

极薄矿体采矿经济模型及应用*

刘恩彦^{1,2}, 刘福春^{1,2}, 熊有为^{1,2}, 雷显权^{1,2}, 刘艳红^{1,2}

(1. 长沙有色冶金设计研究院有限公司, 湖南长沙 410019;
2. 深井矿山安全高效开采技术湖南省工程研究中心, 湖南长沙 410019)

摘要:广西某矿为极薄矿体,其0.4 m厚度以下的脉幅较多,采用传统经验判断法无法评价其经济效益。为充分利用该矿有限的矿产资源,以矿石综合品位、脉幅厚度及采矿成本等经济技术指标为基础,定义采幅系数,并结合盈亏平衡法,通过生产数据的归纳总结和分析,建立采矿经济模型,综合评价极薄矿体的可回采性,确定适宜的采幅参数。该方法为矿山提高资源回收量、增加采矿效益提供了科学依据,可确保矿产资源开发取得实效,实现可持续发展。

关键词:极薄矿体;矿石品位;采幅;经济模型

0 引言

金、钨及锡等稀贵金属,常赋存于极薄矿脉,其厚度常小于0.8 m^[1]。对于该类矿体资源,国内常采用浅孔留矿法、削壁充填法及分段空场法开采^[2-3]。如茅坪钨矿^[4]、鑫达金矿^[5]等采用浅孔留矿法,其采矿成本约为30元/t,生产能力约为50 t/d,贫化率约为60%;三河铅锌矿^[6]、瑶岗仙钨矿^[7]等采用削壁充填法,其采矿成本约为60元/t,生产能力约为20 t/d,贫化率约为20%;首云铁矿^[8]、鑫汇金矿^[9]等采用分段空场法,其采矿成本约为20元/t,生产能力约为100 t/d,贫化率约为80%。

通过上述案例的技术经济比较,可发现采场采幅、矿石品位及贫化率等指标对采场回采的经济效益有极大的影响。因此,对于极薄矿脉,采用经济方法评价采矿工艺参数的合理性是极其重要的。

本文以广西某钨矿极薄矿体回采为工程背景,建立以采幅和矿石品位为核心参数的经济模型,评价极薄矿脉的可回采性,为矿山设计合理的回采参数提供依据。

1 工程技术条件

1.1 工程地质条件

广西某钨矿具工业价值的矿脉有81条,脉幅一

般为0.1~1.5 m,工业矿脉平均脉幅为0.42 m,平均倾角为70°,顶底板围岩主要为灰岩,矿岩硬度系数 $f=8\sim 12$,整体稳定性较好。

石英脉状矿体产状变化复杂,常见有缩小膨胀、错动弯曲和分支复合等现象,变化方向具有极大的不确定性。

1.2 矿脉分布特征

对该钨矿正回采生产中段矿脉进行统计和分析,见图1和表1。由图1和表1可知,该中段共有13条穿脉,其中脉幅小于0.3 m的矿量占该中段矿量的32%,脉幅在0.3~0.4 m的矿量占该中段矿量的25%,脉幅大于0.4 m的矿量占该中段矿量的43%。

