

负泊松比结构填充汽车电池包的冲击响应分析与优化

陈艺文 李煜 杨昆 王益博

(辽宁工业大学 机械工程与自动化学院, 锦州 121001)

摘要:【目的】电动汽车电池包的安全性能对车辆整体安全性具有重要作用。由于电动汽车具有独特的结构和动力系统,其在碰撞安全方面面临更多挑战。为最大限度地提高电动汽车电池包的安全性能,提出将负泊松比材料填充至电池包,利用其轻质、隔振性好和抗冲击性能高等性能特点,提升电池包的抗冲击性能和安全性能。【方法】首先,以具有内凹六边形胞元结构的负泊松比材料为研究对象,采用准静态压缩试验和仿真,验证内凹六边形负泊松比结构具有明显的负泊松比效应;然后,将负泊松比材料填充至电池包中,进行冲击响应分析;最后,采用响应面优化方法,以负泊松比电池包的最大等效应力最小和变形最小为优化目标,对用负泊松比材料填充的电池包的整体结构进行优化。【结果】结果表明,负泊松比电池包的最大等效应力相较原型电池包减小了26.93%,最大变形减小了36.92%,最大加速度减小了44.76%,负泊松比电池包具有更加优越的安全性能。相较于优化前,优化后的负泊松比电池包的安全性得以进一步提升。

关键词: 电动汽车电池包; 负泊松比; 准静态压缩; 响应面优化; 试验设计; 安全性能

中图分类号: U469.72; TH122 **DOI:** 10.16579/j.issn.1001.9669.2026.03.012

0 引言

在电动汽车电池包结构设计中,需要充分考虑其在振动、冲击和碰撞等极端工况下的保护措施,以确保电池包能够符合各种安全标准和法规的要求。当电动汽车在道路上高速行驶时,一旦电池包与道路上的物体碰撞,就容易造成重大交通事故^[1]。车辆事故调查结果显示,发生事故的主要原因有电池包和道路异物发生碰撞,道路异物穿透电池包箱体,与电池模组撞击,从而引发短路,造成车辆燃烧。因此,电池包的设计是非常重要的^[2]。

赵昌方等^[3]基于传统高温热压成型法制备具有层合板截面属性的负泊松比结构,开展了一系列试验研究,最终提出一种理论预测模型。孔维凡等^[4]研究了一种内凹六边形蜂窝夹层板结构的吸声性能,发现胞元倾角、内延伸管孔隙率、腔体壁厚等因素对吸声性能有显著影响。王振等^[5]分析了旋转内凹六边形负泊松比结构,通过理论推导和仿真验证了该结构的力学性能。尤泽华等^[6]提出一种可变弧边内凹多胞蜂窝负泊松比结构,并分析了弧角、冲击速度等因素对结构变形失效模式、动应力-应变曲线、能量吸收率的影响。HU等^[7]开展了有关内凹六边形蜂窝结构在不同内凹角度和冲击速度下的变形模式和泊松比效应的研究。QUAN等^[8]采用3D打印制备了凯夫拉纤维增强聚乳

酸材料的负泊松比结构,获得了等效弹性模量和等效泊松比理论模型。吴小莉等^[9]研究了一种新型负泊松比材料Yo-yo-Shaped Honeycomb在动态压缩下的力学性能和吸能效果,分析了结构参数对其的影响。张庆永等^[10]优化设计了一种仿生功能梯度材料吸能盒,通过仿真分析了其吸能效果,该研究为提升汽车碰撞的安全性提供了参考。

负泊松比结构在受压时,材料向内聚集,瞬时密度增大,伴随着独特的收缩变形现象,具有负泊松比、多孔轻质、高比强度和抗冲击等超常规力学性能^[11]。本文以电动汽车电池包为研究对象,将负泊松比结构填充至电池包的夹层结构中,着重研究电池包的抗冲击性能和吸能能力。采用响应面优化方法进一步提高结构的抗冲击性能、吸能能力及安全性能。负泊松比电池包的应用对提高电动汽车的性能具有重要意义。

1 负泊松比结构的力学性能分析

1.1 负泊松比结构模型设计

采用SolidWorks软件建立了104 mm×10 mm×80 mm的5×6多胞元负泊松比结构模型,如图1所示。其中, L 为直边的长度; d 为斜边的长度; θ 为直边与斜边之间的夹角; t_1 、 t_2 分别为斜边和直边的厚度,具体数值为: $L = 14$ mm, $d = 8.51$ mm, $\theta = 70^\circ$, $t_1 = t_2 = 2$ mm。

收稿日期: 2024-05-18 修回日期: 2024-07-09

基金项目: 辽宁省教育厅科学研究经费项目(JQL202015406)

作者简介: 陈艺文,男,1997年生,辽宁丹东人,硕士研究生;主要研究方向为CAD/CAE/CAM集成技术;E-mail:cccchenyiwen@163.com。

引用格式: 陈艺文,李煜,杨昆,等.负泊松比结构填充汽车电池包的冲击响应分析与优化[J].机械强度,2026,48(3):104-113.

CHEN Yiwen, LI Yu, YANG Kun, et al. Impact response analysis and optimization of automotive battery packs filled with negative Poisson ratio structures[J]. Journal of Mechanical Strength, 2026, 48(3): 104-113.



免费获取

1.2 负泊松比结构的泊松比效应分析

为了检验内凹六边形的泊松比是否为负值,需要对所设计的内凹六边形负泊松比结构进行静力学仿真分析,测得其位移、应力和应变数值,并进行泊松比计算,计算流程为

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta x}{x} \quad (1)$$

$$\varepsilon_y = \frac{\Delta y}{y} \quad (2)$$

$$\nu = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_y} = -\frac{y\Delta x}{x\Delta y} \approx -\frac{\Delta x}{\Delta y} \quad (3)$$

式中, ε_x 为横向正应变; ε_y 为纵向正应变; ν 为泊松比; Δx 为横向位移变化量; Δy 为纵向位移变化量; x 为结构的横向原始长度; y 为结构的纵向原始长度。

