

煤层应力变化与 He, Ar 发射关系*

朱 铭^① 周瑞光^① 尹代勋^② 成彬芳^① 张福松^①
刘 强^① 罗信华^②

(^①中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029; ^②南桐矿务局, 重庆 630802)

摘要 岩石、岩体中稀有气体 He, Ar 的发射能反映地质体中现存的应力状态, 通过对重庆南桐矿区鱼田堡煤矿煤体应力状态与煤、瓦斯突出关系的研究表明: (1)从抽放孔瓦斯中所测的结果表明, 在被卸压煤层的应力集中带有 He 明显的发射, 在量值上比空气高几十倍, 而且可以随应力集中带的迁移而迁移. (2)氡的组分和同位素的峰值则位于应力释放的位置. (3)在回采面上, He 与 Ar 的变化在瓦斯突出的预测上可以构成重要的数据对; 它们对应力状态的响应比瓦斯的响应灵敏度高得多. (4)在抽放孔中 He, Ar, CH₄ 的等值图对于显示煤体(包括其他地质工程体)应力相对大小与方向随时间、空间的动态变化也十分有意义, 具有潜在的利用价值.

关键词 He Ar 和 Ar 同位素 应力发射 瓦斯突出预测 工程地质体的评价

稀有气体与地质应力之间的关系, 在近二三十年以来的地震研究中已被国内、外地震工作者所重视. 近来学者在地震带的研究已经表明, 地应力的改变可以造成地震区地质体中惰性气体的发射^[1-4]. 在 1981 年 Holub 等^[5]曾研究了花岗岩在应力条件下的 Rn 的发射, 结果表明在二分之一 σ 的情况下, Rn 能大量发射. 1983 年 Honda 等^[6]研究了各种岩石在单轴应力条件下 He, Ar 的释放效应. 其结果表明被压过的样品的去气主要依赖于膨胀过程而产生的新生表面. 他们的研究表明 He, Ar 的释放效应只与应力改变的物理过程有关. 对于这种由地质动力过程造成的气体发射现象被 Ozima 称作为应力发射(stress emanation)^[7]. 地震是一种大范围量级的地质动力现象. 那么, 这种应力发射能否在工程地质量级内找到呢? 这就是本文要讨论的内容.

在工程地质研究中, 最关心、最重要的问题之一是工程地质体的灾害预测与评价. 为此, 工程地质体本身地应力变化的监控是十分重要的研究内容. 目前对于硬的、较硬的岩石应力测量相对比较可靠, 而对于软岩、破碎岩、土岩的地应力测定尚缺少可靠的方法. 况且, 即使是在硬岩的研究中, 也难以了解各个构造部位的实际异同.

煤岩实际上也是一种软岩. 由于它富含 U, Th, K, 所以在漫长的地质历史时期中可以积累放射性成因的子体 He 和 Ar. 此外, 还可以在不同的地质时期(包括近代)中俘获一定量的非放射性成因的空气来源的 He 和 Ar. 因此, 在煤和瓦斯中具有较高的 He 丰度及 Ar 同位素比值. 在煤矿开采过程中, 不同地质构造部位的相对应力状况有时也是已知的, 而且随着开采部位的推进而发生变化. 这样就有可能找到应力与稀有气体发射之间的关系. 在我国南方龙潭煤

系的煤矿一般都有大量的瓦斯抽气孔, 这样就为样品采集提供了有利的条件. 因此, 煤矿就成了软岩体应力与气体发射关系研究的理想的天然实验场.

1 地质概况、样品位置与测量

本研究区位于重庆市南 130 km 南桐煤矿区的鱼田堡矿. 该矿区煤、瓦斯突出¹⁾严重, 1955 年以来共发生过 1200 多次, 突出煤量在 500~1000 t 的有 8 次, 1000 t 以上的有 2 次. 该区含煤地层是属于龙潭煤系, 共有 7 层煤, 其中 4, 6 两层为可采煤层. 4 号煤层厚 2.5~3.2 m, 是主采层, 但普遍发生瓦斯突出. 6 号煤层只发生局部突出. 在地质构造上, 鱼田堡矿主体位于八面山向斜, 其东西两翼分别为鸦雀崖扭褶带及鱼塘角扭褶带. 八面山向斜的中部有 F1 断裂, 大型突出都集中在 F1 断裂附近及鸦雀崖扭褶带. 为了减少煤、瓦斯突出的危险性, 在工程上首先开采只有局部突出的 6 号煤层作为 4 号危险煤层的卸压层(在工程上把为了危险煤层卸压而先开采的煤层称为解放层, 而被卸压的煤层则称为被解放煤层), 由于 6 号煤层的开采, 在 4 号煤层的不同部位就形成了不同的受力状态(传统上可分为 4 个带: 正常压力带、应力集中带、压力衰减带、完全卸压带). 随着下部 6 号煤层回采面的推进, 其上部煤层不同部位的应力状况也发生相应的迁移. 虽然采取了这样的工程措施, 瓦斯突出的问题仍然十分严重. 为了进一步减小 4 号煤层在开采时突出的危险性, 又在 4 号与 6 号煤层之间专门开凿巷道, 从该巷道向上对 4 号煤层按一定密度打钻孔、连接管道, 建立瓦斯的抽气系统. 这些钻孔, 为作者提供了一个矿山级的实验室. 本文的样品采自南桐矿区鱼田堡矿的 2602 采区(-30 m 水平), 3601 采区(-100 m 水平). 对 2602 采区进行过两次采样, 时差为 8 d. 更有意义的是, 在抽放孔样品研究的基础上, 还对另外 2 个实际的采煤巷道——3602 机巷²⁾及 2306 风巷³⁾进行了跟踪预测.

样品测量由作者带到南桐煤矿的 LZL-902 四极氦质谱计(经改装后可同时测量 He, Ar)完成的, 有关方法已被赵东植等^[8]做过描述与讨论. 为了讨论方便, 在这里借用类似于同位素地质学中常用的一种表示数值大小的方法, 也就是把测得的样品中 He, Ar 值与空气中的标准值进行比较的方法. 测定的结果用下式进行计算与表示:

$$\delta\text{He} = (\text{He}_s - \text{He}_a) / \text{He}_a, \quad (1)$$

$$\delta\text{Ar} = (\text{Ar}_s - \text{Ar}_a) / \text{Ar}_a, \quad (2)$$

$$\delta(^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}) = [(^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar})_s - (^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar})_a] / (^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar})_a. \quad (3)$$

其中角标 s, a 分别代表样品与空气组分.

