

文章编号: 1003-1480 (2022) 03-0021-06

聚脲涂覆Q235钢板抗爆性能试验研究

张龙¹, 程良玉², 纪冲¹, 王昕¹, 王钰婷¹, 孙宇翔³

(1. 陆军工程大学野战工程学院, 江苏 南京, 210007; 2. 陆军炮兵防空兵学院南京校区, 江苏 南京, 211131;
3. 中国人民解放军63867部队, 吉林 白城, 137000)

摘要: 为了研究聚脲涂覆钢板在爆炸载荷下的防护能力和机理, 通过试验研究了不同涂覆位置及厚度的聚脲涂层对不同厚度的 Q235 钢板抗爆性能的影响, 并利用应力波传播规律揭示了不同涂覆模式下复合靶板的破坏机理。结果表明: 在本文试验条件下, 采用背面涂覆时, 能有效提高钢板的抗爆性能, 且聚脲涂覆厚度越厚, 效果越好。正面涂覆时, 对 3.5mm 的钢板的抗爆性能有所提高, 但效果不明显; 对 3mm 的钢板则会削弱其抗爆性能, 加剧破坏程度。双面涂覆时, 随着钢板及聚脲厚度组合的不同, 抗爆性能呈现差异性变化。

关键词: 聚脲; Q235 钢; 抗爆性能; 爆炸冲击波; 复合结构; 应力波

中图分类号: TQ560.5 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1003-1480.2022.03.006

Experimental Study on Explosion Resistance of Polyurea Coated Q235 Steel Plate

ZHANG Long¹, CHENG Liang-yu², JI Chong¹, WANG Xin¹, WANG Yu-ting¹, SUN Yu-xiang³

(1. Field Engineering Institute, Army Engineering University of PLA, Nanjing, 210007; 2. Army Academy of Artillery and Air Offense of PLA Nanjing Campus, Nanjing, 211131; 3. 63867 Unit of the Chinese People's Liberation Army, Baicheng, 137000)

Abstract: In order to study the protective ability and mechanism of polyurea coated steel plate under explosion load, the effects of coating positions and thickness on the explosion resistance of Q235 steel plate with different thickness were studied through experiments, and the failure mechanism of composite target plate was revealed by using the law of stress wave propagation. The results show that under the test conditions in this study, the explosion resistance of steel plate is effectively improved when the polyurea is coated on the back, and the thicker the polyurea coating thickness is, the better the effect is. When polyurea is coated on the front, the explosion resistance of 3.5mm steel plate is improved slightly, while for the 3mm steel plate, the explosion resistance is weakened and damaged to a greater extent. When polyurea is coated on both sides, it also shows different effects with the different thickness combination of steel plate and polyurea.

Key words: Polyurea; Q235 steel; Explosion resistance; Explosion shock wave; Composite structure; Stress wave

聚脲 (PU) 是一种由异氰酸酯和氨基化合物反应生成的新型高分子材料, 具有非常明显的非线性特征和很强的应变率相关性^[1]。聚脲受到高速载荷冲击时, 由其高应变率所致的玻璃态转变可以吸收大量能量, 表现出优异的抗爆性能^[2-3], 且可使用专用设备将其喷涂于金属、混凝土等结构物的表面, 于短时间内凝结

固化, 研究表明喷涂聚脲可显著提高金属材料的防爆性^[4-5]。已有研究普遍认为在金属背面涂覆聚脲对其防爆性能提升效果优于正面涂覆, 且随着涂层厚度的增加, 提升效果增强^[6-7], 正面喷涂则会加剧钢板损伤^[8]。目前, 聚脲-金属结构抗爆性能的研究主要考虑聚脲涂覆位置及厚度对结构抗爆性能的影响, 没有将基材

