

云雾爆轰冲击波对山羊胸部作用的数值模拟*

陈奕坤¹, 王仲琦¹, 康建毅²

(1.北京理工大学爆炸科学与安全防护全国重点实验室, 北京 100081

2.陆军特色医学中心, 重庆 400042)

摘要: 为了研究云雾爆轰冲击波对生物目标的损伤效应, 分别建立了云雾爆轰模型和山羊胸部有限元模型, 并对模型进行了网格无关性验证和模型有效性分析。在此基础上, 研究了冲击波作用下山羊胸部模型的响应过程, 分析了不同冲击波参数对胸腔动力学响应及肺脏应力传播规律的影响, 并基于数值仿真结果评估不同损伤判据对云雾爆轰肺损伤评价的适用性。结果表明: 冲击波作用下, 胸壁运动压缩肺脏并诱发肺内应力波传播。随着冲量和压力上升时间的增加, 冲击波对胸壁的压缩作用增强, 并削弱了应力波在肺脏内传播的反射特征, 胸部最大压缩速度无法完全评价肺脏损伤。以胸部最大压缩速度作为云雾爆轰肺损伤的评价指标存在局限性, 可能低估肺脏的损伤程度, 可同时使用胸部压缩量与最大压缩速率作为云雾爆轰条件下的肺损伤判据。

关键词: 云雾爆轰; 肺损伤; 有限元模型; 冲击波

中图分类号: O383.1

国标学科代码: 13035

文献标识码: A

Numerical simulation on cloud detonation shock wave loading on goat thorax

CHEN Yikun¹, WANG Zhongqi¹, KANG Jianyi²

(1. State Key Laboratory of Explosion Science and Safety Protection, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Army Medical Center, Chongqing 400042, China)

Abstract: To investigate the injury effects of cloud detonation shock waves on biological targets, a cloud detonation model and a finite element model of the goat thorax were established. Shock wave pressure-time histories at different locations were obtained through numerical simulation of cloud detonation and were applied as input loads to the external air-domain boundary on the blast-facing side of the goat thoracic model. The interaction process between the shock wave and the goat thorax was simulated using a fluid-structure coupling method between the air domain and thoracic tissue structures. Mesh independence verification was performed for both the cloud detonation model and the goat thoracic finite element model, and model validity was analyzed by comparison with field test results. On this basis, chest wall displacement velocity, thoracic compression process, and stress responses at different lung locations were extracted to investigate the dynamic response of the goat thoracic model under shock wave loading. By varying load parameters, including peak overpressure, impulse, and pressure rise time, the effects of different shock wave parameters on thoracic deformation characteristics and pulmonary stress propagation were analyzed. The applicability of cloud-detonation-induced lung injury evaluation indexes was further assessed by combining the maximum thoracic compression rate criterion with the pulmonary stress criterion. The results show that, under shock wave loading, chest

*收稿日期: 2026-04-14; 修回日期: 2026-5-24;

基金项目: 爆炸科学与安全防护全国重点实验室基金项目;

第一作者: 陈奕坤 (2001—), 男, 硕士研究生;

通信作者: 王仲琦 (1972—), 男, 博士, 副教授. E-mail: czqwang@bit.edu.cn。

wall motion compresses the lung and induces stress wave propagation within the pulmonary tissue. As impulse and pressure rise time increase, the sustained compression effect of the shock wave on the chest wall is enhanced, while the reflection characteristics of stress waves propagating in the lung are weakened. Therefore, the maximum thoracic compression rate alone cannot fully evaluate lung injury. Using the maximum thoracic compression rate as an evaluation index for lung injury under cloud detonation conditions has certain limitations and may underestimate lung injury severity under high-impulse and long-rise-time loading conditions. Chest compression and the maximum compression rate can be used together as auxiliary criteria for evaluating lung injury under cloud detonation conditions.

Keywords: Cloud detonation; Lung injury; Finite element model; Shock wave

云雾爆轰是指含能燃料与空气混合后发生的体积爆轰现象，基于云雾爆轰现象研制的云爆弹一直是武器弹药研究的重要方向之一。现有关于云雾爆轰毁伤效应的研究主要集中于弹药结构设计、云雾生长与抛撒特性、超压分布规律及威力评估等方面^[1]，针对生物毁伤效应的研究相对较少。李越等^[2]系统梳理了云爆弹的主要杀伤因素，分析了冲击波、高温、低氧及有害气体等作用对有生力量的损伤特点。胡杨等^[3]和李存治等^[4]分别开展了大当量战斗部爆炸对自由场内不同距离山羊毁伤效应的评估研究，为大当量战斗部爆炸生物损伤规律及防护救治研究提供了参考。Duan 等^[5]研究了温压炸药在高原环境下对山羊肺损伤程度的影响，发现山羊损伤程度随距离和姿态变化表现出明显差异。Yang 等^[6]根据真实自然场爆炸的山羊肺损伤数据以及 CT 影像组学构建了综合评估模型，与传统线性评估模型相比提高了爆炸肺损伤评估的准确性。

云雾爆轰冲击波直接作用于人体时，可导致眼、鼓膜、腹腔和心脏等多部位损伤，并可能引发人员伤亡，其中肺是最易发生致命损伤的器官^[7]。目前，肺部爆炸损伤评价方法主要包括 Bowen 损伤曲线^[8]、Stuhmiller 损伤模型^[9]和 Axelsson 损伤模型^[10]。Richmond 等^[11]的动物试验表明，对于压力上升时间为数毫秒的冲击波，狗的 50% 致死压力为 344.8 kPa；当压力上升时间增至 20 ms 时，该值可升高至 1379 kPa。王波等^[12]建立了人体爆炸冲击模型，用于探讨肺损伤致伤机制及评价指标，结果表明应力波是导致肺损伤的主要因素，靠近胸前壁和心脏的肺部区域更易受损，胸骨速度峰值与加速度峰值可作为肺损伤评价指标。Fan 等^[13]研究了胸廓方向对肺损伤的影响，发现不同方向下肺组织压力和应力差异明显。刘迪等^[14]研究了防护条件下山羊胸部致伤的数值模拟研究，发现山羊迎爆侧受伤最为严重。高能炸药爆炸时，能量在极小体积内近似瞬时释放，相比之下，云雾爆轰受反应区尺度大和发展过程较长等因素影响，其近场峰值超压相对较低，但正压作用时间更长、冲量更高^{Error! Reference source not found.}，且超压衰减速度更缓慢^[15]。以 Axelsson 损伤模型为例，模型主要基于 Yelverton 等^[16]的生物试验建立，试验以 57 g 至 1.3 kg 的 C4 炸药为爆源，其爆炸产生的冲击波正压持续时间和冲量等参数与云雾爆轰相比较低，因此该损伤准则未必完全适用于云雾爆轰条件下的生物损伤评估。

