

不除漆状态下的动车组空心车轴涡流检测

张 伟¹, 权 毅¹, 赵闵明¹, 席黄英¹, 蔡元坤¹, 赵 波²
(1. 智沪铁路设备有限公司, 上海 201800; 2. 成都铁安科技有限责任公司, 成都 610000)

摘 要: 动车组空心车轴外表面横向疲劳裂纹是典型的危害型缺陷, 若未及时发现, 可能引发断轴事故。提出了一种阵列涡流无损检测方法, 其能在有 300 μm 厚漆层覆盖的情况下有效检出 0.3 mm 深人工裂纹, 检测能力优于既有超声检测的 1 mm 深刻槽当量。该方法可融入既有动车组车轴无损检测流程, 也可用于轴身等部位超声检测疑似缺陷的复核, 具有较强的实用价值。

关键词: 空心车轴; 不除漆; 涡流检测

中图分类号: TG115.28 文献标志码: A 文章编号: 1000-6656(2023)06-0038-05

Eddy current inspection of EMU hollow axles without coating removal

ZHANG Wei¹, QUAN Yi¹, ZHAO Minming¹, XI Huangying¹, CAI Yuankun¹, ZHAO Bo²
(1. Zhihu Railway Equipment Co., Ltd., Shanghai 201800, China;
2. Chengdu Railway Safety Science & Technology Co., Ltd., Chengdu 610000, China)

Abstract: The transverse fatigue crack on the external surface of the hollow axle of EMU was a typical hazard defect. If it is not detected in time, it may cause axle breaking accident. In this paper, an eddy current array inspection method was proposed, which can effectively detect 0.3 mm deep artificial crack under the condition of lacquer coating with 0.3 mm thickness, and the detection ability was better than the 1 mm deep groove equivalent of the existing ultrasonic flaw detection. This method can be integrated into the existing EMU axle flaw detection process, and used for the review of suspected defects in ultrasonic flaw detection, which have strong practical value.

Key words: hollow axle; no coating removal; eddy current inspection

在役动车组车轴缺陷的主要类型为内部材料缺陷和外表面横向疲劳缺陷。依据标准 TG/CL248—2013《和谐系列动车组空心车轴超声波探伤规程》的要求, 应定期以内孔表面作为探头贴合面对车轴进行超声检测, 其优势在于能够同时检测车轴内部缺陷和外表面缺陷, 部分探伤设备还兼具检测内孔表面缺陷的功能, 其中外表面横向疲劳裂纹的检测灵敏度为 1 mm 深刻槽当量。如果进一步提高检测灵敏度, 则可能会出现信噪比低、误报率高等问题。

磁粉检测具有探伤灵敏度高等特点, 能够发现车轴表面微小裂纹, 但须对车轴表面进行脱漆。若在未除漆状态下直接检测, 则会受漆层厚度、表面平

整状态等因素则会影响缺陷的识别。车轴探伤的区域、质量要求也和修程密切相关, 标准 TG/CL 283—2016《动车组轮对管理办法》规定, 对于外表面横向缺陷, 车轴磁粉探伤时, 不允许任何裂纹及横向缺陷指示。

在车轴检测领域, 国外于 2010 年开发出针对新制车轴的涡流检测系统, 将其与超声检测相结合, 实现了车轴外表面、近表面、内部缺陷的一次性检测, 提高了车轴的检测效率。2016 年中车青岛四方机车车辆股份有限公司在某型号车轴上截取一段车轴作为试样, 并在车轴表面的不同位置制作不同深度缺陷, 采用阵列涡流技术对其进行检测, 在覆盖 100 μm 厚塑料膜条件下, 可以发现深度为 0.1 mm 的人工模拟裂纹, 但探头与圆弧面的吻合程度及稳定程度会影响检测噪声^[1]。2022 年中国铁道科学研究院集团有限公司金属及化学研究所联合智奇铁

