

DOI: 10.11883/bzycj-2024-0256

## 基于自由场爆炸的小型猪内耳听觉损伤模型\*

薛松波<sup>1,2</sup>, 向书毅<sup>3</sup>, 赵杨<sup>2</sup>, 杜智博<sup>3</sup>, 王兴皓<sup>3</sup>, 李羿洋<sup>3</sup>, 张家瑞<sup>3</sup>, 费舟<sup>4</sup>,  
田旭<sup>2</sup>, 高志强<sup>2</sup>, 庄茁<sup>3</sup>, 柳占立<sup>3</sup>, 冯国栋<sup>2</sup>

- 中国医学科学院北京协和医学院, 北京 100730;
- 中国医学科学院北京协和医院, 北京 100730;
- 清华大学航天航空学院, 北京 100084;
- 空军军医大学西京医院, 陕西 西安 710032)

**摘要:** 建立真实爆炸环境下的小型猪内耳听觉爆炸伤模型, 研究不同爆炸冲击波压力对小型猪内耳听觉损伤的影响。选取14头健康小型猪, 在爆炸前进行听性脑干反应 (auditory brainstem response, ABR) 测试。搭建自由场爆炸实验平台, 使用1.9和8.0 kg TNT炸药, 爆源离地面1.8 m, 身体固定于防护装置中, 仅暴露头部。在不同距离布放小型猪, 记录冲击波峰值压力, 计算即刻死亡率。爆炸后再次进行ABR测试, 并取耳蜗组织进行扫描电镜观察, 分析毛细胞损伤情况。在1.8~3.8 m范围内, 冲击波峰值压力从96.3 kPa升至628.3 kPa, 随着距离的增大, 峰值压力减小。8 kg TNT爆炸在2.6 m处 (峰值压力628.3 kPa) 导致小型猪即刻死亡率为50%。比较爆炸前后ABR阈值发现, 短声 (click) 和各频率短纯音 (2、4和8 kHz) 诱发的ABR阈值均显著升高 ( $P < 0.05$ ), 其中以4 kHz阈值变化最显著。扫描电镜显示, 随着冲击波压力的升高, 内毛细胞的损伤程度高于外毛细胞。爆炸冲击波可引起小型猪听觉系统的明显损伤, 表现为ABR阈值升高和耳蜗毛细胞结构破坏。内毛细胞对爆炸冲击波更敏感。所建立的小型猪爆炸性听觉损伤模型可为研究爆炸伤机制和防护措施提供了重要的实验基础。

**关键词:** 爆炸伤; 小型猪; 内耳听觉功能; 耳蜗损伤

中图分类号: O389

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

## An auditory damage model for inner ears of miniature pigs based on free-field explosion

XUE Songbo<sup>1,2</sup>, XIANG Shuyi<sup>3</sup>, ZHAO Yang<sup>2</sup>, DU Zhibo<sup>3</sup>, WANG Xinghao<sup>3</sup>, LI Yifeng<sup>3</sup>, ZHANG Jiarui<sup>3</sup>,  
FEI Zhou<sup>4</sup>, TIAN Xu<sup>2</sup>, GAO Zhiqiang<sup>2</sup>, ZHUANG Zhuo<sup>3</sup>, LIU Zhanli<sup>3</sup>, FENG Guodong<sup>2</sup>

- Peking Union Medical College, Chinese Academy of Medical Sciences, Beijing 100730, China;
- Peking Union Medical College Hospital, Chinese Academy of Medical Sciences, Beijing 100730, China;
- School of Aerospace Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
- Xijing Hospital, Air Force Medical University, Xi'an 710032, Shaanxi, China)

**Abstract:** A realistic blast injury model was developed for simulating auditory damage in the inner ears of miniature pigs under controlled explosion conditions to investigate the impact of varying blast shockwave pressures on auditory impairment. Fourteen healthy miniature pigs were selected and underwent auditory brainstem response (ABR) testing prior to exposure to explosions. A free-field explosion platform was constructed utilizing 1.9 kg and 8.0 kg of TNT, with the explosive source 1.8 meters above the ground. The pigs were securely fixed in protective devices, exposing only their head, and placed at varying distances from the blast source. Peak shockwave pressures were measured, and immediate mortality rates were calculated

\* 收稿日期: 2024-07-25; 修回日期: 2024-10-24

基金项目: 国家重点研发计划 (2022YFC2402701)