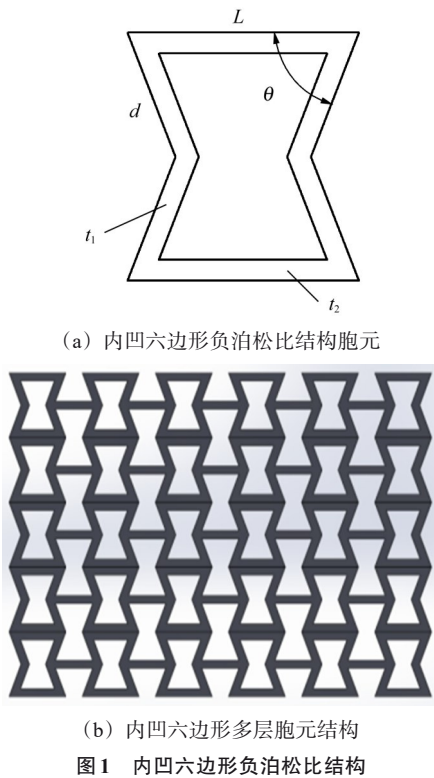


Fig. 1 Concave hexagonal structure with negative Poisson ratio

通过 Ansys Workbench 软件的静态结构模块对内凹六边形负泊松比结构进行仿真分析,载荷为对压缩板设置向下的压缩位移 40 mm、压缩速度 2 mm/min,边界条件为对内凹六边形负泊松比结构底部添加固定约束。在纵向受力时,观察到结构两侧发生横向收缩,其表现出负泊松比效应的特性。内凹六边形负泊松比结构的位移云图如图 2 所示。由图 2 可知,横向和纵向位移最大变化量分别为 $\Delta x = 0.84545$ mm、 $\Delta y = 0.63355$ mm,根据式(3)计算出内凹六边形负泊松比结构的泊松比 $\nu = -1.33$,这一负值结果与负泊松比结构的预期取值相符。

由于胞元结构在垂直于载荷方向上表现出非均匀的变形特征,难以找到一个特定的点来准确代表整

个结构在该方向上的位移情况。因此,采用泊松比的平均值来表征整个结构在垂直载荷方向上的变形行为。设置不同的加载位移,得到一系列泊松比^[12],泊松比与加载位移的关系如图 3 所示。由图 3 可知,内凹六边形的所有泊松比均为负值,因此内凹六边形结构具有明显的负泊松比效应。

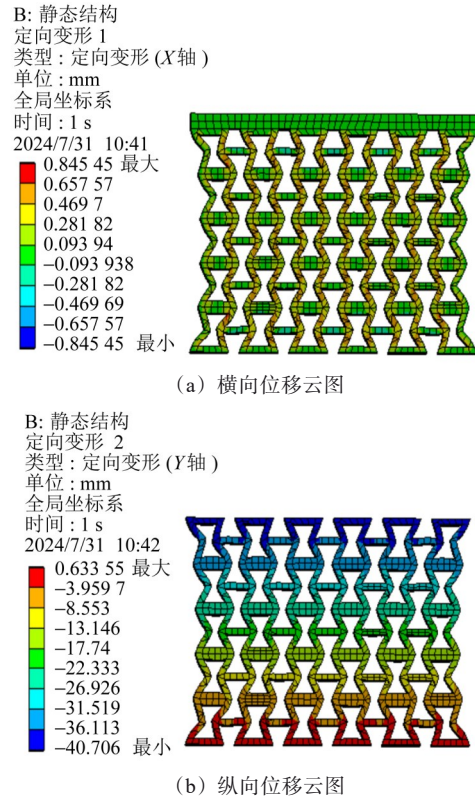


图 2 内凹六边形负泊松比结构位移云图

Fig. 2 Displacement contour plots of the concave hexagonal structure with negative Poisson ratio

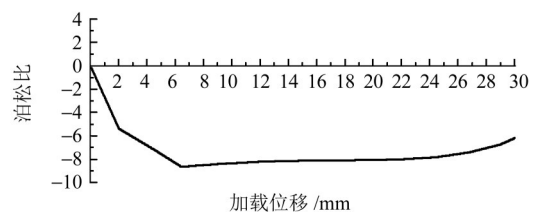


图 3 内凹六边形的泊松比曲线

Fig. 3 Poisson ratio curve of the hexagonal concave

1.3 负泊松比结构准静态压缩试验与仿真分析

1.3.1 试件制备与试验方法

利用熔融沉积 3D 打印的方式制备内凹六边形结构试件,试件为 5×6 的负泊松比多层胞元结构,试件尺寸为 104 mm×10 mm×80 mm,内凹六边形负泊松比结构的基体材料为聚乳酸(Polylactic Acid, PLA)。通过微机控制电子万能试验机对结构进行准静态压缩试验,采用位移加载方式,向下压缩的总位移为 40 mm,压缩速度为 2 mm/min。内凹六边形负泊松比结构试件如图 4 所示。

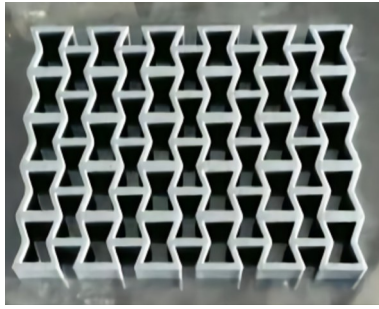


图4 内凹六边形负泊松比结构试件

Fig. 4 Specimen of concave hexagonal structure with negative Poisson ratio

1.3.2 有限元仿真方法

将内凹六边形负泊松比结构模型导入 Ansys Workbench 软件的显式动力学模块,进行准静态压缩仿真分析,将内凹六边形负泊松比结构的基体材料设置为 PLA,PLA 材料的参数如表 1 所示。载荷为对压缩板设置向下的压缩位移 40 mm、压缩速度 2 mm/min,边界条件为对内凹六边形负泊松比结构底部添加固定约束。单元类型采用四-六面体混合单元,网格尺寸设定为 2 mm,划分后实体单元模型共包含 15 291 个节

点和 8 121 个单元。网格灵敏度的测试结果为:单元质量为 0.778、纵横比为 1.24、雅可比比率为 1.18、翘曲系数为 0.42、正交质量系数为 0.912,由上述数据可知,仿真使用的网格质量较好。

表 1 PLA 材料参数

Tab. 1 Material parameters of the PLA

密度/(kg/dm ³)	弹性模量/MPa	抗拉强度/MPa	泊松比	切线模量/MPa
1.20	3 000	60	0.3	1 025

PLA 是一种环保型生物降解材料,具有出色的生物降解性能。PLA 的断裂强度和初始模量相对较低,展现出良好的弹性和延展性,这使得其在 3D 打印技术的应用中非常受欢迎。赵健等^[13]通过 5 组试验测得 PLA 材料的平均弹性模量、泊松比及切线模量等参数,选取双线性各向同性硬化塑性模型,定义 PLA 材料的抗拉强度为 60 MPa,切线模量为 1 025 MPa。

