

Test Research about Injury on The Lower Leg of The Front Occupants

Qiang Yan, Tengting Zhang, Haijian Ding, Xing Su, Jia Fang, Dazhi Wang, Huimin Li

SAIC Motor Technical Center, Shanghai, 201804, China

Abstract: In frontal crash safety development on C-NCAP(China New Car Assessment Program), the occupant injury on the Lower leg is not stable and of high discreteness. The paper used the method of impacting rigidly dummy foot, in order to obtain the lower leg injury in different frontal crash cases. The emphasis was the change trend of lower leg My, and analysis the impact test by peak of statistical data. Finally, the influence of impact velocity, leg angle and impact position on the leg injury My was summarized. The study indicated that it had some guidance on reducing the lower leg injury in vehicle safety design, while the velocity and angle were set no more than 2 meter per second and 100 degree, the foot heel of 50th percentage dummy was impacted.

Keywords: frontal crash; impact rigidly; lower leg injury; leg angle

前排乘员下肢小腿伤害的实验研究

颜强, 张滕滕, 丁海建, 苏醒, 方嘉, 王大志, 李慧敏

上海汽车集团股份有限公司技术中心, 上海, 中国, 201804

yanqiang@saicmotor.com

摘要: C-NCAP 正面碰撞安全开发中, 驾乘人员下肢伤害部位不稳定且离散性较大。本文通过刚性冲击假人足部的方法, 模拟正面碰撞中不同侵入工况对假人下肢的伤害研究, 重点研究小腿损伤 My 的变化趋势, 采用峰值统计的方法对试验数据进行分析, 并总结了冲击速度、腿部角度和冲击位置等相关因素对小腿 My 的影响规律。研究表明: 冲击速度不大于 2m/s、腿部角度为 100° 和对脚跟部进行冲击, 对整车安全设计中降低驾乘人员下肢小腿伤害有一定的指导意义。

关键词: 正面碰撞; 刚性冲击; 小腿损伤; 腿部角度;

1 引言

在 NCAP (New Car Assessment Program) 正面碰撞测试中, 由于被动安全技术的快速发展, 特别是汽车用安全带和安全气囊等配置的不断普及和技术升级, 碰撞过程中驾乘人员的头部、颈部、大腿等可得到越来越好的保护, 在安全星级评价中能够获得较高的得分。同时, 下肢小腿部分的受伤问题显得日益突出^[1], 且小腿失分率仅次于胸部失分率^[2]。小腿的伤害主要来自膝部和髌部运动姿态、小腿撞击仪表板产生的力和力矩, 及前围板纵向变形所引起的歇脚板、地毯和踏板总成的运动形态对小腿产生的力和力矩。近些年, 针对小腿保护方面的研究也在不断深入, 并取得了一定的成果。有研究表明^[3], 通过整理正面碰撞试验数据库, 得出整车正面 100% 重叠刚性壁障碰撞试验和 40% 重叠可变形壁障碰撞试验中影响小腿得分的关键部位, 得到在不同碰撞工况下影响假人小腿得分的主要部位的相关规律。小腿评价指标中 Ti 胫骨指数和单个损伤值 My、Mx、Fz 有直接关系, 然而, 目前国内针对这些单一分解指标值的独立性损伤分析研究较少。

本文以水平冲击速度、腿部角度和冲击位置为变量参数, 设计试验矩阵, 分别对两种状态下的脚部(穿鞋和不穿鞋)进行刚性冲击, 并对显著性损伤值 My 进行数据统计分析, 总结了相关因素对其影响的规律, 对整车设计有

一定的指导意义。

2 小腿损伤及评价简介

在碰撞事故中，小腿部位受到的伤害虽不会直接导致受害者死亡，但由于受到硬性冲击的作用，尤其容易产生骨折、扭伤和撕裂等机械性损伤，甚至会导致腿部永久性的瘫痪。在下肢与汽车内饰件接触的过程中，会产生垂直于小腿骨方向的载荷力和作用于小腿上下部位的扭矩作用，这也是导致小腿骨折与脚踝部受扭曲的重要原因。

