

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2021.04.026

# 深埋花岗岩隧道岩爆灾害微观断裂机制分析

陈毅

(上海勘测设计研究院有限公司, 上海 200434)

**摘要:** 深埋花岗岩隧道工程常面临埋深大、地应力高、构造活动强烈的复杂地质环境,开挖过程岩爆灾害显著,一直是深部地下工程建设领域关注的重点和难点。通过对中国西南地区某深埋花岗岩隧道岩爆岩石开展微观试验,结合现场岩爆案例及地质资料,分析了深埋花岗岩隧道岩爆岩石矿物成分及微观断裂破坏机制。结果表明:深埋花岗岩隧道岩石矿物成分主要为石英、钠长石与钙长石、最大微斜长石、黑云母和斜绿泥石;岩爆微观断裂机制主要为拉剪混合破坏,少数为单独的拉破坏或剪破坏。当岩爆区存在明显充填物时,岩爆微观断裂机制主要为张性破坏,少数为剪切破坏。研究所得深埋花岗岩隧道岩爆岩石矿物成分分析及微观断裂破坏机制对于类似隧道工程建设具有重要的参考价值 and 工程实践意义。

**关键词:** 深埋隧道;花岗岩;岩爆灾害;断裂机制

中图分类号: U455

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2021)04-0162-06

## Microscopic Fracture Mechanism Analysis of Rockburst Hazard in Deep-Buried Granite Tunnel

CHEN Yi

(Shanghai Investigation, Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200434, China)

**Abstract:** The deep buried granite tunnel engineering is often faced with complex geological environment with large burial depth, high in-situ stress and strong structural activity. Rockburst disaster is obvious in the excavation process, which has always been an important issue in the field of deep underground engineering construction. Through the micro test of rockburst in a deep buried granite tunnel in Southwest China, combined with the field rockburst cases and geological data, the mineral composition and micro fracture failure mechanism of rockburst rock in deep buried granite tunnel are analyzed. The results show that the mineral composition of the tunnel rocks is quartz, albite and calcium feldspar, the largest microcline, biotite and clinopyroxene. The mechanism of rockburst micro fracture is mainly tensile shear mixed failure, and few are single tensile failure or shear failure. When there is obvious filling in the rockburst area, the fracture mechanism of rockburst is mainly tensile failure, and the few are shear failure. The analysis of mineral composition and micro fracture failure mechanism of rockburst rock in deep buried granite tunnel are of great reference value and practical significance for similar tunnel construction.

**Keywords:** deep buried tunnel; granite; rockburst disaster; fracture mechanism

随着西部大开发持续推进,国内开展了大量的隧道工程建设,隧道年均增长率高达24%,且逐年

加快<sup>[1-4]</sup>。目前,隧道建设主要集中于高大山区及西部高原地带,施工环境岩性坚硬且埋深大,高温高

地应力特征显著,导致开挖时经常发生岩爆灾害<sup>[5-9]</sup>。岩爆灾害是深埋隧道开挖过程中危害性极大的地质灾害之一<sup>[10-12]</sup>,特别是对于深埋硬岩隧道开挖施工过程中,岩爆灾害发生更加频繁。由于岩爆发生过程随机、突然和剧烈<sup>[13-15]</sup>,当前技术手段很难精确预警<sup>[16-17]</sup>,突然爆发将会毁坏机械设备,威胁生命安全,延误施工进度,造成大量经济损失,影响隧道正常施工。因此,本文通过对深埋花岗岩隧道岩爆岩石开展室内微观试验,并结合现场岩爆地质资料,对深埋花岗岩隧道岩爆岩石矿物成分及微观断裂破坏机制进行了研究,此研究结果对后续隧道施工进度、施工安全以及岩爆预测预警有重要的

学术及工程指导意义。

# 1 工程概况及试验方案

## 1.1 工程概况

深埋花岗岩隧道单线总里程 13 073 m,最大埋深 2 080 m,埋深超 1 km 以上洞段约 9.5 km,占隧道总里程的 72.5%,属于典型的深埋隧道,如图 1 所示。结合表 1 监测区域岩爆发生情况可知,监测区域(4 500 m)发生岩爆段落总里程数为 823 m,占比约 18.29%。隧道开挖区域轮廓为马蹄形,高约 8.9 m,底板宽约 7.2 m,掌子面及围岩开挖区域包括拱顶区、拱肩区、拱脚区以及中间区域,如图 2 所示。

