

聚丙烯酰胺/Fe₃O₄磁诱导取向水凝胶的制备及性能研究

doi:10.20269/j.cnki.1674-7100.2025.0012

谢涛 李祥刚 全婧婧
郑虹丽 殷倩妹 冯妍

湖南工业大学
包装工程学院
湖南 株洲 412007

摘要: 以丙烯酰胺(AM)为基体原料,以N,N'-亚甲基双丙烯酰胺(MBAA)为交联剂,过硫酸铵(APS)为引发剂,在不同磁感应强度的磁场诱导条件下成功制备了聚丙烯酰胺/Fe₃O₄磁诱导取向水凝胶。傅里叶红外光谱表征结果表明,Fe₃O₄与聚丙烯酰胺之间形成了明显的分子间氢键。采用应变控制型旋转流变仪分别对聚丙烯酰胺/Fe₃O₄磁诱导取向水凝胶的力学性能和流变性能进行分析,并采用金相显微镜对该水凝胶的取向结构进行分析。结果表明,平行磁场取向水凝胶的拉伸强度、断裂伸长率都要优于垂直磁场取向水凝胶的;平行磁场取向水凝胶的力学性能优于零磁场取向水凝胶的;随着磁感应强度的增大,聚丙烯酰胺/Fe₃O₄磁诱导取向水凝胶的拉伸强度变大,取向结构更加明显;随着AM含量的增加,水凝胶的力学性能先升高后降低。聚丙烯酰胺/Fe₃O₄磁诱导取向水凝胶在磁响应智能仿生材料领域具有良好的应用前景。

关键词: 聚丙烯酰胺;水凝胶;力学性能;流变性能;取向结构

中图分类号: TP212.9; TB324

文献标志码: A

文章编号: 1674-7100(2025)04-0096-08

引文格式: 谢涛,李祥刚,全婧婧,等.聚丙烯酰胺/Fe₃O₄磁诱导取向水凝胶的制备及性能研究[J].包装学报,2025,17(4):96-103.

1 研究背景

水凝胶是一种具有多孔三维网络结构的高分子材料,三维网络内部呈空隙状态^[1],三维网络结构由分子链缠结和共价键交联组成^[2,3]。由于水凝胶优异的性能,在组织工程支架材料、药物释放光学器件和生物传感器薄膜^[4-6]等多个领域得到了广泛应用。磁性水凝胶是一种结合了传统水凝胶高生物相容性和

磁性纳米粒子独特磁响应特性的新型智能材料^[7],近年来在生物医学、药物递送以及环境修复等领域引起了广泛关注。然而,大部分磁性水凝胶为各向同性材料,缺乏天然组织所具有的各向异性结构^[8]和动态响应能力^[9],这限制了磁性水凝胶在仿生组织和智能材料中的应用。磁诱导取向水凝胶的制备则提供了一种新思路,即在水凝胶基质中嵌入磁性纳米粒子(如Fe₃O₄),并利用外部磁场对磁性纳米粒子的分布和排列进行调控,以此实现水凝胶结构和功能的各向异

收稿日期:2025-03-05

基金项目:湖南省教育厅科学研究基金资助项目(24A0412)

作者简介:谢涛,男,硕士生,主要研究方向为水凝胶制备及流变性能,E-mail:1985270533@qq.com

通信作者:李祥刚,男,副教授,博士,主要从事流变学、可降解高分子材料和高分子材料成型工艺及设备研究,
E-mail:lixiangfm@163.com

性设计。基于该策略,水凝胶不仅具有磁响应特性,还能够模拟天然组织的微观结构^[10],例如肌肉纤维或神经组织的定向排列^[11,12],在组织工程中也能够模拟天然软骨关节^[13],如膝盖软骨等。除此之外,磁诱导取向水凝胶在包装行业中也展现出一定的潜力,特别是在密封包装、缓冲包装等领域^[14]。因此,磁诱导取向水凝胶的研究近年来备受关注。

目前,磁性水凝胶的制备方法主要包括共混法、接枝法、原位沉淀法和溶胀法等^[15],这些方法通过将磁性纳米粒子与高分子基质结合,实现了材料的多功能化。磁诱导取向水凝胶中的高分子基质材料主要包括聚乙烯醇、壳聚糖、聚丙烯酰胺和海藻酸钠等。其中,聚丙烯酰胺通过丙烯酰胺(AM)单体进行聚合,具有机械强度高、成本低、力学性能优异^[16]和反应迅速等优势。同时,磁性纳米粒子在磁场中能够迅速分散,具有快速响应的特点。然而,现有研究仍具有一定局限性,主要体现在磁感应强度单一和磁场强度小等方面,且没有系统研究不同磁感应强度对磁诱导取向水凝胶力学性能和流变性能的影响。

因此,本研究以电磁铁形成的匀强磁场来搭建磁诱导取向场,以AM、 Fe_3O_4 水基磁流体为主要原料,采用光固化的方法成功制备了一种聚丙烯酰胺/ Fe_3O_4 (PAM/ Fe_3O_4)磁诱导取向水凝胶,并分别探究了不同磁感应强度和AM含量对PAM/ Fe_3O_4 磁诱导取向水凝胶力学性能和流变性能的影响。

