

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2020.03.003

爆炸载荷下邻近巷道围岩破坏规律试验研究*

刘康¹, 郭东明^{1,2}, 陈亮亮¹, 张帅¹, 刘宝印¹

(1. 中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京 100083;

2. 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 北京 100083)

摘要: 为了深入分析爆炸载荷下邻近巷道围岩破坏规律, 采用相似模型试验对围岩破坏形态展开了详细研究。试验结果表明: 巷道围岩的破坏区域主要分布在迎爆侧直墙、巷道顶底板和背爆侧直墙底角, 破坏形态为自由面诱发裂纹并沿炮孔径向扩展。结合理论分析发现: 强压缩波传播过程中, 迎爆侧直墙至起拱点区域受竖向拉伸应力作用, 该区域自由面单元拉裂并沿最小抵抗线方向扩展向炮孔; 背爆侧直墙底角尖端指向顺应力波传播方向是该区域诱发裂纹的关键因素; 在上覆岩层重力作用下, 顶底板形成受拉损伤界面。当受到反射波和卸载波综合作用时, 顶底板微观损伤发展成为宏观裂纹。

关键词: 爆炸载荷; 邻近巷道; 裂纹扩展; 扩展机理

中图分类号: TD23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2020)03-0015-06

Experimental Study on Surrounding Rock Failure Law of Adjacent Roadway Under Explosive Loading

LIU Kang¹, GUO Dong-ming^{1,2}, CHEN Liang-liang¹, ZHANG Shuai¹, LIU Bao-yin¹

(1. School of Mechanic & Civil Engineering, China University of Mining & Technology,

Beijing 100083, China; 2. State Key Laboratory of Deep Rock and Soil Mechanics and

Underground Engineering, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to in-depth analyze the damage law of surrounding rock in an adjacent tunnel under explosive loading, the damage morphology of surrounding rock was studied using similar model experiments. The test results show that the surrounding rock damage areas of the tunnel are mainly distributed in the straight wall of face blasting side, tunnel top, tunnel floor and bottom angle of back blasting side. The failure morphology is that cracks are induced in the free surface and grow along radial direction of blasthole. Combined with theoretical analysis, during the propagation process of strong compression wave, the area from straight wall to the arch point of explosion side is subjected to vertical tensile stress, and free surface element of this area is cracked and extended to the blasthole along the direction of minimum resistance. The direction of bottom corner in the straight wall is the key factor for induced crack in the region. The tensile damage interface is formed under the gravity of overburden at the top and bottom plates under the gravity of overburden rock mass. Under the action of reflected wave and unloading wave, microscopic damage is generated into the macrocracks.

Key words: explosion load; adjacent tunnel; crack growth; growth mechanism

收稿日期: 2020-03-23

作者简介: 刘康(1988-), 男, 博士后, 主要从事动静载荷下巷(隧)道围岩损伤演化规律及机理研究, (E-mail) liukang0512@163.com。

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0804204-04); 国家自然科学基金面上项目(51274204); 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-12-0965)

当前, 大多数穿山隧道、煤矿岩巷等, 由于岩性坚硬, 采用掘进机存在能耗高、磨损严重等优点, 仍普遍采用钻爆法施工^[1]。然而, 钻爆法施工产生的爆破振动可能危及邻近巷道的安全运行^[2]。虽然

合理的安全间距能有效地避免爆破振动的影响^[3],但有时很难完全避免危险间距内施工,如流潭隧道等^[4]、招宝山隧道和竖向净距仅 2.7 m 的成渝高铁新中梁山隧道^[5,6]。

为了保证邻近爆破振动影响下小间距既有巷(隧)道的安全,许多学者开展了大量相关研究。理论分析方面,邻近爆炸载荷下巷道围岩响应一般简化为应力波下的动应力集中,着重研究巷道围岩动应力集中系数及影响因素^[7-9];数值分析方面,一般通过 LS-DYNA 等数值分析软件,以有效应力和质点振速为分析指标,模拟研究爆炸载荷下邻近巷道的动态扰动^[10-12];实验室试验方面,一些学者将关注点放在爆炸载荷下邻近巷道围岩裂纹扩展规律研究^[13,14]。上述研究发现巷道迎爆侧直墙至起拱点区域为最主要扰动区,另外,在背爆侧底角区域,由于应力集中,往往诱发裂纹扩展^[13]。

