

系列生物激波管的研制与应用

王正国 孙立英 杨志焕 冷华光

(野战外科研究所, 重庆 630042)

俞鸿儒 谷家华 李振华 李仲发

(中国科学院力学研究所 100080)

摘要 本文介绍了国内唯一的大、中、小系列生物激波管的研制和应用。大型总长39.0m, 试验段内径1m, 驱动段最大超压可达10.3MPa, 利用其末端挡板反射稀疏波的运行而可产生负压。中型总长34.5m, 驱动段最大超压为22MPa, 试验段为组合式, 内径77~600mm, 可作超压、爆炸性减压和水下爆炸波等试验。小型总长0.5m, 设计承压为68.6MPa。三种激波管均用双夹膜将驱动段与试验段分开。动物实验表明, 此套装置可使大、小动物产生不同程度的全身或局部冲击伤, 可满足冲击伤实验研究的需要。

关键词 激波 生物激波管 动物实验

生物激波管是指专门或主要用于生物实验的激波管。此种装置所产生的激波, 可模拟核爆炸或炸药爆炸时产生的爆炸波。动物置于激波管内或管口处, 可发生不同程度的冲击伤, 从而为研究人体冲击伤的发生机理和防治提供较理想的动物模型^[1~6]。

作者等在1985~1988年间, 先后研制成国内唯一用于冲击伤研究的大、中、小(微)系列生物激波管。以后的大量动物实验表明, 此套装置可使羊、狗、兔、豚鼠、大鼠等动物造成从轻伤至现场死亡的不同程度损伤, 并可根据需要造成眼球等局部损伤, 因而能较好地满足冲击伤实验研究的需要。现将有关研制和应用情况叙述如下。

1 系列生物激波管的研制和设计原理

1.1 大型生物激波管(BST-1)(图1)

激波管全长39.0m, 由驱动段、扩张段、过渡段、试验段、消波段及附属设备空气压缩机、高压气罐等组成, 采用双夹膜结构。驱动段长1.59m, 夹膜机段长1.41m, 内径均为0.348m, 扩张段长1m, 内径自0.348m至1m, 过渡段和试验段长24.0m, 消波段长11m, 内径均为1m, 驱动段最大超压为10.3kPa。实测结果显示, 开口时, 试验段超压达0.219MPa, 正压作用时间为32.7ms, 负压为0.09MPa; 试验段末端封闭时, 该段超压可达0.63MPa, 正压作用时间24.5ms, 因而可模拟几十公斤至6000kg TNT 炸药空爆时的爆炸波。

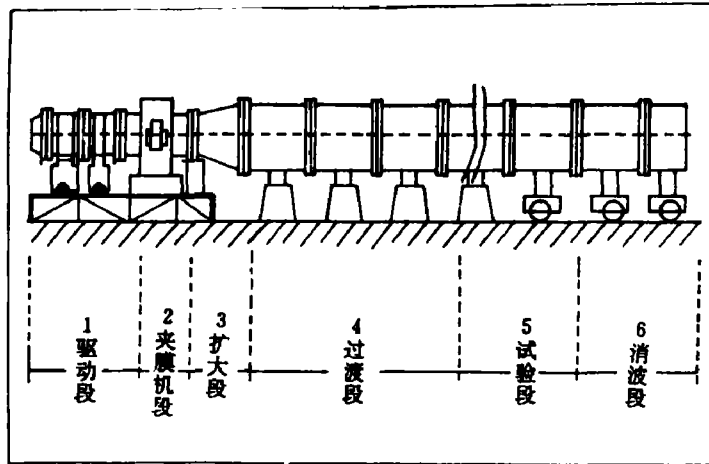


图 1 BST-I 型结构示意图

Fig. 1 Schematic of BST-I model geometry

1. Driving section, 2. Section for clamping diaphragm, 3. Conical section,
4. Transition section, 5. Test section, 6. Wave-elimination section

设计原理:利用驱动段末端挡板的反射稀疏波,使稀疏波和激波在管道中同向运行。当稀疏波赶上激波时,激波压力迅速下降。稀疏波尾压力低于大气压时,则可得到负压相。据此,可模拟出既有正压又有负压的爆炸波。此外,利用活动挡板调节驱动段的长度,或改变驱动段内压力,则可调节试验段的超压和负压峰值以及相应的作用时间,从而达到实验参数可控的目的。采用压缩空气(而不是炸药)驱动,可避免生物燃烧或中毒窒息。用纯铝作膜片,采用双膜阶梯充压式破膜法,可精确控制破膜压力和避免碎膜造成动物破片伤。试验段末端设计有活动挡板,可以模拟开阔地或有限空间内爆炸的两种致伤条件。

