DOI: 10.11883/1001-1455(2017)01-0027-10

顺层岩质边坡爆破的振动控制及损伤特性*

王智德[1],夏元友[1],周 雄[1],夏国邦[2],杨金华[1,3]
(1.武汉理工大学土木工程与建筑学院,湖北 武汉 430070;
2.云南省公路开发投资有限公司,云南 昆明 650101;
3.云南交通职业技术学院建筑工程学院,云南 昆明 650101)

摘要:为了更好地了解顺层岩质边坡爆破开挖时振动速度的传播规律以及坡体的损伤程度,以云南省普宣高速公路顺层边坡爆破开挖为工程背景,利用声波测试结合监测点振动速度的方法,获取坡体不同深度的声速变化及不同位置的振动速度,分析不同药量下单次和多次爆破的坡体损伤范围以及振动速度的衰减规律。研究表明,爆破区任意点的振动速度与损伤深度存在对应关系:对单次爆破,振动速度与损伤深度呈线性关系,而对多次爆破,振动速度与损伤深度呈非线性关系;以声速降低率 10%作为损伤界限,并作为爆破控制时,单次爆破对应的临界振动速度为 11.54 cm/s,损伤半径为 5.57 m;,基于首次爆破的多次爆破临界振动速度为 24.20 cm/s,最大损伤半径为 7.56 m,并由萨道夫基公式得到 2 种方式的最大起爆药量。

关键词:爆炸力学;爆破控制;声波测试;顺层岩质边坡;损伤
中图分类号:O381;TD 235.1 **国标学科代码**:13035 **文献标志码**:A

对岩质边坡采用爆破开挖,会不可避免地造成坡体损伤。其原因是爆破引起的冲击波对岩体产生剪应力和拉应力,当其值超过岩体剪切或抗拉强度时,会导致岩体产生裂隙,同时也会对边坡原有的节理裂隙产生扩张作用[1]。多次爆破时,裂纹逐渐扩大和贯穿,形成累积损伤效应[2-3]。在顺层岩质边坡中,当爆破振动波在结构面处经过多次折射、反射,能量在传播过程中逐渐衰减,造成振动波速度明显降低。当振动波通过岩体裂隙、松散块体和小孔洞等缺陷时也会产生散射和绕射现象,导致波速降低。在坡体一定的深度范围内,爆破前后发生的波速变化是坡体损伤的直接表现[4]。在爆破过程中,不同方向的振动速度随爆破方式的不同呈现不同的衰减趋势[5]。对顺层岩质边坡,爆破引起岩体的损伤在岩土界引起了高度重视。目前,常将监测点的振动速度以及岩体的损伤程度作为爆破的安全控制指标[6];Li Haibo 等[7]给出了岩体单次爆破破坏深度的振动速度安全阈值,但对多次爆破的破坏特征研究甚少;因此,对振动波传播规律和岩体损伤范围及两个指标之间关系的研究尤为重要。本文中,以云南省普宣高速公路沿线顺层岩质边坡的爆破开挖为背景,爆破测试包括岩体损伤的声波测试和质点振动速度监测。通过多次爆破试验,利用声波测试方法得到顺层岩质边坡岩体声速降低率,确定爆破损伤的范围,并结合监测不同距离的质点振动速度确定振动波的传播规律,根据爆破药量、测点振动速度和坡体损伤范围的关系,对单次爆破以及多次爆破产生的损伤进行分析,提出该边坡爆破振动安全控制标准。

1 现场测试

1.1 测试孔(点)的布置

以 K0+850~K0+930 处的顺层岩质四级边坡为爆破试验点,开挖坡率为 1∶0.5,每级开挖高度为 10.0 m,坡体以灰岩为主,岩层厚度为 20~40 cm,岩层倾角为 36°,岩层走向与坡面走向呈 15°小夹角相交,边坡节理裂隙发育,属松散岩类。

试验按 4 次进行,采用 2#岩石乳化炸药,浅孔爆破方式。炮孔深 2.5~2.8 m,直径为 40 cm;1~4

* **收稿日期**:2015-10-08; **修回日期**:2016-01-14
基金项目:国家自然科学基金项目(51374163);云南省交通运输厅 2010 科技专项项目(云交科 2010(A)07-a)
第一作者:王智德(1983—),男,博士; **通信作者**:夏元友,xiayy1965@126.com。

次爆破的炮孔水平间距为 1.5～2.5 m;单次炮孔耦合药量分别为 3.2、4.8、4.8、7.2 kg。声波测试孔沿水平方向布置 12 组,沿坡面方向布置 5 组,钻孔深度为 5.0～8.0 m,直径为 130 mm;振动速度监测点 1＃～7＃分别沿边坡纵向及坡向布置,其中声波测试孔、振动速度监测点与爆破孔的平面布置见图 1。

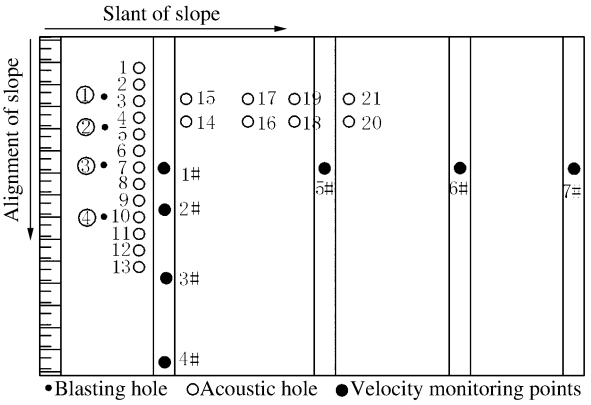

图 1 测点(孔)布置示意图

Fig. 1 Layout diagram of measuring points

1.2 声波测试

测试设备为 RS-ST01D 声波仪,采用一发一收跨孔式方法。声波换能器移动距离为 0.1 m,每组不少于 3 次,取波速稳定时的平均值。按声波原理[8],当脉冲波通过结构面或松散裂隙等波阻抗时会造成声波能量减少,导致声速降低。影响声速的因素包括岩体特性、节理裂隙数量、岩体含水率等。其过程是在爆破前先完成坡体初始声速测试,爆破后再进行节理裂隙扩展的声速测试。在一定的爆破范围内,基于岩体声速变化,可建立岩体损伤程度 D 和声速降低率 η 的关系[9]:

