

DOI : 10.3901/JME.2014.04.099

# 腔室耗能型高速铁路风障的减载抗风性能\*

毛 军<sup>1</sup> 郝艳红<sup>1</sup> 高 亮<sup>1</sup> 杨国伟<sup>2</sup>

(1. 北京交通大学土木建筑工程学院 北京 100044; 2. 中国科学院力学研究所 北京 100190)

**摘要:** 高速铁路挡风风障在减小列车在大风环境中运行的气动荷载的同时,自身具备良好的抗风能力和结构稳定性亦十分重要。为此,提出和设计出一种新型的由双层带孔薄板构成的透风式腔室耗能型挡风风障,并采用数值模拟方法对无挡风风障单层结构和腔室结构挡风风障的挡风作用及自身抗风性能进行计算和分析。结果表明,单层、腔室型挡风风障均可明显减少横风作用于列车的气动荷载,但它们的流场结构存在较明显的差异,且腔室结构风障所受的气动力较小;与单层风障相比,腔室型风障对列车气动荷载具有更好的减载效果以及更强的自身抗风能力和结构稳定性。通过改变腔室结构的两层薄板上透风孔的孔径比,可调节两层薄板的受力分配。腔室耗能型挡风风障的提出,为挡风风障的研究提供新的思路和方法,也可为高速列车的防风设计提供参考与依据。

**关键词:** 高速列车; 横风; 风障; 腔室耗能型; 抗风性能

中图分类号: U216

## Wind Resistance Performance of the Windbreak with Air Chambers Dissipating Energy Applied in High-speed Railway

MAO Jun<sup>1</sup> XI Yanhong<sup>1</sup> GAO Liang<sup>1</sup> YANG Guowei<sup>2</sup>

(1. The Civil Institute, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044;

2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

**Abstract:** It is also very important to improve resistant capabilities of wind resistance and structural stability of the windbreak while reducing train aerodynamic load. A new type of windbreak is proposed with double-layer structure forming a cavity chamber with hole for energy dissipation of crosswind. Numerical simulation is used to analyse and compare the effects of two kinds of windbreak in the reduction of aerodynamic force acting on the train and their own wind-resistance performance. The results show that the two types of windbreaks can significantly reduce the train aerodynamic load under the action of crosswind, and of course, there is obvious difference between them, and the aerodynamic force acting on the windbreak with cavity chamber structure is small than on another one with single layer structure. The new windbreak has better effect in aerodynamic load shedding for the train, stronger resistant capabilities of wind resistance and structural stability. By changing the aperture ratio of leak hole on the two layer plates, force distribution on them can be adjusted for the windbreak with chambers. This new type of windbreak is a new idea and will provide some useful references for design of the wind protection system for high speed train.

**Key words:** high-speed train ; cross-wind ; windbreak ; air chamber dissipating energy ; wind resistance

### 0 前言

在高速铁路沿线安装挡风风障是降低高速列车在横风作用下的气动荷载,使列车在横风下仍然能以较高速度行驶的有效方法。但风障距离轨道较

近,易受到较为强烈的列车风或列车风与横风耦合气流的冲击作用。若设计和安装不当,风障可能在突变气动荷载的作用下失效甚至破坏,进而危及到高速列车的运行安全。因此,风障自身的抗风能力和结构稳定性十分重要。欧洲和日本从 1996 年开始通过缩尺或全尺寸模型的风洞试验研究风障和防风栅的抗风性能<sup>[1-4]</sup>,对其设计、安装和工程应用等进行了分析<sup>[5-6]</sup>。刘凤华等<sup>[7-8]</sup>对兰新线不同类型挡风墙的结构形式进行了研究,对列车在横风中的三维

\* 国家自然科学基金(51278032)、“十一五”国家科技支撑计划重大(GTYZ200902)和中国博士后基金(2013M530520)资助项目。20130306 收到初稿,20130828 收到修改稿

绕流情况进行数值模拟,分析了列车的横风作用稳定性问题。张健<sup>[9]</sup>讨论了防风栅在降低铁道车辆所受气动横向力时自身的抗风性能以及防风栅实际应用情况。郑继平<sup>[10]</sup>针对南疆线大风区桥梁的风障进行了数值模拟和试验研究,分析了风障的高度和透风率对挡风效果的影响。

目前,我国关于高速铁路风障的设计理论和方法尚不足,相关的技术标准或规范也未制定。既有风障主要有南疆线的弧形单层钢板透风式风障和兰新线的平板砌块透风式挡风墙。本文从风障的挡风效果、抗风性能和结构优化设计等方面考虑,提出和设计了一种由双层透风式波纹板构成的腔室耗能型风障,以便在降低列车气动荷载的同时,更好地保证和提高自身的抗风能力和结构安全性。

## 1 腔室耗能型挡风风障的模型

### 1.1 几何结构

既有钢板透风式风障一般为单层波纹板结构,采用弧形立柱,波纹板安装后形成凸面迎风面(图 1)。与纯粹的平面平板相比,这种波纹板结构能够增加挡风风障本身的刚度,提高抗风性能。

