

DOI: 10.20189/j.cnki.CN/61-1527/E.202501011

内爆荷载下框架建筑的毁伤效应

朱宏伟¹, 李邦杰¹, 马峰¹, 庞哲楠²

(1. 火箭军工程大学, 陕西 西安 710025;

2. 96901 部队, 北京 100000)

摘要: 为深入剖析钢筋混凝土框架结构在内部爆炸荷载作用下的动态响应和毁伤机制, 构建了具有工程实践意义的三层三跨钢筋混凝土框架结构作为研究对象, 通过有限元数值模拟方法, 精确量化分析了不同 TNT 炸药量及爆点位置对框架结构整体及主要构件(梁柱、楼板)的毁伤效应。结果表明, 爆炸荷载引起的框架结构局部破坏与 TNT 炸药量呈正相关, 且爆炸位置对结构的毁伤范围和毁伤程度具有显著影响; 爆炸对框架结构造成的破坏主要有爆炸冲击波的直接作用和应力波的间接作用 2 种形式, 其中爆炸冲击波对框架结构所造成的破坏程度更为严重; 此外, 钢筋混凝土板在爆炸荷载作用下表现出多样化的破坏模式, 具体表现为爆炸冲击波造成的剪切和弯曲破坏以及由应力波传播引起的压碎破坏。

关键词: 爆炸荷载; 毁伤效应; 框架结构; 数值模拟; 钢筋混凝土

中图分类号: TU312.3

文献标志码: A

开放科学标识码(OSID):

文章编号: 2097-2741(2025)01-097-09



听语音
与作者互动
聊科研

Damage Effect of Frame Buildings under Internal Blast Load

ZHU Hongwei¹, LI Bangjie¹, MA Feng¹, PANG Zhenan²

(1. Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China;

2. Troops No.96901, Beijing 100000, China)

ABSTRACT: To analyze the dynamic response and damage mechanism of reinforced concrete frame structures under internal blast loads, a three-story, three-span reinforced concrete frame structure with practical engineering significance was constructed and investigated. The damage effects of different TNT explosive quantities and explosion locations on the overall frame structure and main components (beams, columns, and floorslabs) were precisely quantified using a finite element numerical simulation method. The results showed that the local damage to the frame structures caused by the blast load is positively correlated with the amount of TNT, and that the explosion location has a substantial impact on the scope and degree of damage to the structure. The damage caused by explosions to frame structures included two forms: the direct effects of explosion shock waves and indirect effects of stress waves; the damage caused by the former is

收稿日期: 2024-06-12

第一作者: 朱宏伟 (1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事结构毁伤研究。E-mail: zhuhw92@163.com

引用格式: 朱宏伟, 李邦杰, 马峰, 等. 内爆荷载下框架建筑的毁伤效应[J]. 火箭军工程大学学报, 2025, 39 (1): 97-105. ZHU Hongwei, LI Bangjie, MA Feng, et al. Damage effect of frame buildings under internal blast load[J]. Journal of Rocket Force University of Engineering, 2025, 39 (1): 97-105.

more severe. Furthermore, reinforced concrete slabs exhibited various damage modes under blast loads, specifically manifest as shear and bending damage caused by explosion shock wave, and crushing damage caused by stress wave propagation.

KEYWORDS: blast load; damage effect; frame structure; numerical simulation; reinforced concrete

作为一种典型的建筑结构设计形式, 框架结构以其显著的跨度优势、卓越的承载能力和稳固的结构稳定性而著称, 被广泛应用于各类建筑, 在现代工程建设中具有举足轻重的地位。

同时, 在现代高科技战争中, 以指挥办公大楼等框架结构建筑物为代表的地面关键设施往往成为敌方攻击的重要对象。因此, 学者们对框架结构抗倒塌能力, 以及在爆炸荷载下的结构响应和毁伤效应进行了深入研究。李治等^[1]从试验研究和数值模拟两个方面分析了不同去柱工况下的多层钢框架结构抗连续倒塌性能, 结果表明, 不同去柱工况下的钢框架结构水平约束条件不同, 邻角柱失效与邻边柱失效工况下的钢框架结构具有较高的倒塌风险。孟宝等^[2-3]运用试验方法对中柱失效下栓焊连接钢框架梁柱子结构的抗连续倒塌机理进行了研究, 结果表明, 栓焊连接的钢框架结构能够利用梁机制和悬链线机制的协同作用来抵御外部施加的荷载。汪维等^[4]通过数值模拟研究了不同爆炸工况下冲击波对典型单向支撑方形钢筋混凝土板的影响, 结果表明, 近距爆炸下钢筋混凝土板易发生局部冲切破坏, 远距爆炸下易发生整体弯曲破坏和支座剪切破坏。喻君等^[5]通过数值模拟方法探究了近场近地爆炸工况下, 比例爆距和比例爆高对建筑柱冲击波特征参数的影响规律, 拟合出柱迎面面反射冲量和正相超压持续时间的计算公式。熊维^[6]对近场爆炸下砌体填充墙的动态响应开展了研究, 结果表明, 砌体填充墙尖锐碎片的比重随近距离爆炸荷载的提高而上升。殷文骏等^[7]通过数值模拟方法研究了远场爆炸冲击波作用下高层建筑的结构动态响应, 结果表明, 远场爆炸冲击波作用下高层建筑框架柱破坏模式以受剪切破坏为主, 框架梁构件以弯曲破坏为主, 不同构件间的相互作用对破坏模式也有重要的影响。Haleem 等^[8]通过数值模拟方法研究了爆炸荷载作用下不同延性水平的钢筋混凝土框架结构的动力响应, 发现高延性结构能够承受更大爆炸荷载所造成的结构位移, 有效减少结构破坏。舒奕展等^[9]采用数值模拟方法对两层两

