

人体颞下颌关节盘拉伸力学特性研究

康 宏 易新竹 陈孟诗

摘要 通过对4具新鲜尸体的5个颞下颌关节盘共80个试件进行不同应变水平下的应力松弛试验和等应变速度下的拉伸破坏试验,测定了关节盘的横向拉伸力学性质,用拟线性粘弹性理论和二相理论对实验结果进行分析并建立了组织的本构方程。结果表明:关节盘的生理二相区在5%应变内;盘前带的横向拉伸强度、拉伸模量和破坏能量大于中间带和后带,中、后带差异不大;盘的应力松弛程度较低,初始应力松弛率在8%~15%左右。同时证明,在较低应变下可以用获取的本构方程模拟关节盘的流变学特性。

关键词 关节盘 拉伸力学 应力 应变 颞下颌关节

关节盘在人体颞下颌关节功能运动中,具有协调稳定关节、分散缓冲关节运动时产生的冲击力和剪切力,协助滑液扩散和储存的功能¹。软组织拉伸力学试验方法已成功地应用于颞下颌关节生物力学的动物实验研究^{2,3}。因此,获取有关关节盘生物力学参数及相关的本构方程,对颞下颌关节生理功能和病理过程的进一步研究十分有意义。

1 材料和方法

1.1 标本收集与试件制备

按参考文献4的方法制备试件共80个,密封后置-4℃冰箱内保存。

1.2 实验仪器及条件²

本实验在软组织单向拉伸及应力松弛试验机(Revere Co U SA U M P I-005-A)上进行,X-Y函数记录仪同步记录载荷-位移曲线和载荷-时间关系曲线。实验中用林格液滴注,保持试件湿润,实验在室温下(8~14℃)进行。

1.3 实验方法

1.3.1 预调 游标尺测试件原长,以应变速度为每分钟试件原长的10%将试件拉伸至4%的应变长度,同速卸载休息10min,预调3次即可。

1.3.2 应力松弛试验 使试件在0~0.25s内分别产生2%,3%,4%,6%的阶跃应变,保持应变100s,同步记录载荷时间关系曲线。

1.3.3 拉伸破坏试验 以0.05mm/s的应变速度将试件拉伸破坏,记录载荷-位移关系曲线。

1.4 数据处理

本研究应力计算 $\sigma = P/A_0$,即Lagrange应力。其中P为瞬时载荷,A₀为试件原始截面积,应变 $\epsilon = L/L_0$,L为试件伸长值,L₀为原长。转换各组的载荷-时间、载荷-位

移曲线为相应的应力-时间关系和应力-应变关系曲线。用Fung YC拟线性粘弹性理论对实验曲线进行拟合⁵,找出实测数据最佳分布趋势。用方差分析方法进行各组之间的比较判断。

2 结 果

2.1 关节盘不同区域的应力-时间特性

关节盘与其它生物组织一样存在明显的粘弹性,应力松弛主要发生在最初的数秒钟内,各带的初始应力松弛率并不一致,经过一定时间后逐渐接近(表1)。

在同一阶跃应变下,盘各带的瞬时弹性响应对应变高度敏感,呈明显的非线性关系,应变增加,弹性响应急剧增大(表2)。

表1 关节盘各带的应力松弛率($\bar{x} \pm s, \%$)

时间(s)	前带	中带	后带
1	15.30 ± 7.08	12.54 ± 10.32	8.41 ± 8.18
100	30.36 ± 3.59	30.37 ± 5.56	24.92 ± 6.30

表2 关节盘各带的瞬时弹性响应(MPa)

应变(ϵ)	前带 (n=29)	中带 (n=27)	后带 (n=24)
0.02	0.067	0.035	0.042
0.03	0.075	0.057	0.061
0.04	0.151	0.107	0.113
0.06	0.300	0.225	0.324

2.2 关节盘各带的应力-应变特性

国家自然科学基金资助项目(编号:39270725)

作者单位:610041 华西医科大学口腔医学院(康宏,易新竹),四川联合大学工程力学系(陈孟诗)

关节盘各带的拉伸刚度略有差异, 盘前带大于中、后带, 中、后带差异不明显。拉伸应力在 5% 应变内改变较小, 属于曲线的“坡脚区”, 在 6% ~ 11% 应变段, 拉伸应力随应变增大而增大(图 1)。关节盘各带的物质参数见表 3。

