

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2026.03.017

不同配箍率 RC 梁的抗爆性能试验及 数值模拟研究*

许凯¹, 王亚军¹, 徐涵辉¹, 鲁光涛², 冯谦³

(1. 武汉科技大学 城市建设学院, 武汉 430065; 2. 武汉科技大学 冶金装备及其控制教育部重点实验室, 武汉 430081;
3. 武汉理工大学 安全科学与应急管理学院, 武汉 430070)

摘要: 爆炸荷载作用下钢筋混凝土(RC)梁的抗爆性能研究对于工程结构安全具有重要意义。箍筋作为 RC 梁的重要组成部分,其配置数量直接影响构件的力学行为。为系统研究不同配箍率对 RC 梁抗爆性能的影响规律,揭示配箍率与动态响应之间的定量关系及性能提升的饱和阈值,采用实验室爆炸试验与有限元数值模拟相结合的方法开展研究。首先设计制作了两根不同配箍率的 RC 梁(箍筋间距 80 mm 和 140 mm,对应配箍率 0.64% 和 0.37%),在爆炸罐内分别施加 4 次递增爆炸荷载(20 g、40 g、80 g 空气爆炸及 80 g 接触爆炸),采集梁体动态响应数据并观察破坏形态。在此基础上,基于 ANSYS/LS-DYNA 建立经试验验证的数值模型,对 5 种不同配箍率(0.26%、0.30%、0.37%、0.47%、0.64%) RC 梁的抗爆性能进行拓展分析。试验结果表明:在相同爆炸荷载下,配箍率较高的 B_1 梁(0.64%)的加速度、应变及跨中位移峰值均小于配箍率较低的 B_2 梁(0.37%),四次爆炸工况下 B_1 梁跨中最大位移较 B_2 梁依次减小 9.4%、10.0%、11.6% 和 12.1%。从破坏形态看, B_2 梁裂缝数量明显多于 B_1 梁,迎爆面混凝土压溃更严重,剥落面积更大,表明增大配箍率能有效抑制斜裂缝萌生与扩展,增强混凝土抗破损能力。数值模拟结果显示:随着配箍率从 0.26% 增大至 0.64%,RC 梁的应变峰值和跨中位移峰值均呈逐渐减小趋势。与配箍率 0.26% 的模型梁相比,配箍率 0.64%、0.47%、0.37%、0.30% 的模型梁应变峰值分别降低 35.4%、28.5%、20.8% 和 9.7%,位移峰值分别降低 18.2%、14.9%、10.0% 和 3.8%。同时发现,随着配箍率不断提高,梁体动态响应的降低幅度逐渐趋缓:配箍率从 0.26% 增至 0.37% 时位移峰值降幅为 10.0%,从 0.37% 增至 0.47% 时降幅为 4.9%,从 0.47% 增至 0.64% 时降幅仅为 3.3%,表明当配箍率增大到一定程度后,继续提高配箍率对 RC 梁抗爆性能的提升效果逐渐减弱。研究成果可为 RC 结构抗爆设计及工程应用提供科学依据。

关键词: 钢筋混凝土梁; 配箍率; 爆炸荷载试验; 抗爆性能; 有限元分析

中图分类号: TU375.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2026)03-0169-10

Experimental and Numerical Study on Blast Resistance of RC Beams with Different Stirrup Ratios

XU Kai¹, WANG Ya-jun¹, XU Han-hui¹, LU Guang-tao², FENG Qian³

(1. School of Urban Construction, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China;
2. Key Laboratory of Metallurgical Equipment and Control Technology of Ministry of Education,

收稿日期(Date of reception): 2023-02-20

网络首发日期(Published online): 2026-09-15

作者简介: 许凯(1975-),男,副教授,主要从事计算力学与结构试验等研究, (E-mail) xukai@wust.edu.cn。

通信作者: 冯谦(1982-),男,教授,主要从事工程安全与灾害防治等领域研究, (E-mail) qfengwh@foxmail.com。

基金项目: 国家自然科学基金(No. 51878628)碳纤维复合多芯光纤布及其结构加固与监测一体化系统

About the author: XU Kai (1975-), male, associate professor, primarily engaged in research on computational mechanics and structural testing, (E-mail) xukai@wust.edu.cn.

Corresponding author: FENG Qian (1982-), male, professor, primarily engaged in research in the fields of engineering safety and disaster prevention, (E-mail) qfengwh@foxmail.com.

Fund Programs: National Natural Science Foundation of China(No. 51878628) Carbon Fiber Composite Multi-core Fiber Fabric and its Integrated System for Structural Strengthening and Monitoring

Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China;

3. School of Safety Science and Emergency Management,
Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: Investigating the blast resistance performance of reinforced concrete (RC) beams under explosive loads holds significant importance for structural safety engineering. As critical components of RC beams, stirrup configurations substantially affect their mechanical behavior. This study systematically examines how varying stirrup ratios affect blast resistance performance, aiming to establish quantitative relationships between stirrup ratios and dynamic responses and to identify performance-improvement saturation thresholds through integrated experimental explosion tests and finite element simulations. Two reinforced concrete beams with distinct stirrup ratios (0.64% and 0.37%, corresponding to 80 mm and 140 mm stirrup spacing, respectively) were designed and constructed. The specimens underwent four intensified blast scenarios (20 g, 40 g, 80 g air explosions, and 80 g contact detonation) within a controlled explosion chamber. Comprehensive dynamic response data of the beams were captured using accelerometers, strain gauges, and displacement sensors, while failure modes were meticulously documented. Subsequently, experimentally validated numerical models were developed in ANSYS/LS-DYNA finite element software, employing advanced fluid-structure interaction techniques for multi-material simulations. This study comprehensively evaluated the blast resistance performance of RC beams with five stirrup ratios (0.26%, 0.30%, 0.37%, 0.47%, 0.64%) and systematically compared their acceleration responses, strain distributions, mid-span displacements, and failure patterns. Experimental data demonstrated that under identical blast loads, Beam B_1 with 0.64% stirrup ratio showed 18% ~ 22% reductions in peak acceleration, 25% ~ 30% lower strain responses, and 35% ~ 40% decreased mid-span displacements compared to Beam B_2 (0.37% stirrup ratio), while maintaining superior structural integrity with 50% fewer diagonal shear cracks. Across all four blast scenarios, Beam B_1 demonstrated 9.4%, 10.0%, 11.6%, and 12.1% reductions in maximum mid-span displacement compared to Beam B_2 . The failure analysis revealed that Beam B_2 developed substantially more cracks with severe blast-side concrete crushing and larger spallation areas, confirming that higher stirrup ratios effectively suppress diagonal crack formation and propagation while improving concrete damage resistance. Numerical simulation further confirmed a consistent inverse relationship between stirrup ratio (0.26% ~ 0.64%) and structural response metrics, with progressive decreases in both peak concrete strain and mid-span displacement. Experimental data revealed significant performance improvements with increasing stirrup ratios; compared to the 0.26% reference beam, specimens with 0.30%, 0.37%, 0.47%, and 0.64% ratios demonstrated progressive reductions in peak strain (9.7%, 20.8%, 28.5%, and 35.4% respectively) and peak displacement (3.8%, 10.0%, 14.9%, and 18.2%). The study identified diminishing returns in dynamic response reduction-displacement improvements decreased from 10.0% (0.26% ~ 0.37% ratio range) to 4.9% (0.37% ~ 0.47%) and ultimately 3.3% (0.47% ~ 0.64%), indicating a performance enhancement plateau beyond certain stirrup ratios. These findings provide critical quantitative guidelines for optimizing blast-resistant RC structural design in practical engineering applications.

