

煤地下自燃时覆岩中 氢迁移规律数值模拟及应用

王俊峰 著

 煤炭工业出版社

煤地下自燃时覆岩中氦迁移 规律数值模拟及应用

王俊峰 著

煤炭工业出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

煤地下自燃时覆岩中氩迁移规律数值模拟及应用 /
王俊峰著. --北京: 煤炭工业出版社, 2017
ISBN 978-7-5020-5795-4

I. ①煤… II. ①王… III. ①煤层自燃—氩—元素迁
移—数值模拟—研究 IV. ①TD75

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 077052 号

煤地下自燃时覆岩中氩迁移规律数值模拟及应用

著 者 王俊峰
责任编辑 武鸿儒 郭玉娟
责任校对 尤 爽
封面设计 安德馨

出版发行 煤炭工业出版社 (北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)
电 话 010-84657898 (总编室)
010-64018321 (发行部) 010-84657880 (读者服务部)

电子信箱 cciph612@126.com

网 址 www.cciph.com.cn

印 刷 北京建宏印刷有限公司

经 销 全国新华书店

开 本 710mm × 1000mm¹/₁₆ 印张 11³/₄ 字数 223 千字

版 次 2017 年 4 月第 1 版 2017 年 4 月第 1 次印刷

社内编号 8658 定价 30.00 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, 电话: 010-84657880

前 言

据不完全统计,我国自燃或存在自燃危险的矿井已占到 60% 以上,因煤自燃而引起的火灾占矿井火灾总数的 90% 以上;仅我国北方地区,每年直接烧失煤炭资源 2×10^7 t,间接破坏煤炭资源 2×10^8 t。煤炭自燃严重威胁着矿井的安全生产,而且造成资源大量浪费,成为困扰我国煤炭资源持续开发与矿区可持续发展的重要问题。因此,我国政府已将煤矿自燃火灾的防治列入“中国 21 世纪议程”。“七五”至“十二五”期间,我国针对煤矿自燃火灾持续加大了攻关研究。

煤层自燃一般发生于地下数百米深处,由于人员无法靠近以及火源的隐蔽性,给防灭火工作带来了巨大困难。因此,自燃火源位置的精确探测一直是煤炭自燃防治的重大难题之一,也是一项世界性难题。地面同位素测氦技术探测火源位置作为一种行之有效的技术已在自然发火严重的矿井进行了应用,但目前还未形成完善的理论。因此,深入研究煤地下自燃时覆岩中氦的迁移规律及其影响因素,可进一步提高地面同位素测氦技术探测煤层自燃火源位置的精度,有效地解决矿井防灭火火源位置探测这一关键技术难题。

作者利用自己研制的煤自燃与测氦实验台进行了煤自燃实验,找出了煤自燃的特征温度及各特征温度下的标志气体与氦析出的数量关系,研究了不同射气介质及典型构造(断裂)在煤自燃过程中氦的析出规律。通过现场探测,结合实际灭火工程效果,得出了典型条件下地表氦异常与煤地下自燃的相互关系,并进行了数值模拟;结合煤自燃温度场及地气理论,建立了煤地下自燃时氦在覆岩中迁移的数学模型。通过长期实地现场观测,应用 CFD 模拟技术模拟了自燃危险区域,结合地表氦探测技术,验证了自燃危险区域与现场探测结果的一致性,为采空区自燃地面同位素测氦技术探测测场布置提供了科学

依据。

应该指出，掌握氡在地层中的迁移规律仍然是世界性难题，其研究依然是一个长期的过程，今后还需要做更深入的研究来充实和完善同位素测氡技术探测自燃火源的相关理论，以更好地服务煤矿生产现场。

感谢澳大利亚 ACARP 基金项目 “Laboratory - Based Study on Radon Emanation from Coal and its Vertical Movement in Overburden Strata” (项目编号: C13021) 和国家科技部国际合作重点资助项目 “煤自燃过程中氡的运移规律的研究” (项目编号: 2006DFA62520), 以及山西省国际科技合作项目 “煤升温氧化过程中氡在煤岩体中迁移的研究” (项目编号: 041004) 对本书出版的大力支持和帮助!

