

文章编号: 1004-7220(2023)06-1241-07

# 自动紧急制动对公交车内儿童乘员颅脑损伤影响

崔世海<sup>1,2</sup>, 高伟<sup>1,2</sup>, 李海岩<sup>1,2</sup>, 贺丽娟<sup>1,2</sup>, 阮世捷<sup>1,2</sup>, 吕文乐<sup>1,2</sup>

(1. 天津科技大学 机械工程学院, 天津 300222; 2. 现代汽车安全技术天津国际联合研究中心, 天津 300222)

**摘要:**目的 研究自动紧急制动(autonomous emergency braking, AEB)对公交车内儿童乘员的颅脑损伤影响。方法 使用Prescan软件搭建公交车AEB测试场景,通过仿真得到60 km/h初速度下公交车AEB制动工况下的减速度曲线。基于已经验证的公交车模型和具有详细解剖学头部结构的6岁儿童混合有限元模型,选取车内儿童乘员典型的4个乘坐位置,使用LS-DYNA软件对公交车有、无AEB制动工况下儿童乘员头部损伤进行仿真。以儿童乘员头部损伤指标HIC<sub>15</sub>、大脑灰质处压力、脑组织von Mises应力及剪切应力作为损伤评价指标,对儿童乘员的颅脑损伤进行分析。结果 各组仿真试验中,位置1和2前方设置挡板时,儿童乘员大脑灰质处压力超过其损伤阈值,其余各位置儿童乘员的各项损伤指标均远小于对应的损伤阈值。结论 AEB能有效降低公交车内儿童乘员头部碰撞损伤,公交车内位置3处的儿童容易发生碰撞损伤风险,位置1、2处设置广告牌挡板会增加儿童乘员的颅脑损伤风险。

**关键词:** 自动紧急制动; 公交车; 儿童乘员; 有限元仿真; 颅脑损伤

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2023.06.028

## Effects of Autonomous Emergency Braking on Brain Injury of Pediatric Occupants in Buses

CUI Shihai<sup>1,2</sup>, GAO Wei<sup>1,2</sup>, LI Haiyan<sup>1,2</sup>, HE Lijuan<sup>1,2</sup>, RUAN Shijie<sup>1,2</sup>, LÜ Wenle<sup>1,2</sup>

(1. College of Mechanical Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300222, China;  
2. International Research Association on Emerging Automotive Safety Technology, Tianjin 300222, China)

**Abstract: Objective** To study the effect of autonomous emergency braking (AEB) on brain injury of pediatric occupants in buses. **Methods** The bus AEB test scene was developed by using Prescan software. The deceleration curve under the bus AEB condition at initial speed of 60 km/h was obtained by the simulation method. Based on the validated finite element (FE) bus model and the mixed FE model of a 6-year-old child with detailed anatomic head structure, four typical seating positions in the bus were selected, and the head injury of pediatric occupants seated in these positions with and without AEB conditions was simulated with LS-DYNA software. The craniocerebral injury of pediatric occupants was analyzed by using HIC<sub>15</sub> of pediatric occupants, pressure at gray matter of the brain, von Mises stress and shear stress of brain tissues as the injury evaluation indicators. **Results** In simulation test of each group, when the baffle was set in front of Positions 1 and 2, the pressure at gray matter of the brain for pediatric occupants exceeded its injury threshold, while various injury indicators of pediatric occupants at other positions were far smaller than the corresponding injury thresholds. **Conclusions** The AEB can effectively reduce head impact injury severity of pediatric occupants in buses. The pediatric occupants at Position 3 in the bus are prone to a higher impact head injury risk. The billboard baffle set at Positions 1 and 2 in the bus can increase the head injury risk of pediatric occupants.

**Key words:** autonomous emergency braking (AEB); bus; pediatric occupant; finite element simulation; brain injury

收稿日期: 2023-03-17; 修回日期: 2023-04-28

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0807203)

通信作者: 李海岩, 教授, E-mail: lihaiyan@tust.edu.cn

随着我国公路系统的不断发展与城市道路的日益发达,公交车出行已成为国民出行的主要方式之一。由于公交车乘员组成的多样性,大多数公交车内的约束装置与空间布局是按照成年人的体型进行设计。并且公交车内人员的流动性较密集,没有专门针对儿童乘员的固定座椅,无法对儿童乘员起到有效的保护。而儿童作为公交车乘员的主要组成部分之一,其在乘车时坐姿较为随意,在发生交通事故时更容易受到损伤,故公交车内儿童乘员的安全问题更应值得关注。

