

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2013.S1.051

通风方式对巷道内氡析出率的影响情况分析

王曙光^{1,2}, 刘小丽¹, 王春艳¹, 宋碧宏^{1,3}, 李茹¹

(1. 西北核技术研究所, 西安 710024; 2. 后勤工程学院, 重庆 401311; 3. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400030)

摘要: 破碎花岗岩巷道内的氡析出率易受气象条件和通风条件的影响。文章通过建立巷道中氡析出率的计算模型, 分别对夏季自然通风、压入式通风和抽出式通风条件下的氡析出率变化情况进行分析。结果表明: 氡析出率与自然通风量和环境温度之间均存在线性关系; 在相同的环境温度和通风量条件下, 巷道在抽出式通风时的氡析出率高出压入式通风时的 63%。建议在夏季进行巷道内作业时避开高温时段, 并应以压入式通风作为主要通风方式。

关键词: 破碎花岗岩巷道; 氡析出率; 通风

中图分类号: X591 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2013)S1-0222-05

Effects of Radon Exhalation by Ventilation Styles in the Over-broken Granite Tunnel

Wang Shuguang^{1,2}, Liu Xiaoli¹, Wang Chunyan¹, Song Bihong^{1,3}, Li Ru¹

(1. Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, P. R. China;

2. Logistical Engineering University, Chongqing 401311, P. R. China;

3. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China)

Abstract: The regularity of radon exhalation is affected by the weather and the ventilation in the over-broken granite tunnel. Based on the calculation model of radon exhalation in tunnel, some experiments have been carried out to analyze the variation of the radon exhalation in natural ventilation, blowing and exhaust conditions separately. The result showed that there is a linear relation between the radon exhalation and the natural ventilation, the temperature outside the tunnel also works as the same. It also shows that in the same condition of the tunnel's air flux and the outside temperature, the radon exhalation in exhaust case is 63% higher than the blowing case. When the temperature outside is high works in tunnel should avoid, and the blowing ventilation could be an effective way for reduction of radon concentration.

Key words: over-broken granite tunnel; radon exhalation; ventilation

影响巷道中氡析出率的主要因素除岩体的物理性质和围岩的暴露面积外, 还有气象条件和通风方式。早在 1951 年, 史密斯(Smith)就发现了环境气象条件对土壤氡析出的影响; 1963 年, 司诺德(Schroeder)等开始试验加压通风对隧道施工中氡析出的控制^[1]。Perrier^[2]等通过现场监测对尼泊尔 Pulchoki 山中长 38m, 斜率 8% 的巷道进行的研究得出结论: 巷道在一年中仅冬季(10 月至次年 3 月巷道外部气温低于内部气温)存在明显的自然通风, 且巷道内氡浓度随通风量而改变。Perrier^[2]指出, 氡浓度的变化对气流交换非常敏感, 但未对两者之间的变化关系进行定量描述。机械通风作为地下工程常用的一种降氡方式被广泛采用^[1], 但机械通风与氡析出率之间的关系尚不明确。

本文通过实验对地处中国西北某破碎花岗岩巷道在自然通风和机械通风条件下氡的析出规律进行研究, 分析了外界气温条件对巷道在不同通风状态下围岩氡析出率的影响情况。因巷道在夏季时氡害最严重, 故本文仅对夏季情况进行

行了分析。

1 通风巷道氡析出率计算公式

巷道气流中氡浓度变化计算模型如图 1 左所示。取宽度为 dx 的微元体(图 1 右), 则某时刻该微元体中氡的平衡方程为:

$$C_1 Q_1 + \delta dx = C_2 Q_2 + \lambda A dx C_1 \quad (1)$$

式中: C_1 为流入微元气流中的氡浓度, Bq/m^3 ; Q_1 为流入微元的风量, m^3/s ; δ 为围岩表面的氡析出率, $Bq/(s \cdot m^2)$; s 为巷道截面周长, m ; A 为巷道的截面积, m^2 ; dx 为微元宽度, m ; C_2 为流出微元气流中的氡浓度, Bq/m^3 ; Q_2 为流出微元的风量, m^3/s ; λ 为氡的衰变常数, s^{-1} 。