$$D_1 = 1 - (v_1/v_0)^2 = 1 - (1-\eta)^2 \tag{1}$$

式中:v_0、v_1 分别为爆破前、后岩体的声速。

对多次爆破,由于损伤度随爆破次数增加而增大,且存在不可逆的叠加,主要包括初始爆破和多次爆破的累积损伤[10-11],其爆破累积损伤 D' 计算公式为:

$$D' = D_1 + \Delta D_n \tag{2}$$

$$\Delta D_2 = 1 - (1 - \Delta v_2/\Delta v_0)^2 = 1 - (1-\eta_2)^2,$$

$$\Delta D_3 = 1 - (1 - \Delta v_3/\Delta v_0)^2 = 1 - (1-\eta_3)^2, \cdots, \Delta D_n = 1 - (1 - \Delta v_n/\Delta v_0)^2 = 1 - (1-\eta_n)^2$$

式中:D_1 为初始爆破损伤,同式(1);Δv_n 为第 n 与 $n-1$ 次爆破后声速差值;ΔD_n 为 n 次爆破损伤。

不同深度内,以爆破前后声速降低率 10%作为爆破损伤控制指标,对应的岩体损伤程度为 0.19。

1.3 振动速度测试

监测点的振动速度采用四川拓普数字设备有限公司生产的 UBOX-5016 监测仪测定,由于顺层边坡的岩体具有各向异性及非均质性特点,因此振动波在传播过程中具有方向性。其测试的目的是通过不同药量下的爆破来获取测点垂直和水平方向振动速度的变化值,总结此类边坡的振动速度传播规律。振动速度衰减规律常用萨道夫斯基表达式[12]:

$$V = K(\sqrt[3]{Q}/R)^{\alpha} \tag{3}$$

式中:V 为振动速度;K、α 为衰减系数和指数;Q 为单段装药质量;R 为测点到爆源的距离。

2 试验结果及数据分析

2.1 爆破损伤范围

声测孔与爆源距离较近时,应力波产生的能量较大,造成的损伤程度也较大。随应力波在岩体中传播的衰减,声测孔沿深度方向和水平径向的声速发生相应变化,岩体损伤程度逐渐减弱,而多次爆破使损伤程度逐渐累加。以爆破试验中有代表性的声测孔 1－2、2－3、6－7、7－8、8－9、9－10、14－15、16－17 进行分析。利用爆破前后不同深度处声速变化来表征岩体损伤,从而判断损伤深度及其扰动程度。以 4 次爆破为例,绘制测试孔深度与声速变化的关系曲线,如图 2 所示。通过沿深度方向声速变化分析,以式(1)～(2)计算的声速降低率 10%、损伤程度 0.19 为损伤阈值,声速降低率从坡体表面向坡内逐渐递减,4 次爆破测试得到声速最大降低率分布在孔深 0～3.5 m 范围内,损伤深度随爆源到声测孔距离的变化而变化。按初始与爆破后的声速对比,得到每次爆破后最大声速降低率,见表 1。

