



DOI: 10.12382/bgxb.2024.0094

人员易损性分析研究进展及应用综述

樊壮卿^{1,2}, 张双博², 卢芳云^{1*}, 李彤华³, 康建毅², 杨光明², 王建民²

(1. 国防科技大学 理学院, 湖南 长沙 410073; 2. 陆军特色医学中心, 重庆 400042; 3. 63867 部队, 吉林 白城 137000)

摘要: 人员是战场中的核心要素, 是最易损、最复杂的对象之一, 其易损性研究涉及力学、数学、统计学、医学、生物学等多学科交叉, 研究难度大, 但对于开展杀伤效能评估、防护效能、战伤救治等具有重要价值。通过总结不同目标易损性分析的文献, 提出损伤评分及杀伤判据是人员易损性分析中的两个重要环节。回顾了人员损伤评分的研究现状, 重点介绍了4种常用评分方法(简明创伤评分、损伤严重程度评分、校正损伤严重程度指数、军用战伤评分)及应用情况; 给出了典型战场环境中冲击波、投射物、冲击振动、热4种主要杀伤元对无防护人员损伤的研究动态、评估模型、杀伤判据。分析了基于数字化人体模型开展的人员易损性分析应用技术, 探讨了易损性分析结果的主要应用场景, 分析了该领域可能的主要发展方向。所得结果可为人员易损性研究提供重要参考。

关键词: 战场人员; 易损性; 创伤评分; 损伤判据; 减员预测

中图分类号: TJ012.4; TJ41 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1093(2024)09-2888-18

A Review of Research Advances in Personnel Vulnerability Analysis and Application

FAN Zhuangqing^{1,2}, ZHANG Shuangbo², LU Fangyun^{1*}, LI Tonghua³, KANG Jianyi²,
YANG Guangming², WANG Jianmin²

(1. College of Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, Hunan, China;
2. Army Medical Center, Chongqing 400042, China; 3. Unit 63867 of PLA, Baicheng 137000, Jilin, China)

Abstract: Personnel is the core element in the battlefield, and is one of the most vulnerable and complex objects. The personnel vulnerability research involves the mechanics, mathematics, statistics, medicine, biology and other disciplines, which is difficult to study, but it is of great value to carry out the assessment of lethal efficacy, protective efficacy, and rescue of battle wounds. By summarizing the literatures on vulnerability analysis of different targets, this paper proposes that damage score and kill criteria are two important links in personnel vulnerability analysis. Based on this, the current research status of personnel damage scoring is reviewed. Four commonly-used scoring methods, including abbreviated injury scale (AIS), injury severity score (ISS), adjusted severity of injury index (ASII) and military combat injury scale (MCIS), and their applications are introduced, and the research dynamics, assessment models, and kill criteria of the four main killing elements (shock wave, projectile, shock vibration, and heat) on the damage of unprotected personnel in typical battlefield environments are presented. On this basis, the application technology of personnel vulnerability analysis based on digitalization mannequins is analyzed, the main application scenarios of vulnerability analysis results are discussed, and the possible major development directions in this field are analyzed. This paper can provide an important reference for the research of personnel vulnerability.

Keywords: battlefield personnel; vulnerability; trauma score; injury criteria; casualty prediction

0 引言

目标易损性是指在战斗状态下目标受到攻击时发生损伤的难易程度。美军开展目标易损性研究已有近70年的历史^[1],在飞机^[2-3]、装甲车辆^[4]、舰船、建筑物、人员^[5]等易损性分析中形成了相对完善的研究方法和应用成果。

归纳易损性分析的过程,可以主要分为如下两个阶段^[6-7]。

第一阶段:目标特性分析—构建目标构效关系阶段,主要步骤为:1)针对特定目标,明确毁伤等级

定义;2)目标结构与功能关联关系分析(构件命中后毁伤概率 $P_{k/h}$);3)目标的关键部件毁伤模式分析(整件命中后毁伤概率 $P_{k/H}$);4)目标的构件或材料毁伤规律/判据确定。

第二阶段:目标毁伤评估—易损性评估阶段,主要步骤为:1)弹药/毁伤元加载;2)部件结构和功能毁伤严重度的概率计算;3)目标整体功能毁伤概率计算;4)目标毁伤概率分布。这两个阶段可以概括为图1^[8]。图1中,下标h表示构件命中,k表示构件毁伤,H表示整体命中,K表示整体毁伤。

人员是战场中的核心要素,自然成为战场中的

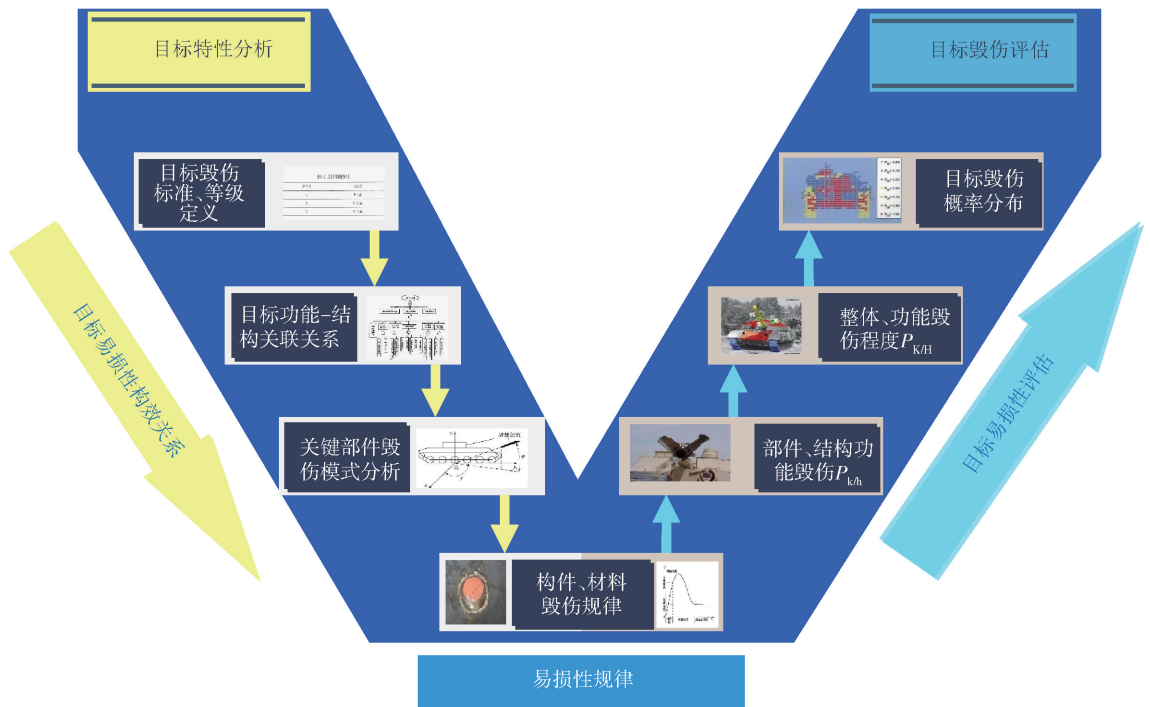


图1 目标易损性分析方法路径图^[8]

Fig.1 Methodological roadmap for the analysis of target vulnerability^[8]

重要目标,但人员不同于装备、工事类硬目标,其不同组织器官之间相互关联大,是作战要素中最易损、最复杂的目标之一^[9]。同时,战场人员由于分工不同导致作战环境差异较大(舱室、平台、开阔地等),不同分工的人员在作战行动中姿态迥异,且不同杀伤元对人员的杀伤机理差异较大^[10],这些因素给系统分析人员目标易损性带来了一定的困难。目前,国内对人员易损性开展系统分析的报道相对较少,相关研究多为单一杀伤元的致伤研究。借鉴飞机、装甲车等目标的易损性分析方法,重点突破两个主要阶段中的关键问题,是系统分析人员易损性的可行之路。

人员目标特性分析方面,主要包括损伤等级划分、物理损伤与功能关联关系、器官损伤模式分析

等内容。由于人员不同部位不同器官损伤后对生命状况、生理功能等影响差异巨大,开展损伤等级划分必须区分不同部位、不同组织器官,因此损伤等级划分的基础是人体结构分析。人体多部位结构与器官共同协调实现运动、操作、听、说、跑、跳等功能^[11],与装甲车、飞机等目标区别较大。开展人体损伤后功能下降程度的分析,必须与某一伤情结合,基于创伤评分中不同伤类、伤情实施人员功能下降分析,是获取人体结构与功能关联关系分析的必经之路。创伤评分研究包含人体结构分析、损伤等级划分以及多部位损伤后功能下降情况^[12]。因此,人员目标特性分析阶段的核心问题是人员创伤评分研究。

评价,且伤类过于细化,在战场快速检伤方面应用有一定的局限性。

1.2 基于 AIS 的损伤严重度评分

1974年 Baker 在 AIS 的基础上提出了损伤严重度评分(Injury Severity Score, ISS)^[23],该评分取人员损伤最严重的3个部位的 AIS 评分求平方和(见式(1))。ISS 评分考虑了多部位伤情,对于爆炸伤等战场损伤具有一定的适应性,ISS 评分的分值范围为1~75分,分值越高,损伤越严重。但 ISS 评分可能会出现轻伤伤员3个部位 AIS 评分求平方和、大于单个重度伤评分的情况,引起伤情分级严重度对应混乱,导致多部位轻度伤评分高、少部位重度伤评分低的结果。

$$ISS = AIS_1^2 + AIS_2^2 + AIS_3^2 \quad (1)$$

式中:ISS 为损伤评分;AIS₁、AIS₂、AIS₃ 分别表示用 AIS 方法获取的最严重损伤的3个部位的损伤评分值。

1997年 Osler 等^[24]对 ISS 进行了简单的改良,不考虑损伤部位,直接将3个损伤最严重的 AIS 值取平方和相加,形成了新损伤严重度评分(New Injury Severity Score, NISS),相比 ISS,可以更好地反映同一部位多处和多器官损伤的严重程度。

1.3 校正损伤严重度指数

1996年美国陆军医学研究中心 Yelverton^[25]为解决爆炸性损伤部位多、致伤类型多、复合伤多发的特点,提出了适用于爆炸伤的评分方法:校正损伤严重度指数 ASII。该评分方法不仅可以应用于爆炸场中人员的损伤评分,而且可以应用到动物的损伤评分。基本原理是将不同部位损伤按照规则相加,如式(2)所示。

$$\begin{cases} IS = (E + G + ST) \times (SD) \\ IS_{ear} = (E + G) \times (SD) \end{cases} \quad (2)$$

