

doi: 10.13241/j.cnki.pmb.2019.07.041

口腔颌面部爆炸伤的研究现状*

欧阳荣键^{1,2} 朱勋志¹ 周旭华¹ 谭颖徽^{1,△}

(1 中国人民解放军陆军军医大学第二附属医院口腔科 重庆 400037; 2 中国人民解放军第 945 医院 四川 雅安 625000)

摘要: 口腔颌面部爆炸伤是指由致伤物爆炸所造成的口腔颌面部组织损伤,两种主要致伤因素是冲击波和高速破片,较一般火器伤而言,爆炸伤的致伤机制及致伤特点都有不同之处。对爆炸伤害的物理机制和病理生理反应方面研究有助于改进防护及改善治疗策略。本文在简述口腔颌面部爆炸伤的致伤因素和损伤特点的基础上,着重综述了动物模型和有限元模型的研究方法及结果,旨在为以后的模型研究提供思路和参考。

关键词: 口腔颌面部;爆炸伤;动物模型;有限元模型

中图分类号: R-33; R782 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-6273(2019)07-1383-04

Research Progress on the Oral and Maxillofacial Blast Injury*

OUYANG Rong-jian^{1,2}, ZHU Xun-zhi¹, ZHOU Xu-hua¹, TAN Ying-hui^{1,△}

(1 Department of Stomatology, Second Affiliated Hospital of Army Medical University, Chongqing, 400037, China;

2 Hospital 945 of People's Republic of China, Ya'an, Sichuan, 625000, China)

ABSTRACT: The oral and maxillofacial blast injury refers to the maxillofacial tissue trauma caused by the vulnerant explosion. Explosive weapons cause injuries with high speed fragments and shock waves. Compared with the gunshot wounds, blast injuries are different in mechanism and characteristics. The study on the physical mechanism and pathophysiological response of the explosion injuries can improve the protection and treatment strategies. Based on the brief description of the injury factor and injury characteristics of oral and maxillofacial blast injury, this paper mainly reviews the research methods and results of animal model and finite element model in order to provide ideas and references for future model studies.

Key words: Oral and maxillofacial; Blast injury; Animal model; Finite element model

Chinese Library Classification(CLC): R-33; R782 **Document code:** A

Article ID: 1673-6273(2019)07-1383-04

前言

口腔颌面部是人的重要且特殊的部位,毗邻颅脑、颈部大血管及眼、耳等重要器官,是呼吸道、消化道的共同开口,涉及呼吸、进食、语言等重要功能,又是人的“脸面”,损伤后既可危及伤员的生命,又可破坏生理功能,还会影响心理^[1]。现代常规武器向着高能、高爆、高精度方向发展,最近报道美军在伊拉克和阿富汗战争中颌面部爆炸伤高达 29 %^[2],国际恐怖主义爆炸事件致颌面部损伤也并不罕见^[3]。由于电子产品、化学物品和烟花爆竹等的广泛使用,日常生活工作中颌面部爆炸伤发生率亦呈明显上升趋势^[4-8]。因此,对颌面部爆炸伤的研究不仅是创伤医学研究的重要领域,也是创伤救治的重要内容。

1 颌面部爆炸伤的致伤因素

1.1 爆炸冲击波致伤

冲击波致伤的主要因素是超压和负压,含气体或液体的空腔脏器,如听器、心、肺、胃肠和膀胱等为主要伤及器官,但单纯的冲击波较少造成体表损伤^[9,10]。由于颌面部的复杂解剖结构,

