

钢轨探伤车对轨头核伤检测能力的分析

石永生¹, 罗国伟², 徐其瑞²

(1. 中国铁道科学研究院基础设施检测研究所, 北京 100081;

2. 中国铁路总公司, 北京 100844)

摘要:针对钢轨探伤车高速检测能力问题,结合我国钢轨探伤车的运用特点和核伤的检测原理,对钢轨探伤车的轨头核伤检测能力进行了理论和应用分析,并通过伤损试块和实际线路检测进行了验证。认为在目前的探伤车标准体系模式和运用管理模式下,轨头核伤的检测灵敏度不低于《钢轨探伤管理规则》(铁运【2006】200号)中钢轨探伤仪对轨头核伤检测时设定的检测灵敏度。

关键词:探伤车;轨头核伤;钢轨探伤;轨头核伤检测;检测灵敏度

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2014)09-0034-04

Analysis on Transverse Cracks Detection Capability of Rail Flaw Detection Vehicle

SHI Yong-sheng¹, LUO Guo-wei², XU Qi-rui²

(1. Infrastructure Inspection Research Institute, CARS, Beijing 100081, China;

2. China Railway Corporation, Beijing 100844, China)

Abstract: In this paper, the capability of the rail flaw detection vehicle on the rail head transverse crack detection is analyzed through considering the application features in china and the rail head transverse crack detection principles, and is verified by the reference block testing and the in-service line testing. We come to that under the Chinese operation management mode and under the Chinese standard system mode, the rail head transverse cracks detection sensitivity is not lower than that in "Rail Flaw Detection Management Rules" (China Railway Transport Bureau Managing Files [2006]200).

Key words: Rail flaw detection vehicle; Rail head transverse cracks; Rail flaw detection; Rail head transverse cracks detection; Detection sensitivity

我国在役钢轨探伤设备主要有钢轨探伤车和钢轨探伤仪两种,探伤车探伤速度快、适应性强,但灵活性差,探伤后需要人工复查。探伤仪灵敏度高,灵活性好,但稳定性差,受操作者人为因素影响大。随着铁路运输发展,高效率的钢轨探伤车承担起了越来越多的探伤检测任务,尤其在高铁线路、高原线路上,由于区间里程长、环境恶劣等原因造成人工探伤作业困

难,将主要采用钢轨探伤车进行探伤^[1]。

无论是钢轨探伤车还是钢轨探伤仪,探伤结果的可靠性非常重要。笔者以钢轨轨头核伤为例,对钢轨探伤车的轨头核伤检测能力作一分析。

1 钢轨轨头核伤的特点及其危害

轨头横向疲劳裂纹俗称轨头核伤,简称核伤。一般出现在距踏面 8~12 mm 和距内侧 5~10 mm 处,其方向与钢轨纵剖面接近垂直,对踏面多有 10°~25°倾角(单行线)或接近垂直(复行线)。核伤又分为白核和黑核,多数发生在轨头。其形成的主要原因是钢轨本身存在白点、气泡、非金属夹杂或严重偏析等缺陷,在列车的重复载荷作用下,使这些细微裂纹疲劳源逐渐扩大而形成疲劳斑痕(即核伤),当疲劳斑痕没有和外界空气接触时,具有平整光亮的表面,通常成为白核;当这种疲劳斑痕发展

收稿日期: 2013-09-15

基金项目: 铁道部科技基金资助项目“钢轨探伤车 80 km/h 及以上提速与系统集成研究”(2008G035); 铁道部科技基金资助项目“钢轨打磨、铣磨及探伤作业系统关键技术自主化研究”(2012G004-A); 铁科院基础所基金资助项目“超声波钢轨探伤检测系统研究”(2012IMXM26)

作者简介: 石永生(1980—),男,副研究员,钢轨探伤部副主任,主要从事高速在役钢轨伤损检测标准研究、应用和高速在役钢轨伤损检测设备开发工作。

至轨头表面而被进入的水气氧化时,称为黑核。核伤可导致钢轨横向断裂,是最危险的钢轨疲劳缺陷之一。西方国家铁路以无缝线路为主,钢轨缺陷主要为核伤,多数国家在核伤面积超过轨头面积 30% 以上时才要求换轨,法国甚至放宽到 55% 才换轨,而我国的标准要求比国外要严得多,只要确认是伤,就要求必须换轨^[2]。