式中:IS 为评分值;IS_{ear} 为耳朵损伤严重度;E (extent) 为损伤范围;G (grade) 为损伤分级;ST (severity type) 为损伤严重程度类型;SD (severity depth/

disruption) 为损伤严重程度深度/分布。针对典型伤情的各参数取值范围见表1。

表1 ASII 评分参数
Table 1 Parameters of ASII

序号	伤情描述	损伤参数				评分最大值 M
		E	G	ST	SD	
1	外部损伤	0~6	0~5	0~3	1~4	56
2	骨折	0~5	0~4	0~3	1~2	24
3	烧伤	0~6	0~4	0~3	1~4	52
4	咽喉损伤	0~4	0~4	0~4	1~5	60
5	气管损伤	0~3	0~4	0~4	1~5	55
6	肺损伤	0~7	0~4	0~5	1~4	64
7	心脏损伤	0~4	0~4	0~4	1~4	48
8	腹部空腔脏器伤	0~8	0~5	0~3	1~3	48
9	腹部实质脏器伤	0~5	0~4	0~2	1~4	44

采用 ASII 的评分方法可以较好地描述爆炸损伤的严重程度,在动物-人员损伤中可以通用。但该评分算式中每个参数均有二级表格,参数取值主要依据主观判断,非专业人员不易掌握,且缺乏对损伤的标准化描述及编码,不方便应用于易损性评估中的快速计算和标准化结果输出。

1.4 美军战伤评分

进入21世纪,美军在军事实践中发现,过于复杂繁琐的评分系统不便于实战应用,且随着武器装备平台的精密化、精确制导弹药的普及和卫勤保障的发展,传统的进攻30s、防御5min、带伤作战、带伤操作装备等理念已经不能满足现代化作战需求, Lawnick 等^[26]于2013年提出了 MCIS,该评分基于美军历次战伤数据统计,形成了系统的编码和描述,编码包含5位数字:第1位表示损伤严重度,第2位表示身体区域,第3位表示组织类型,第4位表示区域明细,第5位表示损伤类型(编码规则见表2),将伤情简化为269种伤情(示例见表3),同时给出了合理的编码和标准化描述,在中度损伤以下给出了

表2 MCIS 编码规则
Table 2 Rules of MCIS coding

第1位	第2位	第3位	第4位	第5位
损伤严重度	身体区域	组织类型	区域明细	损伤类型
1~5级	1~5个	0~9		
1-轻度损伤	1-头颈	1-整个区域,2-皮肤,3-肌肉、肌腱、韧带、关节,4-神经脊索,5-骨骼,6-血管,	与第2、3位相关的区域 内具体器官(例如第3位 取8时,1-肝脏)	与第2、3位相关的定义, 例如1-挤压、2-撕裂、3- -缺损
2-中度损伤	2-躯干	7-头部、颈胸部组织,8-腹部组织,9-骨		
3-重度	3-上肢	盆组织,0-其他		
4-极重	4-下肢			
5-可能致死	5-多部位			

表 3 MCIS 编码及损伤示例

Table 3 Example of MCIS coding

编码	部位/描述(头颈部-整体)
51111	头部挤压伤
51112	头部离断
51113	颅骨缺失、颅内容物脱出
41121	面部穿透伤或爆炸伤,伤及单眼或双眼,未伤及气道
51124	面部穿透伤或爆炸伤,伤及单眼或双眼,伤及气道
41122	穿透伤或爆炸伤,造成口、面部骨骼、软组织破坏,未伤及气道
51123	穿透伤或爆炸伤,造成口、面部骨骼、软组织破坏,伤及气道
编码	部位/描述(头颈部-皮肤)
11203	头、颈部开放性伤口
21204	头、面、颈部开放性伤口,深及肌肉/失去通信-无工作能力

损伤对应的功能丧失,对于快速检伤、数字化预测伤情具有较好的实用性。

表 4 对比了 AIS、ISS、ASII、MCIS。由表 4 可以发现,针对不同用途、目的选择合适的创伤评分方法,是开展相应工作的基础^[27]。

2 冲击波损伤判据研究现状

在第一次世界大战时,人们发现爆炸点周边的死亡人员体表没有外伤,不清楚死亡的原因。直到第二次世界大战时,美国和瑞典等国率先开展了冲击波致伤机理研究,对冲击波损伤效应有了基本认识^[28]。20 世纪 50 年代,美国开始对冲击伤进行较为系统的研究,成为冲击伤实质性研究的开始。1968 年,Bowen 等^[29]基于大量动物试验数据建立起冲击波损伤病理学数据库,并以爆炸环境、冲击波超压和正压持续时间为评价指标,绘制出著名的 Bowen 损伤曲线,用于预测冲击波作用下的肺损伤。Bass 等^[30]基于大量动物试验数据和模拟数据,对人

表 4 损伤评分对比

Table 4 Comparison of injury scores

对比指标	AIS 评分	ISS 评分	ASII 评分	MCIS 评分
来源	美国机动车协会(2015 版)	同 AIS	病理损伤(肺损伤)	美国陆军医学中心等
损伤程度	6 级 6 分(9 个区域)	0 ~ 75 分	病理 5 级	5 级 5 分(4 个区域+复合伤)
计算方法	根据部位查表	3 个部位 AIS 平方和	专家根据病理打分	按部位编码查表
美军三大战伤数据库	使用了 18% ~ 45% 的编码		未见	目前应用
应用情况	分数采用 ISS 评分			

体受正面压力时的 Bowen 损伤曲线进行了修正,降低了冲击波正压持续时间小于 10 ms 的超压值,绘制出修正 Bowen 损伤曲线。Stuhmiller^[31]建立了冲击波对人体肺脏的损伤评估模型,并以冲击波对肺脏做功为损伤程度评价指标,开发出损伤评估软件 INJURY。Johnson 等^[32]提出用胸壁最大向内运动速度进行人体损伤评估,即临界损伤速度为 3.0 ~ 4.5 m/s,1% 致命损伤速度为 8 ~ 12 m/s,50% 致命损伤速度为 12 ~ 17 m/s。Axelsson 等^[33]基于 Johnson 等^[32]的研究基础,建立起冲击波创伤效应与冲击波特征参数之间的联系,并对胸壁最大向内运动速度的界定进行了修正,得出胸壁最大向内运动速度与 ASII 创伤评分之间的关系。Richmond 等^[34]提出体重 70 kg 的人员在不同冲击波正压持续时间下不同死亡率对应的冲击波超压阈值。

20 世纪 50 年代,国内原第三军医大学等单位开始对冲击伤进行研究,王正国^[35]系统研究了冲击伤的发生情况、致伤机理、诊断治疗和个体防护等内容,并于 1983 年出版国际上第一部冲击波损伤的研

究专著《冲击伤》,填补了我国冲击伤研究的空白,奠定了冲击伤研究的基础。周杰^[36]模拟了平面冲击波对人体躯干的损伤过程,建立起用于评估爆炸冲击波对肺脏损伤的人体胸部动力学模型。康建毅^[37]采用动物试验和数值模拟方法研究了复杂冲击波对生物的损伤规律,建立起复杂爆炸环境下的冲击波损伤准则。秦俊华^[38]建立了爆炸冲击波作用下的人体损伤评估理论,并开发出爆炸冲击波对人体的损伤效应评估软件。

2.1 国家军用标准超压对人员杀伤判据

中国人民解放军某试验训练基地邱有成等于 2004 年提出了国家军用标准 GJB5212—2004 云爆弹定型试验规程^[39],并得到了原总装备部批准,于 2005 年 1 月 1 日实施。在该规程附录 C 中,提出了超压场对人体杀伤的判据,如表 5 所示。该判据建立在生物试验研究的基础上,可作为杀伤伤情判断的依据。

2.2 Bowen 曲线以及改进曲线判据

20 世纪 50 ~ 60 年代美军为评估核爆武器威力

表 5 超压对人员杀伤判据

Table 5 Killing criterion of overpressure to personnel

冲击波超压/MPa	杀伤程度
0.03 ~ 0.04	轻微杀伤(耳膜破裂等)
0.04 ~ 0.06	中等杀伤(听觉、视觉器官严重损伤、内脏轻度出血、骨折等)
0.06 ~ 0.10	严重杀伤(内脏破裂、大面积出血)
> 0.10	极严重杀伤(可导致 50% 死亡率)

开展了系列爆炸生物试验研究,并依据常规炸药开阔地爆炸的动物试验资料,建立了冲击波对空腔脏器肺、胃肠道损伤的阈值,并由冲击波导致试验动物死亡的数据外推出人员的致死标准 LD1、LD50、LD90、LD99,发表了在冲击伤判定中至今仍广泛引用的 Bowen 压力损伤曲线,以此计算冲击波造成的人员致死率。在 Bowen 压力损伤标准中,3 个评估曲线基于人体的方位不同而不同,分别是身体长轴平行于冲击波传播方向、身体长轴垂直于冲击波传播方向、身体接近于反射面。这些曲线是通过入射冲击波压力和正压持续时间来预测 70 kg 体重的人受冲击波致伤后 24 h 内 1%、50%、90% 和 99% 死亡的概率(见图 3)。值得注意的是,致死率曲线是爆炸致伤后根据动物 24 h 存活情况推导得出的,肺损伤阈值是指肺脏上针尖大小的损伤而无其他器官损伤,该模型主要应用于简单冲击波。

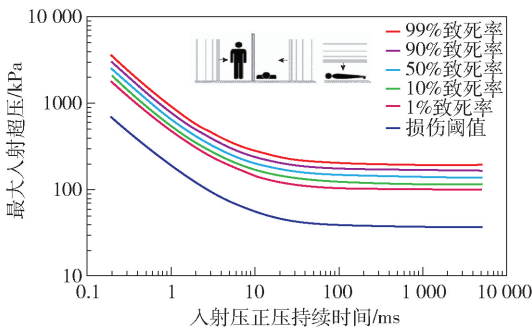


图 3 冲击波对 70 kg 人员致死率曲线

Fig. 3 Lethal rate curves of a 70 kg human subjected to air blast

Bass 等^[30]在 2007 年对 Bowen 标准提出了质疑,认为该标准没有用最新的试验数据更新过,而且没有在正式的科学文献上出版过,该曲线中短脉冲阶段(小于 30 ms)的评估值偏差较大,因此采用 1 129 个动物对小于 30 ms 短脉冲重新做了分析和修正,得到修正曲线如图 4 所示。

图 4 所示曲线适用于卧姿和站姿的作战人员。在此基础上,进行数据统计和数值模拟,得到 L_{50}

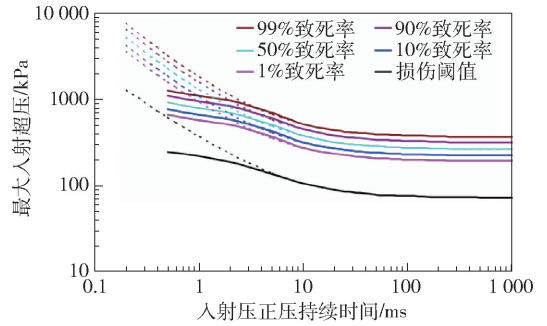


图 4 短脉冲入射冲击波致死率曲线

Fig. 4 Lethal rate curves of short pulse blast wave

(50% Lethality) 和损伤阈值的非线性逻辑回归数学模型为

$$p = p^* (1 + a\tau_+^{-b}) \quad (3)$$

式中: p 为损伤阈值或 L_{50} 所需要的人射压力(kPa), p^* 、 a 、 b 为常数; τ_+ 为正压持续时间(ms)。具体 p^* 、 a 、 b 的取值见表 6。基于该模型计算不同持续时间下的损伤阈值及 50% 致死率压力值,见表 7。