上述研究内容主要分为两方面:一是假设围岩完整,研究爆炸载荷下邻近巷道围岩的动态响应;二是认为爆炸载荷下邻近巷道围岩破坏表现为裂纹的扩展贯穿,详细研究了爆炸载荷下围岩裂纹扩展规律,而未考虑巷道原岩应力场等因素的影响。另外,实际巷道围岩体相当复杂,且不同巷道的围岩地质条件差异较大,很难获得一般性规律,且巷道破坏时存在很大危险性,很难实现现场观测,因此,爆炸载荷下邻近巷道围岩破坏形态的相关研究仍较少^[15]。为了更为真实地还原爆炸载荷下邻近巷道围岩破坏形态,深入分析围岩破坏规律,本文采用相似模型试验展开了详细研究。

1 模型制作

通过相似理论分析,综合试验模型的可操作性等因素,确定几何相似比为 1:50,模型材料及配比为石膏:细砂:水 = 1:6:1。本文采用直径 6 mm 的工业瞬发电雷管起爆模拟邻近爆炸载荷,雷管数量的选取主要保证现象的明显,以呈现理想的破坏形态,不做相似分析。模型尺寸 800 mm × 800 mm × 300 mm,下部断面为矩形,尺寸为 160 mm × 80 mm,上部断面为半圆拱,半径为 80 mm。为了保证围岩的均质性和密实性,模型连续浇筑、分层振捣。采用涂抹润滑油的玻璃棒预留 8 mm 的孔洞模拟炮孔;采用木模板和 PVC 管制作的简易巷道模具预留直墙拱形孔洞模拟巷道;整个模型模具采用木模板制作。由于模型尺寸较小,以 50 mm 厚的黄泥作为边界条件,吸收应力波,以避免应力波反射影响试验结果,如图 1 所示。

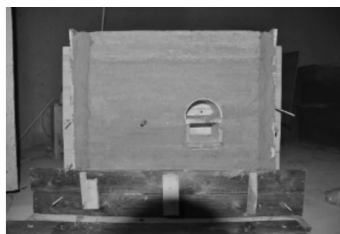


图 1 试验模型图

Fig. 1 Test model

2 相似模型试验结果分析

为充分了解不同方位爆炸载荷对邻近巷道围岩破坏规律的影响,每个模型共进行了三次不同方位的爆破试验:左侧平行爆破、左上方爆破和正上方爆破,每次爆破后拍摄图片,以对比分析三次爆破效果。另外,为了保证试验结果的可靠性,进行了三组重复试验,取其中试验现象较为明显且试验结果重复性高的一组进行分析。

2.1 第一次左侧平行爆破

一般炮掘巷道与既有巷道平行,故首次爆破位置选择巷道的左侧,并在同一水平上,爆破结果见图 2。从图中可看到,爆破后,巷道周边区域出现明显的裂纹扩展,裂纹扩展区域分布在拱顶(裂纹编号为 1#)、迎爆侧直墙(裂纹编号为 2#)和底板靠近迎爆侧底角区域(裂纹编号为 3#)。

图 2(a) 为拱顶区域的放大图像,从图中可看到,1#裂纹起裂点靠近拱顶自由面的中心位置,裂纹整个扩展轨迹可分为三段:第一阶段近似炮孔环向;第二段偏转向炮孔径向;第三段为竖直方向。很明显,裂纹扩展的诱因是爆炸载荷,而裂纹扩展轨迹之所以变化,与上覆岩层重力作用下围岩应力场有很大关联。因此,拱顶裂纹的扩展是爆炸载荷和上覆岩层重力综合作用的结果。2#裂纹位于迎爆侧直墙靠近起拱点区域[见图 2(b)],且基本沿水平方向扩展向炮孔位置,因此,初步判断爆炸载荷对 2#裂纹的扩展过程起决定性作用。3#裂纹初始扩展轨迹为竖直方向,并逐渐向炮孔环向方向偏转,但偏转角度较小。

通过上述分析可初步确定,巷道顶底板裂纹的扩展是爆炸载荷和上覆岩层重力综合作用的结果,而迎爆侧直墙裂纹扩展主要源于爆炸载荷的作用。另外,裂纹扩展的直接诱因是爆炸载荷,且扩展起始位置均为巷道自由面。