收稿日期: 2022-11-04
作者简介: 张 伟(1970—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事轨道交通领域的检修运维工作
通信作者: 赵 波, yy3861680@163.com

路设备有限公司与爱德森电子有限公司,研制了针对 30 mm 内径动车空心轴内孔的涡流检测系统和专用阵列探头,检出了长度为 10 mm,深度为 0.2 mm 的人工刻槽^[2]。

综上,车轴外表面横向缺陷危害性较大,在不除漆状态下提高横向裂纹的检测能力是技术发展的趋势。对于当前在超声检测过程中存在的一些未超闸门的疑似回波,需要认真分析来源、加强复核。涡流检测具有灵敏度高、被检对象与检测线圈间的覆盖层对激发和接收影响小等特点,可进一步研究其检测能力,并将其作为一种缺陷复核的辅助手段。文章采用阵列涡流技术,对不除漆状态下的动车组空心车轴开展检测试验。

1 阵列涡流检测技术

交变电流通过检测线圈时,检测线圈中会产生交变磁场,当线圈靠近被测导电试件时,被测试件会因电磁感应原理产生与激励电场方向相反的感生电动势。感生电动势在闭合导体表面生成闭合流动的感生电流——感生涡流。通过测量检测线圈的阻抗变化可以推断被测表面是否存在缺陷。

涡流阵列检测是一种利用电信号驱动布置在探头中的多个涡流线圈工作的技术^[3-5]。传统的涡流探头可以想象成涡流阵列的某一个线圈,通过仪器软件对各个线圈信号进行处理,可得到融合后的完整 C 扫描图像。C 扫描提高了缺陷检测成像质量和尺寸调整的精度,更直观地反映了缺陷检测结果,具有较高的检测可靠性。涡流阵列在检测过程中减少了移动探头需要的扫描路径,可提高检测效率,单个涡流探头与阵列涡流探头扫查过程示意如图 1 所示。

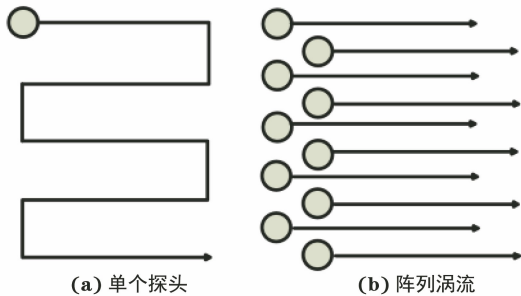


图 1 单个涡流探头与阵列涡流探头扫查过程示意

2 涡流检测试验

2.1 涡流检测系统

2.1.1 仪器

根据产品结构和检测要求,选用 Olympus

Omniscan MX 型阵列涡流探伤仪。该仪器支持 32 通道阵列传感器,操作频率范围为 20 Hz~6 MHz,以电子方式驱动同一个探头中多个相邻的涡流感应线圈,并接收处理这些感应线圈中的信号;使用多路技术采集数据,可避免不同线圈之间的互感。

2.1.2 阵列涡流探头

阵列探头型号为 SBBR-026-300-032,线圈数量为 32,线圈直径为 1.6 mm,中心频率为 300 kHz,覆盖范围为 26 mm。阵列涡流探头尺寸及其实物如图 2 所示,线圈单元沿 x 轴方向排布,分上下两排,上排阵元序号从左至右为 1 到 31 的奇数项,下排阵元序号从左至右为 2 到 32 的偶数项。

