

DOI: 10.11883/bzycj-2025-0054

接触爆炸条件下聚脲涂层对 RC 基板 层裂和贯穿的影响*

郭士旭^{1,2}, 何翔^{1,3}, 刘飞^{1,3}, 杨建超^{1,3}, 陈经^{1,3}, 孙山川^{1,3}

(1. 军事科学院国防工程研究院, 北京 100036;

2. 洛阳理工学院智能建造与土木工程学院, 河南 洛阳 471023;

3. 目标易损性评估全国重点实验室, 河南 洛阳 471023)

摘要: 为研究聚脲涂层对钢筋混凝土 (reinforced concrete, RC) 基板层裂和贯穿的影响, 分析了压缩波在混凝土-聚脲界面传播过程及混凝土层裂过程, 提出了背面喷涂聚脲 RC 基板的层裂解析模型。基于该模型, 定量分析了聚脲涂层对 RC 基板临界层裂和贯穿的影响, 提出无涂层 RC 板的贯穿预估经验方法可扩展应用于背面喷涂聚脲的 RC 基板, 并通过学者们报道的接触爆炸试验进行验证。结果表明: 聚脲涂层会对 RC 基板背面层裂过程产生影响, 紧邻混凝土-聚脲界面的净应力波为压缩波, 而在更深处的混凝土中, 净应力波为拉伸波; 聚脲涂层仅影响 RC 基板的首次层裂, 首次层裂后的层裂过程与无涂层 RC 板相同; 在发生临界层裂时, 聚脲涂层提高了 RC 基板的临界层裂抗力, 但层裂深度会增大; 在发生贯穿时, 聚脲涂层减少了 RC 基板的层裂次数, 但对总层裂深度和贯穿的影响较小; 无涂层 RC 板的贯穿预估经验方法可较好地预估背面喷涂聚脲 RC 基板的贯穿破坏。

关键词: 接触爆炸; 钢筋混凝土板; 聚脲涂层; 抗爆性能; 解析模型; 层裂; 贯穿

中图分类号: O383

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

Effect of polyurea coatings on spalling and breach of reinforced concrete slabs under contact explosion

GUO Shixu^{1,2}, HE Xiang^{1,3}, LIU Fei^{1,3}, YANG Jianchao^{1,3}, CHEN Jing^{1,3}, SUN Shanchuan^{1,3}

(1. Defense Engineering Institute, AMS, PLA, Beijing 100036, China;

2. School of Intelligent Construction and Civil Engineering, Luoyang Institute of Science and Technology, Luoyang 471023, Henan, China;

3. State Key Laboratory of Target Vulnerability Assessment, Luoyang 471023, Henan, China)

Abstract: In recent years, polyurea-coated reinforced concrete (RC) slabs have been extensively studied both experimentally and numerically for structural strengthening against contact explosions. However, theoretical investigations remain limited, particularly concerning the impact of polyurea on the local damages of the RC substrates. In this paper, an analytical model based on stress wave propagation theory was proposed to investigate the reflection of compression waves at the backside of the RC substrate slab and predict the spalling depth. Utilizing this analytical model, a quantitative and detailed discussion was presented regarding the effect of the polyurea on the critical spalling and breach of the RC substrate slab. Furthermore, the applicability of the empirical breach prediction, originally developed for uncoated RC slabs, was validated through existing experiments to predict the breach of polyurea-coated RC substrate slabs. The results indicate that polyurea affects the spalling process of the RC substrate slabs. Specifically, the net stress wave adjacent to the concrete-polyurea interface is a compression

* 收稿日期: 2025-02-19; 修回日期: 2025-04-16

基金项目: 中原科技创新领军人才项目 (234200510016)

第一作者: 郭士旭 (1987—), 男, 博士, 讲师, shixu@lit.edu.cn

通信作者: 何翔 (1966—), 男, 博士, 研究员, XiangHe1396@163.com

wave, while it transitions to a tensile wave in the deeper concrete. Polyurea primarily impacts the first spall of the RC substrate slab; subsequent spalling processes after the first spall align with those observed in uncoated RC slabs. Upon the occurrence of critical spalling, polyurea enhances the critical spalling resistance of RC slabs, although it significantly increases the spalling depth. Conversely, when a breach occurs, polyurea reduces the number of spalls but minimally affects on the total spalling depth. Based on these findings, the empirical method for predicting breaches of uncoated RC slabs can effectively be applied to predict the breach of RC substrate slabs coated with polyurea. The test results from more than twenty contact explosion experiments are consistent with the predicted outcomes, thereby validating the effectiveness of the analytical model and providing a method for estimating the breach of polyurea-coated RC substrate slabs.

Keywords: contact explosion; reinforced concrete slab; polyurea coating; anti-blast performance; analytical model; spall; breach

接触爆炸条件下钢筋混凝土 (reinforced concrete, RC) 板以局部破坏为主, 破坏模式包括正面压缩坑、背面层裂坑和贯穿等^[1,2], 并产生大量混凝土破片。特别是发生贯穿时, 混凝土破片流持续时间长且飞散速度高^[3-5], 严重威胁结构内部人员和设备的安全^[6], 并可能破坏附近的其他结构^[7-8]。经济、轻质、高效的抗爆加固材料受到广泛关注, 其中聚脲材料在物理力学性能方面表现优异, 且易于施工, 可能是更好的轻质抗爆加固材料^[9-11]。

聚脲是由异氰酸酯组分和氨基化合物快速交联加聚反应而形成的一类高分子材料^[12]。两种组分反应生成聚脲的速度较快, 基本不受环境温度和湿度的影响^[10], 为施工提供了便捷性。聚脲加固 RC 板的抗接触爆炸性能是近年来的研究热点。Shi 等^[1]开展了接触爆炸试验和数值模拟研究, 指出在 RC 板正面喷涂聚脲涂层时, 聚脲材料会在高温下熔融, 导致其力学性能无法充分发挥。在接触爆炸试验中, RC 板双面喷涂聚脲涂层, 正面涂层受到高压和高温作用而发生熔融^[12], 当 TNT 药量为 10 kg 时, 背面涂层出现严重脱黏, 涂层鼓包扩展至 RC 基板边缘^[13]。Lim 等^[14]通过试验研究发现 RC 基板出现贯穿, 当涂层越薄时, 涂层鼓包直径越小, 黏结强度是影响抗爆性能的关键因素。Mu 等^[15]通过试验和数值模拟研究发现, 涂层增厚可以降低涂层鼓包高度。Wang 等^[16]、汪维等^[17]和 Wang 等^[18]对一种改性聚脲 (polyisocyanate-oxazodone, POZD) 加固 RC 板进行了试验和数值模拟研究, 指出其破坏模式包括 RC 基板的压缩坑、层裂坑、贯穿以及聚脲涂层的鼓包和破裂^[16]。此外, 涂层未提高 RC 基板的强度, 而是通过大变形抑制混凝土破片的飞散^[16]; 涂层越厚, 涂层鼓包的高度和直径越小^[17], 涂层破裂所需的炸药量则越大^[18]。聚脲涂层在混凝土破片和泄漏冲击波共同作用下产生鼓包^[19], 涂层通过膜体约束作用来束缚混凝土破片^[20]。徐赵威等^[21]对背面喷涂聚脲的 RC 厚板 (厚度为 30 cm) 开展了试验和数值模拟研究, 给出了不同比例板厚对应的破坏模式。胡玉峰等^[22]通过试验对比了碳纤维和聚脲两种加固材料, 发现聚脲加固效果更好。上述学者的试验研究主要集中于爆炸后试件的残余损伤, 如 RC 基板的压缩坑、聚脲涂层的鼓包尺寸以及涂层的破裂等; 数值模拟研究也大多采用残余损伤数据来验证数值模型。需要指出的是, 残余损伤反映了涂层的抗爆加固效果, 而涂层的抗爆作用机制是在爆炸过程中发挥的。

