

# 基于泡沫铝复合结构的汽车座椅横梁填充设计与优化<sup>\*</sup>

## FILLING DESIGN AND OPTIMIZATION OF AUTOMOBILE SEAT CROSSBEAM BASED ON ALUMINUM FOAM COMPOSITE STRUCTURE

张元瑞<sup>\*\*1</sup> 汪高飞<sup>1</sup> 张永亮<sup>\*\*\*1</sup> 郑志军<sup>1</sup> 叶坚<sup>2</sup> 瞿元<sup>2</sup> 虞吉林<sup>1</sup>

(1. 中国科学技术大学 近代力学系中国科学院材料力学行为和设计重点实验室, 合肥 230026)

(2. 奇瑞汽车股份有限公司, 芜湖 100192)

ZHANG YuanRui<sup>1</sup> WANG GaoFei<sup>1</sup> ZHANG YongLiang<sup>1</sup> ZHENG ZhiJun<sup>1</sup> YE Jian<sup>2</sup>

QU Yuan<sup>2</sup> YU JiLin<sup>1</sup>

(1. CAS Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Materials, Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

(2. Chery Automobile Co., Ltd., Wuhu 100192, China)

**摘要** 汽车的座椅横梁在碰撞事故中起着保障乘客生存空间的重要作用,对其进行填充优化设计可以有效地提高车辆的安全性能。基于泡沫铝材料高比吸能与轻质的特点,设计了三组泡沫铝与薄壁钢管组成的复合结构,将其填充到汽车的座椅横梁中。通过对座椅横梁填充结构三点弯曲与轴向压缩的有限元模拟,研究了其抗弯曲与抗压性能,并对填充方案进行了优化。结果表明,填充座椅横梁的承弯和轴压承载性能相较于原件分别提升了193.6%和241.4%,并通过模拟车辆侧面碰撞证明了填充座椅横梁提高车辆耐撞性能的有效性。

**关键词** 座椅横梁 泡沫铝 复合结构 有限元仿真 填充设计

中图分类号 U461.91

**Abstract** Automobile seat crossbeams play an important role in ensuring the living space of passengers in a collision accident. The reasonable filling design may effectively improve the safety performance of automobiles. Based on the characteristics of high specific energy and light weight of aluminum foam, three different kinds of composite structure composed of foamed aluminum and thin-walled steel pipe were designed and filled into automobile seat crossbeams. The bending and compressive properties of the filled seat crossbeams under three-point bending and axial compression were studied by finite element simulation, and then the best filling scheme was optimized. The results show that the bending and axial bearing capacity of the filled seat crossbeam are improved by 193.6% and 241.4% respectively compared with the original one, and the effectiveness of filled seat crossbeams to improve the crashworthiness of vehicle is proved by the side impact simulation.

**Key words** Seat crossbeam; Aluminum foam; Composite structure; Finite element simulation; Filling design

Corresponding author: ZHANG YongLiang E-mail: ylz2018@ustc.edu.cn Tel: +86-551-63603044

The project supported by the New Energy Vehicle and Intelligent Connected Vehicle Innovation Project, and the National Natural Science Foundation of China (No. 11772330).

Manuscript received 20200916, in revised form 20191020.

## 引言

随着汽车工业的日益发展,道路车辆与日俱增,汽车碰撞事故频发。在大多数的车辆驾驶事故中,正面和侧面碰撞是造成车内乘客伤害的重要原因。汽车座

椅横梁是支撑座椅的重要结构件,其与车身侧面的门槛和车辆地板相连接,是侧面碰撞中的力传递部件之一,可以有效地阻止汽车地板的变形,并减小车身的整体变形,从而减小对乘员下半身的挤压伤害,因此提升座椅横梁的耐撞性对保护乘员安全有着至关重要的

\* 20200916 收到初稿,20201020 收到修改稿。新能源汽车暨智能网联汽车创新工程项目,国家自然科学基金项目(11772330)资助。

\*\* 张元瑞,女,1997年2月,安徽省滁州市人,汉族,中国科学技术大学近代力学系中国科学院材料力学行为和设计重点实验室博士研究生,主要研究方向为冲击动力学和材料力学行为与设计。

\*\*\* 张永亮,男,1987年10月出生,河南周口人,汉族,中国科学技术大学特聘副研究员,工学博士,主要研究方向为冲击动力学和材料力学行为与设计。

作用。

通过对车体本身进行结构拓扑优化或多目标优化可以在一定程度上提升汽车的耐撞性能,但这些方式对耐撞性的提升并不显著<sup>[1-2]</sup>。泡沫铝具有轻质与高比吸能的特点,在汽车、航空航天等领域被广泛用作吸能和防撞材料<sup>[3]</sup>,如车门、保险杠、吸能盒、前纵梁<sup>[4-6]</sup>,起到了一定的耐撞缓冲作用。由于薄壁管具有良好的抗拉压特性,其与泡沫铝特殊的相互作用机制使得泡沫铝填充薄壁管等泡沫铝复合结构具有更好的承载和吸能能力<sup>[7-10]</sup>,如将泡沫铝填充薄壁圆管填充到汽车的门槛横梁中可以降低碰撞中车辆的加速度峰值和车身侵入量<sup>[11-12]</sup>。然而,以往的研究更多是对吸能盒、车门等在碰撞中直接受到冲击的部件进行填充设计,缺少对于座椅横梁整体性能的研究与填充优化。因此,有必要根据座椅横梁的结构特点对其进行填充设计以提高其耐撞性能。

