

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2018.04.019

MWCNTs/rGO 纳米杂化材料改性氨纶的流变性能

孔庆宁, 罗钟琳, 王标兵

(常州大学材料科学与工程学院, 江苏常州 213164)

摘要: 采用一步水热还原法制备了多壁碳纳米管(MWCNTs)/还原氧化石墨烯(rGO)纳米杂化材料,进一步通过溶液混合方法将纳米杂化材料与氨纶混合制备了氨纶/MWCNTs/rGO(NCs)溶液,使用旋转流变仪研究了NCs溶液浓度和温度对其静、动态流变行为的影响。结果表明,高浓度的NCs溶液黏度对剪切速率较为敏感,产生明显的剪切变稀现象,但在低剪切速率下其黏度仍有较宽的稳定平台;随温度降低,浓度为10%的NCs溶液黏度升高,剪切变稀现象更为明显,当温度低于60℃时,黏度的稳定平台变窄;NCs溶液在角频率较低时具有较好的纺丝性能,角频率大于200 rad/s时,储能模量高于损耗模量,纺丝时容易造成出口胀大堵塞纺丝孔,对于纺丝不利;NCs溶液的非牛顿指数随着温度升高而升高,与剪切变稀随温度升高而减弱的现象一致。由静、动态流变测试结果综合分析,浓度为10%的NCs溶液适宜纺丝的温度应该大于60℃,剪切速率应低于20 s⁻¹。

关键词: 氨纶;多壁碳纳米管;还原氧化石墨烯;流变性能;黏度

中图分类号: TQ323.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2018)04-0098-05

Rheological Properties of Spandex Modified by MWCNTs/rGO Nano-hybrid Materials

Kong Qingning, Luo Zhonglin, Wang Biaobing

(Department of Materials Science and Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

Abstract: Multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs)/reduced graphene oxide (rGO) nano-hybrid materials were prepared by one-step hydrothermal reduction method. The spandex/MWCNTs/rGO (NCs) solutions were further prepared by solution mixing method. The effects of solution concentration and temperature on the statics and dynamic rheological behaviors of the NCs solutions were investigated by rotating rheometer. The results show that the viscosity of NCs solution with high concentration is sensitive to shear rate and produces obvious shearing thinning phenomenon, however, at low shear rate, its viscosity still has a wide stable platform. With the decrease of temperature, the viscosity of NCs solution with 10% concentration increases, the shear thinning phenomenon is more obvious. When the temperature is lower than 60℃, the stable platform of viscosity becomes narrower and the NCs solution has better spinning performance when the angular frequency is lower. When the angular frequency is more than 200 rad/s, the storage modulus is higher than the loss modulus, which causes the die swell easily to block the spinning hole when spinning. The non-Newtonian exponent of NCs solution is increased with the increase of temperature, which is consistent with the phenomenon that shearing thinning decreases with the increase of temperature. According to the results of statics and dynamic rheological, the suitable spinning temperature of NCs solution with 10% concentration should be more than 60℃, and the shear rate should be lower than 20 s⁻¹.

Keywords: spandex; multi-walled carbon nanotubes; reduced graphene oxide; rheological property; viscosity

近些年,科研工作者们对导电纤维做了大量的研究,对于不同领域的需求促使其朝着高性能化、高功能化发展^[1-2]。在柔性聚合物基体中添加纳米导电填料,通过静电纺丝、纺织等手段制备聚合物导电

纤维是实现导电纤维高性能化的常用手段之一。聚氨酯纤维(氨纶)是由氨基甲酸酯制备的具有超强弹性的纤维材料,经常用来作为柔性基体材料,由其制备的导电纤维具有更加优异的电气性能、独特的

通讯作者: 王标兵,教授,主要从事高性能和功能化高分子材料的研究 E-mail: biaobing@cczu.edu.cn

收稿日期: 2018-02-02

引用格式: 孔庆宁,罗钟琳,王标兵. MWCNTs/rGO 纳米杂化材料改性氨纶的流变性能[J]. 工程塑料应用, 2018, 46(4): 98-102, 112.

