谦比希铜矿涌水水化学特征及防治技术应用*

张兵[1],张梦昭[2],梁权宇[1],樊勇[2],孙伟[2],钱涵[2]

(1.中色非洲矿业有限公司, 赞比亚 基特韦 50100;
2.中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038)

摘要:谦比希铜矿是非洲典型的高涌水量矿山,其矿坑涌水水文地球化学研究对地下水防治工程至关重要。采集地表河水样2组,矿坑涌水样16组,结合Piper三线图、离子比例系数、Phreeqc模拟等方法,解析了水化学特征及主控因素,揭示了主矿体、西矿体涌水水源以及水化学演化机制。结果表明,矿坑涌水水化学类型以SO_4-Ca·Mg型为主,水化学组成主要受石膏和白云岩的溶解控制,少量源于长石的溶解;燧石白云岩含水层作为主要充水水源,区域范围内分布连续;矿区范围内地下水从西矿体区域向主矿体区域径流,主矿体区域受崩落法采矿影响,燧石白云岩含水层直接补给矿体含水层;石英岩隔水层分布不均,部分区段存在厚度变薄或缺失的情况,自然条件下燧石白云岩含水层与矿体含水层存在水力联系。结合矿区现状和涌水水化学特征提出"封堵为主,疏排为辅"的防治对策,为井下防治水及安全生产提供依据。

关键词:谦比希铜矿;水化学特征;充水水源;防治技术

中图分类号:TD74 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2025)07-0227-07

Hydrochemical Characteristics and Prevention and Control Technology Application of Chambishi Copper Mine Water Inrush

ZHANG Bing[1], *ZHANG Mengzhao*[2], *LIANG Quanyu*[1], *FAN Yong*[2], *SUN Wei*[2], *QIAN Han*[2]

(1.NFC Africa Mining Plc, Kitwe 50100, Zambia;
2.China ENFI Engineering Corporation, Beijing 100038, China)

Abstract: Chambishi Copper Mine is a typical high-water-inrush mine in Africa, and the hydrogeochemical study of its pit water inrush is crucial for groundwater prevention and control engineering. A total of 2 groups of surface river water samples and 16 groups of pit water inrush samples were collected. Using a combination of Piper trilinear diagrams, ionic ratio coefficients, and Phreeqc modeling, the hydrochemical characteristics and main controlling factors were analyzed, the water inrush sources of the main and western ore bodies were revealed, as well as the hydrochemical evolution mechanism. The results show that the hydrochemical type of pit water inrush is mainly SO_4-Ca·Mg type, and the hydrochemical composition is mainly controlled by the dissolution of gypsum and dolomite, with a small amount derived from the dissolution of feldspar. The chert dolomite aquifer, serving as the main water filling source, is continuously distributed within the regional scope. Within the mining area, groundwater flows from the western ore body area to the main ore body area. Affected by the caving mining method in the main ore body area, the chert dolomite aquifer directly recharges the ore body aquifer. The quartzite aquiclude is unevenly distributed, with thinning or absence in some sections. Under natural conditions, there is a hydraulic connection between the chert dolomite aquifer and the ore body aquifer. Combining the current situation of the mining area and the hydrochemical characteristics of water inrush, the prevention and control strategy of "blocking as the main approach and drainage as the auxiliary" has been proposed, providing a basis for underground water prevention and safety production.

Key words: Chambishi Copper Mine, Hydrochemical characteristic, Water filling source, Prevention and control technology

0 引言

非洲由于地形平坦、地质构造复杂、降雨充沛等,出现了众多的大水矿山。谦比希铜矿作为水文地质条件复杂的大水矿山,其地下水涌水问题给矿山开采和安全带来了严峻挑战,加之高昂的

* **收稿日期**:2024-03-06
基金项目:非洲典型大水地采矿山地下水一体化防治关键技术与示范项目(YZ2306)
作者简介:张兵(1969—),男,安徽芜湖人,硕士研究生,高级工程师,主要从事金属矿山深部采矿方法技术研究。E-mail:441721251@qq.com
通信作者:张梦昭(1997—),男,河北石家庄人,硕士研究生,工程师,主要从事矿山防治水技术研究。E-mail:zhangmz@enfi.com.cn

排水费用,对社会、经济和环境都造成一定程度的影响。为了有效预防水害事故发生,保证矿山的正常开采,节约排水成本,必须查明矿区地下水的补径排条件和矿坑充水因素,并采取针对性的防治水措施[1]。

