

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20250326002

智能润滑材料和表面

郜培丽 解国新 雒建斌

(清华大学高端装备界面科学与技术全国重点实验室 北京 100084)

摘要: 新型智能润滑材料和表面具有按需响应、主动应变的特征, 这种类生命体自调节机制赋予在役摩擦副自主感知外界环境刺激并进行界面润滑状态自适应调控的功能, 为航空航天、军事武器等高端装备“在线感知-决策-执行”转型升级提供了新解决方案。同时, 人工智能(AI)驱动的润滑材料逆向设计革新了传统试错模式, 实现了摩擦副表面润滑基于需求的高效靶向定制, 为构建满足各类复杂工况的高性能、高可靠润滑材料和表面体系提供了新路径。润滑材料和表面智能化发展正在逐渐重构机械表面界面科学研究范式, 有望为前沿润滑理论和技术研究提供新的突破口。以智能润滑材料和表面技术及其AI创制为切入点, 梳理具有自润滑、自修复、自诊断等功能的润滑材料和表面研究现状, 以及AI加速其逆向设计的前沿进展, 并对未来先进表面润滑材料智能化发展趋势进行展望。

关键词: 智能润滑表面; 智能存储润滑; 智能修复; 智能诊断; 逆向设计

中图分类号: TG156; TB114

Intelligent Lubricating Materials and Surfaces

GAO Peili XIE Guoxin LUO Jianbin

(State Key Laboratory of Tribology in Advanced Equipment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Novel intelligent lubricating materials and surfaces exhibit on-demand responsiveness and adaptability. The biomimetic self-regulating mechanism empowers in-service tribo-pairs with the autonomy to sense external environmental stimuli and adaptively modulate interfacial lubrication states. Such capabilities provide a groundbreaking solution for the “online sensing–decision–execution” intelligent transformation of advanced equipment in aerospace and defense sectors. Concurrently, the AI-driven intelligent inverse design of lubricating materials has revolutionized the traditional trial-and-error paradigm, enabling highly efficient and demand-responsive customization of lubrication for mechanical interfaces. This innovation provides a novel pathway for establishing a scientific framework for high-performance and high-reliability lubrication materials and surface systems capable of addressing diverse complex operational conditions. The intelligent evolution of lubricating materials and surfaces is progressively redefining the research paradigms in mechanical interface science, potentially unlocking breakthrough opportunities to advance frontier tribological theories and technologies. This paper discusses current research on self-lubricating, self-repairing, and self-diagnosing intelligent lubricating materials and surfaces, the frontier progress of AI-accelerated inverse design, and their future development trends, taking intelligent lubricating materials and surfaces and their AI paradigms as the pointcut. Currently, self-lubricating tribo-pairs that are environmentally robust and operationally adaptable use solid lubricating materials as the matrix, with liquid or solid-liquid-coupled lubricants as the dispersed phase. Effectively enhancing the interfacial lubrication performance can be achieved by releasing trace liquid lubricants to form fluid or boundary films. Two primary approaches are used for incorporating liquid lubricants into a tribo-pair matrix: porous-based self-storing and lubricating strategies and capsule-based self-storing and lubricating strategies. The development of capsule-based self-storage and lubrication techniques makes it a novel solid superlubrication method after carbon-based superlubrication and two-dimensional material superlubrication. This method enables

收稿日期: 2025-03-26; 修改日期: 2025-05-07; 接受日期: 2025-05-08; 上线日期: 2025-08-28。

Received March 26, 2025; Revised May 7, 2025; Accepted in revised form May 8, 2025; Available online August 28, 2025.

引用格式: 郜培丽, 解国新, 雒建斌. 智能润滑材料和表面[J]. 中国表面工程, 2025, 38(6): 1-11.

Citation format: GAO Peili, XIE Guoxin, LUO Jianbin. Intelligent lubricating materials and surfaces[J]. China Surface Engineering, 2025, 38(6): 1-11.

macroscopic superlubrication at temperatures between 0 and 250 °C. Although intelligent capsule-based self-storing and lubricating technologies can significantly reduce friction and wear on tribo-pair surfaces, material degradation and surface damage are inevitable during prolonged service. It is important to promptly repair wear and damage to improve the wear resistance and service life of tribo-pair materials. Intelligent surface healing technologies for tribo-pairs can be broadly categorized into extrinsic and intrinsic types. Extrinsic repair typically employs stimulus-responsive materials (for example, microcapsules or microvascular networks) to encapsulate active repair agents that are autonomously released upon external stimulus-induced damage, thereby facilitating physicochemical reactions for localized repair. Intrinsic repair leverages the reversible reorganization of dynamic covalent bonds (for example, Diels-Alder (DA) bonds, acylhydrazone bonds, and disulfide bonds) or non-covalent interactions (for example, hydrogen bonds, metal-ligand coordination, and host-guest interactions) to enable autonomous damage repair. Moreover, excessive wear on tribo-pair surfaces generates clearance, and its enlargement exacerbates vibration during equipment operation and reduces service life. Thus, it is imperative to endow tribo-pairs with self-diagnostic capabilities for real-time monitoring of wear locations and damage severity, enabling intelligent lifecycle management and predictive maintenance of equipment. Three approaches are the primary focus of the current intelligent self-diagnostic technologies: dye-based chromatic detection, electrical signal diagnostics, and optical signal diagnostics. The latest paradigm in the research and development of lubricating materials and surfaces, driven by AI, is the fourth paradigm after empirical, theoretical, and computational science paradigms. The primary technical approach involves employing machine-learning models to establish potential mapping relationships between the properties (such as composition and structure) of lubricant materials and surfaces and their lubrication performance. This enables prediction of the lubrication performance of new materials and surfaces. Furthermore, by integrating optimization algorithms or deep-reinforcement-learning techniques, global optimization within the high-dimensional nonlinear design space of lubricant materials and surfaces can be achieved rapidly, thereby facilitating the efficient inverse design of materials and surfaces with target attributes. This transformative research paradigm is expected to decipher the lubrication and friction reduction mechanisms at mechanical interfaces, overcome the efficiency limitations of traditional trial-and-error iterative methods, and ultimately realize demand-driven customization of lubricant materials and surface designs.

