

文章编号: 1001-1455(2000)03-0264-06

# 冲击波传播的三个时段 模拟实验中动物肺的损伤

陈海斌, 王正国, 杨志焕, 刘宝松, 李晓炎, 宁心, 翁格文, 石林

(第三军医大学大坪医院野战外科研究所, 重庆 400042)

摘要: 利用自制的冲击波分段模拟舱, 对60只家兔和20只大鼠进行了冲击波分段模拟实验。结果表明, 肺冲击伤可能主要发生在冲击波减压段; 冲击波压缩段可能不直接引起明显的肺损伤, 但显著地影响后续的减压段的致伤效应。

关键词: 冲击波; 肺; 损伤

中图分类号: R642 文献标识码: A

## 1 引言

肺是冲击波作用于人体时的靶器官。肺冲击伤在战时和平时意外爆炸事故中较多见, 是军事医学和灾害医学中的重要研究课题之一<sup>[1]</sup>。为了研究肺冲击伤的发生机制及防护措施, 需要了解冲击波对肺的致伤过程。由于完全真实实验及动物实验的复杂性和技术条件的限制, 有关冲击波对活体动物肺致伤过程的连续、在线观测结果, 尚未见文献报道。

将冲击波传播过程分解为三个时段, 使模拟冲击波三个时段的压力波分别单独作用于肺, 即通过冲击波分段模拟实验, 可以初步观察冲击波传播的三个时段本身是否独立的、直接的造成肺损伤? 其致伤规律如何? 比较与分析该冲击波及模拟冲击波三个时段的压力波对肺的致伤效应, 可以初步推知冲击波各个时段在冲击波致伤过程中的相互作用机制。因此, 尽管实际冲击波三个时段对肺的致伤过程是连续的, 且前一个过程会影响后一个过程, 但是如果模拟冲击波三个时段的压力波波形参数或其致伤效应与真实冲击波较为近似, 则进行冲击波分段模拟实验仍不失为一种有效的研究方法。

本研究利用自制的设备进行多种压力波参数条件下的冲击波分段模拟实验, 得出了冲击波传播的三个时段模拟实验中动物肺损伤规律的初步结论, 并对冲击波传播的三个时段在肺冲击伤中的作用等问题进行了讨论。

## 2 实验装置与研究方法

### 2.1 冲击波分段及冲击波分段模拟舱

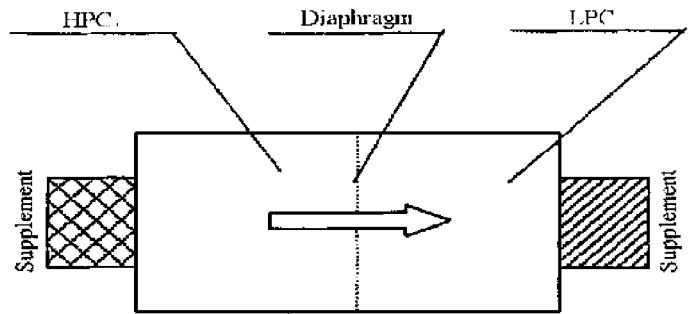
冲击波掠过某点后空气流场的压力开始时高于波前静止空气压力(常压), 表现为超压。

\* 收稿日期: 1999-10-13; 修回日期: 2000-01-27(王正国教授推荐)

基金项目: 军队“九·五”指令性课题一部分(96L040)

作者简介: 陈海斌(1965—), 男, 博士后, 副研究员。

超压随冲击波远去而衰减, 降到常压之后有可能因空气继续流动, 使压力降至常压之下, 出现负压。通常把测试区中压力变化分为二个时段: 超压和负压。超压段又分为压缩段(压力突跃上升过程)和减压段(压力由压力峰值减小到常压的过程), 则流场变化可由压缩段、减压段和负压段三个时段构成。为了分别模拟冲击波流场各个时段的压力波波形, 研制了冲击波分段模拟舱。它包括迅速加压舱、迅速减压舱和负压舱。这三套设备均由高压舱、破膜机构、低压舱和相应的附件组成(图 1), 但结构与尺寸大小不同<sup>[2]</sup>。表 1 对它们进行了比较和分析。



HPC; higher pressure chamber; LPC; lower pressure chamber

图 1 冲击波分段模拟舱示意图

Fig.1 The scheme of shock wave segmentation stimulation chamber

表 1 迅速加压舱、迅速减压舱、负压舱的比较

Table 1 The structural comparison among rapid recompression chamber, rapid Decompression chamber and underpressure chamber