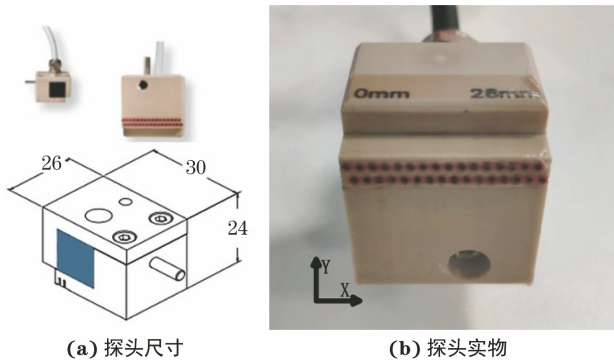


图 2 阵列涡流探头尺寸及其实物

2.1.3 仪器校准

采用 Olympus Omniscan MX 型阵列涡流探伤仪搭配 SBBR-026-300-032 型阵列探头进行检测,以车轴周向裂纹检测为例,其校准过程为:将探头阵列紧贴待检工件表面并保持稳定,探头阵列排布方向与扫查方向垂直;利用设备自动提离校准功能对各阵列单元的提离进行差异补偿校准,接着进行相位角调节,将提离引起的阻抗信号相位角调节到水平,检测时也需要适当调整增益,提高缺陷的检出率。

2.2 试验设计及试块制作

针对车轴表面裂纹检测,为排除轴面圆弧对检测结果的影响,首先在平板试块上设计不同深度缺陷测试单阵元笔式探头检测能力;然后利用相控阵探头对平板上不同角度裂纹缺陷进行检测,测试阵列涡流是否能对缺陷进行多角度检测;最后在试样轴上加工横向裂纹缺陷,通过对比涂漆前后的检测结果来分析漆层对实际检测的影响。

2.3 单阵元涡流探头检测性能

为探究线圈直径为 3 mm 的单阵元涡流探头的检测能力,在钢板上采用线切割制作了 6 个长度为 2.5 mm,宽度为 0.15 mm,深度为 0.1~1 mm 的人

工缺陷,其设计参数如表 1 所示。扫查时,手持笔式探头,使探头垂直紧贴被检试件,从试件左侧平稳移动到右侧,试块不同尺寸人工缺陷形貌如图 3 所示,不同深度缺陷检测结果如图 4 所示。

表 1 单阵元检测缺陷设计参数 mm

缺陷	缺陷尺寸(长×宽×深)
1#	2.5×0.15×0.5
2#	2.5×0.15×0.8
3#	2.5×0.15×1.0
4#	2.5×0.15×0.3
5#	2.5×0.15×0.2
6#	2.5×0.15×0.1

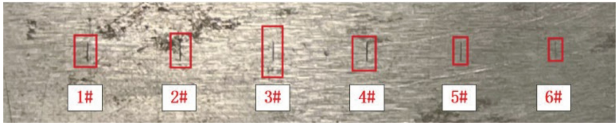


图 3 试块不同尺寸人工缺陷形貌

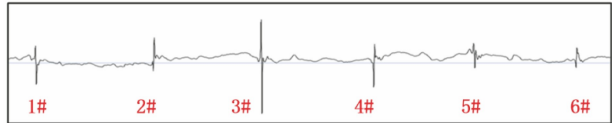


图 4 试块不同深度缺陷检测结果

根据信噪比计算公式与缺陷检出判别方式,对不同深度缺陷检测结果进行统计,其结果如表 2 所示。

表 2 不同深度缺陷单阵元检测结果统计

缺陷	信噪比	是否分辨
1#	7.0	✓
2#	10.6	✓
3#	13.1	✓
4#	8.6	✓
5#	1.9	不明显
6#	4.1	不明显

以信噪比不小于 6 dB 作为缺陷是否检出的阈值,则缺陷深度为 0.1 mm 的 6# 缺陷和缺陷深度为 0.2 mm 的 5# 缺陷视为不可检出,缺陷深度为 0.3 mm 的 4# 缺陷信噪比为 8.6 dB,判定为可检出。所以该笔式涡流探头对长度为 2.5 mm,宽度 0.15 mm 的缺陷,在深度方向的检测能力为 0.3 mm。

2.4 阵列探头涡流检测性能

为进一步提高检测灵敏度,使用线圈直径更小的阵列涡流探头对长为 1.5 mm,宽为 0.15 mm,深为 0.3 mm 的不同角度缺陷进行测试,其缺陷设计参数如表 3 所示。参照车轴上漆工艺进行涂漆处理,漆层厚度约为 240 μm,且模拟实际车轴工况涂

