

文章编号:1000-582X(2009)05-0577-05

火灾烟气中毒性成分 CO 的生物毒性

刘 方^{a,b}, 朱 伟^a, 王贵学^b

(重庆大学 a. 三峡库区生态环境教育部重点实验室; b. 生物工程学院, 重庆 400030)

摘 要: 采样化学反应法制取 CO 气体, 通过采样泵送入暴露实验箱, 开展动物暴露实验, 研究火灾烟气中主要毒性成分 CO 对家兔血气成份和血液流变学指标的影响, 探讨 CO 的生物毒性。动物毒性暴露实验结果表明, 家兔在吸入 CO 后, 血气指标和血液流变学指标都有比较大的变化, 中毒现象非常明显。家兔吸入 CO 后出现代谢性碱中毒, CO 中毒对 PCO_2 和 PO_2 指标影响最为明显。与正常组相比, 血气指标 PCO_2 、 TCO_2 和 HCO_3^- 逐渐升高, PO_2 明显下降。血液流变学指标中的全血高、中、低切变率血液粘度均高于正常值, 而且暴露时间越长, 粘度越高, 尤其是低切变率下, 血液粘度变化非常明显。血浆粘度升高; 红细胞压积、红细胞的聚集指数、红细胞变形指数与刚性指数低于正常值。

关键词: 烟气毒性; 火灾烟气; 生物流变学; 血气分析

中图分类号: R992

文献标志码: A

Biological toxicity effect of CO in fire smoke

LIU Fang^{a,b}, ZHU Wei^a, WANG Gui-xue^b

(a. Faculty of Urban Construction and Environmental Engineering,

b. Faculty of Biology Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China)

Abstract: We investigate the effect of CO on the blood rheology parameters and blood gas composition. Experiments are conducted under isothermal toxicity gas concentration non-radioactive conditions. We use an exposure box 0.8 m long, 0.5 m wide, and 0.5 m high. CO produced by the chemical reaction of formic acid and dense sulphuric acid is introduced to the box by an air-sampling pump. After completion of the exposure period, the blood samples are removed from the animal. The toxicity exposure experiment indicates that after inhaling the CO, the exposed rabbit exhibits signs of metabolized respiratory alkaline toxicosis. While the rabbit inhales CO, the blood gas parameters values of PCO_2 , TCO_2 and HCO_3^- increase; PO_2 reduces very noticeably; and the rheology parameters of whole blood viscosity are higher than the normal values. The viscosity will be higher if the exposure is longer, a very obvious change, especially at low rheology velocity.

Key words: smoke toxicity; fire smoke; biological rheology; blood gas ingredient

收稿日期: 2008-12-27

基金项目: 教育部科学技术研究重点资助项目(104158); 国家自然科学基金重点资助项目(50838009)

作者简介: 刘方(1965-), 女, 重庆大学副教授, 博士后, 主要从事建筑防火技术、建筑节能与 CFD 技术方向的研究,
(Tel)023-65120756; (E-mail) drliufang@126.com。

火灾烟气毒性是造成人员伤亡的主要原因,吸入烟气致死占火灾死亡人数的 70%~75%^[1-4]。因此,火灾烟气危害、毒性评价及其控制是建筑防火领域重要的研究方向。

按照实验方法烟气毒性的研究方法分为:成分分析法(化学分析法)、动物试验法和生理研究法、小尺度物理模型实验^[5]。火灾烟气毒性国际标准 ISO13344 推荐了 8 种小尺度试验模型^[6]。成分分析与动物暴露染毒是目前国际上评估火灾烟气毒性的两种主要技术途径。傅里叶变换红外光谱成分分析技术(FTIR) 近年得到了发展^[7-8]。