模拟舱	高 压 舱	低 压 舱
迅速加压舱(I, II型)	灌充适量的高压空气	布放实验动物, 起始压为常压, 压力波如图 2
迅速减压舱(I, II型)	布放实验动物, 预置减压初压, 压力波如图 3	I 型: 起始压为常压; II 型: 起始压为“预载负压”
负 压 舱	布放实验动物, 起始压为常压, 压力波如图 4	起始压为负压

## 2.2 实验分组

进行如下三组冲击波分段模拟实验。为了研究冲击波传播的三个时段的单独致伤规律和相互作用机制, 要求部分实验的压力波参数与我们以往在家兔或大鼠肺冲击伤模拟实验中的冲击波各个时段的波形参数相近。

压缩波实验: 健康家兔 6 只和大鼠 20 只, 分为 3 组; 压缩波波形如图 2, 用于冲击波压缩段的模拟实验。

减压波实验: 健康家兔 36 只, 分为 6 组, 每组 6 只; 减压波波形如图 3, 用于冲击波减压段的模拟实验。

负压波实验: 健康家兔 18 只, 分为 3 组, 每组 6 只; 负压波波形如图 4, 用于冲击波负压段的模拟实验。

动物分组中, 每组动物性别不拘, 家兔用质量浓度为 15g/L 的戊巴比妥钠液从耳缘静脉内

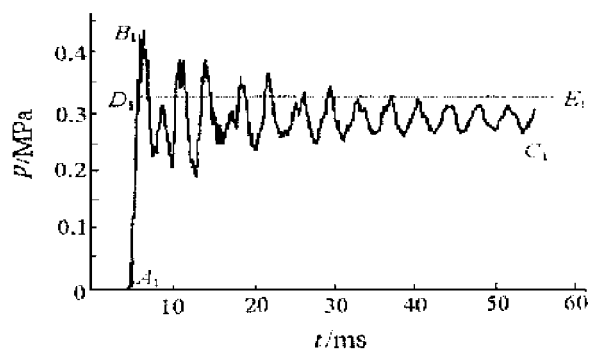


图 2 模拟冲击波压缩段的压缩波

Fig.2 Recompression wave simulating the recompression phase of shock wave

注射麻醉;大鼠用同样浓度的戊巴比妥钠液进行腹腔内注射麻醉。

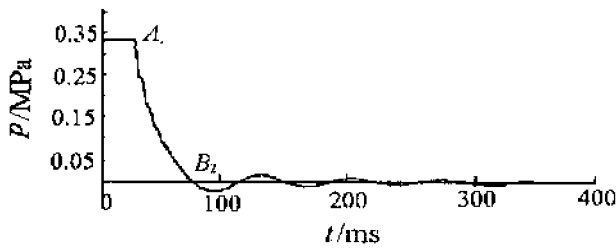


图 3 模拟冲击波减压段的减压波  
Fig.3 Decompression wave of simulating the decompression phase of shock wave

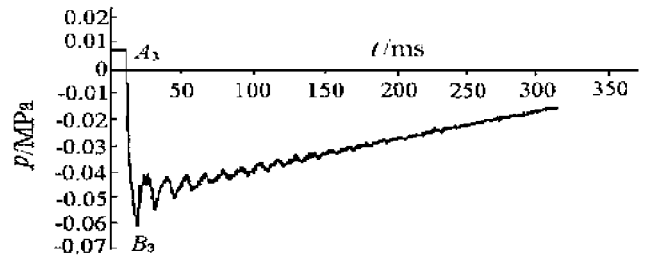


图 4 模拟冲击波负压段的负压波  
Fig.4 Underpressure wave simulating the underpressure phase of shock wave

### 2.3 实验方法

**压缩波实验:**将动物布放于低压舱中,注入适量的氧气;向高压舱灌充高压空气,至压力峰值后,使膜片爆裂,高压舱内的气体迅速向低压舱运动,引起低压舱内压力突变;停留一分钟,按 0.037MPa/min 的速率缓慢减压直至常压。

**减压波实验:**将动物置于高压舱中,注入适量的氧气;给高压舱按 0.07MPa/min 的速率缓慢升压,至预定的减压初压;膜片爆裂,高压舱内的气体向低压舱运动,在高压舱内形成减压波。

**负压波实验:**将实验动物布放于高压舱内(常压环境),真空泵抽吸低压舱内的空气,在低压舱内形成适度的低真空环境;膜片爆裂,高压舱内的常压气体迅速向处于真空状态的低压舱运动,在高压舱内形成负压波。

### 2.4 病理观察

动物致伤后,观察其存活情况,伤后约半小时内解剖动物。夹闭气管,取出肺脏,观察病变。取出血区与未出血区交界部位组织,常规制片,HE 染色,光镜观察、照像。根据本实验室常用的评估标准<sup>[3]</sup>,给出肺伤情的参考评分(Injury Score—IS)。其方法是:将无伤、轻伤、中度伤、重度伤、极重度伤分别记为 0, 1, 2, 3, 4 分。