第一作者: 薛松波 (1995—), 男, 博士, xuesongbo\_ent@163.com

通信作者: 冯国栋 (1977—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, fgdent2013@163.com

accordingly. Post-explosion ABR tests were conducted, followed by examination of cochlear tissues using scanning electron microscopy to analyze hair cell damage. Shockwave peak pressures ranged from 96.3 kPa to 628.3 kPa over a distance range of 1.8 m to 3.8 m, with pressure decreasing as distance increased. At a distance of 2.6 m, a peak pressure of 628.3 kPa resulted in a mortality ratio of 50%. ABR threshold comparisons before and after the explosion revealed significant increases across all tested frequencies ( $P < 0.05$ ), with the most notable changes at a frequency of 4 kHz. Scanning electron microscopy analysis demonstrated that inner hair cells exhibited greater susceptibility to damage compared to outer hair cells, with higher shockwave pressure leading to more severe damage. Blast shockwaves caused substantial auditory system damage to miniature pigs as evidenced by elevated ABR thresholds and destruction of cochlear hair cell. Inner hair cells proved more vulnerable to blast shockwaves. The established model can provide a valuable experimental foundation for further studies on blast injury mechanisms and protective strategies.

**Keywords:** blast injury; miniature pig; inner ear auditory function; cochlear injury

随着现代军事科技的不断进步,爆炸性武器在战争中的广泛应用使得爆炸伤成为战争中最常见的伤害形式之一。据统计,爆炸性武器造成的伤害占战斗伤亡的 50%~80%<sup>[1-2]</sup>。爆炸的特征是大气压瞬间升高,其能量的突然释放会产生一个大的压力锋或正超压,以超音速传播,也称为冲击波<sup>[3]</sup>。爆炸产生的冲击波对人体各个系统器官的影响广泛。听觉系统作为人体中最易受到爆炸冲击波影响的靶器官,常见的损伤包括鼓膜破裂、听骨链断裂、内耳损伤等,甚至可能导致永久性听力丧失<sup>[4-5]</sup>。通常认为,鼓膜对超压高度敏感,0.14~0.35 kg/cm<sup>2</sup> 的冲击波会造成鼓膜穿孔,4~7 kg/cm<sup>2</sup> 的冲击波会造成听骨链脱位或者断裂<sup>[6]</sup>。Niwa 等<sup>[7]</sup> 研究发现,冲击波可以直接导致外毛细胞静纤毛的损失。Cho 等<sup>[8]</sup> 进一步指出,高强度冲击波可能导致耳蜗基底膜的机械损伤。此外,谭君武等<sup>[9]</sup> 研究发现,爆炸可引起耳蜗微循环流速的改变,影响耳蜗内环境的稳定和毛细胞能量,引起毛细胞的损失。这些研究结果共同表明,爆炸对听觉系统的损伤是多因素、多层次的。

在爆炸伤防治研究中,直接的人类研究非常有限,动物模型成为重要的研究途径。现有的动物模型目前主要采用小鼠、大鼠、豚鼠和龙猫等啮齿动物研究听觉损伤<sup>[3, 10]</sup>。然而,这些小动物模型在模拟拟存在诸多局限性:小动物模型的耳蜗解剖结构与人类差异较大,不能准确反映爆炸对人类听觉系统的损伤;小动物模型无法承受较高的爆炸冲击波压力,无法模拟真实爆炸环境中产生的听觉损伤<sup>[11-12]</sup>。相比之下,猪作为一种大型哺乳动物,其耳蜗的形态、解剖结构与人类的高度相似,具有极高的实验应用价值。Dahlquist 等<sup>[13]</sup> 的研究表明,猪的耳蜗在出生时已基本发育成熟,并具备正常听力,其颞骨结构中的中耳、内耳、电生理等与人类的非常相似。此外,猪模型可以在更高强度的爆炸环境中生存,使其成为研究高强度爆炸对听觉系统影响的理想模型。

基于以上背景,设计并建立一个模拟自由场爆炸环境的小型猪爆炸致伤平台,旨在探讨不同爆炸冲击波压力对小型猪内耳听觉系统的损伤作用,进一步为爆炸伤的机制研究和防护措施开发提供实验依据。

## 1 实验方法

### 1.1 实验动物

本实验选用 14 头健康小型猪,均为雄性,质量约 15 kg。实验前一天送至实验场地,并禁食水 12 h。小型猪在爆炸前后均接受听性脑干反应 (auditory brainstem response, ABR) 测试,以评估听觉功能的变化。实验获得动物实验伦理委员会批准,伦理编号为 IACUC20241384。

### 1.2 小型猪麻醉

麻醉采用 2% 戊巴比妥钠,质量为 20 mg/kg,待小型猪角膜反射消失后,判定麻醉完成。在进行听力测试过程中保持深度麻醉,以避免对测试结果产生干扰。

### 1.3 小型猪听性脑干反应测试

在隔音室内进行 ABR 测试。测试前用棉签清洁小型猪双侧外耳道,重复 2~3 次。记录电极安置于小型猪双耳廓上缘连线中点与颅顶交界处,参考电极插入测试耳侧耳垂,地极置于鼻尖,测量电极之

