

生物激波管及动物耐受性的实验研究

冷华光 王正国 杨志焕 李晓炎

(第三军医大学野战外科研究所 重庆市 630042)

俞鸿儒 谷笏华 李仲发 李振华

(中国科学院力学研究所 北京 100080)

摘要 在冲击伤研究中,必须针对两种试验方式分别对致伤机理、耐受性和机体瞬时动力学响应等进行研究。只有这样才能得到近真实的研究结果。文中介绍了能够模拟爆炸波波形成因素和满足动物冲击伤实验研究物理参数要求的BST-I型生物激波管。它是国内第一台用于生物实验的激波管。文中有应用该管开口和端板的两种实验方式,选用51只成年雄性杂种狗作耐受性实验观察,对实验结果作了分析。

关键词 冲击伤 激波管 耐受性

第一次世界大战以来,常规炸弹和炮弹的装药量有较大的增加,特别是第二次世界大战末期核武器的问世并用于军事后,冲击伤研究受到国内外极大的注意和重视^[1]。开初,人们主要应核试验现场和化爆方式进行研究。此方法的优点是符合真实情况,但也存在环境条件恶劣、人力物力耗费很大,物理参数特别是体内响应物理参数的可控性和重复性差、精确可靠地测量物理参数的难度很大以及大量的病生仪器设备不便于运到现场等缺点。

在实验室进行冲击伤实验研究时,就不存在上述问题,但是,关键在于能否解决产生真实现场爆炸的波形因素和物理参数的爆炸模拟器(致伤源)。激波管是上世纪末出现的一种气动力实验设备,本世纪50年代后,已发展成为多学科多功能的气动力实验工具。在应用于冲击伤方面,早在1950年由美国洛杉矶加州大学医学院(The medical school, university of california at losangeles)的Cassen等应用 $\phi 10.16\text{cm}$ 内径的等截面激波管,对小鼠的肺冲击伤病理改变、动压抛掷和防护效果进行过实验研究^[2~5]。60年代期间,美国原子防护管理局(Defence Atomic Support Agency, DASA)的Richmind, Clare, Damon, Bago等应用多种组合型激波管作为致伤源,对数千只大小不同的动物进行过深入的实验研究,取得了以物理参数与动物死亡率为主的大量的研究成果^[6~9]。但是,所用的这些激波管的波形因素与真实爆炸波相差较大。

1987年,我所与中国科学院力学所共同研制成功的BST-I型生物激波管,不但能产生近真实爆炸波的波形因素和物理参数,而且还能造成大动物轻、中、重、极重度的肺冲击伤直至现场死亡的伤情。基本满足了模拟常规爆炸武器、化爆和核武器爆炸条件下,对动

物冲击伤的实验研究要求。

1 基本结构和工作原理

1.1 设备的基本结构

设备的基本结构如图1所示,为扩张形激波管,外形总长39.34m。其中:高压段(驱动段)内径0.346m,长度2.44m;夹膜段采用双夹膜机构内径0.346m,长度0.9m;扩张段内径从0.346m扩大到1.0m,长度1m;过渡段内径1.0m,长度10m;试验段内径1.0m,长度14m;消波段内径1.0m,长度11m,其管体表面打孔面积为总面积的20%左右。高压段,夹膜机和消波段皆为油压推动操作系统。驱动源为压缩空气,首先由空气压缩机把高压空气注入1m³的高压储气罐中,工作压力为20.7MPa。

