

泡沫材料在行人腿部保护的应用研究

吴华春, 田禾, 鲁宏升

(上海恒士达科技有限公司, 上海 201203)

摘要: 在我国汽车设计阶段, 对设计车型进行 CAE 碰撞分析已经占据极其重要的地位, 材料及材料模型的使用对仿真结果起到决定性的作用。本文首先讨论了泡沫材料中的密度和应变率对泡沫力学行为的影响, 然后基于某款车型创建行人保护腿部(下腿)碰撞模型, 利用 LS-DYNA 求解器进行计算, 研究密度和应变率对法规规定的小腿加速度、膝部弯曲角和膝部剪切位移的影响, 根据仿真结果, 给出泡沫材料在行人保护碰撞模型中建议。

关键词: 泡沫材料; 应变率; LS-DYNA; 行人保护

随着国家对车辆的节能减排的要求越来越严格, 汽车厂商对减重要求越来越高, 以轻质材料代替钢材为主的轻量化解决方案就越受行业关注。泡沫材料具有质轻、隔热、隔音、减震、价格低廉等优点, 广泛应用于方向盘总成、仪表板总成、坐垫、靠背、头枕、车身内饰、搁手扶手、保险杠缓冲块等结构^[1]。同时, 随着 CAE 仿真技术的高速发展与普及, 在整个汽车行业中, CAE 已经起到举足轻重的作用, 也是说 CAE 仿真已经渗透到汽车行业的各个角落, 从开始设计到模具制造, 组装等, 这其中, 碰撞仿真使用 CAE 分析最为广泛。因此, 在碰撞仿真模型中, 对泡沫件的处理显得尤为重要, 因为出现常见问题的零件, 以泡沫件最多。本文从常见泡沫材料入手, 根据各自的力学行为, 结合 LS-DYNA 中的材料模型, 对前防撞梁泡沫吸能块选材给出参考意见。

1 泡沫材料

在常温条件下, 硬质泡沫的杨氏模量大于 700Mpa, 加载超过某应力值时会产生塑性形变; 软质泡沫的杨氏模量小于 70Mpa, 卸载后能够恢复原形, 残余变形很小; 半硬质泡沫的性质则介于两者之间^[2]。从软质和硬质的分类来看, 泡沫的性质机械性能差异最明显: 软质泡沫微观多为开孔胞体组织, 具有一定的变形恢复能力; 硬质泡沫闭孔率较高, 在承受高载荷时容易脆性碎裂。

1.1 泡沫材料的力学行为

泡沫最典型的变形方式就是压缩变形。实际应用中, 绝大部分零件是利用其这个特性。因此, 在本文描述的力学行为也是泡沫在压缩过程中表现出来的各种力学特征。一般, 有三个区在泡沫的应力-应变关系(图-1): 一个初始区域, 即弹性阶段(Zone 1), “Yields”一个平坦的高原压实区域, 即平台阶段(Zone 2), 其次是致密化区, 即密实阶段(Zone 3)。在最初地区, 泡沫可能有一些刚度由于材料本身的强度矩阵。受气相成分的影响, 在开孔泡沫中, 气体通过开孔或孔道排出泡沫。在闭孔的泡沫材料中, 气体被压缩, 开孔与闭孔的结构如图-2 所示。现在, 气体压力可能会达到足够高的破坏细胞壁, 从而释放气体到大气中。这将导致胞体永久破裂, 并对泡沫材料造成不可恢复的损坏。另一方面, 如果基质足够强大, 胞体保持完整, 但完全崩溃。当所有的胞体都破裂或崩溃时。致密化开始于泡沫在应力-应变关系中表现得很像基体材料。

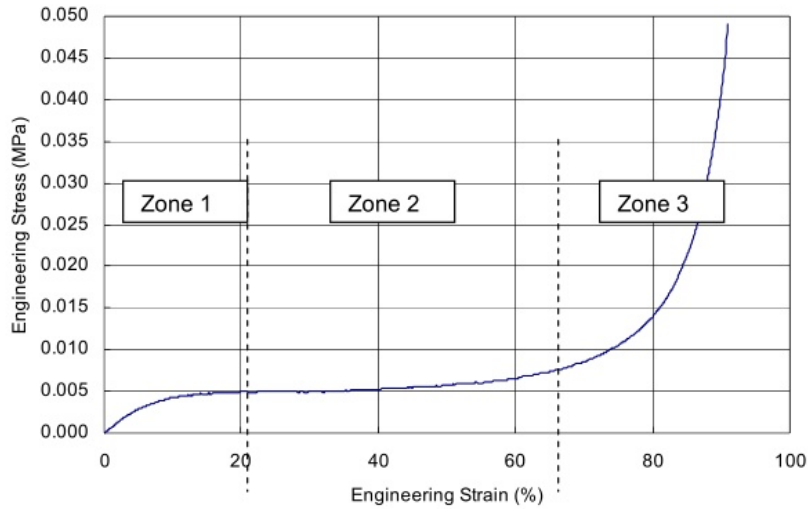


图-1 泡沫的 3 大典型变形区^[3]

