文章编号:1000-4092(2023)04-608-06

纳米纤维素增强的高机械强度聚丙烯酰胺复合水凝胶*

马彦琪[1],林梅钦[2],董朝霞[2],张储桥[2]

(1. 中国人民大学实验室管理与教学条件保障处,北京 100872;2. 中国石油大学(北京)非常规油气科学技术研究院,北京 102249)

摘要:为了增强聚丙烯酰胺凝胶的强度,利用纳米纤维素制备丙烯酰胺/纳米纤维素复合水凝胶,通过质构仪和流变仪研究了纳米纤维素对复合水凝胶拉伸性能、压缩性能、黏附性能及黏弹特性的影响,并利用扫描电镜观察了复合水凝胶的微观结构。结果表明,添加纳米纤维素的复合水凝胶的拉伸强度、压缩应力、黏附力、弹性模量及黏性模量均明显大于不含纳米纤维素的聚丙烯酰胺凝胶。当丙烯酰胺与纳米纤维素的质量比为5∶3时,形成的复合水凝胶的拉伸强度、压缩应力及弹性模量均达到最大。复合水凝胶的韧性增强效果明显,拉伸应力及黏附力较聚丙烯酰胺凝胶提高近3倍。与聚丙烯酰胺凝胶相比,复合水凝胶的网络结构更加致密,机械强度和与井筒管壁的黏附效果更好,可用于油气田的欠平衡钻井。

关键词:水凝胶;丙烯酰胺;纳米纤维素;机械强度

文献标识码:A **DOI**:10.19346/j.cnki.1000-4092.2023.04.007

中图分类号:O648.17 **开放科学(资源服务)标识码(OSID)**:

0 前言

纤维素是地球上最丰富的天然高分子。它是一个较长的直链多糖,由许多*D*-葡萄糖基经过1,4-*β*-糖苷键连接而形成的线性高分子化合物[1-3],具有很多优良的特性[4]。随着科学技术的迅速发展,纤维素作为一种工业的原材料,已经不再局限于纸浆、纸及纺织品,而功能化改性的纤维素及其应用越来越受到人们的重视。

纳米纤维素(NCC)是一种可从廉价可再生的纤维素中通过酸水解或酶解去除纤维素中无定形区而得到的直径为1～100 nm、长度为几十至几百纳米的刚性棒状聚合物[5]。它不但具备纤维素的基本结构和良好性能,并且还具备纳米颗粒的特性,例如大的比表面积、高弹性模量和反应活性。NCC的表面存在大量羟基,能形成很强的氢键,而氢键又决定了纤维素的各种特性[6-7]。纤维素的纳米尺寸效应使其拥有了优越的机械性能,可以作为高分子材料的增强剂,显著提高聚合物的热稳定性、力学强度、硬度、刚性和柔韧性[8-11],从而制得高强度、高热稳定性和高力学性能的高分子复合材料。Zimmermann等[12]将NCC与羟甲基纤维素复合制备了一种分散均匀透明的薄膜,其弹性模量提高了2倍、拉伸强度提升4倍。Lu等[13]将NCC与聚乙烯醇的水溶液混合干燥制得了复合膜,并研究了纤维素含量对材料性能的影响。结果发现,随着纤维素含量的增加,复合材料的强度和模量均有所提高。Huang等[14]用表面改性的NCC来增强壳聚糖膜,当

* **收稿日期**:2022-10-06;**修回日期**:2022-12-16。

基金项目:国家科技重大专项"低渗-致密油藏高效提高采收率新技术"(项目编号2017ZX05009-004)。

作者简介:马彦琪(1989—),女,工程师,中国石油大学(北京)化学工程硕士(2016),从事油田化学及分析化学方向的研究,通讯地址:100872 北京市海淀区中关村大街59号中国人民大学实验室管理与教学条件保障处,电话:010-62516515,E-mail:mayq0818@ruc.edu.cn。林梅钦(1965—),男,副教授,本文通讯联系人,中国科学院化学研究所高分子化学与物理专业硕士(1991),从事提高采收率及油田化学方向的研究,通讯地址:102249 北京市昌平区府学路18号中国石油大学(北京)非常规油气科学技术研究院,电话:010-89733437,E-mail:linmq@cup.edu.cn。