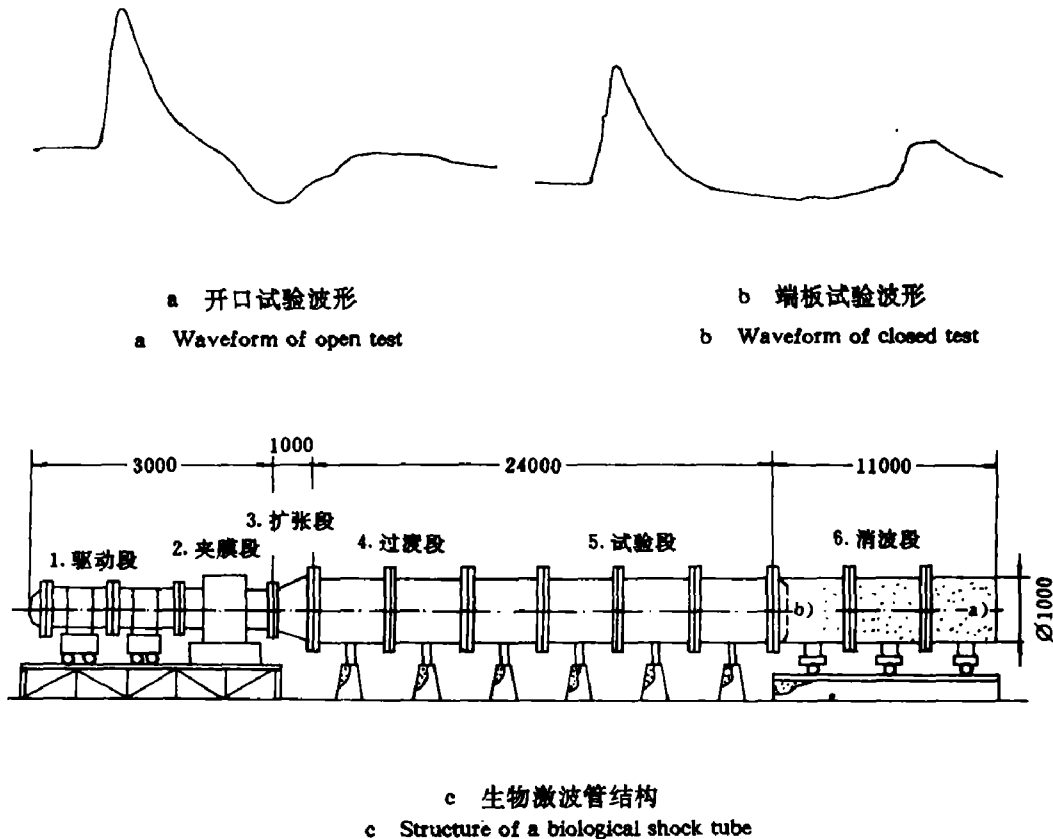


图1 生物激波管结构及波形因素

Fig. 1 The structure and waveform factor of a biological shock tube

1. Driving section, 2. Diaphragm section, 3. Divergent section,
4. Transition section, 5. Test section, 6. Dispersion section

1.2 实验工作原理

首先向高压段和夹膜段送入高压空气,使夹膜段中的压力为高压段实验预定压力1/2时,截断夹膜段进气并继续向高压段供气至实验预定压力后,采用夹膜段进气或放气方式破膜。破膜后高压气体通过扩张段面积(压力)变化,再经过较长的过渡段到实验段形成爆炸波(激波),应用调节高压段长度(容积)和压力大小(膜片厚度),即可完成在一定范

圈内任意调定实验段中的超压值,正向持续时间、负压值及持续时间。实验的全过程都是远离现场自动控制操作。

1.3 主要技术指标和实验能力

该设备能较真实地模拟爆炸波的波形因素。如图 1a 所示,它不但能产生快速上升前沿,有限可控超压幅值和可调超压持续时间的近理想爆炸波;而且还出现一定的负压幅值及比超压持续时间长的负压持续时间。因此,它是冲击伤致伤机理、生物耐受性、机体瞬时效应和动物实验结果的技术评价等实验研究近真实的理想致伤源。

1.3.1 主要技术指标

入射超压(开口)最小值为 9.81kPa,最大值为 246.4kPa;反射超压(端板)最大值为 620.3kPa;超压持续时间从 3.2ms 到 60ms 分档可调;负压值为 26~42kPa;负压持续时间为超压持续时间 1.5~2.5 倍左右。

