

文章编号:1004-7220(2012)03-0344-07

PVA /HA 复合水凝胶力学性能分析及有限元模拟

戴祖明, 张德坤, 陈 凯

(中国矿业大学 材料科学与工程学院, 徐州 221116)

摘要: **目的** 通过实验与有限元模拟对羟基磷灰石(HA)改变聚乙烯醇/羟基磷灰石(PVA/HA)复合水凝胶的力学性能本质及其承载特性进行研究。**方法** 在 UMT 试验机上进行 PVA/HA 复合水凝胶的压缩及应力松弛实验。通过模拟与实验结果相结合,研究 PVA/HA 复合水凝胶的承载特性及 HA 对其性能的影响。**结果** 随着 HA 含量的增加,PVA/HA 复合水凝胶的压缩模量先增大后减小,而渗透系数先减小后增大;HA 含量为 3% 的 PVA/HA 复合水凝胶压缩模量最大、渗透系数最小,分别为 1.25 MPa 和 $1.59 \times 10^{-3} \text{ mm}^4 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。PVA/HA 复合水凝胶的液体承载比例随着施载时间的增加呈现先增加后减小的非线性变化,加入 HA 的 PVA/HA 复合水凝胶的液体承载比例明显增加。应力松弛速率随着 HA 含量增加呈先上升后下降趋势,下压相同位移 HA 含量为 3% 时,PVA/HA 复合水凝胶所能分散的应力更多。**结论** PVA/HA 复合水凝胶内部的承载特性影响着其力学性能,HA 含量为 3% 时的 PVA/HA 复合水凝胶力学性能最优,更接近于天然关节软骨的力学性能。

关键词: PVA/HA 复合水凝胶; 有限元分析; 力学特性; 承载特性

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

Mechanical property analysis of PVA/HA composite hydrogel and its finite element simulation

DAI Zu-ming, ZHANG De-kun, CHEN Kai (College of Materials Science and Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: Objective To study the effect from the content change in hydroxyapatite (HA) on mechanical properties of polyvinyl alcohol/hydroxyapatite (PVA/HA) composite hydrogel and its load bearing characteristics based on experiment and finite element simulation. **Methods** The compression and stress relaxation tests of PVA/HA composite hydrogel were performed on the UMT test machine. Through the simulation and experimental results, the load – bearing characteristics of PVA/HA composite hydrogel and the effect of HA on PVA/HA composite hydrogel performance were investigated. **Results** With HA content increasing, the compression modulus of PVA/HA composite hydrogel was first increased and then decreased, while its permeability coefficient was first decreased and then increased. When the HA content was 3%, the compression modulus of PVA/HA composite hydrogel reached maximum (1.25 MPa) and its permeability coefficient reached minimum ($1.59 \times 10^{-3} \text{ mm}^4 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$). The fluid bearing proportion of PVA/HA composite hydrogel was first increased and then decreased with the loading time increasing, which presented a nonlinear change. The proportion of the fluid bearing was significantly increased after HA added into PVA / HA composite hydrogel. The stress relaxation rate was first increased and then decreased with HA content increasing. Under the same loaded displacement, PVA / HA composite hydrogel with 3% HA content could disperse more contact stress. **Conclusions** The internal bearing characteristics of PVA / HA composite hydrogel have a great impact on its mechanical properties. When the HA content is 3%, the PVA / HA composite hydrogel has the best mechanical properties, which are closer to those of the natural articular cartilage.

Key words: PVA/HA composite hydrogel; Finite element analysis; Mechanical properties; Load-bearing characteristics

收稿日期:2011-12-29; 修回日期:2012-02-16

基金项目:教育部高等学校博士学科点专项科研基金(20110095110001),中国矿业大学培育学科创新能力提升基金项目(2011XK07)。

通讯作者:张德坤,E-mail: dkzhang@cumt.edu.cn.