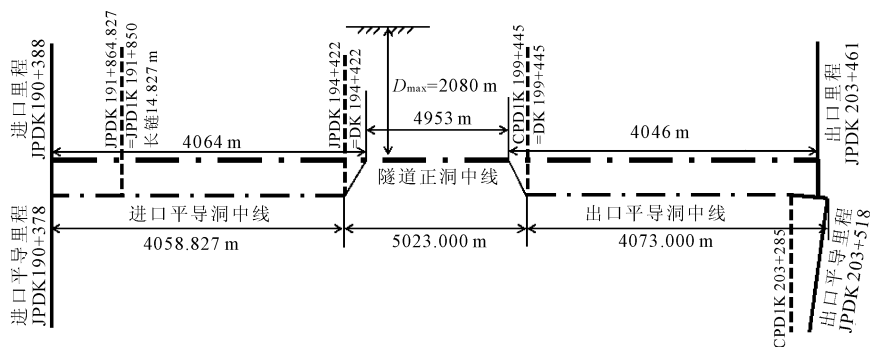


图 1 隧道开挖线路分布

表 1 隧道监测区域岩爆段落总里程统计

岩爆等级	无岩爆	轻微岩爆	中等岩爆	强烈岩爆
总里程/m	3677	565	168	90
占比/%	81.71	12.56	3.73	2.00

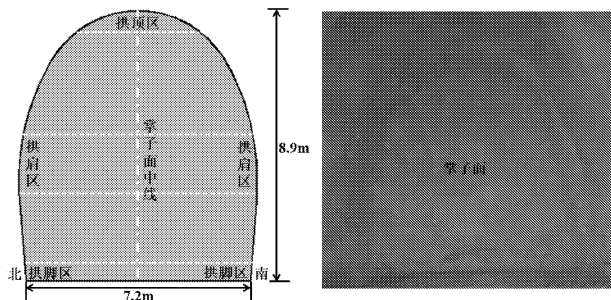


图 2 隧道开挖面及分布示意图

隧道施工环境温度达 35℃ ~ 40℃,开挖区域多数洞段地应力高,根据现场实测情况可知,埋深 1 km 以上洞段最大主应力约 45 MPa ~ 58 MPa。而隧道岩性为极硬花岗岩,围岩结构完整或较完整,导致开挖过程中经常发生岩爆灾害,严重威胁机械设备和工作人员安全,极其影响施工进度与工作效率,造成大量经济损失,如图 3 所示。

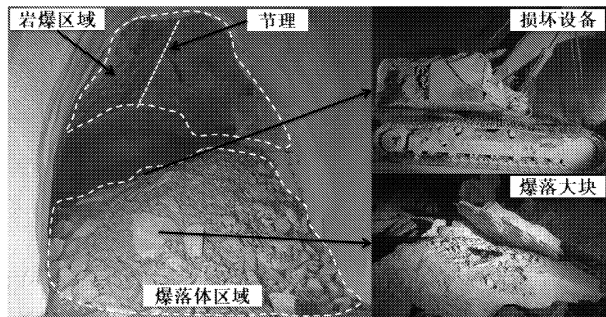


图 3 隧道典型岩爆案例及损坏设备

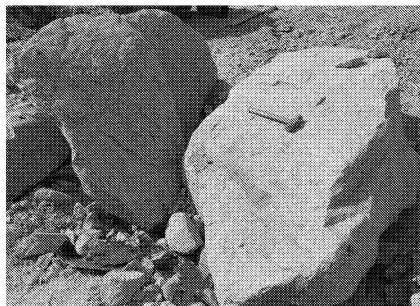
## 1.2 试验方案

为了研究深埋花岗岩隧道岩爆岩石矿物成分及微观断裂破坏机制,在图 1 所示不同岩爆位置取样,密封保存后拿回实验室做 SEM 扫描分析和 XRD 成分分析研究。根据现场岩爆发生区域岩石特征可知,岩爆区岩石可分为含充填物岩石和不含充填物岩石 2 类,如图 4 所示。因此,取样时分别从不同岩爆位置选取 5 份不含充填物岩块和 3 份含充填物岩块进行试验。制样时,每个岩爆位置分别制作一份标准样品做 XRD 分析,共计 8 份,制作 2 份标准样品进行 SEM 扫描试验,共计 16 份。所有试验均在中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国

