

正面碰撞试验中乘员小腿伤害特性研究

孙振东¹, 朱海涛¹, 刘玉光¹

¹中国汽车技术研究中心实车碰撞试验室 天津 300162

摘要: 随着 GB11551-2003 正面碰撞标准实施以来, 对提高车辆的乘员头部和胸部保护性能, 发挥了积极作用。但是, 在汽车正面碰撞事故中, 小腿是最容易受到伤害的部位, 尽管小腿受伤很少直接危及生命, 但是却可能导致长期的瘫痪和损伤。在 GB1151-2003 正面碰撞标准中, 对于乘员小腿的伤害没有要求。本文通过对两种典型正面碰撞试验 100% 正面刚性壁障和 40% 偏置可变形壁障中, 假人小腿的运动形态和伤害指标的分析, 揭示我国汽车在典型正面碰撞试验中乘员小腿的伤害机理和特性。

关键词: 小腿 碰撞试验 伤害指标

Abstract: Along with frontal crash standard for GB11551-2003 is applied in automobile test, which is active significance to improving protect performance of head and chest for passenger in the vehicle. However in vehicle frontal impact accidents, the easiest injury parts for passenger are tibias, which are not as to as head and chest, are exposed to the especially severity effect, result in longtime traumata. This paper analyze dynamic moving state and injury criterion for tibia of dummy in two sorts of representative type frontal crash test-full frontal rigid barrier and offset deformable barrier, to show the injury mechanism and character for tibia of dummy.

Keywords: tibia, crash test, injure criterion

1 前言

随着我国汽车工业的不断发展, 汽车保有量的迅速增长, 由于汽车交通事故所造成的损失也在逐渐递增, 2006 年我国共发生交通事故 37.8 万起, 受伤 47 万人, 直接财产损失 14.9 亿元。改进汽车的安全性, 有效地减少汽车道路交通事故造成的损失是我国汽车行业近几年的重要工作。为了提高汽车安全性, 欧、美、日等汽车工业发达国家由政府制定汽车安全法规, 通过汽车安全法规的强制实施, 促进汽车生产厂切实地改进产品的安全性。实践证明, 这是一项切实可行并且效果十分显著的措施。随着 GB11551-2003《乘用车正面碰撞乘员保护》标准实施以来, 促进了我国汽车碰撞安全技术的进步和发展, 提高了我国汽车正面碰撞安全技术水平。现在, 我国大多数车型均已标配了正面安全气囊, 对改善和提高车辆乘员头部和胸部的保护性能, 发挥了积极作用。但是, 在汽车正面碰撞事故中, 小腿是最容易受到伤害的部位, 有关研究数据表明 70% 腿部受伤发生在正面碰撞的事故中。在正面碰撞事故中, 尽管小腿受伤很少直接危及生命, 但是却可能导致长期的瘫痪和损伤, 给受伤人造成生理和心理的双重压力。

2 小腿伤害评价指标的研究

在汽车正面碰撞法规中, 世界上主要是美国 FMVSS 208 法规和欧洲 ECE R94 法规。在这两个法规中分别规定了两种典型的正面碰撞试验形式, 如图 1 和图 2 所示。

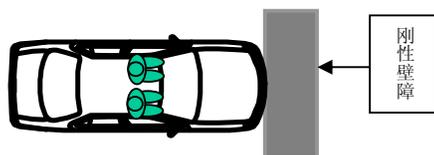


图 1 正面刚性壁障试验

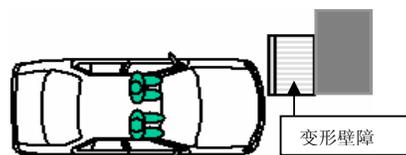


图 2 40% 偏置可变形壁障试验

美国、日本、中国的正面碰撞法规采用的是 100% 重叠率的正面刚性壁障 (以下简称 100%RB), 碰撞速度是 48~50 km/h; 欧洲、澳大利亚、俄罗斯的正面碰撞法规采用的是 40% 偏置可变形壁障 (以下简称 40%ODB), 碰撞速度为 56~57 km/h。两种典型碰撞试验形式的伤害评价指标, 见表 1。

