深部大规模矿山岩体质量评价与巷道支护技术研究*

于振建[1]，龚永超[2,3]，廖敦霞[2,3]，林卫星[2,3]，陈超[4]，王玉丁[2,3]，徐敏[1]，江科[2,3]

（1.安徽开发矿业有限公司， 安徽 六安市 237474；
2.长沙矿山研究院有限责任公司， 湖南 长沙 410012；
3.国家金属采矿工程技术研究中心， 湖南 长沙 410012；
4.五矿矿业控股有限公司， 安徽 合肥 230091）

摘要：为解决李楼铁矿深部－625 m中段28～48线矿体区域受到风化带及断层切割的影响，岩体力学强度显著降低、完整性差和开采技术条件极为复杂等问题。对该矿体区域上下盘4种矿岩进行了岩体质量评价，发现顶板围岩性质较差，脉外巷道应尽量布置在下盘稳固的大理岩中；基于岩体质量评价和巷道破坏机理分析，选取无支护、锚杆＋钢拱架支护、锚喷支护、锚喷＋钢拱架联合支护4种方案，运用FLAC3D软件对4种支护方案下的深部－625 m中段巷道围岩稳定性进行了数值模拟分析。结果表明：相较于无支护条件，锚杆＋钢拱架支护、锚喷支护、锚喷＋钢拱架联合支护方案下的最小主应力分别降低了4.05％、14.02％、11.59％，顶板的竖向位移最大下沉量分别降低了10.33％、42.46％、43.35％，巷道围岩的支护效果由弱到强依次为无支护＜锚杆＋钢拱架支护＜锚喷支护≈锚喷＋钢拱架联合支护，其中锚喷＋钢拱架联合支护方案的支护效果最佳。综合考虑认为，选用锚喷支护方案已能满足矿山大部分风化带区域的支护要求，只有在极破碎区域建议选用锚喷＋钢拱架联合支护方案。研究成果可为后续深部中段巷道的作业生产及采场回采提供依据。

关键词：深部矿体；岩体质量评价；巷道支护；围岩变形；数值模拟

中图分类号：TD353 **文献标识码**：A **文章编号**：1005-2763(2025)06-0001-11

Research on Rock Mass Quality Evaluation and Roadway Support Technology in Deep Large Scale Mines

YU Zhenjian[1], *GONG Yongchao*[2,3], *LIAO Dunxia*[2,3], *LIN Weixing*[2,3], *CHEN Chao*[4], *WANG Yuding*[2,3], *XU Min*[1], *JIANG Ke*[2,3]

(1.Anhui Development Mining Co., Ltd., Lu'an, Anhui 237474, China;
2.Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha, Hunan 410012, China;
3.National Engineering Research Center for Metal Mining, Changsha, Hunan 410012, China;
4.Minmetals Mining Holdings Limited, Hefei, Anhui 230091, China)

Abstract: In order to solve the problems of significant reduction of rock mass mechanical strength, poor integrity and extremely complex mining technical conditions in the 28-48 line ore body area of the deep －625 m middle section of Lilou Iron Mine due to the influence of weathering zone and fault cutting. The rock mass quality evaluation of four kinds of ore rocks in the upper and lower plates of the ore body area was carried out. It is found that the surrounding rock of the roof is poor, and the outer roadway of the vein should be arranged as much as possible in the stable marble of the lower plate. Based on the rock mass quality evaluation and the roadway failure mechanism analysis, four schemes of no support, bolt＋steel arch support, bolt-shotcreting support and bolt-shotcreting＋steel arch combined support were selected. FLAC3D software was used to simulate and analyze the stability of surrounding rock of deep －625 m middle roadway under four support schemes. The results show that compared with the no support, the minimum principal stress under the scheme of bolt＋steel arch support, bolt-shotcreting support and bolt-shotcreting＋steel arch combined support is reduced by 4.05％, 14.02％ and 11.59％ respectively, and the maximum subsidence of vertical displacement of roof is reduced by 10.33％, 42.46％ and 43.35％ respectively. The support effect of roadway surrounding rock from weak to strong is no support＜bolt＋steel arch support＜bolt-shotcreting

* **收稿日期**：2024-07-02
基金项目："十四五"国家重点研发计划项目(2023YFC2907404，2023YFC2907201)
作者简介：于振建(1985—)，男，山东烟台人，高级工程师，主要从事矿山生产及研究工作。E-mail：573715008@qq.com
通信作者：廖敦霞(1997—)，男，湖南隆回人，硕士，工程师，主要从事金属矿山采矿工艺研究工作。E-mail：1300760755@qq.com

support≈bolt-shotcreting＋steel arch combined support, and the support effect of bolt-shotcreting＋steel arch combined support scheme is the best. After comprehensive consideration, it is considered that the selection of bolt-shotcreting support scheme can meet the support requirements of most mine weathering zone areas. Only in the extremely broken area, the bolt-shotcreting＋steel arch combined support scheme is recommended. The research results can provide a basis for the subsequent operation and production of deep middle roadway and stope mining.

Key words: Deep orebody, Rock mass quality evaluation, Roadway support, Surrounding rock deformation, Numerical simulation

0 引言

在经济全球化的背景下,随着矿产需求量的日益增长,机械化开采被广泛应用以提高矿山出矿量,然而大断面掘进、多中段协同作业及大范围爆破对地下采场稳定性及巷道支护带来了极大的挑战,为此,需通过实时监测掌握矿山地下工程的围岩变形情况并进行岩体质量评价,对巷道工程的支护类型进行优化设计[1-5]。

在深部大规模矿山开采中,风化带破碎矿体的开采受复杂工程地质条件、构造应力及水文地质条件影响,巷道支护面临严峻挑战,既要有效控制巷道围岩变形,又要保证支护方案的经济适用性。近年来,众多学者针对破碎矿岩体的岩体质量分析及巷道支护方案优化进行了研究,贾彦州[6]针对岩体复杂的软岩型某金矿巷道掘进支护技术难题,设计采用光面爆破技术与喷锚网支护技术相结合的方式确保巷道掘进过程中的稳定性。罗豪等[7]运用FLAC3D对某金属矿深部的巷道围岩破碎情况进行了不同支护方案下的数值模拟,得出巷道两帮变形最大,顶板次之,底板相对最小。陈国良等[8]针对甲玛铜多金属矿破碎软岩巷道周边的不同围岩类别设计了不同的支护方式,并对其进行了理论分析及数值模拟,得出最优的支护方案。秦绍龙等[9]对梅山铁矿破碎区现有的巷道支护方式进行了优化设计,并运用数值模拟软件验证了优化后支护方案的有效性。不同矿山的岩体性质多样,受构造应力的影响以及风化区域的节理裂隙发育特征也不尽相同,使得当前各支护技术依存在一定的局限性,加之掘进工作面围岩状况的不明确性,易引发巷道支护系统失效,甚至出现巷道反复破坏、前后塌陷的情况[10-12]。

因此,对地下矿山风化带围岩的破坏机制进行研究,并根据这些机制选择适当的支护方案,对工程安全至关重要。本文以李楼铁矿深部－625 m中段矿体风化带区域为工程背景,通过工程地质调查及矿岩质量评价研究,对深部－625 m中段巷道围岩的支护稳定性进行分析,探究巷道破坏形式及支护类型的合理性,为后续深部中段巷道的作业生产及采场回采提供依据。