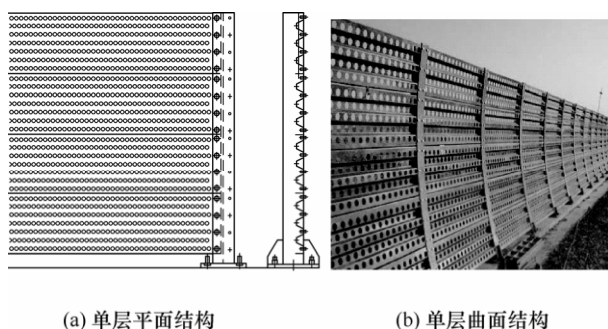


图 1 两种透风式单层挡风风障

这两种风障都是完全利用板面自身直接受力来消耗横风的能量,其自身抗风能力的提高并不明显。另外,曲面结构在受到列车经过时产生的脉动风冲击波时,凹面成为迎风面,对冲击波作用的承受能力减弱。因此,考虑采用垂直等截面立柱、双层波纹板形成耗能腔室的结构型式,既提高风障的挡风作用、自身稳定性和抗列车脉动风冲击波的能力,也便于加工和现场安装,如图 2 所示。

由于腔室结构可以比单层结构采用更薄的钢板,所以前者的材料和加工成本只是略有增加,而其实际挡风效果却能得到显著提高。下面将对单层结构和腔室结构的两种风障的挡风效果和自身抗风能力进行分析。

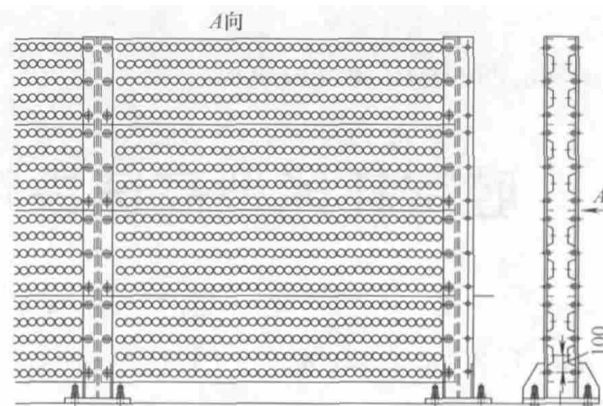


图 2 透风式双层结构的腔室耗能型挡风风障

### 1.2 风障的几何模型

图 1a 所示单层结构风障的单元尺寸为宽 2 m,波纹板透风孔的直径设定为 50 mm,对应的透风率分别为 16.3%。图 2 所示的腔室结构透风孔的直径也为 50 mm,但由于腔室结构的两板上的透风孔错开布置,所以从阻力等效的角度看,其透风率小于 16.3%。另外,腔室结构的两板的孔径可以不同,透风率取决于较小孔径的透风孔。图 3 是风障与列车相对位置的关系示意图。风障与线路中心线的距离按照京沪线的要求设定。

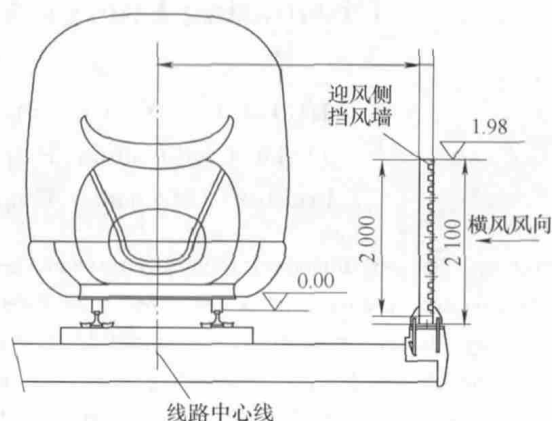


图 3 挡风风障与列车的相对位置关系(标高 m, 其他 mm)

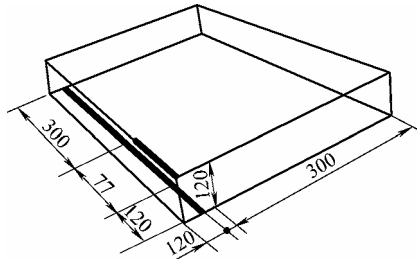
两种风障与列车的相对位置相同,其挡风板的离地间隙均为 90 mm。单层结构风障的透风孔与腔室结构风障的大透风孔的直径相等。

### 1.3 计算域和网格

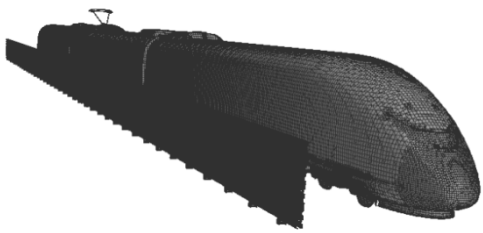
图 4a 给出了计算域的总尺寸以及风障和列车在计算域中的位置,列车长 77 m,3 节车辆编组;风障长度为计算域全长,即 497 m。列车和风障的网格如图 4b 所示。

为了更准确地计算车体表面的摩擦力,对比风障的减载效果,在车体、转向架表面、风障表面及地面处生成边界层网格。在生成体网格时,除了加密列车尾流区、受电弓和转向架区域外,还将风障附近、风障的尾流区、波纹板上的透风孔以及腔室结构的腔室等区域的网格进行了加密。透风圆孔的

