

国家自然科学基金资助项目

全国百篇优秀博士学位论文作者专项基金资助项目

煤矿酸性水地球化学

赵峰华 著

煤炭工业出版社

国家自然科学基金资助项目

全国百篇优秀博士学位论文作者专项基金资助项目

煤矿酸性水地球化学

赵峰华 著

煤炭工业出版社

·北京·

内 容 提 要

本书运用地球化学、环境化学、同位素地球化学和矿物学的原理和多种现代分析测试技术,对我国煤矿酸性矿井水的水化学特征与地球化学演化、有害微量元素特征、稀土元素特征、水文地球化学计算机模拟、酸性矿井水中砷的形态测定、酸性矿井水沉淀矿物“斯沃特曼铁矿”(Schwertmannite)、酸性矿井水中氢氧硫同位素特征、煤系非均质黄铁矿氧化动力学、黄铁矿氧化反应中有害元素的迁移特性、酸性水的形成条件等方面进行了较系统的研究。该书是关于煤矿酸性矿井水地球化学的第一本专著。

本书可作为环境地球化学、环境化学、水文地球化学、同位素地球化学等专业研究人员的参考书,也可供从事上述专业以及煤矿环境保护、金属矿环境保护等方面的研究生、工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

煤矿酸性水地球化学/赵峰华著. —北京:煤炭工业出版社, 2005

ISBN 7-5020-2675-4

I. 煤… II. 赵… III. 煤矿—酸性水—地球化学—研究—中国 IV. P641.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 055119 号

煤炭工业出版社 出版

(北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)

网址: www.cciph.com.cn

北京玥实印刷有限公司 印刷

新华书店北京发行所 发行

*

开本 787mm×1092mm¹/₁₆ 印张 13

字数 315 千字 印数 1—1,000

2005 年 6 月第 1 版 2005 年 6 月第 1 次印刷

社内编号 5446 定价 28.00 元

版权所有 违者必究

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,本社负责调换

前 言

我国是世界上煤炭产量和消耗量最大的国家。长期以来,煤炭在我国能源消耗结构中占 60% 以上。这一特点决定了在今后相当长的时期内,我国的能源消耗仍然是以煤为主,而且随着经济的快速增长,对煤炭的需求量还将进一步增长。然而,煤炭在开发过程中产生的大量酸性矿井水严重影响煤炭生产,对生态环境构成潜在危害,因此,国外产煤大国都非常重视对本国煤矿酸性矿井水的研究。目前,我国在这方面的研究还较薄弱。同时,我国煤炭资源丰富的北方煤矿区又是严重缺水地区,矿区能源开发与水资源紧张的矛盾已严重制约了煤炭工业的可持续发展。因此,开展对我国煤矿酸性矿井水地球化学演化及其环境影响的研究具有重要意义。

在作者主持的国家自然科学基金项目(40272128)和教育部全国百篇优秀博士论文作者专项基金项目(200045)的资助下,对我国的煤矿酸性矿井水进行了初步调查和研究,并对煤中硫含量低的山西大同煤矿集团公司四台煤矿和福建永安煤业有限总公司永安煤矿的酸性矿井水进行了较为详细的研究。项目的研究内容广泛,几乎涉及酸性矿井水的各个方面,包括酸性矿井水的赋存特征、酸性矿井水的水化学特征、有害微量元素特征、稀土元素特征,水文地球化学模拟、酸性矿井水中砷的形态测定、酸性矿井水沉淀矿物、酸性矿井水中氢氧硫同位素特征、煤系黄铁矿氧化动力学、黄铁矿氧化反应中有害元素的迁移特性等。本书正是在上述项目部分研究成果的基础上编写而成的,也是我国第一本较全面研究煤矿酸性水地球化学的专著。希望本书的出版不仅对推动我国煤矿酸性矿井水地球化学的深入研究起到积极作用,而且也期待对我国其他矿山的酸性水研究具有借鉴作用。

本项目由作者和所指导的研究生共同完成。参加项目研究的研究生有岳梅(永安煤矿酸性水、黄铁矿氧化动力学及批淋滤实验)、丛志远(四台煤矿酸性水及地球化学模拟)、孙红福(酸性矿井水沉淀矿物 Schwertmannite)、葛祥坤(水体同位素)、朱银凤(酸性水中砷的形态分析)和李荣杰(酸性水中铁的形态分析)。

在现场调研和样品采集过程中,得到了山西大同煤业集团四台矿地测科徐元禄科长、山西西山煤电集团马兰矿地测科李文生科长、福建永安煤业有限总公司黄和总经理等的大力协助和指导。在实验测试过程中,得到了核工业北京地质研究院、中国地质科学院、中国石油勘探开发研究院、中国科学院地质与地球物理所同位素实验室、北京大学医学部公共卫生学院实验中心、北京大学光电子能谱实验室和化学学院 X 射线分析实验室、中国地质大学 X 射线分析实验室、中国地质科学院同位素实验室等单位的大力协助。对上述单位和个人在此一并表示衷心感谢!

在项目研究过程中,美国俄亥俄州立大学 Biggam 教授、韩国 Kangwon 大学 Jae - Young Yu 教授和德国著名矿物学家 Murad 教授等热情地提供了参考文献,并帮助解释酸性水沉淀物 Schwertmannite 矿物的 X 射线分析结果。美国地调所(USGS)David 博士免费提供和指导使用 PHREEQCI 模拟软件,Finkelman 博士为作者提供了在 USGS 进行访问和学习的机会。中国矿业大学(北京)韩德馨院士、彭苏萍教授、唐跃刚教授、曹代勇教授、姜耀

东教授、邹立状教授、侯慧敏高级工级工程师、代世峰副教授和周强工程师,美国伊利诺伊州地质调查所周诚林博士(Chou Cheng-Lin),太原理工大学郭敏泰教授,中国科学院地质与地球物理所田兴有研究员和曾荣树研究员,安徽理工大学唐修义教授,中国科学院贵阳地球化学研究所郑宝山研究员,中国地质大学(北京)钟佐燊教授、汤鸣皋教授、黄文辉教授,中国地震局地质研究所王广才研究员,重庆煤田地质研究所李大华高级工程师等,都给予了大力支持和指导。在此表示诚挚的感谢!

