

# 爆破后压入式通风独头巷道内氡的运移模型

叶勇军<sup>1,2</sup>, 江俊廷<sup>1</sup>, 丁德馨<sup>2,\*</sup>, 钟永明<sup>1</sup>, 谢超<sup>1</sup>

(1. 南华大学 环境保护与安全工程学院, 湖南 衡阳 421001;

2. 南华大学 铀矿冶生物技术国防重点学科实验室, 湖南 衡阳 421001)

**摘要:**为有效指导铀矿井下独头巷道的通风设计,基于质量守恒定律和置换通风理论,首先建立了描述爆破后压入式通风独头巷道内抛掷空间和风流末端氡活度浓度随通风时间变化的计算模型,利用该模型得到了达到氡活度浓度限值条件的最短排氡通风时间的确定方法;然后分析了不同参数对风流末端氡活度浓度以及最短排氡通风时间的影响。结果表明,爆破后,独头巷道风流末端氡活度浓度在一定通风时间内保持不变,之后瞬间增至峰值,最终逐渐衰减至稳定;在其他参数一定的情况下,风流末端氡活度浓度开始剧增的时间随巷道长度的增加而减小,随风量增加而增大;风流末端氡活度浓度衰减速率随风量的增加而增大;风流末端氡活度浓度峰值随掘进面铀品位的增加而增大;最短排氡通风时间随巷道长度和掘进面铀品位的增加而增大,随通风量的增加而减小。

**关键词:**铀矿;独头巷道;爆破;氡活度浓度;压入式通风

中图分类号:TD 868

文献标志码:A

文章编号:1000-6931(2016)03-0571-06

doi:10.7538/yzk.2016.50.03.0571

## Transport Model of Radon in Blind Roadway with Forced Ventilation after Blasting

YE Yong-jun<sup>1,2</sup>, JIANG Jun-ting<sup>1</sup>, DING De-xin<sup>2,\*</sup>, ZHONG Yong-ming<sup>1</sup>, XIE Chao<sup>1</sup>

(1. School of Environment Protection and Safety Engineering, University of South China,

Hengyang 421001, China; 2. Key Discipline Laboratory for National Defense for Biotechnology  
in Uranium Mining and Hydrometallurgy, University of South China, Hengyang 421001, China)

**Abstract:** In order to guide the design of ventilation in the blind roadway under uranium mine, based on the theories of mass conservation and displacement ventilation, the calculation models for the variation of radon activity concentration with ventilation time after blasting in the throwing-space and in the wind end were firstly built. With the models, the calculation method of the theoretical shortest ventilation time for eliminating radon in the blind roadway which meets radon activity concentration limit was obtained, and the influences of different parameters on the activity concentration of radon in the wind end and the shortest ventilation time to eliminate radon were both analyzed. The results show that after blasting radon activity concentration in the wind

收稿日期:2015-01-22;修回日期:2015-06-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11105069)

作者简介:叶勇军(1979—),男,湖北浠水人,副教授,博士,从事铀矿安全开采技术研究

\* 通信作者:丁德馨, E-mail: dingdxzzz@163.com

end suddenly rises up to peak value after keeping stable for certain ventilation time, and it finally decays gradually to steady value. With other parameters unchanged, the start moment that radon activity concentration suddenly rises up decreases with the increase of the length of the blind roadway, but increases with the ventilation volume. The decay speed for radon activity concentration in the wind end increases with the ventilation volume. The peak value of radon activity concentration increases with the uranium grade of the driving face. The shortest ventilation time to eliminate radon increases with the length of the blind roadway and the uranium grade of the driving face, and decreases with the increase of the ventilation volume.

**Key words:** uranium mine; blind roadway; blasting; radon activity concentration; forced ventilation

独头掘进巷道是铀矿井下重要的作业场所,也是氡气产生和聚集的重要地点。在爆破瞬间,独头巷道掘进面会向爆破抛掷空间释放大量的氡气,若通风管理措施不善,则会对作业人员造成严重的放射性危害<sup>[1]</sup>。为确保地下铀矿山独头掘进巷道爆破后的辐射防护安全,必须优化爆破后巷道的排氡通风时间,确保作业人员进入时巷道内的氡活度浓度处于国家规定浓度限值以下。