Kong Qingning, Luo Zhonglin, Wang Biaobing. Rheological properties of spandex modified by MWCNTs/rGO nano-hybrid materials[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(4): 98-102, 112.

柔软舒适特征,可应用于航空部件^[3]、可穿戴智能设备^[4]、电磁屏蔽器和电子通讯装置等产品。碳纳米管^[5-6]、石墨烯^[7-8]是具有优良性能的纳米填料,研究发现使用其增强的纤维不仅具有良好的导电性能,而且强度得到大幅提升,模量提升近1倍。但碳纳米管由于粒度尺寸小、长径比大,容易相互缠绕发生团聚,石墨烯也因为片层间大的范德华力和强 $\pi-\pi$ 相互作用倾向于多层堆叠,在实际应用中受到了限制,故在将其应用于聚合物纤维前需对其进行改性处理。

研究聚合物的流变性能对纤维大规模加工生产意义重大,使用流变学原理可以了解聚合物形态、结构等信息^[9-10]。在纺丝过程中,螺杆会对纺丝液产生较高的剪切作用,溶液的流变特征会对纺丝加工过程、生产工艺条件、产品性能产生影响^[11-13]。笔者通过一步水热还原法制备了多壁碳纳米管(MWCNTs)/还原氧化石墨烯(rGO)纳米杂化材料,构建了稳定的三维网络结构,很好地解决了碳纳米材料在聚合物基体中的分散性,然后采用溶液混合的方法将纳米杂化材料与氨纶混合制备氨纶/MWCNTs/rGO(NCs)溶液。通过旋转流变仪探讨了溶液浓度和温度对NCs溶液动、静态流变性质以及非牛顿指数的影响,以便为规模化生产高性能纤维提供有效的理论指导。

1 实验部分

1.1 主要原材料

氨纶:20B0427T,新乡市伟平纺织原料有限公司;

MWCNTs:直径8~15 nm,长度30~50 μm ,纯度>90%,中国科学院成都有机化学有限公司;

可膨胀鳞片石墨:9980200,青岛天河达石墨有限公司;

浓硫酸:浓度98%,分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

浓硝酸:浓度65%,分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

过氧化氢(H_2O_2):浓度30%,分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

硅烷偶联剂KH-550:分子量221.37,国药集团化学试剂有限公司;

无水乙醇:分析纯,国药化学试剂有限公司;

N,N-二甲基乙酰胺(DMAC)、硝酸钠、水合肼、氯化钡、高锰酸钾(KMnO_4)、氢氧化钾(KOH):分析

纯,市售。

1.2 主要仪器及设备

乳化机:FA-25型,德国弗鲁克公司;

超声波清洗器:KQ-400DB型,巩义市予华仪器有限公司;

马弗炉: SX-4-10型,上海波络实验设备有限公司;

真空干燥箱: DZF-6050型,上海慧泰仪器制造有限公司;

旋转流变仪: Physica MCR-301型,奥地利Anton Paar公司。

1.3 氧化石墨烯(GO)的制备

采取改进的Humers法制备GO纳米片^[14]。首先将天然可膨胀鳞片石墨表面去污,用丙酮超声洗涤30 min后真空干燥,随后在马弗炉750℃下高温膨胀制得膨胀鳞片石墨。称取2 g制得的膨胀鳞片石墨和4 g硝酸钠一起投入到1 L的三口反应器中,加入92 mL浓硫酸,放置冰水浴(5℃以下)中,启动搅拌并分10次缓慢加入15 g KMnO_4 ,升温到45℃继续搅拌30 min,然后缓缓加入160 mL去离子水(45℃预加热),再升温到98℃继续搅拌30 min,最后将400 mL去离子水和24 mL H_2O_2 (稀释浓度到5%)加入到溶液中。待观看到反应物变成金黄色,用去离子水反复抽滤离心洗涤4~5次直到滤液pH为中性,并且检测不到硫酸根离子(用氯化钡检测)。将氧化石墨膏体分散在去离子水中超声12 h,离心取上清液制得GO分散液,浓度稀释到0.55 mg/mL。

