

隧道爆破开挖作用下砂浆锚杆动力响应特征及安全控制研究

朱 斌, 周传波, 蒋 楠

(中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要:明晰隧道爆破开挖作用下砂浆锚杆的动力响应特征,保证锚杆支护系统的安全稳定是隧道高效建设及安全运行的关键。基于龙南隧道各级围岩爆破开挖工程,采用动力有限元数值模拟软件 ANSYS/LS-DYNA,分别建立不同围岩级别、不同注浆龄期砂浆锚杆爆破开挖动力有限元计算模型,分析隧道爆破作用下各部位砂浆锚杆的动力响应特征与失效机制。研究表明,各级围岩爆破开挖时,隧道拱顶的锚杆振动速度与轴力均最大,锚杆部件端部为最危险点,沿隧道轴线方向,锚杆的振动速度与轴力均随爆破距离的增大而不断衰减;各部位的锚杆峰值振速随着注浆龄期的增加而减小,轴力随注浆强度的增加而减小,其剪力值也会减小;拱顶锚杆的轴力值与峰值振速具有线性关系,其与围岩级别以及龄期的大小有关,根据锚杆安全轴力可以计算得到不同围岩级别、不同养护龄期隧道爆破开挖砂浆锚杆的安全控制振速。

关键词:隧道爆破; 砂浆锚杆; 注浆龄期; 动力响应; 安全控制

中图分类号: O382+.2; U455.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2023)01-0235-12

DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2023.01.025

引 言

锚杆支护是隧道工程中限制岩体变形,改善围岩力学性质保持其稳定性的重要方式。锚杆与喷射混凝土衬砌共同组成隧道结构的初期支护系统。隧道爆破施工与初期支护常常是交叉进行的,初期支护结构尤其会在隧道爆破开挖较近区域受到显著的爆破动力作用。水泥砂浆锚杆的浆体力学性能相对较差,砂浆达到规定强度需要经历不同养护龄期,因此,在不同爆破开挖动力作用下不同龄期的注浆体、隧道围岩、锚杆杆体会发生不同程度动力损伤破坏。如何保证爆破施工过程中砂浆锚杆系统的稳定是隧道高效建设及安全运行的关键。

目前,国内外学者针对隧道爆破开挖过程中锚杆支护结构的动力响应规律研究较多,相关研究主要以现场测试、模型试验、数值模拟和理论解析等手段为主。王照刚^[1]根据场地围岩的振动测试数据的衰减规律,计算得到锚杆孔口处位置的轴向应变时程曲线。周纪军等^[2],单仁亮等^[3]选用水泥砂浆和玻璃钢分别模拟岩石和锚杆,通过模型试验研究近区锚喷结构在掏槽爆破作用下的振动特性。Wu 等^[4]对分离式 Hopkinson 压杆进行了改进,研制了一种

锚杆试验系统,对不同预应力水平的锚杆试件进行反复冲击加载。龚韩林^[5]将 FLAC3D 动力分析模块与结构单元的可选模块 cable 相结合,建立玻璃钢锚杆支护巷道模型,研究了单次和多次爆破荷载作用下玻璃钢锚杆的动态响应特征。易长平等^[6]运用应力波理论,并利用波函数展开法,研究了爆炸应力波与锚杆的相互作用过程。上述研究中多针对特定爆破开挖方式引起的锚杆动力效应进行研究,且未对砂浆锚杆注浆体在经历不同养护龄期过程中的动力特征变化做过多考虑。事实上,不同爆破开挖方式作用下引起的隧道各空间位置的锚杆动力响应是不同的,砂浆锚杆在达到终凝强度前其动力特征亦具有时间效应。

基于此,本文结合赣深高铁龙南隧道主洞爆破开挖工程背景,采用动力有限元数值模拟软件 ANSYS/LS-DYNA,建立了不同级别围岩开挖爆破条件下的全长粘结式砂浆锚杆爆破动力分析数值模型,分析了考虑不同注浆龄期材料强度特征的砂浆锚杆系统爆破动力响应特征,揭示了不同空间位置隧道砂浆锚杆振动与力学变化规律,明晰了爆破振动作用下不同注浆龄期的砂浆锚杆动力响应特征与动力失效机制。建立了基于各级围岩砂浆锚杆支护系统的极限承受能力的动力失效安全判据,提出了

隧道砂浆锚杆支护体系的爆破振动安全阈值,评估了龙南隧道爆破施工作业条件下砂浆锚杆的安全性。

1 爆破开挖工程概况

1.1 隧道工程简介

龙南隧道位于国家“十三五重点工程”赣深高铁客运专线江西省赣州市的全南县和龙南县境内。隧道全长 10244.27 m,最大埋深约为 580 m。隧道采用单洞双线形式,净宽为 14.4 m、净高为 11.8 m,断面面积为 139.3 m²,属特长与特大断面隧道。隧道穿越变质砂岩、花岗岩、砂岩、石英砂岩等地层。根据工程勘察报告中的洞身围岩等级划分结果,隧道爆破建设过程中需要穿越 II~VI 级围岩,有多条断层切穿隧道,如图 1 所示。龙南隧道地质构造及水文地质条件较复杂,局部存在断层破碎带、地下水、高地应力、强风化带、岩溶地带等不良地质条件,钻爆掘进过程中有冒顶塌方、涌水突泥等潜在灾害,设计为一级高风险隧道,属赣深高铁全线施工的控制性重难点工程。

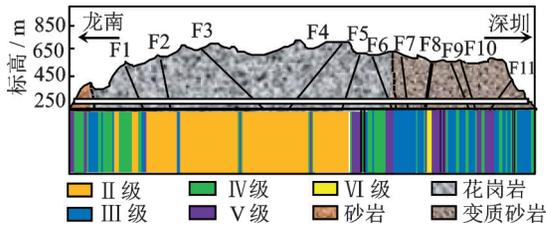


图 1 赣深高铁龙南隧道示意图

Fig.1 Schematic diagram of Longnan Tunnel of Ganshen Railway

1.2 爆破开挖与锚杆支护概况

选取隧道主洞爆破开挖穿越围岩级别为 II, III, IV, V 级的范围为本文的主要研究区域,各岩级围岩爆破开挖炮孔布置如图 2 所示。

如图 2 所示,II 级围岩开挖里程为 DK94+160~220 m,采用全断面爆破开挖,楔形掏槽,一级掏槽孔 6 个,孔长为 1.63 m,二级掏槽孔 8 个,孔长为 3.68 m,总药量为 30 kg;III 级围岩开挖里程为 DK92+150~210 m,采用台阶法爆破开挖,上台阶长度为 5.13 m,下台阶为 6 m,上台阶一、二级掏槽孔孔长分别为 1.36, 2.93 m,总药量为 24.3 kg;IV 级围岩开挖里程为 DK98+150~210 m,采用三台阶爆破开挖,一、二级台阶长为 4 m,三级台阶为 4.13 m,一级台阶掏槽孔长分别为 1.36 和 2.57 m,总药量为 19.4 kg;V 级围岩开挖里程为 DK98+320~

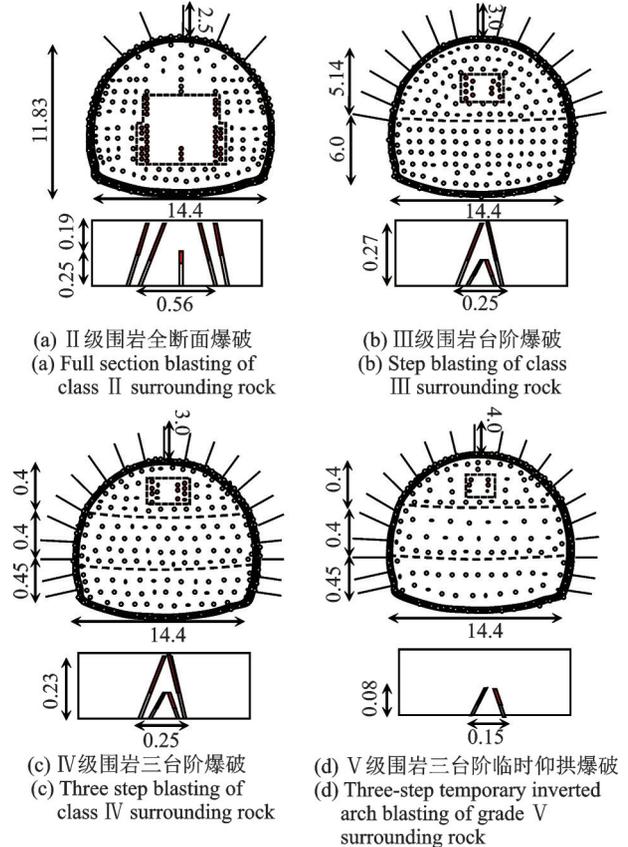


图 2 各级围岩爆破开挖设计及锚杆布置(单位:m)

