

文章编号:1006-9941(2024)09-0887-12

# 爆炸荷载下背爆面柔性聚脲防护混凝土靶板的反直观行为

徐昊<sup>1</sup>,张锐<sup>1,2</sup>,黄微波<sup>2,3</sup>,董奇<sup>1</sup>,胡俊华<sup>1</sup>,梁龙强<sup>3</sup>

(1. 中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621999; 2. 青岛理工大学土木工程学院, 山东 青岛 266520; 3. 青岛沙木新材料有限公司, 山东 青岛 266108)

**摘要:** 金属结构在冲击载荷作用下,最终的变形方向与加载的方向相反,这一现象被称为反直观行为,试验发现背爆面柔性聚脲防护混凝土靶板在75 g TNT爆炸荷载下也发生了反直观行为。为了研究背爆面柔性聚脲防护混凝土靶板在爆炸荷载下的反直观行为,采用ANSYS/LSDYNA有限元软件,建立了背爆面柔性聚脲防护混凝土靶板在爆炸荷载作用下的有限元模型。利用有限元模型分析背爆面柔性聚脲防护混凝土靶板的动态响应规律,从能量的角度研究靶板反直观行为的发生机理。以靶板的中心点位移和挠度为指标,参数化分析了炸药药量和聚脲涂层厚度对靶板反直观行为的影响规律。结果表明:靶板的反直观行为是由聚脲涂层的应变能释放、混凝土损伤破坏的能量耗散及两种材料间能量的相互转化这三种因素共同作用导致的;炸药药量是反直观行为能否发生的关键因素,当药量较低或较高时,靶板都无法发生反直观行为;涂层厚度在2~8 mm范围内,靶板均出现了反直观行为,其弯曲程度随着涂层厚度的增加先增大后减小。

**关键词:** 反直观行为;柔性聚脲;混凝土靶板;爆炸荷载

中图分类号: TJ5; TJ04; TB34; O383+.2

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2024144

## 1 引言

爆炸荷载对土木工程结构的破坏远大于一般静态荷载和低速冲击荷载,土木工程结构中混凝土占比较大,其在爆炸荷载作用下将产生大量的高速破片,造成更为严重的损失<sup>[1-2]</sup>。现有研究表明,土木工程结构破坏导致的人员伤亡大多数是由爆炸产生的高速结构碎片和结构失稳造成的<sup>[3-7]</sup>。因此,降低结构在爆炸荷载作用下产生的破片数量,提高结构在爆炸荷载作用下的稳定性成为当前爆炸防护领域研究的热点。在结构表面涂覆聚脲是提高其抗爆抗冲击能力的有效手段,研究聚脲涂层防护结构在爆炸荷载下的动态响应具有重要意义。

国内外针对聚脲防护结构在爆炸荷载下的响应开展了大量的研究。孙鹏飞等<sup>[8]</sup>通过爆炸试验和仿真计算,研究了表面喷涂 Qtech T26 聚脲的钢筋混凝土靶板在爆炸荷载下的响应,发现喷涂 Qtech T26 可以提高靶板的吸能能力、增强靶板的抗爆性能。Wang 等<sup>[9]</sup>通过研究聚脲涂覆钢板加固的混凝土靶板在爆炸荷载下的响应,发现聚脲涂层可以扩大爆炸荷载作用下混凝土的拉伸面积,使更多的混凝土受到压缩,进而有效地限制结构的破坏,提高混凝土靶板的抗弯能力和承载能力。

由于聚脲分子结构的差异性,不同分子结构的聚脲所表现出的力学性能有明显区别,因而在爆炸荷载等高速荷载作用下的响应特性不同,导致最终的防护效果也不同。Ji 等<sup>[10-12]</sup>通过分析两种聚脲(AMMT-53 和 AMMT-55)在爆炸<sup>[12]</sup>、侵彻<sup>[11]</sup>和爆炸与破片耦合作用<sup>[10]</sup>下的动态响应过程,发现高硬度聚脲(AMMT-53)在抗侵彻和降低破片穿孔率方面的防护效果较好,高延展性聚脲(AMMT-55)适用于防止容器液体泄漏和提高钢板在无破片条件下的抗爆性能。除了聚脲的力学性能,聚脲层的厚度也会对结构的响应过程和防护

收稿日期:2024-06-07;修回日期:2024-07-25

网络出版日期:2024-09-06

基金项目:国家重点研发计划(2022YFC3320504)

作者简介:徐昊(1998-),男,博士研究生,主要从事爆炸与冲击动力学研究。e-mail:xuhaogg123@163.com

通信联系人:董奇(1982-),男,研究员,主要从事爆炸与冲击动力学研究。e-mail:dongqi@caep.com

张锐(1993-),男,博士后,主要从事结构爆炸防护与爆炸防护材料研究。e-mail:zhangray126@126.com

引用本文:徐昊,张锐,黄微波,等.爆炸荷载下背爆面柔性聚脲防护混凝土靶板的反直观行为[J].含能材料,2024,32(9):887-898.

XU Hao, ZHANG Rui, HUANG Wei-bo, et al. Counter-Intuitive Behavior of Flexible Polyurea-Protected Concrete Target Plate on Back Blast Surface under Blast Load[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2024, 32(9):887-898.

性能有重要影响。刘宝华等<sup>[13]</sup>通过研究接触爆炸下聚脲涂层增强钢板的响应过程,发现对于等面密度钢板,涂覆等厚度聚脲的钢板在爆炸荷载下的变形显著降低,但当聚脲层过厚时,结构的变形反而会加大。

反直观行为是结构动态响应的一个特殊的现象,研究结构的反直观行为可为结构的动力学响应机理带来新的认识。1985年,Symonds等<sup>[14]</sup>发现在脉冲荷载作用下梁中点处的最终偏转方向可能会与加载方向相反,这被称为反直观行为(counter-intuitive behavior)。随后研究人员在板结构<sup>[15]</sup>和环结构<sup>[16]</sup>中也发现了相似现象。不同结构的反直观行为机理可能有所不同。Symonds等<sup>[14]</sup>通过对梁反直观行为的研究,发现梁的反直观行为是由于材料的弹塑性非线性、结构的压缩失稳及弯曲响应的共同作用。Li等<sup>[16]</sup>研究表明,环反直观行为与梁、板反直观行为的发生机理完全不同,是塑性能量耗散和材料的运动硬化导致的。外界荷载是影响结构反直观行为的重要因素。李海旺等<sup>[17]</sup>通过数值模拟分析了径向朝外脉冲作用下球形薄壳的反直观行为,研究表明球形壳体的反直观行为对荷载的变化非常敏感。康婷等<sup>[18]</sup>对爆炸冲击荷载作用下拱结构的反直观行为进行了研究,发现荷载持续时间对拱结构的反直观行为有重要影响。

近期课题组在试验中发现,背爆面F-T126柔性聚脲(以下简称F-T126)防护混凝土靶板在爆炸荷载下也出现了反直观行为。为研究爆炸荷载作用下背爆面柔性聚脲涂层防护混凝土靶板(以下简称涂层混凝土靶板)的反直观行为发生机理,本研究建立了与试验工况相同的有限元模型。通过数值模拟,分析炸药药量和涂层厚度对涂层混凝土靶板反直观行为的影响规律。研究爆炸荷载作用下涂层混凝土靶板反直观行为的发生机理,可为抗爆复合结构的设计带来新的思路。

## 2 爆炸试验

### 2.1 试件设计

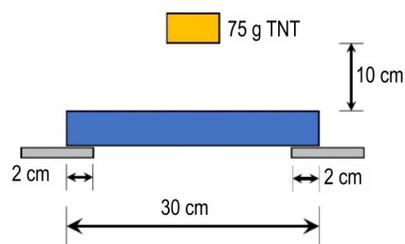
试验共制作了两块混凝土靶板,其长为300 mm×300 mm,厚度为30 mm,混凝土强度等级为C40。一块混凝土靶板的一侧喷涂聚脲,聚脲涂层尺寸为300 mm×300 mm×4 mm。另一块作为对照组,无聚脲涂层防护。

