

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.20211105001

文章编号:1674-599X(2023)03-0090-08

引用格式:刘广林,蒋志明,邓琛,等.切缝间距对环向切缝管气隙聚能效应的影响[J].交通科学与工程,2023,39(3):90-97.

Citation: LIU Guanglin, JIANG Zhiming, DENG Chen, et al. Influence of the slotted spacing on air-gap gathering energy effect of the circumferential slit tube[J]. J. Transp. Sci. Eng., 2023, 39(3): 90-97.

切缝间距对环向切缝管气隙聚能效应的影响

刘广林¹, 蒋志明¹, 邓琛², 于永纯³, 张庆彬¹, 钟立辉¹

(1. 长沙理工大学土木工程学院, 湖南长沙 410114; 2. 中国交通建设总承包分公司, 北京 100088;

3. 保山金厂河矿业有限公司, 云南保山 678000)

摘要:为研究切缝间距对环向切缝管气隙聚能效应的影响,利用ANSYS/LS数值仿真软件建立5种不同切缝间距的聚能爆破模型,并用钢板试验对模拟结果进行验证。研究表明:切缝间距是影响环向切缝管气隙聚能射流形成和作用效果的主要参数之一。若环向切缝间距过小,初始裂纹会过于密集,且会消耗气体射流在岩石上的能量;若环向切缝间距过大,环向切缝变宽,则导致能量不集中;当环向切缝间距为4 cm时,数值模拟结果和钢板试验结果均表明该工况的平均刻痕深度最大,爆破效果最好。

关键词:环向切缝管;聚能效应;初始裂纹;环向切缝间距

中图分类号:U455.41

文献标志码:A

Influence of the slotted spacing on air-gap gathering energy effect of the circumferential slit tube

LIU Guanglin¹, JIANG Zhiming¹, DENG Chen², YU Yongchun³, ZHANG Qingbin¹, ZHONG Lihui¹

(1. School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;

2. China Communications Construction General Contracting Branch, Beijing 100088, China;

3. Baoshan Jinchanghe Mining Co., Ltd., Baoshan 678000, China)

Abstract: In order to study the influence of slotted spacing on air-gap gathering energy effect of the circumferential slit tube, five types of energy-accumulating blasting models with different slit spacing were established using the ANSYS/LS-DYNA, and the simulation results are verified by steel plate experiment. The results show that the slit spacing is one of the main parameters affecting the formation and effect of air gap shaped charge jet in circumferential slit tube. If the circumferential slit spacing is small, the dense initial cracks will be induced. Which will consume the energy of the gas jet on the rock. If the circumferential slit spacing is large, the wider of slits at the circumferential slits will increase, resulting in non-concentration of energy. When the circumferential slit spacing is 4 cm, Both the numerical simulation results and the steel plate test results show that the average notch depth of this condition is the largest, the blasting effect is satisfactory.

Key words: circumferential slotted tube; mohaupt effect; initial crack; circumferential slit spacing

钻爆法是山岭隧道施工中运用最广泛的开挖方法^[1]。在掏槽爆破中,由于单一自由面的岩石块体的夹制作用,给隧道的掘进带来了许多困难。掏槽孔能

否完全掏出,很大程度上取决于爆破在岩石上产生的初始裂纹和在裂纹扩展过程中形成的网格裂缝面积大小。因此,控制裂缝的形成与发展,在岩石破碎中具有

收稿日期:2021-11-05

作者简介:刘广林(1996—),男,长沙理工大学硕士生。

重要意义^[2]。FOURNEY等^[3]通过试验验证了在爆破过程中,利用纵向切缝管,可控制被爆岩石的应力分布,实现岩石定向裂纹的产生与扩展。王仁树等^[4]提出了在岩石爆破中利用切缝药包控制裂隙的产生、扩展和止裂的方法,并对裂隙的控制机理、影响因素、参数设计及应用技术等进行了探讨。廖涛等^[5]建立了水泥砂浆模型,并对切缝药包楔形掏槽爆破进行了试验,发现切缝药包楔形掏槽爆破利用切缝对能量的导向作用,可对裂纹进行定向扩展,提高掏槽效果。肖正学等^[6]利用动态光弹性法对切缝药包的聚能效应进行了试验,试验结果表明:切缝药包的聚能效果显著,且该效果主要表现在炸药爆炸初期。杨仁树等^[7]采用高速纹影试验系统,对不同材质的切缝药包的爆炸冲击波和爆轰产物传播进行了对比研究,研究表明:不锈钢管的聚能效应最强,其次是聚氯乙烯(polyvinyl chloride,PVC)管和有机玻璃管的。杨国梁等^[8-9]将轴向切缝药包定向断裂技术应用在掏槽爆破中,验证了轴向切缝药包用于掏槽爆破的可行性,但该技术仍存在一定的局限性,需要

