

基于 Voronoi 算法的一种新型多孔夹层结构参数 优化和耐撞性研究*

PARAMETER OPTIMIZATION AND CRASHWORTHINESS STUDY OF A NOVEL POROUS SANDWICH STRUCTURE BASED ON VORONOI ALGORITHM

王 帅^{**1,2} 孙 楠³ 陈 卓³ 周开发³

(1. 重庆工程职业技术学院 智能制造与交通学院, 重庆 402260)

(2. 重庆交通大学 航空学院, 重庆 400074)

(3. 重庆交通大学 土木工程学院, 重庆 400074)

WANG Shuai^{1,2} SUN Nan³ CHEN Zhuo³ ZHOU KaiFa³

(1. School of Intelligent Manufacturing and Transportation, Chongqing Vocational Institute of Engineering, Chongqing 402260, China)

(2. School of Aeronautics, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

(3. School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

摘要 提高防撞缓冲车(Truck Mounted Attenuators, TMAs)耐撞性成为道路安全防护的重要途径,借助 Voronoi 算法生成了一种新型多孔结构。首先,通过研究该结构的种子点数 n 、孔隙率 ρ 和不规则度 α 对结构几何拓扑影响关系,建立了材料比吸能与三个参数之间的数学模型。然后,借助有限元方法分析了新结构的能量吸收,证实了该数学模型的可靠性,利用正交试验确定最优结构参数。最后,将新型多孔结构作为夹层填充到 TMAs 防撞缓冲车中,探究了正碰、侧碰和斜碰三种工况下车辆耐撞性。研究发现,新型多孔结构能够有效降低峰值碰撞力,能量吸收性能远远超过传统 TMAs 和圆筒夹层 TMAs,能够有效保护被撞车辆和驾驶人员安全。

关键词 Voronoi 算法 多孔结构 夹层结构 参数优化 耐撞性

中图分类号 TG146.2

Abstract The enhancement of truck mounted attenuators (TMAs) crashworthiness is an important way to protect vehicle safety. A new porous structure was generated by Voronoi algorithm. Firstly, the influence of the parameter, the seed number n , porosity of the structure ρ and irregularity α of porous structure on geometric topology was studied. The mathematical model between the specific energy absorption and the three parameters was established. Then, by the finite element method, the energy absorption of the new structure was analyzed, and the reliability of the mathematical model was confirmed. The optimal structural parameters were determined by orthogonal experiment. Finally, the new porous structure was filled into the TMAs as a sandwich, and the crashworthiness of the vehicle under three working conditions (forward collision, side collision and oblique collision) was discussed. It is found that the new porous structure can effectively reduce the peak impact force, and its energy absorption performance is far better than that of traditional TMAs and cylindrical sandwich TMAs, which can effectively protect the safety of crashed vehicles and drivers.

Key words Voronoi algorithm; Porous structure; Sandwich structure; Parameter optimization; Crashworthiness

Corresponding author: WANG Shuai, E-mail: ws1593500427@163.com, Fax: +86-23-85553001

The project supported by the Natural Science Foundation of Chongqing (general project) (No. cstc2019jcyj-msxmX0516), and the Scientific and Technological Research Program of Chongqing Municipal Education Commission (key) (No. KJZD-K201905701).

Manuscript received 20220803, in revised form 20220809.

* 20220803 收到初稿, 20220809 收到修改稿。重庆市自然科学基金(面上项目)(cstc2019jcyj-msxmX0516), 重庆市教委科技计划项目(重点)(KJZD-K201905701)资助。

** 王 帅, 男, 1987 年生, 河南南阳人, 蒙古族, 重庆工程职业技术学院智能制造与交通学院副教授, 硕士, 主要研究方向为机械设计和力学超材料等。

0 引言

截至2021年底,我国机动车保有量已达3.95亿辆。随着车辆的增多,交通安全面临的压力也越来越大。公路沿线的工作区域一直是事故多发段,其伤亡率与设置在工作区域前的防撞缓冲车(Truck Mounted Attenuators, TMAs)息息相关。TMAs装置(图1)通常由一个防撞缓冲垫和一个对接站组成^[1]。在一些国家, TMAs装置尚未采取统一的制定策略,部分国家采用的倾斜版 TMAs取得了良好的防撞效果^[2],也有一些管状折叠的 TMAs装置^[3]被设计,来保证车辆高速行驶下的安全停靠。此外,还有一种新型的连接附件被设计运用在 TMAs装置上[图1(c)]^[4],以此来满足车辆碰撞的安全标准。

与没有 TMAs装置的情况相比, TMAs装置可以将事故损失费用降低。然而,传统的 TMAs[图1(a)],可能对失控车辆内的乘员造成严重的伤害,不足以提供足够的吸能缓冲作用,并且笨重。因此,设计出具有良好比吸能的新型 TMAs装置[图1(b)]成为研究热点。近年来,国内外对于 TMAs装置的优化研究,主要通过以下两种途径:①设计一种新型 TMAs装置中的防撞缓冲垫,或调整和优化 TMAs的整体几何形式和夹层结构;②对 TMAs装置上导向标志架进行优化设计。除了对 TMAs结构上的优化设计,还有一部分学者对 TMAs装置如何更加有效地警醒驾驶员进行研究。为了降低碰撞的风险及事故的严重程度, TMAs上通常配有大型电子箭头反光标志牌。研究发现,琥珀色、白色、绿色等颜色组合的标志牌对道路车辆的引导能力差异不大,指示标记牌的可见性与箭头的识别性大致成反比关系^[5]。反光标志牌的优化设计,可以最大限度地降低作业区对交通流量的影响,并且提高对施工人员及设备的有效保护。

多孔结构作为典型吸能结构,具有较高的强度、较好的连通性以及良好的能量吸收能力^[6-7],被广泛地应用在航空保护壳、汽车减振件和船舶内部构架等领域中^[8],近年来, Voronoi算法用于3D打印生成仿生人工骨小梁^[9-10],该算法可以有效重构多孔结构,做到结构轻量化设计。研究发现, Voronoi算法生产的结构与松质骨小梁结构类似,多种孔径随机分布,理论上可以较好地改良钛合金多孔结构的骨整合性能,有利于细胞的增殖。Voronoi算法多应用于设计不规则结构^[11]、表现结构的微观形态^[12]、模拟结构的力学响应^[13]及破坏过程^[14]等方面。其中, Voronoi算法可以通过控制结构的不规则程度、相对密度、孔隙率等,对结构进行几何重构,以此来影响结构的整体刚度、等效泊松比及剪切模量^[15-16]等。此外,与此同时, Voronoi算法还

可以有效地减少薄壳物体的3D打印材料的消耗,降低成本^[17]。

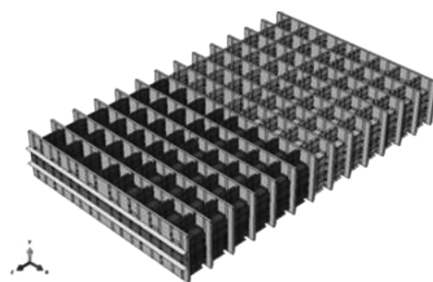
目前,对 TMAs装置防撞缓冲垫内部的夹层结构性能系统深入的研究还相对较少。传统的 TMAs内部夹层结构存在比吸能低、防撞性差等问题,并不利于保障施工人员以及失控车辆的安全。因此,本研究拟基于 Voronoi算法设计一种新型不规则夹层结构,应用于 TMAs装置中,以期解决传统 TMAs装置比吸能低、防撞性差等问题。



