

机车轮箍和整体轮的超声波探伤

刘 宪

(湖东电力机务段,山西大同 037300)

范 军

(秦皇岛爱科电子技术开发有限公司,河北秦皇岛 066200)

Ultrasonic Testing of Locomotive Hoop

LIU Xian

(Hudong Power Locomotive Depot, Datong Shanxi 037300, China)

FAN Jun

(Qinhuangdao Echo Electronic Development Co., Ltd., Qinhuangdao HeBei 066200, China)

中图分类号: TG115.28

文献标识码: B

文章编号: 1000-6656(2006)09-0498-04

车轮是机车走行部重要部件,在运行中不仅起着车轮导向作用,还承受着机车自重、钢轨的冲击、机车的牵引力和制动力,是一个受力较大且复杂、工作条件恶劣的部件,它的质量好坏直接关系着机车的运行安全。随着铁路运输需要,机车速度不断提高、牵引吨数逐渐增加以及段修公里的延长,对车轮质量性能提出更高的要求。我国铁路机车车轮结构有两种形式,一种是组合式车轮,由轮箍和轮心组成,即将轮箍旋削加工后留有一定的紧余量经过超声波探伤确认无缺陷超标后,均匀加热到 $200 \sim 320^{\circ}\text{C}$,套装在车轮轮辋上,因此轮箍是在热应力和组装应力下服役,材质容易产生疲劳,并在运行中不断发展,如果未及时发现采取措施,最终发生轮箍崩裂,轻者造成列车脱轨,重者造成列车颠覆的重大行车事故;另一种是近年来采用较多的整体车轮,虽然整体车轮消除了轮箍弛缓和崩箍故障,但踏面掉块同样威胁机车的运行安全,近几年铁路部门投入大量的人力和物力,对机车车轮和轮箍进行超声波检测,有效地控制了轮箍崩裂,但仍有机车轮箍崩裂和整体车轮踏面掉块发生,威胁着铁路运输安全。

1 车轮故障

1.1 轮箍崩裂

经过多次轮箍崩裂事故分析,其根本原因是轮

箍中存在着冶金缺陷和疲劳缺陷,而冶金缺陷的存在往往是疲劳缺陷发展的根源。冶金缺陷是轮箍在冶炼过程中遗留下的气孔、夹渣物、白点和偏析等缺陷,在轮箍轧制过程中形成的沿轮箍圆周方向的点状或片状缺陷,其厚度较小,在圆周方向具有方向性,这些带有原始冶金缺陷的轮箍装车投入运行后,在轮箍和钢轨接触面受到较大的轮轴牵引力作用下,在缺陷四周产生微小裂纹,并形成疲劳源,随着运行时间的增长,这些微小裂纹逐渐扩展,进一步形成疲劳核,然后向轮箍圆周方向发展,当应力达到最大时裂纹就向前推进一级,当应力消失时裂纹停止发展,这就形成裂纹断面上的中止线;当裂纹发展到一定的面积后,在缺陷两侧沿大约 $20^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 角度分别向内径面和踏面斜向发展,使轮箍有效承载面积逐渐减小,当缺陷发展到轮箍的剩余面积达到承载面积时,裂纹走向突然折向内径面和踏面,形成常见的轮箍崩裂过程。特别是轮箍踏面下 30 mm 范围内存在缺陷时,缺陷在运行中发展更快。也有的缺陷从两侧同时向踏面方向斜向发展,形成轮箍踏面掉块。

随着铁路运输向重载、高速方向发展,车轮受到的高频振动和冲击载荷明显加大,近年来又发生轮箍径向裂纹并崩裂事例,例如 2002 年大同西机务段连续发生两起轮箍崩裂事故,特点是轮箍断面平整且垂直踏面,具有突发性,裂纹源起于轮箍标记处,断裂面有明显的疲劳核,并以标记字处为圆心轴向