NCC质量分数为7%时，拉伸强度达到59.1 MPa，相对于壳聚糖膜提升了97.6%。作为一种天然可再生的高分子原料，纤维素在水凝胶的研究领域也受到了广泛关注[15-20]。众多研究者将不同纤维素以及纤维素衍生物引入水凝胶研究中，制备出了许多性能优异的纤维素基水凝胶。Millon等[21]将NCC悬浊液与聚乙烯醇（PVA）溶液混合，制备了NCC/PVA复合水凝胶。其循环6次的拉伸性能测试结果表明，NCC的加入可以明显提高PVA水凝胶的模量和刚度。Zhou等[22]制备的棒状纤维素纳米晶体（CNCs），不仅能增强聚丙烯酰胺水凝胶的强度，还可以作为多功能交联剂使用。

聚丙烯酰胺及其衍生物形成的水凝胶被广泛用于药物的控制释放、酶反应控制、生物降解材料、油气田开发等领域[23-32]。特别是在油气田的欠平衡钻井过程中，采用聚丙烯酰胺凝胶的冻胶阀技术因其作业成本低、对油气层无污染等优势而得到研究者的关注[33-35]。但对于高压地层，用作冻胶阀的常规聚丙烯酰胺类水凝胶因其自身较低的力学强度、低韧性、易破碎，无法实现对高压井筒的密封，达不到欠平衡钻井对凝胶强度的要求。为此，本文将NCC用于增强聚丙烯酰胺水凝胶的强度以及与金属管壁的黏附力，研究NCC增强的复合水凝胶的黏弹性、拉伸压缩性能及黏附力，以期制备出适合油田压井用的聚丙烯酰胺/NCC复合强凝胶。

1　实验部分

1.1　材料与仪器

丙烯酰胺（AM）、*N*, *N*'-亚甲基双丙烯酰胺（MBA）、过硫酸钾（KPS），分析纯，北京现代东方精细化学品有限公司；纳米纤维素（NCC），固含量2%，长20～500 nm，宽4～5 nm，开翊新材料科技（上海）有限公司；去离子水。

TA.XT plus型质构仪，英国SMS公司；RS600型流变仪，德国Haake公司；SU8010型冷场发射扫描电镜（SEM），日本日立公司。

1.2　复合水凝胶的制备

由于NCC固含量较低，因此首先通过高速离心机对NCC进行处理，提高其固含量至6%，再将处理后的NCC与去离子水搅拌混合均匀，超声震荡20 min，然后将AM加入上述悬浮液，继续搅拌2 h，将0.04%的MBA及0.04%的KPS依次加入上述溶液中继续搅拌0.5 h。将此交联体系在70 ℃恒温下反应4 h得到AM/NCC复合水凝胶。复合水凝胶的具体配方如表1所示。

表1　NCC纤维素复合水凝胶配方

代号	AM加量/%	NCC加量/%	MBA加量/%	KPS加量/%
8AM	8	0	0.04	0.04
7AM+1NCC	7	1	0.04	0.04
6AM+2NCC	6	2	0.04	0.04
5AM+3NCC	5	3	0.04	0.04
4AM+4NCC	4	4	0.04	0.04

1.3　复合水凝胶的性能评价方法

（1）拉伸性能测试

复合水凝胶的拉伸性能可反应出其韧性情况，采用质构仪测试复合水凝胶样品的拉伸应力强度。质构仪力量感应元采用50 kg。凝胶在哑铃型模具（有效拉伸段尺寸为20 mm×5 mm×5 mm）中成胶，即凝胶样品的有效拉伸部分长度为20 mm。将样品两端置于质构仪的上下夹具中，上部夹具以3 mm/s的速度向上拉伸，在此拉伸过程中获得拉伸应力–时间曲线。