### 2.2 试验布置

爆炸试验采用非接触爆炸的形式,试验详细情况如图1所示。爆炸试验支架如图1a所示,支架上方为



a. test setup image



b. cross-section schematic of test set

图1 试验现场布置

Fig.1 Test site layout

回字形镂空钢板,支架下方增加配重,以防止支架与靶板在爆炸发生时倾倒。图1b为靶板支撑截面图,上部靶板为四周简支支撑,钢板各边与靶板接触宽度为2 cm。采用炸药药量为75 g的TNT进行试验,涂层位于靶板背爆面,试验炸高设置为10 cm。炸药采用雷管起爆,试验前在药柱上预留一个孔洞,在试验时将雷管插入药柱孔洞中起爆。

### 2.3 试验结果

无涂层混凝土靶板在爆炸荷载作用下的试验结果如图2所示。由图2a可见,爆炸荷载使无涂层防护靶板完全破坏,破坏的靶板碎片分散在支架周围,最远水平距离为1.2 m。试验现场找回23块混凝土靶板碎片,按照原靶板形状拼接摆放如图2b所示,可发现破坏呈放射状。

涂层混凝土靶板的爆炸损伤情况如图3所示。从宏观损伤来看,涂层混凝土靶板迎爆面同样发生放射状开裂(图3a),由于背爆面F-T126的防护,背爆面无破片飞出,迎爆面仅产生少量破片,靶板的完整性有大幅度提升。从图3a可以发现,迎爆面裂纹主要为垂直于TNT药柱方向和平行于TNT药柱方向。垂直于TNT药柱轴向的裂纹(以下简称垂直裂纹)有一条主裂纹,主裂纹贯穿整个靶板;平行于TNT药柱轴向的裂纹(以下简称平行裂纹)有多条,主要集中于靶板对角线附近。

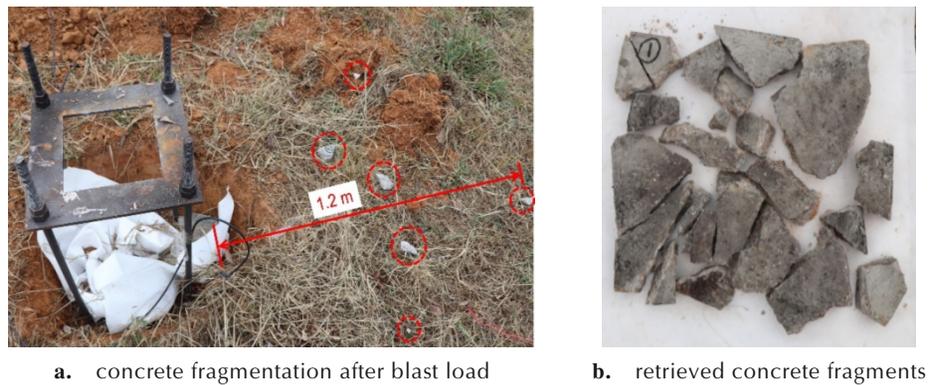


图2 无涂层防护靶板试验照片  
Fig.2 Test photograph of uncoated concrete target plate

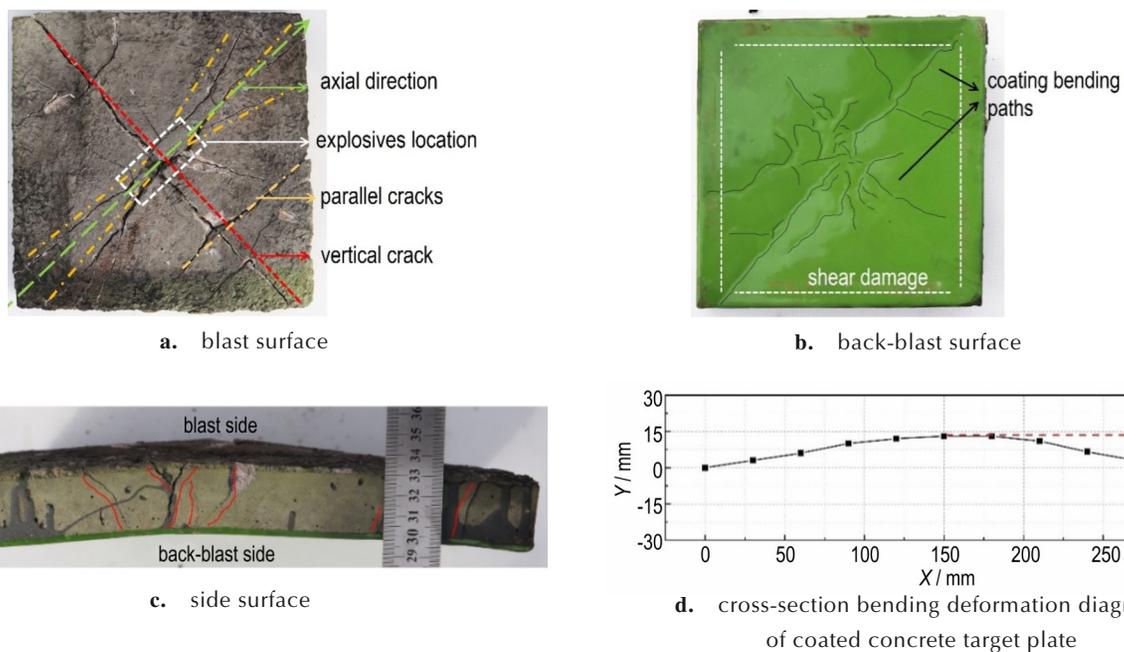


图3 涂层混凝土靶板的试验照片  
Fig.3 Test photograph of coated concrete target plate

背爆面 F-T126 的损伤如图 3b 所示,根据其损伤类型可分为两种,第一种为剪切损伤,发生在 F-T126 与钢架接触位置。由于钢架约束了接触部分涂层厚度方向的位移,使得接触边缘位置涂层发生剪切。第二种为弯曲损伤,发生在混凝土开裂破坏区域。这是因为混凝土破坏后,开裂区域的涂层失去了混凝土的约束,在冲击波的作用下,该位置涂层发生拉伸和弯曲变形,达到最大拉伸形变后,涂层开始回弹并产生褶皱,在涂层上呈现出弯曲痕迹。根据迎爆面的裂纹和背爆面涂层表面呈现出的弯曲痕迹可知,爆炸荷载使混凝土靶板产生了贯穿裂缝,但涂层混凝土靶板仍能保持完整。这是因为大部分涂层与混凝土在爆炸荷载作用下并未脱粘,涂层对靶板起到了包覆作用。

涂层混凝土靶板侧面有明显开裂,裂缝多贯穿靶板侧面(图 3c),但由于背爆面涂层对裂缝发展的抑制和对混凝土靶板的附着,并未出现混凝土脱落。从侧面变形来看,涂层混凝土靶板出现了反直观行为,靶板向爆炸侧弯曲。对涂层一侧靶板中心区域的变形进行测量,得到靶板剖面弯曲变形图(图 3d),爆炸后涂层混凝土靶板的挠度大小为 13 mm。

### 3 有限元仿真

#### 3.1 几何模型

本研究使用有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 建立与爆炸试验尺寸相同的有限元模型,整体模型如图 4 所示。空

