

A Design of Supporting Frame Structure for 25% Small Overlap Frontal Crash Test Barrier in IIHS

Jiasheng LIN^{1,2}, Xichan ZHU¹, Rutao ZHAO², Zhixiong MA¹

¹Tongji University, Shanghai, China

²Shanghai Motor Vehicle Inspection Certification & Technology Innovation Center Co., LTD, Shanghai, China

Email: jiashengl@smvic.com.cn

Abstract: Insurance Institute for Highway Safety (IIHS), a crash-test protocol and rating guidelines for 25% small overlap frontal crash test was released by IIHS in 2012 to enhance the vehicle frontal crashworthiness. The crash test purpose is to improve vehicle safety after frontal small overlap crash accident. In this paper it analyses the importance of the small overlap frontal crash test, and also takes a study on small overlap frontal test rating guidelines. The barrier supporting frame stress distributions and displacements were analyzed by method of finite element simulation. And fixing bolts' strengths were calculated by theoretical analysis, by which the material and size of bolt was determined. By stress comparisons of bolt and supporting frame, a new and best structure design scheme of the installing supporting frame of test barrier was proposed.

Keywords: frontal crash; small overlap; test barrier; supporting frame structure; strength calculation

IIHS 25%小重叠碰撞试验壁障支架结构设计

林佳盛^{1,2}, 朱西产¹, 赵汝涛², 马志雄¹

¹同济大学, 上海, 中国, 201805

²上海机动车检测认证技术研究中心有限公司, 上海, 中国, 201805

Email: jiashengl@smvic.com.cn

摘要: 美国高速公路安全保险协会 IIHS (Insurance Institute for Highway Safety, IIHS) 于 2012 年增加正面偏置 25% 小重叠率碰撞试验, 以考察真实事故中频发的正面小重叠率碰撞下的车辆安全性能。本文介绍了正面 25% 小重叠率碰撞测试方法和评价指标。基于正面碰撞试验壁障要求, 提出了八种试验壁障支架结构设计方案, 利用有限元仿真技术分析壁障支架结构在高速碰撞下的应力分布和位移情况, 理论强度校核了固定螺栓, 确定了螺栓材质和型号, 通过螺栓和支架结构的应力对比得出了最优的试验壁障支架结构设计方案。

关键词: 正面碰撞; 小重叠率; 测试壁障; 支架结构; 强度校核

1 引言

根据美国交通事故调查统计表明, 正面 40% 重叠碰撞和正面小偏置重叠率碰撞在所有正面碰撞事故中占最大比例^[1]。正面 40% 重叠碰撞试验已经纳入到各类 NCAP (New Car Assessment Programme) 测试规程中, 而在各类 NCAP 和汽车碰撞国家法规中均未对小重叠率正面偏置碰撞进行试验测试^[2]。小重叠率碰撞试验中车身结构参与吸能的部分较少, 车身入侵较大, 对乘员安全造成重大的伤害^[3,4]。

美国高速公路安全保险协会 IIHS (Insurance Institute for Highway Safety) 于 2012 年增加正面小偏置 25% 重叠率碰撞试验, 旨在模拟汽车撞击树杆、电线杆及与其它车辆偏位撞击的情况下的车辆安全性能^[5]。中国保险汽车安全指数规程 C-IASI (China Insurance Automotive Safety Index) 于 2017 年 7 月公布, 在正面碰撞试验中提出了 25% 小重叠率正面碰撞试验为车内乘员安全指数的一个试验工况。通过试验中约束系统和假人运动、假人伤害、车辆结构三个方面对车辆安全性进行综合评价^[6]。随着美国 IIHS 和我国 C-IASI 提出车辆小重叠率正面碰撞试验规程, 越来越多的整车厂在车辆安全开发阶段需要进行 25% 重叠率正面碰撞试验。而目前国内能进行此试验的试验机构较少, 试验基础和经验也较为不足。本文对正面 25% 重叠率偏置碰撞试验方法和评价方法进行了介绍, 并提出了试验壁障支架结构方案设计。

2 IIHS 正面 25%重叠率偏置碰撞试验方法及评价

2.1 碰撞试验方法

正面 25%重叠率偏置碰撞试验为车辆以 64.4km/h \pm 1km/h 的速度、25% \pm 1%的重叠率（驾驶员侧）正面撞击固定刚性壁障。试验车辆驾驶员位置放置一个 Hybrid III 50%假人，用于测量碰撞过程中驾驶员的损伤情况[7]。碰撞试验工况如图 1 所示。