2 探伤车超声检测系统及其核伤检测原理

2.1 钢轨超声检测系统

钢轨超声检测系统是以钢轨伤损为探伤对象的检测系统,分为超声电子系统与探轮支持机构两大部分,其中超声电子系统包括超声探轮组件、数据采集及处理系统和控制显示计算机系统等。探轮支持机构安装在检测车 2 位端的转向架轴箱上,是超声探轮组件的载运安装平台。超声探轮组件是超声发射接收的基本单元,安装在探轮支持机构上,主要完成超声检测过程中的电能和声能转化,目前 GTC-80 型探伤车每股钢轨有 15 个超声通道。数据采集及处理系统安装在电子系统柜内,主要控制超声的发射、接收和超声信号的采集及数据处理。控制显示计算机系统以网络模式与数据采集机处理系统通信,主要负责空间转换、伤损自动识别,并将识别后的伤损数据以 B 型图的形式实时显示给操作员。该系统能够对轨头核伤、螺孔裂纹等进行在线实时检测。

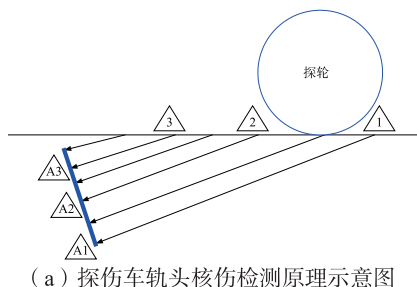
2.2 探伤车轨头核伤检测原理及其 B 型图

钢轨探伤车使用超声探轮模式进行钢轨伤损在线检测。每一个探轮内都有三个 70° 晶片,折射进入钢轨的超声横波声束折射角约为 70°,扩散角较大,对同一点处的轨头伤损随着车辆的运行会进行多次检测,并且由于扩散角大造成对核伤的取向不是特别敏感,甚至垂直的伤损也能够发现,其检测原理如图 1 所示。图 1(a)中 $\triangle_1$ 点发射的超声在伤损的 $\triangle_1$ 点反射回来并在 B 型图中描绘在 $\triangle_1$ 点上,同样 $\triangle_2$ 点、 $\triangle_3$ 点处发射的超声也在 B 型图的 $\triangle_1$ 、 $\triangle_3$ 处描绘一个点,这样经过多个点超声发射和采样,超声检测系统就完成了轨头核伤的探伤检测,并且其 B 型图中的伤损走势和实际的伤损走势基本一致。

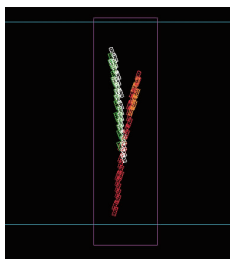
3 检测能力分析

3.1 探伤车与钢轨探伤仪的探伤灵敏度比较

小型多通道钢轨探伤仪检测核伤灵敏度为



(a) 探伤车轨头核伤检测原理示意图



(b) 典型的轨头核伤B型图



(c) 典型钢轨轨头核伤实物图

图 1 钢轨探伤车轨头核伤检测原理及典型轨头核伤 B 型图

$\phi 4$ mm 平底孔当量,其超声反射回的声压为^[3]:

$$p_a = \frac{p_0 A_s}{\lambda^2 a^2} \quad (1)$$

钢轨探伤车检测核伤静态校准标定灵敏度为 $\phi 3$ 横通孔当量时,其超声反射回的声压为:

$$p_b = p_0 \frac{A}{\lambda a} \sqrt{\frac{d}{8a}} \quad (2)$$

取钢轨超声声程(探轮内声程折算到钢轨中) 100 μ s,探头频率 2.25 MHz,则统一到超声检测灵敏度为 $\phi 4$ mm 平底孔当量时,探伤车检测灵敏度还需补偿 $20 \log_{10} \frac{p_b}{p_a} \approx 10$ dB。

考虑探伤车为动态检测,伤损在间隔采样和自动识别时会降低检测灵敏度,还需要补偿检测灵敏度 6 dB(试验测算在最低标定灵敏度的基础上增加 6 dB 时,探伤车在最高检测速度下形成 3 点连续报警反射,能够有效识别)。此时按这个试块测算出的灵敏度探伤车与探伤仪相同。

3.2 探伤车超声检测系统动态标定

铁路局设置探伤车动态标定试验线路,满足等速动态标定要求。人工缺陷钢轨试块必须铺设在直线段。采用 50 kg/m 或 60 kg/m 钢轨,钢轨表面和轨底无锈蚀,轨头垂直磨耗和侧面磨耗均小于 3 mm。人工缺陷钢轨试块左右股各 10 根连续铺设,每根钢轨长度不短于 12.5 m、各设置不少于一个人工模拟缺陷。动态标定时,探伤车按最高检测速度对试验线路的人工伤损钢轨进行连续不间断 10 次检测,统计平

