

针板电晕等离子体对提升农业地膜降解率的影响

冷雪健 金福宝 马山刚 陈科元

(青海大学 能源与电气工程学院 西宁 810016)

摘要 地膜为农业发展带来了极大的便利,但由于其稳定的理化性质,在自然条件下极难进行处理,若处理不当极易对环境造成严重威胁。为了探究低温等离子体降解技术中不同实验因素对农业地膜降解效果的影响,本研究采用自制针板电极结构,通过施加高频交流电压对聚乙烯地膜进行了等离子体处理。分析了输入功率、放电时间、电极数量以及空气流通等因素对地膜降解率的影响。通过地膜质量、拉曼光谱图、扫描电子显微镜以及相对分子质量等参数对比了处理前后地膜的变化。结果表明:当输入功率由26 W上升至80 W,地膜降解率提升了约2.6倍,提高输入功率可以增加反应空间内的高能电子和活性物质,但能量效率并未随降解率而升高,当输入功率为51 W时,能量效率最高为58.82 $\mu\text{g}/(\text{W}\cdot\text{h})$;针尖数量会影响等离子体的均匀性和输入功率,随着针电极数量增加,地膜降解率由3.49%下降至2.1%后又上升到3.57%;延长放电时间会导致分子链结构更容易受到等离子体攻击,发生断裂;此外,空气流动性会影响反应器内的臭氧浓度,当输入功率较低时,密闭环境下臭氧浓度更高,当输入功率提升至80 W,具有良好空气流动性情况下臭氧浓度更高,有助于提升地膜降解率。

关键词 针板电极, 聚乙烯地膜, 高频交流, 等离子体

中图分类号 TK124, O539

DOI: 10.11889/j.1000-3436.2023-0091

引用该文:

冷雪健, 金福宝, 马山刚, 等. 针板电晕等离子体对提升农业地膜降解率的影响[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2024, 42(1): 010401. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2023-0091.

LENG Xuejian, JIN Fubao, MA Shangang, *et al.* Effects of needle-plate corona plasma on improving the degradation of agricultural mulch film[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2024, 42(1): 010401. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2023-0091.



Effects of needle-plate corona plasma on improving the degradation of agricultural mulch film

LENG Xuejian JIN Fubao MA Shangang CHEN Keyuan

(Faculty of Energy and Electrical Engineering, Qinghai University, Xining 810016, China)

ABSTRACT Mulch film has provided significant convenience for agricultural development. However, its stable physical and chemical properties make it challenging to manage under natural conditions, potentially posing a

基金资助: 国家自然科学基金项目(51865049)和青海省科技厅基础研究计划项目(2020-ZJ-708)资助

第一作者: 冷雪健,男,1999年12月出生,青海大学在读研究生,电气工程专业

通信作者: 金福宝,博士,副教授, E-mail: jinfubao@163.com

收稿日期: 初稿 2023-10-17; 修回 2023-11-24

Support by National Natural Science Foundation of China (51865049), and Basic Research Program of Qinghai Provincial Department of Science and Technology (2020-ZJ-708)

First author: LENG Xuejian (male) was born in December 1999. Now he is a graduate student at Qinghai University, majoring in electrical engineering

Corresponding author: JIN Fubao, doctoral degree, associate professor, E-mail: jinfubao@163.com

Received 17 October 2023; accepted 24 November 2023

serious environmental threat if mishandled. This study investigates the influence of various experimental factors on the degradation of agricultural film using low-temperature plasma degradation technology. A self-made needle-plate electrode structure was employed to treat polyethylene film with a high-frequency AC voltage. The study analyzed the effects of input power, discharge time, electrode number, and air circulation on mulch film degradation. Changes in mulch quality, Raman spectrum, scanning electron microscope observations, and relative molecular mass were compared before and after treatment. The results revealed a 2.6-fold increase in mulch film degradation efficiency when the input power rised from 26 W to 80 W. While increasing input power enhanced high-energy electrons and active substances in the reaction space, energy efficiency did not proportionally increase with the degradation rate. At 51 W input power, the energy efficiency reached a maximum of 58.82 $\mu\text{g}/(\text{W}\cdot\text{h})$. The number of needle tips influences plasma uniformity and input power, impacting film degradation efficiency. As the number of needle electrodes increases, film degradation efficiency initially decreased from 3.49% to 2.1%, then rised to 3.57%. Prolonged discharge time made the molecular chain structure more vulnerable to plasma attack and breakage. Additionally, air fluidity affects ozone concentration in the reactor, with higher concentrations in a closed environment at low input power. Increasing the input power to 80 W results in higher ozone concentration with good air fluidity, aiding in improving mulch film degradation efficiency.

