

摘要 钢轨的波浪形磨耗已成为城市轨道交通钢轨伤损的主要形式之一。基于对上海轨道交通 1 号线钢轨波浪形磨耗的连续布点观测,采用频谱分析方法提取波浪形磨耗的波长,并对波深进行统计与分析,初步了解了上海轨道交通钢轨波浪形磨耗的一些基本特征,为进一步研究城市轨道交通钢轨波浪形磨耗生成机理及防治措施提供了依据。

关键词 城市轨道交通;钢轨波浪形磨耗;特征分析

钢轨的波浪形磨耗(简为钢轨波磨)是钢轨伤损的一种表现形式。目前在中国内地已开通运营城市轨道交通的城市,如上海、广州以及南京等,均已不同程度地出现了钢轨波磨的现象[1-3]。波磨的产生加剧了轮轨动力作用,加速了车辆转向架及轨道部件的损坏,增加了工务部门的养护维修费用;由波磨引起的列车高频振动降低了乘车的舒适度,严重时甚至可能危及列车安全;另外,列车通过波磨钢轨时所发出的啸叫声也成为轨道交通噪声的主要来源之一。

要从根本上消除波磨对行车和轨道养护造成的不利影响,采取有效的预防和治理措施,必须弄清楚波磨产生的原因和发展的规律,对影响波磨的因素进行分析。而进行上述研究和分析的前提,就是要对出现波磨的钢轨进行系统全面的观测和追踪,以掌握波磨的特征。本文正是基于上述的考虑而进行的。

1 国外城市轨道交通钢轨波磨特征综述

钢轨波磨作为城市轨道交通钢轨伤损的主要形式之一,早已引起了发达国家轨道交通工务部门的重视。美国、加拿大、法国、意大利和日本等国先后对所在地区的轨道交通线路上的波磨进行了大范围的观测与统计,总结出了轨道交通钢轨波磨的一些特征。

Tassilly 等[4]在 20 世纪 80 年代末期对巴黎都市轨道交通管理局(RATP)运营的巴黎地铁和法国快速轨道网络线路上的钢轨波磨进行了观测,结果发现:波磨主要出现在曲线上且种类各异,波长一般在 50~300 mm 之间;波磨或出现在曲线下股钢轨(混凝土整体道床波磨波长较短),或出现在上股钢轨(有砟轨道上波长较长),或上下股均有波磨产生。

Donald R.Ahlbeck 等人[5]对 1969 年至 1989 年间的 47 篇有关钢轨波磨的科技报告及研究文献进行了综述,总结了波磨出现的轨道类型、运营速度、曲线半径,以及波磨波长、波深等特征。其中:城市轨道交通钢轨波磨出现的曲线半径在 366 m 之内,波磨波长介于 50~200 mm 之间;波深与波长相关,短波波磨的波深一般小于 0.2 mm,最大波深达 0.9 mm。

Yoshihiro Suda 等人[6]发现东京地区重要的通勤线路山手线的小半径曲线下股钢轨上出现了严重的短波长波磨,其波长分布在 50~150 mm 范围内,最大波深达到了 0.9 mm。

Giorgio Diana 等人[7]通过对意大利米兰地铁的现场观测,得出了米兰地铁不同轨道类型的小半径曲线钢轨波磨的主要特征(见表 1)。

表 1 米兰地铁波磨主要特征

轨道类型	曲线半径 / m	波长 λ / mm
硬"Milano"	170	80~ 110
软"Milano"	170	25~ 40
Wien	200	25~ 50

纵观国外研究人员对波磨特征的观测统计结果,城市轨道交通钢轨波磨主要出现在曲线段,尤其是小半径曲线的下股钢轨;波长介于 50~300 mm 之间,波深与波长相关联,最大波深达 0.9 mm。

表 2 上海轨道交通 1 号线被测线路条件

被测线路序号	位置	半径 R / m	超高 h / mm	曲(直)线长度 l_c / m	缓和曲线长 l_s / m
曲线 1	火车站站—汉中路站上行	300	120	570	50
曲线 2	火车站站—汉中路站下行	300	120	570	50
曲线 3	人民广场站—黄陂南路站下行	350	120	686	60
直线 1	人民广场站—黄陂南路站下行			100(直线)	



2 上海轨道交通 1 号线波磨特征统计分析

为了全面地了解上海轨道交通钢轨波磨的情况,分析波磨的成因,以达到针对性地提出减缓钢轨波磨的措施和相应的技术参数,对上海轨道交通 1 号线部分曲线和直线的钢轨进行了连续布点测量,并对波磨测量数据进行统计分析。

