

电子束辐照下三烯丙基异氰尿酸酯对聚丙烯氧化裂解行为的影响

史丛丛¹ 陆毅峰¹ 左红梅² 晏乐三³ 熊传溪³

¹((中广核高新核材(江苏)有限公司 江苏 215400))

²(安徽工程大学纺织服装学院 芜湖 241000)

³(武汉理工大学 材料复合新技术全国重点实验室 武汉 430070)

摘要 为揭示电子束辐照环境下改性聚丙烯(PP)的结构与性能退变规律,本文以三烯丙基异氰尿酸酯改性PP(J-PP)片材为研究对象,研究0 kGy、50 kGy、100 kGy、150 kGy和200 kGy电子束辐照对其表面形貌、化学结构、热学性能及力学性能的影响。采用扫描电子显微镜(SEM)、傅里叶变换红外光谱(FTIR)、差示扫描量热仪(DSC)和拉伸试验进行表征。结果表明,辐照后J-PP表面逐渐粗糙,1 716 cm⁻¹附近羰基吸收峰随吸收剂量而增强,表明PP氧化反应逐渐加剧。随着吸收剂量增加,J-PP拉伸强度和断裂伸长率均明显降低;200 kGy辐照后分别由32.76 MPa和674.80%降低至24.02 MPa和3.10%,降幅分别为26.68%和99.54%。DSC结果表明,随着吸收剂量增加,J-PP的熔融峰温度、熔融焓和结晶度整体降低,凝胶含量升高;低剂量辐照下结晶温度略有提高,而高剂量下呈下降趋势。电子束辐照可诱导PP分子链氧化降解,三烯丙基异氰尿酸酯促进形成的交联网络能够在一定程度上补偿链断裂对材料承载能力的不利影响,但难以抑制高剂量辐照引起的塑性损失。本研究可为PP材料在电子辐照环境下的可靠性评估及辐照交联改性工艺优化提供参考。

关键词 电子束辐照, 聚丙烯, 三烯丙基异氰尿酸酯, 辐照交联, 氧化降解, 力学性能

中图分类号 TL13

DOI: 10.11889/j.1000-3436.2026-0053

CSTR:32195.14.j.JRRRP.1000-3436.2026-0053

引用该文:

史丛丛, 陆毅峰, 左红梅, 等. 电子束辐照下三烯丙基异氰尿酸酯对聚丙烯氧化裂解行为的影响[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, XXXX, XX(X): XXXXXX. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2026-0053.

SHI Congcong, LU Yifeng, ZUO Hongmei, *et al.* The influence of triallyl isocyanurate on the oxidative cracking behavior of polypropylene under electron beam irradiation[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, XXXX, XX(X): XXXXXX. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2026-0053.



基金资助: 安徽省高校协同创新工程项目(GXXT-2023096)

第一作者: 史丛丛, 女, 1988年11月出生, 2013年在天津工业大学获硕士学位, 材料科学与工程专业, E-mail: shicongcong@cgnam.cn

通信作者: 左红梅, 博士, 讲师, E-mail: zuohongmei@ahpu.edu.cn

收稿日期: 初稿 2026-04-30; 修回 2026-09-15

Supported by Anhui University Collaborative Innovation Project (No. GXXT-2023096).

First author: SHI Congcong (female) was born in November 1988, and obtained a master's degree in materials science and engineering from Tianjin Polytechnic University in 2013. E-mail: shicongcong@cgnam.cn

Corresponding author: ZUO Hongmei, doctoral degree, lecturer, E-mail: zuohongmei@ahpu.edu.cn

Received 30 April 2026; accepted 15 September 2026

The influence of triallyl isocyanurate on the oxidative cracking behavior of polypropylene under electron beam irradiation

SHI Congcong¹ LU Yifeng¹ ZUO Hongmei² YAN Leshan³ XIONG Chuanxi³

¹(CGN High-tech Nuclear Materials (Jiangsu) Co., Ltd., 215400, China)

²(School of Textile and Garment, Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000, China)

³(National Key Laboratory for New Technologies in Composite Materials, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

ABSTRACT To reveal the structural and property degradation mechanisms of modified polypropylene (PP) under electron-beam irradiation, triallyl isocyanurate-modified PP (J-PP) sheets were investigated in this work. The effects of electron-beam irradiation at doses of 0 kGy, 50 kGy, 100 kGy, 150 kGy, and 200 kGy on its surface morphology, chemical structure, thermal properties and mechanical properties were studied. Scanning electron microscopy (SEM), Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR), differential scanning calorimetry (DSC) and tensile tests were employed for characterization. The results show that the surface of irradiated modified PP gradually becomes rough. The carbonyl absorption peak near 1716 cm^{-1} intensifies with increasing absorbed dose, indicating progressive oxidation of PP. Both tensile strength and elongation at break of J-PP decrease significantly as the absorbed dose rises. After 200 kGy irradiation, the two parameters drop from 32.76 MPa and 674.80% to 24.02 MPa and 3.10%, representing reductions of 26.68% and 99.54%, respectively. DSC results demonstrate that the melting-peak temperature, melting enthalpy and crystallinity of J-PP generally decrease while the gel content increases with higher absorbed dose. The crystallization temperature increases slightly at low absorbed doses but declines at high doses. Electron-beam irradiation simultaneously induces oxidative degradation of PP molecular chains. The cross-linked network formed with the assistance of TAIC can partially offset the adverse effect of chain scission on the load-bearing capacity of the material, yet it cannot effectively suppress the loss of plasticity caused by high-dose irradiation. This paper provides a reference for reliability evaluation and optimization of radiation-crosslinking modification processes for PP materials under electron-irradiation environments.