抹油污,试块涂漆后外观如图 5 所示。

表 3 阵列探头检测缺陷设计参数 mm

缺陷	缺陷类型	缺陷尺寸(长×宽×深)
1#	90°刻槽	1.5×0.15×0.3
2#	0°刻槽	1.5×0.15×0.3
3#	45°刻槽	1.5×0.15×0.3

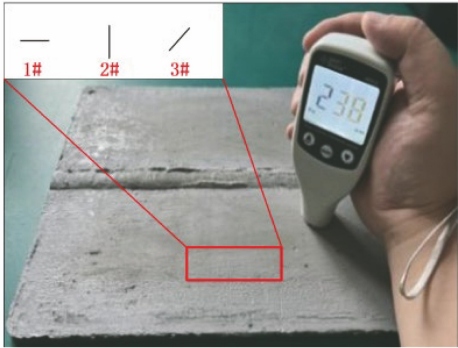


图 5 试块涂漆后外观

检测设备参数设置如表 4 所示,阵列探头由试块左侧扫描至试块右侧,此时阵列排布方向和扫查方向垂直,检测结果如图 6 所示,带漆层裂纹涡流检测信噪比如表 5 所示。

表 4 阵列检测设备参数设置

项目	参数
激励频率(中心频率)/kHz	300
线圈数量	32
探头覆盖长度/mm	26
激励电压/V	2.5
增益/dB	63

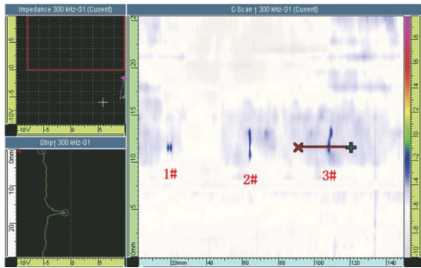


图 6 带漆层裂纹阵列涡流检测结果

表 5 带漆层裂纹涡流检测信噪比

缺陷	信噪比	是否分辨
1#	10.7	✓
2#	8.2	✓
3#	11.0	✓

由图 6 的检测结果可知,漆层厚度为 240 μm 且表面带有油污的情况下,通过调整增益,利用涡流阵列探头可有效检出长为 1.5 mm,宽为 0.15 mm,

深为 0.3 mm 的不同角度人工缺陷。由表 5 可知阵列涡流探头可从不同方向对缺陷进行检测,且相对笔式探头能检测出尺寸更小的缺陷,表面涂漆的缺陷检出证明阵列涡流在检测灵敏度上存在优势。表 5 中检测信噪比最低为 8.2 dB,推测若缺陷深度小于 0.3 mm,其信噪比将低于 6 dB 而不能进行分辨,因此可得出在漆层厚度 240 μm 状态下,该阵列涡流探头的可检最小缺陷尺寸为 1.5 mm \times 0.15 mm \times 0.3 mm(长 \times 宽 \times 深)。

2.5 空心轴裂纹涂漆前后检测能力试验

在某型号车轴上截取一段车轴作为试块。根据所使用的阵列涡流探头最小可检缺陷尺寸,在车轴表面的不同位置制作宽度为 0.15 mm,深度为 0.3 mm 的不同轴径的横向人工裂纹(见图 7),由于车轴表面为圆弧状,缺陷长度则是由圆弧直径与缺陷深度决定的完全贯穿长度。其中 1#裂纹位于轴颈,2#裂纹位于轴肩,3#裂纹位于轮座,其缺陷设计参数如表 6 所示。

