http://pmse.scu.edu.cn

石墨纳米片的原位制备及其对聚碳酸酯/丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物阻燃复合材料低温韧性的影响

周小凤，潘 洋，吴 宏，郭少云

(先进高分子材料全国重点实验室 四川大学高分子研究所 橡塑材料复合成型技术四川省工程研究中心，四川 成都 610065)

摘要：聚碳酸酯/丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物(PC/ABS)阻燃复合材料的力学性能特别是低温韧性较低，限制了其应用。文中通过ABS高胶粉辅助球磨，利用其高韧性吸收球磨中的冲击力促进石墨(GT)的原位剥离，制备了ABS高胶粉和石墨纳米片(GNP)增韧母料，进一步与PC，ABS和阻燃剂经双螺杆挤出制备了PC/ABS阻燃复合材料。结果表明，ABS高胶粉辅助球磨GT 10 h制备得到的GNP横向尺寸3 μm，厚度10~15 nm；与不含GNP体系相比，含有0.1% GNP的复合材料拉伸强度从55.11 MPa提升至57.13 MPa，增加了3.67%；23 ℃冲击强度从42.45 kJ/m^{2}提升至50.44 kJ/m^2，增加了18.82%；特别是−30 ℃低温冲击强度从13.73 kJ/m^{2}提升至20.96 kJ/m^2，增加了52.66%；GNP在复合材料中不仅能传递应力，产生微裂纹、层间断裂及界面脱粘，而且能促进塑性变形的产生，分散和消耗能量，减少应力集中，从而提高力学性能特别是低温韧性。该研究为PC/ABS阻燃复合材料的高性能化提供了一种简单高效的策略。

关键词：聚碳酸酯；丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物；石墨纳米片；球磨；低温韧性

中图分类号：TB332 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-7555(2025)07-0084-10

聚碳酸酯(PC)具有良好的强度和韧性、透明性、耐热性、尺寸稳定性等优点，但具有熔体黏度大、加工困难、易应力开裂、缺口敏感性等缺点[1,2]；而丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物(ABS)具有较好的抗冲击强度，对缺口不敏感，易加工等优点，但也具有耐热性差，热变形温度低等缺点[3]。PC与ABS共混改性能实现优势互补[4]，对于PC而言，能提高加工性能和抗冲击强度，降低抗应力开裂性和缺口敏感性；对于ABS而言，能改善耐热性，提高拉伸强度[5,6]，因而PC/ABS共混物具有优异的综合性能，广泛应用在机械、汽车内部装饰、家电外壳、建材等领域[7,8]。但是PC/ABS共混物中ABS极易燃烧，阻燃性能较差，限制了合金的应用领域，而阻燃剂的添加会严重降低共混物的力学性能特别是低温韧性，在寒冷环境中使用时极易脆裂。通常需要添加额外的增韧剂来增韧PC/ABS，ABS高胶粉是PC/ABS阻燃复合材料常用的增韧剂[9]，但ABS高胶粉会降低复合材料的强度，且ABS高胶粉在低温时分子链的运动能力显著下降，柔性减弱，导致低温增韧效果不佳。

石墨纳米片(GNP)具有超高的强度和模量，是一种被广泛用于聚合物材料增强增韧的刚性粒子[10]。在前期研究中发现，将PP粉末与石墨(GT)共球磨剥离产生的GNP增韧PP，仅添加0.7%的GNP，PP复合材料的拉伸屈服强度和冲击强度分别提高到45.3 MPa和6.5 kJ/m^2，相对于纯PP分别提升了33.34%和33.47%[11]；通过添加还原氧化石墨烯(rGO)来增韧PC，添加0.03%的rGO时，PC复合材料达到最大的增韧效果，PC复合材料的拉伸断裂韧性提高了89%[12]。GNP能否增强PC/ABS阻燃复合材料的力学性能特别是低温韧性有待进一步研究。

在本文中，通过ABS高胶粉(高于60%的聚丁二烯含量)辅助球磨，利用其高韧性能有效吸收球磨过

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2025.0122
收稿日期：2025-03-22
基金项目：企业合作项目(23H1587)
通讯联系人：吴宏，主要从事高分子材料的先进加工与共混复合改性新原理新技术研究，E-mail: wh@scu.edu.cn

程中的冲击力,促进GT的原位剥离制备得到了ABS高胶粉和GNP增韧母料,进一步与PC,ABS和硼酸阻燃剂(H_3BO_3)经双螺杆挤出制备了PC/ABS阻燃复合材料。在复合材料中GNP不仅能传递应力,产生微裂纹、层间断裂及界面脱粘,还能促进塑性变形的产生,分散和消耗能量,减少应力集中,从而提高力学性能,特别是低温韧性。

1　实验部分

1.1　试剂与仪器

PC:牌号CH-65,中沙(天津)石化有限公司;ABS:牌号PA-756S,台湾奇美实业股份有限公司;H_3BO_3:上海阿拉丁生化科技股份有限公司;ABS高胶粉:牌号HR-181,韩国锦湖公司;GT:平均粒径为10~15 μm,密度为2.2 g/cm^3,青岛星远石墨有限公司;石墨烯(GE):上海麦克林生化科技股份有限公司。

球磨机:全方位行星式球磨机,南京南大仪表厂;双螺杆挤出机:型号SHJ20B,南京杰恩特机电有限公司;注塑机:型号MA600,海天机械有限公司;缺口制样机:型号ZQK-20,承德大华试验机有限公司;数显式摆锤冲击试验机:型号XJUD,承德金和仪器制造有限公司;拉伸试验机:型号CMT4104,美特斯工业系统。

1.2　实验过程

1.2.1　GNP的制备:将ABS高胶粉与GT按照质量比1:1放入球磨机中机械混合,球磨机转速为500 r/min,球料比为20:1,球磨时间分别为7.5 h,10 h,12.5 h,15 h和17.5 h。得到5种混合物,记为"ABS-GNPx","x"=7.5 h,10 h,12.5 h,15 h,17.5 h。