（2）压缩性能测试

复合水凝胶的压缩性能可反应其弹性性能，采用质构仪测试复合水凝胶样品的压缩强度。质构仪力量感应元采用50 kg。将凝胶基液倒入统一的圆柱体（φ15 mm×15 mm）模具中成胶后，将样品放置在质构仪的底部压缩板中心位置，上部压缩板以3 mm/s的速度向下移动并压缩凝胶样品，在此压缩过程中获得压缩应力–应变曲线。在此测试中，应变统一设置为95%，即样品压缩程度是初始高度的95%。

（3）流变性能测试

在30 ℃下，采用流变仪评价复合水凝胶的流变性能。流变仪使用转子为PP20的板-板几何测量体系，板-板间距为1 mm。凝胶样品制备成体积为0.4 cm^3的圆饼型。首先，通过应力震荡模式，在0～250 Pa的应力范围内，以1 Hz的频率震荡扫描得到黏弹性曲线，在此曲线的线性黏弹性区取应力为10 Pa；之后在应力为10 Pa的条件下，在0.01～10 Hz的扫描频率范围内进行频率扫描，进而得到样品的黏弹

特性曲线。

(4)黏附力测试

采用实验室自制的不锈钢样品容器。将1.2节制备好的凝胶体系倒入测量容器底座内,然后将容器的上部与下部底座组合在一起。在容器底座上设有一个窗口(1.5 cm×1.5 cm),通过窗口观察底座内凝胶样品上表面与圆柱底部刚好接触,之后将整个凝胶容器密封置于70 ℃烘箱内成胶24 h。最后,将容器与质构仪连接,测定凝胶的黏附力曲线。

(5)扫描电镜表征

将复合水凝胶样品切块,放入液氮中冷冻处理,然后放入冷冻干燥机中干燥24 h,取适量样品黏附于铝片上,喷金处理以增强其导电性,利用SEM观察凝胶样品的断面结构及微观形貌。

2 结果与讨论

2.1 复合水凝胶的拉伸性能

AM、NCC质量比不同的复合水凝胶的拉伸应力–时间曲线如图1所示。复合水凝胶的拉伸应力随着拉伸时间的延长而增加。其中,AM与NCC质量比为7∶1、6∶2、5∶3的复合水凝胶表现出极好的拉伸韧性,在达到质构仪量程时,复合水凝胶样品均未发生断裂;而AM与NCC质量比为8∶0和4∶4的复合水凝胶很早就发生了断裂。

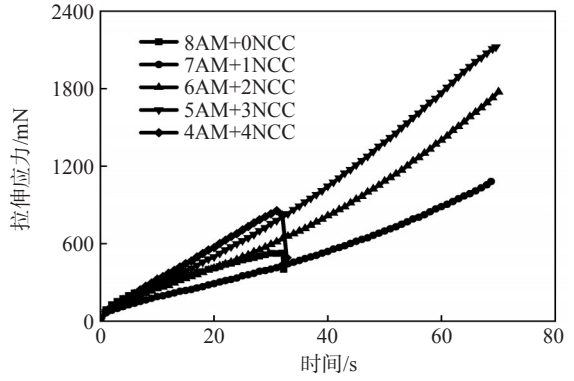

图1 复合水凝胶的拉伸应力–时间曲线

复合水凝胶的拉伸测试结果见表2。当固含量一定时,通过添加少量NCC,复合水凝胶的拉伸时间明显延长,拉伸应力显著增大,韧性大幅改善。随着NCC含量的增加,拉伸应力逐渐增大,韧性增强。当NCC含量超过最佳比例(5∶3)后,复合水凝胶的拉伸应力明显降低且样品发生断裂,但此时的拉伸应力仍高于未添加NCC的凝胶。NCC对复合水凝胶的韧性改善效果明显,这主要与NCC的纤维丝状结构有关。