精确控制轴向切缝药包在掏槽炮孔中的切缝方向才能得到较好的爆破效果。周凯等^[10]结合轴向切缝定向爆破技术,设计了一种新型聚能装置——环向切缝管,即将PVC管按一定轴向间距进行环向切缝,各环向切缝断面由3条切缝组成,且相邻切缝之间保留一定长度的联接弧,如图1所示。在环向切缝管内装填炸药,再将其与起爆器材一同装入经过高压风吹洗的合格炮孔。由于该方法不必像纵向切缝药包一样对切缝方向有严格要求,且现场装药方式与常规炮孔装药方式一致,使用的PVC管价格低廉,因此,该方法被广泛应用于隧道爆破掏槽中。彭松^[11]在新建的黔江至常德线段的桑植隧道爆破开挖现场进行了环向PVC聚能管药包楔形掏槽爆破试验,试验结果表明:在主掏槽孔中,采用环向狭缝聚能药包,有效提高了爆破进尺,增加了炮孔利用率,而切缝间距对掏槽进尺和炮孔利用率影响较大。因此,本研究拟通过数值模型分析环向切缝管不同切缝间距对岩层穿透性的影响,确定最佳切缝间距来提高爆破效果,可为类似工程施工提供借鉴。

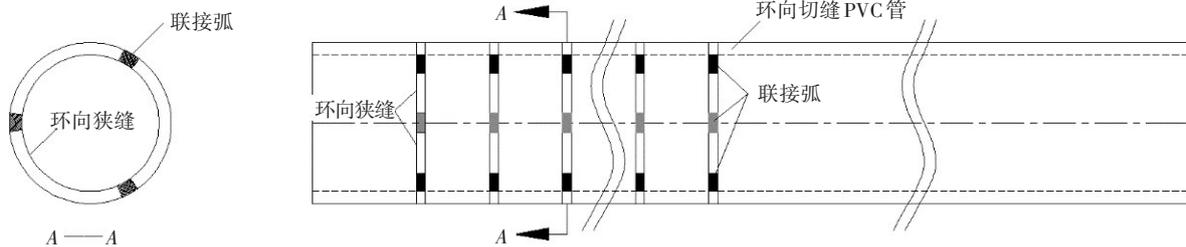


图1 环向切缝管构造

Fig. 1 Structure diagram of the circumferential slit pipe

1 环向切缝管气隙聚能爆破机理

环向切缝管对炸药爆炸产生的气隙聚能效应主要体现在对冲击波波形的调制作用和对爆生气体的影响两个方面^[10-11]。

1.1 环向切缝管对冲击波波形的调制作用

沿药柱轴向传播的滑移爆轰波,在通过环向狭缝所在的平面时,对应狭缝处的爆轰波沿环向切缝径向自由射出,如图2所示。由于爆轰波在通过狭缝处时存在速度差,其在一定距离外产生高能会聚作用。狭缝处会聚的爆轰波,会接触炮孔壁面岩体并转化为冲击波,强烈冲击、粉碎甚至熔化狭缝对应岩壁,形成刻槽。同时,PVC管的管壁联接弧阻滞区域的爆轰波,波阻抗的失配会消耗部分爆轰能量,

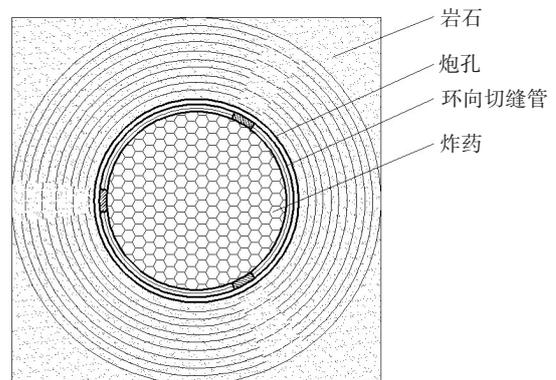


图2 环向切缝管冲击波波形调制

Fig. 2 Shock wave waveform modulation induced by the circumferential slit tube

因此,其与狭缝处外泄的爆轰波存在相位差与强度差,冲击波延迟抵达孔壁。

1.2 环向切缝管对爆生气体的影响

炸药爆轰产生的高温高压爆生气体,在环向狭缝处紧随爆轰波极速向外喷射,形成冲击射流。在狭缝正对方向,冲击射流直接作用于冲击波之前形成的刻槽上,楔入裂缝,形成气楔作用。当冲击射流高速射出后,其将在狭缝外缘形成局部低压区,吸引高密度能量区内的爆生气体,形成两个相邻且反向旋转的高度湍流涡旋,导致爆炸能量沿炮孔径向会聚,最终加强环向气隙聚能效应。孔内炸药爆轰完成后,爆生气体压力均匀分布于孔壁,在准静压场作用下进一步破碎岩体。

由于环向切缝管非环向切缝段的存在,通过狭缝处的爆轰波与非环向段对应爆轰波之间存在的相位差和强度差,且因环向切缝管对爆生气体的径向约束作用,在环向切缝管膨胀、扩张抵达岩壁之前,切缝端面处对应的岩体已受到爆生气体的冲击作用。因此,环向切缝管的非切缝段的长短是影响环向切缝管气隙聚能作用的重要因素。