1.4 MWCNTs功能化

称量6 g MWCNTs,加入600 mL混酸溶液中(浓硝酸/浓硫酸体积比为1/3),置于70℃水浴中,冷凝回流,搅拌反应3 h,反应完成后冷却至室温,在乙醇中沉降并使用直径为0.22 μm 的滤膜进行抽滤,用去离子水反复洗涤直至中性,在真空干燥箱中85℃烘干。研磨,过筛,即制得含羧基MWCNTs(MWCNTs-COOH)。

称取2 g干燥后的MWCNTs-COOH置于烧杯中,加入50 mL无水乙醇和0.05 g KH-550,超声(功率100 W)分散0.5 h,然后将混合液放在40℃干燥箱中恒温4 h。离心水洗几次后取出下层沉淀放在玻璃皿中,70℃抽真空干燥。干燥结束后再次研磨过筛,得到活化的MWCNTs-COOH,记作F-MWCNTs。

1.5 MWCNTs/rGO 杂化材料的制备

称取 90 mg F-MWCNTs 分散在 120 mL 去离子水中,取 60 mL GO 分散液,分别对两种分散液超声 1 h (超声功率 100 W),混合后倒入 250 mL 的三口瓶中搅拌均匀,加入 KOH 调节 pH=10,按 GO 质量的 10 倍加入水合肼,加热到 95℃ 继续搅拌 3.5 h,过滤将沉淀洗至中性,最后超声分散在 DMAC 中。

1.6 NCs 溶液的制备

称取 2 g 氨纶剪碎,放入 50 mL 玻璃烧杯,加入 20 mL DMAC 溶剂于 70℃ 下搅拌使其彻底溶解,按氨纶质量的 10% 加入 MWCNTs/rGO 杂化材料的 DMAC 分散液,得到溶液浓度为 10% 的 NCs 溶液,其中溶液浓度是指氨纶与 MWCNTs/rGO 杂化材料的总质量与溶剂 DMAC 体积的比值。按上述操作分别配制溶液浓度为 2.5%, 5%, 7.5% 的 3 种 NCs 溶液,通过超声与乳化机辅助将上述 4 种溶液分散均匀。

1.7 测试与表征

使用旋转流变仪对 NCs 溶液进行流变性能测试,测试条件如下:

(1) 静态流变测试,剪切速率范围 0.05~200 s^{-1} ,测试温度分别设定为 30, 45, 60, 75, 90℃;

(2) 动态流变测试,角频率范围 0.05~500 rad/s ,振幅为 1%,测试温度分别设定为 30, 45, 60, 75, 90℃。

2 结果与讨论

2.1 NCs 溶液的静态流变行为

图 1 示出温度为 30℃ 时溶液浓度不同时 NCs 溶液黏度随剪切速率的变化曲线。从图 1 可以看出,随着溶液浓度的升高,溶液的黏度起初变化不大,但当溶液浓度增加至 5% 及以上时,溶液黏度急剧上升,假塑行为增强^[15]。同时还可以看出,溶液浓度对溶液黏度与剪切速率的关系影响较大,在溶液浓度较低时溶液黏度随剪切速率的变化不大,但在高溶液浓度时溶液发生明显的剪切变稀现象。这是因为溶液浓度较低时, MWCNTs/rGO 杂化材料含量少,由其构建的三维网络结构较少而且不完善,与聚合物分子链之间只形成较弱的相互作用,使得链段较为容易产生松弛,表现为溶液黏度较低,在剪切作用下不易产生剪切变稀行为。但随着溶液浓度上升, MWCNTs/rGO 杂化材料构建了较完整的三维网络结构,聚合物分子链穿插在网络空间中并与杂化材料间发生缠结,使得分子链运动困难,表现为溶液黏度急剧上升,当剪切速率继续上升到一定值时,剪切力破坏了它们之间的相互作用,氨纶大分子链能够