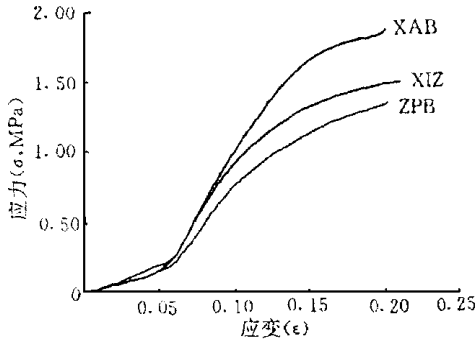


图 1 关节盘各带的应力-应变曲线

XAB, XIZ, XPB 分别表示前带、中带、后带拉伸试件断裂, 坡脚区应变范围在 5% 以内

表 3 关节盘各带的物质参数 ($\bar{x} \pm s$)

物质参数	前带 (n= 29)	中间带 (n= 27)	后带 (n= 24)
破坏应力(MPa)	1.85 ± 1.38	1.53 ± 0.77	1.35 ± 0.90
破坏应变(%)	21.05 ± 6.70	22.46 ± 6.65	21.78 ± 7.49
拉伸刚度(MPa)	13.65 ± 10.42	10.40 ± 5.86	9.04 ± 5.67
破坏能量(N·mm)	0.86 ± 1.05	0.67 ± 0.42	0.42 ± 0.27

2.3 理论分析

用 Fung YC 拟线性粘弹性理论对应力松弛和应力应变实验结果进行曲线拟合, 得出关节盘在短时间内及小应变范围下的 2 个本构方程式:

$$G(t) = 0.925477 - 0.037886 Lnt \text{ 与 } \sigma = 0.8760 \exp(3.9976\epsilon) - 1。$$

在较小的应变范围及较短时间内, 两者拟合效果较好。典型的应力松弛曲线和应力-应变曲线的理论值与实验值比较见图 2, 3。

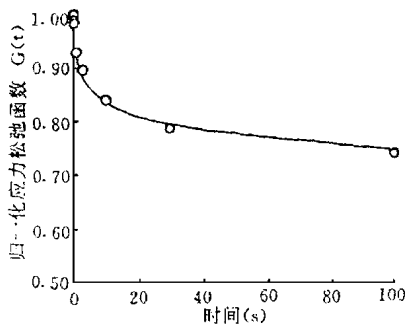


图 2 2% 应变下关节盘前带应力松弛理论值和实验结果比较
——理论值, 实验值, 下同

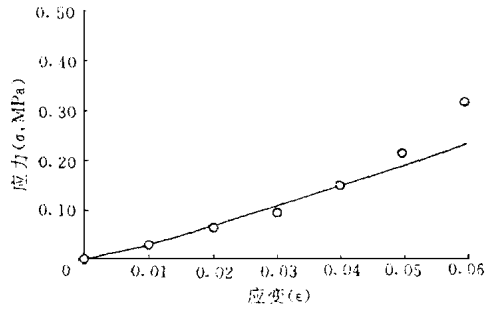


图 3 关节盘前带应力-应变关系理论值和实验结果比较
4% 应变内吻合较好

3 讨 论

3.1 关节盘不同区域的应力-时间特性

应力松弛是生物软组织粘弹性的重要特征, 应用应力松弛实验可以研究这些特征的某些方面。关节盘有一定的应力松弛但较低, 说明关节盘既有分散应力的作用, 又能维持一定的张力保持关节的稳定。按关节软骨二相理论观点⁶, 组织在受到拉伸或压缩载荷时, 内部产生应力分布, 随着大量间隙液流出, 固体基质变形, 组织内应力逐渐松弛并达到平衡。在应力松弛的初始阶段, 关节盘各带的松弛特性略有差异, 前带略高于中带和后带, 可能与蛋白多糖的种类分布和水含量不同有关, 但目前尚缺乏有关人体颞颌关节盘生化分析的定量资料说明其具体机制, 从生物力学角度考虑, 前带的初始应力松弛略高更有利于盘前带承受和分散翼外肌上头的拉伸应力。

软组织的瞬时弹性响应取决于固体基质本身的特性以及间隙液与固体基质的相互作用两个因素^{6,7}, 瞬时弹性响应敏感并呈高度非线性反映出组织的低渗透性, 关节盘的这种低渗性特征使其更有利于承受压缩及剪切载荷。

