

文章编号: 1672-9897(2012)04-0063-05

高速铁路挡风墙防风沙效果研究

周丹^{1,2}, 袁先旭², 杨明智¹, 许良中¹, 黄莎¹, 张雷¹

(1. 中南大学轨道交通安全教育部重点实验室, 长沙 410075; 2. 中国空气动力研究与发展中心 空气动力学国家重点实验室, 四川 绵阳 621000)

摘要:正在建设的兰新第二双线是世界首条穿越大风区的高速铁路。线路穿越风区最大瞬时风速达64m/s, 并伴随大量沙砾, 严重威胁列车运行安全。如何在大风条件下防止列车倾覆、保护受电弓和接触网安全, 避免沙砾侵道、击碎车窗玻璃成为兰新第二双线亟须解决的问题。本文通过数值计算、风洞试验和现场试验等方法, 开展了挡风墙对列车的防风沙效果研究, 研究结果表明:距轨面高2.5m以上的挡风墙对列车有较好的倾覆防护效果, 防沙效果也较好, 但对受电弓和接触网的接触安全防护效果较差, 需要另外采取措施, 确保受电弓和接触网的接触安全。

关键词:挡风墙; 数值模拟; 风洞试验; 风沙; 接触网

中图分类号:U216.41+3

文献标识码:A

Research on the anti-wind/sand effect of windbreak wall on high-speed train

ZHOU Dan^{1,2}, YUAN Xian-xu², YANG Ming-zhi¹,

XU Liang-zhong¹, HUANG Sha¹, ZHANG Lei¹

(1. Key Laboratory of Traffic Safety on Track, Ministry of Education, Central South University, Changsha 410075, China; 2. State Key Laboratory of Aerodynamics, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang Sichuan 621000, China)

Abstract: The second double line of Lanzhou-Xinjiang railway being under construction is the first high-speed railway in the world which passes through strong wind area. The highest instantaneous wind speed can reach 64m/s along with lots of gravels, which brings serious threat to train operation safety. Therefore, how to protect trains being overturned and keep the safety of pantograph and catenary, avoiding gravels eroding and burying railway line, even breaking train glasses has become an urgent problem to be solved regard to the second double line of Lanzhou-Xinjiang railway. Based on numerical simulation, tunnel wind experiment and field test, series of researches were taken to evaluate the anti-wind/sand effect of windbreak wall on trains. The results show that windbreak wall with 2.5m high above the rail has better protective effect as well as anti-sand effect for trains. However, it is not safe enough for pantograph and catenary, some additional measures should be taken to ensure their safety.

Key words: windbreak wall; numerical simulation; tunnel experiment; wind and sand; catenary

0 引言

新建兰州至乌鲁木齐第二通道(简称兰新第二双线)为客运专线铁路,全长1776.9km,是世界上一次建成最长的高速铁路,也是世界首条穿越大风区的高速铁路。线路在甘肃和新疆境内穿越五大风区总长超过500km,其中举世闻名的百里风区、三十里风区,是世界上内陆风力最为强劲的地区之一。区内风

速高、风期长,起风速度快,最大瞬时风速达64m/s,部分地区大风还伴随着沙砾,风沙曾多次造成既有兰新铁路翻车、沙砾掩埋铁路、击碎车窗玻璃等事故,给铁路运输带来了巨大的经济损失和严重的社会影响^[1]。兰新第二双线计划运营速度高达350km/h,以如此高的速度通过大风频繁,风力强劲的风区,这在世界铁路历史上是史无前例的,没有任何可以借鉴的经验和技术。因此,通过防风结构研究解决大风区

收稿日期: 2011-11-05; 修订日期: 2012-03-25

基金项目: 中南大学前沿研究计划(2010QZZD020)空气动力学国家重点实验室开放课题资助(SKLA20110202); 国家自然科学基金资助项目(51105384)