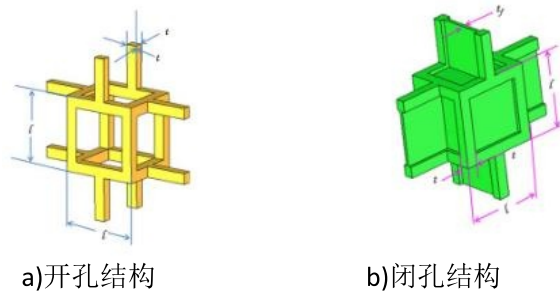


图-2 胞体结构^[4]

1.2 泡沫密度对其力学性能的影响

在汽车碰撞中，针对泡沫零部件的力学性能主要关注点是压缩力学性能。在上节内容中，泡沫在压缩至致密化阶段，其性能基本表现为基体材料的性能，所以，表明了泡沫材料的密度对力学性能的影响非常大，而且也是泡沫材料的一个极其重要的指标。

根据材料不同，泡沫材料的线弹性模量、屈服强度与密度的关系也不尽相同，表达式如下：

EPS 泡沫材料^[4]：

$$E = 0.0097\rho^2 - 0.014\rho + 1.8 \quad (1)$$

$$\sigma_s = 6.875\rho - 52.5 \quad (2)$$

其中 E —弹性模量，单位为 MPa； ρ —泡沫密度，单位为 kg/m^3 ； σ_s —屈服强度，单位为 KPa。

硬质聚氨酯泡沫^[5,6]：

$$\sigma_s = 13.5\left(\frac{\rho}{299}\right)^2 \quad (3)$$

其中 σ_s —屈服强度，单位为 MPa； ρ —泡沫密度，单位为 kg/m^3

1.3 应变率对泡沫材料的力学性能的影响

总所周知，泡沫材料在同一温度、同一相对密度下对应变率的敏感性很强。以 30kg/m^3 的泡沫的单轴压缩曲线为例，如图-3 所示，不同应变率下，曲线都存在弹性、平台、密实化阶段，但是曲线在弹性阶段的斜率和平台区域的高度存在明显的差异，说明随着应变率的增大，泡沫材料的弹性模量和平台应力也随着增大，表明抵抗弹性变形的能力也增大了。