式(1)的物理意义: 某一时刻由巷道气流带入微元内的氡量 $C_1 Q_1$ 与由围岩表面析出到微元内的氡量 δdx 之和等于流出微元的氡量 $C_2 Q_2$ 与微元内氡的衰变量 $\lambda A dx C_1$ 之和。

又, C_1 等于图 1 左所示的 C , Q_1 等于 $Q_0 + qx_0$, C_2 等于 C

收稿日期: 2013-02-25

基金项目: 国家自然科学基金创新群体基金(50921063)

作者简介: 王曙光(1979-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事地下工程环境污染治理研究, (E-mail) hitwsg@163.com。

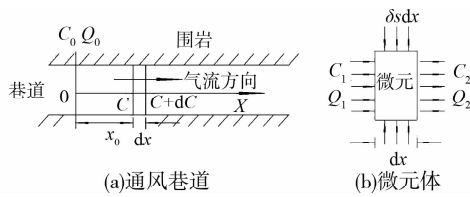


图 1 通风巷道氡浓度计算模型

+dC, Q₂ 等于 Q₀+q(x₀+dx)。故式(3.1)可改写为:

$$\delta s dx + C(Q_0 + qx_0) = [Q_0 + q(x_0 + dx)](C + dC) + \lambda AC dx \quad (2)$$

式中:C 为坐标 x₀ 处的氡浓度, Bq/m³; q 为巷道单位长度自然通风量, m³/(m·s); Q₀ 为坐标原点处巷道通风量, (m³/s); δ 为围岩的氡析出率, Bq/(s·m²); s 为巷道截面周长, 取均值 12 m; A 为巷道截面积, 取设计值 9 m²。

略去二阶小量, 同时将氡析出率 δ 视为常数, 则式(2)变为:

$$\frac{dC}{\delta s - \lambda AC - qC} = \frac{dx}{Q_0 + qx_0}$$

代入边界条件 C|_{x=0} = C₀, 则方程的解为:

$$C = \frac{\delta s}{\lambda A + q} + \left(C_0 - \frac{\delta s}{\lambda A + q} \right) \left(\frac{Q_0}{Q_0 + qx_0} \right)^{\frac{\lambda A + q}{q}}$$

将上式变形后得到:

$$\delta = \frac{(\lambda A + q) \left[C - C_0 \left(\frac{Q_0}{Q_0 + qx_0} \right)^{\frac{\lambda A + q}{q}} \right]}{s \left[1 - \left(\frac{Q_0}{Q_0 + qx_0} \right)^{\frac{\lambda A + q}{q}} \right]} \quad (3)$$

巷道实测 q 值约为 10⁻⁴ m³/(s·m) 量级, 而 λA 值约为 10⁻⁵ m²/s, 因此可近似认为 λA + q ≈ q, 于是可将式(3)简化为:

$$\delta = \frac{C(qx_0 + Q_0) - C_0 Q_0}{sx_0} \quad (4)$$

式中:(qx₀ + Q₀) 是坐标为 x₀ 处截面的通风量。

式(4)为氡析出率的计算式, 由于式中 s 和 x₀ 是巷道尺寸参数, 均为已知量, 因此只需要测量出两个截面的氡浓度 (C 和 C₀) 和通风量 (q 和 Q₀) 的数据就可利用该式计算出氡的析出率。

2 自然通风对氡析出率的影响分析

在氡析出率的测定工作中, 根据被测定环境的空气状态, 测定方法可分为动态法和静态法两种^[3-4]。所谓动态法, 是在空气流动的情况下测量氡析出率; 静态法则是在静止空气中进行。而实验巷道常年存在自然通风, 因此, 只能采用动态法对氡析出率进行测量。

2.1 实验方法与措施

由于巷道自然通风量通常较小, 采用全断面测量时, 风速小, 不易测量。且自然通风流场断面分布不均, 断面上下风向相反(图 2)。为避免外界气象条件对测量结果的影响, 同时提高测量数据的可靠程度, 在巷道内距口部 100 m 处设一道风门(图 3)作为自然通风的风速测量断面, 通过调整拼接门板的数量调节过流断面的大小, 最后根据断面风速和面积可以计算出自然通风量。测量时, 将风门宽度调整至 13 cm, 在测量断面上布置 3 个测点(图 3(b)), 断面风速取平均值。根据断面风速和过风面积计算通风量^[5-6]。

