郭东明,刘　康,胡久羡,等.爆生气体对邻近硐室背爆侧预制裂纹影响机理[J].煤炭学报,2016,41(1):265-270.doi:10.13225/j.cnki.jccs.2015.1249

Guo Dongming,Liu Kang,Hu Jiuxian,et al.Experimental study on the effect mechanism of the explosion gas on the precrack in the back-blasting of adjacent tunnel[J].Journal of China Coal Society,2016,41(1):265-270.doi:10.13225/j.cnki.jccs.2015.1249

爆生气体对邻近硐室背爆侧预制裂纹影响机理

郭东明[1,2],刘　康[1],胡久羡[1],杨仁树[1,2],袁保森[1],赵晓娜[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: 采用动态焦散线实验方法,研究爆炸荷载作用下邻近硐室背爆侧裂纹扩展规律时发现,伴随爆生气体释放出现的弧线型应力集中区是爆生气体引起的主应力差峰值位置,与背爆侧裂纹的扩展有较大的关联。实验研究表明:炸药爆炸后,产生的应力波首先作用于硐室背爆侧裂纹,随后爆生气体产生的准静态应力作用于裂纹,对裂纹的扩展起主要作用,而卸载波主要作用于裂纹扩展后期,使裂纹出现翘曲现象。当弧线型应力集中区接近扩展中的裂纹时,裂纹扩展速度达到峰值,约等于弧线型应力集中区的移动速度,之后,裂纹尖端与弧线型应力集中区的相对距离基本不变,当该应力集中区越过裂纹尖端,裂纹扩展速度逐渐减小,最终止裂。裂纹尖端动态应力强度因子与裂纹扩展速度具有相似的变化规律,峰值动态应力强度因子出现在弧线型应力集中区越过裂纹尖端之前。基于该发现进行的研究证实了爆生气体对邻近巷道裂纹扩展的主导作用,深化了爆炸荷载对邻近巷道影响机理的研究。

关键词: 爆生气体;邻近硐室;背爆侧裂纹;扩展机理

中图分类号: TD235　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 0253-9993(2016)01-0265-06

Experimental study on the effect mechanism of the explosion gas on the precrack in the back-blasting of adjacent tunnel

GUO Dong-ming[1,2],LIU Kang[1],HU Jiu-xian[1],YANG Ren-shu[1,2],YUAN Bao-sen[1],ZHAO Xiao-na[1]

(1.*School of Mechanic & Civil Engineering,China University of Mining & Technology(Beijing),Beijing*　100083,*China*;2.*State Key Laboratory of Geomechanics and Deep Underground Engineering,Beijing*　100083,*China*)

Abstract: During the research about crack extension rule at the back-side of adjacent tunnel under the action of blasting load adopting the dynamic caustics experimental method,a relationship exists between the crack extension in back-side of tunnel to blasting and arc type stress concentration region which appears with the release of detonation gas.Study shows that after the explosion,the explosion stress wave acts on the crack in the back-side of tunnel firstly,then the quasi-static stress field produced by detonation gas acts on the crack,which plays a main role on the propagation of the crack.Finally,unloading wave acts on crack,and the crack warps.When the arc type stress concentration region moves near the tip of propagation crack,the crack extension velocity reaches to maximum,which equals to the velocity of wave front.Later the relative distance between the crack tip and arc type stress concentration region doesn't change basically.When the arc type stress concentration region extends cross the crack tip,the extension velocity gradually decreases,finally,the crack arrest.Similar changing rule happens on the dynamic stress intensity factor.Dynamic stress intensity factor reaches peak before the arc type stress concentration region runs across the crack tip.Research

收稿日期: 2015-08-26　**修回日期:** 2015-11-23　**责任编辑:** 常　琛
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51274204,51134025);教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-12-0965)
作者简介: 郭东明(1974—),男,江西新余人,副教授,博士生导师。E-mail:dmguocumtb@126.com