地下水的水化学组分作为其天然标记,携带着记录地下水形成和演化过程的重要地球化学信息。水文地球化学研究是分析地下水的补给来源和径流途径的有效手段[2],目前已应用到众多矿区充水条件研究和充水水源识别的工程实践中[3-7]。谦比希主矿体、西矿体作为典型的大水复杂矿山,由于其独特的地理位置与样品测试的局限性,目前对涌水来源及演化机制的研究还很缺乏,无法采取针对性的防治水措施。随着矿区继续向深部开采,水头差与排水量不断增大成为制约矿山开发的主要因素。因此,亟需查明矿区充水来源与径流途径,建立水文地质概念模型,以指导矿山防治水和安全生产工作,并为同类型矿区提供参考借鉴。

1 矿区概况

研究区属于内陆热带草原气候,全年平均气温为 19.9～21 ℃,年平均降雨量为 1 118.7 mm,最大降雨量为 1 734 mm,最小降雨量为 885.2 mm,月最大降雨量为 569.5 mm,降雨集中在 11 月中旬至次年 4 月。降雨过程多为阵雨,降雨量为 10～40 mm。矿区内主要河流为穆瓦巴希(Mwambashi)河以及 3 条分支溪流,分别为 Chambishi 河、Lusala 河和 Luela 河。

谦比希盆地构成区域水文地质单元,盆地周边的基底隔水层形成区域隔水边界。主矿区、西矿区位于谦比希盆地的北部。矿区北侧(下盘)为区域隔水边界的一部分,靠近地表水和地下水的补给区。矿区东、西、南三面均有连续含水层分布。地表水和大部分地下水接受大气降雨补给,通过蒸发蒸腾,或由当地溪沟汇入。采矿产生的露天坑和崩落裂隙带增加了地下水的补给途径,主矿区崩落裂隙带贯通上、下罗恩含水层,形成“统一含水体”,使其水文地质条件变得更加复杂。

矿区主要含水层为穆瓦夏亚群页岩和白云岩互层含水层、上罗恩亚群的燧石白云岩含水层、具构造角砾的白云岩含水层和含硬石膏的白云岩含水层,以及下罗恩亚群的矿体与邻近的上、下盘围岩组成的矿体含水层。上、下罗恩亚群含水层之间不连续,被下罗恩亚群顶部的上部石英岩隔水层相隔。对矿坑充水有直接影响的含水层为燧石白云岩含水层和矿体含水层[8]。

目前矿坑涌水量约为 51 000 m^3/d,矿坑涌水基本不受季节影响,主矿体矿坑涌水量约为 43 000 m^3/d,西矿体矿坑涌水量约为 8 000 m^3/d。矿区主要的防治水措施为疏干排水,排水费用高昂,主矿体区域地下水位基本位于 770 m 水平,为矿区最低水位,东西端水位均处于较高位置。

2 样品采集与测试

为查明主矿体、西矿体涌水来源与地下水的演化过程,对矿区周边地表河流以及井下主要中段矿坑涌水进行取样分析,在不同深度、不同位置进行矿坑涌水取样,采样点的平面和空间范围尽可能全面覆盖主矿体和西矿体。共采集地表河流样品 2 组,井下矿坑涌水 16 组(其中主矿体矿坑涌水 12 组、西矿体矿坑涌水 4 组)。每个采样点采集 3 瓶水样,其中一瓶加入优级纯 HNO_3 至 pH 低于 1,用于阳离子分析;一瓶用于阴离子分析;一瓶备用。温度、pH、电导率(EC)和总溶解性固体(TDS)均在现场测定。F^-、Cl^-、Br^-、NO_3^-、SO_4^{2-} 等阴离子含量采用离子色谱仪测定(检测限为 0.01 mg/L);HCO_3^- 和 CO_3^{2-} 按照《地下水分析方法第 1 部分:一般要求》(DZ/T 0064.1—2021)要求进行滴定法测定。金属和类金属元素含量采用电感耦合等离子体光谱仪测定(检测限为 0.01 mg/L)。矿坑涌水水化学组分测试结果见表 1,阴、阳离子电荷平衡误差基本控制在±5%以内。

表 1 矿坑涌水水化学组分测试结果

Table 1 Test result of water chemical composition of mine gushing water mg/L

编号	采样位置	pH	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	HCO_3^-	CO_3^{2-}	Cl^-	F^-	NO_3^-	SO_4^{2-}
Z01	主矿体 500 m 1560 勘探线泄水	7.33	25.20	28.50	<0.01	9.20	179.0	5.0	0.61	<0.011	<0.055	37
Z02	主矿体 500 m 1980 勘探线泄水	7.65	143.20	32.30	<0.01	9.00	149.0	<5.0	2.21	<0.011	13.730	351
Z03	主矿体 500 m 1380 勘探线泄水	7.93	292.80	26.80	<0.01	6.80	59.0	<5.0	1.07	<0.011	<0.055	772
Z04	主矿体 650 m 43# 溜井泄水	7.61	72.40	46.10	<0.01	17.40	36.0	10.1	1.90	<0.011	12.838	320

