

摘要 随着城市轨道交通列车速度、密度和重量的增加,滚动接触疲劳伤损和磨耗伤损问题已经严重影响钢轨的使用寿命。在分析钢轨主要伤损成因的基础上,对钢轨伤损的检测、寿命管理、控制和减缓等方面进行了分析。提出了钢轨全寿命养护策略理念,并讨论了轮轨关系、周期性的钢轨预防性整形作业、钢轨润滑和整形的关系等关键因素。合理的钢轨全寿命养护策略,可以有效地延长钢轨寿命,节约养护成本,改善对环境的影响。

关键词 钢轨磨耗;全寿命养护策略;滚动接触疲劳

0 前言

城市轨道交通通过提高列车行车速度、缩短发车间隔、改善车辆承载能力等措施,不断满足日益增加的客流需求,但同时也加剧了对车辆和轨道结构的破坏作用,减少了轨道部件的使用寿命,增加了养护维修成本。

钢轨作为城市轨道交通的主要承载部件,直接承受来自列车车轮的反复作用。在高密度、大荷载和快速的运输条件下,钢轨特别是轨头运行表面不可避免会出现各种伤损。据统计,上海轨道交通 1 号线钢轨伤损主要包括裂纹、掉块、光斑、碎裂、剥离、核伤、锈蚀、过烧、侧磨和波磨等[1]。其中钢轨轨顶面特别是轨距角处的裂纹、钢轨波磨和小半径曲线钢轨的侧磨是钢轨伤损的主要类型。香港地铁也将钢轨轨距角裂纹和剥离掉块、波磨和小半径曲线钢轨侧磨三大伤损类型归结为影响钢轨寿命的主要因素[2]。

这几类钢轨伤损,可以归结为滚动接触疲劳伤损和磨耗伤损,如果处理不当,不仅会降低乘客乘车舒适度、产生轮轨噪声、增加列车运行能耗、增加养护维修成本,严重的甚至会引发断轨,危及行车安全。因此,必须重视对城市轨道交通线路钢轨伤损的养护管理。

本文在分析钢轨主要伤损成因的基础上,对钢轨伤损的检测、寿命管理、控制和减缓等方面进行分析,提出以延长钢轨使用寿命为目的的钢轨全寿命养护策略理念,以期对我国城市轨道交通工务部门的钢轨管理提供有益的帮助。

1 钢轨伤损成因及控制措施

钢轨滚动接触疲劳以及由此形成的轨头剥离,多发生于曲线外股钢轨的轨距角、轨顶面以及内股钢轨的轨顶面。这里是轮轨接触较为频繁的区域。由于轮轨接触区面积仅有 100 多 mm^2 ,强大的车轮荷载使得轮轨接触区内产生较大的轮轨接触应力。当接触应力超过钢轨的疲劳屈服极限,或者钢轨表面下几毫米处的剪应力使钢轨产生剪切疲劳,就引起钢轨表面或亚表面萌生滚动接触疲劳裂纹。

在滚动接触疲劳裂纹扩展的最初阶段,钢轨表面出现间距呈规律的 45° 细微斜裂纹,裂纹方向与行车方向相反;之后在轮载的反复作用下,轨头表面下出现微裂纹;当裂纹在表面下发展几毫米后,几乎成水平裂纹;当裂纹面积达到一定程度后,裂纹顶层在列车车轮碾压下产生塑性变形,最后断裂,使轨面出现凹坑[3]。钢轨剥离的主要原因是:轮轨接触关系不良导致接触应力过大,钢轨强度不足,钢轨材质有缺陷,车轮和轨道的维修工作不良等。目前国外控制和减缓钢轨滚动接触疲劳的手段主要是钢轨打磨或钢轨铣磨等钢轨整形作业。

