

DOI: 10.7672/sgjs2026130153

基于动能与 DP 准则对小净距隧道爆破控制分析

易定达¹, 曾强², 刘明², 梁星², 杨琨², 李军成²

(1. 中铁隧道局集团有限公司, 广东 广州 511400; 2. 中铁隧道集团一处有限公司, 重庆 401120)

[摘要] 针对小净距隧道爆破施工控制, 以西南地区某铁路隧道出口燕尾段为依托, 基于动能公式对振源距与能量衰减关系进行推导, 结合 DP 准则公式, 并根据爆破产生围岩破裂区的半径与塑性区半径提出了爆破药量、围岩力学性质与振速的关系式。爆破开挖时对既有隧道结构的影响较大, 且靠近既有隧道一侧具有振动速度集中效应, 既有隧道靠近爆破开挖一侧的拱肩与拱脚存在应力集中现象; 爆破振速与药量关系推导的模型涉及围岩不同物理参数, 更具有普遍性。结合实际工程表明: 该理论公式在实际工程中适用性较好。

[关键词] 隧道; 小净距; 爆破; DP 准则; 振速; 有限元分析

[中图分类号] U455

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)13-0153-07

Analysis of Blasting Control of Small Clearance Distance Tunnel Based on Kinetic Energy and DP Criterion

YI Dingda¹, ZENG Qiang², LIU Ming², LIANG Xing², YANG Kun², LI Juncheng²

(1. China Railway Tunnel Bureau Group Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 511400, China;

2. China Railway Tunnel Bureau Group No. 1 Co., Ltd., Chongqing 401120, China)

Abstract: Regarding the control of blasting operations in tunnels with small clearance distances, this study uses the dovetail section at the exit of a railway tunnel in Southwest China as a case study. Based on the kinetic energy formula, the relationship between the distance from the vibration source and energy attenuation was derived. Combining this with the DP criterion formula and considering the radii of the fractured zone and the plastic zone generated by blasting, this study proposes a relationship between the explosive charges, the mechanical properties of the surrounding rock, and the vibration velocities. Blasting excavation exerts significant influence on existing tunnel structures, and the side adjacent to the existing tunnel exhibits a vibration velocity concentration effect, resulting in stress concentration at the crown and toe of the existing tunnel on the side nearest the blasting excavation. The model derived to describe the relationship between blasting vibration velocity and charge quantity incorporates various physical parameters of the surrounding rock, making it more universally applicable. Practical engineering applications demonstrate that this theoretical formula is highly applicable in real-world projects.

Keywords: tunnels; small clearance; blasting; DP criterion; vibration velocities; finite element analysis

0 引言

随着我国交通基础设施的发展, 复杂条件下近接或小净距隧道不断涌现, 其爆破控制要求也越来越高。国内外已有大量小净距隧道: 成都轨道交通 17 号线二期工程阳公桥站^[1], 新线高速北京与河北交界处的小龙门隧道^[2], 日本六月新镇干线交叉隧道^[3]。

此外, 也有不少学者通过萨道夫斯基理论对小净距隧道进行爆破控制: 李小刚等^[4]依托厦门沧海疏港通道工程项目, 通过现场数据, 结合萨道夫斯基公式对掌子面爆破进行控制研究; 崔文镇^[5]通过萨道夫斯基公式、现场验证和最优化等方法, 并结合工程地质特征进行测试和分析, 对新郁山隧道爆破进行有效控制; 陈璐等^[6]利用有限元软件 LS-DYNA 建立相应的数值模型, 探索近邻先行隧道径向和轴向上质点峰值振动速度演化特征及分布规律; 沈可等^[7]借助数值分析法探索地铁隧道对沉管

[作者简介] 易定达, 高级工程师, E-mail: 14861522@qq.com

[收稿日期] 2025-10-20

基槽爆破开挖的力学响应特征,并制定既有隧道结构的安全判据和沉管基槽爆破振动安全距离。以上研究主要结合现场施工数据进行拟合,从而得出相关爆破控制时的药量、安全阈值的振速等,具有一定的局限性,无法很好地满足不同类型隧道的施工要求。上述研究大多数采用振速与时间的关系进行对既有结构的保护研究,显然实用性不如结构与振源距离与振速的关系研究,而针对萨道夫斯基公式,其场地系数 k 与 α 受场地多种因素影响的同时,也具有一定主观性,从而导致与计算结果有较大误差。

