

废弃煤矿山酸水地学防治的实验室模拟研究

卢裴裴^{1,2} 王诗扬^{1,2,3}

(1. 贵州省地质环境监测院, 贵州 贵阳 550004; 2. 中国地质大学(武汉)资源勘查工程,
湖北 武汉 430074; 3. 中国地质大学(武汉)计算机科学技术与软件工程)

[摘 要]为了从地学的角度探索一种从源头变被动为主动的废弃煤矿山矿井酸水防治的途径, 指导矿山环境恢复和治理, 研究工作通过建立废弃煤矿山地下水系统物理模型, 模拟了不同环境条件下矿井酸水形成和演化特征, 探索了不同水动力条件下的矿山酸性水 pH 值、电导率等指标的变化趋势。实验结果表明: 通过人为工程干预, 促使“采空区”氧化环境向还原环境转变, 可以缓解矿井酸性水的形成; 抬高系统中地下水径流带高程, 将模拟矿坑中地下水径流带改变为滞留带, 系统排泄水的 pH 值显著提高, 水质得到了有效的改善。实验成果为废弃煤矿山酸性矿井水地学治理理论提供了技术支撑, 也可以作为废弃矿山矿井酸水治理工作的借鉴。

[关键词] 矿井酸水; 地学防治; 实验室模拟

[中图分类号] X75; X703; X502 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1000-5943(2022)01-0066-06

1 引言

煤炭作为主要的能源之一, 在经济社会发展中发挥了重要的作用。但大量闭坑和政策性关闭的煤矿山及老窑却留下了众多的废弃矿坑和地下采空区, 并产生了大量的酸性矿井水, 造成地下水污染(李怀展, 2015; 胡立峰, 2005; 杨胜元等, 2008), 或溢出地表造成大面积的地表水污染(梁浩乾等, 2019)。在煤矿水的污染类型中, 酸性矿井水的危害最为显著(沈继芳, 于青春, 胡章喜, 1992), 成为生态环境中的“毒瘤”, 也成为“山水林田湖草”生态环境治理的一项重要工作。

传统的矿井酸性水治理方法主要包括: 物理化学处理方法、生物化学处理方法, 以及湿地生态学处理方法三大类(黄世龙, 王学军, 2001), 这些治理方法均局限于对矿井酸水溢出地表以后进行“末端治理”处理, 是一种“被动”的治理(黄世龙, 王学军,

2001), 具有运行成本高、管理难度较大的特点。近代针对煤矿酸性水“源头控制”技术已经成为当今主要研究方向, 不同的学者和专家提出了诸如抑制铁氧化菌技术、通过物理化学反映在硫化矿物表面形成不溶性膜的钝化处理技术、采用碳酸盐岩岩石充填采空区减缓酸性水形成的技术(丛志远等, 2002)等等。众所周知, 煤矿矿井酸水的形成是硫化矿物被氧化并与地下水相互作用的结果(鲍道亮, 2003), 而上述方法都仅局限于从物理化学的角度减缓硫化矿物的氧化进程, 仍不能较好的实现从源头上彻底实现酸性矿井水形成。为此, 需要探索一种新的、从源头上减轻乃至阻断矿井酸水产生的“前端”治理方法。

本研究以地球化学及地下水动力学(陈崇希, 林敏, 1997)为指导, 力图从地学的角度探索从源头上防治废弃煤矿山酸性水的新模式。通过建立闭坑煤矿山矿床物理模型, 分别开展了模拟开放的“氧化环境”和隔绝空气的“还原环境”条件下

[收稿日期] 2021-09-02 **[修回日期]** 2022-01-16

[基金项目] 贵州省 2020 年科研项目“废弃煤矿山酸性矿井水治理的地学方法研究”黔地矿科合[2020] 32 号。

[作者简介] 卢裴裴(1990—), 女, 河南省人, 水工环工程师, 长期从事环境地质工作。

[通讯作者] 王诗扬(1983—), 男, 贵州省人, 水工环高级工程师, 长期从事水文工程环境地质工作。

硫化矿物氧化演变实验,以及通过改变排水高程模拟改变水动力条件下的矿井排水水质演化实验。实验结果表明:“还原环境”下矿井中硫化矿物氧化程度明显滞缓于“氧化环境”;抬高排水高程后,矿井排水的pH值显著上升。实验证明“地学治理”的途径可行、有效,实验结果一定程度上丰富了矿山地质环境治理修复的理论,并为后期野外治理工程奠定了基础,对废弃煤矿山生态修复治理具有借鉴意义。

