

doi: 10.7690/bgzd.2018.10.014

聚脲-钢板夹层结构抗爆性能研究

翟文¹, 戴平仁², 何金迎¹, 王小伟¹

(1. 中国兵器工业集团第五三研究所, 济南 250031; 2. 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, 喷涂于结构上能够提高其防护性能。为研究聚脲喷涂钢板结构靶板的抗爆性能, 运用数值计算与试验研究方法, 对聚脲弹性体-钢板夹层结构进行多种工况下抗爆性能研究。主要分析靶板的变形特点与吸能特性, 并选用 2 种不同的聚脲夹层靶板对数值计算结果进行验证。结果表明: 靶板在抗爆过程中, 聚脲弹性体的存在不仅能吸收大量的能量, 而且能抑制靶板发生大变形; 为提高靶板抗爆能力, 防止破片产生, 其面板与背板需要有较好的强度与刚度。

关键词: 聚脲弹性体; 三明治靶板; 变形; 吸能; 抗爆

中图分类号: TJ01 **文献标志码:** A

Study on Anti-detonation Performance of Polyurea Steel Sandwich Structure

Zhai Wen¹, Dai Pingren², He Jinying¹, Wang Xiaowei¹

(1. NORINCO Group China North Material Science & Engineering Technology Group Corporation, Ji'nan 250031, China; 2. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Polyurea elastomer has good mechanical properties, and its protective properties can be improved by spraying on the structure. In order to study the anti detonation performance of polyurea coated steel plate, numerical simulation and experimental research were conducted to study the anti detonation performance of polyurea elastic steel sandwich structure under various working conditions. The deformation characteristics and energy absorption characteristics of the target plate are analyzed, and two different polyurea sandwich plates are chosen to verify the numerical results. The results show that the target in the explosion process, the existence of polyurea can not only absorb a large amount of energy, but also can suppress target large deformation; in order to improve the target antiknock ability, prevent the fragments, the panel and the backboard need to have good strength and stiffness.

Keywords: polyurea; sandwich target; deformation; energy absorption; anti-detonation

0 引言

防爆抗冲击领域一直是军事研究领域的热点, 为提高结构的防护能力, 普遍采用的方法是增加防护介质厚度、开发新型材料和使用复合结构^[1]。随着喷涂聚脲弹性体技术的研发与应用, 具有优异理化性能的新型材料—聚脲弹性体 (polyurea elastona, PUA), 在防护领域的应用将越来越广泛。学者们率先开展了聚脲弹性在静态力学性能与本构模型的研究, 发现聚脲弹性体具有明显的非线性和较强的应变率相关性^[2-3]。M. R. Amini^[4-6]通过聚脲喷涂钢板复合结构的抗爆试验, 认为聚脲喷涂背面抗爆性能更佳, 聚脲喷涂冲击侧时却加剧了钢板的破坏; L. Xue^[7]研究发现认为聚脲喷涂背板能消耗大量的动能, 背板为最佳的喷涂面; 甘云丹、赵延杰等^[8-9]研究聚脲涂覆钢板水下抗爆性能, 认为涂覆背板对结构抗爆性能有较大的提高; 宋彬等^[10]研究了聚脲夹层防爆罐, 发现聚脲能够使冲击波大幅度

衰减。

由上述研究成果可知, 聚脲能够提高结构的抗爆性能。对于聚脲弹性体提高结构的抗爆机理, Tekalur^[11]通过实验研究发现: 聚脲的非线性本构关系, 铝相关性以及粘结层的破坏是导致能量耗散的主要原因。Roland^[12]认为聚脲从橡胶态向玻璃态转变是提高结构防护性能的主要机理。Grujicic^[13]通过数值模拟验证了 Roland 提出的相变机制。

聚脲弹性体夹层复合结构, 可用于装甲车辆防地雷和舰船隔舱防爆方面, 但这方面公开发表的研究成果非常少。笔者基于以上研究成果, 运用有限元仿真软件 ANSYS/LS-DYNA 对 2 种结构聚脲夹层靶板进行抗爆性能数值模拟; 通过试验研究验证仿真的可靠性, 对靶板进行抗爆性能试验对比, 主要分析靶板在爆炸载荷作用下的变形特点与吸能特性, 并对靶板结构优化设计提出参考建议。

