

聚能金属射流在光面爆破切缝中的应用与研究

潘佩邦^{1,2}, 池恩安^{1,2,3*}

(1. 贵州大学 矿业学院, 贵州 贵阳 550000; 2. 贵州省非金属矿产资源综合利用重点实验室, 贵州 贵阳 550000;
3. 保利新联爆破工程集团有限公司, 贵州 贵阳 550000)

摘要: 影响光面爆破效果的因素较多, 为优化光爆技术方法、改善光爆效果, 通过对混凝土模块的爆破试验探究聚能金属射流在围岩中的爆破切缝效果。以半孔率、切面平整度、残留半孔完整性、振动数据、爆后石渣量及其粒径等因素作为衡量标准, 对聚能金属射流与高压气楔共同作用定向切缝技术进行初步研究。对比 3 组爆破切缝效果发现: 有聚能金属罩连续装药结构的炮孔光爆效果最好, 石渣少、振动小、光爆面平整、残留半孔均匀, 半孔率比普通光爆孔提高 30%, 说明聚能金属射流炮孔中炸药能量定向释放, 粉碎区范围小, 能量利用率更高, 在实际施工中更有利于对预留围岩的保护。同时印证了金属射流与气楔共同作用定向切缝的理论分析, 为实际施工中优化光爆技术提供可行性依据。

关键词: 聚能爆破; 光面爆破; 金属射流; 聚能穴; 高压气楔

中图分类号: TD235

文献标志码: A

文章编号: 1672-9102(2023)03-0024-08

Application and Research of Shaped Charge Metal Jet in Smooth Blasting Slit

PAN Peibang^{1,2}, CHI En'an^{1,2,3}

(1. School of Mining, Guizhou University, Guiyang 550000, China;

2. Key Laboratory of Comprehensive Utilization of Non-Metal Mineral Resources in Guizhou Province, Guiyang 550000, China;

3. Poly Xinlian Blasting Engineering Group Co., Ltd., Guiyang 550000, China)

Abstract: There are many factors that affect the smooth blasting effect. In order to optimize the light blasting technology and improve the light blasting effect, the blasting slit effect of shaped metal jet in surrounding rock is investigated through the blasting test of concrete module. The factors such as half-porosity, flatness of section, integrity of residual half-porosity, vibration data, amount of stone slag after blasting and its particle size are taken as measuring standards. The joint action of shaped metal jet and high pressure gas wedge directed slit technology is preliminarily studied, and the results of 3 groups of blasting slit cutting are compared. The gun hole with shaped metal cover continuous charge structure has the best optical detonation effect, with less stone slag, low vibration, flat surface of light explosion and uniform residual half-hole, and the half-hole rate is 30% higher than that of ordinary light explosion hole, indicating that the explosive energy in shaped metal jet gun hole is released in a directional way, the crushing area is small, and the energy utilization rate is higher, which is more conducive to the protection of reserved surrounding rock in actual construction. At the same time, it proves the theoretical analysis of directional slit cutting of metal jet and air wedge, which provides the feasibility basis for optimizing the optical explosion technology in actual construction.

Keywords: shaped blasting; smooth blasting; metal jet; shaped hole; high pressure air wedge

自 20 世纪 50 年代以来, 光面爆破技术逐渐兴起并得到广泛应用, 该技术能得到较好的爆破轮廓面,

并能保证预留围岩的完整性^[1].光面爆破对爆破参数要求较高,如孔网参数的控制^[2]、单孔装药量与不耦合系数的选取^[3]、填塞质量的保障等,同时还需要根据爆区岩石特性、强度和发育情况,结合施工经验反复试爆,最终才能确定各项参数的取值.但常因爆破参数选取不当导致不能达到较为理想的光面爆破效果,因此国内众多学者在探究如何优化光爆技术的同时引入聚能爆破^[4].孙守孝^[5]通过对沿空留巷采用定向预裂爆破,得到了良好的切顶成缝效果;肖雄等^[6]通过数值模拟验证了两点起爆有利于增强聚能射流侵彻能力;秦健飞等^[7]利用双聚能槽药柱实现气刃切缝效果;王乐等^[8]利用双向线形聚能效应得到显著预裂缝,并达到减震、隔震效果.