Fig.2 Design of blasting excavation and bolt arrangement of surrounding rock at all levels (Unit: m)

380 m,采用三台阶临时仰拱法爆破开挖。V 级围岩三台阶临时仰拱爆破开挖掏槽孔长为 1.03 m,总药量为 5.4 kg。

2 数值模型及参数

2.1 整体模型及材料参数

2.1.1 物理模型及边界

根据隧道各级围岩的爆破设计参数及初期支护参数,结合现场实际工程,利用动力有限元数值软件 ANSYS/DYNA,建立 II, III, IV, V 级围岩爆破开挖作用下锚杆支护的数值模型,如图 3 所示。为保证数值模拟研究所选取的模型不受边界尺寸效应的影响,根据圣维南原理将模型中隧道及周围尺寸取值均大于 3~5 倍洞径,将模型各个面的边界条件均设置为无反射边界^[7]。各级围岩的数值模型整体尺寸设为 70 m×80 m×45 m。数值模型中锚杆采用 BEAM161 单元,其他材料采用 8 节点 SOLID164 实体单元,网格划分均采用 Lagrange 网格划分,掏槽孔弹性边界处网格应不大于 35 cm,其余部位的网格依次增大以合理地缩短计算时间,保证计算精度。

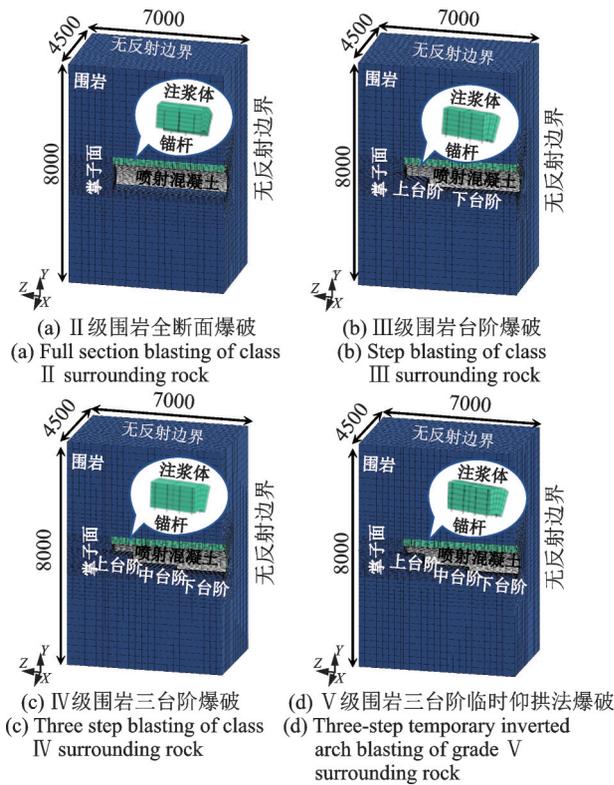


图 3 数值模型示意 (单位:cm)

Fig. 3 Schematic diagram of the numerical simulation model (Unit: cm)

2.1.2 材料模型级参数设置

建模中忽略材料中的节理裂隙等复杂构造,将上述围岩、喷射混凝土、砂浆锚杆、注浆等效区材料看作弹性均匀等效介质。根据经典弹塑性力学理论,上述材料参数的物理力学关系特征可以采用双向随动硬化模型 *MAT_PLASTIC_KINEMATIC 来描述,该本构模型关系式如下式所示^[8]:

$$\begin{cases} \sigma_y = \left[1 + \left(\frac{\epsilon}{C} \right)^{\frac{1}{p}} \right] (\sigma_0 + \beta E_p \epsilon_{eff}^p) \\ E_p = \frac{E_t E}{E - E_t} \end{cases} \quad (1)$$

式中 σ_0 为初始屈服强度; σ_y 为屈服强度; ϵ 为应变率; ϵ_{eff}^p 为有效塑性应变; p, C 为应变率参数; β 为硬化参数; E_p 为塑性硬化模量; E_t 表示切线模量; E 表

示弹性模量。

根据龙南隧道工程地质勘察报告与室内试验,确定本数值模型中各级围岩、喷射混凝土、砂浆锚杆、注浆等效区的相关材料参数如表 1 所示。其中,考虑到初期支护形成后,隧道开挖面实际由砂浆锚杆、注浆材料和围岩共同受力和变形。根据现场施工实际情况,把水泥砂浆与注浆区域隧道围岩的相关参数采用刚度等效原则进行合理折算,其折算公式如下式所示^[9]:

$$E = \frac{E_s A_s + E_c A_c}{A_c} \quad (2)$$

式中 E 为等效的综合弹性模量; E_c 为砂浆弹性模量; A_c 为注浆孔横截面积; E_s 为围岩弹性模量; A_s 为围岩与砂浆的接触面积。

其中,模型注浆区域参数依据 28 d 终凝期的砂浆强度,按照式 (2) 进行计算得出,相关参数如表 1 所示。使用 LS-DYNA 软件中的 *Constrained_Lagrange_In_Solid 函数将钢筋嵌入等效注浆区中,从而使锚杆和注浆区域可以协同工作。通过设置钢筋和混凝土之间的流固耦合参数来保证钢筋和混凝土之间的粘结模拟^[10]。

2.2 爆破荷载及应力初始化

2.2.1 各级围岩开挖爆破荷载施加

根据现场爆破参数,模型采用施加等效爆破荷载的方式进行爆破开挖模拟。将爆炸荷载等效施加在炮孔弹性等效边界上,压力作用范围与炮孔内装药段长度相等^[11]。掏槽孔等效弹性边界为所有炮孔裂隙区包络圈。根据相关研究,采用三角形加载函数可以近似模拟炮孔压力时程,如下式所示:

$$P(t) = \begin{cases} P_m \frac{t}{t_r}, & 0 \leq t \leq t_r \\ P_m \frac{t_d - t}{t_d - t_r}, & t_r \leq t \leq t_d \end{cases} \quad (3)$$

式中 $P(t)$ 为炮孔随时间变化的压力; P_m 为荷载峰值; t 为荷载作用时间; t_r 为峰值荷载上升时间,等于炮孔装药长度与炸药炮轰速度的比值; t_d 为荷载作

表 1 数值模型参数

Tab. 1 Numerical model parameters

参数	II 级围岩		III 级围岩		IV 级围岩		V 级围岩		喷混	锚杆	砂浆
	围岩	注浆	围岩	注浆	围岩	注浆	围岩	注浆			
密度 $\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	2.55	2.65	2.43	2.5	2.32	2.46	2.01	2.43	2.23	2.75	2.52
弹性模量 E / GPa	24	55.77	13	32.5	4	13.46	1.35	7.75	23	205	5
泊松比 μ	0.21	0.21	0.29	0.29	0.31	0.31	0.35	0.35	0.25	0.3	0.2
屈服强度 σ_c / MPa	45.25	45.2	20.35	22.31	15.24	20.73	8.12	22.92	32	320	30.25
切线模量 E_t / MPa	43.2	53.59	29.5	30.63	22.3	25.15	12.1	22.27	25.5	7300	21

用时间。

当多个掏槽孔装药爆破产生的荷载等效时,炮孔初始平均压力 P_0 与等效弹性边界上的荷载峰值 P_1 的计算如下式所示^[12]:

$$\begin{cases} P_0 = \frac{\rho_e D^2}{2(\gamma + 1)} \left(\frac{d_c}{d_b} \right)^{2\gamma} \\ P_1 = k P_0 \left(\frac{r_0}{r_1} \right)^{2 + \frac{\mu}{1-\mu}} \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^{2 - \frac{\mu}{1-\mu}} \end{cases} \quad (4)$$

式中 ρ_e 为炸药密度; D 为爆速; γ 为等熵指数; d_c 为装药直径; d_b 为炮孔直径; k 为掏槽孔群孔起爆时的影响系数; r_0 为炮孔半径; r_1 为柱状装药下的粉碎区半径; r_2 为破碎区半径; μ 为岩石泊松比。