Keywords: intelligent lubricating surfaces; intelligent storing and lubricating; intelligent healing; intelligent diagnosis; inverse design

0 前言

开发具有高效减摩抗磨性能的表面润滑材料以实现装备性能和可靠性的提升，一直是机械表面界面科学研究的重要内容^[1]。然而，润滑材料和表面的性能优化通常需要进行大量的试错迭代，这一过程耗力费时，且难以快速响应各类极端复杂工况对高性能、高可靠、长寿命润滑的要求。同时，传统的被动响应润滑模式因缺乏实时感知和自主调控能力，已无法满足智能制造设备、人形机器人、智能微器件等新装备和器件对自主应变润滑的需求，需要新技术突破。

近年来，润滑材料和表面的智能化发展为各类润滑需求和问题的解决提供了新途径。一方面，通过材料-结构-功能一体化设计，在役摩擦副表面可自主感知外界环境刺激（力、热、光、电、磁等）并自适应调控摩擦界面润滑状态，进而满足高端装备关键运动部件“在线感知-决策-执行”的转

型升级需求^[2-3]。另一方面，利用人工智能（Artificial intelligence, AI）强大的非线性拟合泛化能力，从大量润滑数据中提炼潜在的构效关系，从而驱动润滑材料和表面的正向性能预测和逆向设计，高效生成满足特定工况需求的新型润滑材料和表面。

本文以智能润滑材料和表面技术及其 AI 创制为切入点，梳理了具有自润滑、自修复和自诊断等功能的润滑材料和表面研究现状，以及 AI 加速润滑材料和表面逆向设计的最新研究进展，并对未来润滑材料和表面智能化发展趋势进行了展望。

1 智能润滑材料和表面技术

对摩擦副表面材料进行分子设计和复合构筑，可以赋予摩擦副存储润滑、修复介质并受激响应、按需释放的特性，这能使摩擦副升级为可以自主感知和调节界面润滑状态的智能摩擦副^[4]。图 1 所示即为具有自润滑、自修复和自诊断等功能的润滑材料和表面技术的基本原理。

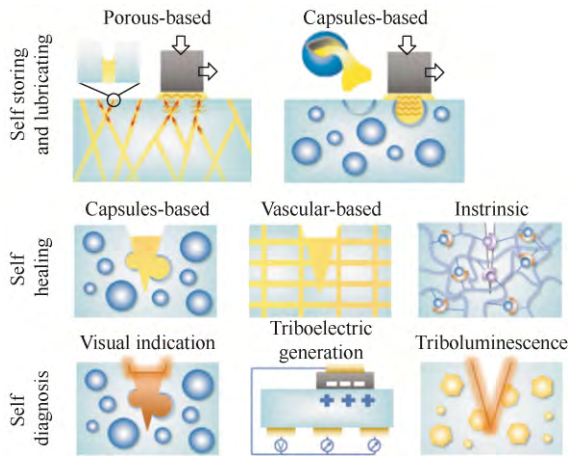


图 1 智能润滑材料和表面技术基本原理

Fig. 1 Mechanism of intelligent lubricating materials and surfaces

1.1 摩擦副表面智能存储润滑技术

响应外部刺激变化的润滑介质多为液体(如电流变液、磁流变液、离子液体)或多受溶剂作用影响(如水合润滑、双电层作用),但液体溶剂又受高温挥发、供给故障易致乏油停机、空间存储有限等限制,因此具有环境鲁棒性和工况适应性的智能存储润滑摩擦副主要以固体润滑介质为基体,液体或固-液耦合润滑介质为分散相。通过缓释微量液体润滑介质形成流体膜或边界膜,可有效提高界面润滑效果。目前,将液体润滑介质引入摩擦副基体表面有以下两种策略。

1.1.1 多孔存储润滑技术

多孔存储润滑技术是利用多孔材料来存储润滑液,并在外界刺激下实现润滑液释放和回收的润滑技术。利用模压-烧结方法制备多孔聚合物复合材料,并采用真空浸渍等方法吸附润滑液体是制备多孔存储润滑材料的常用方法。通过该方法制备得到的内含离子液体的多孔聚醚醚酮(PEEK)复合材料,具有摩擦因数(COF)为 0.049 3、磨损率为 $2 \times 10^{-5} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$ 的润滑性能^[5],尤其是利用多孔中空微米球和多孔材料构建的具有“通道-油池”联通结构的复合材料,相比仅有“通道”结构的多孔复合材料,具有更高的储油能力和减摩降磨能力^[6]。该润滑技术在空间装备滚动轴承保持架材料中应用较为典型,比如多孔储油聚酰亚胺(PI)材料^[7]。此外,金属、复合陶瓷等承载性能较高的材料也常被用作多孔基体,而且金属导电性还能赋予多孔储油材料在外加电刺激下可控释放润滑储液的功能。例如,ZHANG 等^[8]设计制备了存储离子液体的多孔铜/石墨复合材料,并通过外加电压诱导润滑剂加速释放,实现润滑减磨性能的可控调节。

1.1.2 微胶囊智能存储润滑技术

需要指出,多孔存储润滑材料的孔隙率和连通性对其载油量和润滑油分布均匀性有很大影响。相比而言,利用微胶囊化技术将固/液体润滑剂封装在聚合物或陶瓷壳壁中,并将其分散引入摩擦副表面涂层,获得微胶囊智能存储润滑摩擦副,在制备和应用上更加灵活方便。同时,由于微胶囊独特的核壳结构能够通过构建有机/无机壳壁、引入纳米添加剂、表面修饰材料等方法,实现复合材料强韧性和耐热性等性能的调控。与多孔存储润滑材料相比,微胶囊复合润滑材料能获得更加优异的力学性能。因此,微胶囊技术逐渐成为摩擦副表面智能存储润滑技术的重点研究方向。

从机理上来讲,微胶囊在摩擦应力、热或等外部条件刺激下发生破裂,缓慢释放内部芯材至摩擦界面,形成油膜、转移膜或化学膜等润滑膜,实现无需外部干预的自主润滑。微胶囊复合材料的润滑功能实现的核心难题是解决润滑芯材高效存储和适时释放的矛盾。针对该技术难题,研究者们探究了不同核壳结构和组分对微胶囊复合材料润滑性能的影响,并逐渐形成了材料多样性、工况适应性、功能集成性、响应灵敏性的微胶囊技术体系。

例如,聚 α 烯烃(PAO4)@乙烯-醋酸乙烯共聚物(EVA25)微胶囊具有显著的热响应行为,其复合材料的 COF 比纯树脂基体降低了 86.2%,磨损率降低了两个数量级,并能在 70 °C 下提供约 300 s 的应急润滑^[9]。PAO6@聚苯乙烯(PS)微胶囊复合材料在摩擦刺激下自发释放润滑油,其 COF 与纯环氧树脂基体相比降低了 96%,磨损率降低了两个数量级^[10]。PAO10@聚砜(PSF)/四氧化三铁(Fe_3O_4)光响应微胶囊的复合润滑材料在近红外光照射后 15 s 内表面温度快速上升,导致 COF 降至 0.04,移除光照后恢复至 0.09^[11]。除了 PAO 基础油和有机壳材外,硅油(SO)、石蜡油、离子液体、亚麻籽油(LO)、桐油等也常被用作微胶囊芯材,二氧化钛(TiO_2)、二氧化硅(SiO_2)、碳化硅、碳酸钙等硬质无机材料多被用作微胶囊壳材。另外,一些新型的多孔微颗粒如空心微球、介孔分子筛 SBA15^[12]、金属-有机骨架(MOFs)^[13]和多孔沸石微颗粒^[14]具有分级孔隙结构,也常被用作智能存储润滑材料的储油单元。

在保持优异润滑性能的同时,提高微胶囊复合材料力学性能对于工程应用非常重要。目前有效补偿微胶囊的引入带来力学性能下降的主要途径有:基体复合增强填料、调控胶囊尺寸、提高胶囊强度、