本文基于泡沫铝复合结构提出了座椅横梁的多种填充设计,通过三点弯曲与轴向压缩的有限元模拟,分别研究了座椅横梁填充结构的抗弯和抗压性能,探讨了影响座椅横梁填充结构性能的主要因素,并对填充方案进行了优化。

## 1 数值模拟研究

### 1.1 座椅横梁的几何模型和填充方案

本研究以某型汽车中采用的座椅横梁为例,该结构及其在汽车底盘上安装位置如图 1。横梁底部和两端分别与车辆底盘和两侧的内门槛紧密相连,座椅横梁的材料为高强度钢,横截面呈 M 型,质量约为 1.03 kg, X 方向宽为 105 mm, Y 方向长为 1 370 mm, Z 方向高为 190 mm,两侧支撑臂上的方型孔洞中有管道穿过。

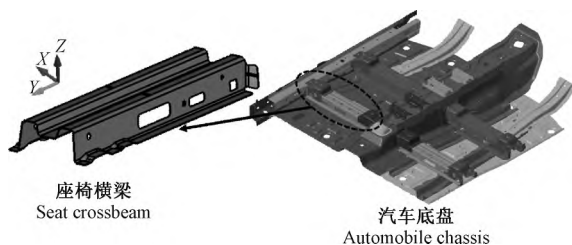


图 1 汽车座椅横梁结构与安装位置示意图

Fig.1 Schematic diagram of an automobile seat crossbeam structure and its installation position

以泡沫铝填充的薄壁钢管为主要填充结构,在不影响座椅横梁安装的前提下设计了三种填充方案,如图 2(图中白色部分代表座椅横梁,黑色部分代表薄壁钢管,灰色部分代表泡沫铝)。方案 1,在横梁中间的下凹槽内放置一梯形截面钢管,钢管内填充泡沫铝,如

图 2a;方案 2,在横梁两侧的上凸槽内分别放置两个外轮廓边长为 20 mm 的泡沫铝填充方型钢管,在两个钢管与座椅横梁接触的四条棱边上每条棱边上都有均布的焊点相连,如图 2b;方案 3,在方案 2 的基础上在横梁底部空腔内添加两个方形支撑,支撑与方管自然接触,如图 2c。上述填充方案中薄壁钢管的壁厚均为 1.5 mm,支撑结构为长 95 mm、宽 60 mm、高 33 mm 的方型泡沫铝,所采用泡沫铝的相对密度均为 0.1。

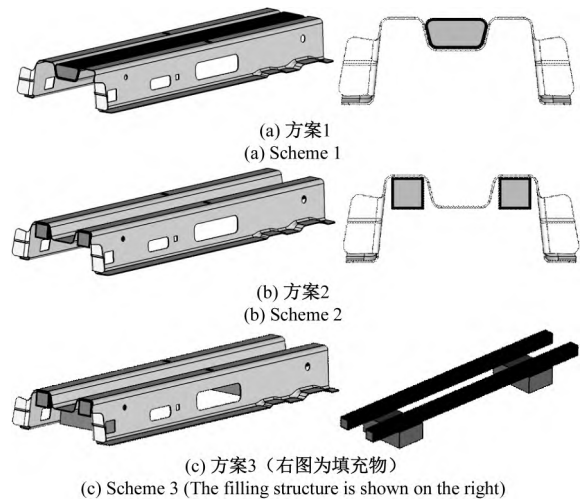


图 2 座椅横梁三种填充方案的示意图

Fig.2 Three filling schemes for seat crossbeams

### 1.2 有限元模型及其验证

车辆发生碰撞时,车身的变形以横向弯曲与轴向压溃为主。座椅横梁在三点弯曲以及轴压下的抗弯性能与抗压性能可以反映出横梁在车辆碰撞中的耐撞性<sup>[13]</sup>。本研究采用 Solidworks 软件首先构建出座椅横梁原结构及三种填充方案中填充物的模型,在 Hypermesh 软件中建立填充结构与座椅横梁之间的焊接连接并划分网格。座椅横梁和填充方管均为薄壁结构,采用壳单元,泡沫采用实体单元。根据网格收敛性分析,单元的网格尺寸均设置为 2 mm。最后在 Ls-Dyna 环境下分别构建了座椅横梁三点弯曲和轴向压缩的有限元模型。在三点弯曲的有限元模型中,参照国标 YB/T 5349-2006,刚性压辊和支撑辊的直径均为 30 mm,两支撑辊之间的间距为 335 mm,压辊位于两支撑辊的中间,并以 5 m/s 的速度匀速向下运动。这种加载速度可以近似模拟准静态加载过程并提高计算速度。此外,在支撑辊的上方加上了四块挡板以起到限位的作用,防止座椅横梁在实验中出现滑移和转动,如图 3a。

在轴向压缩有限元模型中分别构建了一固定刚性面和一移动刚性面,座椅横梁无飞边的端面为固支端,其与固定刚性面相接触;座椅横梁有飞边的端面为移动端,限制移动端面上的节点只具有轴压方向上的移

动自由度,该移动端与另一移动刚性面相接触,并以 5 m/s 的速度加载以模拟轴压工况,如图 3b。座椅横梁与薄壁钢管的材料均为高强度钢,密度为 7.85 g/cm<sup>3</sup>,弹性模量为 200 GPa,泊松比为 0.3,屈服应力为 508 MPa。泡沫铝采用了 Ls-Dyna 内含的 Crushable foam 本构模型,其弹性模量为 1.0 GPa,泊松比为 0,塑性应力-应变数据由 MTS 准静态压缩实验获得,如图 4。计算中除了焊点与门槛以外的接触均采用自动通用接触,动静摩擦因数均为 0.2。