2 实验部分

2.1 实验原料与仪器设备

2.1.1 实验原料

丙烯酰胺(AM),纯度为99%(下同); $\text{N,N}'$ -亚甲基双丙烯酰胺(MBAA),99%;过硫酸铵(APS),98%;上述实验原料均从上海阿拉丁试剂有限公司购买。 Fe_3O_4 水基磁流体,SS-F10C,密度为 $1.18 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,粒径为10 nm,杭州吉康新材料有限公司。实验用水均为去离子水。

2.1.2 仪器设备

电子分析天平,FA1004型,宁波市力辰科技有限公司;应变控制型旋转流变仪,ARES-G2型,美国TA公司;磁力搅拌器,MYP11-2A型,上海梅颖浦仪器仪表制造有限公司;紫外线照射灯(波长365 nm),ZLUVLAMP型,深圳市中联建超科技有限公司;电磁铁,TD8750A-13-1型,长沙天恒测控技

术有限公司;电脑型正反射金相显微镜,CMM-55E型,上海长方光学仪器有限公司;傅里叶变换红外光谱仪,NICOLET IS 50型,赛默飞世尔科技公司。

2.2 PAM/ Fe_3O_4 磁诱导取向水凝胶的制备

2.2.1 PAM/ Fe_3O_4 磁诱导取向水凝胶预聚液的配制

将3份不同质量的AM分别置入3个烧瓶中,加入9 mL去离子水并在室温下进行搅拌,直至AM完全溶解。随后加入交联剂MBAA和引发剂APS,固定APS与MBAA的质量比为5:1,室温下搅拌10 min使其充分溶解,得到PAM水凝胶预聚液。加入适量的 Fe_3O_4 水基磁流体,混合均匀后得到PAM/ Fe_3O_4 磁诱导取向水凝胶预聚液,将溶液倒入特定容器中,静置后消除气泡,并放入4℃的冰箱中备用。PAM/ Fe_3O_4 磁诱导取向水凝胶预聚液中各组分含量的详细信息如表1所示。

表1 PAM/ Fe_3O_4 磁诱导取向水凝胶预聚液的组分

Table 1 The composition of PAM/ Fe_3O_4 magnetically induced oriented hydrogel prepolymerization solution

样品编号	AM 质量 /g	Fe_3O_4 质量 /g	去离子水体积 /mL
1#	2.3	1.5	9
2#	3.3	1.5	9
3#	4.3	1.5	9

2.2.2 磁诱导取向水凝胶制备平台的搭建

利用电磁铁和永磁材料测试系统形成匀强磁场,在电磁铁的两边放置两个紫外线照射灯,采用光固化的方法促进磁诱导取向水凝胶交联网络的形成。利用石英玻璃薄片与橡胶垫圈进行粘接,制备得到中空且空隙厚度为2 mm的模具,利用此模具来制备测试所需样条。自行搭建的磁诱导取向水凝胶制备平台如图1所示。

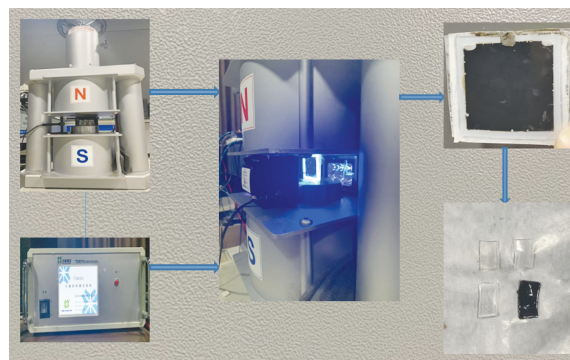


图1 PAM/ Fe_3O_4 磁诱导取向水凝胶的制备流程图

Fig. 1 Flowchart of the preparation process for PAM/ Fe_3O_4 magnetically-induced oriented hydrogel

2.2.3 水凝胶的制备

将预聚液倒入特定模具中,在磁场中经光固化 30 min 后得到 PAM/Fe₃O₄ 磁诱导取向水凝胶。本研究设置的磁感应强度分别为 0, 200, 400, 600 mT。

2.3 测试与表征

1) 傅里叶变换红外光谱 (FTIR) 测试。分别将 PAM 水凝胶和 PAM/Fe₃O₄ 磁诱导取向水凝胶进行冷冻干燥后再进行 FTIR 测试。测试波长范围为 400~4000 cm⁻¹, 分辨率为 4 cm⁻¹。

2) 力学性能测试。用应变控制型旋转流变仪对已制备的水凝胶样品进行力学性能测试。在室温下以 20 mm/min 的恒定拉伸速率对 10 mm × 5 mm × 2 mm 的水凝胶样品进行测试, 每组样品均测试 3 次。由式 (1) 计算得到拉伸强度 (σ_t)^[17], 由式 (2) 计算得到断裂伸长率 (ε)^[18]。

$$\sigma_t = \frac{F}{A_0}, \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0} \times 100\%, \quad (2)$$