针对上述问题，本文建立了云雾爆轰模型和山羊胸部有限元模型，研究云雾爆轰冲击波作用下山羊胸部的响应过程。在此基础上，通过改变超压、冲量和压力上升时间等冲击波入射参数，分析不同参数下山羊胸部动力学响应和肺脏应力传播规律，结合肺损伤评估结果，评价常用胸部损伤指标对云雾爆轰肺损伤评价的适用性及局限性。

1 有限元模型构建及有效性验证

由于云雾爆轰模型主要用于描述大尺度空气域中冲击波的传播过程，而山羊胸部模型需要精细刻画肋骨、胸壁、肺脏等组织结构，二者在计算尺度和网格精度要求上存在明显差异。为兼顾计算精度和计算效率，本文将云雾爆轰过程与冲击波对山羊致伤过程分开计算。通过云雾爆轰数值模拟获取山羊布放位置处的压力曲线，将该曲线作为输入载荷施加于山羊胸部模型迎爆侧外部空气域边

界，并通过空气与山羊胸部的流固耦合模拟冲击波对山羊的致伤过程，进而分析山羊胸部在冲击波作用下的响应过程。

1.1 有限元模型构建

1.1.1 云雾爆轰模型构建

为获得山羊胸部有限元模型的外部冲击波载荷，首先建立了单点云雾爆轰模型。模型根据外场试验工况设置云雾区几何形态、起爆位置。图 1 所示为云雾爆轰模型，云雾顶端距离地面的高度为 7m，云雾区底面形貌为等腰梯形，云雾区上底长 21 m，下底长 37 m，高 30 m。建立模型时默认云雾均匀分布，起爆点位于云雾区中心，离地面距离为 5m，图中 O 点位于爆炸场中心，A、B 两个测点距爆炸场中心分别为 30m、48m。模型网格尺寸为 0.4m，计算域边界条件设置为无反射边界。云雾采用高能炸药模型

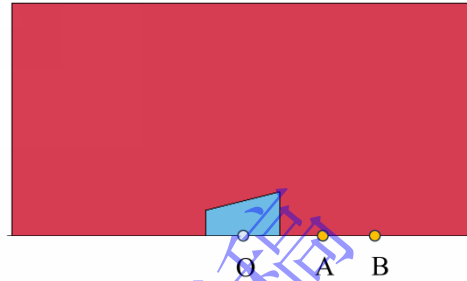


图 1 单点云雾爆轰模型

Fig. 1 Single cloud detonation model

(MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN)，空气域采用空材料模型 (MAT_NULL)，云雾材料参数如表 1 所示。

表 1 云雾材料参数

Table 1 Material Parameters of the Cloud

密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	爆轰速 度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	爆轰压力/Pa	内能/($\text{J}\cdot\text{m}^{-3}$)	ν	B/(Pa)	R_2	ω
1.325	1861	3.32×10^6	2×10^6	1.0	3.89×10^6	0.4312	0.255

1.1.2 山羊有限元模型构建

选取体重约 25 kg 山羊的第 4-5 胸椎 CT 图像作为建模对象，对扫描数据进行识别与三维重建，获得肌肉组织（含皮肤）、骨组织（胸骨、肋骨、椎骨和锁骨）以及内脏器官（心脏、肺）等结构。为降低建模复杂度，将肌肉组织与皮肤视为同一组织，并采用相同材料参数。模型网格在 HyperMesh 中划分，关键词在 LS-PrePost 中设置。

模型为三维实体结构，采用六面体网格，网格尺寸为 4 mm。肺脏组织采用空材料模型 (MAT_NULL)，肌肉、心脏及其他器官采用黏弹性材料模型 (MAT_VISCOELASTIC)，骨骼采用线弹性材料模型 (MAT_ELASTIC)。考虑到山羊与人体同属哺乳动物，而针对山羊组织材料参数的公开研究相对有限，本文选取文献中人体组织材料参数^[18]作为模型参数输入，具体取值见表 2、3、4。通过关键词

表 2 胸部模型骨骼材料参数

组织 器官	密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	杨氏模量 /(GPa)	泊松比
肋骨	1.08	9.5	0.379
脊椎	1.33	0.355	0.26
软肋骨	1.06	0.049	0.4
胸骨	1.35	3.5	0.387

Table 2 Bone material parameters of chest model

表 3 肺脏材料参数

Table 3 Lung material parameters

密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	粘性系数	波速/ (m/s)	S_1
0.288	1	30	1.295

*LOAD_SEGMENT_SET 在空气域边界加载载荷，载荷曲线通过关键词*DEFINE_CURVE 定义，通

过流固耦合实现冲击波对山羊模型的作用，除冲击波入射面外，空气域其余边界均设置为无反射边界。

为便于表述，在后续研究中将首先受到冲击波作用的一侧定义为正面，另一侧定义为背面。图 2 为山羊胸部有限元模型，为分析冲击波作用过程中胸腔变形特征及应力传播过程，选取胸部两侧肋骨末端节点运动速度表征胸壁位移速度，并提取山羊迎爆侧肺叶边缘、肺叶中部、肺叶顶部，即图中 A、B、C 处的应力曲线以分析肺内应力波传播规律。

表 4 胸部模型软组织材料参数

Table 4 Soft tissue material parameters of chest model

组织器官	密度/ (g·cm ⁻³)	体积模量 (GPa)	短时剪切模量/ (kPa)	长时剪切模量/ (kPa)	衰减系数/(s ⁻¹)
肌肉	1.2	9.5	200	195	100
心脏	1	0.355	67	65	100
膈肌	1.2	9.5	200	195	100

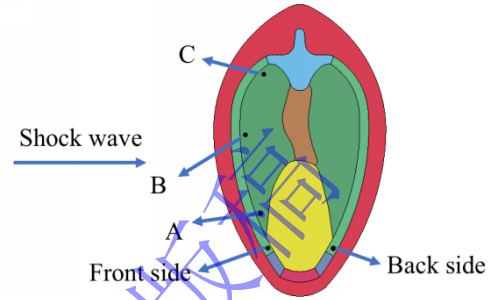


图 2 山羊有限元模型图

Fig. 2 Finite element model of goat chest

1.2 网格无关性验证

1.2.1 云雾网格无关性验证

为评估爆炸流场模型网格尺寸对冲击波载荷提取结果的影响，选取外场试验对应的单点云雾爆轰工况开展网格无关性验证。在保持云雾区几何尺寸、计算域尺寸、边界条件和测点位置不变的条件下，分别建立不同网格尺寸的云雾爆轰模型，并对比距爆炸场中心 20 m、30 m 和 48 m 测点处的冲击波超压。

表 5 云雾爆轰模型网格无关性验证

Table 5 Mesh independence verification results of the cloud detonation model

网格尺寸/m	20m 处超压/		30m 处超压/		48m 处超压/	
	(kPa)	误差	(kPa)	误差	(kPa)	误差
1	294.1	13.16%	128.4	-21.30%	64.5	-24.21%
0.8	307.5	9.24%	143.2	-12.31%	72.8	-14.45%
0.4	331.4	2.15%	157.4	-3.61%	81.5	-4.23%
0.2	338.7	—	163.3	—	85.1	—