(a) 传统TMAs装置
(a) Traditional TMAs device



(b) 新型TMAs装置
(b) New TMAs device



(c) L型结构在传统TMAs装置夹层中的应用
(c) Application of L-shaped structures in the mezzanine of conventional TMAs devices

图1 高速公路 TMAs 装置

Fig. 1 Highway TMAs devices

1 模型与方法

1.1 几何模型

众所周知,蜂窝模型是由正六边形周期排列形成的,大量文献中使用得比较多的也是这种规则的正六边形蜂窝结构。由于各种缺陷导致的不规则才是自然界的常态,因此研究不规则的蜂窝模型是很有意义的。

为此,本文使用了基于 Voronoi 图(图 2)的模型建立方法建立的不规则蜂窝结构作为防撞垫夹层。

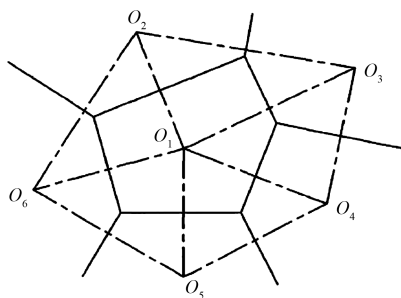
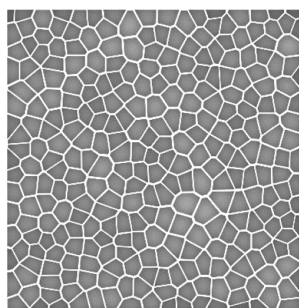


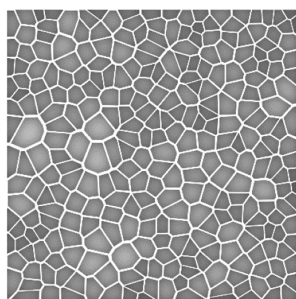
图 2 Voronoi 单元

Fig. 2 Voronoi unit

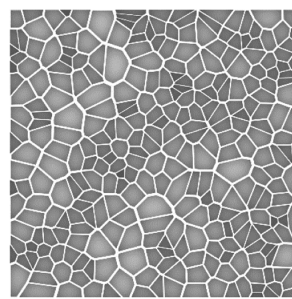
$O_1 \sim O_6$ 称为种子点,每一个种子点对应一个 Voronoi 单元。Voronoi 图的几何意义是单元区域内部



(a) $\alpha = 0.3$



(b) $\alpha = 0.5$



(c) $\alpha = 0.7$

图 3 不同不规则度 α 的 Voronoi 结构

Fig. 3 Voronoi structure of different irregularities α

根据本文研究发现,当不规则度 α 为 0 时,模型为标准的六边形蜂窝结构,随着不规则度逐渐增加,模型孔隙随机度增大(图 4),直到不规则度为 1,模型失效。因此, α 的范围选取为 0.3~0.7,步长为 0.1,做初步研究。而根据余同希^[18]所述,多胞结构孔隙率 ρ 一般为 0.1~0.3,考虑到多孔结构固体材料不超过结构总体积 30%的规定,因此本研究孔隙率选取为 0.7~0.9,步长为 0.05。而种子数量过多或过少,均会影响模型结构的可变化性。因此,选取适当的种子数量也尤为重要。初步设定种子数量 n 的范围为 100~300,步长为 50。

1.2 材料参数

根据国家标准 GB 11567—2017 规定,按照防撞垫所用的钢构件宜采用碳素结构钢,因此,本文选用结构钢材,具体材料参数见表 1。同时,由于本文所研究的夹层结构在大变形受力后往往进入塑性阶段,因此,本文选用双线性随动强化本构模型。

1.3 网格及加载

使用 Hypermesh 软件对上述模型进行网格划分。其中 Voronoi 结构采用四面体网格划分,单元使用 Belytschko-Tsay 单元。上下刚性板采用六面体网格进

的所有点到该单元对应的种子点的距离比它们到其他单元的种子点的距离都要近,因此垂直平分线便是单元的边界。常用于地标选址优化等领域,但在本文中并不使用它的几何意义,只是作为一个快速生成一组不规则多边形的方法来使用。因此,建立不规则蜂窝模型的方法步骤如下:①在指定边界内生成指定数量的随机种子点;②使用算法生成这组种子点的 Voronoi 图;③修剪边界,生成 Voronoi 结构。

本文的模型建立方法是:首先,利用 Python 生成指定边界,指定种子数量为 n 、不规则度为 α 的二维 Voronoi 图;然后,联合 Grasshopper 软件,进行边界修剪,拉伸为三维结构;最终,导入到 Ls-Dyna 中进行仿真计算。图 3 给出了 n 为 300,不规则度分别为 0.3、0.5 和 0.7 的 3 个模型图。

行划分,单位类型选用 Ls-Dyna 软件默认的实体单元。网格划分示意图见图 5,最小单元尺寸为 2 mm。以 $\alpha = 0.4$ 、 $\rho = 0.8$ 、 $n = 300$ 时的 Voronoi 夹层结构顶面受压为例,网格划分的总单元数为 66 951 个,节点总数为 17 311 个。本文对 Voronoi 夹层结构静力学仿真时,设置顶面压缩与侧向压缩两种加载方式,在顶面准静态压缩试验时,在每个结构的上下表面各设置一块尺寸为 50 mm×4 mm×4 mm 的刚性板,便于初始条件与边界条件的施加。本文参考准静态压缩试验标准,使上顶部向下压缩 10 mm 的位移,下底板采用固定约束。图 6 是对应的 Voronoi 结构为例,其在顶面压缩时的加载示意图。在进行侧向准静态压缩试验时,同样在每个结构的上下表面各放置一块尺寸为 50 mm×4 mm×4 mm 的刚性板,其余的施加条件不变,加载方式及约束见图 6。

1.4 接触关系

本文考虑了曲面结构在受两种加载方式时的接触关系,以提高结构在准静态压缩仿真的精度。根据结构的几何特点以及有关准静态压缩试验仿真要求,确定各几何体的接触关系,如表 2 所示。

