

高压物理学报

接触爆炸下POZD涂覆钢筋混凝土梁的抗爆性能

薛建锋 章琪月 许红浩 汪维 刘涛 夏韬

Blast Resistance of POZD-Coated Reinforced Concrete Beams under Contact Explosion

XUE Jianfeng, ZHANG Qiyue, XU Honghao, WANG Wei, LIU Tao, XIA Tao

引用本文:

薛建锋, 章琪月, 许红浩, 等. 接触爆炸下POZD涂覆钢筋混凝土梁的抗爆性能[J]. 高压物理学报, 2025, 39(5):054203. DOI: 10.11858/gywlb.20240881

XUE Jianfeng, ZHANG Qiyue, XU Honghao, et al. Blast Resistance of POZD-Coated Reinforced Concrete Beams under Contact Explosion[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2025, 39(5):054203. DOI: 10.11858/gywlb.20240881

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11858/gywlb.20240881>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

近场爆炸下波纹双钢板混凝土组合墙板的损伤破坏及抗爆性能

Damage Failure and Anti-Blast Performance of Concrete-Infilled Double Steel Corrugated-Plate Wall under Near Field Explosion
高压物理学报. 2024, 38(1): 014102 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20230727>

栓钉型弧形双钢板混凝土组合板的抗爆性能试验与数值分析

Testing and Numerical Analysis of the Anti-Blast Performance of Curved Steel-Concrete-Steel Composite Slab Using Headed Stud Connectors
高压物理学报. 2024, 38(2): 024202 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20230752>

内置拉结筋聚脲涂覆砌体填充墙 近场抗爆性能和分析方法

Close-Range Blast Resistance and Analytical Methods of Polyurea Coated Masonry Infill Walls with Built-in Tie Reinforcement
高压物理学报. 2025, 39(3): 034202 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20240892>

抗爆型聚脲涂层的性能及其抗爆机理

Blast-Resistant Properties and Mechanism of Anti-Explosion Polyurea Coating
高压物理学报. 2022, 36(2): 024102 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20210840>

钢筋混凝土墙抗冲击性能的数值模拟分析

Numerical Simulation Analysis of Impact Resistance of Reinforced Concrete Wall
高压物理学报. 2020, 34(1): 014201 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20190772>

水下接触爆炸作用下金属/CFRP复合层合板的防护性能

Protective Properties of Metal/CFRP Composite Laminates Subjected to Underwater Contact Explosion
高压物理学报. 2024, 38(6): 065101 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20240801>

接触爆炸下 POZD 涂覆钢筋混凝土梁的抗爆性能

薛建锋¹, 章琪月², 许红浩¹, 汪 维², 刘 涛¹, 夏 韬¹

(1. 中航工业江西洪都航空工业集团有限责任公司 660 所, 江西 南昌 330024;

2. 宁波大学冲击与安全工程教育部重点实验室, 浙江 宁波 315211)

摘要: 为得到接触爆炸下聚脲 (polyisocyanate-oxazodone, POZD) 涂覆钢筋混凝土梁的抗爆性能, 对同一尺寸的钢筋混凝土梁开展了数值模拟研究。采用 HyperMesh 和 LS-DYNA 软件建立 POZD 涂覆钢筋混凝土梁模型, 开展了接触爆炸下 POZD 涂覆钢筋混凝土梁的破坏模式和毁伤效应分析。对普通钢筋混凝土梁在接触爆炸下的破坏模式进行了模拟验证试验, 研究了钢筋混凝土梁结构在不同 POZD 涂层位置 and 不同装药量条件下的破坏模式和毁伤情况, 并对不同 POZD 涂覆位置的防护效果进行了评估, 最后, 将接触爆炸下 POZD 涂覆钢筋混凝土梁划分为 3 个局部毁伤等级。

关键词: 接触爆炸; 钢筋混凝土梁; 聚脲; 抗爆性能; 破坏模式

中图分类号: O381; TU378.2; O521.9

文献标志码: A

21 世纪以来, 国际形势逐渐严峻, 意外爆炸事件、军事打击等频繁发生, 严重威胁人们的生命与财产安全。例如, 2020 年 10 月黎巴嫩贝鲁特的硝酸铵爆炸事件、2023 年巴以冲突爆发后的军事打击等, 均造成了巨大的经济损失和人员伤亡, 建筑物破损严重。我国人口密度较大, 在工业生产过程中也存在爆炸事故导致的人员伤亡情况, 例如: 2019 年 3 月江苏响水的“3·21”特别重大爆炸事故, 同年 4 月内蒙古伊东集团旗下工业园的氯乙烯泄漏爆炸事故。近年来, 国内广泛应用钢筋混凝土梁提高房屋结构的抗爆性能, 然而, 钢筋混凝土梁具有抗拉强度较低、脆性大、延展性差、对爆炸冲击的抵抗能力差等缺点, 约束了各类工程建设的发展。因此, 提高结构的防爆抗爆能力, 是当前亟待解决的重要问题。

聚脲 (polyisocyanate-oxazodone, POZD) 是一种高弹性聚合物, 采用特殊喷涂技术可在各种表面立即成形并迅速达到设计厚度, 因其卓越的抗爆性能在建筑防护领域备受关注, 被广泛应用于建筑物、装甲车中。赵春风等^[1] 研究了近场爆炸作用下 60°配筋钢筋混凝土的动态响应, 分析了板厚、药量、钢筋屈服强度和混凝土强度等因素对抗爆性能的影响规律。Wang 等^[2] 研究了钢板加固和 POZD 涂覆钢板加固的钢筋混凝土板在爆炸载荷下的破坏模式和毁伤效应, 发现 POZD 钢板复合层的整体刚度得到显著提升, 混凝土板在爆炸中产生的冲切贯穿破坏主要是由于压缩波在正面引起开坑, 传播至背面时形成拉伸波, 导致背面层裂和贯穿。

Wang 等^[3] 研究了波纹钢加固钢筋混凝土板和 POZD 涂覆波纹钢加固钢筋混凝土板的抗爆性能, 总结了 4 种破坏模式, 并发现 POZD 涂层能显著提高结构的抗爆性能。吴东等^[4] 对 POZD 喷涂钢筋混凝土柱的抗爆性能进行了分析, 发现增加 POZD 厚度可增强柱的抗爆性能, 但能量吸收随爆炸距离的增大而减小。赵苏政等^[5] 基于 CONWEP 加载方法建立了 POZD 加固钢筋混凝土柱在空爆作用下的响应模型, 发现钢筋混凝土柱的位移与距离呈线性递减关系, 并指出 POZD 材料能有效改善钢筋混凝土

* 收稿日期: 2024-09-02; 修回日期: 2024-09-28

基金项目: 国家自然科学基金 (11302261, 11972201)

作者简介: 薛建锋 (1987—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事目标毁伤评估研究. E-mail: xuejianfeng666@163.com

通信作者: 汪 维 (1983—), 男, 博士, 教授, 主要从事工程结构抗爆毁伤评估研究.

E-mail: wangwei7@nbu.edu.cn

柱的抗爆性能,随着 POZD 厚度的增加,钢筋混凝土柱的位移呈先减小后增大的趋势。徐赵威等^[6]开展了 POZD/钢筋混凝土板接触爆炸试验研究,获取了接触爆炸载荷作用下 POZD/钢筋混凝土板复合结构的 6 种破坏模式。上述研究皆表明,POZD 涂料对于建筑物的防护加固效果非常显著,POZD 力学性能研究对于建筑结构在爆炸载荷下的抗性至关重要。

目前,国内外学者对 POZD 的研究重心主要集中于其对钢筋混凝土板和柱的加固作用,并且大多为空爆载荷作用条件下,对于 POZD 涂层加固钢筋混凝土梁的抗爆性能研究尚不多,特别是在接触爆炸情况下的研究工作^[7-8]。因此,本研究通过对 POZD 涂覆钢筋混凝土梁进行接触爆炸试验,研究其破坏模式和破坏特征、毁伤机理和毁伤效应,以期为建筑结构的抗爆抗冲击毁伤评估和建筑防护工程提供一定的参考依据。

1 有限元模型及其验证

1.1 材料模型

LS-DYNA 有限元分析软件提供了丰富的材料数据库^[9],接触爆炸下 POZD 涂覆钢筋混凝土梁的抗爆性能数值分析主要涉及炸药、空气、支座、钢筋、混凝土和聚脲 6 种材料。

炸药采用 *MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN(*MAT_008)模型,该模型提供炸药材料的密度、爆炸速度以及压力等相关参数,采用 *EOS_JWL 状态方程描述压力、比容和温度三者的关系^[10]

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

式中: p 为爆炸压力, V 为相对体积, A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 ω 为状态方程参数, e 为内能密度,TNT 炸药的具体参数见表 1^[11],其中: ρ 为密度, D_{CJ} 为 CJ 爆速, p_{CJ} 为 CJ 爆压。

表 1 炸药的相关参数^[11]
Table 1 Parameters of explosives^[11]

$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$D_{CJ}/(\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	p_{CJ}/GPa	A/GPa	B/MPa	R_1	R_2	ω
1.63	0.693	21	371.200 1	32.31	4.15	0.95	0.3

空气采用 *MAT_NULL(*MAT_009)材料模型,采用 *EOS_LINEAR_POLYNOMIAL 线性多项式状态方程,其表达式^[10]为

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

式中: $C_0 \sim C_6$ 为状态方程参数; $\mu = \rho/\rho_0 - 1$, ρ 为空气的当前密度, ρ_0 为初始时刻的空气密度。空气的相关参数^[12]见表 2。

表 2 空气相关参数^[12]
Table 2 Parameters of air^[12]

$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
1.29	0	0	0	0	0.4	0.4	0

支座采用 *MAT_RIGID 材料模型,该模型可以比较真实地模拟支座在接触爆炸下支撑钢筋混凝土梁的状态,支座的相关参数见表 3^[3],其中: E 为弹性模量, ν 为泊松比。

表 3 支座材料参数^[3]
Table 3 Parameters of support materials^[3]