直径为 50~60 mm, 最小网格尺寸为 2 mm。单层、腔室结构模型的总网格数量分别为 5 100 万和 6 000 万。由于网格量太大, 为了保证网格质量和提高网格划分的效率, 采用分区域划分网格的方法, 每个风障单元为一个区域, 各区域通过交界面连接。



(a) 计算域



(b) 列车附近的网格

图 4 计算域及局部网格分布图

## 2 计算条件和方法

(1) 采用相对运动模拟列车附近的外流场。设定列车静止, 地面和挡风风障移动, 空气来流以与列车运行速度反向等值的速度绕流列车。速度三角形见文献[11]。

(2) 列车时速 350 km/h, 列车绕流按三维黏性、可压缩流动考虑, 流动物理方程见文献[12]。

(3) 计算域流动入口条件为速度边界条件。列车前方入口来流为均匀来流, 流速 97.22 m/s。横风为大气底层边界速度型风场, 距地面 10 m 高度处的风速分别取 15 m/s 和 20 m/s, 风向角为 90°。

(4) 计算域流动出口条件为恒压边界条件, 出口压力设为一个标准大气压。

(5) 列车表面设为有摩擦的壁面边界, 采用移动地板法消除地面效应对列车气动特性的影响。

(6) 由于选择的计算区域足够大, 可认为计算域的几何边界对列车周围流场的影响甚小, 其上表面设定为无摩擦的壁面边界。

(7) 应用 RANS 方法, 湍流模型选择切应力输运 SST  $k-\omega$  模型<sup>[12]</sup>。在车体表面及地面处利用壁面函数法。扩散项使用二阶中心差分格式; 对流项采用二阶迎风离散格式, 控制方程参见文献[13]。用分离式解法对离散控制方程组求解, 使用 SIMPLE

法耦合压力-速度场, 用迭代法修正压力。数值模拟方法的适用性和准确性分析参见文献[11]。

## 3 腔室结构挡风风障的挡风作用分析

以 CRH 型列车为例, 对无挡风风障、设置单层结构挡风风障和设置腔室结构挡风风障三种情况进行分析。数值模拟计算的工况列于表 1。

表 1 高速列车挡风风障的模拟计算工况

编号	车速/ (km/h)	风速/ (m/s)	风向角/ (°)	透风孔 孔径/mm	挡风风 障结构
N	350	15, 20	90	0	无
S	350	15, 20	90	50	单层
D	350	15, 20	90	50	双层

以车速 350 km/h、横风 20 m/s, 风向角为 90°的工况为例, 对其流场结构和压力分布进行分析。

### 3.1 挡风风障的流场结构和压力分布

有、无挡风风障时, 典型断面的涡量和压力分布如图 5 所示。其中, S4 截面是头车上的横截面。该图表明, 腔室结构风障减小列车附近涡量的效果比单层的更加显著。列车原来的迎风侧因现处于风障的分离涡区域而使正压区域的压力降低, 背风侧原来涡量较大的分离涡因横风来流作用的降低而减弱, 压力有所升高, 即原来的正压力峰值降低, 负压力峰值提高。因此, 图示位置的压力场比无挡风风障的要均匀得多, 列车迎风侧和背风侧表面的压差减小, 从而使头车和中间车的横向作用力减小, 尾车的横向力在绝大多数情况下也减小。由于风障改变了列车的外流场和压力分布, 使作用于列车的气动荷载都发生变化, 一般情况下是减小。这些基本规律都适用于单层、双层挡风风障而言是共同的。

由图 5 的压力分布图可知, 有单层风障时, 风障的迎风侧压力升高, 由于是 16% 左右透风式结构, 部分绕流气流从波纹板上部直接分离, 所产生的分离涡进入尾迹区, 另一部分气流通过透风孔进入尾迹区。风障的迎风侧压力升高、背风侧的压力降低, 使单层波纹板受到垂直于面板并与横风方向一致的压差阻力。压差阻力系数

$$C_D = \frac{F_D}{0.5\rho v_A^2 A_c} = \frac{F_D}{0.5\rho v_A^2 (1-\phi)A} \quad (1)$$

式中  $\phi$  ——透风率;

$A$  ——挡风风障的迎风面积;

$\rho$  ——流体密度;

$A_c$  ——挡风风障的不透风面积;

$v_A$  ——来流流速;

