

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20230612004

地下拱结构抗爆研究进展与展望*

孟凡茂¹, 金丰年¹, 王 鹏¹, 周健南², 陈海龙¹

(1. 陆军工程大学爆炸冲击防灾减灾全国重点实验室, 江苏 南京 210007;
2. 江苏省住房和城乡建设厅, 江苏 南京 210036)

摘要: 防护工程在战时能有效抵御打击并保存有生力量, 历来是国家防御和威慑力量的重要组成部分。与地上防护工程相比, 构筑在岩土介质中的地下防护工程具有更强的防护能力。然而, 随着科学技术的发展, 高技术武器和精确制导武器的命中精度、侵彻深度和毁伤能力不断增强, 对地下防护工程构成严重威胁。拱结构具有优异的力学性能, 在地下防护工程中应用十分广泛, 研究地下拱结构的抗爆性能对地下防护工程建设与发展具有重要意义。地下拱结构的抗爆问题涉及岩土介质中的爆炸冲击效应、岩土介质与拱结构的相互作用以及拱结构的动力响应与破坏机理等复杂的研究内容。国内外学者通过试验、数值仿真和理论分析等方法对爆炸荷载作用下地下拱结构的动力响应开展了较为系统的研究, 取得了丰富的科研成果。从地下拱结构抗爆试验、数值模拟研究以及抗爆动力学理论三个方面讨论了地下拱结构抗爆研究进展, 结合研究现状, 指出未来应结合地下防护工程向深埋地、大跨度发展的趋势, 加强地下拱结构原型和大比例模型结构抗爆试验、精细化数值模拟分析以及兼顾精度与实用的计算方法研究。

关键词: 爆炸荷载; 地下拱结构; 动力响应; 抗爆分析

中图分类号: TU352 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)01-0250-13

Research Progress and Prospects on Anti-explosion of Underground Arch Structures

MENG Fanmao¹, JIN Fengnian¹, WANG Peng¹, ZHOU Jiannan², CHEN Hailong¹

(1. State Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation of Explosion and Impact, Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, China; 2. Department of Housing and Urban-rural Development of Jiangsu Province, Nanjing 210036, China)

Abstract: Protective engineering has always been an important component of national defense and deterrence, as it can effectively withstand attacks and preserve vital resources during wartime. Compared to above-ground structures, underground protective engineering built in geotechnical media offers superior protection. However, with the development of science and technology, the hit accuracy, penetration depth, and destructive power of high-tech and precision-guided weapons have continuously increased. These enhanced weapons pose a serious threat to underground protective engineering. Arch structures are widely employed in underground protective engineering due to their excellent me-

* 收稿日期: 2023-06-12; 修回日期: 2023-09-28

基金项目: 江苏省社会发展项目(BE2020716)、国家自然科学基金项目(51778622)资助

作者简介: 孟凡茂(1991—), 男, 博士研究生。主要从事防灾减灾工程及防护工程研究。E-mail:mpopeye@sina.com

通讯作者: 王鹏(1988—), 男, 副教授, 博士。主要从事防灾减灾工程及防护工程教学与科研。E-mail:wp0608@163.com

chanical performance. Consequently, it is of great significance to study the blast resistance of underground arch structures for the construction and development of underground protective engineering. The issues of anti-explosion in underground arch structures involve complex research contents such as the explosive impact effect in geological medium, the interaction between geological medium and arch structures, as well as the dynamic response and failure mechanisms of arch structures. Through experiments, numerical simulations, and theoretical analysis, scholars worldwide have conducted systematic investigations into the dynamic response of underground arch structures under explosions. A wealth of research achievements have been obtained in this field. This paper discusses the research progress of underground arch structures subjected to explosions from the aspects of explosion experiments, numerical simulation studies, and dynamic theory. Considering the current research status, it is pointed out that the explosion tests of prototypes and large-scale model structures, refined numerical simulation analysis, and calculation methods with accuracy and practicality should be strengthened. These further studies need to be combined with the development trend of underground protective engineering towards deep burial and large span.

Keywords: blast loads; underground arch structures; dynamic response; blast-resistant analysis

0 引言

为增强防护能力,防护工程一般建于地下。海湾战争、伊拉克战争和俄乌冲突等实践表明地下防护工程在现代战争中依然具有重要作用,完备的防御体系是抵御打击、保存实力的有效手段。但必须看到,高技术武器和精确制导武器已展现出强大的毁伤能力。2021年,以色列对哈马斯“地铁”隧道系统实施了打击,摧毁了加沙地带北部约15公里的地下防御设施。2022年,俄罗斯使用钻地弹和重型炸弹轰炸了乌克兰亚速钢铁厂,钢铁厂部分地下通道坍塌。同时,钻地武器的命中精度和毁伤能力在不断增强。2018年,美国完成了可穿透61米混凝土、攻击精确度达1.2米的GBU-57钻地弹第4次升级。2021年,美军测试了为摧毁深埋目标而研制的GBU-72钻地弹。面对攻击武器快速发展带来的严峻挑战,应深入研究地下防护结构的抗爆性能,加强地下防护工程建设。

地下防护工程通常构筑在岩土中,拱是地下防护工程的主要结构形式,土中拱结构一般直接承受外部荷载,因围岩具有一定的自承载能力,拱结构在岩石坑道中作为衬砌主要起支护作用。研究岩土中拱结构的抗爆动力响应对于地下防护工程建设具有重要理论意义和工程应用价值。

1 地下拱结构抗爆试验研究

由于实施难度大和保密等原因,国内外关于原型地下拱结构抗爆试验的公开报道不多,从已发表的文献资料看,目前主要通过现场小比例尺试验和模型试验来研究地下拱结构的抗爆性能。

1.1 土中地下拱结构抗爆试验

二十世纪五六十年代,国外开始进行土中拱结构抗爆试验,重点研究了核爆下土中浅埋拱结构的动力响应,T. Krauthammer等^[1]对试验进行了梳理与总结。核爆地冲击作用范围广,时间长,通常可视为平面波。地下拱结构在核爆作用下易发生整体响应,主要有刚体运动、均匀压缩、对称弯曲和非对称弯曲等四种响应模式^[1]。

W. J. Flathau等^[2]通过全尺寸试验研究了地下拱结构的抗爆性能,在核爆作用下结构出现明显弯曲变形,超过结构设计荷载时底板和内表面仅出现轻微损伤,表明地下拱结构能有效抵抗核爆动载。N. Palacios等^[3]通过模拟条件下的模型试验得到与全尺寸试验^[2]相似的结果。为比较现场试验和模拟试验的效果,T. E. Kennedy^[4]分别在野外和室内模拟环境中对小型拱结构进行了抗爆试验,结构在两种环境中所受荷载相似,响应略有不同。R. K. McGrath^[5]对有独立基础的地下拱结构进行了模拟

研究,结构迎爆面向下运动发生倾覆,表明荷载传播方向对结构响应有较大影响。F. D. Dallriva^[6]研究了土与结构相互作用对拱响应的影响,试验中直接覆土的拱坍塌破坏(图1(a)),拱顶和拱腰处分别发生了开裂破坏和剪切破坏,而表面覆盖特氟龙的拱基本完好,表明土与结构的相互作用对拱的动力响应影响较大。J. F. Betz 等^[7]、R. Parsons 等^[8]、J. L. Smith 等^[9]通过 Kachina 系列试验研究了不同纵向长度、不同配筋率以及不同连接方式拱结构的动力响应,试验中较长的拱纵向发生弯曲,中心段破坏(图1(b)),拱墙和底板连接处容易发生损伤。