背面喷涂聚脲的 RC 板中, 聚脲软薄壁层附着在 RC 硬基体上, 二者的力学性能差异导致 RC 基板局部破坏和聚脲涂层动态响应在时间尺度上存在明显差异。具体体现在: 炸药起爆后极短时间 (数百微秒) 内, 爆炸波的传播作用使混凝土发生碎裂^[2, 5, 23-24], RC 基板形成压缩碎裂区和层裂区, 甚至出现贯穿现象; RC 基板背面碎裂的混凝土形成破片流^[5, 25-26], 涂层在其冲击作用下持续长时间 (数十毫秒) 的动态变形^[9, 19-20]。因此, 需要研究爆炸波传播作用下聚脲涂层对 RC 基板局部破坏的影响以及混凝土破片流冲击作用下聚脲涂层的动态响应。关于聚脲涂层的动态响应, Guo 等^[9]对接触爆炸过程中涂层的动态鼓包和动态应变进行了测量, 并揭示了聚脲涂层分区耗散爆炸能量的抗爆作用机制。关于聚脲涂层对 RC 基板局部破坏的影响, 有学者认为, 透射进入涂层的应力波会再次反射回混凝土中, 从而加重 RC 基板损伤^[15]; 也有学者认为聚脲涂层能够延滞应力波作用的时间^[17]、增加应力波反射次数^[21]、削弱入射波^[20-21]的影响。这些基于应力波传播理论的研究, 大多停留在简单分析或现象描述上, 缺乏定量结果和深入分析。

本文中基于应力波传播理论, 研究爆炸波传播作用下聚脲涂层对 RC 基板层裂和贯穿的影响。首先对聚脲涂层对 RC 基板局部破坏的影响进行宏观分析。随后, 在 Tu 等^[24]的 RC 板层裂解析模型基础上, 研究背面喷涂聚脲涂层后 RC 基板中应力波的传播过程, 并提出 RC 基板层裂深度解析模型。利用该模型, 定量分析聚脲涂层对 RC 基板临界层裂和贯穿的影响。基于上述分析, 进一步推断无涂层 RC 板的贯穿预估方法可扩展应用于背面喷涂聚脲的 RC 基板, 并通过学者们报道的接触爆炸试验对该推断进行验证, 为背面喷涂聚脲 RC 基板的贯穿预估提供方法, 同时也间接验证本文提出的 RC 基板层裂深度解析模型的合理性。

1 聚脲涂层对 RC 基板局部破坏影响的宏观分析

接触爆炸下, RC 板的局部破坏主要是由爆炸波的传播作用引起, 爆轰产物(如高压气体)在波传播后, 会加剧 RC 板的局部破坏^[27]。为简化分析过程, 只研究爆炸波的传播作用, 不考虑爆轰产物的影响。无涂层 RC 板(下文称 RC 裸板)和背面喷涂聚脲 RC 基板中爆炸波传播过程, 如图 1 所示。可以看出, 无论是否喷涂聚脲涂层, 压缩波抵达 RC 板背面之前的作用过程是相同的^[9, 18]: 炸药中的爆轰波通过炸药-混凝土界面进入混凝土^[2, 25], 此时炸药下方的混凝土中压力远超动态抗压强度^[2, 7], 形成近似流体区和完全压碎区^[28]; 压缩波沿 RC 板的厚度方向继续传播, 混凝土孔隙塌陷导致压缩波持续衰减^[24, 29-31]。因此, 在压缩波抵达 RC 板背面之前, 可以认为 RC 裸板和背面喷涂聚脲 RC 基板的压缩坑相同。

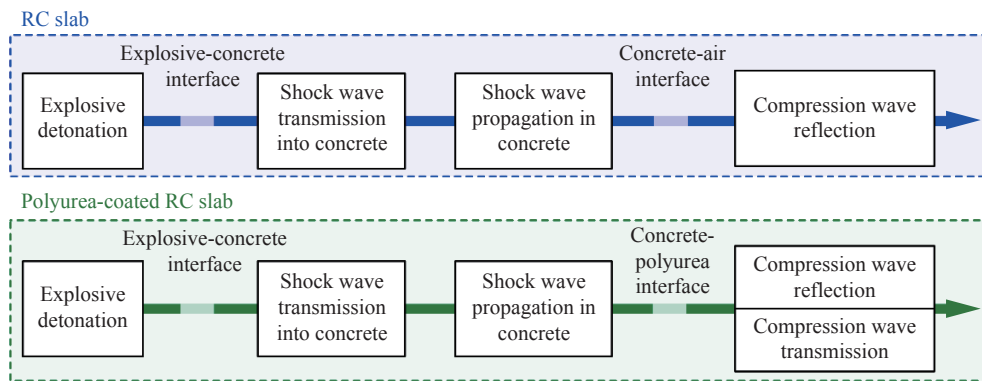


图 1 RC 裸板和背面喷涂聚脲 RC 板中爆炸波作用过程

Fig. 1 Shock wave action processes in RC slabs and polyurea-coated RC slabs

当压缩波抵达 RC 板背面时, 混凝土-空气界面和混凝土-聚脲界面的差异导致 RC 裸板和喷涂聚脲 RC 基板中应力波传播的差异。对于 RC 裸板, 混凝土的波阻抗(介质密度与波速乘积)远大于空气的波阻抗。常规混凝土的弹性波波阻抗为 $8\sim 9 \text{ MPa}\cdot\text{s/m}$ ^[24-25], 空气的波阻抗约 $416.5 \text{ Pa}\cdot\text{s/m}$ ^[25]。因此, 可以认为压缩波在混凝土-空气界面反射为等幅拉伸波, 拉伸波的作用导致背面混凝土发生层裂碎裂。对于背面喷涂聚脲 RC 基板, 聚脲的波阻抗远大于空气介质的, 但小于混凝土材料的。入射压缩波在混凝土-聚脲界面形成反射拉伸波和透射压缩波, 反射拉伸波可能造成混凝土层裂碎裂, 而聚脲涂层中的透射压缩波可能影响混凝土层裂过程。

上述分析表明, 揭示聚脲涂层对 RC 板局部破坏影响的关键在于研究压缩波在背面混凝土-空气界面与混凝土-聚脲界面传播作用的差异。

2 RC 裸板中应力波传播和层裂深度解析模型

接触爆炸产生的爆炸波具有球形波阵面, 沿 RC 板的厚度方向传播, 并在混凝土-空气界面发生反射。图 2 给出了球形波阵面反射示意图。其中 A_1 点位于炸药正下方, 入射压缩纵波 σ_p 垂直入射, 而 A_2 点处的压缩波则以角度 θ 斜入射。Kot 等^[32]和 McVay^[23]的研究表明, 斜入射的纵波会产生反射纵波

σ_r 和反射剪切波 τ , 反射角度分别为 θ 和 β 。反射纵波导致混凝土层裂, 其中在炸药正下方的 A_1 点, 入射角 $\theta=0^\circ$, 反射系数为 -1 , 反射拉伸纵波的幅值最大, 混凝土层裂最严重(层裂深度最大)。

