

航空发动机高温钛合金非等温氧化行为研究进展*

弭光宝^{1,2}, 欧阳佩旋^{1,3}, 陈航^{1,3}, 李培杰³, 黄旭^{1,2}, 曹春晓^{1,2}

(1. 中国航发北京航空材料研究院钛合金研究所, 北京 100095;

2. 中国航发先进钛合金重点实验室, 北京 100095;

3. 清华大学机械工程系, 北京 100084)

[摘要] 阻燃性能是衡量航空发动机钛火安全的关键性能指标, 通常采用钛合金材料/构件抵抗热自燃、点燃和扩展燃烧的能力进行综合评价。针对高性能航空发动机对先进高温钛合金的需求, 在回顾近期抗点燃性能和抗燃烧性能试验技术研究基础上, 重点从抗热自燃性能的层面介绍阻燃钛合金、高温钛合金及钛铝金属间化合物的非等温氧化行为及阻燃机理的研究进展, 并对未来发展方向进行展望。

关键词: 高温钛合金; 阻燃钛合金; 钛铝金属间化合物; 非等温氧化; 阻燃机理

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.15.088



弭光宝

博士、高级工程师, 从事航空发动机高温钛合金及阻燃机理研究, 负责和参与完成科研项目 10 余项, 获得部级科技进步二等奖、技术发明三等奖各 1 项, 授权发明专利 8 项, 在国内外期刊发表学术论文 50 余篇。

高性能航空发动机朝着高涡轮前温度、高推重/功重比、长寿命和低油耗等方向发展, 其先进性不但取决于不断进步的结构设计技术, 也与先进高温钛合金的大量应用密不可分^[1-4]。相比镍基高温合金和结构钢等金属材料, 高温钛合金(含阻燃钛合金、钛铝金属间化合物)在 500~950℃ 的使用温度下具有高的比强度、良好的耐蚀性等显著优势, 在航空发动机压气机关键件/重要件上应用的减重效果达到 40% 以上。然而, 囿于钛的氧化热高、导热性差和燃点低于熔点等特点, 钛火安全问题一直是制约高温钛合金在先进航空发动机中大量应用的国际性难题, 钛火的预防与控制(即钛火防控)贯穿于整个现代航空发动机的研制中。

阻燃性能是衡量航空发动机钛火安全的关键性能指标, 其测试与评价方法是深入认识钛合金材料及构件的燃烧机理、建立防控体系(包括结构、选材和涂层等方面)的关键和基础。近年来, 中国航发先进钛合金重点实验室通过研发钛合金摩擦点火和激光点火等成套试验装置及方法, 创建了阻燃性能实验室, 制定了军工航空行业标准和企业标准, 初步建立了钛合金抗热自燃(热力着火)、抗点燃(强迫着火)和抗燃烧(扩展燃烧)行为的评价技术体系^[5-8]。利用建立的阻燃试验方法, 定量评价了 10 余种高温钛合金的抗点燃性能和抗燃烧性能, 阐明了阻燃钛合金的阻燃机理, 进而设计与优化了阻燃钛合金成分、探索了阻燃涂层材料技术。这些研究为航空发动机设计大量选

* 基金项目: 国家自然科学基金(51471155); 中国航发自主创新专项(CXPT-2018-36); 国家科技重大专项(2017VII0012109)。

用高温钛合金以及开展适航验证提供了技术支撑。

非等温氧化区别于传统的等温氧化,具有高速率和宽温域等特征,本质上近似能量作用下热自燃前期发生自加速氧化并积聚大量热的过程,最高温度远大于高温钛合金的正常服役温度,甚至超过其晶格转变温度,因而对于类似航空发动机钛火这种特殊环境行为,需要考虑其非等温氧化特性。Wolf^[9]通过自制容积式氧化试验装置,实现了钛合金在氧气与氮气混合气体或空气环境中从室温至 800~1300℃ 快速加热,并借助计算得到最大热传递参数与加热速率、合金成分和比表面积等参数的关系,从而评价不同成分高温钛合金的抗热自燃性能。但基于理想气体假设氧消耗量及热传递参数计算模型的误差,导致容积式氧化试验装置不能十分准确地测量出氧化速率和合金的热量变化,难以详细揭示热自燃前期的非等温氧化行为。

