

文章编号:1004-7220(2009)06-0458-04

颅脑模型减速撞击过程中脑组织受力特点的研究

刘盛雄^{a,c}, 尹志勇^{a,b,c}, 赵辉^{a,c}, 杨光瑜^{a,c}

(第三军医大学 a. 大坪医院野战外科研究所四室; b. 创伤、烧伤与复合伤国家重点实验室;

c. 车辆/生物碰撞安全重庆市重点实验室, 重庆 400042)

摘要:目的 研究颅脑减速撞击过程中脑组织关键部位受力的特点(受拉或受压)。方法 制作含气泡的透明颅脑物理模型,并将其固定在竖式颅脑减速撞击实验台上。将移动平台放置在400 mm的高度,自由下落并撞击固定台面,同时采用高速摄像记录整个减速撞击过程,并用序列图片分析软件对气泡长、短轴(分别位于垂直于撞击方向及撞击方向)的轴长变化进行分析。结果 撞击点处的气泡在短轴方向上的轴长变化大于长轴方向上的轴长变化,对冲点处的气泡在短轴方向上的轴长变化小于长轴方向上的轴长变化。结论 实验结果表明撞击点处的气泡所受到的作用力主要为压力且来自于短轴方向,即撞击方向;对冲点处的气泡所受到的作用力主要为拉力且来自于长轴方向,即撞击方向的垂直方向。该结果对于研究颅脑减速撞击致伤的力学机制及其诊断和防护具有重要意义。

关键词: 减速碰撞; 对冲伤; 脑组织; 受力特点;

中图分类号: R318.01 文献标志码: A

Research on brain tissue mechanical style in brain model deceleration Impact

LIU Sheng-xiong^{a,c}, YIN Zhi-yong^{a,b,c}, ZHAO Hui^{a,c}, YANG Guang-yu^{a,c}. (a. Chongqing Key Laboratory of Vehicle/Biology Crash Worthiness Safety, Department 4; b. Institute of Surgery Research; c. Daping Hospital, State Key Laboratory of Trauma, Burns and Combined Injury, Third Military Medical University, Chongqing 400042, China)

Abstract: Objective to research the mechanical style (compressive or tensile force) of the key site of brain tissue in brain deceleration impact. **Method** a transparent physical brain model with air bubbles was built and loaded on an upright brain deceleration impacting experimental platform. Then, the moveable platform was made a free fall from a height of 400mm and impacted on the fixed platform, and the whole deceleration impacting process was recorded by a high-speed video camera. Using the serial pictures analyzing software, the length change of the long axis (vertical to the impacting direction) and the short axis (in the impacting direction) of the air bubbles were analyzed and calculated. **Result** the length change of the long axis of air bubble with in site coup was smaller than the absolute value of that of the short axis; while with the air bubble in the contrecoup site, the length change of the long axis was bigger than the absolute value of the short axis. **Conclusions** the results showed that the air bubble in the coup site mainly suffered from the tensile force vertical to the impacting direction and the air bubble in the contrecoup site mainly suffered from the compressive force in the impacting direction. Since the property of tensile resistance of the brain tissue is inferior to the

收稿日期:2009-06-18; 修回日期:2009-09-16

基金项目:国家自然科学基金(30670513,30800243),973 前期研究专项(2007CB516704)。

作者简介:刘盛雄(1978-),男,博士,研究方向:颅脑撞击损伤生物力学与交通医学。

通讯作者:尹志勇, Tel: (023)66193386; E-mail: zyyin@cta.cq.cn。

property of compressive resistance of the brain tissue, the injury is often easier to occur in the contrecoup site than in coup site. The results were of significance to the research of biomechanical mechanism, diagnosis and prevention of the brain deceleration impacting injury.

Key words: Deceleration impact; Contrecoup injury; Brain tissue; Mechanical style

颅脑撞击损伤是交通事故中常见的伤类和主要致死原因之一,是交通伤后致死、致残的首要原因^[1]。在交通事故伤中,头部创伤在所有人体创伤中的比例约为34%,在导致死亡的创伤中比例更高达68%^[2]。2003年到2005年,我国平均每年大约发生55万起道路交通事故,其中每年死亡和受伤人数分别约为10万和48万^[3]。因此,颅脑撞击伤生物力学研究已经成为了撞击损伤生物力学领域的研究热点。其研究目的在于阐明脑损伤的力学发生机制,为颅脑损伤的救治和防护提供理论基础。

