

铝基复合材料粘结质量超声 C 扫描检测技术

吴斌斌, 颜继东

(江西省锅炉压力容器检验检测研究院, 南昌 330029)

摘要:采用超声 C 扫描水浸聚焦技术检测 Al_2O_3 纤维增强铝基复合材料活塞镶环粘结质量。设计制作 Al_2O_3 纤维增强铝基复合材料活塞模拟对比试样, 利用模拟对比试样研究镶环粘结质量超声 C 扫描检测工艺。结果表明, 超声 C 扫描水浸聚焦技术可实现对 Al_2O_3 纤维增强铝基复合材料活塞镶环粘结质量缺陷的定性、定位、定量检测。

关键词: Al_2O_3 纤维增强; 铝基复合材料; 活塞镶环; 粘结质量; 超声波 C 扫描; 水浸聚焦

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2013)05-0037-03

Research of the Ultrasonic C-scan Technique for Al_2O_3 Matrix Composites

WU Bin-Bin, YAN Ji-Dong

(Jiang Xi Boiler Pressure Vessel Inspection and Testing Institute, Nanchang 330029, China)

Abstract: The ultrasonic C-scan testing method is used in detecting bond quality of piston ring set of Al_2O_3 fiber reinforced aluminum matrix composites. By designing and making simulation comparison sample for piston of Al_2O_3 fiber reinforced metal matrix composites, the ultrasonic C-scan testing method is studied. It shows that the ultrasonic C-scan technique can not only identify and locate the defect, but also precisely measure the defect size.

Keywords: Al_2O_3 fiber reinforced; Aluminum matrix composites; Piston ring set; Bond quality; Ultrasonic C-scan; Water immersion focusing

随着发动机向大功率、高转速、低能耗方向的发展, 对活塞质量提出了越来越高的要求^[1]。活塞产品先后经历了锻造铝活塞、高镍奥氏体铸铁镶环铝活塞、带内冷却油道的镶环铝活塞、电子束焊接铝活塞等发展阶段。近年来, 随着材料科学的发展, Al_2O_3 纤维增强铝基复合材料应用研究取得了显著进展。 Al_2O_3 纤维增强铝基复合材料镶环活塞具有镶环和铝基体结合强度高、耐磨性好、重量轻、成本低等优点, 将成为新一代的高性能活塞, 在大马力发动机上有重要应用前景, 其成品示意图如图 1 所示。

由于 Al_2O_3 纤维增强铝基复合材料活塞制造工艺的复杂性, 难免产生 Al- Al_2O_3 结合面缺陷如孔洞、镶环粘结不良等, 这些缺陷在活塞使用过程中会使产品结构出现离散, 严重影响构件的机械性能和

完整性。缺陷导致材料的强度和刚度等力学性能受到严重的削弱, 使活塞在服役过程易受破坏, 导致严重事故的发生^[2]。目前针对 Al_2O_3 纤维增强铝基复合材料活塞质量的检测基本上采用简单的渗透检测法, 这种方法只能检测出镶环表面裂纹缺陷, 如图 2 所示, 对镶环粘结质量缺陷的检测还没有切实可行的无损检测方法。