$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	E/GPa	ν
7.83	210	0.30

钢筋采用***MAT_PLASTIC_KINEMATIC** 材料模型。在接触爆炸下, 钢筋材料会经历高应变率作用过程, 材料强度可提高约 50%^[13], 因此, 选择塑性随动模型, 该模型参数中自带 F_s 失效准则, 能够满足需求, 钢筋的材料参数见表 4^[14], 其中: F_s 为钢筋断裂应变, σ_s 为屈服强度。

表 4 钢筋材料参数^[14]
Table 4 Parameters of reinforcement bar^[14]

$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	E/GPa	ν	σ_s/GPa	F_s
7.89	206	0.30	1.724	0.500

混凝土采用***MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3**(***MAT_072**)材料模型, 此模型可以有效模拟混凝土材料在高应变率、大变形下的力学形态^[10], 通过定义关键字***DEFINE_CURVE** 调用 **LCRATE723** 曲线设定材料的应变率效应。混凝土相关材料参数取值见表 5^[14], 其中: A_0 为初始抗压强度, R_{size} 、 w_{UCF} 为单位转换数值, L_{CRATE} 为所要调用的曲线号。

表 5 混凝土材料参数^[14]
Table 5 Parameters of concrete^[14]

$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	A_0/MPa	$R_{\text{size}}/(\text{m/inches})$	$w_{\text{UCF}}/(\text{Pa/PSI})$	L_{CRATE}
2.30	-45.4	3.94×10^{-2}	145	723

由于接触爆炸下混凝土单元会出现大变形, 导致网格畸变, 当变形超过一定阈值时会终止计算, 因此, 控制混凝土单元失效需要定义关键词***MAT_ADD_EROSION**。

POZD 材料采用 LS-DYNA 材料库中的***MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY** 模型。根据美国空军实验室对 POZD 在不同应变率下的 165 次测量实验, 可以使用特殊的应力-应变曲线定义材料性能^[15]。汪维课题组^[16-20]通过测量获得了不同应变率下 POZD 材料的应力-应变曲线, 如图 1 所示。由于该模型为多线段弹塑性材料模型, 既可以输入不同应变率下的应力, 又能够定义断裂应变^[9]。本研究将 POZD 的拉伸失效应变定义为 1.85, POZD 的材料参数见表 6^[6], 其中: σ_Y 为屈服应力, G 为剪切模量。

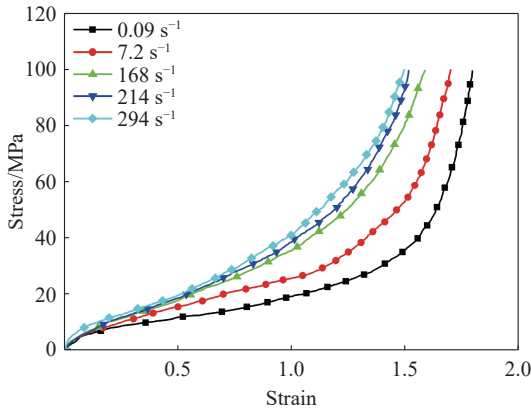


图 1 不同应变率下 POZD 的应力-应变曲线^[16-20]
Fig. 1 Stress-strain curves of POZD at different strain rates^[16-20]

表 6 POZD 的相关参数^[6]
Table 6 Parameters of POZD^[6]

$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	E/MPa	ν	σ_Y/MPa	G/MPa
1.02	230	0.4	1.38	3.5

1.2 验证试验及数值建模

根据王辉明等^[13] 针对相同尺寸的钢筋混凝土 (reinforced concrete, RC) 梁进行的不同装药量的接触爆炸试验, 作为 POZD 涂覆试验梁的参照对象以及数值模拟结果验证对象。

1.2.1 验证试验简介

验证试验场地布置^[13]如图 2 所示,钢筋混凝土梁有限元模型的截面尺寸和配筋情况如图 3 所示。钢筋配筋率为 2.33%,混凝土强度等级为 C30。试验梁的长度为 6 600 mm,截面尺寸为 350 mm×500 mm,截面厚度为 15 mm,通过 380 mm 宽的肢脚固定。如图 3(b) 所示,顶面两角有 2 根直径为 22 mm 的钢筋,中间有 4 根直径为 20 mm 的钢筋,钢筋之间的间距 60 mm;底面角部有 2 层 4 根直径为 22 mm 的钢筋;底面中间有 2 根直径为 14 mm 的钢筋,间距为 60 mm;左右两表面中间各有 2 根直径为 12 mm 钢筋。纵向钢筋均为 HRB400 带肋钢筋。为防止剪切破坏,在两端 1 140 mm 范围内进行直径为 8 mm 的箍筋加密,直径为 8 mm 的钢筋间距为 100 和 200 mm。

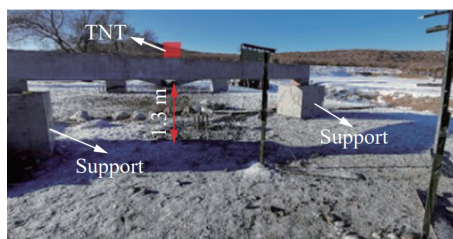
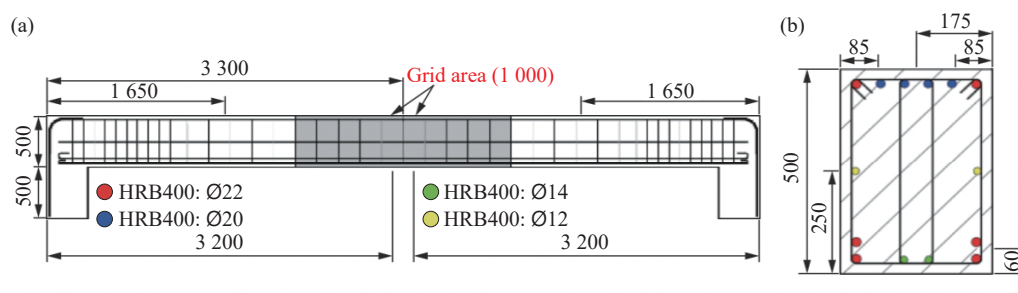
图 2 试验布置^[13]Fig. 2 Test arrangement^[13]

图 3 试验梁结构尺寸及配筋情况(单位: mm)

Fig. 3 Dimensions and reinforcement diagram of RC beam (Unit: mm)

在爆炸试验中,炸药体积为 10 cm×5 cm×2.5 cm,质量为 200 g 的 TNT 标准药块集团装药,密度为 1 630 kg/m³。为了便于梁的安装固定,试验设计了 2 对尺寸为 1 000 mm×950 mm×1 300 mm 的混凝土支撑台,支撑台上预留了 50 mm 的梁肢转角安装缝隙,如图 4 所示。

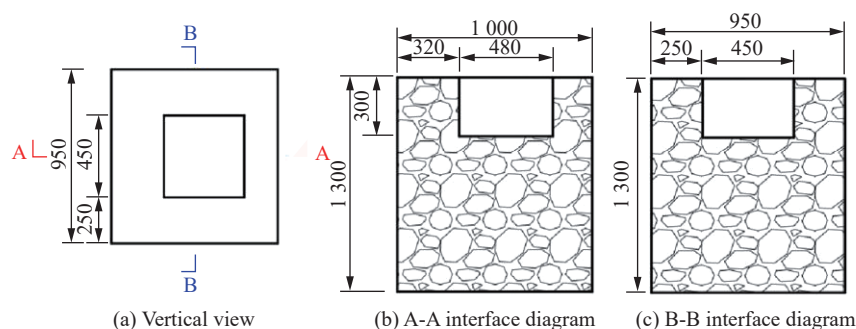


图 4 混凝土支撑台(单位: mm)

Fig. 4 Concrete support platform (Unit: mm)

1.2.2 建立有限元模型

依据文献[13]中的试验建立钢筋混凝土梁接触爆炸有限元模型,如图 5 所示。模型包含混凝土梁、支座、空气、炸药和钢筋 5 部分。为真实模拟 TNT 炸药的作用,采用任意拉格朗日-欧拉(arbitrary lagrange-euler, ALE)流固耦合算法模拟炸药、空气与钢筋混凝土梁之间的相互作用。钢筋采用梁单元,其余部分采用实体单元进行描述,混凝土单元尺寸为 10 mm×10 mm×10 mm; TNT 炸药装药形状为长方体,位于 RC 梁上方,空气、炸药单元尺寸为 20 mm×20 mm×20 mm。空气和炸药的网格与钢筋混凝土梁和支柱网格大小之比控制在 2:1 以内^[9],否则计算精度会大幅降低。

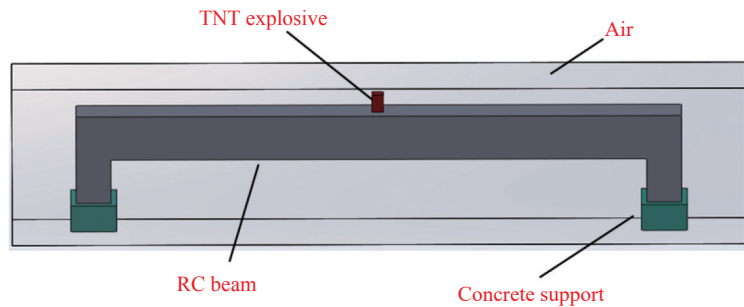


图 5 RC 梁有限元模型

Fig. 5 Finite element model of RC beam

POZD 涂覆钢筋混凝土梁的结构建模并不复杂, 在根据试验^[13]建立钢筋混凝土梁模型的基础上, 通过 HyperMesh 软件, 只需在梁上需要涂覆 POZD 的位置使用 DRAG(Hypermesh 软件中的拖拉按钮)将表面网格拉伸出 0.2 cm 即可。空气和炸药网格无需重新删除再建立, 因为空气和炸药的网格属于 ALE 网格, 与钢筋混凝土梁及支柱的网格无需共节点。在保证 POZD 用量一致的情况下(厚度皆为 0.2 cm), 分别在 RC 梁底部 500 cm 处(Model A)、顶部 250 cm 和底部 250 cm 处(Model B)、四周 103 cm 处(Model C)涂覆 POZD, 如图 6 所示。

