

# 水溶性紫外线吸收剂的合成及其抗紫外水凝胶研究

黄亚琼<sup>1\*</sup>, 余鹏<sup>2</sup>

(1. 湖北科技学院 核技术与化学生物学院, 湖北 咸宁 437000;

2. 湖北工业大学 材料与化学工程学院/绿色轻工材料湖北省重点实验室, 湖北 武汉 201800)

**摘要:** 以含苯甲酮结构的紫外吸收剂衍生物为原料,进行亲水改性,获得含有反应活性基团的水溶性紫外线吸收剂。通过核磁共振(NMR)、傅立叶红外光谱(FTIR)、X射线光电子能谱(XPS)和毒理性实验,表征了水溶性紫外线吸收剂的结构及毒性。实验结果表明,水溶性紫外线吸收剂具有良好抗紫外性能并且无毒性。此外,将水溶性紫外线吸收剂应用于水凝胶中制备出抗紫外水凝胶,并测试了其紫外吸收效果和透光度。实验结果表明,与市售的抗紫外隐形眼镜相比,制备的水凝胶具有更高的抗紫外性能和可见光透光度。

**关键词:** 紫外线吸收剂;磺化;水溶性;水凝胶

中图分类号: TU411.7

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Study on synthesis of water soluble UV absorber and its application in anti UV gel

HUANG Yaqiong<sup>1\*</sup>, YU Peng<sup>2</sup>

(1. College of Nuclear Technology and Chemical Biology, Hubei University of Science and Technology,

Xianning 437000, China;

2. School of Materials and Chemical Engineering / Hubei Provincial Key Laboratory of Green Materials for Light Industry,

Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

**Abstract:** Water-soluble UV absorbers containing reactive groups were obtained by hydrophilic modification of UV absorber derivatives containing benzophenone structures as raw materials. The structure and toxicity of the water-soluble UV absorbers were characterized by nuclear magnetic resonance (NMR), Fourier infrared spectroscopy (FTIR), X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) and toxicology experiments. The experimental results showed that the water-soluble UV absorbers had good UV resistance and contain non-toxic properties. In addition, water-soluble UV absorbers were applied to hydrogel to produce UV-resistant hydrogel, and their UV absorption and transmittance were tested. The experimental results showed that the prepared hydrogel had higher UV resistance and visible light transmission than commercially available UV resistant contact lenses.

**Key words:** UV absorbent; sulfonation; water solubility; hydrogel

## 0 引言

紫外线是一种波长 10~400 nm 的电磁波,它是太阳光中能量最高的光线。根据波长可分为 UVC(波长 100~280 nm)、UVB(波长 280~320 nm)和 UVA(波长 320~400 nm)3 种波段<sup>[1]</sup>。其

中,只有 UVA 和 UVB 能到达地面,UVB 光线可促进维生素 D 的合成,有助于骨骼健康,同时它也会导致皮肤晒伤。长时间暴露在 UVB 下会引起皮肤红肿、疼痛、起水疱等,还可能导致皮肤老化和皮肤癌<sup>[2]</sup>。UVA 波长能穿透玻璃、云层和皮肤深层,因此室内或阴天也需要防护,长期暴露在

收稿日期:2024-01-09;修回日期:2024-03-21;\*.通信联系人,E-mail:18671562826@163.com

基金项目:湖北省自然科学基金项目(2017CFB284);湖北科技学院横向项目(2023HX088, 2023HX022);湖北科技学院校级科研项目(2021-22X05);湖北科技学院博士启动基金项目

作者简介:黄亚琼(1985—),女,湖北武汉人,副教授,博士,主要从事水溶性紫外线吸收剂的合成及其抗紫外水凝胶的研究。

引用格式:黄亚琼,余鹏.水溶性紫外线吸收剂的合成及其抗紫外水凝胶研究[J].信阳师范大学学报(自然科学版),2025,38(2):201-206.

HUANG Yaqiong, YU Peng. Study on synthesis of water soluble UV absorber and its application in anti UV gel[J]. Journal of Xinyang Normal University (Natural Science Edition), 2025, 38(2):201-206.