跨地铁站在爆炸荷载下的动态响应和破坏形态进行了系统研究, 结果表明, 炸药在地铁站内爆炸, 冲击波的传播受到地铁站结构的影响, 在不同结构区域的强度有所不同。

综上所述, 在当前的研究中, 关于爆炸荷载对框架建筑毁伤效应的探讨多聚焦于建筑群内冲击波的传播特性、结构的抗爆与抗倒塌能力, 以及单个构件在爆炸作用下的毁伤行为。然而, 对于框架建筑整体在爆炸荷载作用下的全面结构响应, 现有研究仍显不足。对此, 本文采用数值模拟技术, 选取工程实践中广泛采用的三层三跨钢筋混凝土框架结构作为研究对象, 精确量化分析了多种工况下 TNT 炸药在建筑物内部引爆时产生的爆炸冲击波对框架结构整体及主要构件造成的毁伤效应, 揭示了爆炸冲击波作用下框架建筑结构的毁伤机理。

1 有限元模型及材料参数

爆炸作为一种迅速的能量释放现象, 涉及物理和化学变化, 会在极短时间内释放巨大的能量。在此过程中, 冲击波迅速向外扩散, 对周围介质做功, 同时爆炸产物经历剧烈变形, 并与受冲击物体发生复杂相互作用, 导致受冲击物体发生变形、位移甚至破坏。为深入研究爆炸荷载下框架建筑整体结构响应和毁伤机制, 本文采用 LS-Prepost 软件科学合理地构建了典型三层三跨混凝土框架结构模型。在数值模拟领域, LS-DYNA 程序利用任意拉格朗日-欧拉算法 (Arbitrary Lagrangian-Euler Algorithm, ALE) 实现流固耦合, 能够有效模拟流体与结构间的动态相互作用, 尤其适用于处理结构在极端载荷下产生的大变形情况。在该程序中, 炸药和空气的动力行为采用 Euler 算法捕捉, 结构材料的响应采用 Lagrange 算法描述。通过定义流固耦合关键字 *CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID 处理物质间的相互作用, 该方法巧妙地避免了单元畸变所引发的数值计算问题, 从而为模拟由爆炸引起的复杂

大变形现象提供了一种高效、可靠的计算途径^[10]。

1.1 有限元模型

本文对典型三层三跨钢筋混凝土框架结构进行建模, 结果如图 1 所示。有限元模型中, 设定框架结构中每层的单个房间层高为 3 m、横向跨度为 7 m、纵向跨度为 5.5 m, 以反映典型建筑平面布局的尺寸比例。框架结构中的梁和柱采用了 0.5 m×0.5 m 的规则方形截面设计, 楼板和墙厚度统一为 0.4 m。在模型的基座部分, 柱底与地面之间通过刚性连接固定, 地面假设为完全固定的刚性基础。

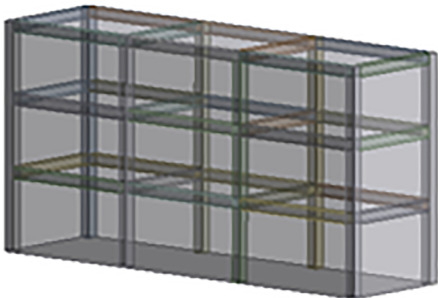


图 1 框架有限元模型
Fig. 1 Finite element model of the frame

整体模型采用了网格共节点的方式连接, 以精确捕捉结构中力的传递与分布, 确保结构整体分析的连续性和准确性, 设置球形 TNT 炸药在建筑物内部起爆。有限元模型采用实体单元类型, 框架结构有限元单元尺寸为 8 mm, 空气有限元单元尺寸为 14 mm。

1.2 材料参数

空气材料模型采用 *MAT_NULL 模型, 该模型适用于空气动力学分析中的空材料定义。同时, 为了描述空气状态的变化, 采用 *EOS_LINEAR_POLYNOMIAL 线性多项式理想气体状态方程^[10], 该方程能够准确模拟在爆炸冲击波作用下空气压力、密度和内能之间的关系^[11], 表达式为

$$p_1=(\gamma-1)\rho E_1$$

式中: p_1 为空气压力; ρ 为空气密度, 本文取值 1.29 kg/m³; E_1 为气体单位体积内能, 取值 253 kPa; γ 为气体绝热指数, 取值 1.4。

炸药材料模型采用 *MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN 模型, 该模型专门用于描述 TNT 炸药爆炸特性。所选用模型中, TNT 炸药的密度为 1 630 kg/m³, 爆速为 6 930 m/s, 爆压为 2.7×10⁷ kPa。同时, 为了准确描述炸药爆炸产物的压力与体积之间的关系, 采用 *EOS_JWL 状态方程, 该

状态方程在爆炸动力学模拟中广泛用于描述爆炸产生的压力变化^[11], 表达式为

$$p_2=A\left(1-\frac{\omega}{R_1V}\right)\exp(-R_1V)+B\left(1-\frac{\omega}{R_2V}\right)\exp(-R_2V)+\frac{\omega E_2}{V}$$

