

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2021.11.029

碳 / 碳复合材料表面改性研究进展

申富强, 刘乐乐, 李科, 周莹, 沈昱杉, 申富胜, 朱明杰, 潘愚然, 周朋

(上海骐杰碳素材料有限公司, 上海 201100)

摘要: 简述了近年来国内外表面改性方法在碳 / 碳复合材料中的应用进展情况, 比较了包括液相沉积法、化学气相沉积法、物理气相沉积法、化学接枝法、聚合物涂层法等表面处理方法对碳 / 碳复合材料的表面改性效果。介绍并总结了不同改性技术在改进碳 / 碳复合材料的力学性能和制备工艺方面的改性原理和各自优缺点, 旨在为碳 / 碳复合材料的工业设计和生产制造提供有效的实现路径和指导, 并对碳 / 碳复合材料表面改性技术的未来发展方向进行了展望。

关键词: 碳 / 碳复合材料; 液相沉积技术; 气相沉积技术; 化学接枝法; 聚合物涂层法

中图分类号: TQ32 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2021)11-0163-05

Research Progress on Surface Modification of Carbon / Carbon Composites

Shen Fuqiang, Liu Lele, Li Ke, Zhou Ying, Shen Yushan, Shen Fusheng, Zhu Mingjie, Pan Yuran, Zhou Peng

(Q-Carbon Material Co., Ltd., Shanghai 201100, China)

Abstract : The application progress on surface modification of carbon / carbon composites at home and abroad in recent years was summarized, and the surface modification effects of surface treatment methods including liquid deposition, chemical vapor deposition, physical vapor deposition, chemical grafting and polymer coating were compared. The different modification technology in improving mechanical properties of carbon / carbon composite materials and preparation process of modified principle and their respective advantages and disadvantages were introduced and summarized, aiming at providing effective path and some important guiding significance for the industrial design and production of carbon / carbon composites manufacturing. The future development direction of surface modification of carbon / carbon composite was prospected.

Keywords : carbon / carbon composite ; liquid phase deposition technology ; vapor deposition technology ; chemical grafting ; polymeric coating

碳 / 碳复合材料(CFC)是指以碳为基体与碳纤维或石墨纤维(或其织物)为增强体组成的复合物。增强体的形式多样,种类繁多,如碳纤维既可以用短切纤维,也可用连续长纤及其编织物。碳 / 碳复合材料具有密度低(一般小于 2000 kg/m^3)、强度高、比模量高、导热性好、膨胀系数低、摩擦性能好、抗热冲击性能好以及高温下尺寸稳定性好等诸多优点^[1],是现今高温领域(2000°C 以上)应用的最佳备选材料,因此被称为最具有发展前途的超高温材料。

目前对包括碳纤维在内的碳 / 碳复合材料的表面进行改性处理方法主要包括液相沉积法^[2]、气相沉积法^[3]等,这些方法主要用于在固体表面生成固体薄膜涂层,也可用于生

产高纯度的块料和粉末,以及通过渗透技术制造碳 / 碳复合材料。沉积技术因具有可有效降低生产成本和提高生产率等优点,目前在航空航天、汽车电子、运动装备和新型材料等方面得到了广泛的应用和发展。伴随着科技的高速发展和快速进步,愈来愈多的更高效的碳 / 碳复合材料的改性方法也在不断涌现,因此有必要对迄今为止应用较广泛的碳 / 碳复合材料方面的改性方法进行较系统的总结。

1 液相沉积法

液相沉积(LPD)法是从湿化学中发展而来的一种新式成膜方法,是专为制备固体表面氧化物薄膜而发展起来的,在1988年由Nagayama^[4]等首先提出。由此开发而来的

通信作者: 刘乐乐,主要研究方向为碳纤维复合材料应用

收稿日期: 2021-08-30

引用格式: 申富强,刘乐乐,李科,等. 碳 / 碳复合材料表面改性研究进展[J]. 工程塑料应用,2021,49(11): 163-167.

Shen Fuqiang, Liu Lele, Li Ke, et al. Research progress on surface modification of carbon / carbon composites[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(11): 163-167.