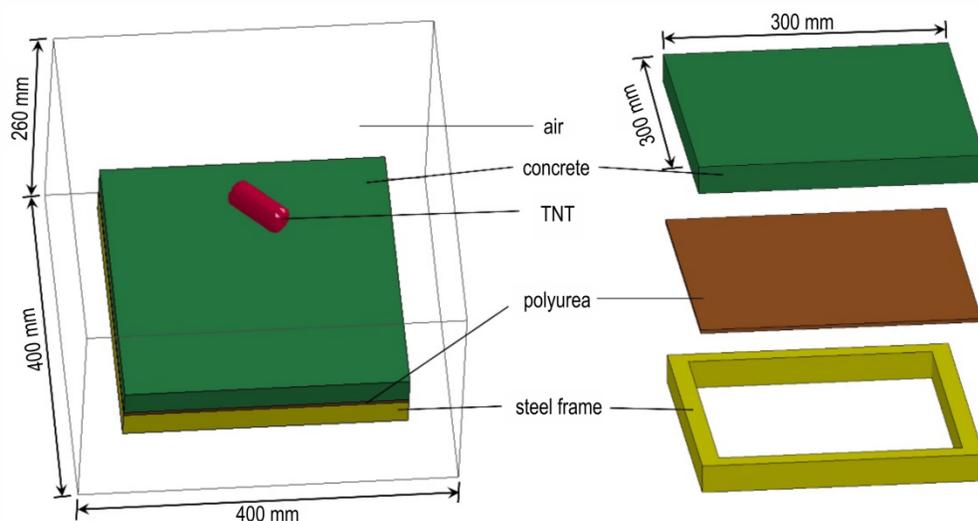


图4 有限元模型示意图

Fig.4 Diagram of finite element model

气域模型的网格尺寸为  $400\text{ mm} \times 400\text{ mm} \times 260\text{ mm}$ , 采用任意拉格朗日-欧拉(ALE)单元模拟空气和炸药,聚脲涂层、混凝土和钢架采用拉格朗日单元。无反射边界条件应用于空气区域的外表面,炸药通过 \*INITIAL\_VOLUME\_FRACTION\_GEOMETRY 关键字嵌入空气域中。

涂层和基材的粘结强度对结构的防护性能有重要影响<sup>[19]</sup>,为了模拟F-T126和混凝土靶板界面间的粘结强度,采用 \*CONTACT\_AUTOMATIC\_SURFACE\_TO\_SURFACE\_TIEBREAK 来定义两者的接触。在该算法中,初始时涂层和混凝土粘结,当达到失效条件后粘结失效,接触转为面面自动接触,失效条件由式(1)控制。

$$\left(\frac{|\sigma_n|}{\text{NFLS}}\right)^2 + \left(\frac{|\sigma_s|}{\text{SFLS}}\right)^2 \geq 1 \quad (1)$$

式中,  $\sigma_n$ 、 $\sigma_s$  分别为接触面上的法向应力和剪切应力, MPa; NFLS 和 SFLS 表示界面的法向强度和剪切强度。NFLS 和 SFLS 的数值由厂家提供, NFLS 和 SFLS 的数值分别为 10 MPa 和 4 MPa。

### 3.2 材料模型

混凝土的材料模型采用 \*MAT\_RHT 模型,该模型用于模拟岩石、混凝土等脆性材料在爆炸冲击荷载作用下的力学行为,可模拟混凝土靶板的裂纹损伤分布和靶后崩落等现象,材料参数见文献[20]。

F-T126 的材料模型选用 \*MAT\_PLECEWISE\_LINEAR\_PLASTICITY,该模型能够有效模拟聚脲的动态力学性能。采用 MZ-4000D<sub>1</sub> 万能试验机,按照

GB/T 528-2009《橡胶、硫化或热塑性橡胶拉伸应力应变性能的测定》对 F-T126 进行准静态力学性能测试。在加载速度为  $500\text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  ( $8.3 \times 10^{-3}\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 的条件下进行准静态力学试验。采用高应变率试验机,在加载速度分别为  $2.5 \times 10^{-4}$ ,  $2.5 \times 10^{-3}$ ,  $1\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  和  $5\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的情况下,测试 F-T126 在不同拉伸速度下的力学性能,得到的 F-T126 拉伸应力应变曲线如图 5 所示。

基于图 5 的 F-T126 的力学性能测试结果得到了 F-T126 的力学性能参数。采用密度瓶法,按照 GB/T 4472-2011《化工产品密度、相对密度的测定》进行测量得到了 F-T126 的密度。F-T126 的相关参数如表 1 所示。

使用关键字 \*EOS\_LINEAR\_POLYNOMIAL 定义空气的状态方程通过式(2)来描述,空气材料参数表 2<sup>[10,13,21]</sup>。

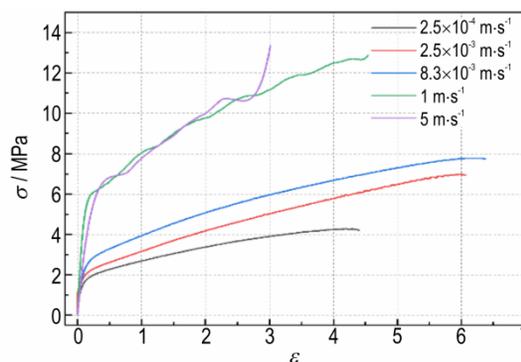


图5 不同速度下F-T126的拉伸应力应变曲线

Fig.5 Tensile stress-strain curves of F-T126 flexible polyurea with different loading speeds

表 1 F-T126 的材料参数

Table 1 Material parameters of F-T126 flexible polyurea

$\rho / g \cdot cm^{-3}$	$E / GPa$	$\nu$	$\sigma_0 / GPa$	$E_t / GPa$	FAIL
0.96	0.22	0.4	0.00778	0.00231	1.3

Note:  $\rho$  is density.  $E$  is elasticity modulus.  $\nu$  is poisson ratio.  $\sigma_0$  is yield strength.  $E_t$  is tangent modulus. FAIL is failure strain.

表 2 空气材料参数<sup>[10,13,21]</sup>

Table 2 Material parameters of air<sup>[10,13,21]</sup>

$\rho / g \cdot cm^{-3}$	$C_0-C_3$	$C_4$	$C_5$	$e / J \cdot cm^{-3}$
0.00129	0	0.4	0.4	$2.5 \times 10^5$

Note:  $\rho$  is density.  $C_0-C_5$  is polynomial equation coefficient.  $e$  is internal energy per unit volume.

$$p = C_0 + C_1 u + C_2 u^2 + C_3 u^3 + (C_4 + C_5 u + C_6 u^2) e \quad (2)$$

式中,  $e$  为单位体积能量,  $J \cdot cm^{-3}$ ;  $u$  为相对体积;  $C_0$ 、 $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ 、 $C_4$ 、 $C_5$ 、 $C_6$  为无量纲常数。

炸药为 TNT 装药, 其本构模型采用 \*MAT\_HIGH\_EXPLOSIVE\_BURN 表述, 使用 \*EOS\_JWL 来描述其状态方程, 该方程可描述炸药爆炸产物压力, 其表达式如式 (3) 所示。TNT 材料参数见表 3<sup>[13]</sup>。

$$p = A \left( 1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left( 1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V} \quad (3)$$

式中,  $p$  是爆轰产物的压力, GPa;  $V$  为相对体积;  $A$ 、 $B$  为常数, GPa;  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $\omega$  为无量纲常数。其中方程右端第一项在高压段起主要作用、第二项在中压段起主要作用, 第三项代表低压段。

表 3 TNT 材料参数<sup>[13]</sup>

Table 3 Material parameters of TNT<sup>[13]</sup>

$\rho / g \cdot cm^{-3}$	$D / m \cdot s^{-1}$	$P_{CJ} / GPa$	$A / GPa$	$B / GPa$
1.58	6880	19.4	307	3.898

Note:  $D$  is detonation velocity of TNT.  $P_{CJ}$  is Chapman-Jouguet pressure.  $A$ ,  $B$  are empirical constant.