从 MWCNTs/rGO 的三维结构中解缠结,并且在剪切作用下发生取向,从而发生较为明显的剪切变稀现象。由上述结论可知高溶液浓度 (7.5%, 10%) 且低剪切速率下,溶液黏度对剪切速率依然具有较宽的稳定平台,此条件下适宜纺丝。虽然 NCs 溶液的剪切黏度在低浓度时较为恒定,但溶液浓度太低时可纺性较差,为了探究高浓度 (10%) NCs 溶液的纺丝加工条件,以下集中研究溶液浓度为 10% 时 NCs 溶液的其它流变性能。

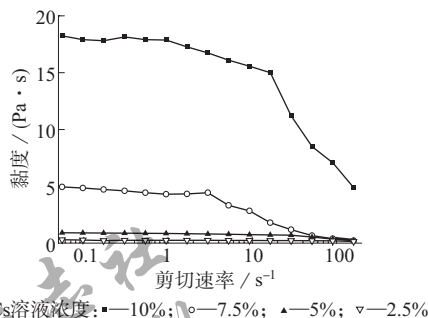


图 1 温度为 30℃ 时不同溶液浓度的 NCs 溶液黏度 - 剪切速率曲线

图 2 示出 NCs 溶液浓度为 10% 时,不同温度下溶液黏度随剪切速率变化的曲线。由图 2 可知,随着温度升高,溶液的黏度随之下降,这归因于外部温度升高时,分子吸收能量,分子热运动增加,内旋转变容易,聚氨酯分子链间的氢键相互作用也随之减弱,分子链松弛变得更为容易。同时在低温时发生更为明显的剪切变稀行为,这是因为低温时黏度更大,而高剪切力使得分子链从 MWCNTs 和 rGO 构建的三维网络结构中脱离,分子链进一步解缠结,使得黏度发生快速降低。温度在 60℃ 之前,随着温度升高,发生剪切变稀台阶向右移动^[16],这是因为温度升高分子运动变得活跃,分子链吸收能量解缠结,变得较为舒展,平台变宽,在更高的剪切作用下 (剪切速率 > 20 s^{-1}) 才能引起黏度发生变化,当超过 60℃ 后台阶变得平缓不明显。因此,浓度为 10% 的 NCs 溶液适宜纺丝的温度应该大于 60℃。

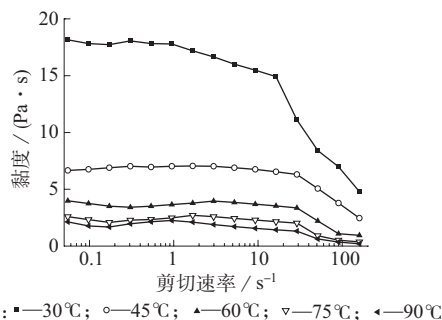


图 2 不同温度下溶液浓度为 10% 的 NCs 溶液黏度 - 剪切速率曲线

2.2 NCs 溶液的动态流变行为

图3示出NCs溶液浓度为10%时,不同温度下储能模量(G')和损耗模量(G'')与角频率(ω)的双对数曲线。从图3可以看出, G' 和 G'' 随 ω 升高而升高,同时发现 $\omega < 200$ rad/s时, $G'' > G'$,当 $\omega > 200$ rad/s后 $G'' < G'$ 。这是由于聚物流体同时表现出“切力变稀”与“弹性记忆”的行为^[17],当 $\omega > 200$ rad/s时大分子链由于外力作用发生相对位移更加明显,积累更多的弹性势能,当外力撤去后有更强的恢复能力。这对于纺丝是不易的,容易造成出口胀大堵塞纺丝孔。对比不同温度的曲线发现, G' 和 G'' 的曲线总体上均随温度升高向下移动。这归因于升温为分子链段运动提供了充足的能量,链段运动活跃,分子间的缠结打开,溶液弹性和黏度随之降低^[18],这表明升高温度对纺丝是有利的,但不能太高,否则聚合物会发生降解。