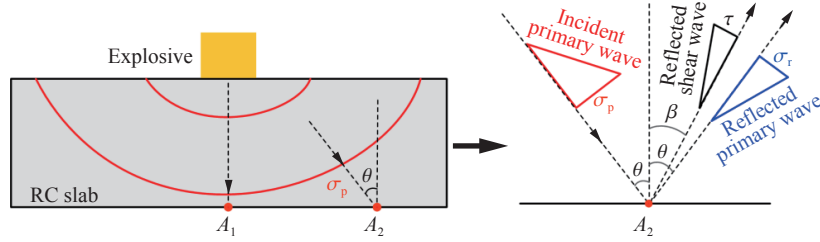


图 2 应力波在 RC 板背面的反射

Fig. 2 Stress wave reflection on the backside of an RC slab

Tu 等^[2, 24] 在 McVay^[23] 研究的基础上, 考虑了混凝土的应变率效应及应力波在混凝土中的衰减等因素, 提出预估 RC 板压缩坑^[2]、层裂坑^[24] 等局部破坏的解析模型。根据 Tu 等^[24] 的层裂预估模型, 图 3 给出了压缩波垂直入射时的反射传播与混凝土层裂。 t_0 时刻, 压缩波抵达混凝土-空气界面, 压缩波简化为无明显上升时间的三角波, 幅值为 σ_p , 空间长度(下文称波长)为 λ 。为了便于分析, 虚拟生成 1 个幅值与入射压缩相等且方向相反的拉伸波(图中虚线三角波), 向混凝土中传播。 t_1 时刻, 反射波与入射波叠加的净应力 σ_n 为拉伸应力, 且满足 $\sigma_n = \sigma_{p1} - \sigma_p$, 其中 σ_{p1} 为入射压缩波剩余部分的幅值; 随着应力波的持续传播, 净应力 σ_n 逐渐增大。 t_2 时刻, 假设在 d_1 深处, σ_n 超过混凝土动态拉伸强度 f_d , 发生第 1 次层裂(层裂深度为 d_1), 并形成新自由面(仍为混凝土/空气界面), 剩余入射压缩波 σ_{p2} 在该新自由面上继续反射。依此类推, 可能发生多次层裂, 层裂总深度不断增加, 当层裂坑与压缩坑相遇时, RC 板将被贯穿。

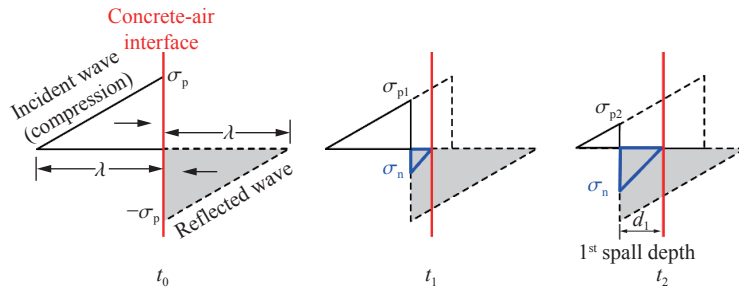


图 3 混凝土-空气界面处应力波反射和混凝土层裂

Fig. 3 Stress wave reflection and concrete spalling at the concrete-air interface

Tu 等^[24] 提出的层裂深度计算公式为:

$$\frac{\sigma_p - f_d}{\lambda - 2d_1} = \frac{\sigma_p}{\lambda}, \quad S_d = Nd_1 = N \frac{\lambda f_d}{2\sigma_p} \tag{1}$$

式中: σ_p 和 λ 分别为压缩波幅值和波长(见图 3), d_1 为首次层裂深度, S_d 为层裂总深度, f_d 为混凝土动态拉伸强度, N 为层裂次数, 其值为小于等于 σ_p/f_d 的最大整数。

接触爆炸条件下, 层裂过程中混凝土的拉伸应变率在 $10^2 \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$ 范围内^[33]。在该应变率范围内, 混凝土拉伸强度的动态增强因子 η 为 $6 \sim 8$ ^[34]。基于此, Tu 等^[24] 给出了 f_d 的计算方法为:

$$f_d = \eta f_t \quad 6 \leq \eta \leq 8, \quad f_t = 0.3 f_c^{2/3} \tag{2}$$

式中: f_t 为混凝土静态拉伸强度, f_c 为混凝土的静态抗压强度。

Tu 等^[24] 还给出了 RC 板背面入射压缩波 σ_p 和波长 λ 的计算方法, 这里不再赘述。Tu 等^[24] 详细给出了 RC 裸板的层裂次数、每次层裂深度, 以及总层裂深度; 并对比了 RC 裸板层裂深度解析模型的预测

结果与 15 次接触爆炸试验结果, 总层裂深度(层裂坑深度)预估误差均未超过 19%。式 (1) 的适用条件^[24]为:

(1) RC 板中应力波简化为三角波, 入射压缩波反射过程是没有衰减、弥散的理想反射。

(2) 采用 McVay^[23] 的层裂深度量化方法, 该方法取决于入射压缩波的幅值和波长, 以及混凝土的动态拉伸强度 f_d , 并假设只要净应力 σ_n 超过 f_d , 就会形成层裂。

(3) 层裂过程中混凝土的拉伸应变率范围为 $10^2 \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$, 混凝土的拉伸强度 $\eta=6 \sim 8$ 。

(4) 不考虑钢筋对应力波传播的影响。

3 喷涂聚脲 RC 基板中应力波传播和层裂深度解析模型

3.1 混凝土-聚脲界面处垂直入射压缩波的反射和透射

RC 板背面喷涂聚脲涂层后, 爆炸波沿板厚方向传播, 在混凝土-聚脲界面发生反射, 入射压缩波表示为 σ_p , 反射拉伸波表示为 σ_r , 球形波阵面的反射见图 4。与图 2 类似, 在炸药正下方的混凝土-聚脲界面, 压缩波垂直入射; 而在炸药投影区之外, 压缩波斜入射。压缩波的斜入射非常复杂, 除了混凝土中的反射纵波和反射剪切波外, 聚脲涂层中还会产生透射压缩波和透射剪切波。反射系数与这些波都相关, 难以确定。考虑到压缩波垂直入射时, RC 基板的层裂破坏最严重(层裂深度最大), 且仅形成反射拉伸波和透射压缩波, 因此本文仅对压缩波的垂直入射进行研究。

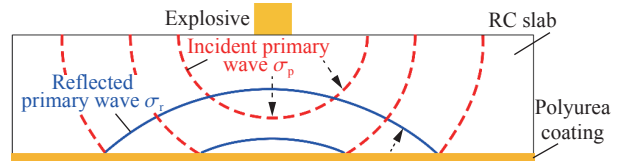


图 4 背面喷涂聚脲 RC 基板中应力波传播

Fig. 4 Stress wave propagation in polyurea-coated RC slab

喷涂聚脲前通常涂刷双组份环氧改性聚氨酯底漆^[1, 9, 12-13, 16-21], 以提升聚脲与混凝土的界面结合强度(黏接强度)。底漆在混凝土表面具有较强渗透能力^[12], 形成约 $20 \sim 50 \mu\text{m}$ 的黏接层。与聚脲涂层厚度(通常为数毫米)相比, 黏接层极薄, 其物理效应可等效为界面过渡区, 而非独立介质层, 可忽略其对混凝土/聚脲反射系数和透射系数的影响。混凝土/聚脲界面处, 在黏接力作用下混凝土与聚脲之间不会发生滑动, 界面两侧的应力处于平衡状态, 位移满足连续性条件。根据这些条件, 可以得到:

$$\sigma_p + \sigma_r = \sigma_t, \quad u_p + u_r = u_t \quad (3)$$

式中: σ_t 为聚脲中透射压缩波应力, σ_p 和 σ_r 分别对应混凝土中入射压缩波和反射拉伸波应力; u_p 和 u_r 分别是入射波和反射波波阵面上及波阵面后的混凝土粒子速度, u_t 是透射波波阵面上及波阵面后的聚脲粒子速度。根据牛顿第二定律, 可以得到:

$$u_p = \frac{\sigma_p}{\rho_c c_c}, \quad u_r = \frac{-\sigma_r}{\rho_c c_c}, \quad u_t = \frac{\sigma_t}{\rho_p c_p} \quad (4)$$

式中: ρ_c 和 ρ_p 分别为混凝土和聚脲的密度, c_c 和 c_p 分别为混凝土和聚脲中的纵波波速。将式 (4) 代入式 (3), 可以得到反射系数 r 和透射系数 k :

$$r = \frac{\sigma_r}{\sigma_p} = \frac{\rho_p c_p - \rho_c c_c}{\rho_c c_c + \rho_p c_p}, \quad k = \frac{\sigma_t}{\sigma_p} = \frac{2\rho_p c_p}{\rho_c c_c + \rho_p c_p} \quad (5)$$