收稿日期: 2021-11-23

作者简介: 张龙 (1994-), 男, 硕士研究生, 从事兵器科学与技术研究。

通讯作者: 纪冲 (1981-), 男, 副教授, 从事兵器科学与技术研究。

基金项目: 国家自然科学基金 (51978660)。

厚度作为变量纳入研究范围; 并且主要针对国外的聚脲产品, 而对国内自主研发的聚脲缺乏研究; 此外, 聚脲涂覆位置及涂层厚度对结构抗爆性能的影响尚存争议。本文以聚脲加固 Q235 钢板 (Polyurea coated Q235 steel plate, 以下简称 PCSP) 为研究对象, 通过试验研究了不同聚脲涂覆位置、涂覆厚度以及基体材料厚度对其防爆性能的影响, 并对其进行定量分析, 最后通过应力波传播效应对不同涂覆模式下 PCSP 的破坏机理进行阐述。

1 试验

1.1 材料特性及 PCSP 工况设计

选用尺寸为 $400\text{mm} \times 400\text{mm} \times 3.5\text{mm}$ (类别 I) 和 $400\text{mm} \times 400\text{mm} \times 3.0\text{mm}$ (类别 II) 2 种不同厚度的 Q235 钢板为基体材料制备 PCSP 复合板。Q235 钢的相关力学参数如表 1 所示。聚脲涂层材料选用国产 AP103 型聚脲。AP103 型聚脲主要由异氰酸酯和二胺化合物共聚而成, 其相关力学参数如表 2 所示。设计了 20 组不同的钢板厚度、聚脲涂覆位置及厚度的工况方案。

表 1 Q235 钢的力学性能
Tab.1 Mechanical properties of Q235 steel

抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	杨氏模量/GPa	伸长率/%
430	239	208	26

表 2 AP103 聚脲材料力学性能

Tab.2 Mechanical properties of AP103 polyurea

密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/MPa	撕裂强度/($\text{N} \cdot \text{mm}^{-1}$)	拉伸强度/MPa	断裂伸长率/%
1090	230	64	18	420

研究表明, 聚脲与基材之间的界面关系是影响复合靶板抗爆性能的重要因素^[9]。为了充分减小聚脲-钢板的界面关系对试验的不利影响, 在复合靶板的制

作过程中, 首先对钢板进行喷砂打磨处理, 并在钢板表面喷涂一层极薄的粘结剂 (约 $2\mu\text{m}$) 以增加钢板与聚脲之间的粘结强度。此外, 采用 Graco H-XP 喷涂设备和 Fusion AP 喷枪进行聚脲喷涂, 聚脲层的测量厚度与设计厚度之间的偏差控制在 0.2mm 以内。

1.2 试验设计

PCSP 抗爆试验装置如图 1 所示。该装置由靶板固定装置和炸药吊装装置两部分组成, 可实现各工况条件下爆炸冲击载荷的一致性, 尽可能减少试验装置所产生的误差。选用 141g TNT 圆柱形装药作为爆元, 装药尺寸为 $\Phi 40\text{mm} \times 70\text{mm}$, 密度为 $1.61\text{g}/\text{cm}^3$, C-J 爆轰压力为 21GPa , 稳定爆速为 $6930\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。装药吊装时使其底面中心与靶板中心在同一垂直线上, 炸高为 2cm 。



图 1 试验装置

Fig.1 Test device setting

2 试验结果及讨论

2.1 试验结果

试验结果如表 3 及图 2 所示。

表 3 试验工况及结果

Tab.3 Test condition and results

编号	前板聚脲+钢板+背板聚脲/mm	δ/mm	L_{max}/mm	破坏模式	编号	前板聚脲+钢板+背板聚脲/mm	δ/mm	L_{max}/mm	破坏模式
I-0	0+3.5+0	51.4	-	A	II-0	0+3.0+0	56.8	100.3	C
I-1	1+3.5+0	50.6	-	A	II-1	1+3.0+0	96.4	237.0	D
I-2	0+3.5+1	50.6	-	A	II-2	0+3.0+1	58.3	118.6	B
I-3	2+3.5+0	50.2	-	A	II-3	2+3.0+0	93.6	239.5	D
I-4	0+3.5+2	49.2	-	A	II-4	0+3.0+2	49.2	79.0	B
I-5	3+3.5+0	49.9	-	A	II-5	3+3.0+0	55.7	108.5	C
I-6	0+3.5+3	44.8	-	A	II-6	0+3.0+3	46.3	63.4	B
I-7	1+3.5+1	49.6	-	A	II-7	1+3.0+1	51.4	91.7	C
I-8	1+3.5+2	45.7	-	A	II-8	1+3.0+2	75.1	198.2	D
I-9	2+3.5+1	49.9	-	A	II-9	2+3.0+1	80.2	201.3	D