家重点实验室完成,SEM 扫描试验采用 Quanta250 型显微镜,其放大倍数主要为 200、800、2 000 和 5 000,能清晰观察到岩爆岩石样品破坏的微观形貌特征。XRD 分析采用 X-射线衍射仪,其可用于室内的物相检索与定量分析。



(a) 含充填物岩块



(b) 不含充填物岩块

图 4 隧道岩爆区域爆落岩块展示

## 2 岩爆岩石矿物成分分析

表 2 为岩爆岩石矿物物相定量分析结果,由表可知,岩爆区不含充填物花岗岩矿物组成主要为石英、钠长石与钙长石、最大微斜长石和少量黑云母,含充填物花岗岩矿物组成主要为石英、钠长石与钙长石、最大微斜长石、斜绿泥石和极少量黑云母。由此可看出,岩爆区岩石矿物成分主要为石英、钠长石与钙长石、最大微斜长石、黑云母和斜绿泥石,充填矿物成分主要为软弱矿物斜绿泥石,说明充填矿物的存在降低了岩爆岩石强度。对比花岗岩与充填物各物相含量变化,斜绿泥石产生主要原因可能是长石和黑云母发生绿泥石化所致。

表 2 岩爆岩石矿物成分相对含量统计

岩爆岩石	矿物成分含量/%				
	钠长石 钙长石	最大微 斜长石	石英	黑云母	斜绿 泥石
含充填物	41.82	24.40	24.34	1.63	7.81
不含 充填物	32.82	43.16	20.86	3.17	—

根据现场岩爆监测情况可知,相对于花岗岩不含充填物区段,花岗岩岩体含较多充填物区段岩爆发生次数明显减少,岩爆发生强烈等级明显降低。因此,岩爆岩石矿物成分中斜绿泥石含量对岩爆发生特征影响最大,这可能是由于斜绿泥石的存在降低了岩体整体强度及稳定性,导致岩爆风险降低。

## 3 岩爆岩石微观断裂机制分析

### 3.1 岩爆岩石微观形貌特征

岩石在不同应力条件作用下,会发生不同形式的断裂破坏,其破坏后的断口形貌特征差异明显,可用来判定岩石破坏过程力学机制。通过对现场所取 8 组样品薄片进行 SEM 试验,共得 90 余幅不同放大倍数下岩爆破坏区岩石断口微观形貌照片,限于篇幅选取特征明显的岩石微观形貌照片进行具体分析。图 5 为岩爆岩石断口典型微观形貌特征,由图 5 可以看出,岩爆岩石断口不平整,棱角分明,表面可见大量微裂隙分布,节理发育,晶体内部存在溶蚀孔洞,决定着岩石内部结构紧密程度。不含充填物岩石晶体内部孔洞数量较少,岩石结构致密,晶体堆积紧凑,含充填物岩石晶体内部孔洞较多,岩石结构较紧密,晶体堆积松散。

由以上分析可知,隧道岩爆破坏区岩石内部含有大量的微裂隙与微孔洞,在各种施工扰动情况下,岩石内部应力随机聚集或重分布,导致岩石破裂时产生多种形式的微观断口形貌花样。

图 6 为岩爆区不含充填物岩石断口代表性微观形貌花样,由图 6 可以看出,岩石断口主要花样有:台阶状花样(见图 6(a)和图 6(e))、河流状花样(见图 6(d))、鱼骨状花样(见图 6(b)和图 6(c))、蜂窝状花样(见图 6(f))、条纹花样(见图 6(a)、图 6(c)和图 6(d))、平行滑移线花样(见图 6(b))、平整面花样(见图 6(g))、蛇形滑动花样(见图 6(h))。

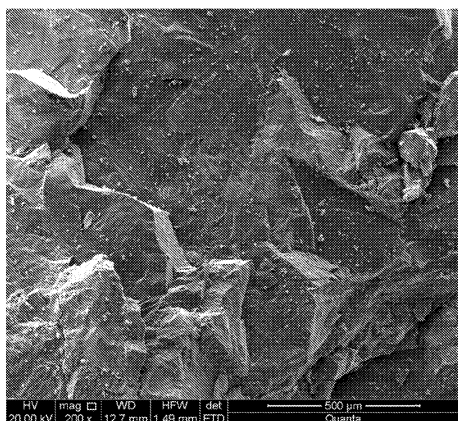
图 7 为岩爆区含充填物岩石断口代表性微观形貌花样,由图 7 可知,岩石断口主要花样有台阶状花样(见图 7(a))、河流状花样(见图 7(c))、鱼骨状花样(见图 7(d))和平行条纹花样(见图 7(b))。