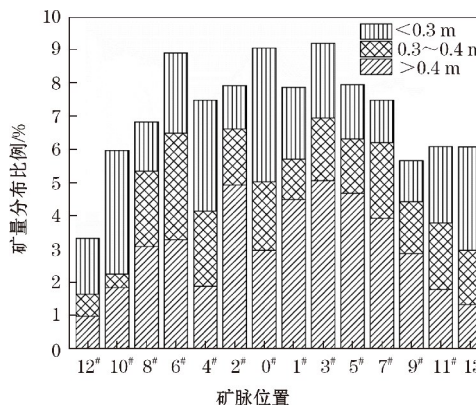


图1 矿脉分布

* 收稿日期: 2023-07-26

基金项目: “十四五”国家重点研发计划项目(2019YFC1904700)。

作者简介: 刘恩彦(1986—),男,浙江舟山人,博士,高级工程师,主要从事充填采矿技术研究, E-mail: liuenyancsu@163.com。

表 1 矿量分布比例

矿脉厚度/m	矿量分布比例/%													
	12#	10#	8#	6#	4#	2#	0#	1#	3#	5#	7#	9#	11#	13#
>0.4	0.98	1.84	3.08	3.28	1.88	4.92	2.96	4.49	5.06	4.68	3.92	2.87	1.78	1.33
0.3~0.4	0.67	0.40	2.26	3.21	2.26	1.70	2.06	1.21	1.88	1.63	2.28	1.55	2.01	1.63
<0.3	1.67	3.73	1.48	2.41	3.34	1.30	4.03	2.17	2.25	1.64	1.28	1.24	2.29	3.11
小计	3.32	5.97	6.82	8.90	7.48	7.92	9.05	7.87	9.19	7.95	7.48	5.66	6.08	6.07

分析矿脉分布特征可发现,0.4 m 厚度以下的矿体约占 55%,比重较大,如不回采会造成矿产资源的损失,但进行矿体开采又可能无法产生足够的经济效益,造成亏损。因此,需要通过技术经济综合评价该部分矿体的可回采性,为该部分极薄矿体的开采提供依据。

1.3 采矿方法

该矿主要采用浅孔留矿法方法^[10],如图 2 所示。采场沿走向布置,长为 50 m,宽为矿体水平厚度,同时为满足人员、设备作业空间需求,采场最小宽度为 1.0 m,高 50 m,顶柱厚 3 m,底柱厚 5 m,间柱厚 6 m。主要采切工程为沿脉运输巷、人行通风天井、采场联络道、充填井等。采用自下而上分层回采,分层高度为 2.5 m,在每分层开展凿岩、通风、出矿、平场及松石处理等作业。

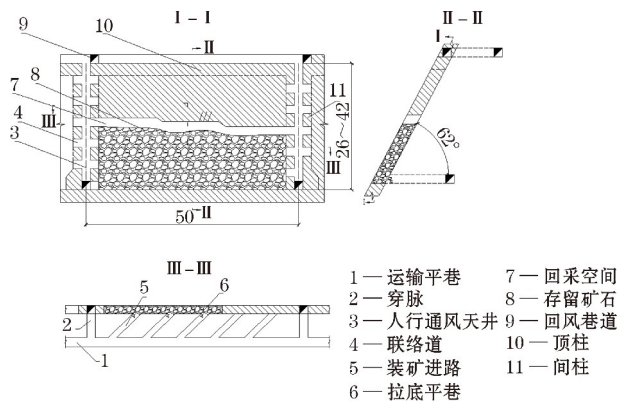


图 2 浅孔留矿法(单位:m)

2 采矿经济模型

极薄矿体的厚度基本在 0.8 m 以下,故回采过程中还需要开挖大量围岩。如采幅过小,则采场生产能力小,生产中段所布采场数多,同时井下的生产人员及设备也需要增加,增加矿山生产管理的难度;如采幅增大,则增加回采贫化率,开挖废石量增多,使运输成本增加,影响采矿经济效益。因此,通过经济技术指标建立采矿经济模型,综合比较确定

合理采幅,是保障采矿作业取得最佳经济效益的关键措施。

2.1 采幅系数

为便于采矿过程中采幅的优化设计,本文定义采幅系数 K_m ,即为采场宽度与矿体厚度的比值,其计算公式为:

$$K_m = \frac{w}{w_k} \tag{1}$$

式中, K_m 为采幅系数; w_k 为矿体厚度,m; w 为采场厚度,m。

极薄矿体回采过程中,采幅系数的增大会增加废石的混入,从而增加矿石贫化率,其计算公式为:

$$\beta = 1 - \frac{1}{K_m} \tag{2}$$

式中, β 为矿石贫化率。

2.2 综合地质品位

该矿为多金属矿床,主金属为钨,锡为伴生金属,为便于计算,根据等值原理将伴生金属换算为主金属钨,并计算矿块的综合地质品位。

伴生金属品位换算公式^[11]为:

$$K = \frac{\epsilon_2 p_2}{\epsilon_1 p_1} \tag{3}$$

式中, K 为伴生金属品位换算系数; ϵ_1 为钨回收率,%; ϵ_2 为锡回收率,%; p_1 为钨价格,元/t; p_2 为锡价格,元/t。

矿块综合地质品位计算公式为:

$$\alpha = \alpha_w + K\alpha_s \tag{4}$$

式中, α 为矿块综合地质品位,%; α_w 为钨平均品位,%; α_s 为锡平均品位,%。

2.3 经济模型

针对极薄矿体,矿体厚度及品位对可采矿量的圈定范围影响极大,需要采用盈亏平衡法计算不同采幅系数的单位矿石收益,得出矿石贫化率、矿石品位及采幅系数的数学模型,寻求获取最大利益的临界点,进一步确定最适合的采幅。

