

doi:10.3969/j.issn.1672-6073.2012.02.012

城市轨道交通钢轨选用的探讨

陈 鹏

(北京城建设计研究总院有限责任公司 北京 100037)

摘 要 在系统分析国内外铁路钢轨应用情况基础上,结合城市轨道交通的特点,对城市轨道交通用钢轨的相关问题进行分析,并对提高钢轨使用寿命的措施提出建议。

关键词 城市轨道交通;钢轨选材;因素;建议

中图分类号 U213.4 **文献标识码** A

文章编号 1672-6073(2012)02-0045-04

钢轨的选用应尽可能提高钢轨及车轮的使用寿命,延长轮轨系统的养护维修周期。在车辆安全、平稳运行的同时,尽可能确保钢轨、车轮处于良好的使用状态,避免车轮及钢轨出现异常伤损。目前城市轨道交通用钢轨的选择主要基于钢轨本身的优缺点进行比选分析,从轮轨系统的角度,并结合城市轨道交通自身特点综合考虑方面做的工作还较少。基于此,笔者将从这些方面探讨城市轨道交钢轨选用的相关问题。

1 轮轨硬度的匹配性

轮轨硬度匹配要达到合理,至少需将4个方面可能产生的病害尽可能降低,即钢轨磨耗、车轮磨耗、钢轨疲劳伤损、车轮表面的擦伤和剥离。

若同时兼顾,则在一定程度上存在矛盾,因此在“轮比轨硬”还是“轨比轮硬”的问题上存在争议。这两种选择对应的优缺点分析见表1,国内外铁路轮轨硬度值见表2。

由表2可见,国内外车轮硬度的取值一般比钢轨硬度略高,且实践表明,当车轮硬度比钢轨硬度稍大时,一般不会出现轮轨硬度匹配有问题的情况。表2中各国轮轨硬度比例范围约为1.05:1~1.45:1,与俄罗斯关于轮轨硬度比例为1.2:1~1.4:1的研究结论基本一致。若除去表中较特殊的日本过高的轮轨硬度

表1 轮轨硬度不同大小关系条件下的定性分析

轮轨硬度大小关系	优缺点分析
车轮硬度低于钢轨	① 车轮的磨耗量相对较大,因车轮的维修及更换比钢轨容易,有利于减小轮轨系统的养护维修工作量(优点); ② 轮轨接触面近似为平面,车轮易打滑,进而导致车轮表面擦伤及剥离可能性的增加(缺点) ^[1] ; ③ 轮轨难以磨合,轮轨接触应力增加和轨头最大剪应力位置长期不变,导致钢轨出现疲劳伤损(斜裂缝、剥离掉块等)(缺点)
车轮硬度高于钢轨	① 钢轨的磨耗量相对较大,轮轨系统总的养护维修工作量可能增加(缺点); ② 钢轨的适当磨耗有利于改善轮轨关系,同时减缓钢轨疲劳伤损的产生(优点); ③ 车轮将嵌入钢轨,此种情况下轮轨接触面是曲面,因此轮轨不易打滑,降低了车轮擦伤及剥离的可能(优点) ^[1]

表2 国内外铁路轮轨硬度值 HB

序号	国家	车轮硬度	钢轨硬度
1	欧洲高速铁路	ER7:248~285 ER8:260~302	UIC700:200~260 UIC900A:260~300
2	日本高速铁路	SSW3R: 311~363	JISE 60:≥235
3	美国(货运为主)	C级车轮(主型车轮): 321~363	AREA: >260(1996年前) >300(1996年后)
4	国铁	ZLB:277~341 CL60:270~341	U71Mn:260~300 U75V(1990~1998) >300 改进后的U75V (1998年后):280~320
5	客运专线	采用国铁车轮及欧系车轮(如ER7、ER8等)	U71MnG:260~300

