

## 肺爆震伤研究进展

彭凌华 郭光华

**Advances in the research of blast lung injury** Peng Ling-hua, Guo Guanghua. Department of Burns, the First Affiliated Hospital of Nanchang University, Nanchang 330006, China  
Corresponding author: Guo Guanghua, Email: guogh2000@hotmail.com

**【Abstract】** In recent years, a variety of explosive weapons become increasingly common used in regional military conflicts and terrorist bomb attacks. Meanwhile, the incidence of accidental explosion also showed an increase in the industries and daily life. The lung is the most labile organ and it is used to be severely injured organ in blast injury although even no signs of external injury could be observed on chest. Blast injury can present the symptoms such as lung rupture, bleeding, edema and emphysema. Respiratory dysfunction can affect oxygen supply to organs and systemic tissue, resulting in rapid and sustained hypoxemia and high mortality rate. Blast lung injury is characterized by respiratory disturbance and hypoxia. This article summarizes the etiology, pathogenesis, pathophysiological changes, diagnosis, and treatment of blast lung injury, with a hope to provide some useful clinical information.

**【Key words】** Lung; Blast injuries; High-frequency ventilation; Mesenchymal stem cells

**Fund program:** National Natural Science Foundation of China (30960400); Science and Technology Infrastructure Program of Jiangxi Province of China(2010BSA10300)

**【关键词】** 肺; 爆震伤; 高频通气; 间质干细胞

**基金项目:**国家自然科学基金(30960400);江西省科技支撑计划(2010BSA10300)

现代局部战争和恐怖爆炸袭击事件中爆炸性武器(炸药、核弹、燃料空气炸弹等)的使用不断增加,日常突发事件如锅炉、燃用液化石油气及煤层气等爆炸也时常发生<sup>[1-3]</sup>。这些爆炸产生强大的冲击波超压,对机体造成的损伤称为原发冲击伤或爆震伤<sup>[4]</sup>。肺脏则因其为气体交换场所而对超压最敏感,成为最易受损的靶器官之一,使肺爆震伤(BLI)发生率逐渐上升<sup>[5]</sup>。既往研究表明,BLI可造成肺破裂、肺大泡、肺萎陷、肺气肿、肺毛细血管内皮细胞受损、肺水肿及肺出血,甚至呼吸衰竭等变化。虽然现代医学水平较发达,对于普通烧伤或者肺损伤患者可以采取补液治疗、呼吸支持、创面修复重建、抗感染及特殊营养支持等进行综合治疗,但因BLI常呈现“外轻内重、发展迅速”等特点<sup>[6]</sup>,使其病死率仍居高不下。本文将BLI的病因和发病机制、病理生理学变化、诊断和治疗等研究进展综述如下。

### 1 病因及发病机制

BLI又可称为原发肺冲击伤。爆炸发生后,爆炸中心瞬间释放出大量能量,产生高温高压气体,气体急速膨胀,并强烈压缩周围空气,形成一个以超音速运动的状态参数有突变变化的冲击波,冲击波作用于肺导致BLI。王正国<sup>[4,7]</sup>研究表明冲击波是BLI主要致伤因素,其由时相交替的超压和负压组成,主要通过产生内爆效应和过牵效应致伤。内爆效应指冲击波直接作用于机体时,在超压作用下肺泡内的气体高度压缩,肺泡容积迅速减少,导致局部压力急剧升高;随后又在负压作用下,导致受压缩的肺泡突然膨胀,形成许多小的“爆炸源”,向四周以发散形式传播能量,造成周围组织损伤。过牵效应指减压过程中肺组织因快速过度扩张而造成的损伤,包含过度扩张效应和过速扩张效应。超压峰值越高,减压时间越短,过牵效应导致的肺组织损伤就越重<sup>[7]</sup>。因压力的急剧改变,使肺泡和肺毛细血管瞬间膨胀和移动,导致肺泡壁和毛细血管壁破裂,影响肺通气,导致通气和换气不足,全身缺氧。肺毛细血管壁破裂后伴有血液外漏,肺血流量减少,加重肺缺血缺氧<sup>[5]</sup>。因冲击波的直接损伤及应激因素可使肺毛细血管内皮细胞受损,导致内皮细胞通透性增加,从而发生肺水肿。肺毛细血管内皮细胞通过释放内皮素,使血管收缩增强,血流灌注量减少,且伤后耗氧量增加,氧供出现不足,导致缺血缺氧性损伤。

