

高速铁路钢轨波浪型磨耗研究及其防治建议

王立乾

(中国铁道科学研究院 铁道科学技术研究发展中心, 北京 100081)

摘要: 基于中国高速铁路钢轨出现波磨的现象, 对高速铁路波磨的特点做了详细介绍。指出目前波磨理论的局限性, 并分析了高速状态下波磨的动力学成因, 以及钢轨材质对波磨的影响, 并给出了可行的预防与减缓波磨的建议。

关键词: 钢轨波磨; 轮轨接触; 高速列车; 振动

中图分类号: U270.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-0373(2013)04-0083-05

0 引言

钢轨波浪型磨耗是指线路在投入运营后, 出现在钢轨接触表面的类似波浪形的不均匀磨损。钢轨波浪形磨耗形成之后, 列车行驶其上必将激励起车辆、轨道系统的振动, 而且这种振动是随着轨道不平顺的加剧而加剧的。车辆、轨道系统的剧烈振动不仅引起行李移位, 使旅客舒适度降低, 而且还会加速动车组车轮和轨道结构的破坏。随着我国高速铁路运营里程的增加和车次的增多, 铁路现场钢轨波磨分布变得更加广泛, 问题日益严重。对已经开通的高速铁路波磨成因等问题进行研究, 不仅对整治已有高速铁路出现的波磨问题起到积极作用, 而且对新开通和尚未开通的线路, 也能起到很好的预测和防护作用。

1 波磨的国内外研究现状

国外很早就开展了钢轨磨耗的预测研究, 早在 1895 年就有人提出钢轨波浪磨损这一概念, 至今已有百年历史^[1]。目前主要形成了基于能量观点的计算摩擦功的磨耗预测模型和基于磨耗指数的磨耗预测模型, 通过在线路上进行相关试验, 对预测模型计算结果和试验数据进行比对分析。德国通过引入波长确定机理和破坏机理, 对波磨进行分类, 将波磨分为长波波磨和短波波磨。日本自 1986 年起为解决新干线上日益严重的波磨现象, 利用小波分析对波磨进行探测, 并通过在模型试验台上的试验, 研究采用高性能合金制造钢轨对减少波磨形成的影响。

在国内, 谭立成自 1980 年起对钢轨波状磨耗形成和发展进行了初步系统的试验和理论研究^[2]。马培德等对既有线钢轨波磨的形成原因做了分析, 并给出了减轻钢轨磨耗的建议^[3]。张继业等将振动功率谱的研究过程结合现场出现波浪型磨耗钢轨的硬度分析结果, 对波磨进行研究^[4]。刘启跃等人对高频作用下钢轨的波磨进行了考察, 通过分析轨道垂向动力行为, 得到不同振动频率振动对轨道表面的磨损的影响^[5]。金学松等利用 Kalker 三维弹性体非 Hertz 滚动接触理论计算轮轨之间的蠕滑力和摩擦功, 进行钢轨表面磨损量的定量分析依据, 对波浪型磨耗进行了分析^[6]。王小文等对广深准高速铁路钢轨波状磨耗特点和发展规律进行了现场试验和分析研究, 得出了准高速客货共线线路钢轨波浪型磨耗的一些特点^[7]。赵国堂通过分维的量测方法, 建立了分维与波磨程度之间的关系^[8]。

世界各国围绕钢轨波磨的产生、恶化和整治等方面作了大量研究工作。特别是我国在既有线提速、客货共线和重载铁路的钢轨磨耗方面做了大量的试验, 积累了许多宝贵的数据, 并依据现场情况的特点建立相应模型对钢轨波磨进行了仿真分析和试验研究, 取得了很多成果。但是对高速铁路波磨的研究, 一方面由于现场试验的机会非常少且测试技术难度高, 目前积累的资料非常有限; 另一方面, 在高速状态