均检出率、误报率^[4]。若平均检出率大于 80% 且平均误报率小于 20%, 则标定合格。

3.3 探伤车灵敏度设置及伤损分级报告

3.3.1 灵敏度设置

探伤车动态标定必须合格, 然后在实际使用检测过程中先调出超声杂波, 之后再减去 3 dB 作为检测灵敏度值。即使用设备的最大检测能力灵敏度^[5]。

3.3.2 伤损分级报告

探伤车的灵敏度设置是在合格检定的基础上使用设备的最大能力进行检测, 这样的检测会增加设备的误报, 实际检测的误报率将远大于 20%, 但同时也提高了小伤损的检测能力。这样检测的优点是提高检测能力, 缺点是误报率高, 失去了定性定量依据。因此在最新的运用管理办法中将探伤车的伤损称为报警, 并分三级, 这三级报警均经过了操作员的判断认为可能是伤损并出具伤损报警报告, 为探伤仪的复核判断提供依据, 并最终由探伤仪复核后定量定性。

3.3.2.1 探伤车伤损的分级原则和量值依据

探伤车一级至三级报警均是探伤车超声检测系统经过自动识别并报警之后的 B 型图。探伤车一级报警为在应出伤损的位置有伤损波的反射报警, 但没有形成伤损形态走势; 探伤车二级报警为在应出伤损的位置有伤损波的反射报警, 初步形成伤损走势; 探伤车三级报警为在应出伤损的位置有多通道伤损波的反射报警, 并且确认不是干扰波和特殊钢轨内部形态形成的非伤损波。

3.3.2.2 探伤车伤损分级与探伤仪复核对照原则

探伤车一级报警: 探伤仪按照正常检测灵敏度不易复核出来; 探伤车二级报警: 探伤仪按照正常灵敏度认真复核能够复核出来; 探伤车三级报警: 探伤仪在正常调整灵敏度的情况下肯定能够复核出来(或有反射报警)。

3.3.2.3 探伤车伤损的周期检测动态变化原则

所有报警一旦复核确认是伤损, 必须报线路维修进行下一步处理。探伤车三级报警复核后必须是“确认是伤损、干扰波或线路固有结构体反射”, 一旦确认不是伤损, 在下次检测中该处即使再出现此类较强反射也不判为伤损报警, 但探伤车检测和分析人员对复核结果有怀疑的例外。探伤车二级报警复核后没有确认是伤损, 并且确认没有干扰波的情况下, 如果下次检测时该处没有反射或反

射波形没有发展, 降为一级或不再判为伤损; 如果下次检测时该处伤损图形有进一步发展, 则可以维持二级报警或升为三级报警。探伤车一级报警在复核后没有确认是伤损, 如果下次检测时该处没有反射或反射没有发展, 可以不再判断该处为伤损; 如果下次检测时该处反射图形有进一步发展, 可根据发展情况维持一级报警或升级为二级报警。

4 检测能力验证

4.1 标准试块能力验证

4.1.1 人工缺陷试块

在 GTS-60 试块的基础上, 将钢轨轨头人工缺陷改为直径为 3 mm 的横通孔, 保留了直径为 30 mm 的标准螺孔、模拟水平裂纹的长 5 mm 螺孔水平刻线、在螺孔上 37.5° 位置处制作长 3 mm 刻线和模拟螺孔下 37.5° 位置处制作长 3 mm 刻线。

4.1.2 试验平台的搭建

由于钢轨探伤仪的发射电压同钢轨探伤车探伤系统的发射电压不同, 为能够正确获取数据, 超声传感器、超声发射接收及处理系统均采用探伤车超声检测系统, 同时使用 4.1.1 节所列的人工缺陷试块和 HT-1 型探轮标定台。系统平台搭建时系统中各通道同探轮各对应通道相连。数据实际测试时使用了 GTC-202 探伤系统、探轮 0827、探轮 0809、探轮 0810A、HT-1 型探轮标定台、人工缺陷试块。

4.1.3 试验数据及分析

探伤车检测系统使用增益型放大器, 增益值越大放大能力越强。表 1-3 中 F70 通道表示外侧超声通道, C70 通道表示中间超声通道, G70 通道表示内侧超声通道。增益值表示该超声通道对应探轮移动距离并且超声回波达到所设定的超声阈值时, 放大器所使用的增益值。移动距离表示该超声通道使用对应增益值并且超声回波达到所设定的超声阈值时, 对应探轮能够前后移动的距离。移动距离中的杂波表示该通道使用对应的增益值时, 超声通道刚好出现杂波, 对应的增益值表示该超声通道出现杂波时的增益最小值。