间阻抗小于  $3\text{ k}\Omega$ 。测试使用短声(click)及不同频率短纯音(1、2、4 和  $8\text{ kHz}$ )作为刺激声音, 滤波宽度为  $300\sim 3000\text{ Hz}$ , 刺激频率为  $11\text{ s}^{-1}$ , 扫描时程为  $10\text{ ms}$ , 叠加次数为 512 次, 最大刺激声强度为  $90\text{ dB}$ , 按  $20\text{ dB}$  递减, 当出现无规律难以辨认的波形时, 递增  $10\text{ dB}$ , 将诱发出可重复规律波形的最低刺激强度记为 ABR 阈值。通过测量其 ABR 阈值的变化, 评估爆炸对听觉功能的损害程度。

#### 1.4 实验平台的设计与构建

本研究搭建了一个小型猪爆炸致伤平台, 能够在自由场爆炸条件下实施爆炸实验。该平台由爆炸源、小型猪防护装置、测压系统等组成, 确保实验环境能够模拟真实爆炸情景。爆炸源采用不同当量的 TNT 炸药, 分别为  $1.9$  和  $8.0\text{ kg}$ , 布置于离地面  $1.8\text{ m}$  的位置, 模拟高能爆炸冲击波的作用(图 1(a)~(b))。动物布放位置均头朝向爆心, 与爆源同高, 动物均处于浅麻醉状态。在防护装置方面, 采用焊制  $3\text{ mm}$  厚的铁质框架将小型猪身体固定, 并在缝隙处填充泡沫胶保证密封性, 爆炸前后防护装置如图 1(c)~(d)所示, 仅露出头部, 确保冲击波作用集中在头部的听觉系统, 同时保护其胸腹部位不受损伤。这一设计确保了听觉系统的重点损伤评估, 减少其他因素干扰实验结果。在不同距离( $1.8\sim 3.8\text{ m}$ )处布放小型猪, 高精度压力传感器分别测试在不同距离下的冲击波峰值压力及正压持续时间。高精度压力传感器(型号 PCB137B22/PCB137B23)能够准确测量爆炸冲击波的压力峰值及其持续时间。爆炸后复测 ABR 阈值, 并统计即刻死亡率: 爆炸后即刻记录每个布放距离下死亡和存活数量, 计算每个布放距离即刻死亡率(死亡动物数/总动物数)。