式中: F 为拉伸过程中的最大应力, N; A_0 为样条初始横截面积, cm²; L 为断裂时的标距长度, mm; L_0 为初始标距长度, mm。

3) 取向结构表征。金相显微镜是一种专门用于观察材料组织结构的仪器。它通过反射光照明和特定的样品制备技术,能够清晰显示材料的晶粒结构、相组成、以及取向结构等微观特征。通过交叉偏振片检测材料的双折射效应,取向结构和高分子基质可能产生明暗对比。将样品 2# 的预聚液分别置于磁感应强度为 0, 200, 400, 600 mT 的磁场下, 以此制备 PAM/Fe₃O₄ 磁诱导取向水凝胶。再将样品裁剪成 10 mm × 10 mm × 0.5 mm 的薄片, 置于电脑型正反射金相显微镜上进行测试, 并观察其取向结构与形貌特征。

4) 流变性能测试。利用应变控制型旋转流变仪对已制备的水凝胶样品进行流变性能测试。夹具采用 25 mm 平行板, 样品直径为 28 mm, 厚度为 1 mm。在 10 rad/s 的恒定频率下, 在 0.1%~100% 的应变范围内对水凝胶进行应变扫描测试。在扫描应变为 10% 条件下, 在 0.1~100 rad/s 的频率范围内对水凝胶进行频率扫描测试, 所有实验均在 25 °C 下进行。

3 结果与讨论

3.1 水凝胶的结构表征

为了分析 PAM/Fe₃O₄ 磁诱导取向水凝胶的合成情况, 利用 FTIR 对水凝胶进行红外光谱表征, 结果如图 2 所示。在 PAM 水凝胶的红外光谱中, 位于 3316.6 和 3198.1 cm⁻¹ 处分别出现游离及缔合后的氨基 (—NH₂) 特征峰。在 2932.7 和 2853.6 cm⁻¹ 处分别出现亚甲基反对称和对称伸缩振动峰。位于 1650.9 cm⁻¹ 波段处的特征峰对应于 N—H 的弯曲振动, 位于 1408.1 cm⁻¹ 处的特征峰则为亚甲基变形的吸收峰。同时, PAM 水凝胶与 PAM/Fe₃O₄ 磁诱导取向水凝胶均在 552.2 cm⁻¹ 处出现了 Fe—O 键的吸收峰^[19]。当 Fe₃O₄ 磁性纳米粒子与 PAM 复合后, 在 1648.9 和 3182.4 cm⁻¹ 处的特征峰强度显著增大, 说明 Fe₃O₄ 与 PAM 之间形成了明显的分子间氢键, 进而表明 Fe₃O₄ 成功键合到水凝胶中。

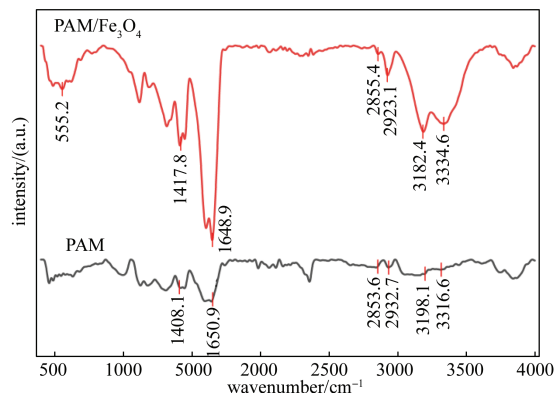


图 2 水凝胶的红外光谱图

Fig. 2 FTIR spectrum of hydrogel

3.2 水凝胶的力学性能分析

3.2.1 水凝胶的应力-应变曲线

为了探究在不同磁感应强度下磁场方向和 AM 含量对水凝胶力学性能的影响, 对制备的水凝胶进行拉伸性能测试。图 3 为截取平行磁场方向与垂直磁场方向的示意图。PAM/Fe₃O₄ 磁诱导取向水凝胶制备好后, 在磁性纳米粒子平行于磁场方向上截取的水凝胶, 称为平行磁场取向水凝胶。在磁性纳米粒子垂直于磁场方向上截取的水凝胶, 称为垂直磁场取向水凝胶。

图 4 为 PAM/Fe₃O₄ 磁诱导取向水凝胶的应力-应变曲线。图 4a、图 4b 和图 4c 分别对应由样品 1#、2# 和 3# 制备的水凝胶样条, 图中 “//” 符号表示平行磁场取向, “⊥” 符号表示垂直磁场取向。综

合图 4 可以看出, 在磁感应强度相同的磁场诱导下, 平行磁场取向水凝胶的应力均大于垂直磁场取向水凝胶的, 且平行磁场取向水凝胶的应力大于在零磁场下制备的水凝胶的应力。在 AM 含量相同的条件下, 磁感应强度越大, 平行磁场取向水凝胶样条的应力更大。随着 AM 含量的增加, 平行磁场取向水凝胶和垂直磁场取向水凝胶的应力先增大后减小。

