DOI: 10.11883/1001-1455(2016)03-0289-08

爆破动载作用下新喷射混凝土累积损伤效应的模型实验*

单仁亮,黄 博,耿慧辉,白 瑶,燕发源
(中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院,北京 100083)

摘要: 利用模型实验的手段模拟了巷道的爆破掘进,并在实验中辅以声波测试,通过分析声波波速和声波波形的变化规律,研究了新喷射混凝土在多次爆破动载作用下的累积损伤效应。实验结果表明,爆破次数、与掌子面之间的距离和爆破药量均会影响喷射混凝土的累积损伤,这种影响体现在声波波速和波形 2 个方面:爆破次数增加、距离减小和药量增加,则声速降低值越大,波形变化越明显,即累积损伤值越大;爆破次数和距掌子面的距离均与累积损伤呈非线性关系,其中距离与爆破损伤之间的非线性关系可以用二次多项式进行较好的拟合;第一次爆破对声速和波形影响最大,造成的单次损伤值也最大;在小药量爆破的情况下,测试面的最大累积损伤值达到了 0.1268,表明爆破近区喷射混凝土的损伤是需要关注的重点。

关键词: 爆炸力学;累积损伤;模型实验;新喷混凝土;声波测试;爆破荷载
中图分类号: O383.2 **国标学科代码**: 13035 **文献标志码**: A

喷射混凝土技术因其具有工艺简便、机动灵活以及造价经济等特点,一直以来在工程建设中被广泛的使用[1]。随着喷射混凝土技术的日趋成熟以及锚喷支护体系在地下工程中的广泛使用,人们越来越关注喷射混凝土的各方面性能。地下工程施工中多采用钻爆法掘进,形成以“爆-装-运-支”为循环的施工工序,而实际施工过程中,由于工期等多方面原因,钻爆和上一循环喷混之间间隔时间短,喷射混凝土支护未达到终凝强度便开始下一循环的钻爆作业。因此,喷射混凝土支护会在形成的短时间内受到爆炸荷载的冲击,这势必会造成喷射混凝土支护内部的微观损伤甚至宏观开裂,影响到喷射混凝土强度的发展,进而减弱支护体系的支承能力,所以需要对喷射混凝土受爆破动载作用后的损伤效应进行研究分析。

关于应用损伤理论分析爆破动载作用下材料的损伤效应,早期的研究主要集中在损伤模型的建立方面,学者们提出了一些有影响力的模型,如 GK 模型[2],以及在这些模型基础上经过修正、改进得到的模型[3-4]。

随着先进的现场测试方法和测试系统的出现,尤其是声波测试系统的出现,以及实际工程中研究需求的增多,学者们越来越多地通过现场测试的手段来研究爆破动载作用下岩土材料的损伤效应。颜峰、姜福兴[5]利用声波测试技术,通过现场爆破实验,研究了爆破荷载作用下露天矿围岩的损伤效应;费鸿禄等[6]结合声波测试和数值模拟的手段,对回采巷道围岩在爆破掘进过程中的累积损伤效应进行了研究;孟凡兵等[7]在理论计算的基础上,结合现场声波测试的结果,研究了隧道中夹岩在爆破荷载作用下的累积损伤效应。

针对混凝土爆破损伤的研究方面,胡振锋等[8]根据混凝土损伤基本理论,利用有限元软件 ANSYS 模拟分析了爆破掘进过程中冲击波对喷射混凝土的损伤影响;丁泰山等[9]利用有限元软件研究了爆破荷载对新喷混凝土的损伤影响,从多方面分析并总结了新喷混凝土在爆破荷载作用下的损伤变化发展规律;谢江峰等[10]通过现场监测的手段,研究了混凝土龄期对由爆破荷载引起的累积损伤的影响,并在此基础上提出了损伤及累积损伤的计算方法。

* **收稿日期**: 2014-09-28; **修回日期**: 2014-10-29
基金项目: 教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目(20120023110009)
第一作者: 单仁亮(1964—),男,博士,教授,博士生导师,srl@cumtb.edu.cn。

