

DOI: 10.11883/bzycj-2020-0180

POZD 涂层方形钢筋混凝土板抗接触爆炸试验研究*

汪 维^{1,2}, 杨建超², 汪剑辉², 高伟亮², 王 幸²

(1. 宁波大学冲击与安全工程教育部重点实验室, 浙江 宁波 315211;

2. 军事科学院国防工程研究院, 河南 洛阳 471023)

摘要: 为研究聚异氰酸酯噁唑烷聚合物高分子材料 (polyisocyanate oxadone, POZD) 涂层方形钢筋混凝土板在接触爆炸作用下的破坏模式和抗爆性能, 对 POZD 涂层方形钢筋混凝土板进行接触爆炸条件下试验研究。试验中采用建筑结构中楼面设计常用的钢筋混凝土板为研究对象, 通过 11 次独立的爆炸试验, 分析了不同 POZD 涂层厚度对抗爆性能的影响, 观测了钢筋混凝土板在不同装药量和不同 POZD 涂层厚度条件下的破坏模式和破坏特征, 研究结果表明: 涂层 POZD 钢筋混凝土板的主要破坏模式为钢筋混凝土板正面爆炸成坑, 背面 POZD 涂层的圆锥状鼓起。POZD 涂层鼓起主要是在爆炸冲击波作用下 POZD 涂层从基体板脱离并出现较大塑性变形所致。当冲击波荷载强度超过 POZD 材料的极限抗拉强度时, 在涂层锥尖处形成较小的圆孔剪切破坏, 涂层的其他区域保持完好, 从而让钢筋混凝土板不会产生较大范围的震塌破坏。在强冲击波荷载作用下利用 POZD 涂层仍然能够保持大变形、高塑性特性, 可以通过自身的大变形很好地延长爆炸荷载的作用时间和耗散时间, 吸收较大冲击波能量, 从而约束混凝土震塌碎片, 提高钢筋混凝土板的抗爆性能。随着 POZD 涂层厚度增加, 板的抗接触爆炸作用下的抗爆能力越强, 临界震塌破坏装药量越多。研究结果可为工程应用及毁伤评估提供参考。

关键词: 爆炸荷载; 钢筋混凝土板; POZD 涂层; 破坏模式

中图分类号: O383

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

Experimental research on anti-contact explosion of POZD coated square reinforced concrete slab

WANG Wei^{1,2}, YANG Jianchao², WANG Jianhui², GAO Weiliang², WANG Xing²

(1. Key Laboratory of Impact and Safety Engineering, Ministry of Education,

Ningbo University, Ningbo 315211, Zhejiang, China;

2. Institute of Defence Engineering, Academy of Military Science, Luoyang 471023, Henan, China)

Abstract: In order to study the failure mode and anti-explosion performance of PODZ coated square reinforced concrete slabs under contact explosion, the PODZ coated square reinforced concrete slabs were tested under contact explosion conditions. In the test, the reinforced concrete slab commonly used in floor design in building structures was used as the research object. Through 11 independent explosion tests, the influence of different PODZ coating thickness on the anti-explosion performance was analyzed, and the reinforced concrete slab failure modes and damage characteristics were observed at different charges TNT mass and different PODZ coating thickness conditions. The results show that the main failure mode of the coated PODZ reinforced concrete slab is the crater of reinforced concrete slab on the front and the conical shape bulge of POZD coating on the back. The bulging of POZD coating is mainly due to the detachment of POZD coating from the base plate and large plastic deformation under explosion shock wave. When the shock wave load strength exceeds the ultimate tensile strength of POZD material, a small round hole shear failure is formed at the tip of coating cone, and the other areas of the coating remain intact,

* 收稿日期: 2020-06-03; 修回日期: 2020-07-10

基金项目: 国家自然科学基金(11302261, 11972201)

第一作者: 汪 维(1983—), 男, 博士, 副教授, wangwei7@nbu.edu.cn

通信作者: 杨建超(1976—), 男, 硕士, 高级工程师, jiebao9630@163.com

so that the reinforced concrete slab will not produce a large range of seismic collapse failure. Under the strong shock wave load, the POZD coating can still maintain large deformation and high plasticity, which can extend the action time and dissipation time of explosion load through its large deformation and absorb large shock wave energy, so as to restrain the concrete spall debris and improve the anti-explosion performance of steel-concrete concrete slabs. With the increase of the thickness of POZD coating, the stronger the anti-explosion ability of the plate under contact explosion, the more the critical collapse damage TNT mass. The research results can provide references for engineering application and damage assessment.

