DOI: 10.11883/bzycj-2016-0354 文章编号: 1001-1455(2018)04-0820-07

多网格防阻块护栏系统的冲击响应*

徐 挺,缪馥星,周风华,杨黎明
(宁波大学机械工程与力学学院,浙江 宁波 315211)

摘要: 防阻块薄壁结构是护栏系统中重要的吸能元件,通过防阻块的优化设计提升护栏防护能力,最大限度地减小对乘员的伤害具有重要的意义。应用有限元软件 ABAQUS,建立了单跨多网格防阻块波形梁护栏系统受质量块冲击的有限元分析模型,计算了壁厚分别为 2、3 和 4 mm 的多网格防阻块护栏系统的冲击响应过程,分析了 3 种不同壁厚的防阻块在给定冲击速度下,内能的变化情况。通过对比分析发现:冲击过程中,壁厚 2 mm 的双网格防阻块最终内能质量比明显高于其他情形,能量吸收能力最强;并且壁厚 2 mm 双网格防阻块情形的质量块加速度峰值比壁厚 3 mm 单网格防阻块情形小约 47.6%,更有利于乘员安全。此外,根据 WSTC 曲线,模拟工况下,冲击引起的人体头部减速度均在安全忍受范围内。

关键词: 冲击响应;有限元分析;多网格防阻块;护栏系统
中图分类号: O383;TH113 **国标学科代码:** 13035 **文献标志码:** A

随着高速公路的迅速发展,车辆数量越来越多,速度越来越快,对道路交通安全问题提出了更高的要求。护栏是高速公路最基本的安全防护结构,因此目前对护栏可靠性的要求也越来越高[1]。防阻块作为护栏系统中重要的一部分,对防阻块进行优化设计,提升公路护栏系统的防护能力,具有重要的现实意义和应用价值。

护栏系统及管状结构的吸能特性已备受的重视。余同希[2-3]、Yu 等[4]提出了利用金属塑性变形原理的碰撞能量吸收装置,即尽可能将碰撞动能不可逆地转换成变形能,以塑性变形而非弹性变形进行贮存,并阐述了碰撞对人体的伤害及管状结构能量吸收性能的评估指标体系。沈新普等[5]利用 ABAQUS 对护栏系统抵抗失控车辆冲击的能力进行了数值模拟,比较了不同质心高度的车辆冲击护栏系统时的吸收能量情况。杜洋等[6]设计了半刚性护栏系统的模型实验系统,并计算得到了护栏系统各部件在冲击条件下的变形特点及各部件的能量吸收比。张科等[7]对有无侧向约束的 TiNi 柱壳进行了横向冲击实验,发现无约束情形具有良好的可恢复变形能力,且侧向约束可有效提高柱壳的耗能能力。张晓晴等[8]建立了三跨缩比梁护栏系统受冲击载荷时的有限元模型,模拟了护栏系统各元件的瞬态变形过程,并分析了撞击过程中护栏系统的能量吸收特性。付锐等[9]讨论了汽车碰撞数值计算中应变率效应问题,得出碰撞速度较低,应变率效应不明显,当变形速率较低时,可忽略应变率效应的影响。Baroutaji 等[10]研究了 3 种嵌套圆管系统在横向动态载荷作用下的能量吸收特性,比较了不同壁厚和不同撞击速度对嵌套圆管系统能量吸收能力的影响。Rouzegar 等[11]对 3 种不同的管状构件进行了横向压扁的实验研究,发现槽口对结构的变形模式有影响,能够提升其吸能能力。然而,目前对多网格薄壁管冲击响应的研究尚未见报道。因此,本文中着重于研究多网格薄壁管结构类型的冲击响应,以期应用于公路护栏系统。

基于中国交通部行业标准《高速公路交通安全设施设计及施工技术规范》[12](以下简称为《规范》)中防护栏设计的标准,对护栏系统的主要吸能元件——防阻块结构进行多网格设计,并利用有限元分析软件 ABAQUS,进行多网格防阻块护栏系统冲击响应的数值研究。用一质量块模拟汽车,建立多网格

