乘用车行人保护仿真精度影响因素研究

崔书圣[1]，曹正林[1]，朱学武[1]，王孙斌[1]，王 洋[1]，王晓霞[1]

（1. 中国第一汽车集团有限公司研发总院，汽车振动噪声与安全控制综合技术国家重点实验室，长春 130011）

摘要：行人保护是汽车碰撞安全 CAE 分析中对仿真精度要求较高的专业领域之一，由于打击点数量较多，如果全部依赖试验，会造成巨大的周期和费用支出。因此，主机厂通常采用 CAE 仿真分析得到所有打击点的 HIC 伤害值，再通过 1-3 轮试验进行标定和修正。

本文基于某款传统车型，针对影响行人保护仿真精度的结构模拟、仿真设置、子系统建模、材料模型应用等 4 类（17 个因子），开展仿真与试验的对比分析，研究各因子对仿真精度的影响程度。对后续产品性能设计，提供指导建议。

关键词：行人保护；仿真标定；仿真精度

汽车的安全性能是汽车的固有属性，伴随着汽车保有量的不断上升，交通事故数量不断增加，政府和消费者对于汽车安全的重视程度逐年提升。近年来，得益于汽车安全法规和汽车安全技术的不断发展，汽车内乘员安全性能改善明显，但车外弱势群体的安全防护相对发展较慢，行人及非机动车事故死亡率居高不下。为此，NCAP 评价体系增加了行人保护性能评价项。行人保护是汽车碰撞安全 CAE 分析中对仿真精度要求较高的专业领域之一，由于打击点数量较多，数量一般集中在 170-200 个打击点。如果全部依赖试验，会造成巨大的周期和费用支出。因此，主机厂通常采用 CAE 仿真分析得到所有打击点的 HIC 伤害值，再通过 1-3 轮试验进行标定和修正。

本文基于 LS-DYNA 显式有限元仿真方法，针对影响行人保护仿真精度的结构模拟、仿真设置、子系统建模、材料模型应用等 4 大类，共计 17 个影响因子，开展不同仿真方法与试验数据的对比分析，研究各因子对仿真精度的影响程度。为后续产品性能设计和仿真精度提升打下了基础。

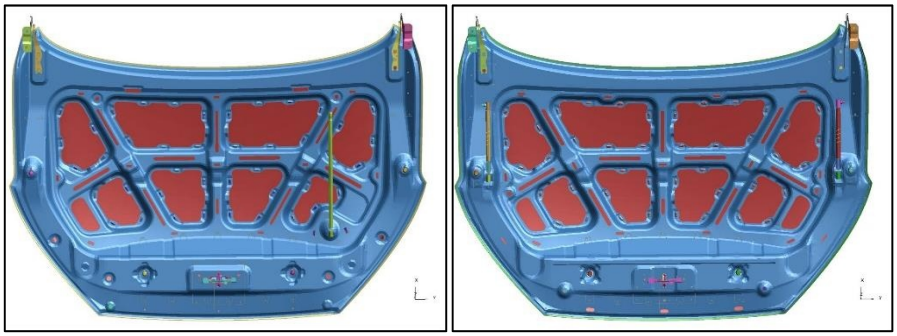
1 行人保护仿真标定分析方法研究

1.1 结构模拟影响度研究

行人保护属于系统性开发工作，受造型、总布置、设计、工艺、其他性能的综合影响，尤其是发罩内外板长线件数据的迭代速度较快，故需要研究模型几何调整和网格尺寸等因素对仿真精度的影响。

1.1.1 模型几何影响度分析

根据发罩内板数据，仅对限位块和气撑位置的结构作调整，如下图 1 所示。



（a）发罩有限元模型(调整前)　　（b）发罩有限元模型(调整后)

