

高山复杂矿体采场结构参数优化研究

顾晓春

(云南铜业(集团)有限公司, 云南 昆明 650051)

摘要:为了确定羊拉铜矿高山复杂难采铜矿体开采的合理采场结构参数,在工程地质调查和岩体质量分级基础上,利用FLAC^{3D}计算软件进行了采场结构参数优化,结果表明,盘区长50 m,宽36 m,间柱宽5 m时有利于采场和矿柱的稳定,是最佳的采场结构参数。工业试验的结果也验证了优化结果,达到了预期目标。

关键词:高山复杂矿体;空场采矿法;采场结构参数;数值模拟

羊拉铜矿地处三江有色金属-贵金属资源经济区南段,是云南铜业(集团)有限公司(以下简称云铜集团)重要的铜矿石原料基地。由于矿区位于金沙江峡谷西岸,地形切割强烈,以高山、狭谷地貌为特征,而羊拉铜矿主要矿段里农矿段则以陡崖、单斜坡地貌出现。矿区地处滇藏高原,主矿体赋存于3000 m以上。区内断裂、褶皱发育,受地质构造的影响,矿体形态复杂多变,为多层、缓倾斜-倾斜、中厚-厚矿体,矿体产状和厚度沿走向、倾向的变化很大,且厚大部分多靠近地表,属典型的高山复杂难采矿体。对于中厚矿体(>8 m),设计采用底盘漏斗

或钎沟受矿的空场法回采,但矿区地形复杂,岩体破碎,还可能存在较大的残余构造应力,因此,确定合理的采场结构参数与回采顺序,对矿体顺利回采与采场安全具有重要意义。

1 矿床地质特征

里农矿段矿体分布于里农复式岩体西侧的泥盆系浅变质岩系内或岩体中。矿体总体走向近南北,向西缓倾,北自里农大沟,南到F₄断层,长约2 km,最宽处1.3 km,一般倾角18°~35°。主矿体的产状特征见表1。

表1 里农矿段主要矿体产状特征

矿体编号	矿体厚度>8 m			矿体厚度4~8 m			矿体厚度<4 m		
	倾角(°)	厚度(m)	比例(%)	倾角(°)	厚度(m)	比例(%)	倾角(°)	厚度(m)	比例(%)
KT2(上)-1	12.11	19.83	36.34	23.96	5.15	32.3	11.86	3.24	31.36
KT2(上)-2	15.32	25.00	73.67	26.65	5.49	20.75	12.00	3.45	5.57
KT5	14.09	14.37	68.35	14.03	5.49	15.15	24.15	3.16	16.50

里农矿段矿体顶底板起伏变化较大,厚度及倾角不稳定,在平面和剖面方向上往往有突变情况。主矿体靠近地表部分厚度较大,但基本为氧化矿;往岩体深部,矿石类型主要为硫化矿和混合矿,矿体厚度小,且出现多层分枝。

矿体的含矿岩石以透辉矽卡岩、石榴石矽卡岩为主,次为角岩化变质石英砂岩、绢云砂质板岩、爆破角砾岩、花岗闪长岩。

矿体受地层、岩体和构造破碎带控制,呈层状、似层状、透镜状、脉状产出。

矿段内已探明工业矿体23个,KT2(上)-1、KT2(上)-2、KT5为主矿体,其余为次要矿体、小矿体或卫星矿体。

2 工程地质调查与岩体质量评价

工程地质条件与岩体质量指标是采矿工程设计与参数优化的前提条件,采用详测线法,对试验矿段的地质构造、节理裂隙及其发育程度进行了调查统计,结合原岩应力测试和矿岩物理力学试验,运用RQD、RMR、Q系统客观评价了岩体质量,为采矿工

基金项目:云南省科技强省计划(省院省校科技合作专项)项目(2007AD001)。

程设计提供了依据。

2.1 节理裂隙调查

根据北京科技大学对试验矿段的工程地质调查结果,将矿山工程所辖地区的岩石,按其建造和改造特性及组合规律进行分组,将首采区周边围岩划分为3个工程地质岩组,即变质石英砂岩岩组、大理岩岩组、矿岩岩组。采用聚类法对不同岩组的结构面进行分类,并确定各岩组的优势结构面,结果见表2。

2.2 原岩应力测试

中南大学采用钻孔应力解除法,对里农矿段进行了原岩应力测试,其结果见表3。

表2 不同岩组节理优势面产状

岩性	优势节理产状		
	I	II	III
变质石英砂岩	270°∠85°	360°∠83°	201°∠83°
大理岩	251°∠86°	329°∠41°	
矿岩	189°∠83°	198°∠86°	149°∠83°