收稿日期: 2013-06-18

作者简介: 王立乾 男 1983 年出生 博士研究生

下,由于垂向加速度、高频振动等各种因素的影响,轮轨磨耗的产生机理要比之前的既有线路复杂得多,波磨的萌生及发展涉及很多不同影响因素之间非常复杂的关系,并且很难确定哪个因素占主导地位,因此高速铁路的波磨研究进展相对缓慢,目前尚未能提出一种被广泛认同的理论来解释各种波磨现象。本文在研究中,一方面主要借鉴国内外已有的研究经验,另一方面通过现场调研和测试,针对我国高速铁路车辆和线路的特点,分析钢轨波浪型磨耗的产生原因和发展规律,为高速铁路钢轨的波磨预测和波磨控制两方面的进一步深入研究打下基础。

2 现有波磨理论分析的局限性

目前世界各国在分析波磨对车辆通过的影响时,主要采用三维弹性体滚动接触理论来进行蠕滑计算并分析车辆的动力学性能。其中精度最好、使用最多的是荷兰学者 Kalker 创立的三维弹性体非线性滚动接触理论,但是由于 Kalker 在分析时做了几个方面的假设,其中最重要的一条假设就是整个滚动过程是稳态的,因此其具有局限性。在稳态滚动接触的过程中,接触斑的形状、大小保持不变,因此蠕滑率、法向力、切向力也保持不变。但如果在滚动过程中,接触斑的形状、大小产生较大变化,从而导致蠕滑率、法向力、切向力随时间变化发生较大的改变,这种情况就是非稳态滚动接触。

车辆在低速下通过钢轨无波磨的区段,其运行状态可以近似地看成稳态滚动接触过程,非稳态的效应较弱。为对稳态和非稳态进行定量的区分,引入一个评价指标,定义 L 为接触参数的波长。为便于分析,先假设接触斑的形状仍为椭圆,只是其大小发生变化,其较长的半径(沿纵向方向)为 a ,定义参数 k 为波长比,即 $k = L/a$ 。

当 k 值较大时,代表车轮运动接近于稳态,即接触斑和其他参数变化较慢;当 k 值较小时,代表车轮运动在非稳态,即接触斑和其他参数变化较快。

在一般情况下,基于有限元计算结果,车轮和钢轨之间接触的接触斑纵轴半径在 5 ~ 10 mm; 基于现场测量和动力学仿真,车辆直线上进行蛇形运动的波长通常在 5 m 左右; 由直线进入曲线段的运动波长通常小于 5 m。经计算,在大多数情况下, k 值基本保持在 300 以上,可以说车辆是处于稳态的,可以应用稳态滚动接触理论对其进行分析和处理。

但是,对于出现波磨的钢轨而言,其波长基本在 150 mm 以内,在加速和制动段因磨耗较严重而产生的短波波磨波长最短甚至可以在 20 mm 以内。可以看出,此时 L 和 a 基本处于同一数量级,相应的 k 值会下降到小于 10 的范围内,此时车辆就会处于非常严重的非稳态状态,基于稳态假设的轮轨接触理论分析方法将不再适用。

因此,目前针对波磨的理论计算及其仿真结果在一定程度上是和真实结果存在较大差异的,因此有必要对高速铁路波磨进行深入研究,找出其变化和发展的规律,并依据这些规律,为逐步建立适用于我国高速铁路的轮轨非稳态滚动接触理论打好基础。

3 我国高速铁路波磨特点

钢轨波磨的特征是钢轨表面出现有规律性的高低波浪形起伏。依据波长的特征,钢轨波磨可分成短波波磨和长波波磨。大多数短波波磨具有波峰发亮、波谷发暗(也有波峰和波谷都发亮的情况)的特征,波幅为 0.1 ~ 0.5 mm,波峰之间的间距为 3 ~ 8 cm。长波波磨大多数则具有波峰、波谷均发亮的特征,其波幅多在 2 mm 以下,波峰间距则在 10 cm 以上。根据现场调查情况,在曲线段和缓和曲线段,长波波磨较为多见;而在直线线路上,分布较广的是短波波磨。在我国高速铁路线路上,大部分为长波波磨,且波长具有较大的随机性,长的可达 480 mm,短的也有 110 mm,波幅小的在 1 mm 以下,大的可达 3 ~ 4 mm。通过现场测试还发现,出现波磨的钢轨特点是波状磨耗从钢轨不平顺处逐渐向钢轨中部发展,随后波及到整个曲线。

