

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2025.02.016

连续梁桥局部桥跨爆破拆除技术研究*

郑选荣¹,任凯¹,刘蕊²,李帅良¹,岳雪茹¹

(1. 西安科技大学 建筑与土木工程学院,西安 710054;2. 陕西路桥集团爆破工程有限公司,西安 710000)

摘要: 连续梁桥部分桥跨爆破拆除时极易对邻近桥跨产生较大的损害,为同时保证桥梁倒塌破碎效果和相邻桥跨的安全,以安康市某连续梁桥病害部分桥跨拆除爆破工程为例,利用 ANSYS/LS-DYNA 软件分别对上部箱梁水压爆破和下部桥墩逐排倾斜倒塌、逐跨倾斜倒塌、从中间向两边倾斜倒塌进行了模拟分析,根据桥体破碎效果、桥梁倒塌姿态以及塌落振动速度确定了最佳爆破方案,依据模拟结果进行了爆破设计并对振动速度进行了安全校核。结果表明:上部箱梁水压爆破梁体较为破碎,且爆破飞石较少防止其对邻近桥跨产生较大的冲击;在爆破前变连续梁为简支梁,并在爆破时先起爆邻近桥跨主梁处药包,随后下部桥墩采用逐排倾斜的倒塌方案可以在保证桥梁倒塌破碎效果的同时减小振动速度确保邻近桥跨的安全;现场实际桥梁爆破效果较好,且倒塌过程与数值模拟结果大体一致,邻近桥墩处无明显损伤,数值模拟监测点处最大振速峰值为 3.58 cm/s,现场监测为 3.96 cm/s,数值模拟结果较为准确。

关键词: 拆除爆破;水压爆破;连续梁桥;局部桥跨;振动速度

中图分类号: TU746.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2025)02-0129-11

Research on Blasting Demolition Technology for Partial Spans of Continuous Girder Bridges

ZHENG Xuan-rong¹, REN Kai¹, LIU Rui², LI Shuai-liang¹, YUE Xue-ru¹

(1. College of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. Shan'xi Road and Bridge Group Blasting Engineering Co., Ltd., Xi'an 710000, China)

Abstract: The blasting demolition of partial spans in continuous beam bridges frequently entails substantial risks of damage to the adjoining spans. To ensure the effective collapse and fragmentation of the bridge while safeguarding the integrity of adjacent spans, a case study was undertaken focusing on the blasting demolition of a damaged section of a continuous beam bridge in Ankang City. Using ANSYS/LS-DYNA software, numerical simulations were conducted to investigate the impact of water pressure blasting on the upper box girder and evaluate various collapse scenarios for the lower piers. These scenarios included row-by-row inclined collapse, span-by-span collapse, and center-to-both-sides collapse patterns. The optimal blasting scheme was identified by comprehensively evaluating three key parameters: structural fragmentation efficiency, collapse configuration, and induced vibration velocity during demolition. Based on these simulation findings, an optimized blasting design was developed, with subsequent safety verification

收稿日期 (Date of reception): 2025-01-22

网络首发日期 (Published online): 2025-03-15

作者简介: 郑选荣 (1974-), 男, 陕西省西安市, 博士、副教授, 主要从事工程爆破方面研究, (E-mail) 254519207@qq.com。

通讯作者: 任凯 (2001-), 男, 陕西省咸阳市, 硕士研究生, 主要从事工程爆破方面研究, (E-mail) 2022185367@qq.com。

基金项目: 国家自然科学基金 (42072319)

About the author: ZHENG Xuan-rong (1974-), male, born in Xi'an City, Shaanxi Province, Ph. D, associate professor, mainly engaged in research on engineering blasting, (E-mail) 254519207@qq.com.

Corresponding author: REN Kai (2001-), male, born in Xianyang City, Shanxi Province, postgraduate student, mainly engaged in research on engineering blasting, (E-mail) 2022185367@qq.com.

Fund Programs: Chinese National Natural Science Foundation (42072319)

conducted on the vibration velocities to ensure structural integrity and operational safety. The results demonstrate that implementing water pressure blasting in the upper box girder successfully achieved substantial structural fragmentation while effectively controlling debris dispersion and minimizing potential impacts on neighboring spans. Through a strategic approach involving the conversion of the continuous beam into a supported configuration prior to demolition, coupled with a sequential detonation protocol initiating at the main beams of adjacent spans followed by row-by-row inclined collapse of the lower piers, the proposed scheme successfully achieved controlled bridge demolition. This methodology ensured optimal structural fragmentation while reducing vibration velocities within safe thresholds, effectively protecting adjacent spans. The field implementation results aligned well with the numerical simulations, as evidenced by the controlled collapse process and satisfactory fragmentation patterns observed during the on-site blasting operation. No significant damage was observed in the proximate piers. The peak maximum vibration velocity recorded at the monitoring points in the numerical simulation was 3.58 cm/s, closely aligning with the field-measured value of 3.96 cm/s, demonstrating the simulation results' reliability.

Key words: demolition blasting; hydraulic blasting; continuous beam bridge; partial bridge span; vibration velocity

桥梁作为基础交通设施的重要组成部分,在跨越河流、山谷等方面都具有重要的作用。然而,受交通量的激增、自然灾害等因素的影响,许多连续梁桥部分桥跨出现严重病害需爆破拆除重建。桥梁局部桥跨拆除爆破不仅要控制桥梁倒塌姿态,防止桥梁主体构件对邻近主梁及桥墩产生冲击,还要确保爆破振动和塌落振动符合要求,以保证周边建筑物的安全。因此,桥梁部分桥跨拆除爆破往往需要精细化的设计,拆除爆破难度较大。

谢先启分析并总结了目前拆除爆破基础理论及新技术的发展情况,提出精细化爆破是拆除爆破技术未来的发展方向^[1]。基于此,许多学者针对紧邻其他建筑物或周边环境复杂的桥梁爆破拆除技术进行了优化研究。蒋跃飞等针对双侧紧贴运营新桥的工程特点^[2],提出了逐跨延时原地缓冲坍塌拆除爆破方案,并对于复杂材质的深孔爆破提出了“一孔三段”式的装药结构;王璞等采用原地缓冲塌落控制爆破技术对紧邻既有桥梁的拱桥进行了爆破拆除^[3],并进行了振动速度验算;季杉等通过单柱爆破试验^[4],研究了单跨梁体塌落触地引起的的振动特点及其传播规律,结果发现倒塌触地振动可能引起周围结构较大的动力响应;胡志坚等建立有限元模型对比分析了考虑扭转作用与不考虑扭转作用的梁桥逐跨倒塌爆破方案^[5],结果发现考虑扭转效应的方案可以提升梁体的碰撞损伤程度与爆破拆除效果;齐鹏等采用数值模拟的方法从起爆顺序、触地振动、主梁损伤情况以及延期时间等方面入手^[6],对梁桥爆破方案进行了优化;冯剑平推导了桥墩定向倒塌时爆破切口角度和高度的计算公式^[7],并采用数值模拟方法进行了验证;杨永强等分析了桥梁塌落引起地面振动加速度特征^[8],发现桥梁塌落地面振动加速度峰值随距离增大而降低;马世明等针对