* **收稿日期:** 2016-11-23; **修回日期:** 2017-01-06
基金项目: 国家自然科学基金项目(11572161,11302109);教育部博士点基金新教师类项目(20133305120001);爆炸科学与技术国家重点实验室开放基金项目(KFJJ13-7M);王宽诚基金项目
第一作者: 徐 挺(1992—),男,硕士研究生; **通信作者:** 缪馥星,aifxmiao@gmail.com。

防阻块波形梁护栏系统的有限元分析模型，计算质量块撞击多网格防阻块护栏系统时的冲击响应，分析2、3 和 4 mm 3 种不同壁厚的多网格防阻块护栏系统的冲击响应过程，比较不同壁厚的防阻块在给定冲击速度下的吸能特性，以期为公路护栏系统多网格防阻块结构的优化设计提供参考。

1　多网格防阻块护栏系统的有限元模型

根据《规范》[12]，多网格护栏系统由半刚性波形梁、防阻块和圆形立柱构成，如图 1 所示。其中防阻块有单网格、双网格、三网格和四网格 4 种，见图 2。护栏系统均选用 Q235 钢，其密度 $\rho=7.85\ \mathrm{g/cm^3}$，弹性模量 $E=210$ GPa，泊松比 $\mu=0.3$，屈服强度 $\sigma_s=235$ MPa。有限元模拟时，防阻块与立柱及波形梁用绑定约束 Tie 连接，立柱底端与地面间采用固支边界条件；质量块采用 R3D4 四节点刚性三维单元，波形梁、防阻块和立柱均采用 Quad-dominated 网格划分方式，主要采用 S4R 四节点四边形壳单元，螺栓处采用 S3R 三节点三角形单元；波形梁与立柱的单元厚度分别为 3.0 和 4.5 mm；选取防阻块单元厚度分别为 2、3 和 4 mm，并且 4 种网格的防阻块有限元单元个数依次为 2 658、2 276、3 282、3 842，对应情形下波形梁和立柱的有限元单元个数分别是 3 257、3 258、3 292、3 263 和 2 746、2 860、2 614、2 766；选取 50 kg 的质量块，定义为刚体。这里需要说明的是，模拟计算过程中，波形梁、防阻块和立柱的本构关系均采用理想弹塑性模型，且忽略波纹板、立柱与防阻块接触面之间的摩擦。

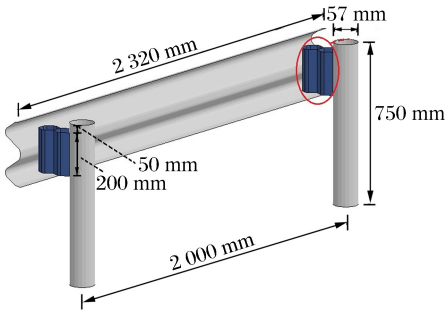


图 1　多网格护栏系统示意图

Fig. 1　Sketch of multi-grid guardrail system

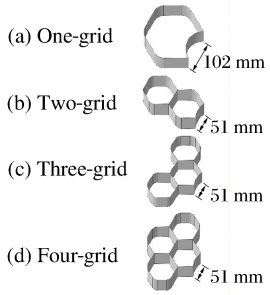


图 2　多网格防阻块模型

Fig. 2　Multi-grid thin-wall obstruction block model

2　多网格防阻块的冲击响应和吸能特性

当护栏系统受到一定速度的车辆撞击时，护栏系统中的波纹板、立柱及防阻块 3 部分均会发生不同程度的变形，甚至破坏。若不考虑摩擦效应，则可以近似认为撞击车辆的冲击动能主要通过 3 大部件的变形和塑性破坏转化为内能。因此，本文中通过护栏系统构件的内能变化情况，分析其能量吸收特性。利用 ABAQUS/Explicit 显式分析模块模拟 50 kg 质量块正撞多网格护栏系统的过程，其冲击初速度为 15 m/s，模拟时间范围为 0.15 s。通过对比不同网格数量和壁厚（t_w）条件下防阻块护栏系统的冲击响应，分析多网格防阻块的冲击响应和吸能特性。

