

地铁车辆轮对异常磨损原因及控制措施

周 浩 李彦武

(西安市地下铁道有限责任公司运营分公司,710016,西安//第一作者,高级工程师)

摘 要 轮对作为地铁车辆的重要组成部分,关系到列车行驶的平稳性和安全性。日常运营维护中,对轮对磨损均采用动态管理,但随着车辆运行里程的增多,轮对异常磨损现象也都逐渐暴露出来。以西安地铁1号线车辆轮对踏面异常磨损情况为研究对象,进行调查分析和数据分析,得出轮对异常磨损的原因是车辆电空配合不良和ATO(列车自动运行)控车不佳。软件优化更新后,轮对异常磨损问题得到有效控制。

关键词 地铁;车辆轮对;异常磨损;电空配合;ATO控车

中图分类号 U270.33

DOI:10.16037/j.1007-869x.2020.01.015

Causes of Metro Vehicle Wheel Set Abnormal Abrasion and Countermeasures

ZHOU Hao, LI Yanwu

Abstract As an important component of metro vehicle, wheel set contributes to the stability and safety in train operation. Dynamic management of the wheel set is generally adopted for daily operation and maintenance. However, with the increase of vehicle operation mileage, the abnormal abrasion of wheel set is exposed gradually. Taking the abnormal abrasion of wheel set on Xi'an metro Line 1 as the study objective, and based on a survey and data analysis, the poor combination control of electric braking and air braking, as well as the malfunction of automatic train operation (ATO) control are detected as the main causes for wheel set abnormal abrasion. After a software upgrading, the wheel set abnormal abrasion is under effective control.

Key words metro; vehicle wheel set; abnormal abrasion; electric braking and air braking coordination; ATO control

Author's address Operation Branch of Xi'an Rail Transit Group Co., Ltd., 710016, Xi'an, China

地铁车辆轮对承载着车辆的全部质量在轨道上运行,同时还承受着从车体、钢轨两方面传递来的其他各种静、动作用力,受力情况复杂。在日常运行中,轮对的磨损是不可避免的。但发生异常磨

耗时,则需要对原因进行深入调查,对影响程度进行评估,以确保车辆正常安全运营。

据调查,车辆轮对踏面异常磨损现象广泛存在,北京、上海、南京、深圳和广州等城市的地铁车辆均发生过不同程度的车辆轮对踏面异常磨损。该异常磨损会使轮轨接触关系恶化,影响行车舒适性、平稳性、安全性,还会造成轮轨异常磨损加剧和异常振动,会大大缩短车辆和轨道各系统部件的使用寿命。

西安地铁1号线车辆轮对在运行三年后,靠轮辋外侧位置出现异常沟槽磨损现象。经跟踪调查,尚未发现运行中有明显异常振动、异响,以及影响舒适平稳性等情况。但考虑到该问题的恶化会进一步降低行车安全系数,影响正常运营,所以必须对该问题进行深入分析。

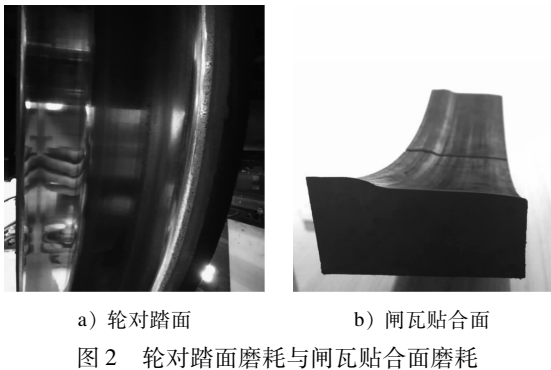
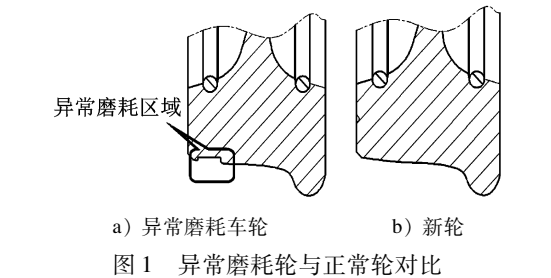
1 车辆轮对异常磨损调查分析