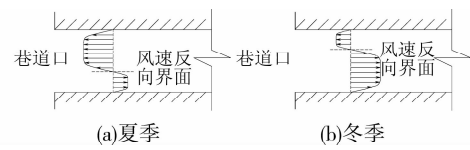


图 2 巷道内自然通风季节性变化规律示意图

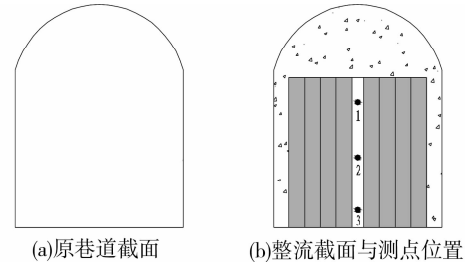


图 3 巷道通风整流截面与测点布置图

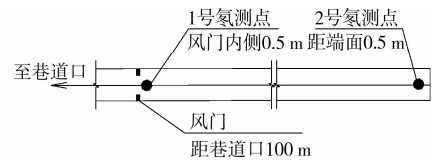


图 4 自然通风下的氡析出率测量总体布局图

实验总体布局如图 4 所示, 测量巷道段为风门至巷道末端, 总长度约 600 m。根据自然通风下动态法的测量原理及式(4), 研究氡的析出规律, 除需要测量自然通风量、巷道的表面积和长度外, 还需要对巷道中的氡浓度和巷道外气温进行监测。

1) 氡浓度测量。夏季自然状态下, 巷道内积聚了大量的氡, 这些氡在巷道空间中的迁移主要受对流和扩散作用控制, 使氡浓度在一定时间内达到一个相对的平衡。实验测量结果表明, 在无机械通风扰动的情况下, 巷道内氡浓度基本上处处一致, 仅在围岩壁面处由于裂缝(或锚杆孔口)的存在而局部略显偏高。因此, 若忽略围岩不均匀性的影响, 理论上在自然状态下对氡浓度进行测量时可将测氡仪放置在任意位置。测量方法是: 巷道内设 2 个氡浓度监测点(如图 4), 均位于巷道横断面的中心位置, 氡浓度采用 2 个测点的平均值。采用的主要仪器: RAD 7 型连续电子测氡仪, 精度为 ±5% (测量范围为 3.7 Bq/m³ ~ 7.4 × 10⁴ Bq/m³)。

2) 温度监测。在巷道外设气象百叶箱, 将气象传感器布置其中, 对巷道外气温进行连续监测。采用的主要元件: HCD1019-5P 型多参数气象传感器, 温度测量精度为 <±0.3℃ (测量范围为 -40 ~ +123.8℃)。

2.2 数据分析

2.2.1 自然通风量与氡析出率 氡析出率按式(4)计算。自然通风量与氡析出率的关系见图 5。

进行线性回归分析后得到自然状态下的氡析出率与自然风量的回归方程为:

$$\delta = 9.0765Q - 0.4854 \quad (5)$$

可见, 氡析出率与自然通风量正相关。

理论方面, 自然通风时有: Q₀ = 0, q ≠ 0, 将该条件带入式(3)中, 经变换得到:

$$\delta = \frac{C}{S} \cdot Q + \frac{\lambda VC}{S} \quad (6)$$

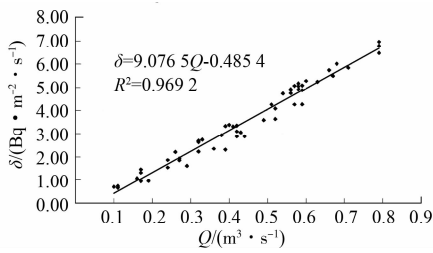


图5 自然通风量与氡析出率的关系

式中, Q 为自然通风量, m^3/s ; V 为巷道体积, m^3 ; S 为巷道内表面积, $S = sx, \text{m}^2$ 。

可以看出, 式(6)右端各物理量中, 除自然通风量 Q 是变量外其余物理量均为常数, 即该式是形如 $y = ax + b$ 的一元线性函数, 表明氡析出率 δ 与自然通风量 Q 呈线性关系, 该结论与上述实测数据的分析结果一致。