图 1 调整几何结构前后的发罩模型

将两版数据的分析结果与试验结果进行对比，选择的对标点涵盖非结构变化区域，以判断模型几何对仿真精度的影响度。

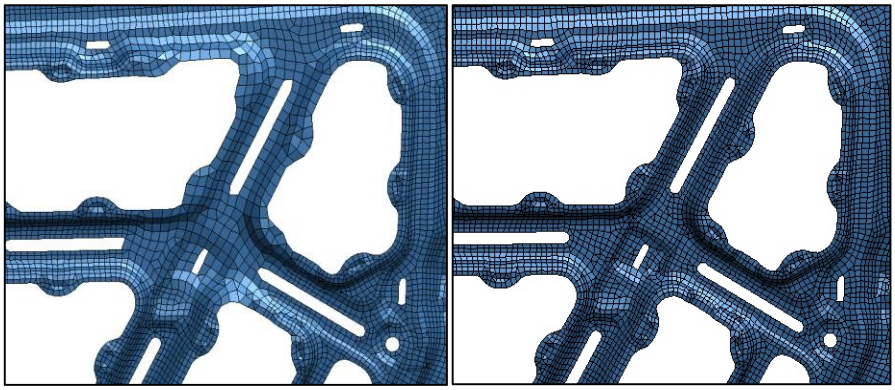
□□□	□□	□□□□□	□□□□	□□□□□	□□□□	□□□□
A	1143	1209	5.8%	927	-18.9%	13.1%
B	827	742	-10.3%	530	-35.9%	25.6%
C	956	899	-6.0%	817	-14.5%	8.5%
D	766	742	-3.1%	917	19.8%	16.7%
E	718	583	-18.8%	431	-40.0%	21.2%

表 1 几何调整前后行人保护头部 HIC 影响度分析

研究结果显示，即使在非结构变化区域，几何差别对行保标定精度的影响平均可达到大约 15%。若未能准确模拟实车的几何结构，会导致标定精度无法弥补的影响。

1.1.2 网格尺寸影响度分析

在相同内板数据基础上，对比平均网格尺寸为 10mm 和 5mm 的仿真模型，对仿真精度的影响程度。如下图 2 所示。



（a）发罩内板有限元模型(调整前)　　（b）发罩内板有限元模型(调整后)

图 2 调整网格尺寸前后的发罩模型

将两版数据的分析结果与试验结果进行对比，以判断网格尺寸对仿真精度的影响度。

□□□	□□	□□□□□	□□□□	□□□□□	□□□□	□□□□
F	952	949	-0.3%	948	-0.4%	0.1%
G	718	583	-19%	599	-16%	3%

表 2 网格尺寸调整前后行人保护头部 HIC 影响度分析

研究结果显示，调整过尺寸较大的网格模型，行保头部伤害值的影响可达到 3%。

相反的，网格尺寸过小将影响 LS-DYNA 显式计算的时间步长，增加计算资源需求（见第 2.2.4 章关于行保模型时间步长研究）。

综合考虑行保网格划分对标定所需的细节度以及过小网格的时间步长对计算资源的额外需求，平衡双方面的考量，行保模型里建议的金属件网格尺寸基本为 5mm（对应 7e-7 秒时间步）到 7mm（对应 1e-6 秒时间步）左右。

1.2 仿真模型设置研究

LS-DYNA 求解器分析软件中有各种模型设置，对行保模型标定精度会有不同影响。在此对模型设置和参数进行分析研究。

1.2.1 壳单元类型影响度分析

对于壳单元，LS-DYNA 默认的 2 号壳单元类型（ELFORM=2）对计算资源需求较小，且有稳定的鲁棒性，可普遍使用。但对于行人保护分析，碰撞区域需要更高计算精度，所以对碰撞区域中的壳单元使用有较多积分点（fully integrated shell element）的 16 号壳单元（ELFORM=16）。将两个模型与试验值进行对比。

[illegible]	[illegible]	2[illegible]	[illegible]	16[illegible]	[illegible]	[illegible]
H	1143	1070	-6.4%	1209	5.8%	1.4%
I	956	858	-10.3%	899	-6.0%	4.3%
J	766	651	-15.0%	742	-3.1%	11.9%
K	952	901	-5.4%	949	-0.3%	5.1%
L	718	549	-23.5%	583	-18.8%	4.7%