2.1　同壁厚不同网格数量情形

模拟了给定防阻块壁厚条件下，单网格、双网格、三网格、四网格护栏系统在相同冲击能量下的响应过程。图 3～6 分别给出了护栏系统被撞击后在 15、30、45、60 ms 时刻的变形情况。

由图 3～6 可看出，4 种不同网格数量的防阻块的变形模式不同，在撞击后 15 ms 时，单网格的变形最明显，三网格次之，双网格和四网格的类同，变形不明显。在 3 ms 时，防阻块发生进一步的大变形，但其变形特点仍基本保持，单网格与三网格的相似，双网格和四网格的类同。在 60 ms 时，单网格、双网格、三网格等基本被冲压为扁形，四网格因网格数多，与立柱相连接处的那个网格未完全被冲压扁，说明网格数增加，每个子网格仍会分担部分冲击能量。另外，波形梁发生明显弯曲变形，也吸收了一部分冲击能量；受冲击过程中，立柱发生轻微摇晃，变形很小，吸收能量最少。

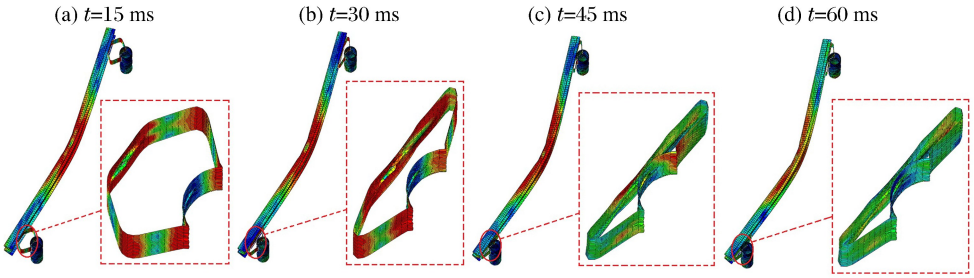


图 3 壁厚 3 mm 单网格护栏系统变形过程

Fig. 3 Deformation process of the guardrail system (one-grid, t_w = 3 mm)

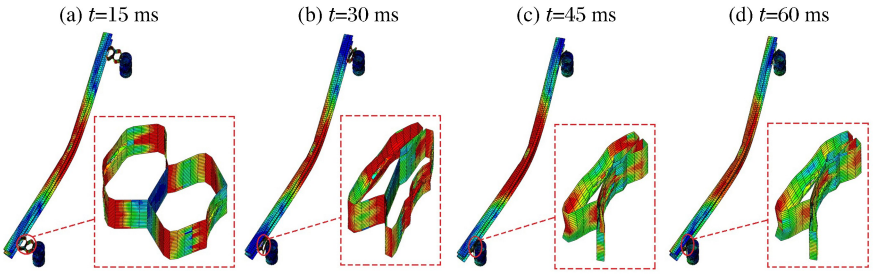


图 4 壁厚 2 mm 双网格护栏系统变形过程

Fig. 4 Deformation process of the guardrail system (two-grid, t_w = 2 mm)

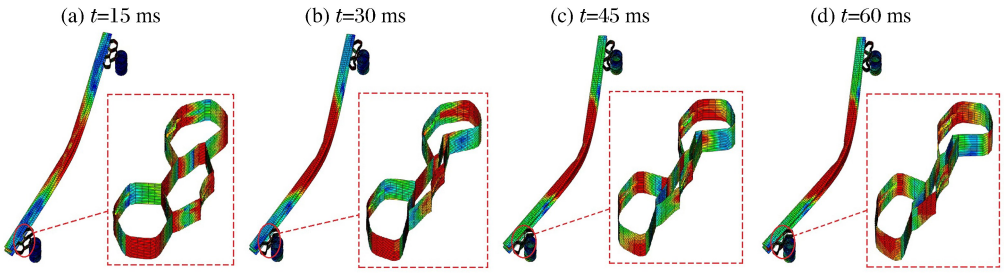


图 5 壁厚 2 mm 三网格护栏系统变形过程

Fig. 5 Deformation process of the guardrail system (three-grid, t_w = 2 mm)