1.3.3 准静态压缩试验与仿真对比分析

准静态压缩试验结果与仿真结果的对比如图 5 所示,负泊松比效应可从图 5(c)中明显看出。

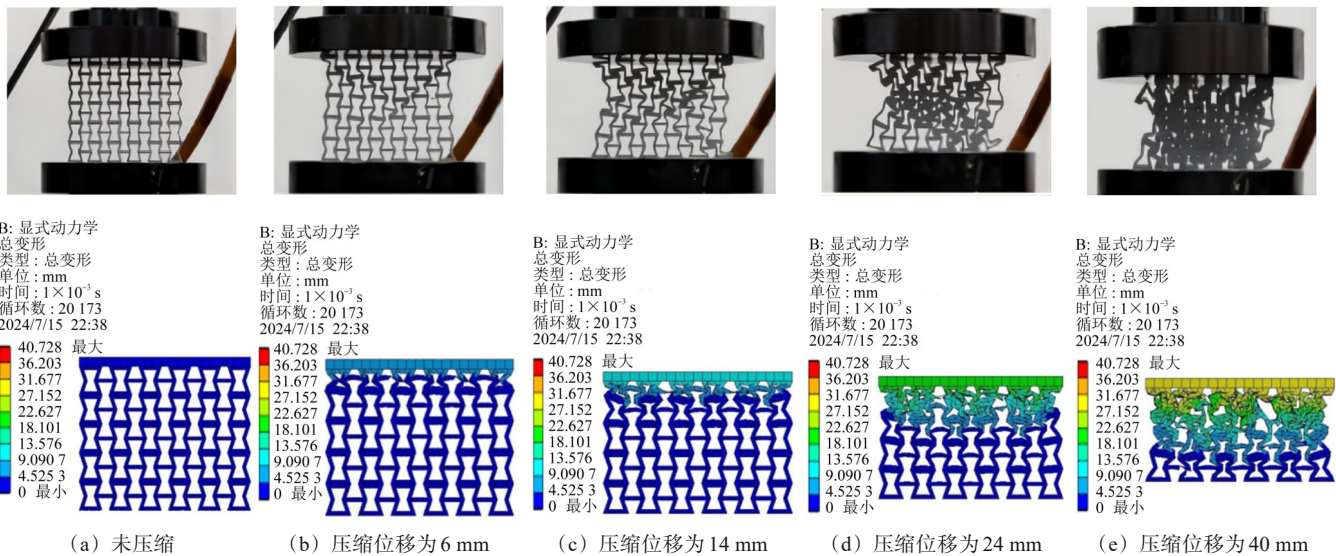


图 5 准静态压缩试验及仿真结果对比

Fig. 5 Comparison of quasi-static compression test results and simulation results

图 6 所示为准静态压缩试验及仿真的压力-位移曲线。在受到载荷作用时,结构发生变形,在被压缩 1 mm 左右时,仿真结果逐步上升至初始峰值,之后开始振荡减小;在被压缩 2.5 mm 左右时,试验结果逐步上升至初始峰值,之后开始振荡减小。通过对比 2 条曲线可知,仿真的平均压溃载荷为 3 565.6 N,试验的平均压溃载荷为 4 096.18 N,两者误差为 12.95%。仿真的初始压力峰值为 3 325.6 N,试验的初始压力峰值为 4 035.5 N,两者误差仅为 17.59%。仿真数据整体

走势与试验数据整体走势比较接近,平均压溃载荷、初始压力峰值存在一定的误差,其原因为仿真时材料被设定为理想化模型,施加载荷后并没有发生断裂。

曲线出现波动表明在此位移下,压力发生了较大变化,结构中某层材料发生压溃变形,波动越大表示压溃变形越大。随着结构不断被压缩,相邻几层材料的压溃堆叠到一起,其他层材料也发生不同程度的塑性变形,使压溃变形没有那么剧烈,因此曲线波动越来越小。在试验时,某一层材料首先发生压溃变形,

个别位置材料发生断裂,嵌入胞元孔洞中,会起到一定的支撑作用。随着结构不断被压缩,其他层材料也发生不同程度的塑性变形(此时还未断裂)。当相邻几层材料的压溃堆叠到一起时,有更多材料发生断裂并嵌入到胞元孔洞中。因此,试验后期未出现大幅度的压力波动,且压力不断增大。

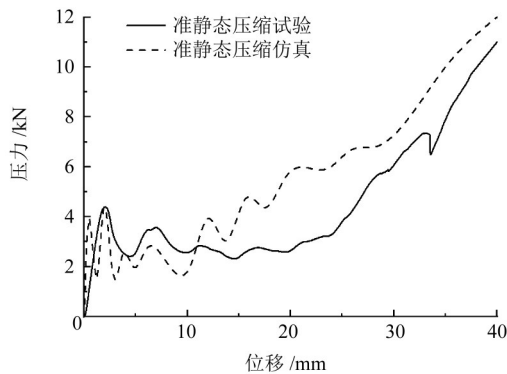


图 6 准静态压缩试验及仿真的压力-位移曲线

Fig. 6 Pressure-displacement curves of the quasi-static compression test and simulation

图 7 所示为准静态压缩试验及仿真的等效应力-等效应变曲线。由图 7 可知,试验台匀速下降,结构逐渐变形,通过试验台测得的反作用压力逐渐增大。因结构变形逐渐增大,材料的刚度特性也逐渐增大,当等效应变率小于 0.075 时,仿真结果与试验结果较吻合。随着压缩过程的进行,仿真结果大于试验结果,这是因为仿真材料被设定为理想化模型,材料并未发生断裂,结构整体能承载更大的压力。仿真结果的误差虽然存在,但不影响整体分析。在压缩变形过程中,有限元方法具有可靠性,且更加快捷高效。

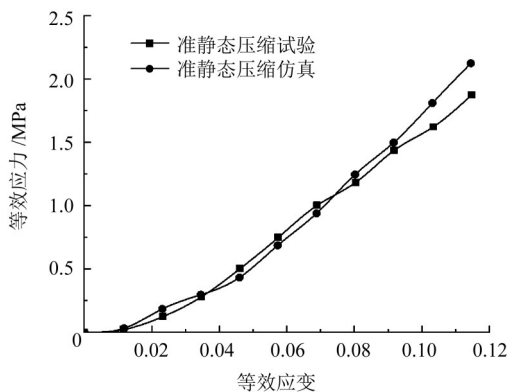


图 7 准静态压缩试验及仿真的等效应力-等效应变曲线

Fig. 7 Equivalent stress-equivalent strain curves of the quasi-static compression test and simulation

