

DOI:10.16781/j.0258-879x.2021.07.0755

· 论 著 ·

水下爆炸致水面泅渡战位比格犬脑和肺的损伤特点

李彦腾, 程 岗, 魏铂沅, 王淑为, 吕文英, 张雷鸣, 董 超, 张剑宁*

解放军总医院第一医学中心神经外科医学部, 北京 100853

[摘要] **目的** 研究水下爆炸引起水面泅渡战位比格犬脑和肺的损伤情况。**方法** 20只健康比格犬随机分为4个实验组(距爆源5、8、11和15 m)和1个对照组($n=4$)。利用1 kg 2,4,6-三硝基甲苯(TNT)裸药在水下2 m实施爆炸对水中漂浮比格犬进行致伤,采用水下及颅内压力传感器和高速摄像机记录爆炸致伤的过程。爆炸后3 h内对存活的比格犬行头部和胸部CT检查及头部MRI检查。爆炸后24 h取脑和肺标本,观察颅脑和胸、肺大体损伤情况,并通过H-E染色和TUNEL染色观察脑和肺组织病理学变化及细胞凋亡情况。**结果** 压力传感器和高速摄像机观察到水下爆炸的致伤过程包括冲击波作用和气泡作用2个阶段。5 m、8 m、11 m和15 m组比格犬分别死亡4、3、1、0只。头部CT和MRI检查示实验组比格犬脑组织无明显损伤,胸部CT检查示有肺内出血、气胸、血胸或胸腔积液等表现。H-E染色结果示实验组比格犬脑组织无明显变化,而肺组织肺泡破裂,肺泡腔内有大量红细胞,肺间质内有大量炎症细胞浸润。TUNEL染色仅见海马区少量细胞呈阳性表现,而肺组织肺泡上皮细胞和间质细胞呈现广泛的凋亡坏死趋势。**结论** 水下爆炸引起水面泅渡战位比格犬的损伤主要为肺爆震伤,脑组织损伤相对轻微。

[关键词] 水下爆炸;爆震伤;脑损伤;肺损伤

[中图分类号] R 826.53

[文献标志码] A

[文章编号] 0258-879X(2021)07-0755-07

Characteristics of brain and lung injuries of beagles in swimming battle position caused by underwater explosion

LI Yan-teng, CHENG Gang, WEI Bo-yuan, WANG Shu-wei, LÜ Wen-ying, ZHANG Lei-ming, DONG Chao, ZHANG Jian-ning*

Department of Neurosurgery, the First Medical Center, PLA General Hospital, Beijing 100853, China

[Abstract] **Objective** To study the damage of underwater explosion to the brain and lung of beagles in the swimming battle position. **Methods** Twenty healthy beagles were evenly randomized into 4 experimental groups (5 m, 8 m, 11 m or 15 m away from the explosion source) and a control group ($n=4$). Beagles in water were subjected to the explosion of 1 kg 2,4,6-trinitrotoluene (TNT) equivalent bare explosive 2 m underwater. Underwater and intracranial pressure sensors and high-speed camera were used to record the process of explosion injury. Computed tomography (CT) scans of the head and chest, as well as magnetic resonance imaging (MRI) scans of head were performed 3 h after the explosion. Brain and lung specimens were taken 24 h after the explosion, and injuries of them were observed. Hematoxylin-eosin (H-E) staining and terminal deoxynucleotidyl transferase-mediated dUTP-biotin nick end labeling (TUNEL) staining were performed afterwards to observe the histopathological changes and apoptosis of brain and lung tissues. **Results** The records of pressure sensors and high-speed camera showed the injury process of underwater explosion included 2 stages: blast wave and bubble pulsation. There were 4, 3, 1 and 0 beagles died in 5 m, 8 m, 11 m and 15 m groups, respectively. The head CT and MRI showed that there was no obvious brain injury in the experimental groups, while the chest CT showed that there were intrapulmonary hemorrhage, pneumothorax, hemothorax or pleural effusion. H-E staining showed that there were no obvious changes in the brain tissue of beagles in the experimental groups, but the alveoli were ruptured, and there were a large number of red blood cells in the alveolar cavity, and many inflammatory cells infiltrated in the lung interstitial. TUNEL staining showed only a few positive cells in the hippocampus, while the alveolar epithelial cells and interstitial cells in the lung showed a trend of extensive apoptosis and necrosis. **Conclusion** The main injury caused by underwater explosion to beagles in swimming battle position is lung blast injury, while the brain tissue injury is relatively slight.

