

文章编号:1004-7220(2022)03-0460-07

气囊式头盔防护下的两轮车骑车人头部损伤风险分析

孟恒帅¹, 毛征宇¹, 马华星¹, 王方², 肖志³, 李桂兵¹(1.湖南科技大学机电工程学院,湖南湘潭 411201; 2.长沙理工大学汽车与机械工程学院,长沙 410114;
3.湖南大学机械与运载工程学院,长沙 410082)

摘要:目的 提出一种气囊式头盔缓冲内衬结构,并分析其对两轮车骑车人头部损伤的防护效果。方法 将气囊式内衬应用于自行车(半盔)和摩托车(全盔)两款典型的两轮车骑车人头盔,通过标准 GB 24429-2009 和法规 ECE R22.05 测试工况下的有限元碰撞仿真,获得人体头部模型运动学和生物力学响应,从颅骨骨折和颅脑损伤风险角度对比常规聚苯乙烯泡沫塑料(expanded polystyrene, EPS)头盔,综合评价气囊式头盔的防护性能。结果 当气囊压力为 0.06 MPa 时,气囊式头盔(半盔/全盔)防护下的人体头部颅骨骨折相关量分别小于 120 g 和 150 g,颅骨骨折风险基本低于 40%;颅脑最大主应变均小于 0.3,轻度脑损伤风险均低于 25%;气囊式头盔防护下的人体颅骨骨折和颅脑损伤风险均低于 EPS 头盔。结论 本文设计的气囊式头盔具有较好的防护效果,能兼顾颅骨骨折和颅脑损伤防护,可以为新型头盔的设计提供基础示例。损伤风险分析也可为骑车人头部损伤应急诊断提供初步参考。

关键词:气囊式头盔;有限元仿真;颅骨骨折;颅脑损伤;防护性能

中图分类号:R 318.01 文献标志码:A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2022.03.012

Analysis on Head Injury Risk of Two-Wheeler Cyclists under Protection of Helmets with Airbag

MENG Hengshuai¹, MAO Zhengyu¹, MA Huaxing¹, WANG Fang², XIAO Zhi³, LI Guibing¹

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, Hunan, China; 2. School of Automobile and Mechanical Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China; 3. School of Mechanical and Transportation Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: **Objective** To propose an airbag-type helmet cushioning lining structure and analyze its protective effect on head injury of two-wheeled bicycle riders. **Methods** The airbag lining was applied to two typical two-wheeled bicycle helmets for bicycles (half helmets) and motorcycles (full helmets). Then kinematic and biomechanical responses of the human head model were predicted from impact simulations under test conditions of the standard GB 24429-2009 and the regulations ECE R22.05, and conventional expanded polystyrene (EPS) helmets were compared from the perspective of skull fracture and brain injury risk, so as to make comprehensive evaluation on protective performance of the airbag helmet. **Results** When the airbag pressure was 0.06 MPa, the relevant amount of human skull fracture under protection of airbag helmet (half/full helmet) was smaller than 120 g and 150 g, respectively; the risk of skull fracture was basically lower than 40%; the maximum principal strains of the

收稿日期:2021-06-01; 修回日期:2021-07-22

基金项目:国家自然科学基金青年项目(51805162),湖南省教育厅优秀青年项目(20B233),湖南省教育厅重点项目(18A188)

通信作者:李桂兵,副教授,E-mail: guibing.li@hnust.edu.cn

brain were both smaller than 0.3, which indicated that the risk of mild brain injury was lower than 25%. Generally, the risk of human skull fracture and head injury under protection of airbag helmets was lower than that under protection of EPS helmets. **Conclusions** The airbag helmet designed in this study has a good protective effect, which can give attention to the protection of both skull fracture and head injury, providing a basic example for the design of novel helmet. Injury risk analysis can also provide the preliminary reference for emergency diagnosis on head injury of cyclists.