国内外学者在铀矿井下巷道通风设计方面已进行了大量研究,范洪滨<sup>[2]</sup>对独头巷道掘进工作面的氡活度浓度与通风量的关系进行了现场实验研究;周星火等<sup>[3]</sup>阐述了调整通风巷道压力分布控制氡析出的方法;Richon等<sup>[4]</sup>建立了氡活度浓度的时空分布模型;Ei-Fawal<sup>[5]</sup>建立了矿井通风网络中风量、风压以及氡活度浓度的联合解算模型;叶勇军等提出了铀矿井独头巷道的最大掘进长度<sup>[6]</sup>、压入式<sup>[7]</sup>和压抽混合式<sup>[8]</sup>通风独头巷道内氡及氡子体浓度分布的计算模型;伍颖等<sup>[9]</sup>探讨了铀矿井巷道氡析出量与通风量的关系。由于以上研究旨在建立稳态通风作用下巷道内氡活度浓度与排氡风量的关系,建立的氡活度浓度预测模型未考虑爆破瞬时氡的释放对巷道内氡活度浓度的影响。鉴于此,本文通过质量守恒定律和置换通风理论,建立爆破后压入式通风独头巷道内氡的运移模型,得到巷道风流末端氡活度浓度的变化规律和满足氡活度浓度限值的最短排氡通风时间的确定方法,为今后铀矿山独头巷道的通风安全管理提供参考依据。

## 1 独头巷道掘进面爆破瞬间氡的释放量与抛掷空间初始氡活度浓度的确定

### 1.1 氡释放量

独头巷道掘进面的岩体可看作半无限大的多孔介质,氡在掘进面岩体内的一维稳定运移方程<sup>[10]</sup>为:

$$D \frac{d^2 c}{dx^2} - v \frac{dc}{dx} - \lambda c + \alpha = 0$$

$$D = n\tau D_0 \quad (1)$$

$$\alpha = 2.562 \times 10^{-3} \rho U K_p S_e$$

式中: $c$ 为掘进面岩体中氡的活度浓度, $\text{Bq}/\text{m}^3$ ; $x$ 为内法线方向离掘进面的距离, $\text{m}$ ; $D$ 为岩体中氡的扩散系数, $\text{m}^2/\text{s}$ ; $D_0$ 为空气中氡的扩散系数, $D_0 = 1.05 \times 10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$ ; $n$ 为岩体的孔隙率, $\%$ ; $\tau$ 为孔隙的扭曲度; $v$ 为岩体中气体的速度, $\text{m}/\text{s}$ ; $\alpha$ 为岩体产生可移动氡的能力, $\text{Bq}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ ; $\rho$ 为岩体密度, $\rho = 2.7 \times 10^3 \text{kg}/\text{m}^3$ ; $U$ 为岩体铀品位, $\%$ ; $K_p$ 为铀镭平衡系数; $S_e$ 为射气系数, $\%$ ; $\lambda$ 为氡的衰变常量, $\lambda = 2.1 \times 10^{-6} \text{s}^{-1}$ 。

图1为爆破前独头巷道掘进面岩体中氡活度浓度计算示意图。掘进面的空气氡活度浓度为 $c_0$ ,方程(1)的边界条件为: $c|_{x=0} = nc_0$ , $c|_{x \rightarrow \infty}$ 时有界。此方程的解为:

$$c = \frac{\alpha}{\lambda} - \left( \frac{\alpha}{\lambda} - nc_0 \right) e^{-\frac{\sqrt{v^2 + 4\lambda D} - v}{2D} x} \quad (2)$$

由于 $\frac{\alpha}{\lambda} \gg nc_0$ ,忽略式(2)中的 $nc_0$ ,且不考虑掘进面岩体中气体流动,即 $v=0$ 时,则有:

$$c = \frac{\alpha}{\lambda} \left( 1 - e^{-\sqrt{\frac{\lambda}{D}} x} \right) \quad (3)$$

假设在爆破瞬间,掘进面爆破岩体孔隙中的氡会全部释放出来,则氡的释放量为:

$$q = \int_0^{x_0} cS dx = \frac{\alpha S}{\lambda} \left[ x_0 - \sqrt{\frac{D}{\lambda}} (1 - e^{-\sqrt{\frac{\lambda}{D}} x_0}) \right] \quad (4)$$

式中: $q$ 为独头巷道掘进面爆破瞬间氡的释放量, $Bq$ ;  $S$ 为独头巷道掘进面的断面积, $m^2$ ;  $x_0$ 为独头巷道掘进面的爆破深度, $m$ 。