Gebbeken 等^[35] 认为常规混凝土的 Hugoniot 弹性极限范围为 $250 \sim 600 \text{ MPa}$, 与密度和强度等相关。在接触爆炸试验^[35] 中, 装药是 500 g PETN 炸药, 混凝土在 4 cm 深处的压力超过 1 GPa , 在 6 cm 深处约为 100 MPa , 而在 8 cm 深处则衰减至 50 MPa 以下。Tu 等^[2] 认为, 在孔隙压实过程中, 压力幅值与波传播距离的 2.5 次方呈反比。上述学者的研究表明, 混凝土中爆炸波衰减迅速。考虑到在接触爆炸试验中, RC 板的厚度通常在 $15 \sim 30 \text{ cm}$, 装药量通常在数千克内, 为了简化分析过程, 假设 RC 板背面的混凝土处于 Hugoniot 弹性极限内, 压缩波为弹性波。因此, 在式 (5) 中, 通过确定混凝土和聚脲的密度及弹性波速, 可以计算出反射系数 r 和透射系数 k 。

3.2 压缩波垂直入射时反射系数和透射系数的确定

学者们^[36-38]开展了聚脲材料冲击状态方程(Hugoniot 方程)的研究。Mock 等^[36]对 Polyurea 1000 聚脲(密度为 1 098 kg/m³)进行了飞板撞击试验,得到冲击波速度与粒子速度 u_s-u_p 的 Hugoniot 线,发现 u_s 和 u_p 之间具有线性关系, $u_p=0$ 时, $u_s=1 850$ m/s。Jordan 等^[37]也研究了聚脲(密度为 1 104±10 kg/m³)的 Hugoniot 特性,并与已有的试验结果进行了对比,发现 $u_p=0$ 时, $u_s=1 950$ m/s。Mock 等^[36]和 Jordan 等^[37]均认为弹性纵波速度为 1 660 m/s,略小于 $u_p=0$ 时的冲击波速度。Carter 等^[38]在对 20 余种聚合物的研究中也发现了该现象,认为可能的原因是聚合物的剪切强度引入了刚体效应,导致在飞板撞击试验中,聚合物试样未处于理想一维应力状态。上述的研究表明,尽管聚脲材料存在差异,但 u_s-u_p Hugoniot 线相似,弹性纵波波速可能接近。本文中聚脲材料弹性纵波波速取 1 660 m/s。表 1 列出了在接触爆炸试验中所用聚脲材料的物理力学性能,密度范围为 977~1 121 kg/m³,其中 POZD 聚脲得到较多研究。因此,本文中聚脲密度取 1 020 kg/m³,得到聚脲材料的弹性波波阻抗约为 1.69 MPa·s/m。

表 1 接触爆炸试验中所用聚脲材料物理力学性能

Table 1 Physical and mechanical properties of polyurea used in contact explosion tests

断裂伸长率/%	弹性模量/MPa	拉伸强度/MPa	密度/(g·cm ⁻³)	黏结强度/MPa	来源
120	161	/	1.120	>混凝土抗拉强度 ⁽¹⁾	文献[1]
451	84.01	22.6~25.4	0.977	5或混凝土破坏 ⁽²⁾	文献[12-13]
105	234	18	1.121	/	文献[14]
465	/	≥25	1.02	≥3.5	文献[9,16-21]
≥400	/	≥25	1.068	≥2.5	文献[15]

注: (1) 文献 [1] 未报道黏结强度,但指出黏结强度大于混凝土抗拉强度。

(2) 文献 [12] 指出底漆与混凝土基底附着强度可达 5 MPa。常规 C40 混凝土的抗拉强度通常低于 5 MPa,此处明确为 5 MPa 或混凝土破坏。

Van Amelsfort 等^[7]的研究中,常规混凝土的强度为 25~30 MPa,密度约为 2 200 kg/m³,弹性波速约为 3 500 m/s。Tu 等^[2,24]的研究中,强度为 36 MPa 的混凝土,密度为 2 314 kg/m³,弹性波速约为 3 600 m/s。本文中强度等级为 C40 的常规混凝土,其密度和弹性波速参考 Tu 等^[2,24]的数值,得出混凝土波阻抗约为 8.33 MPa·s/m。将上述聚脲和混凝土的波阻抗代入式 (5),可以得到压缩波垂直入射时的反射系数 r 和透射系数 k :

$$r = \frac{\rho_p c_p - \rho_c c_c}{\rho_p c_p + \rho_c c_c} = -0.663, \quad k = \frac{2\rho_p c_p}{\rho_p c_p + \rho_c c_c} = 0.337 \quad (6)$$

3.3 喷涂聚脲 RC 基板层裂深度解析模型

混凝土-聚脲界面处应力波传播和混凝土层裂过程,如图 5 所示,其中入射压缩波被简化为无明显上升时间的三角波,幅值为 σ_p ,波长为 λ 。在 t_0 时刻,混凝土中的入射压缩波抵达混凝土-聚脲界面,虚拟的反射拉伸波(图中虚线三角波)幅值为 $r\sigma_p$,其中 r 为反射系数($-1 < r < 0$)。在 t_1 时刻,入射波与反射波叠加后的净应力波 σ_n 仍为压缩波,混凝土处于压缩状态。在 t_2 时刻,净应力波由压缩波和拉伸波两部分组成,其中紧邻混凝土-聚脲界面的是压缩波,而拉伸波则位于混凝土更深处。在 t_3 时刻,距界面 d_1 深处的净拉伸应力 σ_n 超过了混凝土动态拉伸强度 f_t ,导致发生第 1 次层裂(层裂深度为 d_1),形成新自由面(为混凝土/空气界面)。幅值为 σ_{p3} 的剩余入射压缩波在新自由面上继续反射。依此继续,可能会发生多次层裂,层裂的总深度不断增加。当层裂坑与压缩坑相遇时,RC 基板将发生贯穿。

上述分析中未考虑聚脲涂层中透射压缩波对混凝土层裂的影响,这里作如下解释:通常,聚脲涂层的厚度(数毫米至十几毫米)远小于 RC 板,聚脲中的透射波 σ_t 沿涂层厚度方向传播,抵达聚脲/空气界面时反射为拉伸波,并可能在聚脲/混凝土界面透射,进入混凝土。3.2 节中指出,混凝土波速(3 600 m/s)是聚脲波速(1 660 m/s)的 2 倍多。在聚脲涂层中,拉伸波传播至聚脲/混凝土界面的过程中,混凝土中反射

波 σ_r 已传播至一定深度(该深度大于涂层厚度的 4 倍)。此外, 图 5 显示, 紧邻混凝土/聚脲界面的混凝土中, 净应力波仍为压缩波。即使聚脲涂层中的拉伸波进入混凝土, 也会与净应力波叠加并被削弱。因此, 聚脲涂层中透射波对混凝土层裂的影响有限, 本文中忽略其对混凝土层裂的影响。

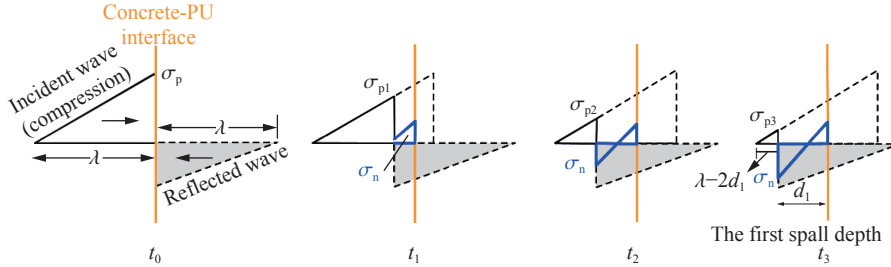


图 5 混凝土/聚脲界面处应力波反射和混凝土层裂

Fig. 5 Stress wave reflection and concrete spalling at the concrete/polyurea interface

