

[文章编号] 1003—4684(2021)05-0081-05

# 老木山隧道爆破振动影响因素灰色关联分析

丁志刚<sup>1</sup>, 唐益新<sup>2</sup>, 包文成<sup>1</sup>, 胡其志<sup>2</sup>

(1 中交路桥南方工程有限公司, 北京 101149; 2 湖北工业大学土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068)

**[摘 要]** 隧道爆破对围岩的稳定性产生较大影响,其中爆心距、单段最大药量和雷管数等因素直接影响爆破对围岩的扰动程度。依托在建的老木山隧道工程,通过对施工爆破监测数据进行分析,建立该工程爆破振动影响因素指标体系;通过对灰色关联理论中的原参考序列与比较序列绝对差进行修正,对两者  $k$  时刻绝对差采用平均法计算,获得修正后的关联系数和灰色关联模型;利用该模型对老木山隧道爆破振动影响因素进行灰色关联分析,确定了各因素间主次关系,依据灰色模型分析结果,对老木山爆破施工方案进行了优化,使得爆破产生的断面峰值振速平均减振率达到 28%,有效降低了爆破振动对围岩的影响。

**[关键词]** 隧道爆破;灰色理论;围岩稳定;模型修正;参数优化

**[中图分类号]** TU997      **[文献标识码]** A

随着我国经济建设的发展以及“交通强国”战略的实施,全国公路总里程数不断增加,为适应山区地形,保证公路平曲线顺畅,公路隧道所占比例逐渐扩大。目前,钻爆法在山岭隧道工程施工中广泛应用,钻爆法施工会产生爆破振动效应,一般来说,爆破振动效应的主要影响因素分为爆源和传播途径<sup>[1]</sup>。在钻爆法施工过程中,受爆破荷载的影响,隧道围岩变形程度受其影响较大。因此,考虑到影响隧道爆破振动影响因素较繁杂且量纲不一的特点,对各爆破振动影响因素间关联度的分析和比较,评价系统内各因素对围岩扰动程度的大小,预测可能出现的结果对整个系统的影响,对优化隧道爆破参数具有很好的现实意义。

杨珊、陈建宏、李斌等<sup>[2-3]</sup>采用灰色关联分析法(GRA)对爆破振动的影响因素进行分析,并结合具体实际工程爆破实测数据,得到爆破振动影响因素的主次顺序,对爆破参数进行优化,从而有效地控制爆破振动的影响。范孝锋、周传波<sup>[4]</sup>通过对 2 个露天矿山生产爆破及其震动实测资料的计算分析,得出了爆破震动各影响因素的主次关系,为准确有效控制爆破震动效应提供了依据。沈蔚、徐全军等<sup>[5]</sup>通过对灰关联度矩阵的分析,得到了影响爆破震动强度的主要因素,认为爆破点与测点之间的高差为影响爆破震动参数的准优因素,为爆破参数优化提

供理论基础。黄冬梅、谭云亮等<sup>[6]</sup>针对深部巷道围岩稳定性影响因素问题,运用灰色关联分析法,分析地质特性、环境因素及人为工程等因素之间的关联度,确定了主要相关因素,并验证了该方法获取的围岩稳定性影响因素的主次关系与实际情况吻合度较好。邹宝平、杨建辉<sup>[7]</sup>基于灰色系统理论和 BP 神经网络,对大断面隧道爆破参数进行预测优化,得到了爆破参数优选值且预测精度较高。

灰色系统理论由我国学者邓聚龙教授于 1982 年创立。其特点是:“少数数据建模”、对“外延明确,内涵不明确的对象”着重研究,重点分析。与传统的层次分析法、回归分析法以及方差分析法<sup>[8-10]</sup>相比,灰色关联分析法可以弥补传统分析法对系统数据量要求大、计算繁杂,且易出现量化结果与定性分析结果误差等缺点。隧道爆破施工是根据有限的地质勘测资料及现场试验数据来确定爆破参数和后期支护方案,其本质上满足灰色系统的特征。因此,采用灰色关联分析法精准的分析爆破振动效应影响因素,为爆破方案优化提供理论基础。

本文依托在建的老木山隧道工程,通过对施工爆破监测数据分析,建立该工程爆破振动影响因素指标体系;通过对灰色关联理论中的原参考序列与比较序列绝对差进行修正,对两者  $k$  时刻绝对差采用平均法计算,获得修正后的关联系数和灰色关联

