

动态冲击下泡沫能量吸收对头盔防护性能的影响

韩勇^{1,2}, 何伟¹, 石亮亮³, 张义^{1,2}, 陈德权⁴

(1. 厦门理工学院 机械与汽车工程学院, 厦门 361024, 中国; 2. 福建省客车及特种车辆研发协同创新中心, 厦门 364024, 中国; 3. 厦门大学 航空航天学院, 厦门 361005, 中国; 4. 厦门宇途复材科技股份有限公司, 厦门 361022, 中国)

摘要: 为摩托车头盔的安全性设计, 需要研究在冲击载荷下内衬泡沫的能量吸收能力对摩托车头盔防护性能的影响。该文建立了有限元数值分析头盔模型, 依据欧洲经济委员会 (ECE) 的法规 ECE R22.05 的动态测试方法, 验证该模型的有效性。改变头盔不同测试点下的泡沫密度, 进行了 12 个跌落的仿真试验。结果表明: 在头盔的前部、冠部和后部测试点区泡沫密度由 40 kg/m^3 增加到 80 kg/m^3 时, 泡沫的能量吸收能力逐渐增大, 头部冲击能量衰减得更快, 导致 3 个测试点头部颅骨骨折的风险从 25%、55%、39% 分别增大至 53%、96%、96%。头盔右侧部测试点区域下的泡沫密度与颅骨骨折风险没有显著的关系。因而, 头盔的安全性设计应同时兼顾内衬泡沫密度与尺寸。

关键词: 摩托车头盔安全; 能量吸收; 泡沫密度; 跌落仿真; 颅骨骨折风险

中图分类号: U 483 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1674-8484.2018.04.004

Effect of foam energy absorption on protective performance of helmet under dynamic loadings

HAN Yong^{1,2}, HE Wei¹, SHI Liangliang³, WANG Fang^{1,2}, ZHANG Yi^{1,2}, CHEN Dequan⁴

(1. School of Mechanical and Automobile Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 364024, China;
2. Fujian Collaborative Innovation Center for R&D of Coach and Special Vehicle, Xiamen 364024, China;
3. School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China;
4. Xiamen Yu Quan composite technology Co., Ltd, Xiamen 361022, China)

Abstract: For the safety design of motorcycle helmet, it is necessary to study the influence of the energy absorption capacity of the liner foam under the impact load on the protective performance of the motorcycle helmet. A finite element model of the helmet was established and the effectiveness of the model was verified according to the drop test in the regulation ECE R22.05 by the Economic Commission for European. Twelve drop test simulations were performed by changing the foam density corresponding to different test points. The results show that when the foam density increases at the test points of front, crown, and rear from 40 kg/m^3 to

收稿日期 / Received : 2018-06-29.

基金项目 / Supported by : 国家自然科学基金 (51775466); 国家外专局高端团队项目 (GDT20173600037); 福建省科技创新平台项目 (2016H2003).

第一作者 / First author : 韩勇 (1984—), 男 (汉), 江西, 副教授. E-mail: yonghan@xmut.edu.cn.

第二作者 / Second author : 何伟 (1993—), 男 (汉), 湖北, 硕士. E-mail: 1127178043@qq.com.

80 kg/m³, the energy absorption capacity of the foam increases, which makes the impact energy of the head decay faster. The risk of skull fracture at the three test points increases from 25%, 55%, and 39% to 53%, 96%, and 96%, respectively. However, there is not clear evidence of the relation between the skull fracture risk and foam density at the right lateral area of the helmet. Therefore, the safety design of the helmet should take into account both the density and size of the liner foam.

Key words: motorcycle helmet safety; energy absorption; foam density; drop simulation; head skull fracture risk

摩托车驾驶人与行人在碰撞事故中的损伤机制, 如碰撞点、碰撞速度等存在差别, 但由于驾驶人头部与行人一样处于没有保护的状态, 所以摩托车驾驶人也属于弱势道路使用者 (vulnerable road user, VRU) 之一。据联合国世界卫生组织 (World Health Organization, WHO) 统计, 全世界道路死亡人数中摩托车驾驶人占到了 23%^[1]。国内外的大量研究和统计学表明头部损伤是摩托车驾驶人最常见的致命伤害, 特别是在摩托车单车碰撞及正面碰撞事故中^[2-4]。摩托车头盔能够对骑车人头部提供直接的保护, 避免摩托车驾驶人严重的头部损伤^[5-7]。在中国复杂的人车混合道路交通现象使摩托车驾驶人的伤亡率大大增加, 因而摩托车头盔的安全性设计显得至关重要。

为更加直观的研究头盔在碰撞过程中对头部的保护作用, 很多学者提出了简化的头盔物理模型。Mills 等人^[8]将头盔外壳及内衬泡沫简化为质量点, 并用弹簧和阻尼模型模拟外壳和内衬泡沫在碰撞过程中的缓冲和吸能作用。但由于该模型忽略了头盔的几何形状, 只适用于头盔顶部在线性载荷下的碰撞, 不能进行侧面等其它工况下的跌落研究, 因而存在很大的局限性。而后, 有学者开发出了复合材料外壳的头盔模型, 并提出复合材料层合板分层对冲击能量吸收具有较大影响, 这一点通过仿真与试验得到证实^[9-10]。Tinard 等人^[11]通过用 Tsai-Wu 标准对复合材料失效形式进行模拟, 提出复合材料头盔外壳的有限元建模方法, 并通过对比仿真和跌落试验数据验证了模型的有效性。在头盔内衬泡沫的研究方面, 相关学者对聚苯乙烯泡沫 (expanded polystyrene, EPS) 在高速冲击压缩下的能量吸收能力进行了试验研究和理论分析, 提出泡沫密度及应变率对泡沫材料的吸能特性具有一定影响^[12-13]。考虑 EPS 泡沫在不同温度下的性能及最佳的内衬泡沫的仿真材料也通过数值仿真与材料试验的对比得到验证^[14-15]。

