

中国人体胫骨尺寸特征及力学特性试验方法研究

明星宇¹, 鲁爽¹, 蒋成约², 祁志楠¹, 曾焯²

(1.中国汽车技术研究中心, 天津市 300300; 2.重庆理工大学, 重庆市 400050)

[摘要]: 下肢损伤是汽车碰撞安全研究的重要部分, 建立符合中国人体实际尺寸特征和生物力学特性的下肢骨仿真模型十分重要。本文结合我国相关标准, 通过志愿者下肢体 CT 扫描和逆向建模测得满足中国 50 分位成年男性的胫骨尺寸, 得出现广泛用于碰撞安全研究的假人模型不符合中国人体下肢体尺寸的结论; 结合国内外相关试验方法及其试验结果, 进行猪股骨的力学试验, 试验结果验证了胫骨力学特性试验方法的可行性, 为后期进行真实人体胫骨试验打下了基础。

关键词: 胫骨, 尺寸特征, 逆向建模, 生物力学, 力学特性

Study on Size Characteristics and Mechanical Properties Testing Methods of Chinese Tibia

MING Xingyu¹, LU Shuang¹, JIANG Chengyue², QI Zhinan¹, ZENG Xuan²

(1.China Automotive Technology and Research Center, Tianjin, 300300, 2.Chongqing University of Technology, Chongqing, 400050)

[Abstract] The low extremity injury is an important part of automotive crash safety research. It's quite necessary to establish a low extremely model which accord with China's human body size characteristics and the crash biomechanics. Combining with the relevant standards of China, get suitable tibia size of China's adult male 50 percentile by reverse modeling. Conclude that the existing dummy model is not in conformity with the China's human body size. According to the relevant mechanical test method and result, the femur of pigs mechanical test, the test results show that the test method is feasible, and build foundation for the real human test.

Keywords: tibia, size characteristics, reverse modeling, biomechanics, mechanical property

1 引言

在车辆碰撞事故中, 行人和车辆的直接接触且缺乏相关保护, 容易造成胫骨骨折; 车内乘员下肢的约束相对较少, 且碰撞中仪表板、踏板、地板等多重冲击, 可造成骨盆、股骨、胫骨、腓骨等部位的骨折和膝关节、踝关节等部位的软组织损伤。在实际碰撞事故造成的损伤中, 下肢受到中等及以上 (AIS 2+) 损伤的风险超过头、胸部等人体其他部位^[1, 2]。

车辆碰撞中人体损伤生物力学研究对象包括生物模型、机械模型和数学模型。生物模型作为研究人体碰撞损伤最直接有效的方法, 包括人类志愿者、尸体和动物替代模型。由于人体骨骼试样不易获取, 动物骨骼广泛被应用于人骨的替代品: 文献 3 中以牛股骨为研究对象, 通过三点弯曲试验得出防腐保对骨骼力学性能的影响; 文献 4 中利用猪骨进行动态三点弯曲试验, 研究高速碰撞下长骨的耐受限度。碰撞试验中使用最广泛的假人是以北美人体为参照基准的 Hybrid III 系列假人, 在碰撞模拟仿真中以美国人体为基准建立的有限元模型 THUMS 有限元模型被广泛使用。

目前, 我国在碰撞安全试验和计算机仿真中主要使用欧美等国家的试验假人和数值假人, 其人体尺寸特征、耐受限度等不能完全真实的反映我国人体的实际情况。我国已有多家机构已开展关于人体下肢骨损伤的研究并取得一定成果, 文献 5 中利用下肢解剖学结构和 LS-DYNA 数据库的材料参数, 建立了下肢的有限元仿真模型。

文献 6 中利用扫描人体下肢尺寸和 THUMS 的人体材料属性，建立了下肢长骨有限元仿真模型。现有人体尺寸标准年代久远，且研究中针对中国人体下肢的材料力学性能的数据不足，故需要进一步进行骨骼采样和骨骼试验获取下肢骨力学特性。

2 中国人体胫骨模型建立

2.1 胫骨 CAD 模型建立

我国现有关于成年人人体尺寸标准为《GB/T 10000-1988 中国成年人人体尺寸》，该标准于 1988 年颁布，由于统计数据较久远，不能准确反映当今中国成年人人体尺寸。2009 年，中国标准化研究院以 3000 人为样本容量，得到了 18-70 岁的中国人体尺寸测量结果。中国男性成年人 50 分位人体部分尺寸测量数据如表 1 所示。