收稿日期: 2018-08-24; 修回日期: 2018-08-30

作者简介: 翟文(1961—), 男, 山东人, 硕士, 研究员, 从事高效抗冲击复合材料、功能防护材料、特种弹性材料研究。

1 聚脲弹性体抗爆数值研究

1.1 数值计算模型

笔者利用 ANSYS/LS-DYNA 对聚脲弹性体夹层结构圆形靶板进行 3 维全尺寸实体建模, 计算模型包括 TNT 炸药、空气、钢板和聚脲。在数值模拟中, 利用问题的对称性采用 1/4 模型, 对称面上添加对称约束, 靶板的边界设置全约束。其中, 聚脲与钢板采用 Lagrange 网格, 炸药空气采用 Euler 网格, 2 种网格采用流固耦合算法 ALE。为保证计算精度, 采用渐变网格划分技术, 将靶板中心区域加密。文中所研究的靶板为聚脲夹层复合结构, 靶板的结构参数与计算工况见表 1。在钢板与聚脲之间有一层很薄的胶层, 为模拟该胶层的作用, 在钢板和聚脲之间建一层 0.1 mm 厚的单元层, 胶层材料属性与聚脲一致, 与钢板和聚脲之间采用共节点法建模。数值计算有 3 个工况, 其参数见表 2, 数值计算参考模型见图 1。

表 1 数值计算中靶板参数 mm

类别	面板	夹层	背板	靶板	工况
A	5.5	5	5.5	16	I II III
B	2	14	2	16	I

表 2 数值计算模型工况

类别	工况 I	工况 II	工况 III
药量/g	200	120	20
炸药尺寸/mm	φ60×44	φ60×26	φ30×20
爆距/mm	200	50	0

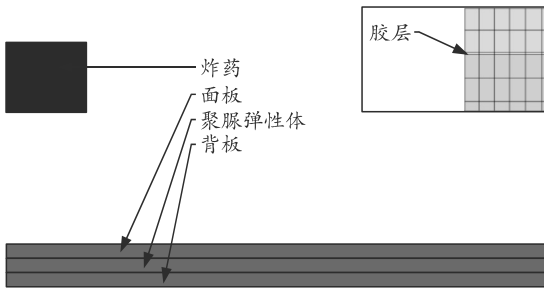


图 1 数值计算参考模型

1.2 材料模型及参数

1.2.1 炸药模型及参数

笔者使用的炸药为 TNT, 采用 MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BORN, 其密度为 1.63 g/cm³, 爆速 6 930 m/s, 爆压 19 GPa。与本构模型相匹配的状态方程采用 EOS_JWL, 本模型中炸药方程的相关参数如表 3 所示。状态方程如下式:

$$P = A(1 - \frac{\omega}{R_1 V})e^{-R_1 V} + B(1 - \frac{\omega}{R_2 V})e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V} \quad (1)$$

表 3 炸药状态方程参数^[14]

A/GPa	B/GPa	R ₁	R ₂	ω	E ₀ /(J·m ⁻³)	V ₀
371	3.23	4.15	0.95	0.3	7×10 ⁹	1

1.2.2 聚脲弹性体模型及参数

聚脲弹性体是一种超粘弹性体, 具有明显的非线性和应变率相关性。材料模型采用 Mooney-Rivlin 模型来表示, 其参数见表 4。

表 4 聚脲弹性体 Mooney-Rivlin 模型参数^[15] MPa

C ₁₀	C ₀₁	C ₁₁	C ₂₀	C ₀₂	C ₃₀
4.5	0.7	-0.03	-0.02	0.001	0.002

1.2.3 钢板本构模型及参数

仿真中靶板的上下钢板均使用 A3 钢, 采用 MAT_PLASTIC_KINEMATIC 本构模型, 应变率效应通过 Cowper-Symonds 模型来描述, 其材料参数见表 5。

表 5 A3 钢材料参数^[14]

ρ/(kg/m ³)	E/GPa	ν	σ _y /MPa	E _v /GPa	C/S ⁻¹	P
7 850	210	0.3	240	2	10 ⁵	5

2 数值计算结果

靶板的抗爆性能一般可采用以下表征: 1)靶板在抗爆过程中发生的变形, 是否在安全变形范围之内; 2)靶板在变形过程中是否产生飞行破片, 对靶后事物进行杀伤; 3)靶板在抗爆过程中吸能能力, 吸能越多使得冲击波衰减得越多。笔者通过数值计算结果, 对 A、B 靶板的变形与吸能进行分析。