龙南隧道现场爆破施工的炸药采用 2[#] 岩石乳化炸药, 炸药药轰参数 $\rho_e = 1.24 \text{ g/cm}^3$, $D = 4800 \text{ m/s}$ 。根据现场各级围岩掏槽爆破设计参数, 炸药等熵指数 $\gamma = 3$, $k = 10$, 粉碎区半径为 $3r_0$, 破碎区半径为 $10r_0$ ^[13]。根据式(3)和(4)计算得到 II, III, IV, V 级围岩的爆破开挖等效到弹性边界的荷载 $P_{1\text{II}} = 53 \text{ MPa}$, $P_{1\text{III}} = 37 \text{ MPa}$, $P_{1\text{IV}} = 20 \text{ MPa}$, $P_{1\text{V}} = 8.5 \text{ MPa}$ 。根据计算结果取荷载上升时间为 0.5 ms , 荷载下降时间为 5 ms 。综上所述, 得到各级围岩的等效爆破荷载曲线如图 4 所示。

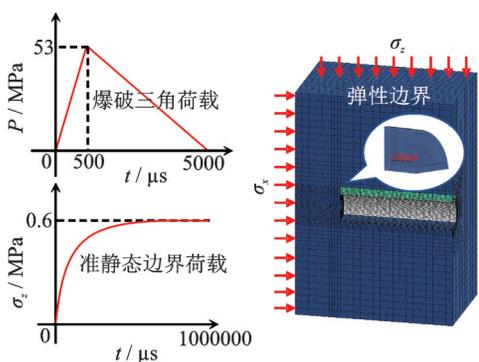


图 4 数值模型荷载

Fig. 4 Numerical model load

2.2.2 模型应力初始化

隧道开挖后初期支护结构在静力作用下与围岩一起发挥承载作用, 锚杆结构在承受爆破荷载前具有初始应力^[14]。在进行爆破数值模拟前需进行初始地应力平衡计算, 得到已开挖区域隧道锚杆等支护结构的初始应力状态。按照下式分别计算各级围岩自重荷载曲线加载终端的初始应力大小:

$$\begin{cases} \sigma_z = \sum_{i=1}^n \gamma_i H_i \\ \sigma_x = \sigma_y = \frac{\mu_n}{1 - \mu_n} \cdot \sum_{i=1}^n \gamma_i H_i \end{cases} \quad (5)$$

式中 σ_x 为竖直围岩压力; σ_y, σ_z 为侧向围岩压力; γ_i

为岩体密度; H_i 为埋深; μ_n 为计算应力处的岩体泊松比。

采用准静态加载的方法进行模型应力的初始化^[15], 通过施加准静态的边界荷载曲线, 控制加载速率和计算收敛来实现模型应力初始化, 缓慢施加半正弦曲线形式的恒值荷载, 模型边界荷载施加及荷载曲线如图 4 所示。各级围岩的计算结果如表 2 所示。根据上述准静态加载的方法, 分别对各级围岩的竖直计算模型的竖直、水平(切向)进行初始应力化加载。

表 2 各级围岩初始应力计算值

Tab. 2 Calculated values of initial stress of surrounding rock at various levels

围岩级别	竖直/MPa	水平(切向)/MPa
II	0.6	0.45
III	0.7	0.5
IV	0.6	0.4
V	0.2	0.1

2.2.3 模型验证及可靠性分析

隧道施工过程中对砂浆锚杆直接进行现场动力特性监测十分困难, 根据现场条件, 本研究采用间接测试的方法对锚杆孔口邻近喷射混凝土进行振动测试以表征该区域范围内的动力响应特征。根据测试需要, 采用常用爆破振动监测仪器 TC-4850 进行振动监测, 分别在各级围岩距离掌子面 45 m 处的拱脚处每隔 5 m 布设振动传感器, 如图 5 所示。

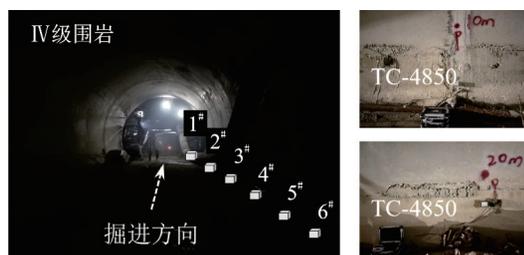


图 5 现场振动监测示意图

Fig. 5 Schematic diagram of on-site vibration monitoring

根据现场监测数据, 选取模型中对应质点进行振动特性对比分析以验证数值模型和参数选取的可靠性。其中 IV 级围岩 45 m 拱脚处的混凝土质点的振动速度时程曲线对比如图 6 所示。

根据现场监测与数值模拟振动曲线, 将各级围岩相应位置测点各方向的峰值振速统计如表 3 所示。

根据现场监测振动时程曲线与数值模拟数据对比分析可知, 数值模拟计算峰值振速略大于现场监测数据, 但在误差允许范围内; 此外, 现场测试与数

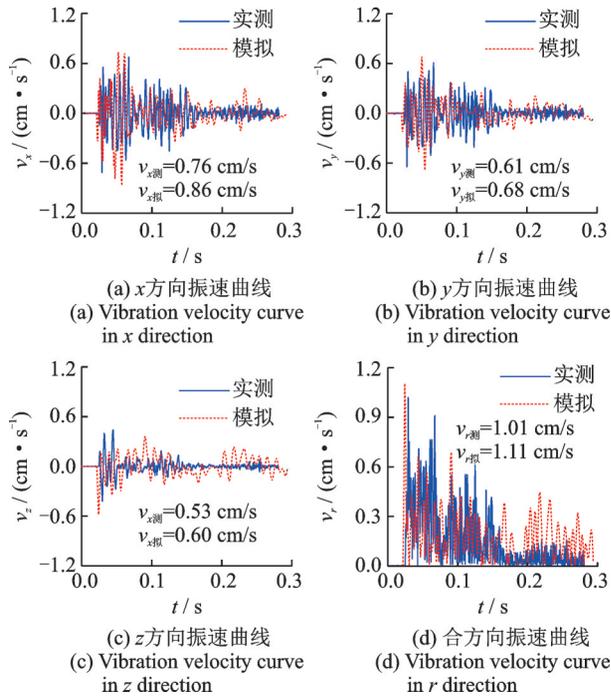


图 6 现场测试与数值模拟振动曲线对比图

Fig. 6 Comparison of field test and numerical simulation vibration curve

值模拟的振动传播持续与衰减时间及趋势基本相同,但可以明显看到数值模拟振动结束段衰减较现场测试曲线较快。分析上述误差的原因可能是现场岩体中存在裂隙与结构面,爆破振动波在其中传播时反射、折射能量损失,而数值模拟中并未考虑其影响,因此数值模型中衰减较快。综上所述,所建数值计算模型与现场实际情况有一定误差,但误差在允许范围内,数值模型是可靠的。

3 隧道爆破砂浆锚杆动力响应特性

基于上述应力初始化计算结果,采用 LS-DYNA 重启进行各级围岩爆破开挖动力计算,对隧道砂浆锚杆的振动速度特征及锚杆轴力变化特征和衰减规律进行分析。

3.1 振动特征分析

根据数值模型的计算结果,为直观地分析掌子

面爆破开挖产生的爆破荷载在隧道锚杆结构中的传播过程,对数值计算结果中锚杆结构单元的振动速度随时间变化的过程进行研究,其中以 IV 级围岩三台阶爆破开挖模型为例,沿隧道轴向选取距离掌子面爆破约 30 m 处截面的拱顶锚杆中部质点 H59394 为研究对象,如图 7 所示。

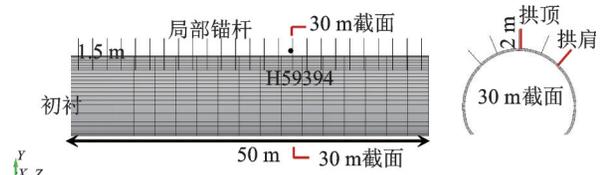


图 7 II 级围岩锚杆支护系统数值模型示意

Fig. 7 Numerical model of bolt support system for grade II surrounding rock

根据数值计算结果,研究区段中的隧道砂浆锚杆的合方向振动速度变化云图如图 8 所示。

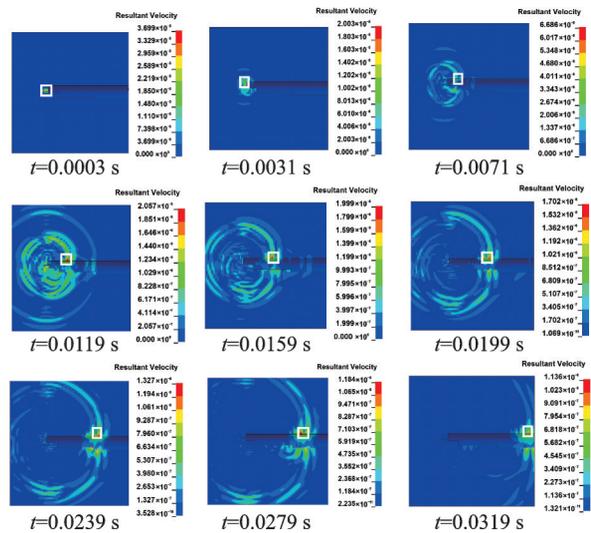


图 8 IV 级围岩爆破锚杆振动速度变化云图

Fig. 8 Cloud diagram of vibration velocity changes of rock bolt in IV grade surrounding rock blast

