

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2019.07.019

聚脲 / 陶瓷复合板抗平头弹冲击性能的 FEM-SPH 耦合模拟

肖毅华, 吴和成

(华东交通大学机电与车辆工程学院, 南昌 330013)

摘要: 采用有限元法-光滑粒子流体动力学 (FEM-SPH) 耦合方法, 通过数值模拟研究了聚脲 / 陶瓷复合板在平头弹高速撞击下的抗冲击性能。考虑了聚脲层与陶瓷层的不同配置型式和结合状况, 计算得到针对不同结构的复合板的弹体剩余速度, 分析了弹体和靶板的变形。结果表明, 在相同面密度的情况下, 抗冲击性能最佳的是陶瓷背面布置聚脲的复合板 (C2 型), 其次是正面和背面布置等厚度聚脲的三明治复合板 (C3 型), 最后是陶瓷正面布置聚脲的复合板 (C1 型), 前两种聚脲 / 陶瓷复合板的抗冲击性能优于相同面密度的纯陶瓷板; 同时, 对于 C2 型和 C3 型复合板, 聚脲层与陶瓷层粘结比层叠的抗冲击性能更好; 另外, 发现在一定范围内增大聚脲层厚度能增强 C2 型和 C3 型复合板的抗冲击性能。

关键词: 复合板; 聚脲; 陶瓷; 平头弹; 抗冲击性能; 耦合模拟

中图分类号: TQ322.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2019)07-0105-05

Coupled FEM-SPH Simulation for Impact Resistance of Polyurea / Ceramic Composite Plates Against Blunt Projectiles

Xiao Yihua, Wu Hecheng

(School of Mechatronics and Vehicle Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract : The impact resistance of polyurea / ceramic composite plates under high velocity impact of a blunt projectile was numerically studied with FEM-SPH coupled method. Different configurations and bonding conditions of polyurea layer and ceramic layer were considered. The residual velocity of the projectile was obtained for composite plates of different structures, and deformations of the projectile and target plate were analyzed. The results show that under the condition of the same areal density, the composite plate consisting of a ceramic layer and a backing polyurea layer (configuration C2) has the best impact resistance, the sandwich composite plate placing a ceramic layer between backing and covering polyurea layers (configuration C3) has the second best impact resistance, and the composite plate consisting of a ceramic layer and a covering polyurea layer (configuration C1) shows the worst impact resistance among the three kinds of composite plate. The impact resistance of the first two polyurea / ceramic composite plates is better than that of the pure ceramic plate with the same areal density. Also, the cohesion of polyurea layer and ceramic layer results in a better impact resistance for composite plates of configurations C2 and C3, compared with the stacking of them. In addition, it is found that the impact resistance of C2 and C3 composite plate is enhanced with the increase of polyurea layer's thickness in a certain range.

Keywords : composite plate ; polyurea ; ceramic ; blunt projectile ; impact resistance ; coupled simulation

聚脲是一种由异氰酸酯组分与端氨基树脂组分反应得到的高分子材料, 具有良好的柔韧性、抗冲击性和延展性等综合力学性能, 与各种金属材料、混凝土等都具有良好的粘结力。同时, 它具有较低的密度 (约为钢的 1/8, 氧化铝陶瓷的 1/4, 铝合金的 1/3)。

目前, 聚脲在防水、防腐和防磨损等领域得到广泛应用, 其在国防军工领域的应用也开始受到重视, 用于提升防弹头盔、坦克车辆等的防护性能。

近年来, 国内外的一些研究者开展了聚脲与其它材料构成的复合结构的防护性能研究。D.

基金项目: 国家自然科学基金地区科学基金项目 (11862005), 江西省青年科学基金项目 (20181BAB211012)

通讯作者: 肖毅华, 博士, 副教授, 主要从事防护材料 / 结构设计与分析 E-mail : xiaoyihua@ecjtu.edu.cn

收稿日期: 2019-04-15

引用格式: 肖毅华, 吴和成. 聚脲 / 陶瓷复合板抗平头弹冲击性能的 FEM-SPH 耦合模拟 [J]. 工程塑料应用, 2019, 47(7) : 105-109, 128.

