

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2026.01.002

承载立柱在复合垫层装药结构下 爆破破坏机理研究*

王仕林¹, 刘涛², 杨涛涛¹, 李洪伟^{2,3}, 刘伟^{2,3}, 梁昊², 张立果², 许博²

(1. 宏大爆破工程集团有限责任公司, 广州 511300; 2. 安徽理工大学 化工与爆破学院, 淮南 232001;
3. 安徽省爆破器材与技术工程实验室, 淮南 232001)

摘要: 为实现建筑物定向爆破拆除中最后一排承载立柱的减弱爆破损伤控制, 提出运用复合垫层装药结构对最后一排承载立柱支撑结构进行减弱爆破。基于复合垫层作用的力学机制的基础上设计与现场为背景的相似模型试验, 结合超动态应变仪、高速摄影、数字图像技术(DIC)等测量手段分析不同装药结构下的承载立柱爆破损伤, 探究不同炸药当量下复合垫层装药结构对承载立柱的破坏特征、应变演化规律的影响特性并分析爆破后残余承重柱的极限承载力。结果表明: 复合垫层装药结构具有明显的孔底损伤控制效果, 反向聚能作用使得承载立柱的损伤主要在孔口所在面上, 炮孔底部预保留混凝土保留较好, 承重柱在倒塌方向形成缺口的同时保留后部混凝土使承重构件有足够的支撑强度形成转动铰支点, 从而使建筑物能够精确按照设定方向倒塌。研究成果可为定向爆破提供一定参考依据, 提高爆破安全性的同时提高精确性。

关键词: 减弱爆破; 复合垫层; 承载立柱; 模型实验

中图分类号: TU746.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2026)01-0011-09

Research on Blasting Failure Mechanism of Load-bearing Columns under Composite Cushion Layer Charge Structure

WANG Shi-lin¹, LIU Tao², YANG Tao-tao¹, LI Hong-wei^{2,3}, LIU Wei^{2,3}, LIANG Hao², ZHANG Li-guo², XU Bo²

(1. Hongda Blasting Engineering Group Co., Ltd., Guangzhou 511300, China;
2. School of Chemical Engineering and Blasting, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 3. Engineering Laboratory of Explosive Materials and Technology of Anhui Province, Huainan 232001, China)

Abstract: To optimize damage control in the directional blasting demolition of buildings, a composite cushion charge structure was proposed to reduce blasting on the support structures of the final row of load-bearing columns. Based on the mechanical mechanism of the composite cushion layer, a field-simulated scaled model test was designed. The blasting-induced damage to load-bearing columns under various charge structures was analyzed using integrated measurement techniques, including ultra-dynamic strain gauges, high-speed photography, and digital image correlation (DIC). To investigate the failure characteristics and strain evolution patterns of load-bearing columns under varying explosive equivalents using a composite cushion charge structure, and to evaluate the residual load-bearing capacity of the remaining columns.

收稿日期 (Date of reception): 2025-08-28

网络首发日期 (Published online): 2025-10-20

作者简介: 王仕林 (1977-), 男, 大学本科、助理工程师, 从事工程爆破方面的研究, (E-mail) shilwang468@163.com。

通信作者: 刘涛 (2000-), 男, 在读硕士, 从事爆破理论与技术方面的研究, (E-mail) 2016397853@qq.com。

基金项目: 精细爆破国家重点实验室面上项目 (PBSKL2023A5)

About the author: WANG Shi-lin (1977-), male, bachelor's degree, assistant engineer, mainly engaged in research on engineering blasting, (E-mail) shilwang468@163.com.

Corresponding author: LIU Tao (2000-), male, postgraduate student, mainly engaged in the blasting theory and technology research, (E-mail) 2016397853@qq.com.

Fund Programs: General Project of State Key Laboratory of Fine Blasting (PBSKL2023A5)

ing capacity post-blasting, experimental results demonstrate that this charge structure effectively controls damage at the borehole surface. The reverse energy concentration effect leads to primary damage occurring on the free surface near the borehole while effectively preserving the pre-reserved concrete at the borehole base. This mechanism ensures gap formation in the collapse direction, while retaining rear concrete, maintaining sufficient support strength to establish a rotating hinge point, thereby enabling precise directional collapse of the structure. These findings offer valuable references for directional blasting engineering, simultaneously enhancing operational safety and demolition accuracy.

Key words: weakened blasting; composite cushion layer; load-bearing column; model experiment

定向爆破拆除方案的显著优势在于爆破工作量较少,拆除效率较高^[1-5]。成功实现这一方案的关键在于确保最后一排未爆破或进行减弱爆破的承重柱能提供足够的支撑强度,形成转动铰支点,从而使建筑物能够精确按照设定方向倒塌。因此,控制爆破过程中最后一排承重柱的损伤直接影响拆除爆破的效果。

国内外研究学者对于拆除爆破中爆炸载荷下钢筋混凝土柱的动态损伤破坏、局部构件的爆破失效研究和整体结构的失稳倒塌等相关内容采用模型试验结合数值模拟的方式进行了深入研究,得到一系列的研究成果。魏世众等结合弹塑性力学和相似理论设计爆破模型实验^[6,7],对钢筋混凝土立柱在不同混凝土强度、不同轴压和药量下进行实验研究,通过块度分布函数分析多参数下钢筋混凝土立柱爆破动力响应特性;Jinshan Sun 等研究了钢筋混凝土柱的应力瞬态响应特性^[8],提出应力瞬态响应模型,详细描述了爆破钢筋混凝土柱过程的应力状态,为数值模拟提供借鉴;吕杨等基于损伤能量阈值和滞回耗能^[9],建立评定竖向承重构件竖向剩余承载力的损伤准则,用于对建筑物混凝土柱在地震作用下的损伤分析;姚颖康等对钢筋混凝土立柱爆破后钢筋骨架承载特征进行研究^[10],基于爆后残余钢筋骨架的承载能力分析判断构筑物的局部失稳与确定混凝土柱爆破高度,对弯曲压杆失稳模型进行优化;黄小武等通过高速摄影观测对钢筋混凝土立柱爆破破坏过程及个别飞散物运动过程进行试验研究^[11],发现孔内雷管延期时间误差影响混凝土柱爆破破坏过程,需要控制混凝土柱不同破坏位置的先后顺序。

