

夹层材料式发动机罩行人保护功效

赵桂范¹, 崔 东¹, 邓作梁²

(1. 哈尔滨工业大学(威海)汽车工程学院, 264209 山东 威海, cuidonghit@yahoo.cn;

2. 台湾大叶大学 机械与自动化工程系, 51591 台湾 彰化)

摘 要: 为降低行人事故中的行人头部损伤,研究了面板为钢板芯材为 PVC 泡棉材料的夹层材料发动机罩的行人头部保护性能.应用 Eshelby 等效夹杂理论和 Mori-Tanaka 均匀化方法将该夹层材料等效为各向异性材料并计算该材料的力学性能,应用 Ls-dyna 动力分析软件进行仿真分析.分析得出当夹层材料等效参数为:厚度 0.82 mm,密度为 $579.8 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,杨氏模量 $E_1 = E_2 = 146.42 \text{ GPa}$, $E_3 = 0.1396 \text{ GPa}$,泊松比 $\nu_{21} = 0.3$, $\nu_{31} = \nu_{32} = 0.0029$,剪切模量 $G_{12} = 56.31 \text{ GPa}$, $G_{23} = G_{31} = 44.45 \text{ GPa}$ 时成人及儿童头部均能获得较好的保护性能.研究结果表明合理设计夹层材料参数能够有效降低行人头部损伤值.

关键词: 夹层材料;头部;仿真;行人保护

中图分类号: U461.91

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2011)01-0125-05

The pedestrian protection efficacy of sandwich material engine hood

ZHAO Gui-fan¹, CUI Dong¹, TSO-LIANG Teng²

(1. School of Automobile Engineering, Harbin Institute of Technology, 264209 Weihai, Shandong, China, cuidonghit@yahoo.cn;

2. Dept. of Mechanical and Automation Engineering, Da-Yeh University, 51591 Zhonghua, Taiwan, China)

Abstract: To reduce the pedestrian injury in accidents, the protection efficacy of sandwich material hood made of steel panel with PVC foam material inside was studied. The sandwich material was treated as anisotropic material by using the Eshelby's principle and Mori-Tanaka's method, and then its mechanical properties were calculated. The simulation of head impacting process was carried out by Ls-Dyna, and the results showed that, when some suitable parameters of the sandwich material were selected, the injury value of pedestrian head could be effectively reduced.

Key words: sandwich material; head; simulation; pedestrian protection

在交通事故中,有约 1/3 的事故与行人有关,在事故中行人头部与颈部受到 AIS2+ 级别损伤的概率为 28%,头部损伤产生致命的伤害的概率为 62%^[1].行人头部与发动机罩撞击是造成行人头部损伤的主要原因,发动机罩的材料及结构是决定头部损伤程度的重要因素.文献[2]中介绍了采用铝制发动机罩代替原始的发动机罩来降低行人头部损伤.在现代结构设计中,夹层材料以其优异的性能越来越受到人们的青睐,而且夹层材料在车身结构方面的应用也越来越广泛.

本文应用 Eshelby 等效夹杂理论和 Mori-Tan-

aka 均匀化方法将夹层材料理想化为各向异性的匀质材料代替发动机罩外板的原有材料,藉以简化分析模型,提高仿真速度.按照法规建立成人及儿童头部模型,应用 Ls-dyna 动力分析软件对发动机罩的多个点进行撞击仿真分析,得出能够降低行人头部损伤的材料参数.

1 等效夹杂理论的基本原理

1.1 基本假设

本文将研究面板为普通钢板,芯材为 PVC 泡棉的夹层材料,如图 1 所示.

在进行仿真的过程中首先将应用 Eshelby 等效夹杂理论和 Mori-Tanaka 均匀化方法将夹层材料等效为正交各向异性材料.

收稿日期: 2009-11-01.

作者简介: 赵桂范(1962—),女,教授,博士生导师;

邓作梁(1958—),男,教授,博士生导师.

在此将各单层假设为:假设组分材料分别是均匀、连续、各向同性的材料;假定材料各层之间紧密结合;假设分析处于线性与小变形的范围内.