最常用的烟气毒性评价指标是 $LC_{50}^{[9]}$ 。烟气毒性评价模型中的 N-气体模型、FED 或 FEC 评价模型、TGAS 评价模型等未考虑毒性物质毒性的相互作用,认为所有毒性气体具有共同的作用机理,不能区分火灾烟气中不同毒性气体成分以及同一种毒性气体在不同的浓度条件下的毒性作用,因此,模型的应用具有一定的局限性^[10]。

火灾烟气是复杂的混合气体,不同建筑材料烟气毒物的组成及产生规律以及同一材料在不同燃烧条件下,烟气毒物的生成规律及其在建筑物内的传播规律,烟气毒物对人员造成的伤害机理等,这些都是需要进一步解决的问题。十五以来国内研究者开展了材料产烟毒性、毒性气体传播规律等研究^[11-14]。参考国际标准技术报告 ISOTR9122-2(1990-10-15)“火灾烟气毒性试验”,制定了我国火灾烟气毒性危险评价方法——动物试验方法^[15]。

国内外有关火灾烟气毒性物质以及低氧对血液和呼吸系统影响的研究较少。火灾中死亡的人大多是因为吸入毒性气体,引起窒息从而死亡。其中 CO 与 CO₂ 是火灾中致人死亡的最主要的气体^[16]。由于吸入烟气中毒性物质,减少了吸入的氧气,会使血液指标发生变化,影响血液中氧的输运,同时吸入的毒性物质会影响呼吸系统,进而对人体造成伤害。因而,通过动物染毒实验,研究烟气中的毒性气体 CO 对血气分析成分和血液流变学指标的影响,探讨毒性气体 CO 对呼吸和血液的影响,对于保护火灾中人员的安全疏散以及消防扑救人员的人生安全,制定有针对性的防护手段有着十分重要的意义。

1 实验装置与实验方案

1.1 实验装置

烟气除了本身具有毒性以外,点燃或加热的烟气会有热辐射伤害等的影响。为了研究烟气中毒性

物质的影响,排除热辐射的影响,采用甲酸(蚁酸)脱水的方法制取毒性气体 CO,用真空泵送入设计的动物毒性气体暴露实验装置。

动物染毒箱长×宽×高为 1 000 mm×500 mm×600 mm。箱体用有机合成材料制作,在正面安装有机玻璃用于观察实验过程中家兔的活动情况。暴露箱的一侧开设进气孔,采用密封性能良好的硅胶管连接气源,并在连接管上安装一个阀门,以调节补气的流量使染毒箱内的气体浓度达到设计的要求。在箱内安装 4 台小型电脑机箱风扇,分布在暴露箱的两侧,使得毒性气体混合均匀。暴露箱侧面开设了一个气体浓度检测孔,采用美国华瑞多种气体检测仪检测暴露箱内 CO 的浓度^[16]。

1.2 实验方案

考虑到辐射等其他因素的影响,人在火灾环境中最多能够呆 30 min,因此,设计动物染毒最长时间为 30 min。实验测试 CO 的浓度选取了 LC_{50} 浓度(称其为对照浓度),暴露时间分别设计为 5、10、15、20 和 30 min,研究在 CO 的 LC_{50} 浓度下,不同暴露时间 CO 对血液特性的影响。CO 的 LC_{50} 浓度值为 0.24%。参考相关文献,建筑物室内火场中 CO 的浓度在 0.01%~0.4%^[17]。暴露时间 30 min,CO 的浓度为 0.06%和 0.4%(文中对应称其为低和高浓度),分析浓度对家兔血液流变特性和血气成分的影响。

2 实验结果

实验选用的动物为重庆医科大学动物中心的经过检疫的家兔,家兔体重在 1.0~1.5 kg,家兔分为正常组和实验组,随机选取 20 只家兔作为正常组,抽取股动脉血 1 mL,作为血气指标样本;同时心脏采血 5 mL,作为血液流变学指标检测样本。将实验组的家兔暴露于设计的 CO 浓度中,每种实验方案重复进行 5 次。

