基于概率统计的浅埋软岩地下工程爆破振动安全控制研究①

李朝朋[1], 黄海仙[2], 李海谦[2], 李晓亮[1], 叶齐鹏[1], 陆海勇[1], 李启月[2]
(1.甘肃合赛公路建设发展有限公司, 甘肃 甘南 747000; 2.中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘 要: 以某浅埋软岩地下工程为背景,进行了大量隧道地表轴向爆破振动监测。基于监测数据,通过概率分布研究确定了质点峰值振动速度(PPV)符合对数正态分布特性。针对 PPV 的随机性特征,引入对数正态分布理论和置信度水平分析方法,将 PPV 衰减模型与概率分布函数相结合,构建了爆破振动安全预测及控制模型,并应用于工程敏感地段。结果表明,当爆破方案的最大单段药量为 43.2 kg 时,2#敏感点与爆源水平距离需大于 35.044 m 方可满足 95% 置信安全标准;当爆破方案的最大单段药量为 18.6 kg 时,2#敏感点与爆源水平距离需大于 25.660 m 方可满足 95% 置信安全标准。基于此模型,对隧道敏感地段制定差异化爆破管控方案。该方法为同类软岩地下工程爆破施工提供了理论支撑。

关键词: 地下工程; 爆破振动; 峰值振速; 对数正态分布; 置信度; 安全预测; 浅埋软岩; 振动监测
中图分类号: TD235 **文献标志码**: A doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2026.04.002
文章编号: 0253-6099(2026)04-0008-08

Probability-Statistics-Based Safety Control of Blast Vibration for Shallow-Buried Underground Soft-Rock Engineering

LI Chaopeng[1], HUANG Haixian[2], LI Haiqian[2], LI Xiaoliang[1], YE Qipeng[1], LU Haiyong[1], LI Qiyue[2]
(1.*Gansu Hesai Highway Construction Development Co., Ltd.*, *Gannan* 747000, *Gansu*, *China*; 2.*School of Resources and Safety Engineering*, *Central South University*, *Changsha* 410083, *Hunan*, *China*)

Abstract: As for underground engineering projects in shallow-buried soft rock, extensive blast vibration monitoring was carried out along the axial direction on the tunnel ground surface. Based on the monitoring data, probability distribution analysis confirmed that the peak particle velocity (PPV) followed the lognormal distribution. Considering the randomness of PPV, the lognormal distribution theory and confidenc-level analysis method were introduced. A blast vibration safety prediction and control model was established by combining the PPV attenuation model with the probability distribution function, and then applied to the sensitive sections of the project. The results show that in a blasting scheme with the maximum charge per delay at 43.2 kg, the horizontal distance between sensitive point 2# and the blast source should be greater than 35.044 m to satisfy the safety criterion of a 95% confidence; while in a scheme with the maximum charge per delay at 18.6 kg, that horizontal distance shall exceed 25.660 m to meet the 95% confidence. On the basis of this model, differentiated blasting control schemes are formulated for sensitive tunnel sections. This proposed method provides theoretical support for blasting operation for similar underground softrock projects.

Key words: underground engineering; blast vibration; peak particle velocity; lognormal distribution; confidence level; safety prediction; shallow-buried soft rock; vibration monitoring

随着矿产资源开发与交通基础设施建设的快速发展,在浅埋软弱岩层中施工的地下工程日益增多。钻爆法凭借成本低、效率高、适应性强等优势,至今仍是矿山巷道及各类地下工程开挖中的常用方法[1]。然而,该方法在高效破岩的同时亦伴随许多负面影响,如爆破振动、空气冲击波、飞石、噪声、粉尘及有毒气体

① **收稿日期**: 2026-02-15
基金项目: 国家自然科学基金(52474163)
作者简介: 李朝朋(1981—),男,河北石家庄人,高级工程师,主要从事炸药研究与爆破工程技术研究。E-mail:572852399@qq.com

等[2]。其中,爆破振动是对岩体和环境最危险的因素。浅埋软岩地层具有强度低、变形大、易受扰动等特点,在此类地层中爆破施工更容易产生较大的振动效应,可能对上部岩体及地表设施构成威胁。因此,揭示浅埋软岩地下工程的爆破振动效应,建立精准预测模型,对优化爆破参数、保障施工安全具有重要的工程应用价值。

质点峰值振动速度(PPV)是衡量爆破振动强度的重要指标。预测质点峰值振动速度的方法主要有经验公式法、智能预测法、数值模拟法等[3],对工程应用来讲,经验公式法便捷、简单,但在不同地形和地层条件多变的情况下,其适用性受到限制。因此,许多学者考虑高程差[4-6]、自由面个数[7]、岩体质量[8]、药包类型[9]、振动频率[10]等因素,提出了各种萨道夫斯基修正公式,但这些预测模型都是基于不存在空洞效应区域的实测数据拟合得到的。针对存在空洞效应的区域,文献[11]基于未空洞区域预测模型,结合空洞效应影响参数,建立了土岩复合地下工程的振动速度分段预测模型;文献[12]通过分析先行洞对后行洞造成的空洞效应影响,基于量纲分析法,建立了浅埋偏压地下工程掘进爆破地表振动计算模型,通过实测数据验证了该模型的正确性。总体来说,关于浅埋软岩地下工程空洞区段地表爆破振动衰减规律的研究较少,还没有形成系统可靠的爆破振动预测模型,因此,有必要进一步研究适用于浅埋软岩地下工程空洞区段地表的预测模型,以精准预测 PPV。