1.2 中型生物激波管(BST-II)(图 2)

激波管总长 34.5m,驱动段长 0.5m~8.0m 可调,最大超压 22MPa,内径 77mm。试验

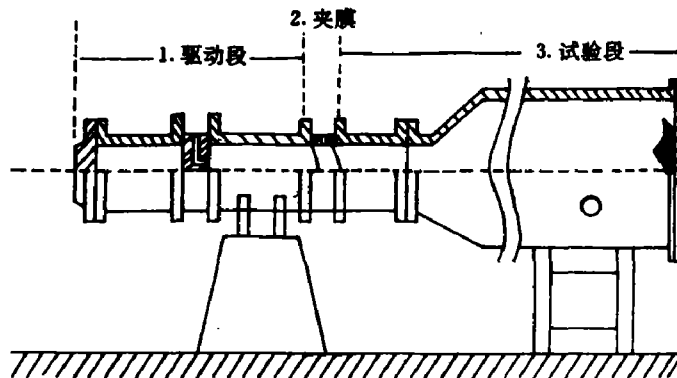


图 2A BST-II 型结构示意图

Fig. 2A Schematic of BST-II model geometry

1. Driving section 2. Clamped diaphragm 3. Test section

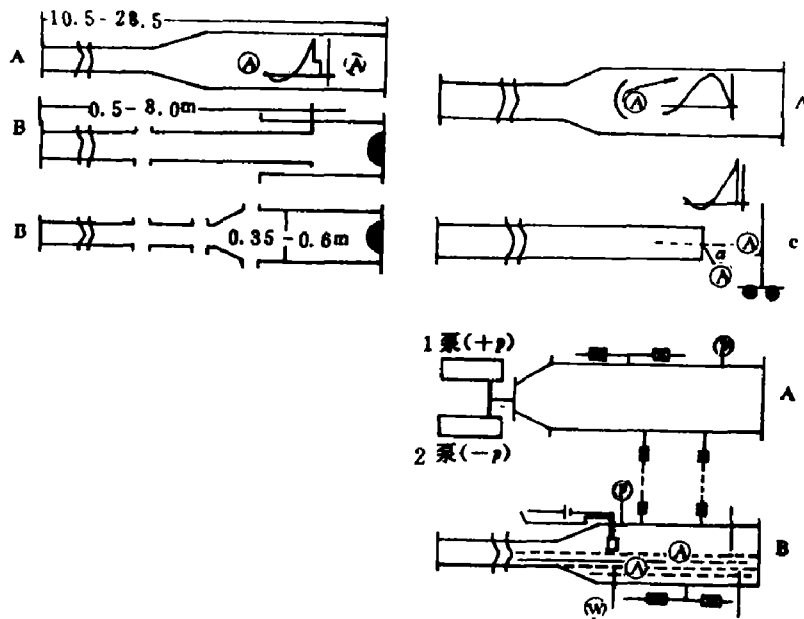


图 2B BST- I 型不同组合的试验段

Fig. 2B Test sections with different combination of the BST- I model

1. Pump(+p) 2. Pump(-p)

段有五种基本装配型,内径为 77mm、100mm、200mm、350mm 和 600mm,可分别模拟高原环境的爆炸波,水下爆炸波,爆炸性减压、高速气流撞击效应等,超压值和正压作用时间分别为 2.52~650kPa 和 0.2~2000ms,能以 $\pm 1\text{dB}$ 和 $1\pm 1\text{ms}$ 为步长改变致伤条件。

设计原理:驱动段内的稀疏波可赶上激波,这是模拟万吨级核爆炸波正压作用时间的前提条件。驱动段采用串接组合方式,可得到 12 种不同长度,从而提高模拟爆炸波的能力和范围。利用激波在截面变化处的锥形段和末端挡板间的距离,可得到不同的入射波与反射波间的时间差,模拟人员距某一反射壁不同距离时受两次爆炸波作用的条件。此设备为密封式设计,A 舱和 B 舱上装有负压,正压调控器和供水供气系统,可在破膜前将舱内压力维持在低气压水平以模拟高原作战或高空气行时的爆炸条件。若维持在高压环境或采用充水加压方法,则可模拟潜水员水下作业时遇到爆炸波作用的条件。致伤后,利用 A 舱或 B 舱可迅速将动物舱内恢复到致伤前水平,以提高模拟的真实性。驱动段末端为半球形盲端,可使稀疏波不能同步反射,从而在较短的设备上得到作用时间长达 100ms 的爆炸波波形。若置于试验段末端,则可研究聚焦激波的作用,并提高致伤强度。