2.2 第二次左上方爆破

第二次爆破炮孔位置选择巷道的左上方。爆破

后,巷道拱形区域出现了新的裂纹(5#裂纹),如图 3 所示,5#裂纹位于第二次爆破的迎爆侧,且扩展轨迹基本沿第二次爆破炮孔的径向方向;在背爆侧底角位置出现了新的裂纹(4#裂纹),4#裂纹初始轨迹沿水平方向,该方向扩展应该在首次爆破后已经出现,只是

扩展现象不明显,很难观测到,第二次爆破后,裂纹宽度增加,出现明显的扩展轨迹。同时,第二次爆炸载荷作用下,4#裂纹偏转向炮孔径向继续扩展。第二次爆破与第一次相比,存在相似的规律,即诱发的裂纹起始点均为巷道自由面,且沿爆破炮孔径向扩展。

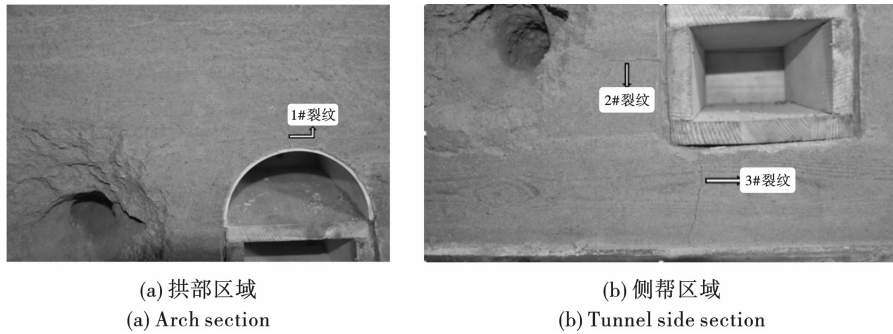


图 2 左侧平行爆破

Fig. 2 The left side parallel explosion



图 3 斜上方爆破

Fig. 3 The explosion above the top left of tunnel

2.3 第三次正上方爆破

第三次爆破炮孔位置选择巷道的正上方,第三次爆破对巷道的影晌主要包括两方面:一是 2#裂纹的扩展轨迹,2#裂纹扩展方向偏转向第三次爆破的炮孔径向;二是 2#裂纹和 4#裂纹扩展轨迹变得更加清晰,即裂纹宽度明显增加,见图 4。

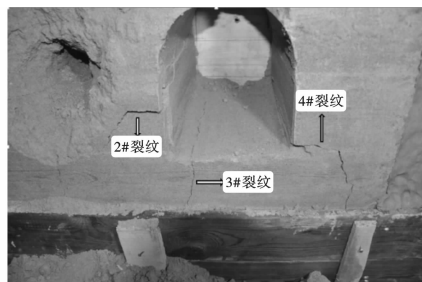


图 4 正上方爆破

Fig. 4 The explosion above the top of tunnel

三次不同方位爆破试验结果表明,爆炸载荷作用下邻近巷道围岩的破坏以裂纹扩展为主,且裂纹的起始点均为自由面。诱发裂纹区域与爆源方位有

很大关联,其中,巷道围岩迎爆侧、巷道顶底板和背爆侧底角是裂纹的主要扩展区域,且诱发裂纹主要沿炮孔径向。另外,通过试验现象可知,尽管在上覆岩层重力或者构造应力作用下,巷道尚未表现明显的破坏现象,但在爆炸载荷等偶然荷载综合作用下,巷道围岩很可能出现瞬时的裂纹扩展,甚至发生灾难性的事故,因此,进行邻近爆破施工时,应对既有巷道或建筑物进行必要的风险评估。

3 巷道围岩裂纹扩展机理分析

由于不同方位爆破,诱发裂纹的扩展规律具有相似性,且平行爆破较为常见,诱发裂纹相对较多,因此,以第一次平行爆破为例,对爆炸载荷下邻近巷道围岩裂纹扩展机理展开详细研究。

3.1 迎爆侧直墙诱发裂纹

巷道迎爆侧是邻近爆炸载荷的初始作用区域,根据最小抵抗线理论,扰动也最为明显,炸药爆炸后,强压缩波作用于邻近巷道围岩。当间距较小时,围岩体可近似看作受弯梁结构,在强压缩波作用下,巷道靠近自由面区域岩体单元受到竖向拉应力作用,诱发裂纹,扩展向炮孔方向,见图 5。