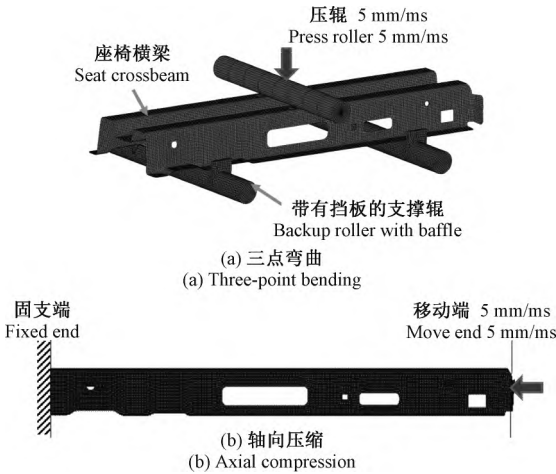


图 3 有限元模型

Fig.3 Finite element models

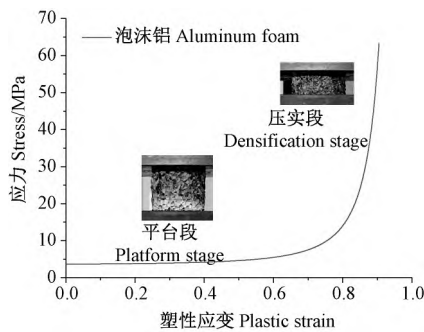


图 4 相对密度 0.1 的泡沫铝在准静态压缩下的塑性应力-应变关系

Fig.4 Plastic stress-strain relation of aluminum foam with a relative density of 0.1 under quasi-static compression

基于上述模型,对泡沫铝填充方管分别进行了三点弯和轴压模拟,并与三点弯和轴压实验进行了比较<sup>[14-15]</sup>。其中,有限元模拟中泡沫铝填充管的材料属性、尺寸设置以及加载条件均与实验相同。可以发现,轴压模拟中泡沫铝填充管的变形模式以及力-位移曲线均与实验基本一致,如图 5a 和图 6a。在轴压实验中泡沫铝填充管的外管棱边处虽出现了撕裂破坏,导致实验的轴压承载力与模拟相比偏低,但其主导变形模式仍为泡沫铝和管壁的相互堆叠,两者的承载力变化趋势也大致吻合,如图 5b 和图 6b。因此,上述模型

能够较好地预测研究对象的抗弯性能和轴压性能,可以用于座椅横梁的力学性能研究。

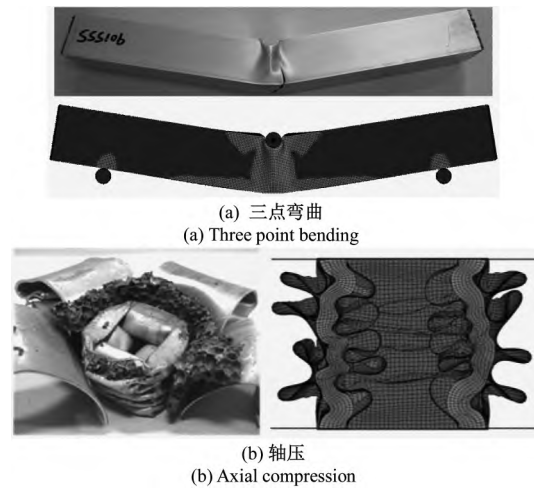


图 5 泡沫填充管有限元模拟和实验的变形比较

Fig.5 Comparison of simulation and experimental deformation of foam-filled square tubes

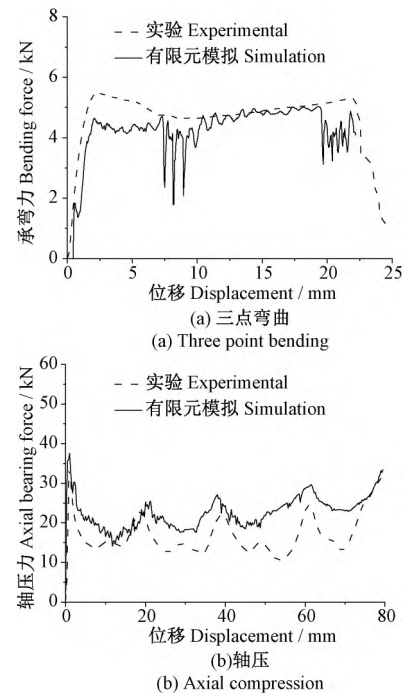


图 6 泡沫填充管有限元模拟和实验的数据比较

Fig.6 Comparison of simulation and experimental data of foam-filled square tubes

## 2 结果与讨论

### 2.1 座椅横梁性能分析及可靠性验证

有限元模拟结果表明,三点弯曲过程中未填充座椅横梁的塑性变形与应力分布主要集中在压辊下压处和有孔洞的两侧壁。加载初期,座椅横梁先在与压辊的接触处形成一较明显的塑性铰,随后两侧壁逐渐被向外挤出,最后两侧壁被完全压垮,如图 7 图 8。将座

