

DOI: 10.7672/sgjs2024210090

# 岩石质量指标对隧道稳定性的影响研究\*

宋鹏飞<sup>1,2</sup>, 张程<sup>1</sup>, 李智<sup>1</sup>, 刘广<sup>1</sup>, 熊斌<sup>1</sup>, 范兵<sup>3</sup>, 周应权<sup>3</sup>, 蒋金宏<sup>3</sup>(1. 中建隧道建设有限公司, 重庆 401320; 2. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045;  
3. 重庆市江南城市建设发展(集团)有限公司, 重庆 400000)

[摘要] 为研究岩石质量指标(RQD)变化对隧道稳定性的影响, 依托江南隧道工程, 采用数值模拟计算方法, 分析了隧道发生岩爆时不同RQD值和节理倾角下围岩环向应力、动能及最大速度变化规律。研究表明, 不同RQD值和节理倾角下, 初始地应力为75MPa时的围岩环向应力峰值、最大动能均较初始地应力为55MPa时大; 围岩破坏程度随着节理倾角的增大而增大; 围岩动能基本随着RQD值的增大逐渐减小, 随着地应力的增大逐渐增大; 当初始地应力为55, 75MPa时, 围岩最大速度在RQD值为62, 72, 82时存在极值, 在RQD值为92时存在最小值。

[关键词] 隧道; 围岩; 环向应力; 节理倾角; 稳定性

[中图分类号] U45

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2024)21-0090-06

## Study on the Influence of Rock Quality Designation on Tunnel Stability

SONG Pengfei<sup>1,2</sup>, ZHANG Cheng<sup>1</sup>, LI Zhi<sup>1</sup>, LIU Guang<sup>1</sup>, XIONG Bin<sup>1</sup>, FAN Bing<sup>3</sup>,  
ZHOU Yingquan<sup>3</sup>, JIANG Jinhong<sup>3</sup>

(1. China Construction Tunnel Co., Ltd., Chongqing 401320, China; 2. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 3. Chongqing Jiangnan Urban Construction and Development (Group) Co., Ltd., Chongqing 400000, China)

**Abstract:** In order to study the influence of rock quality designation (RQD) on tunnel stability, based on the Jiangnan Tunnel project, numerical simulation calculation methods were used to analyze the circumferential stress, kinetic energy and maximum velocity of surrounding rock under different RQD values and joint dip angles during rock burst in the tunnel. The research results show that under different RQD values and joint dip angles, the peak circumferential stress and maximum kinetic energy of surrounding rock at an initial geostress of 75MPa are higher than those at an initial geostress of 55MPa. The degree of surrounding rock damage increases with the increase of joint dip angles. The kinetic energy of surrounding rock gradually decreases with the increase of RQD values and increases with the increase of geostress. When the initial geostress is 55, 75MPa, the maximum velocity of the surrounding rock has extreme values at RQD values of 62, 72, 82, and a minimum value at RQD value of 92.

**Keywords:** tunnels; surrounding rock; circumferential stress; joint dip angles; stability

## 0 引言

隧道开挖过程中, 不可避免地会遇到复杂的地质构造, 当开挖地下隧洞含层状节理的硬脆性围岩时, 将会诱发应变造成坍塌<sup>[1]</sup>。为分析不同初始地应力、岩石质量指标(RQD)和节理倾角对隧道稳定性的影响, 已有学者进行了多方面研究, 如郝英

杰<sup>[2]</sup>通过地应力测量、室内岩石力学试验, 基于变异系数-突变级数法, 对花脑特矿区围岩倾向性进行了综合预测; 杨腾杰等<sup>[3]</sup>对深埋高地应力TBM隧道岩爆发生机理进行了研究, 结果表明, 拱顶板裂屈曲可视为围岩板裂结构在水平切向应力作用下断裂失稳导致的, 劈裂岩体厚度为主要影响因素; 裴成元等<sup>[4]</sup>研究了深埋TBM隧洞结构面对岩爆的作用机制, 结果表明, 结构面特征是决定隧道围岩作用机制的关键因素, 不仅控制爆坑所在边界和深度, 其周围岩体也呈现明显的块状、片状特征; 沙仙