比,则轮轨硬度比例的平均值约为1.05:1~1.25:1。

目前,轮轨硬度匹配有问题的情况主要因钢轨硬度过大而起,体现在成段铺设热处理钢轨地段的钢轨出现较严重的疲劳伤损,导致钢轨使用寿命降低,直线地段热处理轨的使用寿命甚至不如U71Mn钢轨。如在京广、陇海、浙赣等铁路线上,成段铺设的热处理钢

收稿日期:2011-11-28 修回日期:2012-01-31

作者简介:陈鹏,男,博士,工程师,从事城市轨道交通轨道工程及产品的设计研究, njtucp04@126.com

轨出现了严重的疲劳伤损,且相继发生断轨。因此,国铁主要在客货共线及重载线路侧磨较严重的小半径曲线上铺设热处理钢轨,以提高钢轨的抗侧磨能力^[2]。

综合以上分析,若城市轨道交通的轮轨硬度比例借鉴国铁比例范围,定义为 1.05:1~1.25:1,若采用 U71Mn,则车轮硬度应为 273~375 HB;若采用 U75 V,则车轮硬度应为 294~400 HB。所得到的车轮硬度范围与目前地铁车辆中常用的 CL-60 车轮硬度范围基本一致,表明只要实际的轮轨硬度比例在合适范围,两种钢轨均可满足轮轨硬度匹配的要求。

因此,在对城市轨道交通中的钢轨材质进行选择时,应与车辆专业就轮轨硬度合理匹配方面的问题进行充分协同。目前此方面的接口配合工作有待加强。

2 运营列车的轴重及线路年通过总重

国铁中的重载铁路(轴重 25 t 以上,年通过总重 200 Mt·km/km 以上)主要采用强度等级高、硬度大的钢轨;对于客货共线铁路,根据年通过总重选择相应的强度等级及硬度;对于客运专线,则均采用强度等级低、硬度小的钢轨。例如,年通过总重大于 50 Mt·km/km 的客货共线铁路一般建议选择 U75V,其余年通过总重小于 25 Mt·km/km 的铁路则采用 U71Mn^[2]。高速铁路客运专线车辆轴重范围约 14 t (CRH2)~17 t (CRH5),与地铁列车轴重范围基本相当(A 型车轴重最大为 17.5 t,B 型车轴重为 14 t),曲线半径大(一般在 5 000 m 以上),相关规范中已明确指出钢轨应选用 U71MnG^[3],力学性能与 U71Mn 相当。

年通过总重的概念目前在地铁行业中很少提及。笔者认为有必要在设计中引入国铁的这一概念,作为钢轨选型时定量分析的一种方法。因不同地铁线路行车对数、车型、满载率等的差异,导致年通过总重有些差异。依据北京已开通运营的几条主干线目前运行的列车对数,计算得到的线路年通过总重见表 3;依据在建线路行车资料,计算得到的线路年通过总重见表 4。列车平均满载率参考行车专业进行全日行车对数计算时的取值范围,偏保守按 55% 考虑,每个人的质量偏保守按 70 kg 考虑。

表 3 北京已开通运营的主干线目前的年通过总重

线路	年通过总重/(Mt·km/km)
1 号线	28.2
2 号线	26.5
5 号线	22.0
10 号线一期	21.0

表 4 某些在建线路初、近、远期的年通过总重

线路	初期	近期	远期/ (Mt·km/km)
线路 1(6B 编组)	13.8	18.8	25.7
线路 2(6A 编组)	20.9	25.1	27.7
线路 3(8B 编组)	30.1	34.5	35.6

由表 3、表 4 可见,总体而言,地铁线路年通过总重均较小,在 6 辆编组条件下线路年通过总重一般不会超过 30 Mt·km/km,8 辆编组条件下线路年通过总重也不会超过 40 Mt·km/km,与国铁中的客运或运量较小的客货共线铁路相当。因此,若按国铁中依据年通过总重的大小选择钢种,则 U71Mn 钢轨可满足地铁设计要求,且有利于轮轨磨合和降低疲劳伤损。