由于作者水平有限，书中难免存在不足之处，敬请批评指正。

作 者

2017 年 1 月于太原理工大学采矿馆

目 次

第一章 绪论	1
第一节 煤自燃火源探测技术研究现状	2
第二节 氡迁移规律的研究现状	7
第三节 煤地下自燃时覆岩中氡迁移规律研究内容	13
第二章 氡基本性质及自燃煤层覆岩中氡异常形成机理	15
第一节 天然衰变系及氡的产生	15
第二节 氡的基本性质	18
第三节 氡的来源	20
第四节 自燃煤层覆岩中氡异常形成机理	23
第五节 本章小结	31
第三章 煤自燃与测氡实验台及其控制系统的研制	32
第一节 实验台工作原理及构成	32
第二节 实验台工作流程及特点	46
第三节 本章小结	48
第四章 煤自燃生成气体与氡的关系及实验台温度场数值模拟	49
第一节 煤自燃理论	49
第二节 煤自燃实验生成气体相关性分析	52
第三节 实验台煤自燃温度场数值模拟	57
第四节 本章小结	75
第五章 煤自燃时覆岩中氡迁移的实验研究	77
第一节 氡在黄土介质中迁移的实验研究	77
第二节 氡在河砂介质中迁移的实验研究	90
第三节 氡在含断裂构造覆岩层中迁移的实验研究	99

第四节 本章小结·····	105
第六章 矿井自燃火灾中氩探测的现场观测研究·····	107
第一节 探测工艺及分析方法·····	107
第二节 浅埋藏薄基岩条件下火源位置的探测研究·····	109
第三节 深埋煤层条件下的探测研究·····	114
第四节 复杂地形地貌条件下的探测研究·····	117
第五节 基岩裸露地表条件下的探测研究·····	122
第六节 本章小结·····	126
第七章 煤地下自燃时覆岩中氩迁移的数值模拟·····	128
第一节 多孔介质中氩迁移的方程·····	128
第二节 半无限大介质中氩浓度的分布·····	130
第三节 煤地下自燃时温度对覆岩中氩迁移的影响·····	135
第四节 煤地下自燃时气体对覆岩中氩迁移的影响·····	138
第五节 煤地下自燃时覆岩中氩迁移的数值模拟·····	141
第六节 本章小结·····	143
第八章 采空区自燃危险区域数值模拟及上覆地表氩的析出规律·····	144
第一节 黄白茨矿 1293 工作面采空区自燃危险区域模拟 ·····	144
第二节 地面测氩技术现场探测·····	165
第三节 本章小结·····	166
第九章 结论与展望·····	168
参考文献·····	172

第一章 绪 论

我国是一个多煤少油的国家,已探明的煤炭储量占世界煤炭储量的 33.8%,可采量位居世界第二位,产量位居世界第一位。煤炭是我国重要的基础能源和重要原料,是不可再生资源。煤炭工业是关系国家经济命脉的重要基础产业,支撑着国民经济的持续高速发展。在《中国可持续能源发展战略》研究报告中,20 多位院士一致认为,到 2050 年煤炭在一次性能源生产和消费中所占比例不会低于 50%。可以预见,煤炭工业在国民经济中的基础地位将是长期的和稳固的,具有不可替代性,在未来相当长的时期内我国以煤为主的能源消费格局不会改变。

煤矿生产过程中,煤炭自燃严重威胁着矿井的安全生产。据不完全统计,我国自燃或存在自燃危险的矿井已占到 60% 以上,煤炭自燃而引起的火灾占矿井火灾总数的 90% 以上。仅我国北方地区,每年直接烧失煤炭资源 2×10^7 t,间接破坏煤炭资源 2×10^8 t,成为困扰我国煤炭资源持续开发与矿区可持续发展的重要问题。随着煤田的大规模开发,自燃火灾越来越成为煤矿安全生产的突出问题之一。因此,我国政府已将煤矿自燃火灾的防治列入“中国 21 世纪议程”。“七五”至“十二五”期间,我国针对煤矿自燃火灾持续加大了攻关研究。

太原理工大学防灭火专家邬剑明教授认为,矿井防灭火的关键在于自然发火的早期预测预报、火源位置的精确探测和火区信息检测,其中火源位置的精确探测一直是自燃火灾防治中的重大难题之一,也是一项世界性难题。中国煤炭学会常务副理事长胡省三研究员认为,隐蔽火源位置的非接触探测技术是 21 世纪前期煤矿安全领域应重点突破的关键技术之一。