由图 8 可知,起爆后爆炸产生的动力荷载首先传播到上台阶的拱顶处,约 0.01 s 振动开始在锚杆结构与围岩中振荡传播,引起锚杆质点振动速度的变化,期间锚杆质点的最大峰值合振动速度的峰值可以达到 36.9 cm/s。锚杆振动速度以锚杆顶

表 3 各级围岩现场测试与数值模拟振动对比

Tab. 3 Comparison of field test and numerical simulation vibration of each level of surrounding rock

方向	II 级围岩			III 级围岩			IV 级围岩			V 级围岩		
	实测/ (cm·s ⁻¹)	数值/ (cm·s ⁻¹)	误差/%	实测/ (cm·s ⁻¹)	数值/ (cm·s ⁻¹)	误差/%	实测/ (cm·s ⁻¹)	数值/ (cm·s ⁻¹)	误差/%	实测/ (cm·s ⁻¹)	数值/ (cm·s ⁻¹)	误差/%
x	0.76	0.86	13	1.02	1.12	9	0.98	1.04	6	0.62	0.7	12
y	0.61	0.68	11	0.82	0.93	13	0.75	0.83	10	0.55	0.6	9
z	0.53	0.6	13	0.61	0.67	9	0.63	0.7	11	0.42	0.47	11

部较大,随着爆破振动沿隧道轴线方向进行传播,锚杆振动峰值出现的部位也在朝着轴向移动。锚杆质点 x, y, z 方向和矢量合振动速度随时间变化的曲线如图 9 所示。根据锚杆质点振动时程曲线,采用常用的快速傅里叶变换(FFT)对 x, y, z 三个方向和合振动方向的振动信号曲线进行时间-频域的分析,得到各个方向的振动功率-频谱图^[16]如图 10 所示。

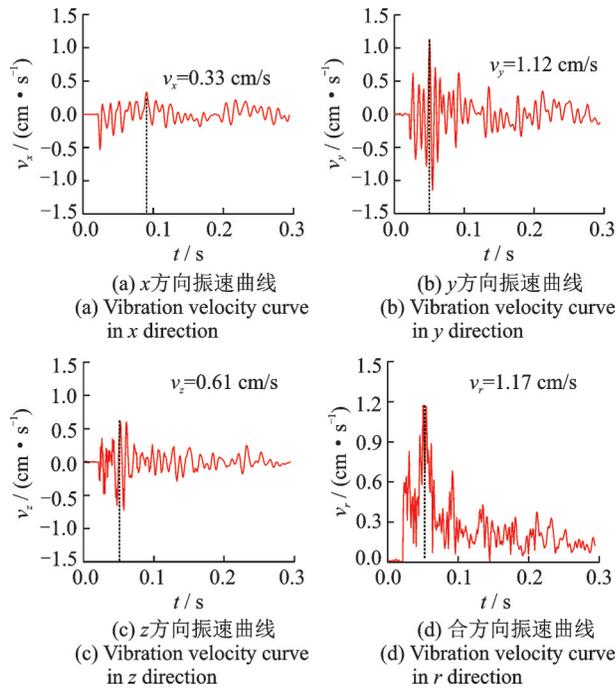


图 9 II 级围岩爆破开挖锚杆振速时程曲线

Fig. 9 The time-history curve of the vibration velocity of the anchor rod in the blasting excavation of class II surrounding rock

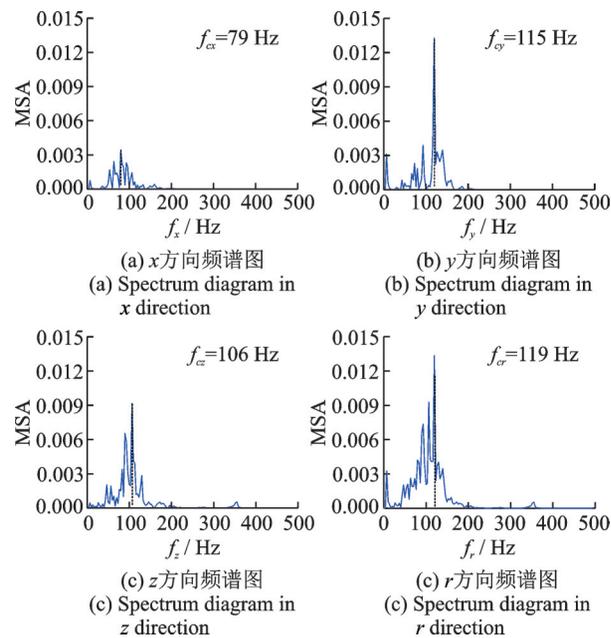


图 10 II 级围岩爆破开挖锚杆频谱图

Fig. 10 The frequency spectrum of the blasting excavation bolt of the II class

根据波形图 9 与频谱图 10 分析可知,爆破地震波能量在锚杆单元中传播具有短时、随机性,质点在约 0.05 s 时达到振动峰值,振动能量在 0.3 s 后开始迅速衰减逐渐消失。其中质点 H59394 三个方向的振速大小不一,其以 y 方向的振动速度为主,大小约为 1.12 cm/s,衰减较快; x 方向的振速最小,衰减较慢。质点 H59394 的 x, y, z 三个方向的振动频率 f 也大小不一,振动速度较大的 y 方向的振动频率较大,其主振动频率 f_{cy} 为 115 Hz;振动速度较小的 x 方向其振动频率一般较小,其主振动频率 f_{cx} 为 95 Hz。为进一步分析锚杆振动沿杆件长度方向的分布特征,根据上述锚杆质点振动时程曲线,选取各级围岩隧道 30 m 处的截面,研究该截面各空间位置的砂浆锚杆沿杆长方向的质点振动特征,其中杆长方向指的是隧道轮廓(锚杆端部)至围岩深部方向,如图 11 所示。

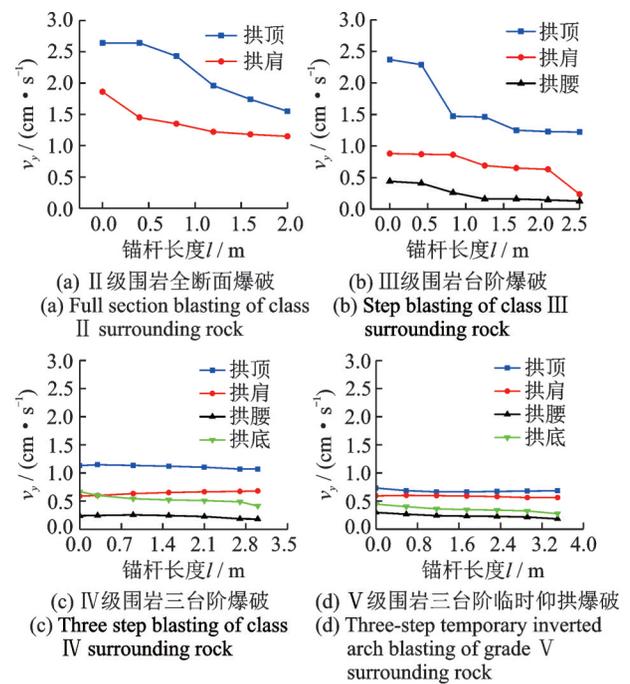


图 11 隧道 30 m 截面不同部位锚杆振速

Fig. 11 Vibration velocity of anchor rods in different parts of the 30 m section of the tunnel