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

based on the findings confirms that the detonation gas plays a dominant role to the crack propagation in adjacent tunnel.The researches enable a better understanding on the impact mechanism of explosion load on neighboring tunnel.
Key words: detonation gas; adjacent tunnel; crack in back-side blasting; extension mechanism

随着经济的快速发展,地铁隧道工程进入蓬勃发展期。在隧洞开挖中,尽管机械开挖已取得较大进展[1],但钻爆法以其成熟技术及简便施工仍被广泛应用,而隧道普遍的双线平行布置使邻近隧道爆破开挖引起既有隧道扰动损伤[2]。尤其巷道围岩中存在各种缺陷时,损伤更加严重,如裂纹相互贯穿,产生局部的剥落,本来扰动较小的邻近巷道背爆侧裂纹缺陷处出现较大的裂纹扩展等,甚至诱发岩爆[3-5]。

邻近硐室爆破开挖对既有硐室的影响与爆破破坏参数关联较大,但由于岩石爆破破坏的瞬时性,无论采用理论计算还是试验方法,都难以得到相关参数;当前,针对岩石爆破破碎机理提出的 3 种假说仍有待进一步深化[6]。因此,在爆破荷载对邻近硐室扰动影响的研究中,采用的爆破荷载大多根据现场实测值进行了简化处理。如刘慧[7-8]、吴亮[9-10]、毕继红等[11]采用 ANSYS 软件,结合实测值,将爆破荷载曲线简化为三角形曲线,并将爆炸荷载以压力形式均匀分布于孔壁上,模拟邻近硐室爆破开挖对邻近隧道的影响,分析硐室质点振动速度、加速度和硐室周边应力场。另外,为了便于理论分析,刘殿魁[12]、盖秉政[13]等基于波动力学理论,将邻近硐室爆破对既有硐室的影响假设为半无限介质中爆炸应力波在孔洞周边绕射引起的动应力集中,分析了弹性波在孔洞处的绕射问题。

上述的分析将爆炸荷载对邻近硐室的影响简化为爆炸应力波作用于邻近硐室,重点分析了邻近硐室的动态响应。而一些学者基于爆生气体和应力波综合作用理论,对爆破破岩机理进行了深入探讨。赵新涛[14]采用 BCM 模型分析了爆生气体对岩体裂隙扩展的影响,并得出炸药爆炸产生的冲击波作用形成了孔壁附近的粉碎圈,爆生气体产生的准静态应力作用使原有裂隙扩展和新裂隙形成。李宁[15]采用动态接触界面模型分析了爆生气体对裂纹扩展的驱动作用,得出爆生气体主要作用与压裂过程。褚怀保等[16]通过模拟试验认为煤体中的爆破损伤是爆炸冲击波或应力波、爆生气体和瓦斯气体综合作用的结果。爆炸冲击波主要作用于近区,爆生气体和瓦斯气体准静态应力场作用于中远区。

笔者采用新型数字激光动态焦散线试验方法[17],探究爆炸荷载对邻近硐室影响问题时发现,伴随着炸药爆炸产生的爆生气体释放,出现弧线型的应力集中区,并向邻近巷道一侧移动,该弧线型集中区与背爆侧裂纹的扩展有较大关联。本文结合上述现象,基于爆生气体和应力波综合作用理论,对爆生气体作用下邻近硐室背爆侧裂纹缺陷的扩展机理进行了分析,进一步深化了邻近硐室爆破开挖对既有硐室影响机理的研究。