2 研究的基本思路

煤矿酸性矿井水的形成是在氧化环境中硫铁矿(FeS_2)被持续氧化,并与地下水共同作用的结果(胡立峰,2005;李锦文等,2012)。矿井酸性水形成的主控因子为“硫铁矿(FeS_2)”、“氧气(O_2)”、“地下水(H_2O)”。其中“硫铁矿”是煤矿床客观存在的、不因人的意志改变的地质背景,而“氧化环境”、“地下水动力”则是可控的。因此,可以通过人为工程干预,改变矿井中“氧化环境”和矿山所处地下水系统的“水动力条件”(王明章等,2014;中国地质调查局,2003),来实现废弃煤矿山酸性矿井水的治理和生态环境的修复。

3 研究方法

以地球科学为指导,综合矿床水文地质学、地球化学、环境水地质学和地下水动力学等相关理论,采用室内模拟试验方法。

3.1 实验室物理模型建立

3.1.1 废弃煤矿基本特征

废弃煤矿山具有如下共同特征:地表下遗留了大面积的“井巷”和“采空区”,采空区通过遗留的运输井筒、风井等与地表相通;采空区顶、底板及边邦残留一定数量的硫分含量较高的煤炭甚至硫铁矿;采空区及井巷部分地带已经发生顶板坍塌,并在顶板产生了大量的“冒落导水裂隙带”,这些裂隙带不同程度导通为采空区上覆盖水岩层,成为含水层中地下水向采空区充水的通道。

3.1.2 废弃煤矿山物理模型建立

根据废弃煤矿山的共性特征,建立了实验室矿山物理模型(图1)。

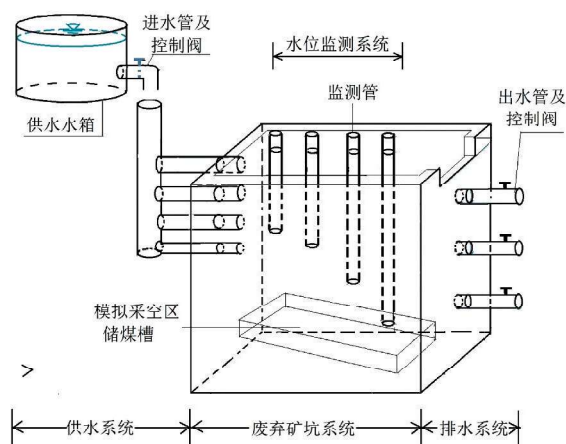


图1 废弃煤矿山实验室物理模型示意图

Fig. 1 Diagram of laboratory physical model of abandoned mine

实验室矿山物理模型由以下四部分组成:

“供水系统”。包括“供水水箱”、“进水控制阀”、“进水管”;

“废弃矿山系统”。包括“废弃矿坑系统”和“模拟采空区(储煤槽)”。“废弃矿坑”除模拟采空区为无充填空间外,其余部分全部采用透水性极差的泡沫材料全充填并在泡沫材料中适当留设小型裂缝,模拟矿坑采空区上覆盖岩层及导水裂隙;

“排水系统”。包括“排水管(口)”、“出水控制阀”。排水管分别按照高于模拟采空区(储煤槽)0.3 m、0.4 m、0.5 m设置;

“水位监测系统”。由多个控制不同高程的监测管组成。

3.2 实验方法

3.2.1 “氧化环境”矿井酸水形成的模拟实验

在储煤槽(模拟采空区)中填入“高硫煤”,注入无污染的清水,开启矿山模型的进、排水通道,模拟与地表空气连通的采空区“氧化环境”以及“氧化环境”下硫化矿物氧化的演化过程。

3.2.2 “还原环境”矿井酸水形成的模拟实验

在储煤槽(模拟采空区)中填入“高硫煤”,注入无污染的清水,关闭矿山模型的进、排水通道,模拟与地表空气隔离的采空区“还原环境”,以及“还原环境”下硫化矿物氧化的演化过程。