1.2 夹层材料力学参数求解

设有各向同性材料 D , 其弹性模量张量为 C_0 , D 域内有許多颗粒, 其体积含量为 c_1 , 弹性模量为 C_1 , 受均匀应力 σ 作用 (如图 2(a) 所示). 为了便于研究, 引入一匀质对比材料 (图 2(b) 所示), 其形状与夹层材料外形 (如图 2(a) 所示) 相同, 弹性模量为 C_0 (与夹层材料基体相同).

根据 Eshelby 等效夹杂理论和 Mori-Tanaka 均匀化方法可知夹层材料的弹性模量 C 为

$$C = C_0 [I - c_1 [(C_1 - C_0)(c_0 S + c_1 I) + C_0]^{-1} (L_1 - C_0)]^{-1} \tag{1}$$

式中: S 为 Eshelby 的 S 张量, 该张量为四阶, 与基体材料性能及颗粒形状有关; I 为四阶单位张量.

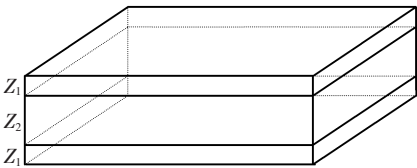


图 1 夹层材料结构

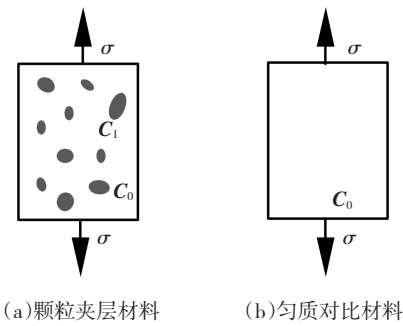


图 2 夹层材料与匀质材料对比图

四阶张量 S 特性为:

1) 对称性, 即 $S_{ijkl} = S_{jikl} = S_{ijlk} = S_{jilk}$. 因此根据此对称法则, S 张量根据 Voigt 符号可以写为

$$S_{ijkl} = \begin{bmatrix} S_{1111} & S_{1122} & S_{1133} & S_{1112} & S_{1113} & S_{1123} \\ S_{2211} & S_{2222} & S_{2233} & S_{2212} & S_{2213} & S_{2223} \\ S_{3311} & S_{3322} & S_{3333} & S_{3312} & S_{3313} & S_{3323} \\ S_{1211} & S_{1222} & S_{1233} & S_{1212} & S_{1213} & S_{1223} \\ S_{1311} & S_{1322} & S_{1333} & S_{1312} & S_{1313} & S_{1323} \\ S_{2311} & S_{2322} & S_{2333} & S_{2312} & S_{2313} & S_{2323} \end{bmatrix} \tag{2}$$

2) 当基体和颗粒都为匀质材料且基体为各向同性. 两相完全接触时, S 张量只与颗粒形状和

集体材料的泊松比有关. 当颗粒为片状时 S 张量可为

$$\begin{aligned} S_{1111} &= 1, \\ S_{2222} = S_{3333} &= \frac{\nu_0}{1 - \nu_0}, \\ S_{1212} = S_{3131} &= 1/2. \end{aligned} \tag{3}$$

当夹层材料各层材料力学特性及各层厚度确定后根据式(3)可求得 S 张量, 再将 S 张量代入式(1)即可求得夹层材料的力学参数.

2 车辆 - 行人头部撞击模型的建立

2.1 车辆模型

在行人头部与发动机罩板撞击时, 由于车辆悬架、轮胎等相关因素, 车身会有下陷情况产生, 从而对头部损伤程度造成影响. 为了更准确的模拟撞击过程, 采用 Ford Taurus 整车有限元模型, 如图 3 所示. 其中: 发动机罩外板厚 0.82 mm (包含 2 662 个节点, 9 852 个单元); 发动机罩内板厚 1.05 mm (包含 1 757 个节点, 1 732 个单元).