Key words: reinforced concrete beam; stirrup ratio; blast loading test; blast resistance performance; finite element analysis

近年来,意外事故导致的爆炸时有发生^[1],爆炸会使临近建筑结构遭受不同程度的破坏^[2]。钢筋混凝土(RC)结构作为最常见的建筑结构形式,需要进行适当的抗爆设计以增强建筑结构的抗爆性能。因此,研究RC结构在爆炸荷载下的动力响应,对于提高RC结构的抗爆性能具有重要的理论意义和工程应用价值。

在工程中通常可以设置箍筋来约束混凝土^[3],当混凝土受到荷载作用时,混凝土内部产生裂缝使其体积膨胀,此时箍筋受到拉力,使受压区混凝土处

于三向受压状态,从而改善了该区域混凝土的性能,提高了混凝土的强度和延性^[4]。箍筋作为RC构件中的重要组成部分,其配置数量(即配箍率)直接影响着构件在静、动荷载作用下的力学行为^[5]。

在钢筋混凝土结构的静荷载试验方面,学者们分别研究了箍筋对钢筋混凝土构件不同力学性能的影响。林智雄等认为增大配箍率能提升箍筋对混凝土的约束效果^[6],提高混凝土柱的极限抗压承载力并增加延性。张琪等研究了不同配箍率对型钢区域约束混凝土柱抗震性能的影响^[7]。结果表明,配箍

率的增加使得混凝土柱的抗震性能提高。金浏等分析了配箍率对 RC 梁剪切延性以及尺寸效应的影响^[8]。研究表明箍筋主要影响 RC 梁的剪切延性,增大配箍率可以有效抑制梁的脆性行为。Song 等对 16 根混凝土填充钢管短柱进行了轴向抗压试验^[9],表明增大配箍率能明显提高钢管混凝土短柱的轴向抗压承载力和延性。

在钢筋混凝土结构的动荷载试验方面,也有学者分别通过试验和数值模拟研究了箍筋对钢筋混凝土构件在爆炸、冲击荷载下的影响。田力等采用数值方法研究了配箍率对 T 形梁抗爆性能的影响^[10],结果表明,增大非加密区配箍率有利于提升梁的抗爆性能。唐泓等指出增大配箍率能减小梁背爆面破坏尺寸^[11]。吴吉光等对 4 根 RC 柱进行了冲击试验^[12],研究了柱配箍率对混凝土柱冲击性能的影响。结果表明,增加混凝土柱的配箍率可以明显减小在高速冲击作用下的变形和损伤。Yao 等分析了不同配箍率对 RC 梁抗爆性能和损伤特性的影响^[13]。结果表明,随着配箍率的增加,RC 梁的挠度、剥落面积随之减小。Sheng 等对 7 根 RC 柱进行冲击试验^[14],研究发现增大配箍率可以提高柱的抗冲击性能。张海鹏等采用 LS-DYNA 流固耦合算法和完全重启动技术^[15],对二次爆炸作用下钢筋混凝土梁的动力响应进行了数值模拟,发现对混凝土梁支座部位采用箍筋加密措施可以降低钢筋混凝土梁在爆炸作用下的剪切破坏程度,提高其抗爆性能。周清等研究表明^[16],与增加纵筋配筋率相比,增加箍筋配筋率能更有效地提高梁抗爆性能,“提高箍筋配筋率+增加梁截面高度”为提高矩形截面梁抗爆性能的最优组合模式。此外,部分学者采用流固耦合方法对爆炸荷载下的梁式构件进行了数值模拟研究^[17,18],为深入研究 RC 梁的抗爆性能提供了有效手段。闫秋实等对比分析了侧向近爆与竖向近爆荷载下 RC 梁的动力响应^[19],发现侧向起爆时 RC 梁的破坏更为严重,对结构的影响更大,需重视侧向爆炸荷载下 RC 梁的工程防护研究。

综上所述,现有研究普遍认为增大配箍率对 RC 构件的力学性能具有改善作用。然而,这些研究多集中于静力或抗震领域,针对爆炸荷载作用下配箍率对 RC 梁抗爆性能影响规律的系统研究尚不充分。现有认识多基于定性趋势判断,对于配箍率与抗爆性能之间的定量关系、性能提升效果的饱和阈值以及兼顾经济性的合理配箍率范围等关键问题,目前尚缺乏系统的试验数据和深入的分析论证^[20]。针对上述问题,本文采用实验室爆炸试验与数值模

拟计算相结合的方法,系统研究配箍率对 RC 梁抗爆性能的影响规律。首先通过实验室爆炸试验,对两根不同配箍率(箍筋间距分别为 80 mm 和 140 mm,对应配箍率 0.64% 和 0.37%)的 RC 梁施加四次爆炸荷载,获取其动态响应数据和破坏形态特征。在此基础上,利用 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件建立经试验验证的数值模型,对五种不同配箍率(0.26%、0.30%、0.37%、0.47%、0.64%) RC 梁的抗爆性能进行拓展分析。实验室试验为数值模型提供了可靠的验证基准,而数值模拟则弥补了试验样本数量有限的不足,两者相互补充、相互印证,能够更全面地揭示配箍率对 RC 梁抗爆性能的影响规律,特别是当配箍率增大到一定程度后性能提升效果的衰减趋势,以期为 RC 结构的抗爆设计和工程应用提供科学依据和技术参考。