1 工程概况

李楼铁矿矿体上方分布着密集的村庄、民宅、农田及公路,根据安全生产需求,必须严格确保无地表移动和塌陷。因此,在矿山开采过程中必须严格控制地表沉降,并采取一系列预防措施确保地表稳定性,从而保护矿体上方居民的生命健康、财产安全和基础设施完好。当前李楼铁矿开采深部－625 m中段28～48线矿体,由于矿岩风化严重,若后期进行规模化开采,容易引发连锁性大面积垮塌,导致垮塌高度增加,影响地表稳定性。矿体上覆周集组风化带受到F2断层切割的影响,矿岩节理裂隙发育,稳固性差。该矿段伏于第四系地层之下,风化强烈,岩芯多为泥土状、砂砾状,岩体质量极差。下部弱风化带岩芯较破碎,岩石质量指标(RQD)平均仅为44.7%,力学强度低,岩体完整性差[13]。在此背景下,李楼铁矿传统的采场结构参数和巷道支护方式已不能满足矿山安全生产的要求,必须重新对－625 m中段28～48线区域的巷道支护情况进行分析。研究成果可为深部矿体的安全作业生产及采场的回采作业提供可靠依据。

2 工程地质调查

根据矿区实际发育的地层岩性类别及研究需求,本次拟调查镜铁矿、矿体下盘大理岩、矿体上盘片麻岩和顶板青白口系泥灰岩4类岩体,由于泥灰岩未揭露,上盘片麻岩很少揭露,仅需要调查镜铁矿和大理岩两种岩体。

2.1 工程地质调查方法与区域

本次调查的核心目标是全面统计不同岩组的优势结构面产状与组数,精确测量节理与裂隙的宽度,深入探究充填物的特性。此外,还对结构面的形态、粗糙程度及节理间距等关键参数进行分析。在调查过程中,

采用罗盘与皮尺作为主要测量工具,并严格按照详测线的方法进行操作,以获取更为准确、全面的数据,为后续的分析与研究提供有力的支持[14]。调查尽量选择结构面发育特点鲜明且具有很强的代表性,同时不会对矿山生产产生负面影响的区域,以确保测绘人员的安全。岩体结构面测绘区域的调查结果见表 1。

表 1 岩体结构面测绘区域调查结果汇总

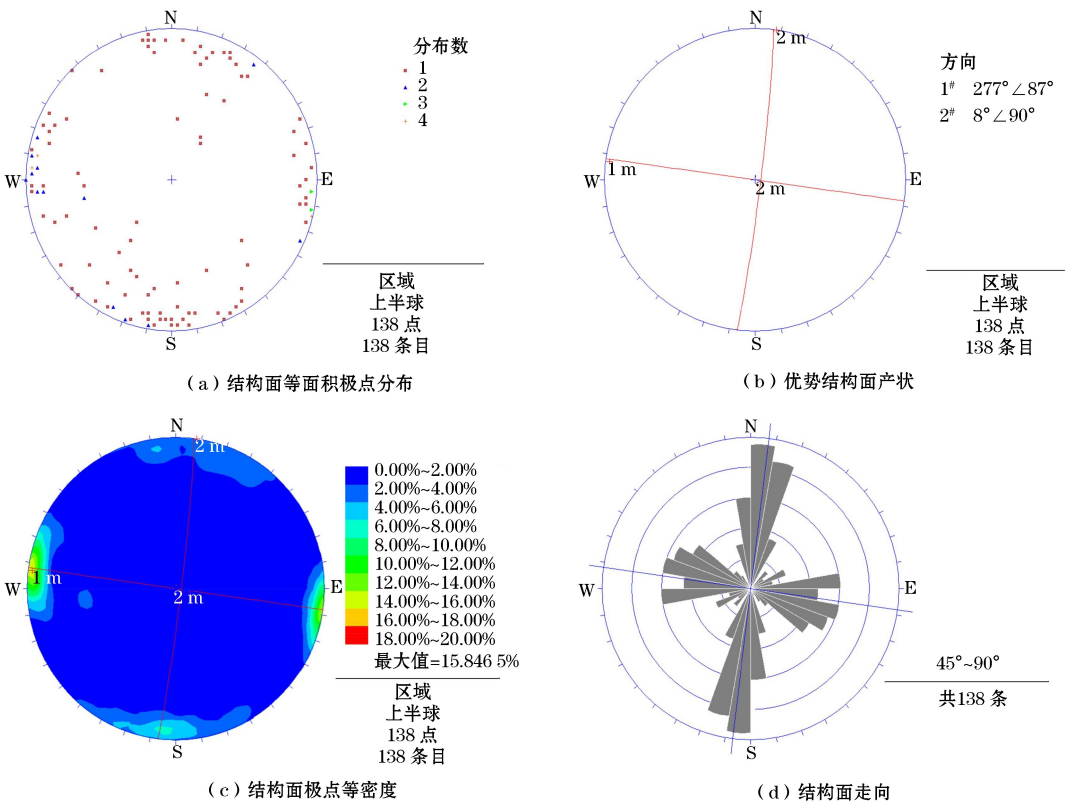
Table 1 Summary of survey results in rock mass structural surface mapping area

岩石类型	线号	区域位置	方位角/(°)	结构面长度/m	条数
大理岩	1#	18-1 溜井联巷	325	5.15	41
	2#	16 号穿南盘回风巷	286	10.20	97
镜铁矿	3#	14-3 采场	97	12.60	109
	4#	16-3 采场	0	4.60	32

2.2 结构面产状统计与分析

2.2.1 大理岩

大理岩结构面统计分析结果如图 1 所示。由图 1 可知,大理岩中主要发育有两组产状为 277°∠87°、8°∠90°的优势结构面,各优势结构面分别占调查结构面总量的 39.86%、19.56%。同时,根据结构面特性调查统计结果可知,大理岩为中厚-厚层状结构,整体较破碎。节理和裂隙一般为压性,极少数为压扭性,一般闭合,宽度一般小于 1 mm,个别石英脉宽度达 50 mm,充填物主要为方解石、绿泥石和铁氧化物,极少量为石英,胶结较好。结构面绝大多数为平直粗糙,极少为弯曲粗糙。大多数为Ⅴ级结构面(88.41%),少数为Ⅳ级结构面(11.59%)。调查区域岩石表面未见明显出水。