依据“3.1 探伤车与钢轨探伤仪的探伤灵敏度比较”中的理论及经验计算, 探伤车若用直径为 $\phi 3$ mm 横通孔进行校准标定, 需在零距离移动的灵敏度基础上增加 16 dB 方可和钢轨探伤仪在 $\phi 4$ mm 平底孔上校准的灵敏度相当。但探伤车使用的灵

敏度调整标准是在杂波的基础上减小 3 dB。那么在该试块测得的零点数据基础上增加 19 dB 后得到的数值若小于试验中出杂波时的数值,则证明探伤车轨头核伤检测灵敏度稍高,否则可说明探伤车使用的轨头核伤检测灵敏度稍低。

表 1 探轮 0827 测试数据

序号	F70 通道		C70 通道		G70 通道	
	增益值 /dB	移动距离/mm	增益值 /dB	移动距离/mm	增益值 /dB	移动距离/mm
1	7.8	0	16.4	0	10.6	0
2	13.8	20	22.4	19	16.6	20
3	19.8	29	28.4	29	22.6	31
4	25.8	39	34.4	38	28.6	41
5	32.3	杂波	37.6	杂波	34	杂波

表 2 探轮 0809 测试数据

序号	F70 通道		C70 通道		G70 通道	
	增益值 /dB	移动距离/mm	增益值 /dB	移动距离/mm	增益值 /dB	移动距离/mm
1	10.9	0	9	0	13	0
2	16.9	22	15	18	19	19
3	22.9	31	21	27	25	29
4	28.9	42	27	36	31	39
5	35	杂波	30	杂波	36	杂波

表 3 探轮 0810A 测试数据

序号	F70 通道		C70 通道		G70 通道	
	增益值 /dB	移动距离/mm	增益值 /dB	移动距离/mm	增益值 /dB	移动距离/mm
1	11.3	0	11.9	0	14	0
2	17.3	19	17.9	21	20	19
3	23.3	28	23.9	29	26	30
4	29.3	38	29.9	39	32	41
5	32	杂波	31.6	杂波	34	杂波

由表 1~3 的数据经过计算分析,可以得出该探伤车超声系统及用于测试的这三个探轮共 9 个 70°轨头核伤检测通道在静态情况下轨头核伤检测灵敏度稍高于标准使用的探伤仪轨头核伤检测灵敏度。

4.2 实际线路检测能力验证

4.2.1 某线路焊缝夹渣伤损

2012 年 1 月 11 日,GTC-301 探伤车报告位于某铁路 K535+497 处(某车站 5 号道岔基本轨后第一处焊缝)一级报警,经某工务段 12 日天窗点内用 CTS-1003 型探伤仪复核,确认此处为铝热焊接头距离轨面 11.2 mm 处有约 2 mm 夹杂,被判为轻伤,用无损加固方式处理。探伤车检测 B 型图如图

2 所示。

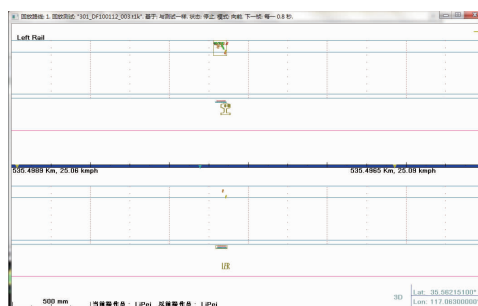
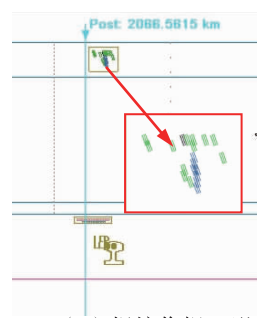


图 2 某线路 K535+497 处探伤车 B 型伤损图

4.2.2 某线路焊缝凹痕伤损

2012 年 8 月 19 日,GTC-301 报告位于某线路 K2066+561 的道岔岔心处焊缝一级伤损,经复核确认为轨头外侧距轨面下 10 mm 处,铝热焊缝中心有一道长 15 mm 宽 1 mm 垂直凹痕。B 型图及现场实物如图 3 所示。