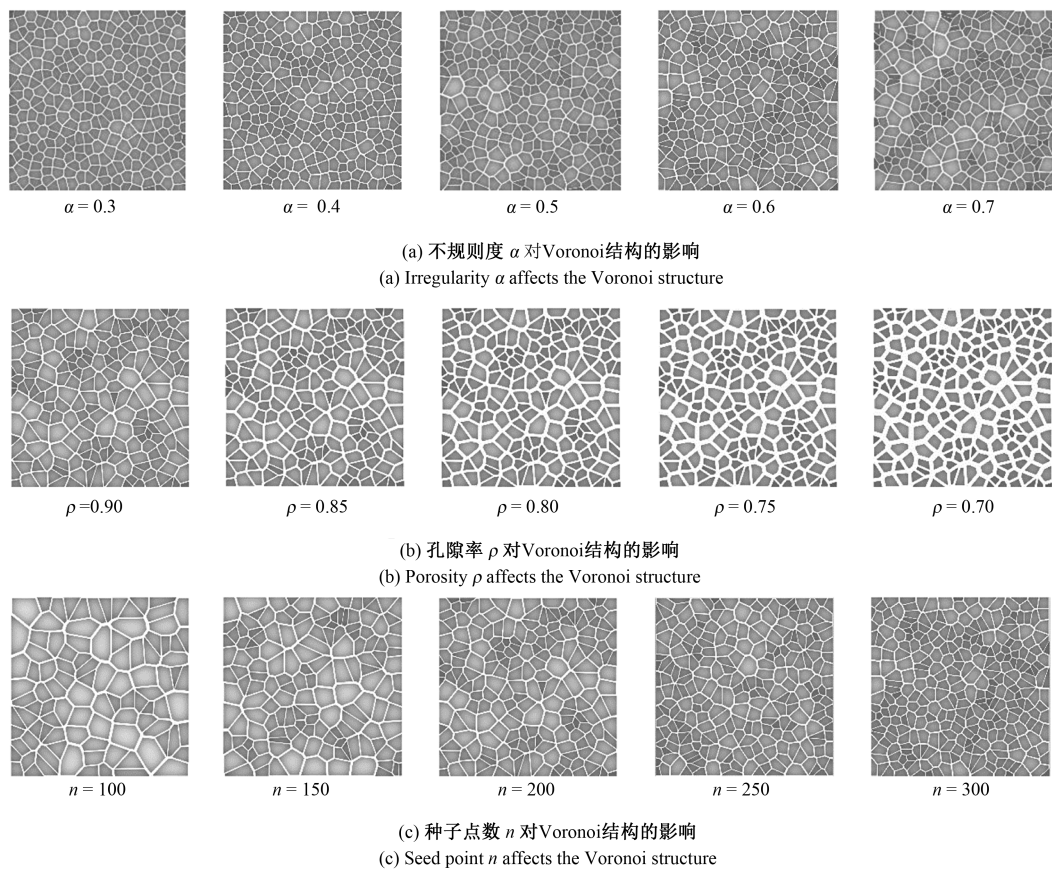


图 4 数学参数对 Voronoi 结构的影响

Fig. 4 Influence of mathematical parameters on the Voronoi structure

表 1 材料参数

Tab. 1 Material parameters

密度 Density $\rho / (\text{kg}/\text{m}^3)$	弹性模量 Elastic modulus/ MPa	屈服强度 Yield strength R_e / MPa	切线模量 Tangent modulus E_t / MPa	泊松比 Poisson's ratio ν	失效应变 Failure strain ε_f
7 850	210 000	235	2 100	0.3	0.6

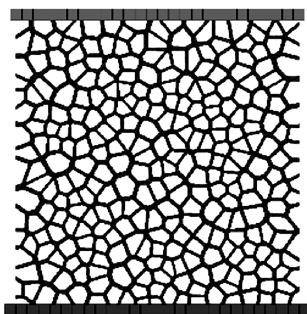


图 5 Voronoi 夹层结构网格划分

Fig. 5 Meshing of the Voronoi sandwich structure

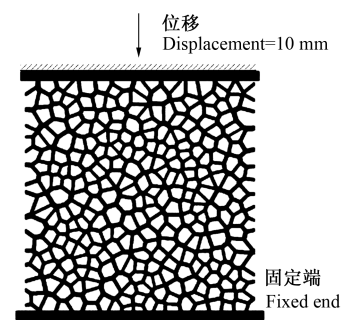


图 6 Voronoi 夹层结构加载方式

Fig. 6 Loading way of the Voronoi sandwich structure

2 结果与讨论

准静态试验:本文获取仿真结果后,首先对模型的整体能量关系进行分析,检验其是否为准静态过程。根据能量平衡关系

$$E_T = E_I + E_V + E_{FD} + E_{KE} - E_W \quad (1)$$

式中, E_T 为压缩试验系统总动能,在仿真过程中为定值; E_I 为系统内能,包括塑性应变能与弹性应变能; E_V 为黏性力学机制所耗散的能量; E_{FD} 为摩擦所耗散的能量; E_{KE} 为系统动能; E_W 为外力所做的功。在准静态压缩试验的过程中,由于各个模型的加载速度非常小,因此动能非常小。由于结构在压缩的过程中发生

表 2 各部件之间接触关系
Tab. 2 Contact relation between the components

名称 Name	接触类型 Contact type	关键字 Keyword
上顶板与曲面夹层之间接触 Contact between the top plate and the sandwich	面面接触 Face to face contact	* CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE
下底板与曲面夹层之间接触 Contact between the bottom plate and the sandwich	面面接触 Face to face contact	* CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE
夹层曲面自接触 Sandwich surface self-contact	自接触 Self-contact	* CONTACT_AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE

大变形,在极小曲面结构中形成了多个局部塑性铰,因此外力功几乎等于模型内能。根据相关文献,动能一般不超过内能的 5%。本文所计算的顶面准静态压缩模型与侧向准静态压缩模型的动能均在内能的 2% 以下。

2.1 等效弹性模量

本文建立了种子数量为 300,孔隙率为 0.8,不规

则度为 0.3、0.4、0.5、0.6、0.7 的 Voronoi 夹层结构以及规则的六面体蜂窝结构,分别对其进行正、侧向仿真计算。通过对应力和位移线性拟合,得到其平均等效弹性模量,并进行比较。为了消除材料本身弹性模量的影响,将等效弹性模量除以模型弹性模量,得到的结果如表 3 所示。

表 3 不同不规则度模型弹性模量值
Tab. 3 Elastic modulus values for different irregularity models

不规则度 Irregularity	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	传统蜂窝 Traditional honeycomb
顶面平均弹性模量 $E_x^*/(10^{12} \text{ Pa})$ Top surface average elastic modulus	0.123 9	0.122 1	0.124 9	0.110 0	0.114 1	0.085 8
侧向平均弹性模量 $E_y^*/(10^{12} \text{ Pa})$ Lateral average elastic modulus	0.120 9	0.126 0	0.116 0	0.116 4	0.100 6	0.076 4
E_x^*/E_y^*	1.02	0.97	1.08	0.94	1.01	1.12

由表 3 可以看出,Voronoi 结构模型顶面和侧向的弹性模量比值都基本为 1,可以认为该材料是各向同性。这说明此结构既可以承受侧向压力,又可以承受顶面的压力,无论哪个方向施加压力,结构变形无差异。而传统的规则六边形蜂窝结构两个方向的弹性模量比值与 1 相差较远,误差达到了 10%以上,说明规则六边形蜂窝结构呈现各向异性。然而,从几何结构中也可以看出,规则六边形蜂窝结构在 x 与 y 方向上存在着几何不对称性,两个方向受力变形时会表现出差异性。其次,传统蜂窝结构与 Voronoi 结构相比,弹性模量减小了 20%~30%,因此将蜂窝结构不规则化的设计方法,可以极大优化结构性能,使其表现出传统结构无法具有的性能。

2.2 位移与应力

由第 2.1 节分析可以得知,Voronoi 夹层结构可以看作各向同性材料,因此仅对顶面压缩情况下的仿真结果进行分析。图 7 展示的是不同不规则度下 Voronoi 结构静力学仿真计算的等效应力(von Mises)以及等效塑性应变云图。受到不规则度变化的影响,结构受力以后应力分布趋势为: $\alpha=0.3$ 时应力分布呈现出“X”形剪切带; $\alpha=0.4$ 和 0.5 时应力分布呈现

