

高速公路护栏碰撞试验检测与安全性能优化策略

沈雅祖

交科院检测技术（北京）有限公司 北京市 101318

DOI: 10.12238/ems.v8i1.17708

[摘要] 高速公路护栏于车辆偏离车道时起关键防护功效，保障撞击时有效吸能、控制轨迹且防止结构失效。本文构建多层检测体系，含全尺度碰撞、构件级测试和数值仿真，用以提升护栏安全性能，分析其结构变形、能量吸收及车辆响应情况。优化护栏几何参数，采用高强钢与复合材料，集成缓冲装置和多传感检测系统，实现碰撞全程数据采集、识别与反馈。试验显示，该体系能精准捕捉关键响应特点，增强护栏在高速撞击下的稳定性与可靠性。

[关键词] 护栏碰撞试验；结构变形；能量吸收；材料性能；智能检测

引言

高速公路车辆运行环境复杂，车道偏离引发的次生碰撞极具危险性，护栏作为主动防护设施，其性能关乎事故后果与交通系统稳定，现有护栏在抗冲击、能量耗散及结构可靠性上存在局限，亟待系统性技术改进。本研究构建碰撞检测体系与试验机制，优化护栏设计参数，应用新型材料与吸能结构，融合高精度传感和图像技术，对护栏响应全程动态监测评估，为提升道路防护设施性能提供技术支持。

1 试验检测技术概述

试验中对车辆行驶速度分档调控，精细设定撞击角度，合理配置质量分布并规划运动轨迹，将典型碰撞载荷精准施加于护栏结构表面^[1]。车辆撞击瞬间，护栏需在极短时间内凭借结构变形吸收动能，有效遏制车辆穿越、翻越护栏或回弹主车道的危险趋向。依照试验原理，碰撞全程的位移、加速度、受力情况及变形数据都要完整记录，以此捕捉系统动态响应，不同护栏结构在冲击下的屈服机制、变形模式与稳定状态，构成试验分析的关键维度，进而实现对护栏结构抗冲击能力的准确评估。

2 检测方法与试验类型

2.1 全尺度碰撞试验方法

碰撞速度区间取 60km/h 至 100km/h，撞击角度维持在 15° 到 25° 范围，车辆质量严格设定于 1500kg 至 2000kg 区间^[2]。试验场地有序安置高速摄影设备、高精度加速度传感装置、应变测量片及位移监测仪器，持续采集护栏撞击前后各阶段结构变化数据。试验车辆借助导轨导向系统或自动化驱动装置精准操控，按预先规划参数执行直线或斜向冲击动

作。碰撞过程中，密切观测护栏能量吸收程度、最大形变数值、构件脱落情况，以及对失控车辆运动轨迹的限制效果，当碰撞终止，以护栏水平方向最大变形不超 1.5m、垂直位移控制在 300mm 以内，结合护栏各段连接稳固性状况，综合判定其整体抗冲击性能表现。

2.2 子系统与构件级试验方法

构件试验借助伺服加载系统施加集中力或分布荷载，加载速率限定于每秒 1 毫米至 10 毫米，最大荷载须达到 50 千牛及以上，试验启动前，运用三维激光扫描设备精准构建构件几何模型，于关键节点部位妥善安装位移计与应变计，实时监测应力传递路径及塑性区域演变状况。试验进程中，采取分段加载方式直至构件出现极限破坏，详细记录屈服荷载数值、破坏荷载大小及残余变形量等关键数据，在连接性能试验环节，重点评估螺栓预紧力释放程度、连接刚度随加载下降曲线特征，以及连接松动前的位移响应变化情况。