1 不同配箍率 RC 梁的爆炸试验

1.1 试件的制作

本试验制作了如图 1 所示的 2 根混凝土等级为 C30 的试验梁。试验梁的长度为 1500 mm,其横截面积为 100 mm × 200 mm。其他尺寸与配筋见图 2 所示。保护层厚度为 20 mm,试验梁顶部配置 2 根直径 8 mm 的 HRB400 级螺纹钢筋,底部配置 2 根直径 14 mm 的 HRB400 级螺纹钢筋,箍筋采用直径 6 mm 的 HPB300 级钢筋。其中一根箍筋间距为 80 mm 的 RC 梁编号为 B_1 ,另一根箍筋间距为 140 mm 的 RC 梁编号为 B_2 。

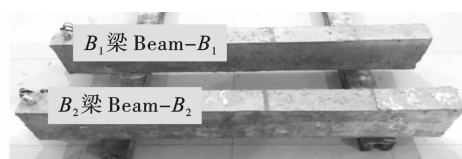


图1 试验梁
Fig. 1 Test beams

1.2 试验装置

试验主要使用设备及爆炸容器如图 3 所示。爆炸试验在爆炸罐中进行,炸药悬空放置在试验梁正中心上方位置,如图 4。

1.3 测点的布置

在试验梁底面布置编号为 A_1 、 A_2 和 A_3 共 3 个加速度传感器,粘贴 3 个编号为 Y_1 、 Y_2 和 Y_3 电阻应变片,布置图如图 5 所示。梁底跨中布置电子位移计。

1.4 试验方案

两根试验梁采用相同的爆炸试验方案,见表 1。试验方案中,前三炸为空气爆炸,主要研究试验梁的

动态响应,第四炸为接触爆炸,主要研究试验梁的破坏形态,不采集应变与加速度数据。

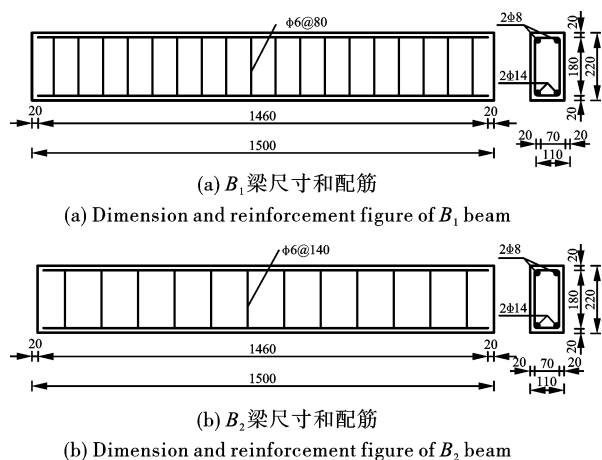


图 2 试验梁尺寸和配筋(单位:mm)

Fig. 2 Dimension and reinforcement figure of test beams(unit:mm)

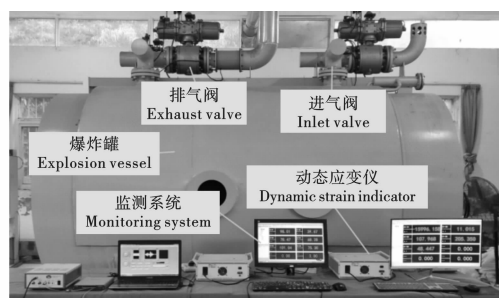


图 3 试验装置图

Fig. 3 Experimental setup

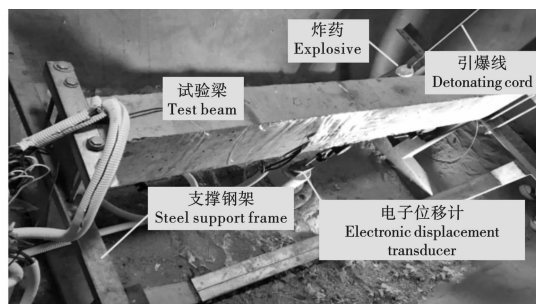
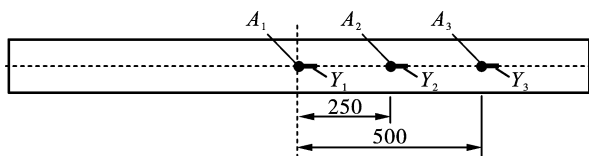


图 4 爆炸罐内的试件

Fig. 4 The specimen in the vessel



A-加速度传感器 Accelerometer Y-电阻应变片 Strain Gauge

图 5 梁底面测点布置图(单位:mm)

Fig. 5 The measuring points on the bottom of the beam(unit:mm)

表 1 爆炸试验方案

Table 1 Explosion test plan

梁编号 Beam ID	炸药与梁距离 Standoff distance/cm	TNT 炸药当量 TNT equivalent/g	爆炸编号 Explosion No.
B_1/B_2	10	20	第一次爆炸 1st explosion
	10	40	第二次爆炸 2nd explosion
	10	80	第三次爆炸 3rd explosion
	0	80	第四次爆炸 4th explosion

1.5 加速度结果分析

试验梁的加速度数据通过加速度传感器记录,图 6 给出了 B_1 梁和 B_2 梁跨中测点(A_1)在 20 g 炸药当量下的加速度时程曲线,两者波形相似。图 7 对比了不同爆炸工况下 A_1 测点的加速度峰值。结果表明,随着炸药当量从 20 g 增至 80 g,两根试验梁的加速度峰值均显著增大。在三次空气爆炸工况下,配箍率较高的 B_1 梁其加速度峰值均低于配箍率较低的 B_2 梁(降低 2% ~ 3%),表明增大配箍率有助于降低梁体在爆炸初期的加速度响应。