表 1 两种正面碰撞试验形式的伤害评价指标对比

法规	美国 FMVSS 208	中国 GB11551-2003	欧洲 ECE R94
假人伤害评价指标	头部伤害值: HIC≤1000	头部伤害值: HIC≤1000	头部伤害值: HIC≤1000; 头部 3ms 合成加速度: ≤80g;
	胸部 3ms 合成加速度: ≤60g (注: $g=9.8\text{m/s}^2$)	胸部位移: ≤75 mm	颈部伤害指标 (NIC) 时间历程; 颈部对 Y 轴弯矩在伸张方向≤57 Nm;
	胸部位移: ≤75 mm	大腿力: ≤10 kN	胸部位移: ≤50 mm; 胸部粘性指标 ($V \cdot C$) ≤1.0 m/s;
	大腿力: ≤1021 kgf		大腿力时间历程;
	小腿压缩力指标≤8 KN; 小腿性能指标 (TI) ≤1.3; 膝滑动位移≤15 mm。		

由表 1 可以看出, 美国和中国的正面碰撞法规没有假人小腿伤害指标的规定。主要分析 ECE R94 中假人小腿伤害评价指标的要求。小腿的压缩力指标是由沿小腿轴向传递的压缩力 (FZ) 确定, 可以直接测量, 小腿性能指标由弯矩 M_x 和 M_y 为基础以及 FZ, 按下面公式计算:

$$TI = |M_R / (M_C)_R| + |F_Z / (F_C)_Z|$$

式中:

M_x ——绕小腿 x 轴的弯矩, M_y ——绕小腿 y 轴的弯矩, 单位为 Nm;

(MC)R ——临界弯矩, 按 225Nm 计;

FZ ——z 向的轴向压缩力, 单位为 kN; (FC)Z ——z 向临界压缩力, 按 35.9kN 计;

MR 为 M_x 和 M_y 的合成弯矩, 公式如下:

$$M_R = \sqrt{(M_x)^2 + (M_y)^2}$$

对每个小腿的顶部和底部计算小腿性能指标; 但 Fz 可以在任何一端测量, 所获值用来计算顶部和底部的 TI 值。 M_x 和 M_y 在两个位置都分别测量。顶部和底部分别计算 TI, 主要是由假人小腿传感器的结构所决定的, 假人小腿力和弯矩的传感器位于上下两端, 如图 3 所示。

根据上述的小腿评价指标, 绘制合成弯曲力矩 MR、轴向力 FZ 和 TI 值的关系曲线图, 见图 4。伤害指标在 $F_z \leq 8\text{kN}$, 合成弯矩 $M_R \leq 225\text{Nm}$, $TI \leq 1.3$ 的区域内, 小腿才会避免产生较大的伤害。

