

CNIC-00215

CN4000178

FDRIN-0001

# 中国核科技报告

CHINA NUCLEAR SCIENCE & TECHNOLOGY REPORT

铀矿通风降氡规律及排氡子体风量计算



中国核情报中心

China Nuclear Information Centre

CNIC-00215

FDRIN-0001

# 铀矿通风降氡规律及排氡子体风量计算

吴 钢

(核工业部第四设计研究院, 石家庄)

中国核情报中心

北京·1988.6

## 摘 要

根据铀矿山留矿法和充填法采场通风降氡试验资料,本文分析总结了采场通风降氡规律。根据氡和氡子体衰变规律的研究,提出了用双曲线回归方程表示氡子体 $\alpha$ 潜能积累方程。由此方程导出了入风流未受污染和受污染两种情况下的排氡子体风量计算公式。并在矿山生产条件下进行了验证试验,按公式算出的风量能够满足辐射安全要求,比较经济合理。

**关键词** 铀矿山 氡 氡子体 风量计算

# A LAW OF REMOVING RADON BY VENTILATION AND AIR REQUIREMENT CALCULATION FOR ELIMINATING RADON DAUGHTERS IN URANIUM MINES

Wu Gang

(The Fourth Design and Research Institute of the Ministry  
of Nuclear Industry, Shijiazhuang)

In accordance with testing data of removing radon and its daughters by ventilation from shrinkage and filling stopes of uranium mines, a law of removing radon by ventilation from the stopes is analyzed and summed. According to the decay law of radon and its daughters, an accumulation equation of potential alpha energy from radon daughters is presented with hyperbolic regression equation. The calculating formulae of ventilation flow are derived from the accumulation equation for eliminating radon daughters in inlet flow with or without contamination. It has been proved that the amount of ventilation air calculated could meet the requirements of radiation safety rationally and economically

# 一. 前 言

在铀矿床开采中,存在的放射性危害主要是氡子体(即Rn-222的短寿命衰变产物RaA、RaB和RaC的总称)α粒子内照射对呼吸器官的损伤。矿山通风是稀释和排除井下空气中的氡及其子体,减少对人体健康危害的主要方法和措施。因此探讨通风降氡规律和确定经济合理的风量是铀矿通风的重要问题。本工作自1984年开始,至1985年完成,1986年6月通过了部级鉴定。

铀矿通风降氡规律是结合铀矿通风计算以及根据生产条件下通风降氡试验数据总结出来的。铀矿氡子体α潜能积累方程和排氡子体风量计算公式是由氡及其子体一般衰变规律推导出来的,并进行了验证试验。

本文简要介绍了现有几种排氡子体风量计算公式,并与本项目研究提出的计算公式进行了比较。

## 二. 铀矿通风降氡规律

### 1. 某矿留矿采矿法采场

#### (1) 采场简介

为了探讨铀矿通风降氡规律和进行排氡子体风量计算公式验证,我们在某铀矿巴泉矿井5-1采场和横涧矿井77-49-1采场进行了通风降氡试验。

上述两个矿井均系急倾斜矿床。铀矿物主要赋存在花岗斑岩中,少量在粉砂岩和片岩中。横涧矿井采用压入式通风,巴泉矿井采用抽出式通风。试验时,采场用带调节门的小型通风机通风(压入式)。

77-49-1采场和5-1采场均采用浅眼留矿法回采。77-49-1采场为巷道型,长度41m,平均宽度1.58m,矿石铀品位0.100~0.685% (平均0.254%) 分层高度1.5m,混凝土人工假底。5-1采场为洞室型,长度23m,宽度12m,矿石铀品位0.075~0.145% (平均0.097%),底部带耙矿巷道,采场用电耙平场。

#### (2) 采场氡和氡子体来源分析

采场氡来源分析见表1,氡子体来源分析见表2。

由表1看出,留矿法采场排氡量中,入风流污染带进的占26.7~52.4% (平均40%);采场析出的占47.6~73.3% (平均60%)。

由表2看出,留矿法采场回风流氡子体中,入风流污染带进占27.6~89.7% (平均68.5%);入风流污染带进的氡衰变占4.8~28.8% (平均12.7%);采场析出的氡衰变占5.5~52.1% (平均18.8%)。由此可看出采场中氡子体主要来源于入风流污染(占80%以上)。

#### (3) 留矿堆氡析出量与矿堆高度的关系

现根据巴泉矿井45-1采场试验资料探讨留矿堆氡析出量与矿堆高度的关系问题。

该采场为洞室型,面积140~180m<sup>2</sup> (平均156m<sup>2</sup>) 矿石铀品位0.064~0.113% (平均0.084%),矿石体重2.57t/m<sup>3</sup>。共回采17分层,每分层都进行了风量、氡和氡子体浓度测定,但有些分层数据不全,这里仅取8个分层的数据,见表3。

表1 留矿法采场氡浓度分析

采场编号	风量 $Q, m^3/s$	入风氡浓度 $C_0$	回风氡浓度 $C_r$	采场析出量 $D$	氡来源分析, %	
		$kBq/m^3$	$kBq/m^3$	$kBq/s$	入风带进	采场析出
77-49-1	0.55	1.74	4.04	2.22	42.8	57.2
	0.90	2.04	3.88	3.49	52.4	47.6
	1.16	1.00	2.74	3.18	36.5	63.5
	1.88	1.07	2.34	4.40	45.7	54.3
	2.56	0.78	2.05	5.25	38.1	61.9
5-1	0.70	0.74	2.63	1.84	23.3	71.7
	0.89	2.63	5.48	4.88	48.6	51.4
	1.60	2.80	5.88	9.41	49.1	50.9
	2.33	0.85	3.13	7.41	26.7	73.3
	3.31	0.96	2.92	9.67	2.9	67.1

表2 留矿法采场氡子体来源分析

采场编号	风量 $Q, m^3/s$	氡浓度, $kBq/m^3$		氡子体浓度, $\mu I/m^3$		氡子体来源分析, %		
		入风 $C_0$	氡增量 $C_R$	入风 $E_0$	回风 $E$	入风带进	入风带进 氡衰变	采场析出 氡衰变
77-49-1	0.55	1.74	2.30	2.91	4.61	63.8	15.6	20.6
	0.90	2.04	1.84	3.46	4.47	77.4	11.9	10.7
	1.16	1.00	1.74	2.50	3.96	81.7	6.5	11.8
	1.88	1.07	1.27	2.62	2.92	80.7	4.8	5.5
	2.56	0.78	1.27	0.77	0.94	82.0	8.0	10.0
5-1	0.70	0.74	1.80	1.02	3.70	27.6	20.3	52.1
	0.89	2.66	2.80	3.14	7.71	40.7	28.8	30.5
	1.60	2.80	2.80	4.61	7.54	61.1	19.1	19.8
	2.33	0.85	2.33	5.12	6.24	82.1	4.8	13.1
	3.31	0.96	1.96	2.75	3.48	79.0	6.9	14.1