\* 中建五局重点课题, 钻爆法隧道喷射混凝土降耗及变断面快速施工关键技术研究与应用(cscce5b-2022-28)

[作者简介] 宋鹏飞, 高级工程师, E-mail: 1161407609@qq.com

[通信作者] 熊斌, 工程师, E-mail: 314706116@qq.com

[收稿日期] 2024-06-16

武等<sup>[5]</sup>研究了巨龙铜矿区地应力对大断面巷道稳定性与围岩倾向性的影响,结果表明,地应力作用下巷道呈现出坍塌倾向,可通过减小开挖进尺削弱岩体局部应力集中。以上学者采用多种方法对隧道岩爆发生机理进行了研究,但未对不同 RQD 下隧道稳定性进行分析。

已有学者对特殊地质条件和复杂施工环境下隧道稳定性进行了分析,如周慧文等<sup>[6]</sup>对穿越富水断层破碎带隧道结构受力及变形特性进行了试验研究,结果表明,隧道衬砌轴力均为压应力,受富水工况影响其轴力产生重分布,严重影响隧道结构整体稳定性;罗春雨等<sup>[7]</sup>以蓝家岩隧道工程为背景,采用数值模拟方法对基于流固耦合效应的高地应力软岩大变形隧道开挖稳定性进行了分析。以上学者对隧道围岩变形及结构受力特征进行了研究,并对隧道开挖稳定性进行了分析,但未系统考虑 RQD 变化时隧道稳定性。

目前,RQD 变化对隧道稳定性的影响研究较少,为此,本文依托江南隧道(城市山岭隧道)工程,采用数值模拟计算方法,分析了不同 RQD 下隧道发生岩爆时围岩环向应力、动能与速度变化规律,研究了 RQD 对隧道稳定性的影响。

## 1 工程概况

江南隧道工程位于重庆市南岸区,穿越铜锣山脉,全长 4 087m,最大埋深为 241m,隧址区所在的地质构造位于南温泉背斜两翼,节理较发育,多呈密闭型,部分为微张型,少有充填物,未发现断层。沿线红层区岩石基岩面层间结合差,局部有泥化,属软弱结构面,裂隙贯通性好,结合差,属硬性结构面。岩体褶皱和断裂衍生出的各级节理裂隙构成节理裂隙系统,破坏了岩体完整性,在隧道开挖过程中,易发生坍塌、突涌水等工程灾害,如果围岩无支护时,将会发生掉块等现象。

## 2 数值模型建立与参数设置

### 2.1 数值模型

根据工程实际情况,建立数值模拟计算模型,设置模型长度为 75m,宽度为 45m,隧道洞径为 10.4m,爆破点距隧洞 18.5m,如图 1 所示。

根据岩石单轴抗压试验数据,设置岩石单轴抗压强度为 142.64MPa,弹性模量为 16.32GPa。对模型微观参数进行选取,得到平行黏结模型微观参数中颗粒密度为 2 540kg/m<sup>3</sup>,有效模量为 12.4GPa,刚度比为 3.2,摩擦系数为 0.82,抗拉强度为 76.2MPa,黏结强度为 78.3MPa;光滑节理模型细观参数中法向刚度为 198.8GPa/m,切向刚度为