Key words: airbag helmet; finite element simulation; skull fracture; brain injury; protection performance

两轮车是发展中国家人们出行的重要交通工具,截至2018年底,我国的电动两轮车保有量将达到2.9亿辆,预计到2035年这一数据将突破3.5亿辆^[1]。每年车辆碰撞事故在全球范围内造成数万辆两轮车骑车人的死亡案件和巨大经济损失^[2],两轮车骑车人的道路交通安全已经成为重大社会问题。汽车-两轮车碰撞事故中,头部损伤是导致骑车人重伤和死亡的主要损伤类型^[3-4]。2020年公安部在全国范围内开展了“一盔一带”安全守护行动,中国新车评价规程(C-NCAP)2021版正式推出了涵盖两轮车骑车人头部碰撞区域的汽车安全评价体系^[5]。研究数据表明,头盔可以降低20%~45%严重或致命头部损伤^[6]。因此,佩戴头盔是骑车人头部损伤防护的有效方法,设计更加安全的两轮车头盔具有重要意义。

国内外已有学者对两轮车骑车人开展大量研究,主要集中在头盔防护性能评价和结构优化两个方面。① 头盔防护性能评价研究。Han等^[7]重建3起交通事故,并且依据事故信息对重建事故进行验证。结果表明,头盔对骑车人头部防护不足,该结果为头盔的安全设计提供更全面的参考。有学者探讨不同载荷对人体头部和颈椎的影响,研究结果可以为头盔的新型设计和防护系统提供参考^[8-9]。Zahid等^[10]以防爆头盔聚苯乙烯泡沫(expanded polystyrene, EPS)塑料吸能衬垫为研究对象,从头盔的不同位置进行冲击试验,评估头盔对不同冲击位置能量和力的吸收效果,并解释头盔不同部位差别的原因。Cai等^[11]研究认为,头盔保护效果与头盔和头部的接触贴合度有密切关系,并利用头盔形状数据库提出一种基于头部形状的头盔试装推荐系统的设计方法,为头盔佩戴者提供建议。Kostopoulos等^[12]建立头盔有限元模型,利用参数化分析方法研究复合材料壳体刚度和冲击对摩

头车头盔的动力学响应,结果表明,具有较低剪切性能的复合材料壳体使头盔的耐撞性能得到提高。② 头盔结构优化研究。韩勇等^[13]对不同密度的EPS泡沫材料进行力学性能测试,并进行不同部位和不同泡沫密度的头盔跌落仿真,得出头盔不同测试点防护性能与泡沫密度的关系,该结果可以为头盔的安全设计提供参考。Gao等^[14]通过分析内衬材料密度和厚度对头部损伤的影响发现,内置20、30 mm泡沫垫的头盔可以满足对能量吸收性能的要求。然而有限元模拟结果表明,头部损伤中仍然存在较高的颅骨骨折和脑损伤风险。但前人的研究基本局限于泡沫缓冲内衬,鲜有研究针对其他类型缓冲内衬设计。

佩戴头盔是骑车人头部防护的有效举措,其可在一定程度上降低骑车人头部损伤及死亡概率。但事故数据表明,现有头盔在对骑车人头部防护上仍存在明显不足。贾晓红等^[15]研究发现,头盔质量和质心对骑车人颈部肌肉响应有明显的影响,并提出头盔设计过程中应该考虑轻量化。本研究兼顾头盔防护性能和轻量化设计,提出一种气囊式缓冲内衬结构,将其应用于两款典型的两轮车骑车人头盔中,并对比分析常规EPS头盔和气囊式头盔在国标GB 24429-2009《运动头盔 自行车、滑板、轮滑运动头盔的安全要求和试验方法》和欧盟法规ECE R22.05《关于批准摩托车和轻便摩托车驾驶员和乘客的防护头盔及其面罩的统一规定》测试工况下对人体头部损伤的防护性能。

