

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2017.12.014

聚脲弹性体“三明治”夹层结构抗爆性能

戴平仁,黄正祥,祖旭东,肖强强,贾鑫

(南京理工大学机械工程学院,南京 210094)

摘要:聚脲弹性体具有良好的力学性能,为研究聚脲作为夹层时靶板的抗爆性能,运用数值模拟对该靶板在爆炸载荷作用下的动态响应过程进行研究,与裸钢板和表面喷涂聚脲弹性体钢板进行对比,主要分析了靶板的变形特点、吸能特性以及对冲击波的衰减;并分析了三明治靶板的面板、夹层、背板厚度变化时对靶板抗爆性能的影响,结果表明,聚脲弹性体能够提高钢板的抗爆性能,作为夹层时抗爆能力更佳;当聚脲夹层厚度为0,2,14,30 mm时,靶板的背压分别为81.78,46.37,7.58,2.28 MPa。三明治夹层结构的面板和背板需要有一定的强度来抵抗变形。

关键词:聚脲弹性体;三明治结构;变形;吸能;冲击波衰减

中图分类号: TQ322.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2017)12-0070-05

Anti-detonation Property of Sandwich Structure with Polyurea Elastomer

Dai Pingren, Huang Zhengxiang, Zu Xudong, Xiao Qiangqiang, Jia Xin

(School of mechanical engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract : Polyurea elastomer has good mechanical properties, in order to study the anti detonation performance of polyurea as a target plate, the dynamic response process of the target plate under 200 g TNT explosion load was studied by numerical simulation. Compared with bare steel plate and surface sprayed polyurea plate, the deformation characteristics, energy absorption characteristics and attenuation of the shock wave were analyzed, and the influence of the plate, interlayer and thickness of the sandwich plate on the detonation resistance of the target was analyzed. The results show that the polyurea elastomer can improve the antiknock performance of steel plate, and as a sandwich, the target plate can have better antiknock ability; when the thickness of polyurea sandwich is 0, 2, 14, 30 mm, the back pressure of the target plate is 81.78, 46.37, 7.58, 2.28 MPa respectively. Sandwich panels and the back need to have a certain strength to resist deformation.

Keywords : polyurea elastomer; sandwich structure; deformation; energy absorption; shock wave attenuation

在防爆安全领域,为提高结构的抗爆能力,通常采用的方案是增加防护介质厚度、采用复合结构和开发使用新材料^[1]。对于高机动的野战场合,单纯的增加防护介质的厚度会使得靶板质量大幅度增加、影响军备机动性能,而若将新材料用于复合结构中是一个可行方案。三明治夹层结构不仅具有良好的比刚度、比强度,而且结构简单、加工方便,应用十分广泛。常用的夹层材料有蜂窝、泡沫金属、波纹、高分子材料等,但前三者多适用于轻型防护。近年来,由异氰酸酯和氨基化合物反应生成的一种高分子材料聚脲弹性体在安全防护领域深受研究者们欢迎^[2],聚脲不仅具有低成本、质量轻、不易燃、自愈性好、吸能性能好、隔声性能好、耐介质性能突出,而且拥有优异的力学性能与便捷的喷涂工艺,能够满足对军事车辆、潜艇、舰船等进行快速喷涂和有效的防护,对严酷战场环境高度适应。N. Gardner等^[3]在研究三明治夹层复合结构时发现,将聚脲涂覆于泡

沫后和背板前能够减少背板的变形,提高整体的抗爆性能。S. A. Tekalur等^[4]在研究聚脲与玻璃纤维试验中发现,聚脲的非线性本构关系、较强的应变率效应以及粘接层的破坏是吸能的主要原因。Xue Liang等^[5]在研究弹体侵彻复合结构中发现,聚脲作为三明治夹层消耗弹体的能量要小于作为背板时的能量。甘云丹^[6]在研究聚脲涂覆钢板水下抗冲击性能研究中发现,弹性体涂覆钢板后抗爆性能提高了大约20%。宋彬等^[7]研究了聚脲夹层防爆罐,聚脲在抗爆过程中吸能效果优于橡胶,使得冲击波大量的衰减。Wang Junguo等^[8]研究了聚脲喷涂墙体试验,发现聚脲能对墙体有较好的加固作用。对于聚脲弹性体三明治夹层结构靶板,可用于坦克装甲底部防雷、舰船隔舱抗爆、军用车防护等领域,