实验数据采用均值与标准差表示,染毒实验组动物血样测试数据与正常组血样测试数据的比较采用 t 检验。 $\alpha=0.05$ 即置信度 $p=1-\alpha=0.95$,查取临界相关系数 $T_{\alpha/2}(23)=2.069$ 。

暴露在 CO 的 LC_{50} 浓度条件下的家兔血气指标结果见表 1;血液流变学指标结果见表 2。

家兔分别暴露在 CO 高浓度(0.4%)和低浓度(0.06%)条件下 30 min,测得的血气指标和血液流变学指标见表 3 和 4。

表 1 对照浓度下家兔的血气指标

时间/min	pH	PCO ₂ /kPa	PO ₂ /kPa	HCO ₃ ⁻ /(mol·L ⁻¹)	TCO ₂ /(mol·L ⁻¹)	SO ₂ c/%
5	7.23±0.10	3.95±0.28	12.57±1.04*	15.38±1.44	17.22±1.79	95.84±1.10
10	7.30±0.10	4.28±0.24*	11.98±0.90*	16.12±1.54	17.70±1.31	97.04±1.22
15	7.38±0.06	4.68±0.25*	11.24±0.82*	17.80±1.21*	17.90±1.30	96.87±1.60
20	7.42±0.08*	5.74±0.17*	10.07±1.08*	19.48±1.63*	19.16±1.21*	96.47±0.91
30	7.46±0.09**	6.25±0.19*	8.47±0.70*	24.22±2.12*	23.36±2.14*	94.64±2.20
正常组	7.31±0.05	3.69±0.26	12.82±1.07	15.18±2.18	16.88±1.02	94.35±6.18

说明:实验组与正常组相比: * P>0.05。

表 2 对照浓度下不同暴露时间家兔的血液流变学指标

时间/min	全血粘度			血浆粘度 /(mPa·s)	红细胞压积 /(L·L ⁻¹)	红细胞聚 集指数	红细胞变 形指数	红细胞刚 性指数
	高(200/s)	中(30/s)	低(3/s)					
5	3.78±0.41*	4.48±0.32*	8.48±0.32	1.10±0.06	0.35±0.05*	7.68±0.34	0.85±0.02	5.02±0.19
10	3.89±0.37*	4.68±0.51*	9.70±0.34*	1.24±0.07*	0.33±0.04*	7.16±0.43*	0.83±0.05*	4.89±0.25
15	4.07±0.48*	4.82±0.33*	10.36±0.41*	1.32±0.05*	0.31±0.05*	6.94±0.35*	0.80±0.03*	4.65±0.22*
20	4.18±0.23*	5.09±0.22*	11.06±0.39*	1.37±0.05*	0.26±0.03*	6.82±0.48*	0.78±0.03*	4.46±0.31*
30	4.38±0.25*	6.04±0.47*	13.26±0.67*	1.42±0.07*	0.21±0.03*	6.69±0.39*	0.77±0.03*	4.29±0.18*
对照组	3.38±0.28	4.03±0.35	8.31±0.59	1.06±0.06	0.42±0.02	7.84±0.66	0.89±0.06	5.23±0.42

说明:实验组与正常组相比 * P<0.05。

表 3 家兔暴露在不同 CO 浓度血气指标结果

CO 浓度/%	pH	PCO ₂ /kPa	PO ₂ /kPa	HCO ₃ ⁻ /(mol·L ⁻¹)	TCO ₂ /(mol·L ⁻¹)	SO ₂ c/%
0.4(高)	7.51±0.09*	6.31±0.16*	8.03±0.35*	26.22±0.87*	25.36±1.59*	97.37±1.25
0.06(低)	7.38±0.05*	4.04±0.18*	10.69±0.35*	20.82±0.70*	20.93±1.32*	92.84±1.80
0.24(对照)	7.46±0.09*	6.25±0.19*	8.47±0.56*	24.22±2.12*	23.36±2.14*	94.64±2.20