[收稿日期] 2020—12—27

[基金项目] 国家自然科学基金(51978249)

[第一作者] 丁志刚(1983—),男,内蒙古商都人,中交路桥南方工程有限公司工程师,研究方向为道路与桥梁工程的施工技术及管理

[通信作者] 胡其志(1969—),男,湖北红安人,湖北工业大学教授,研究方向为道路与桥梁工程

模型;利用该模型对老木山隧道爆破振动影响因素进行灰色关联分析,并对各影响因素关联度排序,确定了各因素间主次关系,为老木山爆破施工方案优化,提供理论指导。

1 隧道爆破振动影响因素指标体系

隧道光面爆破受多种因素影响,包括围岩强度、整体性、节理、层理等地质因素。爆破振动的主要影响因素分为爆源和传播途径,根据爆破振动效应各影响因素,构建出其影响指标体系,如图 1 所示。爆炸荷载激发围岩振动的特性受荷载和荷载作用边界的影响。爆炸荷载峰值、荷载上升时间、荷载衰减时间以及开挖面大小会对爆破振动质点峰值振动速度和振动频率产生影响。从以往大量实际工程实例可以看出,隧道爆破开挖,爆破动荷载会使围岩原始平衡状态遭到破坏,导致应力重分布,围岩扰动程度与爆破参数以及工程地质特性直接相关,因此爆破振动效应是受多重因素影响的非线性空间系统。

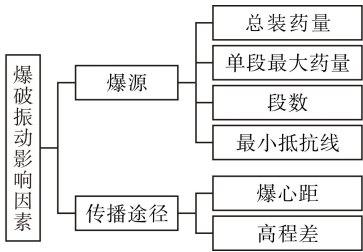


图 1 爆破振动影响因素指标体系

2 灰色关联分析步骤

灰色理论模型是一种研究少数据、贫信息不确定性问题的新方法,依据影响系统各因素之间的异同程度,分析其之间的相关性。建模时,通常采用累加生成或累减生成对原始数据进行处理,使生成数据序列变成有规律的序列。与传统分析方法相比,灰色关联分析对系统样本量及系特征数据间的线性相关性无特殊要求。因而,灰色理论模型在土木工程实践中得到广泛应用,其具体的分析步骤如下:

1)确定参考序列和比较序列 灰色关联分析是在数据数列基础上,通过数理统计的方法对系统内各因素进行分析评价。因此,首先要确定系统参考数据数列和与参评数列相对比的比较数列,并根据比较序列的类型确定其参考值。参考序列:

$$X_0(k) = \{X_0(1), X_0(2), X_0(3), \cdots, X_0(n)\} \quad (1)$$

比较序列:

$$X_i(k) = \{X_1(k), X_2(k), X_3(k), \cdots, X_m(k)\} \quad (2)$$

其中,  $k=1, 2, \cdots, n$ ;  $m$  为参考序列个数。

2)无量纲化处理 由于原始数据数列单位不一致,为了保证分析过程中数据的可靠性和准确性,需

要对原始数据进行无量纲化处理,消除量纲。采用区间值变化法处理数据,如式(3)所示。

$$Y_i(k) = \frac{\max X_i(k) - X_i(k)}{\max X_i(k) - \min X_i(k)} \quad (i = 1, 2, 3, \cdots, m; k = 1, 2, 3, \cdots, n) \quad (3)$$

其中:  $Y_i(k)$  为无量纲化后的值;  $X_i(k)$  为原始值;  $\max X_i(k)$  为数列最大值;  $\min X_i(k)$  为数列最小值

3)求取灰色关联系数 根据邓式灰色理论,定义比较序列与参考序列在第  $k$  个指标的对应差为关联系数  $\xi_{io}(k)$ 。将其表示为:

$$\xi_{io}(k) = \frac{\min_i \min_k |X_0(k) - X_i(k)| + \rho \max_i \max_k |X_0(k) - X_i(k)|}{|X_0(k) - X_i(k)| + \rho \max_i \max_k |X_0(k) - X_i(k)|} \quad (4)$$

其中,  $|X_0(k) - X_i(k)|$  为  $k$  时刻  $X_0$  与  $X_i$  的绝对差;  $\min_i \min_k |X_0(k) - X_i(k)|$  为两极最小差;  $\rho \max_i \max_k |X_0(k) - X_i(k)|$  为两极最大差;  $\rho$  为分辨系数,  $\rho \in [0, 1]$ , 通常取 0.5。