“V”形剪切带; $\alpha=0.6$ 和 0.7 时应力分布呈现“45°”剪切带三种不同的变形模式。结合图 8 可知, $\alpha=0.3$ 时 Voronoi 夹层结构位移变化较小,孔径大体较为均匀,因此在纵向压缩时产生了“X”形剪切带。而随着不规则度增加, $\alpha=0.4$ 开始,剪切带逐渐变化成了“V”形。而 $\alpha=0.6、0.7$ 时,剪切带已经变成了“斜 45°”。这是由于结构孔隙大小不一,在孔隙率较小处容易产生应力集中现象,从而剪切带沿着较小的孔隙分布。这种情况下,结构容易产生滑移失稳,并不利于结构各个部分发生完全变形。而 $\alpha=0.4、0.5$ 左右时,结构整体变化较为均匀,应力分布呈现层级分布,有利于结构在动态载荷下应力波的传递。

图 8 展示的是 5 种不同的 Voronoi 结构在受到顶面压力时的力-位移曲线。结构在受到顶面位移后开始变形,变形过程呈现三个阶段:第一阶段当位移从 0~1 mm 时,结构反力逐渐增大,位移达到 1 mm 时先达到一个初始峰值;第二阶段 1~7 mm 时,反力趋近于平缓,随后缓慢增加;第三阶段位移从 7~10 mm 增加时,反力突然下降。三个阶段反力的变化趋势说明结构在加载初期,结构处于弹性阶段,反力随位移增加而增加;达到初始峰值后,开始屈服;随着进一步的加载,

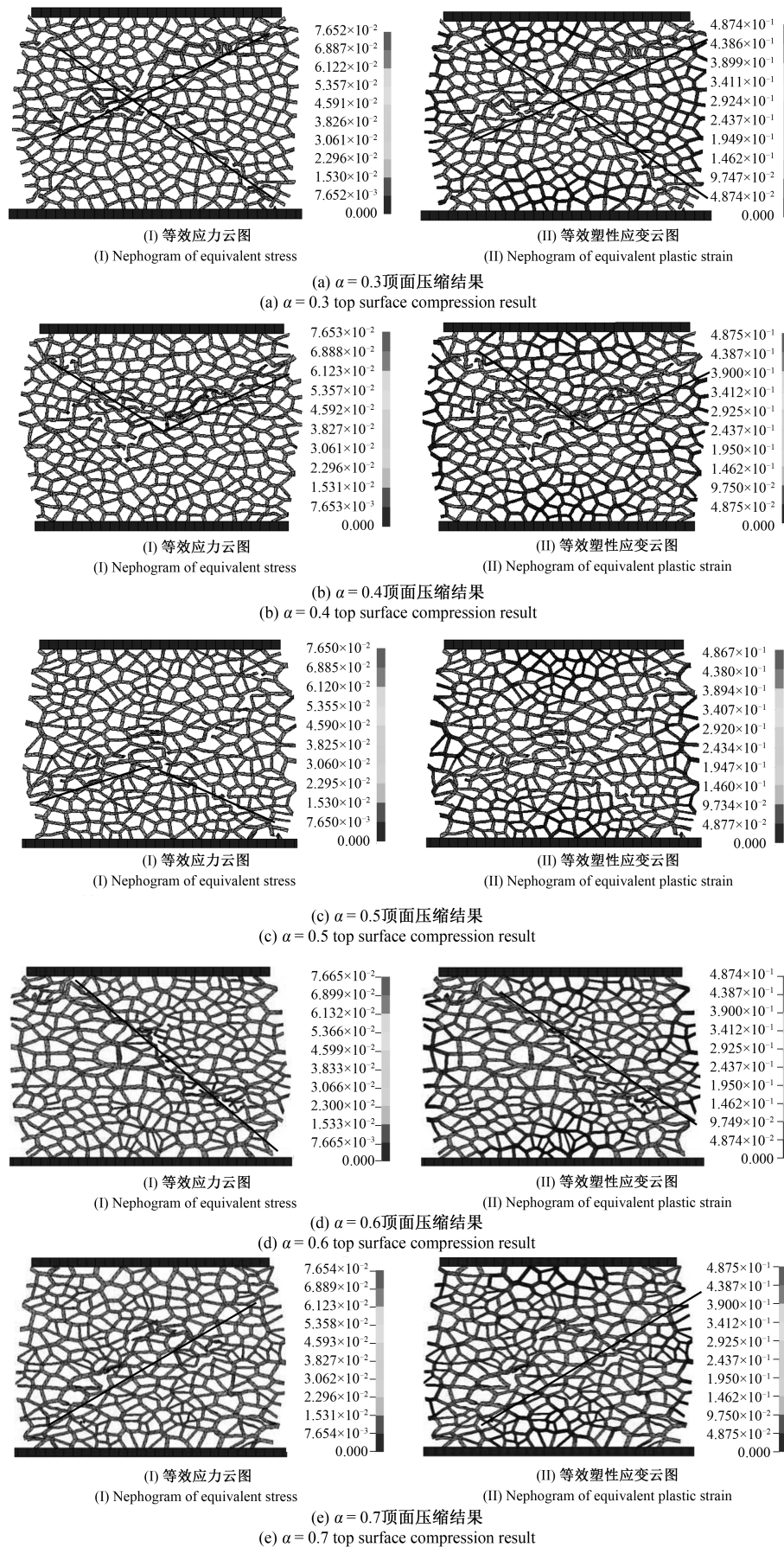


图 7 不规则度对应力的影响

Fig. 7 Irregularity effect on the stress

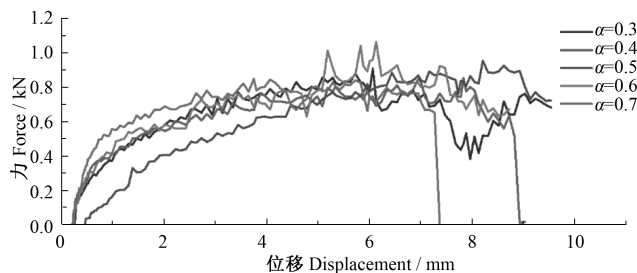


图 8 力-位移曲线

Fig. 8 Force-displacement curve

结构某些局部区域发生屈服,形成塑性铰加速结构发生大变形,直至达到材料强度极限发生断裂破坏或者结构失稳而破坏。就 5 个结构而言, $\alpha=0.3$ 时,结构在位移 8 mm 处突然下降,可以得知结构此时发生了“X”形剪切破坏。 $\alpha=0.4$ 和 0.7 时,结构在位移 7 mm 和 9 mm 处,反力突然骤减,结合应力云图可以得知,此时结构发生失稳。而 $\alpha=0.5$ 时,塑性最好,说明结构逐级压溃,承载能力较优。

