DOI:10.16016/j.1000-5404.202003159

2019年度重庆市出版专项资金资助栏目论文

模拟实爆条件下新型聚脲类材料对肺冲击伤的防护效应研究

薛钰奇,张华才,文大林,杜 娟,张安强,杨 策,蒋建新 400042 重庆,陆军军医大学(第三军医大学)大坪医院野战外科研究所战伤救治前沿技术研究室,创伤、烧伤与复合伤国家重点实验室

[摘要] **目的** 通过肺冲击伤防护效应及冲击波超压峰值衰减效能进行检测、验证,筛选防冲击波性能良好的新型聚脲类材料,为冲击波防护装备的研制提供理论基础和材料支撑。**方法** 采用7 kg TNT炸药球,在旷场空爆条件下,观察距离爆心3.8 m和5.8 m处被覆不同组合防护材料的人体躯干模型的冲击波超压峰值变化。根据新型聚脲类材料(PUR)分子结构和组分(分子结构改造、微米级玻璃颗粒夹杂)不同,以及与现役使用的防弹材料超高分子量聚乙烯(PE)组合分为8组:PE、PUR1+PE、PUR1G20+PE、PUR1G30+PE、PUR2+PE、PUR2G20+PE、PUR2G30+PE、PUR3+PE;每组材料组合于两个距离各测试1次。同时选择衰减冲击波性能良好的聚脲类材料品种,制备山羊胸部防冲击波模具,进行生物防护效应实验。选取24只实验山羊随机分为无防护组、PE防护组、优选聚脲(PUR)防护组和优选聚脲+PE防护组。根据7 kg TNT空爆冲击波超压估值,选择具有较强冲击波杀伤范围的距离爆心3.6、3.8 m处观察穿戴优选聚脲模具山羊在上述模拟实爆条件下,胸壁加速度、生命体征、肺脏伤情及其等级变化。**结果** 在距离爆心3.8 m和5.8 m处,新型聚脲组对冲击波衰减效能较PE组分别增加23%~35%和25%~50%。在距离爆心3.6 m和3.8 m处,优选聚脲+PE防护组动物胸壁加速度较无防护组分别降低55.56%和65.20%,肺脏伤情较PE防护组显著减轻,伤情等级减轻2级。**结论** 新型聚脲材料通过衰减冲击波对肺冲击伤有高效防护效能。

[关键词] 肺冲击伤;超压峰值;胸壁加速度;聚脲;创伤和损伤

[中图法分类号] R642;R826.63;TS941.15 [文献标志码] A

Bioprotective effects of novel polyurea materials on lung blast injury after simulated open-field explosion

XUE Yuqi, ZHANG Huacai, WEN Dalin, DU Juan, ZHANG Anqiang, YANG Ce, JIANG Jianxin State Key Laboratory of Trauma, Burns and Combined Injury, Institute of Surgery Research, Daping Hospital, Army Medical University (Third Military Medical University), Chongqing, 400042, China

[**Abstract**] **Objective** To detect, verify and screen novel polyurea (PUR) materials with better protective efficacy against blast wave by testing their bioprotective effects and peak pressure of shock waves so as to provide theoretical and material support for preparation of protective equipment against blast wave. **Methods** A 7 kg TNT explosive ball in a open field was exploded, and the changes in the peak pressure of shock waves to a human torso model were observed, which was covered with a series of PUR materials and located at 3.8 and 5.8 m from the explosion center respectively. According to the molecular structure and compositions (molecular structure modification, and volume fractions of micron glass particles), and combination with ultra high molecular weight polyethylene (PE, bulletproof material used in active service) or not, the first part of experiment was divided into PE, PUR1+PE, PUR1G20+PE, PUR1G30+PE, PUR2+PE, PUR2G20+PE, PUR2G30+PE, and PUR3+PE groups. Each type of material was tested once at 3.6 and 5.8 m respectively. Based on the results of above experiment, the selected PUR material with good blast mitigation was chosen and then used to prepare a goat chest mold to detect its anti-blast effect. Then 24 goats

[基金项目] 国家重点基础研究计划(613307),"十三五"军队"双重"建设科研创新项目(2019);陆军特色医学中心人才创新能力培养计划(2019CXJSA001, 2019CXJSB007)

[通信作者] 蒋建新,E-mail:hellojjx@126.com

were randomly divided into the unprotected, PE, PUR, and PUR+PE groups. They were placed in a open field at the distance of 3.6 and 3.8 m from the explosion center (7 kg TNT air explosion). The chest wall acceleration, vital signs, and severity of lung injury were observed and compared among the groups. **Results** At 3.8 and 5.8 m from the explosion center, the attenuation effects of new PUR groups on shock waves were increased by 23%~35% and 25%~50%, respectively, when compared with the PE group. At the distance of 3.6 and 3.8 m, the chest wall acceleration was preferably lower by 55.56% and 65.20% in the PUR+PE group than the unprotected group, respectively. The lung injury was significantly alleviated compared with the PE group, and the injury was reduced by 2 levels. **Conclusion** The new PUR material has ideal protective effects against pulmonary blast injury by attenuating shock waves.