现行的摩托车头盔法规有欧洲经济委员会 (Economic Commission for European, ECE) 的 ECE R22.05 及美国材料与试验协会 (American Society for

Testing Materials, ASTM) 的 ASTM-1952 等, 其评判标准主要是针对头部受到线性冲击载荷时头盔对头部的保护能力。Mitsubishi 等人^[16]通过大量头盔跌落试验表明, 改变头盔外壳及内衬材料能够使头盔的冲击吸能特性得到改善。内衬泡沫作为头盔最主要的吸能部件是研究的重点, 而本研究的目的是: 根据法规 ECE R22.05, 通过数值仿真的方法研究在不同泡沫密度下其能量吸收能力对头盔防护性能的影响。

1 方法

1.1 有限元模型

本研究使用的摩托车头盔是由宇途复材科技股份有限公司制造提供的一款 AGV 头盔, 该头盔已通过摩托车法规 ECE R22.05 的测试。在进行头盔有限元建模时, 对头盔通风口处结构及护目镜等对仿真影响较小的结构进行了简化处理。头盔的约束带用非线性弹簧单元进行简化。头盔外壳采用四节点壳单元建模。外壳模型共包含 27 738 个节点和 27 724 个四节点壳单元, 最小单元 1.3 mm, 最大单元 5.76 mm; 头盔内衬采用四节点线性四面体单元建模。内衬模型包含 40 680 个节点和 172 760 个四面体单元, 最小单元 1.5 mm。头盔模型总质量 1.493 kg (实际头盔质量: 1.490 kg)。测试使用的头型和平面钢砧使用六面体单元建模。

图 1 及图 2 分别描述了头盔外壳测试点位置及头盔内衬泡沫在不同区域的密度。表 1 描述了头盔复合材料纤维的铺层角度及测试区的厚度。

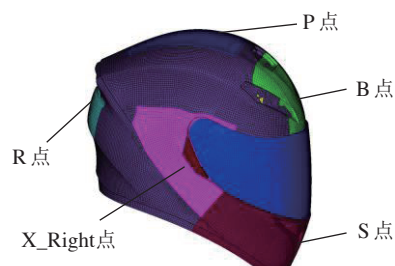


图 1 头盔外壳有限元模型及测试点

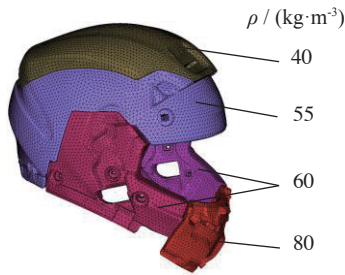


图2 头盔内衬泡沫有限元模型及不同区域密度

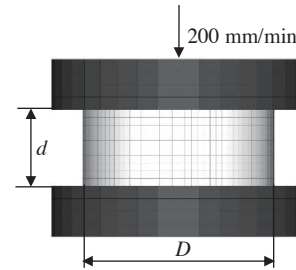


图4 泡沫材料仿真验证

表1 头盔外壳玻璃纤维铺层角度及测试区厚度

测试点	纤维铺层角度, $\alpha / (^{\circ})$	厚度, h / mm
B	± 30	2.1
X	± 30	1.8
P	± 30	1.8
R	± 30	1.2
S	± 30	1.0

1.2 材料

头盔的内衬材料为EPS泡沫,它可以通过压缩变形来吸收头部的冲击能量,达到降低头部损伤的目的^[11,17]。通过万能试验机进行泡沫材料的压缩试验,获得泡沫材料的应力—体积应变曲线。研究表明,高应变率会对泡沫材料特性产生一定影响^[13,18],所以对泡沫进行高速压缩试验能获得更加准确的性能参数。而Bouix等人^[19]的一项研究表明,对于低密度泡沫(如34、51、76 kg/m³) 在1 000 s⁻¹的高应变率下其强度会略微增加。因此本研究出于试验条件限制及安全性考虑,最终将压缩速率设置为200 mm/min。

图3为泡沫材料压缩试验的装夹示意图,试验样品直径 $D = 90 \text{ mm}$, 厚度 $d = 30 \text{ mm}$ 。

图4为泡沫材料仿真验证示意图。

由于EPS具有永久变形的材料特性,其本构模型在LS-DYNA中用具有压碎型泡沫特性的MAT 63号材料来模拟。图5给出了密度为40、60、80 kg/m³的EPS材料的应力—体积应变曲线。头盔外壳主要由玻



图3 泡沫材料压缩试验

璃纤维和环氧树脂复合而成的层合板构成,可以将头部受到的局部冲击力分散出去,防止内衬泡沫破裂,并且防止尖锐物体穿透。其本构模型在LS-DYNA中用增强复合材料型的MAT 54-55号材料来模拟。