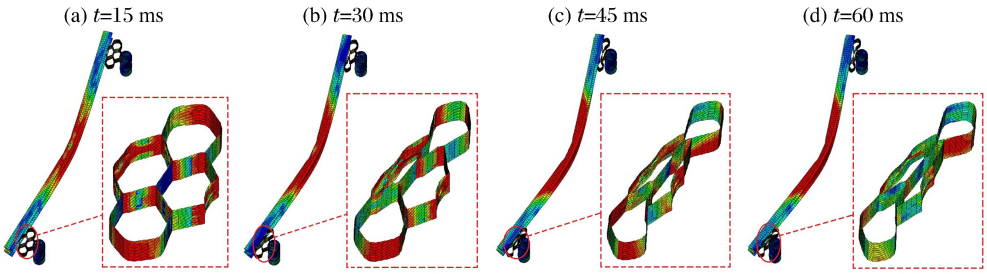


图 6 壁厚 2 mm 四网格护栏系统变形过程

Fig. 6 Deformation process of the guardrail system (four-grid, t_w = 2 mm)

图 7 给出了壁厚同为 3 mm,不同网格防阻块内能随时间变化的曲线。由图 7 可以看出,防阻块内能的变化呈非线性趋势。冲击发生后的 0.01 s 内,双网格、四网格防阻块内能平缓增加,单网格、三网格的内能增加较快,尤其是三网格的。在 0.01 s 之后,单网格防阻块的内能迅速增加,而其他 3 种情形下的仍处于缓慢增加的态势。说明单网格防阻块可以在冲击的短时间内发生大变形,而多网格的不同;单网格防阻块的内能变化量最大,也最快达到峰值,三网格防阻块次之,四网格防阻块内能变化最小;且与 2 mm 壁厚的情形相比,整个冲击过程中,壁厚为 3 mm 时,单网格防阻块的内能变化最大。

2.2　不同壁厚防阻块情形

模拟了 2、3、4 mm 3 种不同壁厚防阻块的内能变化情况，进而分析其能量吸收特性。内能随时间变化曲线如图 8 所示。

由图 8 可知，网格数量相同时，壁厚 3 mm 的单网格防阻块内能变化大于其壁厚 2 和 4 mm 的情形；壁厚 2 mm 的双网格、三网格和四网格防阻块内能变化均大于各自壁厚 3 和 4 mm 的情形。整体来看，在本文模拟的工况中，壁厚 2 mm 双网格防阻块、壁厚 3 mm 单网格防阻块、壁厚 2 mm 四网格防阻块、壁厚 2 mm 三网格防阻块的内能峰值依次减小。可见，防阻块的壁厚和网格数对抗冲击性能有较明显影响。

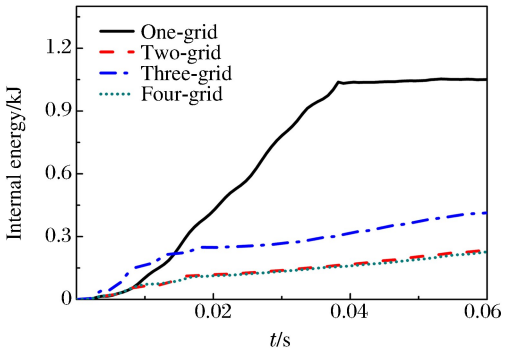


图 7　壁厚 3 mm 防阻块内能随时间变化曲线

Fig. 7　Internal energy-time curves of muli-grid thin-wall obstruction block with 3 mm thickness

