

文章编号: 1004-7220(2022)03-0544-06

致伤物接触面积对家兔颅骨骨折的影响

吴君, 李曼, 周红梅, 王希, 王应雪, 张珊, 熊剪, 路艳林, 汪家文
(贵州医科大学法医学院, 贵阳 550004)

摘要:目的 探讨不同接触面积致伤物在准静态压缩条件下对家兔颅骨骨折生物力学响应参数的影响。方法 将家兔分为保留头皮及去除头皮两组, 每组按致伤物接触直径不同分为 3、6、9 mm 组, 每组 9 只, 合计 54 只。将所有家兔过量麻醉处死后制作成头颅压缩模型。采用电子万能材料试验机对家兔颅骨进行准静态压缩至骨折, 分别检测各组家兔颅骨极限载荷、极限载荷作用下形变、压缩强度等生物力学响应参数。结果 保留头皮组及去除头皮组家兔颅骨在不同接触面积下极限载荷、极限载荷作用下形变、压缩强度组间差异均具有统计学意义。极限载荷与接触面积呈正相关, 压缩强度与接触面积呈负相关, 极限载荷作用下形变与接触面积不存在相关性。保留头皮与去除头皮组间比较, 仅接触面直径为 3 mm 组极限载荷作用下形变的组间差异具有统计学意义, 其余各组均不存在统计学意义。结论 接触面积与家兔颅骨骨折极限载荷呈正相关, 与压缩强度呈负相关, 与极限载荷作用下的形变不存在相关性, 且与是否去除头皮无关。

关键词: 接触面积; 致伤物; 颅骨骨折; 头皮; 法医生物力学

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2022.03.025

Effects from Contact Area of the Instrument Causing Trauma on Skull Fracture in Rabbits

WU Jun, LI Man, ZHOU Hongmei, WANG Xi, WANG Yingxue, ZHANG Shan, XIONG Jian, LU Yanlin, WANG Jiawen

(School of Forensic Medicine, Guizhou Medical University, Guiyang 550004, China)

Abstract: Objective To explore the effects from different contact areas of the instrument causing trauma on biomechanical response parameters of rabbit skull fractures under quasi-static compression conditions. **Methods** The rabbits were divided into the scalp preservation group and scalp removal group. Each group was subdivided into 3 mm group, 6 mm group, 9 mm group according to contact diameter of the instrument causing trauma. There were 9 rabbits in each group, 54 rabbits in total. All rabbits were put to death by over anesthesia and made into a skull compression model. An electronic universal material testing machine was used to perform quasi-static compression of rabbit skulls to fractures, and biomechanical response parameters such as ultimate load, deformation under ultimate load and compressive strength of rabbit skulls in each group were detected. **Results** The differences in ultimate load, deformation under ultimate load, and compressive strength of rabbit skulls in scalp preservation group and scalp removal group under different contact areas were statistically significant. The ultimate load was positively correlated with the contact area, and the compressive strength was negatively correlated with the contact area. No correlation was found between deformation under ultimate load and contact

收稿日期: 2021-06-22; 修回日期: 2021-08-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(81660309), 贵州省科技厅基金项目(黔科合平台人才[2018]5779-3), 贵州省高等学校教学内容和课程体系改革项目(2019040), 贵州省大学生创新创业训练计划项目(20195200922, 20195200138)

通信作者: 汪家文, 副教授, E-mail: wjwfs@126.com

area. For scalp preservation group and scalp removal group, the difference in deformation under ultimate load was statistically significant in the 3 mm contact surface diameter group, and there was no statistical significance in the other groups. **Conclusions** The contact area is positively correlated with the ultimate load of rabbit skull fracture and negatively correlated with compressive strength, while it has no correlation with deformation under ultimate load and is unrelated to whether the scalp is removed.