UVA 下也会导致皮肤老化和皮肤癌。紫外线也会损害眼睛,如角膜炎、白内障、黄斑病变<sup>[3]</sup>。尤其在海滩、雪地、高海拔地方紫外线更强,眼部损伤的风险更高,所以使用防护产品很有必要。抗紫外吸收剂是一类能吸收紫外线的有机化合物,常用于防晒和化妆品,主要是通过形成保护膜,吸收、散射和反射紫外线,从而减少伤害<sup>[4]</sup>。常见的能够吸收 UVA 和 UVB 抗紫外吸收剂,如氧苯酮、环己基甲酮、苯甲酸 2-乙基己基酯等。

抗紫外吸收剂又叫防晒剂,分为油溶性和水溶性两种不同类型。油溶性防晒剂溶于油,不溶于水,但可能对人体有毒性和过敏反应,也对环境有污染风险<sup>[5]</sup>。相比之下,水溶性防晒剂更安全,溶于水,对人体毒性小,不易引发过敏。水溶性防晒剂能够在肌肤上形成薄膜,提供更好的防晒效果。此外,水溶性防晒剂能迅速分解和被生物降解,对环境影响小。因此,水溶性防晒剂的研究备受关注。刘欢等<sup>[6]</sup>以三聚氯氰等为原料,经 3 步反应合成一种具有双活性基团的水溶性紫外吸收剂,这种紫外吸收剂水溶性得到大幅改善,在 240~320 nm 内表现良好,酸碱稳定性也较好。王文波等<sup>[7]</sup>以 2,4-二羟基二苯酮、环氧氯丙烷和聚乙二醇(PEG-400)为原料,通过开环和闭环反应,制备了二苯酮聚氧乙烯醚水溶性紫外吸收剂。结果表明,二苯酮聚氧乙烯醚水溶性紫外吸收剂在 279.05 nm 和 305.28 nm 处有吸收峰,并具有良好的光稳定性。

含二苯甲酮结构的紫外吸收剂是一种常用于防晒和化妆品中的化学性抗紫外吸收剂,能够有效吸收 UVA 和 UVB 波段的紫外线,提供良好的防晒效果,并且具有稳定性高的优点<sup>[8]</sup>。然而,这种化合物疏水性较强,易在肌肤表面堆积,导致毛孔堵塞和粉刺的产生,并且难以分解和被生物降解。因此,本文对含苯甲酮结构的紫外吸收剂进行亲水改性,制备了水溶性紫外吸收剂,利用核磁共振(NMR)、傅立叶红外光谱(FTIR)、X 射线光电子能谱(XPS)和毒性实验等表征了水溶性紫外吸收剂的结构及毒性,并计算其产率。然后将其应用到水凝胶体系,制备出抗紫外水凝胶,并测试了抗紫外水凝胶的性能。

## 1 实验部分

### 1.1 化学试剂与材料

2-羟基-4-丙烯甲氧基二苯甲酮、二氯甲烷、氯

磺酸、氢氧化钠、碳酸氢钠、丙烯酰胺、过硫酸铵、N,N-异丙基双丙烯酰胺,化学纯,由国药集团化学试剂有限公司提供;硫化锌量子点,自制。防紫外隐形眼镜,夕润 UV38%,科莱博公司;去离子水,美国 Milli-Q 净水系统(Millipore)制备。

### 1.2 水溶性紫外吸收剂的合成

在二氯甲烷中,溶解 1 g 2-羟基-4-丙烯甲氧基二苯甲酮,然后在搅拌下,加入摩尔质量为 1~2 倍的氯磺酸,20~35 °C 下搅拌反应 4 h。反应后的溶液,加入过量的碳酸钠,搅拌反应 0.5 h 后,过滤获得清液。清液加入等量的水,然后分液取水溶液。水溶液在 80 °C,旋转蒸发仪下获得浅黄色粉末。样品在 80 °C 下干燥 48 h 后,称重备用。