同步热分析方法是燃烧学领域研究金属粉末抗热自燃性能的重要手段^[10-12],能够揭示其在气流环境下从室温至熔点的非等温氧化增重、增重速率及相应热量的变化规律等信息。但是,钛粉末的非等温氧化行为与致密钛存在较大的差异,且过程分析也有不同,包括尺寸效应等。比如,微米级钛粉末在不同升温速率下直接氧化生成金红石型 TiO₂,其氧化动力学遵循穿过致密金红石氧化膜的三维扩散模型^[11];纳米级钛粉末在更低的温度下开始发生氧化,其氧化动力学遵循对数定律^[12]。

因此,近年来本课题组采用同步热分析方法,结合组织结构的微观分析,对致密的阻燃钛合金、高温钛合金及钛铝金属间化合物热自燃前期的非等温氧化行为进行物理模拟研究,进而探讨合金元素的影响机理。

阻燃钛合金的非等温氧化行为研究进展

阻燃钛合金是为了预防钛火而开发的结构功能一体化的高温钛合金,属于高稳定 β 型高温钛合金,主要包括 Ti-V-Cr 和 Ti-Cu-Al 两个材料体系。Ti-V-Cr 系阻燃钛合金中,以 540℃ 长期使用的 Alloy C (Ti-35V-15Cr) 最为著名,已在 F119 等先进航空发动机的多个部件上应用。Ti-Cu-Al 系阻燃钛合金中,以 BTT-1 (Ti-13Cu-4Al-4Mo-2Zr) 和 BTT-3 (Ti-18Cu-2Al-2Mo) 为代表,工作温度为 450℃,在发动机试车台上通过验证。阻燃钛合金在高性能先进航空发动机上的大量应用成为预防钛火的关键核心技术,其阻燃性能评价、阻燃机理等问题长期困扰了发动机设计选材。

本课题组通过开展阻燃钛合金的非等温氧化物理模拟试验研究,揭示了 Cr、V 及 Cu 等合金元素对钛合金抗热自燃性能的影响规律和机理^[5,13-14]。在二元合金中进行非等温氧化试验(室温至 1450℃ 范围),当温度超过 700℃ 时,氧化动力学遵循抛物线定律,以 TiO₂ 的生长速率为控制步骤;当 Cr 元素低于质量分数 15% 时,合金的抗非等温氧化性随 Cr 元素含量增加而降低,而当 Cr 质量分数超过 15% 时,合金的抗非等温氧化性随 Cr 元素含量增加而增加,主要原因是,当 Cr 含量较低时,合金中 Cr 元素主要以 Cr³⁺ 形式置换 TiO₂ 中的 Ti⁴⁺,使得氧化膜中氧空位浓度增加,促进了 TiO₂ 的生长;而当 Cr 含量超过在 TiO₂ 中的溶解度极限时,氧化膜内层能够形成 Cr₂O₃,降低了 TiO₂ 的生长速率。与 Cr 元素不同,V、Cu 元素含量(20%~40%)的增加使得二元合金的抗氧化性显著降低,即 V、Cu 元素促进了钛合金的非等温氧化。

对于三元合金,当在 Ti-V 合金

(V 元素含量为 20%~40%) 中添加 15% 的 Cr 元素时,能够显著降低 Ti-V 合金的氧化增重,且随着 V 元素含量的增加,Ti-(20~40)V-15Cr 合金的氧化增重差异很小,说明 V、Cr 元素共同作用提高了合金的抗非等温氧化性。主要原因是,一方面 Ti 与 O 的亲和力高于 V 和 Cr,优先向合金基体表面扩散形成 TiO₂,而 O 有进一步向基体内扩散形成氧扩散层的趋势,而 Cr 元素含量较高时,Cr 与 O 结合形成氧化物,当界面反应前沿的 Cr₂O₃ 达到最大溶解度而不断析出时,阻碍元素扩散;另一方面随着 O 元素向基体方向的快速扩散,氧化膜内形成更多的氧化物(V₂O₅),由于 V₂O₅ 的熔点比较低($T_m \approx 675^\circ\text{C}$),所以在快速升温过程中发生熔化并与上述 TiO₂、Cr₂O₃ 形成致密的氧化膜,不仅显著改善了界面结合性,而且抑制了 O 元素向基体的快速扩散。类似地,当在 Ti-Cu 合金中添加少量 Al 元素(1%~7%) 时,Ti-13Cu-Al 合金的氧化速率降低,且抗非等温氧化性随着 Al 元素含量的增加而不断提高,主要是低熔点 Ti₂Cu 化合物改善了 TiO₂、Al₂O₃ 形成氧化膜的结合特性。