Key words: contact area; instrument causing trauma; skull fracture; scalp; forensic biomechanics

致伤物推断是法医实际检案中案件推进与侦破的关键之一。通过损伤响应进行致伤物反推与损伤事件重建有助于解决法医鉴定中的一些难题。建立生物力学有限元模型为司法鉴定中的损伤机制分析提供了更多可能,促进法医生物力学损伤机制分析,并已逐步成为司法鉴定中的重要组成部分^[1]。

头皮作为颅脑损伤过程中首个受力的组织,是头颅有限元模型的重要组成部分,已成为法医生物力学研究的热点^[2-5]。研究人员通过将大鼠、猪等动物头皮与人类头皮的力学性能进行对比发现,不同物种之间的头皮力学参数存在差异^[2,6]。研究表明,头皮能够通过增加接触面积来降低冲击力的强度^[7-9]。陈兴武等^[10]研究了直径3、11 cm 铁锤头对头皮及颅骨的破坏性反应,分析较大直径致伤物对头颅生物力学参数的影响。结果发现,冲击面积增大时,头皮及颅骨不易发生挫裂和骨折。统计分析表明,高坠等接触面较大的损伤,其颅骨骨折类型多为线性骨折,凹陷性骨折和穿孔性骨折较为少见^[11]。但枪弹射击和直径较小的致伤物,如小铁锤或尖锐的棍棒捅、戳等,常导致颅骨发生孔状骨折^[12]。然而,小直径致伤物所导致的颅骨凹陷性骨折和孔状骨折的生物力学参数,仍有待进一步探讨及研究。

本文以家兔为研究对象,将其分为保留头皮及去除头皮两组,每组按致伤物接触直径不同分为3、6、9 mm 组,采用电子万能材料试验机进行准静态压缩,检测各组颅骨骨折的极限载荷、极限载荷作用下形变及压缩强度等生物力学参数,为头颅有限元模型的建立和验证提供参考依据,并从生物力学角度探讨法医病理学颅脑损伤中小直径致伤物的推断思路。

1 材料与方法

1.1 实验动物及分组

健康雄性家兔 54 只,由贵州医科大学实验动

物中心提供[合格证号 SCXK(黔)2018-0001],按保留头皮与去除头皮分为两组,每组按致伤物接触面直径不同分为3、6、9 mm 组,每组9只家兔。本研究经贵州医科大学动物实验伦理委员会批准,实验严格按照动物伦理要求进行。

1.2 方法

1.2.1 样本预处理 1~2 mL/kg 剂量静脉注射10%水合氯醛溶液,过量麻醉致死后将家兔头颅与躯干从颈椎处离断^[13]。去除头皮组去除颅骨正中处头皮,充分暴露顶部颅骨;保留头皮组剔除顶部毛发,然后使用牙托粉制成模具使家兔颅骨固定,而后置于-20℃冰箱保存备检。

1.2.2 颅骨生物力学试验 将固定好家兔头颅的牙托粉模具置于KD II-0.2型微机控制电子万能试验机(深圳市凯强利试验仪器有限公司)承重底座上,分别使用直径为3、6、9 mm 圆柱形压具对其进行压缩,调节压具接触面高度至刚好接触家兔左侧顶骨中部。预调3次达到稳定状态后在室温下进行压缩试验(见图1)。