仿真中复合材料参数参考于宋毅等人^[20]对复合材料的研究,如表2所示。仿真试验中的头型及钢砧均使用刚性材料建模。

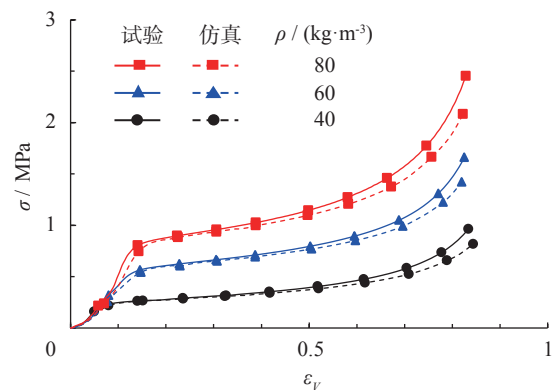


图5 三种密度泡沫的应力—体积应变曲线

表2 头盔外壳材料参数

纵向拉伸模量,	E_A / GPa	52.7
横向拉伸模量,	E_B / GPa	15.8
面内剪切模量,	G_{AB} / GPa	5.46
纵向拉伸强度,	X_T / MPa	812.0
纵向压缩强度,	X_C / MPa	755.1
横向压缩强度,	Y_C / MPa	21.4
横向拉伸强度,	Y_T / MPa	119.0
面内剪切强度,	S_C / MPa	17.3
Poison比,	ν	0.28

1.3 接触及边界条件

头盔外壳和内衬泡沫间实际存在胶粘的地方用“点对点”接触(CONTACT_TIED_NODES_TO_

SURFACE) 进行连接, 以防止外壳和泡沫之间出现相对位移。对于滑动界面, 如外壳与钢砧之间, 头型与泡沫之间的接触采用“面对面”接触 (CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE) 进行设置。Cernicchi 等人^[21]考虑了各种实际的建模问题, 将头型与内衬泡沫的静摩擦系数设置为 0.5。在 Mills 等人^[22]的研究中, 由于钢砧上覆盖有一层增加摩擦的砂纸, 头盔外壳与钢砧之间的静摩擦系数设置为 0.55。本研究中钢砧上并未覆盖砂纸, 头盔外壳与钢砧以及头型与内衬泡沫之间的静摩擦系数可分别设置为 0.4 和 0.5。头盔的约束带用两个非线性弹簧单元分别连接头盔外壳和头型脸颊处, 并将弹簧在拉伸载荷下的弹簧刚度设置为 400 kN/m。

根据摩托车法规 ECE R22.05 的要求, 将佩戴好头盔的头型同时沿着测试轨道上升到测试高度, 释放头盔和头型后做自由落体运动, 使头盔及头型落在钢砧上的速度为 7.5 m/s。图 6 描述了头盔测试点 B 的实际跌落工况及场景。为了更好的验证头盔有限元模型的有效性, 对实际跌落测试中头盔 5 个冲击点进行

了跌落仿真。图 7 描述了跌落测试及仿真过程中头盔 5 个测试点 (B、X_Left、P、R、X_Right) 跌落工况的边界条件, 跌落速度设置与试验过程中实际测得的速度一致, 钢砧 6 个自由度被完全限制。为缩短计算时间和提高仿真精度, 使跌落的距离控制在 0.5 mm 以内。根据国际标准化组织 (International Organization for Standardization, ISO) 给出的滤波方法 ISO 4687 对加速度曲线进行滤波处理, 滤波等级设置为 1 000。



图 6 头盔跌落测试

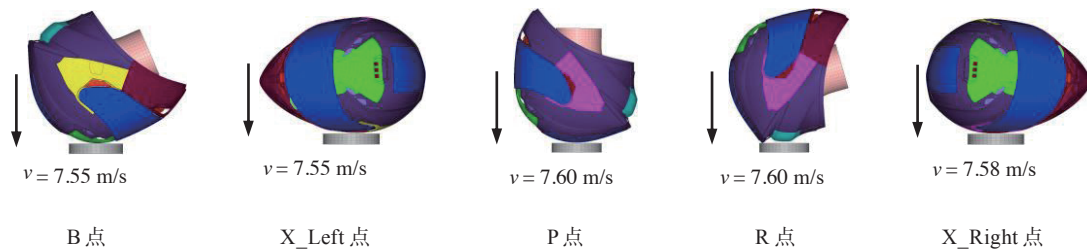


图 7 头盔测试点跌落工况

1.4 头盔跌落仿真矩阵

在有限元仿真中, 通过将头部保护区域对应的泡沫密度依次设置为 40、60、80 kg/m³, 而非头部保护区域泡沫密度保持为初始泡沫密度不变来研究 3 种不同泡沫密度下头盔损伤防护性能。选择了 4 个测试点 (B、P、R、X_Right) 进行跌落仿真, 跌落速度 7.5 m/s, 共设计了 12 组跌落仿真试验。仿真矩阵中的跌落位置及跌落速度根据法规 ECE R22.05 的要求进行设置。