(a) 结构面等面积极点分布 (b) 优势结构面产状

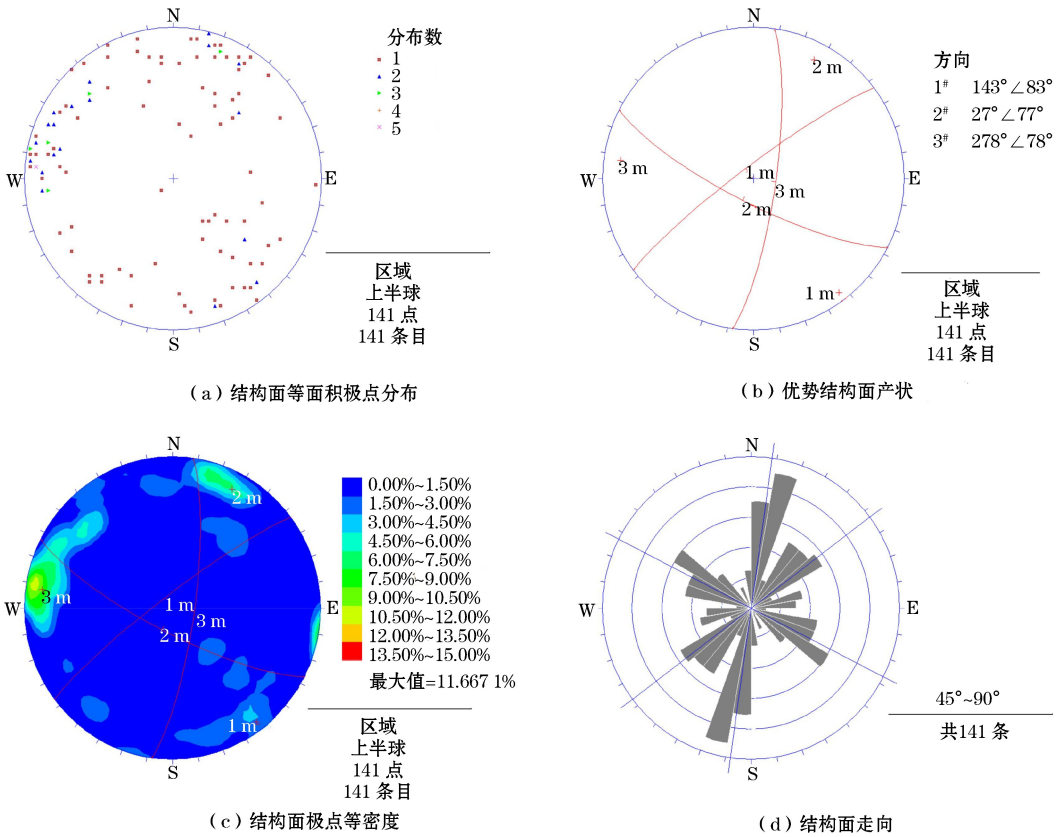
(c) 结构面极点等密度 (d) 结构面走向

图 1 大理岩结构面统计分析结果

Fig.1 Results of statistical analysis of structural planes in marble

2.2.2 镜铁矿

镜铁矿结构面统计分析结果如图 2 所示。由图 2 可知,大理岩中主要发育有 3 组产状分别为 143°∠83°、27°∠77°、278°∠78°的优势结构面,各优势结构面分别占调查结构面总量的 36.17%、26.24%、29.79%。同时,根据结构面特性调查统计结果可知,镜铁矿为中厚层状结构,整体破碎。节理和裂隙一般为压性,极少为压扭性,一般闭合,宽度一般小于 1 mm,个别石英脉宽度达 15 mm,充填物主要为铁氧化物,少数为方解石、绿泥石和石英,胶结程度一般。结构面以平直粗糙为主,少数弯曲粗糙。大多数为Ⅴ级结构面(88.65%),少数Ⅳ级结构面(11.35%)。调查区域岩石表面未见明显出水。



(a) 结构面等面积极点分布　(b) 优势结构面产状

(c) 结构面极点等密度　(d) 结构面走向

图 2　镜铁矿结构面统计分析结果

Fig.2　Result of statistical analysis of structural planes in vitrinite

2.2.3　结构面间距

李楼铁矿矿体及上下盘围岩中的大理岩、镜铁矿、片麻岩、紫红色泥灰岩的节理线密度通过现场生产勘探补充钻孔的编录统计获得，通过对节理线密度求相反数可得到节理的平均间距，见表 2。

表 2　结构面平均间距

Table 2　Average spacing of structural planes

岩性	线密度/(条/m)	平均间距/m
大理岩	3.34	0.30
镜铁矿	4.74	0.21
片麻岩	3.77	0.27
紫红色泥灰岩	2.98	0.34

ISRM(1980)在《岩体基本岩性描述》提出的节理间距分类标准为：0～6 cm 为极密间距；6～20 cm 为密间距；20～60 cm 为中等间距；60～200 cm 为宽间距；大于 200 cm 为极宽间距。由表 2 可知，李楼铁矿深部－625 m 中段 28～48 线之间的矿体及上下盘围岩体中，大理岩、镜铁矿、片麻岩和紫红色泥灰岩的平均间距均为 21～34 cm，按照 ISRM 节理间距的分类方法，该矿山各类岩体的结构面密集程度归纳为中等。

3　岩体质量评价

在岩土工程系统分析中，须将岩体置于赋存环境中进行整体考量，其质量等级直接关系到工程岩体的力学特性和稳定性。因此，岩体结构特征的精准辨识与质量分级评价成为构成工程设计与施工的核心[15-16]。基于岩体质量的定性评估可以揭示岩体的基本力学性能，也可以作为其稳定性评估的依据，确保工程实施顺利进行。岩石质量评估主要使用岩土规范法、RMR 分级法、Q 系统分级法等评估方法。

通过上述评估方法进行岩石质量评价分析，最终确定李楼铁矿－625 m 中段 28～48 线岩段岩体综合分级状况，矿体下盘大理岩、镜铁矿和矿体上盘片麻岩均为Ⅲ级岩体，围岩性质一般，而顶板紫红色泥灰岩为Ⅳ级岩体，围岩性质较差，具体分级情况见表 3。

表 3 岩体分级汇总

Table 3 Summary of rock mass classification

岩性	岩土规范法	RMR分级	Q系统分级法	综合分级
矿体下盘大理岩	Ⅲ	Ⅲ	一般(Ⅲ)	Ⅲ
镜铁矿	Ⅳ	Ⅲ	差(Ⅲ)	Ⅲ
矿体上盘片麻岩	Ⅳ	Ⅲ	差(Ⅲ)	Ⅲ
顶板紫红色泥灰岩	Ⅳ	Ⅳ	差(Ⅲ)	Ⅳ

4 巷道支护技术研究

4.1 巷道破坏机理分析

当巷道围岩应力大于围岩强度或支护所承受的极限承载能力时,巷道发生变形和破坏,围岩应力主要表现为以下 3 点。

(1) 上覆自重应力。

上覆自重应力是指由巷道上部岩土体自身重力引起的应力,这种应力会随着开采深度的递增而逐渐增强。当巷道围岩的强度降低且呈现松散破碎状态时,巷道上覆岩层压力显著上升。此外,巷道的断面形态及高跨比也会对上覆岩层压力的分布产生影响,特别是在大跨度巷道中,这种压力效应尤为显著。李楼铁矿深部埋深最深处超过千米,上覆自重应力也是引起巷道破坏的主要原因之一。

(2) 构造应力。

地壳构造活动是构造应力的根本成因。在地质构造区域,尤其是在坚硬岩石和地表附近,构造应力呈现不均匀分布特征,其中以水平方向的应力为主。在采矿作业区,由于单斜构造和断裂构造的相互作用,构造应力常常超过岩石自身重力而成为主导性力量,当这种应力平衡状态被打破时,将诱发巷道的支护系统承受异常载荷,一旦外载超过支护结构的承受极限,支护系统就会发生严重塑性变形甚至结构性破坏。李楼铁矿在其断层切割及上覆风化带等构造应力的影响下,矿岩体节理裂隙发育,松散破碎岩块增多,岩体的完整性和强度降低,从而对巷道造成破坏。