表3 各测点地应力测量结果

测点编号	最大主应力			中间主应力			最小主应力		
	大小(MPa)	方位(°)	倾角(°)	大小(MPa)	方位(°)	倾角(°)	大小(MPa)	方位(°)	倾角(°)
3275 m-1*	12.08	113.43	20.59	6.79	240.03	57.78	5.90	13.97	23.62
3275 m-2*	11.03	102.83	17.69	4.22	205.45	34.43	2.53	350.43	50.08
3225 m-3*	6.67	116.99	10.77	3.74	236.96	69.15	-5.07	23.52	17.63

测试结果表明,矿区以水平构造应力为主,应力水平中等。在3225中段(第三测点)处地应力出现负值,即有张应力产生,从地质资料分析,该测点处于羊拉背斜较高水平上,离背斜的脊线较近,同时该测点又在近坡面的位置上,所以出现张应力是合理的。但由于岩体中常存在微裂隙、裂纹、节理和断层,除非岩体特别坚硬完整,张应力的影响一般不会

传递到远处,只会影响到测点附近的局部地区。因此,在深部开采中不必特别考虑局部拉应力的影响。

2.3 矿岩物理力学性质

通过现场试样采集和加工,在中南大学现代分析测试中心力学实验室 INSTRON 液压伺服控制试验机上进行了主要矿岩的物理力学参数测定,结果见表4。

表4 矿岩物理力学参数室内测试结果

岩石名称	块体密度 (g/cm ³)	弹性模量 (GPa)	泊松比	单轴抗压 (MPa)	抗拉强度 (MPa)	内聚力 (MPa)	内摩擦角 (°)	纵波速度 (m/s)
大理岩	2.71	26.518	0.22	95.66	4.93	17.62	35.77	3564
砂卡岩(含矿)	3.74	38.507	0.24	178.18	10.04	56.13	41.73	3334
变质石英砂岩	2.74	30.350	0.19	109.72	9.09	43.11	42.50	3636
绢云板岩	2.79	15.219	0.20	89.43	5.69	14.36	44.19	2747
花岗岩	2.67	30.247	0.23	107.92	11.10	19.98	44.01	3529

2.4 岩体质量评价

运用RQD值分级、RMR分级、Q系统分级、BQ分级等4种分级方法,对首采区周边岩体进行了分级,综合4种分级方法的结果,得出了变质石英砂岩岩体中等稳固,大理岩、矿岩岩体稳固的结论(见表5)。

表5 不同岩组岩体质量评价结果

评价方法	变质石英砂岩	大理岩	矿岩
RQD	81.17/好	94.81/很好	83.3/好
RMR	61/Ⅱ/良	69/Ⅱ/良	66/Ⅱ/良
Q	9.14/Ⅲ	21.35/Ⅱ	9.38/Ⅲ
BQ	321/Ⅳ	409.1/Ⅱ	562.9/Ⅰ
综合评价	一般	好	好

首采区周边岩体的现场调查分析结果表明,变

质石英砂岩岩组岩体类型为块状结构,岩性硬度低,在节理、裂隙的切割作用下,容易发生巷道局部的垮冒和片落,在纵向裂隙交切作用下,容易形成不稳定块体而塌落和顶塌方;Ⅲ级结构面是重要不利结构面因素,可能引起岩体沿结构面滑动,应引起特别注意。

3 采场结构优化

从表1可以看出,矿体厚度>8m占多数,对这部分矿体,设计采用底盘漏斗或歪沟受矿的空场嗣后充填采矿法,由于在采矿过程中空区不充填,矿柱及采场顶板的稳定性将关系采矿安全。矿柱尺寸太大、采场跨度过小,则矿石损失大,开采成本高;矿柱

尺寸过小,采场跨度太大,则回采过程可能因大规模地压活动引发安全事故,因此,必须结合矿床开采技术条件,优化采场结构参数。

3.1 优化方法

采场结构参数优化方法采用数值模拟方法,计算软件采用通用的 FLAC^{3D},通过模拟不同盘区宽度及采场暴露面积下采场应力分布状态及破坏模式,探明回采区域应力集中的产生部位与最大压应力、最大拉应力的方向和大小,以及塑性区的位置及形状,进而探求采场最佳尺寸。

根据里农矿段的矿岩特性,假定里农矿段矿岩、充填体为各向同性的弹塑性连续介质。

模型两侧限制水平位移,模型底部限制垂直位移,模型上部施加相应埋深的垂直载荷,模型两侧施加相应深度的水平应力,模型变形设置为大变形。

根据材料力学特征,充填体采用理想弹塑性本构模型,矿岩采用应变软化本构模型;矿岩和充填体均采用莫尔-库仑 (Mohr - Coulomb) 屈服准则判断岩体是否产生破坏。