表2 复合水凝胶的拉伸测试结果

代号	拉伸时间/s	拉伸应力/mN	代号	拉伸时间/s	拉伸应力/mN
8AM	32	570	5AM+3NCC	70	2122
7AM+1NCC	70	1085	4AM+4NCC	33	865
6AM+2NCC	70	1776			

2.2 复合水凝胶的压缩性能

在压缩相同形变量时,复合水凝胶会储存大量的能量,若自身能承受此能量,则在撤掉外力后,凝胶能恢复原状;若复合水凝胶承受不住外界压力,则会发生不可逆形变甚至破碎。NCC含量不同的复合凝胶的压缩应力–应变曲线如图2所示。未添加NCC凝胶的压缩比为0~60%时,产生的压缩应力很小,约为30 kPa,并且压缩应力随压缩形变的变化也很小。这说明在此阶段,凝胶发生微小的弹性形变而储存了少量的能量。当压缩比为60%~80%时,压缩应力缓慢增加,可达到80 kPa,凝胶发生有效的形变,使其自身积聚能量。当压缩比达到80%~95%时,压缩应力急剧增加;当压缩比达到95%时,对应的压缩应力达到850 kPa。这说明在此阶段,凝胶压缩形变量大幅增加,储存大量的能量以对抗外界压力。AM与NCC质量比为5∶3的复合水凝胶的压缩应力(约1600 kPa)最大,AM与NCC质量比为7∶1的复合凝胶的压缩应力(约1300 kPa)最小,但仍远大于未加NCC的PAM凝胶。随复合水凝胶中NCC含量的增加,凝胶的压缩应力增大,

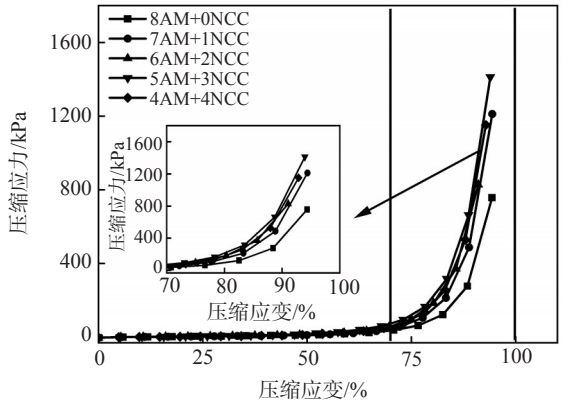

图2 复合水凝胶的压缩应力–应变曲线

但AM与NCC质量比为4∶4的复合水凝胶的压缩应力反而减小，且测试过程中容易破碎，撤掉应力后凝胶无法恢复原状，与复合凝胶拉伸测试结果类似。NCC可以显著增强复合水凝胶的抗形变能力，增强凝胶的机械强度。

2.3　复合水凝胶的黏弹性能

NCC含量不同的复合水凝胶的弹性模量（G'）和黏性模量（G''）随扫描频率（f）的变化曲线如图3所示。未添加NCC的PAM凝胶的G'和G''均随f的增加而逐渐增大，基本呈线性增长，凝胶的G'最大可达到445 Pa。复合水凝胶的G'和G''亦随f的增加而增加。随复合水凝胶中NCC含量的增加，凝胶的G'和G''增加，但AM、NCC质量比为4∶4时，G'有所降低。AM与NCC质量比为5∶3的复合水凝胶具有最大的G'（4800 Pa），而最小的为7∶1的复合水凝胶（约1000 Pa），但仍显著大于不含NCC的PAM凝胶。值得注意的是，在高扫描频率的条件下，复合凝胶的G'不稳定，出现大幅波动，这可能是因为纤维丝发生缠绕或分布不均等情况，导致内部网络结构不均匀。同时，AM与NCC质量比为5∶3的复合水凝胶的G''（约850 Pa）较大。同样的，在高频的情况下，也存在G''不稳定，出现大幅波动现象。NCC有助于提高复合水凝胶的G'和G''，从而增强复合水凝胶的强度。