2 抽放孔瓦斯中 He, Ar, CH₄ 的分布特征

测定结果列于表 1, 结果表明:

2.1 在应力集中带, 煤体中的 He 强烈发射

He 有 2 个同位素, ³He, ⁴He. 前者是地球的古老成分, 它的丰度很低, 仅有后者的 10⁻⁶ 量级. 而 ⁴He 是 U, Th 放射性系列衰变的不同阶段的 α 质子转变的. 因此, 一般所说的 He 就是指

1) 煤与瓦斯突出是煤矿在采煤过程中存在的一种地质动力现象, 它能在极短的时间内(多则几分钟少则几十秒钟)由煤体向巷道与采场突然冲出大量的煤与瓦斯, 造成一定的、甚至是十分巨大的破坏作用, 可以造成人员伤亡和财产的重大损失

2) 是采煤巷道的一种, 为运送矿山机械而专设

3) 是采煤巷道的一种, 为送风而专设

^4He . 因为煤系地层有较丰富的 U, Th 组分, 所以煤系地层也像油气藏一样具有丰富的 He, 其丰度一般在 10^{-4} 量级, 比大气丰度(5.24×10^{-6})高得多, 因此大气成分混入对其影响可以忽略不计. 由于 He 的质量数是 4, 又具有最小的有效直径(0.2 nm), 因此, 它具有独有的穿透与逃逸能力.

在工作中曾发现了矿区量级的应力与 He 发射之间的关系, 并作了有关报道^[9,10].

从鱼田堡 2602 巷钻孔的第一次 δHe 测量值所作的三维图(图 1, 表 1)上可以看到, 被解放的 4 号煤层, 在相应于下部 6 号煤层回采面的前方有明显的 He 异常. 从该巷 2 次采样的结果发现, He 异常峰是随着应力集中带的迁移而迁移的. 从表 1 可以看到, 4 号煤层 6-4 孔中的 δHe 值, 从第一次采样时的 49.12% 降至 8 d 后 37.16%; 而 7-1 孔则由 15.43% 升到了 56.24%, 成为新的峰值孔. He 峰的位置迁移了 10 m. 与此同时, 6 号煤层的回采面也恰恰推进了 9.6 m, 与峰值迁移距离十分接近. 因此, 在被卸压煤层的应力集中带, 不仅有明显的 He 异常, 而且 He 发射的主峰位置是随着下部卸压煤层开采面的迁移而迁移的.

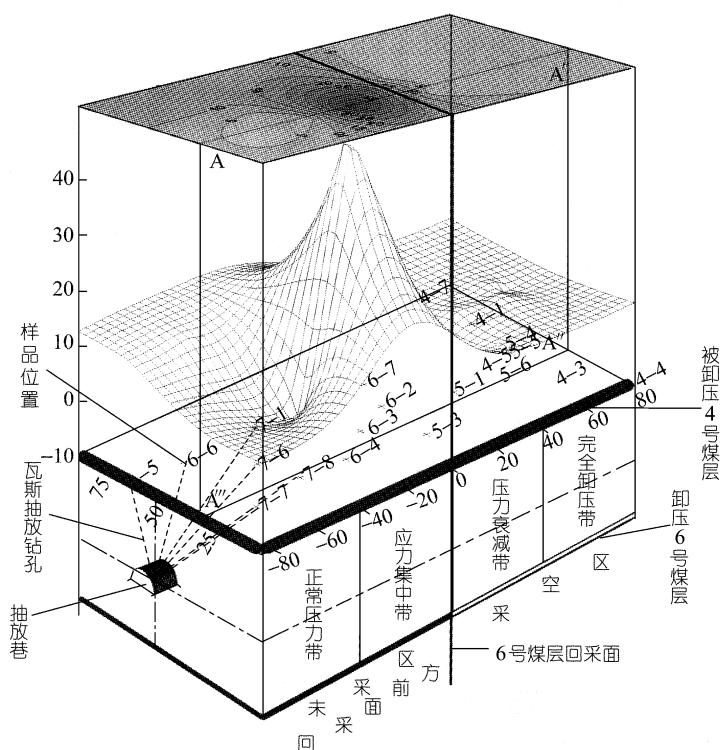


图 1 鱼田堡矿 2602 采区 4 号煤层应力集中带 He 异常

A-A'-A''-A''' 是 He 异常剖面位置, δHe 的坐标位置是 36, -85 到 36, 85

为了比较方便, 现将 3 个抽放巷的 He, Ar 和 CH_4 的等值图展示在图 2. 从这些等值图上可以看到各个采区 He 异常分布特征也是各不相同, 例如, 从图 2-d₃(δHe)中可以看到, 在 3601 采区 He 的异常不仅在应力集中带可看到, 而且还可以在回采面后方 150 ~ 200 m 处看到.

