

高压涡轮叶片超声测厚的工艺方法

董德秀, 朱 萍

(沈阳黎明航空发动机(集团)有限责任公司 产品检验检测中心, 沈阳 110043)

摘 要:针对高压涡轮叶片内腔气冷通道复杂、叶身型面扭角大等特点,选择了合适的超声波测厚仪及探头,制作了超声测厚标准件、叶片空间点定位模板。通过对叶片叶身测量点进行超声测厚工艺试验,确定了高压涡轮叶片超声测厚工艺参数。经与计量检测结果对比、分析,证明了超声测厚结果准确、可靠。

关键词:涡轮叶片;超声测厚;标准件;模板

中图分类号: TG115. 28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2014)02-0029-03

Ultrasonic Gauging Technology for High Pressure Turbine Blade

DONG De-xiu, ZHU Ping

(AVIC Shenyang Liming Aero Engine Group Corporation Ltd, Shenyang 110043, China)

Abstract: Due to the characteristics of high-pressure turbine blade, such as the complex cavity channels and large torsion angle, appropriate ultrasonic thickness gauge, probe, standard part and positioning template are therefore selected. Through ultrasonic thickness measurement experiments on measuring point of blade, procedures of high-pressure turbine blade ultrasonic thickness measurement is determined. As compared with the real thickness, the ultrasonic thickness results are proved accurate and reliable.

Keywords: Turbine blade; Ultrasonic thickness measurement; Standard part; Positioning template

涡轮叶片是航空发动机的重要部件,它在高温燃气包围下工作。涡轮前燃气温度达 1 442 ℃,高压涡轮叶片不仅承受转子高速旋转时叶片自身的离心力、气动力、热应力及振动负荷,而且在热燃气作用下还易于腐蚀。另外,由于发动机的工况不断变化,叶片还得经受冷热疲劳,所以它是发动机中工作条件最为恶劣的零件之一^[1]。因此,在修理过程中,需严格监测叶片型面和壁厚尺寸的变化,尤其是对这种散热和导流效果好的空心叶片,以保证叶片在工作中能够满足所承受的强度。目前空心叶片壁厚一般采用超声波的方法测量。某发动机高压涡轮叶片为 DZ125 合金定向铸造的空心无余量叶片,由于该叶片叶身扭角大,气冷通道十分复杂,不同腔道、同一截面上各点壁厚值不同,因此要想获得准确的

壁厚测量数据,需要开展高压涡轮叶片超声测厚工艺研究。

1 超声测厚原理

超声测厚采用的是超声脉冲反射原理。通过测量由探头产生的超声波在工件中往返一次所需的时间,再根据校准的声速值,计算出试件的厚度^[2]。

2 高压涡轮叶片超声测厚工艺方案

高压涡轮叶片为定向铸造的空心无余量叶片,叶片的外廓尺寸较小,叶身扭角大,内腔结构复杂,叶片叶身外表面及叶片内腔均为曲表面,超声波在叶片中传播声束发散、灵敏度低,曲率较大部位声束发散严重,几乎没有回波,不易测量。再者定向铸造空心无余量叶片的组织具有方向性,不同方向超声波声速不同。因此,高压涡轮叶片超声测厚工艺参数制定是至关重要的。

收稿日期: 2013-04-25

作者简介:董德秀(1969—),女,研究员级高级工程师,主要从事无损检测应用研究。

2.1 仪器、探头选择

高压涡轮叶片的内腔结构复杂,叶身扭角大,超声波检测灵敏度低。超声测厚时,由于叶片曲率较大部位波形经常变化,厚度读数变化,影响超声测厚准确性,有时甚至不显示读数,很难进行厚度测量。因此,应选择具有波形显示及读数功能的超声波测厚仪,具有这种功能的仪器波形清晰且稳定,读数准确,即可通过波形显示判定读数是否准确。笔者选择两种超声测厚仪进行试验。美国生产的便携式超声波测厚仪 25 DL-PIUS,以及俄罗斯生产的固定式超声波测厚仪 YDT45,两者皆可以显示波形以及厚度读数,后者兼有数据储存功能。

超声波探头是组成超声检测系统的最重要组件之一。超声波探头与叶片的接触面面积及反射面的形状直接影响超声波声束进入及叶片内腔反射波的接收。由于叶片叶身为曲面,探头与叶片接触面为线接触,进入叶片的超声波声束发散严重。叶片的内腔为曲面,反射波被探头接收的能量低,因此超声测厚探头形状应充分考虑叶片叶身型面特点,这样探头才能与被检叶片耦合良好,超声波进入叶片能量大、信噪比好、波形显示清晰,故选择表 1 所列三种探头。