近年来,国内外许多学者通过有限元仿真分析与试验相结合的方法对客车乘员碰撞损伤进行研究。何超<sup>[1]</sup>建立公交车坐姿乘员系统,在紧急制动工况下对公交车内不同位置、不同乘员的运动姿态和人体损伤指标进行仿真分析。徐炯<sup>[2]</sup>运用多刚体和有限元结合的方法,建立人体上肢有限元多刚体耦合模型,并对大客车正面碰撞、侧面碰撞和追尾碰撞工况下站姿乘员的车内二次碰撞进行仿真分析。司俊德等<sup>[3]</sup>建立长度为12 m大客车模型,对客车进行整车有效性验证,在不同座椅布置条件下,对主动预紧安全带和普通安全带对乘员运动响应和损伤的影响进行研究。应龙等<sup>[4]</sup>建立6岁儿童胸部生物力学模型并对其有效性进行验证,分析校车正面碰撞工况下儿童胸部在安全带作用下的动态响应;在胸部中心部位选取局部参照点,分析不同载荷下局部参照点内外侧的应力-应变。Palacio等<sup>[5]</sup>选取公交车内乘员3个典型的站立位置,3个乘员常用的站立姿势,和公交车紧急制动以及急加速等3个不同的加速度波形,对站立姿态下老年乘员非碰撞损伤进行研究,并对公交车内非碰撞损伤进行预测。He等<sup>[6]</sup>运用MADYMO软件建立儿童与公交车的多刚体动力学模型,通过分析儿童乘员与公交车栏杆初次碰撞起始点和二次碰撞等信息,结合儿童假人的损伤曲线,对公交车紧急制动工况下的儿童损伤进行分析,并对公交车内饰提出改进方案。

随着主动安全技术的不断发展,客车乘员安全防护进一步提升。自动紧急制动(autonomous emergency braking, AEB)系统已经被广泛应用于客车上,国内外学者也对其展开大量研究。王戡等<sup>[7]</sup>归纳了国内外客车采用的AEB测试方法,提出AEB

测试所需的测试系统,并对某客车的AEB进行性能测试。黄超智等<sup>[8]</sup>根据JT/T 1242—2019法规中规定的客车测试场景,搭建AEB测试系统并对某客车进行AEB测试。谢张军等<sup>[9]</sup>对50组不同客车AEB测试数据进行整理,分析对比国内外客车AEB的制动性能水平,并提出优化建议。Valentina等<sup>[10]</sup>通过对比儿童和成年乘员在AEB和手动紧急制动之间的运动学差异,对紧急制动下后座成年和儿童运动学和肌肉活动的变化进行研究。目前对客车AEB的研究大多关注AEB性能测试以及AEB在追尾和行人保护方面的能力,而对客车乘员的安全性未引起足够重视。公交车由于其内部结构的特殊性,乘员的安全性更应该得到关注。本文基于已经验证的公交车有限元模型和6岁儿童混合有限元模型,研究公交车在有、无AEB两种工况下公交车内典型位置的儿童乘员颅脑损伤,为公交车内的儿童乘员颅脑损伤防护提供理论基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 公交车与儿童乘员有限元模型

使用本研究团队建立并经过验证的公交车有限元模型<sup>[11]</sup>,该模型共有823 120个单元,总质量9 010 kg。儿童乘员有限元模型同样采用本研究团队建立的6岁儿童混合有限元模型<sup>[11]</sup>,该模型头部取自天津科技大学TUST IBMs 6YO-P模型,具有详细的解剖学结构,身体取自LSTC官方网站(<https://lsdyna.ansys.com/>)中的6岁儿童有限元模型,经过拼接而形成(见图1)。