表 6 冲击波致死率数学模型系数

Table 6 Mathematical model coefficients for shock wave lethality rate

系数	入射压拟合值		反射压拟合值	
	L_{50}	损伤阈值	L_{50}	损伤阈值
p^*	89.5	41.6	264.0	103.2
a	6.70		11.80	
b	-0.83		-1.02	

表 7 不同持续时间下损伤阈值压力和 L_{50} 压力

Table 7 Injury threshold pressure and L_{50} pressure under different durations

正压持续时间/ ms	损伤阈 值压力/ kPa	致命性 L_{50} 压力/ kPa	正压持 续时间/ ms	损伤阈 值压力/ kPa	致命性 L_{50} 压力/ kPa
0.20	1 101.62	2 370.07	5.00	114.89	247.17
0.50	537.08	1 155.49	6.00	104.59	225.03
0.80	377.03	811.16	7.00	97.03	208.75
1.00	320.32	689.15	8.00	91.21	196.24
2.00	198.39	426.82	9.00	86.59	186.30
3.00	153.58	330.43	10.00	82.83	178.19

2.3 Stuhmiller 模型判据

由于肺脏是可压缩材料,Stuhmiller^[31]参照一维活塞运动,建立了如下胸壁运动与肺脏内可压缩气体压力的数学模型:

$$p(t) = p_0 \left[1 + \frac{1}{2}(\lambda - 1) \frac{v_0}{c_0} \right]^{\frac{2\lambda}{\lambda - 1}} \quad (4)$$

式中: $p(t)$ 为载荷压力; p_0 为肺内压, 通常取环境压力; λ 为比热比; v_0 为胸壁运动速度; c_0 为声速。

进一步推导, 得到归一化功与胸壁运动速度的计算式为

$$W^* = \frac{W}{p_0 V} = \frac{1}{p_0 L} \int_0^\infty \rho_0 c_0 v_0^2 dt \quad (5)$$

式中: W^* 为归一化功, 定义为胸壁对肺做功除以肺脏体积和肺内压力, 是无量纲量; W 为胸壁对肺做功; V 为肺脏体积; L 为肺体积与胸壁面积之比; ρ_0 为肺脏密度。

虽然肺损伤是由于组织的局部应力超过阈值引起的, 而非该模型所表述的情况, 但整体肺损伤的病理情况却与肺组织的归一化功分布有关, 即由胸壁运动产生的对肺脏做功与动物病理情况、致命性有密切相关性(见图 5)。该模型对复杂冲击波和自由场作用下的肺损伤都适合, 目前美军 Injury 损伤评估软件使用的即为该模型。

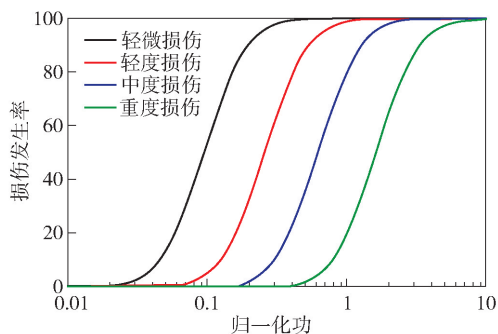


图 5 归一化功与损伤严重度(轻微、轻度、中度、重度)的发生率关系

Fig. 5 Correlation between incidence of injury (trace, slight, moderate, severe) and normalized work

2.4 Axelsson 模型判据

Axelsson 等^[33]通过对复杂冲击波作用下的损伤效应进行调查, 建立了一个冲击伤损伤严重度的计算模型。研究首先对 Johnson 等^[32]于 1993 年做的动物实验进行回顾和分析。Yelverton 在实验中将 255 只实验羊放置在复杂冲击波环境中致伤, 在实验羊旁边放置测试圆筒(冲击波测试设备), 圆筒周向前后左右间隔 90° 放置 4 个压力传感器, 记录冲击波载荷。在 Yelverton 实验的基础上, Axelsson 使用 177 只绵羊的实验数据建立了损伤严重程度与胸壁运动的数学模型, 从而实现了复杂冲击波造成的人体损伤预测评估。

该方法首先通过冲击波载荷计算出胸壁运动速度, 胸壁运动速度与冲击波载荷的数学模型是 Bowen 等^[29]于 1965 年建立的双肺模型。Axelsson 等^[33]在此基础上进行简化, 得到了一个单肺脏模型, 如式(6):

$$M \frac{d^2 x}{dt^2} + J \frac{dx}{dt} + K \cdot x = A \left[p(t) + p_0 - \left(\frac{V}{V - A \cdot x} \right)^\lambda \cdot p_0 \right] \quad (6)$$

式中: M 为胸壁质量; x 为位移; J 为阻尼系数; K 为弹簧系数; A 为胸壁面积。相关参数见表 8。

表 8 70 kg 哺乳动物的模型参数

Table 8 Model parameters for 70 kg mammals

M/kg	$J/(\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1})$	$K/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	A/m^2	V/m^3	λ
2.03	696	989	0.082	0.001 82	1.2

胸壁运动速度与损伤的函数为

$$\text{ASII} = (0.124 + 0.117v)^{2.63} \quad (7)$$

式中: v 为胸壁最大向内运动速度(m/s)。

使用 Axelsson 模型法对生物冲击伤进行评估时, 首先要将胸部 4 个方向的冲击波压力代入式(6)中, 计算出 4 个胸壁向内运动速度; 取 4 个胸壁向内运动速度的平均值, 代入式(7)中求得 ASII 创伤评分, 从而实现对复杂冲击波造成损伤的评估。该创伤 ASII 评分包括对肺脏、上呼吸道、胃肠道、腹部实质脏器的综合损伤评分。表 9 给出了计算得到的速度与伤情的范围关系。该模型的不足之处在于, 同一速度对应伤情范围较大, 即伤情分辨率较低。假如计算获得胸壁运动速度为 6 m/s, 查表 9 对应伤情为轻微伤到轻伤、轻伤到中度损伤, 对应 ASII 或 AIS 评分范围较宽, 容易造成混淆。

表 9 胸壁运动速度与 ASII 和 AIS 评分的关系

Table 9 Relationship among chest wall motion velocity with ASII and AIS scores

损伤水平	$v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	ASII	AIS
(阴性)无伤	0 ~ 3.6	0 ~ 0.2	0
轻微伤到轻伤	3.6 ~ 7.5	0.2 ~ 1.0	1 ~ 4
轻伤到中度伤	4.3 ~ 9.8	0.3 ~ 1.9	2 ~ 4
中度伤到重度伤	7.5 ~ 16.9	1.0 ~ 7.1	3 ~ 5
50%致死率	>12.8	>3.6	>6

3 高速投射物损伤判据研究现状

人类对破片伤的认识起源于 19 世纪末, 但由于技术条件的限制, 并不清楚其致伤机理。1899 年,

Bircher^[40]指出铅质球形破片(质量 12.5 g、直径 12.5 mm)造成人体致命损伤的临界速度为 100 m/s(动能 62 J),而速度为 50 m/s(动能 15 J)的破片只能擦伤皮肤,无法伤及骨骼,从而提出了破片动能杀伤判据。1907 年, Journée^[41]提出不同直径的铅质球形破片穿透皮肤所需的碰撞速度均在 50 m/s 以上,并且与铅球大小和能量无关,从而提出了破片速度杀伤判据。1935 年, Callender 等^[42]研究了步枪弹的致伤机制,奠定了“创伤弹道学”研究的理论基础。1956 年, Allen 等^[43]提出了著名的 A-S 杀伤判据,以人员在规定时间内丧失战斗力的概率来反映破片对人体的损伤。1968 年, Sperrazza 等^[44]提出不同直径的子弹穿透皮肤所需的临界速度为 50 m/s,侵入肌肉 2~3 cm 的临界速度为 70 m/s,并指出子弹穿透皮肤的临界速度由弹头断面比重决定,从而提出了破片比动能杀伤判据。Kneubuehl^[45]研究了手枪弹或破片侵入人体肌肉组织及其替代材料后产生的伤道形状、长度与手枪子弹速度和能量之间的关系,并于 2011 年出版了研究专著《Wound ballistics: basics and applications》,对创伤弹道学的相关理论技术进行了详细介绍。

20 世纪 70 年代,原第三军医大学率先开展了创伤弹道学实验研究,成为我国创伤弹道学领域研究的开端。1985 年,刘荫秋等^[46]编著的《创伤弹道学概论》,对致伤机理及特点进行了阐述,奠定了我国创伤弹道学研究的基础。2020 年,王光华等^[47]系统总结了轻武器杀伤效应的研究成果,撰写了《轻武器杀伤效应》一书,全面介绍了生物靶标、非生物靶标、有防护与无防护损伤效应、数值仿真、理论模型等内容,为轻武器设计及效能评估提供了重要参考。南京理工大学温焱珂等^[48]、刘坤等^[49]、莫根林等^[50]以及浙江大学刘丽^[51]系统研究了典型枪弹打击以明胶为代表的非生物靶标的侵入模型,为非生物靶标的实验和理论研究提供了有益参考。陆军军医大学许川等^[52]分析了破片对人体的损伤机制,并对破片的损伤特点进行了深入探讨。兵器第 208 研究所卢海涛等^[53]研究了低速钢质球形破片对人体模拟靶标的损伤,建立了钢质球形破片对皮肤损伤的冲击速度与剩余速度的关系式。

3.1 动能杀伤判据

破片和枪弹对人员的杀伤作用主要是依靠动能完成的,因此以杀伤元动能为标准的杀伤判据被世界各国所认可,也是使用最为广泛的杀伤判据。但各国对破片致命杀伤临界动能的界定并不统一,差

异性也很大,见表 10。

表 10 破片动能杀伤判据

Table 10 Kinetic energy killing criterion of fragment

国家或组织	联合国	法国	德国和美国	中国	前苏联
破片致命杀伤临界动能/J	20	39	78	98	235

动能杀伤判据认为破片对人体的杀伤与破片数量和命中部位无关,只要有一枚杀伤破片命中人体,就可对人体造成致命杀伤。包括美国在内的多数国家,都以 78 J 为破片动能杀伤判据。当破片动能小于 78 J 时,无法造成致命杀伤,而动能大于 78 J 的破片就能造成致命杀伤。由于动能杀伤判据未考虑破片速度、质量、形状以及命中部位的影响,并且该判据只适合衡量不稳定的沉重破片,不适用于现代杀伤武器,故已被多数国家废弃。

3.2 比动能杀伤判据

即使动能相同的破片,其形状也会影响破片对人体的杀伤效果。由于破片形状的复杂性和运动的不稳定性,破片命中目标的面积是随机变量,故以比动能来衡量破片的杀伤力,即

$$e_d = \frac{E_d}{A_s} = \frac{1}{2} \cdot \frac{m_f}{A_s} \cdot v_i^2 \quad (8)$$