工程实践表明,PPV 预测值与实测值之间存在一定偏差,部分实测值会在预测值上下波动[13]。这种预测误差并非固定值,因此难以保证预测结果的绝对安全性。主要原因在于 PPV 预测方程未考虑岩石介质的动态特性、非均质性与爆破参数的不确定性等因素,导致预测结果表现出显著的不确定性。即使爆破设计满足振动速度标准,这种不确定性仍可能导致实际结果超标。概率论和数理统计是解决不确定性问题的有力数学工具[14]。一些学者尝试将可靠度理论、置信度水平等引入 PPV 预测中,确定了模型相关参数(k,α)的上下限取值,评估 PPV 预测方程的安全性[15]。后续研究进一步从贝叶斯概率的角度对 PPV 预测模型及其参数的不确定性进行量化分析,验证经验爆破设计方程的可靠性[16-18]。现有文献表明,尽管 PPV 的概率分布规律是振动效应不确定性分析的核心要素[19-20],但现有研究多局限于对爆破振动参数统计特征的定性描述,或未经充分验证便假设其服从正态分布,这与实际工程监测数据存在较大差异;另外,目前尚未建立基于实测数据的概率模型验证体系,而概率分布形态的差异会显著影响不确定性分析的结果。因此,建议基于现场监测数据构建最优概率分布模型,从而提高振动效应预测的可靠性。

鉴于此,本文结合某地下爆破开挖工程,通过振动监测研究爆破的空洞效应,结合统计学知识分析实测爆破振动的统计学规律,进而基于置信度水平建立爆破振动预测及控制模型,可为类似工程提供借鉴。

1　工程概况及振动监测

1.1　工程背景

某地下隧道工程为双线结构,右线起讫桩号 K89+930~K91+660,总长 1 730 m,左线起讫桩号 ZK89+980~ZK91+640,总长 1 660 m,隧址区地质构造复杂,褶皱较发育,区域稳定性欠佳,隧道上地表存在断层、重要保护地段。上覆地层为第四系全新统坡积(Q_4dl)粉质黏土,下伏基岩为新近系上统(N_2)泥质砂岩、砂砾岩,其中,上覆粉质黏土(Q_4dl)呈现灰黑色,软塑-可塑,土质不均,含少量砾石,厚不足 2 m,广泛分布于山体坡面。下伏基岩中新近系砂砾岩(N_2)呈暗红色,泥质胶结,层状构造,砾石颗粒磨圆度较好,属极软岩;新近系泥质砂岩(N_2)呈暗红色,砂质结构,中厚层构造,岩心呈砂土状,风化痕迹明显,成岩性差,泥质含量较高,原岩结构被破坏。这一地质条件在矿山深部软岩巷道中具有代表性。岩石物理力学参数见表 1。

表 1　岩石物理力学参数

Table 1　Physical and mechanical parameters of rock

岩石类型	密度/(kg·m^{-3})	弹性模量/GPa	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	纵波声速/(m·s^{-1})
砂砾岩	2 450	19.32	0.80	0.35	2 000
泥质砂岩	1 870	15.67	0.50	0.22	1 600

本次试验段为左右洞进口段,该段隧道埋深较浅,洞室围岩无断裂构造,该岩层节理裂隙发育,岩石破碎,自稳能力差,采取三台阶爆破的方法分台阶起爆,图 1 为上台阶炮孔布置图。

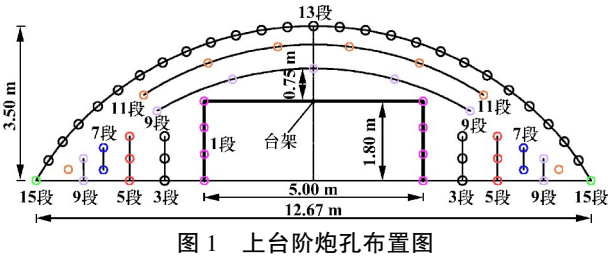


图 1　上台阶炮孔布置图

Fig. 1　Layout of blast holes in upper bench

1.2 爆破振动监测

在掌子面前后区域,沿地表轴线方向间隔 5~10 m 布置爆破振动监测点(3~8 个),每次布点位置依掌子面桩号推进距离及爆破效果进行适当调整。监测点布置图如图 2 所示,测点 B1 和 B2 位于掌子面后方成洞区,测点 A1 与 A2 位于掌子面前方未成洞区。本次爆破振动监测采用成都拓普测控的 NUBOX-8016 爆破振动测量仪。在正式监测前,需对 NUBOX-8016 爆破振动测量仪的工作参数进行配置,以确保爆破振动信号能够被有效且准确地采集。经过预测试和分析,将仪器的触发电平、采样频率、采样时间及采样延迟分别设置为 0.1 cm/s、50 kHz、2 s 及-100 ms。为了保证传感器与地面刚性连接,使用生石膏粉固定传感器,在布设传感器时,可用水平尺调平各个方向,使气泡居中。