KEYWORDS Electron beam irradiation, Polypropylene, Triallyl isocyanurate, Radiation cross-linking, Oxidative degradation, Mechanical properties

CLC TL13

聚丙烯 (PP) 是最常用的高分子聚合物材料之一, 也是应用最为广泛的塑料之一, 具有低密度、高熔点、优异的力学性能、无毒以及良好的化学稳定性等优点^[1-3]。目前, PP 已被广泛应用于汽车、电子器件、航空航天和食品包装等领域。然而, 由于 PP 的使用温度范围较窄, 且对湿气、热和辐射等环境因素敏感, 容易发生降解和脆化, 这在一定程度上限制了其应用^[4]。电子束辐照技术是一种通过电子加速器产生高能电子束, 使之与被辐照材料相互作用, 从而引发一系列物理和化学变化的技术。研究发现, 由于 PP 的每个重复单元中均含有一个叔碳原子, 其在受到辐照时更容易发生降解^[5]。因此, 在辐照环境下, 要使 PP 获得交联结构, 必须添加交联剂。三烯丙基异氰脲酸酯 (TAIC) 分子中含有三个碳-碳双键, 在辐

照条件下, 这些双键能与 PP 分子链上辐射诱导产生的碳自由基结合, 最终形成三维网状交联结构。

PP 薄膜在服役过程中可能受到电子束、 γ 射线等高能辐照作用, 辐照环境对其结构与性能的影响已受到国内外学者的广泛关注^[6-8]。冯宇等^[9]研究了 5 MeV、10 MeV、15 MeV 和 20 MeV 高能电子辐照对双向拉伸聚丙烯 (BOPP) 微观结构及介电性能的影响。结果表明, 高能电子辐照可诱导 BOPP 分子主链断裂, 并生成相应的含氧官能团; 同时, 随着吸收剂量的增加, BOPP 薄膜的介电常数降低, 介电损耗升高, 击穿场强下降。姜纹昕等^[10]对辐照技术在 PP 功能化接枝改性中的应用进行了系统综述。Wang 等^[11]发现, 在 45 kGy、60 kGy、100 kGy 和 200 kGy 电子辐照条件下, PP 的拉伸强度和断裂伸长率均呈下降趋势。已有研

究表明, 电子辐照可引发高聚物内部的交联或降解反应^[12-13], 进而导致聚合物材料发生不可逆的物理和化学变化^[14]。随着相关应用场景的不断拓展以及对PP材料服役性能要求的持续提高, 深入研究电子辐照环境下PP材料的性能退变规律, 对其实际工程应用具有重要意义。

然而, 现有研究多集中于电子辐照对PP介电性能的影响, 而关于电子辐照条件下PP力学性能与热学性能系统性退变规律的研究仍相对不足。基于此, 本研究以纯PP和含交联剂TAIC(质量分数为4%)的聚丙烯(J-PP)片材为研究对象, 考察了0 kGy、50 kGy、100 kGy、150 kGy和200 kGy电子辐照吸收剂量对其综合性能的影响, 系统分析了不同吸收剂量与PP片材力学性能、热学性能及化学结构之间的关联关系。通过扫描电子显微镜(SEM)、傅里叶变换红外光谱(FTIR)、差示扫描量热仪(DSC)和万能材料试验机等多维度表征手段, 揭示电子辐照诱导PP结构演变及性能退变的内在规律, 为PP材料在电子辐照环境下的服役可靠性评估以及辐照改性工艺参数优化提供理论依据与参考。

1 材料与方法

1.1 原料与设备

实验原料: 聚丙烯(PP, T30S, 茂名石化有限公司); TAIC, 结构式如图1所示。

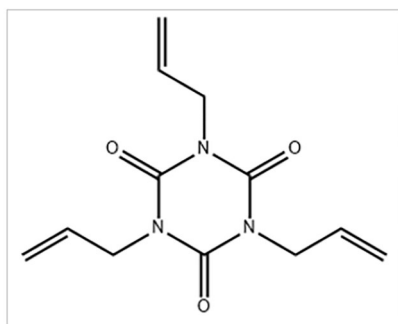


图1 TAIC的结构式
Fig.1 The structure of TAIC

实验设备: 双螺杆挤出机(SHJ20, 南京盛驰橡塑机械制造有限公司); 扫描电子显微镜(Hitachi S-4700, 日本日立); 万能材料试验机(CSS-88100, 长春测试机研究所); 傅里叶变换红外光谱仪(NEXUS-870, 美国ThermoFisher公司); 差示扫描量热仪(DSC-60A); 2.5 MeV电子