1 仿真模型建立

1.1 气囊式头盔建模

选用两款典型EPS两轮车骑车人头盔,通过三维激光扫描获取内外几何点云数据,以此建立其基础有限元模型(见图1)。

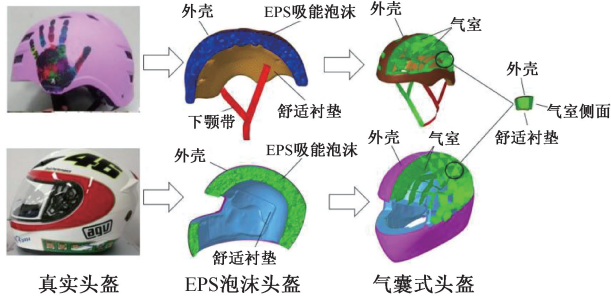


图1 气囊式头盔
Fig.1 Airbag helmet

头盔有限元模型主要包括:外壳、吸能泡沫、舒适衬垫及下颚带;其中外壳、舒适衬垫、气室侧面、下颚带为壳单元,吸能泡沫为四面体单元。半盔外壳单元数为 6 386,节点数为 3 405,单元尺寸为 8 mm;全盔外壳单元数为 24 595,节点数为 24 405,单元尺寸为 4 mm。半盔吸能泡沫单元数为 65 541,节点数为 15 276,单元尺寸为 7 mm;全盔吸能泡沫单元数为 192 338,节点数为 41 160,单元尺寸为 8 mm。半盔舒适衬垫单元数为 10 266,节点数为 5 345,单元尺寸为 6 mm;全盔舒适衬垫单元数为 35 173,节点数为 17 580,单元尺寸为 8 mm。其中,外壳材料为丙烯腈·丁二烯·苯乙烯(acrylonitrile butadiene styrene, ABS),内衬材料为 EPS,下颚带材料为尼龙。头盔各结构材料属性在 LS-DYNA 软件环境中定义:头盔外壳为具有塑性的 ABS 材料,选用弹塑性材料 MAT_24 号表示^[16-19];内衬吸能泡沫采用可破碎泡沫材料模型 MAT_63 模拟^[19-20];舒适衬垫选择弹性材料 MAT_1 模拟^[18];下颚带采用各向异性弹性织物材料 MAT_34 模拟^[21](见表 1)。

在 EPS 头盔模型基础上,保证其内表面几何不变,设计由多个密闭气室(类似于蜂巢结构)组成的气囊来代替基础头盔的 EPS 泡沫层,利用气囊的增程缓冲作用来减小头部加速度。气囊蒙皮材料定义为密闭织布材料,选用 MAT_34 号材料模型模拟,采用缓冲气囊式结构的半盔和全盔质量分别为较原 EPS 头盔降低了 34% 和 29%。气室压力采用 LS-DYNA 中常用于汽车轮胎建模的简单体积压力(Airbag _ Simple _Pressure Volume)定义,本文参考文献[22]中人体头部防护要求,将气囊压力设置为 60 kPa。

表 1 头盔有限元模型材料参数

Tab.1 Material parameters of helmet finite element model

头盔部件	真实材料	本构模型	弹性模量/GPa	泊松比	材料密度/(g·cm ⁻³)
外壳	ABS	MAT_24	2.0	0.4	1.10
吸能泡沫	EPS	MAT_63	0.02	0.1	0.08
舒适衬垫	织布	MAT_1	0.05	0.3	0.18
气囊蒙皮下颚带	尼龙	MAT_34	0.30	0.2	0.88

1.2 法规工况下碰撞模型建立

依据国标 GB 24429-2009 和法规 ECE R22.05 的测试要求,采用 THUMS_4.0 头部有限元模型进行法规工况碰撞仿真,该头部模型已经经过冲击验证^[23]。依据国标 GB 24429-2009 和法规 ECE R22.05 规定的头盔测试工况,分别建立如图 2 所示的 A、B、C、D(GB 24429-2009)和 B₁、P、X、S(ECE R22.05)不同测试点碰撞仿真模型。仿真模型中头部和头盔内衬及下颚带之间的接触定义为面-面接触,摩擦因数设置为 0.3^[24];头盔外壳和吸能

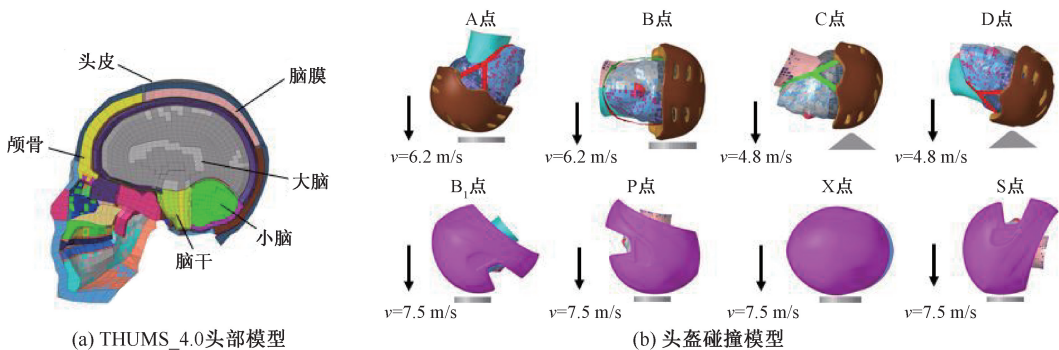


图 2 人体头部模型及法规工况碰撞仿真模型

Fig.2 Human head model and impact simulation models under regulatory conditions (a) THUMS_4.0 head model, (b) Helmet collision model