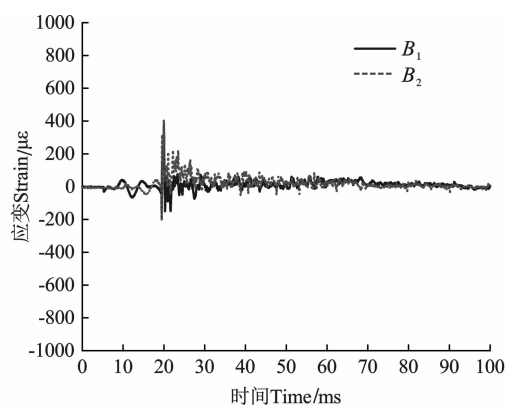


图 6 测点 A_1 加速度时程曲线

Fig. 6 Acceleration time history curve at A_1

1.6 应变测试结果

图 8 为 20 g 爆炸荷载下 B_1 梁和 B_2 梁跨中梁底测点 Y_1 的应变时程曲线,两者波形形态相似,均表现为迅速达到峰值后振荡衰减的特征。其他爆炸工况下的应变时程曲线形态与此类似,仅振幅随炸药量增加而相应增大。图 9 对比了四次爆炸工况下两根试验梁的应变峰值变化规律。由图可见,随着爆炸荷载逐次增大,两根梁的应变峰值均呈递增趋势。在所有四次爆炸工况中,配箍率较高的 B_1 梁其

应变峰值均低于配箍率较低的 B_2 梁:第一次爆炸中, B_1 梁应变峰值 ($423\ \mu\varepsilon$) 较 B_2 梁 ($482\ \mu\varepsilon$) 降低 12.2%;第二次爆炸中, B_1 梁 ($568\ \mu\varepsilon$) 较 B_2 梁 ($665\ \mu\varepsilon$) 降低 14.9%;第三次爆炸中, B_1 梁 ($886\ \mu\varepsilon$) 较 B_2 梁 ($1053\ \mu\varepsilon$) 降低 15.9%;第四次爆炸中, B_1 梁 ($1447\ \mu\varepsilon$) 较 B_2 梁 ($1768\ \mu\varepsilon$) 降低 18.2%。

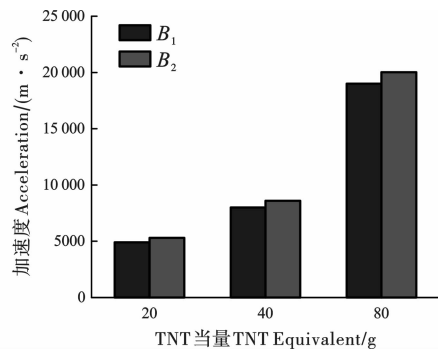


图 7 测点 A_1 加速度峰值对比图
Fig. 7 Peak accelerations at A_1

结果表明:提高配箍率可有效降低梁体应变峰值,增强裂缝控制能力。随着爆炸荷载增大,高配箍率梁的应变降低幅度呈上升趋势,在最强荷载下达到最大降幅 18.2%,说明箍筋的约束作用在强爆炸荷载下更为关键。

1.7 跨中位移测试结果

跨中位移是衡量梁体抗弯刚度的重要指标。表 2 的数据揭示了配箍率对 RC 梁抗变形能力的影响。

随着炸药当量的递增,两根 RC 梁的跨中最大位移均逐步增大。在四种爆炸工况下, B_1 梁跨中最大位移较 B_2 梁依次减小了 9.4%、10%、11.6%、12.1%。结果表明,减小箍筋间距(增大配箍率)能够显著增强 RC 梁的整体刚度,提升其抵抗爆炸荷载下弯曲变形的能力,且这种提升效应在更强的累积损伤下表现更为明显。

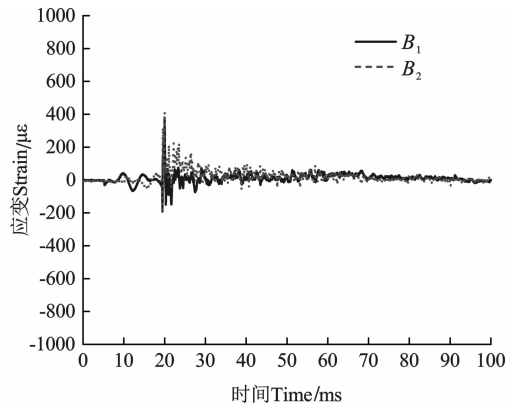


图 8 测点 Y_1 应变时程曲线
Fig. 8 Strain time history curve at Y_1

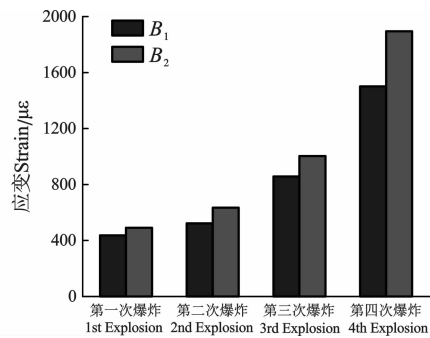


图 9 测点 Y_1 应变峰值对比图
Fig. 9 Peak strain at Y_1

表 2 B_1 梁和 B_2 梁跨中最大位移(单位:mm)
Table 2 Maximum Mid-span Displacement of Beam B_1 and Beam B_2 (unit:mm)

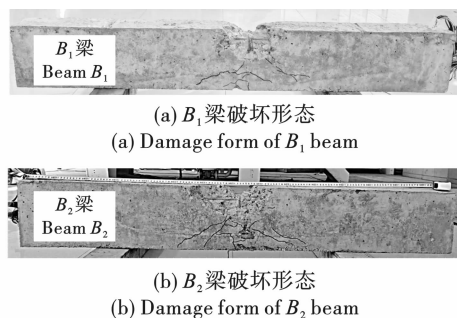
梁编号 Beam ID	第一次爆炸 1st explosion	第二次爆炸 2nd explosion	第三次爆炸 3rd explosion	第四次爆炸 4th explosion
B_1 梁 B_1 Beam	0.58	1.25	1.98	3.57
B_2 梁 B_2 Beam	0.64	1.39	2.24	4.06