感谢国家自然科学基金委员会地球科学部和教育部学位与研究生办公室等项目主管单位及有关老师的支持和指导。

在本书即将出版之际,作者特别感谢导师任德贻教授多年来的培养和教诲,正是在任德贻教授的指导下,作者先后完成了硕士学位论文和博士学位论文,其中博士学位论文被国务院学位委员会和教育部评为2000年全国百篇优秀博士论文。在项目研究过程中,任德贻教授也给予多方面的具体指导,在此表示衷心的感谢!

最后需要指出的是,我国的煤矿酸性水地球化学研究才刚刚起步,可借鉴的资料十分有限;加之研究内容多、时间短、作者水平所限,因此书中的缺点和错误在所难免,恳请同行专家和读者批评指正,也期待在日后的工作中进一步完善,以便更好地推动我国酸性矿井水地球化学的深入研究。

作者
2005年于北京

目 录

1 四台煤矿酸性矿井水的地球化学特征	(1)
1.1 研究区概况	(1)
1.1.1 井田地质构造特征	(1)
1.1.2 含煤地层及煤质特征	(2)
1.1.3 水文地质特征	(4)
1.2 酸性矿井水分布	(5)
1.3 酸性矿井水的水化学特征	(6)
1.3.1 样品采集和样品测试	(7)
1.3.2 酸性矿井水的水化学类型	(9)
1.3.3 酸性矿井水的水质特征	(10)
1.3.4 酸性矿井水的 pH 和 Eh 及其关系	(14)
1.3.5 酸性矿井水的总酸度	(14)
1.4 酸性矿井水的地球化学演化	(15)
1.4.1 酸性矿井水中化学成分浓度的空间变化	(16)
1.4.2 酸性矿井水中主要矿物相的饱和指数特征	(18)
1.5 酸性矿井水中稀土元素的地球化学特征	(19)
2 永安煤矿酸性矿井水的地球化学特征	(24)
2.1 研究区概况	(24)
2.2 酸性矿井水的分布特征	(25)
2.3 样品采集与分析	(28)
2.4 酸性矿井水的水化学特征	(29)
2.4.1 酸性矿井水的水化学类型及常量组分	(29)
2.4.2 酸性矿井水中的微量组分	(31)
2.4.3 酸性矿井水的离子强度和活度系数	(34)
2.4.4 酸性矿井水的总酸度	(36)
2.4.5 酸性矿井水中的稀土元素	(36)
3 酸性矿井水中砷的形态分析	(39)
3.1 砷形态分析的意义	(39)
3.2 砷形态分析的进展	(39)
3.2.1 分光光度法	(40)
3.2.2 动力学光度法	(40)
3.2.3 原子荧光法	(41)
3.2.4 原子吸收光谱法	(41)

3.2.5	色谱法	(41)
3.2.6	联用技术	(42)
3.3	样 品	(44)
3.4	酸性矿井水中形态砷的实验测定	(44)
3.4.1	水中砷的形态分析思路	(44)
3.4.2	实验试剂、标准溶液准备与仪器	(45)
3.4.3	水中有机砷和无机砷的分离与测定	(46)
3.4.4	氢化物发生-原子荧光法测定水中无机态砷	(48)
3.4.5	离子交换-原子荧光法测定矿井水中的形态砷	(51)
3.5	实验方法总结	(55)
3.6	实际样品测定结果与讨论	(56)
3.6.1	不同实验方法测定结果的比较	(56)
3.6.2	四台煤矿和永安煤矿矿井水中砷的形态分布	(57)
3.7	酸性矿井水中砷的污染防治	(60)
4	酸性矿井水的沉淀矿物 Schwertmannite	(61)
4.1	样品与实验	(61)
4.2	结果与讨论	(62)
4.2.1	Schwertmannite 矿物的结构与形貌	(62)
4.2.2	Schwertmannite 矿物的化学组成	(63)
5	酸性矿井水水文地球化学模拟	(68)
5.1	水文地球化学模拟的理论基础	(68)
5.1.1	地球化学模拟中的基本概念	(68)
5.1.2	地球化学模拟中的数学方程	(69)
5.2	地球化学模拟的发展	(70)
5.2.1	地球化学模型的种类	(71)
5.2.2	热力学数据库	(71)
5.2.3	常用地球化学模拟软件	(72)
5.3	水文地球化学模拟应用的现状	(74)
5.3.1	水体溶质化学形态(chemical species)计算	(74)
5.3.2	计算饱和指数	(75)
5.3.3	地下水的迁移演化过程模拟	(76)
5.4	酸性矿井水中金属的化学形态的模拟计算	(76)
5.4.1	水文地球化学模拟软件 PHREEQC 概述	(76)
5.4.2	主要金属元素的化学形态计算	(77)
6	煤系黄铁矿氧化动力学	(93)
6.1	化学反应动力学的表达	(93)
6.2	常用反应器类型	(94)
6.3	煤系黄铁矿氧化动力学实验	(95)
6.3.1	实验仪器及设备	(95)
6.3.2	实验参数的确定和实验液的配制	(96)
6.3.3	黄铁矿样品特征与前处理	(97)