1 实验原理及模型设计

1.1 实验原理

新型数字激光动态焦散线实验系统[18]基于动态焦散线方法,可记录下爆炸荷载作用下裂纹扩展的整个过程以及扩展过程中每一时刻裂纹尖端产生的焦散斑——裂纹尖端应力集中区域的复杂变形状态通过光学的几何映射关系转换成的阴影光学图形,通过焦散斑的直径测量,可确定每一时刻裂纹尖端的动态应力强度因子。动态应力强度因子与裂纹尖端应力场大小呈正相关,反映了裂纹尖端应力集中程度的大小,动态应力强度因子公式[19]为

$$K_{\mathrm{I}}^{\mathrm{d}}=\frac{2\sqrt{2\pi}}{3\left|c_{\mathrm{t}}\right|dz_0}\left[\frac{3}{10\sin\left(\frac{2}{5}\pi\right)}\right]^{\frac{5}{2}}\left(\frac{D_{\mathrm{t}}}{\delta_{\mathrm{t}}}\right)^{\frac{5}{2}} \tag{1}$$

式中,$K_{\mathrm{I}}^{\mathrm{d}}$ 为裂纹尖端Ⅰ型动态应力强度因子;c_{t} 为有机玻璃板的应力光学常数;d 为有机玻璃板厚度;z_0 为参考平面到试件的距离;D_{t} 为焦散斑的纵向直径;δ_{t} 为与裂纹扩展速度相关的修正因子,当裂纹扩展速度具有实际意义时,$\delta_{\mathrm{t}}\approx 1$。

1.2 实验模型设计

为了简化实验,减小实验离散度,需要选用均质、各向同性材料,以避免材料的非均质性和各向异性引起误差;实验采用透射式动态焦散线系统,要求实验材料高透光率;为了便于观察实验,要求材料具有一定塑性,综上选用有机玻璃作为模型材料。试验模型规格为 300 mm×300 mm×5 mm,板中部加工贯穿的直墙拱形孔洞,孔洞下部断面形状为 40 mm×20 mm 的半矩形,上部断面形状为半径 20 mm 的半圆拱,以此模拟邻近硐室。在孔洞左边加工炮孔,炮孔直径为 6 mm,炮孔内装入 160 mg 叠氮化铅单质炸药,以此模拟邻近硐室钻爆法施工。

通过初步试验探究,确定裂纹相关参数,具体如下。裂纹倾角:当裂纹倾角为 30°时,裂纹扩展位移最大,随倾角增大或减小,裂纹扩展位移均逐渐减

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

小[3]，为了简化分析，选择裂纹倾角为水平方向。裂纹的长度: 随预制裂纹长度增大，裂纹扩展位移逐渐增大，当裂纹长度大于 5 mm 后，裂纹扩展位移逐渐减小[4]，为了保证实验现象明显，便于实验分析，最终选择预制裂纹长度 m 为 5 mm。裂纹显隐性: 随裂纹与硐室间距增大，裂纹扩展逐渐减小，当裂纹与硐室间距为 5 mm 时，裂纹基本未扩展。最终选定裂纹与硐室间距 n 为 4 mm。随爆源与硐室间距增大，爆炸荷载对邻近硐室背爆侧裂纹缺陷影响先增大后减小，其中，当爆源与硐室间距为 45 mm 时，背爆侧裂纹缺陷扩展最为明显。在实验设计中，为了防止爆生气体释放，在脱脂棉和胶带密封炮孔的基础上，用铁制薄圆柱体夹具夹住炮孔两侧，并在夹具上加工环形凹槽，用 O 型橡皮圈填塞，可尽量保证爆生气体绝大部分作用于孔壁。图 1 为模型示意图。

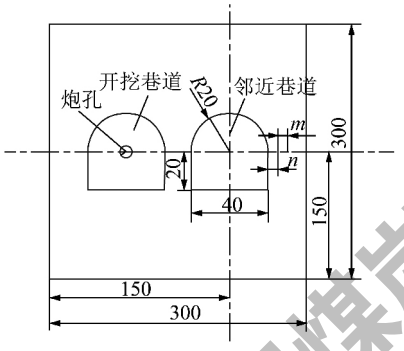


图 1　模型加工示意

Fig. 1　Schematic diagram of model processing

2　背爆侧裂纹扩展机理过程分析

图 2 是相同条件下模拟爆炸荷载作用下邻近硐室背爆侧裂纹动态扩展行为的实验图片，从图中可看出，爆炸荷载作用下，邻近孔洞的破坏形态基本相同，分为炮孔处的粉碎区、孔洞迎爆侧的裂纹扩展区、孔洞背爆侧预制裂纹处的裂纹扩展和背爆侧底角位置的裂纹扩展。由于图 2(a) 和 2(b) 的实验现象及对应的实验数据具有一定的相似性，因此，后续的分析以图 2(b) 对应的数据进行。