[**Key words**] blast lung injury, peak pressure, chest wall acceleration; polyurea; trauma and injury

Supported by the National Key Basic Research Plan (613307), the "Thirteenth Five-Year Plan" of Military "Double-Key" Construction Scientific Research and Innovation Program (2019), and the Talent Innovation Training Plan of Army Characteristic Medical Center (2019CXJSA001, 2019CXJSB007). Corresponding author: JIANG Jianxin, E-mail: hellojjx@126.com

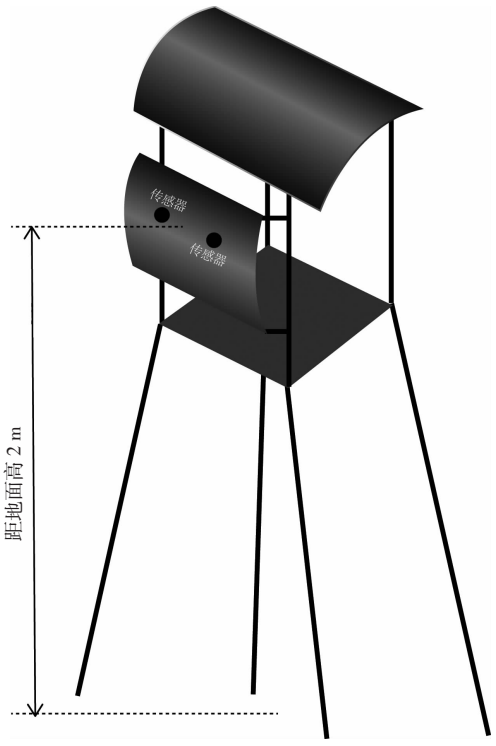
随着局部军事冲突、恐怖袭击以及生产生活中各类爆炸事故频发,冲击伤业已成为现今创伤疾患中最为重要的一种伤类。据不完全统计,从1998年至2006年,与军事和恐怖主义有关的爆炸事故增加了4倍,爆炸伤患者增加了8倍[1]。非战争性爆炸(煤矿瓦斯爆炸、扫雷意外爆炸、粉尘和燃气爆炸、烟花爆炸等)在我国时有发生。对国家安监局数据分析发现,2000-2017年平均每3天发生1起爆炸事故[2]。爆炸发生后,原发冲击伤(primary blast injury)中肺脏是冲击波最易累及的空腔脏器。在阿富汗战争后送伤员中,原发肺冲击伤发生率为6.7%~11.2%[3]。对冲击伤的诊治关口进行前移,即有效防护,无疑是减轻伤情、提升救治效能的最优举措。因此,选择理想的防护材料衰减冲击波向体腔的传布,将冲击波以反射、绕射以及防护材料结构共振、形变等方式施以能量耗散,是冲击伤防护的潜在策略。

既往军用或警用防护材料涉及Kevlar纤维、超高分子量聚乙烯(ultra high molecular weight polyethylene, UHMWPE)、陶瓷和纳米智能材料-剪切增稠液体等,这些材料对子弹、弹丸、破片等损伤具有较强的防护性能,但对冲击波防护效果有限[4],甚至可能加重冲击波致伤。近年材料学研究发现,聚脲类材料因具有较好的抗拉强度、断裂强度、冲击强度、耐磨性等力学性能,在防护材料领域有着广泛的应用前景[5-6],尤其在建筑构件防爆研究中证实聚脲涂层可以加速冲击波衰减,增加底材抗爆性能[7],而在防护服材料的研究中鲜有报道。本研究基于聚脲潜在的防爆性能,通过优化聚脲分子结构和组分配比,观察模拟实爆条件下新材料对于冲击波衰减及其生物防护性能,旨在为冲击波防护装具的设计、制备提供理论和材料支撑。

1 材料与方法

1.1 防护材料

根据聚脲合成分子及硬段含量、制作工艺的不同、以及是否添加不同比例玻璃微珠(G+玻璃微珠体积百分比),设计7种聚脲类防护材料,编号分别为PUR1、PUR1G20、PUR1G30、PUR2、PUR2G20、PUR2G30、PUR3(其中PUR1,PUR2,PUR3代表不同聚脲成分)。采用现役防弹衣主要成分UHMWPE(以下简称PE)纤维材料作为对照。防护材料的形状分别根据人体躯干模型(假人,图1)和山羊(图2)尺寸设计。躯干模型采用挡板式设计方法;山羊采用胸腹部包裹式,根据其体型制作左右两片模具包裹固定。防护材料由清华大学化工系制作提供,具体组分与制作工艺因涉及保密信息暂不提供。