双曲拱桥的特点^[9],精细设计了原地坍塌的爆破方案,确保了新桥的安全,取得了较为理想的爆破效果。

目前对于桥梁爆破拆除技术多研究紧邻其他建筑物的工程,忽略了桥梁部分桥跨拆除爆破对自身既有桥跨的影响,且对于箱梁水压爆破破碎效果的研究还比较欠缺。本文以安康市某高架桥病害部分桥跨拆除爆破工程为例,基于 ANSYS/LS-DYNA 数值模拟软件,对上部箱梁水压爆破和下部桥墩逐排倾斜倒塌、逐跨倾斜倒塌、从中间向两边倾斜倒塌分别进行了模拟分析,从桥梁倒塌效果、触地振动速度等方面出发,研究连续梁桥部分桥跨爆破拆除技术以及对紧邻既有桥跨的影响。对既有桥墩处的振动速度进行了理论计算,并采取了必要的保护措施以减小爆破飞石的危害,研究结果可为类似连续梁桥部分桥跨拆除爆破工程提供参考。

1 工程概况

1.1 桥梁规模及结构尺寸

国家高速公路十堰至天水联络线上的某高架桥是一钢筋混凝土连续梁桥,呈南北走向。桥梁全长 2.36 km,桥跨组合为 40 m × 10 + 20 m × 98,桥面宽度 10 m,两侧各设置 50 cm 防撞护栏,净宽 9 m。单跨上部采用 40 m 或 20 m 后张法预应力混凝土箱梁,每跨 3 片,桥面采用 15 cm 双层钢筋网砼铺装。桥身下部为柱式墩、桩基础、柱式桥台,横桥向每列 2 根墩,通过系梁连接。

受多次强降雨,诱发滑坡、泥石流等自然灾害影响,该桥中部四跨三处盖梁防震挡块均出现严重破损开裂,基本失去限位功能,两根墩柱明显倾斜且出现了大量裂缝,箱梁与墩横向错位明显加剧,盖梁与主梁脱离,失去支撑作用,需要拆除重建,需爆破拆

除桥跨部分实景如下图 1 所示。



图 1 需爆破拆除部分桥跨实景图

Fig. 1 Picture of some bridge spans that need to be demolished by blasting

待拆部分桥体共 4 跨,每跨跨径均为 20 m,总长 80 m,6 根桥墩尺寸相同,直径 1.6 m,高 20 m。

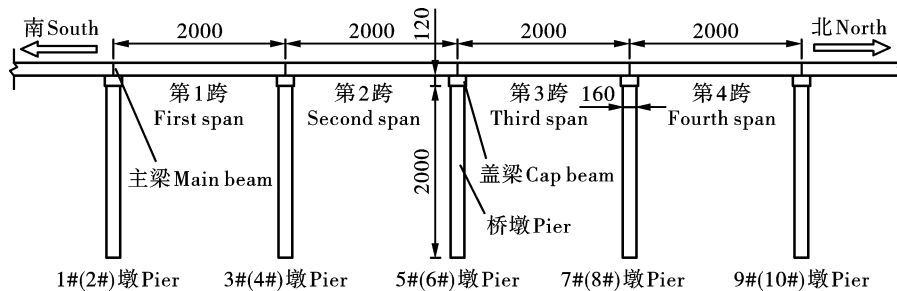


图 2 待拆桥体正视图(单位:cm)

Fig. 2 Front view of the bridge to be demolished(unit:cm)

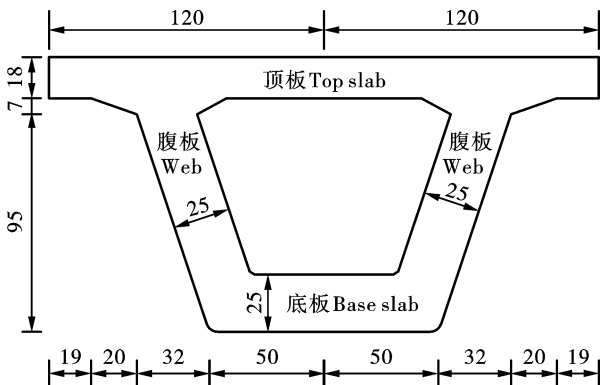


图 3 箱梁横剖面图(单位:cm)

Fig. 3 Cross-sectional view of box girder(unit:cm)

系梁距桥墩底 6 m,截面尺寸为 100 cm × 130 cm,盖梁截面为梯形,上底 9 m,下底 7.5 m,高为 1.2 m,宽 2 m。待拆部分桥体结构如图 2、图 3 所示。

1.2 工程难点

1) 确保相邻桥墩及桥跨的安全性。该连续梁桥要爆破拆除的是有病害部分桥跨,待拆桥跨紧贴相邻桥体结构,且待拆段质量大,塌落高度高,如果不能严格控制其倒塌过程与姿态,将会对周边建筑物造成严重的损害。因此,为确保相邻桥跨的安全,必须控制待拆桥段爆破振动不损伤相邻桥梁构件;待拆桥段塌落振动不损伤相邻桥跨基础及上部结构;待拆桥段塌落过程中主体构件不对相邻桥跨产生冲击。

2) 爆破范围较大。待拆桥跨总长达到了 80 m,4 跨 6 墩,炮孔数量较多,需要确保各跨主梁及桥墩延时时间准确,起爆网路安全可靠。

能够降低爆破飞石距离,减少粉尘和降低塌落振动速度^[10-12]。由于该连续梁桥箱梁壁薄且配筋率较高,钻孔爆破较为困难,且产生的爆破飞石极易对邻近桥跨产生冲击。因此,基于邻近桥跨的安全以及梁体的破碎效果,桥面箱梁采用水压爆破的方法拆除。

采用 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件模拟水压爆破时箱梁的破坏过程,为简化分析只建立单个箱梁水压爆破 1/2 数值模型。本文主要研究水压爆破整体箱梁的裂纹扩展与损伤情况,为简化计算并便于分析,将钢筋与混凝土等效为一种材料。采用流固耦合算法,通过关键字 * CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID 将钢筋混凝土材料与空气、水以及炸药进行耦合分析,钢筋混凝土结构采用拉格朗日算法,空气、水以及炸药都采用欧拉算法。爆破冲击波通过水以及空气介质作用于箱梁,箱梁的动力响应又作用于流体介质,以实现流固耦合。按实际尺寸建立数值模型,如下图 4 所示,空气与箱梁模型大小相同,且处于同一位置。药包简化为正方体,关

2 数值分析

2.1 箱梁水压爆破破碎效果分析

水压爆破是利用水的不可压缩性进行能量传递的爆破技术,炸药爆炸产生的能量和压力通过水介质传递到周围介质上,从而实现破碎的目的。研究表明,箱型梁体水压爆破时不仅破碎效果较好,而且

