

实心车轴的超声相控阵探伤

彭朝勇, 蒋秋月, 高晓蓉, 李金龙

(西南交通大学 物理科学与技术学院 无损检测研究中心, 四川 成都 610031)

摘要: 针对机车车轴的缺陷存在区域及其分布特点, 分析利用超声相控阵技术进行机车车轴探伤的方法, 提出一种新的机车车轴的相控阵超声检测方案, 仅采用一个相控阵探头即可完成整个车轴的缺陷探测, 且定位准确。结果表明, 该系统可一次性完成对样板轴的全扫查, 得出各缺陷所在位置及深度等定位信息, 根据车轴缺陷检测数据结果可快速在车轴上找到缺陷, 检测效率和检测精度较高, 满足车轴检测工艺要求。

关键词: 机车车轴; 相控阵; 超声; 探伤; 疲劳裂纹

中图分类号: TP399

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2013)01-0083-04

Axle inspection based on ultrasonic phased array technology

Peng Chaoyong, Jiang Qiuyue, Gao Xiaorong, Li Jinlong

(Nondestructive Testing Research Center, Physical Science and Technology College,
Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The paper uses the ultrasonic phased array technology to the axle inspection, It aims at the characteristics of the axle flaws, analyses the ultrasonic phased array inspection methods on the new axle and designs a manual inspection method. By putting the phased_array probe on the head face of the axle and using machine oil to coupled. In the last, by using the system to do experiments and analyzing the experiments data, the system can completely finish the one-off inspection of the sample axle, it can improve the work efficiency, has a high precision and satisfy the inspection workmanship requirements.

Key words: locomotive axle; phased-array; ultrasonic; inspection; fatigue flaw

近年来, 随着我国铁路在高速和重载的发展, 铁路运行周期不断增长, 运输日趋繁忙, 机车走行部分承受的各种复杂应力也相应增大。列车车轴作为组成列车车辆系统的关键部件之一, 对列车车轴质量具有高层次的质量要求。车轴的受力复杂、工作条件恶劣, 很容易发生疲劳裂纹并且裂纹位置隐蔽, 如果车轴出现疲劳损伤并且扩展, 就会因断轴而造成列车脱轨, 带来灾难性的后果, 其安全运转直接关系着铁路运输的安全生产。为了及时发现车轴的疲劳缺陷, 防止列车车轴断裂事故的发生, 保证列车的运行安全, 必须进行无损探伤检测^[1]。由于超声波探伤方法能够对金属、非金属、陶瓷及复合材料等进行快速准确的表面及内部探伤, 因此, 超声探伤法特别适合于检测机车车轴。

1 机车车轴的结构

机车车轴的基本结构, 包括轴颈、轴肩、轴身、齿轮

座和车轮座等, 有的还有制动盘座。机车车轴的主要结构如图 1 所示^[1]。

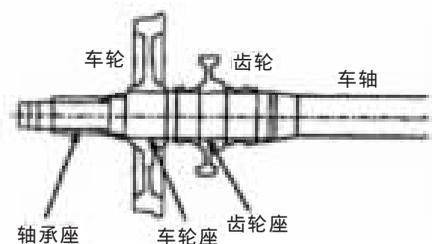


图 1 车轴的结构

列车车轴作为一种常见的锻件, 其特点是结构材料受热变形而变细, 而且变形量的大小和方向会明显影响到缺陷的形态、取向以及分布情况, 所以车轴缺陷多是面积型或者长条形的缺陷^[2]。机车车轴缺陷主要有两大类: 车轴内部缺陷和疲劳裂纹。在役车轴的缺陷主要是疲劳缺陷, 因此, 对在役车轴检测的重点是对疲劳裂纹

的检测。

机车车轴内部缺陷、表面横向大裂纹也是造成车轴“冷切”的主要原因之一。表面横向大裂纹主要是由于车轴加工不当、滑动部位发热渗入其他金属、内部缺陷应力集中、材质变化导致机械性能恶化、应力集中、应变频繁等原因引起。

2 相控阵超声探伤技术

相控阵技术是利用超声阵列换能器,通过控制各阵元发射的声波的相位,实现对超声波声场的控制。相控阵超声检测探头的特点在于,本质来说相控阵探头就是一个较长的常规超声探头,然后将其切割成许多小的晶片,并可独立激发,就像是许多小的常规超声探头集成进入一个探头中。相控阵探头的每一个晶片都有自己的接头、延时电路和数模转换器,每个晶片在声学上都是独立的。通过预先计算好的延时对每个晶片进行激发,实现声束的相控发射与接收。在20世纪70年代,医学诊断设备首先采用了相控阵技术进行动态聚焦。在以后的10年中,这一技术迅速发展,并应用于材料无损评价(NDE)领域。