KEYWORDS Needle plate electrode, Polyethylene film, High frequency AC, Plasma

CLC TK124, O539

地膜具有保温、保湿、防虫害等优点，可提高农作物产量1.2~1.3倍，为我国粮食安全做出了重大贡献，已成为我国重要的农业生产物质资料^[1-3]。青海省自2008年开始推广机械化地膜覆盖种植技术，截至2018年覆盖面积超过 $9.8\times 10^{10}\text{ m}^2$ ，地膜覆盖种植技术已成为青海省种植业的一种重要模式^[4]。但由于聚乙烯稳定的理化性质，难以在自然条件下被降解。随着近年来地膜使用量不断增加，土地实测每亩地残膜量达到6.8~8.46 kg^[5]。土壤内大量残留地膜会严重破坏土壤理化性质，影响土壤透气性、水分，进而影响土壤中的微生物、改变土壤pH、降低土壤肥力，严重影响我国农牧业绿色可持续发展^[6-7]。

目前，农业地膜的主要成分为聚乙烯，而国内外针对聚乙烯的处理方法主要包括：(1)将其作为垃圾进行掩埋或焚烧，但会引发严重的环境污染和生态破坏^[7]；(2)通过热解技术，制造油类产品，但存在生产效率低、投入成本高等情况^[8]；(3)通过生物分解技术，但同样存在降解效率低和降解周期长的问题^[9]。由此可见，地膜问题并没有得到妥善解决，仍存在严重环境隐患。低温等离子体降解技术作为一种高效绿色的降解手段，它的降解机理一方面通过高能电子直接轰击污染物分子链，使其断裂；另一方面通过高能电子电离空气，生成活性物质，使污染物发生氧化还原反

应，最终分解为 H_2O 、 CO_2 和小分子化合物，实现污染物的降解^[10]。低温等离子体降解技术凭借其高效、绿色无污染等优点在近些年来受到了研究人员的关注，取得了积极的进展，并被广泛应用于各类废气和废水的降解工艺中^[11-12]。但其对固体废物尤其是地膜的降解效果尚待进一步研究。

本研究采用针板电晕等离子体对废弃地膜进行处理，对比了输入功率、处理时间、针尖数量、空气流动等不同试验因素对等离子体技术降解效果的影响，分析其宏观质量降解效果。通过臭氧检测仪、拉曼光谱仪、扫描电子显微镜(SEM)、万能试验机等设备探究了降解机理，希望对进一步认识和发展等离子体降解技术在固体废物降解中的应用有一定意义。

1 材料与方法

1.1 实验装置

实验装置如图1所示，供电部分为高频交流高压电源(CTP-2000K)，通过调压器(TDGC2)进行调压，可调电压范围为0~30 kV，频率5~20 kHz。电晕等离子体反应器为实验室自制，反应器高压侧为黄铜材料，低压侧为不锈钢材料，反应器箱体为聚四氟材料，降解实验中将地膜平铺在低压侧电极。

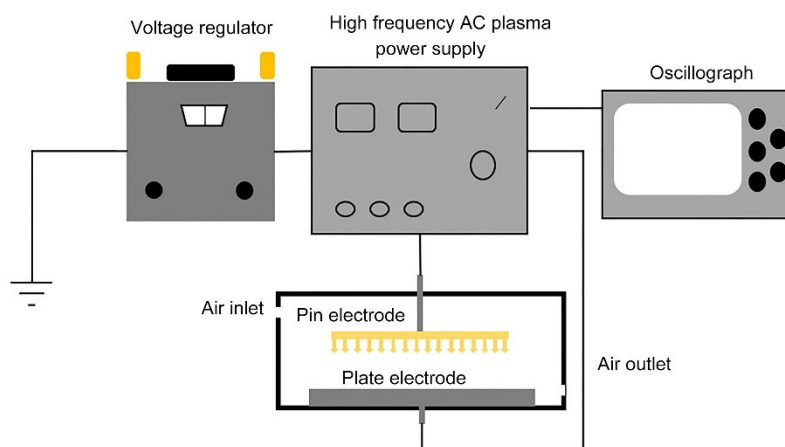


图1 实验装置示意图
Fig.1 Schematic diagram of the experimental setup

1.2 方法

实验中的计算方法和测试方法主要包括对输入功率、降解率、能量效率以及地膜质量、相对分子质量、臭氧浓度和拉曼光谱等数据的计算和分析,用来衡量实验过程中所涉及物理量的变化趋势。

1.2.1 输入功率计算

输入功率通过高频交流等离子电源中LED面板上输入电压和输入电流进行计算。见式(1)。

$$P = U \times I \quad (1)$$

式中: P 为输入功率, W; U 为输入电压, V; I 为输入电流, A。

1.2.2 质量测量

将环保机构提供的商用无色聚乙烯材料地膜地裁剪为 100 mm×100 mm 矩形,质量约为 100 mg。用 99.7% 的无水乙醇清洗表面灰尘,通过真空干燥箱(DZF6090)进行 50 °C 的烘干处理后,放入电子天平(LC-FA1004)测重 3 次,取平均值。

1.2.3 降解率和能量效率计算

本研究中地膜质量降解率 η (%) 和能量效率 G 通过公式(2)、(3)进行计算。

$$\eta = \frac{m_0 - m}{m_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中: m_0 、 m 分别为降解前后的地膜质量, mg。

$$G = \frac{\Delta m}{U \times I} \times 10^3 \quad (3)$$

式中: G 为能量效率, $\mu\text{g}/(\text{W}\cdot\text{h})$; Δm 降解处理前后地膜质量变化量, mg。

1.2.4 相对分子质量测量

相对分子质量测量通过恒温水浴锅和乌式黏

度计进行测量计算,首先将地膜放入 30 mL 正庚烷溶液当中,通过 80 °C 恒温水浴锅加热 30 min,测量加热前后地膜质量,计算溶液浓度,分别测量溶剂和不同浓度溶液流经乌式黏度计 a 刻度和 b 刻度所消耗的时间。计算见式(4)~(6)。

$$\eta_{sp}/c = [\eta] + K[\eta]^2 c \quad (4)$$

$$\ln(\eta_r)/c = [\eta] - \beta[\eta]^2 c \quad (5)$$

$$[\eta] = KM^\alpha \quad (6)$$

式中: $\eta_{sp} = \eta_r - 1$; $\eta_r = t/t_0$; t 和 t_0 分别为溶液和溶剂流过刻度 a 和刻度 b 所消耗的时间, s; $[\eta]$ 为特性黏度, dL/g ; K 、 β 、 α 分别为溶液、温度、溶剂相关常数; η_r 为相对黏度; η_{sp} 为增比黏度, mPas ; c 为溶液浓度, mg/mL ; M 为被测样品相对分子质量。