为了更进一步了解喷射混凝土在爆破荷载下的损伤及累积损伤效应，尤其是针对爆破近区的新喷射混凝土，本文中，通过制作大比例模型来模拟巷道的爆破掘进，利用声波测试技术，得到喷射混凝土在爆破冲击波作用下的声波特性，进而确定喷射混凝土的爆破损伤及其累积值，分析了爆破掘进产生的动荷载对锚喷支护体系中喷射混凝土的损伤影响。

1 模型的设计

1.1 模型实验及相似理论

模型实验是建立在相似理论基础上的一种研究方法，它弥补了数学计算和直接实验的不足，通过对模型进行实验分析，来推测实际中原型可能具有的规律和特性。

相似理论以相似三定理为基础，据此对模型进行设计和对数据进行处理[11]。根据相似理论，从模型实验结果向原型做出推测的前提是两者相似，而这种相似主要包括几何学相似、动力学相似和运动学相似，二者须拥有相同的物理量，且物理量之间遵循相同的关系准则，即相似准则，相同物理量间的比值即为相似比[11]。如在本文中，几何相似比即表示原型和模型的相同线性尺寸（长、宽、高等）之间的比值。在确定了一些基本物理量相似比的基础上，根据相似第二定律，利用量纲分析的方法确定相似准则，进而可以得到其他物理量的相似比，进行实验设计。由此可见模型实验最重要的工作就是确定相似比，相似比是否合理直接影响实验的可操作性和结果的可靠性。

1.2 基本假设

作为规律性探究的实验，本次模型实验没有针对具体的工程背景，仅是按照较为常见的直墙半圆拱形的巷道进行模型的设计[12]。考虑到实际工程条件的复杂性，兼顾模型实验的可操作性和结果的可靠性，在实验设计前做了一些简化和假设：

(1)假设所模拟的巷道围岩是各向同性和均匀连续的，且属于Ⅲ类岩体，参照文献[13]可查相关力学参数，如表 1 所示，其中：γ 为重力密度，E 为变形模量，ν 为泊松比，σ_p 为抗压强度，c_L 为纵波速度；

(2)假设所模拟的巷道为直墙半圆拱形巷道，宽 4.8 m，高 4.2 m，直墙高 1.8 m；

(3)假设所模拟的喷层为 C20 的喷射混凝土，喷层厚度为 60 mm，实验设计时简化了支护结构形式的模拟，而是把重点放在力学效应的模拟上；

(4)假设所模拟巷道的爆破掘进，炮孔深度为 1.8m，每循环进尺 1.8 m，使用二级乳化炸药，实验设计时使用了与实际相同的炸药，简化了装药形式，采用集中装药，通过炸药单耗控制药量。

表 1 Ⅲ类围岩及模型材料力学参数

Table 1 Mechanical parameters of type Ⅲ surrounding rock and model materials

介质	γ/(kN·m^{-3})	E/GPa	ν	σ_p/MPa	c_L/(km·s^{-1})
Ⅲ类围岩	24.50～26.54	6～20	0.25～0.30	20～60	3～4.5
模型材料	18.85～20.42	0.77～2.56	0.25～0.30	2.56～7.69	1.22～1.84
实测值	19.6	2.49	0.29	7.8	1.61

1.3 确定模型相似比

实验涉及多种材料，材料参数也较多，因此在确定相似比(C)时，选取了力、长度和时间 3 个基本量纲，选取了线尺寸、密度和弹性模量 3 个基本参数，通过量纲分析建立了相似准则。再通过多方案的综合比选，最终确定实验的几何相似比为 $C_L=6$，密度相似比(原型与模型密度的比值)为 $C_\rho=1.3$，加速度相似比(由于同处一个重力场所以取 1)$C_a=1$，其他主要参数的相似比及相似准则，如表 2 所示，其中下角标代表相似比对应的物理参量。由于实验中采用的炸药与实际相同，所以炸药爆速相似比取 1。

1.4 模型的设计及模拟材料的选取

根据 1.3 节确定的相似比，由几何相似比首先可以得到模型巷道的尺寸：宽 800 mm，高700 mm，墙高 300 mm。再综合考虑研究内容、测试手段和实验的便捷性、经济性等方面，确定了整个模型的尺寸：