### 2.5 统计学分析

所有数据以平均值±标准差表示,采用 t 检验和单因素相关分析进行统计学处理。

## 3 结 果

### 3.1 家兔和大鼠肺冲击伤模拟实验结果

我们以前所进行的家兔和大鼠肺冲击伤模拟实验部分结果<sup>[2,4]</sup>见表 2。

表 2 冲击波对肺的致伤效应

Table 2 Lung injury effect by shock wave

组别	种 类	数 量	超压峰值 /MPa	升压时间 /ms	减压时间 /ms	负压峰值 /kPa	下降时间 /ms	IS
S <sub>1</sub>	鼠	24	0.32	2.0	48	18	17	2.0
S <sub>2</sub>	兔	27	0.43±0.02	1.9±0.2	64±1.3	21±4.2	19±2.4	2.7±0.7

### 3.2 压缩波对肺的致伤效应

表3表示压缩波对动物肺的致伤效应,其中,升压幅度= $p_{B_1} - p_{A_1}$ ;升压时间= $t_{B_1} - t_{A_1}$ ;参考时间指由常压( $p_{A_1}$ )升至 $p = 0.32\text{MPa}$ 的时间,引入参考时间是为了与以往研究结果比较(见图2)。由表3可知:在本实验条件下,压缩波(图2)对家兔和大鼠肺并未造成明显的损伤。从大体解剖结果来看,仅有R<sub>1</sub>组第2例动物(大鼠)右肺下叶下缘有0.2cm×0.2cm斑状出血,其余未见明显损伤。光镜下大多数肺基本正常,仅见个别肺组织出现肺泡壁轻度充血、肺泡腔内有少许渗液。

表3 压缩波对肺的致伤效应

Table 3 Lung injury effect by the recompression wave

组别	种类	数量	升压幅度/MPa	升压时间/ms	参考时间/ms	IS
R <sub>1</sub>	鼠	10	0.41±0.03	2.43±0.39	1.3±0.10	0.1±0.3
R <sub>2</sub>	鼠	10	0.40±0.02	2.80±0.32	1.9±0.26	0
R <sub>3</sub>	兔	6	0.39±0.03	4.90±0.30	4.1±0.23	0

### 3.3 减压波对肺的致伤效应

减压波对肺的致伤效应见表4,其中减压幅度= $p_{A_2} - p_{B_2}$ ;减压时间= $t_{B_2} - t_{A_2}$ (见图3)。由表4可见,减压波根据减压幅度和减压时间的不同引起由轻伤到极重度伤等不同程度的肺损伤,减压幅度越大,减压时间越短,伤情就越重( $r = -0.8245, P < 0.20$ ,对D<sub>1</sub>~D<sub>4</sub>组)<sup>[2,3]</sup>。

表4 减压波对肺的致伤效应

Table 4 Lung injury effect by the decompression wave

组别	种类(n=6)	减压幅度/MPa	减压时间/ms	IS
D <sub>1</sub>	兔	0.32±0.03	8±0.10	4.0±0.0
D <sub>2</sub>	兔	0.32±0.02	17±1.27	2.0±0.6
D <sub>3</sub>	兔	0.32±0.01	30±2.10	0.6±0.7
D <sub>4</sub>	兔	0.32±0.02	53±2.60	0±0.0
D <sub>5</sub>	兔	0.39±0.01	12±0.90	2.4±0.9
D <sub>6</sub>	兔	0.41±0.01	64±1.30	0±0.0

### 3.4 负压波对肺的致伤效应

表5列出负压波对肺的致伤效应。其中,下降时间= $t_{B_3} - t_{A_3}$ (见图4);U<sub>4</sub>组数据引自文献[5]。由表5可知,负压波对肺具有一定的致伤能力。

U<sub>1</sub>、U<sub>2</sub>、U<sub>3</sub>组:大体观察,少数动物肺有散在性点状出血、表面湿润,其他未见到明显的病变;光镜下见肺泡壁充血,未见其他异常改变。