式中: e_d 为破片的比动能; E_d 为破片的初始动能; A_s 为破片与目标遭遇面积; m_f 为破片的质量; v_i 为破片的初速度。

1968 年 Allen 等^[43]提出不同直径的子弹穿透皮肤所需的临界速度为 50 m/s,侵入肌肉 2~3 cm 的临界速度为 70 m/s,因此提出弹丸断面比例为 \bar{S} 时,弹丸穿透皮肤所需临界速度可按下式计算:

$$v_{cr} = \frac{125}{\bar{S}} + 22 = 125 \frac{A_s}{m_f} + 22 \quad (9)$$

式中: v_{cr} 为临界速度; \bar{S} 为断面比例,由 m_f/A_s 定义。当穿透皮肤临界速度为 v_{cr} 时,穿透皮肤所需的最小比动能表达式为

$$e_1 = \frac{1}{2} \cdot \frac{m_f}{A_s} \cdot v_{cr}^2 \quad (10)$$

式中: e_1 为弹丸穿透皮肤所需的最小比动能。显然若皮肤厚度一定,则 e_1 值固定,不同形状质量弹丸的临界穿透皮肤速度不同。

根据《终点效应及靶场试验》^[54]提出的破片杀伤判据,破片对人员致命杀伤的临界比动能为 160 J/cm²,而穿透皮肤的临界比动能为 9.8 J/cm²。公安部行业标准 GA/T 718—2007《枪支杀伤力的法

庭科学鉴定判据》^[55],规定了口径小于 20 mm 的非制式枪支弹丸穿透角膜而造成眼睛轻伤的临界比动能为 1.8 J/cm²,而中国香港规定的临界比动能为 2.0 J/cm²。同时,各个国家或地区也对破片穿透皮肤的临界比动能进行了规定,见表 11。

表 11 破片比动能杀伤判据

Table 11 Specific kinetic energy killing criterion of fragment

判据	国家或地区				
	中国香港	瑞士	中国大陆	中国台湾	德国
破片穿透皮肤的临界比动能/(J·cm ⁻²)	7	10	16	20	36
角膜损伤比动能/(J·cm ⁻²)	2		1.8		

3.3 与命中部位相关的动能/比动能判据

通过动物(狗)试验研究破片命中活体不同部位的杀伤机理,近似了解破片的实际作用和杀伤结果,是研究破片损伤的重要手段。破片对生物的致伤所需能量随着进入生物体部位的不同差别很大,因此,分析破片能量与杀伤效果的关系,必须根据损伤部位和性质合理地加以分类,一般分为软组织伤、脏器伤、骨折^[52]。表 12 给出了 3 种质量、2 种形状的小破片命中生物后造成不同组织损伤所需要的动能阈值。表 13 为 3 种质量、2 种形状的小破片贯穿动物胸腔所需要的动能和比动能阈值。表 14 为 3 种质量、2 种形状的小破片命中胸壁致命器官致试验动物即刻死亡所需要的动能和比动能阈值。

表 12 不同组织(狗)创伤所需的动能

Table 12 Kinetic energy required for different tissue injuries for dog

破片形状	破片质量/g	软组织/J	脏器伤/J	骨折/J	骨折及脏器/J
方形	0.5	12.65	15.98	18.04	19.22
球形	1.0	16.18	19.61	29.51	30.30
方形	1.0	27.65	31.19	33.44	36.77
方形	5.0	62.13	74.85	97.18	100.03

表 13 贯穿胸腔(狗)所需的动能和比动能

Table 13 Kinetic energy and specific kinetic energy required to penetrate the chest of dog

破片形状	破片质量/g	动能/J	比动能/(J·cm ⁻²)	破片形状	破片质量/g	动能/J	比动能/(J·cm ⁻²)
方形	0.5	21.28	111.8	方形	1.0	38.54	113.8
球形	1.0	35.40	110.8	方形	5.0	101.99	114.7

表 14 狗即刻死亡所需的动能和比动能

Table 14 Kinetic energy and specific kinetic energy required to cause dog death immediately

破片形状	破片质量/g	动能/J	比动能/(J·cm ⁻²)
方形	0.5	20.2	106
球形	1.0	33.2	104
方形	1.0	36.6	108
方形	5.0	99.0	111

从表 12 ~ 表 14 中可以看出,对于同样的创伤,不同形状和质量的破片,造成同等创伤所需的动能有较大差别。一般来说,大破片杀伤需要较大的动能,但各种破片的比动能却非常接近,例如贯穿胸腔的致伤比动能大约都为 112 J/cm²。另外,动物当场死亡的比动能为 107 J/cm²左右,与贯穿胸腔的致伤比动能接近,表明贯穿胸腔即使没有毙命,其创伤也很严重。

3.4 S-K 杀伤判据

美军提出了采用条件性概率法评估投射物杀伤效应的方法,主要获取人员的失能概率 $P_{(LH)}$,其中 I 表示失能,也称为 S-K 杀伤判据^[43]。该判据综合考虑了人体由负伤到丧失战斗力的时间以及人员在战场上承担的具体战斗任务,当人员受伤而不能执行其指定任务时即认为丧失战斗力。S-K 杀伤判据指出:人体受弹丸或破片致伤的损伤严重程度是破片质量与速度的函数,并以威布尔(Weibull)函数表达:

$$P_{(LH)} = 1 - e^{-A_0(mv_t^\beta - B_0)C_0} \quad (11)$$

式中: $P_{(LH)}$ 为人员在规定时间内丧失战斗力的概率; v_t 为破片速度; β 、 A_0 、 B_0 、 C_0 为由破片类型和人员承担的任务及丧失战斗力时间确定的常数。

我国有关部门于 1997 年提出了国家军用标准 GJB2936—97《钢质自然破片对人员的杀伤判据》^[56],适用于质量为 0.4 ~ 5.0 g、速度不超过 1 800 m/s 的单个钢质自然破片;同年还提出了国家军用标准 GJBz20450—97《小质量钢质破片对人员的杀伤判据》^[57],适用于质量为 0.05 ~ 0.45 g、速度不超过 2 000 m/s 的单个钢质球形破片和六边形预制破片。在进攻 5 min 和防御 30 s 条件下,人员丧失战斗力条件概率 $P_{(LH)}$ 的计算公式为

$$P_{(LH)} = \begin{cases} K_0 [1 - e^{-A_0(mv_t^\beta - B_0)C_0}], & mv_t^\beta > B_0 \\ 0, & mv_t^\beta \leq B_0 \end{cases} \quad (12)$$

式中: K_0 为条件概率公式的系数,取值见表 15。

表 15 条件概率计算公式的系数

Table 15 The coefficients of the conditional probability formula

国家军用标准	条件	K_0	β	A_0	B_0	C_0
GJB 2936—97	进攻 5 min	0.911	2.6	$3.393\ 99 \times 10^{-4}$	79 244.7	0.494 960
	防御 30 s	0.656	2.6	$3.718\ 89 \times 10^{-4}$	79 244.7	0.492 943
GJB z20450—97	进攻 5 min	0.981	3.909 983	$3.684\ 176 \times 10^{-5}$	8 335 509	0.420 009 1
	防御 30 s	0.650	3.909 983	$1.761\ 329 \times 10^{-4}$	8 335 509	0.356 972 8

由式(11)、式(12)可以看出,我国国家军用标准 GJB2936—97 和 GJBz20450—97 给出的破片杀伤判据与 S-K 杀伤判据的形式基本一样,故 GJB2936—97 和 GJBz20450—97 杀伤判据本质上还是由 S-K 判据获得的。虽然国家军用标准破片杀伤判据同时考虑了破片质量和速度对损伤概率的影响,但并未说明损伤概率是由哪个命中部位确定的,因此该杀伤判据也很难准确评价破片对人体的杀伤效果。

4 冲击振动(垂直方向)损伤判据研究现状

冲击波与破片损伤属于原发直接损伤,冲击振动引起的损伤多属于次级损伤,多发生在装备平台上,爆炸载荷引起装备振动进而作用于乘员,例如装甲车、扫雷车、舰船、飞机等平台上的乘员损伤^[58]。考虑到战场人员的应用环境,本文主要介绍垂直方向冲击振动对人员立姿下肢损伤、坐姿脊柱损伤。Hirsch^[59]于 1964 年开展了站立人员在短脉冲加速度下的振动损伤,绘制了耐受性曲线。该模型考虑最大速度和达到最大速度的时间,以及平均加速度和作用时间的关系,应用比较广泛。Yogananda 等^[60]于 1996 年采用 26 名成年尸体腿骨构建了下肢损伤实验模型,并得到了损伤概率的理论模型。该模型将胫骨轴向受力作为振动载荷的表征量,将轴向力、年龄与损伤严重度、损伤概率建立了函数关系,绘制了 25 岁、45 岁、65 岁人员下肢损伤曲线,该模型未考虑加载速率的影响。Griffin 等^[61]于 2001 年通过 20 名尸体实验研究了反步兵地雷对穿着扫雷鞋的脚踝损伤,获取了胫骨轴向力、胫骨骨折概率、加载速率之间的关系,该模型考虑了自身质量和加载速率,但实验中加载速率远低于爆炸载荷加载速度。Ruff^[62]在 1950 年首先构建了坐姿胸椎与腰椎的损伤模型,给出了损伤耐受曲线,载荷持续时间 5 ms ~ 1 s 之间,加速度在 20 g 左右,该模型主要用在安全性评估中。Eiband^[63]在 1959 年研究了飞机弹射座

椅加速度对脊柱的安全限值,给出了峰值加速度 110 g 持续 2 ms、42 g 持续 7 ms、42 g 持续 48 ms、28 g 持续 140 ms 的实验研究。

国内原第三军医大学李曙光等^[64]开展了系列扫雷防护装具的研究,分析了不同载荷经防护装具后作用于人员下肢的损伤分析,其研究主要聚焦在防护材料吸能阻震上,对于人员损伤模型的构建不多。海军医学研究所黄建松等^[65]针对舰船受打击冲击振动引起的人员损伤开展了相关研究,分析对比了美军不同部位损伤标准与我军损伤标准的差异,并对冲击振动损伤研究方法进行了梳理。原第四军医大学徐志鹏等^[66]研究了高加速度作用下的飞行员脊柱损伤及其防护,其研究主要应用在安全训练中,分析了脊柱在长时间载荷作用下慢性损伤的发生,对于战斗损伤分析较少。

4.1 国家军用标准损伤判据

国内关于人员在受冲击振动(加速度)引起的整体损伤中,相关判据为航天员着陆冲击振动损伤标准——国家军用标准 GJB4234—2001《人体坐姿着陆冲击安全限值》^[67](见图 6)。