许多研究通过能量衰减进行,如 Peng 等^[8]通过地震波能量衰减特性研究了地震波对周围建筑物产生的不利影响;单仁亮等^[9]运用 Matlab 对爆破振动信号进行 5 层小波包变换分解,求得各节点重构信号小波包频带能量,对爆破振动信号的频带能量分布特征进行研究,并对总能量进行回归分析,提出总能量的衰减方程。

为解决上述问题,在李洪涛等^[10]对爆破能量衰减研究的基础上,考虑围岩介质的物理性质条件,结合 DP 屈服准则,推导出了围岩塑性区与破裂区与振速的关系式。在前人已有研究基础上,进一步采用振源距与其能量衰减原则推导了爆破药量、破裂区半径与振速的关系式。最后以西南地区某铁路隧道工程为依托,对该理论的正确性进行验证与应用,同时也为类似工程提供了理论依据。

1 振动能量与爆破药量理论模型的建立

1.1 爆破动能分析

爆破施工中,爆破对既有结构的影响主要由爆破振动产生,而爆破振动产生的能量由动能体现。

$$W = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1)$$

式中: W 为爆破振动某一时刻的能量; v 为某一时刻爆破振动速度; m 为研究对象质量。

为便于计算,本文取振动传播至 x 处一质点为研究对象,质点质量为单位 1,在距离振源 x 处与振源动能变化量为 ΔW 。

$$\Delta W = \frac{dW}{dx} = \frac{1}{2}v^2(x) \quad (2)$$

式中: $v(x)$ 为质点过程中速度表达式。根据李洪涛等^[10]的研究,采用 2 倍单位质量动能,如果略去质点质量,可作为衡量爆破振动能量的物理量。

由微分方程可得动能变化量为:

$$\Delta W = \int \frac{1}{2}v^2(x) dx \quad (3)$$

1.2 振动能量与振源距的理论公式推导

为满足现场施工与计算简便两个要求,采用胡学龙等^[11]对等效路径的研究,可将其速度变化历程表示为:

$$V(x) = K \left[\frac{(QQ_v)^\beta (1 + \cos\theta_i)}{\sum_{i=0}^n (2x_i \rho_i c_{mi} / \eta_i)} \right]^\alpha \quad (4)$$

式中: V 为质点振速峰值; Q 为最大一段装药量; Q_v 为炸药的定容爆热; x_i 为相邻节点(等效路径上的拐点和岩石岩性变化的分界点)之间的等效距离; θ_i 为地震波传播路径上节点 P_i 处的方向角; ρ_i 为等效路径 $P_i P_{i+1}$ 上所对应岩石的密度; c_{mi} 为等效路径 $P_i P_{i+1}$ 上所对应岩体的纵波传播速度; η_i 为等效路径 $P_i P_{i+1}$ 上所对应岩体的完整性系数; K 为场地系数; α 为衰减系数; β 为对远距离台阶炮孔爆破质点振速预测,可将最大一段装药量视为集中药包,取 $\beta=1/3$ 。

岩体的完整性系数可表示为:

$$\eta_i = \left(\frac{c_m}{c_r} \right)^2 \quad (5)$$

式中: c_m 和 c_r 分别为岩体和岩石的纵波传播速度。

将(4)式代入(3)式中可得:

$$W = \frac{1}{2}K^2 \int \left[\frac{(QQ_v)^\beta (1 + \cos\theta_i)}{\sum_{i=0}^n (2x_i \rho_i c_{mi} / \eta_i)} \right]^{2\alpha} dx \quad (6)$$

为解决小净距隧道爆破施工对邻近隧道衬砌的保护,考虑比较理想的情况,且单段爆破振动在同种岩体内传播进行计算,传播段数 $i=1$,因此式(6)可表示为:

$$\Delta W = \frac{1}{2}K^2 \int \left[\frac{(QQ_v)^\beta (1 + \cos\theta)}{2x \rho c_m / \eta} \right]^{2\alpha} dx = \left[K \frac{(QQ_v)^\beta (1 + \cos\theta)}{2\rho c_m / \eta} \right]^{2\alpha} \left(\frac{1}{x} \right)^{2\alpha+1} \frac{1}{(2\alpha+1)2} \quad (7)$$