联系人:黄正祥,博士生导师,教授级高级工程师,主要从事高效毁伤与目标防护研究

收稿日期:2017-10-07

可对于其抗爆性能,国内外鲜有研究。基于以上研究成果,运用 ANSYS/LS-DYNA 对聚脲三明治夹层结构靶板进行了抗爆性能数值计算模拟,并与正面喷涂、背面喷涂、双面喷涂、无喷涂的钢板进行对比,研究了靶板的变形、吸能,以及对冲击波的衰减特性,并分析了三明治结构靶板的面板、夹层、背板的厚度变化对靶板抗爆性能的影响,并用试验对数值计算结论进行了验证。

1 数值模拟

1.1 数值计算模型

利用 LS-DYNA 有限元软件对靶板进行建模,计算模型包括炸药、空气、钢板、胶层以及聚脲。利用问题的对称性,采用 1/4 模型。炸药和空气采用 Euler 网格,聚脲、钢板、胶层采用 Lagrange 网格,采用 ALE 算法。为提高数值计算精度,采用渐变网格画法。数值计算模型中炸药尺寸为 $\varnothing 60\text{ mm} \times 44\text{ mm}$,药量为 200 g,炸药底部距离靶板表面 80 mm;五种不同的靶板均为 $\varnothing 420\text{ mm}$ 圆形板,其截面尺寸如图 1 所示。为模拟现实中胶层的作用,在靶板的接触界面之间建 0.1 mm 厚的单元层,该胶层的材料属性与聚脲一样,与钢板和聚脲之间采用共节点法建模,计算模型样例见图 2。

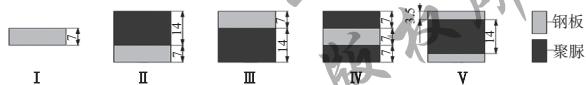


图 1 不同靶板结构尺寸图

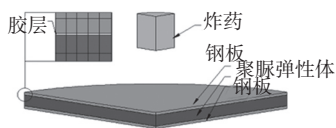


图 2 数值计算模型

1.2 材料模型及参数

使用的炸药为 TNT,采用高能爆炸模型,其密度为 1.63 g/cm^3 ,爆速 6930 m/s ,爆压 19 GPa 。与本构模型相匹配的状态方程采用 JWL,本模型中炸药方程的相关参数参考文献 [9]。

聚脲弹性体是一种超黏弹性体,具有明显非线性和应变率相关性。材料模型采用 Mooney-Rivlin 模型来表示,其中聚脲失效主应力为 300 MPa。聚脲弹性体 Mooney-Rivlin 模型参数为^[5]:密度 ρ 为 7850 kg/m^3 ,弹性模量 E 为 210 GPa,泊松比 ν 为 0.3,六参数分别为 $C_{10}=4.5\text{ MPa}$, $C_{01}=0.7\text{ MPa}$, $C_{11}=-0.03\text{ MPa}$, $C_{20}=-0.02\text{ MPa}$, $C_{02}=0.001\text{ MPa}$, $C_{30}=0.002\text{ MPa}$ 。

数值计算中靶板的上下钢板均使用 A3 钢,选用随动强化本构模型,其应变率效应采用动态塑性本构准则来描述,其材料参数参考文献 [10]。

2 数值模拟结果分析

在相同的爆炸载荷、相同的爆距下,不同靶板在抗爆过程中表现出不同的抗爆性能。下面根据数值计算结果,从靶板的变形、吸能、靶板对冲击波的衰减等情况,研究靶板的抗爆性能如表 1 所示。