式中: p_2 为爆轰压力; V 为相对体积; E_2 为爆炸物单位体积内能; A 、 B 、 R_1 、 R_2 和 ω 为材料常数。TNT 炸药的 JWL 状态方程参数如表 1 所示。

表 1 TNT 炸药 JWL 状态方程参数

Tab. 1 JWL state equation parameters of TNT explosive

A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	ω	E_2 /GPa
371	7.43	4.15	0.95	0.3	7

钢筋混凝土结构采用“整体式”建模方法, 本文选用的材料模型为 *MAT_BRITTLE_DAMAGE^[10], 是一种可以描述钢筋混凝土复合材料的本构模型, 可以自定义配筋率, 很适合用来模拟整体式钢筋混凝土实体单元。由于在数值模拟过程中, 主要通过删除单元实现材料的破碎、断裂等失效情况, 本文将钢筋混凝土材料中钢筋材料的失效应变设置为 0.1。另外, 通过额外控制关键字 *MAT_ADD_EROSION 定义材料抗拉强度, 从而控制材料失效^[11], 钢筋混凝土材料具体参数如表 2 所示。

表 2 钢筋混凝土材料参数

Tab. 2 Material parameters of reinforced concrete

参数	梁、柱	墙、板
密度/(kg·m ⁻³)	2 500	2 300
弹性模量/GPa	30	30
泊松比	0.3	0.3
抗拉强度/MPa	2.5	2.0

2 爆炸荷载下框架建筑物毁伤效应

本文设计了 3 种工况, 通过数值模拟对比分析了不同爆炸荷载作用下框架建筑物的毁伤效应, 炸药位置如图 2 所示。工况 1 和工况 2 为相同 TNT 炸药在不同爆点条件下对建筑物的毁伤模型, 炸药量为 200 kg, 工况 1 爆点位于 1 楼中心, 工况 2 爆点位于 1 楼中柱附近; 工况 3 的爆点位置与工况 1 相同, 炸药量为 400 kg。

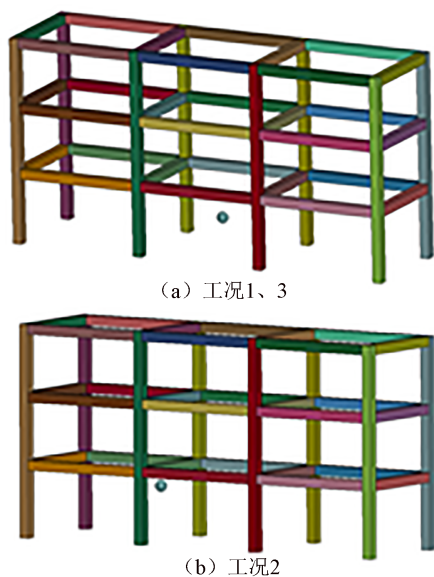
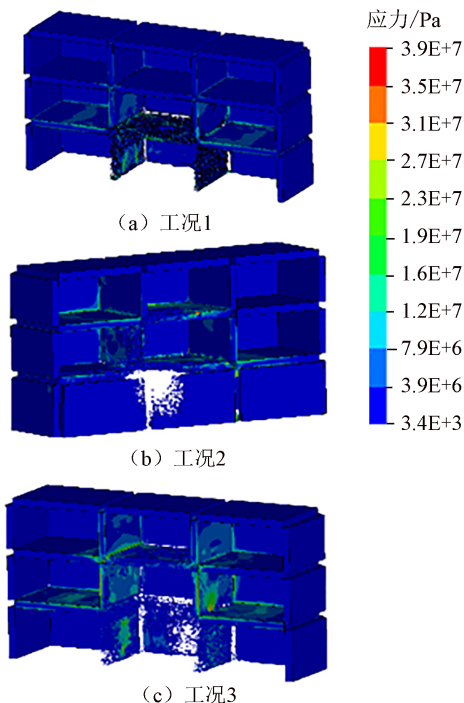


图 2 TNT 炸药位置

Fig. 2 Location of TNT explosives

2.1 框架结构整体毁伤效应

图 3 分别给出了 3 种爆炸荷载工况在 7 ms 时框架建筑物整体结构的破坏形态和应力分布。为方便观察框架建筑物内部情况，将部分前排墙体隐藏处理。可以看到，3 种工况下的框架建筑物都遭受到了不同程度、不同形式的毁伤破坏。

图 3 $t = 7$ ms 时 3 种工况下框架破坏形态Fig. 3 Frame failure modes under three working conditions at $t = 7$ ms

在工况 1 中，框架建筑 1 楼中间房间遭到严重

破坏，楼板产生明显破洞及混凝土崩裂情况，墙体也出现了混凝土崩裂与剥离。由于楼板和墙体的阻隔，爆炸冲击波更多直接作用于 1 楼中间房间，而对其他相邻房间的影响较小。但是爆炸冲击波引起的结构应力波传播蔓延至其他房间，也造成了其他位置构件局部损伤。相比工况 1，工况 2 的炸药位置位于梁柱交汇处，从图中可以看到，1 楼左侧 2 个房间的楼板和墙体均出现破洞，2 楼左侧房间墙体出现明显裂纹和混凝土崩裂现象。同时，结构应力波的传播范围较工况 1 更广，造成的结构构件损伤范围也更大，整体结构遭到严重破坏。工况 3 的 TNT 炸药量是工况 1 的 2 倍，在更为强烈的爆炸冲击波作用下，造成了 1 楼和 2 楼的楼板和墙体出现开裂、震塌、破洞等形式的破坏，框架结构的破坏程度明显比工况 1 更严重，破坏构件更多，影响范围更广。