高温钛合金的非等温氧化行为研究进展

在固溶强化型高温钛合金中,Al 是主要的合金元素,其质量分数为 6% 左右。按照合金中 α 相、β 相稳定元素的含量,中温高强及 600℃ (含) 以上的单纯采用固溶强化方法的高温钛合金包括近 α 和 α+β 两种类型。合金元素除了通过直接参与氧化反应外,还通过置换 TiO₂ 中的 Ti⁴⁺、改变氧空位浓度,进而影响高温钛合金的非等温氧化过程及行为,同时还涉及 α→β 相转变。因此,探讨高温钛合金的非等温氧化行为及机理需充分考虑合金元素和相转变等因素的影响。

在纯氧气氛中,以 40 °C/min 的升温速率将近 α 型 600 °C 高温钛合金 TA29 (Ti-5.8Al-4Sn-4Zr-0.7Nb-1.5Ta-0.4Si-0.06C) 和 $\alpha + \beta$ 型 500 °C 高温钛合金 TC11 (Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.3Si) 从室温加热至 1450 °C,发现上述两种合金的非等温氧化增重规律相似^[15]。根据氧化增重速率的变化,可以将 TA29 和 TC11 钛合金的非等温氧化过程划分为 5 个阶段,即 I—基本无氧化 (<750 °C)、II—缓慢氧化 (750~1000 °C)、III—加速氧化 (1000~1120 °C)、IV—剧烈氧化 (1120~1420 °C) 和 V—减速氧化 (>1420 °C)。其中,第 I 阶段中合金表面薄的致密氧化膜起到阻氧作用;第 II 阶段为氧的溶解与扩散;第 III 阶段中合金基体发生 $\alpha \rightarrow \beta$ 相转变,加速氧的溶解与扩散,使氧化加速;第 IV 阶段中合金近表层发生富氧 β -Ti \rightarrow 氧稳定 α -Ti 的相转变,且对氧化速率无明显影响,尽管 α -Ti 和 β -Ti 中的氧扩散系数和氧溶解度存在较大差异,但氧化膜生长阶段的氧化速率取决于氧在 TiO₂ 膜中的扩散速率(比氧在 α -Ti 和 β -Ti 中的扩散系数低 5~6 个数量级);第 V 阶段为氧化膜表层的再结晶与烧结,起到阻氧作用。

对于 TA29 钛合金,根据氧原子与溶质原子在 α -Ti 晶格中的可能相对位置^[16],在以氧在合金中的溶解为主导的氧化阶段中,Zr 元素的固溶略微提高了氧化速率,而 Nb、Ta、Al、Sn 元素通过降低氧原子的扩散速率而起到降低氧化速率的作用,但降低效果有限,因而合金元素对氧化速率影响差异较小。对于以氧化膜生长为主的氧化阶段,非等温氧化后表面形成 3 层结构的氧化膜,其中 Al 元素在内层膜富集,Zr、Nb、Ta 元素在中间层膜富集,Sn 元素在氧化膜/基体界面偏聚(TiO₂ 中 Sn 具有低的溶解度^[17])。由于合金元素与氧的亲合力不同,在非等温氧化过程中

趋于从合金内部往固/气界面扩散,但由于其含量较低,扩散速率小于 Ti 元素,从而无法参与外生长膜的生长,而是以掺杂离子的形式参与内生长膜的生长。因此,合金元素在氧化膜中的分布规律应与其在氧化膜下方的基体近表层 α 块中的扩散系数^[18-19]相关。实际上,在氧化膜生长阶段,合金元素在基体近表层 α 块中的扩散系数 $D_{Zr} > D_{Nb} > D_{Al} > D_{Sn}$,从而解释了 3 层结构的氧化膜中合金元素的富集规律,在基体近表层 α 块中扩散系数越高的合金元素越易参与内生长氧化膜的生长。基于价态控制规则^[20],高价态的合金元素通过置换 TiO₂ 中的 Ti⁴⁺,降低氧空位浓度,以减缓氧化速率,所以在 α -Ti 中具有高扩散系数的高价态 ($n > 4$) 合金元素有利于降低氧化速率。