表 1 不同靶板抗爆性能数值计算结果

靶板编号	最大位移/mm	钢板最大动能/J	聚脲最大动能/J	钢板最大内能/J	靶板背后应力/MPa	聚脲抗爆结果
I	28.5	1448		2018	81.78	
II	23.1	1116	1057	1511	22.23	破坏
III	23.8	969	298	1531	10.61	破坏
IV	23.7	1006	742	1544	8.59	破坏
V	25.1	1154	487	1654	7.58	完好

2.1 靶板的变形分析

为观察五种类型靶板的变形情况,取 $t=400\text{ }\mu\text{s}$ 时刻靶板的 1/4 模型变形状态如图 3 所示。可以看出在爆炸载荷的作用下,II,III,IV 三种靶板上的聚脲弹性体发生不同程度的破坏,迎爆面的聚脲弹性体中心部分发生大面积的单元失效,并向外侧挤压;而背爆面的胶层失效,聚脲在冲击波的作用下与基材发生剥离并发生韧性断裂,产生飞行破片。I, V 类型靶板变形明显,但 V 靶板中聚脲作为夹层时仍保持着较好的完整性。

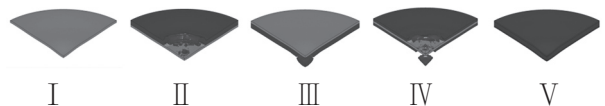


图 3 五种类型靶板的变形图

为定量地研究五种类型靶板的变形情况,取靶板中最外侧的钢板的中心单元为研究对象通过比较可知,聚脲弹性体以不同的方式对钢板加固能够不同程度地降低靶板变形,靶板位移量由大到小排序为 $I > V > III > IV > II$,裸钢板的位移量最大,II,III,IV, V 钢板的位移量分别是 I 钢板位移量的 81.1%,83.5%,83.2%,88.1%。三明治夹层靶板的钢板是上下面板,靶板的强度比一整块钢板强度要低,但仍然具有良好的抗变形能力,而且无破片产生,靶板保持较好的完整性,具有二次抗爆的能力,抗爆性能最佳。

2.2 靶板的吸能分析

对于钢板的动能,根据数值计算结果, I 钢板在 $t=64\text{ }\mu\text{s}$ 达到峰值 1448 J; II 钢板在 $t=76\text{ }\mu\text{s}$ 达到峰值 1116 J; III 钢板在 $t=72\text{ }\mu\text{s}$ 达到峰值

969 J; IV 钢板在 $t=76\mu\text{s}$ 达到峰值 1006 J; V 钢板在 $t=64\mu\text{s}$ 达到峰值 1154 J,按动能峰值的大小排序为 $I > V > II > IV > III$,裸钢板的动能峰值最大,II,III,IV,V 钢板的动能峰值分别是 I 钢板的 77.1%,66.9%,69.5%,79.7%。很明显,聚脲弹性体能够有效降低钢板在爆炸载荷下的动能峰值,裸钢板的动能最大,容易产生裂纹或破片,聚脲三明治夹层靶板的钢板的动能次之。

对于聚脲弹性体的动能,根据数值计算结果,II 聚脲在 $t=56\mu\text{s}$ 达到峰值 1057 J; III 聚脲在 $t=84\mu\text{s}$ 达到最大峰值 298 J; IV 聚脲在 $t=44\mu\text{s}$ 达到峰值 742 J; V 聚脲在 $t=44\mu\text{s}$ 达到峰值 487 J,按聚脲动能峰值的大小排序为 $II > IV > V > III$ 。喷涂于迎爆面的聚脲与爆轰产物直接接触,动能快速地增加达到峰值,使得 II,III 聚脲快速发生大变形,同时也伴随着大量单元的失效。而 IV,V 聚脲动能峰值较小。聚脲作为夹层时吸能动能较小,不容易发生破坏。