通过对比分析 3 种工况下框架结构的破坏形态和应力分布发现，由于墙体和楼板对爆炸冲击波的阻隔，爆炸荷载对框架结构的毁伤主要表现为单个房间的破坏；爆炸冲击波引起的应力波会传播至更远的区域，导致更大范围的结构构件出现裂纹、混凝土崩裂和剥离等现象；TNT 炸药质量越大，爆炸位置越接近梁、柱、墙和楼板，所造成的结构破坏也越严重，影响范围也更大。

2.2 框架结构梁柱毁伤效应

梁和柱作为框架结构中的关键支撑构件，其在爆炸荷载下的毁伤效应对建筑物的整体稳定和安全具有决定性影响。虽然，梁和柱在一定程度上受到楼板和墙体的包围保护，但是当这些构件被破坏时，梁柱也会遭受到爆炸冲击波的直接作用。此外，梁和柱的配筋率要高于楼板和墙体，具有更好的抗毁能力。图 4 分别给出了 3 种爆炸荷载工况下 7 ms 时框架建筑物梁柱结构的损伤形态和应力云图。

从图 4 可以看出，在工况 1 中，楼板和墙体四周未遭到严重破坏，梁柱没有受到冲击波的直接作用，但在结构应力波的作用下仍然产生了混凝土崩裂与剥离现象，但是较楼板和墙体的毁伤情况轻。在工况 2 中，炸点位置更靠近梁柱，从而使梁柱连接处直接遭受到巨大的爆炸冲击波作用，导致梁柱的断裂性破坏，失去承载能力。在工况 3 中，炸药威力的增加使构件遭受到了更强的爆炸冲击波作用，楼板和墙体损坏严重，梁柱也遭受到更为严重的破坏，并且影响范围较工况 1 更广，

2楼的梁柱也出现了混凝土剥离、崩裂的现象。

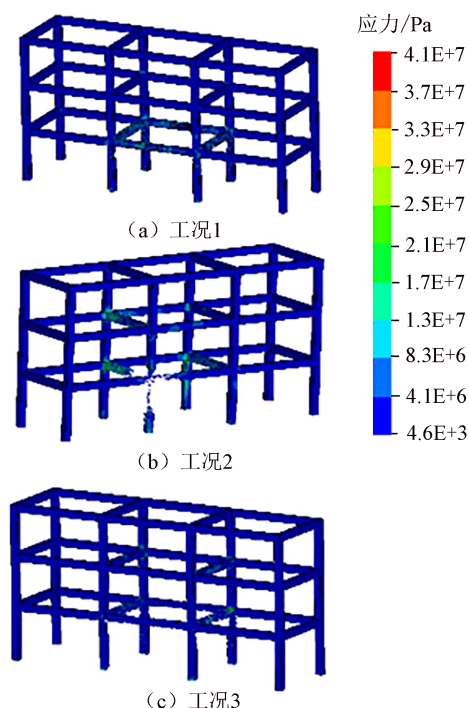


图4 $t = 7$ ms时3种工况下框架梁柱破坏形态

Fig. 4 Frame column failure modes under three working conditions at $t = 7$ ms

综上所述, 在内爆荷载作用下, 框架结构通常出现局部破坏的模式, 在本文设置的3种工况中, 爆炸冲击波对框架结构的毁伤基本是对单个房间的破坏。在建筑物中, 楼板一般为矩形或多边形, 四周以框架梁为支座, 主要承担竖向荷载作用, 所以楼板损伤失效仅仅会导致该房间的功能失效, 不会导致框架建筑物的关联性物理损伤。但是, 当梁受到破坏时, 就会导致楼板失去支撑, 造成梁两侧的楼板承载力下降, 乃至房间功能失效, 因此梁的损伤会造成框架建筑物结构的关联性损伤。由于柱承受着结构的竖向荷载, 当部分柱受到破坏时, 框架建筑物局部失去竖向支撑, 在上部荷载的作用下, 结构会出现局部竖向变形; 当柱的失效达到一定数量时, 会降低建筑物的承载能力, 导致建筑物垮塌。

2.3 钢筋混凝土板毁伤效应

钢筋混凝土板是建筑物结构中重要的承力构件之一, 其对于结构整体的抗爆性能有着至关重要的作用。当钢筋混凝土板被破坏时, 会失去承载能力, 从而导致建筑物结构破坏以及功能丧失。以工况3中1楼和2楼楼板作为研究对象, 分析钢筋混凝土板在爆炸冲击波作用下的响应。图5给出

了工况3不同时刻1楼楼板的破坏形态。

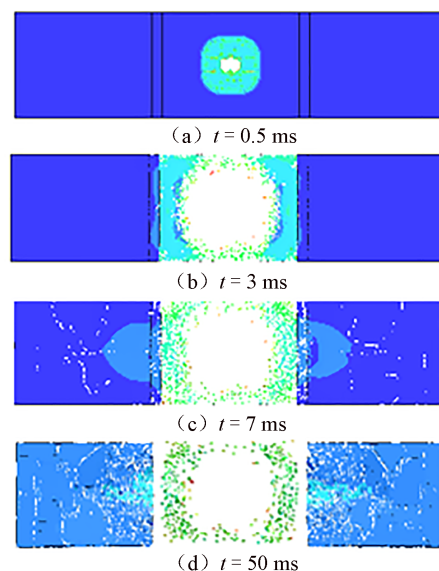


图5 工况3下1楼楼板不同时刻破坏形态

Fig. 5 Failure modes of the 1st floor slab at different moments under working condition III