近年来,作为人工关节软骨替代材料的聚乙烯醇(PVA)水凝胶的研究日益增多^[1]。Oka等^[2]研究表明,PVA水凝胶在材料的润滑性生物相容性与缓冲能力方面明显优于超高分子量聚乙烯,但是其力学性能还存在一定缺陷;因此,很多研究工作者运用多种方法对其进行改性,以提高用于PVA水凝胶的力学性能和摩擦学性能。郑裕东等^[3]用溶胶-凝胶原位复合法制备了PVA/HA水凝胶,结果表明羟基磷灰石(HA)粉体的加入,复合水凝胶的结晶度和力学性能比基体试样均有大幅度提高。张德坤等^[4-6]研究了物理共混法制备的PVA/HA复合水凝胶的力学性能与摩擦磨损及其动态特性。PVA水凝胶是一种液固两相的网络状结构材料^[7],但对PVA水凝胶内部液体流动状况及其承载特性的研究较少,其相关研究主要是基于天然关节软骨的研究。Warner等^[8]利用ABAQUS中的CAX8RP单元分析关节软骨的承载机制,得到载荷会引起关节软骨表面的失效。Seifzadeh等^[9]利用圆柱压缩实验与有限元分析了软骨的弹性模量与渗透系数,结果显示,软骨的弹性模量与渗透系数与压头的直径成正比。Warner^[10]研究发现,软骨在受到载荷作用时,加载的力大部分由液体承受。但利用有限元方法分析PVA水凝胶内部液体流动及承载特性的相关报道较少。

本文基于天然关节软骨的承载特性及理论,通过实验测量PVA/HA复合水凝胶的压缩模量及应力松弛,并结合有限元模型模拟分析PVA/HA复合水凝胶受载荷后的承载特性及其内部液体流动的变化规律,研究不同HA含量对PVA/HA复合水凝胶力学性能和承载性能的影响规律。

1 材料和方法

1.1 实验材料的制备

按质量百分比将15% PVA(1 750 ± 50, 国药集团化学试剂有限公司)置于85%的去离子水中在室温下溶胀24 h,之后在95 °C的恒温水浴锅内搅拌溶解3 h,过程中称量补充去离子水保持质量不变,待PVA完全溶解后超声1 h排除气泡,倒入尼龙基体的模具中,之后于-20 °C的冷冻箱中冷冻解冻7次,冷冻时间6~12 h,室温下解冻时间2~3 h,制备得到PVA纯水凝胶。按质量百分比称量PVA15%、

HA3%(1%、2%、4%或5%),补充相应质量的去离子水,按PVA纯水凝胶的制备方法制备PVA/HA复合水凝胶,制备好的PVA/HA复合水凝胶置于去离子水中^[4]。HA购于南京埃普瑞纳米材料有限公司,粉末状,粒径20 nm,纯度98%,白度96。

1.2 PVA/HA 复合水凝胶的压缩弹性模量测量

采用平头圆柱压头测定材料的压缩弹性模量。在UMT试验机上完成,将试样在加载瞬间产生的线性变化视为压缩弹性模量,试样的厚度为2 mm,试样下压位移为材料厚度的10%,加载速度为84 μm/s,以得到的应力-应变作图,线性拟合得到的斜率视为压缩弹性模量^[11]。

1.3 PVA/HA 复合水凝胶的渗透系数测定

在自制的渗流实验装置上进行复合水凝胶渗流系数的测定。采用φ5 mm × 1.5 mm的PVA复合水凝胶圆片试样,毛细玻璃管的截面积为0.785 mm²,PVA复合水凝胶的实际流通面积为6.17 mm²,试验中采用的压强为0.5 MPa,外部压强为0.1 MPa,试验时间约为500 s。

1.4 PVA/HA 复合水凝胶的应力松弛特性测量

依据国家标准GB1685-82测量复合水凝胶的应力松弛特性,本实验在UMT试验机上完成,加载过程中先对试样加压,试样的厚度为2 mm,试样下压位移为PVA/HA复合水凝胶的5/8,加载速度为84 μm/s,然后保压,持续时间15 min^[11]。