由式(6)可知,其爆破产生的动能与段位药量成正相关的同时,也与研究对象所在距离成反比。

根据杨氏模量^[12]可知岩石的纵波传播速度 c_r 表示为:

$$c_r = \sqrt{\frac{D + 4G/3}{\rho}} \quad (8)$$

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)} \quad (9)$$

$$D = \frac{E}{3(1 - 2\mu)} \quad (10)$$

式中: G 为粒子剪切模量; E 为弹性模量; D 为体积

模量; μ 为泊松比。

联立式(7)、式(8)与式(9)可得:

$$c_r = \left[\frac{E(1-\mu)}{\rho(1-2\mu)(1+\mu)} \right]^{0.5} \quad (11)$$

将式(11)与式(5)代入式(7)中可得振动能量与振源距的表达式:

$$W = \left[\frac{KE(QQ_v)^\beta(1+\cos\theta)(1-\mu)}{2\rho^2c_m^3(1-2\mu)(1+\mu)} \right]^{2\alpha} \left(\frac{1}{x} \right)^{2\alpha+1} \frac{1}{(2\alpha+1)2} \quad (12)$$

令:

$$\frac{E(1+\cos\theta)(1-\mu)}{2\rho^2c_m^3(1-2\mu)(1+\mu)} = \gamma \quad (13)$$

1.3 基于 DP 准则建立爆破药量与振速的理论模型

为更有效地保护既有结构,不少学者对既有结构上的振速进行控制,然而振速控制方法各有千秋,如王鑫尧等^[13]采用实际工程中的回归方程对振速与应力方程进行控制,肖可等^[14]采用萨道夫斯基公式对某特定隧道点爆破振动速度衰减规律进行了讨论。无论是实际工程回归方程控制还是萨道夫斯基公式控制,都具有一定的局限性,无法通过围岩本身力学性质进行讨论。为了能体现围岩自身力学性质与振速的关系,在前人已有的 DP 准则结合动能与振源距的表达式对振速进行推导。

采用 DP 准则对爆破产生围岩破裂区的半径 R_s 与塑性区半径 R_p 进行计算^[14]。

$$R_s = a \left[\frac{(\sigma_{R_p} + M)T^{1-A_{sq}} - M + N}{P_i + N} \right]^{\frac{1}{A_{sq}-1}} \quad (14)$$

$$\frac{R_p}{R_s} = \left[\frac{(1-\zeta_p)(1+\zeta_s)}{2(\zeta_s - \zeta_p)} \right]^{\frac{1}{\zeta_p+1}} \quad (15)$$

$$M = \frac{B_{p\varphi}}{A_{p\varphi} - 1} \quad (16)$$

$$N = \frac{B_{sq}}{A_{sq} - 1} \quad (17)$$

式中: a 为隧道半径; σ_{R_p} 为塑性流动区应力; A_{sq} , $A_{p\varphi}$ 分别表示破裂区与塑性区岩石内摩擦角; B_{sq} , $B_{p\varphi}$ 分别表示破裂区与塑性区岩石黏聚力; ζ_s 与 ζ_p 分别为破裂区与塑性区的扩容系数。

假设既有结构处于快破裂的极限时,即破裂区半径 R_s 等于振源距 x ,可得爆破时需要的最大药量与动能的关系:

$$W = \frac{[(QQ_v)^\beta \gamma K]^{2\alpha}}{2(R_s)^{2\alpha+1}(2\alpha+1)} \quad (18)$$

结合式(2)可得:

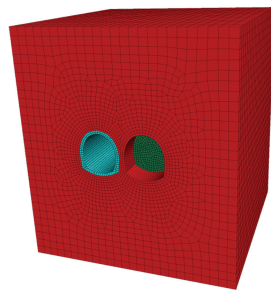
$$v = \sqrt{2W} = K^\alpha \frac{(QQ_v)^\beta \gamma^\alpha}{\sqrt{(R_s)^{2\alpha+1}}} \quad (19)$$