$F_D$  ——压力, 可通过数值模拟计算求出。

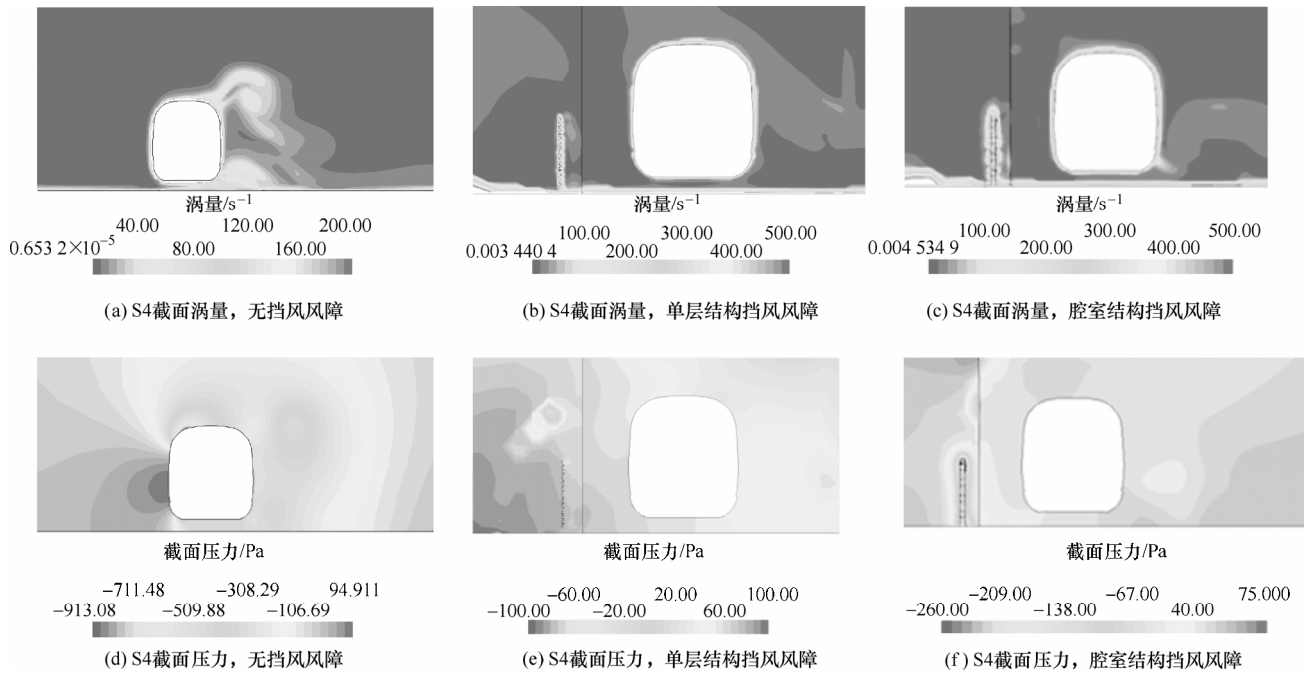


图 5 两种透风式挡风风障对列车绕流流场和压力的作用

### 3.2 双层结构腔室耗能的挡风作用

上述两种挡风风障的宏观作用机制相同，但腔室耗能型挡风风障对列车的减载效果却更明显。

原因如下：气流流经腔室结构挡风风障时，不仅经历第一层波纹板的首次能量头损失，还在腔室内改变流向，再经过第二层波纹板的透风孔流出，在挡风风障的背风侧产生更大的分离涡流和二次能耗，使腔室的耗能作用远大于单层波纹板耗能的作用，如图 6 所示。

腔室结构风障不仅在上部产生大分离涡，还在中间高度位置产生一大分离涡。因此，双层挡风风障的两个大分离涡使挡风风障背风侧的压力更低，使得列车迎风侧的压力也降低，列车周围压力场更均匀，更有效地减少列车的气动荷载。

图 7 是挡风风障内外流动的涡量图和流速矢量图。图 7a 表明，由于腔室结构挡风风障的两层波纹板上的透风孔错位布置，气流经过迎风侧波纹板的透风孔后流入腔室，撞击到背风侧波纹板上产生流动滞止点并改变流向，在流道不断变化的腔室内沿垂直方向上、下流动，并产生较大的动能损失。由于存在滞止流动，腔室内的静压力有所上升，高于背风侧的压力，于是腔内气体便由背风侧波纹板的透风孔流出。腔室内流道的流道周期性变化在腔室里及双层波纹板附近引发大量小尺度分离涡，这些涡会消耗了较多气流的能量。

由图 7b 可知，流入第一层透风孔的来流速度接近于远方来流速度，最大速度可达 25 m/s；经过腔室内的能量损耗后，从第二层波纹板流出的速度

大大降低，约为 10 m/s，挡风风障的腔室结构大大消耗了动能水头。

此外，顺着横风流动方向看，迎风侧波纹板的外侧压力、腔室内的压力和背风侧的压力依次降低，而且腔室内的压力分布比较均匀。图 8 是距列车头部 108 m 处挡风风障的腔室内外压力分布图。腔室结构挡风风障的压差阻力系数

$$C'_D = \frac{F'_D}{0.5\rho v_A^2 A'_c} = \frac{F'_D}{0.5\rho v_A^2 (1-\phi')A} \quad (2)$$