2 数值模型分析

2.1 数值模型的建立

利用 ANSYS/LS 数值软件建立不同环向间距的环向切缝管爆破模型。其切缝间距分别为 2、3、4、5、6 cm。模型参数由炸药参数、PVC 材质环向切缝管参数、空气和岩石参数组成。炸药直径为 32 mm,环向切缝管厚度为 2 mm,环向切缝宽为 4 mm,切缝间联结弧长度为 8 mm,岩石大小为 200 mm×200 mm×200 mm,炮孔直径为 48 mm,位于岩石中间。由于试验模型的对称性,为了减少计算量,只针对环向切缝管的 1/2 建立模型,并在对称面上施压法向位移约束。环向切缝间距为 4 cm 的爆破模型的网格划分如图 3 所示,其他不同环向间距模型均与之类似。考虑 LS-DYNA 程序特点,采用 ALE 算法模拟炸药、环向切缝管和空气,采用 Lagrange 算法模拟被爆岩石。

本试验所采用乳化炸药的材料模型为 MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN^[12]。对应于 JWL 状态方程,爆轰过程中压力与比体积的关系为:

$$P = A \left[1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right] e^{-R_1 V} + B \left[1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right] e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \quad (1)$$

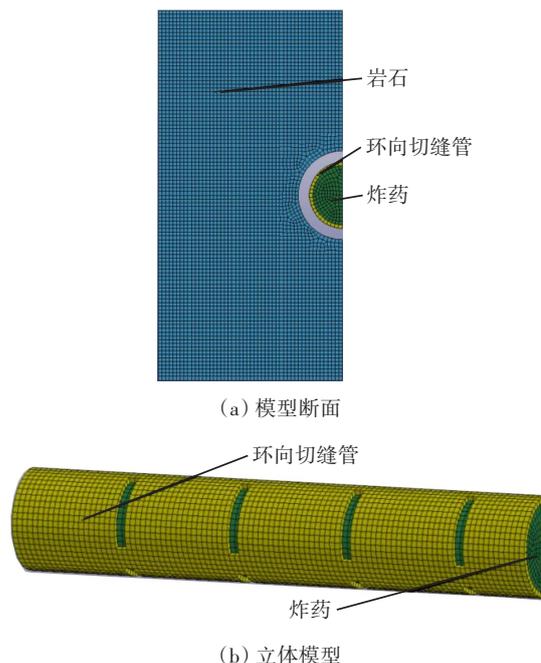


图3 环向切缝间距为4 cm的爆破数值模型

Fig. 3 Blasting numerical model of with 4 cm circumferential slit spacing

式中: P 为爆轰压力; V 为爆生气体与初始体积的比值; E_0 为炸药的初始内能; A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 ω 均为爆炸参数。

乳化炸药参数^[12]见表1。

表1 乳化炸药材料及状态方程参数

Table 1 Emulsion explosive materials and state equation parameters

密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	爆速/ ($m \cdot s^{-1}$)	爆压/ GPa	A /GPa	B / GPa	R_1	R_2	W	E_0 / GPa
1.14	3 200	2.918	246.100	10.460	7.177	2.401	0.069	4.190

空气是爆破中的耦合介质,故采用空物质材料本构模型(MAT_NULL)对其进行模拟,其密度 $1.29 \times 10^{-3} g/cm^3$ 。

环向切缝管选用 PVC 管。由于环向切缝管受力情况复杂,许多试验测试结果表明:可忽略环向切缝管本身的力学性能^[13]。因此,选用理想弹塑性材料模型来模拟环向切缝管,其参数见表2^[14]。

表2 环向切缝管材料参数

Table 2 Material parameters of circumferential slotted pipe

密度/($g \cdot cm^{-3}$)	弹性模量/GPa	屈服强度/MPa	泊松比
1.40	3.0	60	0.36

试验岩石选用花岗岩。采用 MAT_PLASTIC_KINEMATIC 运动材料模型模拟爆破时岩石的本构关系。采用 MAT_ADD_EROSION 来模拟材料的拉应力破坏或者剪应力破坏。花岗岩的基本参数^[15]包括单轴抗压强度 σ_c 、岩石单轴抗拉强度 σ_t 、弹性模量 E 、密度 ρ 、泊松比 μ 和断裂韧性 K_{IC} ,见表3。

表3 岩石力学参数

Table 3 Rock mechanical parameters

$\rho / (\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	μ	σ_c / MPa	σ_t / MPa	E / GPa	$K_{IC} / (\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2})$
2.8	0.27	102	10.5	55.0	1.19

2.2 环向切缝间距对初始裂纹形成的影响

当环向间距分别为2、3、4、5和6 cm时,环向切缝正对岩石单元所受应力范围随时间变化的模拟结果分别如图4~8所示。分析环向切缝管切缝间距对围岩裂纹形成过程的影响规律。