钢轨侧磨多发生于曲线外股钢轨的轨距角。其主要形成原因是机车车辆通过曲线时,作用在外股钢轨轨头内侧的轮缘力和车轮冲击角。而轮缘力和轮轨冲击角的大小与机车车辆的动力性能、转向架固定轴距的长短、曲线半径的大小、轨道的动力性能、轨道几何参数设置等诸多因素有关。工务方面控制和减缓曲线钢轨侧磨的措施,除了合理调整轨道结构参数(如轨距、轨底坡、超高等),以及改善轨道结构的动力性能(如改变轨道结构弹性等轨道养护作业)外,主要是钢轨侧面润滑。

钢轨波磨一般出现在曲线地段。在列车制动地段,钢轨波磨的出现概率和磨耗速率都较大。引起钢轨波磨的原因主要与轮对的扭转粘滑振动有关,而钢轨材质、机车车辆及其走行部的动力性能、列车运行工况、轨道弹性和阻尼、曲线轨道结构参数等因素都会影响轮对的扭转粘滑振动。目前防止和减缓钢轨波磨的措施主要是提高轨道结构弹性、合理设置曲线轨道参数,以及钢轨打磨或铣磨作业等。

2 钢轨全寿命管理策略的内容

2.1 钢轨全寿命管理策略的理念

从钢轨疲劳裂纹伤损和磨耗伤损的成因来看,这些伤损是由车辆-轨道的综合作用所产生。钢轨寿命则受这些伤损的发展状况及所采取的养护措施的影响,如轮轨接触关系、曲线列车运行状况、钢轨材质、钢轨润滑状况、钢轨整形作业等。



有研究证实,改善轮轨接触关系、调节轨道弹性、对钢轨采取润滑和整形作业相结合等手段,可以有效地提高钢轨使用寿命[4-5]。

因此,钢轨寿命管理是一项综合任务。单独消除钢轨单一病害的方法,已经不能实现钢轨寿命的有效管理;必须从整个轮轨系统的相互关系出发,结合车辆、轨道结构、线路条件、车辆运行条件等因素,综合钢轨检测、钢轨润滑、钢轨整形等钢轨伤损控制和减缓手段,合理地对在役钢轨疲劳裂纹伤损和磨耗伤损进行寿命管理,从而有效地延长钢轨使用寿命。为此,结合目前的钢轨滚动接触疲劳伤损和磨耗伤损的主要检测和养护手段,考虑钢轨整个服役寿命期的伤损发展情况,提出钢轨全寿命养护策略理念(如图 1 所示)。

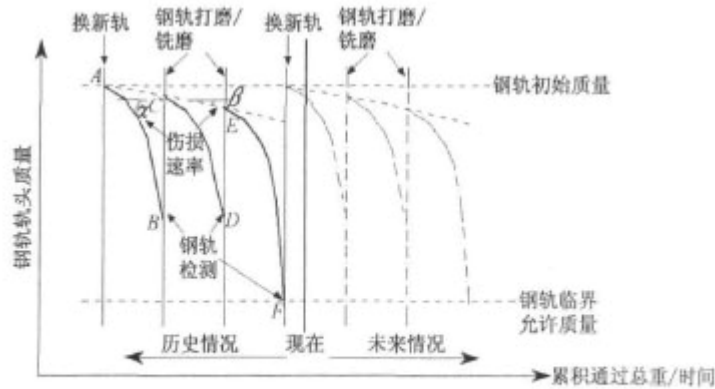


图 1 钢轨全寿命养护策略图

图 1 的钢轨全寿命养护策略是以线路的累积通过总重为时间轴,以钢轨轨头质量的变化(如轨头外形变化、钢轨轨顶面裂纹发展、钢轨磨耗等)为纵坐标,描述了钢轨轨头质量随累积通过总重变化的规律,它涉及钢轨从上道至更换下道全寿命阶段的所有内容,主要包括钢轨轨头质量标准的确定及应用、钢轨轨头检测技术及应用、钢轨轨头整形作业技术及应用以及钢轨寿命预测等四个方面。