说明:实验组与正常组相比 * P<0.05。

表 4 家兔暴露在 CO 不同浓度血液流变学指标

CO 浓度/%	全血粘度			血浆粘度 /(mPa·s)	红细胞压 积/(L·L ⁻¹)	红细胞聚 集指数	红细胞变 形指数	红细胞刚 性指数
	高(200/s)	中(30/s)	低(3/s)					
0.4(高)	4.42±0.25*	6.28±0.42*	14.27±0.82*	1.53±0.09*	0.17±0.05*	5.69±0.38*	0.73±0.03	4.19±0.12*
0.06(低)	3.68±0.25*	5.34±0.20*	10.48±0.40*	1.34±0.10*	0.35±0.02*	7.25±0.14	0.83±0.02*	4.78±0.60
0.24(对照)	4.38±0.25*	6.04±0.47*	13.26±0.67*	1.42±0.07*	0.21±0.03*	6.69±0.39*	0.77±0.03	4.29±0.18*

说明:实验组与正常组相比 * P<0.05。

3 结果分析

从表 1 可以看出,暴露 5 min 后,和对照组相比实验组的家兔血气中 PCO₂ 基本没有改变,但是随着时间的发展,PCO₂ 逐渐升高,而且升高趋势非常明显,这是因为在一开始暴露箱中 O₂ 的含量还足够呼吸,因此 5 min 的时候不足以引起明显的改变,随着时间的发展,暴露箱中 O₂ 含量越来越少,呼出 CO₂ 增多,导致 PCO₂ 会发生明显的改变。与正常

组比较,暴露于 CO 的 LC₅₀ 浓度中的家兔,血气中的 PCO₂ 升高、PO₂ 下降、PCO₂ 升高明显、TCO₂ 升高, HCO₃⁻ 升高,SO₂c 有下降趋势。pH 值均高于正常组,在暴露时间大于 15 min 后, pH 值变化显著。家兔暴露于 LC₅₀ 浓度条件下,血气中 pH 值的改变没有明显的上升或下降趋势,但是和正常呼吸的对照组相比, pH 值均高于对照组,由此推测可能由此推测家兔可能代谢性碱中毒。同时随着家兔暴露在 CO 的时间越长,这种变化趋势就越明显。显著性

分析表明, PCO_2 影响显著。

从表 2 可以看出, 对照组与正常组比较, 家兔吸入 CO 后血液中的全血高、中、低切血液粘度均高于正常值; 血浆粘度比正常值偏高; 红细胞压积、红细胞的聚集指数、红细胞变形指数与红细胞刚性指数比正常值要低。显著性分析表明: 在置信度 $p = 0.95$ 下, 家兔在 LC_{50} 浓度暴露 30 min, 血液流变学各项指标均有显著变化。

从血气指标的实验结果表 3 可以看出, 当 CO 浓度越高, 在相同时间内 CO 中毒现象越为严重。分析上述实验结果, 原因如下, 由于吸入 CO 气体, 影响了动物肺的通气功能, 降低组织气体交换能力, 从而影响了通气和换气, 使得血液中 TCO_2 显著升高。即使在 CO 低浓度值条件下, 暴露 30 min 时, CO 对血气指标影响显著。

表 4 可以看出, 在相同暴露时间内, CO 浓度越高, 对血液粘度影响越大。低浓度 CO 暴露 30 min, 除红细胞聚集指数、刚性指数和变形指数外其他各项血液流变学指标具有显著变化。