表 2 主要参数的相似比例系数

Table 2 Proportional coefficient of main parameters

序号	对应物理参量	相似准则	相似比
1	线尺寸(L)	C_L	6
2	质量密度(ρ)	C_ρ	1.3
3	加速度(a)	C_a	1
4	弹性模量(E)	$C_E=C_LC_\rho C_a$	7.8
5	单轴抗压强度(σ)	$C_\sigma=C_E$	7.8
6	炸药药量(q)	$C_q=C_\rho C_L^3$	280.8
7	炸药爆速(v)	$C_v=C_E^{0.5}C_\rho^{-0.5}$	1
8	应力(σ)	$C_\sigma=C_E$	7.8
9	时间(t)	$C_t=C_L^{0.5}$	2.45

长 2 500 mm，宽 2 000 mm，高 2 100 mm，具体如图 1 所示。

根据 1.3 节确定的相似比以及关于模拟岩体性质的假定，考虑到实验的经济性，最终选用水泥砂浆来制作模型，水泥、砂、水的质量配比确定为 1.5∶7∶2，具体模型材料参数见表 1。

根据 1.3 节确定的相似比以及之前所做的关于喷层的假定，首先可以确定模型喷层的厚度为 10 mm。然后，喷层选择用石膏来模拟，主要是考虑到石膏是一种脆性材料，初凝时间短，其强度参数主要由水膏比控制，这些都与喷射混凝土的性质相似。最后，根据所要模拟的 C20 混凝土的材料参数，水膏比取 1.3。

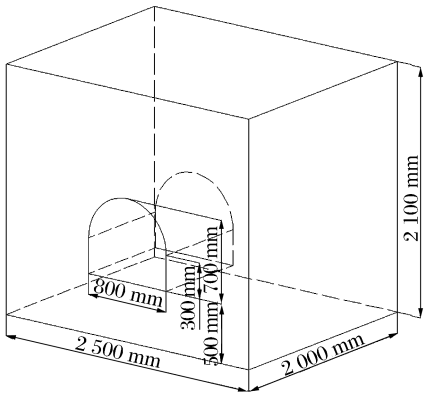

图 1 模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the model

根据 1.3 节确定的相似比，通过计算可得本次模型实验炮孔深度为 300 mm，每循环进尺为 300 mm。每循环使用药量为 30～50 g，起爆采用 6 号毫秒延期电雷管以及 MFB-200 型发爆器，并采用正向起爆方式。同时，为了提高爆破效果，与实际工程一样，使用炮泥封堵炮眼。

考虑到模型实验中使用的炸药量少，爆破产生的能量小、衰减快，爆破产生的应力波在模型边界上形成的反射波的能量小，对测试的干扰小，因此本次实验没有在模型的外侧设消波装置和侧限。多次爆破实验后模型整体性完好，证明了这样处理的合理性。

2　测试原理与测试系统

损伤是指材料由于温度、荷载和环境等因素的作用，微观结构发生了变化，内部微缺陷的成胚、发育以及聚集，使得材料在宏观上劣化，最终可能产生裂纹或发生断裂[14]。在连续损伤力学中，可以近似地使用损伤变量或损伤因子来表示材料的损伤，通常按裂隙面积的增加或者弹性模量的减少来定义。而材料的动弹性模量又和超声波在其中的传播速度存在一定的相关性，因此损伤变量 D 一般可以通过损伤前后的声波波速表示[15]：

$$D=1-\frac{E}{E_0}=1-\left(\frac{c}{c_0}\right)^2=1-(1-\eta)^2 \tag{1}$$

式中：E_0 为无损伤时材料的弹性模量，E 为受损伤后弹性模量，c_0 为损伤前混凝土中的声波传播速度；c 为损伤后混凝土中的声波传播速度；η 为声速的降低率。根据文献[15]，将 $D=0.19$（$\eta=0.1$）作为破坏的临界值。综上所述，在实验中可以通过测量爆破前后喷射混凝土中的声波传播速度，来研究喷射混凝

土在爆破荷载作用下的累积损伤效应。

本次实验所采用的仪器是中国科学院武汉岩土力学研究的 RSM-SY5 型智能声波检测仪。检测时,考虑到模型的结构和测试内容,选择平测法进行测试,即将换能器均布置在模型巷道内壁上。