1.2.2　PC/ABS阻燃复合材料的制备:实验前先将PC置于120 ℃真空烘箱内,ABS和ABS高胶粉置于80 ℃真空烘箱中,至少干燥4 h,以去除原料中的水分。然后将PC,ABS及其他试剂按照比例混合(见Tab.1),经双螺杆挤出机挤出造粒得到母粒,各段温度分别设为230 ℃,240 ℃,250 ℃和250 ℃,转速为200 r/min。将母粒置于100 ℃真空烘箱内干燥至少4 h后,再通过注塑机进行注塑成型,各段温度设定为230 ℃,240 ℃,250 ℃和250 ℃。

1.3　测试与表征

1.3.1　拉曼光谱分析:拉曼光谱可用于分析GT,GE及GNP的层数、缺陷及无序度等。采用in Via Reflex激光拉曼光谱仪(英国Renishaw公司)对GT及ABS高胶粉辅助剥离GT后制备的GNP进行分析测试,测试时的激光波长为532 nm,激光功率为0.15 mW,扫描范围为800~3000 cm^{-1}。

1.3.2　热失重分析:通过热重分析仪(TGA, NETZSCH TG209F1, Germany)对GT及ABS-GNP粉末样品进行测试。温度范围是25~1000 ℃,升温速度为10 ℃/min,空气气氛。

1.3.3　形貌表征:通过场发射扫描电镜(SEM ,FEI NavoNanoSEM450 ,USA)观察GT,ABS-GNP粉末的形态和PC/ABS复合材料的冲击断面形貌及填料的分散情况,加速电压是20 kV。观察之前,样品在真空中进行镀金操作。通过透射电子显微镜(TEM , Thermo Scientific , Talos F200i)表征GT,GE和GNP

Tab. 1 Formulas of samples

	w(PC)/%	*w*(ABS)/%	*w*(ABS high-rubber powder)/%	*w*(H_3BO_3)/%	*w*(GNP)/%	*w*(GT)/%	*w*(GE)/%
PC/ABS	70	15	5	10			
PC/ABS-GT	69.9	15	5	10		0.1	
PC/ABS-GE	69.9	15	5	10			0.1
PC/ABS-GNP7.5 h	69.9	15	5	10	0.1		
PC/ABS-GNP10 h	69.9	15	5	10	0.1		
PC/ABS-GNP12.5 h	69.9	15	5	10	0.1		
PC/ABS-GNP15 h	69.9	15	5	10	0.1		
PC/ABS-GNP17.5 h	69.9	15	5	10	0.1		

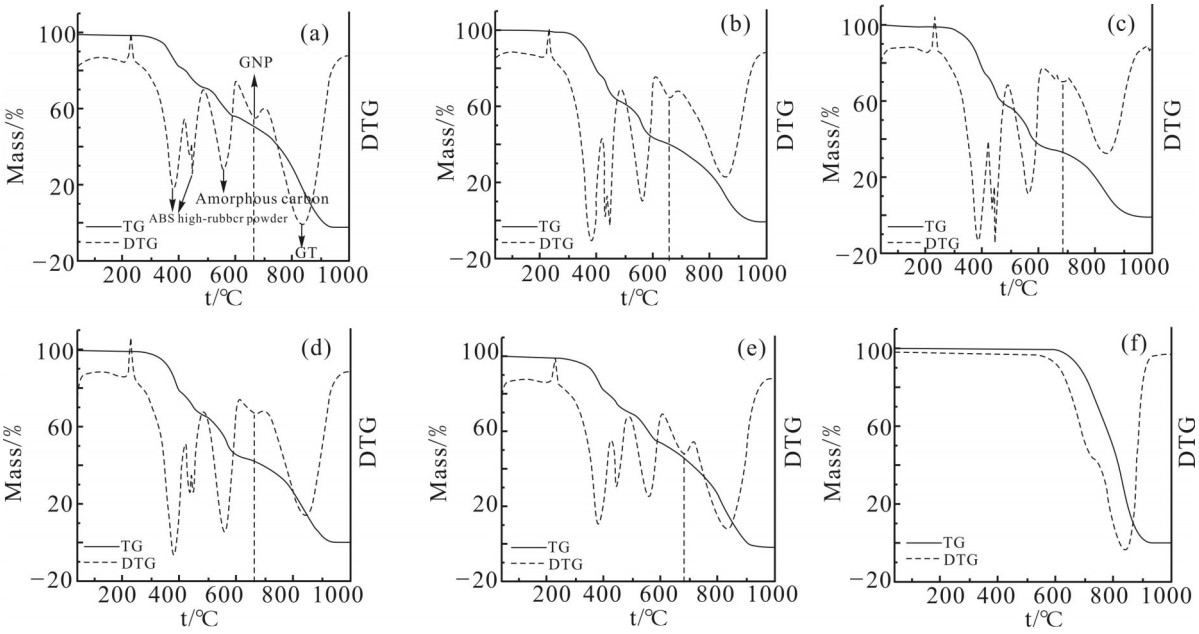


Fig. 1 Mass-loss and its first derivative curves with respect to temperature
(a) ABS-GNP7.5 h; (b) ABS-GNP10 h; (c) ABS-GNP12.5 h; (d) ABS-GNP15 h; (e) ABS-GNP17.5 h; (f) GT

在复合材料中形貌及分散状况。

1.3.4 原子力学显微镜表征：通过原子力学显微镜（AFM, Anasys Instrument, Santa Barbara，CA）表征ABS高胶粉与GT共球磨得到的GNP的纵向尺寸。

1.3.5 拉伸性能测试：将注塑后的样条置于万能试验机上测试材料的拉伸性能。实验条件参考ASTM D638标准。其中，拉伸速率设置为50 mm/min，每组样品至少5个数据点。