单位矿石的综合生产成本主要为采矿成本、运输成本、抛废成本和其他成本,其计算公式为:

$$C = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 \quad (5)$$

$$C_1 = -10K_m + 310 \quad (6)$$

$$C_2 = 5K_m + 10 \quad (7)$$

$$C_3 = 3K_m + 6 \quad (8)$$

式中, C 为综合生产成本,元/t; C_1 为采矿成本,元/t; C_2 为运输成本,元/t; C_3 为抛废成本,元/t; C_4 为其他成本,元/t。

单位矿石的经济效益主要为金属销售收入和废石加工收入,其计算公式为:

$$P = P_1 + P_2 \quad (9)$$

$$P_1 = \frac{\alpha \varepsilon_1 p_1}{100K_m} \quad (10)$$

$$P_2 = \frac{0.15(K_m - 1)p_f}{K_m} \quad (11)$$

式中, P 为经济效益,元/t; P_1 为金属销售收入,元/t; P_2 为废石加工收入,元/t; p_f 为废石价格,元/t。

根据盈亏平衡法^[12],当单位矿石的综合生产成本和经济效益相等时($C = P$),即可求得临界点。因此,采矿经济模型为:

$$\alpha = (-200K_m^2 + (32\,600 + 100C_4 - 15p_f)K_m + 15p_f) / \varepsilon_1 p_1 \quad (12)$$

3 采矿经济模型的应用

根据调研统计,该矿的采矿成本为 280 元/t,运输成本为 25 元/t,抛废成本为 15 元/t,其他成本为 10 元/t;钨回收率为 80%,销售价格为 20 万元/t,锡回收率为 65%,销售价格为 13 万元/t,废石销售价格为 60 元/t。因此,可建立适用该矿的采矿经济模型:

$$K_m = 5.2\alpha - 0.15 \quad (13)$$

3.1 经济模型的变化规律

3.1.1 综合地质品位对采幅系数的影响

采幅系数和综合地质品位呈线性关系,随着综合地质品位的增加而增大,如图 3 所示。当矿脉综合品位为 0.6% 时,矿块采幅系数为 3.11;当矿脉综合品位为 1.2% 时,矿块采幅系数为 6.05;当矿脉综合品位为 1.8% 时,矿块采幅系数为 9.21。

3.1.2 综合地质品位对贫化率指标的影响

综合地质品位对于极薄矿体回采中可接受的贫化率指标有极大影响,两者呈指数关系,如图 4 所示。当矿脉综合品位为 0.5% 时,矿块回采时的最

大贫化率为 59.05%;当矿脉综合品位为 1.0% 时,矿块回采时的最大贫化率为 80.13%;当矿脉综合品位为 1.5% 时,矿块回采时的最大贫化率为 86.88%;当矿脉综合品位为 2.0% 时,矿块回采时的最大贫化率为 90.21%。