表 5 给出了四种不同网格尺寸，不同距离处的超压峰值，以及与网格尺寸为 0.2 m 相比时的相对误差，对比结果表明，网格从 0.4 m 细化到 0.2 m 时，最大误差低于 5%。综合考虑计算效率及成本，本文选取网格尺寸为 0.4 m 的网格进行数值模拟计算。

1.2.2 山羊模型网格无关性验证

为评估网格尺寸对山羊胸部有限元模型计算结果的影响，选用超压为 0.2 MPa，正压持续时间为 3 ms 的冲击波作为载荷输入，开展网格无关性验证。在保持模型几何结构、材料参数、接触关系、边界条件和外部载荷完全一致的条件下，分别建立不同网格尺寸的山羊胸部有限元模型，并对比相同冲击波加载下不同网格尺寸的山羊胸部模型响应差异。

表 6 山羊胸部模型网格无关性验证

Table 6 Mesh independence verification results of the goat thoracic model

网格尺寸/mm	正面肋骨最大位移速	误差	肺脏局部最大应力/	误差
---------	-----------	----	-----------	----

	度/(m/s)		(kPa)	
6	5.3	-12.3%	213.6	-21.14%
5	5.9	-9.23%	238.2	-8.54%
4	6.3	-3.07%	261.5	-3.64%
3	6.5	—	271.4	—

表 6 给出了四种不同网格尺寸下, 山羊模型的正面肋骨最大位移速度、肺脏局部最大应力值, 以及与网格尺寸为 3 mm 相比时的相对误差, 对比结果表明, 网格从 4 mm 细化到 3 mm 时, 最大误差低于 5%。综合考虑计算效率及成本, 本文选取网格尺寸为 4 mm 的网格进行数值模拟计算。

1.3 模型有效性验证

为验证云雾爆轰模型和山羊有限元模型的准确性, 本文选取单发云爆弹外场试验作为验证工况。云爆弹质量为 500 kg, 试验动物为 2 只体重约 25 kg 的山羊, 分别布置于距爆炸场中心 30 m 和 48 m 处, 山羊通过支架固定, 呈站立姿态, 胸腹部朝向爆炸场中心, 冲击波超压测试传感器布置于山羊侧面。现场布置如图 3 所示。



图 3 山羊布置示意图

Fig. 3 Schematic of goat

压力测量系统采用 Elsys 数据采集仪, 采样频率为 1 MHz, 用于记录爆炸冲击波压力时程曲线。经测量得到距爆炸场中心 30 m 和 48 m 处的冲击波超压峰值分别为 164.6 kPa 和 85.7 kPa。通过数值模拟得到距爆炸场中心 30 m 和 48 m 两处测点的冲击波峰值超压分别为 157.4 kPa 和 81.5 kPa。对比结果表明, 数值模拟得到的冲击波超压误差低于 5%, 云雾爆轰模型具有可靠性。

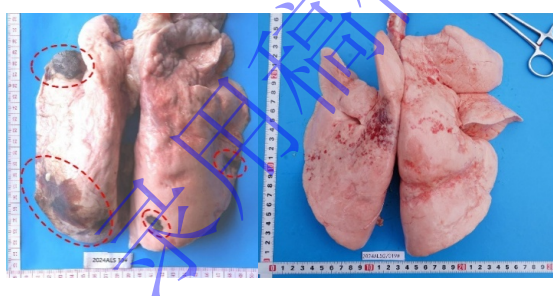


图 4 山羊肺脏解剖图

Fig. 4 Anatomy of the goat lung

试验结束后山羊仍处于存活状态, 观察 24h 后将山羊经颈动脉放血处死, 检查组织损伤程度和范围。山羊肺脏解剖结果如图 4 所示, 判定标准采用定性评估^[19]: 30 m 处山羊肺脏为片状出血, 出血面积约占全肺 19%, 损伤程度判定为中度伤; 48 m 处山羊肺脏出血表现为点状和散在性分布, 出血面积低于 10%, 判定为轻伤。将仿真得到的超压曲线加载至山羊胸部模型上得到肺脏平均应力最大值分别为 96 kPa 和 47 kPa。依据表 7 所示 Greer^[20] 提出的肺损伤判据, 相应损伤等级分别为中度伤和轻伤, 与解剖结果基本一致, 说明模型具有可靠性。

表 7 Greer 肺损伤判据

Table 7 Greer lung injury assessment criteria

肺脏损伤等级	肺脏最大应力均值/kPa
轻伤	35
重伤	129
50%死亡概率	186

2 云雾爆轰冲击波载荷特征以及作用于山羊胸部时的基本响应过程

2.1 冲击波载荷特征对比

针对 500 kg 云雾爆轰工况进行了数值模拟，提取云雾场中距离爆炸场中心 20 m、35 m 处的冲击波载荷曲线以及对应参数。TNT 爆炸冲击波参数及曲线则通过关键词 *LOAD_BLAST_ENHANCED 获取。由于云雾爆轰为体积源爆炸，云雾区空间尺度不可忽略。其中，“Cloud-20m”表示距离云雾爆炸场中心 20m 处的位置，该位置距离云雾边缘 5 m，“Cloud-35 m”则表示载荷继续向外传播 15 m 后的结果。同理，“TNT-5 m”和“TNT-20 m”分别表示距 TNT 爆源中心 5 m 和 20 m 处，二者同样存在 15 m 的传播距离。通过上述设置，可在考虑云雾体积源尺度影响的基础上，对比云雾爆轰与 TNT 爆炸冲击波在近场载荷特征及传播衰减过程中的参数差异。表 8 和图 5 分别给出了云雾和 TNT 爆炸冲击波的载荷参数和超压曲线。对比结果表明，TNT 爆炸冲击波的起始超压更高，可达 2.28 MPa，冲量略低；传播 15m 后，TNT 冲击波超压降低至 0.11 MPa，略低于相同传播距离下即 35m 处云雾爆轰冲击波的超压，且冲量明显低于同距离云雾爆轰工况。说明相比于 TNT 爆炸，云雾爆轰冲击波初始超压较低，但冲量较大，传播衰减速度较慢。

表 8 冲击波载荷参数

Table 8 Shock wave load parameters

冲击波	超压/MPa	正压持续时间/ms	冲量/Pa·s
Cloud-20m	0.33	19	2431
Cloud-35m	0.12	36	1953
TNT-5m	2.28	28	2281
TNT-20m	0.11	12	432.1