1.3.6 冲击性能测试：将注塑后的样条置于缺口制样机上，参考国标GB/1843-2008，制得尺寸为80 mm×10 mm×4 mm，缺口深度为2.0 mm的样条。而后置于摆锤冲击试验机上（低温冲击实验时，需先将样条置于－30 ℃超低温冰箱中冷冻至少24 h），测量其缺口冲击强度，其中摆锤选择为5.5 J。

1.3.7 氧指数测试：采用JF-3型极限氧指数（LOI）测定仪（南京江宁分析仪器有限公司）进行氧指数测试。样条尺寸为80 mm×10 mm×4 mm。

1.3.8 垂直燃烧测试：采用南京市江宁区分析有限公司CZF-3型水平垂直燃烧测定仪（UL-94）对试样的垂直燃烧性能进行测试。样条尺寸为125 mm×13 mm×1.6 mm。

2 结果与讨论

2.1 GNP的形态结构

由于GT，GE和GNP的热稳定性和结构特性在加热过程中会表现出独特的质量变化行为，通过热重分析表征了ABS高胶粉-GNP粉末中GNP的形态。无定形碳的$T_{1/2}$温度范围在550~630 ℃，GNP的$T_{1/2}$温度范围在630~730 ℃，GT的$T_{1/2}$温度范围在830~1000 ℃。Fig.1(a~e)为不同球磨时间的ABS高胶粉-GNP共混物的热重图，Fig.1(f)为GT的热重图，由Fig.1中的DTG曲线可知，380 ℃，430 ℃及440 ℃处为ABS高胶粉分解产生的峰；550 ℃左右的峰为无定形碳的分解峰，即无定形碳的$T_{1/2}$；660 ℃左右的峰为GNP的分解峰，即GNP的$T_{1/2}$；830 ℃左右的峰为GT的分解峰，即GT的$T_{1/2}$，Fig.1(a~e)都产生了GNP的分解峰，说明球磨时间从7.5 h

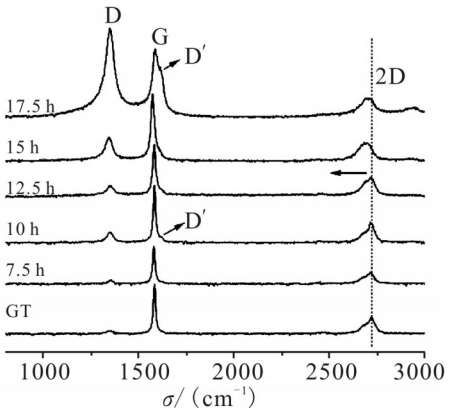


Fig. 2 Raman spectra of GT and ABS protected milling of GT with different ball milling time

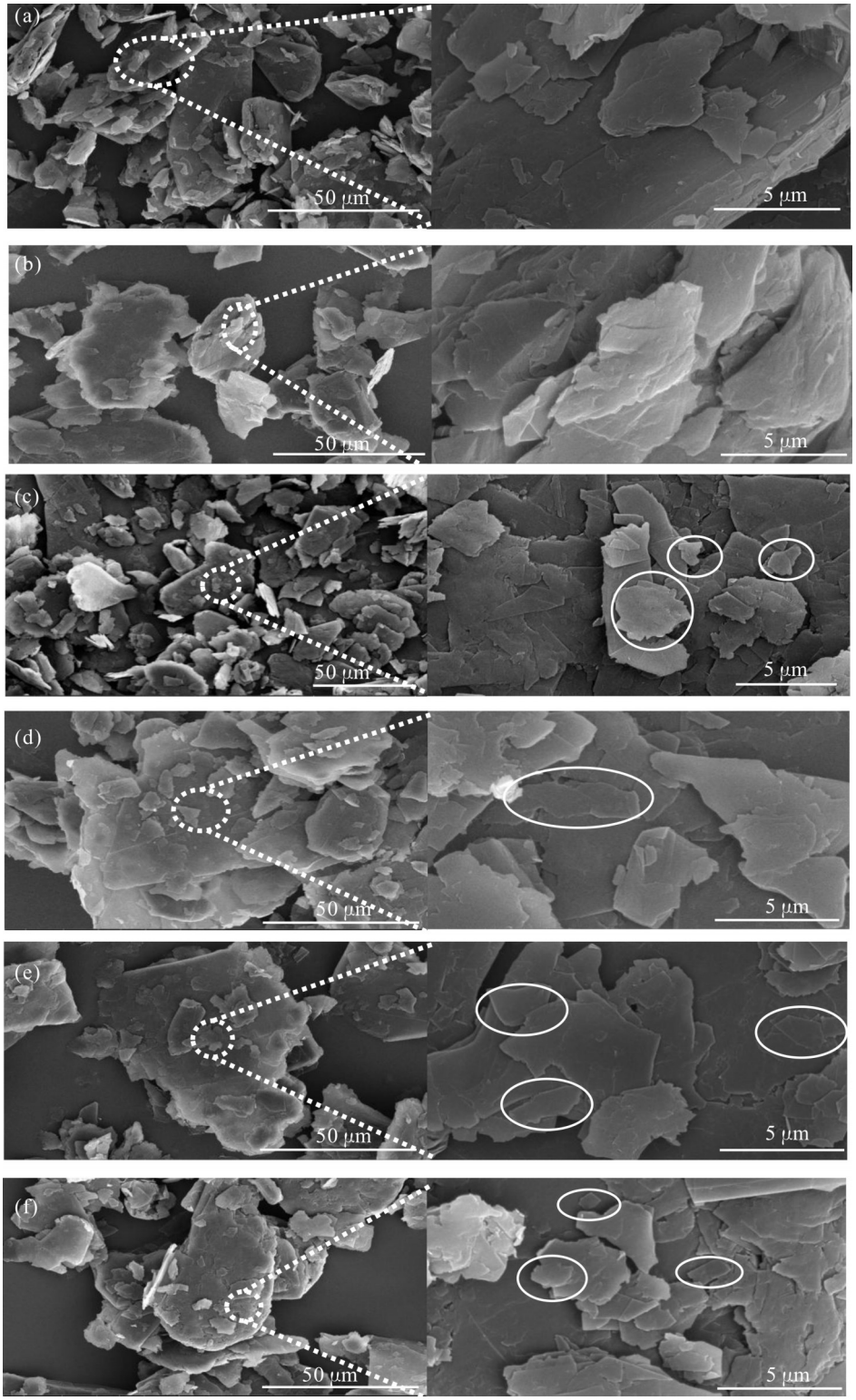


Fig. 3 SEM images of (a) GT, (b) ABS-GNP7.5 h, (c)ABS-GNP10 h, (d) ABS-GNP12.5 h, (e)ABS-GNP15 h and (f)ABS-GNP17.5 h

