

文章编号:0253-9993(2010)08-1303-05

# 矿用救生舱中人体自身代谢一氧化碳规律分析

栗 婧,金龙哲,汪 声,杨玉锋

(北京科技大学 土木与环境工程学院,北京 100083)

**摘 要:**为深入研究矿用密闭空间的生命保障技术,做了大量人体生存实验,其中发现人体在密闭空间内自身代谢一氧化碳,检出率为100%。通过救生舱内6组人体生存实验,对人体代谢一氧化碳规律作了深入分析,得到了人体代谢一氧化碳的量值及产生速率,并对代谢速率进行了分析,对代谢一氧化碳的趋势进行了数据拟合,为矿用救生舱中环控生保系统的建立提供了依据。

**关键词:**救生舱;人体代谢;一氧化碳

**中图分类号:**TD774 **文献标志码:**A

## Regular analysis of the human metabolism carbon monoxide in coal mine refuge chamber

LI Jing, JIN Long-zhe, WANG Sheng, YANG Yu-feng

(Civil & Environment Engineering School, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** In order to further research on the life support technology in confined space, a lot of human live experiments were carried out, and the human body itself generate carbon monoxide by metabolism was found, and the relevance ratio was 100%. By six groups of human live experiments in the refuge chamber, made deep analysis of regular pattern of the human metabolism carbon monoxide, got the body metabolic rate of carbon monoxide and generation rate, analyzed the metabolic rate and made the data fitting of metabolic carbon monoxide, which provided the basis for founding the environmental control and life support system of the coal-mine refuge chamber.

**Key words:** refuge chamber; human metabolism; carbon monoxide

研究表明,在占煤矿事故绝大部分的瓦斯、煤尘爆炸、透水事故中,在事故发生现场瞬间受到伤害死亡的矿工只占事故伤亡总人数的很少一部分,绝大多数矿工都是由于在火灾、爆炸后不能及时升井或逃离高浓度有毒、有害气体现场,导致窒息或中毒死亡的。因此在煤矿发生事故时,为无法及时撤离的矿工提供一个安全的密闭空间——救生舱,成为临时避难、等待救援的有效手段<sup>[1-4]</sup>。救生舱对外可抵御爆炸冲击、高温烟气,隔绝有毒、有害气体,对内可为被困矿工提供氧气、食物、水,去除有毒有害气体,赢得较长的生存时间,同时通过舱内通讯监测设备,引导外界救援<sup>[5-6]</sup>。

矿工在救生舱中长时间生存时,其自身新陈代谢

产物积累会对救生舱气体组分造成显著影响。据统计,人体代谢产物多达400多种。呼吸时排出的气体约有100多种,健康人排出的尿液中约有200多种化合物、30多种电解质、近40种分泌物、10种酶、大量蛋白质和脂肪的代谢产物、0.02%~0.16%的氨。人体经过皮肤排出的汗和皮脂,其中含有有机物和无机物10多种。皮肤表面在进行呼吸的过程中也产生一些污染性气体。健康人一昼夜在肠道内产生气体约800~1 000 mL<sup>[7-8]</sup>。

在密闭环境中人员生存最重要的问题是氧气的供应与二氧化碳的去除<sup>[9]</sup>,但是经过大量实验证明,人体在密闭空间会自身代谢一氧化碳,检出率为100%。其中一氧化碳被人体吸入之后会和血液中的

收稿日期:2010-03-24 责任编辑:毕永华

基金项目:国家“十一五”科技支撑计划项目(2006BAK25B00-4)

作者简介:栗婧(1980—),女,山西长治人,博士研究生,E-mail:rainbow\_lijing@hotmail.com。联系人:金龙哲(1963—),男,教授,博士。E-mail:lzjin@ustb.edu.cn

血红蛋白结合,进而使血红蛋白不能与氧气结合,而引起机体组织出现缺氧,导致人体窒息死亡<sup>[10-11]</sup>,在救生舱中具有极大的危害。经分析,一氧化碳的产生主要来自于人体的呼吸代谢及皮肤代谢,本文就救生舱内人体代谢一氧化碳进行了检测和分析,确定了一氧化碳的产生规律。