蔡建华等<sup>[8]</sup>研究显示,肺毛细血管内皮细胞受损,会引起内皮素1与细胞间黏附因子1表达上调,加速肺内炎症细胞因子释放。同时,部分血液通过肺毛细血管壁溢出,在细胞外环境下,Hb被氧化为高铁血红蛋白,进一步启动且参与部分有害的自由基反应。Chavko等<sup>[9]</sup>认为,红细胞受损后可以引发瀑布效应,促进多种血管活性因子和炎症细胞因子的释放。Kahn等<sup>[10]</sup>研究表明,将氯化血红素通过腹腔注射到冲击伤大鼠体内,可使IL-6、IL-8、TNF- $\alpha$ 及内皮素1等炎症细胞因子的表达降低,同时观察到在给予冲击伤大鼠氯化血红素后其生存率明显增加。这一现象表明BLI的发病机制与炎症反应有密切关系。

冲击波还可引起呼吸道上皮细胞凋亡,因伤后巨噬细胞和中性粒细胞大量聚集,通过上调髓过氧化物酶的表达,使其产生大量活性氧,进而启动上皮细胞凋亡机制<sup>[11]</sup>。此外,爆炸后产生的高速碎片可直接导致机体损伤,BLI常合并烧伤及吸入性损伤等,可加重肺组织损伤,导致病情加重。

### 2 主要病理生理学变化

BLI时因爆炸产生的高压气浪冲击胸部使胸壁撞击肺组织,可引起肺实质出血和水肿,紧随高压后的负压使肺组织回撞胸壁而造成肺挫伤、肺毛细血管出血、小支气管和肺泡破裂、肺组织广泛性渗出、肺水肿,可导致气体栓塞、脂肪栓塞、肺破裂、血气胸或ARDS等,甚至危及生命<sup>[12-13]</sup>。



肺出血因致伤条件及个体的不同而有很大差异,可从散在浅表少量出血至全叶大量出血,特征性表现为相互平行的血性肋间压痕。有研究显示 BLI 兔光学显微镜下可见肺出血,肺泡壁断裂,肺泡壁毛细血管床稀疏,部分毛细血管扩张、延长及充血<sup>[14]</sup>。有研究显示,BLI 大鼠电镜下可见肺泡结构严重破坏,肺泡隔上毛细血管裂口,红细胞由裂口涌出,肺泡间可见“索条”状结构<sup>[15]</sup>。有关 BLI 兔的研究表明,BLI 时冲击波直接损伤肺微血管内皮细胞,使内皮细胞间隙发生变化及内皮细胞骨架重排,血管内液体从血管渗透到内皮细胞下的间质,形成肺间质水肿;BLI 后血浆 IL-6、IL-8、TNF- $\alpha$  等炎性细胞因子水平显著升高,进一步使内皮通透性增加,该研究得出,肺微血管内皮细胞通透性增加是肺水肿发生的主要机制的结论<sup>[16-17]</sup>。有研究表明,BLI 大鼠紧密连接蛋白闭合蛋白 1、闭合蛋白 3、闭合蛋白 4 表达下降,紧密连接受损,肺泡上皮细胞屏障被破坏,从而导致肺水肿的形成<sup>[18]</sup>。

BLI 时冲击波可使部分浅层肺组织撕裂,而肺膜相对完整,出现肺大泡。部分肺泡或细支气管发生破裂,空气进入肺间质后可形成间质性肺气肿。冲击伤剪切力可损害肺泡和肺血管导致气胸或者血胸<sup>[19]</sup>。

BLI 患者均存在不同程度的凝血机制异常表现,伤后机体血小板数量减少,凝血酶原时间延长,血浆纤维蛋白原浓度、D-二聚体含量显著升高,直接诱发弥散性血管内凝血,可能与肺毛细血管内皮细胞释放纤溶酶原激活物有关<sup>[20]</sup>。BLI 后肺泡毛细血管床明显减少,肺内气体交换面积减少,弥散距离增加,使肺氧弥散量降低,可导致通气与血流比例失调,从而引发低氧血症。血液高凝状态下血液黏滞性显著增加,从而加重微循环障碍而导致脏器功能损伤<sup>[21]</sup>。电镜下可见 BLI 大鼠肺泡腔内组织呈裂隙状改变,部分肺泡间隔断裂;肺泡 I、II 型上皮细胞变性、脱落,严重者可出现肺泡 II 型上皮细胞核固缩,细胞质局灶性溶解<sup>[22]</sup>。