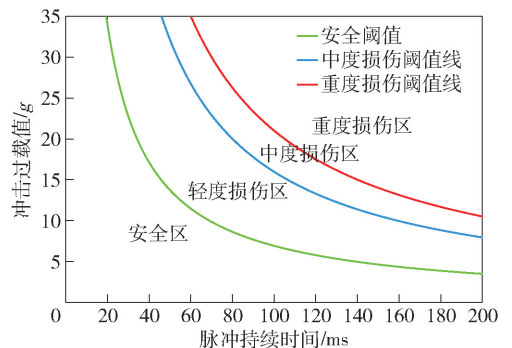


图 6 人员坐姿振动损伤曲线

Fig. 6 Vibration injury curves of human sitting posture

国内关于人员立姿整体受到冲击振动(加速度)时损伤判据为水面舰艇冲击对人体作用安全限值(国家军用标准 GJB2689—96《水面舰艇冲击对人体作用安全限值》)^[68],见图 7。该损伤考虑了速度、加速度、达到最大速度的时间 3 个关键因素。

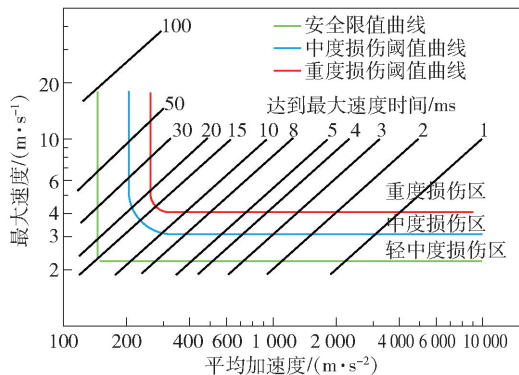


图 7 人员立姿冲击振动损伤曲线

Fig. 7 Vibration injury curves of human standing posture

4.2 人员下肢损伤判据

1996 年 Yogananda 等^[60]在美国威斯康辛医学院采用 26 具尸体(52 个下肢样本)进行实验,开展了下肢(近心端固定)足底冲击实验,样本年龄 27 ~ 85 岁(平均 59 岁),实验数据采用威布尔(Weibull)函数拟合获得了下肢损伤概率与年龄-冲击力的函数关系:

$$P_i = 1 - \left[\exp \left\{ - \left(\frac{0.0348 \times A_a + 0.415 \times F_0}{5.13076} \right)^{7.42582} \right\} \right] \quad (13)$$

式中: P_i 为足、踝骨折概率; A_a 为年龄; F_0 为下肢腓骨受力(kN)。该模型不受体重限制,足踝损伤评分 AIS = 2 以上。

2001 年 Griffin 等^[61]采用 20 具完整尸体模拟开展了地雷爆炸后引起的冲击振动损伤研究,样本年龄 37 ~ 96 岁、体重 73 kg ± 14.1 kg,将获取的实验数据拟合获得了胫骨骨折概率与胫骨垂直方向受力和加载速率的函数关系:

$$P_f = \frac{1}{1 + \exp(-8.39 - 0.078R + 0.073W_b - 5.2 \times 10^{-4}F_1)} \quad (14)$$

式中: P_f 为胫骨骨折概率(AIS = 2 以上); R 为载荷加载速率(kN/ms); W_b 为体重(单位为英镑,使用国际单位制时 1 英镑 = 0.454 kg); F_1 为胫骨轴向受力(N)。

4.3 胸椎腰椎损伤判据

垂直方向坐姿脊柱损伤计算模型有 Stech 等^[69]构建的动态响应指数(Dynamic Response Index, DRI)模型,该模型构建了质量-弹簧-阻尼器(见图 8)模拟脊柱受冲击加速度时的响应:

$$\ddot{z}(t) = \ddot{\delta} + 2 \cdot \gamma_0 \cdot \omega_n \cdot \dot{\delta} + \omega_n^2 \cdot \delta \quad (15)$$

式中: $\ddot{z}(t)$ 为垂直方向的加速度; δ 为相对位移($\xi_1 - \xi_2$), $\delta > 0$ 时为压缩, ξ_1 为质量块位移, ξ_2 为载荷位移; γ_0 为系数, $\gamma_0 = \frac{c}{2 \times m \times \omega_n}$, c 为阻尼系数, m 为身体质量, ω_n 为固有频率, $\omega_n = \sqrt{\frac{K}{m}}$ 。

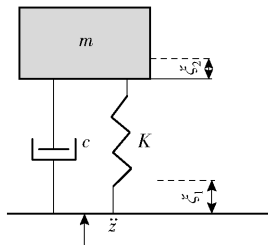


图 8 DRI 垂直损伤模型

Fig. 8 DRI vertical damage model

DRI 指数与最大相对位移 δ_{max} 、固有频率 ω_n 、重力加速度 g 有关的表达式为

$$DRI = \frac{\omega_n^2 \times \delta_{max}}{g} \quad (16)$$

Stech 等^[69]基于飞行员弹射座椅逃生后损伤数据(27.9 岁,体重 70 kg ± 10 kg),获得了 $\gamma = 0.224$, $\omega_n = 52.9 \text{ rad/s}$,并给出了损伤发生率曲线(见图 9)。

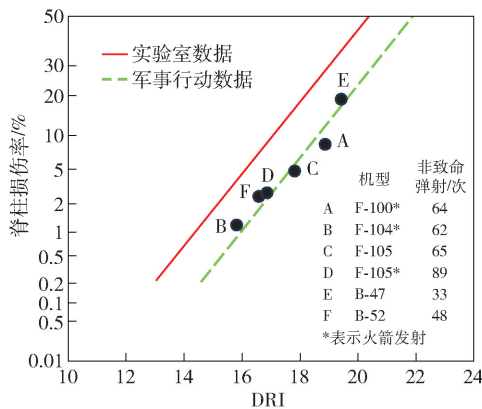


图 9 基于 DRI 指数的脊柱损伤发生率^[69]

Fig. 9 Spine injury probability based on DRI index^[69]

5 热损伤(烧伤)判据研究现状

战场人员热损伤是指由爆炸产生的高温气体或火焰等造成的损伤,分为吸入性气管、肺损伤和体表烧伤^[70],由于吸入性损伤涉及较多人体生化代谢过程^[71],本文不做讨论,本文重点分析体表热损伤。

国外自二战后就开始了烧伤的研究^[72],烧伤最直接的器官是皮肤,皮肤也是人体最大的器官,Bull^[73]研究了烧伤的损伤特点,给出了不同年龄段皮肤烧伤面积占比与死亡概率的关系,研究结果显

示皮肤损伤面积超过 60% 以上就会造成 50% 以上的死亡概率。Hardee 等^[74]通过建立皮肤及皮下循环模型,给出了 70 kg, 1.7 m 的男性皮肤温度上升与热辐射的系数。研究表明:皮肤温度上升系数与空气热传导系数呈正比,与皮肤密度及皮下循环系数呈反比。北约成员国于 1989 年系统总结了烧伤等损伤伤情特点、研究方法、损伤模型、温度衰减模型等内容并出版了“绿皮书”^[75],详细介绍了温度效应对人员的损伤效果,为热损伤或烧伤损伤模型构建提供了思路。Kauvar 等^[76]系统总结了美军在伊拉克和阿富汗战争中的烧伤占比,由于云爆弹、温压弹的使用,烧伤在巷道、车辆舱室、房间等半密闭环境出现比例较高,热损伤或烧伤在减员数量中占比达 20% 以上。

国内烧伤研究始于 20 世纪 60 年代,原第三军医大学黎鳌^[77]在我军烧伤研究中开展了大量研究,系统分析了吸入性损伤、烧伤休克、创面处理、烧伤后脏器炎症反应等内容,并出版了《烧伤治疗学》专著,研究主要集中在救治方面,对烧伤的物理损伤模型研究较少。南京理工大学王杰^[78]对某型云爆弹毁伤威力测试及评价方法开展了研究,对云爆弹中

的热效应测试开展了分析,其主要物理参量为火球持续时间、火球尺寸与热通量,其中热通量为损伤的主要表征量。同时分析给出了冲击波、地震波、热辐射、缺氧窒息 4 种效应的综合毁伤模型,具体为各种损伤因素的杀伤面积乘以单位面积人员密度,该模型相对简单。刘想炎等^[79]开展了云爆弹对地面人员杀伤的仿真评估研究,仿真模型中热的表征量也是热通量,采用热损伤的常见分级方法给出了热通量杀伤阈值:热通量大于 37.5 kW/m² 可致人员死亡。

5.1 热通量准则

热通量是指单位时间通过单位面积的热能 (J/s·m² 或 W/m²),热通量损伤阈值模型中常规爆炸热通量计算公式为

$$q = 1.253 \times 10^{-7} T^4 / \left[1 + 0.0324 \left(\frac{T^{1/3} r}{W_q^{1/3}} \right)^2 \right] \quad (17)$$

式中:q 为距离 r 处接受到的热通量 (W/m²),r 为测点至爆源距离 (m);T 为火球温度 (K);W_q 为等效 TNT 当量 (kg)。表 16 给出了人员热通量的杀伤阈值。

表 16 人员热通量杀伤阈值

Table 16 Personnel injury threshold of heat flux

热通量/(kW·m ⁻²)	时间与损伤程度	热通量/(kW·m ⁻²)	时间与损伤程度
1.60	长时间暴露无不适	6.40	8 s, 严重疼痛;20 s, 2 度烧伤
1.75	60 s, 严重疼痛	12.50	10 s, 1 度烧伤;60 s, 1% 死亡
4.00	20 s, 严重疼痛	16.00	5 s, 严重烧伤
4.50	20 s, 1 度烧伤	25.00	10 s, 严重烧伤;60 s, 100% 死亡
5.00	15 s, 严重致痛	37.50	10 s, 1% 死亡;60 s, 100% 死亡

5.2 热剂量准则

热剂量是指辐射空间单位面积上的热能 (J/m²),热剂量损伤阈值模型中的常规爆炸产生火球热剂量计算公式为

$$Q = \frac{D^2/r^2}{F_0 + D^2/r^2} b_0 W_q^{1/3} T^{2/3} \quad (18)$$

式中:Q 为辐射空间单位面积上的热能 (J/m²);D 为火球直径 (m);F₀ 为常数 (161.7);b₀ 为常数, b₀ = 2.04 × 10⁴)。表 17 给出了人员热剂量的杀伤阈值。

烧伤属于面杀伤,常用烧伤分级为 3 度 4 分法^[80],需要将阈值损伤中的等级转换为对应研究提出的损伤评分方法。

表 17 人员热剂量杀伤阈值

Table 17 Personnel injury threshold of thermal dose

热剂量/(kJ·m ⁻²)	损伤等级	热剂量/(kJ·m ⁻²)	损伤等级
65	皮肤疼痛	375	3 度烧伤
125	1 度烧伤	392	重伤
172	轻伤	592	死亡
250	2 度烧伤		

6 基于数字化人的易损性评估技术现状

美国在 1978 年开发了用于分析破片对人员损伤的评估软件 Computer-man^[81]。开发思路为将人体横切为 108 分,其中头颈 (1 ~ 18 片) 厚度为 1.2 cm,头颈以外部位厚度均为 2.6 cm;19 ~ 44 为

