验过程及数据

2.2.1 改变曝光量对梯度 G 的影响

其它参数保持不变,只改变曝光量。透照参数如下:电压 230 kV;电流 15 mA;曝光时间 2 min(使底片黑度达到 2.0 左右)和 3 min(使底片黑度达到 3.0 左右);焦距 1 500 mm;胶片 AA400,采用前后铅增感屏 Pb0.03;感光显定影液,周围采用铅屏蔽防护散射射线。得到 2 min 时曝光底片如图 5(a),3 min 时曝光底片如图 5(b)。采用密度计测量底片黑度,其测量结果见表 3。



(a) 曝光 2 min 时



(b) 曝光 3 min 时

图 5 不同曝光量下的底片

将以上影像对比度试验值与表 2 中理论值进行比较,如图 6 所示。

2.2.2 改变管电压对 μ 值的影响

采用不同的电压,使底片的黑度基本相同。透照参数如下:曝光量为 200 kV,20 mA · 3.7 min

表 3 不同曝光量下型芯影像黑度及质量

型芯厚度/mm	230 kV, 15 mA · 2 min			230 kV, 15 mA · 3 min		
	质量	ΔD	平均黑度 \bar{D}	质量	ΔD	平均黑度 \bar{D}
0.56	模糊	0.02	1.91	可见	0.03	2.74
1.08	模糊	0.02	1.85	可见	0.04	2.60
1.46	可见	0.03	1.86	清晰	0.05	2.57
1.98	可见	0.04	1.92	清晰	0.06	2.59
2.50	清晰	0.06	2.16	清晰	0.11	2.84

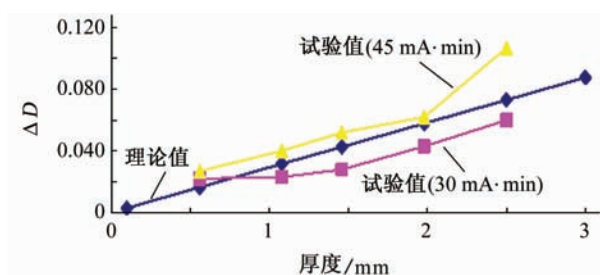


图 6 试验值与理论值的比较

和 230 kV, 15 mA · 2 min; 焦距 800 mm; 胶片 MX125, 前后铅增感屏 Pb0.03; 柯达显定影液 (7 min, 27 °C); 周围采用铅屏蔽防护散射射线。试验所得底片见图 7。采用密度计测量底片黑度, 其测量结果见表 4。



(a) 200 kV, 20 mA · 3.7 min



(b) 230 kV, 15 mA · 2 min

图 7 不同管电压下的底片

表 4 不同曝光量下型芯影像黑度及质量

型芯厚度/mm	200 kV, 20 mA · 3.7 min			230 kV, 15 mA · 2 min		
	质量	ΔD	平均黑度 \bar{D}	质量	ΔD	平均黑度 \bar{D}
0.56	模糊	0.02	2.87	模糊	0.02	2.80
1.08	可见	0.04	2.84	清晰	0.05	2.78
1.46	清晰	0.06	2.76	清晰	0.06	2.80
1.98	清晰	0.08	2.74	清晰	0.10	2.84
2.50	清晰	0.12	2.79	清晰	0.13	2.85