由图5可知, 由于TNT炸药位于1楼中间楼板正下方且距楼板较近, 所以1楼楼板首先从中间迎爆点产生破坏, 0.5 ms时已产生破洞, 随着爆炸冲击波的传播, 楼板破坏区域逐渐扩大, 在3 ms时已被完全破坏。结合图3可以看到, 墙体对爆炸冲击波的阻隔作用较大程度上削弱了爆炸冲击波强度, 所以两侧楼板的破坏要明显晚于中间楼板, 并且破坏程度也较中间楼板要轻。图6为1楼左侧房间楼板在不同时刻的破坏形态和应力分布。

如图6所示, 随着时间的推移, 爆炸冲击波作用于中间楼板所引起的应力波从中间楼板逐渐向两侧楼板传播, 3 ms时已传播到左侧楼板, 造成左侧楼板出现轻微损伤。随着爆炸冲击波对中间房间的持续作用, 应力波也持续向两侧传播, 7 ms时左侧楼板已出现明显的裂纹, 造成较为严重的破坏, 50 ms时左侧楼板已出现大量裂痕, 且靠近中间楼板一侧的损伤程度更为严重。

综上所述, TNT爆炸对框架的毁伤作用形式主要包括爆炸冲击波和应力波2种。墙体会阻隔爆炸冲击波的传播, 减小爆炸冲击波强度, 但是爆炸冲击波所引起的应力波在结构中的传播会造成更多构件的损伤破坏。两侧楼板的破坏主要由应力波造成, 而非爆炸冲击波直接作用。

当TNT炸药在中间房间发生爆炸后, 在0.5 ms时致使1楼中间楼板产生破洞, 导致爆炸冲击

波继续向 2 楼房间传播。图 7 为框架建筑物 2 楼中间楼板在不同时刻迎爆面和背爆面的破坏形态。

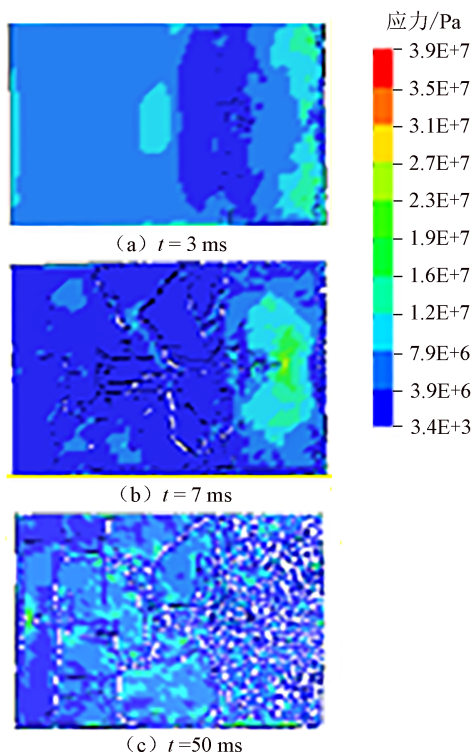


图 6 工况 3 下 1 楼左侧楼板不同时刻应力分布

Fig. 6 Stress distributions of the left floor slab on the 1st floor at different moments under working condition III

如图 7 所示, 在爆炸冲击波的作用下, 钢筋混凝土板中间位置处较边缘位置的位移量大, 并且随着爆炸冲击波的持续作用, 钢筋混凝土板中间位置处的位移量也在持续增加。同时, 钢筋混凝土板背爆面较迎爆面更早地出现裂纹, 在 3 ms 时背爆面已经产生轻微裂纹损伤。这是由于在爆炸冲击波的持续作用下, 钢筋混凝土板发生了弯曲变形, 致使背爆面一侧主要承受拉应力作用, 而迎爆面一侧受压应力的作用, 加之混凝土材料的抗压强度远高于其抗拉强度, 所以背爆面所受应力会较迎爆面更早超过材料强度极限, 导致背爆面更早出现损伤。在 7 ms 时背爆面已经产生大量裂纹, 造成钢筋混凝土板严重损伤, 而迎爆面仍无明显裂纹产生。

图 8 通过失效单元数与构件总单元数的比值来反映框架结构钢筋混凝土板的损伤程度。可以看出, 由于 TNT 炸药位于 1 楼中间房间, 所以距离爆点最近的 1 楼钢筋混凝土板最早出现损伤, 且损伤最为严重, 失效单元比例高达 98% 以上, 表明 1 楼中间楼板已经遭到完全破坏。同时, 1 楼中间楼

板最早出现破洞导致爆炸冲击波继续向 2 楼传播, 造成 2 楼中间楼板损伤严重, 损伤程度达到 83% 以上。因为爆炸冲击波强度在 2 楼被极大减弱, 所以并未造成 3 楼楼板的破坏, 这和前文所示的框架结构破坏形态相一致。