高速铁路防风技术难题,对兰新第二双线的顺利建成、建成后铁路的运输安全,乃至今后西部内陆地区的高速铁路建设均有极为重大的意义。

防风工程的首要任务是防止列车被大风吹翻^[2-8]。既有兰新、南疆铁路均曾发生过因大风吹翻列车,造成人员伤亡的重大事故,因此既有兰新铁路在线路迎风侧修建挡风墙,有效防止了列车因大风倾覆^[9-10]。但是既有兰新线运行普速内燃机车,兰新第二双线运行高速动车组,这就引起两个问题:首先是动车组运行速度远大于普通客车,相同横风条件下,动车组所受到的气动升力和倾覆力矩比低速普客列车大很多,并且动车组自重较轻,抗倾覆能力相对较差,因此,挡风墙对动车组的防护效果需要进一步研究。其次,防风工程的另一要务是防止受电弓和接触网脱离。既有兰新铁路运行的是内燃列车,没有接触网的问题,而高速铁路动车组运行中如果接触网在大风中偏移太大,将使受电弓和接触网脱离,突然的电力中断将导致一系列问题甚至是灾难性的后果。挡风墙能否确保大风情况下受电弓和接触网的接触安全,是否需要采取其他措施还需进一步研究。最后,防风工程还必须兼顾防沙的功能,兰新第二双线所经过的几大风区,特别是烟墩风区和百里风区,有极为特殊的次生灾害,即大风往往伴随着沙砾,严重时击碎列车的车窗玻璃,损坏车体结构,侵蚀和掩埋轨道,给行车安全带来严重后果。2006年既有兰

新铁路就曾发生沙砾击碎(T70次)列车的车窗玻璃,导致列车倾覆,多人受伤的重大事故。因此,防风工程还必须考虑列车高速通过时的防沙功能。

目前,最为经济和应用最广的防风结构是挡风墙。本文通过数值计算、结合风洞试验和现场实测等研究手段,对挡风墙后动车组的倾覆安全特性、接触网的流场特性以及其防沙能力进行了系统研究,为兰新第二双线的防风设计提供依据。

1 挡风墙防动车组倾覆研究

1.1 试验风洞和模型

风洞试验在中国空气动力与发展中心 8m×6m 风洞中进行。该风洞为直流式、闭口、串列双试验段大型低速风洞,本次试验在第二试验段进行。第二试验段截面尺寸为 8m×6m,长 15m,稳定风速范围 20~70m/s。

动车组试验模型如图 1 所示,模型的比例为 1:15,本次试验以将在兰新二线运行的 CRH2 型高速动车组为研究对象,采用三车编组:头车+中间车+尾车。试验需将测力天平安置在车内,因此,动车组车体内部设计成空心结构;模型外部采用红松木,内撑角钢焊接的骨架;每辆模型车的顶部、底部和两侧都设计成可拆卸的方式,以方便天平的安装和调试,模型的大风挡、转向架也均可拆卸。挡风墙离轨面的高度为 2.5m。挡风墙及高速动车组的实验布置如图 2 所示。

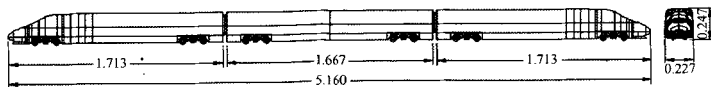


图 1 CRH2(型)高速动车组模型(单位:m)
Fig. 1 CRH2 High-speed train model (unit: m)

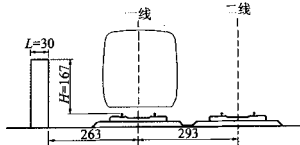


图 2 挡风墙及高速动车组实验布置图(单位:mm)
Fig. 2 Sketch of barrier wall and CRH2 High-speed train model (unit: mm)