[Key words] underwater explosion; blast injuries; brain injuries; lung injuries

[Acad J Sec Mil Med Univ, 2021, 42(7): 755-761]

[收稿日期] 2020-07-01 [接受日期] 2020-12-18

[基金项目] 全军后勤科研重大项目(AHJ14J001),国家自然科学基金(81372128)。Supported by Major Logistics Research Project of PLA (AHJ14J001) and National Natural Science Foundation of China (81372128).

[作者简介] 李彦腾, 硕士, 主治医师。E-mail: yantenglibj@163.com

*通信作者(Corresponding author)。Tel: 010-66938098, E-mail: jnzhang2018@163.com

在渡海登岛、武装泅渡或舰船受损后人员落水时,水面泅渡或停留的作战人员如果遇到水雷、鱼雷等水下爆炸性武器的攻击,常会产生大批重伤伤员。随着战场快速救治技术的改进和转运后送能力的提高,战场伤亡率必将明显下降。但近年来世界各国均未发生过大规模的海战,水下爆炸致脏器损伤的临床病例和实验研究相对较少。目前美国海军水下风险救治指南也不是基于实战的爆炸损伤数据,而是完全基于20世纪50年代发表的一项数据模拟假设^[1]。随着各国海洋资源开发竞争的日益激烈,未来发生海上冲突的可能不断增加,有必要对水下爆炸的损伤特点进行研究。

一般按致伤因素的不同将爆炸相关的损伤分为4级,分别与爆炸产生的冲击波、弹片或二次破片、身体跌落碰撞和其他损伤因素(如爆炸产生的高温、火球、有毒气体等)有关^[2]。与空气中发生的爆炸不同,水下爆炸伤有以下特点:(1)水的密度和黏滞系数都比空气大得多,水下冲击波的传播速度更快、距离更远、损伤强度更大;(2)黏滞系数的增加使破片速度在短距离内急剧下降,二级损伤发生的可能性大大降低;(3)人员在水中漂浮,几乎没有跌落碰撞的危险;(4)由于水的有效阻隔,高温、火球、有毒气体等致伤因素的影响几乎可以忽略不计^[1]。因此,水下爆炸伤主要是由冲击波造成。本实验以比格犬为研究对象模拟水

面泅渡状态,研究水下爆炸冲击波致颅脑和肺的病理学和影像学改变,为该类损伤的防护与救治提供参考。

1 材料和方法

1.1 实验动物及分组 成年比格犬20只(北京玛斯生物技术有限公司提供,动物合格证号:11400600000860),雌雄不限,体重9.0~12.0 kg,按与爆源的水平距离(以下简称爆距)随机分为5 m、8 m、11 m和15 m组,另设对照组,每组4只。

1.2 动物模型的建立 比格犬以戊巴比妥钠溶液腹腔内注射(40 mg/kg)联合速眠新Ⅱ号肌内注射(0.2 mg/kg)进行麻醉。麻醉成功后,将小型救生圈固定于犬的颈部并调节至合适松紧度,确保犬呼吸通畅。将受试比格犬按计划距离布置入实验水池(图1),调整颈部救生圈确保比格犬头部露出水面,颈部以下身体位于水下。爆炸源为1 kg 2,4,6-三硝基甲苯(2,4,6-trinitrotoluene, TNT)裸药,固定于水下2 m位置,爆炸致动物损伤。实验过程中测量和记录水下压力、动物颅内压力,同时高速摄像。水下压力传感器固定于与比格犬等效位置的水面下0.3 m处,颅内微型传感器置于顶部硬膜外,连接动态数据采集系统检测爆炸压力。对照组同样经历麻醉、水池浸泡等过程,但不给予爆炸致伤。