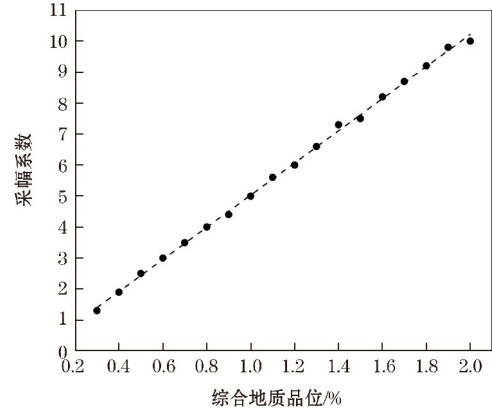


图 3 采幅系数变化规律

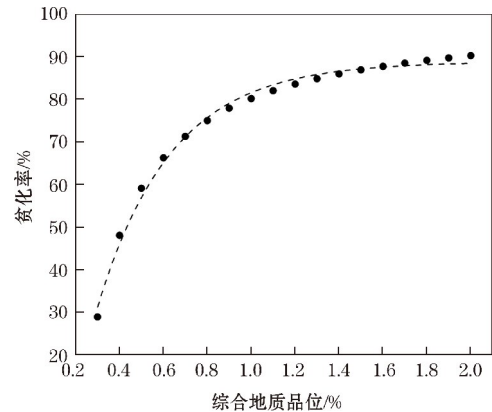


图 4 贫化率变化规律

3.1.3 综合地质品位和脉幅对采幅的影响

采幅是极薄矿体开采的重要技术参数,主要受矿体脉幅和综合地质品位的影响,矿体脉幅越大,综合地质品位越高,则采幅越大,如图 5 所示。其中,综合地质品位对采幅的影响较高,而脉幅对采幅的影响相对较低,尤其是低品位区间,综合地质品位是占主导地位的,当矿脉处于高品位区间时,综合地质品位和脉幅的影响效果趋于一致。

3.2 采矿经济模型的应用

以该矿的生产中段为主体研究对象,开展脉幅、矿石品位等生产指标的调研统计分析。并选取 20 个典型的矿脉,采用上述采矿经济模型进行具体分析。选取采幅参数,结合该矿采矿方法要求的采场结构参数要求,对试验采场进行综合评价,确定最适宜的采幅参数,如表 2 所示。

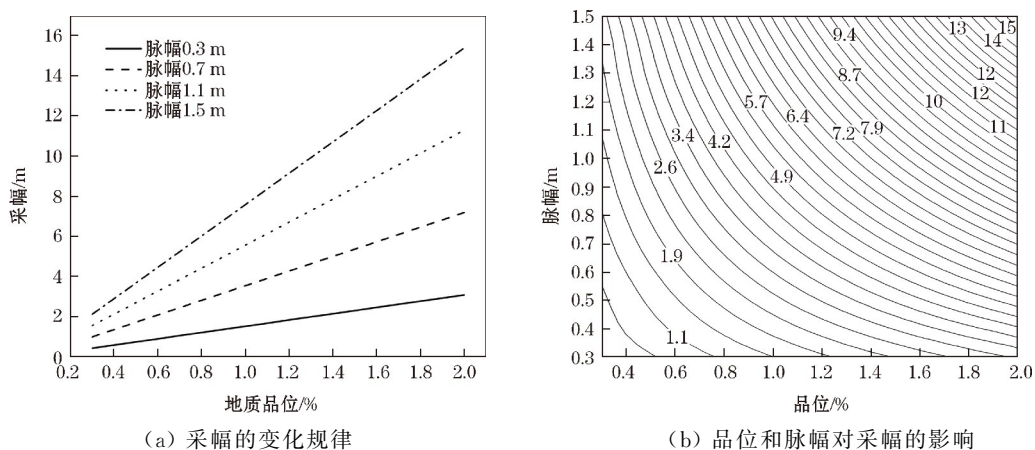


图5 品位和脉幅对采幅的影响规律

表2 采幅参数

采场编号	平均脉幅/m	钨品位/%	锡品位/%	综合品位/%	采幅系数	采幅/m	推荐采幅/m
2446	0.89	0.286	0.021	0.29	1.36	1.21	1.2
3568	1.22	1.891	0.036	1.91	9.78	11.93	11.0
4260	0.74	0.202	0.061	0.23	1.05	0.77	—
3624	0.48	0.248	0.049	0.27	1.25	0.60	—
4911	0.70	0.548	0.021	0.55	2.71	1.90	1.5
4264	1.30	1.561	0.055	1.59	8.12	10.55	10.0
4261	0.53	0.684	0.103	0.74	3.70	1.96	1.5
3581	1.00	0.389	0.039	0.41	1.98	1.98	1.5
1201	0.52	0.927	0.023	0.94	4.74	2.46	2.0
3324	1.19	1.429	0.036	1.44	7.34	8.73	8.0
4262	1.24	0.528	0.038	0.54	2.66	3.30	3.0
8091	1.04	0.513	0.091	0.56	2.76	2.87	2.5
8079	0.57	0.986	0.044	1.01	5.10	2.91	2.5
1357	0.36	0.104	0.003	0.11	0.42	0.15	—
2440	0.43	0.323	0.038	0.34	1.62	0.70	—
4268	0.76	1.371	0.013	1.37	6.97	5.30	5.0
1213	0.59	0.753	0.054	0.78	3.91	2.30	2.0
4263	0.43	0.653	0.136	0.72	3.59	1.54	1.5
3335	0.79	0.959	0.073	1.00	5.05	3.99	3.5
2868	0.58	0.310	0.026	0.32	1.51	0.88	—

