

# 地下矿山避灾硐室压风系统设计研究

谢旭阳<sup>1</sup>, 宁智华<sup>2</sup>, 梅国栋<sup>1</sup>, 李坤<sup>1</sup>

(1. 中国安全生产科学研究院 矿山安全技术研究所, 北京 100012; 2. 五矿邯邢矿业有限公司, 河北 邯郸 056000)

**摘要:** 研究如何设计进入避灾硐室的供风管道以及回风管道的参数, 对于如何利用压风系统对避灾硐室进行供氧, 而又能保证避灾硐室内人员的安全性具有重要的意义. 研究首先根据避灾硐室所需风量确定了避灾硐室压风管道的管径; 其次, 通过对人体最大承受能力的分析, 确定了避灾硐室内最大的超压; 然后, 利用流体力学相关理论分析了合适的排风管径; 最后, 通过计算避灾硐室内的绝对压力核对是否能保证人员的安全性. 研究结果可为避灾硐室的设计提供依据.

**关键词:** 避灾硐室; 压风自救系统; 供风; 排风; 管径

**中图分类号:** X936      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1672-9102(2014)03-0006-04

## Study on the air and oxygen supply system of refuge chamber in underground mines

XIE Xuyang<sup>1</sup>, NING Zhihua<sup>2</sup>, MEI Guodong<sup>1</sup>, LI Kun<sup>1</sup>

(1. China Academy of Safety Science and Technology, Beijing 100012, China; 2. Minmetals Hanxing Ming Co., Ltd, Handan 056000, China)

**Abstract:** When designing and constructing the refuge chambers, it was quite urgent and necessary to solve how to effectively use the compressed - air self - help system to supply sufficient oxygen for people. The calculation of air supply tube diameter and air discharge tube diameter was import to protect safety for people in the refuge chambers. Firstly, According to the air quantity for the refuge chambers, the air supply tube diameter was studied. Secondly, according to the analysis of the most pressure to body, the overpressure in the refuge chambers was studied. Thirdly, base on the fluid mechanics theory, the diameter of discharge air tube was studied. Last, the absolute pressure was calculated to check if the person in refuge mchambers was safe. The results provide a more reasonable way for refuge chamber design.

**Key words:** refuge chamber; compressed - air self - help system; air supply; air discharge; tube diameter

2011年, 国家安全生产监督管理总局正式颁布实施《金属非金属地下矿山紧急避险系统建设规范》(AQ2033-2011)(以下简称《规范》), 对地下矿山安全避险系统的建设进行了规定. 但对于地下矿山避灾硐室的建设, 有些规定还不具体细致, 还需要进一步进行研究.

避灾硐室是一个有限的密闭空间, 避险人员会

不断消耗内部环境的氧气. 为维持避灾硐室内人员呼吸需要, 必须不断向硐室内供应氧气. 密闭空间的供氧方式主要有超氧化物供氧、氧烛供氧、液氧罐供氧、电解水制氧、医用氧气罐等方式<sup>[1-3]</sup>, 由于超氧化物供氧、氧烛供氧、液氧罐供氧、电解水制氧有其应用限制, 目前在地下矿山避灾硐室中应用的较少. 目前, 煤矿避灾硐室供氧方式主要有地面钻

孔供氧、压风供氧、医用氧气罐供氧3种方式.金属非金属地下矿山避灾硐室供氧方式主要采用压风供氧、医用氧气罐供氧2种方式.

《规范》要求避灾硐室必须设置安全可靠的氧气供给保障系统,使氧气浓度始终维持在18.5%~23.0%,同时要求压风自救系统与避灾硐室进行有机融合,但在《规范》中和一些关于避灾硐室建设的参考文献中没有对进入避灾硐室的压风管道和回风管道相关的参数进行说明.因此,研究如何设计进入避灾硐室的管道以及回风管道的参数,对于如何利用压风自救系统对避灾硐室进行供氧,而又能保证避灾硐室内人员的安全性具有重要的意义.

目前在对潜艇和救生舱等封闭性空间(包括潜艇、救生舱和避灾硐室)的供氧系统方面已经进行了广泛地研究<sup>[1-3]</sup>,还有一部分研究集中在井下避灾硐室的建设本身<sup>[4-6]</sup>或避难硐室内相关设备的设计<sup>[7-9]</sup>,但对于避灾硐室内利用压风自救系统进行供氧方面的一些关键参数,如供风管道管径、排风管径等参数研究分析较少.