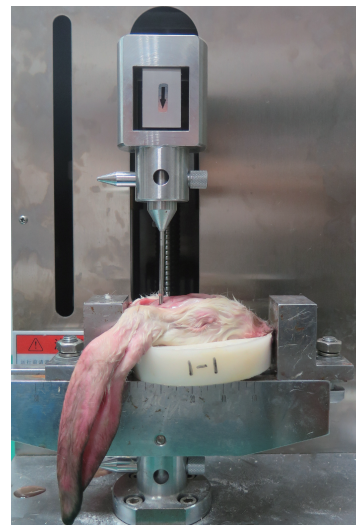


图1 颅骨单向纵轴压缩试验

Fig.1 Skull unidirectional longitudinal axis compression test

加载参数设置:试验速度 5 mm/min,预加载力 0.5 N,停机条件设定为位移 5.0 mm(预实验证实未接触颅底,但顶骨已发生骨折),与材料试验机相连的计算机软件 KPTest V4.3ch(深圳市凯强利试验仪器有限公司)自动输出极限载荷和极限载荷作用下的形变等参数。极限载荷为材料压缩到最大程度时所承受的极限载荷值,以载荷-位移曲线的最大峰值作为试件的极限载荷;极限载荷作用下的形变为试件压缩到极限载荷时发生的形变量,以载荷-位移曲线中最大峰值所对应的位移作为试件极限载荷作用下的形变。利用极限载荷与面积相比公式计算压缩强度^[14-16]。

1.3 统计学分析

采用 SPSS 26.0 软件进行统计学分析,数据均以均数±标准差表示,对于保留头皮组与去除头皮组组间比较采用独立样本 *t* 检验进行分析,接触面直径为 3、6、9 mm 组组间采用单因素方差分析进行

比较,进一步两两比较保留头皮组极限载荷作用下的形变和压缩强度采用 Tamhane's T2 法,其余各组均采用最小显著差异(least significant difference, LSD)法。极限载荷、极限载荷作用下形变和压缩强度与接触面积、保留头皮与去除头皮之间相关性采用 Pearson 相关分析, $P < 0.05$ 为差异具有统计学意义。

2 结果

保留头皮组家兔颅骨在不同接触面积下极限载荷、极限载荷作用下形变及压缩强度比较,组间差异均具有统计学意义($F = 62.78、4.06、102.93$, $P < 0.05$)。

去除头皮组家兔颅骨在不同接触面积下极限载荷、极限载荷作用下形变及压缩强度比较,组间差异均具有统计学意义($F = 55.62、12.68、208.67$, $P < 0.05$),见图 2。

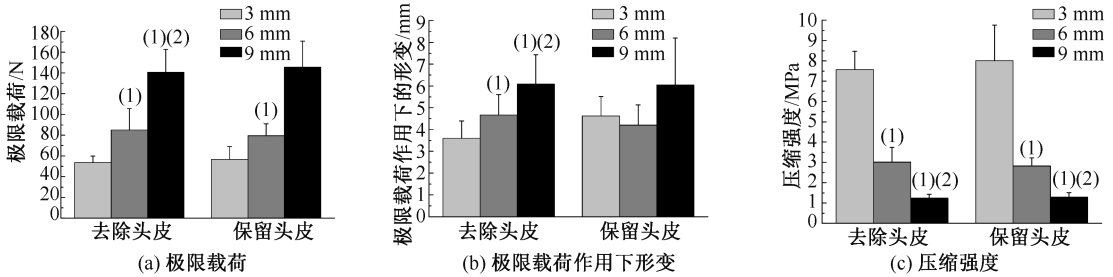


图 2 保留头皮与去除头皮组不同接触面积家兔颅骨生物力学参数比较

Fig.2 Comparison of biomechanical parameters of rabbit skull with and without scalp under different compression areas (a) Ultimate load, (b) Deformation under ultimate load, (c) Compressive strength

注:(1)表示与3 mm组比较, $P < 0.05$;(2)表示与6 mm组比较, $P < 0.05$ 。

进一步两两比较发现,保留头皮组接触面直径 6 mm 与 3 mm 组、9 mm 与 3 mm 组、9 mm 与 6 mm 组除极限载荷作用下形变外,极限载荷与压缩强度比较均具有统计学意义($P < 0.05$)。随着接触面积增大,极限载荷逐渐增大,与接触面积呈正相关($r = 0.883$, $P < 0.05$);压缩强度则表现为降低趋势,与接触面积呈负相关($r = -0.903$, $P < 0.05$);极限载荷作用下形变与接触面积不存在相关性($P > 0.05$)。

去除头皮组接触面直径 6 mm 与 3 mm 组、9 mm 与 3 mm 组、9 mm 与 6 mm 组极限载荷、极限载荷作用下形变及压缩强度比较,均具有统计学意