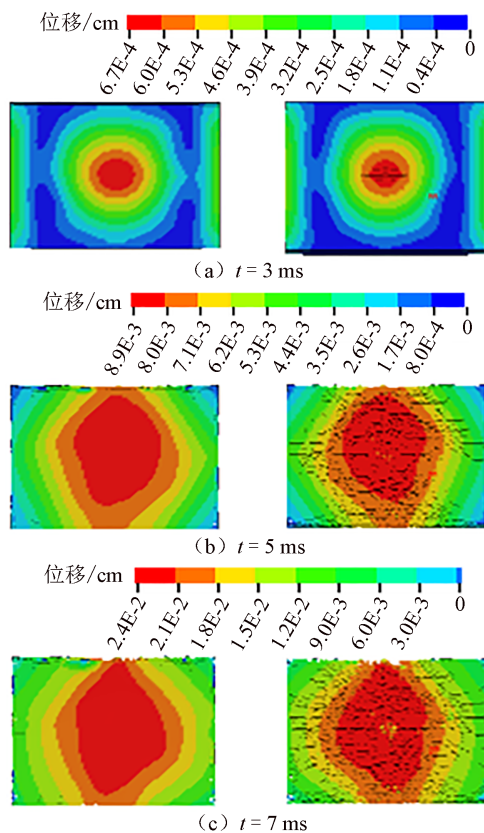


图 7 工况 3 下 2 楼中间楼板不同时刻破坏形态 (左侧为迎爆面, 右侧为背爆面)

Fig. 7 Failure modes of the middle floor slab on the 2nd floor at different moments under working condition 3 (the left is surface facing blast, the right is surface back blast)

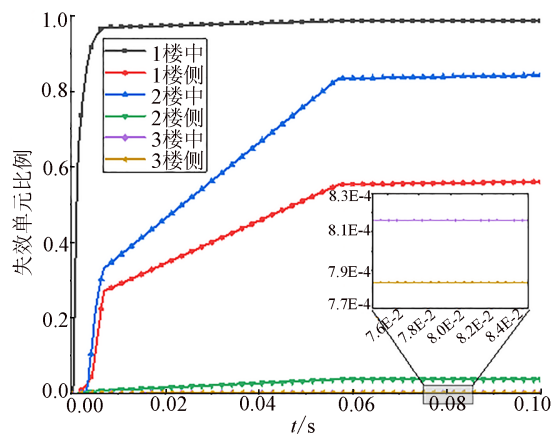


图 8 工况 3 下框架结构钢筋混凝土板损伤程度

Fig. 8 Damage degree of the reinforced concrete slabs of the frame structure under working condition 3

由于楼板最先出现破洞, 爆炸冲击波从孔洞向外传播, 使得作用于墙体的爆炸冲击波强度减弱, 所以爆炸冲击波对墙体破坏程度较楼板要小。

3 爆炸荷载下框架结构动力响应

爆炸荷载作用下框架结构损伤破坏过程属于高速动力学问题, 因此设置6个测点, 分析框架结构在爆炸荷载下的时程动力响应, 测点位置如图9所示, 图10给出了不同观测点的应力时程曲线。

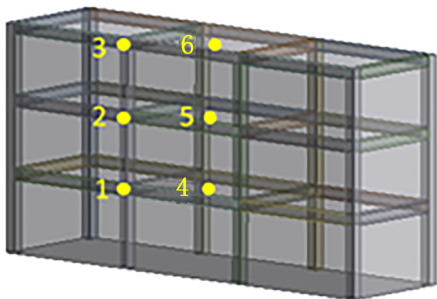


图9 测点位置

Fig. 9 Measurement point locations

从柱上的测点1、2、3的应力变化可以看到, 由于工况2的爆点位置更接近构件, 所以在爆炸冲击波的作用下工况2结构中最先产生应力, 工况3的爆炸冲击波强度比工况1要强, 从而工况1结构

中产生应力时间最晚, 工况3结构中产生应力时间居于两者之间。此外, 由于工况3的TNT炸药量最大, 所以在同一测点位置处, 工况3结构中的应力值最大; 由于工况1和工况2的TNT炸药量相同, 所以在测点2和3处的应力值相差不大。

从钢筋混凝土板的测点4、5、6的应力变化可以看到, 由于测点4位于迎爆面内, 在工况1和工况3中, 爆炸冲击波直接作用在测点4处, 使得测点4的应力快速增大并超过材料许用极限而造成钢筋混凝土板的破坏, 应力值随TNT炸药量的增加而增大。工况2中爆炸冲击波对测点4的作用时间较晚, 且爆炸冲击波强度较小。

从测点5应力变化可知, 当1楼钢筋混凝土楼板被破坏后, 爆炸冲击波继续传播至2楼钢筋混凝土楼板, 由于工况3的TNT炸药量最大, 爆炸冲击波强度也最大, 所以测点5处工况3的应力值最大。虽然工况1和工况2的TNT炸药量相同, 但是工况2爆点更接近1楼楼板, 当1楼楼板被破坏后, 传播到2楼的冲击波强度更大, 所以测点5处工况2的应力值比工况1大。结合前文分析发现, 3楼楼板主要受到应力波的影响, 受爆炸冲击波直接作用较小, 因此在测点6处应力值相差不大。

