

· 研究论文 ·

## 伽马辐射对聚硅氮烷润滑涂层结构及摩擦学性能的影响

孟真萱<sup>1,2</sup> 胡睿<sup>2</sup> 万宏启<sup>2</sup> 张定军<sup>1\*</sup> 吴龔平<sup>2\*</sup>

(<sup>1</sup>兰州理工大学材料科学与工程学院 兰州 730050)

(<sup>2</sup>中国科学院兰州化学物理研究所 润滑材料全国重点实验室 兰州 730000)

**摘要** 服役于核反应堆内运动机构表面的润滑防护涂层同时面临着长寿命润滑和长期辐射稳定性的双重考验. 本工作以具有良好耐核辐射潜力的聚硅氮烷(PSZ)为基础树脂粘剂, 复配二硫化钼(MoS<sub>2</sub>)润滑填料, 获得具有良好润滑和耐辐照性能的PSZ型黏结固体润滑涂层材料. 系统研究了涂层材料在不同处理温度下和伽马射线辐照前后结构、力学性能和摩擦学性能变化情况. 结果表明: 高温热处理和 $\gamma$ 射线辐照均能够促进PSZ复合润滑涂层的交联固化, 使复合涂层的硬度和摩擦学性能显著改善; 同时经过300 °C高温热处理和 $\gamma$ 射线辐照后的复合涂层耐磨损性能表现突出, 其平均摩擦系数在0.34左右, 磨损率低至 $6.7 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ , 表现出良好的摩擦学性能和耐 $\gamma$ 射线辐照性能. 上述研究结果为未来高辐射剂量新型核反应堆内相关机械运动部件的表面润滑防护处理提供技术支撑和理论指导.

**关键词** 聚硅氮烷; 润滑涂层;  $\gamma$ 射线辐照; 摩擦学性能

**引用:** 孟真萱, 胡睿, 万宏启, 张定军, 吴龔平. 伽马辐射对聚硅氮烷润滑涂层结构及摩擦学性能的影响. 高分子学报, doi: 10.11777/j.issn1000-3304.2026.26068.

**Citation:** Meng, Z. X.; Hu, R.; Wan, H. Q.; Zhang, D. J.; Wu, Y. P. Effect of gamma radiation on the structure and tribological properties of polysilazane lubricating coatings. *Acta Polymerica Sinica* (in Chinese), doi: 10.11777/j.issn1000-3304.2026.26068.

在碳达峰、碳中和的大背景下, 加快推进能源结构转型, 积极发展高效、清洁、低碳、安全以及绿色的核能, 是世界能源发展的必然趋势, 也是新时代建设美丽家园, 实施生态文明建设战略和能源革命的必然选择. 以超高温气冷堆、钠冷堆、铅冷堆和熔盐堆为代表的4代堆对相关机械运动部件表面润滑防护材料的使用温度上限、承受累积辐照剂量、服役寿命和稳定性等方面均提出了更高要求, 传统润滑涂层材料面临迭代更新、耐高温有限和抗辐射稳定性不足等巨大挑战, 研究和开发新型耐高剂量辐射润滑防护功能涂层材料刻不容缓. 陶瓷材料具有优异的化学惰性与耐辐照性能, 在核辐射环境中具备良好应用

潜力. 然而, 陶瓷本征脆性大、抗重载能力差, 限制了其直接作为核电站结构部件使用<sup>[1]</sup>. 将陶瓷与金属基体或金属复合材料复合, 可兼顾力学强度与耐辐照性能, 成为重要改进路径. ZrN、TiN、AlN等过渡金属氮化物性能突出, 相关制备与辐照适应性研究已证实其在核环境下的应用价值<sup>[2-4]</sup>. 但现有研究普遍存在辐照剂量偏低、未系统考虑摩擦磨损行为等不足, 仍需进一步完善. 除上述过渡金属氮化物陶瓷外, 聚合物衍生陶瓷(PDCs)为极端环境防护提供了新路径<sup>[5]</sup>, 其分子设计灵活、成型加工便捷且稳定性优异, 从而成为极端环境防护材料核心发展方向<sup>[6]</sup>.

聚硅氮烷(polysilazane, PSZ)作为其重要前驱

2026-03-20收稿, 2026-05-02录用, 网络出版.

基金项目: 国家重点研发计划项目(项目号 2024YFB3410300).

\* 通信联系人, E-mail: zhangdingjun@lut.edu.cn; wuy1012@licp.cas.cn

doi: 10.11777/j.issn1000-3304.2026.26068; CSTR: 32057.14.GFZXB.2026.7610

体,通过热解、非晶化等工艺在先进陶瓷制备中发挥关键作用<sup>[7~11]</sup>。PSZ是一类以Si—N键为主链的有机-无机杂化前驱体,可制备高性能防护涂层。由于其分子结构中Si—N键夹角小,键张力大且键能高达435 kJ/mol,因而表现出优异耐辐照性能,兼具高致密性、高硬度、疏水性、强附着力及耐高温性等优异性能<sup>[12~14]</sup>。若复合润滑相后可获得优异摩擦学性能,耐磨性能显著优于传统防护材料<sup>[15]</sup>。因此,PSZ在抗辐照与耐磨性能上是兼具突出优势的关键前驱体,有望成为核工业高新技术领域关键部件的核心防护材料<sup>[13,16,17]</sup>。但目前核环境宽温域耐磨领域,以PSZ为前驱体粘接剂制备防护涂层的相关研究较少。

本工作以侧链含有大量Si—H键和乙烯基的有机PSZ作为基础树脂成膜物,通过与二硫化钼(MoS<sub>2</sub>)复配后成功制备了一种具有良好耐辐照和润滑防护潜力的PSZ基黏结固体润滑防护涂层材料,系统研究了所制备复合涂层材料在不同热处理温度及伽马射线辐照前后涂层结构及力学、摩擦学性能变化情况,并深入探讨了其磨损和抗辐照机理。相关研究结果为新型核反应堆内相关机械运动部件的润滑防护材料选型和处理提供理论指导和技术支撑。

## 1 实验部分

### 1.1 实验材料及涂层制备

#### 1.1.1 实验材料

有机聚硅氮烷-8801(PSZ)购于北京华威锐科化工科技有限公司;高纯二硫化钼(MoS<sub>2</sub>)购于本溪精盛益金属材料有限公司;二甲苯购于成都市科隆化学品有限公司;其它所有试剂均为分析纯级,直接使用。

#### 1.1.2 涂层制备

将MoS<sub>2</sub>经锥形磨研磨分散后(激光粒度仪测试其Z-均值粒径为1003 nm,粒径分布均匀,分散性良好)与聚硅氮烷树脂按设定比例(质量比1:1)混合均匀,经剪切分散后,利用喷枪均匀喷涂在事先经喷砂处理的718高温合金基材上(循环喷涂2~3次),表干后在不同温度下保温处理2 h获得聚硅氮烷自润滑复合涂层,通过重复喷涂次数控制涂层厚度为30~40 μm。