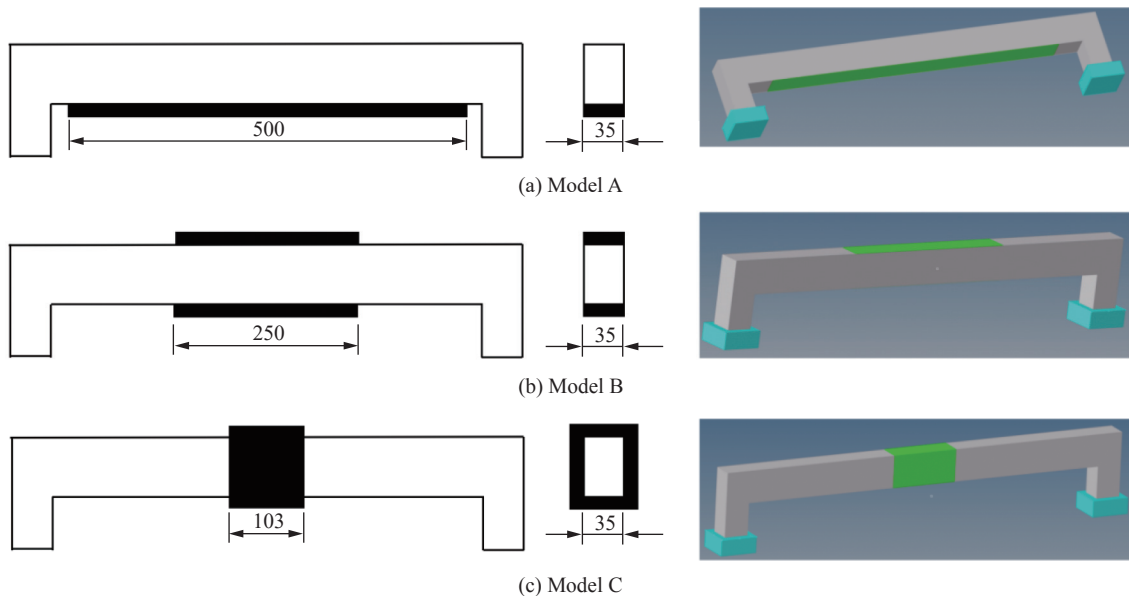


图 6 3 种涂覆位置 RC 梁有限元模型(单位: mm)

Fig. 6 Finite element models of RC beam of three positions of POZD coated (Unit: mm)

1.2.3 模型验证

通过对比王辉明等^[13]的接触爆炸试验结果与数值模拟获得的 RC 梁的破坏模式和尺寸, 验证数值模型的正确性。图 7 为 6 kg TNT 接触爆炸下 RC 梁数值模拟结果与实际破坏形态的对比情况。6 kg TNT 接触爆炸下, 爆点处迎爆面形成了最深达 221 mm 的爆炸坑; 迎爆面混凝土破坏长度为 1337 mm, 背爆面混凝土破坏长度为 1450 mm; 迎爆面 6 根纵筋弯曲形成了碗状凹坑, 中间 1 根箍筋散开并断落, 2 根箍筋严重变形; 侧面纵筋弯曲明显, 较大面积混凝土剥落; 背爆面 4 根纵筋暴露, 无明显弯曲, 表层混凝土多处碎块崩落。

表 7 为 6、8、16 kg TNT 工况下 RC 梁迎爆面、背爆面的数值模拟结果与试验结果的对比。总体上看, 3 种工况下 RC 梁的数值模拟效果较好。迎爆面破坏长度、背爆面破坏长度以及爆坑深度的数值模拟与试验结果的误差皆在允许范围内, 而跨中位移的误差相对较大。这可能是由于重力对梁的影响较大, 致使跨中位移的试验结果相对较大, 而数值模拟时未对梁施加重力, 并且计算时间只有 0.01 s(梁的

尺寸太大, 计算太耗时), 梁还未来得及向下移动便停止计算, 因此, 数值模拟结果中的跨中位移相比实际情况要小。

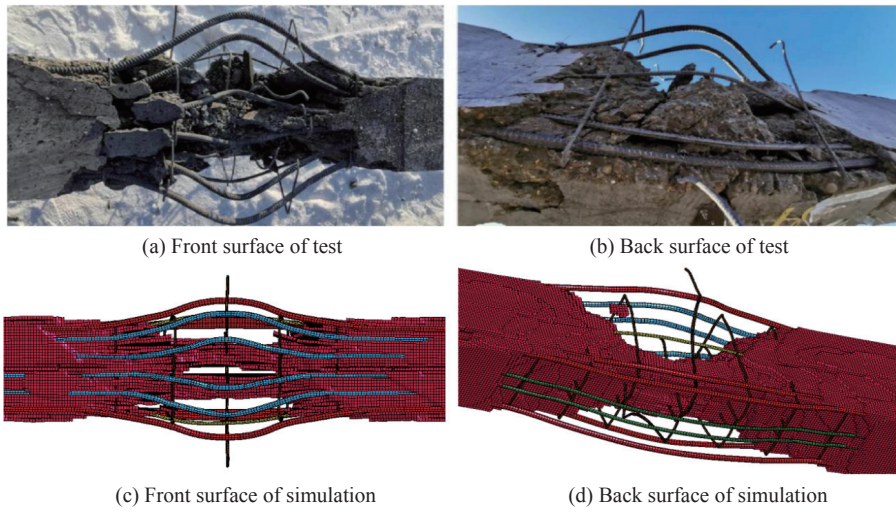


图 7 6 kg TNT 接触爆炸下 RC 梁的数值模拟结果与实际破坏形态对比

Fig. 7 Comparison of the simulation results of RC beam with the actual damage form under 6 kg TNT

表 7 3 种工况下 RC 梁的数值模拟与试验结果对比

Table 7 Comparison of RC beam numerical simulation and test results

Mass of TNT/kg	Midspan displacement			Failure length of front surface			Failure length of back surface			Depth of crater		
	Test/mm	Sim./mm	Error/%	Test/mm	Sim./mm	Error/%	Test/mm	Sim./mm	Error/%	Test/mm	Sim./mm	Error/%
6	330	269	18.4	1400	1337	4.5	1480	1450	2.0	210	221	5.2
8	900	805	10.6	1470	1412	3.9	1500	1628	8.5	255	269	5.5
16	Fracture	Fracture		1900	1790	5.8	1690	1805	6.8	Perforation	Perforation	

2 POZD 涂覆 RC 梁接触爆炸数值模拟结果

由 1.2.3 节中的模型验证可知, 接触爆炸下 RC 梁的验证试验数值模拟结果与试验结果符合较好, 在此基础上, 对 POZD 涂覆在不同位置的 RC 梁(Model A~Model C)进行 6、8、16 kg 3 种工况下的接触爆炸数值模拟。

2.1 6 kg TNT 接触爆炸下 POZD 涂覆 RC 梁数值模拟结果

图 8~图 10 分别给出了 6 kg TNT 工况下, POZD 涂覆在不同位置(Model A~Model C)时 RC 梁的数值模拟破坏形态。

对于 Model A 而言, 爆点处迎爆面形成了最深达 211 mm 的爆炸坑, 迎爆面混凝土破坏面长度为 868 mm, 背爆面混凝土完好, 只有小块区域混凝土发生变形; 迎爆面 3 根纵筋断裂, 另外 3 根发生轻微弯曲; 中间 1 根箍筋散开并断落, 2 根箍筋小幅变形; 侧面纵筋弯曲很小, 部分混凝土剥落。

在 Model B 中, 爆点处迎爆面形成了最深达 206 mm 的爆炸坑, 迎爆面混凝土破坏面长度为 744 mm, 背爆面混凝土基本完好, 两小块混凝土剥落; 迎爆面 4 根纵筋断裂, 2 根纵筋变形很小; 中间 1 根箍筋上侧散开; 侧面纵筋弯曲很小, 较少混凝土剥落。

在 Model C 中, 爆点处迎爆面形成了最深达 167 mm 的爆炸坑, 迎爆面混凝土破坏面长度为 712 mm, 背爆面混凝土完好无剥落, 混凝土单元变形很小; 迎爆面中间 3 根纵筋断裂, 外侧 2 根纵筋发生弯曲; 中间 1 根箍筋上侧散开, 其他基本完好; 侧面纵筋基本无弯曲, 混凝土只有表层存在较多剥落, 其他位置的剥落情况相对很少。