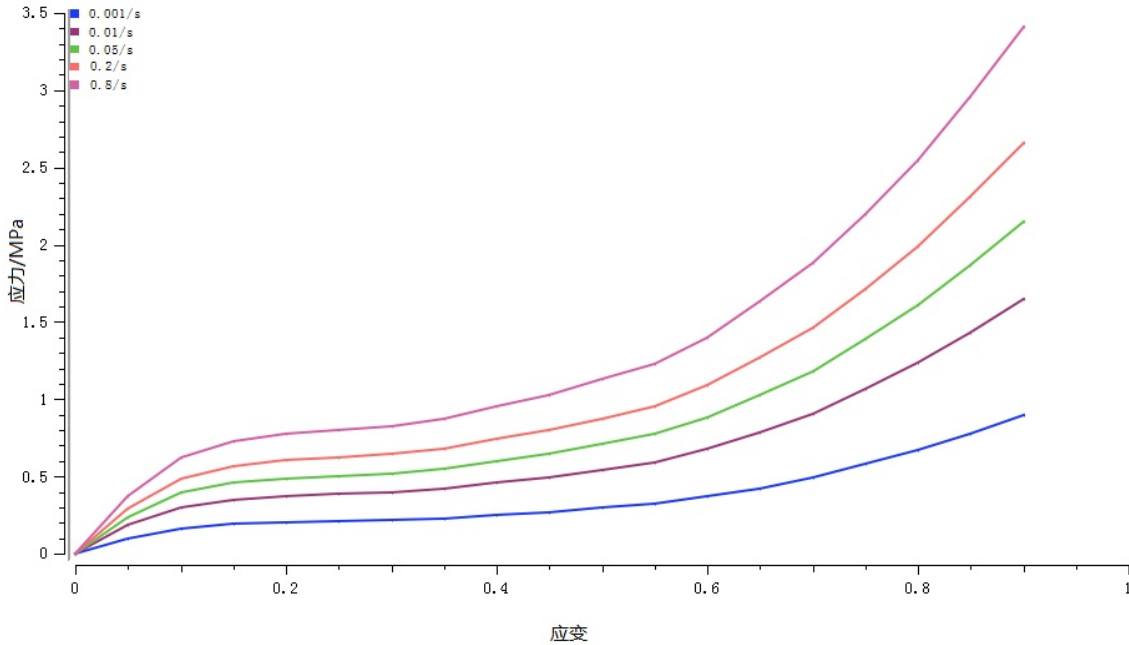


图-3 不同应变率下的应力-应变曲线

另外，随着应变率的增大，在同一应变下，吸收能量也就越多；在同一应力下，应变率越大，吸收能量的效率也就越高^[4]。

2 行人腿部模型及法规要求

本文针对行人保护模型含有泡沫零件并且泡沫材料会影响碰撞伤害值的腿冲击模型，因此采用下腿冲击模型。有限元模型采用 LSTC.PEDESTRIAN_LEGFORM.100813_V2.3 版本，如图 4 所示的 legform 模型由 47409 个节点、33664 个实体单元、2960 个壳单元和 2 个梁单元组成，总共有 29 个零件。模型分为上肢(股骨)和下肢(胫骨)两部分，上肢质量为 8.6kg，下肢质量为 4.8kg，两者由韧带部分(PID 8)连接，股骨和胫骨被单层泡沫层包围，泡沫层被氯丁橡胶皮覆盖，股骨和胫骨的刚性管与泡沫层的内表面有共同的节点，氯丁橡胶皮肤与泡沫层的外表面具有共节点^[7]。

根据 GB/T 24550-2009^[8]对下腿的性能要求，膝部最大动态弯曲角不大于 19°，膝部最大动态剪切位移不大于 6.0mm，下腿上端加速度不大于 170g。

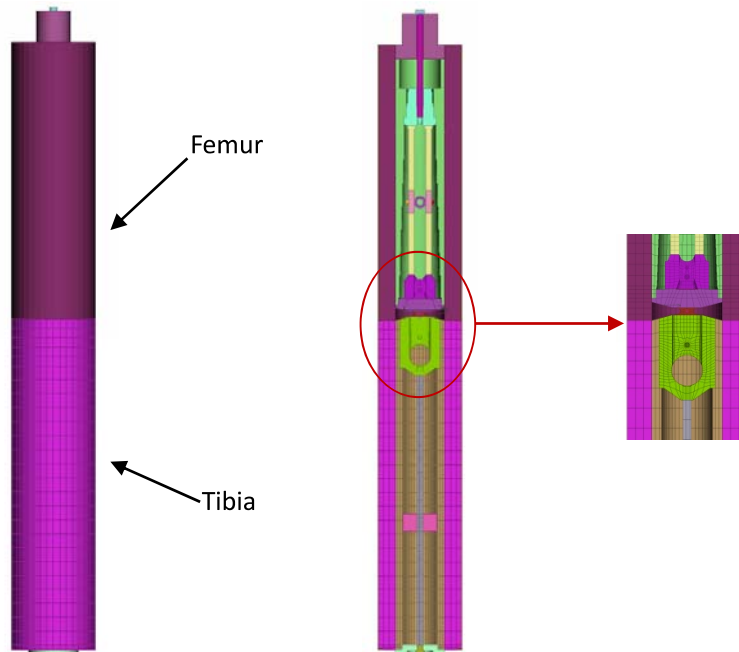


图 4 刚性腿有限元模型

3. 碰撞仿真分析及对比

3.1 碰撞模型

行人保护腿碰模型主要是车身前部，本文仅针对腿碰位置吸能泡沫进行分析，因此只对 L0（其他如 L1~L5 位置暂不考虑）单一位置进行计算，如图 5 所示。为了提高计算精度和更好的描述下腿模碰撞接触部位零件，保险杠部位网格尺寸采用 5mm，其他部位采用 8mm，整个网格数约 71 万。悬架安装座和车身后端约束 6 个自由度。下腿模碰撞速度为 40km/h，运动方向为车身 X 正向。下腿模型与车身的接触采用 *CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE，摩擦系数为 0.2。以其中一种工况为例，能量曲线如图-6 所示，沙漏能小于总能量的 5%，说明整个碰撞模型建模正确。