在受爆炸冲击波的超压作用后,在颌面部的空腔内可形成新的“爆炸源”,即产生所谓的“内爆效应”,导致患者面部多处粉碎性骨折,典型伤者表现为“碎蛋壳样”损伤^[11]。冲击波所引起的损伤与组织强度关系密切,组织强度越大,其所承受的应力上升时间越快,导致组织吸收的能量越多,损伤亦越重。当压力波在不同密度的组织界面传播时,会在不同组织界面上引起反射而形成拉伸波,导致高密度组织因短时间内局部压力增高而损伤,称“碎裂效应”^[12]。由于下颌骨的解剖结构决定,当冲击波从骨密质往骨松质传播时,将在两者界面上反射并形成拉伸波,导致内层的骨密质损伤,同时压力波在内外层密质骨板间多次反射和折射,造成内外层骨板分离骨折。下颌骨在冲击波的“加速度效应”下造成密度不均处形成剪切力,导致下齿槽神经管处或牙根尖平面横行骨折^[13],或牙齿在牙釉质与牙骨质交界平面水平横断^[13]。上述损伤情况可作为颌面部高能爆炸伤时面部骨组织伤的典型伤情。

1.2 高速破片

高速破片是指在爆炸时爆炸物的表面物质接受能量传递后形成的高能破片^[14]。基于投射物的动能理论,现普遍采用高

* 基金项目:全军医学科研基金重点项目(BGZ15001001);军队“十二五”第二批重点项目(BGZ1500J001)

作者简介:欧阳荣键(1986-),硕士研究生,研究方向:口腔颌面部损伤修复,电话:15181226799, E-mail: ouyongrj@tmmu.edu.cn

△ 通讯作者:谭颖徽,博士生导师,教授,研究方向:口腔颌面外科学, E-mail: tanyhxqkq@163.com

(收稿日期:2018-05-23 接受日期:2018-06-18)

爆炸弹提高弹片初速度,初始速度可高达 1800 m/s^[15]。高速破片对机体的损伤远比原发性冲击波造成的损伤严重,因此,一个看起来很小的伤口可能隐藏着巨大的损伤,包括各种类型的软组织伤和骨折等。由于爆炸性武器的大量应用,高速破片致伤率明显高于枪弹伤,局部战争的数据也证实了这一点^[16]。高速破片的致伤机制主要为:①直接切割及挤压;②瞬时空腔效应^[17]。颌面部高速投射物伤常可损伤颈部大血管。通过血管造影研究发现,在颌面部高速投射物致伤员中颈部血管致伤率约 38%,若伴有血管损伤往往需行紧急气道处理^[18]。与身体其他部位相比,高速投射物造成的颌面部瞬时空腔相对较小,因此,瞬时空腔效应对伤道周围的各种组织(包括皮肤、肌肉、神经、黏膜等)的牵拉、震荡及挤压等二次损伤也相对较轻^[19]。颌面部高速破片伤常导致颅脑、颈部及咽部等相邻组织器官的损伤,这在临床及实验中也不少见。此外,因“远达效应”还可致伤心脏和肺脏等远隔脏器^[17]。

1.3 其他因素

爆炸产生的高温气体、继发引燃物均可引起颌面部皮肤及黏膜的烧伤^[20]。因爆炸所引发的有毒气体及其它气体的吸入,导致吸入性损伤和窒息^[21]。另外,由于脏弹添加放射物质,爆炸后产生的放射性尘埃可引起恶心、呕吐及血液疾病等辐射病,且可致癌^[22]。上述多种致伤因素的作用下可引起协同效应。因此,颌面部单纯枪弹伤远不及爆炸伤产生的损伤严重。

2 颌面部爆炸伤的损伤特点

爆炸伤各致伤因素综合作用可造成机体多处或多器官损伤,损伤范围广,全身损伤反应剧烈,休克发生率高^[23]。局部组织毁损严重,常伴组织缺损,深部组织外露。爆炸所掀起的泥沙、碎屑等可直接带入伤口,同时还可将身体上的其他衣物甚至自体组织植入伤口。爆炸伤比单纯的火器伤污染发生率更高,创面污染更严重,创伤口感染率更高,病情进展亦更快。颌面部的软、硬组织均可被爆炸致伤。面部皮肤、口腔黏膜被火药和高温气体烧烫伤,或被尖锐的破片及碎片切割致伤是软组织损伤的主要原因。硬组织损伤包括颌面骨及牙齿的损伤^[24],骨折和移位是主要表现形式,损伤范围涉及上下颌骨、颧骨复合体、眶周和鼻骨等几乎所有的颌面骨,尤以面中 1/3 者多见,由此常导致伤员面部畸形、吞咽功能障碍和咬合功能紊乱等。