LPD工艺可以使玻璃基板通过简单的浸入到含硅凝胶过饱和的 H_2SiF_6 溶液中,从而在玻璃基板上覆盖出均匀而致密的硅膜。低温制备的LPD二氧化硅膜具有良好的化学稳定性和碱阻隔效果,沉积速率取决于溶液温度和过饱和程度。

LPD法经过近些年的迅速发展,除了可在玻璃^[5], GaAs^[6], GaN^[7], Fe_3O_4 纳米粒子^[8], 硅电子^[9], 电色显示器^[10]等器件或基体上生长 SiO_2 或 TiO_2 等多孔有序薄膜^[11]之外,在碳/碳复合材料方面也具有广泛的运用。碳基体可以通过液相或气相沉积技术制备,也可由树脂、沥青等高分子材料热解而成。LPD法所用的碳材料化合物采用碳纤维、鳞片石墨、石墨粉、碳布、石墨纸、碳粉、石墨烯、石墨纤维等其中的一种或多种材料作为基础材料,添加粉体的或液态的酚醛树脂、环氧树脂、沥青等聚合物树脂材料经过固化、碳化、石墨化而成,这些聚合物树脂可以通过浸渍或喷涂工艺对复合材料表面进行改性。以酚醛为例,用于LPD的酚醛主要分为三种,分别为硼酚醛、铵酚醛、钡酚醛。其中,硼酚醛的残炭量最高,一般用于高耐烧蚀性和高耐磨性碳/碳复合材料的制造;铵酚醛含有的杂质最少,纯度最高,一般用于高纯度碳/碳复合材料的制造;钡酚醛介于二者之间,一般用于耐腐蚀性碳/碳复合材料的制造。化学接枝^[11]作为LPD技术中的一个步骤,它可以将聚合物接枝到纤维表面上,被接枝的聚合物能够牢固地固定在纤维表面,同时与基体具有很好的相容性。由于液体溶液中物质移动的平均自由程很短^[12],故析出的固态氧化物不仅可以充满碳/碳复材的孔隙,而且能够在与溶液接触的基体表面均匀涂覆,形成光滑致密、粘接力佳的树脂碳壳层。

碳/碳复合材料虽然价格昂贵,但在高性能和摩擦复合材料中备受青睐。由于这种材料的表面在化学上是惰性的,可能出现附着力不足,比复合材料的预期强度弱等问题。E. Bruneton等^[13]研究发现,采用化学LPD技术可以使得碳基复合材料表面的活性官能团和化学键与基体更好地聚合在一起,它增强了纤维基体的附着力,可以有效提高复合材料的强度,使基体更牢固地支撑着纤维。但同时,由于化学腐蚀作用也可能降低纤维的部分强度,因此必须优化处理程序,使复合材料的性能得到最大程度的提高。

史启桢等^[14]概述了在碳/碳复合材料的致密化工艺技术研究方面的工作,以环己烷为碳前驱体的沉积碳热裂解过程为例,对快速LPD致密化工艺原理、致密化工艺过程的设计、工艺参数的计算、化学理论确定方法以及用该工艺制备碳/碳复合材料及其微观结构进行了细致的研究。

陈俊华等^[15]采用快速LPD法制备出了抗氧化碳/碳复合材料,并采用电化学法对其进行表面改性处理。研究了不同密度的预制体和沉积时间对碳/碳复合材料密度及结

构的影响。结果表明,碳/碳复合材料的密度与预制体密度有关,在相同的沉积时间下,材料密度随预制体密度增加而减小。另外,使用材料万能试验机测得碳/碳复合材料的弯曲和压缩强度,分析了材料的弯曲强度和弯曲特征,结果表明,碳/碳复合材料的弯曲强度随预制体密度增大而增大,界面易呈现脆性特征和假塑性效应。

Yang M等^[16]提出了采用低压后退火加上二步退火工艺制备碳/碳复合材料薄膜的液相化学沉积方法。采用这种退火程序,泄漏的电流密度可以在2 V下被显著地消除大约一个数量级。工艺温度可以从650℃降至600℃而不会出现结晶度恶化的问题,且损耗极低。显微镜分析表明,这种低压过程会形成光滑的表面形貌。此外,热脱附工艺保证了在低压退火后残留的有机物和污染物更少,这可能成为降低结晶温度和改善电性能的原因之一。