Xiao Yihua, Wu Hecheng. Coupled FEM-SPH simulation for impact resistance of polyurea / ceramic composite plates against blunt projectiles[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(7) : 105-109, 128.

Mohotti 等^[1-2]通过实验和数值模拟研究了聚脲/铝合金复合板在低速和高速冲击下的弹道性能,其研究表明聚脲具有很好的吸能特性,能有效地提高基体材料的弹道性能。Xue Liang 等^[3]通过实验和数值模拟研究了用聚脲涂覆在钢板正面和背面以及涂覆在两块相同钢板中间的复合结构,分析了聚脲的吸能机理和靶板的破坏形式,发现聚脲涂覆在钢板背面时靶板吸收的能量最多。戴平仁等^[4]运用 LS-DYNA 对以聚脲作为钢板面板、背板和夹层的复合结构的抗爆性能进行了数值模拟,研究发现三种复合结构的抗爆性能均优于裸钢板,且聚脲作为夹层时抗爆性能最佳。贺红鹰等^[5]通过摆锤对纤维增强树脂前涂覆、后涂覆和未涂覆聚脲的试样进行了冲击试验,并在光学显微镜下观察了试样断裂口的形态,研究结果表明聚脲能大幅度吸收冲击能,且后涂覆试样吸收的冲击能更多。甘云丹等^[6]采用 LS-DYNA 模拟了聚脲涂覆钢板的水下抗爆能力,发现涂覆聚脲的钢板抗爆能力得到了极大提高。国内其他一些研究者^[7-9]也对聚脲涂覆于钢板或铝板的复合板抗爆性能进行了有限元模拟,研究结果均表明涂覆聚脲能有效提高基体材料的抗爆性能。

陶瓷是一种常用的装甲防护材料,具有强度高、硬度大、密度小等特性,但存在韧性低的缺点^[10]。为了克服陶瓷韧性低的缺陷,经常需要与其它材料复合使用。国内外已有许多研究者开展了陶瓷与金属材料的复合装甲研究,以综合应用陶瓷高强度和金属高延性的优点。如前所述,目前关于聚脲与金属或纤维增强树脂等的复合板抗冲击性能研究较多,但关于聚脲与陶瓷的复合板的抗冲击性能研究仍很少。M. Grujicic 等^[11]通过有限元法模拟了仿珍珠母 B4C 陶瓷与聚脲层状复合板的抗冲击性能,并对比了相同面密度的纯陶瓷板的弹道性能,结果表明,仿珍珠复合板的弹道性能明显优于纯陶瓷板。

笔者开展了一种聚脲与氧化铝陶瓷复合板抗平头弹冲击性能的研究。以 S. Nemat-Nasser 等^[12]开展的平头钨合金弹撞击纯氧化铝陶瓷板实验为参考,在准确模拟该实验的基础上,考虑将聚脲与陶瓷组合构建聚脲/陶瓷复合板,建立了相同弹体撞击聚脲/陶瓷复合板(与纯陶瓷板面密度相同)的有限元法-光滑粒子流体动力学(FEM-SPH)耦合计算模型,分析了不同聚脲/陶瓷组合型式和结合条件以及不同聚脲层厚度对复合板抗平头弹冲击性能的影响。

1 数值计算模型

1.1 问题描述

S. Nemat-Nasser 等^[12]开展了平头弹以 903.9 m/s 的速度正撞击纯陶瓷板的实验。实验选用的弹体直径为 6.14 mm、长度为 20.86 mm、质量为 10.708 g,其材料为钨合金。陶瓷板为 101.6 mm × 101.6 mm × 12.7 mm 的方板,其面密度为 4.98 g/cm²、材料为氧化铝。实验的示意图如图 1 中 C0 配置所示。

以上述实验为参考,考虑相同的弹体和冲击条件,研究聚脲/陶瓷复合板抗平头弹冲击的性能。聚脲/陶瓷复合板的结构配置型式考虑如图 1 中所示的 C1, C2 和 C3 三种型式,其中 C1 为陶瓷层正面布置聚脲层, C2 为陶瓷层背面布置聚脲层, C3 为陶瓷层正面和背面均布置等厚度的聚脲层。为了便于对比,合理地设置三种配置型式中陶瓷层和聚脲层的厚度,使其面密度与纯陶瓷板面密度相等。同时,为了研究陶瓷层与聚脲层间界面对复合板抗冲击性能的影响,考虑聚脲层和陶瓷层为层叠和理想粘结两种结合状态。