1.3.4 负泊松比金属材料的冲击性能分析

利用 Ansys Workbench 软件的显式动力学模块对结构进行冲击性能仿真,设定内凹六边形负泊松比结构的基体材料为铝合金^[14],铝合金材料参数如表 2 所

示。载荷为对压缩板设置向下的压缩速度 100 m/s,边界条件为对内凹六边形负泊松比结构底部施加固定约束。在刚性板冲击下,模型与刚性板之间的接触类型为面-面接触,模型本身的接触类型为通用接触,动摩擦因数设为 0.1。单元类型采用四-六面体混合单元,网格尺寸设定为 2 mm,网格划分后实体单元模型共包含 18 752 个节点、10 473 个单元。利用 Ansys Workbench 软件的显式动力学模块对结构进行冲击性能分析,为对负泊松比结构填充电池包进行冲击响应分析做准备。

表 2 铝合金材料参数

Tab. 2 Material parameters of the aluminum alloy

密度/ (kg/cm ³)	弹性模量/GPa	泊松比	屈服强度/ MPa	切线模量/ MPa
2 700	72	0.3	350	103

图 8 为内凹六边形负泊松比结构冲击性能仿真得到的变形云图。由图 8 可知,最大变形为 7.173 8 mm;图 9 为得到的等效应力云图。由图 9 可知,最大等效应力为 346.71 MPa。

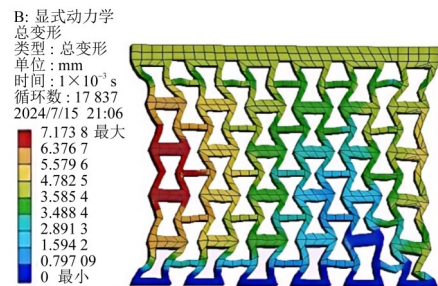


图 8 变形云图

Fig. 8 Deformation contour plot

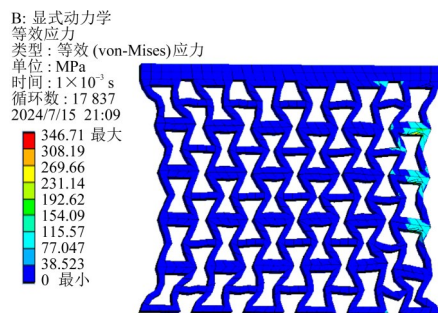


图 9 等效应力云图

Fig. 9 Nephogram of the equivalent stress

图 10 所示为内凹六边形负泊松比结构的能量变化曲线,由图 10 可知,内凹六边形负泊松比结构的内能增加、动能减小,结构的动能逐渐转化为内能,而结构的沙漏能占比很小,当内能增加到最大后几乎不变,最终的内能即为内凹六边形负泊松比结构吸收的能量。

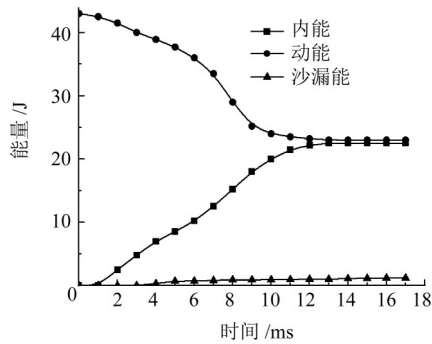


图 10 内凹六边形负泊松比结构的能量变化曲线

Fig. 10 Energy variation curves of the concave hexagonal structure with negative Poisson ratio

2 负泊松比结构填充电池包的结构设计及冲击响应分析

2.1 电动汽车电池包模型

电动汽车电池包是一种微型、高性能的电池系统,可在紧凑空间下实现高质量电池装载,具有性能高、单体温度全监控、耐用性高、充电速度快、防护等级高等特点^[15]。电动汽车电池包具有高压电气安全保护系统,防护等级为IP68。图 11 所示为电动汽车电池包的简化模型,模型尺寸为 900 mm×500 mm×300 mm,电池包内有 8 个槽位,用于安放电池模组,每个电池模组底部与电池包的下箱体固定连接。

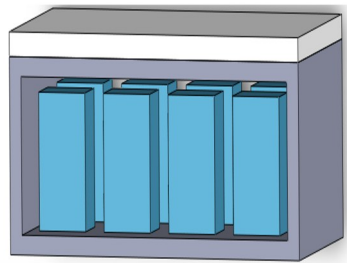


图 11 电池包模型

Fig. 11 Battery pack model

2.2 负泊松比电池包的结构设计

为进一步提升电动汽车电池包的安全性能,延长其使用寿命,本次设计了一种负泊松比材料填充电池包结构。该设计在下箱体与电池模组之间及上箱体与电池模组之间充入了负泊松比材料,当电池包遭受外力挤压时,负泊松比材料的独特性能能够防止电池模组受到破坏,从而增强电池包的抗冲击和减振特性,有助于延长电池包的使用寿命。图 12 所示为负泊松比结构电池包的二维图。为了确保电池包稳固安装在电动汽车的底座,在电池包下箱体的 4 个角安装专用的固定螺栓。同时,为了增强电池包的结构刚性、防止变形,在下箱体内侧配备周向的加强筋。此外,在电池模组的外壳上设计若干均匀分布的伸缩柱,以

更有效地减弱由振动和冲击产生的影响,从而为冲击测试增强缓冲效果。

由于电池包整体尺寸较大,因此计算量过大,影响仿真结果,故将电池包设计成 1/8 模型,以便负泊松比结构的填充,且电池包为对称形状,因此仿真结果不受影响。图 13 所示为填充负泊松比结构的电池包模型,整体尺寸为 120 mm×120 mm×200 mm,设计的电池包的外铝板壁厚为 0.6 mm。

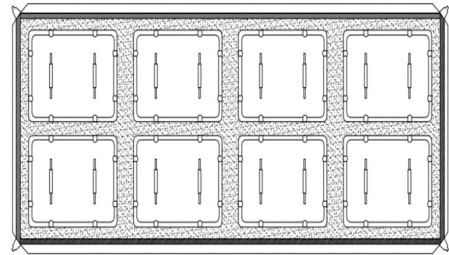


图 12 负泊松比结构填充电池包的二维图

Fig. 12 Two-dimensional image of the battery pack filled with negative Poisson ratio structure