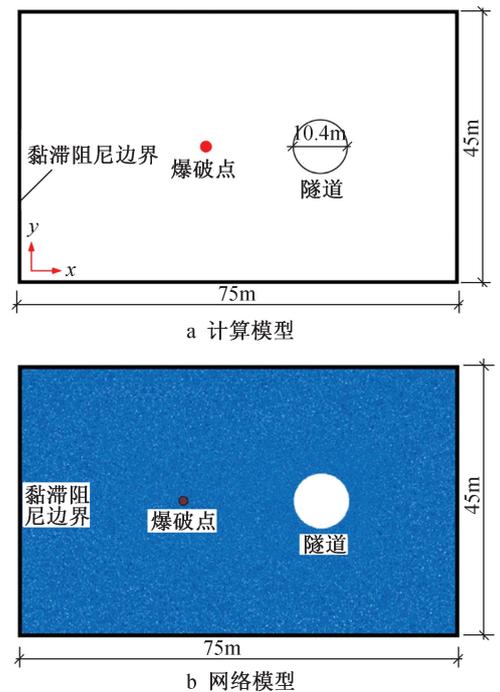


图 1 有限元模型

Fig. 1 Finite element model

51.2GPa/m,摩擦系数为 0.82。

建模过程中设置同一区域的颗粒均匀分布,由于节理间距小,为获得准确的模拟效果,适当增大颗粒粒径,然后在模型不同区域生成不同粒径范围的颗粒,采用裂隙创建命令在岩石中生成节理面,生成颗粒共 164 352 个。为使模拟结果更精确,将模型边界设置为黏滞阻尼边界,边界厚度为 0.45m。

### 2.2 分析参数设置

RQD 为评价岩石完整性的重要指标,RQD 值越大,岩石完整性越好,而岩石中节理倾角可改变岩体抗压强度,在隧道开挖过程中,初始地应力是引起隧道坍塌的主要原因,当初始地应力高到一定程度时,隧道将会发生坍塌。本研究设置 RQD 值分别为 52,62,72,82,92,设置节理倾角分别为 45°,60°,75°,90°,设置初始地应力分别为 55,75MPa,分析不同参数下隧道发生岩爆时围岩环向应力、动能及最大速度变化规律。

## 3 计算结果与分析

### 3.1 围岩环向应力

当初始地应力为 55,75MPa 时,不同 RQD 值与节理倾角下围岩环向应力变化曲线分别如图 2,3 所示。由图 2a 可知,当初始地应力为 55MPa 时,在节理倾角为 45°的条件下,随着 RQD 值的增大,隧道发生岩爆时围岩环向应力相应发生变化。当 RQD 值为 52 时,围岩环向应力总体呈先增大后减小最终

趋于稳定的变化趋势;围岩环向应力短时间内达到峰值,峰值应力为 74.94MPa;随着时间的增加,围岩残余应力逐渐减小,最终残余应力为峰值应力的 13.4%。当 RQD 值为 62 时,围岩环向应力峰值达 101.08MPa,相比初始地应力增大了 46.08MPa,环向应力达到峰值后逐渐衰减,最终残余应力为峰值应力的 8.71%。当 RQD 值为 72 时,围岩环向应力峰值达 109.46MPa,随后环向应力快速减至 82.62MPa,相比峰值应力减小了 24.52%;随着时间的增加,环向应力逐渐趋于稳定,最终残余应力为峰值应力的 8.71%。当 RQD 值为 82,92 时,围岩环向应力总体呈逐渐增大并趋于稳定的趋势,隧道开挖后的围岩未受到破坏。

由图 2b 可知,当初始地应力为 55MPa 时,在节理倾角为 60°的条件下,当 RQD 值为 52 时,隧道发生岩爆时围岩环向应力总体呈先减小后增大再减小最终趋于稳定的趋势,岩爆发生瞬间,围岩环向应力达到峰值,最大应力为 70.25MPa;随着时间的增加,围岩环向应力逐渐减小,0.03s 时减至 17.67MPa,最终残余应力相比峰值应力减小了 92.33%。当 RQD 值为 62 时,围岩峰值应力为 116.2MPa;随着时间的增加,最终残余应力为 3.5MPa。当 RQD 值为 72 时,围岩环向应力总体呈先增大后减小再增大最终趋于稳定的趋势,峰值应力为 108.82MPa;0.03s 时围岩环向应力减至 89.13MPa,最终残余应力减至 88.22MPa。当 RQD 值为 82,92 时,围岩环向应力逐渐增大,最终趋于稳定,隧道开挖后的围岩未受到破坏。

由图 2c 可知,当初始地应力为 55MPa 时,在节理倾角为 75°的条件下,当 RQD 值为 52 时,隧道发生岩爆时围岩环向应力峰值为 64.38MPa;0.03s 时围岩环向应力减至 9.36MPa,最终残余应力为 2.61MPa。当 RQD 值为 62 时,围岩环向应力峰值为 84MPa;围岩环向应力达到峰值后快速减小,最终残余应力为 0.51MPa。当 RQD 值为 72,82,92 时,围岩环向应力逐渐增大,增至一定程度后趋于稳定,隧道开挖后的围岩未受到破坏。