令 $a=|r|$, 根据图 5 中 t_3 时刻的波形得到第 1 次层裂发生时剩余入射压缩波的幅值和波长分别为 $a\sigma_p - f_d$ 和 $\lambda - 2d_1$ 。由相似三角形性质(参考 Tu 等^[24]的推导方法), 进一步得到第 1 次层裂深度 d_1 :

$$d_1 = \frac{\lambda(f_d - a\sigma_p)}{2\sigma_p} + \frac{\lambda}{2} \tag{7}$$

式中: σ_p 为入射压缩波幅值, λ 为波长, f_d 为混凝土的动态拉伸强度。

第 1 次层裂产生的新自由面是混凝土/空气界面(反射系数为 -1), 剩余入射压缩波在该自由面上继续反射, 可能引发第 2 次层裂。假设第 2 次层裂的深度为 d_2 , 则剩余入射压缩波的幅值和波长分别为 $a\sigma_p - 2f_d$ 和 $\lambda - 2d_1 - 2d_2$ 。根据式 (7) 的推导方法, 得到为 d_2 :

$$d_2 = \frac{(-a\sigma_p + 2f_d)\lambda}{2\sigma_p} + \frac{\lambda}{2} - d_1 \tag{8}$$

假设层裂次数为 n , 则第 n 次层裂深度 d_n 为:

$$d_n = \frac{(-a\sigma_p + nf_d)\lambda}{2\sigma_p} + \frac{\lambda}{2} - \sum_{i=1}^{n-1} d_i \tag{9}$$

每次层裂后的剩余入射压缩波, 是引发下一次层裂的入射压缩波。因此, 第 $n-1$ 次层裂后剩余入射压缩波幅值大于等于 f_d , 即 $a\sigma_p - (n-1)f_d \geq f_d$; 而第 n 次层裂后剩余入射压缩波幅值小于 f_d , 即 $a\sigma_p - nf_d < f_d$ 。由此可得, 层裂次数 n 满足:

$$\frac{a\sigma_p}{f_d} - 1 < n \leq \frac{a\sigma_p}{f_d} \tag{10}$$

由式 (9)~(10) 可得总层裂深度 S 以及层裂次数 n :

$$S = \sum_{i=1}^n d_i = \frac{\lambda(-a\sigma_p + nf_d)}{2\sigma_p} + \frac{\lambda}{2} = \frac{n\lambda f_d}{2\sigma_p} + \frac{(1-a)\lambda}{2} \tag{11}$$

式中: n 的值为小于等于 $a\sigma_p / f_d$ 的最大整数。

可以看出, 式 (11) 中有 4 个量, 分别是 a 、 f_d 、 σ_p 和 λ 。其中, $a = |r| = 0.663$, f_d 可由式 (2) 计算。第 1 节的研究显示无论背面是否喷涂聚脲涂层, 压缩波到达 RC 板背面前的传播过程相同。因此, 式 (11) 中 σ_p 和 λ 的计算方法与式 (1) 相同。至此, 式 (11) 中的 4 个量都已确定。最后, 给出式 (11) 的适用条件:

(1) 背面喷涂聚脲涂层 RC 基板中的应力波简化为三角波, 基板背面的混凝土处于 Hugoniot 弹性极限内, 波速为弹性波速。入射压缩波的反射过程是没有衰减和弥散的理想反射。

(2) 采用 McVay^[23] 和 Tu 等^[24] 的层裂深度量化方法, 该方法取决于入射压缩波的幅值和波长以及混凝土的动态拉伸强度(f_d), 并假设只要净应力 σ_n 超过 f_d , 就会形成层裂。

(3) 层裂过程中, 混凝土拉伸应变率范围为 $10^2 \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$, 混凝土的拉伸强度 DIF 范围为 6~8。

(4) 不考虑钢筋对应力波传播的影响。

(5) 聚脲材料类型众多, 学者们在 RC 结构抗爆加固研究中所用聚脲的密度大多在 $977 \sim 1121 \text{ kg/m}^3$ 范围内(见表 1), 假设这些聚脲的弹性纵波波速接近, 大约为 1660 m/s 。

(6) 喷涂聚脲前, RC 基板表面处理中所用底漆通常为双组份环氧改性聚氨酯底漆^[1, 9, 12-13, 16-21], 形成的黏接层厚度远小于聚脲涂层厚度, 其物理效应可等效为界面过渡区, 而非独立介质层, 忽略其对混凝土-聚脲反射系数的影响。

4 聚脲涂层对 RC 基板临界层裂和贯穿的影响分析

4.1 聚脲涂层对 RC 基板临界层裂的影响

第 3.3 节的 RC 基板层裂深度解析模型表明, 背面喷涂聚脲涂层后, 混凝土-聚脲界面仅影响 RC 基板的第 1 次层裂。首次层裂后的层裂过程与 RC 裸板相同, 压缩波在混凝土-空气自由面上发生反射。对比式 (1) 和式 (7) 可以看出, RC 裸板仅发生 1 次层裂时, 入射压缩波需满足 $\sigma_p \geq f_d$; 而对于背面喷涂聚脲 RC 基板, 仅发生 1 次层裂则需满足 $\sigma_p \geq f_d/a = f_d/0.663$ 。当 $f_d/0.663 > \sigma_p > f_d$ 时, RC 裸板发生层裂, 而背面喷涂聚脲 RC 基板则不会发生层裂。显然, 与 RC 裸板相比, 聚脲涂层提高了 RC 基板的临界层裂抗力。

对比图 3 和图 5 可以发现, RC 裸板中的净应力波是拉伸波(见图 3), 而背面喷涂聚脲涂层后, RC 基板中紧邻混凝土/聚脲界面的净应力波则为压缩波(见图 5), 在更深处混凝土中的净应力波才为拉伸波。因此, 如果发生层裂, 喷涂聚脲涂层后的首次层裂深度会大于 RC 裸板, 产生的混凝土破片尺寸可能会增大。例如, 对于强度等级 C40 的常规混凝土, 依据式 (2) 计算得到 f_d 的范围为 $21 \sim 28 \text{ MPa}$, 这里取 $f_d = 21 \text{ MPa}$; 假设入射压缩波幅值 $\sigma_p = f_d/a \approx 32 \text{ MPa}$, 入射压缩波的波长为 λ 。在此条件下, RC 裸板和背面喷涂聚脲 RC 基板均只发生 1 次层裂。依据式 (1) 计算得到 RC 裸板层裂深度 $S_d = 0.33\lambda$; 依据式 (11) 计算得到背面喷涂聚脲 RC 基板层裂深度 $S = 0.5\lambda$, 是 RC 裸板的约 1.5 倍。

4.2 聚脲涂层对 RC 基板贯穿的影响

压缩坑与层裂坑深度之和等于 RC 板厚度时, 会发生贯穿^[2, 24, 33]。第 1 节的研究表明背面喷涂聚脲 RC 基板的压缩坑与 RC 裸板相同。因此, 聚脲涂层对 RC 基板贯穿的影响, 主要体现在其对基板总层裂深度的影响。根据式 (1) 和式 (11), 可以得到 RC 裸板总层裂深度 S_d 与背面喷涂聚脲 RC 基板总层裂深度 S 的比值为:

$$\frac{S}{S_d} = \frac{nf_d + (1-a)\sigma_p}{Nf_d} = \frac{nf_d + 0.337\sigma_p}{Nf_d} \quad (12)$$

式中: $a=|r|=0.663$ 。由于 N 的值为小于等于 σ_p/f_d 的最大整数, n 的值为小于等于 $a\sigma_p/f_d$ 的最大整数, 根据式 (12) 可以得到:

$$1 - \frac{1}{N} < \frac{S}{S_d} < 1 + \frac{1}{N} \quad (13)$$

当贯穿发生时, 有理由认为 RC 板会发生多次层裂, 且 RC 裸板的层裂次数 N 显著大于 1。式 (13) 表明, 当 N 较大时, S 与 S_d 的比值趋近于 1, 这表明聚脲涂层对 RC 基板的总层裂深度影响较小。