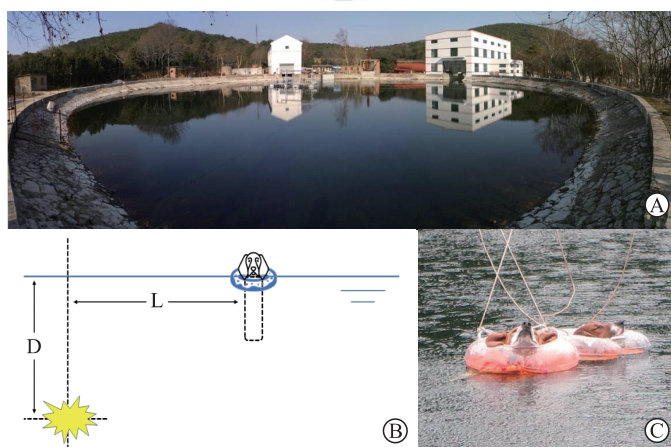


图1 实验布局及比格犬的水中状态

Fig 1 Experiment layout and the condition of beagles in water

A: The underwater explosive pond has a diameter of 60 m and a maximum depth of 10 m at the center. It is shaped as an inverted truncated cone. The ambient temperature was 20-25 °C. B: Schematic diagram of the experiment layout. The source of explosion was 1 kg TNT equivalent bare explosive, the vertical distance from the water surface (D) was 2 m, and the horizontal distance between beagle and explosive (L) was 5, 8, 11 or 15 m. C: The condition of beagles in water before blast. TNT: 2,4,6-trinitrotoluene.

1.3 比格犬的死亡率及生命体征监测 爆炸后立即将犬从水中救出,判断死伤情况,用动物生命体征监测仪对其心电、体温、脉搏、血压、血氧进行监测。

1.4 影像学检查 爆炸后3 h内对存活的比格犬进行头部和胸部CT检查,以及头部MRI的T1、T2、液体衰减反转恢复(fluid attenuated inversion recovery, FLAIR)、扩散加权成像(diffusion-weighted imaging, DWI)序列的检查,观察颅脑和肺的损伤情况。

1.5 病理学检查 对爆炸后死亡的比格犬立即进行现场解剖,存活的比格犬在爆炸后24 h麻醉、放血处死,取脑、肺观察大体损伤情况,之后将脑和肺置于4%多聚甲醛溶液中固定,留存待检。选取顶叶皮质和海马区的脑组织、肺部淤血区域与

外观正常组织交界处组织行常规石蜡包埋,切片,H-E染色,光学显微镜下观察组织的病理形态学改变。同时,将上述包埋好的组织进行TUNEL染色,DAB显色,用光学显微镜观察脑和肺组织内细胞凋亡情况。

2 结果

2.1 爆炸过程相关情况描述 根据压力波形进行分析可知,各爆距的爆炸过程中水下环境压力变化都主要由冲击波作用和气泡脉动作用构成,而且上述2种作用均在比格犬颅内引起了压力响应。不同爆距水下爆炸2个作用阶段的压力峰值、压力冲量值及比格犬颅内响应压力的峰值见表1。图2展示了爆炸过程中爆距11 m处水下及比格犬颅内的压力曲线。

表1 水下爆炸过程中水下0.3 m处及比格犬颅内压力参数

Horizontal distance/m	Blast wave underwater		Bubble pulsation underwater		Intracranial responding peak pressure of beagle/kPa	
	Peak pressure/MPa	Impulse/(Pa·s)	Peak pressure/MPa	Impulse/(Pa·s)	Blast wave	Bubble pulsation
5	7.67	680.0	1.32	225.0	5.20	2.93
8	5.16	367.0	1.27	160.0	4.73	4.72
11	3.81	190.0	1.03	107.6	3.10	2.31
15	2.48	105.0	0.17	31.0	0.47	0.16