超声相控阵技术可在不移动探头的情况下实现对波束的控制,根据所需发射的声束特征,由计算机软件计算各通道的相位关系并控制发射/接收移相换能器,控制各单元发射与接收脉冲的相位(时间延迟),达到聚焦和声束偏转的效果,从而形成所需的声束,如图2所示^[3]。

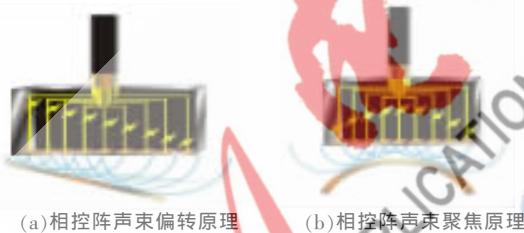


图2 相控阵探头控制波束的方向和聚焦

对于传统超声,必须更换不同的探头或楔块才能改变声束角度;而对于相控阵系统,声束的角度可以用电子控制改变。同一相控阵超声探头,可以控制产生不同的输出波形和能量聚焦,适用于不同的检测需要。这是超声相控阵技术区别于传统单晶片超声波探伤技术的两大特点。这些特性和一些特殊的扫描显示方式(如A扫描显示、C扫描显示和S扫描显示等)结合起来,能够提供强大的图形和数据保存结果,这对于判伤的记录和缺陷的评估是很有价值的。

采用超声相控阵探伤技术,只要在材料表面有适当的耦合面即可方便地实现工件各部位的探伤,降低了探测难度,简化了探伤操作,提升了探测对象的适应性,特别适合在线探伤。由于其采用动态聚焦技术,使近场声束和远场声束都有良好的聚焦特性,探伤信噪比和探伤灵敏度高;采用声束偏转,使多个缺陷可以同时检测,并

以图像的形式直观显示,检测分辨力高。由于相控阵超声具有检测效率高、声束可达性好等特点,特别适合于几何形状复杂的铁路关键受力部件的无损探伤,如车轮、车轴、连杆、钢轨等关键部件的疲劳裂纹探伤,以及转向架的焊缝探伤。下面探讨将超声相控阵技术应用于实心车轴各部位的探伤。

3 车轴超声相控阵探伤

3.1 车轴探伤原理

车轴的超声探伤主要基于脉冲反射法探测原理,超声波束在传播路径上遇到缺陷时会产生反射,通过对反射超声波或透射超声波进行检测,可检测工件的缺陷。由于车轴内部无空洞,用常规超声探伤很难做到全面检查,而利用相控阵超声探头的收发一体和收发分离工作模式,就可实现大角度范围的扫查,即可实现车轴缺陷的探伤,同时检测效率也得到适当的提高。

3.2 车轴相控阵超声探伤方法

现有的超声波探伤法是将探头接触在车轴的端面或表面上,或是没有拆卸的重要部件上,向车轴中入射超声波,观察并分析各反射波。分为垂直探伤、小角度探伤和斜角探伤三种方法。

(1)垂直探伤。垂直探伤是由车轴端面垂直射入超声波,检测车轴在全长方向是否有损伤及一些材质性缺陷。垂直探伤的探伤范围最广,可以扫查到整个车轴纵向。

(2)小角度探伤。在不退轮的情况下,针对车轴可能损伤的某些部位,用小角度探头的纵波在车轴端面进行探伤。超声波进入车轴后,除了发生折射外,还会发生波型转换,出现纵波和横波,小角度探伤利用其中的纵波进行探伤,由于横波声速比纵波慢,因此不会干扰对缺陷的判断。小角度探伤比垂直探伤精度高,但声束不能覆盖车轴全体。因此,小角度探伤检测车轴需要多个探头。

(3)斜角探伤。斜角探伤一般使用较大角度从有车轴表面斜方向射入的横波超声波。斜角探伤可检查到齿轮座、制动盘等部位的损伤。斜角探伤比小角度探伤更能检测出细小的缺陷,但是探伤前需保持车轴表面平整洁净。

上述三种方法扫查的范围和检测精度各有利弊,在设计车轴探伤系统中,需按照特定的需求选用合理的探伤方法,也可以综合各方法优点,组合探伤,提高探伤的精度。

3.3 车轴探伤区域分析

车轴不仅承受着来自列车的全部静载荷,还会受到列车运行过程中的各种复杂作用力,结合以往因车轴导致的铁路交通事故,除了轴颈、轮座内外两侧、齿轮座内外两侧以及轴身部位几处主要受力位置外,还需对轴端等部位进行缺陷检测,如图3所示。一旦车轴上某个部