因此,深入研究隐蔽火源位置的非接触探测技术是非常迫切的。

煤自燃是煤与氧自发产生的氧化放热反应,是一个极其复杂的、动态的、自加速的、自组织的非线性过程,其实质是一个缓慢的自动氧化、放热、升温最后引起燃烧的过程。随着煤自燃过程的发展,煤体内的各种参数都在发生变化,进而造成高温区域的位置、温度随时间发生动态改变。

煤层自燃发生于地下数百米深处,由于人员无法靠近以及火源的隐蔽性,给防灭火工作带来了巨大困难。已故中国工程院院士戚颖敏认为,采空区火源探测的问题在我国依然是一项开放性课题,还需要继续加大力度,花费一定的时间与

人力物力进行研究。

国内外学者在地面曾应用钻探、物探等传统方法进行了火源探测的实验研究,但由于经济和技术上的原因均未能获得成功。太原理工大学(原山西矿业学院)在20世纪80年代首次将同位素测氩技术应用于煤矿自燃火源位置的探测,进行了一定的理论研究和大量现场的实际应用。同位素测氩技术探测煤层自燃火源位置的理论基础是煤体温度升高过程中氩及其子体在煤岩体中的迁移规律,但目前氩及其子体在煤岩体中的迁移规律在全世界范围内并没有形成一个完善的理论;在进行理论研究的同时,国内外学者也进行了实验研究,以便弄清楚真实的氩迁移规律,但有关地下煤层自燃对氩迁移规律影响的研究很少,公开发表的文献中也没有这方面的研究。本书内容重点研究煤地下自燃时覆岩中氩的迁移规律,旨在提高同位素测氩技术探测煤层自燃火源位置的精度,可有效解决矿井防灭火火源位置探测这一关键技术,是建立本质安全化矿井的重要科学前提,具有重要的科学意义和应用价值。

第一节 煤自燃火源探测技术研究现状

为了解决煤层自燃火源位置探测的难题,各国学者对此进行过许多实验研究。其探测原理均是探测煤自燃过程中煤体本身或周围介质的物理性质或化学性质的改变量,以此作为信息来反映自燃程度。其探测方法有温度测定法、无线电波法、地质雷达法、遥感技术、物探、化探及同位素测氩法等。总体上可将火源探测方法分为井下探测法和地面探测法两种。

一、井下探测法

1. 温度测定法

温度测定法可分为接触型和非接触型两种。接触型温度测定法是在煤壁内钻孔,预先埋设测温探头,定期对温度进行检测,以发现煤体内温度的变化情况。非接触型温度测定法则是应用远红外成像技术在井下测量煤体的升温状况。非接触型温度测定法在井下采用红外热成像仪探测煤体升温,其有效探测距离为30 m,30 m外的低温氧化体及高温点存在位置不能预测,受水影响地段的探测准确率偏低。这两种方法在我国也有实验研究。煤科总院合肥研究所曾做过这方面的研究,因探测范围有限且受井下气流、煤岩体及设备重叠高温源的影响,温度测定法仅能探测煤壁自燃,对采空区火源位置探测则难以适应。

2. 无线电波法

无线电波法的工作原理如图1-1所示。温度传感器将所测温度物理量转变

为无线电波传出采空区，由巷道内的接收机接收后再将电信号转变为温度的物理量。在采空区，随工作面推进一定距离放置可发射无线电波的温度传感器，当采空区升温时，传感器发射无线电波，巷道内接收器可接收到发射信号，并记录该信号的发射地点

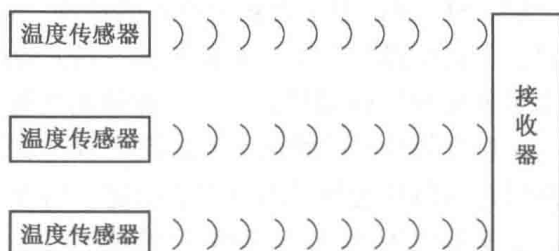


图 1-1 无线电波法的工作原理

和温度变化量，从而起到探测火源位置与预报作用。重庆煤科院对此方法进行了实验研究。

目前，无线电波法仍处于试验阶段，其存在的主要问题是探头维护困难且成本较高，不适用于对采空区火源位置的探测。

3. 地质雷达法

地质雷达法的基本原理是：发射天线将高频电磁波以宽频短脉冲形式发射至地下，电磁波在地下介质中传播时会因介质电性的不同而发生不同程度的衰减，且遇到不同介电性质（断层、破碎带、高温带等）的分界面时会发生反射，反射信号被接收天线接收，经数字信号处理即可得到反映地下介质电性分布的雷达图像；结合具体地质情况加以分析验证，从而可探明煤田自燃区的分布情况，为灭火工作提供依据。