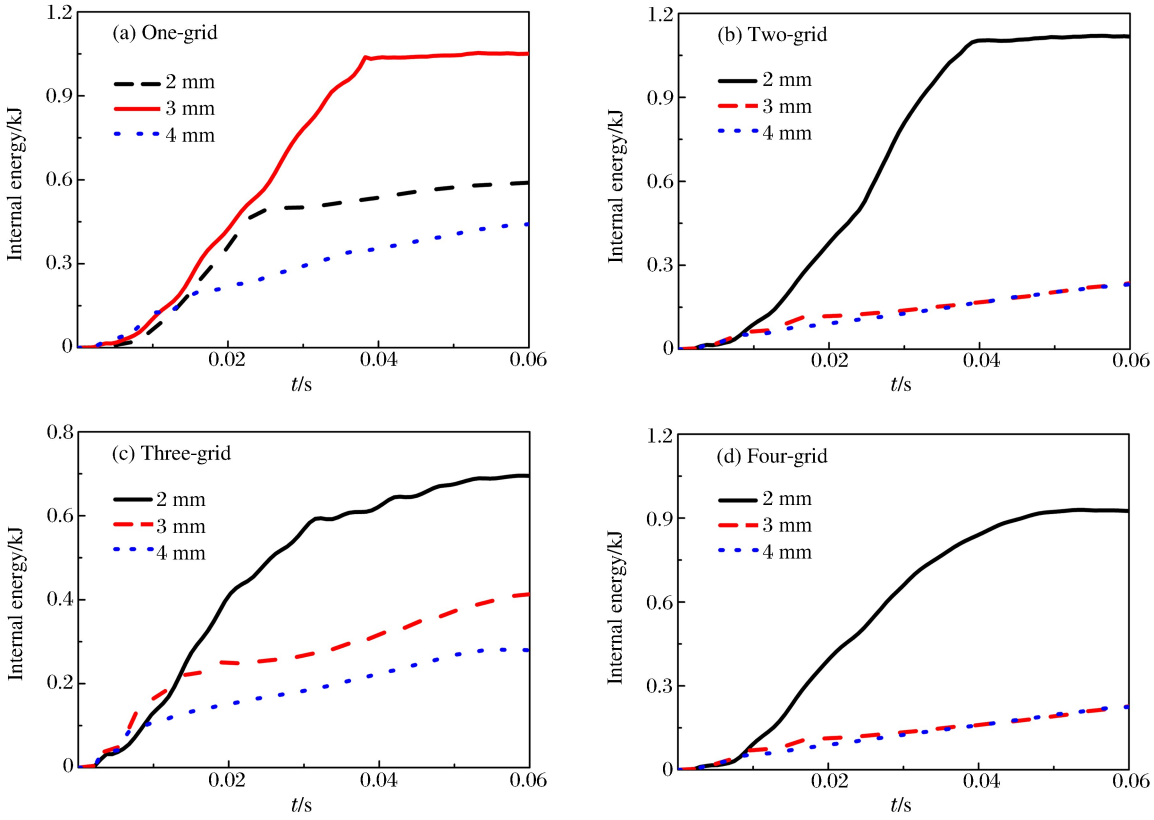


图 8　不同壁厚防阻块的内能随时间变化曲线

Fig. 8　Internal energy-time curves of thin-wall obstruction blocks with different thicknesses

根据余同希等提出的能量吸收理论[4]可知，单位质量的能量吸收能力 φ 为结构在有效压缩行程 S_{ef} 之内所吸收的总的能量 W_{ef} 除以结构总的质量 G，简称比吸能：

$$\varphi=\frac{W_{ef}}{G}=\frac{\int_0^{S_{ef}}F(s)\mathrm{d}s}{G}=\frac{F_m S_{ef}}{\rho AL} \tag{1}$$

式中：ρ 为材料密度，A 为结构的净面积，L 为试件的原长，F_m 为结构的平均压缩力。

冲击过程中，质量块的冲击能量主要转化为护栏系统各部分的内能、动能以及质量块剩余的动能。防阻块作为主要吸能元件，通过发生大变形吸收能量，不考虑摩擦影响，其内能近似等于防阻块吸收的