### 3.2 岩爆岩石微观断裂破坏机制分析

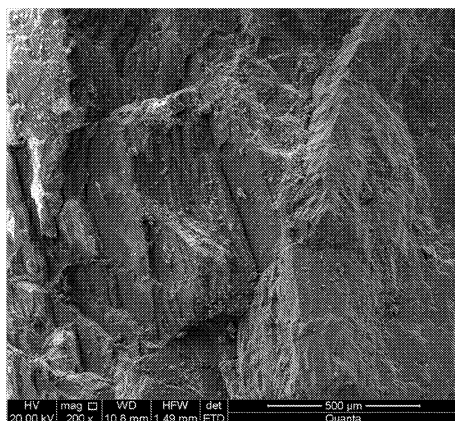
通过对岩爆岩石进行 SEM 扫描分析可知,隧道岩爆破坏区岩石断口的微观断裂方式主要有穿晶断裂和沿晶断裂,其中,不含充填物岩石微观断裂机制主要为拉剪混合破坏,少数为单独的拉破坏或剪破坏,而含充填物岩石微观断裂机制主要为张性破坏,少数为剪切破坏。结合岩石矿物成分分析,软弱充

填物的存在使岩石结构发生改变,受力破坏时主要沿软弱充填结构面发生张性或剪性破坏,而没有充

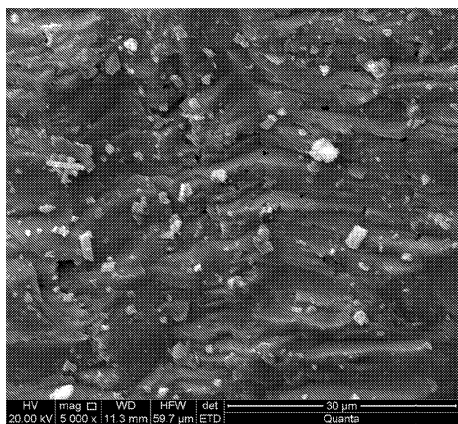
填物的岩石受力破坏时主要沿岩石内部微结构面发生无规则拉剪混合破坏。



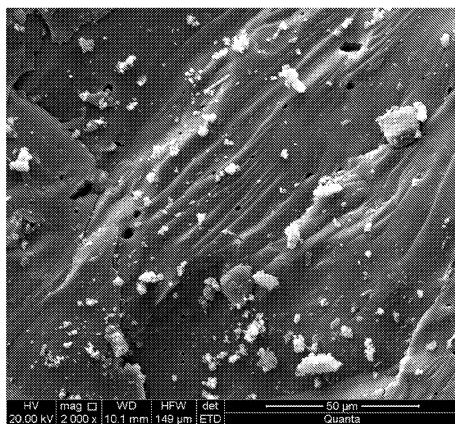
(a) 不含充填物岩石断口(200倍)



(b) 含充填物岩石断口(200倍)



(c) 不含充填物岩石孔洞



(d) 含充填物岩石孔洞

图5 岩爆岩石微观形貌

根据断裂力学理论<sup>[18]</sup>,岩石内部存在大量微裂隙,当受到外界作用力影响时,微裂隙附近发生应力集中,继续受力达临界时,微裂隙尖端起裂、扩展,释放应变能,裂纹尖端应力重新调整分布,不断结核、扩展形成新的裂隙,随着施工扰动及应力挤压逐渐贯通其他节理或岩体,导致宏观断裂。当裂纹扩展所释放弹性应变能大于形成新裂纹所需表面能时,岩石会发生突然断裂,剩余弹性应变能将转化为动能,使岩块弹射,形成岩爆。换言之,岩爆形成过程可认为是岩石微裂隙结核、起裂、扩展,若扩展过程中遇节理面,则突然加速扩展贯通岩体或在节理面尖端或交汇处附近突然断裂,弹性能猛然释放,岩块弹射,岩爆发生,其影响深度及范围由节理面特征决定。