4)计算关联度 根据式(4)计算的关联系数多且繁杂,为了更好的比较各个时刻的各要素间的关联程度,需要将求得的关联系数计算加权平均数,定义该加权平均值为关联度  $R_{io}$ , 即

$$R_{io} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_{io}(k) \quad (i = 1, 2, 3, \cdots, m; k = 1, 2, 3, \cdots, n) \quad (5)$$

5)灰色关联度分析 灰色关联分析实质上是通过计算参考序列与比较序列的关联系数和关联度来确定各影响因素的主次关系。分析和比较计算得到的灰色关联度,并对系统内各因素进行多级综合评价,一般来说,表征系统内各因素水平关联度越大,对系统整体影响就越小,从而有利于决策者做出综合客观评价。

3 关联系数的修正

传统灰色关联模型中,通常采用区间值变化法处理各序列数据,以达到对原始序列消除量纲的目的,灰色关联度计算是对应参考序列和比较序列第  $k$  个指标数理统计的结果,  $k$  值的选取表示集中序列数据的多少,若集中的序列数据达不到精度要求,则该指标值的选取直接对比较序列的相关程度产生影响,在式(4)中  $|X_0(k) - X_i(k)|$  为  $k$  时刻  $X_0$  与  $X_i$  的绝对差,  $|X_0(k) - X_i(k)|$  与关联系数  $\xi_{io}(k)$  具有负相关性,即  $k$  时刻  $X_0$  与  $X_i$  的绝对差越小,灰色关联系数越大,各因素间相关性越好。实质上,  $|X_0(k) - X_i(k)|$  反映的是参考序列和比较序列在

$k$  时刻接近程度。因此参考序列的选取及  $k$  值指标会直接决定灰色关联度精确性。

为避免  $k$  值指标选取对灰色关联度计算的影响,方便集中更多的序列数据,对式(4)中原参考序列与比较序列绝对差做修正,对两者  $k$  时刻绝对差采用平均法计算,即修正后的关联系数  $\xi_{io}(k)$  公式如式(6)所示:

$$\xi_{io}(k) = \frac{\min_i \min_k |X_0(k) - X_i(k)| + \rho \max_i \max_k |X_0(k) - X_i(k)|}{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n |X_0(k) - X_i(k)| + \rho \max_i \max_k |X_0(k) - X_i(k)|}$$

(6)

## 4 实例分析

### 4.1 工程概况

选取贵州石阡至玉屏(大龙)高速公路老木山隧道为研究对象。老木山隧道共划分 V、Ⅳ、Ⅲ级三个围岩级别,左右线围岩级别长度所占隧道长度比例情况为:V 级围岩约占 9.8%(215 m)、Ⅳ级围岩约占 58.3%(1280 m)、Ⅲ级围岩约占 31.9%(700 m)。隧道各级围岩开挖均采用钻爆法施工。根据文献[11],爆破峰值振速、主振频率、振动持续时间作为衡量爆破振动影响程度大小的指标,灰色关联分析中,可看成系统特征变量,记作  $Y_i(i=1,2,3)$ 。将影响爆破振动的主要因素:总装药量、单段最大药量、段数、最小抵抗线、爆心距、高程差作为相关因素变量,分别记为  $X_j(j=1,2,\cdots,6)$ 。影响隧道爆破振动效应的因素很多,各因素在不同等级围岩中变化规律也存在差异。笔者在对现场爆破振动监测数据分析基础上,结合有限差分软件 FLAC 3D 对老木山爆破振动围岩力学响应机理和各因素变化规律进行研究<sup>[12]</sup>,本文选取具有代表性的 5 组现场爆破监测数据作为研究基础(表 1)。

表 1 爆破振动实测数据样本

编号	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$
1	76	3.6	3	0.65	15.34	1.2	6.39	40.0	1536
2	89	6.7	3	0.71	12.12	1.4	7.24	41.3	1605
3	102	7.8	5	0.85	10.74	1.6	8.38	30.2	1800
4	97	8.4	5	0.76	11.93	1.7	7.26	34.7	1575
5	78	3.3	4	0.68	15.44	1.8	6.07	40.5	1692

$X_1$  为总装药量,kg; $X_2$  为单段最大药量,kg; $X_3$  为段数; $X_4$  为最小抵抗线,m; $X_5$  为爆心距,m; $X_6$  为高程差,m; $Y_1$  为峰值振速, $m \cdot s^{-1}$ ; $Y_2$  为主振频率,Hz; $Y_3$  为持续时间,ms。下同