同时,本文以 Voronoi 结构受顶面荷载作用下的比吸能(单位质量结构在静态压缩荷载下所吸收的能量)作为评价指标,以评定单周期极小曲面结构吸能能力。首先,根据结构的力-位移曲线图计算各结构力-位移曲线的线下面积,该面积即为夹层结构受到压缩时所吸收的能量:

$$E = \int_0^s F ds \quad (2)$$

式中, E 为总吸能; s 为结构位移; F 为外荷载。

其次,将各结构吸收的外荷载所做的功分摊到结构的质量上,即为该结构的比吸能 S_{EA} ,可表达为

$$S_{EA} = \frac{E}{M} \quad (3)$$

图 9 所示为对应的比吸能计算结果。不规则度为 0.6 时,结构的比吸能高于其他四种结构,数值达到 1 320.6 kJ/kg; $\alpha=0.3$ 、0.4 和 0.5 时结构在受到侧向压缩时的比吸能相当, $\alpha=0.7$ 时结构的比吸能相较于其他四种结构较小。结合图 7 中的等效塑性应变云图可以看出, $\alpha=0.7$ 时结构在受压的过程中,发生塑性变形的区域仅在“45°”剪切带处发生,塑性流动区域较小,吸能效果不佳。而对于 $\alpha=0.6$ 的结构,尽管其比吸能远高于其他的结构,但它由于压缩过程中失稳,在危险截面发生剪切滑移,进而产生较大的塑性变形,使得其比吸能较大。在工程上,这是一种不被建议的力学变形模式。相反, $\alpha=0.4$ 和 0.5 时结构在受压的过程中,左右两侧同时发生挤压塑性流动,导致材料呈现“V”形集中,材料得到强化,因此能量吸收并不很大。

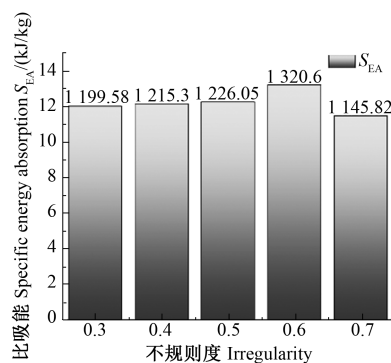


图 9 各结构压缩时比吸能

Fig. 9 Specific energy absorption of each structure

2.3 结构确定

为了确定最后参数,本次设计中选取了 3 个参数变量,每个参数有 5 个取值,如果要完整研究这些参数的影响,需要做 5^3 试验,试验规模太大,这在一定程度上是难以实现的。事实上这种多因素多水平的试验在科学研究中是十分常见的,因此采用正交试验法,用较少的试验次数得到较好的试验结果。本文研究的问题是 3 因素 5 水平试验,因此选用 L25 正交表,见表 4。

根据前文的计算,先对不规则度 α 与孔隙率 ρ 进行拟合。得出关于 S_{EA} 值的 25 个离散的点,见图 10 中的黑点。想要根据离散点得出其局部最优解,可以将已知的离散点拟合出一条曲线,根据拟合曲线得出其在不同数值下 S_{EA} 值的大小,从而求出其局部最优解。

拟合曲线采用 Matlab 中的 Custom Equation 即使用 $z=f(x,y)$ 的函数拟合出一条曲线,其初步公式为 $z=a+b\sin(m\pi xy)+c+\exp(-wy^2)$ 。经过拟合最终给出一个适合离散点的函数系数值,从而推出其他点的取值。采用 Custom Equation 方法拟合的残差平方和 $S_{SE}=8.323$ 、决定系数 $R_{square}=0.9985$ 。此种方案的 S_{SE} 值与 R 值说明拟合很好,数据拟合曲面见图 10。 S_{SE} 值虽然较大,但其受多个因素的影响,表现曲线拟合程度的好坏没有 R 值的决定性强。此条件下所拟合出的函数关系式为

$$S_{EA} = 13.59 + 2.783 \times \sin(8.458x\pi x) + (-10.44)\exp[-(-7.575y)^2] \quad (4)$$

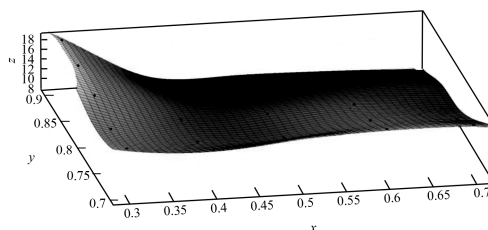


图 10 数据拟合结果

Fig. 10 Data fitting results

表 4 正交试验

Tab. 4 Orthogonal experiment

序号 Number	不规则度 Irregularity α	孔隙率 Porosity ρ	种子数 Seed number n	序号 Number	不规则度 Irregularity α	孔隙率 Porosity ρ	种子数 Seed number n
1	0.3	0.90	100	14	0.5	0.75	300
2	0.3	0.85	200	15	0.5	0.70	150
3	0.3	0.80	300	16	0.6	0.90	200
4	0.3	0.75	150	17	0.6	0.85	300
5	0.3	0.70	250	18	0.6	0.80	150
6	0.4	0.90	300	19	0.6	0.75	250
7	0.4	0.85	150	20	0.6	0.70	100
8	0.4	0.80	250	21	0.7	0.90	150
9	0.4	0.75	100	22	0.7	0.85	250
10	0.4	0.70	200	23	0.7	0.80	100
11	0.5	0.90	250	24	0.7	0.75	200
12	0.5	0.85	100	25	0.7	0.70	300
13	0.5	0.80	200				

通过代入不规则度 α 与孔隙率 ρ 可得出最终的最优解为不规则度为 0.54 与孔隙率为 0.70 取值下的 $S_{EA} = 16.3729$, 与有限元模拟结果基本吻合。

通过 Matlab 拟合出的图像可以看出, S_{EA} 值的大致取值在 $\alpha = 0.55$ (图 10 中 x 轴)、 $\rho = 0.7$ (图 10 中 y 轴) 附近所对应的比吸能较大, 整体图形呈现阶梯缓慢上升趋势。利用相同的方法对网格数量进行拟合, 最终确定 $\alpha = 0.55$ 、 $\rho = 0.7$ 、 $n = 100$ 时, 对应的 Voronoi 夹层结构比吸能最大、性能最优。

3 TMA 结构碰撞

3.1 模型及加载

为了检验新型 Voronoi 夹层结构的吸能性, 本文选定 $\alpha = 0.55$ 、 $\rho = 0.8$ 、 $n = 100$ 时对应的 Voronoi 夹层结构几何参数作为基本尺寸, 将目前市面上 TMA 结构适当尺寸缩小。由传统长 1 800 mm、宽 1 800 mm、高 500 mm, 简化为新型 Voronoi 夹层结构, 其尺寸设计为长 1 500 mm、宽 1 000 mm、高 300 mm。TMA 框架设计为长 1 540 mm、宽 1 040 mm、高 340 mm, 厚度为 2 mm。其余部件尺寸参考 JTG/T D81—2017, 几何模型如图 11 所示。