增强胶囊与基体的界面结合性(图2)^[4]。GONG等^[15]通过减小微胶囊尺寸、调控聚合物壳材链段柔性并引入具有反应性环氧基团的甲基丙烯酸缩水甘油酯(GMA)等手段,使PAO6@聚(甲基丙烯酸甲酯-co-GMA)(PM-G30)纳米胶囊(粒径约65 nm)与环氧树脂基体发生共价交联,从而使其复合材料强度和韧性比微米胶囊(粒径约100 μm)复合材料分别提高1.5倍和3.8倍,COF和磨损率仅为树脂基体的3.9%和0.6%。CHEN等^[16]用负电性聚多巴胺(PDA)对PAO@PI微胶囊进行表面改性,实现

了强静电斥力下分散性的显著提升,而且在官能团交联下微胶囊与基体的界面结合性能也得到有效增强。内含5wt.%的PAO@PI/PDA胶囊复合材料的抗压强度提高至纯树脂的1.4倍,COF降低至未改性胶囊复合材料的65%,并在常温~190 °C的温度范围内COF小于0.074。随后,REN等^[17]在PAO6@PI/PDA微胶囊表面进一步修饰聚乙烯亚胺(PEI),进一步增强胶囊和基体的界面交联强度,其复合材料抗拉强度和压缩强度相比仅有PDA修饰的微胶囊复合材料分别提高了7%和14%。

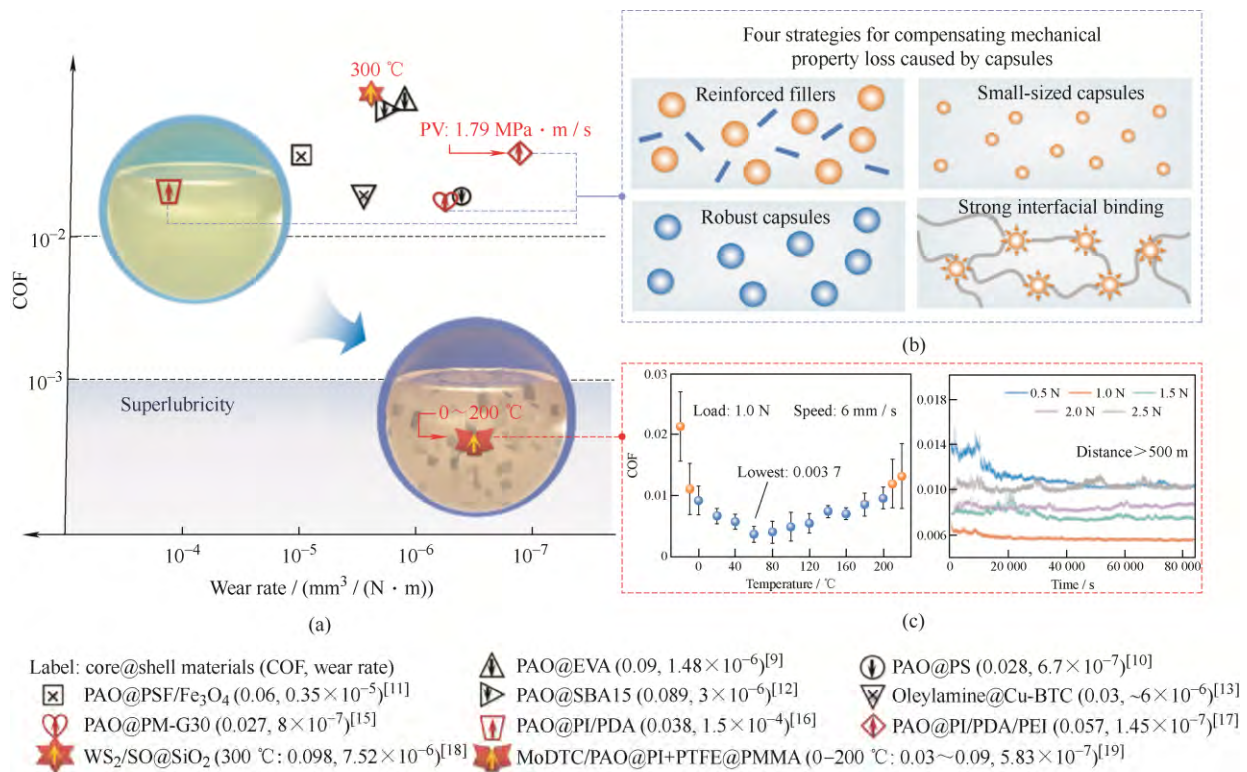


图2 (a) 智能润滑胶囊^[9-13, 15-18]与智能超滑胶囊^[19]摩擦性能对比(实/空心: 固-液耦合芯材/液体芯材微胶囊; ↑/↓/×: 微胶囊复合材料力学性能与纯基体材料相比提高/降低/未明确说明); (b) 有效补偿微胶囊的引入带来复合材料力学性能下降的四种策略^[4]; (c) 超滑胶囊的摩擦学性能^[19]

Fig. 2 (a) Tribological properties of intelligent lubricating^[9-13, 15-18] and superlubricity^[19] materials incorporated microcapsules (solid and hollow labels symbolize microcapsules with solid-liquid coupling core or liquid core, respectively; ↑, ↓, and × in labels means the mechanical properties of lubricating materials compared with pure matrix substrates has been enhanced, reduced and uncharted, respectively); (b) Four strategies for compensating mechanical property loss caused by capsules in intelligent lubricating materials^[4]; (c) Tribological properties of superlubricity microcapsules^[19]

然而, 尽管近年来微胶囊智能存储润滑材料的研究进展较快, 但一直没有实现超低摩擦磨损性能的突破, 而且在固体复合材料表面实现超滑(COF 小于0.01)性能也是摩擦学领域的一大难题。针对该难题, 解国新课题组提出了一种固-液耦合超滑技术与微胶囊技术有机协同的润滑策略(图2a), 即将二维纳米添加剂引入微胶囊芯材, 利用微胶囊受激响应释放功能将二维材料带入摩擦接触区, 形成低剪切吸附膜或

化学反应层, 减少粗糙峰直接接触, 实现超低摩擦和磨损性能。试验分析和计算模拟结果表明, 二硫化钨(Ws₂)/SO@SiO₂固-液耦合微胶囊复合材料得益于WS₂致密化学反应膜及第三者主导承载作用, 比SO@SiO₂微胶囊复合材料承载能力提高1.6~6倍, 并且具有更加优异的耐高温摩擦学性能(COF和磨损率在300 °C温度下分别降低了41%和63%)^[18]。在此基础上, ZHANG等^[19]进一步优化材料体系, 设