钛铝金属间化合物的非等温氧化行为研究进展

与固溶强化的高温钛合金相比,有序强化的钛铝金属间化合物由于具有高比强度、高比刚度、高蠕变抗力、优异的阻燃性能等优势,成为航空发动机 600 °C 以上温度使用的非常有潜力的候选关键材料,其中 Ti₃Al 基合金的长期工作温度约为 650 °C, TiAl 基合金工作温度可达 760~850 °C,甚至更高(TiAl 单晶达 950 °C^[21])。该类型高温钛合金因具有高的 Al 元素含量而使得其高温氧化行为更为复杂,尤其 Ti₃Al 基和 TiAl 基合金中 Al 元素含量和物相结构存在差异,致使非等温氧化行为也存在不同。

在纯氧气氛中将 TiAl 基和 Ti₃Al 基合金快速加热至 1450 °C,发现当温度低于 1280 °C,两种合金的非等温氧化增重曲线相似;当温度超过 1280 °C, TiAl 基合金出现剧烈氧化,增重量显著超过 Ti₃Al 基合金;而当温度超过 1350 °C, TiAl 基合金的增重速率又显著降低^[22]。根

据氧化增重速率的变化规律,也可以将 TiAl 基合金的非等温氧化过程划分为 5 个阶段,包括基本无氧化 (<870 °C)、缓慢氧化 (870~980 °C)、加速氧化 (980~1280 °C)、剧烈氧化 (1280~1350 °C) 和减速氧化 (1350~1450 °C)。各个阶段的氧化机理分别为:合金表面薄的致密氧化膜的阻氧作用;氧在合金中的溶解;以 TiO₂ 为主的氧化膜的生长;合金中 Al 的内氧化;氧化膜中 TiO₂ 和 Al₂O₃ 反应生成具有阻氧作用的富 β -Al₂TiO₅ 的阻挡层。

一般认为, TiAl 基合金的抗氧化性能优于 Ti₃Al 基合金。但是,在非等温氧化过程中,当 TiAl 基合金的加热温度超过 1280 °C 时,内氧化的发生导致氧化速率剧烈增加,使氧化增重显著大于 Ti₃Al 基合金。此时, TiAl 基合金的抗热自燃性能低于 Ti₃Al 基合金,增大了着火危险。由于 TiAl 基合金开始发生内氧化的温度与 α 相转变温度 ($T_{\alpha} = 1226$ °C) 相近,当温度不超过 T_{α} 时,合金基体中以 γ 相为主,基体近表层形成贫 Al 层,通常认为该贫 Al 层的物相是 α_2 ^[23];当温度超过 T_{α} 后,基体内部和近表层的贫 Al 层均转变为 α 相,基于 Wagner 内氧化理论^[24],合金中不同物相在 1280 °C 下发生内氧化的趋势为 $\gamma < \alpha_2 < \beta < \alpha$,所以合金发生内氧化的主要原因为合金近表层形成 α 相。此时, Ti₃Al 基合金在高温下以 β 相存在,且 β 稳定元素含量较高,易在基体近表层富集,避免其形成氧稳定的 α 相,因而 Ti₃Al 基合金中不易发生内氧化。因此,可通过合金成分调控(如增加 Al 含量,提高 α 相转变温度或增加 Nb、Mo 等 β 相稳定元素),抑制 TiAl 基合金近表层形成 α 相,进而降低内氧化倾向。

结论

非等温氧化试验为航空发动机

高温钛合金着火过程与阻燃机理的物理模拟研究提供了可行的技术途径。尽管近年来本课题组在阻燃钛合金、高温钛合金及钛铝金属间化合物的非等温氧化行为及阻燃机理方面取得了阶段性研究进展,但是囿于高温钛合金着火复现及测试条件的限制,模拟服役环境下氧化与燃烧关系的物理本质尚不清楚,从抗热自燃性能的角度理解航空发动机高温钛合金燃烧及阻燃机理的问题有待于进一步加强。

未来的研究重点主要有:(1)模拟服役环境下高温钛合金的非等温氧化试验技术;(2)合金成分—组织结构—氧化速率—抗热自燃性能的相关性机理;(3)多参数耦合作用下非等温氧化与燃烧的动力学及其仿真技术;(4)基于非等温氧化理论模型的高温钛合金优化设计与阻燃新材料/新技术。