早在 80 年代, 德国马勒公司就成功解决了电子



图 1 Al_2O_3 纤维增强铝基复合材料活塞

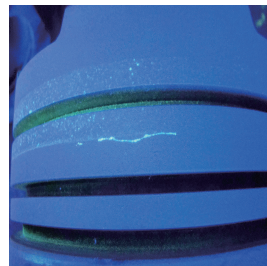


图 2 活塞镶环表面渗透检测显示裂纹

收稿日期: 2011-12-14

作者简介: 吴斌斌(1988—), 男, 助理工程师, 主要从事锅炉压力容器检验检测, 无损检测等。

束焊接活塞结合质量的超声波检测问题,能检测出镶环上、下侧面、背部结合面的结合率,并对外销售活塞超声波无损检测设备。90 年代以来,我国某所针对电子束焊接活塞的无损检测开展了大量的研究工作,研制了检测设备、并制定了《电子束焊活塞焊缝的超声波检测方法》等检测标准。但是,迄今为止有关铝基复合材料活塞的无损检测,国外相关报道还是很少。从公开发表的文献上也没有见到相关的介绍。由于 Al_2O_3 纤维增强复合材料活塞的结合面从制造工艺、组织特性、声学特性等方面与锻造铝活塞、高镍奥氏体铸铁镶环铝活塞、带内冷却油道的镶环铝活塞、电子束焊接铝活塞都有很大的差别,因此需要对其超声波工艺、方法进行系统的研究。在过去的几年里,我国某研究所采用了工业 CT 对 Al_2O_3 纤维增强铝基复合材料镶环活塞顶部及裙部进行质量检测,并取得了较好的应用效果。但是,采用工业 CT 存在两方面缺点,一是射线穿透能力不够,另一方面成本高。

超声 C 扫描,由于具有显示直观、定量方便、检测精度高等特点,已成为铝基复合材料普遍运用的检测技术之一,该技术通过控制闸门的位置和宽度,可以显示出工件特定深度范围内的缺陷信息。与手动超声 A 扫描检测技术相比,基于计算机控制的自动化超声 C 扫描成像检测方法,不仅可以节省人力,更重要的是能保证检测的重复性和检测结果的可靠性、准确性^[3-4]。因此,通过研究 Al_2O_3 纤维增强铝基复合材料活塞镶环粘结质量的超声波 C 扫描检测技术对提高缺陷定位、定性及定量的准确性,确保批量生产中活塞的质量和产品的可靠性具有十分重要的意义。

1 试验方案

1.1 超声 C 扫描方法

由于复合材料活塞毛坯是采用 Al_2O_3 纤维预制作镶环,在将铝液渗入到镶环预制件过程中,表面的铝液可能与空气发生氧化作用产生一层氧化皮,铝液注满后在镶环下结合面处和铝基体之间就隔着一层氧化皮,造成粘结不良,因此只需要对镶环下结合面进行缺陷检测即可。进行下结合面检测时,笔者采用平面圆环扫描方式,即在检测 Al/Al_2O_3 复合材料活塞镶环过程中探头沿径向移动,工件旋转。其检测示意图如图 3 所示。值得注意的是:在扫描开始前,调整探头使之与检测面始终保持垂直(平面

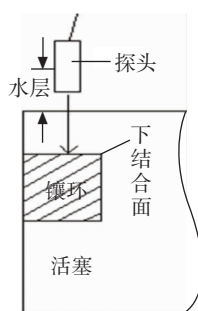


图 3 活塞镶环下结合面水浸超声检测示意图

圆环扫描时探头入射声束和探测平面垂直),并根据 Al/Al_2O_3 复合材料活塞镶环距探测界面的距离调整水深距离^[5]。

1.2 超声波 C 扫描检测工艺

1.2.1 探头频率的选择

为了检测出工件中的微小缺陷,超声波探伤仪必须具有高频带,并能用尖脉冲激励高阻尼换能器,以便获得窄脉冲。换能器的频率影响着检测的灵敏度。

频率越高,得到的回波噪声小、波形集中、清晰,检测的灵敏度也越高,但是超声波的穿透力也降低了。所以,在保证二次界面回波清晰的情况下,尽可能地采用频率较高的探头进行检测。分别采用频率为 5, 10 MHz 的两种圆形晶片纵波水浸点聚焦探头进行试验,通过对图像质量和检测灵敏度的分析,从而确定最佳的探头。