计制备了有机钼 (MoDTC) / PAO@PI 微胶囊为润滑填料、聚四氟乙烯 @ 聚甲基丙烯酸甲酯 (PTFE@PMMA) 固体微胶囊为基体的固体复合材料, 在大气环境和宽温域 (0~200 °C) 条件下实现了宏观超滑 (COF: 0.003~0.009) 性能 (图 2c)。通过滴油试验、分子动力学仿真和润滑数值计算, 揭示了微胶囊复合材料的超滑行为主要归因于基体自润滑性、MoDTC 分解产物 (二硫化钼 MoS₂ 和含氮碳链 R₂N) 吸附膜的低剪切润滑作用, 以及极微量润滑油流体动压支撑和摩擦界面微量液桥的低粘附作用等因素协同作用。随后, 解国新课题组进一步设计 MoS₂ / 全氟聚醚 (PFPE) @SiO₂ 固-液耦合微胶囊的复合材料, 实现了在 200~250 °C 温度范围内的宏观超滑。总之, 微胶囊智能润滑技术是继碳膜超滑、二维材料超滑后的一种新型固体超滑技术。

1.2 摩擦副表面智能修复技术

尽管利用智能存储胶囊等润滑方式可以显著降低摩擦副表面的摩擦磨损, 但在长期服役过程中装备部件仍会不可避免出现材料磨损和表面损伤。若能及时修复磨损和损伤, 则可以提高摩擦副表面材料耐磨性和使役寿命。

摩擦副表面智能修复技术主要可以分为外援型和本征型两种类型^[20]。外援型修复通常采用刺激响应性材料 (如微胶囊或微脉管) 来封装活性修复剂, (图 3a、3b)。在外界刺激下产生损伤时外援修复剂自发释放, 通过物理化学反应对损伤部位进行修复。本征型修复 (图 3c) 主要利用材料自身的动态共价键 (Diels-Alder (DA) 键、酰脲键、二硫键等) 可逆重组或非共价键 (氢键、金属-配位、主-客体等) 相互作用, 进行自发修复损伤。

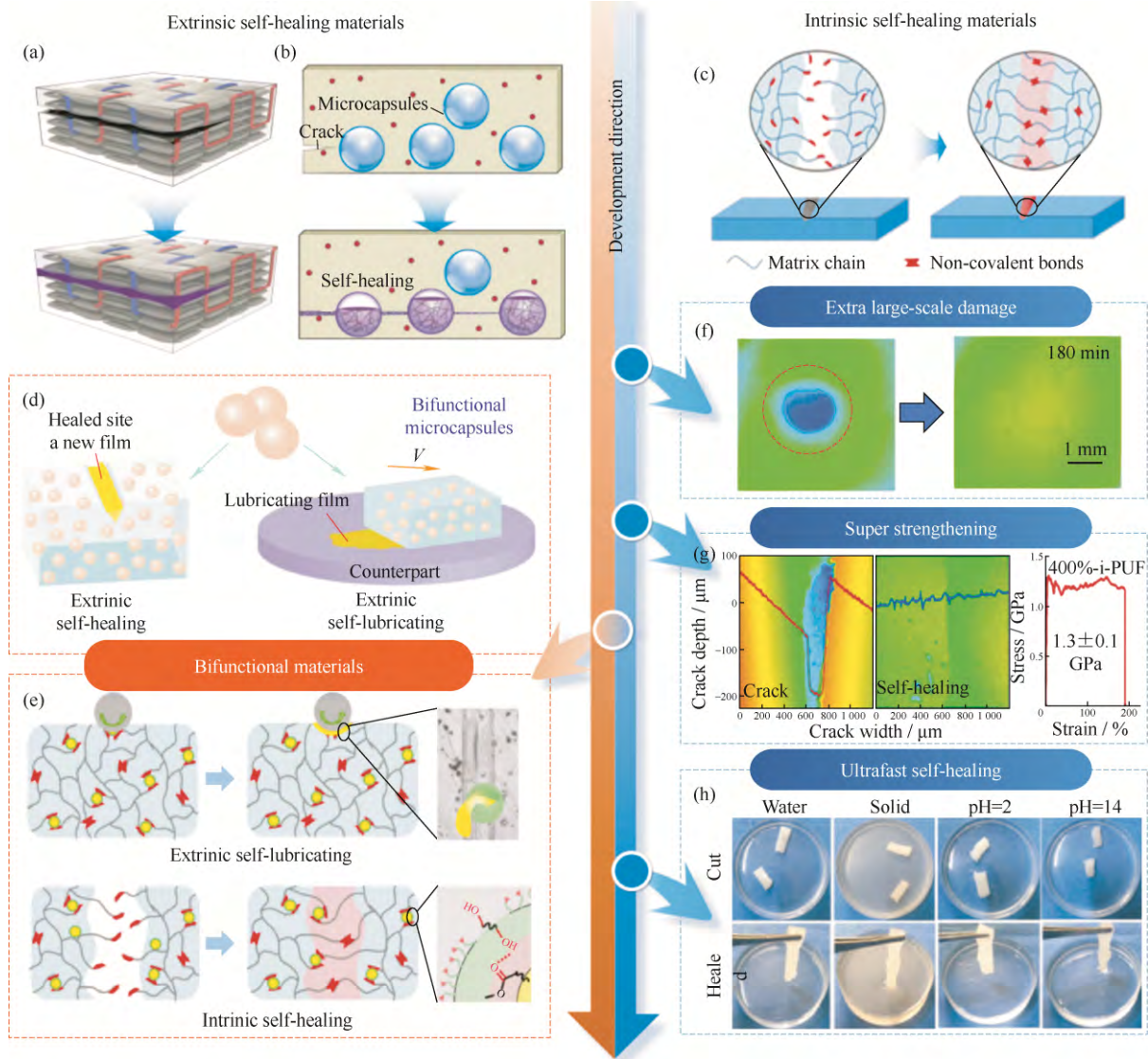


图 3 摩擦副表面智能修复的两种主要策略及其发展趋势: 外援型 (左); 本征型 (右)

Fig. 3 Two primary strategies enable intelligent self-healing functions in polymeric materials and their development trends: extrinsic (left) and intrinsic (right) self-healing materials

1.2.1 外援型智能修复技术

虽然可以利用微脉管独特的联通网络输送大量的修复剂,实现大尺寸修复,但是由于脉管网络存在工艺复杂、基体结合性差、易阻塞导致修复性能下降等问题,外援型修复材料多采用微胶囊来实现修复剂的封装。