6.3.4	黄铁矿氧化动力学实验	(98)
6.4	实验结果与讨论	(99)
6.4.1	煤系黄铁矿氧化反应的复杂性	(99)
6.4.2	pH、Eh 以及电导率(EC)的变化规律	(100)
6.4.3	黄铁矿粒径对氧化速率的影响	(103)
6.4.4	Fe^{3+} 浓度对黄铁矿氧化速率的影响	(105)
6.4.5	温度对黄铁矿氧化速率的影响	(107)
6.5	煤系黄铁矿氧化还原反应机理	(109)
7	煤系黄铁矿中有害元素在氧化反应中的迁移特性	(112)
7.1	样品	(112)
7.2	实验	(114)
7.2.1	实验设备及试液配制	(114)
7.2.2	实验	(114)
7.3	实验结果与讨论	(116)
7.3.1	电导率和 pH 的变化	(116)
7.3.2	反应体系中 Fe、S 组分行为	(117)
7.3.3	反应体系中微量元素的释放行为	(120)
7.3.4	K、Na、Ca、Mg、Cl 的释放行为	(124)
7.3.5	反应体系中有害微量元素表观溶出率和释放速率	(125)
7.3.6	影响酸性矿井水中元素迁移的主要作用	(126)
7.3.7	黄铁矿在氧化还原反应中的物相及成分变化	(128)
8	水体同位素地球化学	(135)
8.1	同位素概述	(135)
8.1.1	同位素概念	(135)
8.1.2	同位素表达及其标准	(135)
8.1.3	同位素测定方法	(136)
8.1.4	同位素分馏理论	(139)
8.2	水的氢氧同位素	(142)
8.2.1	概述	(142)
8.2.2	大气降水线	(142)
8.2.3	氘过量参数(d 值)	(144)
8.2.4	大气降水氢氧同位素的环境效应	(146)
8.2.5	氢氧同位素在水岩相互作用研究中的应用	(150)
8.2.6	氢氧同位素在地下水补给来源研究中的应用	(150)
8.2.7	氢氧同位素在水循环研究中的应用	(151)
8.2.8	氢氧同位素在地热水来源研究中的应用	(151)
8.2.9	氢氧同位素在工程地质中的应用	(152)
8.2.10	氢氧同位素在煤矿矿井水研究中的应用	(153)
8.2.11	水中氡及其应用	(154)
8.3	水中碳同位素	(157)
8.3.1	放射性同位素 ^{14}C	(158)
8.3.2	稳定碳同位素	(160)

8.4 水中硫同位素	(161)
8.4.1 硫同位素的分馏效应	(161)
8.4.2 硫同位素地下水研究中的应用	(163)
8.4.3 大气降水、海水、湖水和河水中的硫同位素	(164)
8.5 水中氯同位素	(165)
8.5.1 氯同位素表示方法及其标准	(165)
8.5.2 水中氯同位素的测定方法	(166)
8.5.3 氯同位素分馏特征	(166)
8.5.4 氯同位素的应用	(167)
8.6 水中锶同位素	(171)
7.6.1 锶同位素表示方法及其标准	(171)
7.6.2 水中锶同位素测定方法	(171)
7.6.3 锶同位素的应用	(172)
8.7 水中硼同位素	(177)
8.7.1 硼同位素的测定方法及其标准	(177)
8.7.2 硼同位素的分馏机理	(178)
8.7.3 地下水的硼同位素	(179)
8.7.4 海洋及海底沉积物的硼同位素	(179)
8.7.5 盐湖卤水的硼同位素	(181)
8.7.6 热液流体及热液沉积物中的硼同位素	(181)
结 论	(183)
参考文献	(186)

1 四台煤矿酸性矿井水的水化学特征

1.1 研究区概况

四台煤矿隶属于大同煤矿集团有限责任公司,位于大同市西北云冈沟,距大同市约 27 km,距集团公司本部约 25 km,地属大同市南郊区管辖。

四台煤矿 1991 年 12 月 13 日建成投产,是我国首座年设计能力 500 万 t 的矿井。四台井田位于大同煤田东北部,井田范围北起刘家窑矿、上深涧矿,南界与燕子山矿、同家梁矿、永定庄矿相接,东部由北而南与北辛窑矿、黄土坡矿、张家湾矿及大同市地方小煤矿相接,西部与鹊儿山矿、燕子山矿相接。四台井田南北长约 13.8 km,东西宽约 8.0 km,面积约 71.0 km²。井田内共赋存两大煤系,即侏罗纪煤系和石炭二叠纪煤系。本矿井设计开采侏罗纪煤系。矿井地质储量 6.02 亿 t,可采储量 3.4 亿 t,设计服务年限为 41 a。

四台煤矿矿井采用斜井(一主一副)立井混合开拓方式,井田内设一个水平开采全部煤层,现有采区 6 个,主采 10 号、11 号、14³ 号三个煤层,共有综采队 4 个,炮采队 2 个,机掘队 6 个,普掘队 4 个,开拓队 3 个。井下 1045 轨道大巷全长 8 000 m。矿井通风采用多井口抽出式通风方式,各采区均有独立的进风、回风井。

四台煤矿区属于温带大陆性季风气候。温度和降水的时空分布变差大,大风多,云量少,日照充足。四季分明,各季长短和气候差异较大。属典型的干旱半干旱地区,夏季高温多雨。年平均温度为 5.4~7.1℃,年极端最高气温为 35.7~38.3℃,年极端最低气温为 -37.3~-29.1℃,年地表平均气温为 7.7~9.8℃;年总降水量为 382.9~429.1 mm,80%集中在 7 月至 9 月,年均蒸发量为 1 600 mm;无霜期 110~150 d,日照时数为 2 659.0~2 976.8 h。

1.1.1 井田地质构造特征

大同煤田为不对称向斜构造,向斜轴走向大致为 40°,西北翼宽缓,东南翼比较陡,构成口泉山脉。四台井田位于大同向斜北西翼,地质构造总体较为简单,呈一单斜构造,地层总体走向北东,倾向南东,倾角小于 10°;同时伴有次级小型褶皱。井田内有四处比较明显的背斜和向斜,分别是位于十里河以北的陶沟背斜(井田东部)、田草沟向斜(井田东部)、杨树湾向斜(井田中部)和位于十里河以南的小村向斜(井田南部)。