到17.5 h都能产生GNP，即ABS高胶粉能辅助球磨剥离GT产生GNP。

为了进一步研究GNP的形态结构，对GT和ABS高胶粉-GNP粉末进行拉曼分析。如Fig.2所示，可以观察到1350 cm^{-1}左右处的D峰，1580 cm^{-1}左右处的G峰，1620 cm^{-1}左右的D'峰，2710 cm^{-1}左右的2D峰。随着球磨时间的延长，I_D/I_G值逐渐增大，表明对GT的剥离越明显，GNP结构缺陷逐渐增多，且D'峰的强度增加，其是少层GT存在的特征，此外，2D峰也逐渐左移，由不对称变为对称，都表明少层GT的存在。在球磨时间为10 h时观察到D'峰的出现，2D峰发生移动，且I_D/I_G值较低，说明球磨时间为10 h时能剥离产生GNP，且此时GNP的结构缺陷较小。

为了了解ABS高胶粉辅助球磨GT在不同球磨时间时微观形貌的变化，对ABS高胶粉-GNP粉末及GT进行了SEM分析。如Fig.3(a)所示，能明显看到GT的层状堆叠结构，在放大图中能看见GT上也存在少量的GNP。对比Fig.3(a~f)可知，随着球磨时间的延长，共混物中的GNP明显增多，且Fig.3(c~f)能明显看见产生了较多GNP，这是由于ABS高胶粉中存在高含量的聚丁二烯相，使其具有高韧性，能吸收球磨中产生的冲击力，使GT主要受剪切力作用，减弱GT的过分破碎和细化，从而更有效地剥离GNP。球磨时间较短时，GT的剥离效果较差，但球磨时间过长，GT的破碎程度加大，横向尺寸明显降低，Fig.3(c)在较短时间内产生了较高质量的GNP，即ABS高胶粉辅助球磨GT 10 h时能高效剥离出较高质量的GNP。

为了进一步确定GNP的层厚度，对ABS高胶粉辅助球磨剥离GT 10 h制备的GNP进行AFM表征。Fig.4(a)和Fig.4(b)分别是GNP的AFM图像（5 μm×5 μm）、高度剖面的分布图，从Fig.4(a)可以看出，GNP的横向尺寸大约为3 μm，纵向尺寸主要分布在10~15 nm，有极少部分大于20 nm，这证实了ABS高胶粉辅助球磨剥离GT能产生横向尺寸大约3 μm，纵向尺寸在10~15 nm的GNP。

2.2 GNP在阻燃复合材料中的微观形貌

采用双螺杆挤出的方法制备了PC/ABS复合材料，为了探究GT，GE及ABS高胶粉辅助剥离制备的GNP在复合材料中的形貌及分散状态，采用SEM对其进行表征。如Fig.5所示，能观察到复合材料以PC为连续相，ABS为分散相，且GT，GE及GNP都主要分布在PC相中。如Fig.5(a)所示，GT在复合材料中有较大的厚度，且层状结构的GT容易在复合材料中聚集。Fig.5(b)中，GE的尺寸较小，但其片层之间的π-π共轭效应和大的比表面积使其在复合材料中存在聚集现象。如Fig.5(c)所示，GNP的厚度仍较大，剥离效果较差；Fig.5(d)中GNP具有较大横向尺寸，较小纵向尺寸，且在复合材料中的分散性较好；而Fig.5(e)中GNP的横向与纵向尺寸都较小；即随着球磨时间的延长，GNP的尺寸逐渐减小，厚度也逐渐变薄，表明球磨时间为10 h时制备的GNP长径比较大，厚度较薄，且在复合材料中的分散性较好。

为了进一步探究GT，GE及ABS高胶粉辅助剥

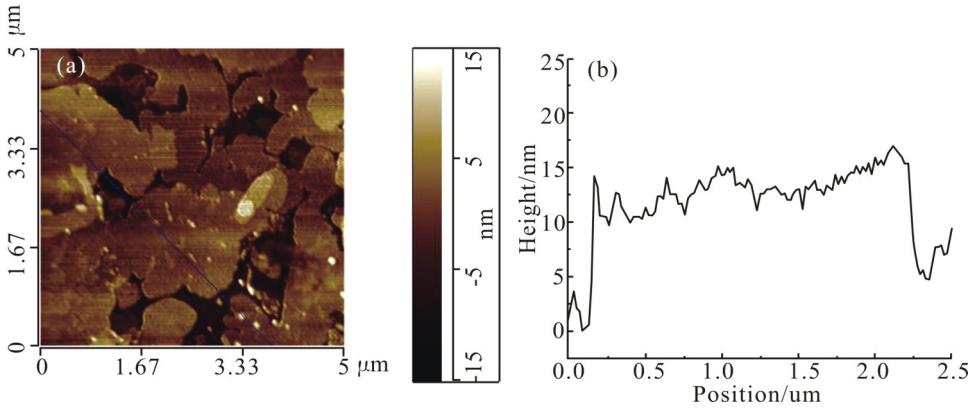


Fig. 4 (a) AFM image of GNP and (b) height profile measured from the AFM image of GNP

