

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2021.02.028

石墨烯改性防弹材料研究进展

陈虹^{1,2}, 艾青松^{1,2}, 吴中伟^{1,2}, 刘元坤^{1,2}, 许冬梅^{1,2}, 虎龙^{1,2}

(1. 北京航天试验技术研究所, 北京 100074; 2. 北京航天雷特机电工程有限公司, 北京 100074)

摘要: 综述了国内外关于石墨烯改性防弹材料的研究进展, 包括石墨烯改性陶瓷复合材料、石墨烯改性芳纶材料、石墨烯改性超高分子量聚乙烯等其它防弹材料, 揭示了石墨烯对防弹材料各项性能的良好改善效果及其在防弹领域的巨大应用潜力, 尤其是在制备轻量化、高性能的防弹材料方面具有较好的应用前景。此外, 简要介绍了石墨烯薄膜、多层石墨烯片、石墨烯纳米粒子等应用于防弹领域的理论研究情况, 并提出了未来石墨烯改性防弹产品产业化研究的主要方向。

关键词: 石墨烯; 防弹; 芳纶; 陶瓷复合材料装甲; 石墨烯薄膜

中图分类号: TQ436 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2021)02-0162-05

Research Progress of Graphene Modified Bulletproof Materials

Chen Hong^{1,2}, Ai Qingsong^{1,2}, Wu Zhongwei^{1,2}, Liu Yuankun^{1,2}, Xu Dongmei^{1,2}, Hu Long^{1,2}

(1. Beijing Institute of Aerospace Testing Technology, Beijing 100074, China;

2. Beijing Aerospace Rate Mechanical & Electrical Engineering Co., Ltd., Beijing 100074, China)

Abstract: The domestic and foreign research progress of graphene modified bulletproof material were summarized, including graphene modified ceramic composite, graphene modified aramid materials, graphene modified ultra-high molecular weight polyethylene and other bulletproof materials. The good improvement effect of the graphene and its huge potential in the field of bulletproof were revealed, especially in the preparation of lightweight, high-performance bulletproof material. In addition, the theoretical research on the application of graphene film, multi-layer graphene plates and graphene nanoparticles in the field of bulletproof were briefly introduced, and the main directions of study on the industrialization of graphene modified bulletproof products in the future was put forward.

Keywords: graphene; bulletproof; aramid; ceramic composite armor; graphene membrane

随着科学技术的发展, 对于防弹装甲的防护性能、舒适性和轻量化水平要求逐渐提高, 石墨烯以其强度高、耐冲击性好和质量轻等优异性能吸引了材料领域的高度关注。石墨烯是由碳原子紧密结合排列成的蜂窝状结构的碳材料, 厚度为 0.335 nm, 仅有一个原子层的厚度, 是迄今为止发现的最薄的二维材料^[1]。它是碳的二维同素异形体, 原子排列呈六边形晶格结构, 也是目前最坚固的材料, 而质量却比一张纸轻得多^[2-4]。自发现至今, 石墨烯吸引了众多研究人员的高度关注。这主要是因为, 与其它纳米材料相比, 其具有优良力学、物理、耐热和导电性能, 例如, 高断裂强度、高拉伸弹性模量、高本征迁移率、高比表面积和良好的热性能和电导率^[5-7]。这些特性源于其独特的结构, 在平面内的 C—C 键

均以 sp² 方式杂化, 每个晶格中 3 个 σ 键形成稳定的六边形结构, 并贡献剩余一个 p 轨道上的电子形成大 π 键。由于强的共价键键合作用, 石墨烯的拉伸强度高达 130 GPa, 加之其超轻的质量, 使得石墨烯成为比凯夫拉更好的弹道材料, 两种材料的性能对比列于表 1。

表 1 凯夫拉与石墨烯性能对比^[8]

项目	GPa	
	凯夫拉	石墨烯
拉伸强度	3	130
拉伸弹性模量	154.61	1000

与单层石墨烯相比, 石墨烯片是指厚度高达 100 nm 的多层石墨烯, 也被称为石墨烯片层、石墨烯纳米片或石墨烯微片, 具备较高的比表面积和出色的力学性能, 作为纳米填料应用在复合材料中具有巨大潜力^[9]。根据微观弹道实验

通信作者: 陈虹, 硕士, 工程师, 主要从事防弹防刺复合材料研究 E-mail: ch916348939@163.com

收稿日期: 2020-12-28

引用格式: 陈虹, 艾青松, 吴中伟, 等. 石墨烯改性防弹材料研究进展 [J]. 工程塑料应用, 2021, 49(2): 162-166.