椅横梁在加载方向上的受力视为其承弯力  $F$ , 其平均承弯力  $F_{avg}$  即为

$$F_{avg} = \frac{1}{l_{max}} \int_0^{l_{max}} F(l) dl \quad (1)$$

式中  $l$  为压辊位移,  $l_{max}$  为所考虑的压辊最大位移, 未填充座椅横梁的承弯力和平均承弯力如图 9a。压辊下压 50 mm 时, 横梁的承弯力已有较明显的下降趋势; 压辊下压 75 mm 时, 座椅横梁的承弯力降至峰值的 1/4, 下降趋势放缓, 此时座椅横梁的力学响应已由“整体保持稳定、局部承弯变形”转变成“整体翘曲变形”, 无法继续承弯, 因此选择压辊前 50 mm 位移内座椅横梁的力学响应进行研究, 由式 (1) 得到未填充座椅横梁的平均承弯力  $F_{avg}^{ub}$  为 7.18 kN。在轴向压缩的过程中, 座椅横梁的移动端先发生逐层堆叠式变形, 随后在横梁的薄弱处(中间开孔处)发生折弯; 当轴压端面位移 100 mm 时, 座椅横梁的固支端翘起, 整体结构已严重失稳, 不再具备良好的轴压承载能力, 如图 8。令移动轴压端面在其加载方向上的受力为轴压承载力, 得到了座椅横梁的轴压承载-位移曲线, 如图 9b。为研究座椅横梁在严重失稳前的变形行为, 采用了轴压端面前 100 mm 位移内的数据, 计算得到未填充座椅横梁的平均轴压承载力  $F_{avg}^{ua}$  为 39.36 kN。

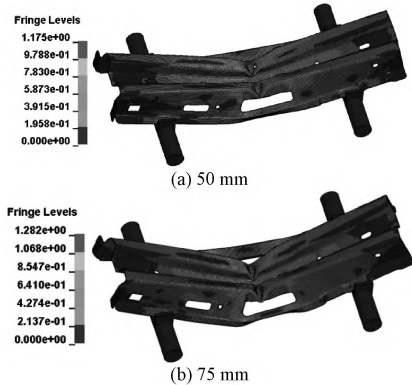


图 7 不同压辊位移下座椅横梁的应力分布与变形  
Fig.7 Stress and deformation of unfilled seat crossbeam under three-point bending under different roller displacements

## 2.2 填充座椅横梁的抗弯性能

在填充方案 1 中, 填充座椅横梁三点弯曲下的变形模式与未填充座椅横梁基本相同, 如图 10a。首先在座椅横梁与压辊接触处发生一定的塑性变形, 但同时其两侧壁也发生了较明显的翘起和滑移, 导致压辊下压的前 15 mm 内, 填充座椅横梁的承弯力波动幅度较大, 如图 11a。随后支撑辊的前后挡板有效地限制了座椅横梁的进一步滑移, 使承弯力趋于稳定。弯曲过程中, 填充物的塑性铰区域和受力均相对较小。该方案中填充物的质量为 0.68 kg, 平均承弯力  $F_{avg}^{fb}$  约为

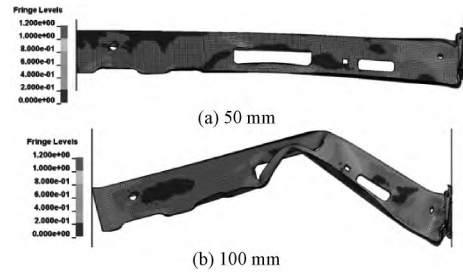


图 8 不同轴压位移下未填充座椅横梁的应力分布与变形  
Fig.8 Stress and deformation of unfilled seat crossbeam under different axial displacement

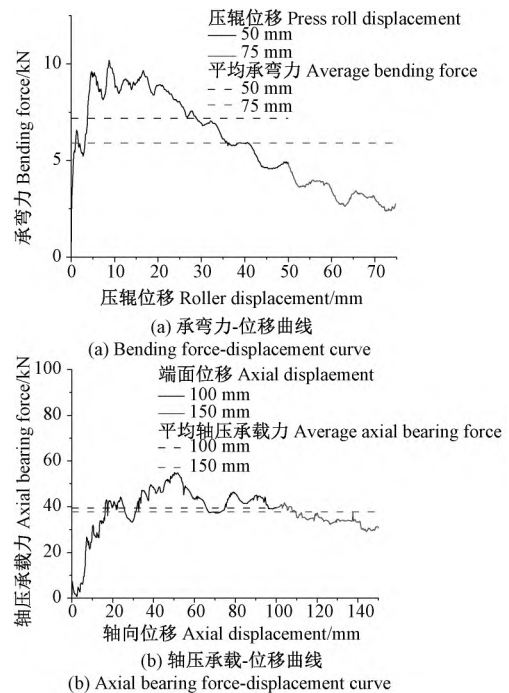


图 9 未填充座椅横梁  
Fig.9 Unfilled seat crossbeam

12.76 kN, 比未填充座椅横梁提高了约 77.7%, 承弯能力的提升并不显著。

方案 2 中在座椅横梁左右两边的上凸槽内均填充了方型泡沫铝填充钢管。三点弯过程中, 该填充方案下座椅横梁两侧壁的变形与滑移仍较为明显, 进一步诱导了座椅横梁向中间倾覆, 使得塑性铰区域转移到了两者的棱边处, 如图 10b。该填充方案中, 填充物质量为 1.00 kg, 填充座椅横梁平均承弯力约为 17.45 kN, 提升了 143.0%。通过对填充方案 1 和 2 中座椅横梁的变形分析发现, 相对于座椅横梁顶部与压辊接触的直接承弯区域, 其两侧壁变形更为严重。由于座椅横梁两侧壁上有供线路通过的孔洞, 其刚度和强度较低, 且线路的限制使得填充物集中在横梁的上半部分, 更强化了座椅横梁上半部分与侧壁之间的强度差异。这使得变形和屈曲会在侧壁率先发生, 并引导座椅横梁的后续变形仍以侧壁变形为主, 因此填充物的