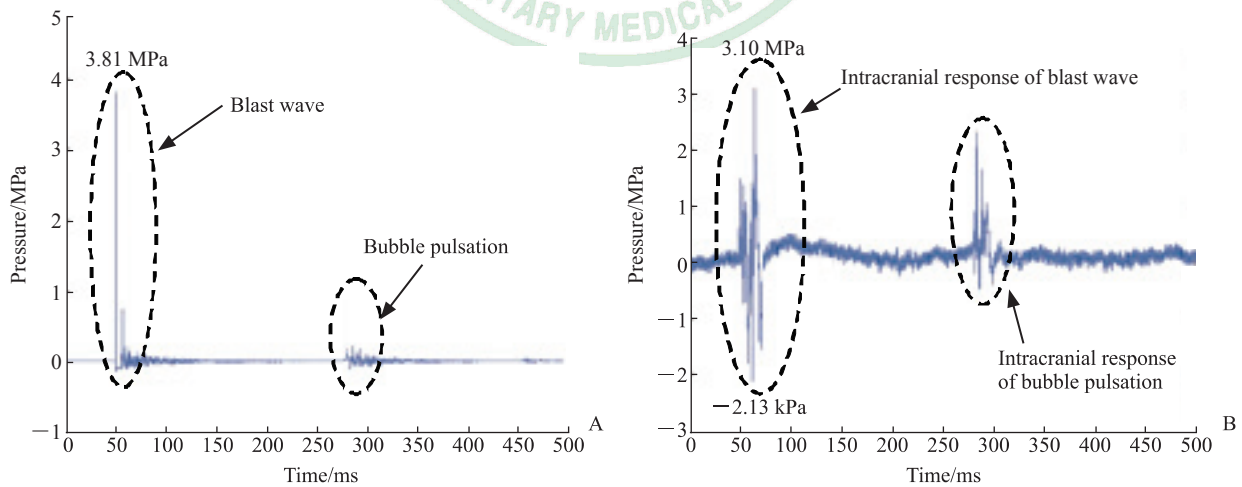


图2 爆炸时爆距11 m处水下及比格犬颅内的压力变化

Fig 2 Changes of underwater pressure and intracranial pressure of beagles 11 m from explosion source

A: Pressure curve at the point of 0.3 m below the water surface 11 m from the explosion source during explosion; B: Intracranial pressure curve of beagles 11 m from the explosion source during explosion.

高速摄像机拍摄频率为每秒730帧。如图3所示,水下爆炸对比格犬的致伤作用可分为冲击波作

用和气泡作用2个阶段,作用过程中可见比格犬全身剧烈震动,前一个阶段时幅度更大。

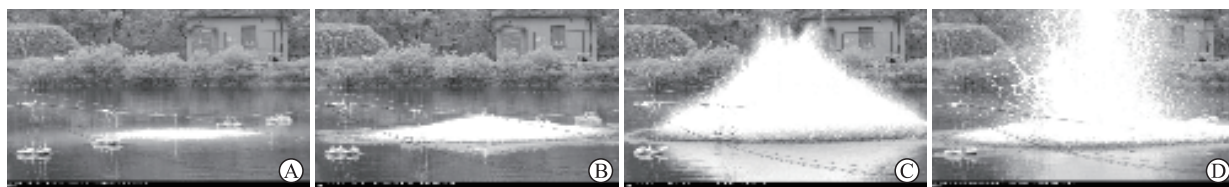


图3 水下爆炸高速摄像结果

Fig 3 Records of high-speed camera of underwater explosion

A: Beginning of the explosion; B: The blast wave stage; C: The bubble pulsation stage; D: The explosion gradually subsided.

2.2 爆炸后比格犬一般情况 爆炸后将比格犬迅速从水中捞出,判断死伤情况并监测生命体征。5 m、8 m、11 m和15 m组比格犬分别死亡4、3、1、0只。其中,5 m组全部4只、8 m组有2只当场死亡,8 m组和11 m组各有1只呈濒死状态并在2 h内死亡,15 m组4只均存活。由于水中浸泡原因,比格犬的体温普遍比正常参考值低1~2℃,呼吸频率下降,部分犬出现心律不齐、心率减缓(约40 min⁻¹)、平均动脉压下降,血氧饱和度为

80%~95%。麻醉清醒后犬精神状态较差,食欲下降,活动减少。

2.3 水下爆炸导致的影像学改变 如图4所示,爆炸后比格犬的胸部CT最突出的表现是肺内出血,部分比格犬出现气胸、血胸或胸腔积液等表现,对照组未见明显变化;各实验组比格犬的头部CT表现基本正常,与对照组相比无明显差异,未发现颅骨骨折、脑挫裂伤、颅内出血、水肿等原发性或继发性脑损伤表现。

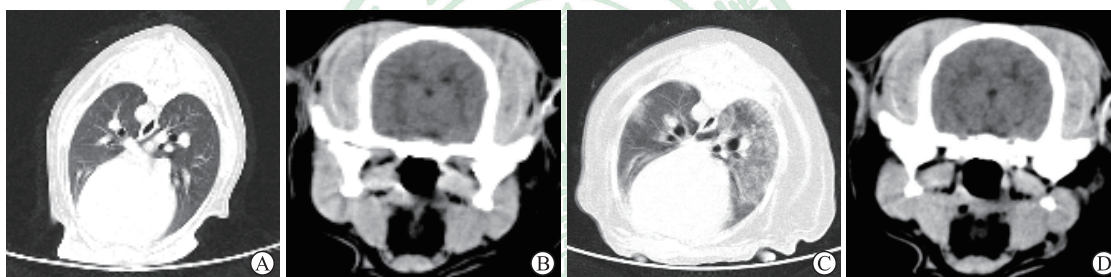


图4 水下爆炸后对照组与11 m组比格犬的胸部和头部CT检查结果

Fig 4 CT findings of chest and head of beagles in control group and 11 m group

A: Chest CT of control group; B: Head CT of control group; C: Chest CT of 11 m group; D: Head CT of 11 m group. CT: Computed tomography.