续表

编号	采样位置	pH	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^{+}	K^{+}	HCO_3^-	CO_3^{2-}	Cl^-	F^-	NO_3^-	SO_4^{2-}
Z05	主矿体 683 m 泄水钻孔	7.23	40.60	33.60	<0.01	7.80	<5.0	<5.0	0.45	<0.011	<0.055	237
Z06	主矿体 700 m 风井泄水	8.38	646.30	95.30	6.55	20.65	174.0	<5.0	5.20	0.150	11.097	1 559
Z07	主矿体 800 m 2760 勘探线钻孔	7.58	227.00	29.00	<0.01	8.00	231.0	<5.0	0.97	<0.011	<0.055	483
Z08	主矿体 800 m 800 勘探线泄水	7.84	373.00	29.40	<0.01	8.60	133.0	<5.0	4.06	<0.011	2.308	913
Z09	主矿体 829 m 东端四号采联	7.57	441.00	24.80	<0.01	17.00	138	<5.0	4.41	<0.011	1.034	1 044
Z10	主矿体 878 m 71# 溜井旁	7.85	98.19	35.30	<0.01	4.00	56.0	20.2	0.34	<0.011	<0.055	306
Z11	主矿体 878 m 73# 拦水坝蓄水	8.13	139.34	36.70	<0.01	3.60	210.0	10.1	0.43	<0.011	6.858	299
Z12	主矿体 878 m 水仓	7.91	155.20	74.90	<0.01	6.00	<5.0	<5.0	1.99	<0.011	23.753	660
X01	西矿体 600 m 4380 勘探线钻孔	7.34	146.00	5.10	<0.01	4.20	138.0	<5.0	0.22	<0.011	<0.055	267
X02	西矿体 700 m 4080 勘探线钻孔	7.13	253.00	47.40	<0.01	4.00	103.0	<5.0	0.35	<0.011	<0.055	719
X03	西矿体 700 m 4200 勘探线钻孔	7.29	109.36	14.90	<0.01	4.80	210.0	10.1	0.49	<0.011	<0.055	148
X04	西矿体 700 m 3000 勘探线钻孔	7.62	101.80	33.20	<0.01	6.00	267.0	10.1	0.04	<0.011	<0.055	159
H01	Lusala 河	7.72	135.20	18.10	<0.01	4.40	144.0	<5.0	1.10	<0.011	0.397	288
H02	Chambishi 河	7.95	392.80	34.20	<0.01	5.40	215.0	<5.0	0.57	0.088	<0.055	910

3 结果与分析

3.1 水化学组分分析

Piper 三线图因标准化程度高、可比性强,被广泛用于水化学类型划分及水化学演变过程分析[9-10]。图 1 为 Piper 三线图,由图 1 可知,主矿体矿坑涌水、西矿体矿坑涌水和地表河流水样均以 SO_4-Ca·Mg 型为主,其次为 HCO_3·SO_4-Ca·Mg 型,基本上所有样品中的 Ca^{2+} 毫克当量百分数在 80%以上,绝大多数样品的 SO_4^{2-} 毫克当量百分数在 50%以上,说明 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 是研究区控制水化学演化的主导因子。

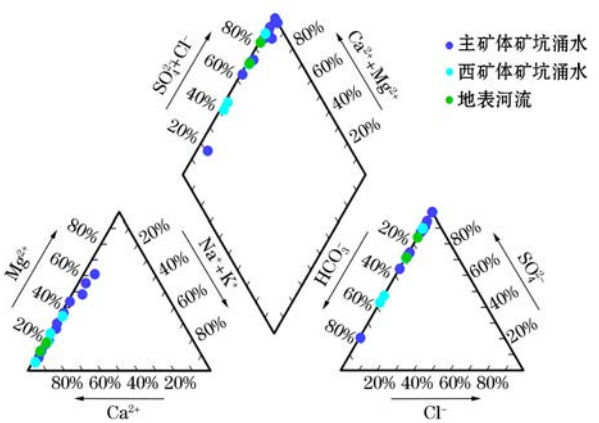


图 1 Piper 三线图

Fig.1 Piper triplet diagram

Schoeller 图是一种常用的水化学特征图示方法(见图 2),可用来分析水样中主要离子浓度变化和水化学变化趋势[11-12]。从图 2 可以看出,地表河流与主矿体、西矿体矿坑涌水主要阴、阳离子含量的波动趋势基本一致,说明三者在水化学组分上具有很高的相似性,推测三者具有一定的水力联系且补给来源密切相关。