注: δ 为靶板最大挠度; L_{max} 为钢板断裂区域长轴的最大长度。

根据试验结果将所有工况靶板的破坏模式定义为 4 类: (1) Mode A: 挠度变形, 靶板仅产生垂直

于靶板平面方向的挠度变形, 无破损发生。(2) Mode B: 局部破裂, 靶板发生局部撕裂破坏, 产生撕裂纹

路。(3) Mode C: 冲切破坏, 靶板发生撕裂且中心区域被冲切, 形成明显的破口。(4) Mode D: 花瓣破坏, 靶板被大面积撕裂, 形成向外翻折的“花瓣”。

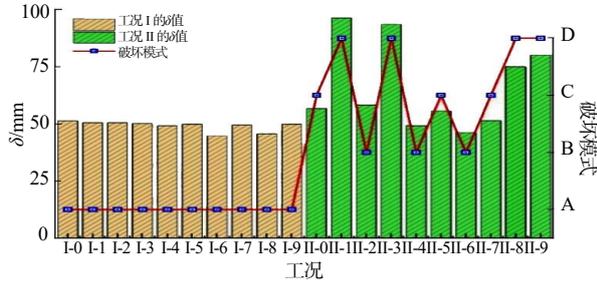


图2 靶板破坏结果统计
Fig.2 Statistics of target failure results

2.2 结果讨论

2.2.1 聚脲涂覆位置对钢板抗爆性能的影响

聚脲涂覆厚度相同、涂覆位置不同时 3.5mm 钢板的挠度曲线如图 3 所示。

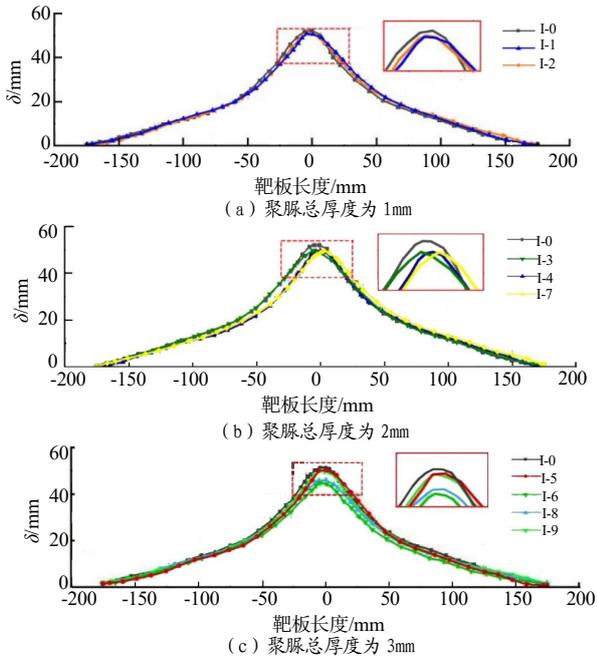


图3 不同聚脲涂覆位置下 3.5mm 钢板挠度
Fig.3 Deflection change of 3.5mm steel plate under different coating positions