### 1.3 产率的测定

水溶性紫外吸收剂产品的产率,计算公式(1)如下:

$$P = \frac{m_1 \times 228}{m_0 \times 330} \times 100\%, \quad (1)$$

式中: $P$ 为产率, $m_0$ 为 2-羟基-4-丙烯甲氧基二苯甲酮的质量, $m_1$ 为反应后得到紫外吸收剂的质量。

### 1.4 抗紫外水凝胶的制备

在含有去离子水的培养皿中,加入质量分数为 10% 的丙烯酰胺,然后依次加入丙烯酰胺质量分数为 1% 的过硫酸铵,0.5% 的 N,N-异丙基双丙烯酰胺,溶解后,加入总质量分数为 0.2%~8.0% 的水溶性紫外吸收剂,控制整个溶液的厚度为 0.1 mm,然后将培养皿密封,80 °C 水浴加热 2 h,获得抗紫外水凝胶,流程如图 1 所示。

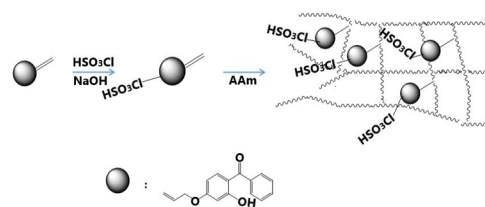


图 1 实验流程图

Fig. 1 Experimental flowchart

### 1.5 毒性实验

人类永生表皮细胞(hacat)和皮肤成纤维细胞(ws1)置于 DMEM 培养基中,培养基中含有 10% (V/V) 热灭活的胎牛血清,青霉素(100 μg/mL)和青霉素链霉素(100 μg/mL),培养环境 37 °C,含有 5% CO<sub>2</sub> 的潮湿环境。在进行毒性实验之前,细胞接种于 24 孔板(5×10<sup>4</sup> 细胞/孔)中,过夜培养后备用。然后将细胞置于水溶性紫外吸

收剂溶液中,在48 h后,通过MTT方法来测试细胞的新陈代谢活性。MTT法重复进行3次,取平均值。

### 1.6 实验表征

干燥后的样品在红外光谱分析仪(Nicolet iS50)上采用全反射模式测试傅里叶红外光谱分析(FTIR),分辨率 $4\text{ cm}^{-1}$ ,扫描次数32次,光谱范围是 $400\sim 4000\text{ cm}^{-1}$ ;采用美国赛默飞公司ESCALAB 250Xi进行X射线光电子能谱(XPS)测试,元素谱通能为 $40\text{ eV}$ ,分析室压力为 $10^{-8}\sim 10^{-7}\text{ Pa}$ ;核磁共振(NMR)采用美国瓦里安300 MHz核磁共振进行测试,溶剂为DMSO;水凝胶样品,利用日本岛津UV-600紫外可见光分光光度计上进行 $200\sim 760\text{ nm}$ 的全波段扫描,分别测量其吸收和透光光谱。

## 2 结果与讨论

### 2.1 水溶性紫外线吸收剂的化学结构表征

2-羟基-4-丙烯甲氧基二苯甲酮(4A2H)和2-羟基-4-丙烯甲氧基二苯甲酮磺酸钠(4A2H-SO<sub>3</sub>Na)的FTIR光谱如图2a所示,水溶性紫外线吸收剂4A2H-SO<sub>3</sub>Na在 $3459\text{ cm}^{-1}$ 、 $1082\text{ cm}^{-1}$ 和 $552\text{ cm}^{-1}$ 出现了一组新峰,为磺酸钠基团的特征峰<sup>[9]</sup>。而 $1625$ 、 $1257\text{ cm}^{-1}$ 分别归属于酮基的C=O拉伸振动峰和羟基中—C—O的伸缩振动