1.5 PVA/HA 复合水凝胶的有限元数值模拟仿真

由于PVA水凝胶为两相多孔材料^[7],可以利用有限元ABAQUS中的Soil模型进行分析。PVA/HA复合水凝胶压缩模型结构具有对称性,故选取模型的1/2进行数值仿真分析,根据PVA/HA复合水凝胶与压头的尺寸,建立PVA/HA复合水凝胶压缩试验模型。

压头在试验中不会发生变形,可以视为是刚体,将φ8 mm的圆柱压头设为Analytical rigid。采用均匀网格划分方法对PVA/HA复合水凝胶划分网格,对2 mm厚的PVA/HA复合水凝胶划分为20个网格,对3.5 mm厚的基体划分为7个网格,在水平方向,10 mm半径的范围内划分为100个网格。因此,PVA/HA复合水凝胶划分为2 000(20 × 100)个4节点双线性位移、双线性孔隙压力缩减积分轴对称实体单元(CAX4RP),对应的PVA/HA复合水凝胶分

为700(7×100)个4节点双线性位移减缩积分轴对称实体单元(CAX4R),得到PVA/HA复合水凝胶压缩试验模型的网格模型(见图1)。

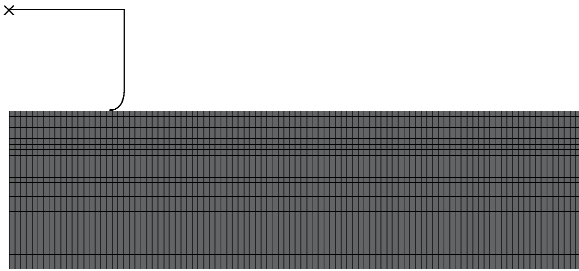


图1 PVA/HA复合水凝胶的压缩模型
Fig.1 Indentation model of the PVA/HA composite hydrogel

尼龙基体的弹性模量和泊松比分别是2 GPa和0.2,近似认为基体为刚体,在压缩过程中几乎不产生变形;基于PVA/HA复合水凝胶的两相多孔介质特性,PVA/HA复合水凝胶的泊松比设为0.45^[7],不同HA含量的PVA/HA复合水凝胶的含水量、孔隙比、弹性模量与渗透系数如表1所示。

表1 不同HA含量的PVA/HA复合水凝胶的性能参数
Tab.1 Performance parameters of PVA/HA composite hydrogel with different HA content

HA含量/%	含水量/%	孔隙比	压缩模量/MPa	渗透系数×10 ⁻³ /[mm ⁴ ·(N·s) ⁻¹]
0	85	5.67	0.86	4.11
1	84	5.25	1.05	2.72
2	83	4.88	1.13	2.44
3	82	4.56	1.25	1.59
4	81	4.26	1.04	2.33
5	80	4	0.92	3.38

为便于获得合适的变形量,设定PVA/HA复合水凝胶的边界条件:对称轴约束水平方向位移为0,底面约束水平方向位移、竖直方向位移、转动位移为0(即固定不动),压头约束水平方向位移、转动位移为0,PVA/HA复合水凝胶层周边区域的孔隙压力被设为0^[12-13],运用有限元进行数值仿真分析。

2 结果与分析

2.1 PVA/HA复合水凝胶力学性能参数

随着HA含量的增加,PVA/HA复合水凝胶的

压缩模量呈现先增加后减小的变化趋势;其中,HA含量为3%时,PVA/HA复合水凝胶压缩模量最大,为1.25 MPa。而随着HA含量的增加,PVA/HA复合水凝胶的渗透系数呈现先减小后增大的变化趋势;其中,HA含量为3%时,PVA/HA复合水凝胶渗透系数最小,为 $1.59 \times 10^{-3} \text{ mm}^4 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。由此可见,PVA/HA复合水凝胶压缩弹性模量与渗透系数成负相关(见表1)。