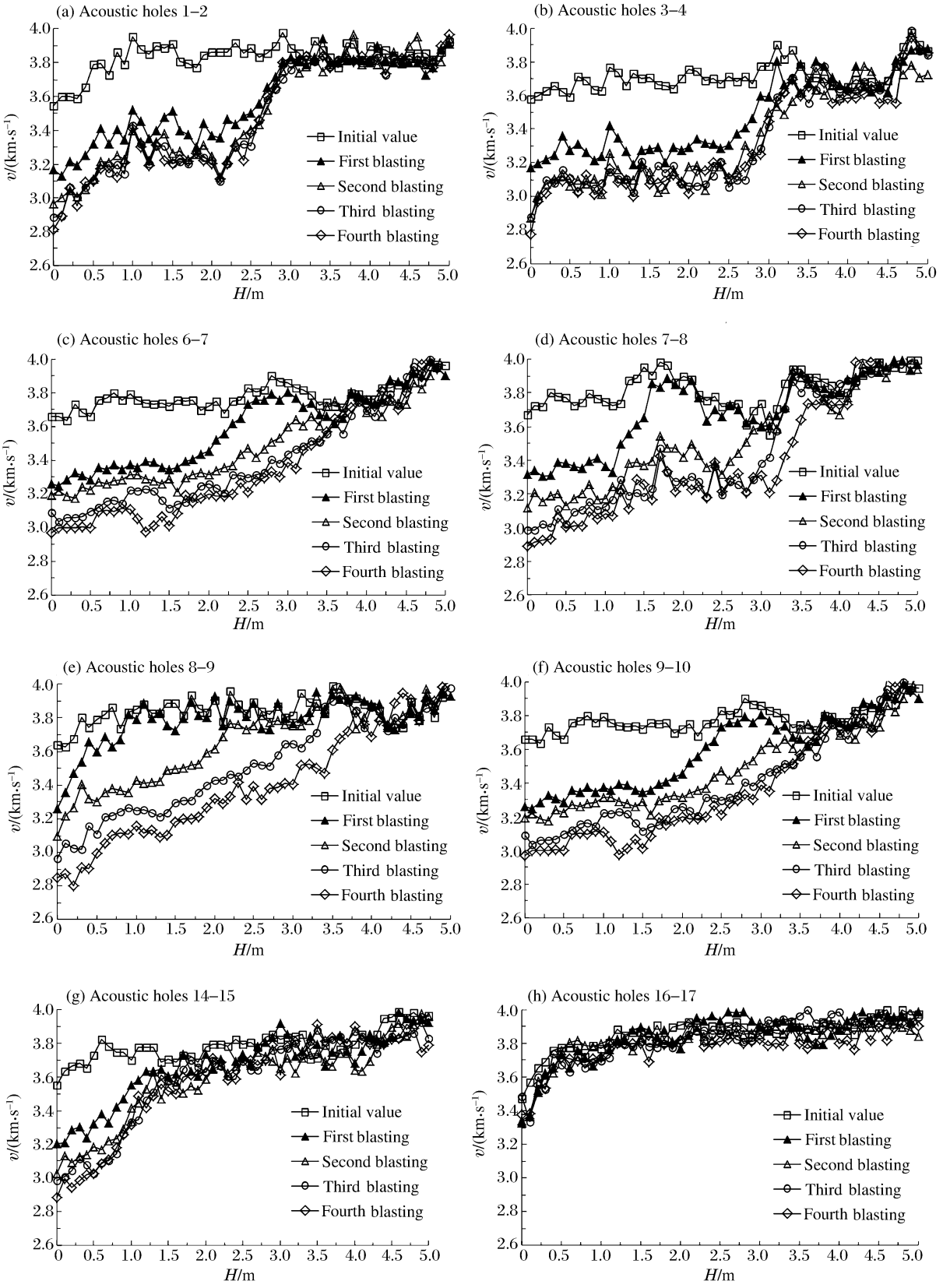

图 2 声波速度与测试孔深度的关系

Fig. 2 Relation between acoustic velocity and test hole depth

表 1 爆破声波测试数据

Table 1 Test data of blasting sound wave

Q/kg	测孔编号	R/m	H_d/m	ΔH_d/m	Q/kg	测孔编号	R/m	H_d/m	ΔH_d/m
	1－2	3.0	2.4			1－2	5.8	2.6	0.0
	2－3	2.4	2.6			2－3	4.8	2.9	0.0
	6－7	4.2	1.7			6－7	2.2	3.2	0.4
3.2	7－8	4.8	1.1		4.8	7－8	2.7	2.9	0.4
第 1 次爆破	8－9	6.3	0.1		第 3 次爆破	8－9	3.3	2.6	0.9
	9－10	7.3	0.0			9－10	4.2	2.0	1.0
	14－15	5.2	0.6			14－15	6.1	0.9	0.0
	16－17	8.8	0.0			16－17	10.1	0.0	0.0
	1－2	3.5	2.6	0.2		1－2	9.1	2.6	0.0
	2－3	2.8	2.9	0.3		2－3	8.1	2.9	0.0
	6－7	2.7	2.8	1.1		6－7	4.0	3.2	0.0
4.8	7－8	3.5	2.5	1.4	7.2	7－8	3.2	3.4	0.5
第 2 次爆破	8－9	4.4	1.7	1.6	第 4 次爆破	8－9	2.6	3.5	0.9
	9－10	5.3	1.0	1.0		9－10	2.3	3.6	1.6
	14－15	5.4	0.9	0.3		14－15	8.3	0.9	0.0
	16－17	9.6	0.0	0.0		16－17	11.4	0.0	0.0

表 1 中 H_d 为损伤深度，ΔH_d 为损伤增量。从表 1 可知，纵向布置的声测孔中，测试孔 1－2 和 2－3 在 4 次爆破后的累积损伤深度分别为 2.6 m 和 2.9 m，受第 1 次的影响较大，在第 2 次中只出现较小的累积损伤，第 3、4 次由于爆距较远没有造成进一步损伤；测试孔 6－7、7－8、8－9 和 9－10 的损伤深度随爆距先减少后增大，呈现出的爆破损伤增量先增大后减少，损伤深度分别为 3.2、3.4、3.5 和 3.6 m。沿边坡坡向的声测孔中，测试孔 14－15 在第 1、2 次爆破中声速有所降低，最大累积损伤深度为0.9 m；而测试孔 16－17 在爆破前后声速基本没有变化，因此，爆破对测试孔 16－17 及以上的区域没有造成损伤。

2.1.1 单次爆破损伤范围

若在表 1 中，统计 3.2、4.8 和 7.2k g 药量下第 1 次出现声速降低率 10%时的损伤深度，并完成数据回归分析，得到最大的损伤深度分别为 3.3、4.55 和 6.08 m，损伤半径分别为 6.2、7.2 和 8.5 m，如图 3 所示。通过数据拟合，得到单次爆破药量(3 kg≤Q_0≤8 kg)下最大损伤半径和最大损伤深度分别为：