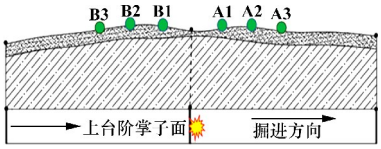


图 2 监测点布置图

Fig. 2 Layout of monitoring points

工程爆破时在地表监测到的空洞区段爆破振动典型波形图如图 3 所示。

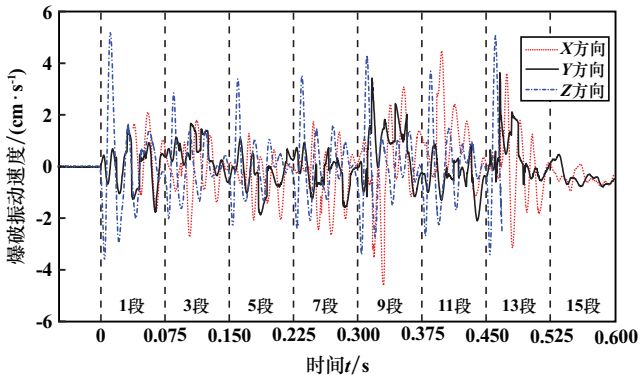


图 3 空洞区段爆破振动典型波形图

Fig. 3 Typical blast vibration waveform for cavity sections

2 实测 PPV 概率分布研究

为确定该地下工程 PPV 的概率分布特性,统计实测质点峰值振动速度,部分空洞区段地表爆破振动监测数据如表 2 所示,并绘制了其分布图,如图 4 所示。

表 2 空洞区段地表爆破振动监测数据

Table 2 Monitoring data of surface blast vibration for cavity sections

监测时间	序号	爆源距离/m			单段最大装药量 Q/kg	质点峰值振动速度/(cm·s^{-1})		
		水平距离 D	空间距离 R	埋深 h		PPV_{max}	PPV_Z	PPV_S
2023.12.02	1	5.0	21.172	20.150	14.4	9.126	9.126	10.472
	2	2.5	21.191	20.810	14.4	6.696	6.696	7.618
2023.12.03	3	4.7	22.817	22.015	16.8	12.005	12.005	12.897
	4	3.8	10.458	9.015	16.8	2.966	2.966	3.078
2023.12.04	5	9.5	14.222	9.015	10.8	7.229	7.229	7.278
	6	4.5	11.461	9.765	10.8	13.048	13.048	13.668
…	…	…	…	…	…	…	…	…
2023.12.14	47	9.1	16.581	12.750	18.6	10.555	10.555	11.356
	48	4.1	14.615	13.500	18.6	11.364	11.364	12.001
	49	21.1	25.312	11.400	18.6	5.059	5.059	5.552
	50	16.1	21.302	12.000	18.6	6.445	6.445	7.153

注:PPV_{max} 表示 X、Y、Z 3 个分量中最大的 PPV;PPV_Z 表示 Z 方向的 PPV;PPV_S 表示 3 个分量 PPV 的矢量和速度。

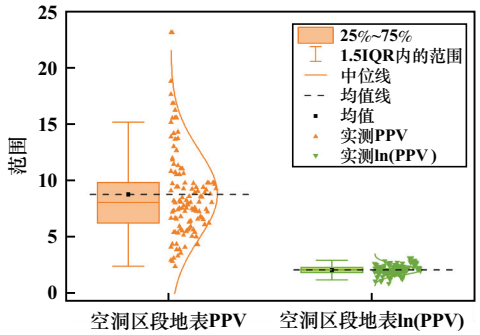


图 4 空洞区段地表实测 PPV 和 ln(PPV)分布箱线图

Fig. 4 Box plot of distributions of measured PPV and ln(PPV) at cavity-section surface

由图 4 可知,隧道工程实测 PPV 的下四分位至上四分位的范围为 5.779~9.863 cm/s,均值为 8.358 cm/s。箱体最中间的数值为中位数。空洞区段地表所有实测 PPV 的自然对数值[ln(PPV)]表现为左右大致对称,均值约等于中位数,满足正态分布的特征;当一个变量的对数值符合正态分布时,这个变量本身符合对数正态分布,所有实测 PPV 值表现为右偏分布,均值大于中位数,也满足对数正态分布的特征。

为进一步定量化描述概率分布的可靠性,绘制了实测 PPV 对数值的正态 Q-Q 图,如图 5 所示,并利用线性拟合的决定系数 R^2 进行验证,拟合结果见表 3。

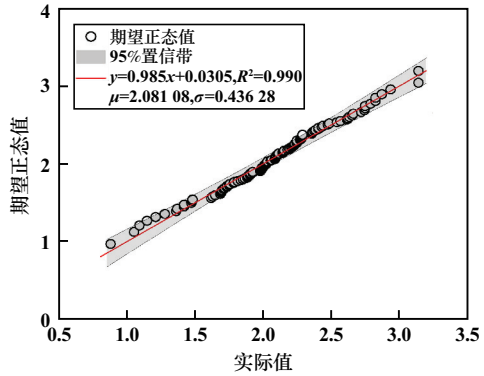


图 5　PPV 对数值的正态 *Q-Q* 图

Fig. 5　Normal *Q-Q* plot for log-transformed PPV values

表 3　概率分布拟合结果

Table 3　Probability-distribution fitting results

类别	μ	σ^2	R^2
随机误差ε	$1.863\ 39\times10^{-6}$	0.008 02	0.990
ln(PPV)	2.081 08	0.190 34	0.990