泡沫之间通过共节点的方式连接。参考韩勇等^[13]的研究,头盔的约束用非线性弹簧分别连接头盔外壳和头型脸颊处,用来代替下颚带的预紧作用,并将弹簧在拉伸载荷下的弹簧刚度设置为100 kN/m。碰撞仿真中,半盔与平砧的碰撞速度为6.2 m/s,与尖砧的碰撞速度为4.8 m/s;全盔的碰撞速度为7.5 m/s;头盔和钢砧之间的摩擦因数设置为0.4^[24]。

2 头盔防护性能分析

为了分析头盔对头部损伤的防护性能,采用可有效表征骑车人常见头部损伤(颅骨骨折和脑损伤)的颅骨骨折相关量(skull fracture correlate, SFC)和颅脑(大脑、小脑及脑干)最大主应变(maximum principal strain, MPS)为评价指标^[25-27],并对比分析气囊式头盔与EPS头盔的防护性能。其中,SFC的

详细计算过程如下:

$$\text{HIC} = \left\{ \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a_t dt \right]^{2.5} (t_2 - t_1) \right\}_{\max}$$

$$\Delta T_{\text{HIC}} = t_2 - t_1$$

$$\Delta V_{\text{HIC}} = \int_{t_1}^{t_2} a_t dt$$

$$\text{SFC} = \Delta V_{\text{HIC}} / \Delta T_{\text{HIC}}$$

式中: t_1 和 t_2 为时间; a_t 为头部加速度。MPS则利用HyperView后处理软件直接输出获得。

2.1 颅骨骨折损伤风险

图3所示为半盔和全盔头盔内衬分别为气囊和EPS吸能泡沫时在不同碰撞测试点仿真输出的头部加速度曲线及SFC值。结果表明,所有碰撞工况下,气囊式头盔防护的人体头部加速度峰值和SFC值均低于EPS头盔,且气囊式半盔和全盔防护下的SFC值分别低于120 g和150 g。