表 1 中国男性成年人 50 分位尺寸数据

	身高/cm	体重/kg	胸围/cm	腰围/cm	臀围/cm	肩峰宽/cm
1988 年国家标准数据	167.80	59.0	86.7	73.5	87.5	37.5
2009 年标准化研究院数据	169.25	64.5	93.2	81.3	93.2	38.53

以中国标准化研究院的测量结果中身高、体重、胸围、腰围、臀围、肩峰宽为重要考虑依据，选取 50 分位健康男性志愿者进行下肢体 CT 扫描。应用医学图像处理软件 Mimics，通过阈值分割方法，从 CT 扫描文件中提取下肢体各部位的点云数据，利用逆向软件 geomagic studio 根据提取的点云数据建立下肢骨的三维几何模型，其中胫骨几何模型如图 1 所示。

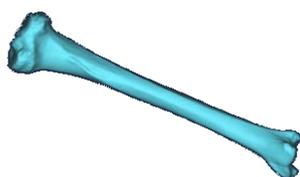


图 1 胫骨几何模型

2.2 胫骨尺寸参数

根据志愿者的胫骨的几何模型和 50 分位的 THUMS 假人，以胫骨的整骨长(L)、骨干长(I)和远心端(A)1/3、中间(B)、近心端(C)1/3 处的胫骨截面积等 8 项尺寸参数为特征尺寸进行测量，测量方法和测量结果如图 2 和表 2 (表 2 中截面积项(A₂)、(B₂)、(C₂)分别为除去骨髓腔面积的近心端 1/3、中间、远心端 1/3 处胫骨截面积) 所示。测量结果显示，符合中国成年男性 50 分位要求的志愿者胫骨特征数据与以北美成年男性 50 分位为基准的 THUMS 假人特征数据有明显差异。现广泛使用的以北美人体尺寸参数的假人模型并不符合中国人体下肢体尺寸要求。

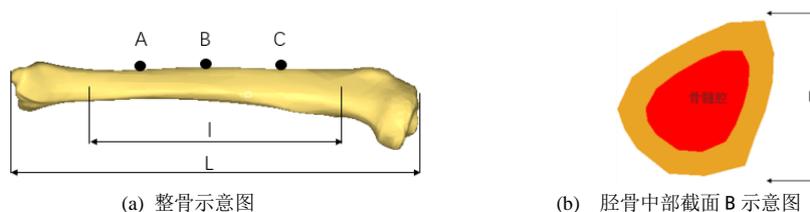


图 2 胫骨测量参数

表 2 胫骨特征尺寸

	L/mm	l/mm	A ₁ (A ₂)/mm ²	B ₁ (B ₂)/mm ²	C ₁ (C ₂)/mm ²
志愿者数据	343.4	266.8	437.1(253.5)	476.1(274.3)	683.3(340.9)
50 分位 THUMS 假人	398.1	272.6	316.6(226.9)	369.1(278.3)	660.2(316.8)
尺寸差异	13.7%	2.2%	27.5%(10.4%)	22.4%(1.4%)	3.4%(7.1%)

3 胫骨力学特性试验方法研究

骨是由胶原纤维和羟磷灰石组成的复合材料，其力学性能与复合材料的组分含量及构造相关，是一种非均质、各项异性、非线性粘弹性材料。骨的力学性能受年龄、健康状况、性别、骨密度、解剖部位等内在因素的影响，测试结果也受保存条件、应力模式、加载方向、加载速率、试样尺寸的影响。整骨的耐受限度主要通过模拟致伤条件对整骨进行弯曲试验获得，建立有限元材料模型则通过测试取自特定位置的规则试件的材料力学性能获得，并以整骨测试结果作为验证。