近年来,在聚合物损伤修复领域逐渐形成了胶囊-催化剂、多胶囊、单胶囊、相分离等微胶囊型自修复体系。例如, RONG 等^[21]在预埋咪唑催化剂的环氧基体中引入环氧@PUF 微胶囊,利用催化剂固化微胶囊释放的环氧芯材,实现基体材料修复。修复后材料的断裂韧性是无损伤材料的 106%。KELLER 等^[22]将修复反应物树脂和引发剂分别用微胶囊封装并分散埋埋在基体中,得到多胶囊自修复弹性体材料。修复后材料的撕裂强度是未损伤材料的 70%。CARUSO 等^[23]利用微胶囊释放的氯苯芯材与树脂基体中胺官能团发生反应,使修复后环氧树脂材料的断裂韧性恢复至无损伤材料的 82%。由于外援型自修复材料的修复剂一次性释放而且难以补充,微胶囊型修复策略无法满足在役摩擦副持续性、多发性磨损的修复需求。对此,研究者们提出了自润滑/自修复双功能复合材料设计策略,即在智能修复体系中引入润滑微胶囊等润滑填料。利用润滑填料发挥减摩降磨作用,减少磨损和损伤的形成,降低修复剂的释放消耗,从而实现摩擦副表面损伤的可持续修复。主要有以下几种方式:一是设计自润滑/自修复双功能溶剂的单胶囊体系(图 3d)。ZHANG 等^[24]将含有修复剂邻苯二甲酸二丁酯(DBP)和润滑剂 LO 的微胶囊埋埋在环氧树脂基体中,实现了润滑和修复功能的协同发挥:COF 相比纯树脂基体降低了 92%,磨损率降低了两个数量级,损伤区域的体积(V)修复率($\eta = (V_{\text{healed}} - V_{\text{damaged}}) / V_{\text{damaged}} \times 100\%$)高于 96%;二是设计含修复填料和润滑填料的复合体系。SHAN 等^[25]在环氧树脂涂层中引入了聚四氟蜡(PFW)修复填料和改性石墨烯润滑填料,利用石墨烯的低剪切润滑作用和 PFW 在光热条件下的相变迁移作用,实现了自修复、自润滑双功能复合。WU 等^[26]制备了包埋修复微胶囊(邻苯二苯二甲酸丁苯酯@脲醛树脂, BBP@UF)和固体润滑填料(PTFE)的自修复/自润滑复合材料。该双功能复合材料在 BBP 增强树脂链段迁移作用下损伤区域体积修复率达 69%,且与纯聚酯树脂基体相比,COF 降低了 89%,耐磨性提高了两个数量级。为了进一步提高减摩耐磨性能,解国新课题组利用固-液耦合超滑胶囊和自

修复胶囊的协同作用,在具有损伤自修复功能的复合材料表面实现了超滑性能(COF 为 0.007);三是在本征自修复材料体系中引入润滑微胶囊,实现外援型润滑和本征型修复双功能一体化设计(图 3e)。GONG 等^[27]在含多重氢键的本征修复材料中引入 PAO6@PMMA/羟乙基纤维素(HEC)双壁润滑微胶囊,达到了 78%的损伤区域体积修复率以及低至 $10^{-8} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$ 量级的磨损率。

1.2.2 本征型智能修复技术

从理论上来说,与外援型修复相比,本征型智能修复材料可以实现多次原位修复,且其响应特性和修复机制可通过分子工程按需定制,从而实现修复性能的高效调控。因此,本征型智能修复技术一直是聚合物损伤修复领域的研究热点。例如, GONG 等^[27]在环氧主链中接枝含有四重氢键自互补序列的 2-脲基-4-嘧啶(UPy)单元,得到了具有修复功能的聚合物 EP-U。通过多重氢键网络在升温过程中发生的有序-无序转变和解离重组,EP-U 聚合物在 120 °C 温度下损伤区域体积修复率达 92.8%,修复后 EP-U 复合材料的纳米硬度和模量分别恢复至未损伤复合材料的 74%和 77%。WANG 等^[28]将硼酸酯键和二硫键引入环氧树脂基体,利用动态交联网络在热压条件下的迁移重组,实现了划痕和断裂损伤修复。

然而,由于本征型修复材料在损伤区域进行的动态键交换反应基本发生在分子水平,材料可修复损伤的宽度一般为微米级,难以满足在役摩擦副大尺寸磨损的修复需求。针对该问题,LI 等^[29]在含氢键的聚氨酯(PU)分子主链中引入二硫键和 DA 键,利用磨损区域的高表面能诱发二硫键和 DA 键动态交联,以及氢键定向迁移重组,实现宽度大于 1 mm 的大尺度穿透性损伤完全修复(图 3f),且修复后复合材料抗拉强度仍能恢复至未损伤复合材料的 80%。随后,解国新课题组进一步探究 PU 分子链段调控对其修复性能的影响规律,实现了宽度大于 3.5 cm 的超大尺度损伤多次修复。

此外,由于受动态键交换反应影响,本征型修复材料机械强度往往偏低,因此如何兼容高强韧与自修复性能,实现超强韧修复,成为了本征型修复材料工程应用必须解决的难题。针对该难题,LI 等^[30]通过在含氢键的 PU 分子主链中引入具有强氢键的 UPy 单元,构建具有强弱氢键交联网络结构的超强韧 iPUF 纤维。通过应变诱导结晶,该纤维的拉伸强度达 1.3 GPa,韧性达 244.8 MJ/m³;利用氢键重组,该纤维的损伤区域体积修复效率

达 97% (图 3g)。同样, SANG 等^[31]研究发现: 由于 DA 键的热机械响应效应, 亚微米厚度的 DA 聚合物薄膜在弹丸超音速穿刺下修复率 ($\eta = (1 - A_{\text{top-view perforation area}} / A_{\text{projectile diametrical cross-sectional area}}) \times 100\%$) 高达 80%。除了解决本征型修复材料超大尺寸修复和超强韧化难题外, 实现在苛刻环境中损伤超快自愈, 对修复材料环境适应性提升也十分关键。例如, LI 等^[32]通过小分子共渗方法, 设计制备了一种含硼酯键和氢键的多级网络水凝胶, 该材料在水、土壤悬浮液、酸、碱、盐溶液等多种苛刻环境中均可超快速 (大于 5 s) 修复损伤 (图 3h)。

1.3 摩擦副表面智能诊断技术

摩擦副表面过度磨损会产生游隙, 游隙增大将导致装备运转过程振动加剧、服役寿命下降。因此, 需要赋予摩擦副实时监测表面磨损位置及损伤程度的自诊断能力, 从而实现装备的生命周期智能化管控和预测性维护。目前摩擦副表面磨损智能诊断技术主要有以下三个方向: 一是染料显色诊断, 即采用微胶囊、中空纤维、脉管等储液容器封装染料, 并将其埋埋在摩擦副表面材料中; 当发生机械损伤时, 染料指示剂会从破裂的储液容器中释放, 并向划痕、点蚀、裂纹等损伤区域渗透, 从而使损伤部位直接显色。除此以外, 也可以通过催化转化^[33]、双相反应^[34]、UV 照射^[35]等方式, 使损伤部位间接显色, 实现对摩擦副表面损伤部位的视觉识别和预