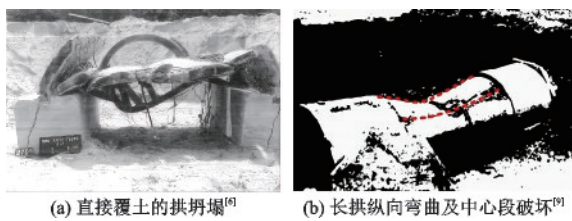


图1 地下拱结构破坏
Fig.1 Failure of underground arch structures

常规武器化爆地冲击作用范围有限,时间较短,传播更复杂。主要采用集团装药开展土中地下拱结构抗化爆试验。化爆地冲击易激发地下拱结构的纵向弯曲效应和局部响应模式,结构会出现弯曲破坏、剪切破坏和震塌破坏等多种破坏形态。

S. A. Kiger 等^[10]研究了埋地侧爆下土中半圆形钢筋混凝土拱的动力响应,试验中装药一侧结构表面压力较大,而另一侧较小,震塌破坏仅发生在结构靠近装药的区域,表明化爆动载在拱结构上具有明显的局部效应。H. L. Chen 等^[11]对土中直墙拱结构进行了埋地顶爆试验,研究了结构表面压力分布和结构响应特征,结果表明压力呈类三角形分布,拱顶响应最剧烈,结构呈现弯曲为主、压缩为辅的变形模式,混凝土剥落、开裂、剪切破坏和钢筋屈服为结构主要损伤特征,最终形成五条塑性铰线的破坏模式(图2)。C. J. Zhao 等^[12]研究了地面爆炸下土中浅埋预制玄武岩纤维筋混凝土拱的抗爆性能,结果显示拱顶开裂为结构宏观破坏模式,拱顶和拱腰部位较为薄弱。陈昊等^[13]通过现场试验研究了二次爆炸作用下土中浅埋钢筋混凝土拱的破坏规律,分析了不同比例爆距下结构的典型破坏模式,综合结构宏观毁伤和最大挠跨比划分了结构毁伤等级。

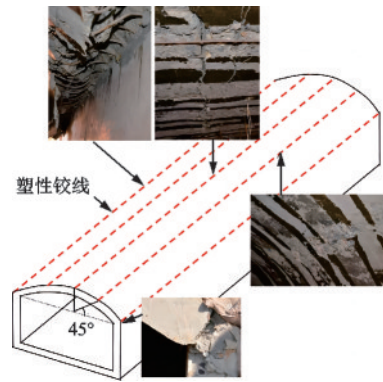


图2 土中拱结构五条塑性铰线破坏模式^[11]
Fig.2 Collapse mode on the five plastic hinge lines in buried arch^[11]

H. L. Chen 等^[14]和 W. Xie 等^[15]分别采用碳纤维板和碳纤维布对土中受损与未受损直墙拱结构进行了加固,研究了加固拱在埋地顶爆下的动力响应,揭示了加固拱的破坏特征,结果表明采用碳纤维板/布对拱进行加固能有效提升结构的抗爆性能。

1.2 岩石介质中地下拱结构抗爆试验

国内学者于1965年至1980年对岩石坑道进行了大规模现场爆炸试验^[16-17],取得了丰富的科研成果,试验主要研究对象为岩石毛洞和锚固支护坑道,较少涉及拱衬砌结构。王承树^[18]在广泛现场试验的基础上,分析了爆炸荷载下喷锚支护坑道的破坏模式,按受力特点将其划分为“结构力学型”、受压、剪切、拉伸剥离和横向断裂等五种破坏形态。陈剑杰等^[19]基于现场爆炸试验中岩石洞室的破坏效应,讨论了岩石洞室的破坏规律,提出了修正的地下洞室应力波破坏分区表,指出爆炸荷载决定地下洞室的破坏,介质特性在很大程度上控制洞室的破坏形式,洞室特征会影响结构破坏程度和局部破坏形态。马海春等^[20]通过现场试验研究了常规锚杆、短密锚杆和长密锚杆支护洞室在爆炸荷载作用下的拱顶位移,分析了不同锚杆支护类型下地下洞室的抗爆效果。W. Ming 等^[21]通过现场试验研究了 NPR 锚索支护洞室的抗爆性能。

岩石中拱结构抗爆现场试验主要有以下两种方式。一是基于既有洞室开展现场试验。田强等^[22]通过在某洞库口部前方和头部上方同时起爆,研究了结构的破坏特征,但受条件限制,未采集试验数据。二是开挖山体构筑拱结构进行现场试验。庞伟宾^[23]在灰岩地层中构筑了一个圆筒形竖井和

四个直墙拱,通过现场试验研究了结构的破坏特征。结合以往试验结果,将钻地武器爆炸作用下地下坑道的破坏机理分为震塌破坏、挤压剪切破坏、局部剪切破坏、劈裂拉伸破坏、结构力学破坏、横向断裂破坏和震动破坏等七种形式。姬楠等^[24]在硬质石灰岩岩体中构筑了三个高跨比不同的直墙拱,研究了平面装药爆炸下结构的宏观破坏模式和受力特征,编制了新的强爆炸硬岩中支护结构破坏等级及破坏特征表。

在模型试验中,通常采用水泥砂浆或混凝土等材料模拟围岩。田强等^[25]依据爆炸相似律,采用比例缩尺方法,研究了拱顶、拱脚和直墙侧方等不同位置爆炸时地下直墙拱模型结构的毁伤,结果表明侧爆对结构造成的破坏最严重。袁伟泽等^[26]基于模型试验研究了炸药当量对大跨度地下拱结构的破坏效应,随装药量增加,结构响应加剧,最终拱顶围岩整体塌落。刘光昆等^[27]开展了不同爆距、不同装药量条件下地下拱结构抗爆模型试验(图3),研究了结构主要破坏模式和响应特征,分析了结构位移与装药量及爆距的关系。王建龙等^[28]研究了平面波作用下锚喷衬砌支护与未支护模型洞室的动力响应,结果表明衬砌支护洞室具有更优的抗爆性能。

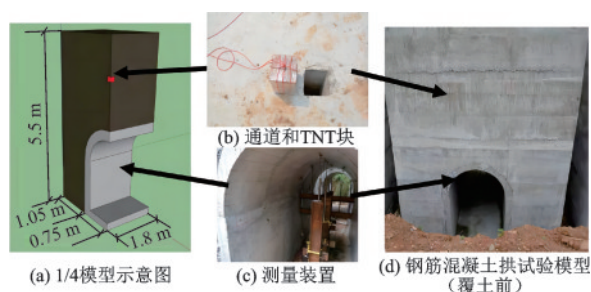


图3 模型试验示意图^[27]

Fig.3 Schematic diagram of model experiment^[27]

深埋拱结构方面,李述涛等^[29]和 X. Bao等^[30]通过模型试验研究了重复顶爆和侧顶爆作用下深埋拱结构的动力响应,试验中结构损伤较小,但加速度反应较大。对于深埋地下拱结构应重点考虑爆炸地冲击对结构造成的强烈震动效应。