收稿日期: 2005-04-22

作者简介: 刘 宪(1969~),男,山西大同人,负责技术管理工作。

向内发展,形成半圆形疲劳扩展,呈典型的贝壳状和海滩形式的裂纹中止线,当裂纹发展到 25~40 mm 时发生脆性崩裂。此类崩裂断面经常在轮箍标记字头处,原因是该处存在缺陷、压制标记时形成应力集中、轮箍加工时过盈量大、镶装时冷却速度过快、轮箍加热温度不均匀及司乘人员操作不规范等,但轮箍崩裂不会单纯由一种因素造成,而是在上述几种因素同时综合作用下造成的。上述两种轮箍崩裂,前者是由周向缺陷引起,后者是由径向缺陷引起,如能将这两种缺陷有效地检出,将疲劳裂纹消灭在萌芽状态,就可以确保机车的行车安全。

1.2 整体车轮踏面掉块

为克服组合式车轮轮箍崩裂或弛缓,近年在新造机车上采用整体车轮,尽管整体车轮达到踏面磨损极限时,必须更换整个车轮,但在经济上仍有优势,特别是当采用现代车轮安装技术时,排除了对车轴产生损伤的可能,采用耐磨踏面弯曲辐板时,可大大提高车轮寿命。整体车轮生产工序有坯料准备、加热、热变形、热处理、机加工和车轮检验与试验,如我国太重整轧钢轮生产工艺流程为,钢锭折断→称重→加热→除鳞→压轧(6 000 t 水压机镦粗、成形,1 000 t 水压机冲孔、轧制,3 000 t 水压机打印及压弯)→空冷→等温处理→热处理(加热、淬火、回火)→抛丸处理→机加工→抛丸强化→检验→成品检查入库,从车轮生产工艺分析,以及北京铁路局发生的两起整体车轮故障分析解剖验证,整体车轮缺陷也是在钢锭生产过程中产生的,其形成原因和分布与轮箍相同,在运用中缺陷沿四周发展,最终导致车轮踏面掉块,因此整体车轮和轮箍组装前要进行逐个检测,防止带有超标缺陷的车轮装车运行。

2 超声波探伤方法

探伤方法直接影响缺陷的检测效果,选择探伤方法的基本原则是,超声波声束尽可能覆盖整个轮箍断面,且声束尽可能和缺陷垂直,以获得最大的缺陷声压反射量,形成较高的探伤灵敏度。受缺陷的形状、大小、性质、取向、内含物及探头种类等多种因素的影响,各种探伤方法都有其可靠性和局限性,因此必须针对轮箍和整体车轮存在缺陷的取向来选择探伤方法,轮箍和整体车轮探伤主要检测沿车轮周向的冶金缺陷和径向的疲劳缺陷,所以轮箍超声波探伤采用纵波垂直入射法和横波斜入射法,前者采用纵波直探头和双晶片探头,后者采用横波斜探头,

两种方法的扫查面相同,即整个轮箍的内表面或踏面(整体车轮为踏面)。根据以往轮箍崩裂和整体车轮掉块事故分析,新制轮箍和整体车轮中主要缺陷为制造缺陷,采用直探头或双晶探头纵波垂直入射法检测;而在役轮箍(整体车轮)主要检测疲劳缺陷,因此采用横波斜探头进行探伤检测。

2.1 新制轮箍(整体车轮)的超声波探伤

新制轮箍和整体车轮超声波探伤主要检查是否存在冶金缺陷,目前采用双晶纵波探头垂直入射法,如 TB/T 2995—2000《铁道车轮和轮箍超声波检验》,或采用直探头垂直入射法进行检测,这两种探伤方法均将探头放置在轮箍内径面或整体车轮的踏面以及内侧面上,对整个轮箍圆周方向扫查一遍,同时采用直探头在轮箍或整体车轮内侧面上进行轴向检测和透声性能检测。

2.1.1 轴向检查

采用 2.5P ϕ 20 mm 直探头在 2 号对比试块 ϕ 3 mm 平底孔反射回波调至荧光屏满刻度的 50% 作为基准,然后增益与最大探测声程处 ϕ 3 mm 当量平底孔的分贝值,在此基础上再补偿试块与实物车轴的耦合差(一般为 4 dB),作为探伤灵敏度。然后在轮箍或整体车轮内侧面上涂上耦合剂进行探伤检查。