根据图 5 和表 3 所示,基于正态分布模型对空洞区段地表 ln(PPV)的概率分布进行线性回归拟合,得到决定系数 R^2 为 0.990。这表明空洞区段地表所有实测 PPV 对数值能够较好地服从正态分布。这一结果充分验证了假设的成立。因此,假设:

$$\ln(\mathrm{PPV}) \sim N(\mu,\sigma^2) \tag{1}$$

$$\mu=\ln(\mathrm{PPV_c}) \tag{2}$$

$$\sigma^2=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left[\ln(\mathrm{PPV}_{mi})-\ln(\mathrm{PPV}_{ci})\right]^2 \tag{3}$$

式中:$\mathrm{PPV_m}$ 为质点峰值振动速度实测值,cm/s;$\mathrm{PPV_c}$ 为质点峰值振动速度预测值,cm/s;σ^2 为实测值偏离预测值的程度;n 为爆破试验次数。

由式(1)可知,随机变量 PPV 服从对数正态分布,则 PPV 的概率密度函数为:

$$f(V_{\mathrm{PPV}},\mu,\sigma)=\frac{1}{V_{\mathrm{PPV}}\sigma\sqrt{2\pi}}\mathrm{e}^{-\frac{(\ln V_{\mathrm{PPV}}-\mu)^2}{2\sigma^2}},V_{\mathrm{PPV}}>0 \tag{4}$$

式中:V_{PPV} 为随机变量 PPV 的取值;μ 为对数正态分布对应的正态分布均值;σ 为对数正态分布对应的正态分布标准差。

经概率分布研究,随机变量 ln(PPV)近似服从正态分布。因此,随机变量 PPV 近似服从对数正态分布,则 PPV 的分布函数为:

$$F(\mathrm{PPV})=P[\ln(\mathrm{PPV})\leqslant\ln(V)],\mathrm{PPV}>0 \tag{5}$$

为方便查表计算,将随机变量 ln(PPV)的分布函数转换为标准正态分布,根据概率论知识,令 $\gamma=\dfrac{\ln(\mathrm{PPV})-\mu}{\sigma}$,则 $\gamma\sim N(0,1)$,转换后的分布函数为:

$$F(\mathrm{PPV})=\Phi(\gamma)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{\gamma}\mathrm{e}^{-\frac{r^2}{2}}\mathrm{d}r,\mathrm{PPV}>0 \tag{6}$$

3　模型建立

3.1　安全水平

为确保地下工程地表的安全性,必须将 PPV 控制在安全阈值以下。基于置信度理论,将安全阈值定义为单侧置信区间的上限。通过确定最大单段装药量 Q、测点与爆源之间的水平距离 D 以及埋深 h,将 PPV 低于安全阈值概率 P 的测点处定义为安全水平。若将洞顶地面的 PPV 安全阈值记为 V_s,则可得:

$$P(\mathrm{PPV}<V_s)=F(V_s)=\Phi(\gamma_s)=P \tag{7}$$

根据式(7)计算 γ_s 的值,并查阅标准正态分布表,可得安全水平 P 值。

$$\gamma_s=\frac{\ln(V_s)-\ln\left[K\left(\dfrac{h}{D}\right)^{\alpha}\left(\dfrac{D}{Q^{1/3}}\right)^{-\beta}\right]}{\sigma} \tag{8}$$

根据一维应力波理论,爆破荷载作用下应力波在岩体中的传播特性可用应力-速度关系式描述,即质点振动速度 V 与岩石静态抗拉强度 σ_t 满足特定函数关系:

$$V=\frac{\sigma_t}{\rho C_p} \tag{9}$$

式中:ρ 为岩石密度;C_p 为纵波波速。

通过结合应力波传播特性与岩体损伤演化机制,构建地表爆破振动速度安全阈值的理论计算公式。损伤变量 M 计算公式为:

$$M=1-\frac{E}{E_0}=1-K_v \tag{10}$$

式中:E 为岩体爆破后的弹性模量,Pa;E_0 为岩体爆破前的弹性模量,Pa;K_v 为岩体完整性系数。

假设爆破前后岩体密度几乎不变,通过弹性波在岩体中传播时与声波波速之间的关系变换,可得:

$$M=1-\frac{C_p^{\ 2}}{C_{p0}^{\ 2}}=1-(1-\eta)^2 \tag{11}$$

式中:η 为岩体声波波速降低率,$\eta=1-C_p/C_{p0}$;C_{p0} 为爆破前波速。

根据《水工建筑物岩石地基开挖施工技术规范》[21]的规定,岩体声波波速 $\eta\leqslant10\%$ 时,可判定岩体结构未受到爆破损伤破坏,本文考虑到该隧址区穿越自然保护区的特殊性,取 η 为 5%,得到考虑损伤阈值后的质点峰值振动速度安全阈值 V_s 计算公式:

$$V_s = \frac{\sigma_{t,max}}{0.95\rho_0 C_{p0}} \tag{12}$$

式中：$\sigma_{t,max}$为岩石的最大抗拉强度；ρ_0 为岩体爆破前密度，kg/m^3。

该基于应力波理论和损伤力学的安全阈值确定方法普遍适用于矿山采场、巷道及边坡的爆破损伤控制。

3.2 安全药量

若已知空洞区段地表某测点与爆源的水平距离 D 及埋深 h，为确保该测点的安全水平达到预设阈值 P_0，可通过动态调整最大单段装药量 Q 实现目标。基于式(8)，可推导出测点安全水平为 P_0 时允许的最大单段安全装药量 Q_{max}：

$$Q_{max} = f(D,h,P_0) = \left[\frac{(V_s/e^{\sigma\gamma_{s0}})D^{\alpha+\beta}}{K\cdot h^{\alpha}}\right]^{\frac{3}{\beta}} \tag{13}$$