于箱梁竖向中心线对称,距空腔顶部距离为45 cm,水充满整个箱梁空腔。模型顶部采用自由边界,模型前侧采用对称边界条件,其余面均施加无反射边界条件,限制模型在三个方向上的位移。

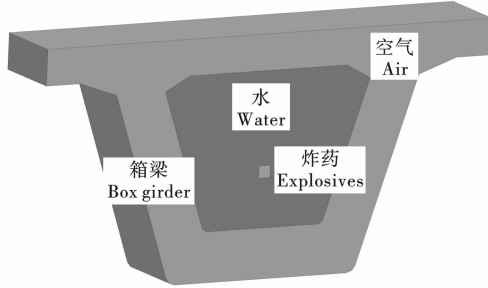


图4 箱梁水压爆破数值模型
Fig. 4 Numerical model for water pressure blasting of box girder

2.1.1 钢筋混凝土本构模型

钢筋混凝土 HJC 材料参数采用 * JOHNSON_HOLMQUIST_CONCRETE 关键字描述, HJC 本构可以较好的模拟钢筋混凝土或岩石处于大应变、高应变率和高压力时的状态,主要由强度模型、状态方程和损伤模型三部分组成,能够较好的描述材料的非

线性变形和断裂特性,因此特别适合于模拟炸药爆炸时钢筋混凝土的动态响应^[13]。

钢筋混凝土 HJC 材料参数:密度为 2460 kg/m³,剪切模量为 14.86 GPa,特征化粘性强度因数 A 为 1.65,特征化压力硬化因数 B 为 1.65,压力硬化指数 N 为 0.66,抗压强度为 40 MPa,最大拉伸静水压力 T 为 0.004 GPa,断裂前的塑性应变量为 E_{fmin} 为 0.01,归一化最大强度 S_{fmax} 为 7.00,损伤参数 D₁、D₂ 分别为 0.04、1.0,压力常数 K₁、K₂、K₃ 分别为 74、-153 和 197 GPa,破碎体积应变为 U_{crush} 为 0.001。

2.1.2 炸药材料及状态方程

炸药选用 ANSYS/LS-DYNA 中 8 号材料 * MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN 关键字定义,用 JWL 状态方程描述炸药爆轰压力与体积之间的关系,如式(1)所示。

$$P = A\left(1 - \frac{\omega}{R_1 V}\right)e^{-R_1 V} + B\left(1 - \frac{\omega}{R_2 V}\right)e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V} \quad (1)$$

式中:P 为爆轰产物压力;V 为爆轰产物初始相对体积;E 为爆轰产物初始能量密度;A、B、R₁、R₂ 及 ω 均为炸药材料常数,采用岩石乳化炸药,相关参数见表 1^[14]。

表 1 炸药材料及状态方程参数

Table 1 Parameters of explosive material and equation of state

ρ/(kg·m ⁻³)	D/(m·s ⁻¹)	状态方程参数 Equation of state parameters						
		A/GPa	B/GPa	R ₁	R ₂	ω	E/GPa	V
1320	6690	307	3.90	4.49	0.79	0.282	7.94	1.0

2.1.3 水及空气材料及状态方程

水和空气材料均采用 * MAT_NULL 关键字定义,通过 * EOS_GRUNEISEN 关键字描述水材料状态方程,如式(2)所示。线性多项式状态方程 * EOS_LINEAR_POLYNOMIAL 模拟空气,如式(3)所示。水和空气参数取值如表 2、表 3 所示^[15]。

$$p = \frac{\rho c^2 \mu [1 + (1 - \gamma/2)\mu - \alpha \mu^2 / 2]}{[1 - (S_1 - 1)\mu - S_2 \mu^2 / (\mu + 1) - S_3 \mu^3 / (\mu + 1)^2]} +$$

$$(\gamma + \alpha \mu) E \quad (2)$$

式中:p 为水压;c 为水中的声速;E 为水的体积内能;μ 为水的动态黏度系数;α、S₁、S₂、S₃ 均为材料常数。

$$p = C_0 + C_1 \mu + C_2 \mu^2 + C_3 \mu^3 + (C_4 + C_5 \mu + C_6 \mu^2) E_0 \quad (3)$$

式中:μ 为比体积;C₀ ~ C₆ 为实常数;E₀ 为空气单位体积内能。

表 2 水材料及状态方程参数

Table 2 Parameters of water material and equation of state

参数 Parameter	ρ/(kg·m ⁻³)	c/(m·s ⁻¹)	S ₁	S ₂	S ₃	γ
值 Value	1000	1480	2.56	-1.98	1.23	0.35

表 3 空气材料及状态方程参数

Table 3 Parameters of air material and equation of state

参数 Parameter	ρ/(kg·m ⁻³)	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	E ₀ /(MJ·m ⁻³)	V ₀
值 Value	1.2	0	0	0	0.4	0.4	0	2500	0

2.1.4 箱梁水压爆破破坏过程

炸药起爆之后,由于爆炸冲击波的反复震荡、爆

生气体的膨胀、高速水流的冲击作用,箱梁会逐渐破碎,其破碎过程如图 5 所示。

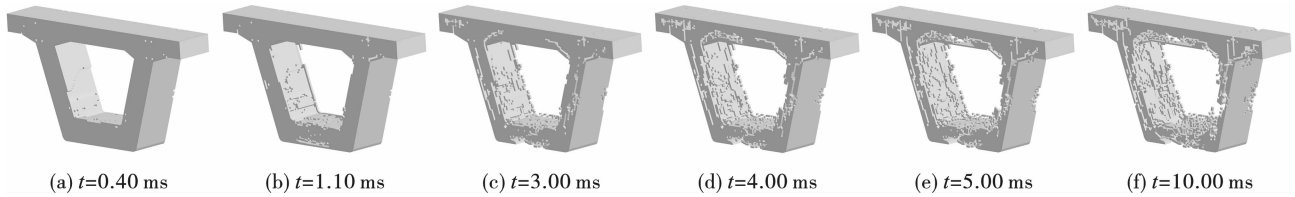


图 5 箱梁破碎过程

Fig. 5 Fragmentation process of box girder

$t = 0.40$ ms 时,爆炸冲击波首先作用于箱梁内壁,冲击波的峰值应力大于箱梁的抗压强度,箱梁内壁已开始形成微小裂隙,由于药包距箱梁底板较近,爆炸冲击波压力较大,底板处爆破损伤更严重; $t = 1.10$ ms 时,箱梁内壁微小裂隙开始贯通,形成大量的张拉裂纹,底板外侧裂纹已经贯通。炸药爆炸后,爆生气体和高速水流进入到由冲击波形成的裂隙中,发生“水楔”作用,使得既有裂纹进一步延伸扩展,箱梁进一步破坏。可以看出 $t = 3.00$ ms 时,箱梁损伤范围进一步增大,箱梁顶板及两侧悬臂板裂纹形成,并逐渐从两边向中间延伸扩展,底板外侧部分混凝土已粉碎且脱落,左右两侧腹板也形成了从上到下的贯通裂纹。