3.2 计算方案

以试验盘区 3275 - 4[#] 为研究对象,为消除尺寸对模拟结果的影响,确定模型上下边界分别为 3350 m 水平和 3200 m 水平,高度为 150 m,宽度为 530 ~ 550 m,共分单元格 44622 ~ 49950 个。

根据里农矿段矿岩的力学特性和矿体赋存状态,设计采场宽度分别为 32, 36, 40 m 3 种方案。其中方案一采场沿走向方向宽度为 32 m,方案二为 36 m,方案三为 40 m,采场间柱均设定为 5 m。

计算过程同时模拟采场底部结构的稳定性与间柱可靠性,模拟不同采场回采顺序对采场稳定性的影响。模型中采场自左向右定义为 1[#]、2[#]、3[#] 采场,考虑依次回采和间隔回采的不同回采顺序。

3.3 计算结果

(1) 数值分析结果表明,当采场沿走向方向跨度为 32 m (包括 5 m 间柱) 时,整个采场在回采过程中,无论采场顶板及间柱都是稳定的,都没有出现失稳现象,因此采场宽度若取 32 m 则过于保守;当采场宽度为 36 m 时,应力集中区主要集中在采场间柱,但采场间柱并没有出现塑性区,采场顶板也没有出现拉应力区,在相临 3 个采场的回采期间,采场都处于稳定状态;当采场跨度由 36 m 增大到 40 m 时,采场间柱的应力集中程度显著增加,并出现较大范围的塑性区,采场顶板还出现拉应力区。因此从采

场整体稳定性考虑,在目前条件下,采场跨度取 36 m 较为合适。

(2) 从最大主应力的分布区域来看,盘区间柱是回采过程中应力最为集中的区域,当 1 号采场回采区域爆破以后,最大主应力的集中区域主要分布在盘区间柱所在位置,其应力值已达到 10 ~ 20 MPa,其数值是其他未采动区域的 2 倍;但底部结构并没有产生较大的应力集中,仅因为受盘区间柱所在区域应力集中区域的影响,在靠近采场两侧的电耙道出现了一定的应力集中区域。当 1 号采场、3 号采场回采并充填完毕,2 号采场矿石全部放出时,应力集中的最显著区域主要分布在 2 号采场与 1 号采场、3 号采场之间的间柱上,其最大主应力平均在 30 ~ 40 MPa 之间,是周围未采动区域的 3 ~ 4 倍。由于采场底部结构垂直应力主要来自盘区内矿石的自重应力,该应力相对较小,其应力主要来自水平应力,因此底部结构的应力集中程度并不明显,最大主应力一般仅在 5 ~ 10 MPa,但靠近采场两侧的电耙道,因受盘区间柱应力集中的影响,出现了 10 ~ 20 MPa 的应力集中区域,这也是今后底部结构支护的重点区域。

(3) 采场回采顺序数值模拟结果表明,从最大主应力分布来看,当一期采场回采完毕时,采用连续回采的采场间柱应力集中程度可达到 30 ~ 40 MPa,采用间隔回采的采场间柱应力集中值一般在 10 ~ 15 MPa 之间。当采场全部回采完后,采用连续回采的采场其间柱最大主应力达到 10 ~ 25 MPa,采用间隔回采的采场间柱应力为 10 ~ 20 MPa。从铅垂方向最大位移量来看,采用连续回采模式和采用间隔回采模式,最大位移量都发生在 3 号和 4 号采场之间的采场顶板上,铅垂方向最大位移量均在 60 mm 以上,但连续回采方式 60 mm 以上位移量的区域要大得多。综合来看,采用间隔方式回采更有利于采场的稳定。

(4) 计算结果表明,采场宽度为 36 m,间柱宽度为 5 m,长为 50 m,盘区采场采用间隔回采方式,最有利于采场和矿柱的稳定,是最佳采场结构参数。

4 工业试验

试验盘区选定在 3275 m 水平 4[#] 盘区,矿体赋存于泥盆系中上统里农组一段 ($D_{2+3}1^1$) 和泥盆系中上统里农组二段 ($D_{2+3}1^2$) 地层中,属于 19[#] ~ 21[#] 勘探 (下转第 23 页)

5 结 论

通过对矿业软件模型构建技术、资源储量估算及动态管理、地下采矿设计、爆破设计和露天境界优化等多方面的实用应用技术的分析研究,可以得出如下结论:

(1) 随着现代科学技术的发展,特别是计算机技术、优化算法技术、3D 技术的发展,三维可视化矿业软件日益成熟完善,为其实际应用提供了坚实的理论和技術基础;