2.1 A 靶板变形与吸能分析

笔者对 A 结构靶板在 3 种工况下数值计算抗爆性能进行了数值模拟研究, 在 t=400 μs 时, 靶板的变形如图 2 所示。

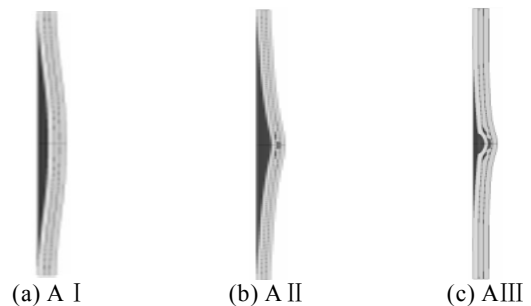


图 2 A 靶板变形

由图可知, 3 块靶板均发生鼓包变形: A I 靶板 (A 类靶板在 I 工况中研究)鼓包最小, 但变形范围最大; A II 靶板鼓包最大, 鼓包范围较大; A III 靶板鼓包高度较大, 鼓包范围较小, 面板出现凹坑, 背板鼓起, 与聚脲部分单元发生实效, 但整体无裂纹产生。这主要是因为 0 爆距下, 柱形炸药的爆轰

波将以恒定的速度在药柱中沿着轴线方向从药柱底部向钢板表面传播，由于稀疏波的作用使得药柱中心部分的冲量大于两侧，故面板表面被挤压变形，中心下凹。

取面板与背板的中心单元为研究对象，3 种工况下 A 靶板的面板背板位移时程曲线见图 3。由图可以看出：A I 面板背板位移最小，且位移量相近，A II 面板与背板位移量最大，且上下面板的位移时程曲线相近。说明 A I、A II 靶板在变形过程中，聚脲夹层与上下平板之间一直紧密贴合，胶层剥离程度较小，且压缩变形程度较小。A III 面板背板的位移时程曲线在初始响应阶段上升最快，且 2 个位移曲线相差较大，这是由于聚脲弹性体的粘弹特性，使得上下面板与聚脲相互作用导致。由图可知：由于面板、背板具有较高的强度和刚度，使得 A 靶板在爆炸载荷下变形较小，面板与背板同步变形，裂纹破片产生，具有较强的抗爆能力。

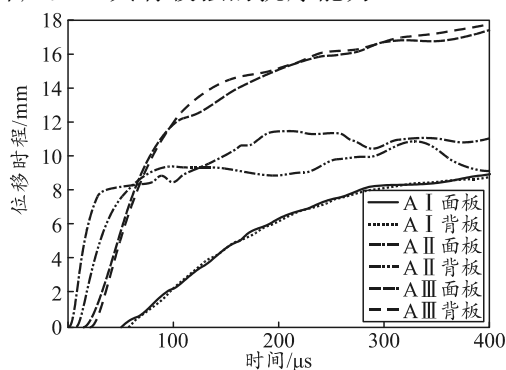


图 3 A 靶板的面板背板位移时程

图 4 为 3 种工况下靶板的吸能时程曲线，可以看出不同工况下，靶板的吸能有较大的差异。A I 靶板能量时程曲线上升缓慢，且在 $t=100 \mu\text{s}$ 以后靶板的吸能趋于稳定状态，为 420 J。A II 靶板在爆炸载荷下，能量时程曲线上升较快并迅速趋于稳定，为 1 338 J。A III 靶板因为与炸药紧靠，所以能量时程曲线上升最快并达到峰值 1 395 J，而总吸能时程曲线下降是因为聚脲材料部分单元发生失效，导致靶板质量减少，能量最终稳定在 1 083 J 左右。可以看出：A II 靶板的最终吸能最多，A I 靶板的最终吸能最少。A 靶板在 3 种工况下吸能差异较大，但靶板的吸能能力稳定，说明靶板对工况的适应性较高，适用的工况范围更广。