对最后一排减弱爆破的承重柱研究涉及较少,本文在已有研究基础上,提出在承重柱的炮孔中设置复合垫层结构的方案以期控制爆破损伤,吴新霞等在水利工程保护层一次爆破中首次提出设置复合垫层于炮孔底部^[12],减少爆破对炮孔底部损伤,并运用数值模拟对复合垫层结构进行了优化设计;胡浩然等在白鹤滩水电站运用复合垫层装药爆破技术进行水平建基面的快速开挖^[13],能有效控制孔底损

伤,显著改善建基面的爆破效果,实现水平建基面的大规模快速开挖;李腾飞等使用有限元模拟仿真软件 ANSYS/LS-DYNA 对水下 40 m 岩体运用复合消能结构爆破开挖进行数值模拟^[14],验证复合垫层可以有效控制水下爆破孔底岩石的损伤范围。

以应力波反射与透射原理为基础,分析复合垫层作用的力学机制,并通过模型试验来验证其合理性与可行性,探究不同炸药当量下复合垫层装药结构对承载立柱的破坏特征、应变演化规律的影响特性。

1 复合垫层作用的力学机制分析

复合垫层是“钢球+石英砂”的组合结构,在钢筋混凝土承重柱减弱爆破中的核心逻辑是通过多级能量转化与分散机制,将爆破产生的冲击波和飞散物动能逐级耗散,从而降低对炮孔底部混凝土的损伤破坏。

1.1 刚性垫层的动态响应与能量散射

在装有复合垫层结构的炮孔中,炸药爆轰产物(气体)、钢球、石英砂垫层以及炮孔底部混凝土的波阻抗存在显著差异,导致爆炸应力波在不同材料界面发生多次反射、透射和能量再分配过程,图 1 给出了复合结构的详细布置图,图 2 给出了作用过程的应力波传播示意图。现以单孔爆破为研究对象,针对应力波在钢球-垫层复合体系中的传播特性展开理论分析:

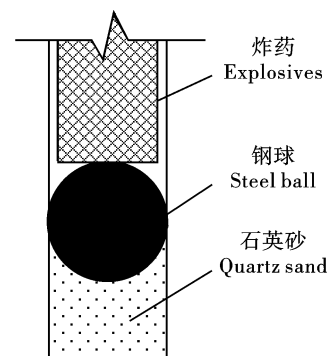


图 1 复合垫层结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of composite cushion structure

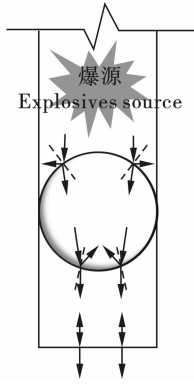


图 2 复合垫层结构应力波透射、反射示意图

Fig. 2 Schematic diagram of stress wave transmission and reflection of composite cushion structure

当应力波从一个介质穿越分界面进入到另一介质时,由于传播介质的波阻抗不同,在不同界面交界处会发生透射和反射,当入射波为纵波(P)时,界面处通常会激发四种波,反射纵波(P_r)、反射横波(S_r)、透射纵波(P_t)和透射横波(S_t),如图 3 所示。

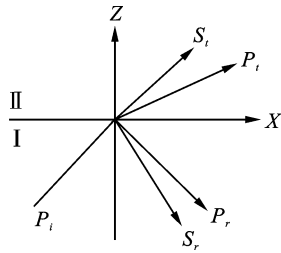


图 3 应力波的反射与透射示意图

Fig. 3 Schematic diagram of reflection and transmission of stress wave

在不同介质的交界处,应力波的反射部分和透射部分的形态变化可以通过以下公式来描述^[15-19]

$$\sigma_r = \sigma_i \frac{\rho_2 C_2 - \rho_1 C_1}{\rho_2 C_2 + \rho_1 C_1} \quad (1)$$

$$\sigma_t = \sigma_i \frac{2\rho_2 C_2}{\rho_2 C_2 + \rho_1 C_1} \quad (2)$$

式中: σ 代表应力; ρ 代表介质密度; C 代表介质的纵波传播速度;脚标“ i ”、“ r ”、“ t ”分别代表入射波、反射波和透射波。

若 $\rho_2 C_2 > \rho_1 C_1$, 反射波和入射波都为正,表示压缩波在分界面上反射后仍为压缩波,并且应力波将以相反的方向加载;若 $\rho_2 C_2 = \rho_1 C_1$,表示入射的应力波在通过分界面时未发生反射,所有波能量在分界面上完全透射到第二种介质中,说明两种介质的材料特性完全一致时,没有能量损失;若 $\rho_2 C_2 < \rho_1 C_1$,反射波与入射波的符号相反,表示在分界面接触未发生滑移的情况下,既会有压缩波透射,也会

有拉伸波反射出现;若 $\rho_2 C_2 = 0$,表示当入射应力波到达自由表面时,则 $\sigma_i = 0, \sigma_r = -\sigma_i$,所有波在分界面上将反射为拉伸波。

当爆炸冲击波由低阻抗气体介质(爆生气体)向高阻抗固体介质(钢球)传播时,在气-固界面产生首次反射与透射现象。受钢球球形结构表面几何特性影响,反射波传播方向呈现显著水平和反向分量,此方向性能量集中效应对于混凝土保护部分的保留是有利的,能量向水平和反向聚集则可以加强水平和反向上混凝土的破碎并通过能量定向聚集减少垂直方向对炮孔底部混凝土的损伤。透射波在钢球内部传播至其与柔性垫层界面时,由于钢球波阻抗显著高于石英砂垫层材料,在该界面上将发生强烈的二次反射,大部分能量反射回钢球内部,仅有少量能量透射进入柔性垫层。钢球两界面构成封闭式能量陷阱,透射进钢球的能量经多次反射使大部分的入射能量滞留于钢球内部,促使其发生塑性变形直至结构破坏。