3 影响护栏安全性能的关键因素

3.1 材料性能与结构形式

Q235 钢等常用材料，屈服强度约 235MPa，极限抗拉强度达 375MPa，延伸率保持在 20% 上下，有塑性变形能力^[3]。结构形式显著影响能量吸收效率，波形梁护栏断面波形使其具备良好屈曲吸能性，碰撞时可渐进式屈服，结构构型方面，立柱间距多设 2.0m 到 4.0m，横梁厚度 2.75mm 至 4.0mm，折弯角度不小于 150° 增强抗剪，碰撞试验显示，横梁抗弯刚度差或立柱间距大，易致整体位移失稳。材料冲击韧性低于 20J/cm²，护栏易脆断，难以有效约束车辆轨迹。

3.2 安装工艺与施工质量

立柱埋深要求严格控制于地面之下 1200mm 至 1500mm 区间, 垂直度误差精准限定在每米 3mm 以内, 借助电动液压打桩机以分段方式逐步压入基础土层, 护栏立柱间横梁采用螺栓锁紧工艺进行连接, 预紧力需切实达到 80kN 及更高标准, 全力保障连接件不出现松动、偏孔状况。安装过程中, 一旦护栏底座压实不到位或者地锚固定不牢靠, 碰撞发生时护栏就会因基础稳定性不足而整体倾倒, 极大程度影响其能量吸收性能。横梁安装运用激光对线技术保障线形顺直, 左右偏差严格控制在 15mm 范围内, 节点部位必须加设抗剪限位装置, 防止连接出现滑移, 护栏拼接处钢板搭接长度不得少于 150mm, 焊接连接区域热影响宽度控制在 8mm 以内, 有效防范热裂纹扩展。

3.3 使用环境与服役状态

温湿度波动大的区域, 金属护栏材料表面氧化层加速损坏, 若无热镀锌或喷涂防腐, 3年内表面锈蚀深度超 0.5mm, 有效承载截面大幅缩减, 冬季低温 (-10℃以下) 时, 材料冲击韧性明显降低, 碳素钢吸收功减至 15J/cm² 以内, 护栏受撞击更易脆断。长期使用中, 车辆微振致使连接件螺栓松动, 残余预紧力或降至初始值一半以下, 引发连接失效, 车辆频繁冲击区域, 横梁产生塑性累积变形, 变形量超 30mm 便减弱对车辆运动的约束效果。

4 碰撞试验数据分析方法

4.1 能量吸收特性分析

初始动能以 $E_k = \frac{1}{2}mv^2$ 计算, 其中车辆质量 $m = 1500\text{ kg}$, 撞击速度 $v = 90\text{ km/h}$ (即 25m/s), 初始动能为 468, 750J。碰撞过程中, 通过力传感器与位移计获取护栏所受冲击力 F 与对应变形位移 s , 计算实际吸收能量 $E_a = \int_0^s F(s)ds$ 。若护栏最大受力为 28kN、等效作用位移为 0.95m, 吸收能量为 26, 600J。碰撞结束后, 根据吸收比率公式 $\eta = \frac{E_a}{E_k}$, 计算能量吸收效率。试验规定能量吸收比率需处于特定范围, 确保车辆动能充分转化为护栏塑性变形, 避免车辆结构遭受破坏。

4.2 车辆轨迹与动态响应评估

车辆运动轨迹由三维坐标系统记录, 按时间间隔 0.5ms 采集一次坐标点, 得到速度曲线与偏移路径^[4]。车辆质心偏移角度由 $\theta = \arctan\left(\frac{y_{\max}}{x_{\text{travel}}}\right)$ 计算, 若最大侧向偏移 $y_{\max} = 1.2\text{ m}$, 纵向行驶距离 $x_{\text{travel}} = 6.5\text{ m}$, 则偏转角为 10.45°。车辆前

悬与后桥加速度分别达到 13.6g 和 9.2g, 超出结构极限阈值即判定为轨迹不稳定。数据同步分析呈现, 车辆碰撞、反弹、减速全过程在 0.48 秒内结束, 只要未回弹至相邻车道, 就意味着护栏引导成功。