图 3 为高速摄影仪采集的爆炸荷载作用下背爆侧裂纹的扩展过程图片，通过系列图片分析，可清楚地了解裂纹的扩展机理。

当炸药起爆后，冲击波压力远大于孔壁动抗压强度，在炮孔周边形成粉碎区，衰减后形成的应力波向周围快速传播，通过 30 ~ 50 μs 的图片可清晰地看到随应力波传播出现的环状应力集中区，且可看到巷道自由面处应力集中区向背爆侧转移，当 t = 70 μs 时，应力波绕射传播到预制裂纹处，并作用于裂纹尖端，



图 2　爆炸荷载对邻近硐室影响实验最终结果

Fig. 2　Final test result of blast load effect on neighboring tunnel

越过尖端的应力波引起沿水平方向的切应力，尖端反射的应力波引起反射拉伸应力[20]，尖端出现应力集中，形成奇异区—焦散斑，但由于未超过动态断裂韧度，预制裂纹未起裂。当 t = 90 μs 时，充满炮孔的爆生气体通过粉碎圈释放，当 t = 130 μs 时，可看到围绕爆生气体出现明显的弧线型的应力集中区，这主要是部分爆生气体以脉冲荷载形式[15]作用于孔壁，炮孔周边主应力差增大达到峰值引起。该应力集中区由于脉冲荷载的波动性而逐渐移动，如图 3 所示。t = 110 ~ 150 μs 时，主应力差峰值位置接近预制裂纹，预制裂纹尖端的焦散斑逐渐变大，当 t = 170 μs 时，裂纹起裂，之后，伴随着弧线型应力集中区的靠近，裂纹快速扩展。当 t = 310 μs 时，弧线型应力集中区追赶上扩展中的裂纹，且由于卸载波产生的径向拉应力作用越来越明显，裂纹向下翘曲。之后，随着弧线型应力集中区的远离，裂纹止裂。上述现象与宗琦[21]、赵新涛等[14]通过理论和数值分析得到的结论相同，即炸药爆炸后，首先作用于岩石的是冲击波和应力波，形成炮孔周围的粉碎区和微裂隙区，随后，爆生气体迅速膨胀充满炮孔并以脉冲荷载形式作用于孔壁。从上述的分析可看出，背爆侧裂纹的扩展是爆炸产生的冲击波、爆生气体形成的准静态应力场和卸载波综合作用的结果。爆炸应力波主要作用于背爆侧裂纹扩展前，爆生气体作用于裂纹扩展的全过程，对背爆侧裂纹的扩展起主要作用，而卸载波主要作用于裂纹扩展后期，使裂纹扩展方向发生偏离，出现翘曲现象[22]。

3　爆生气体作用下背爆侧裂纹扩展机理分析

3.1　裂纹扩展机理运动学分析

图 4 中纵坐标 D 表示扩展中裂纹尖端与弧线型应力集中区的相对距离，当弧线型应力集中区位于裂纹左端时，相对距离为负，反之，为正。裂纹扩展速度和弧线型应力集中区传播速度均通过测量高速摄影机拍摄间隔图片的位置差除以间隔时间获得。