主体结构采用曲面钢架近似替代人体胸腹部

图1 人体躯干模型示意图

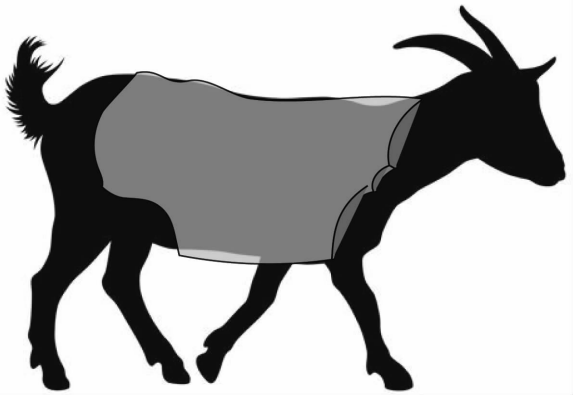


图 2 动物防护服穿戴示意图

1.2 实验材料与场地

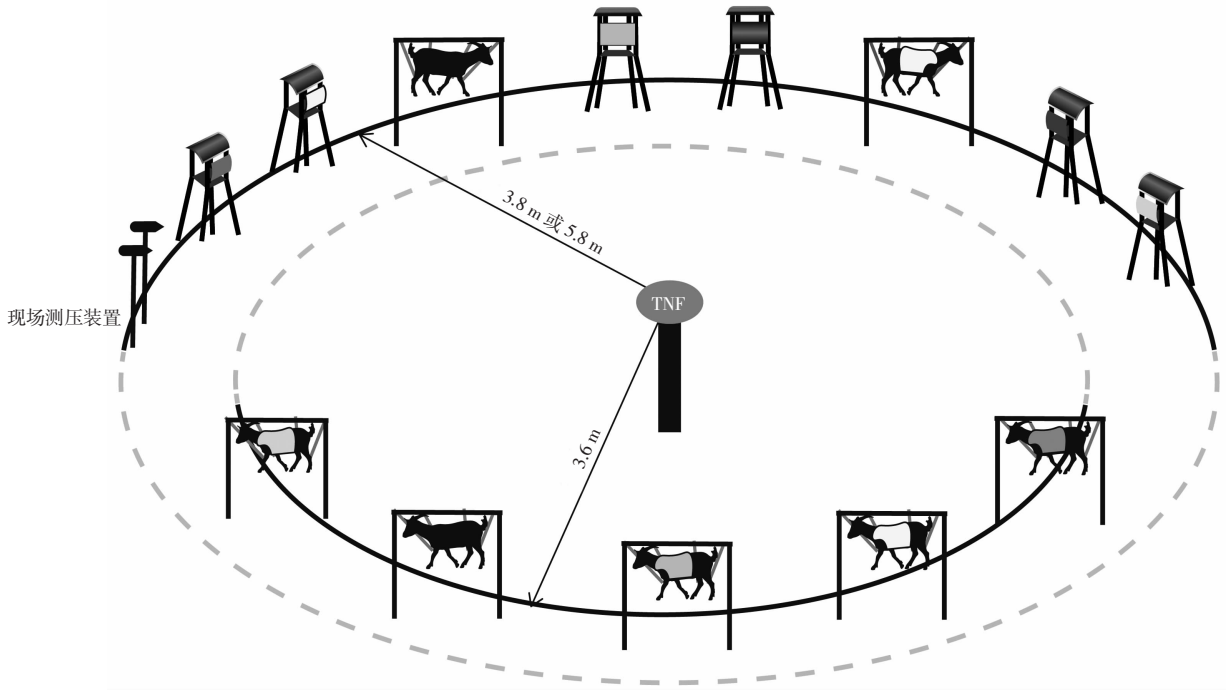
爆源采用标准 TNT(2,4,6-trinitrotoluene, 2,4,6-三硝基甲苯)炸药球(7 kg,内置 JH14 传爆药柱),放置在距地面高度 2 m 处;爆炸场地为 20 m×12 m,两面为刚性墙壁的半开放场;躯干模具采用曲面钢架近似替代。实验在中国工程物理研究院 901 基地进行。场地布置如图 3 所示,山羊随机编号并分别穿戴 PE、PUR、PUR+PE 相应组别防护装具,随机悬吊于右侧体腔纵线中点距地面高度 2 m 位置、距爆心 3.6、3.8 m 和 5.8 m 处,未穿戴装具山羊作对照,具体分组见表 1;分别将 PE、PUR1+PE、PUR1G20+PE、PUR1G30+PE、PUR2+PE、PUR2G20+PE、PUR2G30+PE、PUR3+PE 8 种组合防护装具穿戴于人体躯干模型上,随机摆放于距地面高度 2 m、距爆心 3.8 m 或 5.8 m 处。