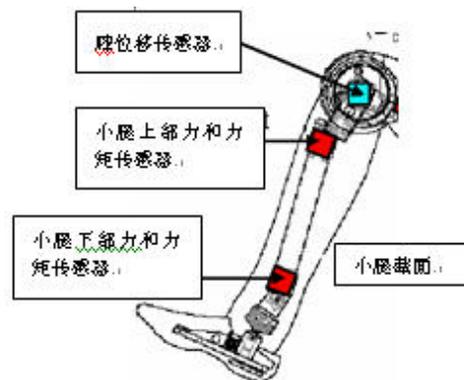


图 3 小腿传感器结构示意图

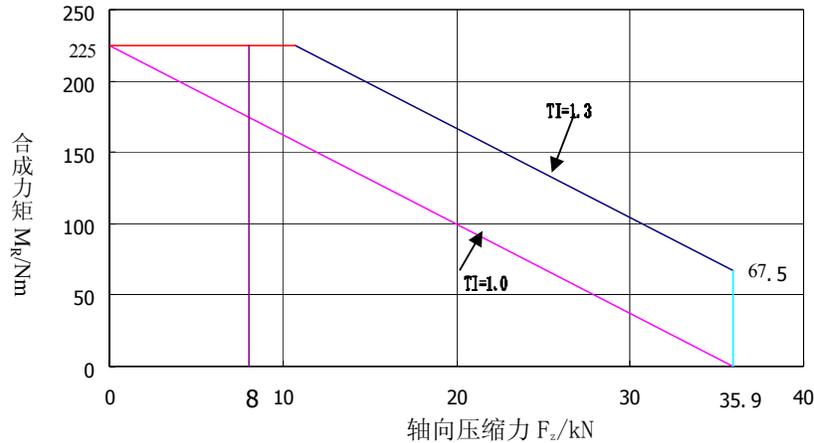


图4 小腿轴向力及 TI 指标限值关系图

3 试验结果分析

根据上述两种典型正面碰撞试验形式，分别进行了 6 个车型的 100%RB 和 40%ODB 正面碰撞试验，碰撞初速度分别为 50.5km/h 和 56.3km/h。A 车型和 B 车型分别是量为 930kg 与 1000kg 的国产紧凑型轿车，C 车型和 D 车型分别是量为 1105kg 与 1130kg 的中型轿车，E 车型和 F 车型分别是量为 1430kg 与 1570kg 的大型轿车。表 2 为 6 个车型在两种碰撞试验形式下的试验结果。

表 2 碰撞试验结果

评价 车型 指 标 试验形式	驾驶员腿部伤害指标 (ECE R94 限值: $F_z \leq 8\text{KN}$, $TI \leq 1.3$)								
	左侧小腿(力: kN)				右侧小腿(力: kN)				
	上部 TI	下部 TI	上部 F_z	下部 F_z	上部 TI	上部 F_z	下部 TI	下部 F_z	
A	100%RB	0.61	0.31	2.09	2.40	0.56	0.32	1.74	1.99
	40%ODB	0.30	0.22	1.22	1.45	0.28	0.38	1.70	1.81
B	100%RB	0.55	0.32	2.20	2.73	0.99	0.54	2.88	3.96
	40%ODB	0.48	0.23	1.78	2.07	0.54	0.37	1.48	2.06
C	100%RB	0.40	0.30	1.36	1.92	0.67	0.75	4.33	5.84
	40%ODB	0.23	0.51	1.11	1.03	0.58	0.32	2.98	3.98
D	100%RB	0.41	1.36	0.17	1.78	0.63	2.15	0.35	2.87
	40%ODB	0.39	1.48	0.11	1.66	0.33	1.14	0.17	1.38
E	100%RB	0.32	1.14	0.16	1.82	0.46	2.24	0.50	2.37
	40%ODB	0.38	1.01	0.18	1.06	0.22	0.85	0.28	0.70
F	100%RB	0.55	2.61	0.42	3.14	0.88	3.95	0.79	4.95
	40%ODB	0.35	1.51	0.37	1.67	0.49	1.30	0.27	1.38

3.1 100%RB 与 40%ODB 试验数据的比较分析

从表 2 中的结果进行 100%RB 试验与 40%ODB 试验的比较，左右侧小腿 TI 值偏高的比率达到 90%；而左侧小腿轴向力 (F_z) 偏高的比率达到 75%，右侧小腿轴向力则达到 90%。这充分表明在 100%重叠率的刚性壁障的碰撞中假人小腿的伤害反而要比 40%偏置变形壁障碰撞要更为严重，这一点可能有些超出常规认识。因为在 100%RB 试验中驾驶员腿部空间的变形量要远远小于 40%ODB 试验，在 40%ODB 试验中腿部空间变形挤压的过程必然会引起腿部高限值的伤害。通过大量曲线分析发现：由于脚踝处的加速度变