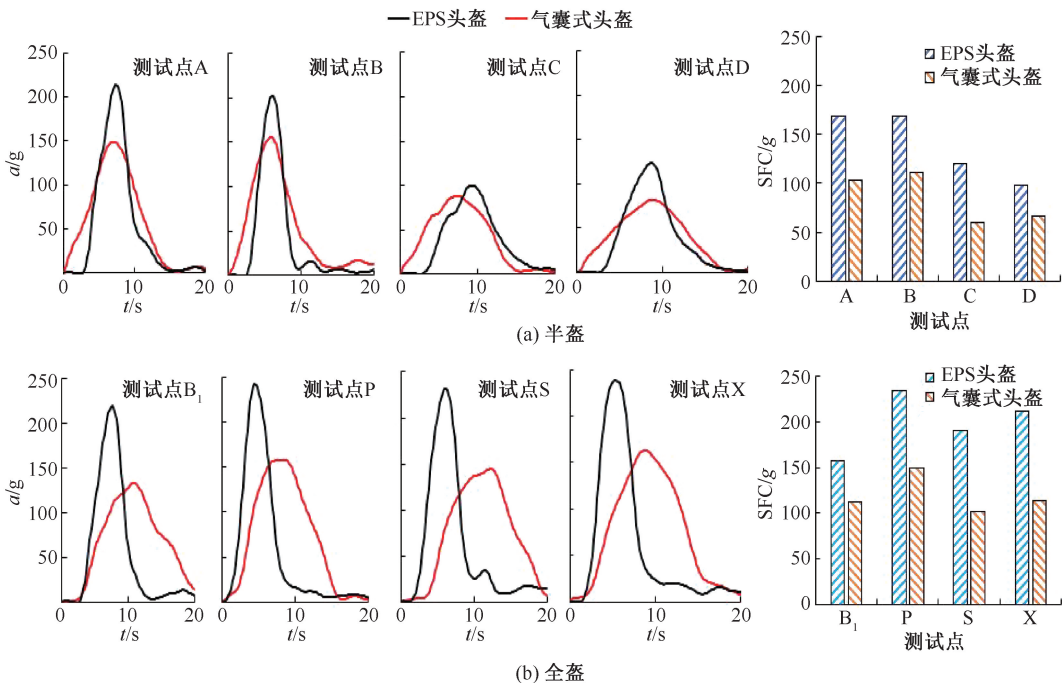


图3 两种头盔加速度及SFC值对比

Fig.3 Comparison of acceleration and SFC of two helmets (a) Half helmet, (b) Full helmet

为了更加清晰的说明气囊式头盔对颅骨骨折的防护性能,参考颅骨骨折的风险 R_t 和SFC的关系曲线^[25],将头盔在4个碰撞测试点的SFC值对应于该风险曲线。结果表明:

(1) 半盔时,气囊式头盔在4个碰撞测试点的

颅骨骨折的风险不到30%,能有效防护颅骨骨折;而EPS头盔在碰撞测试点A点和B点的颅骨骨折的风险高达78%,头部易发生骨折[见图4(a)]。

(2) 全盔时,EPS头盔在4个碰撞测试点的颅骨骨折发生的概率都超过60%,P、S、X点的头部

骨折风险甚至超过 85%,对颅骨骨折的防护严重不足;然而,气囊式头盔在 4 个碰撞测试点中只有

P 点的颅骨骨折发生概率在 50% 以上 [见图 4(b)]。

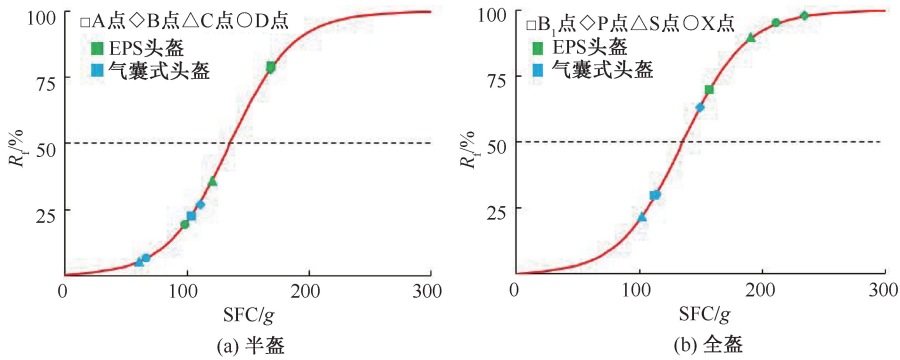


图 4 两种头盔颅骨骨折概率
Fig.4 Probability of skull fracture in two helmets (a) Half helmet, (b) Full helmet

2.2 颅脑损伤风险

图 5 所示为半盔和全盔头盔内衬分别为气囊和 EPS 吸能泡沫时在不同碰撞测试点仿真输出的颅脑应变云图。结果表明:与 EPS 头盔相比,气囊式头盔能明显降低颅脑应变峰值,减小

颅脑高应变区域面积。半盔时,气囊式头盔防护下的 MPS 均小于 0.3,而 EPS 头盔在碰撞测试点 B、D 的 MPS 分别为 0.49 和 0.37;全盔时,气囊式头盔和 EPS 头盔在 4 个碰撞测试点的 MPS 都低于 0.3。