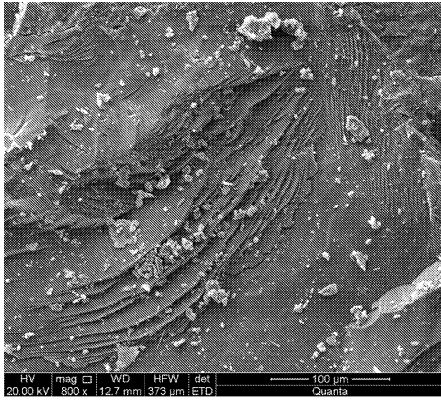
综上所述可知,深埋花岗岩隧道岩爆岩石表面节理发育,内部存在大量微裂隙,岩爆发生微观断裂机制为:隧道开挖过程中,打钻、爆破和排险等施工扰动使围岩应力调整或重分布,岩体内部节理面尖

端附近或节理面交汇处应力集中,随着施工扰动不断产生新的张剪裂隙并快速扩展贯通临空面岩体,造成临空面岩石突然断裂、脱落或弹射,导致岩爆发生。岩爆岩石断口形态呈台阶状、河流状、蜂窝状和平行条带状等混合花样,断裂方式主要为节理断裂和沿晶断裂的耦合,断裂机制主要为脆性张剪混合破坏。

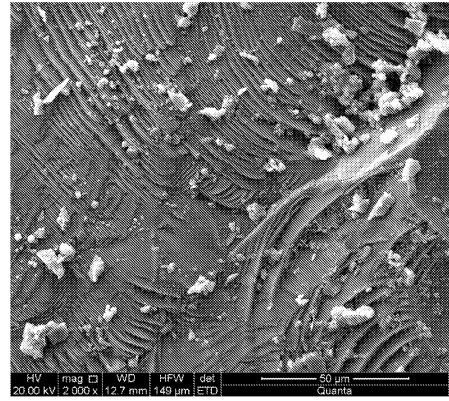
## 4 结论

本文通过室内 SEM 试验和 XRD 试验,结合现场岩爆地质资料,对深埋花岗岩隧道岩爆岩石矿物成分及微观断裂破坏机制进行了分析,得出的主要结论如下:

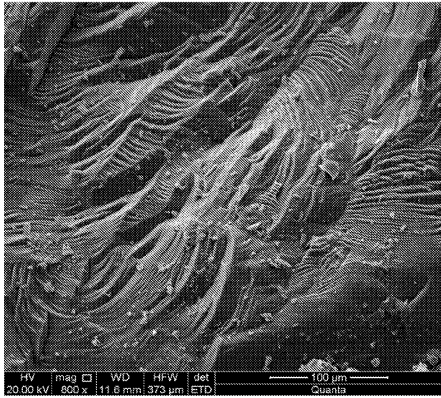
(1) 深埋花岗岩隧道岩爆岩石微观断裂机制主要为拉剪混合破坏,少数为单独的拉破坏或剪破坏,而当岩爆岩石含充填物时,微观断裂机制主要为张性破坏,少数为剪切破坏。