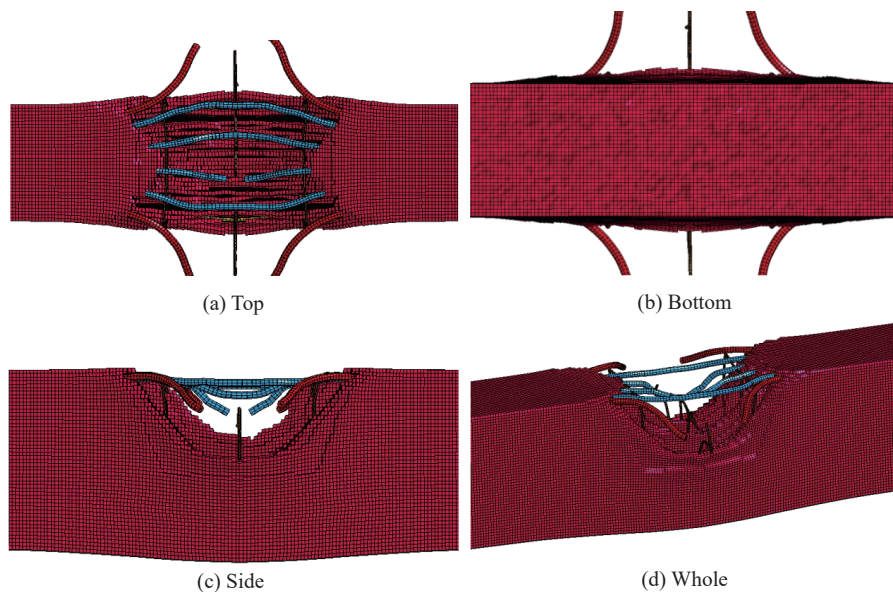


图 8 6 kg TNT 工况下 Model A 的数值模拟结果

Fig. 8 Simulation results of Model A under 6 kg TNT condition

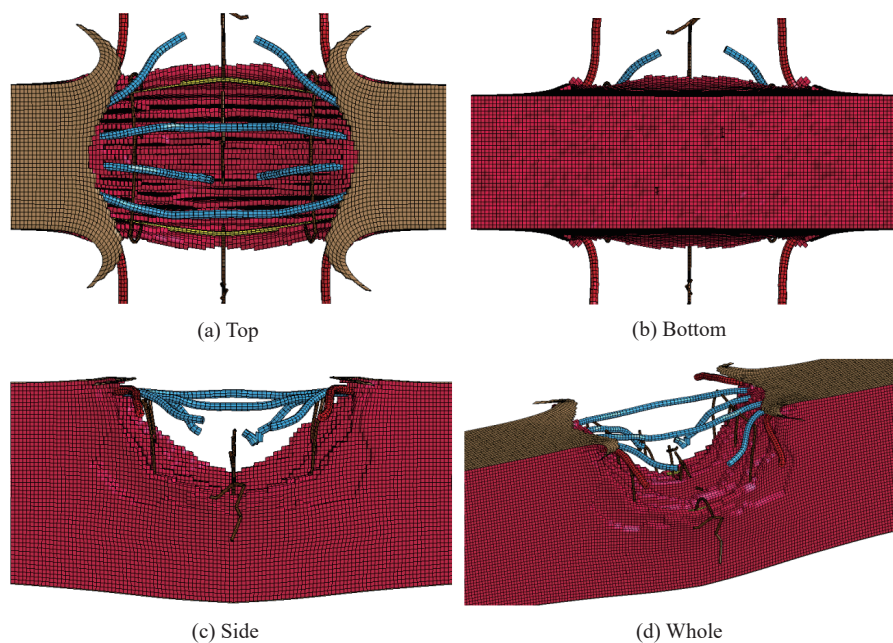


图 9 6 kg TNT 工况下 Model B 的数值模拟结果

Fig. 9 Simulation results of Model B under 6 kg TNT condition

表 8 为 6 kg TNT 接触爆炸下, 无涂覆 RC 梁(RC)和 3 种 POZD 涂覆位置 RC 梁(Model A~Model C)的迎爆面、背爆面数值模拟结果。总体来看, POZD 对梁在接触爆炸下的保护效果非常显著, 尤其表现在对背爆面的保护作用, 并且 Model A~Model C 的保护作用逐渐递增, 加固效果最好的是四周包裹 POZD(Model C), 效果最差的是只在底部涂覆 POZD(Model A)。值得注意的是, 在背爆面破坏长度方面, Model A 显示完好, 而 Model B 反而出现较少的混凝土剥落, 出现这种情况的原因可能是, 当迎爆面表层有保护层时(尤其是 POZD 这种高弹性聚合物), 爆炸瞬间梁受力时间延长, 使得底部混凝土变形超过阈值从而剥落。然而, 由于爆炸作用时间太短, 这种效果不会带来太大影响, 所以只有 2 块很小的混凝土单元删除。

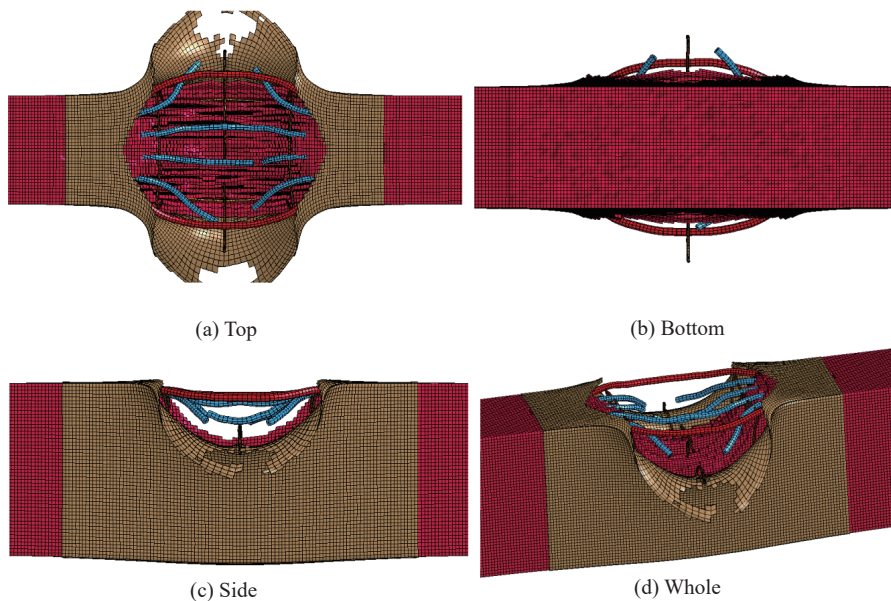


图 10 6 kg TNT 工况下 Model C 的数值模拟结果

Fig. 10 Simulation results of Model C under 6 kg TNT condition

表 8 6 kg TNT 工况下迎爆面和背爆面的数值模拟结果

Table 8 Simulation results of the front and back surface of RC beam under 6 kg TNT

Model	Failure length of front surface/mm	Failure length of back surface/mm	Depth of crater/mm
RC	1337	1450	221
A	868	Good	211
B	744	Less peeling	206
C	712	Good	167