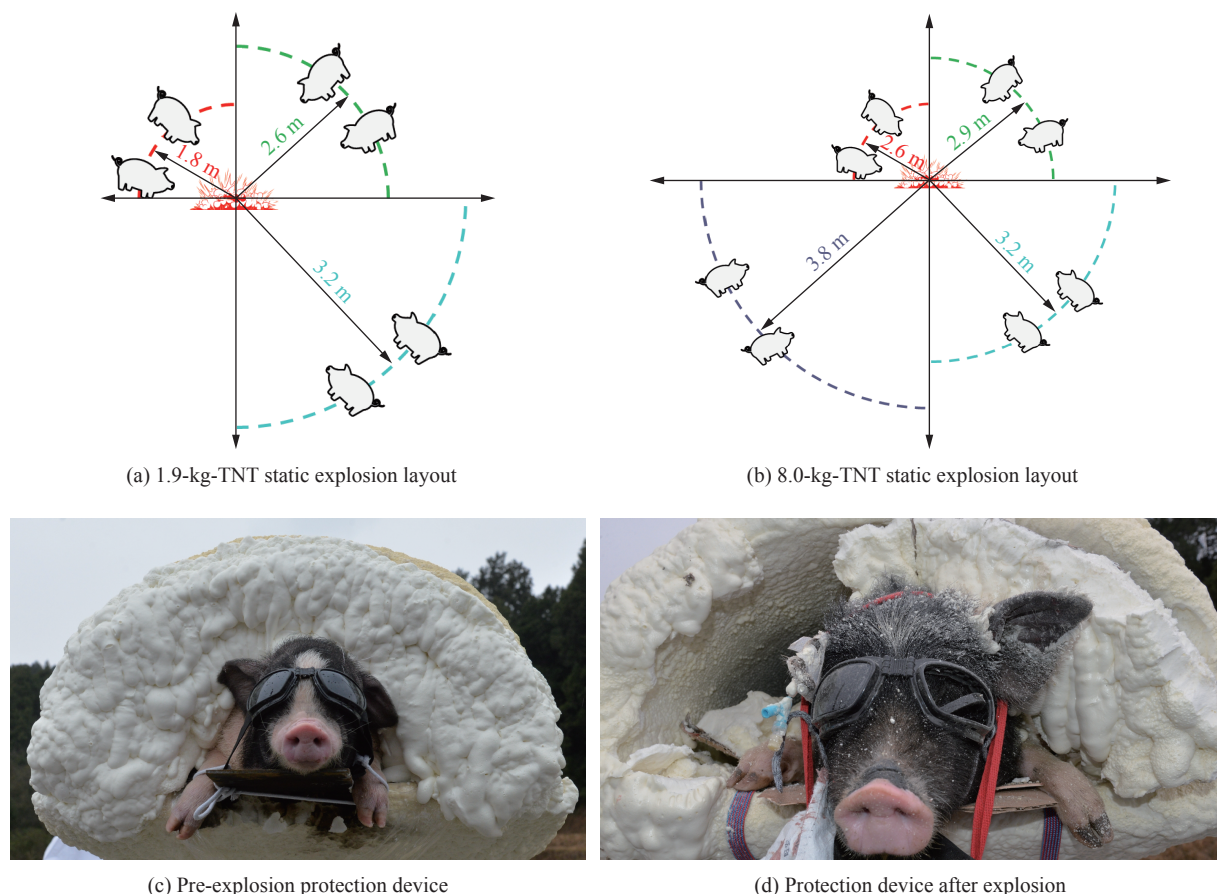


图 1 两次爆炸小型猪布置

Fig. 1 Layouts of miniature pigs with two explosions

#### 1.5 手术取耳蜗步骤

测听后小型猪放置在解剖台上, 麻醉状态下, 以断颈放血的方式处死动物。沿颅顶正中线切开皮

肤, 线锯进行开颅, 暴露双侧脑组织, 去除脑组织及脑膜, 可见双侧半头侧颅底区域不规则状骨块, 底面积约 1.0 cm×1.5 cm, 使用弯头止血钳仔细撬出, 迅速放入电镜固定液室温固定 2 h, 再转移至 4 ℃ 保存。随后将固定好的样品经浓度为 0.1M (0.1 mol/L) 的磷酸缓冲液 PB (PH 值为 7.4) 漂洗 3 次, 每次 15 min。0.1M 磷酸缓冲液 PB (PH7.4) 配制 1% 锇酸室温避光固定 1~2 h。0.1M 磷酸缓冲液 PB (PH7.4) 漂洗 3 次, 每次 15 min。将组织依次放入 30%、50%、70%、80%、90%、95%、100% 和 100% 的酒精每次 15 min, 乙酸异戊酯 15 min。将样本放入临界点干燥仪内进行干燥。样本紧贴于导电碳膜双面胶上放入离子溅射仪样品台上进行喷金 30 s 左右, 利用扫描电子显微镜观察采图。通过电镜观察耳蜗毛细胞的损伤情况, 特别是外毛细胞和内毛细胞的损伤程度, 并分析耳蜗基底膜的裂痕和细胞排列结构变化。

## 1.6 统计分析

采用 SPSS 24.0 软件对实验数据进行统计分析, 采用配对样本 *t* 检验分析爆炸前后小型猪各频率的 ABR 阈值变化。对比爆炸前后的听力阈值, 分析不同的 TNT 载荷和爆炸距离对小型猪听觉功能的影响。

## 2 实验结果

### 2.1 不同距离爆炸物理参数特征及趋势

在爆炸冲击波作用范围内 1.8~3.8 m 处, 实验测得峰值压力为 96.3~628.3 kPa, 冲击波持续时间为 1.30~4.26 ms。实验数据表明, 随着到爆心的距离增大, 冲击波的峰值压力逐渐减小, 同时正压持续时间有所延长, 这一现象符合爆炸冲击波的衰减规律(表 1)。

表 1 TNT 冲击波峰值压力测试及小型猪致死率

Table 1 Results of TNT shock wave overpressure test and mortality of miniature pigs

爆炸当量/kg	到爆心距离/m	峰值压力/kPa	正压持续时间/ms	小型猪即刻死亡率/%
1.9	1.8	511.6	1.40	0(0/2)
	2.6	170.0	2.80	0(0/2)
	3.2	96.3	4.65	0(0/2)
8.0	2.6	628.3	1.30	50(1/2)
	2.9	528.7	2.11	0(0/2)
	3.2	378.5	2.98	0(0/2)
	3.8	237.0	4.26	0(0/2)

### 2.2 即刻死亡率统计

在第 1 发爆炸实验中, 所有小型猪均存活。在第 2 发实验中, 8.0 kg TNT 爆炸后, 距离爆心 2.6 m 处的峰值压力为 628.3 kPa, 导致 1 头小型猪死亡, 死亡率为 50%。而距离爆心 2.9 m 处的峰值压力为 528.7 kPa, 小型猪均存活。这提示峰值压力超过 600 kPa 可能会导致小型猪死亡。

### 2.3 爆炸前后听性脑干反应

在短声(click)和短纯音(2、4 和 8 kHz)诱发条件下, 爆炸前后的 ABR 声压级阈值均具有显著性差

表 2 小型猪爆炸前后 ABR 声压级阈值的比较

Table 2 Comparison of ABR sound pressure level (SPL) thresholds before and after explosion of miniature pigs