1.2 柔性垫层的非线性吸能

透射至垫层内的应力波引发石英砂垫层非线性响应,石英砂颗粒间发生剧烈摩擦滑动与塑性变形,其松散结构在动态压实过程中通过颗粒间的碰撞、摩擦及沙子的整体塑性变形将动能转化为热能,实现应力波能量的耗散。残余透射能量经垫层材料压实变形、颗粒破碎等非线性过程进一步衰减,最终作用于基底混凝土的应力波能量仅有很少部分实现了炮孔底部的损伤控制。

在石英砂垫层中的传播的应力波能量包括弹性应变能和动能。波在传播过程中给石英砂施加一定的应力。在石英砂介质中取一微元体 $dx dy dz$ 分析^[20], P 波在微元体上施加正应力, S 波施加剪应力,可得出微元体的正应变能 E_p 和剪应变能 E_s ,

$$E_p = \frac{1}{2} \iiint (\sigma_{xx} \varepsilon_{xx} + \sigma_{yy} \varepsilon_{yy} + \sigma_{zz} \varepsilon_{zz}) dx dy dz \quad (3)$$

$$E_s = \frac{1}{2} \iiint (\tau_{xy} \gamma_{xy} + \tau_{yz} \gamma_{yz} + \tau_{xz} \gamma_{xz}) dx dy dz \quad (4)$$

式中: σ, τ 为正应力和剪应力,下标表示方向; ε, γ 表示正应变和剪应变,下标表示方向。

总应变能为

$$E_{ps} = E_p + E_s = \frac{1}{2} \iiint (\sigma_{xx} \varepsilon_{xx} + \sigma_{yy} \varepsilon_{yy} + \sigma_{zz} \varepsilon_{zz} + \tau_{xy} \gamma_{xy} + \tau_{yz} \gamma_{yz} + \tau_{xz} \gamma_{xz}) dx dy dz \quad (5)$$

假设应力波能量使介质质点运动的位移为 $s(u_x, u_y, u_z, t)$,那么微元体 $dx dy dz$ 的动能为

$$E_k = \frac{1}{2} \rho \iiint \left[\left(\frac{\partial u_x}{\partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_y}{\partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_z}{\partial t} \right)^2 \right] dx dy dz \quad (6)$$

石英砂介质中微元体 $dx dy dz$ 总应力波能量为

$$E = E_p + E_s + E_k = \frac{1}{2} \iiint \left\{ \sigma_{xx} \varepsilon_{xx} + \sigma_{yy} \varepsilon_{yy} + \sigma_{zz} \varepsilon_{zz} + \tau_{xy} \gamma_{xy} + \tau_{yz} \gamma_{yz} + \tau_{xz} \gamma_{xz} + \rho \left[\left(\frac{\partial u_x}{\partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_y}{\partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_z}{\partial t} \right)^2 \right] \right\} dx dy dz \quad (7)$$

弹性振波在砂石中的传播是逐层衰减的。应力波在不同介质分层界面上的折射和反射过程,便是应力波能量逐渐衰减的过程。假设反射波是唯一干扰源,并为简谐波形式,那么经推导可得

$$I_0 = 1 + \left(\frac{1 - K}{1 + K} \right)^2 \quad (8)$$

式中: I_0 为透(折)射波与入射波的能量流之比,即能量透过系数; K 为波阻抗比。由式(8)可以看出,介质密度差越大,即无论 $K \ll 1$ 或 $K \gg 1$, I_0 都趋近于零,说明能量越不容易透过。

2 复合垫层装药在承载立柱中爆破模型实验

2.1 模型实验建立

本文模拟 10 层 1000 m^2 钢筋混凝土框架结构的建筑物底部的 60 根截面 $0.6 \text{ m} \times 0.6 \text{ m}$, C30 混凝土的承载立柱。依据相识准则设计建立 $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$ 的钢筋混凝土柱模型,内部设计 4 根纵筋,直径为 10 mm 的钢筋,箍筋采用直径为 4 mm 的钢筋,箍筋距立柱两端的距离为 75 mm,相邻箍筋间距

为 100 mm,沿立柱轴线方向均匀布置,钢筋外设置 25 mm 的保护层厚度。模型炮孔直径设定为 12 mm,深度根据是否设置垫层分别设置为 75 mm (无垫层工况)和 89 mm (有垫层工况)。复合垫层依据炮孔直径设计为 12 mm 高石英砂柔性垫层与一个直径 12 mm 的钢球刚性垫层构成。实验模型示意图见图 4,经测试得到模型试件相关参数见表 1。

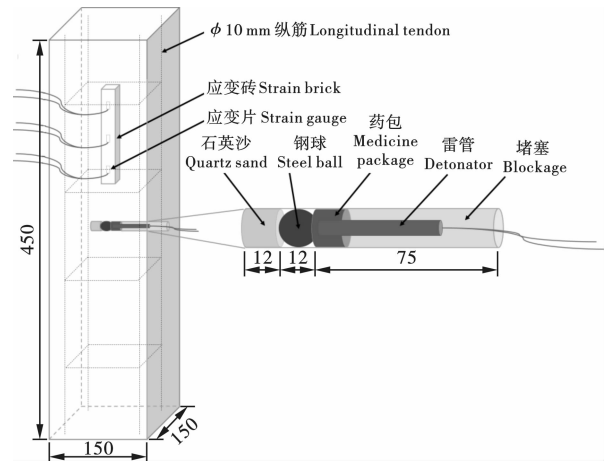


图 4 实验模型示意图(单位:mm)

Fig. 4 Schematic diagram of experimental model(unit:mm)