能量。而防阻块的吸能特点在于其为薄壁构件，质量对能量吸收的影响较小。为此，定义内能质量比作为多网格薄壁结构能量吸收性能的评估量。图 9 给出了不同壁厚、不同网格数防阻块的内能质量比。由图 9 可知：双网格、三网格和四网格防阻块的内能质量比随壁厚的增大而减小；单网格情形下，当壁厚为 3 mm 时，内能质量比最大；整体上，壁厚 2 mm 双网格防阻块的内能质量比明显高于其他情况，能量吸收能力最强。

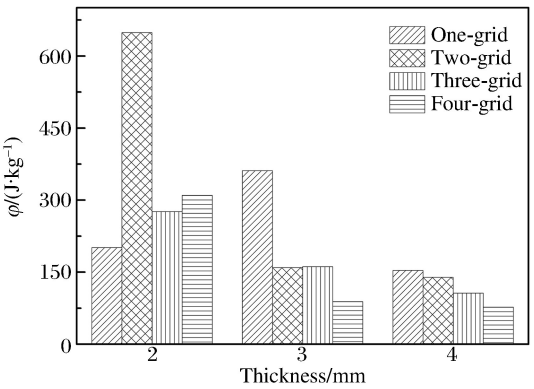


图 9 不同网格及壁厚防阻块的比吸能

Fig. 9 Comparison of thin-wall obstruction block with different thicknesses and grids

3 人体忍受度分析

根据数值模拟结果得到质量块冲击速度-时间曲线，如图 10 所示。可以看出：不同工况下，冲击开始时质量块的速度均直线下降；约 0.04 s 后，速度下降变缓，直至速度反向，一次撞击结束。一次撞击结束后，冲击壁厚为 2 mm 的四网格防阻块护栏的质量块反向速度最小。质量块的加速度是反映护栏力学性能的一个重要指标，进一步计算得到质量块加速度-时间曲线，如图 11 所示。分析可知：冲击初始，质量块受到波形梁的阻力，加速度急剧增大，迅速达到峰值；随着波形梁与防阻块变形的发展，护栏系统承载力下降，加速度快速下降，直至为零。

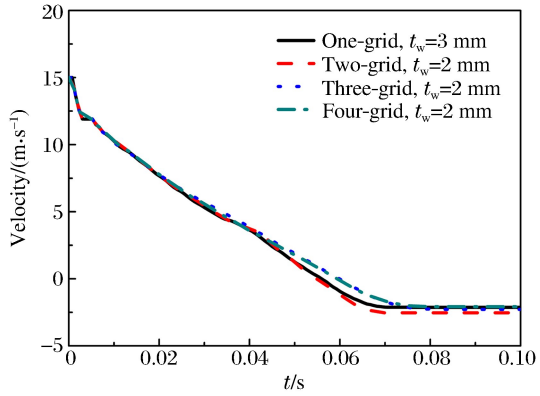


图 10 质量块速度-时间曲线

Fig. 10 Velocity-time curves of the mass block

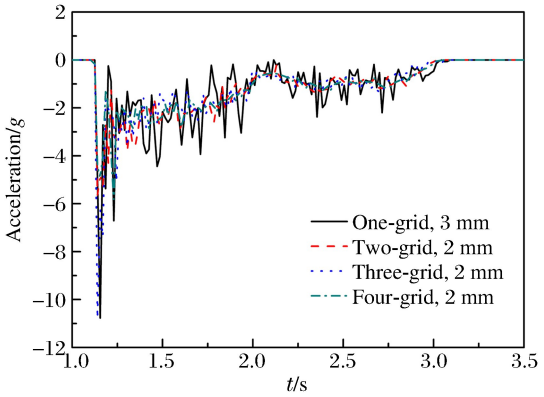


图 11 质量块加速度-时间曲线

Fig. 11 Acceleration-time curves of the mass block

对人体头部损伤最常用的评价标准是美国韦恩州立大学提出的标志人体头部对冲击载荷忍受程度的曲线（Wayne state tolerance curve，WSTC），如图 12 所示。该曲线已经被广泛应用于汽车安全性的研究之中，如果脉冲持续时间和有效减速度在图中的位置超过该曲线，就会引起脑震荡或颅骨骨折[3,13]。通过数值模拟得到 4 种计算工况下质量块加速度持续时间 t_{ac} 和有效加速度 a_{ef}，如表 1 所示。将表 1 中数据标于图 12 中，可以看出，4 种模拟工况下，由质量块加速度持续时间和有效加速度确定的位置均在 WSTC 下方，即质量块加速度脉冲均在人体忍受安全范围内。