2 有限元模型验证结果及误差分析

法规 ECE R22.05 规定, 头部质心合成加速度峰值不得超过 275 g, 头部损伤指标 (head injury criterion, HIC) 值不得超过 2 400。HIC 表达式为

$$HIC = \max \left\{ (t_2 - t_1) \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt \right]^{2.5} \right\}. \quad (1)$$

式中: $a(t)$ 为头部质心处的合成加速度, t_1 和 t_2 为碰撞过程中间隔不超过 15 ms 的任意 2 个时刻。将头盔跌落的仿真结果同试验数据进行对比, 验证摩托车头盔模型的有效性。

图 8 给出了头盔 5 个测试区域跌落在平面钢砧上的仿真与试验结果的头部质心加速度曲线。由图 8 可看出: 5 个测试点的加速度曲线趋势及加速度峰值与试验结果都很接近。5 种工况下的头部加速度峰值及 HIC 值见表 3。除了 B 点的 HIC 值误差偏大外, HIC 值的误差整体控制在 5.2% 以下, 加速度峰值的误差整体控制在 5% 左右。

误差的主要来源有: 1) 模型结构的简化, 忽略掉了护目镜及通风口出的细小结构, 保持系统的约束带是用非线性弹簧单元来进行模拟的; 2) 头盔外壳及泡沫实际出现的裂纹, 在材料的本构模型中都未考虑。

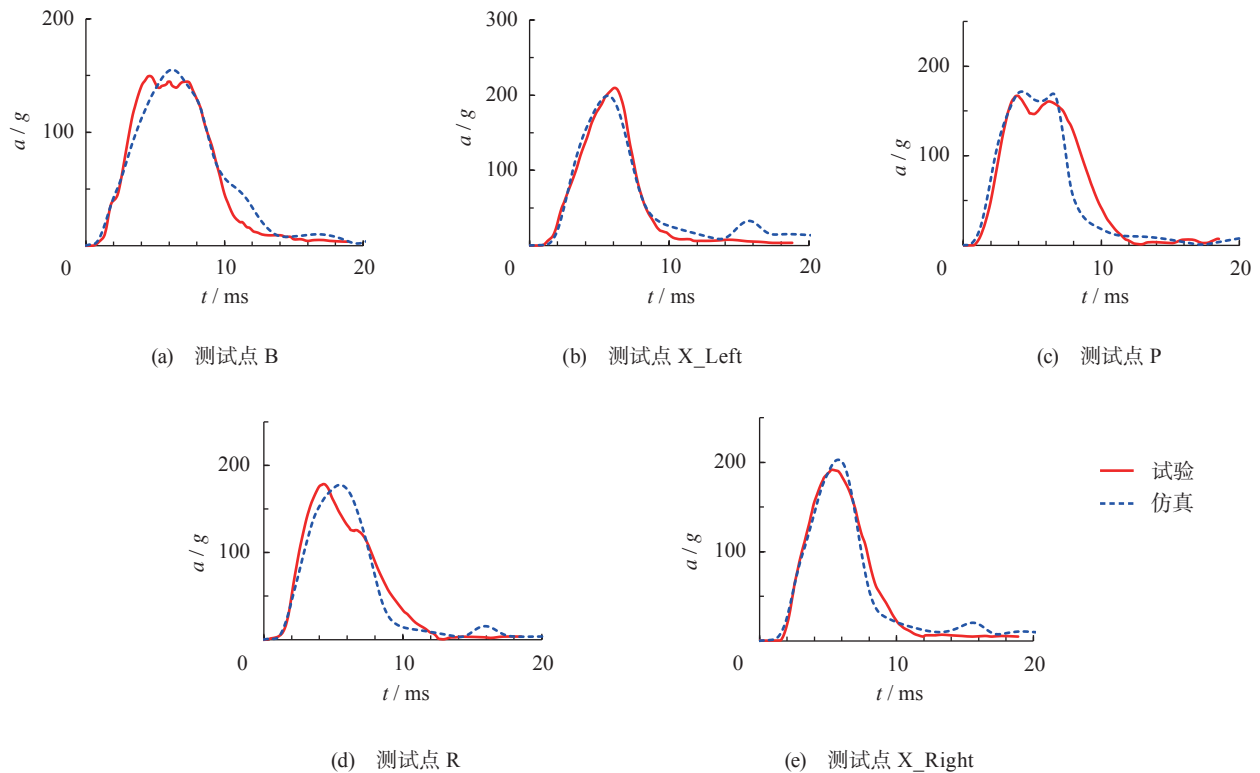


图8 试验与仿真头部质心合成加速度曲线

表3 5种跌落工况下仿真与试验参数对比

测试点	合成加速度峰值 / g		误差 / %	HIC		误差 / %
	试验值	仿真值		试验值	仿真值	
B	150	158.8	3.4	1 245	1 134	8.9
X_Left	210	199.0	5.1	1 531	1 507	1.6
P	167	171.0	2.4	1 576	1 553	1.5
R	179	177.7	0.7	1 286	1 353	5.2
X_Right	192	202.0	5.2	1 503	1 482	1.4

法规 ECE R22.05 的要求是对头盔在平面钢砧及刀砧下都要进行跌落测试,但验证过程只考虑了头盔跌落在平面钢砧下的情况。这一点 Shuaeib 等^[17]已经表示,摩托车碰撞事故中,驾驶员头部碰撞到的最常见物体是平坦的路面。所以头盔进行平面钢砧的跌落验证已经足够验证头盔的有效性。