3.2.3 “水动力条件改变”矿井酸水排放模拟实验

在储煤槽(模拟采空区)中填入“高硫煤”,关

闭排水系统闸阀;开启进水系统闸阀对“模拟矿山系统”充水至模拟矿坑系统达到“饱水”状态,关闭进水闸阀,让“高硫煤”在浸泡1周,让酸性水充分形成;开启供水“供水系统”闸阀向“矿山系统”充水,开启“排水系统”某一高程的排水闸阀进行排水,模拟矿山地下水系统中地下水循环。按照一定的时间间隔在排水口采集水样,采用“水质多参数仪”、pH试纸现场检测水样的pH值、氧化还原电位(ORP)、电导率,并详细记录测量和检测结果。同一高程排水实验结束后,再依次进行下一排水高程的实验。不同排水高程实验的延续时间以水样PH值达到基本稳定为准。

3.3 数据采集

“氧化环境”和“还原环境”矿井酸水演化实验均从实验开始,第一周每天采样1次,嗣后间隔5天、10天采样1次,作pH值测试。

“改变水动力条件”矿井酸水排放模拟实验在排水管出口采样,采样时间间隔原则上每15分钟1次,测试项目包括PH值、氧化还原电位

(ORP)及电导率(SED)。

4 结果与分析

4.1 结果

4.1.1 “氧化环境”下矿井酸水演化实验结果

“氧化环境”条件下模拟矿井酸水演化实验检测结果见表1、图2。

4.1.2 “还原环境”下矿井酸水演化实验结果

“还原环境”条件下模拟矿井酸水演化实验检测结果见表2、图3。

4.1.3 “改变水动力条件”矿井排水水质演化实验结果

距模拟采空区(储煤槽)不同高程排水实验排水口中pH值、氧化还原电位(ORP)以及电导率检测结果见表3、图4。

表1 氧化环境条件下高硫煤水溶液pH值演化检测成果表

Table 1 Test results of pH evolution of high sulfur coal aqueous solution under oxidation environment

检测时间 (月、日)	5.4	5.5	5.6	5.7	5.8	5.9	5.10	5.13	5.18	5.22	5.27	6.6
间隔(天)	1	2	3	4	5	6	7	10	15	20	25	35
高硫煤水淋滤液	7.6	5.5	4.0	3.5	3.3	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0

表2 还原环境条件下高硫煤水溶液pH值演化检测成果表

Table 2 Test results of pH evolution of high sulfur coal aqueous solution under reducing environment

检测时间 (月、日)	5.4	5.5	5.6	5.7	5.8	5.9	5.10	5.13	5.18	5.22	5.27	6.6
间隔(天)	1	2	3	4	5	6	7	10	15	20	25	35
高硫煤淋滤液	7.6	6.5	6.0	5.5	5.5	5.3	5.0	5.0	4.7	4.5	4.5	4.5

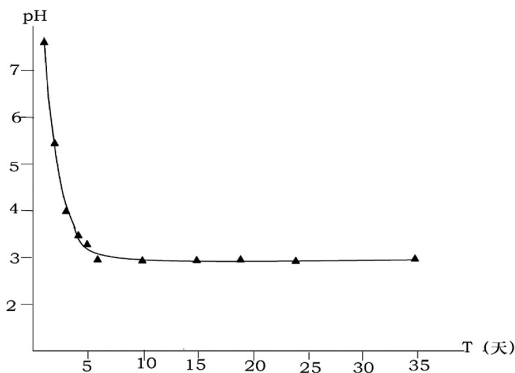


图2 氧化环境下高硫煤溶滤液pH演化历时曲线图

Fig. 2 Duration curve of pH evolution of high sulfur coal aqueous solution under oxidation environment

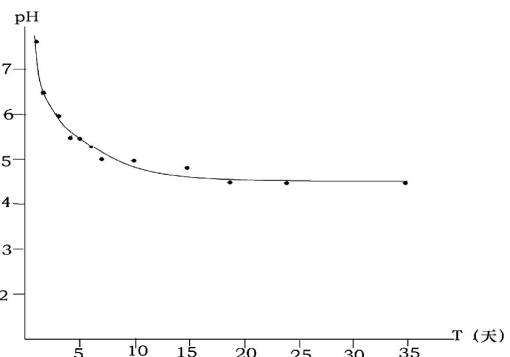


图3 还原环境下高硫煤溶滤液pH演化历时曲线图

Fig. 3 Duration curve of pH evolution of high sulfur coal aqueous solution under reducing environment