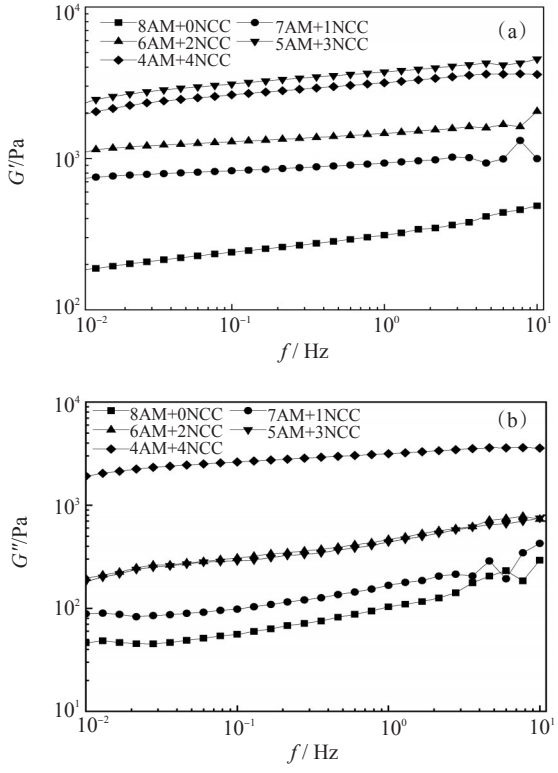

图3　复合水凝胶的G'（a）与G''（b）随扫描频率的变化

2.4　复合水凝胶的黏附性能

冻胶阀主要依靠自身的机械强度和与井筒管壁的黏附力实现压井。因此，为了满足压井要求，除了需要增强复合水凝胶自身的机械强度，也需要增大复合水凝胶与井筒管壁的黏附力。PAM凝胶及AM、NCC质量比为5∶3的复合水凝胶的黏附力随测试时间的变化如图4所示。复合水凝胶的黏附力测试过程可分为3个阶段。第1阶段为质构仪将测试元件上部缓慢提起，黏附力逐渐增大；第2阶段为测试元件上部与复合水凝胶上表面拉扯，黏附力增大到最大值；第3阶段为复合水凝胶与测试元件分离，接触面积逐渐减小，最终完全分离。PAM凝胶的黏附力值为2200 mN。加入NCC后，复合水凝胶的黏附力（7100 mN）明显增大，是未加NCC的PAM凝胶黏附力的3.5倍，表明NCC可以显著增大复合水凝胶与管壁的黏附力。这与复合水凝胶和不锈钢基质表面的分子作用力有关。不锈钢表面存在—OH基团，而比表面积大的NCC表面亦存在大量的—OH，当AM/NCC复合水凝胶与不锈钢表面接触时，除了聚合物链、水与不锈钢表面的作用力，NCC表面所带的—OH与不锈钢表面的—OH形成分子间氢键，使得复合水凝胶与不锈钢表面的黏结性增强，导致复合水凝胶的黏附力远大于PAM凝胶。