通过对钢轨波磨发生地段进行现场测试和调查发现,波磨较为严重的区段具有以下特征:

(1) 波磨多出现在曲线段及缓和曲线段。曲线半径越小,波磨出现和发展的速率越快。目前曲线半

径小于 7 000 m 的线路上多发现存在有波磨。相对而言,直线地段钢轨波磨出现时间晚,发展速率也较慢。

(2) 列车制动地段钢轨的波磨较为严重。列车在牵引、制动、黏着的运行状况下均会产生波磨。通过比较直线段钢轨波磨的分布,发现钢轨波磨主要取决于列车的运行工况。在距离车站较近的同一段,上下行线路波磨分布情况有很大差异,列车制动地段钢轨的波磨更加容易发生,波磨恶化程度也更加严重。

图 1 为高速铁路现场波磨的实拍照片,图 1(a) 波磨的测量波长为 150 mm,最大谷深 0.11 mm;图 1(b) 波磨的测量波长约为 120 mm,最大谷深为 0.05 mm。



(a) 波长 150 mm、波深 0.11 mm



(b) 波长 120 mm、波深 0.05 mm

图 1 高速铁路钢轨波磨

4 高速铁路波磨成因分析

有关钢轨波磨的成因,各国铁路研究工作者曾经提出过各种不同的见解。通过现场试验和理论仿真进行研究,这些解释具有一定的理论依据,但更多的尚处于推测阶段,迄今为止尚没有一个精确的、为大家所公认的对波磨成因的解释。目前有关波磨成因的分析研究主要从动力类成因理论和材料型成因两方面进行分析。动力类成因主要从振动方面进行研究,即波磨的波长取决于振动特性,是有限个波长的混合,与轮轨系统中某一种或几种振动形式相关。材料型成因主要从材料的塑性变形方面去分析波磨的成因。具体在分析时,需要将二者相结合。

4.1 动力类成因分析

波磨产生的源头在于钢轨表面存在不平顺,当列车高速通过不平顺钢轨时,会产生高频瞬时冲击载荷。长期以来,最终会在钢轨不平顺处产生接触疲劳。伴随着接触疲劳的是车轮和钢轨之间的接触振动和摩擦振动。

高频接触振动产生巨大的垂直力增量,使钢轨塑变层遭受反复和快速的锤击作用,逐渐在钢轨表面形成明暗相间的波浪形磨耗。当有切向力作用的动轮经过其上时,瞬间的局部接触间断可使动轮积聚起很大的能量,一旦在波浪形的峰部恢复接触时,聚合的能量就骤然被释放出来。

摩擦振动是一种自激振动,其本质是能量的积聚和释放交替进行的过程。当轮轨间的滑动量达到一定值之后,由于黏着极限的限制,接触面间将完全丧失传递切向力的能力,此时若不降低车辆牵引动力,则会引发车轮的空转。动车组的电机通常具有自动调节作用,借助于其控制回路,黏着的破坏会立即伴随黏着的恢复。这样,周而复始,车辆的运行过程实质上是黏着和滑动交替进行的过程。这种由摩擦力变化而引起的切向力传送的延续和中断交替的过程即为轮轨之间的张弛振动。显然,张弛振动是一种不连续的自激振动,它源于摩擦的能量储存和释放。

当车辆在高速通过曲线线路时,由于轮对冲角发生改变,轮轨的纵向剪切力超过轮轨黏着极限,从而使得车轮和钢轨之间产生纵向滑动,在滑动处随即产生波谷;而滑动后由于释放了先前积累的能量,使得轮轨再次处于黏着状态,这种现象在某种意义上降低了轮轨的磨耗,从而使得该处形成波峰。可以说,钢