表 3 壳单元类型调整前后行人保护头部 HIC 影响度分析

研究结果显示，采用 16 号壳单元对行保标定精度改善平均可达到大约 5%。

1.2.2 体单元类型影响度分析

对于体单元，行保模型中普遍应用的为默认设置的 1 号体单元（constant stress solid element）和 2 号体单元（fully integrated, selectively reduced solid element）。

由于不同体单元类型内不同积分点的分布，若需使用一层体单元来捕捉弯曲刚度，必需使用 2 号体单元，因为单层的 1 号体单元并不能体现弯曲刚度。若是几何需求导致体单元长宽较不方整，则建议使用默认设置的 1 号体单元，以避免变形反应过刚。详情也在 LS-DYNA 关键字手册内有说明，如图 3 所示。

***SECTION** ***SECTION_SOLID**

4. **Elements for Shear and Pressure Locking: Types 2 and 18.** The selective reduced integrated solid element, element type 2, assumes that pressure is constant throughout the element to avoid pressure locking during nearly incompressible flow. However, if the element aspect ratios are poor, shear locking will lead to an excessively stiff response. A better choice, given poor aspect ratios, is the one point solid element which work well for implicit and explicit calculations.

图 3 LS-DYNA 关键字手册说明

研究分析中，针对发罩内外板粘胶类型进行调整， 将两个模型与试验值进行对比。

□□□	□□	1□□□□	□□□□	2□□□□	□□□□	□□□□
M	1143	1186	3.8%	1209	5.8%	2.0%
N	827	738	-10.8%	742	-10.3%	0.5%
O	956	898	-6.1%	899	-6.0%	0.1%
P	1328	1776	33.7%	1753	32.0%	-1.7%
Q	766	741	-3.3%	742	-3.1%	0.2%
R	952	955	0.3%	949	-0.3%	-0.6%
S	718	577	-19.6%	583	-18.8%	0.8%

表 4 体单元类型调整前后行人保护头部 HIC 影响度分析

研究结果显示，采用 1 号体单元和 2 号体单元，对行保标定精度影响较小，平均差别低于 1%。

1.2.3 接触影响度分析

对于较软的橡胶等部件体单元，其相对于金属材料的刚度较软，两者在 LS-DYNA 计算接触时可能导致刚度不匹配，而影响模型计算稳定性下降（例如压缩时出现负体积），因此需考虑在体单元外包裹 Null 材料的壳单元，以便调整接触刚度匹配，改善稳定性。但在体单元外包壳是否会对刚度有所影响，将两个模型与试验值进行对比。

□□□	□□	□□□□	□□□□	□□□□□	□□□□	□□□□
T	827	738	-10.8%	727	-12.1%	-1.3%
U	956	898	-6.1%	869	-9.1%	-3.0%
V	766	741	-3.3%	731	-4.6%	-1.3%
W	952	955	0.3%	939	-1.4%	-1.5%

表 5 包壳调整前后行人保护头部 HIC 影响度分析

研究结果显示，对较软的体单元进行包壳会对标定精度有 1－3%的影响。如果行保模型中较软的体单元（例如橡胶）在压缩下的接触产生不稳定性，可在部件外表面进行包壳。但如果体单元接触表现稳定，则不需要进行包壳处理，以减低任何对刚度的影响。

1.2.4 时间步长影响度分析

LS-DYNA 显式计算的时间步会受单元代表长度（即网格尺寸）和质量所影响，相同材料（密度和刚度）的网格越小则时间步越小。*CONTROL_TIMESTEP 卡片里的质量缩放（mass scaling）参数 DT2MS 会通过对较小网格单元进行质量增加以增加显式计算时间步长。在行保模型中，可以适当利用以达到质量增加和时间步长之间的平衡与优化。