Zhu Y H等^[17]采用快速LPD法在石墨纤维表面制备了SiC涂层,研究了沉积温度对涂层组织的影响,分析了不同温度下SiC涂层的氧化行为。研究结果表明,在1150℃条件下, SiC涂层的厚度在80~120 μm之间,快速LPD工艺可成功地在石墨表面获得光滑致密的涂层,随着沉积温度的提高, SiC晶粒逐渐增大。抗氧化测试结果表明,在1000℃氧化5 h后,样品的质量损失仅为21%, SiC涂层可有效提高石墨材料的抗氧化性。

2 化学气相沉积法

化学气相沉积(CVD)是指在要沉积的有机金属或卤化物的化合物与其它气体之间发生化学反应,从而在基体表面形成固体薄膜的沉积过程^[18]。CVD技术早期应用于高纯金属精炼和金属板材的制造,经过后人的研究和进一步发展,现已用于制备半导体和磁性体的薄膜。以金属表面硬化为目的CVD始于TiC薄膜,除了TiC, TiN等沉积薄膜材料,该方法现今也可用于制备一些耐高温熔融材料的高纯度纳米碳粉、粉状研磨纤维和粒形纤维状碳粉等碳基复合材料。

CVD的制程主要分为常压CVD(APCVD)^[19]、低压CVD(LPCVD)^[20]、等离子体增强型CVD(PECVD)^[21]三大类。APCVD主要发生在大气压力常压下,适合在开放环境下自动化连续生产,且易于发生气相反应,沉积速率较快,适合沉积厚介质层。LPCVD制程的优点是发生在低气压下的CVD具有较长的平均自由路径,可减少气相成核几率和颗粒物耗散,不需要气体隔离,孔洞少,成膜质量好。PECVD制程的优点是射频在沉积气体中感应等离子体场可提高反应速率,因此在低温低压下有较高的沉积速率。

F. S. Galasso等^[22]通过CVD方法在制备的碳/碳复合材料表面涂上了一层很薄(0.1~5 mm)的碳化硅涂层,研究结果表明可以显著提升材料性能。

M. Yehia 等^[23]运用 CVD 法来合成碳纳米管,使得该制造过程既便宜又适于实验室应用,是一种生产碳纳米管的低成本工艺和最常用的薄膜沉积技术。结果表明用于生产碳纳米管的 CVD 方法具有产量高和满足低温要求等优点,可以有效增强 CNTs 表面涂层的强度。

Y. Yamamoto 等^[24]为了深入了解碳纤维表面的 CVD,对不同的典型碳源和不适宜碳源的热催化分解进行了深入研究。研究表明,适宜的烃源可分解为 C1, C2 烃类及其自由基,相比之下,不合适的碳源不能产生碳氢化合物,从而对碳基类材料的涂层沉积有较大的影响。

Song M 等^[25]采用甲烷 CVD 法,在制备 Ni 基物质表面形成了一种新的碳/碳复合材料,该方法不同于常规的制备方法。甲烷首先吸附在金属 Ni 表面,然后通过一系列自由基反应分解为元素碳,产生的碳溶解在金属催化剂中,然后碳原子在催化剂表面沉淀形成碳/碳复合材料。最后对制备的新型复合材料的物理化学性能进行了表征,研究表明该复合材料具有丰富的孔隙结构和较大的比表面积,对二氧化硫具有良好的吸附性能。

R. M. Dey 等^[26]采用 CVD 方法在碳纤维表面制备了纳米镍薄膜,然后利用热化学气相沉积技术在镍纳米颗粒覆盖的碳纤维表面生长碳纳米管,并研究了镍催化剂厚度、碳纳米管生长温度等制备参数对碳纳米管长度和宽度的影响。研究发现,通过调节镍溶液浓度,可以使镍催化剂的厚度和粒径从几十纳米到几百纳米不等;随着 Ni 催化剂膜厚的增加,可以得到各种类型的碳结构,如碳纳米管、碳丝和碳弹簧等。结果表明采用沉积镍催化剂和 CVD 法可实现碳纳米管的直接锚定,相应的研究成果将有助于碳纤维与碳纳米管复合材料的成功制备。