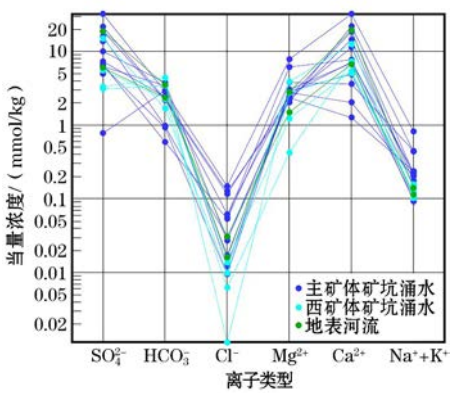


图 2 Schoeller 图

Fig.2 Schoeller diagram

主矿体、西矿体矿坑涌水主要水化学组分含量箱型图如图 3 所示。由图 3 可知,主矿体矿坑涌水中 Ca^{2+}、Mg^{2+} 和 SO_4^{2-} 含量整体上略高于西矿体,而 HCO_3^- 含量则显著低于西矿体。主矿体矿坑涌水与西矿体矿坑涌水水力联系密切,结合矿区地下水的水位分析,矿区范围内地下水从西矿体区域流向主矿体区域。主矿体区域因崩落法开采破坏隔水层,燧石白云岩含水层与矿体含水层形成直接水力相通,导致涌水中燧石白云岩含水层地下水贡献比例显著升高。而西矿体区域燧石白云岩与矿体含水层之间的石英岩隔水层未受采矿扰动,保持完整隔水性。因此,西矿体矿坑涌水以矿体含水层为主。两矿体水文地质结构的差异导致两者水化学组分上存在一定差异。

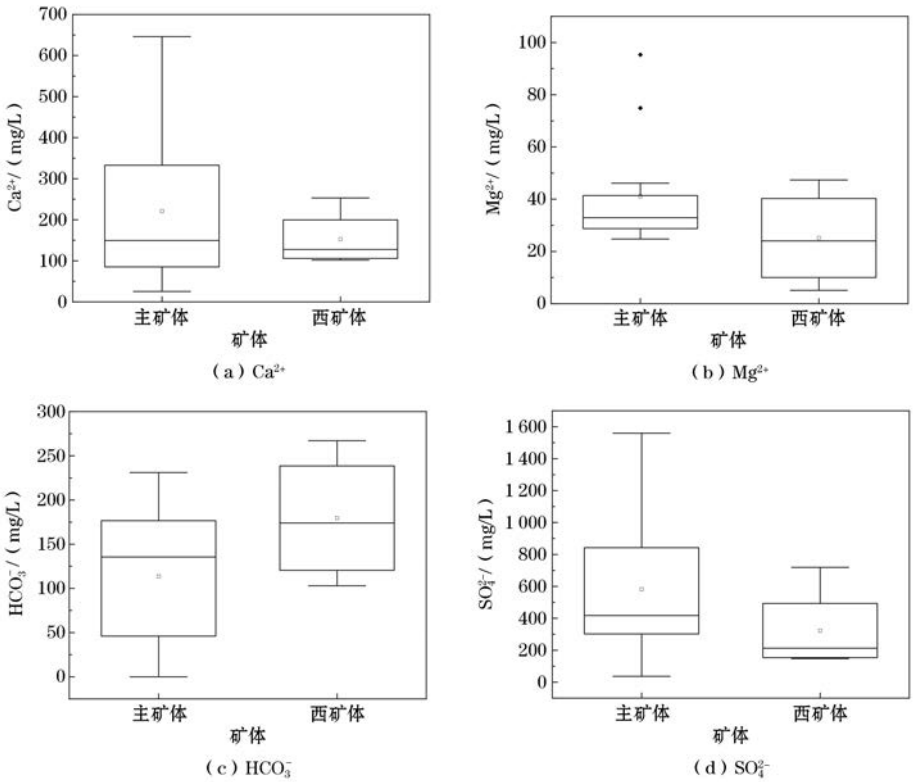


图 3 矿坑涌水主要水化学组分箱型图

Fig.3 Box type diagrams of main hydrochemical components of mine gushing water

3.2 水化学组分演化机制

大气降水、区域地质构造、水动力条件及人类活动等因素共同影响着地下水的水化学特征,反过来,水化学特征又能储存和逆向反映以上复杂的信息[13]。地下水与含水层岩石之间进行着长期的水-岩相互作用,该过程中离子的比值关系可以揭示水环境中主要离子来源及演化过程[14-15]。