表 1 重庆南桐煤矿鱼田堡矿抽放巷钻孔氦、氩、甲烷测定的结果

巷道号	钻孔号	第 1 次测量值				第 2 次测量值			
		CH ₄ /%	δHe/%	δAr/%	(⁴⁰ Ar/ ³⁶ Ar) _g	CH ₄ /%	δHe/%	δAr/%	(⁴⁰ Ar/ ³⁶ Ar) _g
鱼田堡 2602	4-1	0.00		-0.12	298.70				
	4-2					80.00	3.26	-0.91	
	4-3	100.00	3.17	-0.98	763.60	100.00	3.26	-0.89	
	4-4	65.00	4.40	-0.81	414.28				
	4-4					90.00	2.93	-0.74	
	4-5	96.00	3.00	-0.93	521.74	100.00	2.40	-0.85	
	4-6					100.00	2.33	-0.36	
	4-7	40.00	1.85	-0.40					
	5-1	80.00	4.85	-0.85	450.00	100.00	2.43	-0.32	
	5-3	30.00	2.89	-0.41	326.31	100.00	2.31	-0.87	
	5-4	55.00	3.45	-0.95	325.71	80.00	3.31	-0.83	
	5-5	40.00	1.28	-0.45	385.71	65.00	1.18	-0.49	
	5-6	91.00	4.86	-0.90	521.05	98.00	0.96	-0.71	
	6-2	100.00	3.69	-0.98	452.50	96.00	4.69	-0.88	443.70
	6-3	25.00	31.46	-0.52	320.00	0.00	14.06	-0.34	385.26
	6-4	45.00	49.12	-0.47	350.00	15.00	37.16	-0.45	338.88
	6-6	60.00	12.12	-0.55	346.00	20.00	7.17	-0.23	333.00
	6-7	100.00	3.13	-0.95	502.00	100.00	3.41	-0.85	
	7-1	12.00	15.43	-0.23	323.00	78.00	56.24	-0.66	415.55
	7-2					0.00	1.42	-0.15	
	7-3					40.00	2.30	-0.10	
	7-4					0.00	0.50	-0.12	
	7-5	20.00	11.80	-0.14	300.00	42.00	3.98	-0.13	357.03
	7-6	0.00	5.58	-0.026	266.00				360.50
	7-7	1.00		-0.12		16.00	3.40	-0.044	330.00
	7-8	0.00	0.09	-0.048	294.00	0.00	0.61	-0.077	
	8-1				323.00	40.00	-0.32	-0.080	
	8-2					1.00	0.72	-0.028	315.00
	8-3					0.00	0.35	-0.064	325.00
	8-4					0.00	0.11	-0.020	338.00
	8-5					0.00	1.08	-0.096	337.00
	8-7					46.00	2.47	-0.45	369.00
	8-8					0.00	3.82	-0.15	326.00
	9-1					85.00	63.80	-0.87	400.00
	9-2					100.00	105.80	-0.60	397.90
	9-3					92.00	25.91	-0.44	381.42
	9-4					100.00	63.90	-0.81	407.50
鱼田堡 3601	4-2		47.96	-0.27	424.00				
	4-3		8.35	-0.99	430.00				
	4-6	100.00	67.05	-0.96	546.00				
	3-1	100.00	3.73	-0.97	471.00				
	3-3		2.30	-0.87	438.00				
	3-4	100.00	37.74	-0.91	487.00				
	2-1	100.00	1.40	-0.47	342.00				
	2-3	100.00	3.29	-0.95	683.00				
	1-1	50.00	0.96	-0.52	373.00				
	1-2	95.00	2.15	-0.84	453.00				

续表 1

巷道号	钻孔号	第 1 次测量值				第 2 次测量值			
		CH ₄ /%	δHe/%	δAr/%	(⁴⁰ Ar/ ³⁶ Ar) _g	CH ₄ /%	δHe/%	δAr/%	(⁴⁰ Ar/ ³⁶ Ar) _g
鱼田堡 3601	1-3	95.00	-3.89	-0.89	527.00				
	1-	45.00	2.91	-0.45	300.00				
	9-2	43.00	0.83	-0.50	366.00				
	9-3	95.00	2.21	-0.82	455.00				
	9-5	0.00	0.04	-0.02	330.00				
	9-6	75.00	1.48	-0.76	450.00				
	9-7	2.00	0.10	-0.08					
	8-1	72.00	4.68	-0.85					
	8-2	60.00	21.82	-0.62					
	8-3	3.00	7.78	-0.12					
	8-4	9.00	4.89	-0.11					
	8-6	15.00	34.20	-0.09					
	8-8	47.00	10.95	-0.52					

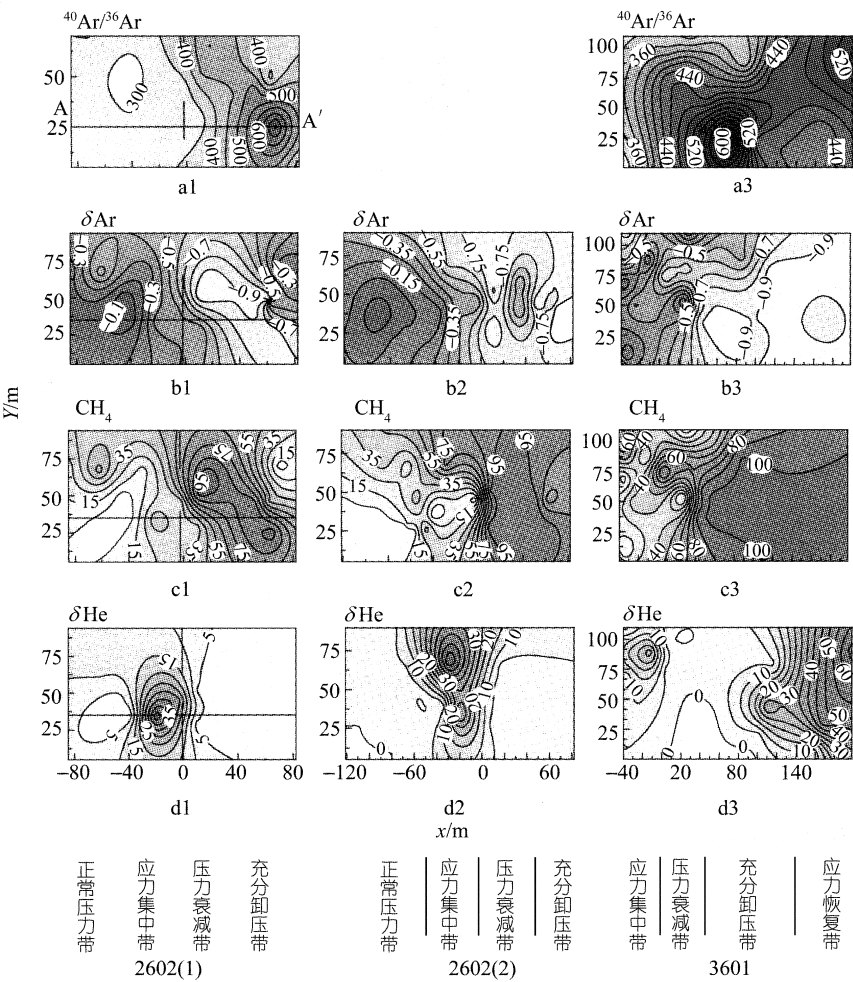


图 2 重庆南桐煤矿抽放巷 δHe , δAr , $(^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar})_g$ 和 CH_4 的等值图

在 b_1 , c_1 , d_1 中的 A-A 线坐标与图 1 中的 A-A'-A''-A''' 剖面坐标相一致的. 不过在 a_1 中剖面 A-A 线坐标是通过 Ar 同位素的峰值