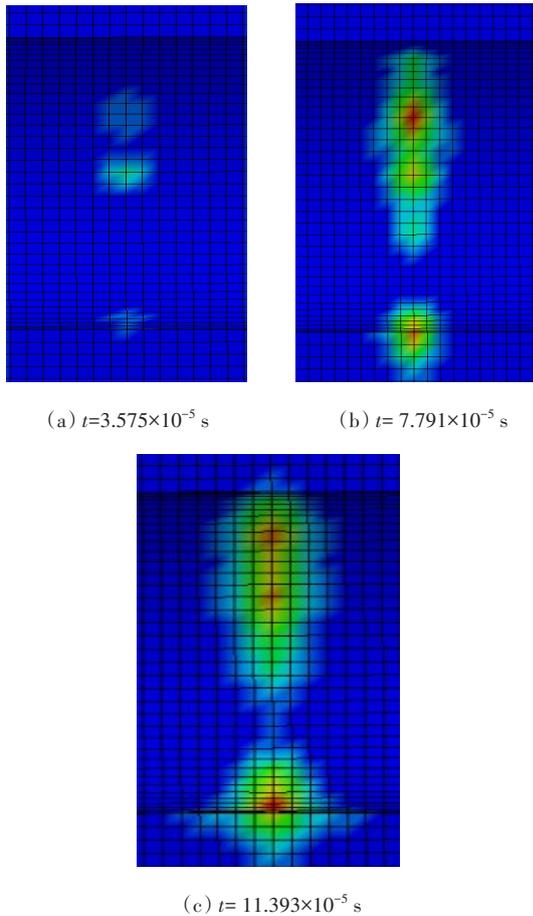


图4 环向切缝间距为2 cm时爆岩体受力情况
Fig. 4 Force state of blasted rock mass with 2 cm circumferential slit spacing

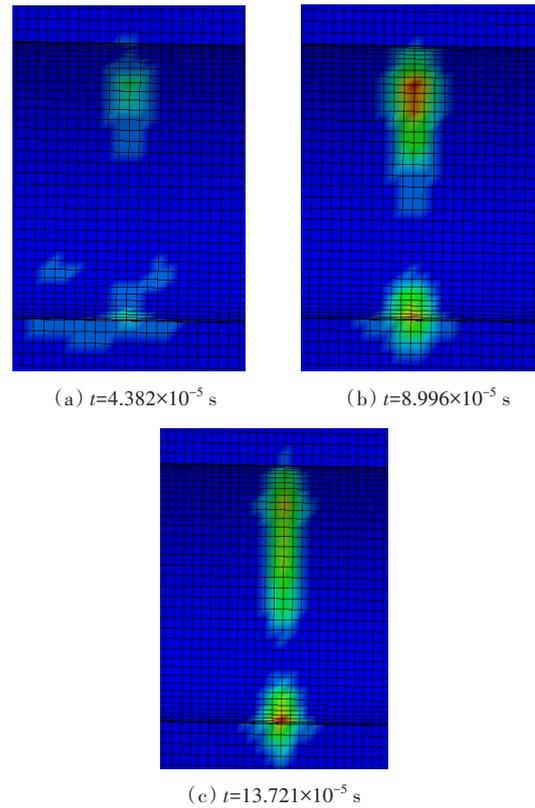


图5 环向切缝间距为3 cm时爆岩体受力情况
Fig. 5 Force state of blasted rock mass with 3 cm circumferential slit spacing

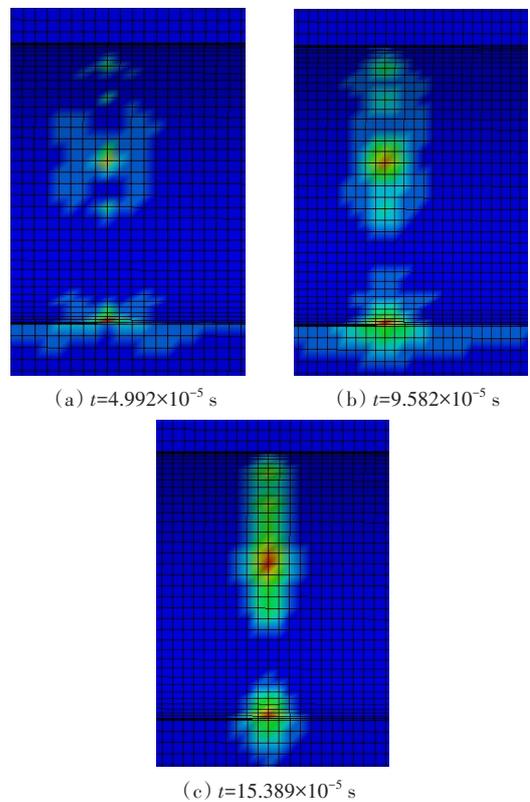


图6 环向切缝间距为4 cm时爆岩体受力情况
Fig. 6 Force state of blasted rock mass with 4 cm circumferential slit spacing