根据图 11 分析可知,锚杆质点的振动速度峰值基本呈现出沿锚杆长度逐渐递减的趋势,锚杆部件端部质点的振动速度最大,为杆件的振动响应的最危险点。各级围岩爆破开挖后锚杆振动速度以拱顶锚杆振动响应最为剧烈,其次是拱肩,再次是拱腰和拱底。且根据爆破药量的不同,II 级拱顶锚杆振速 > III 级拱顶锚杆振速 > IV 级拱顶锚杆振速 > V 级拱顶锚杆振速。上述研究表明,隧道爆破开挖顶部锚杆为振动速度较大的部位,应重点监测,各锚杆部件端部的振动速度最大为最危险点。为进一步分析振

动速度沿隧道轴向随爆破距离衰减的特征,沿隧道轴向(z 方向)依次选取各部位锚杆端部危险点 y 方向的峰值振动速度进行研究,其分布规律如图 12 所示。

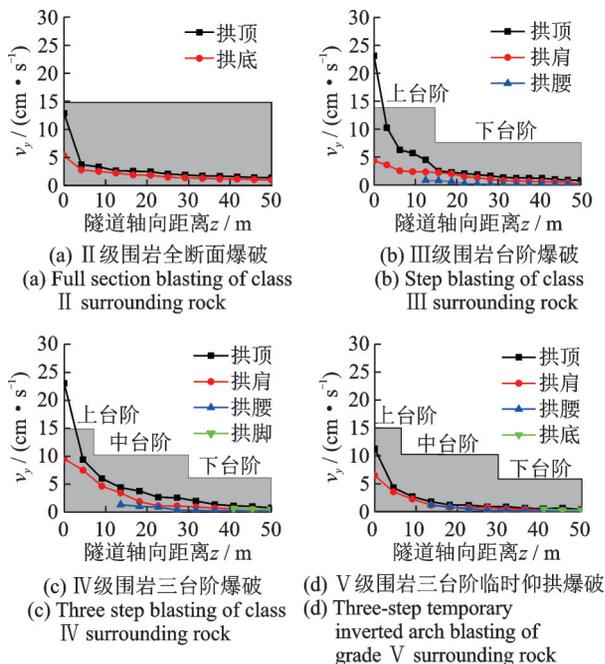


图 12 隧道轴向锚杆振速衰减规律

Fig. 12 The attenuation law of tunnel axial bolt vibration velocity

由图 12 分析可知,沿隧道轴线方向,锚杆的振动速度随爆破距离的增大而不断衰减,其中以距离掌子面较近 10 m 范围内的振速衰减最为迅速,隧道顶部锚杆振动速度最大,肩部次之,随着爆破距离的增大,锚杆质点的振动速度衰减减缓,振动速度峰值趋于一致,其中,以拱顶锚杆的衰减程度最为迅速。此外,根据爆破开挖方式的不同,隧道锚杆峰值振动速度会在台阶处出现不同程度的突变。

3.2 应力特征分析

根据中国的《岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范》(GB 50086—2015)^[17]与《铁路隧道设计规范》(TB 10003—2016)^[18],隧道锚杆支护结构的轴向应力 F_N 以及剪力 F_S 是锚杆支护结构设计以及安全性判定的重要指标。为了直观地分析掌子面爆破开挖产生的爆破荷载影响下隧道锚杆结构中力学状态的变化,对数值模型锚杆结构单元的轴力以及剪力随时间变化的过程进行研究,其中 IV 级围岩三台阶爆破开挖模型中隧道砂浆锚杆的轴力变化如图 13 所示。

由图 13 分析可知,起爆前($t = 0$ s),隧道锚杆处于静力平衡状态,锚杆存在初始轴力,起爆后,爆

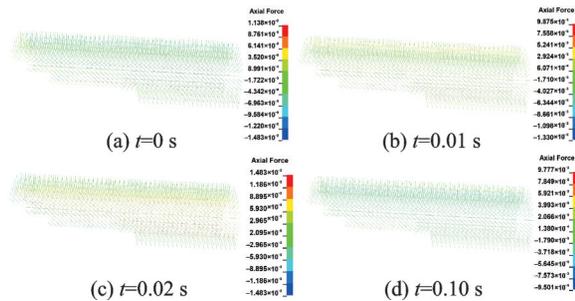
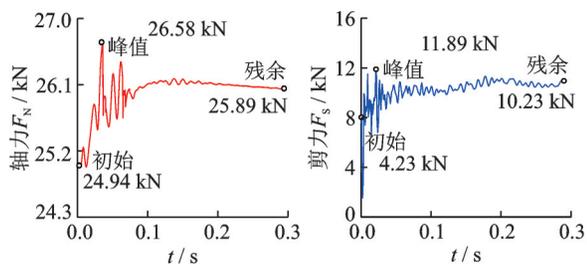


图 13 三台阶爆破开挖锚杆轴力分布云图

Fig. 13 Axial force distribution cloud diagram of anchor rod in three-step blasting excavation

炸产生的动力荷载,首先传播到隧道拱顶处,约 0.001 s 振动开始在锚杆结构与围岩中振荡传播,引起锚杆质点振动速度与应力的变化,大约 0.2 s 后振动停止,隧道锚杆恢复初始静力平衡状态。为进一步分析锚杆单元轴力与剪力变化特征,与振动速度分析相同,选取隧道 30 m 处截面顶部单元为研究对象,其轴力与剪力随时间变化的时程曲线如图 14 所示。



(a) 拱顶锚杆单元轴力 (b) 拱顶锚杆单元剪力
(a) Axial force of vault anchor unit (b) Shear force of vault anchor unit

图 14 锚杆单元轴力时程曲线示意图

Fig. 14 Diagram of axial force time history curve of bolt element

根据图 14 分析可知,锚杆单元在受到爆破振动荷载前处于静力平衡状态,初始轴力和剪力来源于隧道的初始围岩压力平衡,剪力的初始值小于轴力。拱顶锚杆初始轴力约为 24.94 kN,初始剪力为 4.23 kN;当爆破荷载传播到锚杆单元后,开始引起锚杆轴力与剪力的振荡变化,当爆破动力能量传播达到峰值时,锚杆单元轴力与剪力振荡值达到峰值,其中拱顶锚杆单元峰值轴力约为 26.58 kN,剪力值约为 11.89 kN;当振动能量逐渐消失后,锚杆轴力和剪力最后趋于稳定状态,具有一个残余值,其中拱顶锚杆残余轴力为 25.89 kN,残余剪力为 10.23 kN。为进一步分析沿锚杆长度方向的单元轴力沿锚杆长度方向的变化规律,选取爆破动力作用下隧道中区 30 m 处截面不同部位锚杆为研究对象,对沿锚杆长度方向的轴向应力和剪力变化规律进行分析,如图 15 所示。

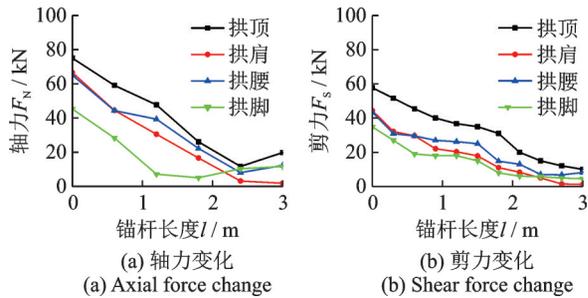


图15 IV级围岩爆破截面锚杆轴力、剪力分布规律

Fig. 15 Axial force and shear force distribution law of blasting section of grade IV surrounding rock

根据图15分析可知,沿锚杆长度方向,锚杆单元的轴力及剪力的峰值基本呈现出沿锚杆长度逐渐递减的趋势,锚杆部件端部单元的应力峰值最大,为杆件的应力响应的最危险单元。锚杆单元的轴力与剪力的峰值变化过程中,总体是锚杆的轴力大于锚杆的剪力,其中以拱顶锚杆的轴力峰值较大,沿杆长方向衰减也最为迅速;剪力峰值也以拱顶较大,但是剪力的衰减趋势小于轴力的衰减趋势。为进一步分析各级围岩爆破开挖作用下各部位锚杆单元应力沿隧道轴向衰减的特征,沿隧道轴向(z 方向)依次对各区域拱顶、拱肩部位锚杆各个方向的峰值轴力进行研究,其分布如图16所示。

由图16分析可知,锚杆端部单元的峰值轴力与剪力均随爆破距离的增大而减小,随着爆破距离的增加,爆破动力产生的隧道锚杆轴力的变化逐渐减弱,锚杆轴力受静力荷载影响增大。其中在距离掌子面较近的锚杆轴力与剪力的衰减均快于较远处,且锚杆轴力为锚杆单元主要应力成分,其主要原因是爆炸近区锚杆结构 y 方向为主要振动方向,且其主要受爆炸P波的作用,S波作用较