图5为11 m组爆炸后存活犬的头部MRI检查结果,可见双侧大脑半球对称,灰白质对比正常,未见局灶性异常信号,各脑室、脑池形态正常,中线结构居中,灰白质交界、基底节区及脑干等爆震

伤易损区域在T1、T2、FLAIR、DWI序列上均未见明显异常信号影。以上结果进一步证明水下爆炸对颅脑的损伤作用甚微。

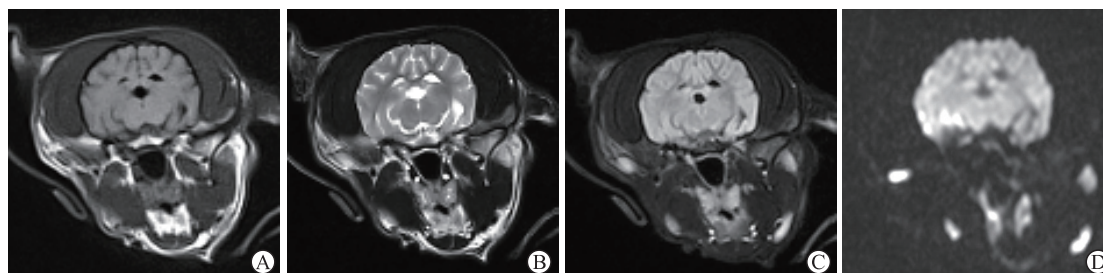


图5 水下爆炸后11 m组比格犬的头部MRI检查结果

Fig 5 Head MRI findings of beagles in 11 m group after underwater explosion

A: T1-weighted imaging; B: T2-weighted imaging; C: FLAIR imaging; D: DWI. MRI: Magnetic resonance imaging; FLAIR: Fluid attenuated inversion recovery; DWI: Diffusion-weighted imaging.

2.4 水下爆炸导致的病理学改变 与对照组(图6A)比较,各实验组比格犬均出现不同程度的肺冲击伤,损伤主要位于肺中叶和下叶,可见肺内片状出血,部分伴有胸腔积液或血胸(图6B)。H-E染色可见大量肺泡壁破裂,肺泡腔融合,红细胞充填在肺泡腔内,肺间质内有大量炎症细胞浸润,水肿严重,间质毛细血管血流淤滞(图6C、6D)。TUNEL染色见肺泡上皮细胞和间质细胞的细胞核广泛深染,呈现凋亡坏死趋势(图6E、6F)。

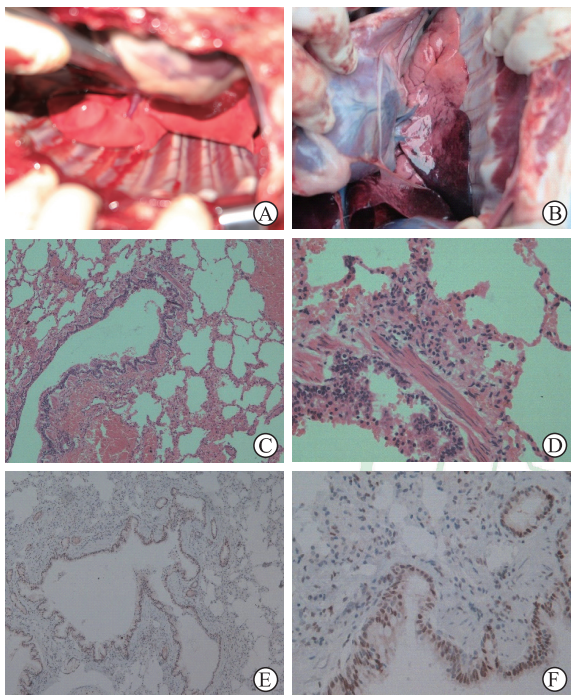


图6 水下爆炸后对照组与11 m组比格犬肺的大体观察和病理结果

Fig 6 Macro-pathology and pathology of beagles' lung in control group and 11 m group after underwater explosion

A: Macro-pathology of control group; B: Macro-pathology of 11 m group; C: H-E staining of 11 m group (100 \times); D: H-E staining of 11 m group (400 \times); E: TUNEL staining of 11 m group (100 \times); F: TUNEL staining of 11 m group (400 \times). H-E: Hematoxylin-eosin; TUNEL: Terminal deoxynucleotidyl transferase-mediated dUTP-biotin nick end labeling.