由式(18)可知,爆破振速与药量及炸药的定容爆热之积成正相关关系,与场地系数亦成正相关。结合式(12)可知,爆破振速与介质的泊松比、弹性模量成正相关关系。结合式(19)与(15)可知,选取场地区域的塑性区半径与爆破振速也成正相关关系。

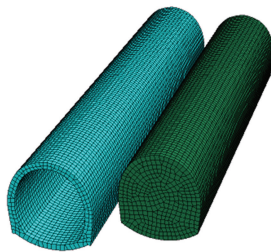
2 数值模拟分析

2.1 数值模型

为了验证式(19)的准确性与适用性,本文以西南地区某燕尾形小净距隧道为依托项目,取小净距隧道某一段为计算模型,采用 FLAC3D 有限差分软件进行数值计算。该区域小净距隧道毛洞宽 9.37m,高 10.52m,隧道间距为 1.2m。模型整体宽度、长度与高度均为 50m,共 166 212 个单元,如图 1 所示。



a 整体云图



b 纵向云图

图 1 三维有限元模型

Fig. 1 Three-dimensional finite element model

2.2 材料参数与爆破荷载

根据凝聚炸药爆轰波的 Chapman-Jouguet 理论,炸药爆炸后作用在炮孔壁上的爆炸荷载峰值压力 P 为^[15]:

$$P = \frac{\rho_e V_D^2}{2(\gamma_s + 1)} \left(\frac{d_c}{d_b} \right)^{2\zeta} \quad (20)$$

式中: ρ_e 为炸药密度; V_D 为炸药爆轰速度; γ_s 为炸药的等熵指数,一般取 3; ζ 为爆生气体的绝热膨胀常数,近似取 1.5; d_c 为装药直径; d_b 为炮孔直径。

根据圣维南原理,等效爆破荷载 P_e 与峰值压力的关系式:

$$P_e = \frac{d_b}{S}P(t)$$

(21)

式中: S 为炮孔间距; d_b 为炮孔直径; $P(t)$ 为爆炸荷载压力。

根据杨建华等^[16]所取参数: $\rho_e=1\,200\text{kg/m}^3$, $V_D=3\,800\text{m/s}$, $d_b=42\text{mm}$, $d_c=32\text{mm}$, $S=0.5\text{m}$,得到爆破荷载峰值压力 $P=80.5\text{MPa}$,并将爆破荷载作用于掌子面。其中,可将塑性区半径 R_p 作为塑性区临界半径,可视为既有衬砌距振源的距离。为确保与施工现场更具有对比性,本次采用西南地区某在建铁路隧道的围岩力学参数。该参数由设计院通过工程地质类比法以及经验值综合分析,如表 1 所示。其中为验证式(19)的正确性,根据经验取最大单响药量 15kg ,采用 FISH 函数计算得出最大振速为 9.2cm/s 。

表 1 围岩物理力学参数

Table 1 Physical parameters of surrounding rock

岩体类型	弹性模量 E/GPa	泊松比	黏聚力/ MPa	内摩擦角/ $(^\circ)$	密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$
绢云母 石英片岩	21.00	0.3	1.00	15	2 600
二衬	36.45	0.2	1.18	55	2 950

2.3 结果分析

根据式(21)得到的爆破荷载峰值压力,采用动荷载 FISH 函数作用在掌子面区域。为确保既有结构的安全性,在既有隧道衬砌距离右侧爆破开挖附近区域设置了 4 个监测点,并通过整体振速、塑性区情况对比 4 个监测点分析式(18)与式(19)的正确性与适用性。其中 4 个测点分别布置于拱腰处,如图 2 所示。



图 2 测点布置

Fig.2 Layout of measurement points

1) 爆破振动影响因素分析

测点计算过程振速变化趋势如图 3 所示,隧道爆破开挖振速云图如图 4 所示。

由图 3 和图 4 可知,在既有隧道靠近爆破面一处振速最大为 8.46cm/s ,与计算结果 9.2cm/s 相差 0.64cm/s 。且振源距越大,其峰值速度越小,变化