1.2.5 拉伸强度和断裂伸长率测量

拉伸强度和断裂伸长率通过万能试验机进行测量,并通过公式(7)、(8)进行计算。

$$\sigma_t = p/(b \times d) \quad (7)$$

$$\varepsilon = \Delta L/L_0 \quad (8)$$

式中: σ_t 为拉伸强度, MPa; p 为最大负荷, N; b 为试样宽度, mm; d 为试样厚度, mm; ε 为断裂伸长率, ΔL 为处理前后长度变化量; L_0 为原长, mm。

1.2.6 臭氧浓度测量

臭氧浓度测量采用实验室自制臭氧浓度测量仪,将测量仪放置距离反应器 5 cm 处,通过蓝牙传输模块将实时数据发送至手机终端并记录。

1.2.7 拉曼光谱测量

拉曼光谱图测量通过显微共焦拉曼光谱仪

(Micro-Raman spectroscopy)通过该器械对等离子体处理前后地膜分子结构和官能团变化进行对比分析,在处理前要保证地膜表面无污染物,并且对其进行干燥处理。测绘地膜拉曼光谱时,将薄膜夹在样品夹上,激光器波长选定为532 nm,扫描范围设定为4 000~400 cm^{-1} 。

1.2.8 实验条件

放电间距20 mm,空气温度约为21 $^{\circ}\text{C}$,空气湿度约为45.1% RH,地膜质量为100 mg。

2 结果与讨论

2.1 输入功率对地膜降解率的影响

分别测量输入功率为26 W、38.8 W、51 W、66.5 W和80 W下放电时间30 min的降解率,实验结果如图2所示。

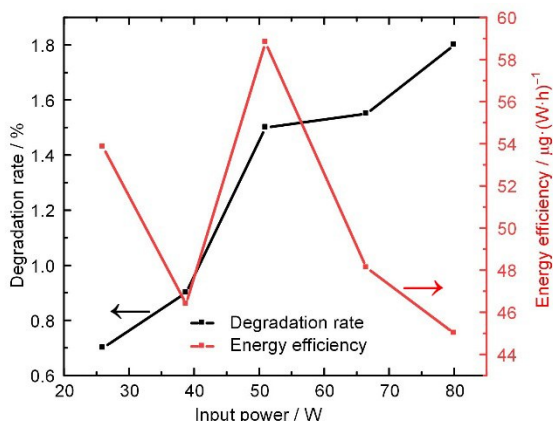


图2 不同输入功率与质量降解率和能量效率的关系
Fig.2 Relationship between different input powers and mass degradation rate and energy efficiency

由图2可知,随着输入功率的增加,地膜的质量降解率呈现单调递增趋势。这是因为随着功率增大,放电空间内的高能电子获得的能量越来越多,越容易与高分子链发生反应,同时在空气中产生更多活性物质,进而提高了质量降解率。但能量效率并未随着输入功率而增加,且存在一个最优值^[13]。在放电初期,由于此时的输入能量较小,即使对地膜造成少量降解也会出现较高的能量效率,当输入功率上升至38.8 W,此时由于输入功率的大幅度提升,但并未产生足够强度的高能电子和活性物质,因此地膜的质量降解率并未有明显的提升,造成了能量效率的降低。当输入功率为51 W,此时整个放电空间存在大量的高能

粒子和活性物质,降解率大大提升,从而使能量效率达到峰值。随着进一步提高输入功率,虽然降解率仍在提高,但是由于此时反应空间内高能电子和活性物质已经达到了一个相对饱和状态,质量降解率并没有明显增长,最终导致能量效率下降。通过计算可知,在不同功率下的能量效率分别为53.85 $\mu\text{g}/(\text{W}\cdot\text{h})$ 、46.39 $\mu\text{g}/(\text{W}\cdot\text{h})$ 、58.82 $\mu\text{g}/(\text{W}\cdot\text{h})$ 、48.12 $\mu\text{g}/(\text{W}\cdot\text{h})$ 和45 $\mu\text{g}/(\text{W}\cdot\text{h})$ 。当输入功率为51 W时,反应达到了最大能量效率58.82 $\mu\text{g}/(\text{W}\cdot\text{h})$ 。

2.2 放电时间对地膜降解率的影响

分别测试输入功率为51 W下不同放电时间的降解率,实验结果如图3所示。通过实验结果可知,随着放电时间延长,地膜降解率逐渐提高,能量效率呈现先升高后降低的趋势,发生这一现象的主要原因是:根据文献[14]记载,当地膜宏观和微观结构良好时,相对脆弱且键能较低的官能团和分子链结构更容易受到高能粒子和活性物质的破坏。导致在前0.5 h以内降解率快速升高,能量效率达到最大值,随着反应进行,容易断裂的微观结构已经和活性物质和高能电子充分反应,在0.5~2 h呈现一个能量效率逐渐快速下降的趋势;在2~2.5 h质量降解率进一步提高,是由于随着等离子体与地膜的持续反应,导致传统方法中难以被降解的官能团结构C-C键在等离子体的持续作用下,出现了断裂分解,但由于此时输入功率大幅度提高,但质量变化量较小,进而导致地膜降解的能量效率并没有明显变化,整体趋于一个稳定的水平。