### 4.2 灰色关联分析

根据表 1 中的原始数据,选取影响爆破振动效应的各因素为比较矩阵  $x_i$ ,爆破产生的振动效应监测值为参考矩阵  $x_0(k)$ ,分别建立比较矩阵序列和

参考矩阵序列,如:

$$x_i = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \cdots \\ x_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 76 & 89 & 102 & 97 & 78 \\ 3.6 & 6.7 & 7.8 & 8.4 & 3.3 \\ 3 & 3 & 5 & 5 & 4 \\ 0.65 & 0.71 & 0.85 & 0.76 & 0.68 \\ 15.34 & 12.12 & 10.74 & 11.93 & 15.44 \\ 1.2 & 1.4 & 1.6 & 1.7 & 1.8 \end{bmatrix}$$
$$x_0(k) = \begin{bmatrix} x_0(1) \\ x_0(2) \\ x_0(3) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 6.39 & 7.24 & 8.38 & 7.26 & 6.07 \\ 40.0 & 41.3 & 30.2 & 34.7 & 40.5 \\ 1536 & 1605 & 1800 & 1575 & 1692 \end{bmatrix}$$

由于爆破振动监测值与爆破效应影响因素的参数值的单位不一致,为了方便计算、保证计算结果的准确性,根据式(3)采取区间值变化法对影响爆破振动效应因素的参考序列和比较序列进行量纲归一化处理,并求取差异性序列矩阵,应用修正后的灰色模型得到灰色关联系数及各因素灰色关联度排序如表 2、表 3 所示。

表 2 爆破振动影响因素灰色关联系数

灰色关联矩阵	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$
峰值振速 $Y_1$	0.512	0.664	0.495	0.579	0.582	0.573
主振频率 $Y_2$	0.617	0.591	0.514	0.533	0.803	0.554
持续时间 $Y_3$	0.663	0.566	0.674	0.548	0.556	0.546
总和	1.792	1.821	1.683	1.660	1.941	1.673

表 3 各因素灰色关联度排序表

影响因素	关联度	排序
总装药量	0.597	3
单段最大药量	0.607	2
段数	0.561	4
最小抵抗线	0.553	6
爆心距	0.647	1
高程差	0.558	5

根据表 2 中各影响因素灰色关联系数可以看出,隧道爆破施工产生的振动效应是多因素作用的结果。影响峰值振速的主要因素是单段最大药量、爆心距和最小抵抗线,其中单段最大药量灰色关联系数达到 0.664,远大于总装药量和爆心距灰色系数,而最小抵抗线引导爆破主导方向,岩石阻力最小的方向即是爆破作用最集中且岩石受爆破作用峰值振速最大处,但受岩层性质和传播途径的影响,最小抵抗线对峰值振速影响程度相对较小。影响主振频率和爆破持续时间的最主要因素分别是爆心距和雷管段数,其次单段最大药量、总装药量对主振频率和爆破振动效应持续时间影响也较大。对影响隧道爆破振动效应的诸多因素中灰色关联度排序,可以得到:爆心距>单段最大药量>总装药量>雷管段数>高程差>最小抵抗线,爆心距可看作是准优因素,单段最大药量和雷管段数是可控准优因素。其中,爆心距属于爆破传播途径对振动效应的影响,属于



非可控因素。因此,通过对隧道光爆面可控准优因素参数调整可达到爆破方案优化的效果。

5 老木山隧道爆破控制

根据灰色关联分析结果,确定了影响老木山隧道爆破振动效应的主要因素,对光爆面爆源参数进行优化,从而可以达到理想的爆破效果,减少爆破振动危害对围岩稳定性的影响。

5.1 原始爆破方案

老木山隧道采用上下台阶法施工,上台阶高约5 m,下台阶高约3 m,上、下台阶分别采用楔形掏槽掘进爆破和水平孔拉槽爆破。爆破选用直径为33 mm的2号岩石乳化炸药,掏槽眼孔径为42 mm,控制掘进循环尺寸在1.8~2.3 m,断面共布置149个炮孔,单段最大药量8.6 kg,总药量108.6 kg,线装药密度0.36 kg/m。根据现场爆破试验及监测结果分析。原始爆破方案,单段最大装药量过大,线装药密度均超过设计值且底板眼装药过于局部集中,导致爆破损伤范围较大,损伤程度较重,加上围岩原生节理的存在,与爆破损伤裂痕交错,进而引起隧道断面拱顶处峰值振速达到6.45 cm/s,超过安全振速,主振频率为28.5 Hz。原爆破方案下开挖后的掌子面均出现不同程度的超挖现象。