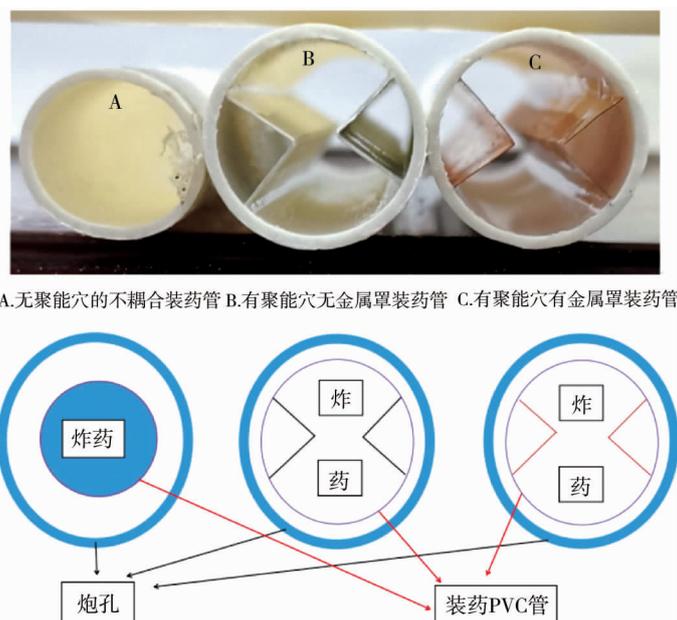
引入聚能穴利用聚能效应可获得一定的光面效果,但对金属射流因素下连续装药结构的非导爆索起爆结构鲜有研究.本文在非导爆索起爆下连续不耦合装药结构基础上,研究利用金属射流和高压气楔共同作用定向切缝,以期达到更好的光爆效果,进而实现优化光爆技术,达到光爆效果更好、半孔率更高的目的.

1 理论分析

利用聚能装药产生的聚能效应已广泛应用于航天航空和军事领域,常见应用于各种自毁系统、穿甲弹和破甲弹、切割分离装置以及切割履带式反坦克地雷等方面^[9],后逐渐应用于民用.光面爆破大致原理可理解为采用不耦合装药结构,炸药爆炸后应力波先在孔壁周围产生球状的径向微裂缝,然后在爆炸气体和炮孔间拉应力集中的共同作用下,产生定向裂缝的爆破技术^[10].国内众多学者将聚能装药技术引入光面和预裂爆破技术中,利用聚能效应产生高压气体进行定向岩石切缝,多用于井下巷道及隧道开挖项目中^[11-13].在实际施工时,多采用PVC管进行不耦合装药,预留出聚能穴,导爆索起爆,只考虑利用聚能效应产生的高压气体定向切缝,而对非导爆索起爆下金属射流和气楔共同作用的切缝效果鲜有研究,此种连续装药方式操作简单,能在原有光爆技术基础之上寻求优化光爆效果的技术措施.

2 试验设计

本次试验使用3组混凝土模块进行爆破试验,模块A炮孔为无聚能穴不耦合连续装药结构,模块B炮孔为有聚能穴无金属罩连续装药结构,模块C炮孔为有聚能穴有金属罩连续装药结构,装药结构如图1所示.3组结构均为连续装药,采用普通导爆管雷管同时起爆,对比各组爆破试验的切缝效果,从不耦合装药、聚能穴、聚能金属罩之间的爆破效果差异中寻求优化光爆效果的技术措施.



A.无聚能穴的不耦合装药管 B.有聚能穴无金属罩装药管 C.有聚能穴有金属罩装药管

图1 炮孔装药结构

2.1 试验模块的选取

试验模块采用 C60 高强度混凝土浇筑成型,长宽高为 200 cm×100 cm×50 cm,经标准养护时间后抗压强度可达到 60 MPa 以上^[14],与变质岩类岩石强度相近^[15],可近似模拟围岩爆破切缝的真实状态,如图 2 所示。



图 2 混凝土模块

2.2 爆破参数设计

浇筑混凝土时,采用 PVC 管插入模块内形成固定炮孔.PVC 管外径 25 mm,内径 23 mm,炮孔深度 35 cm.根据光面爆破经验公式进行各参数计算。

最小抵抗线可根据 $W=KD$ 计算.式中: W 为光面爆破最小抵抗线; K 为计算系数,一般取 10~20,软岩取大值,硬岩取小值; D 为炮孔直径。

孔距计算公式为 $A=MW$.式中: A 为孔距; M 为炮孔密集系数,一般取 0.6~0.8。

单孔装药量 Q 的计算公式为 $Q=qawl$.式中: a 为孔距; w 为最小抵抗线; l 孔深; q 为单位体积装药量,一般取 0.15~0.25 kg/m³,硬岩取大值,软岩取小值。

