

DOI : 10.3901/JME.2013.09.030

高速列车侧窗受交会压力波作用的动态响应*

钱春强 郑志军 虞吉林 李松晏

(中国科学技术大学中科院材料力学行为和设计重点实验室 合肥 230026)

摘要：采用有限元法模拟高速列车车厢在三种等速(250 km/h、350 km/h 和 500 km/h)明线交会时产生的压力波作用下的动态响应过程，得到侧窗中心 Mises 应力随时间的变化曲线，并与相同幅值变化的均布动载及最大静载两种工况进行对比。结果表明同节车厢各个侧窗中心所达到的最大应力值表现出沿载荷移动方向随侧窗位置不同逐渐增加的趋势。当交会速度较低时，在均布动载荷作用下计算得到的侧窗中心应力峰值均高于静载和移动压力波的情况；而随着交会速度的提高，在移动压力波作用下的侧窗应力峰值高于其他两种情况。在等速交会速度为 500 km/h 时，车厢各个侧窗瞬时挠度在压力波第二个峰值到达时表现出混乱。研究表明在高速列车交会时的车窗安全性评估中必须考虑移动压力波的影响。

关键词：列车交会 压力波 侧窗 应力峰值 弯曲波

中图分类号：U271

Dynamic Response of Side Windows of High-speed Trains Subjected to Crossing Air Pressure Pulse

QIAN Chunqiang ZHENG Zhijun YU Jilin LI Songyan

(CAS Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Materials,
University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

Abstract : Dynamic processes of a carriage loaded by air pressure pulses generated as high-speed trains passing each other at three constant velocities (250 km/h, 350 km/h and 500 km/h) are simulated with a finite element method. The variations of von Mises stress at side window centers with time are obtained and compared with the results of the maximum static load or the uniform dynamic load with the same amplitudes as that of the air pressure pulse. Results show that the maximum von Mises stress of side windows located at the rear of the carriage is larger than that at the front when the load on side window center reaches its positive or negative peak values. When the traveling velocity of trains is lower, the peak von Mises stresses of side window centers calculated under uniform dynamic load are higher than those of the other two loading situations. As the velocity increases, the peak von Mises stresses of side window centers resulted by the moving air pressure pulse exceed those calculated under uniform dynamic load. The von Mises stresses caused by the static load are the lowest. When the traveling velocity of trains is 500 km/h, the instant displacements of side windows are not linear to the amplitudes of the loads when the negative peak value of air pressure pulses arrives. Hence, the influence of air pressure pulse caused by high-speed trains passing each other must be considered when elevating the safety of side windows.

Key words : Trains passing each other Air pressure pulse Side window Von Mises stress Flexural wave

0 前言

随着列车运行速度的不断提升，相关的空气动力学问题也变得越来越突出^[1]。田红旗^[2]总结了国

内学者在列车空气动力学方面取得研究进展。在两列车高速交会时产生的压力波是一类移动强动载荷，很多研究人员已经广泛地对其特征进行了数值模拟^[3-6]和试验研究^[7-9]。列车交会压力波可能使车厢产生较大的变形，以至于侧窗破裂，这在低速交会的列车中往往不会出现。田红旗等^[10]对列车交会压力波作用于 22 型客车车体的 1/2 侧墙进行了数值研究，通过考察车窗的应变能以及橡胶与玻璃连接

* 国家重点基础研究发展计划(973 计划, 2011CB711102)和中国科学院创新工程方向项目(KJCX2-EW-L03)资助项目。20120627 收到初稿，20130124 收到修改稿

处的应力来判断车窗的安全性。石得春^[11]研究了高速列车受均布瞬变载荷作用的响应,用内外层玻璃及胶片应力来作为车窗安全性的依据。李人宪等^[12]基于列车交会的数值模型所得的压力波结果,提出了车窗安全性需要考虑玻璃本身的抗冲击强度以及车窗的安装强度。而当前的动车及高铁的车厢表皮大部分都采用大型中空挤压型材,其结构刚度小于老式列车的钢结构车厢,列车在受到交会压力波作用时,车厢的整体结构运动会变得显著。因此,在某一交会速度范围内,可能会出现弯曲波和压力波两者之间的耦合作用。