组别	ABR SPL threshold/dB			
	Click	2 kHz	4 kHz	8 kHz
爆炸前	52.00±8.37	46.00±5.48	54.00±11.40	42.00±13.04
爆炸后	90.00±17.32	84.00±8.94	112.00±10.95	90.00±10.00
<i>P</i>	0.027	0.001	0.000	0.004

异, 如表 2 所示。结果显示在 4 kHz 时阈值变化最显著, 证实爆炸冲击波对小型猪听觉系统的损伤在 4 kHz 时表现最明显(图 2)。

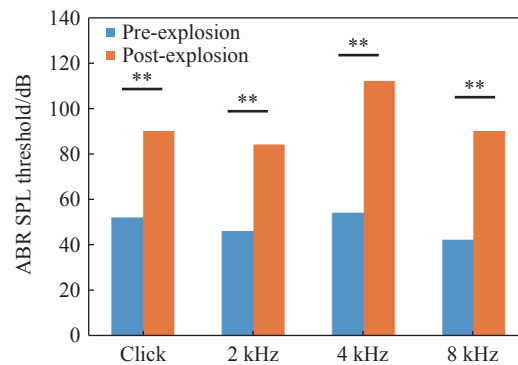


图 2 小型猪爆炸前后 ABR 阈值的统计分析

Fig. 2 Statistical analysis of ABR threshold before and after explosion of miniature pigs

## 2.4 耳蜗损伤情况

在不同爆炸条件下, 耳蜗的损伤程度呈现显著变化(图 3)。随着自由场压力的增大, 耳蜗螺旋器受损加重。内毛细胞(inner hair cells, IHCs)的纤毛数量逐渐减少, 出现退化, 甚至完全消失, 损伤程度明显高于外毛细胞(outer hair cells, OHCs)。外毛细胞的纤毛 V 形结构部分消失分布不均匀, 且基底膜出现裂痕。总体而言, 内毛细胞对爆炸冲击更敏感, 其损伤随着自由场压力的提高而显著加重, 这可能是引起听力损伤的主要原因。

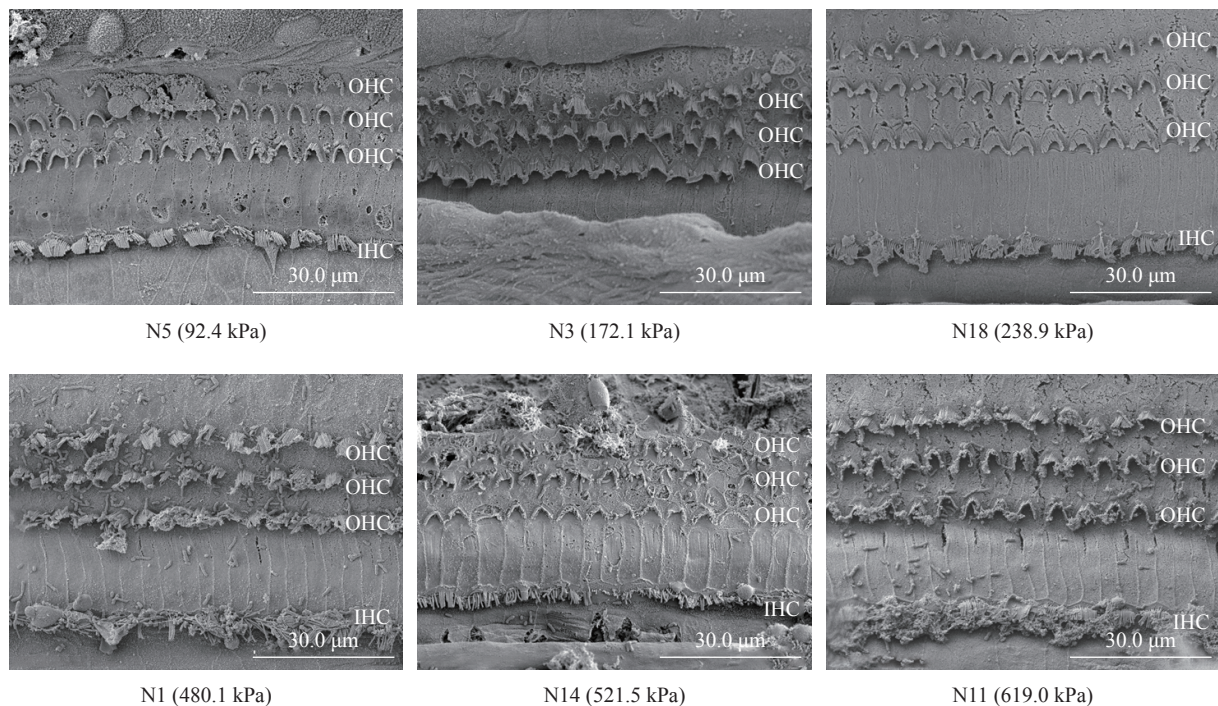


图 3 不同爆炸条件下耳蜗损伤情况

Fig. 3 Cochlear injury under different explosion conditions

## 3 讨论

成功建立了小型猪爆炸内耳听觉损伤模型, 从听觉功能和形态学两个方面评估了爆炸冲击波对内

耳听觉系统的影响。研究结果显示, 爆炸冲击波显著提高小型猪的 ABR 阈值, 尤其在 4 kHz 频率时变化最明显; 扫描电镜观察显示, 内毛细胞损伤程度高于外毛细胞, 且损伤随冲击波压力的升高而加重。这些发现为深入理解爆炸性听觉损伤的机制提供了重要依据。