化趋势与前围板和制动踏板处的加速度曲线基本一致，而脚踝的轴向负荷是由于落脚空间表面动态加速度所造成的。通过图 5 和图 6 可以看出，在 100%RB 试验中前围板下部的加速度峰值较大，而时间历程较短；而在 40%ODB 试验中前围板的加速度峰值小，而时间历程相对较长。前围板短时间内的低加速度只会导致很小的入侵量，但是在假人的脚上造成了很高的伤害，在 40%ODB 试验中前围板较长时间内的低加速度负荷引起较大的入侵量，但在腿部造成较小的轴向负荷，对腿部的伤害反而不大，也就是说脚部空间大小不是造成腿部伤害的一个必要条件。而地板/前围板处的碰撞入侵加速度却是一个主要因素。

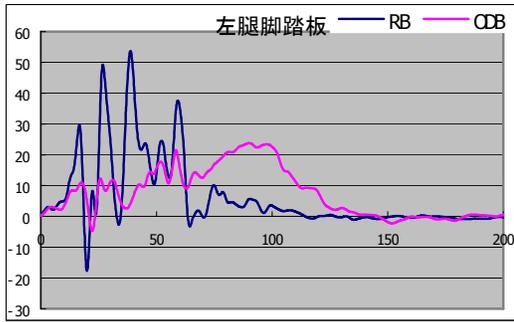


图 5 驾驶员左脚脚踏板加速度-时间曲线

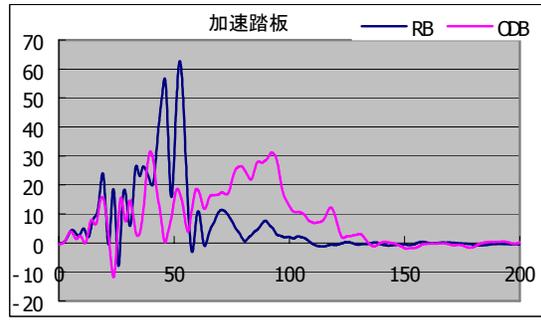


图 6 驾驶员右脚加速踏板加速度-时间曲线

3.2 试验数据的横向比较分析

3.2.1 同一小腿上部指标和下部指标的比较

左侧小腿上部 TI 值大于下部 TI 值的比例为 90%，右侧小腿上部 TI 值大于下部 TI 值的比例为 70%；而在轴向力的比较中，左右小腿下部 F_z 大于上部 F_z 的情况为 95%。根据 TI 的计算公式得知 TI 大小与绕小腿 x 轴的弯矩 M_x 、绕 y 轴的弯矩 M_y 、z 向的轴向压缩力 F_z 有关，虽然小腿上部 F_z 要小于小腿下部的 F_z ，但由于上部小腿的相对运动幅度更大，产生的合成轴向弯矩 M_R 也就更大了，综合结果是上部 TI 大于下部 TI。

3.2.2 左侧小腿与右侧小腿指标的比较

表 2 中左侧小腿与右侧小腿相应指标的对比看出，右侧小腿指标较大。在正面碰撞瞬间，驾驶员的左腿放在脚踏板平面上，处于“放松”状态，而右脚放在加速踏板，处于“绷紧”状态，当右脚在踏板上而其脚后跟离开踏板时，脚部与脚后跟之间的速度差使得它更容易受到的伤害，故其右侧小腿指标较大。

3.3 小腿的高速影像运动分析

通过高速摄像机所采集的影像，进行小腿运动分析。小腿在碰撞瞬间具有五个主要运动阶段，即脚趾接触、脚后跟接触、脚踝旋转、侧向脚踝锁止、纵向脚踝锁止（见图 7）。在每个动态阶段，小腿的响应力（ F_x 、 F_y 、 F_z ）、力矩（ M_x 、 M_y ）都各不相同。