Li Y H 等^[27]研发了一种新型碳/碳复合材料作为电化学电容器电极,采用简单 CVD 方法合成了多壁碳纳米管(MWCNTs)/碳纤维纸(CFP)复合材料,发现在使用不同的催化剂下(如 Fe, Ni, Cu)下,随机取向的 MWCNTs 仅在 Ni 颗粒下得到。他们对制备的该种碳/碳复合材料的物理和电化学性能进行了表征,结果表明该复合材料是一种很有前景的电化学电容器衬底。

3 物理气相沉积法

物理气相沉积(PVD)是一种用于生产高质量、高性能固体材料的沉积方法,通常在真空条件下,用物理的方法将材料气化成原子、分子或电离成离子,并通过气相过程在衬底上沉积一层具有特殊性能的薄膜技术^[28]。PVD 技术,如溅射、电子束和阴极电弧等沉积工艺正在广泛应用中发展,例如航空航天、汽车电子和运动设备工业。为了降低生产成本和提高生产率,硬质耐磨 PVD 涂层在全球的材料制造业

中广泛使用。PVD 涂层在耐磨性、抗冲蚀性、耐腐蚀性和力学性能方面均优于传统涂层。PVD 技术经过进一步的改进,现已可在不释放宏观液滴的情况下,实现均匀、致密、附着力高的涂层制备。

陈照峰等^[29]发明了一种在碳/碳复合材料表面制备铌涂层的方法,该方法的特征在于采用溶胶凝胶法使溶胶渗透到碳/碳复合材料里,然后高温分解,再在 2300℃下反应处理,最后使用 PVD 表面改性技术在碳/碳复合材料表面形成了有效、致密、结合力强的涂覆铌涂层。

李军等^[30]采用大功率电子束物理气相沉积法(EB-PVD)方法制备出了 SiC/SiC-Al₂O₃-Y₂O₃ 碳/碳复合材料抗氧化复合涂层,结果表明该涂层具有良好的抗氧化性能,试样在 2000℃恒温下氧化 50 h,其氧化失重仅有 1.32%。采用 EB-PVD 方法制备的 SiC-Al₂O₃-Y₂O₃ 复合涂层具有良好的沉积效果,能够形成柱状晶形结构,使涂层具有较好的应变容限,从而能够有效减少热应力,使涂层非常均匀致密。

E. Roos 等^[31]采用 EB-PVD 方法在碳/碳增强复合材料(C/C-SiC)和镍基金基体上沉积了 Cr 和 (Cr-Al) 双涂层。利用特殊的离子探测器测量了衬底区域的离子电流,使用光学、扫描电子和原子力显微镜研究了薄膜的表面形貌,并用线扫描电子探针在样品的横截面上测定了沉积元素的变化。对比试验结果表明,离子辅助沉积的 Cr 层显微硬度高于无离子加速沉积的 Cr 层。

4 化学接枝法

化学接枝(CG)法是一种利用材料表面的反应基团与被接枝的单体或大分子链发生化学反应而实现材料表面改性的方法,该法现今主要用于固体高分子材料表面处理,材料的本体部分因为未参与化学反应而仍然能够保持原状而不发生变化。目前的接枝改性材料主要是固体,而接枝单体多是气体或液体,所以这种表面接枝化学反应均为多相反应。聚合物通过接枝处理后,会在表面生出一层具有特殊性能的新接枝聚合物层,而基质聚合物的本体性能却能够不受影响,因而可达到显著的表面改性处理效果。

G. J. Ehlert 等^[32]采用 CG 法将二次材料接枝到碳纤维增强材料上,使碳纤维表面的官能团通过表面自然反应存在的羟基与丙二酸异丙酯有效反应生成了羧基表面层。该反应在接枝前不用预氧化产生官能团,试验结果证明能够保持纤维形态和提高其拉伸强度,这为在不牺牲纤维强度下的进一步接枝开辟了新途径。