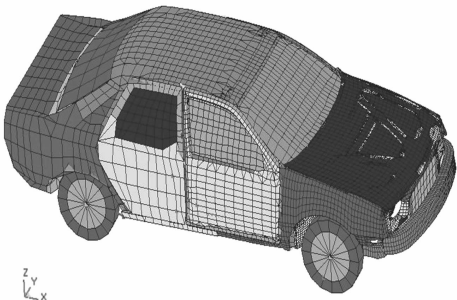


图 3 车辆有限元模型

2.2 行人头部模型

按照 EEVC WG17 法规的要求建立行人头部冲击器有限元模型, 如图 4 所示. 其中: 成人头部冲击器模型直径为 165 mm, 重 4.796 kg, 由 2 662 个节点, 9 852 个单元组成; 儿童头部模型直径 135 mm, 重 2.522 kg, 由 970 个节点, 3 101 个单元组成.

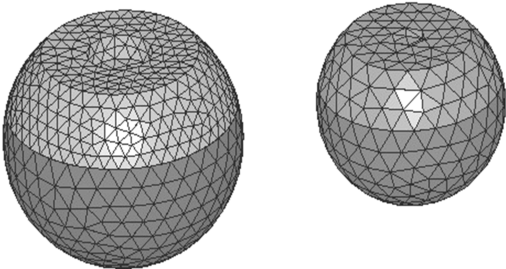


图 4 行人头部冲击器有限元模型

头部模型由头皮和头骨两部分组成, 头皮定

义为粘弹性材料属性,头骨定义为弹性材料属性,成人头皮密度 $956\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,体积模量 0.25 GPa ,头骨密度 $2\,940\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,弹性模量 30 GPa ,泊松比 0.33 ;儿童头皮密度 $956\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,体积模量 0.5 GPa ,头骨密度 $3\,050\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,弹性模量 30 GPa ,泊松比 0.33 .

2.3 撞击模型

依照 EEVC WG17 法规要求,划分出成人头部与儿童头部的撞击区域.成人头部与儿童头部均以 40 km/h 的速度分别与地面呈 65° 与 50° 的夹角与发动机罩撞击,传感器布置在头部模型中间点,来测试头部模型的加速度变化,如图 5 所示.为更好的探求发动机罩对行人头部的整体防护性能,对成人撞击区域选取 8 个撞击点为 A1 ~ A8;儿童撞击区域选取 6 个撞击点为 C1 ~ C6,如图 6 所示.

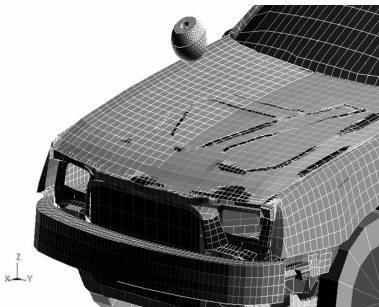


图5 成人头部冲击器撞击模型

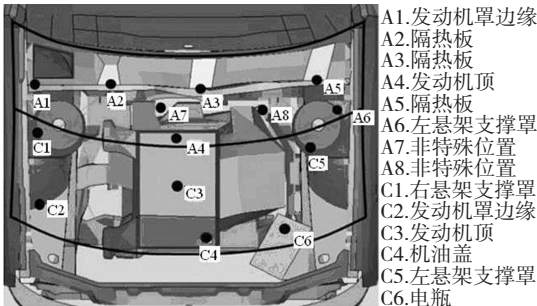


图6 撞击点的选择

3 仿真分析

3.1 原材料发动机罩仿真分析

3.1.1 行人头部损伤评价标准

在汽车碰撞安全性能标准中,行人头部的伤害指标是由头部发生碰撞时产生的加速度(它是重力加速度 g 的倍数关系)和它的持续时间决定的物理量 HIC 值大小来确定为

$$HIC = \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_1^2 a dt \right]^{2.5} (t_2 - t_1). \quad (4)$$

在法规中 HIC 值以 $1\,000$ 为限,认为超过

$1\,000$ 则会对人的头部造成致命的危害.

3.1.2 原材料参数下行人头部损伤分析

在原材料参数下测得成人及儿童头部的 HIC 值如表 1,2 所示.