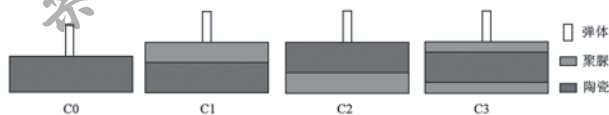


图1 弹体撞击纯陶瓷板和复合板的示意图

1.2 计算模型

基于 LS-DYNA 建立弹体撞击纯陶瓷板和弹体撞击与纯陶瓷板面密度相同的聚脲/陶瓷复合板的计算模型,如图 2 所示。

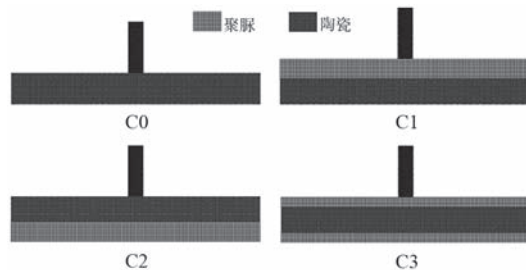


图2 弹体撞击纯陶瓷板和复合板的计算模型

在模型中,考虑到陶瓷是脆性材料,受到弹体撞击时会发生破碎,破碎的陶瓷仍会磨蚀弹体,使弹体发生侵蚀,为此,弹体和陶瓷均采用 SPH 粒子离散,从而更好地模拟陶瓷的破碎和弹体的侵蚀,避免网格畸变。对于聚脲/陶瓷复合板的模拟,由于受聚脲本构模型支持方面的限制,聚脲只能采用 FEM 离散。对于聚脲层与陶瓷层的结合状态的模拟,当

两者为层叠时,两者间的相互作用通过定义接触 *CONTACT_ERODING_NODES_TO_SURFACES 来模拟;当两者为理想粘结时,两者间的相互作用通过定义接触 *CONTACT_TIED_NODES_TO_SURFACES_OFFSET 来模拟。同时,弹体与聚脲层间的相互作用通过定义接触 *CONTACT_ERODING_NODES_TO_SURFACES 来模拟。为了模拟聚脲层破坏后的内部接触,对聚脲层定义单面接触。

1.3 材料模型及参数

弹体材料特性采用 *MAT_JOHNSON_COOK 模型和 Grüneisen 状态方程描述,材料密度为 17162 kg/m^3 ,其它材料参数见表 1。氧化铝陶瓷的材料特性采用 *MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_CERAMICS 模型描述,其密度为 3921 kg/cm^3 ,材料模型参数见表 2。

表 1 弹体材料参数^[14-15]

强度参数	数值	损伤参数	数值	状态方程	数值
A/MPa	1200	D_1	0.00	$C_0 / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	4029
B/MPa	141	D_2	0.33	S_1	1.23
N	0.12	D_3	-1.50	S_2	0.00
C	0.016	D_4	0.00	S_3	0.00
M	1.00	D_5	0.00	γ_0	1.54

注:A为初始屈服强度,B为应变硬化应力,N为应变硬化指数,C为应变率系数,M为温度软化指数; D_1, D_2, D_3, D_4, D_5 为损伤模型常数; C_0 为冲击波速度(V_s)—粒子速度(V_p)曲线的截距; S_1, S_2, S_3 为 V_s-V_p 曲线的斜率的系数, γ_0 为 Grüneisen 常数。

表 2 陶瓷材料参数^[16]

强度参数	数值	损伤参数	数值	状态方程	数值
A'/MPa	0.93	D'_1	0.005	K_1 / GPa	130.95
B'/MPa	0.31			K_2 / GPa	0.00
N'	0.60			K_3 / GPa	0.00
M'	0.60			β	1.0
HEL/GPa	2.79	D'_2	1.0		
EPSI/ s^{-1}	1.00				
T/GPa	0.20				
PHL/GPa	1.46				