2.1.2 径向检查

用分割式纵波探头,将车轮轮辋 6 号对比试块 ϕ 3 mm 平底孔反射回波调至荧光屏满刻度的 50% 作为基准,然后增益与最大探测声程处 ϕ 3 mm 当量平底孔的分贝值,在此基础上再补偿试块与实物车轴的耦合差(一般为 4 dB),作为探伤灵敏度。然后在轮箍内径面或整体车轮踏面上涂上耦合剂进行探伤检查。

2.1.3 材质透声性能检查

用 ϕ 20 mm 纵波直探头,将轮箍 4 号试块 120° ϕ 7 mm 锥底孔处底面回波调至荧光屏满刻度的 50% 作基准,再补偿耦合差(一般为 4 dB 及以上),作为轮箍透声探伤灵敏度。然后在轮箍或整体车轮内侧面上涂上耦合剂进行透声性能检查。

2.1.4 直探头探伤基本原理及存在的问题

直探头纵波探伤主要发现与探测面平行或稍有倾角的缺陷,而对垂直于探测面或与探测面有较大夹角的缺陷难以发现。方法是选用 2.5P ϕ 20 mm 的直探头,在轮箍组装前从内侧面上,对整个轮箍进行扫查,当轮箍内部没有缺陷时,声束到达轮箍外侧,被外侧面反射回来,在探伤仪荧光屏上显示始波

和底波,当声束遇到小于晶片面积的缺陷时,一部分声波被缺陷反射回来形成缺陷波,另一部分声波绕过缺陷传播到轮箍外侧面形成底波,在探伤仪荧光屏上依次显示始波、缺陷波和底波。当缺陷面积大于探头发射声束截面积时,由于声束被缺陷全部反射回来,不能到达外侧面,在探伤仪荧光屏上只显示始波和缺陷波,而没有底波。该方法操作方便,探伤图形简单、直观,容易判伤,对冶金缺陷的探测灵敏度高,缺陷的反射波形较高,但缺陷走向只有和声束垂直才能取得最大的反射量,随着缺陷和声束夹角的增大,缺陷的反射量逐渐下降,缺陷的检测能力也相应降低。同时直探头垂直入射时因近场区中有极大值和极小值反射量的影响,使缺陷无法定量。

2.5P ϕ 20 mm 直探头的近场长度 N 为

$$N = \frac{D^2}{4\lambda} \approx 42 \text{ mm}$$

式中 D ——探头直径

λ ——钢中纵波波长

可见,在 ϕ 20 mm 直探头下有 42 mm 长度的近场区影响,近场区的缺陷易漏探,且距离探头越近,影响越大。超声波探伤缺陷定量只有在 3N 范围外适用, ϕ 20 mm 直探头检测中,3N=126 mm,而机车新轮箍轴向厚度为 140 mm,所以轮箍缺陷定量不能以简单的理论计算来确定。必须制作距探测面不同深度距离的人工缺陷试块,当发现缺陷时要和试块上埋藏深度相同或相近距离的人工缺陷相对比,缺陷定量比较繁琐。

2.1.5 双晶片纵波探头垂直入射法原理及特点

双晶片纵波探头由两个晶片组成,分别接受和发射声能,探头在轮箍中形成一个菱形的声束交汇区,在此交汇区中声能集中,探伤灵敏度高,缺陷形成的反射波高。在检查中将探头放置在轮箍内径面(整体车轮在踏面)上,声束覆盖整个轮箍,该探头探伤盲区小,近表面缺陷检查能力强,探伤图形、波形和直探头相似。但同样存在缺陷定量不准确的弊病,原因之一是在探头声束交汇区中,缺陷虽处在不同深度但反射能量基本相同;二是缺陷定量同样处在 3N 区域中,不能利用理论计算缺陷的大小;但对于面状和条状缺陷,双晶片纵波探头能够准确地测出缺陷的埋藏深度和大概形状,对缺陷定性较为有利,由于新制轮箍和整体车轮内部缺陷具有典型的周向方向性,采用双晶片纵波探头探伤是近几年新轮箍和整体车轮探伤的主要方法。