加速器(中广核达胜加速器技术有限公司)。

1.2 材料制备

将PP粉末置于80℃条件下干燥4h, 以去除其中残留水分。随后, 将干燥后的PP粉末与质量分数为4%的交联剂三烯丙基异氰脲酸酯充分混合, 并通过双螺杆挤出机进行熔融共混、挤出和造粒, 挤出温度设定为190℃。混合造粒完成后, 将所得颗粒置于平板硫化机中, 在205℃、10 MPa条件下热压成型, 制备得到厚度为1 mm的片状样品。

电子束辐照处理在室温(25℃)空气氛围中进行。将制备得到的片状样品置于电子束加速器(KFG-1)下进行辐照处理, 电子加速器能量为2.5 MeV, 束流强度为10 mA, 剂量率为15 kGy/圈, 样品与靶材之间的距离为30 cm。实验设置的吸收剂量分别为0 kGy、50 kGy、100 kGy、150 kGy和200 kGy, 其中0 kGy样品作为未辐照对照组。

1.3 表征与测试

微观形貌表征: 使用SEM对改性PP试片表面的微观形貌进行观察与分析。

红外光谱测试: 将PP及改性PP与KBr充分研磨并混合均匀, 随后压制成薄片, 在FTIR的透射模式下进行测试, 扫描范围为400~4 000 cm⁻¹, 分辨率2.0 cm⁻¹。

拉伸性能测试: 按照GB/T 1040.2—2022《塑料拉伸性能的测定》^[15]对样品的拉伸性能进行测试, 每种材料测试5个平行试样, 并取其平均值作为最终结果。

差示扫描量热测试: 采用DSC对PP及改性PP样品的熔融和结晶行为进行测试。测试过程在氮气氛下进行, 测试温度范围为0~200℃。为消除样品热历史, 首先以20℃/min的升温速率将样品升温至200℃, 并恒温保持5 min; 随后以10℃/min的降温速率冷却至0℃, 记录样品的熔融和结晶过程, 并根据以下公式(1)计算材料的结晶度(X_c)。

$$X_c = \frac{\Delta H_m}{\Delta H_m^0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: ΔH_m 为实际测得熔融焓; ΔH_m^0 为PP在100%结晶时的理论熔融焓, 准参考值为209 J/g。

2 结果与讨论

2.1 辐照对改性 PP 表面形貌的影响

图2为不同吸收剂量下改性PP(J-PP)片材表面形貌的SEM图。由图2可见,未辐照样品表面整体较为平整,表面凸起和缺陷并不明显(图2(a)~(b))。经50 kGy、100 kGy、150 kGy和

200 kGy电子束辐照后,J-PP片材表面粗糙度明显增加,并可以观察到凸起形貌特征(图2(c)~(h))。其原因可能在于,在高能电子束作用下PP分子链发生断裂,并伴随自由基生成、氧化反应以及局部交联或降解过程,从而破坏材料表面结构的均匀性,导致片材表面形貌由相对平整逐渐向粗糙化转变。

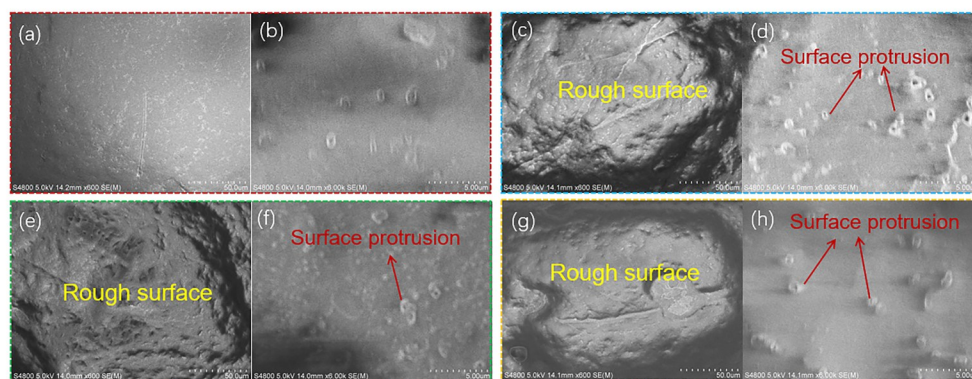


图2 不同电子吸收剂量下J-PP的SEM图:(a~b)J-PP-0 kGy;(c~d)J-PP-50 kGy;(e~f)J-PP-100 kGy;(g~h)J-PP-200 kGy
Fig.2 SEM images of J-PP under different electron absorbed doses: (a~b) J-PP-0 kGy; (c~d) J-PP-50 kGy; (e~f) J-PP-100 kGy; (g~h) J-PP-200 kGy