1.3 实验动物及致伤方法

健康山羊 24 只,25~30 kg,雌雄不限,由当地动物养殖场提供[使用许可证编号:SCXK(PLA)20120031]。实验前 12 h 禁食,自由饮水。将山羊编号并随机分组,具体分组及样本数见表 1。所有山羊以 3%戊巴比妥钠按 30 mg/kg 剂量静脉麻醉。PUR+PE 组和无防护组山羊加装加速度检测传感器。动物麻醉后左侧卧位,取右侧第 8 肋骨正中处开口,在肋骨上用电钻钻孔置入并固定加速度传感器,缝合皮肤。手术后按分组穿戴防护衣,无防护组不穿戴防护材料,用悬吊带固定于不同距离钢架上,右侧体腔纵线中点距地面高度 2 m,右侧朝向爆心。观察伤前和伤后生命体征(心率、呼吸频率、口鼻出血情况等)。动物伦理已通过陆军军医大学实验动物福利伦理审查委员会审核(2015-01-01)。

表 1 距爆心不同距离的各组实验动物数量

组别	3.6 m	3.8 m	5.8 m
无防护组	5	3	1
PE 组	3	–	–
PUR 组	2	–	–
PUR+PE 组	7	2	1



图中山羊及躯干模型上的不同灰度表示穿戴不同的防护服/防护材料,上下两部分分别为以 TNT 为圆心,半径为 3.6 m、3.8 m 或 5.8 m(根据实验条件及分组更改距离)的两个半圆

图 3 旷场实验布置示意图

1.4 动物解剖与伤情判定

山羊麻醉后,开腹进行腹主动脉放血活杀,观察胃肠损伤情况;开胸观察心、肺脏器损伤情况,对肺脏损伤进行评分[杨志焕,等. 野战外科通讯,2006,31(3):8-12]。伤情等级由各组肺脏损伤评分均值所在范围进行判定。

无伤:0,无明显损伤;

轻微:3~4,有散在瘀点或较小瘀斑但小于全肺 10%;

轻度:5~21,有较重瘀斑或散在肺实变但不超过全肺 10%;

中度:22~36,有散在的肺实质挫伤或肺实变,但出血面积小于全肺 30%;

重度:37~64,肺实质挫伤或弥漫性肺实变,面积大于或等于全肺 30%;

1.5 爆炸现场压力测定

于人体躯干模型左右侧各布放 1 个压力传感器,压力感受面朝向爆源。防护组在传感器上下方布放小木条支撑防护材料,使其与传感器存有一定间隙,防止冲击波致材料形变后拍打传感器;而后将 7 种不同防护材料分别固定于躯干模型上,均采用聚脲类材料+PE 复合防护模式,单层 PE 材料作为对照,每种材料于 3.8、5.8 m 两个距离各测试 1 次,取左右侧冲击波超压峰值平均值。无防护组不穿戴防护材料,于 3.8,5.8 m 两个距离各测试 1 次。数据采集装置为 Tek7104(美国 TEK),压力传感器采用 PCB113-b21(美国 PCB),记录压力峰值。山羊于 3.6 m 和 3.8 m 处分别进行胸壁加速度检测。数据采集装置为 HRU-0412-DL(上海好耐),加速度传感器采用 KD1001A 和 KD1000D(扬州科动),记录内向加速度峰值。

1.6 统计学分析

采用 SPSS 22.0 软件对肺大体评分进行统计学分析,结果采用 $\bar{x}\pm s$ 表示,两样本差异比较采用独立样本 t 检验,$P<0.05$ 表示差异有统计学意义。

2 结果

2.1 聚脲类防护材料对爆炸冲击波的衰减性能

2.1.1 动物胸壁加速度变化 动物实验测试表明,在 3.6 m 处 PUR+PE 组胸壁内向最大加速度为 547.35 g,无防护组为 1231.75 g,防护材料对于胸壁加速度的衰减可达 55.56%;3.8 m 处 PUR+PE 组胸壁内向最大加速度为 306.20 g,无防护组为 879.76 g,防护材料对于胸壁加速度的衰减可达 65.20%。以上结果提示,PUR+PE 防护材料对爆炸冲击波动压有较好的衰减作用。