本文通过有限元数值模拟移动压力波、均布动载和静态载荷三种类型工况下的侧窗响应,研究高速列车交会压力波对车窗安全性的影响。

1 计算模型

1.1 模型简化与假设

高速列车一般由多节车厢组成,其中包括带驾驶室的首车、尾车以及若干中间车厢。本文以一节中间车厢为例对侧窗的响应进行数值模拟。车厢两侧各有10个车窗,简化的有限元模型如图1所示,有限元模型做了如下简化。

- (1) 只考虑车头引起的压力波,假设载荷幅值在竖直方向上无变化。
- (2) 忽略车体外部复杂结构细节(如受电弓、门把手等)。
- (3) 省略车厢门结构及车厢两端结构。
- (4) 车窗内层结构受到的影响较小^[11],受载侧只考虑最外层玻璃。
- (5) 侧窗与车厢之间为理想粘接。
- (6) 忽略侧窗倒圆角。



图1 有限元模型整体图

1.2 模型材料及单元选取

车体的普通侧窗由吸热玻璃、平板玻璃、干燥空气层、钢化玻璃组成(由内而外),模型中只考虑了受载侧侧窗的最外层,材料为厚度6 mm的钢化玻璃。车体采用中空型材(双壳)结构,使用大型中空宽幅铝合金挤压型材焊接组装,由底架、车顶、侧墙和端墙四大部分组成,本文的有限元模型只考虑了车顶和侧墙,如图2所示。双壳结构由外表皮、中间夹板和内表皮三部分组成,厚度分别为2.0 mm、

1.5 mm和2.0 mm。各组成部分的材料参数见表1。

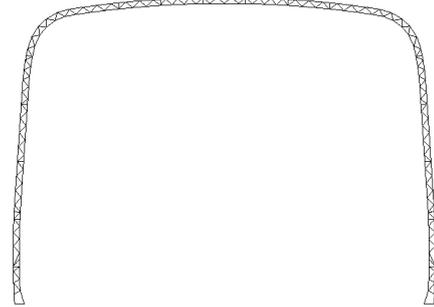


图2 车体截面图

表1 材料参数

材料	密度 $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	弹性模量 E/GPa	屈服应力 σ_y/MPa	泊松比
钢化玻璃	2 500	73.1	41.4	0.3
外表皮	2 700	70.0	250.0	0.3
中间夹板 和内表皮	2 700	62.0	150.0	0.3

采用ABAQUS/Explicit有限元模块进行计算。车厢长度为24.5 m,该方向上单元数为360,内外表皮宽度方向上每两个焊接点之间的单元数为6,中间夹板的宽度方向单元数为4,均用S4R壳单元。

1.3 边界条件及载荷施加

模型中忽略了车厢的整体侧向运动,车厢表皮下端是与地板焊接在一起的,这里近似将表皮下端宽度约为两个焊接点距离内的节点完全固定。

列车交会时中间车厢受到的典型应力波形如图3所示^[9],车头交会的幅值大于车尾交会。因此,有限元模型只考虑车头交会产生的波形。压力波的加载方式如下:在车厢长度方向上,每单元宽度设置一个载荷面,载荷面长度与车厢高度相当,根据交会速度和单元长度之间的关系,以及压力波形,分别施加压强载荷,并假设载荷幅值在垂直方向上无变化。图4是单个载荷面所承载的简化波形,其中 $\Delta t = \Delta L/(2v)$, ΔL 为该载荷面与压力波作用的起始端的距离, v 为列车交会速度,这里 $2v$ 是压力波的移动速度(两列车等速交会)。