### 1.2 测试及表征

#### 1.2.1 伽马射线辐照与摩擦学测试

在甘肃天辰辐照技术有限公司利用<sup>60</sup>Co源

对所制备复合涂层进行γ射线辐照,涂层累积辐照剂量为3000 kGy。采用CSM摩擦试验机对辐照前后的涂层进行摩擦学性能测试,测试条件:对磨球为直径6 mm的GCr15钢球,摩擦方式为往复摩擦,载荷5 N,总滑动距离250 m,振幅5 mm,频率6.4 Hz。磨损率按公式 $\omega = V/(L \cdot N)$ 计算( $\omega$ 为磨损率,单位mm<sup>3</sup>/(N·m); $V$ 为磨损体积,由非接触式三维表面轮廓仪(MicroXAM-800)测定,单位mm<sup>3</sup>;  $L$ 为总滑动距离,单位m;  $N$ 为法向载荷,单位N)。所有摩擦学实验均在相同条件下重复3次,取平均值。

#### 1.2.2 分析表征

采用STA449F3型同步热分析仪(TGA)在空气氛围下对PSZ进行热失重测试(升温速率10.0 °C/min,测试温度范围为25~800 °C)。

采用全反射傅里叶变换红外光谱法(FTIR,德国布鲁克V70)和多功能光电子能谱法(XPS,美国赛默飞世尔ESCALAB XI+)测定辐照前后不同热处理温度下涂层及PSZ的化学结构,分辨率为4 cm<sup>-1</sup>。

采用D/MAX2500型X射线衍射法(XRD)表征辐照前后不同热处理温度下涂层物相结构。

采用维氏硬度(Wilson Tukon1102)测试辐照前后不同热处理温度下涂层的力学性能(载荷大小:3 N,保载时间为5 s)。

采用场发射扫描电子显微镜(JSM-6701F,FEI Czech Republic Co., Ltd.,捷克)观察了γ射线辐照前后不同热处理温度下涂层的表面、截面形貌和元素分布。

## 2 结果与讨论

### 2.1 聚硅氮烷树脂的结构分析

图1(a)为PSZ树脂的热稳定测试结果,其升温失重过程分为25~300及300~800 °C 2个温区。25~300 °C为低温段快速失重,质量损失34.39%,源于有机侧基与弱键的裂解挥发。结合其化学结构,此阶段Si—H键、C—H键断裂,—CH<sub>3</sub>、H等有机侧基裂解为CH<sub>4</sub>、H<sub>2</sub>等小分子逸出,是PSZ有机向陶瓷化转变的起始阶段。300~800 °C为中高温段缓慢失重,质量损失11.67%,属于主链交联与深度陶瓷化过程。经低温段有机侧基大量去除后,以Si—N主链为核心,发生主链重排、交联固化,并伴随剩余有机基团的进一步分解。最终Si—N主链逐步重构为稳定陶瓷相,最

终的陶瓷产率为53.8%。

图1(b)为PSZ红外光谱,在 $3383\text{ cm}^{-1}$ 处吸收峰对应 $-\text{NH}_2$ 的N-H伸缩振动,表明PSZ分子中存在未完全取代的N-H键,是其作为硅氮烷聚合物的典型结构特征。 $2960\text{ cm}^{-1}$ 处吸收峰对应 $-\text{CH}_3$ 的C-H伸缩振动,说明分子中存在Si- $\text{CH}_3$ 结构。 $2125\text{ cm}^{-1}$ 处强吸收峰对应Si-H伸缩振动, $1255\text{ cm}^{-1}$ 处吸收峰对应Si- $\text{CH}_3$ 弯曲振动,与 $2960\text{ cm}^{-1}$ 处C-H伸缩振动相互印证,确认分子中Si- $\text{CH}_3$ 存在。 $931\text{ cm}^{-1}$ 处吸收峰对应

Si-N伸缩振动,是PSZ主链的特征吸收峰,反映了Si-N键是其作为陶瓷前驱体的结构基础。

为了进一步明确PSZ分子结构,对其进行了XPS分析,图1(c)为PSZ全谱结果,可识别出C、N、Si 3种主要元素,同时存在O元素。图1(d)为C 1s信号峰,拟合为C=C和C-Si 2个峰,对应PSZ侧基结构;C=C峰对应 $284.8\text{ eV}$ 特征峰,匹配PSZ侧基中的乙烯基; $285.15\text{ eV}$ 处对应C-Si键,表明PSZ侧基Si- $\text{CH}_3$ 结构。图1(e)为N 1s信号峰,拟合为N-H和N-Si 2个峰,对