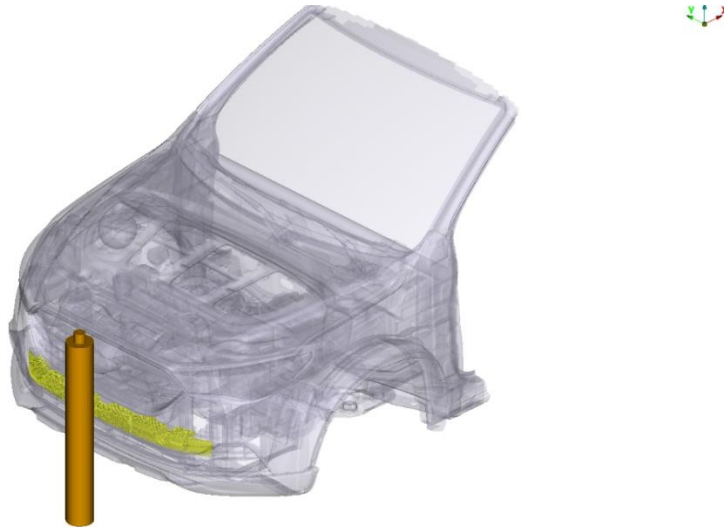


图 5 碰撞模型

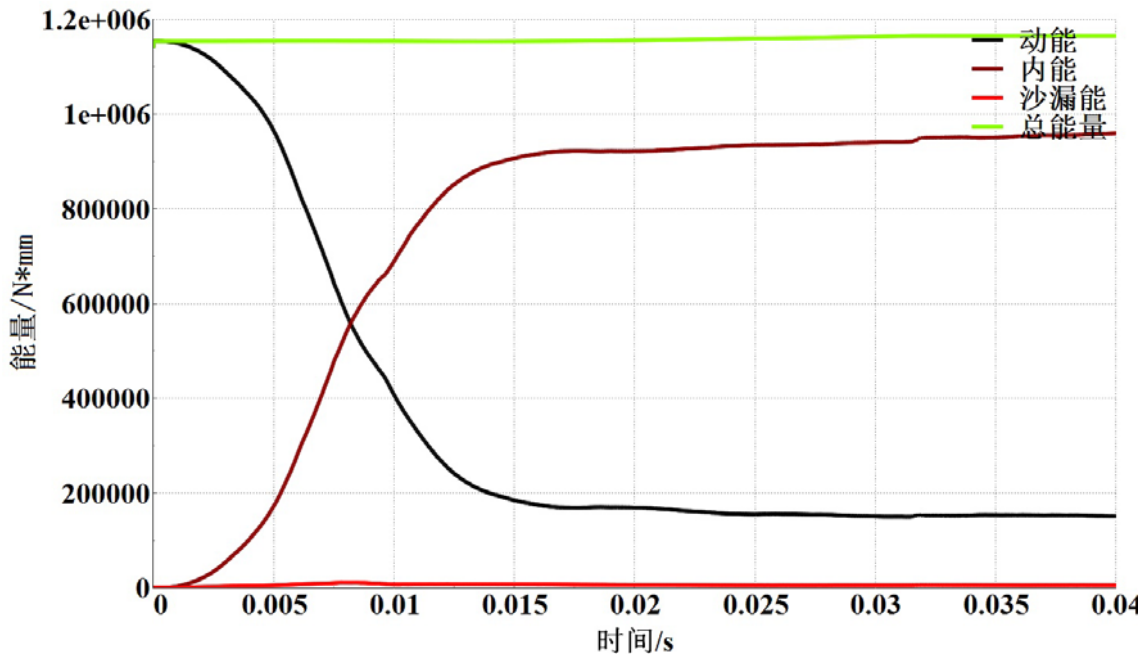


图 6 仿真模型能量

3.2 泡沫密度对腿碰伤害值的影响

本文以 12、20、25kg/m³ 种不同泡沫密度进行仿真，采用 LS-DYNA 中的 *MAT_LOW_DENSITY_FOAM 材料模型进行计算，仿真得到的膝部剪切位移、下腿上端加速度、膝部弯曲角以及其峰值，分别如图 6-8 和表 1 所示。随着密度的增加，膝部剪切位移和膝部弯曲角依次减小，但没有超过 GB/T 24550-2009 的设定的限值 6.0mm 和 19°，上端加速度值在密度为 20kg/m³ 时峰值最大，为 163.0g，这表明并不是密度越