区内大面积为黄土覆盖,断层形迹在地表不易发现。本井田及邻区查明的主要断层有 5 条,只有窑沟断层分布在井田内,其余均在井田外。煤田边缘有一系列大型断层,如东南边缘的口泉断裂带、东北边缘的青磁窑断层、西北边缘的滴水沿断层等。由于断层的影响,煤田边缘地层较陡,甚至直立倒转,但离开断层,煤田内部地层倾角很快变缓,一般在 10°以下。煤田内部构造相对简单,无大型断层与紧闭褶皱,随着煤田的开采,揭露了许多小断层。

这些断层落差一般小于 20 m,常以地堑、地垒等组合形式出现,按其走向可分为北东向断层、东西向断层、北西向断层。北西向断层主要集中于煤田西南部和东北部,局部规模较大。东西向和南北向断层一般规模较小,但经常和其他断层交叉出现,对煤层和顶底板破坏较大,给掘进造成很大影响。

目前,井田已揭露的陷落柱有 18 个。从陷落柱分布情况来看,四台陷落柱是由南向北呈 3 个等间距 NE 向条带平行分布,条带间距约 300 m。陷落柱规模一般不大,直径大多在数十至一百米之间。但井田南部岩溶陷落柱的直径较大,长轴方向大致呈 NNE 走向,而北东部陷落柱长轴走向分异较强,以 NE 和 EW 向为主。目前所揭露的陷落柱多为塌陷至侏罗纪地层的隐伏陷落柱,即使塌陷至地表,也由于黄土覆盖而很少出露。柱体基本不含水,柱内充填物半固结或固结,甚至胶结形成坚硬岩石,极大地破坏了煤层的连续性。

1.1.2 含煤地层及煤质特征

1. 含煤地层及煤层

井田内沉积基底为太古界五台群花岗片麻岩,其上先后沉积了寒武系毛庄组(ϵ_{1m})和徐庄组(ϵ_{2x})、奥陶系(O)、石炭系本溪组(C_{2b})和太原组 C_{3t} 、侏罗系永定庄组(J_{1y})、大同组(J_{2d})和云岗组(J_{2y})、白垩系左云组(K_{1z})和助马堡组(K_{2zm})以及第四系上更新统马兰组(Q_{3m})和全新统。井田内煤层赋存于侏罗系中统大同组,含煤岩系厚 103.9~224.4 m,平均 186.3 m,表现为南厚北薄的趋势。其中,在井田西北部,大同组煤系遭受剥蚀,最上部之 2 号煤层剥蚀边界大致在 40441 孔、42452 孔、42461 孔及 44462 孔一线,左云组自北西向南东超覆其上;底部 15 号煤层剥蚀边界在井田之外。煤系岩性主要为灰白和浅灰色粗砂岩、中砂岩、深灰色细砂岩、粉砂岩、砂质泥岩及煤层;砂岩分选较好,胶结坚固,可见水平层理、波状层理及斜层理。

井田内大同组含煤 21 层,其中在井田内有一定分布并可对比的有 15 层(图 1-1),总厚度 15.54 m,含煤系数 8.3%。煤层层位较稳定,但厚度变化较大,厚度变异系数为 38%~111%,可采指数为 0.29~0.96。但煤层厚度变化有一定规律,可采煤层分布相对集中,在可采范围内,厚度较稳定,变异系数为 23%~64%,可采指数达 0.91~0.97。在局部地段,含煤地层变化异常,如北一盘区 44452 孔 3 号、8 号、9 号、10 号、12¹号及 15 号煤层沉积尖灭,与临近钻孔难于对比。在 15 层煤中,全区分布较稳定且大部可采的有 7 层(3 号、5 号、8 号、10 号、11²号、12²号和 14²号),局部可采的有 5 层(2 号、7 号、9 号、12¹号和 14³号),不可采的有 3 层(4 号、11¹号和 15 号)。

浅部的 2 号和 3 号煤层已大部被采空;4 号煤层的大部分与 5 号煤层合并,该煤层的人为破坏也相当严重。

8 号煤层在井田内普遍分布,中部及南部可采,北部不可采。在井田中东部,7 号层与本层合并。井田范围内煤层厚度变异系数 66%,可采指数 0.57;在可采层范围内该层的厚度变异系数为 41.6%。煤层顶板为中细砂岩,胶结坚硬,局部为粉砂岩、细砂岩或砂泥岩互层。

11²号煤层在井田内分布广泛,井田南部边缘不可采。煤层厚度为 0.13~6.43 m,平均 3.06 m,井田内煤层变异系数 56%,可采指数 0.91;可采煤层范围内,厚度变异系数 40%,可采指数 0.97。煤层顶板为细砂岩、砂泥岩互层;底板为细砂岩或粉砂岩与细砂岩互层。