在爆破试验中,通过在雷管周围添加钝化黑索金药包,实现了对 TNT 当量的调整,在通过预实验调整后具体设置了 1.5 g、2 g、2.5 g、3 g 四个不同 TNT 当量。共设计了 8 组实验,见表 2。试验装置安装示意图见图 5。

表 1 混凝土模型相关参数

Table 1 Parameters related to concrete models

密度 Density/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	抗压强度 Compressive strength/MPa	纵波速度 Longitudinal wave velocity/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	弹性模量 Elastic modulus/ GPa	泊松比 Poissony
2.343	30.741	3398.3	8.293	0.367

表 2 模型实验方案

Table 2 Model test schemes

实验编号 Experiment number	有无垫层 With or without a cushion layer	上部轴压 Upper axial pressure/MPa	炮孔直径 Blast hole diameter/cm	孔深 Hole depth/cm	单孔装药量 Single-hole charge/g
M-1	有	10	1.2	8.9	1.5
M-2	无	10	1.2	7.5	1.5
M-3	有	10	1.2	8.9	2
M-4	无	10	1.2	7.5	2
M-5	有	10	1.2	8.9	2.5
M-6	无	10	1.2	7.5	2.5
M-7	有	10	1.2	8.9	3
M-8	无	10	1.2	7.5	3

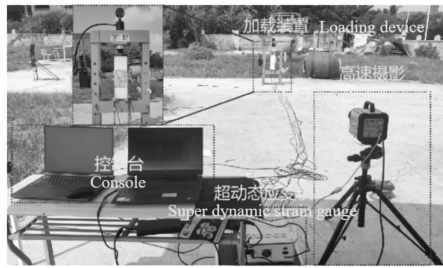


图 5 试验装置安装

Fig. 5 Installation of experimental device

2.2 实验结果与分析

2.2.1 承载立柱爆破破坏形态特征分析

承载立柱爆炸后在孔口所在面损伤严重,即倒塌方向承载立柱损伤严重,炮孔底部预保留混凝土在爆后依然保留较好,最小抵抗线的方向是诱导混凝土发生破坏和抛掷的主要方向。在复合垫层装药结构下,复合垫层的反向聚能作用,冲击波叠加增强向孔口所在面传播,混凝土的破碎主要在孔口所在面上。见图 6。

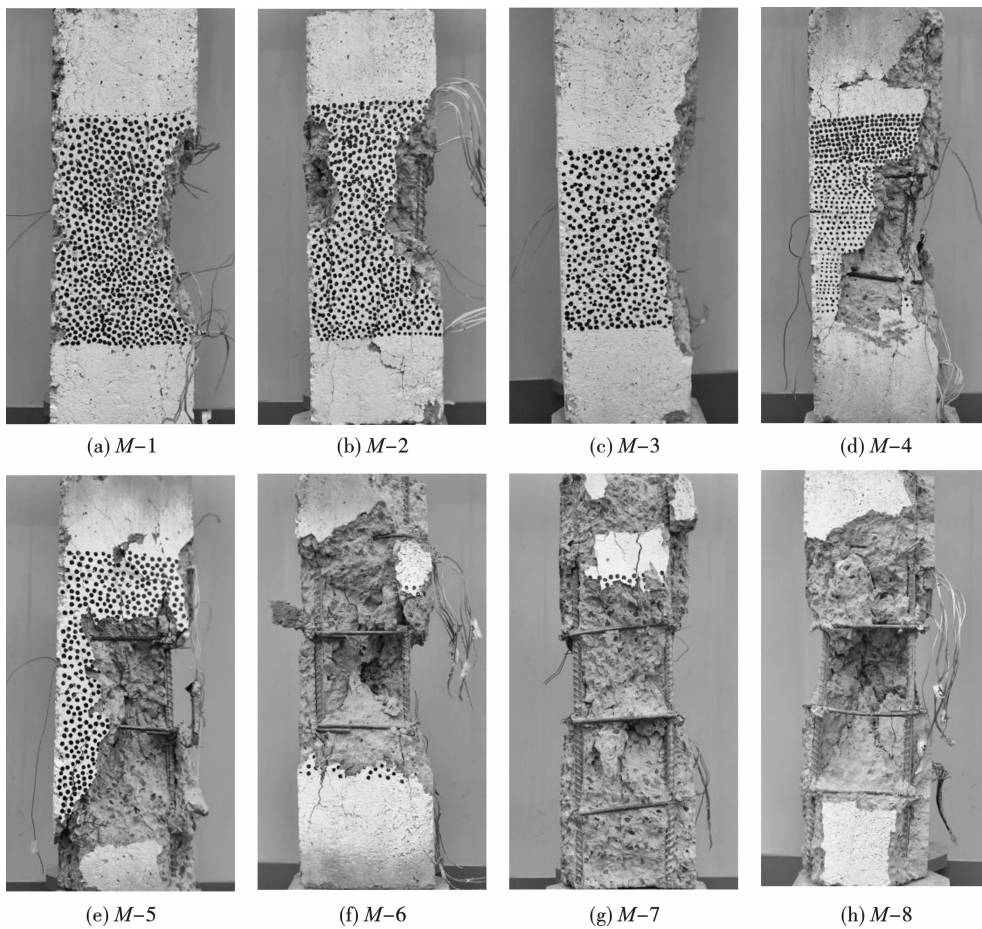


图 6 承载立柱爆破破坏形态特征

Fig. 6 Morphological characteristics of blasting failure of load-bearing columns

2.2.2 爆破作用下承载立柱动态应变演化规律分析

试件 $M-3$ 试件 $M-4$ 进行爆破试验时 3 个测点对应的动态应变时程曲线如图 7 所示,图中均为未平滑的原始数据。

距离爆源较近的应变片峰值应变明显高于距离爆源较远的应变片,离爆炸源越远,应变峰值越小。在相同药量下,有复合垫层结构的混凝土柱测得应变大于无复合垫层的混凝土柱,相同位置所测应变无复合垫层的应变平均为有复合垫层结构的 0.75 倍,受钢球球形结构表面几何特性影响,爆炸