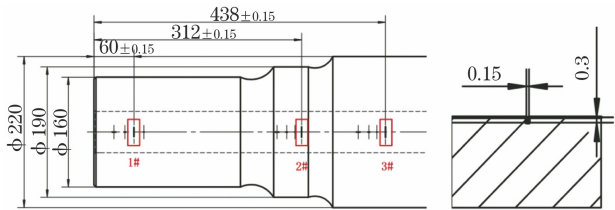


图 7 车轴试件人工缺陷设计参数与横向缺陷截面

表 6 车轴试件缺陷设计参数

缺陷	缺陷类型	部位-轴径/mm	缺陷尺寸(宽 \times 深)/mm
1#	横向刻槽	轴颈-160	0.15 \times 0.3
2#	横向刻槽	轴肩-190	0.15 \times 0.3
3#	横向刻槽	轮座-220	0.15 \times 0.3

首先,验证涡流阵列探头在未涂漆状态下对 0.3 mm 横向裂纹的检测能力。检测时,阵列涡流探头在轴身进行 Z 字型扫查(见图 8),扫查方向为轴向,此时线圈阵列排布方向与刻槽相互平行,试块轴扫查现场与缺陷局部放大如图 9 所示。

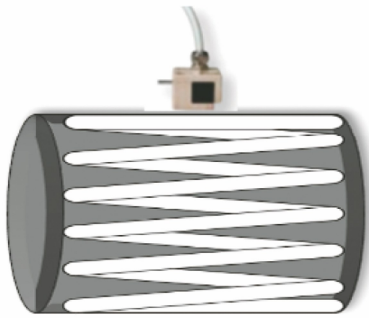


图 8 车轴试件的扫查方式示意

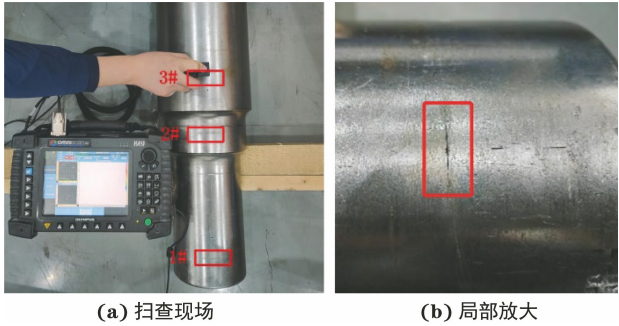


图 9 车轴试件轴扫查现场与缺陷局部放大

1#~3#缺陷检测结果如图 10 所示,其包含单通道阻抗图(左上)、单通道距离-幅值图(左下)和 C 扫图三部分,可见缺陷信号相对背景噪声明显,能够有效分辨出缺陷,信噪比计算结果如表 7 所示。其中,由于 2#缺陷位置接近圆弧过渡区域,其涡流检测的阻抗信号受到界面变化的影响,信噪比较 1#和 3#缺陷的低。

为模拟车轴在役检测状态,对空心车轴缺陷位置进行人工涂漆处理。首先进行底漆涂刷,待底漆干后进行面漆涂刷,待面漆干后用漆膜仪进行漆层厚度测量。漆层测量值为各部位随机测量 10 个点的平均厚度,不同部位漆层厚度如表 8 所示,涂漆后测量现场如图 11 所示,带漆层状态下不同缺陷的信噪比如表 9 所示。