Keywords: explosion load; reinforced concrete slab; POZD coating; failure mode

随着近几年来一系列恐怖袭击事件和高科技局部战争的发生,重要经济军事设施和普通民用建筑结构的抗爆设防给工程界和学术界提出了迫切的要求和挑战。钢筋混凝土结构因其优异的力学性能成为当今建筑设计的首选,但是由于混凝土抗拉强度较低,在遭到接触爆炸时易发生背面震塌破坏。如何提高建筑防爆抗爆能力,是当前急需解决的一大课题^[1]。

目前,有两种主要方法可以提高工程结构的抗震塌能力。一种是在混凝土中添加钢纤维、聚丙烯纤维、玻璃纤维等纤维材料,这些纤维材料通过混合并分布在混凝土中并与水泥砂浆混合有效粘结,从而产生增强,增韧和阻裂效应。另一种是在混凝土结构背爆面增加抗震塌层,如内板钢板、内挂钢丝网、内贴纤维(碳纤维,玻璃纤维等)布、设置架空层等,通过阻止和约束混凝土碎片来起到抗震塌作用。如王明洋等^[2-3]对钢纤维钢筋混凝土(steel fiber reinforced concrete, SFRC)进行了抗爆/震塌及工程应用研究。陈万祥等^[4]对碳纤维(carbon fiber reinforced polymer, CFRP)加固钢筋混凝土梁开展了抗爆性能试验研究,研究了 CFRP 粘贴层数、配筋率、爆炸荷载大小等因素对裂缝开展、破坏形式、应变和挠度的影响。柳景春等^[5-6]对内衬钢板混凝土组合结构的抗震塌性能进行了研究,并建立了混凝土-钢板组合结构局部效应分析的层状波动计算模型。李志成等^[7]对碳纤维布加固混凝土开展了试验研究,证明碳纤维布可以较好地防止混凝土震塌。韩国建等^[8]对双向余弦三维波纹钢板-混凝土复合结构抗震塌性能开展了研究。袁建虎等^[9]通过实爆试验,验证了钢丝网高强混凝土优良的抗震塌性能。陈万祥等^[10]和侯小伟等^[11]对高强钢筋加强混凝土板开展了抗爆性能和接触爆炸作用下试验研究和分析。董新龙等^[12]对混凝土和钢纤维增强混凝土板在爆炸载荷作用下的响应及震塌破坏开展了实验研究。范新等^[13]对钢纤维喷射混凝土支护开展了抗常规爆炸震塌能力研究,量化地说明钢纤维喷射混凝土支护抗爆炸震塌的能力。Lan 等^[14]对不同装药量及爆高下 74 组不同钢筋混凝土板进行了试验,分析了其破坏模式。Huff^[15]对房顶钢筋混凝土双向板在爆炸载荷下的破坏模式进行了较为系统的试验研究。Ohkubo 等^[16]和 Wu 等^[17]对表面纤维增强钢筋混凝土板的抗爆性能进行了试验研究,揭示了钢筋混凝土板在接触爆炸作用下的失效模式,并利用经验公式进行了验证。上述抗震塌加固措施适合新建或扩建工程,对于已建工程的加固、升级改造等实施较为困难。敷设钢板或内挂钢丝网对锚固技术要求较高,否则抗震塌效果不理想。对处于地下环境较为潮湿的军事工程而言,钢板或钢丝网等材料极易锈蚀,不仅影响使用寿命还增加维护保养成本。

本文中对 POZD 涂层方形钢筋混凝土板进行接触爆炸试验,通过 11 次独立的爆炸试验,分析了不同 POZD 涂层厚度对抗爆性能的影响,观测了钢筋混凝土板在不同装药量和不同 POZD 涂层厚度条件下的破坏模式和破坏特征,为钢筋混凝土板的抗爆炸研究与设计提供试验结果,也为后续的 POZD 涂层钢筋混凝土板毁伤判据建立提供试验数据。

1 POZD 材料

POZD 材料是在聚脲弹性体等高分子材料研发的基础上,利用异氰酸酯基团与环氧树脂的催化反应,研发出的一种聚合物高分子材料,全称为聚异氰酸酯噁唑烷聚合物高分子材料(polyisocyanate oxazodone, POZD)。该种材料为大分子结构,分子链间相互缠绕及氢键作用,使得其弹性、强度及整体性能明显提高,并且由于聚异氰酸酯噁唑烷酮的生成,使得该材料的韧性、抗爆性能大大提升。