### 3 诊断

BLI 常呈现外轻内重、发展迅速等特点,患者胸部皮肤可以没有明显缺损,但低氧血症及呼吸功能障碍仍是最典型的临床表现,可出现气短、胸痛、胸闷、咳嗽、咳血、咯血及呼吸困难等;肺部叩诊为实变体征,听诊可闻及哮鸣音或湿性啰音;在伤后第 1 个 24 h 内,出现进行性加重低氧血症和呼吸窘迫的情况;伤后 48 h 后,BLI 的症状类似于 ARDS,出现缺氧、肺浸润,病死率高<sup>[23-25]</sup>。

伤后进行胸部 X 线或者胸部 CT 检查,可见几乎所有患者都有不同程度的肺损伤改变,但因常伴随着烧伤及高热等不同情况以及损伤的具体部位和程度不同,可表现出不同的损伤密度和范围,可发生于单侧,也可发生于双侧;可出现不同程度的肺水肿、肺部感染、肺不张等情况<sup>[26]</sup>。早期影像主要表现为肺门影增大、肺纹理增多增粗且边缘模糊,肺内见片状影或斑片状磨玻璃样影;病情进展过程中可出现肺部大片状实质阴影,肺部云絮或磨砂玻璃状改变,典型者可呈蝶翼状等改变<sup>[27]</sup>。CT 密度分辨率明显高于 X 线,可更全面显示病变,更敏感及清晰地显示两肺病变的部位、特征和范围,在患者病情允许的情况下应首先更多地考虑早期行胸部 CT 检查,有助于早期诊断<sup>[28]</sup>。

### 4 治疗

经过系列研究,人们逐步了解到 BLI 的预后主要取决于损伤的程度及其并发症,伤后应尽早采取针对 BLI 发病规律的防治措施,选择性中断或者改善相关环节,需要更新对 BLI 的治疗观念。

#### 4.1 注重院前急救

因发生 BLI 时可出现其他组织或者器官损伤、咯血、呼吸困难、低血压及心律失常等情况,严重者可直接危及患者生命,故积极有效的院前急救是非常有必要的。医院提早通知相关科室人员积极做好相关准备,可使后续治疗更顺利进行<sup>[29]</sup>。

#### 4.2 保持呼吸道通畅和呼吸支持

清除口腔内分泌物,常规给予导管吸氧。如患者出现呼吸困难加重、低氧血症难以改善,应尽早给予气管切开,并遵循“早上机、早撤机、个性化”的原则使用呼吸机辅助呼吸。机械通气对 BLI(尤其出现复合伤时)的临床救治作用显著<sup>[30-31]</sup>。BLI 后肺组织挫伤,采用传统的机械通气模式会使肺通气功能受损,导致呼吸机相关性肺损伤明显增加。近年来,随着机械通气技术的进步,形成了可明显减少呼吸机相关性肺损伤的保护性机械通气模式,应在 BLI 救治中合理应用。

##### 4.2.1 同步间歇指令通气 + 压力支持 + 呼气末正压(PEEP)通气模式

其中同步间歇指令通气潮气量为 6 ~ 8 mL/kg,压力支持为 8 ~ 15 cmH<sub>2</sub>O(1 cmH<sub>2</sub>O = 0.098 kPa),PEEP 通气的 PEEP 为 8 ~ 10 cmH<sub>2</sub>O,依据气道压变化,适当调整气压数值,使吸气压控制在 25 ~ 30 cmH<sub>2</sub>O。同步间歇指令通气和压力支持可使呼吸肌做功减少,机体氧耗降低。同时低 PEEP 可使肺泡内压和肺间质压增加,肺泡内渗出减少,从而防止肺水肿,改善氧合功能,减少肺泡萎陷和促进已萎缩的肺复张,改善肺通气功能;低潮气量、低 PEEP 可明显防止肺泡破裂、纵隔气肿或气胸<sup>[32]</sup>。