(2) 合理有效应用矿业软件能够快速、高效、准确的为矿山决策、设计和管理提供强有力的技术支持,应用矿业软件解决矿山生产和管理中的相关问题已经势在必行;

(3) 三维可视化矿业软件在模型构建技术、资源储量估算、动态管理、地下采矿设计、爆破设计和露天境界优化等多方面日臻成熟的基础上,应该进一步着眼于矿山实用综合功能的开发应用,完善矿山投资决策、生产管理、生产进度计划控制等各个方

面的功能,使矿业软件真正成为矿山普遍应用的工具。

参考文献:

- [1] 李淑芝,陈道贵. 地下矿山信息化应用综述[J]. 金属矿山, 2005, (12): 51 ~ 53.
- [2] Simon W Houlding. 3D geoscience modeling - computer techniques for geological characterization [M]. Springer - Verlag, 1994.
- [3] Kaufman A. 3D Volume visualization advances in computer graphics a [M]. Springer - Verlag, 1991.
- [4] Bak P, Mill A. Three Dimensional Representation in a Geo - scientific Management System for the Minerals Industry [A]. Three Dimensional Applications in Geographic information system [C]. Taylor & Francis, 1989.
- [5] HOU Enke, Wu Lixin. Several Aspect Research Situation and Developing Trend of 3D Geosciences Modeling [J]. Coal Geology & Exploration, 2000, 28(6): 5 ~ 7.
- [6] 孙玉建, 孟 伟, 万 会. 矿产资源储量估算中工程控制程度划分的探索 [J]. 地质与勘探, 2006, (6): 81 ~ 84.
- [7] 王 青, 史维祥. 采矿学 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2007, 33 ~ 36.

(收稿日期: 2008 - 11 - 02)

(上接第 3 页)

线范围内的 KT2(上) - 1 矿体。矿体倾向北西, 倾角较缓, 标高在 3310 m 以下。

矿体顶板以灰白色厚层状中粗晶大理岩为主, 局部夹绢云砂质板岩、变质石英砂岩。底板为灰白色厚层状变质石英砂岩, 岩石钙化、硅化较强, 受断层影响, 变化较大, 层节理发育, 矿体与围岩呈渐变关系。含矿岩石主要为透辉石砂卡岩, 石榴石砂卡岩及少量角岩化变质石英砂岩。矿体呈似层状产出, 厚度 10.61 ~ 14.75 m, 平均厚度为 12.64 m, 倾角 $8^{\circ} \sim 10^{\circ}$, 平均铜品位为 1.21%, 地质矿量 91797.19 t, 铜金属量 1110.75 t。

根据矿体产状和采场结构参数优化结果, 设计盘区长 50 m, 宽 36 m, 留 5 m 宽的盘区间柱, 盘区内设 2 个采场, 采场宽 15.5 m, 每个采场设一个电耙道, 2 条歪沟巷道, 歪沟巷道兼作中深孔凿岩道, 以降低采切工程量。受凿岩设备能力的限制, 设计采用两层凿岩硐室, 其中下层凿岩巷道即为歪沟巷道, 共 4 条; 根据矿体形态, 上层凿岩巷道布置 2 条凿岩道。凿岩设备为 YG - 90, 钻孔直径 64 mm, 采用扇形中深孔, 凿岩量为 21348 m。采用粉状硝酸炸药, 装药器装药, 分段微差爆破。爆破最小抵抗线 1.2

~ 1.3 m, 炸药单耗 0.6 kg/t。采用中深孔拉槽, 切割槽布置在首段, 即矿体抬起较高的一段。出矿溜井布置在采场端部, 采用 30 kW 电耙出矿。矿石耙运至端部溜井后, 经振动放矿至自卸汽车后运至 3275 m 主溜井。

在盘区试采过程中, 矿柱与采场顶板保持稳定, 盘区矿石损失率为 17.3%, 贫化率为 6.5%, 千吨采掘比为 12 m³/kt, 均达到了预期效果。

5 结 论

(1) 通过现场节理裂隙调查、矿区原岩应力场测量及矿岩物理力学参数测试, 利用 RQD、RMR、Q 及 BQ 系统对岩体质量进行了分级评价, 结果表明, 变质石英砂岩岩体质量一般, 大理岩、矿岩岩体质量好。

(2) 采场结构参数的数值模拟表明, 采场宽度为 36 m, 间柱宽度为 5 m, 长为 50 m, 盘区内采场采用间隔回采方式, 有利于采场和矿柱的稳定, 是最佳的采场结构参数。

(3) 3275 m 水平 4[#] 盘区的试采结果验证了采场结构参数优化结果, 达到了预期的目标。

(收稿日期: 2008 - 11 - 02)