为获得行之有效的骨骼力学性能试验方法，得到更准确的骨骼力学性能，国内外进行了大量的试验：文献 7 中介绍了骨骼试件的保存方法、试件制备方法、试件尺寸测量方法等，为骨骼试件的拉伸、压缩、三点弯曲、四点弯曲、扭转试验等的试验和测试方法提供了指导。文献 8 中测试了经冰冻、防腐的股骨头在不同应变率（生理学范围内）下的力学性能，并通过 14 个应变片的载荷-位移曲线测得单轴载荷下股骨头各部位的应力应变均独立成线性分布。文献 9 中利用低能摆锤撞击猪股骨，研究碰撞方向和轴向载荷对骨折的影响。文献 10 中选取了不同年龄段的儿童长骨进行三点弯曲试验，分析年龄和性别对儿童长骨抗弯曲能力的影响。文献 11 中分别以男性胫骨密质骨试件，利用 11 组轴向拉伸试验和 9 组压缩试验，得出加载速度的变化对胫骨密质骨失效力没有明显影响，且抗拉强度和抗压强度的比值为 1.08 至 1.36。文献 12 中利用 20 个不同部位的杆状牛长骨试件，研究解剖部位对骨骼力学性能的影响。

为确定试验设备和试验方法可行，现进行了猪股骨的整骨三点弯曲试验和股骨试件的压缩试验。

3.1 三点弯曲试验

猪骨相较于人骨便于获取且易于保存，且在猪的生长期和成熟期，其生理学状态和人存在很多相似性^[3]。故以猪股骨骨骼作为替代进行力学试验。

如图 3 (a) 所示试验设备为 Istron 5969 电子万能材料试验机。试验所用猪股骨以 -20℃ 进行保存，试验前对骨骼解冻，并剔除股骨表面骨膜，三点弯曲试验方法如图 3 (b) 所示，可移动试验台架分别支撑股骨的近心端和远心端且相距 83mm，在骨两端支撑位置的中部以 1mm/min 的速度进行静态加载。试验结果如图 4 所示，试验的应力应变曲线在弹性范围成线性增加，骨骼断裂痕迹沿加载面斜向，试验结果与国外相关试验相似，验证了试验条件和试验方法等合理。

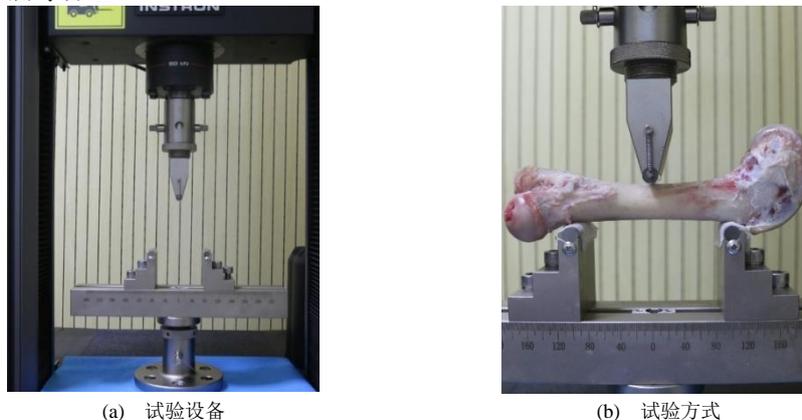


图 3 三点弯曲试验

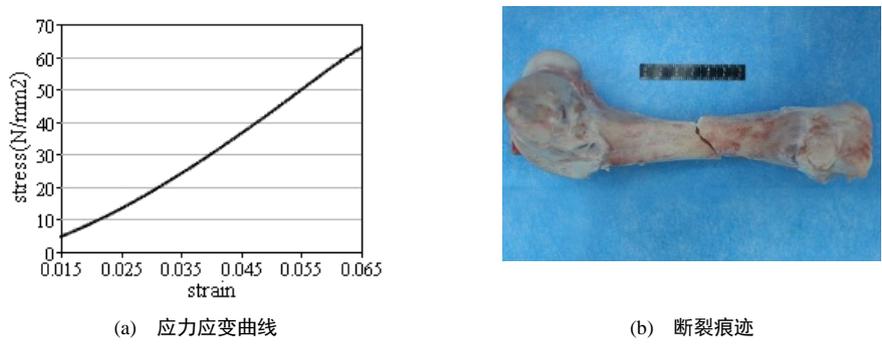


图4 三点弯曲试验结果

3.2 试件压缩试验

试验设备同为 Istron 5969 电子万能材料试验机，试验所用猪股骨以-20℃进行保存并于试验前解冻，屠宰至试验时间间隔不超过 72h。用切割刀片将骨干中间部位切割成长方体试件，其长宽高分别为 7.9mm、5.3mm、10.1mm。以 1mm/min 的速度沿试件轴向进行端帽法静态加载。试验结果如图 5 所示，压缩试验的应力应变曲线在弹性范围成线性增加，骨骼断裂痕迹沿加载方向斜向下，试验结果趋势与国外相关试验相似，验证了试验条件、试验方法等的合理性。