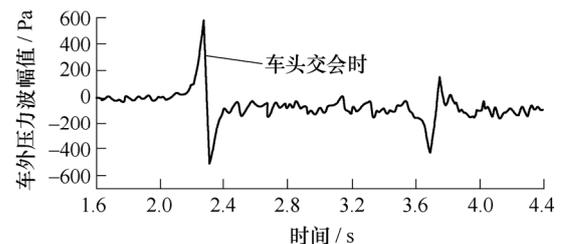


图3 CRH2动车250 km/h等速交会前后第二节车厢中部所测的压力波

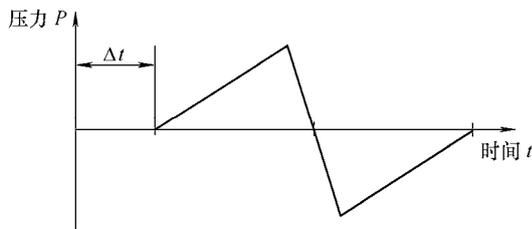


图 4 空间分布的单个载荷作用面所加载荷波形

文献[9]给出了 CRH2 列车在线间距为 4.4 m 的铁路上交会实测数据为最高交会速度 250 km/h 下的情况。对于更高交会速度的压力波幅值，通过文献[9]给出的幅值与交会速度的拟合公式 $P = 0.0178v^2$ 计算得到，其中 P 为压力波正负幅值差 (Pa)， v 为列车等速交会速度 (km/h)。250 km/h、350 km/h、500 km/h 等速交会时的波幅值分别为 0.600 kPa、1.090 kPa、2.225 kPa。

由于压力波由两列车车头相遇时产生的气动作用造成，可以假设压力波的空间长度近似保持不变。根据图 3 可知，250 km/h 等速交会时的测试点的波形时间历程约为 0.40 s，两个波峰之间的时间长度约为总时间历程的 20%，约为 0.08 s。因此，350 km/h 等速交会的波形时间历程约为 0.28 s，500 km/h 时约为 0.20 s。由此可得到不同交会速度时简化的压力波波形。

1.4 模型工况

现有的文献中侧窗玻璃安全性的主要判断依据为压力波的峰值和载荷幅值变化所产生的冲击，即没有考虑移动压力波与静载荷或均布动载下的结构响应的区别。本文模型主要用于研究侧窗玻璃在交会过程中的动态响应，根据所达到的应力峰值来判断是否会被震破。而交会时的压力波有两个显著的特征，就是载荷大小和作用区域都随时间变化。为了研究这两个特征对侧窗应力的影响，本文考虑以下三种工况。

(1) 移动压力波：考虑了三种速度 250 km/h、350 km/h、500 km/h 的等速交会。

(2) 均布动载：分别采用三种交会速度下的波形和载荷幅值，车厢交会侧表面受大小随时间变化的均布压强动载作用。

(3) 静载荷：在静态模型中，将每种交会速度下的压强峰值均匀施加在列车交会的一侧。

2 计算结果和分析

2.1 均布动载与静载的对比

不同交会速度下按均布动载和静载荷计算得到的各车窗中心的 Mises 应力(本文以下结果均为

Mises 应力)的比较如图 5 所示。图 5 中 A、B 分别为相应的压力载荷达到正向峰值和反向峰值的时刻；实线为均布动载作用下的各车窗响应，虚线为静载荷作用下的车窗响应。