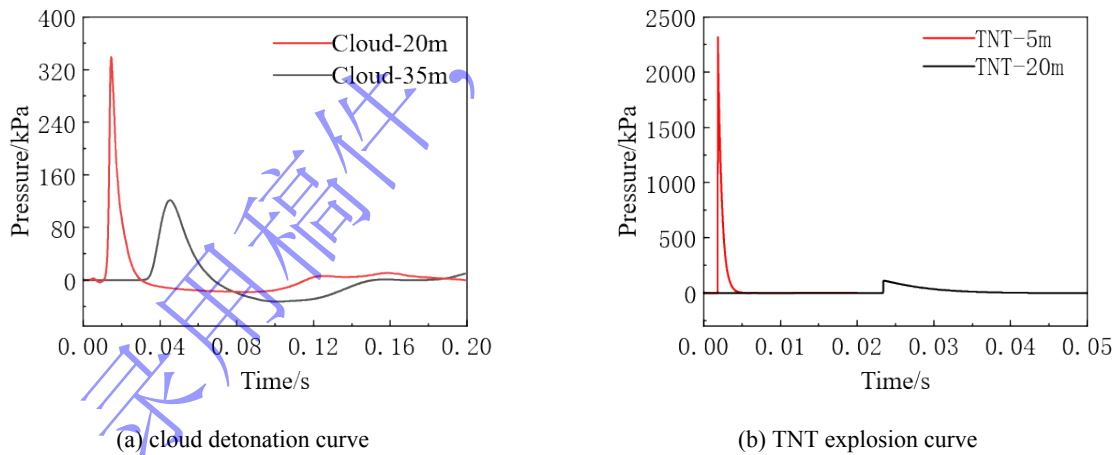


图 5 云雾与 TNT 爆炸冲击波载荷曲线

Fig. 5 Shock wave load curves of cloud detonation and TNT explosion

2.2 冲击波作用下山羊胸部基本响应过程

选取距离爆炸场中心 20m 的云雾爆轰冲击波曲线加载至山羊模型表面，冲击波峰值超压为 0.33 MPa，正压持续时间为 19 ms。计算得到的肺脏应力云图和胸部响应曲线分别如图 6 和图 7 所示。

如图 7(a) 所示，在 1.8 ms 时冲击波到达山羊模型表面并与胸壁发生作用。在冲击波作用下肋骨位移速度在极短时间内升至峰值，随后在惯性作用下压缩肺脏，位移速度则开始下降，同时背面肋骨位移速度开始上升，在冲击波的持续作用下正面肋骨位移速度在下降一段时间后开始缓慢上升，

但胸廓整体的压缩速度仍呈现出下降趋势。6.2 ms 时，前后肋骨位移速度相同，胸部压缩量达到最大，胸廓开始扩张；12.9ms 时，两侧肋骨速度再次相等，胸廓再次进入压缩过程。数次压缩与扩张过程中，山羊两侧肋骨的速度始终在一个稳定的范围内波动，表明胸部器官速度逐渐稳定，胸部整体向后运动。

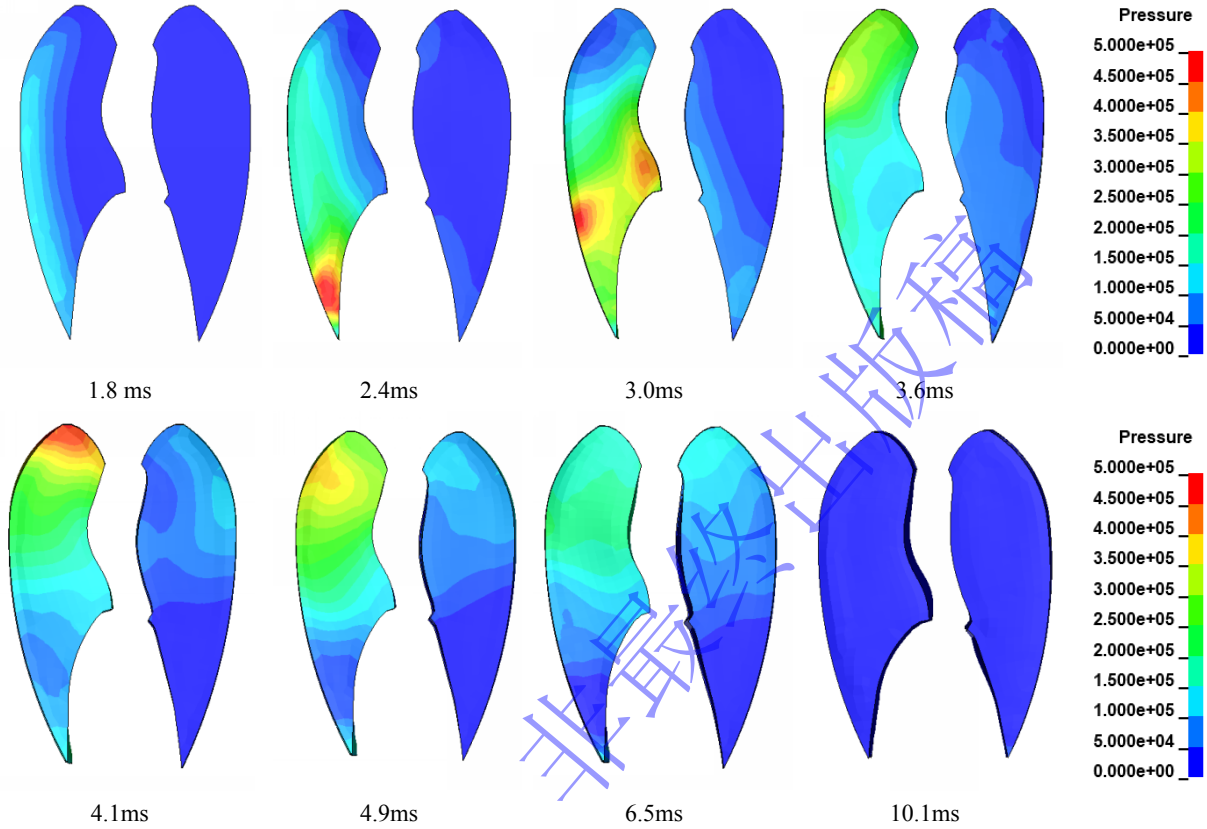
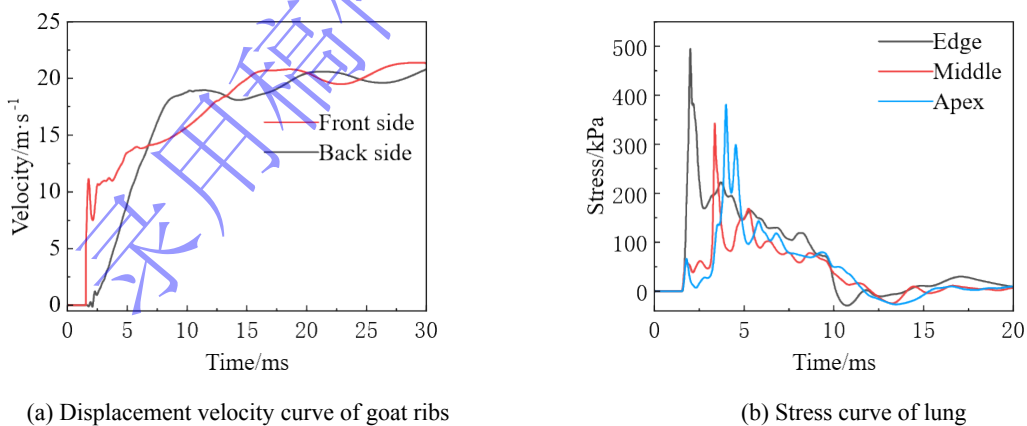