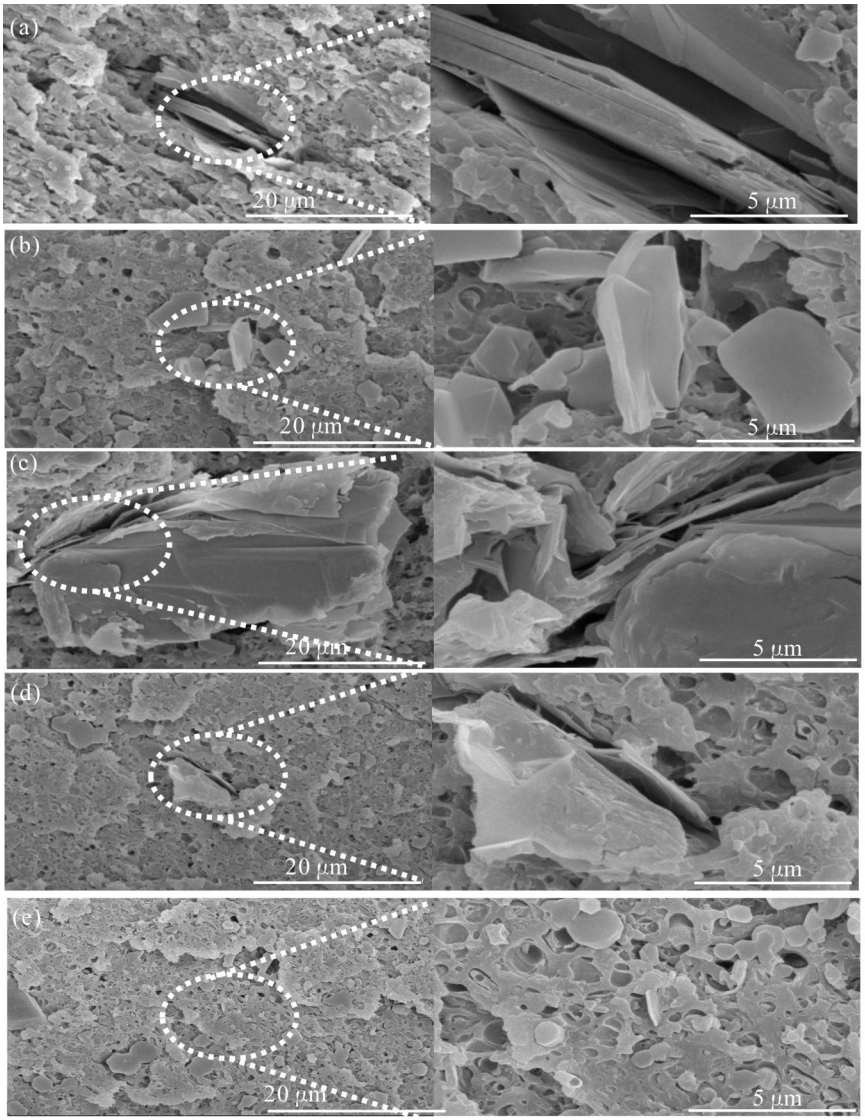


Fig. 5 SEM images of the fracture surface after the notched Izod impact test for (a) PC/ABS-GT, (b) PC/ABS-GE, (c)PC/ABS-GNP7.5 h, (d) PC/ABS-GNP10 h and (e) PC/ABS-GNP17.5 h

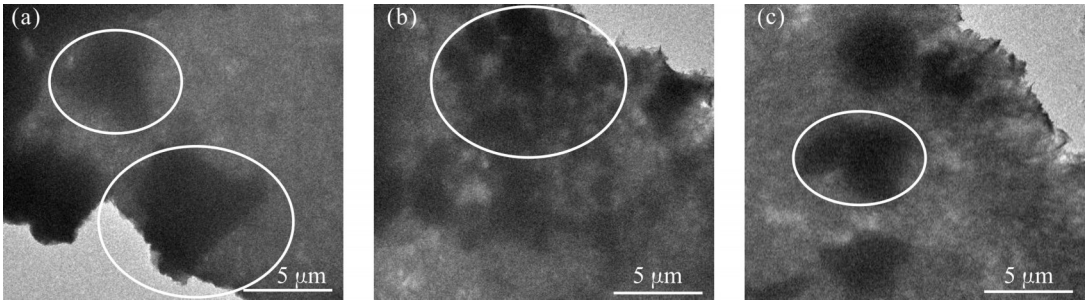


Fig. 6 TEM images of composite materials: (a) PC/ABS-GT; (b) PC/ABS-GE; (c) PC/ABS-GNP10 h