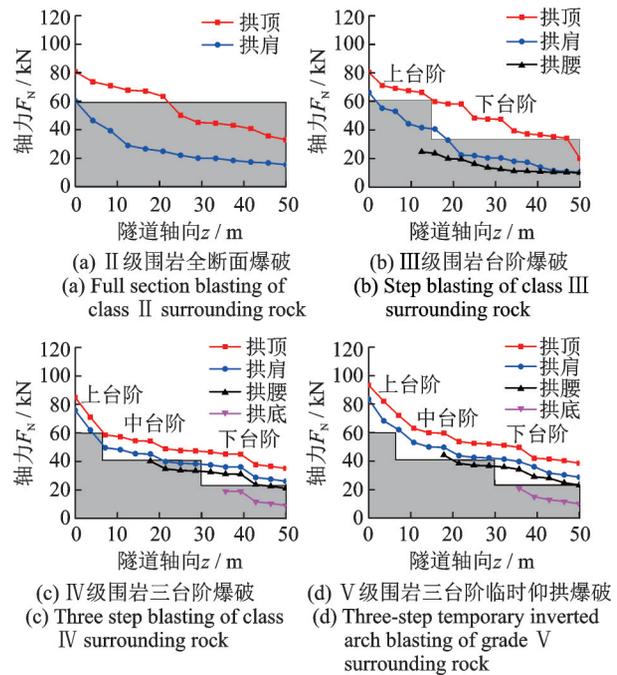


图16 隧道轴线不同部位锚杆轴力峰值分布

Fig. 16 Axial force distribution of anchor rods at different parts of the tunnel axis

小;在爆炸中区,S波成分逐渐增加,影响锚杆剪力的大小及变化过程。因此在能量与冲击较大的掌子面附近,应该主要考虑锚杆轴力变化带来的危险性。

3.3 不同注浆龄期动力响应特征分析

砂浆锚杆系统中提供锚杆与围岩之间锚固力的主要材料就是砂浆,基于28d终凝期砂浆锚杆的动力响应分析,建立各级围岩爆破开挖作用下不同龄期砂浆锚杆的数值计算模型,不同龄期各级围岩注浆等效区的参数如表4所示。

表4 不同龄期注浆等效区数值模拟参数

Tab. 4 Numerical simulation parameters of equivalent grouting zone at different ages

参数	II级围岩			III级围岩			IV级围岩			V级围岩		
	0~3 d	3~7 d	7~28 d	0~3 d	3~7 d	7~28 d	0~3 d	3~7 d	7~28 d	0~3 d	3~7 d	7~28 d
$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	2.45	2.26	2.65	2.34	2.45	2.5	2.56	2.45	2.46	2.36	2.00	2.43
E/GPa	16.15	29.58	55.77	9.49	17.32	32.5	3.91	7.15	13.46	2.41	4.28	7.75
μ	0.26	0.31	0.21	0.28	0.35	0.29	0.14	0.22	0.31	0.30	0.38	0.35
σ_c/MPa	36.0	40.45	45.2	20.88	20.12	22.31	17.71	19.23	20.73	13.61	20.91	22.92
E_t/MPa	15.52	28.43	53.59	8.96	16.33	30.63	7.25	13.31	25.15	6.56	11.93	22.27

选取不同注浆龄期各级围岩爆破开挖作用下隧道30m处截面的锚杆端部质点作为研究对象,研究各级围岩全断面爆破开挖作用下不同龄期砂浆锚杆的振动分布规律,如图17所示。

由图17分析可知,不同注浆龄期的砂浆锚杆

端部质点的振动仍以隧道顶部锚杆为大,肩部次之;各部位的锚杆峰值振速随着注浆龄期的增加其峰值合振动速度会减小,初始注浆强度时锚杆振速最大,最大值为3.86 cm/s,当达到终凝强度时振动速度减小至2.5 cm/s。为进一步分析隧道锚杆质

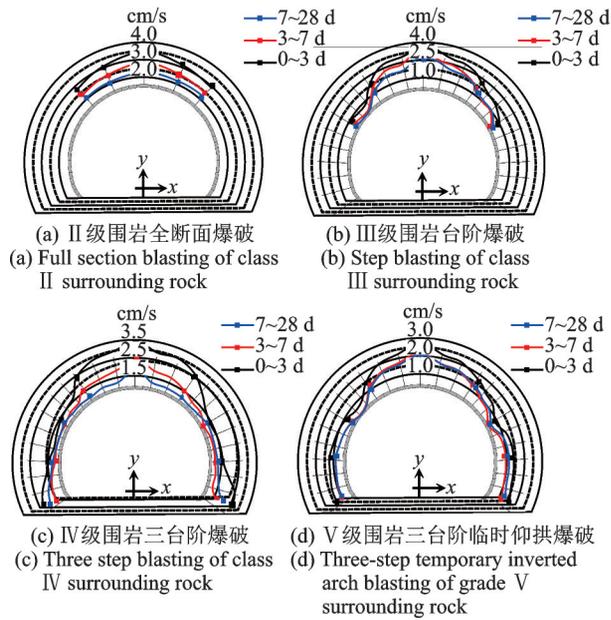


图 17 不同龄期锚杆峰值振动分布特征

Fig. 17 Peak vibration distribution characteristics of bolts at different ages

点振动沿隧道轴线方向衰减的规律,选取振动最大的拱顶锚杆作为研究对象,其沿隧道轴线不同爆破区域的衰减如图 18 所示。

根据图 18 分析可知,沿隧道轴线方向不同注浆龄期的拱顶砂浆锚杆振动速度随着爆破距离的增加不断衰减。随着注浆龄期的增加其振动速度不断减小,当达到 28 d 龄期时,锚杆振动速度达到最小。由此可以判断距离掌子面最近的拱顶锚杆在注浆龄期尚未达到强度的时候应该重点监测,以保证锚杆杆

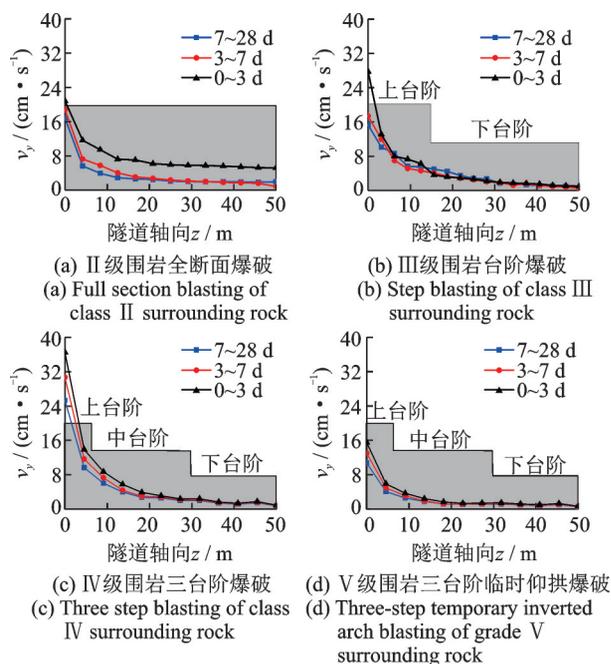


图 18 不同龄期隧道轴线振动衰减规律

Fig. 18 The attenuation law of the axis vibration velocity of tunnels of different ages

件能在砂浆尚未达到终凝期间能够始终处于安全状态。根据砂浆锚杆的性能分析,注浆液主要提供锚杆杆体与隧道围岩之间的锚固力,其表现的宏观特征就是锚杆轴力的大小。

选取各级围岩全断面爆破开挖作用下隧道中截面 30 m 处不同龄期不同部位的砂浆锚杆为研究对象,对其端部质点的峰值轴力衰减规律进行分析,其分布特征如图 19 所示。