Abdelghani 等^[33]为了制备碳纤维多尺度增强材料,将六亚甲基二胺(HDM)功能化多壁碳纳米管(MWCNTs)接枝到经氯胺处理过的碳纤维表面并用 X 射线光电子能谱和扫描电镜检测了材料表面的元素浓度、表面官能团和形貌特

征。其中, MWCNTs 是共价接枝到碳纤维表面的, 碳纤维表面结构并没有被破坏, 接枝的 MWCNTs 以不同的角度附着在纤维表面, 并沿着纤维表面沟槽外缘均匀分布。结果表明, 碳纤维接枝使碳纤维的质量提高了 1.2%, 说明相当数量的 MWCNTs 已经成功接枝到碳纤维表面。

C. U. Pittman Jr 等^[34]为制备对聚氨酯和环氧树脂基体都具有增强附着力的碳纤维, 尝试通过硝酸氧化, 然后与过量的四乙炔戊烷 (TEPA) 反应, 将表面高浓度胺引入高强度碳纤维中。纤维在 115℃ 下被浓硝酸氧化, 然后在 190~200℃ 下与 TEPA 反应, 将生成的酰胺接枝到 TEPA 表面。然后, 利用亚甲基蓝值和甲苯胺黄染料的吸附实验, 提供了测量其表面积、表面密度、表面酸碱度功能的空间可用性。

Ji F 等^[35]采用环氧-聚氨酯涂层对碳纤维表面进行处理, 并进行了相关的碳纤维/环氧复合材料的界面性能试验。试验中将处理方法分为三个阶段, 分别为: 等离子体氧化-包覆、酸酐接枝-包覆、等离子体接枝-施胶。通过单纤维拉伸试验的威布尔分析和单纤维复合材料的长丝断裂试验, 分析了碳纤维的拉伸强度和碳纤维/环氧复合材料的界面附着力。实验结果表明, 添加增塑剂后的碳纤维具有较好的耐磨性能, 等离子体接枝施胶碳纤维的界面剪切强度明显高于施胶碳纤维。

Wu E 等^[36]提出一种以聚丙烯酰氯 (PACl) 为偶联剂将高密度碳纳米管均匀接枝到碳纤维上的新方法。与小分子偶联剂相比, PACl 可以提供更多的活性基团, 这有利于将高密度的碳纳米管接枝到碳纤维表面。此外, 为了进一步提高碳纳米管的接枝密度, 采用热溶剂提高碳纤维与碳纳米管之间的反应活性。碳纳米管接枝处理后, 仍有大量的反应基团可以与不同类型的分子进一步反应, 以满足不同的要求。结果表明, 经过接枝处理后复合材料的界面附着力明显提高。

5 聚合物涂层法

聚合物涂层法^[37]是指为改善碳/碳复合材料的剪切强度, 将被涂层的复合材料先在硝酸中氧化 24 h, 然后涂上聚乙烯醇、聚氯乙烯、硬质聚氨酯等形成涂层。经过聚合物涂层后不仅可以提高复合材料表面的层间强度, 而且几乎不会损伤纤维的原有强度, 抗冲击强度也有所改善, 因此是一种较好的碳/碳复合材料的表面改性方法。

姜再兴等^[38]发明了一种石墨烯/聚合物涂层界面对碳/碳复合材料表面改性的方法, 主要旨在解决现有的界面改性方法制备的碳/碳复合材料存在不耐高温的缺陷。该法首先将石墨氧化得到氧化石墨粉体和石墨烯溶液, 经过提纯, 制备成石墨烯/聚合物涂层溶液, 在复合材料表面进行喷涂, 最后进行碳化处理。经过聚合物涂层处理后的复合材料界面性能比处理前提高了 20%~80%、宏观力学性能提高

了 3%~30%、耐烧蚀性能提高了 10%~50%, 同时具有操作简单、成本低廉的优点, 是一种良好的碳/碳复合材料表面改性方法。

D. Dupenne 等^[39]研究了碳纤维表面涂覆聚氨酯涂层后对电磁屏蔽效应的影响。由于基材和金属镀层之间的热膨胀系数不同, 空间环境的电磁屏蔽要求将碳纤维增强聚合物金属化, 为此他们研究提出了一种基于低含量银纳米线填充聚氨酯基体的导电聚合物涂层的原始工艺。通过对电镀工艺参数的优化, 获得了连续的粘附镀层, 并在恶劣的环境下 (-196~165℃) 检查了粘结力值。结果表明, 该工艺方案在 1~26 Hz 之间获得的有效屏蔽衰减大于 90 dB, 可以满足通信应用的需要。