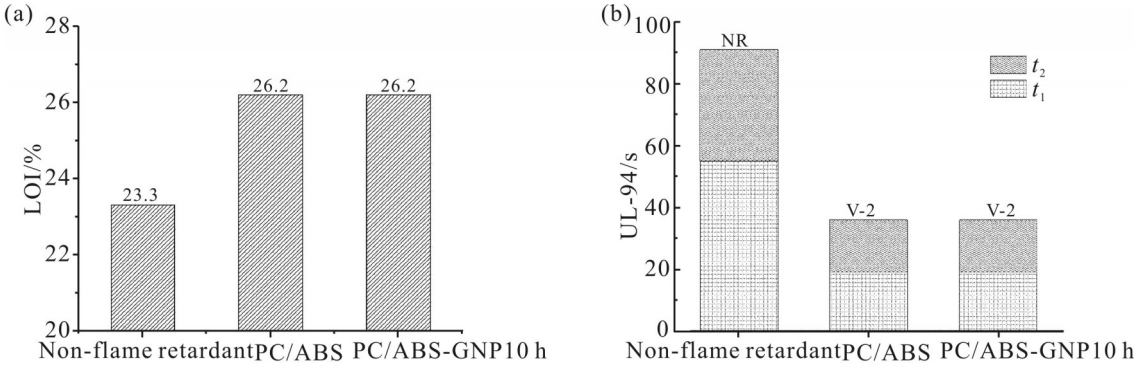


Fig. 7 (a) LOI and (b) UL-94 results of PC/PBS composites

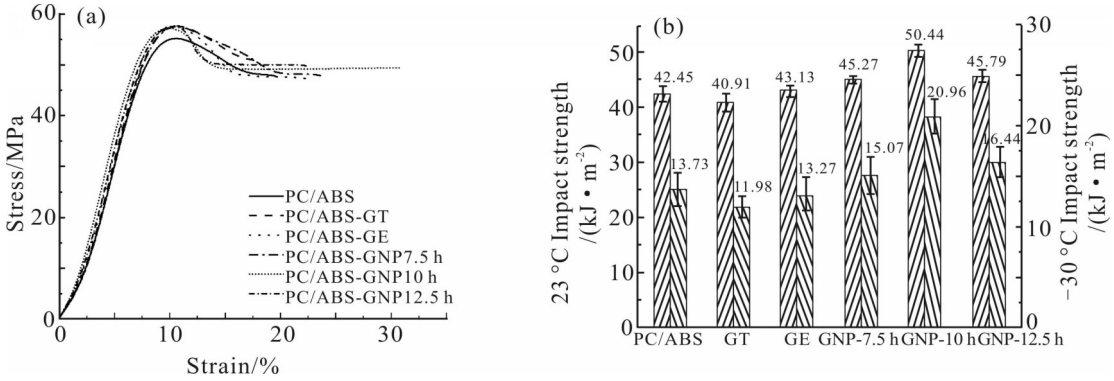


Fig. 8 (a) Stress- strain curves and (b) impact strength of PC/ABS composites

离制备的GNP在复合材料中的形貌及分散状态，对分别含GT，GE及ABS高胶粉辅助剥离10 h制备GNP的复合材料进行了TEM表征。如Fig.6(a)所示，GT在复合材料中具有较大的横向尺寸，Fig.6(b)中，GE的尺寸较小，但由于其片层之间的π-π共轭效应具有较强的聚集现象，而Fig.6(c)中，GNP横向尺寸约为5 μm，且相对于GT和GE而言，其分散性最好。即球磨时间为10 h时制备的GNP在复合材料中具有较好的分散性。

2.3 PC/ABS阻燃复合材料的阻燃性能

为了探究GNP的添加对复合材料阻燃性能的影响，对没有添加阻燃剂、添加阻燃剂H_3BO_3及同时添加H_3BO_3和GNP的复合材料进行了氧指数和垂直燃烧测试。如Fig.7(a)和Fig.7(b)所示，没有添加H_3BO_3时，复合材料的LOI达到23.3%，UL-94测试中复合材料的燃烧时间较长，而添加了10%的H_3BO_3后，复合材料的LOI提高到26.2%，且复合材料的燃烧时间明显缩短，达到V-2等级，这是由于H_3BO_3在高温时会熔化形成玻璃状的B_2O_3覆盖在材料表面，且能促进碳层的形成，隔绝氧气，保护复合材料免受热和空气的影响，此外，H_3BO_3燃烧时能释放结晶水吸收热量，降低表面温度。添加0.1%GNP后，复合材料的LOI和UL-94性能没有变化，即GNP的添加不会影响复合材料的阻燃性能。

2.4 PC/ABS阻燃复合材料的力学性能

如Fig.8(a)所示，增韧母料中分别添加GT，GE和GNP时，复合材料的强度均增加，这是由于GT，GE及GNP都具有极高的模量和强度，对基体起到增强作用。在Fig.8(a)中，含有GT的PC/ABS复合材料的断裂伸长率最低，比无GNP时断裂伸长率更低，这是由于在拉伸载荷的作用下，分子链在滑移过程中会被GT层阻碍，使得复合材料内部产生应力集中，导致断裂伸长率迅速降低。而添加GE及GNP样品的断裂伸长率都有不同程度地提高，是由于它们具有二维片状结构和高比表面积，这种结构可以有效分散应力，提高材料的韧性和延展性。但GE的表面惰

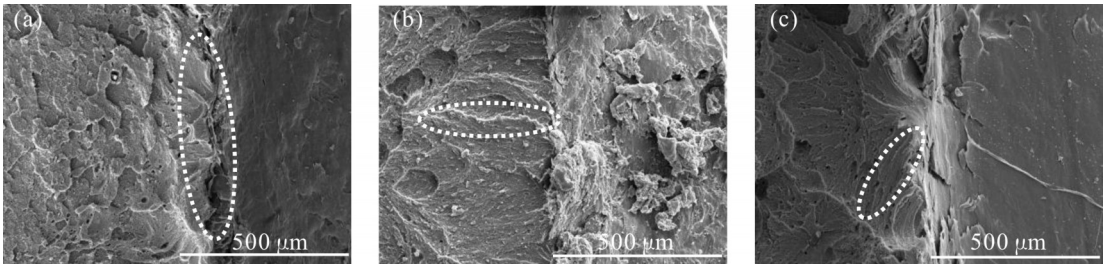


Fig. 9 SEM images of the impacted fracture surface near the notch tip of (a) PC/ABS without high rubber content ABS and GNP, (b) PC/ABS and (c) PC/ABS-GNP10 h