1.3.2 实验研究能力

1. 对空中爆炸而言,在地面上将形成规则反射区和非规则(马赫)反射区,该设备能作为上述两个区域中冲击伤全部实验研究的致伤源。2. 小型爆炸与大中型化爆或核爆之间,主要存在超压持续时间差别。通常 1~500 吨的化爆超压持续时间约 10~200ms;而核爆则约 200ms 以上到几秒范围。根据 White, Richmond, Fletcher 等的实验研究结果表明:通常随着超压时间的延长,其 p_{50} (50%死亡率对应的超压值)有所降低,但超压持续时间超过一定时限,如小动物(小鼠、大鼠、豚鼠)大于 3ms;家兔大于 5ms;大动物(狗、山羊、绵羊)大于 30ms,其 p_{50} 值就不再出现明显变化^[10]。因此,该设备已满足各种爆炸条件下对大小动物冲击伤实验研究的要求。3. 该设备略做修改后,即可作为意外爆炸事故,防护工程或工事内和水中冲击伤实验研究的致伤源。

2 动物冲击伤效应实验研究

2.1 材料和方法

实验动物选用 51 只本地成年雄性杂种狗,体重为 $12.28 \pm 1.83\text{kg}$ 。致伤前采用 3%戊巴妥钠静脉麻醉,然后把动物四肢呈站立位固定在笼内,并以右侧朝向致伤源安装于实验段中。其中 43 只狗用于模拟暴露于规则反射区或马赫反射区靠近反射固壁(端板)状态致伤,其波形因素如图 1b 所示;而另外 8 只狗模拟暴露于马赫反射区即自由伤(开口)状态致伤,其波形因素如图 1a 所示。激波速度由 YL-I 型压电传感器与其配套的激波测速放大器 and YE3571 型多脉冲计时器测量。超压测量采用两种测压系统,603B 型压电晶体传感器和 5007 型电荷放大器(KISTLER);8510B-100 和 8514-50 压阻式传感器及 4423PR 信号调制器(ENDEVCO),它们的记录仪器 DSS 6521 型和 DSS 5040 型数字存储示波器(KIKUSUI)及 3086 型 X-Y 记录仪(YHE)。动压则是根据实测入射超压利用公式计算得到^[11]。

2.2 压力值及持续时间与动物肺伤情关系

模拟空中爆炸两个特征区域中的动物肺冲击伤实验结果详见表 1,2。其伤情的评定是依据本实验室制定的标准,从大体解剖观察肺出血面积和肺水肿(肺体指数)程度,如图 2 所示。肺冲击伤分为轻(+)、中(++)、重(+++)、极重度(++++)四级直至现场死亡,详见表 3。

表1 规则反射区压力值及持续时间与伤情关系

Table 1 The relationship between degree of the lung injury and the peak value, duration of overpressure in the normal reflective area

序号	动物数	超压值 ¹⁾ /(kPa)		超压持续时间 /(ms)	肺伤情 判断	肺体指数 (%)	死亡率 (%)
		入射	反射				
1	14	100.5±12.5	271.8±48.4	47.0±3.9	+	1.04±0.37	—
2	13	130.0±27.2	344.7±70.3	53.5±6.0	++	1.02±0.17	—
3	5	155.9±10.8	411.1±10.0	59.4±1.5	+++	1.95±0.80	—
4	11	148.3±18.5	429.3±11.5	56.8±3.0	+++	2.62±0.69	36

1)M±SD

表2 马赫反射区压力值及持续时间与伤情关系

Table 2 The relationship between degree of the lung injury and the peak value, duration of overpressure in Mach reflective area

序号	自由场入射 超压/(kPa)	动物 数	安放动物后 超压/(kPa)	持续时间 /(ms)	换算动压 /(kPa)	肺伤情 判断	肺体指数 (%)	死亡率 (%)
1	140.7±2.1	2	148.9±9.8%	43.3±34%	59.8	+	0.86±13%	—
2	169.5±3.2	2	217.1±2.6%	47.4±0	83.9	++	0.99±7.1%	—
3	179.2±2.0	2	216.8±7.6%	42.9±51%	92.7	+++	2.16±86%	—
4	202.7±14.7	2	214.8±23%	60.0±11%	115.5	+++	1.48±0.7%	100