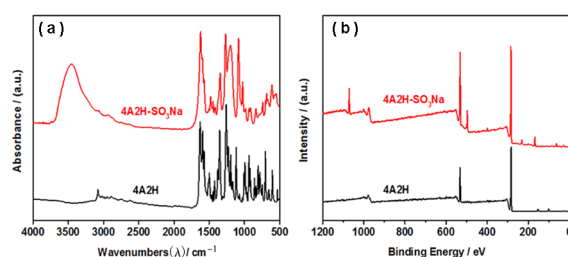


图2 紫外线吸收剂的红外光谱(a)和XPS全谱(b)  
Fig. 2 Infrared spectra(a) and XPS full spectrum(b) of UV absorbers

峰,证明4A2H在磺化反应过程中,基本化学基团并没有发生变化。红外结果表明4A2H成功地发生了磺化反应,并且没有破坏原紫外吸收剂的苯甲酮化学结构。

通过XPS对紫外线吸收剂的元素和价态进行了测试,结果如图2b和图3所示。XPS全谱(图2b)显示,紫外线吸收剂4A2H-SO<sub>3</sub>Na在 $1071\text{ eV}$ 和 $497.4\text{ eV}$ 处出现了两个新峰,分别是Na元素的1s和Auger峰位, $168\text{ eV}$ 处的新峰是S的1s峰<sup>[10]</sup>。

由图3可知,C1s中 $286.7\text{ eV}$ 的新峰是与磺酸基团直接相连的碳的信号峰;O1s在 $531.5\text{ eV}$ 处的新峰,是磺酸基团中氧的峰位;S1s和Na1s的新峰,分别是磺酸钠中S和Na的峰位<sup>[11]</sup>。这些峰来自磺酸钠基团。与紫外线吸收剂4A2H相比,在XPS曲线上多出的峰,均来自磺酸钠基团,说明磺酸基团成功地反应到了抗紫外剂上。

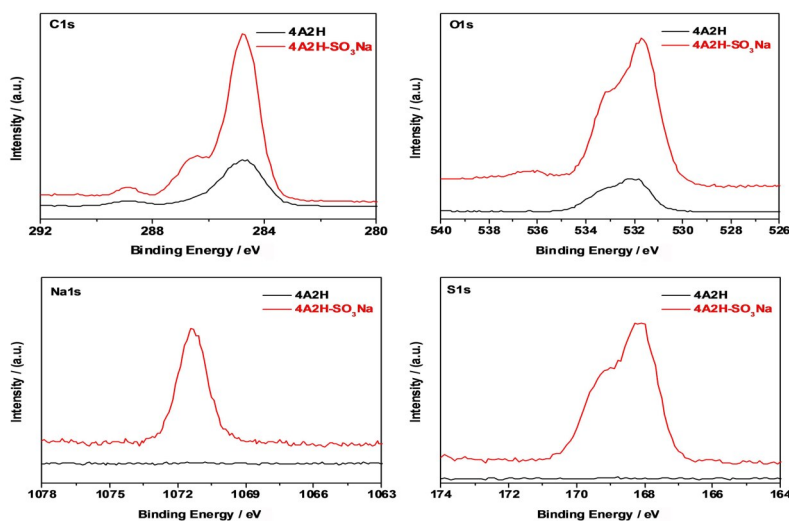


图3 紫外线吸收剂的XPS光谱  
Fig. 3 XPS spectra of UV absorbers

通过核磁H谱和C谱可以分析水溶性紫外线吸收剂的准确化学结构,紫外线吸收剂

4A2H-SO<sub>3</sub>Na和4A2H的核磁图谱如图4所示。<sup>1</sup>HNMR和<sup>13</sup>CNMR谱图证明,成功合成具有水溶

性的紫外线吸收剂,其具有一个磺酸钠基团,磺酸钠基团位于苯环六号位,可命名为2-羟基-4-丙炔甲氧基-6-磺酸钠基-二苯甲酮<sup>[12]</sup>。

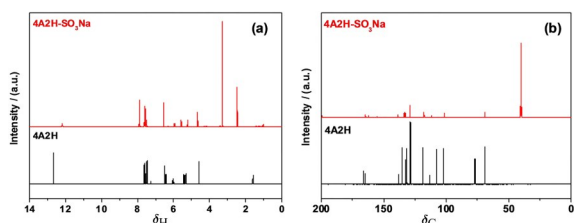


图 4 紫外线吸收剂的<sup>1</sup>H NMR和<sup>13</sup>C NMR光谱

Fig. 4 <sup>1</sup>H NMR<sup>13</sup> and <sup>13</sup>C NMR spectra of UV absorbers