注:A'为完好材料的归一化强度参数,B'为失效材料的归一化强度参数,N'为完好材料的压力指数,M'为失效材料的压力指数,HEL为 Hugoniot 弹性极限强度,EPSI为参考应变率,T为最大抗拉强度,PHL为 Hugoniot 弹性极限压力; D'_1 为失效应变系数, D'_2 为失效应变指数; K_1, K_2, K_3 为状态方程压力系数, β 为弹性能转化比例。

聚脲设为 ESU630D,考虑为超弹性材料,其材料特性采用 *MAT_MOONEY_RIVLIN_RUBBER 模型描述,其密度为 1065 kg/m^3 。D. Mohotti 等^[13]对 ESU630D 高应变率下的力学特性进行了实验研究。笔者通过输入由实验得出的工程应力—应变曲线(应变率 400 s^{-1})并由 LS-DYNA 进行自动拟合,得到聚脲的材料模型参数。根据 D. Mohotti 等^[1]的实验,ESU630D 聚脲在各应变率下的断裂应变

变化不大,为 0.7 左右。因此,为了模拟聚脲的失效和破坏,对聚脲材料采用侵蚀算法,以最大主应变作为失效准则,失效参数设为 0.7。

2 结果与讨论

首先考虑保持聚脲层总厚度为 8 mm 不变,研究聚脲层和陶瓷层为层叠和理想粘结两种状态以及以 C1, C2 和 C3 三种型式复合时复合板抗平头弹冲击性能的变化规律,分析复合板的变形和性能特性。然后,改变聚脲层的厚度,进一步研究聚脲层厚度对复合板抗冲击性能的影响。

2.1 配置型式和结合状态对复合板抗冲击性能的影响

设定聚脲层总厚度为 8 mm,为保证与纯陶瓷板面密度相同,C1, C2 和 C3 三种配置型式的复合板中聚脲层和陶瓷层的厚度组合分别为 8 mm/10.5 mm,10.5 mm/8 mm 和 4 mm/10.5 mm/4 mm。通过数值模拟,得到对应于聚脲总厚度为 8 mm 的复合板的弹体剩余速度。表 3 给出了上述计算结果与对应的纯陶瓷板的弹体剩余速度。由表 3 可见,对于纯陶瓷板,弹体的剩余速度与实验结果(682 m/s)^[12]吻合很好,这说明建立的模型是准确的。同时,由表 3 可见,在复合板的各种配置型式中,陶瓷层背面布置聚脲层(即 C2)的复合板对应的弹体剩余速度最低、抗冲击性能最佳,其次是陶瓷层正面和背面布置等厚度聚脲层(即 C3)的复合板,陶瓷层正面布置聚脲层(即 C1)的复合板抗冲击性能最差。前两种复合板的抗冲击性能优于纯陶瓷板,而陶瓷层正面布置聚脲层的复合板的抗冲击性能比纯陶瓷板差。通过对比层叠和粘结的复合板可见,粘结的聚脲/陶瓷复合板的抗冲击性能均优于相应的层叠的聚脲/陶瓷复合板。同时,对于 C2 和 C3 两种配置型式,粘结的聚脲/陶瓷复合板比层叠的聚脲/陶瓷复合板的剩余速度减小了 25 m/s (3.9%) 和 22 m/s (3.4%),而对于 C1 配置型式的复合板只减小了 2 m/s (0.3%),因此,粘结的聚脲/陶瓷复合板对 C2 和 C3 两种配置型式的抗冲击性能的改善比 C1 配置型式更加明显。

表 3 聚脲层厚度为 8 mm 的不同配置形式的复合板和

纯陶瓷板的弹体剩余速度							m/s
项 目	层叠复合板			粘结复合板			陶瓷板
	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C0
弹体剩余速度	700	636	654	698	611	632	676

图 3 给出了对应于不同复合板的弹体剩余速度历程曲线。由图 3 可以看出,对于 C1 型复合板,

聚脲层与陶瓷层粘结和层叠时的弹体剩余速度曲线差别很小。在碰撞初始阶段,弹体与聚脲接触,由于聚脲弹性模量较小,在弹体压缩作用下对弹体产生的阻抗较小,弹体速度衰减较慢;当弹体穿透聚脲与陶瓷层接触时,弹体速度衰减迅速变快。对于C2型复合板,聚脲层与陶瓷层粘结和层叠时的弹体剩余速度曲线在碰撞前期差别小,当弹体接近背面聚脲层时两者的差别变得明显。层间粘结合板抗冲击能力更强,弹体速度下降更快。对于C3型复合板,其变化规律与C2型相同。

