

公路轻量化护栏材料选型与结构设计

吴德华¹, 陈志清², 曹宏斌³, 李江云⁴

(1. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350108;

2. 福建省高速路桥建设发展有限公司, 福建 厦门 361003;

3. 福建省高速公路科技创新研究院有限公司, 福建 福州 350001;

4. 福建福克曼公路工程技术有限公司, 福建 福清 350322)

摘要: 传统碳钢护栏存在单位体积重量大、生产和运输过程碳排放量大、产品重复利用率低以及在碰撞事故中车辆容易冲入对向车道等缺点。文章优选一种新型不锈钢(QN1701)作为轻量化护栏材料, 化学成分分析显示具有高锰、高铬和高PREN值特点, 其抗拉强度达到740 MPa, 屈服强度为430 MPa, 延伸率为54%, 比传统碳钢(Q235)相应力学指标提高了56%~72%, 因此具有更高的结构安全性; 经Newmark- β 法理论计算, QN1701护栏结构体系可以有效减轻碰撞严重程度, 保护车辆不冲出护栏, 设计防护等级为SB级的护栏结构同比Q235护栏轻量化率达到了48.3%, 数值仿真结果表明, 新型不锈钢护栏的安全性能满足SB级防护等级要求。

关键词: 交通安全设施; 不锈钢护栏; 轻量化; 新型结构; 仿真

中图分类号: U417

文献标志码: A

文章编号: 2097-3853(2024)04-0315-06

Material selection and structural design of highway lightweight guardrail

WU Dehua¹, CHEN Zhiqing², CAO Hongbin³, LI Jiangyun⁴

(1. School of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;

2. Fujian Highway Bridge Construction & Development Co., Ltd., Xiamen 361003, China;

3. Fujian Expressway Science and Technology Innovation Research Institute Co., Ltd., Fuzhou 350001, China;

4. Fujian Folkman Highway Engineering Technology Co., Ltd., Fuqing 350322, China)

Abstract: Traditional carbon steel guardrails have the disadvantages of high weight per unit volume, high carbon emissions during production and transportation, low product reuse rate, and easy entry of vehicles into opposite lanes in collision accidents. A new type of stainless steel (QN1701) was selected as a lightweight guardrail material. Chemical composition analysis shows that it has the characteristics of high manganese, high chromium and high PREN value. Its tensile strength reaches 740 MPa, yield strength is 430 MPa, and its elongation is 54%, which is 56%~72% higher than the corresponding mechanical index of traditional carbon steel (Q235), and therefore has higher structural safety. According to the theoretical calculation of Newmark- β method, the QN1701 guardrail structure system can effectively reduce the severity of the collision and protect the vehicle from rushing out of the guardrail. The guardrail structure with the design protection class being SB is 48.3% lighter than that of Q235 carbon steel guardrail. Numerical simulation results show that the safety performance of the new stainless-steel guardrail meets the requirements of SB-level crash worthiness.

Keywords: traffic safety facilities; stainless steel guardrail; lightweight; new structure; simulation

公路常用的波形梁钢护栏通用材料 Q235 碳钢存在材料强度较低, 单位体积重量大, 生产和运输过程碳排放量大; 且产品需要热浸镀锌, 环境污染严重; 沿海区域产品运营容易锈蚀, 材料重复利

用率低等问题。

为了解决传统波形钢护栏存在的问题, 研究者采用不同的材料替代传统护栏, 孙胜江等^[1]针对目前桥梁护栏在使用过程中出现的碰撞性能

差、使用寿命短等问题提出连续玄武岩纤维复合材料护栏;焦驰宇等^[2]采用新型铝合金防撞护栏替代传统型钢护栏;孙汉正^[3]通过仿真开发出具备较强抗噪能力的新型公路护栏产品,提高了护栏结构的耐撞性和轻量化水平;王立军^[4]研究了现行标准下波形梁碳钢护栏存在的主要问题,对比分析了传统碳钢护栏和高强钢轻量化护栏的优缺点;杨永奇等^[5]研究了一种新型泡沫铝防阻块防撞护栏,其抗撞防护性明显优于传统 Q235 钢护栏,轻量化程度达到了 25%。山西省市场监督管理局颁布了《公路不锈钢护栏应用技术规程》,采用不锈钢材料 TGR-H 替代传统 Q235 碳钢,研发了 A 级、SB、SA、SS 系列不锈钢波形护栏,节省钢材 20%左右,减少碳排放 30%以上。综上,不同材料替代波形钢护栏的研究都取得一定的成果,然而目前针对高性能公路护栏领域的创新研