$t = 4.00$ ms 时,在爆炸应力波、爆生气体以及高速水流的共同作用下,损伤逐渐向外扩展,顶板与悬臂板的交接处也出现了竖向裂纹,顶板中部和底板外侧均出现了混凝土破碎脱落现象; $t = 5.00$ ms 时顶板处左右两侧裂纹贯通,出现较大范围的混凝土剥落,箱梁内壁混凝土进一步粉碎剥落。图 5(f) 为箱梁最终破坏形态,可以看出底板、顶板及腹板处形

成了大量的贯通裂纹,箱梁解体损伤情况较好,箱梁破碎达到了预期效果,水压爆破效果良好。

2.2 桥梁爆破拆除倒塌过程分析

采用 ANSYS/LS-DYNA 动力有限元软件建立待拆桥段桥墩、系梁、盖梁以及主梁的数值模型,分析结构的爆破拆除倒塌以及质点振动速度对相邻桥墩的影响。

按照实际尺寸建立数值模型,如下图 6 所示。采用 kg-m-s 单位系统,SOLID164 实体单元,钢筋混凝土材料选用 96 号 * MAT_BRITTLE_DAMAGE 关键字描述,该关键字能根据构(建)筑物的配筋情况灵活定义配筋率,因此特别适用于钢筋混凝土实体模型的模拟,六面体网格划分并采用关键字 * LOAD_BODY_Z 对整个模型施加重力。主要研究桥梁爆破拆除倒塌过程,若通过建立炸药模型来模拟实际工况,求解时间过长且不利于后期分析,故建立爆破切口,并采用关键字 * MAT_ADD_EROSION 描述切口的破坏及失效过程。采用全局自动面接触(* CONTACT_AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE)自动搜索接触,模拟主梁、盖梁、桥墩以及地面之间的接触。

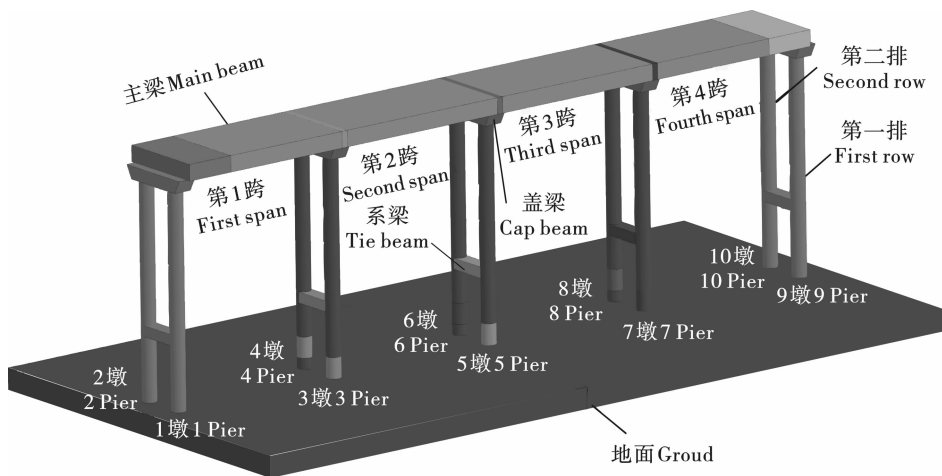


图 6 有限元模型

Fig. 6 Finite element model

2.2.1 桥梁拆除倒塌方案的选择

由于待拆桥跨周边环境的限制,采取向右侧倾斜的倒塌方案,桥体主梁整体塌落至地面往往会产生较大的振动速度,因此在本模拟中先形成3、5、7墩爆破切口,再形成4、6、8墩爆破切口,实现主梁的倾斜倒塌。由于待拆桥段梁体为连续梁,连续梁整体塌落至地面时产生的振动往往比逐跨坍塌时的振动大,为减小地面振动将连续梁切割变为简支梁,即0.05 s时首先删除横桥向三组桥墩顶部的爆破切口。基于以上分析提出了以下3种倒塌方案。

方案1:逐排倾斜倒塌:0.10 s时起爆第1与第4跨主梁处爆破切口,0.20 s时起爆3、5、7墩及系梁处爆破切口,0.50 s时起爆4、6、8墩处爆破切口。

方案2:逐跨倾斜倒塌,0.15 s起爆第1跨主梁处爆破切口,0.35 s时形成3号墩及3与4墩之间

系梁处爆破切口,随后每隔0.20 s依次形成各爆破切口。

方案3:从中间向两边倾斜倒塌,0.10 s时形成各主梁处爆破切口,0.20 s时形成5号墩及5与6墩之间系梁处爆破切口,0.40 s时形成6号墩处爆破切口,随后每隔0.20 s对称起爆各爆破切口。

2.2.2 数值模拟结果分析

方案1倒塌过程如下图7所示, $t=0.54$ s时爆破切口完全形成,桥体出现向前倾斜的趋势,两边跨主梁临空端出现明显向下的位移; $t=1.18$ s时,桥体明显向前倾斜,两边跨主梁分别绕各自盖梁旋转下落; $t=2.01$ s时,由于两中跨主梁倾斜扭转,使第2跨主梁脱离3与4墩墩顶,临空端自由落体; $t=3.42$ s时倒塌结束,主梁粉碎较为严重。

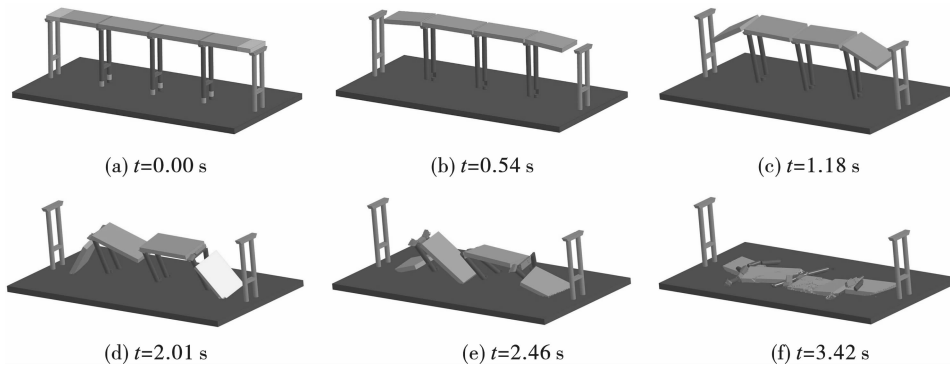


图7 方案1桥梁倒塌过程

Fig. 7 Bridge collapse process in scheme 1

方案2桥梁倒塌过程如下图8所示, $t=0.56$ s时,第3、4、5及6号墩及上部主梁爆破切口完全形成,左边跨主梁临空端出现明显向下位移; $t=1.72$ s时,整座桥体上部向前倾斜,除8号墩外,其余桥墩均已触地; $t=2.85$ s时,5号墩上部主梁及右边跨几乎同时落地,这是因为两边跨一端约束释放,边跨下