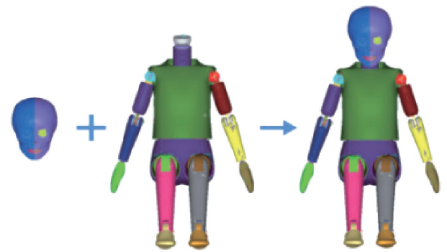


图1 6岁儿童混合有限元模型

Fig. 1 Mixed finite element model of the 6-year-old child

### 1.2 公交车内儿童乘员典型乘坐位置选取

根据乘员在公交车内所处环境的差异性,选取4个儿童乘员典型的乘坐位置(见图2)。其中,位置1位于公交车右前轮包上,其前方约束为扶手栏

杆;位置2位于右前轮包后方,前方设置扶手栏杆与轮包共同对该位置儿童乘员进行约束;位置3位于车厢的前中部,此位置的乘员由前方座椅约束;位置4位于车厢后部,同样由前方的座椅靠背约束该位置的儿童乘员,但位置3和4的前方靠背存在高度差。考虑到公交车内部结构的差异性,在位置1和2前方栏杆上设置有挡板和无挡板两种情况;考虑儿童乘员乘坐的随意性,在位置3和4分别设置正坐和侧坐两种坐姿。

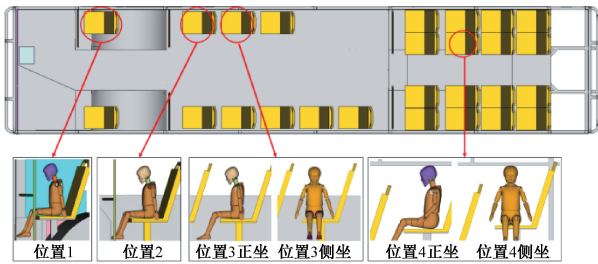


图2 公交车内儿童乘员典型位置选取

Fig. 2 Selection for typical positions of pediatric occupants in the bus

### 1.3 公交车紧急制动时的仿真试验设置

近年来随着城市道路的不断发 展,公交车在城区之间的运营行驶越发普遍。在城区之间,公交车大多行驶于高速道路及快速路等路面宽、路况好的道路上,速度较快,故设定公交车的行驶速度为60 km/h。为了探究公交车 AEB 对儿童乘员颅脑损伤的影响,选取有、无 AEB 两种工况,运用 LS-DYNA 软件进行仿真计算。采用 CARSIM 软件仿真得到无 AEB 工况下的加速度曲线,采用 Prescan 软件搭建公交车 AEB 测试场景,进行仿真得到 AEB 紧急制动工况下的加速度曲线。对比有、无 AEB 紧急制动加速度曲线可以看出,AEB 紧急制动工况下公交车有2次制动过程,第1次发挥40%制动力,减速度为0.4 g,第3次发挥100%制动力,减速度约为1 g。无 AEB 紧急制动工况下最大制动减速度为0.6 g(见图3)。仿真试验组的设置如表1所示。

## 2 结果与讨论

### 2.1 儿童乘员运动学分析

紧急制动工况下各组试验儿童乘员的运动过程如图4所示。结果显示,位置1和2前方未设置挡板时,儿童乘员由于惯性作用其胸部与扶手栏杆

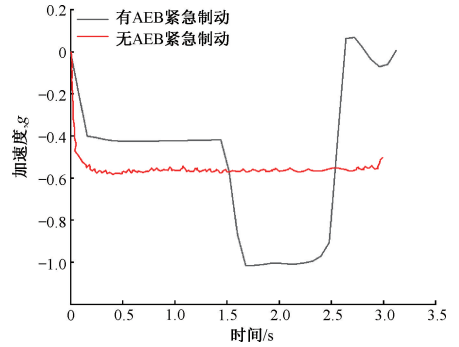


图3 紧急制动加速度曲线

Fig. 3 Emergency braking acceleration curve

表1 仿真试验组设置

Tab. 1 Setting of simulation test groups

组号	设置	组号	设置
A1	位置1,有 AEB,无挡板	B1	位置1,无 AEB,无挡板
A2	位置1,有 AEB,有挡板	B2	位置1,无 AEB,有挡板
A3	位置2,有 AEB,无挡板	B3	位置2,无 AEB,无挡板
A4	位置2,有 AEB,有挡板	B4	位置2,无 AEB,有挡板
A5	位置3,有 AEB,正坐	B5	位置3,无 AEB,正坐
A6	位置3,有 AEB,侧坐	B6	位置3,无 AEB,侧坐
A7	位置4,有 AEB,正坐	B7	位置4,无 AEB,正坐
A8	位置4,有 AEB,侧坐	B8	位置4,无 AEB,侧坐

发生碰撞,头部未发生碰撞;位置1和2前方设置挡板时,儿童乘员头部与挡板发生碰撞。位置3的儿童乘员由于惯性作用,头部与前排座椅靠背发生碰撞,儿童正坐时其头部额骨与座椅靠背碰撞,侧坐时碰撞位置发生在头部顶骨处。与位置3相比,位置4的儿童由于前后排座椅存在高度差,导致头部发生碰撞的位置不同,正坐时儿童头部碰撞位置为鼻骨处,侧坐时儿童下颌骨与前排座椅发生碰撞。