## 1 实验准备

### 1.1 实验条件

为了模拟井下实际环境,试验在某职业技术学校模拟巷道矿用救生舱(图1)内进行。试验用救生舱为分体组装式双层钢结构,内设高效隔温材料,以便有效阻隔舱外热量传递以及有毒有害气体侵入。舱体为双层门结构,内部空间体积约为8 m<sup>3</sup>。舱内为保障人体生存设有供氧系统、有毒有害气体处理系统、温度和湿度控制系统、环境监测系统、通讯系统、动力供应系统及附属设备。



图1 模拟巷道内矿用救生舱

Fig. 1 Coal mine refuge chamber in simulation roadway

监测用KJ70型煤矿安全生产监控系统,可在监控室内实时监测舱内各环境参数浓度变化情况,具有实时、历史数据及曲线生成的功能。前端监测设备包括氧气、一氧化碳、二氧化碳、温度、甲烷、硫化氢传感器,同时为保证舱内人体生存健康,还设有压差计、温湿度计、血压脉搏计、体温计、摄像机等,并与舱外环境参数监控设备组成救生舱监控系统,监测救生舱内人员长时间生存的试验数据。

### 1.2 实验方法

为了保证实验数据的准确性,首先对舱体本身做了系列的基础实验,包括静场试验、气密试验、人体呼吸模拟试验,之后做了4次真人生存实验,具体实验方法如下。

#### 1.2.1 基础试验

静场实验主要为确定舱内传感器准确度、重复性等,以及救生舱基本特性,作为其他实验中舱内环境参数曲线的参照依据。气密性试验为测试救生舱本身的密封情况,具体方法为将救生舱水平放置在试验

室的中央,然后在舱体合适部位安装测压管和充气管,关闭救生舱所有的门窗孔口;启动高压风机或接通贮气罐,通过充气管向舱内送入空气,调节空气节流阀,使救生舱内外的压差达到1 000 Pa,舱内保持正压时间不应少于1 min;记录数据,计算出每分钟的空气泄漏量。

人体呼吸模拟实验主要是通过模拟人体代谢产生的二氧化碳及热湿状况,观察舱内环境参数的变化情况。具体方法为以4人呼出CO<sub>2</sub>量为标准,以1.5 L/min向舱内通入CO<sub>2</sub>,同时开启加湿器、恒温箱。舱内净化装置呈间歇式工作状态,即在舱内CO<sub>2</sub>浓度上升至0.8%时开启净化装置,在舱内CO<sub>2</sub>浓度降低至0.3%时,关闭净化装置,完全模拟真人实验情况,观察舱内是否有CO的产生。

#### 1.2.2 真人生存试验

为了验证救生舱内人体代谢一氧化碳情况,做了6组真人生存实验。前3组实验数据取自同一次实验。在本次实验中,4名实验人员在救生舱密闭状态下持续生存了96 h,依靠高压氧气瓶供氧,舱内净化设备处理CO<sub>2</sub>。由于实验过程中人体持续产生CO,当CO浓度上升到一定值后,采取舱内压缩空气完全置换舱内空气,使舱内CO浓度降低到0,其他气体指标恢复到正常水平后继续试验。从实验过程中截取3段CO浓度从0到最高的过程作为第1组(第16~32 h)、第2组(第47~52 h)、第3组试验(第60~68 h)。在此3组实验数据中,除了实验人员因在舱内生存时间的延长导致的生理、心理状态可能有差异外,舱内各种环境指标起始状态基本相同。