3 小半径曲线钢轨侧磨的应对

虽然地铁列车与客专列车的轴重基本相当甚至比客运专线略小,但地铁系统最突出的特点之一是线路小半径曲线较多(正线最小曲线半径可达 300 m),侧磨超限是目前小半径曲线地段换轨的主要原因。因客运专线曲线半径一般在 5 000 m 以上,故不能全线按客运专线标准选择低强度等级(880 MPa)、低硬度(260~300 HB)的钢轨,需针对小半径曲线钢轨侧磨较快的问题采取措施。

虽然 U75V 钢轨硬度、强度等级比 U71Mn 略大,但国铁的实践表明,其在曲线地段的耐磨性与 U71Mn 相比并无明显优势,主要是其化学成分经历了一个调整过程。1998 年前生产的 U75V 钢轨在曲线地段铺设时其使用寿命比 U71Mn 轨提高约 50%,虽耐磨性不如热处理钢轨,但 U75V 钢轨平直度较好、质量稳定。此外,当时的热处理钢轨生产能力有限,且工艺不完善导致热处理钢轨质量不够理想(如采用喷雾冷却导致硬化层硬度均匀性较差、质量不稳定等)。因此,U75V 钢轨在国铁中得以推广使用,但随后发现其存在一些缺陷,如硬度提高后导致其韧塑性降低,对裂纹产生的缺口敏感性增加,可焊性差,且在钢轨预弯矫直、锯轨、卸轨作业及上道使用中易发生脆断,危及行车安全。为此,攀枝花钢铁有限公司于 1998 年调整了 U75V 钢轨的化学成分,如降低碳、硅、钒等的含量,以提高钢轨的韧塑性,使脆断现象有所减少,焊接性能也得到改善;但耐磨性能比调整前有明显降低,从各路局的反馈看,其在小曲线上的耐磨性能与 U71Mn 相比已无明显优势。

此外,地铁线路的调研也表明,目前包括铺设 U75V

钢轨在内的小半径曲线(半径400 m 以下)地段钢轨侧磨速率较快。如正线上铺设 U75V 的一些 R300 m 曲线 5 年左右即换轨,出入线地段甚至有 2 年即换轨的情况出现(正线侧磨重伤标准为 15 mm^[4])。因此,无论铺设 U71Mn 还是 U75V 钢轨的线路,有必要借鉴国铁经验,在小半径曲线地段采用热处理钢轨(硬度一般在 330 HB 以上)以延缓钢轨侧磨,尤其是对线网中年通过总重较大的主干线。

4 钢轨材质的纯净性

钢轨的纯净性与钢轨的抗疲劳性能密切相关,应尽可能减少钢轨中夹杂物、有害元素(硫、磷等)及氢、氧、氮等气体的含量。因含有这些物质的部位易产生疲劳裂纹,进而形成核伤,导致钢轨强韧性能的降低。对于热处理钢轨而言其纯净性更为重要,各钢种中的 S(硫)、P(磷)含量见表 5^[2-3,5],一般而言,强度等级及硬度越高的钢轨,S、P 含量控制得越严。我国 U71Mn、U75V 钢轨的 S、P 含量相对较高(仅比 UIC900A 低),热处理钢轨的 S、P 含量与国外热处理钢轨相比略高;国铁客运专线上采用的 U71Mn(k)与欧洲 EN260 的 S、P 含量及力学指标一致。

城市轨道交通车辆的轴重轻、速度低,钢轨轮轨力小,钢轨磨损较少,故与客运专线类似,钢轨的疲劳损伤成为相对突出的问题,见图 1。这主要有两方面原因:一是城市轨道交通车辆的发车间隔小(北京地铁 1 号线高峰时段发车间隔达 2 min 5 s),过载频率高;二是减振地段的轨道刚度低,钢轨应变相应也较大。此外,小半径曲线上因轮轨力相对较大,除存在侧磨外,疲劳损伤问题也较突出,并伴随剥离掉块,见图 2。因此,城市轨道交通用钢轨应像国外钢轨看齐,进一步降低钢轨中 S、P 等有害元素的含量,提高钢轨的抗疲劳性能,尤其是小半径地段采用的热处理钢轨更应如此。