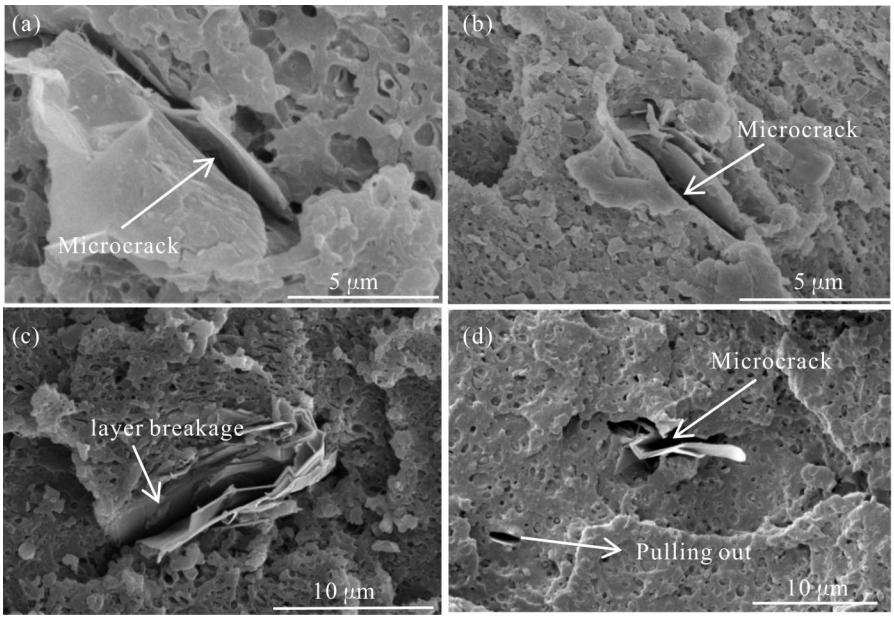


Fig. 10 SEM images of the morphology of GNP on the impacted fracture surface of PC/ABS-GNP10 h composites: (a, b) microcrack of GNP in composite materials; (c) layer breakage of GNP in composite materials; (d) pulling out and microcrack of GNP in composite materials

性及片层之间的π-π堆叠作用使其在基体中难以均匀分散,极易团聚,导致断裂伸长率的增加受限。而GNP的团聚较少,使其能将应力均匀传递到基体中,减少局部应力集中,从而提高断裂伸长率。在球磨时间为10 h时对断裂伸长率的提升最佳,这是因为在之前的拉曼、热重、电镜等表征中证实,在该时间下对GT的剥离效果最好,能更有效地分散应力。

如Fig.8(b)所示,复合材料的－30 ℃冲击强度和23 ℃冲击强度与断裂伸长率具有相同的规律。低温条件下的冲击强度比常温大幅降低,是由于低温环境下,分子链的运动能力降低,不能有效地消耗和分散能量。含GT的PC/ABS复合材料韧性最低,这是由于大尺寸的GT在复合材料中容易形成应力集中点,导致其韧性降低。此外,GE之间的高表面能及范德华力使其在复合材料中易团聚,对复合材料的增韧效果较差。而添加GNP的增韧母料,复合材料的常、低温冲击韧性都有所提升,这是由于GNP能有效传递应力,且在内部形成微裂纹、层间断裂及界面脱粘,耗散能量,从而减少应力集中。球磨时间为10 h对复合材料低温韧性提升最明显,这是由于在该球磨时间下剥离的GNP具有较大的长径比及较小的厚度,能更有效的传递和分散应力。证实了含GNP的增韧母料能显著提高复合材料的力学性能,特别是能提高材料的低温韧性。

2.5　GNP对PC/ABS阻燃复合材料的增韧机理

为了研究GNP在PC/ABS阻燃复合材料中的增韧机理,用SEM表征了未添加增韧母料(ABS高胶粉及GNP, Fig.9(a))、仅添加ABS高胶粉为增韧母料

(Fig.9(b))及以ABS高胶粉-GNP粉末作为增韧母料(Fig.9(c))的复合材料的冲击断裂面。对比可知,Fig.9(a)中产生的塑性变形最少,且局限于在尖端附近,Fig.9(b)中产生了较多塑性变形,区域相较于Fig.9(a)中更广,而Fig.9(c)中产生的塑性变形最多,且相对于Fig.9(a)和Fig.9(b),塑性变形更密集。塑性变形可以吸收能量、延缓裂纹扩展,从而提高材料的冲击韧性,即塑性变形越多,复合材料的冲击韧性越强,这与力学性能测试结果相符合。表明ABS高胶粉在复合材料中通过产生塑性变形消耗能量,而GNP能促使复合材料产生更多塑性变形,减少应力集中,从而提高复合材料的冲击韧性。

用SEM表征GNP在冲击断面上的形貌。Fig.10(a~d)为PC/ABS-10 h样品在冲击断面处GNP的形貌图。从Fig.10(a~d)中可知,大多GNP具有较大横向尺寸及较薄厚度,能有效传递应力,此外,可以发现GNP在断面中形成了微裂纹,能消耗冲击过程的能量,提高冲击韧性;从Fig.10(c)中,还能发现GNP发生了层断裂,复合材料能通过GNP的层断裂吸收冲击能量;从Fig.10(d)中,发现GNP与基体界面脱粘,这种界面行为可以吸收能量,减少应力集中,提高冲击韧性。即GNP在复合材料中能有效传递应力,且还能通过产生微裂纹、GNP层断裂及GNP的界面脱粘消耗能量,从而对复合材料进行增韧。

3 结论

PC/ABS阻燃复合材料的力学性能特别是低温韧性的提升较困难。本文通过ABS高胶粉与GT共球磨促进GT原位剥离,制备了高韧性ABS高胶粉混合刚性粒子GNP增韧母料。GNP在复合材料中能传递应力,产生微裂纹、层间断裂及界面脱粘,促进塑性变形的产生,从而分散和消耗能量,在不影响复合材料阻燃性能的同时提升复合材料的力学性能,特别是低温韧性。该研究为高性能阻燃复合材料的工程化制备提供了可行方案,尤其在要求低温韧性的应用领域(如汽车、电子电器等)具有重要价值。本文的主要结论如下。

(1)ABS高胶粉与GT质量比为1:1,球磨时间10 h,剥离得到的GNP横向尺寸约3 μm,纵向尺寸在10~15 nm。

(2)在PC/ABS阻燃复合材料中添加0.1%球磨10 h原位剥离GT制备得到的GNP,复合材料的拉伸强度从55.11 MPa提升至57.13 MPa,增加了3.67%;23 ℃冲击强度从42.45 kJ/m^{2}提升至50.44 kJ/m^2,增加了18.82%;−30 ℃低温冲击强度从13.73 kJ/m^{2}提升至20.96 kJ/m^2,增加了52.66%。

参考文献:

[1] Zuo Y, Tang Q, Liu M, *et al*. Effect of polybutadiene grafted methyl methacrylate copolymer on the mechanical performance of PC/ABS composites[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2024, 141: e56111.