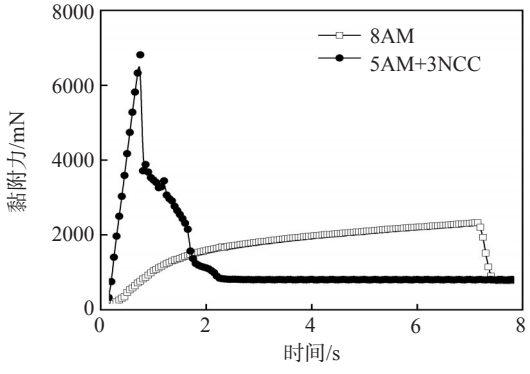

图4　复合水凝胶的黏附力随测试时间的变化

2.5　复合水凝胶的微观形貌

AM含量为8%的未添加NCC的PAM凝胶和AM、NCC质量比为5∶3的复合水凝胶的SEM照片如图5所示。两种凝胶均呈现常规的多孔网络结

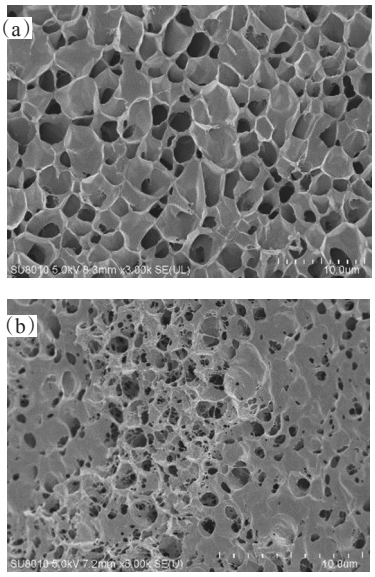

图5 PAM凝胶(a)与复合水凝胶(b)的SEM照片

构,未添加NCC的PAM凝胶仅呈现清晰的网格和近似圆形的多孔结构,孔壁较薄;孔洞为微米级,分布比较均匀;孔道之间相互连接形成了公开的通道。复合水凝胶同样呈现多孔网络结构,但在孔隙与孔隙之间存在细小的纤维丝。纤维丝直径约为几纳米,长度约为几百纳米。复合水凝胶的网络结构明显比不含NCC的PAM凝胶更加致密,且其孔壁也相对较厚,从而使得复合水凝胶的拉伸强度、压缩应力及黏弹性均大于不含NCC的PAM凝胶。

3 结论

由于纤维素结构的影响,PAM/NCC复合水凝胶的拉伸强度、压缩应力、黏附力、弹性模量及黏性模量明显大于不含NCC的PAM凝胶,且复合水凝胶的网络结构更加致密。PAM/NCC能显著增强复合水凝胶的抗形变能力,有效改善PAM凝胶的韧性、机械强度及与井筒管壁的黏附效果。

复合水凝胶中AM与NCC的最佳质量比为5∶3。该配比下形成的复合水凝胶的拉伸强度、压缩应力、弹性模量均达到最大,复合水凝胶的韧性增强效果明显,拉伸应力及黏附力较PAM凝胶提高近3倍。

参考文献:

[1] KLEMM D, HEUBLEIN B, FINK H P, et al. Cellulose: Fascinating biopolymer and sustainable raw material [J]. Angew Chem Int Ed, 2005, 44(22): 3358-3393.

[2] ZUGENMAIER P. Conformation and packing of various crystalline cellulose fibers [J]. Prog Polym Sci, 2001, 26(9): 1341-1417.

[3] NATA I, SURESHKUMAR M, LEE C K. One-pot preparation of amine-rich magnetite/bacterial cellulose nanocomposite and its application for arsenate removal [J]. Rsc Adv, 2011, 1(4): 625-631.

[4] MURAT B, OLGUN G, MARTINA H S, et al. Verification of controlled grafting of styrene from cellulose via radiation-induced RAFT polymerization [J]. Macromolecules, 2007, 40(20): 7140-7147.

[5] LIMA M M D S, BORSALI R. Rodlike cellulose microcrystals: Structure, properties, and applications [J]. Macromol Rapid Commun, 2010, 25(7): 771-787.

[6] YE D Y, MONTANE D, FARRIOL X. Preparation and characterization of methylcellulose from annual cardoon and juvenile eucalyptus [J]. Carbohydr Polym, 2005, 61(4): 446-454.

[7] 叶代勇, 傅和青, 黄洪, 等. 纤维素化学研究进展[J]. 化工学报, 2006, 57(8): 1782-1791.