根据现场爆炸试验的观察, 钢架无明显的位移和变形。因此, 在模拟中将钢架简化为完全约束的刚体, 以提高计算效率。

### 3.3 有限元模型验证

图 6 为模拟中无涂层混凝土靶板的破坏形态, 混凝土靶板发生了大面积破坏, 无法保持其完整性, 同时破坏呈放射状。

图 7 给出了涂层混凝土靶板试验和数值模拟结果的对比。其中混凝土靶板为损伤云图 (图 7a, 图 7c), 涂层为等效应变云图 (图 7b)。混凝土靶板迎爆面出现了与试验结果相同的垂直和平行裂纹。垂直裂纹为

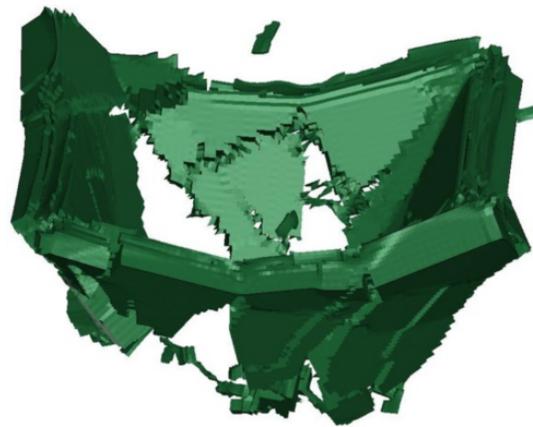
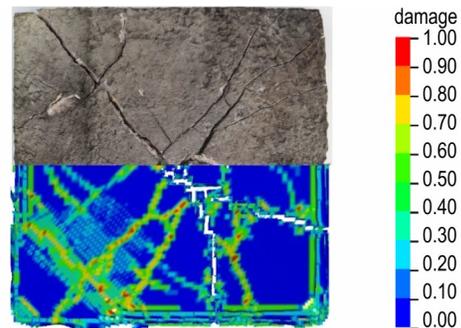
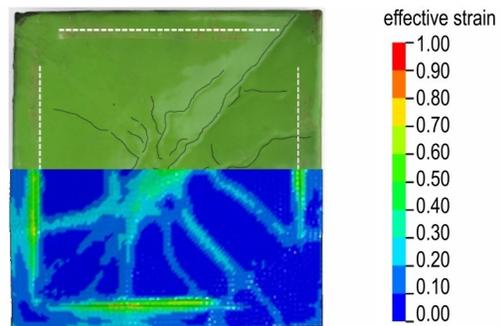


图 6 无涂层靶板的模拟结果

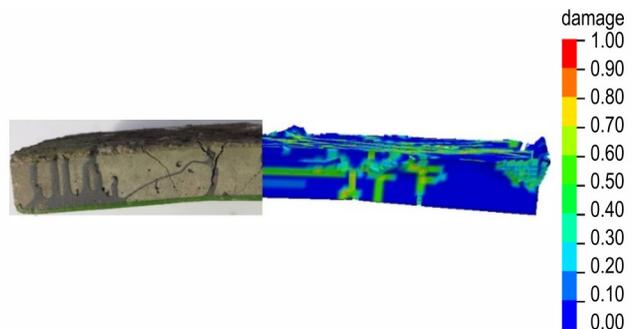
Fig.6 Numerical result of uncoated concrete target plate



a. blast surface



b. back-blast surface



c. side surface

图 7 涂层混凝土靶板的试验和数值模拟破坏模式对比

Fig.7 Comparison of experimental and simulated failure modes of coated concrete target plate

主裂纹,贯穿了靶板的厚度方向,同时存在多个平行裂纹从垂直裂纹延伸到边界处。在图 7b 中可以清楚地观察到涂层的损伤分布,模拟中涂层的损伤区域与试验结果一致。靶板侧面存在多条贯穿靶板的裂纹(图 7c),同时混凝土靶板未剥落,涂层和混凝土未脱粘。从图 7c 中也可以观察到与试验结果一致的反直观行为,涂层中心点的最终位移为  $-16.05\text{ mm}$ ,与试验中测得的最终位移( $-13\text{ mm}$ )相近。综上所述,模型计算的结果和试验结果基本吻合,验证了有限元模型的可靠性。

#### 4 爆炸荷载下靶板的动态响应

基于建立的有限元模型,分析了涂层混凝土靶板的动态响应过程,并从能量的角度研究了涂层混凝土靶板的反直观行为发生机理。

##### 4.1 响应过程分析

图 8 为  $75\text{ g}$  TNT 爆炸荷载作用下涂层混凝土靶板迎爆面、背爆面及涂层外侧的动态云图。其中混凝土靶板采用的是损伤云图(图 8a 和图 8b),涂层采用的是等效应变云图(图 8c)。

爆炸发生后,冲击波向四周传播,在  $0.07\text{ ms}$  时,冲击波到达靶板,此时涂层混凝土靶板背爆面混凝土开始产生损伤,迎爆面无明显变化(图 8a~b)。这是因为爆炸荷载作用下,混凝土靶板的迎爆面以受压为主,背爆面则发生拉伸变形,而混凝土抗拉强度远低于抗压强度,故损伤先出现在背爆面一侧。随后损伤开始迅速扩大,在  $0.25\text{ ms}$  时延伸到混凝土靶板的迎爆面(图 8b),在混凝土靶板的迎爆面可以观察到和背爆面裂纹方向相同的贯穿裂纹(图 8a),此时,涂层中心部分未见损失,表明靶板无明显弯曲(图 8c)。靶板