1.3 小(微)型激波管(BST- II)(图 3)

激波管全长 0.5m,设计承压 68.6MPa,试验段有 9 个截面(内径 2~10mm),超压峰值和正压作用时间分别为 26.8~477.0kPa 和 0.062~16.8ms。该装置用于产生点源性爆炸波,允许定距离、定面积和定位的爆炸波暴露。

设计原理:利用激波传播至管口后在空气中迅速稀疏而获得爆炸波。为提高生成不同强度爆炸波的能力,可采用钢质充填块改变驱动段容积或压力。通过调节管口与布放动物间的距离,以改变动物所受的爆炸波强度。通过防护罩上开孔直径,可以作定部位、定面积

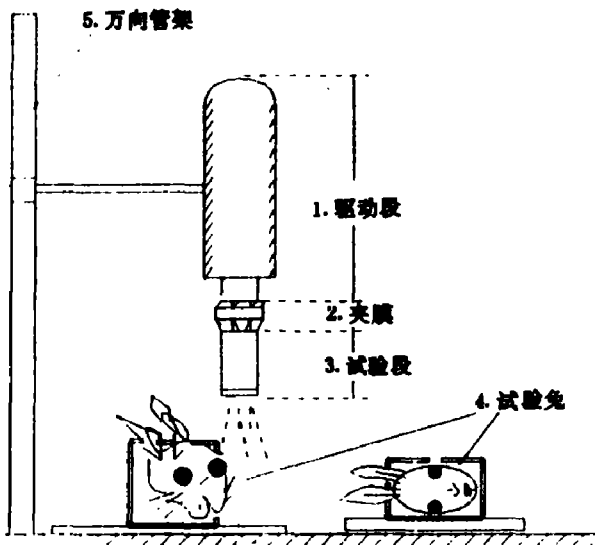


图3 BST-II型结构示意图

Fig. 3 Schematic of the BST-II model geometry

1. Universal-tube support,
2. Driving section, 3. Clamped Diaphragm,
4. Test section, 5. Test rabbit

的局部冲击伤研究。设计了万向管架，可改变激波方向，以便于实验操作。该设备允许使用压力、加速度和位移等传感器，以记录爆炸波作用瞬间生物体内的动态响应。

2 生物实验

系列生物激波管建成以来，先后应用 1459 只动物(大鼠 757 只,豚鼠 105 只,家兔 335 只,狗 240 只,羊 22 只)进行全身或局部(眼、耳、头、胸、腹)冲击伤实验,证明此套设备可造成自听器官轻度伤至立即死亡的各种程度的冲击伤,挡板闭合时可作超压致伤实验,开口时可作超压和动压共同致伤实验。现将部分动物实验资料报告如下。

2.1 大型激波管(BST-I)

用成年雄性杂种狗 52 只,体重 $12.3 \pm 1.8\text{kg}$,BST-I 型激波管致伤,测试参数及脏器损伤情况见表 1.2。52 只动物中,7 只于伤后 5 分钟内死亡,其中 4 只死于严重肺出血和水肿,2 只死于肝脾破裂引起的内出血,1 只死于冠状动脉气栓。

表1 冲击波超压值与伤情的关系

Table 1 Relationship between blast overpressure value and severity of injury

组别	超压峰值 /(kPa)	动物 /数	伤情发生例数			
			轻	中	重	极重
闭口	200.2~245.4	14	10	3	1	---
	298.0~322.2	10	4	6	---	---
	361.2~418.2	13	---	4	6	3
	388.4~399.3	6	---	---	---	6
	620.3	1	---	---	---	1
开口	141.6~156.2	2	2	---	---	---
	170.9~214.3	4	---	3	1	---
	190.4~239.2	2	---	---	1	1

注:冲击伤伤情分级按本实验制订的标准制定。

表 2、各脏器损伤发生频数

Table 2 The occurrence frequency of injury in various organs

组别	动物数	损伤例数							
		听器	肺	心	膀胱	肠管	肝	脾	胃
闭口	44	44	44	24	24	13	6	5	7
开口	8	8	8	7	5	3	4	4	1
合计	52	52	52	35	29	16	10	9	8
百分数		100	100	67	56	29	19	17	15

2.2 中型生物激波管(BST-Ⅱ)