3 实验结果与损伤效应分析

3.1 喷射混凝土的声速变化

共进行了 6 次爆破实验,其中前 4 次爆破实验炸药用量为 30 g,第 5 次为 40 g,第 6 次为50 g。在进行第 1 次爆破实验前,模型巷道已经成型 600 mm。实验中设计每次爆破均在同一个掌子面上同一个炮孔完成,不进行连续地向前掘进,这就需要在每次实验后将破碎部分填充还原,同时,改变每次装药位置(由孔底向孔口逐渐移动)来消除炮孔破碎带来的影响。为了排除龄期的干扰,实验中每一次测试均在喷涂石膏层的 4 h 后进行。

本次实验中首先选择了 5 个与掌子面平行的测试面,距离掌子面的距离分别为 100、200、300、400 和 500 mm。根据之前确定的相似比,本次选择的测试面在实际情况中,最远距离掌子面 3 m,因此本次实验测试的关注点是爆破近区。为了便于测量,测试点选择布置在模型巷道的两个侧墙上,同时 2 个换能器的间距为 150 mm。每个测试面在两个侧墙上各测一次,取平均值作为这个测试面的最终结果。

根据声速测试结果绘制了声波速度(c)与爆破次数(n)的关系曲线,如图 2 所示。

从图 2 中不难发现,随着爆破次数的增加,每一个测试面的声波速度均在不断地降低,这说明随着爆破次数的增加,喷层内部原有的缺陷开始扩展,同时也可能产生了新的裂纹,喷射混凝土内部损伤不断累积,使得超声波在传播过程中受到阻碍,导致波速不断降低。而且,声速的降低率随着与掌子面之间距离的增加,呈现递减趋势,100 mm 测试面声速降低约 6.56%,500 mm 测试面则为 3.99%。

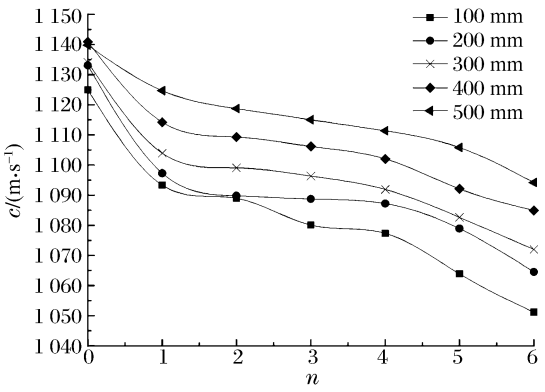

图 2 声速变化曲线

Fig. 2 Variation curves of acoustic velocity

同时,声速降低呈现出非线性的特征,曲线呈现出“S”型,第 1 次爆破使得声速降低较多,2～4 次爆破声速平稳降低,第 5、6 次爆破由于药量的增加声速降低较多,这一方面说明第 1 次爆破对喷层产生的影响最大,另一方面也说明爆破药量的增加会使得喷层的受损加剧。并且随着与掌子面之间距离的增大,这种非线性的特征越发不明显,"S"型曲线的拐点不突出,逐渐向直线退化。

3.2 喷射混凝土的损伤值

根据式(1)将声速结果转化为喷射混凝土的损伤,并绘制了喷射混凝土累积损伤与爆破次数的关系曲线,如图 3 所示。

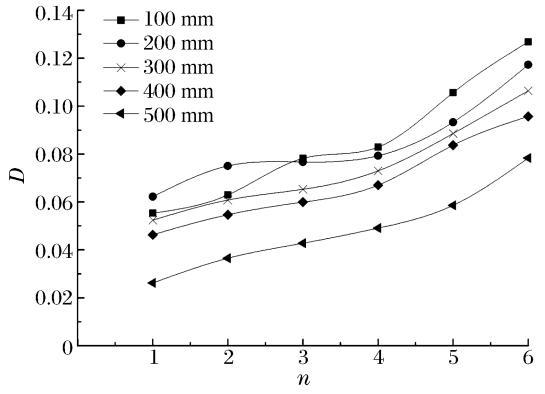

图 3 喷射混凝土爆破累积损伤曲线

Fig. 3 Damage accumulation curves of shotcrete under blasting load

在图 3 中,可以比较直观地发现每一个测试面的爆破损伤在逐渐增加,曲线表现出来的变化规律与图 2 相同:随着与掌子面之间距离的增加,喷层的累积损伤呈递减趋势,最大累积值发生在 100 mm 监测面上,最大值为 0.126 8;累积损伤曲线呈现非线性变化趋势,曲线呈现出倒“S”型,且距离掌子面越近,这种趋势越明显;药量的增加使得喷射混凝土