此外,<sup>1</sup>H NMR中,原始样品 $\delta_{\text{H}}=12.6$ 处羟基的峰完全消失,这说明,在酸碱中和反应的过程中,羟基的氢被钠取代。这种结构的变化更有利于其水溶性的提高。故推测其反应方程式应如图5所示。

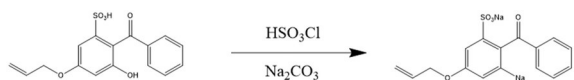


图 5 紫外线吸收剂制备的反应方程式

Fig. 5 Reaction equation for the preparation of UV absorbers

## 2.2 水溶性紫外线吸收剂反应动力学研究

固定反应温度 35 °C 保持不变,考察产率随着氯磺酸摩尔比和反应温度的变化规律如图6所示。如图6a所示,在反应时间内,产率随着氯磺酸摩尔比的增加而增加,从66%增加到83%,随后达到一定的平衡。其中当氯磺酸与原料摩尔比在1.5时,水溶性紫外线吸收剂的产率较高。

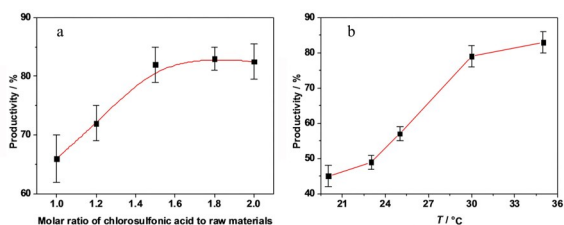


图 6 紫外线吸收剂产率随着氯磺酸摩尔比(a)和反应温度(b)的变化

Fig. 6 Variation of UV absorber productivity with chlorosulfonic acid molar ratio (a) and reaction temperature (b)

图6b中,水溶性紫外线吸收剂的产率随着温度的升高而升高,从20 °C的45%升到35 °C的83%,这是由于温度的升高会促进溶液中分子的热运动,增加分子碰撞概率,从而提高反应转化

率。由于溶剂沸点的影响,并不能研究更高温度下的产率。在反应条件内,产率在反应温度35 °C下产率最高。

## 2.3 水溶性紫外线吸收剂毒理性研究

水溶性紫外线吸收剂更多的应用领域在化妆品、隐形眼镜等行业,直接与人体接触,关系到人身健康和安全问题。因此紫外线吸收剂应具有无毒的特性。本研究通过hacat细胞和ws1细胞来检验所合成紫外线吸收剂的毒理性,实验结果如图7所示。整体上,水溶性紫外线吸收剂溶液浓度的增加,会降低细胞的存活率,但降低的幅度较低。同时,在10%的高浓度下,hacat和ws1细胞的存活率均超过94%,证明其基本没有毒性<sup>[13]</sup>。而且在低浓度下,细胞的存活率非常高,证明其是一种安全无毒的水溶性紫外线吸收剂。