表 1 超声测厚探头参数

序号	探头型号	与探头匹配的仪器	探头延迟块端面尺寸/mm
1	M208-20/.125	25 DL-PIUS	$\phi 5$
2	V260-SM 15/.125	25 DL-PIUS	$\phi 2$
3	双晶	YDT45	7×1

经试验,M208 型号探头延迟块端面尺寸为 5 mm,与叶片曲率较大部位不易接触,超声波很难进入叶片;V260 型号探头延迟块端面直径为 2 mm,容易实现与叶片曲率较大部位接触、耦合,但由于 V260 型号探头为笔式,笔杆较长,手持探头不易与被检叶片表面垂直,同时由于探头与叶片接触面积小,反射回波接收困难,检测灵敏度低,很难实现测量。双晶延迟探头端面尺寸为 7 mm×1 mm,这种结构充分考虑了叶片叶身形状特点,将探头沿着叶片叶身放置,探头与叶片接触面积大、耦合效果好,检测灵敏度高。经过大量的试验比较,最终选择 YDT45 超声测厚仪及与之匹配的双晶探头用于高压涡轮叶片的壁厚测量。

2.2 超声波检测标准件的设计与制作

由超声测厚原理可知,厚度值=1/2 声速×时

间,时间可通过仪器测量,声速则需要通过标准件来校准,不同材料、组织状态的零件其声速不同,它直接决定了超声测厚精度。因此高压涡轮叶片超声测厚标准件的材料、组织状态应与被检高压涡轮叶片相同。超声测厚用标准件的材料选择 DZ125 合金,采用与高压涡轮叶片相同工艺参数制造,但 DZ125 合金高压涡轮叶片采用定向结晶工艺铸造,叶片内部组织具有方向性,因此在标准件的制作时要考虑标准件内部组织方向性与叶片内部组织方向性相同。

高压涡轮叶片叶身壁厚范围为 0.50~1.42 mm,标准件的厚度范围应覆盖叶片厚度范围,因此设计了三个不同厚度标准件,厚度尺寸 H 分别为 0.5,1.0,2.0 mm。为了使标准件上、端面平行且不易变形,同时检测时拿取方便,标准件采用了特殊的设计。按设计图制作了一套高压涡轮叶片超声测厚标准件,如图 1 所示。

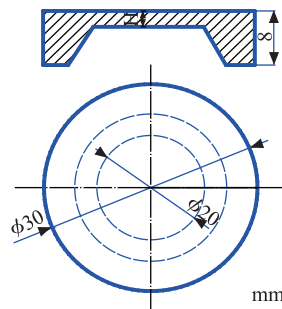


图 1 高压涡轮叶片标准件设计图

2.3 高压涡轮叶片模板制作

高压涡轮叶片叶身为空间曲面结构,叶身上需要测量壁厚的空间点无法用笔直接标记,需要借助特别制作的模板保证测量点位置的准确性。模板采用有一定强度的金属板材制作,制作后的模板与叶片叶身型面贴合,模板上制作定位点,同时模板上制作 $\phi 2$ mm 小孔,方便用记号笔记录叶片叶身测量点。高压涡轮叶片叶盆、叶背型面不同,因此叶盆、叶背均设计并制作了模板。

2.4 试验

2.4.1 超声测厚工艺

以高压涡轮叶片榫头缘板为定位点,该点到叶身不同距离划分为 5 个截面,设计要求其中 II, III, V 截面需要测量壁厚值,叶片每个截面有 7 个型腔,每个型腔的叶盆、叶背均有两点需要控制壁厚,每个截面需要控制壁厚的测量点共 14 点,如图 2 所示。采用 YDT45 超声测厚仪及与之匹配的双晶测厚探头,采用制作的高压涡轮叶片超声测厚标准件、模

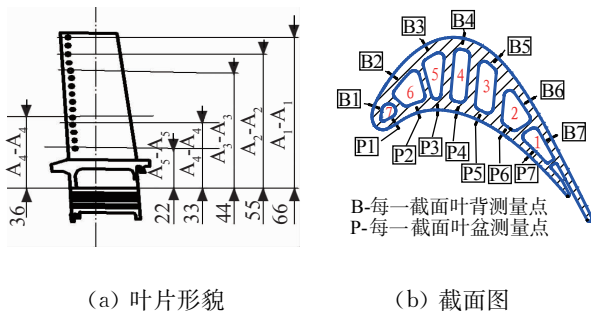


图2 叶片超声波测厚点布置截面图

板,对高压涡轮叶片进行了超声波壁厚测量试验。

2.4.2 超声测厚验证

随机抽取2片已完成超声测厚的高压涡轮叶片,按超声测厚模板标定的截面记号位置进行线切割,得到每个叶片3个截面上超声波测量点的横切面,经计量部门采用JXIB 万能工具显微镜(精度0.01 mm)检测,得到各点的真实壁厚值。超声测量值、计量实测值的对比结果见表2和表3。为了更直观地比较两种测量方法的数据走势,对表2、表3中的测量数据绘制出两种测量方法(超声、计量)的曲线图,如图3所示。