后产生的冲击波在钢球表面反射波传播方向呈现显著水平分量,即轴线方向上有冲击波的叠加,所以有复合垫层结构的混凝土柱应变片所在位置测得应变较无复合垫层更大。

2.2.3 爆后体积与承载力分析

承载立柱爆破后,部分混凝土被破碎和剥离,残留有钢筋骨架及部分未剥离的混凝土。试件破碎后形状不规则,为精确测量其体积,采用 3d 扫描仪测量试块体积,爆后体积如图 8 所示。为分析爆后承载立柱的承载力,通过高地应力多通道微差测试系

统对试件进行残余承载力测量。以预设的 10 MPa 轴压为目标值, $M-1-M-4$ 以 0.3 MPa/s 的速率进行加载, $M-5-M-8$ 损伤严重, 以 0.2 MPa/s 的

速率进行加载, 图 9 展示了爆后混凝土柱残余承载力与 TNT 当量之间的特征曲线。

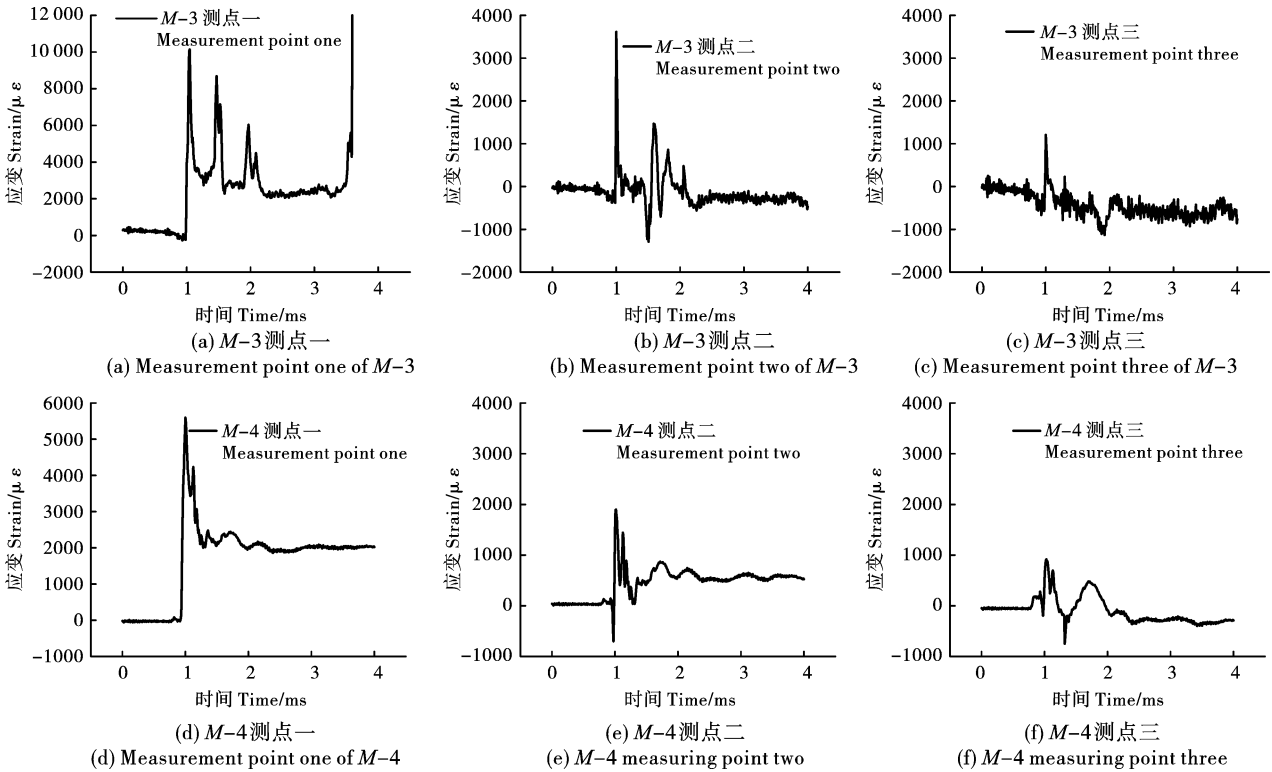


图 7 $M-3$ 与 $M-4$ 应变时程曲线

Fig. 7 Strain time-history curves of $M-3$ and $M-4$

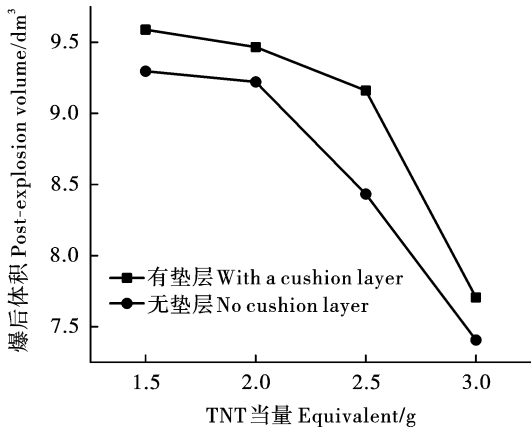


图 8 爆后体积

Fig. 8 Post-explosion volume

在低药量(1.5 g、2 g TNT 当量)时, 有垫层试件的残余承载力(5.643 MPa、4.945 MPa)分别较无垫层(3.638 MPa、2.92 MPa)提升 55.0% 和 69.3%, 表明垫层的几何特性加强水平方向上混凝土的破碎并通过能量定向聚集减少垂直方向对炮孔底部和两侧混凝土的损伤, 炮孔底部混凝土的保护极大地提高了混凝土柱的承载能力。在 2.5 g TNT 时, 有垫