U<sub>4</sub>组:肺的主要病理改变为不同程度的充血、出血和肺水肿<sup>[5]</sup>。

表5 负压波对肺的致伤效应

Table 5 Lung injury effect by the underpressure wave

组别	种类(n=6)	负压峰值/kPa	下降时间/ms	IS
U <sub>1</sub>	兔	-25±3.1	16±1.4	0
U <sub>2</sub>	兔	-61.1±3.0	6.7±1.1	0.9±0.35
U <sub>3</sub>	兔	-55.5±2.0	30±2.0	0
U <sub>4</sub>	兔	-87.8±2.4	7.0±2.1	2

### 3.5 压缩波、减压波、负压波的波形分析

压缩波(图 2):压力突变至压力峰值后,出现短暂的、小幅度的压力波动,接着稳定在一个稳态压力上。压力突变过程与冲击波压缩段较为相似,且缓慢减压过程不造成明显的肺损伤<sup>[3]</sup>。

减压波(图 3):缓慢升压过程不造成明显的肺损伤<sup>[3]</sup>,减压过程与冲击波减压段较为相似。

负压波(图 4):较之冲击波负压段,下降过程相似,恢复到常压的时间偏长,但负压致伤作用主要发生在下降过程,负压波恢复到常压的时间长短对负压波的致伤效应无明显的影响。

因此,可用压缩波、减压波、负压波对肺的致伤效应来分别模拟冲击波三个时段对肺的致伤效应。

### 3.6 冲击波传播的三个时段在肺冲击伤中的作用

比较和分析表 2 中的冲击波及模拟该冲击波三个时段的压缩波、减压波、负压波对兔或鼠的肺损伤特点,发现:

(1)在压缩作用接近的条件下(升压幅度=0.32MPa,升压时间 $\leq 2\text{ms}$ ),压缩波( $R_1, R_2$ 组)未引起明显的肺损伤,而冲击波( $S_1$ 组)造成中度肺损伤(提示:冲击波对肺的损伤可能主要发生在减压段);

(2)在减压作用接近的条件下(减压幅度 $\approx 0.42\text{MPa}$ ,减压时间 $\approx 64\text{ms}$ ),冲击波( $S_2$ 组)的伤情评分比减压波( $D_6$ 组)的伤情评分要高出 2 分以上(提示:尽管冲击波压缩段可能不直接造成明显的肺损伤,但却十分显著地影响着减压段的致伤效应)。

## 4 结 论

(1)在本实验条件下,模拟冲击波压缩段的压缩波不直接造成明显的肺损伤;模拟冲击波减压段的减压波根据减压幅度和减压时间的不同可引起由轻伤到极重度伤等不同程度的肺损伤,减压幅度越大,减压时间缩短,伤情就越重;模拟冲击波负压段的负压波对肺具有一定的致伤能力。

(2)冲击波对肺的损伤可能主要发生在减压段。

(3)尽管冲击波压缩段可能不直接造成明显的肺损伤,但却十分显著地影响着减压段的致伤效应。

### 参考文献:

- [1] 王正国.冲击伤[M].北京:人民军医出版社,1983.
- [2] 陈海斌.过牵效应发生机制的实验研究与力学分析[R].重庆:第三军医大学野战外科研究所,1997.
- [3] Chen Haibin, Wang Zhengguo, YE Zhiyi. Rabbit Lung Injury by Explosive Decompression[J]. Chinese Journal of Traumatology (English Edition), 2000, 2(2): 81—84.
- [4] 金榕兵,朱佩芳,杨志焕,等.烧伤、冲击伤和烧冲复合伤对肺微血管内皮细胞损伤的比较[J].中华创伤杂志,1996,12(6):366—368.
- [5] 张均奎,王正国,冷华光,等.冲击波负压与肺损伤[J].爆炸与冲击,1994,14(1):84—87.

## Injury of Animal Lungs in the Experiments to Simulate the Three Phases of Shock Wave Propagation

CHEN Hai-bin, WANG Zheng-guo, YANG Zhi-huan, LIU Bao-song,  
LI Xiao-yan, NING Xin, WENG Ge-wen, SHI Lin  
(*Research Institution of Surgery, Daping Hospital,  
Third Military Medical University, Chongqing 400042, China*)

**Abstract:** The lung injury effects of the three phases of shock wave were correspondingly simulated by those of the various pressure waves generated by our designed equipment, and a total of 60 rabbits and 20 rats was used to the related simulation experiments. The experimental results show that the lung blast injury probably occur primarily during the decompression phase of shock wave, and the recompression phase of shock wave probably do not cause obvious lung injury, but significantly influence lung injury effects of the continuing decompression phase of shock wave.

**Key words:** shock wave; lung; injury