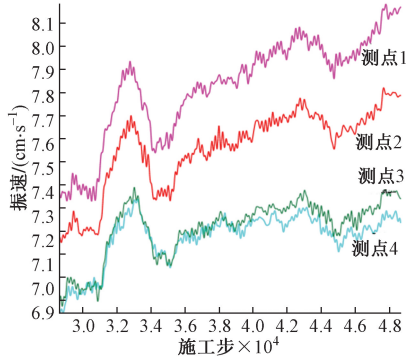


图 3 测点计算过程振速变化趋势

Fig.3 Trend of vibration velocity change in the calculation process of measurement points

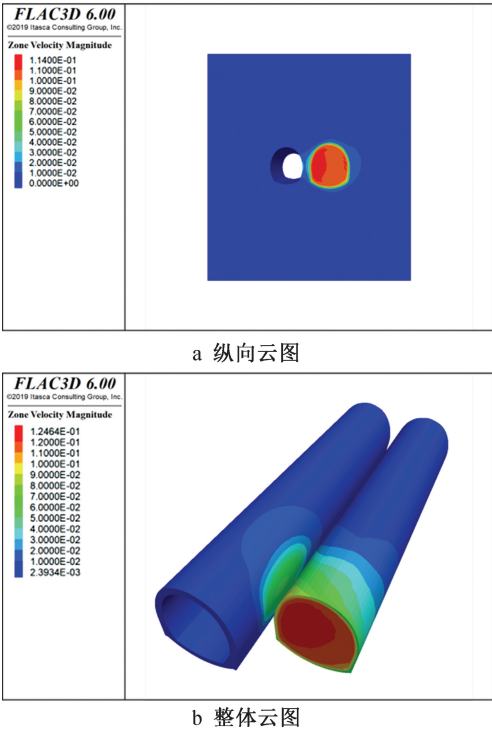


图 4 隧道爆破开挖振速云图

Fig.4 Cloud map of tunnel blasting excavation vibration velocity

速越慢。靠近既有隧道一侧,峰值速度大于远离既有隧道一侧,现场设计施工时,可在既有隧道一侧减少药量使用。

2) 塑性区分析

塑性区半径结果等于既有隧道衬砌距离爆破源的间距,与式(18)基本相符,如图 5 所示。

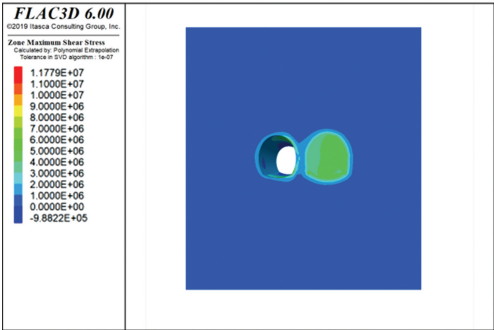
3) 应力分布分析

剪切应力云图如图 6 所示。由图 6 可知,小净距隧道开挖时,既有隧道靠近爆破开挖隧道一侧的拱肩与拱脚处存在应力集中现象,在实际工程中,可对这两处加强支护,并在靠近既有隧道一侧可减

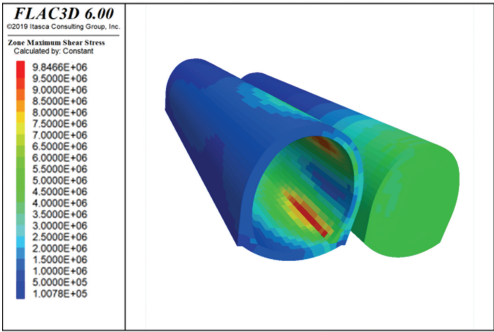


图 5 塑性区
Fig. 5 Plastic zone

少药量。



a 纵向云图



b 整体云图

图 6 剪切应力分布云图

Fig. 6 Cloud map of shear stress distribution

综上所述,爆破开挖时对既有隧道结构的影响较大,且靠近既有隧道一侧具有振动速度集中效应。既有隧道靠近爆破开挖一侧的拱肩与拱脚存在应力集中现象。既有隧道衬砌距离爆破源基本等于塑性区半径,与式(18)基本相符。