表3 留矿法采场氡析出量与矿堆高度的关系

分层编号	矿堆高度, m	矿堆重量, kt	风量 $Q, m^3/s$	氡浓度, $kBq/m^3$		氡析出量, $kBq/s$			
				入风 $C_0$	回风 $C$	合计	矿壁析出	矿堆析出	
1	1.5	0.38	1.70	0.63	1.33	1.20	1.20	0	
3	4.5	1.14	1.03	0.63	4.96	4.46	1.20	3.23	
5	7.5	1.90	0.87	0.56	9.21	7.54	1.20	6.34	
6	9.0	2.28	1.43	0.37	4.18	5.45	1.20	4.25	
7	10.5	2.66	1.14	0.89	8.21	8.34	1.20	7.14	
8	12.0	3.04	1.41	1.26	8.92	10.80	1.20	9.60	
15	22.5	5.70	0.60	7.33	10.43	1.86	1.20	0.66	
17	25.5	6.46	1.54	0.52	4.14	5.57	1.20	4.37	

根据上述测定资料和对试验数据的回归分析, 矿堆氮析出量随矿堆高度的加大而加大的趋势不明显。这是因为, 矿堆氮析出量受通风方式、风流方向、风量、风压和大气压等多种外界因素的影响较大, 矿堆高度不是主要因素, 并不是矿堆中所有氮气都析出, 进入空气中。

根据实测矿堆氮析出量推算矿堆析出高度, 45-1采场抽出式通风条件下, 矿堆析出高度为7~14m; 77-49-1和5-1采场压入式通风条件下, 矿堆析出高度分别为1.2~3m和1.4~4.6m。矿堆析出高度是矿堆氮析出量计算时的一个重要参数。

#### (4) 采场通风降氮规律

为了探讨留矿法采场通风降氮规律, 对试验数据进行了二元回归分析。现以77-49-1采场为例, 选取的回归方程数学模型如下:

氮析出量回归方程:

$$D^{-1} = a + b_1 Q^{-1} + b_2 P \quad (1)$$

氮浓度回归方程:

$$C = a + b_1 C_0 + b_2 Q^{-1} \quad (2)$$

氮子体浓度回归方程:

$$E = a + b_1 E_0 + b_2 Q^{-1} \quad (3)$$

式中  $D$  —— 氮析出量,  $\text{kBq/s}$ ;

$Q$  —— 风量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;

$P$  —— 大气压力,  $\text{kPa}$ ;

$C$  —— 采场回风氮浓度,  $\text{kBq/m}^3$ ;

$C_0$  —— 采场入风氮浓度,  $\text{kBq/m}^3$ ;

$E$  —— 采场回风氮子体浓度,  $\mu\text{J/m}^3$ ;

$E_0$  —— 采场入风氮子体浓度,  $\mu\text{J/m}^3$ ;

$a$  —— 回归常数;

$b_1, b_2$  —— 回归系数。

77-49-1采场通风降氮实测数据, 见表4。

根据表4数据回归计算, 结果如下:

a. 采场氮析出量与风量、大气压的关系 (数据  $M=10$ , 相关系数  $R=0.889$ )

$$D^{-1} = 0.0596 + 0.284 Q^{-1} + 2.036 \times 10^{-3} P \quad (4)$$

b. 回风流氮浓度与入风流氮浓度和风量的关系 ( $M=13$ ,  $R=0.899$ )

$$C = 0.597 + 0.969 C_0 + 1.160 Q^{-1} \quad (5)$$

c. 回风流氮子体浓度与入风流氮子体浓度和风量的关系 ( $M=13$ ,  $R=0.973$ )

$$E = 0.680 + 1.443 E_0 + 0.203 Q^{-1} \quad (6)$$

根据上述回归方程作出的关系曲线, 见图1、图2和图3。

从图1看出: 在大风压力不变的条件下, 氮析出量随风量的加大而呈曲线加大, 其加大的幅度 (速率) 逐渐变小; 在风量不变的条件下, 氮析出量随大气压力的加大而呈曲线减小, 其减小的幅度 (速率) 逐渐变小。

从图2看出: 在风量不变的条件下, 回风流氮浓度随入风流氮浓度的加大而呈直线加大; 在风质不变的条件下, 回风流氮浓度随风量的加大而呈曲线减小, 其减小的幅度逐渐变小。

从图3看出: 采场回风流氮子体浓度与风量和风质的关系曲线同回风流氮浓度与风量、风

质的关系曲线相似。即在风量不变的条件下，回风流氡子体浓度随入风流氡子体浓度的加大而呈直线加大；在风质不变的条件下，回风流氡子体浓度随风量的加大而呈曲线减小，其减小的幅度逐渐变小。

表4 77-49-1采场通风降尘试验数据

大气压力 P, kPa	气温t, ℃	风量Q, m <sup>3</sup> /s	氡浓度, kBq/m <sup>3</sup>		氡子体浓度, pJ/m <sup>3</sup>		氡浓度增量 C <sub>0</sub> *, kBq/m <sup>3</sup>	氡析出量D, kBq/s
			C <sub>0</sub>	C	E <sub>0</sub>	E		
101.17	14	0.79	0.74	4.28	0.32	2.22	3.54	1.73
100.91	18	0.55	1.74	4.04	2.94	4.88	2.30	1.27
101.31	14.5	0.76	1.11	2.68	0.77	2.40	1.57	1.19
101.31	15	0.77	1.37	3.92	1.32	2.30	2.55	1.96
101.17	14	0.84	0.74	2.57	0.51	1.25	1.83	1.54
101.17	16	0.90	2.04	3.88	3.46	5.77	1.84	1.66
100.77	15	1.01	0.70	1.71	0.58	1.15	1.01	1.02
101.04	14.5	1.10	0.79	2.17	0.64	1.51	1.47	1.62
100.44	17.2	1.16	1.09	2.74	2.50	4.70	1.74	2.02
100.64	16.5	1.69	1.07	2.63	2.62	4.88	1.61	2.72
101.04	14	1.88	1.07	2.34	2.62	4.80	1.27	2.39
100.97	16.5	2.29	0.96	1.94	1.09	2.14	0.98	2.24
101.04	16	2.56	0.78	2.05	0.77	2.22	1.27	3.25