一般原煤具有较高的电导率，而自燃区上覆岩层长期受煤层自燃烘烤，含水量小，电导率低，巨大的电性差异可以区分出原煤层与围岩；煤层经过自燃成为部分氧化煤或完全氧化煤，其成分发生巨变，从而引起电性的明显改变。因此，利用地质雷达法很容易区分完全燃烧煤、部分氧化煤及原煤。

从地质雷达图像的单道波形来看，原煤区有很强的反射（图 1-2a），而自燃区则无明显的反射界面，波形比较凌乱（图 1-2b）。利用地质雷达法探测火源时，其波的衰减过快，并且在井下非连续介质中作温度的定性

或定量分析缺乏准确性，缺乏可靠的对比参数，区分构造体与自燃隐患或自然发火源困难。目前，地质雷达法尚处于实验研究阶段。

4. 双元示踪法

双元示踪法的原理是利用灭火剂 1211 (CF_2ClBr) 在高温下

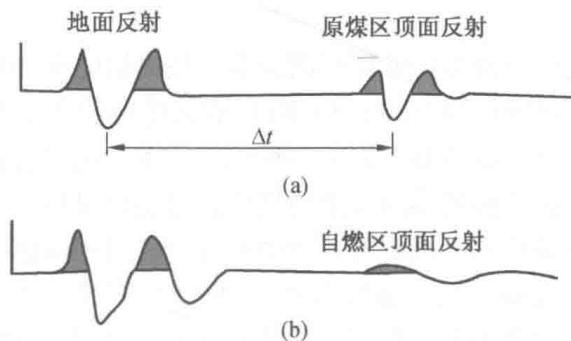


图 1-2 地质雷达的单道波形

易分解、 SF_6 在高温下热稳定性好的特点,通过两种气体在释放时与接收时的浓度对比,得出煤是否发生了自燃,达到火源探测的目的。探测工艺是在进风侧同时定量释放 SF_6 和 1211,在回风侧检测两种气体的浓度,如果 1211 减少,则说明在示踪气体流经的线路上有高温火源存在。该方法只能定性判定有无高温点,但高温点具体位置与范围则无法确定。另外,灭火剂 1211 热解温度在 $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,在实际应用中,该温度有些偏高。

5. 数值分析法

辽宁工程技术大学、中国矿业大学、西安科技大学等单位针对数值分析法做了大量研究工作。该法的原理是:在采空区周边测量与火源定位有关的参数,如温度、火灾气体浓度等,以这些参数为边界条件并结合某一数学模型(如三维非线性流场理论、渗流理论、有限元理论等)进行数学推导,从而确定出这些参数在采空区内达到最大值的点,该点即为煤炭的自燃火源点。严格来讲,数值分析法仅是一种分析方法,其模型是建立在一定假设基础上的,与实际情况存在较大差异,且受井下气流及外界因素干扰,在现场应用中存在许多待解决的问题,而且对已采区煤层自燃不适用。

6. 井下火灾气体测量法

当煤炭发生自燃时,随着温度的升高会产生 CO 、 CH_4 、 C_2H_6 和 C_2H_4 等气体。实验研究证明,该气体组分与温度有一定的规律,因此这些气体的量可以作为衡量自燃发生程度的指标,故而将它们称为指标气体。该法通常用仪器或束管检测系统检测煤自燃释放的指标气体,以确定煤氧化的温度和煤炭自燃火源点的大致范围。但用该法无法知道煤炭自燃的确切位置和发展变化速度,且测量结果易受井下通风因素影响。井下火灾气体测量法在国内应用极为普遍,此法可对煤炭自燃火灾发展的态势进行预测预报。