支护的爆破损伤增大。同时，可以发现由于是只考虑掏槽药量的小药量爆破，所以本次实验每一测试面的累积损伤值均没有超过 $D=0.19$ 的临界值，但尽管是小药量爆破，最大累积损伤值还是达到了 0.126 8，可见爆破近区的喷射混凝土损伤是实际工程中需要关注的。

图 4 为喷层的爆破损伤增量曲线，可以清楚地发现无论在哪一个测试面，第 1 次爆破产生的单次损伤均是最大的，第 5、6 次产生的单次损伤也因药量的增加而增大，这都与之前的分析相印证。

进一步研究发现，距掌子面的距离与喷射混凝土累积损伤之间也存在非线性的关系，并且随着爆破次数的增加，这种非线性关系在退化。所以尝试用二次多项式对这种关系进行拟合：

$$D=A+B_1l+B_2l^2$$

式中：D 为喷射混凝土爆破损伤，l 为距掌子面的距离，A 和 B 为待定系数。图 5 为爆破累积损伤与距掌子面距离之间的拟合曲线。表 3 为 6 条拟合曲线的回归系数汇总，其中：R^2 为回归相关系数。

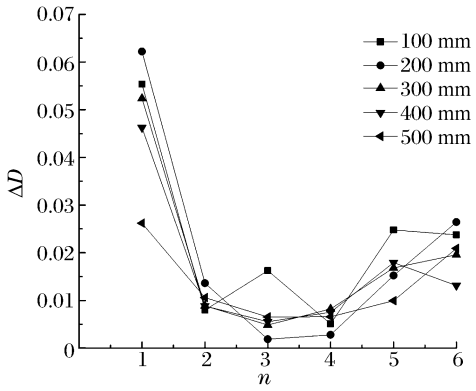

图 4 喷射混凝土爆破损伤增量曲线

Fig. 4 Damage increment curves of shotcrete under blasting load

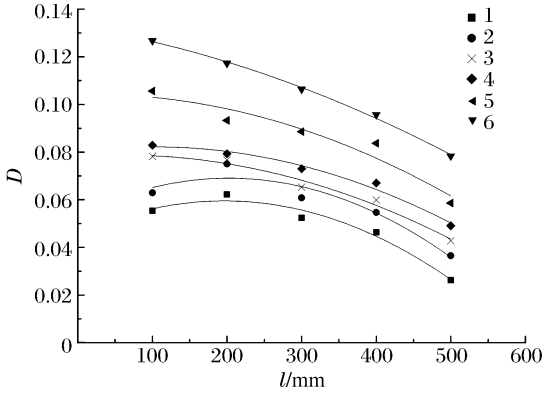

图 5 累积损伤随距离变化的拟合曲线

Fig. 5 Fitted curves of damage accumulation varying with distance

表 3 回归拟合系数

Table 3 Regressive fitted coefficient

爆破次数	A	B_1/mm^{-1}	B_2/mm^{-2}	R^2
1	0.045 7	1.4×10^{-4}	-3.6×10^{-7}	0.971 6
2	0.053 7	1.5×10^{-4}	-3.8×10^{-7}	0.921 0
3	0.078 2	2.0×10^{-5}	-1.8×10^{-7}	0.980 2
4	0.080 1	4.1×10^{-5}	-2.0×10^{-7}	0.983 6
5	0.104 1	7.0×10^{-6}	-1.8×10^{-7}	0.933 7
6	0.132 7	-5.2×10^{-5}	-1.1×10^{-7}	0.997 2

从表中可以看出，回归的相关系数较高，说明可以用二次多项式来拟合爆破累积损伤与距掌子面距离之间的关系。但二次项系数均比较小，说明这种非线性的关系不是很明显，并且随着爆破次数增加，二次项系数的绝对值在减小，说明非线性特征在逐渐退化。