3 泡沫材料特性对头盔防护性能的影响

3.1 密度对泡沫冲击压缩能量吸收能力的影响

头盔内衬材料具有通过永久变形来吸收头部冲击能量的特性,其能量吸收能力是影响头部损伤的重要机理。泡沫的能量吸收能力是指单位体积的 EPS 泡沫

压缩至一定应变 ε_m 时所吸收的能量,其大小可以用泡沫在变形过程中单位体积内吸收的形变功 W_v 来表示^[23],表达式为

$$W_v = \int_0^{\varepsilon_m} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon. \quad (2)$$

式中: W_v 通过对压实应变之前泡沫的应力—应变曲线进行积分求得; ε 为任意压缩应变; $\sigma(\varepsilon)$ 为任意应变下对应的应力; ε_m 为压实应变。

泡沫材料基体材质密度 $\rho_m = 613 \text{ kg/m}^3$,由 Gibson 等人^[23]给出的计算泡沫材料压实应变的经验公式,表达式为

$$\varepsilon_m = 1 - 1.4 \rho / \rho_m. \quad (3)$$

式中, ρ 为成型后泡沫材料密度。通过经验公式估算出

已知的 3 种泡沫密度 (40、60、80 kg/m³) 的压实应变分别为 0.91、0.86 和 0.82。

本文求得了处于压缩应变 0.8 前的 3 种泡沫密度下的泡沫吸收能 W_V 与压缩应变 ε 的关系曲线, 如图 9 所示。

由图 9 得出, 相同泡沫密度下, 泡沫压缩应变越大, 其吸收的能量越多; 在相同压缩应变下, 高密度泡沫吸收能量要高于低密度泡沫吸收的能量。

3.2 泡沫能量吸收能力对头部质心加速度的影响

根据设计的 12 组仿真跌落试验, 得出 4 个测试点在不同泡沫密度下头部合成加速度曲线, 如图 10 所示。

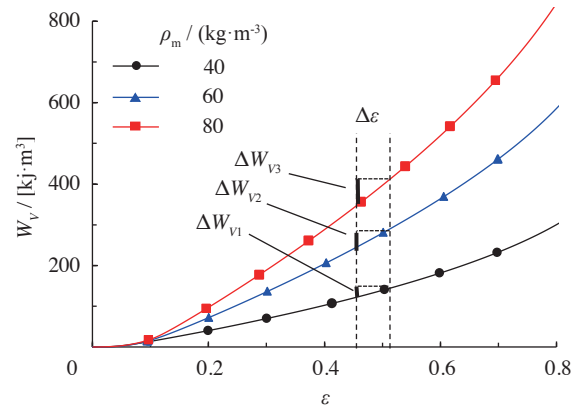


图 9 泡沫冲击压缩时吸收的能量

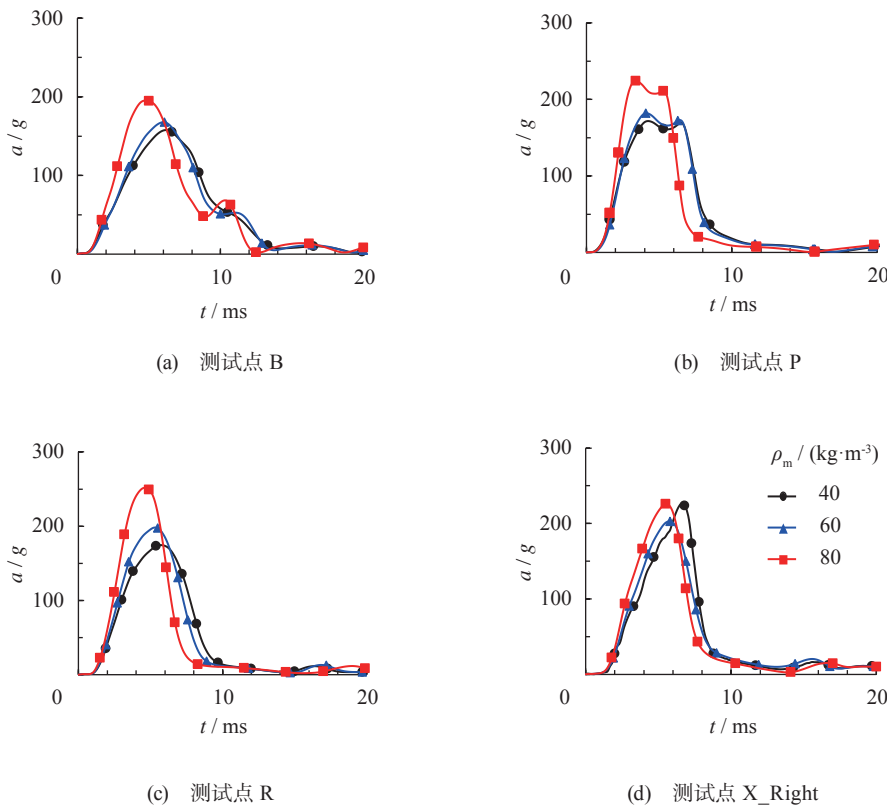


图 10 不同泡沫密度下各测试点头部质心合成加速度

现将 3 种泡沫密度 (40、60、80 kg/m³) 分别用 ρ_{m1} 、 ρ_{m2} 、 ρ_{m3} 来表示。由图 10 得出, 测试点 B、P、R 对应的头部合成加速度峰值随着泡沫密度的增加而增大。不同泡沫密度下 3 个测试点的头部合成加速度峰值的区间分别为 [157, 195] g、[171, 224] g 和 [174, 251] g。测试点 B 的头部加速度峰值整体处于最低水平, 测试点 R 整体处于最高水平。