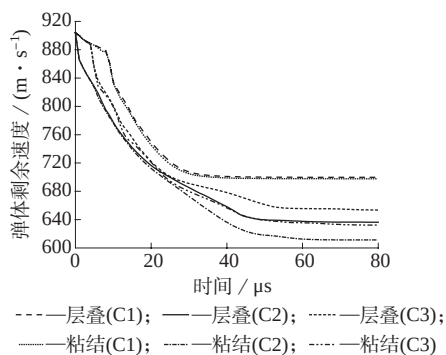


图3 弹体剩余速度历程曲线

图4、图5和图6分别给出了C1、C2、C3型复合板在冲击过程中一些典型时刻的变形。对于C1型复合板,在12 μs时,弹体穿出聚脲层并开始与陶瓷层接触,同时复合板背面开始发生位移;在33 μs时,弹体头部基本穿透靶板整个厚度并呈现蘑菇状,陶瓷层背面形成鼓包;在57 μs时,弹体尾部已穿出靶板。对于C2型复合板,在9 μs时,复合板背面已发生明显位移;在42 μs时,当聚脲层与陶瓷层为层叠状态时,破碎的陶瓷刚开始从聚脲层中喷射出,而当聚脲层与陶瓷层为粘结状态时,此时聚脲层仍未完全断裂,破碎的陶瓷尚未从聚脲层中喷射出。通过对比图4和图5可知,对于C1型复合板,穿透过程中的冲击波引起陶瓷破碎,破碎的陶瓷形成鼓包向背面运动,由于C1型复合板的聚脲层在陶瓷层正面,破碎的陶瓷不受约束,直接喷射出去,对弹体的阻力很小;而对于C2型复合板,位于陶瓷层背面的聚脲层弹性好、断裂应变大,对破碎的陶瓷产生强烈的约束,使得陶瓷破碎后不易喷射出去,仍可承受压力,增大了对弹体的阻力,故C2型复合板的抗冲击性能要比C1型复合板好。同时,通过比较图5a和图5b可见,当聚脲层与陶瓷层为粘结状态时,聚脲层与陶瓷层间存在粘结力,聚脲层更不易向背面弯曲,对破碎的陶瓷的约束作用更强,

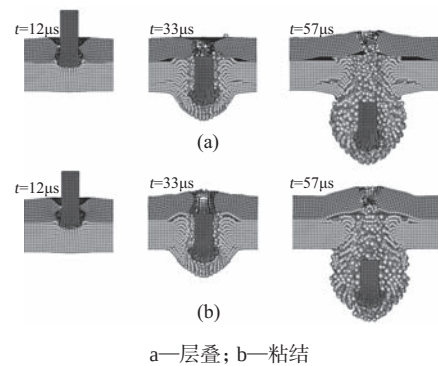


图4 C1型复合板变形(剖面图)

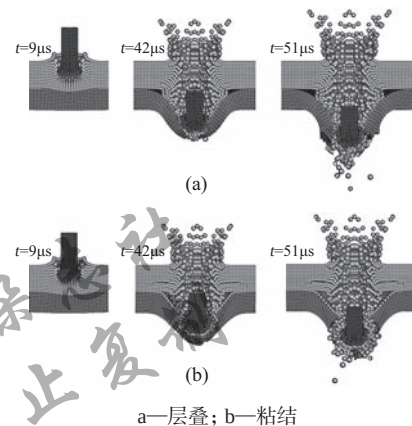


图5 C2型复合板变形(剖面图)

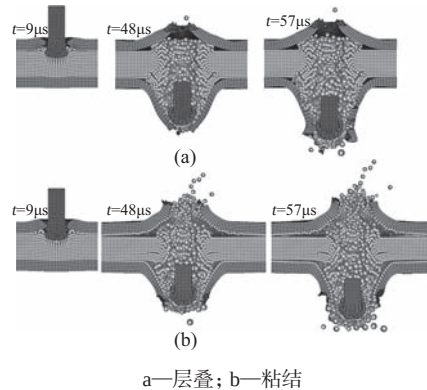


图6 C3型复合板变形(剖面图)