通过水化学类型分析得知,Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 是研究区控制水化学演化的主导因子。从主矿体矿坑涌水样品中 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 的比值图(见图 4)来看,绝大多数样品位于 1∶1 比值线以上。其原因为上罗恩组燧石白云岩和石膏地层在同时发生溶解的过程中,石膏($CaSO_4$)的溶解增大了 Ca^{2+} 的含量,导致白云岩溶解达到饱和,从而析出 $CaCO_3$ 沉淀形成钙化,由于一部分 Ca^{2+} 离子沉淀,SO_4^{2-} 的含量略大于 Ca^{2+}。溶解方程式如下:

$$Ca^{2+}/Mg^{2+}+2HCO_3^- \rightarrow$$
$$CO_2\uparrow+H_2O+Ca/MgCO_3\downarrow$$

其中 Z07 样品位于 1∶1 比值线以下。其原因为该水样采集于 800 m 2760 勘探线钻孔出水,钻孔未揭露燧石白云岩含水层,涌水主要来源于矿体含水层,主要矿物成分为云母、石英和长石,长石的溶解导致 Ca^{2+} 含量增大。溶解方程式如下:

$$CaO\cdot 2Al_2O_3\cdot 4SiO_2+2CO_2+5H_2O\rightarrow$$
$$2HCO_3^-+Ca^{2+}+2H_4Al_2Si_2O_9$$

从西矿体矿坑涌水样品中 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 比值图(见图 4)来看,大部分样品位于 1∶1 比值线以下。这是因为西矿体涌水点均为钻孔出水,主要含水层为下罗恩组矿体含水层,长石溶解导致 Ca^{2+} 含量增大。其中样品 X02 位于 1∶1 比值线上方,与上罗恩组含水层地下水水化学特征类似,由于该区域附近未受崩落法采矿的影响,推测该处的矿体含水层与燧石白云岩含水层两者之间的石英岩隔水层厚度薄,两含水层有直接水力联系。

地表河流样品均位于 1∶1 比值线附近,与主矿体、西矿体矿坑涌水水化学特征相似,说明周边地表河流与矿区地下水水力联系十分密切。天然条件下矿区地下水沿地形坡向由北向南径流,最终排泄于穆瓦巴希河。但由于矿区多年进行地下水疏干,地下水位大幅下降,周边河流同时会对矿区地下水进行补给,地表河流与矿坑涌水在水化学特征上高度相似。

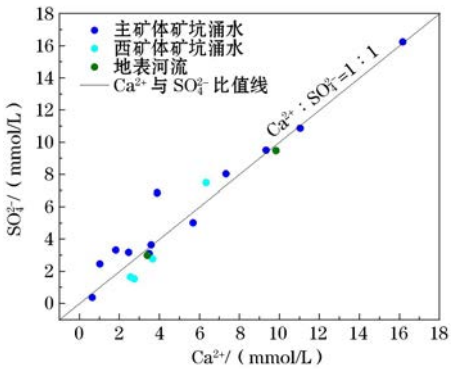


图 4 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 关系曲线

Fig.4 Relation curve between Ca^{2+} and SO_4^{2-}

饱和指数(Saturation Index, SI)可用于判断和研究矿物相对于地下水的饱和状态。为了更好地判断矿坑涌水的来源,通过 Phreeqc 对样品中白云石的饱和指数(见图 5)进行模拟计算,同时考虑水质分析存在一定的误差,一般认为矿物平衡状态饱和指数 SI 范围为−0.5～0.5[16]。由图 5 可知,主矿体矿坑涌水中大多数样品白云石饱和指数大于 0,处于饱和和过饱和状态,其中样品 Z06 和样品 Z11 饱和指数 SI 很高,在采样时发现该区域有明显的钙化现象,说明结果是可靠的,再次论证了主矿体矿坑涌水主要来自上罗恩组,主要流经的岩层为白云岩和石膏。主矿体矿坑涌水样品 Z01 和 Z04 中白云石未达到饱和状态,推测这两个样品中混合了多个含水层的来水,导致白云石未达到饱和状态。

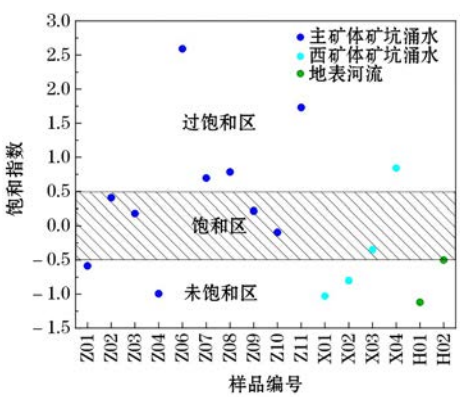


图 5 白云石饱和指数

Fig.5 Dolomite saturation index

西矿体矿坑涌水中白云石大部分位于未饱和区,仅 X04 样品处于过饱和区。由 X04 样品取样位置靠近主矿体崩落裂隙带区域,与燧石白云岩含水层水力联系较为密切,涌水中白云石呈现过饱和状态。其他样品距离主矿体区域较远,而且主要为矿体含水层地下水,主要溶解矿物为硅酸盐类矿物,故白云石处于未饱和状态。