落速度明显快于两中跨,此外当边跨脱离盖梁时,中间桥墩承受更大的主梁重力,导致其下降速度过快。 $t=3.97$ s时倒塌结束,可以看出两中跨主梁相对完整,两边跨主梁除触地部位出现较大损伤外,其余部位也相对完整。

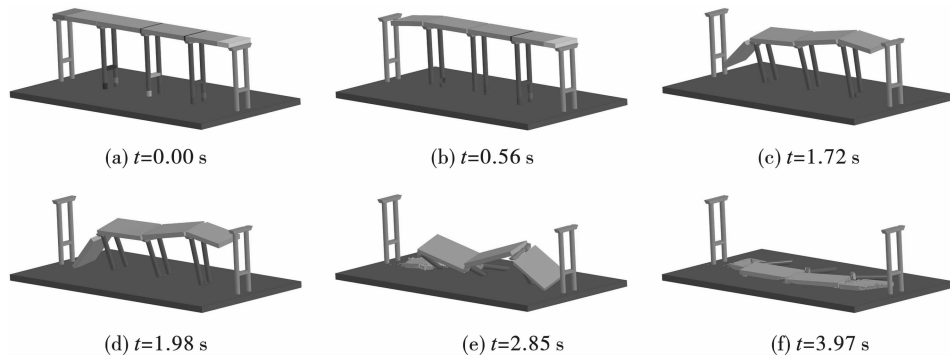


图8 方案2桥梁倒塌过程

Fig. 8 Bridge collapse process in scheme 2

方案 3 桥梁倒塌过程如图 9 所示, $t = 0.67\text{ s}$ 时,桥梁爆破切口完全形成,中间第二排桥墩切口支撑截面处的混凝土已经出现裂缝; $t = 1.28\text{ s}$ 时两边跨主梁开始绕各自支点旋转下落,临空端出现明显向下的位移; $t = 2.33\text{ s}$ 时两边跨主梁已经落地,可

以明显看到中间桥墩向下的位移更大,中间主梁呈“V”形态倾斜倒塌; $t = 3.52\text{ s}$ 时倒塌结束,各跨主梁仍相对完整,盖梁从中间部位断裂,各个桥墩出现了较严重的损伤。

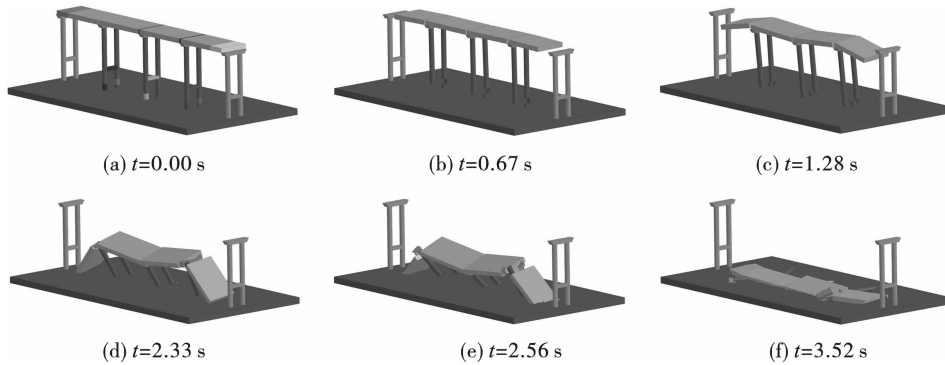


图 9 方案 3 桥梁倒塌过程

Fig. 9 Bridge collapse process in scheme 3

1) 3 种方案倒塌效果对比分析

由图 7~9 可以看出,3 种方案桥梁倒塌过程桥体各构件均不会与邻近 1、2、9 及 10 墩接触,倒塌完成后两桥墩仍相对完整,没有出现较大的损伤。从桥梁倒塌后各构件破碎效果来看,方案 1 破碎效果最优。方案 1 主梁、桥墩以及盖梁均出现了较多的混凝土碎块,而方案 2 中间两跨主梁以及方案 3 全部主梁仍相对完整,不利于后期机械破碎与装运。由图 8 可以看出,方案 2 两边跨主梁落地后较为破碎,虽然边跨破损严重易于后期清理,但碎块飞溅易对邻近桥墩基础造成较大损伤。

桥梁倒塌过程对两桥墩构成最大威胁的是两边跨主梁向两桥墩方向的位移(即 y 方向上的位移),因此选取两跨主梁上靠近两桥墩侧 844 111 与 792 559 单元分析其 y 方向上的最大位移,844 111 单元位于图 6 中右侧,792 559 单元位于左侧。结果显示,844 111 单元三种方案 y 向最大位移分别为 -2.13 m , -1.92 m , -2.10 m ,792 559 单元三种方

案 y 向最大位移分别为 2.60 m , 1.57 m , 2.49 m ,其中,正方向为图 6 中右侧。3 种方案均向远离邻近桥墩方向运动,可以看出,方案 1 向远离两桥墩方向位移最大,因此从两边跨向 y 方向运动最大位移来看,方案 1 为最优方案。

2) 3 种方案塌落振动对比分析

研究表明,建筑拆除爆破时,产生振动的原因主要包括两个方面:一是炸药爆炸产生的振动波,即爆破振动;二是建筑物倒塌解体对地面撞击造成的地层振动,即塌落振动^[16,17]。建筑物拆除时塌落振动往往比爆破振动大,因此主要研究塌落振动对建筑物的影响。以下对 3 种爆破方案桥梁塌落振动进行对比分析,两监测点均布置在相邻桥墩处,即桥梁横桥向的中线上,距待拆桥段中心水平距离为 42 m ,监测点 1 位于待拆桥段南侧,监测点 2 位于待拆桥段北侧。监测三个方向上的最大振动速度,如表 4 所示。

表 4 三种爆破方案的振动速度监测数据

Table 4 Vibration velocity monitoring data of three blasting schemes

方案 Scheme	振速峰值 Peak vibration velocity/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)							
	监测点 1 Monitoring Point 1				监测点 2 Monitoring Point 2			
	v_x	v_y	v_z	v_{\max}	v_x	v_y	v_z	v_{\max}
1	1.93	2.15	3.58	3.58	2.42	3.12	2.96	3.12
2	3.33	4.62	8.49	8.49	4.11	5.74	3.68	5.74
3	6.68	3.65	3.59	6.68	3.60	3.65	5.41	5.41