3 颌面部爆炸伤模型的研究

3.1 动物实验模型的研究

由于爆炸伤致伤因素多,所以动物实验模型的建立较复杂,模型使用较多的致伤条件是冲击波、破片及两者的复合致伤。目前,国内外已建立有多种动物模型用于爆炸伤的模拟研究,且几乎所有实验动物都可使用^[25,26]。大鼠、家兔等小型动物价格合宜,操作简便,饲养容易,便于获取大数据的实验结果。这些动物在伤后的病理变化的模拟中具有良好的优越性,对探究局部损伤的即时病理变化和探索近期死亡原因非常有价值。在研究由海水浸泡等复合条件引起的损伤及远期损伤效应时,大型动物为理想的研究对象,且其实验结果更容易推及人体^[27]。在过去的报道中爆炸物使用黑火药、雷管、TNT 炸药较多。黑火药爆炸的方式仅能获取近似的损伤数据。雷管爆炸所产生

喷射式的爆炸冲击波,在每个方向都不一样,不便于量化统一,重复性难以保证。由基本不产生破片的 TNT 爆炸球爆炸的损伤方法,便于分析单一冲击波因素对实验动物的损伤,且精度和可复性更高。部分学者使用球形爆炸源建立了颌面部爆炸伤模型,其冲击波强度是通过改变装药量及爆距来完成,该模型具备简单、可靠、安全以及重复性高等特性^[28]。研究表明此模型基本上满足爆炸冲击伤应具备的基本条件,是较为合理可行的致伤方法。

通过对动物模型的研究,人们对损伤的性质有更深入的了解,包括组织的损伤阈值、生理或炎症反应及治疗干预的效果。Wang^[28]使用球形爆炸源致伤离体新鲜山羊头颌面部,发现 0.1 g TNT 当量时,分别距离 0.5 cm 和 1.0 cm 处爆炸,其损伤的表现形式及严重程度也不尽相同。前者面颊部皮肤和软组织大部分缺损,颌面骨暴露,骨折处为粉碎性骨折且为半球形内陷,可见骨破片脱落、移位;而后者伤口为星形撕裂伤,骨折呈放射状多线性骨折,骨折片未见明显移位,下颌角附近骨边缘处发现内外侧骨板典型的“层裂”分离现象。He^[29]等以兔颌面部爆炸伤为研究对象,在致伤后不同时间,用光学显微镜和电子显微镜观察创缘处骨组织标本,实验结果显示:伤后 6 小时未发现变化,伤后 3 天发现炎症浸润,在损伤后 7 天观察到骨坏死,且距伤口 1 cm 以上的骨结构正常,骨的修复现象也被观察到。Zhang^[30]等通过家兔爆炸伤的实验发现创面中 VEGF 和 bFGF 表达明显增高,其中 bFGF 加快了创面的血管再生和 VEGF 的生成,后者又进一步促进血管化的进程。有学者^[31]利用犬建立冲击波复合破片损伤的动物模型,模型使用雷管和子弹模拟爆炸中的爆炸波和破片,检测了迷走神经细胞的病理变化,发现迷走神经延长软化,缺乏正常的韧性,神经外膜光滑且神经外膜下存在部分出血区,组织学表现为严重的轴突损伤和水肿,但神经外膜完整,水肿液中散布着破裂的神经元碎片。