4.3 结构变形与失效模式研究

测量装置以激光位移仪布设于关键节点, 每 0.2ms 采样一次, 记录横梁最大凹陷深度为 140mm, 立柱顶部位移量为 84mm。

局部失效区域的等效应变由 $\varepsilon_{eq} = \sqrt{\frac{2}{3}[(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2]}$

计算, 典型断裂区域应变达 0.192, 远超钢材屈服平台应变数值, 失效情形有连接松脱、螺栓剪断、构件屈曲和整体脱焊, 多出现于横梁与立柱衔接处。对金属构件表面微观观察可见, 剪切带形成区域与屈服脊线集中区域完全对应, 展现出护栏在动态荷载下应力集中特性, 这就要求在结构设计时, 优化截面分布, 增强连接柔性, 从而延缓整体破坏的出现。

5 安全性能提升的技术路径

5.1 护栏结构优化设计方法

结构布局调整时, 立柱间距由原标准 4.0m 缩减为 3.0m, 以此显著增强系统横向约束刚度, 波形梁截面高度精心优化至 85mm, 翼缘宽度设定为 310mm, 厚度严格控制在 3.5mm, 通过尺寸参数的精准设定, 有效拓展塑性变形空间, 横梁折弯角度确定为 165°, 借此延长屈服阶段持续时间, 实现对结构破坏的有效延缓。连接方式选用高强螺栓, 规定预紧力必须达到 90kN 及以上, 切实保障冲击过后结构各部件紧密相连不分离, 仿真测试结果表明, 优化后的护栏将最大塑性变形成功控制在 0.93m 以内, 相较原设计减小 160mm, 同时系统吸能能力大幅提升至 31400J。支撑基础采用直埋与地锚相结合的复合结构形式, 立柱入土深度延伸至 1.4m, 并配备 30cm 厚碎石垫层, 显著提升地基反力刚度, 有效降低基础滑移位量, 在等效碰撞模型条件下, 该结构使侧向加速度峰值降至 11.7g, 车辆整体偏移距离缩短约 0.7m。

5.2 新型材料的应用研究

采用 Q355 钢材, 此钢材屈服强度达 355MPa, 延伸率维持在 18%以上, 抗冲击性能比传统 Q235 材质更优, 等载荷对比试验表明, Q355 波形梁最大残余变形减至 125mm, 横梁中部断裂可能性大幅降低^[5]。非金属材料领域, 玻纤增强聚合物 (GFRP) 材料已在防撞柱开展试验, 其拉伸强度达 600MPa, 密度仅 1.9g/cm³。为检验该材料在高速冲击下的反应特性,

制作复合护栏样段,开展 80km/h 实车碰撞测试,结果显示,复合材料横梁受撞击后裂纹均匀延展,最大变形量不足 100mm,未产生脱落碎片,体现出良好的能量分散能力与结构稳固性。

5.3 缓冲与吸能装置集成策略

缓冲模块多安装于护栏前段与中段重要位置,采用内嵌铝蜂窝、弹性体缓冲筒或多腔室可压缩结构单元,平均压溃强度保持在 25kN 至 35kN,试验时,运用数控加载系统开展恒速压溃测试,铝蜂窝模块在压缩位移达 280mm 时释放约 9200J 能量。模块经滑槽与主护栏相连,碰撞发生时滑移距离能控制在 180mm 以内,防止连接部位因应力集中而断裂。实车试验显示,该吸能装置将车辆加速度峰值降低 3.1g,有效缓解车体结构冲击反应,系统配备分段吸能组件,按依次失效机理设计,第一段吸收初始能量,第二段承受高强度后期冲击,构建成多级缓冲结构。横梁后方设置可回弹橡胶包层,避免车辆二次碰撞时出现硬接触,连接部位设有摩擦滑移装置,通过调控螺栓轴力与滑动界面摩擦系数,实现受力后定向滑动耗能,增强护栏对行驶轨迹复杂车辆的适配性。