(1)钢轨轨头质量标准是控制钢轨寿命的前提,主要包括钢轨初始质量和钢轨临界允许质量。在新轨上道后,采用钢轨打磨、铣磨设备对钢轨进行预整形,消除钢轨生产及运输过程中产生的原始不平顺、轨头表面脱碳层及轨头表面残余应力层,尽量减小轨头表面的原始粗糙度;同时,根据轮轨接触关系理论,通过新轨预整形作业实现与车轮外形配合良好的轨头横截面外形。其目的是提供平顺的钢轨运行表面和良好的轮轨接触关系,修正钢轨初始不平顺、从而延迟钢轨滚动接触疲劳裂纹的萌生时间及磨耗的发生时间。这样,新轨经过预整形作业后的轨头外形和表面状态,就是钢轨最佳的初始质量。在一定的累积通过总重条件下,钢轨轨头由于波磨或侧磨,使得外形发生变化,超过磨耗允许限值;或者轨头疲劳裂纹扩展积累到一定的密度和深度,超过检测仪器量程,会引起断轨等危险;或者磨耗或裂纹积累到一定程度,使得列车运行产生的振动和噪声超过限值时,钢轨不能继续服役,必须更换下道。这种情况下的钢轨轨头质量就是钢轨临界允许质量。钢轨临界允许质量是控制钢轨进行整形恢复作业的依据。

(2)新轨经过预整形作业后,以钢轨初始质量投入使用(图 1 中的 A 点)。随着线路通过总重的累积,钢轨轨头逐渐发生磨耗伤损、疲劳裂纹伤损,甚至是两种伤损的结合,轨头质量逐渐下降。这时就要采用相应的技术和设备对轨头质量进行定期检测,记录轨头磨耗变化、轨头外形变形、波磨发展或轨面疲劳裂纹扩展等信息,从而掌握轨头质量的恶化情况。

(3)当轨头质量下降,钢轨磨耗出现但还未严重发展,或者疲劳裂纹萌生但尚未大面积扩展时(图 1 中 B 点),就可以对轨头进行预防性整形。目前,较有效的轨头修复方式是采用钢轨打磨车或铣磨车对轨头进行打磨或铣磨作业。由于轨头磨耗或裂纹情况尚不严重,预防性整形对轨头的金属磨削量较少,可快速进行作业,既缩短了对线路正常运营的干扰,又可以较好地恢复轨头外形,改善轮轨接触关系,较轻易地消除轨面轻微疲劳层或波磨。经过预防性整形作业,轨头质量恢复到接近钢轨初始质量(图 1 中 C 点)。

(4)随着通过总重的累积,钢轨轨头继续经历伤损发展、检测和整形的循环过程。直到轨头质量恶化到临界允许质量(图 1 中 F 点)。这时的轨头经过自然的轮轨磨耗和人工打磨或铣磨,已经没有足够的金属量保持轨头强度和支撑车轮运行,必须进行大换换轨作业。新轨上道后,根据原来旧轨全寿命阶段的养护维修历史数据,结合线路条件、列车运行状况、钢



轨润滑条件等,就可以修正钢轨轨头质量控制标准,制订新轨的检测周期和预防性整形的作业周期等参数,从而预测新轨寿命,进一步优化钢轨全寿命养护策略。

钢轨经过上述养护策略,轨头质量恶化曲线不再是图 1 所示的 AB 曲线(伤损速率为 α),而是 AEF 曲线(伤损速率为 β)。可以看出 $\beta < \alpha$,所以钢轨寿命得到延长。这样,在轮轨接触关系理论上,钢轨轨头质量标准、钢轨轨头检测、钢轨轨头整形和钢轨寿命预测有机结合,就形成了钢轨全寿命养护策略,有效地提高了钢轨寿命。

2.2 钢轨全寿命管理策略的关键因素

2.2.1 轮轨接触关系及合理钢轨外形

从钢轨侧磨、波磨和滚动接触疲劳裂纹的成因来看,这些伤损形成的主要原因是轮轨关系不良。而钢轨全寿命养护策略的主要目的就是通过钢轨整形作业,恢复合理的钢轨轨头外形轮廓,从而改善轮轨接触关系,尽可能延长磨耗和疲劳裂纹发生的时间,以达到延长钢轨使用寿命的目的。