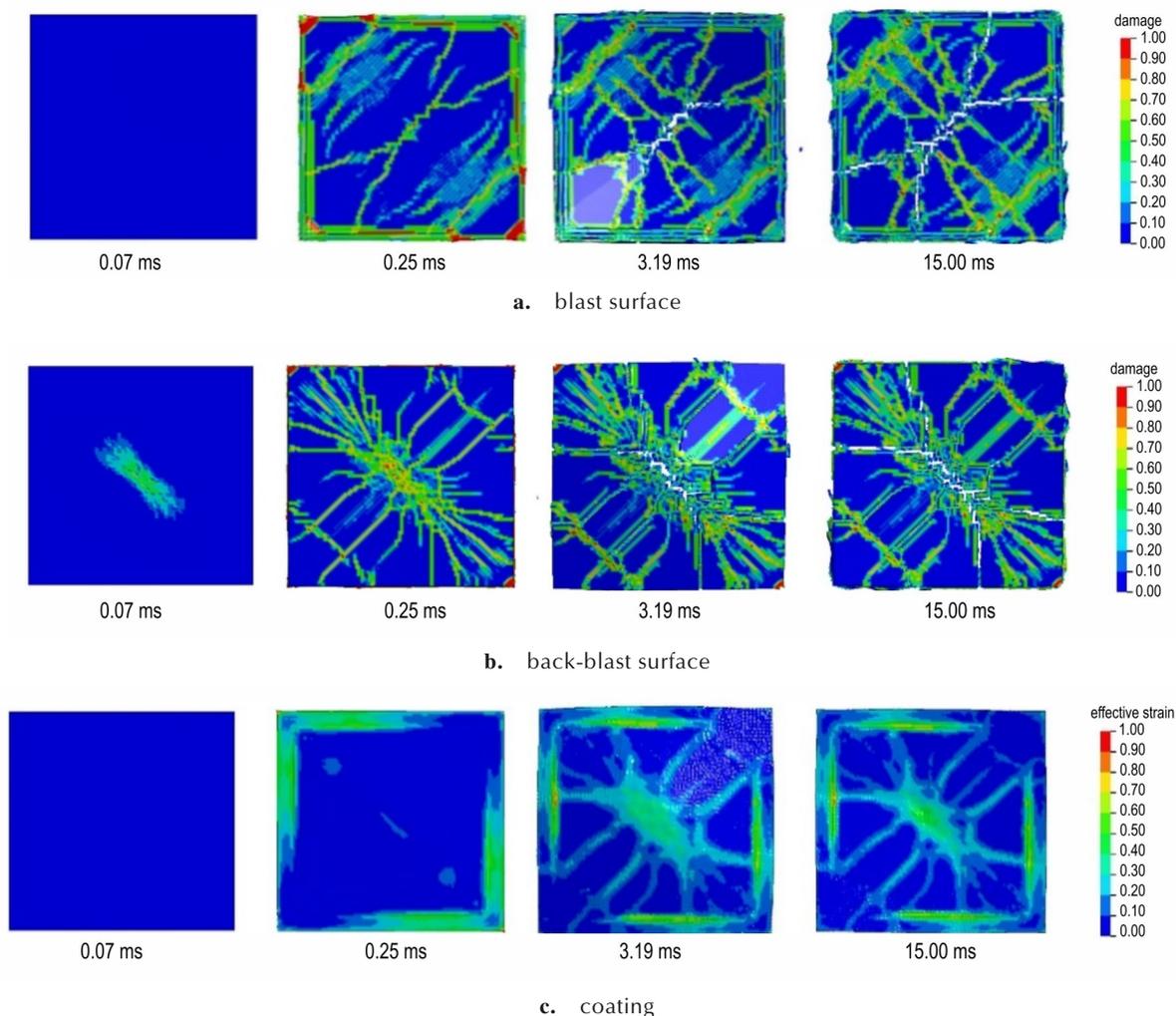


图 8 靶板损伤过程

Fig.8 Damage process of target plate

迎爆面中心点的压力时程曲线如图9所示,在0.25 ms时,荷载作用已经结束,表明荷载仅在响应初期作用于靶板,而不参与靶板的后续响应过程。

图10为涂层中心点位移时程曲线。由于靶板和涂层未脱粘,因此涂层的位移同时也可以代表混凝土的位移。结合图8a-b可以发现,在3.19 ms时,靶板的破坏程度加深,靶板中心点位移达到最大值,同时靶板达到最大变形。随后靶板发生回弹,靶板中心点位移开始减小,靶板的裂纹进一步扩展。在15 ms时,靶板已经停止了振动,最终出现了反直观行为,如图7c所示。

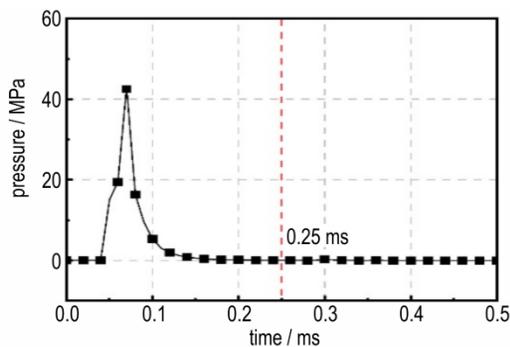


图9 靶板迎爆面中心点的压力时程曲线

Fig.9 Pressure time history curve of the center point of the concrete target plate facing blast

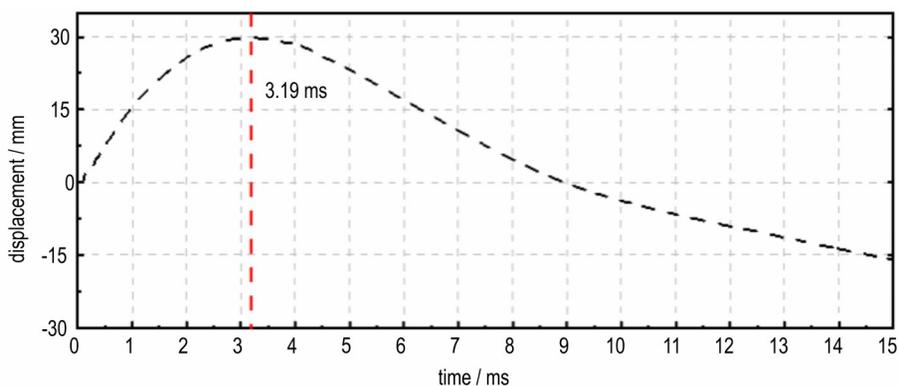


图10 涂层中心点的位移曲线

Fig.10 Displacement curve of the coating center point

## 4.2 能量分析

为进一步研究涂层混凝土靶板的反直观行为发生机理,图11给出了结构中各材料的吸能曲线。在荷载作用结束后,无涂层混凝土靶板中混凝土总能量达到最大,随后混凝土的动能降低、内能增加、总能量几乎保持不变。

对于涂层混凝土靶板,根据能量的变化可以将荷载作用后靶板的响应过程分为三个阶段,第一个阶段为涂层变形吸能阶段,第二个阶段为涂层弹性势能释放阶段。第三个阶段为混凝土损伤耗能阶段。第一个阶段为靶板的正向变形过程,第二个阶段和第三个阶段为靶板的反向回弹过程。

在第一个阶段(0.25~3.19 ms),混凝土总能量达到最大值后开始下降,涂层总能量随着涂层的变形开始增加(图11a)。涂层混凝土靶板中混凝土的动能下降速度明显高于无涂层混凝土靶板,于3.19 ms达到了0点(图11c)。涂层混凝土靶板的内能增幅明显低于无涂层混凝土靶板,涂层混凝土靶板中混凝土最终的内能为472 J,相比于无涂层混凝土靶板(620 J)降低了24%(图11b)。结合内能时程曲线(图11b)和动

能时程曲线(图11c)可知,涂层主要依靠内能增加吸收靶板的动能。综上可知,在第一个阶段,涂层依靠自身变形来吸收靶板的动能,进而降低靶板的损伤程度。

在第二阶段(3.19~7.00 ms),混凝土的动能增加(图11c),涂层的内能减小(图11b)。表明靶板在回弹阶段过程中,涂层释放其储存的弹性势能并传递给了混凝土,使靶板发生反向弯曲变形。

在第三个阶段(7.00~15 ms),混凝土的动能减小(图11c),内能缓慢增加(图11b),涂层能量无明显变化(图11)。表明此阶段内,混凝土通过自身的损伤破坏消耗靶板的动能,直至靶板停止振动。

上述结果表明,涂层在爆炸荷载下能够通过高速变形吸收较多的能量,从而快速降低靶板的动能,减少混凝土的损伤程度。涂层在变形时,大部分能量用于粘性耗散和塑性耗散。在达到最大变形后,涂层中储存的弹性势能会传递给整个靶板,使得靶板发生回弹,涂层释放的弹性势能可用涂层最大内能和最终内能的差值表示,即图11b中 $P_1$ 点和 $P_2$ 点的差值。在回弹过程中,由于混凝土的脆性破坏耗能,使得靶板停止在反向弯曲状态,最终呈现反直观行为。