轨表面波浪形的磨耗源于黏滑振动的不断反复。

除此之外,当因轨面黏着下降而需要降低驱动功率来恢复黏着时,也会伴随有能量的积聚和释放的过程。因此,钢轨波状磨耗是这两种振动联合作用的结果。

伴随着高速度的是动车组电机的高牵引功率。黏着和滑动交替的过程反映了轮轨接触面之间的交变剪应力作用,高牵引会产生过大的剪应力,并使车轮和钢轨材料内部的理性流动逐渐移向接触表面,最终使塑性层在交变应力下形成层状磨耗薄片。因此,当最初的黏着和滑动交替形成磨耗后,将在钢轨表面上产生明暗相间的波浪形,光亮的凹处是疲劳磨耗产生的痕迹,而暗色的凸处则是黏着区留下的印记。因此,高速铁路钢轨上的波磨从近似的观点看,亮区的长度反映滑动期持续时间的积累过程,而暗区长度是黏着期持续时间的积累过程。可以预料,一旦钢轨上形成初始的波浪状,则以后的发展必然朝着扩大亮区而缩小暗处的方向延伸。因为每当后继的车轮经过凹处时,伴随黏着损失出现的总是滑动过程。

4.2 钢轨材质对波磨的影响

在对钢轨波磨区进行波磨统计分析和系统的测量研究后认为,钢轨的波磨直接与钢轨的材质有关。通过对各种类型的钢轨波磨进行研究发现,发现波磨主要跟钢材的化学成分、钢轨的处理和钢轨的表面状态三大因素有关。

对钢轨的化学成分而言,碱性的转炉钢比平炉钢更能引起钢轨的波磨。碱性的转炉钢很容易就能引起钢轨的磨耗;而锰含量较高、碳含量较低的碱性转炉钢和锰含量一般的平炉钢钢轨的磨耗程度中等;含锰量很高的平炉钢钢轨的磨耗程度最轻。

对钢轨的处理而言,经过高温释放内应力处理的钢轨能有效延缓波磨的扩展,并且推迟了钢轨出现波磨的时间。

对钢轨的表面状态而言,在滚筒式校直机上对钢轨进行标准校直,在较短的时间内就会出现磨耗,这是因为钢轨在校直过程中会使钢轨体内的内应力增大;在一定的压力机上对钢轨进行适量的校直,则对钢轨波磨的影响程度较轻。

在高速铁路线路上,提高轨道弹性和道床阻尼值有助于减小因轨道不平顺引起的轮轨附加动力作用,可以延缓波磨的形成和发展。挠曲刚度较大的钢轨会加速钢轨的波磨,对钢轨波磨起到不利的影响。

5 高速铁路波磨的预防和减缓措施

预防波磨的关键,一是减少轨道不平顺;二是消除曲线地段轮对的黏滑振动;三是抑制由黏滑振动引起的钢轨不均匀磨损的累加效应;四是对钢轨材质进行适当的处理。切实可行的减缓波磨的措施必须既易于操作、经济合理,又能兼顾到其他轨道病害,这是考虑减缓波磨措施最基本的两个出发点。以下是具体可行的减缓波磨的措施。

(1) 尽可能的消除轨道不平顺,抑制波磨的产生源头。

(2) 通过加大轨道弹性有效地减小轮对黏滑振动发生机率,降低波磨的发展速率。

(3) 对钢轨进行打磨。波磨出现后,会反过来激化和加剧轮对黏滑振动,促进波磨进一步发展,波深越大则波磨发展越快,构成恶性循环。钢轨打磨中断了这种恶性循环的发展过程,减缓了波磨发展速率。

(4) 提高钢轨材质强度及耐磨性能。波磨的形成和发展表现为钢轨不均匀磨损或不均匀塑性变形的逐步累积。钢轨耐磨性能的提高,能够减缓轨头磨损和塑性变形,从而延缓波磨的形成与发展。