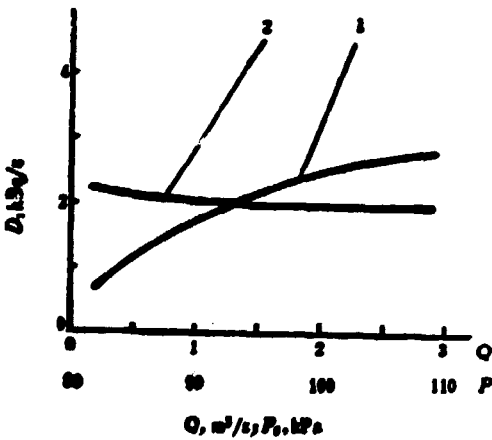


图1 77-49-1采场D与Q、P的关系

$$D = (0.0596 + 0.284Q^{-1} + 2.006 \times 10^{-2}P)^{-1}$$

1——D与Q的关系曲线(P=100kPa)

2——D与P的关系曲线(Q=1.2m<sup>3</sup>/s)

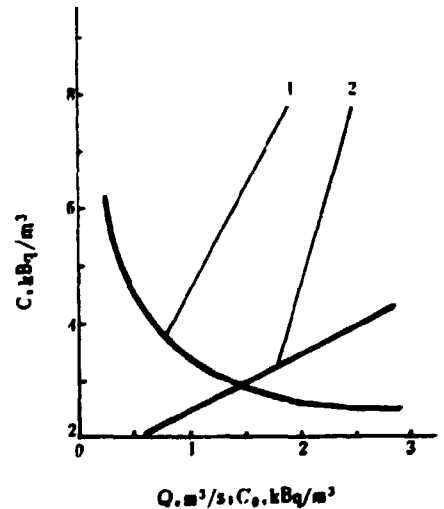


图2 77-49-1采场C与Q、C<sub>0</sub>的关系

$$C = 0.597 + 0.968C_0 + 1.160Q^{-1}$$

1——C与Q的关系曲线(C<sub>0</sub>=1.6kBq/m<sup>3</sup>)

2——C与C<sub>0</sub>的关系曲线(Q=1.2m<sup>3</sup>/s)



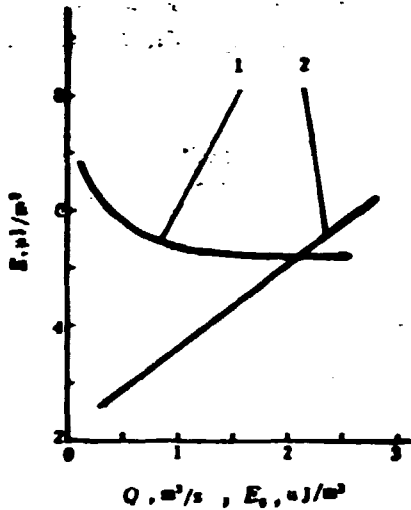


图3 77-49-1采场E与Q, E<sub>0</sub>的关系

$E = 0.680 + 1.443E_0 + 0.203Q$     1——E与Q的关系曲线 ( $E_0 = 3.2 \mu\text{J}/\text{m}^3$ )    2——E与E<sub>0</sub>的关系曲线 ( $Q = 1.2 \text{m}^3/\text{s}$ )

由此可见，加大风量一方面可以加强空气中氡和氡子体的稀释能力，另一方面增大气析出量，两者作用有所抵消，故过大的风量对降氡和氡子体的效果并不显著。而设法减少入风流污染，提高入风流风质对降氡和氡子体的效果是很显著的。

## 2. 充填采矿法采场

### (1) 采场简介

我国铀矿地下采矿方法中，充填采矿法约占矿石总产量的60%（留矿采矿法约占10%）。因此研究充填采矿法采场通风降氡规律具有重要意义。

试验研究在某铀矿主矿带进行。该矿床为急倾斜厚矿床。铀矿物主要赋存于黑色石英岩、微石英岩和炭质泥质页岩中。矿井通风系统为单翼对角式，通风方式为抽出式。

采矿方法为水平分层充填采矿法，碎石干式充填，水泥砂浆垫板。采场为嗣室型，面积一般为400~800m<sup>2</sup>。顺路井用钢筋混凝土预制作架设。用电耙出矿和充填。分层高度1.8~1.9m，有的采场每采两分层充填一次。试验采场用局扇加强通风，局扇安装在充填天井上口旁边，工作方式为压入式（即采用下行通风）。

试验采场为130-19采场和180-7采场。130-19采场面积780m<sup>2</sup>，矿石铀品位为0.114%。180-7采场面积360m<sup>2</sup>，矿石铀品位为0.037%。

### (2) 采场氡和氡子体来源分析

充填法采场氡和氡子体来源分析，分别见表5和表6。

从表5看出，充填法采场排氡量中，入风流污染带入占14~79.7%（平均41%），采场析出占86~20.3%（平均59%）。这与留矿法采场差不多。从表6看出，充填法采场回风流氡子体中，入风流污染带入占38.9~83.7%（平均59%），入风流污染带入的氡衰变产生的占8.9~25.2%（平均15%），采场析出的氡衰变产生的占6.2~78.9%（平均26%）。前两项之和为

表5 克旗法采场氡气源分析

采场编号	风量Q, m³/s	氡浓度, kBq/m³		采场排氡量D, kBq/s	氡气源分析, %	
		入风C <sub>0</sub>	出风C		入风量	采场析出
130-19	1.21	1.11	1.99	9.67	14.0	86.0
	2.10	2.25	3.89	8.17	58.1	41.9
	2.64	0.70	2.18	5.76	32.1	67.9
	5.60	2.20	2.76	15.46	79.7	20.3
	7.40	1.80	3.63	25.86	49.5	50.4
180-7	1.49	1.37	3.81	5.63	35.9	64.1
	1.68	2.22	5.37	9.02	41.4	58.6
	1.92	0.37	6.66	12.79	5.6	94.4
	2.44	2.00	5.77	14.03	24.7	65.3
	4.11	2.25	3.63	14.92	62.3	37.7