小型猪作为爆炸引起内耳听觉损伤的动物模型, 主要基于其在解剖和生理特性上与人类的高度相似性<sup>[14]</sup>。首先, 小型猪的耳蜗形态和大小与人类几乎一致, 这使得研究结果更具临床相关性。相比之下, 其他啮齿类动物的耳蜗结构与人类存在显著差异, 限制了结果的外推应用。其次, 小型猪的内耳在出生时已基本发育成熟, 具备正常的听觉功能, 这与人类的听觉发育过程相似。此外, 小型猪作为大型哺乳动物, 能够耐受真实爆炸条件下产生的高强度冲击波, 而不至于立即死亡, 这为评估爆炸对听觉系统的直接影响提供了可能<sup>[15]</sup>。虽然小型猪的外耳道比人类更弯曲, 可能对冲击波有一定的缓冲作用, 但本研究结果显示, 其听觉系统仍然受到明显损伤, 证明了该模型的适用性。因此, 选择小型猪作为爆炸伤动物模型, 不仅提高了研究结果的可靠性和可转化性, 还为深入探索爆炸冲击波对听觉系统的损伤机制提供了理想的平台。

爆炸性武器所产生的冲击波是产生生物损毁的重要因素, 其毁伤效果主要取决于两个物理参数: 冲击波峰值压力和正压作用时间<sup>[16]</sup>。本研究设计了 2 次不同载荷真实环境爆炸伤和不同距离的爆炸伤, 随着距离增加, 冲击波峰值压力减小, 符合冲击波衰减规律<sup>[17]</sup>。当峰值压力超过 600 kPa 时, 小型猪出现即刻死亡, 提示高压冲击波对生物体具有致命性。内耳听觉系统损伤程度与冲击波压力呈正相关关系, 提示在爆炸伤防护中, 应重点关注高压冲击波对听觉系统的保护。

爆炸冲击波导致小型猪的 ABR 阈值显著升高, 尤其在 4 kHz 频率下变化最明显。这一结果与人类和其他动物模型的研究一致, 表明爆炸冲击波对听觉系统的损伤具有普遍性。人类暴露于爆炸冲击波后, 患者常出现高频听力下降和 ABR 阈值升高<sup>[18]</sup>。在动物模型中, 龙猫和小鼠在暴露于高强度噪声后, 导致 ABR 阈值持久升高, 且在 4~8 kHz 较明显, 常伴随耳蜗毛细胞的丢失和突触连接的破坏<sup>[19-20]</sup>。爆炸冲击波对 4 kHz 频率的损伤尤为显著, 因为耳蜗在该频段具有较高敏感性<sup>[21]</sup>。此外, 可能由于 4 kHz 位于耳蜗基底转, 声波在耳蜗内传播时易产生共振, 导致局部能量集中, 造成细胞损伤。

爆炸冲击波对耳蜗的内毛细胞和外毛细胞均可造成损伤, 然而广泛的外毛细胞丢失是爆炸诱发的声损伤的特征性发现<sup>[22-23]</sup>。而本研究发现, 爆炸冲击波的高压峰值直接损伤内毛细胞的纤毛结构, 导致纤毛断裂、融合或消失。而爆炸冲击波导致外毛细胞的纤毛排列紊乱, V 形结构消失, 外毛细胞最外结构较内排更易缺失。相比内毛细胞, 外毛细胞对爆炸冲击波的抵抗力稍强。爆炸冲击波可导致小型猪内毛细胞和外毛细胞均损伤, 但内毛细胞更易受损。损伤机制涉及机械性损伤<sup>[24]</sup>、氧化应激<sup>[25]</sup>、兴奋性毒性、炎症反应和血流障碍等多种因素。深入研究这些机制, 将有助于开发新的防护和治疗方法, 减轻爆炸伤对听觉系统的影响。

本研究存在以下局限: 首先, ABR 测试耗时较长, 未进行全频率的听觉功能评估, 未来将结合其他检测方法进行测试。其次, 爆炸参数仅限于 1.9 和 8 kg TNT 当量, 样本数量较少, 未涵盖其他类型和当量的爆炸物, 结果的适用性有限。此外, 未考虑长期效应, 缺乏对长期暴露于爆炸环境中的累积影响研究, 未来应进行长期观察。