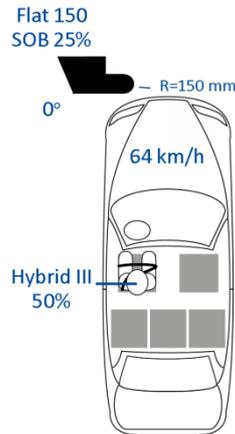


Figure 1. Frontal Small Overlap Test
图 1. 正面 25%小重叠率碰撞试验工况

正面 25%重叠率偏置碰撞试验壁障采用刚性壁障，其正面形状为一块宽 1000mm、高 1524mm 的长方形，右端为一个半径 150mm、弧度 115°的圆弧，碰撞面钢板的厚度为 38.1mm。壁障侧面通过圆弧半径构造来防止车辆与壁障的二次接触。图 2 为试验壁障结构尺寸图。

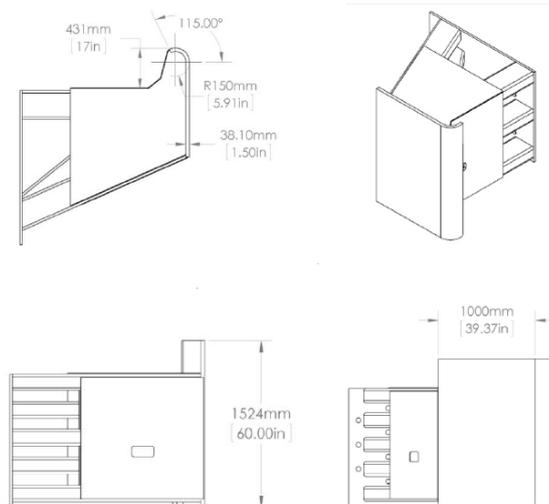


Figure 2. Test Barrier Views
图 2. 试验壁障视图

在 25%重叠率偏置碰撞试验中，车身结构参与变形吸能部分较少，车身入侵量较多。因此试验规程对车身侵入量的考察有其特别的要求。所有测量点被划分为两个区域：乘员舱下部和乘员舱上部。乘员舱下部包括：A 柱下铰链、左侧搁脚板、左侧足板、制动踏板、驻车制动踏板和门槛；乘员舱上部包括：转向管柱、A 柱上铰链、上仪表板和左下方仪表板。用侵入量测量值来对车身结构等级进行评定^[8]。车辆侵入量测量位置如图 2 所示。