表2 1号叶片超声测量值与计量实测值数据

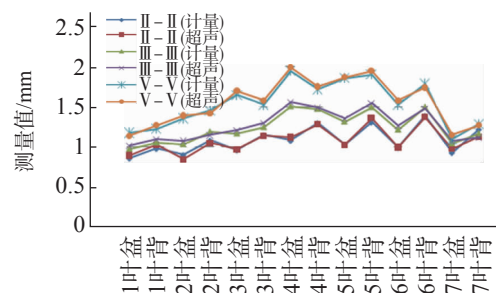
截面测量位置	测量值/mm					
	II-II (计量)	II-II (超声)	III-III (计量)	III-III (超声)	V-V (计量)	V-V (超声)
1叶盆	0.86	0.90	0.98	1.02	1.18	1.14
1叶背	0.98	1.03	1.06	1.10	1.23	1.27
2叶盆	0.90	0.85	1.04	1.08	1.36	1.39
2叶背	1.08	1.05	1.19	1.15	1.46	1.42
3叶盆	0.96	0.97	1.17	1.21	1.65	1.70
3叶背	1.15	1.14	1.25	1.30	1.53	1.58
4叶盆	1.08	1.12	1.51	1.56	1.95	1.99
4叶背	1.30	1.28	1.48	1.49	1.72	1.75
5叶盆	1.03	1.03	1.32	1.36	1.86	1.87
5叶背	1.31	1.36	1.50	1.55	1.91	1.95
6叶盆	0.99	1.00	1.22	1.27	1.53	1.58
6叶背	1.39	1.37	1.50	1.48	1.79	1.74
7叶盆	0.93	0.98	1.05	1.08	1.10	1.15
7叶背	1.22	1.13	1.17	1.12	1.29	1.27

3 结果讨论与分析

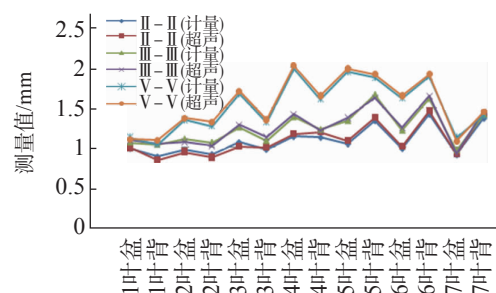
从图3中可以清晰地看出,超声测量值与计量测量值数据走势基本一致。从表2、表3测量结果

表3 2号叶片超声测量值与计量实测值数据

截面测量位置	测量值/mm					
	II-II (计量)	II-II (超声)	III-III (计量)	III-III (超声)	V-V (计量)	V-V (超声)
1叶盆	0.99	1.00	1.07	1.10	1.13	1.10
1叶背	0.89	0.85	1.04	1.05	1.04	1.09
2叶盆	0.97	0.95	1.11	1.08	1.35	1.37
2叶背	0.92	0.88	1.07	1.03	1.27	1.32
3叶盆	1.07	1.02	1.26	1.29	1.68	1.71
3叶背	0.98	1.01	1.09	1.14	1.32	1.35
4叶盆	1.14	1.17	1.39	1.42	1.99	2.03
4叶背	1.13	1.20	1.23	1.22	1.61	1.65
5叶盆	1.05	1.09	1.34	1.38	1.95	1.99
5叶背	1.34	1.38	1.67	1.63	1.88	1.92
6叶盆	0.99	1.02	1.22	1.25	1.62	1.65
6叶背	1.42	1.46	1.62	1.65	1.89	1.92
7叶盆	0.91	0.92	0.97	0.93	1.13	1.08
7叶背	1.37	1.42	1.42	1.46	1.41	1.45