混 III 50% 体位男性假人，是碰撞测试中使用最普遍的假人，其小腿内部结构如图 1 所示，在小腿的上部和下部分别安装上、下胫骨传感器，用以采集腿部受到的载荷和弯矩。根据 SAE J211 规定，方向规定如下：轴向力 F_z 以小腿骨方向受拉为正；弯矩 M_x 以膝盖不动脚向左为正；弯矩 M_y 以膝盖向后脚向前为正。

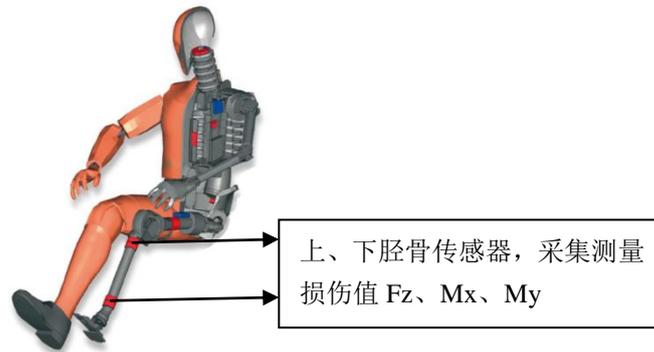


Figure 1. Dummy leg structure diagram

图1. 假人腿部结构示意图

在 CNCAP 评价中，假人小腿伤害的衡量指标包括直接测量得到的小腿压缩力 F_z 和由力和弯矩计算得到的小腿胫骨指数 TI 。其中， TI 计算公式如下：

$$M_R = \sqrt{(M_x)^2 + (M_y)^2} \quad (1)$$

$$TI = \left| \frac{M_R}{(M_C)_R} \right| + \left| \frac{F_z}{(F_C)_z} \right| \quad (2)$$

式中： M_x ——绕 x 轴的弯矩； M_y ——绕 y 轴的弯矩； F_z —— z 向的轴向压缩力；

$(M_C)_R$ ——临界弯矩，按 225Nm 计； $(F_C)_z$ —— z 向临界压缩力，按 35.9kN 计。

小腿部位评分中， F_z 对应的高低性能指标分别为 2kN 和 8kN； TI 对应的高低性能指标分别为 0.4 和 1.3。高低性能值分别对应满分 2 分和零分，处于二者之间的测量值，使用线性插值的方法计算得分^[4]。

3 My 损伤冲击试验

为了研究碰撞过程中小腿伤害机理，降低乘员下肢小腿伤害，仅研究车辆 X 方向的单一冲击侵入量的影响，并根据已有研究成果^[3]，此试验仅针对对腿损伤 M_y 进行了冲击研究；并且参考 B.Fileta 等人的研究结论^[5, 6, 7]，小腿足部冲击试验需要考虑设置腿部角度，以此研究冲击试验中小腿的伤害情况。

3.1 试验方案及变量参数

3.1.1 试验方案

在假人足部标定台上进行冲击试验，从冲击能量角度考虑，以及为便于分析脚掌、脚中、脚跟部同一水平面上左中右三位置的影响性，设计了一种上下、左右均可调节的冲击支架和刚性摆锤，摆锤质量为 5kg，支架

上端固定于足部冲击台架的顶部，刚性摆锤固定在支架下端，对按照试验参数设计摆放的脚部进行冲击。试验装置及示意如图 2 所示，示意图中 d_U 、 d_L 分别为 Upper 与 Lower 对应的冲击力臂。

3.1.2 变量参数

选择冲击速度、腿部角度和冲击位置为影响因子（即变量参数），确定参数变化水平值，设计试验矩阵，如表 1 所示，并针对穿鞋和不穿鞋两种工况执行试验，共计 162 组冲击试验。

表 1. 变量参数及水平值
Table 1. Variable parameters and levels

因子水平	冲击速度	腿部角度	冲击位置
I	2m/s	100°	脚掌部（左/中/右）
II	2.5m/s	105°	脚中部（左/中/右）
III	3m/s	110°	脚跟部（左/中/右）