位出现微小裂纹,在长期运行的作用力下会逐步扩展并最终导致断轴等重大事故。因此,要通过布置在车轴不同表面处的多个相控阵探头对整个车轴区域进行全面检测^[4]。

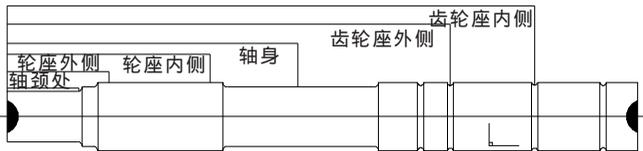


图3 列车车轴重点检测部位

针对上述机车车轴的缺陷存在区域及其分布特点,若采用常规超声探伤,超声声场无法完全覆盖整个部件,检测不全面。要检测所有部位的缺陷,须采用相控阵技术。目前常用的相控阵检测方案,大多采用组合相控阵探头并将其置于车轴不同的部位进行检测,检测系统较复杂,干扰因素较多且成本高。

本文通过对比分析超声相控阵进行机车车轴探伤的方法,自行设计,并提出一种新的机车车轴的相控阵超声检测方案,只需采用一个相控阵探头即可完成整个车轴的缺陷探测,干扰较小,误判率小,且超声声场全覆盖,避免了缺陷的漏检,检测效率较高。

3.4 车轴相控阵超声探伤试验

车轴的超声波探伤试验遵照机车车辆车轴超声波探伤(TB/T 1618-2001)的相关质量标准。车轴超声探伤系统采用一支相控阵探头,放置于轴端面,通过在其上移动探头进行检测,综合利用相控阵超声检测技术的优势实现车轴的全检测。

3.4.1 检测设备及方法

测试模拟现场应用条件:试验设备选用OLYMPUS的Focus LT超声采集设备和Tomoview采集软件;探头采用32晶片的线性排列的相控阵探头(晶片间距为1mm),放置于样板轴端面进行检测。由于设备条件的限制,目前采取手工相控阵探伤法,用手移动相控阵探头,数据按采集时间存储。以通过试验、分析、研究找到针对不同部位缺陷的最佳检测距离及调整方法。

3.4.2 检测流程

检测流程如图4所示。



图4 车轴超声波检测流程

3.4.3 检测步骤

(1)选用机油作为试验耦合剂,搭建车轴探伤试验平台进行检测。合理配置超声检测参数,根据车轴几何结构和探头位置等因素,合理设置检测角度。超声采集图像由Tomoview软件显示,主要观察分析显示的A扫描和B扫描图像数据。

A扫描是一维显示,显示沿探头发射声束方向上不同点的回波信息,是一种波形显示,纵轴表示反射波的声压幅度,横轴表示声波的传播时间(或距离),可确定

缺陷在试件中的埋藏深度及缺陷的反射声压。

B扫描是多重A扫描叠加显示,得到的是与声束传播方向平行的物体断面的图像。水平轴表示扫查位置,垂直轴表示超声声程或传播时间^[5]。当换能器沿一直线移动时,在屏上可显示扫查线所取纵截面上,前表面、后表面及内部反射界面的位置取向和深度。

为确保超声波探伤具有足够的灵敏度,需要根据技术条件和车轴的制造使用要求,制作与实际车轴相似的结构和外形尺寸的对比试块,以供探伤时使用。在试块的相应部位,按车轴疲劳裂纹的特点仿真刻制一系列的人工缺陷。如表1所示是样板轴上的部分缺陷信息。

表1 样板轴上的部分缺陷

缺陷序号	缺陷位置	探头检测位置	缺陷当量
1号	卸荷槽	轴端	1 mm×0.2 mm
2号	卸荷槽	轴端	0.5 mm×0.2 mm
3号	轴身	轴端	3 mm×0.2 mm

(2)车轴内部材质性缺陷检测,将0°探头放置于轴端面进行车轴材质透声综合性能检测。机车车轴超声波的材质透声检测是检出车轴表面横向大裂纹的有效方法之一,检测时通常采用直探头在车轴两端全部区域进行检测,图5为缺陷穿透检测示意图。



图5 穿透检测

(3)将相控阵探头放置在轴端面,手动移动探头,以车轴端面全部区域为检测范围,探头作锯齿形移动,在轴的一端可检测整个半轴,声束覆盖如图6所示,将探头放置于轴两端面检测,可完成车轴的全检测。试验时,耦合剂应涂抹均匀,保证耦合良好。通过观察Tomoview上的A扫描波形来初步判断缺陷。通过调整不同的检测参数,记录相应缺陷的检测角度、增益及信噪比等。最后进行反复多次试验,通过对试验结果及缺陷理论位置的对比分析,寻求最佳探测位置及探测角度。