图2为模拟得到的不同HA含量PVA/HA复合水凝胶在加载速度为84 μm/s、加载时间为2.5 s时的应力-应变曲线。在2.5 s前,随着应变的增加,PVA/HA复合水凝胶的应力呈现线性增加;相同应变下,随着HA含量的增加,PVA/HA复合水凝胶的应力呈现先增加后减小的变化趋势。图3为模拟得到的不同HA含量PVA/HA复合水凝胶的液体流动速度图。结果表明,PVA/HA复合水凝胶的最大液体流动速度位于PVA/HA复合水凝胶与压头的接触边缘,随着HA含量的增加,PVA/HA复合水凝胶的液体流动速度呈现先减小后增大的变化趋势,这是由于HA的加入堵塞了PVA网络孔道,使得液体流动受阻,同时由于HA的凝聚作用^[14]改变了PVA网络结构,减弱了液体流动受阻作用,所以PVA/HA复合水凝胶的力学性能是由这两种作用共同决定的。在压缩模量和应力-应变曲线上体现为在10%应变下,压缩模量及应力呈先上升后下降的趋势。

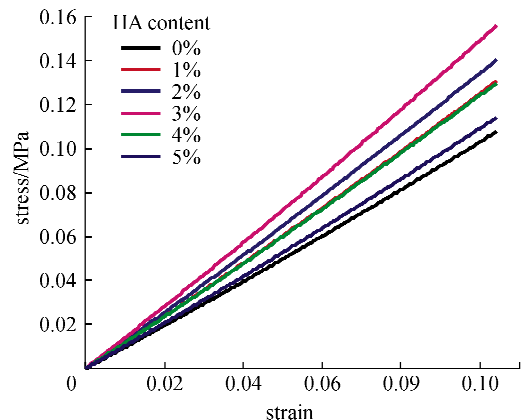


图2 不同HA含量的PVA/HA复合水凝胶的应力-应变曲线
Fig.2 Stress-strain curves of PVA/HA composite hydrogel with different HA content

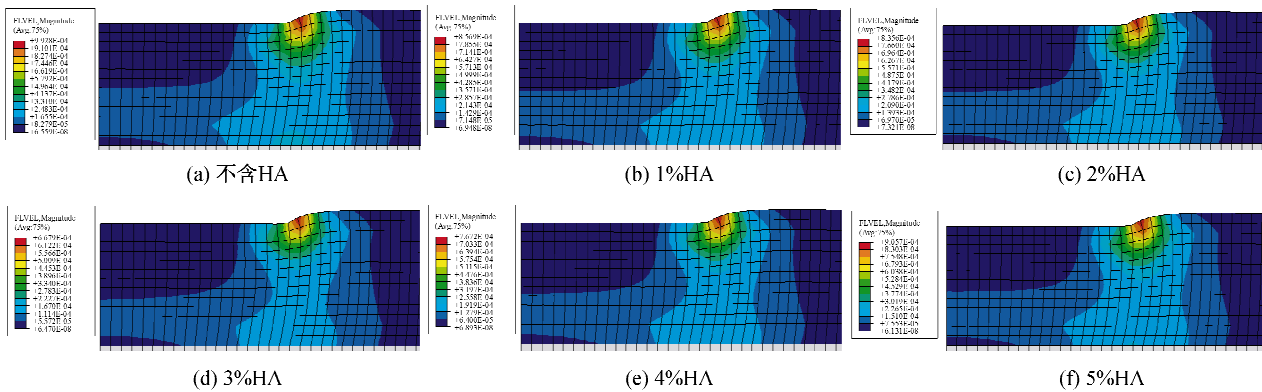


图3 不同 HA 含量的 PVA/HA 复合水凝胶的液体流动速度图
 Fig.3 Fluid flow speed of PVA/HA composite hydrogel with different HA content