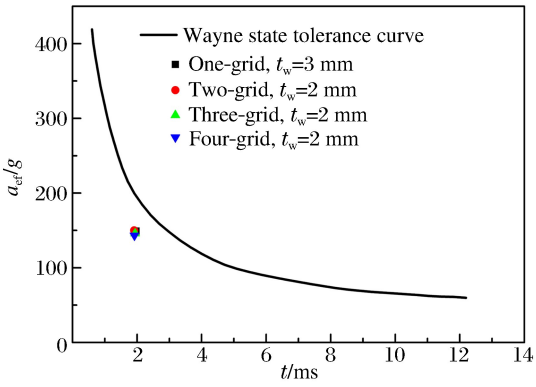


图 12 人体头部对冲击载荷的忍受度

Fig. 12 Tolerance of human's head under impact loading

表 1　4 种工况下人体头部的最大减速度

Table 1　Maximum deceleration for human's head in four cases

防阻块类型	t_{ac}/ms	a_{ef}/g	防阻块类型	t_{ac}/ms	a_{ef}/g
单网格，$t_w=3$ mm	1.97	149	三网格，$t_w=2$ mm	1.94	146
双网格，$t_w=2$ mm	1.91	150	四网格，$t_w=2$ mm	1.92	143

4　结　论

利用有限元分析软件 ABAQUS，建立了多网格防阻块护栏系统受质量块冲击的有限元模型，计算了质量块冲击多网格防阻块波形梁护栏的冲击响应，分析比较了不同壁厚防阻块下，多网格护栏系统受质量块冲击下响应过程的差异和能量吸收情况。

(1) 在冲击载荷作用下，波形梁发生明显弯曲变形，防阻块受到挤压被压扁且不同网格数量的防阻块的变形模式不同，立柱发生轻微摇晃，变形不明显。

(2) 冲击过程中，质量块的初始动能主要转化为护栏系统各部分的内能、动能以及质量块的剩余动能。壁厚 2 mm 的双网格防阻块最终内能质量比明显高于其他情形，说明冲击过程中，壁厚 2 mm 的双网格防阻块单位质量能量吸收能力最强。

(3) 质量块加速度在撞击初始急剧增加达到峰值后迅速减小，直至到零。根据 WSTC 曲线，模拟工况下，冲击引起的有效减速度均在人体头部忍受安全范围内。

(4) 通过比较质量块速度、加速度及防阻块内能的变化情况，发现壁厚 2 mm 双网格防阻块在受质量块冲击的过程中，变形程度大，单位质量能量吸收效率相对最好，其质量块加速度峰值比壁厚 3 mm 单网格防阻块情形小约 47.6%，更有利于乘员安全。

参考文献：

[1] 雷正保. 大力开展半刚性护栏防撞新机理的研究[J]. 振动与冲击，2002，21(1)：1-6.
LEI Zhengbao. Research on the new mechanism of collision protection for semi-rigid fences[J]. Journal of Vibration and Shock, 2002, 21(1): 1-6.

[2] 余同希. 利用金属塑性变形原理的碰撞能量吸收装置[J]. 力学进展，1986，16(1)：28-39.
YU Tongxi. Impact energy absorbing devices based upon the plastic deformation of metallic elements[J]. Advances in Mechanics, 1986, 16(1): 28-39.

[3] 余同希. 结构的耐撞性和能量吸收装置[J]. 力学与实践，1985，7(3)：2-9.
YU Tongxi. Structural crashworthiness and energy absorber[J]. Mechanics in Engineering, 1985, 7(3): 2-9.