究仍然滞后于国家战略发展需求。

本文优选一种新型不锈钢材料(QN1701),利用其高强度、高延伸和高耐蚀特征,优化护栏结构设计,降低护栏材料用量,并克服碳钢应用中容易锈蚀等不利因素,从而达到降低护栏生产、养护、运营过程中的碳排放及对环境污染,降低护栏全寿命成本的目标。

1 轻量化不锈钢材料

1.1 新型不锈钢选材及化学成分

选取一种新型奥氏体不锈钢(以下简称 QN1701)^[6],该不锈钢主要化学成分如表 1 所示。与传统 Q235 钢(以下简称 Q235)相比,具有高锰、高铬和高耐点蚀当量的特点,因而具有高强度、高延伸和高耐蚀特征。

表 1 QN1701 和 Q235 化学成分对比一览表
Tab.1 Comparison of chemical compositions of QN1701 and Q235

型材	w/%							
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu	N
QN1701	≤0.15	≤1.00	5.0~8.0	16.0~18.0	1.0~2.0	≤0.60	0.8~3.5	0.2~0.3
Q235	≤0.20	≤0.35	≤1.40	/	/	/	/	/

1.2 QN1701 力学性能

QN1701 和 Q235 力学性能对比见表 2,经冶炼、连铸、热轧、冷轧等工序,获得冷轧厚度为 1.2 mm 的试验材料, QN1701 的抗拉强度为 740 MPa,约为 Q235(430 MPa)的 1.72 倍;其屈服强度为 430 MPa,约为 Q235(275 MPa)的 1.56 倍;其延伸率为 54%,约为 Q235(33%)的 1.63 倍,因此具有更高的结构安全性。

测试结果对比如表 3 所示, QN1701 在 20、0 ℃ 的冲击韧性是 Q235 的 2.2 倍和 2.9 倍,远优于 Q235,且随温度下降不明显。

表 3 QN1701 和 Q235 冲击性能对比一览表
Tab.3 Comparison of impact properties of QN1701 and Q235

温度/℃	冲击性能/(J · cm ⁻²)	
	QN1701	Q235
20	183	82.8
0	181	62.0
-20	172	20.4
-40	160	17.2
-60	154	7.2

QN1701 和 Q235 耐腐蚀性能在不同试验方法下的对比差异明显, QN1701 点蚀电位为 240 mV,点腐蚀速率为 8.57 g/(m² · h),应力腐蚀裂

表 2 QN1701 和 Q235 力学性能对比一览表

Tab.2 Comparison of mechanical properties of QN1701 and Q235

型材	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	延伸率/%
QN1701	740	430	54
Q235	430	275	33

在热轧状态下,厚度均为 4.0 mm 的 QN1701 和 Q235 在 20、0、-20、-40 和-60 ℃ 的冲击性能

纹萌生时间为 4 h,应力腐蚀裂纹贯穿时间为 17 h,而 Q235 在不同 Cl^- 浓度、强酸环境下全部腐蚀掉,周期浸润 48 h 的实验中,Q235 镀锌板耐腐蚀性能极差,远低于 QN1701,如图 1 所示。

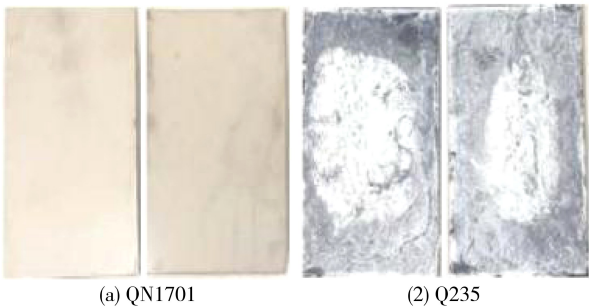


图 1 QN1701 和 Q235 周期浸润 48 h 结果对比图
Fig.1 Result comparison of QN1701 and Q235 infiltrated for 48 hours