对于钢板的内能吸收情况,根据数值计算结果,I 钢板在 $t=524\mu\text{s}$ 达到最大值 2018 J; II 钢板在 $t=568\mu\text{s}$ 达到最大值 1511 J; III 钢板在 $t=580\mu\text{s}$ 达到最大值 1531 J; IV 钢板在 $t=576\mu\text{s}$ 达到最大值 1544 J; V 钢板在 $t=644\mu\text{s}$ 达到最大值 1654 J,按内能最大值的大小排序为 $I > V > IV > III > II$,裸钢板的内能最大,II,III,IV,V 钢板的内能分别是 I 钢板的 74.9%,75.9%,76.52%,77.5%。其中,I 钢板的内能远高于其他类型中的钢板,V 钢

板内能次之,而 II,III,IV 钢板的内能值相近。聚脲作为夹层时上下面板能吸收更多的能量。

2.3 不同靶板对冲击波的衰减分析

炸药爆炸产生的高温高压气体产物在不同的介质中具有不同的扩散和传播形式,冲击波在靶板中以应力波的形式在介质中传播,不同结构的靶板对冲击波的衰减机理是不同的。数值计算得出,冲击波到达靶板的表面时应力为 928 MPa,经过衰减后各个靶板的背压为 $I = 81.78\text{ MPa}$; $II = 22.23\text{ MPa}$; $III = 10.61\text{ MPa}$; $IV = 8.59\text{ MPa}$; $V = 7.58\text{ MPa}$,背压从小到大为 $V > IV > III > II > I$,II,III,IV,V 靶板的背压分别是 I 靶板的 27.2%,13.0%,10.5%,9.3%,裸钢板的背压最高,V 靶板背压最低,三明治夹层结构靶板对冲击波的衰减能力最佳。

3 结构优化研究

由以上分析可知,聚脲弹性体作为夹层结构时不仅能够明显提高靶板的抗爆性能,而且较其他的结构类型,三明治夹层靶板的变形、吸能良好,能够对冲击波有的衰减,靶板保持着较好的完整性,能够进行二次抗爆,但三明治夹层结构靶板的钢板动能与位移较大,为防止面板与背板发生破坏,靶板的上下面板需要有一定的强度来抵抗变形。为研究面板、聚脲夹层、背板对靶板抗爆性能的影响,分别设定面板、聚脲夹层、背板为单一变量时,靶板的变形、吸能、以及靶后压力等情况,其参数如表 2 所示,其中单位质量比吸能参照公 $E_m = E/M^{[1]}$, E 为复合靶板

表 2 不同尺寸的三明治夹层结构抗爆性能研究

编号	面板/mm	夹层/mm	背板/mm	靶板/mm	质量/g	位移/mm	吸能/J	背压/MPa	质量比吸能/(J·g ⁻¹)
1-1	1	14	3.5	18.5	1694	36.05	2738	16.91	1.62
1-2	2	14	3.5	19.5	1966	28.45	2349	12.89	1.19
1-3	3.5	14	3.5	21	2373	24.99	1898	7.58	0.80
1-4	5	14	3.5	22.5	2780	20.47	1528	5.73	0.55
1-5	6.5	14	3.5	24	3186	18.27	1330	5.27	0.42
1-6	8	14	3.5	25.5	3593	15.31	1174	4.77	0.33
2-1	3.5	0	3.5	7	1902	28.22	1911	81.78	1.00
2-2	3.5	2	3.5	9	1976	28.39	2063	46.37	1.04
2-3	3.5	8	3.5	15	2188	27.23	1915	11.83	0.88
2-4	3.5	14	3.5	21	2373	24.99	1898	7.58	0.80
2-5	3.5	20	3.5	27	2612	22.31	1842	4.57	0.71
2-6	3.5	30	3.5	37	2965	19.78	1786	2.28	0.60
3-1	3.5	14	1	18.5	1694	38.37	2456	11.70	1.45
3-2	3.5	14	2	19.5	1966	31.10	2148	9.32	1.09
3-3	3.5	14	3.5	21	2373	24.99	1898	7.58	0.80
3-4	3.5	14	5	22.5	2780	21.81	1701	7.11	0.61
3-5	3.5	14	6.5	24	3186	16.73	1456	5.59	0.46
3-6	3.5	14	8	25.5	3593	15.57	1346	4.44	0.37