由图 3 (a) 可知, 当聚脲厚度为 1mm 时, 不同涂覆位置的 PCSP 产生的破坏效果相似, δ 均为 50.6mm。由图 3 (b) 可知, 当聚脲厚度为 2mm 时, 涂覆于迎爆面 (I-3) 时 δ 为 50.2mm, 涂覆于背爆面 (I-4) 时 δ 为 49.2mm, 双面各涂覆 1mm 聚脲 (I-7) 时 δ 为 49.6mm, 可见聚脲厚度为 2mm 时涂覆于钢板背爆面的抗爆效果更优。由图 3 (c) 可知, 当聚脲涂覆厚度为 3mm 时, 涂覆于迎爆面与背爆面的

挠度曲线的差距显著, 迎爆面涂覆 (I-5) 时 δ 为 49.9 mm, 背爆面涂覆 (I-6) 时 δ 为 44.8mm, 相较裸钢板 (δ 为 51.4mm) 分别减少 3.0% 与 12.9%; 双面涂覆 (I-8 和 I-9) 时, I-8 产生的挠度明显小于 I-9, 即在总厚度不变的情况下, 涂覆于 3.5mm 钢板背面的聚脲越厚, PCSP 的抗爆效果越明显。

聚脲涂覆厚度相同、涂覆不同位置时 3mm 钢板的破坏情况如图 4 所示。

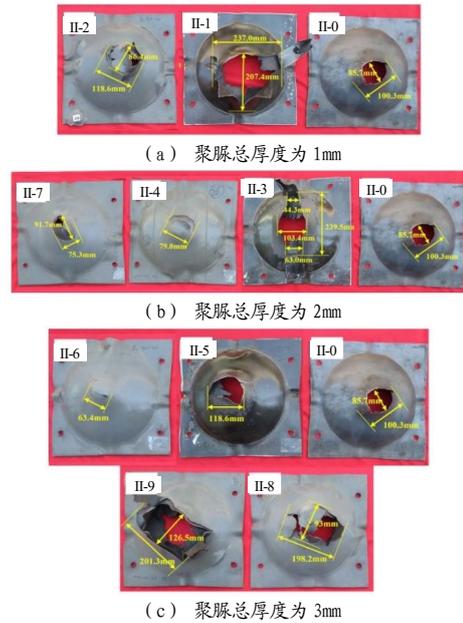


图4 不同聚脲涂覆位置下 3mm 钢板破坏情况
Fig.4 Failure of 3mm steel plate under different coating positions

由图 4 (a) 可知, 当聚脲涂层厚度为 1mm 时, 迎爆面涂覆 (II-1) 使钢板产生花瓣式破坏, 破裂区域尺寸约为无涂覆条件下 (II-0) 冲切区域尺寸的 4 倍, 且花瓣式破片之间的撕裂效果明显, 钢板的损伤程度明显加剧; 背爆面涂覆 (II-2) 时, 钢板发生不完全局部冲切, 虽然损伤区域尺寸与裸钢板破坏区域尺寸相比较小, 但整体性好于裸钢板。由图 4 (b) 可知, 当聚脲厚度为 2mm 时, 迎爆面涂覆 (II-3) 同样使钢板产生花瓣式破坏, 但破坏程度小于 II-1; 背爆面涂覆 (II-4) 的防护性能得到明显增强, 聚脲涂层出现轻微破裂, 钢板仅发生局部损伤; 双面各涂覆 1mm 聚脲 (II-7) 时, 出现了长径为 91.7mm 的破口, 其整体抗爆性能优于裸钢板, 但弱于 II-4。由图 4 (c) 可知, 当聚脲厚度为 3mm 时, 由于厚度的增加, 迎爆面涂覆 (II-5) 的

钢板发生局部冲切破坏, 损伤区域略大于裸钢板损伤区域; 背爆面涂覆 (II-6) 时, 聚脲涂层未发生破坏, 钢板发生轻微的局部破坏; 双面涂覆 (II-8 和 II-9) 时, 钢板均发生严重的花瓣式破裂损伤破坏, II-8 的破坏区域长轴为 198.2mm, 短轴为 93.0mm, II-9 的破坏区域长轴为 201.3mm, 短轴为 126.5mm, 相较于裸钢板, 这 2 种工况的 PCSP 防护性能显著降低。