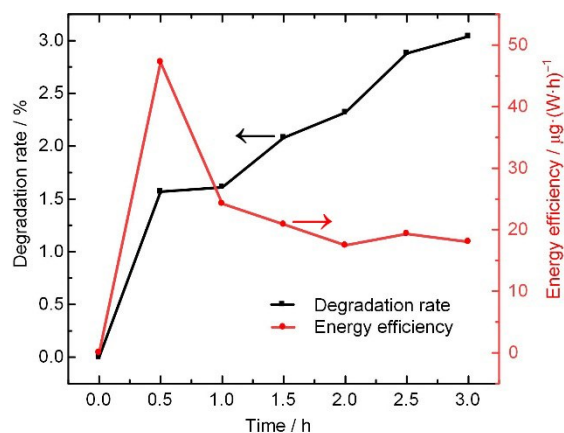


图3 不同放电时间与质量降解率和能量效率的关系
Fig.3 Relationship between different discharge times and mass degradation rate and energy efficiency

2.3 电极数量对地膜降解率的影响

分别测试电极数量为100、90、80、70、60个情况下, 输入功率51 W、放电时间0.5 h、地膜面积 $10\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 的降解率, 实验效果如图4所示。由图4可知, 地膜的降解率随电极的增加呈现一个先减小后升高的趋势, 发生这一现象的主要原因是: 电功率密度会随着针间距而变化, 并且会存在最大值^[15]。而针间距越大, 针电极的数量越少。在保持输入功率不变的前提下, 较少的电极数量可以拥有更高的等离子体强度, 可以释放更多活性物质和高能电子, 随着针数量增加, 等离子体强度减弱, 降解率逐渐降低, 能量效率最低为 $75\text{ }\mu\text{g}/(\text{W}\cdot\text{h})$ 。进一步增加电极数量可以提高等离子体的辐射范围, 使地膜受到的降解范围更加均匀, 从而提升降解率, 使能量效率达到最大值为 $127.5\text{ }\mu\text{g}/(\text{W}\cdot\text{h})$ 。此外, 较少的电极数量容易使针尖处的场强过大, 容易产生火花放电, 造成地膜的烧蚀, 影响等离子体的降解率, 因此, 更多的电极数量更适合用于地膜的降解。

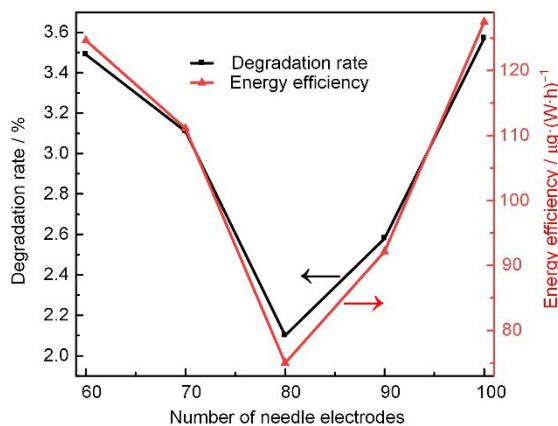


图4 不同针尖数量与质量降解率和能量效率的关系
Fig. 4 Relationship between different number of needle tips and mass degradation rate and energy efficiency

2.4 空气流通对地膜降解率的影响

臭氧产生的主要原因是由于等离子体区会产生大量的高能电子, 这些高能电子会将空气中的氧气分子, 撞击成氧原子, 而氧原子与氧分子会共同作用, 通过三体反应生成臭氧气体, 因此需要对比不同空气流通情况下臭氧浓度, 进而分析臭氧对污染物降解的影响。如文献[16]发现, 当臭氧浓度由 5.6 mg/L 上升至 6.7 mg/L 时, 随着浓度的上升, 亚甲基蓝的降解率也存在明显的升高。

通过图5可以发现, 当输入功率较小时, 无空气流通情况下的降解率更高, 随着输入功率增加, 有空气流通下, 降解率逐渐超过密闭环境下的降解率。产生此现象的原因可以通过图6发现: 当输入功率较低时, 空气流通影响不大, 在无空气流通情况下, 由于空间密闭, 产生的臭氧不容易被空气中中和稀释, 可以保持较高的臭氧浓度并长期作用于地膜, 提升降解率。随着输入功率升高, 空气流通的影响增大, 放电初期, 由于产生的臭氧不会被外来空气稀释导致封闭环境下的臭氧浓度更高, 随着放电时间的延长, 由于没有足够空气稳定产生臭氧, 导致臭氧浓度下降, 降解率相比于有良好空气流通情况有所下降。此外当功率增大, 由于环境封闭, 反应器无法散热, 反应箱内温度过高, 加快臭氧等活性物质的分解, 进一步降低臭氧浓度, 降低降解率。