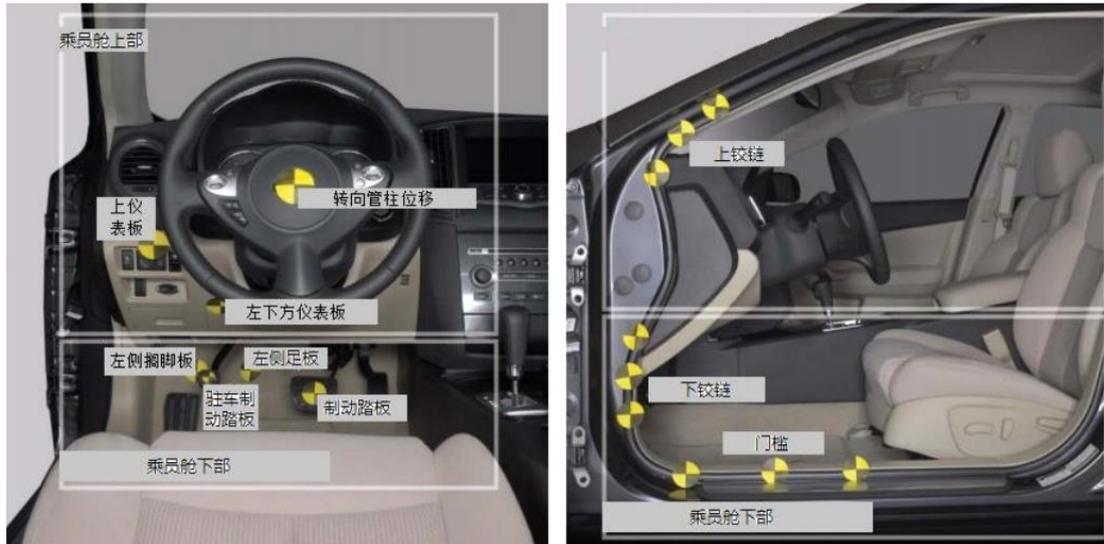


Figure 3. Locations for Measuring Vehicle Intrusion
图 3. 车辆侵入量测量位置

2.2 碰撞试验评价指标

正面 25% 重叠率碰撞试验评价从约束系统和假人运动、假人伤害和车身结构三个方面对车辆安全性能进行综合考量。不同于 NCAP 评价体系中的成绩打分及星级评价，在 IIHS 评价体系中，采用优秀（Good），良好（Acceptable），及格（Marginal）和差（Poor）四个等级以评判试验车辆安全性能。每个项目的评定结果也分成 4 级，并且按照重要程度进行打分。总体评价根据车辆结构、假人头部和颈部、胸部、大腿和髋部、腿部和脚部伤害测量值以及约束系统和假人运动等按照表 1 计算得到。

Table 1. Total Evaluation for Small Overlap Test
表 1. 正面 25% 重叠率偏置试验总体评价

评估项目	优秀 (Good)	良好 (Acceptable)	及格 (Marginal)	差 (Poor)
车辆结构	0	2	6	10
头部和颈部	0	2	10	20
胸部	0	2	10	20
大腿和髋部	0	2	6	10
脚部和脚部	0	1	2	4
约束系统和假人运动	0	2	6	10
总体等级限值	0-3	4-9	10-19	20+

3 试验壁障支架结构设计

3.1 壁障支架结构方案设计

为了避免车辆在碰撞后由于向前的位移过大会与正面壁障碰撞导致二次碰撞，IIHS 采用的移动式壁障的方法将壁障固定在试验室中间位置^[8]。结合车辆碰撞试验室整体布局，在侧碰区域（中碰大厅）安装试验壁障最为合适。本文为试验壁障的安装共设计了八种支架结构设计方案，每种设计方案支架结构均分为两部分：

安装支架和尾部支架。八种方案中，安装支架区别较大（外形长度、所用方管厚度有所调整），尾部支架区别相对较小（长度基本未变、少数方管厚度有调整）。八种支架结构设计方案的形状和几何尺寸如图 4 所示。