$$R_{d,max} = 2.8 \ln Q_0 + 2.966, \quad r^2 = 0.938$$

$$H_{d,max} = 3.42 \ln Q_0 - 0.75, \quad r^2 = 0.953$$

爆破药量与损伤范围对应关系如图 4 所示。

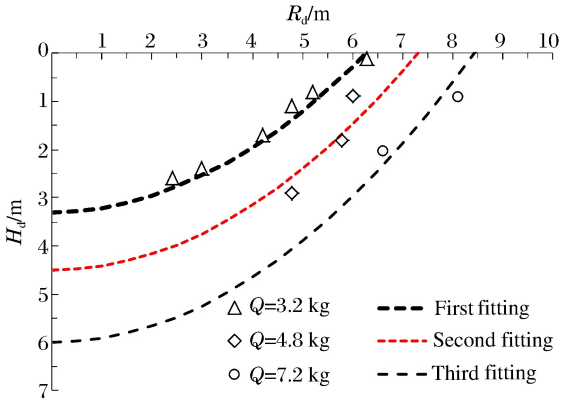

图 3 单次爆破的损伤范围

Fig. 3 Damage region induced by single blasting

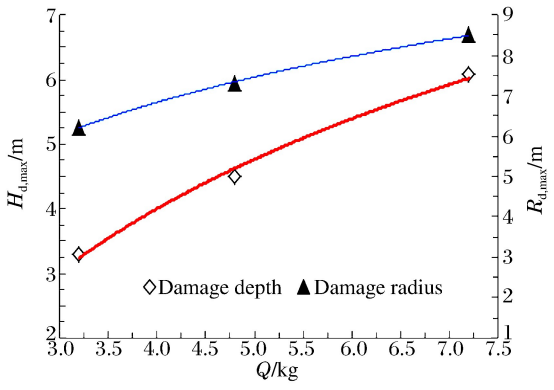

图 4 最大药量与累积损伤区域的关系

Fig. 4 Relation between largest doses and damage region

2.1.2　多次爆破损伤范围

统计累积损伤深度时，按式(2)原理考虑计入首次损伤的多次爆破损伤深度，剔除表 1 中第 2～4 次不产生累积损伤的测点，得到如图 5 所示的累积损伤范围。在爆区内考虑药量与累积损伤范围的关系，如图 6 所示。通过拟合得到多次爆破药量(3 kg≤Q_n≤8 kg)下最大累积损伤深度和半径分别为：

$$R'_{d,max}=R_{d,max}+0.395\ \ln Q_n+5.759,\quad r^2=0.943$$

$$H'_{d,max}=H_{d,max}+0.437\ \ln Q_n+2.769,\quad r^2=0.922$$

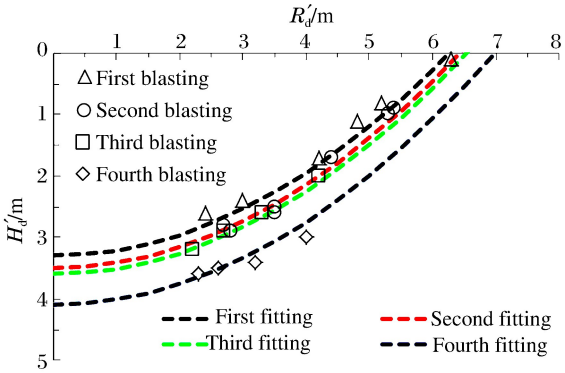

图 5　多次爆破产生的累积损伤范围

Fig. 5　Accumulative damage region after repeated blasting

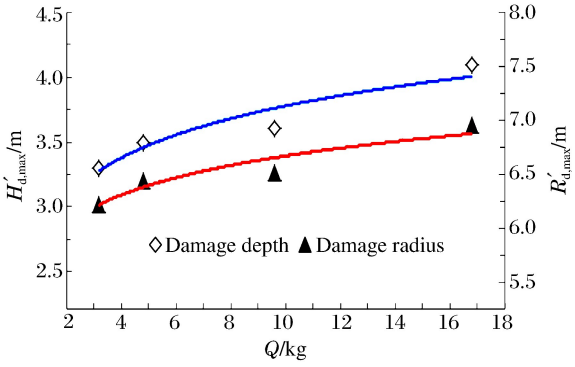

图 6　多次爆破最大药量与累积损伤区域的关系

Fig. 6　Relation between largest explosive mass and damage region after repeated blasting

2.1.3　多次爆破下累积损伤

岩体在多次爆破下经过损伤累积，以测试孔 6－7 为例，由图 2(c)得到测试孔 6－7 的影响深度为 3.2 m，统计多次爆破后声速降低率与损伤度沿损伤深度的变化，如表 2 所示。

将测试孔 6－7 沿深度 0～3.2 m 在 4 次爆破作用下的损伤度与损伤阈值进行对比，超过阈值线高度的区域表示为损伤破坏，如图 7 所示。4 次爆破的损伤深度分别为 1.7、2.8、3.2 和 3.2 m。在多次爆破中，损伤程度随测试孔与爆破距离的增大逐渐减少，损伤深度随药量增大逐渐扩大；随爆破次数的增多，声速降低率并不是每一次声速降低率的线性叠加，而是呈非线性累积的规律。

表 2　声速变化率与损伤度汇总

Table 2　Acoustic velocity change rate and damage level

H/m	第 1 次爆破		第 2 次爆破		第 3 次爆破		第 4 次爆破	
	η	D	η	D	η	D	η	D
0.2	9.66	0.184	12.35	0.232	15.93	0.293	17.52	0.320
0.4	10.21	0.194	12.03	0.226	16.76	0.307	18.36	0.334
0.6	10.66	0.202	12.87	0.241	16.94	0.310	17.55	0.320
0.8	11.12	0.210	13.75	0.256	16.70	0.306	18.49	0.336
1.0	11.05	0.209	12.63	0.237	15.05	0.278	18.17	0.330
1.2	9.21	0.176	11.99	0.225	13.62	0.254	20.45	0.367
1.4	10.22	0.194	12.89	0.241	15.36	0.284	18.08	0.329
1.6	10.75	0.204	14.61	0.271	16.48	0.302	17.89	0.326
1.8	9.35	0.178	11.77	0.222	15.12	0.280	16.08	0.296
2.0	7.23	0.139	11.04	0.209	12.52	0.235	14.11	0.262
2.2	3.29	0.065	10.06	0.191	12.92	0.242	13.41	0.250
2.4	2.98	0.059	10.55	0.200	11.93	0.224	13.15	0.246
2.6	1.24	0.025	10.20	0.194	12.98	0.243	13.93	0.259
2.8	2.72	0.054	10.11	0.192	12.70	0.238	14.52	0.269
3.0	1.32	0.026	6.69	0.129	10.92	0.206	12.27	0.230
3.2	2.70	0.053	5.58	0.108	8.72	0.167	9.41	0.179