(a) 1号叶片



(b) 2号叶片

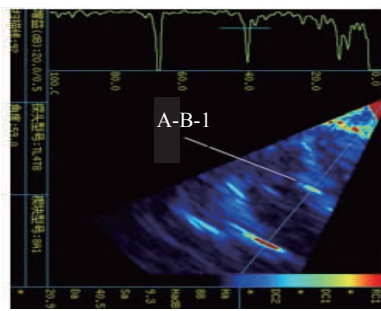
图3 超声测量值与计量测量值曲线对比

可以看出,超声测厚结果与计量实测结果基本相同,测量误差在0.1 mm以内。产生测量误差的主要原因是超声测量点与计量测量点位置存在误差。

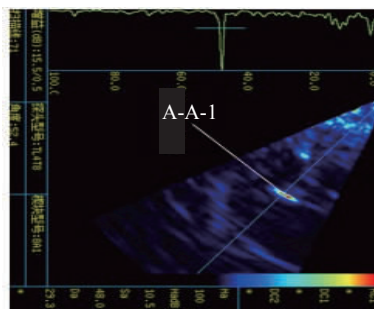
4 结论

- (1) 超声测厚标准件的组织方向性应与叶片

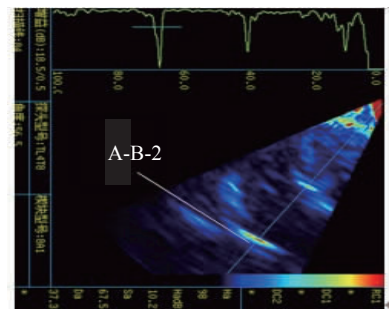
(下转第35页)



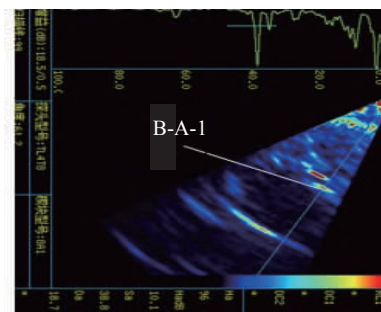
(a) A-B-1 人孔



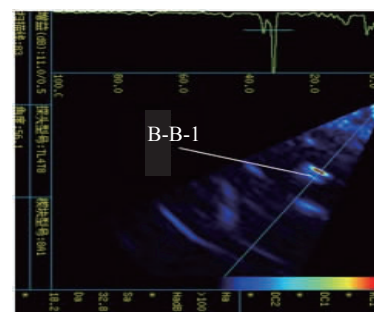
(b) A-A-1 人孔



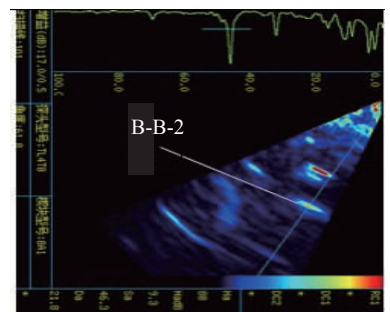
(c) A-B-2 人孔



(d) B-A-1 人孔



(e) B-B-1 人孔



(f) B-B-2 人孔

图6 人孔缺陷检测结果

表3 计算机辅助定位深度与实际值对比

试块 编号	端面 编号	横孔 编号	横孔实际 深度/mm	计算机辅助定 位深度/mm	绝对误 差/mm
试块 A	A	1	12	10.7	1.3
	B	1	20	20.9	0.9
	B	2	3	2.70	0.3
试块 B	A	1	20	18.7	1.3
	B	1	18	18.3	0.3
	B	2	20	21.9	1.9

4 结论

通过试验得出:

(1) 采用超声相控阵扇形扫查可以减小 Y 型管节点焊缝检测盲区,很大程度上降低了缺陷漏检概率。

(2) 计算机辅助软件能够快速对缺陷定位。相同。

(2) 超声测量结果与计量检测结果基本相同,测量误差在 0.1 mm 以内。

(3) 采用确定的超声测厚工艺可以对高压涡轮叶片进行壁厚测量。

比手工绘图定位方法,该软件能即刻完成原本耗时数小时的缺陷定位任务,在定位效率上大大提高。计算机辅助软件的应用有利于检测设备向智能化方向发展。

(3) 采用计算机辅助方法定位的效果与横孔实际深度相比,误差不大于 2 mm。针对海洋平台 T、K、Y 型构件,能够满足缺陷定位精度要求。

参考文献:

- [1] 施克仁. 无损检测新技术[M]. 北京:清华大学出版社, 2007, 205-212.
- [2] 赵志斌. Y 型管节点的超声检测研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2006: 33-37, 41-45.
- [3] 刘兴亚, 晋青珍, 申献辉. T、K、Y 管节点焊缝超声波探伤的计算机辅助计算[J]. 钢结构, 1998, 13(4): 19-23.
- [4] 中国科学院武汉物理与数学研究所. 一种 TKY 管节点焊缝超声相控阵检测装置: 中国, 200410061096[P]. 2005.

参考文献:

- [1] 刘金刚, 卜昆, 杨晓宁, 等. 基于中弧线的空心涡轮叶片壁厚计算方法研究[J]. 中国机械工程, 2012, 23(9): 1025-1028.
- [2] 马恒儒. 超声检测[M]. 北京:机械工业出版社, 2005: 96-97.