(3) 爆破扰动。

爆破扰动主要是由于炸药在岩石或其他介质中爆炸时,释放出的能量导致介质局部状态发生变化,进而引发一系列的物理效应。爆破扰动也是影响巷道破坏的重要因素,岩体被抛掷弹出时,巷道发生冒顶、片帮甚至垮塌。鉴于爆破扰动具有多场耦合的复杂特征,需要综合现场多种因素,并采取有效措施来降低爆破振动效应对巷道及采场的影响。

除了这些外力因素会对围岩稳定性产生显著影响,岩石自身的物理力学性质同样也不容忽视。这些物理力学性质包括孔隙结构、碎胀度、结构面充填特征、波传播阻抗及矿物组分差异等。特别对于风化破碎围岩,稳定性较低,难以通过传统支护手段满足其变形需求。因此,这类围岩更容易受到外界扰动影响,一旦受到扰动,就可能导致失稳,进而发生支护结构破坏。为了深入探究此类围岩的破坏机理,需要对巷道围岩的变形破坏机制进行数值模拟分析。

4.2 数值模型的建立

基于岩体质量评价和巷道破坏机理分析,为了研究支护技术对巷道围岩变形的影响,选取矿体下盘大理岩中的巷道作为研究对象,通过 FLAC3D 有限元软件进行巷道支护的数值模拟研究。巷道断面参照实际矿山工程条件,采用标准三心拱形(见图 3),尺寸为 4.9 m×4.55 m,考虑到巷道围岩受到开挖扰动的影响[17-18],设计模拟范围为 60 m×60 m×30 m,在巷道外围 10 m 内进行网格细化,而对距离巷道较远处则进行相对较稀疏的网格划分,在模型四周及底部施加法向位移约束,在顶部施加等效自重应力,假设各岩层为连续均质各向同性介质,并运用摩尔-库仑准则进行计算。

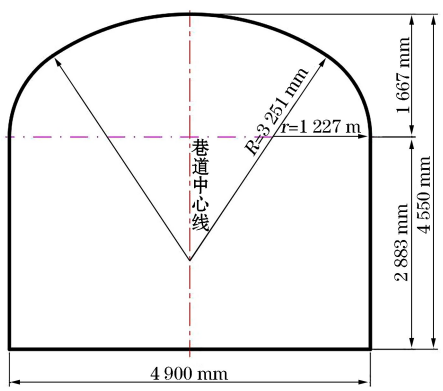


图 3 巷道断面尺寸

Fig.3 Cross-sectional size of roadway

通过现场取样并进行岩石力学试验,得到李楼铁矿 4 种主要岩石的物理力学参数,对物理力学参数进行折减,将折减结果与现场实际情况作对比并进行多次微调,得到本次模拟所需的岩体力学参数,结果见表 4。

表 4 矿岩体力学参数

Table 4 Mechanical parameters of rock mass

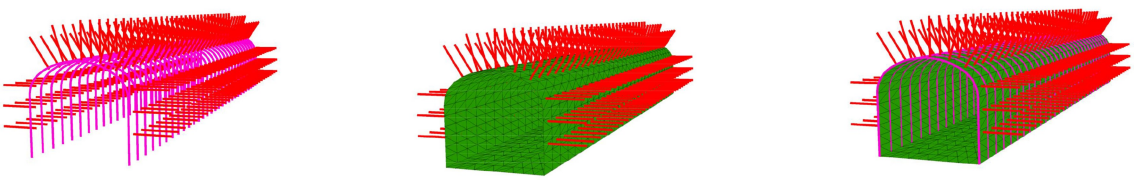
岩性	密度/(g/cm³)	抗拉强度/MPa	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	杨氏模量/GPa	泊松比
矿体下盘大理岩	2.70	0.280	4.060	30.21	10.12	0.240
镜铁矿	3.26	0.760	8.200	35.37	31.62	0.200
矿体上盘片麻岩	2.69	0.030	3.540	34.69	4.49	0.270
顶板紫红色泥灰岩	2.69	0.216	4.652	25.27	6.32	0.238

选取无支护、锚杆＋钢拱架支护、锚喷支护、锚喷＋钢拱架联合支护 4 种方案。锚杆选用树脂锚杆,自巷道底板 1.0 m 处起锚,锚杆的金属杆体采用直径为 25 mm 的螺纹钢,长度为 1.8 m,锚杆呈放射性布置在巷道周围,间排距为 1.0 m×1.0 m。混凝土强度等级 C20,喷射厚度为 100 mm,钢拱架选用 36U 型钢可伸缩性支架,间距为 1.0 m,具体支护方案设计见表 5,各支护方案的数值模型如图 4 所示。

表 5 不同支护方案设计

Table 5 Different support schemes

方案	支护类别	支护设计
1	无支护	—
2	锚杆＋钢拱架支护	锚杆长度为 1.8 m,间排距为 1.0 m×1.0 m,每排 11 根,自巷道底板 1.0 m 处起锚;钢拱架采用 36U 型钢可伸缩性支架,间距为 1.0 m,与锚杆错开布置,型钢横截面积为 45.69×10^{-4} m²。
3	锚喷支护	锚杆长度为 1.8 m,间排距为 1.0 m×1.0 m,每排 11 根,自巷道底板 1.0 m 处起锚;混凝土强度等级为 C20,喷射厚度为 100 mm。
4	锚喷＋钢拱架联合支护	锚杆长度为 1.8 m,间排距为 1.0 m×1.0 m,每排 11 根,自巷道底板 1.0 m 处起锚;钢拱架采用 36 U 型钢可伸缩性支架,间距为 1.0 m,与锚杆错开布置,型钢横截面积为 45.69×10^{-4} m²,混凝土强度等级为 C20,喷射厚度为 100 mm。