从图 4 可看出，爆生气体形成的弧线型应力集中区的移动速度在 300 m/s 上下振荡性的变化，准静态

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

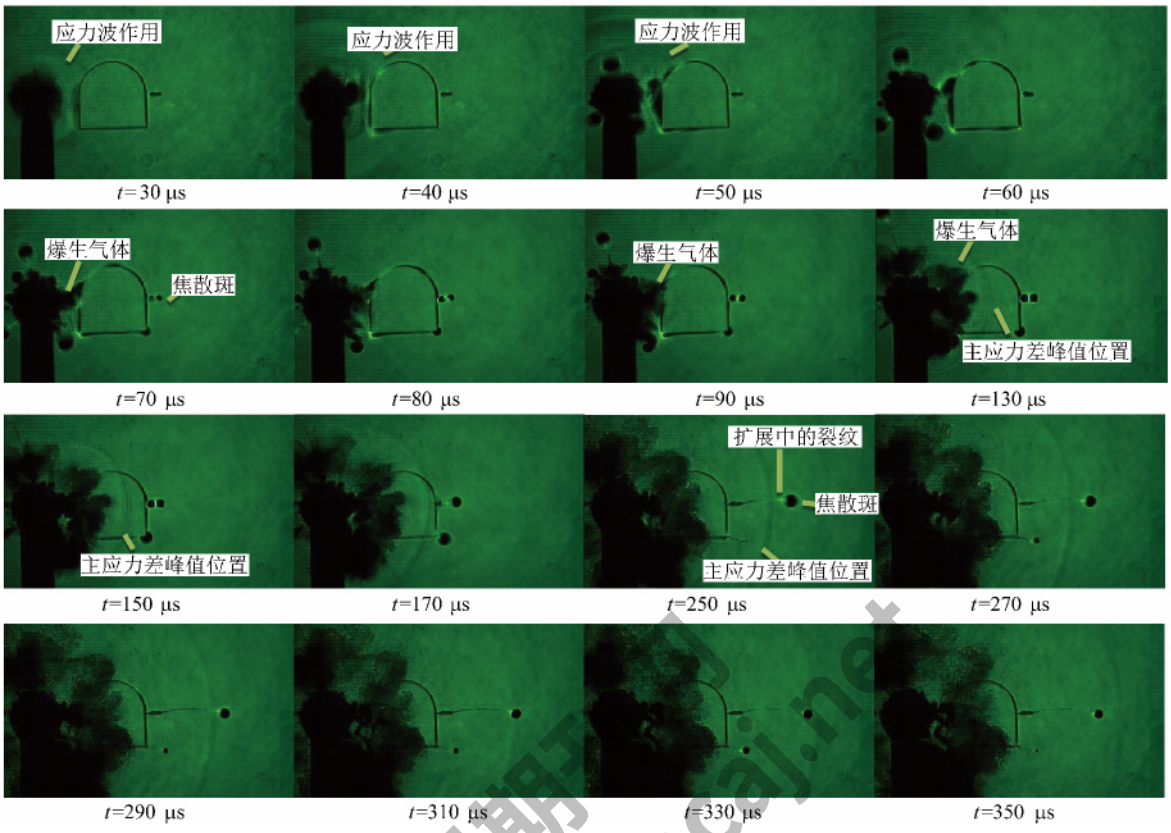


图 3 爆炸荷载作用于邻近巷道

Fig. 3 Explosion loads acting on the adjacent tunnels

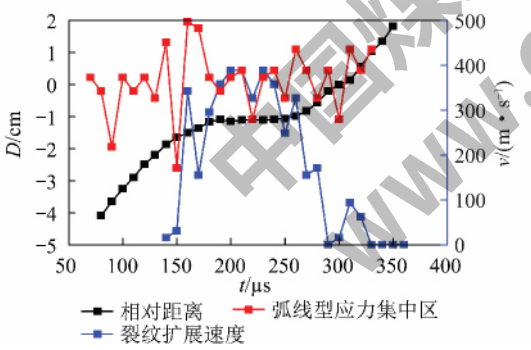


图 4 裂纹尖端与弧线型应力集中区相对距离及其速度随时间变化曲线

Fig. 4 Relative distance between crack tip and arc type stress concentration region and velocity changing curve with time