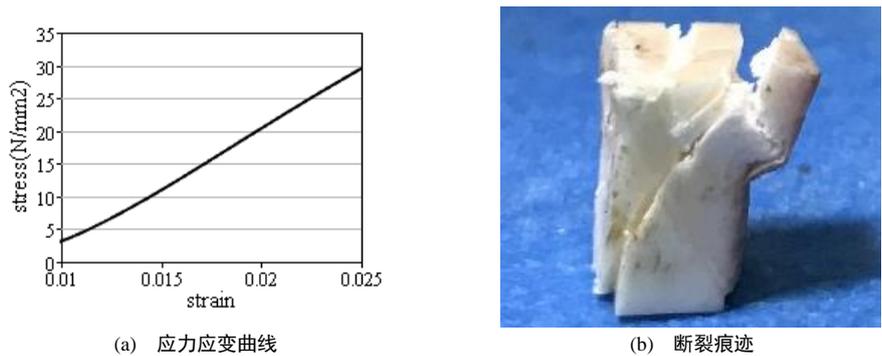


图5 试件压缩试验结果

4 结论

为建立符合中国人体下肢体模型，本文依据中国标准化研究院的统计结果，根据中国成年男性 50 分位尺寸数据，选取了符合尺寸参数的志愿者。根据其下肢体扫描数据，建立了小腿胫骨的几何模型。通过志愿者胫骨尺寸和 50 分为 THUMS 假人尺寸对比，得出现今广泛使用的做被动安全开发的假人与中国人体胫骨尺寸相差过大的结论。有必要针对中国人体尺寸特点，开发相关碰撞用假人。

参考国内外的相关试验方法，以猪股骨代替人骨进行骨骼的三点弯曲试验及试样压缩力学试验，试验结果趋势与国外试验结果一致，证明了试验方法的可行，为后续真实人体胫骨力学特性试验提供了研究依据。

参考文献

- [1] Kuppa S, Fessahaie O. An overview of knee-thigh-hip injuries in frontal crashes in the United States[J]. The 18th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV).Nagoya, Japan, May 19-22, 2003.
- [2] Laituri TR, Henry S, Kaye S, et al. Derivation and theoretical assessment of a set of biomechanics-based, AIS2+ risk equations for the knee-thigh-hip complex[J]. Stapp Car Crash Journal, 2006. 50: 97-130.
- [3] 杨洁. 福尔马林防腐对牛股骨皮质骨生物力学性能的影响研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2016.

- [4] 张冠军. 行人下肢的碰撞损伤特性及相关参数研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2009.
- [5] 蒋小晴. 基于人体有限元模型的汽车前碰撞中驾驶员下肢损伤生物力学研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2014.
- [6] 吕方. 基于中国人体特征的下肢几何建模与长骨验证[D]. 北京: 清华大学, 2015.
- [7] Turner C H, Burr D B. Basic biomechanical measurements of bone: a tutorial. [J]. Bone, 1993, 14(4):595-608.
- [8] Juszczak M M, Cristofolini L, Viceconti M. The human proximal femur behaves linearly elastic up to failure under physiological loading conditions [J]. J BIOMECH, 2011,44(12):2259-66
- [9] Cohen H, Kugel C, May H, et al. The influence of impact direction and axial loading on the bone fracture pattern[J]. Forensic Science International, 2017.
- [10] 欧阳钧,朱青安,赵卫东,徐永清,陈炜生,钟世镇. 儿童四肢长骨的生物力学性质及其意义[J]. 中国临床解剖学杂志,2003,(06):620-623.
- [11] Kemper A, McNally C, Kennedy E, et al. THE MATERIAL PROPERTIES OF HUMAN TIBIA CORTICAL BONE IN TENSION AND COMPRESSION: IMPLICATIONS FOR THE TIBIA INDEX[J]. 2007.
- [12] Nobakhti S, Katsamenis O L, Zaarour N, et al. Elastic modulus varies along the bovine femur[J]. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2017, 71: 279-285.