6 结语

针对高速铁路钢轨波磨的自身特点,指出了现有波磨理论的局限性,结合国内高速铁路现场调查结果,提出波磨主要源自车轮和钢轨在轨道不平顺处产生的高频接触振动和黏滑振动的共同作用,预防和减缓波磨应从消除轨道不平顺和抑制振动方面入手。此外,钢轨的材质也会影响波磨的形成和发展。以上分析为治理高速铁路钢轨波磨提供了理论依据。

(下转第90页)

率由最初的10‰下降到现在的2‰左右,大大提高了施工质量,节约施工成本约100.8万元,经济效益显著。

参 考 文 献

- [1]万国平. 客运专线双块式轨枕预制技术的研究[J]. 铁道勘察, 2008(2): 86-88.
- [2]王玉泽, 孙立, 王森荣, 等. 客运专线铁路双块式无砟轨道双块式混凝土轨枕暂行技术条件[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2008.
- [3]赵东建. 双块式轨枕冲击式脱模控制技术[J]. 铁道建筑, 2012(1): 107-109.
- [4]张振兴. 铁路双块式轨枕制造技术[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2008.
- [5]李敏霞, 李义强, 李申山. 双块式无砟轨道生产线蒸汽养护系统设计[J]. 工业安全与环保, 2010, 36(4): 45-47.

Causal Analysis on Shoulder Cracks of Bi-Block Sleepers and Control Measures

Wang Jianhui, Dong Yingfei

(China Railway 7th Bureau Group Zhengzhou Engineering Co., Ltd. Zhengzhou 450052, China)

Abstract: Cracks in the shoulder of bi-block sleeper during precast is a serious quality problem, which will make the sleeper unqualified. If the defect could not be controlled properly, it would cause big economic losses to the company. This thesis takes the sleeper precast procedure in the Guangning Sleeper Factory of Guiyang to Guangzhou Railway as an example, and analyzes the reasons of shoulder cracks from three aspects, i. e., the demoulding system, concrete mixture ratio and concrete curing. A series of targeted measures are developed based on the reasons. This could provide a reference for the future quality control of bi-block sleepers.

Key words: bi-block sleepers; shoulder; crack; control

(责任编辑 车轩玉)

(上接第86页)

参 考 文 献

- [1] Oostermeijer K H. 钢轨波纹磨耗研究综述[J]. 都市快轨交通, 2010, 23(2): 6-11.
- [2] 马培德, 王雪红. 钢轨波浪磨耗形成原因及预防[J]. 石家庄铁道学院学报, 1995, 8(4): 64-68.
- [3] 谭立成. 钢轨波状磨损形成机理的初步试验和理论研究[J]. 中国铁道科学, 1985, 6(2): 28-51.
- [4] 张继业. 高频轮轨相互作用下钢轨的波磨[J]. 摩擦学学报, 2003, 23(2): 128-131.
- [5] 刘启跃. 滚动波波形磨损试验研究[J]. 摩擦学学报, 2003, 23(2): 132-135.
- [6] 金学松. 轮轨蠕滑理论及其试验研究[D]. 成都: 西南交通大学牵引动力国家重点实验室, 1999.
- [7] 王小文, 章欣, 冯文相. 广深准高速铁路钢轨波状磨耗特点和发展规律[J]. 中国铁道科学, 1998, 19(2): 28-33.
- [8] 赵国堂. 钢轨波磨的分形描述[J]. 铁道学报, 1998, 20(2): 106-109.

Research on High-speed Railway Rail Corrugated Wear and Tear

Wang Lqian

(Railway Science and Technology Research and Development Center,
China Academy of Railway Sciences, Beijing 10081, China)

Abstract: Based on the rail corrugation wear and tear occurring in China's high speed railway, this article makes a detailed introduction to the characteristics of rail corrugation, presenting the limitations of the current corrugation theory. The article also analyses the dynamic causes of corrugation in high speed situations and the influence of the rail's material on corrugation. Suggestions on preventing and reducing corrugation wear and tear are also provided.

Key words: rail corrugation wear and tear; wheel-rail contact; high-speed train; vibration

(责任编辑 刘宪福)