应力作用以相对稳定的波动形态向周边传播，并在应力波之后作用于裂纹尖端，在 150 μs 左右时，裂纹起裂，弧线型应力集中区移动速度出现短暂减小后又恢复原波动状态，而裂纹扩展速度逐渐增大，裂纹尖端与弧线型应力集中区的相对距离逐渐减小，在 200～250 μs 之间时，相对距离稳定，约为 1 cm，裂纹扩展速度与弧线型应力集中区移动速度基本相同。在该阶段，弧线型应力集中区整体移动速度相对其它时间段明显降低，在 250 μs 后，裂纹扩展速度振荡性的减小，在裂纹快速扩展过程中，裂纹的扩展速度约等于弧线型应力集中区移动速度。

综上，裂纹的最大扩展速度发生在弧线型应力集中区越过扩展中的裂纹尖端之前，且伴随着弧线型应力集中区移动速度的略微减弱，当弧线型应力集中区接近扩展中的裂纹尖端时，达到峰值的裂纹扩展速度约等于弧线型应力集中区的传播速度，弧线型应力集中区与裂纹尖端相对距离基本不变，在该时间段内，裂纹扩展速度表现为在峰值上下振荡性变化。

3.2 裂纹扩展机理力学分析

从图 5 可看出，当 $t=50$ μs 左右时，预制裂纹右尖端动态应力强度因子从零开始快速增加，说明此时，应力波开始作用于预制裂纹，当 $t=100$ μs 左右时，动态应力强度因子达到第 1 个峰值，超过动态断裂韧度，裂纹有略微的扩展，之后，动态应力强度因子开始减小，说明此时应力波的作用逐渐减小。但当 $t=130$ μs 左右时，由于爆生气体产生的弧线型应力集中区逐渐接近预制裂纹，弧线型应力集中区对硐室产生的强拉伸应力在硐室背爆侧产生强拉应力场，作用于预制裂纹，并伴随着弧线型应力集中区的接近，强拉应力场逐渐增加，最终导致裂纹尖端动态应力强度因子快速增加，当 $t=170$ μs 左右时，动态应力强度因子出现短暂的平稳后快速增加，裂纹起裂，

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

当 t = 200 μs 时，动态应力强度因子达到峰值 1.68 MN/m$^{3/2}$，之后，裂纹尖端与弧线型应力集中区的相对距离维持不变，此时，裂纹扩展速度与弧线型应力集中区扩展速度相同，当 t = 250 μs 左右时，峰值上下振荡变化的动态应力强度因子开始减小，此时，裂纹尖端与弧线型应力集中区的相对距离开始减小，说明此时裂纹扩展速度相对弧线型应力集中区传播速度较小，当 t = 300 μs 左右时，弧线型应力集中区追赶上扩展中的裂纹，此时，动态应力强度因子开始振荡性的变化，维持一段时间后，开始快速减小，裂纹止裂。

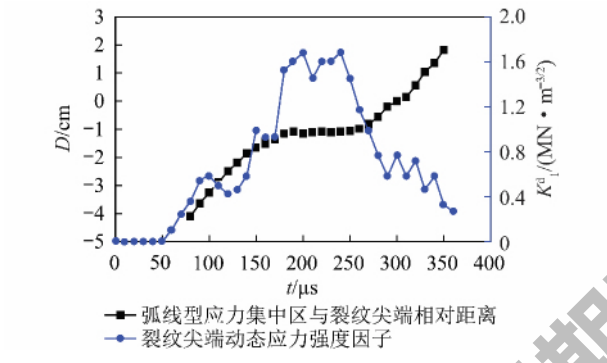


图 5　相对距离 D 和裂纹尖端动态应力强度因子随时间变化曲线

Fig. 5　Relative distance D and the dynamics stress intensity factor of the crack tip changing curve with time