1.8 梁体破坏形态

对两根不同配箍率 RC 梁在炸药当量为 80 g 下接触爆炸时的裂缝发展及宏观破坏形态进行对比。其爆炸损伤图如图 10 所示。

对比图 10(a)、(b),两根试件梁八字形扩展裂缝主要出现在混凝土受拉区,裂缝延伸至梁底部且基本沿梁跨中对称分布, B_2 梁的裂纹数量明显多于

B_1 梁的裂纹数量,说明在爆炸荷载作用下,减小箍筋间距能够抑制斜裂缝的开展。两根 RC 梁都发生了局部混凝土剥离现象,顶部纵筋和箍筋裸露且出现轻微变形。但是 B_2 梁迎爆面混凝土压溃更严重,受压区混凝土剥落面积明显大于 B_1 梁,这表明增大配箍率可以增强箍筋对混凝土材料的约束作用,提高混凝土梁的整体刚度,从而提升梁体的抗爆性能。

图 10 B_1 梁和 B_2 梁破坏形态对比图Fig. 10 Comparison of damage forms of B_1 and B_2 beam

2 不同配箍率 RC 梁抗爆性能的数值模拟

实验室试验对两根不同配箍率 RC 梁进行了爆炸试验,为了更全面地研究不同间距箍筋对 RC 梁抗爆性能的影响,在实验室试验数据的基础上,利用 ANSYS 建立 5 种不同配箍率 RC 梁的数值模型,如表 3 所示。所建模型采用了与实验室梁相同的尺寸、材料参数以及边界条件,模拟梁在爆炸荷载下的动态响应和破坏形态。

表 3 RC 梁的配箍率

Table 3 Stirrup ratio of reinforced concrete beams

模型梁编号 Model beam ID	箍筋间距 Stirrup spacing/mm	箍筋直径 Stirrup diameter/mm	配箍率 Stirrup ratio/%
模型梁 1 Model beam 1	200	6	0.26
模型梁 2 Model beam 2	170	6	0.30
模型梁 3 Model beam 3	140	6	0.37
模型梁 4 Model beam 4	110	6	0.47
模型梁 5 Model beam 5	80	6	0.64

混凝土、炸药、空气均选用 SOLID164 八节点单元,钢筋采用 BEAM161 四节点单元。网格划分采用映射划分,模型梁 1 单元总数量为 309181 个,其中混凝土单元数量为 205979 个,空气单元数量为 180512 个。计算时长为 10 ms,接触关系采用自动接触 CONTACT_AUTOMATIC,采用对称边界条件,对空气域的所有表面节点施加无反射边界条件。

数值模型梁 5 与试验梁 B_1 箍筋间距相同,数值模型梁 3 与试验梁 B_2 箍筋间距相同。通过对比实验室测试结果与有限元计算结果,验证了所建模型的准确性,确保了数值模拟结果的可信度。

2.1 材料参数

混凝土材料模型选用材料模型 Mat Concrete Damage Rel 3^[17]。该模型考虑了应变率对混凝土材料的影响,能够很好地模拟混凝土结构在真实爆炸冲击荷载作用下的动态响应。混凝土材料参数见表 4。

钢筋通过关键字 MAT_PLASTIC_KINEMAT-IC^[4]定义塑性随动强化本构来模拟钢筋在爆炸荷载下的动力行为,本构模型如下

$$\sigma_y = \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{1/P} \right] (\sigma_0 + \beta E_p \epsilon_p^{eff}) \quad (1)$$

式中: σ_y 为钢筋屈服应力; C 、 P 为考虑应变率

效应的模型参数; σ_0 为静载屈服应力; E_p 为硬化模量; β 为硬化参数; ϵ_p^{eff} 为有效塑性应变。钢筋材料参数取值如表 5 所示。

表 4 混凝土材料参数

Table 4 Material parameters of concrete

参数 Parameter	取值 Value
密度 Density	2400 kg · m ³
弹性模量 Elastic modulus	129 GPa
泊松比 Poisson's ratio	0.27
应变率系数 Strain rate coefficient	0.007
静态单轴抗压强度 Static uniaxial compressive strength	0.04 GPa
最大拉伸静水压力 Maximum tensile hydrostatic pressure	0.004 GPa
等效最大强度 Equivalent maximum strength	7 GPa
最小开裂塑性应变 Minimum cracking plastic strain	0.01

表 5 中: ρ 为材料密度; PR 为泊松比; E 和 G 分别为弹性模量和剪切模量; FY 为材料屈服强度; β

为硬化参数; C 、 P 为 Cowper-symonds 模型参数; FS 为材料失效时最大塑性应变。

2.2 配箍率对梁应变的影响

图 11 为配箍率分别为 0.26% (箍筋间距 200 mm)、0.30% (箍筋间距 170 mm)、0.37% (箍筋

间距 140 mm)、0.47% (箍筋间距 110 mm)、0.64% (箍筋间距 80 mm) 下 RC 梁在 0 cm – 80 g 爆炸工况下,梁底部混凝土跨中节点应变时程曲线。图 12 为不同配箍率下该节点的应变峰值。

表 5 钢筋材料参数
Table 5 Material parameters of steel

钢筋类别 Reinforcement type	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	E/GPa	PR	FY/MPa	G/MPa	β	C	P	FS
HRB400	7850	210	0.3	420	2.1	0	40	5	0.4
HPB300	7850	200	0.3	325	2	0	40	5	0.2

由图 11 和图 12 可知,配箍率对混凝土材料的应变有较大影响。配箍率分别为 0.64%、0.47%、0.37%、0.30% 的 RC 梁应变峰值与配箍率 0.26% 的 RC 梁相比,混凝土的应变峰值分别降低了 35.4%、28.5%、20.8%、9.7%。随着箍筋间距的减小(配箍率的增大),RC 梁混凝土跨中节点应变峰值逐渐减小,但减小的幅度随着配箍率增大逐渐减缓。