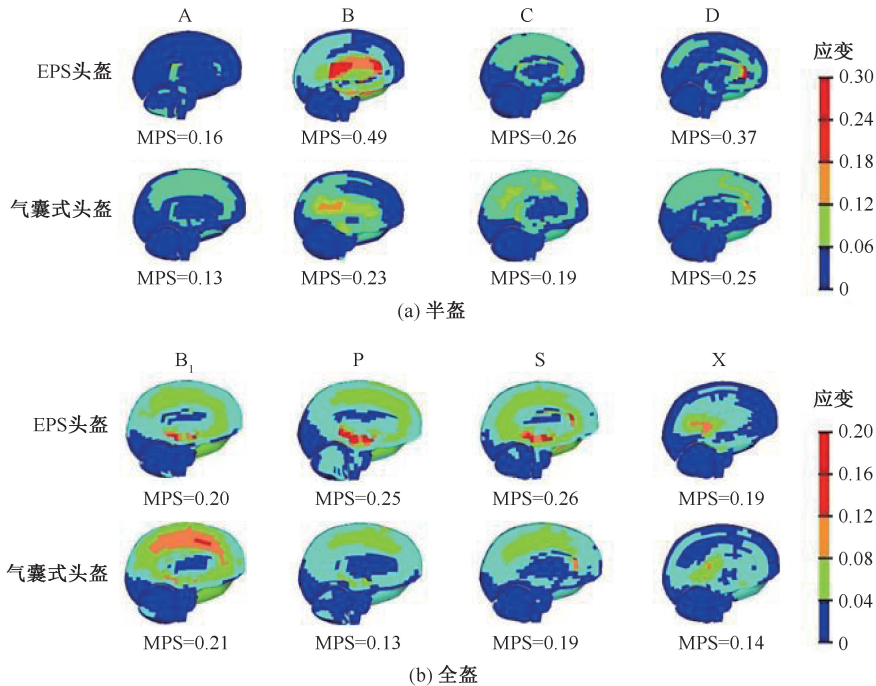


图 5 头盔内衬分别为气囊和 EPS 泡沫时头部应变云图
Fig.5 Head strain nephogram when the helmet lining is airbag and EPS foam respectively
(a) Half helmet, (b) Full helmet

为了更加清晰地说明气囊式头盔对脑损伤的防护作用,运用 MPS 和轻度脑损伤风险 (AIS2+) 的

关系^[25],基于仿真输出的 MPS 计算获得轻度脑损伤风险(AIS2+)发生的概率 R_{AIS2+} 。结果表明,半盔

时,气囊式头盔在 4 个碰撞测试点的 R_{AIS2+} 在 25% 以下,能有效地防护脑损伤;而 EPS 头盔在碰撞测试点 B 和 D 的 R_{AIS2+} 分别为 60% 和 33%。全盔时,两种内

衬头盔防护下的 AIS2+ 颅脑损伤发生概率较低,都在 25% 以下,但所有碰撞测试点气囊式头盔防护下的 AIS2+ 颅脑损伤风险均低于 EPS 头盔(见图 6)。

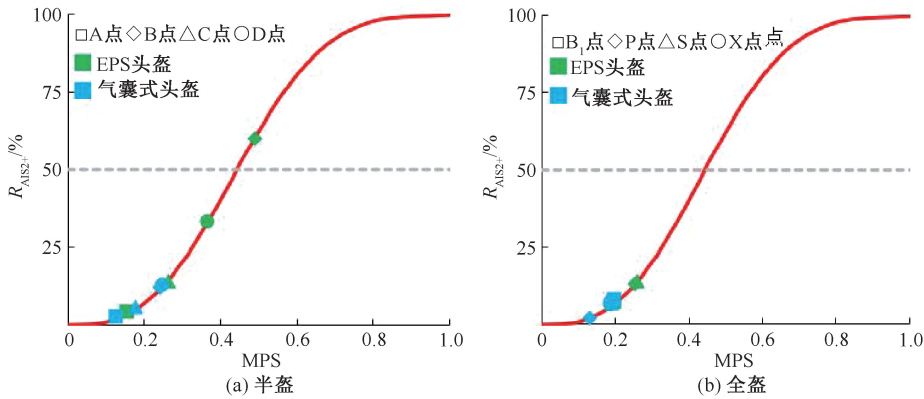


图 6 两种头盔防护下脑损伤风险对比

Fig.6 Comparison for the risk of brain injury between two helmets (a) Half helmet, (b) Full helmet

3 讨论与结论

首先,本文基于两款真实的 EPS 两轮车头盔建立了其有限元模型,并提出一种气囊式头盔衬垫结构应用于该两款头盔;然后,基于人体头部模型和法规工况开展头盔碰撞仿真,综合考虑颅骨骨折和颅脑损伤风险对比 EPS 头盔分析气囊式头盔的防护性能。