因而相比聚脲层与陶瓷层为层叠状态时能对弹体提供更大的阻力,故粘结的C2型复合板的抗冲击性能要比层叠的C2型复合板好。对于C3型复合板,在48 μs时,当陶瓷层与聚脲层为层叠状态时,弹体即将穿出复合板,陶瓷碎片基本还未从正面和背面聚脲层中喷出,而当陶瓷层与聚脲层为粘结状态时,由于背面聚脲层较薄,在受约束的陶瓷碎片的强作用下被穿透,陶瓷碎片已从背面聚脲层中喷出,部分陶瓷碎片也已从正面聚脲层的弹道孔中喷出。同时,由于背面聚脲层相对较薄,对陶瓷碎片约束作用相对较弱,故C3型复合板的抗冲击性能要比C2

型复合板差。

2.2 聚脲层厚度对复合板抗冲击性能的影响

由上述分析可知,聚脲涂层对复合板抗平头弹冲击性能的影响较大。为进一步研究聚脲层厚度对复合板抗冲击性能的影响,考虑聚脲层总厚度为 6, 8, 10 mm 和 12 mm 的各三种结构配置型式的复合板的抗冲击性能。表 4 和图 7 分别给出了相应配置型式的厚度组合和弹体剩余速度曲线。可见,对于 C1 型复合板,随着聚脲层厚度的增大,弹体的剩余速度增大,复合板的抗冲击性能减小;对于 C3 型复合板,当聚脲层与陶瓷层为层叠状态时,随着聚脲层厚度的增大,复合板的抗冲击性能有一定改善,但不明显,而当聚脲层与陶瓷层为理想粘结状态时,聚脲层厚度从 6 mm 增大到 10 mm,复合板的抗冲击性能有较明显的改善,但增大到 12 mm 时,剩余速度略有增大。对于 C2 型复合板,聚脲层厚度对复合板抗冲击性能的影响与 C3 型类似。同时可见,各种聚脲层厚度的复合板均以 C2 型的抗冲击性能最好, C2 和 C3 型复合板的抗冲击性能优于等面密度的纯陶瓷板,且除聚脲层厚度为 10 mm 和 12 mm 的 C1 型外,粘结的复合板的抗冲击性能优于层叠的复合板。

表 4 三种配置型式的复合板的厚度组合

配置型式	聚脲层总厚度 / mm			
	6	8	10	12
C1	6 / 11.1	8 / 10.5	10 / 10	12 / 9.4
C2	11.1 / 6	10.5 / 8	10 / 10	9.4 / 12
C3	3 / 11.1 / 3	4 / 10.5 / 4	5 / 10 / 5	6 / 9.4 / 6

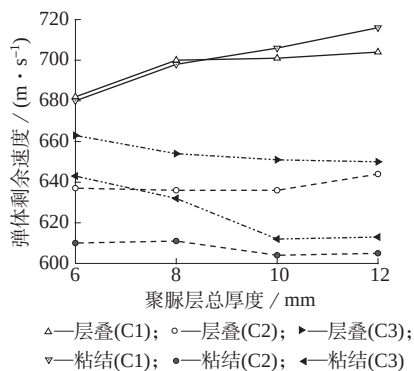


图 7 不同聚脲层总厚度的复合板的弹体剩余速度曲线

3 结论

建立了聚脲/陶瓷复合板的 FEM-SPH 耦合计算模型,对相同面密度、不同结构配置型式和层间结合状态的复合板抗平头弹冲击性能进行了数值模拟研究,得出如下主要结论。

(1) 从结构配置型式来看, C2 型复合板的抗冲

击性能最佳,其次是 C3 型,最后是 C1 型,主要原因是,在 C2 型复合板中,聚脲层可以对破碎的陶瓷片提供强约束作用,增加对弹体的阻抗。C2 和 C3 型的复合板的抗冲击性能优于等面密度的纯陶瓷板。

(2) 从聚脲层与陶瓷层的层间结合状态看,除聚脲层厚度为 10 mm 和 12 mm 的 C1 型外,粘结的复合板的抗冲击性能优于层叠的复合板,其主要原因是,聚脲层与陶瓷层间存在粘结力,使聚脲层不易向背面弯曲,对破碎的陶瓷提供更强约束作用。对于 C2 和 C3 两种型式的复合板,这一优势比 C1 型复合板更突出。