Chen Hong, Ai Qingsong, Wu Zhongwei, et al. Research progress of graphene modified bulletproof materials[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(2): 162-166.

量化结果,纳米厚度的多层石墨烯材料的比穿透能量比同等质量的钢板高 10 倍。这主要是因为变形引起的锥形波的影响,石墨烯的高模量和低密度,使其能够有效地将弹丸动能耗散到更大的面积。通常,防弹装甲材料厚度的设计往往与其要防护的子弹口径相关,而从宏观上看,随着石墨烯材料厚度的增加,侵彻过程和破坏机理也会变得更加复杂^[10-12]。鉴于此,在石墨烯防弹性能的研究过程中,需要考虑单层和多层石墨烯的不同行为,以及石墨烯的不同应用形式,从而全面评估其防弹性能。因此笔者从石墨烯应用探索及弹道模拟理论研究两方面综述了石墨烯对不同材料防弹性能的影响。

1 石墨烯改性防弹材料的应用探索

1.1 石墨烯改性陶瓷复合材料

防弹衣和防弹车辆的主要防弹功能是防止子弹穿透人体,因而材料的选择取决于几个标准,如质量、能量吸收能力、抗损伤性和耐多次冲击性。需要考虑的其它特征包括物理性能和微观结构的组合以及制造工艺的优化。但限于材料成本的约束,弹道陶瓷的使用取决于哪些属性对特殊装甲应用是必要的^[13-15]。A. B. Drescha 等^[16]通过陶瓷厚度与穿透深度(代表陶瓷阻挡弹丸的有效性)之间的关系、陶瓷厚度效率与弹丸动能之间的关系、弹道效率因子与陶瓷厚度的关系等多种性能机制分析,对比了常用的弹道陶瓷(氧化铝、碳化硅和碳化硼)的防弹性能,旨在研究陶瓷的力学性能及其在复合材料动态弹道性能中的作用。结果显示,碳化硅抵御 7.62 mm 口径子弹的弹道性能最好,其次是氧化铝和碳化硼。硬度是破裂和侵蚀弹丸至关重要的性能,断裂韧性和弯曲强度有助于陶瓷承受多重冲击。而陶瓷材料的脆性大、韧性低的致命缺点,导致其使用可靠性与抗破坏能力较差,增大了其灾难性失效的概率。因此,为了得到更有效的防弹陶瓷,必须改善其各项性能。因此,为了得到更有效的防弹陶瓷,必须改善其各项性能。Liu Jian 等^[9]制备了石墨烯片增强 Al_2O_3 陶瓷复合材料,并研究了其对陶瓷复合材料微观结构、力学性能及弹道性能的影响。结果表明,石墨烯片在陶瓷基体中分散良好,且在陶瓷中观察到石墨烯片和孔隙的重叠,改性后的弯曲强度和断裂韧性显著高于 Al_2O_3 陶瓷复合材料,分别提高了 30.75% 和 27.20%。石墨烯片的增韧机理是拔出和裂纹偏转,孔隙也钝化了裂纹的扩展,从而使得局部应力集中在孔隙处并得到了较好的释放。Yin Zengbin 等^[17]采用放电等离子烧结法制备了石墨烯片增韧碳化硼陶瓷,并研究了其增韧机理。对比了两种商用陶瓷装甲碳化硅和碳化硼,采用凹陷深度试验方法对石墨烯片/碳化硼陶瓷装甲的弹道性能进行了研究。结果显示,石墨烯片/碳化硼材料的防弹性能最好,其凹陷深度最小,与碳化硅和碳化硼