表6 克旗法采场氡子体来源分析

采场编号	风量Q, m³/s	氡浓度, kBq/m³		氡子体浓度, pJ/m³			氡子体来源分析, %	
		入风C <sub>0</sub>	氡增量C <sub>10</sub>	入风E <sub>0</sub>	回风E	入风带来的	入风氡衰变产生	采场析出氡衰变
130-19	1.21	1.11	6.83	1.09	12.96	8.4	12.7	78.9
	2.10	2.25	1.63	4.93	8.70	56.7	25.2	18.1
	2.64	0.70	1.48	4.48	6.20	72.2	8.9	18.9
	5.60	2.20	0.56	3.56	4.63	76.1	19.0	4.0
	7.40	1.80	1.83	3.37	4.50	74.9	12.4	12.7
180-7	1.49	1.37	2.44	5.82	8.40	69.3	11.1	19.6
	1.68	2.22	3.15	2.82	6.09	46.3	22.2	31.5
	1.92	0.37	6.29	5.82	9.40	61.9	2.1	36.0
	2.44	2.00	3.77	1.60	4.11	38.9	21.2	39.9
	4.11	2.25	1.39	4.99	5.96	83.7	10.1	6.2

74%，可见入风流污染带入是采场氡子体主要来源。

### (3) 采场通风降氡规律

现以130-19采场为例，对试验数据进行回归分析。

130-19采场通风降氡试验数据，见表7。

选取的回归方程数学模型见式(1)、(2)、(3)。

根据表7试验数据回归分析计算结果如下：

a. 采场氡析出量与风量和大气压的关系 ( $M=10, R=0.915$ )

$$D^{-1} = 12.325 - 0.469Q^{-1} - 0.120P^{-1} \quad (7)$$

表7 130-19采场通风降氡试验数据

大气压力 P. kPa	气温t. t	风量Q. m <sup>3</sup> /s	氡浓度, kBq/m <sup>3</sup>		氡子体浓度, pJ/m <sup>3</sup>		氡浓度增量 C <sub>2</sub> -C <sub>1</sub> kBq/m <sup>3</sup>	氡析出量 D. kBq/s
			C <sub>0</sub>	C	E <sub>0</sub>	E		
98.78	28.0	1.21	1.11	7.99	1.09	9.98	6.88	8.32
98.64	28.0	2.10	2.26	3.89	4.93	8.58	1.63	3.42
100.00	24.8	2.12	3.81	8.14	4.95	13.44	4.33	9.18
99.78	23.6	2.33	3.20	6.51	3.54	7.68	3.31	7.71
99.91	26.2	2.36	2.22	4.07	1.73	5.18	1.85	4.37
98.44	23.4	2.50	2.81	8.58	2.18	12.03	5.77	14.43
99.44	27.8	2.67	0.67	7.73	4.03	13.57	7.66	18.85
99.11	24.0	2.64	0.70	2.18	4.48	8.19	1.48	3.91
99.67	25.0	5.60	2.2)	2.76	3.56	4.42	0.56	3.14
101.17	20.0	6.70	2.52	3.29	4.16	4.48	0.77	5.16
101.41	19.2	7.29	0.70	2.11	6.78	7.30	1.41	10.28
101.57	18.9	7.40	1.80	3.63	3.37	4.49	1.83	13.54

b. 采场回风流氡浓度与风量、风质的关系 ( $M=10, R=0.899$ )

$$C = -0.584 + 1.123C_0 + 7.557Q^{-1} \quad (8)$$

c. 采场回风流氡子体浓度与风量、风质的关系 ( $M=10, R=0.897$ )

$$E = -2.689 + 1.300E_0 + 13.941Q^{-1} \quad (9)$$

从式(7)看出: 由于回归常数偏大, 回归系数 $b_1$ 和 $b_2$ 出现负值, 回归计算结果与原来根据普遍规律预想的结果不一致, 即氡析出量不是随风量的加大而呈曲线加大, 反而呈曲线减小; 不是随大气压力的加大而呈曲线减小, 反而呈曲线加大。故它的关系曲线没有作出。

根据式(8)和式(9)作出的关系曲线, 见图4、图5。

充填法采场通风降氡规律与留矿法采场相似。

### 3. 从采场实测资料分析中得出的结论

(1) 由地面进入井下的新鲜空气沿几百米或更长风路流动中, 巷道析出来的氡气不断混入, 使进入工作面的空气受到严重的放射性污染, 无论留矿法或充填法采场氡及氡子体来源中, 入风污染带来的所占比例均相当大, 因此采场风量计算中, 入风风质是不可忽视的问题。

(2) 从图2、图3及图4、图5看出, 无论留矿法或充填法采场, 回风流氡及其子体浓度均随入风流氡及氡子体浓度的加大而呈线性加大; 随风量的加大而呈曲线减小, 其减小的幅度(速率)逐渐变小。这是因为加大风量一方面使稀释能力加大, 另一方面使浓度梯度和压力梯度加大, 氡析出量加大。可见过大的风量降氡及其子体效果并不显著。因此经济合理的风量应以恰好将工作面氡子体 $\alpha$ 潜能浓度稀释到不超过限值为原则。

(3) 留矿法与充填法采场相比, 由于留矿堆重量很大, 氡气析出量较大, 降氡所需风量相当大。但因采场氡子体来源中由采场析出的氡气衰变产生的所占比例不大, 降氡子体所需风量并不大。从放射防护角度, 使用留矿法这种产量高、效率高、成本低的采矿方法没有什么困难, 在适合条件下可以推广应用。

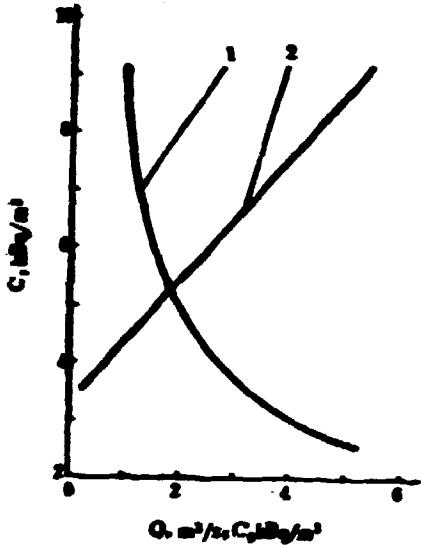


图4 130-19采场C与Q、C<sub>0</sub>的关系

$$C = 0.584 + 1.123C_0 + 7.557Q^{-1}$$

1——C与Q的关系曲线(C<sub>0</sub>=1.6kBq/m<sup>3</sup>)

2——C与C<sub>0</sub>的关系曲线(Q=4m<sup>3</sup>/s)