动物毒性暴露实验结果表明, 家兔在吸入 CO 后, 血气指标和血液流变学指标都有比较大的变化, 中毒现象非常明显。并随 CO 浓度升高, 各项血液指标偏离正常值越大, 中毒的症状越重。从时间的变化趋势可以看出, CO 中毒对 PCO_2 和 PO_2 指标影响最为明显, 因为机体能够对血液 pH、 HCO_3^- 、 TCO_2 进行代偿调节, 变化较小, 长时间的吸入 CO, 机体失代偿后, pH、 HCO_3^- 、 TCO_2 才会有较明显的变化, 而 CO 与红细胞的血红素结合后难以分解, 阻碍了 O_2 和 CO_2 与血红素的结合, 从而抑制 O_2 和 CO_2 在气血中的交换, 所以随着时间的延长, 机体中对 O_2 的消耗和 CO_2 的堆积, PCO_2 和 PO_2 变化也最为明显了。从浓度的变化趋势可以看出, CO 高低浓度在 30 分钟后所检测的血液学指标中, 两组的差距较小, 从而推出, 吸入低浓度的 CO, 只要达到足够长的时间, 同样可以达到高浓度 CO 中毒症状。

4 结 论

设计并建造烟气毒性暴露实验箱, 开展动物染毒实验研究 CO 对家兔的毒性效应, 能够有效地对火灾现场中 CO 对人体血气成分和血液流变学的各项指标的影响进行有效地评估, 为后续有针对性的治疗提供理论依据。

暴露于 CO 中的家兔其血气指标和血液流变学指标都有比较大的变化, 中毒现象非常明显。CO 中毒后对血液中 PCO_2 和 PO_2 产生的影响最大。血

液流变学指标中的全血高、中、低切变率血液粘度均高于正常值, 而且暴露时间越长, 粘度越来越高, 尤其是低切变率下, 血液粘度变化非常明显。

家兔吸入 CO 后出现代谢性碱中毒。CO 阻碍了血气中 O_2 和 CO_2 的交换, 最终导致机体缺氧, 如脑等重要器官, 在 10 min 内不能有效解除缺氧状况, 将产生不可逆性的损害, 机体的各个器官也会相继衰竭死亡。同样, 在吸入低浓度的 CO 时, 如果吸入时间过长, 而不能及时给氧, 同样会产生严重的中毒症状。因此对于火灾现场中, 明确出现 CO 中毒的, 必须进行吸入高浓度氧气治疗, 才能有效地解救 CO 中毒。但是, 实际生活中, 火灾现场气体复杂, 其他有害气体对机体同样产生复杂的损害, 这些损害是否会引起血液学的变化, 或是对 CO 中毒后血液学变化有多大的影响, 还需要进行更深一步地研究。

参考文献:

- [1] NELSON G L. Carbon monoxide and fire toxicity: a review and analysis of recent work [J]. Fire Technology, 1998, 34(1): 39-58.
- [2] GANN R G, AVERILL J D, JOHNSON E L, et al. Smoke component yields from room-scale fire test [S]. Washington DC: U S Government Printing Office, 2003.
- [3] 黄锐, 杨立中, 方伟峰, 等. 火灾烟气危害性研究及其进展[J]. 中国工程科学, 2002, 4(7): 80-85.
HUANG-RUI, YANG LI-ZHONG, FANG WEI-FENG, et al. Progress in study of hazard analysis of fire smoke[J]. Engineering Science, 2002, 4(7): 80-85.
- [4] 陈耀宏, 任炳潭. 洛阳市东都商厦"12.25"特大火灾人员大量死亡原因分析[J]. 消防科学与技术, 2001(5): 57-59.
CHEN YAO-HONG, REN BING-TAN. Analysis of the reasons for the heavy deaths of "12.25" disastrous fire in Dongdu Commercial Building of Luoyang city [J]. Fire Science and Technology, 2001(5): 57-59.
- [5] ISO/TR 9122-4: 1993(E). Toxicity testing of fire effluents part 4: the fire model (furnaces and combustion apparatus used in small-scale testing)[S]. Switzerland: International Organization for Standardization, 1993.
- [6] ISO13344: 1996(E). Determination of the lethal toxic potency of fire effluents[S]. Switzerland: International Organization for Standardization, 1996.
- [7] ISO. CD19702 Toxicity testing of fire effluents-analysis of gases and vapors in fire effluents using FTIR technology[S]. Switzerland: ISO, 2002.
- [8] NFPA . NFPA 269-standard test method for developing toxic potency data for use in fire hazard modeling [M].