(3) 对于 C1 型复合板,随着聚脲层厚度从 6 mm 增大到 12 mm,复合板的抗冲击性能降低。对于 C2 和 C3 两种型式的复合板,当聚脲层厚度从 6 mm 增大到 10 mm 时,复合板的抗冲击性能有一定改善,但当聚脲层厚度增大到 12 mm 时,复合板的抗冲击性能略有下降。

参考文献

- [1] Mohotti D, Ngo T, Raman S, et al. Plastic deformation of polyurea coated composite aluminium plates subjected to low velocity impact[J]. Materials & Design, 2014, 56:696-713.
- [2] Mohotti D, Ngo T, Mendis P, et al. Polyurea coated composite aluminium plates subjected to high velocity projectile impact[J]. Materials and Design, 2013, 52(24):1-16.
- [3] Xue Liang, Jr Mock W, Belytschko T. Penetration of DH-36 steel plates with and without polyurea coating[J]. Mechanics of Materials, 2010, 42(11):981-1003.
- [4] 戴平仁,黄正祥,祖旭东,等.聚脲弹性体“三明治”夹层结构抗爆性能[J].工程塑料应用,2017,45(12):70-74.
- [5] Dai Pingren, Huang Zhengxiang, Zu Xudong, et al. Anti-detonation property of sandwich structure with polyurea elastomer[J]. Engineering Plastics Application, 2017, 45(12):70-74.
- [6] 贺红鹰,倪爱清,王继辉,等.聚脲弹性体/纤维增强树脂基复合材料抗冲击性能研究[J].玻璃钢/复合材料,2017(5):89-92.
- [7] He Hongying, Ni Aiqing, Wang Jihui, et al. Impact resistance study of polyurea elastomer / glass fiber reinforced vinyl resin composite[J]. Fiber Reinforced Plastics / Composites, 2017(5):89-92.
- [8] 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,2009,30(S2):15-18.
- [9] Gan Yundan, Song Li, Yang Liming. Numerical simulation for anti-blast performances of steel plate coated with elastomer[J]. Acta Armamentarii, 2009, 30(S2):15-18.
- [10] 翟文,戴平仁,何金迎,等.聚脲-钢板夹层结构抗爆性能研究[J].兵工自动化,2018,37(10):68-72.

(下转第 128 页)