其中，腿部角度定义为小腿骨轴向与大腿垂直方向的夹角，如试验装置图 2 中所示；脚部冲击位置示意如图 3 所示。

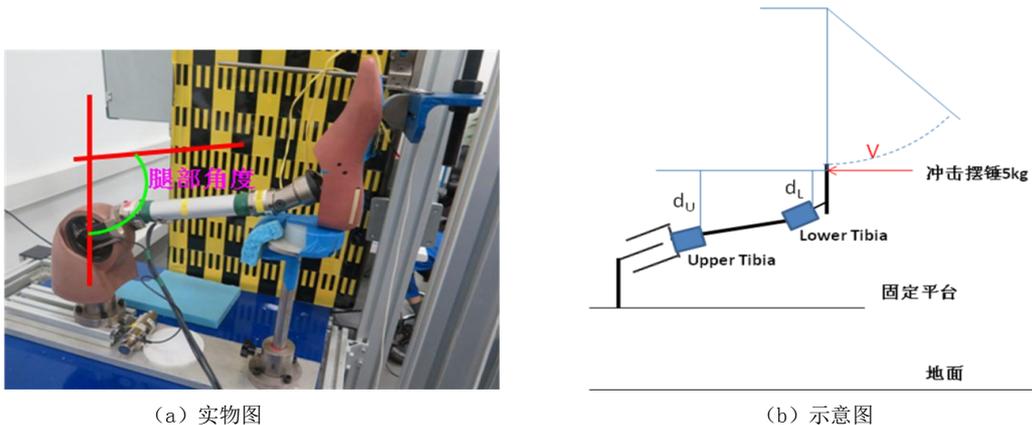


Figure 2. impact experiment facility
图2. 冲击试验装置

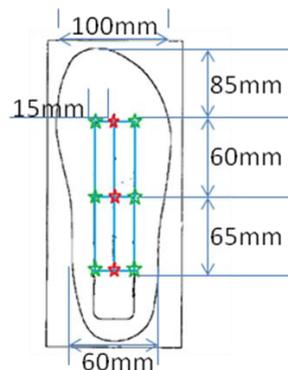


Figure 3. Foot shock position
图3. 脚部冲击位置

3.2 试验数据统计

由于小腿损伤得分，均以峰值计算为准，本文基于 Jbeam 分析软件，对每一组试验数据中损伤指标值进行统计，并分析了穿鞋工况（WS）和不穿鞋工况（NS）试验中，各损伤统计数据的变化趋势。

3.3 试验数据分析

首先对 My、Mx、Fz 三个分解损伤指标值的显著性进行验证，然后重点分析了单一损伤值 My，包括上下胫骨之间的关系、冲击位置及腿部角度对其的影响。

3.3.1 My 显著性验证

根据 My 的损伤机理，当脚部相对于小腿轴向有关于 Y 向的弯曲时，便会产生损伤值 My。对冲击速度 2m/s、腿部角度 100° 为参数输入的 18 组试验数据进行简要分析，如图 4 所示，My 显著于 Mx、Fz，符合试验预期。同时可知，同一高度位置上的冲击可近似看成是同一位置上的三次重复冲击（如脚掌、脚掌左、脚掌右），这也保证了试验数据的有效性与可靠性。