警告。而且, 利用油溶性染料与润滑油、修复剂等溶剂的相溶特性, 将多种功能性溶剂混合封装并引入摩擦副表面复合材料, 可以使摩擦副实现自润滑、自修复、自诊断等多功能的集成。二是电信号诊断, 即在摩擦副表面润滑材料中内置传感线圈或电极, 利用摩擦起电效应, 使摩擦副表面带电, 通过监测预埋电极和摩擦界面在不同磨损状态下的电势差, 实现磨损监测。例如, REN 等^[36]将交叉电极阵列嵌入滑动轴承表面的 PTFE@PMMA 复合材料中, 通过监测电极阵列的输出开路电压 (V_{OC}) 和短路电流 (I_{SC}) 反馈磨损深度 (H), 实现了自润滑滑动轴承的磨损状态实时监测和磨损失效位置的准确定位, 保障了轴承的安全使用和按需更换 (图 4a)。三是光信号诊断, 即将具有高亮度、耐久性的摩擦发光 (TL) 材料分散引入摩擦副表面复合材料。利用 TL 材料的力致发光、电致发光、光致发光等原理, 使摩擦副表面的损伤区域发出光信号, 并通过监测光信号的强度、频率或分布, 判断损伤位置及其损伤程度。例如, LI 等^[37]设计制备了一种含钛酸钡@聚偏氟乙烯-六氟丙烯 (BTO@PVDF-HFP) 纳米压电颗粒和掺杂铜离子的硫化锌 (ZnS:Cu) 材料的复合材料薄膜, 通过压电颗粒受摩擦刺激发电, 激发 ZnS:Cu 材料发光, 从而实现宽温域 (25~80 °C) 条件下磨损位置的可视化 (图 4b), 为原位损伤诊断提供材料-器件一体化的解决方案。

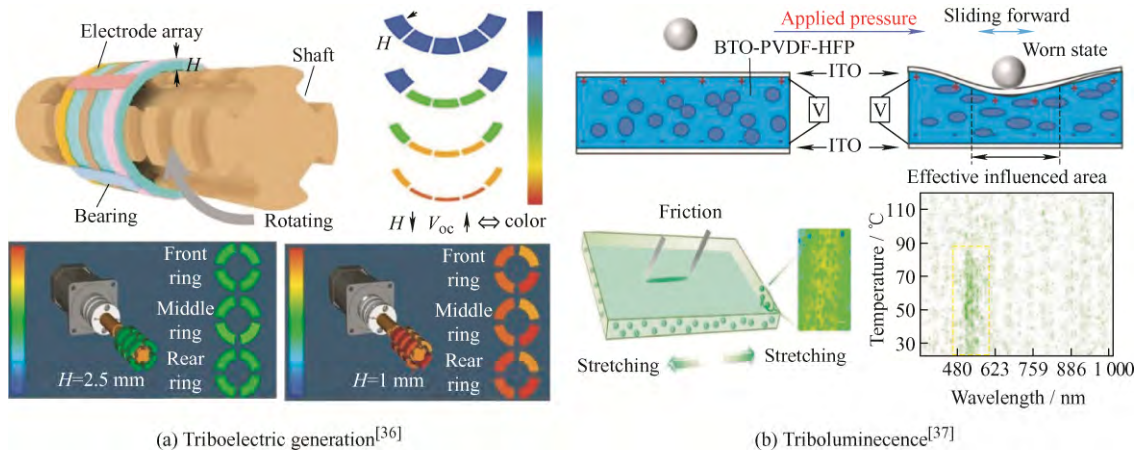


图 4 摩擦副表面智能诊断技术

Fig. 4 Intelligent self-diagnosis for tribopairs

2 润滑材料和表面的 AI 创制新范式

AI 驱动的润滑材料和表面研发新模式是继经验范式、理论范式、计算科学范式后的第四范式, 其主要技术路径如图 5 所示, 具体为: 利用机器学

习模型, 建立润滑材料和表面的成分、结构等物性与润滑性能之间的潜在映射关系, 预测新材料和表面的润滑性能, 同时结合优化算法或深度强化学习算法, 在润滑材料和表面的高阶非线性设计空间中快速全局寻优, 实现目标属性润滑材料和表面的高效逆向设计。这种变革性研发模式, 有望解耦

机械表面界面润滑减摩机制,突破传统试错迭代的效率瓶颈,实现需求导向下润滑材料和表面的按需定制。

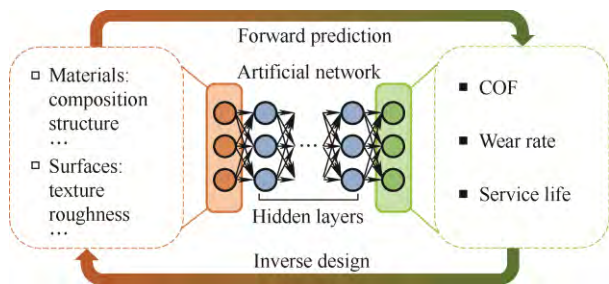


图5 润滑材料和表面的AI创制新范式

Fig. 5 AI research paradigms for lubricating materials and surfaces

2.1 润滑材料和表面基于AI的正向预测

润滑材料和表面基于AI的正向预测是利用从润滑材料和表面的成分、结构、性能等数据中提取的特征向量,训练机器学习模型,建立以润滑材料和表面的物性参数为输入量、以润滑性能为输出量的定量构效关系模型,进而快速预测新材料和表面的润滑性能。例如,BOIDI等^[38]采用机器学习径向基函数方法,解析了1704组具有设计纹理或随机多孔纹理的润滑表面及其摩擦试验数据,并构建了潜在的表面特征-COF映射关系模型,实现了不同特征表面的COF高精度预测(决定系数 $R^2 \approx 0.934$)。NING等^[39]将文献报道的铝/铜自润滑复合材料组分及其摩擦性能数据输入到支持向量机、K-近邻、随机森林、梯度提升决策树、最小二乘提升(LSBoost)等机器学习模型中,得到多种预测模型,对比分析发现LSBoost模型的预测精度最高,COF和磨损率的决定系数 R^2 分别为0.9219和0.9234。JIA等^[40]通过第一性原理计算,获取了润滑添加剂的量子力学参数(如偶极矩、轨道能量),并结合磨损测试和氧化测试数据,训练线性回归机器学习模型,实现了润滑材料摩擦性能和抗氧化性能的高准确率(85.98%~99.95%)预测。TANG等^[41]将二维材料随机采样点层间结合能计算值输入到Registry Index模型中进行优化拟合,实现了二维材料势能面的高效预测及其摩擦性能的定量评估。结合高通量第一性原理计算,从1475种二维材料数据库中筛选出21种超低摩擦性能二维材料,其中新材料占比达90.5%。

另外,利用机器学习模型辅助决策,可以实现润滑材料的高通量筛选。例如,CHEN等^[42]利用卷

积神经网络模型和YOLO-V5目标检测算法,构建了一种含材料超滑性能判断和准确转移判断模型的全自动试验系统,实现了超滑石墨材料的全自动高通量摩擦性能测试。

2.2 润滑材料和表面基于AI的逆向设计

以润滑性能为输入、材料和表面的物性参数为输出的逆向设计模式是在正向预测模型基础上寻找具有目标润滑性能的材料和表面特征,即需要在无穷且可能非凸的润滑材料和表面设计空间中搜索最优解,同时协调“一对多”映射关系引发的多目标冲突问题,因此必须利用启发式优化算法或深度强化学习算法,来实现全局快速寻优。