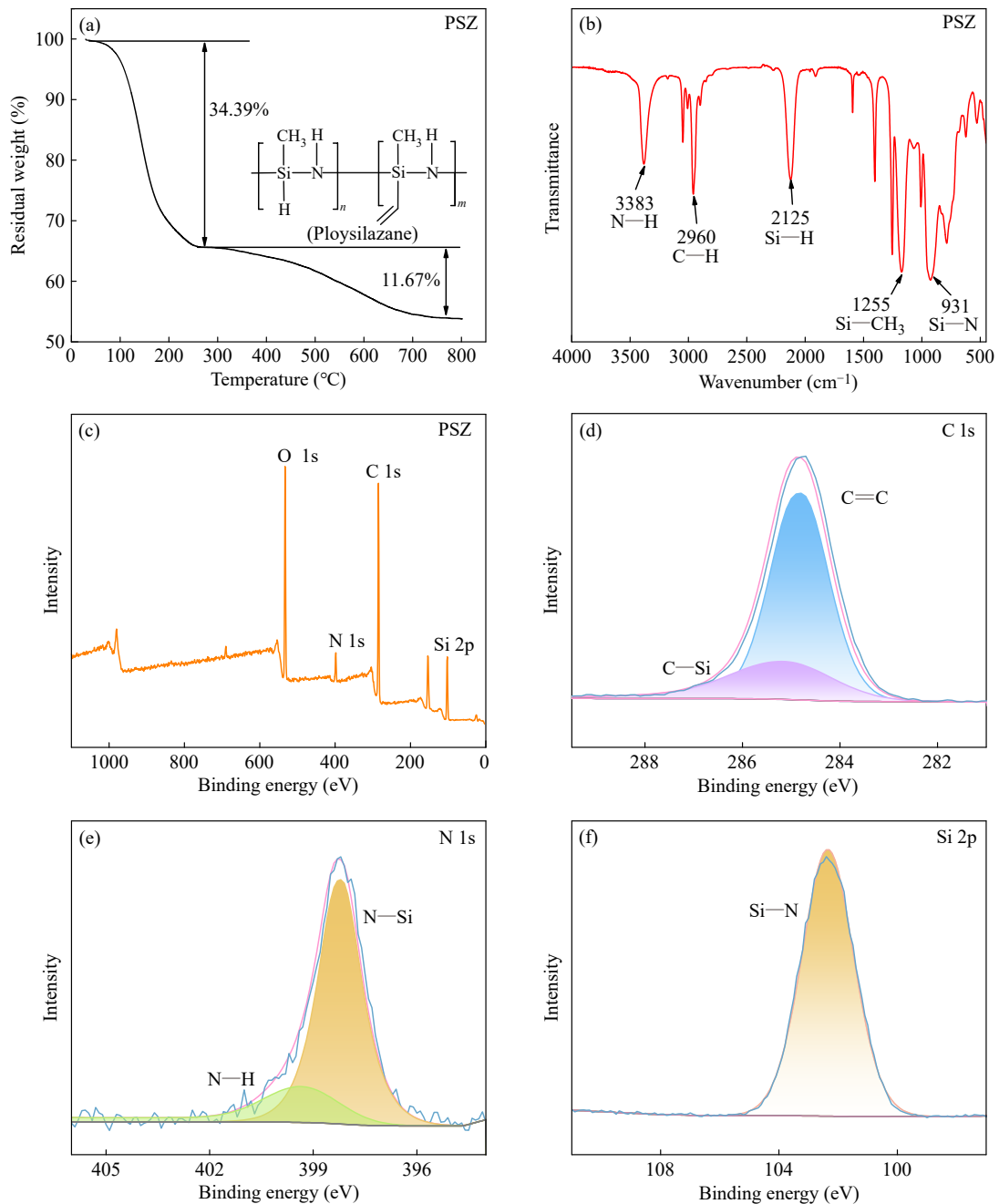


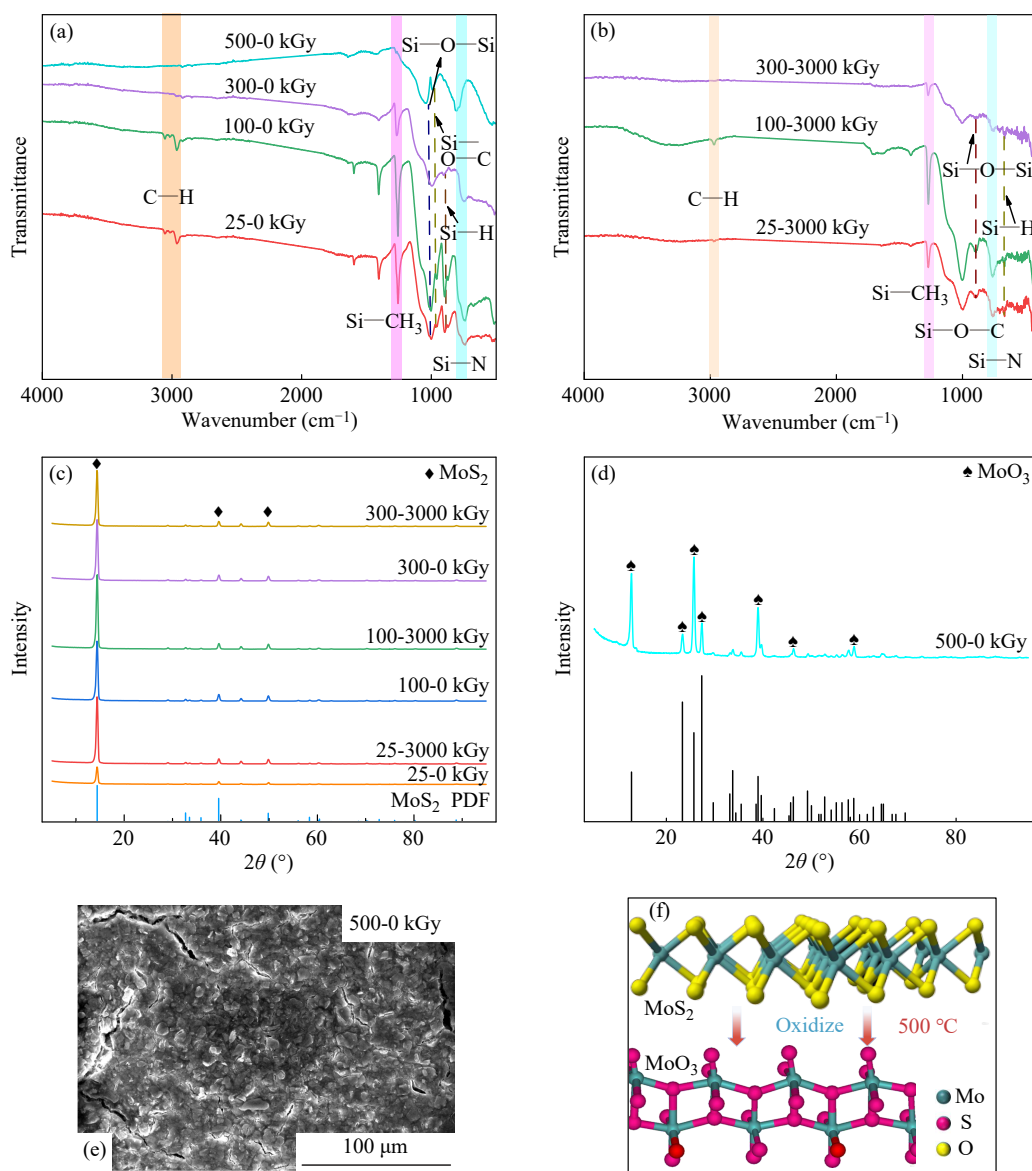
Fig. 1 TG curve (a), FTIR (b) and XPS (c) spectra for PSZ; XPS signal peak of C 1s (d), N 1s (e) and Si 2p (f).

应PSZ主链结构; 398.27 eV处特征峰对应N—Si键, 证明主链中Si—N共价键的存在, 是其作为陶瓷前驱体的核心结构; 399.36 eV处特征峰匹配主链的Si—N—H结构. 图1(f)为Si 2p信号峰, 102.35 eV处特征峰对应Si—N键, 与N 1s谱的分析相互印证.

## 2.2 伽马射线辐照前后涂层结构变化

为了研究不同温度处理对PSZ复合涂层结构的影响, 对不同温度处理、辐照前后涂层进行了FTIR和XRD表征分析. 图2(a)为不同热处理温度PSZ复合涂层辐照前的红外光谱, 未进行热处理

涂层(25 °C, 0 kGy)在2964  $\text{cm}^{-1}$ 和1258  $\text{cm}^{-1}$ 处分别出现了C—H和Si—CH<sub>3</sub>的特征峰, 表明PSZ有机结构大量保留. 涂层经过100 °C和300 °C热处理后, C—H、Si—CH<sub>3</sub>等有机基团峰强度减弱, 同时980  $\text{cm}^{-1}$ 处Si—O—C及750  $\text{cm}^{-1}$ 处Si—N等无机键峰增强, 说明热处理引发PSZ侧基裂解与主链交联, 涂层开始向类陶瓷化转变. 当热处理温度达500 °C时, 有机基团峰几乎消失, 由Si—N、Si—C等无机键峰占主导, 表明高温热处理PSZ进一步向无机相转化, 且该温度下涂层中MoS<sub>2</sub>已被氧化为MoO<sub>3</sub> (图2(d)), 涂



**Fig. 2** FTIR spectra before (a) and after (b) irradiation at different thermal treatment temperatures; (c) XRD patterns of coatings with different heat treatment temperatures before and after irradiation; (d) The XRD pattern of the coating at a heat treatment temperature of 500 °C; (e) SEM image of the coating after heat treatment at 500 °C; (f) Schematic diagram of MoS<sub>2</sub> oxidation at 500 °C.