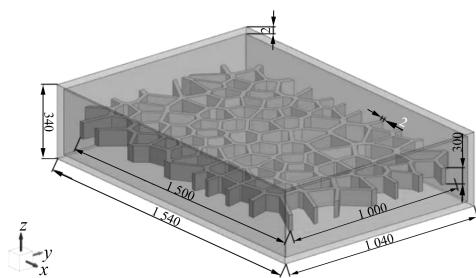


图 11 新型 Voronoi 夹层 TMA 结构三维模型

Fig. 11 A new 3D model of the Voronoi sandwich TMA structure

动车交通安全管理局国家碰撞中心 (NCAC) 建立的车辆模型。单元总数为 25 037。将建立的 Voronoi 三维模型导入 HyperMesh 中划分六面体网格, 所得单元总数为 65 520。TMA 框架采用薄壁金属件, 单元类型采用四边形壳单元, 总单元数为 29 399。而对于车辆有限元仿真模型, 车身和防撞垫结构同样主要是薄壁金属件, 单元类型以四边形壳单元为主。现控制四边形单元翘曲度小于 15° , 长宽比小于 4, 最大角大于 135° , 最小角大于 45° , 控制三角形单元数量在 5% 以内, 最小单元长度在 5 mm 左右, 划分网格见图 12。材料参数同样采用表 1 所列数据。

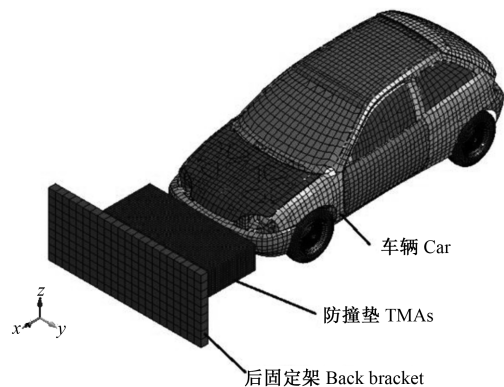


图 12 车辆-TMA 碰撞系统有限元模型

Fig. 12 Finite element model of vehicle-TMA collision system

本文建立的汽车-防撞垫碰撞系统选用 1.5 t 小型客车, 分别进行正碰、偏碰、斜碰, 碰撞速度设定为 60 km/h。后固定架在车辆碰撞时起到支撑作用, 应设置在 TMA 后端, 约束其在 x 、 y 、 z 方向上的位移和转动量均为 0。

为了模拟车辆撞击防撞垫可靠性, 参照相关经验, 对车辆与防撞垫各部件间接触定义见表 5, 各接触面之间的摩擦因数取 0.2。

本次仿真试验中车辆有限元模型采用美国联邦机

表 5 碰撞过程接触关系

Tab. 5 Collision process contact relation

序号 Number	名称 Name	接触类型 Contact type
1	车辆各部件之间的接触 Contact between vehicle components	* CONTACT_AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE
2	TMA 各部件之间的接触 Contact between components of TMAs	* CONTACT_AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE
3	车辆与 TMA 之间的接触 Contact between the vehicle and TMAs	* CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE

3.2 结果与讨论

TMA 结构实车足尺碰撞试验评价标准参照 GB 11567—2017。以正碰条件为例,碰撞总能量为 148 kJ,滑移能和沙漏能均小于 10%,符合碰撞过程工程试验标准,碰撞过程模拟合理,数据可靠。动能呈逐渐减小,但最终未达到 0,见图 13。这是因为车辆在碰撞后发生一定反弹,还保留一定动能。内能逐渐增大,车辆碰撞过程动能不断转化为不可逆的内能,整个过程能量守恒。去除掉滑移能和沙漏能,内能占总初始动能的 95%,说明基于 Voronoi 夹层的 TMA 结构的碰撞吸能作用是非常显著的。

利用 Ls-Prepost 后处理软件,提取车辆-防撞垫碰撞系统的动态变形及加速度变化特征。图 14 展现了车辆正碰、偏碰与斜碰 TMA 结构过程中的结构动态变形响应,可以发现车辆在新型 Voronoi 夹层 TMA 的保护下顺利制动。在碰撞的过程中,TMA 结构均无脱离件或碎片侵入车辆乘员舱,而 TMA 也成功制止了车辆钻入货车底部,发挥缓冲吸能作用。而车辆在

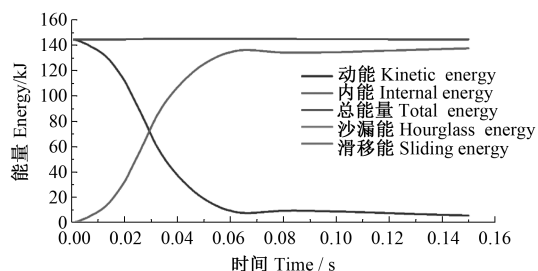


图 13 碰撞系统能量

Fig. 13 Collision system energy

三个角度下碰撞防撞垫后速度发生调转,但没有出现翻车或者骑跨防撞垫的现象,起到了良好制动功能。取车辆质心处加速度,见图 15。三种碰撞角度下的车体横向加速度最大值为 14.36g、12.24g 和 5.27g ($g = 9.8 \text{ m/s}^2$),纵向加速度最大值为 9.68g、11.29g 和 6.65g,均不超过国家标准中要求的 40g 的规定。

根据 NCAC 的标准,车辆峰值碰撞力不得超过 180 kN,而本文设计的防撞垫在三种碰撞条件下均满足此要求,其中碰撞力峰值分别为 174.27、

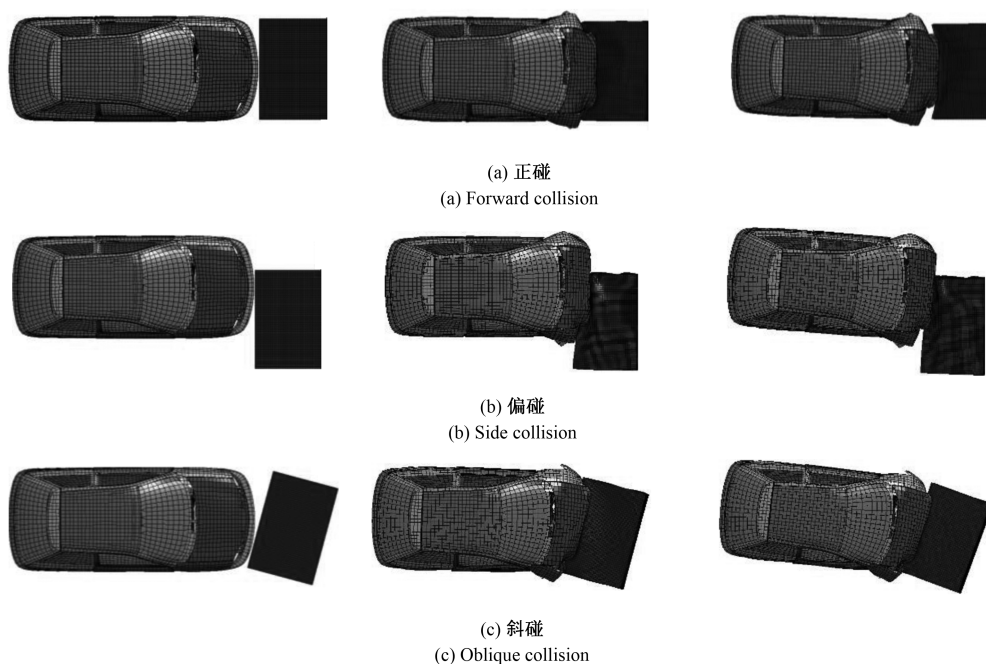
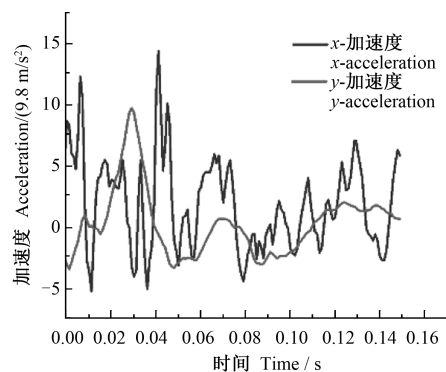
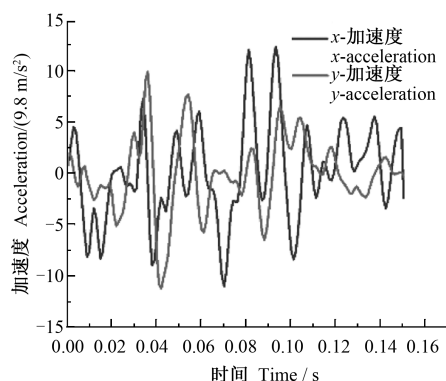