相比无 AEB 紧急制动,配备 AEB 系统的公交车在发生紧急制动时,儿童乘员运动更缓慢,其头部发生碰撞的时刻更滞后。对比 A2、B2 两组仿真,配备 AEB 系统的 A2 仿真,儿童乘员没有脱离座椅跌落至座椅下方;B2 仿真没有配备 AEB,发生紧急制动时儿童乘员在 550 ms 完全与座椅分离,跌落至座椅下方。A6、B6 仿真中同样是有 AEB 紧急制动时儿童乘员未与座椅分离,无 AEB 紧急制动时儿童乘员在 450 ms 时刻跌落至座椅下方空间。

### 2.2 儿童乘员颅脑生物力学响应

由各组试验中出现峰值时刻的指标可知,公交车在有、无 AEB 紧急制动工况下各组试验儿童乘员



图4 各组试验儿童运动过程

Fig. 4 Motion process of children in each test (a) With autonomous emergency braking, (b) Without autonomous emergency braking

头部损伤指标  $HIC_{15}$  都没有超过 700 的阈值, 儿童乘员头部不会出现明显损伤。A1~A8 试验中儿童乘员头部  $HIC_{15}$  均小于 B1~B8 中相对应的值, 说明配备 AEB 系统能明显降低儿童乘员颅脑损伤风险。值得注意的是, A2、B2、A4、B4 组乘员头部  $HIC_{15}$  明显高于其他组, 因此位置 1、2 前方设置广告牌挡板会增加儿童乘员的颅脑损伤风险(见表 2)。

大脑灰质处压力通常用来预测颅内出血和脑挫伤的严重程度<sup>[12]</sup>。Kleiven<sup>[13]</sup> 研究表明, 大脑灰质处压力与颅脑损伤有较高相关性。李凡<sup>[14]</sup> 研究认为, 当大脑灰质处正压与负压超过 195.5 和 -196.8 kPa 时会出现明显的颅脑损伤。从紧急制动工况下各组试验儿童乘员大脑灰质处正压与负压随时间的变化曲线可以看出, 各组试验的大脑灰质处正压和负压大致呈对称分布(见图 5)。位置 1 未设置广告挡板的试验中儿童乘员头部未与车厢内饰发生直接碰撞, 其余各组试验大脑灰质处压力均在头部与车厢发生碰撞的时刻出现峰值。对比

表 2 各组试验峰值时刻指标

Tab. 2 Index at peak time in each test

实验	$HIC_{15}$	大脑灰质	大脑灰质	脑组织	脑组织剪
		处撞击侧 正压/kPa	处对撞侧 负压/kPa	von Mises 应力/kPa	切应力/ kPa
A1	167.1	13.8	-16.1	0.9	0.5
B1	176.1	57.1	-51.5	2.7	1.6
A2	286.2	166.6	-103.8	1.7	1.0
B2	340.8	204.3	-141.9	4.7	2.7
A3	168.7	23.3	-22.6	1.2	0.7
B3	173.8	55.4	-28.5	1.8	1.1
A4	313.6	207.2	-124.0	1.9	1.1
B4	430.8	250.5	-130.3	2.4	1.4
A5	174.9	209.7	-225.6	1.4	0.8
B5	185.2	297.8	-368.6	1.9	1.1
A6	178.1	60.1	-71.2	2.7	1.6
B6	182.4	113.2	-87.5	2.7	1.7
A7	167.3	62.4	-57.0	1.7	1.0
B7	170.6	85.8	-71.9	4.3	2.5
A8	167.8	91.5	-85.8	0.9	0.6
B8	168.5	102.1	-89.3	1.5	0.8
阈值	700	195.5	-196.8	6/15/38	6.0/7.8/10