此外,新建隧道爆破开挖过程中对既有邻近坑道衬砌造成的振动^[31]也在一定程度上揭示了地下拱结构在爆炸荷载作用下的动力响应规律。

通过以上地下拱结构抗爆试验可以发现,土中拱结构在爆炸荷载作用下的动力响应通过试验得

到了相对充分的研究,岩石中拱结构的抗爆试验重点研究了结构的宏观破坏模式,而对结构的荷载分布、变形特征、速度以及加速度等内容研究较少。锚固衬砌复合支护结构和深埋拱结构的抗爆性能还有待深入研究。虽然通过模型试验获得了地下拱结构在爆炸荷载作用下的宏观变形特征和破坏模式,但因相似关系要求高,模型试验不能准确反映出原型结构的局部响应。由于缺乏原型试验验证,将模型试验结果推广至原型结构的相似理论还需完善。

2 地下拱结构抗爆数值仿真

随着仿真技术的快速发展,数值模拟在爆炸冲击领域得到广泛应用。与地下拱结构抗爆试验相比,数值仿真方法具有经济、安全、可参数化分析和结果显示直观等优势,现已成为研究地下拱结构抗爆动力响应的重要手段。通过数值仿真可以拓展爆炸荷载作用下地下拱结构的研究内容,辅助进行地下拱结构抗爆试验方案设计以及验证结构抗爆理论分析结果。为获得准确可靠的模拟结果,需结合试验数据,按照实际工况建立合理有效的地下拱结构分析计算模型。

地下拱结构抗爆数值仿真分析主要基于 ANSYS、LS-DYNA、AUTODYNA、ABAQUS、FLAC3D 以及 UDEC 等模拟软件,重点研究了化爆条件下岩石中拱结构的荷载分布、破坏模式及影响结构动力响应的敏感性因素。

地下拱结构上的荷载分布直接决定结构响应特征,拱结构上的化爆动载具有明显的局部效应。马林建等^[32]采用 LS-DYNA 软件研究了地下拱结构爆炸荷载分布规律,结果表明随时间推移,荷载由拱顶向两侧扩散衰减,局部动载可以简化为以爆心和爆心在结构上投影点连线为轴的中心对称三维动载。洪武等^[33]和 G. K. Liu 等^[34]通过数值模拟分析了动荷载在地下拱结构上的分布形式,给出了可预测荷载的拟合公式,模拟得到的荷载分布规律与试验结果相似。岩石中拱结构上除爆炸动载外,还有毛洞震塌荷载,目前未见有关毛洞震塌荷载的数值模拟研究。

爆炸波在介质和结构中传播,介质与结构相互作用造成地下拱结构响应。赵德辉等^[35]通过有限元软件模拟了爆炸作用下衬砌的开裂及压碎过程。

邓春梅等^[36]利用LS-DYNA软件研究了地下混凝土落地拱的局部震塌破坏和整体变形模式,在爆炸荷载作用下,结构拱腰处产生应力集中并形成塑性铰。高全臣等^[37]分析了爆炸条件下地下拱结构的动力响应,指出结构可能发生以拱脚上部为屈服区域的冲切破坏。冯慧平等^[38]模拟了坑道临界震塌爆距处爆炸时地下拱结构的动态过程(图4),分析了围岩和结构的稳定性。孙惠香等^[39-40]采用有限元软件研究了地下拱结构与围岩的相互作用,得到了围岩与结构最大相互作用力的变化规律。

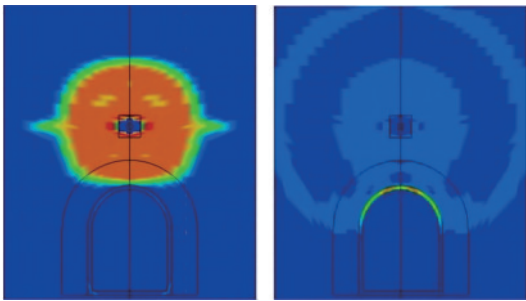


图4 不同时刻的有效应力云图^[38]

Fig. 4 Effective stress contour at different times^[38]

炸药当量、起爆位置、爆距和结构尺寸等均会影响地下拱结构的动力响应。吴亮等^[41]研究了坑道衬砌在爆炸荷载作用下的破坏机理以及影响破坏范围的主要因素,指出结构破坏范围随爆距增加先增大后减小,由压剪破坏逐步变为拉伸破坏,当厚跨比增大时,结构更易发生剪切破坏,破坏范围逐渐减小。孙惠香等^[42]研究了不同装药量和不同起爆位置时各种跨度地下拱结构的破坏模式,结构会发生整体破坏、局部剪切破坏、局部弯曲破坏和受拉破坏等不同破坏形态。J. Mandal等^[43]分析了地面爆炸时炸药当量和埋深对土中拱结构动力响应的影响,发现拱顶位移随炸药当量增加而增大,随埋深增加而减小。罗军洪等^[44]利用FLAC3D软件研究了爆炸强度、起爆位置和结构跨度等对地下洞室稳定性的影响,提出可通过采取增加埋深、增强结构强度以及加固拱顶、拱脚等措施提升洞室稳定性。

提高结构材料性能和截面厚度能有效增强地下拱结构抗爆性能。王光勇等^[45]分析了混凝土弹性模量和截面厚度对地下拱结构抗爆性能的影响,指出适当增加混凝土弹性模量和衬砌厚度能有效增强结构抗爆加固效果。霍庆等^[46]基于仿真分析结果指出提高混凝土强度和拱截面厚度能显著改

善地下拱结构抗爆性能。J. Q. Wu等^[47]研究了浅埋玄武岩纤维筋混凝土拱的抗爆动力响应,结果表明玄武岩纤维筋混凝土拱具有较强的抗动载能力。

跨度增加会导致地下拱结构发生非线性变化,大跨度地下拱结构的动力响应与小跨度不同。孙惠香等^[48]利用ANSYS/LSDYNA软件分析了不同跨度拱结构的破坏形态和最大应力,结果表明大跨度地下拱结构的破坏形态和受力状态与小跨度结构完全不同,远距离爆炸对大跨度结构的安全及围岩稳定性影响较大。马林建等^[49]研究了岩石中不同跨度、不同截面厚度的拱结构在不同爆距、不同爆炸偏角下的动力响应,指出大跨度拱结构的动力响应是结构尺度与空间爆炸效应综合作用的结果。张宇等^[50]通过LS-DYNA软件探讨了动载条件下地下拱结构的跨度效应。目前防护工程领域对地下拱结构“大、小跨度”的具体范围还没有明确的界定。

介质波阻抗会影响地冲击的传播以及介质与结构相互作用,地下拱结构在不同波阻抗介质中的响应会发生改变。孔大庆等^[51]研究石英岩、砾岩、花岗岩和砂岩等4种岩石中地下拱结构的动力响应,结果表明岩石硬度越大,拱顶动力相互作用越强,远距离爆炸对大跨度结构及围岩稳定性不利,近距离爆炸对软岩中结构的响应影响明显。J. Mandal等^[52]通过改变土介质参数研究了土体压缩性能对爆炸荷载作用下地下拱结构变形的影响。

初次打击或地震会造成地下拱结构损伤,降低结构抗爆性能,再次遭受爆炸作用时,结构破坏会加重。陈昊等^[13]通过对结构设置二次爆炸前的初始损伤条件,研究了重复爆炸下土中浅埋拱的破坏规律,发现初次爆炸对结构最终损伤的影响较大。唐廷等^[53]评估了地震后地下受损拱的抗爆能力,指出裂缝位置对地震后地下拱结构的抗爆性能有较大影响,影响最大的裂缝对结构抗爆性能起控制作用。