##### 4.2.2 高频振荡通气 + PEEP 模式

高频振荡通气因其潮气量小、气道压低以及对循环系统干扰小等特点<sup>[33]</sup>,也被认为是一种保护性通气策略,可以明显改善通气和氧合、避免肺泡过度充气,减少呼吸机相关性肺损伤发生,也可减少呼吸机通气状态下的肺细胞凋亡<sup>[34]</sup>。

#### 4.3 药物治疗

##### 4.3.1 西维来司钠

多项研究证实,在 BLI 动物模型中,西维来司钠具有很好的肺保护作用。西维来司钠可降低 BLI 兔血浆中 IL-6、IL-8、TNF- $\alpha$  的含量,通过抑制损伤导致的炎症反应,减轻早期 BLI 的损害<sup>[35-36]</sup>。Chai 等<sup>[37]</sup>研究表明,西维来司钠通过抑制 BLI 大鼠中性粒细胞弹性蛋白酶活性,降低肺血管通透性和抑制 TNF- $\alpha$  和 IL-8 的产生,从而发挥肺保护作用。

##### 4.3.2 地塞米松及乌司他丁

有研究显示,BLI 大鼠伤后,支气管肺泡灌洗液中中性粒细胞增加,而地塞米松治疗可明显减少中性粒细胞数<sup>[38]</sup>。刘锐等<sup>[39]</sup>研究表明,乌司他丁可降低中度烧伤复合伤大鼠血清 IL-6、IL-8、TNF- $\alpha$  水平,抑制血管内皮细胞活化和降低急性炎症时毛细血管的通透性,对血管内皮细胞有保护作用。代尊强等<sup>[40]</sup>研究表明,乌司他丁联合地塞米松对爆震伤所致急性肺损伤兔具有一定

治疗作用,且疗效优于单用乌司他丁或地塞米松。

#### 4.4 间充质干细胞(MSC)治疗

MSC 具有自我更新能力并且能够向多个不同方向分化,可在一定条件诱导下分化为多种细胞。已有研究显示,骨髓来源的 MSC 可以分化为肺泡 I 型、II 型上皮细胞及 Fb、肌 Fb<sup>[41]</sup>。MSC 肺保护作用的主要机制是早期转分化为肺细胞,后通过旁分泌因子、免疫调节和减少液体渗出等来改善肺组织损伤情况<sup>[42-43]</sup>。朱峰等<sup>[44]</sup>采用 MSC 治疗烟雾吸入性损伤兔时观察到,MSC 移植后的兔肺组织病理学变化较轻,肺泡结构更完整。Murakami 等<sup>[45]</sup>研究认为,MSC 可在肺损伤局部通过旁分泌产生角质形成细胞生长因子,间接促进肺损伤的修复。角质形成细胞生长因子增强肺泡液体转运的功能与其改善肺泡血管屏障的通透性、维持肺泡血管屏障完整性是密切相关的。

#### 4.5 其他治疗

根据患者不同年龄、营养状况、检查结果,进行个体化全身综合治疗,初期选用广谱抗生素抗感染,后期根据药物敏感试验结果调整抗生素,保护和改善其他脏器功能。因 BLI 常发生于突发事件中,患者存在焦虑、恐惧不安等反应,早期应加强心理干预,积极与患者沟通,使患者情绪稳定,更好配合治疗。

### 5 BLI 的预防

军事方面,部队人员要更多地了解关于爆震伤的相关知识;国家可根据爆炸物的物理和生物效应来改良轻型战术轮式车辆,通过加装防护性装甲来抵御火力打击、地雷袭击等,可有效防护爆炸物的冲击波,使战士在爆炸的环境中可更好生存;战士穿戴个人防护设备可减少贯通伤的危险,明显降低胸部受伤致死的危险;通过技术研发改造建筑从而提高爆炸时生存可能;借助高新科技,提供相关的有效实时数据用于判断威胁的趋势、告知预防和缓解战术、改进对作战伤员的救护措施<sup>[46]</sup>。日常生活中在发生爆炸前,应尽快离开;如来不及躲避,可就地或在附近凹地处卧倒,且使足部朝向爆炸点,使自身处在扇形冲击波的死角区,最大限度减轻或免遭冲击波的损伤。