相比,石墨烯片/碳化硼陶瓷装甲的防弹性能(防护系数)分别提高了 50% 和 12.5%。

在国内研究方面,凌建寿等^[18]用石墨烯改性陶瓷、铝合金材料,与聚乙烯背板复合制备复合防弹板,应用于防弹警车车身。车身实弹试验表明,石墨烯复合防弹装甲材料具有较好的抗多发弹性能。而在军用武装直升机上的应用方面,石墨烯改性陶瓷材料同样具有良好的应用前景。目前,国内通常以碳化硼防弹复合材料制备的装甲板用作直升机驾驶员的座椅防护,能够抵御 12.7 mm 穿甲燃烧弹,但陶瓷韧性较差,其抗多次打击性能不足,而石墨烯材料的引入能够很好地改善这一缺陷。武岳等^[19]通过对石墨烯改性碳化硼陶瓷的微观组织进行分析发现,在材料断裂时拔出和分离的石墨烯表现出了明显的层片滑移现象,能够消耗裂纹扩展过程中的内应力,并且其多褶皱结构在裂纹扩展的过程中会发生变形,以及由于其在晶界处的不连续分布而产生的裂纹偏转、片拉出等多种增韧机制,都能够提升碳化硼陶瓷的抗裂纹扩展性能,在提高复合装甲抗多次打击能力方面具有良好的应用前景。

1.2 石墨烯改性芳纶防弹材料

凯夫拉纤维具有高强度和良好的防弹性能,S. Manigandan 等^[20]研究了石墨烯片对凯夫拉(kevlar-29)的增强作用。分别添加含量为 2%,5%,10% 和 20% 的石墨烯片制备凯夫拉/石墨烯纳米复合材料层压板,并测试其力学性能,结果表明,经石墨烯片处理后,凯夫拉纤维的强度有所提高,且石墨烯片比例增加,凯夫拉纤维的强度增大。但当石墨烯片含量超过 5% 时,纤维的强度下降。此外,添加量超过阈值时,纤维的界面性能下降。为了提高芳纶纤维与环氧树脂的界面性能,Zeng Lei 等^[21]采用仿生表面改性的方法对芳纶纤维进行表面改性。即在芳纶纤维表面自聚合了一层薄薄的聚多巴胺,然后将氧化石墨烯接枝到聚多巴胺包覆的芳纶纤维表面。利用扫描电子显微镜和 X 射线光电子能谱对改性前后的纤维的微观结构和化学特性进行了表征,并对改性纤维的力学性能进行了评价。结果表明,纤维表面改性使界面剪切强度提高了 210%,而氧化石墨烯-聚多巴胺涂层对纤维的拉伸强度有保护作用。A. O. da Silva 等^[22]对具有氧化石墨烯涂层的芳纶织物弹道性能进行了研究,采用氧化石墨烯溶液增强 Twaron[®],并在 120℃ 下进行热处理,旨在通过增加织物中纤维的摩擦系数来改善材料的弹道性能。采用红外光谱等对原织物和经过一次、两次氧化石墨烯涂覆的织物进行了表征,并进行了 9 mm 弹道试验。结果显示,两种具有氧化石墨烯涂层的织物的防弹性能比普通织物高出 50%。这可能是由于纤维之间的摩擦较大导致的。通过统计学的方差分析也验证了这一结果。这种氧化石墨烯

涂层纳米复合材料有助于开发新型的个体防护和车辆防弹材料。

翟文等^[23]对石墨烯增强芳纶的工艺进行了研究与探索,结果显示,改性强化后的芳纶能够弥补纤维拉丝过程中引起的缺陷,以石墨烯改性芳纶制备防弹布,其防弹性能可提高7%以上。庄银江等^[24]发明了一种由混纺纱与包芯纱机织而成的超轻防弹布。混纺纱是由芳纶、改性超高分子量聚乙烯、石墨烯与乙酸纤维混纺制成。而包芯纱则以碳纤维为中心芯线,聚乙烯为中间的包覆层,乙酸纤维作为外包覆层制备。该材料具有较好的强度、韧性和抗冲击性,能有效抵御子弹及破片的穿透,该成果已申请专利。李星峰^[25]采用芳纶纤维,超高分子量聚乙烯等与石墨烯、转基因蛛丝蛋白纤维复合,发明了一种安全性能好,抵御穿透能力强的防弹无纺布。研究表明,石墨烯的加入增强了纤维的韧性和防弹性能,有效降低了子弹弹跳引起的二次伤害。多项实验结果显示,加入石墨烯的防弹无纺布的抗打击效果优于普通的防弹材料。陈国华等^[26]以氧化石墨烯水溶液改性环氧树脂体系,浸涂于芳纶机织布与芳纶三维机织间隔的织物上,使氧化石墨烯片沿布面取向,从而制备了环氧树脂基防弹复合材料,具备比现有的钢化、陶瓷、金属等防弹材料更好的防弹性能,可用于软质防弹衣致命部位的增强及各种抵御子弹冲击的材料,且更为轻薄。