式中：$f(D,h,P_0)$为综合考虑水平距离、埋深及安全水平的函数关系式；γ_{s0}根据 P_0查标准正态分布表可知。

通过式(13)，工程人员可根据现场实测数据快速计算安全装药量，为爆破参数优化提供量化依据。

3.3 安全范围

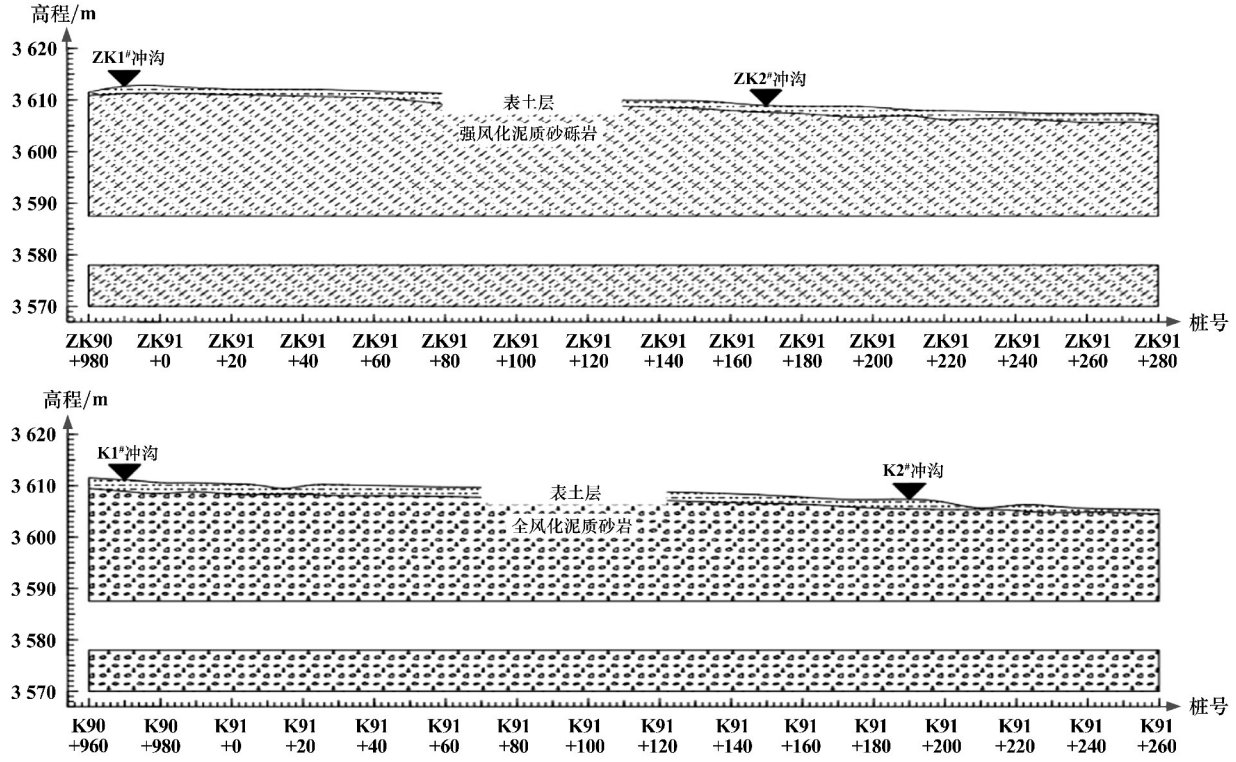
随着掌子面的持续掘进，爆源位置呈现动态变化特征。基于预设的最大单段装药量 Q 和安全水平阈值 P_0，可建立空洞区某测点与爆源的水平距离 D 及埋深 h 之间的函数关系。由此，当测点的安全水平达到 P_0时，D 和 h 需满足的约束条件所界定的区间范围即为安全范围。根据式(8)，可进一步推导出 D 与 h 的显式关系式为：

$$D = g(h,Q,P_0) = (\alpha+\beta)\sqrt{h^{\alpha}\frac{C_1}{C_2}} \tag{14}$$

式中：$C_1 = KQ^{\beta/3}$；$C_2 = V_s/e^{\sigma\gamma_{s0}}$；$g(h,Q,P_0)$为综合考虑埋深、装药量及安全水平的函数关系式。

4 实例验证

敏感点位置示意图如图6所示，图中ZK、K分别表示隧道左线、隧道右线，并分别设置固定的1#敏感点与2#敏感点，埋深分别为33、28、35、28 m，对应ZK1#、ZK2#、K1#、K2#敏感点。