2.1 被测线路的条件及波磨测量方案

本次测量所选线路条件如表 2 所示。所选线路均铺设 60 kg/m 钢轨,轨下基础为长轨枕埋入式整体道床,轨枕数量按 1 680 根/km 配置,钢轨扣件采用 DTIII 型扣件。采用 SEC-RC 电子平直仪(1 m 长),对所选定曲线的下股钢轨和直线左右股钢轨每隔 20m 进行一次测量。各线路对应测点数如表 3 所示。

表 3 定点测量的测点数量统计

工况	测点数量
曲线 1	29 个
曲线 2	29 个
曲线 3	35 个
直线 1	10 个(左股 5 个,右股 5 个)

2.2 钢轨顶面特征及波磨宏观特征

钢轨顶面特征能反映钢轨目前的状况和车轮在钢轨上运行的状态。通过观察发现,测试曲线线路的下股钢轨普遍压溃,轨顶面波磨比较明显,轮轨接触带基本覆盖整个轨顶顶面,并在外侧边形成多处肥边,轨面伴随有长裂纹和剥离,如图 1 所示。在波磨显著地段,波峰光滑,波谷有密集的裂纹,部分地段波峰、波谷裂纹相连。

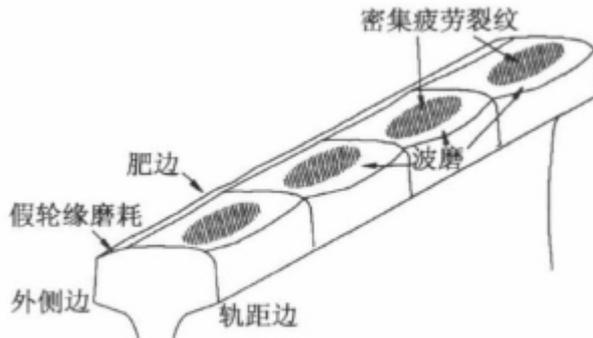


图 1 曲线线路下股钢轨顶面特征

2.3 波磨的波长和波深特征统计分析

波长和波深(即峰峰值)是衡量钢轨波磨的最重要的两个指标。根据波长固定机理,波磨的产生与轮轨系统的某阶振动密切相关。通过列车运行速度 v 与波磨波长 λ 计算所得的频率 $f=v/\lambda$,往往是判断导致波磨产生的振动来源的依据;同时,不同波长和波深的波磨对列车通过的动力冲击响应的影响也不同。二者结合起来共同反映波磨的轻重程度。

由于所采用的波磨测尺在 1 m 的长度范围内每隔 5 mm 进行一次采样,因此在用 Matlab 编程对数据进行频谱分析时设定的空间采样频率 $fs=200m^{-1}$ 。典型测点波磨的波形图和功率谱密度图如图 2 所示。



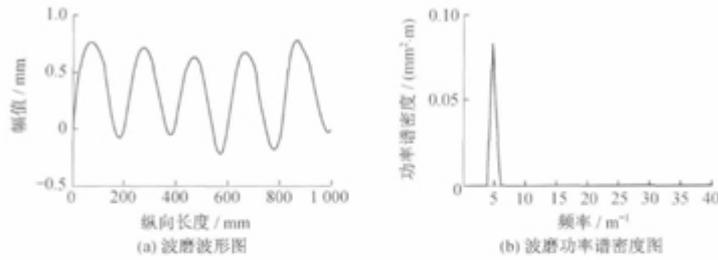


图2 上海轨道交通1号线火车站站—汉中路站下行曲线第8测点波磨波形图及功率谱密度图

表4 测量线路钢轨波磨特征统计

被测线路序号	波长范围/mm	特征波长/mm	波深范围/mm	波深平均值/mm
曲线1	116~233	197	0.04~1.32	0.35
曲线2	165~284	205	0.11~1.37	0.51
曲线3入曲线段	52~76	58	0.02~0.14	0.05
曲线3出曲线段	119~341	223	0.09~0.88	0.37
直线1	53~70	62	0.02~0.12	0.05

从实测的图2(a)波形图中可以看出,波磨均匀规则,周期性明显,波深变化幅度微弱,平均波深 $havg=0.82$ mm,最大波深 $hmax=0.83$ mm。在图2(b)的功率谱密度图上有一处明显的峰值,出现在 4.883 m^{-1} 处,对应波长为 $\lambda=1/f=205$ mm。