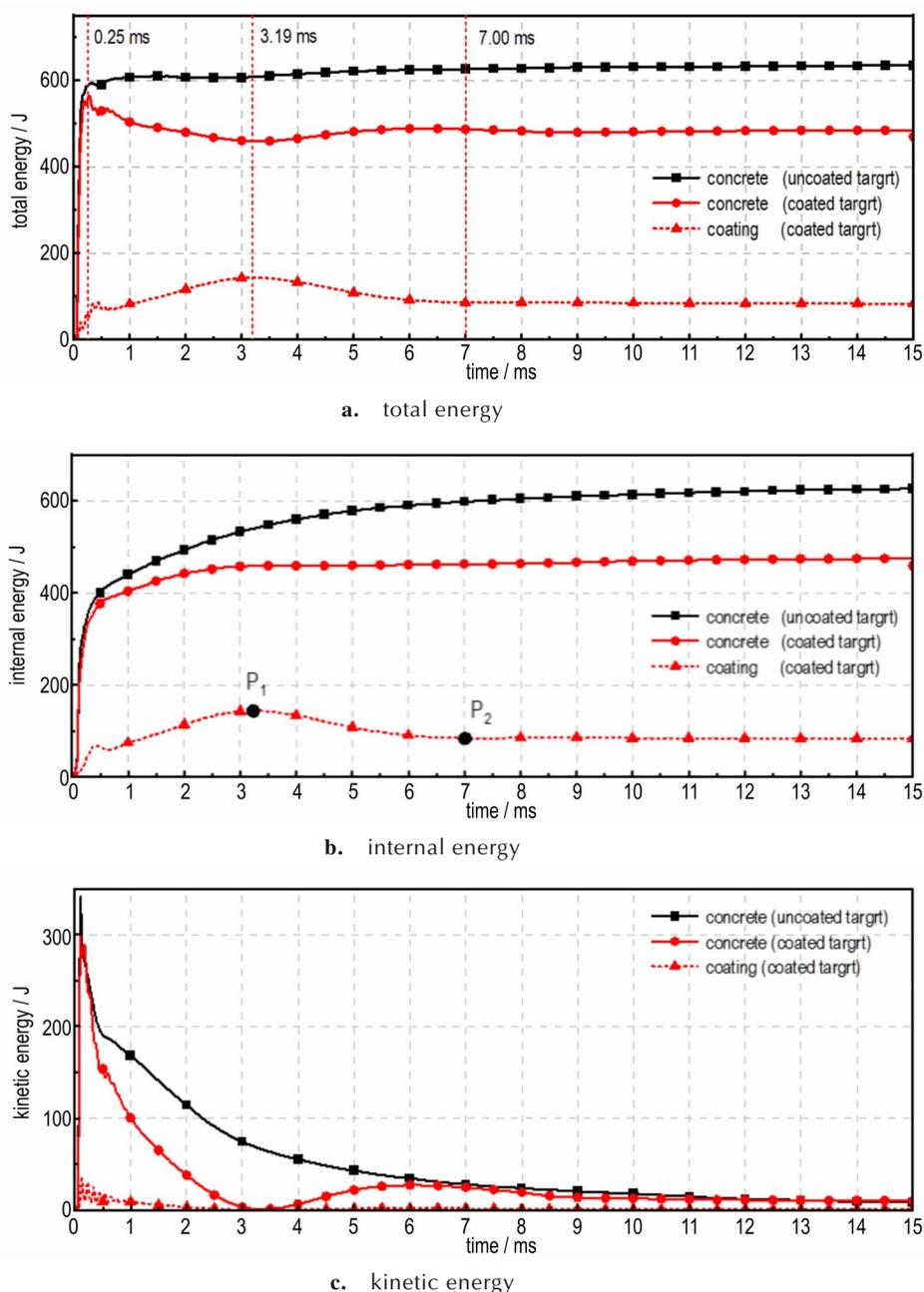


图 11 材料的能量吸收曲线

Fig.11 Energy absorption curves of materials

## 5 靶板反直观行为的影响因素分析

### 5.1 装药药量的影响

为了研究不同荷载对涂层混凝土靶板反直观行为的影响规律,开展了不同药量爆炸荷载作用于涂层混凝土靶板的数值模拟。TNT药量分别为25,50,75,100 g和150 g,不同药量的药柱长度一致,均为68 mm,药柱的半径分别为8.6,12.2,14.9,17.2 mm和21.1 mm。图12为不同药量下涂层中心点的位移曲线。

由图12可知,当药量为50~100 g时,靶板出现了反直观行为,且在50~100 g内,随着荷载的增加靶板的反直观行为更明显(图12)。这是因为随着药量的增加,涂层释放的弹性势能增加(图13),当药量较低时(25 g),涂层释放的能量较少,不足以使靶板发生反直观行为;在中等药量下(50~100 g),涂层释放的能量足以使靶板发生反直观行为,且随着药量的增加反直观行为更明显;当药量为较高时(150 g),载荷强度过高,使得涂层和混凝土大面积脱粘(图14),涂层释

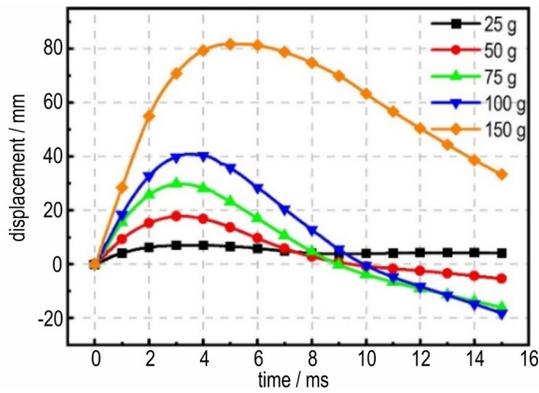
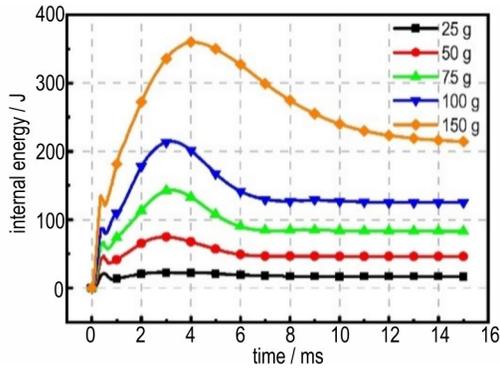
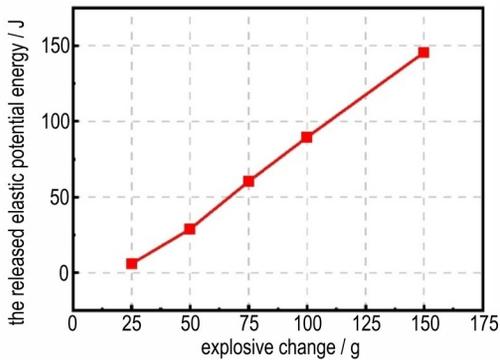


图 12 不同药量下涂层中心点的位移曲线

Fig.12 Displacement curves of coating center point for different charge masses



a. internal energy change



b. released elastic potential energy

图 13 不同药量下涂层的内能曲线

Fig.13 Internal energy curves of coating with different charge masses

放的能量无法有效地传递给混凝土,故靶板也无法发生反直观行为。

### 5.2 涂层厚度的影响

为了研究涂层厚度对涂层混凝土靶板反直观行为的影响规律,开展了不同涂层厚度的涂层混凝土靶板在 75 g TNT 爆炸下的数值模拟,涂层的厚度从 2 mm 到 8 mm 不等。图 15 为不同涂层厚度下涂层的损伤。