胸腹及骨盆切片,45~49 为女性切片,50~75 为左臂切片,76~113 为左腿和足(右腿采用左腿对称生成)切片,每片划分为 0.5 cm×0.5 cm 方块;每层有单独编号,切片中每个网格有坐标编号和组织代码,同一组织跨层代码相同。计算采用射击线法,基于破片打击不同生物组织获得的减速模型、伤道模型,形成伤道删除对应组织,可以实现破片对人员杀伤的快速计算,多次计算也可得到 S-K 方法得到的曲线。该软件后续经过对数字人的组织精细化升级,

破片类型增加,可以实现多种类型破片以及多个破片命中的快速计算。

破片在生物组织中的减速模型被描述为

$$-\sigma Q \frac{dv}{dx} = A_1 v + B_1 + \frac{C_1}{v} \quad (19)$$

式中: σ 为弹丸密度; $Q = (m_r/\sigma)^{1/3}$; v 为破片速度; A_1 、 B_1 、 C_1 为常数(见表 18)。通过计算积分即可获取穿深,Computer-Man 计算时当 v 小于 20 m/s 时计算停止。

表 18 破片侵彻人员不同组织器官的减速模型系数

Table 18 The retardation coefficients of different tissues and organs penetrated by fragments

人体部位	A_1			B_1			C_1		
	球形	方形	柱形	球形	方形	柱形	球形	方形	柱形
皮肤	0.122 6	0.200 7	0.211 7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
面部、心脏	0.192 0	0.453 6	0.322 9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
胰脏、肾脏	0.242 2	0.459 3	0.336 1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
肺部	0.157 7	0.403 7	0.311 5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
颅骨、颈椎、骨骼	0.454 5	0.834 0	0.515 8	0.0	0.0	0.0	753.6E6	761.2E5	920.8E6
胸骨、关节、股骨	0.303 5	0.580 9	0.367 7	0.0	0.0	0.0	234.1E6	216.6E6	296.2E6
大脑、眼球、脊髓	0.205 9	0.483 0	0.350 0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
脊柱、肩胛骨、胫骨	0.741 8	1.137 0	1.111 0	0.0	0.0	0.0	1257E6	801.7E6	1309E6
咽、喉	0.224 7	0.788 9	0.423 4	0.0	0.0	0.0	527.3E6	444.0E6	1220E6

1996 年 Stuhmiller^[31] 基于冲击波作用人体胸部活塞模型构建了归一化功与损伤严重度分布概率的模型(2.3 节所述判据模型),开发了 Injury 软件,目前已更新至 12.0 版本。Injury 软件的开发思路为:通过将胸部简化为活塞模型,经理论分析建立胸壁向内运动速度与肺部压力的关系,经过大量动物实验修正函数关系,将该关系转变为快速算法,使用时需要输入胸部前后超压峰值、持续时间等参数,获取人员对应损伤严重程度的概率。

图 10 为 Injury 软件界面。

1993 年美军开发了人员烧伤评估软件 Burn-Sim^[82],该软件通过构建皮肤及皮下循环系统的物理模型,计算热通量作用皮肤一定作用时间后皮肤温度的上升量,通过动物实验对比皮表温度与损伤的对应关系,快速计算人员烧伤损伤程度。

1997 年美军开发了 AMANDA^[83] 软件,用于评估加速度对人员的损伤,计算不同加速度峰值、持续时间对人员头部、脊柱等部位的损伤,采用的计算模型见 4.2 节及 4.3 节。

2000 年美军将不同损伤软件集成,开发了基于任务需求的减员评估(Operational Requirements-



图 10 Injury 软件界面

Fig. 10 Injury software interface

based Casualty Assessment, ORCA) 软件^[84-85],该软件可以实现破片、冲击波、热、冲击振动、吸入毒气等毁伤元对人员的损伤评估,目前详细开发过程报道较少,文献显示目前美军仍然在不断修改迭代 ORCA 软件。

国内关于人员损伤评估的软件多为单一毁伤元的评估应用。南京理工大学张金洋^[86]与原第三军

医大学联合开发了破片对人员的损伤评估软件,其中伤道构建并非采用美军减速模型的思路,而是通过有限元数值模拟计算大量不同类型破片形成的明胶弹道,将明胶弹道提取形成数据集,投射到数字化人体形成伤道。刘苏苏^[87]基于张金洋^[86]的模型开发了步枪弹对人员损伤的计算软件——轻武器杀伤效应仿真评估系统。秦俊华^[38]提出了爆炸冲击波作用下的人体损伤评估理论,并开发出爆炸冲击波对人体的损伤效应评估软件,但没有给出选用模型的依据。

7 人员易损性结果应用场景

7.1 对武器弹药设计提供指导

武器弹药设计根据使用目的不同而变化,针对杀爆类弹药,弹丸预置破片最小质量、形状、破片数量、分布密度等因素相互关联,若根据破片对人员杀伤判据设计,则能够使破片在有效作用范围内数量最多、质量最小,达到最佳杀伤效果。

针对低附带毁伤弹药,根据小破片穿透能量设计颗粒飞散范围、穿透深度,可确保弹药爆炸后杀伤范围有限,破片衰减迅速,对周围附带毁伤较小。

对非致命弹药,主要以打击疼痛、驱散人群为目的,通过控制弹丸硬度、材质、出口速度等,可确保弹丸不造成严重损伤的同时达到致痛效果。

7.2 为人员等效靶标构建提供依据

在弹药性能鉴定试验、实弹打击试验、作战试验等火力打击中,靶标作为评价和考核的重要手段和依据,是试验开展中不可缺少的一环。如何构建逼真的人员等效靶标,如何评价通过靶标获取的数据,如何让大批量的消耗靶标经济可行,是试验中不可回避的问题。

根据人员易损性分析结果、判据,设置几何结构相似、材料经济可行的等效靶,是解决上述问题的可行方法之一。

例如,美军在装甲车触雷安全性测试中使用了大量的假人模型(包含用于汽车碰撞的 Hybrid III 假人),依据同等配重下测得垂直方向的加速度,再根据人员在振动载荷下的易损性结果判断车辆是否安全。

7.3 高效杀伤与低附带杀伤的支撑

现代战争中,拟打击目标结构复杂,功能复合,不同目标之间关联度高。打击目标群或单一复杂目标,往往需要多种弹药组合使用。不同弹药主要杀伤元差异较大,杀伤元作用于人员机制差异较大,根

据目标易损性结果(人员易损性结果)组合最佳打击方式,获取最小弹药消耗下的最佳杀伤效果,是高效杀伤的重要课题。

城市作战中,控制杀伤范围下打击,避免平民伤亡,是现代作战中经常面对的问题。弹药威力场明确的情况下,依据人员目标易损性结果,选择超压场、破片场、温度场等主要杀伤元合理的弹药,可使打击目标达到预期杀伤等级,同时确保目标周围平民安全。

7.4 支撑战伤减员预测

通过兵棋推演分析敌方使用的武器类型、作战环境等,基于人员易损性分析结果,战前预测作战中的伤亡率、损伤类型(冲击伤、破片伤、截肢伤等)、伤型发生率,配置合理的卫勤力量(内外科医生数量、药品类型、血液量等),对战场伤员救治具有重要价值。

8 人员易损性分析发展思考

8.1 伤情分级编码数字化智能化

目前,战伤分类缺乏统一编码及规范化描述,由于损伤因素复杂,量化指标缺乏,不同人员对同一伤情的严重度判断及描述可能存在差异,这种差异对杀伤评估、战伤救治、伤情统计具有较大影响。

开展全面量化、描述规范、编码合理的数字化战伤分级系统,是人员易损性研究的基础性工作。在此基础上,发展基于图像识别、人工智能算法的智能化手段,可使损伤人员快速分级、分类,使伤类识别准确、伤情量化精准、编码及描述统一,为战伤救治提供强大支撑。

8.2 物理损伤与功能损伤定量化

装备等目标某一部件受损后,可以通过建立部件主要功能与某一物理量的函数形式确定某一部件的功能下降程度,以及对整体目标功能的影响,即建立物理损伤与功能损伤的量化表征。人员与装备类差异较大,人体是结构与功能相互关联紧密的整体,神经系统、血液系统、呼吸系统、骨骼肌肉等某一部位损伤可能引起其他器官损伤,时间因素在人员物理损伤中影响较大,这些因素使得难以构建损伤后功能下降的量化表征。

开展单一杀伤元致不同部位损伤后存活时长、运动、呼吸、意识等能力下降的动物试验,获取基于动物试验的表征模型;通过临床创伤案例调查,获取损伤部位、严重度等与救治前后运动、呼吸、心率、意识等能力的对应关系,开展人员物理损伤与功能损

伤的关系研究,将推动人员易损性分析的进一步发展。

8.3 开发基于任务牵引的快速评估软件

针对已有人员单一杀伤元的易损性分析模型及判据,国内外开发了大量的应用软件。美军基于任务需求,将不同损伤模型及判据集成,开发形成了著名的 ORCA 软件,由于保密原因相关内容报道较少。可以肯定的是,该软件及相关模型仍然在持续升级和迭代。

基于任务牵引的减员评估软件在美军近年来的实战中发挥了重要作用,为火力筹划、弹药采购、卫勤配置、作战任务制定等提供了重要的科学支撑。未来开发类似的评估软件,是人员易损性研究发展的重要方向。

9 结论

本文参考装备类目标易损性分析的通用方法,指出人员易损性分析的 2 个核心内容为:人员损伤分级评分与不同杀伤元的杀伤判据;对比分析了 4 种常见人员损伤评分方法及应用情况;给出了典型战场环境中冲击波、投射物、冲击振动、热 4 种主要杀伤元对无防护人员损伤的研究动态、评估模型、杀伤判据;分析了基于数字化人体模型开展的人员易损性分析应用技术;探讨了易损性分析结果的主要应用场景,分析了该领域可能的主要发展方向。得出以下主要结论:

1) 人员易损性分析中人员损伤评分与不同杀伤元的杀伤判据是该领域的 2 个核心内容,是数字化技术、智能化分析的基础。

2) 人员损伤评分类别较多,需要根据不同应用场景选择合适的评分方法、编码规则、规范化描述。AIS 以及 ISS 评分伤情谱繁多,不适用战场紧急环境,ASII 适用有医学专业背景的人员使用,MCIS 相对简洁,可供借鉴。

3) 冲击波致伤判据主要有超压峰值阈值法、超压峰值及持续时间阈值、归一化功模型、胸壁运动速度模型,在快速评估中可以使用阈值法,在计算机分析软件中可以使用归一化功模型。破片致人员损伤与命中部位关系密切,现有标准缺乏与部位相关的判据。垂直方向的冲击振动载荷主要损伤人员脚踝、胫骨、脊柱,损伤分析中需要考虑年龄、性别等因素。两种热损伤判据均可用于瞬时爆炸场的快速计算,需要注意长时间火灾评估中吸入性损伤是不可忽略的因素,本文模型并未考虑。