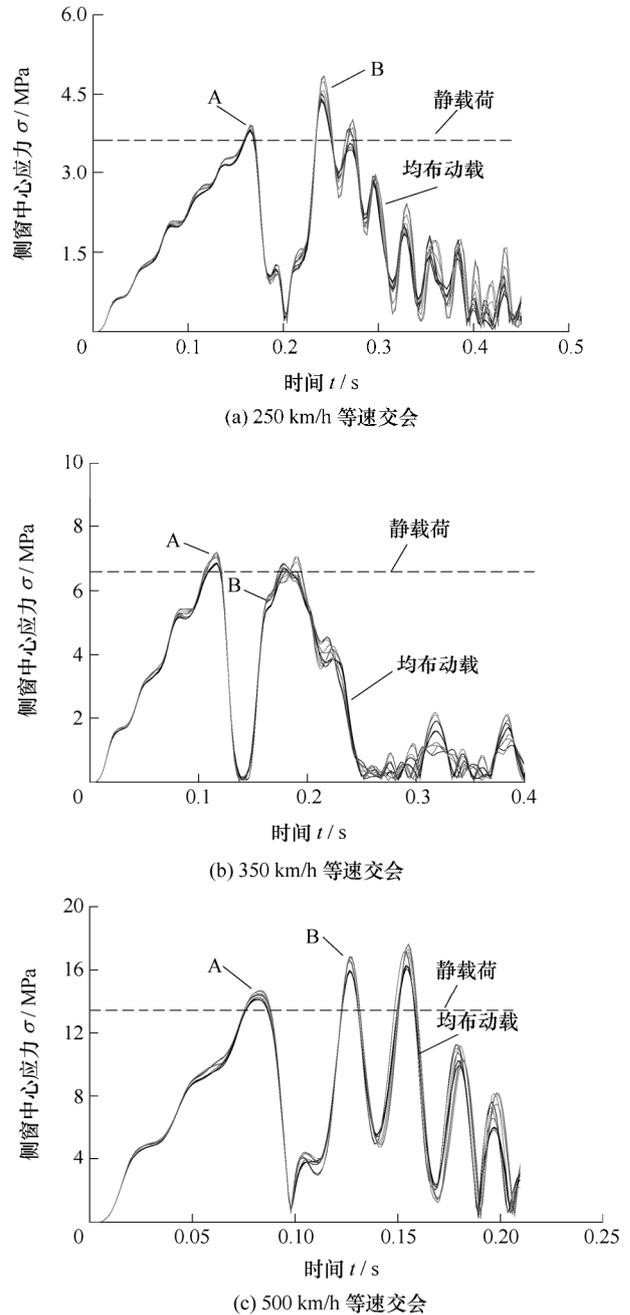


图 5 三种等速交会下按均布动载和静载荷计算得到的各车窗中心的 Mises 应力

同一交会速度下，均布动载作用下的每扇窗的应力曲线差别不大，且应力最大值均高于相应的静载下的应力。三种交会速度的结果都出现了类似的波动，且两个相邻波动的的时间间隔均为 0.03 s，这对应于侧窗玻璃本身的振动周期。三种不同交会速度下按均布动载计算，侧窗中心应力达到最大值的时刻有所不同，分别出现在 B 时刻($v = 250$ km/h)和

B时刻后一个侧窗振动周期($v = 350 \text{ km/h}$, $v = 500 \text{ km/h}$)。值得注意的是, 350 km/h 等速交会按均布动载计算, B时刻的车窗中心应力值小于静载下的应力。均布动载在达到正向压力峰值前, 车窗中心应力随时间的变化均为单调增加; 在达到反向压力峰值后, 三种交会波形下的应力值的变化趋势出现明显不同, 对于后两种交会速度, 车窗应力最大值出现在经过一个车窗振动周期的时刻。由以上结果可知, 虽然均布动载的峰值与静态载荷的大小相同, 但三种均布动载下的车窗中心的应力峰值均高于静载。因此, 如文献[12]中提到的, 车窗设计还应考虑其冲击强度。

2.2 移动压力波与静载的对比

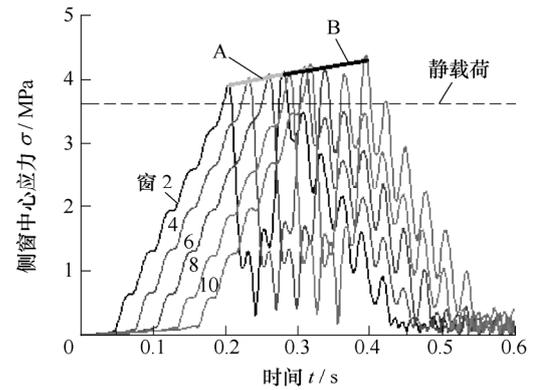
沿载荷移动方向, 将车窗从1号到10号编号, 不同交会速度下按移动压力波计算得到的各车窗中心的应力的比较如图6所示, 这里只显示了第2、4、6、8、10号窗的中心位置的应力随时间的变化。