2.2 在役轮箍的超声波探伤

2.2.1 斜探头横波斜入射法基本原理及特点

在役轮箍受力最大区域是踏面下 0~30 mm 范围内,因此若该区域内存在缺陷,则缺陷不但会快速发展,而且不易被探测到,埋下了崩箍的隐患。斜入射法因横波波长较纵波波长小一倍,探伤灵敏度高,缺陷容易被检出,方法是将斜探头放置在轮箍踏面上,声波在轮箍内沿周向方向斜向传播经过踏面和内径面反复折射形成 W 形路径传播下去,当轮箍内没有缺陷时,声波一直传播下去直到声能衰减,在探伤仪荧光屏上只显示始波;当轮箍内存在缺陷时,一部分声波被缺陷反射回来形成缺陷波,在探伤仪荧光屏上显示始波和缺陷波。但因声波是斜向入射,为保证缺陷和声波垂直,须从轮箍周向正反两个方向进行扫查,工作量大;另外斜入射法对径向缺陷比较敏感,反射能量大,对于周向缺陷尤其是表面光滑、平整的面状缺陷,声束和缺陷有一定夹角,缺陷不能形成回波,容易漏检。

2.2.2 不动车横波探伤原理

无论是采用直探头、斜探头还是采用双晶片探头检测轮箍时,需要探头扫查整个探测面,必须转动车轮,这在车轮解体时容易实现,当探伤在役轮箍时,由于机车车体和单缸制动器掩盖了大半个车轮,需要牵引机车一边动车一边探伤,由于动车时其他检修人员不能作业,且需要动车 4~6 次才能检测完一个车轮轮箍,费时费力,对探伤人员不安全。不动车探伤轮箍是利用轮箍踏面外圆凹面将声束折射后能够聚焦,同时声束避开使其发散的內径面,以保证声束经过多次折射后还有足够的能量,使缺陷形成回波;同时利用一个圆内经过同一点有两条相同的弦,也就是说一个缺陷实际是经过不同角度探伤两次,保证缺陷能有足够的反射量,以确保其检出率。

2.2.3 波形分析

不动车轮箍探伤是利用横波斜入射法,对周向缺陷不敏感,对径向缺陷比较敏感,尤其是开口型径向裂纹会形成很高的反射回波,波形特点为波形单一、笔直,波峰陡峭,根部无杂波,移动探头波形也在时基线上移动,在四次声程中均会出现,在时基线上会保留一定距离;轮箍标记字头也会形成反射波,波形和疲劳裂纹波相同,但不是单一的波形,而是几个波同时出现。如果轮箍标记字头处向车轮轴向发展较快而径向发展缓慢,未发展到內径面和踏面,形成月牙形疲劳裂纹,裂纹反射波和轮箍标记字头波

重合在一起,波形较难分别,但仔细观察波形形状和位置,缓慢移动探头,疲劳裂纹和轮箍标记字头反射波还是有区别的;对于轮箍表面剥离,不动车轮箍探伤也有较强的反射波,尤其是表面剥离下面有径向疲劳裂纹时,会在剥离反射波中间出现一个较强的裂纹反射波,波形呈一束高度几乎相同的草状波;如在轮箍踏面下形成一定面积的周向缺陷,在其周向的两端会出现两个裂纹波,波形和疲劳裂纹反射波相同,所不同的是波形幅度略低,两个裂纹波形的距离即为缺陷的周向长度;而对于埋藏较深、表面光滑的周向缺陷,其反射波较低。

3 结论

(1) 轮箍崩裂的主要原因是轮箍中存在冶金缺陷和疲劳裂纹,冶金缺陷的存在是疲劳裂纹的根源,因此在轮箍出厂和组装时要逐个进行超声波探伤,同时选择适当的入射方向,保证声束和冶金缺陷相互垂直,其次选择双晶片纵波探头探伤。