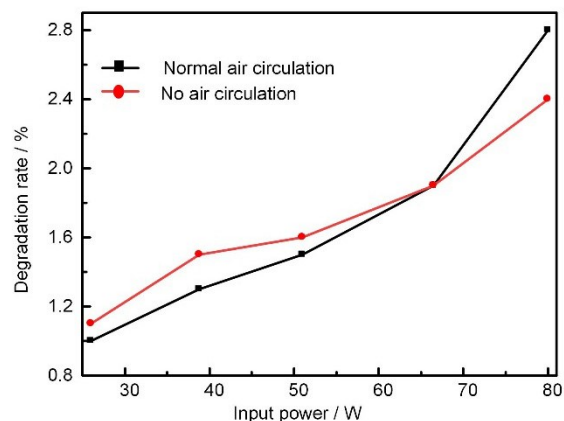


图5 有无空气流通对降解率的影响
Fig. 5 Effect of the presence or absence of air circulation on degradation efficiency

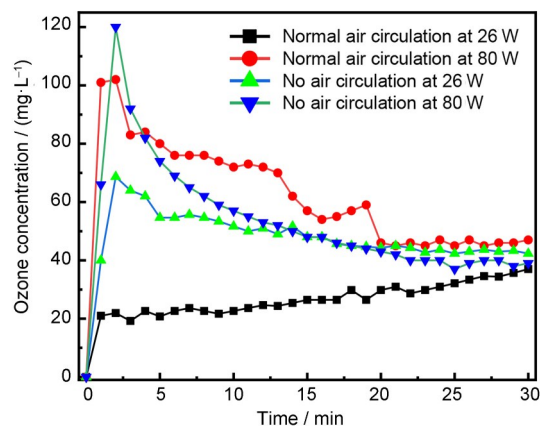


图6 不同输入功率下有无空气流通对降解率的影响
Fig. 6 Effect of the presence or absence of air circulation on degradation efficiency at different input powers

2.5 表面形貌分析

表明形貌分析分别通过肉眼和场发射电子显微镜进行观测，实验条件为输入功率 51 W，放电时间为 3 h。

通过对地膜处理前后表面进行肉眼观察，可以发现，在经过等离子体处理的地膜表面出现很多细微的小孔，并且表面有黄变和黏连的现象发生。发生这些现象的主要原因是：一方面是由于等离子体中高能电子将地膜高分子链打断，使薄膜表面产生大量的外露分子链，当地膜重叠后，这些外露的分子链之间就会相互缠绕，贴合在一起无法轻易打开，造成黏连现象；另一方面由于等离子体会产生大量活性物质，这些活性物质会不断攻击分子链结构，形成高分子过氧自由基和

过氧化物，然后在产生这些氧化物的位置引起主分子链的断裂使聚合物发生黏连和黄变；此外黄变的原因还可能是由于在地膜制作过程中，为了提高地膜稳定性，会在材料中添加酚类抗氧化剂，当这些酚类物质被活性物质氧化后，就会呈现淡黄色或者深褐色^[17]。

图 7 为 5 000 倍下的微观形貌图，可以进一步观察到，经过等离子体处理后，地膜表面由光滑、致密变得十分粗糙，这是由于等离子体在放电空间内产生了大量活性物质和高能粒子，使化学键断裂，造成地膜表面大面积腐蚀，产生很多沟壑和裂纹，加速地膜老化降解^[18]。同时，反映在了宏观形貌上，使其产生了孔洞、黏连、黄变现象，出现了不同程度的物理缺陷。

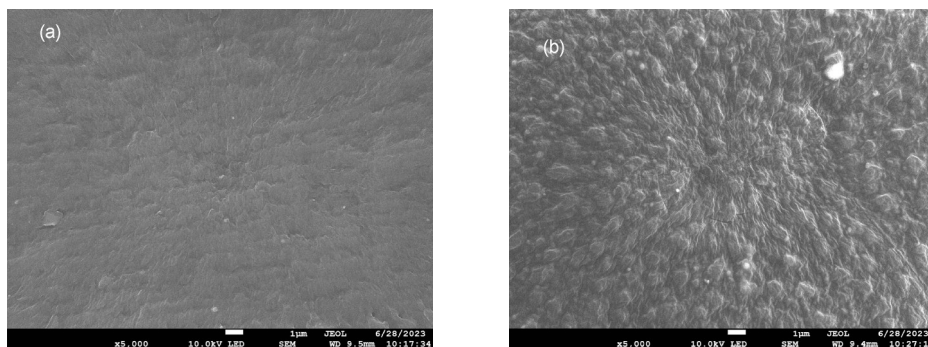


图 7 地膜处理前后的微观形貌图：(a)无处理；(b)正常等离子体处理

Fig.7 Microscopic morphology before and after mulch treatment: (a) without treatment; (b) normal plasma treatment

2.6 力学性能分析

图 8 为输入功率 51 W、放电时间为 3 h 前后地膜力学性能测试图，力学性能测试是用来衡量材

料特性最直观的表达方式，为了准确描述等离子体对薄膜降解程度，本节通过拉伸强度和断裂伸长率对比降解前后薄膜在力学性能上的变化。

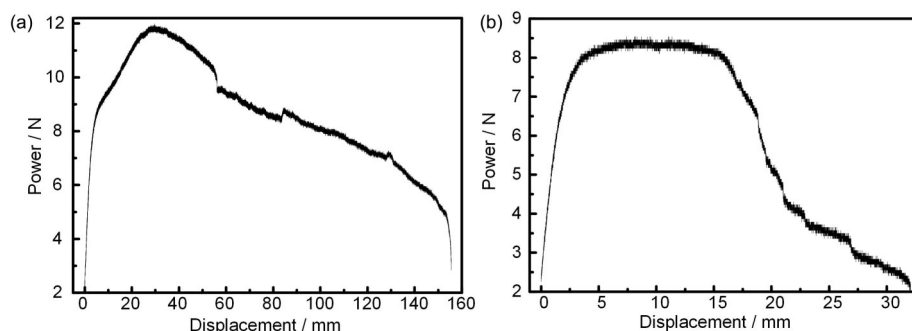


图 8 地膜处理前后力学性能图：(a)处理前；(b)处理后

Fig.8 Mechanical properties before and after membrane treatment: (a) pretreatment; (b) after treatment