聚脲弹性体 (polyurea elastomer) 是聚氨酯群中的一种, 它是由异氰酸酯 (A) 与氨基化合物组分 (R) 混合反应生成的一种弹性涂层。所用原料主要有三大类, 即端氨基聚醚、异氰酸酯以及扩链剂。在聚脲喷涂 (spray polyurea, SPUA) 技术中, 将异氰酸酯与聚醚多元醇反应生成的半预聚体定义为 A 料; 将端氨基聚醚、液体胺类扩链剂和其他助剂的组成定义为 R 料。喷涂施工时, 一定比例的 A、R 料在专用喷枪内快速混合喷出时, 反应活性极高的两种组分液体在高压驱动下相互对冲, 经枪体混合室湍流混合, 通过喷枪后雾化再次均匀混合, 在极短适用期内喷涂在基面上, 形成整体的聚脲弹性体涂层。

POZD 新材料是以聚脲为基础的新材料, 保留了聚脲的优点, 利用异氰酸酯基团与环氧树脂的催化反应, 研发出的一种聚合物高分子材料。POZD 材料同聚脲的主要区别为: POZD 材料从分子组成方面设计分子结构, 通过特殊原料来增加材料的拉伸性能和撕裂性能, 喷涂技术延续聚脲喷涂技术, 二者的立体网状结构有巨大差异, 如图 1 所示, 利用噁唑烷来增加材料撕裂性能; 利用纳米填料对喷涂 POZD 材料材料进行改性, 使 POZD 材料拉伸强度、伸长率和粘结强度等性能远高于聚脲。

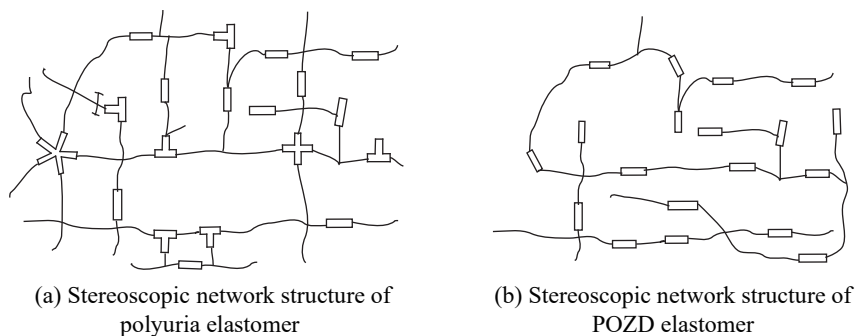


图 1 聚脲及 POZD 材料的立体网状结构图

Fig. 1 Stereoscopic network structure of polyurea and POZD materials

POZD 材料具有高强度、高韧性、高延展率等性能, 同时具备耐酸碱腐蚀、耐低温、抗老化, 防水、防火、阻燃、环保无异味等优点。该材料常温下为流塑状态, 罐装或者桶装运输, 采用专业设备喷涂法施工后暴露空气中 24 h 即可达到自身强度的 100%。POZD 材料力学性能如文献 [18] 所示。

2 试验方法

结合工程实际应用情况, 进行 150 mm 厚钢筋混凝土板喷涂 POZD 涂层的接触抗爆试验, 钢筋混凝土板厚度 150 mm, 平面尺寸 2 000 mm×2 000 mm, HRB400 钢筋 $\phi 14@200\text{ mm}\times 200\text{ mm}$ 双层布置, 钢筋保护层 15 mm, 混凝土强度等级 C40, 28 d 抗压强度为 41.2 MPa。模型示意如图 2 所示。为了对比分析不同 POZD 涂层厚度对接触抗爆性能的影响, 对钢筋混凝土板背爆面喷涂厚度分别为 4、6、8、10 和 12 mm POZD 材料, 模型编号为 P1~P5。作为对照, 模型编号 P0 为钢筋混凝土裸板。

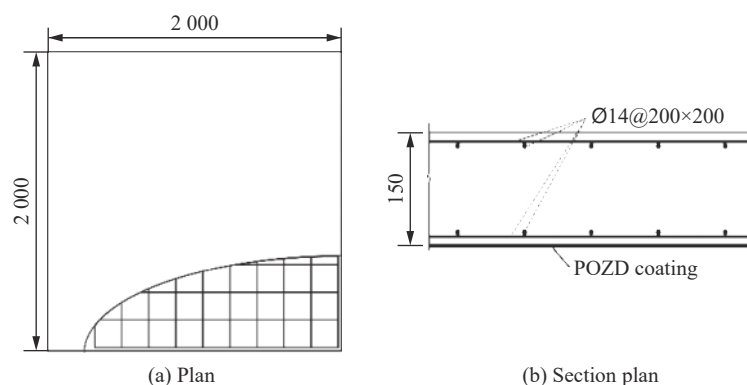


图 2 混凝土板配筋及内衬材料示意图(单位: mm)