- Li Shanlin, Duan Huajun, Wang Xin, et al. Design and preparation of Ni-plated carbon fiber-carbon fiber-glass fiber / vinyl ester resin conductive composites and their electromagnetic properties[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2018, 35(7):1 710-1 715.
- [8] 王勇, 张会青, 梁伟, 等. 基于电磁屏蔽性能强化的碳纤维 / 环氧树脂的制备及性能研究 [J]. *材料科学*, 2018, 8(4):367-373.
- Wang Yong, Zhang Huiqing, Liang Yi, et al. The preparation and performance study of carbon fiber / epoxy resin composites based on electromagnetic shielding properties strengthen[J]. *Material Sciences*, 2018, 8(4):367-373.
- [9] 刘静, 曹意林, 李刚, 等. 激光对碳纤维及碳纤维 / 环氧树脂复合材料的性能影响 [J]. *复合材料学报*, 2018, 35(11):2 980-2 986.
- Liu Jing, Cao Yilin, Li Gang, et al. Effect of laser on properties of carbon fiber and carbon fiber / epoxy resin composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2018, 35(11):2 980-2 986.
- [10] 刘志芳. 石墨烯 / 铁氧体 / 碳纤维复合材料的电磁性能 [D]. 济南: 济南大学, 2018.
- Liu Zhifang. Electromagnetic properties of grapheme / ferrite / carbon fiber composites[D]. Jinan: Jinan University, 2018.
- [11] 叶伟, 吴程斌, 孙启龙, 等. 碳纤维基磁性吸波复合材料的制备及性能 [J]. *纺织导报*, 2018(12):66-69.
- Ye Wei, Wu Chengbin, Sun Qilong, et al. Preparation and properties of carbon fiber based magnetic microwave absorbing composites[J]. *China Textile Leader*, 2018(12):66-69.
- [12] 陈曦, 曹雷团, 吴强, 等. 碳纤维复合材料的屏蔽效能 [J]. *宇航材料工艺*, 2014(2):58-61.
- Chen Xi, Cao Leituan, Wu Qiang, et al. Shielding effectiveness of carbon composite material[J]. *Aerospace Materials Technology*, 2014(2):58-61.
- [13] 王喜顺, 黄江平. 碳纤维 / 镍粉 / 聚丙烯复合材料的电磁屏蔽性能 [J]. *塑料*, 2015, 44(2):22-25.
- Wang Xishun, Huang Jiangping. Electromagnetic properties of CF / Ni / PP composite[J]. *Plastics*, 2015, 44(2):22-25.
- [14] 罗霞, 俞科静, 钱坤. 碳纤维添加碳泡沫的电磁屏蔽效能及力学性能研究 [J]. *宇航材料工艺*, 2018(2):35-39.
- Luo Xia, Yu Kejing, Qian Kun. Electromagnetic interference shielding and mechanical performances of carbon fiber added carbon foam composites[J]. *Aerospace Materials Technology*, 2018(2):35-39.
- [15] 李俊蛟. 连续碳纤维表面合金化及其复合材料屏蔽性能研究 [D]. 天津: 天津大学, 2014.
- Li Junjiao. Research about metallization on the surface of carbon fibers and shielding properties of composite materials[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.
-
- (上接第 109 页)
- Zhai Wen, Dai Pingren, He Jinying, et al. Study on anti-detonation performance of polyurea steel sandwich structure[J]. *Ordnance Industry Automation*, 2018, 37(10):68-72.
- [8] 赵鹏铎, 张鹏, 张磊, 等. 聚脲涂覆钢板结构抗爆性能试验研究 [J]. *北京理工大学学报*, 2018, 38(2):118-123.
- Zhao Pengduo, Zhang Peng, Zhang Lei, et al. Experimental investigation on the performance of polyurea-coated structure under blast loads[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2018, 38(2):118-123.
- [9] 王小伟, 何金迎, 祖旭东, 等. 聚脲弹性体复合夹层结构的防爆性能 [J]. *工程塑料应用*, 2017, 45(5):63-68.
- Wang Xiaowei, He Jinying, Zu Xudong, et al. Antidetonation properties on composite sandwich structure with polyurea elastomer[J]. *Engineering Plastics Application*, 2017, 45(5):63-68.
- [10] 陈智勇, 程广伟, 徐颖强, 等. 防弹车辆用陶瓷复合装甲研究 [J]. *中国陶瓷*, 2018, 54(11):1-8.
- Chen Zhiyong, Cheng Guangwei, Xu Yingqiang, et al. Study on ceramic composite armors for bullet proof vehicle[J]. *China Ceramics*, 2018, 54(11):1-8.
- [11] Grujicic M, Snipes J S, Ramaswami S. Ballistic impact behavior of nacre-like laminated composites consisting of B₄C tablets and polyurea matrix[J]. *Journal of Materials Engineering & Performance*, 2016, 25(3):977-994.
- [12] Nemat-Nasser S, Sarva S, Isaacs J B, et al. Novel ideas in multi-functional ceramic design[J]. *Ceramic Transactions*, 2002, 134:511-525.
- [13] Mohotti D, Ali M, Ngo T, et al. Strain rate dependent constitutive model for predicting the material behaviour of polyurea under high strain rate tensile loading[J]. *Materials & Design*, 2014, 53:830-837.
- [14] Holmquist T J, Templeton D W, Bishnoi K D. Constitutive modeling of aluminum nitride for large strain, high-strain rate, and high-pressure applications[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2001, 25(3):211-231.
- [15] Feli S, Asgari M R. Finite element simulation of ceramic / composite armor under ballistic impact[J]. *Composites Part B*, 2011, 42(4):771-780.
- [16] Cronin D S, Bui K, Kaufmann C, et al. Implementation and validation of the Johnson-Holmquist ceramic material model in LS-DYNA[C]//Proceeding of 4th European LS-DYNA users conference. Ulm, Germany: European L S, 2004:47-60.