抗弯和吸能缓冲能力没有得到有效利用。

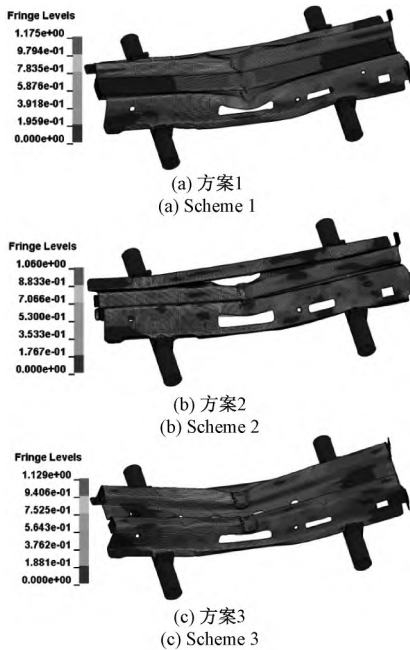


图 10 压辊下压 50 mm 时不同填充座椅横梁的应力分布与变形  
Fig.10 The stress and deformation of seat crossbeams with different fillers when roller displacement is 50 mm

在不阻碍座椅横梁侧壁孔洞的前提下,方案 3 在座椅横梁下半空腔内填充了两个矩形支撑。可以发现,该填充座椅横梁以及填充物的塑性铰区域明显增大,横梁两侧壁变形与滑移明显减小,如图 10c。支撑加强了座椅横梁下半部分的强度,改善了其侧壁的率先失稳问题,使填充物充分地参与到抗弯变形中;该方案中填充物质量为 1.10 kg,填充后横梁的平均承弯力为 22.88 kN,相比横梁原件提升了约 218.7%,承弯力整体较为平稳,如图 11a。与方案 2 相比,方案 3 中填充物质量只增加了 10%,而承弯力得到了 75.7%的提升,如图 11b,因此该填充方案更有效地提升了座椅横梁的抗弯性能。

### 2.3 填充座椅横梁的抗轴压性能与填充优化

上述研究表明,填充方案 3 可以较好地提升座椅横梁的抗弯能力,因此进一步的研究仅比较方案 3 与原设计的抗轴压性能。由于方案 3 中的两个方形支撑块与泡沫铝填充钢管为自然接触,不会参与到轴压变形中,因此在轴压模拟中可以忽略。在轴向压缩下,座椅横梁的受压端并没有产生塑性褶皱,而是很快在横梁两侧有孔洞的部位出现失稳,随后在该处发生严重的屈曲,如图 12;这导致其轴压承载首先出现了一个较高的峰值,而后急速下降。该填充座椅横梁的平均轴压承载力  $F_{avg}^{fa}$  为 101.26 kN,相较于原件提升了约 157.3%。当轴压刚性面位移 50 mm 时,填充座椅横梁的轴压承载力已低于其承载力平均值;位移 100 mm

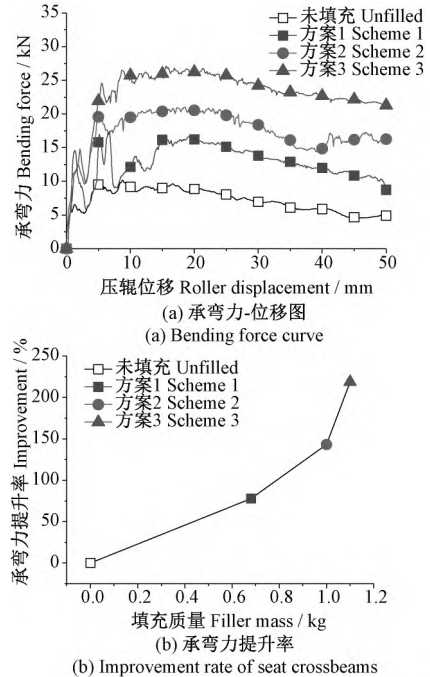


图 11 不同方案填充座椅横梁  
Fig.11 Seat crossbeams with different fillers

时,座椅横梁的承载已远低于优化目标,如图 14a。该方案虽在初期短暂提高了抗轴压能力,但填充物的强度与刚度过高,填充结构易在薄弱的开孔处失稳,使得后期轴压承载能力下降迅速,抗压性能不够平稳。



图 12 轴压下方案 3 填充的座椅横梁的轴压承载力-位移曲线  
Fig.12 Axial bearing force-displacement curve of a filled seat crossbeam of scheme 3 under axial compression

我们对填充方案 3 进行了优化,调整了填充钢管的壁厚。钢管壁厚降低后,座椅横梁前期变形中有明显的褶皱堆叠,并在经历了较长时间后才在开有孔洞的薄弱处发生失稳,如图 13。由于薄壁钢管和泡沫的相互作用以及褶皱堆叠的重复变形机制,该填充座椅横梁的轴压承载力具有较为稳定的平台段,如图 14a。同时,随着钢管壁厚的降低,填充座椅横梁整体的抗弯刚度减弱,承弯能力下降,如图 14b。令填充座椅横梁的承弯力提升指标为  $I_b$ ,轴压承载力提升指标为  $I_a$ ,分别为

$$I_b = \frac{F_{avg}^{fb} - F_{avg}^{ub}}{F_{avg}^{ub}} \times 100\% \quad (2)$$

$$I_a = \frac{F_{avg}^{fa} - F_{avg}^{ua}}{F_{avg}^{ua}} \times 100\% \quad (3)$$