义($P < 0.05$)。随着接触面积增大,极限载荷和极限载荷作用下形变均表现为增大趋势,与接触面积呈正相关($r = 0.896、0.714$, $P < 0.05$);而压缩强度逐渐降低,与接触面积呈负相关($r = -0.942$, $P < 0.05$),见表 1。

表 1 家兔颅骨骨折生物力学参数与接触面积相关性

Tab.1 Correlation between biomechanical parameters and contact area of rabbit skull fracture

力学参数	去除头皮		保留头皮	
	<i>r</i>	<i>P</i>	<i>r</i>	<i>P</i>
极限载荷	0.896	0	0.883	0
极限载荷作用下形变	0.714	0	0.371	0.057
压缩强度	-0.942	0	-0.903	0

针对保留头皮与去除头皮组各生物力学参数比较时,统计分析结果显示,仅在接触直径为 3 mm 时极限载荷作用下形变的组间差异具有统计学意义($P < 0.05$),其余各组均不存在统计学意义($P > 0.05$)。

3 讨论

动态冲击实验表明,外力致头皮和颅骨的破坏性反应与作用时的接触面积存在相关性,不同冲击面直径造成人头皮挫裂及不同部位颅骨骨折时的力响应值差异显著,当冲击面直径增大时,头皮及颅骨不易发生挫裂和骨折^[9]。准静态压缩条件下,接触面直径与颅骨骨折力学响应参数的关系鲜有报道。本文通过准静态压缩实验对家兔颅骨骨折的极限载荷、压缩强度和极限载荷作用下形变等力学参数与接触面积之间的关系进行探讨。结果表明,随着接触面积增加,极限载荷逐渐增大,即头皮及颅骨所能承受的极限载荷增加,这一结论与文献^[9]的结论相一致。研究表明,头皮对于颅骨的保护作用很大程度上是由于其能够通过增大作用面积、吸收和分配外力从而降低冲击作用力,说明接触面积与颅脑损伤之间具有重要关系^[7-9,17]。

本文发现,去除头皮组家兔颅骨骨折的极限载荷作用下的形变与接触面积呈正相关,但保留头皮组接触面直径 3、6、9 mm 组在极限载荷作用下形变两两比较差异均无统计学意义。接触面积与极限载荷作用下形变无相关性,这可能是由于压缩的速率较低所致。研究表明,只有压缩速率或冲击速度达到一定程度,头皮才会发生挫裂^[18-19]。本文所采用的压缩速率为 5 mm/min,其速率明显较低,因此颅骨断裂时,保留头皮组的头皮并未发生断裂,其极限载荷作用下形变可能主要反映头皮的变形,而颅骨因受头皮紧密贴附保护其变形较难以被检测仪器所捕获。因此,各接触直径在保留头皮组之间的极限载荷作用下形变差异无统计学意义,且无相关性,说明头皮对于头颅损伤的保护作用明显^[20]。

在接触面积固定时,本文探讨了保留头皮与去除头皮家兔颅骨材料力学参数的影响。结果显示,接触面直径为 3 mm 时,保留头皮组与去除头皮组在极限载荷作用下形变差异具有统计学意义;接触直径为 6、9 mm 时,则差异无统计学意义。保留头

皮组与去除头皮组仅仅在接触面积较小时变形显著,可能与颅骨结构有关,颅骨的拱形结构可使作用力传递到四周,散布在四周颅腔壁上^[21]。另外,头皮等弹性组织在持续载荷下,会发生黏塑性(蠕变)变形,在固定位移下也会发生应力松弛^[22]。这些生物力学特性使得其在压缩过程中对颅骨和脑组织具有一定保护作用。研究表明,头皮中含有的胶原蛋白聚集在原纤维网络中,为细胞生长和运动提供支架^[23];胶原蛋白无序排列形成胶原网络,在生物力学响应中占有重要作用^[24]。头皮是具有抗压和抗拉伸的弹性组织。在头部受到撞击时,头皮可吸收一部分冲击能量,通过增大颅骨的承载面积分散撞击力量,降低极限载荷,对颅骨起到保护作用^[21]。