由于头部位于水面以上,各实验组比格犬均未见到明显的脑组织损伤,与对照组比较无明显差异(图7A、7B)。光镜下观察各实验组比格犬顶叶皮质及海马区的H-E染色图片(图7C~7F),脑组织形态未见明显变化,也无明显的脑水肿,毛细血管和神经元结构正常,未见明显炎症细胞渗出。TUNEL染色图片仅见海马区少量细胞的细胞核呈阳性表现(图7G、7H)。

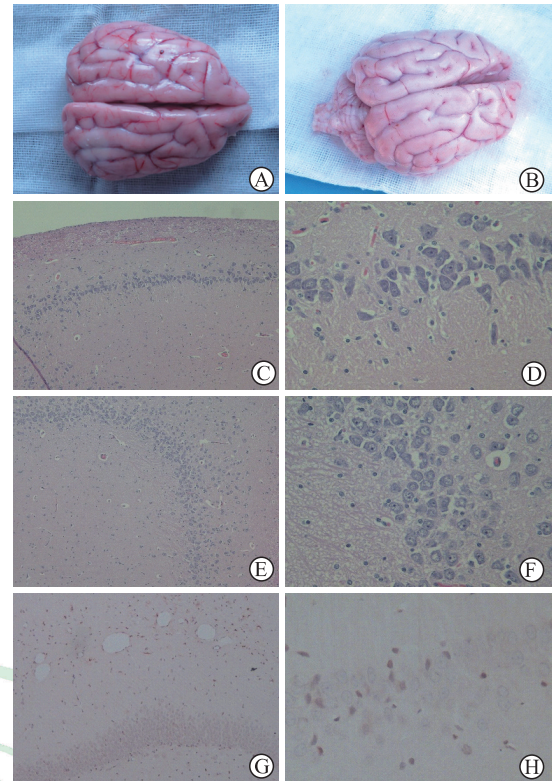


图7 水下爆炸后对照组与11 m组比格犬脑的大体观察和病理结果

Fig 7 Macro-pathology and pathology of beagles' brain in control group and 11 m group after underwater explosion

A: Macro-pathology of control group; B: Macro-pathology of 11 m group; C: H-E staining of parietal cortex in 11 m group (100 \times); D: H-E staining of parietal cortex in 11 m group (400 \times); E: H-E staining of hippocampus in 11 m group (100 \times); F: H-E staining of hippocampus in 11 m group (400 \times); G: TUNEL staining of 11 m group (100 \times); H: TUNEL staining of 11 m group (400 \times). H-E: Hematoxylin-eosin; TUNEL: Terminal deoxynucleotidyl transferase-mediated dUTP-biotin nick end labeling.

3 讨论

抢滩登陆、舰船对抗等战斗往往相当激烈,水面泅渡或坠船落水人员如果遇到水雷、鱼雷等爆炸性武器袭击常在短时间内大量死伤。本实验通过水下爆炸致伤水面漂浮的比格犬模拟上述过程,对其受伤后的一般情况、脑部和肺部的病理学和影像学表现进行研究,结果显示肺部冲击伤为其主要损伤类型,脑部损伤相对轻微。

水的密度约为空气的800倍,冲击波在水中的传播速度更快,杀伤范围更广^[3]。水下爆炸后,水中首先形成向四周扩展的冲击波,紧随在冲击波之后爆炸形成的“气球”在水中膨胀然后回缩、反复