1.2.2 超声 C 扫描参数设置

需在超声波 C 扫描软件相应对话框中设置好扫描步距、步进起点、采样步距、扫描速度等参数。另外,扫描的步距和扫描速度直接影响超声波 C 扫描检测的精度和图像质量,扫描步距、主运动速度、采样步距越小,检测精度和图像质量越好,但检测速度慢;反之亦然。试验中选定扫描步距为 0.2, 0.3, 0.4 mm,扫描速度为 12, 24, 36 °/s。通过对不同参数下的超声波 C 扫描图像质量和检测速度的综合考虑,最终选择最佳的扫描步距和扫描速度。

1.2.3 灵敏度确定

实际检测中,挑选与被测件材质和几何形状都相同的对比试样,以确定检测灵敏度。由于实际缺陷的波形不可能都像人工线切割缺陷的波形那样规整,这就难以将灵敏度调到最佳状态,为了排除人工线切割缺陷对检测的副作用,选择了大量具有自然缺陷临界废品的活塞逐一进行 C 扫描。首先,将它们的超声波 C 扫描图形存储在计算机上,再解剖其中一个活塞与实物进行对照,如果吻合度不理想,就调整灵敏度重复前一个步骤,直至检测出的实物图形与超声波 C 扫描波形图相吻合,才从余下的活塞中选一个作为标准试块;然后在试验、分析基础上以标准试块缺陷确定超声波灵敏度。

1.2.4 对比试样的制作

为验证超声波 C 扫描水浸聚焦技术检测

Al/Al₂O₃ 复合材料活塞镶环粘结质量的可行性和可靠性。根据某构件制作了 Al/Al₂O₃ 复合材料活塞模拟对比试样,即在活塞镶环下结合面处两侧各线切割出两道深为 5 mm 的槽,再用胶布贴住槽口,形成一道空气槽,以研究超声波 C 扫描水浸聚焦技术检测 Al/Al₂O₃ 复合材料活塞镶环粘结质量的最佳扫描工艺,如图 4 所示。

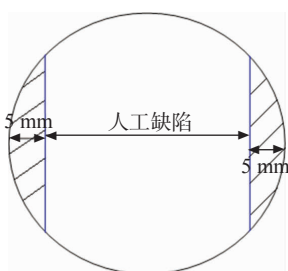


图 4 对比试样人工缺陷示意图

2 试验结果和分析

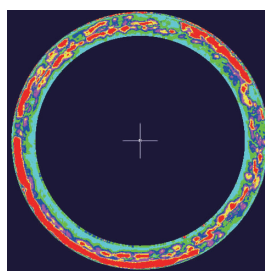
2.1 灵敏度确定

Al/Al₂O₃ 复合材料活塞中 Al-Al₂O₃ 结合面缺陷类型,大小不同,超声回波幅度也不一样。如何确定探伤灵敏度是保证检测定量结果准确性的关键,灵敏度过高,会使该结合面的部位出现虚假报警;灵敏度过低,会造成漏检。对此采用对比试样调整法。

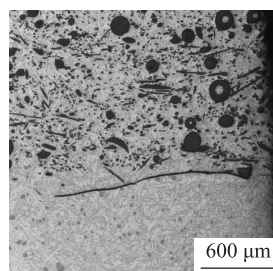
选用多只 Al-Al₂O₃ 结合面不好相当于有自然缺陷的活塞作为对比试样,将对比试样 Al-Al₂O₃ 结合面反射波调至报警阈值,在经过多次检测、解剖对比验证下,最终灵敏度确定为 67 dB 左右。按此灵敏度,先后检测了直径为 151 mm Al/Al₂O₃ 复合材料活塞上千件,通过大量解剖、金相对比验证,说明检测结果和实际缺陷对应性较好。图 5~7 分别为 75, 67, 65 dB 时超声波 C 扫描图及红色区域某段金相图形,从图 5, 6 中,可以初步地确定镶环粘结缺陷为分层。通过金相分析后,更加可以确定 Al/Al₂O₃ 复合材料活塞 Al-Al₂O₃ 结合面缺陷就是分层。图 5, 6 中的金相图形为铝基复合材料镶环与铝基体结合区域有分层缺陷的微观组织相貌。