综上所述, 聚脲涂覆位置对钢板抗爆性能的影响满足以下规律: 迎爆面涂覆可小幅提高 3.5mm 钢板的抗爆性能, 但会加剧 3mm 钢板的破坏; 背爆面涂覆可显著提高钢板的抗爆性能; 双面涂覆可有效提高 3.5mm 钢板的抗爆性能, 而对 3mm 钢板而言, 对其抗爆性能的影响并不是单一递增或递减的, 而是随着聚脲厚度组合的变化呈现出不同的效果。

2.2.2 聚脲涂层厚度对 PCSP 抗爆性能的影响

聚脲涂覆位置相同时, 3.5mm 钢板在不同涂覆厚度下的挠度曲线如图 5 所示。

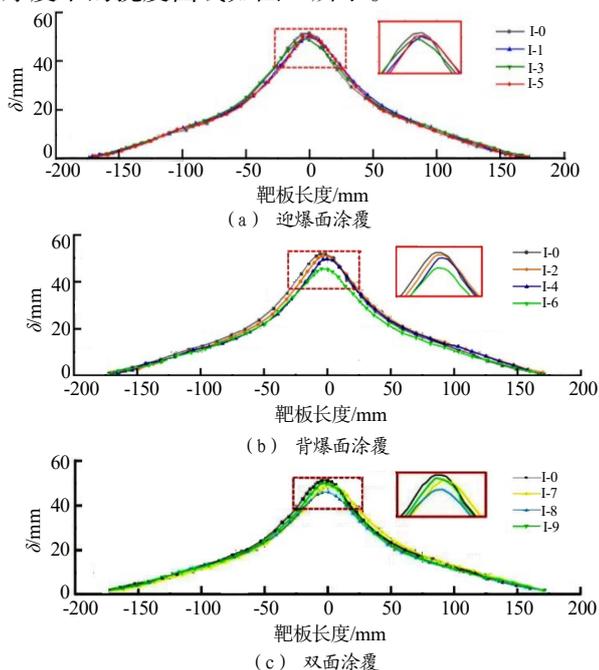


图 5 不同聚脲涂覆厚度下 3.5mm 钢板挠度
Fig.5 Deflection change of 3.5mm steel plate under different polyurea coating thickness

由图 5 (a) 可知, 迎爆面涂覆聚脲时, 虽然遭爆炸毁伤所产生的损伤有减少趋势, 但 δ 下降幅度很小。涂覆聚脲厚度分别为 1mm、2mm、3mm 时, δ 相较于 I-0 下降了 1.6%、2.4% 与 2.9%, 即随聚脲厚度增加, PCSP 的抗爆性能增强, 但增强效果不明显。

由图 5 (b) 可知, 背爆面涂覆聚脲厚度分别为 1mm、2mm、3mm 时, δ 相较于 I-0 降低了 1.6%、4.3% 和 12.8%, 抗爆效果随厚度增加得到明显增强。由图 5 (c) 可知, 双面涂覆聚脲时 δ 均小于 I-0。然而, 随着聚脲厚度增加, 抗爆效果并不是呈单一的上升趋势: I-7、I-8、I-9 的 δ 较 I-0 分别降低了 3.6%、11.1%、3.0%, 即当背面聚脲厚度相同时, 随着正面聚脲厚度的增加防护效果降低。相反, 当正面聚脲厚度相同时, 随着背面聚脲厚度的增加, 防护效果显著增强。