层承载力(3.576 MPa)高于无垫层(2.471 MPa) 30.9%, 此时由于药量的增大, 垫层的几何特性加强水平方向上混凝土的破碎, 导致炮孔两侧混凝土较大损伤, 极大减少了混凝土柱承载力。当爆破能量增至 3 g TNT 时, 有垫层承载力(2.376 MPa)仍显著高于无垫层(1.186 MPa), 差值达 100.3%, 但此时双方承载力都较小, 无垫层结构此时炮孔附近为中空结构, 承载力主要源自于钢筋的承载力。

2.2.4 数字图像相关方法测量应变场分布

图 10 展示了实验 $M-3$ 中通过数字图像相关(DIC)技术获取的混凝土柱炮孔侧面爆炸应变场演化及裂纹扩展情况^[21,22]。由于复合垫层的存在, 炸药爆炸后产生冲击波, 在钢球的交界面上将引发冲击波反射与透射, 从而反射波的方向将向孔口所在面反射, 在该方向形成聚能效果, 使得冲击波在混凝土中传播至炮孔侧面自由面时形成叠加作用。 $t = 40 \mu s$ 时, 应力场出现, 在应力波叠加作用下并快速向右偏移, 在 $t = 80 \text{ ms}$ 时, 可以明显看出距孔口所在面约 2 cm 处出现应力集中, 此时混凝土受拉应力影响, 且拉应力将逐渐增大; $t = 230 \text{ ms}$ 时, 在拉应力

的值达到材料的临界破坏值时出现裂纹, 裂纹出现随即迅速地沿径向向轴向扩展, 形成层裂; $t = 620 \text{ ms}$ 时, 爆生气体开始随着爆炸产生的裂纹向外溢出, 在“气楔”作用下进一步促进裂纹的扩展, 层裂形成的一整块混凝土将被抛掷出去, 最终形成图 6(c) 中混凝土柱的破坏形态。

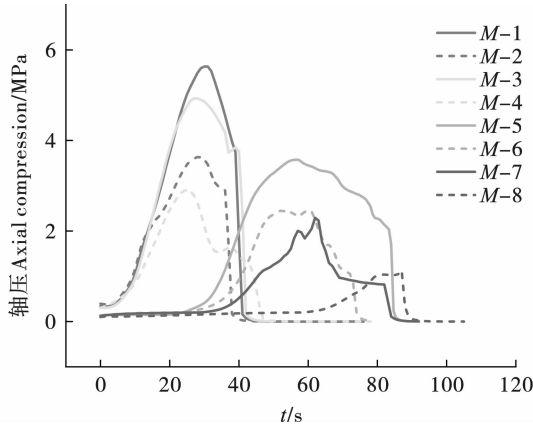


图 9 爆后混凝土柱残余承载力
Fig. 9 Residual bearing capacity of concrete column after explosion

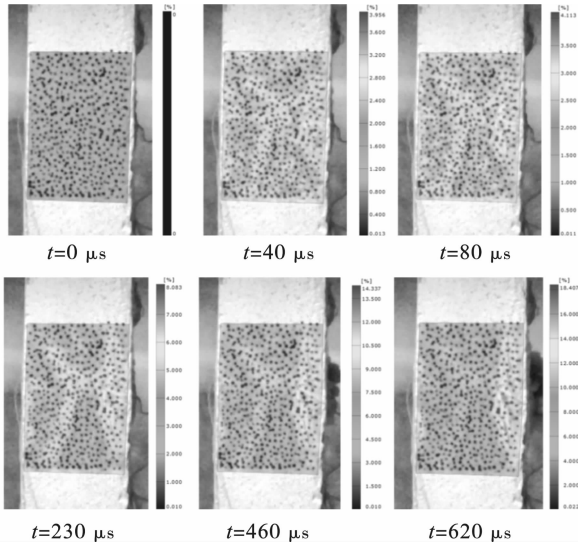


图 10 实验 M-3 混凝土柱炮孔侧面裂纹形成过程
Fig. 10 Experimental M-3 concrete column hole side crack formation process

图 11 为实验 M-4 数字图像相关计算得到的混凝土柱炮孔侧面爆炸应变场演化及裂纹扩展情况。由图 11 可知, $t = 30 \mu\text{s}$ 时, 炸药爆炸后产生冲击波, 冲击波以极快速度在混凝土中传播至炮孔侧面自由面, 从而在表面形成应力场, 同理, 孔口所在面抵抗线性最小, 也将形成应力场; $t = 80 \mu\text{s}$ 时, 应力波到达炮孔所在自由面并反射, 在距孔口所在面不远处出现应力集中; 在 $t = 230 \mu\text{s}$ 时在图中出现裂

纹上拉应力的值达到材料的临界破坏值, 形成层裂效应, 此时陷入破碎混凝土部分的应力波冲量将转化为破碎混凝土的动能促使混凝土碎块与周围内部混凝土分离, 以一定的速度飞出。由于混凝土材料的抗拉能力低, 裂缝传播速度快, 用于消耗混凝土之间的所需做功较小, 最终导致孔口所在面上的整块混凝土剥落。由于钢筋的束缚作用层裂停止; $t = 480 \mu\text{s}$ 时, 炮孔侧面混凝土在爆炸冲击波作用下产生径向裂隙, 在爆生气体的膨胀作用下, 径向初始裂隙迅速扩大; $t = 650 \mu\text{s}$ 时, 可以明显看出混凝土在爆炸冲击波和爆生气体的作用下裂纹形成及扩展情况, 最终形成图 6(d) 中混凝土柱的破坏形态。