1.3 石墨烯改性的其它防弹材料

近年来,关于石墨烯材料防弹性能的研究在国内外逐渐兴起,N. Jesuarockiam等^[27]通过超声波分散法将不同质量分数石墨烯片加入到环氧树脂中,并与凯夫拉等材料复合,通过热压成型制备层状复合材料,随后制备了9层和12层复合材料层合板进行弹道试验,结果表明,石墨烯片的加入使复合材料的吸能性能分别提高了8.5%(9层)和12.88%(12层),冲击极限分别提高了4.28%(9层)和6.17%(12层)。Bi Hui等^[28]研究了一种3D(三维)石墨烯管泡沫状材料,不仅质量非常轻,还具备极好的耐冲击性,该材料的强度是钢的207倍,可支撑起自身质量4万倍的物体,且不会发生弯曲现象。这种坚固耐久的力学性能与金属合金和陶瓷等其它超轻、超硬材料的微晶格形成了鲜明对比。在类似密度下,其它材料的微晶格或遭受屈服应力急剧下降,或在卸载时几乎完全丧失承载能力,而3D石墨烯在重复加载过程中仍然具有类似初始的强度和刚度,应力-应变曲线保持循环不变。这些结果初步支持了由连续管状石墨烯制成的3D网络结构可以最终成为优异的超轻、超硬和超弹性材料的设想。陈鹏等^[29]制备了一种含石墨烯的超高分子量聚乙烯无纺布,具有轻质、舒适、柔软的特性。研究结果显示,加入石墨烯后提高了无纺布的耐冲击性能和其柔韧性,同时

大幅减轻了材料质量,改善了用于软质防弹衣、轻质防弹装甲材料及防弹头盔等产品的高性能纤维无纺布防弹性能差、坚硬笨重、使用方便性差的问题。

A. Safamanesh等^[30]采用氨丙基三甲氧基硅烷化合物对石墨烯片进行表面改性,制备了氧化石墨烯,并以不同含量的氧化石墨烯与环氧树脂混合,采用手糊成型方法制备了多尺度环氧树脂/氧化石墨烯/芳纶纤维复合材料。通过低速和高速冲击试验分析发现,石墨烯片的加入提高了复合材料的低速冲击和高速冲击性能,且当氧化石墨烯添加质量分数为0.3%时,复合材料的耐冲击性最高。通过扫描电子显微镜对复合材料试样的断口进行分析发现,氧化石墨烯的加入减少了损伤面积,提高了损伤容限。进一步对比了质量分数0.3%的氧化石墨烯和0.3%的石墨烯片对芳纶纤维/环氧复合材料低速冲击和高速冲击行为的影响,结果表明,石墨烯片的改性提高了复合材料的低速冲击和高速冲击性能。在低速冲击条件下,添加0.3%的氧化石墨烯可使复合材料的峰值应力与吸收能分别提高44%和95%。在高速冲击条件下,0.3%的氧化石墨烯的加入使复合材料的弹道极限和吸收能分别提高了23%和52%。乌拉草(*curaua*)纤维复合材料具有高拉伸弹性模量、高强度、高韧性等优点,在防护领域具有广阔的应用前景。单向乌拉草纤维增强的环氧树脂和聚酯复合材料,作为多层防护系统的组成部分,其性能已得到研究^[31-33]。F. D. O. Braga等^[34]通过对比乌拉草无纺布复合材料与芳纶层压板的断裂机制,研究了其作为多层防护系统组成部分时的弹道性能。靶片弹道实验背部凹陷显示,多层防护系统防止了致命缺陷,可以认为它能够有效地对抗7.62 mm子弹,且乌拉草无纺布复合材料更适用于高级别防弹材料,是芳纶复合材料的理想替代品。U. O. Costa等^[35]进一步研究了含氧化石墨烯涂层的乌拉草纤维增强环氧树脂复合材料作为前置的陶瓷多层装甲系统中的第二层时,其抵御三级7.62 mm弹药的弹道性能。结果显示,涂层纤维含量为30%的复合材料不仅凹陷满足防弹标准要求,其性能堪比相同厚度的凯夫拉,而且靶片保持完好,这是无涂层纤维复合材料无法达到的。