聚脲涂覆位置相同时, 3mm 钢板在不同涂覆厚度下的破坏情况如图 6 所示。

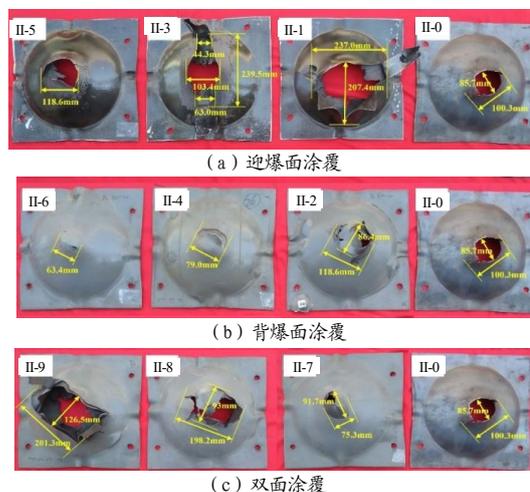


图 6 不同聚脲涂覆厚度下 3.0mm 钢板破坏情况

Fig.6 Failure of 3.0mm steel plate under different polyurea coating thickness

由图 6 (a) 可知, 与裸钢板相比, 采用迎爆面涂覆聚脲的 PCSP 损伤程度均是加剧的。分别涂覆 1mm 和 2mm 聚脲的 II-1 和 II-3 产生了严重的花瓣状破坏, 破坏区域长轴分别达到 237.0mm 和 103.4mm。当聚脲厚度为 3.0mm (II-5) 时, 破坏效应明显减弱, 呈现出与 II-0 相同的冲切破坏, 破坏区域的长轴达 118.6mm。由图 6 (b) 可知, 当聚脲涂覆于背爆面时, 随着涂覆厚度的增加, 靶板的破坏情况明显减轻。II-2 在受到爆炸载荷作用后, 钢板发生不完全冲切破坏, 遭到破坏的部分钢板未完全脱离, 破坏区域长轴约 118.6mm。当涂层厚度为 2mm (II-4) 时, 钢板的破坏模式由冲切破坏转变为局部破裂, 裂纹长度为 79.0mm。II-6 同样发生局部破裂, 出现长度为 63.4mm 的裂纹。由图 6 (c) 可知, 当聚脲同时涂覆于钢板双侧时, 随着厚度的增加, 对钢板的抗爆性能的影响并

非呈单方向线性变化。II-7 靶板的破坏相较II-0 是削弱的, 但II-8 与II-9 均产生了加剧的效应, 呈现出花瓣状破坏。

综上所述, 聚脲涂层厚度对钢板抗爆性能的影响遵循以下规律: 迎爆面聚脲涂层厚度的增加对 3.5mm 钢板抗爆效果有所提升, 但提升效果不明显, 对 3.0mm 钢板损伤破坏的加剧作用呈下降趋势。背爆面涂覆聚脲的 PCSP 其抗爆性能与涂层厚度正相关。双面涂覆聚脲时, 对 3.5mm 的钢板而言, 背爆面聚脲厚度一定时, PCSP 的抗爆性能随着迎爆面聚脲厚度的增加而削弱, 迎爆面聚脲厚度一定时, 背爆面聚脲厚度增加使 PCSP 的抗爆性能增强; 对 3.0mm 钢板而言, PCSP 的抗爆性能呈现出先增加后削弱的非线性特点。

3 聚脲加固钢板损伤机理讨论

炸药爆炸产生的冲击波和爆轰产物对靶板的冲击是一个高速动态加载过程。爆炸冲击波主要以应力波的形式传播, 并在聚脲和钢板中产生毁伤效应。由于未经爆炸冲击的聚脲和钢板之间的物理性质不同,

应力波在两种介质间传播会出现阻抗失配^[10]。但聚脲作为一种具有微相分离结构的聚合物^[11], 在受到爆炸冲击后, 刚度将提升 10~20 倍, 波阻抗将达到甚至超过基材^[12], 从而使得聚脲-钢板结构间的波阻抗逐步由失配转为匹配。同时, 应力波在介质中传播属于加载过程, 这势必会引起介质发生卸载效应, 发出卸载波削弱加载波^[13]。在均质材料中, 卸载波波速只是稍大于加载波, 但滞后于加载波, 需足够时间才能追上加载波。聚脲在受强载过程中刚度逐渐提高, 使得卸载波在其内部的传播速度增加, 缩短追击加载波的时间, 从而达到减轻基材破坏的效果^[14], 如图 7 所示。