(a) 锚杆+钢拱架支护　(b) 锚喷支护　(c) 锚喷+钢拱架联合支护

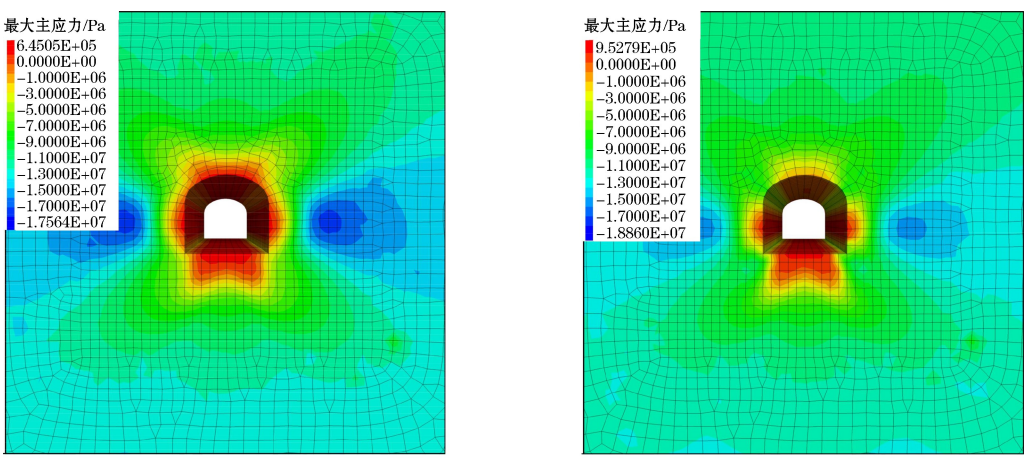
图 4 支护方案的数值模型

Fig.4 Numerical modles of support schemes

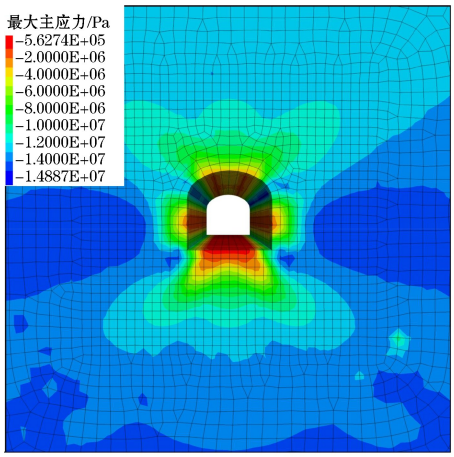
4.3 数值模拟结果分析

4.3.1 巷道围岩应力分析

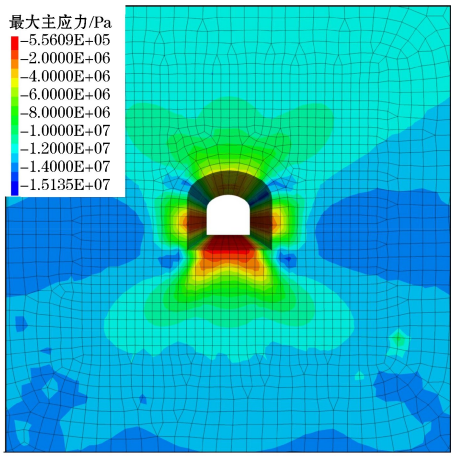
巷道围岩的最大主应力分布情况如图 5 所示。由图 5 可知,在无支护条件下,最大主应力呈“X”形向巷道顶底板深部延伸,最大应力分布在巷道围岩周边,达到 0.645 MPa;在锚杆＋钢拱架支护的条件下,最大主应力分布范围有所减小,顶板处的应力集中区域消失,巷道两帮处的最大主应力范围逐渐缩小;在锚喷支护的条件下,相较于锚杆＋钢拱架支护,巷道两帮及底板的最大主应力分布范围进一步缩小,支护结构的支承应力大于巷道周边的围岩应力,最大主应力值由原来的拉应力转变为压应力;在锚喷＋钢拱架联合支护的条件下,最大主应力值分布范围与锚喷支护类似,巷道围岩应力有所减小,但减小程度与锚喷支护差别不大。



(a) 无支护　(b) 锚杆+钢拱架支护



(c) 锚喷支护

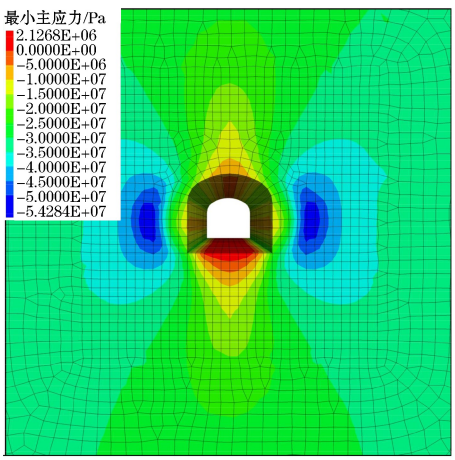


(d) 锚喷+钢拱架联合支护

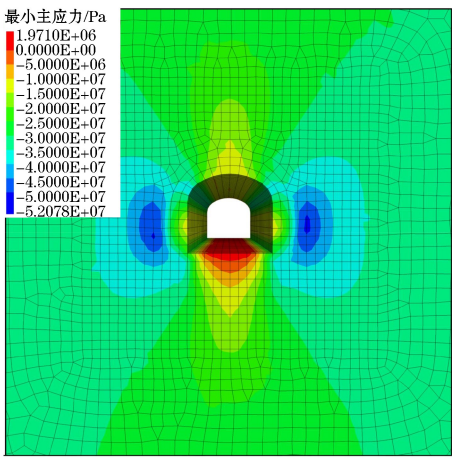
图 5 巷道围岩的最大主应力分布情况

Fig.5 Distribution of maximum principal stress in roadway surrounding rock

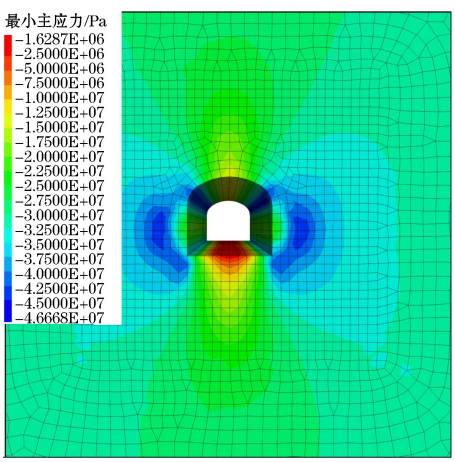
4 种方案的最小主应力分布情况如图 6 所示。由图 6 可知,最小主应力以压应力为主,主要分布在两侧帮处,应力集中区均呈“耳廓形”对称分布。