由图 8 可知，处理前薄膜最大负荷为 12.04 N，断裂伸长为 140.6 mm；处理后薄膜最大负荷为 8.54 N，断裂伸长为 17 mm。拉伸强度由 6.02 MPa

下降至 4.27 MPa，降低约 29.1%。断裂伸长率由 937% 下降至 113%，降低了约 87.9%。拉伸强度和断裂伸长率反映了薄膜整体的稳定性和韧性。在

微观层次上, 高分子聚合物之所以具有稳定的理化性质, 主要是依靠分子间化学键合力和范德华力。进而导致不同类型的材料在力学性能上的差异。等离子体通过释放高能粒子和活性物质对高分子聚合物的微观结构进行破坏, 瓦解分子间的化学键合力和范德华力, 造成了分子链断裂, 引起聚合度下降^[19]。进而导致地膜的力学性能降低。

2.7 拉曼光谱分析

图9为输入功率51 W、放电时间为3 h下地膜降解前后拉曼光谱图。

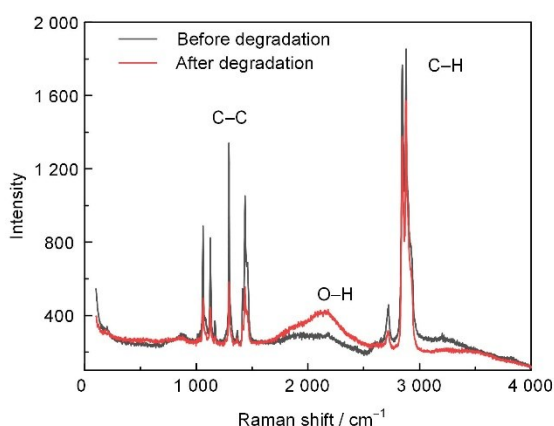


图9 地膜处理前后的拉曼光谱图(彩色见网络版)
Fig.9 Raman spectra before and after mulch treatment (color online)

光谱图的波峰主要出现在 $1\ 060.78\ \text{cm}^{-1}$ 、 $1\ 126.12\ \text{cm}^{-1}$ 、 $1\ 166.74\ \text{cm}^{-1}$ 、 $1\ 292.08\ \text{cm}^{-1}$ 、 $1\ 435.99\ \text{cm}^{-1}$ 、 $2\ 180.46\ \text{cm}^{-1}$ 、 $2\ 721.22\ \text{cm}^{-1}$ 、 $2\ 878.9\ \text{cm}^{-1}$ 等多个振动波峰。由图9可知, 地膜表面振动峰类型并无变化, 但振动峰强度均有明显变化, 如碳碳键、碳氢键都存在较为明显的峰值强度变化, 说明官能团含量降低, 等离子体在微

观层面上存在明显的降解效果, 此外位于 $2\ 200\ \text{cm}^{-1}$ 处的O-H官能团对应峰值强度明显增强, 说明在 高分子聚合物分子链中的C-H键发生断裂与空气中的氧原子结合产生O-H, 此外可以观察到如图10电极表面生成黑色的碳粉, 这部分碳粉是因为能量太高导致了聚乙烯的脱氢反应从而导致碳化^[20]。



图10 地膜处理后的针尖图
Fig.10 Needle tip diagram after mulch treatment

2.8 相对分子质量测量

为了量化地膜在微观层次上的降解率, 通过乌式黏度计对地膜相对分子质量进行测量。通过对测量数据进行拟合计算, 结果如图11所示。

拟合图中的拟合曲线截距为地膜的特性黏度 $[\eta]$, 并且结合物质的 K 、 β 、 α 常数, 根据Mark公式可计算得出, 在经过等离子体降解处理前后地膜相对分子质量分别为40 502和24 766, 分子量降低约28.85%。由于等离子体中拥有大量高能电子和活性物质, 使原本稳定的聚乙烯分子链出现断裂、分解, 进而出现其他的固体、液体、气体等产物, 导致地膜的质量减少, 分子量降低。有助于实现地膜后续的进一步有效降解。

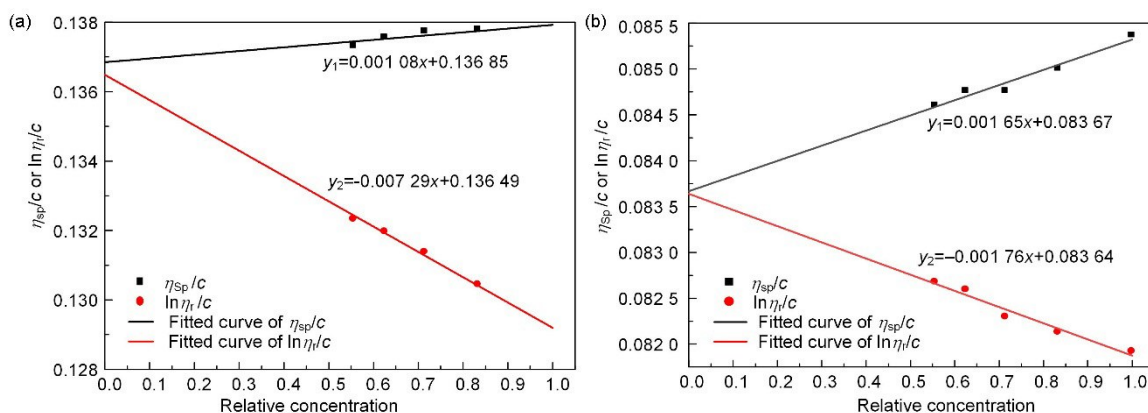


图11 地膜处理前后的黏度测量曲线:(a)处理前;(b)处理后
Fig.11 Viscosity measurement curves before and after film treatment: (a) pretreatment; (b) after treatment