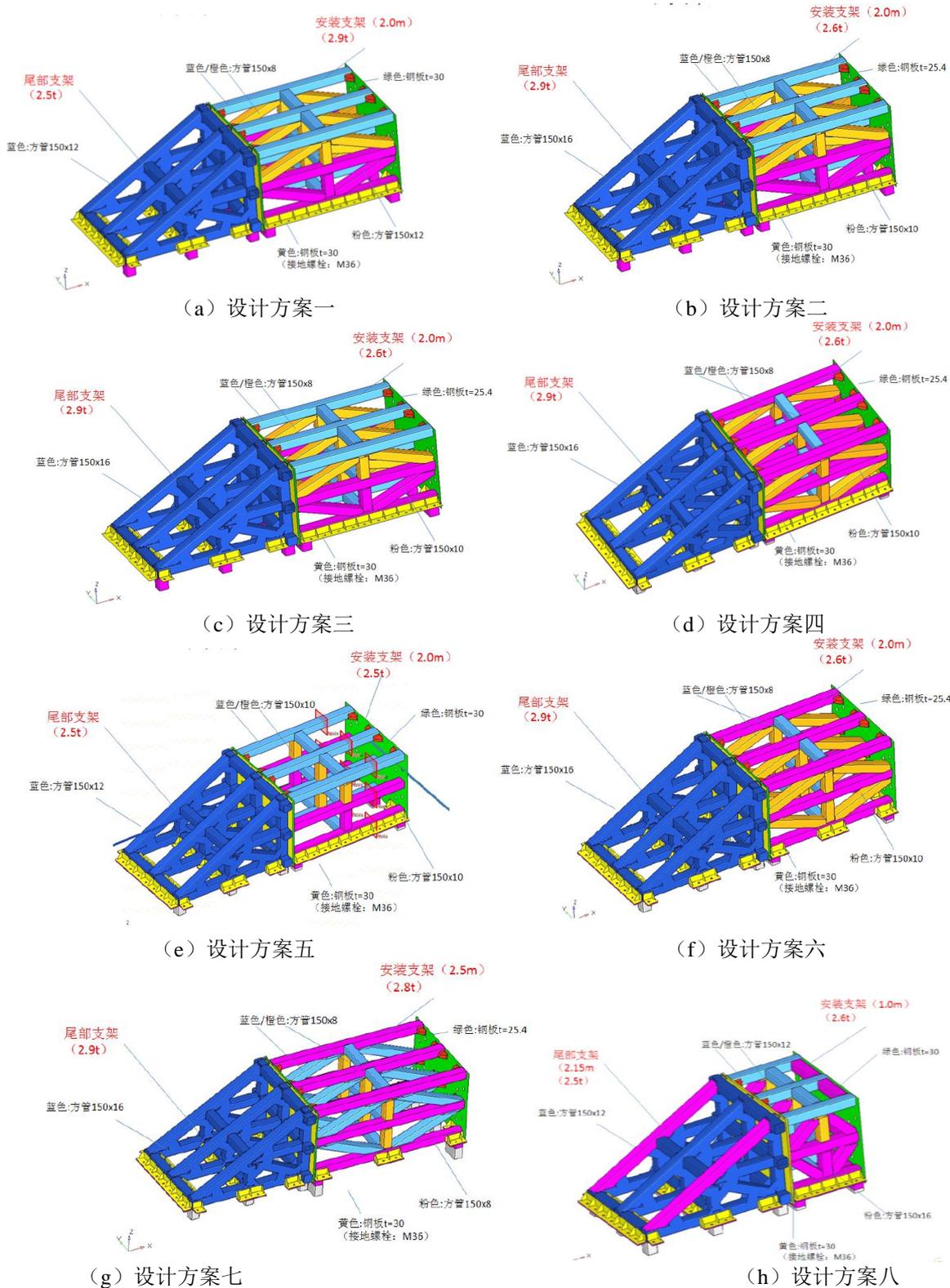


Figure 4. Designing Scheme for Test Barrier Installing Support
 图 4. 试验壁障支架结构设计方案

3.2 壁障支架结构碰撞仿真计算

建立正面小重叠碰撞模型，并将设计方案中的支架结构仿真模型应用到正面 25%重叠率偏置碰撞试验仿真模型^[9]。在仿真计算中，整车质量为 2000kg 的车辆以 64.4km/h 的初速度以 25%重叠率正面撞向壁障。支架所用钢材及安装螺栓全部按照线弹性属性进行计算，未考虑材料塑性性能^[11,12]。从仿真模型中得到碰撞力如图 5 所示。

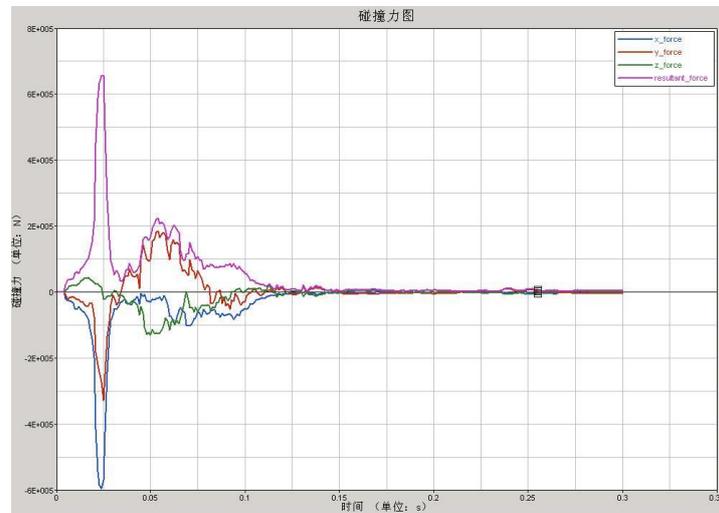
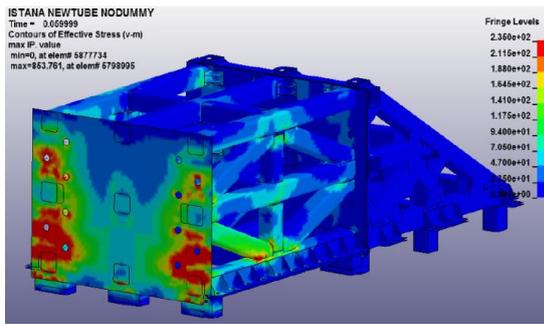
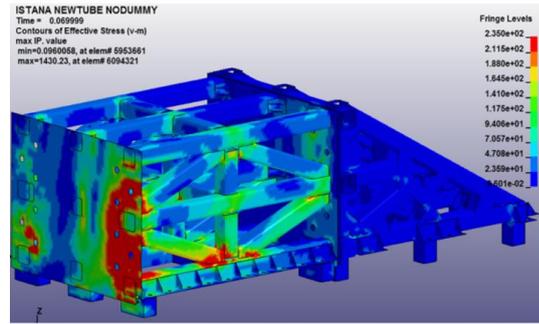