其中4260等5个采场的采幅过小,无法同时满足技术和经济方面的要求,故不具备开采价值。如3624采场,其平均脉幅为0.48 m,综合地质品位为0.27%,按采矿经济模型选取的采幅为0.6 m,而采场回采的最小设计宽度为1.0 m,未满足采矿技术标准,故该采场不宜开采。而2446等15个采场,在具备经济效益的条件下,根据现场采矿工程需求,

推荐了适宜的采幅,如4911采场,其平均脉幅为0.7 m,综合地质品位为0.55%,按采矿经济模型选取的采幅为1.9 m,结合现场采矿方法设计要求,确定该采场的采幅为1.5 m。

4 结论

(1) 分析广西某矿的工程技术条件,其脉状矿

体产状变化复杂,平均脉幅为 0.42 m,其中 0.4 m 厚度以下的矿体约占 55%,主体采矿方法为浅孔留矿法。

(2) 采用矿石综合地质品位、脉幅及采幅等经济技术指标,定义采幅系数,采用盈亏平衡法,建立采矿经济模型。

(3) 矿体脉幅和综合地质品位对采幅均有影响。当矿脉品位较低,综合地质品位影响较大;当矿脉品位较高,综合地质品位和脉幅的影响效果相差不大。

(4) 根据该矿的经济技术指标调研结果,建立适宜该矿的采矿经济模型,并结合采矿方法的采场结构参数要求,综合评价选取的典型试验采场,确定最适宜的采幅参数。

参考文献:

- [1] 龚华平. 探讨急倾斜薄矿体开采技术及趋势[J]. 建材与装饰, 2019(10):221-222.
- [2] 齐发富,李学锋,宋子贺,等. 急倾斜复杂薄矿体高效采矿法技术研究[J]. 矿业研究与开发,2021,41(4):1-5.
- [3] 廖九波,范文录. 急倾斜极薄矿脉机械化开采新技术及应用[J]. 矿业研究与开发,2019,39(7):10-14.
- [4] 郭裕民,钟芳权,周建荣,等. 缓倾斜极薄矿体采矿方法研究[J]. 中国矿业,2023,32(增刊1):328-332+349.
- [5] 秦长旭,秦长琦. 留矿全面法在鑫达金矿倾斜薄矿体中的应用[J]. 现代矿业,2023,39(5):56-59.
- [6] 李永新,王庆磊,吕军恩. 呼伦贝尔山金矿业有限公司急倾斜极薄矿体采矿方法研究[J]. 黄金,2023,44(2):19-21.
- [7] 阳雨平,林翔,邓星星,等. 瑶岗仙钨矿倾斜极薄矿体爆破参数优选与采矿方法改进[J]. 有色金属工程,2014,4(5):52-55.
- [8] 陈彬,郭广贤. 首云铁矿孤立薄矿体开采方法研究[J]. 金属矿山,2011(4):28-31.
- [9] 李正灿,刘允秋,于向波,等. 缓倾斜极薄矿体安全高效采矿方案研究[J]. 现代矿业,2019,35(8):67-69.
- [10] 黄家贤,宋甫,危流永,等. 珊瑚黑钨矿浅孔留矿法优化研究[J]. 采矿技术,2015,15(1):10-13.
- [11] 李金珊,张延凯,连民杰,等. 多金属露天矿边界品位影响因素分析及评价方法[J]. 中国矿业,2018,27(2):70-73.
- [12] 邵尼华,潘懿,阮琰文. 敖包锌矿矿山动态最优边界品位研究[J]. 采矿技术,2019,19(5):171-173.