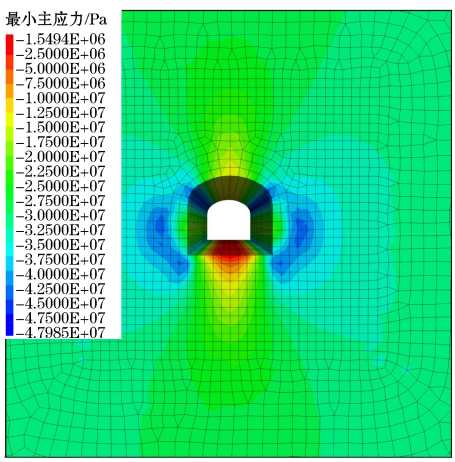
(a) 无支护



(b) 锚杆+钢拱架支护



(c) 锚喷支护



(d) 锚喷+钢拱架联合支护

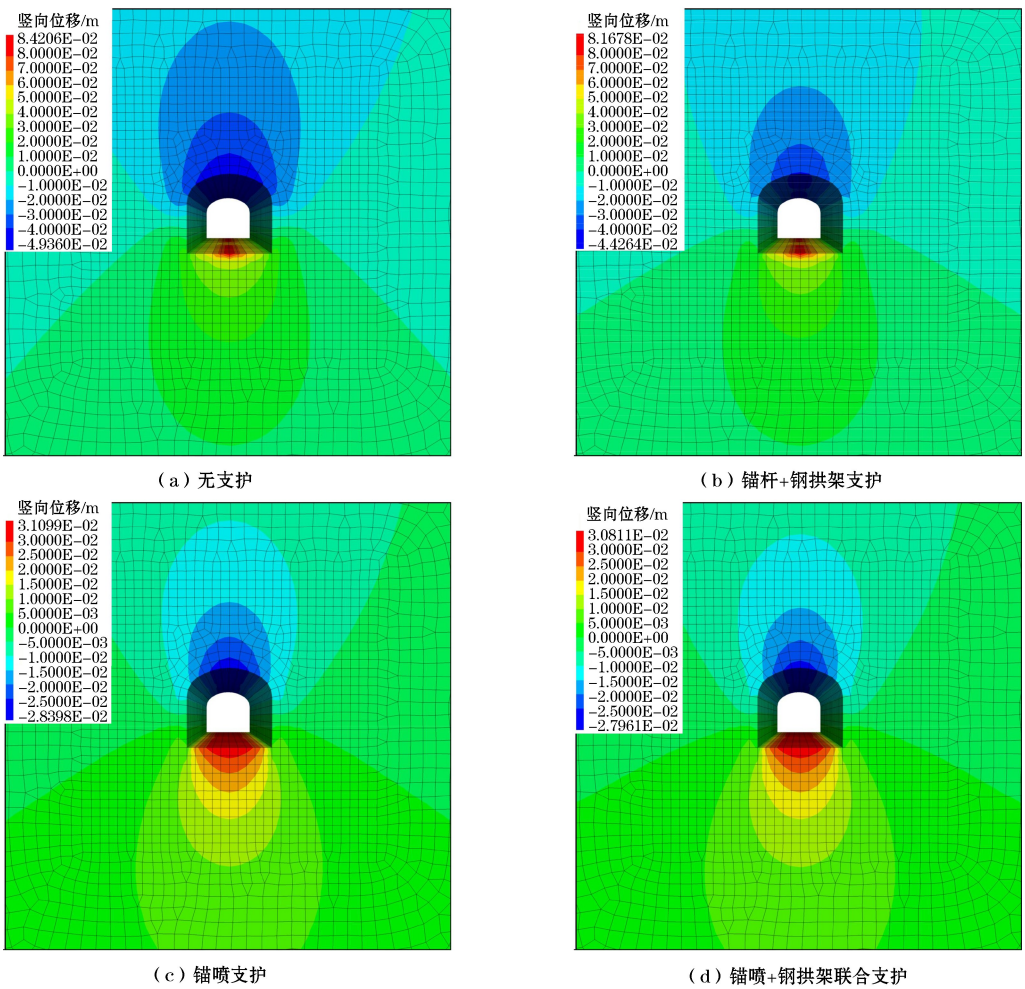
图 6 巷道围岩的最小主应力分布情况

Fig.6 Distribution of minimum principal stress in roadway surrounding rock

在无支护条件下,巷道周边最小主应力集中区分布在巷道两帮围岩深处,最小主应力为 54.28 MPa,在巷道周边围岩中表现为拉应力集中区;在锚杆+钢拱架支护条件下,最小主应力有所减小,为 52.08 MPa,巷道周边的拉应力集中区范围逐渐缩小;在锚喷支护条件下,最小主应力大幅度减小,仅为 46.67 MPa,巷道左右两帮处的拉应力集中区基本消失,顶底板的拉应力集中区进一步缩小;在锚喷+钢拱架联合支护条件下,支护效果与喷锚支护类似,最小主应力为 47.99 MPa,应力集中区域也逐渐缩小。

4.3.2 巷道围岩位移分析

不同支护方案下的巷道围岩竖向位移分布情况如图 7 所示,由图 7 可知,4 种支护条件下,巷道围岩均呈现一定程度的顶板下沉和底板隆起。在无支护条件下,顶板最大下沉量为 49.36 mm,底板最大底鼓量为 84.21 mm,位移范围较大,巷道的起拱线及拱脚位置也出现了一定程度的位移;在锚杆+钢拱架支护条件下,顶、底板的位移变化范围有所缩小,顶板最大下沉量减小为 44.26 mm,底板最大底鼓量减小为 81.68 mm;在锚喷支护条件下,顶、底板的位移量进一步减小,顶板最大下沉量减少为 28.40 mm,底板最大底鼓量减少为 31.10 mm;在锚喷+钢拱架联合支护条件下,相较于锚喷支护,位移量变化范围不大,顶、底板的最大位移分别为 27.96 mm、30.81 mm。



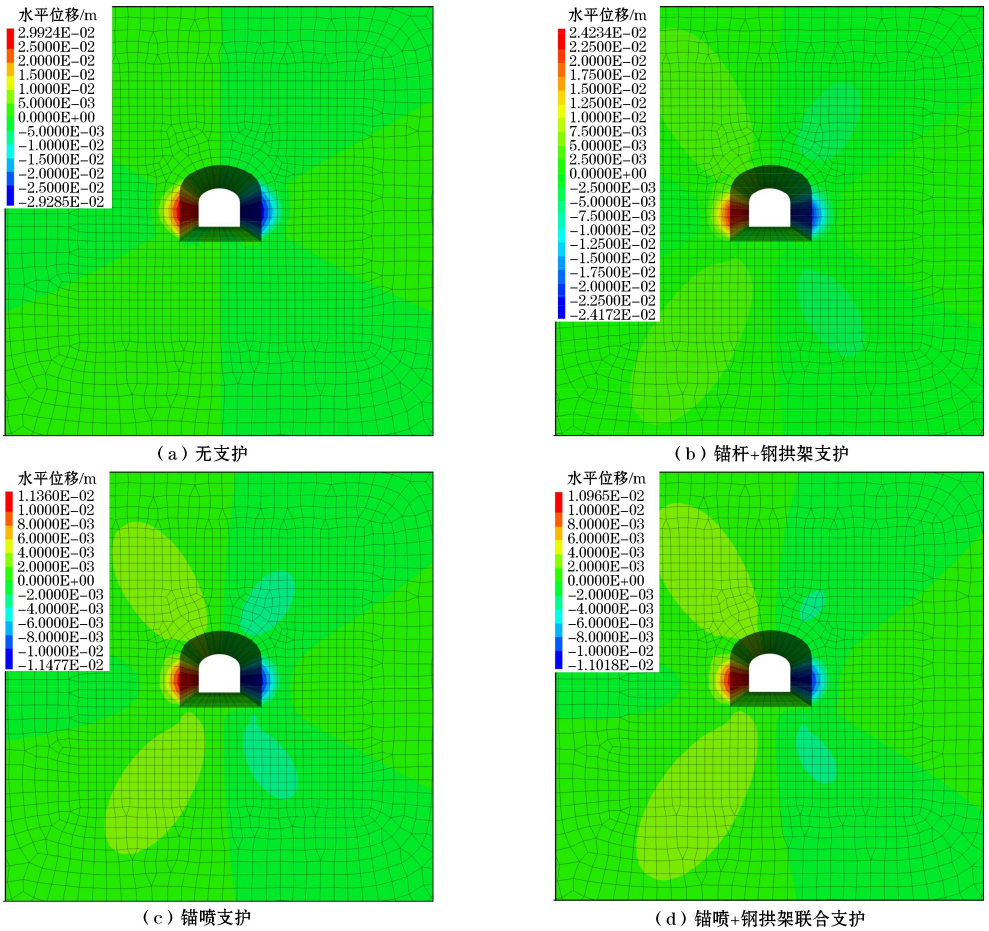
(a) 无支护 (b) 锚杆+钢拱架支护

(c) 锚喷支护 (d) 锚喷+钢拱架联合支护

图 7 巷道围岩的竖向位移分布情况

Fig.7 Distribution of vertical displacement in roadway surrounding rock

不同支护方案下的巷道围岩水平位移分布情况如图 8 所示。由图 8 可知,在无支护条件下,巷道左右两帮的最大位移量分别达到了 29.92 mm、29.29 mm;在锚杆+钢拱架支护的条件下,巷道左右两帮的整体位移量有所减小,分别为 24.23 mm、24.17 mm;锚喷支护与锚喷+钢拱架联合支护条件下,水平位移的差距不大,锚喷支护下的巷道左右两帮位移分别为 11.36 mm、11.48 mm,锚喷+钢拱架联合支护下的左右两帮位移分别为 10.97 mm、11.02 mm,相较于无支护条件的位移量有明显的减小。