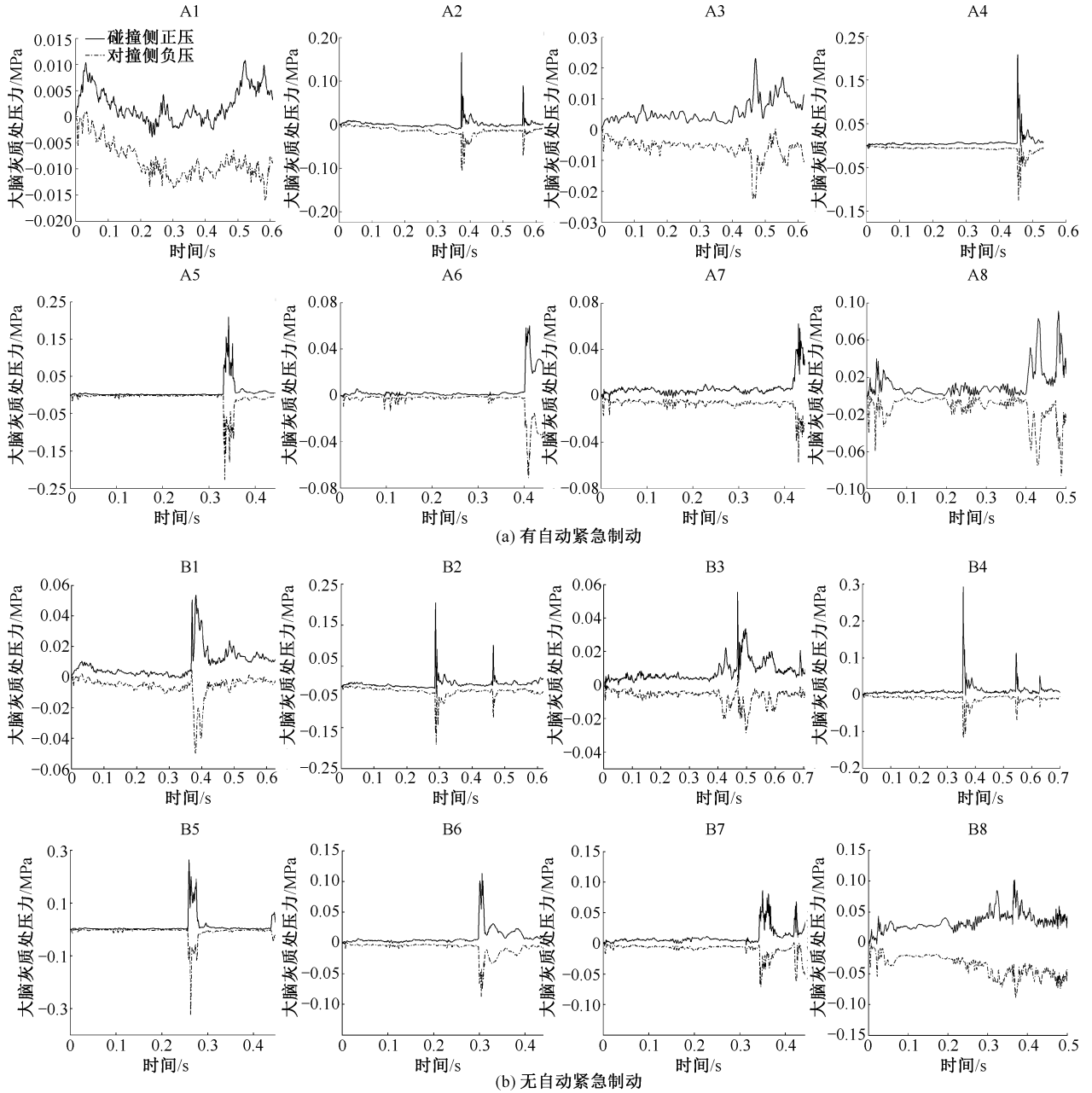


图5 各组试验大脑灰质处压力曲线

Fig.5 Pressure curves of gray matter of the brain in each test (a) With autonomous emergency braking, (b) Without autonomous emergency braking

有、无 AEB 两组试验不难发现,有 AEB 紧急制动工况下各组试验大脑灰质处压力出现峰值的时刻要晚于无 AEB 紧急制动工况,说明在有 AEB 紧急制动时儿童乘员头部碰撞的时刻略晚于无 AEB,且大脑灰质处压力均小于无 AEB 紧急制动试验组。由表 2 可知,位置 1、2 设置广告牌挡板以及位置 3 处正坐儿童乘员大脑灰质处压力极值超过阈值,有脑