表1 成人头部

仿真值	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
HIC	2 242	1 202	1 741	592	2 031	6 298	792.1	917.9
a_{max}/g	216.7	156.4	254.9	104.2	208.8	433.9	166.8	147.6

表2 儿童头部

仿真值	C1	C2	C3	C4	C5	C6
HIC	2 898	1 809	1 065	2 968	1 474	888.1
a_{max}/g	250.5	191.0	196.9	275.6	212.4	154.5

从表 1,表 2 数据可以看出 A6、C1 和 C4 点的 HIC 值较大.它们分别是悬架支撑罩及机油盖上面的测试点、悬架支撑罩及机油盖与发动机罩间的距离较小,因此导致这些点的 HIC 值较高.做出 A6 点位移曲线并与 HIC 值较小的 A4 点比较,如图 7 所示.将 C1 点、C4 点的位移曲线与 HIC 值较小的 C6 点比较,如图 8 所示. A6 点最大位移为 27.6 mm ,A4 点最大位移为 79.3 mm ;C1 点最大位移为 15.7 mm ,C4 点最大位移为 33.1 mm ,C6 点最大位移为 48.2 mm .

可见 HIC 值较大的点在撞击中的位移都相对较小,没能使头部得到充分缓冲,导致损伤值较大.

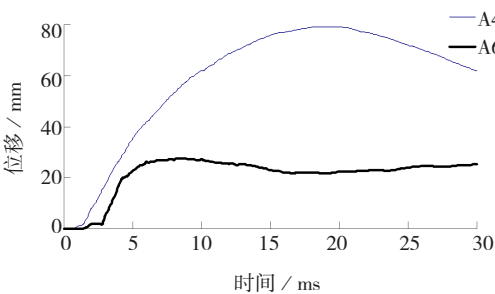


图7 A4 与 A6 点位移对比曲线

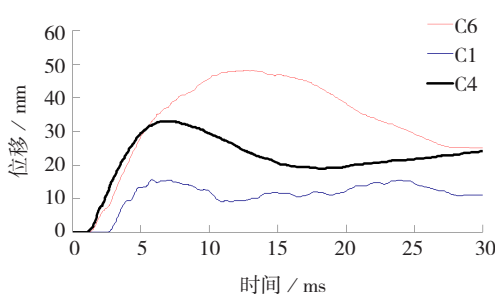


图8 C1、C4 与 C6 点位移对比曲线

3.2 夹层材料发动机罩仿真分析

3.2.1 成人头部分析

对于夹层材料单层的钢板材料选择与原钢板相同,其弹性模量为 200 GPa,剪切模量为 76.92 GPa,泊松比为 0.3,密度为 $7\,850\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,中间芯材选择 Airex 公司的 C70.200 PVC 泡棉材料,其抗剪切性能较好,且为各向同性材料,其弹性模量为 0.28 GPa,剪切模量为 0.075 GPa,泊松比为 0.30,密度为 $200\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

原发动机罩板厚度为 0.82 mm,因此初选上、

下 2 层钢板厚度均为 0.30 mm,最大厚度控制在 0.41 mm 以内;芯材暂取 1 mm.例如夹层材料的厚度为 0.30/1.00/0.30(面板厚度/芯材厚度/面板厚度)则表示上、下面板厚度均为 0.30 mm,中间芯材厚度为 1.00 mm.根据不同的组分应用等效夹杂理论可以计算其等效的力学参数,再将等效参数代入 Ls-dyna 中进行撞击仿真.

针对不同厚度做了多组试验,如表 3 所示.

表 3 不同参数的夹层材料发动机罩对成人头部 HIC 值的影响

厚度参数/mm	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
0.29/0.90/0.29	2 226	1 322	2 088	652.5	1 821	5 477	868.3	867.4
0.29/1.00/0.29	2 196	1 221	1 957	653	1 922	5 946	858.9	1 053
0.30/0.22/0.30	1 688	1 275	1 862	628.6	1 936	6 017	856.6	789.6
0.30/0.50/0.30	2 323	1 229	1 906	580.8	1 702	5 571	871.6	771.1
0.30/1.00/0.30	1 855	1 254	1 509	647	1 873	5 644	856.8	988.9
0.30/1.50/0.30	2 570	1 659	1 471	714.6	1 868	4 739	1010	1 204
0.30/2.00/0.30	3 018	1 875	1 888	724	2 354	3 848	1051	1 339
0.31/0.50/0.31	2 350	1 170	1 924	592.9	1 851	6 257	831.3	873.3
0.31/1.00/0.31	1 710	1 230	1 373	609.5	1 930	6 084	819.1	1 016
0.32/1.00/0.32	2 058	1 229	1 666	654.2	1 496	5 866	830.9	1 095
0.35/1.00/0.35	2 826	1 264	2 087	726.7	1 855	6 044	813	992.4
0.40/1.50/0.40	2 824	1 651	1 549	806.6	2 524	5 129	978.8	1 212
0.41/2.00/0.41	3 019	1 862	1 643	892.3	2 776	3 700	921.3	1 368