5.2 爆破方案优化

隧道爆破开挖要求光爆面成洞效果好,对围岩超欠挖及损伤程度、炮孔利用率等有严格要求。因此根据灰色关联分析结果,在单段最大药量,雷管段数,炮孔布置结构等方面提出优化。原定爆破施工方案没有达到理想的效果和技术规定指标,根据围岩掌子面实际情况对原定爆破方案和参数提出优化,以达到更好的爆破效果。一般来说,根据围岩岩层性质,可以调整适当的炮眼间距、单段最大装药量和段数。1)根据工程经验,炮眼间距一般为炮孔直径的10—15倍左右,围岩等级较高,岩性较差的情况下,可以适当减小炮眼间距或者增加炮眼,根据灰色关联分析结果并结合现场爆破试验,光面爆破的半孔多且长,效果良好,因此缩小Ⅳ、Ⅴ级围岩爆破周边孔间距,由原定的45 cm,缩短至40 cm,炮眼数量由原来的28个增加到35个,Ⅲ级围岩掏槽眼增加两排;2)为使光面爆破达到均匀理想的效果,调整分散光爆孔装药量和单段最大装药量,单段最大装药量由原来的6.7 kg减少到5.2 kg;3)上部水平掘进孔深为3.6 m,孔距为1.1 m,孔间距为0.8 m,为了缩小爆破抵抗线,掏槽孔上部掘进孔需要一定的角度,雷管段数由原来的5排增加到8排。另外,各级围岩周边孔采用轴向空气间隔分段均匀装药,

采用导爆索起爆,有助于使相邻周边眼裂隙相同,达到整体爆破的效果。

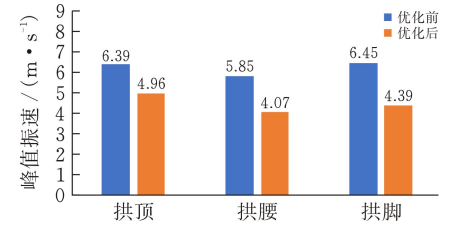


图2 优化前后峰值振速对比

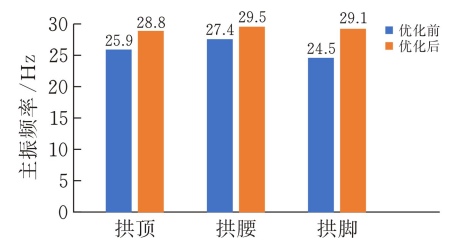


图3 优化前后主振频率对比

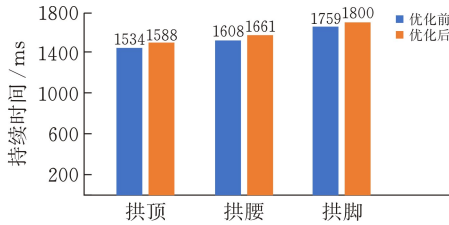


图4 优化前后振动持续时间对比

选取老木山隧道Ⅳ级围岩某断面为例,爆破方案优化前后效果如图2—4所示。从上图可以看出,与参数优化前爆破方案对比,爆破参数优化后爆破效果有了明显的改善。峰值振速、主振频率、持续时间都发生较大变化,断面最大峰值振速出现在拱脚处,从6.45 m/s减小到4.39 m/s,减振率达到32%,拱部平均减振率28%,减振效果显著,有效的减小了爆破波产生的振动危害。另外,最大主振频率由原来的27.4 Hz变为29.5 Hz。增加雷管段数后,持续时间比原设计方案增加约55 ms。

6 结论

- 1)采用钻爆法开挖隧道时,爆破波传播过程受围岩夹制作用会产生波阻抗,但由于隧道内部自由面受限,爆源对振动效应影响程度略大于爆破波传播途径因素。
- 2)用灰色关联分析法明确了影响爆破振动效应各影响因素的重要性关系,计算得到灰色关联度排序:爆心距>单段最大药量>总装药量>雷管段数>高程差>最小抵抗线,爆心距可看作是准优因素,单段最大药量和雷管段数是可控准优因素。根据灰色关联计算结果,对老木山隧道针对性的提出爆破参数优化方案,爆破参数优化后爆破效果有了明显