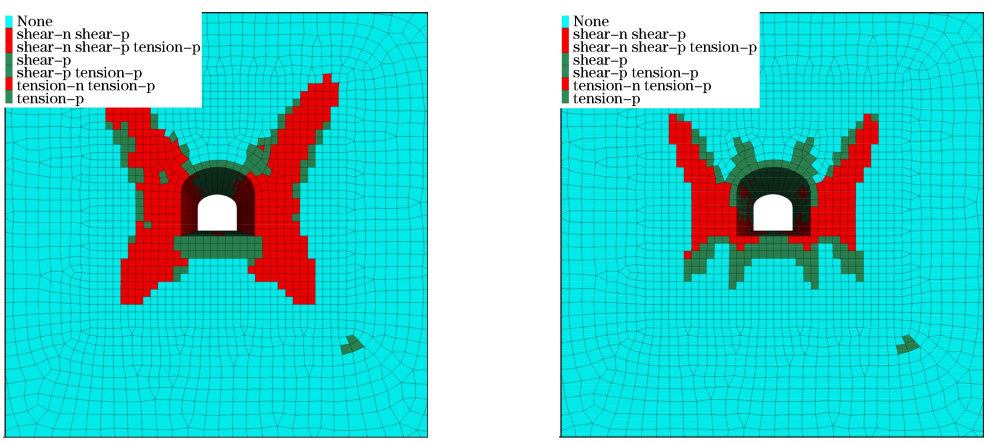
(a) 无支护　(b) 锚杆+钢拱架支护　(c) 锚喷支护　(d) 锚喷+钢拱架联合支护

图 8　巷道围岩的水平位移分布情况

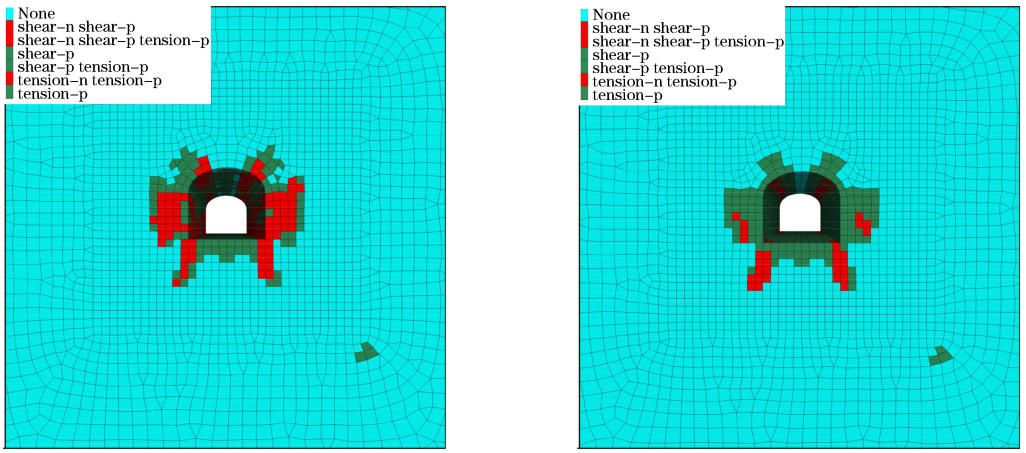
Fig.8　Distribution of horizontal displacement in roadway surrounding rock

4.3.3　巷道围岩塑性区分析

不同支护方案下的巷道围岩塑性区破坏情况如图 9 所示。由图 9 可知,受竖向自重应力、水平构造应力以及掘进过程中的应力重分布影响,在 4 种支护方案下巷道围岩均出现一定程度的塑性破坏区,塑性区破坏范围主要分布在巷道两侧帮,顶、底板塑性区破坏范围较小。在无支护条件下,塑性区破坏范围较大,近似呈“X”形,主要以两帮塑性区破坏为主,其次是巷道四角深处位置;在锚杆+钢拱架支护条件下,塑性区破坏范围明显缩小,巷道拱脚深处的塑性区已经消失;在锚喷支护条件下,塑性区破坏范围进一步缩小,仅巷道拱脚深部位置围岩出现明显的剪切特征;在锚喷+钢拱架联合支护条件下,塑性区破坏范围与锚喷支护类似,仅在巷道拱脚处发生剪切破坏,且相比于锚喷支护明显缩小。



(a) 无支护　(b) 锚杆+钢拱架支护



(c) 锚喷支护　　(d) 锚喷+钢拱架联合支护

图 9　巷道围岩塑性区破坏情况

Fig.9　Failure of plastic zone in roadway surrounding rock

4.3.4　不同支护方案对比分析

对比 4 种支护方案下的巷道围岩应力、位移分布情况,结果见表 6。由表 6 可知,通过锚杆+钢拱架支护、锚喷支护、锚喷+钢拱架联合支护作用后,巷道围岩变形得到有效控制,相对于无支护方案,最小主应力分别降低了 4.05%、14.02%、11.59%,拱顶竖向位移最大下沉量分别降低了 10.33%、42.46%、43.35%,最大底鼓量分别降低了 3.00%、63.07%、63.41%,左帮的最大位移量分别降低了 19.02%、62.03%、63.34%,右帮的最大位移量分别降低了 17.48%、60.81%、62.38%。可以看出,锚杆+钢拱架支护控制巷道周边围岩变形的效果并不明显;而锚喷支护与锚喷+钢拱架联合支护下的支护效果基本类似,围岩变形和塑性区破坏范围的支护效果都相对较小。

表 6　不同支护方案的支护效果对比

Table 6　Comparison of support effect of different support schemes

支护类型	应力/MPa		位移/mm			
	最大主应力	最小主应力	拱顶	拱底	左帮	右帮
无支护	0.645	54.28	49.36	84.21	29.92	29.29
锚杆+钢拱架支护	0.953	52.08	44.26	81.68	24.23	24.17
锚喷支护	−0.563	46.67	28.40	31.10	11.36	11.48
锚喷+钢拱架联合支护	−0.556	47.99	27.96	30.81	10.97	11.02

5　结论

(1) 利用罗盘和皮尺按照详测线法对井下大理岩和镜铁矿岩体的结构面进行了调查,并采用 GIPS 软件对现场调查结果进行了统计分析。结果表明,李楼铁矿矿体下盘岩体内结构面较为发育,矿岩体内均发育有两组以上优势结构面。在工程设计与施工过程中,应全面考虑优势结构面对工程稳定性的影响。即在布置开拓与采准巷道工程时,需确保工程轴线方向与优势节理面保持大角度的交叉状态,旨在降低优势结构面可能带来的不利影响,从而确保巷道工程的整体稳定性与安全性。

(2) 采用岩土规范法、RMR 分级法、Q 系统分级法等多种岩体分级方法对李楼铁矿深部中段28～48 线矿体及上下盘围岩体进行质量评价,确定了各岩体的综合分级状况。结果表明,矿体下盘大理岩、镜铁矿、矿体上盘片麻岩为Ⅲ级岩体,顶板紫红色泥灰岩为Ⅳ级岩体。