1.3 QN1701 力学机理分析

冷轧固溶 QN1701 的室温拉伸应力-应变曲线如图 2 所示,冷轧固溶 QN1701 的抗拉强度为 740 MPa,屈服强度为 439 MPa,伸长率为 54.0%,屈强比为 0.53,相比 Q235 具有较高的结构安全性。

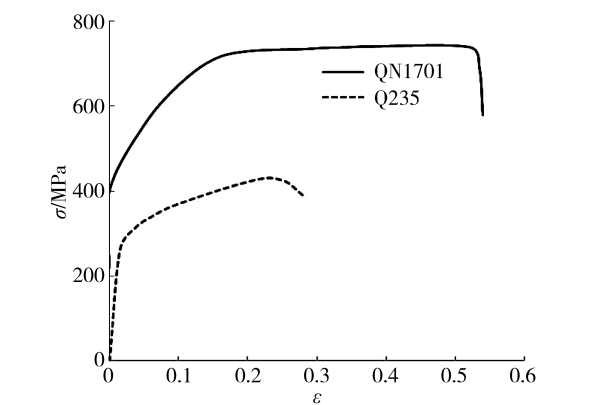


图 2 QN1701 与 Q235 的室温拉伸应力-应变曲线
Fig.2 Room temperature tensile stress-strain curves of QN1701 and Q235

QN1701 属于亚稳态奥氏体不锈钢,由于其金相组织特性,材料结构中存在大量孪晶组织,且 N 原子与位错及晶界存在交互作用,冷变形时产生形变孪晶和位错塞积,提高了材料的抗拉强度;N 原子间隙固溶于奥氏体晶格间隙内,起到固溶强化效果,提升了材料的屈服强度^[7-8];N 元素可促进位错在晶界、孪晶界处塞积,提高其位错密度,起到冷加工应变硬化作用^[9]。因此, QN1701 具备了相变强化、间隙固溶强化和应变硬化等特

点,使其获得更高的抗拉强度和屈服强度。

2 QN1701 护栏结构设计

2.1 QN1701 结构特点

传统常用半刚性钢护栏的立柱有圆管和方管两种,对应的防阻块六方型形状如表 4 所示,现行半刚性钢护栏结构体系在车辆碰撞时,巨大的碰撞能量使得三波板、防阻块和立柱同时变形吸收撞击能量,护栏板伴随立柱同时倾斜,存在车辆跨越护栏冲入对向车道风险,护栏系统防止翻越功能偏弱,缓冲、导向功能一般,其碰撞倒伏过程如图 3 所示。

表 4 QN1701 护栏与 Q235 护栏主要构件对比一览表
Tab.4 Comparison of main components of QN1701 guardrail and those of Q235

护栏种类	防护等级	单元重量/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$)	三波板 板厚/mm	立柱	防阻块
Q235	A 级	31.68	3.0	圆管	
	SB 级	63.8	4.0	方管	
QN1701	A 级	23.9	2.3	C 型	
	SB 级	32.99	3.0	C 型	

为克服传统半刚性钢护栏碰撞过程中存在的缺点,经 Newmark- β 法理论计算,提出一种 QN1701 护栏结构系统如图 4 所示。

在 Newmark- β 列式中^[10],当 $\beta = \frac{1}{6}, \gamma = \frac{1}{2}$ 时,速度和位移分别为:

$$\dot{x}_1 = \dot{x}_0 + \frac{h}{2}(\ddot{x}_0 + \ddot{x}_1) \tag{1}$$

$$x_1 = x_0 + h\dot{x}_0 + \frac{h^2}{3}\ddot{x}_0 + \frac{h^2}{6}\ddot{x}_1 \tag{2}$$

式中, h 为计算时间步长,s; x_0 为初始位移,m; \dot{x}_0 为初始速度,m/s; \ddot{x}_0 为初始加速度, m/s^2 ; x_1 为第一个计算时间步长后的位移,m; \dot{x}_1 为第一个计算时间步长后的速度,m/s; \ddot{x}_1 为第一个计算时间步