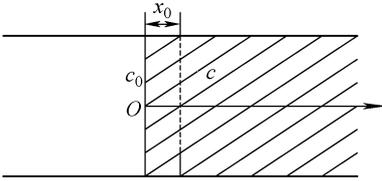


图1 爆破前独头巷道掘进面岩体中氡活度浓度计算示意图

Fig.1 Schematic drawing of calculating radon activity concentration in rock of driving face in blind roadway before blasting

### 1.2 抛掷空间初始氡活度浓度

独头巷道掘进面爆破瞬间氡和炮烟弥漫的空间为抛掷空间,该空间抛掷长度的经验计算公式<sup>[11]</sup>为:

$$b = 15 + Q_B/5 = 15 + \omega S x_0/5 \quad (5)$$

式中: $b$ 为抛掷长度, $m$ ;  $Q_B = \omega S x_0$ 为炸药质量, $kg$ ;  $\omega$ 为每  $kg$  炸药产生的炮烟体积转化系数, $m^3/kg$ 。

爆破瞬间压入式通风独头巷道抛掷空间的初始氡活度浓度为  $c_{Rn}^{Y_0}$  ( $Bq/m^3$ ),由下式计算:

$$c_{Rn}^{Y_0} = \frac{q}{bS} + c_{lim}^Y \quad (6)$$

式中, $c_{lim}^Y$ 为上一次爆破后压入式通风独头巷道抛掷空间稳定后氡的活度浓度, $Bq/m^3$ 。

## 2 爆破后压入式通风独头巷道风流中氡的运移模型

图2为爆破后压入式通风独头巷道通风排氡计算模型示意图。影响抛掷空间氡活度浓度变化的因素为抛掷空间岩石壁面氡析出量、巷道通风气流带入的氡量、爆破矿石堆析出的氡量、排出气流带走的氡量和衰变的氡量。依据质量守恒定律、核素衰变理论和置换通风的理论,确定爆破后独头巷道抛掷空间内氡活度浓度随时间变化的方程为:

$$\frac{dc_{Rn}^{YP}}{dt} = (\delta + \lambda_V c_{Rn}^{in} + \alpha_1) - (\lambda + K_t \lambda_V) c_{Rn}^{YP} \quad (7)$$

式中: $c_{Rn}^{YP}$ 为爆破后压入式通风独头巷道抛掷空间的氡活度浓度, $Bq/m^3$ ;  $\delta = \frac{J_0 S_r}{bS}$  ( $J_0$ 为巷道壁面氡析出率, $Bq/(m^2 \cdot s)$ ;  $S_r = pb$ 为抛掷空间氡的析出面积, $m^2$ ;  $p = r\sqrt{S}$ 为横截面的周长; $r$ 为巷道断面的形状系数)为抛掷空间壁面氡的析出密度, $Bq/(m^3 \cdot s)$ ;  $\lambda_V = \frac{Q}{bS}$  ( $Q$ 为抛掷空间的通风量, $m^3/s$ )为抛掷空间的通风率, $s^{-1}$ ;  $c_{Rn}^{in}$ 为独头巷道的入风氡活度浓度, $Bq/m^3$ ;  $\alpha_1 = \frac{\alpha S x_0}{bS} = \frac{\alpha x_0}{b}$ 为爆破矿石在单位体积抛掷空间内产生的氡量, $Bq/(m^3 \cdot s)$ ;  $K_t$ 为紊流扩散系数。

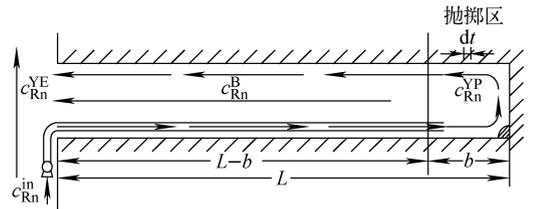


图2 爆破后压入式通风独头巷道通风排氡计算模型  
Fig.2 Calculation model of eliminating radon by forced ventilation in blind roadway after blasting

解方程(7)得到抛掷空间氡活度浓度的计算公式:

$$c_{Rn}^{YP} = \frac{\delta + \lambda_V c_{Rn}^{in} + \alpha_1}{K_t \lambda_V + \lambda} + \left( c_{Rn}^{Y_0} - \frac{\delta + \lambda_V c_{Rn}^{in} + \alpha_1}{K_t \lambda_V + \lambda} \right) e^{-(\lambda + K_t \lambda_V)t} \quad (8)$$