由图 2d 可知,当初始地应力为 55MPa 时,在节理倾角为 90°的条件下,当 RQD 值为 52 时,隧道发生岩爆时围岩环向应力总体呈先减小后增大再减小最终趋于稳定的趋势,环向应力最大值为 66.0MPa;围岩应力达到峰值后逐渐减小,最终残余应力为 4.18MPa。当 RQD 值为 62 时,围岩环向应力峰值为 76.44MPa,最终残余应力为 0.19MPa。当 RQD 值为 72,82 时,围岩环向应力总体呈先减小后

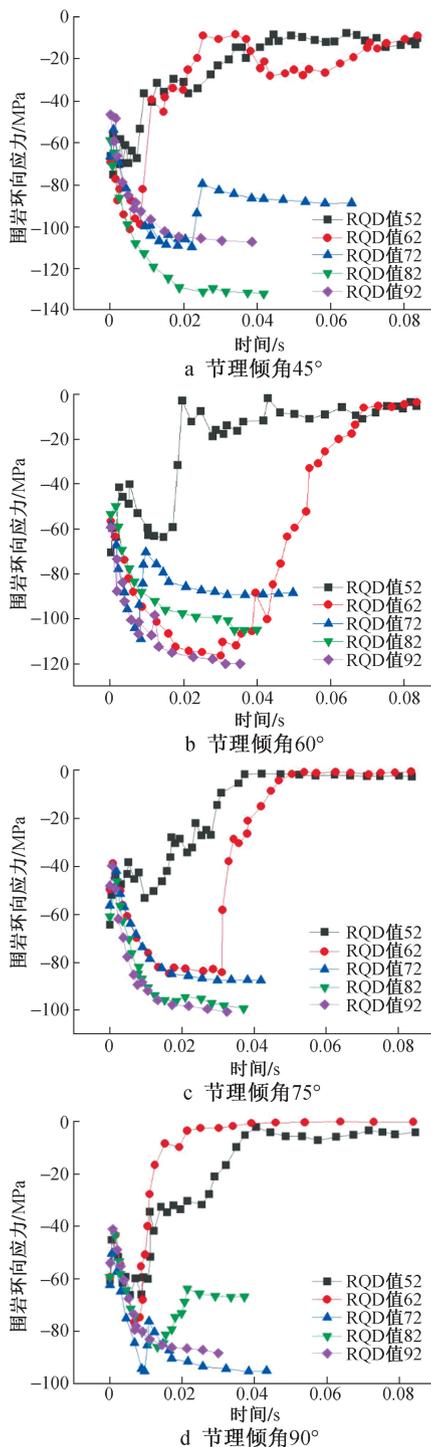


图 2 初始地应力为 55MPa 时围岩环向应力变化曲线

Fig. 2 Circumferential stress curves of surrounding rock when initial geostress is 55MPa