2 石墨烯用于防弹领域的理论研究

J. H. Lee等^[36]的微尺度弹道实验表明,多层石墨烯薄膜具有极高的弹道极限速度和比穿透能。而促成这些多层石墨烯膜卓越性能的一个关键特点是,其在受到撞击时产生的锥形波,对于超轻硬的石墨烯薄膜,这些锥形波以超高速呈放射状传播,可把弹丸的动能分布到远离撞击区的区域。Meng Zhaoxu等^[37]通过模拟和理论模型观察研究了石墨烯薄膜在弹道冲击下由于锥波反射引起的尺寸效应。分子动力学模拟表明,若样品尺寸较小,则会存在一个临界膜尺寸,

当薄膜达到这个临界尺寸时,膜材料受到撞击后,边界产生的锥形反射波有足够的时间从固定的边界返回,并对样品产生破坏作用,降低了薄膜的抗弹能力,且对于独立的圆形结构薄膜,反射波的影响最大。这是一种与石墨烯薄膜的微弹道测试特别相关的现象。所提出的理论分析填补了弹丸撞击过程中的有限薄膜行为,获得的临界尺寸有助于未来弹道防护产品的几何结构设计。M. R. O'Masta 等^[38]通过评估高体积分数的石墨烯-聚合物复合材料在准静态和动态载荷下的响应,以揭示复合材料在防弹应用中的潜力。结果显示,聚乙烯醇/多层石墨烯膜与铝膜相比,具有更高的承载能力,其抗弹极限比铝膜高 50%。在比强度和比模量图中,将聚乙烯醇/多层石墨烯膜与芳纶、碳纤维和聚乙烯基复合材料等常用防弹材料进行对比,结果显示,聚乙烯醇/多层石墨烯膜作为弹道材料具有巨大的潜力。向聚乙烯醇中添加 1% 的多层石墨烯,其弹道极限速度(V_{50})能够超过 500 m/s。M. A. N. Dewapriya 等^[39]通过建立分子动力学模型,研究了将石墨烯薄膜以不同的深度嵌入聚乙烯中,制备的多层石墨烯-聚合物复合材料在受到球形弹丸撞击时的弹道性能,其冲击试验数值模拟结果显示,石墨烯可以改善聚乙烯的防弹性能,单层石墨烯涂层可将聚乙烯的防弹性能提高 8 倍以上。

Meng Zhaoxu 等^[40]在关于“柱状弹丸的类剥落破坏降低多层石墨烯片弹道性能”的仿真研究中,发现了一种新的动态破坏机制:当多层石墨烯片不再以薄膜的方式发挥作用时,在冲击过程中会出现多种模式的组合。当弹丸速度超过 V_{50} 时,材料顶部的局部破坏表现为碎裂,底部断面则显示更多的整体变形和花瓣式的龟裂。比较不同的弹丸形状发现,弹丸形状对其破坏过程和多层石墨烯片的 V_{50} 有很大影响,且多层石墨烯片的密度和压缩弹性模量也是影响其防弹性能的关键因素。S. Vignesh 等^[8]将石墨烯纳米粒子作为层压板插入凯夫拉纤维层中间,进行了动态弹道冲击分析。分别以 20 层凯夫拉(kevlar-29)纤维布、10 层石墨烯层压板与 10 层凯夫拉(kevlar-29)纤维布复合,作为防弹样品,研究其受到撞击时的动力学行为,结果显示,石墨烯层合板的加入使背心内产生的等效应力减小近 1/2,很大程度上降低了变形背心层中产生的最大主应力,可明显减少防弹衣的总变形,提高其防弹性能。

3 结语

综述了近年来国内外关于石墨烯材料在防弹领域的应用研究情况,通过研究人员的实弹测试数据及仿真模拟分析结果,揭示了石墨烯材料在高性能防弹材料研究方面巨大的应用潜力。石墨烯的不同应用形式,包括纳米粒子、石墨烯薄膜、石墨烯微片等,对防弹材料的影响亦会有所不同,因此