[8] STURCOVA A, DAVIES G R, EICHHOM S J, et al. Elastic modulus and stress-transfer properties of tunicate cellulose whiskers [J]. Biomacromolecules, 2005, 6(2): 1055-1061.

[9] ORTS W J, SHEY J, IMAM S H, et al. Application of cellulose microfibrils in polymer nanocomposites [J]. J Polym Environ, 2005, l3(4): 301-306.

[10] PETERSSON L, KVIEN I, OKSMAN K. Structure and thermal properties of poly(lactic acid)/cellulose whiskers nanocomposite materials [J]. Compos Sci Technol, 2007, 67(11): 2535-2544.

[11] DALMAS F, CHAZEAU L, GAUTHIER C, et al. Large deformation mechanical behavior of flexible nanofiber filled polymer nanocomposites [J]. Polymer, 2006, 47(8): 2802-2812.

[12] ZIMMERMANN T, POHLER E, GEIGER T. Cellulose fibrils for polymer reinforcement [J]. Adv Eng Mater, 2004, 6(9): 754-761.

[13] LU J, WANG T, DRZAL L T. Preparation and properties of microfibrillated cellulose polyvinyl alcohol composite materials [J]. Composites Part A, 2008, 39(5): 738-746.

[14] HUANG X J, XIE F, XIONG X P. Surface-modified microcrystalline cellulose for reinforcement of chitosan film [J]. Carbohydr Polym, 2018, 201: 367-373.

[15] YANG J, XU F. Synergistic reinforcing mechanisms in cellulose nanofibrils composite hydrogels: Interfacial dynamics, energy dissipation, and damage resistance [J]. Biomacromolecules, 2017, 18(8): 2623-2632.