2.2 8 kg TNT 接触爆炸下 POZD 涂覆钢筋混凝土梁数值模拟结果

图 11~图 13 分别给出了 8 kg TNT 工况下 POZD 涂覆在 Model A~Model C 时的顶部、底部、侧面和整体破坏形态。

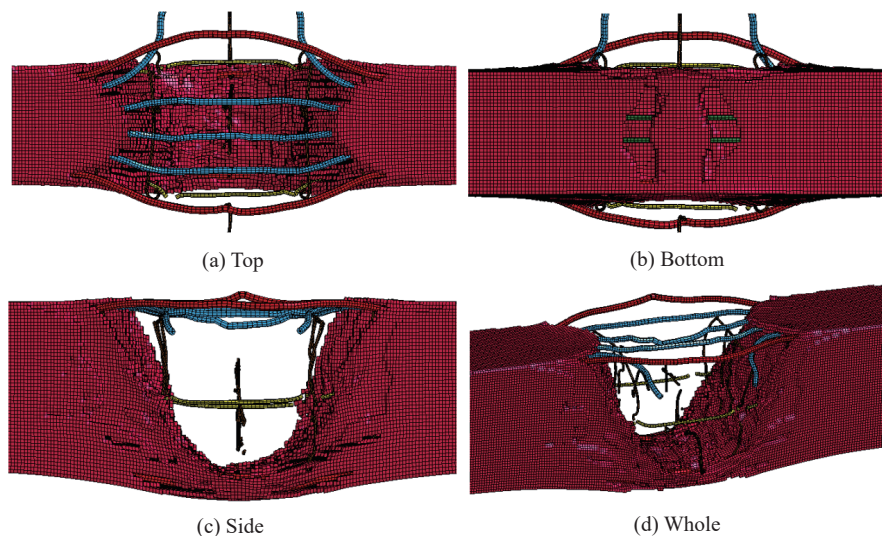


图 11 8 kg TNT 工况下 Model A 的数值模拟结果

Fig. 11 Simulation results of Model A under 8 kg TNT condition

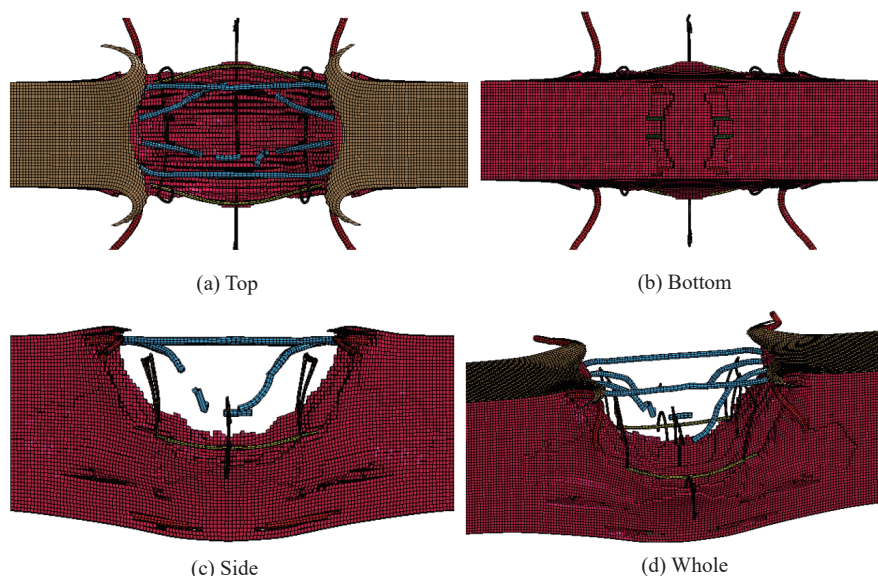


图 12 8 kg TNT 工况下 Model B 的数值模拟结果

Fig. 12 Simulation results of Model B under 8 kg TNT condition

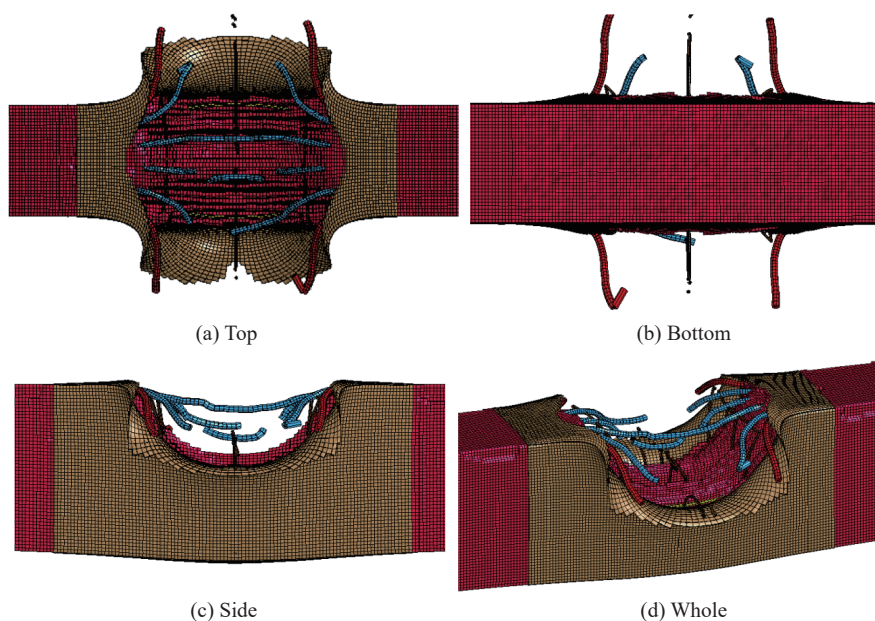


图 13 8 kg TNT 工况下 Model C 的数值模拟结果

Fig. 13 Simulation results of Model C under 8 kg TNT condition

表 9 为 8 kg TNT 接触爆炸下无涂覆 RC 梁和 POZD 涂覆不同位置时 RC 梁的数值模拟结果对比。总体来说, 8 kg TNT 工况下, Model A~Model C 的保护效果与 6 kg TNT 工况下大体一致, 四周包裹 POZD 的加固效果最好, 只在底部涂覆 POZD 的加固效果最差。但是, 爆坑深度发生了较大改变, Model A 和 Model B 的爆坑深度甚至比无涂覆 RC 梁还要深, 这是爆坑形状不同造成的。当 RC 梁表面没有涂料保护时(尤其当 TNT 当量相对较大时), 接近迎爆面和背爆面的混凝土单元受力更大, 达到阈值后删除, 留下的是中间部分混凝土单元, 形成的爆坑形状为“()”形; 而当 RC 梁背爆面有涂料保护时, POZD 这种高弹性聚合物为接近背爆面的混凝土单元提供了极大的缓冲作用, 使其受力大幅减小, 从而不会形成接近背爆面向上的爆坑, 整体上形成一个碗状“U”形爆坑。正是因为接近背爆面的混凝土单元不会在爆炸瞬间立刻消失, 导致中间和上面的混凝土单元受力时间延长, 进而使得整体上接近迎爆面的爆坑深度变大, 因此, Model A 和 Model B 的爆坑深度比无涂覆 RC 梁要深, 而四周包裹 POZD 时,

爆坑深度并没有加深,比无涂覆 RC 梁时浅,恰恰说明四周包裹 POZD 的加固效果远优于底部和顶部涂覆的加固效果。

表 9 8 kg TNT 工况下迎爆面和背爆面的数值模拟结果

Table 9 Simulation results of the front and back surface of RC beam under 8 kg TNT

Model	Failure length of front surface/mm	Failure length of back surface/mm	Depth of crater/mm
RC	1 412	1 628	269
A	957	Less peeling	412
B	865	Less peeling	289
C	726	Good	213

2.3 16 kg TNT 接触爆炸下 POZD 涂覆 RC 梁数值模拟结果

图 14~图 16 为 16 kg TNT 接触爆炸下 POZD 涂覆在底部、底部和顶部、四周的 RC 梁的破坏形态。

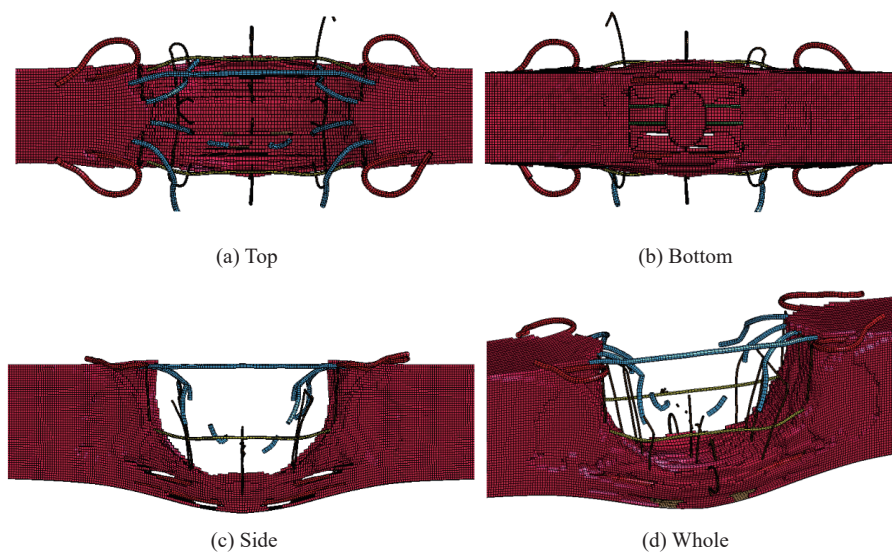


图 14 16 kg TNT 工况下 Model A 的数值模拟结果

Fig. 14 Simulation results of Model A under 16 kg TNT condition

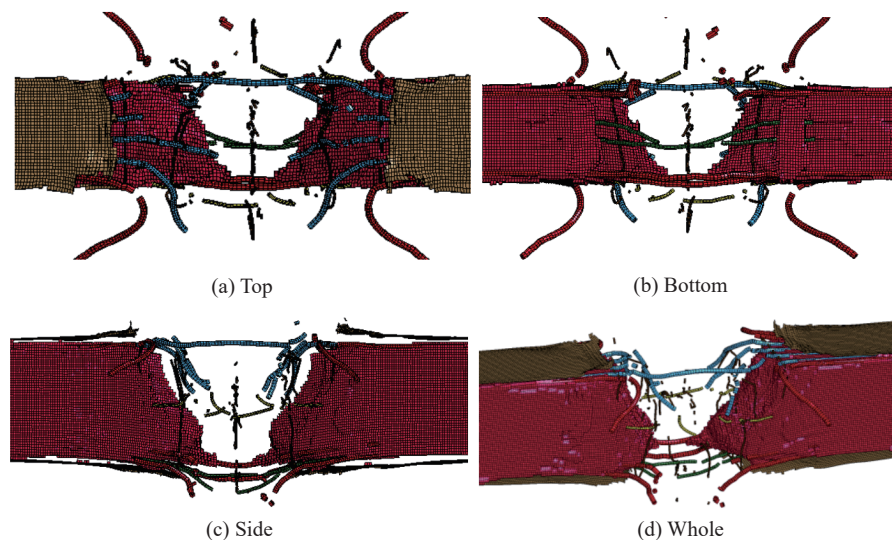


图 15 16 kg TNT 工况下 Model B 的数值模拟结果

Fig. 15 Simulation results of Model B under 16 kg TNT condition

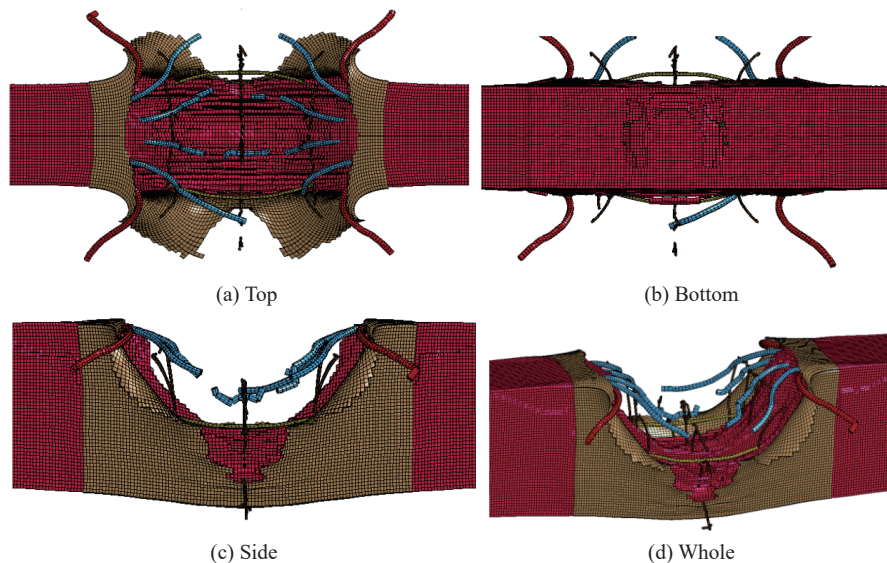


图 16 16 kg TNT 工况下 Model C 的数值模拟结果

Fig. 16 Simulation results of Model C under 16 kg TNT condition

表 10 为 16 kg TNT 接触爆炸下无涂覆 RC 梁以及 POZD 涂覆不同位置 RC 梁的迎爆面和背爆面数值模拟结果对比。可以看出：Model C 的加固效果最好，与 6、8 kg TNT 工况时不同，当 TNT 当量增加到 16 kg 时，Model B 的加固效果最差，并且保护效果不明显，尤其在背爆面破坏长度和爆坑深度方面，甚至比无涂覆 RC 梁还要差。其原因与 8 kg 工况相似，当 TNT 当量很大时，爆坑形状由“(”形(RC 梁)变成了“U”形(加固梁)，接近背爆面混凝土单元的延时删除使得中间和上面的混凝土单元受力时间增长，进而导致接近迎爆面的爆坑变得更深。而在 16 kg TNT 接触爆炸下 Model B 的加固效果之所以比 Model A 还要差，是因为迎爆面的 POZD 涂料延长了下方所有混凝土单元的受力时间，尤其当 TNT 当量达到 16 kg 时特别明显，所以总体上 Model B 的加固效果显得格外差，与无涂覆 RC 梁相比，其保护作用微乎其微。