从图6可以看出, 三种交会速度下, 车厢受载侧窗应力在压力波达到反向峰值时和达到正向峰值时均表现出沿载荷移动方向逐渐增加的趋势, 且均高于静载荷作用的情况。在列车以较低速度(250 km/h)交会时, 侧窗在压力波达到反向峰值时的应力略高于达到正向峰值时的应力; 在中等速度(350 km/h)交会时, 结果刚好相反, 侧窗在压力波达到反向峰值时的应力略低于达到正向峰值时的应力; 在较高速度(500 km/h)交会时, 在压力波达到反向峰值时的侧窗应力明显高于达到正向峰值的侧窗应力。由此可知, 在不同的交会速度下, 车厢侧窗应力峰值均表现出沿压力波方向递增的趋势, 特别是在交会速度较高时, 相对于静载下的应力值, 车厢侧窗应力在压力波达到反向峰值时的增幅非常大, 位置靠后的侧窗应力峰值幅度最大。因此, 对于高速交会的列车侧窗安全性, 必须考虑移动压力波的影响。

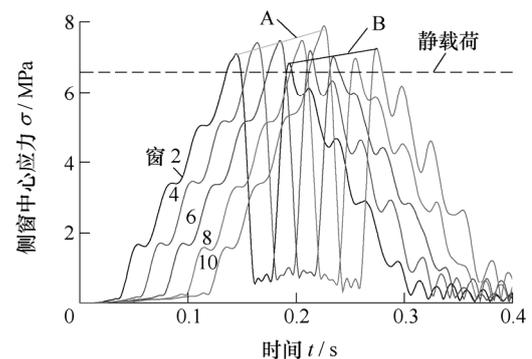
图6中, “线A”表示每扇窗上的压力波达到正向峰值时, 应力在压力波移动方向的变化趋势; “线B”表示每扇窗上的压力波达到反向峰值时, 应力在压力波移动方向上的变化趋势。

2.3 车窗振动与压力波之间的相互关系

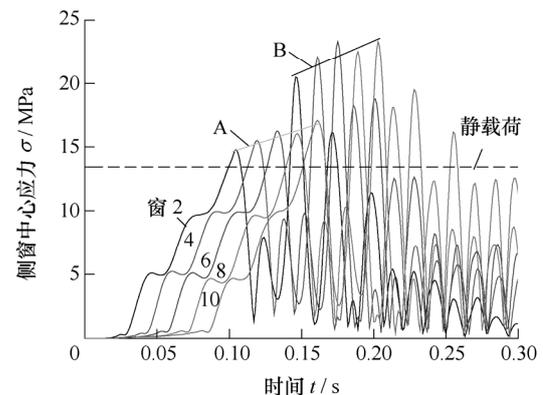
在 500 km/h 等速交会时, 车窗最大应力在压力波第二个峰值到达时明显高于第一个峰值。为了了解其机理, 这里考察车厢受载侧(高度为车窗中间)的所有节点在压力波峰值到达时的某一时刻的横向挠度曲线, 并与较低速度(250 km/h)交会的结果进行



(a) 250 km/h 等速交会



(b) 350 km/h 等速交会



(c) 500 km/h 等速交会

图6 三种等速交会下按移动压力波计算的结果

对比。

当压力波第一个峰值到达时, 两种交会速度下的车窗中心横向挠度与所受载荷大小基本呈线性关系, 如图7所示, 图7中10个下凹处为相应的10扇车窗。

当压力波第二个峰值到达时, 低速交会下的结果与前面情况相同, 而当交会速度为 500 km/h 时, 车窗的挠度变得混乱, 不再与所受载荷大小呈线性关系了, 且在载荷波峰处的车窗挠度相对较大, 见图8。这可能是由于压力波和车厢结构中的弯曲波的相互作用造成的, 还有待进一步研究。