为了更加清晰地分析弧线型应力集中区与扩展中裂纹的相对距离和动态应力强度因子的关系，绘制了裂纹尖端动态应力强度因子随相对距离变化的曲线，如图 6 所示。从曲线中可看到，当 D = −1.7 cm 左右时，裂纹尖端的动态应力强度因子开始增加，相对距离在−1.15 cm 时，动态应力强度因子达到最大值 1.68 MN/m$^{3/2}$，说明此时应力最为集中，裂纹受拉应力最大，之后由于惯性效应，裂纹快速扩展，而导致动态应力强度因子逐渐减小，当 D = 0 左右时，裂纹接近止裂，动态应力强度因子开始振荡性的减小。

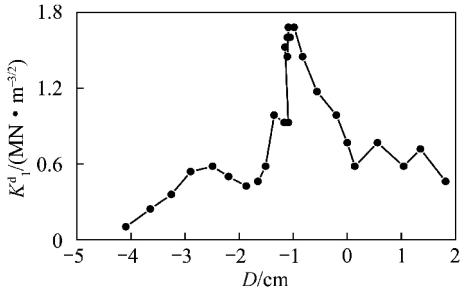


图 6　相对距离 D 与裂纹尖端动态应力强度因子关系曲线

Fig. 6　Relationship curve between the relative distance D and dynamic stress intensity factor of crack tip

从上述分析可看出，导致预制裂纹起裂的主要原因是爆生气体产生的准静态应力场的作用，且裂纹的最大扩展速度发生在弧线型应力集中区接近扩展中的裂纹尖端，此时裂纹的扩展速度约等于弧线型应力集中区的传播速度，动态应力强度因子始终维持在峰值左右振荡性的变化，持续一段时间后，裂纹扩展速度减弱，当弧线型应力集中区越过扩展中的裂纹后，裂纹逐渐止裂。

4　结　　论

(1) 爆炸荷载作用下邻近硐室背爆侧裂纹的扩展是爆炸应力波、爆生气体产生的准静态应力场和卸载波综合作用的结果，其中爆生气体产生的准静态应力场对裂纹的扩展起主要作用。

(2) 当弧线型应力集中区接近扩展中的裂纹尖端时，达到峰值的裂纹扩展速度约等于弧线型应力集中区的传播速度，弧线型应力集中区与裂纹尖端相对距离基本不变，在该时间段内，裂纹扩展速度表现为在峰值上下振荡性变化。

(3) 爆生气体产生的准静态应力主要作用在其产生的弧线型应力集中区追赶上扩展裂纹之前，表现为动态应力强度因子达到峰值，并在峰值上下振荡性变化，当弧线型应力集中区越过裂纹尖端时，动态应力强度因子逐渐减小，裂纹止裂。

参考文献:

[1] Wang Jinhua. Development and prospect on fully mechanized mining in Chinese coal mines [J]. Int. J. Coal Sci. Technol., 2014, 1(3): 253−260.

[2] 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.
Li Ning, Gu Qiangkang, Zhang Chengke. Influence of blasting on excavation of a new tunnel adjacent to existing tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(1): 31−38.

[3] 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.
Guo Dongming, Liu Kang, Yan Renshu, 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.

[4] 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.
Guo Dongming, Liu Kang, Yan Renshu, 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.

[5] Dou Linming, Mu Zonglong, Li Zhenlei, et al. Research progress of monitoring, forecasting, and prevention of rockburst in underground coal mining in China [J]. Int. J. Coal Sci. Technol., 2014,

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

1(3):278-288.

[6] 高尔新,杨仁树.爆破工程[M].徐州:中国矿业大学出版社,1999:120-125.

[7] 刘慧.邻近爆破对隧道影响的研究进展[J].爆破,1999,16(1):57-63.
Liu Hui.The research progress of adjacent blasting effect on tunnel [J].Journal of Blasting,1999,16(1):57-63.

[8] 刘慧.近距侧爆情况下马蹄形隧道动态响应特点的研究[J].爆炸与冲击,2000,20(2):175-181.