(2) 在役轮箍主要检查轮箍中径向疲劳裂纹,应选择横波斜入射法,最好选择探头角度略大些,对轮箍踏面下 30 mm 的主要受力部位和应力集中区进行检查,选择不动车横波斜入射法,探头只需移动一个跨距即可对整个轮箍进行检查,提高了效率。

(3) 整体车轮踏面掉块是由于在运用中,制造

缺陷向四周扩展形成裂纹,当剩余面积强度不足时发生掉块,因此在整体车轮探伤中应采用双晶纵波探头垂直入射法进行检测。

(4) 轮箍(整体车轮)缺陷定量中不能只进行简单的理论计算,要考虑缺陷是否处在三倍近场区内,应制作不同深度、不同孔径的平底孔或横通孔进行当量对比。

(5) 对于不同的探伤方法,要对波形进行认真分析,没有缺陷波并不意味着没有缺陷,如垂直入射法既无缺陷波又无底波,可能是轮箍中存在面积较大的斜向缺陷或轮箍材质不良,是危害性较大的缺陷。探伤操作时应随时注意底波的变化。

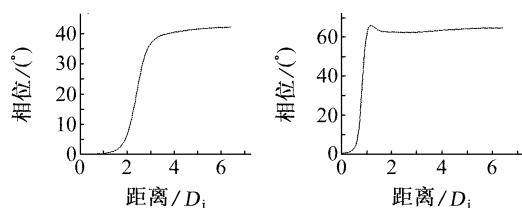
(6) 每一种探头和探伤方法都有对应的缺陷检出能力,对同样的缺陷,不同探头和探伤方法会有不同的检测效果,缺陷定性、定位和定量时最好采用不同探头和不同探伤方法进行判断,同时探伤人员应积累实践经验,对波形做出正确判断,防止机车轮箍在运行中发生崩裂。

(7) 检测结果受超声波探伤仪、探头、检测方法和探伤人员四个要素影响,其中任何一个因素都会改变检测效果,尤其是人员素质,包括人员对轮箍缺陷形成和缺陷的反射回波的认识、对轮箍的加工工艺的了解以及对轮箍超声波探伤的个人经验都会影响检测结果。

(上接第 470 页)

图中铁管、主激励线圈和空气的参数设置和上面的相同,辅助激励线圈长度为主激励线圈的一半,在距离主激励线圈 1 mm 处,所加电流密度和主激励线圈相同,但初始相位不同,辅助线圈的初始相位比主激励线圈的要滞后,在以上的设置条件下,滞后 70° 。经过 ANSYS 仿真运算,将有无辅助激励线圈时得到激励线圈和检测线圈间相位差随两线圈间距离的变化关系示于图 4。

比较图 4a 和 b 可以很明显地看到,过渡区变得陡峭,远场区从 3 倍管径处提前到了 1.5 倍管径处,



(a) 一般探头

(b) 复式探头

图 4 辅助激励线圈对远场涡流测试区域的影响

而且所测得的相位差值增大了,信号增强了。

复式探头中,重要的一点是确定主辅激励线圈间的初始相位差,必须寻找合适的角度,经 ANSYS 仿真尝试,得到初始相位的差值与主激励的初始相位无关,而与激励频率和铁管的材料属性有关。

4 结论

通过有限元仿真工具对探头改进的两种方案进行了模型仿真,对其改进效果进行了验证,表明两种方法对探头的长度缩短有着明显的成效。

参考文献:

- [1] 陶旺斌. 远场涡流机理探讨[J]. 无损探伤, 1996, (5): 42—44.
- [2] 王凤华. 远场涡流探头结构的改进[J]. 试验技术与试验机, 1996, (1, 2): 46—49.
- [3] 张 忠, 曲民兴. 远场涡流检测探头的改进[J]. 油田地面工程, 1994, (4): 85—86.
- [4] 曲民兴, 司家屯. 采用复式激励的新型远场涡流探头[J]. 电工技术学报, 1997, (3): 11—14.