2.1.2 冲击波超压峰值变化 人体躯干模型测试表明,布放在 3.8 m 处时,PUR1、PUR2 和 PUR3 不同聚脲成分材料较 PE 材料对冲击波超压峰值的衰减性能分别为 23.8%、27.7%和 29.4%,就单独聚脲成分来看,PUR3 衰减性能优于 PUR2 和 PUR1;在 PUR2 和 PUR1 聚脲材料内进一步加入不同比例的玻璃微珠后能够提升衰减性能,加入 30%比例玻璃微珠优于 20%。聚脲类材料在不同距离(3.8 m、5.8 m)对冲击波超压峰值衰减规律相似,PUR1、PUR2 和 PUR3 较 PE 材料衰减冲击波超压峰值能力分别为 25.6%、34.8%和 36.7%。以上结果提示,增加聚脲类防护材料相较于单纯 PE 材料,对于冲击波超压有更好的衰减作用(表 2)。

表 2 聚脲对爆炸冲击波的衰减性能

组别	距爆心距离/m	自由场超压峰值/kPa	平均超压峰值/kPa	冲击波衰减性能(%)	较 PE 组衰减性能改善比例(%)
PE			314.26	56.5	-
PUR1+PE			239.54	66.9	23.8
PUR1G20+PE			230.34	68.1	26.7
PUR1G30+PE			203.80	71.8	35.1
PUR2+PE	3.8	722.82	227.34	68.5	27.7
PUR2G20+PE			217.00	70.0	30.9
PUR2G30+PE			209.43	71.0	33.4
PUR3+PE			221.75	69.3	29.4
PE			188.58	30.3	-
PUR1+PE			140.22	48.2	25.6
PUR1G20+PE			110.63	59.1	41.3
PUR1G30+PE			95.25	64.8	49.5
PUR2+PE	5.8	270.68	122.98	54.6	34.8
PUR2G20+PE			94.73	65.0	49.8
PUR2G30+PE			100.31	62.9	46.8
PUR3+PE			119.46	55.9	36.7

冲击波衰减性能(%)=(自由场超压峰值-各防护材料组超压峰值)/自由场超压峰值×100%;较 PE 组衰减性能改善(%)=(PE 组超压峰值-其他各防护材料超压峰值)/PE 组超压峰值×100%

2.2 聚脲类材料对山羊冲击伤的防护作用

2.2.1 生命体征及死亡率 3.6 m 处 PE 组伤后即刻死亡率为 33.33%(1/3),死亡动物出现口鼻出血;无防护组有 1 只口鼻少量出血,死亡率为 0;其他防护组均无口鼻出血,死亡率均为 0。3.8 m 处和 5.8 m 处均无动物死亡。伤后即刻各组动物均出现呼吸急促,心率稍有加快。

2.2.2 肺脏伤情比较 3.6 m 处,无防护组山羊肺损伤伤情主要为重度伤,占 60%(3/5),中度伤占 40%(2/5),伤情评分均值为 39.4;PE 组重度伤占 100%(3/3),伤情评分为 44.7;PUR 组重度伤占 50%(1/2),中度伤占 50%(1/2),伤情评分为 35.0;PUR+PE 组中度伤占 14%(1/7),轻度伤占 43%(3/7),轻微伤占 14%(1/7),无伤占 29%(2/7),伤情评分为 9.1,主要为轻度伤,可以将肺损伤评分显著降低($P<0.05$),伤情减轻 2 个等级;从以上结果可知 PE 组肺损伤伤情类似于无防护组($P>0.05$),以重度伤为主,而增加聚脲类材料后可将肺损伤伤情减轻 2 个等级。具体伤情见表 3,解剖情况见图 4。进一步在 3.8 m 处观察,PUR+PE 组肺损伤伤情较无防护组由中度伤减轻为轻度伤,减轻 1 个等级,而在距离较远的 5.8 m 处冲击波对肺致伤较弱。

2.2.3 其他脏器伤情比较 3.6 m 处胃肠出血率为 71%(12/17),3.8 m 处胃肠出血率为 20%(1/5),5.8 m 处胃肠出血率为 0(0/2)。提示胃肠出血情况与距爆心距离呈相关性,且随着距离增加,出血的可能性越小。其中 3.6 m 处无防护组胃肠出血率为 60%(3/5),PE 组为 100%(3/3),PUR 组为 0(0/2),PUR+PE 组为 86%(6/7)。同时,3.6 m 处心脏出血率为 53%(9/17),3.8 m 处心脏出血率为 60%(3/5),5.8 m 处心脏出血率为 0(0/2)。提示心脏出血情况与距爆心距离呈相关性,且随着距离增加,出血的可能性越小。其中 3.6 m 处无防护组心脏出血率为 40%(2/5),PE 组为 66.67%(2/3),PUR 组 100%(3/3),PUR+PE 组为 43%(3/7)。