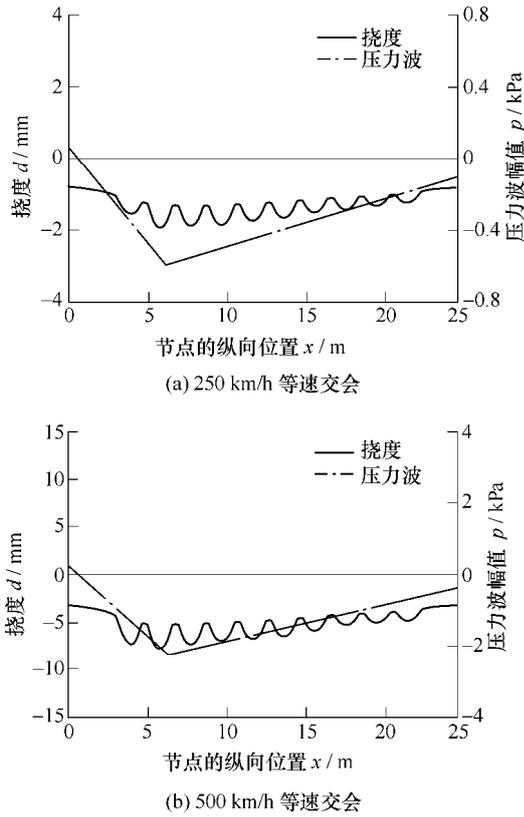


图 7 车窗中心高度处的车厢节点位移与压力波位置关系 (第一峰值到达的某时刻)

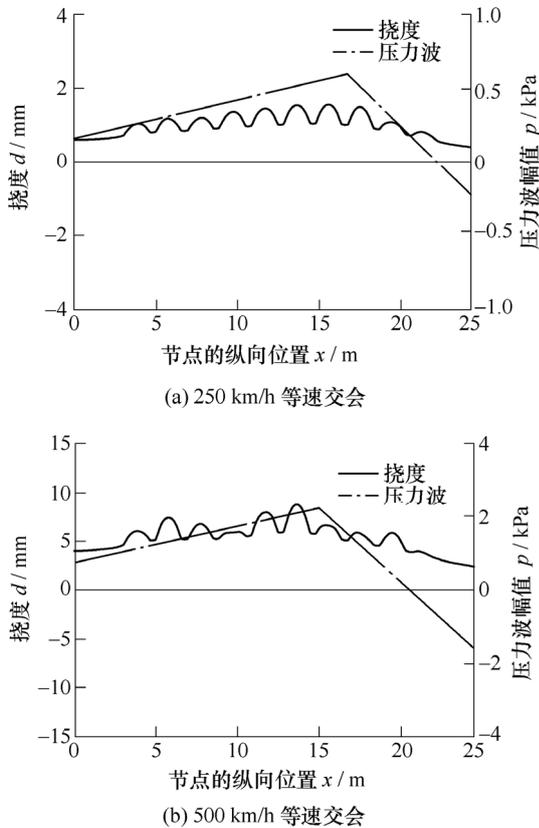


图 8 车窗中心高度处的车厢节点位移与压力波位置关系 (第二峰值到达的某时刻)