杜帅等^[40]研究认为, 将碳纤维复合材料表面涂覆环氧树脂、酚醛树脂等聚合物作为上浆剂, 可以使碳纤维成束而不易发散, 这不仅能够改善其与树脂的浸润性, 而且可以有效防止纤维在运输过程中产生毛丝。这种聚合物表面层能够提高碳纤维与基体的结合能力, 在复合材料成型过程中在纤维与基体之间形成结合良好的界面, 从而提高两者间的界面粘结以及复合材料的界面剪切强度。

Pan Y 等^[41]设计合成了一种具有良好热氧化稳定性和溶解性的新型抗氧化热固性聚合物 (MSCB)。为防止碳/碳复合材料氧化, 采用先驱体浸渍工艺和 300℃ 热固化方法制备了一系列的 MSCB 聚合物涂层。研究了 MSCB, MSCB/TiO₂, MSCB/ZrO₂ 和 MSCB/SiC 包覆碳/碳复合材料的氧化行为。分析结果表明, 碳/碳复合材料抗氧化性能提高的原因在于涂层的良好附着力和涂层表面形成的硼硅酸盐保护层。

6 结语

主要介绍了沉积技术、化学接枝及聚合物涂层等方法对碳/碳复合材料改性处理效果的研究进展。随着表面改性方法的发展, 也有一些其它改性技术的出现, 如真空磷化技术^[42]、低温氧等离子体技术^[43]等。值得注意的是, 沉积技术作为普遍适用表面改性方法, 在未来仍有较广阔的发展应用前景。该项技术可显著提高材料的使用寿命和力学性能, 给人们带来巨大的社会效益和经济效益。其中, 由于聚合物涂层改性表面的粘结力机理非常复杂, 目前仍没有一种定论, 因此在现实的使用过程受到一定的限制。此外, 目前已有的改性方法和技术主要用于碳/碳复合材料的表面改性, 对材料内部改造的研究还相对较少, 因此这在未来将是一个重要的研究方向。随着碳/碳复合材料在多个应用领域的不断发展渗透, 与之相关的改性技术也在不断发展中逐步深化, 多种改性方法或技术的混合发展和应用也必将跨上一个新台阶。