2.2 辐照对改性 PP 化学结构的影响

图3为J-PP片材在0 kGy、50 kGy、100 kGy、150 kGy和200 kGy电子束辐照后的FTIR谱图。由图3可见,各组样品均呈现出PP的典型特征吸收峰。其中,2954 cm^{-1} 处的吸收峰归属于 $-\text{CH}_3$ 中C-H键的不对称伸缩振动,2914 cm^{-1} 处对应 $-\text{CH}_2$ 中C-H键的不对称伸缩振动,2871 cm^{-1} 处为 $-\text{CH}_3$ 中C-H键的对称伸缩振动,2841 cm^{-1} 为 $-\text{CH}_2$ 中C-H键的对称伸缩振动;1460 cm^{-1} 和1378 cm^{-1} 处的吸收峰分别对应 $-\text{CH}_2$ 和 $-\text{CH}_3$ 中C-H键的弯曲振动^[16]。

与未辐照样品相比,经不同剂量电子束辐照后,J-PP试样中 $-\text{CH}_2$ 和 $-\text{CH}_3$ 相关特征峰的吸收强度发生一定变化,说明电子辐照对PP分子链结构及其化学环境产生了影响。由于TAIC分子中含有多个活性双键,在电子束辐照作用下可参与自由基反应,从而促进PP分子链间的交联反应,并在一定程度上限制PP链段运动。此外,在1716 cm^{-1} 附近观察到明显的羰基($\text{C}=\text{O}$)特征吸收峰,表明辐照过程中J-PP发生了一定程度的氧化反应,并生成含氧官能团。随着吸收剂量的增加,J-PP-150 kGy和J-PP-200 kGy样品在1716 cm^{-1} 处的羰基

吸收峰更加明显。这可能是由于高剂量电子束辐照诱导PP主链发生断裂,产生大分子自由基,并进一步与空气中的氧发生氧化反应,形成羰基等氧化产物。上述结果表明,电子束辐照不仅能够诱导J-PP发生交联反应,同时在较高吸收剂量下也会加剧PP分子链的氧化降解。

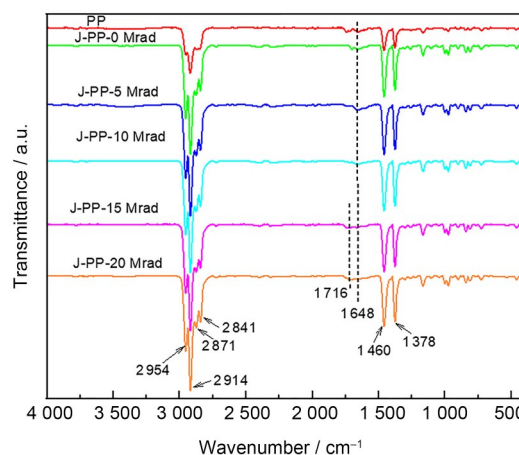


图3 PP和不同电子吸收剂量下J-PP的FTIR谱图
Fig.3 FTIR spectra of PP and J-PP under different electron absorbed doses

2.3 辐照对改性PP热性能及结晶行为的影响

PP是一种典型的半结晶聚合物，其结晶结构及结晶度对材料的拉伸强度、弹性模量等宏观性能具有重要影响。因此，研究电子束辐照作用下J-PP结晶行为的变化，对于揭示其性能演变机制具有重要意义。图4为不同电子吸收剂量下J-PP的DSC曲线，相应的熔融温度、熔融焓、结晶温度、结晶度及凝胶含量等参数列于表1。

由图4(a)可见，加入交联剂TAIC后，未辐

照J-PP与PP的熔融峰温度差异较小，表明TAIC的加入对PP晶体熔融行为影响有限，其片晶结构未发生明显改变^[17]。随着电子吸收剂量的增加，J-PP的熔融峰温度整体呈下降趋势。其中，J-PP-200 kGy的熔融峰温度相比J-PP-0 kGy降低13.44 °C，降幅约为8.22%。熔融峰温度的降低表明高剂量电子束辐照对PP晶区结构产生了明显影响，可能导致晶体完善程度降低或有效片晶厚度减小。

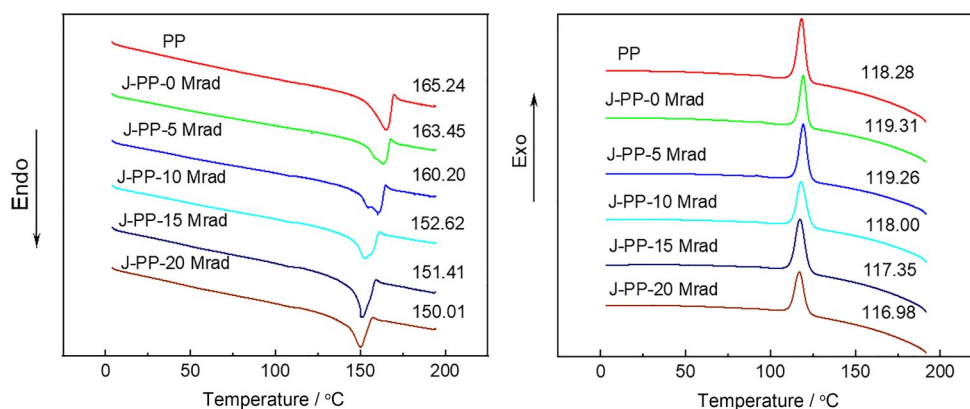


图4 PP和不同电子吸收剂量下J-PP的DSC曲线:(a)熔融曲线;(b)结晶曲线

Fig.4 DSC curves of PP and J-PP under different electron absorbed doses: (a) melting curve; (b) crystallization curve