在增加质量并未影响模型整体配重情况下，研究增加质量的分布对仿真结果的影响程度。如图 4 所示，在局部调整细小网格尺寸后，整体质量增加差别为 0.1%。

```
calculation with mass scaling for minimum dt
   added mass    =   2.5252E-02
   physical mass=   4.3965E-01
   ratio         =   5.7437E-02
```

（a）整体质量增加信息(调整前)

```
calculation with mass scaling for minimum dt
   added mass    =   2.5540E-02
   physical mass=   4.3965E-01
   ratio         =   5.8092E-02
```

（b）整体质量增加信息(调整后)

图 4 整体质量增加信息

在质量增加区域，将两个模型与试验值进行对比。

[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
X	766	741	-3.3%	729	-4.8%	-1.5%
Y	952	955	0.3%	914	-4.0%	-4.3%

表 6 质量增加调整前后行人保护头部 HIC 影响度分析

研究结果显示，不适当的 DT2MS 与细小网格质量增加对行保标定精度的影响差别是 2–4%。因此，除了检查分析输出的 otf 文件内质量增加对整体模型质量的比例，也需额外检查质量增加的分布，调整网格划分以避免质量集中造成的误差。

1.3 子系统仿真研究

碰撞区域涉及多个子系统，对这些子系统的不同仿真方法对 HIC 伤害影响度差异进行分析研究。

1.3.1 锁体影响度分析

对锁体与锁舌之间采用 Rigid Body 连接和几何接触连接两种方式，对比试验结果进行研究分析。

[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
Z	946	932	-1.5%	998	5.5%	-7.0%

表 7 锁体仿真方法对行人保护头部 HIC 影响度分析

研究结果显示，刚性连接会造成锁位置的打击点 HIC 伤害值过高，影响度达到 7%。

1.3.2 铰链影响度分析

对铰链位置采用 Rigid Body 连接和 joint 连接两种方式，对比试验结果进行研究分析。

[illegible]	[illegible]	Joint	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
A	1119	1115	-0.4%	1288	15.1%	-15.5%

表 8 铰链仿真方法对行人保护头部 HIC 影响度分析

研究结果显示，刚性连接会造成铰链位置的打击点 HIC 伤害值过高，影响度达到 15%。

1.3.3 螺栓影响度分析

对螺栓位置采用实体单元连接和 NRB 连接两种方式，对比试验结果进行研究分析。

[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	NRB	[illegible]	[illegible]
B	3882	3851	-1.8%	3321	14.5%	-16.3%
C	3041	2894	-4%	2345	22.9%	-26.9%

表 9 螺栓仿真方法对行人保护头部 HIC 影响度分析

研究结果显示，如果螺栓位置空间尺寸较小，存在击穿情况，空间 NRB 连接会造成打击点 HIC 伤害值过低，影响度平均 21%。

1.3.4 气撑影响度分析

对气撑位置采用 Rigid Body 连接和中间部用弹簧 + CYLINDRICAL Joint，弹簧单元形式用 DISCRETE，材料 MAT_S01_SPRIING_ELASTIC，两端连接用 REVOLUTE Joint，两种方式，对比试验结果进行研究分析。

[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
D	952	1049	10.2%	949	-0.3%	9.9%

表 10 气撑仿真方法对行人保护头部 HIC 影响度分析

研究结果显示，刚性连接会造成气撑位置的打击点 HIC 伤害值过高，影响度达到 10%。

1.3.5 隔热衬垫影响度分析

采用有隔热衬垫和无隔热衬垫两种方式，对比试验结果进行研究分析。

[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
E	953	1205	26.4%	1199	25.8%	0.6%
F	579	739	27.6%	733	26.6%	1%

表 11 隔热衬垫对行人保护头部 HIC 影响度分析

研究结果显示，隔热衬垫材料为 PUR 无纺布，影响度较小为 1%。

1.3.6 雨刮影响度分析

对雨刮位置采用 NRB 连接和采用弹簧+ cylindrical joint 两种方式，弹簧材料选用 MAT_S04_SPRING_NONLINEAR_ELASTIC, 定义压溃力与位移曲线。对比试验结果进行研究分析。