可以发现表 3 数据的规律性较差,通过改变材料厚度及力学性能很难使发动机罩所有点对成人头部损伤值降低,在使某些点 HIC 降低的前提下必定会有 HIC 升高的点.通过上述数据可以看出在 0.30/1.00/0.30、0.30/0.50/0.30/0.30、0.30/0.22/0.30 这 3 组材料参数时 HIC 比较合

理,因此具体要采用哪种材料参数还需根据儿童头部的仿真结果来确定.

3.2.2 儿童头部分析

针对不同材料参数进行多组试验,来分析 HIC 值的变化规律,如表 4 所示.

表 4 不同参数下的夹层材料发动机罩对儿童头部 HIC 值的影响

厚度参数/mm	C1	C2	C3	C4	C5	C6
0.29/1.00/0.29	4 634	2 646	1 451	4 227	2 014	1 252
0.30/0.22/0.30	3 529	1 594	733.6	2 141	1 327	894.1
0.30/0.30/0.30	4 393	1 678	773.6	2 517	1 469	900.3
0.30/0.50/0.30	3 898	1 994	1 086	3 333	1 504	1 016
0.30/1.00/0.30	4 502	2 665	1 468	4 155	1 830	1 264
0.31/0.50/0.31	4 438	1 928	1 069	3 444	1 645	1 011
0.31/1.00/0.31	4 480	2 686	1 468	3 942	1 969	1 258
0.32/1.00/0.32	4 482	2 669	1 451	3 552	1 959	1 250

通过数据可以发现当夹层材料面板采用 0.30 mm 时,随着中间芯材厚度的减小,HIC 值逐渐减小.在采用芯材厚度为 0.22 mm 时,儿童头

部 HIC 值最小,经过与成人头部 HIC 值共同分析可确定采取 0.30/0.22/0.30 这组材料参数时为最优结果.

采取此材料参数时其等效材料参数为:厚度 0.82 mm,密度为 $5\,798\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,杨氏模量 $E_1 = E_2 = 146.42\text{ GPa}$ 、 $E_3 = 0.139\,6\text{ GPa}$,泊松比 $v_{21} = 0.3$ 、 $v_{31} = v_{32} = 0.002\,9$,剪切模量 $G_{12} = 56.31\text{ GPa}$ 、 $G_{23} = G_{31} = 44.45\text{ GPa}$ 。A1 点及 C1 点撞击加速度曲线与采用原材料时的对比如图 9~图 10,其中各试验点 *HIC* 与加速度峰值的下降量如表 5,表 6 所示。

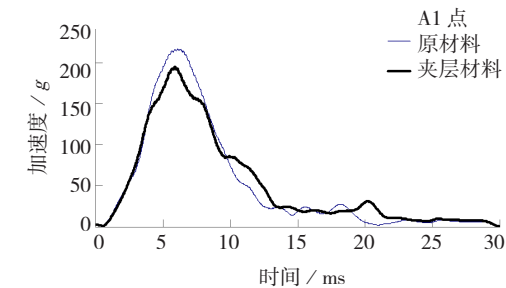


图 9 A1 点夹层材料和原材料加速度对比曲线

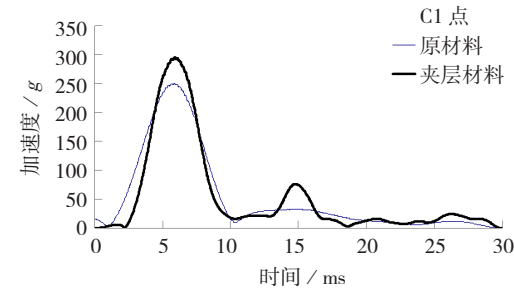


图 10 C1 点夹层材料和原材料加速度对比曲线

表 5 采用夹层材料时成人头部损伤降低程度 %								
仿真值	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
<i>HIC</i>	24.71	-6.07	-6.95	-6.18	4.68	4.46	-8.14	13.98
降低量								
$a_{\max}$	10.19	13.76	24.84	6.99	8.89	5.40	13.37	21.63
降低量								