振荡并不断上浮,同时产生向四周扩展的二次压力脉冲波。因此,水下爆炸的致伤过程有冲击波作用和气泡脉冲作用2个阶段^[4]。本实验的压力曲线和高速摄影结果都记录到了这2个过程,其中以冲击波的杀伤强度更大。水下爆炸的致伤作用由上述2个作用叠加形成,损伤也相对严重。一般以冲击波的压力峰值和冲量大小来衡量其杀伤强度,这2个物理参数与爆炸源的当量、相对距离、传播介质、环境是否密闭等因素均密切相关^[5]。本实验结果显示,1 kg TNT水下爆炸对比格犬的致死杀伤半径为11~15 m,其对应的压力峰值和冲量分别为2.48~3.81 MPa和105~190 Pa·s。美国《海军潜水手册》显示,水下爆炸冲击波压力峰值为3.45~13.8 MPa时将会对人体造成重伤^[6],与本实验结果较为接近。

我们还同时记录了水下爆炸过程中水下及比格犬颅内压力的变化,可以看出比格犬颅内的压力响应总体上随外界压力的增加而增大。在冲击波作用阶段,比格犬颅内响应峰压与冲击波压力呈正相关关系,然而在气泡作用阶段两者之间却无明显相关关系。结合高速摄像记录,我们推测这可能是由于比格犬的身体在受到冲击波作用后部分浮出水面,在气泡脉冲作用时胸腹部受冲击的面积减小所造成的;同时,由于头部位于水面以上,爆炸引起的颅内压力峰值很低。当在同一介质内(如空气)传播时,冲击波通过2种方式造成脑损伤:一种是冲击波穿过头皮和颅骨等组织引起脑组织移位变形而产生损伤;另一种是冲击波作用于胸腹部瞬时挤压该处的大血管,压力经大血管传导入颅并阻碍颅内静脉回流而致伤,2种方式中前者占主导地位^[7-8]。冲击波在穿过不同介质界面时能量会在界面附近沉积而严重衰减^[9]。因此,在本实验中颅内压力的变化主要经胸腹部传导引起,各实验组比格犬的颅内压力峰值均低于10 kPa。已有研究证实,当冲击波压力峰值在100 kPa以上时才能引起较为明显的脑组织损伤^[10],因而水下爆炸对水面泅渡或落水人员的颅脑损伤相对较小^[1,11]。

从病理学和影像学检查结果来看,肺是水下爆炸损伤最主要的靶器官。肺作为空腔脏器,最容易被冲击波致伤^[12-13]。Boutillier等^[14]的一项关于猪肺爆震伤的研究发现肺损伤的阈值为爆炸冲量58.3 Pa·s,当冲量超过232.8 Pa·s时便可引起重度

肺损伤(30%~60%面积的肺组织瘀斑)。冲击波的内爆效应和组织间的剪切牵拉引起肺泡和血管破裂、组织挫伤,发生肺内出血和黏液分泌,导致呼吸困难^[15]。该病变严重时用胸部X线片便可诊断,表现为典型的“蝠翼征”或“蝴蝶征”^[16-17]。胸部CT能更清楚地显示支气管和血管病变,对轻型肺爆震伤有更好的诊断价值,也利于与其他肺部疾病相鉴别。肺爆震伤的临床表现包括咳嗽、咯血、呼吸困难、窒息等^[1],爆炸强度越大损伤越严重。本实验爆炸后即刻死亡的比格犬尸检发现,它们都存在广泛的肺内出血。因此,我们建议对现有的救生衣进行改进,使其既具有漂浮作用又能够对抗或减弱冲击波能量的传导,防止肺爆震伤的发生。与其他爆炸环境不同,本实验中的水下爆炸并未造成明显的脑组织损伤。但是,在潜水或水下作业时人员全身浸入水中,水下爆炸仍会造成一定程度的颅脑损伤,必须采取相应的防护措施^[18-19]。

综上所述,水下爆炸对模拟水面泅渡或漂浮的比格犬杀伤力强,损伤主要表现为肺爆震伤,其病理学和影像学改变具有一定的特征性,同时脑组织损伤相对轻微。根据本实验结果,作战人员在执行类似环境的作战行动时应佩戴相应的防护装具对胸部加以保护;建议爆炸发生后尽快对伤员进行相关的影像学检查,以辅助早期诊断、快速开展针对性治疗。本研究样本量较小,由于研究条件限制仅在单一时间点进行了的相关检查,未对不同程度肺爆震伤的影像学表现进行分级,还有待后续实验进一步探究。

[参 考 文 献]