二、地面探测法

1. 遥感技术

遥感技术是 20 世纪 60 年代兴起的一种非接触型探测技术,是根据电磁波理论,应用各种传感仪器对远距离目标所辐射和反射的电磁波信息进行收集、处理,最后成像,从而对地面各种景物进行探测和识别的一种综合技术。利用地表热效应、植被效应和边界裂隙等综合因子在遥感图像上的反映,可实现煤田大面积火灾区域的探测。中国煤炭遥感地质中心、地矿部遥感中心等单位利用遥感技术完成了我国三北地区煤自燃与环境普查(属区域性普查),但对生产性矿井煤层火灾治理指导意义不大。印度、美国等国家也利用遥感技术开展了煤田火灾探测工作,但由于探测深度受地表热辐射背景以及上覆岩层岩性、构造的影响,一

般探测深度为 50 ~ 160 m。

利用遥感技术进行大面积煤田火区调查时间长且投资大,故很难用于大面积监测,其实用性仍受到限制。

能探测热红外辐射的遥感卫星有 NOAA 气象卫星及装有 TM 传感器的陆地卫星。据分析,NOAA 气象卫星 AVHRR 图像分辨率低,只能分辨燃烧面积较大的煤田火区,对火区细节(即火区内各处火情变化)反映差,获取的信息不能服务于灭火工程;而装有 TM 传感器的陆地卫星生成的 TM 图像不具有较高的空间分辨率(热红外波段分辨率为 120 m)。

2. 地面火灾气体测量法

地面火灾气体测量法的原理是:煤炭自燃火源区域与地面存在一定的压差和分子的扩散,煤自燃时产生的气体会在压差的作用下向地面迁移,从而在地表层中产生一些有代表性的气体(从煤炭自燃源点垂直方向放射的);因此在预定自燃源处布置 10 ~ 30 m 的方形寻找网,在寻找网点处打深度为 1 ~ 1.5 m 的钻孔,从中取气样(CO 、 CH_4 、 C_2H_6 、 C_2H_4 、 H_2 等)进行快速分析,并将分析结果绘制成气体异常图,并根据最大含量的代表性气体确定火源点的大致位置和火灾的燃烧程度。由于利用地面火灾气体测量法时气体须能够不断向上迁移而不与其他物质发生化学反应,因此要使气体能扩散至地面,矿井通风必须是正压通风。地面火灾气体测量法虽能大致确定自燃火源的位置,但其结果易受采深、自燃火区上覆岩层性质、地表大气流动的影响,仅作为探测火源的辅助手段。

3. 磁探测法

磁探测法是物探方法中最古老的一种。磁探测法最早用于研究大地构造及解决地质填图中的一些问题。煤层上覆岩层中一般都含有大量的菱铁矿及黄铁矿结核,当煤炭自燃时,上覆岩层受到烘烤,其中的铁质发生物理化学变化,形成磁性矿物,并且烧变岩在高温冷却后仍保留有较强的热剩磁。由于火区存在这一特殊的磁性特征,使磁探测法勘探自燃火源边界成为可能。然而,烧变岩需 400 ℃ 以上的温度方可有足够的磁性,而自燃初期的煤田难以达到此温度。生产矿井采空区中有很多磁性遗留物,给磁探测法探测火源位置带来了很大干扰;煤层顶底板岩石中分布的铁质结核不均匀,实测的磁异常可能形态复杂,呈波状或锯齿状变化,测线不完整,平面上连续追踪性较差。因此,磁探测法更多地应用于煤田自然发火火区,而生产矿井采空区遗煤自燃或煤柱自燃火灾的探测则受到限制。

4. 电阻率测深法

电阻率测深法简称电测深法。它是在地面的一个测深点上(即 MN 极的中点),通过逐次加大供电电极 AB 极距的大小,测量同一点、不同 AB 极距的视电阻率 ρ 值,研究这个测深点下不同深度的地质断面情况。

在自然条件下,影响煤炭、岩石电阻率的因素主要有煤岩的矿物成分、结构、构造、煤岩孔隙度和含水性。根据大量多孔性岩石电阻率的测定,统计得出如下经验公式:

$$\rho = a\eta^{-m}S^{-n}\rho_0$$

式中 ρ ——岩石电阻率;

ρ_0 ——填充于孔隙中水的电阻率;

η ——孔隙度;