后3组试验分别为4名实验人员在救生舱密闭状态下生存4、8和9.3 h,每组实验人员不同。

第1组试验为4人16 h,4名25岁左右健康男性,其中3人有吸烟史。

第2组试验为4人4.9 h,试验人员同第1组。

第3组试验为4人8 h,试验人员同第1组。

第4组试验为4人4 h,试验人员为4名25岁左右健康男性,其中1人有吸烟史。

第5组试验为4人8 h,试验人员为4名35岁左右健康男性,其中1人有吸烟史。

第6组试验为4人9.3 h,试验人员为4名22岁左右健康男性,其中2人有吸烟史。

## 2 救生舱真人生存实验

### 2.1 基础模拟实验

#### 2.1.1 气密试验

图2显示,救生舱在舱内保持正压1 000 Pa情况

下,197 min 后降至 360 Pa,气密实验结果表明,在舱内正压 1000 Pa 保持 1 min 后,计算舱内每分钟泄漏量为  $0.000\ 3\ \text{m}^3/\text{min}$ ,远远超过国军标<sup>[12]</sup>关于有三防(防核污染、防生化武器、防化学武器)要求密闭方舱气密标准,最大空气泄漏量  $0.05\ \text{m}^3/\text{min}$  的要求,所以救生舱密封性能良好。

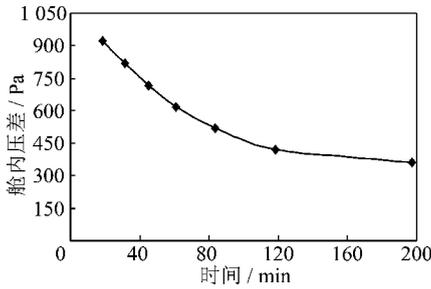


图 2 舱内正压情况下气体泄漏量与时间关系  
Fig. 2 The relationship of gas leakage and time in positive pressure conditions

2.1.2 人体呼吸模拟试验

在救生舱内进行人体呼吸模拟试验中,舱内设备及其运转情况、药剂吸附、人体二氧化碳、热湿代谢等情况完全模拟真人状态。试验期间温湿度恒定上升,11 h 后舱内温度  $28\ \text{℃}$ ,湿度  $88\% \text{ RH}$ ,与真人生存试验参数相同。图 3 显示舱内一氧化碳、二氧化碳浓度变化情况,其中二氧化碳吸附正常,且试验期间舱内无一氧化碳出现。

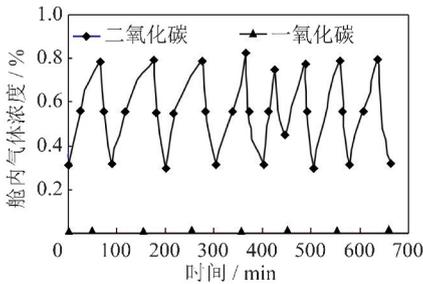


图 3 人体呼吸模拟条件下舱内气体浓度与时间关系  
Fig. 3 The relationship of gas concentrations and time in human respiratory simulation conditions

2.2 真人生存实验

在救生舱内人体生存一定时间后,舱内一定会出

现一氧化碳,检出率 100%,一氧化碳在舱内积聚情况如下。

2.2.1 同组试验人员在舱内不同时间段一氧化碳代谢分析

图 4 显示,随着时间的增加,舱内开始检测到一氧化碳气体,且浓度呈缓慢增长,10 h 后即达到矿井有害气体最高允许浓度  $24 \times 10^{-6}$ <sup>[13]</sup>。上述基础试验和人体模拟试验结果显示,舱内气密性能良好,且舱内始终保持正压状况,不可能与外界环境进行气体交换。同时相同情况下的人体模拟试验中 11 h 内未检测到一氧化碳,所以判定一氧化碳为人体呼吸代谢及皮肤代谢产生。