Fig. 2 Schematic of reinforcement and lining of concrete slab (unit in mm)

该试验主要通过一定当量 TNT 炸药以接触爆的形式实施爆炸,对比验证不同 POZD 喷涂厚度钢筋混凝土板模型的抗震塌性能。试验现场布置如图 3 所示,试验模型置于钢制支撑架上,使下方架空以模拟有限厚板临空状态。TNT 炸药放在钢筋混凝土板上表面实施接触爆炸,通过透明胶带粘接并绑扎牢固形成集团药放置在钢筋混凝土板上表面中心处(如图 3 所示),由电雷管引爆,通过观察板底面破坏状况来判断 POZD 材料的抗爆性能。



图3 试验布置

Fig. 3 Testing arrangement

3 试验参数和结果

对 11 块钢筋混凝土板进行不同工况下的测试,具体试验安排如表 1 所示。

表 1 试验参数及结果

Table 1 Test parameters and results

编号	模型	TNT 药量 W/g	爆心高度 $h_0/$ mm	涂层厚度 $h_1/$ mm	开坑直径 $d_1/$ mm	POZD 涂层		破坏状态
						鼓包直径 d/mm	鼓包高度 h/mm	
1	P0-1	400	12.5	0	295	—	—	震塌
2	P1-1	600	20.8	4	400	750	70	无破损
3	P1-2	1000	32.5	4	415	850	90	无破损
4	P2-1	1800	57	6	475	990	120	无破损
5	P2-2	2000	62.5	6	500	1000	125	破损
6	P3-1	2000	62.5	8	450	1000	115	无破损
7	P3-2	2200	69.3	8	515	1050	125	无破损
8	P4-1	2400	50	10	530	1060	125	无破损
9	P4-2	2600	50	10	540	1100	135	破损
10	P5-1	3000	50	12	660	1150	150	无破损
11	P5-2	3600	50	12	680	1300	180	破损

由试验结果可知,150 mm 厚钢筋混凝土裸板 P0-1 在 400 g TNT 药量接触爆炸作用下就可产生震塌破坏,板背面出现混凝土剥离,碎片飞溅等损坏现象。震塌面积为 550 mm×530 mm 且几乎贯穿,如图 4 所示。

当在板 P1 背面(背爆面)喷涂 4 mm 厚 POZD 材料后,TNT 药量增加到 600 g 时,虽然基体混凝土板出现损坏,爆炸后钢筋混凝土基体板出现了冲切破坏(如图 5 所示),但由于 POZD 材料的约束作用,板背面未出现震塌、贯穿或者混凝土碎片飞散等现象,POZD 材料未出现破损,鼓起高度为 70 mm。当装药量增加到 1000 g 后,POZD 涂层均无任何破损,仅在一定区域内出现圆锥状鼓起现象,鼓起高度为 90 mm,该鼓起为爆炸冲击波作用下 POZD 涂层从基体板脱离并出现较大塑性变形所致。

当 POZD 涂层厚度分别增大到 6 mm (P2-1)、8 mm (P3-2)、10 mm (P4-1)、12 mm (P5-1)时,TNT 药量增加至 1800、2200、2400、3000 g 时,仍然没有出现破损现象,但鼓起高度和鼓起面积逐步增大,高度最大达到 150 mm,鼓起直径达 1150 mm(如图 6~9 所示)。该试验结果表明,POZD 材料喷涂于钢筋混凝土板背面(背爆面)之后,能够大幅度提高其抗爆能力,并随着喷涂厚度的增大抗爆能力相应提高,且

不产生碎片, 不泄漏冲击波, 可以有效保护结构内部人员和设备的安全。

由试验模型迎爆面毁伤状态可知, TNT 药量为 600~2400 g 时, 基体板混凝土出现冲剪破坏, 钢筋下弯未出现断裂; 药量增加到 3000 g 及以上时板内 $\varnothing 14$ mm 钢筋出现断裂, 表明爆炸冲击波较为猛烈。