层表面还出现微裂纹等结构缺陷(图2(e)). 鉴于500 °C热处理导致润滑相氧化失效及涂层产生缺陷, 无法满足核环境下润滑防护的使用要求, 后续研究将重点分析25、100和300 °C热处理条件下的样品. 图2(b)为不同热处理温度PSZ复合涂层经 $\gamma$ 辐照后的红外光谱. 未处理和100 °C热处理并经辐照后C-H、Si-CH<sub>3</sub>等有机基团峰强度明显下降, 300 °C热处理后无明显变化. 图2(c)为不同热处理温度复合涂层辐照前后的XRD结果, MoS<sub>2</sub>特征峰明显, 说明MoS<sub>2</sub>润滑填料在300 °C以下热处理和 $\gamma$ 射线辐照下结构稳定. 此外, 同一热处理温度下, 辐照后的MoS<sub>2</sub>特征峰强度均高于辐照前, 说明 $\gamma$ 射线辐照引发PSZ基体主链交联固化, 使基体结构更致密.

为了考察 $\gamma$ 辐照对涂层力学性能的影响, 对经不同温度处理后涂层辐照前后的维氏硬度进行了测试, 结果如图3所示. 未进行热处理涂层辐照前的硬度仅3.7 HV, 经 $\gamma$ 辐照后的涂层硬度提升至49.9 HV, 这主要是由于 $\gamma$ 射线辐照诱发PSZ交联聚合, 使涂层更加致密; 经过100 °C热处理涂层辐照前后的硬度变化与未进行热处理情况相似, 辐照同样显著提高了涂层的硬度; 300 °C热处理涂层经 $\gamma$ 辐照后硬度同样有所提升. 显然, 热处理可促进PSZ涂层发生交联反应, 实现涂层充分固化; 而 $\gamma$ 射线辐照对涂层兼具两种相反作用效果. 一方面, 辐照可诱导树脂进一步交联, 提升涂层致密化程度, 硬度明显上升; 另

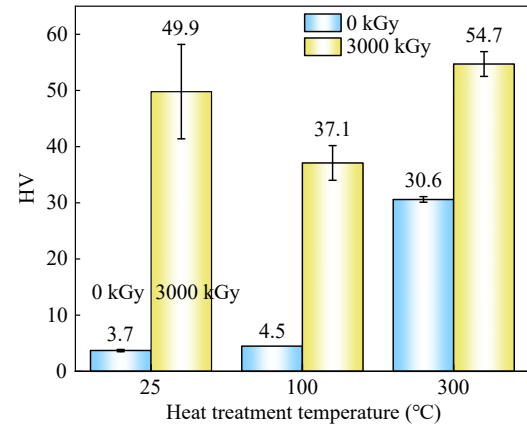


Fig. 3 Hardness changes of coatings heat-treated at different temperatures before and after 3000 kGy irradiation.

一方面,  $\gamma$ 射线会打断涂层内部部分有机侧基化学键, 降低涂层韧性, 最终使材料呈现硬度升高但脆性增大的“硬而脆”特征.

为了进一步探究辐照对涂层结构的影响, 对不同温度处理涂层辐照前后的表面微观结构进行了分析, 结果如图4所示. 在 $\gamma$ 射线辐照前, 随着热处理温度的升高, 涂层表面出现了大颗粒物, 宏观粗糙度增大. 结合热稳定性分析(图1(a)), 主要是由于在高温热处理下PSZ树脂交联固化的同时, 有机链段部分发生了热降解. 不同温度下热处理后的涂层经过 $\gamma$ 射线辐照后, 整体致密性提升, 主要原因是涂层在 $\gamma$ 射线辐照下诱导PSZ树脂产生自由基, 自由基发生了重排, 使涂层发生了二次交联固化.

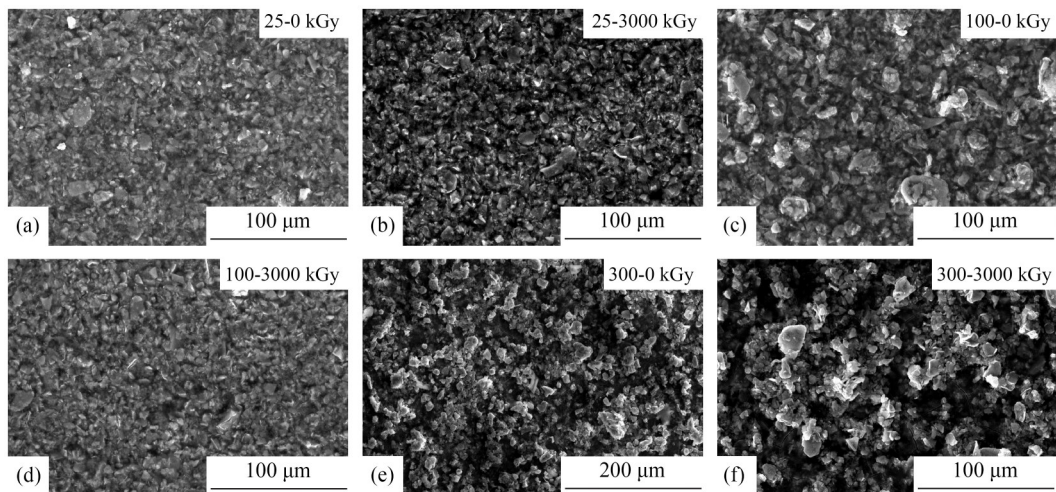


Fig. 4 Surface SEM images of the composite coating treated at different temperatures before and after irradiation. (a) Coating heat-treated at 25 °C without irradiation; (b) Coating heat-treated at 25 °C after 3000 kGy irradiation; (c) Coating heat-treated at 100 °C without irradiation; (d) Coating heat-treated at 100 °C after 3000 kGy irradiation; (e) Coating heat-treated at 300 °C without irradiation; (f) Coating heat-treated at 300 °C after 3000 kGy irradiation.

经 3000 kGy  $\gamma$  射线辐照前后复合涂层的 EDS 分析结果如图 5 所示, 辐照后 C 含量显著下降, 表明 PSZ 基体中有机侧基分解逸出; O 含量提高且原本未被检出的 N 元素信号出现、相对含量显著增加, 表明辐照诱导涂层发生有机基团的降解

与重排, 形成了更稳定的 Si—O—C、Si—N 等杂化网络; S、Mo 元素相对比例升高可能是由于辐照后 PSZ 树脂降解, 部分 MoS<sub>2</sub> 润滑相裸露出来所致.