侵彻和爆炸是钻地武器作用的两个主要阶段,侵彻冲击对地下拱结构的直接影响有限,但会造成结构一定损伤和改变地应力状态,进而增强爆炸阶段的破坏效果。刘绍镛等^[54]研究了弹体垂直侵彻拱顶正上方时地下洞室的动力响应。R. Dhamne等^[55]研究了冲击荷载和爆炸荷载分别作用时拱形隧道的变形。张文堂等^[56]基于SPH-FEM方法模拟了钻地武器侵彻爆炸的全过程(图5),分析了地下拱结构内部应力和毁伤模式,结果表明侵彻爆炸联

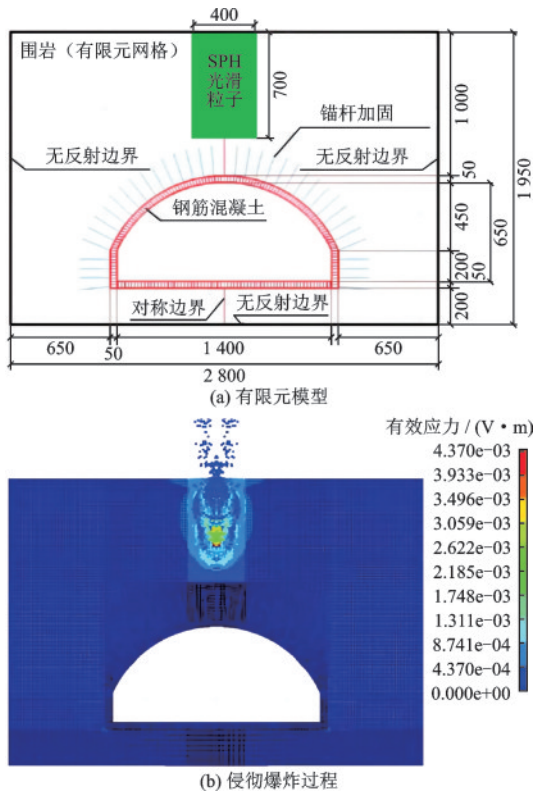


图5 侵入爆炸联合作用数值模拟分析^[56]

Fig.5 Numerical simulation analysis of the combined action of penetration and explosion^[56]

合作用下结构毁伤加剧,拱顶、拱肩和拱脚等部位是薄弱区域。

相对试验而言,岩石中地下拱结构的动力响应通过数值仿真得到更加全面的研究。广大学者针对爆炸荷载作用下岩石中地下拱结构的荷载分布、介质与结构相互作用以及炸药、介质和结构尺寸对结构响应的影响等内容做了大量研究工作,形成了相对系统和成熟的分析方法。因地下拱结构所处环境复杂,当前数值模拟研究均是在对岩土性质、材料物理力学性能以及边界条件等做出一定假设或简化的基础上进行的,地下拱结构的抗爆分析模型与实际研究对象差别较大,虽然通过调整相关参数得到了一些理想的结果,但与结构的实际响应过程仍有区别。部分研究仅从数值仿真层面得到了结论,还缺乏相应试验和理论支撑,研究结论的适用性需进一步通过试验和理论分析验证。

3 地下拱结构抗爆理论分析

地下拱结构抗爆动力分析涉及地冲击在岩土介质中的传播、介质与拱结构相互作用、拱结构动

力响应等一系列复杂的科学问题,使得地下拱结构抗爆动力学理论方面的研究要困难地多。鉴于理论研究内容广泛,本节主要总结分析化爆条件下地下拱结构动力响应的重点理论问题。

3.1 岩土介质中的爆炸波

化爆地冲击受炸药参数、耦合效应、介质特性等众多因素综合影响,准确确定地冲击参数十分困难,目前均是基于半经验半理论方法计算土中化爆自由场地冲击强度,其中美军规范性技术手册《常规武器防护设计原理》(TM5-855-1)^[57]给出的经验公式应用最广。

地冲击在岩石介质中的传播和衰减极其复杂,目前岩石中爆炸自由场应力波参数还没有得到很好解决,一般通过质点震动峰值速度(PPV)评估爆炸对围岩稳定性的影响,在预测峰值震速的计算方法中,应用最多的为萨道夫斯基经验公式^[58]。

3.2 地下拱结构上的动荷载

目前主要基于以下两种方法研究确定化爆作用下土中地下结构的动荷载:一是用土中自由场压力荷载乘以综合反射系数^[57];二是基于一定简化,通过土与结构相互作用理论计算^[59]。

对于平顶结构,其综合反射系数的经验值一般为1.5,根据相互作用理论^[60-61]计算的综合反射系数大致为1.3~1.7。土中地下拱结构的综合反射系数一般取平顶结构综合反射系数的0.9倍^[62]。

地下拱结构有曲率,土中化爆一般产生球面波,因此,土中拱结构的综合反射系数以及拱与土的动力相互作用跟平顶结构均有差异。W. J. Flathau等^[63]分析了顶爆下地下拱结构的荷载分布规律,结果表明化爆动载在拱结构上的作用范围有限。H. L. Chen等^[64]推导的地下拱结构自由场压力分布与W. J. Flathau等^[63]的分析结果非常吻合(图6),在此基础上,采用传统相互作用理论^[60-61]和考虑结构曲率的Constantino相互作用理论^[65]研究了拱结构的动力响应,通过两种相互作用理论计算的拱顶综合反射系数分别大致为2和3。张宇等^[66]利用Costantino相互作用模型^[65],结合虚功原理推导了地下拱结构综合反射系数的计算公式,指出拱结构的综合反射系数可能大于2。周健南等^[67]通过将土中地下拱结构抗爆试验压力数据拟合与归一化,提

出了简化为三角形分布的动荷载工程实用计算方法,建议综合反射系数取为2。王鹏等^[68]基于两组试验数据计算的拱顶综合反射系数分别为1.53和2.03。J. Q. Wu等^[47]通过数值模拟计算的拱顶综合反射系数大约分布在1.42~3.28。

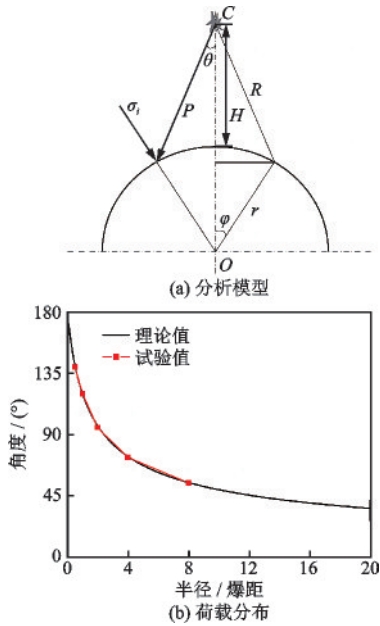


图6 地下拱结构荷载分析与分布^[64]

Fig.6 Analysis and distribution of load applied on the underground arch structure^[64]

由此可见,在综合反射系数、相互作用理论上,土中拱结构与平顶结构不同,综合反射系数的取值还有待进一步研究。

土与地下结构相互作用理论的一个基本假定为应力和速度在界面保持连续^[62],但在实际中,围岩具有自承载能力,动载作用下围岩的变形速度与拱结构可能并不相同,炸药当量、爆距和支护类型等均会影响围岩震塌,因此围岩与拱结构的动力相互作用更复杂。目前地下防护工程中仅将震塌等效静荷载作为拱形被覆结构的设计荷载。周健南等^[69]和金丰年等^[70]对比分析了计算震塌等效静载的四个主要公式,指出毛洞震塌荷载不适用于大跨度及复合式衬砌结构的抗爆设计。金丰年等^[70]采用经验公式^[57]结合几何关系计算的岩石中拱环向自由场应力与有限元结果^[32]比较吻合,但在计算径向荷载时采用的仍为土中综合反射系数。洪武等^[33]和张宇等^[71]通过数值仿真研究了岩石中拱结构的反射系数,因影响因素较多,两者的研究结论并不一致。