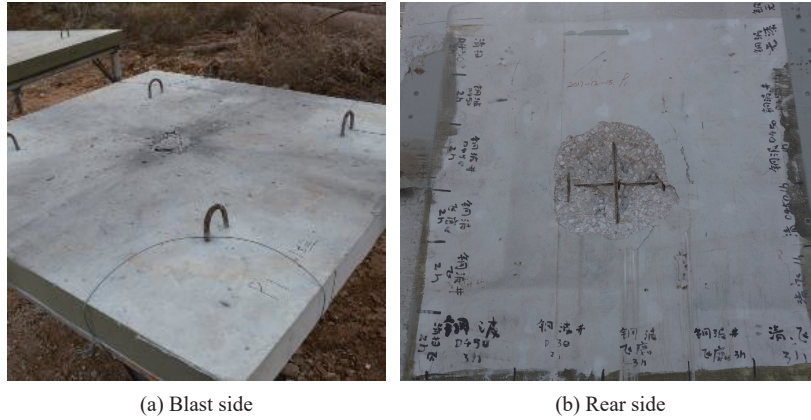


图 4 模型 P0-1 试验结果
Fig. 4 Test results of model P0-1



图 5 模型 P1-1 试验结果
Fig. 5 Test results of model P1-1



图 6 模型 P2-1 试验结果
Fig. 6 Test results of model P2-1



图 7 模型 P3-1 试验结果
Fig. 7 Test results of model P3-1



图 8 模型 P5-1 试验结果
Fig. 8 Test results of model P5-1

TNT 炸药为 2 000 g 时, P2-2 模型 POZD 涂层出现直径为 55 mm 的圆形孔破损, 如图 10 所示。除模型正下方有少量混凝土碎屑外, 大部分混凝土碎片仍被包裹。TNT 炸药增加到 3 600 g 时, P5-2 模型 POZD 涂层出现直径为 113 mm 的圆形孔洞破损并伴有一定撕裂, 通过观察迎爆面钢筋断裂状态



图 9 模型 P4-1 背爆面
Fig. 9 Rear side of model P4-1



图 10 模型 P2-2 背爆面
Fig. 10 Rear side of model P2-2

(图 11(a)), 该撕裂为钢筋断裂下弯并刺破 POZD 涂层所导致。当强冲击荷载足够大, 致使 POZD 涂层破损时, 仅在圆锥状鼓起的锥顶出现破损且破损面积远小于混凝土板的震塌面积, POZD 涂层仍能够约束混凝土使其不产生震塌碎片。



(a) Blast side

(b) Rear side

图 11 模型 P5-2 试验结果

Fig. 11 Test results of model P5-2

上述系列试验表明, POZD 材料具备较好的抗爆性能, 这种抗爆能力是通过材料的大变形、高塑性特性, 卸载了强冲击波, 约束了混凝土碎片, 而不是通过增加板的强度而提高抗爆能力。

4 破坏结果分析

4.1 破坏模式及机理分析

由于爆炸产生的应力波均在板的迎爆面产生开坑, 并传播至板的背爆面形成强拉伸波, 造成背爆面混凝土的层裂和崩塌。目前钢筋混凝土板在接触爆炸作用下的破坏模式通常分为以下 3 类: 正面开坑、底部层裂、爆炸贯穿和爆炸冲切^[16, 19]。

接触爆炸作用下, 钢筋混凝土板产生震塌的主要原因为爆炸产生的应力波反射卸载引起的断裂, 抑制或减弱拉伸冲击波的强度, 可以起到很好的防震塌效果。当钢筋混凝土板背爆面喷涂一定厚度 POZD 涂层后, 由于涂层的波阻抗小于混凝土 ($\rho_{\text{POZD}}c_{\text{POZD}} < \rho_{\text{concrete}}c_{\text{concrete}}$), 因此爆炸冲击波经混凝土板透射入 POZD 涂层后, 应力波和介质的质点速度均小于初始值, 相当于减弱了冲击波强度。同时, POZD 涂层具备较大的延展率和塑性变形能力, 在高应变率的强动载作用下, 仍然能够保持大变形、高塑性特性, 通过自身的大变形, 延长了爆炸荷载的作用时间和耗散时间, 吸收了冲击波能量, 约束了混凝土碎片, 起到了较好的防震塌效果。