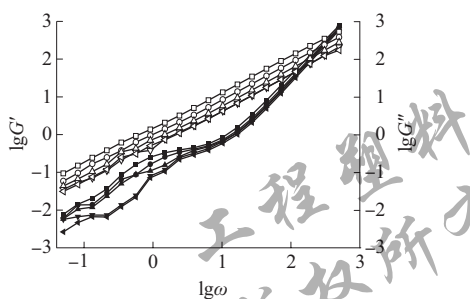


图3 不同温度下溶液浓度为10%的NCs溶液
 G' 和 G'' 与 ω 双对数曲线

可以通过式(1)、式(2)、式(3)进一步计算^[19]出复数黏度(η^*)。

$$\eta' = G'' / \omega \quad (1)$$

$$\eta'' = G' / \omega \quad (2)$$

$$\eta^* = \eta' - i\eta'' = \frac{1}{\omega}(G' - iG'') \quad (3)$$

由式(3)可知 η^* 的变化由 G'' 、 G' 和 ω 共同决定。通过对相关数据计算处理得到不同温度的 $\eta^*-\omega$ 变化曲线,如图4所示。该 $\eta^*-\omega$ 变化曲线可以有效地反映稳态剪切时剪切黏度随 ω 变化的规律。由图4可知,在不同温度时溶液都表现为剪切变稀行为,是典型的假塑性流体,这与稳态流变性能相吻合。 η^* 随着温度升高降低,这是因为温度升高,分子链各运动单元的热运动能力提高,同时由于热膨胀使得聚合物的自由体积增加,提供了更大的运动空间,有利于分子链短的运动。温度较低时表现出明显的剪切

变稀现象,随着温度升高,分子链运动能力提升,剪切变稀现象逐渐减弱。当温度达到75℃后剪切变稀的现象已经很弱。这是由于达到一定温度后链段运动能力已得到足够提升,到一定水平后不再随温度升高而继续提升,此时黏度保持稳定,很难再发生明显的剪切变稀现象。

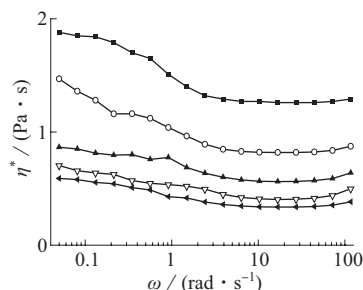


图4 不同温度下溶液浓度为10%的NCs溶液 $\eta^*-\omega$ 变化曲线

2.3 NCs 溶液的非牛顿指数分析

非牛顿指数 n 反映流体相对牛顿流体的偏离程度,它可以用双对数坐标曲线的斜率来表示。对于牛顿流体, $n=1$;对于假塑性流体,则 $n < 1$ 。假塑性流体中 n 越大,说明流体越接近牛顿流体。对于假塑性流体, n 可以使用幂律方程来表示: $\sigma = K \cdot \gamma^n$,方程式中的 K 是与温度相关的常量, γ 为剪切速率, σ 为剪切应力。图5示出溶液浓度为10%的NCs溶液在不同温度下的 $\lg\sigma - \lg\gamma$ 曲线。

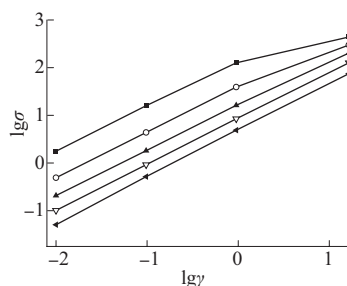


图5 溶液浓度为10%的NCs溶液在不同温度下的 $\lg\sigma - \lg\gamma$ 曲线

从图5可以看出,在高温($> 60^\circ\text{C}$)时 $\lg\sigma$ 和 $\lg\gamma$ 有很好的线性关系。由曲线斜率求得的 n 见表1,从表1数据进一步分析可知,NCs溶液的 n 随着温度升高而升高,这与之前剪切变稀随温度升高而减弱的现象一致,在低剪切速率时越接近1,越符合牛顿流体特性。这是由于聚氨酯大分子链为软硬段嵌段结构,其中软段使大分子柔性折叠出现缠结,而硬段增加了大分子间的化学结合点,当温度升高时,大分子链吸收了大量的能量,可以从三维结构中脱离开,同时大分子链之间以及大分子链与杂化材料之