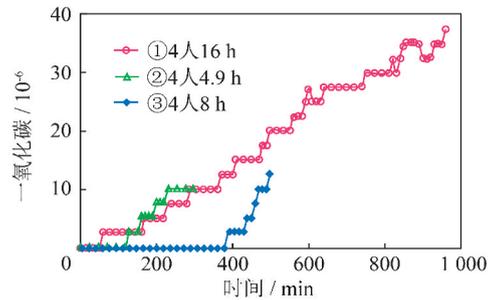


图 4 舱内不同时间段一氧化碳代谢曲线  
Fig. 4 Carbon monoxide metabolization in different periods

为判定一氧化碳的产生趋势,分析了人体代谢一氧化碳参数,见表 1。

在舱内生存一段时间后,首次检测到一氧化碳的时间逐渐延长,经计算,一氧化碳平均代谢速率也逐渐减慢,这与试验人员进入舱内后,控制饮水、饮食情况及心理调节相关。试验期间人员在进入舱后一定时间内,心情由亢奋转入安静状态,多处于睡眠状态,或安静的坐着,此时人体代谢相较于刚进入舱时减慢,一氧化碳代谢率整体下降。

2.2.2 有吸烟史不同人数情况下一氧化碳代谢分析

图 5 显示,随着具有吸烟史人数的增加,一氧化碳代谢速率逐渐增大,首次检测到一氧化碳时间也逐渐缩短。人体代谢一氧化碳量与本人是否具有吸烟史有直接关系,有吸烟史者呼出气及皮肤排泄物中一氧化碳含量较大。

表 1 舱内不同时间段一氧化碳代谢速率

Table 1 Carbon monoxide metabolic rates values in different periods

试验组别	O <sub>2</sub> 消耗速率/(L·(min·人) <sup>-1</sup> )	CO 代谢速率(10 <sup>-6</sup> /(h·4人) <sup>-1</sup> )	入舱后时间/h	CO 出现时间/min	平均代谢率
1	0.30	2.33	16	48	
2	0.25	2.10	47	97	2.10
3	0.32	1.77	60	387	

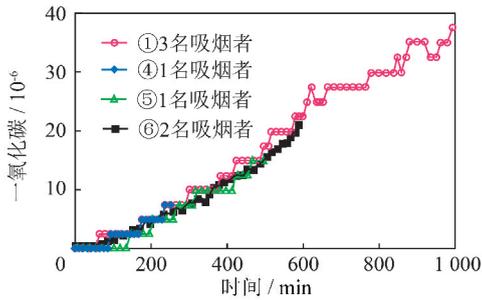


图5 有不同人数的吸烟史者情况下一氧化碳代谢曲线

Fig. 5 Carbon monoxide metabolic curves in different number of testers with history of smoking

根据相关文献中对有无吸烟史者呼出气中一氧

化碳含量的试验分析,其数据表明,有吸烟史者组呼出气中一氧化碳浓度显著高于无吸烟史组,从不吸烟组呼出气一氧化碳浓度最低,均值仅有  $1.64 \times 10^{-6}$ ,重度(大于 20 支/d)吸烟史组均值为  $7.68 \times 10^{-6}$ ,两者相差 5 倍<sup>[14]</sup>。有不同吸烟史者人数情况下一氧化碳代谢速率见表 2。

表 2 显示,一氧化碳代谢率与有吸烟史者的人数相关,与氧气消耗速率及年龄关系不大,根据 6 组试验数据得出,4 人代谢量平均为  $2.10 \times 10^{-6}/h$ ,4 人在救生舱内生存 11 h 后即达到矿井有害气体最高允许浓度  $24 \times 10^{-6}$ ,即每人一昼夜产生一氧化碳 15 mg 左右。

表 2 舱内有不同吸烟史者人数情况下一氧化碳代谢速率

Table 2 Carbon monoxide metabolic rates values in different number of testers with history of smoking

试验组别	O <sub>2</sub> 消耗速率/ (L · (min · 人) <sup>-1</sup> )	CO 代谢速率/ (10 <sup>-6</sup> · (h · 4 人) <sup>-1</sup> )	入舱后 时间/h	CO 出现时 间/min	年龄(有吸烟 史人数)	平均代谢率
1	0.30	2.33	16	48	25(3 人)	2.10
4	0.21	1.86	0	90	25(1 人)	
5	0.35	1.87	0	116	35(1 人)	
6	0.32	2.21	0	50	22(2 人)	