2.2 超声 C 扫描参数优化

笔者选取了六种不同的扫描参数进行了检测试验,试验参数主要是探讨频率的选择、扫描速度、扫描步距。通过对不同参数的选择,得到不同的超声波 C 扫描图像。在使用点聚焦探头时,扫描速度、扫描步距越小, C 扫描结果与实际尺寸相差越小,但是这样的参数需要的扫描时间比较长。在 67 dB 灵敏度下,综合超声波检测的精度、扫描时间、质量和检测速度的分析比较,最终选择最佳超声波 C 扫描参数为探头频率为 10 MHz,扫描速度为 24 °/s,扫描步距为 0.3 mm,如图 8 所示。试验结果表明,采

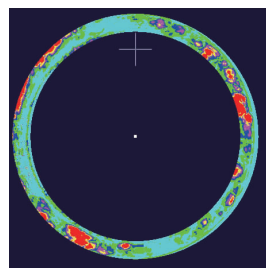


(a) 超声 C 扫描图

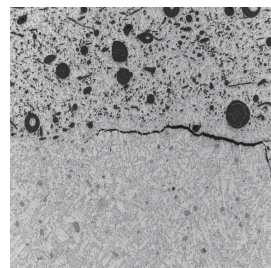


(b) 金相解剖图

图 5 75 dB 时超声波 C 扫描及金相图片

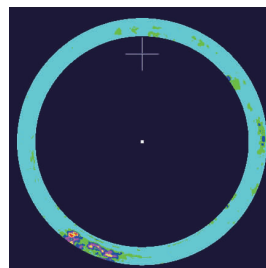


(a) 超声 C 扫描图

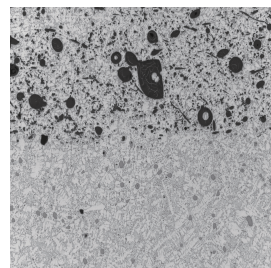


(b) 金相解剖图

图 6 67 dB 时超声波 C 扫描及金相图片



(a) 超声 C 扫描图



(b) 金相解剖图

图 7 65 dB 时超声波 C 扫描及金相图片

用点聚焦探头可清楚地检测出两侧深为 5 mm 的两道槽,检测结果和缺陷实际尺寸相差不超过 0.5%。

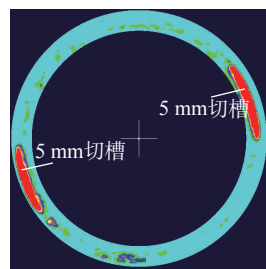


图 8 人工切槽 C 扫描显示

2.3 缺陷定量

由于影响超声波反射特性的因素很多,所以在探头不移动的情况下,只靠波幅的变化来判断缺陷的面积很困难。为此,采用更严格的标准检测缺陷的周长百分比。根据活塞镶环结合面的图像记录曲线,可以计算出下结合面累计的缺陷、最大连续缺陷,以上 2 个参数均以缺陷的长度与活塞整圈的长度的百分比表示,这样就可

(下转第 70 页)