测力试验采用一组六分量盒式天平,可同时测量各模型车所受到的气动力和力矩。为避免风洞壁面边界层的影响,在试验段内安装列车试验地板装置,该地板由 5 块独立地板拼接而成,中间地板有一直径 7m、可旋转 360°的转盘,其它为固定部分。地板前、后缘加工成流线型,以减少对气流的干扰,地板之间

有倾斜的缝隙;各块地板后缘下面,有一角度可调的斜板伸出下表面,通过该斜板可以产生低压涡区,能够被动地吸除边界层,以降低地板边界层的影响。

1.2 设置挡风墙后动车组气动特性

由于大风环境下,升力、侧向力和倾覆力矩对列车的安全有重要影响,因此,要考察挡风墙防止列车倾覆的效果,应分析列车所受到的升力、侧向力和倾覆力矩的特性。表 1 列出了风洞试验测得环境风速度为 50m/s,侧滑角为 90°时(兰新第二双线的线路和风向基本垂直),动车组静止在平地上,在无防风设施和 2.5m 高挡风墙两种情况下,动车组头、中、尾各车的升力系数、侧向力系数和倾覆力矩系数。从该表可以看出:无防风设施时,动车组所受气动压力比较大,设置挡风墙后,动车组受到的气动力显著减小。这是

因为没有挡风墙时,气流在动车组的迎风面滞止,迎风面为正压,而背风面为涡流区,其压力为负压,正压和负压方向一致,产生比较大的侧向力;车体顶部由于气流的膨胀,产生较大负压,导致较大的升力;而倾覆力矩主要由升力和侧向力引起,因此倾覆力矩也比较大。设置挡风墙后,动车组受到的气动阻力显著下降,主要是挡风墙的存在,动车组周围的流场发生巨大变化,在挡风墙和动车组之间形成一涡流区,动车组的背风面也存在一涡流区,动车组的侧向力取决于这两个涡流区的压差,涡流区压强均为负压,两负压方向相反,相互抵消,侧向力绝对值减小约29%,方向与无挡风墙时方向相反,动车组顶部的负压也大幅减小,升力变为负升力,增强了抗倾覆的能力;侧向力和升力的共同变化,最终导致倾覆力矩减小约60%。因此,挡风墙有较好的防止列车倾覆的能力。

表1 动车组各车气动系数比较表
Table 1 Aerodynamic coefficient comparison
between different cars

	无墙 升力	有墙 升力	无墙 侧力	有墙 侧力	无墙倾 覆力矩	有墙倾 覆力矩
头车	6.96	-0.80	-3.61	-2.24	-3.29	1.12
中车	7.44	-1.04	-3.86	2.76	-3.81	1.44
尾车	7.02	-0.75	-3.64	2.27	-3.38	1.15

备注:参考面积 0.0556m^2 ,力矩系数计算取宽度 0.225m ,力矩参考点 $Y_0=\pm 0.04\text{m}$, $Z_0=0.0\text{m}$

分析动车组所受到的力,包括在挡风墙后气动阻力、横向振动加速度、垂向振动加速度、离心力、重力等,并进行稳定性计算可以得到,环境风速为 45m/s ,挡风墙后动车组在直线上可以以 350km/h 的速度安全运行。

2 挡风墙防受电弓和接触网脱离研究

挡风墙能对动车组的倾覆进行有效的防护,但挡风墙是否可以确保大风情况下受电弓和接触网的接触安全,需要进一步进行研究。

接触网的风偏量是衡量受电弓和接触网接触安全的最重要指标,要得到接触网的风偏量,必须准确模拟接触网的运动。但在风洞中准确模拟和测量接触网的运动非常困难,首先接触网的运动非常复杂,包含平动、转动、扭转,还包含挥舞和颤振等运动;其次,为满足流场相似,接触网必须和列车、挡风墙采用相同的缩尺比,缩尺后的接触网的运动很难反映真实接触网的运动。因此,很难通过直接测量接触网的风偏量来研究挡风墙对接触网的影响。但是,接触网处的风速决定了其运动状态,可以通过研究挡风墙对接触网处风速的影响,来评估挡风墙对接触网的影响。