增大再减小最终趋于稳定的趋势。当 RQD 值为 92 时,围岩环向应力总体呈逐渐增大趋势,并于 0.03s 后趋于稳定。

由图 3a 可知,当初始地应力为 75MPa 时,在节理倾角为 45°的条件下,当 RQD 值 < 92 时,隧道发生岩爆时围岩环向应力均基本呈先增大后减小最终

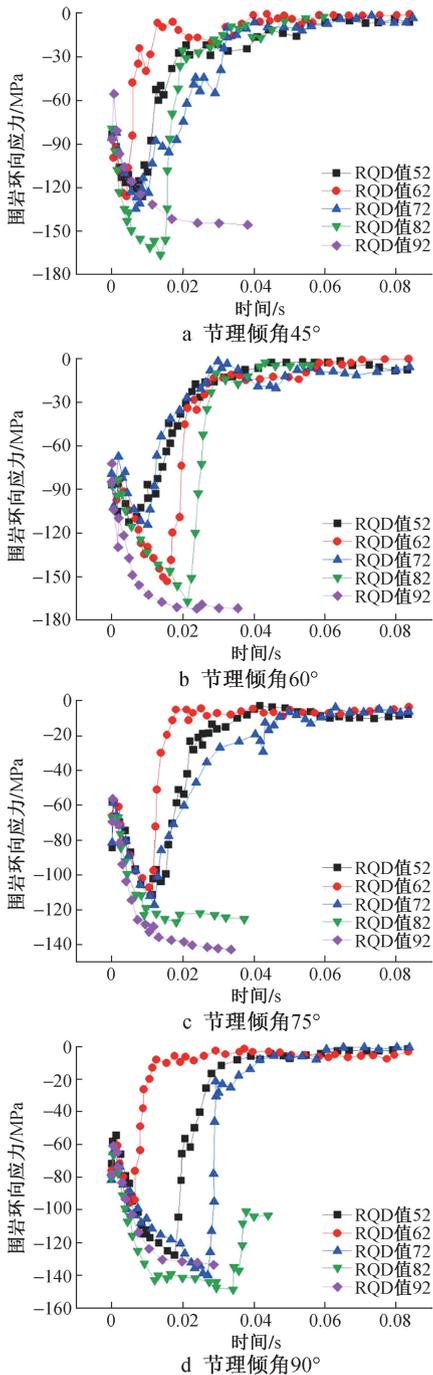


图3 初始地应力为75MPa时围岩环向应力变化曲线

Fig. 3 Circumferential stress curves of surrounding rock when initial geostress is 75MPa

趋于稳定的趋势;当RQD值为92时,围岩环向应力逐渐增大,于0.025s后逐渐趋于稳定,隧道开挖后的围岩未受到破坏。当RQD值分别为52,62,72,82时,围岩最大峰值应力逐渐增大,分别为125.5,125.67,134.29,165.84MPa,最终残余应力分别为6.23,0.81,3.26,2.43MPa。

由图3b可知,当初始地应力为75MPa时,在节理倾角为60°的条件下,隧道发生岩爆时围岩环向

应力变化趋势基本与节理倾角为45°时相同。当RQD值 $<92$ 时,围岩环向应力先减小后增大再减小最终趋于稳定。当RQD值分别为52,62,72,82时,围岩最大峰值应力分别为112.46,153.03,114.07,166.74MPa,0.03s时围岩环向应力分别减至12.81,13.09,6.12,9.8MPa,相比最大峰值应力分别减小了88.6%,91.4%,94.6%,94.1%,最终残余应力分别为7.46,0.11,5.56,4.5MPa。当RQD值为92时,围岩环向应力逐渐增大最终趋于稳定。

由图3c可知,当初始地应力为75MPa时,在节理倾角为75°的条件下,当RQD值分别为52,62,72时,隧道发生岩爆时围岩环向应力先减小后增大再减小最终趋于稳定,最大峰值应力分别为111.38,111.38,117.07MPa,最终残余应力分别为7.53,3.47,6.09MPa。当RQD值分别为82,92时,围岩环向应力总体呈逐渐增大趋势,0.03s后应力逐渐趋于稳定。

由图3d可知,当初始地应力为75MPa时,在节理倾角为90°的条件下,当RQD值 $<92$ 时,隧道发生岩爆时围岩环向应力先减小后增大再减小最终趋于稳定。当RQD值为92时,围岩环向应力先减小后增大,增至一定程度后趋于稳定。当RQD值分别为52,62,72,82时,围岩最大峰值应力分别为127.62,93.81,139.8,148.45MPa,最终残余应力分别为1.59,3.03,0.39,103.16MPa。

由图2,3可知,相比初始地应力为55MPa,初始地应力为75MPa时围岩环向应力较大。当初始地应力为75MPa,RQD值为72时,对隧道发生岩爆时不同节理倾角下围岩张力破坏情况进行分析,可知围岩在张力作用下劈裂成板状,且垂直于节理面(见图4)。当节理倾角为45°时,围岩表层出现压弯隆起现象;随着节理倾角的增大,围岩表层压弯隆起程度增大,局部有细小岩石飞出;当节理倾角为90°时,围岩表层岩石断裂,隆起现象显著,局部有大块岩石飞出。综上所述,当节理倾角增大时,围岩破坏程度逐渐增大。