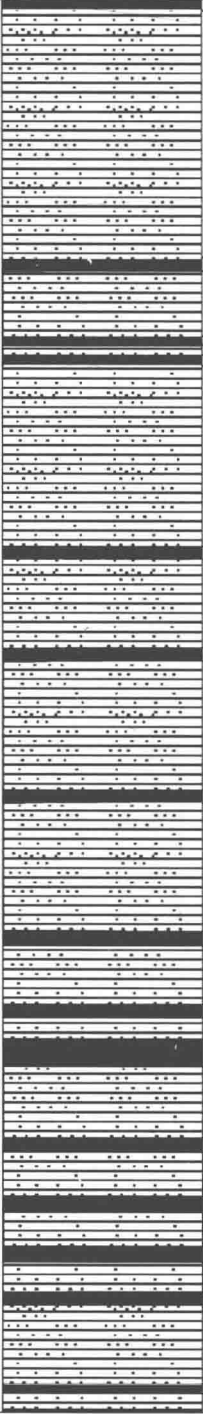
地层	柱状图 1:1 000	煤层	煤层厚度/ m	岩 性 描 述
侏 罗 系 大 同 组		2	0.86	煤
				灰、深灰色粉砂岩为主，局部有粗砂岩
		3	0.92	煤
				深灰色粉砂岩、细砂岩
		4	0.56	煤
		5	0.87	煤
				灰色、深灰色粉砂岩、细砂岩
		7	0.60	煤
				粉砂岩为主，细砂岩次之
		8	1.24	煤
				灰、深灰色粉砂岩、细砂岩互层缓波状
		9	0.58	煤
				灰、深灰粉砂岩、细砂岩互层，砂质泥岩
		10	1.13	煤
				灰、深灰粉砂岩、细砂岩为主
		11 ¹	0.69	煤
				灰白色细砂岩
		11 ²	3.06	煤
				灰白色中粗砂岩
		12 ¹	1.08	煤
				灰白色细砂岩
		12 ²	1.44	煤
				灰白色细砂岩
		14 ²	1.47	煤
		14 ³	1.25	煤
				灰色细砂岩
		15	0.69	煤
				灰白色细砂岩

图 1-1 四台煤矿地层综合柱状图

2. 煤质特征

各煤层均以弱玻璃光泽为主,沥青光泽次之;平坦状-贝壳状断口,条带状或均一结构;宏观煤岩类型以半亮型、光亮型为主,其次为半暗型。镜质组平均油浸最大反射率 0.68%~0.75%。

各可采煤层煤心煤样化验成果见表 1-1 和表 2-2。从表中可以看出,各煤层之间化学性质差异甚小,属低灰-中灰、低硫煤;经过洗选全硫含量明显降低,说明黄铁矿硫占较大比例。井田各煤层均属弱粘结煤,发热量高,是良好的动力用煤,也宜于气化。

表 1-1 四台煤矿原煤工业分析和磷含量分析结果

煤层编号	工业分析/% (括弧中为样品数)				P_d /% (平均值)
	M_{ad}	A_d	V_{daf}	$S_{t,d}$	
2	4.05 (11)	7.56 (11)	31.94 (10)	0.72 (6)	0.003 (2)
3	4.54 (35)	13.69 (35)	32.43 (32)	0.79 (25)	
5	4.75 (27)	11.19 (26)	33.77 (26)	1.24 (19)	
7	3.88 (27)	11.10 (27)	31.58 (25)	0.65 (19)	0.006 (2)
8	3.78 (35)	7.70 (37)	30.29 (36)	0.67 (18)	
9	3.68 (20)	9.69 (20)	30.00 (16)	0.93 (8)	
10	4.07 (31)	10.20 (31)	29.98 (30)	0.97 (21)	0.017 (1)
11 ²	3.92 (63)	9.24 (61)	30.03 (60)	1.22 (47)	
12 ¹	3.03 (20)	11.66 (28)	28.23 (27)	1.24 (15)	
12 ²	3.69 (42)	9.99 (42)	28.08 (41)	1.16 (33)	0.002 (1)
14 ²	3.28 (40)	10.76 (39)	29.53 (37)	1.50 (26)	
14 ³	2.89 (40)	13.07 (40)	31.01 (40)	1.11 (28)	

M_{ad} :空气干燥基水分; A_d :干燥基灰分; V_{daf} :无灰干燥基挥发分; $S_{t,d}$:干燥基全硫分; P_d :干燥基磷含量。

表 1-2 四台煤矿精煤工业分析和元素分析结果

煤层编号	工业分析/%				元素分析/%			
	M_{ad}	A_d	V_{daf}	$S_{t,d}$	C_{daf}	H_{daf}	N_{daf}	O_{daf}
2	4.14	4.07	31.84	0.38	82.78	4.90	0.84	11.36
3	4.61	5.68	33.27	0.32	83.78	4.69	0.90	10.88
5	5.03	4.57	33.81	0.29	—	—	—	—
7	5.28	4.75	32.60	—	82.78	4.91	0.96	11.22
8	3.46	3.86	31.18	0.37	82.37	4.83	1.03	11.29
9	2.58	3.18	30.38	0.45	83.78	4.87	0.94	10.15
10	4.10	5.01	30.51	0.37	83.54	4.70	2.75	10.51
11 ²	4.20	4.47	30.91	0.39	83.51	4.72	0.86	10.45
12 ¹	3.62	4.81	29.04	0.26	83.86	4.72	0.87	10.05
12 ²	4.17	4.03	29.93	0.45	83.96	4.58	0.84	10.49
14 ²	3.51	3.81	3.32	0.44	83.26	4.75	0.90	10.75
14 ³	3.78	3.53	30.62	0.61	83.88	4.67	0.86	9.94

M_{ad} :空气干燥基水分; A_d :干燥基灰分; V_{daf} :无灰干燥基挥发分; $S_{t,d}$:干燥基全硫分; C_{daf} :无灰干燥基碳含量; H_{daf} :无灰干燥基氢含量; N_{daf} :无灰干燥基氮含量; O_{daf} :无灰干燥基氧含量。

1.1.3 水文地质特征

1. 含水层分布及其特征

井田内共有三个含水层:冲积-洪积层、基岩风化壳和含煤地层。

(1) 冲积-洪积含水层。主要分布于十里河一带,发育稳定,岩性为砂、角砾卵石和黏土。总厚度 10~12 m,含水层厚度 6~10 m,地下水坡度为 0.005 1。新高山 20 号水源孔抽水试验结果表明,单位涌水量为 2.55~3.56 L/s·m,渗透系数为 41.32 m/d。