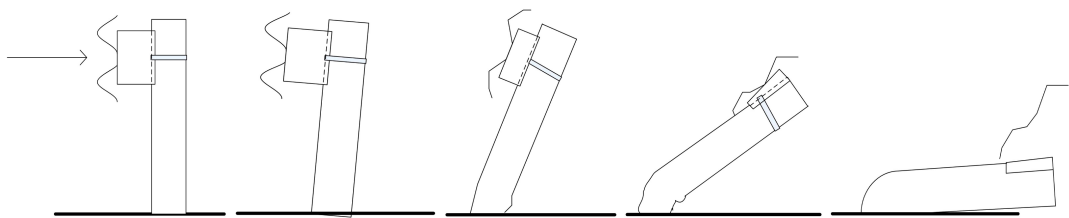


图 3 现行半刚性钢护栏结构碰撞过程示意图

Fig.3 Schematic diagram of collision process of current semi-rigid steel guardrail structure

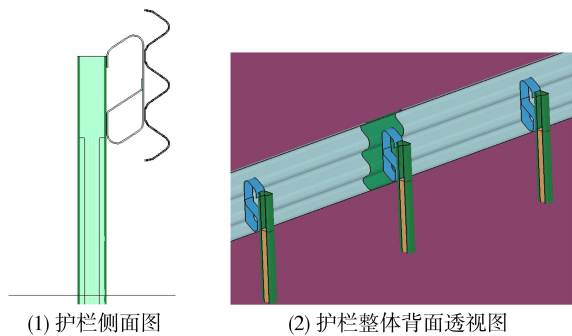


图 4 QN1701 护栏体系示意图

Fig.4 Schematic diagram of QN1701 guardrail system

长后的加速度, m/s^2 。

对非线性体系分析,物理特性假设仅在很短的时间或变形增量内保持常量,在碰撞过程中,考虑汽车转动时位移增量和速度增量,简化表达式为:

$$\Delta x = \left[\widetilde{\Delta P} - 2R \sin\left(\frac{\theta_1 - \theta_2}{2}\right) \sin\left(\frac{\theta_1 - \theta_2}{2} - \varphi\right) \right] / \widetilde{k} \quad (3)$$

$$\Delta \dot{x} = \frac{3}{h} \Delta x - 3\dot{x} - \frac{h}{2} \ddot{x}_0 \quad (4)$$

式中, Δx 为位移增量, m ; $\Delta \dot{x}$ 为速度增量, m/s ; $\widetilde{\Delta P}$ 为等效增量荷载, N ; \widetilde{k} 为等效刚度; φ 为 AB 与汽车轴线的夹角, $(^\circ)$; θ 为 x 轴与汽车轴线的夹角, $(^\circ)$; R 为汽车质心 B 到前角点 A 的距离, m ; B 为汽车质心, A 为汽车前角与护栏碰撞点, 如图 5 所示。

新型护栏结构防阻块为向上倾斜“日”字型, 车辆碰撞护栏时, 整个护栏系统高度协同, 护栏板和防阻块同时变形, 立柱吸收碰撞能量后和护栏板脱离, 由于防阻块结构特点, 在碰撞挤压过程中向上抬高护栏板, 阻止车辆跨越护栏进入对向车道, 伴随护栏板抬高过程, 利用车辆自重部分抵消碰撞冲击能量, 减轻碰撞严重程度, 有效保护车辆不冲出护栏, 具有良好的缓冲、导向性能, 其碰撞倒伏过程如图 6 所示。