2.2 Ar 的组分与同位素是应力释放程度的标志

在瓦斯中, Ar 也是一种提供有关应力信息的十分重要的组份之一. 它是由 ^{36}Ar , ^{38}Ar 和 ^{40}Ar 3 个同位素组成. 其中 ^{36}Ar , ^{38}Ar 是非放射成因的, 是地球古老的成分. ^{40}Ar 是放射性成因的, 是由岩石矿物中 K 的同位素 ^{40}K 衰变而来的. 在地球形成早期, 同位素 ^{40}Ar 并没有积累. Cameron^[11]根据核合成理论给出了 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比值为 2×10^{-4} , 王松山^[12-14]对陨石 Ar 同位素年代研究表明, 其原始 Ar 的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比值的平均值是 0.94^[14], 与 turner 等^[15]和 Pepin 等^[16]所测的月岩平均值 0.83 十分相似. 所以, 认为地球早期 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比值小于 1 是有理由的. 无论是 Ozima^[17], Hamanoy^[18]以及 Hart^[19]的大气演化的理论模型, 还是王松山的实测研究^[20]都表明在漫长的地球历史中 ^{40}Ar 是在不断地积累的, 其中一部分随地球去气进入到大气. 使大气中 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比值由小于 1 演化到现今被公认的 295.5^[21].

对于煤与瓦斯来说, Ar 的来源类似于天然气^[22], 也是多方面的. 它主要来源有 3 种: (1) 放射性成因源: 是来自煤系地层含钾矿物 ^{40}K 衰变的子体 ^{40}Ar ; (2) 继承源: 是来自煤系地层碎屑矿物在进入该沉积层前所包含的 Ar, 包括沉积计时前的放射成因 Ar^[22]. (3) 大气源: 是来自煤系地层俘获的不同地质时期, 由于地下水或空气直接带入的古大气 Ar, 此外, 还有在现今施工、采样过程中混入的现代大气 Ar. 为了方便讨论, 把工程施工、采样前进入的大气统称为古大气, 而把之后进入的统称为现代大气.

据上所说, 在瓦斯中 Ar 是由以下核成分构成的.

$$^{40}\text{Ar}_g = ^{40}\text{Ar}_r + ^{40}\text{Ar}_i + ^{40}\text{Ar}_{aa}, \quad (4)$$

$$^{36}\text{Ar}_g = ^{36}\text{Ar}_i + ^{36}\text{Ar}_{aa}, \quad (5)$$

其中角标 g, r, i, aa 分别代表瓦斯气的、放射性成因的、继承的、古大气的成分. 实际上, 除了放射性成因 $^{40}\text{Ar}_r$ 外, 继承的 Ar_i 和古大气的 Ar_{aa} 这两项都是非放射性成因 Ar, 可合并后以角标 o 表示. 这样(4), (5)式就写成:

$$^{40}\text{Ar}_g = ^{40}\text{Ar}_o + ^{40}\text{Ar}_r, \quad (6)$$

$$^{36}\text{Ar}_g = ^{36}\text{Ar}_o. \quad (7)$$

由(6)式除以(7)式, 这样, 瓦斯中 Ar 同位素比值就可以表示为:

$$(^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar})_g = (^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar})_o + ^{40}\text{Ar}_r/^{36}\text{Ar}_o, \quad (8)$$

如前所说, 在从抽放孔采集的样品中所包含的 Ar, 事实上是由瓦斯中的及现今大气中的两种 Ar 成分混合物构成的:

$$\text{Ar}_s = \text{Ar}_g + \text{Ar}_{ae}, \quad (9)$$

这里角标 s, g, ae 分别代表为样品的、瓦斯的和现代大气的成分. 由于现今大气中的氩 Ar_{ae} 丰度(0.934×10^{-2})比瓦斯中的 Ar_g (仅在 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ 量级之间)高得多, 因此, (9)式中的 Ar_{ae} 混入量对于的总氩量 Ar_s 是有很大的影响. 当大气 Ar 很小时, Ar_s 相对也较小. 因此, 将其代入(2)式所得的 δAr 也就偏小(数值上越偏负); 反之, 当抽放孔主要是现代的空气, 而瓦斯量较少时, 这样 Ar_s 相对较大, 同理所得的 δAr 也就偏大(数值上向零的方向变化); 根据(9)式, 样品中的 Ar 同位素将由如下组成:

$$^{40}\text{Ar}_s = ^{40}\text{Ar}_g + ^{40}\text{Ar}_{ae}, \quad (10)$$

$$^{36}\text{Ar}_s = ^{36}\text{Ar}_g + ^{36}\text{Ar}_{ae}. \quad (11)$$

最终

$$(^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar})_s = (^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar})_g + (^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar})_{ae}. \quad (12)$$

由于在现代大气中 $(^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar})_{\text{ae}} = 295.5$, 因此, 从(12)式可知, 抽放孔中瓦斯量越大时, 现代空气 Ar 混入量越少时, 所得的 $(^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar})_{\text{s}}$ 值越接近 $(^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar})_{\text{g}}$, 那么 $(^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar})_{\text{s}}$ 就越高(在瓦斯中, 由于放射性成因 Ar 的 $^{40}\text{Ar}_{\text{r}}$ 的积累, 使其同位素比值 $(^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar})_{\text{g}}$ 比大气的 $(^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar})_{\text{ae}}$ 比值(295.5)高得多). 反之亦然.

从图 2-a₁, b₁, c₁ 很清楚的看到, Ar 同位素比的高值区, 组分的 δAr 低值区及瓦斯的高值区都是一致地位于压力衰减带到充分卸压带, 也就是说位于应力释放区的位置(图 2). 这表明 Ar 组分及其同位素的大小是应力释放完全程度的一种标志.

2.3 不同压力带的 He, Ar, CH₄ 的综合特征

在正常压力带, 由于煤体几乎没有破裂, 透气性很差, 所以抽放孔中瓦斯浓度低, 这时样品中 Ar 的成分主要来自抽放孔中的空气, 故其 δAr 值较大(向 0 方向变化), 同位素比值也低, 在这种情况下 He 的发射也很弱. 当处于完全封闭状态时, δHe , δAr , $\text{CH}_4\%$ 3 个值都会趋于 0.