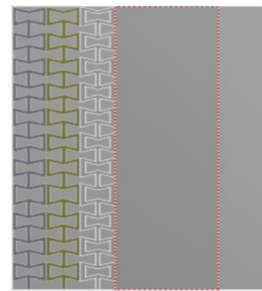


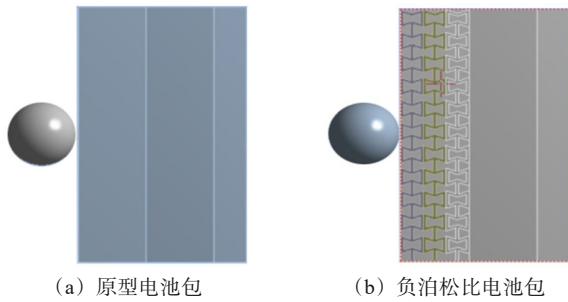
图 13 填充负泊松比结构的电池包模型

Fig. 13 Battery pack model filled with negative Poisson ratio structure

2.3 负泊松比电池包的冲击响应分析

2.3.1 有限元模型的建立

新型的负泊松比电池包是通过将内凹六边形结构与电池包的外部铝板黏合而形成的。为了测试其能量吸收能力,设计了 1 个质量为 0.5 kg 的刚性小球,用以对负泊松比电池包和传统电池包进行撞击试验。定义电池包的基体材料为铝合金,材料参数如表 2 所示。由于负泊松比结构具有良好的减振、吸能、抗冲击性能,现将内凹六边形负泊松比结构以铝合金为基体材料填充到电池包中。图 14 为小球撞击 2 种不同电池包的示意图。试验设定小球以 100 m/s 的速度沿 X 轴方向对电池包进行冲击,考虑到小球与电池包接触过程中会产生摩擦,将动摩擦因数设定为 0.3。在进行仿真分析时,为了准确反映影响因素对结构造成的影响,对网格进行了细致的划分。负泊松比电池包模型包含 63 807 个节点、129 371 个单元,原型电池包模型包含 16 235 个节点、73 117 个单元。



(a) 原型电池包 (b) 负泊松比电池包

图 14 小球冲击 2 种电池包的示意图

Fig. 14 Schematic diagrams of the two types of battery packs impacted by a small ball

2.3.2 小球冲击电池包的冲击响应分析

图 15 所示为 2 种电池包的能量变化曲线。由图 15 可知,随着时间的推移,电池包内能增长、动能降低,内能增至最大后几乎不变,最终的内能即为电池包能够吸收的能量。其中负泊松比电池包吸收的能量为 246 J,原型电池包吸收的能量为 167 J。对图 15 进行分析可知,当电动汽车电池包内填充了负泊松比结构后,其能量吸收能力显著提升,从而显著提高了电池包的整体安全性能。

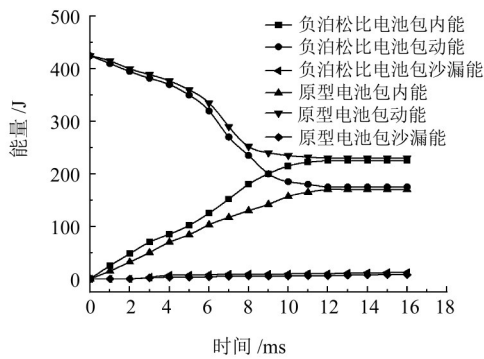


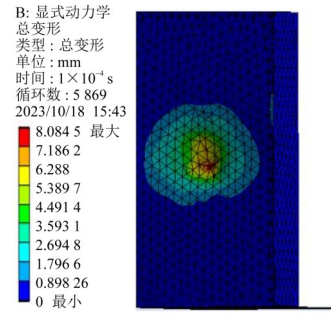
图 15 2 种电池包的能量变化曲线

Fig. 15 Energy variation curves of the two types of battery packs

图 16 为 2 种电池包的位移云图。由图 16 可知,当结构受到小球冲击时,接触表面发生变形,但电池包内部完全不受影响,原型电池包的最大位移为 12.81 mm,负泊松比电池包的最大位移为 8.08 mm,负泊松比电池包的最大位移小于原型电池包的最大位移,负泊松比电池包最大变形相较原型电池包减小 36.92%,因此,填充负泊松比结构后,电池包的抗冲击性能优于原型电池包。



(a) 原型电池包

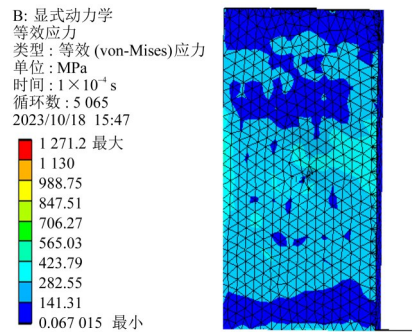


(b) 负泊松比电池包

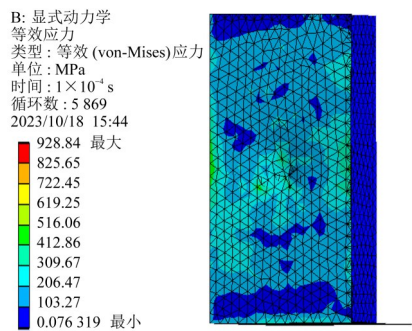
图 16 2 种电池包的位移云图

Fig. 16 Displacement nephograms of the two types of battery packs

图 17 为两种电池包的等效应力云图。由图 17 可知,当小球冲击 2 种电池包时,原型电池包的最大等效应力为 1 271.2 MPa,负泊松比电池包的最大等效应力为 928.84 MPa,负泊松比电池包的最大等效应力明显小于原型电池包,负泊松比电池包的最大等效应力相较原型电池包减小 26.93%。由上述数据可知,填充的负泊松比结构对电池包起到了很好的保护作用。



(a) 原型电池包



(b) 负泊松比电池包

图 17 2 种电池包的等效应力云图

Fig. 17 Equivalent stress nephograms of the two types of battery packs

图 18 所示为 2 种电池包的加速度变化曲线,由图 18 可知,负泊松比电池包在 1.6 ms 时加速度最大,为 $2.32 \times 10^8 \text{ m/s}^2$,随着时间的推移,加速度趋于平稳,大小为 $1.25 \times 10^8 \text{ m/s}^2$ 。原型电池包在 2.12 ms 时加速度最大,最大值为 $4.2 \times 10^8 \text{ m/s}^2$,随着时间的推移,加速度也趋于平稳,大小为 $7.5 \times 10^7 \text{ m/s}^2$ 。原型电池包的最

大加速度和最终加速度均大于负泊松比电池包,负泊松比电池包的最大加速度相较原型电池包的最大加速度减小44.76%。在整个时间范围内,负泊松比电池包的加速度峰值及全程响应均优于原型电池包,表现出更优异的缓冲吸能特性。