为了验证上述结论的有效性, 结合 Tu 等^[24] 给出的算例进行详细分析。该算例的条件为: 常规混凝土强度为 36 MPa , RC 板厚度为 100 mm ; 圆柱体 TNT 药柱长径比为 $1:1$, 药量为 168 g ; Tu 等^[24] 根据其提出的应力波衰减公式, 计算得到 RC 板背面入射压缩波幅值 $\sigma_p = 178.3 \text{ MPa}$, 波长 $\lambda = 105.8 \text{ mm}$ 。由式 (2) 计算得到混凝土动态拉伸强度 f_d 范围为 $19.6 \sim 26.2 \text{ MPa}$, 这里取 $f_d = 19.6 \text{ MPa}$ 。由式 (1) 计算得到 RC 裸板层裂次数 $N = 9$, 总层裂深度 $S_d = 52.34 \text{ mm}$ 。假设在 RC 板背面喷涂聚脲涂层, 由式 (11) 计算得到 RC 基板层裂次数 $n = 6$, 总层裂深度 $S = 52.72 \text{ mm}$ 。在这两种情况下, 每次层裂对应的层裂深度见图 6。可以看出, 在 RC 裸板的 9 次层裂中, 每次层裂深度均为 5.82 mm ; 喷涂聚脲后, RC 基板首次层裂深度为

23.64 mm, 显著大于 RC 裸板, 而第 2~6 次层裂的深度与 RC 裸板相同。

此外, 对前期研究^[9]中保留的试件 T0、T1 和 T2 沿中线进行了切割, 试件剖面损伤形貌如图 7 所示。这 3 个试件均采用厚度为 15 cm、混凝土强度为 40.2 MPa 的 RC 板, 且装药条件相同(800 g 立方体 TNT 药柱)。其中, 试件 T0 为裸板, 层裂坑深度约为 96 mm; 试件 T1 和 T2 的背面分别喷涂了 4.5 和 9.6 mm 厚的聚脲涂层, 基板层裂坑深度分别约为 98 和 96 mm, 分别为 T0 的 1.02 倍和 1 倍。试验结果表明, 在发生贯穿时, RC 裸板与背面喷涂聚脲的 RC 基板的总层裂深度相近, 这验证了式 (13) 中定量分析结果的有效性。

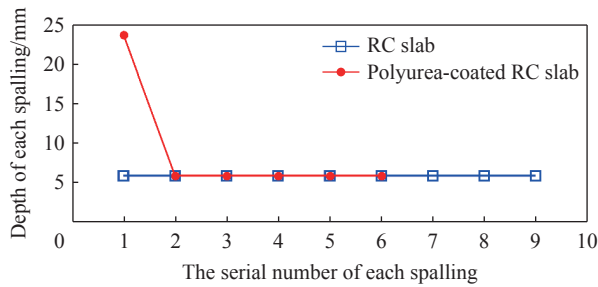


图 6 算例中 RC 裸板和背面喷涂聚脲 RC 板每次层裂的深度

Fig. 6 Depth of each spalling for RC slab and polyurea-coated RC slab in the example

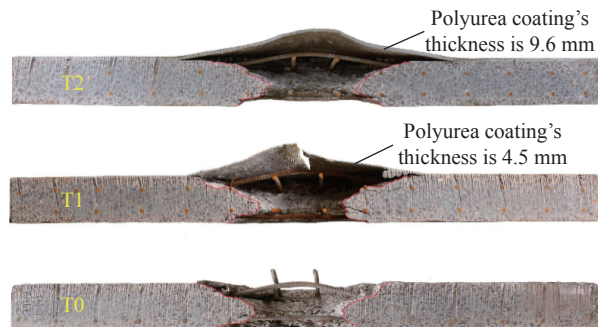


图 7 背面喷涂聚脲 RC 板与 RC 裸板剖面形貌

Fig. 7 Profile morphology of polyurea-coated and bare RC slabs

上述分析表明, 在发生贯穿时, 与 RC 裸板相比, 聚脲涂层显著增大了 RC 基板首次层裂的深度, 这可能导致首次层裂产生的混凝土碎块尺寸增大。此外, 聚脲涂层减少了 RC 基板的层裂次数, 但对总层裂深度和贯穿的影响较小。

5 模型有效性的间接验证及基板贯穿预估方法

在接触爆炸试验中, RC 基板的层裂次数及每次层裂的深度难以通过试验直接测量。此外, 由于聚脲涂层的遮挡, 关于基板层裂坑深度的报道较少。相比之下, RC 基板是否发生贯穿的试验结果较易获取。4.2 节中, 基于背面喷涂聚脲 RC 基板层裂深度解析模型(式 (11)), 式 (13) 定量描述了聚脲涂层对 RC 基板总层裂深度的影响。当发生贯穿时, RC 裸板与背面喷涂聚脲 RC 板的总层裂深度之比接近于 1。由此可以推断, RC 裸板的贯穿预估方法可扩展应用于背面喷涂聚脲 RC 基板的贯穿预估。本节将通过试验验证这一推断, 间接验证式 (11) 所示的层裂深度解析模型的有效性, 并为背面喷涂聚脲 RC 基板的贯穿预估提供方法。

RC 裸板局部破坏预估方法得到了广泛研究^[6, 22, 31-32, 39-41]。其中, Morishita 等^[41]提出的经验公式形式简明、适用条件宽泛, 且与大量接触爆炸试验的结果相符。该公式的适用条件包括: 混凝土强度范围为 18~84.8 MPa, RC 板厚度范围为 4~58 cm, 配筋率为 0.5%~1.0%, 炸药量范围为 25~12 kg。当比例板厚小于或等于 $2.0 \text{ cm/g}^{1/3}$ 时, RC 板发生贯穿; 而当比例板厚大于 $2.0 \text{ cm/g}^{1/3}$ 时, 则不会发生贯穿^[41]。

表 2 列出了部分学者开展的背面喷涂聚脲 RC 板接触爆炸试验(共 21 次试验)以及 Morishita 公式的预估结果。这些试验中, 学者们未提供基板层裂坑深度的试验数据, 但给出了基板贯穿结果。试验中, 常规混凝土强度范围为 36.1~43 MPa, 符合 Morishita 公式的适用条件。在布筋方式方面, Shi 等^[1]采用单层双向钢筋, 徐赵威等^[21]采用 5 层双向钢筋, 其余试验均采用双层双向钢筋。表 2 显示, RC 基板的比例板厚值分布于 $0.98\sim 2.15 \text{ cm/g}^{1/3}$ 范围内。Morishita 公式的预估结果与 20 次试验结果一致。然而, 徐赵威等^[21]的试验 RCP2 中基板未发生贯穿, 而 Morishita 公式却预估为贯穿, 这一差异可能源于其较密的布筋方式(直径为 6 mm 的钢筋 5 层双向布设, 网孔尺寸为 $50 \text{ mm}\times 50 \text{ mm}$ ^[21])。此外, 尽管文献 [9] 和 [17]

中试件的配筋率均超出 Morishita 公式的适用条件(配筋率为 0.5%~1.0%), 但预估结果与试验结果一致。

表 2 背面喷涂聚脲 RC 板接触爆炸试验及基板贯穿预估结果

Table 2 Contact explosion tests and breach prediction results for polyurea-coated RC slabs

试验编号	RC 基板			聚脲涂层 厚度/mm	TNT 药量/kg	试验结果	Morishita 公式 预估结果	试验来源
	厚度/mm	配筋率 ⁽¹⁾ /%	比例板厚/(cm·g ^{-1/3})					
P-1	60	0.92	1.05	3.9	0.189	贯穿	贯穿	文献[1]
P1-1	150		1.78	4	0.6	贯穿	贯穿	
P1-2	150		1.50	4	1.0	贯穿	贯穿	
P2-1	150		1.23	6	1.8	贯穿	贯穿	
P2-2	150		1.19	6	2.0	贯穿	贯穿	
P3-1	150	1.13	1.19	8	2.0	贯穿	贯穿	文献[17]
P3-2	150		1.15	8	2.2	贯穿	贯穿	
P4-1	150		1.12	10	2.4	贯穿	贯穿	
P4-2	150		1.09	10	2.6	贯穿	贯穿	
P5-1	150		1.04	12	3.0	贯穿	贯穿	
P5-2	150		0.98	12	3.6	贯穿	贯穿	
RCP1	300	0.94	2.08	10	3.0	未贯穿	未贯穿	文献[21]
RCP2	300		1.75	10	5.0	未贯穿	贯穿	
T1	200		2.15	2	0.8	未贯穿	未贯穿	
T2	200		2.15	4	0.8	未贯穿	未贯穿	
T3	200	0.90	2.15	6	0.8	未贯穿	未贯穿	文献[15]
T4	200		2.15	8	0.8	未贯穿	未贯穿	
T5	200		2.15	10	0.8	未贯穿	未贯穿	
T1	150		1.62	4.5	0.8	贯穿	贯穿	
T2	150	1.44	1.62	9.6	0.8	贯穿	贯穿	文献[9]
T3	150		1.12	14.8	2.4	贯穿	贯穿	