[illegible]	[illegible]	NRB	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
G	2391	2700	12.9%	2575	7.7%	5.2%
H	2807	3291	17.2%	3147	12.1%	5.1%
I	2850	3122	9.5%	2961	3.9%	5.6%

表 12 压溃式雨刮仿真对行人保护头部 HIC 影响度分析

研究结果显示，如果雨刮为可压溃式结构，采用刚性连接会造成 HIC 伤害值过高，影响度平均为 5.3%。

1.3.7 粘胶节点影响度分析

仿真中粘胶普遍利用 tied contact 与板材连接。该仿真模拟方法能改善仿真工程师在行保仿真工作中对部件调换分析的效率，因为 tied contact 不需要针对粘胶节点进行网格（重新）划分。另一个方法为粘胶节点与板材耦合，需调整网格划分以确保板材与粘胶有共节点，在进行部件调换分析时造成额外工作量。在相同的内外板数据基础上，结合试验结果，对两种粘胶形式进行研究分析。

[illegible]	[illegible]	Tie[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
J	952	949	-0.3%	945	-0.7%	0.4%
K	1718	1753	2.0%	1763	2.6%	0.6%

表 13 粘胶节点形式对行人保护头部 HIC 影响度分析

研究结果显示，两种粘胶仿真形式对结果影响较小，影响度小于 1%。

1.3.8 发罩内外板翻边影响度分析

发罩内外板包边的模拟可采用包边总体厚度壳单元，另一种是将包边单元分为两层，边缘为共节点，对比试验结果进行研究分析。

[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
L	932	939	-0.3%	937	-0.3%	0.1%
M	718	583	-18.8%	589	-17.9%	0.9%

表 14 发罩内外板包边形式对行人保护头部 HIC 影响度分析

研究结果显示，两种发罩包边仿真形式对结果影响较小，影响度小于 1%。

1.4 材料模型应用研究

行人保护设计金属、塑料、泡沫、橡胶等多种材料，其中塑料零件在试验中存在着断裂失效的情况，采用传统 24 号材料很难准确的对断裂时刻和断裂形态进行仿真，应用 M187 等带有失效准则的材料卡片，进行相关的影响度分析研究，如图 5 所示。

图 5 Ls-Dyna MAT187 号材料卡片

1.4.1 大灯材料影响度分析

大灯面罩和大灯壳体使用 MAT24 号材料卡片和使用含有断裂失效信息的 MAT187 号材料卡片，对比试验结果进行研究分析。

???	??	MAT24	????	MAT187	????	????
N	2361	1357	-42.5%	2280	-3.4%	39.1%

表 15 大灯断裂失效材料对行人保护头部 HIC 影响度分析

研究结果显示，大灯面罩和大灯壳体的材料对结果影响非常大，影响度为 40%。

1.4.2 前端框架材料影响度分析

前端框架使用 MAT24 号材料卡片和使用含有断裂失效信息的 MAT187 号材料卡片，对比试验结果进行研究分析。

???	??	MAT24	????	MAT187	????	????
O	845	803	-5.0%	839	-0.7%	4.3%

表 16 前端框架断裂失效材料对行人保护头部 HIC 影响度分析

研究结果显示，前端框架的材料对结果影响度为 4.3%。

其他如锁上护板、机舱护板等影响度平均在 4-5%。

1.4.3 橡胶材料影响度分析

缓冲块、密封条等橡胶使用 MAT77 号材料卡片和 MAT27 号 Mooney-Rivlin 双参数（A、B）橡胶材料模型，对比试验结果进行研究分析。

*MAT_MOONEY-RIVLIN_RUBBER *MAT_027

*MAT_MOONEY-RIVLIN_RUBBER

This is Material Type 27. A two-parametric material model for rubber can be defined.