3 结论

本研究采用针板电极结构, 测量不同影响因素对地膜降解率的影响, 通过电子天平计算宏观层次地膜的降解率, 并通过相关仪器和乌式黏度计计算微观层面上的降解率。

(1)地膜降解率会在有良好空气流通、输入功率 56 W、放电时间 0.5 h, 100 根针电极时达到最佳, 通过分析发现, 实验因素会对降解效果产生影响的内在机理是通过对反应空间内高能电子和活性物质的产生影响, 电子和活性物质的数量越多, 降解效果越明显。

(2)降解后的地膜在宏观和微观上都会出现较为明显的变化: 在宏观上, 地膜会出现大量的孔洞, 表面变黏, 并且会出现颜色上的改变以及力学性能上的减弱; 在微观上, 通过扫描电镜发现微观形貌上出现大量被腐蚀、破坏的痕迹; 在拉曼光谱图发现地膜中 C-C 键和 C-H 键的数量会大量减少, 以及新官能团的产生; 并且在通过乌式黏度计发现地膜的相对分子质量由 40 502 下降至 24 766, 分子量降低约 28.85%, 分子结构的改变和分子量的降低会导致材料的强度和韧性下降, 进而导致更容易受到外部环境的影响而被破坏, 对促进地膜的后续自然降解具有明显的预处理意义。

综上所述, 经过等离子体处理后的地膜无论宏观和微观, 都能看到明显的降解效果, 可以达到一个较好的预处理效果, 但由于本研究中的等离子体发生器输入功率较低, 并且没有后续的自然降解或微生物降解相关数据, 因此有关等离子体的地膜预处理仍存在较大的发展空间。

作者贡献声明 冷雪健负责实验操作、实验数据的处理与分析, 论文的撰写和修改; 陈科元负责校对和语言修改; 金福宝和马山刚负责本文的研究思路和实验方案。所有作者均已阅读并认可该论文最终版的所有内容。

参考文献

- 1 严昌荣, 刘恩科, 舒帆, 等. 我国地膜覆盖和残留污染特点与防控技术[J]. 农业资源与环境学报, 2014, **31**(2): 95-102. DOI: 10.13254/j.jare.2013.0223.
YAN Changrong, LIU Enke, SHU Fan, *et al.* Review of agricultural plastic mulching and its residual pollution and prevention measures in China[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2014, **31**(2): 95-102. DOI: 10.13254/j.jare.2013.0223.
- 2 赵梓君, 何文清, 尹君华, 等. 基于文献计量分析中国全生物降解地膜研究发展态势[J]. 中国农业大学学报, 2023, **28**(4): 57-67. DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2023.04.05.
ZHAO Zijun, HE Wenqing, YIN Junhua, *et al.* Development situation analysis of biodegradable mulch film based on bibliometric analysis in China[J]. Journal of China Agricultural University, 2023, **28**(4): 57-67. DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2023.04.05.
- 3 Sun D B, Li H G, Wang E L, *et al.* An overview of the use of plastic-film mulching in China to increase crop yield and water-use efficiency[J]. National Science Review, 2020, **7**(10): 1523-1526. DOI: 10.1093/nsr/nwaa146.
- 4 王蕾, 惠向娟, 支慧, 等. 一株淡紫紫孢菌对聚乙烯地膜降解能力的研究[J]. 干旱地区农业研究, 2023, **41**(4): 217-225. DOI: 10.7606/j.issn.1000-7601.2023.04.23.
WANG Lei, HUI Xiangjuan, ZHI Hui, *et al.* Degradation effects of a strain of purple violet spore on polyethylene film[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2023, **41**(4): 217-225. DOI: 10.7606/j.issn.1000-7601.2023.04.23.
- 5 师延冰. 青海省残膜回收机械作业性能试验研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2019. DOI: 10.27409/d.cnki.gxbnu.2019.000215.
SHI Yanbing. Experimental study on working performance of residual film recycling machinery in Qinghai Province[D]. XIAN Yang: Northwest A & F University, 2019. DOI: 10.27409/d.cnki.gxbnu.2019.000215.
- 6 林涛, 汤秋香, 郝卫平, 等. 地膜残留量对棉田土壤水分分布及棉花根系构型的影响[J]. 农业工程学报, 2019, **35**(19): 117-125. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.19.014.
LIN Tao, TANG Qiuxiang, HAO Weiping, *et al.* Effects of plastic film residue rate on root zone water environment and root distribution of cotton under drip irrigation condition[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, **35**(19): 117-125. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.19.014.
- 7 胡志娥, 肖谋良, 丁济娜, 等. 长期覆膜条件下农田土壤微生物群落的响应特征[J]. 环境科学, 2022, **43**(10): 4745-4754. DOI: 10.13227/j.hjks.202201237.
HU Zhi'e, XIAO Mouliang, DING Jina, *et al.* Response characteristics of soil microbial community in farmland under long-term plastic film mulching[J]. Environmental