启发式算法是润滑材料和表面逆向设计常用的优化策略,其具体方法为:以随机的初始解为起点,利用启发式规则引导求解方向,最终不断向最优解收敛。例如,WANG等^[43]利用多添加剂润滑脂的四球摩擦试验数据,训练人工神经网络模型,并采用遗传算法,快速搜索出润滑脂添加剂的优化配比。试验数据表明,与基础润滑脂相比,优化添加剂配比后的润滑脂使工程钢摩擦副的磨痕直径减小了25.66%,平均COF降低了29.34%(图4a)。ZHU等^[44]基于有限元模拟生成的200万张表面纹理图像及对应的摩擦性能数据,训练了Res-CNN模型,并利用改进的蒙特卡洛搜索算法,在多目标约束下高效优化出具有较优摩擦性能的表面纹理。KIM等^[45]开发了集成工业润滑油信息的逆向推荐系统,通过高斯过程模型预测润滑油特性、粒子群优化算法全局最优搜索润滑油的优化配比,满足了不同应用场景下的润滑油配方优化的需求。

然而,启发式算法对种群大小、交叉概率等规则参数的设置较为敏感,依赖人工调节参数,且可能收敛到次优解。因此,研究者们提出了另一种结合深度强化学习算法与生成式模型的求解策略,即通过使润滑材料和表面生成模型学习数据的联合概率分布规律,不断优化生成策略,从而提高解的质量。例如,ZHOU等^[46]构建了“润滑大脑”高性能润滑油分子逆向开发系统,利用“左脑”(正向预测模型)预测“右脑”(生成对抗网络,GANs)生成的润滑油分子的润滑性能,并利用评价机制评判生成分子预测性能的优劣性,将评判结果反馈给“右脑”强化学习,指导“右脑”不断优化生成策略,直至得到接近目标属性(高闪点)的多二酯分子。

3 结论与展望

如何实现智能润滑材料和表面赋能现代机械工程的传统润滑模式转型升级和高质量发展以及如何实现润滑材料开发模式由试错迭代向靶向定制的范式革新, 是当前界面润滑领域值得探索的重要科学方向。结合摩擦副表面智能润滑技术及其智能开发现状, 对润滑材料和表面智能化发展提出以下展望:

利用智能润滑材料和表面技术推进智能装备发展, 还需攻克以下难题: 一是实现自润滑 / 自修复 / 自诊断多功能集成。通过聚合物分子设计或多腔多层胶囊技术, 构建多刺激因素下多级触发的自润滑 / 自修复 / 自诊断多功能协同响应材料, 得到具有时 / 空域逻辑控制功能的智能润滑表面。二是突破智能润滑材料和表面在极端环境下的长效稳定性。开发耐极端苛刻环境的智能润滑材料, 结合极端环境模拟设备和原位表征技术揭示界面演化规律, 提高智能润滑表面的环境鲁棒性和工程适用性。三是实现智能润滑材料和表面在智能装备中的集成应用。应用机器视觉等润滑材料和表面特征采集技术, 结合物联网、大数据、AI 分析手段, 实现远程监控维护和潜在故障分析, 构建自感知-自决策-自执行一体化智能装备, 进而推动现代化工业向智能化转型升级的技术变革。

AI 加速目标属性润滑材料和表面的高效靶向设计, 还需要突破以下瓶颈: 一是建设多源数据标准化的高质量开源润滑数据库, 实现高质量数据共享, 解决现有预测模型优质数据稀缺且分散导致的过拟合和泛化能力不足等问题。二是发展具有可解释可转移的机器学习算法和模型, 实现小样本局部模型的移植和外推, 并揭示材料-性能的“白箱”映射关系, 实现模型决策过程可视透明, 促进润滑新理论、新机制和新效应的进一步挖掘。三是打通试验设备接口, 实现软硬件集成, 建立“AI 驱动的设计预测-合成表征-分析决策”全流程润滑材料和表面高通量自驱迭代实验室系统, 进一步释放 AI 在润滑材料和表面开发中的潜力, 推动表面与界面润滑科学和技术的创新发展。

参 考 文 献

[1] 雒建斌. 超滑与摩擦起源的探索[J]. 科学通报, 2020, 65(27): 2966-2978.
LUO Jianbin. Investigation on the origin of friction and superlubricity[J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(27):

2966-2978. (in Chinese)
[2] 葛世荣. 智能表面工程[J]. 中国表面工程, 2024, 37(1): 1-17.
GE Shirong. Intelligent surface engineering[J]. China Surface Engineering, 2024, 37(1): 1-17. (in Chinese)
[3] QIN C X, YANG H, LU Y Q, et al. Tribology in nature: inspirations for advanced lubrication materials[J]. Advanced Materials, 2025, 10: 2420626.
[4] GONG H J, YU C C, ZHANG L, et al. Intelligent lubricating materials: A review[J]. Composites Part B-Engineering, 2020, 202: 108450.
[5] WANG H Y, LI M L, LIU D J, et al. Tribological properties tests and simulations of the nano-micro multilevel porous self-lubricating PEEK composites with ionic liquid lubrication[J]. Journal of Materials Science, 2016, 51: 3917-3927.
[6] WANG J Q, ZHAO H J, HUANG W, et al. Investigation of porous polyimide lubricant retainers to improve the performance of rolling bearings under conditions of starved lubrication[J]. Wear, 2017, 380-381: 52-58.
[7] WANG M D, ZHOU Y X, PAN B L, et al. Tribological performances of epoxy resin reinforced by a novel biomass intelligent “pool-channel” oil storage and delivery system[J]. Tribology International, 2025, 202: 110355.
[8] ZHANG G L, XIE G X, WANG J, et al. Controlled friction behaviors of porous copper / graphite storing ionic liquid through electrical stimulation[J]. Advanced Engineering Materials, 2018, 20(5): 1700866.
[9] YU C C, SUN X H, XIE G X, et al. Dual-functional oil microcapsules with thermo-responsive and self-lubricating properties[J]. Colloids and Surfaces A-Physicochemical and Engineering Aspects, 2025, 709(1): 136080.
[10] ZHANG L, XIE G X, WU S, et al. Ultralow friction polymer composites incorporated with mono-dispersed oil microcapsules[J]. Friction, 2021, 9(1): 29-40.
[11] BAO L, WANG C K, ZHANG Y M, et al. Stimuli-responsive PAO10@PSF / Fe₃O₄ microcapsules for regulation of tribological properties[J]. Tribology International, 2025, 204: 110505.
[12] SUN Y M, REN Y L, ZHU L N, et al. Self-lubrication and tribological properties of SBA-15 as smart microcontainer and resin composites[J]. Polymer Composites, 2022, 43: 7967-7976.
[13] ZHANG G L, XIE G X, SI L N, et al. Ultralow friction self-lubricating nanocomposites with mesoporous metal-organic frameworks as smart nanocontainers for