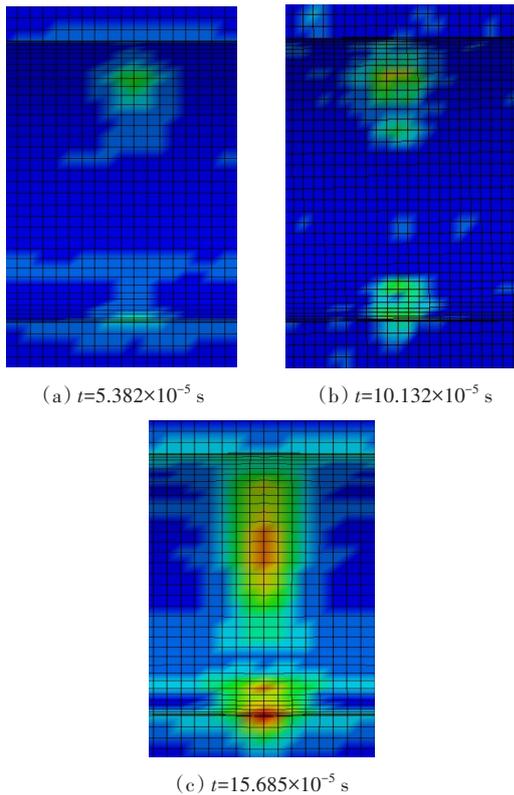


图7 环向切缝间距为5 cm时爆岩体受力情况
Fig. 7 Force state of blasted rock mass with 5 cm circumferential slit spacing

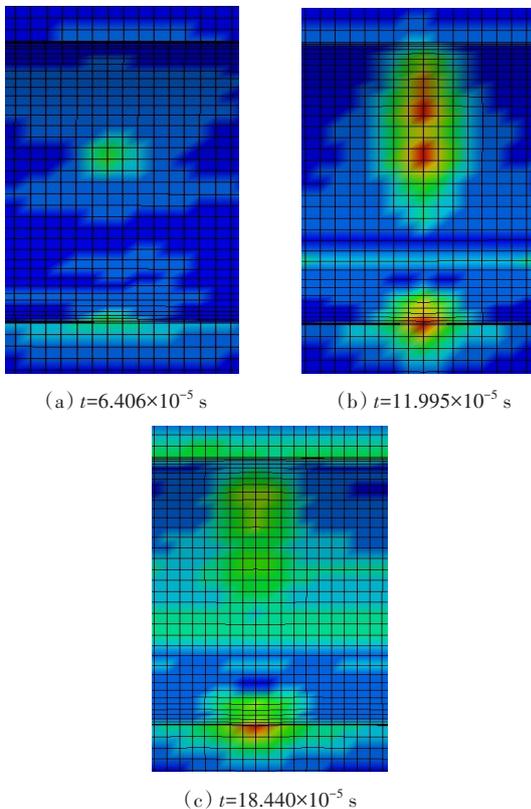


图8 环向切缝间距为6 cm时爆岩体受力情况
Fig. 8 Force state of blasted rock mass with 6 cm circumferential slit spacing

从图6可以看出,当环向切缝间距为4 cm时,爆轰波由炸药的一端开始传播,爆轰波将直接从环向切缝断面处入射至空气中,岩石单元在 4.992×10^{-5} s时受到应力作用,该应力以空气冲击波的形式作用在被爆岩石上。联结弧处高湍流度涡旋吸引周围爆炸能量往环向切缝断面会聚。且与环向切缝断面正对的整个岩石单元受到强大的应力冲击,造成岩石单元的环向破碎。

环向切缝处的炸药爆炸为狭缝处形成的气隙聚能射流提供能量。从图4(a)和图5(a)可以看出,当环向切缝间距较小时,相对于切缝间距为4 cm时,岩石更早受到应力作用,但是过小切缝间距也将为狭缝处聚能射流提供更少能量。环向切缝断面处射流优先抵达被爆岩层后,应力波在岩层中将继续传播,不同环向切缝间距的应力波在岩层中的传播过程相似。从图7(c)和图8(c)可以看出,当切缝间距过大时,相对于切缝间距为4 cm时,高压气体射流由于切缝范围炸药相对较多,环向切缝管沿径向方向过度膨胀,缝宽度在应力作用下发生改变,环向切缝角度增大,导致岩石在切缝处所受应力不集中,形成的初始裂纹较宽,岩石单元的损伤范围增大;应力波衰减越明显,破岩效果越不明显。

从图4~8还可以看出,环向初始裂纹的形成和扩展与环向切缝间距密切相关。环向切缝间的炸药为环向切缝气隙聚能爆破提供能量。过窄小的环向切缝间距和过多的切缝会分散岩石上的能量;过宽大的环向切缝间距,也会导致能量不集中,不利于爆破能量的充分利用。

2.3 环向切缝间距对岩层应力分布的影响

为研究环向切缝间距在岩石上有效应力的分布,分别在5个不同环向切缝管爆破模型的环向切缝中心正对岩石处设置测点。环向切缝管爆破致使岩石单元在孔壁切缝方向上的应力随时间变化的曲线,如图9所示。