[2] 李一搏, 盖景刚. 高透明耐溶剂性聚碳酸酯合金材料的制备[J]. 高分子材料科学与工程, 2024, 40(6): 33-38.
Li Y B, Gai J G. Preparation of high transparent solvent resistant polycarbonate alloy material[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2024, 40(6): 33-38.

[3] Nam Y, Lee S, Jee S M, *et al*. High efficiency upcycling of post-consumer acrylonitrile- butadiene- styrene via plasma- assisted mechanochemistry[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 480: 10.

[4] Pandim T, Oliveira K S D, Araújo J A, *et al*. Indentation, creep and axial – torsional fretting wear analysis of PC/ABS blends[J]. Tribology International, 2023, 188: 15.

[5] Machmud M N, Omiya M, Inoue H, *et al*. Role of size of rubber particles on failure mode and impact resistance characteristics of PC/ABS blends and their ABS constituents with a higher rubber content[J]. Defect and Diffusion Forum, 2020, 402: 1-6.

[6] Bano S, Iqbal T, Ramzan N, *et al*. Study of surface mechanical characteristics of ABS/PC blends using nanoindentation [J]. Processes, 2021, 9: 637.

[7] Janaithanan V, Stein R S, Garrett P D. Effect of oligomers and acrylonitrile content on the interfacial adhesion between PC and SAN[J]. Journal of Polymer Science Part B, 1993, 31: 1995-2001.

[8] 李连荣, 郑晓茜, 刘永超, 等. PC/ABS共混材料的制备及性能研究[J]. 塑料科技, 2024, 52(8): 24-27.
Li L R, Zheng X X, Liu Y C, *et al*. Preparation and performance study of PC/ABS blends[J]. Plastics Science & Technology, 2024, 52(8): 24-27.

[9] Mohammad W M W, Ali E A G E, Abdullah M A A, *et al*. Investigation on mechanical, electrical and morphological of high-density polyethylene (HDPE) reinforced with different particle size and composition of graphene nanoplatelets (GNP)[J]. Digest

Journal of Nanomaterials & Biostructures (DJNB), 2024, 19: 41-52.

[10] 汪国美, 张阳, 吴宏, 等. 石墨纳米片的原位分散及对聚丙烯力学性能的影响[J]. 高分子材料科学与工程, 2023, 39(7): 48-55.
Wang G M, Zhang Y, Wu H, *et al*. In-situ dispersion of graphite nanosheets and its effect on the mechanical properties of polypropylene[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2023, 39(7): 48-55.

[11] Wang J, Li C, Zhang X, *et al*. Polycarbonate toughening with reduced graphene oxide: toward high toughness, strength and notch resistance[J]. Chemical Engineering Journal, 2017, 325: 474-484.

[12] 王红莲, 郭英健, 张阳, 等. 干法球磨原位剥离石墨对聚苯乙烯复合材料导热和力学性能的影响[J]. 高分子材料科学与工程, 2022, 38(9): 80-87.
Wang H L, Guo Y J, Zhang Y, *et al*. Effect of in-situ exfoliated graphite by dry ball milling on thermal conductivity and mechanical properties of polystyrene composites[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2022, 38(9): 80-87.

In Situ Preparation of Graphite Nanosheets and Their Effect on the Low-Temperature Toughness of Polycarbonate/Acrylonitrile-Butadiene-Styrene Copolymer Flame-Retardant Composites

Xiaofeng Zhou, Yang Pan, Hong Wu, Shaoyun Guo

(*National Key Laboratory of Advanced Polymer Materials, Polymer Research Institute , Sichuan Provincial Engineering Research Center of Plastic/Rubber Complex Processing Technology, Sichuan University, Chengdu 610065, China*)

ABSTRACT: The mechanical properties, especially the low-temperature toughness, of polycarbonate/acrylonitrile-butadiene- styrene copolymer (PC/ABS) flame- retardant composites are relatively low, which limit their application range. In this study, ABS high- rubber powder was used to assist ball milling, leveraging its high toughness to absorb the impact force during milling process, thereby promoting the in-situ exfoliation of graphite (GT) to prepare a toughening masterbatch containing ABS high-rubber powder and graphite nanosheets (GNP). This masterbatch was further blended with PC, ABS and flame retardants via twin-screw extrusion to fabricate PC/ABS flame-retardant composites. The results show that GNP prepared by ball milling GT for 10 h with ABS high-rubber powder assistance has a lateral size of 3 μm and a thickness of 10~15 nm. Compared with the system without GNP, the tensile strength of the composite material containing 0.1% GNP increases from 55.11 MPa to 57.13 MPa, an increase of 3.67%; the impact strength at 23 ℃ increases from 42.45 kJ/m^2 to 50.44 kJ/m^2, an increase of 18.82%; especially, the low-temperature impact strength at -30℃ increases from 13.73 kJ/m^2 to 20.96 kJ/m^2, an increase of 52.66%. GNP in the composite not only transfers stress, inducing microcracks, layer breakage, and interfacial debonding, but also promotes plastic deformation, disperses and consumes energy, reduces stress concentration, thereby enhancing the mechanical properties, especially the low- temperature toughness. This study provides a simple and efficient strategy for the high-performance development of PC/ABS flame-retardant composites.

Keywords: polycarbonate; acrylonitrile- butadiene- styrene copolymer; graphite nanosheets; ball milling; low-temperature toughness