Card 1	1	2	3	4	5	6	7	8
Variable	MID	RO	PR	A	B	REF		
Type	A8	F	F	F	F	F		

图 6 Ls-Dyna MAT27 号材料卡片

???	??	MAT27	????	MAT77	????	????
P	766	742	-3.1%	719	-6.1%	-3.0%
Q	952	949	-0.3%	914	-4.0%	-3.7%

表 17 橡胶材料对行人保护头部 HIC 影响度分析

研究结果显示，MAT27 号材料对橡胶的仿真效果更好，影响度为 3.4%。

1.4.4 挡风玻璃材料影响度分析

挡风玻璃的仿真模拟一直是行保的技术难点，对比不包含失效信息的 MAT3 号材料卡片和 MAT 32 号材料（Mat-Laminated-Glass）在壳单元里通过不同积分点设置（Quadrature Rule）模拟玻璃以及 PVB 层。如图 7 所示。

***MAT_032** ***MAT_LAMINATED_GLASS**

***MAT_LAMINATED_GLASS**

This is Material Type 32. With this material model, a layered glass including polymeric layers can be modeled. Failure of the glass part is possible. See notes below.

Card 1	1	2	3	4	5	6	7	8
Variable	MID	RO	EG	PRG	SYG	ETG	EFG	EP
Type	A8	F	F	F	F	F	F	F

Card 2	1	2	3	4	5	6	7	8
Variable	PRP	SYP	ETP					
Type	F	F	F					

图 7 Ls-Dyna MAT32 号材料卡片

建模方法如下：首先开展样片级材料试验，获得夹层玻璃本体和 PVB 聚合物的材料特性。通过高速拉伸设备，获得夹层玻璃本体和 PVB 聚合物的密度、杨氏模量、泊松比、屈服应力、塑性硬化模量、失效塑性应变等 12 项参数。

建立玻璃材料卡片。应用 LS-DYNA 软件采用 integration Rule（QR/IRID）设置玻璃层和 PVB 聚合物层的厚度、积分点数量和分布。积分点数量定义为 9 层，第 1-4 层为外侧玻璃，每一层厚度为 0.5mm；第 5 层是 PVB 聚合物，厚度是 0.8mm；第 6-9 层为内侧玻璃，每一层厚度为 0.5mm。依据第一步获取的玻璃和 PVB 聚合物材料特性数据，填写在 MAT32 号材料卡片的相关参数中，作为挡风玻璃仿真模型的基础参数。

开展部件级三点弯试验，获得试验的力-位移曲线。依据第二步中的挡风玻璃模型的相关参数，建立三点弯 CAE 仿真分析模型，通过仿真与试验曲线对标，对玻璃和 PVB 聚合物的屈服应力、塑性硬化模量、失效塑性应变参数进行调整，直至仿真与试验力-位移曲线 COR 拟合度达到 90%以上。将该玻璃材料模型用于行人保护仿真标定中，以其中一个碰撞点为基础，标定完成后，对其他玻璃区域碰撞点进行验证。与试验曲线对比结果如图 8 所示。