2.4 三种工况下的各个侧窗应力最大值的比较与分析

为了研究是否存在弯曲波和压力波之间的耦合效应，将每扇侧窗受均布动载和移动压力波下所达到的最大应力值与相应静载下的应力值进行比较，如图 9 所示。

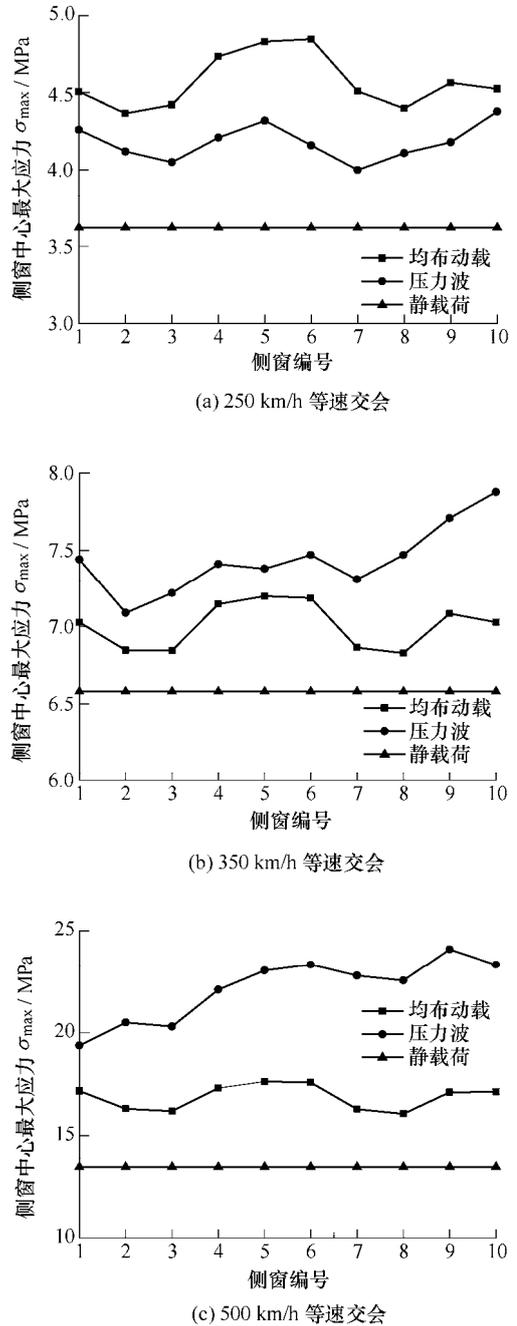


图 9 不同等速交会速度的三种工况下各个侧窗应力最大值

由图 9 可知，三种交会速度下，移动压力波和均布动载作用下的侧窗应力最大值均高于静载荷。在较低交会速度时，移动压力波作用下的侧窗最大应力均低于均布动载下的情况；随着交会速度的提高，压力波作用下的侧窗最大应力开始大于均布动

载,特别是在 500 km/h 的交会速度下,压力波下的侧窗达到的最大应力表现出沿压力波移动方向递增的趋势。造成这种列车侧窗最大应力值与侧窗位置的相关性,可能是由于移动压力波与在车体中传播的弯曲波之间的相互作用。在较低速度交会时,由于压力波的移动落后于弯曲波,这种耦合效应较小;但在高速交会时,在一定的速度下,压力波与弯曲波的效应正好相叠加,使侧窗最大应力表现出随车窗位置沿压力波运动方向递增的相关性。严格说来,结构中传播的弯曲波是弥散的。这里我们比较的是弯曲波的峰值传播速度与移动压力波速度之间的关系。

表 2 列出了三种工况下的列车所有侧窗中所达到的最大应力值以及均布动载和压力波下的侧窗应力与静载荷下相比的增幅。由此可以看出,在交会速度为 500 km/h 时,移动压力波作用下的侧窗最大应力相比按静载荷计算增加了 79.2%,已超过玻璃强度的 1/2。这说明,对于高速列车的侧窗安全性,必须考虑到压力波的影响。

表 2 三种载荷在三种交会速度下的侧窗应力最大值

交会速度 v/(km/h)	静载荷			压力波	
	最大应力/ MPa	最大应力/ MPa	相对增加 量(%)	最大应力/ MPa	相对 增加量 (%)
250	3.62	4.85	34.0	4.38	21.0
350	6.58	7.20	9.4	7.88	19.8
500	13.44	17.64	31.2	24.09	79.2

需要指出的是,以上分析还是初步的。由于车厢的结构过于复杂,无法定量地确定出弯曲波的传播速度,也就无法确定压力波与弯曲波的耦合作用是不是随着交会速度的提高而越来越剧烈。对此还有待进一步研究。

3 结论

(1) 在交会速度较高时,静力学计算或均布动载计算会低估侧窗所达到的峰值应力。

(2) 在移动压力波作用下,车厢受载侧窗应力在压力波达到反向峰值时和达到正向峰值时均表现出沿载荷移动方向逐渐增加的趋势。

(3) 造成峰值应力随车窗位置变化的原因,很可能是由于移动的气动压力与在车厢侧壁传播的弯曲波相互作用引起的,不过还有待进一步研究。

(4) 初步计算表明,500 km/h 等速交会时,车厢各个侧窗瞬时挠度在压力波第二个峰值到达时表现出混乱,侧窗中心的峰值应力已超过玻璃强度的 1/2。因此,高速列车的侧窗安全性,必须考虑到压