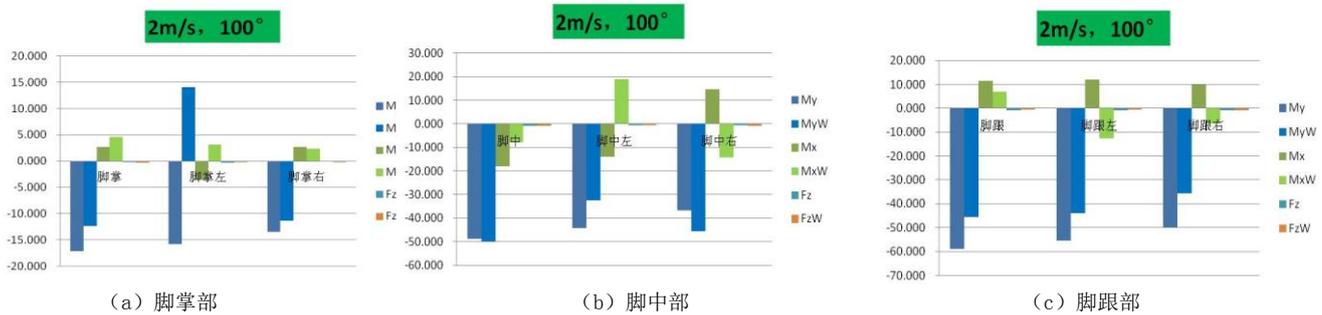


Figure 4. My significant analysis
图4. My显著性分析

3.3.2 Upper My 显著性及与冲击位置关系

对 162 组试验数据中 Upper My 与 Lower My 进行统计，对比分析分别如图 5、6、7 所示，并汇总结果如表 2、3 所示。从表 2 中可以得到，Upper My 要显著于 Lower My，初步分析，可能是由于上胫骨传感器距离受力位置较远，力臂较大，如图 2 (b) 示意图 d_U , d_L ，因而产生了较大力矩。从表 5 中可以看出，脚跟部受到冲击时，形成 Upper My 损伤值较大，且不穿鞋工况较为恶劣。