注:表中误差为相对误差,即M±Y%。

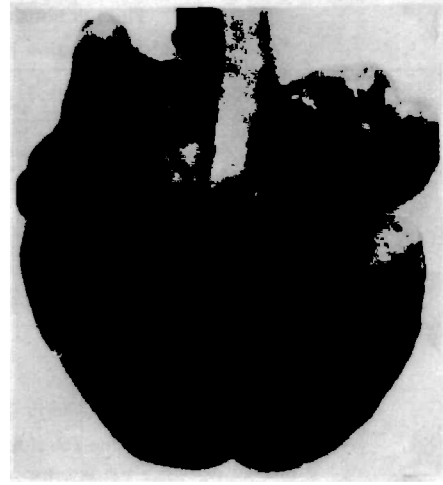
表3 肺冲击伤的分级

Table 3 The degree of the lung blast injury

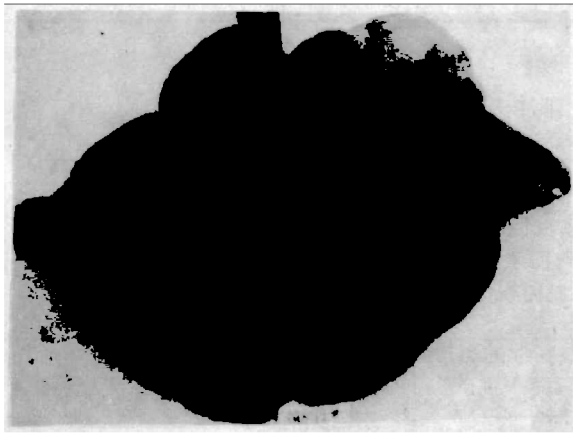
肺损伤级别	记号	肺出血	水肿	破裂
轻度	+	一叶或数叶有散在性的出血面积为0.25cm ² ;而个别(指两个以上)的出血面积为2.25cm ²	仅在镜下方能确定有轻度水肿	
中度	++	一叶或数叶有散在性的出血面积为2.25cm ² ;而个别(两个以上)的出血面积为9.0cm ²	两叶以上的肺表面较膨满,切面见有少许泡沫液	
重度	+++	一叶或数叶多个(三个以上)出血面积为9.0cm ² ;而个别为弥漫性大片状出血	通常有三叶以上的肺表面明显膨满,发亮,主支气管腔内积存有血泡沫液	个别浅层裂口或胸腔内有少量积血
极重度	++++	出血呈两侧性,四叶以上为弥漫性大片状出血	两侧表面显著膨满,发亮,不萎陷,较多的泡沫液积存于气管腔,引起严重窒息症状	多发性浅层裂口,个别严重哆开之裂口



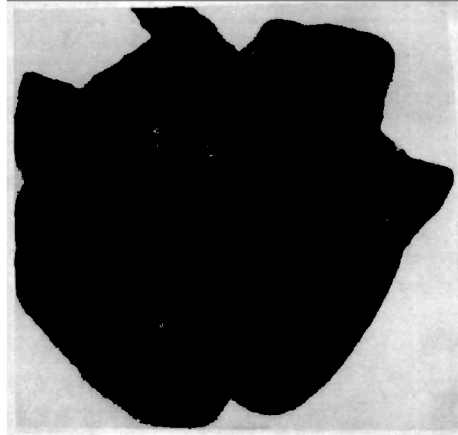
a) 轻度(+)
a) Slight



b) 中度(++)
b) Moderate



c) 重度(+++)
c) Severe



d) 极重度(++++)
d) Very severe

图2 肺冲击伤的病理形态

Fig. 2 Pathomorphology of the lung blast injury

2.3 动物伤情分布规律

实验所用的 51 只狗皆出现不同程度的冲击伤, 详见表 4。主要是听器和胸腹腔中的脏器损伤。除听器和肺是 100% 的损伤之外, 在规则反射区中动物损伤分布规律为心、膀胱、肾、肠道、肝、脾、胃等; 而马赫反射区中则为心、肝、肾、膀胱、脾、肠道、胃等。听器病变为鼓膜破裂、鼓室积血和听小骨骨折; 肺病变为出血、渗血、水肿和萎陷; 其它脏器病变则为包膜下或内膜出血、瘀血、破裂和血肿等。

