

在役火车车轮踏面探伤方法研究

摘要: 文章介绍了一种新的在役火车车轮的检测方法, 分析了它与传统车轮检测方法相比较的技术特点和优势及应用前景。

关键词: 在役火车车轮 踏面 无损检测 电磁超声探伤

Inspection of In-Service Railroad Wheel Treads

JIA Huiming FAN Hong ZHANG Weidai TONG Kai

YUE Dongping LIU Tao DU Jiansheng

(Division of Analysis and Testing, CISRI, Beijing, 100081)

Abstract: This paper introduces a new inspection technique for in-service railroad wheel treads, and its characteristics and advantages in comparison with the conventional inspection techniques for railroad wheels.

Keywords: in-service railroad wheel, treads, nondestructive testing, electromagnetic acoustic testing

火车是当今人们出行的重要工具。火车的速度越来越快。以德国为例, 它现在投入运行的第三代高速列车的正常运行时速已达 330 公里。在我国, 近年来伴随着经济的快速发展, 火车的速度也一再提高, 以正在投入建设的京沪高速铁路为例, 设计时速将达到 300 公里。随着火车速度的不断提高, 火车运行的安全性越来越引起人们的关注, 对火车各个部分的性能、质量也提出了更高的要求。

1. 火车安全运行与车轮踏面缺陷

车轮是火车重要的运动和承载部件, 其质量优劣对保证火车的安全运行起着至关重要的作用, 一旦引发事故, 往往是灾难性的。1998 年 6 月, 一向以安全可靠著称的德国高速列车发生了轰动世界的列车倾覆事故, 造成了大量的人员伤亡和财产损失。而导致此次事故的主要原因, 经事故后分析是火车轮踏面上产生的疲劳裂纹失察所致^[1]。在同年 8 月, 我国江岸 554-8081 次货车发生脱轨事故, 其诱因同样是火车轮踏面的疲劳裂纹。由此可见, 火车轮中的缺陷、尤其是车轮踏面裂纹是引发事故的巨大隐患。毋庸置疑, 如果此类缺陷不能尽早有效的检出并及时采取措施, 随着火车的进一步提速、车轮运行状况进一步恶化, 由此引发的事故会不断增多, 后果是不堪设想的。



图 1. 列车倾覆事故

造成引发列车事故的车轮缺陷的主要原因有两个, 其一, 在车轮用钢的冶炼和加工过程中, 往往会在车轮的表面和内部产生一些气孔、砂眼、夹杂物和划痕等缺陷。由于这些缺陷的存在, 在车轮运行过程中造成了应力集中。在应力集中区域金属的承载能力较小, 极易延展出裂纹; 而在裂纹端头又会形成新的应力集中。在连续承载情况下, 裂纹不继扩展, 使金属能够传递应力的部分越来越少, 直到剩余部分不足以传递载荷时, 金属构件即彻底崩溃, 灾难性事故也就随之发生了。由此可见, 车轮事故是沿寻“应力集中→裂纹→新的应力集中→裂纹扩大→车轮破坏”的恶性循环过程发展而来。其二, 在列车高速运行中, 由于车轮与钢轨之间的磨擦会在车轮踏面产

生局部高温；当列车启动和制动时，温度会更高。列车停运后，车轮随之冷却。由于温度的频繁交替变化，也会在车轮表面产生应力集中，从而在原本完好的车轮踏面产生疲劳裂纹。这种疲劳裂纹又必然会在车轮运行过程中逐步扩展，同样可能导致事故的发生。需要强调指出的是，这种裂纹并非由夹杂物等冶金缺陷所致，完全由车轮在运行过程中的疲劳引起。

由于现有的车轮冶金制造技术不可能完全杜绝缺陷的产生；而在车轮的运行中，原有的冶金缺陷会不断扩展，同时新的裂纹还会不断产生。在目前火车普遍提速的情况下，实现对在役列车车轮的探伤，用以经常性地监视车轮质量状况，消除事故隐患，已经成为当今世界各国共同瞩目的重要问题。