靶板的变形和吸能与工况紧密相关，尽管 I 靶板的鼓包范围大，但位移量小，总吸能少；II 靶板的位移量最大，吸能也最多；III 靶板的面板与背板的位移曲线较大，但鼓包范围小，总吸能最少。

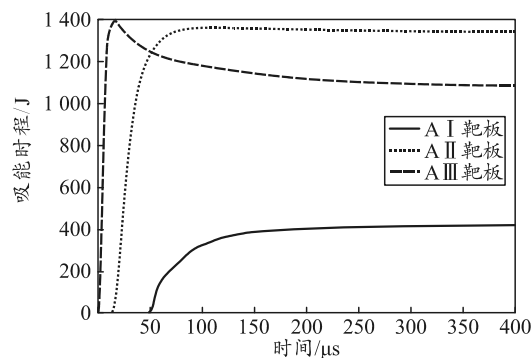


图 4 靶板的吸能时程

2.2 B 靶板的变形与破坏分析

如图 5 所示，在爆炸载荷作用下，B I 靶板各个部分进行响应，面板出现中心坍塌断裂，且中心部分径向开裂向下翻卷；背板出现坍塌撕裂，并向下翻卷；聚脲弹性体中心部分断裂，断裂边缘向下凹陷，部分单元发生失效；胶层部分失效严重。整体来看，靶板破坏非常严重，靶板凹陷，且中心部分出现较大的近似圆锥形穿孔，面板、聚脲、背板发生断裂并伴随有碎片飞出。可以看出：在 I 工况下，B 靶板的防护效果不理想，对靶后事物容易造成杀伤。

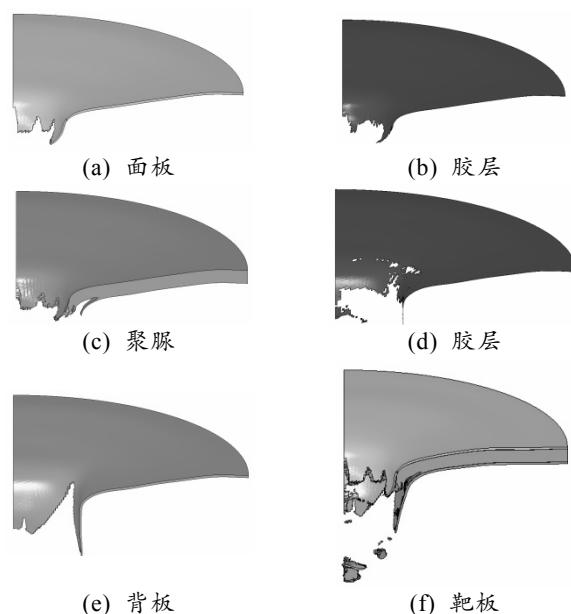


图 5 B I 靶板变形破坏

为研究靶板破片的速度，笔者取结构中各部分碎片中的某个单元为研究对象，其速度时程曲线如图 6 所示。从图中可以看出：面板、聚脲夹层、背板所产生的破片速度相差较小，最终稳定在 320 m/s 左右，速度波动是由于破片在飞行过程中翻转造成的。破片质量较大，数量较多，极易对靶后事物造成大面积杀伤。

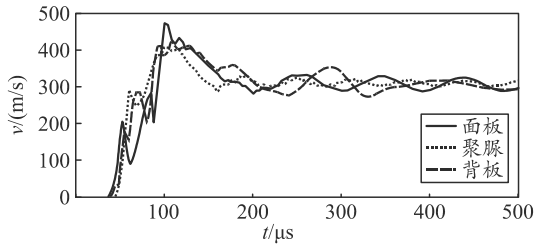


图 6 B I 靶板各部分的破片

B I 靶板因变形破坏并产生破片，抗爆效果不理想，但靶板中的聚脲夹层有效地抑制了面板进一步发生扩孔翻卷，使得靶板的破坏程度降低，靶板的整体变形量减少。且背板与聚脲间的胶层也能提高靶板

3 试验验证

试验研究选用 2 种不同的聚脲夹层靶板，其试验参数见表 6，试验靶板中的上下面板采用 A3 钢，聚脲弹性体采用型号为 SPUA409，其参数见表 7。为保证钢板与聚脲之间的粘结强度，采用胶水进行粘接。靶板具体尺寸与仿真模型高度一致。试验布置中，炸药放置与靶板中心正上方用火雷管起爆，试验布置如图 7 所示。