S ——含水饱和度;

n ——饱和度指数;

m ——孔隙度指数;

a ——比例系数。

正常情况下,埋藏于地下的煤层,沿走向(或其他方向)因其结构状态和含水性变化不大,电阻率基本保持不变。而在煤炭自燃过程中,煤层的结构状态及其含水性会发生较大变化,从而引起煤层及周围岩石电阻率的变化。在自燃初期,由于空气中的水分逐渐凝聚,使得裂隙中的水分增加,导电性增强,会导致电阻率下降。自燃后期,由于煤层充分燃烧,其结构状态发生较大变化,水分蒸发,表现为较高的电阻率值。这就是电阻率测深法探测煤炭自然发火火源位置与范围的原理。电阻率测深法受大地杂散电流的干扰大,在测区附近有高压线、大型电机等设备时将使测定数据受到干扰,对区分地质构造与火源存在多解性,另外该法也受地形的影响。故此法主要应用于露天开采矿井或煤田的煤层自然发火火源位置探测。在埋深较大时,探测火源位置难以取得明显效果。

5. 浅表米测温法

浅表米测温法即1 m深度测温,是一种浅层测温方法。通过探测近地表1 m深度的温度,对所得米温异常进行分析处理,可定性了解地下深处热源的赋存状况。浅表米测温法对浅层着火区的探测反映明显,不受仪器设备、电缆钻孔和巷道等的制约,测量简便易行,是一种较为有效的着火区探测方法。但由于实际地下采空巷道十分复杂,目前尚难对深部采空巷道进行探测,而且浅表米测温法易受地表气温、地形等的影响,特别是导气裂隙容易引起米温假异常,因此必须结合钻探等资料进行综合分析。在今后的研究与应用中,应深入研究浅表米测温法所得测量结果在灭火效果评价中的应用。

6. 同位素测氩技术

同位素测氩技术由太原理工大学矿业工程学院首创。从20世纪80年代中期开始,太原理工大学进行了地面同位素测氩技术探测煤层自燃火源位置与范围的研究,其原理是利用煤岩介质中天然放射性氩随温度升高析出率增加的特性,在

地面探测氡的变化规律,并经过一系列数据分析处理从而给出火源位置、范围及发展趋势。1996年以来,太原理工大学改进了探测方法及仪器,研制了测氡探火(CDTH)数据处理软件包,根据探测结果可绘出火区分布平面图、立体图和火源发展趋势图。目前,探测深度可达600 m,理论研究深度可达800~1200 m,且能探测出高温氧化点。该技术操作简便、成本低、精度高、抗干扰能力强,缺点是要求地表有一定的表土层,受水的影响大。目前已在我国山西、山东、内蒙古、河南以及澳大利亚等自然发火严重的矿区进行了应用,为矿区防灭火工作提供了科学依据。该技术于2000年7月被山西省科技厅鉴定为“国际领先水平”。

第二节 氡迁移规律的研究现状

自1900年德国物理学家F. E. Dorn发现元素氡以来,氡及其子体一直受到科学界的广泛关注,被广泛应用于矿产地质、水文地质、工程地质、灾害地质、环境地质等方面的测量探测中,取得了良好效果。然而,人们在拓宽其应用领域、研究测量技术的同时,也对氡及其子体的释放和迁移规律进行了研究。迄今为止,氡及其子体是如何从地下深处迁移到地表附近,为何在地面数千米的高空也含有大量的氡及其子体,一直是困扰科学界的难题之一。国内外学者对氡及其子体的迁移规律研究还处在实验阶段,目前只是提出了一些假说,认为氡的迁移是一个很复杂的过程,受多种因素制约,是多种迁移机制的综合。在地壳深部,由于受氡半衰期短的限制,首先是氡的母体铀、钍的迁移,铀、钍迁移到地球浅层后聚集,发生衰变产生氡,氡再通过扩散理论、对流作用、抽吸作用、泵吸作用、地下水的搬运作用、伴生气体的压力作用、地热作用、地震应力作用引起的毛细压力的变化、大气压力的纵深效应等迁移到地表。

100多年来对氡及其子体的迁移研究主要可以分为两个大的方面,即外因方面的研究和内因方面的研究。外因方面的研究起步较早,在20世纪30年代就已经开始;内因方面的研究较晚,20世纪末21世纪初才开始。