间的氢键作用大大减弱,表现为黏度对剪切速率的依赖下降。

表 1 不同温度及剪切速率下 NCs 溶液的 n

剪切速率 / s^{-1}	温度 / $^{\circ}C$				
	30	45	60	75	90
0.01	0.96	0.96	0.95	0.97	0.98
0.1	0.94	0.96	0.95	0.97	0.98
1	0.67	0.84	0.92	0.96	0.97
10	0.44	0.71	0.89	0.95	0.96

3 结论

(1) 高浓度 (7.5%, 10%) 的 NCs 溶液黏度对剪切速率较为敏感, 产生明显的剪切变稀现象, 低浓度时 NCs 溶液的剪切黏度较为恒定, 但浓度太低可纺性较差。

(2) 浓度为 10% 的 NCs 溶液在温度较高 ($> 60^{\circ}C$) 及低剪切速率 ($< 20 s^{-1}$) 时, 溶液黏度对剪切速率依然具有较宽的平台, 平台区流动稳定适宜纺丝。

(3) 动态流变分析可知, NCs 溶液在角频率较低时, 具有较好的纺丝性能, 角频率大于 $200 rad/s$ 时, 储能模量高于损耗模量, 纺丝时容易造成出口膨大堵塞纺丝孔, 对纺丝不利。

(4) 由溶液 $\lg\sigma - \lg\gamma$ 曲线斜率可知, 剪切速率越低非牛顿指数越接近 1, 溶液越符合牛顿流体特性; 非牛顿指数随着温度升高而升高; 在高温 ($> 60^{\circ}C$) 时 $\lg\sigma$ 和 $\lg\gamma$ 有较好的线性变化关系, 说明升高温度有利于纺丝, 但不能太高, 否则聚合物会发生降解。

参考文献

- [1] 孙晓婷, 郭亚. 高性能纤维的性能及应用 [J]. 成都纺织高等专科学校学报, 2017, 34(2): 216–219.
Sun Xiaoting, Guo Ya. Properties and applications of high performance fiber[J]. Journal of Chengdu Textile College, 2017, 34(2): 216–219.
- [2] 吕海荣. 高性能纤维产业发展的现状、问题及建议 [J]. 纺织科学研究, 2017(6): 104–107.
Lyu Hairong. Current situation, problems and suggestions of the development of high performance fiber industry[J]. Textile Science Research, 2017(6): 104–107.
- [3] Lee J W, Hart D L, Shinn E T, et al. Multifunctional metal / polymer hybrid fiber for space and aerospace applications[J]. Mrs Proceedings, 2004, 851. doi: 10.1557/PROC-851-NN5.3.
- [4] 郝向阳, 刘吉平, 田军, 等. 聚合物基纳米复合材料的研究进展 [J]. 高分子材料科学与工程, 2002, 18(4): 38–41.
Hao Xiangyang, Liu Jiping, Tian Jun, et al. Progress of polymer-nanocomposites[J]. Polymeric Materials Science & Engineering, 2002, 12(4): 38–41.
- [5] Khan M R, Mahfuz H, Adnan A, et al. A study of mechanical behavior and morphology of carbon nanotube reinforced UHMWPE / nylon 6 hybrid polymer nanocomposite fiber[J]. Fibers & Polymers, 2014, 15(7): 1484–1492.
- [6] Cao M, Luo Z, Yang Y, et al. In-situ polymerized poly(amide imide) / multi-walled carbon nanotube composite: Structural, mechanical, and electrical studies[J]. Polymer-Plastics Technology and Engineering, 2017, 56(13): 1391–1400.
- [7] 刘伟伟. 聚合物 / 石墨烯复合材料研究进展 [J]. 工程塑料应用, 2017, 45(1): 133–136.
Liu Weiwei. Research progress of polymer / graphene composites[J]. Engineering Plastics Application, 2017, 45(1): 133–136.
- [8] 施其权, 吴焕岭, 权静, 等. 湿法纺丝制备聚丙烯腈 / 氧化石墨烯复合纤维及其抗紫外性能研究 [J]. 化工新型材料, 2017(1): 115–117.
Shi Qiquan, Wu Huanling, Quan Jing, et al. Preparation and ultraviolet resistant performance of polyacrylonitrile / graphene oxide composite fiber by wet spinning [J]. New Chemical Materials, 2017(1): 115–117.
- [9] 王文峰, 王瑞华, 张昊, 等. PPS / GF / 晶须复合材料流变性能 [J]. 工程塑料应用, 2017, 45(8): 101–105.
Wang Wenfeng, Wang Ruihua, Zhang Hao, et al. Rheological properties of PPS / GF / whisker composites[J]. Engineering Plastics Application, 2017, 45(8): 101–105.
- [10] 路广明, 邵宁宁, 曹梦, 等. 高分子链结构对聚酰胺酰亚胺溶液流变行为的影响 [J]. 工程塑料应用, 2016, 44(4): 90–93.
Lu Guangming, Shao Ningning, Cao Meng, et al. Effect of polymer chain structure on rheological behavior of polyamide imide solution[J]. Engineering Plastics Application, 2016, 44(4): 90–93.
- [11] Simonov-Emel'yanov I D, Petrov A V. Structure and visco-elastic properties of polymer solutions for electrospinning fibers[J]. Fibre Chemistry, 2017, 49(3): 161–166.
- [12] Kirkendall C K, Dandridge A. Overview of high performance fibre-optic sensing[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2004, 37(18): 197–216.
- [13] 刘杰. 防皱纤维素纤维的制备与性能研究 [D]. 青岛: 青岛大学, 2015.
Liu Jie. Study on preparation and properties of cellulose fiber with crease-resistance[D]. Qingdao: Qingdao University, 2015.
- [14] Luo Zhonglin, Cai Zengping, Wang Yanbin, et al. In situ growth of silver nanowires on the reduced graphene oxide sheets for transparent electrically conductive films[J]. Rsc Advances, 2016, 6(43): 37124–37129.