方案 2 单向起爆方案塌落振动明显比其他两种方案高,其振速峰值也最大。理论上单向起爆塌落

振动应较小,这是因为单向起爆先爆跨下落时会受到后爆跨的牵扯作用,从而减小触地振动。但是由

于本模拟中部桥墩处主梁与右边跨主梁几乎同时落地,反而加大了其塌落振动速度,见图8(e)。由于方案1逐排起爆第2跨主梁先落地,第3跨主梁随后落地;方案3两中跨主梁几乎同时落地,因此方案3的塌落振速峰值比方案1塌落振速峰值大。由此可以看出,若只考虑塌落振动时,方案1为最优方案。

综合以上分析,采用逐排倾斜倒塌方案时,倒塌后主梁较为粉碎利于后期破碎与装运、其向远离两邻近桥墩侧位移最大有利于两桥墩的安全、塌落振动峰值最小有利于周边建筑物的安全。因此,在实际工程中采取方案1的倒塌方式最合理。

3 拆除爆破设计

3.1 爆破方案

采用延时分段起爆技术,逐排倾斜倒塌方案,使

桥梁向东侧倾斜倒塌,爆破部位选择6根墩柱下部6m范围、系梁以及第1和第4跨靠近相邻桥墩一侧。双柱式桥墩采用双排水平钻孔的方式拆除,每根墩柱钻孔32个,共16排,每排两个炮孔,间距为30cm,排距为40cm。系梁采用单排布孔,钻孔4个。墩柱及系梁爆破参数统计如下表5所示。箱梁水压爆破药包间距取1.2m,根据模拟结果药包距空腔顶部距离为45cm,距梁体内底面为32cm,单跨梁体共用岩石乳化炸药36kg,普通毫秒导爆管雷管90发。

采用绳锯切割的方法,将3根墩顶部梁体全断面切断,变连续梁为简支梁,待梁体安全稳定之后再行装药。上部箱梁水压爆破时需要对箱梁进行密封,随后再对水压爆破装药位置进行钻孔作业。

表5 桥墩及系梁爆破主要参数表

Table 5 Main blasting parameters of bridge pier and tie beam

名称 Name	最小抵抗线 Minimum burden/cm	孔径 Hole diameter/mm	孔距 Hole spacing/cm	排距 Row spacing/cm	孔深 Hole depth/cm	炮孔数量 Number of blast holes/个	总装药量 Total explosive charge/kg
桥墩 Pier	50	40	30	40	110	192	115.2
系梁 Tie beam	30	40	40	-	90	12	7.2
总计 Total						204	122.4

3.2 爆破振动校核

根据国家《爆破安全规程》(GB6722—2014)的规定,主振频率小于等于10Hz时,新浇大体积混凝土(C20龄期:7~28d)安全允许质点振动速度为7.0~8.0cm/s,因此对邻近桥墩爆破振动安全允许标准取为7cm/s^[18,19]。

工程爆破中,常采用萨道夫斯基公式预测和控制爆破振动对周围环境的影响,本文采用同一高程的萨道夫斯基公式对邻近桥墩处的爆破振动进行校核,如下式4所示^[20]。

$$v = k'K \left(\frac{Q^{1/3}}{R} \right)^\alpha \quad (4)$$

式中:Q为一次齐爆药量;R为保护目标至爆源的距离;v为质点振动速度,cm/s;k'为衰减系数,取为0.3;K、 α 为与介质和爆破条件因素有关的系数,K取150, α 取1.5。

计算得到,邻近桥墩处的爆破振动速度为3.51cm/s,符合规范要求。

3.3 塌落振动校核

邻近桥墩处的塌落振动采用孙金山教授等根据动量守恒原理以及塌落冲击作用下地基塑性区的分

布,推导出的距离振源R处的最大振动速度计算公式,如式(5)所示^[21]

$$v_R = \left(\frac{m_1 v_1}{m_2 R} \right)^\beta \quad (5)$$

式中: m_1 为塌落体的质量,取为1224000kg; v_1 为碰撞前塌落体的速度,取为17.5m/s; m_2 为地面塑性区的质量;R为与振源的距离,取为1m; β 为衰减系数。

经计算1、2、9以及10号墩塌落振动速度均为4.15cm/s,符合设计要求。

3.4 爆破安全防护

在爆破前进行实爆实验,进一步调整和优化爆破参数。钻孔时需保证炮孔位置、深度及方向准确,填塞长度及填塞质量符合设计要求。对爆破部位采取三重防护,第一层用稻草、草袋或棉被进行包裹、覆盖,第二层用尼龙安全网进行包裹、覆盖,第三层用钢丝网进行包裹、覆盖。通过这样的方式减小爆破飞石的危害效应。

为进一步控制塌落振动,在需爆破的4跨梁下修筑高度不小于1.5m,宽度为5~6m的横向减震墙,保留沟槽。用土石覆盖露出地表的底系梁,在两

侧须保留的墩柱外侧回填高度不小于 3 m 的防撞墙,并采用竹架板包裹邻近整个墩柱,防止飞石撞击。

4 实桥爆破拆除过程

首先引爆第 1 与第 4 跨主梁,利用水压爆破中水的传能作用,将爆炸能量均匀地作用在主梁上,如图 10(b)所示;随后,下部结构起爆,炸药爆炸冲击波直接作用于墩柱,使墩柱失去承载能力,桥体开始倾斜,如下图 10(c);第 1 跨与第 4 跨主梁靠近邻近桥墩一侧约束释放,两跨主梁分别绕各自盖梁旋转

下落,如图 10(d);桥体倾斜,主梁失去支撑,斜向倾转,第 2 跨主梁右侧脱离中间盖梁,主梁开始倾斜下落,如图 10(e);由图 10(f)可知,第 3 跨主梁失去了两边桥跨的限制,开始倾斜下落。图 11 为爆后相邻桥墩形态图,可以看出,两墩表面无明显损伤,爆破效果良好。对比图 10 与图 7 可知,桥梁倒塌过程与数值模拟结果基本一致,均经历了第 1 与第 4 跨主梁旋转下落、第 2 跨主梁及左边墩柱倾斜下落、第 3 跨主梁及下部桥墩倾斜倒塌三个阶段,数值模拟结果较为准确。