Figure 5. Impact Force in IIHS Small Overlap Crash Test
图 5. IIHS 小重叠碰撞试验碰撞力

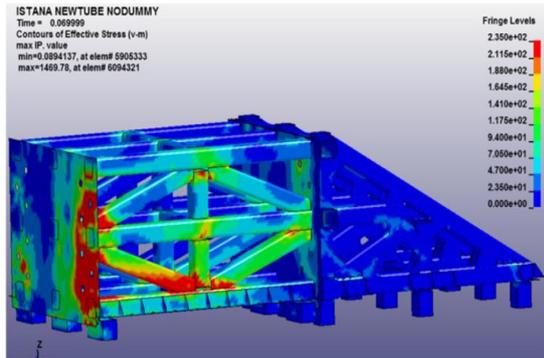
支架结构在高速碰撞冲击力下的应力云如图 6 所示，其中红色区域应力为屈服极限 235MPa。从应力云图得出，在大冲击力作用下固定试验壁障的支架前端面板两侧区域应力均较大，如应力云图中红色区域所示。应力较大的原因是该区域为固定螺栓孔，属于应力集中区域。支架结构中的方管则应力均较小。从图中对比，方案（一）和方案（八）应力相对较小



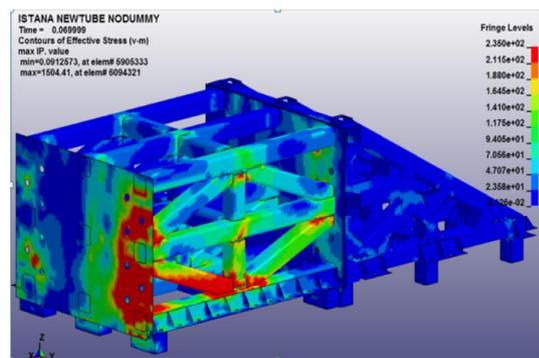
(a) 设计方案一



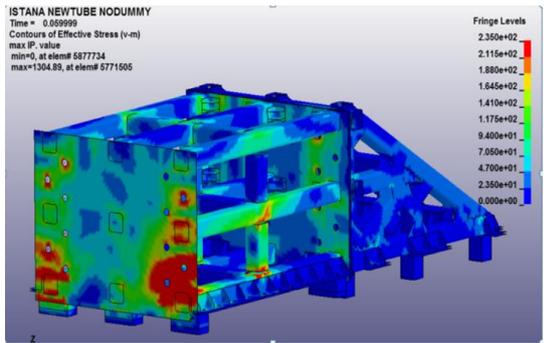
(b) 设计方案二



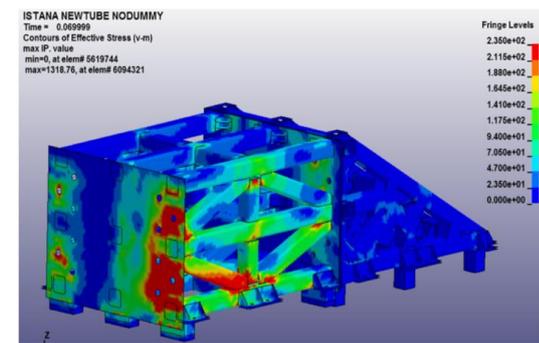
(c) 设计方案三



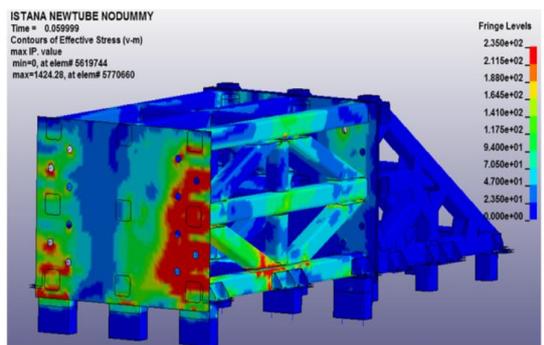
(d) 设计方案四



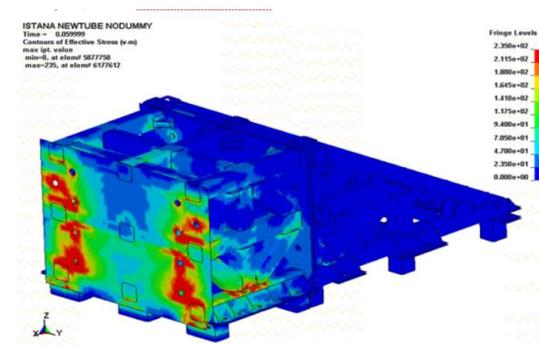
(e) 设计方案五



(f) 设计方案六



(g) 设计方案七



(h) 设计方案八

Figure 6. Stress Contour for Test Barrier Installing Support

图 6. 支架结构应力云图

3.3 壁障支架的螺栓强度校核

假设各螺栓所受的工作载荷相等，则每个螺栓所受的剪力为 F_i ，则

$$F_i = F/n \quad (1)$$

其中F为载荷冲击力，n=12，为螺栓数量。
螺栓杆与孔壁的挤压强度满足条件为：

$$\delta = \frac{F_i}{d_0 L_{\min}} \leq [\delta_p] \quad (2)$$

螺栓的剪切强度条件为^[13]：

$$\tau = \frac{F_i}{m \frac{\pi}{4} d_0^2} \leq [\tau] \quad (3)$$

其中， F_i 为单个螺栓所受到的横向载荷，N； d_0 为螺栓小直径，可对应螺栓直径表选取，mm； L_{\min} 为螺栓杆与孔壁挤压面的最小高度，设计时选取 $L_{\min} = 2d_0$ ，mm； m 为螺栓杆所剪面的数目，此处 $m=1$ 。