表 3 不同高程条件下矿井排水水质演化实验记录表

Table 3 Experimental records of mine drainage water quality evolution under different elevation conditions

排水口与 储煤槽间距 (cm)	采采样 间隔时间 (分)	排水口检测指标		
		pH	氧化还原电位(mv)	电导率($\mu\text{mS/cm}$)
0	0	3.0	-67	802
	15	3.0	-66	794
	30	3.0	-67	795
	60	3.1	-65	795
	80	3.2	-63	793
	0	4.5	-60	780
30	15	3.5	-23	730
	30	3.5	-17	664
	45	3.4	-10	650
	60	3.3	-5	621
	75	3.2	22	583
	90	3.2	51	543
40	0	5.6	-36	621
	15	5.8	-10	554
	30	6.0	41	522
	45	6.1	57	487
	60	6.3	61	432
	75	6.1	62	350
50	90	6.0	65	210
	105	6.3	61	198
	0	4.5	-21	511
	15	6.5	-10	457
	30	7.3	52	426
	45	7.5	287	394.1
	60	7.5	285	187.0
	80	7.5	278	165

4.2 分析

4.2.1 不同环境条件矿井酸水演化趋势

不同环境条件矿井酸水演化实验得出两个结论:一是高硫煤溶滤液 pH 值下降与水、煤相互作用的时间呈指数关系,在开放的“氧化环境”条件下满足 $\text{pH}_t = \text{pH}_0 e^{-0.3623t}$,而“还原环境”条件下则为 $\text{pH}_t = \text{pH}_0 e^{-0.1565t}$,氧化环境下的 pH 值的衰减速率是还原环境条件下的 2.32 倍;二是开放的“氧化环境”条件下高硫煤溶滤液 pH 值远远小于“还原环境”条件下的 pH 值。

4.2.2 改变水动力条件下矿井排放水 pH 演化特征

实验结果表明,随着模拟矿井排水口的抬高,排水口水中 pH 值和氧化还原电位随之升高呈正

相关关系,而电导率相应减小呈负相关关系(图 5)。特别是当出水口高于模拟采空区顶板 0.3 m 以后,上述变化极为显著,当出水口高于模拟采空区顶板 0.5 m 时,排水口出水的 pH 值基本恢复到了进水口的“本底值”。

5 结论与讨论

5.1 结论

(1) 封闭废弃煤矿山采空区与地表的联系通道,尽可能的将原地下采空区的“氧化环境”改造为近似的“还原环境”,可以实现延迟矿井酸性水的形成时间和减低矿井水酸性程度。