综上所述, 内爆荷载对建筑物的毁伤主要有2个途径, 一是爆炸冲击波对结构的直接作用, 二

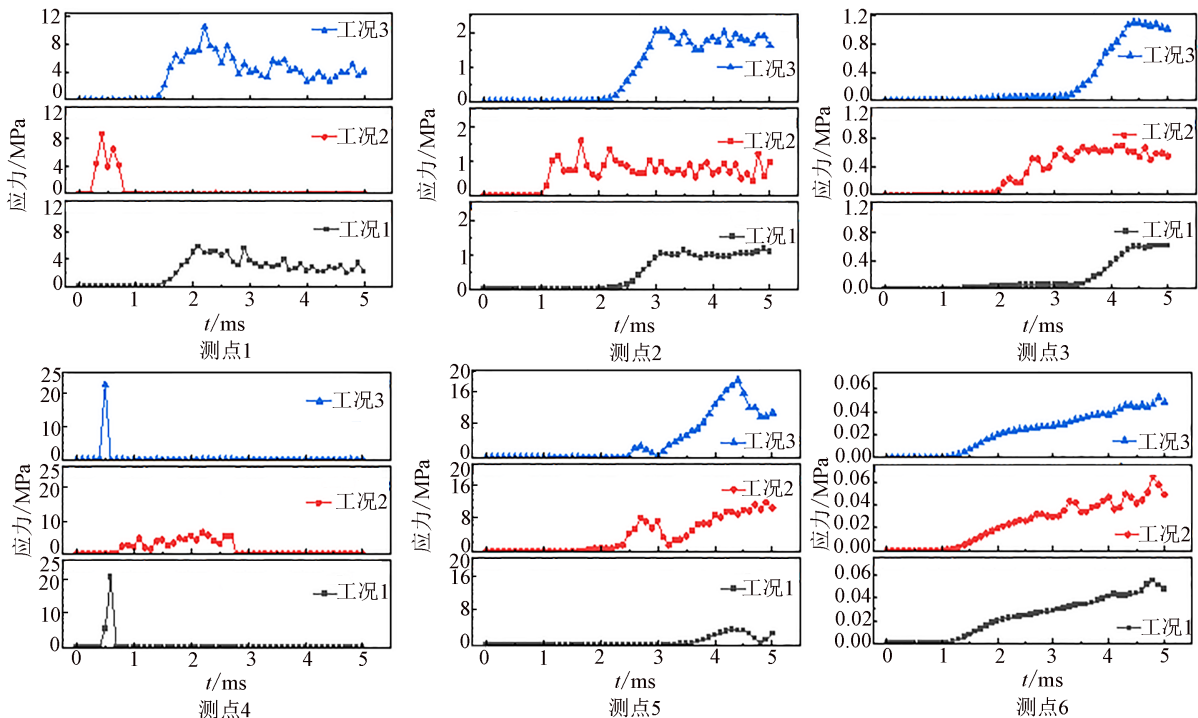


图10 不同测点位置应力时程变化曲线

Fig. 10 Stress versus time course variation curves at different measuring points

是爆炸冲击波引起的应力波的间接作用。随着 TNT 炸药量的增大或爆点位置更靠近于构件, 爆炸对结构损伤破坏的范围也就更大、损伤破坏程度也越严重。

4 结论

本文采用有限元数值模拟方法深入研究了钢筋混凝土框架结构在内部爆炸荷载作用下的毁伤效应, 对比分析了不同 TNT 炸药量及爆点位置对框架结构毁伤模式的影响, 得到以下结论。

1) 内爆荷载对框架结构的毁伤效应与炸药量和爆点位置密切相关。为增大毁伤程度, TNT 炸药量较小时, 爆点要更接近于梁柱等关键承力构件; 炸药量较大时, 爆点位置则应更靠近楼板, 使爆炸冲击波能通过楼板破洞向外传播, 避免因外墙破洞过多导致冲击波分散衰减; 爆点的具体位置可根据楼板、梁柱等关键构件毁伤程度最大化选择合适楼层。

2) 爆炸冲击波对框架结构造成的破坏可分为 2 种主要形式: 一是爆炸冲击波的直接作用; 二是应力波在结构内部传播引起的间接作用。爆炸冲击波造成的破坏程度往往更为严重。

3) 钢筋混凝土板在爆炸荷载作用下表现出多样化的破坏模式, 主要包括由爆炸冲击波直接引起的剪切和弯曲破坏, 以及由应力波传播引起的压碎破坏。

本文分析了框架结构在内部爆炸荷载作用下的动态响应和毁伤机制, 研究成果不仅为未来武器装备的研发提供了理论支撑, 也为框架建筑的毁伤评估和抗爆设计提供了参考, 但本文并未将重力影响纳入考量。鉴于此, 未来的研究可以探索在爆炸荷载与重力共同作用下的连续性结构破坏, 为框架建筑的毁伤评估和抗爆设计提供更全面的参考。

参考文献

[1] 李治, 原小兰, 薛天琦, 等. 不同去柱工况下多层钢框架结构抗连续倒塌机理研究[J]. 工程力学, 2024, 41(4): 140-150.

LI Z, YUAN X L, XUE T Q, et al. Behavior of progressive collapse of multi-layer steel frame structure under different column removal conditions[J]. Engineering Mechanics, 2024, 41(4): 140-

150.

[2] 孟宝, 钟炜辉, 郝际平. 不同跨度比下栓焊刚性连接梁柱子结构抗倒塌性能试验研究[J]. 工程力学, 2018, 35(1): 79-87.

MENG B, ZHONG W H, HAO J P. Experimental study on anti-collapse performance for beam-column assemblies with bolt and weld rigid connection based on different span ratio[J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(1): 79-87.