研究表明,相较于气囊式头盔,两种常规的 EPS 头盔对颅骨骨折的防护效果较差,颅骨骨折发生的概率较大。上述结果一方面与头盔的 EPS 泡沫密度有关^[13],EPS 泡沫密度较大时其缓冲作用有限,不能有效降低头部碰撞加速度,而合理设置压力的气囊式头盔可有效缓冲碰撞载荷,降低头部加速度;另一方面与 EPS 的材料性能有关,当头部与头盔的碰撞速度超过一定大小时,泡沫破碎量超过 65%,泡沫就会处于压溃状态,头盔丧失保护能力^[28],而设置恒定压力的气囊式头盔能在其压缩变形中始终保持防护性能。

此外,研究表明,EPS 头盔对颅脑损伤的保护不足^[29]。Hallidin 等^[30]用胶合头盔、自由头盔、多方向冲击保护系统 (multi-direction impact protection system, MIPS) 3 种结合方式的头盔进行跌落实验,对比发现 MIPS 头盔对颅脑损伤的防护效果更好。本文提出的气囊式头盔可以有效避免外壳和吸能

泡沫之间的摩擦旋转,对骑车人脑损伤保护方面更加有效。

通过以上对两款头盔在内衬分别为 EPS 泡沫和气囊结构下对骑车人颅骨骨折和轻度脑损伤风险的防护性能对比结果可知,气囊式内衬结构要优于常规 EPS 吸能泡沫;同时,由于用气囊代替 EPS 泡沫能明显减小头盔重量,这使头盔的佩戴舒适性要比使用 EPS 泡沫更好。本文提出的气囊缓冲式内衬结构可为新型头盔的设计提供基础示例,损伤风险分析也可为头盔防护下的骑车人头部损伤应急诊断提供初步参考。

参考文献:

- [1] 王伦. 两轮电动车市场规模将达千亿, 新国标加剧行业洗牌 [J]. 电动自行车, 2020, 2: 3-4.
- [2] World Health Organization. Global status report on road safety 2018; Summary [R]. Geneva: WTO, 2018.
- [3] BECK B, STEVENSON M, NEWXTEAD S, et al. Bicycling crash characteristics: An in-depth crash investigation study [J]. Accid Anal Prev, 2016, 96: 219-227.
- [4] BUKOVA-ZIDELUNA A, VILLERUSA A, LAMA A. An overview of injured bicyclists in traffic accidents analysis of traffic accident database in Latvia for the period 2010-2014 [C]//Proceedings of International Research Council of Biomechanics of Injury (IRCOBI) Conference. Tampere, Finland: ICOBI, 2016.
- [5] 中国汽车技术研究中心有限公司. C-NCAP 管理规则(2021版)-行人保护试验方法 [R]. 2020.