图 6 冲击波作用下山羊肺脏在不同时刻肺脏应力云图

Fig. 6 Time-resolved stress contours of the goat lung under shock wave loading



(a) Displacement velocity curve of goat ribs

(b) Stress curve of lung

图 7 冲击波作用下山羊肋骨位移速度曲线和应力曲线

Fig. 7 Displacement velocity and stress curves under shock wave loading

如图 7(b) 所示，为山羊肺脏不同位置的应力曲线。结合图 6 所示应力云图可知，在 1.8 ms 时，冲击波与山羊模型接触，冲击波超压在极短时间内上升至峰值，由于软肋骨刚度较低，与其连接部位的肋骨位移速度更大，因而该区域对肺叶边缘的挤压更为显著，肺叶边缘应力最先升高并到达峰值。随后，受肺脏与胸壁阻抗差异影响，应力波沿胸壁方向传播，随着传播距离增加，应力波的峰

值逐渐降低。4.1 ms 时，应力波传播至肺脏顶部，并在胸壁与肋骨约束作用下发生汇聚和反射，导致局部应力再次升高。随后肺脏应力整体缓慢下降，表明山羊胸部响应逐渐趋于稳定。

3 冲击波参数对力学响应的影响规律研究

在研究不同冲击波参数对山羊模型响应过程的影响时，通过输入冲击波载荷曲线将其作为边界条件施加于山羊模型空气域上，同时对冲击波参数进行单独修改，以减弱其他因素对实验结果的干扰。三组对照实验中冲击波的峰值超压范围为 0.1~0.45 MPa，冲量范围为 144~720 Pa·s，压力上升时间范围为 0~2 ms。

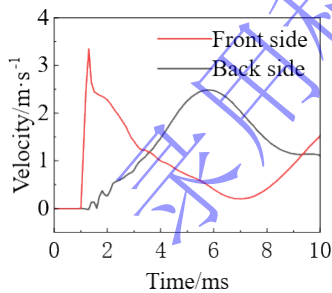
3.1 冲击波参数对胸腔变形过程的影响

图 8 为不同参数冲击波作用下山羊胸部模型的肋骨位移速度曲线。随着冲击波超压和冲量增加，肋骨位移速度曲线的整体变化趋势未发生明显改变。胸腔变形过程表现为：正面肋骨位移速度迅速升至峰值，同时胸部最大压缩速度到达峰值，随后胸壁在惯性作用下持续挤压肺脏，胸廓整体经历数次压缩扩张过程并向后移动。由表 9 可知，随着超压的增加，速度峰值显著增加；随着冲量的增加，正面肋骨位移速度峰值上升到一定值后则不再增加，且两组工况中正面肋骨最大位移速度等于胸部最大压缩速率。随着冲击波压力上升时间增加，正面肋骨最大位移速度和胸部最大压缩速率峰值均降低，且二者不再相等。以压力上升时间为 1 ms 的工况为例，1.35 ms 时冲击波到达山羊模型表面，正面肋骨位移速度和胸部压缩速率开始上升；2.35 ms 时冲击波压力升至峰值，此时山羊胸部压缩速率到达峰值，肋骨位移速度则继续升高，但增速减缓，胸壁对肺脏的压缩过程开始变为胸壁自身的惯性主导；3.95 ms 时肋骨位移速度达到峰值，之后，肋骨位移速度开始降低。这一结果表明，当压力上升时间增加后，冲击波持续加载作用于山羊胸部模型的时间增加，胸壁挤压肺脏的方式由冲击波瞬时加载后的惯性挤压变为冲击波持续加载挤压。

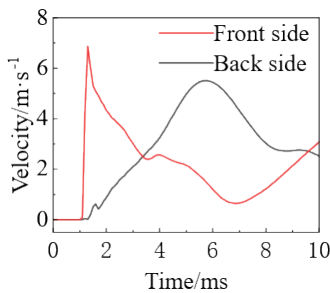
表 8 肋骨位移速度

Table 8 Displacement velocity of goat ribs

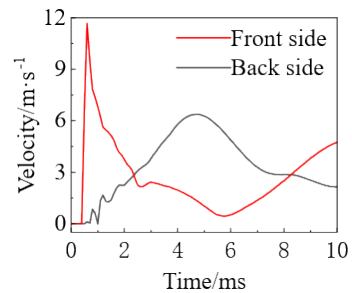
冲击波载荷	正面肋骨最大位移速度/m/s	胸部最大压缩速率/m/s
0ms-0.1 MPa-54 Pa·s	3.3	3.3
0ms-0.2 MPa-54 Pa·s	6.1	6.1
0ms-0.45 MPa-54 Pa·s	11.8	11.8
0ms-0.2 MPa-144 Pa·s	6.9	6.9
0ms-0.2 MPa-360 Pa·s	7.8	7.8
0ms-0.2 MPa-720 Pa·s	7.8	7.8
1ms-0.2 MPa-360 Pa·s	7.2	4.7
2ms-0.2 MPa-360 Pa·s	6.9	4.1