3.3　喷射混凝土的声波波形变化

喷射混凝土在爆破荷载作用下受到的损伤不仅仅会体现在声波波速上，并且声波的波形会发生改变，诸如波形紊乱、振幅衰减等。本节选取了实验前后的波形进行对比分析，由于在实验中 5 个测试面得到的波形变化规律类似，因此选取 5 个测试面中处于中间位置的测试面（即距离掌子面 300mm 测试面）的测试结果进行分析，波形变化如图 6 所示，图中 U 为测量得到的电压信号。

首先，通过对比图 6(a)和 6(b)可以发现，喷射混凝土在第 1 次爆破后，声波的振幅出现了显著的下降，最大振幅下降了接近 4 mV。爆破前的波形较为规则，声波的波峰与波谷比较明显。而在第 1 次爆

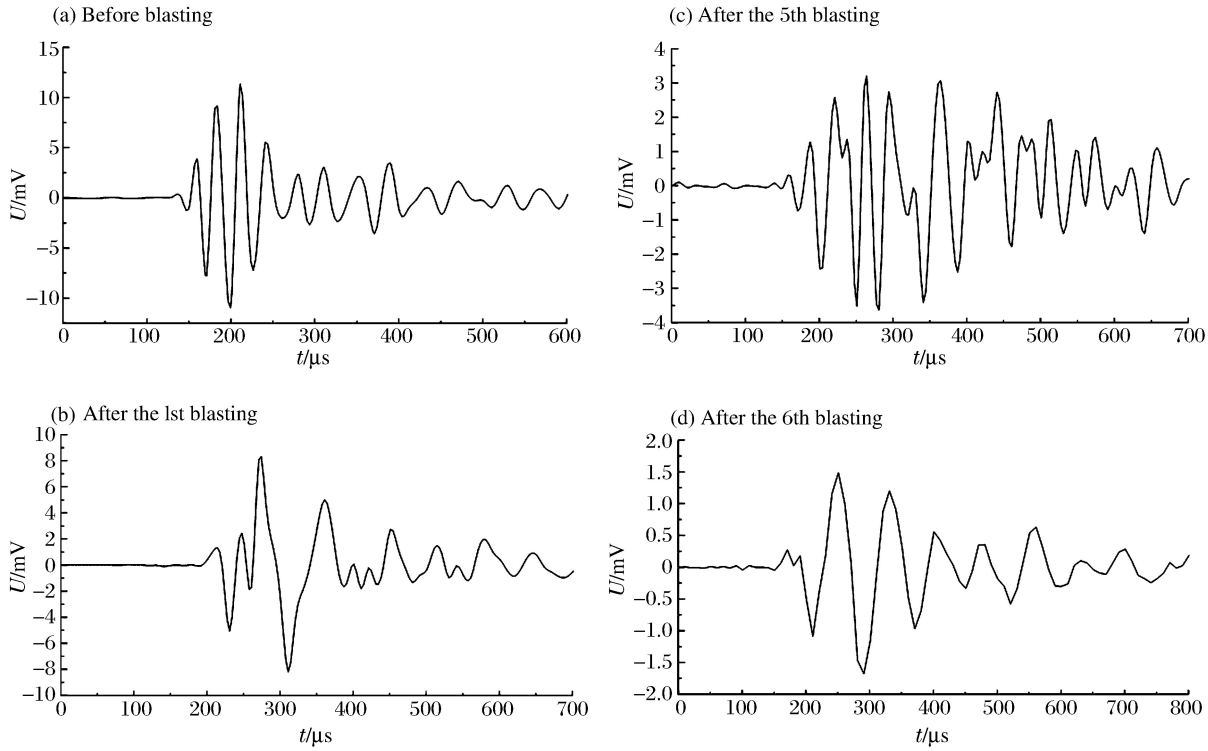

图 6 测点波形图

Fig. 6 Measurment point waves

破后,波形开始紊乱,原有的规律开始被破坏,波峰与波谷不如爆破之前明显。这些现象说明,在第 1 次爆破后,喷射混凝土受到了损伤,内部原有的裂纹或缺陷开始扩展。与此同时新的裂纹开始产生,裂纹或缺陷的增多导致了声波反射、散射的机会增多,进而使得声波在传播过程中能量快速衰减(表现为振幅的下降),波形紊乱,传播速度下降。