表 6 采用夹层材料时儿童头部损伤降低程度 %						
仿真值	C1	C2	C3	C4	C5	C6
<i>HIC</i>	-21.77	11.88	31.12	27.86	9.97	-0.68
降低量						
$a_{\max}$	-18.02	14.86	30.16	7.17	0.59	14.93
降低量						

通过表 5,表 6 可以看出,对于成人头部在 A2、A3、A4、A7 这 4 点的 *HIC* 值略有增大,但 A4 与 A7 点的 *HIC* 值仍在 1 000 以内,另外通过加速度的峰值来看,所有点的加速度峰值都有所下降,因此该夹层材料发动机罩能够满足成人头部保护的功能。

对于儿童头部,在 C1、C6 点 *HIC* 值及加速度峰值有所增大,其他各点都有降低。此夹层材料的厚度与原发动机罩外板厚度相同,因此其相对于原材料较“软”,C1 点下面为悬架支撑罩,较“软”

的发动机罩导致了头部与悬架支撑罩间接的撞击力加大,从而该点的 *HIC* 值变大。

4 结 论

- 1)应用 Eshelby 等效夹杂理论进行了面板为钢板,芯材为 PVC 泡棉材料的夹层材料力学性能的计算。
- 2)建立了成人及儿童的头部冲击器有限元模型,按照 EEVC WG17 法规对行人头部撞击进行了仿真分析,得到了发动机罩不同撞击点头部损伤 *HIC* 值,并得出头部缓冲距离是影响 *HIC* 值大小的关键因素。
- 3)设计了夹层板式夹层材料,应用此夹层材料替换发动机罩原有材料进行撞击仿真,结果显示采用此夹层材料的发动机罩能降低行人头部损伤,当夹层材料等效参数为:厚度 0.82 mm,密度为 $5\,798\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,杨氏模量为 $E_1 = E_2 = 146.42\text{ GPa}$ 、 $E_3 = 0.139\,6\text{ GPa}$,泊松比为 $v_{21} = 0.3$ 、 $v_{31} = v_{32} = 0.002\,9$,剪切模量为 $G_{12} = 56.31\text{ GPa}$ 、 $G_{23} = G_{31} = 44.45\text{ GPa}$ 时成人及儿童头部均能获得较好的保护性能;
- 4)由于儿童头部质量较轻,冲击能量较小,若要使儿童头部获得最佳保护能力,所得材料相比较成人来说应相对较“软”,厚度较薄。

参考文献:

[1] FAROOQ S I, SCHUSTER P. Body concept design for pedestrian head impact[J]. SAE 2003 World Congress & Exhibition,2003,doi:10.4271/2003-01-1300.

[2] IKEDA K, ISHITOBI H. Development of auminum hood structure for pedestrian protection[J]. SAE Technical Paper, 2003, doi:10.4271/2003-01-2793.

[3] 孙少俊. 复合材料车身的发展动态[J]. 汽车工艺与材料, 2008(3): 68-71.

[4] van HOOFF J, de LANGE R, WISMANS J S. Improving pedestrian safety using numerical human models[J]. Stapp Car Crash Journal, 2003(47): 401-436.

[5] 赵颖华. 复合材料损伤细观力学分析[D]. 北京:清华大学,1996.

[6] 邓作梁. 等效同质体法在钢筋混凝土结构分析上之应用[J]. 力学, 2003(1): 17-27.

[7] 赵桂范,赵立军,杜星文. 复合材料车身对头部撞击损伤的模拟[J]. 汽车技术, 2003(3): 11-14.

[8] TENG T L, NGUYEN T H. Assessment of pedestrian friendliness of a vele using subsystem impact tests[J]. International Journal of Automotive Technology, 2009, 11(1): 67-73.