大对行人保护中腿碰的结果越好。

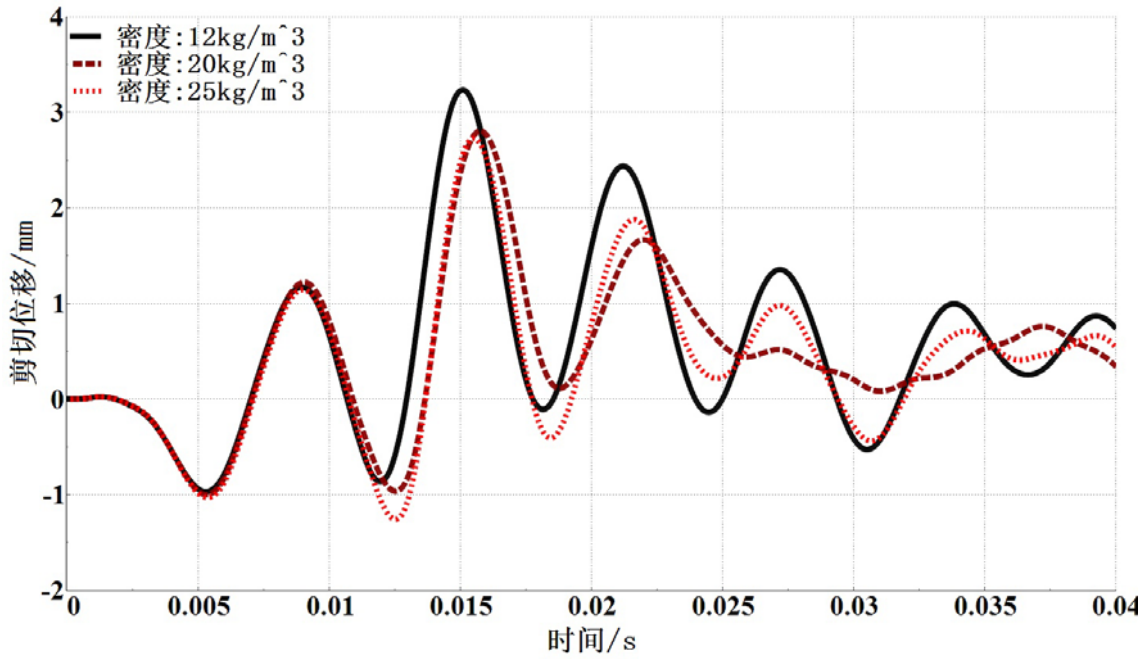


图 7. 不同密度下膝部剪切位移

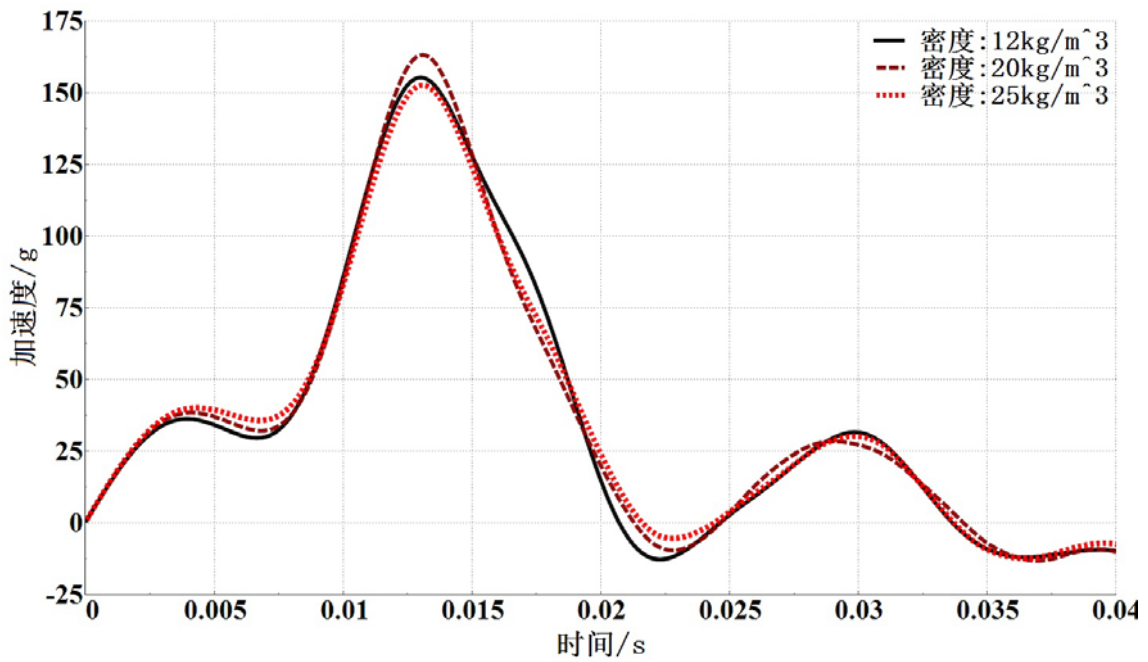


图 8. 不同密度下下腿上端加速度

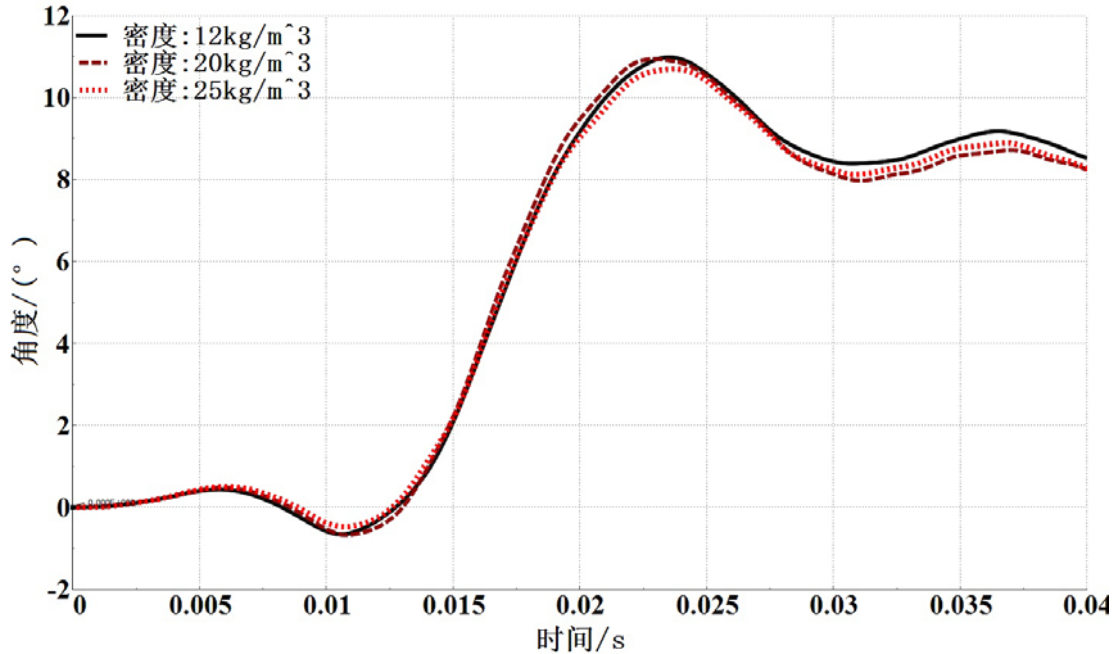


图 9 不同密度下膝部弯曲角度

表 1 不同泡沫密度下的腿模伤害值峰值

类型	膝部剪切位移	上端加速度	膝部弯曲角度
15kg/m ³	3.23	155.1	10.98
20kg/m ³	2.80	163.0	10.94
25kg/m ³	2.73	152.4	10.69

3.3 应变率对腿碰伤害值的影响

考虑应变率的泡沫材料采用是 30kg/m^3 ，应变率曲线参考图 3，不考虑应变率采用准静态曲线进行仿真。仿真得到的膝部剪切位移、下腿上端加速度、膝部弯曲角以及其峰值，分别如图 9-11 和表 2 所示。考虑材料应变率的模型中的泡沫在变形过程中压缩率比不考虑应变率的模型相差较小，但是考虑应变率的模型回弹的速率明显更大。因此，考虑应变率的模型计算结果得到的伤害值明显较大，比不考虑应变率的模型得到的伤害值高 30%以上。而且，不考虑材料的模型得到的伤害值均没有超过 GB/T 24550-2009 的限值。而考虑应变率的模型对于下腿上端加速度值达到了 167.9，接近 170 限值。