当  $t$  趋向于无穷大时,由式(8)得到  $c_{lim}^Y$ :

$$c_{lim}^Y = \frac{\delta + \lambda_V c_{Rn}^{in} + \alpha_1}{K_t \lambda_V + \lambda} \quad (9)$$

将式(9)代入式(6),有:

$$c_{Rn}^{Y_0} = \frac{q}{bS} + \frac{\delta + \lambda_V c_{Rn}^{in} + \alpha_1}{K_t \lambda_V + \lambda} \quad (10)$$

将式(10)代入式(8),有:

$$c_{Rn}^{YP} = \frac{\delta + \lambda_V c_{Rn}^{in} + \alpha_1}{K_t \lambda_V + \lambda} + \frac{q}{bS} e^{-(\lambda + K_t \lambda_V)t} \quad (11)$$

假设在置换通风条件下,排风氡活度浓度与抛掷空间平均氡活度浓度相等,紊流扩散系数  $K_t = 1$ 。同时,由于  $\lambda_V \gg \lambda$  时,忽略  $\lambda$ ,则式

(11)变为:

$$c_{Rn}^{YP} = \frac{\delta + \alpha_1}{\lambda v} + \frac{q}{bS} e^{-\lambda v t} + c_{Rn}^{in} \quad (12)$$

$$\text{将 } \delta = \frac{J_0 S_r}{V}, S_r = pb, p = r\sqrt{S}, \lambda v = \frac{Q}{Sb}, q =$$

$\frac{\alpha S}{\lambda} \left[ x_0 - \sqrt{\frac{D}{\lambda}} (1 - e^{-\sqrt{\frac{\lambda}{D}} x_0}) \right]$  代入式(12),得:

$$c_{Rn}^{YP} = \frac{J_0 r \sqrt{S} b}{Q} + \frac{\alpha x_0 S}{Q} +$$

$$\frac{\alpha}{b\lambda} \left[ x_0 - \sqrt{\frac{D}{\lambda}} (1 - e^{-\sqrt{\frac{\lambda}{D}} x_0}) \right] e^{-\frac{Q}{bS} t} + c_{Rn}^{in} \quad (13)$$

设整个独头巷道的长度为  $L$ , 从抛掷空间末端到风流末端之间的距离为  $L - b$ , 则风流从抛掷空间到巷道风流末端的时间  $t_B$  (s) 为:

$$t_B = \frac{L - b}{v} = \frac{(L - b)S}{Q} \quad (14)$$

氡的半衰期为  $T_{1/2, Rn}$ , 由于  $t_B \ll T_{1/2, Rn}$ , 可忽略衰变氡的减少量, 则压入式通风独头巷道抛掷空间末端到风流末端之间巷道岩壁析出的氡导致通风气流氡活度浓度的增量  $c_{Rn}^B$  (Bq/m<sup>3</sup>) 为:

$$c_{Rn}^B = \frac{J_0 r \sqrt{S} (L - b)}{Q} \quad (15)$$

因此, 爆破后压入式通风独头巷道风流末端氡活度浓度  $c_{Rn}^{YE}$  (Bq/m<sup>3</sup>) 的计算公式为:

$$c_{Rn}^{YE} = \begin{cases} c_{lim}^Y + c_{Rn}^B & t < t_B \\ \frac{J_0 r \sqrt{S} b}{Q} + \frac{\alpha x_0 S}{Q} + \frac{\alpha}{b\lambda} \left[ x_0 - \sqrt{\frac{D}{\lambda}} (1 - e^{-\sqrt{\frac{\lambda}{D}} x_0}) \right] e^{-\frac{Q}{bS} (t - t_B)} + c_{Rn}^{in} + c_{Rn}^B & t \geq t_B \end{cases} \quad (16)$$

将式(9)、(14)、(15)代入式(16), 有:

$$c_{Rn}^{YE} = \begin{cases} \frac{J_0 r \sqrt{S} L}{Q} + \frac{\alpha x_0 S}{Q} + c_{Rn}^{in} & t < t_B \\ \frac{J_0 r \sqrt{S} L}{Q} + \frac{\alpha x_0 S}{Q} + \frac{\alpha}{b\lambda} \left[ x_0 - \sqrt{\frac{D}{\lambda}} (1 - e^{-\sqrt{\frac{\lambda}{D}} x_0}) \right] \cdot e^{-\frac{Q}{bS} (t - \frac{(L-b)S}{Q})} + c_{Rn}^{in} & t \geq t_B \end{cases} \quad (17)$$