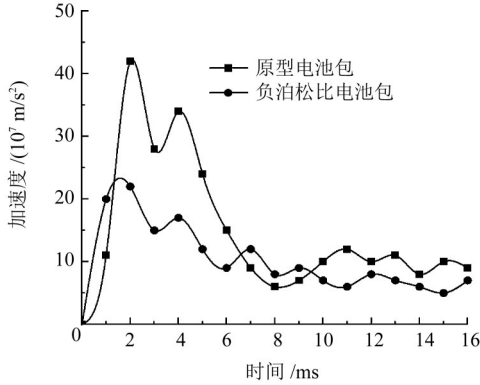


图 18 2 种电池包的加速度变化曲线

Fig. 18 Acceleration variation curves of the two types of battery packs

3 负泊松比结构填充电池包的多目标优化

3.1 多目标优化数学模型

负泊松比电池包相比于原型电池包具有更好的抗冲击性能、能量吸收特性和减振性能。当发生碰撞时,电池包变形越小,电池包结构破坏就越小。因此,以负泊松比电池包的最大等效应力最小和变形最小为优化目标,优化上述 2 个目标的目标函数,通过等权重加权将双目标优化转化为单目标优化,并规范化处理。优化数学模型为

$$\min F(X) = \left[\alpha \frac{f_{\min}^1 - f_1(X)}{f_{\max}^1 - f_{\min}^1} + \alpha \frac{f_2(X) - f_{\min}^2}{f_{\max}^2 - f_{\min}^2} \right] \quad (4)$$

$$\begin{cases} X = [x_1, x_2, x_3]^T \\ 0.55 \leq x_1 \leq 0.65 \\ 1.8 \leq x_2 \leq 2.2 \\ 15 \leq x_3 \leq 17 \end{cases} \quad (5)$$

式中, $F(X)$ 为总优化目标函数; $f_1(X)$ 为最大等效应力的优化目标函数; $f_2(X)$ 为变形的优化目标函数, f_{\max}^1, f_{\min}^1 分别为电池包最大等效应力的最大值、最小值; f_{\max}^2, f_{\min}^2 分别为电池包变形的最大、最小值; α 为权重系数,本文中取 $\alpha = 1/2$,代表各目标函数具有相同的比重; x_1, x_2, x_3 分别为 3 个设计变量 P_1, P_2, P_3 的值; X 为由 x_1, x_2, x_3 组成的向量。

3.2 尺寸变量的参数化设计

分别以电池包壁厚、负泊松比夹层板厚度、负泊松比胞元宽度作为输入变量 P_1, P_2, P_3 ,分别以变形最小和最大等效应力最小作为优化目标 P_4, P_5 。负泊松比电池包的设计变量及其变化范围如表 3 所示,优化目标如表 4 所示。

表 3 设计变量及其变化范围

Tab. 3 Design variables and their variation ranges

设计变量	变量名称	初始值	变化范围
P_1	电池包壁厚/mm	0.6	0.55~0.65
P_2	负泊松比夹层板厚度/mm	2	1.8~2.2
P_3	负泊松比胞元宽度/mm	16	15~17

表 4 优化目标

Tab. 4 Optimization objectives

优化目标	名称	原设计方案数值
P_4	最大变形量/mm	8.08
P_5	最大等效应力/MPa	928.84

采用试验设计(Design of Experiment, DOE)方法,试验设计类型为最佳空间填充设计,设计目标为最大、最小距离,采用中心复合设计(Central Composite Design, CCD)方法采样,生成 15 个试验设计点。15 个设计点的数据结果如表 5 所示。

表 5 15 个设计点的数据

Tab. 5 Data of the 15 design points

设计点	P_1 /mm	P_2 /mm	P_3 /mm	P_4 /mm	P_5 /MPa
1	0.633	2.107	15.333	7.702	1 080.853
2	0.587	2.133	15.2	7.883	572.22
3	0.56	2.053	16.4	8.202	1 089.361
4	0.627	1.84	16.533	8.08	962.077
5	0.553	1.867	15.867	8.569	730.42
6	0.647	1.92	15.733	7.771	1 178.447
7	0.613	1.947	15.067	7.475	1 454.726
8	0.64	2.027	16.667	7.835	1 039.554
9	0.607	1.973	16.133	8.392	529.419
10	0.593	2.13	16.85	8.555	671.974
11	0.573	2.187	16	7.888	814.238
12	0.567	2	15.467	8.191	573.376
13	0.6	1.813	15.6	8.036	1 111.15
14	0.615	2.18	15.98	7.933	814.841
15	0.58	1.893	16.8	8.812	4 084.107

3.3 基于遗传迭代法的响应面优化

在多目标优化分析中,由于设计变量多,目标函数多,往往不能使所有条件均达到最优解。通过设计结构优化分析,产生基于目标优化的 3 个候选点的最优设计方案,候选点方案的结果如表 6 所示。

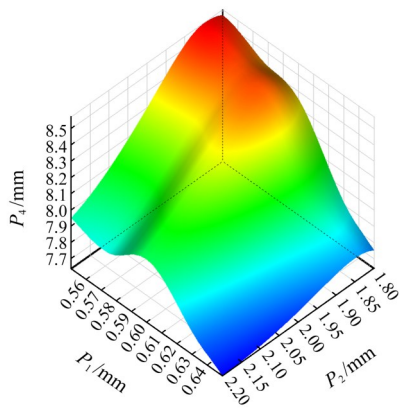
将候选点方案进行星级对比,选择候选点 3 作为优化后的新设计点,考虑到实际加工过程的具体情况,对数据进行取整处理,取电池包壁厚为 0.61 mm、负泊松比夹层板厚度为 2.2 mm、负泊松比胞元宽度为 15 mm。

表 6 候选点方案结果

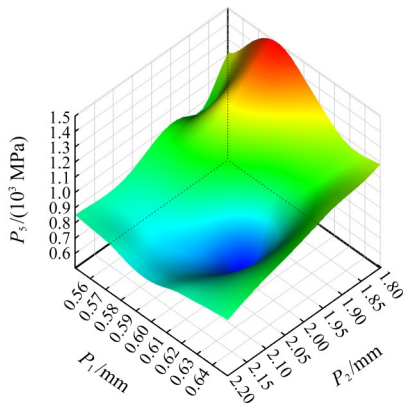
Tab. 6 Results of candidate point schemes

候选点	P_1 /mm	P_2 /mm	P_3 /mm	P_4 /mm	P_5 /MPa
候选点 1	0.609 8	2.199 3	15.004	7.546 8	531.51
候选点 2	0.609 1	2.196	15.004	7.549 5	532.42
候选点 3	0.609 8	2.198 2	15.011	7.549 6	534.32