2.2.2 氡析出率与温度的相关性分析

1) 回归方程。根据氡的渗流析出机理, 影响氡析出率的关键因素是巷道内外的压力差, 而压差是由于气温变化形成的, 因此重点研究环境气温与氡析出率的关系。实验共取得有效数据 56 组, 温度与氡析出率的散点图如图 6 所示。

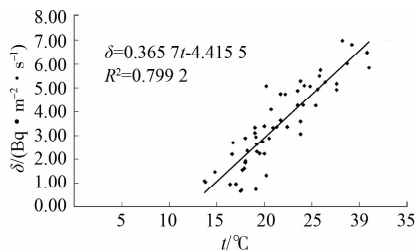


图6 自然通风状态下巷道外温度与氡析出率的关系

从图 6 可以看出, 温度与氡析出率之间具有比较明显的线性关系, 进行一元线性回归分析后得到氡析出率与温度的线性回归方程为:

$$\delta = 0.3657t - 4.4155 \quad (7)$$

式中: t 为巷道外气温 $^{\circ}\text{C}$ 。

2) 直线回归的显著性检验。采用 F 检验法检验直线回归的显著性:

$$F = (n-2) \frac{R^2}{1-R^2} = 214.92$$

查 F 分布临界值表得, $\alpha = 0.05$ 时, 自由度为 $(1, n-2)$ 即 $(1, 54)$ 的临界值 λ 为 $4.00 < \lambda_{\alpha=0.05} < 4.08$, 则, $F > \lambda_{\alpha=0.05}$, 即, 直线回归是显著的; 又, 查 F 分布临界值表得, $\alpha = 0.01$ 时, 自由度为 $(1, n-2)$ 即 $(1, 54)$ 的临界值 λ 为 $7.08 < \lambda_{\alpha=0.01} < 7.31$, 则, $F > \lambda_{\alpha=0.01}$, 即, 直线回归是高度显著。

3) 预测区间。按照数理统计理论, 根据回归方程(7)得到的 $t=t_0$ 时的 δ 预测值 δ_0 的置信度为 $1-\alpha=0.95$ 的预测区间近似为 $(\delta_0-2\sigma, \delta_0+2\sigma)$; $t=t_0$ 时的 δ 预测值 δ_0 的置信度为 $1-\alpha=0.99$ 的预测区间近似为 $(\delta_0-3\sigma, \delta_0+3\sigma)$, 其中, σ 为预测值的均方差。

$$\sigma^2 = \left[\sum_{i=1}^n (\delta_i - \bar{\delta})^2 - a \sum_{i=1}^n (\delta_i - \bar{\delta})(t_i - \bar{t}) \right] / (n-2) = 0.$$

59

即 $\sigma=0.77$ 。上式中, $\bar{\delta}$ 为测量氡析出率的平均值; δ_i 为

测量氡析出率的第 i 个值; \bar{t} 为测量温度的平均值; t_i 为测量温度的第 i 个值; a 为回归方程的一次项系数, 0.3657 ; n 为样本容量 56。

由此得到, 预测值 δ_0 的置信度为 $1-\alpha=0.95$ 的预测区间近似为 $(\delta_0-1.54, \delta_0+1.54)$; 预测值 δ_0 的置信度为 $1-\alpha=0.99$ 的预测区间近似为 $(\delta_0-2.31, \delta_0+2.31)$ 。

3 机械通风对氡析出率的影响分析

对巷道在机械通风状态下的氡析出率进行动态法测量, 应满足以下条件: 1) 通风巷道中氡析出均匀, 且同一截面上氡浓度处处相等; 2) 机械通风量恒定。为满足上述条件, 实验选取固定的风机对巷道进行机械通风, 并在通风系统稳定运行 24 h 后再对巷道内各种数据进行测量。