从图 9 描述的泡沫能量吸收能力进行分析。在泡沫压实段前任意两个应变时刻 t_1 与 t_2 对应的应变区间

$\Delta\varepsilon$ 下, 泡沫所吸收的能量满足

$$\Delta W_{V3} > \Delta W_{V2} > \Delta W_{V1}. \quad (4)$$

当这两个应变时刻 t_1 与 t_2 无限趋近时, 及 $\Delta\varepsilon$ 趋近于 0 时, 泡沫在这一微小时间段 Δt 下吸收的能量满足

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \Delta W_{V3} > \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \Delta W_{V2} > \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \Delta W_{V1}. \quad (5)$$

式 (5) 说明: 在泡沫进入到压实段前任意微小时间段内, 高密度泡沫吸收的能量同样高于低密度泡沫所吸收的能量, 使得头部冲击能量在相同时间下衰减较

快, 导致头部加速度增加。

测试点 X_Right 下头部合成加速度峰值未表现出随泡沫密度的增加而增大的趋势, 头部加速度出现先减小后增大的结果。从泡沫在冲击压缩吸能过程中吸能区域的应变值的角度考虑。图 11 为 3 种泡沫密度下不同测试点泡沫吸能区域的应变图。

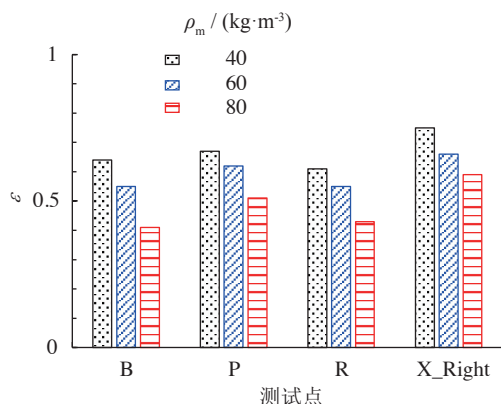


图 11 不同泡沫密度下各测试点泡沫压缩区域的应变

由图 11 可得出: 在泡沫密度为 ρ_{m1} 时, 相比较测试点 X_Right, 测试点 B、P、R 下泡沫压缩吸能区域的压缩应变距离压实应变值较远, 泡沫在此区域内仍然具有相当好的压缩吸能能力。而测试点 X_Right 在泡沫密度为 ρ_{m1} 时泡沫的压缩应变最接近压实应变, 泡沫很难通过永久压缩变形来吸收能量, 使得头部加速度变得比泡沫密度为 ρ_{m2} 时的更大。

3.3 泡沫能量吸收能力对颅骨骨折风险的影响

本文采用头部 HIC 值来评估头部发生颅骨骨折的损伤风险。图 12 为 3 种泡沫密度下的不同测试点头部 HIC 值。

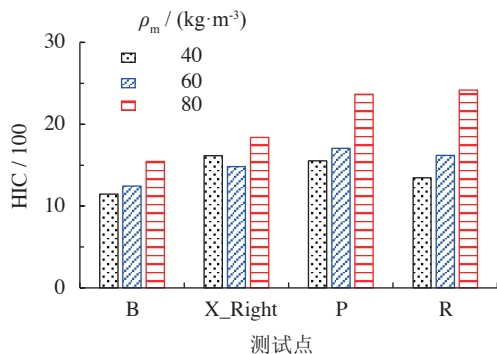


图 12 不同泡沫密度下各测试点头部 HIC 值

为更加清晰的说明不同泡沫密度下头盔对头部的保护性能, 本文运用 Mertz 等人^[24]得出的颅骨骨折的风险 R_f 与 HIC 的关系曲线, 将头盔 4 个测试点 (B、P、R、X_Right) 在不同泡沫密度下头部 HIC 值对应于该风险曲线下, 如图 13 所示。

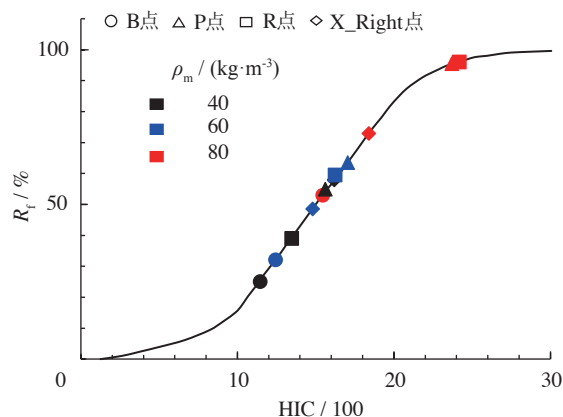


图 13 不同泡沫密度下的颅骨骨折风险

由图 13 得出, 发生颅骨骨折风险同 HIC 值与泡沫能量吸收能力的关系一致, 即除测试点 X_Right 外, 测试点 B、P、R 发生颅骨骨折的风险随着泡沫密度的增大而增加。泡沫密度为 ρ_{m1} 时的测试点 B 的颅骨骨折风险最低, 仅在 25% 左右。泡沫密度为 ρ_{m3} 时, 各个测试点产生颅骨骨折的风险极高, 特别是测试点 P 和 R, 颅骨骨折风险均超过了 95%。这一点与泡沫密度对头部加速度值和 HIC 值的影响相契合, 同样可以从泡沫材料的能量吸收能力作出分析。