- of hydrothermal ageing on properties of high-performance composites[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2006, 29(3):301-304.
- [5] 过梅丽,肇研,谢令. 航空航天结构复合材料湿热老化机理的研究[J]. 宇航材料工艺, 2002(4):51-54.
- Guo Meili, Zhao Yan, Xie Ling. Study on hydrothermal ageing mechanisms of aerospace structural composites[J]. Aerospace Materials & Technology, 2002(4):51-54.
- [6] 张亚娟,成竹,刘海燕. 环境因素对石英纤维增强氰酸酯树脂基复合材料力学性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2013, 41(11):81-87.
- Zhang Yajuan, Cheng Zhu, Liu Haiyan. Effect of environment factors on mechanical properties of quartz fiber reinforced cyanate ester composites[J]. Engineering Plastics Application, 2013, 41(11):81-87.
- [7] 赵培仲,魏华凯,戴京涛,等. 光固化碳纤维增强树脂基复合材料的研究[J]. 工程塑料应用, 2015, 43(9):26-30.
- Zhao Peizhong, Wei Huakai, Dai Jingtao, et al. Study on carbon fiber reinforced resin matrix composites cured by UV radiation[J]. Engineering Plastics Application, 2015, 43(9):26-30.
- [8] 陈晓丽,王彤伟,蒋荣峰,等. 三种泡沫材料的吸水性及微观结构[J]. 塑料, 2003, 32(4):37-40.
- Chen Xiaoli, Wang Tongwei, Jiang Rongfeng, et al. Water absorption-desorption and microstructure of three types of foam materials[J]. Plastics, 2003, 32(4):37-40.
- [9] 马立,刘芾,胡培. PMI 泡沫材料在航天器结构中的应用的可行性研究[J]. 航天器环境工程, 2010, 27(2):164-169.
- Ma Li, Liu Peng, Hu Pei. Feasibility research of PMI foam in spacecraft structure[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2010, 27(2):164-169.
- [10] 尹亮,郑国栋,丁常方,等. PMI 泡沫夹芯复合材料湿热老化性能研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2015(8):5-9.
- Yin Liang, Zheng Guodong, Ding Changfang, et al. Study on hydrothermal ageing of PMI foam cored sandwich composite[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composite, 2015(8):5-9.
- [11] 董安琪,段跃新,肇研,等. 湿热环境对 PMI 泡沫夹芯复合材料性能的影响[J]. 复合材料学报, 2012, 29(2):46-52.
- Dong Anqi, Duan Yuexin, Zhao Yan, et al. Effects of hydrothermal condition on properties of polymethacrylimide (PMI) foam cored sandwich structure[J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 2012, 29(2):46-52.
- [12] 赵锐霞,尹亮,潘玲英. PMI 泡沫夹层结构在航空航天工业的应用[J]. 宇航材料工艺, 2011(2):13-16.
- Zhao Ruixia, Yin Liang, Pan Lingying. Application of PMI foam cored sandwich structure in aerospace industry[J]. Aerospace Materials & Technology, 2011(2):13-16.
- [13] 王宝春,郑威,袁秀梅. 泡沫塑料研究进展[J]. 工程塑料应用, 2009, 37(10):77-82.
- Wang Baochun, Zheng Wei, Yuan Xiumei. Research situation of foam plastic[J]. Engineering Plastics Application, 2009, 37(10):77-82.
- [14] 吉布森,阿比什. 多孔固体结构与性能[M]. 刘培生,译. 北京:清华大学出版社, 2003:2-8.
- Gibson J, Ashby F. Cellular solids:Structure and properties[M]. Liu Peisheng, Translate. Beijing:Tsinghua University Press, 2003:2-8.
- [15] 赵飞明,安思彤,穆哈. 聚甲基丙烯酸酯亚胺 (PMI) 泡沫研制现状[J]. 宇航材料工艺, 2008(1):1-9.
- Zhao Feiming, An Sitong, Mu Han. Present state of art of polymethacrylimide (PMI) foam research[J]. Aerospace Materials & Technology, 2008(1):1-9.
- [16] 马瑛剑. 聚甲基丙烯酸酯泡沫塑料[J]. 化学与粘合, 2010, 32(4):44-47.
- Ma Yingjian. Polymethacrylimide foam plastics[J]. Chemistry and Adhesion, 2010, 32(4):44-47.
- [17] Jacqueline S. The influence of hygrothermal ageing on polymeric composite sandwich materials and structure[D]. Southampton: University of Southampton, 2001.