3.1 实验方法与措施

选定研究巷道长度约 120 m, 测量总体布局如图 7。根据动态法测量原理及氡析出率计算公式(3.4), 除需要测定巷道的表面积和长度外, 还需要测定巷道两截面处的通风量和氡浓度。为保证测量结果的可靠度, 测量过程中主要采取以下方法及措施:

1) 巷道选择。为降低外界气象条件变化对巷道内测量数据的影响, 将实验段选在距巷道口 100 m 以远处, 长度共计 120 m, 即图 7 中的阴影部分。

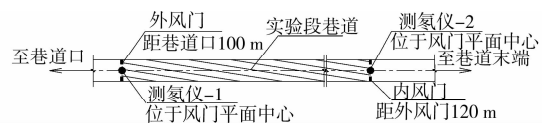


图7 机械通风下氡析出率测量总体布局图

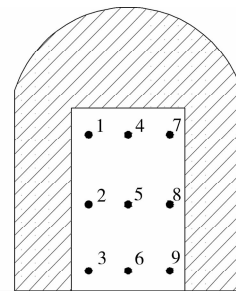


图8 机械通风截面风速测点位置示意图

2) 通风系统设计与气流组织。巷道内的通风系统设计单风路硬质风管, 风管上并联两台同型号的风机, 其中一台可实现压入式通风, 即该风机运行时巷道内气流方向为由内向外; 另一台可实现抽出式通风, 该风机运行时巷道内气流方向为由外向内。因此, 可分别对压入式通风和抽出式通风两种条件下的氡析出率进行研究。

通风管道伸出巷道口约 30 m, 且管道口部处于开阔场地, 可以忽略机械通风时气体回流对巷道内氡浓度的影响。巷道内管道贯穿整个选定巷道段, 其末端距内风门约 200 m, 可忽略管道口对巷道内流场的影响。

3) 风量测量。考虑到机械通风条件下自然通风量可能会导致选定巷道段两端截面处总通风量的差异, 因此必须对两个截面处的风量进行分别测定。由于巷道的真实截面不规则, 采用全截面测量时难以计算过流截面的面积, 为便于

测量和计算,分别在选定巷道的两端各设一道风门(位置如图 7)作为风速测量截面。在截面上设 9 个测点(图 8),取其平均值作为截面风速,最后根据截面风速和过风面积计算出总通风量。

4) 氡浓度测量。对巷道进行机械通风后,由于通风的排除作用使大量的氡流出巷道外,而通风的稀释作用又使氡浓度的分布发生了改变。实验结果表明,在机械通风条件下,独头巷道内的氡浓度沿气流方向逐渐增大,氡浓度最大值将出现在风流末端^[7]。文献^[8]也有类似的结论。

风门的存在改变了巷道的形状,也影响了巷道内气流的流动,气流在流经风门时会在附近形成涡流^[9],严重影响氡在断面上分布的均匀性。

根据上述情况,在机械通风条件下,需要分别测量实验巷道段两端截面的氡浓度;并认为风门中心处的氡浓度可以代表流过风门气流中的氡浓度水平。机械通风条件下的测氡仪布置方法见图 7。

5) 巷道外部气温监测。

6) 根据风门处的氡浓度和风量值,利用式(4)计算氡析出率。

3.2 数据处理与分析

3.2.1 氡析出率计算 根据公式(4),氡析出率可按照下式计算:

$$\delta = \frac{C(qx_0 + Q) - C_0Q}{sx_0} \quad (8)$$

式中: C 为通过风门气流中氡的浓度, Bq/m^3 , 压入式通风取外风门, 抽出式通风取内风门; C_0 为通过风门气流中氡的初始浓度, Bq/m^3 , 压入式通风取内风门, 抽出式通风取外风门; Q 为通过风门的机械通风量, m^3/s , 压入式通风取内风门, 抽出式通风取外风门; $(qx_0 + Q)$ 为通过风门的总风量, m^3/s , 压入式通风取外风门, 抽出式通风取内风门; x_0 为测量巷道段长度, 取 120 m; s 为巷道截面周长, 取平均值 12 m。