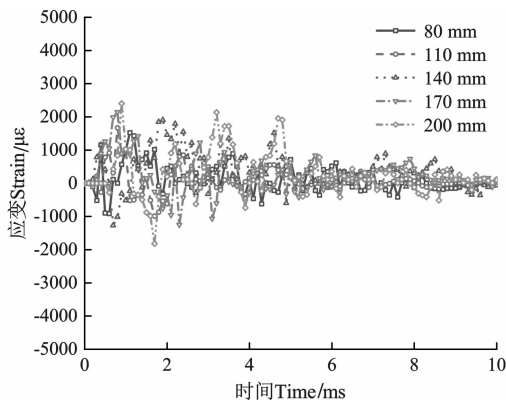


图 11 应变时程曲线

Fig. 11 Strain time history curves

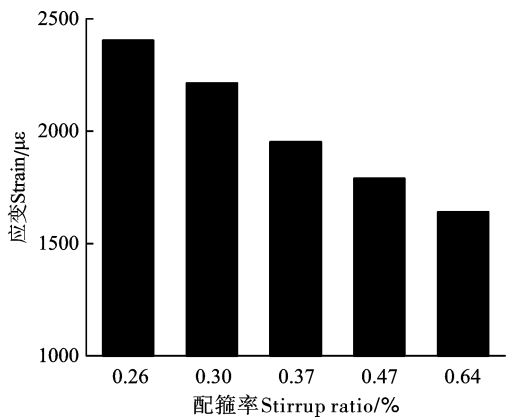


图 12 不同配箍率应变峰值

Fig. 12 Peak strains of different stirrup ratio

2.3 配箍率对梁位移的影响

图 13 对比了配箍率分别为 0.26%、0.30%、0.37%、0.47%、0.64% 下,RC 梁在 0 cm – 80 g 爆炸工况下梁底跨中节点竖向位移时程曲线。图 14 为不同配箍率下 RC 梁底面混凝土跨中节点竖向位移峰值。

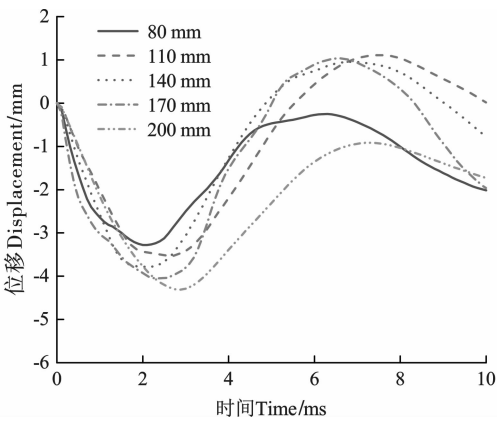


图 13 位移时程曲线

Fig. 13 Displacement time history curves

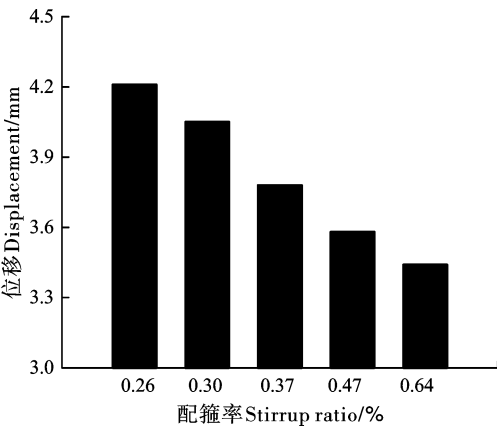


图 14 不同配箍率位移峰值

Fig. 14 Peak displacement of different stirrup ratio

由图 13 和图 14 可知,随着箍筋间距缩小(配箍率增大),RC 梁底面跨中节点位移峰值逐渐降低。当箍筋间距分别为 200 mm、170 mm、140 mm、110 mm、80 mm 时,对应的梁位移峰值分别为 4.21 mm、4.05 mm、3.78 mm、3.53 mm、3.28 mm。与箍筋间距 200 mm(配箍率 0.26%)的模型梁相比,间距 170 mm、140 mm、110 mm、80 mm 的模型梁位移峰值分别下降了 3.8%、10.0%、14.9%、18.2%。

结果表明,减小箍筋间距能够增强箍筋对混凝土的约束作用,提高梁体整体刚度,从而增强其抵抗变形的能力。同时,随着配箍率的不断增大,位移峰值的降低幅度逐渐趋缓,这一规律与应变分析结果相一致。

2.4 配箍率对梁破坏形态的影响

配箍率分别为 0.26%、0.30%、0.37%、0.47%、0.64% 下的 RC 梁在 0 cm–80 g 爆炸工况下破坏形态对比图见图 15 所示。

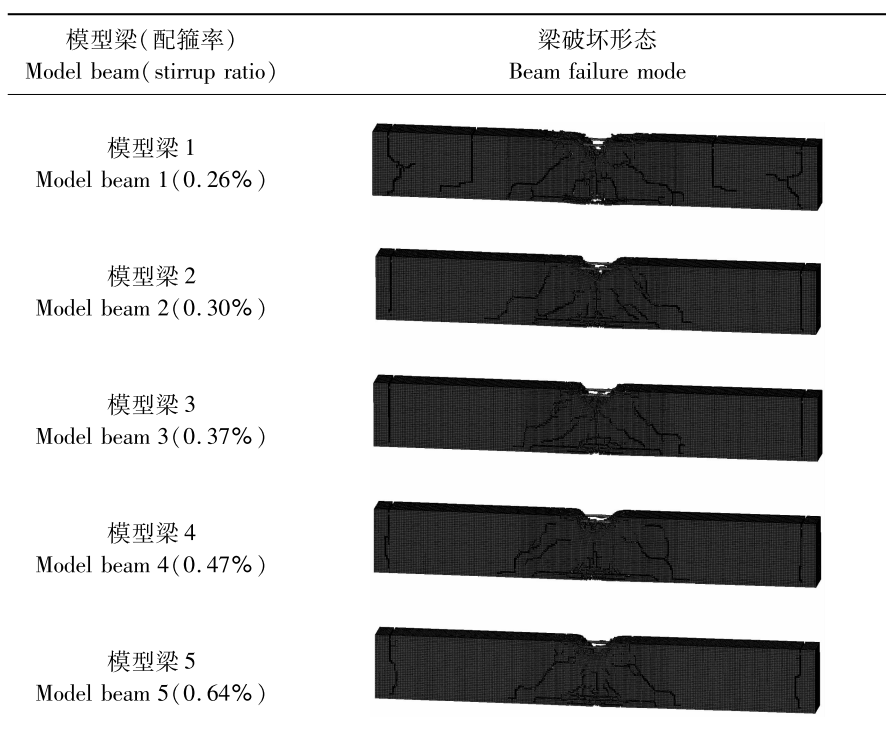


图 15 梁破坏形态对比

Fig. 15 Comparison of damage forms of RC beams

由图 15 可知,在接触爆炸工况下,5 根试验梁的破坏形态类似,均表现为受压区混凝土压碎,迎爆面跨中混凝土出现明显的剥落现象。梁侧混凝土裂缝形式主要为斜裂缝,基本沿跨中对称分布,表现为“八”字形裂缝。但可以观察到,随着配箍率的增大,梁侧面混凝土斜裂缝的数量逐渐减小且斜裂缝的延伸长度缩短,梁体的破坏程度也逐渐减少。这表明随着配箍率增大,箍筋对混凝土的约束作用更为明显,增强了混凝土材料的强度,抑制了梁体斜裂缝的出现与延伸,从而在一定程度上提升了 RC 梁的抗爆性能。