图 1 直线上钢轨出现的疲劳损伤(鱼鳞伤)



图 2 曲线外股钢轨伴随侧磨的疲劳损伤
(鱼鳞伤,局部剥离掉块)

表 5 国内外钢轨有害元素含量及力学指标

国别	钢种	有害元素含量/%		力学指标	
		P	S	抗拉强度/MPa	硬度/ HB
中国	U71Mn	≤0.03	≤0.03	≥880	260 ~ 300
	U71Mn(k)	≤0.025	≤0.025	≥880	260 ~ 300
	U75V	≤0.03	≤0.03	≥980	280 ~ 320
	U71Mn 热处理轨	≤0.03	≤0.03	≥1 180	332 ~ 391
	U75V 热处理轨	≤0.03	≤0.03	≥1 230	341 ~ 401
欧洲	UIC900A	≤0.04	≤0.04	≥880	260 ~ 300
	EN260	≤0.025	0.008 ~ 0.025	≥880	260 ~ 300
	350HT/350 LHT(热处理钢轨)	≤0.02	0.008 ~ 0.025	≥1 175	350 ~ 390
美国	碳素钢	≤0.02	≤0.02	≥980	≥300
	碳素钢热处理轨	≤0.02	≤0.02	≥1 180	≥370

5 提高钢轨使用寿命的其他建议

除钢种的合理选择外,其他措施对于提高钢轨使用寿命也至关重要。

1) 钢轨预打磨。新线上实施预打磨对于消除钢轨表面脱碳层、轨面毛刺、锈迹等瑕疵,改善轮轨接触关系,缩短轮轨磨合期以延缓钢轨病害发生具有显著效果。以往的轨道交通工程建设,对于新线开通的预打磨工作重视程度不够,随着新开通线路局部区段钢轨异常磨耗的出现,目前这一问题也日益引起各相关单位的重视。对于建设的第一条地铁线路,轨道设计单位一般应要求将打磨车费用纳入工艺专业概算,作为本城市线网中需优先考虑配置的大型工务维修设备。由于铣磨车费用较高,考虑设备国产化率问题,第一条线上可不配置,在续建线路中需结合线网建设情况及各条线路的造价再综合考虑何时配置。

2) 钢轨接头焊接质量的控制。城市轨道交通的钢轨焊接因受铺轨工期、下料口(地下线车站铺轨基地

下料口较小,一般约 30 m × 5 m)等原因影响,不具备基地焊的条件,故一般采用现场移动闪光接触焊。钢轨闪光焊后,焊接接头组织尤其是奥氏体晶粒粗化,韧塑性下降较多。对于淬火轨而言,原淬火硬化层消失,运营后经列车碾压易形成低接头。因此,需对焊接接头进行焊后热处理。目前,地铁中普遍采用的移动闪光焊后热处理方式为火焰加热,温度不易控制,导致热处理质量不稳定,且地下线焊接时烟气不易消散,作业环境差,操作不当易导致焊接接头的平直度较差(目前地铁中焊接接头的垂直不平顺度控制得普遍不好),这些因素均对接头质量的可靠性有一定影响。因此,今后有必要研究类似基地焊采用的电感应加热焊后热处理装置。接头的平直度也应严格控制,如采用精度较高、操作方便的数字显示钢轨平直度检测仪检测接头的平直度。

3) 曲线钢轨涂油。曲线外股钢轨涂油可有效减缓钢轨的侧磨,这在国内外铁及地铁领域均是成熟的经验。但应注意,曲线钢轨润滑后,在磨耗降低的同时,有可能会加剧钢轨的接触疲劳伤损。通常做法是先打磨钢轨消除疲劳源,再涂油润滑。若有条件应尽可能采用固体润滑剂,实践证明固体润滑不仅可大幅减少钢轨磨耗,且不会导致钢轨剥离掉块的发生,对于提高钢轨的使用寿命效果明显^[6],且可避免使用液体润滑剂导致道床及扣件脏污等问题。当然,涂油并非越多越好,应合理确定涂油周期及涂油量,合理涂油的基本原则是确保钢轨疲劳伤损和磨耗伤损的比例较接近^[7]。