的改善,断面峰值振速平均减振率达到 28%,有效的减小了爆破波产生的振动危害。

3)影响测点峰值振速的主要因素是单段最大药量和爆心距,而爆心距为非人为影响因素,通过减小单段最大药量可有效控制测点峰值振速在安全范围内;影响主振频率的因素除了爆心距以外,总装药量灰色关联度也较高,但在合理微差条件下总药量对主振频率的影响可近似忽略;雷管段数为影响爆破振动持续时间的主要因素,随着雷管段数的增加,振动持续时间与之成正相关增加。

4)灰色关联分析通过分析影响爆破振动效应各因素矩阵列相关性,弥补传统分析法对系统数据量要求大、计算繁杂,且易出现量化结果与定性分析结果误差等缺点。计算结果直观精确,可广泛应用于土木工程实践。

[ 参 考 文 献 ]

[1] 霍永基.建筑结构爆破震动效应及安全分析研究[J].爆破,2003(1):1-6.  
[2] 杨珊,陈建宏,郭宏斌,等.隧道爆破振动影响因素的灰色关联分析[J].中国安全科学学报,2011,21(6):

65-71.  
[3] 李斌,毕延华,刘新伟.基于灰色关联分析浅埋隧道爆破振动影响因素[J].工程爆破,2018,24(4):86-90.  
[4] 范孝锋,周传波,陈国平.爆破震动影响因素的灰关联分析[J].爆破,2005(2):100-102+105.  
[5] 沈蔚,徐全军,黄文华,等.用灰关联分析法确定爆破震动参数的主要影响因素[J].工程爆破,2000(4):6-8+13.  
[6] 黄冬梅,谭云亮,常西坤,等.深部巷道围岩稳定性影响因素的灰色关联分析[J].煤矿安全,2016,47(3):202-204.  
[7] 邹宝平,杨建辉,王建秀,等.基于灰色理论与 BP 神经网络的特长瓦斯隧道爆破参数优选[J].铁道标准设计,2015,59(8):131-136.  
[8] 张光州,王德胜,丁剑锋.运用 MATLAB 对爆破震动数据的回归分析[J].山西建筑,2005(16):102-103.  
[9] 张世雄,陈庆发,许名标.模糊层次分析法在爆破方案优化选择中的应用[J].爆破,2004(4):83-85.  
[10] 贾俊平.统计学[M].北京:人民大学出版社,2008.  
[11] 张继春,钮强,徐小荷.用灰关联分析方法确定影响岩体爆破质量的主要因素[J].爆炸与冲击,1993(3):212-218.  
[12] 胡其志,唐益新,卢国兴.钻爆法施工对软硬围岩过渡段振动特性研究[J].地下空间与工程学报,2020,16(S1):201-207.

Grey Correlation Analysis of Influencing Factors of Blasting Vibration in Laomushan Tunnel

DING Zhigang<sup>1</sup>, TANG Yixin<sup>2</sup>,BAO Wencheng<sup>1</sup>, HU Qizhi<sup>2</sup>

(1 Zhongjiao Luqiao South Engin. Co., Ltd., Beijing 101149,China;

2 School of Civil Engin.,Architecture and Environment ,Hubei Univ.of Tech.,Wuhan 430068,China)

**Abstract:** Tunnel blasting has a greater impact on the stability of the surrounding rock, among which factors such as the blasting center distance, the maximum charge in a single section and the number of detonators directly affect the degree of disturbance of the surrounding rock by blasting. Relying on the Lao-mushan tunnel project under construction, by analyzing the construction blasting monitoring data, an index system of factors affecting the blasting vibration of the project is established; by correcting the absolute difference between the original reference sequence and the comparison sequence in the grey relational theory, the absolute difference of their K time point is calculated by the average method, and the revised correlation coefficient and gray correlation model are obtained; using this model, the gray correlation analysis of the influencing factors of the blasting vibration of Laomushan tunnel is carried out. The correlation degree of each influencing factor is sorted, and the main factors among the factors are determined. The results show that the blasting center distance is the quasi-optimal factor, and the maximum charge of a single segment and the number of detonator segments are the controllable quasi-optimal factors; based on the gray model analysis results, the Laomushan blasting construction plan is optimized to make the peak vibration of the section produced by blasting, The speed average damping rate reaches 28%, effectively reducing the impact of blasting vibration on surrounding rock.

**Keywords:** tunnel blasting; grey theory; surrounding rock stability; model modification; parameter optimization

[责任编辑:裴 琴]