[16] CHANG S T, CHEN L C, LIN S B, et al. Nano-biomaterials

application: Morphology and physical properties of bacterial cellulose/gelatin composites via crosslinking [J]. Food Hydrocolloid, 2012, 27(1): 137–144.
[17] WAN W K, CAMPBELL G, ZHANG Z F, et al. Optimizing the tensile properties of polyvinyl alcohol hydrogel for the construction of a bioprosthetic heart valve stent [J]. J Biomed Mater Res, 2002, 63(6): 854–861.
[18] ZHOU C J, WU Q L, LEI T Z, et al. Adsorption kinetic and equilibrium studies for methylene blue dye by partially hydrolyzed polyacrylamide/cellulose nanocrystal nanocomposite hydrogels [J]. Chem Eng J, 2014, 251(251): 17–24.
[19] WANG J H, GAO C, ZHANG Y S, et a1. Preparation and in vitro characterization of BC/PVA hydrogel composite for its potential use as artificial cornea biomaterial [J]. Mater Sci Eng: C, 2010, 30(1): 214–218.
[20] BUTYLINA S, GENG S, LAATIKAINEN K, et al. Cellulose nanocomposite hydrogels: From formulation to material properties [J]. Front Chem, 2020, 8: 655.
[21] MILLON L E, WAN W K. The polyvinyl alcohol-bacterial cellulose system as a new nanocomposite for biomedical applications [J]. J Biomed Mater Res B, 2006, 79 (2): 245–253.
[22] ZHOU C J, WU Q L, YUE Y Y, et al. Application of rod-shaped cellulose nanocrystals in polyacrylamide hydrogels [J]. J Colloid Interface Sci, 2011, 353(1): 116–123.
[23] 付志威，周益名，黄倩，等. 温度和pH双重响应的改性纳米纤维素制备及表征[J]. 高分子材料科学与工程，2023，39(2)：143–153.
[24] SHEKHTER A B, LOPATIN V V, CHOCHIYA S L. Injectable hydrophilic polyacrylamide gel form acryl and tissue response to its implantation [J]. The Annals of Plastic, Reconstructive and Aesthetic Surgery, 1997, 2: 1l–21.
[25] ZOLFAGHARI R, KATBAB A A, NABAVIJADEH J, et al. Preparation and characterization of nanocomposite hydrogels based on polyacrylamide for enhanced oil recovery applications [J]. J Appl Polym Sci, 2006, 100(3): 2096–2103.
[26] SCHILLER A M, SUEN T J. Ionic derivatives of polyacrylamide [J]. Ind Eng Chem, 1956, 48(12): 2132–2137.
[27] KAWAGUCHI H, HOSHINO H, AMAGASA H, et al. Modifications of a polymer latex [J]. J Colloid Interface Sci, 1984, 97(2): 465–475.
[28] 涂宏俊，周明，李彤彤. 自修复水凝胶的研究进展及油气田应用[J]. 西南石油大学学报(自然科学版)，2023，45(1)：71–80.
[29] KAMEL A A, MA C M, EL-AASSER M S, et al. Concerning the origin of charge at the polystyrene particle/water interface [J]. J Dispersion Sci Technol, 2007, 2(2/3): 315–330.
[30] 易辉永，王世彬，李帅帅，等. 纤维素纳米晶杂化压裂液的流变性能[J]. 油田化学，2021，38(2)：230–234.
[31] KASG Z H, OZG M S S, ORBAY M. Modified polyacrylamide hydrogels and their application in removal of heavy metal ions [J]. Polymer, 2003, 44(6): 1785–1793.
[32] 吴天江，鄢长灏，赵海峰，等. 低渗透油藏水凝胶调驱剂的制备及封堵性能评价[J]. 油田化学，2023，40(1)：51–55.
[33] 刘德基，廖锐全，张慢来，等. 冻胶阀技术及应用[J]. 钻采工艺，2013，36(2)：28–33.
[34] SUN F F, LIN M Q, DONG Z X, et al. Nanosilica-induced high mechanical strength of nanocomposite hydrogel for killing fluids [J]. Colloids Interface Sci, 2015, 458: 45–52.
[35] SUN F F, DONG Z X, LIN M Q, et al. High strength polyacrylamide/nmSiO_2 composite hydrogel for well killing [J]. J Jpn Pet Inst, 2017, 60(1): 19–25.

Polyacrylamide Composite Hydrogel with High Mechanical Strength Reinforced by Nanocrystalline Cellulose

MA Yanqi[1], LIN Meiqin[2], DONG Zhaoxia[2], ZHANG Chuqiao[2]
(*1. Office of Laboratory Management and Teaching Facilities Development, Renmin University of China, Beijing 100872, P R of China; 2. Unconventional Petroleum Research Institute, China University of Petroleum, Beijing 102249, P R of China*)

Abstract: In order to enhance the strength of polyacrylamide (PAM) gel, nanocrystalline cellulose (NCC) was used to prepare AM/NCC composite hydrogel. The effects of NCC on the tensile property, compressive property, adhesion property and viscoelastic property of composite hydrogel were investigated by using texture analyzer and rheometer, and then the microstructure of composite hydrogel was observed by scanning electron microscope (SEM). The results showed that the tensile strength, compressive stress, adhesive force, elasticity modulus and viscosity modulus of composite hydrogel were significantly higher than those without NCC. When the mass ratio of AM to NCC was 5∶3, the tensile strength, compressive stress and elasticity modulus of composite hydrogel reached the maximum. The toughness of composite hydrogel was significantly enhanced. Meanwhile, the tensile stress and adhesion force were nearly 3 times higher than those of PAM gel. Compared with PAM gel, the network structure of PAM/NCC composite hydrogel became denser. Furthermore, the mechanical strength and adhesion to wellbore wall became better. PAM/NCC composite hydrogel could be used for underbalanced drilling in oil and gas fields.

Keywords: *hydrogel*; *acrylamide*; *nanocrystalline cellulose*; *mechanical strength*