力波的影响。

参 考 文 献

- [1] RAGHUNATHAN R S, KIM H D, SETOGUCHI T. Aerodynamics of high-speed railway train[J]. Prog. Aerospace Sci., 2002, 38: 469-514.
- [2] 田红旗. 中国列车空气动力学研究进展[J]. 交通运输工程学报, 2006, 6(1): 1-9.
TIAN Hongqi. Study evolvement of train aerodynamics in China[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2006, 6(1): 1-9.
- [3] 田红旗, 贺德馨. 列车交会压力波三维数值的计算[J]. 铁道学报, 2001, 23(3): 18-22.
TIAN Hongqi, HE Dexin. 3-D Numerical calculation of the air pressure pulse from two trains passing by each other[J]. Journal of the China Railway Society, 2001, 23(3): 18-22.
- [4] 刘杰, 李人宪, 赵晶. 高速列车等速会车时气动作用力仿真分析[J]. 铁道车辆, 2009, 47(3): 5-9.
LIU Jie, LI Renxian, ZHAO Jing. Simulation analysis of aerodynamic force for high speed trains passing at the same speed[J]. Railway Vehicle, 2009, 47(3): 5-9.
- [5] 李现今, 刘晨辉, 杨国伟. 高速列车明线交会压力波特性研究[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(15): 3689-3694.
LI Xianjin, LIU Chenhui, YANG Guowei. Characteristics of pressure wave induced by high speed trains meeting in open air[J]. Science Technology and Engineering, 2012, 12(15): 3689-3694.
- [6] 李人宪, 刘杰, 戚振岩, 等. 明线会车压力波幅变化规律研究[J]. 机械工程学报, 2011, 47(4): 125-130.
LI Renxian, LIU Jie, QI Zhenyan, et al. Air pressure pulse developing regularity of high-speed trains crossing in open air[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(4): 125-130.
- [7] OZAWA S. Aerodynamic forces on train[J]. JSME, 1990, 900-937.
- [8] 田红旗, 许平, 梁习锋, 等. 列车交会压力波与运行速度的关系[J]. 中国铁道科学, 2006, 27(6): 64-67.
TIAN Hongqi, XU Ping, LIANG Xifeng, et al. Correlation between pressure wave of train passing and running speed[J]. China Railway Science, 2006, 27(6): 64-67.
- [9] 熊小慧, 梁习锋. CRH2 型动车组列车交会空气压力波试验分析[J]. 铁道学报, 2009, 31(6): 15-20.
XIONG Xiaohui, LIANG Xifeng. Analysis of air pressure pulses in meeting of CRH2 EMU trains[J]. Journal of the

- China Railway Society, 2009, 31(6): 15-20.
- [10] 田红旗, 姚松, 姚曙光. 列车交会压力波对车体和侧窗的影响[J]. 中国铁道科学, 2000, 21(4): 6-12.
TIAN Hongqi, YAO Song, YAO Shuguang. Influence of the air pressure pulse on car-body and side-windows of two meeting trains[J]. China Railway Science, 2000, 21(4): 6-12.
- [11] 石得春. 高速列车侧窗在交会压力波作用下的瞬态响应分析[J]. 铁道车辆, 2002, 40(4): 17-19.
SHI Dechun. The transient response analysis of side windows on high speed trains under the pressure wave of encountering another train[J]. Railway Vehicle, 2002, 40(4): 17-19.
- [12] 李人宪, 赵晶, 刘杰, 等. 高速列车会车压力波对侧窗的影响[J]. 机械工程学报, 2010, 46(4): 87-98.
- LI Renxian, ZHAO Jing, LIU Jie, et al. Influence of air pressure pulse on side windows of high-speed trains passing each other[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(4): 87-98.

作者简介: 钱春强, 男, 1986 年出生, 博士研究生。主要研究方向为高速列车交会时的结构瞬态响应。

E-mail: qcq86@mail.ustc.edu.cn

郑志军(通信作者), 男, 1979 年出生, 副教授。主要研究方向为冲击动力学和吸附接触力学。

E-mail: zjzheng@ustc.edu.cn

虞吉林, 男, 1946 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为冲击动力学和材料力学行为与设计。

E-mail: jlyu@ustc.edu.cn

李松晏, 男, 1984 年出生, 博士研究生。主要研究方向为高速列车的运行稳定性。

E-mail: amk@mail.ustc.edu.cn