表 6 试验靶板的相关参数 mm

类别	面板	夹层	背板	靶板	工况
A	5.6	5	5.6	16.2	I II III
B	2.1	14	2.1	16.2	I

表 7 SPUA409 主要性能参数

密度/(g/cm ³)	拉伸强度/MPa	附着力/MPa	拉伸伸长率/%	撕裂强度/(kN/m)
1.02	18.8	11.7	506	80



图 7 试验布置

试验结果表明：靶板 A I、A II 变形量较小，这是因为支架具有一定的宽度，使得背板被环状约束而非边界面约束，不易变形。A III 靶板变形明显，为观察靶板变形情况，将其对半切开，靶板变形如图 8 所示。可以看出：A III 靶板出现明显鼓包，其迎面面钢板在爆轰波作用下压垮变形，钢板表面有

碎片崩落，聚脲弹性体与钢板紧密贴合并被轻微压缩，未出现剥离现象。试验得到的鼓包形状与仿真结果极为相似，试验鼓包变形高度为 9 mm，仿真鼓包变形高度为 9.18 mm，误差为 2%；试验鼓包变形范围 $\phi 210$ mm，仿真鼓包变形范围 $\phi 224.9$ mm，误差为 7.45%，表明仿真可靠。

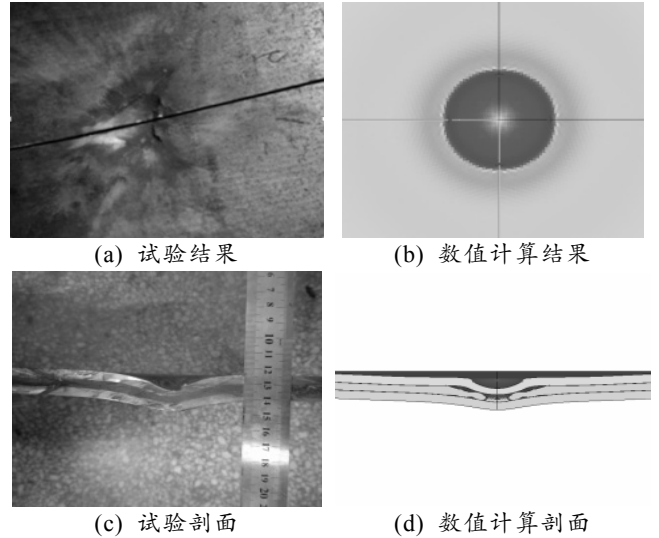


图 8 A III 靶板变形结果

从 B 靶板可以看出，数值计算的结果与试验结果非常相似。试验中面板凹陷坍塌出现通孔，孔径为 $\phi 91$ mm，如图 9 所示。面板通孔附近多处发生径向撕裂向下翻卷，并挤压聚脲夹层，但聚脲夹层的约束未发生进一步的破坏。聚脲夹层发生脆性断裂破坏，穿孔边缘向下突出。胶层失效严重，背板与聚脲夹层发生大面积剥离，呈 6 个花瓣型大范围破坏向外翻卷，且背板上有些许聚脲残留，表明靶板变形过程中聚脲发生撕裂。数值计算中面板凹陷坍塌出现通孔，孔径为 $\phi 93$ mm，与试验误差为 2.2%，表明数值计算可靠。