(a) 隧道左线；(b) 隧道右线

图6 敏感点位置示意图

Fig. 6 Schematic of sensitive point locations

当敏感点处于左右线掌子面正上方时，按照最大单段装药量18.6 kg，计算PPV安全阈值为7.519 cm/s，通过安全水平计算公式得到安全水平，结果如表4所示。

当2#敏感点位于掌子面正上方时，其安全水平为0.506，表明该区域在爆破施工中存在49.4%的失稳风险。随着掌子面推进，敏感点进入掌子面后方空洞区，

表 4　敏感点处于掌子面正上方时的安全水平

Table 4　Safety confidence level for sensitive points directly above working face

敏感点	安全水平
ZK1#	0.528
ZK2#	0.506
K1#	0.536
K2#	0.506

由于爆源距离增大,2#敏感点处振动能量衰减,其安全水平才会提升至 0.506 以上。

基于小概率事件理论(单次事件发生概率低于 5%时视为可接受风险),工程中通常将安全水平阈值设定为 0.95(即 95%置信度)。当最大单段装药量为 18.6 kg 时,2#敏感点安全水平明显低于 0.95 的管控要求。所以,应根据管控要求进一步讨论 2#敏感点的安全药量及安全范围。

采用最大单段安全装药量预测及控制模型,计算安全水平分别取 0.95、0.98、0.99 时的敏感点最大单段安全装药量 Q_{max},计算模型如表 5 所示。根据表 5 的Q_{max}计算模型可以确定敏感点位于空洞区上方时距爆源不同水平距离 D 对应的最大单段安全装药量 Q_{max}。

表 5　敏感点最大单段安全装药量计算模型

Table 5　Calculation model for maximum safe charge per delay for sensitive points

安全水平	γ_{s0}	2#敏感点(h=28 m)	ZK1#敏感点(h=33 m)	K1#敏感点(h=35 m)
0.95	1.645	$Q_{max}=0.002\,89D^{2.709}$	$Q_{max}=0.003\,03D^{2.709}$	$Q_{max}=0.003\,09D^{2.709}$
0.98	2.054	$Q_{max}=0.002\,01D^{2.709}$	$Q_{max}=0.002\,11D^{2.709}$	$Q_{max}=0.002\,15D^{2.709}$
0.99	2.326	$Q_{max}=0.001\,58D^{2.709}$	$Q_{max}=0.001\,66D^{2.709}$	$Q_{max}=0.001\,69D^{2.709}$

以 2#敏感点为例,其 Q_{max}设计曲线如图 7 所示,当最大单段装药量为 18.6 kg 时,在距爆源水平距离 D 为 25.621 m 处,安全水平为 0.95;当 D 为 29.304 m 时,安全水平为 0.98;当 D 为 32.042 m 时,安全水平为 0.99。因此,以安全水平 0.95 为敏感点的安全标准,在距爆源水平距离超过 25.621 m 后,才能采用 Q_{max}=18.6 kg。敏感点与爆源水平距离 D 越大,允许采用的单段装药量越大,但最大单段装药量不得超出安全水平 0.95 对应的控制线。根据 Q_{max}设计曲线,在距离爆源较近的区域,为避免对围岩造成过大扰动,不宜采用钻爆法开挖,建议改用机械开挖法。

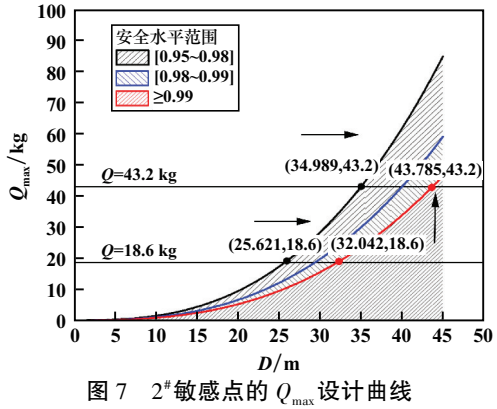


图 7　2#敏感点的 Q_{max}设计曲线

Fig. 7　Q_{max} design curve for sensitive point 2#

将单侧置信区间的上限设置为 7.519 cm/s,并代入最大单段装药量 18.6 kg 与 43.2 kg,计算得到安全范围预测及控制模型,如表 6 所示。

表 6　安全范围预测及控制模型

Table 6　Prediction and control model for blast-vibration safety range

安全水平	γ_{s0}	Q=18.6 kg 模型	Q=43.2 kg 模型
0.80	0.842	$D=28.345h^{-0.109}$	$D=38.710h^{-0.109}$
0.85	1.037	$D=30.220h^{-0.109}$	$D=41.270h^{-0.109}$
0.90	1.282	$D=32.752h^{-0.109}$	$D=44.728h^{-0.109}$
0.95	1.645	$D=36.898h^{-0.109}$	$D=50.391h^{-0.109}$
0.98	2.054	$D=42.203h^{-0.109}$	$D=57.635h^{-0.109}$
0.99	2.326	$D=46.146h^{-0.109}$	$D=63.020h^{-0.109}$

最大单段装药量分别为 43.2、18.6 kg 时,2#敏感点处的安全范围分别如图 8、图 9 所示。

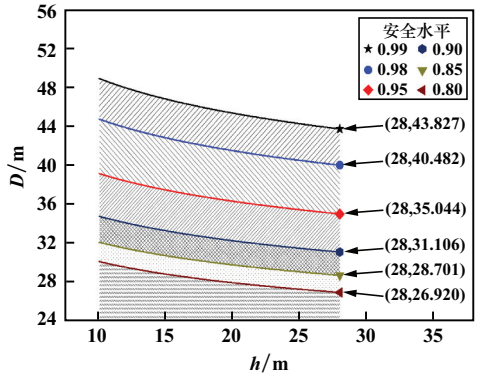


图 8　Q=43.2 kg 时 2#敏感点处的安全范围

Fig. 8　Safety range for sensitive point 2# at Q=43.2 kg

分析图 8、图 9 可知:

1)同一埋深条件下,安全水平与距爆源水平距离

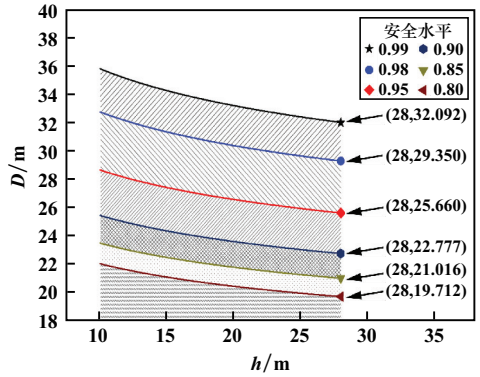


图 9 Q=18.6 kg 时 2#敏感点处的安全范围

Fig. 9 Safety range for sensitive point 2# at Q=18.6 kg

D 成正相关;安全水平增量相同时,D 增幅呈现非线性加速趋势。

2) 最大单段装药量 43.2 kg 时,2#敏感点距爆源水平距离为 26.920~43.827 m,安全水平为 0.80~0.99;当 D>35.044 m 时,安全水平才能大于 0.95。最大单段装药量为 18.6 kg 时,2#敏感点距爆源水平距离为 19.712~32.092 m,安全水平为 0.80~0.99;当 D>25.660 m,安全水平才能大于 0.95。

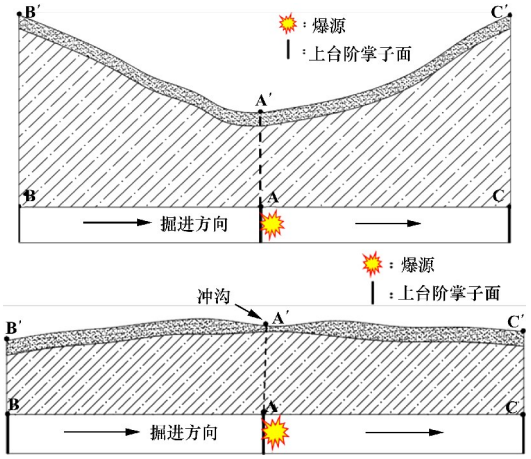
3) 当 2#敏感点最大单段装药量从 43.2 kg 降至 18.6 kg、安全水平大于等于 0.95 时,对应的最小距爆源水平距离从 35.044 m 减少至 25.660 m,缩短了9.384 m。为缩短安全水平大于等于 0.95 时的最小安全距离,需调整当前三台阶爆破方案,具体措施包括:控制最大单段装药量至更低量级,比如降至 10.8 kg 时,敏感地段敏感点可实现 $D \geqslant 20.955$、安全水平稳定大于等于 0.95;相较于 18.6 kg 装药方案所需的最小爆源安全水平距离缩短 4.705 m,减少了 18.36%。

通过以上分析,该爆破振动安全预测及控制模型可以应用到该隧道工程进行分段爆破振动控制,以极浅埋段、敏感点 2 个特征为依据,分为以下 2 个特殊地段,如图 10 所示。

离敏感点较远处,当掌子面位置从埋深较深处 B 点推进到较浅处 A 点时,以掌子面正上方的 Q_{max} 设计曲线调整当前爆破方案;当掌子面位置从埋深较浅处 A 点推进到较深处 C 点时,以埋深最浅处 A′点的安全水平为准调整爆破方案;当掌子面位置接近敏感点时,在接近敏感点之前,以掌子面正上方的 Q_{max} 设计曲线进行爆破振动安全开挖控制;当敏感点进入空洞区段地表时,以敏感点 A′处的安全水平为准调整爆破方案。

5 结论

1) 通过现场监测与数据分析,明确了随机变量



(a) 极浅埋段;(b) 敏感地段(冲沟处)

图 10 特殊地段图

Fig. 10 Layout of special section

PPV 服从对数正态分布。这一分布特性对矿山软岩巷道及类似地质条件下的地下工程具有普遍参考价值。

2) 结合一维应力波理论与岩体损伤控制标准[声波波速降低率(η=5%)]确定振动安全阈值,融合对数正态分布与 95% 置信度构建爆破振动概率预测控制模型;工程测算表明,满足 95% 置信安全标准时,2#敏感点与爆源水平距离在最大单段装药量 43.2、18.6 kg 工况下需分别大于 35.044、25.660 m。

3) 依据埋深、空洞与敏感点分布划分极浅埋段、冲沟敏感空洞段两类管控区域,提出差异化爆破施工方案:远离敏感区域按埋深调节单段装药量,临近敏感点且安全距离不足时采取减少装药量或机械开挖措施,相关概率控制方法可为同类软岩地下工程爆破施工提供理论支撑。

参考文献(References):

[1] Bhagat N K, Singh R K, Hembram P, et al. A scientific exploration of blast-induced ground vibration mitigation strategies for sustainable coal mining in India[J]. Mining, Metallurgy & Exploration, 2024, 41(1):123-138.

[2] 汪旭光. 爆破手册[M]. 北京:冶金工业出版社, 2010.
Wang Xuguang. Blasting manual[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2010.

[3] 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.