3 工程实例

3.1 工程概况

截至 2023 年 4 月 1 日,西南地区某在建隧道左线向小里程方向 DK972+965—DK972+370 已完成开挖支护。右线由 DK972+370 开始向大里程方向施工,通过对左线 DK972+965—DK972+370 段爆破施工的振速监测、沉降变化来进一步优化 DyK972+

529—DyK972+370 极小净距段的施工方案,如图 7 所示。

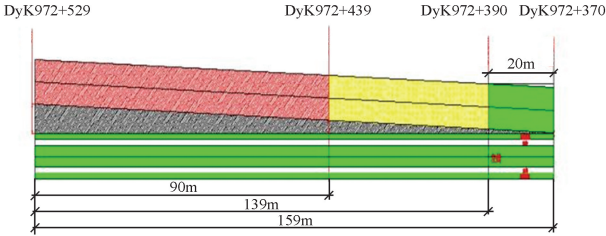


图 7 右线施工平面
Fig. 7 Construction plan of the right line

3.2 爆破监测准备

对 3 次爆破进行试验监测,其药量设计根据表 2 与式(18)并结合现场控爆要求,对该隧道掌子面上台阶一次性爆破药量进行计算,如表 2 所示。

表 2 药量计算与净距

Table 2 Dosage calculation and net distance

试验数	药量/kg	左右线净距/m
第 1 次	30. 122	9. 8
第 2 次	27. 810	9. 0
第 3 次	25. 514	8. 2

根据 GB 6722—2014《爆破安全规程》要求及小净距隧道爆破振动速度控制标准,其安全允许爆破振动速度应在 5cm/s,同时结合数值模拟分析可知,当爆破荷载均匀分布在掌子面时,既有隧道的拱肩和拱脚的振速存在最大值,结合现场实际施工,在数值模拟中靠近既有隧道一侧减少药量使用,且分段爆破,对该小净距段掌子面分为 5 部分进行爆破设计。在隧道净距 8~12m 段进行减振爆破试验,验证爆破设计的可行性。本燕尾段小净距爆破遵循以下 3 点。

- 1) 每个开挖断面分 5 个部位起爆,首爆部位设左右双排掏槽,其余部位适当增加减振孔,利用临空面起爆,不设掏槽孔,其爆破布孔如图 8 所示。
- 2) 采用逐孔延时起爆,同排单孔延迟设置 8~15ms,不同排延迟设置 80~100ms。
- 3) 结合数值模拟结果可知,靠近既有隧道一侧处减少 30% 药量进行装药。

3.3 爆破振速结果分析

为保证既有隧道结构安全,确保隧道开挖过程中围岩的稳定性,对钻爆施工进行严格的控制和监测。该隧道右线爆破振动监测试验使用 TC-4850 爆破测振仪。现场使用前振动监测仪器及传感器均须经过检定合格。

根据《爆破安全规程》及式(16)的定义,选取 3

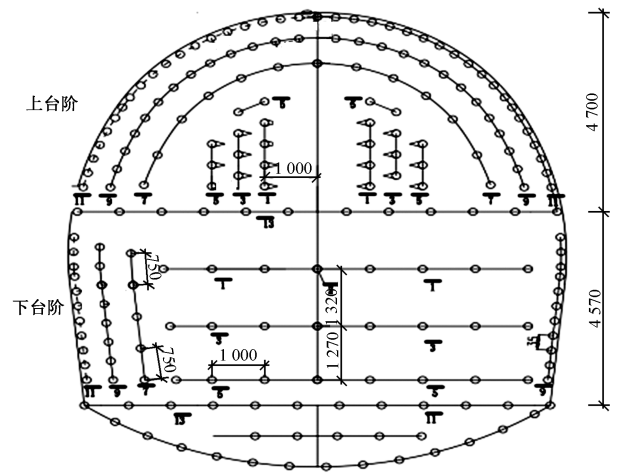


图 8 爆破布孔

Fig.8 Blasting hole arrangement

个方向中最大的振动速度分析爆破振动响应的分布特征。通过 3 次药量控制对拱肩、拱腰及拱脚的爆破振速监测,结果如表 3 所示(只取 3 个方向中最大值)。

表 3 爆破振速监测结果

Table 3 Blasting vibration velocity monitoring results		
净距/m	位置	最大监测振速/(cm·s ⁻¹)
9.8	拱肩	4.90
	拱腰	2.99
	拱脚	3.46
9.0	拱肩	5.10
	拱腰	4.26
	拱脚	3.64
8.0	拱肩	5.10
	拱腰	5.00
	拱脚	5.10