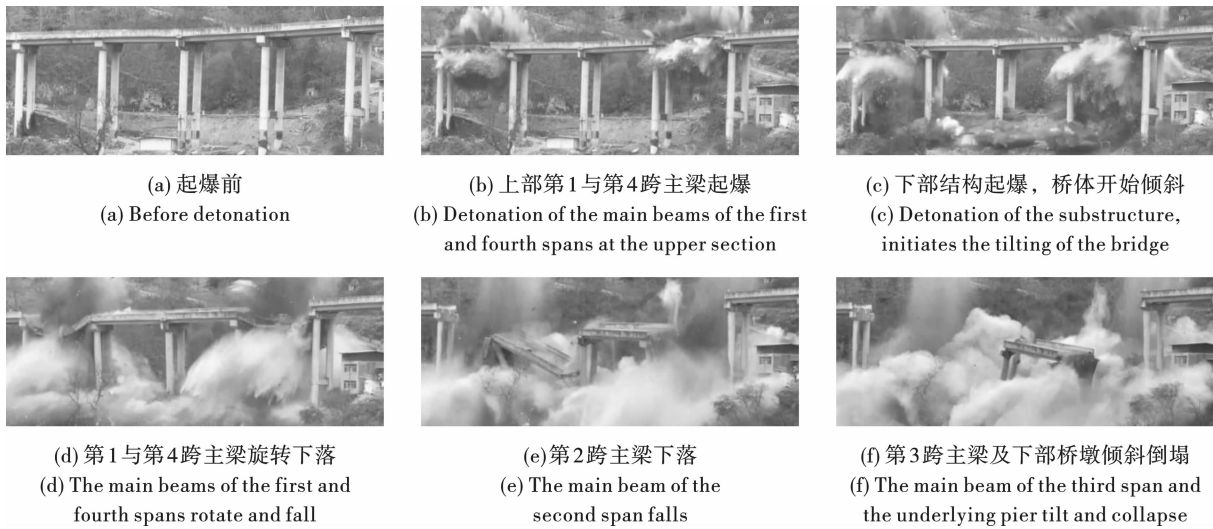


图 10 桥梁倒塌过程

Fig. 10 Bridge collapse process

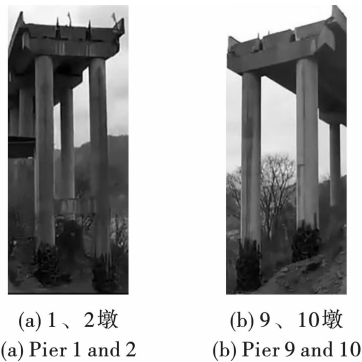


图 11 相邻桥墩爆后形态图

Fig. 11 Morphology of adjacent pier after explosion

为了研究桥梁倒塌振动传播,采用中科测控 TC-4850 型爆破振动测试仪,监测其爆破振动速度。监测点 1、2 位于桥体横桥向的中线上,距待拆桥段中心水平距离为 42 m,与数值模拟部分监测点位置相同,实测振动数据如表 6 所示。

由表 6 可知,各监测点振动速度峰值均小于安全允许振速,不会对相邻桥墩产生危害。现场振动

监测值比数值模拟结果略大,但二者结果仍较为接近,最大误差为 13.09%,在允许的范围内,进一步说明数值模拟结果较为准确。

表 6 现场振动监测数据

Table 6 Vibration monitoring data

监测点号 Monitoring point number	水平距离 Horizontal distance/m	v_x	v_y	v_z	v_{max}
1	42	3.96	3.41	3.18	3.96
2	42	3.12	3.59	2.86	3.59

5 结论

1) 通过数值模拟和现场实际爆破对连续梁桥局部桥跨拆除爆破技术进行了研究,提出了连续梁桥局部桥跨拆除爆破方案。上部梁体水压爆破,下部桥墩钻孔爆破的方法可以有效降低爆破飞石距离,以免对邻近桥跨产生较大的冲击。

2) 爆破前人工切割各桥墩顶主梁, 将连续梁变为多跨简支梁; 爆破时首先起爆主梁靠近邻近桥跨处的炸药, 随后下部桥墩采用逐排倾斜的倒塌方案是较为理想的爆破顺序, 可以有效降低爆破振动及塌落振动速度, 以保证相邻桥跨的安全。

3) 现场实际爆破效果较好, 邻近桥墩无明显损伤, 数值模拟与工程实际桥梁倒塌过程以及塌落振动速度均较为接近, 现场监测数据与模拟结果的最大误差为 13.09%, 数值模拟结果较为准确。合理运用数值模拟技术对连续梁桥局部桥跨爆破拆除倒塌过程进行模拟, 从多个方面详细分析数值模拟结果, 进而优化爆破设计方案, 可以有效保证实际工程拆除爆破的成功。

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] 蒋跃飞, 何贤辉, 刘 桐, 等. 双侧紧贴运营新桥的大型桥梁爆破拆除技术[J]. 工程爆破, 2019, 25(3):32-42.
- [2] JIANG Yue-fei, HE Xian-hui, LIU Tong, et al. The blasting demolition technology of large-scale bridge in close proximity to bilateral new operational bridges[J]. Engineering Blasting, 2019, 25(3):32-42. (in Chinese)
- [3] 王 璞, 周卫华, 欧阳光, 等. 紧邻既有桥梁的大型钢筋混凝土拱桥爆破拆除[J]. 爆破, 2020, 37(1):107-112.
- [3] WANG Pu, ZHOU Wei-hua, OUYANG Guang, et al. Explosive demolition of large reinforced concrete arch bridge adjacent to existing bridges[J]. Blasting, 2020, 37(1):107-112. (in Chinese)
- [4] 季 杉, 谢伟平, 王 礼. 爆破振动与塌落触地振动特点及传播规律试验研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(11):195-201.
- [4] JI Shan, XIE Wei-ping, WANG Li. Tests for ground vibration characteristics and propagation laws due to blasting and touchdown impact[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(11):195-201. (in Chinese)
- [5] 胡志坚, 张周煜, 张永涛, 等. 双柱墩混凝土梁桥爆破拆除倒塌过程与机理研究[J]. 中国公路学报, 2024, 37(5):67-79.
- [5] HU Zhi-jian, ZHANG Zhou-yu, ZHANG Yong-tao, et al. Investigation of explosive collapse process and mechanism of girder bridges with double-column piers[J]. China Journal of Highway and Transport, 2024, 37(5):67-79. (in Chinese)
- [6] 齐 鹏, 尚修瑞, 刘 川, 等. 复杂环境下跨路桥梁拆除爆破方案优化研究[J]. 爆破, 2021, 38(3):104-112.
- [6] QI Peng, SHANG Xiu-ru, LIU Chuan, et al. Optimization of blasting schemes for demolition of cross-road bridges in complicated conditions[J]. Blasting, 2021, 38(3):104-112. (in Chinese)
- [7] 冯剑平. 桥梁结构的爆破拆除数值模拟优化研究[D]. 西安: 长安大学, 2016.
- [7] FENG Jian-ping. Numerical simulation study and optimization of bridge structure in blasting demolition[D]. Xi'an: Chang'an University, 2016. (in Chinese)
- [8] 杨永强, 胡进军, 谢礼立, 等. 沌阳高架桥爆破拆除塌落引起的地面振动特征[J]. 振动与冲击, 2015, 34(5):110-114.
- [8] YANG Yong-qiang, HU Jin-jun, XIE Li-li, et al. Characteristics of ground vibration caused by blasting demolition collapse of zhuan yang viaduct[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(5):110-114. (in Chinese)
- [9] 马世明, 蔡永彬, 王新阁, 等. 复杂环境下双曲拱桥的控制拆除爆破[J]. 工程爆破, 2023, 29(2):115-119, 136.
- [9] MA Shi-ming, CAI Yong-bin, WANG Xin-ge, et al. Controlled demolition blasting of double curved arch bridge in Complex environment[J]. Engineering Blasting, 2023, 29(2):115-119, 136. (in Chinese)
- [10] 孙金山, 姚颖康, 吴 亮, 等. 高架桥混凝土多室箱梁水压爆破破碎机理数值模拟[J]. 爆炸与冲击, 2017, 37(2):299-306.
- [10] SUN Jin-shan, YAO Ying-kang, WU Liang, et al. Numerical simulation of water-pressure blasting mechanism in breaking viaduct box girder[J]. Explosion and Shock Waves, 2017, 37(2):299-306. (in Chinese)
- [11] 吴 亮, 谢先启, 韩传伟, 等. 高架桥箱梁水压拆除爆破数值模拟与实践[J]. 公路交通科技, 2016, 33(3):64-70.
- [11] WU Liang, XIE Xian-qi, HAN Chuan-wei, et al. Numerical simulation and practice of hydraulic demolition blasting of viaduct box girder[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2016, 33(3):64-70. (in Chinese)
- [12] 马守龙, 吕 闹, 汪海波, 等. 非等厚钢筋混凝土箱梁水压爆破拆除研究[J]. 爆破, 2019, 36(2):99-104.
- [12] MA Shou-long, LV Nao, WANG Hai-bo, et al. Numerical simulation of hydraulic blasting in unequal-wall pc box girder[J]. Blasting, 2019, 36(2):99-104. (in Chinese)
- [13] 辛春雷, 薛再清, 涂 建, 等. 有限元分析常用材料参数手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2019:467-471.
- [14] 马龙浩. 岩石动力损伤本构模型及低损伤爆破方法