[4] 周文海,梁瑞,余建平,等. 边坡抛掷爆破峰值质点振动速度的无量纲分析[J]. 爆炸与冲击, 2019,39(5):76-83.
Zhou Wenhai, Liang Rui, Yu Jianping, et al. Dimensionless analysis on peak particle vibration velocity induced by slope casting blast[J].

Explosion and Shock Waves, 2019,39(5):76-83.

[5] 杨珊,陈建宏,郭宏斌,等. 基于回归分析的隧道爆破振动传播规律研究[J]. 中国安全科学学报, 2011,21(10):71-75.
Yang Shan, Chen Jianhong, Guo Hongbin, et al. Application of regressive analysis in the research on propagation law of tunnel blasting vibration[J]. China Safety Science Journal, 2011,21(10):71-75.

[6] 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.

[7] 李启月,肖宇航,魏快快,等. 露天边坡体爆破振动特性研究[J]. 黄金科学技术, 2024,32(3):491-500.
Li Qiyue, Xiao Yuhang, Wei Kuaikuai, et al. Characterization of blasting vibration in open slopes[J]. Gold Science and Technology, 2024,32(3):491-500.

[8] 于崇,岳好真,李海波,等. 基于岩体质量的爆破控制参数及可靠度分析[J]. 岩土力学, 2021,42(8):2239-2249.
Yu Chong, Yue Haozhen, Li Haibo, et al. Analysis of blasting control parameters and reliability based on rock mass quality[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021,42(8):2239-2249.

[9] 单仁亮,赵岩,王海龙,等. 下穿铁路隧道爆破振动衰减规律研究[J]. 爆炸与冲击, 2022,42(8):143-157.
Shan Renliang, Zhao Yan, Wang Hailong, et al. Attenuation of blasting vibration in a railway tunnel[J]. Explosion and Shock Waves, 2022,42(8):143-157.

[10] Wang Q, Tao T J, Jia J, et al. Analysis of blasting vibration duration considering frequency and energy and its application[J]. Heliyon, 2024,10(12):e33210.

[11] 朱明,胡鑫涛,冯志威,等. 土岩复合地层条件下爆破振速衰减模型优选[J]. 科学技术与工程, 2021,21(10):4211-4218.
Zhu Ming, Hu Xintao, Feng Zhiwei, et al. Optimization of blasting vibration velocity attenuation model under the condition of soil-rock strata[J]. Science Technology and Engineering, 2021,21(10): 4211-4218.

[12] 汪艮忠,胡宇,周汉红,等. 浅埋偏压隧道掘进爆破地表振动效应研究[J]. 工程爆破, 2023,29(6):147-152.
Wang Genzhong, Hu Yu, Zhou Hanhong, et al. Study on surface vibration effect of shallow-buried bias tunnel[J]. Engineering Blasting, 2023,29(6):147-152.

[13] 李启月,李丽,黄海仙,等. 基于概率论的高边坡爆破振动安全预测及控制研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2024,20(12):12-18.
Li Qiyue, Li Li, Huang Haixian, et al. Safety prediction and control of blasting vibration on high slope based on probability theory[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2024,20(12):12-18.

[14] 郑一,王玉敏,冯宝成. 概率论与数理统计[M]. 大连:大连理工大学出版社, 2015:16-19.
Zheng Yi, Wang Yumin, Feng Baocheng. Probability theory and mathematical statistics[M]. Dalian: Dalian University of Technology Press, 2015:16-19.

[15] Kahriman A. Analysis of parameters of ground vibration produced from bench blasting at a limestone quarry[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2004,24(11):887-892.

[16] Yan W M, Tham L G, Yuen K V. Reliability of empirical relation on the attenuation of blast-induced vibrations[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2013,59:160-165.

[17] Yan W M, Yuen K V. On the proper estimation of the confidence interval for the design formula of blast-induced vibrations with site records[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2015,48(1): 361-374.

[18] Rukhaiyar S, Ramulu M, Choudhury P B, et al. Uncertainty estimation in blast vibration attenuation model using Bayesian probabilistic approach[J]. Mining, Metallurgy & Exploration, 2021,38(6): 2405-2415.

[19] 张小军,汪旭光,王尹军,等. 基于正态分布的爆破振动评价与安全药量计算[J]. 爆炸与冲击, 2018,38(5):1115-1120.
Zhang Xiaojun, Wang Xuguang, Wang Yinjun, et al. Blasting vibration evaluation and safety dose calculation based on normal distribution[J]. Explosion and Shock Waves, 2018,38(5):1115-1120.

[20] 王林峰,邓冰杰,莫诎,等. 基于概率论的爆破振动安全评估与控制[J]. 振动与冲击, 2020,39(14):122-129.
Wang Linfeng, Deng Bingjie, Mo Qu, et al. Safety assessment and control of blasting vibration based on the probability theory[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020,39(14):122-129.

[21] SL 47—2020 水工建筑物岩石地基开挖施工技术规范[S].
SL 47—2020 Technical specification for excavation construction of rock foundation of hydraulic structures[S].

引用本文:李朝朋,黄海仙,李海谦,等. 基于概率统计的浅埋软岩地下工程爆破振动安全控制研究[J]. 矿冶工程, 2026,46(4):8-15.
Li Chaopeng, Huang Haixian, Li Haiqian, et al. Probability-statistics-based safety control of blast vibration for shallow-buried underground soft-rock engineering[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(4):8-15.