3 结论

通过实验室爆炸试验与 ANSYS/LS-DYNA 有限元数值模拟相结合的方法,研究了不同配箍率对钢

筋混凝土梁抗爆性能的影响。首先对两根箍筋间距分别为 80 mm(配箍率 0.64%)和 140 mm(配箍率 0.37%)的 RC 梁进行了四次爆炸荷载试验,分析了其加速度响应、应变响应、跨中位移及破坏形态。在此基础上,建立了五种不同配箍率(0.26%、0.30%、0.37%、0.47%、0.64%)RC 梁的有限元模型,经试验结果验证后,进一步分析了配箍率对梁体动态响应及破坏形态的影响规律。主要得到以下结论:

(1)实验室爆炸试验结果表明,在相同爆炸荷载条件下,配箍率较高的 B_1 梁(0.64%)其加速度峰值、应变峰值及跨中位移峰值均小于配箍率较低的 B_2 梁(0.37%)。在四次爆炸工况下, B_1 梁跨中最大位移较 B_2 梁依次减小了 9.4%、10.0%、11.6%和 12.1%。这表明增大配箍率能够增强箍筋

对混凝土的约束作用,提高梁体的整体刚度,从而有效降低 RC 梁在爆炸荷载下的动态响应。

(2)从破坏形态来看,接触爆炸后两根试验梁均出现受压区混凝土剥落、箍筋裸露及斜裂缝开展等现象,但损伤程度存在明显差异。 B_2 梁(配箍率 0.37%)的裂缝数量多于 B_1 梁(配箍率 0.64%),且迎爆面混凝土压溃更为严重,剥落面积更大。说明增大配箍率能够有效抑制斜裂缝的萌生与扩展,增强混凝土材料的抗破损能力,从而提升 RC 梁的抗爆性能。

(3)数值模拟结果表明,随着配箍率从 0.26% 逐步增大至 0.64%,RC 梁的混凝土应变峰值和跨中位移峰值均呈现逐渐减小的趋势。与配箍率 0.26% 的模型梁相比,配箍率为 0.64%、0.47%、0.37%、0.30% 的模型梁其应变峰值分别降低了 35.4%、28.5%、20.8% 和 9.7%,位移峰值分别降低了 18.2%、14.9%、10.0% 和 3.8%。这表明在一定范围内提高配箍率对改善 RC 梁抗爆性能具有积极作用。

(4)数值模拟结果同时显示,随着配箍率的不断提高,梁体动态响应的降低幅度逐渐趋缓。配箍率从 0.26% 增至 0.37% 时,位移峰值降幅为 10.0%;从 0.37% 增至 0.47% 时,降幅为 4.9%;从 0.47% 增至 0.64% 时,降幅为 3.3%。这说明当配箍率增大到一定程度后,继续提高配箍率对 RC 梁抗爆性能的提升效果逐渐减弱。在实际工程设计中,应综合考虑抗爆性能提升效果与经济效益,选择合理的配箍率范围。

参考文献 (References)

- [1] HU Qi-yun, ZHANG Qiang, YUAN Meng-qi, et al. Traceability and failure consequences of natural gas explosion accidents based on key investigation technology[J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 139: 106448.
- [2] 齐宝欣, 阎石, 武行. 建筑结构抗爆设防性能目标研究[J]. 爆破, 2018, 35(3): 135-140.
- [2] QI Bao-xin, YAN Shi, WU Hang. Study on anti-explosive fortification and performance target of building structure[J]. Blasting, 2018, 35(3): 135-140. (in Chinese)
- [3] 邓宗才, 姚军锁. 高强箍筋约束超高性能混凝土柱轴压性能[J]. 复合材料学报, 2020, 37(10): 2590-2601.
- [3] DENG Zong-cai, YAO Jun-suo. Axial compression behavior of ultra-high performance concrete columns confined by high-strength stirrups[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2020, 37(10): 2590-2601. (in Chinese)
- [4] 蔡鹏飞, 熊祖钊, 蔡路军. 爆炸荷载下钢管混凝土构件动态响应的数值模拟与试验验证[J]. 爆破, 2021, 38(4): 44-51, 88.
- [4] CAI Peng-fei, XIONG Zu-zhao, CAI Lu-jun. Numerical simulation and experimental verification of dynamic response of concrete filled steel tubular members under explosive loading[J]. Blasting, 2021, 38(4): 44-51, 88. (in Chinese)
- [5] 周清, 丁杰, 张新鑫, 等. 各因素对简支 T 形截面钢筋混凝土梁抗爆性能的影响[J]. 水利与建筑工程学报, 2018(1): 247-254.
- [5] ZHOU Qing, DING Jie, ZHANG Xin-xin, et al. Influence of various factors on anti-explosion performance of simply supported T-shaped reinforced concrete beams[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2018(1): 247-254. (in Chinese)
- [6] 林智雄, 林宇洪, 邹文平, 等. 高强箍筋约束高强混凝土柱轴压性能研究[J]. 混凝土, 2022(3): 30-34.
- [6] LIN Zhi-xiong, LIN Yu-hong, ZOU Wen-ping, et al. Study on the axial compression behavior of high strength concrete columns confined by high strength stirrups[J]. Concrete, 2022(3): 30-34. (in Chinese)
- [7] 张琪, 曹新明, 肖利平, 等. 型钢区域约束混凝土柱抗震性能试验研究[J]. 建筑结构, 2021, 51(2): 85-91.
- [7] ZHANG Qi, CAO Xin-ming, XIAO Li-ping, et al. Experimental research on seismic behavior of steel regional confined concrete columns[J]. Building Structure, 2021, 51(2): 85-91. (in Chinese)
- [8] 金浏, 王涛, 杜修力, 等. 箍筋间距对 RC 梁剪切破坏及尺寸效应的影响研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2021, 41(6): 1157-1166.
- [8] JIN Liu, WANG Tao, DU Xiu-li, et al. Effect of stirrups spacing on shear failure and size effect of RC beams[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2021, 41(6): 1157-1166. (in Chinese)
- [9] SONG Xiao, WEI Xin-yu, HE Chen, et al. Performance of stirrup-confined concrete-filled steel tubular stub columns under axial loading: A further investigation[J]. Case Studies in Construction Materials, 2022, 17: e01689.
- [10] 田力, 王赛. 破片与冲击波复合作用下预应力混凝土 T 形梁损伤分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2021, 48(7): 28-41.
- [10] TIAN Li, WANG Sai. Damage analysis of a prestressed concrete T-beam subjected to combined loading of fragments and shock waves[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2021, 48(7): 28-41. (in Chinese)
- [11] 唐泓, 翟红波, 苏健军, 等. 近场爆炸下钢筋混凝土梁毁伤效应研究[J]. 兵器装备工程学报, 2022, 43(3): 196-201.
- [11] TANG Hong, ZHAI Hong-bo, SU Jian-jun, et al. Re-