### 6 问题与展望

BLI 大部分因突然爆炸事件导致,涉及人数多、常复合其他损伤,使病情复杂多变,给诊治带来很大困难。关于 BLI 的基础研究及临床经验时有报道,使人们对 BLI 的病理生理、发病机制及临床特点等有了进一步了解,但仍未形成规范的诊疗标准,治疗上仍采用以改善肺功能为主的综合治疗策略。应继续加强 BLI 的相关基础研究探索及 BLI 患者的临床随访,建立更完善的病例资料库,以便制订规范的治疗方案。

#### 参考文献

- [1] Singh SK, Kumar A, Katyal S. A terrorist bomb blast, a real challenge for any tertiary care health provider[J]. *Anesth Essays Res*, 2014, 8 (2): 229-232. DOI: 10. 4103/0259-1162. 134517.
- [2] Dabkama TM, Bunu B, Na'aya HU, et al. Pattern of injuries seen during an insurgency: a 5-year review of 1339 cases from Nigeria[J]. *Ann Afr Med*, 2015, 14 (2): 114-117. DOI: 10. 4103/1596-3519. 149910.
- [3] 刘军,赵富丽,吴健,等. 昆山“8·2”爆炸事故存活伤员损伤特点及救治分析[J]. *中华急诊医学杂志*, 2015, 24 (9): 952-957. DOI: 10. 3760/cma. j. issn. 1671-0282. 2015. 09. 006.
- [4] 王正国. *创伤学基础与临床*[M]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 2007: 1277-1278.
- [5] Wolf SJ, Beberta VS, Bonnett CJ, et al. Blast injuries[J]. *Lancet*, 2009, 374 (9687): 405-415. DOI: 10. 1016/S0140-6736 (09)60257-9.
- [6] Smith JE. Blast lung injury[J]. *J R Nav Med Serv*, 2011, 97 (3): 99-105.
- [7] 王正国. 原发肺冲击伤[J/CD]. *中华肺部疾病杂志: 电子版*, 2010, 3 (4): 231-233. DOI: 10. 3877/cma. j. issn. 1674-6902. 2010. 04. 001.
- [8] 蔡建华,柴家科,申传安,等. 烧伤、冲击伤及烧冲复合伤后大鼠早期血清中性粒细胞弹性蛋白酶的变化及意义[J]. *中华医学杂志*, 2010, 90 (24): 1707-1710. DOI: 10. 3760/cma. j. issn. 0376-2491. 2010. 24. 013.
- [9] Chavko M, Prusaczyk WK, McCarron RM. Lung injury and recovery after exposure to blast overpressure[J]. *J Trauma*, 2006, 61 (4): 933-942. DOI: 10. 1097/01. ta. 0000233742. 75450. 47.
- [10] Kahn SA, Beers RJ, Lentz CW. Resuscitation after severe burn injury using high-dose ascorbic acid: a retrospective review[J]. *J Burn Care Res*, 2011, 32 (1): 110-117. DOI: 10. 1097/BCR. 0b013e318204b336.
- [11] Seitz DH, Perl M, Mangold S, et al. Pulmonary contusion induces alveolar type 2 epithelial cell apoptosis: role of alveolar macrophages and neutrophils[J]. *Shock*, 2008, 30 (5): 537-544. DOI: 10. 1097/SHK. 0b013e31816a394b.
- [12] 白俊清,宋敬锋,白璐,等. 家兔肺爆震伤的实验研究[J]. *中国煤炭工业医学杂志*, 2013, 16 (12): 2048-2050. DOI: 10. 11723/mtgyx. 1007-9564. 201312054.
- [13] Mackenzie IM, Tunnicliffe B. Blast injuries to the lung: epidemiology and management[J]. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*, 2011, 366 (1562): 295-299. DOI: 10. 1098/rstb. 2010. 0252.
- [14] 范崇熙,张志培,程庆书,等. 胸部爆震伤致急性呼吸窘迫综合征模型的建立及相关因素分析[J]. *中国危重病急救医学*, 2011, 23 (4): 243-246. DOI: 10. 3760/cma. j. issn. 1003-0603. 2011. 04. 018.
- [15] 赵敏,王正国,刘大维. 正常和冲击伤大鼠气道及肺的扫描电镜观察[J]. *第三军医大学学报*, 1988, 10 (6): 470-472.
- [16] 贺盟,董利民,侯晓彬. 兔胸部爆炸伤后 IL-6、IL-8 及 TNF- $\alpha$  的时间相关性表达[J]. *法医学杂志*, 2014 (2): 85-87. DOI: 10. 3969/j. issn. 1004-5619. 2014. 02. 002.
- [17] 张波,卢兆桐,袁束,等. 家兔轻中度肺爆震伤相关指标及早期主要死亡原因的研究[J]. *创伤外科杂志*, 2012, 14 (6): 535-538.
- [18] 付泽军,刘龙,杨卫忠,等. 紧密连接蛋白 claudin 1、3、4 与肺爆震伤致大鼠肺水肿的关系研究[J]. *医学研究杂志*, 2015, 44 (11): 31-34. DOI: 10. 11969/j. issn. 1673-548X. 2015. 11. 009.
- [19] Smith JE. The epidemiology of blast lung injury during recent military conflicts: a retrospective database review of cases presenting to deployed military hospitals, 2003-2009[J]. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*, 2011, 366 (1562): 291-294. DOI: 10. 1098/rstb. 2010. 0251.
- [20] Zeerleder S, Hack CE, Willemin WA. Disseminated intravascular coagulation in sepsis[J]. *Chest*, 2005, 128 (4): 2864-2875.
- [21] 初向阳,侯晓彬,张连斌,等. 兔胸部爆炸伤后血液高凝状态