的总吸能, M 为复合靶板的总质量。

由表 2 可以看出,当面板作为单一变量由 1 mm 增加到 8 mm 时,靶板的变形、吸能、靶板背后的压力均大幅度减小,分别下降 57.5%, 57.12%, 71.8%, 而质量比吸能下降 79.6%; 当背板作为单一变量由 1 mm 增加到 8 mm 时,靶板的变形、吸能、靶板背后的压力也大幅度减小,分别下降 59.4%, 45.2%, 62.1%, 而质量比吸能下降 74.5%。当靶板的夹层为单一变量由 0 增加到 2 mm 时,靶板的变形与吸能均出现小幅度增加,增幅分别为 3.9%, 0.6%, 而背压却大幅度降低,降幅达到 43.3%, 随着夹层的厚度进一步增加到 30 mm, 位移、吸能、背压均大幅度的降低,降幅分别为 29.9%, 6.5%, 97.2%, 质量比吸能下降 40%。对比 1- i 与 3- i ($i=1 \sim 6$) 可知,如果三明治靶板的上下板厚度不同,那么选取不同的迎爆面,靶板的抗爆性能也不一样。根据数值计算结果发现,在抗爆过程中,当面板厚度为 1 mm 时,靶板的强度较低,使得缩聚脲夹层压缩变形严重而失效,二次抗爆能力较弱;当背板厚度为 1 mm 时强度较低,与聚脲夹层相互作用时易发生破坏。

4 试验研究

为了验证数值计算的可靠性,对聚脲弹性体三明治夹层复合靶板进行抗爆试验研究。三明治夹层结构靶板的尺寸为 $\varnothing 420 \text{ mm} \times (3.5+14+3.5) \text{ mm}$, 其中上下面板均为 A3 钢。为保证聚脲与钢板粘接牢固,先在钢板的表面涂一层底漆,然后进行喷涂。为降低冲击波地面反射影响,靶板距地面 1 m。柱状炸药均采用 200 g TNT, 尺寸为 $\varnothing 200 \text{ mm} \times 44 \text{ mm}$, 炸药位于靶板中心正上方,炸药底部放塑料圆筒 80 mm 以保证爆距,用火雷管起爆。考虑到与试验工况的一致性,在数值计算模型中加入同样的圆筒,其材料试验布置如图 4 所示。

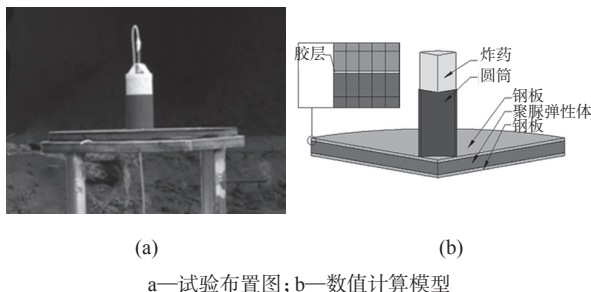


图 4 试验工况与数值模型

靶板抗爆试验结果与数值计算结果对比如图 5 所示,可以看出,两者结果十分相似。聚脲弹性体三明治夹层靶板的面板轻微的凹陷变形,面板中心

均出现一个圆形切口,圆形切片挤压聚脲夹层与背板,背板鼓起。试验中面板切口直径为 $\varnothing 57.8 \text{ mm}$, 数值计算结果为 $\varnothing 58.2 \text{ mm}$, 误差为 0.67%。试验靶板的背板鼓起,鼓包范围 $\varnothing 332 \text{ mm}$, 鼓包高度 4.1 mm, 鼓包周边有裂缝。数值计算中靶板的背板鼓包范围 $\varnothing 390 \text{ mm}$, 鼓包高度 3.7 mm, 鼓包周边无裂缝;鼓包范围误差 14.8%, 鼓包高度误差 10.8%, 在工程误差范围之内。