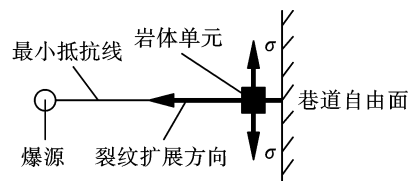


图 5 迎爆侧裂纹扩展机理分析

Fig. 5 The mechanism analysis about crack growth in the face blasting side

3.2 背爆侧直墙底角诱发裂纹

直墙拱形巷道两底角为几何尖端,邻近爆炸载荷作用下,产生应力集中,成为主要扰动区域。以常用的质点振速为分析指标,大量的研究表明,迎爆侧直墙底角质点振速峰值远大于背爆侧直墙底角,但根据平行爆破试验结果,背爆侧底角反而诱发了裂纹,迎爆侧底角未发现明显的裂纹扩展。为了合理解释上述现象,绘制了图6。已知爆炸载荷作用下,岩体单元径向压缩,产生切向拉伸应力,诱发裂纹沿炮孔径向方向扩展,因此规定炮孔径向为轴线,应力波传播方向为正方向,简称为炮孔径向。两直墙底角的尖端指向以角平分线为轴线,定义直墙底角尖端指向与炮孔径向夹角为 θ ,当 $\theta=0^\circ$ 时,应力波完全顺着尖端指向传播,尖端两自由面应力波反射形成最大的拉伸应力,裂纹最易扩展;当 $\theta>90^\circ$ 时,为逆炮孔径向方向,不利于尖端扩展,当 $\theta<90^\circ$ 时,为顺炮孔径向方向,利于尖端扩展。很明显,背爆侧底角尖端顺炮孔径向,相较于迎爆侧直墙底角,爆炸载荷下更易诱发裂纹。

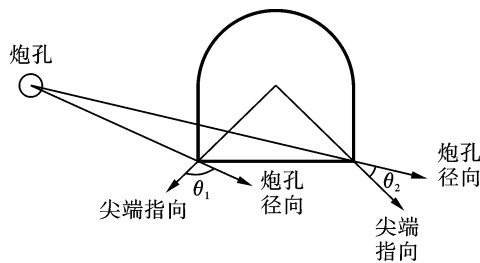


图6 直墙底角裂纹扩展机理分析

Fig. 6 The mechanism analysis about crack growth in the bottom angle

3.3 顶底板诱发裂纹

由实验结果可知,顶底板诱发裂纹与上覆岩层

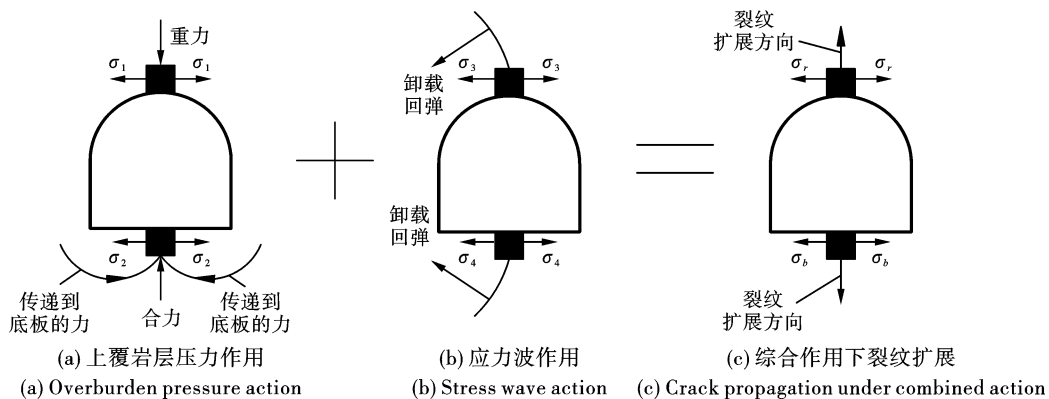


图7 爆炸载荷和上覆岩层压力综合作用下巷道围岩受力分析

Fig. 7 The stress analysis of tunnel under the compression of overburden rock and explosive load