由表 3 可知,其初支最大振速为 5.1cm/s,其余均小于设计要求的 5cm/s,在排除现场外界因素影响外,基本符合设计要求。

综上,本文采用理论计算控制既有隧道初支结构的振速所需药量进行基本计算后^[17-18],通过数值模拟进行验证,最后结合现场实际施工,按照区域性爆破能达到安全及有效施工的目的。

4 结语

本文依托西南地区某新建铁路隧道出口燕尾段,基于动能公式对振源距与能量衰减关系进行推导,从而对爆破药量的控制进行讨论,通过数值模拟与现场爆破验证,得出以下结论。

1)基于动能与 DP 准则,推导出了爆破振速与药量及炸药的定容爆热之积成正相关。爆破振速与介质的泊松比、弹性模量成正相关关系,选取场地区域的塑性区半径与爆破振速也成正相关关系。

2)爆破开挖时对既有隧道结构的影响较大,且靠近既有隧道一侧具有振动速度集中效应。既有隧道靠近爆破开挖一侧的拱肩与拱脚存在应力集中现象。

3)基于动能与 DP 屈服准则对爆破振速与药量关系推导的模型涉及围岩不同物理参数,该模型更具有普遍性。结合实际工程表明,该理论公式在实际工程中适用性较好。

4)通过爆破时能量等效路径衰减规律,引入围岩力学性质及相关参数,结合 DP 准则得到塑性半径与爆破药量及振速的关系式,未考虑爆破时产生的其他能量衰减及振动叠加的影响。因此,下一步可在此基础上对振动叠加爆破附近区域其他能量的影响,进一步提高计算结果的准确性。

参考文献:

[1] 王威. 大断面隧道小净距上跨既有隧道施工方案优化[J]. 铁道建筑,2023,63(9):85-90.
WANG W. Optimization of construction scheme for large cross-section tunnel overcrossing existing tunnel with small clear distance[J]. Railway engineering,2023,63(9):85-90.

[2] 李小帅,高文学,宿利平,等. 小净距隧道掘进爆破及其振动响应规律研究[J]. 爆破,2024,41(2):194-202.
LI X S,GAO W X,SU L P,et al. Study on attenuation law of blasting vibration in a small clear distance highway tunnel[J]. Blasting,2024,41(2):194-202.

[3] 王成. 隧道工程[M]. 北京:人民交通出版社,2009.
WANG C. Tunnel engineering [M]. Beijing: China Communications Press,2009.

[4] 李小刚,周先齐,杨杭澎,等. 大跨度小净距隧道中夹岩爆破振动控制与损伤判别[J]. 隧道建设(中英文),2022,42(3):406-413.
LI X G,ZHOU X Q,YANG H P,et al. Blasting vibration control and damage determination of interlaid rock in a tunnel with large spans and short distances[J]. Tunnel construction,2022,42(3):406-413.

[5] 崔镇镇. 小净距隧道全断面扩挖爆破振动影响分析[J]. 铁道建筑技术,2021(2):119-123.
CUI W Z. Impact analysis on blasting vibration of the whole section expansion and excavation for tunnel with small net distance [J]. Railway construction technology, 2021 (2): 119-123.

[6] 陈璐,曹洪涛,周子龙,等. 硬岩小净距隧道先行洞的爆破振动响应规律[J]. 中南大学学报(自然科学版),2024,55(9):3354-3367.
CHEN L,CAO H T,ZHOU Z L,et al. Response characteristics of blasting vibration of existing tunnel of hard rock neighborhood tunnel[J]. Journal of Central South University (science and technology),2024,55(9):3354-3367.

[7] 沈可,魏立新,刘庭金,等. 沉管隧道基槽爆破开挖作用下邻近地铁隧道力学响应[J]. 隧道建设(中英文),2018,38(6):901-906.

SHEN K, WEI L X, LIU T J, et al. Mechanical response of adjacent metro tunnel subjected to blasting excavation of foundation trench of immersed tunnel [J]. Tunnel construction, 2018, 38 (6) : 901-906.