表4 实验动物伤情分布规律
Table 4 The distributive law of the injury in test animal

组别	动物数	听器	肺	心	膀胱	胃	肠道	肝	脾	肾
规则反射区(端板)	43	43	43	30	23	5	15	10	10	21
致伤率(%)		100	100	70	53	12	35	23	23	49
马赫反射区(开口)	8	8	8	6	5	2	3	6	4	6
致伤率(%)		100	100	75	63	25	38	75	50	75
合计	51	51	51	36	28	7	18	16	14	27
总致伤率(%)		100	100	71	55	14	35	31	27	53

3 动物实验结果分析

1. 在端板实验中,狗肺冲击伤是随着入射和反射超压的增大而显著加重,但是极重度(卅)比重度(卅)伤组的超压值约大5%,两者差别不大。本文实验结果与Phillips等对绵羊的实验结果相近。详见表5,这可能与都采用大动物有关^[15]。

2. 在开口实验中,狗肺冲击伤是随入射超压和动压的增大而加重;而在安放动物处实测超压值出现中度(卅)略大于重度(卅)和极重度(卅)组,其相对误差较大,这可能与动物体表面积差异较大和阻塞管流的截面积大小有关。

3. 当在两种实验状态中都采用同一入射超压值 $148.3 \pm 18.5 \text{ kPa}$, 致伤条件时,造成有端板实验状态中由于端板形成反射面,使入射超压增大2.89倍,故狗肺冲击伤为极重度(卅)并有36%的狗现场死亡;而开口实验状态中由于入射超压值不变化,故狗只出现轻度(+)肺冲击伤。表明端板反射大大地加重了动物肺冲击伤的伤情。

4. 狗冲击伤的分布规律,除听器和肺为100%损伤之外,开口实验状态中的动物腹腔内脏器的损伤率比端板实验状态有较大的增加,其伤情也相应加重,并且先后次序也有较大的改变。表明开口实验状态主要是动压荷载使动物致伤,而端板实验状态则为反射超压使动物致伤。

5. 采用肺体指数对肺冲击伤分级时,中度(卅)以下者不显著;而重度(卅)以上者很显著,这说明重度肺损伤的肺水肿严重。但是,极重度肺冲击伤现场死亡的动物,其肺体指数出现明显下降趋势;可能与现场死亡动物肺的出血水肿因伤后时间短暂有关。

表5 反射超压值及持续时间与伤情关系
Table 5 The relationship between degree of the lung injury and the peak value, duration of reflective overpressure

序号	动物数	反射超压值 /(kPa)	持续时间 (%)	肺体指数 (%)	肺伤情评定 ¹⁾	死亡率 (%)
1	6	113 ± 5	14.3 ± 0.2	0.94 ± 0.08	阈值或+	
2	9	232 ± 12	15.6 ± 0.7	1.22 ± 0.06	+~卅	
3	8	299 ± 26	15.2 ± 0.7	1.75 ± 0.57	卅~卅	
4	6	427 ± 20	13.6 ± 0.7	2.51 ± 0.39	卅~卅	33

1)肺伤情评定是作者参照有关资料评定的。

6. 在端板实验状态的 11 例肺冲击伤为极重度的动物, 只有 4 例现场死亡, 其中 1 例死于冠状动脉内气栓, 其它死因可能是气管内积有大量泡沫血性液体造成窒息或者迷走神经受损及应急反应的结果; 而开口实验状态两例现场死亡的动物, 皆为肝脾破裂造成大出血所致。

4 结 论

1. 本文介绍的 BST- I 型生物激波管, 它不但能模拟空气冲击波的各种波形因素, 同时也能满足动物冲击伤实验研究中对各种物理参数的要求。经过近千只大小不同种属动物的实验结果证明, 在国内外还未见有这样性能好和实验能力强的同类设备。