参考文献

- [1] 江文波. 碳/碳复合材料及其应用[D]. 北京:中国地质大学, 2019.
Jiang Wenbo. Carbon/carbon composite and its application[D]. Beijing:China University of Geosciences, 2019.
- [2] 余萍,等. 广东微量元素科学, 2006(13):12-17.
Yu Ping, et al. Guangdong Trace Elements Science, 2006(13):12-17.
- [3] Agarwala R P. Materials Science Forum, 1997, 246:153-180.
- [4] Nagayama H, et al. Journal of Society, 1988, 135:2013-2016.
- [5] 王永珍,等. 真空与低温, 2013(9):228-233.
Wang Yongzhen, et al. Vacuum and Low Temperature, 2013(9):228-233.
- [6] Huang C J, et al. Physics, 2001, 70:78-83.
- [7] Wu H R, et al. Materials Chemical and Physics, 2003, 80:329-333.
- [8] 陈令允,等. 机械工程材料, 2005(29):34-37.
Chen Lingyun, et al. Mechanical Engineering Materials, 2005(29):34-37.
- [9] 林哲群,等. 利用液相沉积法制备氧化物抗反射薄膜于硅基太阳能电池之应用[C]. 第十二届全国硅基光电子材料及器件研讨会, 2017.
Lin Zhequn, et al. Preparation of oxide anti-reflection thin films by liquid deposition for silicon-based solar cells[C]. The 12th National Symposium on Silicon Based Optoelectronic Materials and Devices, 2017.
- [10] Mohammad H M, et al. Journal of Alloys and Compounds, 2021. doi:10.1016/j.jallcom.2021.160418.
- [11] 仲启智. 基于液相沉积法的有序多孔膜表面涂层构建及其性能研究[D]. 杭州:浙江大学, 2017.
Zhong Qizhi. Formation of coatings on honey-comb patterned porous film surfaces and the applications[D]. Hangzhou:Zhejiang University, 2017.
- [12] Buhl H. Advanced aerospace materials[M]. New York:Spring Verlag, 1992.
- [13] Bruneton E, et al. Carbon, 1997, 35:1593-1598.
- [14] 史启桢,等. 西北大学学报, 2002(32):12-15.
Shi Qizhen, et al. Journal of Northwest University, 2002(32):12-15.
- [15] 陈俊华. 快速化学液相沉积法制备抗氧化 C_f/C 复合材料及其焊接性研究[D]. 济南:山东大学, 2009.
Chen Junhua. Study on the fabrication of oxidation resistance C_f/C composites by rapid chemical liquid deposition techniques and its welding properties[D]. Jinan:Shandong University, 2009.
- [16] Yang M, et al. Japanese Journal of Applied Physics, 2014, 40(12A):1333-1335.
- [17] Zhu Y H, et al. Applied Mechanics & Materials, 2011, 55-57:82-86.
- [18] Theresa F, et al. Fibers, 2016. doi:10.3390/fib4040028.
- [19] Amjadi H. Dielectrics & Electrical Insulation IEEE Transactions on, 1999, 6(6):852-857.
- [20] Harbecke G. Journal of the Electrochemical Society, 1984, 131(3):675-682.
- [21] Battiston G A, et al. Thin Solid Films, 2000, 371(1-2):126-131.
- [22] Galasso F S, et al. Carbon, 1984. doi:10.1016/0008-6223(84)90024-1.
- [23] Yehia M, et al. Materials, 2018, 11(5):822-857.
- [24] Yamamoto Y, et al. Diamond & Related Materials, 2017, 75:1-5.
- [25] Song M, et al. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2016, 118:34-41.
- [26] Dey R M, et al. Bulletin of Materials Science, 2007, 30(6):541-546.
- [27] Li Y H, et al. Applied Energy, 2015, 153(1):78-86.
- [28] Prabu R, et al. Review of physical vapour deposition (PVD) techniques[C]. International Conference on "Sustainable Manufacturing", 2013.
- [29] 陈照峰,等. CN101445930A[P]. 2011-04-27.
Chen Zhaofeng, et al. CN101445930A[P]. 2011-04-27.
- [30] 李军,等. 炭素技术, 2007(3):1-5.
Lijun, et al. Carbon Technology, 2007(3):1-5.
- [31] Roos E, et al. Surface & Coatings Technology, 2002, 151:429-433.
- [32] Ehler G J, et al. Carbon, 2011, 49(13):4246-4255.
- [33] Laachachi A, et al. Materials Letters, 2008, 62(3):394-397.
- [34] Pittman Jr C U, et al. Carbon, 1997, 35(3):317-331.
- [35] Ji F, et al. Materials, 2020. doi:10.3390/ma13173813.
- [36] Wu Z, et al. Fibers and Polymers, 2014, 15(3):659-663.
- [37] 储双杰,等. 兵器材料科学与工程, 1993(6):59-64.
Chu Shuangjie, et al. Ordnance Material Science and Engineering, 1993(6):59-64.
- [38] 姜再兴,等. CN104211423A[P]. 2014-12-17.
Jiang Zaixing, et al. CN104211423A[P]. 2014-12-17.
- [39] Dupenne D, et al. Journal of Applied Polymer Science, 2020, 138(14):1-11.
- [40] 杜帅,等. 纺织导报, 2017(6):58-61.
Du Shuai, et al. China Textile Leader, 2017(6):58-61.
- [41] Pan Y, et al. Corrosion Science, 2019, 154(7):1-10.
- [42] 杨鸿斌,等. CN111304909A[P]. 2020-06-19.
Yang Hongbin, et al. CN111304909A[P]. 2020-06-19.
- [43] Huang Y, et al. Chemical Engineering Journal, 2021. doi: 10.1016/j.cej.2021.129474.