4) 多条伤元复合作用,无人化、智能化、数字化开展易损性分析及评估,构建基于任务牵引的易损性分析软件,是人员易损性分析的主要发展方向。

参考文献 (References)

- [1] 张克钊,卢芳云. 美军目标易损性研究发展历程分析[J]. 国防科技, 2022, 43(2):66-74.
ZHANG K F, LU F Y. Development of target vulnerability research by the U. S. military[J]. National Defense Technology, 2022, 43(2):66-74. (in Chinese)
- [2] LOMAZZI L, CADINI F, GIGLIO M, et al. Vulnerability assessment to projectiles: approach definition and application to helicopter platforms[J]. Defense Technology, 2022, 18(9):1523-1537.
- [3] 陈荣,卿华,任柯融,等. 美军飞机易损性实弹测试现状及启示[J]. 国防科技, 2021, 42(2):36-41.
CHEN R, QING H, REN K R, et al. Progress on live fire tests and assessment of aircraft vulnerability in the US armed forces[J]. National Deference Technology, 2021, 42(2):36-41. (in Chinese)
- [4] 梁振刚,王鑫,赵书超,等. 装甲车辆目标易损性模型快速建模技术[J]. 弹箭与制导学报, 2020, 40(1):105-109.
LIANG Z G, WANG X, ZHAO S C, et al. Rapid modeling technique for target vulnerability model of armored vehicle[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2020, 40(1):105-109. (in Chinese)
- [5] STARKS M W. Improved metrics for personnel vulnerability analysis[R]. Harford County, MD, US: Ballistic Research Laboratory, 1991.
- [6] DEITZ P H, HARRIS B A, SHEEHAN J H, et al. A general framework and methodology for analyzing weapon systems effectiveness[R]. Aberdeen Proving Ground, MD, US: US Army Materiel Systems Analysis Activity, 2001.
- [7] 卢芳云,李翔宇,田占东,等. 武器毁伤与评估[M]. 北京:科学出版社, 2021.
LU F Y, LI X Y, TIAN Z D, et al. Weapon damage and assessment[M]. Beijing: Science Press, 2021. (in Chinese)
- [8] 卢芳云,彭永,张克钊,等. 目标易损性分析—共性技术[M]. 长沙:国防科技大学出版社, 2023.
LU F Y, PENG Y, ZHANG K F, et al. Target vulnerability analysis-Generic technology[M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 2023. (in Chinese)
- [9] 张金洋. 面向损伤评估的数字化人体建模研究[D]. 南京:南京理工大学, 2016.
ZHANG J Y. Research on digital human modeling for damage assessment[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016. (in Chinese)
- [10] GEORGE S, MARTIN L, GEORGIOS V, et al. A survey of computational models for blast induced human injuries for security and defense applications[R]. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2020.
- [11] 汪华侨. 功能解剖学[M]. 北京:人民卫生出版社, 2008.

- WANG H Q. Functional anatomy [M]. Beijing: The Peoples Medical Publishing House, 2008. (in Chinese)
- [12] HAZELL G A, PEARCE A P, HEPPEP A E, et al. Injury scoring systems for blast injuries: a narrative review [J]. British Journal of Anesthesia, 2022, 128(2): e127 - e134.
- [13] KIM Y J. Injury severity scoring systems: a review of application to practice [J]. Nursing in Critical Care, 2012, 17(3): 138 - 150.
- [14] SWAN K G. War surgery: working with limited resources in armed conflict and other situations of violence Volume I [M]. International Committee of the Red Cross, 2009.
- [15] 周继红. 量化评估创伤严重程度的标尺—创伤评分 [J]. 伤害医学(电子版), 2014, 3(4): 1 - 2.
ZHOU J H. Quantitative evaluation of trauma severity scale—trauma score [J]. Injury Medicine (Electronic Edition), 2014, 3(4): 1 - 2. (in Chinese)
- [16] 周继红. 创伤评分学 [M]. 北京: 科学出版社, 2018.
ZHOU J H. Trauma scoreology [M]. Beijing: Science Press, 2018. (in Chinese)
- [17] 康建毅, 段朝霞, 张洁元, 等. 不同创伤评分系统在爆炸伤伤情评估中的比较 [J]. 第三军医大学学报, 2019, 41(15): 1403 - 1406.
KANG J Y, DUAN Z X, ZHANG J Y, et al. Application of different trauma scoring systems for evaluation of severity of blast injuries [J]. Journal of the Third Military Medical University, 2019, 41(15): 1403 - 1406. (in Chinese)
- [18] 刘文宝, 刘建, 陈国良, 等. 战伤分类编码系统研究 [J]. 解放军医院管理杂志, 2008, 15(1): 54 - 55.
LIU W B, LIU J, CHEN G L, et al. Coding system to classify war wound [J]. Hospital Administration Journal of Chinese People's Liberation Army, 2008, 15(1): 54 - 55. (in Chinese)
- [19] 贺祯, 姜永, 武洪波. 战伤分类和四肢战伤发生发展趋势 [J]. 武警医学, 2017, 28(10): 973 - 976.
HE Z, JIANG Y, WU H B. Classification of war injuries and trends in the occurrence and development of limb war injuries [J]. Medical Journal of the Chinese People's Armed Police Force, 2017, 28(10): 973 - 976. (in Chinese)
- [20] 韩天民, 宋慧菊, 钟靖明, 等. 某院收治 3776 例战伤统计分析 [J]. 西南国防医药, 2015, 25(4): 423 - 425.
HAN T M, SONG H J, ZHONG J M, et al. Statistical analysis of 3776 cases of war injuries treated in a hospital [J]. Medical Journal of National Defending Forces in Southwest China, 2015, 25(4): 423 - 425. (in Chinese)
- [21] 胡鹏伟, 陈福兴, 刘晓荣, 等. 美军战伤编码研究进展 [J]. 第二军医大学学报, 2017, 38(9): 1196 - 1201.
HU P W, CHEN F X, LIU X R, et al. Research process of combat injury coding of U. S. army [J]. Academic Journal of Second Military Medical University, 2017, 38(9): 1196 - 1201. (in Chinese)
- [22] FRANKLYN C S P. Assessment of the effects and limitations of the 1998 to 2008 abbreviated injury scale map using a large population-based dataset [J]. Scandinavian Journal of Trauma, Resuscitation and Emergency Medicine, 2011(1): 1 - 10.
- [23] BAKER S P, O'NEILL B, HADDON W J, et al. The injury severity score: a method for describing patients with multiple injuries and evaluating emergency care [J]. The Journal of Trauma, 1974, 14(3): 187 - 196.
- [24] OSLER T, BAKER S P, LONG W. A modification of the injury severity score that both improves accuracy and simplifies scoring [J]. Journal of Trauma, 1997, 43(6): 922 - 926.
- [25] YELVERTON J T. Pathology scoring system for blast injuries [J]. The Journal of trauma, 1996, 40(3 Suppl): S111 - S115.
- [26] LAWNICK M M, CHAMPION H R, GENNARELLI T, et al. Combat injury coding: a review and reconfiguration [J]. The Journal of Trauma and Acute Care Surgery, 2013, 75(4): 573 - 581.
- [27] 彭博, 蒯丽萍, 杜国福, 等. 基于分级救治的常规武器战伤分类及编码体系研究 [J]. 人民军医, 2017, 60(4): 344 - 346, 351.
PENG B, KUAI L P, DU G F, et al. Research on classification and coding system of conventional weapon battle wound based on hierarchical treatment [J]. People's Military Surgeon, 2017, 60(4): 344 - 346, 351. (in Chinese)
- [28] CLEMEDSON C J. Blast injury [J]. Physiological Reviews, 1956, 36(3): 336 - 354.
- [29] BOWEN I G, FLETCHER E R, RICHMOND D R. Estimate of man's tolerance to the direct effects of air blast [R]. NM, US: Lovelace Foundation for Medical Education and Research, 1968.
- [30] BASS C R, RAFAELS K A, SALZAR R S. Pulmonary injury risk assessment for short-duration blasts [J]. Journal of Trauma: Injury, Infection & Critical Care, 2008, 65(3): 604 - 615.
- [31] STUHMILLER J H. Biological response to blast overpressure: a summary of modeling [J]. Toxicology, 1997, 121(1): 91 - 103.
- [32] JOHNSON D L, YELVERTON J T, HICKS W, et al. Blast overpressure studies with animals and man: biological response to complex blast waves [R]. Fort Detrick, MD, US: U. S. Army Medical Research and Development Command, 1993.
- [33] AXELSSON H, YELVERTON J T. Chest wall velocity as a predictor of nonauditory blast injury in a complex wave environment [J]. The Journal of Trauma, 1996, 40(3 Suppl): S31 - S37.
- [34] RICHMOND D R, YELVERTON J T, FLETCHER E R. New air-blast criteria for man [R]. NM, US: Los Alamos National Lab NM Life Sciences Div, 1986.
- [35] 王正国. 冲击伤 [M]. 北京: 人民军医出版社, 1983.
WANG Z G. Blast injury [M]. Beijing: People's Military Medical Press, 1983. (in Chinese)
- [36] 周杰. 爆炸冲击波作用下的人体创伤及泡沫材料对冲击波的衰减机理研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2014.
ZHOU J. Research on mechanism of human injury and the attenuation in foam under blast wave [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2014. (in Chinese)
- [37] 康建毅. 复杂冲击波的生物效应与数值模拟研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
KANG J Y. Biological effect and numerical simulation study of complex blast wave [D]. Chongqing: Chongqing University, 2010. (in Chinese)
- [38] 秦俊华. 爆炸冲击波对人体创伤效应评估软件设计 [D]. 南