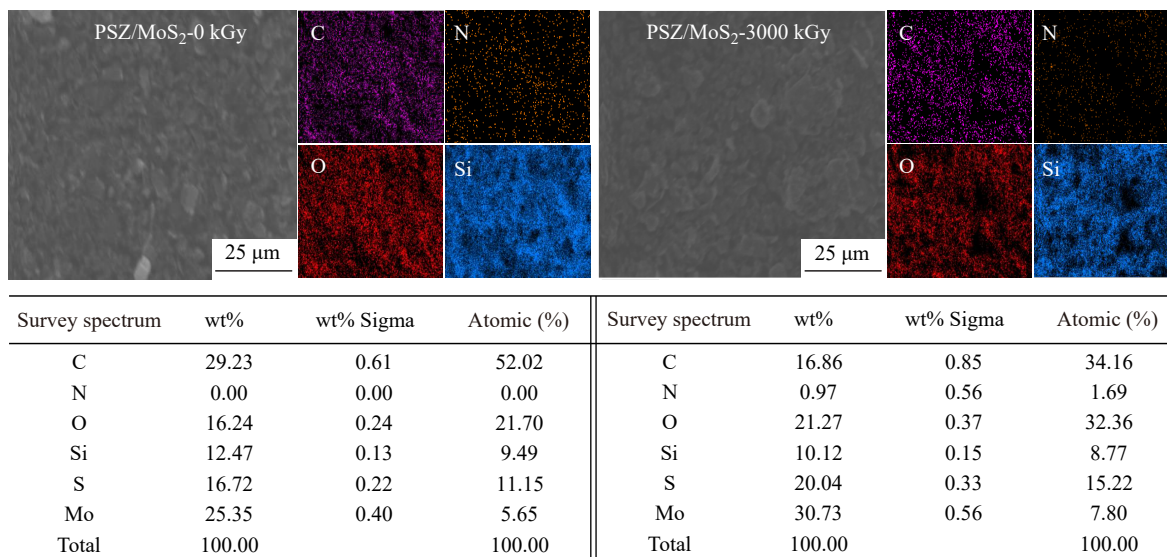
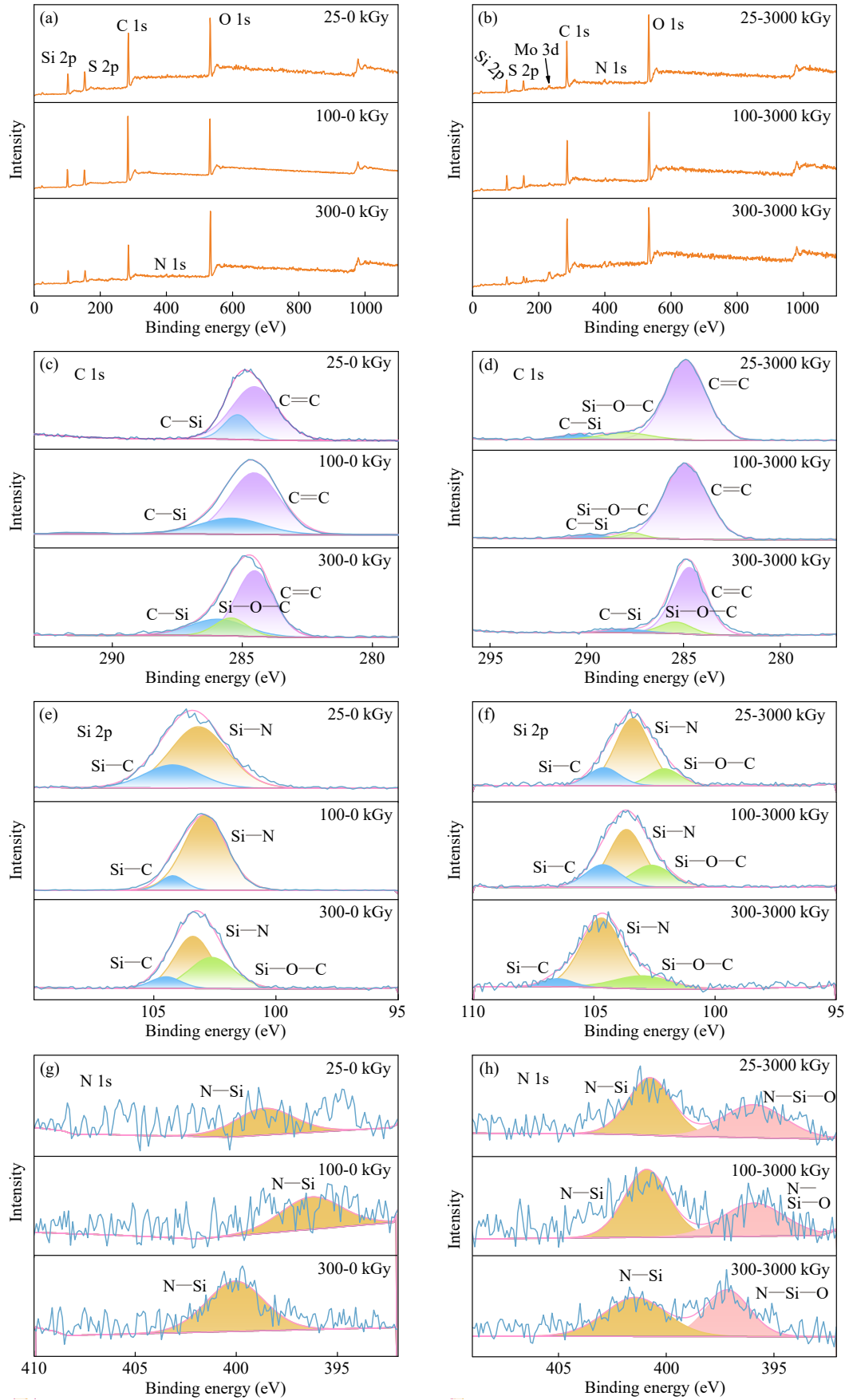


Fig. 5 EDS analysis and element content changes of PSZ composite coatings before and after 3000 kGy irradiation.