### 3 分析与讨论

由式(17)可知, 压入式通风独头巷道风流末端氡活度浓度  $c_{Rn}^{YE}$  受巷道本身的物理参数(长度  $L$ 、巷道断面积  $S$ 、掘进面岩体铀品位  $U$  和巷道岩壁氡析出率  $J_0$ )、通风参数(入风氡活度浓

度  $c_{Rn}^{in}$  和通风量  $Q$ ) 以及爆破参数(爆破深度  $x_0$  和炮烟抛掷长度  $b$ ) 的影响。依据式(17)可确定爆破后压入式通风独头巷道风流末端的氡活度浓度达到限值所需最短排氡通风时间  $t_{Rn}$ 。

为能直观地分析爆破后压入式通风独头巷道风流末端氡活度浓度随通风时间的变化以及各物理参数对风流末端氡活度浓度的影响, 假设独头巷道为3心拱, 巷道断面积  $S = 5.5 \text{ m}^2$ , 断面形状系数  $r = 3.85$ ; 爆破时采用2#岩石炸药, 爆破深度  $x_0 = 2 \text{ m}$ , 每 kg 炸药产生的炮烟体积转化系数  $\omega = 0.035 \text{ m}^3/\text{kg}$ , 经式(5)计算得抛掷长度  $b = 16.9 \text{ m}$ ; 岩石介质孔隙率  $n = 0.03$ , 铀镭平衡系数  $K_p = 1$ , 扭曲度  $\tau = 1$ , 射气系数  $S_e = 12.6\%$ , 掘进面岩体铀品位  $U$  分别取  $0.05\%$ 、 $0.1\%$ 、 $0.2\%$ , 对应的可移动氡的能力  $\alpha$  分别为  $4.358$ 、 $8.716$ 、 $17.432 \text{ Bq}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ ; 巷道岩壁氡析出率  $J_0$  取  $0.1$ 、 $0.5$ 、 $1.0 \text{ Bq}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ; 通风量  $Q$  取  $1.0$ 、 $1.5$ 、 $2 \text{ m}^3/\text{s}$ ; 巷道长度  $L$  分别取  $50$ 、 $100$ 、 $150 \text{ m}$ , 入风氡活度浓度  $c_{Rn}^{in}$  取  $1000 \text{ Bq}/\text{m}^3$ 。依据《铀矿井排氡及通风技术规范》<sup>[12]</sup> 的规定, 铀矿山井下独头巷道氡活度浓度限值为  $2.7 \text{ kBq}/\text{m}^3$ 。通过式(17)得到几种典型参数条件下爆破后压入式通风独头巷道风流末端氡活度浓度  $c_{Rn}^{YE}$  随时间的变化, 如图3所示。

由图3可知, 爆破后, 1) 压入式通风独头巷道风流末端氡活度浓度先保持不变, 之后瞬间增大至峰值, 并随通风时间的增加逐渐衰减至稳定; 2) 巷道长度  $L$  影响风流末端氡活度浓度急剧增长开始的时间,  $L$  越大, 风流末端氡活度浓度急剧增长开始的时间越晚, 原因为巷道长度越长, 风流从抛掷空间到巷道风流末端的时间  $t_B$  越大, 造成风流末端氡活度浓度急剧增长开始的时间越晚; 3) 通风量  $Q$  影响巷道风量氡活度浓度急剧增长开始的时间和氡活度浓度的衰减速率, 通风量  $Q$  越大, 风流末端氡活度浓度急剧增长开始的时间越早, 风流末端氡活度浓度的衰减速率越大, 原因为通风量  $Q$  影响风流从抛掷空间到巷道风流末端的时间  $t_B$  和风流末端氡活度浓度的衰减系数; 4) 掘进面岩石铀品位  $U$  影响风流末端氡活度浓度  $c_{Rn}^{YE}$  的峰值,  $U$  越大,  $c_{Rn}^{YE}$  的峰值也越大, 原因为  $U$  越大, 爆破瞬间破碎矿体向抛掷空间释放的氡量也越多, 造成  $c_{Rn}^{YE}$  的峰值也越大。