在应力集中带, 煤体还没有全部破裂, 只有部分瓦斯可以释放出来, 反映在样品中瓦斯量处于中等状态, 而由于煤体中气体组分与空气组分混合, 使 δAr 值与 Ar 同位素值也处于中等状态. 因为 He, Ar 和 CH_4 三组分的有效直径分别为 0.2, 0.28 及 0.32 nm, 无疑, He 的穿透力最强, 因此, 当通导条件对于 Ar 与 CH_4 来说还不能通过的时候, He 已经大量的发射, 形成峰值异常.

在过渡带和完全卸压带, 瓦斯逐渐加大, 现代空气 Ar_{ae} 混入量减小, 而煤瓦斯组分的 Ar_{g} 却逐渐加大. 当 $\text{CH}_4\%$ 达到 100% 时, Ar 的组分也全部是由煤瓦斯中的 Ar_{g} 组分构成, 因此, 这时 Ar 同位素比值 $(^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar})_{\text{g}}$ 也最高, 同时 δAr 值由 0 向 -1 方向变化, 显示了原始值得特征. 由于 He 已在应力集中带首先获得释放, 故在后两个带中其量已衰(图 2-d₁, d₂, d₃).

在不同应力状态下, 对于同一点位上的 He, Ar, Ar 同位素以及甲烷量的相对关系, 可以从图 1, 2 上的 A-A' 方向剖面图(图 3)显示出来, 从图 3 可看到 He 仅仅在应力集中带明显发射, 而 Ar 同位素的最大值则显示在应力释放的完全卸压带. Ar 与 CH_4 之间也呈明显的反相关.

2.4 在等值图上可以显示出 δHe , δAr 和 CH_4 之间具有对应性、不均一性及方向性特征

从传统的概念上认为, 正常压力带、应力集中带、应力衰减带、完全卸压带似乎是平行分布的. 但等值图(图 2)的结果表明它们之间并非如此的简单. 此外, 它们可以提供许多有价值的动态信息. 从图 2 中还可以看到以下特点:

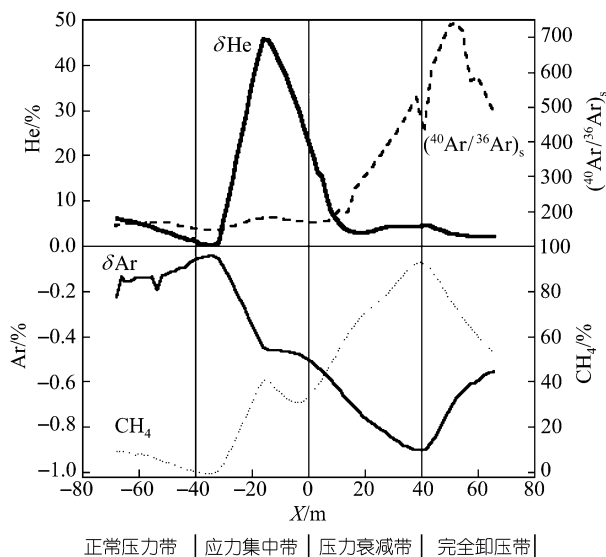


图 3 不同应力带 He, Ar 和 CH_4 发射特征
该图是根据图 1, 2 的 A-A' 剖面位置上各点的拟合值绘制而成; δHe , δAr , CH_4 的坐标位置是 36, -85 到 36, 85; $(^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar})_{\text{s}}$ 的坐标位置是 25, -85 到 25, 85

(1)瓦斯量与 Ar 之间具有良好的对应性. 从图 2-b₁, b₂, b₃, c₁, c₂, c₃ 中可以清楚的看到瓦斯量与 Ar 之间有很好的对应性. 在该图上能很好地显示出它们的一一对应的特点.

(2)煤体中 He, Ar, CH₄ 分布具有不均一性. 从等值图上可以看到, 在应力集中带有时出现了“正常压力带”的特征. 例如, 在 CH₄ 等值图的 2-c₂ 图中, 在相当于 6 号煤层回采面前方的 4 号煤层中, 出现了一小条斜交回采面的 CH₄ 值较低的块段. 这是一种在应力集中带中出现正常压力带特征的异常现象. 所以, 在一个应力带内实际的状况是比较复杂的. 而这种复杂性恰恰可以通过 He, Ar 和 CH₄ 的等值图显示出来.

(3)等值图(图 2)上的峰、谷的轴线与边界有时有一定的方向性. 从图 2 可以普遍看到等值线的峰、谷及边界往往有一定的方向性, 有的还与回采面斜交, 构成“X”型. 这种现象意味着煤体中 CH₄, He 和 Ar 的分布不仅受到采动应力的控制, 而且还可能受到原生应力的控制, 使之显示出与残留剪应力方向相一致的痕迹. 这种方向性与在油气田地表土壤气中 He 组分与 Ar 同位素的等值图中所看到的十分类似^[23-25].

综上所述, 这些结果不仅可以使我们从这些等值图上获得一个具体煤体的卸压与透气程度的信息, 而且还可以获得内部实际动力变化状况的信息, 这是一般的方法所不易获得的.

3 煤层开采面钻孔瓦斯中 He 和 Ar 分布特征

3.1 封闭(压性)构造区回采面钻孔的 He 和 Ar 组分的特征

3602 采区处于宽大的向斜之中, 内部有一条未出露到地表的内部断距为 2~9 m 的 F1 隐伏断层. 说明向斜上部处于压性封闭状态, 而下部为张性状态. 在 F1 断裂的西侧距石门 85 m 处发生突出, 突出煤量为 13 t, 6 d 后发生第 2 次突出. 在距第 2 次突出 3 m 处进行了第 1 个钻孔的综合研究. 煤层采掘面由东向西推进, 钻孔每进展 1 m 采一次样, 共完成了 10 个钻孔、总长 120 m. 在每个采样点上开展了多种参数的测定, 包括瓦斯涌出量 $Q(L/min)$ 、钻屑量 $S(kg/m)$ 、煤抗拉强度 $\sigma(Mpa)$ 、温度 $t(^{\circ}C)$, He 和 Ar, 其中 He 和 Ar 是取自流量计入口处. 各孔平均值列于表 2. 为了更清楚地显示它们之间的关系, 作了一系列 He, Ar 与其他参数之间的二维、三维相关图(图 4). 从图 4 可以看到有以下特征:

(1) δHe 与 δAr 之间呈反相关(图 4-1). (2) 钻屑量(S)与 δHe 有很好的正相关性, 与 δAr 是二次曲线关系(图 4-2a, 4-2b). (3) 温度(t)与 δAr 有很好的线型相关, 而与 δHe 则是呈负相关的二次曲线(见图 4-3a, 3b). (4) 瓦斯流量与 He, Ar 之间都是二次曲线关系(图 4-4a, 4-4b). 从图 4-4a, 4-4b 的二维及三维图可以看到, 当瓦斯流量最大的时候, δHe 和 δAr 值都是中间值. 这个结果显示了一个非常值得注意的重要现象. 因为, 在长期瓦斯突出预报中, 瓦斯量终是一个很重要的首选参数, 但在实际工作中, 常常发现, 把瓦斯涌出量作为突出指标时往往又会发生误报. 有时瓦斯量很大, 超过了突出预报的警戒指标, 但并不出现煤、瓦斯的突出; 相反, 有时瓦斯涌出量并不大, 但却发生了严重的突出事故. 为此, 长期始终不得其解. 从本项研究中可以得到很好的解释. 因为在瓦斯突出的部位, 正是应力极强的部位, 在发生突出前的一瞬间, 煤体还没有完全破裂, 瓦斯的涌出量也比较小, 只有在应力开始释放以后瓦斯才有可能大量出现(图 2-c₁, c₂, c₃ 及图 3). 由于过去没有做过 He 的测量, 人们无法认识煤体破裂前后那一段 Δt 时间内瓦斯量与应力之间的真正关系. 因而对能量突然释放前的较小瓦斯涌出量是不会引起注意的. 所以, 这就是小瓦斯量能发生大的, 甚至巨大突出的重要原因. 因此, 说明把瓦

斯量作为预报的指标是有一定的不可靠性, 瓦斯涌出量对应力的反映比 He 要滞后得多. 作为突出预报的灵敏指标来说, 相比之下, He 要比瓦斯具有明显的优越性. (5) 煤的抗拉强度与其它几个参数的相关性较差(见图 4-5a, 4-5b).

表 2 鱼田堡煤巷回采面瓦斯突出平均参数

巷号	孔号	氦	氩	钻屑量	抗拉强度	瓦斯流量	温度
		$\delta\text{He}/\%$	$\delta\text{Ar}/\%$	$S/\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}$	σ/MPa	$Q/\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$	$t/^{\circ}\text{C}$
鱼田堡 3602	1	24.70	-0.88	10.1	0.60		20.21
	2	18.97	-0.83	5.4	0.67	2.56	26.95
	3						
	4	19.05	-0.79	4.9	0.56	4.20	26.96
	5	17.70	-0.76	4.5	0.53	5.52	27.62
	6	17.84	-0.77	7.5	1.05	4.54	31.74
	7	17.64	-0.74	5.9	0.94	2.54	32.14
	8	6.17	-0.64	2.0	0.50	2.75	31.75
	9	16.18	-0.70	3.9	0.32	3.78	32.35
	10	14.50	-0.93	3.0	0.29		
鱼田堡 2603	1	-0.42	-0.48	3.0	0.41		33.1
	2	-0.29	-0.25	2.2	0.40		31.07
	3	-0.19	-0.13	2.3	0.4		31.56
	4	-0.55	-0.47	1.9	0.41	20.17	23.88
	5	-0.62	-0.61	2.5	0.4	18.08	29.26
	6	-0.67	-0.75	2.2	0.4	9.65	23.30
	7	-0.74	-0.77	1.8		11.80	23.18
	8	-0.67	-0.85	1.9	0.41	43.78	24.47
	9	0.74	-0.68	1.9		0.55	24.19
	10	0.87	-0.90	0.76		16.12	23.30
	11	0.38	-0.59	1.74	0.25	0	
	12	1.26	-0.82	4.41	0.24	12.99	
	13	0.32	-0.59	5.24	0.21	16.57	
	14			2.17	0.43		
	15	0.47	-0.57	2.1	0.28		
	16	2.40	-0.65	2.46	0.29		
	17	1.67	-0.54	3.27		1.11	
	18	0.95	-0.83	5.08	0.25	18.46	

上述讨论表明: He, Ar, 温度和钻屑量可以作为瓦斯突出预报的主要指标, 而瓦斯流量及煤抗拉强度仅可作参考指标.

3.2 开放(张性)构造区煤巷回采面 He, Ar 组分的特征

2603 风巷实际上位于鸦雀崖扭褶带的压性构造区, 过去曾发生过 9 次重大突出. 多年来, 一直被认为是严重危险区, 并规定禁止开采. 因此, 研究工作开始时就有很大的冒险性. 但工作不久出现以下现象:

(1) 瓦斯涌出量普遍比压性区大得多, 许多孔中的瓦斯量已超过突出的预警指标(表 2), 但是在这一次工作过程中没有一处发生过任何水平的突出. (2) 在该工作区瓦斯中 He 含量不仅明显低于压性构造区, 而且低于大气中的丰度, 所以 δHe 值是负值(表 2, 图 5). (3) He 和 Ar 之间有很好的相关性(图 5). (4)煤体的温度也很高. 这些现象都表明不可能发生突出, 而且在工作过程中也确实没有发生过突出, 仅用了 1 个月的时间就安全地完成了 18 个孔, 掘进了