因此,要根据车辆条件、线路条件、车辆运行工况,结合轮轨动力学,设计能产生最佳轮轨接触关系的钢轨轨头外形轮廓。其中:车辆条件包括车辆类型、转向架类型、轴重、轮对刚度、悬挂阻尼、主要车轮外形等参数;线路条件包括曲线半径、外轨超高、轨底坡、轨道弹性和阻尼、钢轨类型等参数;车辆运行工况包括运行速度、运行状态(制动、加速还是惰行)等。在掌握这些参数的基础上,结合轮轨动力学,设计适合此种线路和运营条件下的钢轨轨头外形轮廓。这个外形轮廓应该是基于指定线路条件的,能与主要车轮外形实现最佳匹配的,能尽量延长疲劳裂纹萌生或磨耗出现的。设计合理的钢轨外形轮廓是钢轨全寿命养护策略实施的重要前提。

2.2.2 周期性的钢轨预防性整形作业

钢轨在使用过程中,其外形轮廓由于磨耗而发生变化。变化后的轨头外形,进一步恶化了轮轨接触关系,使得疲劳裂纹或磨耗快速发展,从而导致钢轨更换。钢轨整形作业(钢轨打磨或铣磨)就是将钢轨外形恢复到设计的最佳轨头外形轮廓。

钢轨整形作业是一种人工干预下的钢轨磨耗,而轨头疲劳裂纹的发展和磨耗的发展又是相互影响的。当轨头磨耗降低,则轨头疲劳裂纹发展较快;反之磨耗增加,则可能磨掉一部分疲劳裂纹,从而抑制了裂纹的发展。这种情况下,如何有效应用钢轨整形作业是延长钢轨寿命的关键。

钢轨整形作业的实践证明,周期性的预防性钢轨整形能最大程度地延长钢轨使用寿命。其原理如图 2 所示。

图 2(a)中,在没有采取周期性钢轨整形作业的条件下,随着通过总重的累积,钢轨受轮轨自然磨耗和滚动接触疲劳的影响。其中:自然磨耗随通过总重呈线性发展;轮轨滚动接触疲劳裂纹随通过总重呈指数型发展[6],且伤损初期发展较慢,伤损后期发展较快。当假设通过总重达到 Q_1 时,疲劳裂纹达到最大允许扩展深度,即超过疲劳裂纹检测仪器的最大量程。这时认为钢轨已经受疲劳裂纹伤损影响严重,存在裂纹继续扩展导致断轨等危险,必须更换下道。因此,在没有采取周期性钢轨整形作业的条件下,钢轨寿命受滚动接触疲劳控制,通过总重远远低于磨耗允许限值对应的通过总重。