以综合力学性能提升指标  $I_t$  来评估填充座椅横梁的抗弯与抗压综合能力, 其与  $I_b$  和  $I_a$  的关系如下

$$I_t = \frac{I_b + I_a}{2} \quad (4)$$

$I_t$  随钢管壁厚变化的趋势如图 14c。可以看出, 当钢管的壁厚为 1.3 mm 时, 方案 3 填充座椅横梁的综合力学性能较好, 兼顾提升了其抗弯性能与抗压性能, 具体数据见表 1。

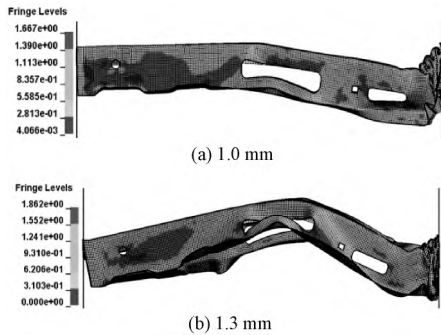


图 13 轴压位移 100 mm 时方案 3 变壁厚钢管填充座椅横梁的变形图

Fig.13 Deformation of filled crossbeams of scheme 3 with different thick steel tubes when displacement is 100 mm

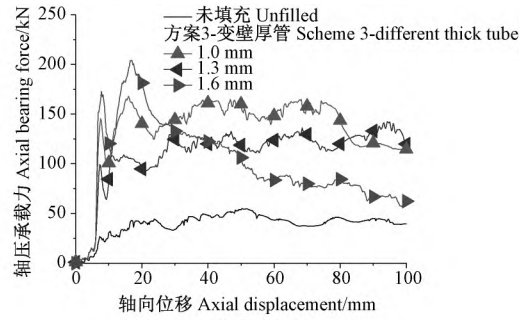
表 1 方案 3 变壁厚钢管填充座椅横梁的力学响应

Tab.1 Mechanical response of filled seat crossbeams of scheme 3 with different thick steel tubes

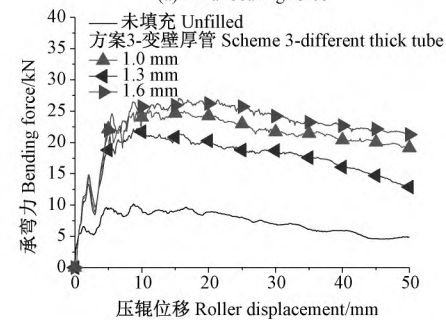
钢管壁厚 Wall thickness	抗弯性能 Bending performance		抗压性能 Axial bearing performance		综合力学性能指标 Comprehensive improvement/%
	平均 承弯力 Average bending force /kN	承弯力 提升 Bending improvement/%	平均轴压 承载力 Average axial bearing force/kN	轴压承 载力提升 Axial bearing improvement/%	
无填充 Unfilled	7.18	—	39.36	—	—
1.0 mm	17.49	143.6	111.08	182.3	162.9
1.1 mm	18.85	162.6	103.14	162.1	162.3
1.2 mm	20.14	180.5	130.56	231.7	206.1
1.3 mm	21.08	193.6	134.38	241.4	217.5
1.4 mm	22.05	207.1	98.39	150.0	178.6
1.5 mm	22.88	218.7	101.26	157.3	188.0
1.6 mm	23.85	232.2	103.12	162.0	197.1

### 3 碰撞模拟

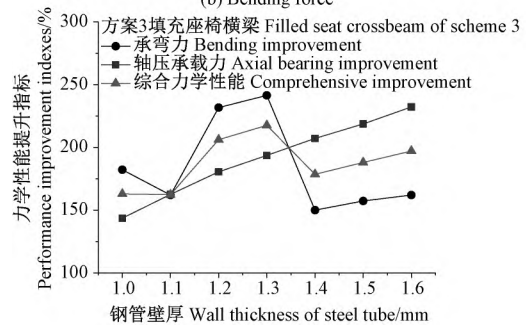
以移动车辆碰撞一静止车辆侧面的碰撞事故为例, 评估座椅横梁填充后车辆的耐撞性能。由于整车模型计算量大、影响因素复杂, 且座椅横梁的主要连接部件和传力部件为汽车地板和门槛, 因此以汽车底盘为主要研究对象进行了碰撞模拟。汽车地板和中通道上具有大量的圆角、凹槽等复杂几何特征以安装和连接座椅横梁、门槛等结构件, 在有限元模型中可以忽略这些对计算结果影响不大的复杂几何特征以减小碰撞



(a) 轴压承载力



(b) 承弯力



(c) 力学性能提升指标

图 14 方案 3 变壁厚钢管填充座椅横梁

Fig.14 Mechanical responses of the filled seat crossbeams of scheme 3 with different thick steel tubes