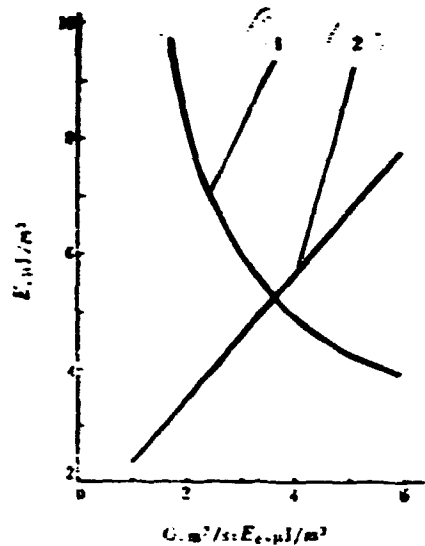


图5 130-19采场E与Q、E<sub>0</sub>的关系

$$E = -2.689 + 1.300E_0 + 13.941Q^{-1}$$

1——E与Q的关系曲线(E<sub>0</sub>=3.2μJ/m<sup>3</sup>)

2——E与E<sub>0</sub>的关系曲线(Q=4m<sup>3</sup>/s)

### 三. 氡子体α潜能积累方程

#### 1. 氡子体浓度积累方程

氡子体浓度表示方法有两种：一种以单位空气体积中的放射性活度表示，另一种以单位空气体积中的α潜能值表示。氡子体浓度积累方程也有相应不同的两种表示方法。

氡子体浓度积累方程有几种，我们选用计算结果较大的 E.C.Tivoglou (济伏格劳) 和 H.E.Ayer (埃伊尔) 早期提出的氡子体浓度积累方程作为原始方程<sup>[1]</sup>。他们假设通风空间为厢室形，供给的空气是未受污染的新鲜空气，通风处于稳定状态，氡子体与氡的比率处于稳定状态，氡子体的减少仅由于其本身的衰减和被通风所排除。由该方程得出的氡子体镭A (RaA)、镭B (RaB) 和镭C (RaC) 浓度积累方程分别为：

$$C_a = \left( \frac{\lambda_a t}{\lambda_a t + 1} \right) C_{n_a} \quad (10)$$

$$C_b = \left[ - \frac{\lambda_a \lambda_b}{(\lambda_a t + 1)(\lambda_b t + 1)} \right] C_{n_a} \quad (11)$$

$$C_c = \frac{\lambda_a \lambda_b \lambda_c}{(\lambda_a t + 1)(\lambda_b t + 1)(\lambda_c t + 1)} C_{n_a} \quad (12)$$

式中C<sub>a</sub>、C<sub>b</sub>和C<sub>c</sub>——分别为RaA、RaB和RaC的浓度，kBq/m<sup>3</sup>；

λ<sub>a</sub>、λ<sub>b</sub>和λ<sub>c</sub>——分别为RaA、RaB和RaC的衰变常数，λ<sub>a</sub>=3.79(ks)<sup>-1</sup>，λ<sub>b</sub>=0.431(ks)<sup>-1</sup>，λ<sub>c</sub>=0.586(ks)<sup>-1</sup>；

$C_{ra}$ ——氡浓度,  $\text{kBq/m}^3$ ;  $C_{ra} = D/Q$  ( $D$ 为氡气析出量,  $\text{kBq/s}$ ;  $Q$ 为风量,  $\text{m}^3/\text{s}$ )  
 $t$ ——通风换气时间 (即氡及其子体衰变积累时间),  $\text{ks}$ ;  $t = V/Q$  ( $V$ 为通风体积,  $10^3 \text{m}^3$ )。

氡子体RaA、RaB和RaC的 $\alpha$ 潜能浓度按下式计算:

$$E_a = f_a C_a \quad (13)$$

$$E_b = f_b C_a \quad (14)$$

$$E_c = f_c C_a \quad (15)$$

氡子体总 $\alpha$ 潜能:

$$\begin{aligned} E &= E_a + E_b + E_c \\ &= \frac{\lambda_a t}{\lambda_a t + 1} \left[ f_a + \frac{\lambda_b t}{\lambda_b t + 1} \left( f_b + f_c \frac{\lambda_c t}{\lambda_c t + 1} \right) \right] C_{ra} \end{aligned} \quad (16)$$

式中 $E_a$ 、 $E_b$ 和 $E_c$ ——分别为RaA、RaB和RaC的 $\alpha$ 潜能,  $\mu\text{J/m}^3$ ;

$f_a$ 、 $f_b$ 和 $f_c$ ——分别为RaA、RaB和RaC的 $\alpha$ 潜能换算系数,  $f_a = 0.579 \mu\text{J/kBq}$ ,

$f_b = 2.86 \mu\text{J/kBq}$ ,  $f_c = 2.10 \mu\text{J/kBq}$ 。

从式(16)看出, 当氡浓度一定时, 氡子体 $\alpha$ 潜能是换气时间的函数。如果令:

$$f(t) = \frac{\lambda_a t}{\lambda_a t + 1} \left[ f_a + \frac{\lambda_b t}{\lambda_b t + 1} \left( f_b + f_c \frac{\lambda_c t}{\lambda_c t + 1} \right) \right] \quad (17)$$

则式(16)变为:

$$E = f(t) C_{ra} \quad (18)$$

$f(t)$ 实质上是在通风条件下氡浓度为 $1 \text{kBq/m}^3$ 时衰变产生的氡子体 $\alpha$ 潜能值; 在平衡条件下该值为 $f(t) = f_a + f_b + f_c = 5.54 \mu\text{J/m}^3$ 即 $5.54 \mu\text{J/kBq}$ 。