(a) 0.1 MPa-54 Pa·s



(b) 0.2 MPa-54 Pa·s



(c) 0.45 MPa-54 Pa·s

I Overpressure

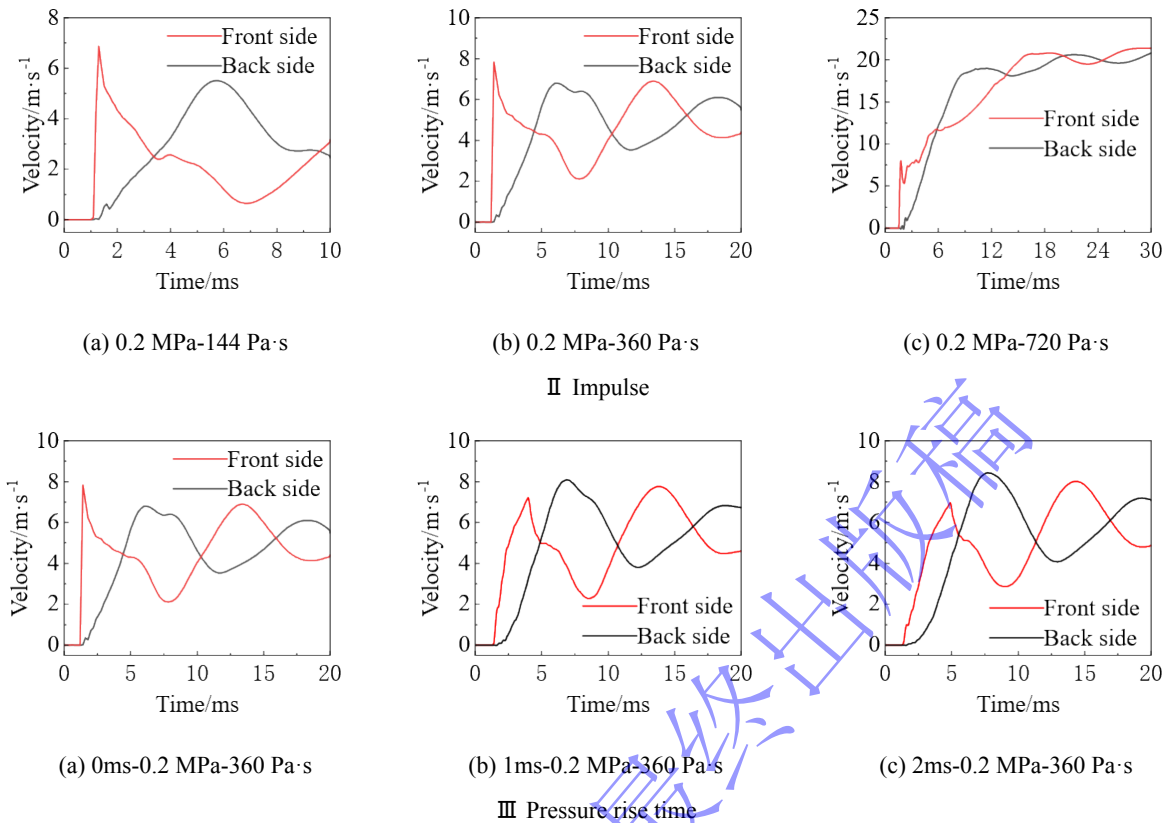


图 5 冲击波作用下山羊肋骨位移速度曲线

Fig. 5 Displacement velocity curves of goat ribs under shock wave loading

3.2 冲击波参数对肺脏应力传播过程的影响

图 9 为不同参数冲击波作用下山羊胸部模型的肺脏应力曲线。随着峰值超压和冲量增加，肺脏应力曲线的整体形态未发生明显改变：肺叶边缘应力曲线为明显的单峰，肺叶中部在冲击波作用于胸壁的瞬间出现一个较低的波峰，并在应力波传播到达后出现第二个更高的波峰；肺叶顶部在此基础上还出现由反射作用形成的多个次峰。不同工况的主要差异体现在应力峰值大小。由表 10 可知，随着峰值超压和冲量增大，肺脏局部应力峰值以及肺脏应力均值明显增加，随着压力上升时间增加，肺叶边缘在应力峰值降低的同时还出现了第二个峰值，肺叶各位置的应力曲线整体形态也趋于一致。这表明，冲击波瞬时加载至峰值时，由胸壁快速挤压形成的应力波峰值高于持续加载条件下形成的应力波峰值。同时，肺叶顶部应力曲线由多峰特征逐渐转变为单峰特征，说明在冲击波持续加载条件下，由胸部压缩引起的肺内应力波反射过程减弱。对比不同工况下的应力曲线发现，随着冲量和压力上升时间的增加，肺脏各个位置的应力差距逐渐降低，表明肺脏内部应力响应的空间非均匀性减小，肺脏整体压缩效应有所增强。

表 9 肺脏应力表

Table 9 Stress of lung

冲击波载荷 冲击波峰值 峰值/kPa	肺脏应力表 Table 10 Stress of lung	
	肺脏局部应力 峰值/kPa	肺脏应力均值 /kPa
0ms-0.1MPa-54 Pa·s	98.2	27.9
0ms-0.2 MPa-54 Pa·s	248.5	69.5
0ms-0.45 MPa-54 Pa·s	688.4	164.9
0ms-0.2 MPa-144 Pa·s	349.4	92.3
0ms-0.45 MPa-360 Pa·s	588.4	164.7
0ms-0.2 MPa-144 Pa·s	384.6	122.3
0ms-0.2 MPa-360 Pa·s	399.7	102.7
0ms-0.2 MPa-360 Pa·s	468.8	172.9
1ms-0.2 MPa-360 Pa·s	221.7	85.2
2ms-0.2 MPa-360 Pa·s	208.8	77.4