2. 传统的在役火车车轮探伤技术

例检、段检、小修、大修是铁道部门雷打不动的例行公事。而对在役车轮的质量检测一般在车辆大修时进行。通常采用的车轮检测手段，以超声波探伤和磁粉探伤为主。

传统的车轮超声波探伤采用压电超声纵波法，主要用于检测车轮内部缺陷^[2]。该方法的优点是灵敏度高。但是，这种方法存在着很大的局限性。首先是对车轮径向缺陷的检测灵敏度低，而径向缺陷恰恰是导致车轮剥离甚至崩裂的致命缺陷；其次是操作过于复杂，尤其是在火车不解体的情况下，要对车轮进行全面扫查更是困难，由于车轮大部分被其他部件所遮盖，因而探伤只能分阶段进行，即一边动车一边探伤，有时一台车需经多次移动方能完成探伤作业。而更重要的是，对于压电超声纵波法，车轮踏面及踏面下 10mm 内区域属于检测盲区。目前，对这一区域的检查尚没有十分理想的检测手段。

早期对车轮踏面沿用传统的压电超声表面波法进行探伤的尝试，也由于离不开液态耦合介质、声传播距离短和探伤效率低等原因而未能奏效。同时，液态耦合介质的使用也对动态探伤形成了根本性的制约。

磁粉探伤是一种探测工件表面缺陷的无损检测方法，其特点是灵敏度高，操作简单。但当用于检查车轮时，只能探测其表面极浅的范围，且判伤要靠人工进行，所以该方法仅适用于车轮的静态手工探伤。与上述压电超声探伤相同，在车轮不解体的情况下，由于车轮被其他部件和铁轨遮挡，因此对车轮及其踏面进行完全的磁粉检查是不可能的。磁粉探伤法只适用于在车轮生产厂或较大的路内维修厂内，对组装前或解体后的车轮的检验，一般用来检查轮辋和辅板的表面缺陷。

3. 在役车轮踏面的电磁超声波检测方法

随着无损检测技术的不断发展，近年来一些工业发达国家相继开始转向研究不需要耦合介质的非接触式车轮探伤技术——电磁超声表面波法^[3]。这种方法不仅可以弥补传统方法存在检测盲区的不足，还可以将其装设在铁道线上，对行驶中的列车车轮实现动态在役探伤。由于将电磁超声波法用于车轮踏面探伤的一系列优点（诸如不用耦合剂、非接触、快速、灵敏等），将这一技术尽快地用于在役运行中的列车已成为共识。

3.1 电磁超声表面波的激发原理

在车轮中激发表面波是由电磁超声表面波换能器实现的。电磁超声表面波换能器的原理示意图如图 2 所示。电磁超声换能器由一个通以高频电流的线圈和磁铁组成。高频线圈为徊折形也称蛇形，置于磁铁的 N 极和 S 极之间。由于线圈相邻绕组的电流方向相反，所以它们在车轮中感

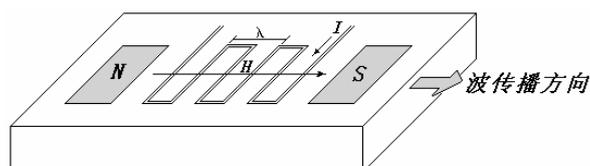


图 2. 表面波电磁声换能器

应出反向流动的涡流。涡流在磁铁的磁场中受到洛仑兹力作用。根据右手定则我们可以判断出涡流受到的洛仑兹力的方向垂直于车轮踏面。在洛仑兹力的作用下，车轮表面趋肤层内的磁畴产生切向壁移，沿车轮表面传播而形成表面波。

电磁超声换能器在车轮中产生表面波的原理主要是磁致伸缩作用。我们知道，构成车轮的铁磁性钢材是由许多自发磁化的磁畴组成。在无外磁场作用时，这些磁畴的自发磁化方向杂乱无章地分布着，各磁畴磁性相互抵消，因而宏观上表现为磁中性。但当外磁场作用后，磁畴产生壁移和旋转，最后顺外磁场方向排列起来。在这些磁畴运动中，会伴随着宏观形变，这就是所谓的磁致伸缩效应。磁致伸缩力与外加磁场大小有关，这可由图3看出。磁致伸缩超声振幅与外磁场不呈单调函数关系，它有两个峰值出现。当外磁场强度达到某一特定数值时，磁致伸缩超声振幅出现最大值。在这一点处对应着表面波的最大值，即最高检测灵敏度。