西安地铁车辆空气制动采用单侧踏面制动方式,轮对采用整体辗钢全加工车轮,执行TB/T 2817—1997《铁道车辆用辗钢整体车轮技术条件》,踏面形状为TB/T 449—2003《机车车辆车轮轮缘踏面外形》中的LM型磨耗型踏面。

1.1 车辆轮对磨耗关系

分别对车辆轮对和闸瓦异常磨损情况进行调查,分析车辆轮对的磨耗关系。查看轮对踏面发现,异常磨耗主要分布在踏面靠近轮辋外侧位置(见图1),形成沟槽磨耗。沟槽的平均宽度约26 mm,平均深度约3.48 mm,深度随里程增加而增加。查看闸瓦贴合面侧发现:在轮轨接触区域附着一些铁锈和污垢,呈棕色;异常磨耗区域较光亮,无锈蚀痕迹(见图2a))。核实闸瓦与轮对的切合程度发现,车轮沟槽形状与闸瓦磨耗形状相吻合。由图2b)可知,异常磨耗区域发生在闸瓦与车轮部分贴合区域(并非全部贴合面),没有与轨道接触。故可判定,异常磨耗主要是由车轮与闸瓦部分区域异

常摩擦所产生的。可能与轮对硬度不足、闸瓦贴合面硬度不均、踏面制动单元施加力不均、空气制动施加频次过高等原因相关。



1.2 轮对闸瓦硬度

一般来说,轮对、钢轨、闸瓦三者硬度匹配关系多采用“闸瓦硬度 < 轮对硬度 < 钢轨硬度”的设计思路,目的是为了通过闸瓦磨损来减少钢轨与轮对的磨损,降低更换频次,提升运营的经济性。所以,闸瓦硬度最低,在正常运营中会优选磨耗闸瓦,闸瓦断面形状会跟随轮对踏面形状摩擦成型。

1.2.1 轮对硬度

根据 TB/T 2817—1997 对 CL60 钢的要求,车轮出厂硬度(轮辋表面硬度)为 300~330 HB。现场使用便携式里氏硬度计(G 型)分别对西安地铁 1 号线、2 号线车轮进行硬度测试,测试位置为踏面滚动圆处和沟槽磨耗处,测试结果见表 1。

由表 1 可知,运行 3~5 年后,车轮滚动圆位置硬度大约在 370 HB 左右,沟槽磨耗处硬度大致在 340 HB 左右,差值在 30 HB 左右。由此可知:

- 1) 在运营过程中,车轮滚动圆位置受轮轨接触应力作用发生了一定程度的塑性硬化,故相对于沟槽磨耗处硬度值要高一些。
- 2) 西安地铁 1 号线、2 号线车辆轮对踏面沟槽位置硬度基本一致,不存在硬度不足问题。而 2 号线轮对并无类似异常磨耗,这说明 1 号线轮对踏面异常磨耗与踏面硬度无关。

表 1 西安地铁 1 号线和 2 号线车辆轮对踏面硬度测试结果

线路	运行 里程	样本数 量/件	测量车轮	硬度平均值/HB	
				滚动圆处	沟槽磨耗
1 号线	40 万 km	28	动车轮(8 件)	366	348
			拖车轮(20 件)	364	330
			总体	364	335
			动车轮(4 件)	370	355
2 号线	70 万 km	8	拖车轮(4 件)	375	355
			总体	372	355

1.2.2 闸瓦硬度

一般来说,闸瓦整体材质是均匀的,在整个摩擦面内其硬度基本一致,当受到温度、压力、拍打频次等外界因素影响后,部分技术参数会发生一定变化。对异常磨耗的闸瓦硬度、密度和摩擦系数等参数进行检测,结果如下:

1) 标准硬度要求在 100~120 HRX 范围内,实测异常磨耗区域各点硬度均分布在该范围内(不同位置略有偏差),硬度值符合标准要求。

2) 标准密度要求在 1.80~1.95 g/cm³ 范围内,实测异常磨耗区域各点密度均分布在该范围内(不同位置略有偏差),材质密度符合要求。

3) 闸瓦出厂摩擦系数标准为 0.40±0.05,不同批次闸瓦异常磨耗区域的实测摩擦系数分别为 0.35、0.38、0.35,均符合标准要求。

由此可知,闸瓦整体材质是均匀的,不是造成异常磨耗的原因。

1.3 踏面制动单元状态

上述调查排除了轮对和闸瓦硬度不足导致异常磨耗的可能。故继续对踏面制动单元状态进行调查。检查内容包含油脂润滑、零部件装配、关键部件尺寸测量。

检查结果为:踏面制动单元内部润滑油脂干净、脂量充足;零部件装配正常,无损坏,关键部件无异常磨损或磨损不均匀情况;转轴易磨损位置的磨损均匀无异常偏磨,磨耗量符合运用标准。

如果踏面制动单元驱动推杆推力不均匀,则会导致机构内部出现异常磨损,但实际检查确定:踏面制动单元在使用 3 年后其内部结构磨损正常,设备驱动推杆推动闸瓦贴合踏面精度并未降低。故可排除闸瓦对轮对施加制动力不均导致异常磨耗的可能。

1.4 空气制动施加情况

通过对上述疑点的逐项排除,下一步需调查车辆运行过程中空气制动施加是否存在异常。车辆制动中空气制动压力变化曲线如图 3 所示。

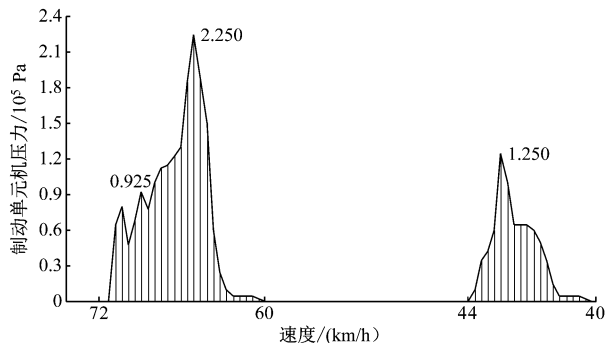


图 3 车辆制动中空气制动压力变化曲线

由图 3 可知,列车在制动过程中共出现 2 次空气制动 BC(制动单元机)压力补充的现象,对应的速度分别是制动初期 70 km/h 左右和制动中期 45 km/h 左右。该 2 处空气制动施加,就表象来说是由于电制动不足空气制动进行了补充,而实际属于电空配合不良问题,与地铁“优选使用电制动,不足之处使用空气制动补充,最大化利用电制动”的节能设计理念不相符。该情况会导致列车高速时上闸频次增多、闸瓦磨耗过快、轮对磨耗加剧、维修成本提升。同时空气制动高速补充也会导致踏面闸瓦温升加快,影响闸瓦摩擦系数,影响制动性能。

2 车辆轮对异常磨耗原因及控制措施

2.1 轮对异常磨耗原因

通过上述分析,查明踏面异常磨耗与列车空气制动高速工况下异常补气有直接的关系,明确了下一步调查方向。通过对数据进行分析,得出轮对异常磨耗原因如下:

1) 列车运行速度在 70 km/h 时,电制动有效信号滞后发出,导致空气制动补充。这主要是由于车辆发出制动指令后,牵引系统反馈电制动有效信号滞后约 1.5 s 左右才送达空气制动系统,空气制动系统 1.5 s 内接收不到电制动有效信号(空气制动根据此信号才能输出正确的电制动请求值),立即施加空气制动;随后电制动发出电制动有效信号并开始建立电制动力,空气制动力响应电制动增大开始减小,直至电制动满足当前的制动需求,空气制动完全撤出(见图 4)。故该问题的原因是:因电制动有效信号输出时机不对而引发空气制动提前补

充;同时,电制动等效信号呈一定斜率上升,势必导致制动初期电制动力无法满足要求,需空气制动予以补充。该问题是由车辆牵引系统与空气制动系统电空配合控制不良导致的。

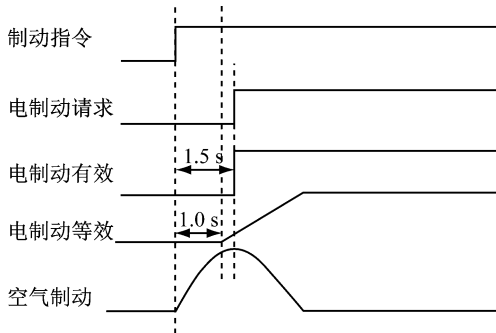


图 4 电制动信号滞后导致空气制动补充示意图

2) 列车运行速度在 45 km/h 时,ATO(列车自动运行)制动控车发出异常牵引信号,导致空气制动补充。在车辆制动时,由于 ATO 设备发出短暂无效的牵引指令,牵引系统为响应 ATO 控车指令要求而对电机磁场控制进行反复转换,即由发电机状态转电动机再转发电机状态,磁场转换过程用时约 4 s 左右(见图 5)。而在电制动转换中,电制动能力基本失效,为防止制动全过程制动力不足,列车整体制动必须由空气制动进行补充,因此在这个阶段空气制动存在补充的现象。该问题是由 ATO 控车方案不良所导致的。

2.2 轮对异常磨耗控制措施

1) 修改牵引系统电制动控制软件,优化电制动配合空气制动逻辑。牵引系统提前发出电制动力有效信号,并建立 2.5 s 制动力等效虚拟值信号反馈给空气制动系统,来抑制空气制动系统上闸实施空气制动(见图 6)。同时,对于虚拟值时段所损失的制动力,后续由空气制动系统提升总制动力,并增大电制动能力发挥比重,来避免列车运行速度在 70 km/h 左右的异常补气抱闸现象。