表 3 3.6 m 处各组肺损伤伤情分布

分组	评分($\bar{x}\pm s$)	伤情分布/只				
		重度伤	中度伤	轻度伤	轻微伤	无伤
无防护组	39.4±11.5	3	2	0	0	0
PE 组	44.7±9.1	3	0	0	0	0
PUR 组	35.0±4.2	1	1	0	0	0
PUR+PE 组	9.1±10.3	0	1	3	1	2

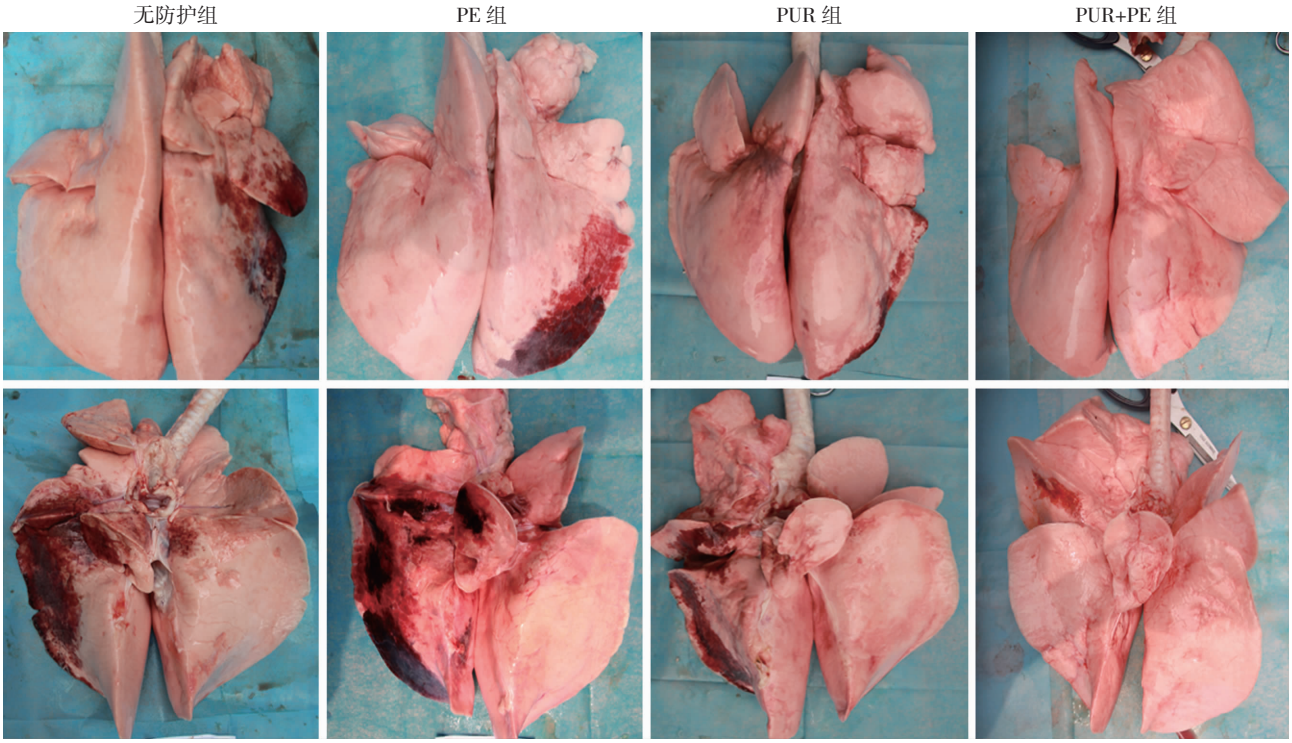


图 4 3.6 m 处各组肺组织解剖伤情情况

3 讨论

肺冲击伤是原发冲击伤最常见的死伤原因[8]。爆炸即刻产生的冲击波压力导致胸壁向脊柱侧挤压,使得胸内压急剧上升,进而导致肺泡间隔撕裂、气道上皮剥离和肺泡腔破裂,出现肺泡出血和肺水肿;呼吸系统症状主要表现为呼吸急促、呼吸困难、发绀和咯血,有些由缺氧或继发性大脑空气栓塞引起的神经体征可能为唯一表现[9],诊治难度大,病程长且康复效果不佳。因此,有效防护必然优于救治。然而,现有防弹衣对于弹丸、破片伤有显著的防护效果[10],但其在子弹未穿透衣服情况下仍会形成“冲击凹陷”,即冲击波产生的伤害,故防弹衣的冲击波防护性能亟待提升[11]。近年来,聚脲类材料因成本低、质量轻、吸能性能强、效果好、易燃性低、抗变形及自修复性好等特点[12],在防爆领域有应用价值[13],且通过复合玻璃纤维或麻类纤维可提升其力学性能并延长使用寿命[14]。因此,以聚脲基为原材料,通过分子结构改造、添加增效组分等手段,对于衰减冲击波、高效防护肺冲击伤有理论上的可行性。