- USA; NFPA, 2000.
- [9] 刘方,廖署江. 建筑防火性能化设计[M]. 重庆:重庆大学出版社, 2007.
- [10] LEVIN B C, BRAUN E, NAVARRO V, et al. Further development of the n-gas mathematical model. American Chemical Society [C]// Fire and Polymers II: Materials and Tests for Hazard Prevention. National Meeting, 208th. August 21-26, 1994, Washington DC, 1994. Washington DC: American Chemical Society, 1995: 293-311.
- [11] 全国消防标准化技术委员会第七分技术委员会. GA/T506-2004 火灾烟气毒性危险评价方法:动物试验方法[S]. 北京:中国标准出版社, 2004.
- [12] 杨立中,方伟峰,邓志华,等. 火灾中的烟气毒性研究[J]. 火灾科学, 2001, 10(1):29-33.
YANG LI-ZHONG, FANG WEI-FENG, DENG ZHI-HUA, et al. Study on fire smoke toxicity[J]. Fire Safety Science, 2001, 10(1):29-33.
- [13] 张慧,祁海鹰,吕子安,等. 通风量对火灾烟气中CO₂和CO释放的影响[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2004, 44(8):1088-1091.
ZHANG-HUI, QI HAI-YING, LV ZI-AN, et al. Influence of ventilation on the release of CO₂ and CO in fire smoke[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2004, 44(8):1088-1091.
- [14] 吕子安,连晨舟,季春生,等. 火灾中材料产烟毒性的分析[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2004, 44(2): 278-281.
LV ZI-AN, LIAN CHEN-ZHOU, JI CHUN-SHENG, et al. Toxicity analysis of smoke from materials burnt in fires[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2004, 44(2):278-281.
- [15] 冯文兴,杨立中,方廷勇,等. 狭长通道内火灾烟气毒性成分空间分布的实验[J]. 中国科学技术大学学报, 2006, 36(1):61-64.
FENG WEN-XING, YANG LI-ZHONG, FANG TING-YONG, et al. The spatial distribution of toxicant species in fires in a long corridor[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2006, 36(1):61-64.
- [16] 翁庙成. 建筑火灾烟气中CO/CO₂浓度分布及其毒性研究[D]. 重庆:重庆大学城市与环境建设工程学院, 2007.
- [17] LATTIMER B Y. Carbon monoxide levels in structure fires: effects of wood in the upper layer of a post-flashover compartment fire[J]. Fire Technology, 1998, 34(4):325-355.

(编辑 赵静)

~~~~~

(上接第 571 页)

- [9] YUMLU M, OZBAY M U. A study of the behavior of brittle rocks under plane strain and triaxial loading conditions[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts, 1995, 32(7): 725-733.
- [10] 黄滚,尹光志,李东伟. 一种双轴岩石平面应变仪的改进和应用. 重庆建筑大学学报, 2006, 28(2):43-51.  
HUANG GUN, YIN DONG-ZHI, LI DONG-WEI. Improvement and application of a biaxial apparatus for rock[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2006, 28(2): 43-51.
- [11] LABUZ J F, VARDOULAKIS I, DRESCHER A. Plane-strain apparatus: US, 5063785[P]. 1991-11-12.
- [12] LABUZ J F, BRIDELL J M. Reducing frictional constraint in compression testing through lubrication[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts, 1993, 30(4): 451-455.
- [13] BROWN E T. Suggested methods for determining the strength of rock materials in triaxial compression: revised version [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts, 1983, 20(6):283-290.
- [14] MOGI K. Effect of the triaxial stress system on fracture and flow of rocks[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 1972(5): 318-324.
- [15] VARDOULAKIS I, SULEM J. Bifurcation analysis in geomechanics[M]. Glasgow: Blackie Academic & Professional, 1995.

(编辑 赵静)