注: Morishita 等^[41]给出的配筋率由钢筋截面面积除以 RC 板截面面积计算得到。

表 2 的对比结果表明, Morishita 公式的预估结果与试验结果具有良好的一致性, 这直接验证了本节推断的合理性, 即 RC 裸板贯穿预估方法可扩展应用于背面喷涂聚脲 RC 基板的贯穿预估, 并间接验证了第 3 节所述层裂深度解析模型的有效性。结合 Morishita 公式适用条件^[41]以及表 2 中所列的试验条件, 给出 Morishita 公式扩展应用于背面喷涂聚脲 RC 基板贯穿预估的适用条件: (1) 常规混凝土强度等级为 C30 或 C40; (2) RC 基板的厚度范围为 60~300 mm; (3) RC 基板的配筋方式为单层双向或双层双向布筋, 配筋率范围为 0.5%~1.44%, 比例板厚范围为 0.98~2.15 cm/g^{1/3}。

6 结 论

本文中基于应力波传播理论, 宏观分析了聚脲涂层对 RC 板局部破坏的影响, 并在 Tu 等^[24]的 RC 裸板层裂深度解析模型基础上, 分析背面喷涂聚脲 RC 基板中的应力波传播过程, 提出 RC 基板层裂深度的解析模型。基于该解析模型, 定量分析了聚脲涂层对 RC 基板临界层裂和贯穿的影响, 提出并通过试验验证了 RC 裸板贯穿预估方法(Morishita 等^[41]的经验公式)可以扩展应用于背面喷涂聚脲的 RC 基板, 得到主要结论如下。

(1) 在爆炸波传播作用过程中, 与 RC 裸板相比, 背面聚脲涂层对 RC 基板的压缩坑没有影响, 但会对 RC 基板的层裂破坏产生影响。

(2) 在 RC 裸板背面, 拉伸波与压缩波形成的净应力波始终是拉伸波; 而在背面喷涂聚脲 RC 基板中, 紧邻混凝土/聚脲界面的净应力波是压缩波, 在更深处的混凝土中, 净应力波才是拉伸波。聚脲涂层中透射的压缩波对混凝土层裂的影响有限。

(3) 背面喷涂聚脲后, 混凝土/聚脲界面仅影响 RC 基板的第 1 次层裂, 首次层裂后的层裂过程与 RC 裸板相同。

(4) 发生临界层裂(只发生 1 次层裂)时, 聚脲涂层可以提高 RC 基板的临界层裂抗力, 但层裂深度会增大, 层裂产生的混凝土破片尺寸可能变大。

(5) 发生贯穿时, 聚脲涂层会使 RC 基板第 1 次层裂深度显著增加, 但层裂次数减少; 聚脲涂层对 RC 基板的总层裂深度和贯穿影响较小。

(6) RC 裸板的贯穿预估方法可以扩展应用于背面喷涂聚脲的 RC 基板。其中, Morishita 等^[41]的经验公式的适用性得到了接触爆炸试验的验证, 并给出了其适用条件。

需要指出的是, 接触爆炸过程非常复杂, 爆炸波传播作用在炸药起爆后极短时间内占主导, 之后爆炸产物会加剧 RC 板的局部破坏^[27]; 此外, 应力波在钢筋附近会发生弥散^[4,23]。本文并未考虑爆炸产物和钢筋的影响。

参考文献:

- [1] SHI S, LIAO Y, PENG X, et al. Behavior of polyurea-woven glass fiber mesh composite reinforced RC slabs under contact explosion [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2019, 132: 103335. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2019.103335.
- [2] TU H, FUNG T C, TAN K H, et al. An analytical model to predict the compressive damage of concrete plates under contact detonation [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2019, 134: 103344. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2019.103344.
- [3] 杨建超, 王幸, 张强, 等. 钢筋混凝土板震塌碎片特性试验 [J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(5): 1690–1695. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2021.05.002.
YANG J C, WANG X, ZHANG Q, et al. Experimental study on the fragments characteristics of reinforced concrete slab caused by collapsing [J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(5): 1690–1695. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2021.05.002.
- [4] HUPFAUF M, GEBBEKEN N. Secondary debris resulting from concrete slabs subjected to contact detonations [J]. *Advances in Structural Engineering*, 2022, 25(7): 1373–1385. DOI: 10.1177/13694332221080614.
- [5] GUO S, HE X, LIU F, et al. Fragmentation behavior and velocity formula for secondary fragments from RC slabs during contact explosions [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2025, 167: 109047. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2024.109047.
- [6] US Department of Defense. Structures to resist the effects of accidental explosions, with change 2: UFC 3-340-02 [S]. Washington: US Department of Defense, 2008: 583-600.
- [7] VAN AMELSFORT R, WEERHEIJM J. The failure mode of concrete slabs due to contact charges [R]. Rijswijk (Netherlands): Prins Maurits Laboratory, 1988.
- [8] 颜海春, 方秦, 陈力. 遮弹层震塌碎块对成层式结构顶板的冲击破坏效应 [J]. *解放军理工大学学报(自然科学版)*, 2008, 9(1): 52–56. DOI: 10.7666/j.issn.1009-3443.20080111.
YAN H C, FANG Q, CHEN L. Damage effect on top plate of layered structure under impact of falling mass from blast layer [J]. *Journal of PLA University of Science and Technology*, 2008, 9(1): 52–56. DOI: 10.7666/j.issn.1009-3443.20080111.
- [9] GUO S, LIU F, CHEN J, et al. Dynamic response and blast resistance mechanism of polyurea coating on RC slab during contact explosions [J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 411: 134271. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.134271.
- [10] IQBAL N, TRIPATHI M, PARTHASARATHY S, et al. Polyurea coatings for enhanced blast-mitigation: a review [J]. *Royal Society of Chemistry Advances*, 2016, 6(111): 109706–109717. DOI: 10.1039/c6ra23866a.
- [11] RAMAN S N, NGO T, MENDIS P, et al. Elastomeric polymers for retrofitting of reinforced concrete structures against the explosive effects of blast [J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2012, 2012(1): 754142. DOI: 10.1155/2012/