2) 优化 ATO 控车逻辑。去除制动阶段发出的瞬间牵引信号,将其优化为稳态制动或制动转惰行的方式,来避免 45 km/h 时异常补气抱闸现象。

2.3 轮对异常磨耗控制措施实施效果分析

2.3.1 70 km/h 速度下的电空配合优化

选择西安地铁 1 号线正线客流量较大的 10 个区间,采集空气制动补气情况数据,对比控制软件更新前、更新后效果,如表 2 所示。

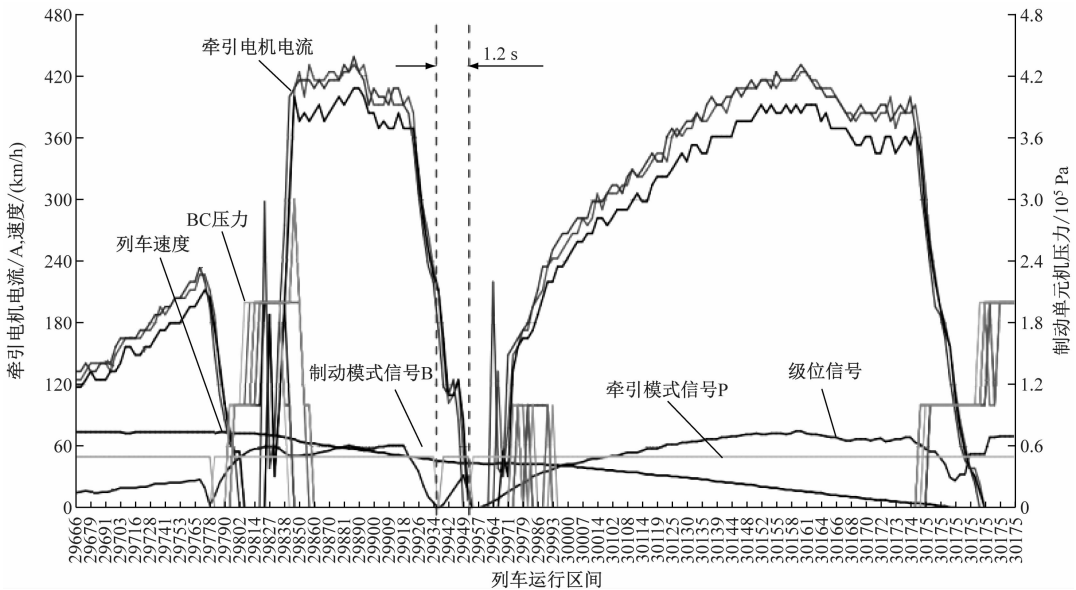


图5 ATO 控车指令变换时电机电流变化曲线

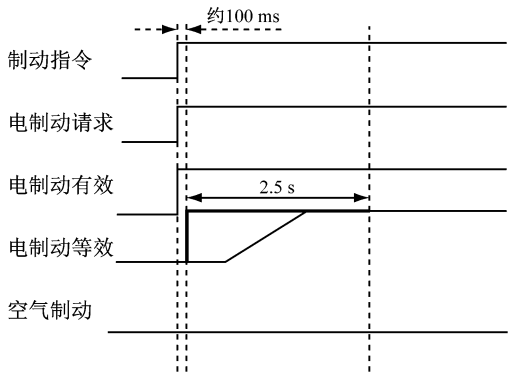


图6 电制动信号优化后效果示意图

表2 西安地铁1号线各区间空气制动补气后的制动压力状况对比表

正线区段	更新前拖车和动车补气后的制动压力/kPa	更新后拖车补气后的制动压力/kPa
纺织城站—半坡站	220	45(200 ms)
长乐坡站—万寿路站	260	75(200 ms)
通化门站—康复路站	250	77(400 ms)
朝阳门站—五路口站	310	77(400 ms)
五路口站—北大街站	280	73(400 ms)
北大街站—洒金桥站	240	73(400 ms)
洒金桥站—玉祥门站	290	93(400 ms)
玉祥门站—劳动路站	260	35(200 ms)
开远门站—汉城路站	280	35(600 ms)
枣园站—皂河站	300	48(600 ms)

注:括号内数据为补气时间

由表2可知,在整体减少车辆空气制动力补充方面,新版控制软件效果显著;由原拖车、动车均补气优化为仅拖车补气,补气时间也大幅缩短。采用新版控制软件后,空气制动补气量明显减小,制动压力由原来最大269 kPa降至63 kPa,大大降低了闸瓦和轮对的磨耗。

2.3.2 45 km/h 速度下 ATO 控车优化

1) 优化前,西安地铁1号线北大街站至五路口站上行区间空气制动补气采样数据如表3所示。列车以ATO模式运行,在速度降至46 km/h时,ATO控车发出瞬间牵引信号,导致电机退磁转换,电制动力丢失,空气制动补充,制动压力升高。最高补充至145 kPa,时长约为2 s。闸瓦贴合轮对施加制动。

2) 优化后,西安地铁1号线北大街站至五路口站上行区间空气制动补气采样数据如表4所示。列车以ATO模式运行,制动速度从48 km/h降至44 km/h过程中,级位始终是制动指令,而此时电制动发挥有效制动力,空气制动无需补充。