2.2 PVA/HA 复合水凝胶内液体流动变化

图4为有限元模拟的不同加载时间下PVA/HA复合水凝胶内液体流动状况图。PVA/HA复合水凝胶内液体的流动随着加载时间发生了变化。图4(a)、(b)为下压过程中PVA/HA复合水凝胶内部液体流动,可以看出液体流量及流速随着时间增加而增加;PVA/HA复合水凝胶内液体流动分为4部分,在圆柱压头正下方,PVA/HA复合水凝胶上层,液体向着底部流动,PVA/HA复合水凝胶下层,液体向着表面流动;在圆柱压头外部,PVA/HA复合水凝胶上层,液体向着表面流动,PVA/HA复合水凝胶下层,液体向着底部流动;图4(c)、(d)、(e)、(f)为下压位移保持不变PVA/HA复合水凝胶内部液体流动。总体上,PVA/HA复合水凝胶内部的上下层相

反流向的趋势减弱并且逐渐趋于均一,即在PVA/HA复合水凝胶内部液体流向与压头接触面平行。压头中心PVA/HA复合水凝胶内部液体少量的向下流动,而在压头与PVA/HA复合水凝胶接触边缘,液体向着PVA/HA复合水凝胶表面流动。

2.3 PVA/HA 复合水凝胶的承载特性

图5为PVA/HA复合水凝胶在加载速度为84 μm/s、加载时间为2.5 s时的液体承载比例(孔隙压力与接触应力的比值定义为液体承载比例^[15])曲线。在加载2.5 s后,PVA/HA复合水凝胶的法向位移为0.21 mm;在受到载荷作用时,PVA/HA复合水凝胶内部液体压力急剧增加,液体承载比例也呈增长趋势可以达到73%;随后,PVA/HA复合水凝胶液体从组织渗出,液体承载比例随之逐渐降低,

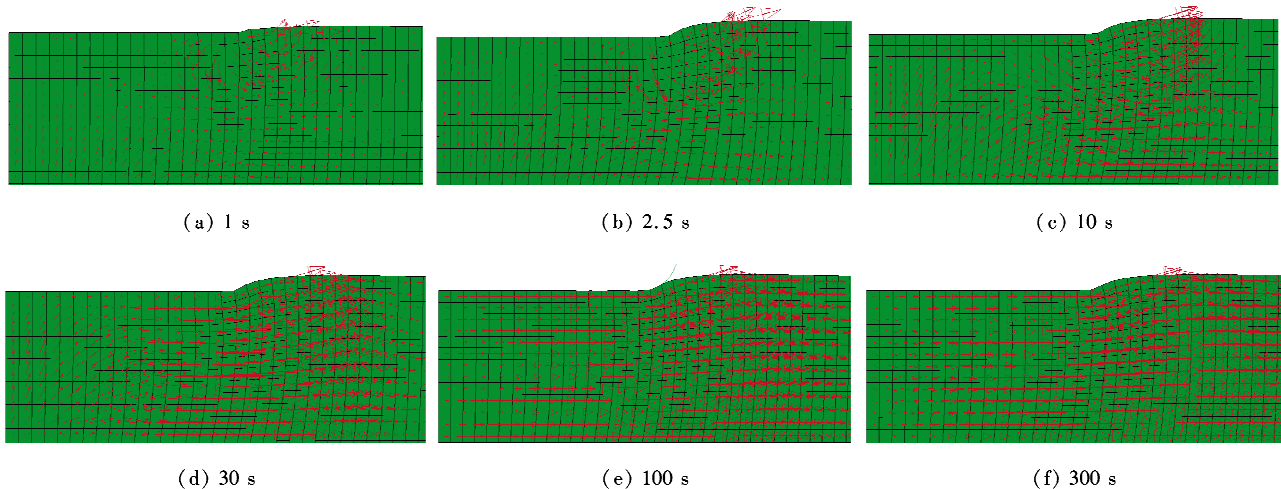


图4 不同加载时间下PVA/HA复合水凝胶内液体流动图
 Fig.4 Fluid flow of PVA/HA composite hydrogel at different loading time