- Science, 2022, **43**(10): 4745-4754. DOI: 10.13227/j.hjcx.202201237.
- 8 Stahl R G Jr. A plastic problem: taking a look at plastic pollution in our oceans[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2020, **39**(11): 2095-2096. DOI: 10.1002/etc.4856.
- 9 张可, 胡芮琦, 蔡珉敏, 等. 黄粉虫取食和消化降解PE塑料薄膜的研究[J]. *化学与生物工程*, 2017, **34**(4): 47-49. DOI: 10.3969/j.issn.1672-5425.2017.04.011.
ZHANG Ke, HU Ruiqi, CAI Minmin, *et al.* Degradation of plastic film containing polyethylene(PE) by yellow meal worms[J]. *Chemistry & Bioengineering*, 2017, **34**(4): 47-49. DOI: 10.3969/j.issn.1672-5425.2017.04.011.
- 10 李蕊. 有机污染土壤的低温等离子体修复方法及机理研究[D]. 上海: 东华大学, 2017: 72-73.
LI Rui. Study on remediation method and mechanism of organic contaminated soil by low temperature plasma[D]. Shanghai: Donghua University, 2017: 72-73.
- 11 刘双全, 于文锦, 张利. PE废塑料热解油化中催化剂的研究[J]. *化学工程师*, 2002, **16**(4): 60-62. DOI: 10.16247/j.cnki.23-1171/tq.2002.04.028.
LIU Shuangquan, YU Wenjin, ZHANG Li. Study on the catalysts of the degradation of waste polystyrene[J]. *Chemical Engineer*, 2002, **16**(4): 60-62. DOI: 10.16247/j.cnki.23-1171/tq.2002.04.028.
- 12 刘万波, 孙鑫, 张然, 等. 放电条件对电晕放电等离子体脱除羰基硫的影响研究[J]. *高校化学工程学报*, 2019, **33**(1): 245-252. DOI: 10.3969/j.issn.1003-9015.2019.01.032.
LIU Wanbo, SUN Xin, ZHANG Ran, *et al.* Effects of discharge conditions on COS conversion by corona discharge plasma[J]. *Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities*, 2019, **33**(1): 245-252. DOI: 10.3969/j.issn.1003-9015.2019.01.032.
- 13 胡志军, 王志良. 介质阻挡放电低温等离子体协同催化降解苯乙烯[J]. *化工环保*, 2023, **43**(5): 627-632. DOI: 10.3969/j.issn.1006-1878.2023.05.009.
HU Zhijun, WANG Zhiliang. Degradation of styrene by dielectric barrier discharge low-temperature plasma synergistic catalysis technology[J]. *Environmental Protection of Chemical Industry*, 2023, **43**(5): 627-632. DOI: 10.3969/j.issn.1006-1878.2023.05.009.
- 14 范帆. 氟化聚乙烯空间电荷及电晕老化特性的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
FAN Fan. Study on space charge and corona aging characteristics of fluorinated polyethylene[D]. Chongqing: Chongqing University, 2018.
- 15 杨加元, 陈海丰, 朱益民. 多针电极双极电晕放电电极间距优化[J]. *高电压技术*, 2008, **34**(1): 95-98. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.2008.01.020.
YANG Jiayuan, CHEN Haifeng, ZHU Yimin. Optimization of space between electrodes of multi-needles bipolar corona discharge[J]. *High Voltage Engineering*, 2008, **34**(1): 95-98. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.2008.01.020.
- 16 张犇, 张瑞峰, 杨川云, 等. 锰镁氢氧化物碳基复合材料催化臭氧降解亚甲基蓝[J]. *功能材料*, 2023, **54**(9): 9123-9132.
ZHANG Ben, ZHANG Ruifeng, YANG Chuanyun, *et al.* Manganese-magnesium hydroxide carbon based composites for catalytic ozonation degradation of methylene blue[J]. *Journal of Functional Materials*, 2023, **54**(9): 9123-9132.
- 17 姜楠. 沿面一填充床复合放电等离子体及其协同催化降解苯的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
JIANG Nan. Study on surface-packed bed composite discharge plasma and its synergistic catalytic degradation of benzene[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014.
- 18 张兴涛, 吴广宁, 杨雁, 等. 介质阻挡放电等离子体处理对聚酰亚胺表面放电的影响[J]. *高电压技术*, 2018, **44**(9): 3097-3104. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20180828042.
ZHANG Xingtao, WU Guangning, YANG Yan, *et al.* Influence of dielectric barrier discharge plasma treatment on the surface discharge of polyimide film[J]. *High Voltage Engineering*, 2018, **44**(9): 3097-3104. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20180828042.
- 19 张明玉. 离子交换法制备聚酰亚胺/氧化铝复合薄膜及电晕老化机理[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2016.
ZHANG Mingyu. Preparation of polyimide/alumina composite films by ion exchange method and corona aging mechanism[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2016.
- 20 万坚坚. 低温等离子体应用于聚乙烯降解的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2022. DOI: 10.27157/d.cnki.ghzku.2020.003156.
WAN Jianjian. Study on the application of low temperature plasma in polyethylene degradation[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2022. DOI: 10.27157/d.cnki.ghzku.2020.003156.