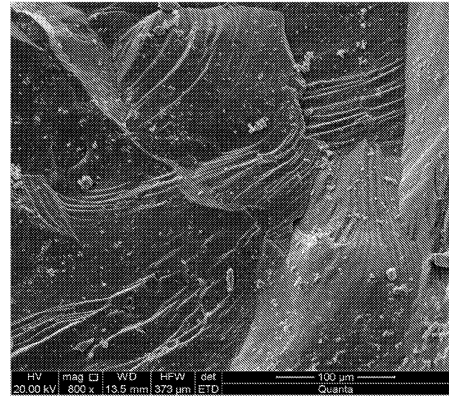
(a) 台阶状-条纹混合花样



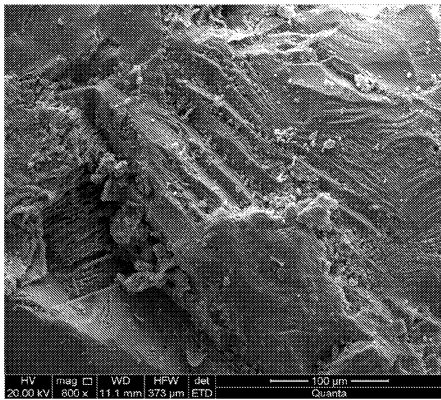
(b) 鱼骨状-平行滑移线混合花样



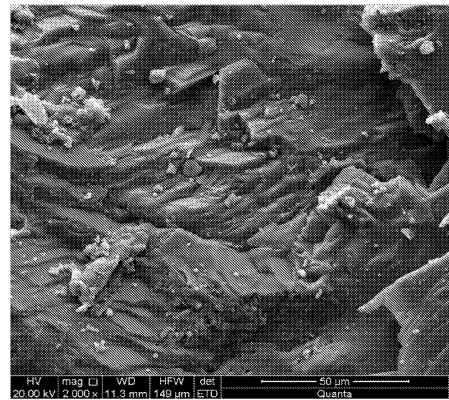
(c) 鱼骨状-条纹混合花样



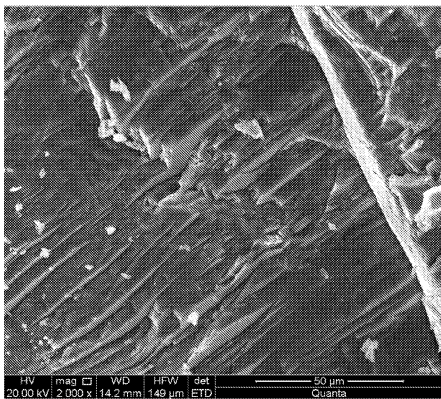
(d) 河流状-条纹混合花样



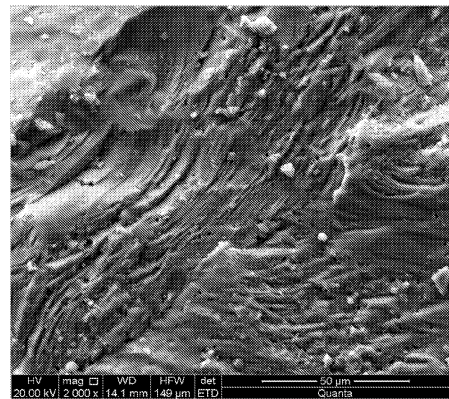
(e) 台阶状花样



(f) 蜂窝状花样



(g) 平整面花样



(h) 蛇形滑动花样

图 6 岩爆区不含充填物岩石断口典型微观形貌花样

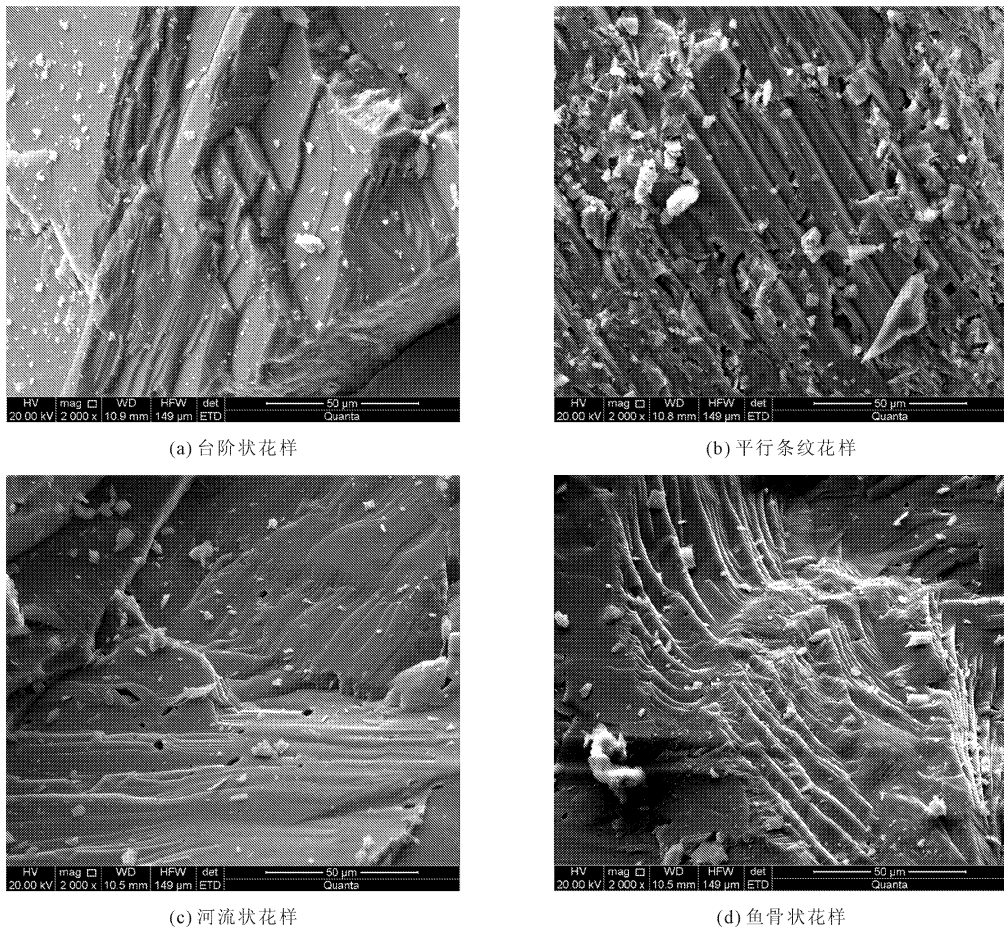


图7 岩爆区含充填物岩石断口典型微观形貌花样

(2) 深埋花岗岩隧道岩爆岩石矿物成分主要为石英、钠长石与钙长石、最大微斜长石、黑云母和斜绿泥石,岩石内充填物成分主要为斜绿泥石。

(3) 深埋花岗岩隧道岩爆发生微观机制为,隧道开挖过程中,打钻、爆破和排险等施工扰动使围岩应力调整或重分布,岩体内部微裂隙尖端附近应力集中,随着施工扰动快速扩展贯通,岩石突然断裂、脱落或弹射,岩爆发生。

#### 参考文献:

- [1] 张杨. 秦岭终南山公路隧道应急处置方案研究 [D]. 西安:长安大学,2017.
- [2] 潘岳,赵志明,王华. 坚硬岩体中巨跨洞室围岩稳定性影响因素研究[J]. 水利与建筑工程学报,2021,19(1):46-51.
- [3] 茶增云,陈舞,肖振江,等. 基于集对分析法的山岭隧道坍塌风险评价[J]. 水利与建筑工程学报,2021,19(1):122-129.
- [4] 康玉梅,于佳月. 基于三维随机场的地下洞室围岩变形分析[J]. 水利与建筑工程学报,2021,19(2):161-165.
- [5] 黄润秋,王贤能,唐胜传,等. 深埋长隧道工程开挖的主要地质灾害问题研究[J]. 地质灾害与环境保护,1997(1):50-68.