## 2. 氡子体 $\alpha$ 潜能积累方程

氡子体 $\alpha$ 潜能用式(16)计算是相当复杂的, 用它无法推导排氡子体风量计算公式, 故要对它进行简化。

根据式(17)的部分计算值作出的 $f(t)$ 与 $t$ 的关系曲线, 见图6。

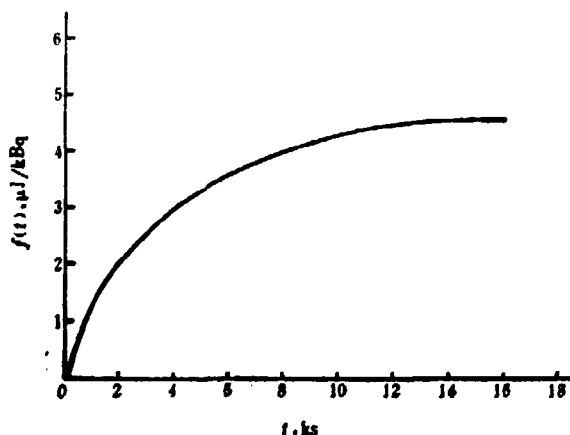


图6  $f(t)$ 与 $t$ 的关系曲线

从图6看出，氡子体 $\alpha$ 潜能随通风换气时间的加大而呈曲线加大，其加大的幅度（速率）逐渐变小，直到平衡状态。

$f(t)$  与  $t$  的这种关系曲线接近于双曲线。现探讨用回归分析方法求简化的氡子体 $\alpha$ 潜能积累方程。

经几种回归方程方案比较，选取换气时间在0.60~6.00ks、时间间隔为0.60ks条件下的双曲线回归方程（相关系数 $r=0.99996$ ）：

$$1/f(t) = 0.180 + 0.570/t \quad (19)$$

该方程变为：

$$f(t) = 1.75t / (0.316t + 1) \quad (20)$$

分子1.75恰好可以分解为 $5.54 \times 0.316$ ，并设 $K_r = 5.54$ ， $\lambda_r = 0.316$ ，则上式变为：

$$f(t) = K_r \lambda_r t / (\lambda_r t + 1) \quad (21)$$

据计算，式(21)与式(17)比较，在 $t=0.12 \sim 6.00$ ks范围内，相对误差一般在0~4%之间，最大为8~11%。见表8。

表8  $f(t)$  按双曲线回归方程计算的相对误差

时间 $t$ , ks	$f(t)$ 值, $\mu\text{J}/\text{kBq}$		相对误差, %	时间 $t$ , ks	$f(t)$ 值, $\mu\text{J}/\text{kBq}$		相对误差, %
	精确值	回归值			精确值	回归值	
0.06	0.121	0.103	-14.9	2.40	2.394	2.389	-0.2
0.12	0.227	0.202	-11.0	2.70	2.559	2.550	-0.4
0.18	0.324	0.298	-8.0	3.00	2.708	2.695	-0.5
0.24	0.415	0.390	-6.0	3.30	2.844	2.827	-0.6
0.30	0.501	0.480	-4.2	3.60	2.967	2.947	-0.7
0.60	0.888	0.883	-0.6	4.20	3.193	3.158	-0.8
0.90	1.222	1.225	+0.3	4.80	3.366	3.338	-0.8
1.20	1.516	1.523	+0.5	5.40	3.524	3.492	-0.9
1.50	1.776	1.781	+0.3	6.00	3.659	3.626	-0.9
1.80	2.006	2.008	+0.1	7.20	3.883	3.847	-0.9
2.10	2.208	2.209	0	10.80	4.321	4.283	-0.9

从表8看出，式(21)的精度是相当高的。

将式(21)代入式(18)得氡子体 $\alpha$ 潜能积累方程：

$$E = K_r C_{R_n} \lambda_r t / (\lambda_r t + 1) \quad (22)$$

这是在用未受污染的新鲜空气通风条件下的氡子体 $\alpha$ 潜能积累方程。

当入风流受污染即带有氡和氡子体时，氡子体 $\alpha$ 潜能积累方程为：

$$E = E_0 + K_r (C_0 + C_{R_n}) \lambda_r t / (\lambda_r t + 1) \quad (23)$$

式中 $E_0$ ——入风流氡子体浓度， $\mu\text{J}/\text{m}^3$ ；

$C_0$ ——入风流氡浓度， $\text{kBq}/\text{m}^3$ 。

式(23)是为了便于推导风量计算公式而取的近似表达式。它对于 $E_0$ 从入风口经时间 $t$ 运移到回风口的衰变减少未予考虑使计算结果偏大，而 $C_0$ 衰变产生的氡子体按与 $C_{R_n}$ 相同计

算比按集中污染浓度单独计算偏小。在 $E_0$ 和 $C_0$ 值不太大、通风换气时间不太长的条件下,据计算,该式相对误差不超过3%。

### 3. 氡子体衰变积累规律

根据上面的研究,氡子体衰变规律概括为:在放射性矿井稳定通风条件下,风路末端或风流中氡子体 $\alpha$ 潜能浓度随入风流氡和氡子体浓度的加大而呈线性加大,随通风空间内氡气析出量和通风体积的加大而呈线性加大,随风量(或风速)的加大而呈曲线减小。这与根据采场试验资料总结的规律是一致的。

## 四、排氡子体风量计算公式

### 1. 风量计算公式推导

#### (1) 用未受污染的新鲜空气通风

将 $C_{R_n} = D/Q$ 和 $t = V/Q$ 代入式(22)解一元二次方程得:

$$Q = 0.5\lambda_e [\sqrt{4K_e DV / (E\lambda_e) + V^2} - V] \quad (24)$$

如果去掉式中 $V^2$ 和 $V$ 两项,考虑一个修正系数 $K = 0.834$ ,并将 $K_e = 5.54$ 和 $\lambda_e = 0.316$ 代入得:

$$Q = 1.10\sqrt{DV}/E \quad (25)$$

式(25)与式(24)比较,相对误差一般不超过6%。

根据ICRP(国际放射防护委员会)于1981年推荐的氡子体年摄入量限值0.02J导出空气中氡子体浓度限值 $^{222}8.3\mu\text{J}/\text{m}^3$ ,根据ICRP于1985年通过的第47号出版物中“在实际应用时,导出值可取一位有效数字”。风量计算时,浓度限值取 $8\mu\text{J}/\text{m}^3$ (恰好等于 $5 \times 10^4 \text{MeV}/\text{L}$ )。我国国家标准《放射卫生防护基本标准》(GB4792-84)已采用了上述标准。将 $E = 8$ 代入式(25)得:

$$Q = 0.39\sqrt{DV} \quad (26)$$

#### (2) 用受污染的空气通风

将 $C_{R_n} = D/Q$ 和 $t = V/Q$ 代入式(23)解一元二次方程得:

$$Q = 0.5\lambda_e / (E - E_0) [\sqrt{4K_e DV (E - E_0) / \lambda_e + (E - E_0 - K_e C_0)^2 V^2} - (E - E_0 - K_e C_0) V] \quad (27)$$