- search on damage effect of reinforced concrete beam under close-in explosion [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2022, 43(3):196-201. (in Chinese)
- [12] 吴吉光, 肖 岩, DEMARTINO C. 圆形截面钢筋混凝土悬臂柱抗冲击性能试验研究 [J]. 结构工程师, 2018, 34(6):95-103.
- [12] WU Ji-guang, XIAO Yan, DEMARTINO C. Impact behaviour of circular section RC cantilever columns [J]. Structural Engineers, 2018, 34(6):95-103. (in Chinese)
- [13] YAO Shu-jian, ZHANG Duo, LU Fang-yun, et al. Damage features and dynamic response of RC beams under blast [J]. Engineering Failure Analysis, 2016, 62: 99-111.
- [14] SHENG Xi, ZENG Lian, LIU Yan-hui, et al. Experimental study on the dynamic behavior of T-shaped steel reinforced concrete columns under impact loading [J]. Engineering Structures, 2020, 208:110319.
- [15] 张海鹏, 潘钻峰, 司豆豆. 二次爆炸作用下钢筋混凝土梁动力响应的数值模拟 [J]. 爆炸与冲击, 2024, 44(10):101404.
- [15] ZHANG Hai-peng, PAN Zuan-feng, SI Dou-dou. Numerical simulation of dynamic response of reinforced concrete beams under secondary explosions [J]. Explosion and Shock Waves, 2024, 44(10):101404. (in Chinese)
- [16] 周 清, 丁 杰, 牛宁宁, 等. 配筋率及截面尺寸对简支矩形截面钢筋混凝土梁抗爆性能的影响 [J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2018, 49(6):1032-1036.
- [16] ZHOU Qing, DING Jie, NIU Ning-ning, et al. Effect of reinforcement ratio and section size on anti-explosion performance of simply supported rectangular reinforced concrete beams [J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2018, 49(6):1032-1036. (in Chinese)
- [17] 申双俊, 廖维张, 张春磊. 爆炸作用下高强钢绞线网片-聚合物砂浆加固钢筋混凝土板的数值模拟 [J]. 爆破, 2018, 35(1):167-174.
- [17] SHEN Shuang-jun, LIAO Wei-zhang, ZHANG Chun-lei. Numerical simulation of reinforced concrete slabs retrofitted with high strength steel wire mesh and polymer mortar subjected to explosion loading [J]. Blasting, 2018, 35(1):167-174. (in Chinese)
- [18] 孙炳鑫, 王晓磊, 马文彪, 等. 爆炸荷载作用下不同抗剪连接件组合梁动力响应及破坏模拟分析 [J]. 爆破, 2022, 39(1):152.
- [18] SUN Bing-xin, WANG Xiao-lei, MA Wen-biao, et al. Dynamic response and failure simulation analysis of composite beams with different shear connectors under blast loading [J]. Blasting, 2022, 39(1):152. (in Chinese)
- [19] 闫秋实, 梁伟豪. 侧向近爆荷载下 RC 梁动力响应及破坏形态分析 [J]. 北京工业大学学报, 2025, 51(9):1071-1079.
- [19] YAN Qiu-shi, LIANG Wei-hao. Dynamic response and failure mode analysis of RC beams under lateral close-in blast loading [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2025, 51(9):1071-1079. (in Chinese)
- [20] MA Lin-jian, WU Hao, FANG Qin. A unified performance-based blast-resistant design approach for RC beams/columns [J]. International Journal of Impact Engineering, 2023, 173:104468.

(上接第 120 页)

- [11] 彭正阳, 黄 震, 秦茂虹, 等. 内部与地表爆炸作用下装配式框架隧道结构动力响应及抗爆性能 [J]. 隧道建设(中英文), 2025, 45(11):2140-2154.
- [11] PENG Zheng-yang, HUANG Zhen, QIN Mao-jiang, et al. Dynamic response and blast resistance performance of assembled frame tunnel structures under internal and surface explosion effects [J]. Tunnel Construction, 2025, 45(11):2140-2154. (in Chinese)
- [12] XIE Li-xiang, LU Wen-bo, ZHANG Qian-bing, et al. Analysis of damage mechanisms and optimization of cut blasting design under high in-situ stresses [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2017, 66:19-33.
- [13] 刘翔宇, 龚 敏, 杨仁树, 等. 隧道周边孔毫秒延时爆破围岩损伤数值分析研究 [J]. 振动与冲击, 2023, 42(24):8-15.
- [13] LIU Xiang-yu, GONG Min, YANG Ren-shu, et al. Numerical analysis of surrounding rock damage caused by millisecond delay blasting of tunnel peripheral holes [J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(24):8-15. (in Chinese)
- [14] KAMRAN M, LIU Hong-yuan, FUKUDA D, et al. State-of-the-art review and prospect of modelling the dynamic fracture of rocks under impact loads and application in blasting [J]. Geosciences, 2025, 15(8):314.
- [15] 阚吉亮, 窦林名, 周坤友, 等. 多孔爆破岩石破坏机制及起爆方式选择 [J]. 采矿与安全工程学报, 2025, 42(5):1175-1187.
- [15] KAN Ji-liang, DOU Lin-ming, ZHOU Kun-you, et al. Rock failure mechanism of multi-hole blasting and selection of initiation pattern [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2025, 42(5):1175-1187.