底部喷涂 POZD 涂层的钢筋混凝土板在近距离或接触爆炸下的动力响应是一个十分复杂的过程, 其受力行为与破坏程度不仅与爆炸荷载峰值、爆炸荷载波长、爆炸荷载波形以及材料的临界抗拉强度有关, 而且更主要的是与涂层厚度及涂层粘结力有关。涂层越厚, 其延滞时间越长, 钢筋混凝土板就越能减少剥落的次数, 防层裂崩塌效果就越好; 涂层越薄, 其延滞时间越短, 防层裂崩塌效果就越不明显。同样, 如果涂层与混凝土粘结力不够, 在爆炸荷载作用下钢筋混凝土板中的涂层来不及发生变形以吸收能量就有可能被震落, 从而失去 POZD 涂层的加固作用。

不同喷涂 POZD 涂层厚度的钢筋混凝土板在接触爆炸条件下产生不同的破坏模式和破坏机理。在爆炸荷载作用下, POZD 涂层厚度的钢筋混凝土板中可能会出现裂缝、剥落甚至多层剥落等, 但这些最终都体现在 POZD 涂层的整体变形上。POZD 涂层厚度的钢筋混凝土板主要局部破坏模式可以分为: 正面开坑、背面层裂和涂层鼓包、爆炸贯穿涂层大面积鼓包、爆炸冲切和涂层穿孔。当 POZD 涂层变形不

大时,即使混凝土内发生裂缝、剥落,POZD 涂层照样能托住这些高速飞行的剥落块而保持结构的完整性;当 POZD 涂层变形过大而失效时,也即 POZD 涂层已承受不了混凝土剥落块的冲击,这时结构也就彻底毁坏而失去保护作用。另外,当装药量增加到一定程度时候,试验已表明爆炸产生的冲击作用足以使 POZD 涂层脱落失去防震塌作用。因此,爆炸荷载作用下 POZD 涂层混凝土板的破坏模式通常为板底部小部分 POZD 涂层鼓包、逐步增加到大面积鼓包脱落,直至当 POZD 涂层变形超过容许值而发生撕裂破孔。

4.2 临界破坏药量分析

POZD 涂层鼓包直径、鼓包高度与装药量之间的关系如图 12 所示,可以发现在相同爆炸装药量条件下,随着 POZD 涂层厚度的增大,鼓包区域直径和鼓包高度逐渐变小。

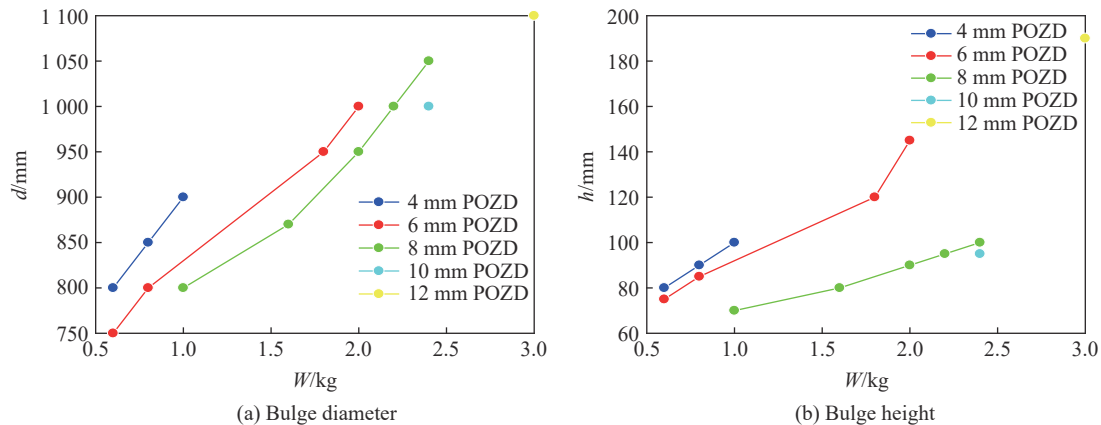


图 12 POZD 涂层变形大小与装药量之间的关系

Fig. 12 Relationship between deformation and thickness of POZD coating

POZD 涂层临界破坏装药量随着涂层厚度增加逐渐增加,通过数据拟合,得到了临界装药量 $W(\text{kg})$ 与 POZD 涂层厚度 $h_1(\text{mm})$ 之间的关系如 $W = 0.24 h_1 + 0.26$ 。在本次试验中,12 mm POZD 涂层的最大临界破坏装药量为 3.3 kg,拟合曲线与试验数据点如图 13 所示,可以发现吻合较好。