(2) 基岩风化壳含水层。风化壳厚度为 25~80 m,岩性为粗、中粒砂岩,分布于井田北中部丘陵地带及南部河谷地带。含水层厚度为 6.30~23.50 m,裂隙发育,含水性较强,水位 1.86~16.90 m,一般为 3.03~5.02 m。据马 14、云 223、云 228 号孔抽水实验资料,单位涌水量为 0.12~0.42 L/s·m,渗透系数为 0.77~2.72 m/d。十里河的河北部分在补孔勘探时,经补 19、14、12 号孔揭露,其含水层厚度约为 10 m,裂隙发育,水位 9.30~83.0 m。

井田中北部广泛发育的白垩系左云组砾岩,经钻孔简易水文观察表明,含水性较弱,未发现漏水现象,水位在 2.95~13.5 m。

(3) 含煤地层层间裂隙含水层。大部为承压水。含水层岩性为砂岩,厚度为 8.25~25.26 m,发育不稳定。水位 1.12~7.71 m,水柱高度为 136.03~117.20 m。据马 14、云 223 号孔抽水实验资料,单位涌水量为 0.06~0.129 L/s·m,渗透系数为 0.44~2.08 m/d。十里河的河北部分在补孔勘探时,在井田中北部经钻孔揭露的 5~9 号煤层间的砂岩含水性好,该层厚度为 4~10 m,水位 16.2~63.6 m。补勘时,大部分钻孔在 11 号煤层间漏水,深度在 180~240 m。

2. 矿井充水因素分析

总体而言,含煤地层的层间裂隙是影响四台井田充水的主要因素,煤层顶板砂岩含水层是矿井涌水的主要水源。但由于含水层厚度不大,属小到中等含水量。发源于左云县西南部曹家堡一带的十里河是大同煤田最大的河流,河流全长 76 km,流域面积 1 185 km²。十里河自西向东横贯四台井田,将井田分为南北两部分,经旧庙、姜家湾至小站注入大同平原。四台矿的主、付斜井距十里河较近,河水通过裂隙渗透进入井筒增加了井筒涌水量。因此,十里河地表水以及老窑采空区积水等因素对矿井充水的影响值得注意。

1.2 酸性矿井水分布

截至 2002 年,四台矿区现有采空区积水约为 109.3×10^4 m³,其中强酸性水约为 30.3×10^4 m³,主要分布在 2 号、3 号和 8 号煤层等三个层位(表 1-3)。

表 1-3 四台煤矿矿井积水情况表

所属盘区	积水层位	积水量/m ³	pH	排放措施	备 注
402 辅 1	8 号煤层 8202 面	12.6×10^4	6.0	地面放水孔	补给 390 m ³ /d
402 辅 1	8 号煤层盘区巷边	3 000	6.0	8 号煤层抽排	补给 600 m ³ /d
402 辅 1	牛头沟矿 2 号煤层和 3 号煤层	13.4×10^4	3.11	地面抽水孔	补给 286 m ³ /d
402 辅 1	小东沟矿 8 号煤层	2.18×10^4	6.0	地面放水孔	
402 辅 1	小东沟矿 4 号煤层	0.37×10^4	6.0	地面放水孔	
402 辅 2	元宝沟矿古窑 2 号煤层	$>7.15 \times 10^4$	2.50	未定	补给 500 m ³ /d
402 辅 2	田草沟矿古窑 2 号煤层	2.5×10^4	3.0	未定	
404	10 号煤层各工作面	30×10^4	不祥	井下放水孔	
303	小窑 3 号煤层和 4 号煤层	25×10^4	6.5	未定	
410	小窑 8 号煤层	不祥	不祥	未定	

近年来,四台煤矿为解放 11 号煤层 402 辅 1 盘区 8200 及 8202 工作面上覆牛头沟矿 2 号煤层、3 号煤层酸性水,利用大口径抽水井、耐酸深井泵及 PVC 耐酸管材进行抽排,排放到附近区域。图 1-2 和图 1-3 即为酸性矿井水排放井口和排放的情况。



图 1-2 酸性矿井水排水井口

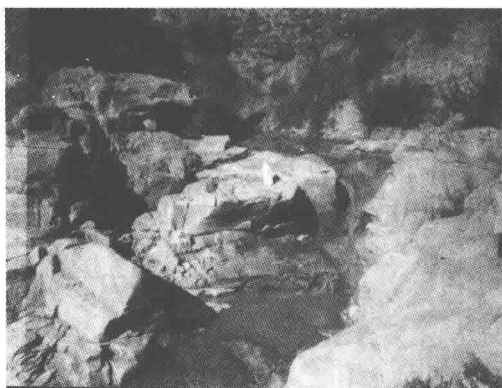


图 1-3 酸性矿井水排水渠

1.3 酸性矿井水的水化学特征

1.3.1 样品采集和样品测试

四台煤矿 2 号煤和 3 号煤层的老窑水为强酸性矿井水,对其下方的煤炭开采有直接影响。为保证煤炭开采的进行,四台煤矿利用大口径抽水井对 2 号煤和 3 号煤层的老窑酸性水进行抽排。排放到地面的矿井水沿沟渠而下,经约 1 km 的距离与十里河汇合。研究样品采集工作先后进行了 2 次,共采集水样 17 个,其中样品 S-1 至 S-11 的采样位置如图 1-4 所示。

样品 S-1 至 S-9 即为从排水井口到十里河交汇点这一段距离内以约 100 m 的间隔采集的水样, S-10 为交汇点上游 100 m 处水样, S-11 为交汇点下游 100 m 处水样。S-13、S-14 为 8 号煤层采空区积水; S-12、BST-1 和 BST-2 是从其他排水口采集的来自 2 号和 3 号煤层采空区的酸性积水水样; BST-7 水样品为 2 号和 3 号煤层老窑酸性积水向下渗漏至 11 号煤层工作面附近的顶板淋水。