表 10 16 kg TNT 工况下迎爆面和背爆面的数值模拟结果

Table 10 Simulation results of the front and back surface of RC beam under 16 kg TNT

Model	Failure length of front surface/mm	Failure length of back surface/mm	Depth of crater/mm
RC	1 790	1 805	Perforation
A	1 258	More peeling	482
B	1 545	1 626	Perforation
C	945	Less peeling	329

3 接触爆炸下 POZD 涂覆 RC 梁的破坏模式和局部毁伤

3.1 破坏模式

由第 2 节 POZD 涂覆 RC 梁接触爆炸数值模拟结果，总结出 6、8、16 kg TNT 接触爆炸下 POZD 涂覆 RC 梁的 4 种破坏模式。

(1) 正面开坑破坏。爆坑呈“U”形，在 POZD 保护下正面混凝土单元和钢筋的受力时间延长，导致正面爆坑加深，迎爆面纵筋弯曲或断裂，箍筋断裂或散开。

(2) 侧面崩落破坏。在爆炸压缩波侧面拉伸作用下出现混凝土剥落，当 TNT 当量较大时，接近底部的侧面混凝土出现横向裂缝，侧面纵筋弯曲或断裂。

(3) 背面震塌破坏。在底部 POZD 的保护下, 背爆面的混凝土剥落, 背爆面纵筋弯曲或断裂, 当 TNT 当量较小时, 背面几乎完好, 只有少量混凝土剥落暴露出纵筋。

(4) 截面冲切破坏。当 TNT 当量较大时, 迎爆面和背爆面的纵筋发生断裂或散开, 全截面混凝土全部破碎崩落, 梁被冲断。

图 17 和图 18 对比了不同涂覆方式对梁的迎爆面破坏长度和爆坑深度的影响。当 TNT 当量为 6、8、16 kg 时, 四周包裹 POZD 涂料(Model C)的加固效果均最优, 并且保护作用十分显著; 当 TNT 当量较小时, 底部加固(Model A)、底部和顶部加固(Model B)、四周加固(Model C)的效果依次递增; 当 TNT 当量较大时, 底部和顶部加固(Model B)的效果最差, 保护作用微乎其微, 主要是因为当迎爆面表层有 POZD 保护层时, 爆炸瞬间梁的受力时间相对增长, 导致接近迎爆面的爆坑更深, 在 TNT 当量很大的情况下, 梁很有可能被直接冲断。

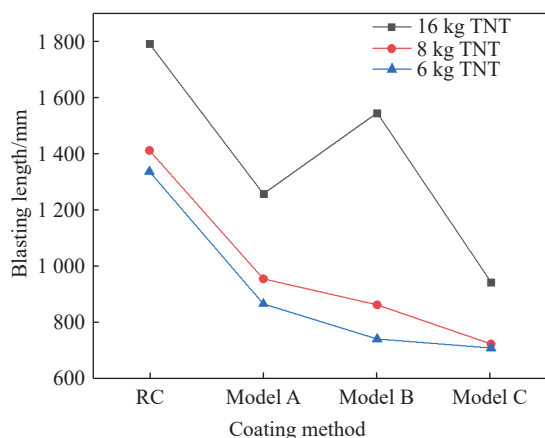


图 17 不同涂覆方式对梁迎爆面破坏长度的影响

Fig. 17 Influence of coating methods on blasting length of beam

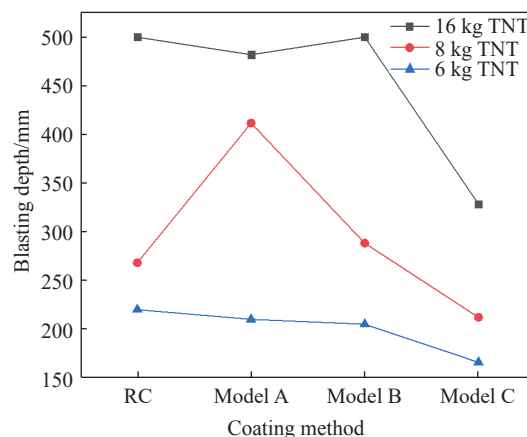


图 18 不同涂覆方式对梁爆坑深度的影响

Fig. 18 Influence of coating methods on blasting depth of beam

3.2 局部毁伤

基于 3.1 节获得了 6、8、16 kg 工况下迎爆面和背爆面的破坏长度以及爆坑深度, 图 19~图 24 为梁接触爆炸迎爆面和侧面的有效塑性应变云图。

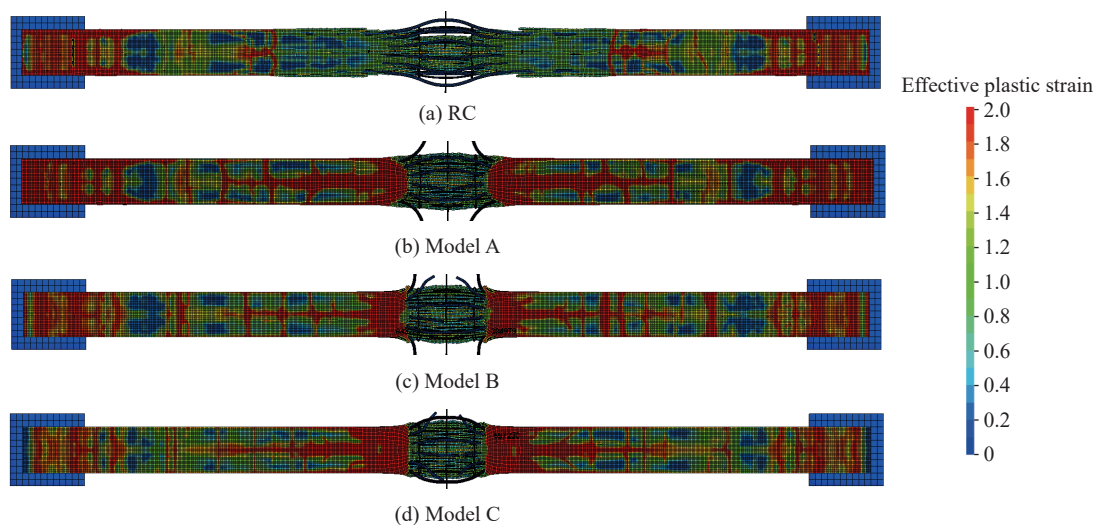


图 19 6 kg TNT 工况下梁迎爆面的有效塑性应变云图

Fig. 19 Cloud images of effective plastic strain on the blasting surface of the beam under 6 kg TNT condition

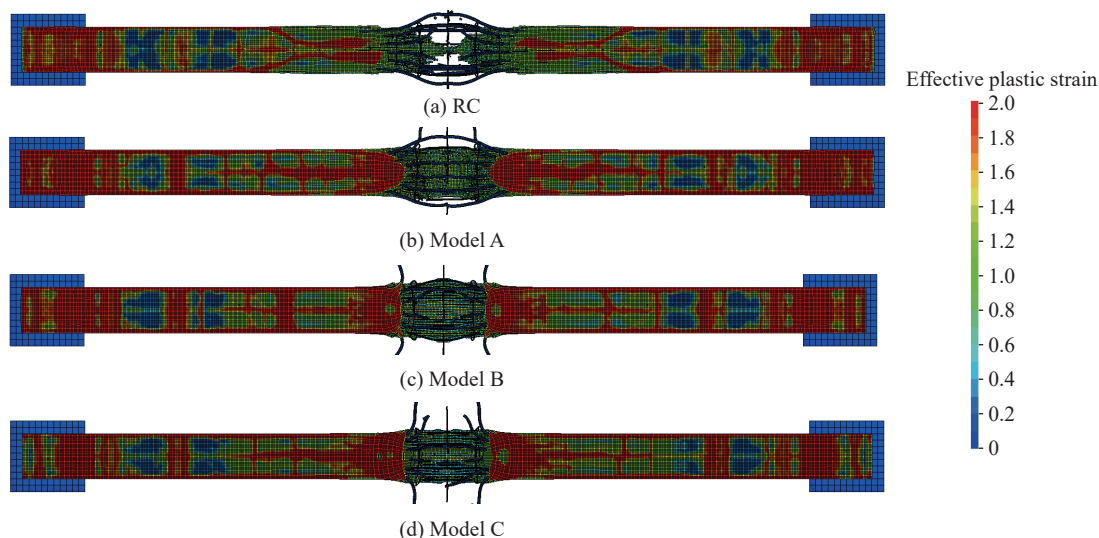


图 20 8 kg TNT 工况下梁迎爆面的有效塑性应变云图

Fig. 20 Cloud images of effective plastic strain on the blasting surface of the beam under 8 kg TNT condition

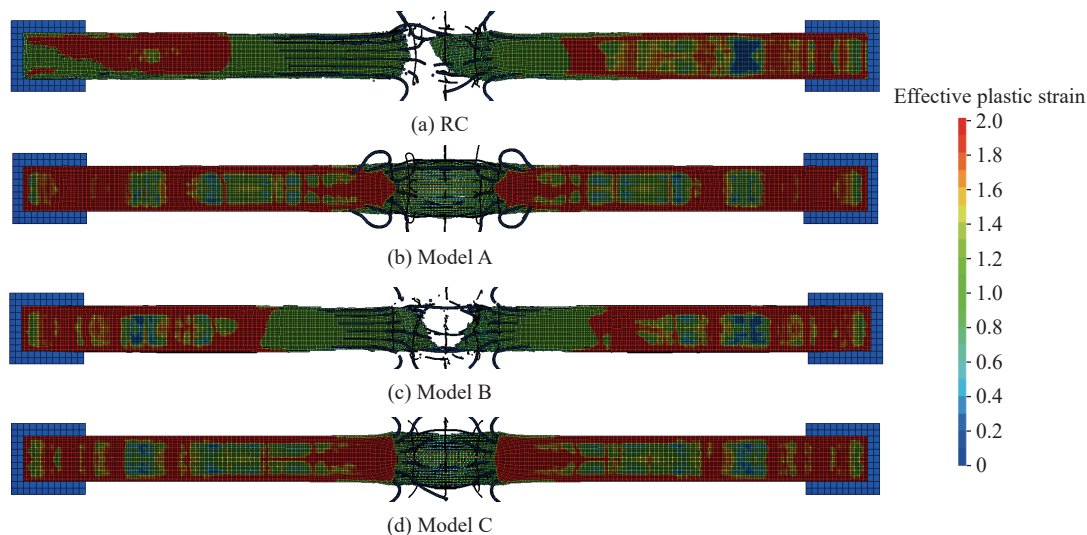


图 21 16 kg TNT 工况下梁迎爆面的有效塑性应变云图

Fig. 21 Cloud images of effective plastic strain on the blasting surface of the beam under 16 kg TNT condition