### 3.2 围岩动能

当初始地应力不同时,隧道发生岩爆时不同节理倾角下围岩动能变化如图5所示。由图5a可知,当初始地应力为55MPa时,相同节理倾角下,随着RQD值的增大,围岩动能基本逐渐减小。在RQD值 $<92$ 的条件下,当节理倾角为90°时,围岩动能最大。在RQD值为92的条件下,当节理倾角为45°时,围岩动能最大。在节理倾角分别为45°,60°,75°,90°的条件下,当RQD值为52时,围岩动能最

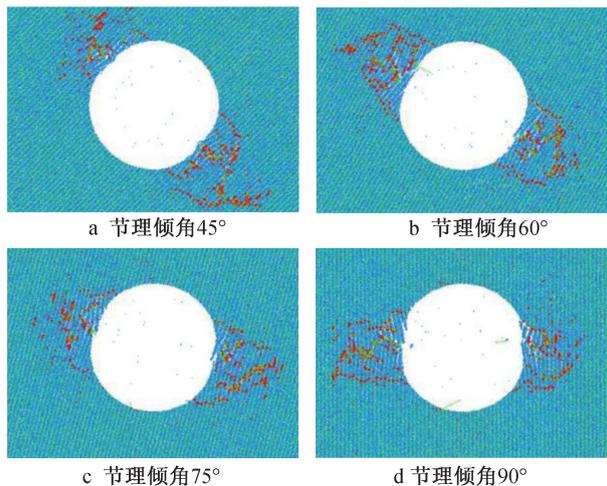
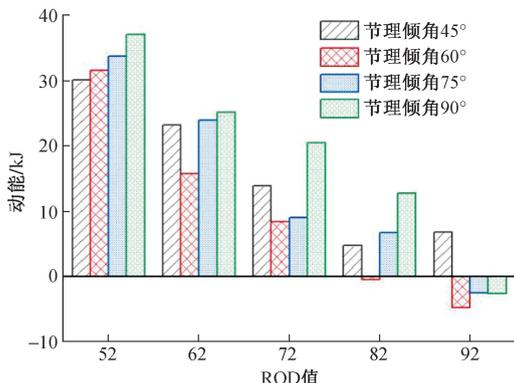


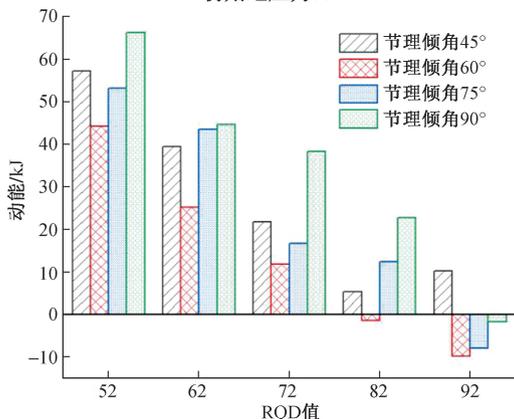
图 4 围岩破坏云图

Fig. 4 Cloud map of surrounding rock failure

大,分别为 30.08,31.64,33.74,37.11kJ。



a 初始地应力55MPa



b 初始地应力75MPa

图 5 围岩动能变化

Fig. 5 Kinetic energy of surrounding rock

由图 5b 可知,当初始地应力为 75MPa 时,围岩动能变化趋势与初始地应力为 55MPa 时基本一致,即围岩动能基本随着 RQD 值的增大而减小。在节理倾角分别为 45°,60°,75°,90°的条件下,当 RQD 值为 52 时,围岩动能最大,分别为 57.25,44.25,53.19,66.33kJ,相比初始地应力为 55MPa 时分别