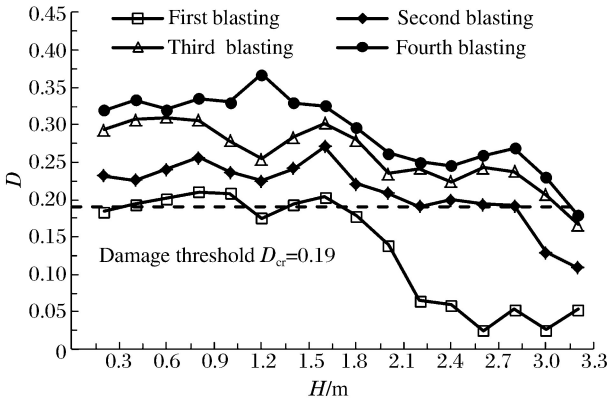

图 7 测试孔深度与累积损伤度的关系

Fig. 7 Relation between depth and accumulative damage level

2.2 振动速度传播规律

测点与爆源距离和一次起爆药量是影响测点振动峰值速度的主要因素。为了获取爆区质点振动峰值速度的规律，沿边坡纵向及坡向布设测点，每个测点按垂直和水平向布置速度传感器，表 3 为监测数据。其中 1#、2#、3# 和 4# 为沿边坡纵向的测点，5#、6# 和 7# 为沿坡向的测点，通过对测点速度与震源距离的关系得知，振动速度随震源距离增加而减少。测点距爆源越近对应的速度越大。在 4 次爆破下获取的数据并结合式(3)，绘制速度与爆源距离的关系见图 8。通过图 8 结合表 2 的数据回归分析，得到首次爆破振动速度衰减规律表达式，垂直向为：$V_v = 63.5(\sqrt[3]{Q}/R)^{1.29}$；水平向为：$V_h = 54.5(\sqrt[3]{Q}/R)^{1.12}$。依次类推，汇总其他几组回归数据，如表 4 所示。

表 3 爆破振动速度测试数据

Table 3 Test data of blasting vibration velocity

Q/kg	测点	R/m	V_v/(cm·s^{-1})	V_h/(cm·s^{-1})	Q/kg	测点	R/m	V_v/(cm·s^{-1})	V_h/(cm·s^{-1})
	1#	6.8	9.01	8.80		1#	5.1	15.5	13.5
	2#	15.5	1.02	1.08		2#	13.4	5.24	4.65
	3#	35.1	1.02	1.08		3#	33.0	1.55	1.65
3.2	4#	55.0	0.54	0.68	4.8	4#	53.0	0.75	0.95
	5#	14.4	3.11	3.30		5#	14.7	4.38	4.25
	6#	26.1	1.62	1.71		6#	25.5	2.56	2.21
	7#	38.6	1.05	1.14		7#	36.2	1.43	1.21
	1#	4.5	17.50	16.50		1#	5.5	17.20	17.50
	2#	10.6	5.91	6.21		2#	8.0	12.20	11.10
	3#	29.9	1.65	1.97		3#	27.0	2.55	2.83
4.8	4#	49.8	0.75	1.15	7.2	4#	46.9	1.40	1.81
	5#	14.3	3.86	4.65		5#	14.7	5.01	5.86
	6#	25.4	2.11	2.71		6#	25.6	2.71	3.61
	7#	36.2	1.35	1.22		7#	36.4	1.84	2.21

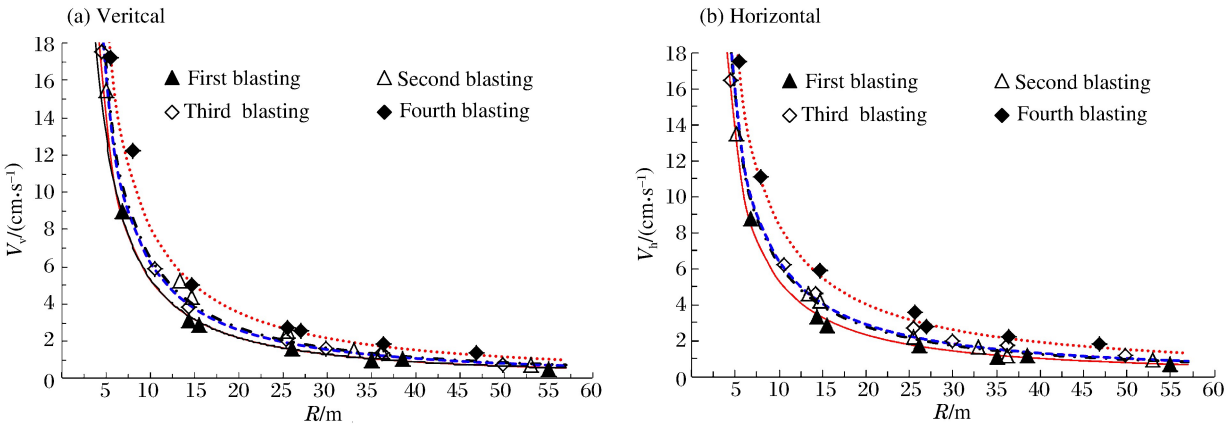

图 8 峰值振动速度与爆距的关系

Fig. 8 Relation between peak vibration velocity and explosive distance

表 4 爆破振动速度数据回归结果

Table 4 Regression data of blasting vibration velocity

爆破顺序	方向	衰减参数		相关系数	爆破顺序	方向	衰减参数		相关系数
		K	α				K	α	
第 1 次	垂直向	3.5	1.29	0.91	第 3 次	垂直向	60.5	1.27	0.93
	水平向	54.5	1.21	0.95		水平向	51.1	1.16	0.95
第 2 次	垂直向	61.8	1.26	0.97	第 4 次	垂直向	60.1	1.21	0.92
	水平向	51.5	1.18	0.93		水平向	50.3	1.08	0.91