6 检测系统集成与智能化升级

6.1 多传感融合检测系统

该系统涵盖应变计、加速度计、激光位移计、地面冲击力传感器与高频陀螺仪,分别布置于护栏关键节点、连接件、车辆接触面及地基下方,各传感器采样频率均设定为 10kHz,保证在碰撞全程不遗漏任何微小时间间隔内的应力变化数据。数据传输由同步时钟模块调控,误差控制在 $\pm 1\text{ms}$ 以内。系统配备多通道信号放大器与 16 位模数转换模块,最大量程达 $\pm 500\text{kN}$ 与 $\pm 300\text{g}$,可满足强冲击响应的测量要求,采用扩展卡尔曼滤波融合算法对数据进行去噪和对时处理,输出统一格式的多维响应曲线。实际车辆撞击波形梁试验中,0.4 秒内共采集 1200 组有效数据点,经融合处理实现车辆位移、护栏弯矩、地基回弹等信息的同步可视化,构建三维动态力学响应模型,为后续仿真校验与结构调整提供实时数据支撑。

6.2 高速图像采集与处理技术

高速图像采集系统运用双向立体成像设备搭配红外补光模块,其采样频率设定高于 2000 帧/秒,分辨率维持在 1920×1080 像素,有力保障对车辆与护栏碰撞全程中快速变形及位移路径的精确捕捉^[6]。设备安置于碰撞试验场地正前方、

侧前方以及上方三维坐标轴的关键点位,视角偏移量控制在不超过 5° ,借助激光标定系统实现坐标的统一,图像采集完成后,采用基于光流法和 SURF 特征点匹配算法,针对车辆轮廓边界和护栏变形线条进行点位提取,构建出等时位移序列。运动轨迹曲线经 Bezier 插值平滑处理,误差限制在 3mm 以内,图像处理平台支持图像与力学数据的同步联动,能够自动生成与时间轴相关联的速度曲线、车体倾角变化情况以及护栏波形轮廓展开图。试验过程中,成功捕获车辆与波形护栏接触时横梁的凹陷演化进程,峰值变形出现于碰撞后的第 0.186 秒,图像序列表明该节点前后变形速率从 0.21m/s 急剧增加至 0.63m/s,有效辅助确定实际吸能峰值时段和能量密集区的位置。

6.3 智能平台数据管理与分析机制

平台经 CAN 总线与 Wi-Fi 模块接入传感网络和图像采集系统,数据上传速率达 8MB/s,单个碰撞事件数据存储量在 1.4GB 到 2.7GB 之间,内嵌 TSDB 时序数据库存取高频波形数据,多线程数据压缩模块确保采集频率不低于 95%,结构数据解析模块借 Fast Fourier Transform 提取频域特征,结合 Wavelet 包络解调算法找出潜在失效特征频率点。智能筛选规则将数据分析成果推至可视化界面,呈现最大位移曲线、冲击传播时延图谱、连接件载荷-时程曲线等,用户于界面调整时间窗、节点编号和响应类型,快速锁定关键响应片段。

结语

高速公路护栏动态撞击响应特性研究构建碰撞试验评估体系,涉及材料性能、结构设计、试验方法和智能监测技术等方面,多维度数据分析优化技术路径,提升护栏实际工况下吸能导向能力。研究显示集成智能化设计有利于提升护栏安全性能。量化追踪调整的评估框架,为道路防护装置性能检测及工程应用给出明确路径与参考。

[参考文献]

- [1]黎连回.高速公路组合式桥梁护栏碰撞安全性能仿真研究[J].公路交通技术,2024,40(03):81-89.
- [2]杨雪峰.在役 94 规范高速公路 Am 级波形梁护栏防护性能研究[D].西华大学,2024.
- [3]孙建林.高速公路路侧波形梁护栏防护性能提升研究[D].重庆交通大学,2024.