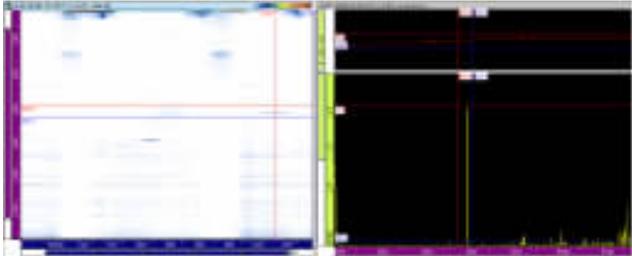


图6 半轴检测声束覆盖图

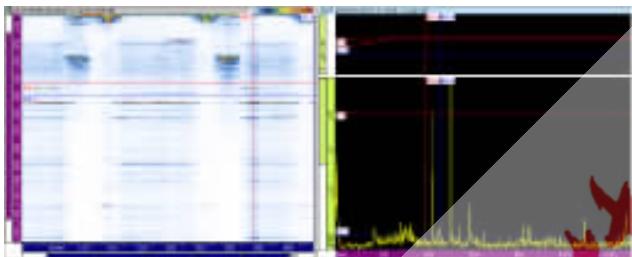
3.5 试验分析

针对样板轴上的缺陷,小幅度移动探头,依次检验样板轴上所有的缺陷,最后得出各个缺陷的检测角度、探头摆放位置。置于车轴端面的超声波相控阵探头以不同角度发射超声横波。同一缺陷可能由不同角度的超声波检测到,同一角度也可能检测到多个缺陷。对比分析探头位置、检测增益及缺陷是由超声波的几次回波测得等,最终得出最佳的方案及调整方法。如图7所示分别为卸荷槽和轮座部位的缺陷检测图。由图可见,各波形

清晰可辨,通过分析和计算 A 扫和 B 扫图上的波形位置,可确认对应位置的缺陷波。通过调整增益及 TCG 曲线(时间校正增益),将找到的缺陷的波幅调整到满屏幕的 80%,并记录其检测角度、增益、信噪比及探头摆放位置。



(a)卸荷槽部位缺陷,检测角度 -8°



(b)轮座部位缺陷,检测角度 -12°

图7 不同部位缺陷检测示意图

通过多次试验统计,相控阵采集软件上得到的缺陷深度误差最大仅为 3 mm。当缺陷波幅在满屏的 80%时,检测增益在 25 dB~40 dB 左右,最大不超过 50 dB,且各缺陷检测信噪比均在 15 dB 以下,具有较好的检测效果。

试验结果表明,本方案设计的相控阵超声波车轴探伤系统只需要采用一个相控阵探头即可检测样板轴上距车轴表面不同深度的缺陷,检测范围可覆盖整个车轴结构体,能够得出每个缺陷的定位信息报告(缺陷所在位置及深度),根据车轴缺陷检测数据结果可快速在车轴上找到缺陷。方案可行,且检测效率较高。

采用超声相控阵技术探伤,与传统的探伤方法相比,检测速度快,可以同时检测车轴不同部位的多个缺陷,检测精度高,且不易出现漏检等情况。若将相控阵探头配以适当的夹具和电机等,使探头自动旋转,检测效率会大大提高。

相控阵超声技术对车轴的探伤,只需一支相控阵探头置于轴端面进行检测,即可完成透声检测和多角度连续自动聚焦扫查,通过多次试验和结果的分析,该方案对车轴的相控阵超声检测,能实现车轴卸荷槽、轮座、抱轴颈及轴身缺陷的检测,检测方便、快捷,检测效率、精度及准确度都高,不易漏检,满足铁路车轴检测的要求,适用于电力、内燃机车轮对车轴内部材质性缺陷及裂纹等的超声波检测。

参考文献

- [1] 司万强,马兰童,余海军.机车车轴超声波探伤工艺浅析[J].装备制造技术,2009(10).
- [2] 曾海云,段怡雄,王平华.35CrMo 车轴疲劳裂纹超声波检测工艺方法[J].电力机车与城轨车辆,2005(6):34-37.
- [3] LONSDALE C, TRAXLER J, WAGNER R, et al. Phased array ultrasonic inspection of new wrought railroad wheel rims. 500 North Walnut Street Burnham, PA, USA.
- [4] 石塚弘道.车体、转向架构架和车轴的疲劳研究[J].国外列车车辆工艺,2009(5):38-41.
- [5] 李衍.超声相控阵技术第二部分 扫查模式和图像显示[J].无损探伤,2007,31(6):33-39.

(收稿日期:2012-09-03)

作者简介:

彭朝勇,男,1981年生,讲师,在读博士,主要研究方向:光电检测与信息处理。

蒋秋月,女,1987年生,在读硕士,主要研究方向:光电检测与信息处理。

高晓蓉,女,1969年生,教授,硕士,主要研究方向:光电检测与信息处理。