[3] 孟宝, 钟炜辉, 郝际平. 基于节点刚度的钢框架梁柱子结构抗倒塌性能试验研究[J]. 工程力学, 2018, 35(6): 88-96.

MENG B, ZHONG W H, HAO J P. Experimental study on anti-collapse performance for beam-to-column assemblies of steel frame based on joint stiffness[J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(6): 88-96.

[4] 汪维, 刘瑞朝, 李林, 等. 不同爆炸距离下单向支撑方形钢筋混凝土板破坏模式数值模拟研究[J]. 兵工学报, 2015, 36(S1): 233-241.

WANG W, LIU R C, LI L, et al. Numerical simulation of one-way square reinforced concrete slab at different blast distances[J]. Acta Armamentarii, 2015, 36(S1): 233-241.

[5] 喻君, 刘福余, 方秦. 近场近地爆炸下建筑柱爆炸荷载分布规律及简化模型[J]. 爆炸与冲击, 2024, 44(1): 164-180.

YU J, LIU F Y, FANG Q. Distribution pattern and simplified model of blast load for building columns under near-field near-ground explosion[J]. Explosion and Shock Waves, 2024, 44(1): 164-180.

[6] 熊维. 近距离爆炸下砌体填充墙局部破坏试验研究与数值模拟[D]. 天津: 天津大学, 2015.

XIONG W. Experimental study and numerical simulation of local damage of unreinforced masonry under closein explosion[D]. Tianjin: Tianjin University, 2015.

[7] 殷文骏, 程帅, 刘文祥, 等. 远场爆炸冲击波作用下高层建筑动态响应试验研究[J/OL]. 兵工学报, 2024: 1-13. <http://link.cnki.net/urlid/11.217.tj.2024016.1920.007>.

YIN W J, CHENG S, LIU W X, et al. Experimental study on dynamic response of upper structure of high-rise building under far-field explosion shock wave[J/OL]. Acta Armamentarii, 2024: 1-

13. <http://link.cnki.net/urlid/11.217.tj.2024016.1920.007>.
- [8] HALEEM AL-BAGHDADI W, HAMEED ABD-ALRAZAQ A. Behavior study of reinforced concrete frame with different ductility levels under explosive loading[J]. Journal of Engineering and Applied Sciences, 2019, 14(3): 796-801.
- [9] 舒奕展, 王高辉, 卢文波, 等. 爆炸冲击波在双层地铁站内的传播规律研究[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(6): 1859-1865.
- SHU Y Z, WANG G H, LU W B, et al. Study on propagation law of explosive shock wave inside metro station[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(6): 1859-1865.
- [10] 辛春亮, 薛再清, 涂建, 等. TrueGrid 和 LS-DYNA 动力学数值计算详解[M]. 北京: 机械工业出版社, 2019: 213-218.
- [11] 辛春亮, 朱星宇, 薛再清, 等. 有限元分析常用材料参数手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2022: 11-12.
- (编辑: 刘建民)

《火箭军工程大学学报》中文摘要写作示例

根据《学术论文编写规则》(GB/T 7713.2—2022)摘要写作要求, 中文摘要的字数原则上应当与论文中成果的多少相适应, 在一般情况下, 报道性摘要以 400 字左右、报道/指示性摘要以 300 字左右、指示性摘要以 150 字左右为宜。《火箭军工程大学学报》中文摘要通常采用报道性摘要, 字数以 400 字左右为宜。为有效规范期刊中文摘要写作, 我们拟制了写作示例, 供广大作者借鉴参考。示例如下:

燃气透平冲击冷却的射流孔形状优化方法及验证

摘要: 为降低双层壁结构中冲击冷却的横流效应和提升射流的穿透能力, 提出了射流孔形状优化方法。将横流干涉射流问题简化为射流柱的绕流问题, 采用非均匀有理 B 样条曲线对圆柱形射流柱参数化, 进行拉丁超立方抽样、MATLAB 平台中有限元分析工具箱流场求解、神经网络代理模型构建以及遗传算法优化, 建立了冲击冷却射流孔形状优化方法; 采用 RANS 方法, 结合 SST $k-\omega$ 湍流模型, 以平板阵列射流冲击模型为对象, 对比分析了圆柱形射流孔和流线形射流孔的流动特性与换热特性。结果表明: 与圆柱形射流孔相比, 流线形射流孔具有低的绕流阻力和较强的射流穿透能力, 其射流偏转情况获得改善, 射流冲击的滞止点位置较圆柱形射流孔的更靠近几何滞止点, 验证了射流孔形状优化方法的有效性; 流线形射流结构的靶面换热效果明显增强, 在所计算的横流比为 0.3~0.9 时, 其面平均 Nu 数提高了 6.78%~15.55%; 在横流比为 0.3、0.5 时, 靶面换热取决于倾斜的射流冲击和上游涡的强对流换热, 流线形射流孔以其较小的绕流阻力能获得更好的冲击冷效和促进上游涡的产生; 在横流比为 0.7、0.9 时, 射流明显偏转, 靶面换热取决于射流和横流的冲刷作用, 此时流线形射流孔以较大的冲击角度要略优于圆柱孔结构; 结合换热效果和压力损失, 流线形射流孔的热性能因子增幅为 2.31%~9.83%。提出并验证了冲击冷却射流孔形状优化方法的可靠性, 为燃气透平叶片传热优化提供了一定的参考。

《火箭军工程大学学报》编辑部

二〇二五年一月