本文发现,保留头皮组与去除头皮组在接触面直径为 3、6、9 mm 时的极限载荷和压缩强度差异均无统计学意义。然而,Gurdjian 等^[25]的尸体试验研究表明,头部在去除头皮情况下所受冲击力比保留头皮高 35%。陈兴武等^[10]使用配备大量程力传感器的力锤对人尸体头部进行冲击试验,结果发现,保留头皮与去除头皮时的冲击作用时间具有显著差异,保留头皮时冲击作用时间比去除头皮时增加约 0.4 ms。Antonia 等^[17]也证实了保留头皮和去除头皮在冲击作用时间、加速度峰值和冲击期间吸收的能量具有统计学差异。本文与上述研究结果不相符,可能是物种或位置差异导致。Trotta 等^[6]研究发现,猪头皮的弹性模量和极限拉伸强度约为人头皮的 2 倍,表明人与猪头皮之间的力学性能具有显著差异。本文的研究对象为家兔,其极限载荷和压缩强度差异无统计学意义,推测原因是家兔头皮与其他动物及人类头皮有所不同,以及压缩部位为左侧颅顶部。Antonia 等^[26]研究表明,冲击对保留头皮与去除头皮顶部的作用时间无显著差异,与本研究结果相一致。

本文通过检测保留头皮家兔颅骨在不同接触面积下生物力学参数,说明接触面积这一影响因素在法医颅脑损伤致伤物推断中具有重要作用。在法医病理学颅脑损伤案件中,往往根据损伤特点来推断损伤机制^[27]。若颅脑损伤表现为“外轻内重”,则认为其符合大面积钝物所致的损伤,如高坠及车祸等;若表现为内外损伤程度相当,则推断其

符合小面积钝物加速损伤的特点^[28]。另外,对于颅脑损伤中涉及颅骨骨折的案件,根据骨折的形态推断致伤物也是常用的方法之一。虽然通过骨折的形态能够大致推断出致伤物的类型,如钝器或锐器,但是单纯根据损伤形态来准确推断具体是何种致伤物仍然具有较大难度,主要原因在于损伤形态、致伤工具与材料力学响应参数之间的一一对应关系并未建立^[29]。研究表明,使用锥子、螺丝刀、拴牛桩等尖锐的条形金属以相对较低的速度捅、戳、凿击人的头颅,会导致颅骨发生孔状骨折^[30-31]。本文通过研究致伤物在准静态压缩条件下导致颅骨骨折的力学响应,旨在分析直径较小的致伤物以较低速度导致颅骨发生凹陷性或孔状骨折时的力学性能参数,从生物力学角度对直径较小致伤物以较低速度和较高速度导致颅骨骨折进行推断与鉴别。准静态试验能够更直接地表征组织材料特性^[32]。许多研究针对准静态试验和冲击试验导致的骨折进行对比,发现准静态试验条件下骨折的形态与冲击试验下不同,且刚度和失效能低于冲击试验^[33-34]。另外,研究表明,颅骨的力学性能与加载速率显著相关。随着加载速率从准静态增加到高速率,颅骨样品的极限强度和失效能有显著差异^[35]。因此,在准静态压缩试验条件下检测颅骨骨折的力学性能,对于推断致伤物仍然具有现实意义。

综上所述,利用头颅有限元模型对头部受到外力冲击作用进行应力、应变等力学参数的计算和模拟,为法医学颅脑损伤的成伤机制研究提供了新的研究工具^[36-37]。本文所测极限载荷、极限载荷作用下形变与压缩强度,为头颅有限元模型的建立和完善提供数据参考。同时,不同接触面积致伤物导致颅骨骨折产生的生物力学响应分析,为法医病理学致伤物推断提供参考依据。

4 结论

接触面积与家兔颅骨骨折极限载荷呈正相关,与压缩强度呈负相关,与极限载荷作用下形变不存在相关性,且各力学参数与是否去除头皮无关。

参考文献:

[1] CHEN Y. Current state and progress of research on forensic biomechanics in China [J]. Forensic Sci Res,

2021, 6(1): 1-12.