围岩与拱结构相互作用方面,曹志远等^[72]采用有限元与边界元耦合法研究了冲击波作用下直墙拱与围岩的非线性动力相互作用。房营光^[73]基于渐进解析法和映射函数法提出了非线性弹性岩土中波与直墙圆拱相互作用的简化解析计算方法。

3.3 地下拱结构动力分析

地下拱结构抗爆动力分析主要基于以下两类力学模型^[62]:一是首先确定拱结构上的动荷载,而后利用拱的振动理论分析地下拱结构的动力响应;二是将介质和地下拱结构作为整体,采用波动理论解析法或有限元数值法求解地下拱结构的动力响应。

第一类力学模型需要正确考虑波与结构的相互作用,采用能反映实际情况的动荷载。S. A. Kiger等^[74]基于单自由度模型研究了地下拱结构的抗爆动力响应。彭立生等^[75]采用振型叠加法和拟静力法计算了地下拱结构在爆炸振动作用下的内力。H. L. Chen等^[64,76]和H. Y. Zhou等^[77]通过在拱的动力学运动方程中引入界面阻尼来考虑土与拱结构的相互作用,利用振型叠加法对地下拱结构的动力响应进行了计算与分析。

第二类力学模型较为复杂,一般按半无限或无限平面(空间)问题求解。杨昇田等^[78]用接触压力函数表示围岩和衬砌之间的相互作用力,通过求解联立方程,给出了计入弹性半空间相互作用效应的直墙拱结构响应的解析解。K. C. Wong等^[79]利用有限元法与本征函数展开相结合的混合方法研究了半无限弹性介质中直墙拱结构的动力响应。赵以贤等^[80-81]采用有限元法研究了爆炸荷载作用下地下拱结构的动态响应,对比分析了大变形理论与小变形理论、弹性解与弹塑性解的差异。D. J. Stevens等^[82]提出了包含有限元法和有限差分法的混合方法,将本构模型与混合方法和Timoshenko梁单元相结合研究了均布冲击波作用下浅埋拱结构的动力响应。范鹏贤等^[83]采用共同变形理论及矩阵力法考虑衬砌与围岩的相互作用,研究了有弹性垫层的地下直墙拱结构在爆炸地震波作用下的动力响应(图7)。

综上所述,地下拱结构抗爆动力学理论涉及内容较广,介质与结构相互作用是地下拱结构动力分析的重点。土与拱结构的相互作用可在土与平顶结构相互作用理论的基础上,考虑拱的曲率效应进

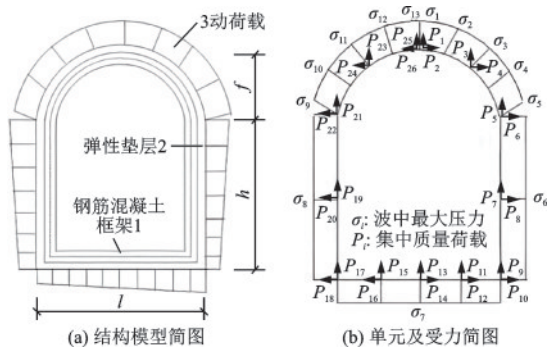


图7 地下拱结构动力分析模型^[83]

Fig.7 Dynamic analysis model of underground arch structure^[83]

行研究,岩石与拱结构的相互作用机理目前尚不完全清晰,需进一步深入探讨。基于地下结构动力分析的两类力学模型,可对地下拱结构的动力响应进行分析,预测结构潜在破坏模式。但因拱结构的自身特性以及介质环境十分复杂,已有计算模型均有其局限性,需根据精度要求合理选择计算方法。

4 总结与展望

通过回顾地下拱结构的抗爆试验、数值仿真分析和动力学理论,总结了地下拱结构抗爆研究进展,讨论了需关注的问题。随着防护需求变化,防护工程向深地下、大空间加速发展,未来应结合防护工程的发展趋势,加强深埋地、大跨度拱结构抗爆性能研究。主要研究结论和重点研究方向建议如下:

(1)爆炸荷载作用下地下拱结构的响应是高度非线性化的动态过程,涉及岩土介质中的爆炸冲击效应、岩土介质与拱结构之间的相互作用以及拱结构的动力响应与破坏机理等一系列复杂的科学问题。地下拱结构抗爆的研究内容主要包括荷载在拱结构上的分布规律、拱结构的响应特征与破坏模式、拱结构动力学理论以及岩土性质、材料参数、结构尺寸和埋深对拱结构动力响应的影响等。

(2)地下拱结构抗爆试验以现场小比例尺试验和模型试验为主,因难以满足全部相似条件、相似理论尚不完善,通过小型试验还不能准确得到原型结构的响应特征。数值模拟是爆炸试验和理论分析的有益补充,但建模分析复杂地质环境中大型拱结构的动力响应是一个较大的挑战。理论研究方面,土中拱结构的动力分析方法较多,而岩石中拱

结构的动力学理论相对缺乏,已有计算方法的精度和实用性还未能很好结合。

(3)跨度增加会导致地下拱结构的响应发生非线性变化,深部岩体具有特殊的力学状态,深埋地拱结构处于复杂的地应力环境。在埋深和跨度效应的综合影响下,深埋地、大跨度拱结构在爆炸地冲击扰动作用下的动力响应变得更加复杂。需在充分考虑埋深和跨度效应的基础上,加强原型和大比例模型结构抗爆试验、精细化数值模拟分析以及兼顾精度与实用的计算方法研究,提出适用于深埋地、大跨度拱结构的抗爆设计理论。

(4)基于埋地深度和结构跨度对地下拱结构抗爆性能的影响,建立深埋地、大跨度拱结构的具体判定标准。爆炸地冲击扰动会造成深埋地、大跨度拱结构强烈震动,局部效应更加明显,需结合结构响应特征,提出合理有效的减震、减跨措施。根据深埋地、大跨度拱结构的破坏模式,研究抢修抢建技术,制定加固方案。

参考文献:

- [1] Krauthammer T, Flathau W J, Smith J L, et al. Lessons from explosive tests on RC buried arches[J]. Journal of Structural Engineering, 1989,115(4):809-825.
- [2] Flathau W J, Breckenridge R A, Wiehle C K. Blast loading and response of underground concrete-arch protective structures [R]. Vicksburg: Waterways Experiment Station, 1957.
- [3] Palacios N, Kennedy T E. The dynamic response of buried concrete arches, Project 3.2, Operation Snowball [R]. Vicksburg: Waterways Experiment Station, 1967.
- [4] Kennedy T E. Comparison of simulation and field tests of a buried concrete arch structure [R]. Vicksburg: Waterways Experiment Station, 1968.
- [5] McGrath R K. Dynamic response of concrete arch bunkers: Event Dial Pack Project LN314A [R]. Vicksburg: Waterways Experiment Station, 1971.
- [6] Dallriva F D. Data report for FY 86 dynamic shallow-buried arch test [R]. Vicksburg: Waterways Experiment Station, 1986.
- [7] Betz J F, Smith J, Walhood G, et al. Kachina test series: Eagle Dancer[R]. Albuquerque: Air Force Weapons Laboratory, 1983.
- [8] Parsons R, Rinehart E. Kachina test series: Butterfly Maiden[R]. Albuquerque: Air Force Weapons Labora-