该小型猪爆炸损伤模型具有广泛的应用前景。首先, 它为深入研究爆炸冲击波对听觉系统的损伤机制提供了理想平台, 可用于探讨不同爆炸条件下听觉损伤的累积效应, 有助于揭示听觉系统对爆炸冲击波的长期适应和损伤机制<sup>[26]</sup>。其次, 该模型可用于听力保护装置的开发与评估, 尤其是在高强度爆炸环境中<sup>[27]</sup>。利用本研究的实验平台, 可测试和优化各种听力保护设备的设计, 为军事和工业领域提供有效的防护措施。此外, 该模型还可支持爆炸性听觉损伤的医学干预和康复治疗研究, 如药物治疗和听力植入设备等, 为改善爆炸伤患者的生活质量提供新的科学依据和治疗策略。

## 4 结 论

通过构建小型猪爆炸致伤平台, 采用不同当量的 TNT 炸药, 在自由场条件下对小型猪进行了爆炸冲击波损伤实验, 多维度评估了爆炸对听觉系统的影响, 得到的结论如下。

(1) 爆炸冲击波显著损伤小型猪的听觉功能。爆炸后, 所有频率下的听性脑干反应阈值均显著升高, 尤其在 4 kHz 频率时, 阈值变化最明显。这表明爆炸对听觉系统的损伤具有频率依赖性, 4 kHz 可能是受损最敏感的频率。

(2) 耳蜗损伤程度与爆炸压力密切相关。随着爆炸峰值压力的增大, 耳蜗受损加重, 基底膜出现裂痕, 细胞排列结构发生变化。

(3) 内毛细胞对爆炸冲击波可能更为敏感。扫描电子显微镜观察显示, 内毛细胞的纤毛数量减少, 排列紊乱甚至消失, 损伤程度明显高于外毛细胞。内毛细胞的严重损伤可能是引起听力损伤的主要原因, 这强调了其在听觉系统中的关键作用。

(4) 小型猪内耳听觉爆炸伤模型实用性和推广性。在不同实验中, 使用相同的爆炸参数对小型猪进行测试, 观察到一致的听力损伤结果, 表明建立的小型猪听觉爆炸伤模型具有较好的重复性和稳定性, 可以作为评估听力损伤和防护措施有效的有效工具, 适用于更广泛的爆炸伤害研究。

## 参考文献:

- [1] SULLIVAN E V. War-related PTSD, blast injury, and anosognosia [J]. *Neuropsychology Review*, 2012, 22(1): 1–2. DOI: 10.1007/s11065-012-9188-z.
- [2] MCEVOY C B, CRABTREE A, POWELL J R, et al. Cumulative blast exposure estimate model for special operations forces combat soldiers [J]. *Journal of Neurotrauma*, 2023, 40(3/4): 318–325. DOI: 10.1089/neu.2022.0075.
- [3] PAIK C B, PEI M, OGHALAI J S. Review of blast noise and the auditory system [J]. *Hearing Research*, 2022, 425: 108459. DOI: 10.1016/j.heares.2022.108459.
- [4] MIZUTARI K. Blast-induced hearing loss [J]. *Journal of Zhejiang University: Science B*, 2019, 20(2): 111–115. DOI: 10.1631/jzus.B1700051.
- [5] 刁明芳. 爆震伤对听觉系统的损害与影响 [J]. *中国耳鼻咽喉颅底外科杂志*, 2016, 22(3): 254–256. DOI: 10.11798/j.issn.1007-1520.201603022.
- [6] PARK W J, MOON J D. Changes in the mean hearing threshold levels in military aircraft maintenance conscripts [J]. *Archives of Environmental and Occupational Health*, 2016, 71(6): 347–352. DOI: 10.1080/19338244.2015.1136588.
- [7] NIWA K, MIZUTARI K, MATSUI T, et al. Pathophysiology of the inner ear after blast injury caused by laser-induced shock wave [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 31754. DOI: 10.1038/srep31754.
- [8] CHO S I, GAO S S, XIA A P, et al. Mechanisms of hearing loss after blast injury to the ear [J]. *PLoS One*, 2013, 8(7): e67618. DOI: 10.1371/journal.pone.0067618.
- [9] 谭君武, 彭洪. 传统方法联合银杏叶注射液治疗爆震性聋的临床分析 [J]. *中华劳动卫生职业病杂志*, 2015, 33(4): 279–281. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1001-9391.2015.04.013.  
TAN J W, PENG H. Clinical analysis of Ginkgo biloba injection combined with traditional therapy in treatment of explosive deafness [J]. *Chinese Journal of Industrial Hygiene and Occupational Diseases*, 2015, 33(4): 279–281. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1001-9391.2015.04.013.
- [10] NAERT G, PASDELOU M P, LE PRELL C G. Use of the guinea pig in studies on the development and prevention of acquired sensorineural hearing loss, with an emphasis on noise [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2019, 146(5): 3743–3769. DOI: 10.1121/1.5132711.
- [11] ARUN P, WILDER D M, EKEN O, et al. Long-term effects of blast exposure: a functional study in rats using an advanced blast simulator [J]. *Journal of Neurotrauma*, 2020, 37(4): 647–655. DOI: 10.1089/neu.2019.6591.
- [12] JIANG S Y, WELCH P, SANDERS S, et al. Mitigation of hearing damage after repeated blast exposures in animal model of chinchilla [J]. *Journal of the Association for Research in Otolaryngology*, 2022, 23(5): 603–616. DOI: 10.1007/s10162-022-00862-2.
- [13] DAHLQUIST A, ELANDER DEGERSTEDT L, VON OELREICH E, et al. Blast polytrauma with hemodynamic shock, hypothermia, hypoventilation and systemic inflammatory response: description of a new porcine model [J]. *European Journal of Trauma and Emergency Surgery*, 2022, 48(1): 401–409. DOI: 10.1007/s00068-020-01476-0.
- [14] GURR A, STARK T, PROBST G, et al. The temporal bone of lamb and pig as an alternative in ENT-education [J].