表1 PP和不同电子吸收剂量下J-PP的熔融温度、熔融焓、结晶温度、结晶度及凝胶含量

Table 1 Melting temperature, melting enthalpy, crystallization temperature, crystallinity and gel content of PP and J-PP under different electron absorbed doses

样品 Sample	结晶温度 T_c / °C Crystallization temperature	熔融温度 T_m / °C Melting temperature	熔融焓 ΔH_m / (J·g ⁻¹) Melting enthalpy	结晶度 X_c / % Degree of crystallinity	凝胶含量 / % Gel content
PP	118.28	165.24	86.53	41.40	—
J-PP-0 kGy	119.31	163.45	82.59	39.52	—
J-PP-50 kGy	119.26	160.20	76.72	36.71	56.18
J-PP-100 kGy	118.00	152.62	69.99	33.49	66.97
J-PP-150 kGy	117.35	151.41	60.77	29.08	72.64
J-PP-200 kGy	116.98	150.01	58.89	28.18	73.24

与此同时，随着电子吸收剂量的增加，J-PP的熔融焓和结晶度均呈下降趋势。电子束辐照过程中，高能电子与PP分子链发生相互作用，可诱导产生大量自由基，并进一步引发分子链交联、链断裂及氧化降解等反应。在TAIC存在的条件下，非晶区中的活性分子链可通过自由基反应形成交联结构，从而限制链段运动及其向晶区重新排列的能力；另一方面，辐照诱导的氧化及链断裂也会对已有晶区产生破坏作用。随着吸收剂量进一步增加，交联及氧化降解程度不断提高，分

子链规整排列受到更强限制，同时原有晶区结构受到破坏，最终导致J-PP熔融焓和结晶度降低。

值得注意的是，电子束辐照引起的分子链断裂也可能生成分子量较低、运动能力较强的短链段。这些短链段具有较高的迁移和重排能力，在一定条件下更容易进入晶格并发生折叠排列，从而促进聚合物结晶，在一定程度上抵消交联作用对结晶过程的抑制效应^[16]。因此，辐照后J-PP结晶行为的变化实际上是交联、链断裂及氧化降解等多种机制共同竞争作用的结果。本研究中，随

着吸收剂量增加, J-PP 的熔融焓和结晶度总体下降, 并结合表 1 中凝胶含量的变化趋势, 表明在所研究的吸收剂量范围内, 交联及辐照诱导的晶区破坏作用对材料结晶行为的抑制效应更为显著。

由图 4 (b) 可见, J-PP-0 kGy 和 J-PP-50 kGy 样品的结晶温度均高于未改性 PP, 其中 J-PP-0 kGy 的结晶温度较 PP 提高 1.03 °C。这可能是由于 TAIC 参与形成的局部交联结构或辐照初期产生的结构缺陷能够提供一定的异相成核位点, 降低晶核形成所需的能垒, 从而促进 PP 在较高温度下发生结晶。然而, 随着电子吸收剂量进一步增加, J-PP 的结晶温度逐渐降低, 表明高剂量辐照条件下交联结构增多以及氧化降解和晶区破坏加剧, 对分子链迁移、规整排列及晶体生长产生明显限制, 最终使 PP 的结晶能力受到抑制。

2.4 辐照对改性 PP 拉伸力学性能的影响

图 5 为 J-PP 在 0 kGy、50 kGy、100 kGy、150 kGy 和 200 kGy 电子束辐照后的拉伸强度和断裂伸长率变化。由图 5 (a) 可见, 随着电子吸收剂量的增加, J-PP 的拉伸强度整体呈下降趋势。未辐照 J-PP 的拉伸强度为 32.76 MPa, 经 50 kGy、100 kGy、150 kGy 和 200 kGy 电子束辐照后, 其拉伸强度分别降低至 24.86 MPa、24.78 MPa、24.67 MPa 和 24.02 MPa, 较未辐照样品分别下降 24.13%、24.36%、24.72% 和 26.68%。