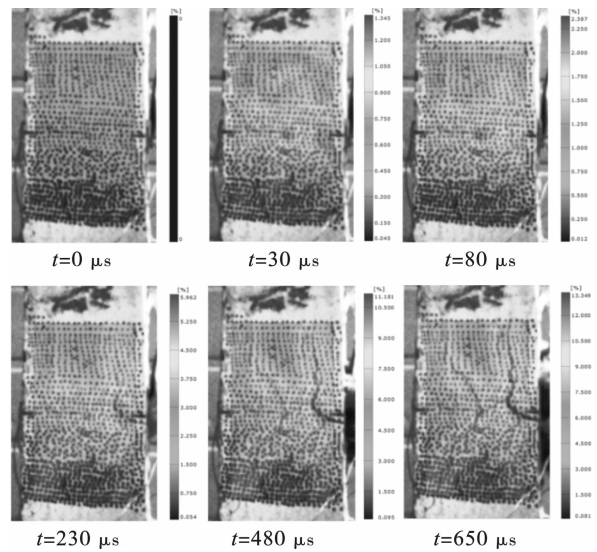


图 11 实验 M-4 混凝土柱炮孔侧面裂纹形成过程
Fig. 11 Experimental M-4 concrete column hole side crack formation process

M-3 试件炮孔侧面冲击波反射拉伸产生应力小于材料的破坏应力, 未产生 M-4 试件中 $t = 480 \text{ ms}$ 时炮孔侧面混凝土在爆炸冲击波作用下产生径向裂隙, 在保护炮孔底部混凝土的同时加强对爆破方向混凝土的损伤作用, 实现了对混凝土柱的定向爆破效果。

3 结论

1) 基于应力波的反射原理对复合垫层的动态响应与能量散射机理进行力学机制分析, 钢球作为刚性垫层对应力波的反射形成反向聚能效应并形成封闭式能量陷阱使透射应力波经界面多次反射滞留钢球内部, 同时石英砂作为柔性垫层通过颗粒间摩擦滑移及塑性变形非线性耗散能量, 两者综合作用显著降低爆破对孔底混凝土的损伤。

2) 由承载立柱爆破破坏形态特征分析得出, 承

载立柱爆炸后在孔口所在面损伤严重,即倒塌方向承载立柱损伤严重,炮孔底部预保留混凝土在爆后依然保留较好,最小抵抗线的方向是诱导混凝土发生破坏和抛掷的主要方向。在复合垫层装药结构下,复合垫层的孔口所在自由面效应增强,冲击波叠加增强向孔口所在面传播,混凝土的破碎主要在孔口所在面上。

3)通过数字图像相关方法计算模型表面散斑位移计算得出,爆炸后产生的冲击波最先抵达炮孔侧面中心区域,出现明显应变场,由于复合垫层的反向聚能作用,冲击波叠加增强向孔口所在面传播,增加孔口所在面的损伤;常规装药结构混凝土柱在冲击波抵达炮孔侧面中心区域后出现裂隙,这些裂隙以中心区域为起点向四周迅速扩展的裂隙并向模型边缘扩展。

参考文献 (References)

- [1] 谢先启. 拆除爆破技术的发展与展望[J]. 爆破, 2019, 36(2):1-12.
- [1] XIE Xian-qi. Development situation and trend of demolition blasting technology[J]. Blasting, 2019, 36(2):1-12. (in Chinese)
- [2] ISAAC Kwaffo, MAHA Hussein Abdallah, ABASS Braimah. Experimental assessment of the residual capacity of axially loaded blast-damaged square RC columns [J]. Structures, 2022, 40:469-484.
- [3] MEJ A Nestor, PERALTA Ricardo, TAPIA Rodrigo, et al. Damage assessment of RC columns under the combined effects of contact explosion and axial loads by experimental and numerical investigations. [J]. Engineering Structures, 2022, 254:113776.
- [4] LIN Shu-chao, HU Zhi-qiang, HAN Jian-qiang, et al. Failure time of reinforced concrete column under blast load [J]. Structures, 2023, 53:1122-1134.
- [5] 刘涛, 李洪伟, 刘伟, 等. 钢混水塔爆破参数的安全校核及数值模拟验证分析[J]. 工程爆破, 2025, 31(1):74-81.
- [5] LIU Tao, LI Hong-wei, LIU Wei, et al. Safety check and numerical simulation analysis of blasting parameters of steel mixed water tower [J]. Engineering Blasting, 25, 31(1):74-81. (in Chinese)
- [6] 魏世众. 上部加载作用下钢筋混凝土立柱爆破效应试验研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2021.
- [6] WEI Shi-zhong. Reinforced concrete column under upper loading experimental research on blasting effect[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2021. (in Chinese)
- [7] 费鸿禄, 李文焱, 魏世众, 等. 承载立柱爆破破坏特征及应变演化规律研究[J]. 爆破, 2023, 40(1):10-20.
- [7] FEI Hong-lu, LI Wen-yan, WEI Shi-zhong, et al. Research on blasting failure characteristics and strain evolution law of bearing column [J]. Blasting, 2023, 40(1):10-20. (in Chinese)
- [8] SUN Jin-shan, JIA Yong-shen, YAO Ying-kang, et al. Experimental investigation of stress transients of blasted RC columns in the blasting demolition of buildings [J]. Engineering Structures, 2020, Vol. 210:110417.
- [9] 吕杨, 徐龙河, 李忠献, 等. 钢筋混凝土柱基于能量阈值的损伤准则[J]. 工程力学, 2011, 28(5):84-89.
- [9] LU Yang, XU Long-he, LI Zhong-xian, et al. Energy threshold based damage criterion of RC concrete [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(5):84-89. (in Chinese)
- [10] 姚颖康, 谢先启, 孙金山, 等. 钢筋混凝土立柱爆破后钢筋骨架承载特征研究[J]. 爆破, 2017, 34(4):1-6, 16.
- [10] YAO Ying-kang, XIE Xian-qi, SUN Jin-shan, et al. Bearing characteristics of reinforcement steel cage after reinforced concrete pillar blasting [J]. Blasting, 2017, 34(4):1-6, 16. (in Chinese)
- [11] 黄小武, 谢先启, 贾永胜, 等. 钢筋混凝土立柱爆破破坏过程及个别飞散物试验研究[J]. 爆破, 2020, 37(1):13-18.
- [11] HUANG Xiao-wu, XIE Xian-qi, JIA Yong-sheng, et al. Experimental study on failure process and flyrock of reinforced concrete columns induced by blasting [J]. Blasting, 2020, 37(1):13-18. (in Chinese)
- [12] 吴新霞, 赵根, 张正宇, 等. 复合垫层理论研究及计算机优化设计[J]. 爆破器材, 2000(4):8-11.
- [12] WU Xin-xia, ZHAO Gen, ZHANG Zheng-yu, et al. The foundation of self-sensitization theory and its experimental research for expanded ammonium nitrate [J]. Blasting Materials, 2000(4):8-11. (in Chinese)
- [13] 胡浩然, 卢文波, 席浩, 等. 聚-消能复合垫层保护下的水平建基面开挖方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(S2):4129-4138.
- [13] HU Hao-ran, LU Wen-bo, XI Hao, et al. Horizontal foundation surface excavation method under the protection of energy shaped and dissipation composite cushion [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(S2):4129-4138. (in Chinese)
- [14] 李腾飞, 钟冬望, 司剑峰, 等. 基于复合消能爆破技术的海底基坑开挖数值模拟研究[J]. 爆破, 2023, 40(1):139-146.
- [14] LI Teng-fei, ZHONG Dong-wang, SI Jian-feng, et al. Numerical simulation research on submarine foundation pit