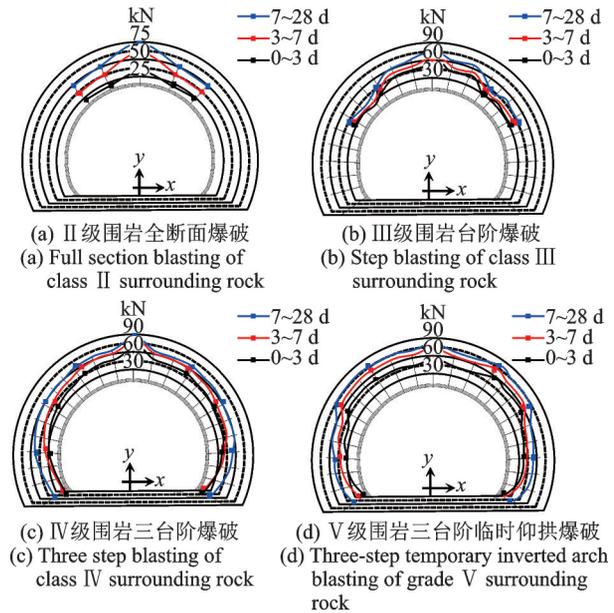


图 19 不同龄期隧道截面锚杆轴力分布

Fig. 19 Axial force distribution of anchor rods in tunnel sections of different ages

由图 19 分析可知,随着注浆龄期的增加,轴力增大的幅值大于剪力的幅值。隧道拱顶的锚杆单元轴力较大。当锚杆处于初期注浆龄期时,最大轴力为 75 kN。因此,随着注浆龄期的增加,隧道砂浆锚杆杆体的轴力和剪力会逐渐增加,表明砂浆锚杆在达到终凝以前,随注浆龄期的增加逐渐发挥支护能力,不断提高隧道围岩的稳定与安全性。为进一步分析沿隧道轴线方向锚杆应力的变化规律,选取截面拱顶处的锚杆单元为研究对象,其沿隧道轴线方向的变化规律如图 20 所示。

根据图 20 分析可知,沿隧道轴线方向,随着爆破距离的增加锚杆轴力峰值呈现出不断衰减的趋势,且随着注浆龄期的增加其峰值应力不断增大,当达到 28 d 龄期时,锚杆轴力达到最大,最大轴力为 85.75 kN。不同爆破区域,距离掌子面较近的区域锚杆轴力峰值较大但衰减速率较快,其衰减趋势大于较远处。因此距离掌子面爆破最近的锚杆轴力是最应重点关注的参量。

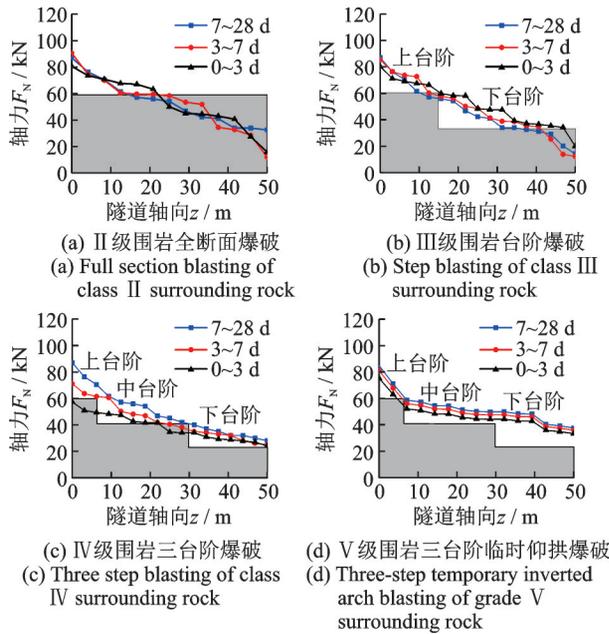


图20 不同龄期隧道轴线拱顶锚杆轴力分布

Fig. 20 Axial force distribution of axial vault anchor rods of tunnels at different ages

4 隧道爆破砂浆锚杆安全评价及控制

4.1 锚杆爆破动力安全性评价

综上所述可知,不同围岩级别爆破开挖方式中,拱顶锚杆均处于最危险部位,且其与注浆龄期砂浆强度的变化有关^[19],根据最不利校核原则,选取各级围岩爆破开挖作用下隧道顶部锚杆的轴向应力进行校核。根据文献[17-18]提出的锚杆及锚杆单元锚固段的拉力设计值的计算方法,不同级别围岩不同龄期砂浆锚杆设计拉力值如表5所示。

各级围岩爆破开挖作用下锚杆单元的峰值轴力以达到终凝期的峰值轴力为大,根据上述安全判别过程,当锚杆单元峰值轴力小于设计值时锚杆处于安全状态,由此可以判断各级围岩不同爆破开挖方式下处于不同注浆龄期锚杆的安全状态如表5所示。根据表5中数据分析可知,以现工况开挖时隧道锚杆支护结构基本处于安全状态,在达到终凝强度时期其锚杆结构承担的支护力较大但是基本处于安全状态。

4.2 锚杆爆破振动控制阈值

根据爆破应力波的传播理论,由爆破振动产生的动力与振动速度具有对应关系,根据上述分析,选取拱顶锚杆单元峰值轴力作为安全判定的控制值,则根据力的叠加原理,假设锚杆在受爆破动力作用前具有初始轴力 f_{n0} ,则当锚杆受不同级别围岩爆破开挖作用下隧道拱顶锚杆单元产生的峰值轴力与振速的关系可以由下式计算:

$$F_N = f_{n0} + C \cdot v_{\max} \quad (6)$$

根据式(6)选取隧道拱顶锚杆端部单元峰值合振动速度与轴力分布进行数据拟合如图21所示。

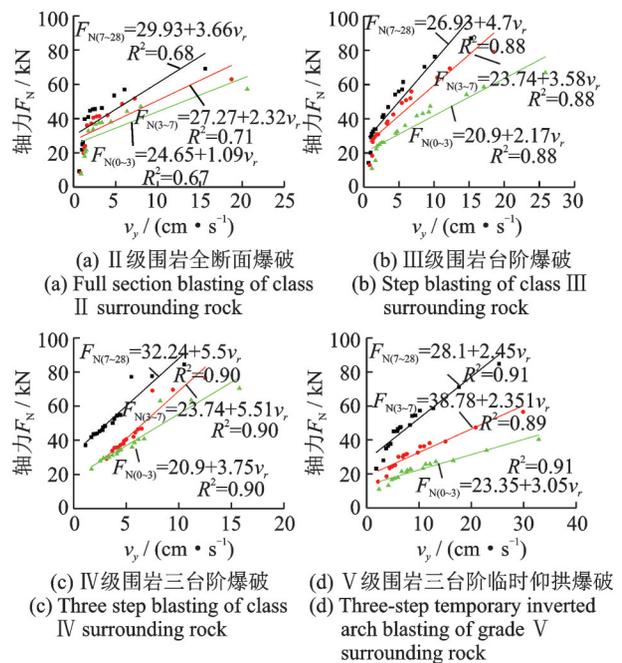


图21 拱顶锚杆峰值合振速与锚杆轴力拟合关系

Fig. 21 The fitting relationship between the peak resultant vibration velocity of the dome anchor and the axial force of the anchor

由图21可知,各级围岩开挖爆破作业下,对于具有不同养护龄期的隧道拱顶锚杆的轴力值与峰值振速具有线性关系,其表示的初始轴力值轴力 f_{n0} 与振速关系系数 C 与爆破方式以及龄期的大小有关系,其具体值如图21所示。根据锚杆轴力判定的安全准则,当轴力值小于设计值时,锚杆结构处于安全

表5 各级围岩不同龄期砂浆锚杆安全判定

Tab. 5 Safety judgment of anchor rods at different ages of surrounding rocks at various levels

围岩级别	7~28 d			3~7 d			0~3 d		
	设计/kN	数值/kN	判定	设计/kN	数值/kN	判定	设计/kN	数值/kN	判定
II	110.5	85.75	小于	124.3	82.34	小于	110.5	80.42	小于
III	138.1	87.56	小于	155.4	86.54	小于	138.1	80.23	小于
IV	165.7	86.34	小于	183.6	79.65	小于	165.7	58.47	小于
V	82.4	88.56	大于	82.4	81.23	小于	82.4	78.96	小于

状态。根据式(2)将图21中各级围岩不同龄期的峰值轴力与峰值振速的对应关系代入上述锚杆安全性判别的关系式中,计算可得本工程中不同围岩级别爆破开挖作用下隧道不同龄期砂浆锚杆的安全峰值振速控制阈值,如表6所示。

表6 不同围岩级别不同龄期砂浆锚杆安全振速/($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)
Tab. 6 Safe vibration velocity of mortar bolts of different surrounding rock grades and ages/($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)

围岩级别	0~3 d	3~7 d	7~28 d
II	18.36	25.36	32.25
III	16.35	20.65	25.65
IV	5.23	8.32	21.51
V	3.25	5.62	10.25