由图 15 可见,随着涂层厚度的提高,涂层内侧的

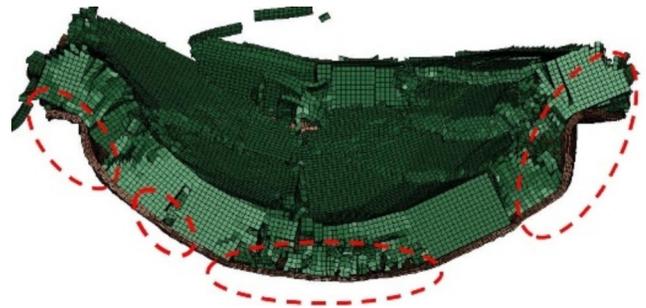


图 14 粘结层失效

Fig.14 Coating adhesion failure

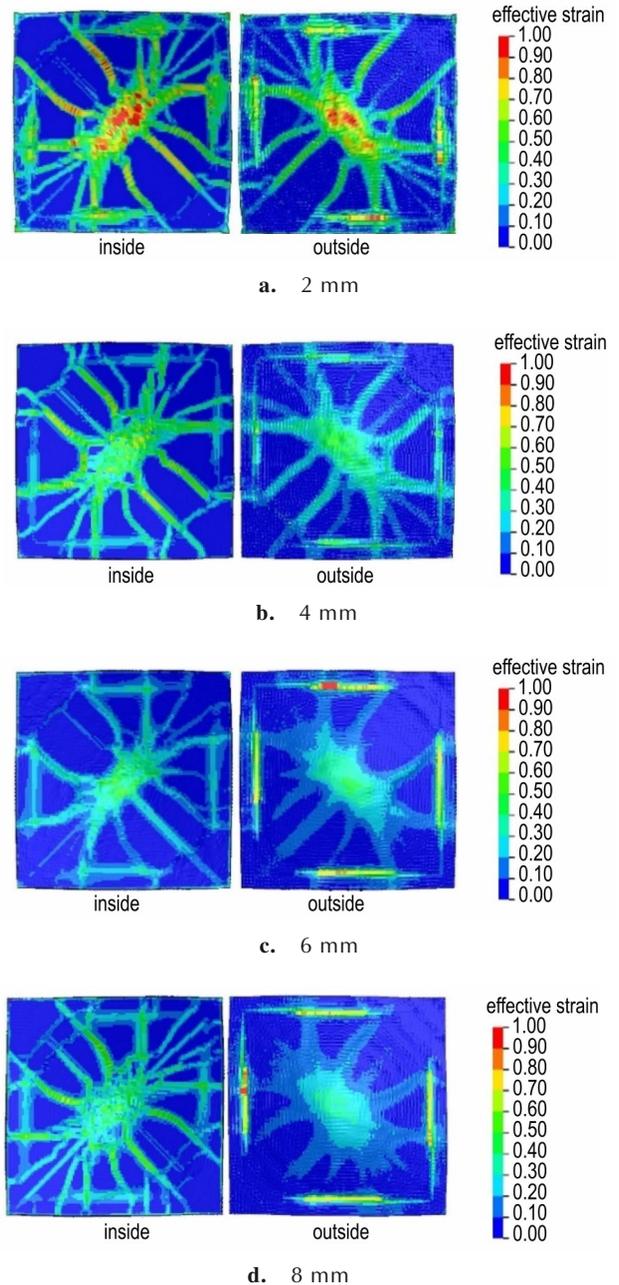


图 15 不同涂层厚度下涂层的损伤

Fig.15 Damage of coatings with different coating thicknesses

损伤面积无明显变化,而涂层外侧的损伤面积呈减小的趋势。在2 mm和4 mm时涂层内侧和外侧的损伤面积基本一致。但当涂层厚度为8 mm时,涂层的外层损伤面积明显小于涂层内侧,这是由于涂层较厚时,涂层两侧的受力状态差别较大,在爆炸荷载作用下的变形程度不一致。当涂层较薄时,涂层整体都可发挥吸能作用;当涂层较厚时,内侧的涂层起主要的吸能作用。

表4为不同涂层厚度下靶板变形的特征参数。由表4可知,涂层厚度为2 mm时,涂层中心点的最大位移明显高于4~8 mm下涂层中心点位移。在4~8 mm下,涂层中心点的最大位移相近。这是由于随着涂层厚度的增加,涂层在相同面积下吸收的能量更多;当涂层较厚时,随着涂层厚度的增加,涂层发生变形的面积减少(图16),故涂层的有效吸能面积减少。综上所述可知,涂层厚度与涂层防护性能并非线性关系,当涂层厚度达到4 mm后,继续提高涂层厚度并不会显著提高靶板的防护性能。

在75 g TNT爆炸荷载作用下,不同涂层厚度下涂

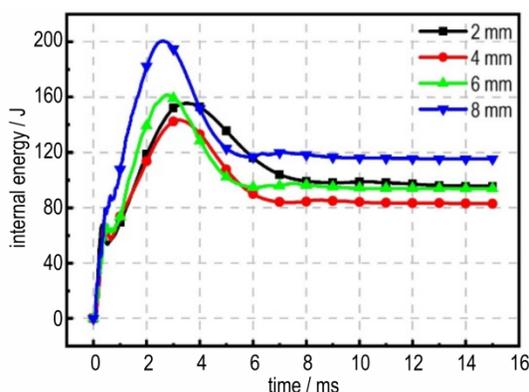
层的挠度均与荷载作用方向相反(表4),即靶板最终都会发生反直观行为,但弯曲程度不同。靶板的弯曲程度与涂层厚度并非正相关,当涂层厚度在2 mm到6 mm范围内时,靶板的挠度随着涂层的厚度的增加而增加,当涂层厚度为8 mm时,靶板挠度明显低于6 mm时的挠度(表4)。这是因为当涂层较薄(2 mm、4 mm)时,涂层整体的应变较大,涂层释放的能量主要使靶板发生弯曲变形(图17a-b),随着涂层厚度的增

表4 不同涂层厚度下靶板变形的特征参数

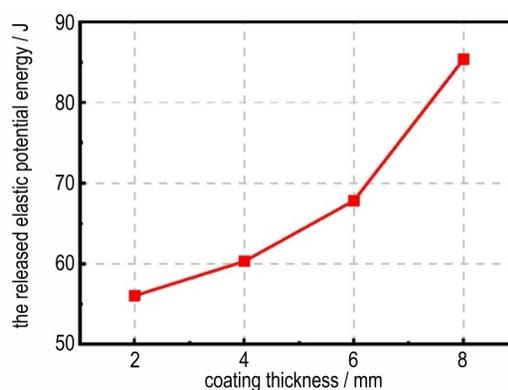
Table 4 Characteristic parameters of target plate deformation for different coating thicknesses

coating thickness / mm	$S_{\max}$ / mm	$S_f$ / mm	$W_f$ / mm
2	39.26	-10.50	-10.50
4	29.81	-16.05	-16.05
6	29.87	-29.87	-21.63
8	28.56	-26.02	-15.39

Note:  $S_{\max}$  is the maximum displacement of coating center point.  $S_f$  is the final displacement of coating center point.  $W_f$  is the final deflection of target plate.



a. internal energy change



b. released elastic potential energy

图16 不同涂层厚度下涂层的内能

Fig.16 Internal energy curves of coatings with different coating thicknesses

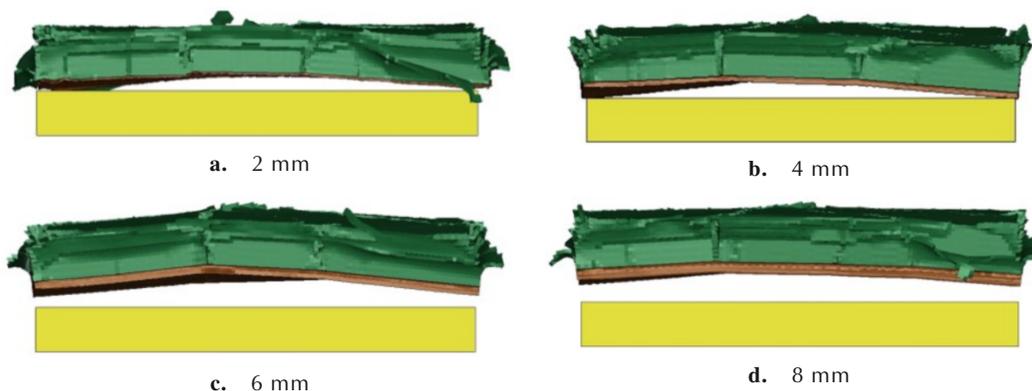


图17 不同涂层厚度下模型的最终形态

Fig.17 The final morphology of the model with different coating thicknesses

加,涂层释放的能量增加(图16),靶板的挠度增加;当涂层较厚时(8 mm),涂层的整体应变较小(图15),在回弹过程中会限制靶板的弯曲变形,使得靶板整体运动(图17c-d),故而靶板的挠度较小。综上可知,涂层厚度并不能决定靶板反直观行为是否发生,但会改变靶板反直观行为的弯曲程度,涂层厚度较低时,涂层厚度越高,靶板弯曲程度越高;当涂层厚度较高时,随着涂层厚度的提高,靶板的弯曲程度降低。

## 6 结论

本研究通过数值模型研究了背爆面喷涂柔性聚脲的混凝土靶板在爆炸荷载作用下的动态响应规律,从能量变化的角度重点分析了反直观行为的发生机理。在此基础上,研究了炸药药量和聚脲涂层厚度对背爆面柔性聚脲涂层防护混凝土靶板反直观行为的影响规律,具体结论如下:

(1)背爆面柔性聚脲涂层防护靶板的反直观行为是由柔性聚脲弹塑性变形引起的应变能释放、混凝土靶板脆性破坏引起的能量耗散及两种材料间能量的相互转化共同作用导致的;