- 的实验研究[J]. 创伤外科杂志, 2010, 12(2):165-168. DOI: 10.3969/j.issn.1009-4237.2010.02.020.
- [22] 任文杰, 秦祖喧, 王桂芝, 等. 大鼠瓦斯爆炸伤伤情特点[J]. 中华创伤杂志, 2005, 21(3):208-211. DOI: 10.3760/j.issn.1001-8050.2005.03.017.
- [23] 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.
- [24] Clapson P, Pasquier P, Perez JP, et al. Blast lung injuries[J]. *Rev Pneumol Clin*, 2010, 66(4):245-253. DOI: 10.1016/j.pneumo.2010.07.008.
- [25] Scott SG, Belanger HG, Vanderploeg RD, et al. Mechanism-of-injury approach to evaluating patients with blast-related polytrauma[J]. *J Am Osteopath Assoc*, 2006, 106(5):265-270.
- [26] 陈新晖, 王明君, 呼兵, 等. 煤矿工人肺爆震伤的影像分析[J]. 中华劳动卫生职业病杂志, 2014, 32(3):225-228. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1001-9391.2014.03.018.
- [27] 黄丽娜, 倪衡建, 姜建威. 肺爆震伤的影像学表现[J]. 中国医学影像学杂志, 2015, 23(6):458-460, 465. DOI: 10.3969/j.issn.1005-5185.2015.06.014.
- [28] Singleton JA, Gibb IE, Bull AM, et al. Primary blast lung injury prevalence and fatal injuries from explosions: insights from post-mortem computed tomographic analysis of 121 improvised explosive device fatalities[J]. *J Trauma Acute Care Surg*, 2013, 75(2 Suppl 2):S269-274. DOI: 10.1097/TA.0b013e318299d93e.
- [29] 刘磊. 成批烧伤合并肺爆震伤的救治[J]. 医学信息, 2014, 27(6):409-410. DOI: 10.3969/j.issn.1006-1959.2014.17.471.
- [30] Barnard E, Johnston A. Images in clinical medicine. Blast lung[J]. *N Engl J Med*, 2013, 368(11):1045. DOI: 10.1056/NEJMicm1203842.
- [31] Guermazi A, Hayashi D, Smith SE, et al. Imaging of blast injuries to the lower extremities sustained in the Boston marathon bombing[J]. *Arthritis Care Res (Hoboken)*, 2013, 65(12):1893-1898. DOI: 10.1002/acr.22113.
- [32] 朱剑仙, 宋斌, 詹新华, 等. 应用保护性机械通气救治烧伤复合肺爆震伤[J]. 东南国防医药, 2010, 12(1):42-44.
- [33] Pillow JJ. Tidal volume, recruitment and compliance in HFOV: same principles, different frequency[J]. *Eur Respir J*, 2012, 40(2):291-293. DOI: 10.1183/09031936.00020012.
- [34] 郭光华, 王少根, 付忠华, 等. 高频振荡通气联合肺表面活性物质对吸入性损伤肺组织天冬氨酸特异性半胱氨酸蛋白酶-3 和 p73 的影响[J]. 中华危重病急救医学, 2008, 20(6):327-330.
- [35] 王海龙, 卢兆桐, 袁末, 等. 西维来司钠对家兔早期肺爆震伤的治疗作用[J]. 中华实验外科杂志, 2015, 32(5):1090-1092. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1001-9030.2015.05.049.
- [36] 王海龙, 袁末, 卢兆桐, 等. 西维来司钠对家兔早期肺爆震伤后血浆肿瘤坏死因子- $\alpha$ 、白细胞介素-6、白细胞介素-8 的影响[J]. 创伤外科杂志, 2015, 17(3):243-246.