一、外因引起氡迁移的机理

1. 扩散对流作用

扩散对流作用是最早提出的氡迁移机理的假说。最早由Flügge和Zimens提出氡迁移是扩散引起的。扩散迁移机制认为,由于浓度的差异引起氡从高浓度向低浓度的地方迁移。它是建立在Fick定理基础上用于解释氡迁移的一种理论,至今仍被认为是氡迁移的重要机理。几十年来,这个理论模式一直是解释氡迁移的主要依据。苏联学者在这方面建立了一整套各种不同形态射气的理论计算公

式,根据这些公式计算,氦射气在岩层中向上迁移的距离一般只有几米。如果再加上对流作用,迁移距离最多也只有几十米。随着氦测量技术的广泛应用与深入研究,人们发现只用扩散理论不能解释所观测到的众多现象。

为了弥补扩散理论的不足,Fleisher 和 Mogro - Campero 提出了流体对流理论,即由于地温梯度和压力梯度的存在,在地下空间可以存在气体的对流,其迁移速率可以使氦迁移很长距离,远远超过扩散作用。并指出在高渗透区,热对流可能是氦迁移的一种主要模式。

刘庆成等在前人工作的基础上设计了一种氦迁移模型,用氦迁移的扩散对流理论检验了实验结果,证明近地表岩石、土壤和空气氦的迁移可以用扩散对流理论解释。

李良应用气体扩散理论,给出了水氦异常变化与体积应变的关系式,证明由于气体的扩散效应,水氦异常的变化可使体积应变量有相当于 1×10^5 的放大作用,这可能是氦异常灵敏的主要原因。

李韧杰根据氦在多孔介质中迁移的理论,导出氦在充满流体的空隙中行进的动力有体积活动梯度和压力梯度两种,即扩散和对流。扩散是低渗透性土壤中氦迁移的主要方式,而对流是较高的可渗透性土壤中氦迁移的主要方式,多数情况下氦迁移是这两种迁移方式的结合。

程业勋等讨论了近地表空气中氦迁移的理论方程,并给出了室内模拟实验,进而讨论了扩散系数、对流系数及氦析出率等参数的选择问题。

2. 孔隙流体作用

孔隙流体作用理论是建立在达西定律基础上的一种氦迁移机制。该理论认为,在毛细孔隙中,氦被流动的气体或水携带运动。迁移距离依赖于流体流动速率,这使长距离迁移成为可能。Tanner 就氦扩散和流体的携带机制进行了详细论述。S. Lombardi 等提出氦浓度与岩石的渗透系数有关。Wilkening 提出氦半衰期很短决定其迁移距离很短,深部氦的迁移需要依靠一种相对快速运动的气体。

Lennart Malmqvist 等通过用“倒置杯子”方法在不同深度的土壤中测量氦的浓度以及对同一剖面的钻孔中取岩心样测量氦的扩散等的结果,发现地下流体也非常重要,并主导着氦在地下迁移。

李亚平等认为水中氦的迁移主要取决于水的迁移,地下水的运动成为氦迁移到地表的一个重要途径。

叶树林等认为滑坡作用导致土体和岩体中已有裂隙和潜在裂隙增多或发生破裂,土体和岩体的连通性变好,使其中流体沿裂隙迁移运动,从而带动氦向上迁移。

戴华林等研究了测氦定位隐伏断裂的理论基础,当岩石中存在岩溶、节理裂隙、断裂破碎带时,它们便是地下水和气体良好的储存场所和迁移通道,而水和气体的运动带动了氦的迁移。

3. 气体或微气泡搬运作用

20 世纪 80 年代 J. E. Gingrich 提出了气体搬运假说,认为扩散可以使氦原子离开矿物而运动,并以极短的距离迁移而进入开放的或者充满水的颗粒间的微孔中。在此,也可以发生其他重要的搬运形式。这些搬运机制通常分为两个范畴——地球的力学作用和流体的对流,从而使氦迁移的距离大大超过扩散作用。

微气泡理论认为,在潜水面以下存在着微气泡,氦附着在微气泡上向上迁移,速率很快,可以迁移很长的距离。而在潜水面以上,氦主要以扩散和对流方式迁移。

Kristiansson and Malmqvist 曾在地下 6 m 进行的氦测量中,证实了向上流动气体的存在。地下水面以下向上携带氦的气泡已被 Somogyi 和 Lenart 在实验室中证实。