3.2 有限元模型的研究

有限元分析法是将连续的弹性体分割成有限个单元,以其结合体来代替原弹性体,并逐个研究每个单元的性质,以获得整个弹性体的力学分析方法。近年来,有限元法已用于研究爆炸冲击波作用下人体生物力学问题的有效工具,而在研究创伤对人体骨组织影响中可作为首选方法^[32],既节约时间,结果又可靠。Lei^[33]等通过建立猪下颌骨爆炸伤模型与动物致伤实验对比,结果显示在 5 cm 距离爆炸致伤时仿真结果与动物实验实际损伤效果在形态上十分相似,且两者大部分生物力学数据非常相近,表明有限元分析法可以用于爆炸伤模拟研究。随着计算机技术辅助下的有限元分析方法迅速发展,三维体网格模型逐渐取代早期二维面网格模型,使得模型越来越精细,几何相似度也显著提升^[34-36]。Panzer^[37]等利用球体对比了四面体和六面体单元在爆炸冲击波载荷下应力,结果表明四面体最高压力峰值和应力明显比六面体高。因此,体网格的选择是影响计算结果的重要因素。六面体计算精度高,刚性适中,因此是目前碰撞、侵入、冲击等动态仿真模拟的首选单元^[38]。

理想的有限元模型应具备下列特性:(1)模型与人体解剖结构和生物力学特性具有良好的相似性;(2)实验数据便于获取,方便运算;(3)可视化程度高,方便观察研究各部位的受力状况,损伤整个过程重现性好;(4)模型应有良好的重复性,实

验结果便于储存^[39]。目前,软组织材料参数的获取及各个分离的结构组装仍是一个难点,但还是有不少学者进行了相关的探索^[40-43]。Koch 首次把软组织设置成线弹性材料,并认为各向同性,在此基础上构建软组织线弹性有限元模型^[44]。Sarti 通过计算机 CT 数据来建立立方体网格有限元模型,并在超级计算机上进行模拟运算实验^[45]。该实验模拟仿真效果虽好,然而存在运算速度慢及内存要求高等不足,更重要的是难以应用于临床。Chabanas 等建立的多层模型是颌面部软组织建模中的重要里程碑之一,利用 CT 扫描数据进行面部软组织有限元模型的建立,将面部皮肤层和皮下软组织层分别建模,赋予不同的材料参数,精细构建了唇周肌肉组织^[46]。针对不同的患者该模型可构建个性化的面部软组织有限元模型,并可进行预测分析,在临床上有较高的实用价值。但该模型未对皮肤及皮下两层间的接触问题进行深入解析。

关于颌面部爆炸伤的研究主要集中在创伤的救治及修复重建上,对爆炸伤致伤机制及生物力学分析等基础研究相对较少^[15,47],利用有限元法进行的爆炸伤的生物学仿真模拟可以定量分析且能直观的观察爆炸损伤的动态发生、发展过程,通过观察在一定区域上施加特定爆炸载荷时的生物力学响应分析相关生物力学参数,揭示爆炸伤的发生机制及损伤特点,为临床治疗方案提供理论基础与科学依据。Lei^[48]等利用有限元分析法建立了人下颌骨爆炸伤模型,记录了整个下颌骨的损伤分布情况、Von Mises 应力^[49]分布情况及有效应变分布,结果显示不仅直接致伤处,双侧髁状突及乙状切迹也发现高应力、高应变集中区域,即骨折好发位置。Liu^[50]等通过有限元法建立了眼球原发性爆炸伤模型,眼球模型包括角膜、巩膜、晶状体、睫状体、房水和玻璃体等解剖结构,发现随时间的变高应力区化总是出现在角膜缘部,且眼球破裂超压阈值为 2000 kPa,这一结果为深入研究提供了参考。Rossi^[51]等通过建立眼球、眼眶及颅骨有限元模型,发现爆炸角度对每个观察点的压力有显著影响,在眼眶内压力波被反射和放大,并产生持续的共振波^[52]。

4 小结

颌面部爆炸伤是多因素的复合损伤,其损伤特点具有复杂性及多样性。因此,临床救治水平的提高不仅需要不断积累和总结救治经验,更需要不断丰富基础理论。目前的研究模型多为单因素致伤模型,对爆炸伤多因素致伤模拟尚有待继续深入探索研究。