(2) 通过抬高排水口与模拟采空区的距离,可

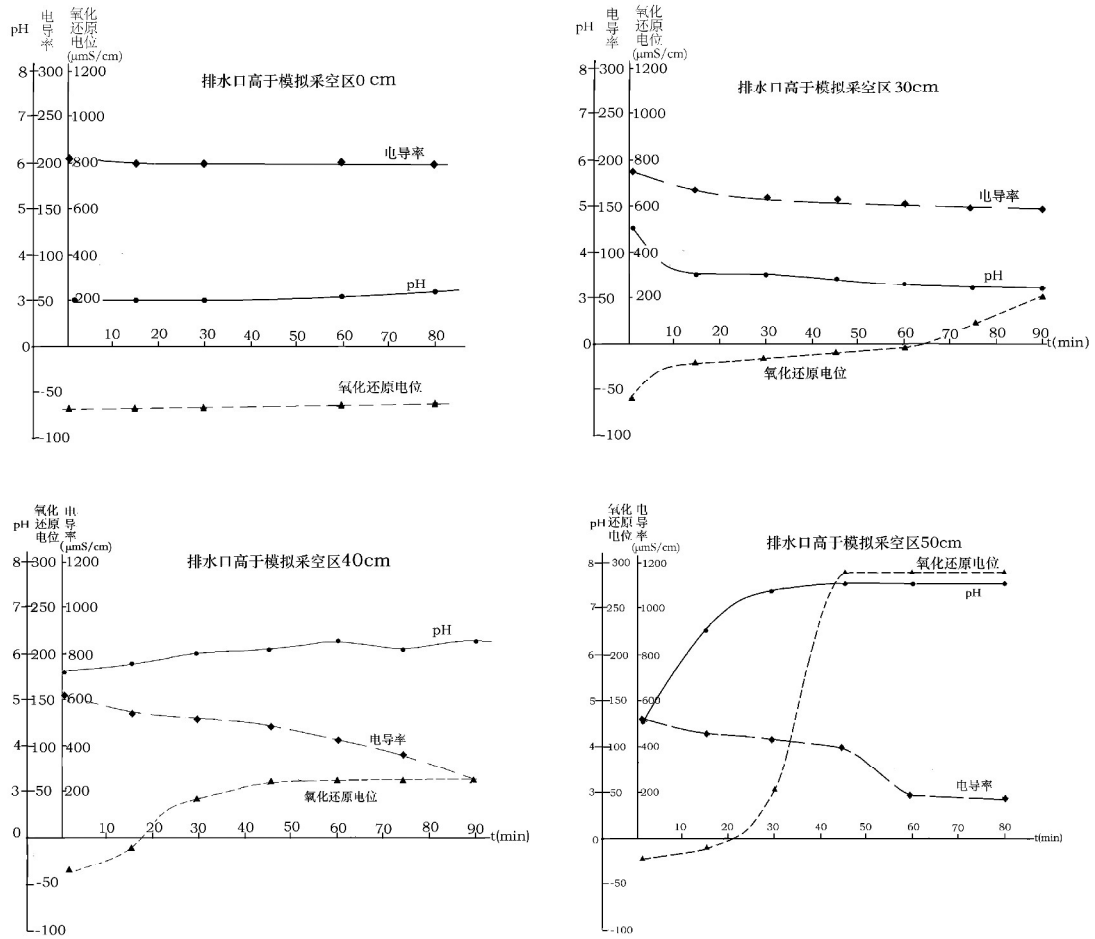


图4 “不同高程条件下”矿井排水水质演化历时曲线图

Fig. 4 Duration curve of mine drainage water quality evolution under different elevation conditions

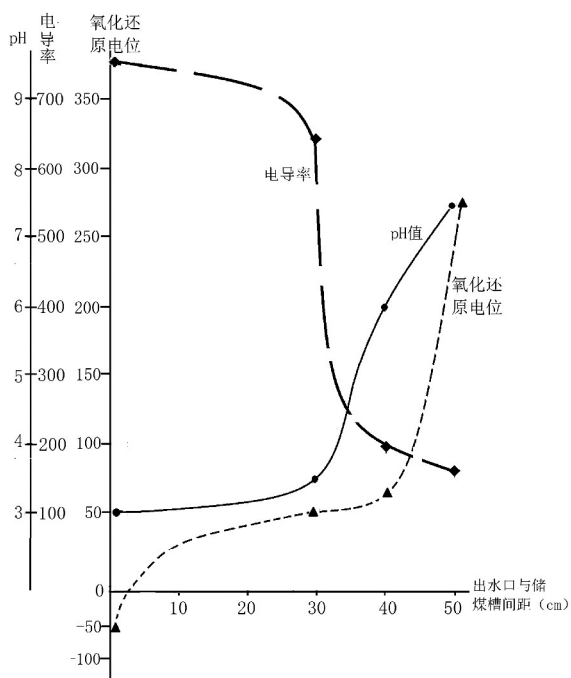


图5 不同高程排水口 pH 值演化曲线图

Fig. 5 Evolution curve of pH value of different elevation drainage port

以实现排水口 pH 值改善。实验结果说明,在废弃矿井采空区下游合理设置地下截水“帷幕”,抬升“帷幕”上游地下水系统含水层径流带,而将原采空区中地下水径流带改变成为滞留带,并利用采空区顶板岩层渗透性弱、弥散性差的特点,有效截断矿井采空区中酸性矿井水和含水层上游清洁地下水的混合,实现“清污分流”,以达到废弃煤矿山地下水和地表水质的改善。