实验依然在 $8\text{m}\times 6\text{m}$ 风洞中进行,挡风墙的高度为 2.5m 。上、下接触网离开轨道顶部距离分别为 5.5m 和 6.9m 。接触网处风速主要采用两排七孔探针进行测量,探针位置安装在第二节动车组中部对称线上方,对应接触网位置。同排探针测试结果非常一致,而受挡风墙和动车组的影响,上、下接触网处风速有所差异。表2列出了风洞试验实测动车组静止在平地一线和二线,没有防风设施和有 2.5m 高挡风墙两种情况时,不同接触网位置处风速的无量纲速度。测试表明,沿接触网长度方向和垂向的风速比较小,而对接触网横向偏移影响最大的横向速度比较大。比较有无挡风墙接触网处风速,可以认为:挡风墙对接触网基本没有起到保护作用,甚至在 6.9m 位置处还有加速效应。根据文献[11]可知,进一步增加挡风墙的高度,可以减小接触网处的风速,但此时动车组的倾覆力矩随之增加。鉴于挡风墙对动车组的倾覆防护和弓/网的接触防护之间的矛盾,并考虑建筑成本, 2.5m 左右的挡风墙是比较合适的,尽管挡风墙无法防护弓/网的接触安全,但可以采取减小接触网-立柱之间的距离,增加承力索拉力等措施,加强接触网自身的抗摆动能力,防止接触网因环境风导致的大幅摆动,确保大风环境下受电弓和接触网的接触安全。

表2 接触网处无量纲速度比较表

Table 2 Nondimensional velocity comparison in catenary section

	距轨面 5.5m				距轨面 6.9m			
	V_x	V_y	V_z	V	V_x	V_y	V_z	V
无设施	0.06	1.17	0.36	1.22	-0.03	1.10	0.26	1.13
挡风 一线	0.06	1.12	0.30	1.16	-0.06	1.17	0.10	1.17
墙 二线	0.04	0.96	0.15	0.97	-0.03	1.13	0.23	1.15

3 挡风墙防沙能力研究

3.1 玻璃破碎原因分析

评估挡风墙防止沙砾击碎列车的车窗玻璃的能力,首先应分析列车玻璃被破坏的原因。列车玻璃在风沙流的作用下被破坏,主要因素包括风和沙两个方面,风的因素包括:车窗玻璃所承受的静态风压差、动态风压差和长期承受压力所引起的疲劳;沙的因素主要是不同大小沙砾以不同速度冲击玻璃。

在沙砾冲击玻璃试验中,最关键的技术是沙砾的大小和速度的测定。本次试验采用基于机器视觉的原理设计了一种空间粒子速度和粒径实时测量和分析系统,通过图像处理技术,得到空间粒子的速度和粒径。

大量实验结果表明玻璃破碎的主要原因是沙砾的击打,风压和疲劳对玻璃破碎的作用较小。表3为

风压 4kPa 情况下,不同粒径多颗击碎玻璃的破碎速度^[12]。从该表可以看出两点:(1)粒径小于 2mm 的沙砾对车窗玻璃威胁很小;(2)结合百里、三十里风区的风速分布和沙区分布,对列车玻璃威胁最大的沙砾粒径大于 3mm。

表 3 风压下多颗沙砾击碎速度
Table 3 Crush speed of sands under wind pressure

粒径范围 /mm	平均粒径 /mm	破碎速度		
		1 颗	3 颗	6 颗
2~3	2.5	75.6	69.70	60.70
3~5	4	57.45	49.33	44.84
5~6	5.5	42.66	37.58	35.53
6~8	7	37.43	31.52	29.16
8~10	9	30.92	27.80	23.98