[9] 吴亮,钟冬望.不同布置条件下邻近隧道掘进爆破对既有隧道的影响[J].煤炭学报,2009,34(10):1339-1343.
Wu Liang,Zhong Dongwang.Effect of tunneling blasting on the existing adjacent tunnel under different conditions [J].Journal of China Coal Socity,2009,34(10):1339-1343.

[10] 钟冬望,吴亮,余刚.邻近隧道掘进爆破对既有隧道的影响[J].爆炸与冲击,2010,30(5):456-462.

[11] 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.
Bi Jihong,Zhong Jianhui.The research about the effect of the adjacent tunnel blasting shaking on the tunnel [J].Journal of Engineering Blasting,2004,10(4):69-73.

[12] 盖秉政.论弹性波绕射与动应力集中问题[J].力学进展,1987,17(4):447-465.
Gai Bingzheng.The discuss of elastic wave diffraction and dynamic stress concentration problem [J].Journal of Mechanics,1987,17(4):447-465.

[13] 刘殿魁,盖秉政,陶贵源.论孔附近的动应力集中[J].地震工程与工程振动,1980,试刊(1):97-109.
Liu Diankui,Gai Bingzheng,Tao Guiyuan.The dynamic stress concentrations thoery near the hole [J].Earthquake Engineering and Engineering Vibration,1980,test issue(1):97-109.

[14] 赵新涛,刘东燕,程贵海.爆生气体作用机理及岩体裂纹扩展分析[J].重庆大学学报,2011,34(6):75-80.
Zhao Xintao,Liu Dongyan,Cheng Guihai.Analysis of blasting gas mechanism and rock crack growth [J].Journal of Chongqing University,2011,34(6):75-80.

[15] 李宁,陈莉静,张平.爆生气体驱动岩石裂缝动态扩展分析[J].岩土工程学报,2006,28(4):460-463.
Li Ning,Chen Lijing,Chen Ping.Dynamic analysis for fracturing progress by detonation gas [J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2006,28(4):460-463.

[16] 褚怀保,杨小林,梁为民.煤体爆破作用机理模拟试验研究[J].煤炭学报,2011,36(9):1451-1456.
Chu Huaibao,Yang Xiaolin,Liang Weimin.Simulation experimental study on the coal blast mechanism [J].Journal of China Coal Society,2011,36(9):1451-1456.

[17] 杨仁树,桂来保.焦散线方法及应用[M].徐州:中国矿业大学出版社,1997.

[18] 杨仁树,杨立云,岳中文,等.数字激光动态焦散线实验方法和系统[P].中国专利,201110366309.92012-07-04.
Yang Renshu,Yang Liyun,Yue Zhongwen,et al.Digital laser dynamic caustics method and system [P].China Patent,201110366309.9.2012-07-04.

[19] 杨仁树,王雁冰.切缝药包不耦合装药爆破爆生裂纹动态断裂效应的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2013,32(7):1337-1343.
Yang Renshu,Wang Yanbing.Experimental study on dynamic fracture effect of blasting crack in slotted cartridge decoupling charge blasting [J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2013,32(7):1337-1343.

[20] 胡荣,朱哲明,胡哲源,等.爆炸动载荷下裂纹扩展规律的实验研究[J].岩石力学与工程学报,2013,32(7):1477-1481.
Hu Rong,Zhu Zheming,Hu Zheyuan,et al.Experimental study of regularity of crack propagation under blasting dynamic loads [J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2013,32(7):1477-1481.

[21] 宗琦.爆生气体的准静态破岩特性[J].岩土力学,1997,18(2):73-78.
Zong Qi.Investigation on features of rock quasi-static fragmentation by gaseous explosion product [J].Rock and Soil Mechanics,1997,18(2):73-78.

[22] 穆朝民,齐娟.含瓦斯煤在爆炸荷载作用下的力学特性[J].煤炭学报,2012,37(2):268-273.
Mu Chaomin,Qi Juan.Mechanical characteristics of gas-filled coal under blasting load [J].Journal of China Coal Society,2012,37(2):268-273.

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net