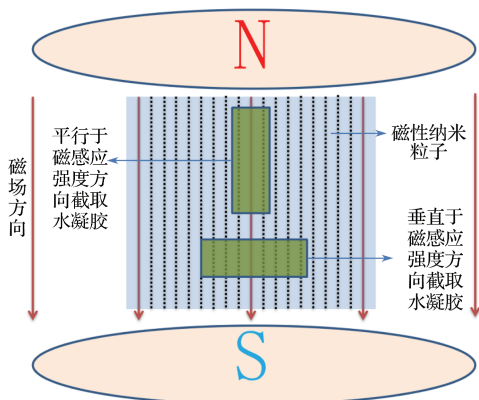
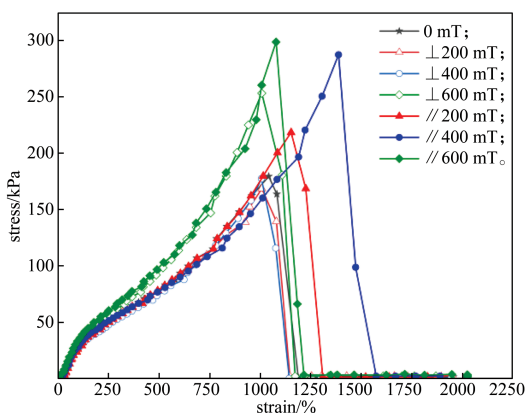
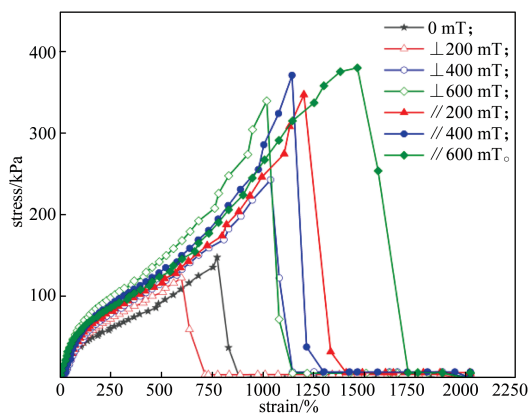


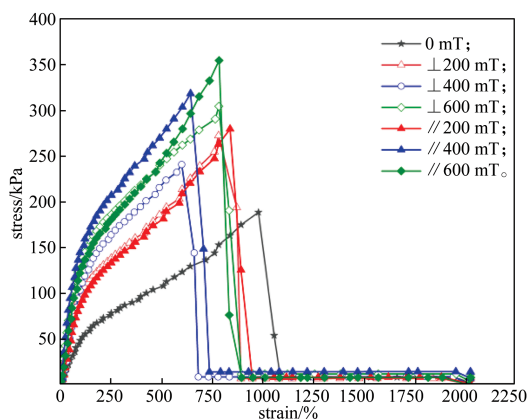
图 3 PAM/ Fe_3O_4 磁诱导取向水凝胶拉伸样条截取示意图
Fig. 3 Interception diagram of PAM/ Fe_3O_4 magnetically induced oriented hydrogel tensile splines



a) 样品 1# 制备的水凝胶



b) 样品 2# 制备的水凝胶

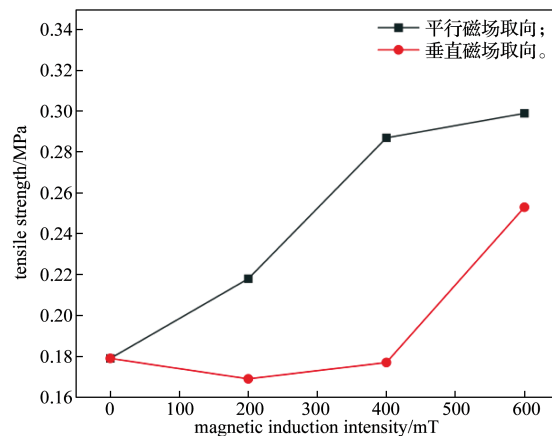


c) 样品 3# 制备的水凝胶

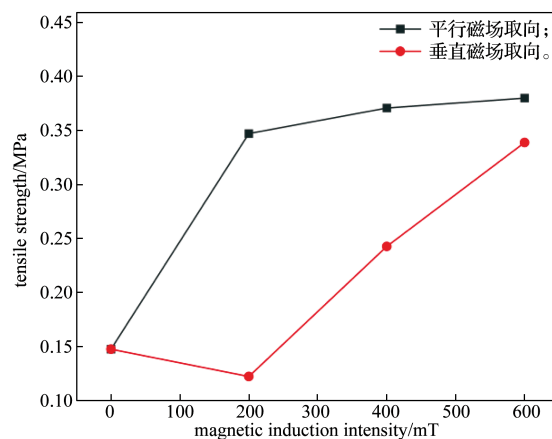
图 4 PAM/ Fe_3O_4 磁诱导取向水凝胶的应力 - 应变曲线图
Fig. 4 The stress-strain curve of PAM/ Fe_3O_4 magnetically induced oriented hydrogel