- [6] Li S J, Feng X T, Li Z H, et al. In situ monitoring of rockburst nucleation and evolution in the deeply buried tunnels of Jinping II hydropower station [J]. Engineering Geology,2012,137:85-96.
- [7] Li S J, Feng X T, Li Z H, et al. Evolution of fractures in the excavation damaged zone of a deeply buried tunnel during TBM construction [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2012,55:125-138.
- [8] Li S J, Zhao H B, Ru Z L. Deformation prediction of tunnel surrounding rock mass using CPSO-SVM model [J]. Journal of Central South University,2012,19(11):3311-3319.
- [9] Feng X T, Xiao Y X, Feng G L. Mechanism, warning and dynamic control of rockburst evolution process[C]// ISRM Regional Symposium-7th Asian Rock Mechanics Symposium. International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering,2012.

(下转第179页)

向展布速率变大,长宽比更小。

(2) 湖水位影响扇三角洲展布面积和厚度。更高的湖水位给沉积体提供更多垂向可容纳空间,利于扇体垂向沉积,厚度更大。物源量一定,厚度更大,扇体面积相应减小。

(3) 湖水位影响扇三角洲展布位置和前缘倾角。湖水位越高,湖岸线越靠近物源,水流携带泥砂受到湖水顶托的位置整体越接近物源,泥砂就会在越接近物源的地方沉积,扇三角洲展布位置更靠近物源。湖水位越高,砂体厚度越大,扇体前缘高差越大,前缘倾角也越大。