根据上述公式得到本次试验光面爆破参数如表 1 所示,孔网布置如图 3 所示。

表 1 爆破参数

爆破参数	最小抵抗线/m	孔距/m	孔数/个	孔深/m	单孔装药量/g
计算值	0.24~0.48	0.24~0.30			6.3~10.5
实取值	0.40	0.30	5	0.35	10.0

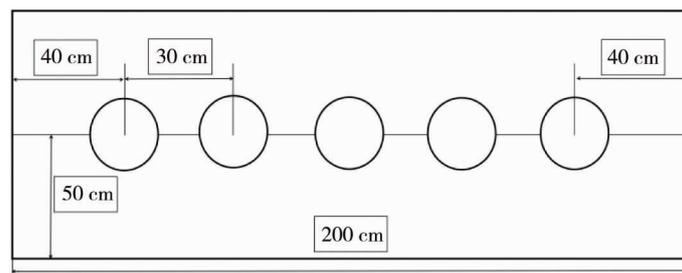


图 3 孔网参数布置

除表 1 中爆破参数外,不耦合系数也是影响光面爆破效果的重要因素之一.张迅^[16]通过工程实践发现轴向不耦合系数为 1.50~2.33 时光爆效果最好,为避开本次选用炸药的临界直径区间,装药时 A 组无聚能穴结构选用外径 16 mm、内径 14 mm 的 PVC 管形成装药管,不耦合系数为 1.79;B、C 组聚能穴结构选用外径 20 mm、内径 18 mm 的 PVC 管形成装药管并放置在炮孔内,不耦合系数为 1.39.因 B、C 组装药管直径略大,所以同等重量相同装药高度的前提下,A 组单孔装药密度略大。

2.3 聚能罩参数设计

2.3.1 聚能罩材料选择

已有众多学者研究发现聚能罩材料与金属射流的形成密切相关^[17-18].炸药爆炸压垮金属罩形成爆轰

产物,沿着罩体表面垂直方向飞出,此时爆轰产物的射流速度称为来流速度 V_f ,爆轰产物在聚能罩顶角中线上相遇碰撞形成金属射流和杵体,射流和杵体的速度为 V_d ,如图4所示.李晓杰等^[19]研究发现,来流速度 V_f 是影响碰撞产生射流和杵体的主要因素,来流速度 V_f 的产生对聚能罩材料属性有一定的条件要求.作为流出条件,来流速度 V_f 必须小于聚能罩材料的体波声速,且爆炸产生的驻点压力要远大于聚能罩材料强度.经过大量实践证明:纯铜密度高,可塑性强,是目前使用最多的聚能罩金属材料.为便于研究,本次试验选择纯铜作为聚能金属罩材料,其厚度为 0.01 mm.

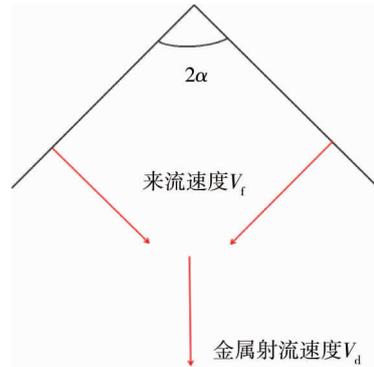


图4 金属射流产生示意图

2.3.2 聚能罩最优顶角选择

聚能罩顶角的大小对聚能射流的速度有着重要影响.随着顶角的变化,射流与杵体也会随之变化,小锥角($30^\circ \sim 80^\circ$)能产生常规射流,多应用于常规破甲弹;中锥角($80^\circ \sim 120^\circ$)形成杆式射流;大锥角($120^\circ \sim 160^\circ$)常应用于爆炸型弹丸(EFP)^[20].焦志刚等^[21]运用模拟仿真技术得出聚能罩形成聚能杆式弹丸(JPC)与金属射流(JET)的顶角范围及其转换关系;孙飞等^[22]利用数值仿真模拟软件进行计算,得出最优聚能结构参数组合,当聚能罩顶角为 90° 时聚能切割效果最佳;李晓杰等^[19]通过经验公式 $\cos \alpha = (1 - \sin \theta) / \cos \theta$ (α 为半顶角, θ 为弯折角) 计算得出,当顶角 2α 在 $80^\circ \sim 101^\circ$ 时,金属射流的动能 E 达到最大.结合上述研究成果并考虑聚能罩制作的便利性,此次试验聚能罩顶角设计为 90° .