水样采集后,在现场测定其 pH 和 Eh,并用 0.45 μm 孔径滤膜过滤,然后用聚乙烯塑料瓶分装,一部分加 HNO_3 至 $\text{pH} < 2$,用以测定主要金属阳离子及可过滤态 REE 的含量,一部分不加酸,用以测定阴离子含量。采用高分辨电感耦合等离子质谱仪[(HR-ICP-MS(Element I))测定所有样品的主要金属阳离子和稀土元素(La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu)的含量,采用离子色谱仪(IC, DIONEX-500)测定氯离子、氟离子、溴离子、硝酸根和硫酸根离子的含量,采用滴定法测定碳酸根、重碳酸根和氢氧根离子的含量(Metrohm 785DMP 全自动滴定仪)。上述测试分析与统计结果见表 1-4、表 1-5、表 1-6 和表 1-7。

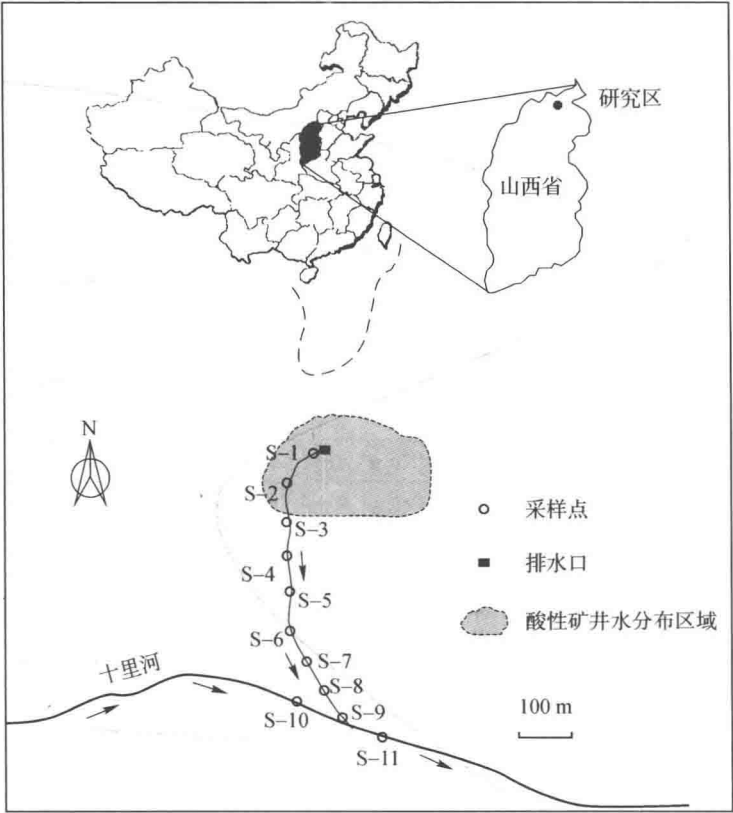


图 1-4 采样点示意图

表 1-4 四台煤矿矿井水电导率、pH、Eh 及主要离子分析结果

样品	EC	pH	Eh	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	Fe ³⁺	Mn
S-1	1 510	3.20	568.2	0.28	189.1	1.74	1 320	0.0	0.0	37	119.1	241.7	99.2	10.8	16.2	5.28
S-2	1 530	3.43	456.2	0.37	181	3.82	1 290	0.0	0.0	35.3	110.0	246	99.2	8.2	5.09	3.61
S-3	1 500	3.44	416.3	0.40	166.7	4.02	1 138	0.0	0.0	13.8	106.3	257.3	101	7.64	3.48	3.55
S-4	1 500	3.51	409	0.34	162.9	3.81	1 284	0.0	0.0	13	151.9	251.2	105	7.52	3.62	5.18
S-5	1 470	3.65	419.5	0.99	174.1	4.77	1 357	0.0	0.0	12	117.3	259	101	7.34	1.67	3.45
S-6	1 450	3.7	393.8	0.40	159.6	4.31	1 291	0.0	0.0	13	115.4	260.9	107	6.84	1.29	4.01
S-7	1 320	7.61	191.8	0.33	202.5	bdl	910.6	0.0	291	15.6	140.9	180.7	63.3	0.07	0.16	0.20
S-8	1 210	7.73	208.9	0.68	201.0	10.29	677.2	0.0	306	29.7	212.7	118.1	83.4	0.06	0.03	0.003
S-9	1 490	7.62	208.1	0.42	312.3	4.80	1 095.3	0.0	305	36.4	431.2	186.2	119.4	0.04	0.04	0.007
S-10	1 550	7.39	175.1	0.38	392.4	16.94	1 241.2	0.0	243	30.8	431.2	199.8	176.9	0.11	0.05	0.118
S-11	1 630	7.76	176.5	0.63	434.9	34.61	1 296.5	0.0	171	20.6	474.9	194.2	119.4	0.03	0.06	0.786
S-12	1 550	3.37	495.2	0.28	167.9	3.85	1 925.1	0.0	0.0	13.7	157.3	280.0	128.0	11.0	5.06	5.30
S-13	1 150	7.02	309.5	0.76	205.8	11.90	724.7	0.0	305	33.3	194.4	147.5	83.4	0.13	0.04	0.049
S-14	1 690	7.35	300.7	0.57	305.3	1.38	2 033.2	0.0	149	92.1	456.7	216.2	97.8	2.03	7.52	1.96
BST-1	1 900	2.99	640.3	bdl	145.3	bdl	2 005	bdl	bdl	12.8	107.2	373.9	159.0	10.62	3.41	1.65
BST-2	1 850	3.47	628.4	bdl	153.8	bdl	1 938	bdl	bdl	12.6	108.4	402.2	158.5	7.44	2.56	1.54
BST-7	1 600	6.97	427.2	bdl	220.5	bdl	1 092	10.3	380	51.75	344.9	229.2	66.5	2.11	4.12	0.005