3.2.2 压入式通风条件下的数据分析

1) 回归分析。压入式通风状态下共取得有效数据 109 组。温度与氡析出率的散点图如图 9 所示, 具有较为明显的线性关系, 故进行线性拟合。

进行线性回归分析后得到氡析出率与温度的线性回归方程为:

$$\delta = 1.7814t - 28.94 \quad (9)$$

式中: δ 为氡析出率, $Bq/(m^2 \cdot s)$; t 为巷道外气温, $15^\circ C \leq t \leq 34^\circ C$ 。

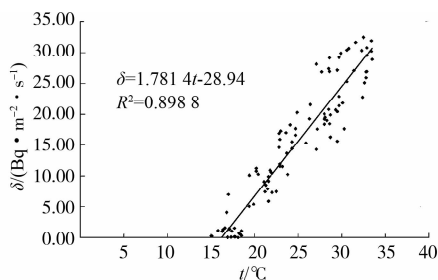


图 9 压入式通风状态下氡析出率与巷道外温度的关系

2) 显著性检验。采用 F 检验法检验直线回归的显著性, 检验结果是: 直线回归是高度显著的。

3) 预测区间。预测值 δ_0 的置信度为 $1 - \alpha = 0.95$ 的预测区间近似为 $(\delta_0 - 6.74, \delta_0 + 6.74)$; 预测值 δ_0 的置信度为 $1 - \alpha = 0.99$ 的预测区间近似为 $(\delta_0 - 10.11, \delta_0 + 10.11)$ 。

3.2.3 抽出式通风条件下的数据分析

1) 回归分析。抽出式通风状态下的氡析出率测量共取得有效数据 89 组。温度与氡析出率的散点图如图 10 所示, 从图中可以看出数据散点具有一定的线性关系, 故进行线性拟合。进行线性回归分析后得到氡析出率与温度的线性回归方程为:

$$\delta = 2.8979t - 45.168 \quad (10)$$

式中: δ 为氡析出率, $Bq/(m^2 \cdot s)$; t 为巷道外气温, $15^\circ C \leq t \leq 25^\circ C$ 。

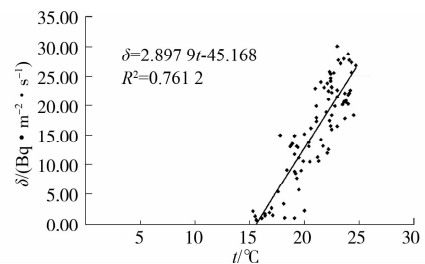


图 10 抽出式通风状态下氡析出率与巷道外温度的关系

2) 直线回归的显著性检验。经 F 检验法检验, 直线回归高度显著。

3) 预测区间。预测值 δ_0 的置信度为 0.95 的预测区间近似为 $(\delta_0 - 8.22, \delta_0 + 8.22)$; 预测值 δ_0 的置信度为 0.99 的预测区间近似为 $(\delta_0 - 12.33, \delta_0 + 12.33)$ 。

3.2.4 两种通风方式对氡析出率的影响分析 数据分析结果表明, 在相同的环境温度下, 抽出式通风时巷道内的氡析出率高于压入式通风时的氡析出率。根据上述回归方程, 若令 k_1 、 k_2 分别表示方程(3.9)、(3.10)的斜率, 则 $(k_2 - k_1)/k_1 \approx 0.63$, 其意义是: 抽出式通风时的氡析出率比压入式通风时高约 63%。这一结果略高于文献^[10]对某隧道的研究结果: 抽出式通风隧道中氡析出空间密度比压入式通风隧道高 40%~60%^[11-12], 导致这一差异的原因可能是由于实验巷道所处破碎岩体的渗透率较高所致。

4 结论与建议

本文在现场实验基础上分别对夏季自然通风和两种机械通风条件下的氡析出规律进行了研究, 得出如下结论:

1) 自然通风状态下, 巷道内氡析出率与自然通风量和外部环境温度均线性相关。夏季自然状态下巷道内氡析出率与环境温度正相关, 即氡析出率随环境温度升高而增大, 较高的环境温度会导致巷道内较高的氡浓度。