增大了 27.17,12.61,19.45,29.22kJ,这表明随着地应力的增大,围岩动能逐渐增大。

综上所述,隧道发生岩爆时,随着 RQD 值的增大,围岩动能逐渐减小;随着地应力的增大,围岩动能逐渐增大,地应力增大是隧道发生岩爆的主要原因。

### 3.3 围岩最大速度

当初始地应力不同时,隧道发生岩爆时不同节理倾角下围岩最大速度变化如图 6 所示。由图 6a 可知,在初始地应力为 55MPa 的条件下,当 RQD 值为 52,92 时,随着节理倾角的增大,围岩最大速度均先减小后增大。当 RQD 值为 62 时,随着节理倾角的增大,围岩最大速度先减小后增大再减小。当 RQD 值为 72,82 时,随着节理倾角的增大,围岩最大速度均先增大后减小。当节理倾角为 45°,60°,75°时,随着 RQD 值的增大,围岩最大速度均先增大后减小。当节理倾角为 90°时,随着 RQD 值的增大,围岩最大速度逐渐减小。在 RQD 值为 62 的条件下,当节理倾角分别为 45°,75°时,围岩最大速度达到极值,分别为 10.88,12.54m/s。在 RQD 值为 72 的条件下,当节理倾角为 60°时,围岩最大速度达到极值,为 14.04m/s。当 RQD 值为 92 时,围岩动能与最大速度均较小,在隧道开挖过程中围岩未受到破坏。

由图 6b 可知,在初始地应力为 75MPa 的条件下,RQD 值不同时,随着节理倾角的增大,围岩最大速度变化规律差异较大。当 RQD 值为 52,92 时,随着节理倾角的增大,围岩最大速度基本先减小后增大。当 RQD 值为 62,72 时,随着节理倾角的增大,围岩最大速度先减小后增大再减小。当 RQD 值为 82 时,随着节理倾角的增大,围岩最大速度先增大后减小再增大。当节理倾角为 45°,60°,75°,90°时,随着 RQD 值的增大,围岩最大速度均先减小后增大再减小。在 RQD 值为 72 的条件下,当节理倾角分别为 45°,75°时,围岩最大速度达到极值,分别为 14.09,15.81m/s。在 RQD 值为 82 的条件下,当节理倾角为 60°时,围岩最大速度达到极值,为 10.64m/s。当节理倾角为 90°时,随着 RQD 值的增大,围岩最大速度基本逐渐减小。

综上所述,在初始地应力为 55MPa 的条件下,当 RQD 值为 62,72 时,围岩最大速度存在极值;当 RQD 值为 92 时,围岩最大速度最小。在初始地应力为 75MPa 的条件下,当 RQD 值为 72,82 时,围岩最大速度较大。

### 4 结语

1) 相比初始地应力为 55MPa,初始地应力为

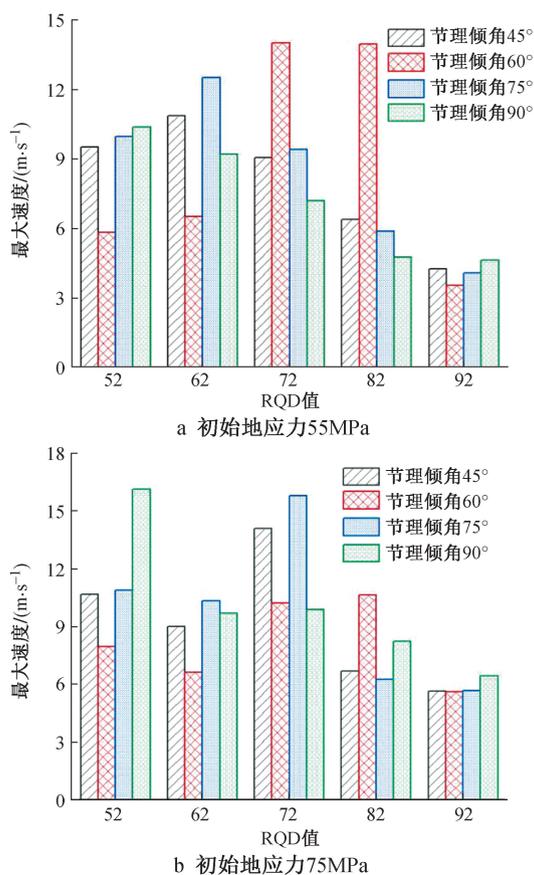


图6 围岩最大速度变化

Fig. 6 Maximum velocity of surrounding rock

75MPa 时围岩环向应力较大。当节理倾角增大时,围岩破坏程度逐渐增大。不同初始地应力和节理倾角下,当 RQD 值为 92 时,围岩环向应力均逐渐增大,增至一定程度后最终趋于稳定,隧道开挖后的围岩未受到破坏。