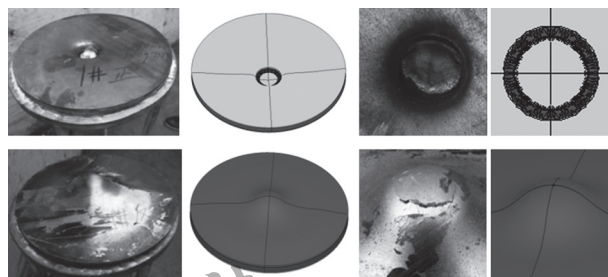


图 5 靶板试验数值计算结果对比图

柱状炸药爆炸后产生的爆轰产物近似沿装药表面法线方向飞散,不同方向飞散的爆轰产物的质量可在装药上按照爆炸后各方向稀疏波传播的交界(即角平分线)来划分。由于炸药下方圆筒的存在,使得爆轰波向下运动的过程中,短时间内受到圆筒约束向下运动,出现“聚能”现象,图 6 为不同时刻模型压力云图。

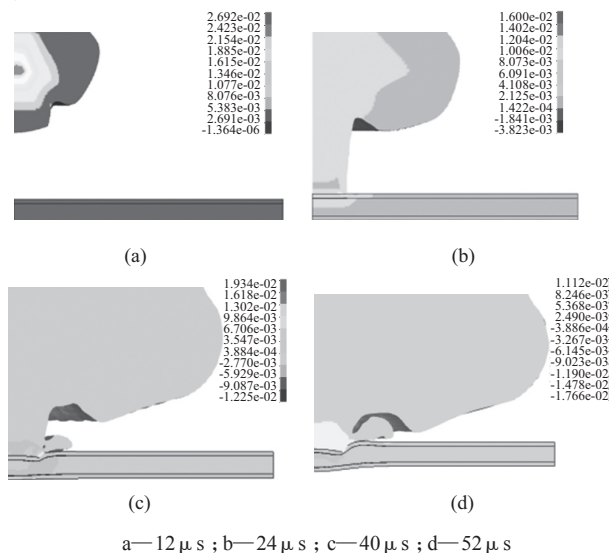


图 6 数值计算压力云图

在 $t=12 \mu\text{s}$ 左右,爆轰波向下运动过程中开始明显受到爆轰波的作用出现能量汇聚;在 $t=24 \mu\text{s}$ 左右,能量汇聚后的爆轰波到达靶板的面板,并对面板中心造成较大的冲击;在 $t=40 \mu\text{s}$ 左右,面板在中心圆筒的内径处开始出现明显塑性拉伸变形。 $t=64 \mu\text{s}$ 左右,面板发生完全剪切破坏。

5 结论

运用数值模拟计算方法研究了聚脲以不同喷涂方式对钢板进行加固的抗爆性能,并研究了聚脲弹性体三明治夹层结构复合靶板的结构尺寸变化对靶板整体抗爆性能的影响,得到的结论如下:

(1) 聚脲弹性体以不同的方式对钢板进行加固,均能不同程度的降低钢板的变形、动能峰值以及靶后压力,抑制钢板产生裂纹或破片。

(2) 聚脲弹性体喷涂于钢板的表面时,聚脲在迎爆面上与爆轰波直接接触而发生大面积失效,喷涂背面容易发生韧性断裂,对靶后目标造成杀伤,不宜直接采用。

(3) 与表面喷涂结构相比,聚脲弹性体三明治夹层结构在抗爆过程中变形良好、吸能性好,并且能够对冲击波大幅度衰减,具有二次抗爆的能力,抗爆性能最佳。

(4) 随着聚脲三明治夹层结构的面板、夹层、背板厚度做为单一变量增加,靶板的抵抗变形、吸能能力和对冲击波的衰减能力均有提高。随着夹层厚度的增加,靶板对冲击波衰减能力增加明显。