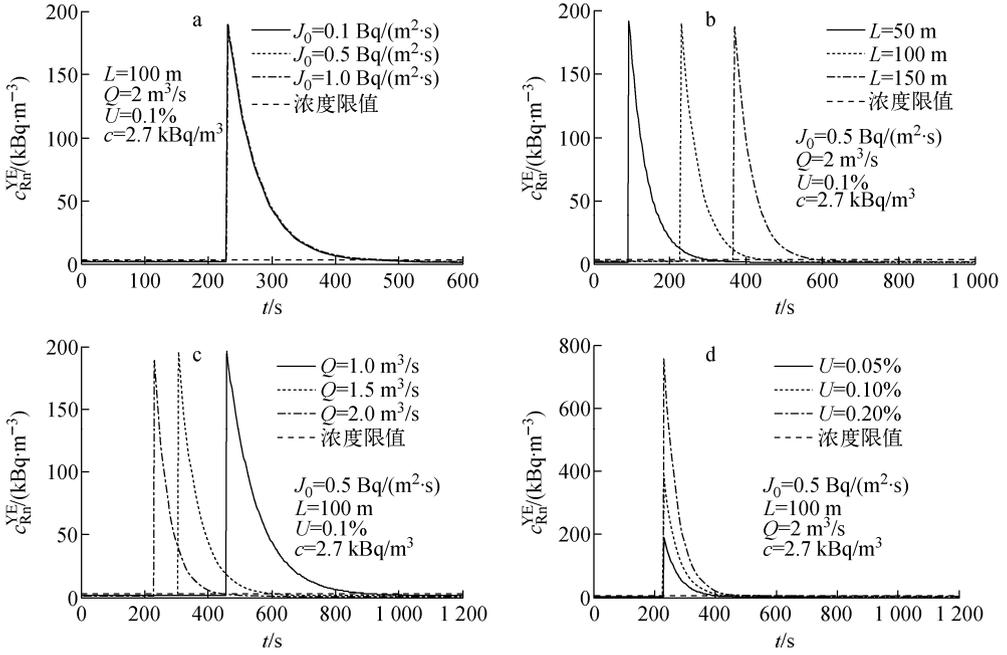


图3 风流末端氡活度浓度  $c_{Rn}^{YE}$  随通风时间  $t$  的变化

Fig. 3  $c_{Rn}^{YE}$  vs.  $t$

为能直观地分析爆破后压入式通风独头巷道最短排氡通风时间  $t_{Rn}$  随巷道物理参数和通风参数的变化,使  $c_{Rn}^{YE} = 2.7 \text{ kBq/m}^3$ , 得到几种典型参数条件下最短排氡通风时间  $t_{Rn}$ , 结果列于表1。

表1 爆破后典型物理条件下压入式通风独头巷道的最短排氡通风时间

Table 1 Theoretical shortest time of eliminating radon under typical condition in blind roadway with forced ventilation after blasting

$J_0 /$ ( $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$U / \%$	$Q /$ ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	$L / \text{m}$	$t_{Rn} / \text{s}$
0.1	0.05	2.0	100	451
0.5	0.05	2.0	100	456
1.0	0.05	2.0	100	464
0.5	0.05	2.0	50	316
0.5	0.05	2.0	100	456
0.5	0.05	2.0	150	598
0.5	0.05	1.0	100	931
0.5	0.05	1.5	100	632
0.5	0.05	2.0	100	456
0.5	0.05	2.0	100	456
0.5	0.10	2.0	100	489
0.5	0.20	2.0	100	523

由表1可知,对于具体爆破作业的压入式通风独头巷道,爆破后,在其他参数一定的情况下,巷道长度  $L$  越大,最短排氡通风时间  $t_{Rn}$  也越长;通风量  $Q$  越大,最短排氡通风时间  $t_{Rn}$  越短;掘进面岩石铀品位  $U$  越大,最短排氡通风时间  $t_{Rn}$  越长。

### 4 结论

基于质量守恒定律和置换通风理论,建立了爆破后压入式通风独头巷道抛掷空间和风流末端氡活度浓度随通风时间变化的数学计算模型,利用该数学模型给出了最短排氡通风时间  $t_{Rn}$  的确定方法,并获得以下结论:

1) 压入式通风独头巷道风流末端氡活度浓度  $c_{Rn}^{YE}$  与  $t_{Rn}$  受到巷道本身物理参数(长度  $L$ 、巷道短面积  $S$ 、掘进面岩体铀品位  $U$  和巷道岩壁氡析出率  $J_0$ )、通风参数(入风氡活度浓度  $c_{Rn}^0$  和通风量  $Q$ )以及爆破参数(爆破深度  $x_0$  和炮烟抛掷长度  $b$ )的影响。

2) 对于具体爆破作业的压入式通风独头巷道,爆破后,在其他参数一定的情况下,风流末端氡活度浓度开始急剧增长的时间随巷道长度增加而减小,随风量增加而变大;风流末端氡活度浓度的衰减速率随风量增加而增大;爆破

后风流末端峰值随掘进面铀品位的增加而增大。

3) 对于具体爆破作业的压入式通风独头巷道,爆破后,在其他参数一定的情况下,最短通风排氡时间随巷道长度和掘进面铀品位的增加而增大,随通风量的增加而减小。

### 参考文献:

- [1] 赵云胜,罗中杰,刘如民. 地质勘探巷道的通风新方法探讨[J]. 中国安全科学学报,1997,7(1): 55-59.  
ZHAO Yunsheng, LUO Zhongjie, LIU Rumin. Study on the new methods of auxiliary ventilation [J]. China Safety Science Journal, 1997, 7(1): 55-59(in Chinese).
- [2] 范洪滨. 独头巷道氡的析出特性与排氡通风[J]. 铀矿冶,1984,3(3):50-55.  
FAN Hongbin. Characteristics of radon escaping and mode of ventilation for radon discharging in some blind heading [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 1984, 3(3): 50-55(in Chinese).
- [3] 周星火,李先杰. 某矿氡污染分析和通风降氡效果[J]. 辐射防护通讯,2002,22(3):7-11.  
ZHOU Xinghuo, LI Xianjie. Radon contamination analysis and control in a uranium mine[J]. Radiation Protection Bulletin, 2002, 22(3): 7-11 (in Chinese).
- [4] RICHON P, PERRIER F, SABROUX J, et al. Spatial and time variations of radon-222 concentration in the atmosphere of a dead-end horizontal tunnel[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2004, 78(2): 179-198.
- [5] EI-FAWAL M. Mathematical modelling for radon prediction and ventilation air cleaning system requirements in underground mines[J]. Journal of American Science, 2011, 7(2): 389-402.
- [6] 叶勇军,丁德馨,周星火,等. 铀矿井独头巷道最大掘进长度的研究[J]. 核科学与工程,2009,29(2):188-192.  
YE Yongjun, DING Dexin, ZHOU Xinghuo, et al. Study on the maximal driving length of dummy drift in uranium mines[J]. Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering, 2009, 29(2): 188-192(in Chinese).
- [7] 叶勇军,丁德馨,王立恒,等. 压入式通风独头巷道内氡及其子体浓度的计算模型与其分布规律[J]. 中南大学学报,2015,46(5):1 799-1 805.  
YE Yongjun, DING Dexin, WANG Liheng, et al. Calculation model of radon and its daughters concentration in blind roadway with forced ventilation and their distribution rule[J]. Journal of Central South University, 2015, 46(5): 1 799-1 805(in Chinese).
- [8] 叶勇军,王立恒,丁德馨,等. 压抽混合式通风独头巷道内氡及氡子体浓度的计算模型及其分布规律研究[J]. 核科学与工程,2014,34(2):219-227.  
YE Yongjun, WANG Liheng, DING Dexin, et al. Study on calculation models and distribution rules of the radon concentration and its progenies concentration in blind roadway with forced-exhaust ventilation[J]. Nuclear Science and Engineering, 2014, 34(2): 219-227(in Chinese).
- [9] 伍颖,李庆双,王坤. 某铀矿井氡析出量与排氡通风量的估算[J]. 安全与环境工程,2011,18(1):45-47.  
WU Ying, LI Qingshuang, WANG Kun. Calculation of the precipitation amount of radon and rowing of radon ventilation for a mine[J]. Safety and Environmental Engineering, 2011, 18(1): 45-47(in Chinese).
- [10] 张哲,朱民安,张永祥. 地下工程与人居环境氡防护技术[M]. 北京:原子能出版社,2010.
- [11] 赖涤泉. 隧道施工通风与防尘[M]. 北京:中国铁道出版社,1994.
- [12] 周星火,邓文辉,吴钢,等. EJ/T 359-2006 铀矿井排氡及通风技术规范[S]. 北京:中国标准出版社,2006.