国内关于石墨烯改性防弹材料的理论研究基础仍有待加强。此外,石墨烯改性防弹材料在产品的产业化的过程中仍然存在一些难题亟待解决,一是优化工艺,解决石墨烯改性产品在生产过程中的团聚问题,增强其可操作性和可实施性。二是探索石墨烯的最佳应用形式及其与本体防弹材料的结合方式。

参考文献

- [1] Gupta N, et al. Carbon Letters, 2019, 29(5):419-447.
- [2] Wang Shuang, et al. Journal of Applied Polymer Science, 2018. doi:10.1002/app.46093.
- [3] Papageorgiou D G, et al. Progress in Material Science, 2017, 90:75-127.
- [4] Lee X J, et al. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2019, 98:163-180.
- [5] Gago I, et al. Advanced Materials for Defense. 2020, 4:45-54.
- [6] Shah S, et al. Journal of colloid and interface science, 2020, 560: 581-588.
- [7] Liu Yihun, et al. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2012, 60(4):591-605.
- [8] Vignesh S, et al. Materials Today:Proceedings 2020. doi:10.1016/j.matpr.2020.02.808.
- [9] Liu Jian, et al. Ceramics International, 2013, 39(6):6 215-6 221.
- [10] Lee J H, et al. Nature Communications, 2012. doi:10.1038/ncomms2166.
- [11] Wetzel E D, et al. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2015, 82:23-31.
- [12] Guo Jiangang, et al. Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 2012, 12(4):3 159-3 164.
- [13] Yadav R, et al. RSC Advances, 2016, 6(116):115 145-115 174.
- [14] Benitez T, et al. Ceramics International, 2017, 43(16):13 031-13 046.
- [15] Tchamba A B, et al. International Journal of Applied Ceramic Technology, 2020, 17(3):949-962.
- [16] Drescha A B, et al. Ceramics International. 2020. doi:10.1016/j.ceramint.2020.12.095.
- [17] Yin Zengbin, et al. Ceramics International, 2019, 45(17):23 781-23 787.
- [18] 凌建寿,等. 北京理工大学学报, 2018, 38(A01):5-9.
Ling Jianshou, et al. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2018, 38(A1):5-9.
- [19] 武岳,等. 直航空材料学报, 2019, 39(5):34-44.
Wu Yue, et al. Journal of Aeronautical Materials, 2019, 39(5):34-44.
- [20] Manigandan S, et al. IOP Conference Series:Materials Science and Engineering, 2017, 225. doi:10.1088/1757-899X/225/1/012061.
- [21] Zeng Lei, et al. Applied Composite Materials, 2018, 25(4):843-852.

- [22] da Silva A O, et al. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9(2):2 267–2 278.
- [23] 翟文,等. 纺织导报,2017(Z1):66–72.
Zhai Wen, et al. China Textile Leader, 2017(Z1):66–72.
- [24] 庄银江,等. CN106702573[P]. 2017-01-04.
Zhuang Yinjiang, et al. CN106702573[P]. 2017-01-04.
- [25] 李星峰. CN105202974[P]. 2015-08-17.
Li Xingfeng. CN105202974[P]. 2015-08-17.
- [26] 陈国华,等. CN106113814[P]. 2016-06-24.
Chen Guohua, et al. CN106113814[P]. 2016-06-24.
- [27] Jesuarockiam N, et al. Textile Research Journal, 2019, 89(21–22): 4 349–4 362.
- [28] Bi Hui, et al. Advanced Materials, 2015, 27(39):5 943–5 949.
- [29] 陈鹏,等. CN106245343[P]. 2016-08-31.
Chen Peng, et al. CN106245343[P]. 2016-08-31.
- [30] Safamanesh A, et al. Polymer Composites, 2019, doi:10.1002/pc. 25851.
- [31] Monteiro S N, et al. Metallurgical and Materials Transactions A:Physical Metallurgy and Materials Science, 2011, 42(10): 2 963–2 974.
- [32] Monteiro S N, et al. Polymer Engineering & Science, 2017, 57(9): 947–954.
- [33] Monteiro S N, et al. Metallurgical and Materials Transactions A:Physical Metallurgy and Materials Science, 2015, 46(10): 4 567–4 577.
- [34] de Oliveira Braga F, et al. Journal of Materials Research and Technology, 2017, 6(4):417–422.
- [35] Costa U O, et al. Polymers, 2019, doi:10.3390/polym11081356.
- [36] Lee J H, et al. Science, 2014, 346 (6213):1 092–1 096.
- [37] Meng Zhaoxu, et al. Extreme Mechanics Letters, 2017, 15:70–77.
- [38] O'Masta M R, et al. Extreme Mechanics Letters, 2017, 11:49–58.
- [39] Dewapriya M A N, et al. Computational Materials Science, 2019, 170, doi:10.1016/j.commatsci.2019.109171.
- [40] Meng Zhaoxu, et al. Carbon, 2018, 126:611–619.