[8] PENG Y X, SU Y, WU L, et al. Study on the attenuation characteristics of seismic wave energy induced by underwater drilling and blasting [J]. Shock and vibration, 2019, 2019:4367698.

[9] 单仁亮,宋永威,白瑶,等. 基于小波包变换的爆破信号能量衰减特征研究 [J]. 矿业科学学报, 2018, 3 (2) : 119-128.

SHAN R L, SONG Y W, BAI Y, et al. Research on the energy attenuation characteristics of blasting vibration signals based on wavelet packet transformation [J]. Journal of mining science and technology, 2018, 3 (2) : 119-128.

[10] 李洪涛,卢文波,舒大强,等. 爆破地震波的能量衰减规律研究 [C] // 中国岩石力学与工程学会, 2010.

LI H T, LU W B, SHU D Q, et al. Study on energy attenuation law of blasting seismic wave [C] // Chinese Society of Rock Mechanics and Engineering, 2010.

[11] 胡学龙, 璩世杰, 蒋文利, 等. 基于等效路径的爆破地震波衰减规律 [J]. 爆炸与冲击, 2017, 37 (6) : 966-975.

HU X L, QU S J, JIANG W L, et al. Attenuation law of blasting induced ground vibrations based on equivalent path [J]. Explosion and shock waves, 2017, 37 (6) : 966-975.

[12] 韩鞠,王春艳,唐杰. 岩石环境因素下的岩石圈地震波波速 [J]. 科技创新导报, 2012, 9 (28) : 108-109, 111.

HAN J, WANG C Y, TANG J. Lithospheric seismic wave velocity under rock environmental factors [J]. Science and technology innovation herald, 2012, 9 (28) : 108-109, 111.

[13] 王鑫尧,傅家钰,刘殿柱,等. 相邻隧道爆破振动时空演化与安全阈值研究 [J]. 金属矿山, 2026 (1) : 171-177.

WANG X Y, FU J Y, LIU D Z, et al. Study on the spatiotemporal evolution and safety threshold of blasting vibration in adjacent tunnels [J]. Metal mine, 2026 (1) : 171-177.

[14] 肖可,周传波,郑璇,等. 断层带影响下隧道二衬结构爆破振动特性与安全判据 [J]. 工程爆破, 2021, 27 (4) : 130-139.

XIAO K, ZHOU C B, ZHENG X, et al. Blasting vibration characteristics and safety criteria of tunnel secondary lining under the influence of fault zone [J]. Engineering blasting, 2021, 27 (4) : 130-139.

[15] 陈梁,茅献彪,李明,等. 基于 Drucker-Prager 准则的深部巷道破裂围岩弹塑性分析 [J]. 煤炭学报, 2017, 42 (2) : 484-491.

CHEN L, MAO X B, LI M, et al. Elastoplastic analysis of cracked surrounding rock in deep roadway based on Drucker-Prager criterion [J]. Journal of China coal society, 2017, 42 (2) : 484-491.

[16] 杨建华,黄启欢,姚池,等. 空洞对隧道喷射混凝土爆破振动特性及安全评价的影响研究 [J]. 岩土力学, 2022, 43 (5) : 1401-1411.

YANG J H, HUANG Q H, YAO C, et al. Influence of cavities on blasting vibration characteristics and safety assessments of tunnel shotcrete [J]. Rock and soil mechanics, 2022, 43 (5) : 1401-1411.

[17] 王正庆,郭运华,王明明,等. 上软下硬复合地层大断面隧道爆破施工的安全控制分析 [J]. 施工技术 (中英文), 2025, 54 (11) : 14-18.

WANG Z Q, GUO Y H, WANG M M, et al. Blasting safety control of large section tunnel in upper soft and lower hard composite strata [J]. Construction technology, 2025, 54 (11) : 14-18.

[18] 代青华,易帅. 邻近寺庙群高海拔隧道钻爆施工关键技术研究 [J]. 施工技术 (中英文), 2024, 53 (1) : 136-141.

DAI Q H, YI S. Research on key construction technology of drilling and blasting in high altitude tunnel near temple group [J]. Construction technology, 2024, 53 (1) : 136-141.