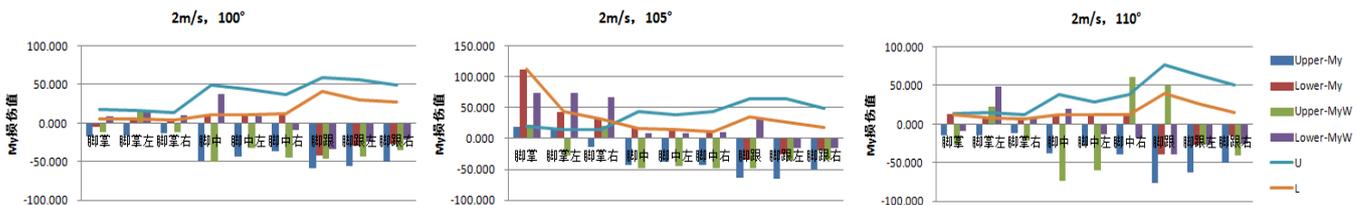


Figure 5. 2m/s Upper&Lower My analysis
图5. 2m/s Upper&Lower My对比分析

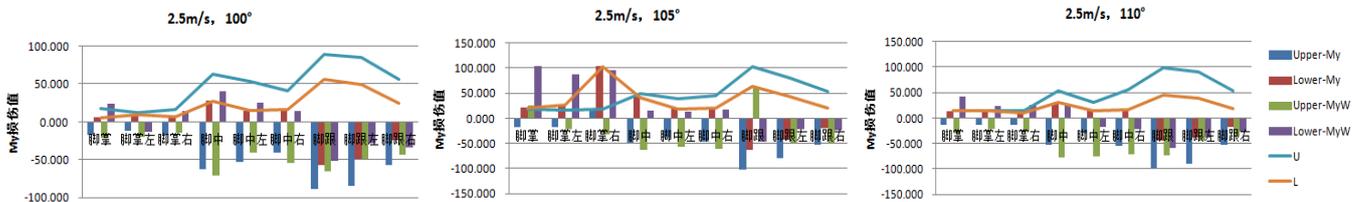


Figure 6. 2.5m/s Upper&Lower My analysis
图6. 2.5m/s Upper&Lower My对比分析

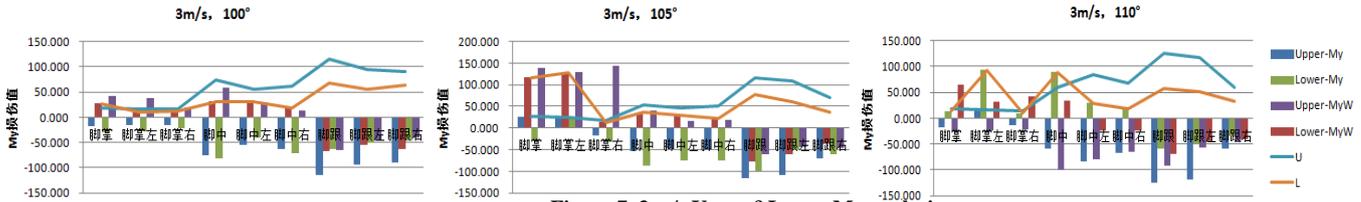


Figure 7. 3 m/s Upper&Lower My analysis
图 7. 3m/s Upper&Lower My 对比分析

Table 2. Upper&Lower My comparative statistics

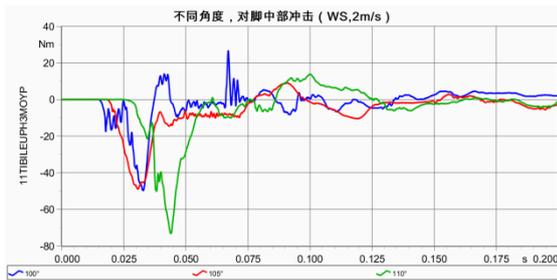
表2. Upper&Lower My对比统计			
工况	脚掌	脚中	脚跟
100°	Upper	Upper	Upper
105°	Lower	Upper	Upper
110°	Upper	Upper	Upper

Table 3. WS&NS Upper My comparative statistics

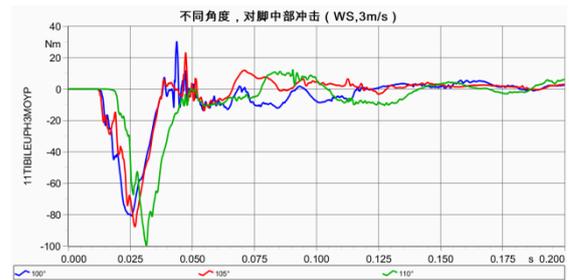
表3. WS&NS Upper My对比统计			
工况	脚掌	脚中	脚跟
100°	W	W★ ₁	N★ > W★ ₂
105°	W	W★ ₁	N★ > W★ ₂
110°	W	W★ ₁	N★ > W★ ₂

3.3.3 Upper My 与腿部角度关系

按照表 3，对穿鞋的脚中部冲击工况，以及不穿鞋的脚跟部冲击工况进行数据分析，研究腿部角度的变化对 Upper My 的影响。如图 8、图 9 曲线所示，Upper My 损伤值随腿部角度增大呈现增大趋势。