达到一个平衡值(约为70%)。由此看出 PVA/HA 复合水凝胶在短时间受到载荷作用时,液体承载了绝大部分的载荷,起到了保护 PVA/HA 复合水凝胶的作用。

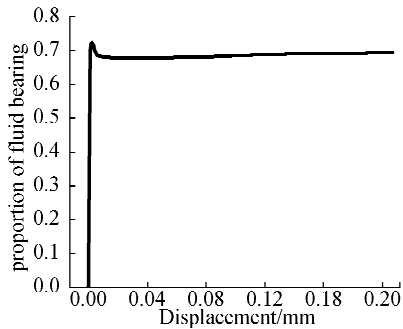


图5 PVA/HA 复合水凝胶的液体承载比例曲线
Fig.5 Fluid bearing proportion curve of PVA/HA composite hydrogel

图6为不同HA含量的PVA/HA复合水凝胶在加载位移为0.2 mm、加载时间为1 200 s时的液体承载比例曲线。PVA/HA复合水凝胶的液体承载比例随着时间的增加呈现先增加后减小的非线性变化,加入HA的PVA/HA复合水凝胶的液体承载比例明显高于纯水凝胶的液体承载比例;其中,HA含量为3%的PVA/HA复合水凝胶在加载1 200 s后的液体承载比例最高(约为44%)。

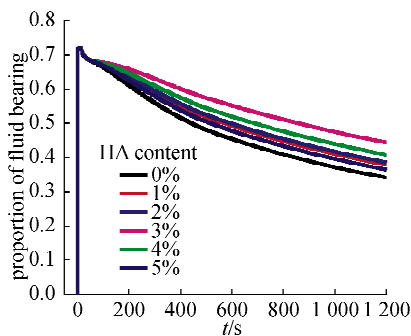


图6 不同HA含量的PVA/HA复合水凝胶的液体承载比例曲线
Fig.6 Fluid bearing proportion curves of PVA/HA composite hydrogel with different HA content

2.4 PVA/HA 复合水凝胶的应力松弛

图7为不同HA含量的PVA/HA复合水凝胶应力松弛曲线。PVA/HA复合水凝胶应力随着时间的增长呈现非线性减小,HA的加入提高了相同下压位移时PVA/HA复合水凝胶所能承受的应力,并且在

900 s时间内比纯PVA水凝胶分散更多的应力,而在松弛的初始阶段纯PVA水凝胶应力下降更快。图8为不同HA含量的PVA/HA复合水凝胶在应力松弛过程中的液体承载比例曲线。不同HA含量PVA/HA复合水凝胶液体承载比例随着时间的增长呈现非线性变化,加入HA后,PVA/HA复合水凝胶内部的液体承载能力增强,PVA/HA复合水凝胶内部的液体流动起到分散应力的作用。

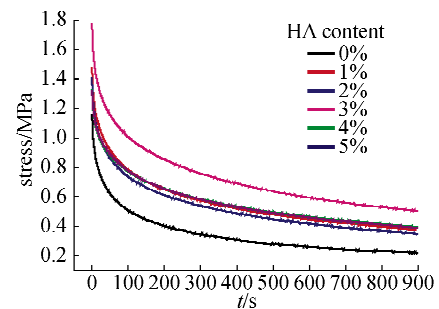


图7 不同HA含量的PVA/HA复合水凝胶应力松弛曲线
Fig.7 Stress relaxation curves of PVA/HA composite hydrogel with different HA content

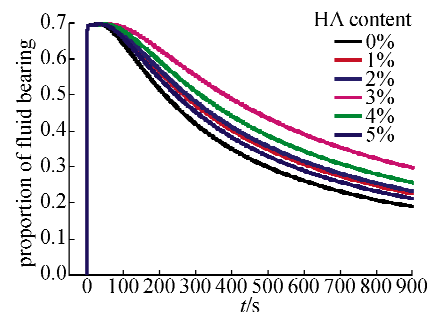


图8 应力松弛过程中不同HA含量PVA/HA复合水凝胶的液体承载比例曲线
Fig.8 Fluid bearing proportion curves of PVA/HA composite hydrogel with different HA content during stress relaxation process