4 结论

(1) 相似模型试验结果表明,爆炸载荷作用下

重力和爆炸载荷有关。大量研究表明,顶板可简化为组合梁,在上覆岩层压力作用下,顶板向下弯曲,中性轴以下单元水平方向受拉,设为 σ_1 ,其中,自由面附近单元拉应力最大。已知,上覆岩层压力传播途径为,压力首先通过顶板传递到两帮,然后作用于巷道底板,如图7(a),在两侧挤压力作用下,自由面附近单元受水平拉应力作用,设为 σ_2 ,底板向上弯曲,严重时出现底鼓现象。另外,大量研究表明,当围岩侧压力系数小于1时,顶底板中将出现拉应力,极易引起底板受拉破坏^[16]。

上述分析可知,巷道在上覆岩层重力的作用下,巷道顶底板受拉,形成拉应力损伤界面,尤其顶底板中点附近可能拉裂。当应力波传播到损伤界面时,发生应力波反射,产生水平方向的拉应力;另外,应力波传播过程中将在围岩中储存弹性应变能,当弹性应变能释放时,形成卸载波,也将围岩中产生水平方向拉应力,一般来说,卸载波的卸载回弹效应往往在原有损伤界面表现更为明显。在卸载波和损伤界面反射波作用下,顶底板的拉应力分别为 σ_3 和 σ_4 ,见图7(b)。根据叠加原理,爆炸载荷和围压作用下:

顶板单元拉应力为

$$\sigma_r = \sigma_1 + \sigma_2 \quad (1)$$

底板单元拉应力为

$$\sigma_b = \sigma_2 + \sigma_4 \quad (2)$$

当顶板或底板单元动态拉应力超过动态抗拉强度时,顶板或底板诱发宏观裂纹,见图7(c)。实验研究中,底板的拉裂纹没有出现在底板中点,而是出现在底板靠近迎爆侧底角附近,可能是模型浇筑过程中该区域出现原始损伤,应力波在原始损伤处发生反射,从而诱发裂纹扩展。

邻近巷道围岩的破坏以裂纹扩展为主,且裂纹的起始点均为自由面。而裂纹扩展区域与爆源方位有很大关联,其中,巷道围岩迎爆侧、巷道顶底板和背爆

侧底角是主要裂纹扩展区,且诱发裂纹主要沿炮孔径向。

(2)不同方位爆破,邻近巷道围岩破坏往往发生在首次破坏位置,但裂纹扩展方向往往偏向当次爆破炮孔径向和环向。

(3)强压缩波作用是迎爆侧最小抵抗线方向拉裂纹产生的主要原因;相较于迎爆侧直墙底角,背爆侧底角尖端指向顺炮孔径向是诱发裂纹的关键因素;上覆岩层重力作用下,顶底板往往产生损伤界面,当爆炸载荷作用于原损伤界面时,损伤界面发展为宏观裂纹。

参考文献 (References)

