



图3 应力波衰减

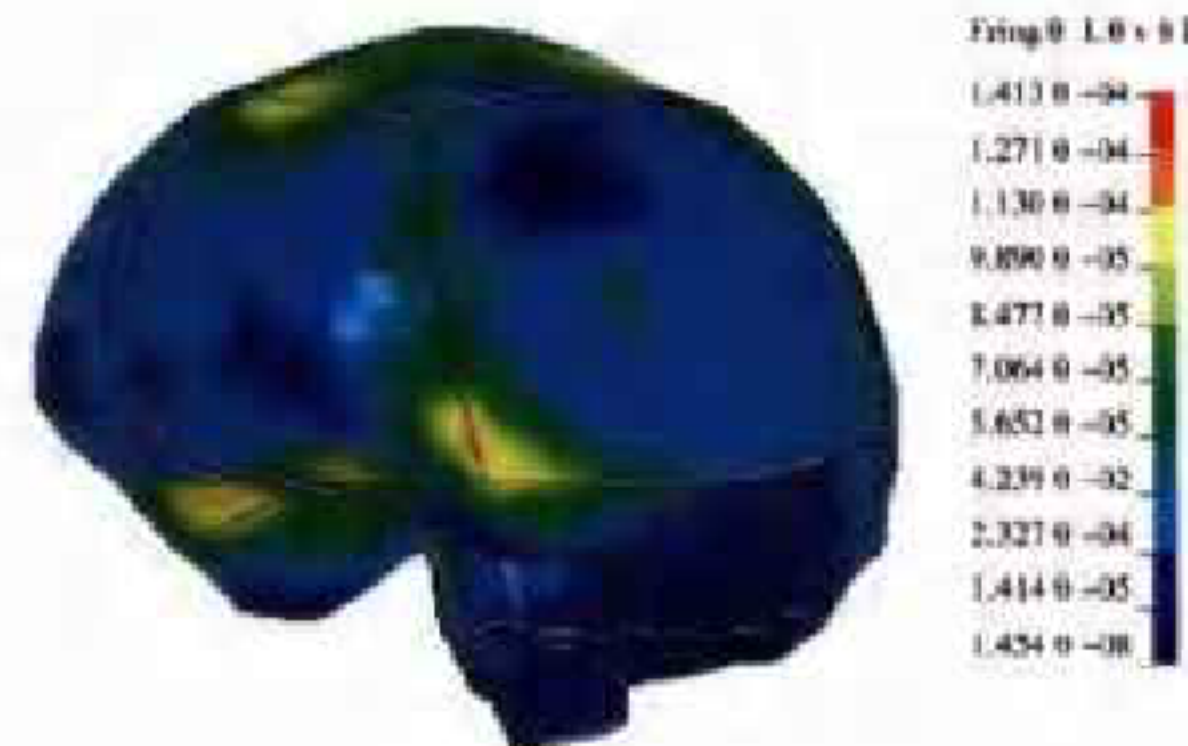


图4 颅底应力集中

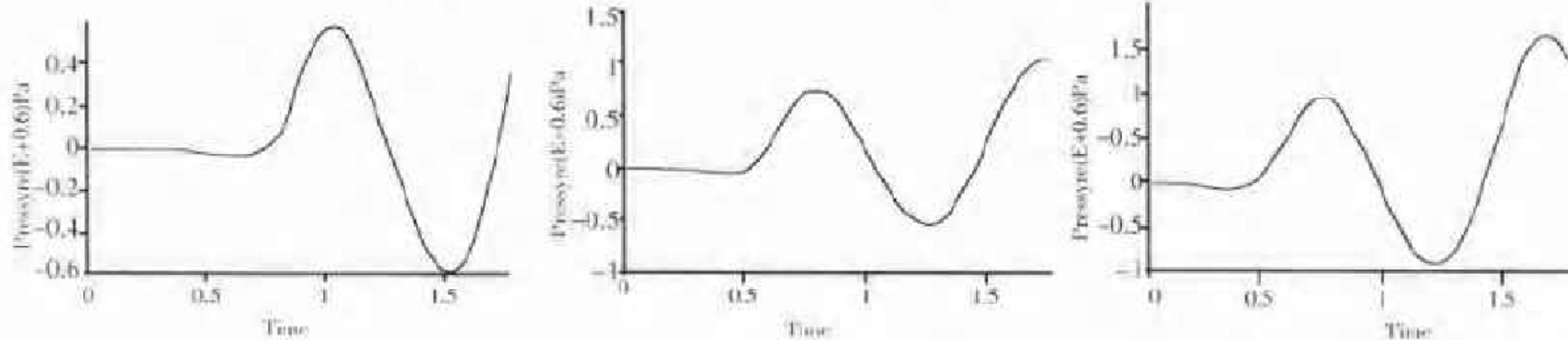


图5 颅内压力曲线

### 讨论

常见的颅脑损伤生物力学研究方法有物理参数测试、无接触测量(高速摄像测量、光弹性模型和喷漆法)以及数学计算。当前,随着计算机科学迅速发展,用数学模型来计算颅脑损伤的生物力学已经成为研究颅脑损伤生物力学的最常用方法,头部有限元模型正是在这一背景下发展起来的。有限元法是一种从工程结构分析发展起来的求解连续介质力学问题的数值分析方法,1969年Fridenberg首次将有限元理论应用于医学领域,为人类生物力学研究提供了新方法和理论。迄今为止,已有多种版本的头部有限元模型被用于颅脑损伤的研究,分别被用于模拟接触性头部撞击伤和模拟非接触性(惯性)颅脑损伤。用有限元模型来模拟颅脑损伤过程,可供研究的生物力学参数非常丰富,且以此获取所需要的生物力学参数几乎没有任何困难。Von Mises应力是将压应力、拉应力及剪应力的不同分量用数学方法综合起来产生的一个单独的量,这个标量常用于表示某种材料承受的总应力情况,因此 Von Mises 应力是本文所研究的生物力学参数之一。

颅骨因解剖部位差异有不同的力学特点,颞骨的抗骨折能力又较枕骨、顶骨、额骨低。颞部受到撞击时,骨折线容易转向外耳道,致鼓室盖骨骨折和脑脊液漏。综合颞骨撞击伤模型<sup>[2]</sup>可以初步判断,颞骨的应力达到 11.2MPa 时,只造成撞击侧颞骨某些层面的线性骨折;当颞骨的应力达到 15.4MPa 时,颞骨将出现纵行骨折或混合型骨折,同时伴有凹陷性骨折、错位等;而应力达到 18.2MPa 后,撞击侧骨折还可出现粉碎性骨折。骨折线的形状与骨骼被