- 京:南京理工大学, 2017.
- QIN J H. Software design of safety assessment of explosive shock wave on human[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2017. (in Chinese)
- [39] GJB-5212—2004. 云爆弹定型试验规程[S]. 北京: 总装备部军标出版发行部, 2004.
- GJB-5212—2004 Specification for cloud explosion bomb sizing test [S]. Beijing: General Equipment Department Military Standard Publishing and Distribution Department, 2004. (in Chinese)
- [40] BIRCHER H. Die wirkung der artilleriegeschosse [M]. Nordrhein-Westfalen, Germany: HR Sauerländer, 1899.
- [41] JOURNEE F A. Rapport entre la force vive des balles et la gravité des blessuresqu' ellespeuvent causer, par M. Journée [M]. Paris, France: Berger-Levrault, 1907.
- [42] CALENDER G R, FRENCH R W. Wound ballistics; studies in the mechanism of wound production by rifle bullets[J]. Military Surgeon, 1935, 77: 177—201.
- [43] ALLEN F, SPERRAZZA J. New casualty for wounding by fragments, ballistic research laboratories [R]. MD, US: Ballistic Research Laboratories, Aberdeen Proving Ground, 1956.
- [44] SPERRAZZA J, KOKINAKIS W. Ballistic limits of tissue and clothing [J]. Annals of the NewYork Academy of Sciences, 1968, 152(1):163—167.
- [45] KNEUBUEHL B P. Wound ballistics; basics and applications [M]. Berlin, Germany:Springer, 2011.
- [46] 刘荫秋, 李曙光. 创伤弹道学概论[M]. 北京: 新时代出版社, 1985.
- LIU Y Q, LI S G. Introduction to trauma ballistics[M]. Beijing: New Times Press, 1985. (in Chinese)
- [47] 王光华, 吴志林, 赖西南, 等. 轻武器杀伤效应[M]. 北京: 科学出版社, 2021.
- WANG G H, WU Z L, LAI X N, et al. Terminal effects of small arms[M]. Beijing: Science Press, 2021. (in Chinese)
- [48] 温垚珂, 徐诚, 陈爱军, 等. 步枪弹侵彻明胶靶标的数值模拟[J]. 兵工学报, 2013, 34(1):14—19.
- WEN Y K, XU C, CHEN A J, et al. Numerical simulation of the penetration of bullet on gelatin target[J]. Acta Armamentarii, 2013, 34(1):14—19. (in Chinese)
- [49] 刘坤, 吴志林, 徐万和, 等. 球形破片侵彻明胶修正力学模型[J]. 南京理工大学学报, 2012, 36(5):755—761.
- LIU K, WU Z L, XU W H, et al. Correction mechanical model of spherical fragments penetrating gelatin[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2012, 36(5):755—761. (in Chinese)
- [50] 莫根林, 吴志林, 冯杰. 长方体破片侵彻明胶的运动模型与实验研究[J]. 兵工学报, 2015, 36(3):81—86.
- MO G L, WU Z L, FENG J. Theoretical and experimental study of penetration of cuboid fragments into gelatin [J]. Acta Armamentarii, 2015, 36(3):81—86. (in Chinese)
- [51] 刘丽. 弹道明胶的冲击与侵彻动力学研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- LIU L. Study on impact and penetration in ballistic gelatin[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014. (in Chinese)
- [52] 许川, 李兵仓. 爆炸破片伤的机制, 特点及早期外科处理[J]. 创伤外科杂志, 2011, 13(1): 86—89.
- XU C, LI B C. The mechanism, characteristics and primary surgery treatment for explosive injuries[J]. Journal of Traumatic Surgery, 2011, 13(1):86—89. (in Chinese)
- [53] 卢海涛, 王晓琳, 覃彬, 等. 低速钢球对人体模拟靶标作用研究[C]//中华医学会第十一届全国创伤学术会议. 北京: 中华医学会, 2017: 886—890.
- LU H T, WANG X L, QIN B, et al. Research on the effect of low-speed steel balls on human simulated targets [C]//Proceedings of the 11st National Trauma Academic Conference of the Chinese Medical Association. Beijing: National Trauma Academic Conference of the Chinese Medical Association, 2017: 886—890. (in Chinese)
- [54] 张国伟. 终点效应及靶场试验[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2009.
- ZHANG G W. Terminal effect and range test [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2009. (in Chinese)
- [55] GA/T 718—2007. 枪支致伤力的法庭科学鉴定判据[S]. 北京: 中华人民共和国公安部, 2007.
- GA/T 718—2007. Identification criteria to cause casualty of firearms[S]. Beijing: Ministry of Public Security of the People's Republic of China, 2007. (in Chinese)
- [56] GJB 2936—97. 钢质自然破片对人员的杀伤判据[S]. 北京: 国防科学技术委员会, 1997.
- GJB 2936—97. Wounding criteria of natural steel fragment against personnel [S]. Beijing: National Defense Science and Technology Commission, 1997. (in Chinese)
- [57] GJBz 20450—97. 小质量钢质破片对人员的杀伤判据[S]. 北京: 中国人民解放军总参谋部, 1997.
- GJBz 20450—97. Wounding criteria of the attack of personnel for small steel fragment [S]. Beijing: General Staff of the Chinese PLA, 1997. (in Chinese)
- [58] GRIFFIN, MICHAEL J, ZHOU, et al. Response of the seated human body to whole-body vertical vibration; biodynamic responses to mechanical shocks [J]. Ergonomics; The Official Publication of the Ergonomics Research Society, 2017.
- [59] HIRSCH A E. Man's response to shock motion [R]. Washington, D. C., US: David Taylor Bassin Model, Report 1797, 1964.
- [60] YOGANANDA N, PINTAR F A, BOYNTON M, et al. Dynamic axial tolerance of the human foot-ankle complex[J]. Journal of Passenger Cars, 1996, 105(6):1887—1898.
- [61] GRIFFIN L V, HARRIS R M, HAYDA R A, et al. Loading rate and torsional moments predict pilon fractures for antipersonnel blast mine loading [C] // Proceedings of the International Conference on the Biomechanics of Impacts. Isle of Man, UK: IRCOBI, 2001.
- [62] RUFF S. Brief acceleration; less than one second [M]. Washington, D. C., US: Government Printing Office, 1950.
- [63] EIBAND A M. Human tolerance to rapidly applied acceleration [R]. Washington, D. C., US: NASA Memorandum5-19-59E, National Aeronautics and Space Administration, 1959.
- [64] 李曙光, 凌峰, 付祥林, 等. 扫雷防护装具的研制[J]. 医疗

- 卫生装备, 2003(10):5-7.
- LI S G, LING F, FU X L, et al. Development of the mine sweeping protective outfit [J]. Chinese Medical Equipment Journal, 2003(10):5-7. (in Chinese)
- [65] 黄建松, 华宏星, 沈荣赢. 舰船冲击运动引起人员损伤评估方法研究综述[J]. 振动与冲击, 2008, 27(5): 60-63.
- HUANG J S, HUA H X, SHEN R Y. Injury assessment functions for human under ship shock motions[J]. Journal of Vibration and Shock, 2008, 27(5): 60-63. (in Chinese)
- [66] 徐志鹏, 孙喜庆. 高G作用下飞行员脊柱的损伤及其防护[J]. 中华航空航天医学杂志, 2004(4): 251-254.
- XU Z P, SUN X Q. High-G overload related spinal injuries and its protection in pilots[J]. Chinese Journal of Aerospace Medicine, 2004(4): 251-254. (in Chinese)
- [67] GJB 4234—2001. 人体坐姿着陆冲击安全限值[S]. 北京: 中国人民解放军总装备部, 2001.
- GJB 4234—2001. Safety limits of landing impact on man in sitting position[S]. Beijing: General Armament Department of the Chinese PLA, 2001. (in Chinese)
- [68] GJB 2689—96. 水面舰艇冲击对人体作用安全限值[S]. 北京: 国防科学技术工业委员会, 1996.
- GJB 2689—96. Safety limits for the effects of surface ship shock on man [S]. Beijing: Commission of Science Technology and Industry of National Defense, 1996. (in Chinese)
- [69] STECH E L, PAYNE P R. Dynamic models of the human body [R]. Englewood, CO, US: Aerospace Medical Research Laboratory, 1969.
- [70] 杨宗城, 黎鳌. 我军烧伤研究的主要进展[J]. 解放军医学杂志, 1991(4):274-277.
- YANG Z C, LI A. The main progress of burn research in our army [J]. Medical Journal of Chinese People's Liberation Army, 1991(4):274-277. (in Chinese)
- [71] 范晓明, 张学军, 夏照帆. 伊拉克战争和阿富汗战争中美军烧伤医疗后送体系和伤员烧伤特点[J]. 解放军医学杂志, 2015, 40(1): 71-74.
- FAN X M, ZHANG X J, XIA Z F. Medical evacuation system of burn casualties and characteristics of burn injuries in US Army in Iraqi War and Afghanistan War[J]. Medical Journal of Chinese People's Liberation Army, 2015, 40(1):71-74. (in Chinese)
- [72] 黎鳌, 杨宗城. 国外烧伤防治研究进展近况述评[J]. 重庆医药, 1980(4):36-39,18.
- LI A, YANG Z C. Review of recent progress in burn prevention and treatment abroad[J]. Chongqing Pharmaceutical, 1980(4): 36-39,18. (in Chinese)
- [73] BULL J P. Revised analysis of mortality due to burns[J]. The Lancet, 1971, 298(7734): 1133-1134.
- [74] HARDEE H C, LEE D O. A simple conduction model for skin burns resulting from exposure to chemical fireballs[J]. Fire Safety Journal, 1978, 1(3):199-205.
- [75] BOSCH C J H, TWILT L, MERX W, et al. Methods for the determination of possible damage to people and objects resulting from releases of hazardous materials [M]. Voorburg, the Netherlands; The Director-General of Labour, 1992.
- [76] KAUVAR D S, WOLF S E, WADE C E, et al. Burns sustained in combat explosions in Operations Iraqi and Enduring Freedom (OIF/OEF explosion burns) [J]. Burns: Journal of the International Society for Burn Injuries, 2006, 32(7): 853-857.
- [77] 黎鳌. 烧伤治疗学[M]. 北京: 人民卫生出版社, 1995.
- LI A. Burn therapy [M]. Beijing: People's Health Publishing House, 1995. (in Chinese)
- [78] 王杰. 某型云爆弹毁伤威力测试及评价方法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2016.
- WANG J. Research on testing and evaluating the damage power of a certain type of cloud explosive bomb [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016. (in Chinese)
- [79] 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(8):103-106.
- 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(8): 103-106. (in Chinese)
- [80] 张慧君, 赵筱卓, 王成, 等. 223例成人严重烧伤住院患者的流行病学调查[J]. 中国医刊, 2022, 57(2):184-190.
- ZHANG H J, ZHAO X Z, WANG C, et al. Epidemiological investigation of 223 severe burn hospitalized adult patients[J]. Chinese Journal of Medicine, 2022, 57(2):184-190. (in Chinese)
- [81] STANLEY C A, BROWN M. A computer man anatomical model. AD056564[R]. MD, US: Ballistic Research Laboratory, 1978.
- [82] KNOX F S I, BONETTI D, PERRY C. User's manual for BRNSIM/BURNSIM; a burn hazard assessment model [R]. Armstron Lab Wright Patteron AFB on Crew Systems Directorate, 1993.
- [83] LITT O P. Procedures for using the AMANDA model in acceleration response studies (Tutorial by Example) [R]. Fort Detrick, MD, US; U. S. Army Medical Research & Development Command ARL-TR-333, 2004.
- [84] LITT O P. ORCA user's manual glossary [R]. Aberdeen Proving Ground, MD, US; U. S. Army Research Laboratory, 2004.
- [85] BAKER J, MURRAY E. Manipulating the geometric computer-aided design of the operational requirements-based casualty assessment model within BRL-CAD [R]. MD, US; U. S. Army Research Laboratory, 2018:1-16.
- [86] 张金洋. 面向损伤评估的数字化人体建模研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2016.
- ZHANG J Y. Research on digital human modeling for damage assessment [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016. (in Chinese)
- [87] 刘苏苏. 轻武器典型杀伤元与靶标相互作用仿真及评估研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2017.
- LIU S S. Study of simulation and assessment of the interaction between typical small arms ammo and target [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2017. (in Chinese)