- excavation based on energy dissipation blasting technology[J]. *Blasting*,2023,40(1):139-146. (in Chinese)
- [15] 朱强,陈明,郑炳旭,等. 空气间隔装药预裂爆破岩体损伤分布特征及控制技术[J]. *岩石力学与工程学报*,2016,35(S1):2758-2765.
- [15] ZHU Qiang, CHEN Ming, ZHENG Bing-xu, et al. Distribution and control technology of rock damage induced by air-deck charge presplitting blasting[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35 (S1): 2758-2765. (in Chinese)
- [16] 吴亮,卢文波,钟冬望,等. 混凝土介质中空气间隔装药的爆破机理[J]. *爆炸与冲击*,2010,30(1):58-64.
- [16] WU Liang, LU Wen-bo, ZHONG Dong-wang, et al. Blasting mechanism of air-spaced charge loading in concrete medium[J]. *Explosion & Impact*,2010,30(1):58-64. (in Chinese)
- [17] 叶海旺,吴家鹏,郑长青,等. 钢筋砼烟囱拆除爆破切口高度优选及效果分析[J]. *工程爆破*,2023,29(3):117-122.
- [17] YE Hai-wang, WU Jia-peng, ZHENG Chang-qing, et al. Optimization of cutting height and effect analysis of reinforced concrete chimney demolition blasting[J]. *Engineering Blasting*,2023,29(3):117-122. (in Chinese)
- [18] 楼晓明,王振昌,陈必港,等. 空气间隔装药孔壁初始冲击压力分析[J]. *煤炭学报*,2017,42(11):2875-2884.
- [18] LOU Xiao-ming, WANG Zhen-chang, CHEN Bi-gang, et al. Initial shock pressure analysis for hole wall with air-decked charge[J]. *Journal of China Coal Society*,2017,42(11):2875-2884. (in Chinese)
- [19] 钟立辉,蒋志明,于永纯,等. 孔底空气间隔装药增强破碎作用研究[J]. *工程爆破*,2023,29(4):43-51.
- [19] ZHONG Li-hui, JIANG Zhi-ming, YU Yong-chun, et al. Study on enhanced fragmentation effects of bottom air-decked charge[J]. *Engineering Blasting*,2023,29(4):43-51. (in Chinese)
- [20] 刘稚媛. 砂垫层减震性能研究[D]. 天津:河北工业大学,2003.
- [20] LIU Zhi-yuan. Study on seismic reduced function of sand cushion[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2003. (in Chinese)
- [21] 任会兰,杜一宁,宋水舟. 基于DIC方法研究混凝土劈裂的变形和破坏[J]. *高压物理学报*,2022,36(4):91-100.
- [21] REN Hui-lan, DU Yi-ning, SONG Shui-zhou. Research on Deformation and Failure of concrete splitting based on DIC method[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*,2022,36(4):91-100. (in Chinese)
- [22] 陈静静. 基于高速DIC方法的脆性材料动态力学性能研究[D]. 北京:北京理工大学,2014.
- [22] CHEN Jing-jing. Study on the dynamic mechanical properties of brittle materials by high-speed DIC[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology,2014. (in Chinese)

(上接第10页)

- [10] LI J, ZHANG Y X. Evaluation of constitutive models of hybrid-fibre engineered cementitious composites under dynamic loadings[J]. *Construction and Building Materials*,2012(30):149-160.
- [11] ZHANG Zhao-qiang, WANG Xian-yu, DENG Yong-jun. Dynamic response of square recycled aggregate concrete-filled steel tube columns subjected to close-range blast loads[J]. *Journal of Building Engineering*, 2022, 52: 104427.
- [12] WANG Rui, HAN Lin-hai, HOU Chuan-chuan. Behavior of concrete filled steel tubular(CFST) members under lateral impact; experiment and FEA model[J]. *Journal of Constructional Steel Research*,2013,80:188-201.
- [13] WANG Rui, HAN Lin-hai, ZHAO Xiao-ling. Analytical behavior of concrete filled double steel tubular(CFDST) members under lateral impact[J]. *Thin-Walled Structures*,2016,101:129-40.
- [14] TANG Qi-Chen, JIANG Nan, YAO Ying-kang, et al. Safety assessment of buried gas pipeline subject to surface explosion;a case study in Wuhan, China[J]. *Engineering Failure Analysis*,2021,120:105119.
- [15] C M Roland, J N Twigg, Y Vu, et al. High strain rate mechanical behavior of polyurea [J]. *Polymer*, 2007, 48(2):574-578.
- [16] L Javier Malvar, JOHN E Crawford, JAMES W Wesevich, et al. A plasticity concrete material model for DYN3D[J]. *Impact Engineering*,1997(19):847-873.