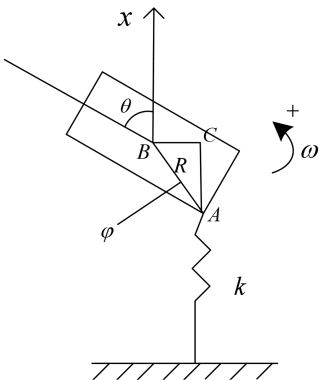


图 5 考虑汽车转动时计算分析模型

Fig.5 Computational and analytical model considering vehicle rotation

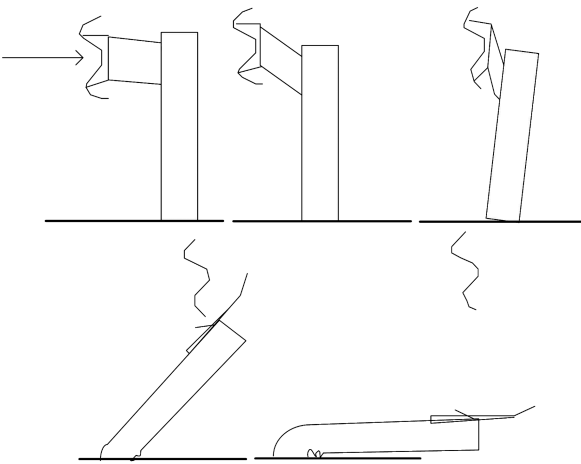


图 6 新型护栏结构碰撞过程示意图

Fig.6 Schematic diagram of collision process of new guardrail structure

2.2 新旧护栏规格与重量对比分析

以防护等级 SB 级护栏为例, Q235 三波护栏的构件组成和重量如表 5, 核算单元护栏组合重量为 63.8 kg/m ; 同防护等级 QN1701 护栏的构件组成和重量如表 6 所示, 核算单元护栏组合重量为 32.99 kg/m , 单元护栏平均组合重量降低了 30.81 kg , 轻量化率达到了 48.3% 。

表 5 Q235 护栏(SB 级)构件重量一览表

Tab.5 Q235 guardrail (SB grade) component composition and weight

构件组成	构件规格	重量/kg	每单元构件数量	重量/kg
波形梁板	4 320 mm×506 mm×85 mm×4.0 mm	101.740	1	101.740
立柱	130 mm×130 mm×6 mm×2 610 mm	60.970	2	121.940
防阻块	200 mm×(66+300)×256 mm×4.5 mm	11.390	2	22.780
紧固件	/	8.732	1	8.732

表 6 QN1701 护栏(SB 级)构件组成和重量一览表

Tab.6 QN1701 guardrail (SB grade) component composition and weight

构件名称	构件规格	重量/kg	每单元构件数量	重量/kg
波形梁板	4 320 mm×506 mm×85 mm×3.0 mm	75.60	1	75.60
立柱	C125 mm×60 mm×5.0 mm×1 650 mm	16.30	3	48.90
防阻块	262 mm×247 mm×4.0 mm	2.15	3	6.45
紧固件	/	1.02	1	1.02

3 仿真分析

根据《公路护栏安全性能评价标准》(JTG B05 -01-2013)^[11],防护等级为 SB 级的实车足尺碰撞试验车辆模型结构参数及碰撞条件见表 7。建立

车辆的三维数值模型,采用 Hypermesh 软件对车辆进行有限元网格划分处理;并对模型各部分连接、材料等属性以及初始速度、载荷和约束条件设置^[13];不锈钢护栏模型采用 MAT24 弹塑性材料,单元属性为 shell 单元,护栏长度设置为 72 m。

表 7 高速公路路侧护栏试验车辆结构参数及碰撞条件

Tab.7 Structural parameters and collision conditions of test vehicles for highway roadside guardrails

防护等级	碰撞车型	车辆总质量/t	重心高度	尺寸参数(长×宽×高)	碰撞速度/(km·h ⁻¹)	碰撞角度/(°)
SB 级	小型客车	1.5	0.5~0.6	4.6 m×1.77 m×1.5 m	100	20
	中型客车	10.0	1.2~1.4	11.2 m×2.4 m×3.0 m	80	20
	大型货车	18.0	1.4	8.0 m×2.5 m×3.0 m	60	20

将处理好的模型导入 LS-Dyna 进行仿真碰撞计算,车辆行驶轨迹如图 7 所示,仿真结果如表 8 所示。

表 8 仿真评价结果

Tab.8 Simulation evaluation results

车型	护栏最大 横向动态 变形/m	护栏最大 横向动态 位移外延/m	车辆最大 动态外 倾/m	车辆最大 动态外倾 当量/m
小型客车	0.413	0.980	—	—
中型客车	1.120	2.077	1.659	1.896
大型货车	1.260	1.311	1.928	2.699