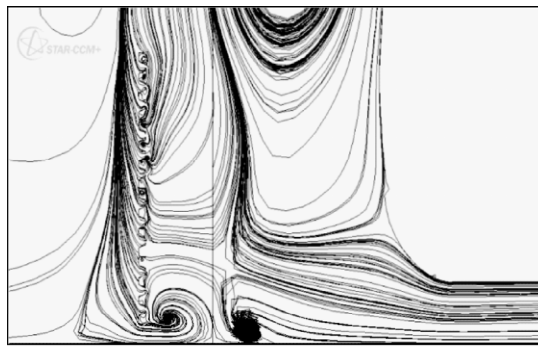
式中  $\phi'$  —— 双层挡风风障的透风率；

$A$  —— 挡风风障的迎风面积。

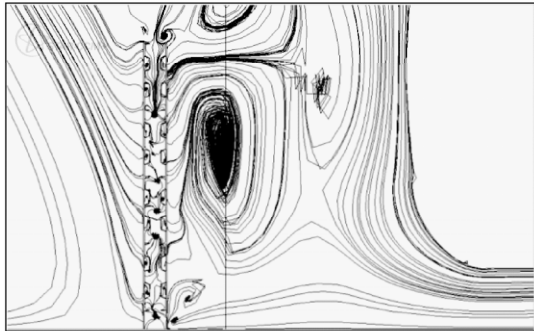
### 3.3 单、双层挡风风障对列车减载作用的比较

横风作用于列车的阻力、升力、横向力和倾覆力矩是列车横风气动性能的主要指标。表 2 给出了工况 350- $u_w$ -90° 在各个风速下的单、双层挡风风障的减载情况。为便于比较单、双层风障的减载效果，将无风障时列车的气动荷载作为参照列入表 2 中，并以  $(|无挡风风障的荷载值| - |有挡风风障的荷载值|) / |无挡风风障的荷载值| \times 100\%$  表示风障对气动荷载的减载幅度。

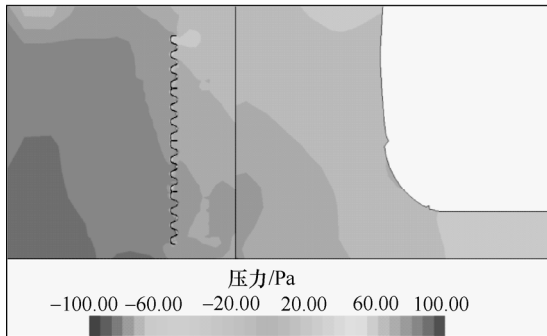
由表 2 可知，在各个横风风速下，单、双层挡风风障减小横风作用于各节车辆的气动阻力和升力的效果比较接近，减载幅度均在 72% ~ 95% 的范围内。而减小横向力的幅度的情况则比较复杂，与风障类型、横风风速及车辆位置有关，并不总是腔室结构风障的减载幅度比单层的大。腔室结构风障减小头车横向力的幅度明显高于单层风障的。



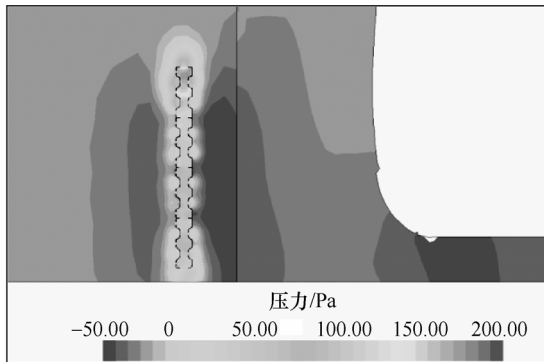
(a) 单层结构风障附近流线



(b) 双层结构风障附近流线



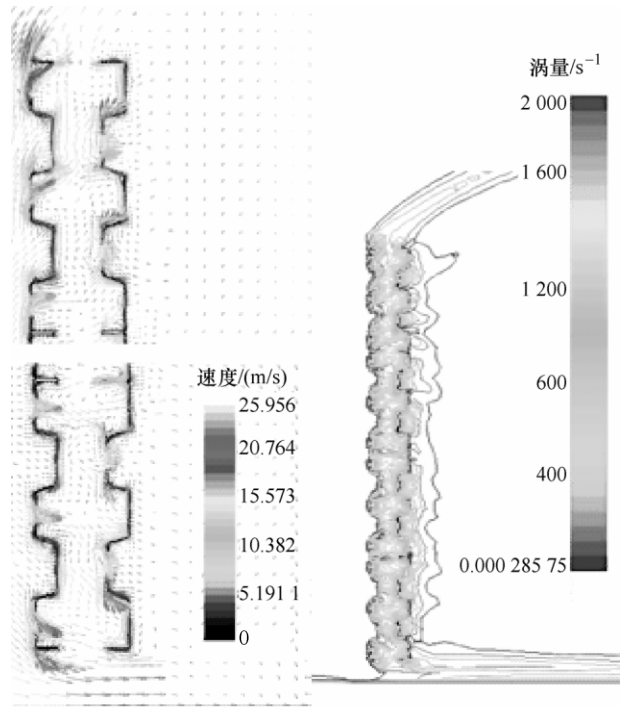
(c) 单层挡风风障的压力



(d) 双层挡风风障的压力

图6 两种透风式挡风风障在S4截面的流场

风速为 15 m/s 时,腔室结构风障减小中间车横向力的幅度大于单层风障的,而风速为 20 m/s 时,单、双层风障减小中间车横向力的幅度相当,分别为 99.48%和 98.6%,单层风障的减载幅度略大。对于尾车,由于单层、腔室结构风障对尾车绕流尾流的强非线性的影响程度不同,横向力的变化与横风风速关联度更高。例如,单层、腔室结构风障的列