将以上影像对比度试验值与表 2 中理论值做一个比较,如图 8 所示。

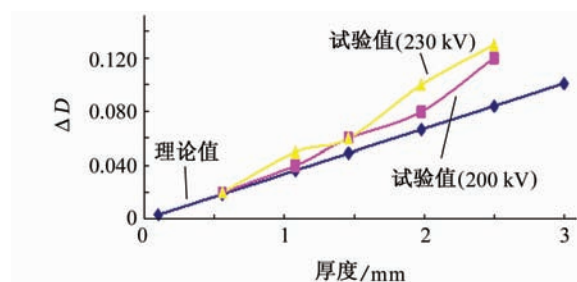


图 8 试验值与理论值的比较

2.2.3 散射比 n 的影响

从底片的照片和试验数据结果可以看出,通过在试块周围增加铅屏蔽防护散射线,有效地降低了边蚀,提高了影像对比度。

3 结论

(1) 在合适的电压下,适当增加曝光量,控制底片的黑度在 3.0 左右,能有效地增加梯度值,提高了残芯的影像对比度。

(2) 残芯的线衰减系数 μ 在能量改变较小的情

况下,对残芯的影像对比度基本没有影响。因此,可以采用稍高的电压以达到较大的黑度,从而增加梯度 G 来增大型芯的影像对比度。

(3) 试块周围增加铅屏蔽防护散射线,能有效降低边蚀,提高影像对比度。

试验证明了采用合适的参数,在 12 mm 厚的 DD6 试块上至少可以检测出 0.56 mm 厚的残芯。

参考文献:

- [1] 陈荣章. 航空铸造涡轮叶片合金和工艺发展的回顾与展望[J]. 航空制造技术, 2002, (2): 19—23.
- [2] 张立同, 曹腊梅, 刘国利, 等. 近净形熔模精密铸造理论与实践[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- [3] 国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证培训教材编审委员会. 射线检测[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [4] 美国无损检测学会. 美国无损检测手册·射线卷[M]. 上海: 世界图书出版公司, 1992.
- [5] 兑卫真, 杨晓华. 金属材料 X 射线散射比的测定[J]. 热处理, 2001, (2), 29—31.
- [6] 日本无损检测协会, 编. 射线探伤 B[M]. 李衍, 译. 北京: 机械工业出版社, 1988.

(上接第 543 页)

冲杆于聚合物之间的透射率高于金属缓冲杆。

(2) 锥角为 2° 的变直径 PEEK 缓冲杆能很好地抑制脉冲回波尾随信号, 有很高的信噪比, 有利于特征信号的提取。

(3) 通过水冷装置对 PEEK 缓冲杆进行降温, 能够使超声波探头不受挤出机的高温影响, 水包覆对 PEEK 缓冲杆身冷却时, 特征回波幅值略有减小, 但对尾随信号有一定抑制作用。

(4) PEEK 缓冲杆测头在 160°C 以上时特征信号幅值受温度影响变化很大。在 160°C 以下时, 当温度稳定, 特征回波趋于稳定。PEEK 缓冲杆能用于在线监测熔融温度低于 160°C 的聚合物共混物的混合状态。

参考文献:

- [1] 袁可, 尹应武, 廖翠莺, 等. 聚丙烯/甘氨酸改性碳酸钙

复合材料的研究[J]. 化工新型材料, 2008, 36(2): 69.

- [2] 杨, 邹素华. 聚丙烯/碳酸钙复合材料的性能研究[J]. 塑料, 2007, 36(6): 5—7.
- [3] Sun Z, Jen C K, Shih application of ultrasound in the determination of fundamental extrusion performance: residence time distribution measurement[J]. Polymer Engineering and Science, 2003, 43(1): 102—111
- [4] Jen C K, Cao B, Nguyen K T, et al. On-line ultrasonic monitoring of a die-casting process using buffer rods[J]. Ultrasonics, 1997, 35(6): 335—344.
- [5] Jena C K, Legoux J G, Parent L. Experimental evaluation of clad metallic buffer rods for high temperature ultrasonic measurements[J]. NDT&E International, 2000, 33(3): 145—153.
- [6] 王爽, 王召巴, 郑建利, 等. 超声缓冲杆仿真研究[J]. 无损检测, 2008, 30(5): 307—309.
- [7] 王爽, 王召巴, 陈友兴. 物料检测超声缓冲杆研究. 弹箭与制导学报, 2008, 28(1): 297—306.

欢迎网上投稿 欢迎订阅 欢迎刊登广告