然后,通过对比图 6(b)、6(c)和 6(d)可以发现,第 5 次爆破后较第 1 次爆破后相比波形更加紊乱,振动频率显著增加,声波最大振幅下降约 50%,形成大量的微振动。而第 6 次爆破后最大振幅又下降了约 50%,但在相同时间内的微振动减少,振动频率出现下降。这些现象说明在第 1 次加大药量后,产生了更多的微缺陷,使得声波产生了更多的反射、散射,进而出现了很多微振动,振动频率增加,而在第 2 次加大药量后,喷层的内部结构受到了更大的损伤,原有的微缺陷、微裂隙可能已经贯通,内部裂纹的数量在减少,尺度在增加,严重影响到声波的传播。因此微振动数目在减少,同时振幅和振动频率也都大幅减小,这也说明药量对喷射混凝土的损伤有较大的影响,使得喷层的损伤累积加剧。在实验中也发现,距离掌子面越近的测试面,波形变化越大,振动幅值减小的越多。这说明了距掌子面距离越近,喷射混凝土受爆破荷载影响越大,累积损伤也越大,与波速测试结果一致。

4 结 论

利用模型实验结合声波测试的方法,模拟了一般巷道的爆破开挖,通过分析多次爆破荷载作用下喷射混凝土的声波波速与波形的变化规律,研究了爆破荷载作用下喷射混凝土的累积损伤效应。得到的主要结论如下:

(1) 随着爆破次数的增加,喷射混凝土中的声速逐渐降低,爆破引起的累积损伤值在逐渐增大,变化呈现出了非线性的特征。这种非线性关系会随着与掌子面之间距离的增加,而变得不明显。

(2) 喷射混凝土至掌子面的距离会影响爆破累积损伤值,距离越小,累积损伤值越大,两者之间也

存在非线性的关系，并且可以用二次多项式进行拟合。这种非线性关系随着爆破次数的增加，而变得不明显。

(3) 虽然实验中每一测试面的累积损伤值均没有超过 $D=0.19$ 的临界值，但考虑到是小药量爆破，测试面的最大累积损伤值还是达到了 0.126 8。这说明了爆破近区的喷射混凝土损伤是实际工程中需要关注的重点。

(4) 声波波形会随着爆破次数增多而发生紊乱，波峰与波谷越发不明显，最大振幅逐渐降低。这种影响会随着与掌子面之间距离的减小和药量的增加，而变得显著。

(5) 药量相同时，第 1 次爆破使得声速降低最多，对波形影响最大，最大振幅降低最多，造成的单次损伤值也最大。药量增加时，会对喷射混凝土造成更大的损伤，在波速和波形测试结果中都有体现。

参考文献：

[1] 程良奎. 喷射混凝土[M]. 北京：中国建筑工业出版社，1990.

[2] Grady D E, Kipp M E. Continuum modeling of explosive fracture in oil shale[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1980,17(3):147-157.

[3] Liu L, Katsabanis P D. Development of a continuum damage model for blasting analysis[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 1997,34(2):217-231.

[4] 杨军，王树仁. 岩石爆破分形损伤模型研究[J]. 爆炸与冲击，1996,16(1):5-10.
Yang Jun, Wang Shuren. Study on fractal damage model of rock fragmentation by blasting[J]. Explosion and Shock Waves, 1996,16(1):5-10.

[5] 颜峰，姜福兴. 爆炸冲击荷载作用下岩石的损伤实验[J]. 爆炸与冲击，2009,29(3):275-280.
Yan Feng, Jiang Fuxing. Experiment on rock damage under blasting load[J]. Explosion and Shock Waves, 2009, 29(3):275-280.

[6] 费鸿禄，杨卫风，张国辉，等. 金属矿山矿柱回采时爆破荷载下采空区的围岩稳定性[J]. 爆炸与冲击，2013,33(4):344-350.
Fei Honglu, Yang Weifeng, Zhang Guohui, et al. Surrounding rock stability of mined-out area under blast loading in metal mine pillar robbing[J]. Explosion and Shock Waves, 2013,33(4):344-350.