- [37] Chai JK, Cai JH, Deng HP, et al. Role of neutrophil elastase in lung injury induced by burn-blast combined injury in rats[J]. *Burns*, 2013, 39(4):745-753. DOI: 10.1016/j.burns.2012.08.005.
- [38] Türüt H, Ciralik H, Kilinc M, et al. Effects of early administration of dexamethasone, N-acetylcysteine and aprotinin on inflammatory and oxidant-antioxidant status after lung contusion in rats[J]. *Injury*, 2009, 40(5):521-527. DOI: 10.1016/j.injury.2008.05.001.
- [39] 刘锐, 王树明, 曹卫红, 等. 乌司他丁对中度烧冲复合伤大鼠肺炎症介质和血管通透性的影响[J/CD]. 中华损伤与修复杂志: 电子版, 2015, 10(2):132-136. DOI: 10.3877/cma.j.issn.1673-9450.2015.02.007.
- [40] 代尊强, 袁末, 邹志强, 等. 乌司他丁联合地塞米松对兔爆震伤后急性肺损伤的治疗作用[J]. 中华创伤杂志, 2015, 31(5):461-466. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1001-8050.2015.05.021.
- [41] Serikov VB, Popov B, Mikhailov VM, et al. Evidence of temporary airway epithelial repopulation and rare clonal formation by BM-derived cells following naphthalene injury in mice[J]. *Anat Rec (Hoboken)*, 2007, 290(9):1033-1045.
- [42] Lee SH, Jang AS, Kim YE, et al. Modulation of cytokine and nitric oxide by mesenchymal stem cell transfer in lung injury/fibrosis[J]. *Pespir*, 2010, 11:16. DOI: 10.1186/1465-9921-11-16.
- [43] Lee JW, Fang X, Gupta N, et al. Allogeneic human mesenchymal stem cells for treatment of E. coli endotoxin-induced acute lung injury in the ex vivo perfused human lung[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2009, 106(38):16357-16362. DOI: 10.1073/pnas.0907996106.
- [44] 朱峰, 郭光华, 陈雯, 等. 骨髓间充质干细胞移植对吸入性损伤家兔炎症反应和肺损伤的影响[J]. 中华烧伤杂志, 2010, 26(5):360-365. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1009-2587.2010.05.010.
- [45] Murakami M, Nguyen LT, Zhuang ZW, et al. The FGF system has a key role in regulating vascular integrity[J]. *J Clin Invest*, 2008, 118(10):3355-3366. DOI: 10.1172/JCI35298.
- [46] Champion HR, Holcomb JB, Young LA. Injuries from explosions: physics, biophysics, pathology, and required research focus[J]. *J Trauma*, 2009, 66(5):1468-1477. DOI: 10.1097/TA.0b013e3181a27e7f.

(收稿日期:2015-11-13)

(本文编辑:贾津津)

**本文引用格式**

彭凌华, 郭光华. 肺爆震伤研究进展[J]. 中华烧伤杂志, 2016, 32(3):156-159. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1009-2587.2016.03.007.

Peng LH, Guo GH. Advances in the research of blast lung injury[J]. *Chin J Burns*, 2016, 32(3):156-159. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1009-2587.2016.03.007.