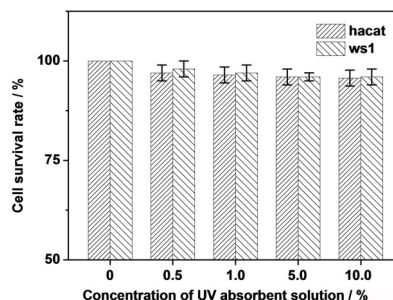


图 7 不同紫外线吸收剂浓度下细胞的存活率

Fig. 7 Cell survival rate under different concentrations of UV absorbers

## 2.4 抗紫外水凝胶的性能研究

将不同含量的水溶性紫外线吸收剂加入水凝胶中,合成出厚度为1 mm的水凝胶材料,如图8所示。

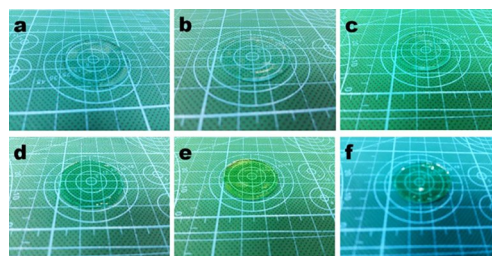


图 8 不同紫外线吸收剂含量的水凝胶图片

Fig. 8 Pictures of hydrogel with different UV absorber contents

a: 0%; b: 0.2%; c: 0.4%; d: 2%; e: 4%; f: 8%

实验结果证明,抗紫外水凝胶具有良好的透明性,但是随着吸收剂含量的增加,水凝胶的颜色加深,其中0.2%和0.4%含量的水凝胶体现出更

优异的透光性,对于其在光学方面的应用具有重要的意义<sup>[14]</sup>。

抗紫外水凝胶的紫外吸收如图9所示。

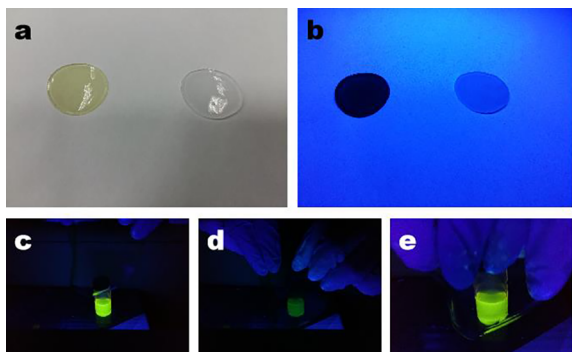


图9 抗紫外水凝胶在紫外灯下的照片

a: 日光灯下; b: 紫外灯(365 nm)下和对量子点紫外线屏蔽效果图; c: 无屏蔽; d: 抗紫外水凝胶; e: 丙烯酰胺水凝胶

**Fig. 9 Photographs of UV-resistant hydrogel under UV lamp**  
a: Under fluorescent light; b: Under UV lamp (365 nm) and for quantum dot UV shielding; c: Without shielding; d: UV-resistant hydrogel; e: Acrylamide hydrogel

日光下,纯的聚丙烯酰胺水凝胶显示出透明状态,而抗紫外水凝胶显示出浅黄色,这是因为抗紫外水凝胶吸收了日光中的紫外波段;而在紫外灯照射下,抗紫外水凝胶显示出强烈的紫外吸收性能,几乎显示出黑色,而纯的聚丙烯酰胺依然显示出透明状态,证明紫外吸收剂起到良好的紫外吸收效果。为了验证聚丙烯酰胺水凝胶和抗紫外水凝胶的吸收性能,对其进行了吸收光谱测试,结果如图10所示。

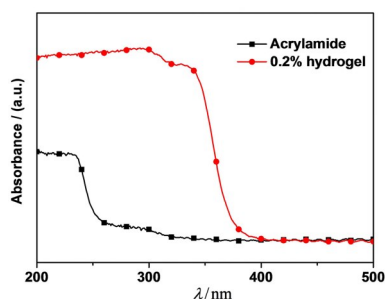


图10 抗紫外水凝胶的紫外可见吸收光谱

**Fig. 10 UV-Vis absorption spectra of UV-resistant hydrogel**

从图10中可以看出,抗紫外水凝胶在整个紫外光谱(波长200~600 nm)范围内都显示出吸收能力<sup>[15]</sup>,最佳吸收范围为200~350 nm。图9c—e利用量子点紫外发光的性能,定性地测试了水凝胶的抗紫外能力。综上,加入紫外线吸收剂的水凝胶具有明显的抗紫外效果,而聚丙烯酰胺水凝胶