模拟的计算量和出错率。此外, 还对座椅横梁、地板、中通道等部件施加了合理的自由度约束以模拟这些结构件在汽车底盘中的实际限位, 如约束了座椅横梁上下方向的位移自由度以模拟座椅对座椅横梁的限位, 约束了座椅横梁受冲击端除了冲击方向位移自由度以外的所有自由度, 以模拟门槛、车门和地板对座椅横梁的限位。以一质量为 1 400 kg 的刚性墙模拟移动中的车辆, 并以 50 km/h 的速度碰撞简化后的车辆底盘, 如图 15。

观察碰撞模拟中的座椅横梁可以发现, 相比未填充座椅横梁, 方案 3 填充座椅横梁的整体变形较小, 其下半部分侧壁的屈曲和滑移也较小。填充座椅横梁的变形主要发生在其受冲击方向上, 纵向没有发生明显的变形, 如图 16。此外, 还提取了碰撞前 30 ms 内冲击侧汽车地板的侵入速度和侵入量来分析乘员生存空间的受挤压程度, 如图 17。碰撞初期, 座椅横梁和地板

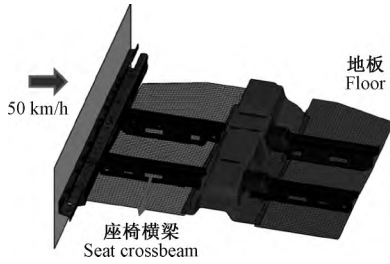


图 15 简化的汽车底盘碰撞模拟的有限元模型

Fig.15 Simplified finite element model of vehicle chassis collision simulation

未直接受到冲击,地板的侵入速度和侵入量几乎为0。碰撞进行到7.5 ms时,门槛作为直接受冲击部件被压扁,座椅横梁和地板开始受到影响。从图中可以看出,座椅横梁未填充时,汽车地板的侵入速度最高达到了10.23 m/s;20 ms时侵入速度有一定的衰减,但整体仍偏高;采用方案3填充座椅横梁后,地板的最高侵入速度降至7.79 m/s,且15 ms时,侵入速度已开始有较为明显的整体衰减趋势,此后均远小于座椅横梁未填充时地板的侵入速度,如图17a。30 ms时,座椅横梁填充后汽车地板的侵入量相较于未填充时的侵入量减少了约70 mm,约为原地板侵入量的38.3%,如图17b。说明填充座椅横梁可以有效地抵挡地板的变形和提高汽车底盘的耐撞性,更好地保证了碰撞事故中乘员的生存空间。

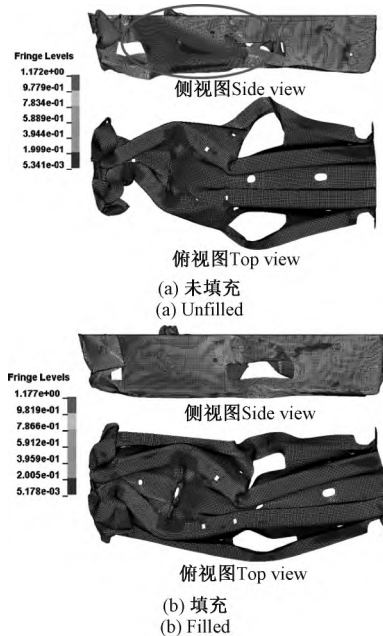


图 16 20 ms 时高速碰撞下座椅横梁的变形

Fig.16 Deformation of seat beam under high speed impact at 20 ms

### 4 结论

本文中采用泡沫铝作为复合结构的填充物,根据

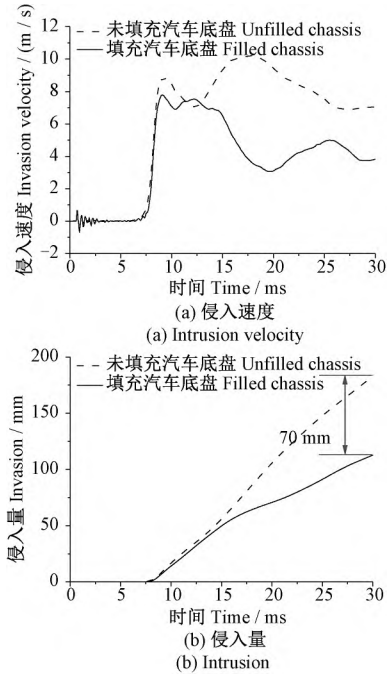


图 17 高速碰撞下的汽车地板

Fig.17 Vehicle floor under high speed impact

座椅横梁的结构特点设计了多种填充方案。通过有限元模拟对填充后座椅横梁的抗弯性能和抗压性能进行了分析和评估,并对填充方案进行了优化,最后对安装有未填充和填充后座椅横梁的汽车底盘部分进行了碰撞模拟,对其填充有效性进行了评估。主要得到以下结论:

1) 针对不同填充方案的填充座椅横梁进行了三点弯曲和轴压的数值模拟,发现在横梁两侧的上凸槽内设置泡沫铝填充方型薄壁钢管,并在横梁下侧空腔内增加泡沫铝支撑后,座椅横梁的承弯能力与抗压能力得到了较为显著的提升。

2) 泡沫铝填充薄壁钢管的壁厚对填充后的座椅横梁的抗弯和抗压表现影响较大。管壁过厚时,填充座椅横梁易发生屈曲,抗压性能变差;管壁厚度过薄时会削弱填充结构的抗弯性能。特别地,当钢管壁厚为1.3 mm时,填充座椅横梁的抗弯和抗压性能均得到较好的提升,分别提升了193.6%和241.4%。