=====

(上接第 161 页)

- 学, 2018.
- Yang Lipeng. Study on novel phosphazene flame-retardant polymer materials[D]. Beijing:Beijing University of Chemical Technology, 2018.
- [39] Bešli S, et al. Polyhedron, 2017, 122:61–70.
- [40] 王春征,等. CN 104292504A[P]. 2015-01-21.
Wang Chunzheng, et al. CN104292504A[P]. 2015-01-21.
- [41] Wan Chaoying, et al. Materials Today Communications, 2017, 11:38–60.
- [42] 肖啸,等. 化学推进剂与高分子材料, 2011, 9(5):72–75.
Xiao Xiao, et al. Chemical Propellants & Polymeric Materials, 2011, 9(5):72–75.
- [43] 李梦迪,等. 化工学报, 2020, 71(4):1 871–1 880.
Li Mengdi, et al. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2020, 71(4):1 871–1 880.
- [44] 胡文田,等. 化工学报, 2015, 66(5):1 976–1 982.
Hu Wentian, et al. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2015, 66(5):1 976–1 982.
- [45] 周立生. 基于磷腈结构的线性聚合物及阻燃与自修复环氧树脂的研究 [D]. 西安:西北工业大学, 2018.
Zhou Lisheng. Synthesis and properties of liner polymer, flame retardant and self-healing epoxy resins based on phosphazenes[D]. Xi'an:Northwestern Polytechnical University, 2018.
- [46] Philip L M. Flame retardant polymeric compositions containing halogen substituted hexakis-(substitute-edphenoxy)cyclotriphosphazene:US4029634[P]. 1977-06-14.
- [47] 肖啸,等. 火炸药学报, 2011, 34(5):16–19.
Xiao Xiao, et al. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2011, 34(5):16–19.
- [48] 刘朋委. 环三磷腈衍生物制备及阻燃环氧树脂研究 [D]. 太原:中北大学, 2019.
- Liu Pengwei. Preparation of phosphazene derivatives and their flame retardant application in epoxy resin[D]. Taiyuan:North University of China, 2019.
- [49] Chen Kuiyong, et al. Journal of Macromolecular Science, Part B:Physics, 2012, 51:269–274.
- [50] Huang Xiaobin, et al. Science in China Series B:Chemistry, 2008, 51(1):46–50.
- [51] 贺梦,等. 复合材料学报, 2019, 36(3):584–591.
He Meng, et al. Acta Materiae Compositae Sinica, 2019, 36(3): 584–591.
- [52] Zhang Yabin, et al. Journal of Applied Polymer Science, 2020, doi: 10.1002/app.49727.
- [53] 李军强,等. 火炸药学报, 2019, 42(3):289–294.
Li Junqiang, et al. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2019, 42(3):289–294.
- [54] 李鹏,等. 化工新型材料, 2019, 47(7):107–110.
Li Peng, et al. New Chemical Materials, 2019, 47(7):107–110.
- [55] 刘建利,等. 现代化工, 2019, 39(z1):115–119.
Liu Jianli, et al. Modern Chemical Industry, 2019, 39(z1):115–119.
- [56] Kuan J F, et al. Journal of Applied Polymer Science, 2004, 91(2): 697–702.
- [57] 陈国辉,等. 工程塑料应用, 2020, 48(4):129–133, 138.
Chen Guohui, et al. Engineering Plastics Application, 2020, 48(4): 129–133, 138.
- [58] 肖啸,等. 火炸药学报, 2020, doi:10.14077/j.issn.1007-7812. 202004005.
Xiao Xiao, et al. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2020, doi:10.14077/j.issn.1007-7812.202004005.
- [59] 肖啸,等. 火炸药学报, 2020, doi:10.14077/j.issn.1007-7812. 202004006.
Xiao Xiao, et al. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2020, doi:10.14077/j.issn.1007-7812.202004006.