值得注意的是, J-PP 的拉伸强度在 50 kGy 辐照后发生明显下降, 而当吸收剂量进一步由 50 kGy 增加至 200 kGy 时, 其拉伸强度仅由

24.86 MPa 降低至 24.02 MPa, 变化幅度较小。这表明电子束辐照初期对 J-PP 的承载能力影响较为明显, 而在 50~200 kGy 范围内, 拉伸强度对吸收剂量进一步增加的敏感性相对较低。电子束辐照能够使 PP 分子链上的化学键发生断裂并产生大量自由基, 进而诱发链断裂、氧化降解以及分子链间交联等多种反应。链断裂及氧化降解会造成分子量降低、分子链连续性下降以及有效缠结数量减少, 从而削弱材料的载荷传递能力; 与此同时, 随着辐照剂量的增加, J-PP 接触空气的时间增加, 交联剂 TAIC 作为氧气分子捕获剂消耗了一些氧气, 有利于 PP 自由基的结合, 进而产生交联^[18]。在 TAIC 存在的条件下, 部分 PP 自由基可参与交联反应, 形成一定程度的三维网络结构, 从而对分子链间的连接和载荷传递起到一定补偿作用。因此, 在 50~200 kGy 辐照范围内, TAIC 的存在使得 J-PP 降解幅度减小, 其拉伸强度的变化也相对较小, 这也与表 1 中结晶度和凝胶含量随吸收剂量的变化具有一定对应关系。

与拉伸强度相比, J-PP 的断裂伸长率对电子束辐照表现出更高的敏感性。如图 5 (b) 所示, 未辐照 J-PP 的断裂伸长率为 674.80%, 经 50 kGy 辐照后降低至 307.88%; 当吸收剂量进一步增加至 100 kGy、150 kGy 和 200 kGy 时, 断裂伸长率分别降低至 38.33%、4.60% 和 3.10%, 与未辐照样品相比, 分别下降 54.38%、94.32%、99.32% 和 99.54%。由此可见, 随着电子吸收剂量增加, J-PP 的塑性变形能力受到显著抑制, 并逐渐表现出明显的脆化特征。

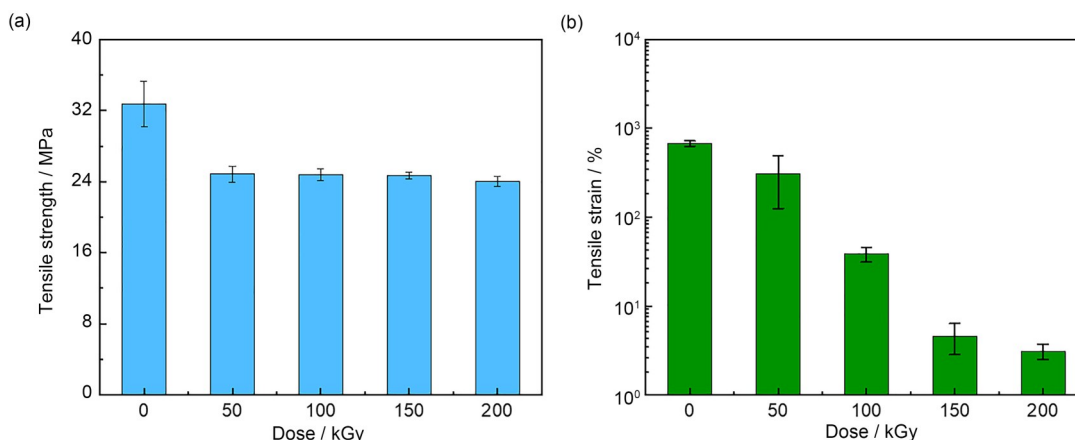
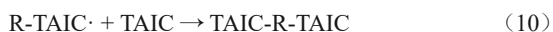
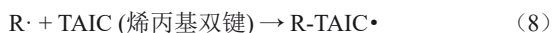


图5 不同电子吸收剂量下J-PP的拉伸性能:(a)拉伸强度;(b)断裂伸长率

Fig.5 Tensile properties of J-PP under different electron absorbed doses: (a) tensile strength; (b) elongation at break

电子束辐照条件下，TAIC改性PP力学性能的变化是交联与降解等多种反应共同作用的结果。PP在空气氛围电子束辐照过程中可能发生的主要自由基反应可表示为式(2)~(10)。



式中：R表示聚丙烯分子链， $R \cdot$ 表示电子束辐照产生的聚丙烯大分子自由基。

在空气氛围下，电子束辐照首先使PP分子链发生均裂并形成大分子自由基，如式(2)所示。部分自由基可与氧气迅速反应生成过氧自由基，并进一步形成氢过氧化物及其他含氧结构，如式(3)和式(4)所示。这些氧化中间体进一步发生反应，可诱导PP分子链断裂和氧化降解。另一方面，PP大分子自由基之间也能够发生重组反应，形成分子链间连接结构，如式(7)所示。

TAIC含有多个具有较高反应活性的烯丙基双键，可参与辐照过程中产生的自由基反应。PP大分子自由基能够加成至TAIC的烯丙基双键，生成新的中间体自由基；该自由基随后可进一步与其他PP大分子自由基或TAIC分子发生反应，从而在不同PP分子链之间构建连接结构。由于TAIC具有多个可参与反应的烯丙基基团，因此能够作为分子链之间的“桥接单元”，促进三维交联网络的形成。随着吸收剂量增加，交联反应不断进行，表1中J-PP凝胶含量的提高也进一步表明TAIC能够促进辐照条件下PP分子链间网络结构的形成。