3) 对安装座椅横梁的底盘部分进行了侧面碰撞模拟,发现座椅横梁填充后,车辆地板的侵入量和侵入速度均得到了显著的降低,验证了填充座椅横梁能有效提升车辆的侧向耐撞能力。

### 参考文献(References)

[1] 徐涛,郝亮,徐天爽,等.轿车侧碰中车门抗撞性的快速优化[J].吉林大学学报,2012,42(3):677-682.  
XU Tao,HAO Liang,XU TianShuang, et al. Fast crashworthiness optimization of car door during side collision[J]. Journal of Jilin

- University, 2012, 42( 3) : 677-682( In Chinese) .
- [ 2 ] 唐 涛. 汽车侧围结构抗柱撞设计理论与方法研究[D]. 湖南: 湖南大学, 2016: 40-46.  
TANG Tao. A study on theory and method in vehicle side structure crashworthiness design under pole side impact [D]. Hunan: Hunan University, 2016: 40-46( In Chinese) .
- [ 3 ] Yi Y T, Chee S L, Hamid M. A finite element analysis of high-energy absorption cellular materials in enhancing passive safety of road vehicles in side-impact accidents [J]. International Journal of Crashworthiness, 2014, 19( 3) : 288-300.
- [ 4 ] 徐 平, 李 巢, 于英华, 等. 油罐车后保险杠耐撞性设计仿真[J]. 计算机仿真, 2019, 36( 5) : 159-163.  
XU Ping, Li Chao, Yu YingHua, et al. Design and crash-worthiness analysis of rear bumper of the tank [J]. Computer Simulation, 2019, 36( 5) : 159-163 ( In Chinese) .
- [ 5 ] 于英华, 徐 畅, 阮德灵, 等. 泡沫铝填充结构汽车车门防撞梁仿真[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2014, 33( 12) : 1698-1701.  
YU YingHua, XU Chang, RUAN DeLing, et al. Simulation of car door anti-collision beam filled with foam aluminum [J]. Journal of Liaoning Technical University, 2014, 33 ( 12) : 1698-1701 ( In Chinese) .
- [ 6 ] 曾繁波. 泡沫铝填充管的吸能特性研究及其在轿车前纵梁结构中的应用[D]. 广州: 华南理工大学, 2014: 82-86.  
ZENG FanBo. Study on energy absorption capability of aluminum foam-filled tubes and its application in automotive front rails [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014: 82-86( In Chinese) .
- [ 7 ] 谢中友, 李剑荣, 虞吉林. 泡沫铝填充薄壁圆管的三点弯曲实验的数值模拟[J]. 固体力学学报, 2007, 28( 3) : 261-265.  
XIE ZhongYou, LI JianRong, YU JiLin. Numerical simulation of three-point bending experiments of thin-walled cylindrical tubes filled with aluminum foam [J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2007, 28( 3) : 261-265 ( In Chinese) .
- [ 8 ] Santosa S P, Wierzbicki T, Hanssen A G, et al. Experimental and numerical studies of foam-filled sections [J]. International Journal of Impact Engineering, 2000, 24( 5) : 509-534.
- [ 9 ] Hanssen A G, Langseth M, Hopperstad O S. Static and dynamic crushing of square aluminum extrusions with aluminum foam filler [J]. International Journal of Impact Engineering, 2000, 24( 4) : 347-383.
- [ 10 ] Chen W, Wierzbicki T, Santosa S. Bending collapse of thin-walled beams with ultralight filler: Numerical simulation and weight optimization [J]. Acta Mechanica, 2002( 153) : 183-206.
- [ 11 ] 马聪承, 兰凤崇, 陈吉清. 泡沫铝复合结构改善汽车侧撞安全的仿真研究[J]. 汽车工程, 2017, 39( 4) : 432-439.  
MA CongCheng, LAN FengChong, CHEN JiQing. Simulation study on the improvement of vehicle side impact safety by aluminum foam composite structure [J]. Automotive Engineering, 2017, 39( 4) : 432-439 ( In Chinese) .
- [ 12 ] 马聪承, 兰凤崇, 陈吉清, 等. 泡沫铝填充门槛横梁改善汽车侧碰安全性研究[J]. 汽车工程学报, 2020, 10( 1) : 34-39.  
MA CongCheng, LAN FengChong, CHEN JiQing, et al. Study on the effect of aluminum foam structure on improving vehicle safety [J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2020, 10( 1) : 34-39 ( In Chinese) .
- [ 13 ] 姚 宙, 郝玉敏, 李亦文, 等. 基于高强度与材料填充的白车身耐撞性轻量化设计[J]. 机械强度, 2019, 41( 1) : 148-156.  
YAO Zhou, HAO YuMin, LI YiWen, et al. Crashworthiness and light weight design of body in white based on high strength steel and filling materials [J]. Journal of Mechanical Strength, 2019, 41( 1) : 148-156( In Chinese) .
- [ 14 ] Guo L W, Yu J L, Li Z B. Experimental studies on the quasi-static bending behavior of double square tubes filled with aluminum foam [J]. Acta Mechanica, 2010, 213( 3/4) : 349-358.
- [ 15 ] 郭刘伟, 虞吉林. 泡沫铝夹芯双方管结构准静态轴压性能的实验研究[J]. 实验力学, 2010, 25( 3) : 271-278.  
GUO LiuWei, YU JiLin. Experimental investigations on the quasi-static axial crushing of foam-filled double square columns [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2010, 25( 3) : 271-278 ( In Chinese) .