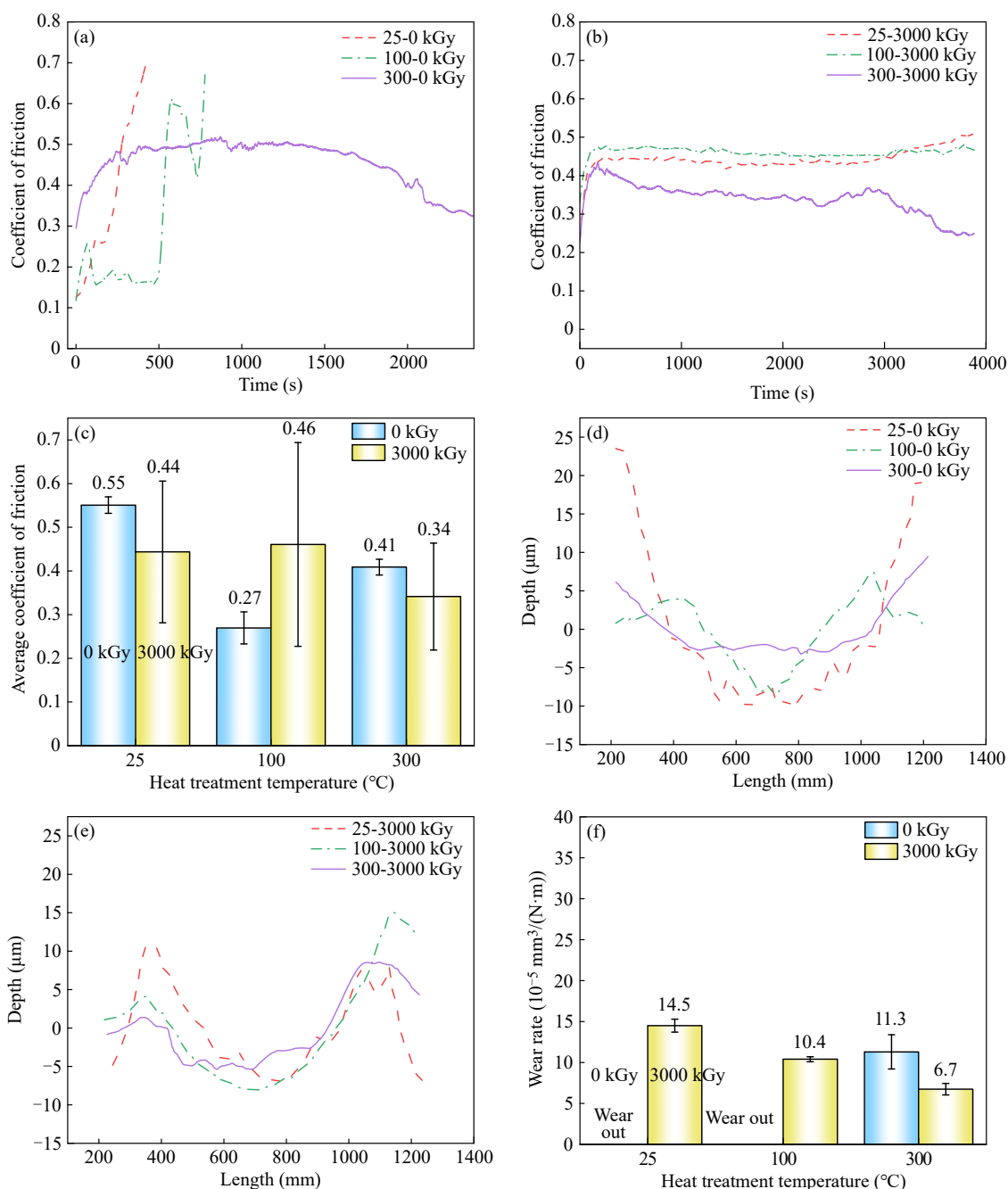
为了深入探究  $\gamma$  辐照对复合涂层微观结构的影响, 对复合涂层进行了 XPS 分析, 结果如图 6 所示. 辐照前不同温度热处理样品均呈现 PSZ 核心元素峰及 MoS<sub>2</sub> 的 S 2p 峰; 300 °C 处理后 N 1s 峰强度显著提升, 对应 PSZ 主链 Si—N 键热交联更充分. 辐照后新增 Mo 3d 峰且 O 1s 峰强度明显增强, 表明辐照促进氧化与杂化反应. 辐照前未处理及 100 °C 热处理后仅含 PSZ 侧基 C—Si、C=C 键; 300 °C 热处理后两者峰型宽化且新增 Si—O—C 峰, 表示热处理引发 PSZ 主链初步交联杂化. 辐照后不同温度热处理涂层均出现 Si—O—C 峰且 C—Si 峰显著衰减, 说明辐照驱动 C—Si 键与氧反应生成杂化键. 同时, 辐照前不同温度热处理涂层均以 Si—C、Si—N 峰为主, 300 °C 处理后热交联使 Si—N 峰占比提升; 辐照后 25 及 100 °C 处理涂层新增 Si—O—C 峰, Si—N 峰仍为核心; 300 °C 热处理后 Si—O—C 峰占比进一步提高, 且辐照导致主链 Si—N 交联密度升高, 峰型宽化. 辐照不同温度热处理涂层均仅有 N—Si 峰出现, 300 °C 热处理峰强度因主链占比提升而增高; 辐照后不同温度处理涂层 N—Si 峰因键局部重组宽化, 且新增 N—Si—O 峰, 表明

辐照与热处理协同促进 N、Si、O 键合, 主链杂化交联程度显著提升. 综上,  $\gamma$  辐照可引发 PSZ 键合杂化且主链 Si—N 键核心结构稳定存在, 300 °C 热处理涂层辐照引发的杂化键生成更显著, 同时主链交联密度更高.

图 7 给出了不同温度热处理及辐照前后复合涂层摩擦学性能的变化情况. 经不同温度处理后的复合涂层的摩擦系数变化曲线如图 7(a) 所示, 显然, 未经过高温热处理的复合涂层 (25 与 100 °C) 在短期内被磨穿, 这主要是由于涂层中 PSZ 树脂在室温和低温下未完全固化, 涂层结构疏松所致; 经 300 °C 热处理后, 涂层固化彻底, 且 PSZ 树脂部分向类陶瓷相转变, 硬度显著增大, 复合涂层表现出良好的耐摩擦性能; 对不同温度下热处理后的复合涂层经  $\gamma$  射线辐照后的摩擦系数测试结果如图 7(b) 所示, 由摩擦系数变化曲线可知, 经  $\gamma$  射线辐照后, 复合涂层均表现出优异的耐磨损性能, 且经高温热处理后, 复合涂层的耐磨损性能显著提高, 瞬时摩擦系数也明显下降, 这进一步说明高温热处理和  $\gamma$  射线辐照均能够促进 PSZ 复合涂层的固化, 且  $\gamma$  射线辐照效果更佳; 图 7(d) 和 7(e) 分别给出了  $\gamma$  射线辐照前



**Fig. 6** XPS survey and signal peak spectra of different PSZ composite coatings before and after irradiation: (a, b) XPS survey spectra; (c, d) C 1s, (e, f) Si 2p and (g, h) N 1s signal peaks.



**Fig. 7** Friction coefficient of the composite coating before (a) and after (b) irradiation at different heat treatment temperatures; (c) Average friction coefficient of coatings heat-treated at different temperatures before and after 3000 kGy irradiation; Cross-sectional wear depth profiles of coatings before (d) and after (e) irradiation at different heat treatment temperatures; (f) Wear rate of coatings heat-treated at different temperatures before and after 3000 kGy irradiation.