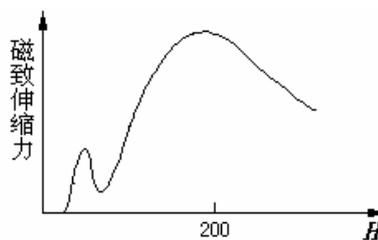


图3. 磁致伸缩与磁场强度的关系

在上面分析电磁超声表面波激发原理中我们看到，从本质上讲，车轮本身也属于换能器的一个不可缺少的组成部分，超声波直接在车轮中产生。正因为这样，电磁超声不需要耦合介质。

3.2 在役车轮踏面的电磁超声探伤技术

在役火车车轮踏面的探伤包括两种方式。一种是在车辆非解体或解体状态下的手工探伤。它可以在车辆进行例检、段检、小修或大修时，由检测人员手持便携式电磁超声波仪器和探头，对车轮踏面进行探伤。这种探伤只在车轮踏面上的两个点进行点接触式探测，简单快速，没有检测盲区。

车辆非解体或解体状态下车轮手工探伤可以作为例检和维修时的检测手段。它技术难度小，所用装置简单，人员易于掌握和操作，很容易大面积推广，可在较短时间内改变目前例检中用榔头听声音的车轮原始检测的局面。

在役火车车轮踏面探伤的另一种方式是，在火车运行的状态下自动完成对整个车轮踏面的检测。它是在钢轨中埋设电磁超声换能器（简称探头），当列车行进和车轮滚动通过探头时，依靠表面波的自行传播能力，在车轮接触探头的瞬间完成对车轮踏面的检测（参见图4所示）。在这种车轮检测方式中，探头的安装方法是在钢轨的外侧挖一个缺口，将探头固定于缺口内。由于所需缺口很小，所以不会影响钢轨的承载能力。

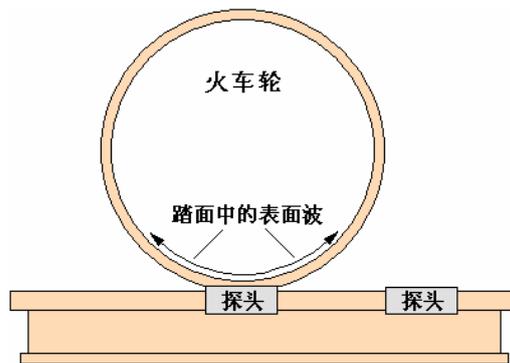


图4. 车轮踏面中表面波的传播

将电磁超声表面波用于火车轮踏面检查时，存在着声波“入射点”和“透过波对应点”的检测盲区。要实现车轮踏面的无盲区检查，需要克服这个检查盲区的不足。在每侧铁轨上相隔四分之一轮长处分别埋设2个电磁超声探头，实现互补检查，即可消除检测盲区。

4. 车轮踏面缺陷判废尺度与电磁超声表面波检测能力

火车在行进过程中由于动态的冲击作用，车轮中会出现热裂纹或疲劳裂纹，这些裂纹严重时会造成整个车轮的破裂。要详尽地描述这些非连续性缺陷何时产生并非易事。同样地，预言何种缺陷及其尺寸即造成车轮的致命破损，目前尚未有统一定论，但是下面的一些理论和实践有助于我们利用电磁超声表面波评价在役车轮质量和设置拒斥标准。

经断裂力学分析，认为具有危险性的车轮踏面疲劳裂纹的深度一般为9mm。1995年在美国召开的关于对在役铁路的无损评价学术会议上，有关专家提出将6mm深的裂纹界定为不再安全

的缺陷。

我国的铁道部科学研究院金化所认为：车轮的疲劳裂纹是从踏面下约 10mm 的地方发展起来的，先是沿着周向发展，然后再折向径向，形成最危险的横向裂纹。对这种裂纹最有效的检测方法是用 0.4MHz 表面波进行探测，它能达到车轮踏面下约 10mm 的深度，这是车轮最危险的部位，并认为目前美国和德国等在对车轮疲劳裂纹进行检测时都使用 0.4MHz 的表面波，证明这一结论的正确性。

德国弗朗霍夫无损检测研究所为德国铁路公司研制的用于高速列车车轮踏面检验的全自动超声探伤系统，使用频率为 0.4MHz 的标准人工缺陷是 1mm 深、20mm 长的锯口。这种系统已经在德国汉堡和慕尼黑的德国高速列车修理厂以及西班牙的马德里等应用多年^[4]。