然而，在空气氛围电子束辐照过程中，交联并非唯一发生的反应。辐照产生的大量自由基可进一步与氧发生反应，引起PP分子链氧化和断裂，造成分子量降低以及分子链缠结数量减少。前述FTIR结果中高剂量辐照样品羰基吸收峰的增强，也说明随着吸收剂量增加，J-PP的氧化程度逐渐

提高。同时，表1结果表明，随着电子吸收剂量增加，J-PP的结晶度下降而凝胶含量升高，说明体系中交联、链断裂、氧化降解及晶区结构破坏等过程同时存在。

因此，J-PP在电子束辐照后的力学性能变化可视为交联与降解竞争作用的宏观体现。TAIC促进形成的交联网络能够增强分子链之间的连接，并在一定程度上补偿链断裂和氧化降解对材料承载能力造成的不利影响，从而使J-PP在50~200 kGy范围内的拉伸强度仅发生小幅下降。然而，交联网络的形成会显著限制分子链的滑移、解缠结和取向变形，同时链断裂及氧化损伤进一步降低分子链的连续性和塑性变形能力。因此，随着吸收剂量增加，J-PP的断裂伸长率急剧下降，并表现出明显脆化。由此可见，电子束辐照对J-PP力学性能最显著的影响并非持续大幅降低其拉伸强度，而是显著削弱材料的塑性变形能力。

3 结论

本研究采用0 kGy、50 kGy、100 kGy、150 kGy和200 kGy电子束对TAIC改性PP(J-PP)进行辐照处理，系统分析了其表面形貌、化学结构、热学性能及拉伸力学性能的变化规律。结果表明，随着吸收剂量增加，J-PP表面由平整逐渐粗糙并出现明显凸起， 1716 cm^{-1} 附近羰基吸收峰增强，表明辐照诱导的氧化反应不断加剧；同时，熔融峰温度、熔融焓和结晶度整体下降，而凝胶含量持续升高，说明交联结构的形成及晶区破坏共同抑制了分子链的规整排列和结晶。力学性能方面，J-PP拉伸强度在50 kGy辐照后明显下降，而在50~200 kGy范围内仅由24.86 MPa降至24.02 MPa，表明TAIC促进形成的交联网络可在一定程度上补偿链断裂和氧化降解对载荷传递能力的不利影响。相比之下，断裂伸长率由未辐照时的674.80%急剧降至200 kGy时的3.10%，说明高剂量辐照主要表现为塑性变形能力显著衰减和材料脆化。综上，随着吸收剂量增加，TAIC改性PP的辐照交联程度提高，但与此同时链断裂和氧化降解也逐渐加剧。交联网络的形成可在一定程度上维持材料的承载能力，但难以抑制高剂量辐照引起的塑性损失。因此，实际应用中应合理控制吸收剂量，以协调辐照交联与氧化降解之间的竞争关系。

作者贡献声明 史丛丛、陆毅峰设计实验方案并撰写初稿；史丛丛、陆毅峰进行了实验；晏乐三、熊传溪对实验数据进行了表征和分析；左红梅对初稿进行了修改。所有作者均已阅读并同意稿件最终版本的内容。