- tory, 1983.
- [9] Smith J L, Betz J F, Baird G T. Kachina test series: Dynamic arch test three (DAT-3) analysis report [R]. Albuquerque: Air Force Weapons Laboratory, 1986.
- [10] Kiger S A, Albritton G E. Response of a buried hardened arch structure to the effects of localized explosions [R]. Vicksburg: Waterways Experiment Station, 1979.
- [11] Chen H L, Zhou J N, Fan H L, et al. Dynamic responses of buried arch structure subjected to subsurface localized impulsive loading: Experimental study [J]. International Journal of Impact Engineering, 2014, 65: 89-101.
- [12] Zhao C J, Tang Z X, Wang P, et al. Blast responses of shallow-buried prefabricated modular concrete tunnels reinforced by BFRP-steel bars [J]. Underground Space, 2022, 7(2):184-198.
- [13] 陈昊, 卢浩, 孙善政, 等. 常规武器二次爆炸作用下浅埋钢筋混凝土拱结构破坏规律 [J]. 爆炸与冲击, 2023, 43(8):085104.
- Chen H, Lu H, Sun S Z, et al. Failure law of shallow buried reinforced concrete arch structure under secondary explosion of conventional weapons [J]. Explosion and Shock Waves, 2023, 43(8):085104. (in Chinese)
- [14] Chen H L, Xie W, Jiang M R, et al. Blast-loaded behaviors of severely damaged buried arch repaired by anchored CFRP strips [J]. Composite Structures, 2015, 122:92-103.
- [15] Xie W, Jiang M R, Chen H L, et al. Experimental behaviors of CFRP cloth strengthened buried arch structure subjected to subsurface localized explosion [J]. Composite Structures, 2014, 116: 562-570.
- [16] 曹国庆. 喷锚支护抗爆性能与设计 [J]. 防护工程, 1979, 1(2):34-51.
- Cao G Q. Explosion-resistance and design of shotcrete-bolt support [J]. Protective Engineering, 1979, 1(2): 34-51. (in Chinese)
- [17] 黄理兴. 岩石动力学研究成就与趋势 [J]. 岩土力学, 2011, 32(10):2889-2900.
- Huang L X. Development and new achievements of rock dynamics in china [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32 (10):2889-2900. (in Chinese)
- [18] 王承树. 爆炸荷载作用下喷锚支护破坏形态 [J]. 岩石力学与工程学报, 1989, 8(1):73-91.
- Wang C S. Failure modes of shotcrete lining of tunnel under blasting loading [J]. Chinese Journal of Rock Mechanism and Engineering, 1989, 8(1): 73-91. (in Chinese)
- [19] 陈剑杰, 孙钧, 林俊德, 等. 强爆炸应力波作用下岩石地下洞室的破坏现象学 [J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2007, 8(6):582-588.
- Chen J J, Sun J, Lin J D, et al. Failure of rock openings under intensive explosion stress wave [J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2007, 8(6):582-588. (in Chinese)
- [20] 马海春, 顾金才, 张向阳, 等. 喷锚支护洞室抗爆现场试验洞顶位移研究 [J]. 岩土工程学报, 2012, 34(2): 369-372.
- Ma H C, Gu J C, Zhang X Y, et al. Displacement at top of underground cavern reinforced by grouted bolts during site explosion resisting tests [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(2): 369-372. (in Chinese)
- [21] Ming W, Yang X J, Pan Y F, et al. Field test and numerical simulation of initial support effect of negative poisson's ratio anchor cable under strong impact and vibration [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2023, 133:104955.
- [22] 田强, 王起帆. 某洞库模拟精确打击的毁伤效应实爆试验 [J]. 防护工程, 2013, 35(5):5-8.
- Tian Q, Wang Q F. Explosion test of damage effects on a rear cavern depot under precision strike [J]. Protective Engineering, 2013, 35(5):5-8. (in Chinese)
- [23] 庞伟宾. 抗常规钻地武器坑道毁伤效应及安全防护层厚度研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2007.
- Pang W B. Research on damage effect and safety protective layer thickness of tunnel against conventional drilling weapons [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2007. (in Chinese)
- [24] 姬楠, 吴祥云, 任辉启, 等. 岩石中平面装药爆炸作用下不同高跨比结构抗爆性能试验研究 [J]. 岩土力学, 2023, 44(8):1-12.
- Ji N, Wu X Y, Ren H Q, et al. Experimental study on anti-explosion performance of structures with different height-span ratios under plane charge explosion in rock [J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(8): 1-12. (in Chinese)
- [25] 田强, 郑云木, 王起帆, 等. 地下结构头部在精确打击下的毁伤试验研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(6):1125-1129, 1151.
- Tian Q, Zheng Y M, Wang Q F, et al. The damage test investigation of underground structure heads subjected to precision strikes [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6(6): 1125-1129, 1151. (in Chinese)
- [26] 袁伟泽, 徐干成, 顾金才, 等. 大跨度地下洞库爆炸荷载下破坏形态试验研究 [J]. 地下空间与工程学报,