## 1 压风系统供风量分析

地下矿山避灾硐室压风供氧需风量主要根据硐室内CO<sub>2</sub>平衡、CO<sub>2</sub>稀释、O<sub>2</sub>平衡和温度T平衡4个原理来进行确定<sup>[8-9]</sup>.高娜等人<sup>[8]</sup>根据CO<sub>2</sub>平衡原理,确定硐室内单人需风量为85 L/min;根据CO<sub>2</sub>稀释平衡原理,确定避灾硐室单人需风量为90 L/min;根据O<sub>2</sub>平衡原理,确定了避灾硐室单人需风量为17 L/min;根据温度T平衡原理,确定避灾硐室单人需风量为17.1 m<sup>3</sup>/h,即285 L/min.而《规范》依据温度T平衡原理,确定了单人需风量为0.3 m<sup>3</sup>/min.

由上述结果可知,当避灾硐室建设了降温系统而未建设CO<sub>2</sub>吸收系统时,则避灾硐室内供氧需风量为90 L/min;当其内同时建设了降温系统和CO<sub>2</sub>吸收系统,避灾硐室内供氧需风量为17 L/min,大大小于《规范》中规定的单人需风量0.3 m<sup>3</sup>/min(即300 L/min)的要求.但根据《规范》要求,下文对供风管道参数和排风管道的分析仍然基于单人需风量为0.3 m<sup>3</sup>/min.

## 2 供风管道参数分析

由于《规范》未能对压风供氧系统的设计做出详细规定,因此如何利用压风供氧系统为避灾硐室供风成为多数矿山企业的难题.目前已经建成的避灾硐室中,多数避灾硐室只有供风管道,而未建设排风管道,在灾难发生时,压风系统较难起到应有的作用,而完全依靠氧气瓶供氧来维持人的供氧需求.

根据避灾硐室的额定人数可确定避灾硐室内需风量,为避灾硐室供风的压风管道管径(内径,下同)可按下式计算:

$$d = 146 \sqrt{\frac{Q_1}{v_0}} \quad (1)$$

式中, $d$ 为压风管内径,mm; $v_0$ 为压风管内压缩空气流速,一般为5~10 m/s; $Q_1$ 为平均压力 $P_1$ 状态下的压缩空气流量,m<sup>3</sup>/min,可用下式计算:

$$Q_1 = \frac{Q_0 P_0}{P_1} \quad (2)$$

式中, $Q_0$ 为常温(25℃)、常压(0.1 MPa)状态下管道计算流量,m<sup>3</sup>/min,取避灾硐室内额定人数的需风量; $P_0$ 为吸气状态的大气压,MPa,一般为0.1 MPa; $P_1$ 为压气管道内空气的平均压力,一般为0.3~0.9 MPa.

将式(2)代入式(1)得到:

$$d = 146 \sqrt{\frac{Q_0 P_0}{v_0 P_1}} \quad (3)$$

根据《规范》要求,当避灾硐室额定人数为50人时,所需的风量 $Q_0 = 50 \times 0.3 = 15 \text{ m}^3/\text{min}$ .一般现有空压机出口压力为0.7~0.8 MPa,不考虑管道压力损失,取 $P_1 = 0.7 \text{ MPa}$ ,一般管道流速为 $v_0 = 7 \text{ m/s}$ ,将上述参数分别代入式(3)可得:

$$d = 146 \sqrt{\frac{15 \times 0.1}{7 \times 0.7}} = 81 \text{ mm}.$$

在实际建设中,采用81 mm直径以上的钢管即能满足供风的要求.

## 3 避灾硐室内最大压力分析

Oberholzer从生物和结构方面分析了超压的影响<sup>[10]</sup>,并认为欧美人体能够承受的最大超压是140 kPa,即 $1.4 \times 10^5 \text{ Pa}$ .根据国内相关资料,当一个成年人受到超过12~15 T的大气压力时即会死

亡. 一个成年人的表面积计算如下:

$$S = 71.84 \times H^{0.725} \times W^{0.425} \times 10^{-4}. \quad (4)$$

式中,  $S$  为人体表面积,  $\text{m}^2$ ;  $H$  为人的身高,  $\text{cm}$ ;  $W$  为人的体重,  $\text{kg}$ .