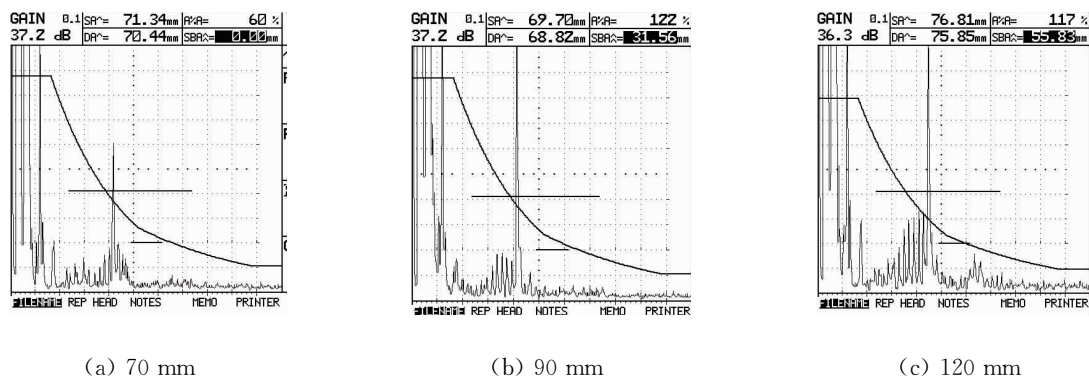


图7 不同指示长度裂纹的检测信号图

检测没有发现任何异常。但是经过超声波检测, 却发现其中3根高压缸内缸螺栓的内部存在裂纹, 指示长度分别为70, 90, 120 mm, 超声波检测显示信号, 如图7所示。

通过对上述的3处超声波超标检测信号进行解剖, 发现确实存在疲劳裂纹。通过对裂纹的超声波信号分析, 发现当螺栓某个螺纹部位出现裂纹时, 裂纹反射波会比螺纹反射波高出很多, 具有很高的信噪比, 而且其后邻近的第1个螺纹反射波被裂纹反射波遮挡, 当裂纹反射波较大时, 其后的几个螺纹的反射波也被阻挡, 这样为判定该信号是否是裂纹信号提供了更直观的依据, 极大地提高了小角度纵波

斜探头超声波检测的灵敏度。

4 结论

- (1) 小角度纵波探头对齿根及内部裂纹的检测具有灵敏度高和波形分辨清晰的特点。
- (2) 能够检测目视、渗透或磁粉无法检测到的内部危险性的疲劳裂纹。

参考文献:

- [1] 郑晖, 林树青. 超声检测[M]. 北京: 中国劳动社会保障出版社, 2008.



(上接第39页)

以对缺陷精确定量。其中, 用软件测量缺陷的尺寸, 测量次数不少于三次, 取其平均值。在实际检测中, 把探头运动起点和工件起始位置对应, 探头与工件的运动方向和C扫描图像对应, 这样就可以对缺陷精确定位。超声C扫描可通过对超声波缺陷反射波形的形态、缺陷颜色、形貌、大小、位置等特征初步判断缺陷的性质。本检测方法工艺简单、检测结果可靠, 适合于中小型活塞生产企业使用。

3 结论

通过对大量活塞的检验及金相对比验证, 超声波C扫描检测技术用于Al/Al₂O₃ 复合材料活塞镶环粘结质量的检测, 可以提高检测定位、定性及定量的准确性。这种方法成像直观, 避免了人为因素的影响, 对于改进铸造工艺、降低成本、保证活塞的质量具有重要意义。

通过对模拟对比试样的超声波水浸C扫描检测试验, 缺陷的检出能力: 缺陷的定量误差小于

0.5%。

影响缺陷检测的有关因素主要包括: 声束入射面上的水泡和粘附物(如阻流剂)均影响缺陷显示; 工件旋转轴线与工件轴线不重合; 探头频率的选择; 扫描参数的设置; 检测灵敏度的确定等。实际检测时, 需要对每个环节进行严格控制, 才能保证得到理想的超声波C扫描检测图像。

参考文献:

- [1] 陈长江, 王渠东. 内燃机活塞材料的研究发展[J]. 材料导报, 2009, 23(8): 62—65.
- [2] 周家文, 夏昌木. 镶圈活塞结合层的几种缺陷分析[J]. 汽车科技, 1997(5): 19—23.
- [3] 刘松平, 张斌. 先进的复合材料超声C扫描检测技术[J]. 航空制造技术, 2009(4): 12—15.
- [4] 徐向群. 电子束焊缝超声C扫描检测技术研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2007, 30(4): 70—74.
- [5] 倪培君, 赵振龙. 镶圈铝活塞Al-Fe结合质量的超声波检测[J]. 无损检测, 1993, 15(7): 193—195.