- [1] 郭东明,刘康,杨仁树,等.动静荷载对邻近巷道裂纹扰动的模拟实验[J].爆炸与冲击,2016,36(3):297-304.
- [1] GUO Dong-ming, LIU Kang, YANG Ren-shu, et al. Simulated experiment of disturbance effect on crack defects of adjacent tunnel under dynamic and static load[J]. Explosion and Shock Waves, 2016, 36(3):297-304. (in Chinese)
- [2] 郭东明,刘康,杨仁树,等.爆炸冲击荷载下相邻巷道裂隙扩展机理模拟试验[J].振动与冲击,2016,35(2):178-183.
- [2] GUO Dong-ming, LIU Kang, YAN Ren-shu, et al. Simulation experiments on the mechanism of adjacent tunnel crack extension induced by explosion load[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(2):178-183. (in Chinese)
- [3] 毕继红,钟建辉.邻近隧道爆破震动对既有隧道影响的研究[J].工程爆破,2004,10(4):69-73.
- [3] BI Ji-hong, ZHONG Jian-hui. The research about the effect of the adjacent tunnel blasting shaking on the tunnel[J]. Journal of Engineering Blasting, 2004, 10(4):69-73. (in Chinese)
- [4] 孔德森,孟庆辉,张伟伟,等.爆炸荷载作用下地铁隧道的冲击反应研究[J].振动与冲击,2012,31(12):68-72.
- [4] KONG De-seng, MENG Qing-hui, ZHANG Wei-wei, et al. Shock responses of a metro tunnel subjected to explosive loads[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(12):68-72. (in Chinese)
- [5] 易长平,卢文波.开挖爆破对邻近隧洞的震动影响研究[J].工程爆破,2004,10(1):1-12.
- [5] YI Chang-ping, LU Wen-bo. A study of the effect of blasting vibration on adjacent tunnel[J]. Engineering Blasting, 2004, 10(1):1-12. (in Chinese)
- [6] 袁红所,张家铭,董宇,等.小净距邻近营业线隧道爆破施工研究[J].爆破,2017,34(1):57-60.
- [6] YUAN Hong-suo, ZHANG Jia-ming, DONG Yu, et al. Research of tunnel blasting construction adjacent to business line[J]. Blasting, 2017, 34(1):57-60. (in Chinese)
- [7] 施高萍,祝江鸿,李保海,等.矩形巷道孔边应力的弹性分析[J].岩土力学,2014,35(9):2587-2061.
- [7] SHI Gao-ping, ZHU Jiang-hong, LI Bao-hai, et al. Elastic analysis of hole-edge stress of rectangular roadway[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(9):2587-2061. (in Chinese)
- [8] 梁建文,张浩, VINCENT W Lee. 平面P波入射地下洞室群动应力集中问题解析解[J].岩土工程学报,2004,26(6):815-819.
- [8] LIANG Jian-wen, ZHANG Hao, VINCENT W Lee. An analytical solution for dynamic stress concentration of underground cavities under incident plane P waves[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(6):815-819. (in Chinese)
- [9] 李兴华,龙源,纪冲,等.爆破地震波作用下隧道围岩动应力集中系数分析[J].岩土工程学报,2013,35(3):378-382.
- [9] LI Xin-hua, LONG Yuan, JI Chong, et al. Dynamic stress concentration factor for tunnel surrounding rock under blasting seismic waves[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(3):378-382. (in Chinese)
- [10] 贾磊,解咏平,李慎奎.爆破振动对邻近隧道衬砌安全的数值模拟分析[J].振动与冲击,2015,34(11):173-177.
- [10] JIA Lei, XIE Yong-ping, LI Shen-kui. Numerical simulation for impact of blasting vibration on nearby tunnel lining safety[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(11):173-177. (in Chinese)
- [11] 赵晓,高志华,李鹏,等.爆破开挖作用下HD工程地下洞室围岩动力响应特性研究[J].爆破,2014,31(1):55-59.
- [11] ZHAO Xiao, GAO Zhi-hua, LI Peng, et al. Characteristics of dynamic response of surrounding rock induced by blasting excavation in underground[J]. Blasting, 2014, 31(1):55-59. (in Chinese)
- [12] 李宁,顾强康,张承客.相邻洞室爆破施工对已有洞室的影响[J].岩石力学与工程学报,2009,28(1):31-38.
- [12] LI Ning, GU Qing-kang, ZHANG Cheng-ke. Influence of blasting on excavation of a new tunnel adjacent to existing tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(1):30-38. (in Chinese)
- [13] 郭东明,刘康,杨仁树,等.爆破对邻近巷道背爆侧倾斜裂纹影响实验研究[J].采矿与安全工程学报,2015,32(1):99-104.
- [13] GUO Dong-ming, LIU Kang, YANG Ren-shu, et al. Experimental research on the influence of blasting on the inclined crack in the back-blasting side of nearby roadway[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2015, 32(1):99-104. (in Chinese)

- [14] 郭东明,刘康,杨仁树,等. 爆炸荷载对邻近巷道背爆侧裂纹的影响规律[J]. 煤炭学报,2014,39(12):2355-2361.
- [14] GUO Dong-ming, LIU Kang, YAN Ren-shu, et al. Effects of blast load on crack in back-blast side of adjacent tunnel[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(12):2355-2361. (in Chinese)
- [15] 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,2007,8(6):582-588.
- [15] CHEN Jian-jun, SUN Jun, LIN Jun-de, et al. Failure of rock openings under intensive explosion stress wave[J]. Journal of PLA University of Science and Technology, 2007,8(6):582-588. (in Chinese)
- [16] 唐治,潘一山,朱小景,等. 直墙拱形巷道围岩应力场分析[J]. 土木建筑与环境工程,2015,37(3):79-85.
- [16] TANG Ye, PAN Yi-shan, ZHU Xiao-jing, et al. Analysis on surrounding rock stress field of vertical wall arch roadway[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2015, 37(3):79-85. (in Chinese)

英文编辑:袁必和

(上接第7页)

参考文献 (References)