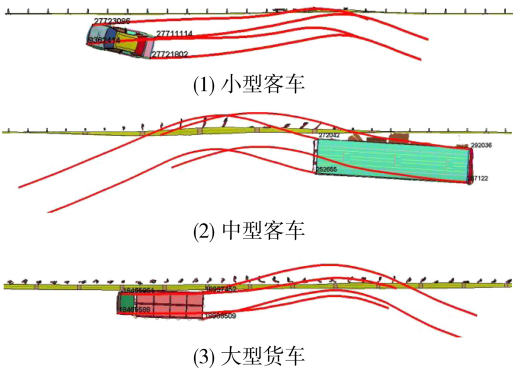


图 7 车辆碰撞护栏防撞行驶轨迹图

Fig.7 Vehicle collision guardrail anti-collision trajectory

仿真结果分析表明:小型客车、中型客车和大

型货车在碰撞过程中均能满足阻挡、导向和缓冲功能要求,其中小型客车乘员碰撞速度的纵向与横向分量分别为 5.04、6.92 m/s,满足规范值小于 12 m/s 的要求,乘员碰撞后加速度的纵向与横向分量分别为 69.41、39.52 m/s²,满足规范值小于 200 m/s² 的要求;大型货车碰撞时护栏最大横向动态变形值为 1.26 m,中型客车碰撞时护栏最大横向动态位移外延值为 2.077 m;大型货车最大动态外倾值和外倾当量值分别为 1.928 m 和 2.699 m,可以满足护栏最大横向相关动态变形值要求。

综上,从数值仿真角度,QN1701 护栏的安全性能满足 SB 级防护等级要求。

4 结论

1)与 Q235 相比,QN1701 具有高锰、高铬和高耐点蚀当量的特点,具备了奥氏体不锈钢的高强度、高延伸和高耐蚀特征;QN1701 抗拉强度为

740 MPa,屈服强度为 430 MPa,延伸率为 54%,分别是 Q235 对应力学性能指标的 1.72、1.56 和 1.63 倍,因此作为公路护栏材料具有更高的结构安全性。

2)QN1701 护栏结构体系采用 C 型立柱和向上倾斜“日”字型防阻块,属于“强板弱柱”受力体系,在车辆碰撞护栏时,整个护栏系统高度协同,立柱吸收碰撞能量后与护栏脱离,防阻块碰撞挤压后向上抬高护栏板,可以有效保护车辆不冲出护栏,具有良好的缓冲、导向性能。

3)防护等级为 SB 级的 QN1701 护栏与同等级的 Q235 护栏相比,单元护栏组合重量降低了 30.81 kg/m,轻量化率达到了 48.3%,有效降低了护栏的重量,降低了碳排放。

4)车辆与护栏碰撞仿真实验验证了 QN1701 护栏的安全性能满足 SB 级防撞等级要求。

参考文献:

- [1] 孙胜江,朱长华,梅葵花.玄武岩纤维复合材料梁-柱式护栏防撞性能[J].振动与冲击,2019,38(21):265-270.
- [2] 焦驰宇,朱格西,龙佩恒,等.城市桥梁新型铝合金防撞护栏安全性[J].科学技术与工程,2019,19(30):310-316.
- [3] 王利军.高强度轻量化波形梁护栏应用分析[J].北方交通,2021(10):66-68,72.
- [4] 杨永奇,虞叶东,贾宜鑫.高速公路新型泡沫铝防撞护栏性能研究[J].公路,2021,66(7):220-223.
- [5] 赵德望,王皖婷,邢云,等.公路波形梁护栏抗撞防护特性及轻量化研究[J].安徽理工大学学报(自然科学版),2023,43(4):19-25.
- [6] 蒋一,石显云,江来珠,等.电梯用含氮节镍奥氏体不锈钢 QN1701 的组织 and 性能[J].中国冶金,2022,32(6):108-116.
- [7] SINGH B B, SUKUMAR G, PAMAN A, et al. A comparative study on the ballistic performance and failure mechanisms of high-nitrogen steel and RHA steel against tungsten heavy alloy penetrators[J]. Journal of Dynamic Behavior of Materials, 2021, 7(1): 60-80.
- [8] 翁建寅,董瀚,李北,等. N 含量对高氮 CrMnMo 奥氏体不锈钢组织和性能的影响[J].金属热处理,2020,45(1):160-163.
- [9] 张荣华,杨川,石宁,等.高氮奥氏体钢的塑性加工变形特性研究进展[J].材料导报,2021,35(11):11154-11162.
- [10] 刘广,刘济科,陈衍茂.基于 Wilson- θ 和 Newmark- β 法的非线性动力学方程改进算法[J].计算力学学报,2017,34(4):433-439.
- [11] 中华人民共和国交通运输部.公路护栏安全性能评价标准:JTG B05-01—2013[S].北京:人民交通出版社,2013.
- [12] 熊刚.基于 LS-DYNA 的车辆与半刚性护栏碰撞的有限元仿真[D].武汉:华中科技大学,2021.

(责任编辑:陈雯)