此外,对于小半径曲线上的钢轨波磨问题,可采用轨顶摩擦控制装置,通过调整轮轨接触面摩擦系数在一定范围的方式减缓钢轨磨耗。此类装置在北京地铁新线建设及既有线改造中已尝试采用。

6 结语

通过对城市轨道交通钢轨应用方面相关问题的分析,有以下结论:

1) 不同强度等级、硬度的钢轨各有其优缺点,除钢轨自身特点外,应从轮轨系统的角度,结合所设计工程自身的特点,综合考虑后选择合适的钢轨。

2) 从目前城市轨道交通钢轨的使用情况看,U71Mn 及 U75V 在小半径地段的钢轨侧磨均较严重,因此无论是选用 U71Mn 还是 U75V 钢轨,在小半径地段采用热处理轨均有必要,尤其是线网中年通过总重较大的主干线。

3) 城市轨道交通用钢轨的选择,除钢轨自身的耐磨性、经济性等因素的考虑外,还应与车辆(轴重、轮轨

硬度的匹配要求等)、行车(线路的年通过总重)等专业进行配合后,综合考虑确定。目前城市轨道交通轨道设计时对于钢轨的选择主要从本专业角度考虑,与其他相关专业的接口配合有待加强。

4) 城市轨道交通轴重轻,但过载频率高、小半径曲线多,减振地段钢轨应变较大,导致钢轨接触疲劳问题相对突出,因此应更加重视钢轨材质的纯净性问题,尽可能降低钢轨中有害元素(如 S、P)及非金属夹杂物的含量,尤其是小半径曲线上采用的热处理轨。

5) 除钢种的选择外,其他措施是否到位对于提高轮轨系统的使用寿命也至关重要,如钢轨预打磨、焊接接头质量的严格控制、合理涂油方式的选择等。

此外,目前城市轨道交通用钢轨尚处于直接采用国铁钢种的阶段。由于城市轨道交通与国铁在技术标准、车辆类型、施工条件、施工方法、运营特点及养护维修模式等方面均有所差异,因此今后有必要针对城市轨道交通自身特点,研发城市轨道交通专用的钢轨。

参考文献

[1] 丁伟,黄辰奎,高文会,等. 铁路车轮与钢轨的强度及硬度匹配[J]. 铁路采购与物流,2003,(6):37-38.
[2] 周清跃,刘丰收,朱梅,等. 轮轨关系中的硬度匹配研究[J]. 中国铁道科学,2006,27(5):35-41.
[3] TB/T 3276—2011 高速铁路用钢轨[S]. 北京,2009.
[4] 北京市地铁运营有限公司. 工务维修规则[S]. 北京,2009.
[5] 周清跃,王树清,张银花,等. 热处理钢轨若干问题的探讨[J]. 中国铁道科学,2005,26(1):72-77.
[6] 周清跃,张建峰,郭战伟,等. 重载铁路钢轨的伤损及预防对策研究[J]. 中国铁道科学,2010,31(1):27-31.
[7] 刘启琛. 城市有轨交通的钢轨磨耗与其减磨措施[J]. 都市轨道交通,1996(4):26-29.

(编辑:郝京红)

Discussion on Application of Rails in Urban Rail Transit

Chen Peng

(Beijing Urban Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Beijing 100037)

Abstract: In this paper, based on the analysis of domestic and international application of rails and in light of the characteristics of urban rail transit, analysis is carried out on the related problems of rails used in urban rail transit. Suggestions on increasing rail service life are put forward.

Key words: urban rail transit; selection of rail material; factor; suggestion