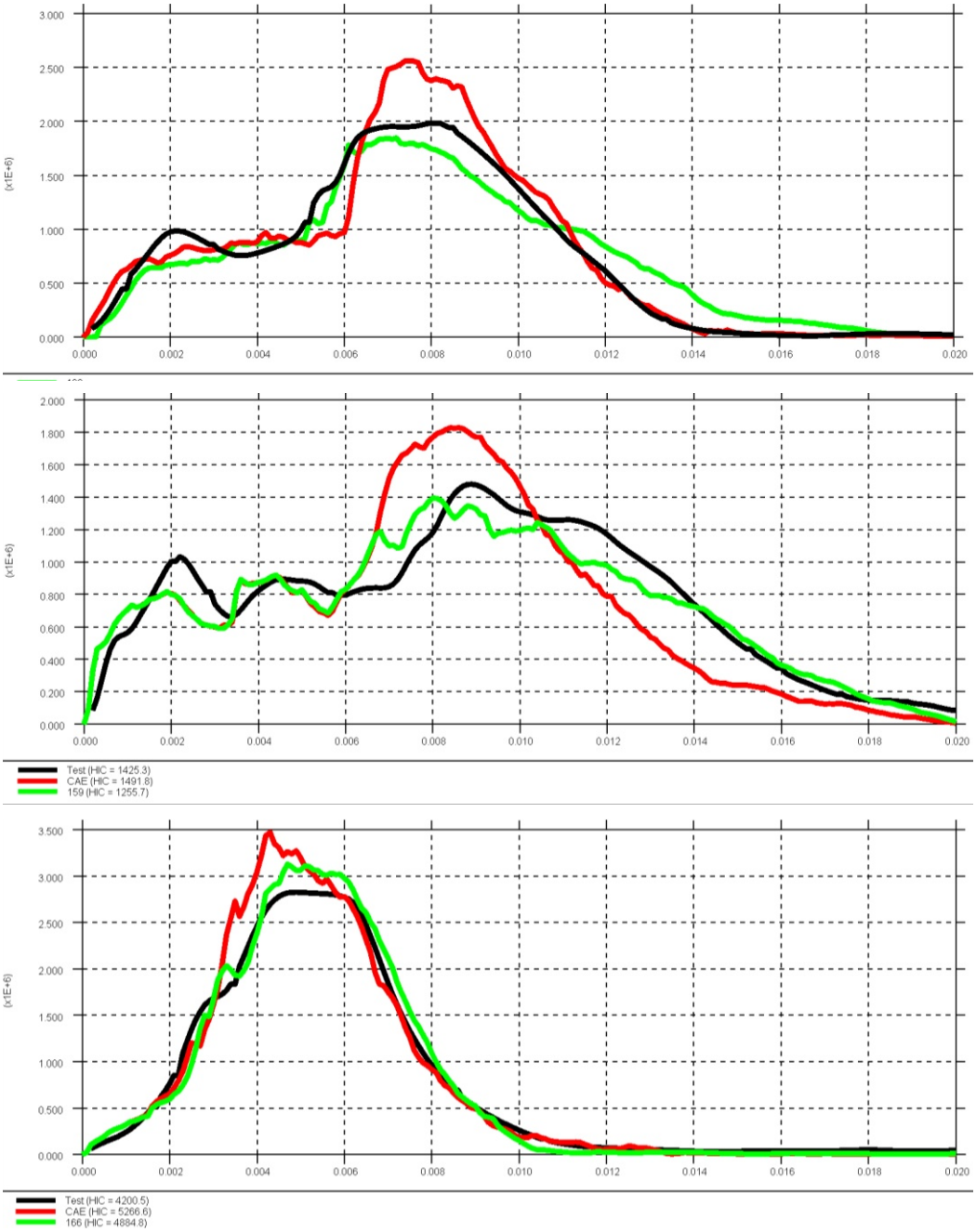


图 8 不同玻璃碰撞点 HIC 伤害曲线

□□□	□□	MAT32	HIC□□□	COR2□□□□□
R	2135	1825	86%	94%
S	1425	1256	88%	91%
T	4200	4885	86%	91%

表 18 玻璃材料对行人保护头部 HIC 影响度分析

研究结果显示，MAT32 号材料对玻璃的仿真效果较好，HIC 伤害拟合度 85%以上，曲线拟合度 90%以上。

2 结果与分析

本文基于 LS-DYNA 显式有限元仿真方法，针对影响行人保护仿真精度的结构模拟、仿真设置、子系统建模、材料模型应用等 4 大类，共计 17 个影响因子，开展不同仿真方法与试验数据的对比分析，以数据作为支撑，研究各因子对仿真精度的影响程度，确定了各影响因子的最优仿真方法。为后续产品性能设计和仿真精度提升打下了基础。