撞击时所发生的应变率有关,当应变率较低时,骨特性表现为胶原纤维结构,而应变率高则体现为钙质结构,易出现爆裂性骨折<sup>[6]</sup>,这可能也是本试验中第3组出现粉碎性骨折的原因。

颅内压力峰值是头部对外力载荷的响应,常常被作为评估颅脑损伤程度的重要指标。Ward 等<sup>[7]</sup>曾从动物、尸体实验以及有限元模拟推断存在头部压力容限,压力峰值超过该容限将导致颅脑挫伤和出血。颅内压力峰值大小差异也导致损伤程度轻重不同:颅内压力超过 235kPa 将导致重度脑损伤,在 173 ~ 235kPa 之间会出现中度脑损伤,而低于 173kPa 则至多导致轻度伤<sup>[8]</sup>。通过模拟仿真看出随着撞击速度增大,颅内压力峰值也增大,因而从生物力学方面验证了随着撞击速度对脑损伤程度的影响。颅脑对外力的响应除反映在颅内压力变化外,脑组织的应力、应变也是重要的判断指标。作者通过对颅骨-脑组织的应力波传播和应力分布研究观察到了临床常见的颅底挫裂伤的颅底应力集中现象,这与颅底的多孔、窝状结构有关;颅底结构在头部撞击伤时还因其易达到屈服应力而出现导致骨折。应力波在颅骨和脑组织耦合处急剧衰减是由于两种介质不同导致。尽管模拟仿真试验中确实观察到了对侧部位的应力集中现象,且生物撞击实验还发现对侧的骨折,但作者还不能肯定地认为这是由对冲伤所导致,因为在准静态撞击实验中,右侧颞骨由刚性墙支撑,刚性墙对右侧颞骨的反作用力随着撞击速度的增大而增大,相当于在对侧也施加这一外力载荷,这也能够解释本实验中右侧颞骨骨折的现象,提示颞部撞击后的缓冲空间小以及支撑面刚