(2)炸药药量是决定靶板反直观行为能否发生的关键因素,在中等药量(50~100 g)下,会发生反直观行为,当药量过低时(25 g)时,由于涂层释放的应变能较少而无法发生反直观行为,当药量过高(150 g)时,由于涂层脱粘影响两种材料的能量转化,也无法发生反直观行为;

(3)在本研究的工况下,不同涂层厚度下靶板均发生了反直观行为。靶板反直观行为的弯曲程度与涂层厚度并非正相关,当涂层厚度较低(低于6 mm)时,随着涂层厚度的增加,涂层释放的弹性势能增加,靶板的弯曲程度增加;当涂层厚度较高(高于6 mm)时,随着涂层厚度的增加,在回弹过程中,涂层对靶板弯曲变形的限制作用增强,导致靶板的弯曲程度降低。

### 参考文献:

- [1] 冯加和,董奇,张刘成,等.聚脲弹性体在爆炸防护中的研究进展[J].含能材料,2020,28(4):277-290.  
FENG Jia-he, DONG Qi, ZHANG Liu-cheng, et al. Review on using polyurea elastomer for enhanced blast-mitigation[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2020,28(4):277-290.
- [2] ZHANG R, HUANG W B, LYU P, et al. Polyurea for blast and impact protection: A review[J]. *Polymers*, 2022, 14(13):2670.
- [3] WANG J G, REN H Q, WU X Y, et al. Blast response of polymer-retrofitted masonry unit walls[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2017,128:174-181.
- [4] FALLON C, MCSHANE G J. Impact mitigating capabilities of a spray-on elastomer coating applied to concrete[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2019,128:72-85.
- [5] LI Z, CHEN L, FANG Q, et al. Experimental and numerical study on CFRP strip strengthened clay brick masonry walls subjected to vented gas explosions[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2019,129:66-79.
- [6] WU J, LIU Z C, YU J, et al. Experimental and numerical investigation of normal reinforced concrete panel strengthened with polyurea under near-field explosion[J]. *Journal of Building Engineering*, 2022,46:103763.
- [7] 黄微波.喷涂聚脲弹性体技术[M].北京:化学工业出版社,2005.  
HUANG Wei-bo. *Spray Polyurea Elastomer Technology* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.
- [8] 孙鹏飞,吕平,黄微波,等.喷涂抗爆型聚脲钢筋混凝土板抗爆性能研究[J].材料导报,2021,35(S2):642-648.  
SUN Peng-fei, LYU Ping, HUANG Wei-bo, et al. Research of explosion resistance of sprayed anti-blast polyurea reinforced concrete slab[J]. *Materials Reports*, 2021,35(S2):642-648.
- [9] WANG W, WEI G S, WANG X, et al. Structural damage assessment of RC slab strengthened with POZD coated steel plate under contact explosion[J]. *Structures*, 2023,48:31-39.
- [10] WU G, WANG X, JI C, et al. Experimental and numerical simulation study on polyurea-coated fuel tank subjected to combined action of blast shock waves and fragments[J]. *Thin-Walled Structures*, 2021,169:108436.
- [11] SUN Y X, WANG X, JI C, et al. Experimental investigation on anti-penetration performance of polyurea-coated ASTM1045 steel plate subjected to projectile impact[J]. *Defence Technology*, 2021,17(4):1496-1513.
- [12] ZHANG L, WANG Y T, WANG X, et al. Investigation on the influence mechanism of polyurea material property on the Blast Mitigation of polyurea-steel composite plate[J]. *Structures*, 2022,44:1910-1927.
- [13] 刘保华,徐文龙,王成,等.接触爆炸下聚脲涂层增强钢板的抗爆性能[J].兵工学报,2024,45(5):1637-1647.  
LIU Bao-hua, XU Wen-long, WANG Cheng, et al. Contact explosion resistance of steel plates reinforced with polyurea coating[J]. *Acta Armamentarii*, 2024, 45(5):1637-1647.
- [14] SYMONDS P S, YU T X. Counterintuitive behavior in a problem of elastic-plastic beam dynamics[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1985,52:517-522.
- [15] GALIEV S U. Distinctive features of counter-intuitive behavior of plates and shells after removal of impulse load[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1997,19(2):175-187.
- [16] DONG Q, LI Q M, ZHENG J Y. Further study on counter-intuitive response of single-degree-of-freedom structures[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2011,38(5):305-308.
- [17] 李海旺,树学峰,秦冬祺.球面薄壳在径向朝外脉冲作用下反直观动力响应研究[J].北京工业大学学报,2011,37(1):98-103.  
LI Hai-wang, SHU Xue-feng, QIN Dong-qi. A study of counter-intuitive behaviors of pin-ended thin spherical shell subjected to rectangle impulse loadings[J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2011,37(1):98-103.
- [18] 康婷,许金余,白应生,等.爆炸冲击荷载作用下拱结构的弹塑性

- 动力响应研究[J].兵工学报,2013,34(9):1097-1102.
- KANG Ting, XU Jin-yu, BAI Ying-sheng, et al. Elastic-plastic analysis on dynamic response of arch subjected to explosive impact[J]. *Acta Armamentarii*, 2013,34(9):1097-1102.
- [19] ACKLAND K, ANDERSON C, NGO T D. Deformation of polyurea-coated steel plates under localised blast loading [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2013,51:13-22.
- [20] BORRVALL T, RIEDEL W. The RHT concrete model in LS-DYNA[C]//Proceedings of The 8th European LS-DYNA user conference. 2011: 23-24.
- [21] 吴港,王昕,纪冲,等.高速破片与爆炸冲击波对钢板联合作用的数值模拟分析[J].火工品,2021,(03):24-28.
- WU Gang, WANG Xin, JI Chong, et al. Numerical simulation analysis of combined action of high-speed fragments and explosion shock wave on steel plate [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2021, (03):24-28.

## Counter-Intuitive Behavior of Flexible Polyurea-Protected Concrete Target Plate on Back Blast Surface under Blast Load

XU Hao<sup>1</sup>, ZHANG Rui<sup>1,2</sup>, HUANG Wei-bo<sup>2,3</sup>, DONG Qi<sup>1</sup>, HU Jun-hua<sup>1</sup>, LIANG Long-qiang<sup>3</sup>

(1. Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621999, China; 2. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China; 3. Qingdao Shamu Advanced Material Co., Ltd., Qingdao 266108, China)

**Abstract:** The final deformation of a metal structure under impulsive load occurring in the direction opposite to that of loading, which is a phenomenon known as counter-intuitive behavior. It was found that the flexible polyurea-protected concrete target plate on the back blast surface also experienced counter-intuitive behavior under 75 g TNT blast load. To investigate the counter-intuitive behavior of the flexible polyurea-protected concrete target plate on the back blast surface under blast load, a finite element model of the back blast surface of the flexible polyurea-protected concrete target plate subjected to blast load was developed using the ANSYS/LS-DYNA finite element software. The finite element model was utilized to analyze the dynamic response regularity of the flexible polyurea sheltered concrete target plate on the back blast surface, and to study the occurrence mechanism of the target plate's counter-intuitive behavior from the perspective of energy. Taking the center point displacement and deflection of the concrete target plate as indexes, the influence of the amount of explosive charge and coating thickness of polyurea on the counter-intuitive behavior of the target plate was analyzed parametrically. The results demonstrate that the counter-intuitive behavior of target plate is attributed to strain energy release from the polyurea coating, energy dissipation from concrete damage, and mutual transformation of energy between both materials. Furthermore, it is found that explosive charge mass is the dominant factor affecting counter-intuitive behavior. The concrete target plate is unable to undergo counter-intuitive behavior when either the charge mass was too small or too large. Within a range of coating thicknesses from 2 mm to 8 mm, an initial increase followed by subsequent decline in bending degree was observed for the target plate exhibiting counter-intuitive behavior.

**Key words:** counter-intuitive behavior; flexible polyurea; concrete target plate; blast load

**CLC number:** TJ5; TJ04; TB34; O383+.2

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2024144

**Grant support:** National Key Research and Development Program of China (No. 2022YFC3320504)

(责编:高毅)