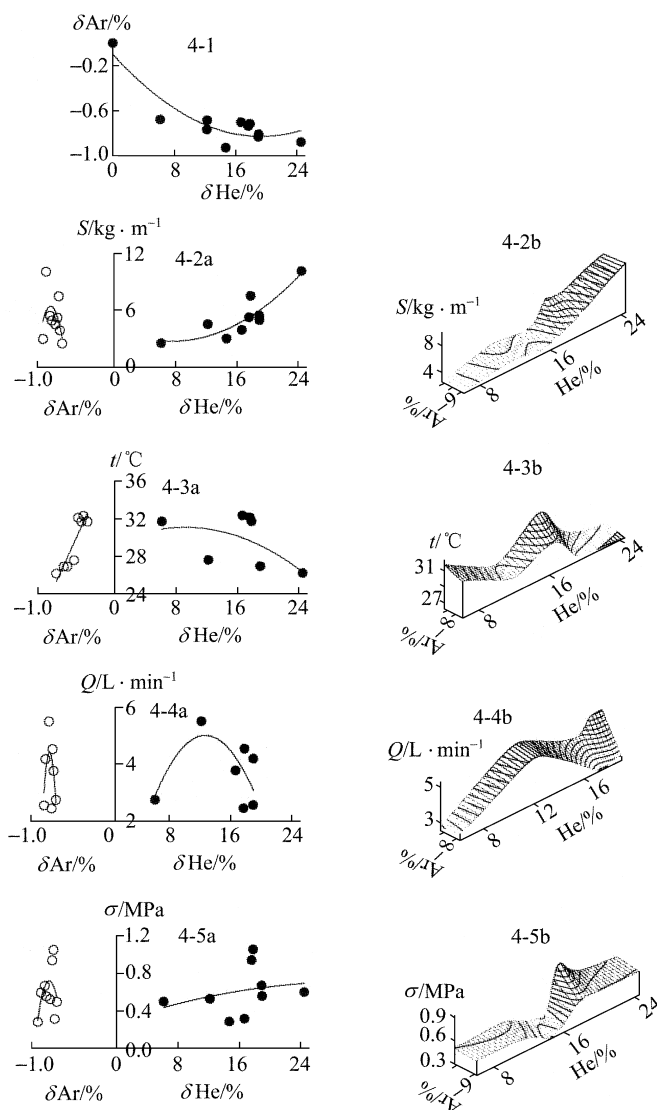


图 4 压性构造区 He, Ar 发射与其他突出参数相关图

120 m. 所获结果列于表 2. 期间, 在现场还观察到煤体的裂隙十分发育, 并穿插了方解石脉, 充分表明此处确实具有张性构造的特征. 后来才发现该风巷正是被设计在一个局部平卧褶曲转折端的拉张部位(褶曲中心层的拉张一侧), 因此有许多不同于压性构造区内的参数特征. 在张性构造部位往往有很好的通道, 使相邻富瓦斯地段的瓦斯借此通道大量流过. 由于大量的瓦斯涌出而使煤体内与外界环境相比, 处于正压的状态, 这样使大气的组分不能倒流进煤体的瓦斯系统. 由于 He 的质量比 CH_4 小得多, 十分容易扩散到大气中, 使瓦斯气中 He 优先散逸, 最终, 使其组分的量值比大气中的还小得多. 这可能是张性区的特点.

3.3 煤、瓦斯气中的 He, Ar 在瓦斯突出预报中的意义

上述讨论表明, 煤瓦斯中 He 与 Ar 在瓦斯突出预报工作中能起到十分重要的作用. 由于 He 是应力强度的一种标志, 而 Ar 是应力释放与煤体破裂程度的标志, 因此, 建立瓦斯突出的

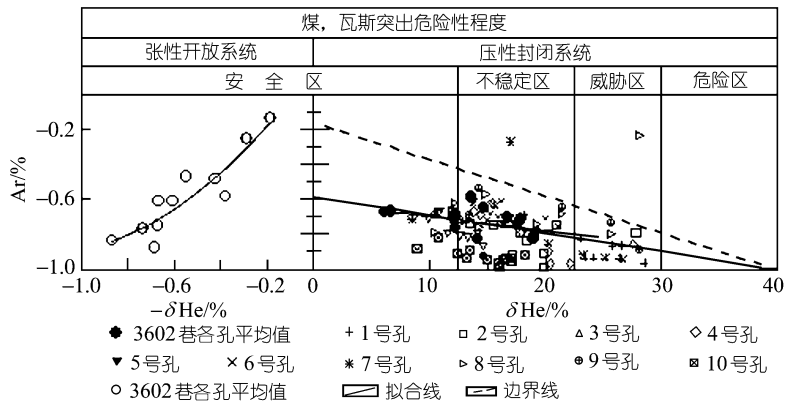


图 5 重庆南桐煤矿鱼田堡矿不同构造区 6 号煤层回采面钻孔 He, Ar 组分与瓦斯突出危险性的关系

He, Ar 预警指标是有可能的. 在 3602 煤巷, 第一钻孔的采样的位置仅距突出点 3 m, 因此该孔位的 δHe 和 δAr 值具有警戒值意义. 事实上, 1 号孔的 δHe 值范围为 23.4~28.0, 而 δAr 值范围为 $-0.83\sim-0.97$, 它们的平均值分别为 24.7 及 -0.88 (表 2), 这两个值与所有孔中的值相比都属于是极值(最大和最小), 同时该孔相应的钻屑量(10.1 kg/m)及温度(20.21°C)也是在这次测量中是极值(表 2). 所以有理由把这些带有瓦斯突出危险的数值范围暂称为威胁区(为了取其整数, 可将 δHe 值定在 $22.5\sim30.0$, 而 δAr 值定在 $-0.80\sim-0.95$ 之间); 这样就有可能把 δHe 值大于 30 及 δAr 值小于 -0.95 的定为危险区. 而对于大多数钻孔, 如 2, 3, 4, 5, 6, 9 所获得的 δHe 值在 $12.5\sim22.5$ 之间; δAr 值的分布范围($-0.5\sim-0.8$ 之间)也逐渐加宽, 其中有些钻孔单个样品的值已进入威胁区范围, 也有一些钻样品点的 δHe 值小于 12.5, 故将这个特征区定为不稳定区. 其余的与没有发生任何突出的张性开放构造区一起可划入安全区(图 5).

综上所述, 可以将不同构造区的 δHe , δAr 特征与煤、瓦斯突出的关系概括于表 3 中.