从表 4 的回归数据分析，随爆破次数的增多，衰减系数和指数逐渐减少，原因是每次爆破对岩体都会有一定的破碎，形成损伤区域。振动波在破碎岩体中产生散射和绕射，导致波速降低，使衰减参数出现相应变化。对不同起爆药量，同一方向距离相同的测点随药量增加振动速度增大，沿坡向垂直速度随比例药量（$\sqrt[3]{Q}/R$）增大呈非线性增加，如图 9 所示。

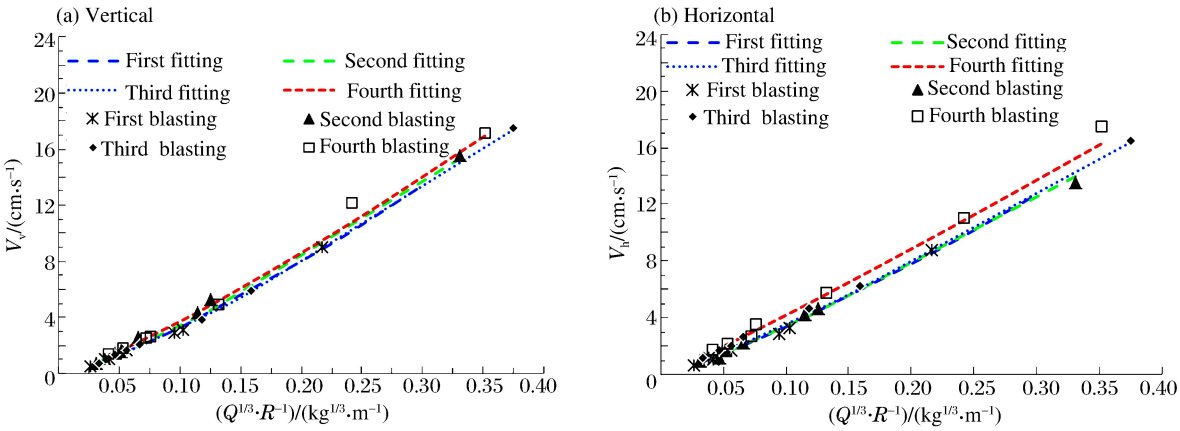

图 9 振动速度与比例药量的关系

Fig. 9 Relation between vibration velocity and scale explosive mass

多次爆破时，不同药量下衰减系数的数据回归有一定差异，随次数的增多，衰减参数出现微降，如图 10 所示。原因是衰减参数取决于坡体自身的性质，多次爆破使坡体裂隙增多，损伤区域增大，振动波在坡体内衰减增快，若不进行适当考虑会产生误差。当 3 kg$\leqslant Q_n \leqslant$8 kg 时，垂直与水平向的衰减参数分别为：

$$\begin{cases} K_v = -0.801Q_n + 65.4, \\ \alpha_v = 1.441Q_n^{-0.14}, \\ r^2 = 0.941; \\ K_h = -0.975Q_n + 56.7, \\ \alpha_h = 1.422Q_n^{-0.07}, \\ r^2 = 0.962 \end{cases} \tag{4}$$

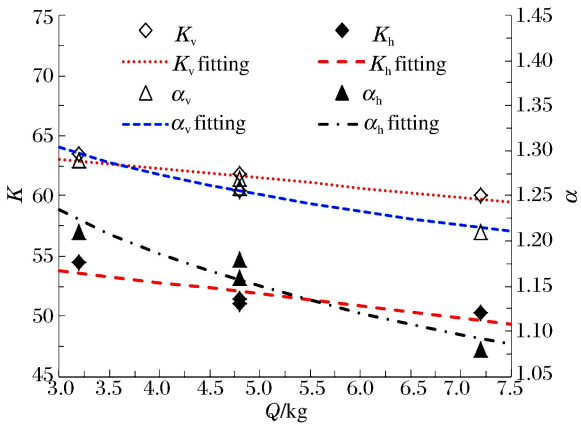

图 10 衰减参数与药量的关系

Fig. 10 Relation between attenuation parameters and explosive mass

2.3 爆破安全控制确定

通过不同药量爆破下坡体的累积损伤范围及测点振动峰值速度变化的分析，建立三者的关系并提出安全控制指标。选取垂直振动速度为例，建立爆破区域损伤范围和测点振动速度的对应式。按实测振动速度的拐点结合损伤深度，并以此作为爆破安全控制指标。

2.3.1 单次爆破安全指标

对于单次爆破，利用振动速度衡量岩体损伤范围，通过图 3、图 4 和图 8(a)得到振动速度与距爆源任意处的损伤范围，如图 11 所示。以距爆源 5.0 m 布置测点，通过振动速度即可反应出损伤程度，两者呈线性变化，当 3 kg$\leqslant Q_0 \leqslant$8 kg 时，其最大损伤半径和损伤深度分别为：

$$\begin{cases} R_{\mathrm{d,max}} = 0.415V + 0.787, \\ r^2 = 0.966; \\ H_{\mathrm{d,max}} = 0.493V - 5.29, \\ r^2 = 0.957 \end{cases} \tag{5}$$