5 结 论

本文基于龙南隧道主洞各级围岩爆破开挖现场施工条件,采用动力有限元数值模拟软件,分别建立不同围岩级别、不同注浆龄期砂浆锚杆爆破开挖动力有限元计算模型,分析隧道不同围岩级别、不同隧道部位、不同注浆龄期的砂浆锚杆系统的动力响应特征,得到如下主要结论:

(1)各级围岩爆破开挖时,爆破振动传播过程中以隧道拱顶的锚杆质点的振动速度最大,拱脚振速次之,其中以 y 方向的振动速度为主;沿锚杆长度方向,振动速度呈现出逐渐递减的趋势,锚杆部件端部为最危险点;沿隧道轴线方向,锚杆的振动速度随爆破距离的增大而不断衰减。

(2)隧道截面锚杆轴力、剪力沿锚杆长度方向不断衰减,隧道截面各部位锚杆的轴力和剪力分布以拱顶、拱肩部位较大,拱腰次之;锚杆端部单元的轴力、剪力随爆破距离的增大而减小,每一级台阶连接处会出现突变,不同部位的锚杆轴力为锚杆单元受力的主要成分。

(3)各部位的锚杆峰值振速随着注浆龄期的增加而减小,沿隧道轴线方向,峰值振速随注浆龄期增加而不断减小;不同养护龄期隧道拱顶的锚杆单元轴力、剪力较大,轴力随注浆强度的增加其值会减小,其剪力值也会减小,轴力增大的幅值大于剪力的幅值。

(4)不同围岩爆破开挖作用下,不同龄期拱顶锚杆的轴力值与峰值振速具有线性关系,其初始轴力值 f_{n0} 、振速关系系数 C 与爆破方式以及龄期的大小有关,根据锚杆安全轴力得到隧道锚杆爆破振动安全判据,计算得到隧道爆破开挖砂浆锚杆的安全控制振速。

参考文献:

- [1] 王照刚. 爆破动载下锚固支护结构动态力学响应研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2019.
WANG Zhaogang. Dynamic mechanical response of an anchoring retaining structure under blasting dynamic load [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2019.
- [2] 周纪军, 单仁亮, 贾志欣, 等. 近区锚喷结构的爆破振动特性研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(8): 2225-2230.
ZHOU Jijun, SHAN Renliang, JIA Zhixin, et al. Research on the blasting vibration characteristics of the nearby bolt-shotcrete structure [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(8): 2225-2230.
- [3] 单仁亮, 周纪军, 夏宇, 等. 爆炸荷载下锚杆动态响应试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(8): 1540-1546.
SHAN Renliang, ZHOU Jijun, XIA Yu, et al. Experimental study on dynamic response of rockbolt under explosive load [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(8): 1540-1546.
- [4] Wu Q, Li X, Weng L, et al. Experimental investigation of the dynamic response of prestressed rock bolt by using an SHPB-based rockbolt test system [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2019, 93: 103088.
- [5] 龚韩林. 爆破动载作用下玻璃钢锚杆力学响应特征研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2016.
GONG Hanlin. Research on the mechanical response characteristics of GFRP bolts under blasting dynamic load [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2016.
- [6] 易长平, 卢文波. 爆破振动对砂浆锚杆的影响研究[J]. 岩土力学, 2006(8): 1312-1316.
YI Changping, LU Wenbo. Research on influence of blasting vibration on grouted rockbolt [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006(8): 1312-1316.
- [7] 袁松, 王峥峥, 周佳媚. 隧道地震动力计算边界取值范围研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(11): 166-172.
YUAN Song, WANG Zhengzheng, ZHOU Jiamei. Research on the boundary value range of tunnel seismic dynamic calculation [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(11): 166-172.
- [8] 朱斌, 蒋楠, 周传波, 等. 基坑开挖爆破作用邻近压力燃气管道动力响应特性研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(11): 201-208.
ZHU Bin, JIANG Nan, ZHOU Chuanbo, et al. Study on the dynamic response characteristics of adjacent pressure gas pipeline during blasting of foundation pit excavation [J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(11): 201-208.
- [9] Al Hallak R, Garnier J, Leca E. Experimental study of the stability of a tunnel face reinforced by bolts [C]//

- Geotechnical Aspects of Underground Construction on Soft Ground, 2000: 65-68.
- [10] Lin S C, Li D, Yang B. Experimental study and numerical simulation on damage assessment of reinforced concrete beams [J]. International Journal of Impact Engineering, 2019, 132(10): 103323.
- [11] 蒲磊. 不同加载方式下隧道爆破振动特征分析[J]. 爆破, 2018, 35(1): 42-48.
PU Lei. Analysis of characteristics of tunnel blasting vibration under different loading methods [J]. Blasting, 2018, 35(1): 42-48.
- [12] Li L, Hagan P C, Saydam S, et al. A laboratory study of shear behaviour of rockbolts under dynamic loading based on the drop test using a double shear system [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019, 52(9): 3413-3429.
- [13] 陈明, 卢文波, 周创兵, 等. 初始地应力对隧洞开挖爆生裂隙区的影响研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(8): 2254-2258.
Chen Ming, Lu Wenbo, Zhou Chuangbing, et al. Study on the effect of initial ground stress on burst fracture zone in tunnel excavation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(8): 2254-2258.
- [14] 杨自友, 杨本水, 顾金才, 等. 爆炸荷载下不同锚固参数围岩的加速度响应分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(1): 146-150.
YANG Ziyu, YANG Benshui, GU Jincai, et al. Acceleration response analysis of surrounding rock with different anchoring parameters under explosive load [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(1): 146-150.
- [15] Yang, J C, Liu K W, Li X D, et al. Stress initialization methods for dynamic numerical simulation of rock mass with high in-situ stress [J]. Journal of Central South University, 2020, 27(10), 3149-3162.
- [16] 薛亚东, 张世平, 康天合. 回采巷道锚杆动载响应的数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(11): 1903-1906.
XUE Yadong, ZHANG Shiping, KANG Tianhe. Numerical analysis of dynamic load response of mining roadway bolts [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(11): 1903-1906.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范: GB 50086—2015 [S]. 北京: 中国计划出版社出版, 2015.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical specification for geotechnical anchor and shotcrete support engineering: GB 50086—2015 [S]. Beijing: China Planning Publishing House, 2015.
- [18] 中华人民共和国国家铁路局. 铁路隧道设计规范: TB 10003—2016 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017.
Nation Railway Administration of the People's Republic of China. Code for design of railway tunnels: TB 10003—2016 [S]. Beijing: China Railway Press, 2017.
- [19] 刘永志. 砌筑砂浆在不同龄期时的硬化强度[J]. 建筑技术, 1983(7): 49.
Liu Y Z. Hardening strength of masonry mortar at different ages [J]. Construction Technology, 1983(7): 49.

Dynamic response characteristics and safety control of mortar bolts under the action of tunnel blasting excavation

ZHU Bin, ZHOU Chuan-bo, JIANG Nan

(Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: Clarifying the dynamic response characteristics of mortar bolts under the action of tunnel blasting and excavation and ensuring the safety and stability of the bolt support system is the key to the efficient construction and safe operation of the tunnel. Based on the Longnan Tunnel's surrounding rock blasting excavation engineering at all levels, using the dynamic finite element numerical simulation software ANSYS/LS-DYNA, the dynamic finite element calculation models of mortar bolt blasting excavation for different surrounding rock levels and different grouting ages are established and analyzed. The dynamic response characteristics and failure mechanism of mortar bolts at various locations under the action of tunnel blasting. Studies have shown that during blasting and excavation of surrounding rock at all levels, the vibration speed and axial force of the anchor rod on the tunnel vault are the largest, and the end of the anchor rod is the most dangerous point. Along the tunnel axis, the vibration speed and axial force of the anchor rod decay continuously as the blasting distance increases. The peak vibration velocity of the bolt at each part decreases with the increase of the grouting age, the axial force will decrease with the increase of the grouting strength, and the shear force will also decrease. The axial force value of the dome anchor rod has a linear relationship with the peak vibration speed, and its surrounding rock grade and age are related. According to the safety axial force of the bolt, the safe control vibration speed of the mortar bolt in tunnel blasting excavation of different surrounding rock grades and different maintenance ages can be calculated.

Key words: tunnel blasting; mortar bolt; grouting age; dynamic response; safety control

作者简介: 朱 斌(1996—),男,博士研究生。电话:17771420235; E-mail: b.zhu@cug.edu.cn。

通讯作者: 周传波(1963—),男,教授。电话:(027)67883124; E-mail: cb.zhou@cug.edu.cn。