3.2.2 水凝胶的拉伸强度 - 磁场强度曲线

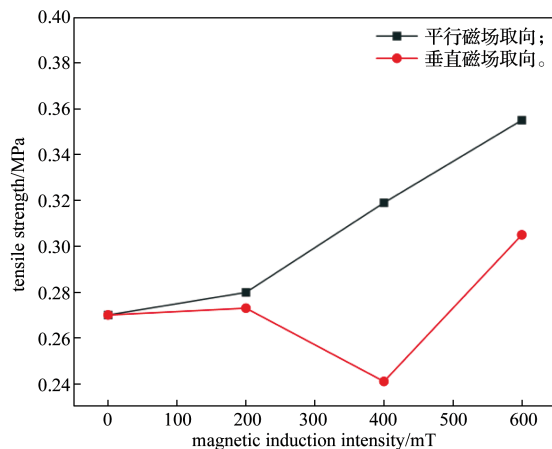
图 5 为 PAM/ Fe_3O_4 磁诱导取向水凝胶的拉伸强度 - 磁场强度曲线。图 5a、图 5b 和图 5c 所用水凝胶分别是通过样品 1#、2# 和 3# 制备得到的。



a) 样品 1# 制备的水凝胶



b) 样品 2# 制备的水凝胶



c) 样品 3# 制备的水凝胶

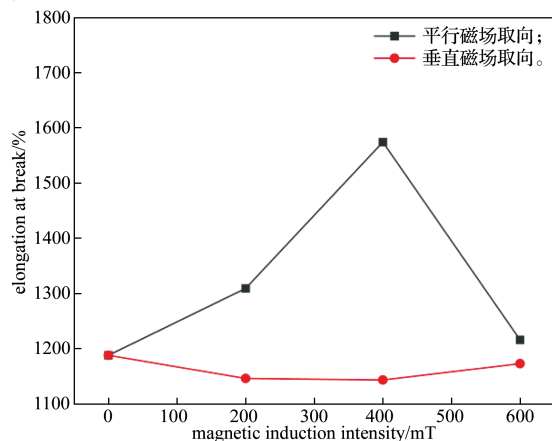
图 5 PAM/Fe₃O₄ 磁诱导取向水凝胶的拉伸强度 - 磁感应强度曲线图

Fig. 5 The tensile strength-magnetic induction intensity curve of PAM/Fe₃O₄ magnetically induced intensity oriented hydrogel

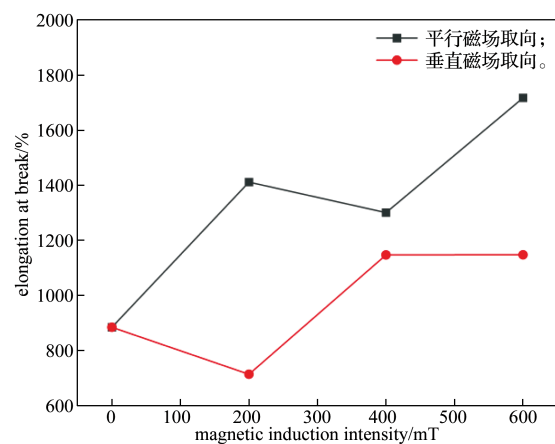
从图 5 中可以看出, 平行磁场取向水凝胶的拉伸强度均大于垂直磁场取向水凝胶的, 且当磁感应强度增大时, 平行磁场取向水凝胶与垂直取向水凝胶的拉伸强度均增大, 说明磁场诱导的取向结构可以有效提高水凝胶的拉伸强度。随着磁感应强度的增大, 平行磁场取向水凝胶的拉伸强度增长趋势变缓。当样品 2# 经磁场 (磁感应强度为 600 mT) 诱导形成水凝胶后, 平行磁场取向水凝胶的拉伸强度达到最大值, 为 0.38 MPa。这可能是因为磁性纳米粒子的取向程度随着磁场强度的增大而增大。当磁场强度增大到一定程度后, 取向结构基本趋于稳定, 拉伸强度基本达到饱和状态, 此时增强效果不明显。

3.2.3 水凝胶的断裂伸长率 - 磁场强度曲线

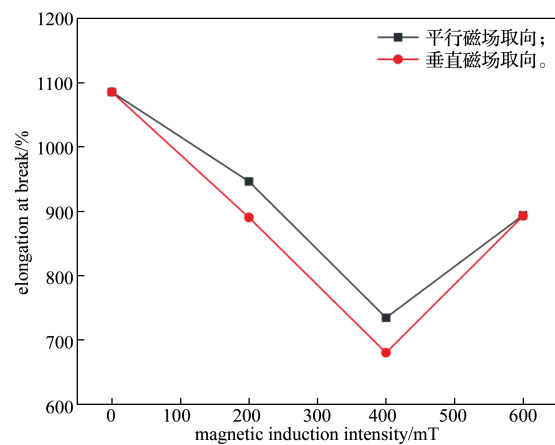
图 6 为 PAM/Fe₃O₄ 磁诱导取向水凝胶的断裂伸长率 - 磁场强度曲线。



a) 样品 1# 制备的水凝胶



b) 样品 2# 制备的水凝胶



c) 样品 3# 制备的水凝胶

图 6 PAM/Fe₃O₄ 磁诱导取向水凝胶的断裂伸长率 - 磁感应强度曲线图

Fig. 6 The elongation at break-magnetic induction intensity curve of PAM/Fe₃O₄ magnetically induced intensity oriented hydrogel

图 6a、图 6b 和图 6c 所用水凝胶分别是通过样品 1#、2# 和 3# 制备得到的。综合图 6 进行分析, 在相同磁感应强度下, 平行磁场取向水凝胶的断裂伸长率大于垂直磁场取向水凝胶的。从图 6b 可见, 当样品 2# 经磁场 (磁感应强度为 600 mT) 诱导后, 平行磁场取向水凝胶的断裂伸长率达到最大值, 为 1717%。