(a) 腔室内流速局部放大 (b) 腔室内涡量

图7 双层腔室风障的内外流场

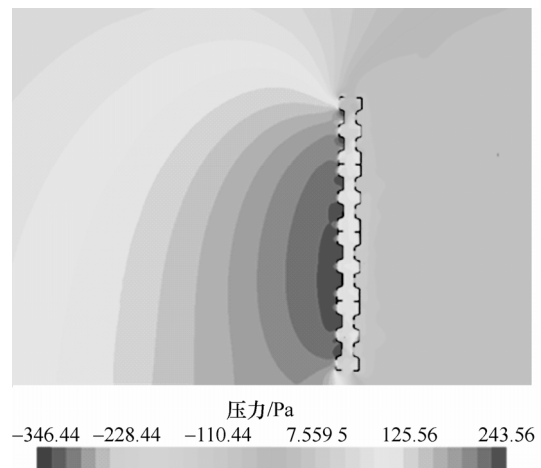


图8 双层结构风障腔室的内外压力分布云图

车气动横向力在风速为 15 m/s 时反而均增大,双层风障增大的幅度较小;但双层风障在风速为 20 m/s 时减小横向力的幅度远高于单层风障的,可达 82%。

表 2 还表明,单层、腔室结构风障均大幅度减小了横风作用于各节车辆绕车体中心的倾覆力矩,但减小幅度还与、风速大小和车辆位置等有关。

对于头车,腔室结构风障减小倾覆力矩的幅度高于单层风障的;对于中间车,风速为 15 m/s 时,腔室结构风障减小倾覆力矩的幅度大于单层风障的,而风速为 20 m/s 时,减小倾覆力矩的幅度相当,分别为 88.96%和 87.25%;对于尾车,单层风障的尾车倾覆力矩的方向与腔室结构风障的相反,且腔室结构风障在风速为 20 m/s 时减小尾车倾覆力矩的

幅度比单层的大,但在 15 m/s 时的减小尾车倾覆力矩的幅度比单层的略小。

表 2 无挡风风障、单层和双层挡风风障的气动力矩计算结果

N · m

荷载类型	车辆位置	横风风速 15 m/s			横风风速 20 m/s		
		无挡风风障	单层结构挡风风障	腔室结构挡风风障	无挡风风障	单层结构挡风风障	腔室结构挡风风障
阻力	头车	14 214.74	4 407.218	3 029.501	14 760.10	1 996.033	2 568.451
	中间车	17 726.89	6 602.987	6 191.704	19 636.66	4 572.267	5 472.059
	尾车	14 934.62	3 858.693	3 623.290	17 057.85	2 990.358	3 350.033
升力	头车	13 784.32	3 831.798	2 885.407	30 462.63	2 397.158	3 200.931
	中间车	25 925.06	-4 196.030	-3807.540	43 371.05	-2 391.000	-3 074.020
	尾车	20 665.56	6 192.422	5 017.295	25 111.41	4 394.803	4 836.991
横向力	头车	47 271.83	2 720.535	844.329 30	66 708.23	2 072.391	1 676.401
	中间车	19 505.65	760.468 1	38.193 73	30 296.40	-158.779	423.200 6
	尾车	331.488 9	4 794.917	3 776.748	4 534.773	4 596.637	810.761 8
车体形心倾覆力矩	头车	-15 109.900	1 701.206	833.482	-21 053.000	863.692 5	351.582
	中间车	4 015.177	-440.238	-362.695	3 751.637	-414.213	478.221
	尾车	-639.201	359.845 1	-412.127	-2 728.870	-777.154	120.588 1
侧偏力矩	头车	-277 500.2	9 440.704	4 254.364	-371 886.06	1 926.874	9 193.179
	中间车	260.513 7	5 815.656	4 740.282	15 015.21	9 015.961	-1 228.240
	尾车	-178 642.9	-19 454.000	-28 919.800	-258 265.30	-14 187.90	-8 274.840
俯仰力矩	头车	-194 353.70	22 399.990	25 103.380	-231 994.20	8 191.352	23 701.950
	中间车	31 950.82	-23221.300	-20 735.700	66 374.66	-19 368.400	-10 534.500
	尾车	11 347.12	-612.341	-364.737	5 717.51	10 826.050	1 128.222

对于侧偏力矩,风障使头车和尾车的侧偏力矩均减小,但中间车的情况则比较复杂,与风速和风障的类型有关:工况-N-15-90°中间车的侧偏力矩为 260.51 N · m,工况-S-15-90°使用单层风障,该侧偏力矩增加到 5 815.66 N · m,工况-D-15-90°使用双层风障,该侧偏力矩为 4 740.28 N · m,侧偏力矩增大。原因如下:侧偏力矩是由气动阻力和横向力对车辆中心垂直轴取矩得到的若气动阻力合力对矩心的力矩与横向力合力对矩心的力矩方向相反,则即使阻力和横向力都很大,最后的合力矩也可能很小。反之,若方向相同,即使阻力和横向力都很小,最后的合力矩仍然可能较大。上述三个工况的阻力、横向力及侧偏力矩的值就是这一关系的体现。侧偏力矩本身并不大,即使有所增加也不会对车辆的气动安全性产生大的影响。