式中：V 为距离爆源 5.0 m 时的峰值速度。将式(5)代入式(3)中即可得到一次最大起爆量。

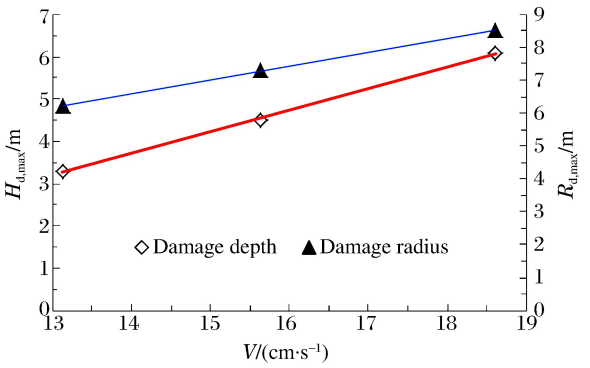

图 11 单次爆破损伤深度、损伤半径与振动速度的关系

Fig. 11 Relationbetween damage depth, radius and vibration velocity after single blasting

2.3.2 多次爆破安全指标

对于多次爆破，同样以振动速度衡量岩体损伤程度，通过图 5、图 6 和图 8(b)得到振动速度与距任意处的损伤范围，通过拟合建立曲线，得到任意点振速对应的爆破损伤深度与半径。两者呈非线性变化，测点振速越大，相应的损伤深度也越大，以距爆源 5.0 m 设置测点，当 3 kg$\leqslant Q_n \leqslant$8 kg时，对应关系见图 12。其测点速度对应的最大损伤半径和深度分别为：

$$\begin{cases} R'_{\mathrm{d,max}} = 0.004V^2 - 0.022V + 5.745, \\ r^2 = 0.932; \\ H'_{\mathrm{d,max}} = 0.009V^2 - 0.162V + 1.753, \\ r^2 = 0.948 \end{cases} \tag{6}$$

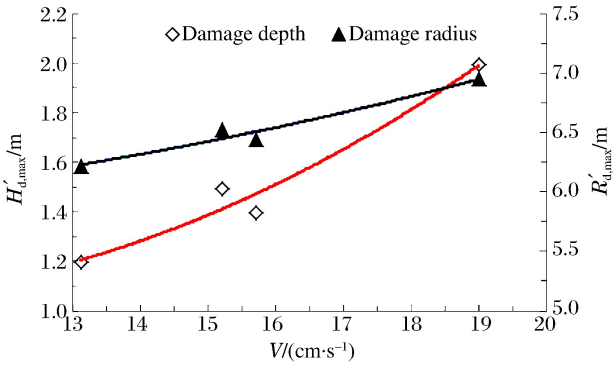

图 12 多次爆破最大损伤深度、损伤半径与振动速度的关系

Fig. 12 Relation between accumulative damage depth, radius and vibration velocity after repeated blasting

多次爆破过程中损伤深度和损伤半径增加量呈非线性增加，传播速度下降比单次爆破要快，原因是多次爆破在爆区形成的破碎区产生较多裂隙，这对工程爆破中常用小药量延时方式起到很好诠释。

2.3.3 爆破分析

以单次爆破为例，爆破开挖如图 13(a)所示。取表 4 中第 1 次爆破拟合得到的数据作为边坡衰减参数，按声速降低率 10%作为损伤标准，以岩体不出现损伤作为安全控制指标，代入式(5)中得到开挖面处的振速为 11.54 cm/s，爆源至开挖面损伤半径为 L=5.57 m。将参数代入式(3)，得到一次起爆最大控制药量为 4.62 kg，即一次起爆最大药量在 4.62 kg 时，对应的振速若大于 11.54 cm/s，在距爆源 5.57 m 范围内会使坡体产生新裂隙或扩展岩体内原有节理裂隙，导致坡体损伤，应采取有效的减震措施；当测点距爆源在 5.57 m 范围外，振速小于 11.54 cm/s 时，爆破振动波在坡体节理裂隙下沿深度方向声速发生一定变化，但不会对坡体产生损伤。采用多次爆破时，如图 13(b)所示，以不出现损伤作为安全控制指标时，将参数代入式(6)中得到基于首次爆破的多次爆破临界速度为 24.2 cm/s，损伤半径为 7.56 m，将临界速度代入式(3)，结合振动衰减参数式(4)即可得到多次爆破时的最大控制药量。

通过分析，以声速降低率 10%作为岩体损伤标准，质点速度对应的损伤界线作为安全控制指标，结合边坡衰减参数，按萨道夫斯基公式便可完成爆破开挖单段最大起爆药量的控制，并以此作为爆破损伤和爆破开挖的安全控制方法是可行的。

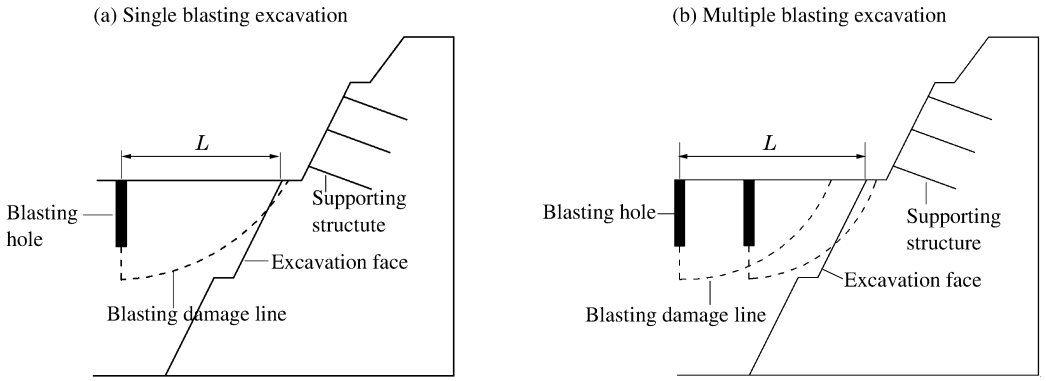

图 13 爆破开挖示意图

Fig. 13 Sketch map of slope blasting excavation

3 结　论

(1)通过爆破前后声速测试，近坡面的声速降低率比深层的要快，以速度降低率为 10%作为临界线定义损伤区，得到测区爆破前后边坡损伤深度主要在 0～3.5m；

(2)爆破振速衰减率随爆源距离的增加呈递减趋势，振速随比例药量的增大呈非线性增加；损伤范围随振速增大而增加。对于单次爆破，振速与损伤范围呈线性变化；而多次爆破的振速与损伤增量呈非线性变化；