3.2 含沙量随高度变化分布规律

由于列车玻璃破碎的主要原因是沙砾击打,那么,沙砾随高度变化的分布直接关系到挡风墙防止沙砾击碎列车的车窗玻璃的能力。兰新铁路 K1476+875~K1477+000,属于沟口地形,易产生大风。中铁西北科学研究院在 K1476+800 附近,挡风墙上风向设置集沙仪,对试验期间该处风沙流结构进行观测^[13],如图 3 所示。



图 3 集沙仪
Fig. 3 Sand collector

观测时间为 4 月 16 日至 21 日,各级大风持续时间情况见表 4。表 5 为集沙仪颗粒分数数据表。从该表可以看出,风沙流密度、沙石粒径随高度增加急剧减少。对列车玻璃威胁比较大的、粒径大于 3mm 的沙砾基本处于 1m 以下。离地高度 3m 以上,沙砾的粒径只有 1~2mm,沙砾量也非常小,只有 0.1g。

表 4 试验期间各级大风持续时间概况表

集沙时间	8 级	9 级	10 级	11 级	12 级	13 级
	/h	/h	/h	/h	/min	/min
4 月 16 日~21 日	16.633	12.983	7.067	1.692	9.500	1.000

表 5 集沙仪颗粒分数数据表(单位:g)

Table 5 Sand collector particle data (unit: g)

粒径/mm	9m	7m	3m	2m	1m	0.5m	0.1m	累计量
>6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.2
5~6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3~5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.8	1.4
2~3	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.4	0.6
1~2	0.0	0.0	0.1	0.2	1.0	1.7	4.0	7.0
0.5~1	0.0	0.0	0.1	0.7	3.5	8.3	15.4	28.0
0.25~0.5	0.1	0.0	0.1	0.6	5.6	17.4	33.7	57.5
0.1~0.25	0.7	0.8	2.8	7.9	16.3	38.4	119.9	186.8
0.075~0.1	0.6	0.7	1.2	0.8	3.6	5.3	9.8	22.0
<0.075	3.2	4.0	5.0	2.0	5.3	6.4	10.7	44.0
总量	4.6	5.5	9.3	12.3	35.4	78.1	194.9	347.5

3.3 挡风墙防沙能力评估

如前所述,对兰新第二双线,大风区除了大风强劲频繁以外,沙害也是一个需要高度重视解决的问题。挡风墙防沙能力要从两个方面评估,一是防止大风卷起的沙砾击碎玻璃,二是防止侵蚀和掩埋轨道。

从沙砾的分布规律来看,设置离轨面以上 2.5m 的挡风墙后,越过挡风墙的沙砾密度非常小,轨道上即使出现很少量的小沙砾,由于这些沙砾粒径比较小,在地面会非常容易随风滚离线路,列车风也可以将其吹离线路,因此,不可能造成沙砾侵蚀和掩埋轨道的情况。这样,离轨面以上 2.5m 的挡风墙,有较好的防止沙砾侵蚀和掩埋轨道的能力。

对于大风卷起的沙砾击碎玻璃的情况,需要综合考虑沙砾的粒径、密度、沙砾的速度、挡风墙和车窗玻璃之间的流场等因素。

图 4 为经过数值求解 N-S 方程后得到的挡风墙周围流线图^[11]。如图中所示:气流的主流经过挡风墙后有所抬升,在挡风墙和列车之间存在一个大的涡,该涡内部的气流速度非常低,并且涡流的气流流经玻璃附近时,其速度方向是顺着玻璃的方向,垂直于玻璃的速度非常小。因此,综合考虑越过 3m 高(离地面高度)挡风墙沙砾的粒径、密度以及垂直于列车玻