挫伤和颅内出血的风险,其余各试验组儿童乘员头部均不会出现明显损伤。

von Mises 应力通常被用来预测脑震荡和脑挫裂伤的严重程度。Sheiber 等<sup>[15]</sup>研究认为,脑组织 von Mises 应力达到 6~11 kPa 时通常会发生脑挫裂伤。Baumgartner 等<sup>[16]</sup>研究表明,当脑组织 von Mises 应力达到 15 kPa 时通常会发生脑震荡,

脑组织 von Mises 应力达到 38 kPa 时会出现严重脑损伤。本文结果表明,各组试验儿童乘员脑组织 von Mises 应力均小于 6 kPa,说明在有 AEB 紧急制动工况下乘员颅脑不会出现明显损伤。在相

同乘坐位置下,有 AEB 紧急制动工况儿童乘员脑组织 von Mises 应力均小于无 AEB 紧急制动工况,公交车配备 AEB 系统能有效降低儿童乘员颅脑损伤风险(见图 6)。

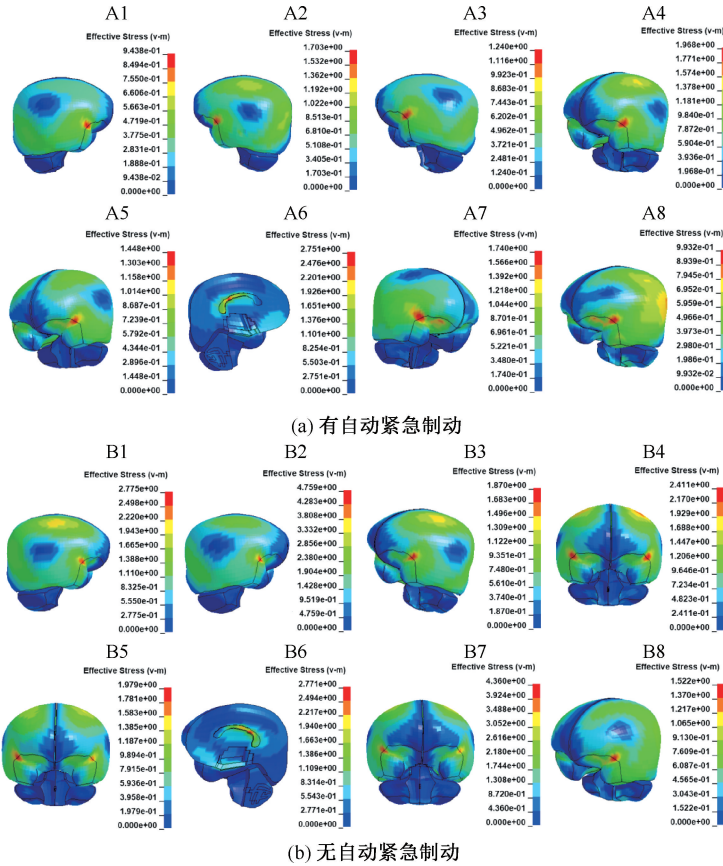


图 6 各组试验脑组织 von Mises 应力最大时刻云图

Fig. 6 Cloud diagram of the maximum von Mises stress of brain tissues in each test (a) With autonomous emergency braking, (b) Without autonomous emergency braking

观察脑组织 von Mises 应力峰值出现的位置,结果表明,有、无 AEB 紧急制动工况下,对应试验组儿童乘员脑组织 von Mises 应力峰值位置相同,说明 AEB 系统不会影响颅脑损伤部位。A6、B6 两组试验 von Mises 应力峰值出现在胼胝体处,其余各组试验 von Mises 应力峰值均出现在大脑灰质颞叶处。结合试验设置可知,A6、B6 试验中儿童乘员均为侧坐,故脑组织 von Mises 应力峰值出现的位置与头部发生碰撞的位置有关。侧坐的 A8、B8 两组试验, von Mises 应力峰值出现在大脑灰质处,推测原因是前后座椅存在高度差,儿童乘员肩部与前座椅靠背发生接触,随后身体在惯性作用下发生旋转,头部

与公交车前排座椅发生碰撞时,下颌骨与座椅靠背接触,使碰撞位置发生改变。

Zhang 等<sup>[17]</sup>研究认为,剪切应力可作为外伤性脑组织损伤的评价指标,当脑组织的剪切应力为 6.0、7.8、10.0 kPa 时,脑组织发生轻度外伤性脑组织损伤的概率分别为 25%、50% 和 80%。由表 2 可知,在有 AEB 工况下各组试验的脑组织剪切应力均小于 6.0 kPa,儿童乘员出现脑损伤的概率较小。另外,通过对比各组试验数据发现,有 AEB 紧急制动工况下,脑组织剪切应力均小于无 AEB 时,配备 AEB 系统的公交车能进一步降低外伤性脑组织损伤的风险。