### 参考文献:

- [1] 魏思源. 正断层控制下冲积扇沉积过程与沉积构型模拟实验研究[D]. 武汉:长江大学,2020:3.
- [2] 刘怡婷. 辫状河河道砂坝物理沉积模拟实验[D]. 武汉:长江大学,2019:1.
- [3] 李紫琪. 水槽模拟结果的三维重构及建模算法测试[D]. 武汉:长江大学,2019:18.
- [4] 胡晓玲,李少华,刘忠保. 基于沉积模拟的河口坝构型分析[J]. 水利与建筑工程学报,2015,13(2):53-56.
- [5] 段华庭,尹艳树,刘忠保,等. 一种基于面的三角洲前缘河口坝建模方法[J]. 水利与建筑工程学报,2014,12(5):38-41.
- [6] 吕峻岭,朱一杰,夏 瑞,等. 干旱型分支河流体系沉积特征与演化过程——水槽沉积模拟实验研究[J]. 沉积学报,2020,38(5):994-1005.
- [7] Baker M L, Baas J H, Malarkey J, et al. The effect of clay type on the properties of cohesive sediment gravity

flows and their deposits[J]. Journal of Sedimentary Research, 2017,87(11):1176-1195.

- [8] Ho V L, Dorrell R M, Keevil G M, et al. Pulse propagation in turbidity currents[J]. Sedimentology, 2018, 65(2):620-637.
- [9] Mooneyham C, Strom K. Deposition of suspended clay to open and sand-filled framework gravel beds in a laboratory flume[J]. Water Resources Research, 2018,54(1):323-344.
- [10] Holmes A. Principles of physical geology(2nd edition)[M]. London:Thomas Nelson, 1965.
- [11] 刘 磊,钟怡江,陈洪德,等. 中国东部箕状断陷湖盆扇三角洲与辫状河三角洲对比研究[J]. 沉积学报,2015,33(6):1170-1181.
- [12] 马永平,张献文,朱 卡,等. 玛湖凹陷上乌尔禾组扇三角洲沉积特征及控制因素[J/OL]. 岩性油气藏:1-14[2021-05-12].
- [13] 邱隆伟,杜双虎,代 莉,等. 孤北洼陷沙三段沉积特征及其控制因素[J]. 新疆石油地质,2019,40(2):161-167.
- [14] 蒋庆平,孔垂显,李维锋,等. 陆相湖盆大型扇三角洲沉积特征与演化规律——以准噶尔盆地玛湖凹陷西斜坡区三叠系百口泉组为例[J]. 沉积学报,2020,38(5):923-932.
- [15] 金 睿. 准噶尔盆地玛湖凹陷三叠系百口泉组沉积演化研究[D]. 北京:中国石油大学,2018.
- [16] 唐 勇,尹太举,覃建华,等. 大型浅水扇三角洲发育的沉积物理模拟实验研究[J]. 新疆石油地质,2017,38(3):253-263.

(上接第 167 页)

- [10] 王英豪,康国强,郑 超. 岩爆成因机理与 AHP-FUZZY 的浅析[J]. 资源环境与工程,2010,24(5):612-614.
- [11] 邹成杰. 地下工程中岩爆灾害发生规律与岩爆预测问题的研究[J]. 中国地质灾害与防治学报,1992(4):50-55.
- [12] 张镜剑,傅冰骏. 岩爆及其判据和防治[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(10):2034-2042.
- [13] Li P X, Feng X T, Feng G L, et al. Rockburst and microseismic characteristics around lithological interfaces under different excavation directions in deep tunnels[J]. Engineering Geology,2019,260:105209.
- [14] Feng X T, Yu Y, Feng G L, et al. Fractal behaviour of the microseismic energy associated with immediate rockbursts in deep, hard rock tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology,2016,51:98-107.

- [15] Feng G L, Feng X T, Chen B, et al. A microseismic method for dynamic warning of rockburst development processes in tunnels[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering,2015,48(5):2061-2076.
- [16] Feng G L, Feng X T, Chen B R, et al. Effects of structural planes on the microseismicity associated with rockburst development processes in deep tunnels of the Jinping-II Hydropower Station, China[J]. Tunnelling and Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research,2019,84:273-280.
- [17] Xiao Y X, Feng X T, Li S J, et al. Rock mass failure mechanisms during the evolution process of rockbursts in tunnels[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2016,100(83):174-181.
- [18] 李世愚,和泰名,尹祥础,等. 岩石断裂力学导论[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,2010.