地表河流中白云石均位于未饱和区。前文分析得知,矿坑涌水与地表河流水力联系密切,但由于地表河流直接接受大气降水的补给,对水化学组分具有一定的稀释作用,相对于矿坑涌水,地表河流的水化学组分含量较低。H02 样品相较于 H01 样品距离矿区更近,受矿坑涌水的影响更大,因此与矿坑涌水的水化学组分更为接近。

3.3 矿区水文地质概念图

根据对矿区基础水文地质条件以及涌水数据的梳理,结合水化学特征的解译和讨论,建立旨在表示矿区主要充水水源和充水途径的水文地质概念图[17],如图 6 所示。

矿区的主要补给来源有大气降水和地表河流。大气降水中有一部分通过地表崩落裂隙带下渗补给地下水,由于矿坑涌水量基本不随季节发生变化,说明矿区范围内大气降水不直接补给上罗恩组燧石白云岩含水层,而是通过局部流动系统补给上部含水层。矿区东、西、南三面均连续分布有含水层,矿区不是独立的地下水流系统,因此,矿区燧石白云岩含水层主要通过区域流动系统接受地下水补给。主矿体区域由于崩落法开采导致燧石白云岩含水层和矿体含水层之间的石英岩隔水层被破坏,燧石白云岩含水层与矿体含水层发生直接水力联系。

由于西矿体区域地下水位高于主矿体区域,矿区内地下水从西矿体区域向主矿体区域流动。西矿体涌水受区域地下水补给,涌水水化学特征与燧石白云岩地下水具有一定的相似性,说明天然状态下矿体含水层与燧石白云岩含水层之间的石英岩隔水层并不是连续分布,在部分区段存在厚度变薄或缺失的情况,导致燧石白云岩含水层直接或间接补给矿体含水层。

区域地下水沿区域水力梯度由北向南径流,最终排泄于穆瓦巴希河,但由于矿区多年进行地下水疏干,地下水位大幅下降,周边河流同时会对矿区地下水进行补给。

综上所述,区域燧石白云层含水层分布连续,且其地下水与西矿体涌水水化学特征具有一定的相似性。矿区范围地下水受大气降水、周边地表河流及区域地下水的补给,地下水由西矿体区域向主矿体