几乎没有抗紫外效果。

向水凝胶中加入不同紫外线吸收剂含量,进行定量的测量其紫外可见吸收效果,测量结果如图11所示。

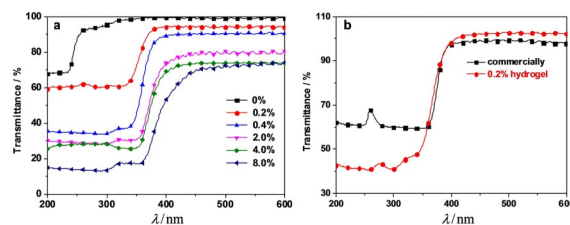


图11 水凝胶紫外-可见透光度曲线图

a: 不同紫外线吸收剂含量;

b: 含量0.2%水凝胶与市售隐形眼镜

**Fig. 11 UV-Vis transmission curves of hydrogel**

a: Different levels of UV absorbers;

b: 0.2% hydrogel and commercially available contact lenses

从图11a中可以看出,随着紫外线吸收剂含量的增加,抗紫外效果明显,最高可降低80%的紫外辐照(1 mm厚度下);但是随着紫外线吸收剂含量的增加,水凝胶的颜色不断加深,会影响可见光的透过,因此使用量不能太高。从测试结果发现,当紫外线吸收剂含量低于0.4%时,水凝胶具有良好的可见光透过性,甚至好于纯的聚丙烯酰胺,同时具有更强更宽的紫外吸收能力。因此,实际应用时,建议添加量为0.4%为宜。

为了进一步比较抗紫外水凝胶的抗紫外效果,将合成的水凝胶(紫外线吸收剂含量为0.2%)与市售同样厚度(1 mm)的隐形眼镜进行比较,如图11b所示。结果显示,抗紫外水凝胶具有更优异的抗紫外效果,可提高50%,而且抗紫外水凝胶在可见光范围表现出突出的透光性。因此推断抗紫外水凝胶或紫外线吸收剂可能在隐形眼镜等领域有着潜在的应用价值。

### 3 结论

成功利用磺酸化的方法简单有效地将2-羟基-4-丙烯甲氧基二苯甲酮改性成水溶性紫外线吸收剂。通过FTIR、XPS、NMR等分析,表征了紫外线吸收剂的化学结构。通过合成反应动力学筛选了最优的反应条件:反应温度为35℃,氯磺酸与原料摩尔比为1.5。另外将紫外线吸收剂应用到水凝胶中,合成了具有优异抗紫外性能的水凝胶。尤其含量低于0.4%时,相较于市售的隐形眼镜,具有更高的抗紫外性能和可见光透过性能。