- [2] 李明杰,王杰,夏冰,等.大鼠头皮组织形态和生物力学参数的增龄性变化[J].贵州医科大学学报,2020,45(4):402-407.
- [3] 张丙淑,随力.颅脑有限元模型的研究进展及应用[J].医用生物力学,2017,32(6):559-565.
- ZHANG BS, SUI L. Research progress and application of head finite element model [J]. J Med Biomech, 2017, 32(6): 559-565.
- [4] CAI Z, HUANG X, XIA Y, *et al.* Study on behind helmet blunt trauma caused by high-speed bullet [J]. Appl Bionics Biomech, 2020, 2020: 2348064.
- [5] FALLAND-CHEUNG L, SCHOLZE M, LOZANO PF, *et al.* Mechanical properties of the human scalp in tension [J]. J Mech Behav Biomed Mater, 2018, 84: 188-197.
- [6] TROTTA A, NÍ ANNAIDH A. Mechanical characterisation of human and porcine scalp tissue at dynamic strain rates [J]. J Mech Behav Biomed Mater, 2019, 100: 103381.
- [7] LI X, SANDLER H, KLEIVEN S. The importance of nonlinear tissue modelling in finite element simulations of infant head impacts [J]. Biomech Model Mechanobiol, 2017, 16(3): 823-840.
- [8] 王晓红,宋大勇,董骧,等.膝关节假体股胫接触面积的影响因素[J].医用生物力学,2019,34(6):594-600.
- WANG XH, SONG DY, DONG X, *et al.* Influencing factors of femoro-tibial contact area for knee prostheses [J]. J Med Biomech, 2019, 34(6): 594-600.
- [9] KHALIL TB, GOLDSMITH W, SACKMAN JL. Impact on a model head-helmet system [J]. Int J Mech Sci, 1974, 16(9): 609-625.
- [10] 陈兴武,王慧君,赵卫东,等.人头部力锤冲击试验的生物力学研究[J].中国临床解剖学杂志,2005,23(3):298-302.
- [11] 楼旭鹏,刘江金,苟吉,等.高坠伤骨折分布及颅骨骨折类型分析[J].中国司法鉴定,2016,88(5):41-44.
- [12] 从斌,官大威,王振原,等.法医病理学(第5版)(供法医学类专业用)[M].北京:人民卫生出版社,2016:160-161.
- [13] 王跃秀,梁绪红,徐敬东.家兔常用麻醉方法及药物的选择与应用[J].继续医学教育,2019,33(7):120-122.
- [14] 李阳,雷伟,王征,等.生物玻璃和壳聚糖改性的多孔活性骨水泥体内实验研究[J].中国修复重建外科杂志,2013,27(3):320-325.
- [15] 李钦亮,马迅,陈维毅,等.颈椎姿势及椎间盘水化状态对颈椎运动单位整体压缩强度影响——体外力学分析[J].医用生物力学,2006,21(2):138-141.
- LI QL, MA X, CHEN WY, *et al.* Effect of cervical spinal column posture and hydration on compressive strength——Biomechanical study *in vitro* [J]. J Med Biomech, 2006, 21(2): 138-141.