2.3.3 聚能罩炸高选择

炸高是指聚能罩底边到靶板的距离.炸高过高,会造成金属罩爆轰产物过早汇集而导致能量浪费,影响射流侵彻深度;反之,则导致爆轰产物在未汇集前就撞击靶板,造成方向分散、定向效果不明显、切割能力下降等现象.合理的炸高有利于金属射流的形成及撞击靶板的时间恰当,能量得到最大限度的有效利用^[23].根据炸高的经验公式 $H = h \sin \alpha \tan \alpha$ (H 为炸高, h 为聚能罩直角边长, α 为半顶角)^[19,22]可知,炸高与半顶角 α 及聚能罩直角边长 h 有关.PVC 管内聚能罩截面如图5所示,聚能罩为等腰直角三角形,直角边长 h 确定后炸高即可确定,通过计算得出当 h 为 6.7 mm 时,最优炸高为 4.8 mm.试验时在 PVC 管两端外侧缠相同长度胶带,便于装药时孔内固定药包,确保聚能方向两侧炸高一致.

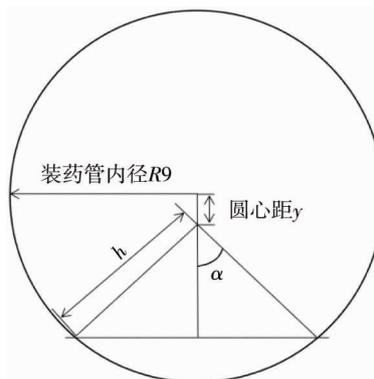


图5 PVC管内聚能罩截面示意图

3组模块炮孔内装药高度一致,根据PVC管截面图计算可知,模块A炮孔内的空气占比约为68.6%,模块B、C炮孔内的空气占比约为59.4%。

2.4 炸药选择与装药结构设计

传统的光面爆破常使用乳化硝酸铵炸药,采用底部加强装药、中部和上部空气间隔装药的方式,用竹片连接固定,导爆索起爆,而且需要选择合理的单耗药量、单孔装药量和孔网参数,并结合丰富的施工经验,才能获得较好的光面爆破效果.但实际施工时常因作业人员技术参差不齐、装药方式不当、爆破参数选择不合理等原因导致光面爆破效果不佳.此次试验选用贵州盘江化工厂生产的2号岩石膨化硝酸铵炸药,严格控制线装药密度和装药直径,10 g 硝酸铵炸药装药高度仅为10 cm.膨化硝酸铵炸药的各项参数值如表2所示。

表2 膨化炸药爆破参数

名称	密度/(g/cm ³)	爆速/(m/s)	猛度/mm	殉爆距离/mm	临界直径/mm
2号岩石膨化硝酸铵炸药	0.95~1.10	3 300~3 500	13~15	50~70	18~22

通过数值模拟发现,一个合理的间隔装药空气比可以提升爆炸能量的利用率,当炮孔中空气比为40%时,混凝土单元从压剪破坏转换为拉伸破坏^[24].在梯段爆破中,空气间隔位于装药上部时,能量利用率最大,所以此次试验采取炮孔底部装药,确保填塞长度为15 cm,预留10 cm未装药空间作为应力波的反射增强空间,如图6所示。

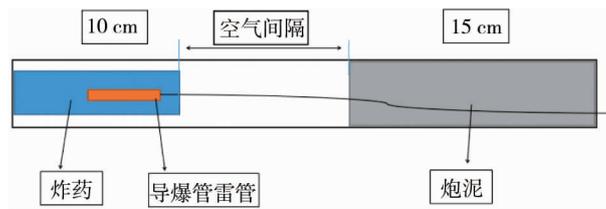


图6 炮孔装药结构

3 试验结果及分析

3.1 半孔率

通过对比3组试验模块爆破效果发现,无聚能穴不耦合装药结构(A组)爆破能产生残留半孔,但光爆面不规则,半孔破损率高,光爆效果不佳,爆后石渣最多且粒径较小,半孔率约为66%.A组爆破效果如图7所示。



图7 无聚能穴不耦合装药结构爆破效果

有聚能穴无金属罩装药结构(B组)爆破能产生完整的残留半孔,光爆面沿聚能穴方向分布,但半孔尺寸大小不一,光爆面不平整,爆后石渣较多且粒径大小不一,半孔率约为95%.B组爆破效果如图8所示。



图8 有聚能穴无金属罩装药结构爆破效果

有聚能穴有金属罩装药结构(C组)的光爆效果最好,能产生完整炮孔的残留半孔,光爆面沿着聚能穴方向均匀分布,残留半孔尺寸基本一致,爆后石渣最少,半孔率为100%.C组爆破效果如图9所示.