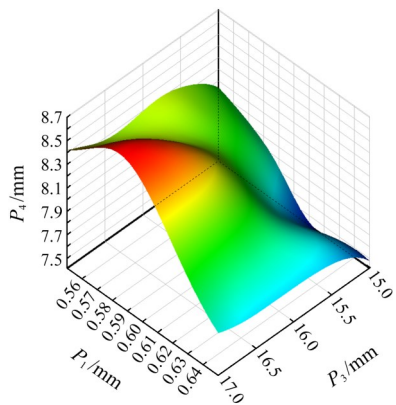
在 Ansys Workbench 软件中建立分析项目, 设置尺寸参数、约束条件, 并确定优化区域。根据星级选择最优方案, 构建 3D 响应面模型, 采用遗传迭代法^[16]进行响应面分析, 使每个输出目标的决定系数都能达到 0.99 以上, 整个系统参数为最佳拟合效果。生成的 3D 响应面如图 19 所示。



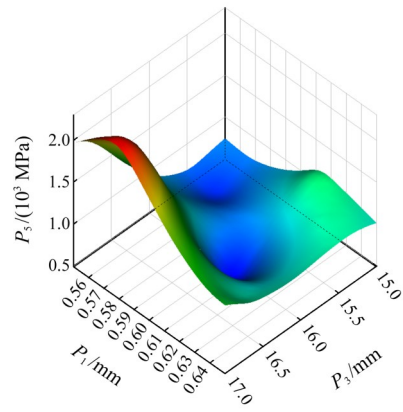
(a) P_1 - P_2 - P_4 3D 响应面



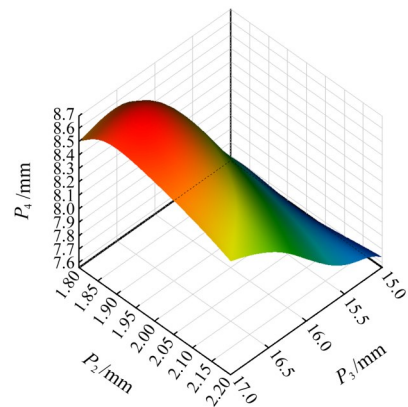
(b) P_1 - P_2 - P_5 3D 响应面



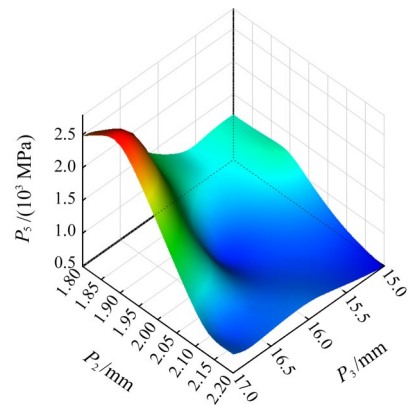
(c) P_1 - P_3 - P_4 3D 响应面



(d) P_1 - P_3 - P_5 3D 响应面



(e) P_2 - P_3 - P_4 3D 响应面



(f) P_2 - P_3 - P_5 3D 响应面

图 19 3D 响应面

Fig. 19 3D response surfaces

3.4 优化后负泊松比电池包的仿真分析

将优化处理后的模型导入 Ansys Workbench 软件中进行仿真, 图 20、图 21 分别为小球碰撞优化后的电池包的变形云图、等效应力云图。

优化后的负泊松比电池包的最大等效应力为 546.68 MPa, 较优化前减小 382.16 MPa; 最大变形为 7.93 mm, 较优化前减小 0.15 mm。在满足实际工况的条件下, 该优化使电池包的生产制造更加便捷, 实用安全性有所提高。

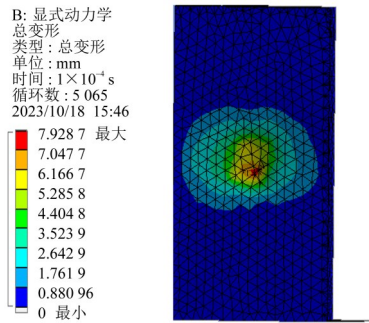


图20 优化后电池包的变形云图

Fig. 20 Deformation contour plot of the optimized battery pack

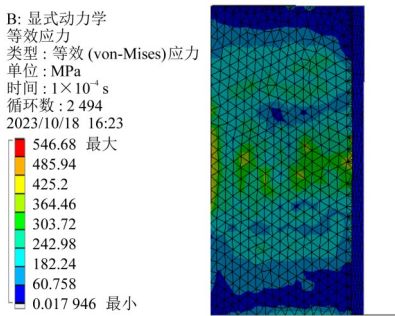


图21 优化后电池包的等效应力云图

Fig. 21 Equivalent stress contour plot of the optimized battery pack

4 结论

结构设计分析、准静态压缩试验、冲击吸能性能分析和响应面优化等方面的结果表明,负泊松比电池包在加速度、应力、变形等方面与原型电池包相比具有优异的性能。冲击响应和优化2个方面的具体结果如下:

1) 冲击响应方面:当小球高速冲击电池包时,负泊松比电池包吸收的能量为246 J,原型电池包吸收的能量为167 J,负泊松比电池包吸收的能量显著高于原型电池包。在电池包受到小球碰撞冲击时,相较原型电池包,负泊松比电池包的最大等效应力减小26.93%;最大变形减小36.92%;最大加速度减小44.76%。当达到最大加速度后,负泊松比电池包的加速度呈波动性振荡减小,且振幅与均值均小于原型电池包的相应值。

2) 优化方面:以负泊松比电池包的最大等效应力最小和变形最小作为优化目标,进行响应面优化。优化后的电池包相较于优化前,最大等效应力减小382.16 MPa,最大变形减小0.15 mm,证明优化后的负泊松比电池包相较优化前更安全。

参考文献 (References)

[1] 赵悦,高晶,刘思怡. 电动汽车底部电池包碰撞安全和典型工况研究[J]. 汽车与配件,2022(17):68-71.
ZHAO Yue, GAO Jing, LIU Siyi. Study on collision safety and typical working conditions of battery pack at the bottom of electric vehicle[J]. Automobile & Parts,2022(17):68-71. (In Chinese)

[2] 黄芦. 车用动力电池包底部冲击响应分析及安全性评价[D]. 广

州:华南理工大学,2021:13-14.

