



体头颅进行螺旋 CT 扫描。撞击头质量为 1.88kg, 撞击锤末端面积为 1 589.6mm<sup>2</sup>。

表 1 准静态下颞部撞击参数<sup>[2]</sup>

组别	驱动压力(kPa)	撞击速度(m/s)	加速度(m/s <sup>2</sup> )
第 1 组	800	10.1	3.6 × 10 <sup>3</sup>
第 2 组	1200	14.5	5.0 × 10 <sup>3</sup>
第 3 组	1400	16.0	5.4 × 10 <sup>3</sup>

### 2 头部有限元模型参数

本文所用的头部有限元模型为 TNO 公司推出的头部有限元模型(英国伯明翰大学提供)基础上修正而成。该模型由头部解剖结构分为颅骨、蝶骨、硬脑膜、大脑、小脑和延髓等 22 个部分,含有 15 639 个节点和 13 827 个单元,颅骨-脑组织为共用节点结构(图 1)。头部各部分的材料特性参数按表 2 进行定义。

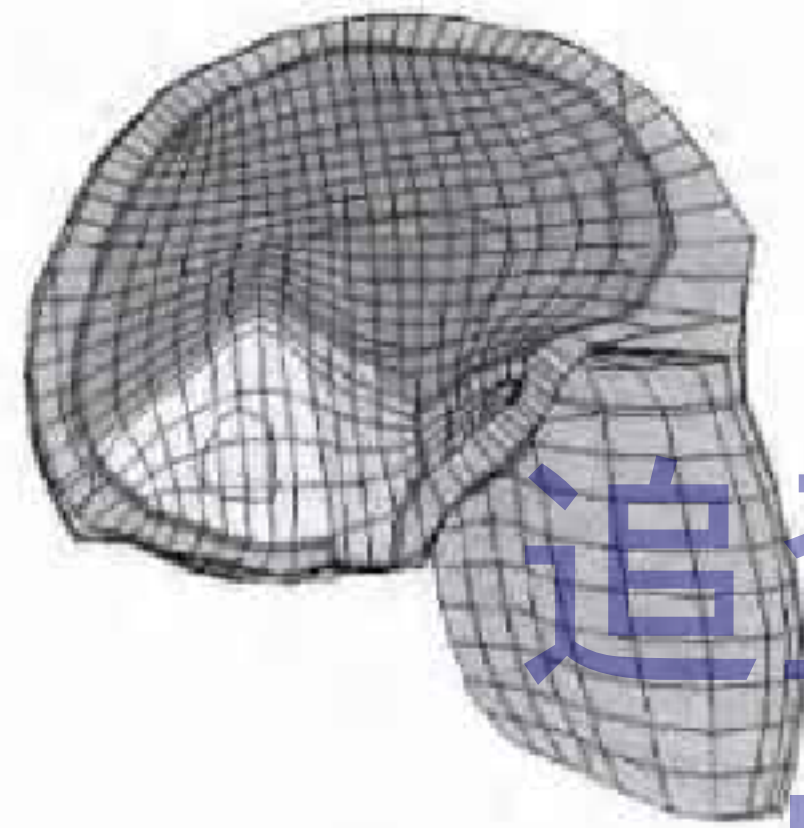


图 1 头部有限元模型

表 2 有限元模型材料参数定义<sup>[3-5]</sup>

序号	名称	材料特性			
		材料模型	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	弹性模量 (MPa)	泊松比
1	密质骨	线弹性	1800	15000	0.21
2	松质骨	线弹性	1500	4500	0.01
3	面骨	线弹性	4500	10000	0.30
4	硬脑膜	线弹性	1133	31.5	0.45
5	大脑镰	线弹性	1133	31.5	0.45