### 2.3 真人生存实验一氧化碳代谢率模拟

为了更准确地分析人体代谢一氧化碳情况,6 组生存试验取平均值拟合曲线。煤矿安全规程规定,矿井一氧化碳气体最高允许浓度为  $24 \times 10^{-6}$ ,拟合浓度规定范围下限舱内一氧化碳浓度变化曲线如图 6 所示。

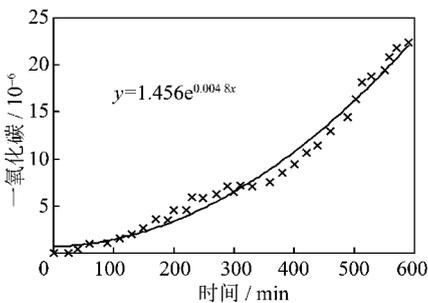


图 6 人体代谢一氧化碳拟合曲线

Fig. 6 The fitting curve of human metabolism carbon monoxide

采用 Matlab 工具拟合曲线,得到在 4 人实验时 10 h 内,人体代谢一氧化碳浓度与时间曲线函数为

$$y = 1.456e^{0.0048x} \quad (0 \leq x \leq 600) \quad (1)$$

式中, $y$  为舱内一氧化碳浓度,  $10^{-6}$ ;  $x$  为人员进入舱内时间, min。

拟合函数相关系数  $R^2 = 0.8891$ , 残差平方和为 32.01, 函数置信度为 95%。

在本次实验过程中,实验的条件为 4 人,实验用

舱的容积为  $8 \text{ m}^3$ ;综合考虑舱内人数和舱体容积,可得出密闭舱体环境下人体产生的一氧化碳浓度积累随时间变化的一般规律为

$$y = \frac{14.4e^{0.0012nx}}{1000V} \quad (2)$$

式中, $y$  为舱内一氧化碳浓度, mg/L;  $n$  为舱内的人数;  $V$  为舱的体积,  $\text{m}^3$ 。

为确认试验结果确定性,对本公式进行了验证实验,实验过程在容积为  $8 \text{ m}^3$  的密闭舱室内放置了 8 个人,测定一氧化碳浓度的变化情况,并与理论计算值相比较,结果见表 3。

表 3 验证实验数据

Table 3 The verification of experimental data

序号	时间/min	理论值/ (mg · L <sup>-1</sup> )	实际值/ (mg · L <sup>-1</sup> )	误差/%
1	150	0.0076	0.0082	7.3
2	200	0.0123	0.0125	1.6
3	300	0.0320	0.0297	7.7

从验证结果可知,本次实验获得的经验公式,对分析密闭舱室内人体一氧化碳扩散规律具有指导意义。在舱体体积不是很大,舱内一氧化碳较低时,通过式(2)计算出的结果可较准确地反映实际气体环境。

### 3 结 论

(1)人体在救生舱内生存,自身代谢活动会产生微量一氧化碳气体,并随着时间的积累会危及人的生命安全。

(2)在体积  $8 \text{ m}^3$  救生舱空间内,额定人数(8人)情况下,舱内 5.5 h 后达到矿井有害气体最高允许浓度  $24 \times 10^{-6}$ 。

(3)确定救生舱内人体一氧化碳代谢速率平均为每人  $0.52 \times 10^{-6}/\text{h}$ ,每人一昼夜产生一氧化碳 15 mg 左右,为救生舱内一氧化碳去除能力及要求提供了依据。