- [16] SERVER EA, ALKAN Z, YIGIT O, *et al.* Biomechanical strength of glass ionomer cement in incudostapedial rebridging [J]. *J Laryngol Otol*, 2015, 129(2): 148-154.
- [17] TROTTA A, NÍ ANNAIDH A, BUREK RO, *et al.* Evaluation of the head-helmet sliding properties in an impact test [J]. *J Biomech*, 2018, 75: 28-34.
- [18] DENDORFER S, MAIER HJ, HAMMER J. Deformation behaviour of bovine cancellous bone [J]. *Technol Health Care*, 2006, 14(6): 549-56.
- [19] 吴新丰, 康国政, 钱林茂. 猪背部皮肤生物力学特性的实验研究 [C]//四川省力学学会 2008 年学术大会. 成都: [s.n.], 2008.
- [20] DESAI SC, SAND JP, SHARON JD, *et al.* Scalp reconstruction: An algorithmic approach and systematic review [J]. *JAMA Facial Plast Surg*, 2015, 17(1): 56-66.
- [21] 喻永敏, 刘振江, 李奎, 等. 颅脑钝性损伤的生物力学研究进展 [J]. *重庆医学*, 2015, 44(15): 2142-2145.
- [22] LEAR W, BLATTNER CM, MUSTOE TA, *et al.* *In vivo* stress relaxation of human scalp [J]. *J Mech Behav Biomed Mater*, 2019, 97: 85-89.
- [23] MOUW JK, OU G, WEAVER VM. Extracellular matrix assembly: A multiscale deconstruction [J]. *Nat Rev Mol Cell Biol*, 2014, 15(12): 771-785.
- [24] BURLA F, DUSSI S, MARTINEZ-TORRES C, *et al.* Connectivity and plasticity determine collagen network fracture [J]. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 2020, 117(15): 8326-8334.
- [25] GURDJIAN ES. Recent advances in the study of the mechanism of impact injury of the head-A summary [J]. *Clin Neurosurg*, 1972, 19: 1-42.
- [26] ANTONIA T, DIMITRIS Z, GUIDO DB, *et al.* The importance of the scalp in head impact kinematics [J]. *Ann Biomed Eng*, 2018, 46(6): 831-840.
- [27] 段喜华. 由损伤特点推断致伤物 [J]. *河南公安高等专科学校学报*, 2006, 15(2): 106.
- [28] 陈兴武. 人头部力锤试验的生物力学研究及有限元模型的建立 [D]. 广州: 第一军医大学, 2004.
- [29] 陈旺根, 汪枫. 146 例体表损伤类型与致伤物分析 [J]. *法医学杂志*, 2009, 25(2): 127-129.
- [30] 李新奇, 汪隽, 靳永胜, 等. 螺丝刀刺击头部致颅脑损伤的法医学分析 [J]. *刑事技术*, 2014, 39(4): 50-51.
- [31] 马祥涛, 李上勋, 刘丹, 等. 颅脑贯通伤致伤工具推断 1 例 [J]. *法医学杂志*, 2010, 26(2): 151-152.
- [32] BAILEY S, VASHISHTH D. Mechanical characterization of bone: State of the art in experimental approaches-what types of experiments do people do and how does one interpret the results? [J]. *Curr Osteoporos Rep*, 2018, 16(4): 423-433.
- [33] KAMAL S, HASHEMI A. Design and fabrication of a drop tower testing apparatus to investigate the impact behavior of spinal motion segments [J]. *Arch Bone Jt Surg*, 2020, 8(6): 682-688.
- [34] BLACKBURNE WB, WADDELL JN, SWAIN MV, *et al.* Biomechanical investigation of impact induced rib fractures of a porcine infant surrogate model [J]. *J Mech Behav Biomed Mater*, 2016, 62: 588-598.
- [35] ZHAI X, Nauman EA, Moryl D, *et al.* The effects of loading-direction and strain-rate on the mechanical behaviors of human frontal skull bone [J]. *J Mech Behav Biomed Mater*, 2020, 103: 103597.
- [36] 汪家文. 头颅钝性撞击伤的生物力学机制研究 [D]. 广州: 南方医科大学, 2015.
- [37] 汪家文, 黄江, 李正东, 等. 儿童颅脑损伤生物力学研究进展 [J]. *法医学杂志*, 2016, 32(6): 448-451.