图 14 三种工况下车辆的行驶轨迹及姿态

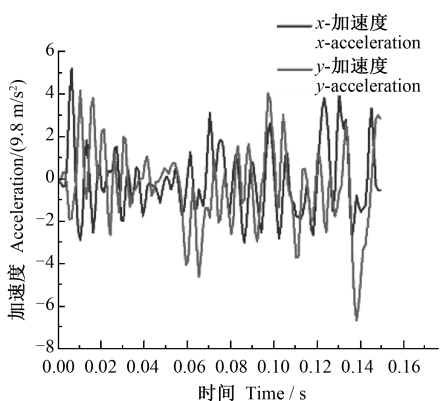
Fig. 14 Vehicle running track and gesture under three working conditions



(a) 正碰横纵方向加速度
(a) Horizontal and vertical acceleration of forward collision



(b) 偏碰横纵方向加速度
(b) Horizontal and vertical acceleration of side collision



(c) 斜碰横纵方向加速度
(c) Horizontal and vertical acceleration of oblique collision

图 15 三种工况下车辆的横纵方向加速度

Fig. 15 Horizontal and vertical acceleration of the vehicle under three conditions

149.23、138.98 kN, 见图 16。由图 16 可以看出, 三种车况下碰撞趋势大体相同, 均是在 0.04 s 左右达到峰值, 此时 TMA 的结构承载能力较高。随后, 碰撞力逐渐下降, 最终趋于平缓, 说明 TMA 结构局部区域发生屈服, 形成了塑性铰加快结构变形。而碰撞力值在 0.1 s 之后达到 0, 说明车辆成功制动, 并且脱离了 TMA 结构。

此外, 选取 TMA 前端节点, 描绘其速度时间变化

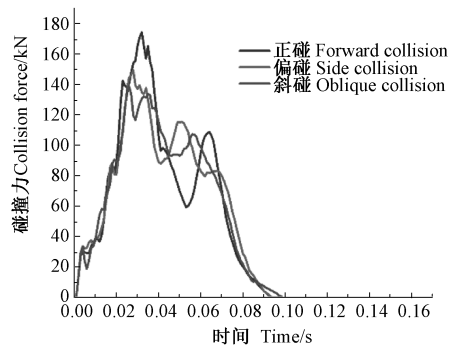


图 16 不同角度下的碰撞力曲线

Fig. 16 Collision force curves at different angles

曲线, 见图 17。由图 17 可以看出, 在 0.04 s 以前, 速度较大, 此时正处于碰撞变形阶段; 而 0.06 s 以后, 碰撞基本完成, 车辆成功制动, 速度趋于 0。而三种条件下的最大速度分别为 1.06、0.85、2.06 m/s, 基本满足国家标准中不大于 2 m/s 的规定。

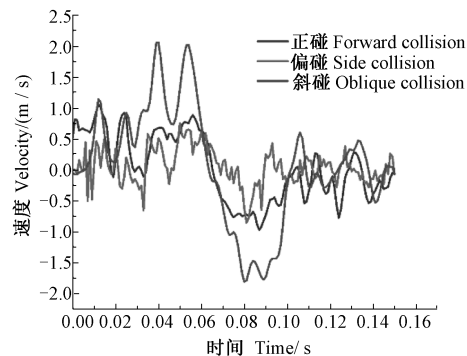


图 17 不同角度下的速度曲线

Fig. 17 Velocity curves at different angles

后处理提取出车辆质心位置前进方向的横纵向加速度、峰值碰撞力以及 TMA 结构最大水平位移, 将传统、圆桶夹层以及 Voronoi 夹层 TMA 结构的加速度、碰撞力以及水平位移数据整理在表 6 中。

对比分析发现, 在碰撞初期, 传统 TMA 结构压缩过程中剧烈震荡, 随着车辆速度的逐渐减小, TMA 结构塑性变形吸能逐渐接近极限, 车辆最终发生驾驶室、乘客室以及车身严重毁坏的现象, 见图 18。并且碰撞结束时, 仍未出现回弹的趋势。而 Voronoi 结构趋于压实, TMA 结构刚度趋于增大, 横、纵向加速度陡然上升至峰值而后回落。相比于传统 TMA, 圆桶夹层将横向加速度降低了 50%。而 Voronoi 夹层又将圆桶夹层的加速度分别降低了 22.46%、37.97% 和 70.98%。从峰值碰撞力对比中可以发现, 传统夹层防撞垫的正碰碰撞力峰值在 212.06 kN 左右, 偏碰碰撞力峰值在 184.99 kN, 斜碰碰撞力峰值在 215.02 kN, 均超过了 NCAC 的标准, 对车体及乘客会造成极大的损伤。而基于 Voronoi 夹层的 TMA 结构有效将正碰峰值力降低至 174.27 kN 左

右,偏碰峰值力降低至 149.23 kN,斜碰峰值力降低至 138.98 kN,极大保障了车体及乘客的安全。与此同时,Voronoi 夹层 TMA 结构平均碰撞力得到了提升,有利于对能量的吸收。而水平位移上相比较,传统 TMA 结构的水平最大位移没有一个条件下符合

国家标准的规定,不仅对车辆自身造成巨大影响,同时超大的水平位移还可能会影响到前方的施工车辆及人员。而 Voronoi 夹层 TMA 结构均满足国家标准的规定。

表 6 传统夹层与 Voronoi 夹层防撞垫对比

Tab. 6 Comparison of the traditional sandwich TMA and the Voronoi sandwich TMA

	横向加速度 Horizontal acceleration/ (9.8 m/s ²)			纵向加速度 Vertical acceleration/ (9.8 m/s ²)		峰值碰撞力 Peak force /kN		水平位移 Horizontal displacement/mm	
	传统 Tradition	圆桶 Drum	Voronoi	传统 Tradition	Voronoi	传统 Tradition	Voronoi	传统 Tradition	Voronoi
正碰 Forward collision	41.73	18.52	14.36	15.13	9.68	212.06	174.27	682.70	135.91
偏碰 Side collision	45.55	19.75	12.25	24.72	11.29	184.99	149.23	546.86	89.91
斜碰 Oblique collision	51.21	18.16	5.27	35.16	6.65	215.02	138.98	514.45	109.29