注:EC为电导率,单位 mS.m⁻¹;Eh 单位为 mV;离子和元素含量单位为 mg/L; bdl 为低于检测限。

表 1-5 四台煤矿矿井水阳离子分析结果

样品	Si	Cu	Pb	Zn	As	Co	Ni	Cd	Tl	Mo	V	Cr	Ba	Be	B	Th	U	P	Sc	Ti	Zr	Li	Rb	Cs	Ga	Sr	Pd	
S-1	1.78	50.2	5.74	428.3	1.20	113.3	173.3	0.66	1.00	0.02	0.73	2.66	13.9	0.26	0.82	0.02	7.78	152.9	9.64	183.5	0.07	107.9	26.7	0.10	0.48	0.93	2.26	0.09
S-2	1.43	44.2	5.0	325.2	<0.1	82.4	128.7	0.55	0.86	<0.01	0.52	1.51	7.77	0.17	0.70	0.38	5.67	10.9	7.15	178.2	<0.01	81.8	22.8	0.10	0.29	0.86	2.16	0.05
S-3	1.49	45.1	3.23	328	<0.1	83.7	127.5	0.46	0.94	<0.01	0.61	1.50	8.55	0.20	0.67	0.50	6.70	82.3	6.82	176.8	0.03	80.9	21.8	0.10	0.18	0.55	2.30	0.02
S-4	2.06	43.0	2.49	424.2	<0.1	115.1	174.9	0.83	1.27	<0.01	0.82	1.94	12.4	0.23	1.01	0.46	7.99	102.9	9.00	142.7	0.07	111.4	29.1	0.12	0.43	1.53	2.22	0.03
S-5	1.59	42.4	1.99	331.8	3.09	84.5	130.6	0.55	0.91	<0.01	0.58	1.49	9.90	0.20	0.69	0.31	6.24	72.0	6.92	192.4	0.05	83.9	22.0	0.10	0.21	0.72	2.05	0.02
S-6	1.74	42.0	2.11	354.6	0.61	93.3	143.4	0.66	1.13	0.03	0.86	1.67	13.6	0.19	0.68	0.27	6.72	98.8	7.31	171.0	0.03	89.4	24.9	0.11	0.44	1.03	2.39	0.02
S-7	0.41	3.15	0.07	12.4	4.27	3.08	4.64	<0.01	0.07	1.24	1.29	11.2	28.1	0.01	0.71	0.14	2.47	489.8	0.72	126.6	0.02	25.2	7.87	0.04	0.06	<0.1	1.41	0.01
S-8	1.33	2.30	<0.01	<0.1	<0.1	0.51	13.4	<0.01	0.10	7.00	0.99	12.0	27.6	<0.01	0.90	<0.01	4.48	11.1	1.49	104.8	0.06	105.0	38.7	0.13	0.04	0.28	2.71	0.02
S-9	1.28	2.83	0.04	1.39	0.22	7.06	13.2	<0.01	0.10	2.34	1.24	11.9	28.2	0.01	0.90	<0.01	3.53	33.9	1.58	173.1	<0.01	146.3	48.0	0.10	0.01	0.64	2.63	<0.01
S-10	1.42	3.43	<0.01	0.93	<0.1	13.5	27.5	<0.01	0.09	3.14	1.81	7.36	38.4	0.01	0.93	<0.01	4.32	30.5	1.79	178.6	0.05	134.6	40.5	0.07	0.05	0.78	3.10	0.01
S-11	1.59	3.69	0.19	0.17	<0.1	16.0	31.0	<0.01	0.07	4.03	2.02	9.74	53.9	<0.01	0.97	<0.01	5.95	102.9	1.58	187.3	0.07	127.9	30.6	0.03	0.03	0.32	3.87	0.01
S-12	2.23	66.6	6.59	493.2	<0.1	124.9	200.0	0.81	1.47	<0.01	0.84	3.28	10.9	0.31	1.03	0.53	9.30	185.2	10.9	208.1	0.05	126.6	33.4	0.15	0.29	1.01	2.52	0.03
S-13	0.39	2.72	0.33	19.7	0.54	5.42	34.1	<0.01	0.11	3.03	0.89	3.99	35.2	<0.01	0.84	<0.01	0.62	22.0	0.58	94.0	<0.01	101.9	37.3	0.13	0.06	0.29	2.87	<0.01
S-14	1.31	18.7	7.25	837	5.20	301.0	507.6	1.25	2.07	1.13	1.56	4.50	38.7	0.10	2.24	0.42	2.15	94.2	2.27	176.9	0.18	302.9	89.5	0.27	0.27	0.87	3.97	0.06
BST-1	1.32	68.94	1.902	bdl	1.271	226.2	262.7	0.299	1.059	bdl	bdl	1.634	12.51	13.21	204.1	0.192	5.031	bdl	8.987	2427	bdl	204.4	47.82	2.206	29.14	bdl	2766	bdl
BST-2	1.65	76.18	1.733	bdl	1.036	215.2	250.5	0.43	1.042	bdl	bdl	bdl	25.3	11.94	182.6	0.175	4.382	bdl	6.407	2097	0.017	179.9	41.08	0.97	27.78	bdl	2454	bdl
BST-7	1.57	18.04	bdl	9.335	2.096	0.502	5.899	0.011	0.178	0.29	bdl	11	23.7	0.115	290.7	bdl	5.256	bdl	2.347	1250	bdl	333.5	80.05	1.822	1.825	bdl	4547	bdl

注:元素含量单位为 mg/L; bdl 为低于检测限。