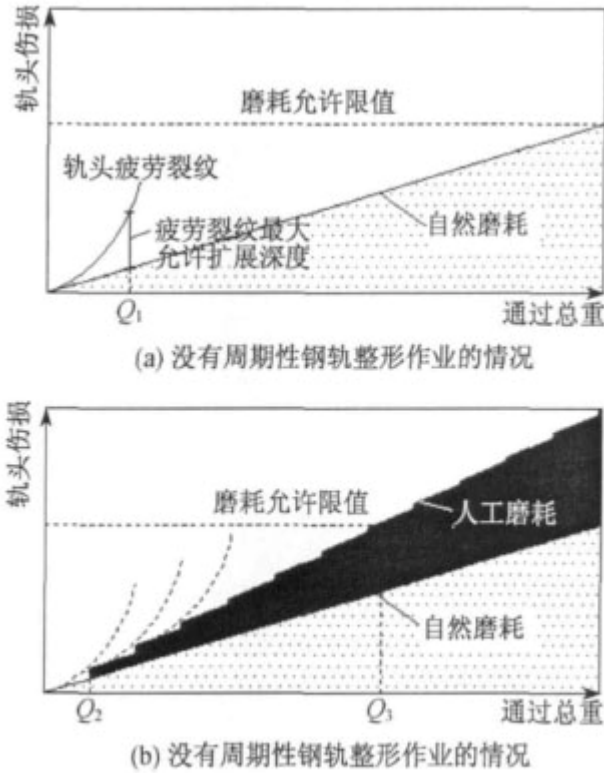


图 2 周期性预防性钢轨整形作业对钢轨寿命的延长

图 2(b)中,在通过总重达到 Q_2 时($Q_2 < Q_1$),就对钢轨采取预防性整形作业,采用人工磨耗加自然磨耗的手段及时消除钢轨轨头的少量发展的裂纹层。这样,疲劳裂纹随通过总重重新发展,经过周期性的预防性钢轨整形作业,钢轨最终达到其磨耗允许限值而下道,这时的通过总量为 Q_3 ,远远超过没进行周期性钢轨整形作业的情况,钢轨寿命受磨耗控制。周期性钢轨整形作业使钢轨的寿命得到延长。

因此,合理设计和安排周期性预防性钢轨整形作业,是钢轨全寿命养护策略实施的重要手段。

2.2.3 钢轨润滑和钢轨整形的关系

良好的钢轨润滑,其目的是有效降低磨耗。但是磨耗的降低无法使钢轨表面疲劳层被磨掉。疲劳裂纹可能在轨头表面或亚表面下积累,最终引起钢轨剥离导致换轨。如不采取润滑措施,钢轨磨耗伤损又会快速发展,有时候也不能避免在轨面出现裂纹。因此,必须将钢轨润滑和钢轨整形有机联系,合理配合:一方面通过钢轨整形作业,改善轮轨关系,尽可能延长磨耗和疲劳裂纹发生时间,并在裂纹出现后,有效消除疲劳裂纹层;另一方面通过钢轨侧面润滑,降低曲线外股钢轨侧磨的发展;通过钢轨顶面润滑,控制轨顶面摩擦系数,减小车轮冲击角、轨顶面横向蠕滑力和塑性变形,从而降低轨顶面的裂纹发生率。

3 结语

国外城市轨道交通钢轨养护的实践证明,针对影响钢轨寿命的主要伤损,设计合理的钢轨全寿命养护策略,可以有效地延长钢轨寿命,减少钢轨更换数量,降低钢轨和车轮的伤损发生率,并可以节约车辆和钢轨的维修成本,减少列车运行能耗,降低轮轨振动和噪声。

要设计合理的钢轨全寿命养护策略,就需要结合城市轨道交通的具体轨道和车辆条件,掌握钢轨全寿命阶段的伤损发展规律,并设计合理的钢轨伤损检测、控制和减缓等技术参数和作业方法。为此,应该进一步深入研究轮轨接触几何关系、钢轨伤损检测技术及评价标准、合理轨道参数设置、钢轨整形作业的方法和技术参数、钢轨润滑和轨顶面摩擦控制与钢轨整形作业的关系、钢轨寿命预测等方面的理论,从而设计合理的钢轨全寿命养护策略,有效延长钢轨使用寿命,提高城市轨道交通的运营效率。

参考文献



- [1]黄玉纯,曲铭,许玉德.城市轨道交通钢轨伤损分析[J].城市轨道交通研究,2007(4):54.
- [2]Keefe R,Ravitharan S S S. Managing rail deterioration[J].Railway Engineering,2001,London,2001.
- [3]练松良.轨道工程[M].上海:同济大学出版社,2006.
- [4]Keefe R,Soeleiman S.The Development and application of a technical/economic rail management model to Hong Kong's mass transit railway[C]//Tenth International Rail Track Conference,Brisbane,1994:131.
- [5]Keefe R,Fung W Y.Recent developments in planning aids and track designs for the permanent way in Hong Kong MTRC[C]//Exporail (Asia) 97,Kuala Lumpur,1997.
- [6]Thomas H,Thomas S.Rail grinding as an integral part of technically and economically efficient track maintenance[J].Rail Engineering International Edition,2007(3):6.