我们钢铁研究总院采用自己研制的电磁超声表面波技术，使激发出的声波束沿着车轮踏面及踏面下约 10mm 深度内周向传播，形成对车轮表面和近表面的检查。总结我们多年在国内多个路局对在役车轮的检测实验认为，在我国国情下，既要检出车轮中的有害缺陷保证行车安全，又要避免因过多检出微小瑕疵使车轮提早退役而造成浪费，应将在役车轮的缺陷判废标准设置在一个适中尺度上，比如 3mm 深、20mm 长的横向裂纹。此结论可供无损检测的同行们和铁道系统的专家们商榷。

5. 在役车轮踏面自动探伤技术的发展

在钢轨线路上嵌入超声波探头对行进中的车轮踏面进行自动检测，是一种新的车轮在役探伤理念。钢铁研究总院从本世纪初开始这一技术的尝试和研究工作。我们利用高频交变磁场在车轮踏面激发超声表面波，所激发出的声束依靠自己的“爬行”能力，沿着踏面及踏面下周向自行传播，在车轮与探头接触的瞬间，实现对被检车轮表面及近表面的覆盖检测。



图 5 探头嵌入钢轨中的车轮踏面检测

我们在实验室中模拟真实铁道线上车轮的运行情况，在钢轨中装设电磁超声换能器（如图 5 所示），并使车轮在钢轨上使用。通过这种方法，我们能够很好地发现车轮上垂直于踏面的疲劳裂纹、表面擦伤和掉块等，参见图 6 和图 7 所示。

超声表面波在钢铁材料中的传播速度约为 2900m/sec。要确保超声表面波将车轮踏面中的缺陷可靠地检测出来，需使声束能够在车轮表面至少传播两周或两周以上。由此，电磁超声探头与车轮的接触时间不应小于 2ms。按照我们研制的探头长度计算，允许火车的行进速度约为 30km/h。这一速度适合用于列车进库一段的轨道上的检查。



图 6. 车轮踏面缺陷



图 7 车轮踏面缺陷的波形显示

电磁超声探伤虽然是一种非接触式探伤方法，但它对提离间隙的要求是十分苛刻的。按照电磁超声

探伤理论，探头距离被检试件每增加 1mm，检测灵敏度将下降 96dB。一般来说，在火车车轮探伤中，探头距车轮踏面的距离应保持在 0.5mm 范围之内。火车的重量是巨大的，当列车驶过时，每个车轮对钢轨的正向压力超过数十吨，并伴有侧向碾压和剧烈的振动。所以，使探头对车轮的近距离跟踪和保护探头不受损坏，是能否保证检测得以成功的关键。此外，电磁超声换能器埋在铁道线上，其所处的环境是非常恶劣的，如电磁干扰、振动干扰、风霜雨雪等等，这些都会给检测带来噪声。这就要求采取屏蔽、密封、以及仪器降噪等一系列措施，确保检测的可靠性。

在役火车车轮自动检测是一种实时动态检测，它需要在实施探伤（多路信号的触发、发射、接收、处理、显示、判伤等）的同时，完成检测结果的纪录和存储等多项工作。在这些方面，我们均进行了大量卓有成效的尝试。

6. 结束语

随着火车不断提速，各方面对火车的安全性能要求越来越高。实现对在役火车车轮的质量状况实时监测，对于消除事故隐患具有十分重要的实际意义。据统计，国内现有几十家车辆修理厂和几百家车辆段。如果能够将研制的非接触式快速电磁超声探伤技术用于在役车轮踏面的检测，特别是能够实现列车入库行驶中的自动检查，对于及时发现车轮事故隐患、改善车轮质量状况，将会起到重要的作用。

参考文献

- [1] 李湘渊. 德国铁路惨案的“元凶”——金属疲劳. 金属世界. 1999, (1): 6~7.
- [2] Bray D E. Ultrasonic Flaw Detection in Model Wheels. Ultrasonic, 1973, (March):66~72.
- [3] Schramm R E. Crack Inspection of Railroad Wheel Treads by EMATs. Nondestructive Characterization of Materials. Proceeding of the 3rd International Symposium Sarbricken, FRG, October 1988. 66~72.
- [4] 范弘. 火车车轮超声探伤技术研究与开发. 钢铁. 2000, (12): 60~63.