(3) 以岩体质量评价为参考,对比分析 4 种支护方案条件下的深部－625 m 中段巷道围岩稳定性。结果表明,在无支护条件下,巷道周边围岩应力、位移较大,塑性区的破坏范围较大,巷道围岩有很明显的坍塌、垮落风险;在锚杆+钢拱架支护、锚喷支护、锚喷+钢拱架联合支护条件下,巷道围岩变形均有一定程度的减小,巷道围岩的支护效果由弱到强依次为支护<锚杆+钢拱架支护<锚喷支护≈锚喷+钢拱架联合支护,锚喷+钢拱架联合支护方案的效果最佳。综合分析来看,虽然锚喷+钢拱架联合支护条件下的效果更佳,但锚喷支护可满足矿山大部分类型的巷道支护需要,在大部分破碎矿段区域选用锚喷支护是相对合理的,只有在极破碎区域建议选用锚喷+钢拱架联合支护,以保证后续巷道作业的安全生产。

参考文献(References):

[1] 蔡美峰,薛鼎龙,任奋华.金属矿深部开采现状与发展战略[J].工程科学学报,2019,41(4):417-426.
CAI Meifeng, XUE Dinglong, REN Fenhua. Current status and development strategy of metal mines [J]. Chinese Journal of Engineering,2019,41(4):417-426.

[2] 李小松,武鹏杰,赵承佑,等.基于岩体质量评价的深部斜坡道机械化支护技术研究[J].采矿技术,2024,24(2):17-21.
LI Xiaosong, WU Pengjie, ZHAO Chengyou, et al. Research on mechanized support technology of deep ramp based on rock mass quality evaluation [J]. Mining Technology,2024,24(2):17-21.

[3] 刘志强,宋朝阳,程守业,等.全断面竖井掘进机凿井围岩分类指标体系与评价方法[J].煤炭科学技术,2022,50(1):86-94.
LIU Zhiqiang, SONG Zhaoyang, CHENG Shouye, et al. Classification grading evaluation index system and evaluation method of surrounding rock for full section shaft boring machine [J]. Coal Science and Technology,2022,50(1):86-94.

[4] 刘允秋,修国林,张玉华,等.超千米深井极松散破碎岩体岩石力学试验与岩体质量评价[J].现代矿业,2020,36(12):77-79.
LIU Yunqiu, XIU Guolin, ZHANG Yuhua, et al. Rock mechanics experiment and rock mass quality evaluation of extremely soft and fractured rock mass in super kilometer deep well[J]. Modern Mining,2020,36(12):77-79.

[5] 谷亚州.破碎矿体高分段开采结构参数优化及支护技术研究[D].长沙:中南大学,2022.
GU Yazhou. Study on structural parameter optimization and supporting technology of high segment mining in broken orebody[D]. Changsha:Central South University,2022.

[6] 贾彦州.破碎矿岩采掘中光面爆破与锚喷网联合支护技术研究[J].世界有色金属,2022(22):52-54.
JIA Yanzhou. Study on the combined support technology of smooth blasting and bolt shotcrete mesh in broken rock mining[J]. World Nonferrous Metals,2022(22):52-54.

[7] 罗豪,吴锐,王庆,等.深部破碎巷道应力演化与围岩控制技术数值模拟[J].矿业研究与开发,2021,41(2):39-44.
LUO Hao, WU Rui, WANG Qing, et al. Numerical simulation of stress evolution and surrounding rock control technology in deep broken roadway[J]. Mining Research and Development,2021,41(2):39-44.

[8] 陈国良,关士良,王志修,等.甲玛铜多金属矿破碎软岩巷道分级支护参数优化[J].中国矿业,2019,28(增刊1):254-258.
CHEN Guoliang, GUAN Shiliang, WANG Zhixiu, et al. Optimization of grading support parameters for broken soft rock roadway in Jiama copper polymetallic mine[J]. China Mining Magazine,2019,28(Suppl.1):254-258.

[9] 秦绍龙,单迪,赵兴东,等.梅山铁矿破碎区稳定性分析及支护研究[J].金属矿山,2023(2):9-14.
QIN Shaolong, SHAN Di, ZHAO Xingdong, et al. Stability analysis and support research of fracture area in Meishan Iron Mine[J]. Metal Mine,2023(2):9-14.

[10] 郭平,沈大富.深部巷道支护方案优化设计及数值模拟研究[J].矿业安全与环保,2021,48(4):87-91.
GUO Ping, SHEN Dafu. Optimization design and numerical simulation of supporting scheme for deep mine roadway[J]. Mining Safety & Environmental Protection,2021,48(4):87-91.

[11] 程志强.软弱破碎围岩深埋隧道大变形控制施工技术研究[J].铁道建筑技术,2023(7):158-162.
CHENG Zhiqiang. Research on large deformation control construction technology for deep buried tunnel in soft and fractured surrounding rock [J]. Railway Construction Technology,2023(7):158-162.

[12] 卢颖,易鹏豪,何平,等.软弱破碎炭质板岩地层隧道施工受力研究[J].山西建筑,2023,49(16):133-136.
LU Ying, YI Penghao, HE Ping, et al. Study on tunnel construction stresses in weak and broken carbonaceous slate strata[J]. Shanxi Architecture,2023,49(16):133-136.

[13] 李奥立,王沉,苟仁涛,等.坚硬顶板工作面支架前方切顶卸压技术研究[J].矿业研究与开发,2024,44(5):85-91.
LI Aoli, WANG Chen, GOU Rentao, et al. Research on pressure relief technology of roof cutting in front of working face support in hard roof [J]. Mining Research and Development,2024,44(5):85-91.

[14] 戈凯,王亚军,李强.高海拔大型铜多金属矿井下工程地质调查与岩体质量评价[J].采矿技术,2022,22(1):27-31.
GE Kai, WANG Yajun, LI Qiang. Underground engineering geological survey and rock mass quality evaluation of large copper polymetallic mine at high altitude [J]. Mining Technology,2022,22(1):27-31.

[15] 江飞飞,李向东,盛佳,等.软弱破碎岩体工程地质调查与质量评价[J].黄金科学技术,2016,24(3):94-99.
JIANG Feifei, LI Xiangdong, SHENG Jia, et al. Engineering geological investigation and quality evaluation of soft fractured rock[J]. Gold Science and Technology,2016,24(3):94-99.

[16] 龚永超,梁巨理,管桦,等.高海拔高品位地下铜矿工程地质调查与岩体质量评价[J].采矿技术,2023,23(2):6-9.
GONG Yongchao, LIANG Juli, GUAN Hua, et al. Engineering geological survey and rock mass quality evaluation of high altitude and high grade underground copper mine[J]. Mining Technology,2023,23(2):6-9.

[17] 熊祥林,陈朋磊.近距离采空区下回采巷道锚网索支护技术[J].能源与环保,2022,44(7):278-283+290.
XIONG Xianglin, CHEN Penglei. Bolt-net-cable supporting technology for coal winning roadway in short-distance goaf [J]. China Energy and Environmental Protection,2022,44(7):278-283+290.

[18] 王贤来,崔继强,张鹏强,等.金川二矿区深部巷道支护稳定性数值模拟研究[J].采矿技术,2022,22(1):66-69.
WANG Xianlai, CUI Jiqiang, ZHANG Pengqiang, et al. Numerical simulation of support stability of deep roadway in Jinchuan No.2 Mining Area[J]. Mining Technology,2022,22(1):66-69.