(a) 焊接伤损 B 型图



(b) 钢轨焊接缺陷照片

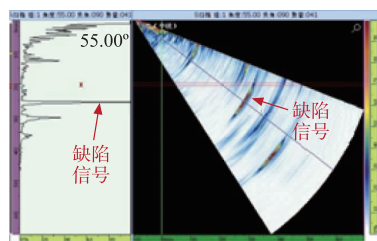
图 3 某线路 K2066+561 处探伤车 B 型伤损图及伤损实物图

4.2.3 某线路轨头核伤

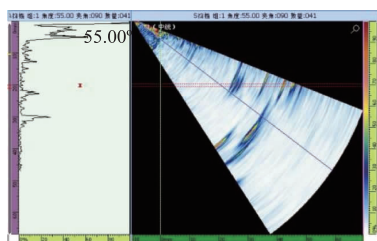
2010 年 11 月 22 日,GTC-301 检测出位于某线路 K664+710 处轨头核伤于十天后断轨,断轨处面积约 $25 \times 30 \text{ mm}^2$ 。探伤车 GC70°有效检测,C70°有 8 点反射,G70°有 4 点反射。从伤损分级上看,该伤损为在应出伤损的位置有多通道伤损波的反射报警,并且确认不是干扰波和特殊钢轨内部形态形成的非伤损波,可以判定为三级报警,如图 4 所示。

(下转第 41 页)

的裂纹显示,如图7所示。裂纹深约3 mm,并在齿



(a) 含缺陷叶片检测结果



(b) 同级完好叶片的检测到的结构信号

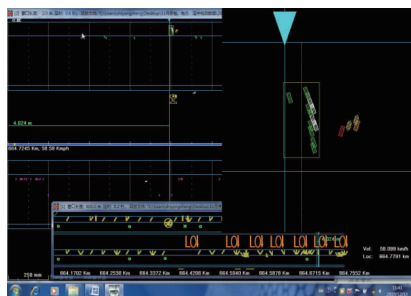
图6 扫查方式3横波相控阵探头信号对比



图7 拆卸打磨处理后的裂纹显示



(上接第37页)



(a) 探伤车检测偏于垂直的较小轨头核伤



(b) 断轨处照片

图4 某线路K664+710处轨头核伤

根方向延伸。由此证明在复杂的在役检测条件下,所设计的叶片根部相控阵检验技术可以有效的检测出真实的缺陷。

4 结论

针对复杂结构的汽轮机转子叶片根部缺陷开发出了一套相控阵检验技术。通过叶片运行应力分析,得出超声扫查的重点关注区域;采用声场仿真的手段量化了相控阵探头各参数与探头激发声场间的关系,并以此设计了针对枞树型叶片根部的专用相控阵探头;结合现场检测条件,针对不同检测部位设计出了四种扫查方式;在模拟试块上的检测试验表明,所设计的检测工艺能够清晰地检测出所有模拟试块中的月牙槽;将检测工艺应用于工程实际,结果证明了所设计的叶片根部相控阵检验技术是准确有效的。

参考文献:

- [1] 彭志珍,李玉龙,丰慧星. 压水堆核电站汽轮机叶根超声检测[J]. 机械与电子,2012(11):138-139.
- [2] 丁辉,张俊,张益成,等. 超声检测声场计算模型的建立与仿真软件的开发[J]. 无损检测,2009,31(8):614-618.
- [3] 单洪彬,李明,程怀东. 国外超声仿真软件的研究进展[J]. 无损检测,2008,30(7):1-6.

5 结论

钢轨探伤车的探伤检测属定性检测,检测速度快,在目前的探伤车标准体系模式和运用管理模式下,其轨头核伤的检测灵敏度不低于《钢轨探伤管理规则》中钢轨探伤仪对轨头核伤检测时设定的检测灵敏度。分析多年来的探伤车检测数据,在满足探伤条件的情况下,未发生过因灵敏度能力不足而漏检较大轨头核伤的事例。

参考文献:

- [1] 石永生,张全才,李杰,等. 探伤车与探伤仪的轨头核伤检测能力对比分析[J]. 铁路技术创新,2012(1):99-101.
- [2] 石永生,李培,钟旭峰,等. 钢轨踏面斜裂纹与轨头核伤的B型图对比分析[J]. 铁路技术创新,2012(1):92-95.
- [3] 中国机械工程学会无损检测分会. 超声波检测[M]. 北京:北京机械工业出版社,2000.
- [4] GB/T 28246-2012. 大型超声波钢轨探伤车[S].
- [5] 石永生. 依靠杂波设置探伤车检测标准的分析探讨[J]. 中国铁路,2013(5):67-70.