- [6] SERVADEI F, BEGLIOMINI C, GARDINI E, *et al.* Effect of Italy's motorcycle helmet law on traumatic brain injuries. [J]. *Injury Prev*, 2003, 9: 257.
- [7] HAN Y, HE W, SHI LL, *et al.* Helmet protective performance via reconstruction of electric two-wheeler rider's head-to-ground impact accidents [J]. *Int J Crashworthiness*, 2019; 1-11.
- [8] 王威, 毛征宇, 李桂兵, 等. 枪弹冲击下新型防弹头盔质量对颈椎损伤影响[J]. *医用生物力学*, 2019, 34(4): 339-345.
WANG W, MAO ZY, LI GB, *et al.* The impact of the quality of the new bullet-proof helmet on the cervical spine injury under the impact of bullets [J]. *J Med Biomech*, 2019, 34(04): 339-345.
- [9] 毛征宇, 李泽民, 牛文鑫, 等. 不同载荷作用下头部生物力学响应仿真分析[J]. *医用生物力学*, 2016, 31(6): 532-539.
MAO ZY, LI ZM, NIU WX, *et al.* Simulation analysis of head biomechanical response under different loads [J]. *J Med Biomech*, 2016, 31(6): 532-539.
- [10] ZAHID B, CHEN X. Effect of liner for single-piece continuously textile reinforced riot helmet shells [J]. *J Ind Text*, 2015, 45(6): 1652-1660.
- [11] CAI X, BLOSTEIN D, SAUNDERS FW. A shape-based helmet fitting system for concussion protection [C]// *Proceedings of 37th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*. Milan: IEEE, 2015.
- [12] KOSTOPOULOS V, MARKOPOULOS YP, GIANNOPOULOS G, *et al.* Finite element analysis of impact damage response of composite motorcycle safety helmets [J]. *Compos B Eng*, 2002, 33(2): 99-107.
- [13] 韩勇, 何伟, 石亮亮, 等. 动态冲击下泡沫能量吸收对头盔防护性能的影响[J]. *汽车安全与节能学报*, 2018, 9(4): 32-40.
- [14] GAO WR, BAI ZH, LI H, *et al.* A study on cyclist head injuries based on an electric-bicycle to car accident reconstruction [J]. *Traffic Inj Prev*, 2020, 21(8): 563-568.
- [15] 贾晓红, 蔺军兵, 王人成, 等. 头盔质量和质心对军机飞行员颈部肌力的影响[J]. *医用生物力学*, 2012, 27(4): 416-420.
JIA XH, MAO JB, WANG RC, *et al.* Effects of helmet mass and centroid on neck muscle strength of military pilots [J]. *J Med Biomech*, 2012, 27(4): 416-420.
- [16] YIN ZN, WANG TJ. Investigation of viscoelastic deformation and constitutive modeling of PC, ABS and PC/ABS alloys [C]// *Proceedings of International Conference on Mechatronics and Applied Mechanics*. Hongkong: [s.n.], 2012.
- [17] YU MH, MA GW, QIANG HF, *et al.* Elasto-plastic constitutive relations [M]. Berlin: Springer, 2006.
- [18] LS-DYNA keyword user's manual [M]. California: Livermore, 2009.
- [19] MILNE G, DECK C, BOURDET R, *et al.* Bicycle helmet modelling and validation under linear and tangential impacts. [J]. *Int J Crashworthiness*, 2014, 19: 323-333.
- [20] CHEN JG, YANG JK, ZHOU XN. FEA of helmet-head injury protection based on motorcycle accident reconstruction [C]// *Proceedings of Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA)*. Hongkong: [s.n.], 2013.
- [21] BORRVALL T, EHLE C, STRATTON T, A fabric material model with stress map functionality in LS-DYNA [C]// *Proceedings of 10th Europe LS-DYNA Conference*. Wurzburg: [s.n.], 2013.
- [22] 刘子建. 汽车乘员碰撞损伤防护及智能型安全气囊关键要素研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2001.
- [23] WATANABE R, MIYAZAKI H, KITAGAWA Y, *et al.* Research of collision speed dependency of pedestrian head and chest injuries using human FE Model (THUMS Version 4) [J]. *Acci Reco J*, 2012, 22: 31-40.
- [24] MILLS NJ, WILKES S, DERLER S, *et al.* FEA of oblique impact tests on a motorcycle helmet [J]. *Int J Impact Eng*, 2009, 36(7): 913-925.
- [25] WANG JW, WANG RH, GAO W, *et al.* Numerical investigation of impact injury of a human head during contact interaction with a windshield glazing considering mechanical failure [J]. *Int J Impact Eng*, 2020, 141(7): 103577. 1-103577. 14.
- [26] TAKHOUNTS EG, CRAIG MJ, MOORHOUSE K, *et al.* Development of brain injury criteria (BrIC) [J]. *Stapp Car Crash J*, 2013, 57: 243-266.
- [27] VORST MV, STUHMILLER J, HO K, *et al.* Statistically and biomechanically based criterion for impact-induced skull fracture.[J]. *Annu Pro*, 2003, 47: 363-381.
- [28] BOURDET N, DECK C, TINARD V, *et al.* Behavior of helmets during head impact in real accident cases of motorcyclists [J]. *Int J Crashworthiness*, 2012, 17(1): 51-61.
- [29] DECK C, BOURDET N, HALLDIN P, *et al.* Protection capability of bicycle helmets under oblique impact assessed with two separate brain FE models [C]// *Proceedings of International Research Council of Biomechanics of Injury (IRCOBI) Conference*. Antwerp: [s.n.], 2017.
- [30] HALLDIN P, GILCHRIST A, MILLS NJ. A new oblique impact test for motorcycle helmets [J]. *Int J Crashworthiness*, 2001, 6: 53-64.