表 3 不同构造区 δHe , δAr 特征与煤、瓦斯突出危险性的关系

构造分区	安全性	瓦斯状态分区	特 征 范 围		其 他 特 征		
			δHe	δAr	应力状态	封闭程度	瓦斯突出危险性
压性封闭区	不安全区	危险区	>30	<-0.95	极大	封闭	很大
		威胁区	$22.5\sim30$	$-0.8\sim-0.95$	很大	封闭	有
		不稳定区	$12.5\sim225$	$-0.5\sim-0.8$	大	封闭	据变化趋势
张性开放区	安全区	稳定区	$12.5\sim0$	$-0.4\sim-1.0$	小	封闭	无
		渗漏区	$0\sim-0.1$	$-0.9\sim-0.1$	小	开放	无

4 结论

(1) 在煤体应力集中带, He 有明显的发射, 其发射的位置随发射应力位置的改变而改变, 其强度则与应力大小有关; Ar 的组分与同位素的变化与煤体的应力释放状况有密切的关系. (2) 在回采面煤体瓦斯中的 He, Ar 组分, 在煤瓦斯突出预测工作中有极大的潜在价值, 它们在反映应力变化方面比瓦斯更灵敏. 在与传统方法相比较的话, He, Ar, 温度及钻屑量有可能成为有效的瓦斯突出的预测的新技术. (3) 煤体瓦斯气的 He, Ar 和 CH_4 等值图对于了解地质体中应力的动态变化也有实际的应用意义, 有可能为其他工程地质体应力动态相对变化的监测提

供一种新的工具。

致谢 在现场工作时得到南桐矿区的李宗鉴、谢梦章、雷绍云高级工程师, 罗昭林、蔡春祥、王春晓、李秋林、赵素平、陈宗琴、赵盛芳、黄京卫等工程师的帮助; 在 1986~1990 年期间, 中国科学院地质与地球物理研究所赵东植高级工程师, 谭骏副研究员也参加了该项早期工作, 并参加了现场基础调查与质谱测定, 北京分析仪器厂余恭谦高级工程师帮助进行了质谱调试。此外, 还得到中国科学院地质与地球物理研究所孙广忠教授、钟大赉院士, 孙玉科、易善峰、许兵、姚宝魁、王松山等教授, 中国矿业大学梁东汉副教授的帮助。本项目的大部分现场工作是在“七五”期间完成的, 在此一并表示感谢。

参 考 文 献

- 1 Minisale A, Magro G, Martinnelli G, et al. Fluid geochemical transect in Northern Apennines (central northern Italy) fluid genesis and migration and tectonic implication. *Tectonophysics*, 2000, 319(3): 199 ~ 222
- 2 Pili E, Kenedy B M, Canrad M S, et al. Isotope constraints on the involvement of fluids in the San Andreas fault. *AGU. spring meeting EOS transaction. American Geophysical Union*, 1998, 79(17 suppl): 229 ~ 230
- 3 车用太, 余金子, 刘五洲. 地壳放气动态监测与张北-尚义 Ms 6.2 级地震预报. *地质论评*, 1999, 45(1): 59 ~ 65
- 4 孔令昌, 王志敏. 用于地质研究和地震监测的稀有气体质谱分析. *质谱学报*, 1998, 19(1): 54 ~ 59
- 5 Ozima M, Podosek F A. *Noble Gas Geochemistry*. Cambridge, London: Cambridge University Press, 1983. 246 ~ 249
- 6 Holub R F, Brady B T. The effect of stress on radon emanation from rock. *Journal of Geophys. Research*, 1981, 86: 1776~1785
- 7 Honda M, Kurita K, Hamano Y, et al. Experimental studies of He and Ar degassing during rock fracturing. *Earth and Planetary Science Letter*, 1982, 59: 429~436
- 8 赵东植, 朱 铭, 余恭谦. 四极质谱计在煤矿安全技术中的应用. *分析仪器*, 1991, (4): 49 ~ 53
- 9 朱 铭, 赵东植, 谭 骏. 煤层应力集中带 He 异常的发现及其意义. *科学通报*, 1993, 38(7): 47 ~ 51
- 10 朱 铭, 赵东植, 谭 骏. 四川南桐鱼田堡煤矿瓦斯中稀有气体 He, Ar 组分与瓦斯突出关系的研究. *中国科学院地质研究所集刊*, 1994, 第 7 号: 212 ~ 251
- 11 Camaro A G W. Abundances of element in the solar system. *Space Sci Rev*, 1973, 15: 1121 ~ 1146
- 12 王松山. 吉林陨石原始俘获的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比值及其地质意义. *地质科学*, 1984, (3): 341 ~ 345
- 13 王松山, 胡世龄, 桑海清, 等. 信阳陨石热历史与原始氩特征. *空间科学学报*, 1985, 5(4): 308 ~ 313
- 14 王松山, 桑海清, 裘 冀. 大气端元值及其地质意义. *地球学报*, 1997, 18(3): 313 ~ 317
- 15 Turner G. ^{40}Ar - ^{39}Ar ages from the lunar maria. *Earth Planet Sci Lett*, 1971, 11: 169 ~ 191
- 16 Pepin R, Drqgon J, Murthy V. Rare gases and trace elements in Apollo 15 drill core fines; depositional chronologies and K-Ar ages, and production rates of spallation-produced ^3He , ^{21}Ne and ^{38}Ar versus depth. *5th unar Sci, Conf, Suppl.5. Geochim Cosmochim Acta*, 1974, 2: 2149 ~ 2184
- 17 Ozima M, Alexander Jr E C. Ar isotopes and earth-atmosphere evolution models. *Geochim et Cosmochim Acta* 1975, 39: 1127 ~ 1134
- 18 Hamano Y, Ozima M. Earth-atmosphere evolution model based on Ar isotopic data, in: Alexander Jr E C, Ozima M, eds. *Terrestrial rare gases*. Tokyo: Japan Scientific Society Press, 1978. 155 ~ 171
- 19 Hart R, Hodan R. Earth degassing models, and the heterogeneous vs. homogeneous mantle, in: Alexander Jr E C, Ozima M, eds. *Terrestrial rare gases*. Tokyo: Japan Scientific Society Press, 1978. 193 ~ 205
- 20 王松山, 桑海清, 裘 冀. 元古宙地球去气作用与撞击事件的探讨. *地球科学*, 1995, 18(3): 92 ~ 97
- 21 Nier A O. A redetermination of the relation abundances of the isotopes of nitrogen, oxygen, argon and potassium. *Phys Rev*, 1950, 77: 789 ~ 793
- 22 朱 铭. 天然气藏中氩同位素积累模式及其定年. *地质科学*, 1990, (2): 166 ~ 171
- 23 朱 铭, 张福松, 霍卫国, 等. 广饶地区浅表土壤中 He, Ar 组分及其同位素特征和对油气化探的意义. *岩石学报*, 1993, 9(4): 342 ~ 356
- 24 朱 铭, 霍卫国, 张福松, 等. 土壤气中 He, Ar 组分在金家地区油气化探中应用研究. *地质科学*, 1995, 31(3): 302 ~ 311
- 25 朱 铭, 霍卫国, 张福松, 等. Ar 同位素地质若干问题. *地球学报*, 1997, 18(增刊): 319