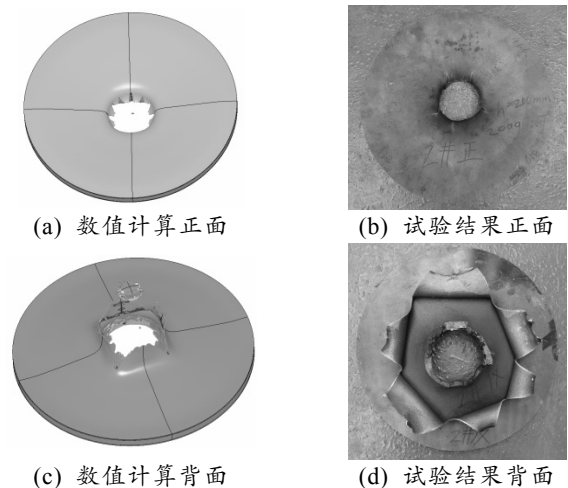


图 9 B I 靶板试验结果

靶板在抗爆过程中需要吸收大量的能量来衰减冲击波, 结构的大变形是吸能的主要手段, 其次是利用材料特性使得冲击波衰减弥散。根据 2 种靶板的数值计算与试验研究发现: A 类靶板的面板与背板较厚, 抗爆过程中变形较小, 具有承受二次爆轰能力, 抗爆性能较好; 而 B 靶板的上下面板较薄, 抗爆性能较差, 但聚脲弹性体夹层较厚, 能有效抑制靶板的扩孔。聚脲夹层靶板在抗爆过程中, 主要依靠面板与背板的刚度来抵抗变形, 而聚脲夹层在变形过程中不仅可以吸收大量的能量, 而且还可抑制靶板破坏。聚脲与上下面板之间粘结层的破坏将吸收大量的能量, 应使用黏接强度高的胶水粘接, 不仅可以提高靶板的抗变形能力, 当胶层失效时也可消耗大量的能量。为防止产生飞行破片对周围人员造成伤害, 可增强背板强度。

4 结论

笔者通过对聚脲弹性体填充钢板夹层靶板进行数值计算和试验研究, 得到如下结论:

1) 聚脲填充钢板夹层结构靶板, 面板强度较大时靶板变形较小, 无裂纹和破片产生, 防护能力较好, 具有承受二次抗爆轰的能力。

2) 聚脲作为夹层时, 使得靶板在抗爆过程中具有较好的柔韧性, 在靶板发生剪切破坏时能够有效地抑制靶板的扩孔。

3) 聚脲和钢板之间胶层的存在, 在靶板抵抗变形过程中通过粘结层与基体的撕裂吸收能量。

4) 为降低飞行破片的产生, 靶板的背板需要有一定的强度、刚度和韧性。

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, 27(2): 375-379.
- [2] AMIRKHIZI A V, ISAACS J, MCGEE J S. An experimentally-based viscoelastic constitutive model for polyurea including pressure and temperature effects[J]. Philosophical Magazine, 2006, 86(36): 5847-5866.
- [3] S TEKALUR A, SHUKLA A, SHIVAKUMAR K. Blast resistance of polyurea based layered composite materials[J]. Composite Structures, 2008, 84(3): 271-281.
- [4] ISAACS J, NEMAT N S. Investigation of effect of polyurea on response of steel plates to impulsive loads in direct pressure-pulse experiments[J]. Mechanics of Materials, 2010, 42(6): 628-639.
- [5] ACKLAND K, ANDERSON C, NGO T D. Deformation of polyurea-coated steel plates under localized blast loading[J]. International Journal of Impact Engineering, 2013, 51(1): 13-22.
- [6] MCSHANE G J, STEWART C, ARONSON M T. Dynamic rupture of polymer-metal bilayer plates[J]. International Journal of Solid and Structures, 2008, 45(16): 4407-4426.
- [7] XUE L, MOCK J. W, BELYTSCHKO T. Penetration of DH-36 steel plates with and without polyurea coating[J]. Mechanics of Materials, 2010, 42(11): 981-1003.
- [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(S2): 15-18.
- [9] 赵延杰, 潘建强, 刘建湖. 聚脲涂覆钢板水下爆炸试验研究[C]. 第十一届全国爆炸力学学术会议论文集. 2016: 90.
- [10] 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, 35(7): 138-144.
- [11] TEKALUR S A, SHUKLA A, SHIVAKUMAR K. Blast resistance of polyurea based layered composite materials[J]. Composite Structures, 2008, 84(3): 271-281.
- [12] GAMONPILAS C, MCCUISTON R. A non-linear viscoelastic material constitutive model for polyurea[J]. Polymer, 2012, 53(17): 3655-3658.
- [13] GRUJICIC M, PANDURANGAN B, HE T, et al. Computational investigation of impact energy absorption capability of polyurea coatings via deformation-induced glass transition[J]. Materials Science and Engineering: A, 2010, 527(29): 7741-7751.
- [14] 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.
- [15] MOHOTTI D, NGO T, MENDIS P, et al. Polyurea coated composite aluminium plates subjected to high velocity projectile impact[J]. Materials & Design, 2013, 52(24): 1-16.