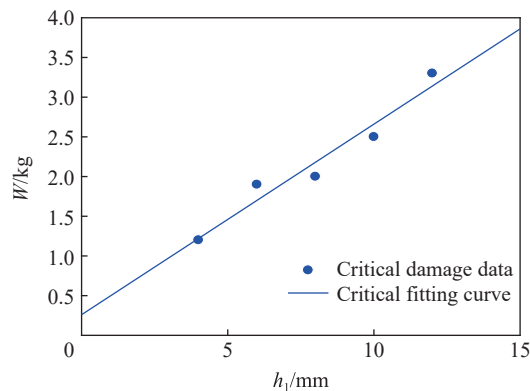


图 13 POZD 涂层厚度与临界破坏的 TNT 药量关系

Fig. 13 Relationship between coating thickness and TNT charge weight inducing critical failure of coating

5 结 论

本文中通过接触爆炸试验,对喷涂不同厚度 POZD 的方形钢筋混凝土板在爆炸荷载作用下的抗爆性能进行了分析,得到以下主要结论:

(1) POZD 材料喷涂于钢筋混凝土板背面(背爆面)之后,能够大幅度提高其抗爆能力,并随着喷涂

厚度的增加抗爆能力相应提高,且不产生碎片,不泄漏冲击波,可以有效保护结构内部人员和设备的安全。

(2)背爆面喷涂 POZD 涂层的钢筋混凝土板主要破坏模式为正面开坑;背面破坏模式随着炸药量增加破坏模式为层裂和涂层鼓包、爆炸贯穿涂层大面积鼓包、爆炸冲切和涂层穿孔 3 种主要形式。

(3)相同爆炸装药量条件下,随着 POZD 涂层厚度的增加,鼓包区域直径和鼓包高度逐渐变小。POZD 涂层厚度分别为 4~12 mm 时,15 cm 厚钢筋混凝土板的临界装药量由 1.2 kg 增加到 3.3 kg,并且拟合了涂层厚度与临界装药量的经验公式,发现临界抗爆药量随涂层厚度线性提高。

参考文献:

- [1] LI Z X, DU H, BAO C X. Review of current researches on blast load effects of building structures in China [J]. *Transactions of Tianjin University*, 2006, 12(S): 35–41.
- [2] 王明洋, 张胜民, 国胜兵. 接触爆炸作用下钢板-钢纤维混凝土遮弹层设计方法: I [J]. *爆炸与冲击*, 2002, 22(1): 40–45.
WANG M Y, ZHANG S M, GUO S B. Design method of steel fiber concrete shelter plate under contact detonation: I [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2002, 22(1): 40–45.
- [3] 王明洋, 钱七虎, 赵跃堂. 接触爆炸作用下钢板-钢纤维钢筋混凝土遮弹层设计方法: II [J]. *爆炸与冲击*, 2002, 22(2): 163–168.
WANG M Y, QIAN Q H, ZHAO Y T. Design method of steel fiber concrete shelter plate under contact detonation: II [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2002, 22(2): 163–168.
- [4] 陈万祥, 严少华. CFRP 加固钢筋混凝土梁抗爆性能试验研究 [J]. *土木工程学报*, 2010, 43(5): 1–12. DOI: 10.15951/j.tmgxcb.2010.05.014.
CHEN W X, YAN S H. Experimental study of RC beams strengthened with CFRP under blast loading [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2010, 43(5): 1–12. DOI: 10.15951/j.tmgxcb.2010.05.014.
- [5] 柳景春, 方秦. 爆炸荷载作用下内衬钢板的混凝土组合结构防震塌的工程计算方法 [J]. *防护工程*, 2008, 38(4): 31–34.
LIU J C, FANG Q. The engineering calculation method of steel-backed concrete composite structures for anti-scabbing under blast loading [J]. *Protective Engineering*, 2008, 38(4): 31–34.
- [6] 柳锦春, 方秦, 张亚栋, 等. 爆炸荷载作用下内衬钢板的混凝土组合结构的局部效应分析 [J]. *兵工学报*, 2004, 25(6): 773–776. DOI: 10.3321/j.issn:1000-1093.2004.06.027.
LIU J C, FANG Q, ZHANG Y D, et al. Analysis of local effects on steel-backed concrete composite structures under blast loading [J]. *Acta Armamentarii*, 2004, 25(6): 773–776. DOI: 10.3321/j.issn:1000-1093.2004.06.027.
- [7] 李志成, 艾德武, 严少华. 碳纤维布加固混凝土试块抗侵彻试验研究 [J]. *防护工程*, 2002(1): 42–49.
LI Z C, AI D W, YAN S H. Experimental study on penetration resistance of concrete block strengthened with CFRP [J]. *Protective Engineering*, 2002(1): 42–49.
- [8] 韩国建, 程国亮, 杨进勇, 等. 双向余弦三维波纹钢板-混凝土复合结构抗震塌性能研究 [J]. *防护工程*, 2013, 35(6): 13–17.
HAN G J, CHENG G L, YANG J Y, et al. Research on anti-collapse ability of bidirectional cosine three-dimensional corrugated steel place-reinforced concrete composite structure [J]. *Protective Engineering*, 2013, 35(6): 13–17.
- [9] 袁建虎, 唐建, 吕振坚, 等. 钢丝网高强混凝土抗爆性能试验研究 [J]. *兵工学报*, 2012, 33(3): 373–378.
YUAN J H, TANG J, LU Z J, et al. Experimental investigation on anti-explosion performance of steel-wire-net reinforced concretes [J]. *Acta Armamentarii*, 2012, 33(3): 373–378.
- [10] 陈万祥, 卢红标, 侯小伟, 等. 高强钢筋加强混凝土板抗爆性能试验研究 [J]. *振动与冲击*, 2015, 34(10): 135–141. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2015.10.023.
CHEN W X, LU H B, HOU X W, et al. Tests for anti-blast performance of concrete slabs with high-strength reinforcements under blast loading [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2015, 34(10): 135–141. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2015.10.023.
- [11] 侯小伟, 卢红标, 陈万祥, 等. 高强钢筋混凝土板抗接触爆炸破坏形态分析 [J]. *武汉理工大学学报*, 2013, 35(9): 96–100. DOI: 10.3963/j.issn.1671-4431.2013.09.019.
HOU X W, LU H B, CHEN W X, et al. Analysis on the anti-contact explosion failure patterns of high strength RC slabs [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2013, 35(9): 96–100. DOI: 10.3963/j.issn.1671-4431.2013.09.019.
- [12] 董新龙, 洪志权, 高培正, 等. 混凝土及钢纤维混凝土板爆炸破坏研究 [J]. *兵工学报*, 2009, 30(S2): 280–283.