参考文献

- 1 Park S K, Jung S, Lee D Y, *et al.* Effects of electron-beam irradiation and radiation cross-linker on tensile properties and thermal stability of polypropylene-based carbon fiber reinforced thermoplastic[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2020, **181**: 109301. DOI: 10.1016/j.polymdgradstab.2020.109301.
- 2 Anshari R, Tsuboi M, Sato H, *et al.* Raman and ATR-FTIR unmask crystallinity changes and carboxylate group and vinyl group accumulation in natural weathering polypropylene microplastics[J]. *Scientific Reports*, 2025, **15**: 2518. DOI: 10.1038/s41598-025-85837-y.
- 3 胡明磊, 张维, 胡斌, 等. 多孔二氧化硅对聚丙烯 VOC 吸附及其力学性能的影响[J]. *胶体与聚合物*, 2026, **44** (1): 15-18. DOI: 10.13909/j.cnki.1009-1815.2026.01.004. HU Minglei, ZHANG Wei, HU Bin, *et al.* Effect of porous silica on VOC adsorption, mechanical properties of polypropylene[J]. *Chinese Journal of Colloid & Polymer*, 2026, **44**(1): 15-18. DOI: 10.13909/j.cnki.1009-1815.2026.01.004.
- 4 Boukourou K, Khaldi M, Zengah S, *et al.* Effects of different ageing on structural, mechanical and thermal properties of polypropylene/talc microcomposites[J]. *Journal of Polymer Research*, 2026, **33**(3): 112. DOI: 10.1007/s10965-026-04807-8.
- 5 Otaguro H, de Lima L F C P, Parra D F, *et al.* High-energy radiation forming chain scission and branching in polypropylene[J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2010, **79**(3): 318-324. DOI: 10.1016/j.radphyschem.2009.11.003.
- 6 Liu B X, Gao Y, Guo C Y, *et al.* Effect of gamma-ray irradiation on electrical conductivity of polypropylene composite for nuclear cable insulation[J]. *High Voltage*, 2025, **10**(2): 470-479. DOI: 10.1049/hve2.70002.
- 7 Liu B X, Gao Y, Li J, *et al.* Polypropylene-based blend with enhanced breakdown strength under gamma-ray irradiation for cable insulation[J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2024, **36**(1): 12. DOI: 10.1007/s41365-024-01568-1.
- 8 Krieger B, Marque S R A, Girard F, *et al.* Investigation of X-rays, e-beam, and gamma irradiation on chemical, thermal, and mechanical properties of polypropylene-derivatives[J]. *Macromolecular Chemistry and Physics*, 2025, **226**(20): e00130. DOI: 10.1002/macp.202500130.
- 9 冯宇, 何梓源, 杨智捷, 等. 高能电子辐照对双向拉伸聚丙烯薄膜的微观结构及介电性能影响[J]. *中国电机工程学报*, 2022, **42**(22): 8405-8414. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.212090. FENG Yu, HE Ziyuan, YANG Zhijie, *et al.* Effect of high-energy electron irradiation on the microstructure and dielectric properties of biaxially oriented polypropylene films[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, **42**(22): 8405-8414. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.212090.
- 10 姜纹昕, 顾雪萍, 冯连芳, 等. 聚丙烯辐照接枝改性技术及其应用[J]. *塑料*, 2021, **50**(6): 140-145. JIANG Wenxin, GU Xueping, FENG Lianfang, *et al.* Grafting modification of polypropylene by irradiation technology and its application[J]. *Plastics*, 2021, **50**(6): 140-145.
- 11 Wang H T, Jiang H Q, Shen R F, *et al.* Electron-beam radiation effects on the structure and properties of polypropylene at low dose rates[J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2018, **29**(6): 87. DOI: 10.1007/s41365-018-0424-y.
- 12 张茂江, 吴彦甫, 崔渴欣, 等. 低剂量电子束辐射改性线性低密度乙烯/三元共聚聚丙烯及其性能[J]. *辐射研究与辐射工艺学报*, 2024, **42**(4): 32-42. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2024-0037. ZHANG Maojiang, WU Yanfu, CUI Kexin, *et al.* Effects of low-dose electron beam irradiation on linear low density polyethylene/ternary copolymer polypropylene polyolefin structure and properties[J]. *Journal of Radiation Research and Radiation Processing*, 2024, **42** (4): 32-42. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2024-0037.
- 13 Arquinto J, Harada J, de Castro D P, *et al.* Effects of E-beam irradiation on the chemical, thermal, and mechanical properties of polyamide-6, polyamide-6.6, and polypropylene used in conveyor belt rollers[J]. *Materials Research*, 2025, **28**(suppl. 1): e20250068. DOI: 10.1590/1980-5373-mr-2025-0068.
- 14 李化, 王雨橙, 王哲豪, 等. 双向拉伸聚丙烯薄膜 shish-kebab 结构的辐照劣化模型研究[J]. *中国电机工程学报*, 2024, **44**(9): 3378-3387. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.230364.

- LI Hua, WANG Yucheng, WANG Zhehao, *et al.* Irradiation degradation model of shish-kebab structure of biaxially oriented polypropylene film[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, **44**(9): 3378-3387. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.230364.
- 15 全国塑料标准化技术委员会. 塑料 拉伸性能的测定: 第2部分 模塑和挤塑塑料的试验条件:GB/T 1040.2—2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- National Committee for Plastic Standardization Technology. Plastics—Determination of tensile properties —Part 2: Test conditions for moulding and extrusion plastics: GB/T 1040.2—2022[S]. Beijing: Standards Press of China, 2022.
- 16 杜潇丹, 肖萌, 宋玉宁, 等. 基于辐照交联改性的电容器用聚丙烯薄膜介电性能[J]. 高电压技术, 2024, **50**(10): 4601-4610. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20232105.
- DU Xiaodan, XIAO Meng, SONG Yuning, *et al.* Dielectric properties of polypropylene film for capacitor based on irradiation crosslinking modification[J]. High Voltage Engineering, 2024, **50**(10): 4601-4610. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20232105.
- 17 Rytlewski P, Stepczyńska M, Moraczewski K, *et al.* Flax fibers reinforced polycaprolactone modified by triallyl isocyanurate and electron radiation[J]. Polymer Composites, 2019, **40**(2): 481-488. DOI: 10.1002/pc.24672.
- 18 王吉祥, 谢放华, 曾虹燕, 等. 辐照对聚丙烯粉末氧化裂解的影响[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2018, **36**(5): 050301. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2018.rj.36.050301.
- WANG Jixiang, XIE Fanghua, ZENG Hongyan, *et al.* Effects of radiation on oxidation scission of polypropylene powder[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2018, **36**(5): 050301. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2018.rj.36.050301.