2) 机械通风条件下, 巷道内氡析出率与巷道外环境温度线性相关, 在相同的环境温度条件下, 对巷道进行抽出式通风比压入式通风时的氡析出率高约 63%。分析结果表明, 相同条件下, 抽出式通风比压入式通风更能加速岩体中氡的析出, 因此巷道采用压入式通风更有利于控氡。

基于以上结论, 建议在对破碎花岗岩巷道及其他有有害气体危险的地下工程进行作业时, 应尽量避免夏季高温时段, 有条件的应提倡在冬季或春秋季节作业; 当需要对地下作业空间进行机械通风时, 应选择压入式通风作为主要的通风方式。

参考文献:

- [1] 朱思明. 铀矿通风与降氡[J]. 铀矿冶, 1992(4): 25-29.
- [2] Frédeéric Perrier, Patrick Richon, Umesh Gautam, et al. Seasonal variations of natural ventilation and radon-222 exhalation in a slightly rising dead-end tunnel [J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2007, 97: 220-235
- [3] 李韧杰. 氡析出率的测定及其影响因素的探讨[J]. 铀矿冶, 2000, 19(1): 56-61.
Li R J. Determination of radon reduction rate and exploration on its influence factors[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2000, 19(1): 56-61.
- [4] 吴慧山. 氡测量及实用数据[M]. 北京: 原子能出版社, 2001.
- [5] 赵以蕙. 矿井通风与空气调节[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1990.
- [6] 杜卫新. 矿井通风技术[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2009.
- [7] 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 Y J, Ding D X, Zhou X H, 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.
- [8] André Unger, Stefan Finsterle, Gudmundur S. Bodvarsson. Estimating large-scale fractured rock properties from radon data collected in a ventilated tunnel [C]//Proceedings Tough Symposium[C]. Lawrence Berkeley Lab, Berkeley, Calif. 2003: 1-7.
- [9] 周漠仁. 流体力学泵与风机[M]. 3版. 北京: 中国建筑工业出版社, 1981.
- [10] 朱思明. 国外铀隧道风量计算方法[C]//中国核学会矿山辐射环境学术讨论会, 1994.
- [11] 刘永, 张新华. 铀矿开采中氡及其子体的渗流与控制[J]. 中国矿业, 2004, 13(4): 62-65.
Liu Y, Zhang X H. Permeation and control of radon and its radiation products in underground mining of uranium deposits [J]. China Mining Magazine, 2004, 13(4): 62-65.
- [12] 李明, 张新华, 刘永. 隧道工程中氡的迁移规律及其控制研究[J]. 现代隧道技术, 2005, 42(1): 33-35.
Li M, Zhang X H, Liu Y. Research on the regularity of emission and dispersion of radon in tunnel construction [J]. Modern Tunneling Technology, 2005, 42(1): 33-35.
- (编辑 彭建国)
-
- (上接第 211 页)
- [7] Kevin Mc Grattan, Randall McDermott. Fire Dynamics Simulator (Version 5) User's Guide [M]. NIST Special Publication 1019, Gaithersburg, Maryland: National Institute of Standards and Technology, 2007.
- [8] Kevin McGrattan, Simo Hostikka. Fire Dynamics Simulator (Version 5) Technical Reference Guide [M]. NIST Special Publication 1018-5, National Institute of Standards and Technology, 2007.
- [9] Heskestad G, Bill R G. Quantification of thermal responsiveness of automatic sprinklers including conduction effects [J]. Fire Safety Journal, 1988, 14: 113-125.
- [10] 陈展. 某教学建筑地下车库火灾 FDS 数值模拟分析[J]. 中外建筑, 2012.
- [11] Zhang X G. Numerical simulations on fire spread and smoke movement in an underground car park [J]. Building and Environment, 2007, 42: 3466-3475.
- [12] GB 50067-97. 汽车库、修车库、停车库设计防火规范[S].
- [13] GB 50084-2001. 自动喷水灭火系统设计规范[S].
- [14] 徐洪涛, 肖瑞雪, 杨莱, 等. 地下车库火灾产烟量对能见度影响的模拟分析[C]//中国工程热物理学会学术会议论文, 2012.
- (编辑 侯湘)