- lubricants[J]. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 2017, 9(43): 38146-38152.
- [14] JI Z J, XIE G X, XU W H, et al. Self-cleaning of interfacial oil between polymer composites with porous zeolite microparticles and their self-lubrication properties[J]. *Advanced Materials Interfaces*, 2019, 6(10): 1801889.
- [15] GONG H J, SONG Y, LI G L, et al. A highly tough and ultralow friction resin nanocomposite with crosslinkable polymer-encapsulated nanoparticles[J]. *Composites Part B-Engineering*, 2020, 197: 108157.
- [16] CHEN H, ZHANG L, LI M Y, et al. Ultralow friction polymer composites containing highly dispersed and thermally robust microcapsules[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2022, 634: 127989.
- [17] REN Y L, GAO K, YING S J, et al. Significant enhancement of tribological properties of microcapsule / epoxy composites in the presence of high loads by incorporating PTFE[J]. *Wear*, 2023, 514: 204563.
- [18] CHEN H, ZHANG Y, GAO K, et al. Ultralow friction polymer composites enabled by the solid-liquid core microcapsules at high temperatures[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 476: 146780.
- [19] ZHANG Y, CHEN H, GAO K, et al. Superlubricity microcapsules[J]. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 2025, 17(9): 14634-14744.
- [20] PATRICK J F, ROBB M J, SOTTOS N R, et al. Polymers with autonomous life-cycle control[J]. *Nature*, 2023, 540(7633): 363-370.
- [21] RONG M Z, ZHANG M Q, ZHANG W. A novel self-healing epoxy system with microencapsulated epoxy and imidazole curing agent[J]. *Advanced Composites Letters*, 2007, 16(5): 167-172.
- [22] KELLER M W, WHITE S R, SOTTOS N R. A self-healing poly(dimethyl siloxane) elastomer[J]. *Advanced Functional Materials*, 2007, 17(14): 2399-2404.
- [23] CARUSO M M, DELAFUENTE D A, HO V, et al. Solvent-promoted self-healing epoxy materials[J]. *Macromolecules*, 2007, 40(25): 8830-8832.
- [24] ZHANG L, WANG H Y, HE F, et al. Wear in-situ self-healing polymer composites incorporated with bifunctional microcapsules[J]. *Composites Part B-Engineering*, 2022, 232: 109566.
- [25] SHAN Z Q, JIA X H, LI S, et al. An intelligent self-lubricating organic-inorganic hybrid epoxy-based coating based on the “snowboard” effect[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2025, 200: 109016.
- [26] WU X Y, ZHANG Y, CHEN H, et al. Solvent effect of microcapsules endows self-lubricating polymer composites with wear in-situ self-healing function[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2023, 676: 132158.
- [27] GONG H J, SONG Y, LI G L, et al. An intelligent polymer composite with self-lubricating and self-healing functionalities[J]. *Composites Part B-Engineering*, 2023, 260: 110776.
- [28] WANG Q H, ZHANG N, ZHANG X R, et al. Dynamic covalent chemistries of thermosetting polymer for recyclability and intelligent lubrication[J]. *Friction*, 2025, 13(4): 9440925.
- [29] LI M Y, HAN X, FAN Z W, et al. A strong phase separation polyurethane for self-repairing large-scale damage[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2022, 10(25): 13368-13377.
- [30] LI M Y, HAN X, ZHANG Y, et al. Anomalous strengthening behavior of nanocrystal-reinforced polyurethane fibers[J]. *Materials Today*, 2024, 72: 87-96.
- [31] SANG Z, EOH H, XIAO K L, et al. Supersonic puncture-healable and impact resistant covalent adaptive networks[J]. *Materials Today*, 2025, 83: 43-53.
- [32] LI M Y, HAN X, FAN Z, et al. Autonomous ultrafast-self-healing hydrogel for application in multiple environments[J]. *Colloids and Surfaces A-Physicochemical and Engineering Aspects*, 2021, 631: 127669.
- [33] ODOM S A, JACKSON A C, PROKUP A M, et al. Visual indication of mechanical damage using core-shell microcapsules[J]. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 2011, 3(12): 4547-4551.
- [34] LI W L, MATTEWS C C, YANG K, et al. Autonomous indication of mechanical damage in polymeric coatings[J]. *Advanced Materials*, 2016, 28(11): 2189-2194.
- [35] DI C B, GRIFFINI G, LEVI M, et al. Microencapsulation of a UV-responsive photochromic dye by means of novel UV-screening polyurea-based shells for smart coating applications[J]. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 2013, 5(14): 6628.
- [36] REN Y L, LIU G X, YANG H, et al. Dynamic wear sensor array based on single-electrode triboelectric nanogenerators[J]. *Nano Energy*, 2020, 68: 104303.
- [37] LI M Y, HAN X, ZHANG C L, et al. Self-reinforced piezoelectric response of an electroluminescent film for

- the dual-channel signal monitoring of damaged areas[J]. 2024, 16(3): 3786-3794.
- [38] BOIDI G, DA S M R, PROFITO F J, et al. Using machine learning radial basis function (RBF) method for predicting lubricated friction on textured and porous surfaces[J]. Surface Topography-Metrology and Properties, 2020, 8(4): 044002.
- [39] NING H F, CHEN F Q, SU Y F, et al. Modeling and prediction of tribological properties of copper / aluminum-graphite self-lubricating composites using machine learning algorithms[J]. Friction, 2024, 12(6): 1322-1340.
- [40] JIA D, DUAN H J, ZHAN S P, et al. Design and development of lubricating material database and research on performance prediction method of machine learning[J]. Scientific Reports, 2019, 9: 20277.
- [41] TANG K W, QI W H, RU G L, et al. Screening of low-friction two-dimensional materials from high-throughput calculations using lubricating figure of merit[J]. Friction, 2024, 12(8): 1897-1908.
- [42] CHEN L, LIN C, SHI D W, et al. Fully automatic transfer and measurement system for structural superlubric materials[J]. Nature Communication, 2023, 14(1): 6323.
- [43] WANG S Y, LIANG Z, LIU L, et al. Artificial intelligence-based rapid design of grease with chemically functionalized graphene and carbon nanotubes as lubrication additives[J]. Langmuir, 2023, 39(1): 647-658.
- [44] ZHU B, ZHANG W X, ZHANG W S, et al. Generative design of texture for sliding surface based on machine learning[J]. Tribology International, 2023, 179: 108139.
- [45] KIM M, JOO C, LIM J, et al. Novel inverse predictive system integrated with industrial lubricant information[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2025, 142: 109853.
- [46] ZHOU R, MA R, BAO L Y, et al. "Lubrication brain"-A machine learning framework of lubrication oil molecule design[J]. Tribology International, 2023, 183: 108381.

作者简介: 郜培丽, 女, 1997 年出生, 博士研究生。主要研究方向为高性能自润滑材料设计调控。

E-mail: gpl6161@163.com

解国新 (通信作者), 男, 1982 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为智能润滑理论与技术、带电润滑行为与失效理论以及新型超滑材料构筑和机制等。

E-mail: xgx2014@tsinghua.edu.cn

雒建斌 (通信作者), 男, 1961 年出生, 博士, 教授, 中国科学院院士, 博士研究生导师。主要研究方向为超滑、纳米摩擦学和纳米制造。

E-mail: luojb@tsinghua.edu.cn