图9 有聚能穴有金属罩装药结构爆破效果

3.2 爆破振动

本次爆破采用交博 L20-N 爆破振动仪进行振动数据采集,爆破振动仪距爆点 7 m.对 3 组模块进行振动数据采集后发现:A 组最大爆破峰值为 1.809 cm/s,B 组最大爆破峰值为 1.693 cm/s,C 组最大爆破峰值为 1.606 cm/s,C 组有金属聚能罩的爆破振动峰值最小.A 组炮孔截面的空气占比为 68.6%,B,C 组的空气占比为 59.4%,理论上爆生气体在预留空间大的 A 组炮孔中的作用时间更长,即准静态压力做功时间长,有效做功能量更多,产生爆破振动等无效能量转换更少,爆破振动应更小,但试验数据正好相反,说明聚能效应使炸药能量得到了定向释放,能量利用率更高,转化为爆破振动等无效能量更少,更有利于提高炸药能量利用率.

4 结论

1)仅通过简单增加孔内空气含量和优化不耦合系数并不能有效减小爆破峰值压力对预留围岩的损伤和降低爆破振动危害,也不能获得较好的爆破轮廓面效果.因此,在进一步研究中,应考虑其他因素和技术手段来改善这些问题.

2)金属射流与高压气楔共同作用的切割效果最佳,可实现光滑的爆破轮廓面、较高的炮孔半孔率以及良好的半孔残留完整度.此外,该方法还能减少石渣的生成并降低爆破振动的影响.本研究验证了非导爆索起爆的连续装药结构光爆技术的可行性,为进一步优化光爆技术提供了依据.

3)利用线型聚能金属射流和爆生气体的气楔作用,为非均匀质复合材料的定向爆破切割的应用提供了参考.未来的研究可以进一步深入探索该技术在多种不同材料中的适用性,以实现更好的定向爆破切割效果.

参考文献:

- [1] 刘占中,柯升,杨廷明,等.非导爆索预裂爆破在露天矿山道路边坡治理中的应用[J].中国建材,2020(8):122-124.
- [2] 高玉杰.工业炸药装药直径对爆速的影响[J].淮南职业技术学院学报,2012,12(3):11-15.
- [3] 付强.径向不耦合系数对预裂爆破影响的数值模拟研究[J].岩土工程与地下工程,2020,40(4):158-159.
- [4] 周凯,赵新琛,崔步云,等.环向切缝聚能管在隧道掘进中的试验研究[J].工程爆破,2021,27(5):26-31.
- [5] 孙守孝.定向预裂爆破在鹿台山矿沿空留巷的应用[J].煤炭技术,2020,39(9):46-50.
- [6] 肖雄,张建华,吴芳,等.两点起爆双槽聚能装药的模拟及实验研究[J].爆破,2015,32(1):38-42.
- [7] 秦健飞,秦如霞,李必红.双聚能槽药柱的理论研究及其工程应用[J].采矿技术,2009,9(5):40-44.
- [8] 王乐,郭连军,张大宁,等.双向线形聚能预裂爆破技术及其降震效果研究[J].矿业研究与开发,2015,35(7):27-30.
- [9] 乔金超,吴越,郑伟,等.不同壁厚比的双层药型罩聚能射流对靶板毁伤效应研究[J].火炮发射与控制学报,2017,38(4):35-39.
- [10] 蒋明,马伟伟,郑建明.德源露天矿预裂爆破技术研究[J].建材与装饰,2019,26(38):235-236.
- [11] 种玉配,齐燕军,刘书奎. PVC管聚能爆破法在水平砂泥岩隧道中的应用[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2021,40(3):116-120.
- [12] 王鹏飞.聚能爆破技术在岩巷掘进中的应用[J].化学工程与装备,2020(9):222-223.
- [13] 吴波,韦汉,徐世祥,等.聚能光面爆破光爆层参数优化研究[J].有色金属工程,2020,10(12):113-121.
- [14] 段策,党玉栋,陈嘉宇,等.标养时间对C60自密实混凝土抗压强度和干燥收缩的影响[J].混凝土世界,2016,81(3):84-86.
- [15] 葛正枝,彭涛,池焕明.贵州地区软质岩石的强度准则[J].中国金属通报,2018(7):183-185.
- [16] 张迅.光面爆破不耦合装药参数优化的试验研究[J].工程爆破,2019,25(6):27-31.
- [17] 崔平,闫建林,施冬梅,等.聚能装药破甲效能影响因素分析及研究进展[J].爆破,2021,38(2):4-16.
- [18] LI W B, WANG X M, ZHOU H. Effect of the liner material on the shape of dual mode penetrators [J]. Combustion, Explosion, and Shock Waves, 2015, 51(3):387-394.
- [19] 李晓杰,闫鸿浩,王小红,等.线型聚能切割爆破的理论研究[J].工程爆破,2021,27(1):1-13.
- [20] 朱建桥.聚能装药穿墙弹参数设计与应用研究[D].大连:大连理工大学,2010.
- [21] 焦志刚,寇东伟,杜宁.药型罩锥角对JPC与JET形成的影响[J].装备制造技术,2015(12):38-40.
- [22] 孙飞,周向阳,蒋新忠,等.线型聚能切割器爆破拆除钢结构烟囱的优化设计[J].工程爆破,2016,22(6):48-54.
- [23] 吴建宇,龙源,纪冲,等.炸高对环形聚能射流侵彻特性的研究[J].兵器材料科学与工程,2015,38(4):68-72.
- [24] 吴亮,卢文波,钟冬望,等.混凝土介质中空气间隔装药的爆破机理[J].爆炸与冲击,2010,30(1):58-64.