HUANG Lu. Impact response analysis and safety evaluation of the bottom of EV battery pack [D]. Guangzhou: South China University of Technology,2021:13-14. (In Chinese)

- [3] 赵昌方,LIM G K,乐贵高,等. 复合材料负泊松比结构等效弹性力学理论建模[J]. 青岛科技大学学报(自然科学版),2023,44(5):87-99.
ZHAO Changfang, LIM G K, LE Guigao, et al. A preliminary theoretical model of equivalent elastic mechanics for composite structures with negative Poisson's ratio [J]. Journal of Qingdao University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2023,44(5):87-99. (In Chinese)
- [4] 孔维凡,付涛. 负泊松比内凹六边形蜂窝夹层板的吸声性能[J]. 复合材料学报,2024,41(4):2157-2166.
KONG Weifan, FU Tao. Sound absorption performance of concave hexagonal honeycomb sandwich panels with negative Poisson's ratio [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, 41 (4) : 2157-2166. (In Chinese)
- [5] 王振,陈国平,惠旭龙,等. 基于旋转内凹六边形的负泊松比结构力学性能研究[J]. 机械强度,2023,45(1):124-130.
WANG Zhen, CHEN Guoping, HUI Xulong, et al. Mechanical performance of negative Poisson's ratio structures based on rotating concave hexagon [J]. Journal of Mechanical Strength, 2023,45(1):124-130. (In Chinese)
- [6] 尤泽华,肖俊华,王美芬. 弧边内凹蜂窝负泊松比结构的力学性能[J]. 复合材料学报,2022,39(7):3570-3580.
YOU Zehua, XIAO Junhua, WANG Meifen. Mechanical properties of arc concave honeycomb structure with negative Poisson's ratio [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39 (7) : 3570-3580. (In Chinese)
- [7] HU L L, ZHOU M Z, DENG H. Dynamic crushing response of auxetic honeycombs under large deformation: theoretical analysis and numerical simulation [J]. Thin-Walled Structures, 2018, 131: 373-384.
- [8] QUAN C, HAN B, HOU Z H, et al. 3d printed continuous fiber reinforced composite auxetic honeycomb structures [J]. Composites Part B:Engineering,2020,187:107858.
- [9] 吴小莉,李兆凯. 新型负泊松比材料等效性能与吸能性能研究 [J]. 机械强度,2023,45(4):826-837.
WU Xiaoli, LI Zhaokai. Study on the equivalent properties and energy absorption properties of a novel material with negative Poisson's ratio [J]. Journal of Mechanical Strength, 2023, 45 (4) : 826-837. (In Chinese)
- [10] 张庆永,王宇超,王辉. 功能梯度材料吸能盒碰撞仿真及优化 [J]. 机电技术,2022,45(1):50-53.
ZHANG Qingyong, WANG Yuchao, WANG Hui. Collision simulation and optimization of functionally graded material energy-absorbing box [J]. Mechanical & Electrical Technology, 2022, 45 (1):50-53. (In Chinese)
- [11] DHARI R S, JAVANBAKHT Z, HALL W. On the deformation mechanism of re-entrant honeycomb auxetics under inclined static loads [J]. Materials Letters, 2021,286:129214.
- [12] 韩广,郗彦辉,班宝旺. 新型斜十字负泊松比结构弹性力学性能研究 [J]. 机械强度,2023,45(1):183-189.
HAN Guang, QIE Yanhui, BAN Baowang. Study on elastic

- mechanical property of novel oblique cross-like structure with negative Poisson's ratio[J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2023, 45(1):183-189. (In Chinese)
- [13] 赵健,刘效朋,王泽武. 基于3D打印的PLA材料力学性能研究[J]. *塑料工业*, 2020, 48(7):139-143.
ZHAO Jian, LIU Xiaopeng, WANG Zewu. Research on mechanical properties of PLA material based on 3D printing[J]. *China Plastics Industry*, 2020, 48(7):139-143. (In Chinese)
- [14] 叶正挺. 新能源汽车铝合金轻量化及其连接技术发展现状[J]. *科技创新与应用*, 2023, 13(20):155-158.
YE Zhengting. Development status of aluminum alloy lightweight and its connection technology for new energy vehicles [J]. *Technology Innovation and Application*, 2023, 13(20):155-158. (In Chinese)
- [15] DEROUSSEAU M, GULLY B, TAYLOR C, et al. Repurposing used electric car batteries: a review of options[J]. *JOM*, 2017, 69(9):1575-1582.
- [16] SHE Z H. A class of unconditioned stable 4-point WSGD schemes and fast iteration methods for space fractional diffusion equations [J]. *Journal of Scientific Computing*, 2022, 92(1):18.

Impact response analysis and optimization of automotive battery packs filled with negative Poisson ratio structures

CHEN Yiwen LI Yu YANG Kun WANG Yibo

(College of Mechanical Engineering and Automation, Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001, China)

Abstract: [Objective] The safety performance of the battery pack is a critical factor for the overall safety of electric vehicles. Owing to the unique structures and power systems of electric vehicles, they face more challenges in crash safety. To maximize the safety performance of electric vehicle battery packs, the negative Poisson ratio materials were filled into the battery packs. By leveraging the superior properties of negative Poisson ratio materials, such as light weight, excellent vibration isolation and high impact resistance, the impact resistance and safety performance of the battery packs are enhanced. [Methods] First, the negative Poisson ratio material with a concave hexagonal cell structure was taken as the research object. Quasi-static compression test and simulation were carried out to verify that the concave hexagonal structure with negative Poisson ratio structure exhibits an obvious negative Poisson ratio effect. Second, the negative Poisson ratio material was filled into the battery pack, and the impact response analysis was conducted on the negative Poisson ratio-structure-filled battery pack. Finally, the response surface optimization method was adopted, with the minimization of the maximum equivalent stress and the maximum deformation of the battery pack filled with negative Poisson ratio material as the optimization objectives, to optimize the overall structure of the battery pack filled with negative Poisson ratio material. [Results] The results show that the maximum equivalent stress of the battery pack filled with negative Poisson ratio material is reduced by 26.93% compared with that of the original battery pack, the maximum deformation is decreased by 36.92%, and the maximum acceleration is decreased by 46.43%. The battery pack filled with negative Poisson ratio material demonstrates significantly superior safety performance. In addition, the safety performance of the optimized battery pack filled with negative Poisson ratio material is further improved in comparison with that before optimization.

Key words: Electric car battery pack; Negative Poisson ratio; Quasi-static compression; Response surface optimization; Test design; Safety performance

Corresponding author: CHEN Yiwen, E-mail: ccchenyiwen@163.com

Fund: Scientific Research Funding Project of Liaoning Provincial Department of Education (JQL202015406)

Received: 2024-05-18

Revised: 2024-07-09

(编辑:刘星泽)