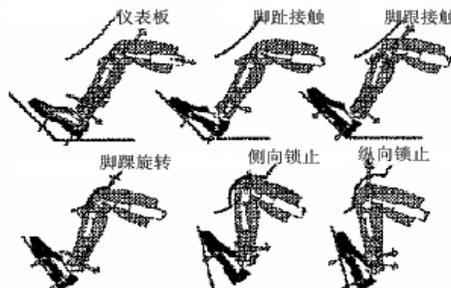


图7 小腿运动形态

阶段1-脚趾接触：在车辆碰撞的初始阶段，车辆开始减速，假人相对于车辆向前运动，整个腿部相对于搁脚空间向前滑动，脚趾将加速踏板压到顶端后又继续加速，此时小腿下部和脚后跟却要持续向前运动，脚趾和脚后跟之间的速度差会引起脚部围绕踝关节进行旋转，背向弯曲会引起轴向载荷和胫骨弯曲力矩 M_x 的产生。

阶段2-脚后跟接触：当脚后跟撞到搁脚空间时，脚后跟迅速加速，使得脚踝与脚趾加速度相反的方向弯曲旋转。当脚后跟、脚踝、搁脚空间三者速度相同时，下胫骨要受到 F_z 载荷，而臀部和膝盖的整体前移迫使小腿围绕着踝关节和膝关节进行旋转这样的角加速度会引起小腿上胫骨产生 M_y 的弯曲力矩；如果脚后跟和搁脚空间之间仍然有较大的相对速度，小腿上部轴向力 F_z 和上胫骨力矩 M_y 的组合将产生上胫骨伤害指标 TI 的峰值。

阶段3-脚踝旋转：当脚部和搁脚空间充分接触时，臀部继续向前移动，胫骨则围绕着脚踝和膝部旋转，小腿下部的加速度相对与阶段2的峰值开始减小，一直持续到脚踝的旋转角达到最大为止，导致脚踝锁止以及膝盖撞下部仪表板。

阶段4-侧向脚踝锁止：脚部定位在搁脚板上，脚跟的滑脱导致它朝侧向或外翻的方向旋转，侧向旋转达到最大角度后，侧向脚踝发生锁止，使得上下胫骨弯曲力矩 M_x 瞬时上升。

阶段5-纵向脚踝锁止：纵向脚踝锁止发生在脚踝从阶段3到达其旋转极限，伴随着阶段4中的侧向角度的锁止。如果臀部相对与搁脚空间的速度仍很高或在脚部纵向锁止时，搁脚空间仍有旋转时，下胫骨弯曲力矩的上升导致下胫骨伤害指数迅速增加，伴随着脚跟出现跳跃现象。

4 结论

(1) 在正面碰撞中小腿的伤害分布具有如下特点：

小腿上部的伤害指标往往要比小腿的下部指标大，右腿的伤害大于左腿的伤害。100%重叠率的刚性壁障的碰撞中假人小腿的伤害要比40%偏置变形壁障碰撞要更为严重。

(2) 通过对小腿的运动形态分析发现造成其损伤的根本机制是：

在小腿运动的过程中，碰撞产生的瞬时加速度作用在小腿踝关节上，形成高应力区，使踝关节产生过度运动，形成轴向力。而此轴向力沿踝关节和胫骨向上传递，引起小腿部位的损伤。

参考文献

- [1] 白鹏. 两种正面碰撞标准的试验对比. 天津汽车, 2005.2
- [2] 朱西产. 汽车正面碰撞试验方法及其碰撞相容性的分. 汽车工程, 2002.1
- [3] 孙振东. 不同形式的汽车正面碰撞试验研究及分析. 汽车工程, 2006.7
- [4] Welbourne, E.R., Improved Measures Of Foot And Ankle Injury Risk From The Hybrid Iii Tibia, Transport Canada, Paper Number 98-S7-O-11.
- [5] Payne MIRA A.R. et al, The Effect Of Hybrid Iii Lower Leg Kinematics On Loading Mechanisms And Injury Criteria, Paper Number 98431-O-16.