用家兔 50 只,分为 5 组,每组 10 只,1、3 组动物用胸带环绕其胸廓,使冲击波作用后胸廓扩张受限,以达到减轻肺损伤的防护目的。2、4 组动物为致伤对照,5 组为正常对照。结果显示,用胸带包绕的 1、3 组动物,其肺出血面积明显小于无胸带包绕的 2、4 组动物($p < 0.05$)(表 3)。

表 3、胸带包绕对家兔肺出血的防护效果

Table 3 The protection effect of chest stripe wrapped on lung hemorrhage in rabbits

组别	家兔/数	体重/(kg)	肺出血面积/(mm ² /100g 体重)	肺体指数	肺水指数	死亡数
1. 防护	10	2.2±0.3	16±15	0.652±0.190	0.810±0.002	0
2. 致伤对照	10	2.2±0.4	101±71	0.544±0.102	0.767±0.005	0
3. 防护	10	2.5±0.6	19±18	0.588±0.297	0.824±0.003	0
4. 致伤对照	10	2.2±0.2	107±70	0.509±0.107	0.791±0.004	2
5. 正常对照	10	2.5±0.2	0	0.512±0.022	0.633±0.009	0

1、2 组和 3、4 组所受的超压峰值及作用时间分别为

262.5±11.4kPa、15.3±1.2ms 和 296.2±3.2kPa、12.5±0.8ms。

2.3 小(微)型激波管(BST-Ⅲ)

2.3.1 眼冲击伤实验

将 60 只家兔置于距管口 4cm 和 2cm 处,分别正向和侧向暴露兔眼,超压峰值分别为 477.0±42.4kPa 和 236.7±22.0kPa,正压作用时间分别为 8.2±0.3ms 和 0.062±0.023ms。致伤后伤眼有瞳孔缩小(占 97.5%)、眼压升高(占 80%),健侧眼分别为 22.5%和 35%,两眼差别显著($p < 0.05$)。病理检查见伤眼有角膜、晶体、视网膜及色素膜损伤,严重者可发生眼球破裂、视路断离,甚至眼球被击至体外。值得注意的是,有的伤眼 2 角膜和前房无明显改变,但却发生了晶体和视网膜损伤。

2.3.2 胸腹局部冲击伤实验

实验动物为 50 只大鼠,体重为 234±25g,平均分为 5 组,第 1 和第 3 组为胸部致伤组,第 2 和第 4 组为腹部致伤组,第 5 组为对照。第 1、2 组的暴露距离为 15mm,第 3、4 组

的暴露距离为 135mm, 结果表明, 胸部暴露时, 仅出现胸部损伤(肺出血), 腹部无脏器损伤, 而腹部暴露时, 胸腹部脏器均有损伤(表 4), 这可能是由于腹部受压时膈肌突然上顶所致。

表 4. 局部冲击波作用时大鼠胸腹腔脏器的损伤情况

Table 4 The occurrence of injury of thoracic and abdominal organs in rats under local blast exposure

组别	暴露部位	超压峰值 / (kPa)	正压作用时间 / (ms)	肺出血 / (mm ² /100g 体重)	肺重体重比	肺水指数	胃肠出血 / (mm ²)	肝肾破裂 / (%)	30 分钟内死亡率 / (%)
1	胸	231.9 ± 24.2	38.6 ± 10.4	483 ± 47*	0.98 ± 0.14	0.720 ± 0.065	0	0	100
2	腹	224.6 ± 28.5	35.4 ± 6.8	114 ± 42	0.81 ± 0.12	0.861 ± 0.042	8 ± 11	100	100
3	胸	173.7 ± 27.4	43.0 ± 8.7	29 ± 8	1.24 ± 0.07 ^Δ	0.902 ± 0.085	0	0	0
4	腹	186.3 ± 44.1	49.8 ± 12.7	12 ± 7	0.71 ± 0.11	0.981 ± 0.055	2 ± 3	0	0
5	对照	0	0	0	0.60 ± 0.17	0.619 ± 0.037	0	0	0

* 与其他组相比差别显著 ($p < 0.05$), Δ 与 4 组相比差别显著 ($p < 0.05$).