泡沫密度为 ρ_{m1} 的 X_Left 点发生颅骨骨折的风险达到了 58%, 而在 ρ_{m2} 的泡沫密度下发生颅骨骨折的风险降低到了 48.3%, 在 ρ_{m3} 的泡沫密度下发生颅骨骨折的风险增加到了 73%。根据图 11 从泡沫的材料特性分析: 测试点 X_Right 在泡沫密度为 ρ_{m1} 时压缩应变值最接近压实应变, 泡沫很难通过永久压缩变形来吸收能量。而且此时也更容易发生内衬泡沫触底的现象使颅骨骨折的风险大大提高。

这在一项关于自行车头盔对骑车人头部碰撞 A 柱的保护性能的研究中已经提出^[25]。当泡沫密度为 ρ_{m2} 和 ρ_{m3} 时压缩应变离压实应变较远, 所以导致头部颅骨骨折风险的主要因素可能是泡沫密度而不是压实应变。此时由于高密度泡沫吸收头部能量比低密度泡沫快的关系, 使得头部冲击能量衰减迅速, 导致头部发生颅骨骨折风险增大。

3.4 固定头盔型号的最佳泡沫密度设计

ECE R22.05 规定的头型按照尺寸可划分 A、C、E、G、J、K、M、O 型 8 种, 而头盔外壳的尺寸都是相同的。根据头盔与头型的匹配关系, 对于确定型号的头盔, 泡沫尺寸已经固定, 故头盔与头型间相互匹配的关系取决于内衬泡沫尺寸与头型型号。对于确定的头盔型号, 通过设计更加细致的泡沫密度梯度, 进行跌落仿真得出各泡沫密度下颅骨骨折风险值, 将数据进行曲线拟合后可求得使颅骨骨折风险最小的泡沫密度。

根据本文研究的结果: 测试点 X_Right 下颅骨骨折风险随泡沫密度的增加出现先减小后增加的结果, 可以对该测试点泡沫密度进行最优化设计。图 14 为本文研究中的测试点 X_Right 的曲线拟合结果, 从图中可得出该测试点下更优的泡沫密度估计为 55 kg/m^3 。

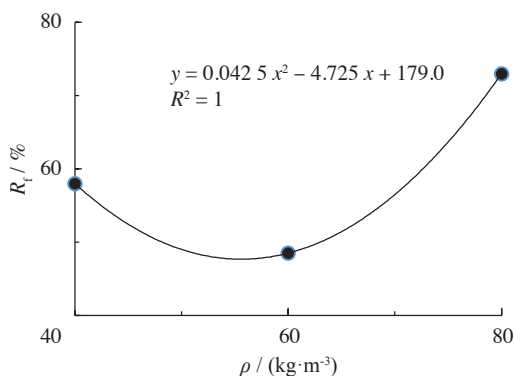


图 14 颅骨骨折风险拟合曲线

4 结 论

1) 通过头盔跌落仿真结果与试验测试数据对比表明仿真误差整体控制较好, 头盔有限元模型的有效性得到验证。该模型可被用于泡沫材料吸能对头盔损伤防护性能的影响研究。

2) 在保证头盔内衬泡沫尺寸的前提下, 低密度泡沫吸收头部能量要比高密度泡沫缓慢, 使头部质心合成加速度峰值较小, 从而降低头部发生颅骨骨折的风险。研究中的测试点 B、P、R, 当泡沫密度由 40 kg/m^3 增加到 80 kg/m^3 时颅骨骨折风险分别从 25%、55%、39% 分别增大至 53%、96%、96%。

3) 泡沫密度越低且尺寸越小时会使泡沫压缩应变更容易接近压实应变, 从而出现泡沫触底现象, 使头部冲击能量瞬间变化较大, 导致颅骨骨折风险显著增加。因此, 头盔的安全性设计应合理考虑泡沫密度和尺寸, 避免泡沫压缩到压实应变和内衬泡沫发生触底

现象。对研究中的 M 型号头盔的测试点 X_Right 的泡沫进行最优密度设计得出泡沫密度为 55 kg/m^3 时颅骨骨折风险可能最小。

参考文献 (References)