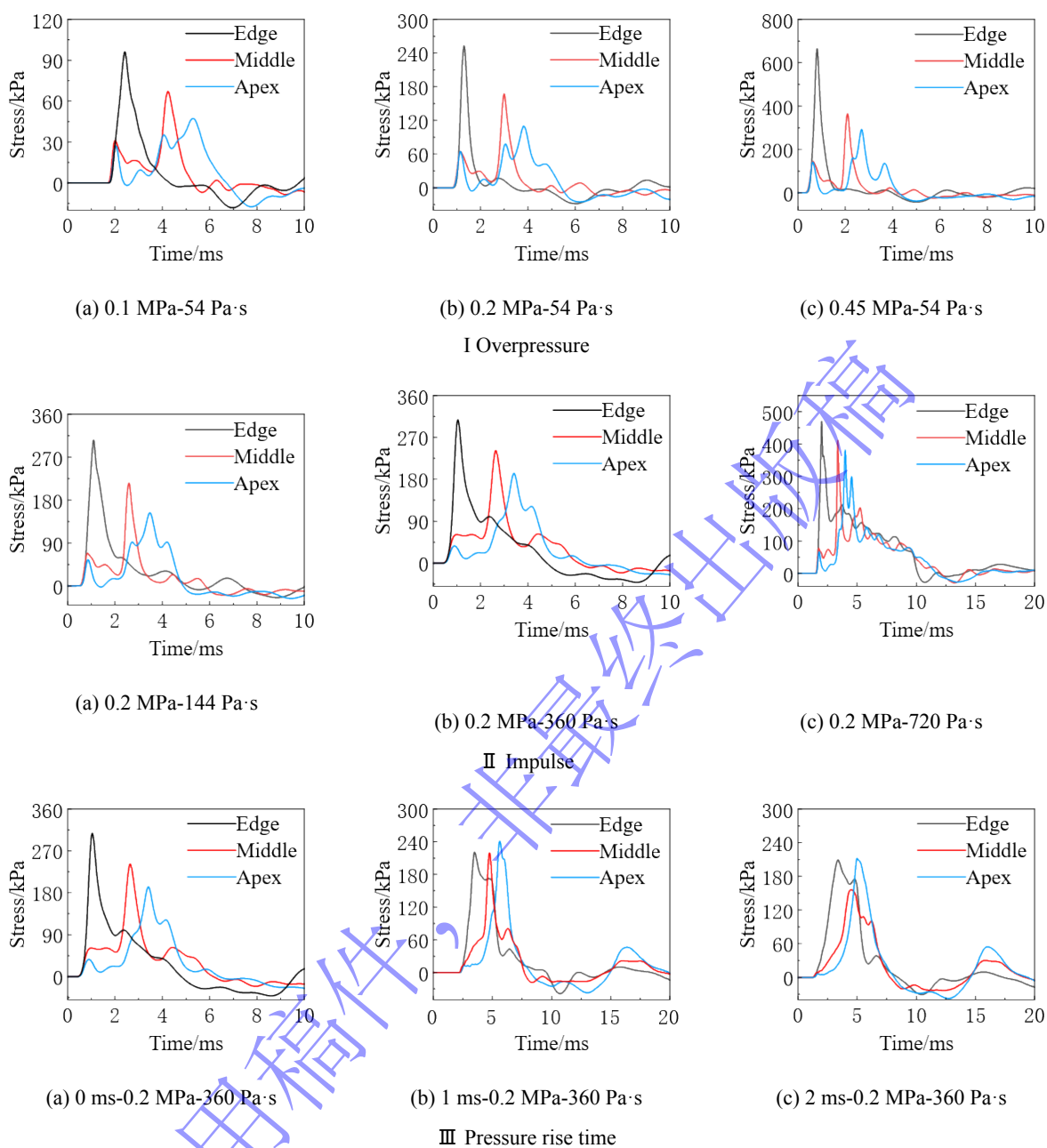


图 6 冲击波作用下山羊肺脏应力曲线

Fig. 6 Stress curves of goat lung under shock wave loading

3.3 冲击波作用下的肺部损伤评估

对于肺部冲击损伤的评估, Axelsson 等^[10]基于羊爆炸试验提出了如表 11 所示的胸部最大压缩速率与肺损伤程度的对应关系; Greer^[20]以 Bowen 等试验数据为基础结合数值模拟, 提出了前文表 7 所示的基于肺脏应力值的肺部爆炸伤评价标准。本文参照上述两类损伤评价标准, 结合数值模拟结果, 获得了不同冲击波工况下山羊肺损伤评估指标及其对应损伤等级。

如表 12 所示, 随着超压的增加, 两种评价标准对应的肺损伤等级整体均呈增加趋势, 同时两个判据的评估结果总体一致。但超压为 0.2 MPa 时, 当冲量增至 720 Pa·s 或压力上升时间为 1ms、2ms 时, Axelsson 判据得到的损伤等级要低于 Greer 判据, 表明其对该条件下的损伤程度存在低估。

表 11 Axelsson 损伤评估标准

Table 11 Axelsson injury assessment criteria

肺脏损伤等级	胸部最大压缩速率/(m/s)
微伤~轻伤	3.6~7.5
轻伤~中伤	4.3~9.8
中伤~重伤	7.5~16.9
>50%致命伤	>12.8

在冲击波作用过程中，冲击波瞬间作用在胸壁上，胸壁位移速度迅速增加，然后胸壁在惯性作用下挤压肺脏，胸部压缩速率几乎是瞬间到达峰值，此时胸部压缩量较低，损伤响应更容易表现为与胸壁快速运动相关的动态效应，因此使用胸部最大压缩速率作为评价肺损伤的重要指标；在汽车碰撞过程中，撞击物则是持续挤压胸部和肺脏，为较长持续时间的冲击，因此常用胸部压缩量和黏性响应系数来评价胸部器官的损伤。

表 12 肺脏损伤等级表

Table 12 Table of lung injury

冲击波载荷	胸部最大压缩速率/(m/s)	肺脏损伤等级	肺脏应力均值/(kPa)	肺脏损伤等级
0ms-0.1 MPa-54 Pa·s	3.3	无伤	27.9	无损伤
0ms-0.2 MPa-54 Pa·s	6.1	轻微伤	69	轻微伤到轻伤
0ms-0.45 MPa-54 Pa·s	11.8	中伤至重伤	164.7	中伤至重伤
0 ms-0.2 MPa-144 Pa·s	6.9	轻伤至中伤	92.3	轻伤至中伤
0 ms-0.2 MPa-360 Pa·s	7.8	轻伤至中伤	102.7	中伤
0 ms-0.2 MPa-720 Pa·s	7.8	轻伤至中伤	172.9	重伤
1ms-0.2 MPa-360 Pa·s	4.7	轻微伤	85.2	轻伤至中伤
2ms-0.2 MPa-360 Pa·s	4.1	轻微伤	77.4	轻伤至中伤

随着冲击波冲量的增加，山羊受载时间延长，胸壁持续压缩作用增强，此时胸部压缩对肺脏损伤的影响不宜忽略。随着冲击波压力上升时间增加，胸部最大压缩速率到达峰值时，肺脏已产生一定程度的压缩变形，相比未压缩时的情况更容易造成损伤。因此，单独采用 Axelsson 胸部最大压缩速率判据时，可能难以充分反映高冲量和较长压力上升时间条件下胸壁持续压缩对肺脏损伤的影响。云雾爆轰冲击波在持续时间和加载速率方面介于汽车碰撞与高能炸药爆炸冲击之间，其损伤评估准则的选取不宜直接照搬单一场景下的评价指标。与高能炸药相比，云雾爆轰冲击波具有更明显的持续加载特征。因此，云雾爆轰生物损伤评估不宜采用胸部最大压缩速率作为单一指标，而应综合考虑胸部压缩量和胸部最大压缩速率作为辅助判据，对云雾爆轰作用下胸部器官损伤进行综合评价。

4 结论

本文建立了山羊胸部有限元模型，并结合外场试验对模型进行了验证。在此基础上，分析了冲击波作用下山羊胸部的响应过程，以及不同冲击波参数对山羊胸部响应的影响规律。主要结论如下：

(1) 冲击波超压和冲量的增加会加剧肺脏损伤，压力上升时间的增加会使肺脏的损伤程度降低。冲量的增加会使山羊胸部受载时间变长，胸部压缩量对山羊损伤的贡献增加。

(2) 压力上升时间的增加使胸壁对肺脏的挤压方式由惯性主导转变为冲击波持续加载主导，降低了胸部最大压缩速率，削弱应力波在肺脏内传播的反射特征，使肺脏的压缩效应更明显，只使用胸部最大压缩速率作为评估指标可能会低估生物的损伤程度。

(3) 在评价云雾爆轰冲击波对生物目标的损伤时, 冲量的增加会使基于胸部最大压缩速率的肺损伤评估结果偏低, 说明传统损伤判据在评价云雾爆轰损伤时存在一定局限, 因此云雾爆轰下的生物损伤评估可同时考虑胸部压缩量与最大压缩速率, 而不是以单一变量为指标进行评估。