(上接第 102 页)

- [15] 王海花,孙成林,费贵强,等. *N*-甲基二乙醇胺用量对水性阳-非离子聚氨酯溶液性能的影响[J]. 高分子学报, 2015(12):1456-1463.
- Wang Haihua, Sun Chenglin, Fei Guiqiang, et al. Effects of *N*-methyl-diethanolamine concentration on solution properties of waterborne cationic-nonionic polyurethane surfactants[J]. Acta Polymerica Sinica, 2015(12):1456-1463.
- [16] 曹梦,王标兵. PAI/ 羧基化 MWCNTs 复合材料的制备及流变学特性[J]. 工程塑料应用, 2017, 45(1):80-85.
- Cao Meng, Wang Biaobing. Preparation and rheological properties of polyamide-imide / MWCNTs-COOH nanocomposites[J]. Engineering Plastics Application, 2017, 45(1):80-85.
- [17] Landa M, Canales J, Fernández M, et al. Effect of MWCNTs and graphene on the crystallization of polyurethane based nanocomposites, analyzed via calorimetry, rheology and AFM microscopy[J]. Polymer Testing, 2014, 35(6):101-108.
- [18] Pötschke P, Villmow T, Krause B. Melt mixed PCL / MWCNT composites prepared at different rotation speeds:Characterization of rheological, thermal, and electrical properties, molecular weight, MWCNT macrodispersion, and MWCNT length distribution[J]. Polymer, 2013, 54(12):3071-3078.
- [19] Wang Kejian. Quantitative study of extrudate swell for polymer blends[J]. Current Physical Chemistry, 2011, 1(1):2-6.