3.3 水凝胶的取向结构观察

结合上文, 选择样品 2# 预聚液分别在不同磁感应强度下 (0, 200, 400, 600 mT) 诱导形成水凝胶并进行取向结构表征。通过电脑型正反射金相显微镜对 PAM/Fe₃O₄ 磁诱导取向水凝胶的取向结构进行观察和分析, 结果如图 7 所示。在零磁场条件下诱导形成的水凝胶中, Fe₃O₄ 磁性纳米粒子排列杂乱且不明

显(见图 7a)。在磁感应强度较低条件下诱导形成的水凝胶中, Fe_3O_4 磁性纳米粒子的混乱程度降低,水凝胶内部已形成微取向结构(见图 7b)。在磁感应强度为 400 mT 条件下诱导形成的水凝胶中,内部取向程度增大(见图 7c)。从图 7d 中可以看出,在磁感应强度为 600 mT 条件下诱导形成的水凝胶中, Fe_3O_4 磁性纳米粒子的排列更加紧密。综合图 7 可知,随着磁感应强度的增大, Fe_3O_4 磁性纳米粒子在磁感线方向上的排列更加紧密,促使 Fe_3O_4 磁性纳米粒子与 PAM 分子链形成更为紧凑的取向结构。

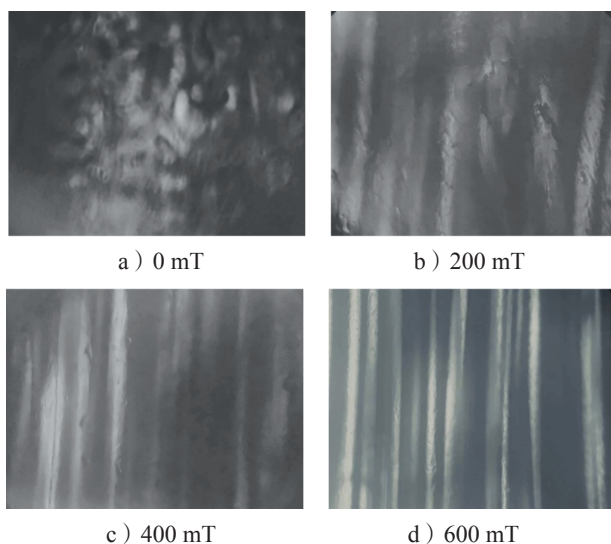


图 7 样品 2# 预聚液在不同磁感应强度下诱导形成的水凝胶的显微镜图

Fig. 7 Microscopic images of the hydrogels induced by sample 2# prepolymer under different magnetic induction intensities

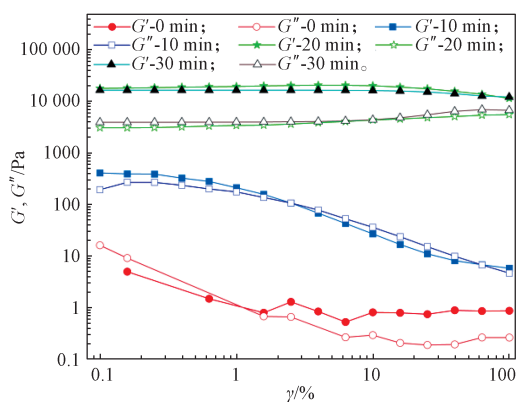
3.4 水凝胶的流变性能分析

为了进一步分析水凝胶的结构与宏观力学行为的关系,选择样品 2# 预聚液在不同交联时间和不同磁感应强度条件下进行动态流变学性能测试,温度为 25 $^{\circ}\text{C}$ 。

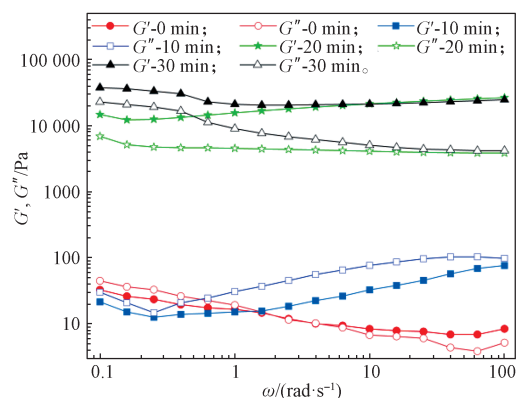
3.4.1 不同交联时间下样品 2# 预聚液的流变性能测试

图 8 为不同交联时间下样品 2# 预聚液的流变性能测试结果。图 8a 是交联时间分别为 0, 10, 20, 30 min 时对应的应变扫描曲线。在交联时间分别为 0 和 10 min 的样品中,储存模量(G')和耗损模量(G'')曲线相交,表现为液体性质。在交联时间为 20 min 时,样品 2# 预聚液的 G' 大于 G'' ,表明此时凝胶已基本形成。图 8b 是交联时间分别为 0, 10, 20, 30 min 时的频率扫描曲线。在样品 2# 预聚液交联时间分别为 20