后涂层截面磨痕深度变化，其结果与涂层摩擦系数变化趋势完全一致；比较不同温度热处理和 $\gamma$ 射线辐照对复合涂层平均摩擦系数(图7(c))和磨损率(图7(f))的影响结果发现：经高温和 $\gamma$ 射线辐照后的复合涂层表现出最佳的摩擦学性能，其磨损率低至 $6.7 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$ 。且 $300^\circ\text{C}$ 以上热处理固化不利于涂层的摩擦学性能，会使涂层中部

分润滑填料发生氧化失效， $\gamma$ 射线辐照对涂层摩擦学性能的影响较小，能够促进涂层的交联固化，使复合涂层保持优异的摩擦学性能。

图8为不同温度热处理和 $\gamma$ 射线辐照前后复合涂层经摩擦试验后的磨痕形貌变化情况，其磨痕形貌的变化与摩擦系数和磨损率的变化基本吻合，在复合涂层未完全固化前，磨痕表面出现了

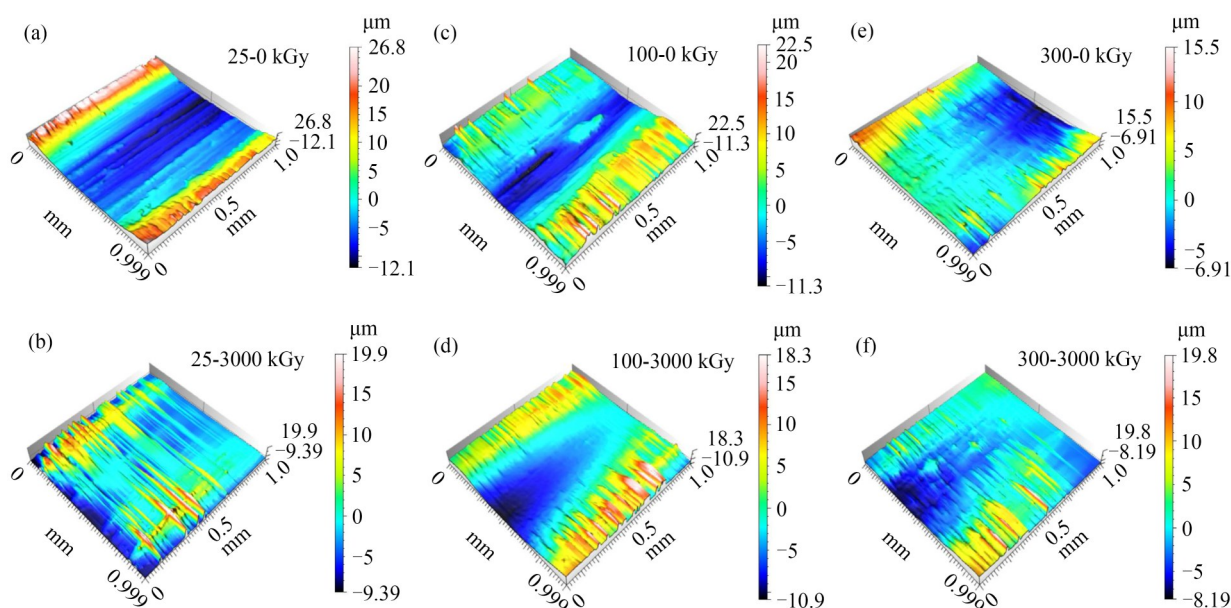


Fig. 8 3D Morphology changes of wear tracks before and after irradiation at different heat treatment temperatures.

与滑动方向高度重合的规则磨痕条纹，此时由于涂层未完全固化，结构较疏松，对偶球表面微凸体和磨屑颗粒物对涂层表面的刮擦比较明显，涂层主要发生磨粒磨损；经300℃热处理后的涂层磨损表面比较光滑；同样， $\gamma$ 射线辐照后涂层磨痕表面也出现了不规则凹坑、微凸起等，表明此时发生了黏着疲劳磨损和磨粒磨损等，复合涂层表现出良好的耐磨损和耐 $\gamma$ 射线辐照性能，且 $\gamma$ 射线辐照对复合涂层摩擦学性能的改善是有利的。

### 3 结论

以聚硅氮烷(PSZ)为基础树脂黏结剂，通过

复配二硫化钼制备了聚硅氮烷基黏结固体润滑复合涂层，并系统表征分析了PSZ基础树脂结构及所制备复合涂层在不同热处理温度下的结构变化；在此基础上，进一步比较分析了热处理温度和 $\gamma$ 射线辐照对复合涂层微观结构、硬度和摩擦学性能影响的研究。结果表明高温热处理和 $\gamma$ 射线辐照均能够促进PSZ复合涂层的固化，且 $\gamma$ 射线辐照对涂层耐磨损性能的改善更加显著，同时经过300℃热处理和 $\gamma$ 射线辐照后复合涂层摩擦系数约为0.34，磨损率低至 $6.7 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ ，复合涂层表现出优异的耐辐照和耐磨损性能，在核辐射领域相关机械运动部件的表面润滑与防护方面具有潜在的应用价值。

### REFERENCES

- 1 Ferré, F. G.; Mairov, A.; Iadicicco, D.; Vanazzi, M.; Bassini, S.; Utili, M.; Tarantino, M.; Bragaglia, M.; Lamastra, F. R.; Nanni, F.; Ceseracciu, L.; Serruys, Y.; Trocellier, P.; Beck, L.; Sridharan, K.; Beghi, M. G.; Di Fonzo, F. Corrosion and radiation resistant nanoceramic coatings for lead fast reactors. *Corros. Sci.*, **2017**, 124, 80–92.
- 2 Yin, Y.; Liu, S. K.; Wu, X. Y.; Liu, D.; Siddique, A.; Umair, M.; Min, C. Y.; Zhou, X. K.; Chen, L.; Yu, C. B.; Xu, Z. W. MOF-based interfacial phase inhibiting structural damage of carbon fiber reinforced polymer composites derived from high-energy irradiation. *Compos. Part B Eng.*, **2025**, 306, 112817.
- 3 Jiao, L. M.; Wang, Y.; Wu, Z. H.; Shen, H.; Weng, H. Q.; Chen, H. B.; Huang, W.; Wang, M. Z.; Ge, X. W.; Lin, M. Z. Effect of gamma and neutron irradiation on properties of boron nitride/epoxy resin composites. *Polym. Degrad. Stab.*, **2021**, 190, 109643.
- 4 Wang, X. H.; Li, Y. X.; Qian, Y. H.; Qi, H.; Li, J.; Sun, J. Q. Mechanically robust atomic oxygen-resistant coatings capable of autonomously healing damage in low earth orbit space environment. *Adv. Mater.*, **2018**, 30(36), 1803854.
- 5 Sujith, R.; Jothi, S.; Zimmermann, A.; Aldinger, F.; Kumar, R. Mechanical behaviour of polymer derived ceramics—a review. *Int. Mater. Rev.*, **2021**, 66(6), 426–449.