- [1] LANCE R M, BASS C R. Underwater blast injury: a review of standards[J]. *Diving Hyperb Med*, 2015, 45: 190-199.
- [2] PLURAD D S. Blast injury[J]. *Mil Med*, 2011, 176: 276-282.
- [3] 杨志焕,朱佩芳,蒋建新,尹志勇,周继红,李晓炎,等.水下冲击波的生物效应[J]. *爆炸与冲击*, 2003, 23: 134-139.
- [4] 宁心,李晓炎,杨志焕,朱佩芳,蒋建新,尹志勇,等.水下冲击波和空气冲击波传播速度及物理参数的对比研究[J]. *解放军医学杂志*, 2004, 29: 97-99.
- [5] BAUMAN R A, LING G, TONG L, JANUSZKIEWICZ A, AGOSTON D, DELANEROLLE N, et al. An introductory characterization of a combat-casualty-care

- relevant swine model of closed head injury resulting from exposure to explosive blast[J]. *J Neurotrauma*, 2009, 26: 841-860.
- [6] WHALEY R. US navy diving manual [M]. 6th ed. USA: Direction of Commander, Naval Sea Systems Command, 2008: 2-9.
- [7] COURTNEY A C, COURTNEY M W. A thoracic mechanism of mild traumatic brain injury due to blast pressure waves[J]. *Med Hypotheses*, 2009, 72: 76-83.
- [8] MAGNUSON J, LEONESSA F, LING G S. Neuropathology of explosive blast traumatic brain injury[J]. *Curr Neurol Neurosci Rep*, 2012, 12: 570-579.
- [9] SAWYER T W, LEE J J, VILLANUEVA M, WANG Y, NELSON P, SONG Y, et al. The effect of underwater blast on aggregating brain cell cultures[J]. *J Neurotrauma*, 2017, 34: 517-528.
- [10] RENEER D V, HISEL R D, HOFFMAN J M, KRYSZCIO R J, LUSK B T, GEDDES J W. A multi-mode shock tube for investigation of blast-induced traumatic brain injury[J]. *J Neurotrauma*, 2011, 28: 95-104.
- [11] 陈吉钢. 水下爆炸致颅脑损伤的特点及3'-脱氧腺苷的保护作用研究[D]. 上海:海军军医大学,2019.
- [12] 潘建光,张雷,文文,胡群,柳德灵,赖国祥. 肺爆震伤大鼠早期血管内皮生长因子、神经菌毛素-1的变化及其与肺损伤程度的相关性[J]. *解放军医学杂志*, 2019,44:63-69.
- [13] CRIPPS N P, COOPER G J. The influence of personal blast protection on the distribution and severity of primary blast gut injury[J]. *J Trauma*, 1996, 40(3 Suppl): S206-S211.
- [14] BOUTILLIER J, DECK C, DE MEZZO S, MAGNAN P, PRAT N, WILLINGER R, et al. Lung injury risk assessment during blast exposure[J]. *J Biomech*, 2019, 86: 210-217.
- [15] SCOTT T, HULSE E, HAQUE M, KIRKMAN E, HARDMAN J, MAHONEY P. Modelling primary blast lung injury: current capability and future direction[J]. *J R Army Med Corps*, 2017, 163: 84-88.
- [16] LICHTENBERGER J P, KIM A M, FISHER D, TATUM P S, NEUBAUER B, PETERSON P G, et al. Imaging of combat-related thoracic trauma-blunt trauma and blast lung injury[J/OL]. *Mil Med*, 2018, 183: e89-e96. DOI: 10.1093/milmed/usx033.
- [17] ABU-ZIDAN F M, AMAN S. Underwater explosion lung injury[J/OL]. *J Trauma*, 2001, 50: 169. DOI: 10.1097/00005373-200101000-00037.
- [18] NAKAGAWA A, MANLEY G T, GEAN A D, OHTANI K, ARMONDA R, TSUKAMOTO A, et al. Mechanisms of primary blast-induced traumatic brain injury: insights from shock-wave research[J]. *J Neurotrauma*, 2011, 28: 1101-1119.
- [19] 陈吉钢,张丹枫,王春晖,李振兴,董艳,侯立军. 水下冲击波致比格犬肺和颅脑损伤特点[J]. *第二军医大学学报*, 2019,40:763-768.
- CHEN J G, ZHANG D F, WANG C H, LI Z X, DONG Y, HOU L J. Underwater shock wave induced lung and brain injuries in canines[J]. *Acad J Sec Mil Med Univ*, 2019, 40: 763-768.

[本文编辑] 尹 茶