由表3、表4可知,ATO控车软件优化后,去除了45 km/h时异常牵引信号,能够有效避免该速度点空气制动上闸补气,从而降低了闸瓦与轮对的磨耗。

2.3.3 轮对磨耗跟踪

软件优化更新后,选取一列车进行轮对镟修,对该车软件更新前和软件更新后轮对运用状态进行跟踪。软件更新前异常磨耗区域磨耗率为0.11

mm/万 km;软件更新后磨耗率为 0.01 mm/万 km,磨耗区域无明显沟槽变化。
降低至更新前的 1/11。跟踪近一年时间,发现异常

表 3 西安地铁 1 号线 ATO 控车软件优化前 45 km/h 速度下发出瞬间牵引信号时空气制动补气运行数据

速度/(km/h)	级位	电机电流/A			空气制动补气压力/kPa					
		2 车	3 车	5 车	1 车	2 车	3 车	4 车	5 车	6 车
48	B13%	212	235	220	0	0	0	0	0	0
47	B2%	157	220	141	0	0	0	0	0	0
47		118	141	110	0	0	0	0	0	0
46	P1%	125	110	118	0	0	0	0	0	0
45	P2%	39	133	24	0	0	0	0	0	0
45	B0%	0	24	0	0	0	0	0	0	0
44	B8%	0	0	16	0	0	0	35.0	12.5	0
44	B11%	78	63	55	27.5	45.0	45.0	35.0	37.5	32.5
45	B18%	125	31	170	42.5	77.5	57.5	47.5	87.5	50.0
45	B24%	188	188	196	117.5	10.0	25.0	125.0	7.5	145.0

注:B 为制动工况;P 为牵引工况

表 4 西安地铁 1 号线 ATO 控车软件优化后空气制动补气运行数据

速度/(km/h)	级位	电机电流/A			空气制动补气压力/kPa					
		2 车	3 车	5 车	1 车	2 车	3 车	4 车	5 车	6 车
48	B38%	290	267	282	0	0	0	0	0	0
47	B36%	290	259	282	0	0	0	0	0	0
47	B31%	259	227	235	0	0	0	0	0	0
46	B25%	227	196	220	0	0	0	0	0	0
45	B20%	204	180	188	0	0	0	0	0	0
44	B15%	173	170	173	0	0	0	0	0	0

注:B 为制动工况

因此可判定,通过上述 2 项措施可以明显减少制动过程中闸瓦与轮对机械磨耗频次,降低踏面异常磨耗,有效推迟轮对镟修时间,延长使用寿命,节约运营成本。

3 结语

基于轮对、钢轨、闸瓦动态接触情况,通过对车辆轮对踏面硬度、闸瓦硬度、制动缸磨损情况、空气制动上闸频次逐步排查得出轮对踏面异常磨耗的真实原因。本文研究结论如下:

- 1) 轮对异常磨耗虽然表面上是一种机械磨损现象,但通过本次分析可知,车辆电空配合不良、ATO 控车不佳同样可以间接影响轮对的实际运用状态。
- 2) 在新车调试中,调试人员往往重点关注制动系统的减速度和冲击率、平稳性等指标,对于车辆电空配合、ATO 控车细节评判易出现遗漏。而该细节在车辆投入运营初期不会出现明显问题,但随着运营里程增加,异常磨耗量就会逐渐累积,最终发生质的变化。故新线建设时需充分考虑这方面因素,将相关性能评估工作做全面。

参考文献

[1] 西安市地下铁道有限责任公司. 西安市地铁 1 号线一期工程地铁车辆采购合同[R]. 西安:西安市地下铁道有限责任公司,2010.

[2] 李霞,温泽峰,金学松. 地铁车轮踏面异常磨耗原因分析[J]. 机械工程学报,2010(8):60.

[3] 巫红波,王明娟,吕劲松. 广州地铁 2 号线车辆闸瓦与车轮磨耗异常分析及改进[J]. 电力机车与城规车辆,2006(5):51.

(收稿日期:2018-04-03)