基于构造应力的弱面斜穿巷道围岩变形特征

谷翱翔¹, 余伟健^{1,2,3*}, 潘豹¹

(1. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201;

2. 湖南科技大学 煤炭资源清洁利用与矿山环境保护湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201;

3. 湖南科技大学 煤矿安全开采技术湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201)

摘要:为研究弱面与构造应力组合作用对巷道围岩稳定性的影响,基于贵州木孔煤矿工程地质条件,采用 3DEC 软件,对全断面开挖下的围岩稳定性进行数值模拟,重点分析弱面倾角与构造应力对围岩变形及位移的影响,同时对围岩变形机理进行讨论.研究表明:巷道开挖后,水平方向的位移均表现为向巷道中心收敛;巷道竖向位移受弱面倾角影响较大,随着弱面倾角的增大,最大位移从拱顶逐渐转移到巷道左帮;巷道两帮的变形量随着弱面倾角的变化呈现明显的不均匀变形特征,所设置的监测点显示巷道两帮的位移在特定的弱面倾角范围内表现出相反的变化趋势.该研究结果可为巷道支护设计及工程应用提供技术支撑.

关键词:结构面;不均匀变形;巷道围岩变形;构造应力

中图分类号:TD322

文献标志码:A

文章编号:1672-9102(2023)03-0031-07

Deformation Characteristics of Surrounding Rock in Oblique Roadway with Weak Structural Plane Based on Tectonic Stress

GU Aoxiang¹, YU Weijian^{1,2,3}, PAN Bao¹

(1. School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. Hunan Provincial Key Laboratory of Coal Resources Clean-Utilization and Mine Environment Protection,

Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

3. Hunan Provincial Key Laboratory of Safe Mining Techniques of Coal Mines, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: To study the influence of the combination of weak plane and tectonic stress on the stability of surrounding rock in tunnels, based on the engineering geological conditions of Mukong Coal Mine in Guizhou, 3DEC software is used to numerically simulate the stability of surrounding rock under full section excavation. The focus is on analyzing the influence of weak plane inclination angle and tectonic stress on the deformation and displacement of surrounding rock, and the deformation mechanism of surrounding rock is discussed. The research results indicate that after excavation of the tunnel, the horizontal displacement converges towards the center of the tunnel. The vertical displacement of the tunnel is greatly affected by the inclination angle of the weak plane. As the inclination angle of the weak plane increases, the maximum displacement gradually shifts from the arch to the left side of the tunnel. The deformation of the two sides of the tunnel exhibits obvious non-uniform deformation characteristics with the change of weak plane inclination angle. The displacement changes of the monitoring points set up on both sides of the tunnel exhibit opposite trends within a specific range of weak plane dip angles. Based on the research on the deformation characteristics of the surrounding rock of the tunnel, technical support is provided for the design and engineering application of tunnel support.

Keywords: structural plane; uneven deformation; deformation of surrounding rock of roadway; tectonic stress