根据 POZD 加固梁接触爆炸模拟试验结果, 接触爆炸下 POZD 涂覆 RC 梁的局部毁伤可分为轻度毁伤、重度毁伤和严重毁伤 3 个等级, 如图 25 所示。轻度毁伤: 迎爆面产生碗状爆坑, 爆坑深度较浅, 纵筋大多弯曲, 极少断裂; 侧面混凝土崩落较少, 无裂缝产生; 背爆面混凝土完好, 纵筋轻微变形。重度毁伤: 迎爆面混凝土破坏严重, 正面开坑较大, 纵筋发生较大弯曲变形并断裂, 中间箍筋断开散落; 侧面混凝土大量崩落, 在接近底部区域出现横向裂缝; 背爆面部分混凝土震塌脱落, 暴露出产生小变形的纵筋。严重毁伤: 迎爆面爆坑直接贯穿梁, 纵筋全部断裂成许多小段, 中间大多箍筋断裂散开; 侧面混凝土全部剥落, 形成“U”形截面; 背爆面大量混凝土崩落, 纵筋大多断裂, 少有严重弯曲, 梁被冲断。

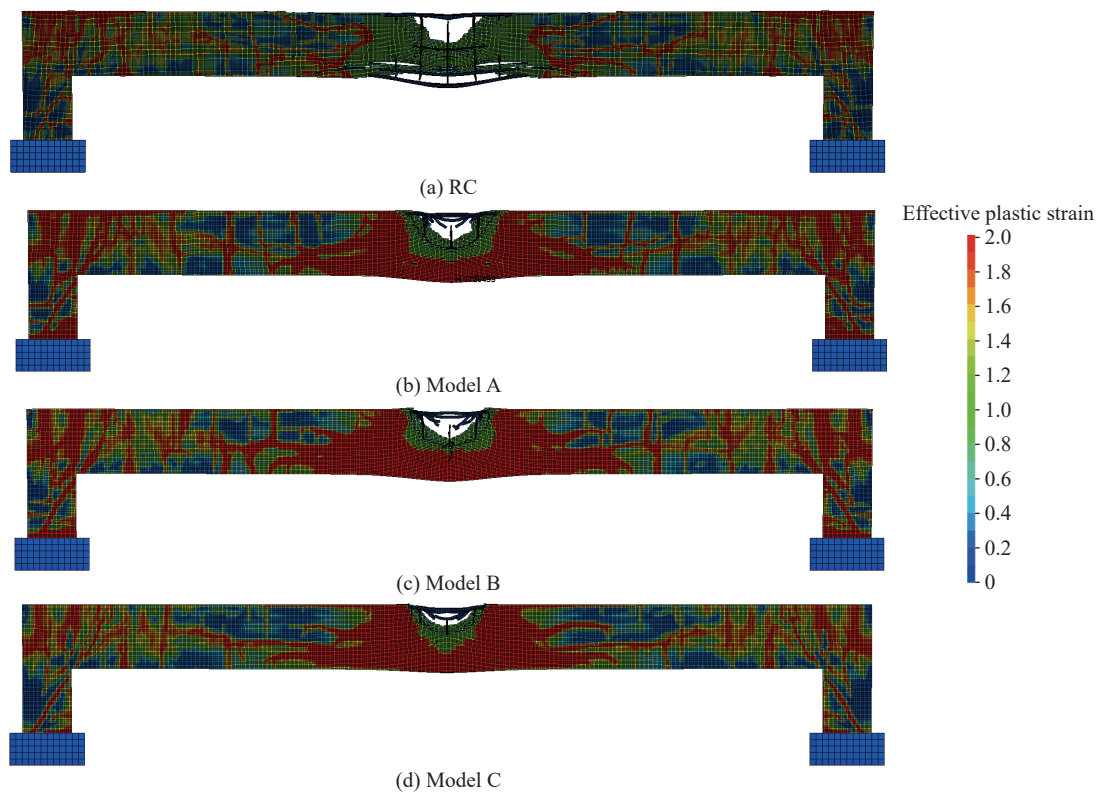


图 22 6 kg TNT 工况下梁侧面的有效塑性应变云图

Fig. 22 Cloud images effective of plastic strain of beam side under 6 kg TNT condition

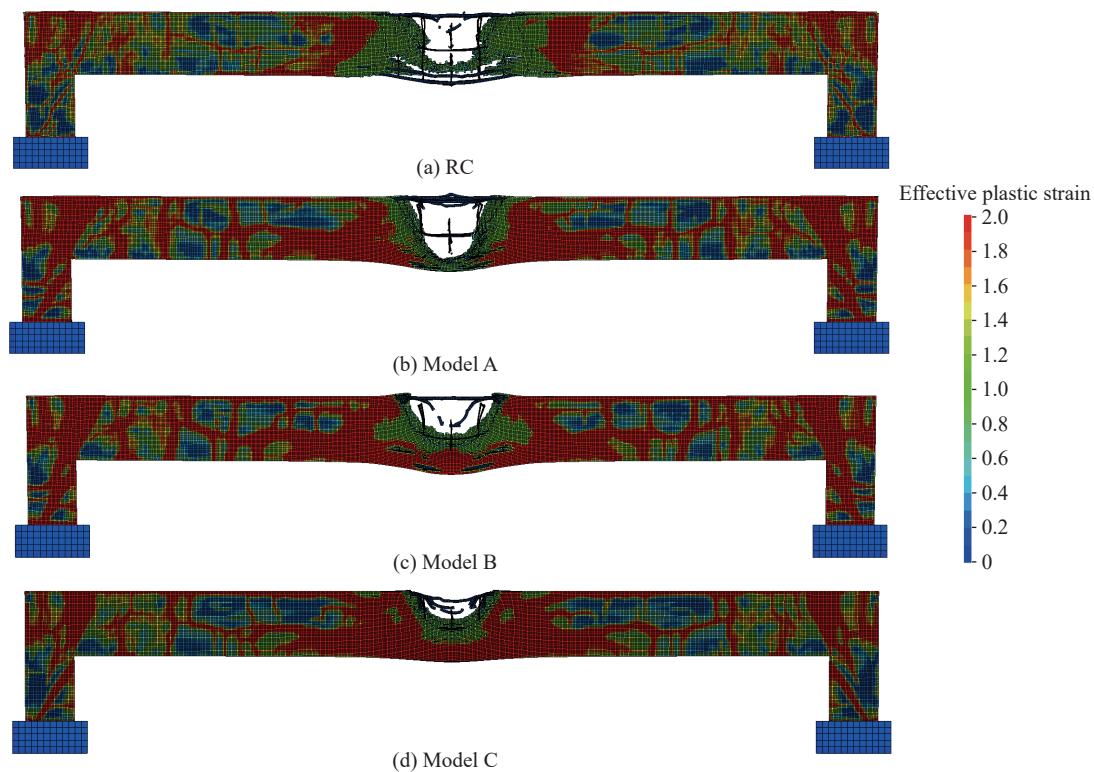


图 23 8 kg TNT 工况下梁侧面的有效塑性应变云图

Fig. 23 Cloud images of effective plastic strain of beam side under 8 kg TNT condition

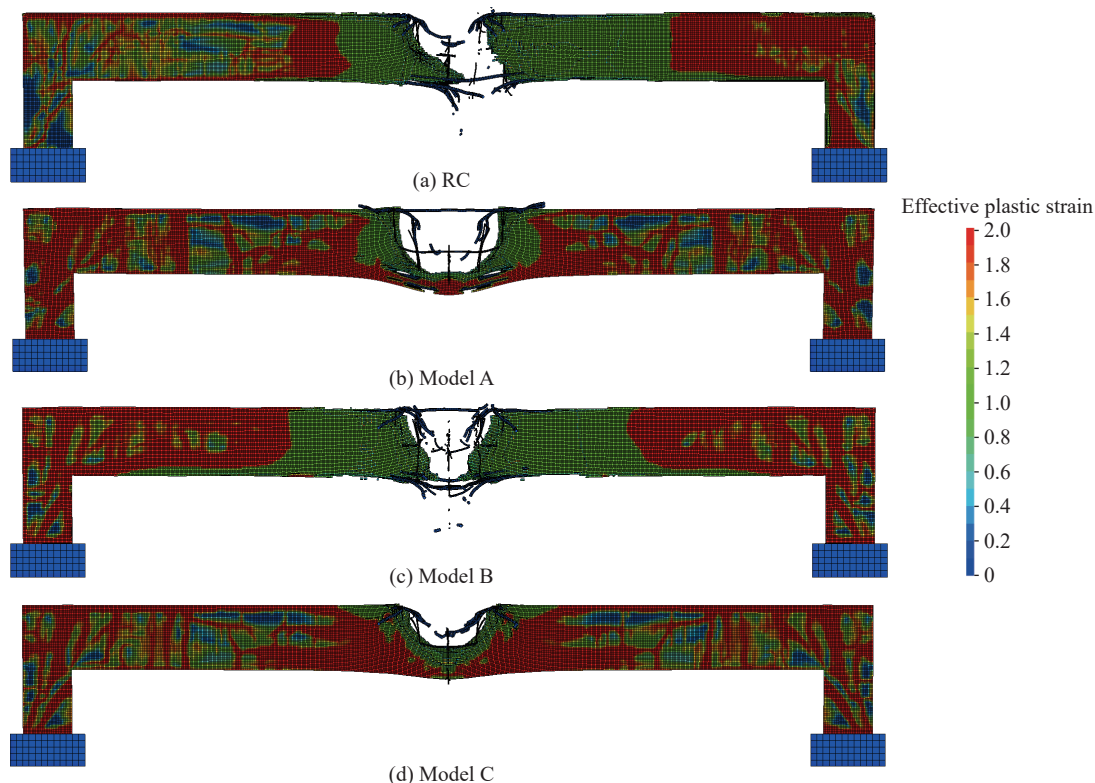


图 24 16 kg TNT 工况下梁侧面的有效塑性应变云图

Fig. 24 Cloud images of effective plastic strain of beam side under 16 kg TNT condition