根据仿真得到的冲击载荷最大值为600kN,取安全系数为2，因此最大冲击载荷力为 $F=1200$ kN。选用12.9级别的高强度螺栓，螺栓的抗拉强度为1200MPa，屈服强度为1080MPa。在动态冲击载荷下，取安全系数为0.8，因此许用抗拉强度 $[\delta_p]=1200*0.8=960$ MPa， $[\tau]=1080*0.8=864$ MPa。将上述值代入到公式（2）和公式（3）进行计算，并查询螺栓尺寸规格表，最终支架结构接地螺栓选取M48，支架连接螺栓选取M36。

3.4 壁障支架结构的仿真结果讨论

表2为试验壁障支架结构所有节点的最大纵向移动量和螺栓仿真应力结果。从连接支架之间螺栓受力结果可以看出，设计方案（一）中的连接螺栓应力在所有方案中最小，方案（五）中接地螺栓应力值超过了许用剪切应力。从支架接地螺栓受力结果可以看出，只有方案（八）中螺栓应力在许用应力范围内。在支架所有节点最大纵向移动量上，八种方案中，纵向压缩位移量均较小（<2mm）。其中，方案（三）和方案（八）纵向压缩位移又相对小于其他方案，表明两者抗压刚度优于其他方案。在综合比较了各设计方案在车辆高速冲击下的应力云图、支架节点位移、连接螺栓应力和接地螺栓应力结果，最优选择试验壁障支架结构设计方案（八）。支架结构设计方案（八）的设计参数是：尾部支架长度为2.15m，质量是2500kg，支架结构长度1m，质量是2600kg。支架所用蓝色方管截面尺寸是0.15m*0.012m，粉色方管是0.15m*0.016m，支架连接钢板厚度是0.03m。

Table2. Total Evaluation for Small Overlap Test
表 2. 支架结构螺栓受力结果

设计方案	支架所有节点最大纵向移动量 (mm)	连接支架间的 12.9 级螺栓 (M36) 应力 (MPa)	支架接地 12.9 级螺栓 (M48) 应力(MPa)
设计方案一	1.22	580	1500
设计方案二	1.06	720	1900
设计方案三	0.96	750	1780
设计方案四	1.10	850	1750
设计方案五	1.92	1050	2050
设计方案六	1.12	820	1500
设计方案七	1.44	800	1800
设计方案八	1.03	800	618