参考文献

- [1] НОЧОВАЯ Н А, АЛЕКСЕЕВ Е Б, ИЗОТОВА А Ю, et al. Пожаробезопасные титановые сплавы и особенности их применения[J]. Титан, 2012(4): 42–46.
- [2] PETERS M, KUMPFERT J, WARD C H, et al. Titanium alloys for aerospace applications[J]. Advanced Engineering Materials, 2003, 5(6): 419–427.
- [3] 蔡建明, 弭光宝, 高帆, 等. 航空发动机用先进高温钛合金材料技术研究与进展[J]. 材料工程, 2016, 44(8): 1–10.
- CAI Jianming, MI Guangbao, GAO Fan, et al. Research and development of some advanced high temperature titanium alloys for aero-engine[J]. Journal of Materials Engineering, 2016, 44(8): 1–10.
- [4] 曹京霞, 弭光宝, 蔡建明, 等. 高温钛合金制造技术研究进展[J]. 钛工业进展, 2018, 35(1): 1–8.
- CAO Jingxia, MI Guangbao, CAI Jianming, et al. Progress on manufacturing technology of high temperature titanium alloys[J]. Titanium Industry Progress, 2018, 35(1): 1–8.
- [5] MI G B, HUANG X, LI P J, et al. Non-isothermal oxidation and ignition prediction of Ti-Cr alloys[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22(10): 2409–2415.
- [6] 弭光宝, 黄旭, 曹京霞, 等. Ti-V-Cr 系阻燃钛合金抗点燃性能及其理论分析[J]. 金属学报, 2014, 50(5): 575–586.
- MI Guangbao, HUANG Xu, CAO Jingxia, et al. Ignition resistance performance and its theoretical analysis of Ti-V-Cr type fireproof titanium alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2014, 50(5): 575–586.
- [7] 弭光宝, 黄旭, 曹京霞, 等. 摩擦点火 Ti-V-Cr 阻燃钛合金燃烧产物组织特征[J]. 物理学报, 2016, 65(5): 056103.
- MI Guangbao, HUANG Xu, CAO Jingxia, et al. Microstructure characteristics of burning products of Ti-V-Cr fireproof titanium alloy by frictional ignition[J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(5): 056103.
- [8] OUYANG P X, MI G B, CAO J X, et al. Microstructure characteristics after combustion and fireproof mechanism of TiAl-based alloys[J]. Materials Today Communications, 2018, 16: 364–373.
- [9] WOLF J S. Anisothermal oxidation of titanium and its alloys[R]. Clemson: Clemson University, 1977.
- [10] TRUNOV M A, SCHOENITZ M, ZHU X Y, et al. Effect of polymorphic phase transformations in Al₂O₃ film on oxidation kinetics of aluminum powders[J]. Combustion and Flame, 2005, 140(4): 310–318.
- [11] SCHULZ O, EISENREICH N, KELZENBERG S, et al. Non-isothermal and isothermal kinetics of high temperature oxidation of micrometer-sized titanium particles in air[J]. Thermochimica Acta, 2011, 517(1/2): 98–104.
- [12] MURAVYEV N V, MONOGAROV K A, ZHIGACH A N, et al. Exploring enhanced reactivity of nanosized titanium toward oxidation[J]. Combustion and Flame, 2018, 191: 109–115.
- [13] 弭光宝, 曹春晓, 黄旭, 等. Ti-V-Cr 系阻燃钛合金的非等温氧化行为及阻燃性能预测[J]. 材料工程, 2016, 44(1): 1–10.
- MI Guangbao, CAO Chunxiao, HUANG Xu, et al. Non-isothermal oxidation characteristic and fireproof property prediction of Ti-V-Cr type fireproof titanium alloy[J]. Journal of Materials Engineering, 2016, 44(1): 1–10.
- [14] CHEN H, MI G B, LI P J, et al. Influence mechanism of Cu on high temperature oxidation behavior of titanium alloys[J]. Materials Science Forum, 2019, 944: 110–119.
- [15] OUYANG P X, MI G B, LI P J, et al. Non-isothermal oxidation behavior and mechanism of a high temperature near- α titanium alloy[J]. Materials, 2018, 11: 2141.
- [16] WU H H, TRINKLE D R. Direct diffusion through interpenetrating networks: oxygen in titanium[J]. Physical Review Letters, 2011, 107(4): 45504.
- [17] KITASHIMA T, KAWAMURA T. Prediction of oxidation behavior of near- α titanium alloys[J]. Scripta Materialia, 2016, 124: 56–58.
- [18] PEREZ R A, NAKAJIMA H, DYMENT F. Diffusion in α -Ti and Zr[J]. Materials Transactions, 2003, 44(1): 2–13.
- [19] ZHU L L, ZHANG Q Z, CHEN Z Q, et al. Measurement of interdiffusion and impurity diffusion coefficients in the bcc phase of the Ti-X (X= Cr, Hf, Mo, Nb, V, Zr) binary systems using diffusion multiples[J]. Journal of Materials Science, 2017, 52: 3255–3268.
- [20] TANIGUCHI S, SHIBATA T. Influence of additional elements on the oxidation behaviour of TiAl[J]. Intermetallics, 1996, 4(S1): 85–93.
- [21] CHEN G, PENG Y, ZHENG G, et al. Polysynthetic twinned TiAl single crystals for high-temperature applications[J]. Nature Materials, 2016, 15: 876–881.
- [22] OUYANG PX, MI G B, LI P J, et al. Non-isothermal oxidation behavior and mechanism of Ti-Al Intermetallic Compounds[J]. Materials, 2019, 12: 2114.
- [23] RAHMEL A, SCHÜTZE M, QUADAKKERS W J. Fundamentals of TiAl oxidation—a critical review[J]. Materials and Corrosion, 1995, 46(5): 271–285.
- [24] 莱茵斯 C, 皮特尔斯 M. 钛与钛合金[M]. 陈振华, 译. 北京: 化学工业出版社, 2005: 172–195.
- LEYENS C, PETERS M. Titanium and titanium alloys[M]. CHEN Zhenhua, trans. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 172–195.