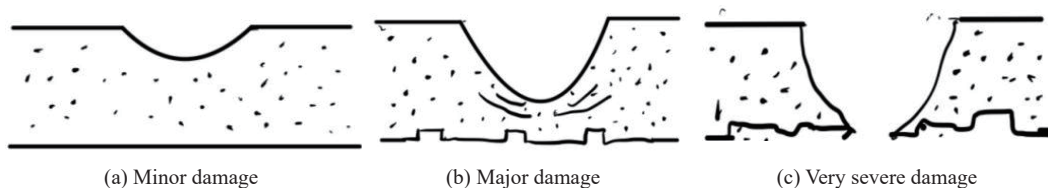


图 25 POZD 涂敷 RC 梁的不同等级毁伤破坏形态

Fig. 25 Local damage grade of POZD coated RC beams

4 结 论

采用 HyperMesh 和 LS-DYNA 软件建立了 POZD 涂覆钢筋混凝土梁模型, 研究了不同 POZD 涂覆位置 and 不同 TNT 装药量 (6、8、16 kg) 时 RC 梁结构的破坏模式和毁伤情况, 并对不同 POZD 涂覆位置的防护效果进行了评估, 将接触爆炸下 POZD 涂覆 RC 梁划分了 3 个局部毁伤等级, 得到以下主要结论。

(1) 对 POZD 涂覆在底部、底部和顶部、四周的 RC 梁进行接触爆炸数值模拟, 发现四周包裹 POZD 涂料的加固效果最好, 保护作用显著, 只在底部涂覆 POZD 的加固效果相对较差。

(2) 在 6、8、16 kg TNT 3 种工况下, 对 3 种加固方式的抗爆性能进行分析, 发现四周包裹 POZD 涂料的加固效果最好; 当 TNT 当量较小时, 底部加固、底部和顶部加固、四周加固的效果依次递增; 当 TNT 当量较大时, 底部和顶部加固的加固效果最差, 其保护作用微乎其微, 其中底部涂覆 POZD 时迎爆面长度和爆坑深度是四周包裹涂覆 POZD 时的 2 倍。

(3) 接触爆炸下 (6、8、16 kg TNT 当量), POZD 涂覆 RC 梁的破坏模式包括正面开坑破坏、侧面崩落破坏、背面震塌破坏以及截面冲切破坏, 其局部毁伤可分为轻度毁伤、重度毁伤和严重毁伤 3 个等级。

参考文献:

- [1] 赵春风, 王强, 王静峰, 等. 近场爆炸作用下核电厂安全壳穹顶钢筋混凝土板的抗爆性能 [J]. *高压物理学报*, 2019, 33(2): 025101.
ZHAO C F, WANG Q, WANG J F, et al. Blast resistance of containment dome reinforced concrete slab in NPP under close-in explosion [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2019, 33(2): 025101.
- [2] WANG W, WEI G S, YANG J C, et al. Study on antexplosion performance of reinforced concrete slabs strengthened with POZD coated steel plate under contact explosion [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2022, 140: 106589.
- [3] WANG W, YANG G R, YANG J C, et al. Experimental and numerical research on reinforced concrete slabs strengthened with POZD coated corrugated steel under contact explosive load [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2022, 166: 104256.
- [4] 吴东, 刘志鹏, 张瑞云, 等. 聚脲喷涂加固钢筋混凝土柱抗爆性能分析 [J]. *四川建筑*, 2022, 42(2): 305–309.
WU D, LIU Z P, ZHANG R Y, et al. Analysis of anti-explosive performance of reinforced concrete column [J]. *Sichuan Architecture*, 2022, 42(2): 305–309.
- [5] 赵苏政, 葛文璇. 聚脲涂层防护下钢筋混凝土柱的抗爆性能研究 [J]. *工程爆破*, 2022, 28(6): 85–91.
ZHAO S Z, GE W X. Study on anti-detonation performance of reinforced concrete columns protected by polyurea coating [J]. *Engineering Blasting*, 2022, 28(6): 85–91.
- [6] 徐赵威, 汪维, 李奕硕, 等. 接触爆炸下聚脲/钢筋混凝土厚板复合结构的抗爆性能 [J]. *爆炸与冲击*, 2025, 45(3): 033104.
XU Z W, WANG W, LI Y S, et al. Blast resistance of polyurea/reinforced concrete thick slab composite structures under contact explosion [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2025, 45(3): 033104.
- [7] RAHEEM A H A, MAHDY M, MASHALY A A. Mechanical and fracture mechanics properties of ultra-high-performance concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 213: 561–566.
- [8] ZHANG C W, GHOLIPOUR G, MOUSAVI A A. State-of-the-art review on responses of RC structures subjected to lateral impact loads [J]. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2021, 28(4): 2477–2507.
- [9] HALLQUIST J O. LS-DYNA theory manual [M]. Livermore: Livermore Software Technology Corporation, 2006.
- [10] 周清, 齐麟. LS-DYNA 软件中 5 种常用抗爆混凝土材料模型的分析与比较 [J]. *混凝土*, 2019(11): 43–49.
ZHOU Q, QI L. Analysis and comparison of 5 different common anti-explosion concrete material models of LS-DYNA software [J]. *Concrete*, 2019(11): 43–49.
- [11] ZHAO C F, CHEN J Y. Damage mechanism and mode of square reinforced concrete slab subjected to blast loading [J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2013, 63/64: 54–62.
- [12] 王喜梦, 刘均, 陈长海, 等. 近距空爆载荷下钢板/聚脲复合结构动响应特性仿真 [J]. *中国舰船研究*, 2021, 16(2): 116–124.
WANG X M, LIU J, CHEN C H, et al. Simulation on dynamic response characteristics of steel/polyurea composite structures under close-range air blast loading [J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2021, 16(2): 116–124.
- [13] 王辉明, 刘飞, 晏麓晖, 等. 接触爆炸荷载对钢筋混凝土梁的局部毁伤效应 [J]. *爆炸与冲击*, 2020, 40(12): 121404.
WANG H M, LIU F, YAN L H, et al. Local damage effects of reinforced concrete beams under contact explosions [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2020, 40(12): 121404.
- [14] 陈锐林, 李康, 董琪, 等. CFRP 加固钢筋混凝土板爆炸冲击作用下动力响应分析的数值模拟 [J]. *铁道科学与工程学报*, 2020, 17(6): 1517–1527.
CHEN R L, LI K, DONG Q, et al. Numerical simulation of dynamic response analysis of reinforced concrete slabs strengthened with CFRP under blast load [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2020, 17(6): 1517–1527.
- [15] DAVIDSON J S, SUDAME S, DINAN R J. Development of computational models and input sensitivity study of polymer reinforced concrete masonry walls subjected to blast: AFRL-ML-TY-TR-2006-4522 [R]. Barnes Drive: Air Force Research Laboratory, 2004: 26–29.
- [16] WANG W, HUO Q, YANG J C, et al. Damage analysis of POZD coated square reinforced concrete slab under contact blast [J]. *Defence Technology*, 2021, 18(9): 1715–1726.
- [17] 王逸平, 汪维, 杨建超, 等. 钢板/POZD 复合结构在近距空爆载荷下的抗爆性能 [J]. *高压物理学报*, 2023, 37(1): 014104.
WANG Y P, WANG W, YANG J C, et al. Blast resistant performance of steel/POZD composite structures under close-range air blast loading [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2023, 37(1): 014104.
- [18] 杨光瑞, 汪维, 杨建超, 等. POZD 涂覆波纹钢加固钢筋混凝土板抗爆性能 [J]. *兵工学报*, 2023, 44(5): 1374–1383.

- YANG G R, WANG W, YANG J C, et al. Blast resistance of reinforced concrete slabs strengthened with POZD coated corrugated steel [J]. *Acta Armamentarii*, 2023, 44(5): 1374–1383.
- [19] WANG W, WEI G, 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.
- [20] WANG W, ZHANG C, YANG G. Anti-explosion performance of a new type of polyurea-coated corrugated steel plate reinforced concrete slab [J]. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 2024, 18(1): 42.

Blast Resistance of POZD-Coated Reinforced Concrete Beams under Contact Explosion

XUE Jianfeng¹, ZHANG Qiyue², XU Honghao¹, WANG Wei², LIU Tao¹, XIA Tao¹

(1. 660 Design Institute of AVIC Jiangxi Hongdu Aviation Industry Group Co., Ltd., Nanchang 330024, Jiangxi, China;

2. Key Laboratory of Impact and Safety Engineering, Ministry of Education, Ningbo University,
Ningbo 315211, Zhejiang, China)

Abstract: In order to obtain the anti-blast performance of polyisocyanate-oxazodone (POZD) coated reinforced concrete beams under contact explosion, numerical simulation studies were carried out on reinforced concrete beams of the same size. Hypemesh and LS-DYNA were used to establish the model of POZD-coated reinforced concrete beams, and the failure modes and damage effects of POZD-coated reinforced concrete beams under contact explosion were analyzed. The failure mode of ordinary reinforced concrete beams under contact explosion was simulated and verified, the failure modes and damage conditions of reinforced concrete beams under different POZD coating positions and different charge amounts were studied, and the protective effects of different POZD coating positions were evaluated.

Keywords: contact explosion; reinforced concrete beam; polyisocyanate-oxazodone; anti-blast performance; damage mode