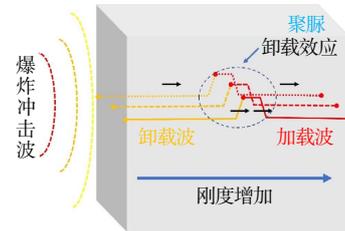


图 7 聚脲内卸载波与加载波的相互作用过程
Fig.7 Interaction process of unloading wave and loading wave in polyurea

图 8 为不同聚脲涂覆模式下 PCSP 内应力波传播规律示意图。

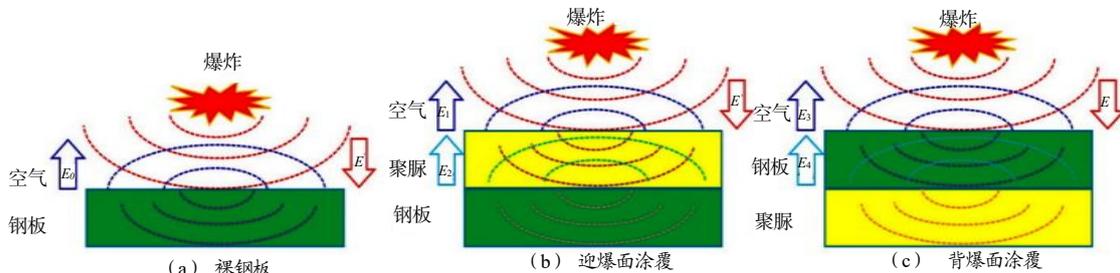


图 8 不同聚脲涂覆模式下 PCSP 内应力波传播规律
Fig.8 Propagation law of stress wave in PCSP under different polyurea coating modes

由图 8 (a) 可知, 由于空气的波阻抗远小于钢板的波阻抗, 爆轰波作用于裸钢板时, 大部分爆炸冲击能量被反射 (E_0)。由图 8 (b) 可知, 由于未受爆炸载荷冲击的聚脲的波阻抗介于空气介质和钢板介质之间, 在钢板正面涂覆聚脲后, PCSP 在聚脲-空气界面的波阻抗匹配度更好, 更多的能量进入到 PCSP 中。涂覆于钢板正面的聚脲受到冲击后发生玻璃态转变, 刚度逐渐增加。但由于涂层厚度的限制, 卸载波在传播过程中无法完全追赶上加载波产生卸载作用。尽管冲击波在空气-聚脲-钢界面处经历了双重反射, 但总

反射能量 (E_1 和 E_2) 远小于 E_0 , 这导致冲击能量直接进入钢板。因此, 对于 3.0mm 的钢板而言, 受聚脲厚度及钢板的限制, 正面涂覆聚脲后靶板损伤效果增强, 但随着聚脲厚度由 1mm 增加到 3.0mm, 这种损伤增强效应是递减的。对 3.5mm 的钢板而言, 钢板厚度在一定程度上弥补了聚脲厚度的不足, 但总体防护增强效果不明显。由图 8 (c) 可知, 背面涂覆聚脲时, 应力波的传播过程完全相反, 爆炸冲击波首先由空气传播到更“硬”的钢板, 在空气-钢板界面发生第 1 次反射, 反射的能量 (E_3) 较大。随后应力波

又在钢板-聚脲界面发生第 2 次反射, 由于此时是从“硬”介质向“软”介质传播, 因此反射回钢板的能量 (E_4) 较小, 而向聚脲中透射的能量更大, 此时应力波在钢板中呈现出反射卸载效应。再加上聚脲受载后刚度增加, 卸载波进一步卸载加载波能量, 从而有效减轻靶板受到的破坏。

4 结论

本文为研究 AP103 型聚脲加固 Q235 钢板抗爆性能, 开展了多工况条件下 PCSP 的爆炸试验, 研究了基材厚度、聚脲厚度、聚脲涂覆位置等因素对复合结构损伤效应的影响规律, 并对不同涂覆位置 PCSP 的破坏机理进行了探讨, 得到以下结论:

(1) 当聚脲涂覆于钢板迎爆面时, 聚脲涂层对 3.5mm 钢板抗爆性能有微弱提升效果, 而对 3mm 钢板则会加剧钢板的破坏程度。聚脲涂覆于钢板背爆面时, 可有效增强 3.5mm 和 3mm 钢板抗爆能力; 聚脲双面涂覆时, 可提高 3.5mm 钢板的抗爆性能, 而对 3mm 钢板的影响则随聚脲厚度组合不同而变化。

(2) 聚脲涂覆于钢板迎爆面时, 随着涂覆厚度的增加, 3.5mm 钢板抗爆性能递增; 而对 3.0mm 钢板破坏的加剧作用是递减的。背面涂覆聚脲时, 随着聚脲厚度的增加, PCSP 的抗爆性能递增。

(3) 不同厚度的钢板在相同位置涂覆相同厚度的聚脲后, 靶板表现出的抗爆性能并不完全一致, 说明基材结构尺寸对于聚脲增强复合结构抗爆效果具有重要影响。

(4) 聚脲涂覆于钢板迎爆面使应力波在钢板中出现了加载效应, 在一定程度上抵消了聚脲的防护作用; 背爆面涂覆聚脲使应力波在钢板中出现了卸载效应, 从而增强 PCSP 的抗爆性能。

参考文献:

[1] Wang H, Deng X, Wu H, et al. Investigating the dynamic mechanical behaviors of polyurea through experimentation and modeling[J]. Defence Technology, 2019, 15(6): 875-884.

- [2] Wu G, Wang X, Ji C, et al. Blast response of clay brick masonry unit walls unreinforced and reinforced with polyurea elastomer [J]. Defence Technology, 2021. <http://10.1016/j.dt.2021.03.004>.
- [3] Li Y, Chen C, Hou H, et al. The Influence of spraying strategy on the dynamic response of polyurea-coated metal plates to localized air blast loading: experimental investigations[J]. Polymers, 2019, 11(11): 1 888.
- [4] Hou H, Chen C, Cheng Y, et al. Effect of structural configuration on air blast resistance of polyurea-coated composite steel plates: experimental studies[J]. Materials & Design, 2019(182): 108 049.
- [5] Wu G, Wang X, Ji C, et al. Anti-blast properties of 6063-T5 aluminum alloy circular tubes coated with polyurea elastomer: experiments and numerical simulations[J]. Thin-Walled Structures, 2021, 164(7): 107 842.
- [6] 池海, 王刚, 赵鹏铎, 等. 聚脲装甲结构抗爆性能研究发展[J]. 兵器装备工程学报, 2020(2): 100-106.
- [7] 王琪, 贾子健, 赵鹏铎, 等. 聚脲涂覆钢复合结构的抗爆效应[J]. 高压物理学报, 2020, 34(6): 53-60.
- [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(002): 118-123.
- [9] Chen C, Wang X, Hou H, et al. Effect of strength matching on failure characteristics of polyurea coated thin metal plates under localized air blast loading: experiment and numerical analysis[J]. Thin-Walled Structures, 2020(154): 106 819.
- [10] 张鹏. 聚脲涂覆结构抗弹抗爆防护性能与机制研究[D]. 山西太原: 中北大学, 2020.
- [11] Manav M, Ortiz M. Molecular dynamics study of the shock response of polyurea[J]. Polymer, 2020, 212(4): 123 109.
- [12] Wu G, Wang X, Ji C, et al. Damage response of polyurea-coated steel plates under combined blast and fragments loading[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2022: 107 126.
- [13] 张天锡. 工程爆破中卸载波与加载波互相作用的初步讨论 [J]. 爆破, 2010, 27(2): 18-21.
- [14] Iqbal N, Tripathi M, Parthasarthy S, et al. Polyurea coatings for enhanced blast-mitigation: a review[J]. Rsc Advances, 2016: 10. 1039. C6RA23866A.