参考文献(References)

- [1] 付小兵,谭颖徽,何黎升,等. 中华战创伤学[M]. 郑州: 郑州大学出版社, 2016
- [2] McVeigh K, Breeze J, Jeynes P, et al. Clinical strategies in the management of complex maxillofacial injuries sustained by British military personnel[J]. J R Army Med Corps, 2010, 156(2): 110-113
- [3] Mathews Z R, Koyfman A. Blast Injuries [J]. J Emerg Med, 2015, 49 (4): 573-587
- [4] Yang C C, Shih C L. A Coordinated Emergency Response: A Color Dust Explosion at a 2015 Concert in Taiwan [J]. Am J Public Health, 2016, 106(9): 1582-1585
- [5] Yu M, Lv Q, Ding H, et al. Evaluation of blast injury patients from the 2015 Tianjin explosions in China[J]. Burns, 2016, 42(5): 1133-1140
- [6] Vaught B, Spellman J, Shah A, et al. Facial trauma caused by electronic cigarette explosion[J]. Ear Nose Throat J, 2017, 96(3): 139-142
- [7] Sandvall B K, Jacobson L, Miller E A, et al. Fireworks type, injury pattern, and permanent impairment following severe fireworks-related injuries[J]. Am J Emerg Med, 2017, 35(10): 1469-1473
- [8] Makhoba M A, du Toit-Prinsloo L. Self-inflicted explosive death by intra-oral detonation of a firecracker: a case report [J]. Forensic Sci Med Pathol, 2017, 13(4): 459-463
- [9] Shuker S T. Facial skin-mucosal biodynamic blast injuries and management[J]. J Oral Maxillofac Surg, 2010, 68(8): 1818-1825
- [10] Hicks R R, Fertig S J, Desrocher R E, et al. Neurological effects of blast injury[J]. J Trauma, 2010, 68(5): 1257-1263
- [11] Shuker S T. Maxillofacial air-containing cavities, blast implosion injuries, and management [J]. J Oral Maxillofac Surg, 2010, 68 (1): 93-100
- [12] Shuker S T. Rocket-propelled grenade maxillofacial injuries and management[J]. J Oral Maxillofac Surg, 2006, 64(3): 503-510
- [13] Shuker S T. The effect of a blast on the mandible and teeth: transverse fractures and their management [J]. Br J Oral Maxillofac Surg, 2008, 46(7): 547-551
- [14] Shuker S T. Thermal shell fragment craniofacial injury: biophysics, pathophysiology, and management [J]. J Craniofac Surg, 2015, 26(1): 55-59
- [15] Shuker S T. Emergency Management of High-Energy Shell Fragment Midface Complex Injuries [J]. J Craniofac Surg, 2016, 27 (5): 1308-1311
- [16] Prat N J, Daban J L, Voiglio E J, et al. Wound ballistics and blast injuries[J]. J Visc Surg, 2017
- [17] Chen J, Zhang B, Chen W, et al. Local and distant trauma after hypervelocity ballistic impact to the pig hind limb[J]. Springerplus, 2016, 5 (1): 1497
- [18] Franke A, Bieler D, Friemert B, et al. The First Aid and Hospital Treatment of Gunshot and Blast Injuries [J]. Dtsch Arztebl Int, 2017, 114(14): 237-243
- [19] Tan Y, Zhou S, Jiang H. Biomechanical changes in the head associated with penetrating injuries of the maxilla and mandible: an experimental investigation [J]. J Oral Maxillofac Surg, 2002, 60 (5): 552-556, 557-558
- [20] Franke A, Bieler D, Friemert B, et al. The First Aid and Hospital Treatment of Gunshot and Blast Injuries [J]. Dtsch Arztebl Int, 2017, 114(14): 237-243
- [21] Keller M W, Han P P, Galarneau M R, et al. Airway Management in Severe Combat Maxillofacial Trauma [J]. Otolaryngol Head Neck Surg, 2015, 153(4): 532-537
- [22] Reeves G I. Biophysics and medical effects of enhanced radiation weapons[J]. Health Phys, 2012, 103(2): 150-158
- [23] Zhao Y, Zhou Y. The past and present of blast injury research in China [J]. Chinese Journal of Traumatology, 2015, 18(4): 194-200
- [24] Powers D B, Delo R I. Characteristics of ballistic and blast injuries[J]. Atlas Oral Maxillofac Surg Clin North Am, 2013, 21(1): 15-24
- [25] Breeze J, James G R, Hepper A E. Perforation of fragment simulating projectiles into goat skin and muscle [J]. J R Army Med Corps, 2013,