如果 $E_0 + K_e C_0$ 不超过 $15\mu\text{J}/\text{m}^3$ ,上式中第二、三两项可以去掉,并将 $K_e = 5.54$ 和 $\lambda_e = 0.316$ 代入,可简化为:

$$Q = 1.32\sqrt{DV}/(E - E_0) \quad (28)$$

式中 $E$ 取 $8\mu\text{J}/\text{m}^3$ 。

据计算,式(28)与式(27)比较,相对误差一般不超过9%。

### 2. 风量计算公式适用条件

矿井总入风流来自地面空气,放射性污染一般很小(总入风流氡浓度不超过 $0.1\text{kBq}/\text{m}^3$ ,氡子体浓度不超过 $0.2\mu\text{J}/\text{m}^3$ ),可以忽略不计。矿井总风量(总体算法)可按入风污染为零计算,即按式(24)或式(25)计算。

采场等局部地点入风污染一般较大(据采场通风降氡研究资料,入风污染带来的和入风氡浓度衰变产生的氡子体所占比例很大),不可忽略不计。采场、掘进工作面等局部地点排氡子体风量应按式(27)或式(28)计算。 $E_0 + K \cdot C_0$  不超过  $15 \mu\text{J}/\text{m}^3$  时用式(28)即可。

### 3. 风量计算公式验证

#### (1) 验证方法

为了检验本研究提出的上述排氡子体风量计算公式算出的风量是否符合辐射安全要求,在铀矿山留矿法和充填法两种采场生产条件下进行了验证。

选择在有代表性采场而不在全矿井中进行试验验证,是因为采场是主要生产活动场所,而且测定条件比较简单,容易改变风量等参数,易获得比较准确的数据。

由于在生产条件下难以人为地控制采场氡气析出量和入风风质不变而只改变风量来验证,根据不同风量和风质条件下的试验数据,用回归分析方法求出采场氡子体 $\alpha$ 潜能积累方程,由该方程导出风量计算公式。这是在该采场特定条件下的经验公式,与前面根据氡子体一般规律导出的计算公式的途径不同。如果两者计算结果相差不大,说明理论计算公式符合生产实际。

#### (2) 验证结果

对充填法和留矿法两种采矿方法的五个采场试验数据进行了验证。按排氡子体风量计算公式(28)与按各经验公式计算比较,有些符合很好,有的较大,有的较小。

例如,某充填法硐室型采场,根据试验数据统计规律得出的氡子体 $\alpha$ 潜能积累方程(数组  $M=10$ , 相关系数  $R=0.834$ ),

$$E = 0.419 + 1.280E_0 + 1.238DV/Q^2 \quad (29)$$

由该方程导出的风量计算经验公式:

$$Q = 1.10 \sqrt{DV/[E - (0.419 + 1.280E_0)]} \quad (30)$$

该采场取  $D = 13.54 \text{ kBq/s}$ ,  $V = 1.40 \text{ k(m}^3\text{)}$ ,  $E_0 = 3.37 \mu\text{J}/\text{m}^3$ 。将各值代入上式计算得:

$$Q = 1.10 \sqrt{13.54 \times 1.40 / [8 - (0.419 + 1.280 \times 3.37)]} = 2.65 \text{ m}^3/\text{s}$$

按式(28)计算得:

$$Q = 1.32 \sqrt{13.54 \times 1.40 / (8 - 3.37)} = 2.67 \text{ m}^3/\text{s}$$

计算是在氡气析出量、通风体积和入风风质等参数完全相同的条件下进行的。从总的试验验证结果看出,排氡子体风量计算公式基本符合生产实际,算出的风量可以满足辐射安全要求。由于理论计算公式是根据氡子体一般规律导出的,经验公式是根据某个采场具体规律得出的,两者计算结果有些差别是必然的。

### 4. 几种排氡子体风量计算公式比较

#### (1) 几种排氡子体风量计算公式<sup>[8]</sup>

下面介绍的几种风量计算公式均已将各符号的意义和计量单位改为与本文采用的相一致,其中有的公式经过重新推导。

a. 捷克斯洛伐克 M. Hemer 公式(1975年):

氡子体 $\alpha$ 潜能积累方程:

$$E = 1.24C_n \cdot t^{0.78} \quad (31)$$



风量计算公式 (浓度限值  $E=6.4\mu\text{J}/\text{m}^3$ ) :

$$\begin{aligned} Q &= 1.13 (DV^{0.76}/E)^{0.66} \\ &= 0.40(DV^{0.76})^{0.66} \end{aligned} \quad (32)$$

b. 加拿大 R. W. Thompkins 公式 (1975年) :

氡子体  $\alpha$  潜能积累方程:

$$E = 0.764 C_{R_n} t^{0.85} \quad (33)$$

风量计算公式 (浓度限值  $E=6.86\mu\text{J}/\text{m}^3$ ) :

$$\begin{aligned} Q &= 0.86(DV^{0.85}/E)^{0.54} \\ &= 0.31(DV^{0.85})^{0.54} \end{aligned} \quad (34)$$

c. 苏联 V. I. Holmin 公式 (原式1959年发表, 采用图表计算法, 现经我们根据原资料重新推导出计算公式) :

氡子体  $\alpha$  潜能积累方程:

$$\begin{aligned} E &= K_e C_{R_n} \psi(t) = 1.48 C_{R_n} t^{0.78} \\ & \text{(式中 } K_e = 5.54, \psi(t) = 0.267 t^{0.78} \text{)} \end{aligned} \quad (35)$$

风量计算公式 (浓度限值  $E=10.4\mu\text{J}/\text{m}^3$ ) :

$$\begin{aligned} Q &= 1.25(DV^{0.78}/E)^{0.57} \\ &= 0.33(DV^{0.78})^{0.57} \end{aligned} \quad (36)$$

d. 苏联 L. D. Saltkov 等人公式 (1977年) :

氡子体  $\alpha$  潜能积累方程:

$$\begin{aligned} E &= K_e C_{R_n} \psi_e = K_e C_{R_n} [1 - \exp(-0.5\lambda_e t)] \\ &\approx 2.77 C_{R_n} [1 - \exp(-\lambda_e t)] \\ &\approx 0.93 C_{R_n} t \end{aligned} \quad (37)$$

(式中  $\psi_e = 1 - \exp(-0.5\lambda_e t) \approx 0.5[1 - \exp(-\lambda_e t)] \approx 0.5\lambda_e t$ ,  $K_e = 5.54$ ,  $\lambda_e = 0.334$ )

风量计算公式 (浓度限值  $E=6.4\mu\text{J}/\text{m}^3$ ) :

$$Q = 0.96 \sqrt{DV/E} = 0.36 \sqrt{DV} \quad (38)$$

c. 张哲公式 (1979年) :