2) 随着 RQD 值的增大,围岩动能基本逐渐减小;随着地应力的增大,围岩动能逐渐增大,地应力增大是隧道发生岩爆的主要原因。

3) 在初始地应力为 55MPa 的条件下,当节理倾角为 45°,60°,75°时,随着 RQD 值的增大,围岩最大速度均先增大后减小;当节理倾角为 90°时,随着 RQD 值的增大,围岩最大速度逐渐减小。

4) 在初始地应力为 75MPa 的条件下,当节理倾角为 45°,60°,75°,90°时,随着 RQD 值的增大,围岩最大速度均先减小后增大再减小。

5) 在初始地应力为 55,75MPa 的条件下,当 RQD 值为 62,72,82 时,围岩最大速度存在极值;当

RQD 值为 92 时,围岩动能与最大速度均较小,在隧道开挖过程中围岩未受到破坏。

6) 在实际隧道开挖过程中,建议提前采取防坍塌预防措施,提高光面爆破效果,避免应力集中,如果围岩周边位移较大时,施工人员应及时撤离。

#### 参考文献:

- [1] 朱宝合,戴亦军. 开挖技术对隧道围岩稳定性数值模拟分析[J]. 公路,2020,65(2):316-319.  
ZHU B H, DAI Y J. Numerical simulation analysis of tunnel surrounding rock stability using excavation technology [J]. Highway, 2020, 65 (2): 316-319.
- [2] 郝英杰. 花脑特矿区基于变异系数-突变级数法的岩爆倾向性综合预测[J]. 中国矿业,2023,32(9):145-150.  
HAO Y J. Comprehensive prediction of rockburst tendency based on variation coefficient-mutation series method in Hanaote Mining Area [J]. China mining magazine, 2023, 32 (9): 145-150.
- [3] 杨腾杰,高新强,王立川,等. 深埋高地应力 TBM 隧道岩爆发生机理研究[J]. 国防交通工程与技术,2024,22(3):18-23,11.  
YANG T J, GAO X Q, WANG L C, et al. Study on mechanism of rock burst in deep buried high ground stress TBM tunnels [J]. Traffic engineering and technology for national defence, 2024, 22 (3): 18-23,11.
- [4] 裴成元,姚志宾. 深埋 TBM 隧洞结构面对岩爆的作用机制研究[J]. 吉林水利,2024(5):67-72.  
PEI C Y, YAO Z B. Study on mechanism of deep buried TBM tunnel structure facing rock burst [J]. Jilin water resources, 2024 (5): 67-72.
- [5] 沙仙武,陈才贤,李佳建. 巨龙铜矿地应力对大断面巷道稳定性与岩爆倾向性数值模拟[J]. 矿产保护与利用,2024,44(2):52-57.  
SHA X W, CHEN C X, LI J J. Numerical simulation of stress on stability and rockburst tendency for large section tunnels in Julong Copper Mine [J]. Conservation and utilization of mineral resources, 2024, 44 (2): 52-57.
- [6] 周慧文,王志红,高联斌,等. 穿越富水断层破碎带隧道结构受力及变形特性试验研究[J]. 施工技术(中英文),2023,52(19):128-132.  
ZHOU H W, WANG Z H, GAO L B, et al. Experimental study on stress and deformation characteristics of tunnel structures crossing fractured zone for water-rich fault [J]. Construction technology, 2023, 52 (19): 128-132.
- [7] 罗春雨,钱志豪,刘富华,等. 基于流固耦合效应的高地应力软岩大变形隧道开挖稳定性分析[J]. 施工技术(中英文),2023,52(9):88-94.  
LUO C Y, QIAN Z H, LIU F H, et al. Stability analysis of high ground stress soft rock large deformation tunnel excavation based on fluid structure coupling effect [J]. Construction technology, 2023, 52 (9): 88-94.