[4] YU Tongxi, XIANG Yanfei, WANG Min, et al. Key performance indicators of tubes used as energy absorbers[C]// AEPA2014. Gaoxiong, Taiwan, 2014.

[5] 沈新普，杨璐，郭丽丽，等. 半刚性护栏受冲击载荷时力学行为数值模拟[J]. 安全与环境学报，2008，8(1)：134-137.
SHEN Xinpu, YANG Lu, GUO Lili, et al. Numerical simulation of effect of impact on mechanical behavior of strong guardrail system[J]. Journal of Safety and Environment, 2008, 8(1): 134-137.

[6] 杜洋，黄小清，汤立群. 半刚性护栏系统模型冲击实验研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版)，2003，31(12)：66-70.
DU Yang, HUANG Xiaoqing, TANG Liqun. Impact experiment of semi-rigid guardrail system model[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2003, 31(12): 66-70.

[7] 张科，唐志平. TiNi 柱壳在不同约束下的横向冲击实验[J]. 爆炸与冲击，2015，35(3)：296-303.
ZHANG Ke, TANG Zhiping. Experimental study of TiNi tubes under radial impact with and without lateral constraint[J]. Explosion and Shock Waves, 2015, 35(3): 296-303.

[8] 张晓晴，黄小清，汤立群. 三跨缩比护栏系统冲击动力响应的有限元分析[J]. 华南理工大学学报(自然科学版)，2005，33(10)：67-71.
ZHANG Xiaoqing, HUANG Xiaoqing, TANG Liqun. Finite element analysis of dynamic response of three-span

scaled-down guardrail system under impact loading[J]. Journal of South China University of Technology (Nature Science Edition), 2005,33(10):67-71.

[9] 付锐,魏朗.汽车碰撞数值模拟中应变率效应问题的讨论[J].中国公路学报,1999(3):117-121.
FU Rui, WEI Lang. Discussion on strain rate effect in numerical simulation of vehicle crash[J]. China Journal of Highway and Transport, 1999(3):117-121.

[10] BAROUTAJI A, GILCHRIST M D, OLABI A G. Quasi-static,impact and energy absorption of internally nested tubes subjected to lateral loading[J]. Thin-Walled Structures, 2016,98:337-350.

[11] ROUZEGAR J, ASSAEE H, NIKNEJAD A, et al. Geometrical discontinuities effects on lateral crushing and energy absorption of tubular structures[J]. Materials and Design, 2015,65(65):343-359.

[12] 交通部公路科学研究所.JTJ074—94 高速公路交通安全设施设计及施工技术规范[S].北京:人民交通出版社,1994.

[13] MELLANDER H. HIC: the head injury criterion[J]. Acta Neurochirurgica Supplement (Wien), 1986,36:18-20.

Response of multi-grid obstruction block guardrail system under impact loading

XU Ting, MIAO Fuxing, ZHOU Fenghua, YANG Liming

(*School of Mechanical Engineering and Mechanics, Ningbo University, Ningbo* 315211, *Zhejiang, China*)

Abstract: The thin-wall obstruction block structure plays a significant role in energy absorbing guardrail systems. Research on the methods to improve the guardrail protection capability and minimize the passenger injury becomes increasingly more important. In this paper, using the commercial finite element software ABAQUS, we investigated the response of the single-span multi-grid obstruction block guardrail systems with three different wall thicknesses crashed by a mass block. The simulation results prove that the two-grid obstruction block with a gauge of 2 mm exhibits the best final internal energy mass ratio and energy absorbing density. In addition, the resultant acceleration peak of the 2 mm two-grid model is about 47.6% smaller than that of the 3 mm one-grid model, indicating a better passenger safety performance. According to the Wayne state tolerance curve (WSTC), the deceleration of a human's head is within the safety range for simulation cases. This study provides design guidelines for enhancing a guardrail system's impact resistant ability and safety grade.

Keywords: impact response; finite element analysis; multi-grid obstruction block; guardrail system

(责任编辑 王玉锋)