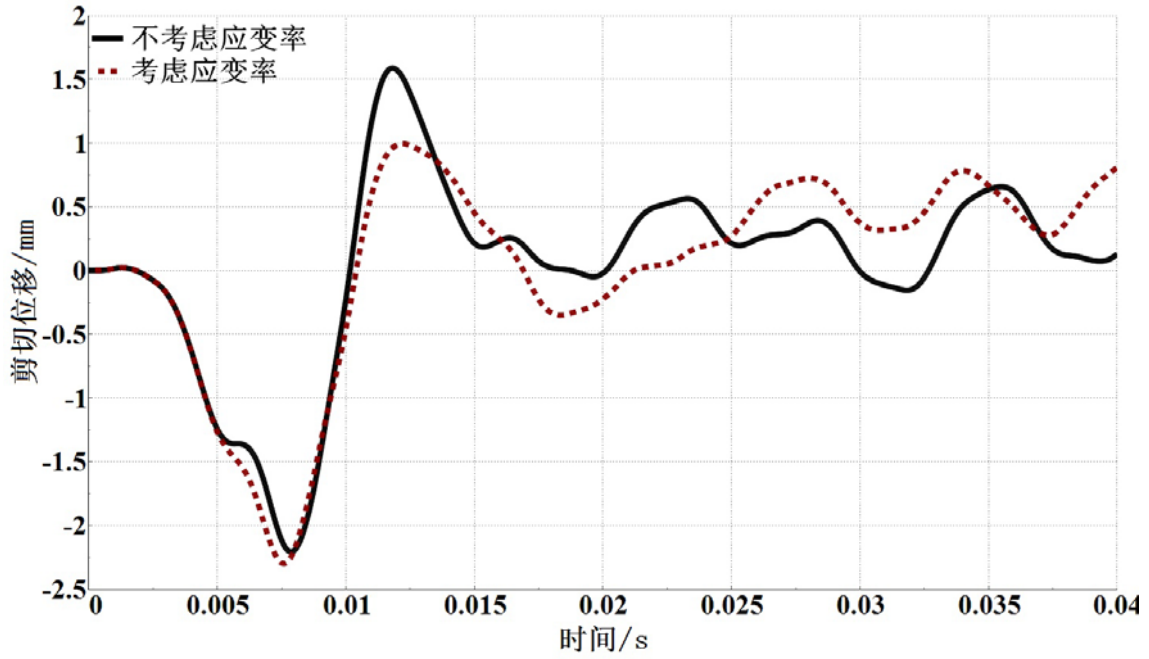


图 10 考虑应变率和不考虑应变率下剪切位移

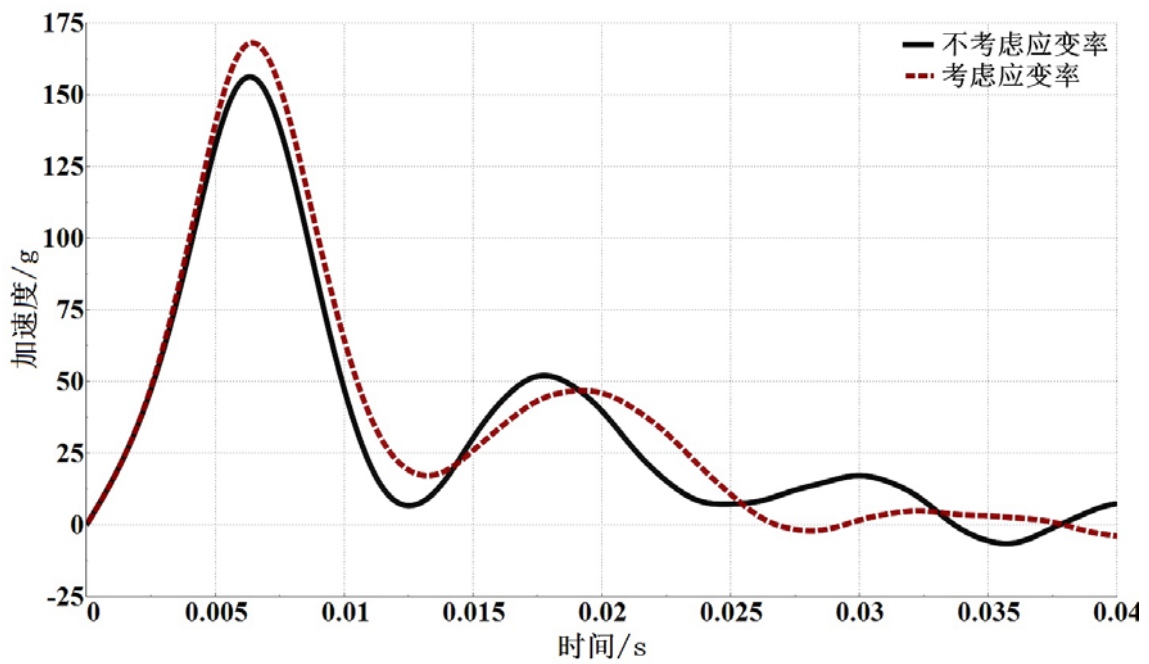


图 11 考虑应变率和不考虑应变率下下腿上端加速度

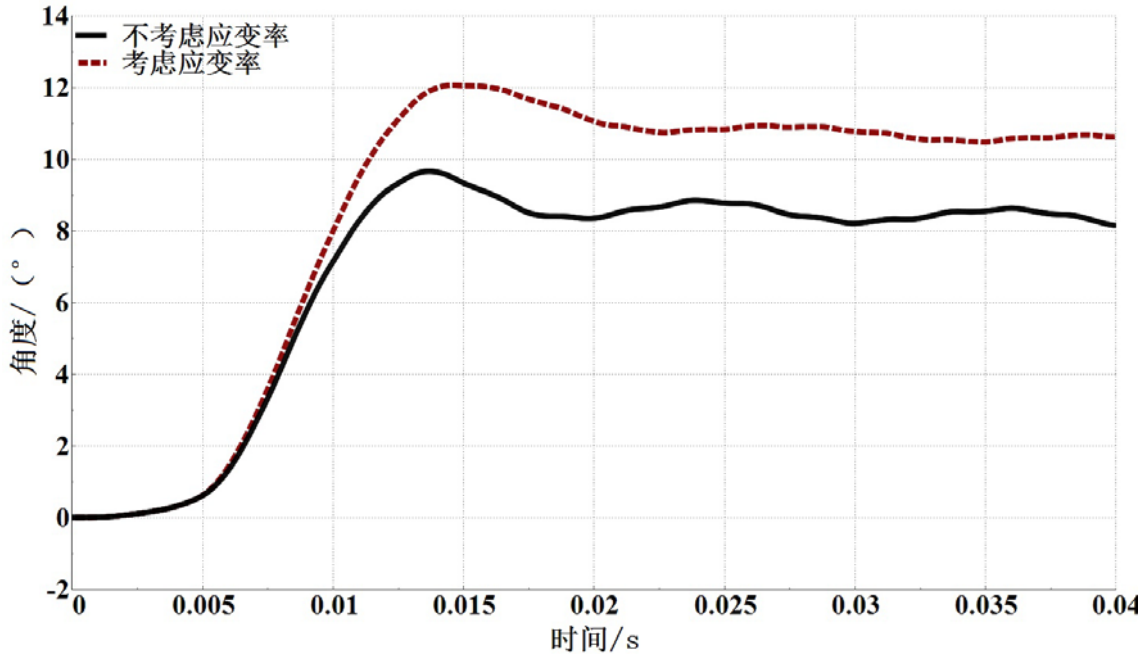


图 12 考虑应变率和不考虑应变率下膝部弯曲角度

表 2 考虑应变率和不考虑应变率下的腿模伤害值峰值

类型	膝部剪切位移	下腿上端加速度	膝部弯曲角度
考虑材料应变率	1.589	167.9	12.05
不考虑材料应变率	0.995	156.1	9.659

4 结论

利用对行人保护中腿碰模型中泡沫吸能块的密度和应变率的仿真计算，说明，随着材料密度的增加，腿碰中的膝部剪切位移和膝部弯曲角依次减小，但是加速度值反而是 20kg/m³ 的值更大。应变率对腿碰结果的影响比密度要更大，但是考虑实际碰撞中，泡沫材料具有率敏感性，考虑应变率应该是碰撞模型中首要选择。

参考文献

- [1] 曲杰, 徐梁等, 硬质聚氨酯泡沫拉伸本构模型研究[J], 机电工程技术, 2018, 47 (10): 102-105.
- [2] 马强, 车用硬质聚氨酯泡沫的力学特性研究和仿真应用[D], 广州: 华南理工大学, 2018.
- [3] Brian Croop, Hubert Lobo. Selecting Material Models for the Simulation of Foams in LS-DYNA, 7th European LS-DYNA Conference.
- [4] 陈诚, 车用硬质聚氨酯泡沫的力学实验及有限元翻转[D], 广州: 华南理工大学, 2015.
- [5] W Chen, F Lu, N Winfree High-strain-rate compressive behavior of a rigid polyurethane foam with various densities[J], Experimental Mechanics, 2002, 42 (1) :65-73.
- [6] 林玉亮, 卢芳云, 王晓燕等, 低密度聚氨酯泡沫压缩行为实验研究[J], 高压物理学报, 2006, 20 (1): 88-91.
- [7] Morten R. Jensen, Oliver Graf, Khanh D. Bui, Mike Burger, Christoph A. Maurath, LSTC Legform Impactor Finite Element Model[M], 11, 2014.
- [8]. GB/T 24550—2009, 汽车对行人的碰撞保护[S], 北京: 中国标准出版社, 2010.

Study on the application of foam material in pedestrian leg protection

Huachun Wu ,Tian He , Hongsheng Lu

(Shanghai Hengstar technology co., LTD., Shanghai 201203)

Abstract: In the stage of automobile design in China, CAE collision analysis of vehicle models has occupied an extremely important position, and the use of materials and material models plays a decisive role in the simulation results. This paper first discusses the density of foam and the influence of strain rate of foam mechanical behavior, and then based on a model to create the pedestrian protection leg (Lower Legform) collision model, calculated using by LS-DYNA solver, the effects of density and strain rate on leg Acceleration, knee Bending Angle and knee Shear Displacement stipulated by laws and regulations were studied., according to the simulation results, the foam in the pedestrian protection collision model advice.

Key words: Foam ;Material;Strain rate;Ls-dyna;The Pedestrian protection