- 2019, 15(2):601-606.
- Yuan W Z, Xu G C, Gu J C, et al. Test study on damaged effects of large-span underground cavern under explosion[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(2):601-606. (in Chinese)
- [27] 刘光昆, 刘瑞朝, 汪维, 等. 地下钢筋混凝土拱形结构在顶爆条件下的抗爆试验[J]. 含能材料, 2021, 29(2):157-165.
- Liu G K, Liu R C, Wang W, et al. Blast resistance experiment of underground reinforced concrete arch structure under top explosion[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2021, 29(2):157-165. (in Chinese)
- [28] 王建龙, 徐景茂, 顾金才, 等. 爆炸平面波作用下大跨度洞室的抗爆性能研究[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(5):1613-1621, 1629.
- Wang J L, Xu J M, Gu J C, et al. Study on antiknock performance of large span cavern under explosive plane wave[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(5):1613-1621, 1629. (in Chinese)
- [29] 李述涛, 刘晶波, 宝鑫, 等. 爆炸地冲击作用下深埋地下结构模型试验研究[J]. 建筑结构学报, 2023, 44(5):89-100.
- Li S T, Liu J B, Bao X, et al. Model test of deep underground structure under ground shock induced by explosion[J]. Journal of Building Structures, 2023, 44(5):89-100. (in Chinese)
- [30] Bao X, Li Sh T, Liu J B, et al. Experimental study of deep-burial underground structures subjected to multiple 45° side-top far-field explosions[J]. International Journal of Impact Engineering, 2023, 173:104432.
- [31] Zhang Z, Zhou C B, Remennikov A, et al. Dynamic response and safety control of civil air defense tunnel under excavation blasting of subway tunnel[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 112:103879.
- [32] 马林建, 周振中, 孙博. 大跨度被覆结构爆炸荷载分布规律研究[J]. 岩土工程技术, 2008, 22(6):295-298.
- Ma L J, Zhou Z Z, Sun B. Distribution rule of blast loads on large-span compound structure[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2008, 22(6):295-298. (in Chinese)
- [33] 洪武, 周健南, 徐迎, 等. 拱形结构爆炸作用荷载分布规律研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(11):3407-3413, 3418.
- Hong W, Zhou J N, Xu Y, et al. Research on distribution laws of blast load on arch structure[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(11):3407-3413, 3418. (in Chinese)
- [34] Liu G K, Wang W, Liu R C, et al. Deriving formulas of loading distribution on underground arch structure surface under close-in explosion[J]. Engineering Failure Analysis, 2020, 115:104608.
- [35] 赵德辉, 田大战, 张伟成. 武器爆炸作用下地下洞库坑道动力响应数值模拟分析[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2007, 8(5):52-55.
- Zhao D H, Tian D Z, Zhang W C. An analysis of numerical simulation under condition of blast[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2007, 8(5):52-55. (in Chinese)
- [36] 邓春梅, 许金余, 沈刘军. 装药爆炸下地下拱形结构变形及破坏特征分析[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2007, 8(5):534-537.
- Deng C M, Xu J Y, Shen L J. Deformation and damage characteristics analysis of underground arch structure subjected to subsurface blast[J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2007, 8(5):534-537. (in Chinese)
- [37] 高全臣, 刘凯文, 聂宏朋, 等. 地下拱形结构对侵彻爆炸的响应效应模拟研究[C]//第七届全国工程结构安全防护学术会议论文集. 宁波: 宁波大学, 2009: 154-159.
- Gao Q C, Liu K W, Nie H P, et al. Simulation of response effect of underground arch structure to penetration explosion[C]//Proceedings of the 7th National Conference on Safety Protection of Engineering Structures. Ningbo: Ningbo University, 2009: 154-159. (in Chinese)
- [38] 冯慧平, 刘洪兵, 左兴, 等. 地下坑道对其临界震塌爆距处钻地武器爆炸载荷的动力响应[J]. 爆炸与冲击, 2014, 34(5):539-546.
- Feng H P, Liu H B, Zuo X, et al. Dynamic response of underground tunnel to explosive loading from penetration weapons in the critical collapse distance[J]. Explosion and Shock Waves, 2014, 34(5):539-546. (in Chinese)
- [39] 孙惠香, 许金余. 爆炸荷载作用下地下结构与围岩动力相互作用研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(增2):148-151.
- Sun H X, Xu J Y. Dynamic action study between structure and rock of underground structure subjected to blast load[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(Sup2):148-151. (in Chinese)
- [40] 孙惠香, 路锋, 迟维胜, 等. 爆炸冲击波作用下围岩与被覆结构的动力相互作用[J]. 爆炸与冲击, 2017, 37(4):670-676.

- Sun H X, Lu F, Chi W S, et al. Dynamic interaction between surrounding rock and initial supporting structure subjected to explosion shock wave[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2017, 37(4): 670-676. (in Chinese)
- [41] 吴亮, 卢文波, 章克凌, 等. 侵彻爆炸荷载作用下坑道衬砌破坏机理及影响因素分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(增1): 4900-4904.
- Wu L, Lu W B, Zhang K L, et al. Analysis of affecting factors and failure mechanism of concrete lining under explosion loading[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(Sup1): 4900-4904. (in Chinese)
- [42] 孙惠香, 许金余, 李庆. 爆炸荷载作用下地下结构破坏模式研究[J]. *弹箭与制导学报*, 2011, 31(5): 89-92, 98.
- Sun H X, Xu J Y, Li Q. The failure mode study of underground structure subjected to blast load[J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2011, 31(5): 89-92, 98. (in Chinese)
- [43] Mandal J, Agarwal A K, Goel M D. Numerical modeling of shallow buried tunnel subject to surface blast loading[J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2020, 34(6): 4020106.
- [44] 罗军洪, 刘宏伟, 林振荣, 等. 多因素影响下大跨度地下洞室抗爆稳定性分析[J]. *爆破*, 2022, 39(3): 181-189.
- Luo J H, Liu H W, Lin Z R, et al. Analysis of anti-explosion stability of large-span underground chamber under multi-factor effects[J]. *Blasting*, 2022, 39(3): 181-189. (in Chinese)
- [45] 王光勇, 李桂林, 张素华. 在动载作用下衬砌洞室抗爆加固效果数值分析[J]. *爆破器材*, 2009, 38(6): 5-8.
- Wang G Y, Li G L, Zhang S H. Numerical analysis of the anti-explosion anchored effects of lined tunnel under dynamic loads[J]. *Explosive Materials*, 2009, 38(6): 5-8. (in Chinese)
- [46] 霍庆, 王逸平, 刘光昆, 等. 地下拱形结构侧顶爆炸的破坏模式及影响因素[J]. *兵工学报*, 2021, 42(增1): 105-116.
- Huo Q, Wang Y P, Liu G K, et al. Failure mode and influencing factors of underground arched structure subjected to side top blast[J]. *Acta Armamentarii*, 2021, 42(Sup1): 105-116. (in Chinese)
- [47] Wu J Q, Zhou J N, Xu Y, et al. Dynamic responses of blast-loaded shallow buried concrete arches strengthened with BFRP bars[J]. *Materials*, 2022, 15(2): 535.
- [48] 孙惠香, 许金余, 朱国富, 等. 爆炸作用下跨度对地下结构破坏形态的影响[J]. *空军工程大学学报(自然科学版)*, 2013, 14(2): 90-94.
- Sun H X, Xu J Y, Zhu G F, et al. The influence of span for deep underground arch structure on failure modes under blast loading[J]. *Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition)*, 2013, 14(2): 90-94. (in Chinese)
- [49] 马林建, 刘新宇, 马千里, 等. 爆炸荷载作用下岩石介质中大跨度被覆结构动力响应分析[J]. *煤炭学报*, 2011, 36(增2): 416-420.
- Ma L J, Liu X Y, Ma Q L, et al. On dynamic responses of large-span revetment structures subjected to blast loads in rock medium[J]. *Journal of China Coal Society*, 2011, 36(Sup2): 416-420. (in Chinese)
- [50] 张宇, 黄必斌. 大跨度岩洞跨度界定与跨度效应探讨[J]. *地下空间与工程学报*, 2015, 11(1): 39-47.
- Zhang Y, Huang B B. Discussion on the span-classification of large-span cavern and the span-effects[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2015, 11(1): 39-47. (in Chinese)
- [51] 孔大庆, 孙惠香, 康婷, 等. 岩体特性对围岩与结构动力相互作用影响[J]. *空军工程大学学报(自然科学版)*, 2014, 15(6): 77-81.
- Kong D Q, Sun H X, Kang T, et al. The influence of rock characteristics on dynamic interaction between adjoining rock and structure subjected to blast loading[J]. *Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition)*, 2014, 15(6): 77-81. (in Chinese)
- [52] Mandal J, Goel M D, Agarwal A K. Dynamic response of underground tunnel in soft soil under surface and sub-surface explosion[J]. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 2022, 27(2): 4021081.
- [53] 唐廷, 周健南. 地震后地下受损拱结构的抗爆炸能力研究[J]. *兵工学报*, 2017, 38(9): 1736-1744.
- Tang T, Zhou J N. Study of anti-blasting ability of damaged underground arch structure after earthquake[J]. *Acta Armamentarii*, 2017, 38(9): 1736-1744. (in Chinese)
- [54] 刘绍镡, 孙惠香, 王晓龙, 等. 不同跨度地下洞室弹体侵彻效应数值模拟研究[J]. *弹箭与制导学报*, 2017, 37(4): 51-54, 59.
- Liu S L, Sun H X, Wang X L, et al. Research on the numerical simulation of penetration effect of underground cavity with different spans[J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2017, 37(4): 51-54, 59. (in Chinese)
- [55] Dhamne R, Mishra S, Kumar A. Numerical study of the cross-sectional shape of shallow tunnels subjected to