从图9可以看出,当环向切缝间距为2 cm时,岩石的应力峰值为12.3 GPa,远小于其他环向切缝间距的。当在环向切缝内装炸药时,过窄小的环向间距导致炸药与环向切缝管之间没有足够的能量形成射流,导致岩石在切缝方向的应力过小,削弱气隙聚能爆破的优势,使形成的初始裂纹浅,穿透效果差。当环向间距在一定范围内增大时,孔壁岩石

单元的应力峰值增大,其所散发的能量增大,表明环向切缝间距所形成的空间是气隙聚能射流形成和发展的关键。当环向切间距为4 cm时,岩石所受的应力峰值为31.5 GPa。但随着环向切缝间距的继续增大,切缝处对应被爆岩体应力峰值开始逐渐减小。当环向切缝间距为6 cm时,岩石所受的应力峰值为25.1 GPa,过大的环向切缝间距也削弱了气隙聚能爆破的优势。这表明:环向切缝间距与环向切缝管的气隙聚能效果密切相关,过小的环向间距导

致炸药与环向切缝管之间没有足够的能量形成射流,导致岩石在切缝方向的应力过小,削弱了气隙聚能爆破的优势,形成的初始裂纹浅,穿透效果差。环向切缝间距太大,会导致环向切缝管的切缝口太宽,使岩石单元上气体射流面积增大,减小了后续爆轰气体的累积作用,使被爆岩层切缝处应力峰值减小,不利于爆破能量的充分利用。当环向切缝间距为4 cm时,岩石单元应力峰值最大,能量利用率最大,破岩效果最好。

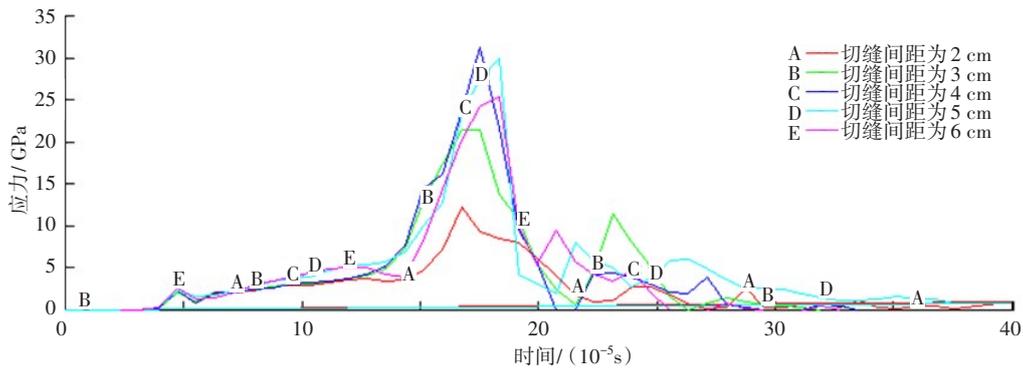


图9 岩石在环向切缝管第一条切缝处的应力随时间变化曲线

Fig. 9 The stress-time curve of rock at the first slit of circumferential slit pipe

3 钢板试验

为验证该数值模型的准确性及研究环向间距对环向切缝管爆破能量分布的影响,用钢板试验对其进行爆破模拟。

3.1 试验设计

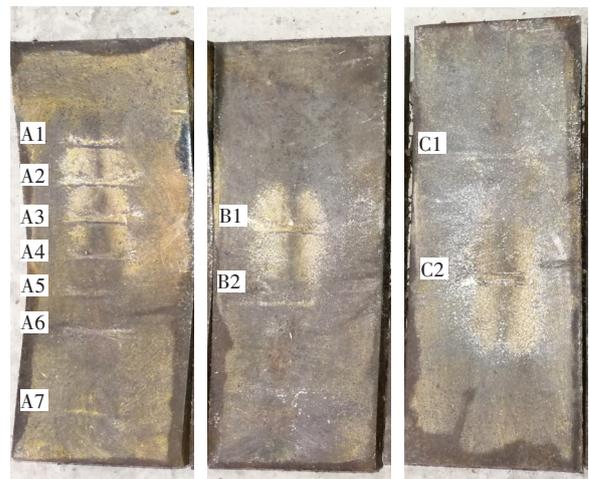
试验将装了炸药的环向切缝管平置于钢板上。这种方式可减小爆生气体的压力,实现只考虑炸药在环向切缝管时冲击波对钢板作用。当环向切缝管装药爆轰后,由于处在无限的空气介质中,爆生气体迅速向四周膨胀,爆生气体对钢板的作用可忽略不计,可只考虑爆炸产生的冲击波对钢板的作用。

选用外径为 $\varnothing 40$ mm,壁厚为2 mm,长为220 mm的圆柱形PVC管为外壳材料,从PVC管一端20 mm处开始,分别按2、4和6 cm间距加工环向切缝。待爆破目标钢板Q235的大小为200 mm \times 100 mm \times 10 mm,采用2#岩石乳化炸药,在雷管端点起爆。