(3) 本研究提出“地学模式”对治理废弃矿山酸性矿井水,实现矿山生态环境修复是可行的,研究成果为从源头治理废弃煤矿山矿井酸水提供了技术支撑。

5.2 讨论

(1) “煤矿酸性水地学防治”的理论基础是环境地球化学和地下水动力学,治理的实质是减缓矿进污染组份形成,以及实现废弃煤矿山地下水系统中地下水的“清污分流”。因此,必须以详细查明废弃煤矿山矿床水文地质条件和矿山采空区

空间分布为前提,据此合理进行“井巷封堵”和“帷幕”设计,才能有效实现废弃煤矿山矿井酸水的治理。

(2)受有研究经费等多种因素影响,未能开展采空区上覆岩层的岩性和厚度与矿井酸水垂直弥散能力关系的模拟研究。

(3)本研究成果仅为实验室模拟实验结果,未来尚需在实际的废弃煤矿山工程治理中进一步检验,完善。

[参考文献]

- 鲍道亮. 2003. 龙永煤田酸性矿井水的形成机理与防治对策[J]. 矿业安全与环保, 30(3): 41-42.
- 丛志远, 赵峰华, 郑晓燕. 2002. 煤矿酸性矿井水研究进展[J]. 煤炭环境保护, 16(5): 8-11.
- 陈崇希, 林敏. 1997. 地下水动力学[M]. 中国地质大学出版社.
- 胡立峰. 2005. 煤炭酸性矿井水成因及其处理方法[J]. 中国煤炭学会矿井地质专业委员会、中国煤炭工业劳动保护科学技术学会水害防治专业委员会 2005 年学术交流会: 68-70.
- 黄世龙, 王学军. 2001. 强酸性矿井水的综合治理[J]. 山西煤炭, 21(4): 26-27.
- 李怀展, 查剑锋, 原亚菲. 2015. 关闭煤矿诱发灾害的研究现状及展望[J]. 煤矿安全, 46(5): 201-204.
- 李锦文, 陈南, 吴惠明, 等. 2012. 硫铁矿酸化过程中铀向水环境的释放迁移行为[J]. 中国环境科学, 32(6): 1026-1031.
- 梁浩乾, 冯启言, 周来, 等. 2019. 鱼洞河流域废弃煤矿矿井水对环境的影响[J]. 水土保持研究, 26(6): 382-388.
- 沈继芳, 于青春, 胡章喜. 1992. 矿床水文地质学[M]. 中国地质大学出版社.
- 王明章, 陈萍. 2014. 贵州岩溶石山地区重大地质环境问题与对策研究[R]. 贵阳: 贵州省地矿局.
- 于通华, 陈明, 谭科艳, 等. 2006. 用赤泥去除酸性矿井水中重金属污染物的初步研究[J]. 岩矿测试, 25(1): 45-48.
- 杨胜元, 张建江, 等. 2008. 贵州环境地质[M]. 贵阳: 贵州科技出版社.
- 中国地质调查局. 2003. 中国岩溶地下水与石漠化研究[M]. 南宁: 广西科技出版社.

Laboratory Simulation Study of Geosciences Prevention and Treatment of Acid Wasterwater in Acid Water in Abandoned Coal Mines

LU Pei-pei^{1,2}, WHANG Shi-yang^{1,2,3}

- (1. Guizhou Institute of Geo-environment Monitoring, Guiyang 550081, Guizhou, China;
2. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China;
3. School of Computer Series, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China)

[Abstract] In order to explore the way to treat acid water from the source of abandoned coal mine mountain mine from the geosciences point of view, guide the restoration and management of mine environment. By building the physical model of abandoned mine mountain underground water system, it simulates the formation and evolution characteristics of mine acid water under different environmental conditions, and explores the change trend of mine acid water pH, conductivity and other indicators under different environmental conditions. The experimental results show that the formation of acidic water in mine can be alleviated by artificial engineering intervention to promote the transformation of the oxidation environment of the “empty area” to the reduced environment. Raising the elevation of groundwater runoff zone in the system changes the groundwater runoff zone in simulated pits to a residual zone, the pH of the system excretion water is significantly improved, and the acidic water is effectively treated. The experimental results provide technical support for the theory of water geoscience management of acidic mine in abandoned coal mines, and can also be used as a reference for the treatment of acid water in abandoned coal mines.

[Key Words] Mine acid water; Geosciences prevention and control; Laboratory simulation