在颅脑损伤中,减速伤的发生率要比加速伤高得多,而减速伤往往伴随着大量严重的对冲伤。一些研究者发现颅脑减速性损伤以道路交通伤、坠落伤等常见,其临床特点为对冲伤多见,着力部位脑损伤轻,而对冲部位脑损伤较重^[4]。国内外也有一些学者对对冲伤进行过研究,提出了一些致伤机理^[5-8]。但是对冲伤为何发生得如此频繁,到目前为止这方面的研究结论大部分还是处于假说阶段,还有待于使用各种行之有效的研究方法对其进行复制、再现与研究。

本研究在竖式颅脑减速致伤实验平台的基础上,通过构建透明的颅脑物理模型,将气泡放置到脑组织中的撞击部位、对冲部位以及其他用来比较的感兴趣部位,采用高速摄像系统记录碰撞实验过程中脑组织内气泡的形变过程,最终通过分析软件分析颅脑减速撞击过程中脑组织内气泡的长、短轴轴长变化,明确颅内各关键部位脑组织的受力特点,进而初步阐明对冲伤的力学发生机制。

1 材料与方法

采用透明钢化玻璃颅骨模型(内径为100 mm,厚度为2 mm)与植物水凝胶的组合制作颅脑物理模型(如图1b所示)。该透明颅脑模型有利于直接观察碰撞过程中颅内气泡长、短轴的轴长变化过程,从而能够对颅脑减速碰撞过程中脑组织关键部位受力特点进行研究。

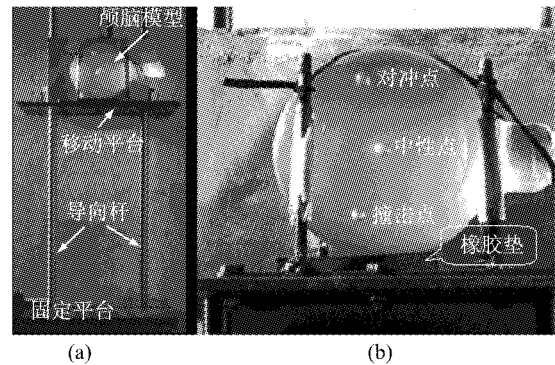


图1 透明颅脑物理模型及竖式颅脑减速碰撞致伤实验模型

Fig.1 The transparent head model and the experimental model of head decelerating injury

将透明颅脑模型置于实验平台的移动平台上,采用4根直杆加橡胶绳索和橡胶垫片的固定方式,使模型在碰撞过程中只能沿着平行于碰撞方向做有限的平移运动,充分模拟直线减速碰撞的边界条件(如图1a所示)。在脑组织模型中的碰撞点、对称点和中性点3处通过注射器注入少量空气的方法生成3个微气泡(如图1b所示),气泡成形后将模型进行静置使气泡充分扩张以便使气泡内的空气压力近似于一个标准大气压。在移动平台上放置厚度为5 mm的橡胶垫片用以模拟头皮,在此基础上建立完整的竖式颅脑减速碰撞致伤实验平台(如图1a所示)。

在高强度灯光(直流镝灯,XG201-2000北京星光大宇影视舞台灯具厂)的照明环境中,将移动平台升至 (400.0 ± 1.0) mm的高度并使其自由下落撞击固定平台,同时采用高速摄像系统(5 000 fps,Plantom 4.3,美国Visionresearch公司)记录整个减速碰撞实验过程。使用序列图片分析软件对高速摄像结果进行逐帧分析,计算出各点位气泡长、短轴的轴长变化比率($\Delta L/L$)曲线。该比率值为正表明此轴受到拉伸作用,值越大则拉伸程度越大;该比率值为负表明此轴受到压缩作用,其绝对值越大则压缩程度越大。进而可以据此对颅内各关键点位脑组织的受力特点进行研究。

2 实验结果

2.1 气泡变形总体规律

通过高速摄像记录整个碰撞过程,并应用序列图片分析软件进行逐帧分析,提取气泡体积从开始变化到其体积达到极限值的图片,共8帧,下图是减速碰撞过程中气泡的变形序列图片:

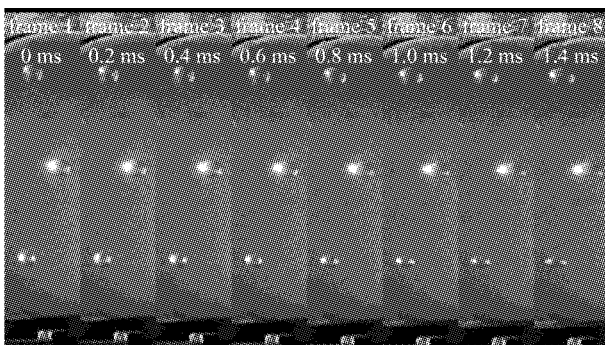


图2 颅脑模型减速碰撞气泡变形序列图片

Fig.2 Serial air bubble shape changing frames of the head model decelerating impact