**参考文献:**

- [1] 谭西顺. 夏季紫外线防护[J]. 劳动保护, 2007(7): 114.  
TAN Xishun. UV protection in summer[J]. Labour Protection, 2007(7): 114.
- [2] SANTOS-FERNANDEZ M, JEANNE DIT FOUQUE K, FERNANDEZ-LIMA F. Integration of trapped ion mobility spectrometry and ultraviolet photodissociation in a quadrupolar ion trap mass spectrometer[J]. Analytical Chemistry, 2023, 95(22): 8417-8422.
- [3] DELIC N C, LYONS J G, DI GIROLAMO N, et al. Damaging effects of ultraviolet radiation on the cornea[J]. Photochemistry and Photobiology, 2017, 93(4): 920-929.
- [4] 刘艳霞, 周莉莉, 冯献起. 高强度聚 N-异丙基丙烯酰胺-黏土纳米复合水凝胶的制备及表征[J]. 信阳师范学院学报(自然科学版), 2019, 32(3): 449-452.  
LIU Yanxia, ZHOU Lili, FENG Xianqi. Fabrication and characterization of high strength PNIPAm/clay nanocomposite hydrogels[J]. Journal of Xinyang Normal University (Natural Science Edition), 2019, 32(3): 449-452.
- [5] 杨再猛. 抗紫外吸收剂和抗氧剂对一种新型太阳能光伏膜光老化性能的影响[J]. 塑料助剂, 2020(2): 38-43.  
YANG Zaimeng. Photoaging properties of anti-ultraviolet additives and antioxidants in a novel solar photovoltaic film[J]. Plastic Additives, 2020(2): 38-43.
- [6] 刘欢, 杨秀, 李蓉, 等. 基于双活性基的水溶性紫外吸收剂的合成及表征[J]. 化学世界, 2018, 59(10): 621-627.  
LIU Huan, YANG Xiu, LI Rong, et al. Synthesis and characterization of water-soluble UV-absorber containing bi-reactive groups[J]. Chemical World, 2018, 59(10): 621-627.
- [7] 王文波, 陈国力, 王雅珍, 等. 二苯甲酮聚氧乙烯醚型水溶性紫外线吸收剂的合成与表征[J]. 印染助剂, 2018, 35(11): 14-18.  
WANG Wenbo, CHEN Guoli, WANG Yazhen, et al. Synthesis and characterization of diphenyl ketone polyoxyethylene ether water-soluble ultraviolet absorber[J]. Textile Auxiliaries, 2018, 35(11): 14-18.
- [8] 姜健, 王国宇, 路艳华, 等. 反应性抗紫外剂改性天然染料紫草素[J]. 丝绸, 2022, 59(8): 19-24.  
JIANG Jian, WANG Guoyu, LU Yanhua, et al. Modification of natural dye shikonin with reactive UV-absorbent[J]. Silk, 2022, 59(8): 19-24.
- [9] AHMED M, LAI B F L, KIZHAKKEDATHU J N, et al. Hyperbranched glycopolymers for blood biocompatibility[J]. Bioconjugate Chemistry, 2012, 23(5): 1050-1058.
- [10] DE LIMA XAVIER RIBEIRO G, DE CASTRO R S, DOS SANTOS R G, et al. Characterization of Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V alloy produced by laser-powder bed fusion and surface modification using nanosecond laser[J]. Materials Research, 2023, 26(S1): e20220544.
- [11] 曹书勤, 付新建, 叶俊涛, 等. 4-氨基水杨酸在一种超分子水凝胶中的释放行为研究[J]. 信阳师范学院学报(自然科学版), 2009, 22(2): 252-255, 280.  
CAO Shuqin, FU Xinjian, YE Juntao, et al. Release of 4-aminosalicylic acid from supramolecular hydrogel of gelator based on L-Phenylalanine derivatives[J]. Journal of Xinyang Normal University (Natural Science Edition), 2009, 22(2): 252-255, 280.
- [12] 俞显芳, 曹毅, 闫凯, 等. 反应型紫外吸收剂对天丝的紫外线防护整理[J]. 染整技术, 2016, 38(3): 56-59.  
YU Xianfang, CAO Yi, YAN Kai, et al. Anti-UV finishing of tencel fabrics with reactive UV absorber[J]. Textile Dyeing and Finishing Journal, 2016, 38(3): 56-59.
- [13] 曹机良, 孟春丽, 程献伟, 等. 反应型紫外吸收剂对蚕丝的紫外线防护整理[J]. 印染助剂, 2015, 32(10): 33-36.  
CAO Jiliang, MENG Chunli, CHENG Xianwei, et al. Anti-UV finishing of silk fabric with reactive UV-absorbent[J]. Textile Auxiliaries, 2015, 32(10): 33-36.
- [14] 刘霖泽, 吴银财, 林凤龙, 等. 紫外光助剂在聚合物包装材料中的应用[J]. 塑料, 2023, 52(4): 167-171, 177.  
LIU Linze, WU Yincai, LIN Fenglong, et al. Application of ultraviolet additives in polymer packaging materials[J]. Plastics, 2023, 52(4): 167-171, 177.
- [15] 李伦, 张静妍, 罗静, 等. UV/Vis-LED 激发的香豆素吡啶鎓盐光引发剂的合成及性能[J]. 高等学校化学学报, 2022, 43(10): 274-280.  
LI Lun, ZHANG Jingyan, LUO Jing, et al. Synthesis and properties of UV/Vis-LED excitable photoinitiators based on coumarin pyridinium salt[J]. Chemical Journal of Chinese Universities, 2022, 43(10): 274-280.

责任编辑: 张 钰