4. 应力应变作用

应力应变的变化可引起岩石孔隙的压缩、膨胀以及裂隙的产生和发展,岩石的变形及次生效应、断层的错动蠕动等都可引起氦的迁移。

车用太等认为,含水岩层是多孔隙介质,在很低的应力水平下发生变形,从而改变岩体的孔隙率及孔隙压力,导致水动力水平和状态的变化,由此引起氦的迁移。

张朝明等通过研究井孔-含水气层物理模拟实验以及地下水气补给与逸出气动态的关系实验得出:地下逸出气动态的最基本特征是突发、阵发。其形成机制可解释为在逸出气的迁移、排放过程中存在地壳应力应变积累释放的往复过程。

5. 温度压力作用

当空气温度较高时,在热作用下,水蒸气蒸发,致使地下的氦不断向上迁移,这就是抽吸作用;另外,由于地热梯度的关系,气体在向冷的部位流动时,带动氦的迁移。压力作用包括伴生气体的压力作用和大气压力的纵深效应。

李韧杰对废石和尾矿氦的析出率与温度压力的关系进行了相关性分析,发现气压的变化会使氦的析出产生一个瞬时变化,原因是气压的变化在大气、废石和尾矿之间产生了压力梯度,导致其中的气体垂向迁移。地温和气温的差与氦析出关系密切,温差增大,氦的析出率也增大。

程业勋等对我国各地氦的测量结果研究发现,空气中氦浓度的日变、地下 1 m 以下的年变与气温存在很好的相关性,即每天气温最高时间段(12:00—

14:00) 氡浓度最低, 夜间温度最低时间段(2:00—3:00) 氡浓度最高; 每年温度最高的6—8月空气中氡浓度最低, 温度最低的12月到来年1月氡浓度最高。日温差大的季节和年温差大的地区空气中氡浓度变化幅度较大(除此之外, 风的影响不可忽视)。地下1 m以下土壤中氡浓度的日变化不明显, 而年变化差不多滞后半年, 故1—2月才是氡浓度的最低值。这一方面由于太阳辐射的大部分被反射, 只有少部分进入土壤; 另一方面由于土壤的导热率很低, 太阳辐射传到地下深处要经历较长时间, 地表温度的年变化传入深部要滞后大约半年。这说明地下氡浓度的年变化主要也是温度变化所致。

6. 接力传递作用

Folger等用数值模拟方法研究了水氡的迁移, 认为水氡是依靠其载体的流动而迁移, 但长距离的迁移与其母体铀、镭的迁移息息相关。

白云生等分析了多种氡的迁移机制, 认为氡的迁移距离在多数情况下取决于铀矿体周围地质作用而发育起来的原生晕和次生晕的发育程度, 氡的母体镭元素的迁移距离在很大程度上决定了氡的迁移距离, 铀矿床氡迁移机制一般为多棒接力传递作用。

吴慧山等认为, 根据氡的半衰期, 扩散和对流只能使氡做短距离迁移, 长距离迁移要依靠接力传递作用实现。

二、内因引起氡迁移的机理

内因引起氡迁移机理研究是近几年才开始的, 还处在探索阶段, 一些结论是在理想条件下得出的。

1. 团簇理论

成都理工大学贾文懿等在室内较理想的条件下进行了氡及其子体的迁移规律及机理研究, 发现: ①氡及其子体的纵向迁移能力远大于横向迁移能力; ②氡及其子体比重很大, 但其向上迁移的贡献大于向下迁移的贡献; ③氡及其子体和母体衰变放出的 α 粒子减速后形成 ^4He , 能与它们形成团簇, 当其密度小于空气时, 能自行上行, 成为氡及其子体向上迁移的内因。即氡及其子体迁移时, 可视作为长寿放射性元素, 故其在地壳中上升距离可远远超过数十米甚至数百米。

贾文懿等通过实验研究了氡在不同介质模型中的迁移情况, 发现氡及其子体在竖直的封闭空气模型中迁移距离大大超过27 m, 远超过扩散作用下氡的迁移距离; 而且, 在空气、砾石、水和砂介质模型顶端, 氡及其子体均呈阵发性而不是连续性变化。他认为, 出现这些异常情况是由于氡及其子体的产生与衰变有关, α 粒子(即 ^4He)能与氡及其子体形成 $\text{He}-\text{Rn}$ 等团簇, 进行长距离迁移。同时, 因为团簇的形成需要一个过程, 所以表现出阵发的性质。并且来自铀矿石