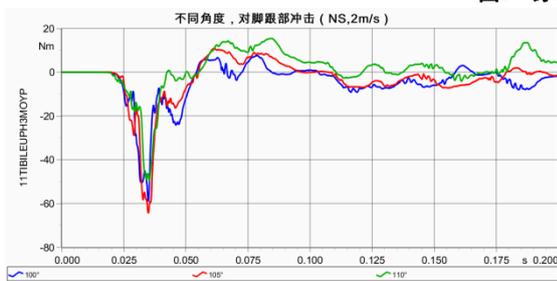
(a) 2m/s, 脚中部 WS



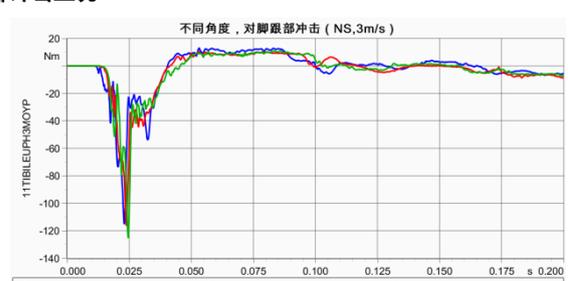
(b) 3m/s, 脚中部 WS

Figure 8. Wear shoes feet central impact conditions

图8. 穿鞋的脚中部冲击工况



(a) 2m/s, 脚跟部 NS



(b) 3m/s, 脚跟部 NS

Figure 9. Not wear shoes heel impact conditions

图9. 不穿鞋的脚跟部冲击工况

3.3.3 Upper My 损伤值分布区间

随着速度变大，即冲击能量的增加，Upper My 损伤值显然也呈现增大趋势。为进一步实现工程应用的需要，文中对不穿鞋的脚跟部冲击中的上胫骨弯矩 My 损伤值进行分布区间统计，如图 10 所示，并计算对应的脚跟部动态移动量，如表 4 所示。

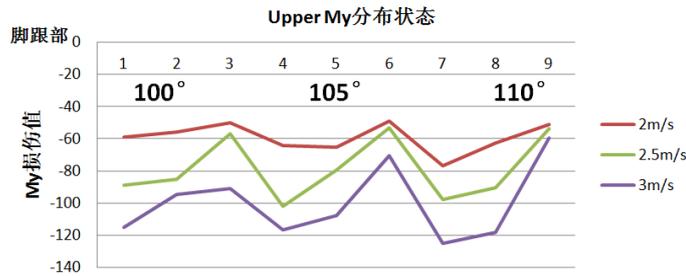


Figure 10, Upper My damage value distribution range
图10. Upper My损伤值分布区间

Table 4. Upper My damage value distribution range
表 4. Upper My 损伤值分布区间

速度	Upper My	动态移动量
2m/s	50~75Nm	59~63mm
2.5m/s	60~100Nm	60~66mm
3m/s	70~120Nm	62~74mm

统计结果表明,为得到小腿部位较好的保护,对脚跟部的动态移动量有一定的设计要求,推荐控制在 60mm 以内。然而,出于实际碰撞情况考虑,下肢尤其小腿部的运动姿态,不仅与踏板等直接接触件相关,还与车内约束系统装置密切相关,本文仅从子系统冲击试验的角度进行研究,存在一定的局限性,后续需要更深入的研究。

4 结论

为提高整车安全开发性能,降低乘员下肢小腿的伤害,从单一冲击因素研究冲击对 My 的伤害影响。文中基于足部标定试验台,通过刚性冲击的方法,对正碰工况中驾乘人员脚部的运动进行复现并研究了相关因素对单一伤害值 My 的影响规律。结论指出,当冲击速度小于等于 2m/s、腿部摆放角度为 100° 时,对脚跟部进行冲击,可有效控制显著性伤害值上胫骨弯矩 My,对工程应用以及提高下肢得分有一定的指导意义。

参考文献

- [1] Jenkins, J., S. Ridella. Development of an Inflatable Knee Bolster by using MADYMO and DOE[C]//The 9th International MADYMO User's Conference
- [2] 陈堡磊, 杨华明, 赵会, 等. H3 50th 假人下肢受冲击速度、位置和大腿角度对腿部伤害的研究[C]//2015 年中国汽车安全技术学术会议, 2015
- [3] 朱兰芹, 张滕滕, 王大志, 等. 正面碰撞中假人小腿伤害特点的分析研究[C]//第十九届汽车安全技术学术会议, 2016
- [4] 中国汽车技术研究中心, 《C-NCAP 管理规则 2015 版》, 2015
- [5] Fileta, B., A. J. Rossell, Y. Lin ,et al., Assessment of Magnetohydrodynamic Angular Rate Sensors in Measuring Ankle Rotations During Vehicle's Crash Test[C]//SAE Paper2001-01-0609
- [6] Lihua Li, Youmei Zhao, Guangyong Shen. Hybrid III 50th Dummy Ankle Performance Study and Proposed Design Modification[C]// SAE Paper2013-01-0664
- [7] Olson, C., S. Rouhanam, B. Spahn,et al., Comparison of the THOR and Hybrid III Lower Extremities in Laboratory Testing[C]. //SAE Paper2007-01-1168