- [1] 中国建筑科学研究院. 建筑拆除管理政策研究[R]. 北京:中国建筑科学研究院,2014.
- [1] China Academy of Building Research. Researches on building demolition management policy[R]. Beijing: China Academy of Building Research, 2014. (in Chinese)
- [2] 谢先启. 拆除爆破技术的发展与展望[J]. 爆破,2019,36(2):1-12.
- [2] XIE Xian-qi. Development situation and trend of demolition blasting technology[J]. Blasting, 2019, 36(2):1-12. (in Chinese)
- [3] 金骥良,王中黔. 建筑物拆除爆破设计原理和方法[J]. 爆炸与冲击,1998(2):95-98.
- [3] JIN Yi-liang, WANG Zhong-qian. Design principle and method of building demolition blasting[J]. Explosion and Shock, 1998(2):95-98. (in Chinese)
- [4] 谢先启. 高耸构筑物控制爆破拆除技术及塌落震动研究[D]. 武汉:武汉科技大学,2004.
- [4] XIE Xian-qi. Study on control blasting demolition technology and collapse vibration of high - rise structure[D]. Wuhan: Wuhan Science & Technology University, 2004. (in Chinese)
- [5] 彭韬宇. 框架结构建筑物爆破拆除失稳倒塌分析及计算机模拟[D]. 宁波:宁波大学,2009.
- [5] PENG Tao-yu. Unstable analysis and collapse simulation of frame construction by blasting demolition[D]. Ningbo: Ningbo University, 2009. (in Chinese)
- [6] 徐钦明,王猛. 拆除爆破中梁柱结构失稳过程的求解[J]. 煤矿爆破,2009(4):7-11.
- [6] XU Qin-ming, WANG Meng. Solution to the instability process of beam-column structure in demolition blasting[J]. Coal mine blasting, 2009(4):7-11. (in Chinese)
- [7] 赵根,张文焯,李永池,等. 钢筋混凝土烟囱定向爆破参数与效果的 DDA 模拟[J]. 工程爆破,2006,12(3):19-21.
- [7] ZHAO Gen, ZHANG Wen-xuan, LI Yong-chi, et al. DDA numerical simulation of directional blasting parameters and effect in demolition of reinforced concrete chimney[J]. Engineering Blasting, 2006, 12(3):19-21. (in Chinese)
- [8] 贾永胜,谢先启,李欣宇,等. 建(构)筑物控制爆破拆除的仿真模拟[J]. 岩土力学,2008,29(1):285-288.
- [8] JIA Yong-sheng, XIE Xian-qi, LI Xin-yu, et al. Numerical simulation for demolition of structures[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(1):285-288. (in Chinese)
- [9] 言志信,刘培林,叶振辉. 框架剪力墙结构的定向爆破倒塌过程[J]. 爆炸与冲击,2011,31(6):647-652.
- [9] YAN Zhi-xin, LIU Pei-lin, YE Zhen-hui. Directional blasting collapse process of frame-shear wall structure[J]. Explosion and Shock, 2011, 31(6):647-652. (in Chinese)
- [10] 谢先启,姚颖康,贾永胜,等. 冷却塔爆破拆除失稳机制与变形破坏特征研究[J]. 爆破,2017,34(2):40-46.
- [10] XIE Xian-qi, YAO Ying-kang, JIA Yong-sheng, et al. Study on instability mechanism and deformation characteristics of hyperbolic cooling tower explosive demolition[J]. Blasting, 2017, 34(2):40-46. (in Chinese)
- [11] 王宇,姚颖康,贾永胜,等. 钢筋混凝土烟囱爆破拆除失稳下坐和空中断裂现象研究[J]. 爆破,2018,35(4):116-123.
- [11] WANG Yu, YAO Ying-kang, JIA Yong-sheng, et al. Phenomenon of downward crush and break in air of reinforced concrete chimneys in blasting demolition[J]. Blasting, 2018, 35(4):116-123. (in Chinese)
- [12] 姚颖康,孙金山,贾永胜,等. 压缩脆性介质爆破破坏时冲击荷载与初始应力卸载特征[J]. 振动与冲击,2019,38(24):257-266.
- [12] YAO Ying-kang, SUN Jin-shan, JIA Yong-sheng, et al. Characteristics of shock load and initial stress unloading in blasting of compressed brittle medium[J]. Shock and Vibration 2019, 38(24):257-266. (in Chinese)

英文编辑:李立峰