通讯作者: 弭光宝, E-mail: miguangbao@163.com.

Research Progress of Non-Isothermal Oxidation Behavior of High Temperature Titanium Alloys for Aero-Engine

MI Guangbao^{1,2}, OUYANG Peixuan^{1,3}, CHEN Hang^{1,3}, LI Peijie³, HUANG Xu^{1,2}, CAO Chunxiao^{1,2}

(1. Titanium Alloy Research Institute, AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China;

2. Key Laboratory on Advanced Titanium Alloys of AECC, Beijing 100095, China;

3. Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

[ABSTRACT] Fireproof property is a key performance index to measure the safety of aero-engine titanium fire, which is generally evaluated by the abilities of titanium alloy materials/components to resist thermal spontaneous combustion, ignition and extended combustion. Aiming at the demand of advanced high-temperature titanium alloys for high-performance aero-engines, this paper reviews recent experimental studies on ignition resistance and combustion resistance and introduces the research progress of non-isothermal oxidation behavior and fireproof mechanism of fireproof titanium alloys, high temperature titanium alloys and intermetallic titanium aluminides from the aspect of thermal spontaneous combustion resistance. Finally, the future direction of development is prospected.

Keywords: High temperature titanium alloy; Fireproof titanium alloy; Intermetallic titanium aluminides; Non-isothermal oxidation; Fireproof mechanism

(责编 逸飞)

(上接第87页)

Progress in Application of Graphene Conductive Composites in Flexible Sensors

LIU Zhiwen¹, CUI Xu², XU Lisheng³, ZI Xingyu³, WANG Shuo¹, YU Yin¹, MENG Qingshi¹

(1. College of Aerospace Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China;

2. College of Civil Aviation, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China;

3. Sino-Dutch Biomedical and Information Engineering School, Northeastern University, Shenyang 110016, China)

[ABSTRACT] As a new generation of two-dimensional carbon nanomaterials, graphene has excellent mechanical and electrical properties, and it is an ideal reinforcing material for the preparation of functional composites. Graphene can effectively improve the mechanical properties and electrical conductivity of graphene composites by combining with matrix materials. Polymer-matrix graphene composites can be used to prepare graphene flexible sensors, which has broad application prospects in structure health monitoring for composite material and human wearable devices. The basic properties of polymer-matrix graphene composites are introduced, based on this, the applications of flexible sensors in structure health monitoring and human wearable devices are analyzed. The progress of graphene flexible sensors in monitoring for strain of structure and human physiological motions are reported, and looking forward to the future developments of graphene flexible sensor.

Keywords: Graphene; Composites; Mechanical property; Electrical conductivity; Flexible sensor; Structure health monitoring; Wearable device

(责编 长青)