(3)救生舱内人体一氧化碳代谢速率与舱内有吸烟史者人数的个数相关,有吸烟史者代谢一氧化碳速率高于无吸烟史者。

(4)在人体承受 CO 浓度极限范围下,人体 CO 代谢拟合函数为  $y = \frac{14.4e^{0.0012nx}}{1000V}$ 。

### 参考文献:

- [1] 李荣生. 矿井避难室[J]. 云南冶金, 1989(1): 47.  
Li Rongsheng. Mine refuge chamber[J]. Yunnan Metallurgy, 1989(1): 47.
- [2] 相桂生. 应急避难室在矿难救援中的应用[J]. 劳动保护, 2006(4): 92-93.  
Xiang Guisheng. The application of emergency refuge chamber in mining accident rescue[J]. Labour Protection, 2006(4): 92-93.
- [3] 郭德勇, 刘金城, 姜光杰. 煤矿瓦斯爆炸事故应急救援响应机制[J]. 煤炭学报, 2006, 31(6): 697-700.  
Guo Deyong, Liu Jincheng, Jiang Guangjie. The mechanism of the emergency rescue response during coal mine gas explosion[J]. Journal of China Coal Society, 2006, 31(6): 697-700.
- [4] 周心权, 陈国新. 煤矿重大瓦斯爆炸事故致因的概率分析及启示[J]. 煤炭学报, 2008, 33(1): 43-46.  
Zhou Xinquan, Chen Guoxin. The probability analysis of occurrence causes of extraordinarily serious gas explosion accidents and its revelation[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(1): 43-46.
- [5] 高广伟, 张禄华. 煤矿井下移动救生舱的设计思路[J]. 中国安全生产科学技术, 2009, 5(4): 162-164.  
Gao Guangwei, Zhang Luhua. Design principles of movable coal mine refuge chamber[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2009, 5(4): 162-164.
- [6] 张恩强, 王 丽, 刘名阳, 等. 探讨井下避难硐室在矿井中的应用[J]. 煤矿安全, 2009(7): 90-92.  
Zhang Enqiang, Wang Li, Liu Mingyang, et al. Discussion of the application of permanent chamber in coal mine[J]. Safety in Coal Mines, 2009(7): 90-92.
- [7] 何正杰, 于 芳. 密闭环境中人体自身代谢挥发性有机化合物气相色谱分析[J]. 分析化学仪器装置与实验技术, 2001, 29(8): 978-982.  
He Zhengjie, Yu Fang. Gas chromatography-mass spectrometric analysis for volatile organic compound of human metabolites in sealed cabin[J]. Analytical Chemistry, 2001, 29(8): 978-982.
- [8] 梁 宏, 余秉良, 何正杰, 等. 密闭环境挥发性有机物行为特性分析[J]. 解放军预防医学杂志, 1999, 17(2): 85-89.  
Liang Hong, Yu Bingliang, He Zhengjie, et al. Analysis on environmental behavior of VOCs in closed cabin[J]. Journal of Preventive Medicine of Chinese People's Liberation Army, 1999, 17(2): 85-89.
- [9] 王普秀. 航天环境控制与生命保障工程基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.  
Wang Puxiu. Aerospace environmental control and life support engineering fundamentals[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2003.
- [10] 余秉良, 张恒太, 牟晓非, 等. 低浓度一氧化碳对人体生理功能的影响[J]. 航天医学与医学工程, 1997, 10(5): 328-332.  
Yu Bingliang, Zhang Hengtai, Mou Xiaofei, et al. Effects of low concentration carbon monoxide on physiological function[J]. Space Medicine & Medical Engineering, 1997, 10(5): 328-332.
- [11] 袁之炎, 付丽华, 张洪彬, 等. 密闭环境空气污染源的控制[J]. 舰船科学技术, 1999(6): 59-64.  
Yuan Zhiyan, Fu Lihua, Zhang Hongbin, et al. Air pollution source control in the closed environment[J]. Ship Science and Technology, 1999(6): 59-64.
- [12] GJB 2093-94, 军用方舱通用试验方法[S]. 北京: 国家军用标准出版社, 1995.
- [13] 国家安全生产监督管理局. 煤矿安全规程[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2004.  
State Administration of Work Safety. Safety regulations in coal mine[S]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2004.
- [14] 张国贤, 卢济灼, 陈淑英, 等. 吸烟与呼出 CO 浓度的关系[J]. 预防医学, 1990, 12(5): 36-37.  
Zhang Guoxian, Lu Jizhuo, Chen Shuying, et al. The relationship of smoking and exhaled carbon monoxide concentration[J]. Prevention Medicine, 1990, 12(5): 36-37.