和 30 min 时,在高频区,二者的 G' 值接近;在低频区,交联 20 min 时预聚液的 G' 值较低。这是因为在低频区的观察时间较长,结构体现更为明显,也进一步说明随着交联时间的增加,预聚液会逐渐形成水凝胶。在交联时间为 20 min 时,预聚液逐渐形成水凝胶,但是此时水凝胶还未完全成型。因此,为保证预聚液充分凝胶化,光固化时间应不少于 30 min。



a) 应变扫描



b) 频率扫描

图 8 样品 2# 预聚液在不同交联时间条件下的流变性能测试
Fig. 8 The rheological properties of sample 2# prepolymer solution under different crosslinking time conditions

3.4.2 样品 2# 预聚液制备的水凝胶的流变性能测试

图 9 为样品 2# 预聚液制备而成的水凝胶的流变性能测试曲线。将样品 2# 预聚液置于 0 mT 和 600 mT 的磁感应强度条件下(垂直磁场取向),经光固化 30 min 后制备得到水凝胶,并对其进行应变扫描和频率扫描,制备得到的水凝胶分别命名为 0 mT-30 min 非取向水凝胶和 $\perp$ 600 mT-30 min 取向水凝胶。从图 9a 可以看出,0 mT-30 min 非取向水凝胶和 $\perp$ 600 mT-30 min 取向水凝胶的 G' 均大于 G'' ,表明此时水凝胶网络结构均已基本稳定。从图 9b 可以看

出, 在低频区, 0 mT-30 min 非取向水凝胶的 G' 大于 $\perp 600$ mT-30 min 取向水凝胶的, 说明非取向水凝胶的结构更稳定。随着扫描频率的增大, 两者的 G' 在高频区基本一致, 这是因为在高频区属于短期观察, 水凝胶结构体现不明显。

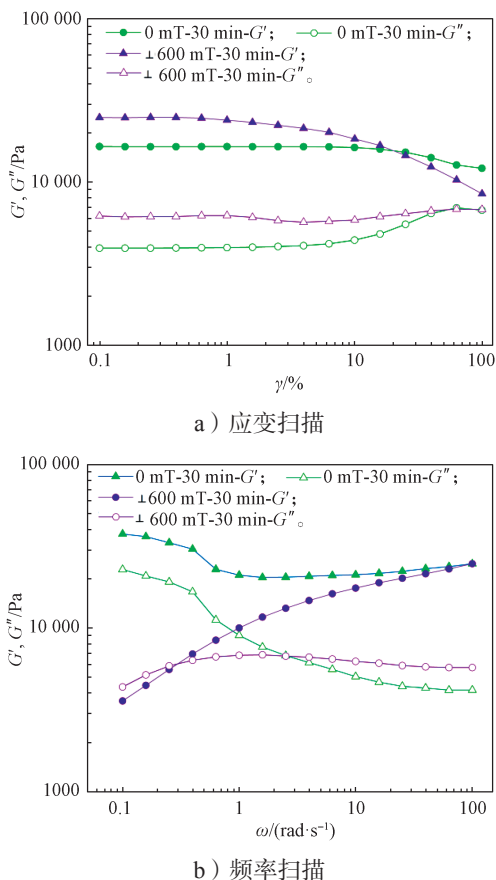


图9 样品 2# 预聚液制备的水凝胶的流变性能测试
Fig. 9 The rheological properties of the hydrogel prepared by sample 2# prepolymer

4 结论

本研究通过搭建电磁铁-永磁材料测试系统作为磁场强度可调节的匀强磁场, 在不同磁场条件下经光固化成功制备了具有不同取向度的 PAM/ Fe_3O_4 磁诱导取向水凝胶。经磁场诱导后, Fe_3O_4 磁性纳米粒子在磁场作用下沿磁场方向有序排列, 并牵引 PAM 中的分子链共同构成致密的取向结构, 有效提升了 PAM/ Fe_3O_4 磁诱导取向水凝胶的力学性能。实验结果表明, 为保证预聚液充分凝胶化, 光固化时间需满足 30 min。平行磁场取向水凝胶的拉伸强度和断裂伸长率都要大于垂直磁场取向水凝胶的, 且水凝胶的拉伸强度随磁场强度的增大而增大。当样品 2# 预聚液在

磁感应强度为 600 mT 的磁场下诱导形成水凝胶时, 平行磁场取向水凝胶的拉伸强度和断裂伸长率达到最大, 分别为 0.38 MPa 和 1717%。在强磁场诱导条件下形成的取向结构有效改善了 PAM/ Fe_3O_4 磁诱导取向水凝胶的力学性能, 在磁响应智能材料领域中展现出良好的应用前景。

参考文献:

- [1] JIANG N S, YU T Y, ZHANG M, et al. Effect of Micellar Morphology on the Temperature-Induced Structural Evolution of ABC Polypeptoid Triblock Terpolymers into Two-Compartment Hydrogel Network[J]. *Macromolecules*, 2024, 57(14): 6449–6464.
- [2] 陈大旗, 付 华, 殷祝平, 等. 丝素蛋白取向水凝胶的研制 [J]. *丝绸*, 2017, 54(8): 1–7.
- [3] HOFFMAN A S. Hydrogels for Biomedical Applications[J]. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 2012, 64: 18–23.
- [4] DRURY J L, MOONEY D J. Hydrogels for Tissue Engineering: Scaffold Design Variables and Applications[J]. *Biomaterials*, 2003, 24(24): 4337–4351.
- [5] LEE K Y, MOONEY D J. Hydrogels for Tissue Engineering [J]. *Chemical Reviews*, 2001, 101(7): 1869–1879.
- [6] RUDZINSKI W E, DAVE A M, VAISHNAV U H, et al. Hydrogels as Controlled Release Devices in Agriculture[J]. *Designed Monomers and Polymers*, 2002, 5(1): 39–65.
- [7] 相 梅, 贺昌城, 汪辉亮. 磁性高强度聚丙烯酰胺 / Fe_3O_4 纳米复合水凝胶 [J]. *物理化学学报*, 2011, 27(5): 1267–1272.
- [8] 化泽坤, 赵一诺, 张 萌, 等. 具有各向异性的导电水凝胶用于骨再生的研究 [J]. *医用生物力学*, 2024, 39(增刊 1): 622.
- [9] 何进伟, 周 栋. 磁响应性水凝胶在肿瘤诊断和治疗中的应用研究进展 [J]. *肿瘤学杂志*, 2024, 30(2): 151–156.
- [10] WANG Y Y, JIANG X Y, LI X S, et al. Bionic Ordered Structured Hydrogels: Structure Types, Design Strategies, Optimization Mechanism of Mechanical Properties and Applications[J]. *Materials Horizons*, 2023, 10(10): 4033–4058.
- [11] SHI M T, BAI L, XU M G, et al. Magnetically Induced Anisotropic Conductive In Situ Hydrogel for Skeletal Muscle Regeneration by Promoting Cell Alignment and Myogenic Differentiation[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 484: 149019.
- [12] XU Z, CHEN H, YANG H B, et al. Hierarchically

- Aligned Heterogeneous Core-Sheath Hydrogels[J]. *Nature Communications*, 2025, 16(1): 400.
- [13] TAGHIZADEH S, TAYEBI L, AKBARZADEH M, et al. Magnetic Hydrogel Applications in Articular Cartilage Tissue Engineering[J]. *Journal of Biomedical Materials Research Part A*, 2024, 112(2): 260–275.
- [14] CHEN Z H, CHEN H, FANG K W, et al. Magneto-Thermal Hydrogel Swarms for Targeted Lesion Sealing[J]. *Advanced Healthcare Materials*, 2025, 14(2): 2403076.
- [15] 董黎明, 陈金雨, 袁 源, 等. 磁性水凝胶的制备及其应用研究进展 [J]. *化学试剂*, 2023, 45(2): 1–10.
- [16] 邹 健, 陈 卓, 王盛冀, 等. 导电水凝胶中交联剂含量对综合性能的影响 [J]. *包装学报*, 2022, 14(6): 80–89.
- [17] 牛 锐. 果胶基高强度水凝胶的制备及其性能表征 [D]. 天津: 天津大学, 2018.
- [18] HAN Z L, WANG P, LU Y C, et al. A Versatile Hydrogel Network-Repairing Strategy Achieved by the Covalent-Like Hydrogen Bond Interaction[J]. *Science Advances*, 2022, 8(8): eabl5066.
- [19] 舒 震. 高强韧聚乙烯醇/海藻酸钠磁响应水凝胶及聚丙烯酰胺基导电磁响应水凝胶的制备应用研究 [D]. 北京: 北京化工大学, 2022.
- (责任编辑: 李 涛)

Study on the Preparation and Properties of Polyacrylamide/Fe₃O₄ Magnetically Induced Oriented Hydrogel

XIE Tao, LI Xianggang, TONG Jingjing, ZHEN Hongli, YIN Qianmei, FENG Yan

(School of Packaging Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: Polyacrylamide/Fe₃O₄ (PAM/Fe₃O₄) magnetically induced oriented hydrogels were successfully prepared by using acrylamide (AM) as the matrix material, N,N'-methylenebisacrylamide (MBAA) as the crosslinking agent and ammonium persulfate (APS) as the initiator under different magnetic induction conditions. The results of Fourier transform infrared spectroscopy showed that obvious intermolecular hydrogen bonds were formed between Fe₃O₄ and polyacrylamide. The mechanical properties and rheological properties of PAM/Fe₃O₄ magnetically induced oriented hydrogels were analyzed by strain-controlled rotational rheometer, and the orientation structure of the hydrogels was analyzed by metallographic microscope. The results showed that the tensile strength and elongation at break of the parallel magnetic field oriented hydrogel were better than those of the vertical magnetic field oriented hydrogel. The mechanical properties of parallel magnetic field oriented hydrogels were better than those of zero magnetic field oriented hydrogels. With the increase of magnetic induction intensity, the tensile strength of PAM/Fe₃O₄ magnetic induction oriented hydrogel became larger, and the orientation structure was more obvious. With the increase of AM content, the mechanical properties of hydrogels increased first and then decreased. The PAM/Fe₃O₄ magnetically induced oriented hydrogel has a good application prospect in the field of magnetic response intelligent bionic materials.

Keywords: polyacrylamide; hydrogel; mechanical property; rheological property; oriented structure