气泡体积从开始变形至其极限体积,共历经了8帧图片的时间,由于采用的是5 000 fps的摄像速度,因此每帧经历时间为0.2 ms,8帧合计1.4 ms。总体上而言,位于撞击点的气泡体积逐帧变小,位于对冲点的气泡体积逐帧增大。

2.2 气泡轴长变化比率对比

对每帧图片3个点位处气泡的长、短轴长度(long axis, short axis)进行测量,并对各个轴长的变化情况进行计算绘图(见图3),从图3可以看出:对冲点处气泡的长轴轴长变化率(撞击方向的垂直方向)从0不断增加到0.31左右,短轴轴长变化率

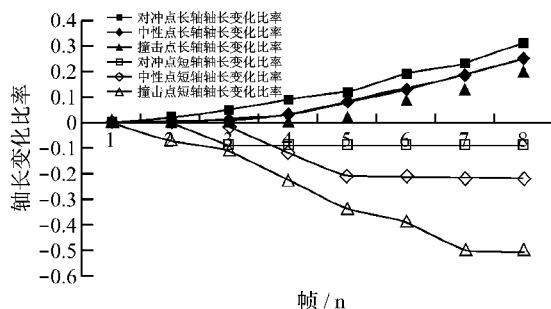


图3 颅脑模型减速碰撞气泡轴长变化比率对比图

Fig.3 Compare of the length changing ratios of the air bubbles in the head model decelerating impact

(撞击方向)从0不断减小到-0.09左右。也就是说长轴轴长变化率为正,受到的是拉力;而短轴轴长变化率为负,受到的是压力;且长轴轴长变化率绝对值大于短轴轴长变化率的绝对值,即所受的拉力大于压力。由此可见,在撞击过程中,对冲点处的气泡所受到主要作用力是拉力,该拉力的作用方向为撞击方向的垂直方向。

撞击点处气泡的长轴轴长变化率(撞击方向的垂直方向)从0不断增加到0.20左右,短轴轴长变化率(撞击方向)从0不断减小到-0.52左右。长轴轴长变化率为正,受到的是拉力;短轴轴长变化率为负,受到的是压力;且长轴轴长变化率小于短轴轴长变化率的绝对值,即所受的拉力小于压力。由此可见,在撞击过程中,撞击点处的气泡所受到主要作用力是压力,该压力的作用方向为撞击方向。

中性点处气泡的长轴轴长变化率(撞击方向的垂直方向)从0不断增加到0.25左右,短轴轴长变化率(撞击方向)从0不断减小到-0.22左右。长轴轴长变化率为正,受到的是拉力;短轴轴长变化率为负,受到的是压力;且长轴轴长变化率与短轴轴长变化率的绝对值比较相近,因此即所受的拉力与压力也是大小相当。由此可见,在撞击过程中,中性点处的气泡所受到拉力与压力大小相当,两种作用力共同作用,无主次之分。

2.3 气泡受力特点对比图

从图4可以清晰地看出:撞击点处的气泡(图4-a)在撞击方向受到了较为明显的压力的作用,而该气泡在撞击方向的垂直方向受到的拉力则相对要小得多;相反地,对冲点处的气泡(图4-b)在撞击方向受到的压力较小,而该气泡在撞击方向的垂直方向则受到了较为明显的拉力的作用;这说明在颅脑的减速撞击过程中,撞击点部位的脑组织可能会因

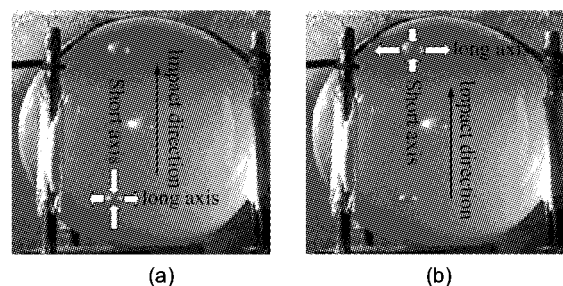


图4 撞击点与对冲点气泡受力特点对比图

Fig.4 Compare of the mechanical style of the air bubbles in the coup and contrecoup sites

为挤压而损伤,对冲点部位的脑组织则可能会因为牵张、拉伸而损伤。

3 分析与讨论

很多学者也曾利用众多颅脑模型对颅脑撞击损伤的生物力学机制做过研究,比如国内的姜燕平等使用光弹性的颅脑二维模型对颅脑受撞击时的应力分布进行研究,得出了以矢状面受顶载、冠状面受顶载时的应力为最大的结论^[9]。其研究目的主要在于揭示颅内应力的分布,但并未涉及脑组织受力方式的研究。美国韦恩州立大学等机构完成了一项人尸体头颅枕骨撞击实验。他们用金属球和薄壁管制成与脑组织密度接近的标志物。撞击过程中将标志物置于大脑中,采用高速 X 光机(250 帧/秒)对颅脑的冲击历程进行拍摄。同时在颅骨内也安装微型标志物,研究人员在对拍摄的图像进行分析之后得出了大脑中标志物相对颅骨的“8”字形运动轨迹及其规律^[10]。但是该研究重点在于探索颅脑撞击过程中颅内脑组织的位移情况,也未涉及脑组织受力方式的研究。