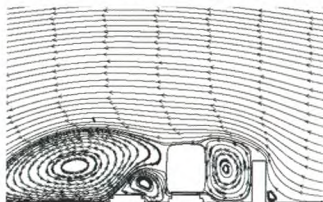


图 4 挡风墙周围流线图

Fig. 4 Streamline around windbreak wall

璃的气流速度,可以认为,离轨面以上 2.5m 的挡风墙,有较好的防止沙砾击碎玻璃的能力。

4 结 论

针对兰新第二双线的工程需要,以解决大风区高速铁路防风技术难题为目标,通过大量试验和数值模拟,研究了 2.5m 挡风墙对动车组、受电弓和接触网的防护能力,防沙能力。得到如下结论:

(1) 挡风墙高度为 2.5m 时有相当好的防止列车倾覆的能力。在其防护下,动车组的倾覆力矩降低了 60% 左右;

(2) 2.5m 高挡风墙对接触网的防护作用比较差,无法保证大风环境下受电弓和接触网的正常接触。需要从输电线路自身采取措施,确保大风环境下受电弓和接触网的接触安全;

(3) 风沙流环境下,大风卷起沙砾击打破璃是列车玻璃破碎的原因,风压和疲劳对列车玻璃破碎影响不大;

(4) 挡风墙高度为 2.5m 时具有良好的防沙功能。越过挡风墙沙砾的粒径比较小,数量也非常少,不会造成沙砾侵蚀和掩埋轨道的情况;挡风墙和列车之间的涡使垂直于玻璃的气流速度比较小,速度小和小颗粒的沙砾,不会击碎列车的玻璃。

参考文献:

- [1] 田红旗. 列车空气动力学[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2007.
- [2] MINORU Suzuki, KATSUJI Tanemoto, TATSUO Maeda. Aerodynamic characteristics of train/vehicles under cross winds[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2003, 91: 209-218.
- [3] BETTLE J, HOLLOWAY A G L, VENART J E S. A computational study of the aerodynamic forces acting on a tractor-trailer vehicle on a bridge in cross-wind[J].

Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2003, 9: 573-592.

- [4] TOSHISHIGE Fuji, KATSUJI Tanemoto. Wind induced accidents of train-vehicles in japan and the countermeasures on kansai airport line[C]. World Congress on Railway Research, 1997.
- [5] TOSHISHIGE Fuji, TATSUO Maeda, HIROAKI Ishida, et al. Wind-induced accidents of train/vehicle and their measures in Japan[J]. QR of RTRI, 1999, 40(1): 50-55.
- [6] 周丹, 田红旗, 杨明智. 强侧风下客车在不同路况运行的气动性能比较[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2008, 39(3): 554-559.
- [7] 杨明智, 袁先旭, 鲁寨军, 等. 强侧风下青藏线列车气动性能风洞试验研究[J]. 实验流体力学, 2008, 22(1): 76-79.
- [8] 高广军, 田红旗, 姚松. 兰新线强侧风对车辆倾覆稳定性的影响[J]. 铁道学报, 2004, 26(4): 36-40.
- [9] 刘风华. 不同类型挡风墙对列车运行安全防护效果的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2006, 37(1): 176-182.
- [10] 姜翠香, 梁习锋. 挡风墙高度和设置位置对车辆气动性能的影响[J]. 中国铁道科学, 2006, 27(2): 66-70.
- [11] 中南大学轨道交通安全教育部重点实验室. 兰新线列车气动性能及稳定性数值计算报告[R]. 2009, 11.
- [12] 中南大学轨道交通安全教育部重点实验室. 兰新线风沙对车窗玻璃影响实验报告[R]. 2010, 8.
- [13] 蒋富强, 李炎, 李凯崇, 等. 兰新铁路百里风区风沙流结构特性研究[J]. 铁道学报, 2010, 32(3): 106-110.

作者简介:



周 丹(1980-),女,贵州六盘水人,博士。研究方向:列车空气动力学。通讯地址:湖南长沙中南大学铁道校区高速列车研究中心(410075)。电话:13874807246, E-mail: zd_lzj@126.com