- impact and blast loading [C]//National Conference on Prospects & Retrospect in Engineering Geology, Geophysics & Instrumentation. Hyderabad: [s.n.], 2018.
- [56] 张文堂, 孙惠香, 袁英杰, 等. 基于 SPH-FEM 方法的地下结构侵彻爆炸数值模拟研究[J]. 弹箭与制导学报, 2023, 43(1):77-84, 90.
Zhang W T, Sun H X, Yuan Y Y, et al. Numerical simulation of underground structure penetration and explosion based on SPH-FEM method[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2023, 43(1): 77-84,90. (in Chinese)
- [57] TM5-855-1. Fundamentals of protective design for conventional weapons [S]. Vicksburg: US Army Engineers Waterways Station, 1986.
- [58] 李夕兵. 岩石动力学基础与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
Li X B. Rock dynamics fundamentals and applications [M]. Beijing: Science Press, 2014. (in Chinese)
- [59] TM5-1300. Structures to resist the effects of accidental explosions[S]. Washington: Departments of the army, the navy and the air force, 1990.
- [60] Wong F S, Weidlinger P. Design of underground protective structures[J]. Journal of Structural Engineering, 1983, 109(8):1972-1979.
- [61] Weidlinger P, Hinman E. Analysis of underground protective structures[J]. Journal of Structural Engineering, 1988, 114(7):1658-1673.
- [62] 方秦, 柳锦春. 地下防护结构[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.
Fang Q, Liu J C. Underground protective structures [M]. Beijing: China Water Power Press, 2010. (in Chinese)
- [63] Flathau W J, Mlakar P F, Bryant L M. Single-degree-of-freedom analysis of buried arches loaded by conventional ground shock [C]//Proceedings of International Symposium on Interaction of Non-Nuclear Munitions with Structures. Mannheim: Bundeswehr, 1987: 285-307.
- [64] Chen H L, Xia Z C, Zhou J N, et al. Dynamic responses of underground arch structures subjected to conventional blast loads: Curvature effects [J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2013, 13 (3) : 322-333.
- [65] Costantino C J, Vey E. Response of buried cylinders encased in foam[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1969, 95(5):1159-1179.
- [66] 张宇, 范华林, 金丰年. 爆炸作用下拱形结构反射系数计算方法研究[J]. 工程力学, 2012, 29(9):278-283.
Zhang Y, Fan H L, Jin F N. Study of reflective coefficients of underground protective arches under blast loads [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29 (9) : 278-283. (in Chinese)
- [67] 周健南, 徐迎, 金丰年, 等. 爆炸作用下地下直墙拱结构动荷载分布规律试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(11):2283-2289.
Zhou J N, Xu Y, Jin F N, et al. Dynamic test of interface stress distribution on a buried straight-wall arch structure subjected to blast loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(11) : 2283-2289. (in Chinese)
- [68] 王鹏, 周健南, 金丰年, 等. 土中拱形结构抗爆试验设计与分析[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2013, 14(6):636-640.
Wang P, Zhou J N, Jin F N, et al. Design and analysis of blast test of underground arch structure[J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2013, 14(6) : 636-640. (in Chinese)
- [69] 周健南, 范华林, 徐迎, 等. 爆炸荷载作用下地下拱形结构荷载的实用计算方法探讨[C]//第七届全国工程结构安全防护学术会议论文集. 宁波: 宁波大学, 2009:140-145.
Zhou J N, Fan H L, Xu Y, et al. Discussion on practical calculation method of load of underground arch structure under explosion load [C]//Proceedings of the 7th National Conference on Safety Protection of Engineering Structures. Ningbo: Ningbo University, 2009: 140-145. (in Chinese)
- [70] 金丰年, 袁小军, 周健南, 等. 爆炸荷载作用下大跨度动被覆结构荷载分布规律[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2011, 12(6):635-642.
Jin F N, Yuan X J, Zhou J N, et al. Distribution law of blast loads on large-span compound structure [J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2011, 12(6) : 635-642. (in Chinese)
- [71] 张宇, 李国强, 王志亮. 爆炸作用下地下岩石结构界面反射参数探讨[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(5):991-1001.
Zhang Y, Li G Q, Wang Z L. Discussion on reflection coefficient for buried rock structure subjected to explosive load [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(5):991-1001. (in Chinese)
- [72] 曹志远, 曾三平. 爆炸波作用下地下防护结构与围岩的非线性动力相互作用分析[J]. 爆炸与冲击, 2003, 23(5):385-390.

- Cao Z Y, Zeng S P. Nonlinear dynamic interaction between underground structure and surrounding medium under blast loading [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2003, 23(5):385-390. (in Chinese)
- [73] 房莹光. 岩土介质与结构动力相互作用理论及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.
Fang Y G. Theory and application of dynamic interaction between rock and soil medium with structure [M]. Beijing: Science Press, 2005. (in Chinese)
- [74] Kiger S A, Dallriva F D, Hall R L. Dynamic skin-friction effects on buried arches [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1989, 115(7):1768-1781.
- [75] 彭立生, 孟吉复, 朱以文. 拱在爆炸振动作用下的计算 [J]. *武汉水利电力学院学报*, 1987, 20(1):53-59.
Peng L S, Meng J F, Zhu Y W. The calculation of arches under explosive vibration [J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 1987, 20(1):53-59. (in Chinese)
- [76] Chen H L, Jin F N, Fan H L. Elastic responses of underground circular arches considering dynamic soil-structure interaction: A theoretical analysis [J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2013, 29(1):110-122.
- [77] Zhou H Y, Du W Z, Wang X J, et al. Shock environment assessment of underground arch-wall structures subjected to ground shock [J]. *Journal of Structural Engineering Mechanics*, 2022, 148(8):4022034.
- [78] 杨昇田, 曹志远. 地下结构与岩体动力相互作用的一种解析解 [J]. *应用数学和力学*, 1983, 4(6):861-868.
Yang S T, Cao Z Y. An analytical solution for underground structure-country rock dynamic interaction [J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 1983, 4(6):861-868. (in Chinese)
- [79] Wong K C, Shah A H, Datta S K. Dynamic stresses and displacements in a buried tunnel [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1985, 111(2):218-234.
- [80] 赵以贤, 王良国. 爆炸载荷作用下地下拱形结构动态分析 [J]. *爆炸与冲击*, 1995, 15(3):201-211.
Zhao Y X, Wang L G. Dynamic analysis of responses of an underground arc structure to explosive loading [J]. *Explosion and Shock Waves*, 1995, 15(3):201-211. (in Chinese)
- [81] 赵以贤. 爆炸载荷作用下地下拱形结构应力分析 [J]. *南京理工大学学报*, 1995, 19(6):561-564.
Zhao Y X. Stress analysis of an underground arc structure respond to explosive load [J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 1995, 19(6):561-564. (in Chinese)
- [82] Stevens D J, Krauthammer T, Chandra D. Analysis of blast-loaded buried RC arch response. Part II: application [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1991, 117(1):213-234.
- [83] 范鹏贤, 王明洋, 冯淑芳, 等. 直墙拱顶地下结构受爆炸地震波作用的动力响应 [J]. *振动与冲击*, 2014, 33(22):183-187.
Fan P X, Wang M Y, Feng S F, et al. Dynamic response of underground straight-wall-round-arch structure subjected to explosion seismic wave [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2014, 33(22):183-187. (in Chinese)

(本文编辑:周小潭)