本文通过构建透明的颅脑模型,首次在颅脑减速碰撞中局部脑组织的受力方式(即受拉或受压)这方面开展了一些研究工作,初步得出了一些关于脑组织受力特点的规律性的结论。通过该实验的研究结果可以看出:对冲点处的气泡所受到的作用力主要为拉力;撞击点处的气泡所受到的作用力主要为压力;而中性点处的气泡所受到拉力与压力大小相当。由于对冲点处气泡的长轴轴长变化率最大值达到了 0.31 左右,在这 3 个气泡的长轴轴长变化率中是最大的,同时由于脑组织及其血管的抗拉性能劣于抗压性能,因此在对冲点相对较大的拉力作用下,颅脑更容易在对冲部位出现较为严重的损伤。这也就是为何颅脑在减速撞击情况下,往往在对冲部位会出现更大的损伤的原因。这一结论可以解释刘宏伟发现的颅脑减速性损伤中对冲伤多见,着力部位脑损伤轻,而对冲部位脑损伤较重^[4]这一临床现象。长期以来对于颅脑对冲伤的形成往往多用负压进行解释,通过此次实验可以说明脑组织对冲伤的形成归根到底还是由于某一点在各方向上所受到的力的差异而造成的,如果该点各方向上的拉力效应大于压力效应则会使脑组织形成牵张型损伤,否则如果该点各方向上的压力效应大于拉力效应则会

使脑组织形成挤压型损伤。也就是说负压并非是形成对冲伤的根本原因,导致对冲伤的根本机制在于脑组织对冲部位受拉的程度大于受压的程度,从而使脑组织易于受到牵张、撕裂以及剥离等等效应而损伤。

尽管本次研究中所用的颅脑模型还是人颅脑的简化模型,模拟及计算的结果在数值上可能与实际情况不完全一致。但通过对该模型减速碰撞实验结果的分析,可以明确局部脑组织的主要受力特点,初步阐明了交通事故颅脑减速伤中较为常见的颅脑“对冲伤”的力学发生机制。同时,该研究结果对于提高颅脑撞击致伤机理的研究水平以及颅脑撞击致伤的临床诊断及其防护等都具有重要的参考意义。

参考文献:

- [1] 王正国. 交通事故伤研究近况[J]. 中华创伤杂志, 1996, 12(3): 141-142.
- [2] Gennarelli TA, Champion HR, Copes WS. Importance of Mortality from Head Injury in Immediate Survivors of Vehicular Injuries [C]//Proceeding of the 1992 International IRCOBI Conference on the Biomechanics of Impacts. Verona: 1992: 167-178.
- [3] ZHOU Ji-hong, QIU Jun, ZHAO Xin-cai, et al. Road crash in China from 2003 to 2005 [J]. Chinese Journal of Traumatology, 2008, 11(1): 3-7.
- [4] 刘宏伟. 颅脑减速性损伤临床特点及治疗体会[J]. 中国现代神经疾病杂志, 2004, 4(1): 9.
- [5] 刘艳辉, 毛铂镛, 陈槐卿. 颅脑撞击伤的生物力学机制研究进展[J]. 生物医学工程学杂志, 1997, 14(1): 73-76.
- [6] Nusholtz GS, Glascoe LG, Wylie EB. Modeling cavitation during head impact [C]//Proceedings of NATO/AGARD Head Impact Conference. USA: 1996: 6.
- [7] Brennen CE, 2003. Cavitation in biological and bioengineering contexts [C]// The Fifth International Symposium on Cavitation (cav2003). Osaka: 2003: 1-9.
- [8] 丁祖荣, 马靖东. 对头-颈模拟系统的撞击研究[J]. 上海交通大学学报, 1991, 25(3):10-16.
- [9] 姜燕平, 刘宝松, 王正国, 等. 模拟颅脑受撞击致伤时颅内应力的光弹性法测定[J]. 中华物理医学与康复杂志, 1999, 21(4): 233-235.
- [10] Hong Zou, James PS, Warren NH. Separating brain motion into rigid body displacement and deformation under low-severity impacts [J]. Journal of Biomechanics, 2007, 40: 1183-1191.