根据式(4), 一个体重 60  $\text{kg}$ , 身高 170  $\text{cm}$  人的表面积为 1.69  $\text{m}^2$ .

人能承受的最大超压为

$$P = F/S. \quad (5)$$

式中,  $P$  为人能承受的超压,  $\text{Pa}$ ;  $F$  为人能承受的壓力,  $\text{N}$ ;  $S$  为人的表面积,  $\text{m}^2$ .

取  $F$  为 12 T, 即  $12 \times 9.8 \times 10^3 \text{ N}$ ,  $S$  为 1.69  $\text{m}^2$ , 由式(5)可计算人最大能承受的超压为

$$\begin{aligned} P &= 12 \times 9.8 \times 10^3 / 1.69 \\ &= 6.96 \times 10^4 \text{ Pa}. \end{aligned}$$

取大气压为 1 个大气压, 即  $1.0133 \times 10^5 \text{ Pa}$ , 由上述分析可知, 则避灾硐室内允许最大的绝对压力为  $1.7093 \times 10^5 \text{ Pa}$ . 因此在利用压风自救系统对避灾硐室进行供风时, 需进行排风管道的设计, 避免避灾硐室内部因为压力过高而威胁避险人员的生命安全.

## 4 排风管道参数分析

排风管道设置主要包括两方面: 即管道设置高度及管道管径分析. 目前多数地下矿山在建设避灾硐室时中, 往往未设置排风管道, 或排风管道只通向避灾硐室所在的水平. 当发生火灾时, 此时排风管道仍能正常工作而保证硐室内的环境, 但当发生水灾时, 由于排风管道被水堵塞而无法排风, 并且由于上文中提到的避灾硐室最大压力的限制, 此时避灾硐室内压风自救系统无法连续使用.

《规范》规定避灾硐室的设防水头高度应在矿山设计中总体考虑. 一般情况下, 当避灾硐室所在水平同时建设有水泵房或中央变电所时, 避灾硐室的防水门的承压能力应不低于水泵房防水门的承压能力. 为充分发挥压风自救系统供风作用, 排风管道的排风口应至少安装在位于避灾硐室防水门的承压水头高度以上的位置. 当避灾硐室防水门的承压能力为 1.0 MPa (即 100 m 水头) 时, 排风管道应至少铺设到距避灾硐室所在水平的垂直距离 100 m 以上的中段或水平, 以保证在避灾硐室防水门有效时, 压风自救系统能为避灾硐室供风.

影响排风管道设置的另一重要因素为排风管道管径, 同时还应分析避灾硐室内的空气是否能克服管道的摩擦阻力和局部阻力而向外流动.

在排风管道中安装单向阀, 确保风流由避灾硐室内向避灾硐室外单向流动. 根据相关研究, 硐室内的空气在克服相应阻力后, 在一定时间内, 内外压差将稳定在一定的数值不变<sup>[4]</sup>.

根据伯努利方程:

$$P_1 + \frac{\rho_1 v_1^2}{2} + \rho g h_1 = P_2 + \frac{\rho_2 v_2^2}{2} + \rho g h_2. \quad (6)$$

假设排风管道起始点为 1 点, 终点为 2 点 (即大气点), 同时假设风流在排风管道内的为不可压缩均质流体, 在管道的风速一致, 为  $v$ , 在大气中的流速为 0.

由式(6)可以得到:

$$P_1 + \rho g h_1 - (P_0 + \rho g h_2) = \frac{\rho v^2}{2}. \quad (7)$$

根据《煤矿井下紧急避险系统建设管理暂行规定》, 避灾硐室内外压差应保持不低于 100 Pa 的正压状态, 通过试验, 当管道设置合理时, 避灾硐室排风管端点压差最终将稳定在一个值上<sup>[8]</sup>. 现取该压差为 150 Pa, 在这种情况下分析排风管道的管径, 即令

$$P_1 + \rho g h_1 - (P_0 + \rho g h_2) = 150. \quad (8)$$

常温情况下, 即温度为 25  $^{\circ}\text{C}$  时, 空气密度为 1.205  $\text{kg}/\text{m}^3$ . 由此根据式(7)和式(8)可以计算出  $v = 15.78 \text{ m/s}$ .