3 讨论

对于天然软骨的弹性模量相关的报道很多,其数值随着软骨在人体部位的不同而改变;同时由于测定方法的差异,各研究者所测定的弹性模量值相差甚大。随着下压深度的变化,软骨的弹性模量呈现非线性的变化,下压位移低于10%时可认为软骨的弹性模量变化为线性变化。本研究中,PVA/HA复合水凝胶的压缩模量随着HA含量的增加呈先上升后下降的趋势,3%HA含量的PVA/HA复合水凝

胶的模量较大为1.25 MPa。Seifzadeh 等^[9]利用3 mm 直径压头进行压痕实验得到软骨的弹性模量约在1.2 MPa,而天然软骨的模量^[16]为1.9~14.4 MPa。PVA/HA 复合水凝胶中的液体流动影响着其力学性能,渗透系数为液体流动的一种表征方法,HA 在 PVA 网络结构中改变了网络结构同时也对网络通道有着堵塞的效应,这两种结果共同决定在水凝胶内部液体的流动。随着 HA 含量的增加,HA 会发生凝聚作用^[14],形成体积相对较大的颗粒。目前相关报道表明天然软骨的渗透系数在 $10^{-14} \sim 10^{-16} \text{ m}^4 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,其测定的结果变化亦较大,报道最多的渗流系数其数量级为 10^{-15} ^[17]。本研究中的 PVA/HA 复合水凝胶的渗透系数达到了作为天然软骨替代材料的要求。

利用有限元模拟 PVA/HA 复合水凝胶在受到载荷时内部液体流动发现,下压过程中 PVA/HA 复合水凝胶内部液体流量及流速随着时间增加而增加,液体流动分为4部分,PVA/HA 复合水凝胶上下层液体流动方向相反;在位移保持阶段,PVA/HA 复合水凝胶上下层相反流向的趋势减弱并且逐渐趋于均一,即内部液体流向与压头接触面平行。通过对 PVA/HA 复合水凝胶内部液体流动变动的研究可为凝胶类材料的改性提供依据。例如,在水凝胶的不同深度加入不同的增强相,来改变这种液体流动,从而达到制备分层水凝胶目的。

PVA/HA 复合水凝胶作为损伤软骨的替代材料已有大量研究报道,但是其有限元模拟的相关研究开展得并不多,尚未涉及利用有限元模拟 PVA/HA 复合水凝胶的承载特性来解释其力学性能。本研究利用 Abaqus 有限元模拟 PVA/HA 复合水凝胶的液体承载比来解释在其负荷时应力的变化,即用液体承载比来解释应力松弛作用。在加载初期,载荷主要是由 PVA/HA 复合水凝胶中液体承载;随着承载时间的增加,液体迅速在 PVA/HA 复合水凝胶内部重新分布,使内部的应力分散;达到平衡时,载荷主要由 PVA/HA 复合水凝胶中固相即 PVA 网络结构和 HA 承载。由于 HA 的加入,在 PVA 网络孔道内堵塞了孔道,使得液体流动受阻;同时又由于 HA 的凝聚形成相对较大的颗粒改变了 PVA 网络孔道,两种效应共同影响了水凝胶内的液体流动,最终导致了其力学性能的差异。

4 结论

(1) 随着 HA 含量的增加,PVA/HA 复合水凝胶的压缩模量呈现先上升后降低的趋势,而渗透系数呈现先减小后增大的变化趋势,HA 含量为3%的 PVA/HA 复合水凝胶压缩模量最大,渗透系数最小,分别为 1.25 MPa 和 $1.59 \times 10^{-3} \text{ mm}^4 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

(2) 下压过程中 PVA/HA 复合水凝胶内部液体流量及流速随着时间增加而增加,液体流动分为4部分,PVA/HA 复合水凝胶上下层液体流动方向相反;在位移保持阶段,PVA/HA 复合水凝胶上下层相反流向的趋势减弱并且逐渐趋于均一,即内部液体流向与压头接触面平行。