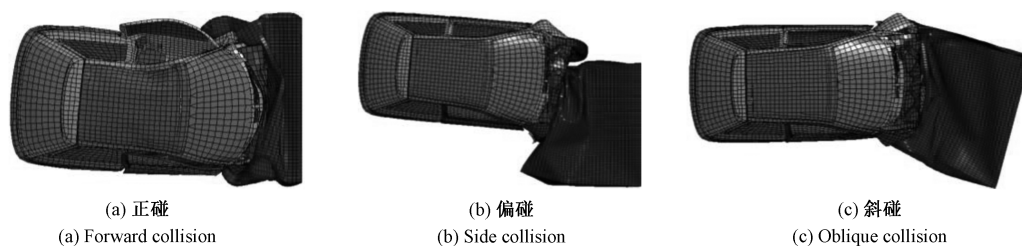


图 18 传统 TMA 不同角度下碰撞车辆姿态

Fig. 18 Collision vehicle's attitude of traditional TMA at different angles

综上,基于 Voronoi 夹层的 TMA 结构的正碰、偏碰、斜碰的阻挡、缓冲等功能评价指标均符合国家标准的要求,有效提高了传统 TMA 的防撞性能与吸能效率,能够为车辆和乘客提供良好的安全保障。

4 结论

本研究先利用 Voronoi 算法设计了一种新型蜂窝结构。研究了种子数量、孔隙率和不规则度三个参数对新型蜂窝结构的影响规律。然后,模拟仿真计算新型蜂窝结构力学性能,结合正交试验方法确定最优结构。最后,将 Voronoi 夹层结构填入 TMA 中,探究了 Voronoi 夹层结构对 TMA 吸能性能的影响。通过 Ls-Dyna 有限元仿真及理论分析,得出以下结论:

1) 正交试验确定了不规则度与孔隙率的双变量数学模型,得到不规则度为 0.54 与孔隙率为 0.70 取值下的 $S_{EA} = 16.3729$,与有限元模拟结果吻合。最终确定 $\alpha = 0.55$, $\rho = 0.7$, $n = 100$ 时,对应的 Voronoi 夹层结构比吸能最大,性能最优。

2) 在实车足尺试验仿真中,Voronoi 夹层 TMA 结构各项标准均满足国家标准的要求,横向与纵向加速度均不超过 $40g$,碰撞过程中无脱离件或碎片侵入驾

驶室,碰撞后速度不超过 2 m/s ,最大位移距离不超过 400 mm 。

3) 与传统 TMA 以及圆桶夹层 TMA 相比,三种碰撞条件下 Voronoi 夹层 TMA 结构峰值碰撞力降低了 20% 以上,有效降低了车辆及人员的损伤,提高了碰撞后车辆动能的吸收效率,并避免了车辆钻入前车底部的现象。

参考文献 (References)

- [1] WASZCZUK K G. Development of efficient finite element model for truck mounted attenuator[M]. Lincoln: The University of Nebraska-Lincoln ProQuest Dissertations Publishing, 2013:4.
- [2] HUMPHREYS J B, SULLIVAN T D. Guidelines for the use of truck-mounted attenuators in work zones [J]. Transportation Research Record, 1991(1304):292-302.
- [3] GAUTAM S. Design of a truck-mounted attenuator with tube folding technology [D]. Birmingham: The University of Alabama at Birmingham, 2019: 13.
- [4] ROHDE J R, REID J D, SICKING D L, et al. Trailer truck-mounted attenuator[J]. International Journal of Crashworthiness, 2008,13(1):77-87.
- [5] ZHANG S, QING Z, BROWN H, et al. Simulator and field study of green lights on truck-mounted attenuators in Missouri during mobile

- operations[J]. *Transportation Research Record*, 2019, 2673(2): 769-778.
- [6] 韩宗政, 段明德, 杨子威, 等. 反 Kagome 点阵结构主参数分析及力学行为[J]. *机械强度*, 2022, 44(2): 440-446.
- HAN ZongZheng, DUAN MingDe, YANG ZiWei, et al. Main parameter analysis and mechanical behavior of anti-Kagome lattice structure[J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2022, 44(2): 440-446 (In Chinese).
- [7] DU Y, LIANG H, XIE D, et al. Design and statistical analysis of irregular porous scaffolds for orthopedic reconstruction based on voronoi tessellation and fabricated via selective laser melting (SLM) [J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2020, 239: 121968.
- [8] 王茂华, 段明德, 杨子威, 等. 基于 TPMS 的多孔结构力学性能研究[J]. *机械强度*, 2022, 44(2): 424-431.
- WANG MaoHua, DUAN MingDe, YANG ZiWei, et al. Study on mechanical properties of porous structures based on TPMS [J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2022, 44(2): 424-431 (In Chinese).
- [9] 张敬乙, 刘俭涛, 高延征, 等. 基于泰森多边形图算法生成人工骨小梁的 3D 打印加工精度及生物力学性能[J]. *中华创伤杂志*, 2020, 36(10): 885-891.
- ZHANG JingYi, LIU JianTao, GAO YanZheng, et al. 3D printing accuracy and biomechanical properties of artificial bone trabecular generated based on Tyson polygon diagram algorithm[J]. *Chinese Journal of Trauma*, 2020, 36(10): 885-891 (In Chinese).
- [10] FANTINI M, CURTO M, DE CRESCENZIO F. A method to design biomimetic scaffolds for bone tissue engineering based on Voronoi lattices[J]. *Virtual and Physical Prototyping*, 2016, 11(2): 77-90.
- [11] ABDULLAHI H S, GAO S. A novel multi-cell square tubal structure based on Voronoi tessellation for enhanced crashworthiness [J]. *Thin-Walled Structures*, 2020, 150: 106690.
- [12] VITTORIETTI M, KOK P J J, SIETSMA J, et al. Accurate representation of the distributions of the 3D Poisson-Voronoi typical cell geometrical features [J]. *Computational Materials Science*, 2019, 166: 111-118.
- [13] WU Z, XU X, LIU Q, et al. A zero-thickness cohesive element-based numerical manifold method for rock mechanical behavior with micro-Voronoi grains [J]. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 2018, 96: 94-108.
- [14] SONG Y, WANG Z, ZHAO L, et al. Dynamic crushing behavior of 3D closed-cell foams based on Voronoi random model[J]. *Materials & Design*, 2010, 31(9): 4281-4289.
- [15] LI Z, ZHANG J, FAN J, et al. On crushing response of the three-dimensional closed-cell foam based on Voronoi model [J]. *Mechanics of Materials*, 2014, 68: 85-94.
- [16] BOUAKBA M, BEZAZI A, SCARPA F. FE analysis of the in-plane mechanical properties of a novel Voronoi-type lattice with positive and negative Poisson's ratio configurations[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2012, 49(18): 2450-2459.
- [17] ZHENG A Z, BIAN S J, CHAUDHRY E, et al. Voronoi diagram and Monte-Carlo simulation based finite element optimization for cost-effective 3D printing [J]. *Journal of Computational Science*, 2021, 50: 101301.
- [18] 余同希. 关于“多胞材料”和“点阵材料”的一点意见[J]. *力学与实践*, 2005(3): 90.
- YU TongXi. A little opinion on “multicellular materials” and “dot matrix materials” [J]. *Mechanics and Practice*, 2005(3): 90 (In Chinese).