### 3 结论

本文基于已经验证的公交车模型和6岁儿童混合有限元模型,对车内典型位置的儿童假人在有、无AEB两种工况下进行仿真,通过一系列损伤指标分析儿童乘员颅脑损伤。本文得到的结论如下:

(1) 公交车60 km/h紧急制动工况下配备AEB时儿童乘员的头部损伤明显小于无AEB时的损伤,故公交车配备AEB能有效降低儿童乘员的损伤风险。

(2) 公交车60 km/h紧急制动工况,位置3正坐儿童乘员大脑灰质处压力大于阈值,有颅内出血和脑挫伤的风险,其余各组试验各项指标均远小于阈值,儿童乘员头部不会受到明显损伤。

(3) 位置1、2前方设置广告挡板时各组试验各项头部损伤指标峰值均大于无挡板时,故从公交车内儿童乘员颅脑损伤的角度而言,建议公交车取消位置1、2前方的广告挡板。

### 参考文献:

[1] 何超. 大客车车内碰撞事故过程重建和安全设计改进[D]. 上海:上海交通大学,2013.

[2] 徐炯. 面向乘员损伤的大客车碰撞事故再现研究与应用[D]. 上海:上海交通大学,2010.

[3] 司俊德,李建平,张博强,等. 大客车正面碰撞乘客约束系统仿真分析[J]. 中国安全科学学报,2021,31(3):135-141.

[4] 应龙,葛如海,张学荣,等. 校车正面碰撞下儿童胸部骨骼局部应力应变分析[J]. 中国安全科学学报,2016,26(12):35-40.

[5] PALACIO A, TAMBURRO G, NEILL DO, et al. Non-collision injuries in urban buses—Strategies for prevention [J]. *Accid Anal Prev*, 2009, 41(1): 1-9.

[6] HE C, ZHANG XY. Study of the injury analysis and safety

design improvement of the bus in the typical position [J]. *Adv Mat Res*, 2011, 308-310: 2379-2383.

[7] 王戡,刘昌仁,曹飞,等. 客车自动紧急制动系统性能测试[J]. 客车技术与研究,2017,37(2):46-49.

[8] 黄超智,龙军,周金应,等. 基于JT/T 1242-2019的AEB测试研究[J]. 公路与汽运,2020,198(3):1-6.

[9] 谢张军,朱江华,刘卫星,等. 客车AEBS性能水平国内外对比分析[J]. 客车技术与研究,2021,43(3):60-62.

[10] GRACI V, DOUGLAS E, SEACRIST T. Effect of automated versus manual emergency braking on rear seat adult and pediatric occupant precrash motion [J]. *Traffic Inj Prev*, 2019, 8(20): 106-111.

[11] 崔世海,马伟盛,李海岩,等. 城市公交车内儿童乘员头部损伤的有限元分析[J]. 汽车工程,2021,43(3):414-420.

[12] 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. The simulation analysis on biomechanical responses of human head under different loading conditions [J]. *J Med Biomech*, 2016, 31(6): 532-539.

[13] KLEIVEN S. Predictors for traumatic brain injuries evaluated through accident reconstructions [C]// *Proceedings of 51<sup>st</sup> Stapp Car Crash Conference*. California; SAE, 2007, 51: 81-114.

[14] 李凡. 基于真实车辆-行人交通事故的颅脑损伤风险分析研究[D]. 长沙:湖南大学,2009.

[15] SHEIBER DI, BAIN AC, MEANEY DF. *In vivo* thresholds for mechanical injury to the blood-brain barrier [C]// *Proceedings of 41<sup>st</sup> Stapp Car Crash Conference*. Lake Buena Vista; SAE, 1997.

[16] BAUMGARTNER D, WILLINGER R, SHEWCHENKO N, et al. Tolerance limits for mild traumatic brain injury derived from numerical head impact relocation [C]// *Proceeding of International IRCOBI Conference on the Biomechanics of Impacts*. Isle of Man; IRCOBI, 2001: 353-355.

[17] ZHANG LY, YANG KH, KING AI. A proposed injury threshold for mild traumatic brain injury [J]. *J Biomech Eng*, 2004, 126(2): 226-236.