- 6 Zhou, L. L.; Zhao, C. X.; Liu, W. H.; Li, Y. N.; Li, Y. B.; Shen, R. F.; Wang, M. L.; Wu, Y. L.; Wang, M. H. ESR study of free radicals in polysilazane irradiated by gamma rays. *Radiat. Phys. Chem.*, **2018**, 151, 108–113.
- 7 Fu, S. Y.; Zhu, M.; Zhu, Y. F. Organosilicon polymer-derived ceramics: an overview. *J. Adv. Ceram.*, **2019**, 8(4), 457–478.
- 8 Chatterjee, A.; Sen, S.; Ramakanth, D.; Singh, S.; Maji, P. K. Unravelling polysilazanes: synthesis, structure-property insights and versatile coating applications. *Adv. Colloid Interface Sci.*, **2025**, 342, 103508.
- 9 Niu, Z. B.; Li, D. X.; Jia, D. C.; Yang, Z. H.; Lin, K. P.; Wang, D.; He, Y. P.; Zhou, G. X.; Colombo, P.; Riedel, R.; Zhou, Y. Comparative study on the microstructure evolution and crystallization behavior of precursor-derived and mechanical alloying derived SiBCN. *J. Eur. Ceram. Soc.*, **2024**, 44(2), 668–678.
- 10 Sun, J. P.; Xiu, Z. Y.; Meng, Y. X.; Xu, L. W.; Xi, P. F.; Yan, Y.; Wang, W. P.; Zhao, J. C.; Yang, W. S.; Ju, B. Y. Microstructure and mechanical properties of graphene nanoplatelets/Al composites with polysilazane-modulated interlocked interface. *Carbon*, **2025**, 243, 120586.
- 11 Liu, J. J.; Dai, Q. W.; Yan, C.; Giuntini, D.; Riedel, R. Preparation of polymer-derived SiOC-Cu ceramic composites and their tribological performance. *J. Eur. Ceram. Soc.*, **2024**, 44(5), 3065–3073.
- 12 牛勇超, 李天昊, 卢莹, 刘丽洁, 余波, 文贞玉, 何邦友, 陈军, 宋育杰. 室温湿气快速固化聚硅氮烷的合成及涂层性能研究. *高分子学报*, **2025**, 56(11), 2050–2057.
- 13 丁振杰, 安晓伟, 何利娜, 成健楠, 危春阳. 有机聚硅氮烷复合涂层的制备及耐高温性研究. *涂料工业*, **2025**, 55(7), 27–33.
- 14 李泽森, 陈楚童, 李成宾, 罗永明, 张宗波, 徐彩虹. 聚硅氮烷应用研究进展. *高分子通报*, **2025**, 38(07), 1056–1072.
- 15 李谋吉, 杨武芳, 汤洁, 马正峰, 王睿, 麻拴红, 于波, 周峰. 聚硅氮烷/MoS<sub>2</sub>高温自润滑涂层的制备及性能研究. *摩擦学学报(中英文)*, **2024**, 44(06), 752–762.
- 16 张宗波, 曾凡, 罗永明, 徐彩虹. 聚硅氮烷的应用研究进展. *有机硅材料*, **2013**, 27(03), 216–222.
- 17 Shang, X. L.; Shao, C. W.; Zhu, Y. H. Preparation and properties of pinacolborane modified polycarbosilane as SiC fiber precursor. *J. Inorg. Organomet. Polym. Mater.*, **2015**, 25(6), 1327–1331.

## Research Article

## Effect of Gamma Radiation on the Structure and Tribological Properties of Polysilazane Lubricating Coatings

Zhen-xuan Meng<sup>1,2</sup>, Rong Hu<sup>2</sup>, Hong-qi Wan<sup>2</sup>, Ding-jun Zhang<sup>1\*</sup>, Yan-ping Wu<sup>2\*</sup>

<sup>(1)</sup>School of Materials Science and Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050)

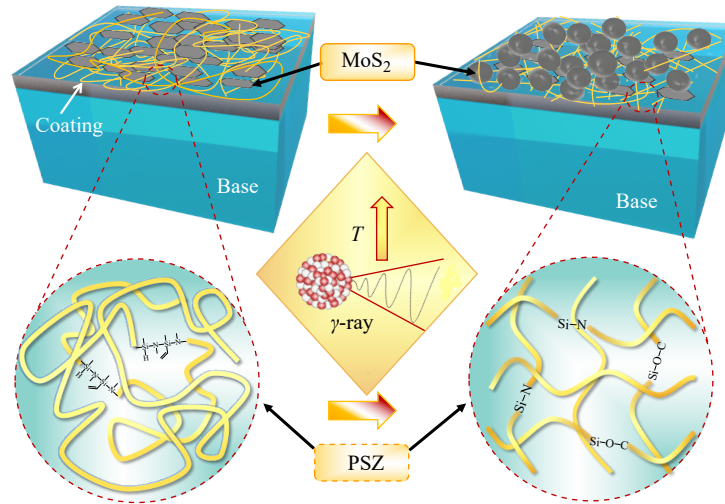
<sup>(2)</sup>State Key Laboratory of Solid Lubrication, Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000)

**Abstract** Lubrication and protective coatings applied to the surfaces of moving mechanisms in nuclear reactors face the dual challenges of long-life lubrication and long-term radiation stability. In this study, polysilazane (PSZ), a precursor with excellent potential for nuclear radiation resistance, was adopted as the base resin binder, and molybdenum disulfide (MoS<sub>2</sub>) was incorporated as the lubricating filler to prepare a PSZ-bonded solid lubricating coating with favorable lubricating and radiation-resistant properties. The variations in the composition, structure, mechanical properties, and tribological properties of the coating after heat treatment at different temperatures and before and after gamma-ray irradiation were systematically investigated. The results show that both high-temperature heat treatment at 300 °C and  $\gamma$ -ray irradiation can promote the cross-linking and curing of the PSZ composite lubricating coating, thus significantly improving the hardness and tribological properties of the composite coating. In particular, the composite coating subjected to the combined treatment of 300 °C high-temperature heat treatment and gamma-ray irradiation exhibited outstanding wear resistance, with an

\* Corresponding authors: Ding-jun Zhang, E-mail: zhangdingjun@lut.edu.cn

Yan-ping Wu, E-mail: wuyanping1012@126.com

average friction coefficient of approximately 0.34 and a wear rate as low as  $6.7 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$ . The composite coating exhibited excellent tribological properties and  $\gamma$ -ray radiation resistance. The above research findings provide technical support and theoretical guidance for surface lubrication and protection of relevant mechanically moving components in advanced nuclear reactors under high radiation dose conditions in the future.



**Keywords** Polysilazane; Lubricating coating;  $\gamma$ -Ray irradiation; Tribological performance