- DONG X L, HONG Z Q, GAO P Z, et al. Study on collapse of common and steel fiber reinforced concrete slabs subjected to contact detonation [J]. *Acta Armamentarii*, 2009, 30(S2): 280–283.
- [13] 范新, 章克凌, 王明洋, 等. 钢纤维喷射混凝土支护抗常规爆炸震塌能力研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(7): 1437–1442. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2006.07.021.
- FAN X, ZHANG K L, WANG M Y, et al. Study on spalling resistance performance of steel fiber shotcrete induced by conventional explosion [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(7): 1437–1442. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2006.07.021.
- [14] LAN S R, LOK T S, HENG L. Composite structural panels subjected to explosive loading [J]. *Construction and Building Materials*, 2005, 19(5): 387–395. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2004.07.021.
- [15] HUFF W L. Collapse strength of a two way reinforced concrete slab contained within a steel frame structure: ADA012825 [R]. Washington D C: Army Engineer Waterways Experiment Station Vicksburg Miss Defense Civil Preparedness Agency. 1975.
- [16] OHKUBO K, BEPPU M, OHNO T, et al. Experimental study on the effectiveness of fiber sheet reinforcement on the explosive-resistant performance of concrete plates [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2008, 35(12): 1702–1708. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2008.07.022.
- [17] WU C, OEHLERS D J, REBENTROST M, et al. Blast testing of ultra-high performance fibre and FRP-retrofitted concrete slabs [J]. *Engineering Structures*, 2009, 31(9): 2060–2069. DOI: 10.1016/j.engstruct.2009.03.020.
- [18] 杨建超, 汪剑辉, 周旺进, 等. 喷涂 POZD 弹性涂层防护门抗爆性能试验研究 [J]. *防护工程*, 2020, 42(1): 7–11.
- YANG J C, WANG J H, ZHOU W J, et al. Experimental study on blast resistance performance of blast door with POZD elastic coating [J]. *Protective Engineering*, 2020, 42(1): 7–11.
- [19] 张想柏, 杨秀敏, 陈肇元, 等. 接触爆炸钢筋混凝土板的震塌效应 [J]. *清华大学学报 (自然科学版)*, 2006, 46(6): 765–768. DOI: 10.3321/j.issn:1000-0054.2006.06.004.
- ZHANG X B, YANG X M, CHENG Z Y, et al. Explosion spalling of reinforced concrete slabs with contact detonations [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2006, 46(6): 765–768. DOI: 10.3321/j.issn:1000-0054.2006.06.004.

(责任编辑 王易难)