3 讨 论

为进行冲击伤的实验研究, 以往多用炸药爆炸法给动物致伤。此种方法虽接近真实情况, 但很难得到准确的测试数据, 也很难在现场对动物进行早期功能等检查, 伤情不够稳定, 重复性差, 而采用激波管致伤, 则能较好地克服上述缺点。

美国和瑞典^[1~3]曾于 50 年代研制了实验室用小型生物激波管, 内径 0.1m, 长 1m 至数米, 分为驱动段和试验段两部分, 中间用胶片隔开, 用此装置进行了压力值与小鼠死亡率关系等研究。

60 年代后, 美国 Richmond 等^[4~6]先后研制 5 种大型或中型的生物激波管, 并用此装置系统研究了不同压力峰值, 不同正压作用时间条件下, 不同动物的致伤或致死效应, 进而将其结果推论到人。

1987 年, 美国 Jaffin 等^[7]设计了一种微型激波发生器, 驱动段容积 150ml, 水压 10~25MPa, 用一片或数片 0.36mm 厚铝箔作膜片, 自然充气破膜。用此装置可作小动物实验。

作者等研制的激波管在前人工作的基础上又有所改进, 主要是: (1) 同一实验室内有大、中、小、三型, 基本上做到了系列化。(2) 由于设计原理新颖(如 BST-I 型利用驱动段末端挡板的反射稀疏波追赶激波, 当稀疏波尾压力低于大气压时, 则可得到负压波), 可得到典型的爆炸波波型。国外的生物激波管多不能产生典型的负压波, 因而模拟的程度较差。(3) 采用双夹膜结构, 可更好地调控压力。(4) BST-I 型为多功能组合式, 可分别模拟高原环境的爆炸波, 水下爆炸波, 爆炸性减压, 高速气流撞击效应等。(5) 由于装置配套, 故实验范围广, 既可造成大小动物(羊、狗、兔、鼠等)的全身损伤, 也可造成局部损伤, 既可造成超压伤, 也可造成超压和动压共同作用的损伤, 既可造成轻伤, 也可造成致死性损伤。

基于以上情况, 可以认为此套装置是先进的, 可以较好地满足冲击伤实验研究的需

要, 并使其达到更高的水平。

李晓炎、唐承功、马孝华、尹友国、赵敏、张均奎等同志参加了本项研究的部分工作特此致谢。

参 考 文 献

- 1 Cassen B, Curtis L, Kistler K. Initial studies of the effect of laboratory-produced air blast on animals. *J Aviat Med*, 1950, 21:38
- 2 Cassen B, Kalian P, Gass H. High speed photography of the motion of mice subjected to laboratory-produced air blast. *J Aviat Med*, 1953, 23:104
- 3 Celandier H, Clemenson C J. A study of the relationship between the duration of a shock wave and the severity of the blast injury produced by it. *Acta Physiol Scand*, 1955, 33:14
- 4 Richmond D R, Clare V R, Goldizen V C, et al. Biological effects of overpressure I A Shock tube utilized to produce sharp-rising overpressures of 400 milliseconds duration and its employment in biomedical experiments. *Aerosp Med*, 1961, 32:997
- 5 Richmond D R, Goldizen V C, Clare V R, et al. The biological response to overpressure. II Mortality in small animals exposed in a shock tube to sharp-rising overpressures of 3 to 4 msec duration. *Aerosp Med*, 1962, 33: 1
- 6 Richmond D R, Damon E G, Bowen I G, et al. Air blast studies with eight species of mammals, Defense Atomic Support Agency Report, DASA, 1966 1854;
- 7 Jaffin J H, McKinney L, Kinney R C, et al. A laboratory model for studying blast overpressure injury. *J Trauma*, 1987, 27(4):349

THE DESIGN PRODUCTION AND APPLICATION OF A SERIES OF BIO-SHOCK TUBES

Wang Zhengguo Sun Liying Yang Zhihuan Leng Huaguang
 (Research Institute of Surgery, the Third Military Medical College, Chongqing 630042)
 Yu Hongru Gu Jiahua Li Zhenghua Li Zhongfa
 (Institute of Mechanics, the Academy of Sciences of China, Beijing 100080)

ABSTRACT The design, production and application of a series of shock tubes for biological testing are presented in this paper. There are three types of our bio-shock tubes. The large one (BST-1) is 39 meters long. The inner diameter of its testing suction is 1 m, and the maximum overpressure in the driving section is 10.3 MPa. Based on transmitting of the reflecting rarefaction wave from the end plate the negative pressure wave can be formed. The medium one (BST-I) is 34.5 m long. The maximal pressure value of its driving section is 22 MPa. The testing section is of composed type. Its inner diameters are 77-600 mm. This tube can be used for the testing of overpressure, explosive decompression of even underwater explosion etc. The small one (BST-II) is 0.5 m long. The maximum endured overpressure is 68.6 MPa. A double-diaphragm made of aluminium separates two sections, the driving section and the testing section in all of these three shock tubes. The results of animal experiments indicate that this set of equipment can inflict large or small animals both local and systemic blast injuries, thus meets the need of experimental research of blast injury.

KEY WORDS shock wave bio-shock tube animal experiment