- [1] World Health Organization. Global status report on road safety 2015 [R/OL]. Geneva: United Nations. (2016-09-01). [http:// apps.who.int/iris/bitstream/10665/189242/1/9789241565066_eng.pdf?ua=1](http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/189242/1/9789241565066_eng.pdf?ua=1).
- [2] Peekasa C, Kraus J F. Injuries sustained by motorcycle riders in the approaching turn crash configuration [J]. *Accident Analysis & Prevention*, 1996, **28**(5): 561-569.
- [3] Ankarath S, Giannoudis P V, Barlow I, et al. Injury patterns associated with mortality following motorcycle crashes [J]. *Injury-Int'l J Care Injured*, 2002, **33**(6): 473-477.
- [4] 白茹, 陈明. 498 例海口市道路交通事故死亡案例的法医学分析 [J]. *法医学杂志*, 2017, **33**(6): 604-606.
BAI Ru, CHEN Ming. Forensic analysis of 498 road traffic accident deaths in Haikou city [J]. *J Forensic Medicine*, 2017, **33**(6): 604-606.
- [5] Povey L J, Frith W J, Graham P G. Cycle helmet effectiveness in New Zealand [J]. *Accident Analysis & Prevention*, 1999, **31**(6): 763-70.
- [6] Khor D, Inaba K, Aiolfi A, et al. The impact of helmet use on outcomes after a motorcycle crash [J]. *Injury-Int'l J Care Injured*, 2017, **48**(5): 1093-1097.
- [7] Hering A M, Derler S. Motorcycle helmet drop tests using a hybrid III dummy [C]// *Proc 2000 Int'l Ircobi Conf Biomechanics of Impacts*, Montpellier, France, Sept 20-22, 2000: 307-321.
- [8] Mills N J, Gilchrist A, Rowland F J. Mathematical modelling of the effectiveness of helmets in head protection [C]// *Proc 1988 Int'l Ircobi Conf Biomechanics of Impacts*, Bergisch-Gladbach, Germany, Sept 14-16, 1988: 215-226
- [9] Kostopoulos V, Markopoulos Y P, Giannopoulos G, et al. Finite element analysis of impact damage response of composite motorcycle safety helmets [J]. *Composites Part B Engi*, 2002, **33**(2): 99-107.
- [10] Iannucci L. Dynamic delamination modelling using interface elements [J]. *Computers & Structures*, 2006, **84**(15-16): 1029-1048.
- [11] Tinard V, Deck C, Willinger R. Modelling and validation of motorcyclist helmet with composite shell [J]. *Int'l J Crashworthiness*, 2012, **17**(2): 209-215.

- [12] 胡俊, 韦璐. 聚苯乙烯泡沫应力-应变模型及吸能性能研究 [J]. 应用力学学报, 2015(3): 430-434.
HU Jun, WEI Lu. A study on the stress-strain model and energy absorption capability of the expanded polystyrene foam [J]. *Chin J Appl Mech*, 2015(3): 430-434.
- [13] 王志亮, 诸斌. EPS 泡沫冲击压缩和吸能特性试验研究 [J]. 建筑材料学报, 2013, 16(4): 630-636.
WANG Zhiliang, ZHU Bin. Experimental study on impact compression and energy-absorbing property of expanded polystyrene foam [J]. *J Building Mat*, 2013, 16(4): 630-636.
- [14] Aiello M, Galvanetto U, Iannucci L. Numerical simulations of motorcycle helmet impact tests [J]. *Int'l J Crashworthiness*, 2007, 12(1): 1-7.
- [15] Croop B, Lobo H. Selecting material models for the simulation of foams in LS-DYNA [C]// *7th European LS-DYNA Conf*, Salzburg, Austria, 2009: 1-6.
- [16] Mitsuishi H, Ono K, Nishimoto T, et al. Present and future performance levels of head injury protection for motorcycle helmets: An attempt to search for better impact energy absorption property for helmets [C]// *Proc 1994 Int'l Ircobi Conf Biomechanics of Impacts*, Lyon, France, Sept 21-23, 1994: 259-270.
- [17] Shuaeib F M, Hamouda A M S, Hamdan M M, et al. Motorcycle helmet: Part II. Materials and design issues [J]. *J Mat Processing Tech*, 2002, 123(3): 422-431.
- [18] Viot P, Beani F. Polypropylene foam behavior under compressive loading at high strain rate [C]// *Structures Under Shock and Impact VIII*, Crete, Greece, 2004: 507-516.
- [19] Bouix R, Viot P, Lataillade J L. Polypropylene foam behaviour under dynamic loadings: Strain rate, density and microstructure effects [J]. *Int'l J Impact Engi*, 2009, 36(2): 329-342.
- [20] 宋毅, 王璠. 复合材料层合圆柱壳体缓冲吸能的实验与模拟 [J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2009, 37(12): 140-145.
SONG Yi, WANG Pan. Test and simulation of cushioning energy-absorbing property of composite-laminated cylindrical shell [J]. *J South Chin Univ of Tech: Nat Sci Ed*, 2009, 37(12): 140-145.
- [21] Cernicchi A, Galvanetto U, Iannucci L. Virtual modelling of safety helmets: practical problems [J]. *Int'l J Crashworthiness*, 2008, 13(4): 451-467.
- [22] Mills N J, Wilkes S, Derler S, et al. FEA of oblique impact tests on a motorcycle helmet [J]. *Int'l J Impact Engi*, 2009, 36(7): 913-925.
- [23] Gibson L J, Ashby M F. Cellular solids: structure and properties [M]. Cambridge, Cambridge University Press, 1997: 1-528.
- [24] Mertz G N H J, Prasad P. Head injury risk assessment for forehead impacts [R]. *SAE Tech Paper*, 960099, 1996.
- [25] Mizuno K, Ito D, Oida K, et al. Head protection with cyclist helmet in impact against vehicle A-pillar [J]. *Int'l J Crashworthiness*, 2017, 22(3): 322-331.