- 159(2): 84-89
- [26] Eftaxiopoulou T, Barnett-Vanes A, Arora H, et al. Prolonged but not short-duration blast waves elicit acute inflammation in a rodent model of primary blast limb trauma[J]. *Injury*, 2016, 47(3): 625-632
- [27] Panzer M B, Wood G W, Bass C R. Scaling in neurotrauma: how do we apply animal experiments to people?[J]. *Exp Neurol*, 2014, 261: 120-126
- [28] Wang Z, Liu Y, Lei D, et al. A new model of blast injury from a spherical explosive and its special wound in the maxillofacial region [J]. *Mil Med*, 2003, 168(4): 330-332
- [29] He L, Li J, Liu Y. An experimental study on injury characteristics of blast injury in maxillofacial region wounded by spherical explosive [J]. *Journal of Practical Stomatology*, 2003, 19(3): 228-230
- [30] Zhang C, Li H, Zhou S, et al. Study of the changes and effect of VEGF and bFGF in early stage of maxillofacial blast injury in rabbits [J]. *Hua Xi Kou Qiang Yi Xue Za Zhi*, 2001, 19(2): 77-79, 82
- [31] Wang Y, Pan L, Fan W, et al. Influence of vagal injury on acute traumatic reaction after blast injury [J]. *Eur J Trauma Emerg Surg*, 2013, 39(4): 385-392
- [32] Huempfer-Hierl H, Schaller A, Hierl T. Biomechanical investigation of the supraorbital arch - a transient FEA study on the impact of physical blows[J]. *Head Face Med*, 2014, 10: 13
- [33] Lei T, Xie L, Tu W, et al. Development of a finite element model for blast injuries to the pig mandible and a preliminary biomechanical analysis[J]. *J Trauma Acute Care Surg*, 2012, 73(4): 902-907
- [34] Yang B, Tse K M, Chen N, et al. Development of a finite element head model for the study of impact head injury [J]. *Biomed Res Int*, 2014, 2014: 408278
- [35] Mao H, Zhang L, Jiang B, et al. Development of a finite element human head model partially validated with thirty five experimental cases [J]. *J Biomech Eng*, 2013, 135(11): 111002
- [36] Kim D, Ho D C, Mai H, et al. A clinically validated prediction method for facial soft-tissue changes following double-jaw surgery[J]. *Med Phys*, 2017, 44(8): 4252-4261
- [37] Panzer M B, Myers B S, Bass C R. Mesh considerations for finite element blast modelling in biomechanics[J]. *Comput Methods Biomech Biomed Engin*, 2013, 16(6): 612-621
- [38] Burkhart T A, Andrews D M, Dunning C E. Finite element modeling mesh quality, energy balance and validation methods: a review with recommendations associated with the modeling of bone tissue [J]. *J Biomech*, 2013, 46(9): 1477-1488
- [39] Tang Z, Tu W, Zhang G, et al. Dynamic simulation and preliminary finite element analysis of gunshot wounds to the human mandible[J]. *Injury*, 2012, 43(5): 660-665
- [40] Weickenmeier J, Jabareen M. Elastic-viscoplastic modeling of soft biological tissues using a mixed finite element formulation based on the relative deformation gradient [J]. *Int J Numer Method Biomed Eng*, 2014, 30(11): 1238-1262