同时,单层、腔室结构挡风风障使头车和中间车的俯仰力矩大大降低。尾车的情况比较复杂,出现了力矩绝对值增大的情况。例如,尾车俯仰力矩在无风障工况-N-20-90°中为 5 717.51 N · m,在单层风障工况-S-20-90°中增大为 10 826.05 N · m,但在双层风障工况-D-20-90°中减小为 1 128.22 N · m。其原因与侧偏力矩的相似,只是俯仰力矩是由气动阻力和升力对车辆中心水平轴取矩而得到的。

可见,从总体上看,与单层挡风风障相比,腔室结构挡风风障能够更有效地减小作用于列车的、影响气动安全性能的横风气动荷载。

#### 4 双层腔室结构挡风风障的抗风性能分析

如前所述,风障不仅要减少横风作用于列车的气动荷载,自身也应该有较好的抗风性能和稳定性。因此,不考虑列车,专门对单层、腔室结构风障自身的气动力进行分析,模拟计算的工况列于表 3。

表 3 单、双层结构挡风风障抗风性能的计算工况

编号	风速/(m/s)	风向角/(°)	透风孔孔径/mm	挡风风障
-S-	20, 30, 40	90	50	单层结构
-D-	20, 30, 40	90	迎风、背风层等径孔 50	双层等径结构
-D-	20, 30, 40	90	异径孔:迎风层 60、背风层 50	双层异径结构

通过计算发现,若腔室结构挡风风障的迎风侧波纹板与背风侧波纹板的透风孔孔径相等,例如均为 50 mm,虽然其减载效果优于单层结构的,但两层波纹板的受力相差较大,迎风侧波纹板的受力超过比背风侧波纹板的较多。为了使两波纹板的受力均衡,采用压力孔调节原理,增大迎风侧波纹板上透风孔的孔径至 60 mm,形成双层波纹板开孔异径式的腔室结构挡风风障。这两种腔室结构挡风风障和单层结构挡风风障的计算结果列于表 4 中。

表4 单层、腔室结构挡风风障抗风性能的计算结果

载荷	挡风风障 受力部位	风速 20 m/s			风速 30 m/s			风速 40 m/s		
		单层	双层等径	双层异径	单层	双层等径	双层异径	单层	双层等径	双层异径
迎风压 差阻力/ kN	迎风侧板	1.161	0.739	0.505	2.59	1.645	1.143	4.58	2.926	2.029
	背风侧板	—	0.349	0.584	—	0.794	1.329	—	1.417	2.362
	立柱	0.027	0.066	0.066	0.05	0.148	0.149	0.096	0.265	0.26
	合力	1.188	1.154	1.155	2.64	2.589	2.62	4.676	4.608	4.651
弯曲力矩/ (kN·m)	迎风侧板	1.13	0.72	0.49	2.53	1.602	1.114	5.604	2.854	1.975
	背风侧板	—	0.059	0.56	—	0.764	1.27	—	1.356	2.265
	立柱	0.02	0.334	0.059	0.04	0.133	0.134	0.09	0.238	0.232
	合力矩	1.15	1.114	1.112	2.57	2.499	2.517	5.694	4.447	4.471

注：迎风侧与背风侧波纹板的孔径比为6:5；弯曲力矩的取矩轴是沿挡风风障纵向的地面平行轴。

由表3和表4可知，在各横风风速下，腔室结构挡风风障所受的合力均略小于单层结构挡风风障的合力，但其减载效果远超过单层的。对于腔室结构挡风风障，若迎风侧与背风侧波纹板的孔径相等即腔室为双层等径结构(此处为50 mm)，则两层波纹板的迎风压差阻力以及对地面轴的弯矩均相差较大，迎风侧板的受力远大于背风侧板的受力；若两层波纹板的孔径不等即腔室为双层异径结构，且迎风侧与背风侧波纹板的孔径比大于1，则采用合适的孔径比(此处为6:5)可使两层波纹板的受力非常接近。说明改变两层波纹板上透风孔的孔径比可以改变两波纹板的受力。且迎风侧的孔径较大时，则可减小其受力，使两层波纹板的受力相当，使腔室受力均衡，从而更好地保证风障整体结构的气动稳定性。

由表4还可知，在各个横风风速下，单层挡风风障、双层等径孔和双层异径孔挡风风障所受的合力均十分接近。根据式(1)和式(2)可得

$$0.5\rho v_A^2(1-\varphi)AC_D \doteq 0.5\rho v_A^2(1-\varphi')AC'_D$$

或

$$(1-\varphi)C_D \doteq (1-\varphi')C'_D \quad (3)$$

式中  $\varphi$ ——单层风障的透风率；

$\varphi'$ ——双层风障的透风率；

$C_D, C'_D$ ——单、双层风障的作用力系数。

由式(3)可知，若 $\varphi = \varphi'$ ，则 $C_D = C'_D$ ，即若单、双层挡风风障的透风率相等，则单、双层挡风风障的作用力系数相等。在作用力系数相等的情况下，双层结构风障对列车的气动荷载具有更好的减载效果，更能提高其气动安全性。同时，由于构件结构不同，双层的是框架立体结构，而单层则可认为是近似的平面结构。因此，从结构动力学性能上看，在相同的气动荷载作用下，双层结构比单层具有更