3.2 关节盘不同区域的应力-应变特性

关节盘的应力应变同其它胶原类软组织的力学特性一样, 呈典型的 S 型曲线, 在低应变范围 (2% ~ 5%), 较小的应力增加产生相对大的应变, 表现为应力应变曲线的初始段, 即坡脚区, 代表了组织正常功能活动时应力应变变化的生理范围⁵。在此范围内, 大部分胶原排列成波浪状并未被拉直, 胶原与蛋白多糖基质和间隙液相互作用, 共同承受应力应变而不引起组织损伤。随着应变增加, 胶原纤维被拉直, 盘组织的拉伸刚度迅速增加, 较

小的应变增加即可产生很大的应力增量,组织开始变形甚至破坏。

由于胶原的排列取向是决定组织拉伸强度和刚度的主要因素^{8,9},盘前带的拉伸强度、拉伸刚度和破坏能量大于中、后带,说明前带承受横向拉伸的能力较强,而中、后带抗横向拉伸的能力差异不大。但盘各带的破坏应变相近是否与盘内胶原与弹性蛋白比率、蛋白多糖含量及其各成分之间的相互作用有关尚待进一步研究。

理论分析表明,在小应变下可以用拟线性粘弹性理论来模拟关节盘的应力松弛特性和应力应变关系,用于比较和研究正常、病变、修复或增龄状态下关节盘组织对外界载荷的反应。

4 参考文献

- 1 徐樱华主编 实用 学 成都:四川大学出版社,1990:73
- 2 Shengyi T, Yinghua X, Mengshi C, et al Biomechanical properties and collagen fibers orientation of the temporomandibular joint discs in dogs Part 2 Tensile mechanical properties of the disc J Cranio and ib Disord Facial Oral

Pain, 1991, 5: 107

- 3 黄 钦,徐樱华 狗颞下颌韧带及关节囊拉伸力学性能比较 华西口腔医学杂志,1993,11:96
- 4 康 宏,易新竹,李晓箐,等 人体颞下颌关节盘内部胶原构筑与力学性能关系研究 华西口腔医学杂志,1998,16:251
- 5 冯元桢主编 生物力学 北京:科学技术出版社,1983:124
- 6 Mow VC, Kuei SC, Lai WM, et al Biphasic creep and stress relaxation of articular cartilage in compression: theory and experiments ASME J Biomech Engng, 1980, 102: 73
- 7 Woo SLY, Simon BR, Kuei SC, et al Quasi-linear viscoelastic properties of normal articular cartilage ASME J Biomech Engng, 1980, 102: 85
- 8 Teng SY, Xu YH. Biomechanical properties and collagen fiber orientation of TMJ discs in dogs Part I Gross anatomy and collagen fiber orientation of the discs J Cranio and ib Disord Facial Oral Pain, 1991, 5: 28
- 9 Mills DK, Fiandaca DJ, Scapino RP. Morphologic, microscopic, and immunohistochemical investigations into the function of the primate TMJ disc J Orofac Pain, 1994, 8: 136

(1997- 10- 15 收稿)

A Study of Tensile Mechanical Property of Human Temporomandibular Joint Disc

Kang Hong, Yi Xinzhu

College of Stomatology, West China University of Medical Sciences

Chen Mengshi

Department of Civil Engineering and Applied Mechanics, Sichuan Union University

Abstract

Eighty specimens taken from five TMJ discs of four fresh human cadavers were examined by a group of uniaxial tensile tests including stress relaxation at different strain rates (2%, 3%, 4%, 6%) and tensile fracture test under 0.05mm/s constant strain rate. The results were analyzed in conjunction with the Quasi-Linear Viscoelastic Theory as proposed by Fung YC and the Biphasic Theory. The results showed: The physiological strain was within 5%. The transverse tensile strength, tensile modulus and fracture energy of the anterior band were higher than that of the intermediate zone (IZ) and posterior band (PB), there were no differences between IZ and PB. The disc had low stress relaxation, whose initial stress relaxation rate was about 8% ~ 15%. The results above suggest that the Quasi-Linear Viscoelastic Theory may modelize and characterize the constitutive relation of the disc within small strain rates.

Key words: articular disc tensile mechanics stress strain temporomandibular joint