对于额定人数为 50 人的避灾硐室, 总进风量为

$$Q_{\text{进}} = 50 \times 0.3 \text{ m}^3/\text{min} = 15 \text{ m}^3/\text{min} = 0.25 \text{ m}^3/\text{s}.$$

为保持避灾硐室内总的压力平衡, 当稳定到一定内外压差时, 排风量和进风量保持一致, 为 0.25  $\text{m}^3/\text{s}$ . 根据排风管流量与风速、管径关系式:

$$Q_{\text{回}} = \pi r^2 v = 0.25 \text{ m}^3/\text{s}. \quad (9)$$

用  $v = 15.78$  代入式(9)可以得到  $r = 0.071 \text{ m} = 71 \text{ mm}$ . 在实际建设中, 采用管径为 71 mm 以上的管道就能保证排风的需要.

为了确保避灾硐室内压力不因压力过大而造成避险人员不适, 需要复核避灾硐室内的压力是否超过人能承受的最大压力.

考虑到摩擦阻力, 钢管摩擦阻力计算如下:

$$\Delta P = 10^{-6} \frac{kl}{d^5} Q^{1.85}. \quad (10)$$

式中,  $\Delta P$  为排风管的阻力损失, Pa;  $l$  为排风管的长度, m;  $d$  为排风管的内径, m;  $Q$  为排风管的计算流量(自由状态),  $\text{m}^3/\text{min}$ .  $k$  为考虑排风管上管件的局部阻力系数, 该系数一般取 1.1 ~ 1.2, 计算中取 1.15.

现假设一个避灾硐室, 其排风垂直高度为 100 m, 在巷道中有 900 m, 排风管道总长度为 1 000 m, 根据上面的分析, 设置回风管道管径为 80 mm, 将相关的数据代入式(10)得到,  $\Delta P = 52\ 604$  Pa. 假设排风管外大气压为标准大气压, 则避灾硐室内的超压为

$$P_1 = \Delta P + \rho gh = 52\ 604 + 1.205 \times 9.8 \times 100 = 53\ 785 < 69\ 600.$$

由上述分析可知, 避灾硐室内的超压在安全超压范围内, 能够保障避险人员的生命安全. 如果通过核算发现避灾硐室内安全超压大于其最大超压, 则需要通过管径的调整重新进行校验.

## 5 结论

1) 当避灾硐室建设了降温系统和  $\text{CO}_2$  吸收系统时, 避灾硐室内单人需风量比《规范》中的要求中要小.

2) 避灾硐室内需建设排风管道, 且排风管路的排风口应至少位于避灾硐室防水门的承压水头以上.

3) 避难硐室内回风管道的管径需通过计算和

核算后, 才能确保避难硐室内的人员生命安全.

## 参考文献:

- [1] 姜世楠, 马丽娥, 王雅娟, 等. 潜艇密闭舱室供氧技术[J]. 舰船防化, 2009(5): 1-5.
- [2] 彭光明. 潜艇密闭舱室供氧措施分析[J]. 船海工程, 2005(5): 64-67.
- [3] Mikey D M. Analysis of underground coal mine refuge shelters [D]. Morgantow: West Virginia University, 2007.
- [4] 孙继平. 煤矿井下紧急避险系统研究[J]. 煤炭科学技术, 2011, 39(1): 69-71.
- [5] 张大明, 马云东, 丁延龙. 矿井避难硐室研究与设计[J]. 中国安全生产科学技术, 2009, 5(3): 94-98.
- [6] 孙继平. 煤矿井下安全避险“六大系统”建设指南[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2012.
- [7] 岳亮, 周学友. 永久避难硐室供氧系统的特点与优化方案[J]. 科技信息, 2012(25): 44-45.
- [8] 高娜, 金龙哲, 王磊, 等. 常村煤矿避难硐室供氧系统研究与应用[J]. 煤炭学报, 2012, 37(6): 1021-1025.
- [9] Michal A. Parametric design of a coal mine refuge chamber [D]. Morgantown: West Virginia University, 2007.
- [10] Oberholzer J W. Assessment of refuge deigns in collieries [C]//Safety in Mines Research Advisory Committee, Report on research project COL 115. Pretoria, South Africa: Department of Minerals and Energy, 1997.