- 754142.
- [12] 方志强, 吕平, 张锐, 等. 抗爆型聚脲涂层的性能及其抗爆机理 [J]. *高压物理学报*, 2022, 36(2): 43–52. DOI: 10.11858/gywlb.20210840.
FANG Z, LYU P, ZHANG R, et al. Blast-resistant properties and mechanism of anti-explosion polyurea coating [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2022, 36(2): 43–52. DOI: 10.11858/gywlb.20210840.
- [13] 张锐, 黄微波, 吕平, 等. 抗爆型聚脲涂层性能及其防护钢筋混凝土板接触爆炸与断裂机制研究 [J]. *工程科学与技术*, 2022, 54(5): 1–10. DOI: 10.15961/j.jsuese.202100619.
ZHANG R, HUANG W B, LYU P, et al. Study on the performance of blast-mitigation polyurea and fracture mechanism of the coated reinforced concrete slabs under contact explosion [J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 54(5): 1–10. DOI: 10.15961/j.jsuese.202100619.
- [14] LIM B, HONG P J. Sprayed-on polymer as concrete spall shield [J]. *Solid State Phenomena*, 2008, 136: 145–152. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.136.145.
- [15] MU M, LIU F, LI J, et al. Influence of modified polyurea coating thickness on the blast resistance of RC slab [J]. *Structures*, 2024, 67: 107009. DOI: 10.1016/j.istruc.2024.107009.
- [16] WANG W, YANG J, WANG J, et al. Experimental investigation of polyisocyanate-oxazodone coated square reinforced concrete slab under contact explosions [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2021, 149: 103777. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2020.103777.
- [17] 汪维, 杨建超, 汪剑辉, 等. POZD 涂层方形钢筋混凝土板抗接触爆炸试验研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2020, 40(12): 14–23. DOI: 10.11883/bzycj-2020-0180.
WANG W, YANG J C, WANG J H, et al. Experimental research on anti-contact explosion of POZD coated square reinforced concrete slab [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2020, 40(12): 121402. DOI: 10.11883/bzycj-2020-0180.
- [18] WANG W, HUO Q, YANG J, et al. Damage analysis of POZD coated square reinforced concrete slab under contact blast [J]. *Defence Technology*, 2022, 18(9): 1715–1726. DOI: 10.1016/j.dt.2021.07.005.
- [19] 杨建超, 汪剑辉, 陈力, 等. POZD 涂层钢筋混凝土板抗震塌性能 [J]. *兵工学报*, 2021, 42(1): 133–140. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2021.01.015.
YANG J C, WANG J H, CHEN L, et al. Anti-collapsing performance of POZD coated reinforced concrete slab [J]. *Acta Armamentarii*, 2021, 42(1): 133–140. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2021.01.015.
- [20] 杨建超, 汪剑辉, 王幸, 等. 聚异氰酸酯脂噁唑烷弹性涂层钢筋混凝土板抗震塌机理 [J]. *科学技术与工程*, 2022, 22(4): 1338–1343. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2022.04.005.
YANG J C, WANG J H, WANG X, et al. Anti-collapsing mechanism of reinforced concrete slab with polyisocyanate-oxazodone elastic coating [J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22(4): 1338–1343. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2022.04.005.
- [21] 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*. DOI: 10.11883/bzycj-2024-0083.
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*. DOI: 10.11883/bzycj-2024-0083.
- [22] 胡玉峰, 宋殿义, 谭清华, 等. 接触爆炸作用下 RC 单向板抗爆加固的试验研究 [J]. *防护工程*, 2019, 41(5): 1–7.
HU Y F, SONG D Y, TAN Q H. Experimental investigation on anti-explosion strengthening of one-way RC slabs under contact explosion [J]. *Protective Engineering*, 2019, 41(5): 1–7.
- [23] MCVAY M K. Spall damage of concrete structures: Technical report SL-88-22 [R]. Vicksburg, Mississippi: Structures Laboratory, Department of the Army, Waterways Experiment Station, Corps of Engineers, 1988.
- [24] TU H, FUNG T C, TAN K H, et al. An analytical model to predict spalling and breaching of concrete plates under contact detonation [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2022, 160: 104075. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2021.104075.
- [25] GEBBEKEN N, KRAUTHAMMER T, HUPFAUF M. Understanding the dynamic response of concrete to loading: Practical examples [M]//*Understanding the Tensile Properties of Concrete*. Woodhead, 2024: 379–418. DOI: 10.1016/B978-0-443-15593-2.00008-7.
- [26] HUPFAUF M, GEBBEKEN N. Secondary debris resulting from concrete slabs subjected to contact detonations: spatial velocity distribution and influence of steel fibers [J]. *International Journal of Protective Structures*, 2024(1): 1–22. DOI:

- 10.1177/20414196241264026.
- [27] 岳松林, 王明洋, 张宁, 等. 混凝土板在接触爆炸作用下的震塌和贯穿临界厚度计算方法 [J]. *爆炸与冲击*, 2016, 36(4): 472–482. DOI: 10.11883/1001-1455(2016)04-0472-11.
YUE S L, WANG M Y, ZHANG N, et al. A method for calculating critical spalling and perforating thicknesses of concrete slabs subjected to contact explosion [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2016, 36(4): 472–482. DOI: 10.11883/1001-1455(2016)04-0472-11.
- [28] 高鑫, 孔祥振, 方秦, 等. 混凝土中爆炸应力波衰减规律的数值模拟研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2022, 42(12): 123202. DOI: 10.11883/bzycj-2022-0041.
GAO C, KONG X Z, FANG Q, et al. Numerical study on attenuation of stress wave in concrete subjected to explosion [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2022, 42(12): 123202. DOI: 10.11883/bzycj-2022-0041.
- [29] 孙玉祥, 王杰, 武海军, 等. 混凝土高压状态方程实验与数值模拟研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2020, 40(12): 121401. DOI: 10.11883/bzycj-2020-0002.
SUN Y X, WANG J, WU H J, et al. Experiment and simulation on high-pressure equation of state for concrete [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2020, 40(12): 121401. DOI: 10.11883/bzycj-2020-0002.
- [30] HARTMANN T, PIETASCH A, GEBBEKEN N. A hydrocode material model for concrete [J]. *International Journal of Protective Structures*, 2010, 1(4): 443–468. DOI: 10.1260/2041-4196.1.4.443.
- [31] RIEDEL W, MAYRHOFFER C, THOMA K, et al. Engineering and numerical tools for explosion protection of reinforced concrete [J]. *International Journal of Protective Structures*, 2010, 1(1): 85–102. DOI: 10.1260/2041-4196.1.1.85.
- [32] KOT C A, VALENTIN R A, MCLENNAN D A, et al. Effects of air blast on power plant structures and components [R]. Argonne, Illinois, United States: Argonne National Laboratory, 1978. DOI: 10.2172/6611172.
- [33] RIEDEL W, FORQUIN P. Modelling the response of concrete structures to dynamic loading [M]//Understanding the Tensile Properties of Concrete. Woodhead, 2013: 125–142. DOI: 10.1533/9780857097538.2.125.
- [34] HAO H, ZHOU X Q. Concrete material model for high rate dynamic analysis [C]//Proceedings of the 7th International Conference on Shock and Impact Loads on Structures, Beijing, China. 2007: 753–768.
- [35] GEBBEKEN N, GREULICH S, PIETZSCH A. Hugoniot properties for concrete determined by full-scale detonation experiments and flyer-plate-impact tests [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2006, 32(12): 2017–2031. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2005.08.003.
- [36] MOCK J W, BARTYCZAK S, LEE G, et al. Dynamic properties of polyurea 1000 [J]. *AIP Conference Proceedings*, 2009, 1195(1): 1241–1244. DOI: 10.1063/1.3295029.
- [37] JORDAN J L, CASEM D T, ROBINETTE J. Hugoniot and dynamic strength in polyurea [J]. *Journal of Applied Physics*, 2022, 131(16). DOI: 10.1063/5.0082477.
- [38] CARTER W J, MARSH S P. Hugoniot equation of state of polymers [R]. Los Alamos, New Mexico, United States: Los Alamos National Laboratory, 1995. DOI: 10.2172/95183.
- [39] 郑全平, 钱七虎, 周早生, 等. 钢筋混凝土震塌厚度计算公式对比研究 [J]. *工程力学*, 2003, 20(3): 47–53. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4750.2003.03.009.
ZHENG Q P, QIAN Q H, ZHOU Z S, et al. Comparative analysis of scabbing thickness estimation of reinforced concrete structures [J]. *Engineering Mechanics*, 2003, 20(3): 47–53. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4750.2003.03.009.
- [40] GEBBEKEN N, GREULICH S, PIETZSCH A, et al. The engineering-tool XploSim to determine the effects of explosive loadings on reinforced and fibre reinforced concrete structures [C]//Proceedings of 18th Symposium of Military Aspects of Blast and Shock, 2004.
- [41] MORISHITA M, TANAKA H, ANDO T, et al. Effects of concrete strength and reinforcing clear distance on the damage of reinforced concrete slabs subjected to contact detonations [J]. *Concrete Research and Technology*, 2004, 15(2): 89–98. DOI: 10.3151/crt1990.15.2_89.

(责任编辑 王易难)