氡子体  $\alpha$  潜能积累方程:

$$\begin{aligned} E &= K_e C_{R_n} \psi(t) = 0.796 C_{R_n} t^{0.82} \\ & \text{(式中 } K_e = 5.54, \psi(t) = 0.143 t^{0.82} \text{)} \end{aligned} \quad (39)$$

风量计算公式 (浓度限值  $E=6.4\mu\text{J}/\text{m}^3$ )

$$\begin{aligned} Q &= 0.88(DV^{0.82}/E)^{0.55} \\ &= 0.32(DV^{0.82})^{0.55} \end{aligned} \quad (40)$$

## (2) 本项目与其他风量计算方法比较

a. 氡子体  $\alpha$  潜能积累方程: 国内外以幂函数方程 (个别以指数方程) 表示, 不能较好地反映氡子体衰变积累规律; 建立  $\alpha$  潜能积累方程的方法大多不是回归分析方法。本文以双曲线回归方程表示, 较好地反映了氡子体衰变积累规律, 建立  $\alpha$  潜能积累方程的方法是回归分析方法, 而且经多种方案比较选取最优的。

b. 排氡子体风量计算公式: 国内外现有风量计算公式推导有的不严格, 采用的防护标准已经陈旧, 计量单位不是国际单位制 (SI) 单位, 入风流受污染条件下的风量计算公式未导出。

本文风量计算公式推导严格，精度较高，采用的防护标准是ICRP推荐的新标准，计量单位是SI单位；重视入风风质问题，不仅导出了入风流未受污染条件下的计算公式，而且导出了入风流受污染条件下的计算公式（这些公式均很简单、实用），并且指出了它们不同的使用范围。

c. 风量计算公式验证：国内外现有排氡子体风量计算公式推导出来就算完成，有些公式算出的风量偏小。本文风量计算公式在铀矿山生产条件下进行了试验验证，算出的风量大小适当，经济合理。

### 5. 矿井总风量计算和风量计算举例

矿井总风量计算方法有两种：一种是“总体算法”，即根据全矿井总氡析出量和总通风体积计算，按式(26)计算；另一种是“分项算法”，即根据采场、掘进工作面 and 硐室等各自的风量计算标准和工作面数目分项计算。其公式：

$$Q = K_1 (\sum q_1 n_1 + \sum q_2 n_2 + \sum q_3 n_3 + \sum q_4 n_4) \quad (41)$$

式中  $q_1$  和  $n_1$  —— 分别为某类采场风量标准和采场数目；

$q_2$  和  $n_2$  —— 分别为某类巷道掘进工作面风量标准和工作面数目；

$q_3$  和  $n_3$  —— 分别为某类硐室风量标准和硐室数目；

$q_4$  和  $n_4$  —— 分别为其他工作面风量标准和工作面数目；

$K_1$  —— 矿井漏风系数，相对单位。

采场风量标准按式(28)计算选取，用排尘风速校验；掘进工作面风量一般按排炮烟计算选取；硐室和其他工作面按各自不同的要求计算选取。

矿井漏风系数即矿井有效风量率的倒数。有效风量是指进入采场、掘进工作面和工作硐室等被有效利用了风量；它与矿井总风量之比的百分数即为有效风量率。

在分项算法中，矿井漏风系数  $K_1$  可取 1.3~1.5（相当于有效风量率为 77~67%）在总体算法中，它算出的风量已经考虑了未被有效利用部分，漏风系数不应考虑（即取  $K_1=1$ ）。

矿井总风量按总体算法计算比较合理，但矿井射气面积和通风体积统计计算工作量大。分项算法将风量的计算与分配结合起来，但因设计选取的工作面数目往往比生产实际少，风量可能偏小。因此应按两种方法计算取较大值。

矿井总风量计算举例：

a. 总体算法 已知某铀矿井氡析出量  $D=400\text{kBq/s}$ ，通风体积  $V=60\text{k}(m^3)$ ，其矿井总风量为：

表9 矿井总风量分项计算举例

项 目	风量标准, $m^3/s$	工作面数目	风量小计, $m^3/s$	项 目	风量标准, $m^3/s$	工作面数目	风量小计, $m^3/s$
1.采场			(25.0)	生产探矿	2.0	1	2.0
面积80m <sup>2</sup>	2.0	2	4.0	采准	2.0	3	6.0
面积200m <sup>2</sup>	3.0	4	12.0	3.硐室及其他			(6.0)
面积420m <sup>2</sup>	4.5	2	9.0	炸药库	2.0	1	2.0
2.掘进工作面			(11.0)	溜矿井	2.0	2	4.0
开拓	3.0	1	3.0	总计( $K_1=1.3$ )			54.6

$$Q=0.39 \times \sqrt{400 \times 60} = 60.4 \text{ m}^3/\text{s}$$

b. 分项计算法 见表9。

两种方法计算结果,按总体计算法算出的风量较大。该矿井总风量可取 $60 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

## 五、结 论

1. 根据生产条件下留矿法和充填法采场通风降氡试验数据分析了采场中氡和氡子体来源的特点,用回归分析方法探讨了采场通风降氡规律,这对于研究铀矿通风计算具有重要的意义。

2. 根据铀矿氡和氡子体衰变积累规律的研究,提出了以双曲线回归方程表示氡子体 $\alpha$ 潜能积累方程,它与通常用幂函数方程或指数方程表示的 $\alpha$ 潜能积累方程比较,更好地反映了氡子体衰变积累规律。

3. 根据氡子体 $\alpha$ 潜能积累方程,按ICRP(国际放射防护委员会)于1981年推荐的防护标准,推导出了新的排氡子体风量计算公式,较好地解决了入风流未受污染和受污染两种情况下的风量计算问题。

4. 排氡子体风量计算公式在铀矿生产条件下进行了试验验证,按公式算出的风量能够满足辐射安全要求,比较符合实际,经济合理。

## 参 考 文 献

- [1] Tsivoglou, E.C. and Ayer, H.E.; Ventilation of Uranium Mine 1954; 转引自R.L.Harris和R.E. Bales, 控制氡及其子体的铀矿通风, 载《铀矿通风防护汇编》王盛震等译,北京:原子能出版社,1964, 1~13
- [2] ICRP第32号出版物,工作人员吸入氡子体的限值(1981年通过),孙世荃、李素云译,北京:原子能出版社,1983, 16~17
- [3] 吴 钢; 铀矿山现行通风计算方法几个问题的探讨, 载《铀矿冶》第1卷1982年第1期; 63~70

**P.O.Box 2103**

**Beijing, China**