将脑组织作为线黏弹性材料并结合大变形理论进行研究,以能更好地模拟脑组织的剪应变等力学

响应。黏弹性材料的剪切模量用以下方程表达:

$$G(t) = G_{\infty} + (G_0 - G_{\infty}) \cdot e^{-\beta t}$$

式中 G<sub>0</sub> 为动态剪切模量,取值范围为 34 ~ 528kPa; G<sub>∞</sub> 为静态剪切模量,取值范围为 5.5 ~ 338kPa; β 为衰减常数; t 为时间。本文中动态剪切模量、静态剪切模量以及衰减常数的值分别为 34、5.5kPa 和 700s<sup>-1</sup>。

### 3 颞骨撞击伤模拟的前、后处理

在 Hypermesh 软件中建立撞击锤有限元模型,根据以上参数设置头部有限元模型的材料特性参数,撞击锤与左侧颞骨的接触采用自动面-面接触,并根据撞击试验调整初始位置,然后完成 Control Cards 的设置。在 Ls-Dyna 中对以上所建立的左侧颞部撞击伤有限元模型进行数值求解,最后用 Ls-Prepost2.1 软件对模拟结果进行后处理,研究颅骨及颅内应力分布和应力波传播以及撞击点处脑组织的压力变化。

### 结果

头部在撞击瞬间,在撞击锤与头部的接触点处形成点状的应力集中区域,而后随着撞击过程延续,撞击锤与头部的接触深度和接触面逐渐增大,在颞骨处形成应力集中区域逐渐扩大,直至撞击锤末端面与头部完全接触,出现大小如撞击面大小的圆状应力集中区域,然后应力以波的形式向周围扩散,直至最后能量消失(图 2)。模拟仿真结果表明,第 1、2 和 3 组实验撞击点的 Von Mises 应力峰值分别为 11.2、15.4、18.2MPa。应力波在颅骨-脑组织耦合处急剧衰减(图 3),虽然颅骨经硬脑膜传递到脑组织后能量急剧降低,但在颅底处有应力集中区域(图 4)。三次实验均在对侧颞骨发现应力集中现象。

撞击头分别以 3 种致伤参数撞击左侧颞部,除第 1 组外,第 2、3 组都出现颞骨骨折<sup>[2]</sup>。由撞击点处脑组织的压力变化波形图能看出,随着撞击能量增大,颅内的压力幅度也增大,第 1、2 和 3 组的压力峰值分别为 0.58、1.10、1.52MPa(图 5)。

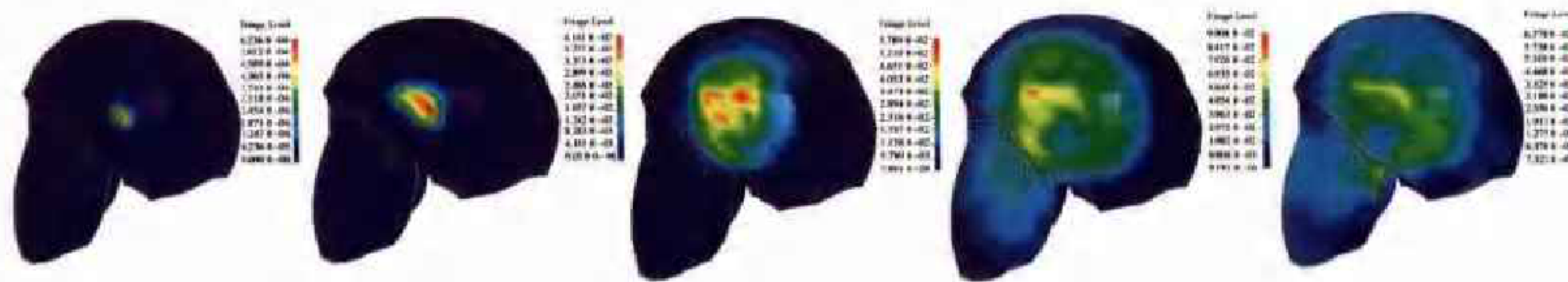


图 2 应力波在颞骨表面的传播过程