由于进行了涂漆处理,需将仪器增益提高 10 dB,其余参数保持一致,带漆层状态下横向裂纹检测结果如图 12 所示。通过对比图 10 与图 12 可知,带

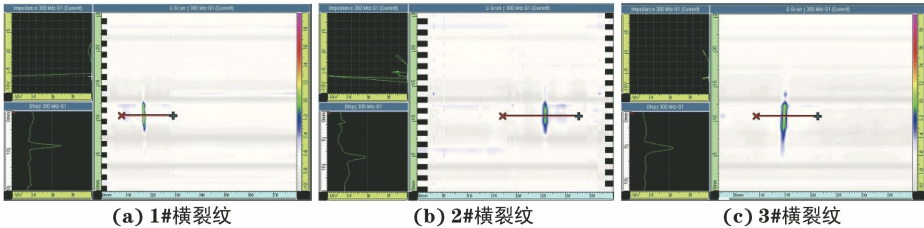


图 10 未涂漆时横向裂纹检测结果

表 7 未涂漆状态下不同部位缺陷的信噪比

缺陷编号	部位-轴径/mm	信噪比	是否分辨
1#	轴颈-160	17.2	✓
2#	轴肩-190	8.5	✓
3#	轮座-220	21	✓

表 8 车轴不同部位漆层厚度 μm

缺陷编号	部位	厚度均值
1#	轴颈	316.50
2#	轴肩	259.43
3#	轮座	341.11

漆层状态下缺陷检测结果指示长度变大。此现象是由于对带漆层车轴检测时,探头相对于缺陷的提高增加,工件中涡流感应的磁场经过扩散,阻抗发生变化的阵元数量增加,在 C 扫图中缺陷指示长度也相应增加。对比表 7 与表 9 可见带漆层下的缺陷信噪

比相较于未涂漆下的信噪比有所下降,且下降幅度在 1 dB 以内,两种检测状态下各部位缺陷信噪比大小分布趋势一致,3# 缺陷信噪比最高,其次为 1# 缺陷,2# 缺陷最低,但都高于 6 dB,为可分辨缺陷。因此可得出,在对车轴进行涂漆处理后,可通过提高增益的方式来降低漆层对检测灵敏度的影响。



图 11 车轴试件涂漆后测量现场

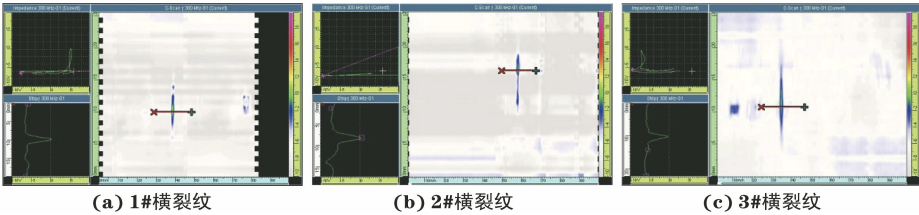


图 12 带漆层状态下横向裂纹检测结果

表 9 带漆层状态下不同部位缺陷的信噪比

缺陷编号	部位-轴径/mm	信噪比	是否分辨
1#	轴颈-160	16.7	✓
2#	轴肩-190	8.2	✓
3#	轮座-220	20.6	✓

3 结论

采用阵元大小为 1.6 mm,阵元数量为 32 的阵列式涡流探头,能有效地在车轴漆层厚度约为 300 μm 时对表面深度为 0.3 mm 的横向人工开口缺陷进行检测,检测效果直观。阵列涡流对微小缺陷的检测能力优于当前超声探伤 1 mm 当量刻槽的极限检测能力,该方法可运用于未除漆状态下车轴表面缺陷检测以及超声检测后的缺陷复核工作。

针对试块轴上不同外圆表面上的人工缺陷,为了使探头更贴合检测面,在后续实际运用过程中可

设计能适应不同弧度检测面的夹具,保障两者较好贴合的同时,还可避免探头与轴面冲击和硬性摩擦,提升探头寿命。

参考文献:

[1] 周庆祥,傅晔,詹发福,等. 阵列涡流技术在车轴在役检测中的应用研究[J]. 金属加工:冷加工,2016(1):399-400.

[2] 黄凤英,薛清涛,李庆耀,等. 动车组空心轴内孔表面阵列涡流检测系统研发[J]. 高速铁路新材料,2022,1(4):52-56.

[3] 徐可北,周俊华. 涡流检测[M]. 北京:机械工业出版社,2004.

[4] 郭德瑞. 汽轮机叶片与叶根槽阵列涡流检测技术应用[J]. 中国设备工程,2018(12):92-95.

[5] 尹利,尤永洪,路凤玲,等. 阵列涡流检测性能验证技术研究[J]. 金属加工(热加工),2022(6):114-116.