(3)在不同药量下，提出爆破测点的振速与损伤范围结合的方法，以坡体不出现损伤作为控制指标，单次爆破对应的临界速度为 11.54 cm/s，损伤半径为 5.57 m，若测点振速大于临界值，应采取相应的减震措施；对多次爆破，基于单次爆破的临界速度为 24.2 cm/s，损伤半径为 7.56 m，并以临界速度作为控制指标实现爆区对应的单次和多次最大起爆药量，对同类型的顺层边坡爆破安全控制提供相应参考。

参考文献：

[1] 言志信，言浬，江平，等. 爆破振动峰值速度预报方法探讨[J]. 振动与冲击，2010，29(5)：179-182.
Yan Zhixin, Yan Li, Jiang Ping, et al. Prediction methods for blasting-induced ground vibration velocity[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010,29(5):179-182.

[2] Hao H, Wu C H, Zhou Y X. Numerical analysis of blast-induced stress waves in a rock mass with anisotropic continuum damage models, part I: Equivalent material property approach[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2002,35(2):79-94.

[3] Napier J A L, Peirce A P. The use of a multiple expansion techniques to analyze large scale fracture process and seismic recurrence effects in deep level mines [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 1997,34(3/4):680-691.

[4] 曹孝君，吴青山，张继春，等. 顺层岩质边坡的爆破振动控制标准试验研究[J]. 岩石力学与工程学报，2003，22(11)：1924-1928.
Cao Xiaojun, Wu Qingshan, Zhang Jichun, et al. Testing study on control standard of vibration for layered rock slope blasting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003,22(11):1924-1928.

[5] 张继春，郭学彬，郑爽英，等. 顺层边坡岩体的爆破振动特性试验研究[J]. 地下空间与工程学报，2005，1(7)：1041-1044.
Zhang Jichun, Guo Xuebin, Zheng Shuangying, et al. Experimental study on vibration characteristics of rock mass blasting at layered slope[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005,1(7):1041-1044.

[6] 闫长斌，徐国元，杨飞. 爆破动荷载作用下围岩累积损伤效应声波测试研究[J]. 岩土工程学报，2007，29(1)：88-92.
Yan Changbin, Xu Guoyuan, Yang Fei. Measurement of sound waves to study cumulative damage effect on sur-

rounding rock under blasting load[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007,29(1):88-92.

[7] Li Haibo, Xia Xiang, Li Jianchun, et al. Rock damage control in bedrock blasting excavation for a nuclear power plant[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2011,48(2):210-218.

[8] 彭德红.边坡开挖爆破的声波测试技术[J].武汉理工大学学报,2004,26(12):38-40.
Peng Dehong. Sound wave test technology for blasting excavation in side slope[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2004,26(12):38-40.

[9] 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 discriminance of rock mass damage induced by blasting[J]. Engineering Blasting, 2001,7(1):12-16.

[10] 闫长斌.基于声速变化的岩体爆破累积损伤效应[J].岩土力学,2010,31(增 1):187-192.
Yan Changbin. Blasting damage cumulative effect of rock mass based on sound velocity variation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010,31(Suppl 1):187-192.

[11] 颜峰,姜福兴.爆炸冲击载荷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.

[12] 唐海,李海波.反映高程放大效应的爆破振动公式研究[J].岩土力学,2011,32(3):820-824.
Tang Hai, Li Haibo. Study of blasting vibration formula of reflecting amplification effect on elevation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011,32(3):820-824.

Blasting vibration control and damage characteristics of bedding rock slopes

Wang Zhide[1], Xia Yuanyou[1], Zhou Xiong[1], Xia Guobang[2], Yang Jinhua[1,3]

(1. *School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan* 430070, *Hubei, China*;
2. *Yunnan Highway Development & Investment CO., LTD., Kunming* 650101, *Yunnan, China*;
3. *School of Architectural Engineering, Yunnan Jiaotong College, Kunming* 650101, *Yunnan, China*)

Abstract: In order to understand the law of vibration propagation and the damage degree of the bedding rock slope during blasting excavation, we studied the bedding slope in Puli-Xuanwei Expressway in Yunnan Province as an example. By applying acoustic tests in combination with the monitoring vibration and sound velocities under different depths of the rock mass, we obtained the vibration velocities at different locations after blasting, and analyzed the damage range as well as the propagation and attenuation law of the vibration wave measured of different explosive doses. The results show that the vibration velocity at any point of the blasting area exhibits a corresponding relationship with the damage depth of the slope. It exhibits a linear relation for single explosion and a presents non-linear relation for repeated explosion. Assuming a decrease of 10% in the sound velocity as the damage limit and the control value of blasting, the critical velocity corresponding to single explosion is 11.54 cm/s, the damage radius is 5.57 m, and the critical velocity corresponding to repeated explosion is 24.20 cm/s, the damage radius is 7.56 m. The largest explosive dose is deduced by two ways mentioned above according to the Sadaovsk Formula.

Keywords: mechanics of explosion; blasting control; acoustic test; bedding rock slope; damage

(责任编辑 张凌云)