3.2 试验结果分析

PVC管制成的环向切缝管钢板爆破试验的试验结果如图10所示。从图10可以看出,环向切缝管起爆后在钢板上留下了清晰的刻痕。由于起爆

方式为端点起爆,爆炸沿着轴线从上向下传播。因此,环向切缝管上侧首先受到冲击波的作用被压垮,下侧被压垮的时间比上侧更晚一些,故环向切缝管在不对称压力的作用下发生偏移,即留在钢板上的刻痕间距可能不规则,如图10(a)所示。从图10(a)中可看出,炸药在钢板上形成了一条纵向侵彻痕迹,其与环向切缝管形成的横向刻痕垂直。



(a) 环向切缝间距为 2 cm 的试样 (b) 环向切缝间距为 4 cm 的试样 (c) 环向切缝间距为 6 cm 的试样

图10 环向切缝管不同间距钢板试样

Fig. 10 Different spacing steel plate samples of circumferential slit pipe

三组试验结果见表4。由表4可知,在环向切缝管钢板试验中,当环向切缝间距为2 cm时,刻痕平均宽度为1.970 mm,平均深度为0.418 mm;当环向切缝间距为6 cm时,刻痕平均宽度为3.010 mm,平均深度为0.439 mm,比切缝间距为2 cm时的平均宽度、平均深度分别增加了52.79%和5.02%,当环向切缝间距为4 cm时的平均宽度为2.82 mm,平均深度为0.478 mm,较环向切缝间距为2 cm时的平均宽度、平均深度分别增加了43.15%和14.35%,平均宽度气隙聚能效果优于其他环向切缝间距,与模拟结果相符合。

表4 环向切缝管钢板刻痕分布表

Table 4 Scoring distribution of steel plate of circumferential slotted pipe

环向切缝间距/cm	刻痕数/条	平均深度/mm	平均宽度/mm	平均长度/mm
2	7	0.418	1.97	23.03
4	2	0.478	2.82	24.79
6	2	0.439	3.01	23.60

环向切缝间距能影响岩层的致裂效果,合理的环向切缝间距可以增强环向切缝管的气隙聚能效应,增大刻痕深度,提高炸药的利用率。同时岩石属于脆性材料,其强度远低于钢的。因此,可预见环向切缝管在岩石爆破中将有更好的爆破效果。

4 结论

1) 建立了不同环向间距的环向切缝聚能爆破模拟模型,其模拟分析结果表明:爆破后爆轰能量高度集中,且该能量集中的方向为切缝方向,切缝处岩石比非切缝处的岩石更早被破坏,形成环向裂纹。环向切缝间距是环向裂纹形成和扩展的关键,其可为爆炸能量的聚集和迁移提供空间。过窄小的环向切缝间距会分散气体射流在岩石上的能量,不利于初始裂纹的形成与发展;且宽大的环向切缝间距,也会分散能量,不利于爆破能量的充分利用。

2) 分析环向切缝间距对环向切缝管气隙聚能爆破应力波传播特性的影响。随着环向切缝间距的增大,岩石在环向切缝处的应力峰值先增大后减小。当环向切缝间距为4 cm时,应力峰值最大,爆破效果最好。当环向切缝间距为2 cm时,能量传递

效果最差,炸药利用率最低。过多的切缝导致应力波在一定范围内发生衰减。但当环向切缝间距过大时,环向切缝管会消耗过多的爆炸能量,岩石在环向切缝处应力峰值减小。

3) 通过对不同环向切缝间距的气隙聚能爆破钢板试验,发现:当环向切缝间距为2 cm时,环向切缝管在钢板上留下的刻痕平均深度最浅,当环向切缝间距为6 cm时,刻痕宽度大、深度小,当环向切缝间距在4 cm时,刻痕深度最大、效果最好。该研究可为环向切缝管在岩石爆破中的应用提供借鉴。

参考文献(References):

- [1] 凌同华, 欧阳雄志, 刘建伟, 等. 爆破振动下双洞隧道衬砌动力响应分析[J]. 交通科学与工程, 2021, 37(2): 20-27.
LING Tonghua, OUYANG Xiongzi, LIU Jianwei, et al. Dynamic response analysis of double tunnel lining under blasting vibration[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2021, 37(2): 20-27.
- [2] FOURNEY W L. Mechanisms of rock fragmentation by blasting [M]//Excavation, Support and Monitoring. Amsterdam: Elsevier, 1993: 39-69.
- [3] FOURNEY W L, DALLY J W, HOLLOWAY D C. Controlled blasting with ligamented charge holders [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1978, 15(3): 121-129.
- [4] 王树仁, 魏有志. 岩石爆破中断裂控制的研究[J]. 中国矿业学院学报, 1985, 14(3): 118-125.
WANG Shuren, WEI Youzhi. Fracture control in rock blasting [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1985, 14(3): 118-125.
- [5] 廖涛, 蒲传金, 王俊青, 等. 岩巷切缝药包楔形掏槽爆破模型试验与分析[J]. 金属矿山, 2015(2): 40-44.
LIAO Tao, PU Chuanjin, WANG Junqing, et al. Model experiment and analysis of wedge-shaped cutting blasting with cutting seam cartridge in rock tunnel [J]. Metal Mine, 2015(2): 40-44.
- [6] 肖正学, 陆渝生, 张志程, 等. 切缝药包聚能效应的动光弹试验[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2005, 6(5): 447-450.
XIAO Zhengxue, LU Yusheng, ZHANG Zhicheng, et al. Dynamic photoelasticity experiment on energy cumulative effect of slit charge [J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural

- Science), 2005, 6(5): 447-450.
- [7] 杨仁树, 左进京, 李永亮, 等. 不同切缝管材质下切缝药包爆炸冲击波传播特性研究[J]. 中国矿业大学学报, 2019, 48(2): 229-235.
YANG Renshu, ZUO Jinjing, LI Yongliang, et al. Experimental study of slotted cartridge explosion shock wave propagation characteristic with different cutting seam pipe material [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2019, 48(2): 229-235.
- [8] 杨国梁, 杨仁树, 佟强. 切缝药包掏槽爆破研究与应用[J]. 煤炭学报, 2012, 37(3): 385-388.
YANG Guoliang, YANG Renshu, TONG Qiang. Research and application of cut blasting with slotted charge[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(3): 385-388.
- [9] 杨仁树, 佟强, 杨国梁. 切缝药包掏槽爆破试验研究[J]. 煤矿安全, 2010, 41(10): 11-14.
YANG Renshu, TONG Qiang, YANG Guoliang. Experimental study on cut blasting with slotted cartridge [J]. Safety in Coal Mines, 2010, 41(10): 11-14.
- [10] 周凯, 赵新琛, 张庆彬. 一种基于爆轰波波调制环向狭缝无药型罩气隙聚能爆破装药方法: CN110243244A[P]. 2019-09-17.
ZHOU Kai, ZHAO Xinchun, ZHANG Qingbin. Annular slit non-shaped-charge-cover type air gap energy concentration blast charging method based on detonation wave waveform modulation: CN110243244A [P]. 2019-09-17.
- [11] 彭松. 切缝管狭缝聚能效应铅管模拟与隧道爆破试验研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2017.
PENG Song. Experimental study on the slit gathering energy effect in slotted pipe by means of lead-tube test and tunnel blasting [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2017.
- [12] SONG Y Q, LI X S, GUO D Y, et al. Study on the decoupled charge effect in deep-hole cumulative blasting of coal seam [J]. Advances in Civil Engineering, 2019, 2019: 1-9.
- [13] WANG Y B. Study of the dynamic fracture effect using slotted cartridge decoupling charge blasting [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2017, 96: 34-46.
- [14] YU Y, LU Y, LU Y. Numerical simulation of controlled perimeter blasting and field test on the fracture zones in Guanjiao tunnel [M]//Rock Mechanics: Achievements and Ambitions: CRC Press, 2011: 57-63.
- [15] SHU Y, SHAO P, DONG C, et al. Influence of rock strength on the propagation of slotted cartridge blasting-induced directional cracks [J]. Advances in Civil Engineering, 2019, 2019: 1-12.
- (责任编辑: 欧兆虎; 校对: 罗容; 英文编辑: 陈璐)

(上接第66页)

- rock mass classification in the tunnel construction process based on random forest algorithm and TBM in situ operation parameters [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 570(5): 52056.
- [11] PUNIA S K, KUMAR M, STEPHAN T, et al. Performance analysis of machine learning algorithms for big data classification: ML and AI-Based algorithms for big data analysis [J]. International Journal of E-Health and Medical Communications, 2021, 12(4): 60-75.
- [12] 马俊杰, 李天斌, 孟陆波, 等. MSVM在汶马高速公路隧道围岩分级中的应用[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2019, 46(3): 373-380.
MA Junjie, LI Tianbin, MENG Lubo, et al. Application of MSVM to the classification of surrounding rock in Wenchuan-Barkam Highway tunnels, Sichuan, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2019, 46(3): 373-380.
- [13] 长江科学院. 工程岩体分级标准: GB/T 50218—2014 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.
ChangJiang River Scientific Research Institute. Standard for engineering classification of rock mass: GB/T 50218—2014 [S]. Beijing: China Planning Press, 2015.
- [14] 方昱, 刘开云, 刘保国. 公路隧道施工期围岩快速分级的一种新方法[J]. 工程地质学报, 2013, 21(2): 190-198.
FANG Yu, LIU Kaiyun, LIU Baoguo. Fast classification method for rock mass surrounding highway tunnel during construction [J]. Journal of Engineering Geology, 2013, 21(2): 190-198.
- (责任编辑: 罗容; 校对: 李脉; 英文编辑: 粟森)