- Laryngorhinootologie*, 2010, 89(1): 17–24. DOI: 10.1055/s-0029-1224158.
- [15] JIANG S Y, SANDERS S, GAN R Z. Hearing protection and damage mitigation in Chinchillas exposed to repeated low-intensity blasts [J]. *Hearing Research*, 2023, 429: 108703. DOI: 10.1016/j.heares.2023.108703.
- [16] ARTERO-GUERRERO J, PERNAS-SÁNCHEZ J, TEIXEIRA-DIAS F. Blast wave dynamics: the influence of the shape of the explosive [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2017, 331: 189–199. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2017.02.035.
- [17] DEWEY J M. An interface to provide the physical properties of the blast wave from a free-field TNT explosion [J]. *Shock Waves*, 2022, 32(4): 383–390. DOI: 10.1007/s00193-022-01076-4.
- [18] DION G R, MILLER C L, O’CONNOR P D, et al. Correlation of otologic complaints in soldiers with speech disorders after traumatic brain injury [J]. *Journal of Voice*, 2014, 28(1): 88–91. DOI: 10.1016/j.jvoice.2013.08.005.
- [19] CAMPBELL K, CLAUSSEN A, MEECH R, et al. D-methionine (D-met) significantly rescues noise-induced hearing loss: timing studies [J]. *Hearing Research*, 2011, 282(1/2): 138–144. DOI: 10.1016/j.heares.2011.08.003.
- [20] SHAO N N, JIANG S Y, YOUNGER D, et al. Central and peripheral auditory abnormalities in chinchilla animal model of blast-injury [J]. *Hearing Research*, 2021, 407: 108273. DOI: 10.1016/j.heares.2021.108273.
- [21] CAMPBELL K C M, MEECH R P, KLEMENS J J, et al. Prevention of noise- and drug-induced hearing loss with D-methionine [J]. *Hearing Research*, 2007, 226(1/2): 92–103. DOI: 10.1016/j.heares.2006.11.012.
- [22] EWERT D L, LU J Z, LI W, et al. Antioxidant treatment reduces blast-induced cochlear damage and hearing loss [J]. *Hearing Research*, 2012, 285(1/2): 29–39. DOI: 10.1016/j.heares.2012.01.013.
- [23] KIM J, XIA A P, GRILLET N, et al. Osmotic stabilization prevents cochlear synaptopathy after blast trauma [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(21): E4853–E4860. DOI: 10.1073/pnas.1720121115.
- [24] LIU C C, GAO S S, YUAN T, et al. Biophysical mechanisms underlying outer hair cell loss associated with a shortened tectorial membrane [J]. *Journal of the Association for Research in Otolaryngology*, 2011, 12(5): 577–594. DOI: 10.1007/s10162-011-0269-0.
- [25] CHEN T, SMITH K, JIANG S Y, et al. Progressive hearing damage after exposure to repeated low-intensity blasts in chinchillas [J]. *Hearing Research*, 2019, 378: 33–42. DOI: 10.1016/j.heares.2019.01.010.
- [26] HUANG X Y, XIA B C, CHANG L J, et al. Experimental study on intracranial pressure and biomechanical response in rats under the blast wave [J]. *Journal of Neurotrauma*, 2024, 41(5/6): 671–684. DOI: 10.1089/neu.2022.0229.
- [27] ANDERSON D A, ARGO T F, GREENE N T. Occluded insertion loss from intracochlear pressure measurements during acoustic shock wave exposure [J]. *Hearing Research*, 2023, 428: 108669. DOI: 10.1016/j.heares.2022.108669.

(责任编辑 张凌云)