本研究采用清华大学研究设计的聚脲类材料,模拟旷场实爆防护实验,与现役防弹衣主要成分 PE 比较,证实分子结构优化后的聚脲类材料显著衰减冲击波,在一定线性范围内,增加玻璃微珠可进一步提高防护性能。因此,在兼顾材料分子结构和新组分夹杂上,选择工艺成熟、步骤简洁、成本较低的优质新型聚脲材料,对于高效防护肺冲击伤的量产材料制备和推广有重要价值。

肺冲击伤伤情与胸部形变化呈正相关,且加速度是胸壁受力的客观反映和独立危险因素,胸壁向内加速度越大,所承受的冲击波入射压也越大,且胸壁运动会导致胸内压的波动,使得肺泡快速扩张与压缩导致损伤[15-17],故胸壁加速度检测结果表明,PE 复合 PUR 对于胸壁正向加速度有明显衰减;此外,随着距爆心距离的增加,肺组织伤情减轻,肺组织朝向爆心一侧肺损伤更重;在同一致伤距离下,复合 PE 的优选聚脲材料能将山羊中重度肺损伤减轻 2 个等级,由中重度减为轻中度伤或无伤,防护效能优于 PUR、PE 及无防护组。当今各国警用防弹衣并无单一材料便可完美防护的情况[18],而本研究结果也证实,单 PUR 虽可将伤情减轻,但并无显著效果($P>0.05$),因此能够抵御火力袭击的防弹衣必须是软硬结合的复合式结构,本研究中 PE+PUR 组也具有显著的防护性能。同时,单 PE 组肺损伤反而较无防护组加重,与压力测试结果不符,原因可能与防弹衣后钝性损伤有关[19],对于冲击波衰减性能较弱的 PE 材料,冲击波到达瞬间使其变形而产生压力与剪切力,进而对材料下组织造成损伤;此外,穿戴 PE 模具时可能与躯体间存在缝隙,存在反射波叠加致伤效应。由于样本量过小,对于耗散冲击波能量性能较差的防护材料是否具有加重冲击伤伤情有待进一步研究。在本实验条件下,随着距爆心距离增加,超压峰值逐渐降低,空腔脏器(如肺组织、胃肠)伤情明显减轻,且在同一致伤距离,空腔脏器损伤发生率高于实质性脏器。胃肠和心脏出血情况未见组间差异,分析原因:一方面由于心脏和胃肠出血仅有定性判断,未进行定量评分,如胃肠出血多为斑块状出血,心脏多为点状出血,一定程度上会影响伤情的比较;另一方面,与防护模具外观、腹腔部分区域材料包被不彻底有关。此外,本研究还存在以下不足:①由于旷场实爆实验成本高,样本量较小,大动物实验操作性亟待提高;②旷场实爆环境中可变因素多,对结果存在影响;③动物肺脏伤情评估缺乏三维和动态评估指标。

综上,新型聚脲材料通过衰减冲击波对肺冲击伤有良好的防护效能,在军事和民用防爆领域均具有广泛应用前景。

志谢 感谢清华大学庄茁教授和郭宝华教授团队,中国工程物理研究院流体物理研究所张远平研究员,军事科学院系统工程研究院军需工程技术研究所黄献聪高级工程师、康越工程师等,以及本研究部王建民教授、张良潮实验师、李晓霞助理研究员等对本实验的帮助。

参考文献:

[1] WOLF S J, BEBARTA V S, BONNETT C J, *et al*. Blast Injuries[J]. Lancet,2009; 374(9687):405-415.

[2] 杨策, 蒋建新, 王正国, 等. 肺冲击伤转化研究: 历史、现状与挑战[J]. 实用医药杂志, 2019, 36(1): 1-5, 8.
YANG C, JIANG J X, WANG Z G. Transformation research of pulmonary blast injury: history, current situation and challenges[J]. Pract J Med Pharm, 2019, 36(1): 1-5, 8.

[3] SCOTT T E, KIRKMAN E, HAQUE M, *et al*. Primary blast lung injury—a review[J]. Br J Anaesth, 2017, 118(3): 311-316. DOI:10.1093/bja/aew385.

[4] 尹德军, 郑坚, 熊超, 等. 基于弹丸爆炸毁伤效应的复合材料与结构研究进展[J]. 材料导报 2018; 32(05):815-821,827.
YIN D J, ZHENG J, XIONG C, *et al*. Research progress on composite materials and structures used for protection against damage effect of projectile explosion[J]. Mater Rep 2018; 32(05):815-821,827.