高的稳定性和整体结构刚度。腔室结构风障具备更强的自身抗风能力和结构安全性。

## 5 结论

(1) 气流经过腔室结构挡风风障的迎风侧波纹板的透风孔后流入腔室，在流道不断变化的腔室内产生大量上、下运动的小尺度涡，有效地消耗了动能水头。并在背风侧产生更大的分离涡和二次能耗，使腔室的耗能作用远大于单层波纹板的耗能作用。

(2) 在不同的横风条件下，单层、腔室结构挡风风障改变列车荷载的幅度与风障类型、风速大小及车辆位置有关。但总体上看，腔室结构挡风风障减小列车气动荷载的效果优于单层结构的。同时，腔室结构挡风风障因其结构特性优于单层结构的，从而比单层结构的具备更强的自身抗风能力和结构安全性。

(3) 对于腔室结构挡风风障，若两层波纹板上的透风孔等径，则迎风侧受力较大；若两层波纹板上的透风孔的直径不等，且迎风侧与背风侧波纹板的孔径比大于1，则与等径的情形相比，迎风侧受力会变大。存在合适的孔径比，可使两层波纹板的受力相当，从而提高整体结构的受力均匀性和气动稳定性。此类优化问题将另文论述。

## 参考文献

- [1] QUINN A D. An investigation of the wind-induced rolling moment on a commercial vehicle in the atmospheric boundary layer[J]. Journal of Automobile Engineering, 2007, 21(11): 1367-1379.
- [2] COLEMAN S A. Experimental study of the aerodynamic behavior of high sided lorries in cross winds[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1994, 54(3): 401-429.

- [3] BAKER C J. Behaviour of road vehicles in unsteady cross winds[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics , 1993 , 49(1) : 439-448.
- [4] BAKER C J. Assessment of wind tunnel testing techniques for ground vehicles in cross winds[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics , 1990 , 33(1) : 429-438.
- [5] TATSUO N. Minimizing the effect of natural disasters[J]. Japan Railway & Transport Review, 2000(3) : 52-59.
- [6] 盛其平 . 高速铁路上的侧风问题[J]. 铁道标准设计, 2006(4) : 19-21.  
SHENG Qiping. The issue on windside in high speed railways[J]. Railway Standard Design, 2006(4) : 19-21.
- [7] 刘凤华 . 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, 2006 , 37(1) : 176-182.  
LIU Fenghua. Wind-proof effect of different kinds of wind-break walls on the security of trains[J]. Journal of Central South University , 2006 , 37(1) : 176-182.
- [8] 董香婷, 党向鹏 . 风障对侧风作用下列车行车安全影响的数值模拟研究[J]. 铁道学报, 2008 , 30(5) : 36-40.  
DONG Xiangting, DANG Xiangpeng. Study on influence of wind barriers on traffic safety of trains under crosswind by numerical simulation[J]. Journal of the China railway Society, 2008 , 30(5) : 36-40.
- [9] 张健 . 铁路防风栅抗风性能风洞试验研究与分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2007 , 4(1) : 13-17.  
ZHAGN Jian. Wind-tunnel test investigations and analysis on wind break performances of wind fences on railway[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2007 , 4(1) : 13-17.
- [10] 郑继平 . 南疆线桥梁挡风墙结构性能研究[D]. 成都 : 西南交通大学, 2009.  
ZHENG Jiping. Study on the behaviors of bridge windbreak of Nanjing railway[D]. Chengdu : Southwest Jiaotong University, 2009.
- [11] 毛军, 郝艳红, 杨国伟 . 侧风风场特征对高速列车气动性能作用的研究[J]. 铁道学报, 2011 , 33(2) : 22-33.  
MAO Jun, XI Yanhong, YANG Guowei. Research on influence of characteristics of cross wind field on aerodynamic performance of a high-speed train[J]. Journal of the China railway Society , 2011 , 33(2) : 22-33.
- [12] 王福军 . 计算流体动力学分析 - CFD 软件原理与应用 [M]. 北京 : 清华大学出版社, 2004.  
WANG Fujun. Computational fluid dynamic analysis principle and application of CFD software[M]. Beijing : Tsinghua University Press , 2004.
- [13] 周宇, 钱炜祺, 邓有奇, 等. k- $\omega$  SST 两方程湍流模型中参数影响的初步分析[J]. 空气动力学学报, 2010 , 28(2) : 213-217.  
ZHOU Yu, QIAN Weiqi, DENG Youqi, et al. Introductory analysis of the influence of Menter's k- $\omega$  SST turbulence model's parameters[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2010 , 28(2) : 213-217.

作者简介: 毛军, 男, 1966 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为高速列车空气动力学, 地铁和铁路隧道的通风与火灾安全。  
E-mail : jmiao@bjtu.edu.cn

郝艳红, 女, 1980 年出生, 博士, 讲师。主要研究方向为火灾安全科学与技术、高速列车空气动力学及流体力学等。  
E-mail : 06121404@bjtu.edu.cn