- [41] Flynn C, Taberner A J, Nielsen P M, et al. Simulating the three-dimensional deformation of in vivo facial skin [J]. *J Mech Behav Biomed Mater*, 2013, 28: 484-494
- [42] Nazari M A, Perrier P, Payan Y. The distributed lambda (lambda) model (DLM): a 3-D, finite-element muscle model based on Feldman's lambda model; assessment of orofacial gestures [J]. *J Speech Lang Hear Res*, 2013, 56(6): S1909-S1923
- [43] Weickenmeier J, Jabareen M, Mazza E. Suction based mechanical characterization of superficial facial soft tissues [J]. *J Biomech*, 2015, 48(16): 4279-4286
- [44] Koch R M, Roth S H M, Gross M H, et al. A framework for facial surgery simulation: Spring Conference on Computer Graphics, 2002 [C]
- [45] Sarti A, Gori R, Lamberti C. A physically based model to simulate maxillo-facial surgery from 3D CT images[M]. Elsevier Science Publishers B V, 1999
- [46] Chabanas M, Payan Y, Marécaux C, et al. Comparison of Linear and Non-linear Soft Tissue Models with Post-operative CT Scan in Maxillofacial Surgery[J]. *Lecture Notes in Computer Science*, 2004, 3078 (1): 19-27
- [47] Bochicchio G V, Lumpkins K, O'Connor J, et al. Blast injury in a civilian trauma setting is associated with a delay in diagnosis of traumatic brain injury[J]. *Am Surg*, 2008, 74(3): 267-270
- [48] Lei T, Xie L, Tu W, et al. Blast injuries to the human mandible: development of a finite element model and a preliminary finite element analysis[J]. *Injury*, 2012, 43(11): 1850-1855
- [49] Huempfer-Hierl H, Schaller A, Hierl T. Maxillofacial fractures and craniocerebral injuries - stress propagation from face to neurocranium in a finite element analysis [J]. *Scand J Trauma Resusc Emerg Med*, 2015, 23: 35
- [50] Liu X, Wang L, Wang C, et al. Prediction of globe rupture caused by primary blast: a finite element analysis[J]. *Comput Methods Biomech Biomed Engin*, 2015, 18(9): 1024-1029
- [51] Rossi T, Boccassini B, Esposito L, et al. Primary blast injury to the eye and orbit: finite element modeling[J]. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2012, 53(13): 8057-8066
- [52] Clemente C, Esposito L, Speranza D, et al. Firecracker eye exposure: experimental study and simulation [J]. *Biomech Model Mechanobiol*, 2017, 16(4): 1401-1411

(上接第 1400 页)

- [27] 朱合伟, 张元立, 雷景伟, 等. 宝石能谱 CT 物质定量分析对肝硬化结节与癌性结节鉴别诊断的临床价值[J]. *中国医学创新*, 2014, 11 (36): 10-12
- [28] 王翔, 王涛, 王小琴, 等. 双源 CT 双能量扫描在肝肿瘤诊断中的应用价值探讨[J]. *当代医学*, 2012, 18(29): 292-293
- [29] Zhang LJ, Lu L, Bi J, et al. Detection of pulmonary embolism comparison between dual energy CT and MR angiography in a rabbit model[J]. *Acad Radiol*, 2010, 17(12): 1550-1559
- [30] 高回青, 胡春洪, 胡栗, 等. 能谱 CT 定量分析在鉴别肝癌和肝脓肿中的价值[J]. *中华肝脏病杂志*, 2016, 24(9): 1007-1018
- [31] 王静, 赵廷涛, 颜廷波, 等. CT 能谱技术对伴有肝硬化的原发性肝癌优化成像的分析[J]. *中国现代医生*, 2015, 53(08): 105-108