区域径流,区域地下水由北向南径流最终排泄于穆瓦巴希河。主矿体区域燧石白云岩含水层直接补给矿体含水层,西矿体区域仅在部分区段存在燧石白云岩含水层补给矿体含水层。

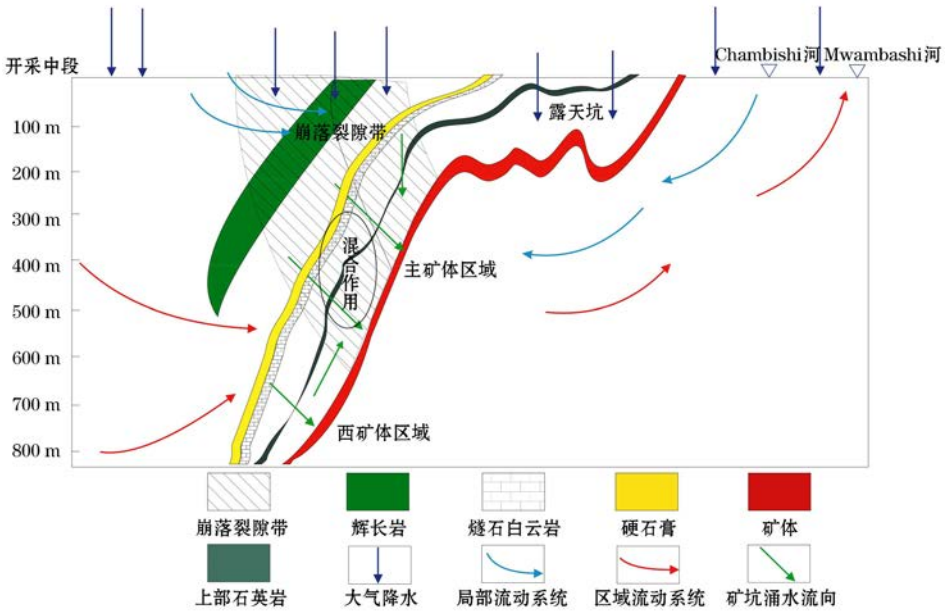


图 6 矿区简要水文地质概念图

Fig.6 Brief hydrogeological concept map of mine area

3.4 主矿体、西矿体防治水对策

目前,谦比希铜矿主矿体、西矿体主要的防治水措施为井下疏干。综合前文分析,矿区水文地质条件复杂,主矿体区域受崩落法采矿影响,燧石白云岩含水层与矿体含水层水力联系密切,加上矿区降雨丰富、地表河流众多、地下水补给充足,燧石白云岩含水层连续分布且富水性、导水性良好,因此难以有效疏干。基于此,建议矿区调整防治水策略,采取“以帷幕注浆为主,井下疏干为辅”的综合防治措施。

尽管矿体含水层与燧石白云岩含水层之间存在天然的石英岩隔水层,但主矿体区域隔水层已遭严重破坏,且西矿体区域地下水水化学特征显示其亦受到燧石白云岩含水层影响。表明天然隔水层的连续性差、厚度不均,部分区段存在厚度薄或缺失的情况。因此,有必要在矿体侧面(平行于矿体走向)构筑注浆帷幕。

此外,由图 6 可知,燧石白云岩含水层还会通过崩落裂隙带对矿体含水层进行垂向补给。因此,还需在崩落裂隙带区域构筑顶板截水帷幕,才能全面切断燧石白云岩与矿体含水层的水力联系。实施上述侧向帷幕与顶板帷幕工程后,矿区深部开采时仅需疏干矿体含水层内部的水即可,这将显著降低后期生产中的排水压力和排水成本,从根本上改善矿区水文地质条件,实现长期稳定的防治水目标。

4 结论

(1) 谦比希铜矿主矿体、西矿体矿坑涌水和周边地表河流的主要水化学类型为 SO_4-Ca·Mg 型水,Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 是研究区控制水化学演化的主导因子。主矿体涌水、西矿体涌水和周边地表河流的水化学特征具有高度相似性,表明三者之间存在密切的水力联系。

(2) 矿坑涌水主要来源于上罗恩组燧石白云岩含水层,一部分来源于矿体含水层。其中,上罗恩组的白云岩和石膏的溶解是控制水化学特征与演化的主导因素;矿体含水层中硅酸盐类矿物(如长石)的溶解对水化学组分的形成也有一定贡献。

(3) 矿区地下水受大气降水、周边地表河流区域地下水的补给。主矿体区域燧石白云岩含水层与矿体含水层存在直接水力联系;在西矿体区域,燧石白云岩含水层仅在石英岩隔水层厚度薄或缺失的区段补给矿体含水层。矿区范围地下水由西矿体区域向主矿体区域径流。

(4) 矿坑涌水主要有两个来源:一是上部含水层通过崩落裂隙带垂向直接入渗补给矿坑;二是燧石白云岩含水层侧向径流补给矿坑。鉴于燧石白云岩含水层不易疏干,需要分别针对上述垂向入渗和侧向径流两个补给路径实施帷幕注浆,才能达到良好的防治水效果。

参考文献(References):

[1] 黄荷,陈植华,王涛,等.岩溶矿区水文地球化学特征及其水源指示意义[J].水文地质工程地质,2019,46(1):19-26.
HUANG He, CHEN Zhihua, WANG Tao, et al. Groundwater source identification incarbonate-hosted deposit using hydrogeochemistry, hydrogen and oxygen isotope method[J]. Hydrogeology & Engineering Geology,2019,46(1):19-26.

[2] 张梦昭,郭清海,刘明亮,等.山西忻州盆地地热水地球化学特征及其成因机制[J].地球科学,2023,48(3):973-987.
ZHANG Mengzhao, GUO Qinghai, LIU Mingliang, et al. Geochemical Characteristics and formation mechanisms of the geothermal waters in the Xinzhou basin, Shanxi Province[J]. Earth Science,2023,48(3):973-987.

[3] 杜金龙.潞安矿区中部煤矿充水水源水化学特征及水源识别意义[J].西北地质,2022,55(1):208-215.
DU Jinlong. Hydrochemical characteristics of water filling source in central Lu'an mining area and water source identification significance[J]. Northwestern Geology,2022,55(1):208-215.

[4] 黄望望.新集矿区地下水水文地球化学与环境同位素特征[D].合肥:安徽大学,2020.
HUANG Wangwang. Groundwater hydrogeochemistry and environmental isotope characteristics in Xinji mining area [D]. Hefei: Anhui University,2020.