2. 在相同设备致伤条件下, 模拟空中爆炸的两个特征区域, 造成动物肺冲击伤不同的伤情特点和全身伤情分布规律和研究结果。国内外未见同类报导。

3. 本文的研究结果与 Phillips 等对绵羊处于端板状态的实验研究具有较好的一致性, 从而证实本文中的物理参数测量是可靠的。应用肺出血面积和肺体指数(水肿)来对肺冲击伤分级是可靠的。

4. 动物肺冲击伤即使达到极重度也不一定会现场死亡, 因此, 除极少数因冠状动脉气栓引起现场死亡之外, 应加强其它死因的研究。分析压力值与死亡率之间关系的不确定性的原因; 对采用病理特征对冲击伤分级与临床分期的相关性和一致性进行更深入的研究。

参 考 文 献

- 1 王正国. 冲击伤. 北京: 人民军医出版社, 1983, 1~59, 146~182
- 2 Cassen B, et al. Initial Studies of the Effect of Laboratory Produced Air Blast on Animals. *J Aviation Med*, 1950, 21(2), 38~47
- 3 Cassen B, et al. High Speed Photography of the Motion of Mice Subjected to Laboratory Produced Air Blast. *J Aviation Med*, 1952, 23(4), 104~114
- 4 Cassen B, et al. Lung Hemorrhage Produced in Heparinized Mice by Air Blast. *J Aviation Med*, 1952, 23(4), 115~119
- 5 Cassen B, et al. Some Effects of Air Blast on Mechanically Constrained Mice. *J Aviation Med*. 1952, 23(4), 120~129
- 6 Richmond D R, et al. DASA-AEC-Lovelace Foundation Blast-simulation Facility. DASA-1853 1966
- 7 Damon E G, et al. The Effects of Ambient Pressure on Tolerance of Mammals to Air Blast. DASA-1852, 1966
- 8 Clare V R, et al. The Effects of Shock Tube. DASA-1312, 1962
- 9 Bogo V, et al. The Effects of Airblast on Discriminated Avoidance Behavior in Rhesus Monkeys. DASA-2659, 1971
- 10 Richmond D R, et al. A Tentative Estimation of MAN's Tolerance to Overpressures from Air Blast. AD-293875, 1962
- 11 Glasstone S, Dolan P J. The Effects of Nuclear Weapons. US. Department of Defense and US. Department of Energy. 1977, 127~153
- 12 59171 部队. 科研资料汇编(冲击伤部分). 1976, 73~75

- 13 王正国,等. 冲击伤的病理学. 解放军医学杂志, 1990, 12(4): 217
- 14 Chiffelle TL, et al. The Biologic and Pathologic Effects of Blast Injury. DASA-1778, 1966
- 15 Phillips YY, et al. Cloth Ballistic Vest Alters Response to Blast. J Trauma, 1988, 28(1) suppl: 149

A BIOLOGICAL SHOCK TUBE AND AN EXPERIMENTAL STUDY ON ANIMAL TOLERANCE TO BLAST WAVE

Leng Huaguang Wang Zhengguo Yang Zhihuan Li Xiaoyan

(*Research Institute of Surgery, Third Military Medical College, Chongqing, 630042*)

Yu Hongru Gu Jiahua Li Zhongfa Li Zhenghua

(*Institute of Mechanics, the Academy of Sciences of China, Beijing, 100080*)

ABSTRACT The present paper introduces a biological shock tube which can simulate waveform factors as blast wave and satisfy the needs for the experimental study of animal blast injury. It is the first shock tube for biological study in China.

The paper presents experimental results of tolerance of 51 male mongrel dogs in the tube with two end conditions opened or closed. The results may give some reference values for studies on prevention, diagnosis and treatment of blast injuries. The results indicate that it is necessary for separate studies on injury mechanism, tolerance and dynamic response in the two experimental conditions. Only in this way will the results be comparable in the sense of reality.

KEY WORDS blast wave, biological shock tube, animals' tolerance