- 研究[D]. 重庆:重庆大学,2022.
- [14] MA Long-hao. Study on dynamic damage constitutive model of rock and low damage blasting method [D]. Chongqing:Chongqing University,2022. (in Chinese)
- [15] 马泗洲,刘科伟,杨家彩,等. 不耦合装药下岩石爆破块体尺寸分布特征[J]. 爆炸与冲击,2024,44(4):122-140.
- [15] MA Si-zhou,LIU Ke-wei,YANG Jia-cai,et,al. Size distribution characteristics of blast-induced rock fragmentation under decoupled charge structures [J]. Explosion and Shock Waves,2024,44(4):122-140. (in Chinese)
- [16] 汪旭光,于亚伦. 拆除爆破理论与工程实例[M]. 北京:人民交通出版社,2008:153-162.
- [17] 汪旭光. 爆破设计与施工[M]. 北京:冶金工业出版社,2011:689-694.
- [18] 中国工程爆破协会. 中国典型爆破工程与技术[M]. 北京:冶金工业出版社,2006:638-669.
- [19] 国家安全生产监督管理总局. GB6722—2014 爆破安全规程[S]. 北京:中国标准出版社,2014.
- [20] 谭文辉,璩世杰,毛市龙,等. 边坡爆破振动高程效应分析[J]. 岩土工程学报,2010,32(4):619-623.
- [20] TAN Wen-hui,QU Shi-jie,MAO Shi-long,et al. Altitude effect of blasting vibration in slopes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2010,32(4):619-623. (in Chinese)
- [21] 孙金山,谢先启,贾永胜,等. 建(构)筑物拆除爆破塌落触地振动预测模型研究[J]. 工程爆破,2014,20(2):25-28.
- [21] SUN Jin-shan,XIE Xian-qi,JIA Yong-sheng,et al. Forecast model of peak vibration velocity induced by the collapse of structures in demolition blasting projects[J]. Engineering Blasting,2014,20(2):25-28. (in Chinese)

(上接第66页)

- [5] 亨利奇 J. 爆炸动力学及其应用[M]. 熊建国,译. 北京:科学出版社,1987:225-229.
- [5] HENRICH J. Explosion dynamics and its application[M]. Translated by XIONG Jian-guo. Beijing:Science Press,1987:225-229. (in Chinese)
- [6] 张立,吴红波. 爆破器材测试技术[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,2018:377-389.
- [6] ZHANG Li,WU Hong-bo. Explosive materials testing technology. [M]. Hefei:Press of University of Science and Technology of China,2018:377-389. (in Chinese)
- [7] 邵磊. 航空领域用典型钛合金的燃烧行为与机理研究[D]. 北京:北京科技大学,2022.
- [7] SHAO Lei. Combustion behavior and mechanism of typical titanium alloys for aircraft[D]. Beijing:University of Science and Technology Beijing,2022. (in Chinese)
- [8] 蔡瑞娇. 火工品设计原理[M]. 北京:北京理工大学出版社,2002:324-329.
- [8] CAI Rui-jiao. Principles of explosive devices design[M]. Beijing:Beijing Institute of Technology Press,2002:324-329. (in Chinese)
- [9] 葛丽炜,夏颖,刘书悦,等. 热解温度和时间对马弗炉制备生物炭的影响[J]. 沈阳农业大学学报,2018,49(1):95-100.
- [9] GE Li-wei,XIA Ying,LIU Shu-yue,et al. Effect of pyrolysis temperature and time on biochar production in a muffle furnace[J]. Journal of Shenyang Agricultural University,2018,49(1):95-100. (in Chinese)
- [10] 贾德昌,何培刚,苑景坤,等. 铝硅酸盐聚合物及其复合材料研究进展[J]. 硅酸盐学报,2017,45(12):1721-1737.
- [10] JIA De-chang,HE Pei-gang,YUAN Jing-kun,et al. Preparation and properties of aluminum silicate polymer composite foam material[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society,2017,45(12):1721-1737. (in Chinese)
- [11] 门建兵,蒋建伟,王树有. 爆炸冲击数值模拟技术基础[M]. 北京:北京理工大学出版社,2015:75-84.
- [11] MEN Jian-bing,JIANG Jian-wei,WANG Shu-you. Fundamentals of numerical simulation for explosion and shock problems[M]. Beijing:Beijing Institute of Technology Press,2015:75-84. (in Chinese)
- [12] 辛春亮,薛再清,涂建,等. 有限元分析常用材料参数手册[M]. 北京:机械工业出版社,2019.
- [12] XIN Chun-liang,XUE Zai-qing,TU Jian,et al. Manual of common material parameters for finite element analysis [M]. Beijing:Machinery Press,2019. (in Chinese)
- [13] 栗保华,畅博,张立建,等. 装药密度对炸药JWL状态方程的影响[J]. 兵器装备工程学报,2021,42(1):174-178.
- [13] JIA Bao-hua,CHANG Bo,ZHUANG Li-jian,et al. Effect of charge density on the explosive JWL equation of state [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering,2021,42(1):174-178. (in Chinese)
- [14] 杨丹,赵海滨,龙哲,等. MATLAB 图像处理实例详解[M]. 北京:清华大学出版社,2013.
- [14] YANG Dan,ZHAO Hai-bing,LONG Zhe,et al. MATLAB Image processing example details[M]. Beijing:Tsinghua University Press,2013. (in Chinese)