[5] 代革联,薛小渊,牛超.基于水化学特征分析的象山矿井突水水源判别[J].西安科技大学学报,2017,37(2):213-218.
DAI Gelian, XUE Xiaoyuan, NIU Chao. Discrimination of water inrush source in Xiangshan coal mine based on chemical characteristics of groundwater[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology,2017,37(2):213-218.

[6] 石晓昕.汉中市五里坝硫铁矿区水化学特征及其形成机制研究[D].西安:长安大学,2022.
SHI Xiaoxin. Hydrochemical characteristics and formation mechanism of Wuliba pyrite mine in Hanzhong city[D]. Xi'an: Chang'an University,2022.

[7] 唐秀龙,王来斌,杨晓彤.杨柳煤矿主采10煤层充水条件分析及充水水源识别[J].煤炭技术,2014,33(7):32-34.
TANG Xiulong, WANG Laibin, YANG Xiaotong. Analysis on conditions for filling water and water source identification of water inrush from main coal seams of Yangliu Coal Mine [J]. Coal Technology,2014,33(7):32-34.

[8] 李占炎,王贻明,陈顺满.缓倾斜中厚破碎矿体采矿方法优化实践[J].采矿技术,2021,21(2):6-8+17.
LI Zhanyan, WANG Yiming, CHEN Shunman. Optimization practice of mining method for gently inclined medium-thick broken ore body[J]. Mining Technology,2021,21(2):6-8+17.

[9] 范立民,马万超,常波峰,等.榆神府矿区地下水水化学特征及形成机理[J].煤炭科学技术,2023,51(1):383-394.
FAN Limin, MA Wanchao, CHANG Bofeng, et al. Hydrochemical characteristics and formation mechanism of groundwater in Yushenfu mining area[J]. Coal Science and Technology,2023,51(1):383-394.

[10] 刘海,康博,管政亭,等.淮南煤矿区地表水和地下水水化学特征及控制因素[J].环境科学,2023,44(11):6038-6049.
LIU Hai, KANG bo, GUAN Zhengting, et al. Hydrochemical characteristics and control factors of surface water and groundwater in Huainan coal mine area [J]. Environmental Science,2023,44(11):6038-6049.

[11] MAGHRABY E, MAGDY M. Hydrogeochemical characterization of groundwater aquifer in Al-Madinah Al-Munawarah City, Saudi Arabia [J]. Arabian Journal of Geosciences,2015,8(6):4191-4206.

[12] 张雅,胡元平,陶良,等.武汉长江新城地下水化学特征及成因分析[J].环境科学学报,2021,41(3):1022-1030.
ZHANG Ya, HU Yuanping, TAO Liang, et al. Hydrochemical characteristic and formation mechanism in the Yangtze River demonstration district, Wuhan City[J]. Journal of Environmental Science,2021,41(3):1022-1030.

[13] MU Wenping, WU Xiong, WU Chu, et al. Hydrochemical and environmental isotope characteristics of groundwater in the Hongjiannao Lake Basin, Northwestern China [J]. Environmental Earth Sciences,2021,80(2):51.

[14] 孟令华.基于水化学和氢氧同位素的泰安城区岩溶地下水补给来源及演化过程[J].环境科学,2024,45(4):2096-2106.
MENG Linghua. Recharge source and evolution process of karst groundwater in Tai'an urban area based on hydrochemistry and hydrogen and oxygen isotopes [J]. Environmental Science,2024,45(4):2096-2106.

[15] 何金,丁华,白向飞,等.准东煤田大井矿区B_1煤中水溶态离子分布及赋存特征[J].煤炭转化,2023,46(5):1-11.
HE Jin, DING Hua, BAI Xiangfei, et al. Distribution and occurrence characteristics of water-soluble ions in B_1 coal in Dajing mining area of Eastern Junggar coalfield[J]. Coal Conversion,2023,46(5):1-11.

[16] 贺世芳,陈永春,谢毫,等.潘谢矿区灰岩地下水水化学特征与成因分析[J].能源环境保护,2020,34(1):37-43.
HE Shifang, CHEN Yongchun, XIE Hao, et al. Water chemistry characteristics and their causes of limestone groundwater in Panxie mining area [J]. Energy Environmental Protection,2020,34(1):37-43.

[17] 樊勇,张东红,钱涵,等.谦比希铜矿床水文地质特征和防治水对策[J].中国矿山工程,2020,49(1):21-26+41.
FAN Yong, ZHANG Donghong, QIAN Han, et al. The hydrogeological feature and ground water control measures at Chambishi copper mine[J]. China Mine Engineering,2020,49(1):21-26+41.