经统计,得出测量方案中四种工况下的波磨的波长和波深特征,如表4所示。

表4中的特征波长是将同一曲线上所有波磨特征明显的测点数据合并所得到的平均功率谱对应的波长。可以看出,曲线1和曲线2波磨的特征波长都在200 mm左右,它们的波深范围与波深的平均值也很接近。对比曲线1与曲线2发现,曲线2的特征波长与平均波深都要略大于曲线1,同时其波长与波深的范围也比曲线1略大一些。曲线3的波磨在沿列车运行方向的出入曲线部分呈现出两种不同的特征:入曲线段波长与波深都较小,而出曲线段则较大。曲线3在入曲线段波长为52~76 mm,波深介于0.02~0.14 mm之间;而出曲线段的波长为119~341 mm,波深为0.09~0.88 mm。其出曲线段的特征波长约为入曲线段的4倍,平均波深则为入曲线段的7倍之多。曲线3在列车运行方向的入曲线端与直线1相连。直线1的波磨特征与曲线3的入曲线段非常相似。

从动力学角度来说,在相同运行速度下,具有大波深和高通过频率的钢轨波磨对车辆-轨道耦合系统具有很大的冲击能量,对车辆和轨道的损伤程度也很严重[8]。将所测数据按照0.2 mm波深区间长度进行统计,各个范围波深所占比例如图3所示。

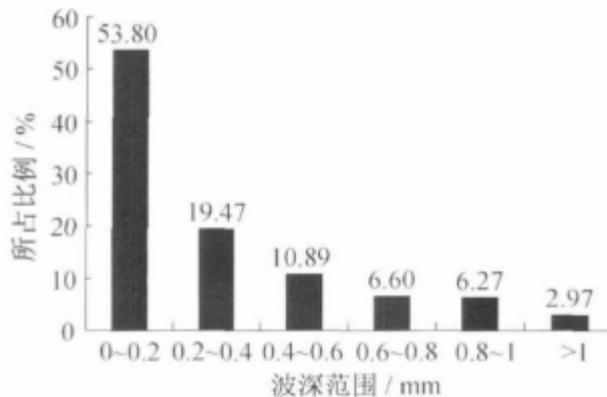


图3 波磨波深范围比例统计

由图3可以看出,波深在0.2 mm之内的波磨比例最大,达到了53.8%;随着波深的增大,各范围的比例在降低;波深大于1 mm的波磨仅占2.97%。

3 结语

本文在对上海轨道交通 1 号线部分波浪形磨耗较为严重的曲线钢轨和直线段进行连续布点测量的基础上,采用 Matlab 编程对测量数据进行了频谱分析,并结合现场观测的实际情况对波磨特征进行统计分析,得出以下结论:

- 1)城市轨道交通钢轨波磨在曲线下股和直线的左右股均有可能产生。
- 2)所测段的波磨钢轨波峰光滑,波谷有密集的裂纹,部分地段波峰、波谷的裂纹相连。
- 3)上海轨道交通 1 号线所测段线路钢轨波磨的波长介于 50~350 mm 范围之内,波深最大值达 1.37 mm。
- 4)不同半径曲线的波长范围及特征波长可能有所差异;同一条曲线上沿列车运行方向的出曲线段与入曲线段波磨可能会呈现明显的差异,出曲线段的波长与波深要大于入曲线段,入曲线段与相连的直线段波磨特征相似。

通过对现场实测数据的统计分析,为今后进一步研究城市轨道交通钢轨波磨的生成机理以及针对性地采取波磨防治措施提供了一定的参考和依据。

参考文献

- [1]张学华.城市轨道交通钢轨波浪形磨耗的产生和预防[J].上海铁道科技,2008(1):100.
- [2]王华川,王仲林.打磨技术在地铁轨道养护中的实践探讨[J].甘肃科技,2006,22(1):51.
- [3]瞿锋.上海地铁轨面接触疲劳裂纹伤损的产生、影响及防治[J].城市轨道交通研究,2008(11):40.
- [4]Tassilly E,Vincent N.Rail corrugations:analytical model and field tests[J].Wear,1991,144(1-2):163.
- [5]Ahlbeck D R,Daniels L E.Investigation of rail corrugations on the Baltimore Metro[J].Wear,1991,144(1-2):197.
- [6]Yoshihiro Suda,Mitsuo Hanawa,Mikio Okumura,et al.Study on rail corrugation in sharp curves of commuter line[J].Wear,2002,253(1-2):193.
- [7]Diana G,Chelif F,Bruni S,et al.Experimental and numerical investigation on subway short pitch corrugation[J]. Vehicle System Dynamics,1998,29(supplement):234.
- [8]温泽峰.钢轨波浪形磨耗研究[D].成都:西南交通大学,2006.