[5] 许帅. 聚脲弹性体复合结构抗冲击防护性能研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
XU S. The impact resistance study of polyurea composite structures[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015.

[6] 宋彬. 聚脲弹性体夹层防爆罐抗爆性能研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2016.
SONG B. Research on anti-explosion performance of polyurea elastomer sandwich explosion-proof tank[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016.

[7] 黄阳洋, 王志军, 赵鹏铎, 等. 聚脲涂层复合结构防护性能研究现状[J]. 兵器装备工程学报, 2018, 39(4):57-60.
HUANG Y Y, WANG Z J, ZHAO P D, *et al*. Research status of protective properties of po1yurea coating composite structures[J]. J Ordnan Equipm Engineer, 2018, 39(4):57-60.

[8] SINGLETON J A, GIBB I E, BULL A M, *et al*. Primary blast lung injury prevalence and fatal injuries from explosions: insights from postmortem computed tomographic analysis of 121 improvised explosive device fatalities[J]. J Trauma Acute Care Surg, 2013, 75(2 Suppl 2): S269-S274. DOI: 10.1097/TA.0b013e318299d93e.

[9] AVIDAN V, HERSCH M, ARMON Y, *et al*. Blast lung injury: clinical manifestations, treatment, and outcome[J]. Am J Surg, 2005, 190(6): 927-931. DOI:10.1016/j.amjsurg.2005.08.022.

[10] LATOURRETTE T. The life-saving effectiveness of body armor for police officers[J]. J Occup Environ Hyg, 2010, 7(10): 557-562. DOI:10.1080/15459624.2010.489798.

[11] 马晓荣. 漫话"防弹衣"(一)[J]. 中国军转民, 2019;(2):52-58.
MA X R. Random talk on "Bulletproof Shirt" (1)[J]. Defence Industry Convers China, 2019;(2):52-58.

[12] 戴平仁, 黄正祥, 祖旭东, 等. 聚脲弹性体"三明治"夹层结构抗爆性能[J]. 工程塑料应用, 2017, 45(12): 70-74.
DAI P R, HUANG Z X, ZU X D, *et al*. Anti-detonation property of sandwich structure with polyurea elastomer[J]. Eng Plast Appl, 2017, 45(12): 70-74.

[13] 王小伟, 何金迎, 祖旭东, 等. 聚脲弹性体复合夹层结构的防爆性能[J]. 工程塑料应用, 2017; 45(5):63-68.
WANG X W, HE J Y, ZU X D, *et al*. Antidetonation properties on composite sandwich structure with polyurea elastomer[J]. Eng Plast Appl, 2017; 45(5):63-68.

[14] DUDA M, PACH J, LESIUK G. Influence of polyurea composite coating on selected mechanical properties of AISI 304 steel[J]. Materials (Basel), 2019, 12(19): E3137. DOI:10.3390/ma12193137.

[15] 张均奎, 王正国, 冷华光,等. 冲击波负压作用下家兔胸部动力学响应的观察[J]. 生物医学工程学杂志, 1994, 11(1): 14-18.
ZHANG J K, WANG Z G, LENG H G, *et al*. Observation on the dynamic responses of the Thorax of rabbits to the underpressure[J]. J Biomed Eng, 1994, 11(1): 14-18.

[16] 张均奎, 王正国, 孙立英, 等. 激波载荷下绵羊胸部动力学响应的数学模型[J]. 生物医学工程学杂志, 1990,(1):13-17.
ZHANG J K, WANG Z G, SUN L Y, *et al*. A mathematieal model used to prediet the dynamic responses of the chest wall in sheep to blast waves[J]. J Biomedical Eng, 1990, (1): 13-17.

[17] 赵敏, 王正国. 原发性肺冲击伤生物力学研究概述(一)[J]. 爆炸与冲击, 1994, 14(1): 89-96.
ZHAO M, WANG Z G. Biomechanics of the primary lung blast injury(Ⅰ)[J]. Explos Shock Waves, 1994, 14(1): 89-96.

[18] 陶然. 各国警用防弹衣的质量和应用研究[J]. 中国个体防护装备, 2009(6): 11-14, 23.
TAO R. The quality and application study of police body armor in countries around the world[J]. China Pers Prot Equip, 2009(6): 11-14, 23.

[19] 张波. 步枪弹致背部复合防弹衣后脊柱脊髓钝性损伤特点及损伤机理研究[D]. 重庆: 第三军医大学, 2012.
ZHANG B. Characteristics and mechanism of blunt trauma after the armored spine injured by rifle bullets[D]. Chongqing: Third Military Medical University, 2012.

(**收稿**:2020-03-13;**修回**:2020-06-09)
(编辑 邓强庭)