(3) PVA/HA 复合水凝胶的液体承载比例随着时间的增加呈现先增加后减小的非线性变化,加入 HA 的 PVA/HA 复合水凝胶的液体承载比例明显高于纯水凝胶的液体承载比例。

(4) 应力松弛速率随着 HA 含量增加呈先上升后下降趋势,下压相同位移时 HA 含量为3%的 PVA/HA 复合水凝胶所能分散的应力更多。

参考文献:

- [1] Jiang S, Liu S, Feng WH. PVA hydrogel properties for biomedical application [J]. J Mech Behav Biomed Mater, 2011, 4(7): 1228-1233.
- [2] Takashi Noguchi Masanori Oka, Praveen Kumar, Ken Ikeuchi, et al. Development of an artificial articular cartilage [J]. Clin Mater, 1990, 6(4): 361-381.
- [3] 王迎君,刘青,郑裕东,等. 沉淀法原位复合聚乙烯醇(PVA)/羟基磷灰石(HA)水凝胶的结构与性能研究[J]. 中国生物医学工程学报, 2005, 24(2): 150-153.
- [4] 沈艳秋,张德坤,葛世荣. 聚乙烯醇/纳米 HA 复合水凝胶的接触变形与启动摩擦特性研究[J]. 摩擦学报, 2008, 28(2): 97-102.
- [5] Zhang DK, Shen YQ, Ge SR. Research on the friction and wear mechanism of poly(vinyl alcohol)/hydroxylapatite composite hydrogel [J]. Sci China Ser E, 2009, 52(8): 2474-2480.
- [6] Zhang DK, Duan JJ, Wang DG, et al. Effect of preparation methods on mechanical properties of PVA/HA composite hydrogel [J]. J Bionic Eng, 2010, 7(3): 235-243.
- [7] Silva P, Crozier S, Veidt M, et al. An experimental and finite element poroelastic creep response analysis of an in-

- tervertebral hydrogel disc model in axial compression [J]. *J Mater Sci: Mater Med*, 2005, 16(7): 663-669.
- [8] Warner MD, Taylor WR, Clift SE. Cyclic loading moves the peak stress to the cartilage surface in a biphasic model with isotropic solid phase properties [J]. *Med Eng Phys*, 2004, 26(3): 247-249.
- [9] Seifzadeha A, Oguamanama DCD, Trutiak N, *et al.* Determination of nonlinear fibre-reinforced biphasic poroviscoelastic constitutive parameters of articular cartilage using stress relaxation indentation testing and an optimizing finite element analysis [J]. *Comput Methods Programs Biomed*, 2011; Epub ahead of print.
- [10] Warner MD. Finite element biphasic modelling of articular cartilage; An investigation into crystal induced damage [D]. Bath, UK: University of Bath, 2000.
- [11] 程慧茹. PVA-HA-Silk 复合水凝胶的制备与性能表征[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2010.
- [12] Pawaskar SS. Contact mechanics modelling of articular cartilage and applications [D]. Leeds, UK: University of Leeds, 2006.
- [13] Warner MD, Taylor WR, Clift SE. A method for automatically determining contact between a non-porous surface and articular cartilage in a biphasic FE model [J]. *Comput Method Biomech Biomed Eng*, 2001, 3: 207-212.
- [14] 王迎军, 刘青, 郑裕东, 等. 沉淀法原为复合聚乙烯醇(PVA)/羟基磷灰石(HA)水凝胶的结构与性能研究[J]. *中国生物医学工程学报*, 2005, 24(2): 150-153.
- [15] 钱善华. 天然关节软骨的摩擦行为研究[D]. 徐州: 中国矿业大学博士学位论文, 2009.
- [16] Stammen JA, Williams S, Ku DN, *et al.* Mechanical properties of a novel PVA hydrogel in shear and unconfined compression [J]. *Biomaterials*, 2001, 22(8): 799-806.
- [17] Sakai N, Hagihara Y, Furusawa T, *et al.* Analysis of biphasic lubrication of articular cartilage loaded by cylindrical indenter [J]. *Tribol Inter*, 46(1): 225-236.