(5) 当上下板的厚度不同时,选取不同侧面作为迎爆面,聚脲三明治夹层结构靶板的抗爆能力有明显差异,其中背板不易太薄,以免产生破片,对靶后目标造成杀伤。

(6) 在柱形炸药下方放空心圆筒,在短时间内能够对冲击波干扰,使得冲击波出现“聚能现象”。

参考文献

- [1] 王宇新,顾元宪,孙明. 冲击载荷作用下多孔材料复合结构防爆理论计算[J]. 兵工学报,2006(2):375-379.
Wang Yuxin, GuYuanxian, Sun Ming. Blast-resistant calculation of compound structure with porous material under impact load[J]. Acta Armamentarii,2006(2):375-379.
- [2] 汪家铭. 聚脲弹性体的发展概况与前景[J]. 化学工业,2009(10):17-21.
Wang Jiaming. The development situation and prospects polyurea elastomer[J]. Chemical Industry,2009(10):17-21.
- [3] Gardner N, Wang E, Kumar P, et al. Blast mitigation in a sandwich composite using graded core and polyurea interlayer[J]. Experimental Mechanics,2012,52(2):119-133.
- [4] Tekalur S A, Shukla A, Shivakumar K. Blast resistance of polyurea based layered composite materials[J]. Composite Structures,2008,84(3):271-281.
- [5] Xue Liang, Mock W, Belytschko T. Penetration of DH-36 steel plates with and without polyurea coating[J]. Mechanics of Materials,2010,42(11):981-1003.
- [6] 甘云丹,宋力,杨黎明. 弹性体涂覆钢板抗冲击性能的数值模拟[J]. 兵工学报,2009, S2:15-18.
Gan Yundan, Song Li, Yang Liming. Numerical simulation for anti-blast performances of steel plate coated with elastomer[J]. Acta Armamentarii,2009, S2:15-18.
- [7] 宋彬,黄正祥,翟文,等. 聚脲弹性体夹芯防爆罐抗爆性能研究[J]. 振动与冲击,2016(7):138-144.
Song Bin, Huang Zhengxiang, Zhai Wen, et al. Anti-detonation properties of explosion-proof pots made of sandwich structures with polyurea elastomer[J]. Journal of Vibration and Shock,2016(7):138-144.
- [8] Wang Jinguo, Ren Huiqi, Wu Xiangyun. Blast response of polymer-retrofitted masonry unit walls[J]. Composites Part B: Engineering,2016.
- [9] Hallquist J O. LS-DYNA keyword user's manual[M]. US: Livemore Software technology Corporation,2007.
- [10] 刘新让,田晓耕,卢天健,等. 泡沫铝夹芯圆筒的抗爆性能[J]. 振动与冲击,2012,31(23):166-173.
Liu Xinrang, Tian Xiaogeng, Lu Tianjian, et al. Blast-resistance behaviors of sandwich-walled hollow cylinders with aluminum foam cores[J]. Journal of Vibration and Shock,2012,31(23):166-173.
- [11] 王中钢,鲁寨军. 铝蜂窝异面压缩吸能特性实验评估[J]. 中南大学学报(自然科学版),2013(3):1246-1251.
Wang Zhonggang, Lu Zhajun. Experimental assessment on energy absorption property of aluminum honeycomb under out-of-plane compression[J]. Journal of Central South University(Science and Technology),2013(3):1246-1251.

索尔维 PVDF 聚合物在华投产,全球生产格局重塑

2017年11月7日,索尔维位于中国的聚偏氟乙烯(PVDF)工厂正式揭幕。新工厂将满足全球节能、环保和工业应用领域对该热塑性聚合物产品的强劲需求。

“索尔维一直持续对常熟工厂进行扩展。此次全新 Solef® PVDF 工厂正式揭幕,标志着我们为服务亚洲的客户已做好准备,并能满足这一区域客户对我们产品的强劲需

求。我们的 PVDF 生产业务现在可以遍布全球三大主要地区:欧洲、美国以及亚洲,”索尔维特种聚合物全球事业部总裁 Augusto Di Donfrancesco 表示。

Solef® PVDF 材料适用于众多应用领域,包括,可用于电极粘结剂,从而提高混合动力及电动汽车(xEV)中锂离子(Li-ion)电池的电气性能;可用于海洋石油和天然气管道与衬层、水质净化过滤膜,以及化学和半导体行业。(中塑在线)