4 结论

本文对正面25%重叠率偏置碰撞试验方法和评价指标进行了解读。基于正面碰撞试验壁障要求,提出了八种试验壁障支架结构设计方案,仿真分析了壁障支架的应力情况,对支架所使用的螺栓进行理论计算和选型,通过仿真计算对比得出最优的试验壁障支架结构方案。得出了最优的支架结构设计参数是:尾部支架长度为2.15m,质量是2500kg,安装支架长度1m,质量是2600kg。支架所用蓝色方管截面尺寸是0.15m*0.012m,粉色方管是0.15m*0.016m,支架连接钢板厚度是0.03m。

参考文献 (References)

- [1] Insurance Institute for Highway Safety (IIHS).IIHS Status Report Newsletter. 2012.
- [2] Hallman J J, Yoganandan N, Pintar F A , et al. Injury Differences between Small and Large Overlap Frontal Crashes[C]. 55th Annuals of Advances in Automotive Medicine Conf, San Diego, CA: 2011: 147-154.
- [3] Chen Keming. Analysis for Vehicle Small Overlap Crash Test[C].The 15th Conference of Automotive Safety Technology. An Hui2012:178-182.
- [4] 陈可明. 车辆小偏置正面碰撞分析[C].第 15届汽车安全技术学术会议,安徽, 2012: 178-182.
- [5] Sherwood C P,Nolan J M,Zuby D S.Characteristics of Small Overlap Crasher[C].Proceedings of the Enhanced Safety of Vehicles. Washington,DC,National Highway Traffic Safety Administration,2009,1-7
- [6] Insurance Institute for Highway Safety(IIHS).An Update on the IIHS Small Overlap Frontal Crash Research Program.SAE International 2011 Government Industry Meeting.2010.
- [7] China Insurance Automotive Safety Index(C-IASI).Small Overlap Frontal Crash Test Protocol.2017.
- [8] Insurance Institute for Highway Safety (IIHS).IIHS Small Overlap Test,IIHS Secretary. 2012.
- [9] Insurance Institute for Highway Safety (IIHS).Small Overlap Frontal Crashworthiness Evaluation Crash Test Protocol (Version I),IIHS secretary. 2012.
- [10] Matthew L. Brumbelow, David-S. Zuby. Impact and Injury Patterns in Frontal Crashes of Vehicles with Good Ratings for Frontal Crash Protection. IIHS [J].2009.
- [11] Lin Yi, et al. The Setting Up of Parameterized Model for Frontal Impact of Minibus Body Structure[J],Automotive Engineering 2006(Vol.28),No.1.
- [12] 林逸等. 微型客车车身结构正面碰撞参数化模型的建立[J] 汽车工程, 2006年(第28卷) 第一期
- [13] Hallman J J,Yoganandan N,Pintar F A,et al. Injury Differences between Small and Large Overlap Frontal Crashes[C].55th Annuals of Advances in Automotive Medicine Conf. San Diego: CA, 2011: 147-154.
- [14] Pintar F A,Yoganandan N,Maiman D J.Injury Mechanisms and Severity in Narrow Offset Frontal Impacts. 52nd Annuals of Advances in Automotive Medicine Conf . 2008.
- [15] Pu Lianggui,Ji Mingang.Design of Machinery[M].Higher Education Press.
- [16] 濮良贵,纪名刚. 机械设计[M].高等教育出版社.第八版.
- [17] Su Chengqian, Lv Zhenhua.Simulation Analysis of Inner Force Characteristics of Car Body Thin-walled Beam Structures Subject to Lateral Impact [J].China Mechanical Engineering. May,2002, Vol. 19, No.9.
- [18] 苏成谦等. 横向冲击载荷下的车身薄壁梁结构截面内力特性仿真分析方法[J] 中国机械工程.2008 年,第 19 卷 第 9 期
- [19] Hu yuanzhi, Zeng Biqiang, Xie Shugang.Vehicle Safety Simulation and Analysis Based on LS-DYNA and Hyperworks[M].Tsinghua University Press.2011.
- [20] 胡远志等. 基于 LS-DYNA 和 Hyperworks 的汽车安全仿真与分析[M].北京: 清华大学出版社, 2011.