参考文献

- [1] 刘想炎, 黄振贵, 陈秋元, 等. 云爆弹对地面人员综合杀伤的仿真评估研究[J]. 兵器装备工程学报, 2020,41(08): 103-106. DOI: 10.11809/bqzbgcxb2020.08.020.
LIU X Y, HUANG Z G, CHEN Q Y, et al. Simulation Evaluation of Comprehensive Killing Effect of FAE on Ground Personnel Targets [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2020, 41(08): 103-106. DOI: 10.11809/bqzbgcxb2020.08.020.
- [2] 李越, 李兵仓. 云爆弹/温压弹的杀伤因素及杀伤特点的研究进展[J]. 创伤外科杂志, 2022,24(01): 18-22. DOI: 10.3969/j.issn.1009-4237.2022.01.004.
LI Y, LI B C. Research progress on killing factors and wound characteristics for human body of FAE/TB [J]. Journal of Traumatic Surgery, 2022, 24(01): 18-22. DOI: 10.3969/j.issn.1009-4237.2022.01.004.
- [3] 胡杨, 孙冠超, 李静, 等. 300kg TNT 对绵羊毁伤效应的评估[J]. 空军军医大学学报, 2023,44(03): 235-238. DOI: 10.13276/j.issn.2097-1656.2023.03.008.
HU Y, SUN G C, LI J, et al. Evaluation of damage effect of 300kg TNT on sheep [J]. Journal of Air Force Medical University, 2023, 44(03): 235-238. DOI: 10.13276/j.issn.2097-1656.2023.03.008.
- [4] 李存治, 王鸿, 范小琳, 等. 某战斗部静爆对山羊的毁伤效应研究[J]. 创伤外科杂志, 2021,23(09): 705-709. DOI: 10.3969/j.issn.1009-4237.2021.09.016.
LI C Z, WANG H, FAN X L, et al. Damage effect of warhead explosion on goats [J]. Journal of Traumatic Surgery, 2021, 23(09): 705-709. DOI: 10.3969/j.issn.1009-4237.2021.09.016.
- [5] DUAN Z, LI G, ZHANG J, et al. Effects of orientation and distance of goats on blast lung injury characteristics on a plateau above 4500-meter[J]. CHINESE JOURNAL OF TRAUMATOLOGY, 2023,26(3): 139-146. DOI: 10.1016/j.cjtee.2022.09.001.
- [6] YANG B, WANG H, FENG L, et al. CT radiomics to assess severity of explosion-induced primary blast lung injury in goats[J]. SCIENTIFIC REPORTS, 2025,15(1). DOI: 10.1038/s41598-025-03069-6.
- [7] 阮洪伟, 范思宇, 曾灵, 等. 爆炸冲击伤发生机制及防护材料研究进展[J]. 爆炸与冲击, 2024,44(12): 43-56. DOI: 10.11883/bzycj-2024-0197.
RUAN H W, FAN S Y, CENG L, et al. Research progress on the mechanism of explosion impact injury and protective materials [J]. Explosion and Shock Waves, 2024, 44(12): 43-56. DOI: 10.11883/bzycj-2024-0197.
- [8] BOWEN I G, FLETCHER E R, RICHMOND D R. Estimate of man's tolerance to the direct effects of air blast[R].1968.
- [9] STUHMILLER J H. Biological response to blast overpressure: A summary of modeling[J]. TOXICOLOGY, 1997,121(1): 91-103. DOI: 10.1016/S0300-483X(97)03658-5.
- [10] AXELSSON H, YELVERTON J T. Chest wall velocity as a predictor of nonauditory blast injury in a complex wave environment[J]. Journal of Trauma and Acute Care Surgery, 1996,40(3): 31-37. DOI: 10.1097/00005373-199603001-00006.

- [11] RICHMOND D R, YELVERTON J, FLETCHER E R. Far-field under water-blast injuries produced by small charges[R]. Washington DC: Defense Nuclear Agency, 1973.
- [12] 王波, 杨剑波, 姚李刚, 等. 爆炸冲击波作用下人体肺部的损伤[J]. 爆炸与冲击, 2022,42(12): 13-21. DOI: 10.11883/bzycj-2022-0173.
WANG B, YANG J B, YAO L G, et al. Blast injuries to human lung induced by blast shock waves [J]. Explosion and Shock Waves, 2022, 42(12): 13-21. DOI: 10.11883/bzycj-2022-0173.
- [13] FAN Z, ZHANG S, GAN H, et al. Assessing the effect of chest orientation on pulmonary pressure under free field shock waves: a numerical analysis[J]. ACTA OF BIOENGINEERING AND BIOMECHANICS, 2024,26(2): 45-58. DOI: 10.37190/abb-02427-2024-04.
- [14] 刘迪, 陈菁, 张安强, 等. 爆炸冲击波作用下聚脲材料对肺冲击伤防护作用的数值模拟研究[J]. 爆炸与冲击, 2024,44(12): 84-94. DOI: 10.11883/bzycj-2024-0205.
LIU D, CHEN J, ZHANG A, et al. Numerical simulation study on the protective effects of polyurea materials against lung blast injuries under blast wave loading[J]. Explosion and Shock Waves, 2024,44(12). DOI: 10.11883/bzycj-2024-0205.
- [15] 张陶惠, 君明, 解立峰, 等. FAE 爆炸场超压与威力的实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2004(02): 176-181. DOI: 1001-1455 (2004) 02-0176-06.
ZHANG T H, JUN M, XIE L F, et al. Experimental research on the overpressure and power in the FAE blast field[J]. Explosion and Shock Waves, 2004(02): 176-181. DOI: 1001-1455 (2004) 02-0176-06.
- [16] 赵新颖, 王伯良, 李席. 温压炸药在野外近地空爆中的冲击波规律[J]. 爆炸与冲击, 2016,36(01): 38-42. DOI: 10.11883/1001-1455(2016)01-0038-05.
ZHAO X Y, WANG B L, LI X. Shockwave characteristics of thermobaric explosive in free-field explosion [J]. Explosion and Shock Waves, 2016, 36(01): 38-42. DOI: 10.11883/1001-1455(2016)01-0038-05.
- [17] JOHNSON D L, YELVERTON J T, HICKS W, et al. Blast overpressure studies with animals and man: Biological response to complex blast waves[R]. Maryland: U.S.: Army Medical Research and Development Command, 1993.
- [18] KIMPARA H, LEE J B, YANG K H, et al. Development of a Three-Dimensional Finite Element Chest Model for the 5th Percentile Female[C]// Washington, DC, United states: SAE International, 2005.
- [19] 蒋建新, IOBLJA C, 王正国, 等. 肺冲击伤对大鼠学习、记忆能力的影响及其机制[J]. 第三军医大学学报, 1999(06): 394-397. DOI: 10.16016/j.1000-5404.1999.06.003.
JIANG J X, IOBLJA C, WANG Z G, et al. Effects of blast injury of the lungs on learning and memory capacity and their mechanisms in rats[J]. Journal of Army Medical University, 1999(06): 394-397. DOI: 10.16016/j.1000-5404.1999.06.003.
- [20] GREER A. Numerical modeling for the prediction of primary blast injury to the lung[D]. Waterloo: University of Waterloo, 2007.