[7] 孟凡兵，林从谋，蔡丽光，等. 小净距隧道爆破开挖中夹岩累积损伤计算方法及其应用[J]. 岩土力学，2011,32(5):1491-1494.
Meng Fanbing, Lin Congmou, Cai Liguang, et al. Cumulative damage evaluation of clip rock in small-distance tunnels caused by blasting excavation and its application[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011,32(5):1491-1494.

[8] 胡振锋，吴子燕，李政. 喷射混凝土衬砌爆破损伤的数值分析[J]. 矿业研究与开发，2005,25(5):71-75.
Hu Zhenfeng, Wu Ziyan, Li Zheng. Numerical analysis on the blasting damage of shotcrete lining[J]. Mining Research and Development, 2005,25(5):71-75.

[9] 丁泰山，李万喜. 爆破施工对新喷射混凝土的损伤影响分析[J]. 地下空间与工程学报，2006,2(5):834-838.
Ding Taishan, Li Wanxi. Damage analysis of fresh shotcrete under excavating blast load[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006,2(5):834-838.

[10] 谢江峰，李夕兵，宫凤强，等. 隧道爆破震动对新喷混凝土的累积损伤计算[J]. 中国安全科学学报，2012,22(6):118-123.
Xie Jiangfeng, Li Xibing, Gong Fengqiang, et al. Cumulative damage evaluation of young shotcrete in tunnel caused by blast-induced vibration[J]. China Safety Science Journal, 2012,22(6):118-123.

[11] 徐挺. 相似理论与模型试验[M]. 北京：中国农业机械出版社，1982.

[12] 单仁亮，周纪军，夏宇，等. 粘结式锚杆在爆炸动载下轴向应力分布研究[J]. 岩土力学，2011,32(10):2965-2971.
Shan Renliang, Zhou Jijun, Xia Yu, et al. Axial stress distribution of grouted rockbolts subjected to blast loading [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011,32(10):2965-2971.

[13] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB50086-2001，中华人民共和国建设部. 锚杆喷射混凝土支护技术规范[S]. 北京：中国计划出版社，2001.

[14] 郝松林,陈铸曾.损伤及损伤力学[J].国防科技大学学报,1984,6(3):1-36.
Hao Songlin, Chen Zhuzeng. Damage and damage mechanics[J]. Journal of National University of Defense Technology, 1984,6(3):1-36.

[15] 朱传云,喻胜春.爆破引起岩体损伤的判别方法研究[J].工程爆破,2001,7(1):12-16.
Zhu Chuanyun, Yu Shengchun. Study on the criterion of rockmass damage caused by blasting[J]. Engineering Blasting, 2001,7(1):12-16.

Model experiment to study cumulative damage effects of young shotcrete under blasting load

Shan Renliang, Huang Bo, Geng Huihui, Bai Yao, Yan Fayuan
(*School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing* 100083, *China*)

Abstract: In this work we simulated the blasting excavation in a mine tunnel using a model test. Adopting the sound wave test method, we investigated the cumulative damage effects of young shotcrete under multiple blasting loads by analyzing variations of acoustic velocity and acoustic waveform during the model test. The results indicate that all the following factors, the times of blasting, the distance between the tunnel face and the test plane, and the dosage of the explosive used as are responsible for the cumulative damage of shotcrete. Their influences are shown both in the acoustic velocity and the acoustic waveform: the more times of blasting, the shorter distance, and the greater explosive dosage, then the greater the reduction value of the acoustic velocity and the more obvious the change of the acoustic waveform, and the greater the cumulative damage value. Specifically, there is a nonlinear relationship between the times of blasting and the cumulative damage. Between the distance and the cumulative damage there also exists a nonlinear relationship, which can be well fitted by a quadratic polynomial. Furthermore, it is found that the first time of blasting affects the acoustic velocity and the acoustic waveform the most, and causes the greatest damage. In general, when the explosive dosage is small, the maximum cumulative damage reaches 0.1268, which indicates that the shotcrete damage close to the blasting area should be the major concern.

Key words: mechanics of explosion; cumulative damage; model test; young shotcrete; sound wave test; blasting load

(责任编辑 王小飞)